

ISSN 1883-0870

# 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン)

## 講演要旨集

**Summaries of JSSI & JSSE Joint Conference on  
Snow and Ice Research – 2021 Chiba-Online**

**期間：2021年9月13日(月)～9月16日(木)**

公益社団法人 日本雪氷学会



The Japanese Society of Snow and Ice  
<https://www.seppyo.org/>

日本雪工学会



Japan Society for Snow Engineering  
<http://www.snoweng.org/>



JSSI & JSSE Joint Conference – 2021 Chiba-online

# 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン)

期間：2021年9月13日(月)～9月16日(木)

主催：(公社)日本雪氷学会，日本雪工学会

## 目 次

学会長挨拶	1
実行委員長挨拶	2
大会日程	3
大会実行委員会	5
研究技術交流会	6
式典・会合	7
スペシャルセッションの概要紹介	13
研究発表プログラム	I
講演要旨	1
技術学術展示	
広告・協賛	

公益社団法人 日本雪氷学会



The Japanese Society of Snow and Ice

<https://www.seppy.org/>

日本雪工学会



Japan Society for Snow Engineering

<http://www.snoweng.org/>





## ごあいさつ



(公社) 日本雪氷学会  
会長 西村 浩一

(名古屋大学名誉教授)



日本雪工学会  
会長 高橋 徹

(千葉大学大学院工学研究院)

雪氷研究大会（2021・千葉 - オンライン）にご参加いただき心よりお礼申し上げます。「今年こそは Face to Face の開催を」と、昨年末より関係者間で鋭意検討を続けてまいりました。しかし次々と変異株を発現するコロナウイルスにより第4波、第5波と感染者数が拡大するなかワクチンの接種率もいまだ十分ではなく、ゆめゆめ「コロナに打ち勝った」などとは申し上げられない状況を踏まえ、今回の雪氷研究大会も昨年に引き続きオンラインでの開催という決断に至りました。

前回はまったくの手探りの状態で始まったオンライン開催でありましたが、実行委員の献身的な努力に加え多くの会員の皆様のご協力のもと成功裏にすべてのスケジュールを終えることができました。とりわけリアルタイムの口頭発表やオンデマンドのポスター発表での活発な質疑応答は特筆すべきものでしょう。今回の雪氷研究大会におきましても、前回はさらにパワーアップした内容とするべく、実行委員を中心にたゆまぬ努力が続けられてまいりました。公開講演会や雪氷楽会は残念ながら今年も中止となりましたが、各種会合、分科会、懇親会など新たな企画が組み込まれております。皆様の研究の進展さらには研究者間の交流をはぐくむ一助となりますことを願ってやみません。機会あるたびにお願いしておりますが、是非ご専門以外のセッションにも顔を出してみてください。思いがけないインスピレーションを得ることで研究のブレークスルーに繋がる一方、皆様のインプットが当該分野の研究発展の進展にも大きく貢献することが期待されます。セッションサーフィンをお楽しみいただければ幸いです。

我々もここ最近は否応なしにオンラインでの会議に慣らされてしまった感がございますが、学会の醍醐味は何と言っても、実際に顔を突き合わせた研究発表や意見交換を行うことにあると思います。来年こそそうした機会が復活できますことを願いつつ、今回の研究大会をぜひとも有効にご活用いただけますよう心よりお願い申し上げます。それでは、9月13日からの4日間をどうぞ十分にご堪能ください。

雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）の開催にあたり、日本雪工学会会長として一言ごあいさつ申し上げます。実は当欄に執筆するのは4回目なのですが、そのうち3回は大会の現地開催が出来ない巡り合わせになってしまいました。即ち、2019年の札幌は直前の胆振地震により、昨年と今年ではCOVID-19の蔓延により、皆様に直接お目にかかることが出来なかったのです。2期4年の任期中の3回なので、すごく高い確率です。たぶん来年からは通常開催に戻ることができると思いますので、空前絶後でしょう。まさに、100年に1度の災厄である、という例えを実感致します。

とはいえ、会員の皆様の弛まぬ研究実践の発表の場としての雪氷研究大会は、今年もオンラインで開催することができる運びとなりました。私のところに直接、発表システムを売り込んできたイベント会社もありましたが、内製している、と答えると、驚かれました。このように卓抜した能力者の集団でもある実行委員会の皆様の適材適所のご活躍により、本大会が開催されることを、会員の皆様とともに慶びたいと思います。

学会誌上での査読論文の発表や討論と違って、大会での発表は、研究途上での観測例の紹介や会場で直接顔を合わせた忌憚のない意見交換の場として貴重なものであり、オンラインで開催できたからといって、完全に置き換えることができるものではないとは考えています。しかしながら、このコロナ禍の状況において、たとえオンライン上に限られた交流とはいえ、顔を見ながらの議論の場として、本大会が貴重な機会を与えてくれているのは間違いのないことだと思っています。

フィールドワークを前提とすることの多い雪氷の研究にとって、研究実践と研究発表の二重の意味で非常に困難を伴うこのコロナ禍という状況乗り越えていく上で、今回の雪氷研究大会が有意義なものとなりますよう、会員の皆様とともに、大いに盛り上げていきたいと考えております。そのためにも、ぜひ、職場からでも、自宅からでも、通信回線さえあれば自由に参加できるこの機会を大いに活用して頂きたいと考えております。



# 雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）へようこそ

雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）

実行委員長 高橋 徹

雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）へようこそ。大会実行委員長として、一言、ごあいさつを申し上げます。前ページから読んだ方は、お気づきと思いますが、今年は雪工学会の会長である私が実行委員長を兼ねる、という巡り合わせにもなっておりました。最初に「再来年は千葉でいかがですか？」とお話があったのは、2019年の山形大会の会場で、であったと記憶しています。4年に1度、(公社)雪氷学会の関東以西支部担当で大会を開催する順番で、まだ大会を開催していないめばしい会場、という基準で選ばれた、後に引けない立場でした。実はその時点では、2020年度の日本建築学会大会（約1万人参加）も千葉大学で引き受けることになっており、規模からして、そのノウハウを注ぎ込めば何とかなる、という目算もありました。

使用教室の確保など、会場担当としておおよその道筋をつけ、他学会との日程調整も行って、開催日まで確定して、2020年度を迎えました。最初に潮目が変わったのは2020年の4月です。2020年1月末から流行の始まったCOVID-19が世界的に蔓延し、緊急事態宣言も発出される中、諸学会の大会は軒並み中止となっており、2020年度の日本建築学会千葉大会も諸行事が中止となりました。その時点では、2020年度の雪氷研究大会は発表登録も開始されておらず、一旦は大会そのものが中止とされ、改めて、雪氷研究大会（2020・オンライン）として開催されたことは、皆様ご存知の通りです。その時点では、COVID-19の流行の行く末はとても見通せませんでしたので、その終息を祈りつつ、対面での開催を前提として、通常の準備日程に則って、大会実行委員会を立ち上げることにしました。実は、実行委員会立ち上げの準備段階として、コアメンバーで打ち合わせを何度か行ったのですが、それも合わせ、本大会の実行委員会は全てZoomやメールを通してのオンラインでのやり取りで行われました。10年前だったら、通信環境的にも、ソフト的にも不可能であったろうと思います。

そうやって、両睨みの状態で2021年度を迎えたのですが、両睨みができたのも、昨年度のオンライン大会が成功裡に実施された、という裏付けがあったからで、昨年度のオンライン大会の立ち上げに携わった皆様には、本当に頭が上がりません。深く感謝申し上げます。

さて、2021年度に入り、実行委員会では、対面かオンラインかの判断時期をゴールデンウィーク明けに設定していたのですが、COVID-19の流行は一向に衰える気配を見せず、日本では特にワクチン接種の見通しが全く立っていない状態でした。そこで、やむを得ず、今年もオンラインでの開催とすることとし、過日、学会誌やWebサイトを通じて告知を行なった次第です。

そんなわけで、昨年に続きオンラインでの開催となった本大会ですが、準備期間は上記のように対面を想定しておりましたので、オンライン上でもなるべく対面の時の大会に近づけるべく、工夫を凝らすことにしました。また、大会名称も、去年と区別を付け、万が一これ以降もオンラインとなった場合の前例ともなるべく、地名を付与させて頂きました。

昨年と比較して対面に近付けるべく工夫を凝らしたこととしては、1) 雪氷学会の分科会や両学会の会務委員会を、通常時と同じように、Zoomの部屋を区切って開催可能としたこと。2) 情報交換会を、Zoom上ではありますが、無料で、開催すること。3) 企業展示を募集し、これもZoomの機能を使って、リアルタイムでの情報交換ができるように工夫したこと、が挙げられます。

いずれも初の試みですので、迷子になる人が出ないか、ブレイクアウトルームでの会話がうまく成り立つのか、最後まで読みきれないところはありますが、参加者の皆様のご協力を得て、有意義に進行することを期待しております。そして何よりも、大会のメインイベントである口頭発表とポスター発表が、去年にも増して盛況となるように、参加者の皆様には、お時間の許す限り、会場（Zoomの部屋）を巡って頂き、積極的に質問をなさってくださいますよう、お願いする次第です。

また、去年は事後集計していた学生優秀発表賞も、今年は学生の発表を大会前半に集め、大会期間中に審査結果を集計して、3日目の夕方に行われる技術交流会の場で表彰を行いたいと考えています。若い研究者のモチベーションを高め、今後の雪氷分野での人材を育成していく観点からも、重要なイベントであると考えていますので、参加者の皆様には是非発表の場にもご参加いただき、学生をエンカレッジする建設的な質問を、積極的に発言していただければ幸いです。どうぞよろしくお願い申し上げます。



# 大会日程（1）

[略記 雪氷：（公社）日本雪氷学会，雪工：日本雪工学会]

## 1日目：9月13日（月）

9月13日（月）

		9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	
Zoom	A会場	開会式	吹雪(1)	吹雪(2)	雪氷と教育	SP1 ここまできた凍害対策技術2021		学生優秀発表賞セッション						
	B会場		氷床(1)	氷床(2)		雪氷化学				雪氷 氷河情報センター				
	C会場						雪氷 編集委員会				雪工 凍害対策研究委員会			
	D会場											雪氷 雪氷物性分科会		
	E会場											雪氷 吹雪分科会		
	F会場						雪工 広報委員会		雪工 理事会					
	G会場					企業展示 コアタイム								
	H会場	談話室												
	I会場	事務局												
発表システム														

## 2日目：9月14日（火）

9月14日（火）

		9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	
Zoom	A会場		氷河(1)	氷河(2)	雪氷と生物		積雪		ポスターコアタイム(1)					
	B会場		雪と社会基盤(1)	雪と社会基盤(2)		雪氷物理				雪氷 極地雪氷分科会				
	C会場										雪氷 凍土分科会			
	D会場											雪工 除雪安全行動研究委員会		
	E会場											雪氷 気象水文分科会		
	F会場											雪氷 雪氷工学分科会 雪氷 着雪氷研究会		
	G会場					企業展示 コアタイム		企業展示 コアタイム						
	H会場	談話室												
	I会場	事務局												
発表システム									ポスターコアタイム(1)					



## 大会日程（2）

### 3日目：9月15日（水）

9月15日（水）

		9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00		
Zoom	A会場	SP4 今冬(2020/2021冬季)の雪による人的被害の実態から対策を見出す		SP2 粒子特性に着目した降雪・積雪系の統合的理解に向けて		ポスターコアタイム(2)		雪氷学会 学会賞授賞式・記念講演会			研究技術交流会 学生賞授賞式				
	B会場	雪氷と生活(1)		雪氷と生活(2)		雪工学会 学会賞受賞記念講演会									
	C会場														
	D会場														
	E会場														
	F会場														
	G会場						企業展示 コアタイム							企業展示 コアタイム	
	H会場	談話室													
	I会場	事務局													
発表システム							ポスターコアタイム(2)								

### 4日目：9月16日（木）

9月16日（木）

		9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	
Zoom	A会場	SP3 2017/18年と2020/21年冬季の豪雪を引き起こしたものは何か？		降雪・着氷雪		雪崩		開 会 式						
	B会場	観測計測技術		凍土	気候システム									
	C会場								雪氷 顧問会議					
	D会場								雪氷 雪氷化学分科会					
	E会場								雪氷 衛星観測分科会					
	F会場								雪氷 雪崩分科会 雪工 雪崩防災委員会					
	G会場						企業展示 コアタイム							
	H会場	談話室												
	I会場	事務局												
発表システム														



## 大会実行委員会

委員長	高橋 徹	千葉大学
副委員長	竹内 望	千葉大学
幹事長	倉元 隆之	東海大学
委員	青木 輝夫	国立極地研究所
	池田 敦	筑波大学
	伊東 靖彦	土木研究所
	大風 翼	東京工業大学
	大川戸 貴浩	北海道開発技術センター
	大塚 清敏	大林組
	大沼 友貴彦	東京大学
	尾関 俊浩	北海道教育大学
	鎌田 慈	(公財) 鉄道総合技術研究所
	川瀬 宏明	気象研究所
	菊池 浩利	清水建設
	熊倉 俊郎	長岡技術科学大学
	小竹 達也	大成建設
	金野 慎	雪研スノーイーターズ
	紺屋 恵子	海洋研究開発機構
	斉藤 和之	海洋研究開発機構
	齋藤 冬樹	海洋研究開発機構
	佐川 隆之	清水建設
	猿谷 友孝	国立極地研究所
	澤柿 教伸	法政大学
	島田 利元	宇宙航空研究開発機構
	杉村 剛	国立極地研究所
	杉山 慎	北海道大学
	谷川 朋範	気象研究所
	對馬 あかね	千葉大学
	永井 裕人	早稲田大学
	永塚 尚子	国立極地研究所
	中村 一樹	防災科学技術研究所
	庭野 匡思	気象研究所
	原田 鉦一郎	宮城大学
	藤田 耕史	名古屋大学
	本吉 弘岐	防災科学技術研究所
	安木 啓	応用気象エンジニアリング
	矢吹 裕伯	国立極地研究所
監事	中島 肇	日本大学
	兒玉 裕二	北海道大学



## 研究技術交流会

雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）に参加される多くの研究者・技術者が交流・親睦を深める場、また自己研鑽・情報収集の場として、研究技術交流会を下記の通り開催します。

日時：9月15日（水）18:30-20:30

会場：ウェブ会議システム（Zoom）を使用したバーチャル開催

アクセス方法：研究大会サイトにてリンクを案内いたします

会費：無料



## 式典

### 日本雪氷学会 学会賞授賞式・受賞記念講演会

日時：9月15日（水）15:00～18:00

場所：A会場

式次第：

開会の辞（総務委員長）

会長挨拶

学会賞授賞者・受賞理由の紹介（学術委員長）

平田賞 阿部 隆博

「人工衛星搭載合成開口レーダーによる永  
久凍土荒廃地域の地形沈降の検出」

平田賞 大沼 友貴彦

「氷河および氷床の融解を加速させるバイ  
オアルベド効果とそのモデル化研究」

平田賞 大藪 幾美

「氷床アイスコアの微量気体・塩微粒子等  
の解析に基づく気候変動の研究」

論文賞 宮下 彩奈

「ひずみゲージを用いた積雪期における樹  
木曲げ応力のモニタリング」(BGR)

功績賞 和泉 薫

「雪崩防災に関する教育・研究・社会貢献  
と学会運営に果たした多大な功績」

功績賞 高橋 修平

「雪氷学ならびに学会誌『雪氷』と学会運  
営に果たした多大な功績」

授賞式

受賞記念講演会

平田賞（3件）

論文賞

功績賞（2件）

閉会の辞（総務委員長）

### 日本雪工学会 学会賞受賞記念講演会

日時：9月15日（水）15:00～18:00

場所：B会場

式次第：

会長挨拶

受賞記念講演会

学術賞 上村靖司

「近年の人身雪害リスクに関する定量分析」

学術賞 伊豫部勉

「準リアルタイム積雪分布監視システムの  
開発」

学術奨励賞 櫻井俊光

「空隙率を指標とした防雪林の防風・防雪  
効果把握の可能性」

技術賞 平島寛行・伊豫部勉・河島克久・

佐野浩彬・本谷研

「屋根雪おろし判断のための『雪おろシグ  
ナル』の開発と運用」



## 理事会・委員会

### [日本雪氷学会]

#### 雪氷学会雪氷編集委員会

日時：9月13日（月）13:30～15:30

場所：C会場

#### 顧問会議

日時：9月16日（木）15:15～16:45

場所：C会場

### [日本雪工学会]

#### 広報委員会

日時：9月13日（月）13:30～14:30

場所：F会場

#### 理事会

日時：9月13日（月）15:00～17:00

場所：F会場



## 会合(分科会など)

(どなたでも参加できるオープンな会合です)

### [日本雪氷学会]

#### 氷河情報センター総会

日時：9月13日(月) 17:00~18:30

場所：B会場

氷河情報センターは、氷河および氷河研究に関する情報の収集と提供を目的とした分科会です。

氷河に関心をお持ちの方であればどなたでも参加いただけます。今年の講演会では、南米チリに研究員として2年間滞在された箕輪氏を講師として招き、パタゴニアでのフィールド観測から得られた経験や研究成果についてお話しいただきます。是非、多くの方々にご参集いただけますよう、よろしくお願いたします。

##### ■ 総会

1. 活動報告
2. 活動計画・方針

##### ■ 講演会

「南米パタゴニアにおける氷河観測-これまでの活動と今後の展望-」

箕輪昌紘氏(北海道大学)

#### 雪氷物性分科会

日時：9月13日(月) 17:00~18:30

場所：D会場

##### ■ 総会 17:00-17:30

##### ■ セッション：雪氷物性シンポジウム

雪氷物性分科会では、雪・氷など  $H_2O$  という分子の物性から、様々な現象を理解しようとする基礎的な研究について、情報交流を行っています。今年の「雪氷物性シンポジウム」では、寒地土木研究所の櫻井俊光氏に以下のご講演をいただく予定です。

##### ■ 話題提供

「レーザー加工による金属表面性状と濡れの性質について」 櫻井俊光

(国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所)

#### 吹雪分科会

日時：9月13日(月) 17:00~18:30

場所：E会場

吹雪分科会は、吹雪現象やそれに付随する現象(吹きだまりや視程障害など)に興味を持つ研究者や実務者、学生によって構成されています。

この吹雪分科会は、年1回、雪氷研究大会に併せて総会を開催している(昨年はコロナにより中止)ほか、吹雪にまつわる最近の研究トピックスや過去の吹雪研究、直近の吹雪災害事例などについて情報交換を行っています。年会費は無料ですので、お気軽にご参加ください。

##### ■ 話題提供

「陸屋根建築物に形成される雪庇を対象とした風洞実験および屋外観測」

千葉隆弘(北海道科学大学教授)

##### ■ 総会(話題提供の後)

1. 事業報告
2. 今年度の事業計画
3. 意見交換
  - ・ 話題提供内容に関する議論
  - ・ 次回以降のスペシャルセッションに関して
4. 役員改選
5. その他



## 極地雪氷分科会

日 時：9月14日（火）17:00～18:30

場 所：B会場

総会では観測計画やプロジェクト報告，ワーキンググループ報告などがあり，極地観測研究の動向を共有する良い機会です．関心のある方はどなたでも歓迎ですので，どうぞご参集ください．

### ■ 総会 議事次第（予定）

#### 1. 南極観測

JARE63 計画

#### 2. 北極観測

ArCS II 関連

その他北極

#### 3. ワーキンググループ報告

第3期ドーム計画対応 WG

北極雪氷検討 WG

#### 4. 事業報告

国際対応

#### 5. 監査報告

#### 6. その他

新学術領域「熱－水－物質の巨大リザーバ：全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床」（H29-33）の紹介

極地雪氷特集号の刊行

HP 極地写真対応について

## 凍土分科会

日 時：9月14日（火）17:00～18:30

場 所：C会場

凍土および土の凍結とその周辺現象を対象とした分科会です．自然凍土の調査から人工凍土の利用まで広く凍結に関心のある方は，お気軽にご参加ください．

### ■ 総会

・活動報告，事業計画，役員改選，その他

### ■ 話題提供

「日本の凍土工学」

赤川 敏（低温圏工学研究所）

## 気象水文分科会

日 時：9月14日（火）17:00～18:30

場 所：E会場

### ■ 話題提供

1. 井手玲子さん（国立環境研究所）：「定点カメラ画像を用いた残雪分布の検出とモデル化—立山西斜面における解析例—」

2. 山田嵩さん（寒地土木研究所）：「高山帯における積雪分布と水資源量について」

### ■ 総会

1. 事業・収支報告

2. 今年度の事業計画

3. スペシャルセッション「SP3: 2017/18年と2020/21年冬季の豪雪を引き起こしたものは何か？」について

4. その他

## 雪氷工学分科会・着雪氷研究会

日 時：9月14日（火）17:00～18:30

場 所：F会場

雪氷工学分科会は，雪や氷に関する工学的研究と技術の発展に寄与することを目的としています．

今年も分科会総会に合わせて着雪氷研究会を開催し，話題提供を通じて意見と情報の交換を行います．雪氷工学に関心のある皆さまの参加をお待ちしています．

### ■ 総会

・活動報告，活動計画，その他

### ■ 話題提供

1. 「道路構造物等の着雪対策におけるレーザー技術の活用」櫻井俊光（寒地土木研究所）

2. 「風車発電電力量に与える着氷の影響評価用コードの適用」五十嵐若菜（神奈川工科大）

3. 「滑走路雪氷検知技術の研究開発と空港実証」小林孝彰（宇宙航空研究開発機構）



## 雪氷化学分科会

日 時：9月16日(木) 15:15～16:45

場 所：D会場

雪氷化学分科会は、雪や氷、寒冷地の化学成分、生物などなどの情報交換、研究交流を図ることを目的とし、関心がある方はどなたにでも参加いただけます。今年は総会を開催いたします。例年、実施している話題提供(講演会)については、メーリングリスト等にて改めて連絡いたします。

### ■ 総会

1. 2019年度, 2020年度の事業報告  
(雪合宿・ピヤシリの報告など)
2. 2021年度の事業計画
3. 役員人事
4. その他  
(雪合宿候補地について, 来年の企画セッションについて)

## 衛星観測分科会

日 時：9月16日(木) 15:15～16:45

場 所：E会場

衛星観測分科会では、人工衛星観測やリモートセンシング技術を用いた様々な雪氷現象の研究に興味を持つ学会員によって構成されています。今年は総会の前に、打上げを間近に控えた ALOS シリーズ衛星の話題を、田殿武雄氏にご講演頂く予定です。関心のある方はお気軽にご参加ください。

### ■ 話題提供

「ALOS シリーズ衛星の取り巻く状況について」  
田殿武雄氏(宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター)

### ■ 総会

1. 事業報告
2. 今年度の事業計画
3. 役員人事(幹事の交代)
4. その他

## [ 両 学 会 合 同 ]

### 日本雪氷学会雪崩分科会・日本雪工学会雪崩 防災委員会合同分科会, 雪崩分科会総会

日 時：9月16日(木) 15:15～16:45

場 所：F会場

### ■ 合同分科会

1. 話題提供  
「2020/21 冬季の雪崩事例」  
「北海道での国道の雪崩事例」松下拓樹  
(土木研究所 寒地土木研究所)  
「東北地方で発生した雪崩事例」荒川逸人  
(防災科学技術研究所 新庄雪氷環境実験所)

「岐阜県野谷荘司山での大規模雪崩」勝山祐太  
(森林総合研究所 十日町試験地)

### 2. その他

「積雪分類ワーキンググループの活動報告一季  
節積雪の国際分類に関する進捗状況」尾関俊浩  
(北海道教育大学)

### ■ 雪崩分科会総会

1. 2020年度事業・会計報告
2. 2021年度事業・会計計画
3. 第31回雪崩対策基礎技術研修会について
4. その他



## [ 日本雪工学会 ]

## 凍害対策研究委員会

日 時：9月13日（月）17:00～18:30

場 所：C会場

日本雪工学会「凍害対策研究委員会」は、凍害に関する調査・研究並びに啓蒙活動を行うことを目的としている。

この目的のため、当委員会（発足時は「凍上防災委員会」）では1989年度から全国の寒冷地を回って「凍上対策に関する講習会」を実施してきた。この講習会は、各地の現場の技術者（自治体職員、コンサルタント、建設業者等）を対象に、実務的な面を強調しながら、「凍上」に係る知識の普及を図ることを目的としていた。しかし、凍上被害が人命に関わる事故は皆無に近く、知識が共有されていないことから、凍上現象と言えない原因からの破損例も報道されるなど、凍上現象は古くて、新しい問題でもある。

今後、過去19回開催の「凍上対策講習会」テキストを基にしながら、

・「凍上対策講習会」テキストを見直し、普遍的基礎知識の再執筆

・東京都〇町の凍上に関する報告書の取りまとめ（今後の報告書の作成の参考）

・凍上被害事例や凍害対策技術等の継続的な取りまとめ

・新しい凍害対策技術の検証と広報（地方自治体、コンサルタント、建設業者、学生等）

・その他

を持続可能な現地調査、シンポジウム（委員会内の勉強会等含む）の開催により、新しい知見を取り入れながら、完成度を高め、より分かりやすくブラッシュアップした凍上・凍害に対する総合的テキストを作成すべく作業を進める予定である。

研究委員会当日は、今後の方針（特に、テキストの執筆と広報の方法）について話し合う予定であり、関心のある方々は是非お気軽にご参加下さい。

## 除雪安全行動研究委員会

日 時：9月14日（火）17:00～18:30

場 所：D会場

除雪安全行動研究委員会は、雪による事故・犠牲者を軽減する手段と実践について研究することを目的としています。

これらの活動をさらに進化させ、雪国の安全・安心により具体的にコミットするため、住民が適切でかつ安全な除雪行動を日常から行うための啓発手法、防災教育としての展開の可能性、望ましい行動変容に至るプロセス等について実践的研究を行っています。

研究委員会当日は、『仕掛学 人を動かすアイデアのつくり方』（東洋経済新報社）など数多くの著書を発行されている松村真宏氏（大阪大学大学院経済学研究科 教授）をお招きし、参加者の皆様と一緒に課題解決に向けた次の一手を導き出したいと考えております。関心のある方々はぜひお気軽にご参加ください。



## スペシャルセッションの概要紹介

### SP1: ここまできた凍害対策技術 2021

日時: 9月13日(月) 13:00~14:30

**趣旨:** 地盤の凍上・凍害は、最近の温暖化による降雪減少を含む気候変動により、現象の激甚化や発生地域の拡大が生じている。また、豪雨や豪雪による被害においても凍上・凍害現象がその誘因になっている可能性も指摘され始め、その具体的な対策技術も開発・研究が進んでいる。

日本雪工学会凍害対策委員会の活動の一環として、「ここまできた凍害対策技術 2018(札幌大会)」に続き、最近の知見とともに、実用化されている工法や技術に関する発表・討議を行うこととした。本セッションでは、これらの研究や対策についての討論を通じて、凍上・凍害の知見や対策技術がさらに普及・貢献することが期待できる。なお、本セッションでは日本雪工学会凍害対策研究委員会の活動成果の紹介、さらには最近の対策技術の動向についての招待講演を行う。

**コンビーナー:** 吉村優治(岐阜工業高等専門学校)、木村茂雄(神奈川工科大学)、東海林更二郎(高座サーチ)、堀江征信(日本雪工学会凍害対策研究委員会事務局)

### SP2: 粒子特性に着目した降雪・積雪系の統合的理解に向けて

日時: 9月15日(水) 10:45~12:15

**趣旨:** 降雪・積雪中の粒子の粒径・形状・密度・微細構造等の物理特性は、降雪雲内部の雲微物理過程に関与して降雪量を左右するとともに、積雪層の変態過程に関与して融雪量に影響を与える。さらに、降雪雲や積雪表面の電磁波散乱特性や、積雪層の安定度を定める強い因子である。そのため、気象・雪氷防災の他、衛星遠隔観測による地球環境監視の観点からも、粒子特

性と粒子成長過程を解明しモデル化を進める必要がある。近年、観測・モデリングともに、粒子特性・粒子成長過程に着目したアプローチが益々可能となってきた。

本セッションでは、発展しつつある観測・モデリング的アプローチをもとに、降雪・積雪における粒子特性・粒子成長過程を統合的に理解するために、それらの関係や位置付けについて改めて議論し、新たな知見や連携研究を生み出す契機としたい。

**コンビーナー:** 橋本明弘(気象研究所)、中井専人(防災科学技術研究所)、本吉弘岐(防災科学技術研究所)、青木輝夫(国立極地研究所)

### SP3: 2017/18年と2020/21年冬季の豪雪を引き起こしたものは何か?

日時: 9月16日(木) 9:00~10:30

**趣旨:** 2020/21年冬季のみなかみ町の豪雪、上越から富山にかけての豪雪、2018年2月の福井豪雪など、近年の豪雪及び関連する災害において、日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)をはじめとするさまざまな要因が指摘されている。しかしながら、現在でも豪雪をもたらす日本海上及び日本海側で発達する降雪雲について、日本海の水温分布の役割や発達メカニズム、予測に関して未知の部分が多い。

本セッションでは、主に2018/19年及び2020/21年冬季に発生した豪雪を対象に、衛星・地上観測に基づく実態調査、大気と海洋の循環場の分析、数値シミュレーション、過去の豪雪事例との比較などの調査を集めることで、豪雪をもたらす諸現象についての理解を包括する。また、近年の地球温暖化による大気・海洋状態の変化が日本海側の豪雪に及ぼす影響についての最新の知見をまとめる。



コンピーナー：山崎哲（海洋研究開発機構），川瀬  
宏明（気象研究所），鈴木和良（海洋研究開発機  
構），紺屋恵子（海洋研究開発機構），本田明治  
（新潟大学），本谷研（秋田大学）

#### SP4：今冬（2020/2021 冬季）の雪による人 的被害の実態から対策を見出す

日時：9月15日（水）9:00～10:30

趣旨：2020/2021 冬季における屋根雪下ろし作業  
中の転落，落氷雪との接触，除雪機の誤操作等  
を起因とする死者は100名を数え（2021年3月  
末，消防庁応急対策室），昨冬と比べ10倍以上  
に膨れ上がった。

そこで本セッションでは，2020/2021 冬季の  
雪による人的被害を振り返りつつ，各話題提供  
者の視点（雪氷・建築・社会学など）から，被  
害の背景を考察し，被害軽減に向けた今後の対  
策の論点を整理する。

なお，本セッションは日本雪工学会除雪安全  
行動研究委員会及び雪害調査委員会，日本雪氷  
学会災害対応委員会の共同企画であり，それぞ  
れの委員会として取り組むべき対策を見だし，  
今後の研究活動及び雪害防止の具体的なアクシ  
ョンを推進するものとする。

コンピーナー：諸橋和行（日本雪工学会除雪安全  
行動研究委員会），堤拓哉（日本雪工学会雪害調  
査委員会），上石勲（日本雪氷学会災害対応委員  
会）

ISSN 1883-0870

# 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン)

## 講演要旨集

**Summaries of JSSI & JSSE Joint Conference on  
Snow and Ice Research – 2021 Chiba-Online**

**期間：2021年9月13日(月)～9月16日(木)**

公益社団法人 日本雪氷学会



The Japanese Society of Snow and Ice  
<https://www.seppy.org/>

日本雪工学会



Japan Society for Snow Engineering  
<http://www.snoweng.org/>



## プログラム委員会

### 委員長

杉山 慎 北海道大学

### 幹事

川瀬 宏明 気象庁気象研究所

### 委員

青木	輝夫	国立極地研究所
東	久美子	国立極地研究所
伊東	靖彦	土木研究所
大宮	哲	土木研究所寒地土木研究所
尾関	俊浩	北海道教育大学札幌校
小田	憲一	日本大学
木田	真人	北見工業大学
猿谷	友孝	国立極地研究所
鈴木	利孝	山形大学
竹内	望	千葉大学
谷川	朋範	気象庁気象研究所
富永	禎秀	新潟工科大学
中村	一樹	防災科学技術研究所
庭野	匡思	気象庁気象研究所
八久保	晶弘	北見工業大学
堀	雅裕	富山大学
松下	拓樹	土木研究所寒地土木研究所
松元	高峰	新潟大学
諸橋	和行	中越防災安全推進機構
渡辺	晋生	三重大学



## 研究発表プログラム 口頭発表

発表時間：1 鈴：9 分，2 鈴：12 分（発表終了），3 鈴：15 分（質疑・討論終了）

9 月 13 日（月） 09：00 ～ 12：15

## A 会場

09：00～10：30

## 吹雪

座長：根本征樹（防災科学技術研究所）

- A1-1 ニセコアンヌプリ山域を対象とした吹きだまり分布の計算  
○小松麻美（日本気象協会），西村浩一（日本気象協会，名古屋大学）
- A1-2 UAV-SfM 写真測量によるフェンス周辺の吹きだまり観測  
○新屋啓文（新潟大学），大宮哲（土木研究所寒地土木研究所），砂子宗次朗（防災科学技術研究所），西村浩一（名古屋大学），大風翼（東京工業大学）
- A1-3 吹走距離の異なる 2 地点における吹雪量の解析 —北海道弟子屈町での 2021 年 1 月 8 日の観測—  
○武知洋太（土木研究所寒地土木研究所，北見工業大学），大宮哲（土木研究所寒地土木研究所），原田裕介（土木研究所寒地土木研究所），松島哲郎（土木研究所寒地土木研究所），西村敦史（土木研究所寒地土木研究所），亀田貴雄（北見工業大学）
- A1-4 WRF を用いた北海道弟子屈町周辺に発生する Gap wind 強化要因の検討  
○川島理沙（東京工業大学），池田侑樹（広島電鉄株式会社），大宮哲（土木研究所寒地土木研究所），新屋啓文（新潟大学），大風翼（東京工業大学）
- A1-5 降雪を伴う吹雪時における飛雪流量の最大瞬間値と平均値の関係  
○池田侑樹（広島電鉄株式会社），川島理沙（東京工業大学），大宮哲（土木研究所寒地土木研究所），新屋啓文（新潟大学），西村浩一（名古屋大学），大風翼（東京工業大学）
- A1-6 吹雪時における飛雪流量の瞬間的な増加と乱流構造に関する分析  
○大風翼（東京工業大学），池田侑樹（広島電鉄株式会社），川島理沙（東京工業大学），大宮哲（土木研究所寒地土木研究所），新屋啓文（新潟大学），西村浩一（名古屋大学）

10：45～12：15

## 吹雪，雪氷と教育

座長：杉浦幸之助（富山大学）

- A1-7 高密度集中観測による吹雪の時空間構造の解明 II  
○西村浩一（名古屋大学），根本征樹（防災科学技術研究所），大宮哲（土木研究所寒地土木研究所），櫻井俊光（土木研究所寒地土木研究所），下山宏（北海道大学），新屋啓文（新潟大学），羽賀秀樹（株式会社スノーテック新潟），伊藤陽一（防災科学技術研究所）
- A1-8 2017/2018 年冬季における北海道の吹雪発生マップの作成  
○丹治星河（北海道大学），稲津将（北海道大学），川添祥（北海道大学），佐藤陽祐（北海道大学，理化学研究所）
- A1-9 一回の極端な暴風雪の厳しさを評価する指標の検討 —その 2：暴風雪の強度・広がり・継続時間に着眼した解析—  
○原田裕介（土木研究所寒地土木研究所），大宮哲（土木研究所寒地土木研究所），武知洋太（土木研究所寒地土木研究所），遠藤康男（土木研究所寒地土木研究所），西村敦史（土木研究所寒地土木研究所）
- A1-10 2021 年 1 月に東北地方で発生した吹雪について —1 月 19 日の宮城県大崎市の吹雪事例を中心に—  
○根本征樹（防災科学技術研究所），田邊章洋（防災科学技術研究所），荒川逸人（防災科学技術研究所）
- A1-11 新たな安全概念 Fool Education の学習理論への対応づけと適用例  
宍戸紀之（長岡技術科学大学），○安孫周（長岡技術科学大学），上村靖司（長岡技術科学大学），杉原幸信（長岡技術科学大学）
- A1-12 北極域データアーカイブシステムの第 3 回北極科学大臣会合への貢献  
○矢吹裕伯（データサイエンス共同利用基盤施設，国立極地研究所），飯野啓子（国立極地研究所），杉村剛（国立極地研究所）



## B 会場

09:00~10:30

## 氷 床

座長：庭野匡思 (気象庁気象研究所)

- B1-1 グリーンランド EGRIP 浅層コアの年代決定及び固体粒子解析  
○小室悠紀 (国立極地研究所), 中澤文男 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 東久美子 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 平林幹啓 (国立極地研究所), 尾形純 (国立極地研究所), 福田かおり (国立極地研究所), 栗田直幸 (名古屋大学), 北村享太郎 (国立極地研究所), 米倉綾香 (総合研究大学院大学), Trevor J. Popp (コペンハーゲン大学), Dorthe Dahl-Jensen (コペンハーゲン大学)
- B1-2 グリーンランドで掘削されたアイスコア中の過去 100 年間の鉱物組成変動  
○永塚尚子 (国立極地研究所), 東久美子 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 對馬あかね (千葉大学), 藤田耕史 (名古屋大学), 的場澄人 (北海道大学), 大沼友貴彦 (東京大学), Remi Dallmayr (アルフレッド・ウェグナー極地海洋研究所), 門田萌 (北海道大学), 平林幹啓 (国立極地研究所), 尾形純 (国立極地研究所), 塚川佳美 (国立極地研究所), 北村享太郎 (国立極地研究所), 箕輪昌紘 (名古屋大学), 小室悠紀 (国立極地研究所), 本山秀明 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 青木輝夫 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 中澤文男 (国立極地研究所), Trevor James Popp (コペンハーゲン大学), Dorthe Dahl-Jensen (コペンハーゲン大学)
- B1-3 グリーンランド南東ドームアイスコアに含まれる不純物の解析  
○捧茉優 (北海道大学), 飯塚芳徳 (北海道大学)
- B1-4 北極浅層アイスコア用の近赤外反射率測定装置の開発  
○松本真依 (北海道大学), 飯塚芳徳 (北海道大学), 斎藤健 (北海道大学)
- B1-5 東南極リュッツォホルム湾における溢流氷河変動に定着氷が与える影響  
○近藤研 (北海道大学), 杉山慎 (北海道大学)
- B1-6 氷床コア深層掘削機の電装部の開発—プロトタイプ機の作成と掘削実験での動作確認—  
○高田守昌 (長岡技術科学大学), 本山秀明 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 大谷昌央 (九州オリンピック工業株式会社)

10:45~11:45

座長：庭野匡思 (気象庁気象研究所)

- B1-7 南極ドームふじ深層氷床コア中ダストの濃度と粒径の高時間分解能解析—最終氷期最寒期~完新世中盤における変動—  
○東久美子 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 平林幹啓 (国立極地研究所), 中澤文男 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 藤田秀二 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 福田かおり (国立極地研究所), 尾形純 (国立極地研究所), 北村享太郎 (国立極地研究所), 塚川佳美 (国立極地研究所), 米倉綾香 (総合研究大学院大学), 川村賢二 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学)
- B1-8 ドームふじアイスコアの連続分析により得られた約 15 万年前の氷期におけるメタン濃度変動  
○米倉綾香 (総合研究大学院大学), 川村賢二 (総合研究大学院大学, 国立極地研究所, 海洋研究開発機構), 大藪幾美 (国立極地研究所), 北村享太郎 (国立極地研究所), 尾形純 (国立極地研究所), 平林幹啓 (国立極地研究所), 福田かおり (国立極地研究所), 塚川佳美 (国立極地研究所), 猿谷友孝 (国立極地研究所), 中澤文男 (総合研究大学院大学, 国立極地研究所), 藤田秀二 (総合研究大学院大学, 国立極地研究所), 東久美子 (総合研究大学院大学, 国立極地研究所), 本山秀明 (総合研究大学院大学, 国立極地研究所)
- B1-9 ドームふじ氷床コアにおける  $O_2/N_2$  と  $Ar/N_2$  の分別  
○大藪幾美 (国立極地研究所), 川村賢二 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学, 海洋研究開発機構), 内田努 (北海道大学), 藤田秀二 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 北村享太郎 (国立極地研究所), 平林幹啓 (国立極地研究所), 青木周司 (東北大学), 森本真司 (東北大学), 中澤高清 (東北大学), Jeffrey P. Severinghaus (スクリップス海洋研究所), Jacob Morgan (スクリップス海洋研究所)
- B1-10 気候変動に伴うドームふじ氷床コアファブリックの変化  
○猿谷友孝 (国立極地研究所), 藤田秀二 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学)



## 研究発表プログラム 口頭発表

発表時間：1 鈴：9分，2 鈴：12分（発表終了），3 鈴：15分（質疑・討論終了）

9月13日（月） 13：00～16：45

### A会場

13：00～14：30

#### SP1：ここまできた凍害対策技術 2021

座長：堀江征信（日本雪工学会凍害対策研究委員会事務局）

A1-13 ここまできた凍害対策技術—日本雪工学会凍害対策研究委員会の歩み—

○吉村優治（岐阜工業高等専門学校）

A1-14 最近の凍害対策技術の動向—日本雪工学会凍害対策研究委員会の活動を中心に—

○熊谷浩二（八戸工業大学名誉教授），堀江征信（日本雪工学会凍害対策研究委員会），吉村優治（岐阜工業高等専門学校）

A1-15 地球温暖化に伴う地盤凍結範囲変化の推定

○東海林更二郎（高座サーチ合同会社）

A1-16 農業水利施設の目地補修工法の改善への取り組み報告—簡易水路目地補修工法—

○広瀬貴（丸治コンクリート工業所），堀江征信（日本雪工学会凍害対策研究委員会事務局）

15：00～16：45

#### 学生優秀発表賞+ポスター1分紹介

座長：猿谷友孝（国立極地研究所）

A1-17 グリーンランド南東ドームアイスコアから復元する硫酸エアロゾルと北半球中高緯度の雲量の関係

○渡利晃久（北海道大学），飯塚芳徳（北海道大学），藤田耕史（名古屋大学），増永浩彦（名古屋大学），河本和明（長崎大学）

A1-18 南極DFS10 浅層コアに含まれる気泡の $N_2/O_2$ —気泡サイズ依存性に着目して—

○橋本健吾（北見工業大学），藤田秀二（国立極地研究所），飯塚芳徳（北海道大学），大野浩（北見工業大学）

A1-19 アラスカ・グルカナ氷河における雪氷藻類に寄生するツボカビの感染率

○小林綺乃（千葉大学），竹内望（千葉大学），鏡味麻衣子（横浜国立大学）

A1-20 信越地方苗場山の積雪で繁殖する雪氷藻類の標高分布と植生との関係

○高橋翼（千葉大学），鈴木拓海（千葉大学），竹内望（千葉大学）

A1-21 ネパール・ヒマラヤ，トランバウ氷河アイスコアの氷安定同位体分析

○江刺和音（名古屋大学），對馬あかね（千葉大学），植村立（名古屋大学），飯塚芳徳（北海道大学），的場澄人（北海道大学），藤田耕史（名古屋大学）

※ 学生優秀発表賞セッションの口頭発表の後，学生優秀発表賞セッションのポスター発表及びその他のポスターセッションで学生優秀発表賞にエントリーした学生のポスター1分間紹介を行います。

ポスター1分紹介の発表番号

P1-1, P1-2, P1-3, P1-4, P1-5, P1-6, P1-7

P1-8, P1-12, P1-14, P1-18, P1-24, P1-30, P1-31, P1-32, P1-36



## B 会場

13:00~14:30

### 雪氷化学

座長：大藪幾美（国立極地研究所）

B1-11 富山県上空における過酸化水素およびホルムアルデヒド濃度の測定

○渡辺幸一（富山県立大学），楊柳（富山県立大学），姫玖玖（富山県立大学），中村賢（富山県立大学），大谷卓也（富山県立大学），長村遥（富山県立大学），増田竜之（富山県立大学）

B1-12 アイスコアを用いた過去の北極大気中の氷晶核能を復元する測定装置の開発

○大塚美侑（北海道大学），飯塚芳徳（北海道大学），森章一（北海道大学），宮崎雄三（北海道大学）

B1-13 グリーンランド氷床アイスコアを用いた融解再凍結層に含まれる不純物の解析

○川上薫（北海道大学），飯塚芳徳（北海道大学），的場澄人（北海道大学），青木輝夫（国立極地研究所），杉山慎（北海道大学），安藤卓人（島根大学）

B1-14 高時間分解能アイスコアによる近年の北大西洋植物プランクトンブルームの長期化の解明

○黒崎豊（北海道大学），的場澄人（北海道大学），飯塚芳徳（北海道大学），藤田耕史（名古屋大学），島田利元（宇宙航空研究開発機構）

B1-15 Estimation of outcrops of soluble ions and mineral dust from ablating ice surface of a glacier based on an ice core in Tien Shan Mountains, Central Asia.

○陳耘傑（千葉大学），竹内望（千葉大学），李忠勤（Laboratory of Cryosphere and Environment/Tienshan Glaciological Station）



## 研究発表プログラム 口頭発表

発表時間：1 鈴：9分，2 鈴：12分（発表終了），3 鈴：15分（質疑・討論終了）

9月14日（火） 9：00～12：15

### A会場

9：00～10：30

#### 氷河

座長：砂子宗次朗（防災科学技術研究所）

- A2-1 グリーンランド北西部カナック氷帽における2012-2020年の表面質量収支変動  
○渡邊果歩（北海道大学），近藤研（北海道大学），杉山慎（北海道大学）
- A2-2 グリーンランド北西部Heilprin氷河における氷河上湖および流動速度の季節変動  
○Wang Yefan（北海道大学），杉山慎（北海道大学）
- A2-3 飛驒山脈の氷河の冬期収支における雪崩の影響  
○有江賢志朗（新潟大学），奈良間千之（新潟大学）
- A2-4 南パタゴニア氷原Occidental氷河における2005-2021年の末端変動  
○上脇諒一（北海道大学），波多俊太郎（北海道大学），杉山慎（北海道大学）
- A2-5 パタゴニア氷原Greve湖で2020年4月に発生した突発的な排水イベント  
○波多俊太郎（北海道大学），杉山慎（北海道大学），日置幸介（北海道大学）
- A2-6 パタゴニア・グレイ氷河前縁湖における水温と流速の季節変動  
○杉山慎（北海道大学），箕輪昌紘（北海道大学），深町康（北海道大学），波多俊太郎（北海道大学），山本淳博（北海道大学），Tobias Sauter（アレクサンダー大学），Christoph Schneider（フンボルト大学），Marius Schaefer（オーストラリア大学）

10：45～12：15

#### 氷河

座長：砂子宗次朗（防災科学技術研究所）

- A2-7 中央アジア・パミールアライ山域で掘削されたアイスコアの溶存化学成分  
○瀬戸大貴（千葉大学），鋸屋遥香（千葉大学），竹内望（千葉大学），藤田耕史（名古屋大学），川村賢二（国立極地研究所），對馬あかね（千葉大学），Vladimir Aizen（アイダホ大学）
- A2-8 グリーンランド北西部カナック氷河消耗域の雪氷溶存化学成分  
○竹内望（千葉大学），渡辺茜（千葉大学），石渡晃起（千葉大学），大沼友貴彦（東京大学）

#### 雪氷と生物

座長：對馬あかね（千葉大学）

- A2-9 風と雪の複合作用による防雪林の枝抜け被害一木・幹ひずみの連続観測に基づくメカニズム解明  
○岩崎健太（北海道立総合研究機構），勝島隆史（森林総合研究所），鳥田宏行（北海道立総合研究機構），真坂一彦（岩手大学）
- A2-10 積雪中を垂直移動する雪氷微生物の日周期  
○小野誠仁（千葉大学），薄羽珠ノ介（千葉大学），竹内望（千葉大学）
- A2-11 全球雪氷藻類モデルの開発と赤雪現象再現の試み  
○大沼友貴彦（東京大学），芳村圭（東京大学），竹内望（千葉大学）
- A2-12 北極域の氷河上で繁殖する雪氷藻類の色素構成比の空間分布  
○對馬あかね（千葉大学），竹内望（千葉大学），高橋翼（千葉大学），小野誠仁（千葉大学），鬼沢あゆみ（中央大学）



## B 会場

9 : 00~10 : 15

### 雪氷と社会基盤

座長：河島克久 (新潟大学)

- B2-1 観測用建物モデルを用いた屋根雪荷重の実測 —地上積雪重量との比較—  
○五十嵐賢次 (新潟工科大学), 涌井将貴 (新潟工科大学), 本吉弘岐 (防災科学技術研究所), 富永禎秀 (新潟工科大学)
- B2-2 アメダスデータを用いた降雪量推定(1)：関東地方を対象とした試算  
○大宮哲 (土木研究所寒地土木研究所), 原田裕介 (土木研究所寒地土木研究所), 西村敦史 (土木研究所寒地土木研究所)
- B2-3 アメダスデータを用いた降雪量推定(2)：北海道石狩地方を対象とした試算  
○菅原邦泰 (土木研究所寒地土木研究所), 大宮哲 (土木研究所寒地土木研究所), 原田裕介 (土木研究所寒地土木研究所), 西村敦史 (土木研究所寒地土木研究所)
- B2-4 汎用レーザー距離計による路面残雪深計測 —その2：路面残雪深計測における表面下散乱現象—  
山賀康平 (長岡技術科学大学), ○平田拓巳 (長岡技術科学大学), 杉原幸信 (長岡技術科学大学), 上村靖司 (長岡技術科学大学)
- B2-5 塩化カルシウム溶液を散布した路面のすべり特性  
○藤本明宏 (福井大学)

10 : 30~11 : 45

### 雪氷と社会基盤

座長：藤本明宏 (福井大学)

- B2-6 無散水消融雪施設の効率的な稼働に向けた検討 (その4)  
○服部恭典 (日本地下水開発 (株)), 山口正敏 (日本地下水開発 (株)), 鈴木和則 (日本地下水開発 (株))
- B2-7 大雪による車両滞留の危険度評価システムの開発と試験的運用  
○河島克久 (新潟大学), 伊豫部勉 (京都大学)
- B2-8 雪による車両滞留イベントデータベースの構築  
○村田晴彦 (新潟大学), 河島克久 (新潟大学)
- B2-9 2020-21 シーズンの大雪における新潟県の対応について  
○吉田あみ (新潟県)
- B2-10 鉄道車両からの落雪現象に関する実験  
○辻滉樹 (鉄道総合技術研究所), 鎌田慈 (鉄道総合技術研究所), 高橋大介 (鉄道総合技術研究所)



## 研究発表プログラム 口頭発表

発表時間：1 鈴：9 分，2 鈴：12 分（発表終了），3 鈴：15 分（質疑・討論終了）

9 月 14 日（火） 13：00 ～ 14：45

### A 会場

13：00～14：45

#### 積 雪

座長：上野健一（筑波大学）

- A2-13 道路雪堤の崩壊メカニズムの解明に向けた基礎研究—内部層構造の調査と崩壊現象の類型化—  
○芝崎智貴（長岡技術科学大学），渡邊香歩（長岡技術科学大学），杉原幸信（長岡技術科学大学），上村靖司（長岡技術科学大学），町田敬（町田建設株式会社）
- A2-14 積雪の微細構造に基づく雪質の定量的分類方法の開発（2）—片薄片解析と X 線 CT 解析の比較—  
○荒川逸人（防災科学技術研究所），安達聖（防災科学技術研究所）
- A2-15 放射伝達理論に基づく積雪の波長別偏光特性  
○谷川朋範（気象庁気象研究所），増田一彦（気象庁気象研究所），石元裕史（気象庁気象研究所），青木輝夫（国立極地研究所）
- A2-16 積雪中の側方流による流出不均一の水分移動モデルを用いた再現計算  
○平島寛行（防災科学技術研究所），山口悟（防災科学技術研究所），Francesco Avanzi（イタリア国際環境モニタリングセンター），Nander Wever（コロラド大学），大澤光（森林総合研究所）
- A2-17 他時期の積雪特性に基づく積雪分布シミュレーション  
○山田嵩（土木研究所寒地土木研究所），西原照雅（国土交通省北海道局），村上泰啓（土木研究所寒地土木研究所）
- A2-18 菅平高原における山岳積雪のモデル実験  
○浪間洋介（筑波大学），上野健一（筑波大学），山崎剛（東北大学）
- A2-19 日本海側の中山間地帯における積雪環境の変動  
○松浦純生（前京都大学），岡本隆（森林総合研究所），大澤光（森林総合研究所）



## B 会場

13:00~14:45

## 雪氷物理

座長：大島基 (産業技術総合研究所)

- B2-11 バイカル湖における天然ガスハイドレートのメタン安定同位体分別  
○木村宏海 (北見工業大学), 八久保晶弘 (北見工業大学), Oleg Khlystov (ロシア陸水学研究所), Gennadiy Kalmychkov (ロシア地球化学研究所), Marc De Batist (ゲント大学), 坂上寛敏 (北見工業大学), 南尚嗣 (北見工業大学), 山下聡 (北見工業大学)
- B2-12 炭化水素ガスハイドレート生成時のゲスト水素同位体分別に及ぼすケージサイズの効果  
○鎌田諒也 (北見工業大学), 八久保晶弘 (北見工業大学), 竹谷敏 (産業技術総合研究所)
- B2-13 メタンないしアルゴン+ヘリウム系混合ガスハイドレートにおけるヘリウム濃度の時間的变化  
○森谷優希 (北見工業大学), 木村宏海 (北見工業大学), 八久保晶弘 (北見工業大学), 竹谷敏 (産業技術総合研究所)
- B2-14 結晶構造 I 型をとる CO<sub>2</sub> ハイドレートの水和数の直接測定  
○矢作大輔 (北見工業大学), 八久保晶弘 (北見工業大学), 竹谷敏 (産業技術総合研究所)
- B2-15 TBAF セミクラスレートハイドレートと CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 混合ガス間の気固接触における CO<sub>2</sub> 分離特性  
○藤原玲司 (北見工業大学), 合田隼人 (北見工業大学), 木田真人 (北見工業大学), 坂上寛敏 (北見工業大学), 南尚嗣 (北見工業大学)
- B2-16 放射冷却による高品質製氷の実用化- その2 高電圧パルス印加による過冷却解消促進と微気泡群抑制 -  
○吉田匡貴 (長岡技術科学大学), 杉原幸信 (長岡技術科学大学), 上村靖司 (長岡技術科学大学)
- B2-17 凍結細胞の長期保存における氷結晶の再結晶現象の影響  
○内田努 (北海道大学), 法花翼 (北海道大学), 黄川田隆洋 (農業・食品産業技術総合研究機構, 東京大学), 津田栄 (産業技術総合研究所), 山崎憲慈 (北海道大学), 郷原一壽 (北海道大学)



## 研究発表プログラム 口頭発表

発表時間：1 鈴：9 分，2 鈴：12 分（発表終了），3 鈴：15 分（質疑・討論終了）

9 月 15 日（水） 9：00 ～ 12：15

## A 会場

9：00～10：30

SP4：今冬（2020/2021 冬季）の雪による人的被害の実態から対策を見出す

座長：諸橋和行（日本雪工学会除雪安全行動研究委員会）

A3-1 2020～2021 年冬の雪による人的被害の状況

○堤拓哉（北海道立総合研究機構）

A3-2 今冬の大雪災害の事例と特徴－雪氷災害データベース解析－

○上石勲（防災科学技術研究所），山口悟（防災科学技術研究所），砂子宗次朗（防災科学技術研究所），山下克也（防災科学技術研究所），覺道由郎（長岡技術科学大学）

A3-3 札幌市における冬道での自己転倒による救急搬送の特徴分析

○永田泰浩（北海道開発技術センター），金田安弘（北海道開発技術センター）

A3-4 Google Earth を利用した住宅地における雪による人身事故のリスク評価－その 1 2 階建て木造戸建て住宅の建築年代と屋根形状との関係－

○鎌田晃嘉（北海道科学大学），千葉隆弘（北海道科学大学）

A3-5 Google Earth を利用した住宅地における雪による人身事故のリスク評価－その 2 木造戸建て住宅地における人身事故リスク評価の試み－

○千葉隆弘（北海道科学大学），鎌田晃嘉（北海道科学大学）

A3-6 屋根雪処理における安全対策の論点整理

○上村靖司（長岡技術科学大学）

10：45～12：15

SP2：粒子特性に着目した降雪・積雪系の統合的理解に向けて

座長：中井専人（防災科学技術研究所）

A3-7 雲箱を用いた鉱物粒子の氷晶核化能力の測定 - その雲粒サイズ・鉱物サイズ・温度依存性 -

○島田互（富山大学），強力麻唯（富山大学），関原清流（富山大学），大岩敬典（富山大学），大木雅生（富山大学）

A3-8 JPCZ に関連した北陸平野部の集中降雪時の降雪粒子の特徴－2018 年と 2021 年の大雪から－

○石坂雅昭（防災科学技術研究所），本吉弘岐（防災科学技術研究所），山下克也（防災科学技術研究所），中井専人（防災科学技術研究所），山口悟（防災科学技術研究所），橋本明弘（気象庁気象研究所）

A3-9 気象モデル SCALE を用いた北海道を対象とした降雪研究

○佐藤陽祐（北海道大学），稲津將（北海道大学），勝山祐太（森林総合研究所），丹治星河（北海道大学），近藤誠（北海道大学）

A3-10 降雪粒子の粒子形状を扱う気象モデルの検証～北海道を対象とした数値実験

○鎌田萌花（北海道大学），佐藤陽祐（北海道大学）

A3-11 光吸収性不純物粒子を介した大気－積雪相互作用に関する研究の新展開

○庭野匡思（気象庁気象研究所，国立極地研究所），梶野瑞王（気象庁気象研究所，筑波大学），梶川友貴（筑波大学），青木輝夫（国立極地研究所），兒玉裕二（北海道大学），谷川朋範（気象庁気象研究所），的場澄人（北海道大学）

A3-12 拡張された波長領域 0.2 - 4.0  $\mu\text{m}$  における積雪の放射特性

○青木輝夫（国立極地研究所），内山明博（国立環境研究所）

**B 会場**

9:00~10:30

**雪氷と生活**

座長：的場澄人（北海道大学）

B3-1 実用的な可搬型雪冷房装置の開発と性能試験

○青柳大輔（長岡技術科学大学），辻野憲孝（長岡技術科学大学），杉原幸信（長岡技術科学大学），上村靖司（長岡技術科学大学）

B3-2 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発ーその4：異径製氷型における引上げ試験ー

○杉原幸信（長岡技術科学大学），水橋奈那（長岡技術科学大学），大瀧智宏（長岡技術科学大学），柏崎志武（長岡技術科学大学），上村靖司（長岡技術科学大学）

B3-3 氷の切削メカニズムとカーリング・ストーン運動のエッジ・モデル（3）

○前野紀一（北海道大学名誉教授）

B3-4 氷上を進むカーリング・ストーンの軌跡に対する氷面の影響

○亀田貴雄（北見工業大学），斉藤茉由美（北見工業大学），山浦高伸（北見工業大学，東日本高速道路株式会社），原田康浩（北見工業大学），柳敏（北海道釧路明輝高等学校），奈良浩毅（アルゴグラフィックス北見カーリングホール），佐渡公明（北見工業大学名誉教授）

B3-5 カーリング・リンクにおけるストーン通過時のペブル上端面の摩耗

○柳敏（北海道釧路明輝高等学校），亀田貴雄（北見工業大学），斉藤茉由美（北見工業大学），原田康浩（北見工業大学），佐渡公明（北見工業大学名誉教授）

B3-6 角運動量保存則を用いたカーリング・ストーンの曲がり

○佐渡公明（北見工業大学名誉教授）

10:45~12:15

**雪氷と生活**

座長：原田鉦一郎（宮城大学）

B3-7 新型コロナウイルス感染症の影響を考慮した冬期の歩行者転倒事故の予測に関する研究

○高橋尚人（札幌市立大学），丹治和博（日本気象協会），小松麻美（日本気象協会）

B3-8 福島県における雪害対策に関する基礎的研究ー落雪事故発生時の気象要因についてー

○高橋真里（郡山女子大学），山形敏明（郡山女子大学），細川和彦（北海道科学大学），苫米地司（北海道科学大学）

B3-9 屋根雪事故発生危険日予測結果の報告ー2020/21 冬期・山形県ー

○沼野夏生（地域社会デザイン研究所，東北工業大学名誉教授）

B3-10 アメダスデータを用いた各地の寒さの特性について（1）ー各種気温指標による寒さランキングー

○大橋一仁（北海道開発技術センター），金田安弘（北海道開発技術センター），小林利章（北海道気象技術センター）

B3-11 凍結を利用した伝統的な食糧の保存・貯蔵文化ー自然冷熱エネルギー利用の「フードライフストーリー」ー

○斉藤和之（海洋研究開発機構，総合地球環境学研究所），岩花剛（アラスカ大学フェアバンクス校），久郷洋子（アラスカ大学フェアバンクス校），平澤悠（東亜大学），立澤史郎（北海道大学）

B3-12 2021年2月にグリーンランドシオラパルクで生じた海水流出ー海水の脆弱性が将来の地域住民の生活に与える影響ー

○的場澄人（北海道大学），山崎哲秀（アバンナット北極プロジェクト），青木輝夫（国立極地研究所）



## 研究発表プログラム 口頭発表

発表時間：1 鈴：9 分，2 鈴：12 分（発表終了），3 鈴：15 分（質疑・討論終了）

9 月 16 日（木） 9：00 ～ 12：15

## A 会場

09：00～10：30

SP3：2017/18 年と 2020/21 年冬季の豪雪を引き起こしたものは何か？

座長：山崎哲（海洋研究開発機構）

- A4-1 2020/21 冬季に発生した大雪に対する大気と海洋の温暖化の影響  
○川瀬宏明（気象庁気象研究所），今田由紀子（気象庁気象研究所），渡邊俊一（気象庁気象研究所），本  
田明治（新潟大学），山崎哲（海洋研究開発機構）
- A4-2 2020/21 年冬季の日本海側の大雪にかかわる上空寒気の振る舞い  
○本田明治（新潟大学），川瀬宏明（気象庁気象研究所），山崎哲（海洋研究開発機構）
- A4-3 日本海寒帯気団収束帯（JPCZ）の理想化実験  
○渡邊俊一（気象庁気象研究所），新野宏（東京大学），Thomas Spengler（ベルゲン大学）
- A4-4 2020-2021 年冬季の岩見沢の積雪観測の特徴と大雪をもたらした気象パターン  
○尾関俊浩（北海道教育大学），白川龍生（北見工業大学），金田安弘（北海道開発技術センター），松岡  
直基（北海道気象技術センター）
- A4-5 対馬暖流が岩見沢の大雪に与える影響  
○佐藤和敏（北見工業大学），亀田貴雄（北見工業大学）
- A4-6 2018 年寒波を誘発したアラスカ沖の北極海の海氷激減の影響は特殊事例だったのか？  
○立花義裕（三重大学），太田圭祐（三重大学），安藤雄太（新潟大学）

10：45～12：15

## 降雪・着氷雪

座長：鎌田慈（鉄道総合技術研究所）

- A4-7 南岸低気圧による首都圏の降雪における降雪結晶特性と大気環境場  
○荒木健太郎（気象庁気象研究所）
- A4-8 2019/2020 冬季に秋田県内陸部で発生した着氷性降水の事例 - 雨氷災害に着目して -  
○鳥潟幸男（大館市教育委員会）
- A4-9 冠雪による送電用鉄塔の部材変形の原因と評価手法の考察  
○矢口龍太（東電設計(株)），栗原幸也（東電設計(株)），高橋圭一（東電設計(株)）
- A4-10 気象積雪条件による滑雪塗料の機能発現機構の解明に関する研究（2）  
○今野奈穂（宮城県産業技術総合センター），四戸大希（宮城県産業技術総合センター），佐藤勲征（宮  
城県産業技術総合センター），小杉健二（防災科学技術研究所），伊藤陽一（防災科学技術研究所）
- A4-11 アクチュエータを用いた湿雪のせん断付着力測定  
○麻生照雄（電力中央研究所），佐藤研吾（防災科学技術研究所），野村光春（電力中央研究所），松島宏  
樹（電力中央研究所），富樫数馬（防災科学技術研究所），松宮央登（電力中央研究所）
- A4-12 着雪状況把握のための検知技術の開発  
○佐藤研吾（防災科学技術研究所），中村一樹（防災科学技術研究所），富樫数馬（防災科学技術研究所）



## B 会場

10:30~12:15

### 観測・計測技術, 凍土

座長: 阿部隆博 (三重大学)

- B4-1 寒冷地対応型小型ポータブルPM<sub>2.5</sub>測定装置の開発ー冬季札幌観測, 夏季アラスカ森林火災事例, 函館黄砂事例の紹介ー  
○安成哲平 (北海道大学), 若林成人 (北海道大学), 松見豊 (名古屋大学), 的場澄人 (北海道大学)
- B4-2 パーティクル偏光ライダーによる雨粒と雪片の鉛直分布観測  
○柴田泰邦 (東京都立大学)
- B4-3 小型 UAV および SfM を用いた雪面粗さの現場測定  
○高橋浩司 (北見工業大学, 構研エンジニアリング), 白川龍生 (北見工業大学), 長沼芳樹 ((株) 構研エンジニアリング), 猿渡久人 ((株) ジオリサーチ)
- B4-4 IoT タイムラプスカメラと衛星観測画像による湖沼の冬季湖面環境観測データの解析  
○佐藤建 (一関工業高等専門学校)
- B4-5 小樽市ガスロードヒーティングの省エネ可能性調査  
山田忠幸 (山田技研 (株)), 山田健雄 (山田技研 (株)), ○中山隆之 (山田技研 (株)), 片山幸宏 (小樽市), 長内尚平 (小樽市)
- B4-6 モンゴル北部・連続永久凍土地帯における盆地冷却に及ぼす湖水の影響  
○武田一夫 (摂南大学), 木村賢人 (帯広畜産大学), 杉田明史 ((株) 環器)
- B4-7 永久凍土帯における地表面変位の経年・季節変化ー東シベリア・チュラプチャの事例ー  
○阿部隆博 (三重大学), 飯島慈裕 (三重大学)



## 研究発表プログラム 口頭発表

発表時間：1 鈴：9分，2 鈴：12分（発表終了），3 鈴：15分（質疑・討論終了）

9月16日（木） 12：45 ～ 14：30

### A会場

13：00～14：30

#### 雪崩

座長：安達聖（防災科学技術研究所）

A4-13 雪崩観測事例を用いた雪崩モデルパラメータ分布の決定とその適応性

○田邊章洋（防災科学技術研究所），安達聖（防災科学技術研究所），荒川逸人（防災科学技術研究所），伊藤陽一（防災科学技術研究所）

A4-14 20-km 解像度の大規模アンサンブル気候予測データを使った弱層形成頻度と上載積雪荷重の将来予測

○勝山祐太（森林総合研究所），勝島隆史（森林総合研究所），竹内由香里（森林総合研究所）

A4-15 低気圧性降雪による表層雪崩危険度予測システムの改良

○中村一樹（防災科学技術研究所）西田浩平（(株)雪研スノーイーターズ），齋藤佳彦（(株)雪研スノーイーターズ）

A4-16 2021.3.21 富士山で発生したスラッシュ雪崩

○上石勲（防災科学技術研究所），中村一樹（防災科学技術研究所），伊藤陽一（防災科学技術研究所）

A4-17 灌木に作用する雪圧に関する研究

○小田憲一（日本大学），松元高峰（新潟大学），勝島隆史（森林総合研究所），中村勝哉（日本大学），宮下彩奈（森林総合研究所），勝山祐太（森林総合研究所）

A4-18 ドローンによる雪崩パトロール

○町田敬（町田建設株式会社）



## B 会場

12:45~14:30

### 気候システム

座長：佐藤和敏（北見工業大学）

- B4-8 タイムラプスカメラを用いた北アルプス池ノ谷氷河周辺に形成される雲の発達  
○杉浦幸之助（富山大学）、吉田航（富山大学）
- B4-9 コリマ川流域の雪氷圏変動が河川流出に及ぼす影響  
○鈴木和良（海洋研究開発機構）、朴昊澤（海洋研究開発機構）、Olga Makarieva（メルニコフ永久凍土研究所）、金森大成（名古屋大学）、堀雅裕（富山大学）、松尾功二（国土地理院）、松村伸治（北海道大学）、Natalia Nesterova（メルニコフ永久凍土研究所）、檜山哲哉（名古屋大学）
- B4-10 パタゴニア ペリート・モレノ氷河の表面質量収支と気候  
○箕輪昌紘（名古屋大学）、藤田耕史（名古屋大学）、ペドロ・スクバルカ（パタゴニア氷原博物館）
- B4-11 気候インデックス法を用いた 23 世紀末までの南極氷床のシミュレーション  
○グレーベ・ラルフ（北海道大学）、チェンバース・クリストファー（北海道大学）、小長谷貴志（東京大学）、齋藤冬樹（海洋研究開発機構）、陳永利（東京大学）、阿部彩子（東京大学）
- B4-12 南極 AWS の超音波積雪深計により検出される暖候期の雪面の沈降  
○平沢尚彦（国立極地研究所、総合研究大学院大学）、本山秀明（国立極地研究所、総合研究大学院大学）、ヌアスムグリアリマス（国立極地研究所）、齋藤圭祐（総合研究大学院大学）、杉浦幸之助（富山大学）
- B4-13 衛星搭載光学センサデータから抽出される積雪域分布の軌道時刻依存性  
○堀雅裕（富山大学）、庭野匡思（気象庁気象研究所、国立極地研究所）、島田利元（宇宙航空研究開発機構、気象庁気象研究所）、青木輝夫（国立極地研究所、気象庁気象研究所）
- B4-14 ヒマラヤ高山域における Sentinel-2/Landsat 画像を用いた雪線高度の検出  
○佐々木織江（名古屋大学）、Evan S. Miles（スイス連邦森林・雪氷・景観研究所）、Francesca Pellicciotti（スイス連邦森林・雪氷・景観研究所）、坂井亜規子（名古屋大学）、藤田耕史（名古屋大学）



## 研究発表プログラム ポスター発表 1

オンライン討論の期間：9月6日（月）9:00～9月21日（火）12:00

9月14日（火） 15:15 ～ 16:45（ポスターコアチャット 1）

## 学生優秀発表賞

- P1-1 2020-2021年冬季における北海道の広域積雪分布の特徴  
○石井日菜（北見工業大学），白川龍生（北見工業大学），亀田貴雄（北見工業大学）
- P1-2 十勝地方の融雪期におけるROSイベント発生時の気象条件  
○及川凌雅（北見工業大学），白川龍生（北見工業大学），亀田貴雄（北見工業大学）
- P1-3 北海道釧路市の春採湖の結氷と気象データの関係ー全面結氷日，全面解氷日，結氷期間の変化と将来予測ー  
○牛塚貴博（北見工業大学），亀田貴雄（北見工業大学），吉川泰弘（北見工業大学），野本和宏（釧路市立博物館），貞國利夫（釧路市立博物館），加藤ゆき恵（釧路市立博物館），山代淳一（元釧路市立博物館）
- P1-4 積雪初期に形成されたざらめ雪が積雪変質モデル計算に及ぼす影響  
○新免幸信（北見工業大学），白川龍生（北見工業大学），佐藤航（北見工業大学），八久保晶弘（北見工業大学）
- P1-5 こしもざらめ雪・しもざらめ雪のせん断強度ー濡れ雪に変化した場合のせん断強度，および寡雪地域におけるせん断強度の推移ー  
○佐藤航（北見工業大学），白川龍生（北見工業大学），新免幸信（北見工業大学），八久保晶弘（北見工業大学）
- P1-6 カーリングにおけるスウィーピングの効果の解明  
○斉藤茉由美（北見工業大学），亀田貴雄（北見工業大学），山浦高伸（北見工業大学，東日本高速道路株），柳敏（北海道釧路明輝高校）
- P1-7 山形県月山の高山帯における赤雪の分布  
○鈴木拓海（千葉大学），竹内望（千葉大学），小野誠仁（千葉大学）

## 雪氷物理

- P1-8 TBAC ハイドレートのCH<sub>4</sub>およびCO<sub>2</sub>分離特性の温度圧力依存性  
○藤原玲司（北見工業大学），合田隼人（北見工業大学），木田真人（北見工業大学），坂上寛敏（北見工業大学），南尚嗣（北見工業大学）
- P1-9 225-246 Kにおけるメタンハイドレートの水和数測定  
○宅和聖悟（北見工業大学），矢作大輔（北見工業大学），八久保晶弘（北見工業大学），竹谷敏（産業技術総合研究所）
- P1-10 窒素酸化物を包接するクラスレートハイドレートの生成実験  
○堀智貴（北見工業大学），八久保晶弘（北見工業大学），竹谷敏（産業技術総合研究所）
- P1-11 亜酸化窒素ハイドレートの水和数測定  
○矢作大輔（北見工業大学），宅和聖悟（北見工業大学），八久保晶弘（北見工業大学），竹谷敏（産業技術総合研究所）
- P1-12 亜酸化窒素ハイドレート生成時のゲスト窒素安定同位体分別  
○鎌田諒也（北見工業大学），木村宏海（北見工業大学），八久保晶弘（北見工業大学），竹谷敏（産業技術総合研究所）
- P1-13 一酸化炭素ハイドレート生成時のゲスト炭素安定同位体分別  
○木村宏海（北見工業大学），矢作大輔（北見工業大学），八久保晶弘（北見工業大学），竹谷敏（産業技術総合研究所）
- P1-14 X線CTによる天然ガスハイドレートの微細構造の観察  
○森谷優希（北見工業大学），木村宏海（北見工業大学），八久保晶弘（北見工業大学），小西正朗（北見工業大学），坂上寛敏（北見工業大学），南尚嗣（北見工業大学），山下聡（北見工業大学）



### 雪氷化学

- P1-15 ICP 質量分析計を接続した連続融解分析装置によるアイスコア中の無機元素の多元素同時定量  
○平林幹啓 (国立極地研究所), 尾形純 (国立極地研究所), 東久美子 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), 藤田秀二 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学)

### 雪氷と生物

- P1-16 ひずみゲージを用いた全層雪崩斜面の灌木が持つグライドに対する抵抗力の計測  
○勝島隆史 (森林総合研究所), 松元高峰 (新潟大学), 小田憲一 (日本大学), 宮下彩奈 (森林総合研究所), 勝山祐太 (森林総合研究所), 河島克久 (新潟大学), 竹内由香里 (森林総合研究所)

### 氷 河

- P1-17 模擬積雪を用いた氷河氷形成過程のその場観察ー氷河氷形成過程で圧力が結晶成長に与える影響と結晶軸方向ー  
○南銀河 (富山大学), 島田亙 (富山大学)
- P1-18 ブータンヒマラヤにおける末端氷河湖の形成に伴う氷河縮小の加速  
○佐藤洋太 (名古屋大学), 藤田耕史 (名古屋大学), 井上公 (防災科学技術研究所), 坂井亜規子 (名古屋大学), Karma Toeb (ブータン水文気象局)
- P1-19 ネパールヒマラヤ・ヤラ氷河における上流への表面標高低下伝播  
○砂子宗次朗 (防災科学技術研究所), 藤田耕史 (名古屋大学), 泉岳樹 (東京都立大学), 山口悟 (防災科学技術研究所), 坂井亜規子 (名古屋大学), Rijan B. Kayastha (カトマンズ大学)
- P1-20 モンゴル, アルタイ山脈におけるポターニン氷河のアルベド解析  
○石田直也 (名古屋大学), 坂井亜規子 (名古屋大学)
- P1-21 氷河変動を制御する気候因子について  
○坂井亜規子 (名古屋大学), 藤田耕史 (名古屋大学)

### 海水と陸氷

- P1-22 摩周湖の全面結氷条件の解明およびそれに基づく 2021 年の全面結氷日の予測  
○亀田貴雄 (北見工業大学), 蜂谷衛 (無所属), 仁平慎吾 (北見工業大学, 大子町役場), 細川音治 (無所属)
- P1-23 北極海最適航路探索システムの開発と実装  
○杉村剛 (国立極地研究所), 矢吹裕伯 (国立極地研究所), 山ロー (国立極地研究所)
- P1-24 オホーツク海の海水変動に影響を与える熱帯海洋からの遅延効果  
○竹端光希 (三重大学), 立花義裕 (三重大学), 安藤雄太 (新潟大学)
- P1-25 ブラインチャネルの三次元構造と海水の曲げ強度の関係に関する実験的研究  
○布川大暉 (株式会社雪研スノーイーターズ, 北海道教育大学), 尾関俊浩 (北海道教育大学), 安達聖 (防災科学技術研究所)
- P1-26 ロードヒーティング舗装上で観察された霜の花  
○白川龍生 (北見工業大学), 石井日菜 (北見工業大学), 佐々木優太 (国土交通省北海道開発局)

### 気候システム

- P1-27 暖湿移流増加に伴う南極表面の温度上昇  
○佐藤和敏 (北見工業大学), Simmonds Ian (メルボルン大学)
- P1-28 東北 6 県における新・旧平年値に対応した積雪水量分布とその変化ー1981~2010 年および 1991~2020 年の 30 年平均の比較ー  
○本谷研 (秋田大学)
- P1-29 長期気候再現計算に基づく中部山岳域の降雪・積雪の経年変化マップ  
○栗林正俊 (長野県環境保全研究所)
- P1-30 近年の関東地方における降雪の極端化とそれをもたらす環境場の変化  
○中村祐貴 (三重大学), 立花義裕 (三重大学), 安藤雄太 (新潟大学)



### 観測・計測技術

- P1-31 海氷上における塩を含む積雪の含水率測定  
○木村宏海 (北見工業大学), 八久保晶弘 (北見工業大学), 舘山一孝 (北見工業大学), 谷川朋範 (気象庁気象研究所), 小嶋真輔 (三菱重工冷熱 (株))
- P1-32 UAV-SfM 測量による湖氷フリーボードの広域計測  
○佐藤功坪 (北見工業大学), 舘山一孝 (北見工業大学), 渡邊達也 (北見工業大学)
- P1-33 極域の雪氷の融解・凍結および積雪被覆の変化に関するモニタリング観測  
○ヌアスムグリ アリマス (国立極地研究所), 榎本浩之 (国立極地研究所, 総合研究大学院大学), シュリダー ジャワク (スバルバル統合観測システムノーリッジセンター)

### 雪氷と教育

- P1-34 降雪量の重心位置  
○藤野丈志 ((株) 興和), 坂東和郎 ((株) 興和)
- P1-35 土壌凍結深の測定を通じたアウトリーチプログラム (10)  
○原田鉦一郎 (宮城大学), 吉川謙二 (アラスカ大学), 岩花剛 (アラスカ大学), Julia Stanilovskaya (Total S.A.), 澤田結基 (福山市立大学), 曾根敏雄 (北海道大学)
- P1-36 北米とスイスの雪氷防災に関するユース教育の比較研究  
○上山大器 (東京学芸大学), 尾関俊浩 (北海道教育大学), 榊原健一 (北海道医療大学)
- P1-37 コロナ禍オンライン授業にむけた平松式雪の結晶作成実験のインターバル動画撮影  
○竹内望 (千葉大学)



## 研究発表プログラム ポスター発表 2

オンライン討論の期間：9月6日(月) 9:00~9月21日(火) 12:00

9月15日(水) 13:15 ~ 14:45 (ポスターコアチャット 2)

## 雪崩

- P2-1 野谷荘司山で2021年に大規模雪崩を引き起こした積雪状態の推定  
○勝山祐太(森林総合研究所), 勝島隆史(森林総合研究所), 竹内由香里(森林総合研究所)
- P2-2 岐阜県野谷荘司山で2021年1月に発生した乾雪表層雪崩による樹木の折損状況と雪崩速度の推定  
○竹内由香里(森林総合研究所), 勝島隆史(森林総合研究所), 勝山祐太(森林総合研究所), 荒川逸人(防災科学技術研究所), 安達聖(防災科学技術研究所), 河島克久(新潟大学)
- P2-3 スキー場を対象とした面的風況分布・吹きだまり分布の推定と一冬期にわたる観測  
○田邊章洋(防災科学技術研究所), 伊藤陽一(防災科学技術研究所), 山口悟(防災科学技術研究所), 齋藤佳彦((株)雪研スノーイーターズ), イセンコ・エフゲーニー((株)雪研スノーイーターズ), 西村浩一((株)雪研スノーイーターズ)
- P2-4 UAV空撮測量による全層雪崩堆積深分布の計測  
○安達聖(防災科学技術研究所), 勝島隆史(森林総合研究所), 荒川逸人(防災科学技術研究所)
- P2-5 野谷荘司山で発生した乾雪表層雪崩における堆積深分布の特徴  
○勝島隆史(森林総合研究所), 安達聖(防災科学技術研究所), 荒川逸人(防災科学技術研究所), 勝山祐太(森林総合研究所), 竹内由香里(森林総合研究所), 河島克久(新潟大学)
- P2-6 雲粒付着の少ない降雪結晶による乾雪表層雪崩事例について  
○松下拓樹(土木研究所寒地土木研究所)
- P2-7 初冬における気象条件と低木広葉樹の倒伏とがグライドと全層雪崩発生とに及ぼす影響  
○松元高峰(新潟大学), 河島克久(新潟大学), 勝島隆史(森林総合研究所), 宮下彩奈(森林総合研究所), 小田憲一(日本大学)

## 降雪・着氷雪

- P2-8 中山間地で集落の孤立が発生した令和3年1月の富山における大雪  
○杉浦幸之助(富山大学), 堀田裕弘(富山大学)
- P2-9 塩沢での降雪粒子と降雪密度の観測 -2020年12月の大雪事例-  
○高見和弥(鉄道総合技術研究所), 竈本倫平(鉄道総合技術研究所), 辻澁樹(鉄道総合技術研究所), 高橋大介(鉄道総合技術研究所), 鈴木賢士(山口大学), 山口弘誠(京都大学), 中北英一(京都大学)
- P2-10 基本形状模型を用いた着雪密度測定実験  
○鎌田慈(鉄道総合技術研究所), 辻澁樹(鉄道総合技術研究所), 高橋大介(鉄道総合技術研究所), 佐藤研吾(防災科学技術研究所)
- P2-11 着雪サンプルを用いた静穏・弱風下での電線着雪観測 その2 -山形県新庄市における2020年度冬期の観測-  
○野村光春(電力中央研究所), 佐藤研吾(防災科学技術研究所), 松島宏樹(電力中央研究所), 麻生照雄(電力中央研究所), 松宮央登(電力中央研究所), 富樫数馬(防災科学技術研究所)
- P2-12 尿素水を用いた飛沫着氷の低温室実験 -円筒試験体の直径の違いによる着氷形状と着氷量の比較-  
○尾関俊浩(北海道教育大学), 松沢孝俊(海上技術安全研究所), 徳留大樹(工学院大学), 布川大暉(雪研スノーイーターズ), 松田裕太(北海道教育大学), 金野祥久(工学院大学)

## 融雪

- P2-13 地すべり地における積雪期の流出水量観測  
○大澤光(森林総合研究所), 平島寛行(防災科学技術研究所), 岡本隆(森林総合研究所), 土佐信一(国土防災技術), 松浦純生(京都大学防災研究所)
- P2-14 雪えくぼのその場観測実験で発生した2種類の窪み  
○鈴木歩空(富山大学), 島田互(富山大学), 小杉健二(防災科学技術研究所), 荒川逸人(防災科学技術研究所)
- P2-15 融雪型火山泥流の粘度計測に関する検討  
○小田憲一(日本大学), 新屋啓文(新潟大学), 桂木洋光(大阪大学)



## 積 雪

- P2-16 山形蔵王における雪氷現象の観測(2020/2021 冬季)  
○沖田圭右 (日本地下水開発株式会社), 山谷睦 (日本地下水開発株式会社), 原田俊明 (日本地下水開発株式会社), 沼澤喜一 (日本地下水開発株式会社)
- P2-17 積雪モデルを用いた積雪重量分布情報の長期データセットの作成  
○平島寛行 (防災科学技術研究所), 本谷研 (秋田大学), 河島克久 (新潟大学), 佐野浩彬 (防災科学技術研究所)
- P2-18 雪氷用 X 線 CT と MRI の三次元画像の合成による積雪中の液体分布の解析  
○山口悟 (防災科学技術研究所), 安達聖 (防災科学技術研究所), 砂子宗次朗 (防災科学技術研究所)
- P2-19 札幌で 2021 年 2 月に発生した斑点濡れ雪の氷薄片観察  
○波多俊太郎 (北海道大学), 日下稜 (北海道大学), 原田康浩 (北見工業大学), 庭野匡思 (気象庁気象研究所), 的場澄人 (北海道大学)

## 氷 床

- P2-20 SEM-EDS 測定による air hydrate 結晶中のアルゴンの発見  
○内田努 (北海道大学), 繁山航 (総合研究大学院大学, 国立極地研究所), 大藪幾美 (国立極地研究所), 東久美子 (総合研究大学院大学, 国立極地研究所), 中澤文男 (総合研究大学院大学, 国立極地研究所), 本間智之 (長岡技術科学大学), 川村賢二 (総合研究大学院大学, 国立極地研究所, 海洋研究開発機構), Dorthe Dahl-Jensen (コペンハーゲン大学)
- P2-21 グリーンランド南東ドームにおけるアイスコア掘削と気象・雪氷観測  
○飯塚芳徳 (北海道大学), 的場澄人 (北海道大学), 箕輪昌紘 (名古屋大学), 山崎哲秀 (アバンナット北極プロジェクト), 川上薫 (北海道大学), 角五綾子 (北海道大学), 宮原盛厚 (株式会社アノウィ), 藤田耕史 (名古屋大学), 橋本明弘 (気象庁気象研究所), 庭野匡思 (気象庁気象研究所), 谷川朋範 (気象庁気象研究所), 青木輝夫 (国立極地研究所)
- P2-22 グリーンランド・カナック氷帽上 SIGMA-B サイトで観測された雲の有無による表面熱収支の違い  
○西村基志 (国立極地研究所), 青木輝夫 (国立極地研究所, 気象庁気象研究所), 庭野匡思 (気象庁気象研究所), 的場澄人 (北海道大学), 谷川朋範 (気象庁気象研究所), 山口悟 (防災科学技術研究所), 山崎哲秀 (アバンナット北極プロジェクト)
- P2-23 複数衛星を用いた 2018 年および 2019 年のグリーンランド氷床表面融解面積と領域気候モデルによる再現結果との比較  
○島田利元 (宇宙航空研究開発機構), 堀雅裕 (富山大学), 庭野匡思 (気象庁気象研究所)
- P2-24 氷床流動モデル IcIES-2 の開発と理想的・現実的氷床の感度実験  
○齋藤冬樹 (海洋研究開発機構), 阿部彩子 (東京大学), 小長谷貴志 (東京大学), 大石龍太 (東京大学)

## 雪氷と社会基盤

- P2-25 一回の極端な大雪の厳しさを評価する指標の検討 –その 1: 大雪の強度・広がり・継続時間に着眼した評価指標の設定–  
○原田裕介 (土木研究所寒地土木研究所), 大宮哲 (土木研究所寒地土木研究所), 武知洋太 (土木研究所寒地土木研究所), 遠藤康男 (土木研究所寒地土木研究所), 西村敦史 (土木研究所寒地土木研究所)
- P2-26 深層学習を用いた冬期歩行空間の路面すべり摩擦係数推定に関する基礎的検討  
○齊田光 (土木研究所寒地土木研究所), 徳永ロベルト (土木研究所寒地土木研究所)
- P2-27 除雪作業で形成される雪堤の力学的特性の基礎的評価 –雪層境界面の明瞭化による強度測定の改善–  
○永井悠都 (長岡工業高等専門学校), 河田剛毅 (長岡工業高等専門学校), 本間翔大 (長岡工業高等専門学校), 上村靖司 (長岡技術科学大学)
- P2-28 凍結防止剤が雪堤の強度に与える影響に関する基礎的評価  
○本間翔大 (長岡工業高等専門学校), 河田剛毅 (長岡工業高等専門学校), 永井悠都 (長岡工業高等専門学校), 上村靖司 (長岡技術科学大学)
- P2-29 鉄道安全データベースを用いた雪害事象分析  
○高橋大介 (鉄道総合技術研究所), 鎌田慈 (鉄道総合技術研究所), 辻滉樹 (鉄道総合技術研究所)



## 雪氷と生活

- P2-30 ホッキョクギツネ毛皮と防水透湿性素材の低温下での透湿性能  
○日下稜 (北海道大学), 杉山慎 (北海道大学), 原田亜紀 (NPO 北海道自然エネルギー研究会)
- P2-31 近年の東北地方における雪氷による人的被害の発生状況について  
○小杉健二 (防災科学技術研究所)
- P2-32 勝山雪室内の熱環境計測  
○大倉康平 (福井大学), 寺崎寛章 (福井大学), 上西淳予 (元福井大学), 古市健二 (元福井大学), 福原輝幸 (福井大学名誉教授)

## SP2: 粒子特性に着目した降雪・積雪系の統合的理解に向けて

- P2-33 2018年冬季大雪における降雪粒子特性のJMA-NHMによる再現性の検証  
○橋本明弘 (気象庁気象研究所), 山下克也 (防災科学技術研究所), 石坂雅昭 (防災科学技術研究所), 本吉弘岐 (防災科学技術研究所), 中井専人 (防災科学技術研究所), 山口悟 (防災科学技術研究所)
- P2-34 2021年1月7-9日上越大雪時降雪粒子のLPM PEによる観測  
○中井専人 (防災科学技術研究所), 山下克也 (防災科学技術研究所), 熊倉俊郎 (長岡技術科学大学), 本吉弘岐 (防災科学技術研究所)
- P2-35 長岡における融解層に伴う0℃等温層の観測事例  
○本吉弘岐 (防災科学技術研究所), 中井専人 (防災科学技術研究所), 山下克也 (防災科学技術研究所)

## SP3: 2017/18年と2020/21年冬季の豪雪を引き起こしたものは何か?

- P2-36 2020/21年冬季の降雪量と積雪深の時空相関特性  
○鈴木和良 (海洋研究開発機構), 松村伸治 (北海道大学)
- P2-37 気象再解析データでの2018年2月の福井豪雪  
○山崎哲 (海洋研究開発機構), 福井真 (東北大学, 気象庁気象研究所), 村田昭彦 (気象庁気象研究所),
- P2-38 地域気候モデルによる積雪の再現性について  
○山崎剛 (東北大学), 高橋直也 (ハワイ大学), 川瀬宏明 (気象庁気象研究所), 山口悟 (防災科学技術研究所)

ニセコアンヌプリ山域を対象とした吹きだまり分布の計算  
Calculation of snowdrift distribution over the Niseko Annupuri○小松麻美<sup>1</sup>, 西村浩一<sup>1,2</sup>

Asami Komatsu and Kouichi Nishimura

## 1. 研究目的

我々は、気温と降雪量（または降水量）を用いて積雪の構造を得ることで積雪安定度(SI)を計算する「簡易な積雪変質モデル」を開発し、雪崩の発生危険度に関する情報提供を実施するなど一定の成果をあげている<sup>1)</sup>。しかし山岳域など地形が複雑で風の強い地域では吹雪による雪の移動があるために、降雪量だけでは積雪の状態を十分には再現できない事例があった。そこで積雪の再配分が頻繁に起こる地域での雪崩危険度の計算精度の向上を目的に、吹雪・吹きだまりの効果をシステムに組み込んだモデルの開発を進めている。本発表ではシステムに導入予定の計算過程について、検証を行った結果を報告する。

## 2. 研究方法と結果

## 2.1 気流モデルと吹きだまりモデル

本研究では Uematsu et al.(1991)<sup>2)</sup>の吹雪・吹きだまりモデルを基礎とし、これに地形に沿った一般曲線座標系を導入した佐藤・安田 (2014)<sup>3)</sup>の数值シミュレーションモデルに基づいて計算を行った。吹雪現象は固体と気体の二相混相流とみなすことができるが、本研究では最初に気流場を解き、次に解かれた気流場を用いて飛雪場を解くという手順で数值シミュレーションを実施した。気流モデルは連続の式、レイノルズ方程式、標準 k-ε モデルで構成される。一方、飛雪モデルでは、浮遊層内の輸送を拡散方程式により計算し、Iversen et al. (1980)<sup>4)</sup>を用いて算出した跳躍層の輸送量を下層の境界条件として用いた。

## 2.2 ニセコアンヌプリ地域への適用

本研究では、ニセコアンヌプリ周辺 (14km 四方) での吹きだまりの状況を面的に把握するため、国土地理院発行の数值地図 50m メッシュの標高を利用して計算を行った。

## 2.3 風速の計算結果の検証

気流モデルでは、風上側の高さ 10m における風速を 10m/s になるように境界条件を設定し、16 方位別に領域内の風速分布を計算してその結果をデータベース化した。冬型の気圧配置や発達した低気圧の接近等の事例を含む 2020 年 2 月の 1 ヶ月間について、倶知安アメダスにおける風向・風速のデータをもとに、山域内 6 地点における風速変化の時系列を計算し、観測値と比較したところ、表 1 に示す通り、相関係数は約 0.8、Bias は約 ±1m/s、RMSE は 3m/s 程度となり、実用的な精度が得られた。

## 2.4 吹きだまりの計算結果とその検証

発達した低気圧が北海道に接近しその後冬型気圧配置が強まった 2020 年 2 月 22 日から 24 日の事例について、倶知安アメダスにおける風速変化から気流モデルと飛雪モデルで吹きだまりの発達状況を求めた。2 月 23 日 21 時の結果を図 1 に示す。吹きだまりの発達が予測された地域は、現地での観測ともおおむね

一致した。

## 謝辞

山域内の観測地点の風の観測データについては防災科学研究所とニセコ町に、また、ニセコアンヌプリ周辺の吹きだまり情報については、防災科学技術研究所 雪氷防災研究センターの伊藤陽一様に提供頂きました。合わせて御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Komatsu, A., K. Nishimura, 2020: A Simple Snow-Cover Model for Avalanche Warning in Japan. *SOLA*, **16**, 246-251.
- 2) Uematsu, T., Nakata, K., Takeuchi, K., Arisawa, Y., and Kaneda, Y., 1991: Three-dimensional simulation of snowdrift. *Cold Regions Science and Technology*, **20**, 65-73.
- 3) 佐藤・安田, 2014: 吹き払い柵の防雪効果に関する数值シミュレーション, 第 30 回寒地技術シンポジウム予稿集, 47-52.
- 4) Iversen, J. D., Greeley, R., White, B. R., and Pollack, J. B., 1980: Eolian erosion of the Martian surface, Part I; Erosion rate similitude. *Icarus*, **26**(3), 321-331.

表 1 風速の計算結果と観測値の比較 (2020 年 2 月)。

	モイワ	アンヌプリ	湯ノ沢	ヒラフ	ビレッジ	花園
n	654	221	696	696	696	659
相関係数	0.84	0.87	0.81	0.76	0.84	0.82
Bias(m/s)	1.5	0.5	0.9	1.2	-0.5	0.7
RMSE(m/s)	3.3	3.1	2.5	2.8	2.8	2.5

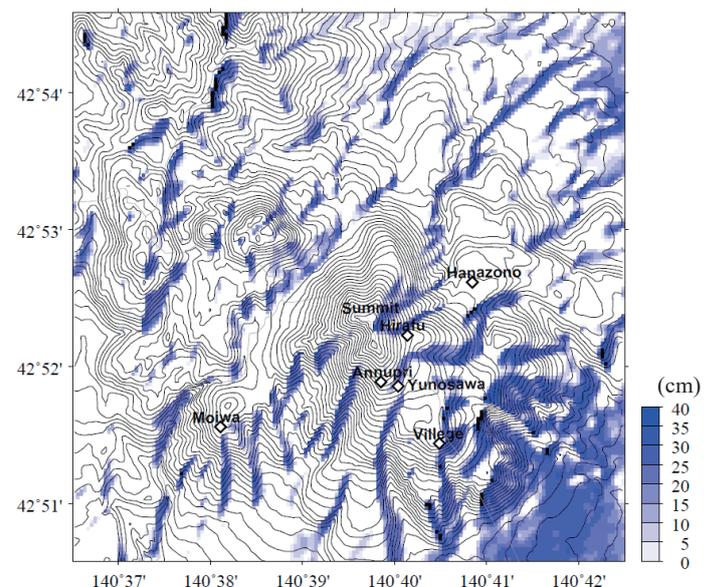


図 1 研究対象地域における吹きだまりの分布。

1 一般財団法人日本気象協会  
2 名古屋大学名誉教授

Japan Weather Association  
Professor emeritus of Nagoya University

# UAV-SfM 写真測量によるフェンス周辺の吹きだまり観測 Snowdrift Observation around Fence by UAV-SfM Photogrammetry

○新屋啓文<sup>1</sup>, 大宮哲<sup>2</sup>, 砂子宗次朗<sup>3</sup>, 西村浩一<sup>4</sup>, 大風翼<sup>5</sup>

Hirofumi Niiya, Satoshi Omiya, Sojiro Sunako, Kouichi Nishimura and Tsubasa Okaze

## 1. はじめに

吹雪による吹きだまり形成は、道路や建物など構造物の周辺だけでなく平野や山岳における地形の起伏でも確認される。特に、道路上の吹きだまりは車両の立ち往生に繋がり、風下斜面上の吹きだまりは雪崩の発生に寄与しており、防減災の観点からも吹きだまりの形成メカニズム解明は急務である。防雪柵周辺に形成される吹きだまりの観測は Tabler (1986)に端を発して行われてきたが、その大部分は防雪柵に直交する主風向の2次元鉛直断面に限られてきた。そのため、吹きだまりの面的発達過程を詳細に調べた観測事例は極めて少ない。本研究では、フェンス周辺に形成される吹きだまりの内部構造および面的分布を調べるため、2次元フェンスを用いた野外観測を実施した。

## 2. 手法

2019年以降、我々は吹きだまり観測を毎年2月に実施しており、今回は2020年2月15,16日の観測について報告する。観測地は北海道川上郡弟子屈町の雪原であり、吹走距離500m以上が確保されている。現地では、積雪深や気温などの気象観測の他、SPCと超音波風速計を設置している<sup>2)</sup>。吹きだまり観測では、吹雪前に厚さ4mmのプラダン(開口率0%)を高さ1m、長さ6mと垂直に立て、仮設フェンスを設置した。そして、吹雪後にフェンス中央からフェンス面法線方向の風上にかけて断面観測を行い、吹きだまり深さや密度、硬度を計測した。さらに、吹きだまり深さの面的分布を推定するため、吹雪前後にUAV(Phantom 4 Pro)での空撮を行い、SfM(Metashape)処理によって数値表層モデル(DSM)を作成した。DSMの精度向上のため、フェンスを囲うようにGround Control Pointを配置した。

## 3. 結果

図1は高さ7mの風速 $u_{xy}$ と高さ1mの飛雪流量 $q_x$ の10分間平均値を示しており、背景色はUAV空撮および断面観測の時間帯を意味する。2月15日16~17時のUAV空撮(フェンス設置後)前は、飛雪粒子が検出されていたが風速 $5\text{ m s}^{-1}$ を下回っていたため、吹雪ではなく降雪があったと考えられる。その後、2月16日9~12時のUAV空撮と断面観測までに、風速と飛雪流量の増加が確認された。2月16日2~5時では、風速 $10\text{ m s}^{-1}$ を越える時間もあり、発達した吹雪が発生したと思われる。

図2は、フェンス風上側の吹きだまり深さ $A_s$ と密度 $\rho_s$ 、硬度 $H$ を示している( $x=0\text{ m}$ :フェンス)。吹雪前の雪面はほぼ平坦であったことから、吹きだまり深さは雪面形状と対応している。フェンスから1.5m程(フェンス高さの1.5倍)に深さ30cm程のピークを持つ吹きだまり形状であり、内部に向かうほど密度と硬度ともに低下する傾向が確認された。吹雪後も風速 $5\text{ m s}^{-1}$ を維持しており、wind packingによる硬度の増加も考えられる。

図3は2月15,16日のDSMの差分を示しており、正負はそれぞれ堆積と侵食を意味する。フェンス風上に深さ30cm程の吹

きだまりが確認され、その深さとフェンスからの距離の関係は断面観測の結果(図2)と整合していた。さらに、フェンス風下に深さ10cm程の吹きだまりも形成されており、吹きだまりの面的把握にUAV-SfM写真測量が有用であることを示した。

## 参考文献

- 1) Tabler, R. D., 1986: Snow fence handbook. Tabler and Associates.
- 2) 増澤諭香ほか, 2021: 降雪を伴う吹雪の鉛直構造の解明. 雪氷83(3), 259-273.

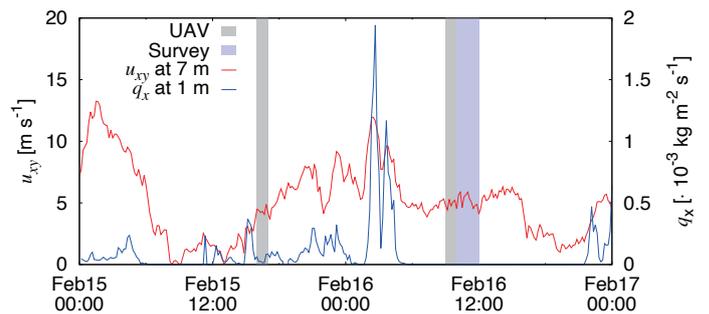


図1 風速と飛雪流量の時間変化(10分間平均値)

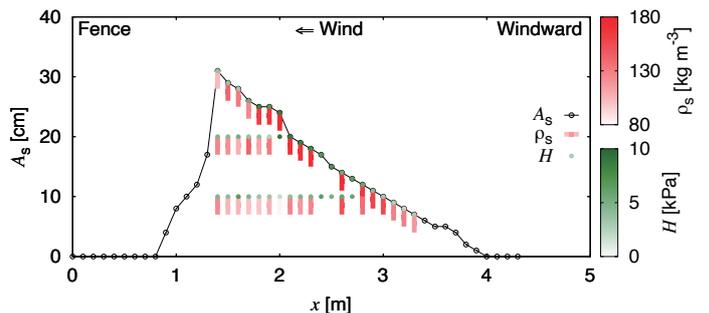


図2 フェンス風上の吹きだまり断面観測

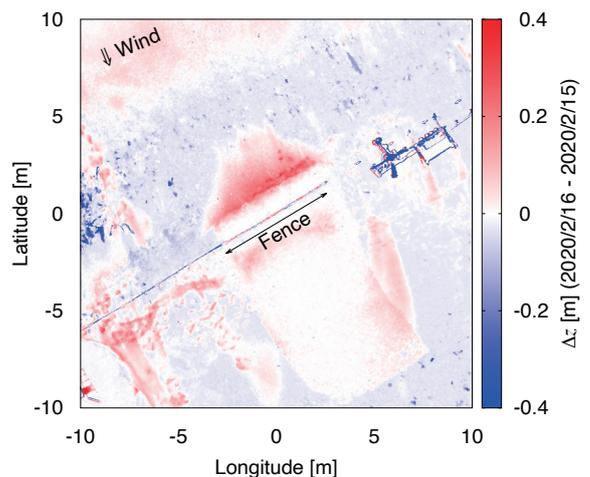


図3 DSMの差分(吹きだまりの面的分布)

1 新潟大学研究推進機構超域学術院  
2 土木研究所寒地土木研究所  
3 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター  
4 名古屋大学  
5 東京工業大学環境・社会理工学院

Center for Transdisciplinary Research, Niigata University  
Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI  
Snow and Ice Research Center, NIED  
Nagoya University  
School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

## 吹走距離の異なる2地点における吹雪量の解析 —北海道弟子屈町での2021年1月8日の観測— Analysis of snow transport rate at two locations of drift fetch — Observation in Teshikaga town, Hokkaido on January 8, 2021 —

○武知洋太<sup>1,2</sup>, 大宮哲<sup>1</sup>, 原田裕介<sup>1</sup>, 松島哲郎<sup>1</sup>, 西村敦史<sup>1</sup>, 亀田貴雄<sup>3</sup>

Hiroataka Takechi, Satoshi Omiya, Yusuke Harada, Tetsuro Matsushima, Atsushi Nishimura and Takao Kameda

### 1. はじめに

道路の吹雪対策の計画・設計や道路への吹きだまり発生などの吹雪災害のリスクを事前に把握する上では吹雪量( $\text{kg m}^{-1} \text{h}^{-1}$ )が重要な指標となる。吹雪量は風速との経験式<sup>1)4)</sup>から推定されることが多いが、風速のみで吹雪量を推定するには限界がある。これまで、吹雪が定常状態に達するのに必要な吹走距離について Takeuchi<sup>3)</sup>が報告しているが、吹走距離と吹雪量の累計値との関係については研究が行われていない。

そこで、吹走距離の異なる2地点で飛雪流量( $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )を観測し、吹雪量の違いについて解析した。

### 2. 観測概要

北海道弟子屈町内 (N43°31', E144°26') の牧草地において、冬期卓越風向(北北西)に障害物のない観測線上で吹雪量の観測を行った。観測地点は、風上側の林縁からの吹走距離が約 350 m (以下、風上と示す) と約 1500 m (以下、風下と示す) の2地点とした。観測は2021年1月6日~10日に実施した。観測では、各地点の地上高 0.5 m, 1.0 m に飛雪粒子計数装置(新潟電機製: SPC-95)を設置し飛雪流量を計測した。地上高 2.4 m に風向風速計を設置し、各地点の風向風速を計測した。併せてタイムラプスカメラを設置し、各地点の積雪深や吹雪状況を静止画で10分毎に記録した。

本分析は、観測地点近傍の気象庁 AMeDAS 弟子屈観測所において、卓越風向(北~北西)から風速  $5 \text{ m s}^{-1}$  以上の風が概ね連続して記録された2021年1月8日0時00分~21時10分のデータを対象とした。対象期間において、上記観測所の気温は $-4.5 \sim -7.8 \text{ }^\circ\text{C}$ で推移し、降水量の累計値は 15.5 mm であった。

各観測地点の2高度(地上高 0.5 m, 1.0 m)で計測した飛雪流

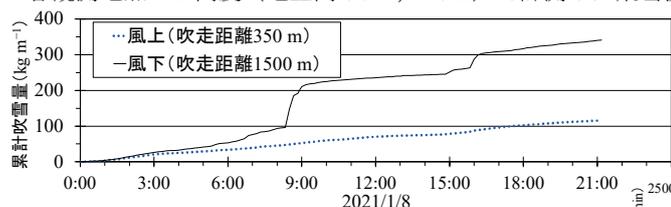


図1 累計吹雪量の時系列 (2021/1/8)

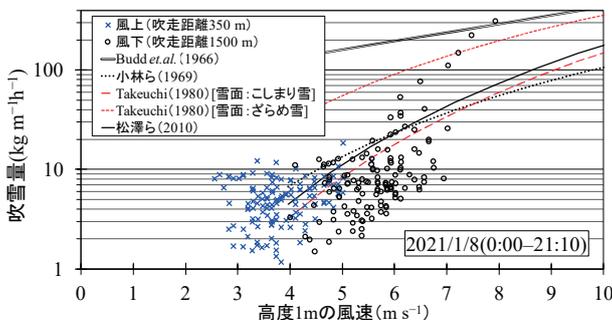


図2 吹雪量と高度1mの風速との関係 (10分値)

量と計測時の雪面からの高度より、雪面高 2.0, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1, 0.07, 0.05 m の飛雪流量を外挿及び内挿により算出した。なお、雪面からの計測高度は静止画及び観測地点近傍の雪原(摩周観光文化センター: N43°31', E144°27')で別途計測していた積雪深より把握した。各高度の飛雪流量を用い高度 2 m までの吹雪量を台形近似により算出した。ここで、高度 0.05 m 以下雪面までの飛雪流量を一定と仮定した。

### 3. 結果および考察

図1は、風上及び風下における累計吹雪量の時系列図である。風下の累計吹雪量は風上より多く風上の2倍以上であった。ただし、風下の風速が風上より大きく風上の約 1.5 倍であったため、その差には風速の違いも影響していると考えられる。

雪面高 1 m の風速と吹雪量の関係を図2に整理した。ここで、雪面高 1 m の風速は対数測(粗度  $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$ )により換算した。なお、経験式<sup>1)4)</sup>による吹雪量の推定値を図2に曲線で併記した。吹雪量の観測値は、風速の増加に伴い大きくなる傾向が見られた。観測値の多くは小林ら<sup>2)</sup>、松澤ら<sup>4)</sup>の推定値以下であったが、風下では高度 1 m の風速が概ね  $6 \text{ m s}^{-1}$  以上の場合に観測値がこの推定値を超過する事例が見られた。

風上と風下の風速が概ね一致した時間帯に着目し、各地点の粒径区分毎の飛雪粒子数と飛雪流量を比較した(図3)。その結果、地上高 1 m では風上と風下で大きな違いが見られなかったが、地上高 0.5 m では風下の飛雪粒子数がほとんどの粒径で風上の約 2 倍であり飛雪流量に 2 倍近い差が見られた。従って、吹雪が定常状態(飽和吹雪量)に達するには吹走距離が 350 m では十分でない場合があると考えられる。

### 参考文献

- 1) Budd W.F. et al., 1966: *Studies in Antarctic Meteorology*, American Geophysical Union. Antarctic Research Series, **9**, 71–134.
- 2) 小林大二ら, 1969: 低温科学・物理編, **27**, 99–106.
- 3) Takeuchi M., 1980: *Journal of Glaciology*, **26**, 481–492.
- 4) 松澤勝ら, 2010: 寒地技術論文・報告集, **26**, 45–48.

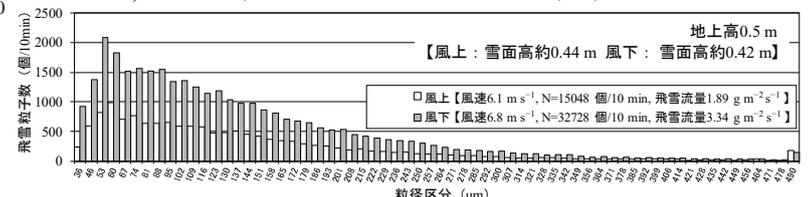


図3 各観測地点の粒径別の飛雪粒子数 (2021/1/8 7:10~7:20)

1 土木研究所寒地土木研究所  
2 北見工業大学大学院工学研究科  
3 北見工業大学

Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI  
Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology  
Kitami Institute of Technology

# WRF を用いた北海道弟子屈町周辺に発生する Gap wind 強化要因の検討 Analysis of Gap Wind Enhancement Factors in Teshikaga, Hokkaido based on WRF Simulation

○川島理沙<sup>1</sup>, 池田侑樹<sup>2</sup>, 大宮哲<sup>3</sup>, 新屋啓文<sup>4</sup>, 大風翼<sup>1</sup>

Risa Kawashima, Yuki Ikeda, Satoshi Omiya, Hirofumi Niiya and Tsubasa Okaze

## 1. はじめに

北海道東部は南岸低気圧の北上により強風が発生し、暴風雪による施設の倒壊や交通障害がしばしば発生する。道東の中でも、川上郡弟子屈町は、冬季の3割が日最大風速 10 m/s を上回る<sup>1)</sup>など、局所的に風速の大きな地域であり、池田ら<sup>2)</sup>は領域気象モデル WRF の解析によって、弟子屈の強風は Gap wind の特徴が見られることを示している。しかし、弟子屈の風況場に対する周囲の複雑な地形の効果について、詳細な検討は行われていない。

本研究では WRF を用いて、弟子屈周辺の谷地形及び風上の屈斜路カルデラ外輪山の一部を改変した数値実験を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 解析手法

風況場の再現には、WRF Version 3.7.1 を用いた。解析対象事例は、弟子屈で地吹雪が発生した 2019 年 2 月 18 日の午前中とし、計算期間は 2 月 16 日 21 時から 18 日 21 時の 2 日間とした。大気境界層 scheme は Mellor-Yamada-Janjic scheme<sup>2,3)</sup>とし、鉛直層数は 35 層とした。その他の計算条件は、文献 1 参照。図 1 に、本解析で用いた地形を示す。実際の地形を再現した解析(Case 1)、弟子屈周辺の谷幅を広げた解析(Case 2)及び屈斜路カルデラ外輪山の一部を除去した解析(Case 3)の 3 ケースを実施した。

## 3. 解析結果

図 2 に、弟子屈にて強風であった 18 日 11 時の Case 1 の地上 10 m 水平風速の分布図及び、Case 1 と Case 2 ないし Case 3 との差を示す。

図 2 (a)に示すように Case 1 では、AMeDAS 弟子屈(T)を含む谷の出口付近において、10~12 m/s の強風領域が形成されていることが確認でき、弟子屈(T)から風上の北西方向へ約 17 km 離れた屈斜路湖地点(K)と比べ、風速が 1.3 倍程度に加速している。

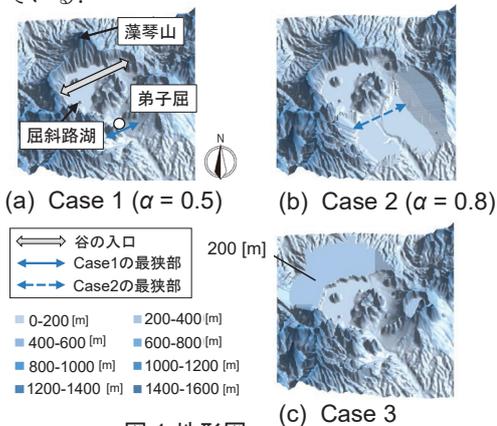


図 1 地形図

図 2 (b)を見ると、弟子屈を含む谷の出口付近の風速は Case 1 の方が大きく、その差は最大で 4 m/s 程度である。Case 2 の 11 時の屈斜路湖上に対する弟子屈の風速比は、1.1 程度であったことから、弟子屈周辺の谷地形によって局所的に強風になっていると考えられるが、さらに他の地形的影響も受けている可能性がある。

図 2 (c)を見ると、弟子屈の風上にあたる屈斜路湖(K)付近から弟子屈の谷の出口付近にかけて Case 1 の方が風速は大きく、その差は 2 m/s 程度である。

弟子屈を含む谷の出口付近において、Case3 より Case2 の方が Case1 との風速差が大きいことから、弟子屈周辺の谷地形による Gap wind が強風発生 の 主要因 と考えられる。ただし、Case3 に比べて Case1 の風速が大きいことから、屈斜路カルデラ外輪山の影響により屈斜路湖上の風速が増加し、これが弟子屈周辺の峡谷部に流入することで弟子屈周辺に強風をもたらしている可能性もある。

## 4. まとめ

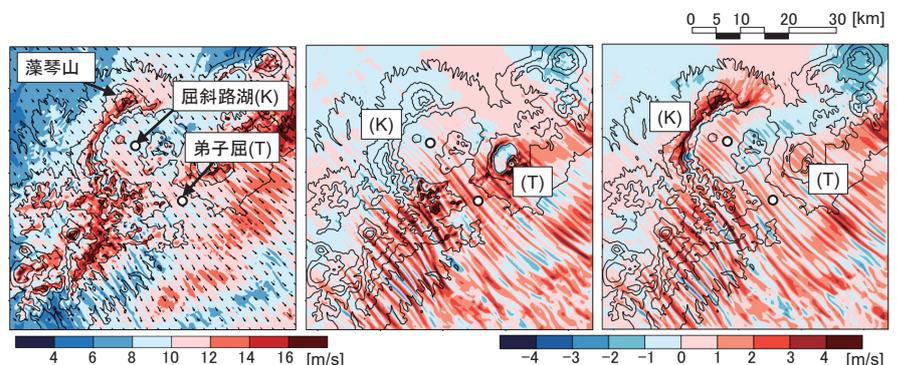
領域気象モデル WRF を用いて、弟子屈周辺の地形を変更した解析を行い、弟子屈の強風は、主として谷地形に起因するものであるが、屈斜路カルデラ外輪山がさらにその風を強化していることが示唆された。今後は、外輪山の山岳波の影響など流れの 3 次元的分析を進め、弟子屈周辺の局所的な強風域の形成メカニズムを明らかにする予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費(18H01592, 21H01489)の助成を受けた。

注釈 図 1 (b)に示す Case 2 では、谷の入口と最狭部の比( $\alpha$ )が 0.8 程度になるように標高データを与えた。なお、Case 1 は  $\alpha = 0.5$  程度である。図 1 (c)に示す Case 3 では、弟子屈から 25 km 北西に位置する藻琴山 (標高 1000 m) を含む屈斜路カルデラ外輪山の一部を藻琴山の北西の標高と同じ 200 m に変更した。

### 参考文献

- 1) 池田ほか, 2020 : 風工学研究論文集, 26, 1-8.
- 2) Mellor, G.L. and Yamada, T. 1982 : Rev. Geophys. Sp. Phys., 20, 851-875.
- 3) Janjic, Z. I. 2001 : National Center for Environmental Prediction Office Note 437.



(a) Case 1 (b) Case 1 – Case 2 (c) Case 1 – Case 3

図 2 地上 10 m 風速或いは風速差の水平分布図  
(コンタは風速, 等値線は Case 1 の 200 m 毎の標高, 矢印は風向)

1 東京工業大学環境・社会理工学院  
2 広島電鉄株式会社  
3 土木研究所寒地土木研究所  
4 新潟大学研究推進機構超越学術院

School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology  
Hiroshima Electric Railway  
Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI  
Center for Transdisciplinary Research, Niigata University

## 降雪を伴う吹雪時における飛雪流量の最大瞬間値と平均値の関係 Relation between Mean and Instantaneous Values of Snow-drift Flux under Blowing Snow with Snowfall

○池田侑樹<sup>1</sup>, 川島理沙<sup>2</sup>, 大宮哲<sup>3</sup>, 新屋啓文<sup>4</sup>, 西村浩一<sup>5</sup>, 大風翼<sup>2</sup>

Yuki Ikeda, Risa Kawashima, Satoshi Omiya, Hirofumi Niiya, Kouichi Nishimura and Tsubasa Okaze

### 1. はじめに

吹雪は、風により雪が空气中を輸送される現象である。吹雪は乱流変動に伴い、その空間密度が時間的に大きく変動し、これに伴い視程も大きく変動する<sup>1)</sup>。吹雪によるホワイトアウトなどの雪害低減のためにも、吹雪の特徴量は、平均的性状だけでなく、乱流変動に伴う変動性状の把握も重要である。筆者らは、吹雪の時空間構造の把握のため、北海道弟子屈町の雪原でタワー観測を実施しており、地吹雪時、飛雪流量は瞬間的に10分間平均値の15倍程度に増加することを示した<sup>2)</sup>。しかし、降雪の影響が小さい一つの地吹雪イベントを対象とした分析結果であり、他の吹雪イベントへの適用性や降雪の影響は議論されていない。

本研究では、北海道弟子屈町の雪原にて吹雪のタワー観測を実施し、降雪を伴う吹雪イベントを対象とした、飛雪流量の変動に関する分析を行ったので、その結果を報告する。

### 2. 対象とする分析期間

北海道川上郡弟子屈町内の雪原において、高さ1.0, 1.5, 3.0, 7.0 mに超音波風速計(Young社製CYG-81000)及びスノーパーティクルカウンター(以下、SPC;新潟電機社製、SPC-95ないしSPC-S7)を設置し、2018年から3冬期継続してタワー観測を実施している。詳細は文献2参照。本研究では、風向が北西で安定し強風が継続して吹いた2019年2月18日9:00~13:00(Period 1)及び2019年3月6日20:00~24:00(Period 2)を分析の対象とした。対象期間中における平均降雪強度は、Period 1が $0.034 \text{ mm h}^{-1}$ 、Period 2が $0.16 \text{ mm h}^{-1}$ であり、Period 2の方が、降雪の影響が大きい。

吹雪発生臨界条件を検討した竹内らの研究<sup>3)</sup>に倣って、分析期間中の気温と高さ7.0 m風速の10分間平均値がそれぞれ $-2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下と $8.5 \text{ m s}^{-1}$ 以上である時間帯を、高い地吹雪が発生していた1回のイベント(10分間)として抽出した。その結果、Period 1から17、Period 2から21の地吹雪イベントを抽出した。

増澤ら<sup>4)</sup>は、弟子屈の雪原での観測より、降雪がある場合には、浮遊層の飛雪流量が鉛直方向に一定になると述べている。これに倣って、高い地吹雪が発生していたイベントの中から、降雪の影響があったと考えられるイベントをさらに抽出した。以降、降雪のない地吹雪イベントをCase A、降雪のあるイベントをCase Bとする。Case Bに該当したのは、Period 1では17ケース中4ケース、Period 2では21ケース中11ケースであった。

### 3. 飛雪流量の変動に関する分析

図1に、高さ1.0 mの平均風速と平均飛雪流量 $q_{mean}$ の関係を示す。同程度の風速における飛雪流量を見ると、Period 1ではCase AとBで大きな差は見られないが、Period 2では降雪を伴うCase Bの方が大きい傾向にある。これは、Period 2の方がPeriod 1よりも降雪強度が大きく、SPCを通過する降雪粒子の影響をより受けたためだと考えられる。図2に、高さ1.0 mの、平均風速と飛雪流量の99.5パーセンタイル値 $q_{99.5}$ (1秒毎のデータより算出)の関係を示す。同程度の風速において、 $q_{99.5}$ はCase AとBの

間で大きな差は見られない。 $q_{99.5}$ のような稀に発生する大きな飛雪流量は、降雪粒子よりも、風の乱流変動による影響が大きいためだと考えられる。

図3に、各高さの、飛雪流量の10分間平均値 $q_{mean}$ と99.5パーセンタイル値 $q_{99.5}$ の関係を示す。Period 1では、降雪の有無に関係なく、既報<sup>2)</sup>に示したように $q_{mean}$ が $0.1 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ よりも大きい領域において比例関係が見出せ、その傾きは15程度である。一方Period 2では、 $q_{mean}$ が $0.1 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ よりも大きい領域において、比例関係が見出せるものの、傾きは15より小さい。これは、図1, 2に示すように、同じ風速条件であれば、 $q_{99.5}$ は降雪強度に影響されない一方で、 $q_{mean}$ は降雪強度が大きいと増加するためだと考えられる。吹雪時、降雪強度が大きいと、飛雪流量の瞬間的な増加の割合はやや小さくなることを示唆している。

### 4. まとめ

降雪を伴う吹雪イベントを対象に、飛雪流量の変動に関する分析を行い、降雪時は、地吹雪時よりも飛雪流量の瞬間的な増加の割合が小さくなることを示した。今後は、瞬間的な飛雪流量の増加と乱流変動との関係についての分析を進めていく。

謝辞 本研究はJSPS科研費(18H01592, 21H01489)の助成を受けた。

#### 参考文献

- 1) Ishimoto, K. 1995: 開発土木研究所報告, 57pp.
- 2) 池田ほか, 2021: 2021年度日本建築学会大会(東海)学術講演会梗概集(投稿中).
- 3) 竹内ほか, 1986: 昭和61年度日本雪氷学会全国大会予稿集.
- 4) 増澤ほか, 2021: 雪氷, 83, 259-273.

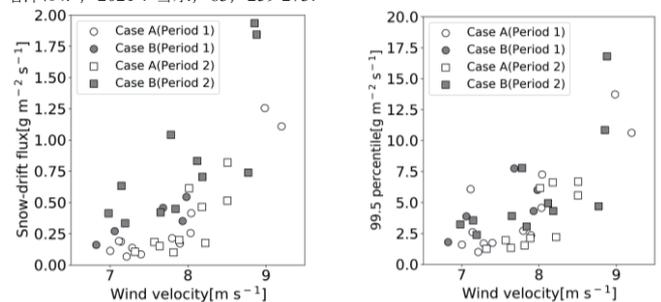


図1 高さ1.0 mの平均風速と $q_{mean}$ の関係

図2 高さ1.0 mの平均風速と $q_{99.5}$ の関係

(図1と図2は縦軸のスケールが異なることに留意されたい)

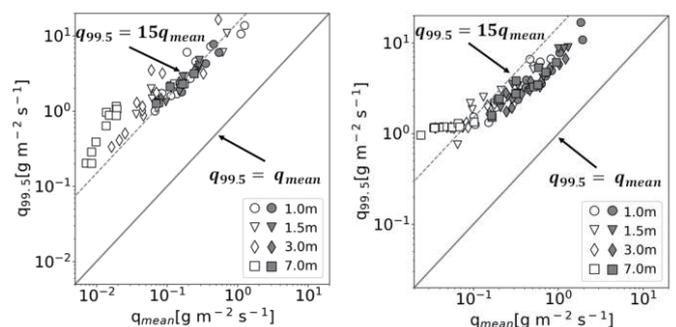


図3  $q_{mean}$ と $q_{99.5}$ の関係

(左図: Period 1, 右図: Period 2, 白抜き: Case A, 灰色: Case B)

1 広島電鉄株式会社  
2 東京工業大学環境・社会理工学部  
3 土木研究所寒地土木研究所  
4 新潟大学研究推進機構超域学術院  
5 名古屋大学

Hiroshima Electric Railway  
School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology  
Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI  
Center for Transdisciplinary Research, Niigata University  
Nagoya University

# 吹雪時における飛雪流量の瞬間的な増加と乱流構造に関する分析

## Investigation of Relation between Spike in Snow-drift Flux and Turbulent Coherent Structure under Blowing Snow

○大風翼<sup>1</sup>, 池田侑樹<sup>2</sup>, 川島理沙<sup>1</sup>, 大宮哲<sup>3</sup>, 新屋啓文<sup>4</sup>, 西村浩一<sup>5</sup>

Tsubasa Okaze, Yuki Ikeda, Risa Kawashima, Satoshi Omiya, Hirofumi Niiya and Kouichi Nishimura

### 1. はじめに

一般的に、風による飛砂や飛雪の固体粒子の輸送は、1)風による堆積粒子の取り込み、2)跳躍・浮遊粒子の運動、3)スプラッシュ過程(飛散粒子の地表面への衝突による粒子の放出)、4)飛散粒子と流れ場の運動量交換に伴う風速の変化、の4つの物理過程によって説明される<sup>1)</sup>。乱流の組織構造と粒子飛散の関係は、Sterk et al.<sup>2)</sup>が四象限解析<sup>注</sup>により砂面近傍の粒子の運動に、主に主流方向の正の風速変動(Outward interaction/Sweep)が寄与している可能性を指摘している。Aksamit and Pomeroy<sup>3)</sup>は、野外でのハイスピードカメラによる雪面近傍の吹雪粒子の撮影と超音波風速計による測定から、Sweepが雪面からの雪粒子の輸送や雪面近傍の飛雪流量の増加に支配的な役割を担っていると推察しているが、十分なデータは得られていない。一方、筆者ら<sup>4)</sup>は近年、北海道弟子屈町での吹雪のタワー観測を実施し、吹雪時、高さ1~3mの飛雪流量の最大瞬間値は、高さに寄らず10分間平均値の15倍程度となることを示し<sup>4)</sup>、浮遊層の飛雪流量の急増が、組織的な乱流構造の影響を受けている可能性を指摘している。

本研究では、弟子屈町で観測した地吹雪イベントのデータを用い、飛雪流量の時間変動と乱流の組織的構造に関する分析を行ったので、その結果を報告する。

### 2. 分析手法

本分析では、飛雪流量が継続的に記録され、主流直交方向の風向の変動も小さかった2019年2月18日10:30~10:40(高さ7.0m平均風速:11.4 m s<sup>-1</sup>, 摩擦速度:0.46 m s<sup>-1</sup>, 高さ1.0m平均飛雪流量:1.2 g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)の時間帯を対象とした。3次元超音波風速計及びSnow Particle Counterを高さ1.0, 1.5, 3.0, 7.0mの4高度に設置し、風速及び飛雪流量の時系列データを得た。観測手法の詳細は、文献4を参照されたい。

### 3. 分析結果

図1に高さ1.0mにおけるシアストレス $u'w'$ と飛雪流量 $q$ の時系列変化を示す。なお、比較的大きな乱流構造に着目するため、 $u'$ と $w'$ に5秒間の移動平均を施した時系列データにより $u'w'$ を算出し、 $q$ にも同様の移動平均を施している。飛雪流量が10分間平均値(1.2 g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)の3倍の値(図1の灰色の鎖線)は、およそ飛雪流量の90パーセンタイル値に相当し<sup>4)</sup>、これを超える5イベント(210, 260, 350, 410, 490 s付近)が観測された。210 s及び350 s付近では、 $u'w'$ が大きな負値となっており、SweepもしくはEjectionが関与している可能性がある。

飛雪流量が10分間平均値の3倍を超える時刻における高さ1.0mにおけるシアストレス $u'w'$ と飛雪流量 $q$ の関係を図2に示す。図2を見ると多くがSweepに該当しており、10分間平均値よりも5秒間平均値の飛雪流量が一桁大きい210 s及び350 s付近はいずれも多くがSweepに該当していた。Sweepの飛雪流量急増への関与について、Sterk et al.<sup>2)</sup>は、飛砂の観測より、主流方向Sweep及びOutward Interactionの関与を示しており、また、根本

ら<sup>5)</sup>は、北海道北部の平坦地での吹雪観測から、飛雪流量の急増は主としてSweep中に生じていると述べており、これらの観測とも傾向は一致する。

飛雪流量が10分間平均値の3倍を超える5イベントのピーク前後10s間のQuadrant traceを示す。継続的に $u'$ が負かつ $w'$ が正であった一つのイベント(399-419 s)を除き、Sweepが継続して発生しており、Sweepが高密度な飛雪流量の発生に影響していると考えられる。Sweepが発生していなかった一つのイベントは、主としてEjectionが生じていた。Ejectionによる低速流体塊の上昇により雪面近傍の雪粒子が上方に持ち上げられた可能性もあるが、他のEjection発生時には、飛雪流量の急増は見られないことから、さらなる検討が必要である。

### 4. まとめ

1つの地吹雪イベントを対象に、飛雪流量の急増と乱流の組織的構造に関する分析を行い、飛雪流量の急増には、Sweepが関与していることを示した。今後は、数値流体解析<sup>6)</sup>による分析も進め、乱流の3次元構造と飛雪流量急増のメカニズムについて分析を行う予定である。

謝辞 本研究はJSPS科研費(18H01592, 21H01489)の助成を受けた。

注 四象限解析は、各時刻の風速変動の水平成分 $u'$ と鉛直成分 $w'$ を用いて、乱流の組織構造を分析する手法の一つで、 $u'-w'$ 図上で、第一象限( $u' > 0, w' > 0$ )に分類される現象をOutward Interaction, 第二象限( $u' < 0, w' > 0$ )をEjection, 第三象限( $u' < 0, w' < 0$ )をInward Interaction, 第四象限( $u' > 0, w' < 0$ )をSweepと呼ぶ。

#### 参考文献

- 1) Bagnold, 1941: The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen, London.
- 2) Sterk et al., 1998: Earth Surf. Proc. Landforms, **23**, 877-887.
- 3) Aksamit and Pomeroy, 2018: Boundary-Layer Meteorol., **167**, 211-233.
- 4) 池田ほか, 2020: 雪氷研究大会(2020・オンライン)講演要旨集, A3-14.
- 5) 根本ほか, 2013: 雪氷研究大会(2013・北見)講演要旨集, A5-2.
- 6) Okaze et al., 2017: J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. **183**, 35-43.

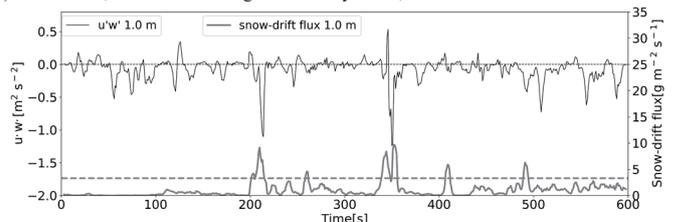


図1 高さ1.0m地点のシアストレス $u'w'$ と飛雪流量の時系列変化(図中の灰色の水平線は、10分間飛雪流量の3倍の値)

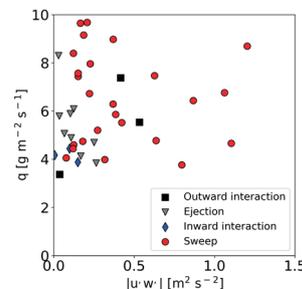


図2  $u'w'$ と $q$ の関係(10分間平均飛雪流量の3倍を超える時間の値のみ抽出した。)

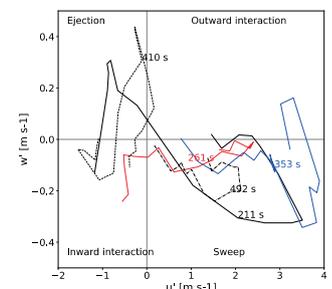


図3 Quadrant trace ( $q$ がピークとなった前後10秒間の $u'$ と $w'$ の関係。図中の時刻は $q$ がピークとなった時刻。)

1 東京工業大学環境・社会理工学院  
2 広島電鉄株式会社  
3 土木研究所寒地土木研究所  
4 新潟大学研究推進機構超域学術院  
5 名古屋大学

School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology  
Hiroshima Electric Railway  
Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI  
Center for Transdisciplinary Research, Niigata University  
Nagoya University

## 高密度集中観測による吹雪の時空間構造の解明 II

## Elucidation of Spatiotemporal Structures from High-Resolution Blowing Snow Observations II

○西村浩一<sup>1</sup>, 根本征樹<sup>2</sup>, 大宮 哲<sup>3</sup>, 櫻井俊光<sup>3</sup>, 下山 宏<sup>4</sup>, 新屋啓文<sup>5</sup>, 羽賀秀樹<sup>6</sup>, 伊藤陽一<sup>2</sup>

Kouichi Nishimura, Masaki Nemoto, Satoshi Omiya, Toshimitsu Sakurai, Kou Shimoyama,

Hirofumi Niiya, Hideki Haga and Yoichi Ito

## 1. はじめに

吹雪は大気乱流の作用のもと、時間的、空間的に大きく変動する。本稿では、吹雪の時空間変動特性を明らかにすることを目的に石狩郡当別町で2018年冬期に実施された観測結果に加え、前年の石狩吹雪実験場（寒地土木研究所）、さらに2000年に南極みずほ基地で取得されたデータを用いた解析の概要を報告する。

## 2. 野外観測

図1に当別町で計15台のスノーパーティクルカウンター（SPC）と14台の3次元超音波風速計を用いて行われた集中観測の様子を示す。全センサのアナログ出力を高速でサンプリングし、質量フラックス、粒径のほか粒子速度の変動と乱流構造との関係に着目して解析を行った。

## 3. 結果

図2に高さ23 cmにおける2分間（2018年2月16日）と高さ1 cmでの10秒間（2月24日）の吹雪質量フラックスの時空間変動を示す。前者からは吹雪の波状の構造（Snow wave）が、後者では筋状の構造（Snow snake）が確認できる。

図3には4象限解析による乱流構造と吹雪質量フラックスの関係を求めた一例を示す。 $u'$ 、 $w'$ は主流風と鉛直風それぞれの変動成分で、レイノルズ応力（ $-u'w'$ ）が正になり乱れエネルギーの生成に寄与するEjection（ $u' < 0, w' > 0$ ）とSweep（ $u' > 0, w' < 0$ ）は第2、第4象限に対応する。吹雪フラックスはSweep、Outer interaction（ $u' > 0, w' > 0$ ）の順に出現頻度が高く、吹雪輸送には正の $u'$ の寄与が大きいことが示唆される。また積分時間Tにおける乱れエネルギーの分散値を以下の量で定義し、

$$\text{var}_{uu}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u'^2(t') dt' - \left[ \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u'(t') dt' \right]^2$$

Blackwelder and Eckelman (1979) ほかによる VITA 法 (Variable Interval Time Averaging method) を用いて乱流の bursting 現象を検出し、吹雪輸送フラックス、粒子速度、粒径分布との関係についても比較検討を行った。



図1 石狩郡当別町での観測機器の設置状況

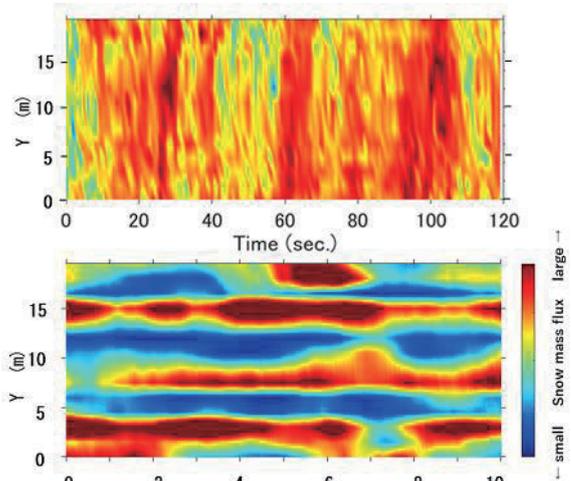


図2 吹雪フラックスの時空間構造（時間-水平断面）の例上：2018/2/16 05:17:08～19:08、測定高 23 cm  
下：2018/2/24 21:39:42～39:52、測定高 1 cm

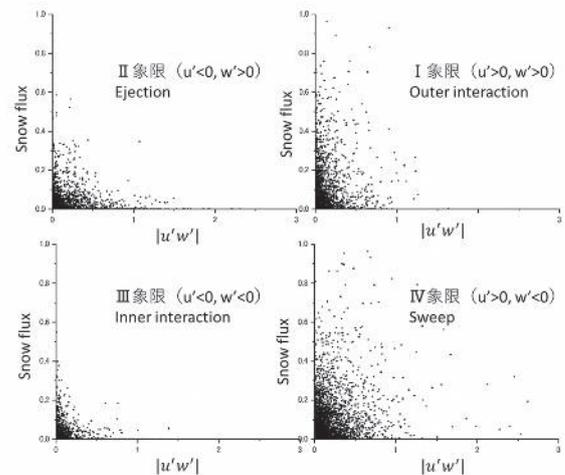


図3 4象限解析による乱流構造と吹雪質量フラックスの関係

## 参考文献

Blackwelder, R. F. and H. Eckmann 1979: Streamwise vortices associated with the bursting phenomenon J. Fluid Mech., 94, 577-594.

**謝辞** 本研究の遂行にあたっては長岡科学技術大学の熊倉俊郎氏をはじめ、土木研究所寒地土木研究所、新潟電機（株）、北大低温研、富山大などに所属する多くの方々にご多大なるご協力をいただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

1 名古屋大学  
2 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター  
3 土木研究所寒地土木研究所  
4 北海道大学低温科学研究所  
5 新潟大学研究推進機構超域学術院  
6 株式会社 スノーテック新潟

Nagoya University  
Snow and Ice Research Center, NIED  
Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI  
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Center for Transdisciplinary Research, Niigata University  
Snow-tech Niigata Co. Ltd

2017/2018 年冬季における北海道の吹雪発生マップの作成  
Blowing snow map of Hokkaido in 2017/2018 winter○丹治星河<sup>1</sup>, 稲津将<sup>2,3</sup>, 川添祥<sup>2</sup>, 佐藤陽祐<sup>2,4</sup>

Seika Tanji, Masaru Inatsu, Sho Kawazoe, and Yousuke Sato

## 1. はじめに

吹雪は、地表付近の強い風によって降雪あるいは積雪粒子が移動することで発生する。吹雪発生予測の鍵である地表付近の風は、総観場に依存した上空の風だけでなく、微小な地形の影響も強く受ける。しかし、現業の吹雪予測は解像度が 5 km 以上の風データに基づいて行われているため、それよりスケールの小さい地形の影響を受けた吹雪の発生を捉えることができていない。

本研究の目的は、力学的ダウンスケーリング(DDS)を施した 1 km 解像度の気象データを用いて北海道における吹雪発生マップを作成することである。また、自己組織化マップ (SOM) を使って冬季の日本付近における総観場のパターンを分類し、北海道で吹雪が発生した時の総観場の特徴を調べる。

## 2. 方法

DDS の初期値・境界値として、気象庁メソ解析データ<sup>1</sup>を使用した。これは 3 時間ごと、水平解像度が 5 km の気象データである。ダウンスケーリングには、理化学研究所計算科学研究センターが開発している SCALE の領域モデル<sup>2,3</sup>を使用した。計算期間は 2017 年 11 月 1 日から 2018 年 2 月 28 日の 4 か月である。

吹雪発生の指標として、DDS で出力された気象データから各グリッドにおける高さ 1.2 m における視程  $V(z)$  を計算した<sup>4,5,6</sup>。視程  $V(z)$  は、雪粒子空間濃度  $n(z)$  ( $\text{g m}^{-3}$ ) 及び風速  $U(z)$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) から 
$$\log(V(z)) = -0.773 \log(n(z)U(z)) + 2.845 \quad (1)$$
 で求めた。 $n(z)$  は降雪強度  $P$  ( $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) と摩擦速度  $U^*$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) から求めた<sup>4</sup>。

また、吹雪発生時の総観場の特徴を調べるために、SOM マップ<sup>7</sup>を作成して、冬季北海道における気圧偏差のパターンを分類した。使用したデータは、気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)<sup>8,9</sup> の 6 時間ごとの平均海面気圧である。解析領域は北緯 27 度から北緯 55 度、東経 128 度から東経 158 度であり、データの解像度は 1.25 度である。解析期間は 1960 年 1 月から 2020 年 2 月の冬季(12-2月)である。

## 3. 結果

図 1 の結果より、解析期間中で吹雪時間数が特に長かった地域は日本海側の海岸付近並びに室蘭及びえりものような岬地形、日本海岸の北西～西から内陸へ伸びる谷筋であるとわかった。石狩平野では、吹雪時間数が石狩で 500 時間以上、江別で 204 時間、恵庭で 97 時間と、南ほど吹雪頻度が少なかった。根釧台地では、ほかの 2 つの地域に比べて吹雪頻度が少なく、50 時間未満の場所がほとんどであった。

図 2 は SOM 解析で 1960 年 1 月から 2020 年 2 月の冬季(12-2月)における日本付近の気圧偏差を分類した結果である。主に、日本全体が高気圧に覆われるもの(左上)、日本の南を南岸低気圧が通過するもの(下)、オホーツク海に低気圧が存在する西高東低の気圧配置のもの(右)に分類された。江別で最も多くの吹雪が発

生したノード番号 28 の事例では、低気圧が北海道の北東に位置しており、石狩平野上空の風向は北西～西北西だった。この風が石狩平野に向かうとき地形効果によって水平収束して強風となり吹雪が発生した。

Low visibility cases (&lt; 200 m) 201712–201802

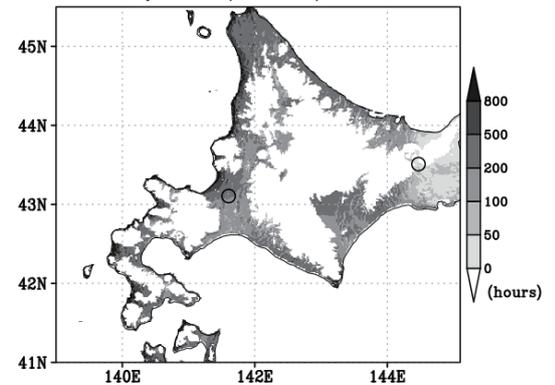


図 1 DDS データを用いて計算した視程が 200 m 以下となった時間数。丸は左から江別、弟子屈である(丹治他 2021<sup>10</sup>より)。

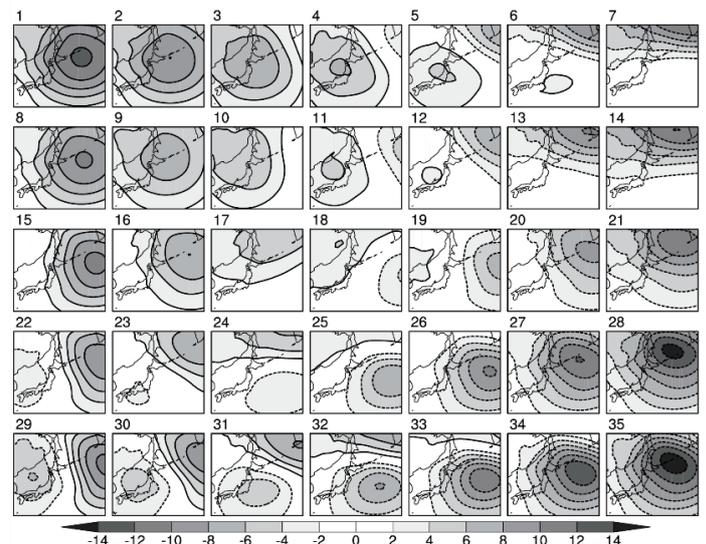


図 2 海面気圧の偏差を 7×5 の SOM マップ上に分類した結果。実線が高気圧偏差、破線が低気圧偏差、シェードがそれらの絶対値を表している(hPa) (丹治他 2021<sup>10</sup>より)。

## 参考文献

- 1) Japan Meteorological Agency (2020) <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm>. (2021 年 6 月 25 日閲覧)
- 2) Nishizawa et al. (2015) *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3393-3419.
- 3) Sato et al. (2015) *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 23.
- 4) 松澤・竹内 (2002) 雪氷, **64**, 77-85.
- 5) Tanji and Inatsu (2019) *SOLA*, **15**, 32-36.
- 6) Inatsu et al. (2020) *Cold Reg. Sci. Tech.*, **177**, 103123.
- 7) Kohonen (1995): *Self-Organizing Maps*. Springer Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer-Verlag, 362 pp.
- 8) Kobayashi et al. (2015) *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- 9) Harada et al. (2016) *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 269-302.
- 10) 丹治他 (2021) 雪氷, **83(3)**, 275-284.

1 北海道大学大学院理学院  
2 北海道大学大学院理学研究院  
3 北海道大学広域複合災害研究センター  
4 理化学研究所計算科学研究センター

Graduate School of Science, Hokkaido University  
Faculty of Science, Hokkaido University  
Center for Natural Hazards Research, Hokkaido University  
RIKEN Center for Computational Science

一回の極端な暴風雪の厳しさを評価する指標の検討  
 - その2 : 暴風雪の強度・広がり・継続時間に着眼した解析 -  
 Investigation of Evaluation Indexes for Severe Snowstorm Events

- Part 2: Analysis of Focusing on the Severity, Expansion and Duration of Snowstorm Events -

○原田裕介<sup>1</sup>, 大宮哲<sup>1</sup>, 武知洋太<sup>1</sup>, 遠藤康男<sup>1</sup>, 西村敦史<sup>1</sup>

Yusuke Harada, Satoshi Omiya, Hiroataka Takechi, Yasuo Endo and Atsushi Nishimura

1. はじめに

暴風雪災害を軽減するためには、一回の極端な暴風雪の頻度や地域性の特徴を整理のうえ、通行規制や情報提供のタイミングなどをサポートするための基準を示すことが重要である。これまで、著者らは1kmメッシュの気象値を用いた時間吹雪量の推定手法を整備のうえ、北海道東部の8冬期53事例の暴風雪事例を用いて、網羅的に解析するためのデータセットを作成した<sup>1)2)</sup>。また、暴風雪災害の規模について、道路管理に資することを重点に置いた5段階の警戒レベル(表1)と、判断支援方策の素案を提案した<sup>3)</sup>。本稿では、上記データセット<sup>1)2)</sup>の53事例に5段階の警戒レベルを設定のうえ、各事例の時間吹雪量を用いて一回の暴風雪の厳しさを評価する指標を、暴風雪の強度・広がり・継続時間に着目して解析した。

2. 時間吹雪量の閾値の設定

吹雪の度合いが大きい場合、道路上では交通に影響する「視程障害」と「吹きだまり」が発生する。吹きだまりは、道路の構造にも依存するため、ここでは視程障害に着目した。加治屋ら<sup>4)</sup>によれば、吹雪時の視程が50m未満になると、ブレーキ操作による減速が多くなることを示している。これが、道路での立ち往生や通行止めにつながる要因となると仮定し、ドライバーの目線高さ1.2mにおける吹雪視程 $Vis(m)$ と時間吹雪量 $Q_h(kg\ m^{-1}\ h^{-1})$ との関係<sup>5)</sup>を参考に、雪堤高さ $H(m)$ を0.0,0.5,1.0に設定のうえ、以下の式(1)より $Vis$ を推定した。

$$Vis = \begin{cases} 8438Q_h^{-0.891} & H = 0.0(z = 1.2) \\ 11200Q_h^{-0.981} & H = 0.5(z = 0.7) \\ 25284Q_h^{-1.226} & H = 1.0(z = 0.2) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $z$ は視程を推定する高さ(m)である。式(1)に $Q_h = 300$ を代入すると、 $Vis$ は23~52mで概ね50m未満となることから、時間吹雪量 $Q_h = 300$ を閾値として設定した。

3. 統計解析による評価指標の選定と警戒レベルの再現期間

5段階の警戒レベル(表1)と一回の暴風雪の強度・広がり・継続時間との関係を把握するために、対象とする地域において閾値以上の時間吹雪量 $Q_h \geq 300$ が占める比率の積算値となる(1)積算面積率(%), 最大値となる(2)最大面積率(%), ならびに(2)の起時を含みかつ比率が連続して0%より大きい(3)継続時間(h)を

評価指標として設定した。データセットの53事例の時間吹雪量を用いて、警戒レベルごとに(1)~(3)の評価指標との関係を図1に示した。併せて、Wilcoxonの順位と検定(有意水準5%)を用いて各警戒レベル間の差を調べたところ、(1)~(3)の評価指標とも警戒レベル1~2から4は有意となった。また、レベル4と5の差は、(2)最大面積率の方が(1)積算面積率や(3)継続時間よりも有意水準に近い結果となった。つぎに、(2)最大面積率は強度と広がりを表現しているが継続時間が考慮されていないため、(3)継続時間との関係を確認したところ、相関係数は0.46( $p < 0.001$ )であった。以上から、警戒レベルの判別が最もできており、(3)継続時間との関係性がみられた(2)最大面積率を、暴風雪の強度・広がり・継続時間を考慮した評価指標として選定した。データセットの対象地域において、最大面積率は警戒レベル3が0.5~3%、レベル4が3~11%、レベル5が11%以上と概ね分類された(図1(2))。加えて、一般化極値分布(GEV)を用いて、対象地域における最大面積率と再現期間との関係を整理のうえ、図1(2)の分類結果を代入した。その結果、再現期間は警戒レベル3が1~2年、レベル4が2~10年、レベル5が10年超となった。

参考文献

- 1) 原田ら, 2020:雪氷研究大会(2020・オンライン)講演要旨集, 68.
- 2) 原田ら, 2020:寒地土木研究所月報, **811**, 21-26.
- 3) 原田ら, 2020:第32回ふゆトピア研究発表会論文集, 97-100.
- 4) 加治屋ら, 2004:寒地技術シンポジウム論文集, **20**, 325-331.
- 5) 松澤, 2020:北海道の雪氷, **39**, 39-42.

表1 暴風雪災害における警戒レベル(案)。原田ら<sup>3)</sup>に一部追加

警戒レベル	暴風雪災害の規模	道路交通に影響する吹雪障害状況	(参考)気象情報
レベル5	通行止め+集落孤立(自衛隊派遣等)	広範囲かつ長期的	過去に経験のない
レベル4	通行止め+除雪作業困難(他地方整備局や開発建設部に応援, 災害対策本部の設定)	広範囲	数年に1度
レベル3	通行止めまたは立ち往生発生	局所的	警報
レベル2	平均旅行速度の低下	-	注意報または警報
レベル1	除雪	-	注意報

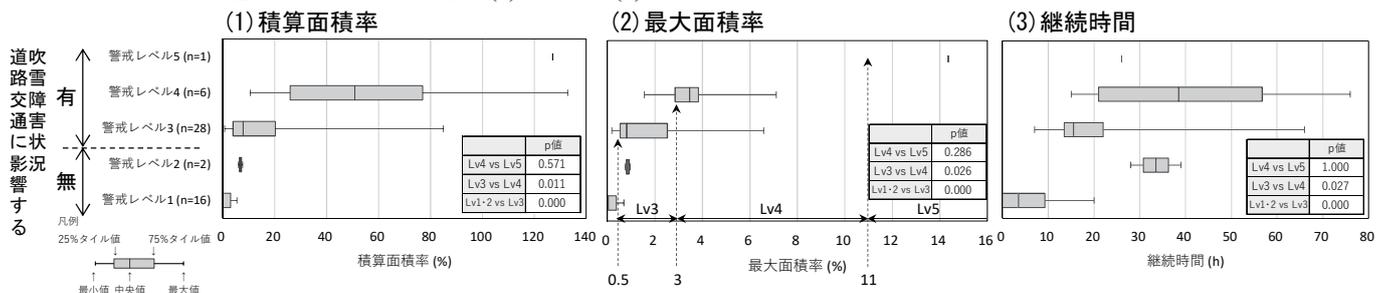


図1 警戒レベル(Lv)と評価指標((1)積算面積率, (2)最大面積率, (3)継続時間: 時間吹雪量 $Q_h \geq 300$ )との関係。

1 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所

Civil Engineering Research Institute for cold region, PWRI

2021年1月に東北地方で発生した吹雪について  
 –1月19日の宮城県大崎市の吹雪事例を中心に–  
 On the Blowing Snow in Tohoku Region, Japan, on January 2021  
 - Focusing on the blowing snow in Osaki, Miyagi on January 19 -

○根本征樹<sup>1</sup>, 田邊章洋<sup>1</sup>, 荒川逸人<sup>1</sup>

Masaki Nemoto, Takahiro Tanabe and Hayato Arakawa

### 1. はじめに

2021年1月19日正午ごろ、宮城県大崎市古川の東北自動車道下り線で、約140台の車両が関係する多重衝突事故が発生した。この事故は1月19日に東北地方の広範囲にわたり発生した非常に強い風による吹雪が要因となった、著しい視程障害によりもたらされたとされる。この日は東北の広範囲において強風が発生し、荒れた天候となった。また、そのおよそ10日後の1月30日から31日にかけても強風による吹雪の発現が認められている。本稿では東北地方、特に宮城県、山形県周辺における今冬の吹雪事例について、上述した古川の例も含めて紹介する。

### 2. 積雪調査、現地状況および気象状況について

上述した多重衝突事故を受けて、1月19日の20時から22時頃において、事故現場から比較的近い場所に位置するアメダス古川周辺の平坦地にて積雪調査等を実施した。また1月19日前後の気象状況について、周辺地域における気象状況の代表性が高いと推定されるアメダス古川のデータを活用して確認した。現地では、当日の卓越風向に沿って、西北西から東南東に向かって、道路路肩付近に数多くの吹きだまりが確認された。平坦地で行った積雪断面観測では、周辺の積雪深は0.20m～0.25m程度で、積雪内部はざらめ雪、こしもざらめ雪で表面はクラストであり、一方で吹きだまりを構成する雪粒子は新雪～こしまり雪とざらめ雪であった。図1にアメダス古川で観測された気象要素の時系列を示す。19日の明け方4時前後に0.5～1.0 mm h<sup>-1</sup>程度の降水（気温は0℃～氷点下であり降雪と思われる）があり、その後正午にかけて気温は-3℃程度まで低下、風は著しく増加して高い吹雪の発生臨界（8～10 m s<sup>-1</sup>程度）を大きく超えて、12時には最大瞬間値で27.8 m s<sup>-1</sup>に達した。積雪深は明け方の降雪で5cm程度増加した後、12時から13時にかけて4 cm減少しており、降り積もった新雪がほぼすべて風によって削りさらされ地吹雪に転化した可能性を示している。以上より、事故当日には低温、積雪、降雪、著しい強風といった、強い吹雪の発生条件が重なっていたことが理解できる。なおこの日は山形県最上地方でも強い吹雪の発生が確認されている。

### 3. 数値モデルによる予測について

上述した古川の事例に対し、防災科研雪氷防災研究センターの吹雪予測モデル<sup>1)</sup>を適用した例を図2に示すが、事故発生前後の強風について予測値はかなり過少となっており、予測された視程値は100m程度にとどまるなど、十分な精度は得られなかった。なお、モデル（気象庁MSM）の初期値（現況推定値）のみを用いた場合、気温の再現性に優れる部分もあるものの、風速については大きな改善は見られなかった。

#### 参考文献

- 1) 根本征樹, 上石勲, 中村一樹, 2016: 2014/15年冬期における北海道中標津町周辺での吹雪予測システム試験運用について。防災科学技術研究所主要災害調査, 49, 119–122.

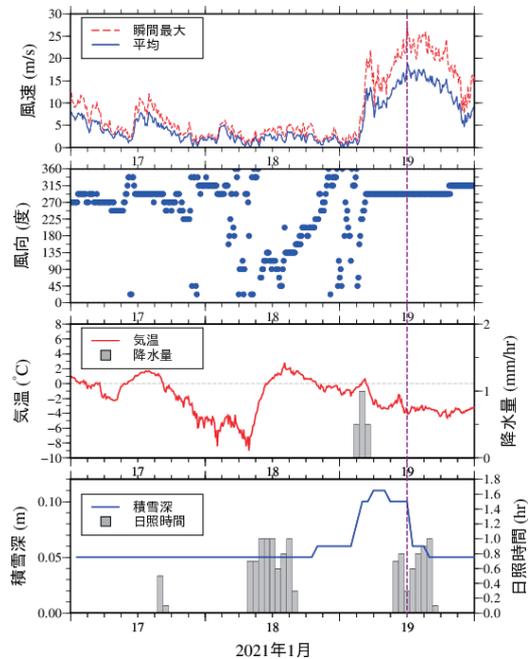


図1 気象要素の時系列（アメダス古川）。風速、風向、気温は10分ごとの値、他の要素は1時間ごとの値。図中、縦の点線は1月19日12時（正午）に対応。

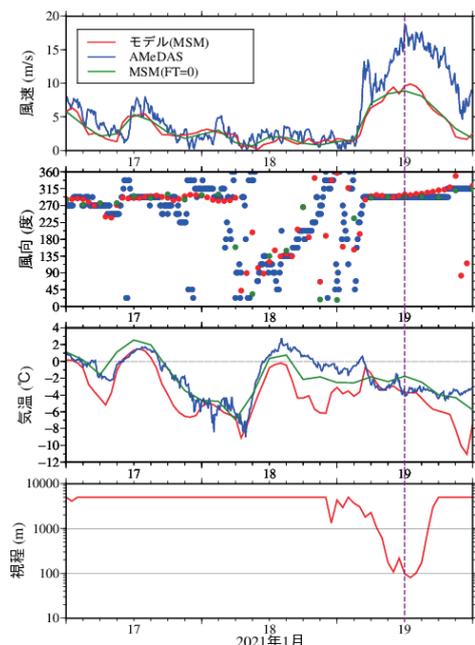


図2 気象モデル（MSM）、MSM初期値（FT=0）と実測値（アメダス古川）との比較、および吹雪モデルから得られた視程。MSMは1時間ごと、MSM初期値は3時間ごとの値。

## 新たな安全概念 Fool Education の学習理論への対応づけと適用例 Correspond to learning ethics and application example of new safety concept "Fool Education"

宍戸紀之<sup>1</sup>, 安孫 周<sup>1</sup>, 上村靖司<sup>2</sup>, 杉原幸信<sup>2</sup>

Shishido Noriyuki, Yasumago Shu, Kamimura Seiji and Sugihara Yukinobu

### 1. 緒言

雪や氷によって日本では平均して一冬に 1,000 人規模で人身災害が起きている。この内の約 8 割は除雪作業中の安全装備の不使用や道具の誤使用が原因であることから、人身事故を減らしていくには道具の誤使用対策が必要である。そこで、宍戸らは、雪国発の新たな安全概念 Fool Education を提案した<sup>[1]</sup>。Fool Education とは、道具の使用を通じて自然に作業者の安全意識やスキルを向上させるという新たな概念である。

本研究では、古典的条件付け<sup>[2]</sup>及びオペラント条件付け<sup>[3]</sup>の二つの学習理論と対応付けながら具体的に Fool Education を道具に適用した例を紹介する。適用例は、ハシゴの「立てかけ角度」及びスマートコップの「持ち手位置」の学習である。

### 2. 学習理論

古典的条件付け学習とは、「ある刺激に対して、何らかの特定の反応を引き出す学習方法」のことを古典的条件づけ学習という。一方、オペラント条件付け学習とは、「生体が何らかの行動をした直後に、強化、すなわち行動に随伴する結果によって新たな行動が形成される」ことをオペラント条件づけという。

### 3. ハシゴの立て掛け角度の学習

ケーススタディのハシゴの「立てかけ角度」について、Fool Education の考えの基、古典的条件づけ学習を用いて解決する。

#### 3.1 実験方法

実験で使用する安全装置の仕様は「ハシゴの角度を測定し、 $75 \pm 5^\circ$  の範囲外にある際にブザーを鳴動させる」デバイスとした。ブザー無しのハシゴを立て掛け、その角度を計測し、次にブザーをハシゴに取り付けて同じように立てかけ、角度を計測した。この計測後、ブザーの機能を解説し、アンケートを取って実験終了とした。

#### 3.2 実験結果

ブザーを取り付けていないハシゴでは被験者はバラバラな角度でハシゴを屋根に立てかけていた。そして、ブザーを取り付けると、多くの被験者は安全装置が鳴動しない  $75 \pm 5^\circ$  の範囲に立て掛けるようになったことから、ブザーによって  $75^\circ$  の立て掛けを教示できることがわかった。

これらにより、古典的条件づけ学習による「安全なハシゴの立て掛け角度の教示」を達成した。

### 4. スコップの持ち手位置の学習

怪我につながるスコップのハンドリング位置に着目し、持ち手位置を教育するグリップを取付け、オペラント条件付け学習を用いて解決する。

#### 4.1 実験方法

実験は屋内で模擬雪を用いて一人ずつ行い、被験者はまずグリップを無し状態で約 10kg の模擬雪を除雪してもらう。その後、グリップを取り付けて約 20kg の模擬雪を除雪し、再度グ

リップを取り外した状態で約 10kg の模擬雪を除雪してもらった。作業中の被験者の持ち手位置として、親指付け根からさじ部までの距離を求めた。

また、実験の約 3 か月後に同被験者を再度招集してスコップを構えてもらい、その際の親指付け根からさじ部までの距離を求めた。

#### 4.2 実験結果

図 1 にグリップの取り付け前と取り外し後の持ち手位置の結果を示す。グリップを用いた実験では、取り付け前は被験者がバラバラな位置を持っていたのに対し、取り付け後はほとんどの人が適切な位置を持つようになったことから教育効果があったことが確認された。また実験後に取り付けた安全装置類を全て外し、そのスコップにて除雪作業を行ってもらった結果、教育前と後で持ち手位置には有意に差が有り、実験の 3 ヶ月後に被験者に対し不意にスコップでの除雪作業の構えを取らせると、やはりスコップのさじ部に近い位置を持った。

これらより、オペラント条件付け学習を用いて「腰痛を防止できる正しいスコップの持ち方を教示する」ことを達成した。また、Fool Education を適用することで安全装置を取り外された場合にも「無意識下に安全意識を刷り込み」しているために安全を維持できることが分かった。

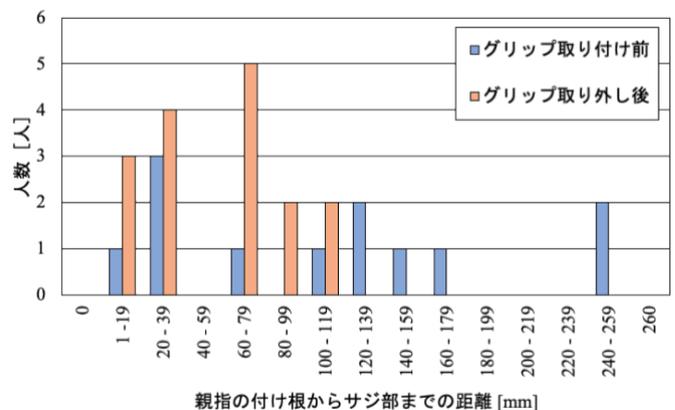


図 1 グリップの取り付け前と取り外し後の持ち手位置

### 参考文献

- [1] 宍戸紀之, 上村靖司, 杉原幸信 (2020), 雪国発の新たな安全概念 Fool Education の提案, 雪氷研究大会 (2020・オンライン) 講演要旨集, p14.
- [2] KUMAR Surender, KIM Yong Seob, OH Kun Seoku (2019), 筑紫女学園大学研究紀要 14 号, p124.
- [3] 佐伯 胖 (2014), そもそも「学ぶ」とはどういうことか: 正統的周辺参加論の前と後, 組織科学 Vol.48 No.2, p.39.

1 長岡技術科学大学院 工学研究科 機械創造工学専攻  
2 長岡技術科学大学

Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology  
Nagaoka University of Technology

## 北極域データアーカイブシステムの第3回北極科学大臣会合への貢献 Contribution to 3rd Arctic Science Ministerial of Arctic Data archive System

○矢吹裕伯<sup>1,2</sup>, 飯野啓子<sup>2</sup>, 杉村 剛<sup>2</sup>  
Hironori Yabuki, Keiko Ino and Takeshi Sugimura

### 1. はじめに

北極科学大臣会合（ASM）は、北極における研究・観測や主要な社会的課題への対応の推進、関係国間や北極圏に居住する先住民団体との科学協力の更なる促進を目的とした会議である。これは、第1回目が2016年9月に米国・ワシントンDCで開催され、第2回目が2018年10月にドイツ・ベルリンで開催された。今回は、第3回目となり北極評議会メンバー国であるアイスランドとの共催により、2021年5月8日（土曜日）～9日（日曜日）にアジア初となる日本・東京で開催された。本会議にはこれまでで最多となる35の国・地域と先住民団体が参画した。基本的に各国大臣はオンラインでの参加になったが、会場には萩生田文部科学大臣をはじめ20か国におよぶ在京大使館からの来場があった。

ASM3では、Knowledge for a Sustainable Arctic を全体のテーマとし、北極の科学研究を国レベルで推進していくための議論が行われた。本会合は閣僚級会合であるが、その準備過程では、前回のASM2での成果物や議論を踏まえ、北極圏の研究活動の概要、プロジェクトの成果物の最新情報、国際的・学際的な協力関係を強化するための新たな取り組みなどを提出することが求められています。提出された情報はデータベースに統合され、ASM3最終報告書の基礎となるとともに、共同声明に反映された。

### 2. プロジェクトデータベース構築

北極域データアーカイブシステム（ADS）は、このASM2後の各国の活動等北極研究に関するデータベースの作成、公開ツールの制作を担当しASM3Project DataBaseとして世界に向けて公開している（URL：<https://ads.nipr.ac.jp/ASM3DB/>）。

ASM3では、トータル434件のプロジェクトが提出された。うち177件は前回ASM2からの更新、また257件は新しいプロジェクトだった。これらのプロジェクトのうち8件は先住民団体、37件は北極研究や教育に関する国際団体、残り389件はEUを含む国によって提出された。これらのプロジェクトのうち約89%が国際連携によって行われるプロジェクトであることが分かった。うち3つのプロジェクトでは28か国以上の連携によるプロジェクトであることが分かった。

この資料は北極圏で行われるプロジェクトの国際的な協力体制を俯瞰することができるとともに、観測の空白域やその問題についても見いだせる可能性がある。本データベースは北極地域の観測体制構築のために利用されることを期待したい。

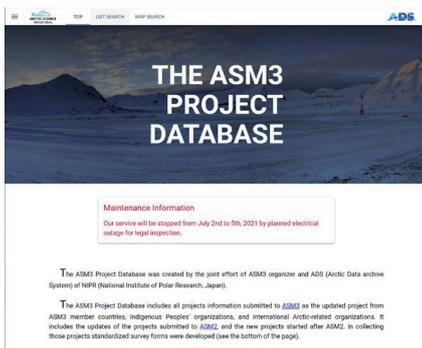


図1. ASM3 プロジェクトデータベース  
ストップページ

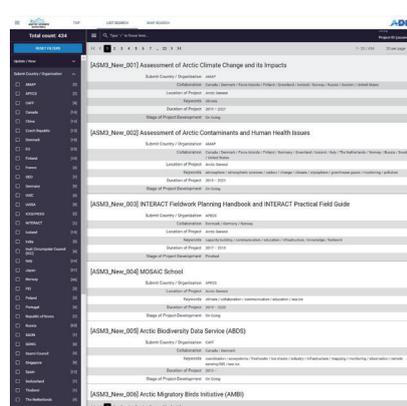


図2. データベースリスト表示

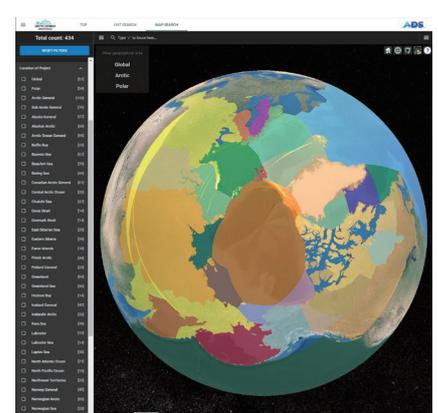


図3. データベース地図表示

1 データサイエンス共同利用基盤施設  
2 国立極地研究所

Joint Support-Center for Data Science Research  
National Institute of Polar Research

## ここまでの凍害対策技術

ー日本雪工学会凍害対策研究委員会の歩みー

## At the present stage of Frost Heaving Countermeasure

- History of Measure for Frost Heaving Research Committee in Japan Society for Snow Engineering -

○吉村優治 (日本雪工学会凍害対策研究委員会委員長)<sup>1</sup>

YOSHIMURA Yuji

## 1. はじめに

地盤の凍上・凍害は、最近の温暖化による降雪減少を含む気候変動により、現象の激甚化や発生地域の拡大化が生じている。また、豪雨や豪雪による被害においても凍上・凍害現象がその誘因になっている可能性も指摘され始め、その具体的な対策技術も開発・研究が進んでいる。

日本雪工学会「凍害対策研究委員会」は、凍害に関する調査・研究並びに啓発活動を行うことを目的としており、本稿では、日本雪工学会凍害対策研究委員会のこれまでの歩みを紹介する。

## 2. 委員会活動の変遷

講習会開催は19回(2007(H19).12.10 高山市, 吉村司会)を数えたが、凍上に関する知識普及活動の役目は終わったとして、この回で講習会をやめ、「凍上」から「凍害」に範囲を広げ、2009年度凍害対策委員会、2016年度法面凍害対策研究委員会、2018年度凍害対策研究委員会と委員会名を変更しながら、凍害に関する調査・研究に加え凍害対策などの勉強会(現地調査2009~2015年8回, 委員会内講演1991~2012年19回など)を続けている。

その内容は地盤の凍結・融解, 凍上, その他も含んでおり、また、各社が開発しつつある凍害対策新工法の検証・紹介にも力を入れていることから、2014年(H26)から主として凍害対策の紹介を目的として隔年での雪氷研究大会への参加(技術展示を含む)を開始した。

雪氷研究大会では、2014八戸(企画セッション01「ここまでの凍害対策」)、2016名古屋(SP09「最近の凍害対策」)、2018札幌(SP03「ここまでの凍害対策技術」)、2020年新潟(ここまでの凍害対策技術2020)と、「技術展示」を含め隔年で参加を続けている。また、2018年の札幌大会が、地震災害のため誌上公開扱い(対外発表済)となり、2019年3月15日に一般公開の凍害対策研究委員会第4回寒冷地環境セミナーin 岐阜を開催(このセミナー過去3回1986年, 1989年, 1989年に東京都開催)でしたが、その席で雪氷研究大会への参加の話を持ち上がり、2019年は山形(SP05「寒冷地環境における地盤の凍害」)へ参加した。

また、凍上においては人命に関わる事故のイメージが希薄なためもあり、地方自治体やコンサルタント、さらには報道機関においても、凍上が注目される機会が少なく、知識の共有がなされていないと考え、2009年からこれまでに大学等で7回の講義を行い「凍上現象や寒冷地における地盤技術」の知識を学生たちに教授することを続けている(国士舘大学1回, 八戸工業大学4回, 岐阜高専2回)。

さらに、長野県0市でテールアルメ工法が凍上現象で崩落した件に関して2000年から2009年に7回の現地調査を行い、その調査結果を日本雪工学会誌に報告した。また、2015年には東京都0町を現地調査し、凍上に関する報告書を見る機会があったが、温度測定その他の基本的情報の取得が的確に実施していない事例も散見された。

## 3. 今後の展望

2014年から雪氷研究大会に参加し、研究発表や技術展示を行い、各種新工法として、凍害を受けにくいコンクリート、人工軽量盛土材による非凍上性盛土、メッキ法の改良による塩害に非常に強い鋼板、さらには除雪機によって生ずる側溝とプラウの両方の破損を防ぐ方法等々を紹介してきた。しかし、凍上被害が人命に関わる事故は皆無に近く、知識が共有されていないことから、凍上現象と言えない原因からの破損例も報道されるなど、凍上現象は古くて、新しい問題でもある。

今後も、「寒冷地環境セミナー(公開)」、「凍上現象・寒冷地における地盤技術の普及講演会(今後は学校の他、自治体職員、コンサルタント、建設業者等へ拡張)」、「委員会内勉強会」を俯瞰するシンポジウム(これまで実施してきた前述のセミナー4回+普及講演会7回+勉強会19回を通算し、次回開催のシンポジウムを第31回とする)の開催、「現場調査」を発展的に継続する予定である。

1 岐阜工業高等専門学校環境都市工学科

Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Gifu College

## 最近の凍害対策技術の動向

### －日本雪工学会凍害対策研究委員会の活動を中心に－

### Recently Trend in the Technology for Frost-Disaster

○熊谷浩二<sup>1</sup>, 堀江征信<sup>2</sup>, 吉村優治<sup>3</sup>

Koji Kumagai, Masanobu Horie and Yuji Yoshimura

#### 1. はじめに

凍害対策研究委員会では、新しい凍害対策に関する技術を継続的に掘り起こし、その検証・広報につとめている<sup>1)</sup>。例えば、寒冷地における舗装道路の計画・設計では凍害対策を検討した上で可否を判断していることが事例をもとに報告<sup>2)</sup>されている。また、寒冷地の斜面における凍害抑制のための設計時の原則や対策工法を説明した調査・設計マニュアルの刊行が報告<sup>3)</sup>されるなど、関心のある技術者にとって、最新の知見が発信され浸透している。

しかし、温暖化による降雪減少を含む気候変動により、凍害の激甚化や発生地域の拡大が生じている。また、豪雨や豪雪による土砂災害の誘因に長期的な凍害の可能性も指摘されている。このため、より広範に多分野の研究者・実務者に関心を持ってもらえるよう、凍害メカニズムの複雑さとともに、対策技術の情報を積極的に提供する必要がある。

#### 2. 凍害とその対策の考え方

地盤の凍害は表面からの水だけでは発生せず、未凍結層から凍結層への水の移動によってアイスレンズが成長・肥大化して被害が発生する。このため対策の原則は、次の3つになる。1) 温度の抑制；断熱材を用いて土中の温度を制御する、2) 地盤の置き換え；凍上が発生しにくい材質の地盤に置き換える、3) 水の制御；地下水などの供給を出来るだけ抑える。この3つのうちのどれかを現場条件に沿って徹底することで、被害は抑制出来る。なお、農学の分野では、塩類の添加により間隙水の凍結点を下げることが対策のひとつになっている<sup>4)</sup>。

凍害対策の最近の課題として、次のような感覚・理解のため関心を持たず、詳細な検討を躊躇し損傷が拡大・継続する例が見られる。①凍害は豪雪や極端に寒冷な地域のみで起きるとの受け止め、②豪雪や大雪の地域では雪の保温効果で凍害は生じないと受け止め(除雪により雪はなくなる)、③凍害は設計や施工の不具合から生じるので口外できないとの受け止め、④凍害には事後の対策技術が少ないとの受け止め、⑤その他。

#### 3. 最近の研究大会スペシャルセッション SP 等で紹介した対策技術

当委員会では多分野の凍害対策技術について情報交換し、多くの考え方をもとにした研究開発および実用化への橋渡しを進めている。また、凍害の予測が、効果的な対策技術のひとつと考え、継続して取り組んでいる。

- 1) 八戸大会(2014)：除雪防護版/MAC リート/高性能コンクリート二次製品/レコサル/合成樹脂シート活用技術
- 2) 名古屋大会(2016)SP：充填材詰ジオセル/軽量骨材の使用/除雪作業の段差障害の抑制金具/調査・設計マニュアル
- 3) 札幌大会(2018)：凍上抑制層の確保/使用環境に応じた PC 製品の選択/温風循環式蓄熱床暖房システム/フレキシブル製のある小段排水工/盛土材の置換/のり面の断熱/凍上量予測
- 4) 山形大会(2019)：被災に強い材料・工法/未利用木質破砕材による木質舗装/積雪疲労/温暖地域での凍害

#### 4. おわりに

凍害は、同一気象条件のなかで比較的局部的に発生し、実務的に的確な予測が難しいものの、計画・設計段階で予防的に対策をとるべきと判断出来る情報・事例の発信が望まれる。さらに、既設の地盤構造物について将来の損傷レベルを考慮した補修復旧の目安や工法・材料の研究開発も重要と考えている。なお、斜面安定工の凍害対策についての研究が、2020年度 JC-IGS 論文奨励賞を受賞<sup>5)</sup>し、対策技術の必要性が他の分野でも認識されつつある。

本文が、凍害対策は口外できないと思われている技術者に伝わることを期待している。

#### 参考文献

- 1) 東海林更二郎, 北村直樹, 福田誠(2018)：凍害対策研究委員会について。雪氷研究大会(札幌), B1-1, 13.
- 2) 名久井保, 熊谷浩二(2018)：青森県三八地域凍害対策の現状, 雪氷研究大会(札幌), B1-3, 15
- 3) 小野丘(2016)：斜面の凍上対策の調査・設計マニュアル, 雪氷研究大会(名古屋), B2-4, 47
- 4) 長沢徹明(1983)：農業土木における凍害とその対策, 農業土木学会誌, 51(2), 155-163
- 5) 平井泰輔(2021)：論文奨励賞を受賞して, ジオシンセティックス技術情報, Vol.37. No.1, 15

1 八戸工業大学名誉教授

2 日本雪工学会凍害対策研究委員会事務局

3 岐阜工業高等専門学校環境都市工学科

Professor Emeritus, Hachinohe Institute of Technology

The Secretariat of JSSE Committee for Frost-Damage

Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Gifu College

©2021 日本雪工学会

## 地球温暖化に伴う地盤凍結範囲変化の推定 The Influence of Global Warming upon Frost Heaving

東海林更二郎<sup>1</sup>

Kojiro Shoji

### 1. はじめに

地球温暖化によって地盤の凍結がどの程度影響を受けるか、凍上対策の今後を考える参考とすべく検討を試みた。

“IPCC の RCP8.5 シナリオを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測”として「地球温暖化予測情報第9巻」(以下、第9巻、と記す)が気象庁から発表されている。

第9巻では、現在気候(1980~1999年)と21世紀末(将来気候、2076~2095年)との比較を論じている。現在気候の中間は1990年、将来気候の中間は2086年で差は96年。

この検討では、気象庁のHPで「過去の気象データ検索」の画面に入り、全国の観測地点の中で積雪情報を記録してある地点を選び、「3か月ごとの平年値を表示」機能を用いて、12月から2月(冬の3か月)の平均気温の平年値を取り出した。算出した期間は、1991~2020年の30年間である(一部観測点では2003年その他の算出開始年もあったが、同じ期間として取り扱った)。30年間の平年値であるから中間は2005年と考える。

### 2. 予測値

第9巻では「年平均気温は、全国平均で4.5°C上昇するなど、全国的に有意に上昇する。地域別にみると、北日本日本海側で4.8°C、北日本太平洋側で4.9°C、東日本日本海側で4.5°C、東日本太平洋側で4.3°C、西日本日本海側で4.1°C、西日本太平洋側で4.1°C、沖縄・奄美で3.3°C上昇するなど、高緯度地域ほど上昇が大きい」との記述の後に、季節ごとの表があり「冬」の値が表1である。

なお、図から読み取った地域は、下記の通り。

- 北日本日本海側：宗谷、留萌、上川、空知、石狩、後志、檜山、青森(西部)、秋田、山形、
- 北日本太平洋側：網走・北見・紋別、根室、釧路、十勝、日高、胆振、渡島、青森(東部)、岩手、宮城、福島、
- 東日本日本海側：新潟、富山、石川、
- 東日本太平洋側：茨城、栃木、群馬、埼玉、東京、千葉、神奈川、山梨、静岡、長野、岐阜、愛知、三重

### 3. 観測値

表2. に過去30年の平均気温の平年値を示した。値を得られた346地点中「冬の3か月」の平均気温の平年値が-4.8°C以下であったのは岩手県の区界までの69地点のみである。

-4.8°Cは表1. の東日本太平洋側の将来予測4.8°Cを選んだものの、富士山を除けば、将来4.8°Cの平均気温上昇で「冬の3か月」の平均気温がマイナスとなる地点は、本州では青森県の酸ヶ湯、長野県の菅平、岩手県の区界(0°Cであるが)だけであった。

冬の3か月の平均気温がマイナス1°Cとは、12月から2月で日数がほぼ90日であるので、凍結指数は90°C日となり、現在の福島県猪苗代-1.0°Cや秋田県阿仁合-1.1°Cと同等の寒さである。

表2に漏れた各地点の平年値を示すと、釧路-3.6、稚内-3.5、登別-3.2、草津-3.0、奥日光-2.8、苫小牧-2.6、根室-2.5、小樽・札幌-2.3、軽井沢-2.1、駒の湯-1.8、函館-1.4、遠野-1.3、角館・

那須高原-0.6、盛岡・弘前-0.5、横手・只見-0.3、尾花沢-0.2°C等である。

観測中間の2005年から2086年までは81年なので、表1の4.8°Cを4.1°Cに補正し、表2を-4.1°Cからに変更しても、北海道の11地点が増えるだけであった。

この予測からは、本州では殆どの地点で将来「地盤の凍結は発生しない」となる。

北海道でも、表2から4.4~4.6°Cの気温上昇があったとして地盤凍結の範囲・深さを検討することになる。

(補正方法は同上)

### 4. 雪の影響

積雪により地盤の凍結が抑えられることから、表2には積雪の情報も入れてある。求め方は平均気温の平年値と同じである。

第9巻では、海面水温の上昇で大気中の水蒸気量が増加し、降水量が増えるが、気温上昇により雪ではなく雨になる可能性が高く、本州日本海側では大幅に降雪量が減少すると予測している。

降雪量の増加が予想されているのは厳冬期の北海道内陸の一部地域である。

本州では気温上昇の影響が大きいので、地盤凍結への積雪の影響は無視できよう。

なお、第9巻はRCP8.5という最も温室効果ガスの排出が多いシナリオでの予測である。

コード	積雪記録のある観測点	平年値	標高	降雪の深さ合計	最深積雪
		12-2月			
19	山梨県 富士山	平均(°C)	(m)	(cm)	(cm)
1	十勝 陸別	-9.4	207	258	71
1	十勝 ぬかひら源泉郷	-8.9	540	290	96
1	釧路 阿寒湖畔	-8.6	426	354	111
1	上川 占冠	-8.3	332	470	89
1	網走 留辺蘂	-8.1	325	346	76
1	釧路 川湯	-7.8	158	333	90
1	上川 朱鞠内	-7.8	255	829	228
1	十勝 帯広泉	-7.6	149	198	85
1	網走 佐呂間	-7.4	54	393	91
1	上川 下川	-7.4	143	538	115
1	網走 白滝	-7.4	475	382	84
1	宗谷 中頓別	-7.3	25	622	136
1	上川 美深	-7.3	77	583	134
1	十勝 大樹	-7.3	87	425	90
1	上川 名寄	-7.3	89	557	107
1	上川 美瑛	-7.3	250	476	77
1	十勝 本別	-7.2	67	189	48
1	網走 津別	-7.2	100	342	79
1	十勝 上札内	-7.2	251	392	97
1	上川 上川	-7.2	324	525	91
1	宗谷 歌登	-7.1	14	572	148
1	上川 幌加内	-7.1	159	832	193
1	網走 滝上	-7.0	165	428	101
1	上川 幾寅	-7.0	350	385	78
1	網走 遠軽	-6.9	80	373	86
1	上川 和寒	-6.9	150	483	100
1	上川 富良野	-6.9	174	423	75
1	上川 音威子府	-6.8	40	830	189
1	十勝 芽室	-6.8	90	274	75
1	網走 北見	-6.8	104	289	77
1	上川 東神楽	-6.8	211	281	58
1	釧路 標茶	-6.7	20	226	53
1	胆振 穂別	-6.6	56	340	57
1	釧路 中徹別	-6.6	80	229	67
1	網走 女満別	-6.5	33	223	56
1	網走 西興部	-6.5	120	423	97
1	十勝 上士幌	-6.5	287	239	52
1	日高 日高	-6.4	280	336	82
2	青森 酢ヶ湯	-6.4	890	1164	373
1	後志 喜茂別	-6.2	264	675	142
1	胆振 大滝	-6.2	390	533	122
1	釧路 鶴居	-6.0	38	215	54
1	空知 深川	-6.0	55	673	107
1	宗谷 沼川	-5.9	23	567	111
1	根室 根室中標津	-5.9	65	195	///
1	上川 旭川	-5.7	120	378	85
1	網走 斜里	-5.6	15	376	87
1	根室 別海	-5.6	23	220	59
1	空知 滝川	-5.6	50	603	111
1	空知 夕張	-5.6	293	620	134
1	十勝 浦幌	-5.5	20	199	52
1	十勝 帯広	-5.5	38	141	69
1	根室 中標津	-5.5	50	290	67
1	空知 美唄	-5.4	16	570	112
1	留萌 幌糠	-5.4	20	803	202
1	空知 豊富	-5.2	14	522	90
1	空知 芦川	-5.2	91	476	80
1	日高 中札内	-5.2	98	296	62
1	釧路 白糠	-5.1	9	198	46
1	宗谷 浜鬼志別	-5.1	13	560	79
1	網走 雄武	-5.0	14	236	68
1	石狩 恵庭島松	-5.0	30	413	83
1	十勝 新得	-5.0	178	341	71
1	石狩 新篠津	-4.9	9	631	129
1	根室 厚床	-4.9	41	228	49
20	長野 菅平	-4.9	1253	466	102
1	石狩 千歳	-4.8	22	173	49
3	岩手 区界	-4.8	734	389	85

表1. 気温の将来予測

地域	冬
全国	5.0 ± 0.9
北日本日本海側	5.2 ± 1.1
北日本太平洋側	5.5 ± 1.1
東日本日本海側	4.9 ± 1.0
東日本太平洋側	4.8 ± 1.0
西日本日本海側	4.7 ± 0.9
西日本太平洋側	4.6 ± 1.0
沖縄・奄美	3.6 ± 0.8

<sup>1</sup> 高座サーチ合同会社

Koza Search LLC.

## 農業水利施設の目地補修工法の改善への取り組み報告

## —簡易水路目地補修工法—

## Report on efforts to improve joint repair methods for agricultural irrigation facilities

## - Simple waterway joint repair method -

○広瀬 貴<sup>1</sup>, 堀江 征信<sup>2</sup>

Takashi Hirose Masanobu Horie

## 1. はじめに

農業水利施設に使用されているフリュームやU形側溝の耐用年数は40年が目安とされており、老朽化により継ぎ目部分（以後：目地）からの漏水が課題になっている。農林水産省より農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル（案）等が示されているが、田畑を保有する耕作者が実施するには難易度が高く専門業者へ委託しなければならない場合が多かった。目地補修工事は、稲作や果物を収穫した後の11月から3月の冬季に水路を乾燥した状態にして施工するため、寒冷地においては凍害の影響を受けない工夫が求められた。そこで、耐用年数3~5年を想定した簡易かつ耕作者が自ら実施できる（「多面的機能支払交付金」を利用した）目地補修工法へと改善した取り組みについて報告する。

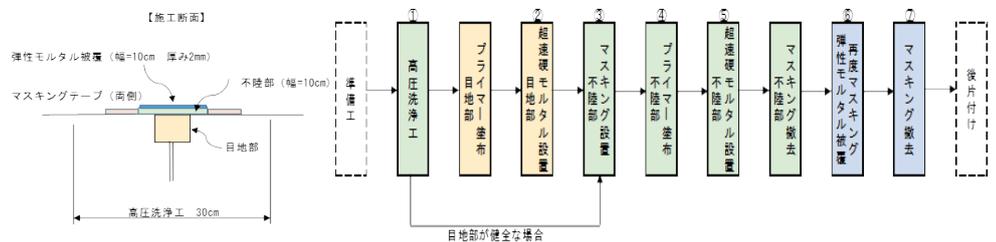
## 2. 目地補修の従来との相違点と手順

従来の目地補修方法は、グラインダーを用いて目地部をUカットしてからモルタルを充填するため、危険な作業が伴った。また、モルタルは固練りかつ硬化時間が長いため寒冷地においては硬化前に粉状化や凍結の恐れがあった。そこで図-1に示す袋練り法（内容量1kg）とし取り扱いを容易にすると同時に超速硬タイプにすることで前記の課題を解決した。また、目地部は剥離部のみ除去し超速硬モルタルを充填することでグラインダー作業を無くした。簡易目地補修工法の手順を図-2に示す。超速硬モルタルは、温度変化による伸縮において追随できない場合があるため、更にもう一つに弾性モルタルを被覆する二重構造にして保護することとした。実際に農家の方々に施工をして頂いている。

図-1：袋練り法



図-2：簡易目地補修工法の手順



## 3. 施工事例

図-3、4においては、超速硬モルタル塗布後と弾性モルタル塗布後、図-5、施工経過(2018年12月施工)2年7か月、図-6、施工経過(2019年12月施工)1年7か月の状況を示す。農家の人より漏水が無く維持できていると評価頂く。

図-3：超速硬モルタル塗布後

図-4：弾性モルタル塗布後

図-5：2年7か月の経過状況

図-6：1年7か月の経過状況



## 参考文献

小水路目地補修講習会 モルタル充填工法 (ひびわれ充填工法) 東海農政局土地改良技術事務所

1 株式会社丸治コンクリート工業所

Ltd. Maruji Concrete Industries

2 日本雪工学会 凍害対策研究委員会 事務局

Frost damage measures study committee secretariat

グリーンランド南東ドームアイスコアから復元する硫酸エアロゾルと  
北半球中高緯度の雲量の関係Relationships between cloud cover over Northern mid-high latitudes and aerosol proxies preserved  
in the SE-Dome ice core○渡利 晃久<sup>1</sup>, 飯塚 芳徳<sup>2</sup>, 藤田 耕史<sup>3</sup>, 増永 浩彦<sup>4</sup>, 河本 和明<sup>5</sup>

Akihisa Watari, Yoshinori Iizuka, Koji Fujita, Hirohiko Masunaga and Kazuaki Kawamoto

## 1. はじめに

グリーンランド南東ドームアイスコア(SE-Dome コア)は高涵養量の地域で掘削されたアイスコアであり、月-季節スケールの時間分解能で過去 60 年間の古環境を復元できる<sup>1)</sup>。また、SE コアは積雪堆積後の過去の大気中浮遊物質(エアロゾル)の変質が少ないため、近過去のエアロゾルの復元に適している<sup>1)</sup>。エアロゾルは雲核としての役割を持ち、水滴となる雲凝結核(CCN)や氷晶となる氷晶核(IN)として雲粒形成に寄与している。例えば、本研究で着目する硫酸エアロゾルは CCN として雲粒生成の役割を担い<sup>2)</sup>、とりわけ海洋生物や人為排出など陸海表面を主な起源とするため、低層雲(特に層積雲)の形成に寄与する<sup>3)</sup>。層積雲を含む下層に存在する雲は光学的に厚い雲が多く、層積雲の冷却効果は 60-120 W/m<sup>2</sup>と見積もられ<sup>4)</sup>、これは IPCC が報告しているエアロゾルと前駆物質の直接冷却効果(1 W/m<sup>2</sup>)の 60 倍に相当する<sup>5)</sup>。

SE-Dome コアは過去 60 年間の硫酸エアロゾルフラックスを月々の時間スケールで記録している。また、衛星画像は過去 40 年間の雲量を記録している。もし SE-Dome コアの硫酸フラックスと衛星による雲量との因果関係が明らかになれば、衛星時代以前である人為起源の硫黄排出極大期(1960-70 年代)の雲量を SE-Dome コアから復元できる。しかしながら、これまでアイスコア中のエアロゾル成分と雲量の関係について解析された例は無い。これはアイスコアの時間分解能とその精度が十分でないことが理由であった。本研究で使用した SE-Dome コアデータは高涵養故にこれまでに無い時間分解能のデータが得られており、長い時間スケールで詳細に比較できる。本研究では春と夏(4~9 月)に着目し、SE-Dome コアに保存された硫酸イオンフラックスと北半球中高緯度の雲量との関係を調査した。

## 2. 使用データと分析方法

本研究では、National Oceanic and Atmosphere Administration(NOAA)衛星に搭載されている Advanced Very High Resolution Radiometer(AVHRR)、International satellite cloud climatology project(ISCCP)、European Centre for medium-range weather forecasts(ECMWF)から提供されている衛星・再解析の雲プロダクトを使用した。AVHRR と ISCCP は 1970 年代後半に衛星観測が始まって以降、最も古い衛星データの 1 つとして存在し、長期間のアイスコアプロキシとの比較に優れている。ERA5 はこれまで ECMWF が提供してきた再解析データより多くの衛星観測の結果を利用し、最新の予測モデルと結びつけ、データが同化されている。本研究では 3 つの雲プロダクトを使用し、SE-Dome コアから復元された硫酸イオンフラックス<sup>1)</sup>との相関関係を解析した。

## 3. 結果と考察

図 1 は ERA5 の低層雲量と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の相関分布図を示している。黒色のグリッドは 95%水準で有意となる最低相関(0.32)以上を示し、相関のある地域は主に北米域と北大西洋海域に分布している。これらの地域はグリーンランド南東部に運ばれてくる人為由来の硫黄化合物の発生源(北米)や自然由来の硫黄化合物の起源域(北大西洋)<sup>1)</sup>と一致している。海上低層雲に着目するため、北大西洋(30° W-50° W, 50° N-60° N)を対象に、雲量に対する硫酸エアロゾル以外の要素について評価した。雲量に影響を与える主要因は相対湿度・気温であるが、エアロゾルが SE-Dome へ運ばれやすい気象条件が、雲を生成しやすい条件である可能性を排除できない。そこで、相対湿度・気温の影響を排除するために、これらが一定の範囲内に収まるよう、対象地域において、1979-2014 年の低層雲量データ(N=36)のうち相対湿度・気温が共に 1 標準偏差以内の年(N=14)のみで 95%水準で有意となる最低相関(0.47)を求めた。その結果、北大西洋において相対湿度と気温が同じ条件下でも、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と低層雲量の相関が 99%水準で有意であることが示された(図 2)。この結果は発生源の一つである北大西洋の低層雲量の変動に硫酸エアロゾルが寄与していることを示唆している。また、1979-2014 年において硫酸イオン濃度が 2 標準偏差以上の年(1984,1990,1992 年)のうちピナツボ火山噴火が発生した年を除く 1984,1990 年の対象地域における低層雲量のコンポジット解析を行った(図 3)。その結果、1984,1990 年の北大西洋における低層雲量は増加しており、過去の北大西洋域の雲量が特異な年をアイスコアの硫酸エアロゾルから復元できる可能性が示唆された。以上の結果から、北大西洋の雲量との強い因果関係を示し、衛星観測が始まる以前の雲量を推定できるプロキシとなる可能性を示した。

## 参考文献

- 1) Iizuka et al, JGR, 123, 1, 574-589, 2018
- 2) Pruppacher & J.D. Klett, New York, 1997
- 3) Kim, Y. & Cess, R. D, Geophys. Res. 98, 14883-14885, 1993
- 4) Fan et al, Atm. Sci., 73, 11, 4221-2352, 2016
- 5) Alexander et al, IPCC, 2013

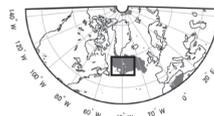
図 1 ; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と低層雲量の相関分布図図 2 ; 対象地域において相対湿度・気温が 1 標準偏差以内の年(N=14)の SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と低層雲量の相関分布図

図 3 ; 低層雲量のアノマリーの分布図

1 北海道大学大学院環境科学院  
2 北海道大学低温科学研究所  
3 名古屋大学大学院環境学研究所  
4 名古屋大学宇宙地球環境研究所  
5 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University  
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University  
Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University  
Graduate School of Fisheries and Environmental Science, Nagasaki University

南極 DFS10 浅層コアに含まれる気泡の  $N_2/O_2$   
 – 気泡サイズ依存性に着目して –  
 $N_2/O_2$  Measurements of Air Bubbles in the DFS10 Shallow Ice Core  
 - Focus on relation to bubble size -

○橋本健吾<sup>1</sup>, 藤田秀二<sup>2</sup>, 飯塚芳徳<sup>3</sup>, 大野浩<sup>1</sup>

Kengo Hashimoto, Shuji Fujita, Yoshinori Iizuka and Hiroshi Ohno

### 1. はじめに

アイスコアに保存されている大気成分は、過去の大気組成を直接復元するための唯一の情報源であるが、その情報を正確に読み取るためには、氷床内部における大気成分の挙動を把握する必要がある。氷床浅部で積雪が圧密・氷化する際に、ガスの分別が生じると考えられている。

氷床には起源の異なる2種類の気泡が存在するとされている。1つ目は積雪の圧密・氷化過程で形成されるもので、気泡の大半を占める(ノーマルバブル)。2つ目は表面積雪の段階ですでに含まれる微小な気泡で、通称マイクロバブルと呼ばれている。マイクロバブルはその小ささや少なさからトータルガス含有量に対する寄与は小さいものの、ガス分別が卓越して起こることでガス組成(例えばアイスコアの年代軸決定に利用されている酸素窒素比)に大きな影響を与える可能性が理論的に示されている。<sup>1)</sup>

しかしながら、これまで氷床浅部に含まれる気泡の個々のガス組成を分析した例は少なく、大気と大きく異なるガス組成を持つ微小気泡の存在は確かめられていない。

### 2. 方法

第51次南極地域観測隊がドームふじ周辺で掘削したDFS10アイスコアの深度121.47-121.50 m及び99.96-99.99 mの箇所を試料とした。この地点においては深度約103 mで氷化することが知られている。厚さ約3 mmに成型した氷厚片に含まれる気泡一つの窒素酸素比( $N_2/O_2$ )を、顕微ラマン分光器を用いて測定した。測定中のバックグラウンドノイズを極力抑えるために、窒素ガスのかわりにアルゴンガスを試料の冷却に用いた。各試料に対して3回測定を行い、その平均値を測定結果とした。測定結果の誤差は標準誤差の2倍と定義した。

### 3. 結果と考察

深度99.96-99.99 mで分析した気泡93個の窒素酸素比とサイズの関係を図1に示す。気泡の半径が0.2 mm~1.6 mmの範囲においては、 $N_2/O_2$ は概ね大気組成(3.7)に近い値であった。興味深いことに、半径が0.1 mmよりも小さな気泡の中に、極めて高い $N_2/O_2$ ( $>10$ )を有するものが多数認められた。その一方で、同程度のサイズの気泡の中で大気組成に近い $N_2/O_2$ を示すものも複数観察された。深度121.47-121.50 mにおいても同様の結果が得られた。極端に $N_2$ リッチとなっている微小気泡についてはマイクロバブルに、その他の気泡についてはノーマルバブルに由来すると考えられる。

気泡から大気に繋がった空隙にガスが拡散する際に、その速度がガスの種類に依存するためにガス分別が生じる(窒素より酸素のほうが速く拡散する)。<sup>2)</sup> Kobashiらの研究によると、

表層ですでに気泡になっているマイクロバブルはフィルン中でガス分別に晒される時間がノーマルバブルと比べて長くなり、ガス分別がより進行することになる。<sup>1)</sup>

### 4. 今後の課題

南極内陸部の氷化深度付近に、大気組成よりはるかに大きな窒素酸素比( $>10$ )を有する微小気泡(マイクロバブル)が存在することを実験的にはじめて明らかにした。今後は同じ深度のコアのマイクロ X線 CT 観察を行い、マイクロバブルの空間分布(数密度やサイズ分布)を調べ、今回のガス組成分析の結果と合わせて解析することで、マイクロバブルがコア全体のガス組成にどの程度影響し得るか評価したい。

### 参考文献

- 1) Kobashi, T., T. Ikeda-Fukazawa, M. Suwa, J. Schwander, T. Kameda, J. Lundin, A. Hori, H. Motoyama, M. Döring and M. Leuenberger: Post-bubble close-off fractionation of gases in polar firn and ice cores: effects of accumulation rate on permeation through overloading pressure, *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 13895–13914.
- 2) Ikeda, T., H. Fukazawa, S. Mae, L. Pepin, P. Duval, B. Champagnon, V. Y. Lipenkov, and T. Hondoh (1999): Extreme fractionation of gases caused by formation of clathrate hydrates in Vostok Antarctic ice. *Geophysical Research Letters*, **26**(1), 91-94.

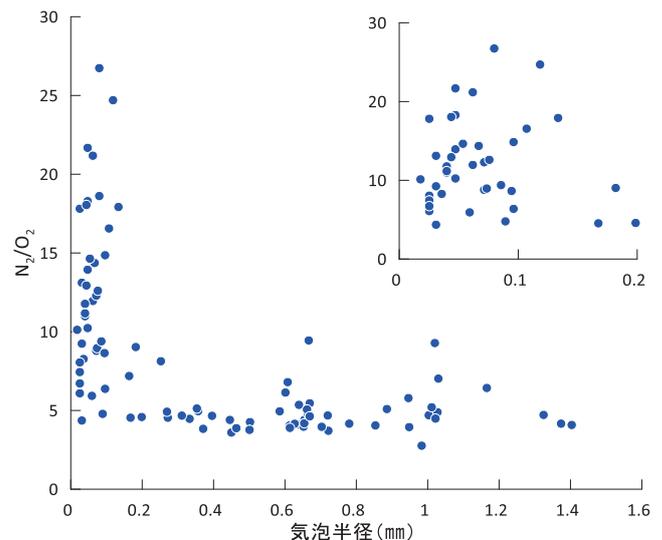


図1 深度99mにおける気泡の半径と $N_2/O_2$

1 北見工業大学  
 2 国立極地研究所  
 3 北海道大学低温科学研究所

Kitami Institute of Technology  
 National Institute of Polar Research  
 Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

## アラスカ・グルカナ氷河における雪氷藻類に寄生するツボカビの感染率 Infection rate of chytrids on glacier algae on Gulkana Glacier in Alaska

○小林綺乃<sup>1</sup>, 竹内望<sup>2</sup>, 鏡味麻衣子<sup>3</sup>

Kino Kobayashi, Nozomu Takeuchi and Maiko Kagami

### 1. はじめに

ツボカビとは、鞭毛をもつ遊走子という細胞を作る菌類の仲間である。ツボカビは、一般に湖沼や土壤に生息し、種によって維管束植物やカエル等の脊椎動物など様々な分類群の生物に寄生するものが存在する。寄生性のツボカビは、寄主の絶滅を招いたり、個体群の季節変動を制御したりするなど、生物群集に大きな影響力をもつ。ツボカビは、一般に水環境で増殖し、その生活史は、遊走子と孢子体の大きく2つの段階に分けられる。水中を泳ぐ遊走子は、寄主細胞に付着すると、仮根を細胞の中に侵入させて孢子体となる。寄主から栄養を吸収し成長すると、孢子体内に多くの遊走子を作り、遊走子を再び水中に放出する。氷河や積雪の表面にも、雪氷藻類という光合成微生物に寄生するツボカビの存在が知られている。雪氷藻類は、雪氷上で繁殖すると表面のアルベドを下げ、雪氷の融解を促進することが明らかになっている。したがって、雪氷藻類に寄生するツボカビの生態を理解することは、氷河生態系や雪氷の融解過程を理解する上で重要である。Kol(1942)は、アラスカの氷河に繁殖する緑藻 *Ancylopera* (*A.*) *nordenskioldii* の細胞に寄生するツボカビを報告している。しかしながら、この報告以降、氷河上のツボカビの情報はほとんどなく、その生態は全くわかっていない。そこで本研究では、多様な雪氷藻類が繁殖し、藻類による氷河の暗色化も報告されているアラスカのグルカナ氷河において、その裸氷域表面で採取された雪氷サンプル中の雪氷藻類およびそれに寄生するツボカビを観察し、氷河の生息場所による藻類の感染率を算出し、ツボカビが雪氷藻類へ与える影響を考察することを目的とした。

### 2. 調査地と方法

分析に用いたサンプルは、2001年および2015年の8月にアラスカ・グルカナ氷河で採取されたものである。標高の異なる3地点(1385 m, 1470 m, 1585 m)のクリオコナイトホール内と氷表面のサンプルを分析した。真菌などの細胞壁を染色する蛍光試薬カルコフロールホワイトを用い、蛍光顕微鏡で雪氷藻類に寄生しているツボカビの形態的特徴を観察し、ツボカビの寄生の有無から藻類の感染率を算出した。さらに、緑藻 *A. nordenskioldii* は複数の細胞(1~16細胞)が連結する形態を持つことから、細胞連結数とツボカビの感染率との比較を行った。

### 3. 結果と考察

観察の結果、多数の緑藻 *A. nordenskioldii* の細胞に球形のツボカビが付着しており、藻類の細胞中に伸びるツボカビの仮根の形態から、少なくとも3種のツボカビが存在することがわかった。ツボカビの藻類への感染率を求めた結果、2015年ではクリオコナイトホール内で19.2%、氷表面で3.9%となった。これは、ツボカビは、氷表面に比べてクリオコナイトホール内でもより藻類に寄生しやすいことを示している。さらに、2001年のクリオコナイトホール内の感染率を求めた結果20.8%となり、年に関わらずクリオコナイトホールでの感染率は約20%であることがわかった。緑藻 *A. nordenskioldii* の細胞連結数の違いによる感染率を求めた結果、細胞連結数が少ないほうが感染率は高いことがわかった。以上の結果から、アラスカ・グルカナ氷河の裸氷域では、ツボカビはクリオコナイトホール内の藻類細胞を中心に寄生し、とくに連結数の少ない藻類細胞に寄生することが明らかになった。このことは、氷河上で比較的安定した水環境であるクリオコナイトホールが、氷河のツボカビの繁殖に重要な場所であることを示唆している。

### 4. 参考文献

1) Kol E, 1942: The snow and ice algae of Alaska, Smithsonian Miscellaneous Collections, 101,1-36.

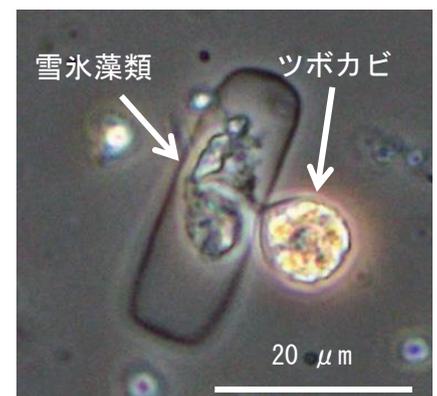


図 雪氷藻類に寄生するツボカビ

1 千葉大学 大学院融合理工学府

2 千葉大学 大学院理学研究院

3 横浜国立大学 環境情報研究院

Graduate school of Science and Engineering, Chiba University

Graduate school of Science, Chiba University

Graduate school of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

## 信越地方苗場山の積雪で繁殖する雪氷藻類の標高分布と植生との関係 Altitudinal distribution of snow algae associated with vegetation in Mt. Naeba, Japan

○高橋翼<sup>1</sup>, 鈴木拓海<sup>1</sup>, 竹内望<sup>2</sup>

Tsubasa Takahashi, Takumi Suzuki and Nozomu Takeuchi

### 1. はじめに

雪氷藻類は、低温で貧栄養な積雪表面で繁殖する特殊な光合成微生物である。雪氷藻類は、日本列島の多雪地域に広く分布し、その繁殖は雪を着色することが知られており、特に高山帯では雪面が赤く染まる赤雪現象、山地帯や亜高山帯では雪面が緑に染まる緑雪現象が報告されている。先行研究から、雪氷藻類群集は積雪上の物理化学条件に影響を受け、標高や季節によって変化することが分かっている。特に、樹林帯の積雪上の物理化学条件は周囲の動植物の活動から大きな影響を受けるため、そこに生息する雪氷藻類の時空間分布もその場の植生に依存している可能性がある。しかし、山岳地広域の積雪の雪氷藻類の時空間分布が植生分布とどのように対応するのかについては、ほとんど調査が行われておらず明らかになっていない。本研究の目的は、日本列島の多雪山岳地域の一つで、地域特有の様々な植生が高度分布する信越地方苗場山の雪氷藻類の標高分布の季節変化を明らかにし、雪氷藻類の時空間分布と植生との関係を理解することである。

### 2. 調査地と方法

調査は、2019年に3回（4月中旬（4/13-14）、4月下旬（4/29-30）、5月上旬（5/9-11））、2020年に2回（5月下旬（5/22）、6月下旬（6/25））の計5回行った。調査地点は、苗場山西側斜面の標高別の10地点（S1-S10）である。ただし、2020年の調査は、5月にS4, S5, 6月にS9, S10でのみ行った。調査各地点の植生は、S1-S2でスギ林, S3-S5でブナ林, S6でブナ林とオオシラビソ林の境界, S7でオオシラビソ林, S8でダケカンバ林, S9, S10で湿原またはオオシラビソ林である。各地点の平均をとるために、1地点につき5か所の積雪表面をランダムに採取し、藻類量の指標となるクロロフィルa濃度、溶存化学成分濃度、不純物量を分析した。

### 3. 結果と考察

2019年の積雪表面のクロロフィルa濃度は、4月中旬から5月上旬にかけて全地点で増加した。これは雪氷藻類が苗場山の広範囲で繁殖していることを示している。特に増加が顕著であったのはS1, S2, S7であり、4月中旬のクロロフィルa濃度は、それぞれ5.2, 2.5, 2.8  $\mu\text{g/l}$ であったのに対し、5月上旬では、それぞれ127.7, 114.9, 85.4  $\mu\text{g/l}$ まで増加した。低標高（S1, S2）で藻類量の増加が大きいのは、気温が高く融雪開始が早いことから、より長い期間、藻類が繁殖したためと考えられる。一方、高標高のS7でも藻類量が増加したことは、気温以外の要因も藻類量の繁殖に影響していることを示唆している。調査期間中、積雪中の有機物量はS1, S2, S7で大きく増加し、4月中旬ではそれぞれ0.09, 0.09, 0.05  $\text{g/l}$ であったのが、5月上旬ではそれぞれ4.25, 1.87, 2.98  $\text{g/l}$ まで増加した。この3地点は、藻類量が顕著に増加した地点と一致する。さらに藻類の栄養塩である $\text{PO}_4^{3-}$ の濃度は、S1, S2で顕著に高かった。このことから、積雪中の有機物が藻類に栄養塩を供給することで、これらの地点の藻類の繁殖を促したと考えられる。有機物量が大きかった3地点の植生は、いずれも針葉樹林であった。常緑樹である針葉樹からは多くの有機物が雪面に供給された一方、まだ展葉していなかった広葉樹林帯の地点では、樹木から雪面への有機物の供給が少なかったものと考えられる。

2020年の積雪表面のクロロフィルa濃度は、5月のS4, S5でそれぞれ137.9, 140.6  $\mu\text{g/l}$ であり、2019年のS1, S2, S7と同等の藻類量であることがわかった。これらの地点で前年に比べて藻類が繁殖したのは、広葉樹の展葉が原因であると考えられる。広葉樹は5月中旬に展葉し、開いた葉からは、雨水等によって積雪表面に有機物や栄養塩が供給され、藻類量が増加したのかもしれない。6月のS9, S10のクロロフィルa濃度は、それぞれ51.5, 9.7  $\mu\text{g/l}$ であり、十分長い融解期間を経ているにもかかわらず藻類量は少ないことを示している。特にS10は、森林限界を超えて周囲に樹林がなかったため、6月になっても藻類量が増加しなかったのかもしれない。

本研究によって、雪氷藻類の時空間分布は植生の種類と広葉樹の展葉に依存していることが示唆された。本州日本海側で典型的な植生分布を持つ苗場山は、日本海側の山岳域の積雪の微生物群集のモデルとなるだろう。

1 千葉大学大学院融合理工学府  
2 千葉大学大学院理学研究院

Graduate School of Science and Engineering, Chiba University  
Graduate School of Science, Chiba University

## ネパール・ヒマラヤ、トランバウ氷河アイスコアの水分安定同位体分析

## The analysis of water stable isotopes of the ice core from Trambau glacier, Nepal Himalaya

○江刺和音<sup>1</sup>, 對馬あかね<sup>2</sup>, 植村立<sup>1</sup>, 飯塚芳徳<sup>3</sup>, 的場澄人<sup>3</sup>, 藤田耕史<sup>1</sup>

Nao Esashi, Akane Tsushima, Ryu Uemura, Yoshinori Iizuka, Sumito Matoba and Koji Fujita

## 1. はじめに

これまでにアジア高山域では中央アジアやチベット高原、ヒマラヤ山脈などでアイスコアが掘削されている。しかし、山岳氷河でのアイスコア掘削は様々な困難が伴うため限られた場所で行われておらず、特にヒマラヤ山脈南面の高標高でアイスコアが掘削された例は少ない。本研究で対象とするネパール・ヒマラヤは、夏季モンスーンの影響を強く受け、降水による氷河の涵養と気温上昇による融解が夏季に同時に起こる複雑な気候条件下にある。そのため、この地域のアイスコアから直接的に得られる古環境情報は、モンスーン循環や山岳地帯の複雑な地形による水蒸気・大気エアロゾル輸送への影響を理解するために重要である。

本研究では、2019年に掘削されたトランバウ氷河アイスコアの水分安定同位体比を分析し、近隣の山岳氷河アイスコアデータと比較解析することで、同位体比の経年変動の地域特性を明らかにすることを目的とした。さらに、この地域へ到達した空気塊の輸送経路から、水蒸気の起源を推定することで同位体比の地域特性をもたらす要因について考察する。

## 2. 試料と分析手法

試料となるアイスコアは2019年11月にネパール・ヒマラヤ、ロールワリン地域のトランバウ氷河 (27.919°N, 86.545°E)、標高5,862 m地点で掘削された。コアの全長は81.2 mである。掘削現場での初期解析によって明らかになったアイスコアの平均密度は866 kg/m<sup>3</sup>で、コア全体の約88%が融解再凍結氷で構成されていると推測された。掘削地点の年間涵養量は水当量で0.73±0.11 mであり (Sunako et al., 2019)、このアイスコアは約100-130年間の古環境情報を保有していることが予想された。

本研究では、81.2 mのコア全層について水の酸素・水素安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ・ $\delta\text{D}$ ) の分析を行った。分析には、名古屋大学のキャピティリングダウン式分光計 (Picarro社製; L2120-i, L2130-i) を用いた。アイスコアは約5 cm分解能で分割し、室温で融解させた1637試料を分析した。1試料につき5回の測定を行い、メモリー効果を補正後の3-5回目の3回の平均値を測定値とした。

## 3. 結果と考察

図1に酸素安定同位体比の深度プロファイルを示す。 $\delta^{18}\text{O}$  は-23.6‰から-12.3‰の間で変動しており、全層の平均値は-17.0‰であった。深度22.1-25.1 mの区間は $\delta^{18}\text{O}$ が顕著に低く、d-excessが高い特徴的な変動を示したため、雪崩による涵養や氷河融解に伴う流出などによって形成された不連続層である可能性が考えられる。

一般に $\delta^{18}\text{O}$ 値は気温や降水量と相関があり、アイスコアの古環境復元に広く用いられている。トランバウ氷河コアでも同位

体比の変動幅は小さいものの、 $\delta^{18}\text{O}$ が高い時期と低い時期を繰り返す周期的な変動が見られた。そのため $\delta^{18}\text{O}$ が高い時期を夏と仮定して年層カウントを行い、仮年代を決定した。仮年代をもとにしたトランバウ氷河コアの酸素安定同位体比時系列変動を図2 b)に示す。図2 a)には約40 km離れたエベレスト山のEast Rongbuk氷河、標高6500 m地点で掘削されたアイスコアの酸素安定同位体比時系列変動を示した。これらと比較すると、トランバウ氷河コアは同位体比の変動幅が非常に小さいことがわかった。これは融解再凍結の影響によって季節シグナルが平滑化されていることが考えられる。また、トランバウ氷河コアは過去140年間にわたり、 $\delta^{18}\text{O}$ に約3.1‰の長期的な増加傾向が見られ、East Rongbuk氷河コアのおよそ2倍の増加率を示した。

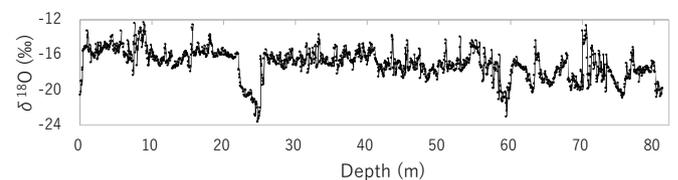


図1 酸素安定同位体比の深度プロファイル

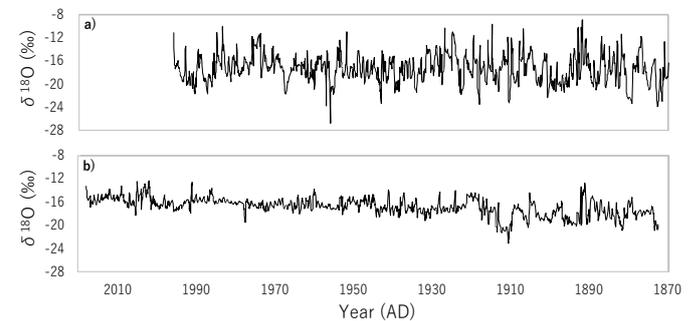


図2 a) East Rongbuk氷河アイスコアの酸素安定同位体比時系列変動 (Hou et al., 2003). b) 仮年代をもとにしたトランバウ氷河アイスコアの酸素安定同位体比時系列変動(不連続層22.1-25.1 mを除く)。

## 参考文献

- 1) Sunako et al. (2019) Mass balance of Trambau Glacier, Rolwaling region, Nepal Himalaya: In-situ observations, long-term reconstruction and mass-balance sensitivity. *J. Glaciol.*, **65**, 605-616.
- 2) Hou et al. (2003) A 154a high-resolution ammonium record from the Rongbuk Glacier, north slope of Mt. Qomolangma (Everest), Tibet-Himal region. *Atmos. Environ.*, **37**, 721-729.

1 名古屋大学大学院環境学研究科  
2 千葉大学大学院理学研究院  
3 北海道大学低温科学研究所

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University  
Graduate School of Science, Chiba University  
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

## グリーンランド EGRIP 浅層コアの年代決定及び固体粒子解析

## Dating and solid particle analysis of a shallow ice core drilled at EGRIP, Greenland

○小室悠紀<sup>1</sup>, 中澤文男<sup>1,2</sup>, 東久美子<sup>1,2</sup>, 平林幹啓<sup>1</sup>, 尾形純<sup>1</sup>, 福田かおり<sup>1</sup>, 栗田直幸<sup>3</sup>,  
北村享太郎<sup>1</sup>, 米倉綾香<sup>2</sup>, Trevor J. Popp<sup>4</sup>, Dorthe Dahl-Jensen<sup>4</sup>

Yuki Komuro, Fumio Nakazawa, Kumiko Goto-Azuma, Motohiro Hirabayashi, Jun Ogata, Kaori Fukuda, Naoyuki Kurita,  
Kyotaro Kitamura, Ayaka Yonekura, Trevor J. Popp, Dorthe Dahl-Jensen

## 1. はじめに

グリーンランド氷床へ飛来する鉱物ダストの起源の1つに、グリーンランド沿岸域の土壌面がある。温暖化によってグリーンランド沿岸域の雪氷面積が減少すると、土壌面積が増加し、この地域から供給される鉱物ダストが増加すると考えられる。粒径が大きい鉱物ダストの濃度やフラックスは、グリーンランド沿岸域からの鉱物ダストの供給量や、この地域の雪氷/土壌面積を評価するためのプロキシとなり得る (e.g., Simonsen et al., 2019)。本研究では、アイスコアに含まれる鉱物ダストの時間変動から、グリーンランド沿岸域における雪氷面積の時間変動を推定することを目的として、東グリーンランド深層氷床掘削プロジェクト (EGRIP 計画) で掘削された浅層コアの解析を行なった。本発表では、このコアの年代決定と、固体粒子分析による鉱物ダストの粒径別濃度 (粒径分布) の解析結果について報告する。

## 2. 方法

本研究では、深度 0–65 m のコア試料を分析した。国立極地研究所で開発したアイスコア連続融解分析システム (CFA システム) を用いて、試料の連続分析を行った。CFA に接続された水同位体比アナライザー (Piccaro 社, L2130-i) と ICP 質量分析計 (Agilent technologies 社, 7700), レーザー遮蔽式固体粒子分析器 (Klotz 社, Abakus) を用いて、水の酸素・水素安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta\text{D}$ ) と 7 元素 (Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Fe) の濃度、固体粒子濃度 (粒径 1.2–10.5  $\mu\text{m}$ ) を測定した。また、フラクションコレクターを用いて融解水の一部を深度長で約 12 cm ごとに採取し、コールターカウンター (Beckman Coulter 社, Coulter Multisizer 4c) を用いて固体粒子濃度 (粒径 0.6–18  $\mu\text{m}$ ) を測定した。トリチウム分析のために、コア試料の一部から深度長で約 4 cm の氷片を分取、融解させた。そして、液体シンチレーションカウンター (ParkinElmer 社, Quantulus 1220) を用いて濃度測定を行なった。

## 3. 結果

$\delta^{18}\text{O}$  と  $\delta\text{D}$  の深度プロファイルは、深度 0–7 m 付近までは季節変動を保存していたものの、それ以深では不明瞭となった。この結果は、EGRIP における先行研究 (Vallelonga et al., 2014) の結果と整合的である。Na や Ca、固体粒子濃度のプロファイルは、全深度で季節変動を保存していた。そのため、本研究では主にこれらのプロファイルを用いて年層カウントを行なった。トリチウムが 14.1 m 付近で最大濃度を示したため、この深度を 1963 年とした。また S (主に  $\text{SO}_4^{2-}$  由来) は、深度 23.3 m と 39.8 m, 44.7 m 付近で鋭い濃度ピークを示した。これらのピークは、火山噴火由来だと考えられる。年層カウントによる年代値も考慮すると、これらのピークが 1912 年の Katmai 火山, 1816 年の Tambora 火山, そして 1783 年の Laki 火山の噴火にそれぞれ対応するものと考えられる。これらの結果から、本研究で分析した深度 0–65 m の年代は、過去約 400 年間に相当すると推定された。

当日の発表では、上記の結果に加えて、鉱物ダストの粒径分布の時間変動についても報告する予定である。

## 参考文献

- 1) Simonsen et al. 2019: East Greenland ice core dust record reveals timing of Greenland ice sheet advance and retreat, *Nature Communications*, **10**, 4494.
- 2) Vallelong et al. 2014: Initial results from geophysical surveys and shallow coring of the Northeast Greenland Ice Stream (NEGIS), *The Cryosphere*, **8**, 1275–1287.

1 国立極地研究所  
2 総合研究大学院大学  
3 名古屋大学  
4 コペンハーゲン大学

National Institute of Polar Research  
The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI  
Nagoya University  
University of Copenhagen

## グリーンランドで掘削されたアイスコア中の過去 100 年間の鉱物組成変動

## Variations in mineralogy of dust in ice cores obtained from Greenland over the past 100 years

○ 永塚尚子<sup>1</sup>, 東久美子<sup>1,2</sup>, 對馬あかね<sup>3</sup>, 藤田耕史<sup>4</sup>, 的場澄人<sup>5</sup>, 大沼友貴彦<sup>6</sup>, Remi Dallmayr<sup>7</sup>, 門田萌<sup>5,8</sup>,  
平林幹啓<sup>1</sup>, 尾形純<sup>1</sup>, 塚川佳美<sup>1</sup>, 北村享太郎<sup>1</sup>, 箕輪昌紘<sup>4</sup>, 小室悠紀<sup>1</sup>, 本山秀明<sup>1,2</sup>, 青木輝夫<sup>1,2</sup>,  
中澤文男<sup>1</sup>, Trevor James Popp<sup>9</sup>, Dorthe Dahl-Jensen<sup>9</sup>

Naoko Nagatsuka, Kumiko Goto-Azuma, Akane Tsushima, Koji Fujita, Sumito Matoba, Yukihiko Onuma, Remi Dallmayr, Moe Kadota, Motohiro Hirabayashi, Jun Ogata, Yoshimi Ogawa-Tsukagawa, Kyotaro Kitamura, Masahiro Minowa, Yuki Komuro, Hideaki Motoyama, Teruo Aoki, Fumio Nakazawa, Trevor James Popp, and Dorthe Dahl-Jensen

## 1. はじめに

グリーンランド氷床には、周囲の土壌や遠方の砂漠などを起源とする鉱物ダストが堆積し、毎年涵養域の雪の層に保存される。このようなダストをアイスコアとして取り出して分析すれば、その輸送経路や起源となる場所の変化を明らかにできる可能性がある。しかしながら、アイスコア中のダストの粒径や組成の分析はまだ限られており、特に濃度が低い間氷期の変動については詳細がほとんど明らかにされていない。

## 2. 目的

本研究では、微量でも分析が可能な走査型電子顕微鏡 (SEM) およびエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) を用いてグリーンランドのアイスコア中の鉱物ダストの形態観察および化学組成分析を行い、過去 100 年間の変動を明らかにすることを目的とした。また、得られた結果を過去の環境変動のデータと比較することで、ダストの起源の変化やその要因についても考察した。

## 3. 分析手法

観察を行ったのは、グリーンランド氷床北西部 SIGMA-D サイト (N77°636', W59°120', 2100 m a.s.l) において 2014 年に掘削された、長さ 222.72 m のアイスコアに含まれる鉱物ダストである。観察には 1915 年から 2013 年までの約 100 年分に相当する深さ 0 - 38.60 m 部分を使用した。コアは 5 年ごとにまとめて凍結乾燥した後にメンブレンフィルター上に捕集し、1 サンプルにつき 150 粒子を無作為に選んで観察して、その時間変化を明らかにした。また、エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) を用いて、鉱物ダスト表面の化学組成を分析し、形態情報と合わせてその種類を同定した。さらに、鉱物が形成されたプロセスおよび環境の違いを元に、その種類を分類して各起源地域からのダスト寄与の指標とした。サンプルの観察は、国立極地研究所の走査型電子顕微鏡 (QUANTA FEG 450) を用いて行った。

## 4. 結果と考察

観察の結果、アイスコア中にはいずれも平均 1-3  $\mu$ m の粒径の鉱物ダストが含まれており、主に長距離輸送された粒子が供給されていたと考えられる。しかしながら、その粒径分布は年によって異なり、1915-1950 年および 2000 年以降のサンプルには、他の年に比べて粒径が大きい粒子が多く含まれていた。

EDS 分析の結果、アイスコア中のダストは地質の主要構成物

であるケイ酸塩鉱物が大半を占めていた。その組成は数十年および 10-15 年という異なる 2 つの時間スケールで変動しており、変動の傾向が鉱物のタイプ間で異なることがわかった。また、過去の気温データとの比較の結果、数十年スケールの変動はグリーンランドの地表面気温変化の影響を受けている可能性が高いことが示唆された。寒冷期 (1950-80 年代) には湿潤温暖な環境 (中低緯度地域) で形成された鉱物の割合が多く、温暖期 (1920-40 年代, 1990 年代以降) には寒冷乾燥な環境 (高緯度地域, 砂漠, グリーンランド) で形成された鉱物の割合が多くなった。

鉱物ダストのより詳しい起源を明らかにするために、後方流跡線解析も行った。その結果、SIGMA-D サイトには主にグリーンランド沿岸域から大気が入り込んでおり、次にカナダやアラスカからの流入が多いことがわかった。また、期間を通じて各起源地域からの大気の寄与率に大きな変化はなかったことから、ダスト起源の変化は大気輸送の影響ではなく、起源地域の地表面状態の影響によるものであることが示された。一方、従来の説とは異なり、アジアやアフリカなどの乾燥域からはほとんど供給がなく、鉱物組成から示された中低緯度地域の寄与も非常に少ないことがわかった。

以上の結果から、SIGMA-D サイトには過去の温暖な環境 (第三紀) で形成されたカナダやアラスカの地質から定常的にダストが供給されており、温暖期にはそれに加えてグリーンランド沿岸域からの供給割合が増加した可能性が高いことが明らかになった。温暖期にはグリーンランドにおける氷河氷床の融解・後退や夏季の季節積雪被覆期間の減少によって沿岸域の地表面が露出し、ダストの発生が増加したためと考えられる<sup>1)</sup>。

上記の手法を用いて、グリーンランド氷床北東部 EGRIP アイスコアに含まれるダストも同様に分析を行う予定である。当日は、SIGMA-D コアとの比較を行った結果についても発表する。

## 参考文献

1) Nagatsuka, N., Goto-Azuma, K., Tsushima, A., Fujita, K., Matoba, S., Onuma, Y., et al : Variations in mineralogy of dust in an ice core obtained from northwestern Greenland over the past 100 years, *Clim. Past*, 17, 1341-1362, 2021.

1 国立極地研究所

2 総合研究大学院大学

3 千葉大学理学研究院

4 名古屋大学環境学研究所

5 北海道大学低温科学研究所

6 東京大学生産技術研究所

7 アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所

8 北海道大学環境科学院

9 コペンハーゲン大学

National Institute of Polar Research

SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

Graduate School of Science, Chiba University

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Institute of Industrial Science, University of Tokyo

Alfred Wegener Institute

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

University of Copenhagen

## グリーンランド南東ドームアイスコアに含まれる不純物の解析 Analysis of impurities in the ice core from south-east dome, Greenland

○捧菜優<sup>1,2</sup>, 飯塚芳徳<sup>2</sup>

Mahiro Sasage, Yoshinori Iizuka

### 1. はじめに

グリーンランド氷床は、北半球の人間活動の盛んな地域に近く、産業革命後に欧州や北米から排出された人為起源物質を保存している。特に、グリーンランド氷床南東部は、涵養量が多いため保存された人為起源物質（硫酸塩、硝酸塩、アンモニウム塩）の変質が少ない特徴があり、これらのイオンフラックスが復元されてきた<sup>1)</sup>。しかし、これらのエアロゾルについて、アイスコア中の分布や各塩の化学組成の変遷には十分な理解が得られていない。グリーンランド氷床に保存されたエアロゾルの化学的変遷を復元することは、過去の北極域の大気化学環境を復元することにつながる。

本研究では、2015年5月にグリーンランド南東ドーム（67.18°N, 36.37°W, 3170 m a.s.l.）において掘削されたコア（以下 SE-Dome コア）を用い、SE-Dome コアに含まれる不純物（エアロゾル）の存在状態と化学組成を解析した。

### 2. 試料と分析

全長 90.45m の SE-Dome コアから、深さ 89.350 m~89.370 m(1957/58 冬), 89.850 m~89.870 m(1957 夏)の 2 つのセクションを解析に用いた。これらの試料の表面をマイクロトーム (Leica, SM2400) で研削した後、2 台の測定顕微鏡 (OLYMPUS, STM-UM および Nikon, MM400) を用いて不純物の存在状態を調べた。検出された不純物は顕微ラマン分光器 (HORIBA, JOBIN YVON T64000) を用いてその化学組成を同定した。また、アイスコアをクリーンな環境で昇華させ、残渣の不揮発性不純物の形態、粒径、元素組成を走査型電子顕微鏡 (JOEL, JSM-6360LV) とエネルギー分散型 X 線分析装置 (JOEL, JED2201) を用いて分析した。

### 3. 結果と考察

測定顕微鏡 (OLYMPUS, STM-UM) で観察した結果、深さ 89.850 m~89.870 m のセクションから 8 個（氷結晶粒界上 4 個、氷結晶粒内 4 個）の不純物が検出された。さらに測定顕微鏡 (Nikon, MM400) では、OLYMPUS, STM-UM では検出できなかった不純物が 3 個（結晶粒内）検出された (図 1,2)。他方で、深さ 89.350 m~89.370 m のセクションからは不純物が検出されなかった。季節によって沈着するエアロゾルの量や組成が変化すると考えられる。観察された不純物 (11 個) の平均粒径は 4.21 μm だった。Nikon, MM400 では、微粒子そのものが観察しやすいが、OLYMPUS, STM-UM で観察された結晶粒界が干渉縞のためか観察できないなど、両者には長所と短所がある。両者を組み合わせることで、それぞれの長所を生かした微粒子の検出ができる。今後微粒子の分析数を増やし、量や組成からのエアロゾルの古環境復元を季節変動スケールで進めていく。研究大会当日には顕微ラマン分光器や走査型電子顕微鏡の結果と合わせて不純物の存在状態を議論する予定である。

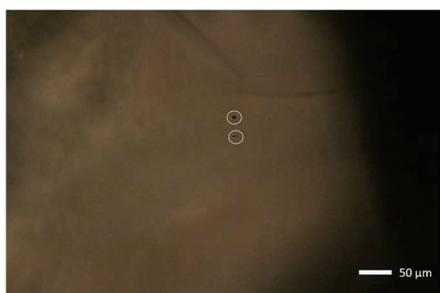


図 1. SE-Dome コアに含まれる氷結晶粒内の不純物  
(OLYMPUS, STM-UM で観察)



図 2. 図 1 と同じ不純物 (Nikon, MM400 で観察)

### 参考文献

- 1) Iizuka, Y., Uemura, R., Fujita, K., Hattori, S., Seki, O., Miyamoto, C., Suzuki, T., Yoshida, N., Motoyama, H., Matoba, S., 2018. A 60 year record of atmospheric aerosol depositions preserved in a high accumulation dome ice core, Southeast Greenland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 123. <https://doi.org/10.1002/2017JD026733>.

1 北海道大学大学院環境科学院  
2 北海道大学低温科学研究所

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University  
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

## 北極浅層アイスコア用の近赤外反射率測定装置の開発 Development of near-infrared reflectance device for shallow ice cores, Greenland

○松本真依<sup>1</sup>, 飯塚芳徳<sup>2</sup>, 斎藤健<sup>2</sup>

Mai Matsumoto, Yoshinori Iizuka and Takeshi Saitoh

### 1. はじめに

積雪粒子の比表面積(単位体積あたりに含まれる積雪粒子の表面積)は、積雪粒子の粒形や形状に依存するため、積雪の微細構造を決定するパラメータとなる<sup>1)</sup>。比表面積の測定にはいくつかの手法が存在するが、近赤外反射率を用いる方法は比較的平易であり、大量の試料を測定するのに適している。本研究では、2021年9月に日本に輸入される新しいアイスコアの近赤外反射率を測定するための、低温室内で利用することを前提とした近赤外反射率測定装置を開発している。

### 2. 近赤外反射率測定装置の概要

前後のコアを設置できるよう長さ1.5 mのアイスコア台を-22°Cの低温室内の暗室に設置し、コア台の全容を撮影できる位置に近赤外線撮影カメラ(Nikon D7000)を導入した。このカメラは内蔵の近赤外除去フィルターを取り除いた上で、可視光(760 nm)以下の波長を取り除くフィルターを取り付けている。アイスコア台を挟むように、近赤外光源(S8100 Energy Power; 波長 850 nm)を2台設置し、アイスコア台に均質に光が当たるように角度をつけて投影した。アイスコア台に標準反射板(Tokyo Instruments, Inc.; Zenith Lite)を置き、近赤外光源から照射された光を反射させ、近赤外カメラで反射光を撮影した。その後、標準反射板と同じ場所かつ反射板表面と高さが一致するように、事前にマイクロームで表面研磨したアイスコアを置き、標準反射板とアイスコアの近赤外反射強度を写真の同じ位置で撮影した(図1)。またアイスコアの撮影の際、前後のコアを設置することでコアとコアの継ぎ目のノイズを減少させた(図1)。

撮影した画像は、Nikon Camera Control Pro2を用いて無線でPCに取り込めるようにした。撮影したRAWファイル形式の画像(図1)をImageJソフトで取り込み、ソフトのDCRraw Readerを用い、長さ80 cmに相当する約4000ピクセルの1次元輝度強度データを計測した。ピクセル強度から近赤外反射率(NIR)を求めるため、反射板の標準反射強度値とピクセル強度の近似式を得た。近似式は約4000ピクセルのそれぞれの位置で異なり、すべての位置で概ね $r^2=0.96$ 以上の高い相関を得ている。アイスコアから得られたピクセル強度と近似式を用いて近赤外線反射率に換算した。

### 3. 近赤外反射率の試験測定の結果

近似式の精度を変える要因の一つとして、カメラの周辺減光や光源の指向性など撮影環境がもたらす標準板の反射率の不均質性がある。この不均質性を改良するため、カメラの設定や光源の強さ、高さ、数や角度などの最適条件を評価した。

初めに、カメラのf値を最大にすることで周辺減光を削減させた。次に、光源の高さを5 cmずつ、光源の角度を水平面から光源の前方淵まで5°ずつ変化させ、周辺減光が最も小さく反射率が均質となる光源の位置を検討した。その結果、床からの高さ

150 cm-角度55°、140 cm-60°、131 cm-65°という光源の位置で周辺減光の影響が最も少なく、標準反射板の反射率が均質に近くなった。次にアイスコア台に対する2つの光源の強度を変化させ、上記の3条件のうち標準反射板の反射率が最も均質になる光源の位置を検証した。その結果、131 cm-65°が最も良い条件であることが分かった。

この条件においてアイスコアの撮影を行い、改良前後の条件で撮影したデータと比較を行った(図2)。その結果、改良後の反射率のほうが、氷板で高い反射率を示す一方、フィルムの反射率が低く、深さ方向のばらつきが少ないことが分かった。改良後の近赤外反射率の絶対値が妥当であるか否かは、異なる手法で測定されたアイスコアの近赤外反射率と比較するなど今後の検証が必要になるが、改良前に比べ、よりばらつきの少ない反射率を得ることができた。

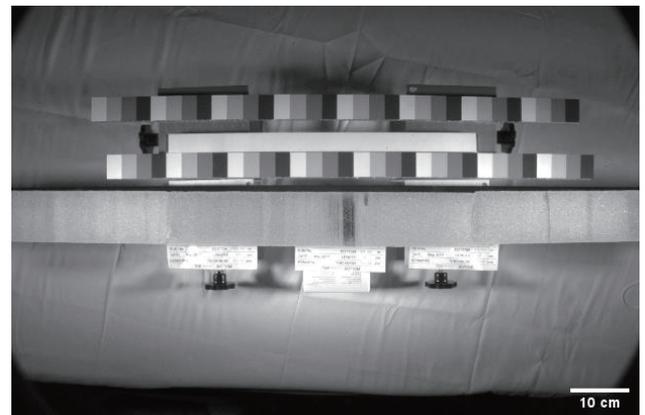


図1 アイスコアの近赤外線写真

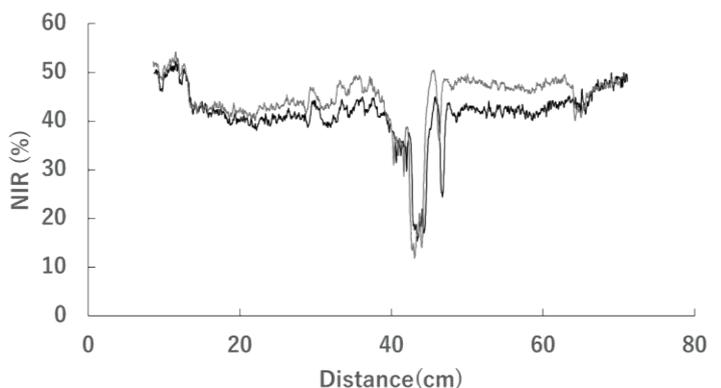


図2 改良前(点線)と改良後(実線)のNIR

### 参考文献

- 1) Margret Matzl and Martin Schneebeli 2006: Measuring specific surface area of snow by near-infrared photography. *Journal of Glaciology*, 52, 179, 558-564.

1 北海道大学大学院環境科学院

2 北海道大学低温科学研究所

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University  
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

# 東南極リュッツォホルム湾における溢流水河変動に定着氷が与える影響 Outlet Glacier Variations Controlled by Land-fast Sea Ice on Lützow-Holm Bay, East Antarctica

○近藤研<sup>1,2</sup>, 杉山慎<sup>1</sup>  
Ken Kondo, Shin Sugiyama

## 1. はじめに

溢流水河から海洋への水流出は、南極氷床の水損失量を制御する重要な役割を果たす。近年の研究によって、海水流出や棚氷のカービングが氷河末端の応力変化をもたらし、流動変化の要因となることが指摘されている<sup>1</sup>。しかし、海氷、氷河末端位置、流動速度の変動を詳細に観測した研究は少なく、流動変化のメカニズムは十分に明らかでない。東南極リュッツォホルム湾では、約十年の周期で大規模な定着氷流出が観測されている<sup>2</sup>。直近では2016年に海水が流出した<sup>3</sup>。この海水流出は湾に流入する氷河に影響を与えた可能性があるが、その実態は明らかとなっていない。そこで本研究では、溢流水河変動と海氷変動との関係を明らかにすることを目的とし、リュッツォホルム湾の氷河で衛星観測を行った。本発表ではその結果に基づいて、末端位置、流動速度、表面標高と海水との相互作用の実態を解明する。

## 2. データと手法

リュッツォホルム湾に流入する5つの氷河(図1)で、2000年以降の氷河前の海氷面積、末端位置、流動速度、表面標高を測定した。海氷面積は、氷河前に設けた解析領域内で、Google Earth Engine上で可視衛星画像の反射率から海氷、開水面、雲のピクセル判別を行って算出した。末端位置は、衛星画像(ASTER, Landsat 7/8)を用いてGISソフトウェア(QGIS)およびGoogle Earth Engine上で描画した。流動速度はLandsat 8の画像を用いてFeature Tracking法による測定<sup>4</sup>を行ったほか、NASA MEaSUREsが公開するITS\_LIVEを用いて年平均の流動速度を取得した。表面標高は、数値標高モデル(REMA)とレーザー高度計(ICESat-1/2)のデータを使用した。

## 3. 結果

氷河前は2005–2015年に継続して海氷に覆われていたが、2016年以降に大きく開水面が広がった(図2a, b)。末端位置は全ての氷河で2000–2015年に前進し、その後2020年までに明瞭な後退を示した。白瀬氷河、スカーレン氷河の末端後退は特に大きく、それぞれ10.8、1.6 kmであった。白瀬氷河の流動速度は2010–

2015年に $-39 \text{ m a}^{-2}$ の減速傾向を示し、2015–2018年に $23 \text{ m a}^{-2}$ の加速傾向を示した(図2c)。スカーレン、テーレン氷河でもよく似た変動が観測された(図2d)。白瀬、スカーレン氷河の接地線付近では、2012–2016年に4.4および2.4 mの標高増加が観測された(図2e)。その後、2016–2020年には標高が横ばい、または減少傾向に転じた。

## 4. 考察

2016年に発生した定着氷流出の後に、大規模な末端後退、流動加速、表面標高の減少が観測された。これらの結果は、氷河前の海氷が氷河末端を安定化させ、カービングや流動加速を抑制していたことを示唆する。さらに、2010–2015年に生じた氷河末端の減速により、氷の伸長で生じる接地線付近の引っ張り歪みが顕著に減少したことが判明した。一方で、氷河が加速した2015–2018年には引っ張り歪みが増加していた。したがって、接地線付近で観測された標高変化は流動変化で生じた歪み速度の変化に起因すると考えられる。以上の結果は、海氷の有無に起因する氷河の流動変化が、氷床から海へ流出する氷質量の変化を引き起こし、氷床体積の変化をもたらしたことを示す。

## 参考文献

- 1) Rott et al., 2018: *The Cryosphere*, **12**, 1273–1291
- 2) Ushio, 2006: *Ann. Glaciol.*, **44**, 177–182
- 3) Aoki, 2017: *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 3219–3227
- 4) Skakibara and Sugiyama, 2014: *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, **119**, 2541–2554

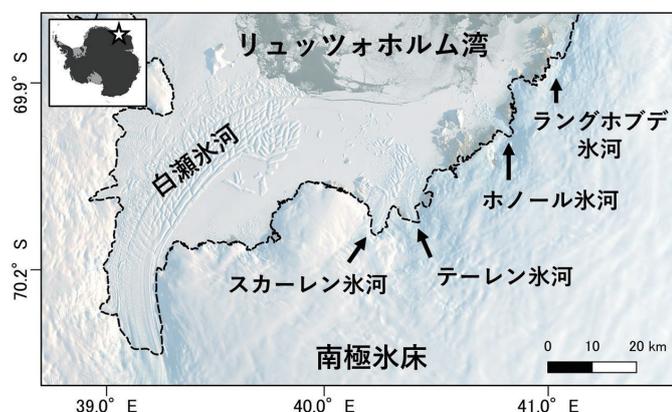


図1 研究対象地に解析した5つの氷河を示す

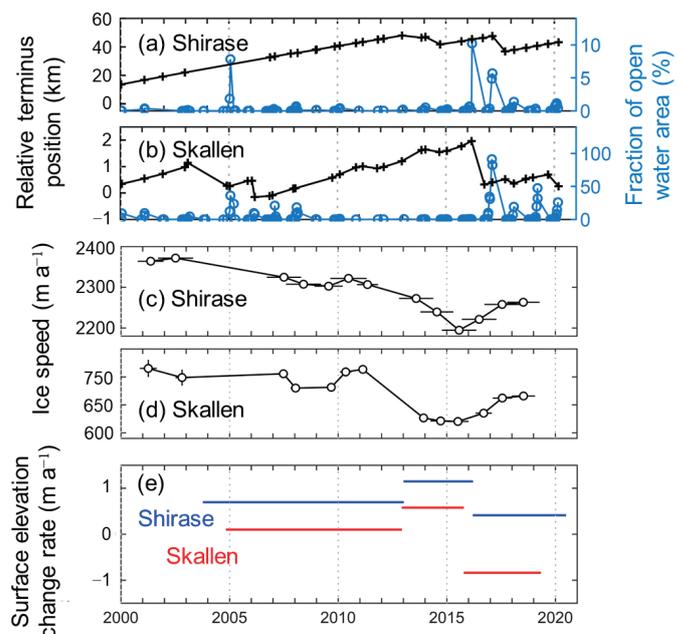


図2 白瀬、スカーレン氷河の、末端位置(+)と氷河前の開水面積率(○)(a, b)、接地線付近の流動速度(c, d)、表面標高変化率(e)

1 北海道大学低温科学研究所  
2 北海道大学大学院環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

## 氷床コア深層掘削機の電装部の開発 —プロトタイプ機の作成と掘削実験での動作確認— Development of electric device for deep ice core drilling - Prototype device design and its evaluation by ice drilling test -

○高田守昌<sup>1</sup>, 本山秀明<sup>2,3</sup>, 大谷昌央<sup>4</sup>

Morimasa Takata, Hideaki Motoyama and Masateru Otani

### 1. はじめに

南極ドームふじ地点近傍において、過去 80 万年を超える最も古い氷試料の存在が示唆され、日本南極地域観測隊は、第 3 期ドームふじ深層コア掘削計画を進行している。南極輸送を控え、2019 年度に国内で掘削テストを実施するため、掘削機システムの開発が急務であった。掘削機は、氷床氷を掘り進めコア試料を採取するための機械部だけでなく、地上より氷の切削状態をモニタする電装部が必要である。機械部は、第 2 期計画で一度の掘削で採取可能なコア長が 4 m のコアバレルとチップ回収室に改良された。一方、電装部は 1990 年代の第 1 期に設計された古いものであり、データ処理の一部に問題が見つかっている。電装部のコンピュータとして、市販の小型 PC を利用することが可能であれば、研究者ベースでの開発が可能であることから、基本設計を行い、開発を進めている。実用化へ向けた課題は、(1)3500m ウインチケーブルを介した掘削機への電源供給とデータ通信、(2)耐圧室に入るサイズのプロトタイプ機の設計と製作、(3)プロトタイプ機を掘削機に実装したテストである。(1)については、問題なく稼働することを報告済みであり、本発表では(2)および(3)の概要について報告する。

### 2. プロトタイプ機の設計と製作

電装部の作成は、機能面は基本設計に沿って行うが、深層掘削機に実装するプロトタイプ機として使用可能な状態とするためには、サイズの制約を大きく受ける。これは深層掘削では、掘削孔の収縮を防ぐため、氷の密度に近い液を掘削孔に充填した液封掘削が行われるため、掘削機には静水圧から機器を守るための耐圧室が設けられ、電装部はこの耐圧室に入れる必要があるためである。この耐圧室は、従来のサイズを踏襲するため、挿入口の内径が 85mm であり、電装部の外径はこの寸法未満とする必要がある。また、電装部として利用可能な有効長は、耐圧室に収納する機器が、掘削用モーター、減速機、計器類であることを考慮すると 700mm であり、配線の接続と収納の都合からより短いほうが好ましい。

設計・製作面、剛性および、現地で故障が発生した場合のメンテナンス性の観点から、電装部はユニット構造を採用することとした。一つのユニットの骨格は、外径 84mm のアルミリング板と幅 80mm または 54mm の樹脂プレートをボルトで固定した構造である。樹脂プレート両表面に電装部の機器類を固定するが、それぞれの機器の役割およびサイズを考慮しながら各ユニットに取り付ける機器類を決めた。電装部全体としては、5つのユニットで構成されることとなった。各ユニットに取付けた機器は、以下の通りである。

- 1 : 端子台、USB-Hub、電流電圧測定回路、アナログ・デジタル入出力器、センサー類、発信回路
- 2 : 温度計測ロガー
- 3 : スティック PC、二次電池
- 4 : リレーコントローラー、電源電圧計測用回路
- 5 : 電源供給切替リレー

これらの 5 つのユニットを長ボルトとナットで固定し、ユニット間の配線を行うことで、電装部として機能する。スペース節約の観点から、ユニット 1 では多層に機器を組付けた。なお、主要部を完成と動作確認を優先する観点から、センサー類および温度計測ロガーは、設置のみとした。

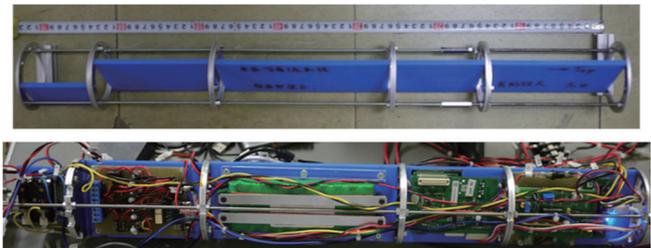


図 1 ユニット構造の掘削機電装部。骨格 (上)。電装機器類を組付け配線した状態のプロトタイプ (下)

### 3. 掘削機への実装と電装部テスト

2020 年 1 月 30 日に宮崎総合深層掘削実験が実施された。第 3 期ドームふじ深層コア掘削で使用予定の掘削機を仮設タワーから吊下げ、その下に約 1 m の掘削が可能な氷柱を置き、氷の掘削が行われた。3500m のウインチケーブルおよびドラムも使用し、国内で実施可能な実際の掘削に近い条件での試験である。この掘削機の耐圧室に電装部のプロトタイプ機を組み込み、このテストも行う総合深層掘削実験であった。

まず、準備段階でプロトタイプ機が問題なく耐圧室に挿入・取出しできることを確認した。氷の掘削実験では、約 6 時間にわたり、約 1 m の氷掘削が 9 回行われた。この間、電装部は正常に稼働し、電源供給を行うとともに、ケーブル通信を経て電装部の PC から時刻、供給電圧、電池電圧、電池電流、掘削機接地圧、掘削モーター回転数、内部電気リレー状態のデータを取得できた。これにより、電装部プロトタイプ機の主要部が問題なく動作し、基本設計と製作の正しさを把握できた。今後、総合深層掘削実験で得られたデータを精査するとともに、センサー類との連動、小型改良を含めた本号機の製作を行う予定である。

1 長岡技術科学大学

2 国立極地研究所

3 総合研究大学院大学

4 九州オリンピア工業株式会社

Nagaoka University of Technology

National Institute of Polar Research

SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies

Kyusyu Olympia Kogyo Co. LTD

南極ドームふじ深層氷床コア中ダストの濃度と粒径の高時間分解能解析  
 –最終氷期最寒期～完新世中盤における変動–  
 High-Resolution Analysis of Concentrations and Sizes of Solid Particles  
 in Dome Fuji Deep Ice Core  
 - From LGM to Mid-Holocene -

○東久美子<sup>1,2</sup>, 平林幹啓<sup>1</sup>, 中澤文男<sup>1,2</sup>, 藤田秀二<sup>1,2</sup>, 福田かおり<sup>1</sup>, 尾形純<sup>1</sup>  
 北村享太郎<sup>1</sup>, 塚川佳美<sup>1</sup>, 米倉綾香<sup>2</sup>, 川村賢二<sup>1,2</sup>

Kumiko Goto-Azuma, Motohiro Hirabayashi, Fumiko Nakazawa, Shuji Fujita, Kaori Fukuda, Jun Ogata  
 Kyotaro Kitamura, Yoshimi Ogawa-Tsukagawa, Ayaka Yonekura and Kenji Kawamura

## 1. はじめに

大気中のダストは放射強制力に影響を及ぼすと同時に、雪面に沈着するとアルベドを低下させ、氷床・氷河や海水の融解を促進する。二酸化炭素の主要な吸収・放出源である南大洋に降下するダストは、植物プランクトンの光合成に不可欠な鉄の供給源として重要であり、大気中の二酸化炭素の濃度に影響を及ぼすと考えられている。また、地球温暖化の進行に伴い、ダストストームが増加して、健康被害や環境破壊を招くことが懸念されている。南大洋やその周辺の地域において、ダストが放射収支に及ぼす影響や、気候変動とダストストーム発生の相互関係を解明するためには、南極の深層氷床コアを用いて、過去に大規模な気候変動が生じた際のダストの変化を研究することが有効な手段となる。

ダストが大気の放射強制力、雪氷面のアルベド、南大洋の植物プランクトンに及ぼす影響を解明し、気候変動に伴う発生源の変化や、発生源から南極までの輸送・沈着過程の変化を推定するためには、濃度と粒径分布のデータが必要である。しかし、長期間にわたるダストの濃度と粒径分布の高精度連続データは非常に限られている。本研究では、大規模な気候変動が生じた最終氷期最寒期～完新世にかけての時代に着目し、改良した分析手法(昨年の雪氷研究大会で報告)を用いて、ドームふじ氷床コアに含まれるダストの濃度と粒径分布を高時間分解能・高精度で連続分析したので、その結果について報告する。

## 2. 方法

国立極地研究所で開発したアイスコア連続融解分析システム(CFA システム)に接続したレーザー遮蔽式固体微粒子分析計(Klotz 社, Abakus)を用いて、ドームふじ氷床コアに含まれるダストの数濃度を高時間分解能で連続分析した。また、CFA システムによって得られた融解水の一部をフラクシオンコレクターで採取し、コールターカウンター(Coulter 社, Coulter Multisizer 4 及び 4e)で分析し、数濃度、体積濃度、粒径分布について 50cm 間隔の高精度連続データを取得した。ダストの他、CFA システムに接続した水同位体比アナライザー(Piccaro 社, L2130-i)と ICP 質量分析計(Agilent technologies 社, 7700)により、それぞれ酸素・水素の同位体比と 8 元素の濃度を測定した。

## 3. 結果

ドームふじ深層氷床コアのデータとして公表されているダストのデータは、不連続であるとともに、測定精度が低かったが、本研究ではダストの高精度分析データを取得することができた。先行研究と同様、ダストの濃度とフラックスは寒冷な最終氷期最寒期に高く、温暖な完新世に低かったが、本研究ではダスト濃度が低い完新世においても、濃度の詳細な変動を検出することができた。また、ダストの粒径分布の変動についても高精度で復元することができた。気候変動に伴う FPP (Fine Particle Percentage の略で、粒径 1 $\mu$ m-5 $\mu$ m の粒子に対して 1.0 $\mu$ m-2.0 $\mu$ m が占める割合)の変動のパターンは、南極内陸部でも場所によって異なり、氷期から間氷期に移行する際に増加する地点と減少する地点の両方があることが示されてる (Delmonte et al., *Climate Dynamics*, 2004) が、ドームふじでは予想に反して、ドーム C と同様、氷期から間氷期に移行する際に増加していた。ダストの粒径分布のもう一つの指標としてダスト粒子の平均体積を計算したところ、最終氷期最寒期に小さく、完新世に大きかった。これらの情報はダストの発生源や輸送・沈着過程の理解に貢献することが期待される。

1 国立極地研究所  
 2 総合研究大学院大学

National Institute of Polar Research  
 The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

# ドームふじアイスコアの連続分析により得られた約15万年前の氷期におけるメタン濃度変動 Methane concentration variation in Dome Fuji ice core during the penultimate glacial period obtained by a continuous flow analysis

○米倉綾香<sup>1</sup>, 川村賢二<sup>1,2,3</sup>, 大藪幾美<sup>2</sup>, 北村享太郎<sup>2</sup>, 尾形純<sup>2</sup>, 平林幹啓<sup>2</sup>, 福田かおり<sup>2</sup>,  
塚川佳美<sup>2</sup>, 猿谷友孝<sup>2</sup>, 中澤文男<sup>1,2</sup>, 藤田秀二<sup>1,2</sup>, 東久美子<sup>1,2</sup>, 本山秀明<sup>1,2</sup>

Ayaka Yonekura, Kenji Kawamura, Ikumi Oyabu, Kyotaro Kitamura, Jun Ogata, Motohiro Hirabayashi, Kaori Fukuda,  
Yoshimi Tsukagawa, Tomotaka Saruya, Fumio Nakazawa, Shuji Fujita, Kumiko Goto-Azuma, Hideaki Motoyama

## 1. はじめに

氷床コアや石筍、海底コアなどの解析から、最終氷期にはダンスガード・オシュガー (D/O) 振動と呼ばれる、突然の遷移を伴う数千年周期の気候変動が繰り返し起こったことが分かっており、それらのイベントの数やタイミングは世界各地から得られる古環境指標の間で概ね一致している。しかし、最終氷期より古い時代に関しては、D/O振動の数やタイミング、持続期間などは試料間での不一致が大きく、未だに実態が不明である。D/O振動と対になる変動が南極の気温に見られ (パイポーラー・シーズン)、その原因は大西洋の深層循環の変化であると考えられている。

最終氷期の変動は、高涵養量地域で掘削された (高時間分解能である) グリーンランド氷床コアと南極氷床コアから復元されてきたが、それらは最終氷期までしか遡ることができないためそれ以前の復元には、南極の低涵養量地域のアイスコア (例えばドームふじコア) の分析によって南極の気温指標 (水同位体) (DF Project Members, 2017) と北半球の気候指標 (メタン濃度) を調べる必要がある。しかし、従来の深層コア (ポストーク, EDC, ドームふじ) による最終氷期以前のメタン濃度復元は、個別試料の分析に限られ (時間分解能が最大約 500 年)、短周期変動の把握は困難である。そこで、本研究では、最後から 2 番目の氷期 (海洋同位体ステージ 6) を対象にして、アイスコアの連続融解システム (Continuous flow analysis: 以下 CFA) を用いて、低涵養量のドームふじアイスコアからメタン濃度変動をほぼ連続的に復元することを目的とする。

## 2. 手法

第二期ドームふじ深層掘削計画で得られたアイスコアの 1869 ~ 2076m (全長 207m) を測定した。試料は 3.4×3.4×50 cm の柱状で、縦型の冷蔵庫内 (-20°C) において約 15°C に加熱した金属プレート上で約 3 cm/min の速度で融解させた。融解中の試料が残り 10cm 以下の時点で次の試料を継ぎ足すことを繰り返し、1日あたり約 7m の連続測定を行なった。融解水中の空気の分析に際しては、水と空気を大まかに分離した後、気体透過膜を用いて気体を抽出し、水蒸気を除去した後にキャビティリングダウン分光装置 (キャビティ圧力を 40 Torr に改造した Picarro G2301) に導入した。実質的な測定の分解能は、配管や気液分離部、測定器内部等における試料の混合により制約を受ける。シグナルの減衰の程度と融解速度から、測定の分解能はコアの長さで約 5cm と評価した。CFA では、融解水に溶解した気体を完全には抽出できないため、測定されたメタン濃度は常に過小評価となる。標準ガスと超純水を混合させた試料の測定からその度合いを推定し、アイスコアの分析値に対して約+8%の補正を行った。

さらに、個別試料分析による高精度メタン濃度データとの比較を行い、必要な場合にはさらなる補正を行った (平均約 20ppb)。

## 3. 結果と考察

最後から 2 番目の氷期 (145,000~195,000 年前) の約 50,000 年間にわたるメタン濃度をほぼ連続的に復元した (図)。ドームふじコアや EDC コア (Louergue et al., 2008 など) の個別試料分析の結果に見られる D/O 振動に類似した数十 ppb の変動については、振幅やピークの形状が概ね一致し、本結果の妥当性が示された。さらに、個別試料分析では解像できない、数百年で約 10ppb の振幅の細かな変動 (図中矢印) も復元できたうえ、この氷期の D/O 振動の頻度が、南極アイスコアの水同位体比とダスト (DF Project Members, 2017) やメタンの個別試料分析から見つかったより高いことが判明した。また、今回得られた連続データによる、この時代のメタン濃度の短周期変動の特徴 (振幅や持続期間) は、最終氷期後半の D/O 振動と良く似ていた。なお、低涵養量地域のフィルンでは大気を取り込みにかかる時間が長く、アイスコアから復元される記録は数十年以上のスミージングがかかる。そのため、短周期の濃度ピークの振幅は、実際の大气中の変動と比べて小さくなってしまふ。その評価については今後の課題である。

## 参考文献

- 1) Dome Fuji ice core project members, 2017: State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. *Sci. Adv.*, 3: e1600446.
- 2) Louergue et al., 2008: Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years. *Nature*, 453(15), 383-386.

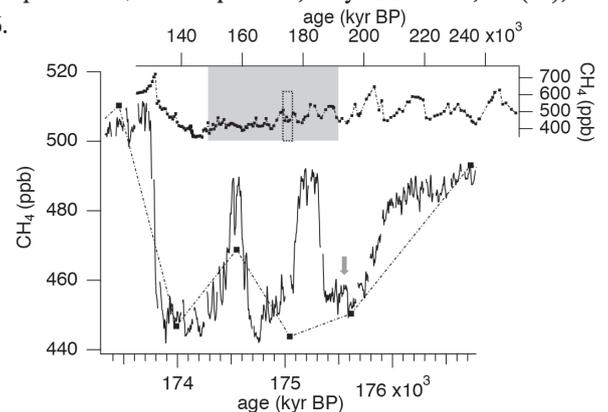


図 1 ドームふじコア中のメタン濃度変動。CFA による連続データ (実線) と個別試料のデータ (角印, Oyabu et al., unpublished data)。 (上) 最後から 2 番目の氷期のメタン変動。網掛部分が対象期間。 (下) 対象期間の一部の拡大図 (上図点線内部)。

1 総合研究大学院大学  
2 国立極地研究所  
3 海洋研究開発機構

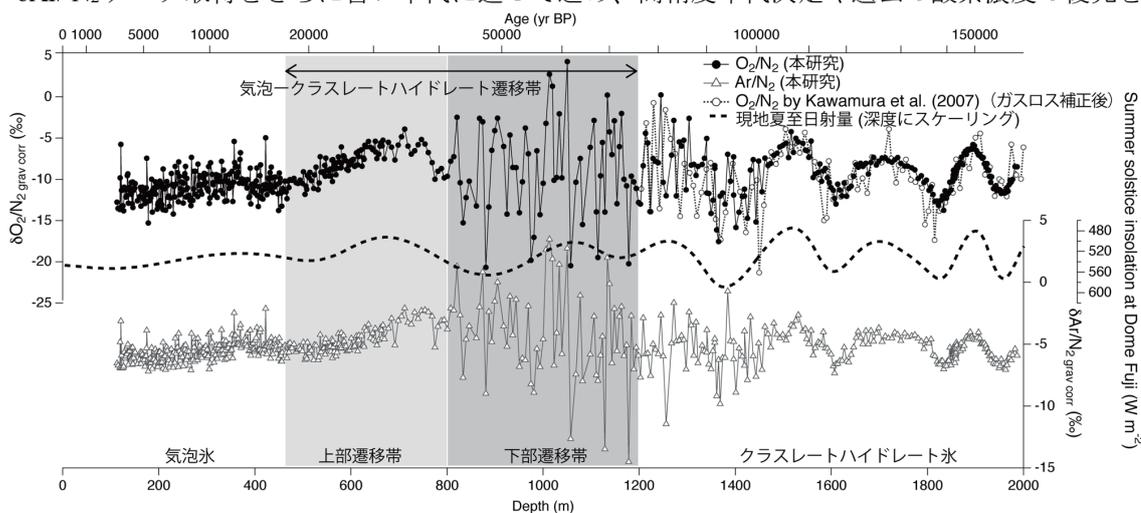
The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI  
National Institute of Polar Research  
JAMSTEC

ドームふじ氷床コアにおける  $O_2/N_2$  と  $Ar/N_2$  の分別Fractionation of  $O_2/N_2$  and  $Ar/N_2$  in the Antarctic ice sheet during bubble formation and bubble-clathrate hydrate transition from precise gas measurements of the Dome Fuji ice core

○大藪幾美<sup>1</sup>, 川村賢二<sup>1,2,3</sup>, 内田努<sup>4</sup>, 藤田秀二<sup>1,2</sup>, 北村享太郎<sup>1</sup>, 平林幹啓<sup>1</sup>, 青木周司<sup>5</sup>, 森本真司<sup>5</sup>, 中澤高清<sup>5</sup>, Jeffrey P. Severinghaus<sup>6</sup>, Jacob Morgan<sup>6</sup>  
Ikumi Oyabu<sup>1</sup>, Kenji Kawamura<sup>1,2,3</sup>, Tsutomu Uchida<sup>4</sup>, Shuji Fujita<sup>1,2</sup>, Kyotaro Kitamura<sup>1</sup>, Motohiro Hirabayashi<sup>1</sup>, Shuji Aoki<sup>5</sup>, Shinji Morimoto<sup>5</sup>, Takakiyo Nakazawa<sup>5</sup>, Jeffrey P. Severinghaus<sup>6</sup>, Jacob Morgan<sup>6</sup>

極域の氷床コアに閉じ込められた空気から、過去の大気組成や気候変動を復元することができる。 $O_2$  と  $Ar$  は空隙が閉じて気泡に取り込まれる際に分別することが知られている。日射が積雪の物理構造に影響を与えることで分別の度合いを制御していると考えられており (Fujita et al., 2009, *J. Glaciol.* など)、氷床コアの  $\delta O_2/N_2$  は現地の夏至日射量変動と類似している (Bender, 2002, *EPSL* など)。ドームふじやポストークコアにおいては、 $\delta O_2/N_2$  と日射量変動との類似性を利用して高精度な年代決定が行われてきた (Kawamura et al., 2007, *Nature* など)。また、複数の  $\delta O_2/N_2$  データから過去 80 万年間の長期トレンドを見出し、過去の酸素濃度を復元した研究例もある (Stolper et al., 2016, *Science*)。しかしながら、先行研究で得られたほぼ全ての  $\delta O_2/N_2$  や  $Ar/N_2$  データは、“コア掘削後の保管中に生じる分別 (ガスロス)” の影響を受けているため、これまで十分な精度で研究が行われたとはいえない。年代決定や過去の酸素濃度の復元の高精度化のためには、 $\delta O_2/N_2$  や  $\delta Ar/N_2$  のシグナル形成のメカニズムの理解が必須である。

本研究では、ドームふじ氷床コアの試料表面を 1 cm 程度除いて測定することで、気泡氷からクラスレートハイドレート氷 (112–2001 m) を通し、世界で初めてガスロスの影響がない  $\delta O_2/N_2$  と  $\delta Ar/N_2$  データの取得に成功した。気泡氷から上部遷移帯 (気泡からクラスレートハイドレートが生成する深度帯) (112–800 m) では、日射量変動と相関の高い  $\delta O_2/N_2$  および  $\delta Ar/N_2$  データが初めて得られた。下部遷移帯 (800–1200 m) では、 $\delta O_2/N_2$  と  $\delta Ar/N_2$  が非常に激しく変動していた。これは、相変化によってガス組成が大きく分別したクラスレートハイドレートが、mm スケールで層状に分布しているためだと考えられる。遷移帯以深 (>1200 m) では、 $\delta O_2/N_2$  と  $\delta Ar/N_2$  のばらつきが徐々におさまリ、日射量変動と非常に相関の高い変動が確認できた。ガス拡散モデルから、遷移帯以深における  $\delta O_2/N_2$  と  $\delta Ar/N_2$  の平滑化を再現し、 $N_2$ 、 $O_2$  および  $Ar$  の氷結晶中の透過係数を推定することができた。 $\delta Ar/N_2$  と  $\delta O_2/N_2$  の相関を示すグラフの傾きは、気泡形成時  $\sim -0.5$ 、クラスレートハイドレート生成時  $\sim -1$ 、ガスロス  $\sim -0.2$  であることが分かった。それぞれの傾きが異なることから、各分別プロセスのメカニズムが異なることが示唆された。今後は、ドームふじコアの  $\delta O_2/N_2$  と  $\delta Ar/N_2$  データ取得をさらに古い年代に遡って進め、高精度年代決定や過去の酸素濃度の復元を目指す。



**Figure:**  $\delta O_2/N_2$  and  $\delta Ar/N_2$  data analyzed in this study, together with the previous  $O_2/N_2$  data by Kawamura et al. (2007) and local summer insolation curve scaled to depth.

1 国立極地研究所  
2 総合研究大学院大学  
3 海洋研究開発機構  
4 北海道大学  
5 東北大学  
6 スクリップス海洋研究所

National Institute of Polar Research  
The Graduate University of Advanced Studies (SOKENDAI)  
Japan Agency for Marine Science and Technology  
Hokkaido University  
Tohoku University  
Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego

## 気候変動に伴うドームふじ氷床コアファブリックの変化

## Development of crystal orientation fabric in Dome Fuji ice core during climate change

○猿谷友孝<sup>1</sup>, 藤田秀二<sup>1,2</sup>  
Tomotaka Saruya and Shuji Fujita

## 1. はじめに

氷床氷のファブリック (結晶集合組織) は氷床の流動や変形挙動をコントロールする重要な物理パラメータである。ドームふじのように一軸圧縮応力が卓越する場所では深くなるにつれ、転位クリープに伴う結晶回転により c 軸がコア軸方向に集中する (Azuma et al., 2000)。結晶組織は環境や含有物に応じて変動をすることが知られており、含有不純物濃度が高い氷期の氷は結晶粒径が小さくなる。一方で、環境とファブリックの関係性については未解明な点が多く、氷期/間氷期サイクルのような大きな気候変動においてもファブリックがどう変化するのか明らかになっていない。

現在のファブリック解析は、自動ファブリックアナライザーを用いた薄片法が主流だが、薄片の作成には多大な労力がかかるため、測定間隔は 5-10m、もしくはそれ以上である。また、薄片内に含まれる結晶粒の数は数百から千のオーダーであり、統計的有意性や代表性の疑問が残っていた。そのため環境変動に伴うファブリックの変化を検出することは困難であった。

そこで我々はファブリック解析の新たな手法として誘電テンソルの計測システム (図 1) を開発してきた (Saruya et al., 2021)。この手法では厚さ数十 mm のバルクな氷試料のファブリックを非破壊で連続測定することが可能である。コア軸に対して水平な成分と鉛直な成分の誘電率の差分をとることにより、コア軸方向への c 軸集中度を見積もることが可能である。本研究ではこの手法を用いてドームふじ氷床コアのファブリックを測定した。

## 2. 計測手法

南極ドームふじ基地にて掘削された深層コアを用いて計測を行なった。測定サンプルは厚さ約 35mm または 70mm であり、マイクロトームを用いて平行面を出した。計測は 100m から 2400m までの範囲で 5m につき 1m 行なった。全層に対して 20% のファブリックを計測したことに相当する。従来の薄片観察と比べて測定間隔がせまく、統計的有意性も高いため、ファブリックの細かな変動も検出することが可能である。

## 3. 結果

図 2 に誘電異方性の深さ方向の変化を示す。深くなるにつれて c 軸集中度を表す誘電異方性が大きくなっている。直線的な増加傾向に加えて、10-100m スケールのゆらぎを持っていることがわかる。ゆらぎは深くなるにつれて大きくなり、特に 1800、2150、2300m 付近で誘電異方性の大きな低下が見られる。これらの深さはそれぞれ termination II, MIS7, termination III に相当する。

## 4. 議論

ドームふじ氷床コアにおいては深くなるにつれて誘電異方性が増加することから、深いほど c 軸集中度が高くなっていくことがわかる。これは先行研究結果と一致しており、転位クリープ

に伴う結晶回転によるものと考えられる。また、深くなるほどゆらぎが大きくなることから、浅部で形成された層構造が変形を通して正のフィードバックで強調されていく可能性が高い。

氷期/間氷期の遷移期 (1800, 2300m) に着目すると、ターミネーションと間氷期を通して c 軸集中度が大きく低下していることがわかる。これらの変化は気候変動に伴う含有不純物や結晶組織の変化と関連していると考えられる。本発表では、氷床コア解析で得られた様々なパラメータと比較しながら、気候変動に伴うファブリックの変化を議論する。

## 参考文献

- 1) Azuma, N., Y. Wang, Y. Yoshida, H. Narita, T. Hondoh, H. Shoji and O. Watanabe, 2000: Crystallographic analysis of the Dome Fuji ice core. *Physics of Ice Core Records*, 45-61.
- 2) Saruya, T., S. Fujita and R. Inoue, 2021: Dielectric anisotropy as indicator of crystal orientation fabric in Dome Fuji ice core: method and initial results. *J. Glaciol.* in press.

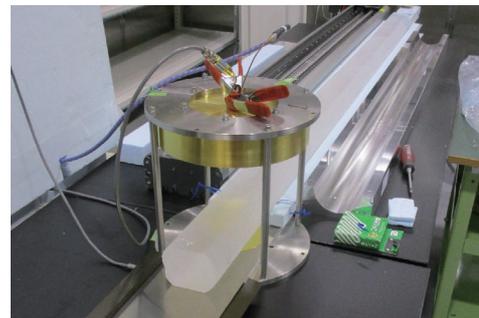


図 1 誘電テンソル計測システム

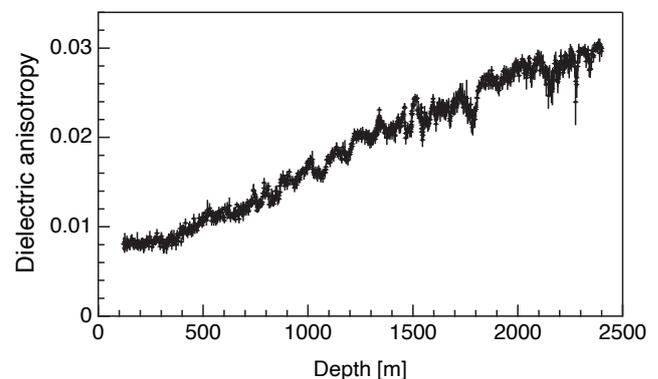


図 2 誘電異方性の深さ方向の変化

1 国立極地研究所  
2 総合研究大学院大学

National Institute of Polar Research  
The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

## 富山県上空における過酸化水素およびホルムアルデヒド濃度の測定

## Measurements of Hydrogen Peroxide and Formaldehyde Concentrations over Toyama Prefecture

○渡辺幸一<sup>1,2</sup>, 楊柳<sup>2</sup>, 姫玖玖<sup>2</sup>, 中村賢<sup>1</sup>, 大谷卓也<sup>1</sup>, 長村遥<sup>1</sup>, 増田竜之<sup>1</sup>

Koichi Watanabe, Liu Yang, Jiujiu Ji, Satoru Nakamura, Takuya Otani, Haruka Nagamura and Tatsuyuki Masuda

## 1. はじめに

大気中の過酸化水素 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) は、主にオゾン ( $\text{O}_3$ ) を介した光化学反応によって生成され、二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ ) の液相酸化を促進させるなど重要な役割を果たしている。ホルムアルデヒド ( $\text{HCHO}$ ) は、化石燃料の不完全燃焼により一次排出される他に、メタン等の酸化過程において二次生成される。また、 $\text{HCHO}$  は、 $\text{H}_2\text{O}_2$  が不足している状況下において  $\text{SO}_2$  との液相反応により、ヒドロキメタン sulfonate 酸塩を生成させる。そのため、両者の測定データの蓄積が非常に重要となるが、国内での同時測定例は非常に少なく、特に東アジア域上空での  $\text{H}_2\text{O}_2$  と  $\text{HCHO}$  の同時観測はほとんどなされていない。本研究では、寒候期の富山県上空において小型ヘリコプターを利用した  $\text{H}_2\text{O}_2$  と  $\text{HCHO}$  の測定を行い、 $\text{SO}_2$  の液相酸化能力およびエアロゾル粒子生成への影響について考察した。

## 2. 方法

(有)アドバンスドエアー社保有の R44 型 4 人乗りヘリコプターを利用して富山県射水市上空の大気観測を行った。目的高度 (4000ft および 8000ft) において 10 分間旋回水平飛行し、ミストチャンバー法により大気中の過酸化水素やアルデヒド類を採取した。試料採取終了後、直ちに富山県立大学構内へ下降し、捕集液が入ったポリ瓶を超低空で投下させ実験室へ運び、速やかに HPLC 法により分析を行った。学内へサンプルを輸送後、次の高度へ上昇し、再び試料採取を行った。また、上空大気の観測結果について、立山・室堂平における積雪層中の化学成分との比較を行った。

## 3. 結果と考察

図 1 に、寒候期の富山県射水市上空における  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{HCHO}$ 、 $\text{O}_3$  および  $\text{SO}_2$  濃度の鉛直プロファイルを示す。 $\text{H}_2\text{O}_2$  は上空で高くなる傾向がみられ、2018 年 3 月の観測時以外は高度 8000ft (約 2400m) で最も高かった。 $\text{HCHO}$  および  $\text{SO}_2$  は通常地上で高く上空で低かったが、2019 年 12 月 25 日においては上空 8000ft で最も高かった。後方流跡線解析の結果から、2019 年 12 月の観測日は、上空の方が中国からの越境汚染の影響を受けやすい状況であり、 $\text{SO}_2$  や  $\text{HCHO}$  越境輸送されていた可能性が考えられる。立山・室堂平 (標高 2450 m) の積雪層中において、 $\text{HCHO}$  の濃度ピークと硫酸イオン濃度のピークがよく一致しており<sup>1)</sup>、2019 年 12 月 25 日の観測結果は、立山高所での雪氷化学の特徴を支持しているものと考えられる。

寒候期では、 $\text{SO}_2$  よりも  $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度が低く、 $\text{SO}_2$  の硫酸への液相酸化が抑えられていると考えられる。また、 $\text{H}_2\text{O}_2$  より  $\text{HCHO}$  の方が高く、ヒドロキメタン sulfonate 酸生成の方が硫酸生成よりも卓越しやすい条件であると考えられる。

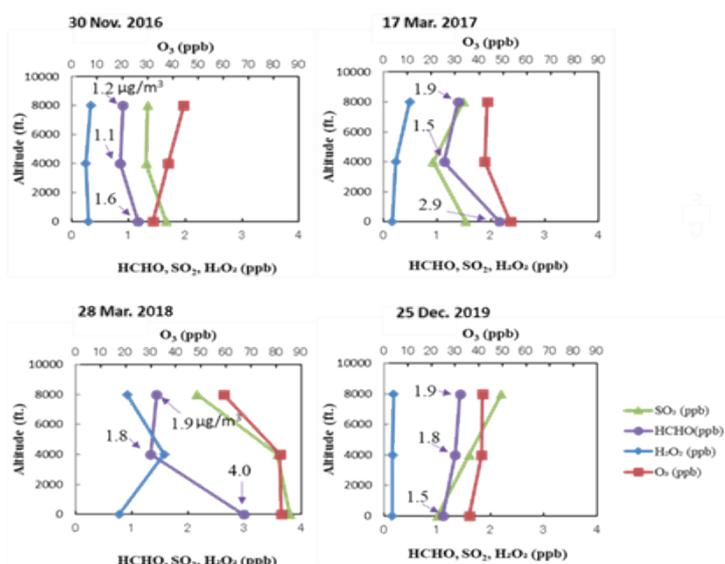


図 1 寒候期の富山県射水市上空における  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{HCHO}$ 、 $\text{O}_3$  および  $\text{SO}_2$  濃度(ppb)の鉛直プロファイル

## 参考文献

- 1) Watanabe, K., D. Nishimoto, S. Ishita, N. Eda, Y. Uehara, G. Takahashi, N. Kunori, T. Kawakami, W. Shimada, K. Aoki and K. Kawada, 2012: Formaldehyde and hydrogen peroxide concentrations in the snow cover at Murododaira, Mt. Tateyama, Japan. *Bull. Glaciol. Res.*, **30**, 33–40.

1 富山県立大学工学部

2 富山県立大学大学院工学研究科

Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University  
Graduate School of Engineering, Toyama Prefectural University

## アイスコアを用いた過去の北極大気中の氷晶核能を復元する測定装置の開発 An instrumental development of reconstructing ice-nuclei ability of past arctic aerosols by using a Greenlandic ice core.

○大塚美侑<sup>1</sup>, 飯塚芳徳<sup>2</sup>, 森章一<sup>2</sup>, 宮崎雄三<sup>2</sup>

Miu Otsuka, Yoshinori Iizuka, Shoichi Mori and Yuzo Miyazaki

### 1. はじめに

雲滴(過冷却水滴・氷晶)はエアロゾルを核として発生する。氷晶の核形成にはいくつかの経路があり、そのうちの重要な経路の一つに過冷却雲粒に浸された氷晶核能を持つエアロゾル(INPs)による不均質核生成がある。これは、INPsを含む一部の雲滴のみが均質凍結温度(約-38°C)よりも高い温度で凍結する。高い温度での雲滴形成を可能にする氷晶核は、降水や雲の寿命やその放射特性に影響を与えるため、気候や水循環に重要な役割を果たしている。とりわけ北極圏は気候変動に過敏な地域であり、近年温暖化が加速している。北極圏の雲は過冷却水滴と氷晶が混在する混相雲が存在しやすく、混相雲内のINPsの氷雲形成生成メカニズムを明らかにすることは重要である<sup>1)</sup>。しかし、北極圏上空におけるINPsの実態はいまだよくわかっていない<sup>2)</sup>。

北極グリーンランド氷床の涵養域では過去のエアロゾル保存されている。INPsの氷晶形成生成メカニズムを解明するアプローチのひとつとして、過去から現在までの北極圏上空におけるINPsを復元することが挙げられる。本研究では、グリーンランドで掘削されたアイスコアに含まれる過去のエアロゾルを用いて過去の北極大気INPsの復元するために、アイスコアの氷晶核能を測定する装置を開発した。

### 2. 氷晶核能測定装置の開発と方法

エアロゾル粒子を含まない水滴(超純水; 比抵抗約18.1~18.2MΩm)の氷晶核形成温度の理論値が約-38°C付近であるため、0°Cから-40°Cの温度範囲において、冷却速度を可変することができる冷却装置を開発している。昨年の研究大会ではオイルエマルジョン型の冷却装置を紹介したが、本発表では水滴滴下凍結法による装置開発状況を報告する。

試料水滴をワセリン塗布した金属板上に数十個滴下し、金属板を冷却することで水滴を一定速度で冷却していく。個々の水滴が凍る温度を計測することで、温度に対する水滴の凍結割合を求めることができ、凍結割合が0.5となる温度からその水滴の持つ氷晶核能を算出する。この方法の長所としては、雲粒よりも大きなミリメートルサイズの液滴を用いることで効率よく氷晶核を検出することができる点<sup>3)</sup>や、ワセリンの塗布により金属板のアーチファクトの低減や、隣接する液滴凍結の際に発生する霜の成長を阻害することができるなどの利点がある。

本実験では、金属板としてアルミニウム製プレートを選定した。プレートにワセリン(建栄製薬株式会社, 白色ワセリン)を薄く塗布し、マイクロピペット(エッペンドルフ社)で約2-5μLの液滴を滴下し、それらの水滴を冷却した。冷却速度を制御するために、温度勾配プログラムを組むことのできるデジタルプログラム調節計(株式会社チノー, KP1000)を搭載した液体窒素循環型のプレート冷却装置を作成した。液体窒素は流量を自動調整しながら、銅のチャンバーに流入され、その銅チャンバーとアルミニウムプレートを接触させることで、アルミニウムプレートを

冷却する。水滴の冷却空間内は実験中に水滴の汚染を防ぐために上部を覆った密閉式になっており、実験空間内は乾燥窒素ページも可能にすることで、よりクリーンな実験環境を構築した。実験中は随時水滴の凍結の様子を観察(図1)し、水滴の凍結温度を記録する。

### 3. 氷晶核能測定装置の試験運用

まず、超純水滴の均質凍結温度は約-38°Cであることから、アルミニウムプレートに滴下した超純水滴を-1°C/minの冷却速度で冷却させ、均質凍結温度まで水滴を液体のまま維持できるかを調べた。銅チャンバーとアルミニウムプレートでわずかに温度誤差が生じるもののおおよそ一定の速度でアルミニウムプレートを冷却できることを確認した(図2)。しかしながら、現時点では均質凍結温度よりも高い温度で超純水滴が凍結することが多く、引き続き実験環境の改良に取り組んでいく。

#### 参考文献

- 1) Morrison, H. et al., 2012: *nature geoscience*, 5, 11-17.
- 2) Hartmann, M. et al., 2019: *Geophysical Research Letters*, 46(7), 4007-4016.
- 3) Tobo, Y., 2016: *Scientific reports*, 6, 32930

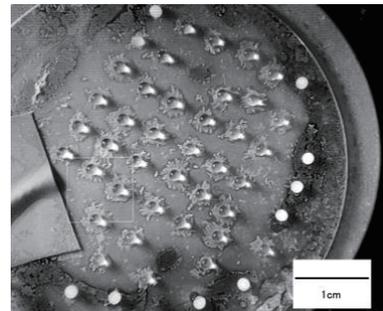


図1 凍結実験の様子(白色した水滴は凍結している)

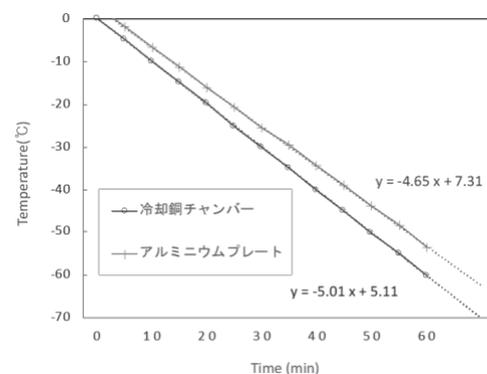


図2 冷却銅チャンバーとアルミニウムプレートの冷却速度

1 北海道大学 環境科学院  
2 北海道大学 低温科学研究所

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University  
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

グリーンランド氷床アイスコアを用いた融解再凍結層に含まれる不純物の解析  
Inclusions in ice layers of an ice core, Greenland○川上薫<sup>1,2</sup>, 飯塚芳徳<sup>2</sup>, 的場澄人<sup>2</sup>, 青木輝夫<sup>3</sup>, 杉山慎<sup>2</sup>, 安藤卓人<sup>4</sup>Kaoru Kawakami<sup>1,2</sup>, Yoshinori Iizuka<sup>2</sup>, Sumito Matoba<sup>2</sup>, Teruo Aoki<sup>3</sup>, Shin Sugiyama<sup>2</sup>, Takuto Ando<sup>4</sup>

## 1. はじめに

近年の北極域の温暖化によりグリーンランド氷床の融解は進行している。涵養域で生じる融解水は積雪内部で再凍結し上積氷として保存される。この上積氷は氷床涵養域で掘削されたアイスコアで氷板として検出され、氷板に含まれる環境プロキンは融解再凍結過程によって再配分される。これまで、再配分のメカニズムは氷板中のイオン濃度などを  $10^2$  mm スケールで議論されているにとどまり、詳細に理解されているとはいえない。そこで本研究では、近年の融解現象をよく保存しているグリーンランド北西部の涵養域で掘削されたアイスコアの氷板に着目して、水中の不純物の存在状態や化学組成を数  $\mu\text{m}$  のスケールで解析し、環境プロキシンの再配分メカニズムについて考察した。

## 2. 分析方法

2017年にグリーンランド北西部で掘削された全長約 60 m のアイスコア 1)には、融解再凍結を経て形成された厚さ 1 mm 以上の氷板が 243 層 (平均厚さ 14 mm) 含まれている。2000 年以降の温暖化に伴い氷板の数や厚さは増加し、特に 2012 年 (深度 4.330-4.480 m) と 2006 年 (深度 6.056-6.211 m) に 150 mm 以上の厚い氷板が存在する。本研究ではこれらの氷板に着目する。従来のイオン濃度・水同位体比分析に加えて、低温室 (-20°C) において氷板試料の観察面表面をマイクローム (Leica, SM2400) で研削した後、測定顕微鏡 (OLYMPUS, STM-UM) を用いて不純物の存在状態を、顕微ラマン分光器 (HORIBA, JOBINYVON T64000) を用いて不純物の化学組成を分析した。また氷板試料を -20°C 環境で昇華させ残渣として不揮発性不純物を抽出し、走査型電子顕微鏡 (JOEL, JSM-6360LV)・エネルギー分散型 X 線分析装置 (JOEL, JED2201) を用いて不揮発性不純物の形態、粒径、表面積、元素組成を分析した。

## 3. 結果と考察

2012、2006 年の氷板ともに凍結末期と考えられる酸素同位体比の極小と d-excess 値の極大を示す深度が見つかった (例えば図 1a の 4.37-4.39, 4.43-4.45 m)。凍結末期の深度では各イオン種が濃縮しており (図 1b)、この濃縮は従来言われている融解再凍結過程で生じたと考えられる。凍結末期の深度において  $\mu\text{m}$  スケールでどのようにイオンの濃縮が起きているのかを調べるため、これらの氷板における不純物の存在状態・化学形態を分析した。その結果、1)氷結晶粒内に直径数  $\mu\text{m}$  程度の  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  と  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  の固体微粒子 (図 2a)が、2)氷結晶粒界に長さ 200  $\mu\text{m}$  にもなる細長い不純物が存在し、これらの不純物からはときおり液相の  $\text{H}_2\text{SO}_4$  や  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  を検出したものの (図 2b)、ほとんどは  $\text{SO}_4^{2-}$  や  $\text{NO}_3^-$  が検出されなかった。不揮発性不純物の観察からも数  $\mu\text{m}$  の微粒子や数 10  $\mu\text{m}$  から数 mm の細長い不純物が検出され (図 2c)、凍結末期の深度に不純物が濃縮していた (図 1b)。凍結末期の不純物は他の深度と比較して Na、S、Cl、Ca の四元素がより検出される傾向がある (図 1b)。そこで、凍結末期 (4.37-

4.39 m)で検出された不純物 208 個について四種の各元素のモル分率と表面積の関係を調べた (図 1c)。数  $\mu\text{m}$  の微粒子であれば  $10^1$ - $10^2 \mu\text{m}^2$ 、数 mm の細長い不純物であれば  $10^4$ - $10^5 \mu\text{m}^2$  程度の表面積を示す。S、Ca は不純物の表面積が増加するにつれてその割合が有意に減少して 0 に近くなる (図 1c)。他方で、Na、Cl は不純物の表面積が増加するにつれて 0.5 に近づく傾向にある (図 1c, 2c)。表面積の大きい細長い不純物では、液相の  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  が検出されたことから、より共晶点温度の低い NaCl もまた液相として存在していると考えられる。結晶粒界に存在する細長い不純物は  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  を主成分とする、ブラインであることが示唆される。

水溶液の凍結末期において溶質は氷結晶粒界に濃縮しやすい<sup>2)</sup>。本研究で結晶粒界に存在した細長いブラインは凍結の最終段階で形成されたことが示唆される。他方で、結晶粒内に検出された数  $\mu\text{m}$  の固体微粒子は結晶粒界のブラインに先行して氷結晶に取り込まれたと考えられる。結晶粒内に検出された数  $\mu\text{m}$  の固体微粒子は硫酸塩を、結晶粒界に検出された細長いブラインは  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  を含むという結果は、凍結末期において先に共晶点温度の高い固体硫酸塩が析出し、その後  $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  が濃縮するという化学分別が生じていることを示唆している。

## 4. 引用文献

- 1) Matoba et al., 2018: Bull. Glaciol. Res., 36, 15-22.
- 2) Takenaka et al., 1996: J. Phys. Chem., 100, 13874-13884.

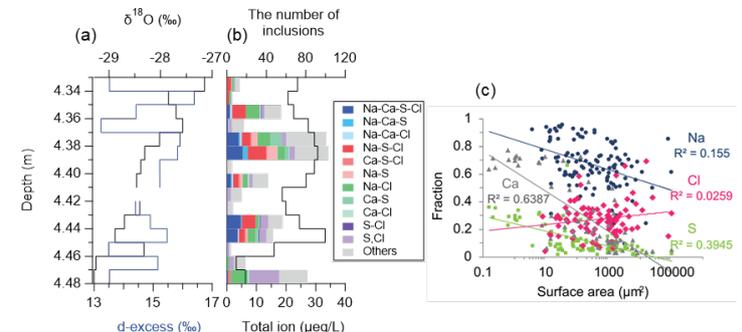


図 1 2012 年氷板における各深度の (a) 酸素同位体比と d-excess 値、(b) 不揮発性不純物の検出数、構成元素とイオン濃度総量。 (c) 凍結末期 (4.37-4.39 m) の不純物の表面積と Na、S、Cl、Ca のモル分率の関係。

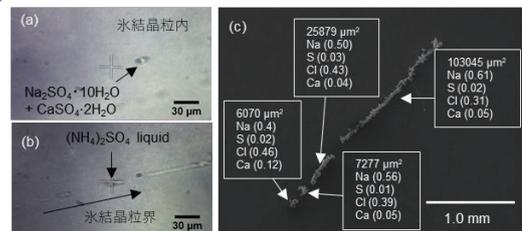


図 2(a) 氷結晶粒内に存在する  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  と  $\text{CaSO}_4$  の固体微粒子。 (b) 氷結晶粒界に存在する  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  を含む不純物。 (c) 表面積の大きい細長い不揮発性不純物。

1 北海道大学大学院環境科学院  
2 北海道大学低温科学研究所  
3 国立極地研究所  
4 島根大学エスチュアリー研究センター

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University  
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
National Institute of Polar Research  
Estuary Research Center, Shimane University

# 高時間分解能アイスコアによる近年の北大西洋植物プランクトンブルームの長期化の解明 Recent expanding of north Atlantic phytoplankton bloom evidenced by seasonal resolution ice core

○黒崎豊<sup>1,2</sup>, 的場澄人<sup>2</sup>, 飯塚芳徳<sup>2</sup>, 藤田耕史<sup>3</sup>, 島田利元<sup>4</sup>

Yutaka Kurosaki, Sumito Matoba, Yoshinori Iizuka, Koji Fujita and Rigen Shimada

## 1. はじめに

太陽光が十分に届く海洋浅層に栄養塩が豊富に存在すると、植物プランクトンの大增殖(ブルーム)が起こる<sup>1)</sup>。北大西洋は、世界的に最も植物プランクトンの春と秋のブルームが活発な地域である<sup>2)</sup>。ハプト藻などの植物プランクトンによって生成される硫化ジメチルは、大気中に放出され、酸化されると、硫酸またはメタンスルホン酸(以下、MSA)になる<sup>3)</sup>。これらのエアロゾルは、太陽光を散乱させ、雲凝結核となり雲アルベドの増加に寄与し、地球上の放射収支に影響を与える<sup>3)</sup>。そのため、過去から現在のブルームの変遷を把握し、そのメカニズムを理解することは、将来の海洋基礎生産量や、それが地球大気放射収支に与える影響を評価するために重要である。複数のグリーンランド氷床アイスコアを用いた研究は、産業革命以降から1990年代にかけて年間のMSA堆積量が減少していることを示し、北大西洋の海洋生物生産量が減少していることを示唆した<sup>4)</sup>。しかし、先行研究で得られたアイスコアは、掘削地点における涵養量が小さく、季節分解能でのMSAの挙動の解釈はされてこなかった。本研究では、グリーンランド氷床で最も涵養量が大きく季節分解能での古環境復元が可能で、グリーンランド南東部(以下、SE-Dome)で採取されたアイスコアを用いて、過去60年間の北大西洋のMSAの時系列変化の解釈を行い、北大西洋の植物プランクトンと周辺の気象場との関係を季節変動スケールで明らかにすることを目的とした。

## 2. 研究方法

2015年にSE-Domeで掘削された90.45 mのアイスコア<sup>5)</sup>を鉛直約100 mm毎に分割し、汚染除去処理を施した後清浄なポリプロピレン容器内で融解せしめ溶液試料を調製した。試料中の主要イオン濃度をイオンクロマトグラフィー(Thermo Scientific社; ICS-2100)を用いて定量した。Furukawa et al. (2017)において水の酸素同位体比組成を用いて推定されたコア年代に基づき1959年-2015年の約8日分解能<sup>6)</sup>のMSA濃度プロファイルと、各年について年間(前年12月-11月)および季節毎(冬: 前年12月-2月, 春: 3月-5月, 夏: 6月-8月, 秋: 9月-11月)にMSA堆積フラックスを求めた(以下、MSA-F)(図1)。植物プランクトンのバイオマスの目安となるクロロフィルa濃度(以下、Chl-a)は、JAXA/EORCが提供している、Terra衛星とAqua衛星に搭載されているMODISセンサーから得られたChl-aのコンポジットデータ(2000年-2015年)<sup>7)</sup>を使用した。また、気象データは、ECMWFが提供しているERA5再解析データの海上10 m風速、海面水温、海氷密接度(1979年-2015年)<sup>8)</sup>を使用した。

## 3. 結果と考察

SE-Domeアイスコア中の年間のMSA-Fは、1997年以降に増加し(2.89 ng m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>,  $p < 0.05$ ), 2007年に正のピークに達した(43.90 ng m<sup>-3</sup>)。また、1997年-2007年は、年間に対する秋のMSA-Fの割合が上がった。2009年-2014年は、冬のMSA-Fが連続して検

出された。年内のMSA検出開始月は、2002年-2013年にかけて早まり(-0.47 month yr<sup>-1</sup>,  $p < 0.05$ ), MSA検出終了月は、1995年-2005年にかけて遅くなった(0.26 month yr<sup>-1</sup>,  $p < 0.05$ )。

上述したMSA-Fの年々変化を、衛星観測による海氷密接度や植物プランクトンの春と秋のブルームから考察する。まず、1980年-2015年にかけて、SE-Dome近海の冬と春の海氷密接度は減少傾向を示した(冬: -0.41 % yr<sup>-1</sup>,  $p < 0.01$ , 春: -0.30 % yr<sup>-1</sup>,  $p < 0.05$ )。海氷密接度の減少により、太陽光が海洋表層に届く面積が拡大したため、海氷域の春のブルームが早まり、2009年以降は冬のMSA-Fの検出頻度が増えたことが考えられる。他方で、北大西洋中高緯度における秋のブルームは夏の終わりから秋にかけて海面水温が下がることで、海洋の鉛直混合が激しくなり、海洋深層の栄養塩が有光層に浮上することで起きる<sup>9)</sup>。1997年-2007年にかけて、北大西洋中高緯度海域では、秋の海面水温が増加傾向を示した(0.02 °C yr<sup>-1</sup>,  $p < 0.001$ )。そのため、秋のブルームのタイミングが9月以降に遅れたことが考えられる。また、秋のMSA-Fが高かった2001年-2007年の北大西洋中高緯度における秋のChl-aの平均値は、2001年-2015年の平均値よりも高かった(+0.09 mg m<sup>-3</sup>,  $p < 0.05$ )。そのため、秋のブルームの規模の拡大が、秋のMSA-Fを高くしたことが考えられる。以上より、1997年以降は、春と秋のブルームの早期化、遅延化、および秋のブルームの拡大化によって、大気中に放出される生物由来の硫黄濃度が大きくなっていることが示唆される。

## 参考文献

- 1) Lindeman and John, 2014: *Front. Mar. Sci.*, **1**(37), 1-6.
- 2) Boyce et al., 2010: *Nature*, **466**, 591-596.
- 3) Charlson et al., 1987: *Nature*, **326**, 655-661.
- 4) Osman et al., 2019: *Nature*, **569**, 551-555.
- 5) Iizuka et al., 2016: *Bull. Glaciol. Res.*, **34**, 1-10.
- 6) Furukawa et al., 2017: *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**.
- 7) JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies (JASMES), <http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index.html>
- 8) Hersbach et al., 2020: *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **146**, 1999-2049.

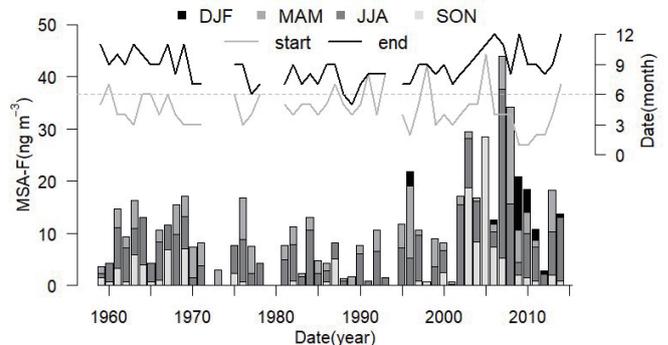


図1 SE-Domeアイスコア中の各季節のMSA-Fの積み上げ棒グラフと、各年のMSA検出開始月(灰色線)と終了月(黒線)。

1 北海道大学 大学院環境科学院  
2 北海道大学 低温科学研究所  
3 名古屋大学 大学院環境学研究所  
4 宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University.  
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.  
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University.  
Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency.

## Estimation of outcrops of soluble ions and mineral dust from ablating ice surface of a glacier based on an ice core in Tien Shan Mountains, Central Asia.

○陳 耘傑<sup>1</sup>, 竹内 望<sup>1</sup>, 李 忠勤<sup>2</sup>

Yunjie Chen, Nozomu Takeuchi and Zhongqin Li

### 1. Introduction

Albedo reduction of the glacier surface has been reported worldwide and is one of major reasons for recent mass loss of glaciers. It is mainly caused by organic or inorganic light-absorbing impurities in snow and ice. Cold-adapted microbes and their products, e.g., cryoconite, are typical organic impurities on glaciers. Their abundance is strongly dependent on the physical and chemical conditions of supraglacial environment, such as abundance of nutrients and mineral dust on the glacier surface. Nutrients and mineral dust on the glacier surface are usually supplied from atmosphere as aerosols, but they can also be supplied from the glacial ice. They have been preserved in glacial ice in the accumulation area of glaciers, can move down to the lower part of the glacier over decades or hundreds of years, and finally release onto the glacier surface when ice melts. Since ice melting continuously occurs during microbial growth, the glacial ice also seems to be a significant source of nutrients and mineral dust on the supraglacial environment. In this study, owing to the lack of data for chemical and mineral substances in the glacial ice, we aim to estimate annual fluxes of outcropping solutes and dust from ablation ice by using the ice core samples obtained from the ablation area of an Asian alpine glacier in central Asia, and compared them with those from the atmosphere to evaluate the impact of the outcropping substances on the supraglacial environment.

### 2. Methods

The ice samples analyzed in this study were collected on Urumqi glacier No.1 is located in the Tien Shan Mountains in western China. The ice surface of the ablation area is densely covered with the microbial and abiotic impurities on surface. An ice core (55.7 m) drilled in the ablation area in 2009 is used in this study to quantify the outcropping substances from the glacial ice. We also use the abundance of the materials in another ice core drilled in the accumulation area of this glacier in 2006 (total length: 7.76 m) to quantify their supply from the atmosphere. Concentrations of major ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) and mineral dust were measured with an ion chromatography system and microscopic observations, respectively. The annual fluxes were estimated based on the mean concentrations and ice melt rates on the basis of the stake records (Zhou and Li, 2011, 2011, 2015, and 2016) at the drilling site.

### 3. Results and discussion

The analysis of soluble chemical ions and mineral dust in the ice core showed that their concentrations varied with depth. Mean ion concentrations in the ice core are  $79.8 \mu\text{Eq L}^{-1}$  for  $\text{Ca}^{2+}$ , 1.3 for  $\text{NO}_3^-$ , 4.8 for  $\text{NH}_4^+$ , 7.3 for  $\text{Cl}^-$ , and 2.5 for  $\text{SO}_4^{2-}$ , respectively. The mean dust concentration was  $2.5 \times 10^5$  number  $\text{ml}^{-1}$ . The presence of chemical solutes and mineral dust in all samples analyzed indicates that melting of the glacial ice could potentially affects the supraglacial conditions. The annual fluxes of major ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) from the glacial ice were estimated to be 11.9, 0.2, 0.8, 1.1,  $0.4 \times 10^4 \mu\text{Eq m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ , respectively. In contrast, the annual fluxes from the atmosphere, calculated from the records of an ice core in the accumulation area, are 3.1, 0.2, 0.5, 0.6,  $0.4 \times 10^4 \mu\text{Eq m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ , respectively. The obtained annual ion fluxes of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  were comparable between atmosphere and glacial ice, but those of other ions were generally higher for the glacial ice than that for atmosphere. Mean mass flux of mineral dust (size > 5  $\mu\text{m}$  in diameter) from the glacial ice was  $4318 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ year}^{-1}$ , which was greater than that from the atmosphere ( $1664 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ). Our results showed that glacial ice supplies chemical solutes and mineral dust to the supraglacial environment and the acceleration of melting rate of glacial ice would change the chemical conditions on the glacier surface and affect the growth of photoautotrophs on the ablating ice surface.

### Reference

1) Z. Li, P. Zhou; 2011, 2011, 2015, 2016; Annual Report, Tianshan Glaciological Station Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institution, Chinese Academy of Sciences; **19:11, 20:11, 22:22, 23:69.**

1 千葉大学大学院融合理工学府

Graduate School of Science, Chiba University

2 Laboratory of Cryosphere and Environment/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, China

## グリーンランド北西部カナック氷帽における 2012–2020 年の表面質量収支変動 Surface Mass Balance of Qaanaaq Ice Cap, Northwestern Greenland, from 2012 to 2020

○渡邊果歩<sup>1,2</sup>, 近藤研<sup>1,2</sup>, 杉山慎<sup>1</sup>

Kaho Watanabe, Ken Kondo, Shin Sugiyama

### 1. はじめに

近年の気候変動とともに、グリーンランド氷床および周辺の氷河氷帽で表面融解量が増加している。北西部でも融解が顕著であるが、グリーンランド北部はアクセスの悪さから現地観測の研究例が乏しく、氷河氷帽の質量変動データの報告は少ない。そこで我々は、グリーンランド北西部のカナック氷帽において、2012年から2020年まで継続的に表面質量収支の観測を行ってきた。本研究では、観測で得られたデータから定量化したカナック氷帽全体の質量変動を報告するとともに、気象データを用いて質量変動の要因を考察する。

### 2. 観測地と手法

カナック氷帽は、グリーンランド北西部カナック村 (77°28'N, 69°13'W) の北側に位置する。表面積は 268 km<sup>2</sup>、分布標高は 27–1128 m である。氷帽より南西に溢流するカナック氷河において、2012年から6地点 (243–968 m a.s.l.) で表面質量収支の測定を行っている<sup>1)</sup>。本研究では、埋設したポールを使って毎年7–8月に測定した年間融解量または積雪水当量から、2012/13–19/20年の年間質量収支を求めた。本稿では8月から翌年7月を質量収支年とし、たとえば2012年8月–2013年7月を2012/13年と表記する。

人工衛星画像 (Landsat 8) を用いて氷帽の周縁を GIS ソフトウェア (QGIS) 上で描画し、その領域内で数値標高モデル (ArcticDEM, 解像度 32 m) を解析して氷帽面積の標高分布を得た。表面質量収支を標高の関数と仮定し、得られた面積標高分布を用いて、氷帽全体の表面質量収支を求めた。このとき、観測データの無い高標高域 (968 m 以上) と低標高域 (243 m 以下) には、直近の観測値または質量収支勾配の外挿値を極端値として与え、両者の差異を誤差幅とした。また、カナック氷帽上の SIGMA-B (944 m a.s.l.) において測定された気温の1時間値を用いて各年の夏期 (6–8月) 平均気温を計算した<sup>2)</sup>。

### 3. 結果と考察

各年の質量収支は概ね良く似た標高依存性を示し、各標高での値は約 2 m w.e. a<sup>-1</sup> の幅で比較的大きな年々変動を示した (図 1)。全期間における平均値は、標高 968 m で 0.23 m w.e. a<sup>-1</sup>、243 m で -1.75 m w.e. a<sup>-1</sup> であった。また、2012/13年から2019/20年にかけて、氷帽全域で -4.04 ± 0.16 m w.e. の質量変化が生じた (図 2)。特に 2014/15年と 2019/20年に大きな質量損失が観測され、表面質量収支は -1.08 ± 0.04 m w.e. a<sup>-1</sup> と -1.77 ± 0.02 m w.e. a<sup>-1</sup> であった。これらの年は、夏の平均気温が全期間の平均 (0.5 °C) より顕著に高く (2015年: 1.6 °C と 2019年: 2.0 °C)、夏期の融解がその原因のひとつと考えられる。2017/18年は唯一、正の表面質量収支 (0.24 ± 0.01 m w.e. a<sup>-1</sup>) が観測された。2018年の夏の平均気温は -1.0 °C と全期間の平均より顕著に低く、ここでも夏の融解量が質量収支に大きな役割を果たしたことを示唆している。

### 4. 今後の予定

今後は気象データを詳細に解析し、降雪量も含めた質量収支変動の要因を解析する。さらに、カナック氷河において開発された融解モデルを用いて<sup>3)</sup>、質量収支変動メカニズムの正確な理解を目指す。

### 参考文献

- 1) Tsutaki et al., 2017 : Surface mass balance, ice velocity and near-surface ice temperature on Qaanaaq Ice Cap, northwestern Greenland, from 2012 to 2016. *Annals of Glaciology*, **58**, 181–192.
- 2) Aoki et al., 2014 : Field activities of the “Snow Impurity and Glacial Microbe effects on abrupt warming in the Arctic” (SIGMA) Project in Greenland in 2011–2013. *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 3–20.
- 3) Kondo et al., 2021 : Flood events caused by discharge from Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland. *Journal of Glaciology*, **67**, 500–510.

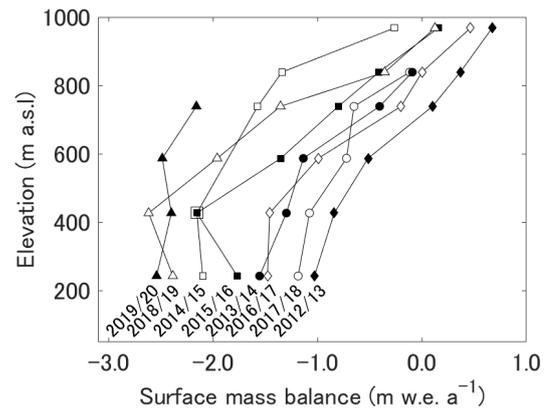


図 1 2012/13–2019/20年におけるカナック氷河の表面質量収支

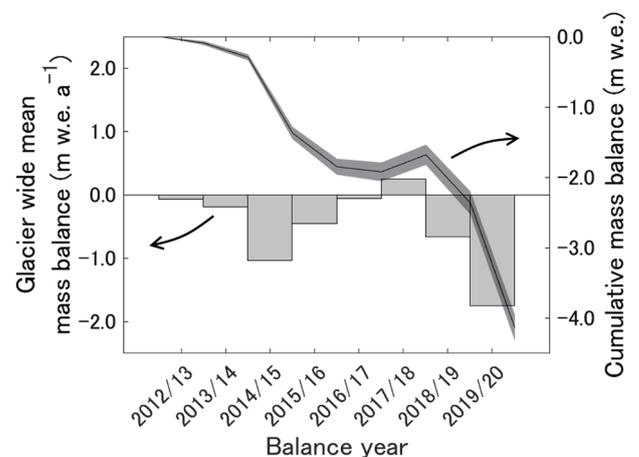


図 2 2012/13–2019/20年における、カナック氷帽の全域平均表面質量収支 (棒, 左軸) とその積算値 (実線, 右軸, シェードは誤差幅を示す)。

1 北海道大学低温科学研究所

2 北海道大学環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

©2021 (公社) 日本雪氷学会

# グリーンランド北西部 Heilprin 氷河における氷河上湖および流動速度の季節変動 Seasonal Evolution of Supraglacial Lakes and Ice Speed Variations in Heilprin Glacier, Northwestern Greenland

○ Wang Yefan<sup>1,2</sup>, 杉山慎<sup>1</sup>  
Yefan Wang and Shin Sugiyama

## 1. Background

Meltwater on the surface of the Greenland ice sheet drains into the ice base through crevasses and moulins, or via rapid supraglacial lake drainages, causing ice flow acceleration due to elevated basal water pressure<sup>1)</sup>. Such a speed-up is usually observed at the beginning of the melt season, while ice speed decreases subsequently over the summer despite sustained meltwater input. The deceleration in late summer is generally explained by increasing efficiency of the subglacial drainage system. This general seasonal velocity pattern has been observed in tidewater glaciers in Greenland<sup>1-4)</sup>, but little is known about detailed response of glacier dynamics to meltwater supply. Here, we use high-resolution satellite-derived ice velocity, optical satellite imagery and regional climate model output to examine the relationships between lake drainage and ice velocity, at Heilprin Glacier in northwest Greenland during the melting season in 2020.

## 2. Data and Method

By applying offset tracking algorithm in SNAP (Sentinel Application Platform), we produced ice velocity fields in 6/12-day intervals using Sentinel-1 radar imagery during the period from May to the end of September 2020. Ice velocity was averaged within two regions of interest (ROI) with area of  $2 \times 2 \text{ km}^2$  (Fig. 1). Lake areas were obtained by applying supervised classification on Sentinel-2 imagery using Google Earth Engine. Lake areas were computed for three elevation bands based on ArcticDEM. We defined a rapid lake drainage event as a loss of  $> 70\%$  maximum seasonal area within two days. Daily meltwater time series were extracted from RACMO2.3p2 modeled surface melting rates<sup>5)</sup> within Heilprin Glacier basin and were computed for three elevation bands. We used precipitation and temperature data from a station at Thule Airbase, situated 130 km southwest of Heilprin Glacier.

## 3. Results and Discussions

Seasonal ice velocity within ROI-1 and ROI-2 (Fig. 1) showed a similar variation. Two obvious accelerations were observed in June and August (Fig. 2a). Peak speeds were 20–30% greater than those prior to the acceleration. The ice flow then decelerated rapidly, falling to about 25% below pre-acceleration speeds (Fig. 2a). The first acceleration started when lake drainage events were observed in mid-June. Small ( $< 0.1 \text{ km}^2$ ) rapid drainage events under 800 m a.s.l. (Fig. 2c) combined with continuous glacier speed-up were subsequently observed (Fig. 2a). During this period, melt rate was high and lake area increased (Fig. 2a-b). Several large drainage events happened in the end of June and start of July after the peak of the ice speed. We assume the small drainage events in mid-June injected a large amount of meltwater into the bed, increasing subglacial water pressure and reducing basal drag of the glacier. The acceleration stretched the ice and opened crevasses,

resulting in several large drainage events ( $> 0.1 \text{ km}^2$ ) above 400 m a.s.l. The second obvious acceleration corresponded with a melt event in 2–20 August. Continuous precipitation in the second half of August might also have enhanced the acceleration.

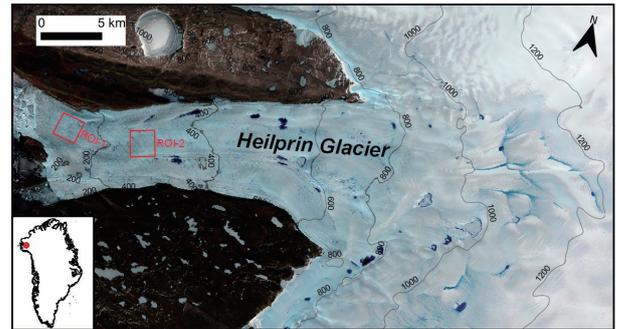


Figure 1. Satellite image of Heilprin Glacier (Landsat-8 image acquired on 27 June 2020). Red boxes outline the regions of interest used for ice velocity extraction. Contour lines show surface elevation

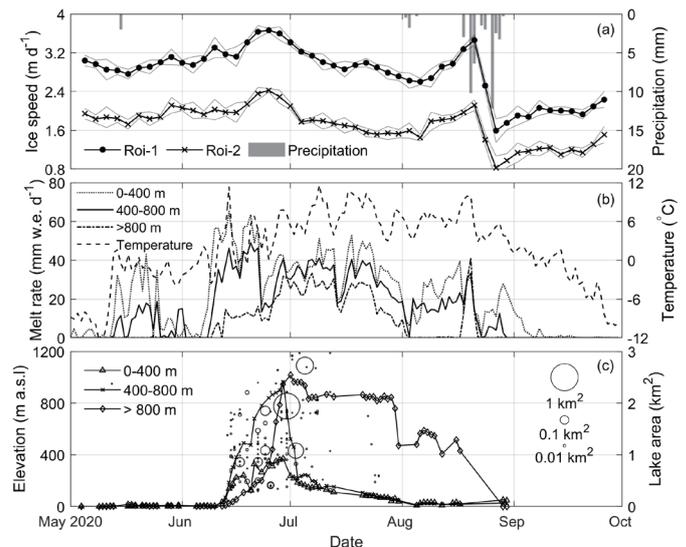


Figure 2. (a) Ice velocity and precipitation, (b) time series of temperature and modelled surface melt at different elevation band, (c) drainage events with lake area given by the marker size and lake areas at different elevation bands

## References

- 1) Bartholomew et al., *Nature Geoscience* 3.6 (2010): 408-411.
- 2) Davison et al., *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 125.9 (2020): e2019JF005492.
- 3) Moon et al., *Geophysical research letters* 41.20 (2014): 7209-7216.
- 4) Sakakibara and Sugiyama, *Journal of Glaciology* 66.255 (2020): 25-34.
- 5) Noël et al., *Science Advances* 5.9 (2019): eaaw0123.

1 北海道大学低温科学研究所  
2 北海道大学大学院環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

## 飛騨山脈の氷河の冬期収支における雪崩の影響 Avalanche contribution to the mass balance of glaciers in the northern Japanese Alps

○有江賢志朗<sup>1</sup>, 奈良間千之<sup>2</sup>

Kenshiro Arie and Chiyouki Narama

### 1. はじめに

福井・飯田 (2012) などは、飛騨山脈北部の多年性雪渓において氷厚と流動の測定を実施し、七つの多年性雪渓が現存氷河であることを確認した。Arie et al. (2021) は、これら確認された飛騨山脈の氷河の 2015-2019 年の 4 年間の年間質量収支、冬期収支、夏期収支を算出した。この結果、雪崩の影響のため、飛騨山脈の氷河の年間質量収支勾配は典型的な氷河と異なり、正の勾配を持たないことが示された (図 1)。Hughes (2009) は、氷河の総面積に対する総雪崩放出面積 (氷河の集水域で傾斜が 30° 以上) の比率 (雪崩率) が高い場合、氷河に対する雪崩の寄与が大きいことを示した。そこで本研究では、各氷河の谷地形の集水域面積を航空レーザー測量の DSM から求め、飛騨山脈の氷河の冬期収支に与える雪崩の影響を考察した。

### 2. 研究手法

国土交通省の航空レーザー測量 DSM と ArcGISPro のツールを使用して各氷河の総雪崩放出面積を算出し、雪崩率を求めた。さらに、各氷河を最上流部、上流部、中流部、下流部、最下流部に分割し、各領域の集水域面積を算出した (図 2)。

### 3. 結果

氷河の雪崩率は各氷河の冬期収支の大きさには正の相関関係が確認された (表 1)。また、各氷河の領域別の集水域面積の比 (最上流 : 上流 : 中流 : 下流 : 再下流) をみると、御前沢で 1.6 : 1.0 : 1.2 : 1.7 : 1.5, 三ノ窓で 1.0 : 1.2 : 1.3 : 1.4 : 1.1, 小窓で 1.2 : 1.0 : 1.0 : 1.3 : 1.1, カクネ里で 11.9 : 3.8 : 2.3 : 1.6 : 1.0 であった。御前沢、三ノ窓、小窓は全域で同程度の集水域面積を持つのにに対し、カクネ里氷河では最上流部で集水域面積が大きかった。

### 4. 考察

飛騨山脈の氷河の雪崩率と冬期収支の大きさには正の相関関係があったため、雪崩率は谷底の雪崩の寄与の大きさを示すことが考えられる。

また、冬期収支の大きさが全高度帯で一様であるカクネ里氷河では、総雪崩放出面積が氷河上流部に集中していた。このことから、氷河上で雪崩が発生し、氷河上流部から下流部へ積雪が供給されていることが考えられる。全高度帯の総雪崩放出面積が同程度である御前沢氷河、三ノ窓氷河、小窓氷河では、氷河上の雪崩により下流部で冬期収支が大きくなっており、総雪崩放出面積の分布が高度別の収支に大きく影響している可能性がある。

### 参考文献

- 1) 福井幸太郎, 飯田肇, 2012: 飛騨山脈, 立山, 剣山域の 3 つの多年性雪渓の氷厚と流動—日本に現存する氷河の可能性について—。雪氷, 74, 213-222.
- 2) Arie, K., Narama, C., Yamamoto, R., Fukui, K., and Iida, H., 2021: Characteristics of mountain glaciers in the northern Japanese Alps, The Cryosphere Discuss. [preprint].
- 3) Hughes, P. D., 2008: Twenty-first Century Glaciers and Climate in the Prokletije Mountains, Albania, Arct. Antarct. Alp. Res., 41(4),

440 455–459.

表 1 各氷河の雪崩率および 2015–2019 の平均冬期収支

	御前沢	三ノ窓	小窓	カクネ里
雪崩率	3.8	8.3	7.2	8.8
平均冬期収支	7.4	9.9	8.9	10.39

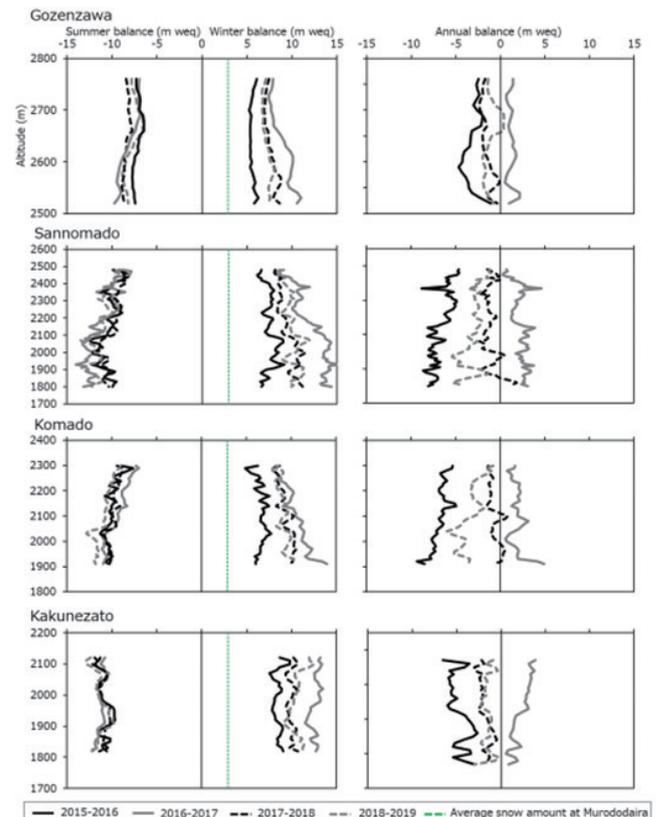


図 1 各氷河の質量収支のプロファイル (Arie et al., 2021)

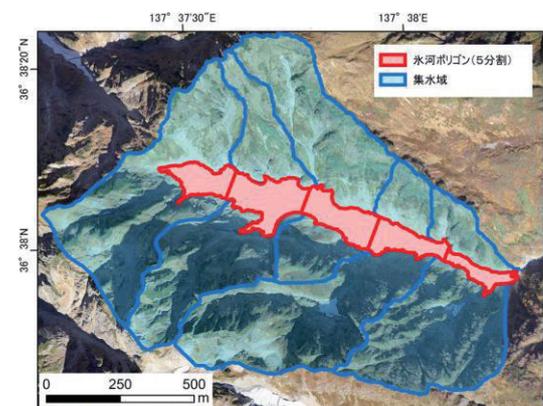


図 2 小窓氷河の 5 分割した氷河と集水域

1 新潟大学大学院自然科学研究科

2 新潟大学理学部フィールド科学人材育成プログラム

Graduate School of Science and Technology, Niigata University

Program of Field Research in the Environmental Sciences, Niigata University

©2021 (公社) 日本雪氷学会

## 南パタゴニア氷原 Occidental 氷河における 2005–2021 年の末端変動 Frontal retreat of Glaciar Occidental, Southern Patagonia Icefield, from 2005 to 2021

○上脇諒一<sup>1,2</sup>, 波多俊太郎<sup>1,2</sup>, 杉山慎<sup>1</sup>  
Ryoichi Kamiwaki, Shuntaro Hata, Shin Sugiyama

### 1. はじめに

南パタゴニア氷原では、1980年代以降カービング氷河の急速な後退により、質量損失が増加している<sup>1)</sup>。カービング氷河は、気候変動に加えて、氷河の流動、カービング、基盤地形、水中モレーンなど様々な要素に影響を受けて変動する。したがって、末端変動の原因説明には、これらの要素を調査する必要がある。

そこで本研究では、2000年代に急速な後退を示した Occidental 氷河に着目して、末端位置と流動速度の定量化を行った。Occidental 氷河の末端後退は報告されているが、その詳細とメカニズムは未解明である。1976–2021年の人工衛星データの解析によって、パタゴニア氷原におけるカービング氷河の急速な末端変動のメカニズムの解明を目指す。

### 2. 研究対象地と手法

研究対象地である Occidental 氷河は南パタゴニア氷原の北西部 (48.8°S, 73.8°W) に位置し、面積 218.63 km<sup>2</sup>、長さ 43.78 km、末端の幅 2.06 km である。平均標高は 670 m であり、周囲の氷河と比較すると標高は低い<sup>2)</sup>。また、氷河末端部は湖に流れ込んでいる。

アメリカ地質調査所が配布する Landsat 1 MSS, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI と、欧州宇宙機関が配布する Sentinel-2 の可視画像を用いて、1976–2021年の Occidental 氷河末端位置を解析した。空間解像度はそれぞれ、80, 30, 30, 15, 10 m である。末端位置は衛星画像を GIS ソフトウェア QGIS 上で目視により決定した。また、NASA の ITS\_LIVE プロジェクトによる年間流動速度プロダクトを用いて、A で示した矩形内で流動速度を求めた<sup>3)</sup> (図 1)。

### 3. 結果と考察

1976年に対岸から約 500 m の位置にあった氷河末端は、そのあとの期間に後退を続け、2021年には氷河前縁湖が約 6 km に拡大した (図 1)。また、2005年から 2021年にかけて約 4 km の急速な後退が確認できた (図 2)。年平均流動速度は、全体としては加速傾向にある。氷河末端の平均後退速度は 1986–2005 年には 244.8 m a<sup>-1</sup> だったが、2005–2021 年には 256.5 m a<sup>-1</sup> まで加速した。また、後退速度は 2000 年に 237 m a<sup>-1</sup> であったが、2018 年には 259 m a<sup>-1</sup> まで 9.3 % 加速した。

これらの結果より、2000年から 2021年までの間に末端位置が後退すると共に、流動速度が約 22 m a<sup>-1</sup> 増加したことが判明した。それゆえ、両者のどちらかの反応が進めば、もう一方の反応も傾向に従い促進される可能性がある。

### 4. 今後の展望

流動速度をこれまでよりも高い時間・空間分解能で測定し、加速と後退のメカニズムを明らかにする計画である。また、新たに表面標高の変化を測定し、氷厚変動を調査する。そして、カービング氷河末端で発生する末端変動、流動速度、氷厚変動のタイピングや大きさを解析し、因果関係を解明する予定である。

### 参考文献

- 1) Sakakibara and Sugiyama (2014) : JGR Earth Surface, Volume 119, 11, 2541-2554.
- 2) Hernan de Angelis (2014) : Journal of Glaciology, Vol. 60, No. 219.
- 3) Gardner, A. S et al., (2019) [update to time of data download]: ITS\_LIVE Regional Glacier and Ice Sheet Surface Velocities. Data archived at National Snow and Ice Data Center; doi:10.5067/6II6VW8LLWJ7.

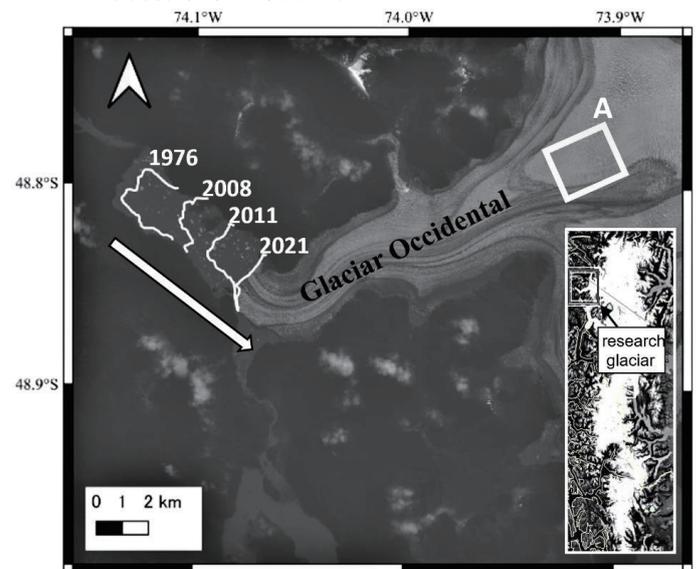


図 1 1976–2021 年の Occidental 氷河における末端位置変動。右下は研究対象地を示している (氷河の画像は 2021 年 4 月 20 日 Sentinel-2 によって撮影された可視画像、パタゴニア氷原の画像は Google Earth による)。A の矩形は流動速度を求めた位置を示している。

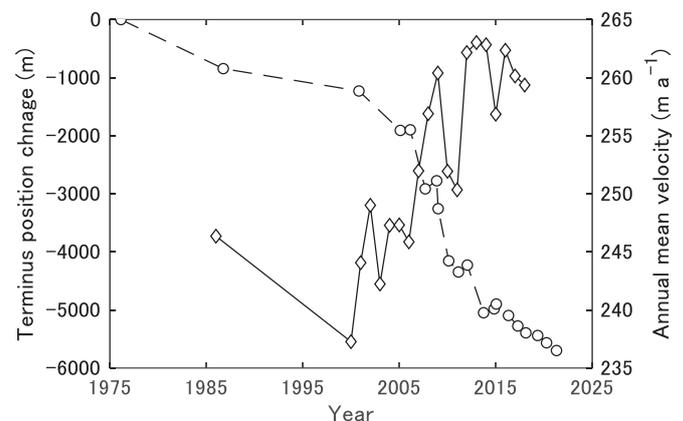


図 2 Occidental 氷河の 1976 年に対する末端位置と、流動速度の変化 (点線が左縦軸、実線が右縦軸を表す。)

1 北海道大学低温科学研究所  
2 北海道大学環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

## パタゴニア氷原 Greve 湖で 2020 年 4 月に発生した突発的な排水イベント A Rapid Drainage event at Lago Greve, Patagonia Icefield, in April 2020

○波多俊太郎<sup>1,2</sup>, 杉山慎<sup>1</sup>, 日置幸介<sup>3</sup>  
Shuntaro Hata<sup>1,2</sup>, Shin Sugiyama<sup>2</sup> and Kosuke Heki<sup>3</sup>

### 1. はじめに

近年の世界各地で進む氷河後退の結果、氷河湖が増加・拡大傾向にある<sup>1)</sup>。氷河湖は氷河の変動に大きな影響を与えると共に、その決壊洪水は山岳地域の社会を脅かす重大なリスクである。したがって、氷河湖とその変動に関する理解が求められている。

数多くの氷河が湖に流入する南米パタゴニアでは、氷河と湖の相互作用がパタゴニア氷原の変動に主要な役割を果たしている。Greve 湖 (74°W, 49°S) は南パタゴニア氷原西部に位置し、氷原の 8 つの溢流水河が流入するパタゴニアでも主要な氷河湖のひとつである (図 1)。筆者らは人工衛星画像による観察から、2020 年 4-7 月にこの湖で大規模な排水が起きたことを見出した。このイベントによって湖岸線が大きく変化し、氷河への影響も予想される。そこで本研究では、人工衛星データを用いて、湖水量の変化、重力変化、排水の原因について解析を行なった。

### 2. 手法

#### 2. 1. 面積変化

欧州宇宙機関および米国地質調査所がそれぞれ配布する Sentinel-2 (空間分解能 10 m)、Landsat 8 (空間分解能 30 m) の光学衛星画像を基に GIS ソフトウェア (QGIS) 上で湖岸を描画し、氷河湖面積を測定した。面積測定の不確か率は、Sentinel-2、Landsat 8 を用いた場合でそれぞれ 1.4、2.2 km<sup>2</sup> と推定された。

#### 2. 2. 水位変化

氷河湖の水位変化は、2 つの手法を用いて定量化した。まず、衛星レーザー高度計 ICESat-2 によって計測された陸水表面高度プロダクト (ATL13) を用いた。また、排水イベント前後の湖岸標高を数値標高モデルから読み取った。数値標高モデルは 2000 年のスペースシャトル観測による SRTM-DEM (空間分解能 30 m)、2020 年 7 月 21 日の World View-2 衛星画像を用いて本研究で作成した WV-DEM (空間分解能 5 m) をそれぞれ用いた。

#### 2. 3. 重力変化

テキサス大学宇宙研究センターが配布する衛星重力測定ミッション (GRACE/GRACE-FO) のマスコン解 (mass concentration solution) を用いて、湖周辺の重力変化を測定した。湖の面積・水位変化から得られた排水イベント期間における重力変化を解析した。

### 3. 結果と考察

2016 年 10 月から 2020 年 4 月にかけて、湖の面積は主に流入する氷河の後退に影響を受けて  $3.1 \pm 2.6$  km<sup>2</sup> 増加した。その後 2020 年 4 月 8 日から 7 月 29 日には、 $-14.5 \pm 2.6$  km<sup>2</sup> の大きな面積減少が起き、この間に湖の水位は  $18.9 \pm 3.9$  m 低下した (以下ではこの変化を「排水イベント」と呼ぶ)。その後の期間は、面積、水位ともにほぼ一定の値を保った。

氷河湖の水位変化と面積を用いて、2020 年の排水イベントにおける湖水変化量は  $3.7 \pm 0.6$  Gt と推定された。この水量は、

2000-2016 年における南パタゴニア氷原の年間平均質量損失量の約 30% に相当し、海水準に換算すれば 0.01 mm に相当する。

衛星重力測定から、排水イベントを含む 2020 年 3-8 月に湖を中心とした地域で負の重力変化が観測された。2002-2019 年の同季節にはこの変化は観測されず、2020 年の排水イベントによる重力変化を捉えたものと考えられる。しかしながら、この変化は、実際の水量変化によって生じる水量変化よりも 2-10 倍程度大きい値を示した。この結果は、GRACE による局所的な質量変化の推定が難しいことを示唆している。

イベント前後の数値標高モデルの比較から、湖水が排水される湖北部の峡谷地形が ~30 m 低下し、排水経路が変化したことが明らかとなった。また、排水イベント前の衛星画像では、不安定な形状の凸地形が排水経路を遮っていた。最終氷期における周辺の氷河末端位置を考慮すると<sup>2)</sup>、氷河性堆積物または湖底堆積物が何らかの原因によって崩壊したことで水路が変わり、その結果生じた侵食によって出水口の標高が低下し、湖の排水が起きたと考えられる。

### 謝辞

湖の排水箇所 の地形に関して、奈良間千之教授から助言を受けた。本研究は JSPS 科研費 JP20H00186 の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- 1) Shugar et al. (2020): *Nat. Clim. Chang.*, **10**(10), 1-7
- 2) Meier et al. (2018) *Front. Earth Sci.*, **6**, 62

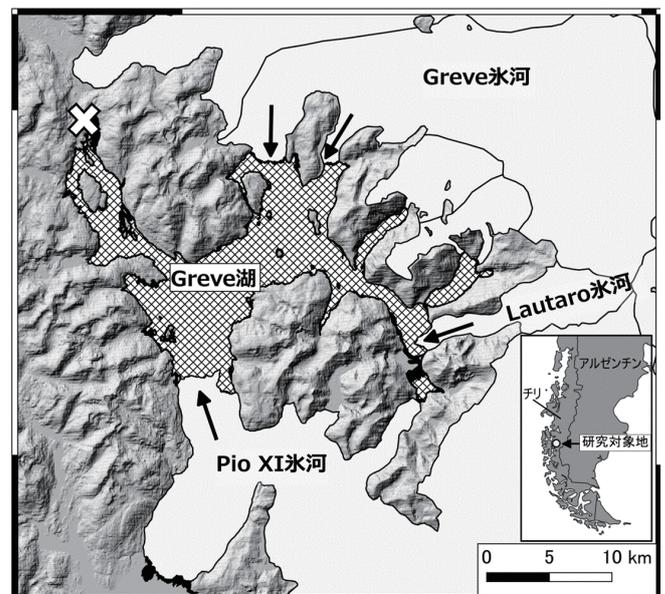


図 1. 研究対象地である Greve 湖。×で 2020 年に崩壊した排水経路の場所を示す。

1 北海道大学低温科学研究所  
2 北海道大学大学院環境科学部  
3 北海道大学理学研究院

Institute of Low Temperature of Science, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University  
Department of Earth and Planetary Sciences, Hokkaido University

## パタゴニア・グレイ氷河前縁湖における水温と流速の季節変動 Seasonal Temperature and Current Variations in the Proglacial Lake of Glaciar Grey, Southern Patagonia Ice Field

○杉山慎<sup>1,2,3\*</sup>, 箕輪昌紘<sup>1</sup>, 深町康<sup>2</sup>, 波多俊太郎<sup>1,3</sup>,  
山本淳博<sup>1,3</sup>, サウター・トビアス<sup>4</sup>, シュナイダー・クリストフ<sup>5</sup>, シェーファー・マリウス<sup>6</sup>  
Shin Sugiyama, Masahiro Minowa, Yasushi Fukamachi, Shuntaro Hata, Yoshihiro Yamamoto,  
Tobias Sauter, Christoph Schneider, Marius Schaefer

### 1. はじめに

近年の研究により、カービング氷河と海洋の相互作用の重要性が認識されるようになった。氷河の水中融解が海洋循環に強い影響を受け、融解水の流出は海洋環境に主要な役割を果たすことが明らかになっている。一方で、淡水性のカービング氷河は研究例が少なく、氷河と湖の相互作用はその理解が遅れている。

そこで我々は、多数の氷河が湖に流入するパタゴニア地域で、氷河と湖の観測を行ってきた。これまでの研究から、氷河から流出する懸濁した冷たい融解水が湖の深部に滞留し<sup>1)</sup>、氷の水中融解と末端形状に強い影響を与えることが明らかになっている<sup>2)</sup>。本研究では、水中融解をコントロールする湖水温の季節変化に着目して、グレイ氷河前の湖にて通年の測定を行った。

### 2. 研究対象地・手法

グレイ氷河は、チリ・パタゴニアの南部 (51.0°S, 73.2°W) に位置し、その末端は三か所でグレイ湖 (長さ 16 km, 面積 38 km<sup>2</sup>) に流入する (図 1)。湖の観測は、中央の氷河末端から 1.4 km の地点で行った。水深は観測地点付近で最も深く (410 m)、氷河から 4 km の地点では 150 m まで浅くなる (図 1)。

測定は、3 台の水温センサ (Seabird 社 SBE56) と 2 台の水温・流速センサ (JFE Advantech 社 INFINITY-EM) で行った。これらの測定センサを、浮き、錘、切り離し装置と共にロープで繋ぎ、2017 年 3 月 7 日から 2018 年 11 月 8 日まで約 20 カ月係留した。その結果、深さ 57.5, 139, 224, 309, 391.5 m における水温、57.5, 391.3 m における流速を、1 時間の間隔で得た。氷河末端部の露岩には自動気象測器を設置し (図 1)、気温、風速、風向、降水量の 1 時間値を湖のデータと比較した。

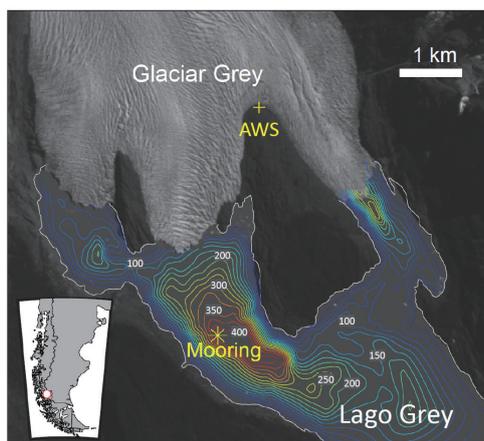


図 1 グレイ氷河の Landsat 人工衛星画像 (2016 年 2 月)。  
水深を示す等値線の間隔は 25 m。挿入図○印は氷河の位置。

### 3. 結果と考察

水温は表層付近と中層以深で大きく異なる季節変動を示した。深度 58 m では、気温から数週間～数か月遅れた季節変動を示し、9 月と 2 月にそれぞれ最低 (2.8°C) と最高値 (5°C) を記録した (図 2)。139 m では、氷河の融解が激しい 12 月から 1 月にかけて、約 1.5°C の水温低下が測定された。より深い 224–391.5 m においても、気温が上昇する春から夏に顕著な水温低下がみられた (図 2)。流速は夏に増大する傾向を示したが、短期的な変動のタイミングは表層と湖底付近で異なる。58 m 深では風速の強い時期に流れが強くなる一方で、391.5 m 深での流速は気温とより強い相関を示した。

139 m 以深で得られた夏期の水温低下は、氷河から湖に流入する融解水の影響を強く示唆する。冬期に全層一様に低温となった湖が、夏期にその表層が大気に暖められる一方で、中層より深い部分にはより冷たい融解水が混入する。懸濁した密度の高い融解水が湖の深みに流入するため、湖底付近の流速と融解の指標である気温との間に相関が得られたと考えられる。

本観測によって、氷河前縁湖の水温構造について、その詳細な季節変動が初めて明らかになった。淡水性カービング氷河の末端消耗と氷河湖環境を理解する上で、重要な新しい知見である。

### 謝辞

本研究は科研費 (16H05734, 20H00186) の支援を受け実施した。

### 参考文献

- 1) Sugiyama S. et al., 2016: *J. Geophys. Res.*, **121**, 2270-2286.
- 2) Sugiyama S. et al., 2019: *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 2602-2609.

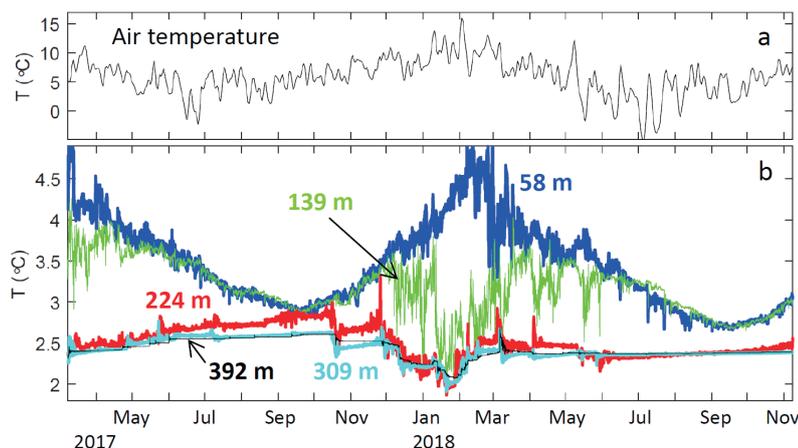


図 2 (a) 気温、および (b) 各深度における湖水温の変化。

1 北海道大学低温科学研究所  
2 北海道大学北極域研究センター  
3 北海道大学大学院環境科学院  
4 フリードリヒ・アレクサンダー大学エアランゲン・ニュルンベルク  
5 ベルリン・フンボルト大学地理学部  
6 アウストラル大学理学部

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Arctic Research Center, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Germany  
Geography Department, Humboldt-Universität zu Berlin, Germany  
Faculty of Science, Austral University of Chile

## 中央アジア・パミールアライ山域で掘削されたアイスコアの溶存化学成分 Chemical composition of ice-core drilled in the Pamir-Alay Mountains in the Central Asia

○瀬戸大貴<sup>1</sup>, 鋸屋遥香<sup>1</sup>, 竹内望<sup>1</sup>, 藤田耕史<sup>2</sup>, 川村賢二<sup>3</sup>, 對馬あかね<sup>1</sup>, Vladimir Aizen<sup>4</sup>

Daiki Seto, Haruka Ogaya, Nozomu Takeuchi, Koji Fujita, Kenji Kawamura, Akane Tsushima, Vladimir Aizen

### 1. はじめに

氷河には、大気を介して供給される様々な化学物質が保存されている。例えば、海洋からの海塩成分、陸域からの土壌や植生に由来する物質、人間活動の化石燃料燃焼に由来する人為起源物質などである。アイスコアとして氷河から掘削された雪氷試料の化学成分を分析することで、過去のその物質の起源に関連する環境変動や物質輸送に関する大気循環を復元することができる。中央アジアの山岳域に分布する氷河からも数多くのアイスコアが掘削され、その化学分析から特にアジア内陸乾燥域の環境変動や大気循環が復元されてきた。中央アジアの西部に位置するパミール高原は、アジアの中でも偏西風の影響を強く受ける特有の気候条件をもつ。中央アジアの中でもこのような各地域特有の環境変動の理解はまだ十分ではなく、特に今後の地球温暖化の影響予測をするためには、各地域の陸域の環境変動や大気循環の変動の理解が重要である。そこで、本研究では、中央アジア西部に位置するパミールアライ山域で掘削されたアイスコアの主要化学成分の分析を行い、その地域の大気輸送化学物質の特徴とその起源および大気循環に関する環境変動を明らかとすることを目的とした。

### 2. アイスコア試料と分析方法

2016年8月に、キルギス共和国のパミールアライ山域の標高5300mの氷帽(以下、レーニン氷帽とする)において、3本のアイスコアが掘削された。掘削は、標高5208mの氷帽鞍部(Site 1)と標高5300mの氷帽頂上(Site 2)の2地点で行われ、Site 1では、全長約7mのアイスコア(Core 1)1本、Site 2では全長約12m(Core 2)と全長約37mのアイスコア(Core 3)の2本が掘削された。このうちCore 3については、氷河底部の岩盤まで到達した。これら3本のアイスコアを千葉大学のイオンクロマトグラフィーを用いて主要化学成分濃度の分析を行った。Core 3については、上部の一部のみ分析が完了している。

### 3. 結果と考察

レーニン氷帽アイスコアの主要化学成分を分析した結果、全試料平均では、等量比でCa<sup>2+</sup>が最も濃度が高かった(Core 2において25.8 μEq/L)。Ca<sup>2+</sup>に続き濃度が高かったのは、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とNH<sub>4</sub><sup>+</sup>であった。Ca<sup>2+</sup>の濃度が高かったことは、一般的な中央アジアのアイスコアと同様、砂漠などの地表面からの鉱物粒子に由来する成分が最も大きいことを示している。また、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>やNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の濃度が高いことは、この氷河への人為起源物質の供給も比較的大きいことを示している。

Core 2の化学成分濃度のプロファイルでは、Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>がおよそ1mおきの周期的なピークを示した。しかし、それ以外の成分では周期的な変動は現れなかった。Core 1とCore 3ではどの成分も周期的な変動はなかった。また、Core 3のNa<sup>+</sup>とNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の平均濃度は、他の2本の5分の1程度の濃度であることが分かった。Core 3の層位は氷板層が大部分を占め、融解再凍結が顕著であることを示しており、アイスコア中の化学成分が融解水によって流出した可能性がある。したがって、Core 3の化学成分の記録は、他の2本に比べ融解の影響を強く受けて変化していると考えられる。

レーニン氷帽の主要化学成分濃度を、同じパミール高原でより南部に位置するフェドチェンコ氷河のアイスコアの主要化学成分濃度と比較した。その結果、海塩起源と考えられるNa<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>の濃度は、レーニン氷帽よりもフェドチェンコ氷河の方で高い値を示した。一方、人為的起源と考えられるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の濃度は、レーニン氷帽の方が高かった。このことは、同じパミール高原に位置する氷河でも、南部のフェドチェンコ氷河は海洋起源の物質の供給がより強く、北部のレーニン氷帽は人為起源物質の供給がより大きいことを示唆している。さらに、パミールアライ山域の北部に位置する天山山脈のグリゴレア氷河のアイスコアの主要化学成分濃度と比較した結果、その成分構成は、フェドチェンコ氷河に比べて、レーニン氷帽と近い値を示した。このことから、レーニン氷帽に供給される物質は、北部の天山山脈と同様に砂漠及び人為起源物質が多い一方、フェドチェンコ氷河が位置するパミール高原南部とは異なる大気循環の影響を受けていることが示唆された。

1 千葉大学  
2 名古屋大学  
3 国立極地研究所  
4 アイダホ大学

Chiba University  
Nagoya University  
National Institute of Polar Research  
University of Idaho

## グリーンランド北西部カナック氷河消耗域の雪氷溶存化学成分 Soluble chemical ions in snow and ice on Qaanaaq Glacier in northwest Greenland

○竹内望<sup>1</sup>, 渡辺茜<sup>1</sup>, 石渡晃起<sup>1</sup>, 大沼友貴彦<sup>2</sup>

Nozomu Takeuchi, Akane Watanabe, Koki Ishiwatari and Yukihiko Onuma

### 1. はじめに

グリーンランド氷床を含む北極圏の氷河では、裸氷域表面の暗色化が進んでいる。氷河表面の暗色化は、アルベドの低下による日射量の吸収を増やし、氷河融解を促進する。近年の氷河融解加速の原因は、地球温暖化による気温上昇だけでなく、このような氷河の暗色化も主要な要因であることが明らかになりつつある。暗色化の主な原因は、氷河表面に堆積した光吸光性の不純物である。このような不純物には、大気由来の鉱物粒子や黒色炭素粒子のほか、雪氷上で繁殖する微生物も含まれる。特に近年の氷河の暗色化は、微生物の繁殖量の増加が原因であることがわかってきた。しかしながら、微生物の繁殖量増加の要因については、まだ理解が進んでいない。氷河の暗色化の原因となる微生物は、主に光合成微生物である雪氷藻類である。雪氷藻類の繁殖の条件は、氷河表面が融解していることと、適度な日射と雪氷中の栄養塩の存在である。栄養塩の供給は主に大気由来のエアロゾルであると考えられてきた。しかしながら、グリーンランド氷床および周辺氷河では、暗色表面がバンド状の模様を描いていることが多く、このことは大気からの栄養塩の供給では説明できない。このような模様の形成は、氷河の融解に伴う氷からの物質供給が、微生物の繁殖や濃縮を引き起こすことが要因である可能性がある。そこで、本研究では、グリーンランド北西部のカナック氷河で、消耗域の多数の地点で1 m のアイスコアを掘削し、氷河氷の溶存化学成分や鉱物粒子濃度の特徴を明らかにすることを目的とした。

### 2. 調査地と方法

グリーンランド北西部に位置するカナック氷河で、2017年の7月から8月にかけて調査を行った。カナック氷河消耗域の表面の暗色化の異なる9地点において、直径9 cm のアイスオーガを用いて、深さ1 m のアイスコアを合計39本掘削した。掘削したアイスコアは、深さ0.5 m で半分にわけ、ビニールでそれぞれ融解した後、融解水の一部を化学成分分析用にとりわけ、さらに沈殿物をボトルに採取した。また、コアとは別に表面の氷を同地点で採取した。サンプルは千葉大学に持ち帰り、イオンクロマトグラフィーで主要化学成分、水同位体アナライザーで安定同位体、さらにサンプル中の沈殿物の重量を定量した。

### 3. 結果と考察

カナック氷河の裸氷域から得たアイスコアサンプル中の主要化学成分は、どのサンプルでも Na と Cl が等量比で全体の約8割を占めていた(平均: 83%)。このことは、消耗域の氷中の化学成分のほとんどは海塩起源であることを示している。検出された SO<sub>4</sub> や Mg, Ca の大部分も海塩起源とみられたが、海塩起源ではない NO<sub>3</sub> (平均: 1.1 μEq/L) や NH<sub>4</sub> (平均: 0.9 μEq/L) もどのサンプルにも含まれていた。裸氷域の中でも暗色域(表面不純物堆積量が多い)と白色域(表面不純物堆積量が少ない)で掘削したアイスコアを比較した結果、化学成分濃度の違いはほとんどなかった。また、両領域の氷中の鉱物粒子の濃度にも顕著な違いはなかった。このことは、表面の暗色の強さは、単にその表面下の氷の化学成分や鉱物粒子濃度を反映しているわけではないことを示している。標高によるアイスコアの化学成分濃度の違いは、ほとんどの成分でみられなかったが、唯一 NH<sub>4</sub> は標高が高い領域で濃度が高い傾向にあった。藻類のバイオマスも標高が高い領域で大きく、NH<sub>4</sub> は藻類の栄養塩となりえることから、この領域の氷からの NH<sub>4</sub> 供給が藻類繁殖に貢献しているのかもしれない。氷河の表面とアイスコアの化学成分を比較した結果、成分構成に大きな違いはなかったが、化学成分濃度はどの成分も表面に比べアイスコアのほうが高い傾向にあった。特に NO<sub>3</sub> は約2.6倍、NH<sub>4</sub> は約2.2倍高い濃度であった。氷河表面は、表面を流れる融解水と表面氷の混合サンプルで、微生物が繁殖する環境を示している。したがって、以上の結果は、氷河の氷は融解に伴って化学成分を放出し、氷河表面に繁殖する微生物の窒素栄養塩の供給源となっていることを示唆している。裸氷域に現れるバンド状の暗色模様の原因についてはまだわからないが、単に氷からの物質供給によるのではなく、表面氷中の不純物の滞留時間に影響する氷の物理的特性の違いが影響しているのかもしれない。

1 千葉大学大学院理学研究院  
2 東京大学生産技術研究所

Graduate School of Science, Chiba University, Japan  
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

## 風と雪の複合作用による防雪林の枝抜け被害 — 枝・幹ひずみの連続観測に基づくメカニズム解明 —

### Combined effects of wind and snow caused the damage of branch pulling at a snow break forest - A mechanism revealed by continuous measurements of the strain on tree branches and trunks -

○岩崎健太<sup>1</sup>, 勝島隆史<sup>2</sup>, 鳥田宏行<sup>1</sup>, 真坂一彦<sup>3</sup>

Kenta Iwasaki, Takafumi Katsushima, Hiroyuki Torita and Kazuhiko Masaka

#### 1. はじめに

樹木の枝抜け被害は、積雪沈降圧・冠雪・グライドのいずれかの要因により生じると考えられてきたり。しかし、どのような気象条件において、どれだけの力が加わり、枝抜けが発生するのか実測されておらず、枝抜けを引き起こす要因について十分な検討がなされていない。そこで本研究では、枝抜け被害が発生したヨーロッパトウヒ防雪林において、枝・幹におけるひずみの連続観測を気象観測とあわせて実施し、枝抜け被害の発生メカニズムを検討した。

#### 2. 方法

調査地は、北海道新得町にある2004年植栽のヨーロッパトウヒ防雪林である。調査地の中で特に林縁部の吹きだまり深度が深い地点において、高さの異なる枝4本の根元上側にひずみゲージを取り付け、4個体・10分間隔(2019年度)、2個体・1分間隔(2020年度)で測定した。2020年度には、各個体について測定枝のうち3本と樹幹風下側(高さ1m)におけるひずみの高頻度観測(5Hz)も併せて実施した。ひずみ観測値は、測定箇所の温度で補正した。林帯前面において、風向・風速・気温を1分間隔で測定した。約2週間に一度、吹きだまりの積雪深と全層密度を測定した。

#### 3. 結果

高さ1.7mまでの枝が吹きだまりに埋没し、高さ1.2~1.3mの枝で特に大きくひずみが増加した。埋雪していない枝では冠雪によってひずみが増加したのに対し、高さ1.2~1.3mの枝では、吹きだまりに埋没していた3月中の強風時にひずみが最大となった(図1)。強風時の連続した8時間において、5Hzで測定された高さ1.2~1.3mの枝のひずみと樹幹ひずみには、強い負の相関があった(図2)。これは、強風を受けて幹が風下方向へ曲がった際に、埋雪した枝が強く引っ張られたことを意味する(図3)。したがって、本調査地では、吹きだまりによる埋雪を素因、強風を誘因とする風と雪との複合作用によって枝抜けが生じており、積雪沈降圧・冠雪・グライド以外の枝抜け発生メカニズムの存在が明らかとなった。

#### 参考文献

1) 斎藤新一郎, 2001: 樹木の雪害と対策. 樹木医学研究, 5(1), 21-22.

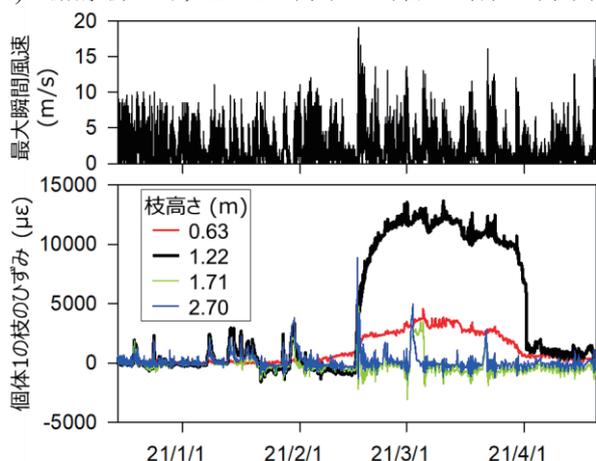


図1 枝のひずみと最大瞬間風速の時系列変化。  
枝のひずみは、観測開始時が0、下方向への引張が正

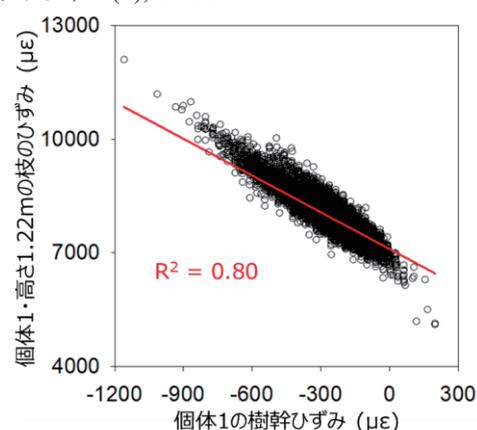
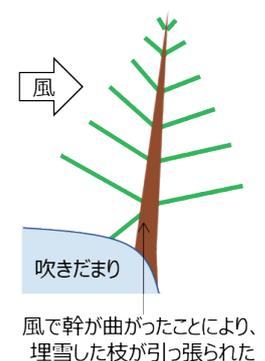


図2 2021年3月1日0時~8時における樹幹と高さ1.22mの枝に生じたひずみの関係。

樹幹ひずみは、風上方向への曲げが正



風で幹が曲がったことにより、埋雪した枝が引っ張られた

図3 本調査地の枝抜けメカニズム

1 北海道立総合研究機構構林業試験場  
2 森林総合研究所 十日町試験地  
3 岩手大学農学部

Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization  
Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute  
Faculty of Agriculture, Iwate University

## 積雪中を垂直移動する雪氷微生物の日周期 Diurnal variation in vertical migration of snow-ice microorganisms in a snow pack in Mt. Gassan in Yamagata Prefecture, Japan

○小野誠仁<sup>1</sup>, 薄羽珠ノ介<sup>2</sup>, 竹内望<sup>3</sup>

Masato Ono, Suzunosuke Usuba and Nozomu Takeuchi

### 1. はじめに

氷河や季節積雪といった雪氷環境には、雪氷生物とよばれる寒冷な環境に適応した特殊な生物が生息している。例えば、寒冷環境に適応した光合成微生物である雪氷藻類や、雪氷藻類を餌とするクマムシやワムシ、雪面上を歩行するセッケイカワゲラといった無脊椎動物などである。雪氷生物は雪氷環境で食物連鎖を形成していることから、雪氷はこれらの生物群集を含む生態系（雪氷生態系）とみなすことができる。中でも季節積雪では、春の融雪期になると、雪氷藻類が大繁殖し、積雪表面を赤や緑、黄色といった様々な色に着色する彩雪現象が見られる。これまでに、カナダの高山帯に見られる赤雪中の藻類構成や、赤雪中の藻類を食べるトビムシやダニ、クマムシ、ワムシといった捕食者が報告されており、スロバキアの高山帯の赤雪や緑雪からも、雪氷藻類や菌類、絨毛虫、微小無脊椎動物の存在が報告されている。また、日本の森林帯では、パッチ状に形成される緑雪にクマムシやワムシといった無脊椎動物が集中して藻類を食べていることが明らかになっている。いずれの研究も積雪表面のみに焦点を当てている一方で、積雪中のクマムシやワムシは、垂直方向に能動的に移動している可能性が新たに示唆されている。これら生物の垂直移動は、季節的な変化以外にも、日射強度、積雪の融解速度、気温といった積雪環境の日周期に伴っている可能性がある。しかしながら、積雪中の生物活動の日周期についてはいままですべて調査されていなかった。そこで本研究では、日本国内の積雪中に生息する雪氷藻類、微小無脊椎動物（クマムシ、ワムシ）、菌類について、積雪内分布の日周期を明らかにすることを目的とした。今回は、積雪量が多く雪氷藻類も豊富に繁殖することで知られる山形県月山の樹林帯において、積雪表面および積雪内部の各種生物について、形態的分類を行い、個体密度の表面分布および垂直分布の調査を行った。

### 2. 方法

山形県月山の県立自然博物館（標高 750 m）のブナ樹林帯において、積雪期の 2020 年 5 月 6 日 2 時から翌日 7 日 2 時までの 24 時間の間、3 時間おきに積雪表面および内部の白い雪と緑雪を採取した。この地点では、緑雪が毎年現れることが知られている。サンプル採取時には、ブナの葉は展葉していなかった。調査中は、気象条件の日変化を明らかにするために、林内において気温および日射量の自動観測を行った。千葉大学に持ち帰ったサンプルは顕微鏡で形態的特徴を観察し、藻類、微小無脊椎動物（クマムシ、ワムシ）、菌類の積雪中の個体密度を算出した。また、藻類量を示すクロロフィル *a* 濃度を測定した。

### 3. 結果と考察

積雪サンプルを顕微鏡で観察した結果、主に多様な形態の雪氷藻類細胞、2 種類のヤマクマムシ属のクマムシとヒルガタワムシ、菌類が含まれていることが明らかになった。積雪表面のクロロフィル *a* 濃度は、夜間から早朝（5 時および 17 時–2 時）には、積雪下層に比べ表面（深さ 0-3 cm）で濃度が高く（最大平均濃度： $8.0 \pm 4.7 \times 10^2 \mu\text{g/L}$ ）、日中から夕刻にかけて（8 時–20 時）は、反対に積雪表面に比べ下層（3-8 cm）で濃度が高かった（最大平均濃度： $4.4 \pm 3.5 \times 10^2 \mu\text{g/L}$ ）。クマムシとワムシは、早朝（5 時）に積雪表面で個体密度が高く（最大平均： $1.3 \pm 1.5 \times 10^4 \text{ ind/L}$ ,  $2.3 \pm 2.5 \times 10^2 \text{ ind/L}$ ）、反対に日中から深夜（8 時–23 時）は、積雪下層で個体密度が高かった（最大平均： $3.7 \pm 5.2 \times 10^4 \text{ ind/L}$ ,  $3.5 \pm 5.0 \times 10^3 \text{ ind/L}$ ）。以上の変化は、日射量の変化のタイミングによく一致したことから、積雪中の藻類は、強すぎる日射を避けて積雪内を垂直移動しているものと考えられ、微小無脊椎動物も食物となる藻類に合わせて積雪内を垂直移動するものと考えられる。当日は、形態に基づいてより細分化した藻類種および菌類の個体密度の日変化の結果を含めた、積雪中の微生物の日変化について考察、発表する。

1 千葉大学 大学院融合理工学府  
2 千葉大学理学部  
3 千葉大学 大学院理学研究院

Graduate School of Science and Engineering, Chiba University  
Faculty of Science, Chiba University  
Graduate School of Science, Chiba University

## 全球雪氷藻類モデルの開発と赤雪現象再現の試み

### Developing a snow algae model to reproduce the red snow phenomenon at the global scale

○大沼友貴彦<sup>1</sup>, 芳村圭<sup>1</sup>, 竹内望<sup>2</sup>

Yukihiko Onuma, Kei Yoshimura and Nozomu Takeuchi

#### 1. はじめに

雪氷藻類とは、寒冷環境に適応した光合成微生物の総称であり、夏季の積雪内や氷河氷床の表面で繁殖活動を行っている。なかでも *Sanguina nivaloides* と呼ばれる緑藻は、細胞内にカロテノイド色素を多量に含むため、その繁殖により積雪表面を赤に着色させる赤雪と呼ばれる現象を発生させ、雪氷面のアルベドを 0.1-0.2 程度低下させる。この赤雪現象は、世界中で現地観測あるいは衛星観測により報告されており、特に北極圏における雪氷融解加速の一因となっている。この赤雪現象を発生させる *Sanguina nivaloides* は北極から南極にかけて繁殖が報告されている種であるものの、どのような過程を経てこの種が全球に分散したのかは明らかになっていない。したがって、その繁殖を数値計算によって全球規模で再現することは地球環境と生態学の両面で重要である。しかしながら、雪氷藻類の繁殖を計算する数値モデルは北極圏の氷河を対象としたものしか現存せず、全球規模で適用可能な数値モデルを新しく開発する必要がある。

#### 2. 手法

本研究で著者らは、これまで開発してきた snow algae model (Onuma et al., 2018; 2020) を改良し、雪氷藻類繁殖を全球で計算可能なモデルに発展させることを試みた。従来の snow algae model は、積雪の融解時間に応じて藻類細胞の指数関数的な増殖を再現するモデルで、夏季の降雪の少ないグリーンランド氷河では赤雪を再現するために適用できる。しかしながら、降雪の量や頻度の多い地域や夏季の夜に日照のない中低緯度地域ではこのモデルは適用できないため、モデルの全球展開には課題があった。そこで従来のモデルに日周期の繁殖過程と新雪被覆による繁殖抑制過程を導入し、北極から南極までの 15 地域の積雪の現地観測結果を用いて改良したモデルを検証した。その後、改良した snow algae model を陸面過程モデル MATSIRO6 (Tatebe et al., 2019) に導入し、開発した全球雪氷藻類モデル Bio-MATSIRO を用いて、全球 50 km 空間解像度で近年 35 年間の雪氷藻類繁殖を計算した。

#### 3. 結果と考察

15 地域の検証結果は、日周期の繁殖過程と新雪被覆による繁殖抑制過程を導入することで snow algae model による藻類繁殖、中でも赤雪発生時期の再現性が向上し、観測から概ね前後 10 日以内の誤差で赤雪発生を予測できることが示唆された。例えば、従来のモデルでは中緯度で赤雪発生時期が観測よりも数ヶ月ほど早くなっていたが、新モデルではこの赤雪の早期発生は改善された。中緯度では、春ごろに頻繁な降雪が発生しており、新雪の被覆が雪氷藻類の繁殖を抑制していたと考えられることから、雪氷藻類繁殖には新雪被覆の影響を考慮することが重要である。さらに、Bio-MATSIRO による計算結果は、全球で観測報告のある赤雪発生の時空間変化を良く再現できていた。北半球（南半球）の赤雪は春から夏にかけてその発生地域が北上（南下）していたが、融雪期に降雪が多い地域では夏季でも赤雪が発生しない地域があることも全球計算から示された。本研究で開発した Bio-MATSIRO は、南極地域での再現性が比較的悪いなど改善すべき点はあるものの、全球規模での赤雪発生を過去から将来にかけて予測できるポテンシャルがあると考えられる。赤雪は積雪アルベドを低下させるため、今後本モデルで雪氷藻類の繁殖によるアルベド低下（バイオアルベド）効果も全球規模で定量化できるかもしれない。本研究は、現在 preprint (Onuma et al., 2021) として公開中である。

#### 主な参考文献

- 1) Onuma, Y., Takeuchi, N., Tanaka, S., Nagatsuka, N., Niwano, M. and Aoki, T., 2018: Observations and modelling of algal growth on a snowpack in north-western Greenland, *Cryosphere*, 12 (6), 2147-2158, doi:10.5194/tc-12-2147-2018.
- 2) Onuma, Y., Takeuchi, N., Tanaka, S., Nagatsuka, N., Niwano, M. and Aoki, T., 2020: Physically based model of the contribution of red snow algal cells to temporal changes in albedo in northwest Greenland. *Cryosphere*, 14, 2087-2101, doi:10.5194/tc-14-2087-2020.
- 3) Onuma, Y., Yoshimura, K. and Takeuchi, N., 2021: Developing a Snow Algae Model to Reconstruct Blooming at the Global Scale Using a Land Surface Model. *Earth and Space Science Open Archive ESSOAr*, doi:10.1002/essoar.10506587.1.

1 東京大学生産技術研究所  
2 千葉大学大学院理学研究院

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo  
Graduate School of Science, Chiba University

# 北極域の氷河上で繁殖する雪氷藻類の色素構成比の空間分布 Spatial variability in photosynthetic pigment composition of snow and ice algae growing on a melting glacier in the Arctic region

○ 對馬あかね<sup>1</sup>, 竹内望<sup>1</sup>, 高橋翼<sup>2</sup>, 小野誠仁<sup>2</sup>, 鬼沢あゆみ<sup>3</sup>

Akane Tsushima, Nozomu Takeuchi, Tsubasa Takahashi, Masato Ono and Ayumi Kizawa

## 1. はじめに

近年、雪氷面のアルベド低下への寄与などから注目を集める氷河上の暗色化現象は、融雪期の雪氷上で雪氷藻類と呼ばれる低温環境に適応した光合成独立栄養微生物が高密度に繁殖する事で引き起こされる。雪氷藻類は主に緑藻とシアノバクテリアで構成され、細胞中には光を吸収する多様な色素が含まれる。藻類細胞の雪氷アルベドへの影響を計算する物理モデルでは、特有の吸光波長依存性をもつ其々の色素の濃度がパラメータとなる事から、氷河の雪氷アルベドの理解には、藻類の色素構成の時空間的な変化の把握が重要である。藻類の色素は、大きくクロロフィルとカロテノイドに分類される。クロロフィルは緑色の光捕集・反応色素で、細胞が死滅するとフェオフィチン化し褐色になる。カロテノイド類は補助色素として作用する一方で、抗酸化作用を有し、過剰な太陽光から細胞を保護する役割ももつ。特に緑藻類は強光のストレス条件下では、過剰な光エネルギーが細胞内で活性酸素を発生させ、細胞が死滅してしまう。そのような強光防御反応として(1)キサントフィルサイクルと(2)アスタキサンチンの生成という機能を持つ。キサントフィルサイクルはゼアキサンチン、アンテラキサンチン、ビオラキサンチンの3色素が強光条件によって相互変換する仕組みである。緑から橙色の一次カロテノイドにはキサントフィルサイクル色素のほか、βカロテン、ルテインなどがある。アスタキサンチンは光合成に関与せず、紫外線からの細胞保護の為にβカロテンから生合成される赤色の2次カロテノイドで、*Sanguina nivaloides*等の藻類で蓄積され、多くが不適環境下で形成する休眠接合子に集積する。

藻類色素の構成は、分類群によって特徴的で、かつ、生息環境の変化にも依存する。近年、氷河上の藻類種の群集構造については明らかになってきている一方、藻類色素構成の時空間分布について定量された例はほとんどない。そこで本研究では、効率的かつ高精度に色素を定量する手法を確立した上で、北極圏の氷河上で繁殖する雪氷藻類の色素構成比の空間分布を示し、空間分布の支配要因を明らかにする事を目的とした。

## 2. 分析方法と試料

融解した雪氷試料をガラス繊維フィルタで濾過し、ジメチルホルムアミドを溶媒としてフィルタから藻類色素を抽出した。色素の分離・定量にはフォトダイオードアレイ検出器および蛍光検出器付き高速液体クロマトグラフを用いた。標準試料や積雪試料を用いて10種類の色素(クロロフィルaおよびb, フェオフィチンa, ゼアキサンチン(Z), アンテラキサンチン(A), ビオラキサンチン(V), ネオキサンチン, βカロテン, ルテイン, アスタキサンチン)の同時定量法の検討と精度確認を行った後、2019年にアラスカ・グルカナ氷河で採取された表面雪氷試料の測定を行った。

## 3. 結果と考察

試料に含まれる藻類の色素を定量した結果、氷河裸氷域の上流と下流で色素構成が異なる事が明らかになった(図1)。上流域は2次カロテノイドの含有率が高く、藻類が強光によるストレス状態に置かれた事が示唆された。一方、キサントフィルサイクルのエポキシ化率( $EPS=(V+0.5A)/(Z+A+V)$ )は高い値を示した事から、この領域の藻類の光防御は、キサントフィルサイクルではなく、アスタキサンチンの蓄積が大きい事がわかった。下流域では1次カロテノイドの含有率と、強光下で生合成されるゼアキサンチンの含有率が高い事から、藻類群の強光防御反応は、主にキサントフィルサイクルが機能している事が示唆された。Takeuchi (2001)で示されたように、グルカナ氷河では上流と下流で藻類の優占種が異なる事から、藻類群の優占種の強光防御反応が異なる事で、色素構成が変化した可能性がある事がわかった。藻類の色素構成の違いが雪氷面アルベドにも影響を与える可能性があると考えられる。

参考文献 1) Takeuchi et al. (2001) The altitudinal distribution of snow algae on an Alaska glacier (Gulkana Glacier in the Alaska Range). *Hydrol. Processes*, **15** (18), 3447-3459.

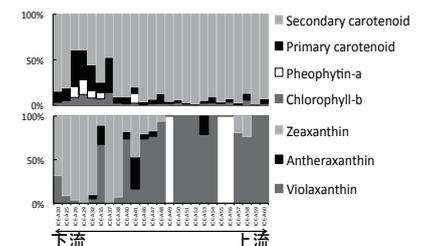


図1 グルカナ氷河におけるChlorophyll-aに対する各色素の割合

1 千葉大学大学院理学研究院  
2 千葉大学大学院融合理工学府  
3 中央大学理工学部

Graduate School of Science, Chiba University  
Graduate School of Science and Engineering, Chiba University  
Faculty of Science and Engineering, Chuo University

## 道路雪堤の崩壊メカニズムの解明に向けた基礎研究 — 内部層構造の調査と崩壊現象の類型化 —

### Basic Study for Elucidating the Collapse Mechanism of Road Snowbank - Investigation of Internal Layer Structure and Typology of Collapse Phenomena -

○芝崎智貴<sup>1</sup>, 渡邊香歩<sup>1</sup>, 杉原幸信<sup>2</sup>, 上村靖司<sup>2</sup>, 町田敬<sup>3</sup>

Tomoki Shibasaki, Kaho Watanabe, Yukinobu Sugihara, Seiji Kamimura and Takashi Machida

#### 1. はじめに

除雪作業が繰り返されると、降雪も加わり道路の路肩や中央分離帯に雪の山が形成される。これが雪堤と呼ばれる。堆積・成長した雪堤は思いがけず崩壊することがあり、道路側に崩壊すると車線を塞ぎ、自動車への物損被害や交通事故に繋がる恐れがある。雪堤の形成過程及び崩壊メカニズムは未だ解明されておらず、雪堤処理のタイミングや処理方法は作業員の経験則に依存しているのが実状である。

本研究では雪堤崩壊メカニズムの解明を目的に、実際に形成された雪堤内部の層構造を調査する。加えて、雪堤崩壊が発生している箇所を探索・観察することで崩壊現象の類型化を試みる。

#### 2. 道路雪堤の内部層構造

雪堤の内部状態の調査するために、雪堤を掘削して断面を露出させ、一定距離間隔で密度、硬度、含水率、雪温、雪質、粒径、塩分濃度の全 8 種の物性値を測定した。密度測定には角型密度サンプラー、硬度測定にはプッシュプルゲージ、含水率測定にはデノース式含水率計または遠藤式含水率計、雪温測定にはサーミスタ温度計、雪質等には町田建設(株)が独自に作成した粒度ゲージ、塩分濃度には屈折率方式の塩分濃度計を用いた。

まず、2021年2月1日、2月26日、3月3日の計3日間に、関越自動車道上の雪堤のうち5箇所において物性値測定を行った。測定箇所の選定は、中央分離帯と路肩の位置の違いに加え、ガードレール型とガードケーブル型の構造の違いを考慮した。

まず、測定した物性値で特に特徴があった事柄について述べる。第1に密度は、自然積雪の場合は一般的に下層部から上層部にかけて密度が低下するが、上層部の密度が下層部の密度を上回る逆転現象が発生している箇所が中央分離帯と路肩の両者で確認された。雪は密度が低いほど融解しやすいため、下層部の不安定化が促進されると考えられる。中央分離帯では、ロータリ除雪車による積み上げが無いものの、構造物の影響で下層部では雪が積もりにくく、かつ圧密過程が十分に進行していなかったことが原因と考えられる。また、路肩では、測定地点がインターチェンジ区間であったことから、頻繁にロータリ除雪車による積み上げが行われていた。よって、路面上の圧密された高密度な雪が上層部に積み上げられたことが原因と考えられる。第2に塩分濃度は、全ての試料でほぼ0%であった。凍結防止剤の散布から時間が経っていたため、雪堤から塩分が流出した後であったと考えられる。なお、凍結防止剤(NaCl)によって雪が弱化した報告<sup>2)</sup>もあるため、今後さらに検討が必要である。

次に、雪堤断面から観察した層構造の傾向について述べる。全体のほとんどが「ざらめ雪」で構成されており、形成時期による層の違いが目視で区別できた。特に中央分離帯では、雪堤内部に



図1 雪堤下部の空洞



図2 剥がれ型雪堤崩壊の例

存在するガードレール、ガードケーブルの周辺に共通して大きな空洞が存在することが明らかになった(図1)。空洞内表面が氷状態となっていたことから、構造物によって積雪段階で形成された微小な内部空洞に対し、構造物を介した熱伝達によって空洞が融解・拡大されて再凍結したと考えられる。車線から距離が離れた場所でも同様の現象が見られたことから、地面からの熱によると示唆される。

#### 3. 道路雪堤の崩壊現象の類型化

冬期間(2021年1月上旬~2月下旬)において、豪雪地帯である新潟県と長野県の高速度道路(関越自動車道、北陸自動車道、上信越自動車道)及び一般道路を自動車で巡回し、雪堤崩壊の発生箇所の探索と状態観察を行った。その結果、雪堤崩壊は「剥がれ型」と「滑り型」の2種類の現象に大別されることが分かった。まず、剥がれ型では、破断面が共通してガードレール、ガードケーブルの上方であり、構造物側面の雪堤が道路側に剥がれながら倒れるように崩壊していた(図2)。また、滑り型では、雪堤上部が滑り落ちるように崩壊していた。全体的には、構造物が存在する箇所では剥がれ型、構造物が存在しない箇所では滑り型の傾向にあり、特に高速度道路では多くが剥がれ型であった。

#### 4. おわりに

本研究では、雪堤内部の層構造を観察するとともに、密度・硬度などの物性値の測定を行い、雪堤がどのような状態で成り立っているのかを調査した。また、様々な雪堤崩壊の実例をもとに、崩壊現象を2種類に分類した。

今後は、凍結防止剤の雪堤への影響について引き続き調査すると共に、雪堤層と気象条件の照合を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 伊西ら, 2014: 雪堤切りアタッチメントによる中央分離帯雪堤処理の効率化. ゆき, 97, 86-89.
- 2) Johan Wahlin et al., 2014: The effect of sodium chloride solution on the hardness of compacted snow. Cold Regions Science and Technology, 102, 1-7.

1 長岡技術科学大学大学院工学研究科  
2 長岡技術科学大学 機械創造工学専攻  
3 町田建設株式会社

Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology  
Department of Mechanical and Creative Engineering, Nagaoka University of Technology  
Machida Construction Co.

## 積雪の微細構造に基づく雪質の定量的分類方法の開発 (2)

— 片薄片解析と X 線 CT 解析の比較 —

## Development of the Snow Type Quantitative Classification by Snow Microstructure Part 2

- Comparison between Section Plane Analysis and  $\mu$ CT Analysis -○荒川逸人<sup>1</sup>, 安達聖<sup>1</sup>

Hayato Arakawa and Satoru Adachi

## 1. はじめに

筆者らは積雪の物性値と微細構造との関係を明らかにし、雪質の定量的分類に関する研究をおこなっている。雪質は積雪粒子の形態をもとに分類されており、その判別は定性的で観測者に依存しやすい。雪氷防災の観点からは、雪崩発生に起因する雪質の判定に重要であり、数値化が可能となれば雪崩予測モデルの高度化につながる。このように、雪質の定量的判別は積雪構造に関する共通認識が高まる点で有益な情報となり得る。

乾き雪は氷と空気の混合物であるので、それぞれの構造を数値として表す比表面積と固有透過度を用いることで雪質を定量的に分類方法が提案されており<sup>1)</sup>、比表面積と固有透過度については、それぞれ密度と平均粒径との関係式が求められている<sup>2)3)</sup>。しかし、片薄片画像を用いたステレオロジー解析は画像数枚で積雪層を代表するのにに対し、X線CTは1000倍弱もの画像を処理することから、これまでの解析は過小評価の傾向があることが前報で示唆された。本報では前報に更にデータを追加したので、その結果について報告する。

## 2. 観測データ

2019年2月14~19日および2021年2月3~9日に、新庄雪氷環境実験所(北緯38度47分, 東経140度19分, 海拔高度127m)の露場から積雪層を切り出して-5°Cの低温室に運び、通気度測定をおこない固有透過度 $k$  [m<sup>2</sup>]を、X線CTによる微細構造計測により単位面積あたりの比表面積 $SSA_v$  [mm<sup>-1</sup>]と粒子の平均的太さ $D_g$  [mm]を求めた。試料数は22で雪質は主に新雪、こしまり雪であった。また、既往研究<sup>2)3)</sup>の一部もX線CTによる解析をおこなった。データ数は35で、雪質はこしまり雪、しまり雪、こしもざらめ雪、しもざらめ雪であった。

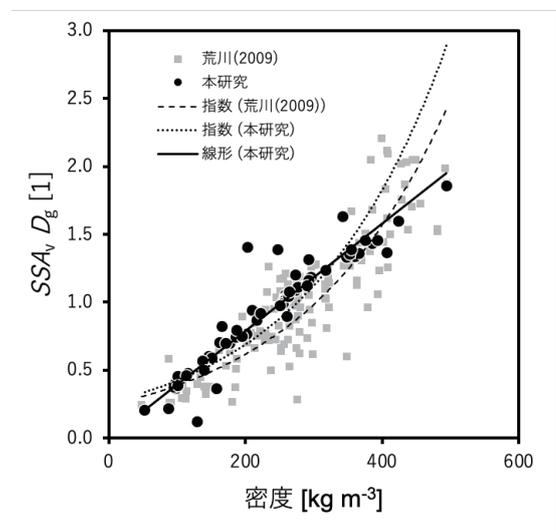
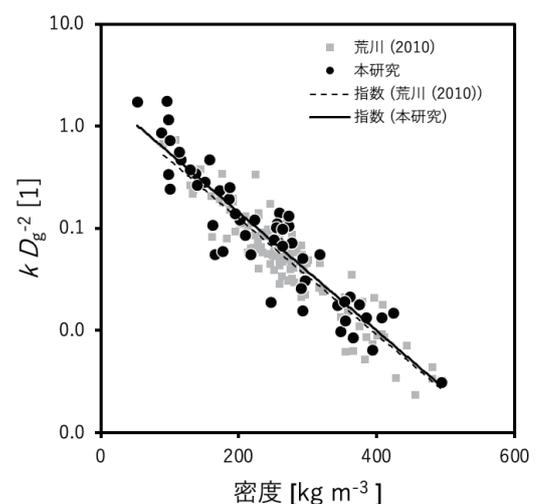
## 3. 結果と考察

図1は $SSA_v D_g$ と密度 $\rho_s$ を比較したもので、 $SSA_v D_g = 0.003 \rho_s (R^2 = 0.9821)$ の関係が得られた。既往研究<sup>2)</sup>での指数近似の決定係数は0.7399であり、本研究でも0.7081であったことから、直線近似は良い相関関係が示された。図2は $k D_g^{-2}$ と密度 $\rho_s$ を比較したもので、両者の関係は $k D_g^{-2} = 2.06 \exp(-0.013 \rho_s) (R^2 = 0.7454)$ となった。既往研究<sup>3)</sup>での決定係数は0.8757であり、相関は既往研究の方が若干良かった。密度にかかる係数は数値計算でも-0.013になる報告<sup>4)</sup>があり、固有透過度に対する密度の影響は実測もモデルも一致している。粒径の定義によって図2での比例係数が変わるため、使用する粒径についての課題が残った。比表面積の決定に有効と考えられている粒径Aoki grain size  $d_2$ <sup>5)</sup>は現地測定が可能という点で着目しており、今後 $d_2$ と微細構造や通気度等と関連付けていく必要があると考えられる。

## 参考文献

1) Arakawa et al. (2009): Study on quantitative classification of seasonal snow using specific surface area and intrinsic permeability, *Cold Res. Sci. Technol.*, **59**, 163-168.

- 2) 荒川他 (2009): 季節積雪における体積比表面積と微細構造との関係, *雪氷*, **71**(1), 3-12.
- 3) 荒川他 (2010): 季節積雪における固有透過度と微細構造に関する諸因子との関係, *雪氷*, **72**(5), 311-321.
- 4) Calonne et al. (2012): T3-D image-based numerical computations of snow permeability: links to specific surface area, density, and microstructural anisotropy, *The Cryosphere*, **6**, 939-951.
- 5) 八久保他 (2014): 積雪の比表面積と粒径との関係, 北海道の雪氷, **33**, 121-124.

図1  $SSA_v D_g$ と密度との関係図2  $k D_g^{-2}$ と密度との関係

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 新庄雪氷環境実験所

Shinjo Cryospheric Environment Laboratory, SIRC, NIED

放射伝達理論に基づく積雪の波長別偏光特性

Spectral polarization properties of snow surface based on radiative transfer theory

○谷川朋範<sup>1</sup>, 増田一彦<sup>1</sup>, 石元裕史<sup>1</sup>, 青木輝夫<sup>2</sup>

Tomonori Tanikawa, Kazuhiko Masuda, Hiroshi Ishimoto and Teruo Aoki

1. はじめに

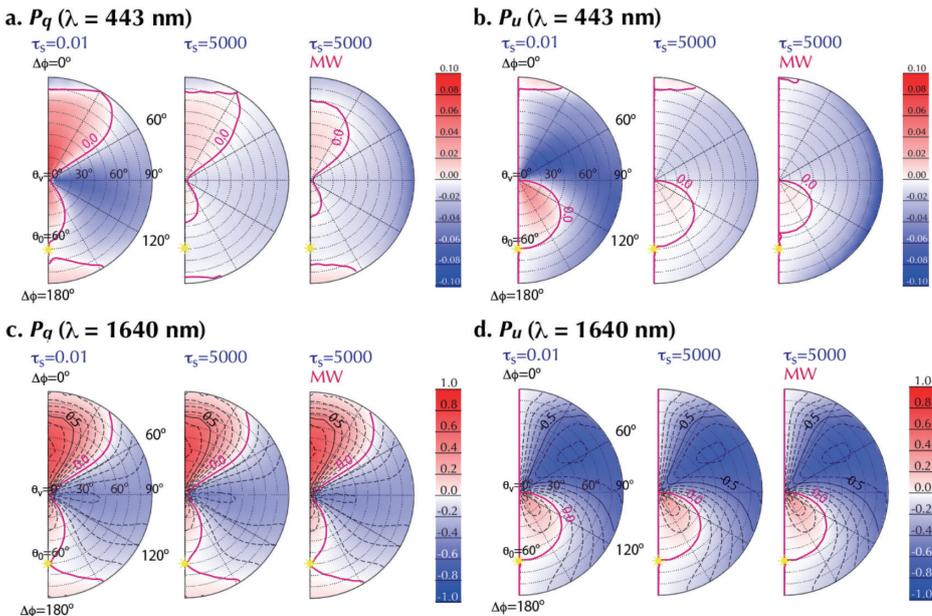
光の性質の1つに偏光がある。偏光計測は物質の内部情報や表面性状を知ることができるため、様々な分野で活用されている。偏光状態を表現する方法の1つにストークベクトル  $\mathbf{I}$  を用いる方法がある。慣例として、それぞれ変数を  $I, Q, U, V$  で表し、 $I$  は光線の強度、 $Q$  は光の進行方向に垂直な面内において、振動方向が方位角  $0$  度である直線偏光成分、 $U$  は振動方向が方位角  $45$  度である直線偏光成分、 $V$  は円偏光成分を表し、 $\mathbf{I} = [I \ Q \ U \ V]^t$  (但し  $t$  は転置) で表現する。直線偏光の度合いを示す直線偏光度 (Degree of linear polarization:  $DoLP = (P_q^2 + P_u^2)^{0.5}$ 、但し、 $P_q = -Q/I, P_u = U/I$ ) は、近赤外、短波長赤外域において積雪粒径に感度があり<sup>1)</sup>、現在、この特徴を利用した、航空機・衛星リモートセンシングや、非偏光チャンネルの偏光感度試験等への利用が行われている<sup>2)</sup>。積雪の偏光特性はこの他にいくつか報告があるものの<sup>3)</sup>、 $DoLP$  を構成する  $Q(P_q)$  や  $U(P_u)$  の光の振る舞いについては、まだ良くわかっていない。筆者らは昨年の当大会において、積雪の波長別  $P_q, P_u$  の反射角・方位角依存性について報告し、短波長赤外域の  $P_q, P_u$  に、積雪粒径や形状に依存しない、入射角、反射角、方位角の幾何情報のみで決まる中立線 (Neutral point: NP,  $P_q = 0, P_u = 0$ ) の存在を観測と散乱理論から明らかにした。短波長赤外域では、氷の光吸収が強く、かつ大気の影響がほとんど無い (光学的厚さが十分に薄い) ため、積雪表面粒子の散乱が NP を決めていることを示した<sup>4)</sup>。しかし、可視域、近赤外域においては、NP の存在を確認したものの、その角度分布は短波長赤外域の NP と異なり、理由を十分説明することができなかった。そこで本研究では大気-積雪/海水系の多重散乱放射伝達モデルを用い、NP の波長依存性について調査した。

2. 大気-積雪/海水系の多重散乱放射伝達モデル

大気-積雪/海水系の多重散乱放射伝達モデルは、大気と積雪/海水の間の多重反射を考慮し、偏光の効果を含んだ放射伝達モデルである。一次散乱にボロノイ粒子を仮定した幾何光学近似法<sup>5)</sup>、多重散乱過程に加算増乘法を適用した。このモデルは大気-海洋系の多重散乱放射伝達モデル<sup>6)</sup>を雪氷用に改良を加えたものである。大気上端、下端だけでなく任意の高さ、また雪面、海氷面上の放射量の計算も可能である。本研究では大気や積雪による多重散乱の効果に注目し、 $P_q, P_u$  に対する大気と積雪の光学的厚さの影響について調査した。

3. 結果と考察

図1に可視域の波長  $443 \text{ nm}$  と短波長赤外域の波長  $1640 \text{ nm}$  の  $P_q, P_u$  の反射角 ( $\theta_r$ )、方位角 ( $\Delta\phi$ ) 依存性を示す。波長  $1640 \text{ nm}$  は、積雪の光学的厚さや大気 (中緯度冬型モデルを適用) の有無に対し変化がなく、積雪の光学的厚さが十分薄いと ( $\tau_s=0.01$ ) の値と変わらなかった。この理由は1章で述べたとおりである。対照的に、波長  $443 \text{ nm}$  は、(a)積雪の光学的厚さや(b)大気の有無に対して変化が見られ、特に  $\Delta\phi=30^\circ$  方向、また後方散乱側 ( $\Delta\phi>150^\circ$ ) において顕著な違いが見られた。近赤外域 (波長  $869 \text{ nm}$ ) においても同様の結果が得られた (図省略)。 (a)については、両波長域ともに短波長赤外域に比べて氷の光吸収が弱いため、積雪粒子による多重散乱の影響によると考えられる。また (b) については、大気の有無による大気-積雪間の多重散乱の影響によると考えられる。以上まとめると、大気や積雪による多重散乱の効果は、可視域、近赤外域の  $P_q, P_u$  や NP の位置に大きく影響を及ぼすことが確認された。



参考文献

- 1) Tanikawa *et al.*, 2014, JGR, **120**, 868-882.
- 2) Sun *et al.*, 2018, JQSRT, **222-223**, 154-169.
- 3) Peltoniemi *et al.*, 2009, JQSRT, **110**, 1940-1953.
- 4) Tanikawa *et al.*, 2021, JQSRT (in review).
- 5) Ishimoto *et al.*, 2018, JQSRT, **209**, 113-128.
- 6) Masuda, 1998, RSE, **64**, 53-63.

図1 波長  $443 \text{ nm}$  と  $1640 \text{ nm}$  の  $P_q, P_u$  の反射角、方位角依存性。太陽天頂角  $\theta_s=60^\circ$ 。積雪粒径は  $1000 \mu\text{m}$ 、不純物なし。各図それぞれ左から、積雪の光学的厚さ  $\tau_s=0.01, 5000$ 、積雪 ( $\tau_s=5000$ ) の上に大気 (中緯度冬型モデル: MW) がある場合。  $P_q, P_u$  の NP ( $P_q = 0, P_u = 0$ ) をそれぞれ赤線で示す。

1 気象庁気象研究所  
 2 国立極地研究所

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency  
 National Institute of Polar Research

## 積雪中の側方流による流出不均一の水分移動モデルを用いた再現計算

## Reproduction simulation of nonuniform discharge by lateral flow using multi-dimensional water transport model

○平島寛行<sup>1</sup>・山口悟<sup>1</sup>・Francesco Avanzi<sup>2</sup>・Nander Wever<sup>3</sup>・大澤光<sup>4</sup>

Hiroyuki Hirashima, Satoru Yamaguchi, Francesco Avanzi, Nander Wever, Hikaru Osawa,

## 1. はじめに

山岳地域で発生する全層雪崩や融雪地すべり等の湿雪災害は、積雪中における水分移動過程が強く関連する。斜面積雪中においては、水は鉛直方向より斜面下方へ移動するが、そのメカニズムや影響は十分に解明されていない。これまでに開発してきた3次元の水分移動モデル<sup>1)</sup>では、斜面積雪を流れる水の移動を計算することが可能で、昨年の発表<sup>2)</sup>において、斜面積雪における浸透実験が水分移動モデルで良く再現できたことを確認した。同様の手法で凹凸による水の側方移動も解析されている<sup>3)</sup>。しかしながら、再現計算に使用できる斜面浸透実験の事例数は限られており、様々な気象、積雪パターンで解析するのは困難である。一方、長岡の雪氷防災研究センターの露場に設置しているマルチライシメータでは2005年以降のデータが蓄積されており<sup>4)</sup>、その間に行われた気象観測や積雪断面観測の情報と組み合わせることで様々な積雪パターンで水分移動過程を計算することが可能である。そこで本研究では、マルチライシメータ及び断面観測で得られた様々な条件下における積雪底面流出の不均一性について、水分移動モデルを用いて再現計算を行い、流出の不均一性に関してモデルと実測で比較を行った。

## 2. 計算方法

マルチライシメータは傾斜のない露場に1m<sup>2</sup>×1m<sup>2</sup>のライシメータを3×3個並べて設置したものである。各々のライシメータにおける時間流出量の違いから、積雪中の横方向の移動量が確認できる。観測結果によると、不均一の発生時には多くの事例で中心のライシメータに集中が起きている<sup>3)</sup>。これは外部からの流入や流出を防ぐためにライシメータを10cmの周りで囲った枠により僅かな傾斜が形成され、それが原因で側方流が発生して中心へのライシメータへの集中が起きた可能性が考えられる。

そこでモデルによる再現計算では、フレームの高さから推定される傾斜を計算して1.73°と仮定した。再現計算では断面観測が行われた時刻を起点に48時間計算を行い、水の供給量は観測された降雨量とSNOWPACKで計算される融雪量の合計を与えた。外側のライシメータを上流側、内側を下流側として単純傾斜を設定し、横方向はライシメータの端から中心までの距離として1.5mを設定した。このうち上流側1mを外側、下流側0.5mを内側のライシメータで流出するものとして扱い、差を比較した。

## 3. 結果

2010年2月25日の断面観測後48時間の計算結果を例に、傾斜1.73°と0°の場合の計算終了後の含水率分布を図1に示した。この時の積雪は表面から20cmほど下に粒径の細かい5cmほどの層があり、そこで帯水した層がみられた。傾斜なしの場合と比べ、傾斜ありの結果では傾斜の上流側では帯水した層の上部の含水率が低めになっており、また下流側では帯水した層より

下側で含水率が高めになっていることが確認できる(図1a)。このことから、帯水した層で下流側に水が移動したと考えられる。

また、図2にそれぞれの傾斜における上流側と下流側の流出量及び実測の流出量の時系列変化を示した。傾斜のある条件では流出量に顕著な差が見られた一方で(a)、平地では差は殆どなかった(b)。また実測では中心のライシメータでは外側より流出量が大きかった(c)。このことから、実際のライシメータ上でもわずかな傾斜が形成され、帯水した層で水が移動し中心のライシメータに水が集中したと考えられる。流出が均一だった事例においては、図1のような傾斜による水の偏りや、図2のような流出量の大きな差はみられなかった。

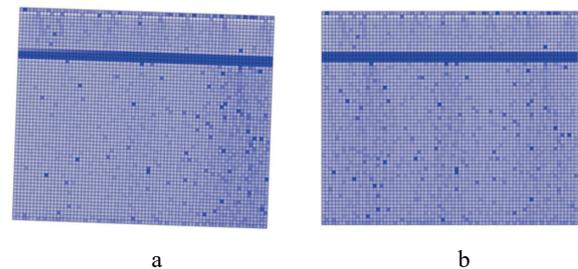


図1 計算による水分移動。(a)傾斜1.72°、(b)傾斜0°

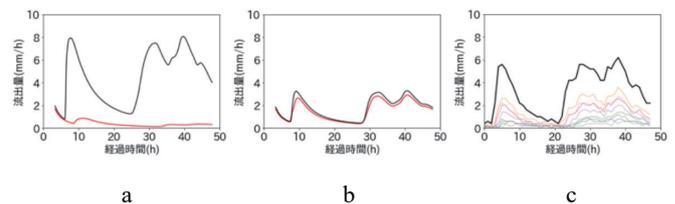


図2 浸透実験の再現計算結果(a)傾斜1.72°(b)傾斜0°(c)マルチライシメータの流出量。黒の折れ線が下流側(中心)

## 4. まとめと今後の課題

マルチライシメータで観測された流出の不均一パターンが水分移動モデルでも再現可能なことが確認された。また、2°以下の小さい傾斜でも流出に大きな偏りを生じさせることが示された。今後はより多くのパターンで解析を行い、不均一性の定量的な解析を進めていく予定である。

本研究はJSPS 科研費JP20K04068, JP20K14562で行われた。

## 参考文献

- 1) Hirashima et al., 2014: *Cold Reg. Sci. Technol.*, 108, 80-90.
- 2) 平島ら, 2020: 雪氷研究大会講演要旨集, p89.
- 3) 勝島ら, 2013: *雪氷*, 75(6), 429-439.
- 4) Yamaguchi et al., 2018: *Cold Reg. Sci. Technol.*, 149, 95-105.

1 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター  
2 国際環境モニタリングセンター(イタリア)  
3 コロラド大学ボルダー校(アメリカ)  
4 森林総合研究所

Snow and Ice Research Center, NIED  
The International Center for Environmental Monitoring, Italy  
University of Colorado Boulder, Boulder, CO, USA  
Forestry and Forest Products Research Institute

## 他時期の積雪特性に基づく積雪分布シミュレーション Simulation of Snow Distribution Based on Snow Characteristics in Other Seasons

○山田嵩<sup>1</sup>, 西原照雅<sup>2</sup>, 村上泰啓<sup>1</sup>

Takashi Yamada, Terumasa Nishihara and Yasuhiro Murakami

### 1. はじめに

最近, UAV 写真測量や地上レーザー測量が急速に普及している。UAV 写真測量による地表面の計測は, コストが低く, 機動性が高いことから, 高頻度の観測が可能である。また, このようなりモートセンシング技術による実測積雪分布データを用いた, 積雪分布シミュレーション手法が提案されている。提案手法(以後, ALS\_SCALING という)ではリモートセンシングデータを用いて, 降水量の入力処理を行えば, 風や雪崩による雪の再分配等の複雑なプロセスを置換可能としている。

本研究では, 2020年のUAV写真測量の結果を用いて2019年の地上レーザー測量結果を再現可能かの検証を行う。

### 2. シミュレーション概要

#### 2.1 対象領域

対象領域は北海道の旭岳ロープウェイ姿見駅周辺である。対象領域における主たる植生は, 樹高が1m~2m程度のハイマツ, 高山植物であり, 一部に裸地や露岩している箇所がある。また, 姿見駅では複合気象センサー (VAISALA 社製 WXT536) を設置して, 気温, 湿度, 風向風速, 気圧, 降雨強度を観測している。さらに対象領域からは離れているが, 旭岳温泉 (旭岳観測所) にて, 国土交通省が降水量及び積雪深を観測している。

#### 2.2 モデル概要

積雪分布のシミュレーションには, スイス連邦雪・雪崩研究所により開発された Alpine3D を用いた。計算期間は2018年11月10日1時から2019年5月1日23時までである。計算範囲は地上レーザー測量及びUAV写真測量の範囲を参考に設定した。また, Alpine3Dの計算解像度は計算負荷を考慮して5mメッシュとした。

#### 2.3 リモートセンシングデータ

積雪分布のリモートセンシングデータには, 2019年1月から4月にかけて約一か月間隔で実施した3回の地上レーザー測量データ及び2020年1月から3月にかけて3回実施したUAV写真測量データを用いた。また, 無雪期の標高データには国土交通省より提供を受けた地表面DEM (水平解像度1m) を用いており, 積雪表面のDEMとの差分値を積雪深とした。

ALS\_SCALINGには2020年1月7日に実施したUAV写真測量の結果を用いて, 2019年の積雪分布結果の再現計算を行った。紙面の都合により, 計算結果は2019年1月13日の結果のみを示す。

### 3. 計算結果

図1に2019年1月13日の地上レーザー測量による積雪分布を, 図2にはAlpine3Dによる計算結果をそれぞれ示す。地上レーザー測量による積雪分布には, 欠測があるため単純比較は難しいが, 概ね堆積傾向は再現できている。特に, 枠線の範囲を再現できている。そのため, 1度でも高精度な積雪分布データを得ることができれば, 高精度な積雪分布シミュレーションが可能となると考えられる。ただし, 本研究での対象領域は旭岳の一部

であり, 今回適用した範囲以外での適用性については未知数である。

### 4. まとめ

Alpine3Dを用いて他シーズンの積雪分布データによる, 積雪分布シミュレーションを行った。その結果, 旭岳においては他シーズンのデータを用いた場合でも, 計算結果には高い再現性があり ALS\_SCALING の有効性が確認できた。

#### 謝辞

地上レーザー測量, UAV写真測量及び観測機器の設置を行うに当たり, ワカサリリゾート(株)旭岳事業部(旭岳ロープウェイ)にご協力頂いた。また, 1mメッシュのDEM, 忠別ダム管理所及び旭岳温泉の気象データは国土交通省から提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Christian Vögeli, Michael Lehning<sup>1</sup>, Nander Wever and Mathias Bavay, 2016: Scaling Precipitation Input to Spatially Distributed Hydrological Models by Measured Snow Distribution, *Frontiers in Earth Science*, 4, 108.

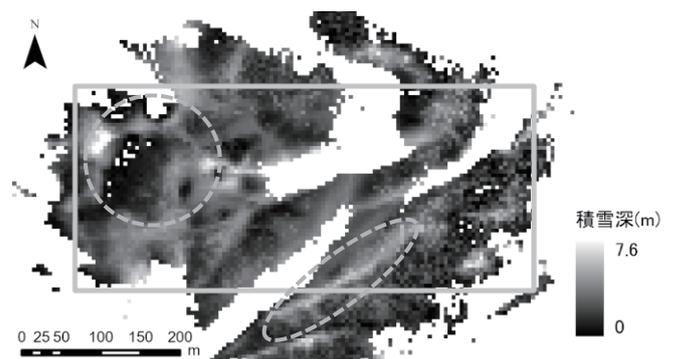


図1 地上レーザー測量による積雪分布  
(2019年1月13日)

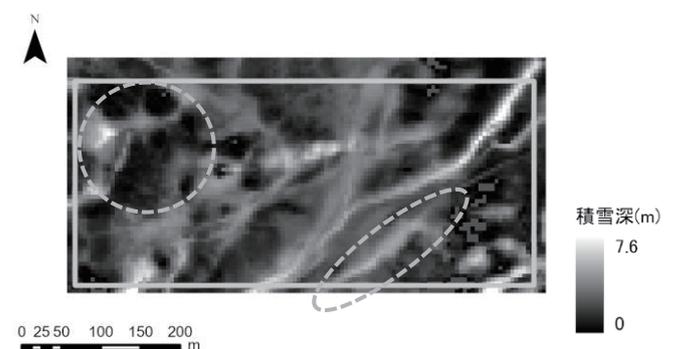


図2 Alpine3Dによる計算結果  
(2019年1月13日)

1 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所

2 国土交通省北海道局

Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI

Hokkaido Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

## 菅平高原における山岳積雪のモデル実験

## Diagnosing the mountain snow cover using one-dimensional numerical model in Sugadaira

○浪間 洋介\*1・上野健一\*2・山崎剛\*3

Yosuke NAMIMA, Kenichi UENO, Takeshi YAMAZAKI

## 1. はじめに

上野ほか (2020) は中部山岳域内陸に位置する菅平高原での積雪層構造が南岸低気圧の通過に伴う積雪上の降雨 (ROS) の影響を強く反映していることを明らかにしている。特に、少雪であった2019/20年の積雪は全層でざらめ化を引き起こしている。しかし、過去13年間の断面観測結果によると、必ずしも近年ほど湿雪化が進行している傾向は見られず、年による雪質変化が著しい。本研究では、Yamazaki (2001) の一次元多層積雪数値モデル (山崎モデル) を用いて、積雪量が著しく少ない2019/20年と比較的平常年並みであった2020/21年を対象として菅平高原における積雪再現実験を行い、年による雪質変化が何に依存するかを診断した。さらに雪質の長期変化に影響を与える気象場の指標として何が重要かを考察した。

## 2. 2019/20 および 2020/21 年冬季の積雪特性

高原内の標高1254m, 1320m, 1600mで測定された積雪深変化に大きな差異は見られない。この要因として、同スケールでは降水量・降水形態の標高に応じた著しい違いがみられない事が想定される。一方で、2020/21年の融雪期には最高地点における積雪深より低標地点の方で積雪深が大きく、菅平盆地内で発達する冷氣層が融雪に影響していることが示唆された。2019/20年の積雪深には堆積期の増加が見られず、2020/21年に比べて早期からROSが頻発・ざらめ層が卓越し、3週間程度早く消雪している (図1)。低気圧活動に伴う温暖な天候が積雪構造に大きな違いをもたらしたと考えた。

## 3. 1次元モデルによる再現実験とデータ補正

山崎モデル (Ver.3.46) により1320m地点における積雪の再現実験を行った。モデルは植生無しの150秒間隔、2cm間隔で計算し、気温、相対湿度、降水量、風速、下向き短波・長波の時間値を入力し、層毎の密度・雪温度・含水率・しもざらめ度と積雪深・水量を出力した。両年とも初期入力データでは著しく積雪深が過小評価となったが、降雪量を参考に降水量を4-5割増加する補正を行い、アルベドに観測値を採用することにより積雪深変化が改善された (図2)。雨量計では計測されていない弱い降雪の発生や、融雪期後半に生じる裸地との混在を入力値に考慮する事が重要と考えられる。

モデルにより再現された積雪内の温度・密度・含水率・しもざらめ度およびこれらからYamazaki (2001) で定義する雪質の季節内変化を両年で比較した。2019/20年は冬季の初期から雪温が0度の濡れ雪が卓越し、下層の密度増加も顕著でない。底面流出も頻繁に派生している。一方、2020/21年は2月以降に密度の増加および濁き雪から濡れ雪への変化が顕著である (図3)。特に、1月27日と2月15日のROSに伴い全層の湿雪化と下層での密度増加が見られ、積雪内での再凍結が生じている事も考えられる。

## 4. 今後の課題

両冬季において、ROSの発生の有無、潜熱・顕熱量の違い、再凍結量の差、盆地冷却効果などに関する感度実験を行い、暖冬時と平常時の山岳積雪構造に影響を与える気象条件を把握する。

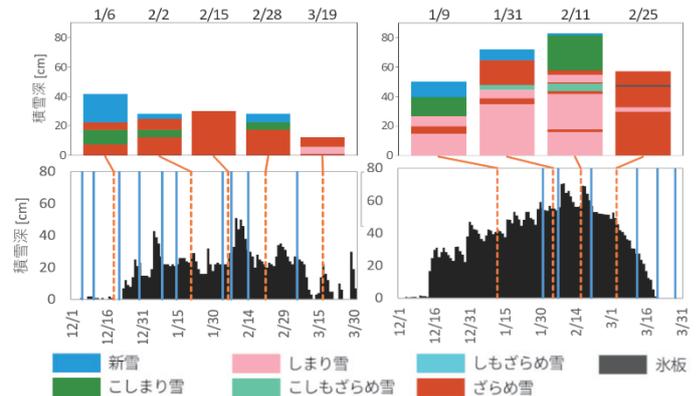


図1 2019/20と2020/21年の断面 (上段) と積雪深 (下段) 変化  
ROS発生日と断面観測日を青実線と赤破線で示す。

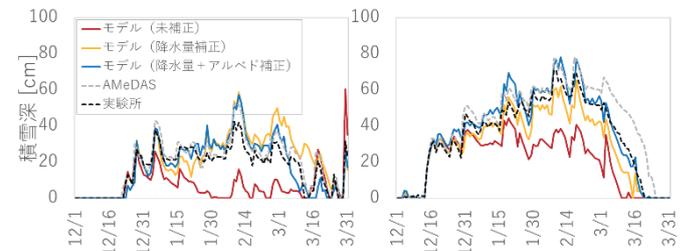


図2 2019/20年 (左図) と2020/21 (右図) の積雪深シミュレーションと観測値の比較

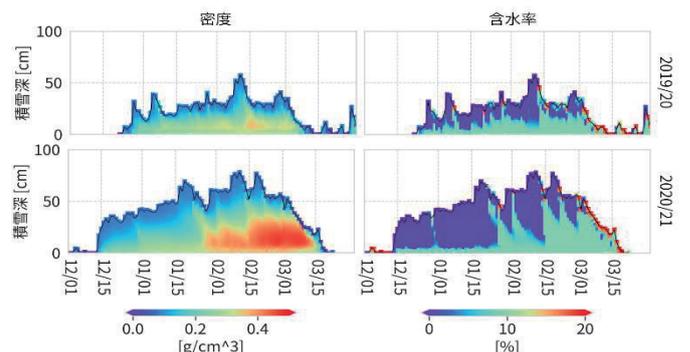


図3 シミュレーションにより再現された密度および含水率の比較

## 参考文献

- 1) 上野健一, 杓天候, 浪間洋介, 2020: 菅平高原における山岳積雪の湿雪化と低気圧活動の影響、2020年雪氷研究大会、予稿集。
- 2) Yamazaki, T., 2001: A one-dimensional land surface model adaptable to intensely cold regions and its applications in Eastern Siberia. J. Meteor. Soc. Japan, 79, 1107-1118.

\*1 筑波大学理工情報生命学術院

\*2 筑波大学環境系

\*3 東北大学大学院理学研究科

Graduate School of Science and Technology, Univ. Tsukuba  
Faculty of Life and Environmental Science, Univ. Tsukuba  
Graduate School of Science, Tohoku University

## 日本海側の中山間地帯における積雪環境の変動 Variation of snow cover in a midland area on the Sea of Japan side

○松浦純生<sup>1</sup>, 岡本隆<sup>2</sup>, 大澤光<sup>2</sup>

MATSUURA Sumio, OKAMOTO Takashi and OSAWA Hikaru

### 1. はじめに

日本海側に位置する中山間地は、世界でも有数の多雪地帯と知られている。これらの地域は暖温帯に属することから温暖化による影響を受けやすい。積雪環境が変化すると、雪氷災害や水象災害、さらに地盤災害などの種類や規模、形態、さらに発生時期などに大きな影響を及ぼすと考えられる。したがって、これまでの気候変動を検証し、将来を予測する上でも長期間にわたる積雪環境のモニタリングは極めて重要となる。国立研究開発法人森林総合研究所では関東森林管理局と共同で、1987年から積雪環境の観測を34年間にわたって実施してきた。今回、得られたデータを用いて、日本海側に面した中山間地における積雪環境の変動を予察的に調べたので報告する。

### 2. 観測地と観測方法

観測地は、新潟県上越市安塚区伏野地区(伏野試験地)の新第三紀の緩やかな中山間地帯に位置する。気象観測露場の標高は567mで積雪深や積雪水量、融雪水量、気温、降水量などの観測を1987年12月から開始した。積雪深の観測は、超音波式の積雪深計を用い、2008年からはレーザー式の積雪深計も追加された。観測地は冬期間に深い雪に覆われることに加え、山間地のため落雷などの被害を受けやすい。したがって、しばしば欠測が生じる。このため、欠測期間中のデータは、観測地から北約6.7kmにある、気象庁アメダス安塚観測所(標高126m)のデータを用いて補完した。

### 3. 観測結果と考察

固体降水の結果としてもたらされる積雪は、最大積雪水量までの堆積期間では気温や降水量、とくに降水種に大きく依存し、融雪期間は気温や日射量などの影響を大きく受ける。地表面に形成される季節積雪量を評価する指標としては、根雪日数や平均積雪深、最大積雪深、さらに積雪水量などが挙げられる。

積雪に関係する災害や水資源の観点からは、積雪水量を指標とした場合が最も適当であると考えられる。しかし、積雪水量の観測は積雪深と比較して難しく、とくに山間地では積雪層のグライドやクリープが発生するため困難な場合が多い。したがって、今回は積雪深のデータを用いることにした。

毎年形成される積雪層をより定量的に評価するため、積雪総量(SSAI: Seasonal Snow Accumulation Index)を用いることにした。すなわち、観測期間中に初めて積雪が観測された日(1988年10月28日)から最も遅く消雪を記録した日(1996年5月20日)を積雪期間とし、その期間内における各寒候期の日平均積雪深の積算値を求めて指標にすることにした。その結果を図に示す。

SSAIが最も少なかったのが2020年寒候期(19/20)で101.5mとなった。なお、この年は最寒期の2月に地すべりが発生してい

る。以下、88/89が続き、さらに08/09、06/07となり、いずれも暖冬少雪年と位置づけられる。一方、最もSSAIが大きかったのは05/06の590.4mで、19/20の約6倍近くの値となった。当然のことながら根雪期間も170日と19/20の132日より約2ヶ月長かった。次に11/12、14/15となり、さらに04/05、12/13が続き、2000年代以降に多雪年が多発する傾向が見られた。ちなみに、日平均最大積雪深を記録したのは11/12で、2月11日に539.4cmを記録している。

さらに長期的な積雪量の変化の傾向をみるため、1987~98(87/98)、98/09、09/21の3期間毎にSSAIの平均値と標準偏差を求めたところ、平均値は約11年毎に増加する傾向がみられた(図1)。とくに87/98に比べて89/09および09/21は20~30%多くなった。さらに、標準偏差も87/98と比べて30~50%も大きな値を示す。つまり2000年以降は平均すると多雪傾向にあるものの、少雪年の出現も頻発し、そのコントラストが大きくなることがわかった。前述のように05/06は多雪年となったが、翌年の06/07のSSAIは134.9mと、4番目の少なさであった。

一方、寒候期(11~5月)における平均気温の変化をみたところ、全体的に上昇する傾向がみられた。気温と積雪総量の関係は、穏やかな負の関係にあるものの、14/15のように多雪年にもかかわらず、34年間の平均気温よりも高い場合もあった。一方、15/16は最も高い平均気温を記録しSSAIも181.1mと少雪だったものの、期間中の下から6番目と最も低いわけではない。

いずれにしても寒候期の平均気温は緩やかに上昇する傾向がみられたものの、少雪年と多雪年の差が大きくなり、平均すれば積雪量は増加する傾向が得られた。これらの結果は、全国の気象観測地点での最深積雪深のデータをもとに、多雪指数(SSDI)による年々の変動解析結果とほぼ一致する結果となる<sup>1)</sup>。今後、さらに詳しい解析に取り組みたい。

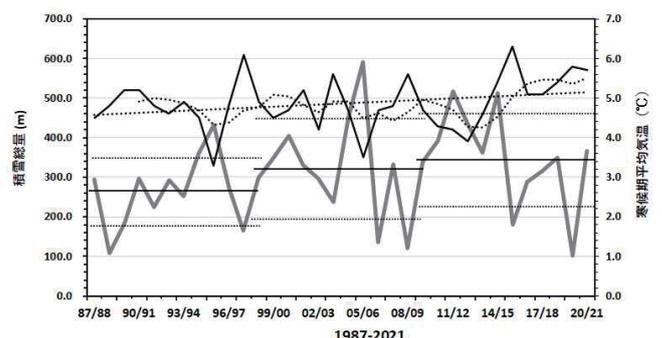


図 伏野試験地での積雪総量と気温の変化(1987~2021)

### 参考文献

- 1) 中井専人(2015):”多雪指数”を用いた全国の多雪・少雪の年々変動と分布、天気、62(3)、29-41。

1 前京都大学防災研究所  
2 国立研究法人森林総合研究所

Professor Emeritus, Kyoto University  
National Institute of Forestry and Forest Products Research

観測用建物モデルを用いた屋根雪荷重の実測  
— 地上積雪重量との比較 —

## Measurement of roof snow load on an observational building model

- Comparison of snow loads on roof and ground -

○五十嵐賢次<sup>1</sup>, 涌井将貴<sup>1</sup>, 本吉弘岐<sup>2</sup>, 富永禎秀<sup>1</sup>

Kenji Igarashi, Masaki Wakui, Hiroki Motoyoshi, Yoshihide Tominaga

## 1. はじめに

屋根上の積雪荷重を正確に推定する方法を構築するための基礎資料を得ることを目的として、準実大の建物モデル<sup>1)</sup>を設置して現地計測によりその挙動を把握する。また地上積雪深・積雪重量を同時に計測し、屋根雪荷重との比較を試みる。

## 2. 観測概要

新潟県長岡市にある防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの露場に、木造の観測用建物モデルを設置した。建物モデルを図1に示す。軒高さ2.0m、3/10勾配の切妻屋根で、屋根面積4.0m<sup>2</sup>×2.0mのアスファルトルーフィング仕上げである。妻面を南北方向とし、主に西側が風上となる。

建物モデルの4隅には小屋組みを支える荷重計を設置し、降雪による荷重変化を測定した。軒先には雨どいを設けて内部に引込み、流量計で屋根流出水を計測した。同時に屋根積雪状況を自動撮影した。また敷地内で気象観測される外気温、風速、降水量、積雪深、積雪重量、融雪量を用いて屋根雪荷重と比較した。観測期間は根雪となった2020年12月14日から地上積雪が消雪した2021年3月20日までとした。これら観測は1時間毎であるが、データ整理においては毎日に換算した。

## 3. 地上積雪量との比較

図2に観測された屋根雪荷重と地上積雪重量の変化を示す。屋根雪荷重と地上積雪重量は1月10日頃までは比較的よく対応していたが、その後屋根雪の軒先やケラバで融雪が進み2月25日には消雪した。地上積雪はその約1か月後までは積雪状態が観測された。積雪荷重の最大値は、屋根は1月12日で2.95kN/m<sup>2</sup>、地上は2月19日で4.9kN/m<sup>2</sup>あった。写真1に屋根雪の積雪状況を示す。積雪深は共に1月10日が最大で、屋根は写真スケールで約1.05m、地上は1.55mであった。また屋根積雪荷重の最大値である1月12日の屋根積雪深は約0.9mであった。

図3に地上積雪重量-積雪深関係を示す。シーズンを通すと積雪の単位体積重量は約3.4kN/m<sup>3</sup>となる。地上積雪深は1月10日をピークに2月に1.2m超えが3回あったが、期間が短く沈降や圧密で締固められ、積雪重量としてのピークは2月19日となった。それ以降は融雪が支配的になり単位体積重量も4.9kN/m<sup>3</sup>に近い値となっている。

## 4. 融雪量の観測結果

屋根雪、および地上積雪の融雪水を観測し、単位面積で除した融雪量を積算したものを図4に示す。融雪量は1月10日頃まではほぼ一致したが、それ以降は屋根雪で融雪が進み、その差が大きくなっている。

また実際に観測した融雪量と、デグリデー法を用いた日平均気温による積算値が合うように融雪係数の設定を試みた。図中の破線は設定による推測値である。融雪係数は-2℃を融雪下限温度に設定すると、屋根雪では0.044kN/m<sup>2</sup>・℃の場合にRMSE値

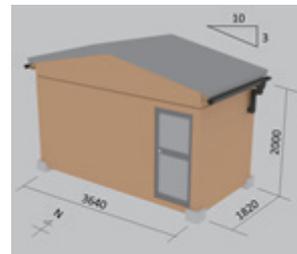


図1 建物モデル

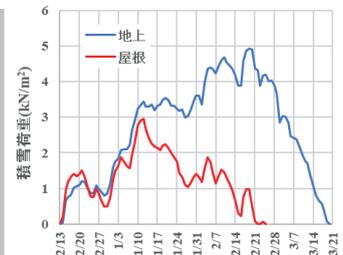


図2 積雪荷重の変化



写真1 屋根積雪状況

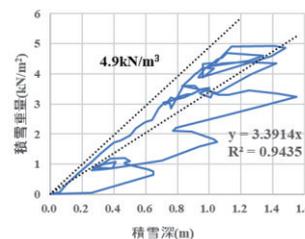


図3 地上積雪重量-積雪深関係

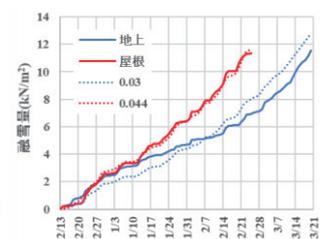


図4 融雪量の積算

が0.204、地上積雪では0.03kN/m<sup>2</sup>・℃の場合にRMSE値が0.817である。屋根雪では非常に良い対応を示し、融雪係数を適切に設定すれば、融雪量を精度よく推定できる。

## 5. まとめ

2020/21シーズンの観測結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 屋根雪と地上積雪を比較することで、その挙動が明らかになった。降雪当初は積雪荷重や融雪量が比較的よく一致するが、途中から屋根雪の融雪量が大きくなり消雪まで期間に影響を及ぼす。
- 2) 今回設定した融雪係数を用いて、日降水量と日平均気温から推測される積雪重量・積雪深について、屋根雪でも適用できるか検証する予定である。

謝辞 本研究は科学研究費(20H02315)の助成で行われた。  
参考文献 1) 富永禎秀, 五十嵐賢次, 涌井将貴, 本吉弘岐, 高田清太郎, 2021. 屋根雪荷重推定モデルの検証用データ取得を目的とした準実大建物モデルの開発, 日本建築学会技術報告集, 第27巻, 第65号, pp114-118

1 新潟工科大学

2 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

Niigata Institute of Technology  
Snow and Ice Research Center, NIED

## アメダスデータを用いた降雪量推定(1) : 関東地方を対象とした試算 An Estimation of Snowfall Amounts Using AMeDAS Data (1): Examples of Kanto District

○大宮哲<sup>1</sup>, 原田裕介<sup>1</sup>, 西村敦史<sup>1</sup>  
Satoshi Omiya, Yusuke Harada and Atsushi Nishimura

### 1. はじめに

近年、普段あまり雪が降らない地域(以下、少雪地域)においても集中的な大雪が度々発生している。大雪による被害を軽減するためには、広域かつ多点の降雪状況をリアルタイムに把握することが求められる。現在、日本全域を対象とした降雪状況のリアルタイムメッシュ情報が気象庁「解析積雪深・解析降雪量」や新潟大学「準リアルタイム積雪深分布」として公開されているが、これらのメッシュ推定値はいずれも積雪深計による実測値を用いた補間・補正処理に基づいている。したがって、積雪深計の設置数が少ない少雪地域の推定精度は、多雪地域に比べて低いと考えられる。

本研究では、少雪地域における降雪状況を、積雪深計を用いずに、一般的なアメダスデータ(降水量・風速・気温)から把握することを目指している。本稿では、2014年2月に関東甲信地方で発生した2度の大雪事例(8~9日, 14~15日)を対象に、関東地方の8地点で降雪量を推定した結果について述べる。なお、多雪地域である北海道石狩地方を対象とした降雪量の推定結果については、第2報の菅原ほか<sup>1)</sup>により報告する。

### 2. 降雪量の推定方法

降雪量の推定には雪水変換法<sup>2)</sup>を使用した。これまで、気象庁によって、関東6都県の官署(東京・横浜・千葉・熊谷・前橋・宇都宮)における雪水比が統計的に整理されている<sup>2)</sup>。気象庁は、この6地点を気象特性の違いに基づいて2つの地域(南部都市部・北部平野部)に分けたうえで、気温階級別に雪水比を示している。しかし、官署の1つである水戸については、両方の気象特性を併せ持つという理由から、雪水比が示されていない。また、通常の天気予報では関東地方南部に属する熊谷がここでは北部平野部として扱われているなど、地域の区分けが統一されていない。このような地域の区分けが曖昧な雪水比は、意思決定を担う実務者(道路管理者や自治体の防災担当者等)にとって使いやすい指標とは言えないだろう。実務的な観点からは、地域の区分けが明確、もしくは地域に依らない雪水比を提示することが望ましいと考える。これを踏まえ、本研究では雪水比が地域に依らないと仮定したうえで、上述のアメダスデータから降雪量を推定した。ここでは、新雪時の積雪密度<sup>3)</sup>から換算した3パターンの雪水比(①: 1.11, ②: 0.67, ③: 0.38 or 0.76)を使用した。雪水比①と②は気温に依存しないと仮定したものの、雪水比③は気温0℃を境に異なる値を設定したものである。なお、風による降水量計の捕捉損失分については、大宮ほか<sup>4)</sup>が示した風速と捕捉率の関係式を用いて補正した。この補正済みの降水量データに雪水比を乗ずることで、降雪量を算出した。

### 3. 推定結果の精度検証

積雪深計による実測値との比較結果の一部を図1に示す。図1は、最も推定精度が高かった雪水比③を用いた推定結果について、全地点・両事例のデータをまとめたものである(データ数N=260)。比較対象としたデータは、積雪深計によって降雪が記録されてから最大積雪深を記録するまでの各時間降雪量である。

推定値と実測値の相関係数Rは0.77, RMSEは1.2, 回帰係数aは0.91であった。次に、雪水比③によって推定した時間降雪量の累計値の比較結果の一部を図2に示す。これは、積雪深計によって降雪が記録されてから最大積雪深を記録するまでの累計値の時間推移を示している。この結果より、本研究において推定した降雪量は、積雪深計によって実測された降雪量と概ね整合的であることが確認できる。

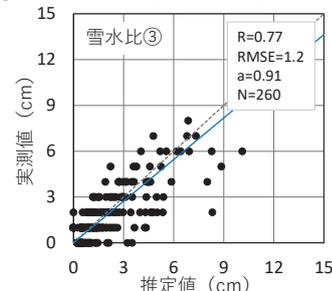


図1 時間降雪量の比較

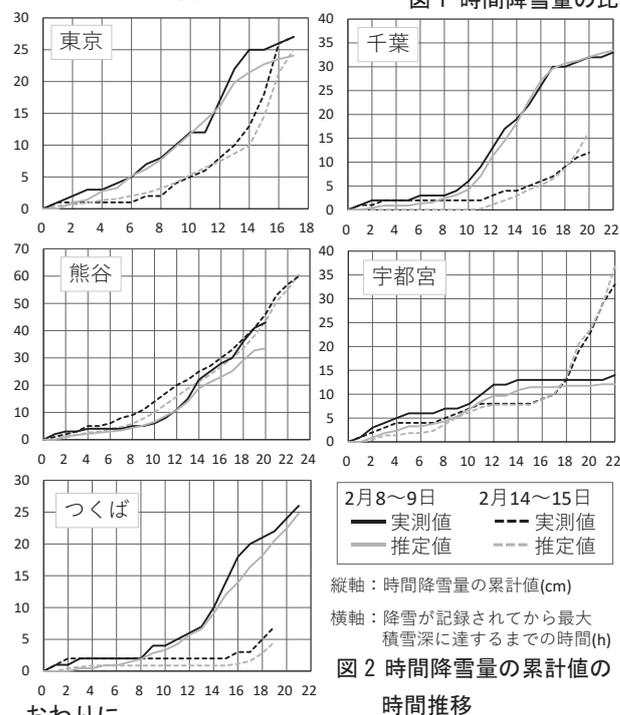


図2 時間降雪量の累計値の時間推移

### 4. おわりに

本研究の完成は、一般的なアメダスデータから広域かつ多点の降雪状況をリアルタイムに把握することを可能とするものである。積雪深計を必要としないため、降雪観測網が手薄な少雪地域における雪氷災害対策の一助となることが期待される。今後は、推定誤差の許容範囲について意思決定を担う実務者へのヒアリングを行うほか、解析を行う大雪事例を増やすとともに、他の少雪地域への適用可能性についても検討する予定である。

本研究の一部は、(公財)日立財団「2018年度倉田奨励金」により実施した。ここに記して謝意を示す。

### 参考文献

- 1) 菅原ほか, 2021: 雪氷研究大会 (2021・千葉) 講演要旨集。
- 2) 気象庁, 2014: 量的予報技術資料, 19, p.35.
- 3) 斎藤, 1974: 水利科学, 96, pp.35-48.
- 4) 松田・清水, 2015: 雪氷, 77, pp.303-311.
- 5) 大宮ほか, 2020: 北海道の雪氷, 39, pp.33-34.

<sup>1</sup> (国研) 土木研究所 寒地土木研究所

Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI

## アメダスデータを用いた降雪量推定(2) : 北海道石狩地方を対象とした試算 An Estimation of Snowfall Amounts Using AMeDAS Data (2): Examples of Ishikari District

○菅原邦泰<sup>1</sup>, 大宮哲<sup>1</sup>, 原田裕介<sup>1</sup>, 西村敦史<sup>1</sup>

Kuniyasu Sugawara, Satoshi Omiya, Yusuke Harada and Atsushi Nishimura

### 1. はじめに

積雪深や降雪量は、冬期道路管理に不可欠な情報である。現在、日本全域を対象とした積雪深や降雪量のリアルタイムメッシュ情報が、気象庁「解析積雪深・解析降雪量」や新潟大学「準リアルタイム積雪深分布」として公開されている。これらのメッシュ推定値には、積雪深計の実測値による補間・補正処理が施されており、実測値に依存する。しかし、積雪深計が設置されていない気象観測点も多数存在する。本研究の目標は、積雪深計以外の観測データから降雪量を推定することである。本稿では、多雪地域である北海道石狩地方の結果について報告する。なお、少雪地域における結果は大宮ら<sup>1)</sup>の第1報を参照されたい。

### 2. 解析手法

気象庁管轄の北海道石狩地方のアメダス観測点のうち、積雪深計を有する6地点を対象として、雨量計(降水量計)による実測の降水量から降雪量を推定し、実測値との比較を行った。なお、雨量計における捕捉損失は大宮ら<sup>2)</sup>が示した関係を用いて補正した。降雪量の推定には、2010年から2019年の1月の地上観測データ(降水量・風速・気温)の時別値を使用した。データの抽出条件は、降水量および実測降雪量のいずれかが $0 \text{ mm h}^{-1}$ ないし $0 \text{ cm h}^{-1}$ より大きく、気温が $0^\circ\text{C}$ 未満であることの2条件とした。推定降雪量は1時間ごとに算出した降雪量を、実測降雪量は積雪深計によって1時間ごとに計測された積雪深差(増加分)を時間降雪量とし、それぞれ比較した。降水量から降雪量を求めるためには、新雪密度を考慮する必要がある。新雪密度には、① $30 \text{ kg m}^{-3}$ 、② $90 \text{ kg m}^{-3}$ 、③ $132 \text{ kg m}^{-3}$ 、④中尾<sup>3)</sup>の回帰式による推定値の4パターンを用いた。①および②は、斎藤<sup>4)</sup>における新雪密度のそれぞれ最小値と平均値である。③は大宮ら<sup>1)</sup>において用いられた松田・清水<sup>5)</sup>に基づく新雪密度である。④は風速と気温の時別値から新雪密度を推定する回帰式である。

### 3. 結果と考察

それぞれの新雪密度における回帰直線を図1に示す。新篠津、石狩、札幌、千歳の4地点では、新雪密度②が最も実測値との整合性が高かった。一方で、厚田は新雪密度③が、恵庭島松では回帰式による推定値を用いた新雪密度④が、それぞれ最も整合性が高かった。次に、表1に石狩管内各地点で新雪密度②を用いた場合の事例数( $N$ )、二乗平均平方根誤差(RMSE)、相関係数( $r$ )、回帰係数( $a$ )を示す。どの地点でもRMSEは1.0から2.0の範囲に収まっており、千歳を除いて相関係数にも大きな差はなかった。しかし、回帰係数には地点ごとに差が見られた。降雪特性には気温や雲内の過飽和度、総観場や地理的な効果などが影響を及ぼす。今回の結果はそれらの影響を反映していると考えられる。今回は厳冬期である1月の石狩地方のみを解析対象とした。今後は他の月および北海道内の他地域にも同様の解析を行い、その特徴について整理する方針である。

### 謝辞

本研究の一部は、(公財)日立財団「2018年度倉田奨励金」により実施した。ここに記して謝意を示す。

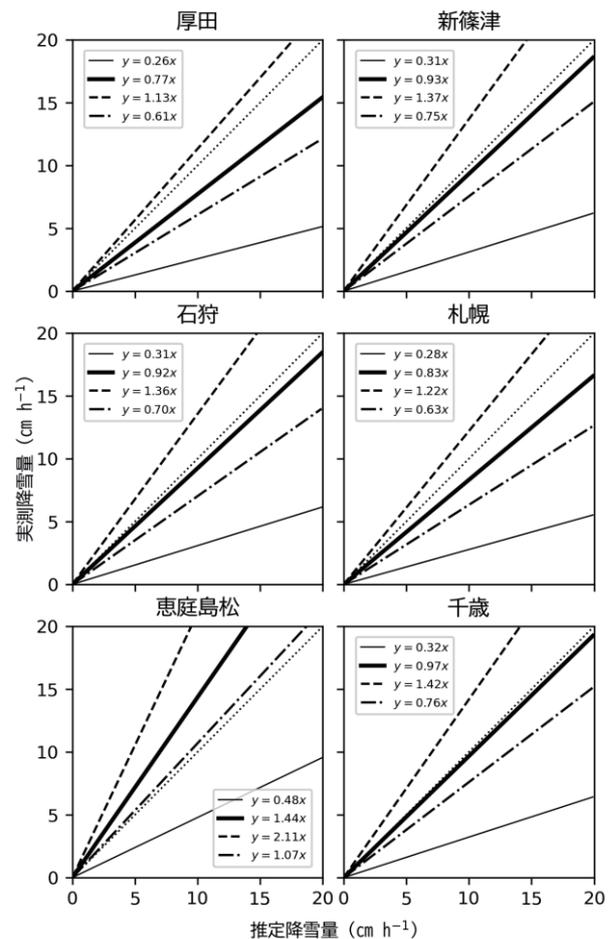


図1 各新雪密度の回帰直線。細線，太線，破線，一点鎖線はそれぞれ新雪密度① - ④における回帰直線を示す。点線は等値線を示す。

表1 新雪密度②を用いた場合の各地点の統計指標

地点	$N$	RMSE	$r$	$a$
厚田	1346	1.34	0.56	0.77
新篠津	1640	1.48	0.52	0.93
石狩	1223	1.50	0.56	0.92
札幌	1141	1.06	0.59	0.83
恵庭島松	894	1.50	0.62	1.44
千歳	427	1.63	0.27	0.97

### 参考文献

- 1) 大宮ら, 2021: 雪氷研究大会 (2021・千葉) 講演要旨集。
- 2) 大宮ら, 2020: 寒地土木研究所月報, **810**, 31-34.
- 3) 中尾, 2005: 土木学会北海道支部論文報告集, **61**, II-7.
- 4) 斎藤, 1974: 水利科学, **96**, 35-48.
- 5) 松田・清水, 2015: 雪氷, **77**, 303-311

## 汎用レーザー距離計による路面残雪深計測

## - その 2 : 路面残雪深計測における表面下散乱現象 -

Measurement of road surface snow depth by a general laser distance meter  
- Part 2: Subsurface Scattering phenomenon in measurement of road surface snow depth -山賀康平<sup>1</sup>, ○平田拓巳<sup>1</sup>, 杉原幸信<sup>2</sup>, 上村靖司<sup>2</sup>

Kohei Yamaga, Takumi Hirata, Yukinobu Sugihara and Seiji Kamimura

## 1. はじめに

年間を通じて温度が一定な地下水を散水する融雪装置は、比較的 low コストで効果も高いことから雪国に欠かせない技術として広く普及している。現在は降雪の有無を検知して制御する方法が主流であるが、上村らの研究では、これを積雪深による制御に変更するだけで消費熱は半分以下に削減され、運転時間の短縮につながる事が示されている。山賀ら(2020)は、積雪深制御の実用化に向けた基礎検討として、レーザー距離計による路面残雪深測定実験を行い、10 cm 以下の残雪深測定において測定値が実際よりも低くなるバイアスが生じることと、そのバイアスが「表面下散乱現象」によって引き起こされている可能性が高いことを報告した。本報告ではこの表面下散乱現象をモンテカルロ法によるシミュレーションによって分析し、レーザー距離計を用いた残雪深計測に対する表面下散乱の影響について調べた結果を報告する。

## 2. 表面下散乱現象

レーザー光が照射された模擬雪を横から見ると「表面下散乱」と呼ばれる入射した光が表面だけでなく積雪粒子内で反射・散乱した後に表面から出ていく現象が確認された。本来、レーザー距離計から対象物表面までの距離を計測するはずだが、表面下散乱を起こすと、レーザー光の経路が表面での反射時よりも長くなり、計算によって導かれる積雪深の測定値が小さくなる(図1)。

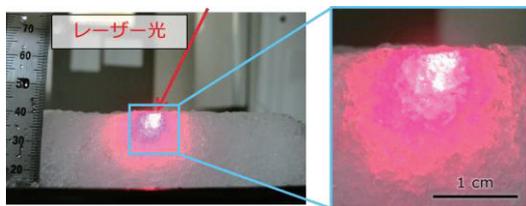


図1 レーザー光を照射した積雪面における表面下散乱

## 3. モンテカルロ法による表面化散乱シミュレーション

本研究ではモンテカルロ法を用いたシミュレーションを用いて、残雪に照射したレーザー光のふるまいを調べる。モンテカルロ法とは、様々な事象を乱数に対応させ、その事象が何回発生するか、どのくらいの確率で起こるのかなどを、シミュレートする方法である。モンテカルロ法による光子伝播シミュレーションでは光子の進行方向、進行する距離、散乱後のエネルギーなどを、散乱媒質の光学特性に基づいて発生させた乱数を用いて計算する。(図2)

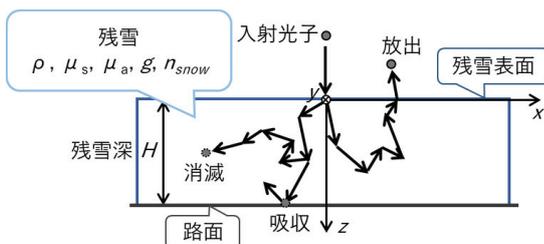


図2 モンテカルロ法によるシミュレーションの模式図

残雪と光子のふるまいは残雪の光学特性(散乱係数 $\mu_s$ , 吸収係数 $\mu_a$ , 屈折率 $n_{\text{snow}}$ , 非等方性パラメータ $g$ )によって関係づけられる。シミュレーションでは、光子の残雪内部での移動、減衰、散乱を繰り返し計算する。そして、残雪入射時に表面で反射、または残雪内部を伝播して放出した光子の伝播距離を平均することで、レーザー距離計が受光する残雪深測定値への表面下散乱の影響を推定することができる。今回は残雪深を0~10cmの間について1cm刻みでシミュレーションを行った。

## 4. シミュレーション結果

図3にシミュレーションの結果と残雪深測定実験での模擬雪の残雪深の実測値を示す。各プロットをみるとシミュレーション結果よりも実測値の方が、残雪深が低くなるバイアスが大きいのことがわかる。シミュレーションの結果、表面下散乱によって残雪内を伝播し残雪表面から放出した光子が、黒路面では0.13~4.06 cm, 白路面では0.30~3.76cmの伝播距離を持っていることが確認できた。レーザー距離計が出力するのはレーザー光が往復した距離ではなく、片道分の距離である。したがって、伝播距離を半分にした値が、残雪深測定値のバイアスとなる。

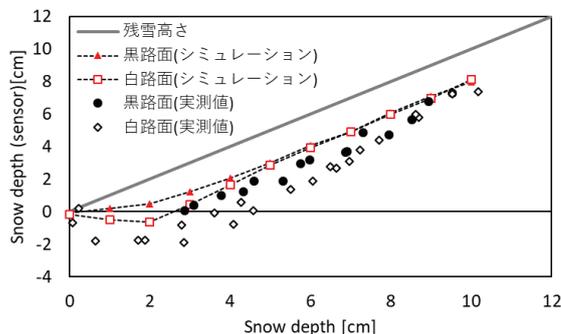


図3 シミュレーション結果と実測値の比較

## 5. まとめ

残雪深推定実験で確認されたバイアスについて、モンテカルロ法を用いた残雪内光子伝播シミュレーションによりレーザー光の表面下散乱が残雪深測定値に与える影響について調査した。構築したプログラムによるシミュレーションの結果、表面下散乱によって残雪内を伝播し残雪表面から放出した光子が、バイアスの大きさはシミュレーション結果では約2 cm, 実測値では約3 cmであった。

## 参考文献

- [1] 上村靖司, 善哉広大 (2019) 「路面融雪装置の設計熱負荷 第3報: サービス水準と消費熱の総合評価指標の提案」, 雪氷 81(6), pp.269-281.  
[2] 山賀康平, 上村靖司, 藤野丈志, 杉原幸信 (2020) 「汎用レーザー距離計による路面残雪深計測」, 雪氷研究大会 (2020・オンライン)講演要旨集, p.69.

1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 機械創造工学専攻  
2 長岡技術科学大学 機械創造工学専攻

Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology  
Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology

## 塩化カルシウム溶液を散布した路面のすべり特性 Characteristics of Sliding Friction on Road Surface Sprayed with Calcium Chloride Solution

○藤本明宏<sup>1</sup>  
Akihiro Fujimoto

### 1. はじめに

塩化カルシウム(以下, CaCl<sub>2</sub>)は吸湿性が高く, 水分を含むとべとつき, 粘り気やぬめりが強いことが知られている. この特性により, 路面に残留した CaCl<sub>2</sub>は路面を滑り易くさせる可能性が懸念されている. 実際に, CaCl<sub>2</sub>の撒き過ぎがスリップ事故を誘発させたとして管理瑕疵を争った訴訟事例<sup>1)</sup>もある.

本研究では, CaCl<sub>2</sub>溶液散布に着目し, CaCl<sub>2</sub>に起因した路面すべり摩擦係数 $\mu$ の低下を明らかにするために, 室内および野外実験を実施したので, その結果<sup>2)</sup>を紹介する.

### 2. 室内実験

室内では, CaCl<sub>2</sub>溶液の散水実験(以下, 溶液散水実験)とCaCl<sub>2</sub>を析出させた路面への散水実験(以下, 析出散水実験)を実施した. 溶液散水実験では, 乾燥路面に規定の質量および濃度のCaCl<sub>2</sub>溶液を散布し, 図1に示すポータブル・スキッド・レジスタンス・テスタを用いて舗装供試体のすべり抵抗値BPNを測定した. 析出散水実験は次の手順で実施した. (i)乾燥した舗装供試体にCaCl<sub>2</sub>溶液を散布する, (ii)乾燥させ, 溶質を析出させる, (iii)規定質量の蒸留水を散布する, (iv)BPNを測定する. 表1に実験の条件を示す. 比較のために塩化ナトリウム(以下, NaCl)溶液の実験も行った.

図2(a)および(b)は密粒度舗装でのCaCl<sub>2</sub>溶液およびNaCl溶液の実験結果を示す. まず, 溶液散水実験の結果を述べる. 同図(a)に着目すると, 散水厚 $h_w = 0$  mm(乾燥状態)の $\mu$ は0.83であるが,  $h_w = 0.01$  mmの僅かな水分によって $\mu$ は0.6程度まで急減した.  $h_w > 0.01$  mmでは $\mu$ に明確な変化はなかった. また, 散布濃度による $\mu$ の違いは殆どない. 同図(b)からは, 蒸留水にNaClが混入したことによる $\mu$ への影響はないことが分かる.

次に, 析出散水実験では, CaCl<sub>2</sub>溶液の実験において $h_w \leq 0.01$  mmの $\mu$ は極端に小さく,  $h_w = 0$  mmの $\mu$ は0.40であった.

なお, 本論文に図を示していないが, ポーラス舗装では,  $h_w = 0$ の $\mu$ は0.92であり, 溶液散水実験での $h_w = 0.01$  mmでは0.57に, 析出散水実験での $h_w = 0$  mmでは0.30まで, 低下した.

### 3. 野外実験

室内実験は, 現象を明確に観るため, CaCl<sub>2</sub>溶質量が150 g/m<sup>2</sup>と多い条件で実施した. 実道路においてCaCl<sub>2</sub>の析出やそれに伴

う $\mu$ の低下を調べる目的で春季の晴天日に野外実験を行った.

2020年3月31日に野外で実施した道路勾配2%, CaCl<sub>2</sub>溶液量を20~30 g/m<sup>2</sup>とした溶液散布実験では, 約2時間後に溶質の析出が観られ,  $\mu$ は密粒度舗装およびポーラス舗装でそれぞれ0.46および0.32に低下した. 2020年4月3日に実施した溶液散布実験では, 析出がより顕著に現れたが, 密粒度舗装の $\mu$ は0.76と極端な低下は観られなかった. この相違について, 4月3日は舗装表面が完全に乾燥した状態であったが, 3月31日は舗装表面に僅かに水分が存在したためと推察する. この水分は, 舗装を日向から日陰に移してから30分程度の中に, 大気からの凝縮によって生じた. 参考までに, 4月3日に析出して $\mu = 0.76$ となった密粒度舗装に $h_w = 0.01$  mmに相当する蒸留水を散布すると,  $\mu = 0.40$ に低下した.

### 4. おわりに

本研究により得られた知見を以下に記載する. CaCl<sub>2</sub>溶液を高濃度で散布しても,  $\mu$ は湿潤状態の値と大差ない. また, CaCl<sub>2</sub>が析出しても, 舗装表面が完全に乾燥状態であれば $\mu$ は大きく低下しない. しかし, 僅かな水分が舗装表面に残っている状態や大気からの凝縮などで0.01 mmでも水分が舗装表面に供給されると,  $\mu$ は湿潤状態の値より0.2程度小さくなる. このことから, 析出したCaCl<sub>2</sub>とわずかな水分が混在している路面状態がスリップ事故に対して危険な状態と言える. 一方, NaCl溶液散布の場合, 散布直後あるいは析出後ともに, 極端な $\mu$ の低下は認められない.

### 参考文献

- 国土交通省道路局: 普通乗用車が凍結防止剤によりスリップし擁壁に衝突したとして, 道路の管理瑕疵が争われた事例, [https://www.hido.or.jp/14gyousei\\_backnumber/2010data/1011/1011soshoujirei.pdf](https://www.hido.or.jp/14gyousei_backnumber/2010data/1011/1011soshoujirei.pdf), 2021.6.28 (最終閲覧日).
- 藤本明宏, 2020: 塩化カルシウム溶液散布による路面すべり摩擦係数の低下. 土木学会論文集E1, 76(2), I\_101-I\_108.



図1 BPNの測定

表1 実験条件

共通		
凍結防止剤	塩化カルシウム	塩化ナトリウム
舗装	種別	密粒度(13F), ポーラス(13)
	サイズ(m)	面積0.3×0.3, 厚さ0.05
	個数	各3体
溶液散水実験		
溶液濃度(%)	0, 10, 15, 35	0, 10, 15, 20
散水厚(mm)	0, 0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0	
析出散水実験		
溶液濃度(%)	15	
散水厚(mm)	1.0	
蒸留水散水厚(mm)	0, 0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0	

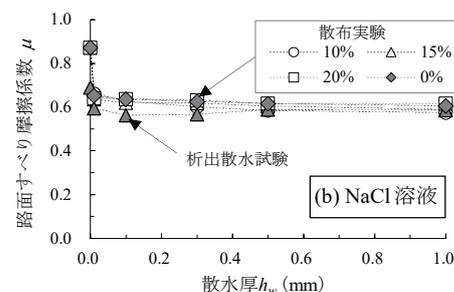
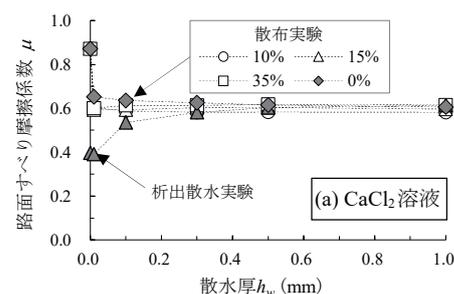


図2 室内実験結果

<sup>1</sup> 福井大学学術研究院工学系部門

School/Graduate School of Engineering, University of Fukui

## 無散水消融雪施設の効率的な稼働に向けた検討 (その4) Consideration for Efficient Operation of Non-sprinkling Snow Melting Facility(Part4)

○服部恭典<sup>1</sup>, 山口正敏<sup>1</sup>, 鈴木和則<sup>1</sup>

Yasunori Hattori, Masatoshi Yamaguchi and Kazunori Suzuki

### 1. はじめに

無散水消融雪施設の制御要素に路面温度を加えたことで、2020年度は1冬季を通して稼働時間の大幅な改善を確認した(服部ら, 2021)。本報では2020年度の稼働状況を踏まえ、さらに効率的な施設運転に向けた考察を行う。

### 2. 稼働状況と考察

2020年度の凍結防止運転は、気温1℃以下かつ路面温度3℃以下の場合に間欠稼働(1.0時間稼働後に0.5時間停止)を行う設定とした。1月23日00:00~24日12:00の稼働状況を図1に示す。従来の気温のみを制御要素としていた凍結防止信号(気温)と路面温度を加味した。2020年度の稼働条件の凍結防止信号(気温+路面温度)と比較することで稼働時間の削減効果を確認した。日射が無い23日0:00~7:00まで、気温は低く推移したことから、凍結防止信号(気温)が出力し、加えて路面温度が低いため施設は間欠稼働した。23日7:00から8:00の間、凍結防止運転(気温)は出力していたが、路面温度が高いため、凍結防止運転(気温+路面温度)が出力せず、施設は稼働しなかった。23日20:30から翌日8:00までは気温が氷点下付近まで低下し、凍結防止信号(気温)は常時出力したものの、路面温度は稼働条件を満たさなかったため、凍結防止信号(気温+路面温度)は出力せず、稼働しなかった。従来の気温のみで制御していれば、この11時間30分の2/3(7時間40分)が稼働していたことになる。すなわち路面温度を制御要素に加えたことで、7時間40分の稼働削減が行えた。

凍結防止運転時の路面温度は設定値の3℃を保てており、路面凍結防止の観点からすれば、路面温度の設定値や間欠稼働における休止時間を見直すことで、稼働時間をさらに減じる余地はあるといえる。大会当日には、これらを踏まえて具体的な設定値の改善案を示したいと考える。

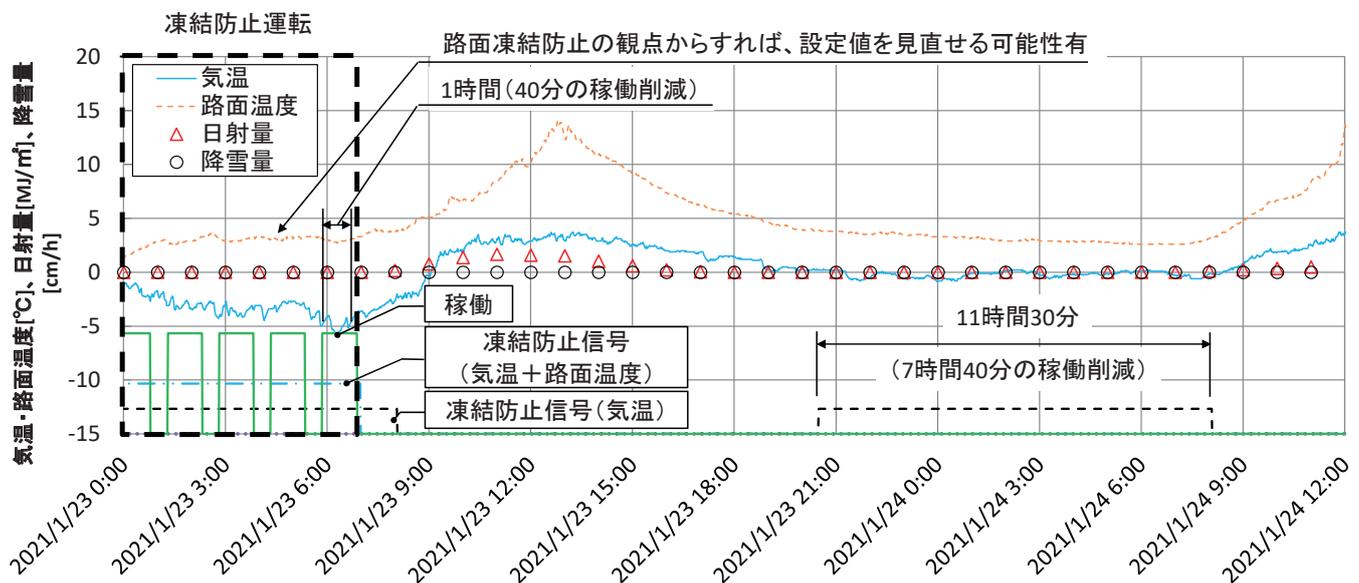


図1 2021年1月23日0:00~24日12:00の稼働状況

### 参考文献

- 1) 服部恭典, 山口正敏, 鈴木和則, 2021: 無散水消融雪施設の効率的な稼働に向けた検討(その3)。東北の雪と生活, 36, 掲載予定。
- 2) 気象庁, 2021, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (2021年4月9日)

<sup>1</sup> 日本地下水開発株式会社

Japan Groundwater Development CO.,LTD.

# 大雪による車両滞留の危険度評価システムの開発と試験的運用

## Development of a System for Estimating Occurrence Risk of Stranded Vehicles Events Triggered by Heavy Snowfall and Its Trial Operations

○河島克久<sup>1</sup>, 伊豫部勉<sup>2</sup>  
Katsuhisa Kawashima and Tsutomu Iyobe

### 1. はじめに

近年、極端な大雪時に、国道・高速道路において大規模な車両滞留が多発し、大きな社会問題になっている。これに対して、道路管理者は、除雪車の配備・出勤基準の見直し、交通規制、積雪センサー・ライブカメラの設置、タイムラインの作成などの防止対策を検討して対応している。これらの対策は、大雪による車両滞留の潜在的危険度の評価・予測が可能になればより効果的な運用が可能であるが、これまでそのような方法は確立されていない。そこで本研究では、気象条件からみた車両滞留の潜在的危険度の評価手法を検討し、車両滞留を未然に防ぐための意思決定を支援する車両滞留発生危険度評価システムを開発した。

### 2. 車両滞留発生時の気象の特徴

著者らは、車両滞留発生時の降雪量、気温、風速に着目した気象特性解析から、雪による車両滞留は「大雪タイプ」と「強風タイプ」の2つに分けられることを明らかにした(村田・河島, 2021)。前者は、車両滞留発生前に長時間・多量の降雪があり、降雪時の気温はほとんどが氷点下で推移することが、後者は車両滞留の発生前に強風を伴うことがそれぞれ特徴である。新潟県や北陸地方のような温暖多雪地域では前者が主体であるため、本研究では大雪タイプの車両滞留の潜在的危険度を気象データから評価するシステムを構築することとした。

### 3. 大雪タイプの危険度評価に用いる気象指標

危険度評価にはできるだけ単純な気象指標を用いることとした。また、早めに危険性を認知できるようにするため、多数の事例解析から明らかになった車両滞留発生時の気象指標のしきい値に対して、安全側に余裕を持たせることとした。危険度のランクは「非常に危険」、「警戒」、「今後の情報等に留意」の3段階とし、それぞれのランクに対応する気象指標のしきい値を表1の通りに設定した。

### 4. 車両滞留危険度評価システムの概要

開発した車両滞留危険度評価システムは、新潟県版、福井・石川県版、鳥取県版から構成されており、道路管理者等の協力のもと2018/19年冬季から試験的運用を開始した。ここでは、新潟県版について以下に説明する。

新潟県版では、新潟県内の幹線道路である「北陸道・国道8号」、「関越道・国道17号」、「上信越道・国道18号」、「磐越道・国道49号」、「国道7号」を対象として危険度評価を行うことにした。構築したシステムでは、幹線道路沿線の気象庁のアメダスと国

表1 危険度ランクごとの気象指標のしきい値。

ランク	24時間平均気温	24時間累積降雪量
非常に危険	1°C未満	40 cm以上
警戒	1~2°C	20~40 cm
今後の情報等に留意	2°C以上	20 cm未満

道交通省の気象テレメータ(合計22観測点)の1時間データ(積雪深, 気温)をリアルタイムで取得する。システムのトップ画面では、表1のしきい値に基づいて評価された現在の危険度に応じて、22観測点が3色に色分けされて地図上に表示される。閲覧したい地点をクリックすると、過去72時間の気象(1時間降雪量, 気温)や過去48時間の危険度の推移がグラフ表示される。

### 5. 2020/21年冬季における新潟県版システムの試験的運用

2020/21年冬季は、構築した車両滞留発生危険度評価システムの試験的運用を2021年2月7日から開始した。運用開始後は新潟県内では大規模な車両滞留の発生は認められなかったが、2月8~9日及び2月17~18日には強い降雪が新潟県内を襲い、複数の地点で危険度が「非常に危険」に達した。その例として、2月9日9時の関山(上信越道・国道18号)における危険度の推移を図1に示す。2月7日20時から始まった降雪は、翌8日に7時間の中断をはさんで8日23時まで続いており、8日19時には10 cm/hの極めて強い降雪を記録した。それに対応して、危険度は8日18時に「非常に危険」に到達し、その後11時間にわたってこの危険度が続いていたことがわかる。図1の危険度の推移図は、土砂災害警戒情報の判断に用いられるスネークライン図と類似しており、時々刻々大きく変化する気象に対して、曲線の変化が比較的小さいため、現時点の危険度ランクとの位置関係を実感的に認識しやすい点が利点である。これに加えて、気象予測情報を用いることによって、危険度の将来予測への発展も容易であることが特徴であると言える。

### 謝辞

本研究の一部は、一般財団法人研友社平成30年度調査研究助成、新潟大学災害・復興科学研究所共同研究費(2018-5)、一般財団法人新潟県建設技術センター第7回研究助成、JSPS 科研費20K05043の助成を受けて実施された。

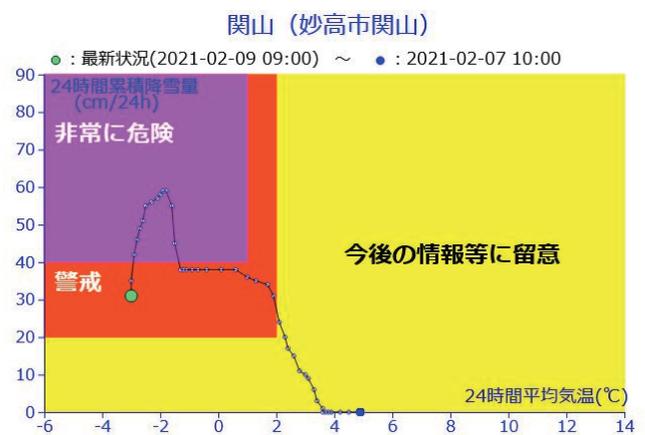


図1 関山における2月7日10時~2月9日9時の危険度。

1 新潟大学災害・復興科学研究所

2 京都大学大学院工学研究科 (現在: 東日本旅客鉄道株式会社)

Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University  
Graduate School of Engineering, Kyoto University

## 雪による車両滞留イベントデータベースの構築 Development of a Database of Stranded Vehicles Events Induced by Snow

○村田晴彦<sup>1</sup>, 河島克久<sup>2</sup>  
Haruhiko Murata and Katsuhisa Kawashima

### 1. はじめに

今冬は2020年12月から2021年2月にかけて日本海側地域で大雪となり、北陸地方を中心に多くの地域で雪による車両滞留が発生した。特に規模が大きいイベントでは長時間にわたって道路交通が麻痺し、地域社会に大きな被害をもたらした。この他にも福井県(2018)、鳥取県(2017)、新潟県(2016)のように大規模車両滞留は近年多発しており、こうした事態を未然に防ぐ方法として道路管理者は除雪体制の改善や予防的通行止めなどの様々な対策を実施、検討している。これらの対策をより効果的に実施するためには、過去の雪による車両滞留イベントをデータベース化し、その分析から車両滞留が発生しやすい場所や時間帯、気象条件といった車両滞留の発生特性を事前に把握しておくことが重要である。

国土交通省は道路管理業務の一環として、全国で発生した冬の登坂不能車1台ごとの発生場所や発生年月日、時刻、天候、道路状況などについて調査、整理し、データベース化を行っている(佐藤ら, 2018)。このデータベースではイベントごとの詳細な情報が得られている一方、収集対象は国土交通省の管理道路で発生したものに限定されている。また、吹雪に伴う視程障害や吹きだまりによる走行不能は含まず、原因を登坂不能に限定していることから網羅性に課題がある。さらに、情報は登坂不能に陥った車両についてのみであり、滞留全体の規模や状況はわからない。

そこで本研究では高速道路会社、県、市の管理道路も含めて、全国で発生した雪による車両滞留イベントデータベースの構築を行った。さらに、構築したデータベースを基に分析を行い、車両滞留の発生特性を調べた。

### 2. データベースの構築

まず、インターネットを用いて雪による車両滞留イベントの検索、抽出を行った。検索対象は官公庁の発表資料、報道資料、Twitter情報とし、報道資料については主に朝日新聞と新潟日報のデータベースの他、全国紙や地方紙、テレビ局各社のウェブサイトでも検索できる過去のニュース記事を用いた。また、Twitter情報についてはより情報の信頼性が高いと考えられる官公庁もしくは報道機関による投稿のみを用いた。検索対象期間は特に定めず、可能な範囲で遡ることとした。ただし、本研究では交通事故、雪崩、倒木を原因とするものは対象外とした。

次に検索、抽出によって得られたイベントのデータベース化を行った。収集されたイベントは1986年1月から2021年2月の期間に39都道府県で発生した計339件である。これらのイベントについて「発生年月日」、「発生時刻(1時間ごともしくは時間帯)」、「発生場所(都道府県、市町村、路線)」、「発生原因」、「車種」、「滞留規模(時間・距離・台数)」、「発生状況」をイベントごとに整理し、データベースを構築した。

### 3. 車両滞留の発生特性

構築したデータベースを基に車両滞留の発生特性を分析した。分析期間は滞留イベントが比較的多く確認された2010/11冬期から2020/21冬期とし、小規模なものを除く122イベントを対象とした。分析では発生地域を図1に示した5つの地域に分類し、全体や地域別の特徴を調べた。その結果の内、発生件数、発生月、発生原因について以下に示す。

#### 3.1 発生件数

発生件数は北陸が39件で最も多く、他の地域は20件前後であった。一方、冬期ごとの地域別発生件数(図1)をみると、16/17冬期は山陰地域、13/14や14/15冬期は非積雪地域における発生割合が高いといったように、多発する地域に偏りが見られた。

#### 3.2 発生月

全体での発生件数は1月、2月、12月の順に多く、厳冬期に集中していた。地域別に見ると、北海道以外の地域では多くが12月から2月の間に発生していた一方、北海道では10月や3月にも発生していた。

#### 3.3 発生原因

発生原因は「雪氷路面におけるスタック」と「吹雪に伴う視程障害や吹きだまりによる走行不能」に分けることができる。全体では前者が多いが、北海道、東北のような寒冷な地域では後者の割合が高くなっていた。

#### 謝辞

本研究の一部は令和2年度新潟県建設技術センター研究助成事業及びJSPS科研費20K05043の助成を受けて実施された。

#### 参考文献

- 1) 佐藤吉一, 飯田雅之, 齋藤雅春, 2018: 登坂不能車データ分析ツールの開発と冬期道路管理への活用について。ゆきみらい 2018 研究発表論文, [http://www.hrr.mlit.go.jp/yukimirai-toyama/happyouuni/13\\_tohannfunou.pdf](http://www.hrr.mlit.go.jp/yukimirai-toyama/happyouuni/13_tohannfunou.pdf) (2021.07.01 閲覧)。

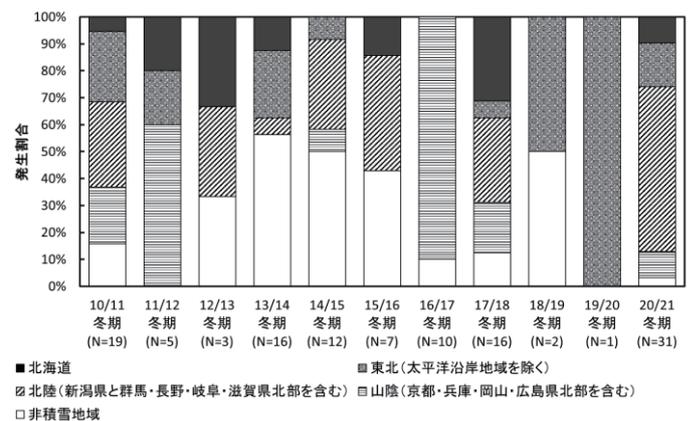


図1 10/11冬期から20/21冬期までの地域別発生件数の割合

1 新潟大学大学院自然科学研究科

2 新潟大学災害・復興科学研究所

Graduate School of Science and Technology, Niigata University

Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University

## 2020-21 シーズンの大雪における新潟県の対応について About correspondence of Heavy Snowfall in 2020-21 year at Niigata Prefecture

○吉田あみ<sup>1</sup>

Ami Yoshida

### 1. はじめに

新潟県は全国有数の豪雪地帯であり、除雪対応及び防雪対策は円滑な冬期道路交通確保のために不可欠である。令和2年度は、3回の強い寒波に見舞われた。以下に、新潟県道路管理者の大雪対応状況について報告する。

### 2. 今冬の大雪による被害状況

#### 2.1 ①12月14～20日の大雪

群馬県境に近い南魚沼地域を含む山間部で降雪が強まり、湯沢町湯沢観測所（気象庁）で16日4時に24時間降雪量113cmを観測し、観測史上1位を記録した。関越自動車道で大規模な立ち往生、国道17号で大渋滞が発生した。県管理道路では4件のスタック車両による全面通行止めが発生し、十日町～南魚沼間において最長約7時間の通行規制を実施した。また、全面通行止め38箇所のうち、31箇所が倒木によるものであった。令和元年度が少雪だったことから2年ぶりのまとまった降雪による重みで倒木被害が多発し、県内全域で道路通行止めに加えて通信障害等も発生した。雪崩災害については初冬のため積雪が無く、小規模な肌落ちが数件発生した程度であった。

#### 2.2 ②12月30日～1月3日、1月4日の大雪

12月30日から続いた降雪では、主に十日町地域を含む山間部で降雪が強まり、十日町観測所（気象庁）で24時間降雪量56cmを観測した。特に大きな交通障害や雪崩災害はなかったが、倒木により2箇所の全面通行止めが発生した。1月4日の降雪では倒木により3箇所の全面通行止めが発生した。

#### 2.3 ③1月7日～11日の大雪

上越地域及び下越地域の平野部を中心に大雪となり、県内初の「顕著な大雪に関する新潟県気象情報」が発表され、48時間降雪量が上越市高田（気象庁）で160cm、糸魚川市能生（気象庁）で143cmなど、いずれも観測史上1位を記録する降雪量となった。屋根雪おろしなど除雪作業中の事故や、空き家の倒壊等が発生するなど、上越地方を中心に県民生活に大きな影響を及ぼした。また、上越市内の国道8号において、記録的な降雪及び北陸道通行止めによる交通集中を原因とする最大約2kmの車両滞留が発生した。この期間における県管理道路の全面通行止めは32箇所が発生し、最も多い要因はスタックであった。

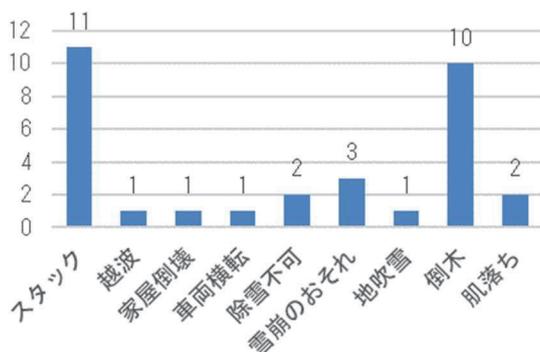


図1 1月7～11日の県管理道路全面通行止め要因

### 3. 新潟県の対応状況

上越市高田では1月8日の降雪量が103cmを記録し、1日で降った雪の量としては、1986年1月以来35年ぶりの大雪となった。激しい降雪が長時間にわたり続いたため、除雪で路肩及び歩道にたまった雪の排雪が間に合わず、車道幅員が大幅に減少し、大型車のすれ違い困難や、右左折レーンが確保できない状況が生じた。特にバス路線の一部では幅員が確保できず、県道、市道を走行するバスが運行休止（1月3日～7日）となる事態となった。このことから、地域機関相互の広域応援除雪（1.13～2.5）及び9年ぶりとなる一斉屋根雪降ろし（R3.1.23～25）を実施した。

### 4. 今冬の大雪及び大規模渋滞による新たな課題

1月の大雪により、国道が渋滞となった場合の新潟県管理道路の除雪作業への影響や除雪機械の回送、雪捨て場への接続路線の除雪など、今冬の豪雪で浮き彫りとなった。特に迂回路が無い区間における通行規制への対応は課題の一つである。

1月7～11日に上越市から糸魚川市にかけての直轄国道で渋滞が発生し、沿岸の直轄国道が唯一の接続となる県管理道路において、一部の除雪機械が除雪路線に到着できず、一時的に孤立集落が発生した。また、国道を含む上越市内主要幹線道路の渋滞により、ガソリンスタンドへの燃料供給に影響が生じるなど、除雪機械の燃料供給についても新たな課題として浮きあがった。高速道路や直轄国道が通行規制を実施した場合の県管理道路への影響について、特に迂回路として想定される主な路線への対応を予め検討しておく必要があることも認識された。また県除雪機械配置についても、集中降雪時や除雪路線へのアクセスが直轄道路のみ等の場合を想定した機械配置の検討も必要であると考えられる。

### 5. おわりに

今冬の12月から1月にかけて新潟県内で発生した幹線道路の大規模な立ち往生発生については、警報級の大雪が予報された段階で住民への不要不急の外出を控える呼びかけがなかったことや、通行止めのタイミングを逃したことで、また立ち往生の更なる拡大については、滞留車両の確認やドライバーへの正確な情報発信が十分でなかったことが原因として挙げられている。

また、令和2年度冬期は、平年を大幅に上回る短時間での降雪により、県管理道路においてもスタック車両の発生や倒木、集中除雪等のため、通行規制を実施したことから、今後はインターネット会議によるタイムリーな情報共有による適切な初動対応、除雪機械の稼働状況の共有やスタック車両対応、交差点除雪等、渋滞要因の解消となるスポット的相互支援の実施など、道路管理者間の更なる連携の強化を図るとともに、事前に対応を想定し、管理者間で徹底しておく必要がある。今後は、今冬のような異常降雪が予報された段階で県民に不要不急の外出を控えるよう呼びかけ、除雪作業に支障が生じないように、初動対応の強化に努めるなど、今冬の大雪による対応と新たな課題を踏まえ、引き続き安定した除雪体制の維持に努め、安全安心な新潟県の冬期道路交通を確保していく。

## 鉄道車両からの落雪現象に関する実験 Experiments for Snow Dropping from Railway Vehicle

○辻滉樹<sup>1</sup>, 鎌田慈<sup>1</sup>, 高橋大介<sup>1</sup>

Hiroki Tsuji, Yasushi Kamata and Daisuke Takahashi

### 1. はじめに

冬期に積雪寒冷地域を走行する鉄道車両には、雪の舞い上がり起因する着雪が発生することがある。このような着雪が成長し、落下すると、そのサイズや走行速度によっては、地上設備の破損や分岐器不転換が発生することがある<sup>1)</sup>。そこで、鉄道事業者は、スプリンクラーを用いた軌道上積雪の「濡雪化」や「散水消雪」、車両形状の変更、駅での雪落とし作業などの対策を実施している。このような対策を効率的に実施するためには、車両への着雪量を推定する手法<sup>2)</sup>に加えて、落雪や融解の影響を考慮した、より精緻に車両の着落雪を予測する手法を開発する必要がある。

一般に落雪が発生する原因としては、気温上昇や物体の振動などが考えられる。しかしながら、鉄道車両における落雪現象を直接的に観測することは非常に困難である。鉄道事業者からの情報では、冬季の設備損傷がトンネルで多いため、落雪現象はトンネルで多く発生していると推測される。これは、トンネル内が明かり区間に比べて、一般に高温であることから、落雪が発生しやすいことが原因と考えられる。また、同じく鉄道事業者からは、着雪は車両の様々な部分で発生するが、特に車両端部フサギ板では着雪量が多いという情報もある。

そこで、本研究では、トンネル部分での車両端部フサギ板からの落雪現象の解明を目的として、基礎実験を実施した。

### 2. 実験方法

実際の新幹線車両の車両端部フサギ板で使用されている材質の金属板上に、約-30℃の低温で保存していた自然雪をふるいかける。この作業は常温の実験室で行うため、保存雪は金属板に接する部分で一部融解する。これを低温で約2時間保管することで、金属板と雪を凍着させ、着雪を模擬した雪試料を作成した。雪試料を低温実験室の風洞開口部に設置する。低温実験室内の温度を変化させることでトンネル内の温度を再現し、風洞装置を用いて車両端部フサギ板に当たる風速を再現して、冬期のトンネル内走行状態を模擬した。実験の模式図を図1に示す。実験の様子をタイムラプスカメラ (Brinno, TLC200) にて撮影し、雪試料が滑り始める時間 (以下、滑り時間) を計測した。

実験条件として風速、気温、雪試料のサイズ (付着面積) を変化させ、滑り時間との関係を分析した。気温に関しては、5℃、10℃、15℃、風速に関しては0 m/s から20 m/s までを2.5 m/s 間隔、サイズに関しては、50400mm<sup>2</sup>、22100mm<sup>2</sup>、2500mm<sup>2</sup> の設定とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 気温による影響

気温を変化させた際の風速と滑り時間の関係を図2(a)に示す。雪試料のサイズは22100mm<sup>2</sup>である。

同じ風速では、気温が高いほど滑り時間は短くなることが分かる。また、風速の増加とともに滑り時間は減少することがわかる。また、風速が概ね10m/sを超えると減少率は小さくなった。

#### 3.2 雪試料のサイズによる影響

雪試料のサイズ (付着面積) を変更させた際の風速と滑り時間の関係を図2(b)に示す。試験時の気温は10℃一定である。

同じ風速では、雪試料のサイズが小さくなるほど、滑り時間は短くなることが分かる。また、いずれのサイズでも風速の増加とともに滑り時間は減少し、風速が概ね10m/sを超えると減少率は小さくなった。サイズが大きな雪試料の方が、減少率は大きいいため、50400mm<sup>2</sup>と22100mm<sup>2</sup>の滑り時間の差は風速10m/s以上では風速0m/sと比べ、小さくなっていった。

### 4. 考察とまとめ

本実験では金属板と雪試料の凍着部分が融解することで、落雪が発生すると考えられる。金属板を伝導して凍着部分に供給された熱が融解を発生させると考え、その供給熱量を伝熱工学の知見を元に計算すると、各実験で風速が違っても、気温と面積が同じであれば、供給熱量は概ね一定であった。この結果は雪氷研究大会において発表する。

今後は、落雪が発生するまでの供給熱量の計算をもとに、落雪発生の予測に繋がる落雪モデル構築を行う計画である。

#### 参考文献

- 1) 斎藤雅男, 1971: 東海道新幹線の雪氷害とその対策(1). 雪氷, 33(3), 61-78.
- 2) 鎌田慈, 穴戸真也, 佐藤亮太, 2021: 沿線の気象情報を利用した新幹線台車の着雪量推定手法. 鉄道総研報告, 35(1), 11-16.

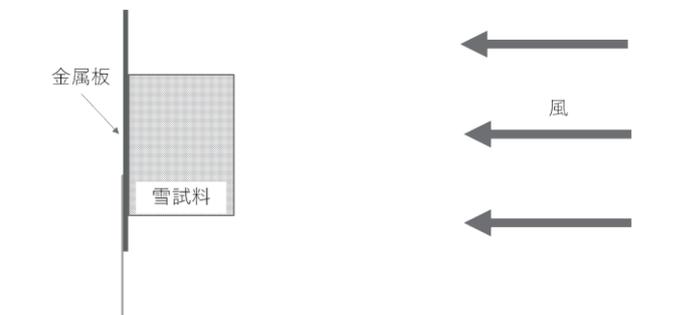


図1 実験模式図

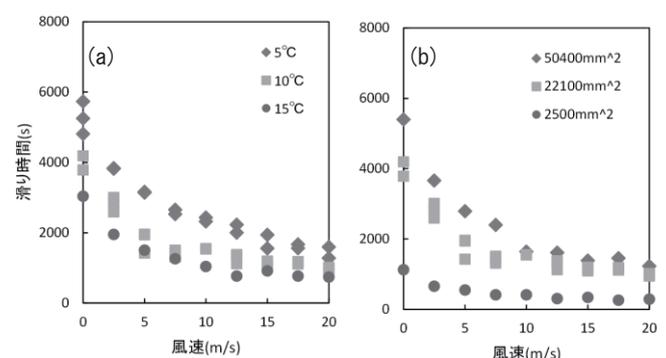


図2 風速と滑り時間の関係

(a) : 気温による影響, (b) : 雪試料のサイズによる影響

## バイカル湖における天然ガスハイドレートのメタン安定同位体分別 Methane Stable Isotope Fractionation of Natural Gas Hydrates at Lake Baikal

○木村宏海<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, Oleg Khlystov<sup>2</sup>, Gennadiy Kalmychkov<sup>3</sup>, Marc De Batist<sup>4</sup>,  
坂上寛敏<sup>1</sup>, 南尚嗣<sup>1</sup>, 山下聡<sup>1</sup>

Hiroimi Kimura, Akihiro Hachikubo, Oleg Khlystov, Gennadiy Kalmychkov, Marc De Batist,  
Hirotoshi Sakagami, Hirotosugu Minami and Satoshi Yamashita

### 1. はじめに

ガスハイドレート生成の際、ハイドレートに取り込まれずに結晶の周囲に存在する残ガス相と、ハイドレートに取り込まれた包接ガス相の間には、ゲスト分子の安定同位体分別が起こる。メタンハイドレートの場合、水素同位体分別に関しては、包接ガス相に取り込まれるメタンは残ガス相よりも約 5‰小さく、 $\text{CH}_3^2\text{H}$  が包接ガス相に相対的に取り込まれにくいことを示している。これは、ゲスト分子のアイソトポログの違いによるハイドレート平衡圧の差で説明される<sup>2)</sup>。一方、メタンの炭素同位体分別に関しては検出限界以下である<sup>1)</sup>。我々の研究グループでは、このことを利用して、自然界におけるハイドレート包接ガスと堆積物中のガスとの間のメタン安定同位体比の差から、天然ガスハイドレートのおかれた状態や、ガスハイドレート生成・分解過程等に関する情報が得られる、と考えている。

我々の研究グループは、Multi-phase Gas Hydrate Project (MHP) の枠組みの下、ロシア・ベルギーの各研究機関との共同研究体制が 2009 年から継続しており、ロシア・バイカル湖における湖底表層型ガスハイドレートの産状に関する研究が進められている。本研究では、昨年度の雪氷研究大会での報告<sup>3)</sup>からさらに解析データを追加し、2012~2019 年のバイカル湖調査によって回収された、天然ガスハイドレートの包接メタンおよび堆積物ガス中のメタンの安定同位体比に関する分析結果を報告する。

### 2. ガス試料および解析方法

バイカル湖南湖盆、中央湖盆の計 50 地点以上でガスハイドレート含有湖底堆積物コアを得た。ハイドレート包接ガスについては、回収された天然ガスハイドレートを船上にて水上置換法でバイアル瓶に採取し、保存剤として塩化ベンザルコニウム水溶液を加えた。また、半割した堆積物コア断面から 40 cm おきに堆積物を採取し、飽和 NaCl 水溶液とともにバイアル瓶に一定量を封入し、ヘッドスペースガス法により堆積物中のガスを得た。これらの試料について、安定同位体比質量分析装置でメタンの炭素・水素同位体比をそれぞれ測定した。

### 3. 測定結果および考察

安定同位体解析の結果を図に示す。まず、堆積物ガスの  $\delta$  値からハイドレート包接ガスの  $\delta$  値を差し引いたものを  $\Delta\delta$  値と定義する。 $\Delta\delta^{13}\text{C}$  および  $\Delta\delta^2\text{H}$  はそれぞれ、+2‰付近および+4‰付近を中心に分布し、これらの結果は包接ガス側に重いアイソトポログ ( $^{13}\text{CH}_4$  および  $\text{CH}_3^2\text{H}$ ) が相対的に少ないことを示している。同位体分別のない  $\delta^{13}\text{C}$  でこれだけの系統的な差があることは、現段階では説明できないが、 $\delta^2\text{H}$  については同位体分別の結果であると判断され、多くの地点で天然ガスハイドレートが周囲の環境とおおむね平衡状態にあることを示唆する。

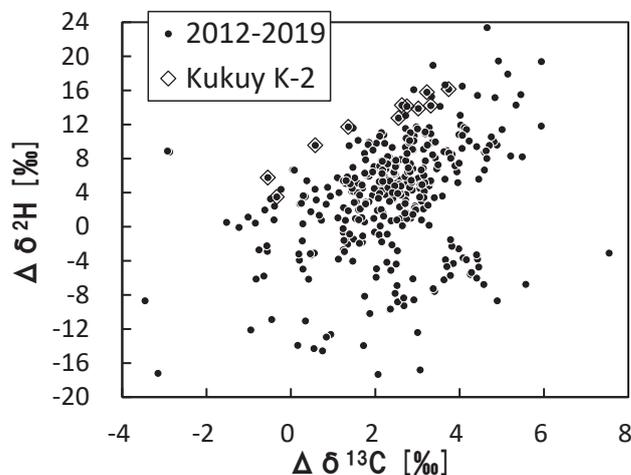


図  $\delta^{13}\text{C}$  (横軸) および  $\delta^2\text{H}$  (縦軸) に関する  $\Delta\delta$  値 (堆積物ガス  $\delta$  値 - ガスハイドレート包接ガスの  $\delta$  値) の関係。

また、中央湖盆の泥火山である Kukuy K-2 では、図中のデータ全体の中心より上方にプロットされており、他の地点と比較して  $\delta^2\text{H}$  の差が相対的に大きいことを示している。Kukuy K-2 は深部からのガス供給プロセスが複雑であると考えられている場所であり、炭化水素ガスの解析結果からは、熱分解起源ガスと微生物起源ガスとの混合ガスがハイドレートに包接されている<sup>4)</sup>。なお、Kukuy K-2 は昨年度報告した南湖盆 Kedr 泥火山<sup>3)</sup>と同様に、結晶構造 I 型ガスハイドレートの分解と結晶構造 II 型のエタンリッチなガスハイドレートの二次生成が示唆されている場所<sup>5)</sup>である。しかしながら、 $\Delta\delta^2\text{H}$  と  $\Delta\delta^{13}\text{C}$  が 0 から負の値に分布していた Kedr<sup>3)</sup>とは大きな違いがある。 $\Delta\delta^2\text{H}$  が 0 の場合、ハイドレートと周囲のガスは平衡状態になく、むしろハイドレートの分解によって周囲のガスと包接ガスが同一の安定同位体比となっている、との解釈が妥当である。そうすると、 $\Delta\delta^2\text{H}$  が 10‰ 以上の Kukuy K-2 では必然的に、結晶生成時の環境のガスが変化して  $\delta^2\text{H}$  が増加した、つまり現在の包接ガスは環境のガスと平衡状態ではなく、古い時代に包接したガスをそのまま保持していると考えられる。

### 参考文献

- 1) Hachikubo, A., et al. 2007: *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L21502, doi: 10.1029/2007GL030557.
- 2) Ozeki, T., et al. 2018: *J. Chem. Eng. Data*, **63**(6), 2266–2270.
- 3) 木村宏海ほか, 2020: 雪氷研究大会 (2020・オンライン) 講演要旨集.
- 4) Hachikubo, A., et al. 2009: *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L18504, doi:10.1029/2009GL039805.
- 5) Poort, J. et al. 2012: *Geo-Mar. Lett.*, **32**, 07–417.

1 北見工業大学  
2 ロシア陸水学研究所  
3 ロシア地球化学研究所  
4 ゲント大学

Kitami Institute of Technology  
Limnological Institute, SB RAS  
Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS  
Ghent University

# 炭化水素ガスハイドレート生成時のゲスト水素同位体分別に及ぼすケージサイズの効果 Effect of Cage Size on Guest Hydrogen Isotope Fractionation of Hydrocarbon Gas Hydrates

○鎌田諒也<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 竹谷敏<sup>2</sup>

Ryoya Kamata, Akihiro Hachikubo and Satoshi Takeya

## 1. はじめに

ガスハイドレート (GH) 生成時には, ゲストガスの安定同位体分別が起こる. 例えばメタン (C<sub>1</sub>) を GH に包接する場合, ガス相より GH 相の方が水素同位体比は約 5 ‰ 小さくなる<sup>1)</sup>. これは, CH<sub>3</sub>D ハイドレートが CH<sub>4</sub> ハイドレートよりもわずかに平衡圧が高く<sup>2)</sup>, GH 相に包接されにくいことと調和する. また, プロパン (C<sub>3</sub>) を GH に包接する場合も同様に, ガス相より GH 相の方が水素同位体比は約 4 ‰ 小さい<sup>3)</sup>. 一方では, エタン (C<sub>2</sub>) を包接する場合の水素同位体比の差は約 1 ‰ 程度に過ぎない<sup>4)</sup>. すなわち, 何が水素同位体分別の程度を決定しているのか, という問題が依然として存在している.

本研究では混合 GH に関し, C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> 系の C<sub>1</sub> の挙動に着目し, 結晶構造 II 型の小ケージに優先的に包接された場合のメタン水素同位体分別について調べた. 今回の測定結果を主軸として, 所属研究室でこれまでに蓄積された純ガス系および他の混合ガス系の GH との比較を行なった.

## 2. 実験方法

本研究で使用した炭化水素 (C<sub>1</sub> および C<sub>2</sub>) については, 高純度化学工業製の高純度ガスボンベ (いずれも純度 99.99%) を用いた. -20°C の温度下で実容積 40 mL の耐圧容器に粉末氷 0.7g を封入した. その後, 液体窒素温度下で真空引きし, 任意のガス混合比で C<sub>1</sub> と C<sub>2</sub> を適量加圧した. これを +1°C の温度条件で予想される混合ガス系の平衡圧以上, かつ C<sub>2</sub> の液化圧以下になるように調整した. GH 生成の圧力低下が止まり次第, 耐圧容器内の GH 結晶に取り込まれなかったガス試料 (以下「残ガス」と GH 結晶の試料を取り出した.

残ガスは試料容器を真空ラインに直接接続し, GH 試料は真空ライン内で結晶中の包接ガスを解離させることでそれぞれ得た. シリンジインジェクションにより, 残ガスおよび GH 解離ガスを安定同位体質量分析装置 GC-IRMS (DeltaV, Thermo Fisher Scientific) に導入し, それぞれの C<sub>1</sub> に関する水素安定同位体比の測定を行った. また, C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> 系ではラマン分光分析装置 (RMP-210, 日本分光) により, 波数 1000 cm<sup>-1</sup> の C<sub>2</sub> のラマンスペクトルから結晶構造の判定を行った.

## 3. 測定結果および考察

水素安定同位体比の差 (残ガス相 δD-GH 相 δD) を ΔδD とし, それぞれの純ガス系および混合ガス系での ΔδD 文献値 (炭化水素に限定, いずれも所属研究室データ) と合わせて, 本研究の結果を表にまとめた. 本研究の C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> 系での C<sub>1</sub> に関する ΔδD は 3.7±1.1 ‰ であり, C<sub>1</sub>+C<sub>3</sub> 系の ΔδD と同程度<sup>4)</sup>で, 純 C<sub>1</sub> の ΔδD より小さかった. C<sub>1</sub> について考えると, 純 C<sub>1</sub> の GH は I 型で, I 型を構成するケージ個数比 (14 面体:12 面体=3:1) から 14 面体の寄与が大きく, 14 面体に多く包接される. 一方, II 型を構成するケージ個数比 (16 面体:12 面体=1:2) における C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> 系および C<sub>1</sub>+C<sub>3</sub> 系では, 16 面体に C<sub>2</sub> や C<sub>3</sub> が包接されるために,

表 純ガス系 GH および混合ガス系 GH の水素安定同位体分別

ハイドレートガス	水素安定同位体比の差 ΔδD (残ガス相 δD-GH 相 δD) と 優先的に包接されるケージ
純メタン <sup>1)</sup>	4.8±0.4 ‰ (I 型, 14 面体約 75%, 12 面体約 25%)
純エタン <sup>1)</sup>	1.1±0.7 ‰ (I 型, 14 面体)
純プロパン <sup>3)</sup>	4.4±1.0 ‰ (II 型, 16 面体)
純イソブタン <sup>8)</sup>	1.2±0.6 ‰ (II 型, 16 面体)
C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub> のエタン <sup>5)</sup>	1~2 ‰ (I 型, 14 面体)
C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub> のエタン <sup>5)</sup>	8.8~12 ‰ (II 型, 16 面体)
Ar+C <sub>2</sub> のエタン <sup>6)</sup>	-3.0~0.6 ‰ (I 型, 14 面体)
Ar+C <sub>2</sub> のエタン <sup>6)</sup>	4.2~6.6 ‰ (II 型, 16 面体)
C <sub>1</sub> +C <sub>3</sub> のメタン <sup>4)</sup>	3.1±1.0 ‰ (II 型, 12 面体)
C <sub>1</sub> +C <sub>3</sub> のプロパン <sup>4)</sup>	5.5±1.3 ‰ (II 型, 16 面体)
C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub> のメタン (本研究)	3.7±1.1 ‰ (II 型, 12 面体)
Ar+C <sub>1</sub> のメタン <sup>7)</sup>	7~8 ‰ (I 型, 14 面体が約 8割)
Ar+C <sub>1</sub> のメタン <sup>7)</sup>	6 ‰ (I 型, 12 面体と 16 面体が約半々の割合)

C<sub>1</sub> は相対的に 12 面体に多く包接されやすい. このことから, C<sub>1</sub> はケージサイズが大きい 14 面体に「ゆるく」包接されるより, ケージサイズが小さい 12 面体に「きつく」包接される方が水素安定同位体分別は小さくなる, と考えた.

以上の仮説を過去の実験結果の解釈に適用してみる (表を参照). C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> 系<sup>5)</sup> および Ar+C<sub>2</sub> 系<sup>6)</sup> の C<sub>2</sub> では, 16 面体より 14 面体に包接された場合の ΔδD が相対的に小さくなる. また, Ar+C<sub>1</sub> 系<sup>7)</sup> の C<sub>1</sub> では, 14 面体に大半が包接されるより 12 面体に半分程度が包接された場合の ΔδD がわずかに小さくなる. これらはいずれも上記の仮説と矛盾しない. 加えて, 純ガス系の C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> およびイソブタン (iC<sub>4</sub>) について考える. C<sub>1</sub> と比較すると C<sub>2</sub> は相対的に 14 面体に「きつく」包接され, 同様に C<sub>3</sub> と比較すると iC<sub>4</sub> は相対的に 16 面体に「きつく」包接されるため, ΔδD が小さくなると言える. したがって, 炭化水素 GH 生成時の水素安定同位体分別はケージとゲストガスのサイズ比に依存すると考えられる.

## 参考文献

- 1) Hachikubo *et al.*, 2007: *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L21502, doi: 10.1029/2007GL030557.
- 2) Ozeki *et al.*, 2018: *J. Chem. Eng. Data*, **63**(6), 2266–2270.
- 3) 二階堂ほか, 2018: 雪氷研究大会 (2018・札幌) 講演要旨集.
- 4) 鎌田ほか, 2020: 北海道の雪氷, **39**, 71–74.
- 5) 松田ほか, 2018: 北海道の雪氷, **37**, 27–30.
- 6) 松田ほか, 2019: 北海道の雪氷, **38**, 35–38.
- 7) 中川ほか, 2020: 雪氷研究大会 (2020・オンライン) 講演要旨集.
- 8) 二階堂, 2019: 北見工業大学社会環境工学科卒業論文.

1 北見工業大学

2 産業技術総合研究所

Kitami Institute of Technology

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

メタンないしアルゴン+ヘリウム系混合ガスハイドレートにおけるヘリウム濃度の時間的变化  
Time Variation of Helium Concentration in the Methane/Argon + Helium Mixed-Gas Hydrates○森谷優希<sup>1</sup>, 木村宏海<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 竹谷敏<sup>2</sup>

Yuki Moriya, Hiromi Kimura, Akihiro Hachikubo and Satoshi Takeya

## 1. はじめに

ガスハイドレート (以下, GH) は, 水分子間の水素結合で形成されたカゴ状構造のケージ内にガス分子を包接した結晶である. 天然ガスの主成分であるメタンだけでなく, 多くの種類のガスが GH 結晶を構成することが知られており, またガスの種類や成分によって結晶構造が変化する. GH は低温・高圧環境下で安定であるため, 天然 GH は海底・湖底の表層堆積物中や永久凍土下から発見されている. 天然 GH を分解させて得た包接ガス中に, ヘリウムが検出された例が報告されている<sup>1</sup>. しかしながら, GH に包接されたヘリウムに関する研究は少ない. 純粋なヘリウムの GH 生成には高圧力が必要であり, 220 K で 0.28 GPa との報告があるが<sup>2</sup>, その結晶構造は明らかにされておらず, ヘリウムがどのように包接されるのかなど, 不明な点が多い. しかし, ヘリウムを含む混合ガス系で GH を生成すれば, ヘリウムもわずかながら包接ガスとして取り込まれる可能性がある.

先行研究<sup>3</sup>では, メタン・ヘリウム混合系 GH を人工的に生成し, 試料生成後の残ガス相と結晶相を完全に分離して, それぞれのガス組成を求める技術を確認した. この実験では, 液体窒素温度で試料を固定し, 残ガス相を真空ポンプで引き続ける. このとき, ヘリウムは分子径が非常に小さいために, GH のケージに包接されずに結晶中を拡散し, 結晶外に出ていく可能性がある. そこで本研究では, 先行研究<sup>3</sup>の実験手法を踏襲し, メタン・ヘリウム混合系 (結晶構造 I 型), アルゴン・ヘリウム混合系 (結晶構造 II 型) の 2 種類について, 包接ガス中のヘリウム濃度が真空引きを行う時間とともに変化するかどうかを調べた.

## 2. 実験方法

混合 GH の生成については, 先行研究<sup>3</sup>と同様に実施した. まず, 実容積 42 mL の耐圧容器に微粉末状の水 3 g を -20°C の低温室で封入し, 液体窒素温度下で真空引きした. 結晶構造 I 型の場合は高純度メタン (純度 99.99%, 高千穂化学工業), 結晶構造 II 型の場合は高純度アルゴン (純度 99.999%, エア・ウォーター) をベースとし, 高純度ヘリウム (純度 99.995%, エア・ウォーター) とともに耐圧容器に導入, 加圧した. ガス組成および導入量を固定することで, 複数試料で同じガス組成の結晶相を目指した. その後, 耐圧容器を液体窒素温度からゆっくりと 0°C まで昇温させ, 微粉末氷の融解水と混合ガスを接触させる方法で GH 結晶を生成した.

耐圧容器を 0°C の恒温槽に約半日静置した後, 耐圧容器を液体窒素温度に冷却し, GH 結晶を分解させることなく, 真空ポンプで数時間引き続けることで残ガス (ヘリウムおよび液化した余剰メタンまたはアルゴン) を完全に排出し, GH 結晶のみが耐圧容器に残存する状態を実現した. 先行研究<sup>3</sup>では数時間程度で残ガスが完全に排出できたことを確認後, 速やかに包接ガス採取しているが, 本実験では真空引きの時間をさらに延長し, 数日~1ヶ月の範囲で複数サンプル毎に設定時間を変化させた. このように長期間真空にさらされた GH 結晶を, 耐圧容器に封入し

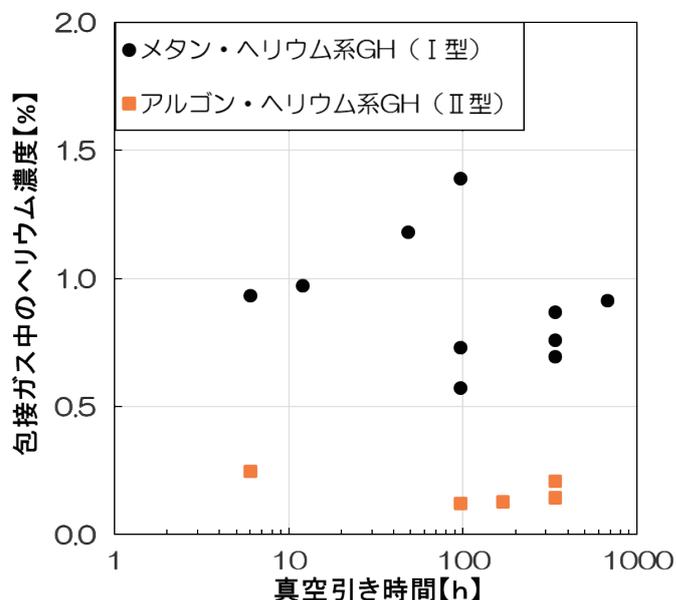


図 真空引き時間による包接ガス中のヘリウム濃度の変化.

たまま常温で分解させ, GH 包接ガスを水上置換で 100 mL バイアル瓶に捕集した. GH 包接ガス試料については, 速やかにポータブルガスクロマトグラフ (CP-4900, Varian) で分析し, 包接ガス中のヘリウム濃度を求めた. なお, キャリアガスにはアルゴンないし窒素を, カラムにはモレキュラーシーブ MS5A およびポラプロット PPQ (いずれもカラム長さ 10 m) を使用した.

## 3. 結果および考察

実験結果を上図に示す. 結晶構造 I 型のメタン・ヘリウム混合系 GH の包接ガス中のヘリウム濃度は 0.6~1.4% の範囲にあり, 結晶構造 II 型のアルゴン・ヘリウム混合系では 0.2% 程度だった. 前者では最長 1 ヶ月, 後者では 2 週間, 真空引きを続けたにもかかわらず, GH 包接ガスのヘリウム濃度低下はみられなかった. 特に, 結晶構造 II 型では 12 面体小ケージ同士が隣接しているために, 相対的に小ケージに多く存在すると考えられるヘリウムは結晶構造 II 型のほうが小ケージを伝って抜けやすい, と予想されたにもかかわらず, 変化はなかった. したがって, 少なくとも 1 ヶ月程度の時間では, 1% 程度の試料中のヘリウム濃度は液体窒素温度で維持されることが確認できた. ただし, GH 結晶中にヘリウムが確実に包接されているかどうかは未だに不明のままであり, また液体窒素温度よりも高温下でヘリウムが抜けるのかどうか, については今後の課題として残されている.

## 参考文献

- 1) 白倉, 2020: 北見工業大学社会環境工学科卒業論文.
- 2) Londono *et al.*, 1992: *J. Chem. Phys.*, **97**, 547-552.
- 3) 森谷ほか, 2020: 北海道の雪氷, **40**, 印刷中.

1 北見工業大学  
2 産業技術総合研究所

Kitami Institute of Technology  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

## 結晶構造 I 型をとる CO ハイドレートの水和数の直接測定 Direct Measurement of Hydration Number of CO Hydrate Enclathrated in the Structure I

○矢作大輔<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 竹谷敏<sup>2</sup>

Daisuke Yahagi, Akihiro Hachikubo and Satoshi Takeya

### 1. はじめに

ガスハイドレートは、水分子によって形成されるケージがガス分子を包接した水和物であり、包接されるガス種によって結晶構造が決まる。例えば、メタンを包接したメタンハイドレートは結晶構造 I 型をとる。結晶構造 I 型は、水分子 46 個が 14 面体の大ケージ 6 個および 12 面体の小ケージ 2 個で単位胞を形成する。全てのケージをガスが占有する場合、水和数(ガス分子 1 個に対する水分子の平均個数)は 5.75 となる。ガスハイドレートの水和数はガス包蔵性の指標となることから、多くの研究が行われており、例えばメタンハイドレートの水和数は  $6.2 \pm 0.2$  と報告されている<sup>1)</sup>。水和数が 5.75 にならないのは、小ケージに空のケージが存在するためである。

CO ハイドレートは結晶構造 I 型よりも結晶構造 II 型の方が安定であるが、実験では結晶構造 I 型を経たのちに、特定の条件下で結晶構造 II 型に変化すると報告されている<sup>2)</sup>。CO は宇宙に豊富に存在し、原始太陽系星雲、惑星、衛星において CO ハイドレートが形成されている可能性がある。土星の衛星であるタイタンの大気は主に窒素とメタンであるが、初期のタイタンは一酸化濃度が高かったため、CO ハイドレートの形成が示唆されている<sup>3)</sup>。このため、宇宙科学の観点からも CO ハイドレートの基礎物性を調べることは重要である。

ガスハイドレートの水和数を推定する方法の 1 つとして、ラマン分光法の利用が挙げられる。包接されたゲスト分子のラマンスペクトルを測定し、統計熱力学モデルを援用して水和数を推定する場合、大小ケージにそれぞれ包接されるゲスト分子のピーク面積比を求める必要がある。CO ハイドレートの場合、大小ケージに由来するピーク位置が近すぎるために、ピーク分離が困難である。そこで本研究では、先行研究<sup>4)</sup>と同様の重量測定による水和数の導出を試みた。また、ガス導入量を制御することで生成圧力を変化させ、水和数の生成圧力依存性を調べた結果について報告する。

### 2. 試料の生成方法および測定方法

#### 2.1 試料の生成方法

-20℃の低温室にて凍結させた蒸留水を 5g 削りだし、ステンレス製の耐圧容器に封入した。この耐圧容器を液体窒素温度下で真空引きしたのち、CO ボンベ (日本酸素, 純度 99.95%) から耐圧容器に一定量のガスを導入した。その後、耐圧容器を 0℃までゆっくり昇温させることで、微粉末氷からの融解水と CO との接触を促し、CO ハイドレートを生成した。

#### 2.2 PXRD による結晶構造の同定および氷の混入率の測定

試料の結晶構造の同定のために、PXRD による結晶構造解析を行った。また、上記の試料生成方法では、未反応の氷が残存する可能性がある。そこで、PXRD で得られた回折パターンを解析することにより、試料中に含まれる未反応の氷の存在割合を求めた。

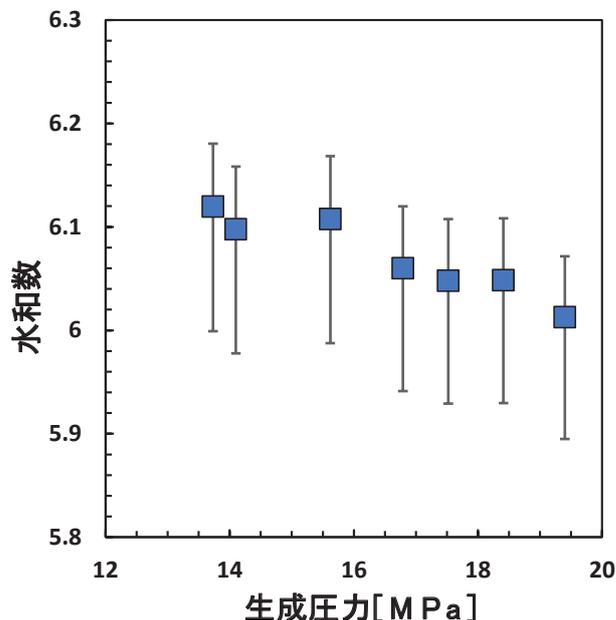


図 生成圧力と CO ハイドレートの水和数の関係

### 2.3 重量測定による水和数の算出

試料の生成が終了した後、試料容器を液体窒素に浸し、余剰な CO を排出するために真空引きを行った。真空引き完了後、試料容器を常温下に置き、試料を解離させた。この状態で耐圧容器ごと重量測定を行った。その後、耐圧容器のバルブを開放し、空気が混入しないように大気圧まで減圧し、同様に重量測定を行った。容器内の残った大気圧分のガス重量は、理想気体の状態方程式から算出した。以上から CO ハイドレートに包接された CO の重量を求めた。最後に、耐圧容器内の水重量を測定し、CO ガス重量および水重量の測定結果から水和数を求めた。

### 3. 測定結果および考察

PXRD 解析の結果、生成圧力 15.3 MPa で生成した試料は結晶構造 I 型であり、氷の混入率は 1%以下であることが判明した。生成圧力と CO ハイドレートの水和数の関係を上図に示す。図中のエラーバーは測定誤差および上記の氷の混入 (1%以下) による誤差を合わせたものである。今回の測定における平均の水和数は  $6.1 \pm 0.1$  であり、生成圧力上昇に伴い、わずかな水和数の減少傾向が得られた。

#### 参考文献

- 1) Uchida, T., *et al.*, 1999: *AIChE J.*, **45**, 2641–2645.
- 2) Zhu, J., *et al.*, 2014: *Nat. Commun.*, **5**, 4128.
- 3) Lunine, J., and Stevenson, D., 1985: *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **58**, 493–531.
- 4) 杉森ほか, 2019: 雪氷研究大会 (2019・山形) 講演予稿集.

1 北見工業大学

2 産業技術総合研究所

Kitami Institute of Technology

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

TBAF セミクラスレートハイドレートと CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 混合ガス間の気固接触における CO<sub>2</sub> 分離特性CO<sub>2</sub> separation characteristics in gas-solid contact between CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> mixture and TBAF semi-clathrate hydrate

○藤原玲司<sup>1</sup>, 合田隼人<sup>1</sup>, 木田真人<sup>1</sup>, 坂上寛敏<sup>1</sup>, 南尚嗣<sup>1</sup>  
Reiji Fujiwara, Hayato Goda, Masato Kida, Hirotohi Sakagami and Hirotsugu Minami

## 1. はじめに

クラスレートハイドレート (CH) は、複数の水分子によって形成された多面体ケージの中にガス分子などを包接した氷とよく似た結晶物質であり、低温高圧下で高密度にガスを貯蔵できる。また、ガス分子によってケージへの取り込まれ方が異なるという性質も有しており、CH を利用したガス分離が検討されている<sup>1)</sup>。ガスを取り込んだ CH の生成方法として、主に水や添加物を含んだ水溶液をガスと接触させる気液接触と氷やハイドレート結晶にガスを接触させる気固接触がある。テトラヒドロフランと CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 混合ガスのハイドレートシステムにおいて、気液接触と気固接触で CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> のハイドレートケージへの包蔵選択性が逆転することが知られており<sup>2,3)</sup>、接触方法の違いによるガス分離特性の違いを理解することは、CH の工学的な応用を検討する上で重要になる。しかし、CH を用いた多くの気固接触系のガス分離特性は解明されていない。そこで、本研究では、テトラブチルアンモニウムフルオリドハイドレート (TBAFh) を対象として、CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 混合ガスとの気固接触による CO<sub>2</sub> 分離特性を評価した。

## 2. 方法

本研究では、253~293 K の一定温度下で TBAFh 結晶と CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 混合ガス (CH<sub>4</sub>: 61.3%, CO<sub>2</sub>: 38.7%) による気固接触を行った。TBAFh 結晶は化学量論組成である 3.4mol% に対応するようにテトラブチルアンモニウムフルオリド水溶液を調製し、253 K で冷却することで生成した。その後、粒径を 300 μm 以下にふるい分けした TBAFh 結晶 5.000 g を体積約 31 cm<sup>3</sup> の耐圧容器に導入し、0.9 MPa と 3.0 MPa の二つの初期圧力条件で CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 混合ガスを接触させ、約 9 日間静置させた。所定時間経過後、TCD 型ガスクロマトグラフを用いて耐圧容器内の最終気相ガスとハイドレート分解ガスのガス組成を測定した。ガス組成データと耐圧容器内の圧力変化挙動により、気固接触における CO<sub>2</sub> 回収率 ( $R_{CO_2}$ )、CH<sub>4</sub> 回収率 ( $R_{CH_4}$ )、CO<sub>2</sub> 分離係数 ( $S$ ) を算出し、ガス分離性能の評価を行った。

## 3. 結果と考察

ガス組成データより、本研究のすべての条件で、CO<sub>2</sub> が TBAFh 結晶内に選択的に包接されることがわかった。低圧条件 (初期圧力 0.9 MPa) において、 $R_{CO_2}$  の値は接触温度が低温になるほど高くなる傾向を示し (293 K: 18.1%, 253 K: 33.7%)、低温ほど初期に封入した CO<sub>2</sub> をより多く回収できることが明らかになった。一方、高圧条件 (初期圧力 3.0 MPa) においては、接触温度が 293 K から 283 K に低下するにつれて、 $R_{CO_2}$  は増加したが (293 K: 11.9%, 283 K: 19.3%)、それ以下の接触温度では、ほぼ一定の値を示し、接触温度条件による顕著な変化傾向は確認されなかった。これに対して、どちらの接触圧力条件でも  $R_{CH_4}$  の値は低温ほどわずかに低下する傾向を示した (高圧条件では、293 K: 5.6%, 253 K: 2.9%, 低圧条件では、293 K: 9.4%, 253 K: 6.1%)。  $S$  の値は、接触温度一定下において、高圧条件と低圧条件でほぼ同じ値を示し (高圧条件では、293 K: 2.3, 253 K: 5.8, 低圧条件では、293 K: 2.2, 253 K: 8.1)、接触温度が低下するにつれて値が高くなる傾向が確認された。このことから接触温度条件が低温であるほど、TBAFh 結晶に CO<sub>2</sub> がより選択的に取り込まれることが明らかになった。この傾向は TBAFh 結晶に対する、CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> の熱力学的安定性の差が影響していると推察される。

## 参考文献

- 1) Kamata, Y., Oyama, H., Shimada, W., Ebinuma, T., Takeya, S., Uchida, T., Nagao, J., Narita, H., 2004: Gas Separation Method Using Tetra-*n*-butyl Ammonium Bromide Semi-Clathrate Hydrate, *J. Jpn. Appl. Phys.*, **43**, 362–365.
- 2) Kida, M., Goda, H., Sakagami, H., Minami H., 2020: CO<sub>2</sub> capture from CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> mixture by gas–solid contact with tetrahydrofuran clathrate hydrate, *Chem. Phys.*, **538**, 110863–110869.
- 3) Lee, Y.-J., Kawamura, T., Yamamoto, Y. and Yoon, J.-H., 2012: Phase Equilibrium Studies of Tetrahydrofuran (THF) + CH<sub>4</sub>, THF + CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub>, and THF + CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> Hydrates, *J. Chem. Eng. Data*, **57**, 3543–3548.

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 20K12269 の助成を受けたものです。

## 放射冷却による高品質製氷の実用化

## - その2 高電圧パルス印加による過冷却解消促進と微気泡群抑制 -

## Practical use of high quality ice making by radiation cooling

## -Part2 Microbubble suppression by Supercooling resolution with high voltage pulse -

○吉田匡貴<sup>1</sup>, 杉原幸信<sup>2</sup>, 上村靖司<sup>2</sup>

Masaki Yoshida, Yukinobu Sugihara and Seiji Kamimura

## 1. はじめに

高品質な水(単結晶, 結晶粒が大きい, 結晶方位が揃っている)は, その透明度や加工性の高さから特に飲食業界などで需要がある. その中でもバーデンドー業界では丸氷などを作るための無気泡氷の需要が高い. そのため, 当研究室では放射冷却を用い, 上記の高品質な氷を作製する技術について研究を行ってきた. しかし, 無気泡かつ単結晶の氷を安定して生成する条件は十分に解明できていない. そこで, 本研究では氷の透明度を下げる主因である気泡に着目し, 製氷初期に発生する微気泡群を抑制し, 無気泡氷を作るための条件の検討を行った.

## 2. 気泡の析出メカニズムについて

放射冷却によって出来た氷に析出する気泡は, 氷の初晶形成時に氷に取り込まれる「微気泡群」と氷の成長に伴い所定厚さに達した後に析出する「気泡列」の二種類に分けられる(図1). そのうちの「気泡列」は原料水を室温以上に保持した後, 空気に触れない状態を維持しながら製氷することで抑制できることが先行研究により分かっている<sup>1)</sup>. 「微気泡群」は初晶のデンドライト(樹枝状晶)付近に析出することが分かっている. デンドライトは, 過冷却度が高い液体の過冷却が解消され, 結晶成長が始まった際に発生し, 過冷却された原料水の体積が大きいほど大きく成長する. 微気泡群がデンドライト付近に析出したメカニズムは, 過冷却が解消した際に, 水中の溶存気体の拡散速度よりも結晶成長速度のほうが早くなった結果, デンドライト部分を中心に局所的に溶存気体の濃度が飽和に達して, 気泡が析出したと考えられている<sup>2)</sup>. このことから, 過冷却度が小さいうちに過冷却の解消を促進し, デンドライトの成長を遅くすることで, 微気泡群の発生を抑制できると考えられる.

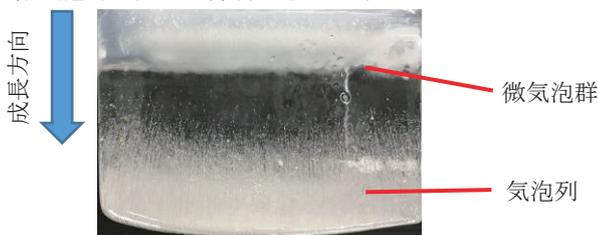


図1 氷に析出する気泡の種類

## 3. 実験概要

本研究では, 製氷中の原料水に高電圧パルスを印加することで, 過冷却を強制的に解消し, 微気泡群の発生への影響を調査した. 製氷ユニット内に高電圧パルス発生装置の導線を通し, 水槽内の試料水内に導線が出るようにセットし, 放射冷却を行う. 導線付近の試料水の水温は T 型熱電対とデータロガーを用いてリアルタイムで確認し, 水温が0度以下になったことが確認で

きたら1分ごとに高電圧パルスを印加する. そして, 過冷却が解消されるまでの時間および最大過冷却度を調査した.

## 4. 実験結果

高電圧パルスの印加の有無で3回ずつ実験を行い, それぞれの過冷却解消までの時間および最大過冷却度の平均値で比較を行った. その結果, 原料水に高電圧パルスを印加したことで, 過冷却解消までの時間と最大過冷却度を抑えることが出来た. また, 表1にパルス印加の有無で製氷した氷を側面から観察した様子を示す. パルスを印可して製氷した氷には, 微気泡群が目視では確認できなかった. そのため, 過冷却解消を促進することが微気泡群の抑制に有効であるといえる. また, パルス印可の有無によって, 初晶が形成されてから水平方向への成長速度に差があることが分かった. このことから, 微気泡群が抑制されたのはデンドライトの成長量が抑制された以外にも, 溶存気体の拡散速度と結晶成長速度が関係している可能性があると考えられるため, 今後はそれらに着目した実験を行っていく必要がある.

表1 パルス印加の有無で製氷した氷

	印加有り	印加なし
1回目		
2回目		
3回目		

## 5. まとめ

放射製氷によって出来た氷に析出する微気泡群を抑制するため, 製氷中の原料水に高電圧パルスの印加を行い, その影響の調査を行った. その結果, 高電圧パルスの印加が, 過冷却の解消を促進させ, 微気泡群の析出を抑制させることに有効なことが分かった. また, パルス印可の有無は初晶の水平方向の成長速度にも影響を与えていたため, 微気泡群の析出には溶存気体の拡散速度と結晶成長速度が関係している可能性があると考えられる.

## 6. 参考文献

- 1) 本田宇希, 上村靖司(2018): 「放射冷却による高品質製氷の実用化: 初気泡析出条件」, 寒地技術論文・報告集: 寒地技術シンポジウム p301-304
- 2) 前野紀一, (1966): 『氷水界面における気泡の発生と捕捉』, Low temperature science. Series A, Physical sciences, 24: 91-109

1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科

2 長岡技術科学大学 機械創造工学専攻

Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology

Department of Mechanical Engineering Nagaoka University of Technology

## 凍結細胞の長期保存における氷結晶の再結晶現象の影響

## Effect of Ice Recrystallization Phenomenon on Long-Term Storage of Cryopreserved Cells

○内田努<sup>1</sup>, 法花翼<sup>2</sup>, 黄川田隆洋<sup>3,4</sup>, 津田栄<sup>5</sup>, 山崎憲慈<sup>1</sup>, 郷原一壽<sup>1</sup>

Tsutomu Uchida, Tsubasa Hohana, Takahiro Kikawada, Sakae Tsuda, Kenji Yamazaki and Kazutoshi Gohara

## 1. はじめに

細胞の凍結保存は、畜産業等で利用されている技術である。しかし未だ凍結保存できない細胞種もあり、そのメカニズムは科学的には解明されていない。また細胞を凍結保存するには凍結保護剤 (CPA) を添加することが有効であるが、現在用いられているグリセリン等の化学物質は細胞毒性があることが知られており、改善が必要とされている。私達は糖類や不凍タンパク質 (AFP) 等の天然 CPA を用いた凍結保存技術の開発と、凍結保存メカニズムの解明に取り組んでいる。しかし天然 CPA は分子量が大きいので、そのままでは細胞内へ取り込まれず、CPA としての働きが弱い。そこで二糖類のトレハロースを輸送する膜タンパク質を発現した細胞を用いて、細胞内トレハロースの凍結保護効果を調べたところ、高い効果を発揮することを確認した<sup>1,2)</sup>。またその細胞を $-80^{\circ}\text{C}$ で長期保存した際、1 年間は良好に保存できるものの 2~3 年たつと生存率が低下してしまうことも見出した<sup>3)</sup>。この凍結状態で品質が劣化する要因の一つとして、氷の再結晶現象の影響が考えられている。しかしこれまで氷再結晶の観測は主に冷凍食品等で用いられる $-30^{\circ}\text{C}$ 以上に限られており、より低温での再結晶速度などは明らかになっていない。さらに凍結液には多くの溶質が含まれており、それらの影響を考慮する必要がある。そこで本研究では、実際に細胞の凍結保存に用いる凍結液を $-80\sim-40^{\circ}\text{C}$ の低温で 1 年間保存して氷結晶の観察を行い、再結晶速度の計測を行った。

## 2. 実験方法

細胞用培養液 (F-12 HAM 培地に抗生物質 1%, 牛胎児血清 10%等を含む) に CPA としてトレハロース 400mM を、再結晶抑制剤として AFP 類を添加し、凍結液を作成した。AFP 類には魚類由来の AFP type I, type III, および不凍糖タンパク質 (AFGP) を用いた。そして約 10 $\mu\text{L}$  の溶液をカバーガラスに挟み、液体窒素中で急冷させて微細な氷結晶を作成した。また培養液中の添加物の再結晶への影響を評価するため、リン酸緩衝液 (PBS) を培養液の代わりに用いた試料も作成した。これらの試料を $-80\sim-40^{\circ}\text{C}$ に設定した Deep freezer 中に保存し、一定期間ごとに取り出して低温室内の偏光顕微鏡で氷結晶粒観察を行った。そして一定面積中に含まれる結晶粒数より平均粒径を求め、その時間変化から再結晶速度を評価した。

## 3. 結果と考察

初期の結晶粒径は、培養液や PBS のみの場合  $\phi 10\mu\text{m}$  程度と、細胞と同程度の大きさであった。これにトレハロースを加えるとその大きさが  $\phi 5\sim 7\mu\text{m}$  と小さくなることが分かった。また AFP 類を加えると、粒界の形状が複雑になることが観測された。この状態から保存温度毎に平均粒径の変化を観測した結果、 $-80^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ でも再結晶が進行することを確認した。平均粒径の 3 乗が時間に比例する関係式より再結晶速度を評価した結果、培養液や PBS のみの場合保存温度が高いほど再結晶速度が大きくなった。これに対し、AFP 類を加えると再結晶速度自体が小さくなることがわかり、AFP 類の再結晶抑制効果を確認した。またその再結晶速度の温度依存性は、不明瞭になることがわかった。

なおこれらの解析結果と凍結細胞の生存率との関係などについては、当日議論する予定である。

謝辞: This research is supported by Adaptable and Seamless Technology transfer Program through Target-driven R&D (A-STEP, JPMJTM19A6) from Japan Science and Technology Agency (JST). Trehalose was supplied by Hayashibara Co. Ltd., and experimental apparatuses were supported by Prof. Sazaki and by Dr. Iizuka, Hokkaido University.

## 参考文献:

- 1) T. Uchida, M. Furukawa, T. Kikawada, K. Yamazaki, K. Gohara, 2017: *Cryobiology*, **77**, 50-57.
- 2) T. Uchida, M. Furukawa, T. Kikawada, K. Yamazaki, K. Gohara, 2019: *Cryobiology*, **90**, 30-40.
- 3) T. Uchida, M. Furukawa, T. Kikawada, K. Yamazaki, K. Gohara, 2019: *Bulliten of Glaciological Research*, **37**, 1-9.

1 北海道大学大学院工学研究院

2 北海道大学大学院工学院

3 農業・食品産業技術総合研究機構

4 東京大学大学院新領域創成科学研究科

5 産業技術総合研究所

Faculty of Engineering, Hokkaido University

Graduate School of Engineering, Hokkaido University

National Agriculture and Food Research Organization (NARO)

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

## 2020～2021年冬の雪による人的被害の状況 Casualties caused by snow in this winter (2020-2021)

○堤 拓哉<sup>1</sup>  
Takuya Tsutsumi

### 1. はじめに

昨冬の雪による人的被害は 222 名と近年では最も少ない状況であったが、2020～2021年の冬は局地的な大雪が多数発生したことなどに伴い、死者は昨冬の10倍を超える被害となった。本報では、被害軽減に向けた議論に資するため、行政機関から公開されている被害報告の資料を整理し、今冬の雪による人的被害状況を概観する。

### 2. 人的被害の状況

#### 2.1 雪による人的被害の推移

図1より雪による人的被害(死者、重傷、軽傷の合計)の推移をみると、今冬(R2)の人的被害は、2014年関東甲信の大雪(H25)以降において、最も大きい被害であったことが分かる。

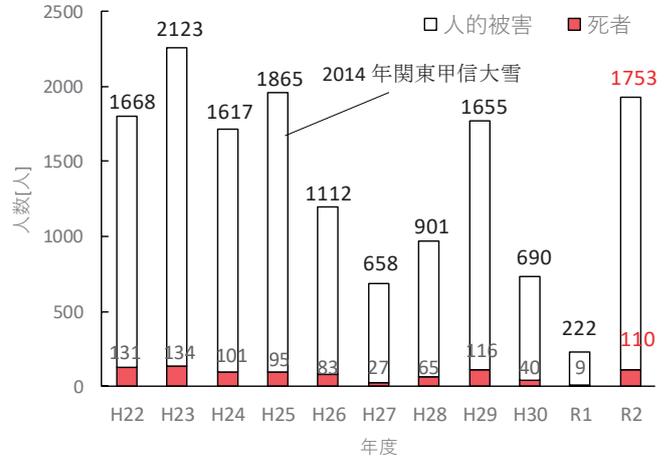


図1 雪による人的被害の推移 (消防庁まとめ)<sup>1)</sup>

#### 2.2 都道府県別の人的被害

図2に都道府県別の人的被害の状況を示す。図2より都道府県別の人的被害をみると、北海道が388人と最も多く、次いで新潟県365人、秋田県264人、山形県192人、青森県133人であり、5道県で国内における人的被害総数の76%を占める。R2.1.1住民基本台帳の人口から人口10万人あたりの人的被害を試算すると、秋田県が26.8人と最も多く、次いで山形県17.7人、新潟県16.3人、青森県10.4人、北海道7.4人となった。

#### 2.3 人的被害の原因別内訳

図3に上位5道県における人的被害の原因別内訳を示す。なお各道県で被害の分類方法が異なることから、ここでは、「雪下ろし等除雪」、「落水雪」、「除雪機」、「その他」の4項目に整理した。図3をみると、人的被害の原因としては「雪下ろし等除雪」が最も多く、47～92%を占めている。「落水雪」は3～23%、「除雪機」は1～12%と地域間の差が比較的大きく、住宅の仕様や雪処理方法の違いが影響していると考えられる。

### 3. おわりに

行政機関の公開資料を整理し、2020～2021年冬の雪による人的被害の状況を概観した。平成18年豪雪以降、安全上の課題として指摘されている「雪下ろし」による事故が未だ多数発生し、雪による人的被害は千人を超える状況にある。雪による人的被害の軽減には、住民の意識啓発と共に、安全性を高めるための住宅改修や高齢者の住替え、雪国に適した住宅ストック形成など、短期的、中長期的な施策を組み合わせた取り組みが求められる。

### 参考文献

- 1) 総務省消防庁：今冬の雪による被害状況等
- 2) 北海道：雪による被害状況 (北海道), 2021.4.7
- 3) 青森県：雪害発生状況 (令和2年度)
- 4) 秋田県：雪による被害状況等について, 2021.6.3
- 5) 山形県：今冬の大雪による被害状況等について, 2021.6.7
- 6) 新潟県：今冬の雪による被害状況について, 2021.5.26

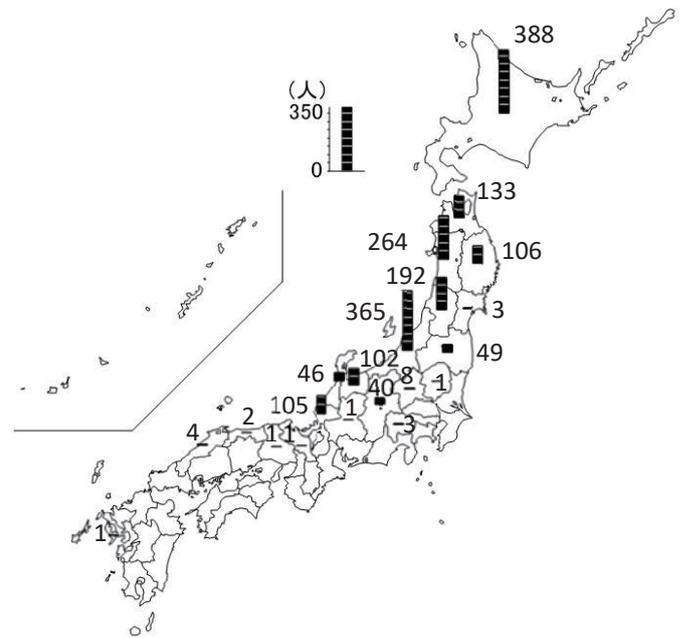


図2 都道府県別の人的被害の状況 (消防庁資料を基に作図)<sup>1)</sup>

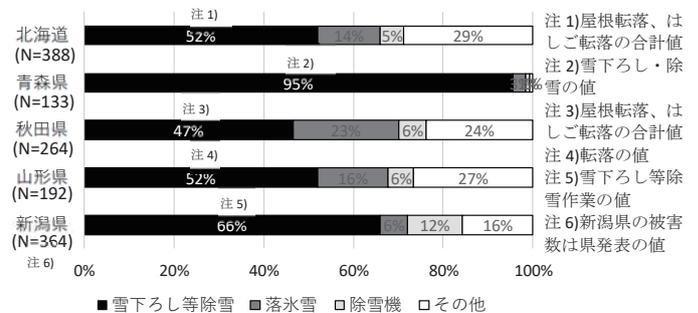


図3 人的被害の原因別内訳<sup>2)~6)</sup>

1 北海道立総合研究機構 建築研究本部

Building Research Department, Hokkaido Research Organization

今冬の大雪災害の事例と特徴  
— 雪氷災害データベース解析 —

Case examples and characteristic of the heavy snow disaster in this winter  
- Analyze of the snow disaster database -

○上石勲<sup>1</sup>, 山口悟<sup>1</sup>, 砂子宗次朗<sup>1</sup>, 山下克也<sup>1</sup>, 覺道由郎<sup>2</sup>

Isao Kamiisi, Satoru Yamaguchi, Sojiro Sunako, Katsuya Yamashita and Yoshiro Kakudo

1. 今冬の大雪災害の概要

2020年12月には、新潟県や群馬県の山沿い中心に2、3日で2m以上の集中した降雪があり、関越自動車道で2000台以上の車が滞留し、50時間以上の通行止めとなった。2021年1月には北陸地方の海岸平野部も含めて場所的、空間的に集中した大雪となった。山形県、秋田県では山間部で大雪となって、除雪中の事故が多発し雪崩の発生もあった。宮城県では東北自動車道で吹雪が原因の事故によって長時間通行止めとなった。

とくに、新潟県上越地方の平野部では、1986年(昭和61年)以来、35年ぶりの大雪となり、社会的に大きな影響が発生した。2021年1月7日～12日には、上越市の気象庁アメダス高田観測点で1月8日の日降雪量103cm、8～9日の2日間降雪量153cm、11日には最大積雪深249cmを記録した。また、8日16時には1時間降雪量11cm、14～16時の3時間降雪量26cmの短時間の集中した降雪となった。海岸部の直江津地区や柿崎地区などでも大雪となり、雪の重みによる家屋や農業用ハウスの倒壊も発生した。上越市高田の中心市街地では、一斉雪おろしも行われた(図1)。消雪パイプの設置されていない狭い道路では、道路除雪が進まず長期間の通行止めで、車の使えない不自由な生活を余儀なくされたところも多くみられた(図2)。また、北陸道や上信越道でも長時間の通行止めが発生した。

2. 雪害データベースから今冬の大雪の特徴

防災科研では、2001年度から積雪地域の各道府県の代表的な地方紙より雪氷災害を抽出し整理してきた(雪氷災害データベース)。2020-21年冬期の全国の雪による犠牲者は147名、負傷者は448名、事故件数は730件となっている。これを北海道、新潟県別に死傷者と重軽傷者別の2006年から2021年今冬までの推移を図3に示した。また、今冬2021年、2012年、2006年、それぞれの北海道、新潟県の雪害事故の種類別件数を図4に示した。今冬の新潟県の事故件数は2006年(平成18年豪雪)以来16年ぶりの多さとなっている。北海道では、交通事故の割合が多くなっているが、新潟県では、屋根からの転落や落雪、除雪期の事故など除雪作業中の事故が多くなっている。

3. 今後の解析と課題

今冬の大雪災害では長期の渋滞や生活道路の除雪遅延があり、大きな社会的影響を与えた。海岸平野部の状況把握のための雪の観測点が不足していることも改めて認識された。今後は今冬の大雪被害や対応のデータをさらに収集し、降雪量や積雪深と人的被害や渋滞などの社会的影響の大きい事象との関係等を解析する予定である。また、これらのデータを活かし、状況にあった最適な対応をとれるような「雪のフラットフォーム」を形成することが必要であると考えられる。



図1 一斉雪下ろし(上越市)



図2 狭隘道路の堆雪状況(上越市)

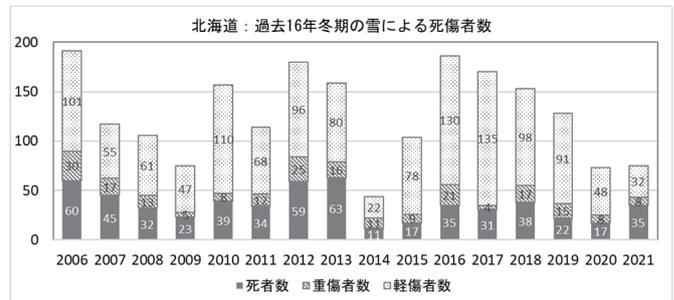


図3 死傷者の推移(上段：北海道 下段：新潟県)

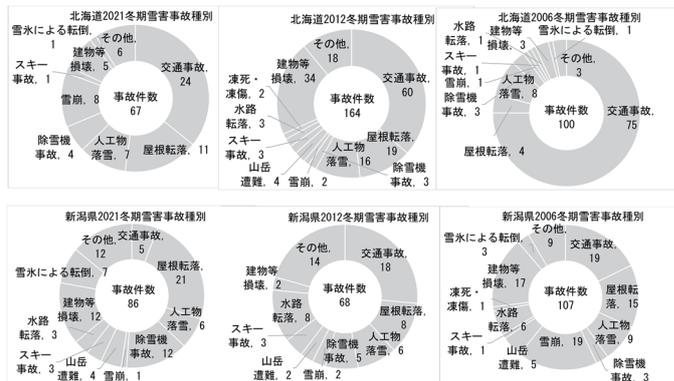


図4 雪害事故の種類別件数

上段：北海道 下段：新潟県  
左：2021年 中：2012年 右：2006年

1 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

2 長岡技術科学大学

Snow and Ice Research Center,  
National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience  
Nagaoka University of Technology

札幌市における冬道での自己転倒による救急搬送の特徴分析  
Analysis of Pedestrian's Falls on Winter Road in Sapporo○永田泰浩<sup>1</sup>，金田安弘<sup>1</sup>  
Yasuhiro NAGATA, Yasuhiro KANEDA

## 1. はじめに

札幌市の冬道での自己転倒による救急搬送者数は、1995年度以降、毎冬期（以後、12月～3月を”冬期”と称す）600名以上に達している。2012年度冬期は、1317名が冬道での転倒によって救急搬送され、データのある1983年以降で最多となった。2012年度冬期から2017年度冬期までの6冬期の間には救急搬送者数が1000名を上回る冬期が4回あった。一方、2018年度冬期以降は、2018年度が886名、2019年度が688名と1000名を下回った。本報告では2020年度冬期の転倒による救急搬送者の状況を整理するとともに、救急搬送の発生の特徴を分析した。

分析にあたり、救急搬送者データをご提供いただいた札幌市消防局様に深く御礼を申し上げます。

## 2. 2020年度冬期の動向

2020年度冬期の自己転倒による救急搬送者数は836名であり、3年連続で1000名を下回った。図1には月別の救急搬送者数を示した。12月の救急搬送者数は133名と少なく、図のように25冬期で初めて150名を下回った。一方で2月の救急搬送者数は315名と、図のように25冬期で初めて300名を上回った。12月の救急搬送者数が少なかった理由として、札幌市内の雪の降りはじめが遅く、降雪、積雪が少なかったことが考えられる。

2月の救急搬送者数が多くなった理由の一つとして、2月2日に救急搬送が多発したことがある。令和3年2月2日の日救急搬送者数は77名で、表1に示すように、日救急搬送者が過去25冬期で3番目に多かった。札幌の気象データを確認すると前日1日の午後から気温が高い状態が続き、2日の3時と4時には気温が6℃以上となっている。5時以降は気温が低下し、午前8時から気温がマイナスになり、12時が-2.0℃、15時は-4.8℃と気温が急激に低下した。救急搬送者数は午後になって増加しており、14時台から19時台までの6時間で45名、17時台が最多で11名の方が自己転倒により救急搬送者数されていた。

表1 過去25冬期の救急搬送者多発日

順位	年月日	救急搬送者数
1	2014年12月21日	163人/日
2	2014年12月22日	84人/日
3	2021年2月2日	77人/日
4	2012年12月5日	57人/日
5	2018年3月9日	56人/日
6	2016年12月28日	53人/日
7	2009年2月1日	46人/日
8	2015年12月27日	45人/日
9	2001年2月22日	43人/日
	2017年12月6日	43人/日

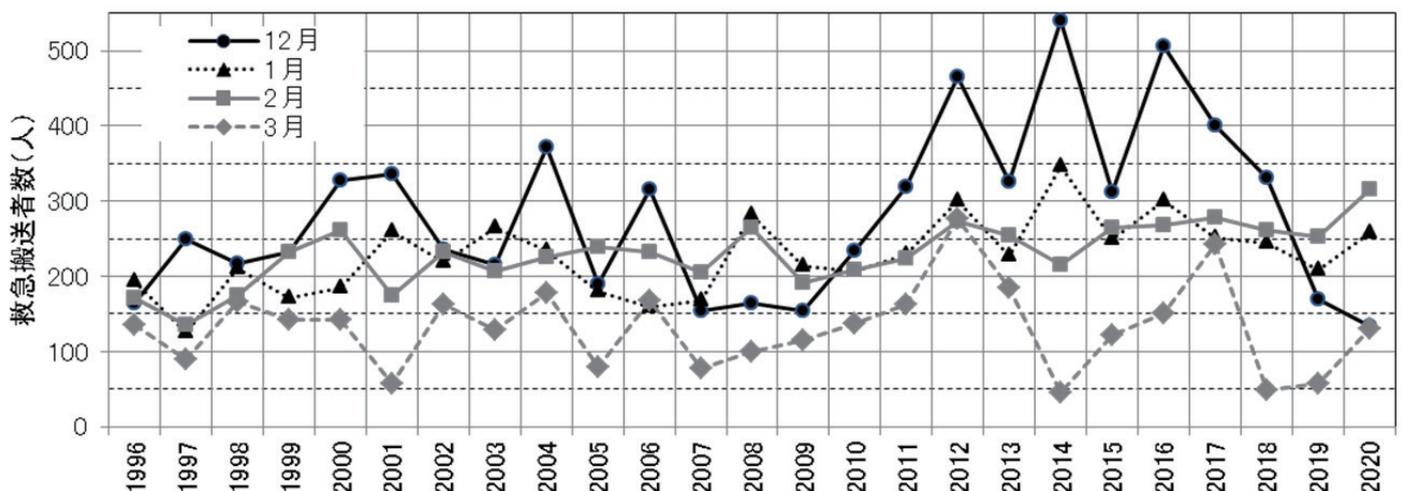


図1 札幌市における月別の救急搬送者数(25冬期:1996年度～2020年度)

## 参考文献

1) 永田泰浩，金田安弘，2015：転倒による救急搬送集中日の特徴分析．雪氷研究大会（2015・松本）講演要旨集．137

1 (一社)北海道開発技術センター

Hokkaido Development Engineering Center

Google Earth を利用した住宅地における雪による人身事故のリスク評価

—その1 2階建て木造戸建て住宅の建築年代と屋根形状との関係—

Risk Assessment of Human Damage caused by Snow in Residential Areas using Google Earth

- Part 1 Relationship between construction period of 2 stories wooden houses and the roof shape -

○鎌田晃嘉<sup>1</sup>, 千葉隆弘<sup>2</sup>

Akiyoshi Kamada and Takahiro Chiba

1. はじめに

北海道では、雪による人身事故が後を絶たない。札幌管区気象台で観測された年最大積雪深をみると、2020 寒候年が 80 cm, 2021 寒候年が 79 cm であり、いずれも平年の 0.8 倍程度の値である。一方、札幌市が含まれる石狩振興局管内における雪による死傷者数は、2020 寒候年が 22 名, 2021 寒候年が 46 名である<sup>1)</sup>。このように、平年を下回る積雪状況下においても雪による人身事故が発生しているのが現状である。

このようなことから本研究では、雪による人身事故の拡大要因を把握することを目的に、Google Earth を利用して住宅地に建築されている 2 階建て木造戸建て住宅の屋根形状やカーポート等の付属施設の設置状況を調査した。本報その 1 では、住宅地の建築年代と屋根形状との関係について述べる。

2. 研究方法

札幌市手稲区における建築年代が異なる 3 つの住宅地を対象に、Google Earth を利用して 2 階建て木造戸建て住宅の屋根形状およびカーポート、ガレージ、および物置の設置状況を調査した。各住宅地の建築年代は、国土院の地形図・地勢図図歴<sup>2)</sup>に基づいて 1970 年代、1990 年代、および 2010 年代と推定した 3 つの住宅地を調査の対象とした。調査棟数は、1970 年代が 48 棟、1990 年代が 58 棟、2010 年代が 55 棟である。Google Earth では、建築物の表面が 3D モデル化されていることから、各住宅の屋根勾配は Google Earth Pro の計測ツールを用いて測定した。

3. 研究結果

図 1 に、各建築年代における屋根形状の構成比を示す。1970 年代をみると、屋根がほぼフラットな無落雪屋根が 40%強を占め、勾配屋根が 60%弱を占めている。1990 年代をみると、無落雪屋根の構成比が増加し、その一部が勾配屋根の場合を含めるとおよそ 70%を占めている。2010 年代をみると、ほぼ無落雪屋根で占められるようになり、その一部が勾配屋根あるいは勾配屋根はそれぞれ 1 棟のみであった。なお、2010 年代の無落雪屋根には、石粒を付着させて表面を粗くした屋根材を用いている住宅を含めたことから、図中の勾配屋根は落雪屋根であることを意味する。

図 2 に、各建築年代における下屋 (1 階屋根) の有無を示す。1970 年代および 1990 年代をみると、下屋ありの住宅は全体の 60%強を占めている。これに対し、2010 年代をみると、下屋がない総 2 階建ての住宅が全体の 60%強を占めている。このように、最近の木造戸建て住宅は、総 2 階建てにする傾向が強い。

図 3 に、各建築年代における屋根勾配の分布を示す。1970 年代をみると、4/10 未満が大半を占めている。これに対し、1990 年代をみると、5/10~12/10 の範囲に分布し、10/10 勾配が最も多い。2010 年代をみると、石粒を付着させた無落雪勾配屋根の場合であるが、4/10~10/10 に分布しており、5/10~6/10 とする住宅が多く見受けられる。以上の結果をみると、1970 年代の屋根勾配

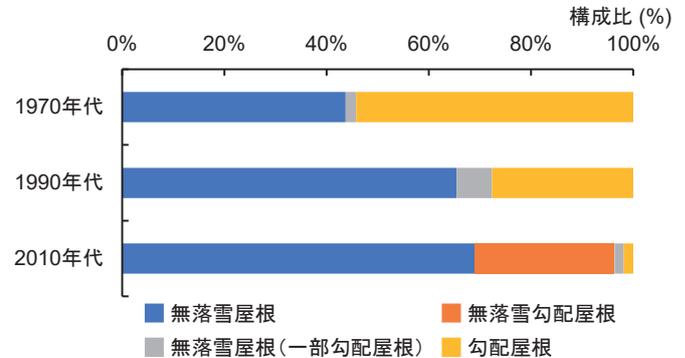


図 1 各建築年代における屋根形状の構成比

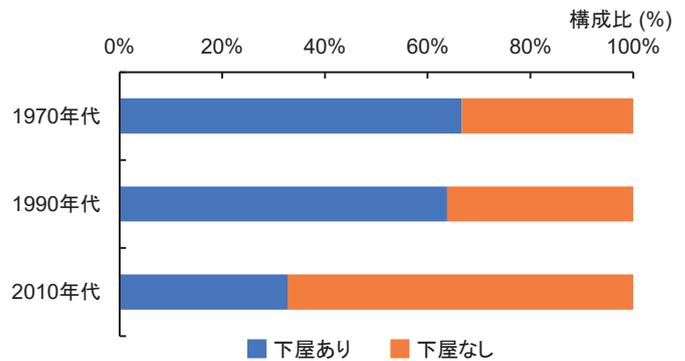


図 2 各建築年代における下屋 (1 階屋根) の有無

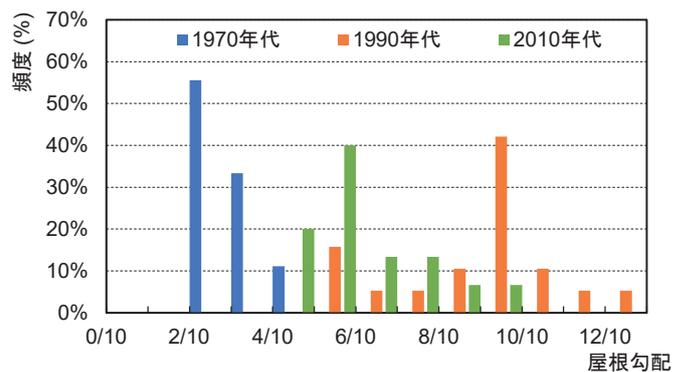


図 3 各建築年代における屋根勾配の分布

は、雪下ろしのために屋根に上がることができるほど緩いことが明らかである。

参考文献

- 1) 北海道総務部危機対策課：雪による被害状況，入手先 <<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/ktk/bsb/yukihigaizyokyou.htm>>，参照 2021.06.16
- 2) 国土院：地形図・地勢図図歴，入手先 <<https://mapps.gsi.go.jp/history.html#l=37.3912834,140.3903225&z=5&target=t25000>>，参照 2021.06.16

1 北海道科学大学大学院工学研究科建築学専攻

2 北海道科学大学工学部建築学科

Graduate School of Engineering, Hokkaido University of Science  
 Department of Architecture, Hokkaido University of Science

## Google Earth を利用した住宅地における雪による人身事故のリスク評価

## —その2 木造戸建て住宅地における人身事故リスク評価の試み—

## Risk Assessment of Human Damage caused by Snow in Residential Areas using Google Earth

## - Part 2 Examination of risk assessment caused by snow in the residential areas -

○千葉隆弘<sup>1</sup>, 鎌田晃嘉<sup>2</sup>

Takahiro Chiba and Akiyoshi Kamada

## 1. はじめに

前報その1では、札幌市手稲区における建築年代が異なる3つの住宅地を対象に、Google Earthを利用して2階建て木造戸建て住宅の屋根形状およびカーポート等の設置状況を調査し、雪による人身事故の拡大要因を把握する試みを行った。本報その2では、それら拡大要因ごとにリスクを点数化し、住宅地における人身事故のリスク評価を試みた。

## 2. 事故リスクの評価方法

雪による人身事故リスクの評価方法を表1に示す。本報では6つの拡大要因に対してリスクの重み付けを行うことによりリスク評価を行うこととした。始めに、無落雪屋根か勾配屋根かによってリスクの重み付けを行った。勾配屋根の場合は落水雪による危険性があることから、事故リスク1点を加えることとした。次に、下屋の有無について、下屋がある場合は、吹きだまり等によって積雪深が多くなりがちで雪下ろしの動機になり得ることから、事故リスク1点加えることとした。屋根勾配については、緩勾配ほど屋根に上がることが容易になるため、勾配4/10未満の屋根で事故リスク1点加えることとした。

カーポートやガレージは、いずれの住宅地においても、40～60%の割合で設置されていた。上屋については積雪荷重に耐える構造性能を有しているものの、基礎構造は束石を用いるなど簡易なものが多く、大雪の際、優先的に雪下ろしが行われている様子が伺える。このことから、カーポートやガレージが設置された住宅では、事故リスク1点を加えることとした。また、屋外に物置を設置している住宅も多く存在し、60～90%の割合で設置されていた。物置の構造においても、ガレージやカーポートと同様であることから、物置が設置された住宅では事故リスク1点を加えることとした。また、これら物置の設置場所をみると、アプローチに近い位置ではなく、その反対側の敷地の隅に設置される場合が多くみられた。物置の冬期の利用が十分に考えられ、アプローチから物置までの通路を確保するための除雪が想定される。その通路には勾配屋根からの落水雪や無落雪屋根からの雪庇の落下の危険性が想定されることから、事故リスクとして1点加えることとした。

## 3. 事故リスクの評価結果

各住宅地における事故リスクの平均値を図1に示す。1970年代の事故リスクの平均値は3.41、1990年代では3.36、2010年代では3.00であり、年代が進むにつれて事故リスクが低くなる傾向を示す。1970年代の事故リスクが高くなる要因としては、4/10未満の緩い勾配屋根の住宅が多いこと、下屋ありの住宅が多いことである。2010年代では、総2階建ての住宅が多いことが事故リスク低下に繋がっている。

表1 人身事故リスクの評価方法

人身事故の拡大要因	説明	事故リスク
屋根形状① 無落雪屋根 勾配屋根	<ul style="list-style-type: none"> <li>勾配屋根では落水雪のリスクがあることから、事故リスク1点を加える。</li> </ul> 	1
屋根形状② 下屋の有無	<ul style="list-style-type: none"> <li>2階建て木造住宅の下屋（1階屋根）は吹きだまり等で積雪深が多くなりがちであり、雪下ろしの動機になりやすいことから、事故リスク1点を加える。</li> </ul> 	1
屋根形状③ 屋根勾配	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩勾配ほど屋根に上がりやすくなることから、勾配4/10未満で事故リスク1点を加える。</li> </ul> 	1
カーポートやガレージの設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>カーポートやガレージについては、その上屋は積雪荷重に耐える構造を有しているものの、基礎構造が簡易であることが多い。</li> <li>大雪の際、優先的に雪下ろしが行われる傾向があることから、カーポートやガレージが設置されている場合は事故リスク1点を加える。</li> </ul>	1
物置の設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>カーポートやガレージと同様の理由で物置が設置されている場合は事故リスク1点を加える。</li> </ul>	1
通路確保のための除雪	<ul style="list-style-type: none"> <li>物置の設置場所は、アプローチ部ではなく、裏側の敷地の隅角部に設置される傾向がある。防犯上の理由が考えられる。</li> <li>物置の冬期の利用が十分に考えられ、敷地内において物置までの通路を確保するための除雪が想定される。</li> <li>通路に勾配屋根からの落水雪や雪庇の落下が想定されることから、事故リスク1点を加える。</li> </ul>	1

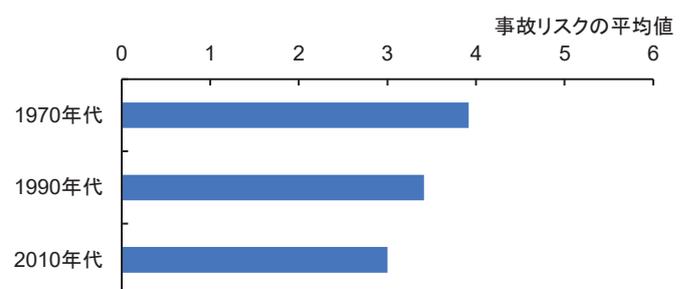


図1 各住宅地における事故リスクの平均値

1 北海道科学大学工学部建築学科

2 北海道科学大学大学院工学研究科建築学専攻

Department of Architecture, Hokkaido University of Science

Graduate School of Engineering, Hokkaido University of Science

## 屋根雪処理における安全対策の論点整理

## Issues regarding safety measures on roof snow shoveling

○上村靖司<sup>1</sup>  
Seiji Kamimura

## 1. はじめに

今冬の大雪でも全国で110名が犠牲となった。そしてその86%は屋根の雪下ろし等の除雪作業中の事故であった<sup>1)</sup>。最近の研究で除雪中事故の作業時間当たりリスクは一般労働災害の20~32倍と報告されており<sup>2)</sup>、雪国の住民は到底看過できないリスクに晒され続けている。行政機関も、除雪中の転落事故防止のために「命綱をつけよう」という啓発活動は行っているが、これによって事故が減少したという証左はまだない。本稿では、こういった除雪作業中の事故を着実に減らしていくために取り組むべき事項について、論点整理を試みる。

## 2. 屋根雪処理中の事故

屋根雪処理に関連した転落事故を防ぐ最も有効な方法は、高いところには上がらないことである。しかし、積雪が建物の許容荷重を超えそうになれば除雪せざるを得ないし、許容荷重以下でも不安から除雪に駆り立てられるという住民心理もある。いわゆる克雪住宅(融雪、落雪、耐雪式)ならば、屋根に上がらずに屋根雪が処理できるはずだが、「融雪の燃料代がもったいない」「落雪屋根面が劣化して滑りが悪くて落ちない」「雪庇や氷柱が垂れ下がっていて気になる」などの理由で屋根に上がるケースもある。また、屋根からの転落と統計データに記載されていても、実際にはハシゴ・脚立に関わる事故(ハシゴごと転倒、脚立から落下など)が転落事故のおよそ半分を占めるという分析結果もある<sup>3)</sup>(ハシゴ問題)。

また、一般には屋根雪下ろしという居住する母屋を思い浮かべがちだが、転落事故の内訳を読み解いていくと、付属屋(車庫、カーポート)の事故も多く、この場合には安全確保できない、周囲の路面が露出している、強度が低く早めの雪下ろしが必要、などと母屋以上のリスク要因が存在する(付属屋問題)。

以上のように、単に屋根雪下ろし中の転落事故、といっても、状況は多種多様で複雑であり、さらにそこに論理だけでなく居住者の心理要因も加わってくるため、対策はそれほど単純ではない。

## 3. 高所作業としての屋根上の安全対策

そもそも2mを超える高さでの作業は「高所作業」と呼び、労働安全衛生規則で安全対策が義務付けられている。しかし新潟県が県民に対して2013(H25)年に実施したアンケート調査では、「命綱を使ったことがある」との回答はわずか4.7%であるなど安全対策はほぼ取られていないのが実状である。加えて、ここで「命綱」と呼称しているものは、①安全帯、②ロープ、③支持具(アンカー)の3点揃って初めて機能するものであるが、その意味を正しく理解している住民はほとんどいない。また特に寒冷地で、雪止め金具の無い(絶対に上がってはいけない)屋根で雪下ろししている最中に突然雪が滑り、巻き込まれるという事故も起きている。(雪防災教育の問題)。

一般に高所作業は、作業床(いわゆる足場)を設置して実施する

のが基本であるが、これが難しい場合には「ロープ高所作業」が認められている。それは屋根に親綱・主綱を予め張ってそこに作業者がぶら下がる方法である。積雪によって足場を組むことができない雪おろし作業の場合もこれが適用されると考えられる。

しかし、除雪の際にロープ高所作業の実施を住民に促すとした場合、住民自身が自ら「屋根に予め親綱・主綱を張る」という作業をすることが前提となるので、これは如何にもハードルが高い。これを避けるためには、屋根上に設備として支持具(アンカー)となる金具等が設置されている必要があるが、これも備えている住宅はほとんど存在しないのが現状である(アンカー問題)。

また、高所作業の安全対策を義務としている対象が雇用された作業員であって、一般住民は対象外(すなわち義務ではない)であることも、安全対策の普及推進の阻害要因となっている。ただし、雪下ろしを業者に委託する場合には、委託された業者にとっては安全対策は義務となるはずだが、これまで安全対策を取らずに請け負ってきたという慣例から、事業者でも安全対策を十分にとっている業者は限られている(規則適用問題)。

最近では、労働基準監督署の安全対策への指導が厳しくなっていて、請負の雪下ろしから撤退する事業者も増えており、除雪できない要援護世帯が増える一方であるのに、請け負う業者は減る一方という、深刻な状況が現実になりつつある(請負撤退問題)。

## 4. ハシゴ・脚立の安全対策

前述の通り、転落事故の半分はハシゴ・脚立に関連している。筆者らも関与して転倒しにくく屋根に乗り移りやすい新しいハシゴの技術開発などの取組は着実に進んだ。一方、本来やってはいけないはずのハシゴ・脚立上での除雪作業(例えば、軒先の雪庇を落とす、氷柱を落とす、など)の途中で、思いがけず雪が崩落したり、屋根の雪が滑り落ちたりして巻き込まれる事故も特に寒冷地で多い。これはハシゴや脚立の本来の使用用途を逸脱しての作業中の事故であるから技術開発によって解決できるものではなく、どうやってユーザーに適切な道具の使用を促すか、という問題である(道具の適正使用問題)。

以上の通り課題山積ではあるがこれらを一つ一つクリアし、なんとしても除雪作業中の事故を着実に減らしていかなければならない。

## 参考文献

- 1) 消防庁、今冬の雪による被害状況等(～令和3年4月30日)  
<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/setugai202104.pdf>
- 2) 上村靖司、高田和貴、関健太、県別・市町村別の人身雪害リスクの比較、自然災害科学、34(3)、213-223。(2015)
- 3) 上村靖司、増田宗一郎、杉木道明、除雪作業中のハシゴ事故の発生状況分析と安全ハシゴの開発、日本雪工学会論文集、35(3)、pp1-10。(2019)

1 長岡技術科学大学大学院 機械創造工学専攻

Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology

## 雲箱を用いた鉱物粒子の氷晶核化能力の測定

—その雲粒サイズ・鉱物サイズ・温度依存性—

## Measurements of ice nucleation probability of mineral particle using cloud chamber

- Its dependency of cloud size, particle size and air temperature -

○島田 互<sup>1</sup>, 強力麻唯<sup>1</sup>, 関原清流<sup>1</sup>, 大岩敬典<sup>1</sup>, 大木雅生<sup>1</sup>

Wataru Shimada, Mai Gohriki, Seiryu Sekihara, Keisuke Ooiwa and Masaki Ooki

## 1. はじめに

地球大気において、南極大陸など特殊な場所以外では、通常は凝結核が多数存在する。一方、氷晶核の数は非常に少ないにもかかわらず、降雪時には数多くの雪粒子が形成される。雲の中で氷晶核がどのような働きをしているのか、多くの雪結晶がどのように形成されるのかについては、未解明の部分が多く残されている。

これまで鉱物粒子が氷晶核として働く有効温度（氷点下何度になったら氷晶核として働くか）の測定は行われてきた<sup>1)</sup>が、1個の氷晶核から何個の氷晶が形成されるか、またどのような形態の氷晶が形成されるかについては測定例がほとんどない。

そこで本研究では、低温雲箱内に過冷却雲を発生させ、サイズ範囲を揃えた鉱物粒子 200 個を撒布し、落下した氷晶をサンプリングして顕微鏡で観察することにより、生成した氷晶数とその形状を調べた。

## 2. 実験方法

## 2.1 低温雲箱

高さ 224 cm, 直径 27.5 cm の円筒状の雲箱の周囲を $-15^{\circ}\text{C}$ または $-20^{\circ}\text{C}$ に温度調節した空気を循環させることで一定温度に保った。雲箱内の気温が一定になった後、上部より霧吹き（雲粒サイズ（大）: 30–40  $\mu\text{m}$ ）、あるいは超音波加湿器（雲粒サイズ（小）: 10–15  $\mu\text{m}$ ）により水滴を入れた。雲箱内の気温と湿度は、二つの熱電対（一方は湿球とした）で測定・計算した。

## 2.2 鉱物試料

氷晶核試料として、石英、カオリナイト、モンモリロナイト、火山ガラスを乳鉢で細かくしたものを用いた。各試料は篩にか

けてサイズを揃えた。氷晶核粒子サイズは、大（65–125  $\mu\text{m}$ ）、中（11–33  $\mu\text{m}$ ）、小（10  $\mu\text{m}$  以下）を用いた。各試料は薬包紙の上で実体顕微鏡を用いて 200 個を用意した。

## 2.3 氷晶核化能力

ここでは、1 個の鉱物試料から何個の氷晶が形成されたかを氷晶核化能力と呼ぶ。なお、雲箱上部からは 200 個の試料を撒布するが、雲箱下部ではシリコンオイルを塗布したスライドガラス上の 2 カ所で、カバーガラスで覆いサンプリングを行った。生物顕微鏡を用いて氷晶の数と形態を観察した。氷晶数については、カバーガラス 2 枚分と雲箱底面積との比を用いて計算して求めた。

## 3. 実験結果

3.1 気温が $-20^{\circ}\text{C}$ の場合

雲粒サイズ、氷晶核粒子サイズとも大きいときに氷晶核能力は大きくなった。雲粒サイズ大、氷晶核粒子サイズ大の場合、23–32 となった。すなわち 1 個の氷晶核から 23–32 個の氷晶が生成されたことを示す。氷晶核粒子サイズが中になると氷晶核能力は 6–24 程度となり、氷晶核粒子サイズが小になると 1.7–9.3 となった。

鉱物試料別では、モンモリロナイトが、特に雲粒サイズが小さいときにも氷晶核能力が大きい傾向が見られた。

3.2 気温が $-15^{\circ}\text{C}$ の場合

雲粒サイズ、氷晶核粒子サイズとも大きいときに氷晶核能力は大きいことには変わりはなかったが、雲粒サイズが大きい場合の氷晶核能力は 25–30 程度であったのに対し、雲粒サイズが小では氷晶核能力は 3–18 程度と小さくなった。

鉱物試料別では、火山ガラスを用いた場合、氷晶核粒子サイズが小さくても氷晶核能力の上がり方が小さい傾向が見られた。

## 4. まとめ

わずか 200 cm 程度の落下中に多くの氷晶を形成することが分かった。自然界に存在する氷晶核サイズに比べると本実験の試料サイズは大きく、また氷晶核能力の試料サイズ依存性から、本実験では接触凍結核として働いたと考えられる。

=文献=

1) 田中豊頭, 1974: 雲の氷晶化過程と氷晶核. 気象研究ノート, 122, 85-133.

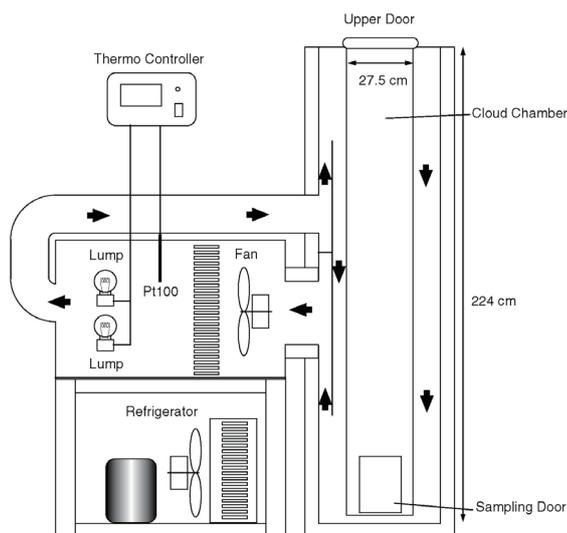
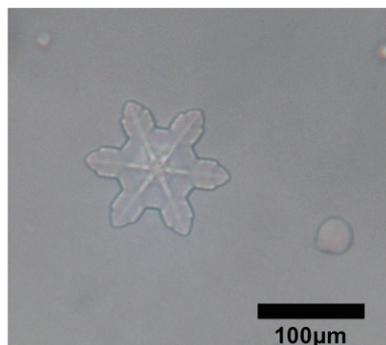


図1 実験装置の概略図

左側の冷却器で冷やした空気を、右側の雲箱周辺に送り一定温度を保つ。

図2 形成された広幅六花結晶  
-15°C、雲粒大、氷晶核試料大

## JPCZ に関連した北陸平野部の集中降雪時の降雪粒子の特徴

- 2018年と2021年の大雪から -

## Characteristics of solid Hydrometeors during Intensive Snowfalls related to JPCZ in Hokuriku Area

- Case studies on intensive snowfalls observed at Nagaoka in 2018 and at Takada in 2021 -

○石坂雅昭<sup>1</sup>・本吉弘岐<sup>1</sup>・山下克也<sup>1</sup>・中井専人<sup>1</sup>・山口悟<sup>1</sup>・橋本明弘<sup>2</sup>

Masaaki Ishizaka, Hiroki Motoyoshi, Katsuya Yamashita, Sento Nakai, Satoru Yamaguchi, and Akiriro Hashimoto

## 1. はじめに

2018, 2021年冬季, 北陸では大規模車両滞留(車両立往生)が話題になった. その自然要因は, JPCZ に関連する時間当たり数 cm を超える極度に強い降雪であるが, それをもたらした降雪粒子にも特徴があった. すなわち, 降雪を, 霰を主にする霰タイプとそれ以外の雪片タイプに分けると, 集中降雪時には雪片タイプが圧倒的に多くなることがわかった. 2018年については既に報告(石坂ほか, 2019)があるので, ここでは今冬 2021年高田の観測について報告し, 両者の共通点についてふれる.

## 2. 観測・手法と観測結果

今冬 2021年の事例では, 降積雪等については気象庁高田特別地域気象観測所の気象データを, 降雪粒子については近傍の農研機構中央農業研究センター北陸研究拠点に設置した粒子観測器(LPM)のデータを使用した. その結果, 時間数センチを超える降雪の連続で急激な積雪深増加を示す期間の降雪がほとんど雪片タイプという 2018年と同様の特徴を示した(図1のA, B). なお, 霰と雪片のタイプ分けは, LPM で得られた粒径・落下速度から CMF (降水量寄与で重み付け平均した粒径・落下速度; Ishizaka et al., 2013) を求め, 霰状雪の同関係を境界として区分した(図2).

## 3. 考察

今冬と 2018年 2月 5日前後の長岡の二事例には環境場に多くの共通点があった. すなわち, 日本海北部に上空寒気を伴う低気圧, 輪島上空 500hPa で $-30^{\circ}\text{C}$ 以下の低温, 下層(850hPa)で海上 JPCZ から沿岸部にかけて水平風シアの存在(図3)などである. 対応して北陸平野部から山間部にかけて背の高い雲(低温)が分布した. 図4は強い降雪期間 A, B (灰色部分)が上空の強い寒気下での湿度の増加期間に対応していることを示しているが, 関連して同様の傾向を持つ 2018年の事例では, 雪片を構成する粒子が主にマイナス $20^{\circ}\text{C}$ 以下で生成される低温型雪結晶(cold habits)であった. 写真観測はないが, 今冬高田での雪片タイプの降雪粒子の CMF もそれと矛盾しない(図2). 低温下での氷化促進が霰から雪片タイプへの変化をもたらしたと考えられる(橋本ほか, 2019).

## 4. まとめ

JPCZ に関連する北陸平野部の大雪を調べると, 集中降雪時の主要な降雪が雪片タイプであるという共通した特徴が見出される. 霰に比べ初期密度が小さい雪片は積雪深増に有利に働くと考えられ, そのことは A, B 期間の雪水比が霰の多い T mode 期間に比べ大きいことからわかる(図1). また, 低温型雪結晶からなる降雪には無垢の各板・角柱などの小粒子が多く含まれ, 接地後も低温下では結合が弱くサラサラしている(石坂ほか, 2018). この点, 車のスタックを招きやすいとも考えられ, 深刻な車両滞留にこの種の降雪粒子が関係している可能性がある(本吉, 2016). 降雪タイプを決める詳細なメカニズムの解明とともに今後の課題である.

## 参考文献

- 1) 橋本ほか, 2019, 雪氷研究大会 (2018・山形), p183.
- 2) 石坂ほか, 2019, 雪氷研究大会 (2018・山形), p39.
- 3) Ishizaka et al., 2013, J. Meteor., Soc. Japan, **91**, 747-762.
- 4) 石坂ほか, 2018, 雪工学誌. **34**, 186-191.
- 5) 本吉, 2016, 「今年の雪速報会 2015-16」資料集.

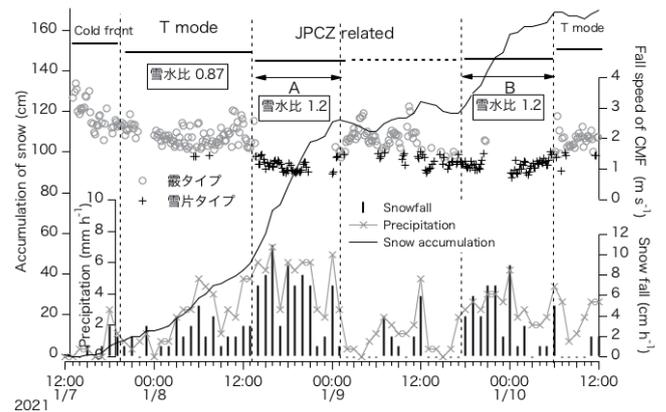


図1 高田の降積雪と降雪タイプの推移.

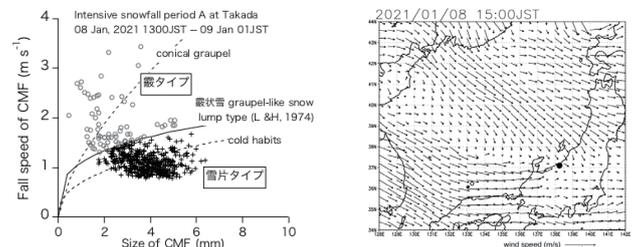


図2 期間 A の粒子の 1 分

図3 下層(850hPa)の風毎の CMF.

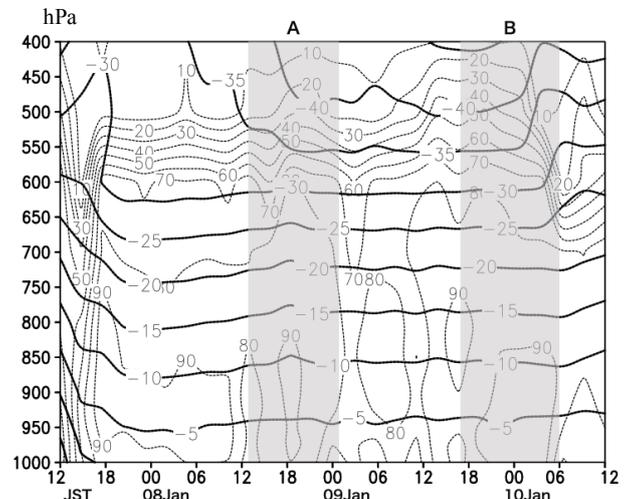


図4 高田上空の気温と相対湿度の推移.

## 気象モデル SCALE を用いた北海道を対象とした降雪研究 Researches for snowfall event in Hokkaido using a meteorological model, SCALE

○佐藤陽祐<sup>1,2</sup>, 稲津将<sup>1,3</sup>, 勝山祐太<sup>4</sup>, 丹治星河<sup>5</sup>, 近藤誠<sup>5</sup>  
Yousuke Sato, Masaru Inatsu, Yuta Katsuyama, Seika Tanji, Makoto Kondo

### 1. はじめに

降雪粒子の粒径・形状・密度といった特性は降水・降雪をもたらす雲の微物理特性と密接に関わり、降水量・降雪量に大きな影響を与える。また雲の微物理特性は雲の放射特性とも密接に関係するため、放射過程を通して地球のエネルギー収支にも大きく影響を与える。さらに、降雪粒子の微物理特性は積雪層の特性にも影響を及ぼし雪崩や雪質にも深く関連する。そのため、日々の防災気象情報をはじめとした気象予測のために用いられる数値モデルで降雪粒子の微物理特性を詳細かつ精度よく再現することは重要である。

しかしながら気象予測や気候予測に用いられる数値モデルにおいて、降雪粒子は、簡略化したいくつかのカテゴリに分けて取り扱われ、その粒径分布・形状・密度といった微物理特性は経験的に決められていることがほとんどである。このように簡略的な扱いをする理由は、降雪粒子の複雑な微物理特性をモデルで表現することが難しいこと<sup>1</sup>、降雪粒子の微物理特性に着目した観測が必ずしも十分でないことである。加えて、数値モデルで降水・降雪粒子を表現する雲微物理モデルの多くは、豪雨をもたらす激しい降水に焦点を当てた開発・検証・改良されてきた歴史があり、降雪に対して必ずしも再現性が良くない<sup>2</sup>。

以上のような背景から、北海道大学気象学研究室では、数値モデルによる降雪粒子の精緻な再現と精緻な降雪予測を目指して、寒冷地である北海道を対象として数値モデルの開発・検証・改良を行なっている。また降雪粒子の観測データの取得にも取り組んでいる (例えば Katsuyama and Inatsu 2021<sup>3</sup> など)。本発表では主に北海道大学気象学研究室で行われている数値モデルの開発について紹介を行うとともに、今後の方針を述べる。

### 2. 数値モデル

北海道大学気象学研究室で主に用いている数値モデルは、理化学研究所計算化学研究センターで開発されている (Scalable Computing for Advanced Library and Environment: SCALE<sup>4,5</sup>) である。この SCALE は BSD2 条項に基づき誰でも無料で、自由に使える数値モデルであり、これまでに寒冷地気象学という観点では、吹雪を対象としたダウンスケーリング<sup>6,7,8</sup> や、ディストロメータを用いた地上観測<sup>3</sup> との比較を通じた雲微物理モデルの検証が行われてきた<sup>2</sup>。

この SCALE には降雪粒子を表現する雲微物理モデルとして、広く用いられている一般的なバルク法雲モデル<sup>9,10</sup> に加えて、降雪粒子の成長プロセスを追跡して粒子形状を診断するバルク法雲モデル (Process Tracking Model: PTM)<sup>11</sup>、粒径を直接考慮するビン法雲モデル<sup>12</sup>、降雪粒子の形状を陽に取り扱う粒子法雲モデル<sup>13</sup> といった様々なオプションが存在し、降雪粒子の微物理特性を対象とした数値実験を行うのに適した数値モデルである。

しかしながら、数値モデルで計算された粒子形状や密度を検証するための観測データは必ずしも十分とは言えない。

### 3. 雪結晶観測とモデルの検証

2章で示したような背景から数値モデルの検証・改良のために、札幌市内3か所と北海道の7空港 (旭川, 函館, 釧路, 紋別, 女満別, 帯広) で降雪粒子の写真をスマートフォンで撮影する観測を2020年/2021年の冬季に行った。図にその一例を示す。これらの写真によるデータと先行して気象学研究室で行なっているディストロメータ (Katsuyama and Inatsu, 2021<sup>3</sup>) による観測結果を SCALE に実装されている PTM (SCALE-PTM) の結果と比較することで、SCALE-PTM の検証を行なっている (鎌田らによる同一セッションの発表)。今後これらの検証を通して SCALE-PTM の妥当性を確認するとともに、再現性に問題がある場合は、必要な改良を施す。

これらの数値モデルによる計算は、雪質や雪崩の危険性の評価に役立てることができると考えられることから、寒冷地における防災情報の創出を目的として、今後も数値モデルの開発を続けていく予定である。

### 4. 参考文献

- 1) Morrison et al. (2020), *J. Adv. Model. Earth Sys.*, doi: 10.1029/2019MS001689, 2) Kondo et al. (2021), *SOLA*, **17**, 74-80, 3) Katsuyama and Inatsu (2021), *SOLA*, **17**, 35-40, 4) Nishizawa et al. (2015) *Geosci. Model Dev.* **8**(10), 3393-3419, 5) Sato et al. (2015) *Prog. Earth Planet. Sci.* doi: 10.1186/s40645-015-0053-6, 6) Tanji and Inatsu (2019) *SOLA*, **15**, 32-36, 7) Inatsu et al. (2020) *Cold Reg. Sci. Tech.* doi: 10.1016/j.coldregions.2020.103123, 8) 丹治他 (2021) 雪氷. 9) Tomita (2008), *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **86A**, 121-142. 10) Seiki and Nakajima (2014), *J. Atmos. Sci.*, **119**, 6681-6701 11) Hashimoto et al. (2020), *SOLA*, **16**, 51-56 12) Suzuki et al. (2010), *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1126-1141 12) Shima et al. (2020), *Geosci. Model Dev.*, **13**(9), 4107-4157

謝辞：本研究は科研費(基盤 A : 21H04571)、寄附分野北海道気象予測技術分野(北海道気象予測技術センター)の支援を受けて行われています。

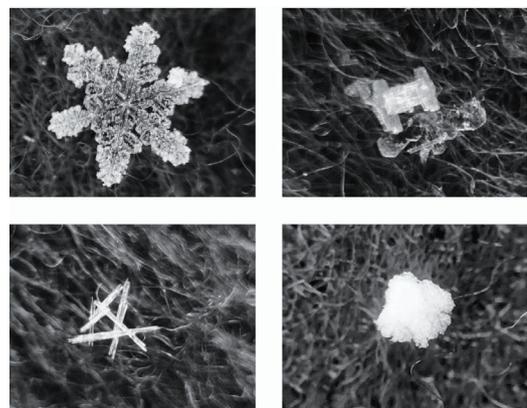


図 2020年/2021年冬季に撮影された雪結晶写真の一例。(左上) 樹枝状結晶、(右上) 鼓状結晶、(左下) 針状結晶、(右下) 霰

1 北海道大学大学院理学研究院

2 理化学研究所計算科学研究センター

3 北海道大学広域複合災害研究センター

4 森林総合研究所十日町試験地

5 北海道大学大学院理学院

Faculty of Science, Hokkaido University

RIKEN Center for Computational Science

Center for Natural Hazards Research, Hokkaido University

Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products and Research Institute

Graduate School of Science, Hokkaido University

降雪粒子の粒子形状を扱う気象モデルの検証～北海道を対象とした数値実験  
Validation of process tracking model targeting on snowfall event in Hokkaido○鎌田萌花<sup>1</sup>, 佐藤陽祐<sup>2</sup>

Moeka Kamada, Yousuke Sato

## 1. はじめに

雪の結晶には様々な形が存在しており、その形状は昇華成長や雲粒捕捉成長により主に決定され、降雪粒子の結晶の形の違いは雪質や雪崩の発生確率などに影響を与えることが報告されている<sup>1</sup>。数値実験に用いられる気象モデルにおいて雲は雲物理モデルにより表現されているが、広く用いられている雲物理モデルでは降雪粒子の結晶の形について区別していない。そこで、数値実験により降雪粒子の結晶の形を再現するために、Hashimoto et al.(2020)<sup>1</sup>では Process Tracking Model(PTM)の開発を行った。PTMは既存の雲微物理モデルを拡張して降雪粒子の形状に関するカテゴリを予報変数として増やし、降雪粒子の形状が生成から降水・降雪により地上に至るまでどう変化するかを追跡することができるモデルであり、降雪粒子を結晶の形ごとに区別して計算することが可能なモデルである。このPTMでの実験は Hashimoto et al. (2020)で北陸を対象とした理想実験が行われたのみで、検証が十分に行われていない。そこで本研究では、北海道を対象としてPTMの検証を行うことを目的とする。具体的にはPTMを用いた数値実験の結果を観測データと比較しモデルの妥当性を検証した。

## 2. 方法

本研究では、2020年1月29日と2020年2月3日を対象とした検証を行った。これらはそれぞれ柱状・板状の結晶が占める割合の高い事例と針状結晶の占める割合の高い事例であり、また、どちらの事例も北海道の南の低気圧により発達した雲が降雪をもたらした事例である。数値実験はSCALE<sup>2,3</sup>にPTMが実装されたモデルを用いて行い、初期値・境界値には気象庁のMANL<sup>4</sup>の(水平解像度5km)データを用いた。数値実験の対象とした期間は2020年2月2日21:00 UTC~翌9:00 UTCと2020年1月28日15:00 UTC~翌3:00 UTCの各12時間である。モデルの検証に用いる観測データとして、静止気象衛星ひまわり8号によって観測された輝度温度<sup>5</sup>、AMeDAS(提供:気象庁)によって観測された降水量、雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チーム<sup>6</sup>により公開されている秋田谷英次博士が札幌市北区で行った積雪観測の画像を用いた。結晶形の比較は積雪観測画像から結晶形を読み取り、数値モデルの出力と比較を行った。その際、数値実験における結晶形の出力の関係から、針・角柱状結晶、角板・扇状結晶、樹枝状結晶、雲粒付き結晶、霰に区分して比較を行った。

## 3. 結果と考察

2020年2月3日の事例の計算結果は、輝度温度は北海道の西側の再現性が低いものの、雲がやって来る北海道の南側ではよく再現できており、また、降水量もよく再現できていた。結晶形は観測データで見られた針・角柱結晶が占める割合が最も高く、次点で角板・扇状結晶の占める割合が高いという傾向をよく再

現できていた。

2020年1月29日の事例の計算結果は、輝度温度は傾向が一致しているものの、雲がやって来る北海道の南側を含む計算領域の全体で過小評価傾向であった。降水量についてはよく再現できていた。結晶形は観測データで多く見られた高温型結晶である針状結晶が少なく計算されており、針状結晶よりも低温で形成される角板・扇状結晶が多く計算されていた。

これらの結果から、モデルは輝度温度、すなわち雲の分布や雲頂の再現性が高い場合、観測された結晶の形をよく再現できるが、輝度温度、すなわち雲の分布や雲頂の再現性が低い場合は、結晶の形の再現性も低くなる可能性が示唆された。

## 参考文献

- 1) 秋田谷英次, 中村一樹. (2013) 北海道の雪氷. 32: 10-13. 2) Hashimoto et al. (2020) *Scientific Online Letters on the Atmosphere* 16: 51-56. 3) Nishizawa et al. (2015) *Geoscientific Model Development* 8(10): 3393-3419. 4) Sato et al. (2015) *Progress in Earth and Planetary Science* 2(1). 5) Japan Meteorological Agency (2019) <https://www.jma.go.jp/jma/eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm> (2021年6月29日閲覧) 6) Yamamoto et al.(2020) *Remote Sensing* 12(9). 7) <https://avalanche.seppyo.org/snow/> (2021年6月29日閲覧)

謝辞: 本研究は科研費(基盤A: 21H04571)、寄附分野北海道気象予測技術分野(北海道気象予測技術センター)の支援を受けて行われています。また、ひまわり8/9号フルディスク gridded data(千葉大学の環境リモートセンシング研究センター提供)、AMeDAS観測データ(気象提供)、積雪観測画像(雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チームより公開)を利用させていただきました。

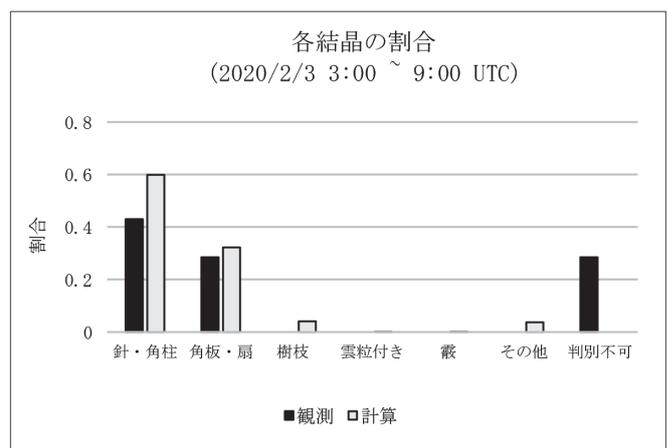


図1 2020年2月3日3:00~9:00UTCの観測データから求めた各結晶の割合と数値実験により得られた各結晶の割合の比較

1 北海道大学大学院理学院

2 北海道大学大学院理学研究院

Graduate School of Science, Hokkaido University

Faculty of Science, Hokkaido University

## 光吸収性不純物粒子を介した大気-積雪相互作用に関する研究の新展開 New insights into snow-atmosphere interaction through light-absorbing particles

○庭野 匡思<sup>1,2</sup>, 梶野 瑞王<sup>1,3</sup>, 梶川 友貴<sup>4</sup>, 青木 輝夫<sup>2</sup>, 兒玉 裕二<sup>5</sup>, 谷川 朋範<sup>1</sup>, 的場 澄人<sup>6</sup>

Masashi Niwano, Mizuo Kajino, Tomoki Kajikawa, Teruo Aoki, Yuji Kodama, Tomonori Tanikawa, and Sumito Matoba

### 1. はじめに

近年の急激な全球規模の温暖化によって、積雪面積の減少が進行している。このことは、積雪-アルベドフィードバックを引き起こし、温暖化を一層加速する役割を担っていると考えられている。積雪物理状態の変化を駆動する主要な要因は気象状態の変化である。その結果として生じる積雪アルベドの変化は、転じて大気場の変調の一因となる。従来、大気-積雪相互作用は、積雪表面における熱収支と質量収支の観点で理解されてきた。近年では、それらに加えて、雪粒子や、ブラックカーボン (BC) やダストといった光吸収性不純物粒子 (Light Absorbing Particles: LAP) を媒介した大気-積雪結合に大きな注目が集まってきている。その理由として、

- (1) 沈着後の雪粒子のサイズ (積雪粒径) と積雪層内の LAP 濃度は積雪アルベドに大きな影響を与えること (Wiscombe and Warren, 1980; Warren and Wiscombe, 1980) と、
  - (2) 大気-積雪系を取り扱う数値モデルにおいて雪粒子のサイズや LAP の取り扱いが精緻化し、それらを陽に考慮した積雪アルベド計算過程が実装されてきていること (例えば, Aoki et al., 2011)
- を挙げることが出来る。

近年、我々は、人間活動にも関係する LAP に特に注目し、大気-積雪系におけるその定量的影響評価手法の高度化に取り組んできた。本発表では、その最新の試みについて報告する。

### 2. 数値モデリング

我々は、気象庁領域気象化学モデル NHM-Chem (Kajino et al., 2019) と積雪変質モデル SMAP (Niwano et al., 2012) を統合活用して、この問題に取り組む。本モデルシステム (以下, NHM-Chem-SMAP と記す) の多角的な精度評価は、本研究に関連する気象・雪氷観測データが豊富に蓄積されている札幌の北海道大学低温科学研究所観測露場において実施した。解析期間は 2011-2012 冬期 (11~4 月) である。

### 3. 結果と考察

NHM-Chem-SMAP によってシミュレートされた 2011-2012 冬期の札幌における積雪内部 BC・ダスト重量濃度時間変化 (図 1a, 及び図 1b) の内、表層 2 cm に着目して現場観測データ (Kuchiki et al., 2015) と比較したところ (図 1c, 及び図 1d), モデルが計算した季節変化は観測結果に良く対応していた。発表では、詳細な評価結果を説明し、NHM-Chem-SMAP モデルシステムによって可能となった研究について考察する。更に、雪粒子を介した大気-積雪結合研究についても我々の研究計画を提示して、学会における広範な議論の一助としたい。

謝辞: 北海道大学低温科学研究所・共同利用研究 (21G029), 環

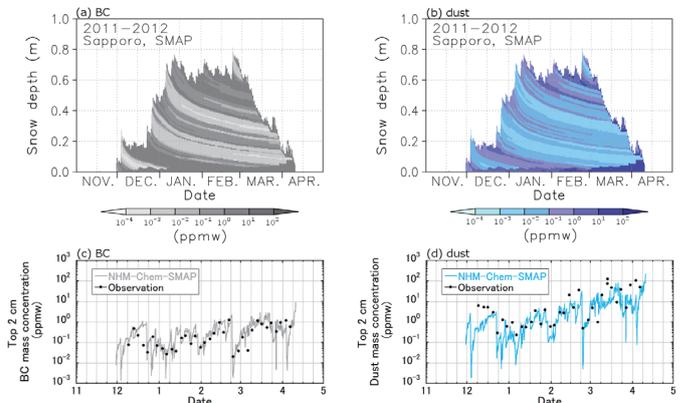


図 1 NHM-Chem-SMAP によってシミュレートされた 2011-2012 冬期の札幌における積雪内部(a) BC 重量濃度と(b)ダスト重量濃度プロファイルの時間変化。及び、表層 2 cm 層中における(c) BC と(d)ダストの各重量濃度の観測 (Kuchiki et al., 2015) とモデルの比較。

境省地球環境保全試験研究費 MLIT1753, 及び北極域研究加速プロジェクト (ArCS II) JPMXD1420318865 の助成を受けました。

### 参考文献

- 1) Wiscombe, W. J., and Warren, S. G., 1980: A model for the spectral albedo of snow. I: Pure snow. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2712–2733.
- 2) Warren, S. G., and Wiscombe, W. J., 1980: A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2734–2745.
- 3) Aoki, T. et al., 2011: Physically based snow albedo model for calculating broadband albedos and the solar heating profile in snowpack for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, 116, D11114.
- 4) Kajino, M. et al., 2019: NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's Regional Meteorology – Chemistry model: Model evaluations toward the consistent predictions of the chemical, physical, and optical properties of aerosols. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 97, 337–374.
- 5) Niwano, M. et al., 2012: Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan. *J. Geophys. Res.*, 117, F03008.
- 6) Kuchiki, K. et al., 2015: Elemental carbon, organic carbon, and dust concentrations in snow measured with thermal optical method and gravimetric methods: Variations during 2007–2013 winters in Sapporo. *J. Geophys. Res.*, 120, 868–882.

1 気象研究所  
2 国立極地研究所  
3 筑波大学生命環境系  
4 筑波大学生命環境科学研究科  
5 北海道大学北極域研究センター  
6 北海道大学低温科学研究所

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency  
National Institute of Polar Research  
Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba  
Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba  
Arctic Research Center, Hokkaido University  
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

## 拡張された波長領域 0.2 - 4.0 $\mu\text{m}$ における積雪の放射特性 Radiative properties of snow in the extended spectral region 0.2 - 4.0 $\mu\text{m}$

○青木輝夫<sup>1</sup>, 内山明博<sup>2</sup>  
Teruo Aoki<sup>1</sup> and Akihiro Uchiyama<sup>2</sup>

### 1. はじめに

積雪の波長別アルベドの数値モデルは、積雪の光学特性の理解だけでなく、広波長帯域アルベドの計算や衛星観測、気候・領域モデルによる雪氷圏の気象予報・将来予測のための基礎となる研究開発項目である。波長別アルベドの基本的な特徴は、1980年代に  $\delta$ -Eddington 近似モデルによって大きく理解が進んだ<sup>1,2)</sup>。その後、doubling and adding modelによってモデルそのもの高精度化と同時に大気がアルベドに与える効果が明らかにされた<sup>3)</sup>。放射収支の観点からは、大気外日射量の98%を含む波長域 $\lambda = 0.3 - 3.0 \mu\text{m}$ を計算対象<sup>3)</sup>とすれば十分であった。しかし、放射収支のロスを完全になくし、衛星観測で重要な $\lambda = 3.7 \mu\text{m}$ 付近における積雪の光学特性の理解を深めるためには、最終的に波長域を $\lambda = 4.0 \mu\text{m}$ まで拡張することが必要である。そこで、大気と積雪の放射特性両者に対し、波長域を $\lambda = 0.2 - 4.0 \mu\text{m}$ の範囲にまで拡張し、主に拡張波長範囲における積雪面と大気上端の放射特性を調べた。

### 2. 放射伝達モデル

本研究における波長別アルベド及び放射フラックス密度の放射伝達計算には、大気層内と積雪層内の多重散乱過程及び両者の多重反射過程を考慮した大気-積雪系の多重散乱モデル (ARTMASS)<sup>3)</sup>を用いた。本モデルでは放射輝度の計算も可能である。モデルの基本構造や計算手法の変更はなく、積雪粒子と大気エアロゾルの一次散乱特性、大気中の気体による吸収特性<sup>4)</sup>の波長範囲を拡張した。波長分解能は25 nmで、大気及び積雪の光学特性の波長別計算は単一波長に対する値ではなく、25 nmのバンド幅に対する平均値(積雪)及び有効透過率(気体の吸収)を求めた。以下の計算では、不純物のない1層半無限積雪深、3通りの積雪粒子の有効半径 $r_{\text{eff}} = 50, 200, 1000 \mu\text{m}$ 、太陽天頂角 $\theta_0 = 60^\circ$ と仮定し、大気モデルは中緯度冬季 (MW) モデル、大気エアロゾルは $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ で光学的厚さ $\tau = 0.05$ の Continental average modelを使用した。

### 3. 結果と考察

積雪面における波長別アルベドの計算結果を図1に示す。波長 $\lambda = 0.2 \mu\text{m}$ 付近のアルベド低下は、 $\lambda = 0.200 \mu\text{m}$ を中心とする25 nmのバンド幅に対する氷の複素屈折率の平均値が、直近の波長域( $\lambda = 0.225 - 0.4 \mu\text{m}$ )よりも高いためである。次に、拡張した長波長側の波長範囲に着目すると、 $\lambda = 2.8 \mu\text{m}$ 付近にアルベドの最低値が見られ (A)、 $\lambda = 3.1 \mu\text{m}$ 付近には局所的な極大値が見られる (B)。しかし、氷による光吸収が最も強い複素屈折率の最大値は $\lambda = 3.1 \mu\text{m}$ 付近である。計算されたアルベドは光吸収が最も強い $\lambda = 3.1 \mu\text{m}$ で最低値とならず、むしろその波長では局所的に上昇している。この一見矛盾した結果は、Wiscombe and Warren (1980)<sup>1)</sup>によって、非常に吸収の強い媒質へ光が入射する場合の鏡面反射によってすでに説明されている。しかし、さらに詳細を見ると $\lambda = 2.85 - 3.4 \mu\text{m}$ の範囲では、アルベドの粒径依存性が僅かな違いながら他波長とは逆転している。この点について、Wiscombe and Warren (1980)<sup>1)</sup>は触れていない。この原因とし

て、大粒子ほど鏡面反射する面積が広いことが可能性として考えられるが、非球形粒子の場合や観測値はどうかなどさらに検討の余地がある。

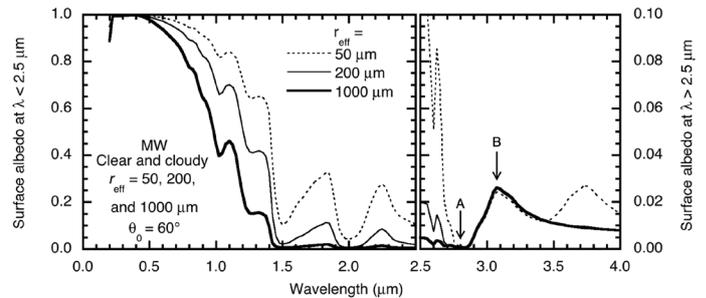


図1 ARTMASSで計算した積雪面アルベドの波長変化。波長域 $\lambda > 2.5 \mu\text{m}$ は縦軸を10倍に拡大。

衛星観測で雪氷面上の雲検知に用いられる $\lambda = 3.7 \mu\text{m}$ 付近の雲と積雪の放射特性の違いを見るために、晴天時と曇天時における大気上端における上向き放射フラックス密度を計算した (図2)。この波長付近では曇天時の放射量が晴天時を大きく上回るものの、衛星が観測する放射量は、それぞれに雲頂または積雪面からの熱赤外放射が加わる。仮に、その射出温度が共に273 Kとすると、図中のプランク関数で計算した放射量がそれに相当する。ここで仮定した雲の場合、曇天時の放射量はプランク関数計算値よりも $1.6 [\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-2}]$ 程度大きいが、雲の光学的厚さが小さくなった場合や、衛星センサーの感度によっては雲検知が困難な可能性がある。検出限界を知るためには、様々な積雪、大気、雲、太陽天頂角に対するシミュレーションが必要である。

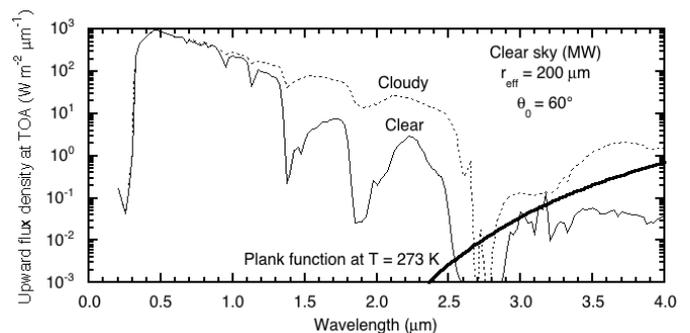


図2 大気上端 (TOA) における晴天時 (細実線) と曇天時 (破線) における上向き放射フラックス密度と温度273 Kのプランク関数で計算した放射フラックス密度 (太実線)。

### 参考文献

- 1) Wiscombe and Warren, 1980: *JAS*, **37**, 2712-2733.
- 2) Warren and Wiscombe, 1980: *JAS*, **37**, 2734-2745.
- 3) Aoki, Uchiyama, et al., 1999: *JMSJ*, **77**, 595-614.
- 4) Uchiyama, 1992: *JQSRT*, **47**, 521-532.

## 実用的な可搬型雪冷房装置の開発と性能試験

## Development and performance test of a practical portable snow cooling system

○青柳大輔<sup>1</sup>, 辻野憲孝<sup>2</sup>, 杉原幸信<sup>3</sup>, 上村靖司<sup>3</sup>

Daisuke Aoyagi, Noritaka Tsujino, Yukinobu Sugihara and Seiji Kamimura

## 1. はじめに

一般に雪冷房は、利用可能な地域が豪雪地帯に限定され、システム全体が大型になるという制約がある<sup>1</sup>。非雪国でのイベント等において活用するためにシステムを簡略化して小型化し、移動を可能とする簡易雪冷房装置も試験的に運用されてきた。しかし、輸送から運用までの工程でハンドリングの手間が多かったり、1時間毎に雪の補充が必要であったりして、運用上の課題があり、未だ広く普及するには至っていない。

本研究において、ハンドリングの工程を減らすと共に連続運転可能時間を長くすることを狙い、雪の運搬時に使用されるフレキシブルコンテナ（以下、FCと呼ぶ）を直接搭載する可搬型雪冷房装置を試作した。ここでは、システムの概要を紹介するとともに性能評価実験の結果を報告する。

## 2. 可搬型雪冷房装置の概要と性能試験

## 2.1 装置の構成と空気の流れ

本研究で製作した可搬型雪冷房装置の概略図を図1に示す。

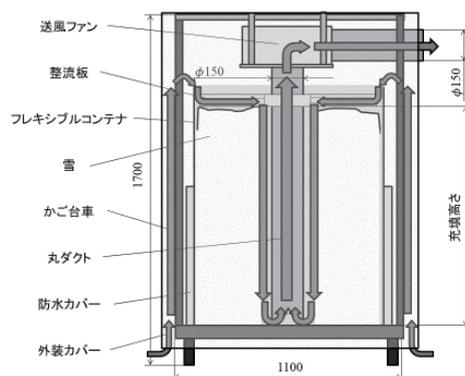


図1 可搬型雪冷房装置と空気の流れ

本装置は市販のかご台車を活用し、整流板、ダクト(φ150mm, t=1.5mm)、送風ファン(VD-20ZLC12-IN 三菱電機製, 寸法: 247×451×362[mm], 風量: 420[m<sup>3</sup>/h], 最大静圧: 約 230[Pa], 定格消費電力: 49[W])を組み込んで構成した。使用電源はポータブルバッテリーのAC100V(60Hz)を用いた。空気は送風ファンによって外装カバーの下部から装置内部に取り込まれ、整流板下とダクト周りで雪と直接接触することで熱交換しながら冷やされ、吹出口から吹き出される。

## 2.2 性能試験

性能試験は屋外に設営したテント内に装置を収容し、約3時間の連続運転を行った。雪は雪山に保存されたものを、スコップで踏み固めながらFCに充填したものを用いた。装置の性能を評価するため、外気温度および吹出口の温度と風速を測定した。温度測定には、T型熱電対を用いてデータロガー(GL220)で記録した。吹出口の風速はベーン式風速計(AM-4207SD)で測定した。

## 2.3 評価方法

装置の性能を評価するため、測定データより冷房能力およびCOPを求める。冷房能力 $P$ は次式で求める。

$$P = \Delta t \rho Q C_p \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

ここで $\Delta t$ は外気温[°C]と吹出口温度[°C]の差、 $\rho$ は空気密度[kg m<sup>-3</sup>]、 $Q$ は風量[m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>] (=  $v_{\text{out}} A_{\text{fan}}$ 、 $v_{\text{out}}$ は吹出口平均風速[m s<sup>-1</sup>]、 $A_{\text{fan}}$ はファン吐出口断面積[m<sup>2</sup>]、 $C_p$ は空気の比熱[kJ/kg・°C]である。また、COPは冷房能力 $P$ をバッテリーに表示された消費電力で除すことで求める。

## 3. 実験結果

試験結果を図2に示す。また、装置の性能を比較するため、改良前の装置(送風ファン: MBS20-BH Oriental motor 製, 風量 414[m<sup>3</sup>/h], 最大静圧: 420[Pa], 定格消費電力: 136[W])の冷房性能測定結果も示す。

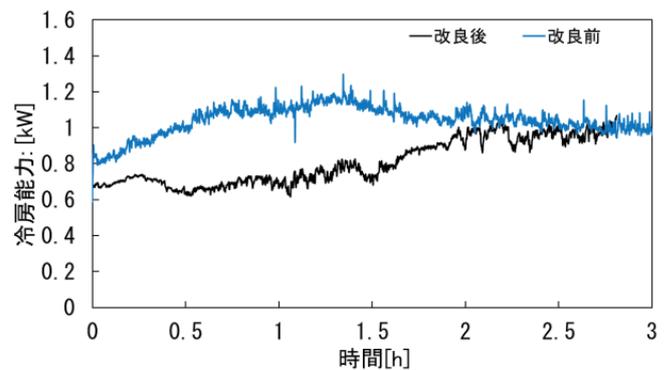


図2 冷房能力

図より本装置の冷房能力は運転開始直後は0.6kWであるが、徐々に増加し1kW付近まで上昇した。この間、外気温と吹出口温度差は13°C付近で安定、吹出口風速は2 m/sから4 m/sに上昇した。運転開始直後は、空気の流路が狭く、改良前のファンより最大静圧が半分ほどであるため流れにくかったが、流路が拡大していくと約2時間後には同等の性能になった。次にCOPについて比較すると本装置の消費電力は70[W]であり、COPは11.4となった。改良前の値が7.35であったことから、効率は大幅に向上した。また、装置の製作コストも一般の浴室換気扇用ファンを用いたため、コストの低減も可能となった。

## 4. まとめ

本可搬型雪冷房装置の冷房能力は約1kW、COPは約11.4が得られ、COPの面で優れていることが示された。また、運転から約2時間で空気の流路が十分に確保されたとき、改良前と比較して消費電力が半分で冷房能力は同等の性能が示された。

## 参考文献

- 1) “雪ルネッサンス新潟”事業コンソーシアム事務局 公益財団法人新潟県環境保全事業団, 雪冷熱利用ガイド niigataパンフレット, 平成26年2月

1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科  
2 長岡技術科学大学 工学部  
3 長岡技術科学大学 機械創造工学専攻

Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology  
Faculty of Engineering, Nagaoka University of Technology  
Department of Mechanical Engineering Nagaoka University of Technology

## 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発

## - その4: 異径製氷型における引上げ試験 -

## Development of Continuous Ice Drawing Method

## - Part 4: Ice drawing experiment using molds with different inner diameters -

○杉原幸信<sup>1</sup>, 水橋奈那<sup>2</sup>, 大瀧智宏<sup>3</sup>, 柏崎志武<sup>2</sup>, 上村靖司<sup>1</sup>

Yukinobu Sugihara, Nana Mizuhashi, Tomohiro Otaki, Nozomu Kashiwazaki and Seiji Kamimura

## 1. はじめに

透明さや形状といった外観の美しさは飲料用の氷の付加価値を高める上で重要である。現在、その場で氷を製造して使用する技術として普及しているオーガ方式、アイストレー方式、セル方式に対し、綱島と上村<sup>1</sup>は着水面が小さくて薄い任意断面の氷板を作り、それを断続的に引き上げて、氷柱を製氷する氷柱引上げ式連続製氷技術 (Continuous Ice Drawing Method, CD法) を提案した。そして125分で直径25 mm、高さ25 mmの氷を作製できることを示した。さらに水橋ら<sup>2,3</sup>は、CD法において直径25 mmの初期氷板を引上げる際に観察された現象を漏水、成功、剥離、破壊の4種類に整理し、それぞれの状態における引上げ力の過渡的变化について述べた。本研究では筒状製氷型の内径を25 mmから30 mmへ大きくし、それぞれの内径における氷厚さと最大引上げ力の関係を比較した結果を報告する。

## 2. 初期氷板引上げ実験の手順

まず上蓋に内径30 mmの筒状製氷型 (PTFE製) を取り付け水槽を水で満たす。そして冷却棒 (アルミ製、外径35 mm、設定温度 $-1^{\circ}\text{C}$ ) を水面に所定の初期冷却時間 (1分から23分の間を2分刻みで変更) だけ接触させて初期氷板を形成する。その後に冷却棒の温度を保ちつつ昇降ジャッキを5秒ごとに0.2 mm下降させる。この際に冷却棒に作用する (以降、引上げ力と呼ぶ) を、冷却棒の上部に取り付けたカンチレバー式ロードセル (最大荷重200 N、(株) AND製) で測定する。最後に、引上げた氷板の厚さを測定する。実験は約 $2.5^{\circ}\text{C}$ の低温室で実施した。

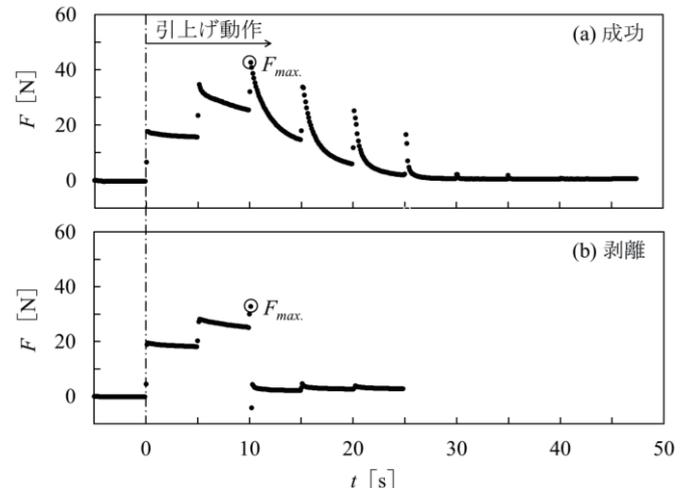
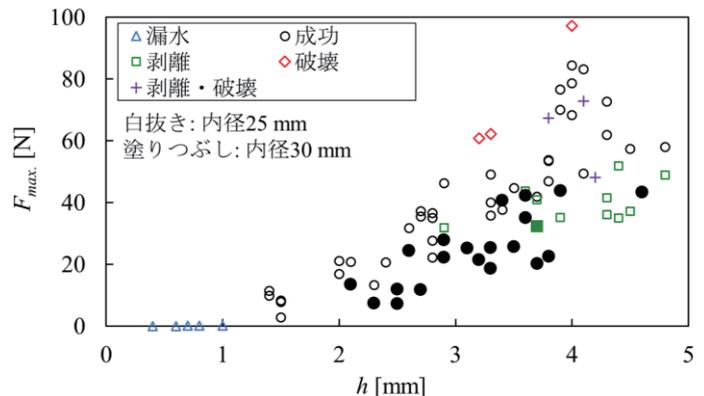
## 3. 引上げ力の過渡的变化および氷厚さとの関係

図1(a)と(b)に内径30 mmの製氷型における成功および剥離時の引上げ力 $F$ の過渡的变化を示す。横軸は引上げ動作を開始した時刻をゼロとしている。また引上げ力 $F$ が最大となった点を $F_{max}$ として表した。成功時の $F$ は $F_{max}$ 以降、指数関数的な減衰を見せる。減衰過程では製氷型と氷板側面において摩擦が生じているのだと考えられる。一方、剥離時の $F$ は $F_{max}$ を示したのちに直ちにゼロとなることがわかる。図2に初期氷板厚さ $h$ と最大引上げ力 $F_{max}$ の関係を示す。比較のため、内径25 mmの結果 (白抜き記号) も合わせて示す。内径30 mmの製氷型を用いて初期冷却時間を変更しながら実施した21回の試験の内、成功が20回、剥離が1回となった。内径25 mmの結果と同様に内径30 mmの $h$ と $F_{max}$ はおおよそ比例関係にあることがわかる。また、内径筒を25 mmから30 mmにすると同じ $h$ のときに氷板が製氷型に接触する面積は1.2倍となる。したがって、氷板のせん断付着強度が等しいと仮定すると、 $F$ は内径25 mmの1.2倍になると言える。しかし、内径30 mmの $F_{max}$ は内径25 mmの結果よりも小さくなった。これは、接触面積や試料体積の増加に伴って氷板-製氷型間の液体層や氷板内部の微小クラックの発生確率が

上昇し、小さい $F_{max}$ で氷板が製氷型側面から外れたのだと推測される。今後、詳細な検討を要する。

## 4. まとめ

本研究では内径30 mmの製氷型を用いて初期評判の引上げ試験を行い、 $h$ と $F_{max}$ の関係を示した。氷板を $2.1 \leq h < 3.7$  mmの範囲に成長させて引上げると成功する割合が増すと云える。

図1 内径30 mmの製氷型における引上げ力 $F$ の過渡的变化図2 初期氷板厚さ $h$ と最大引上げ力 $F_{max}$ の関係

## 参考文献

- 1) 綱島匠, 上村靖司, 2018: 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発, 雪氷研究大会 (2018・札幌) 講演要旨集, p.32.
- 2) 水橋奈那, 岩橋大樹, 上村靖司, 杉原幸信, 2019: 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発-その2: 初期製氷時間と溶存酸素濃度の検討-, 雪氷研究大会 (2019・山形) 講演要旨集, p.47.
- 3) 水橋奈那, 杉原幸信, 上村靖司, 2020: 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発-その3: 製氷容器と氷との着氷力測定-, 雪氷研究大会 (2020・オンライン) 講演要旨集, p.11.

1 長岡技術科学大学

2 長岡技術科学大学大学院 機械創造工学専攻

3 長岡技術科学大学 機械創造工学課程

Nagaoka University of Technology

Graduate School of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology

Undergraduate School of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology

# 氷の切削メカニズムとカーリング・ストーン運動のエッジ・モデル (3) Mechanism of ice cutting and the edge model of the motion of a curling stone (3)

○前野紀一<sup>1</sup>

Norikazu Maeno

## 1. エッジ・モデル

カーリング・ストーンの運動に関して筆者が2018年に提案した「エッジ・モデル<sup>1), 2), 3)</sup>」では、ストーン質量中心には、底面のランニング・バンド面と接触する氷による通常のクーロン摩擦力の他に、ランニング・バンド両端のエッジによる切削抵抗が作用する。エッジ切削抵抗はエッジ角の増加関数であるが、精密計測<sup>4)</sup>によって一般に通常のストーンのランニング・バンドの内側エッジ角は外側エッジ角より平均3度大きいことが確認された。その結果、ストーン質量中心には進行方向と直角方向の力が作用することになる<sup>4), 5)</sup>。本報告では、氷の切削メカニズムの考察から得られたエッジ切削抵抗をストーンの運動の式に適用して摩擦係数を求めストーンの運動を計算する。

## 2. エッジ切削抵抗

エッジ切削抵抗はエッジ角( $\theta$ )と切削速度の関数である。切削速度は、切削方向に平行( $U$ )および直角( $W$ )の2方向考えられる。結局、1個の水ペブルから発生する切削抵抗( $G$ )は次式で表される<sup>4), 5)</sup>。

$$G = Kf\theta^\alpha U^\beta e^{\gamma W} \quad (1)$$

ここで、 $K$ はエッジの材質や鋭さに関する定数、 $f$ はストーン荷重による力、 $U$ は相対速度、 $W$ は回転方向速度である。べき指数の数値は、氷を含む種々の物質の切削実験の結果をもとに $\alpha = 1.41$ ,  $\beta = -0.319$ ,  $\gamma = -3.42$ と決められた。

## 3. エッジ・モデルによるストーンの運動シミュレーション

ストーン質量中心に作用する外力( $H$ )がランニング・バンドに接するすべてのペブルによるクーロン摩擦力( $F$ )とエッジ切削抵抗( $G$ )の和:

$$H = \sum F + \sum G \quad (2)$$

であるとして、ストーンの運動を計算した。エッジ角には、標準的な値(外側8度、内側11度)を用いた。

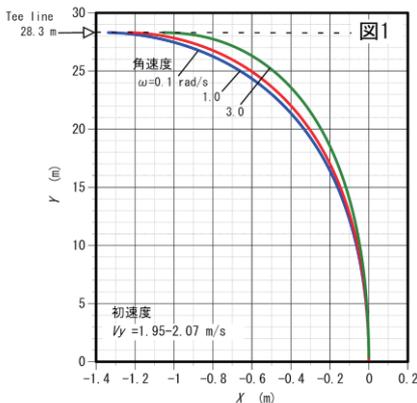


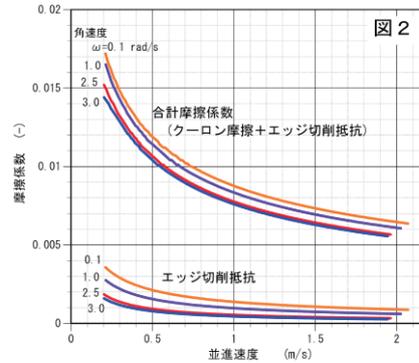
図1は初速度2 m/sで左回転のストーンがちょうどTライン(28.3 m)で停止するように摩擦係数を与えた時の運動軌跡である。これは競技での標準的なドロショットに対応する。ストーンは左にカールしながら滑り、カール距離はほぼ1 mで、角

速度の増加に伴って減少の傾向を示した。

## 4. クーロン摩擦係数とエッジ切削摩擦係数

図1の運動軌跡の計算で得られた摩擦係数を図2に示す。合計摩擦係数の内訳は、約90%がクーロン摩擦で、滑走距離はほ

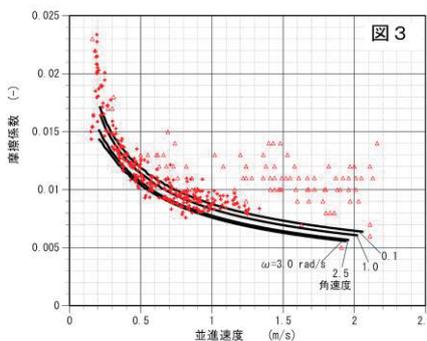
ぼこの値で決まる。エッジ切削抵抗の寄与は10%程度に過ぎない。



しかし、カール距離はこの値で決まる。図3には、合計摩擦係数とともに、これまでに実測されたカーリング・ストーンの摩擦係数を併記した(△+印)。

## 5. 検証実験の条件

エッジ・モデルの予備的検証実験は直径80 mmのランニング・バンドで試みられた<sup>1), 2)</sup>。その後、実際のストーンと同じ直径130 mmのランニング・バンドに2種類のエッジ角の組み合わせを加工した模擬ストーンを使ってより精密な検証実験が実施された。しかし、ストーンの運



動が不安定で不規則な動きとなったため十分に解析結果に至っていない。不安定の原因は、ランニング・バンドに、花崗岩ではなく、アルミニウムやスチール等の金属を使ったためエッジ切削に起因する摩擦抵抗が大き過ぎるためと考えられる。

詳細なエッジ・モデルの検証実験が今後複数の研究室によって実施されることが望まれる。その場合の必要条件の一つとして、実際の花崗岩製のカーリング・ストーンにいろいろなエッジ角の組み合わせを加工することを挙げておく。本来、式(1)の定数 $K$ の値はそのような実験で決められるべきであり、また、そうすることによって $K$ の物理的意味がより明確になると考えられる。

## 参考文献

- 1) 前野紀一, 2018: カーリング・ストーンはなぜ曲がるか? 新理論: エッジ・モデル. 北海道の雪氷, **37**, 18-22.
- 2) Maeno, N., 2018: Edge model of the motion of a curling stone. 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2018 講演論文集, D-1.
- 3) 前野紀一, 2018: 氷の切削メカニズムとカーリング・ストーン運動のエッジ・モデル. 雪氷研究大会講演要旨集, A2-3, 39.
- 4) Maeno, N. *et al.*, 2019: Edge model of the motion of a curling stone. 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2019 講演論文集, B-12.
- 5) 前野紀一, 2019: 氷の切削メカニズムとカーリング・ストーン運動のエッジ・モデル(2). 雪氷研究大会講演要旨集, S1-1, 1.

1 北海道大学名誉教授

Professor Emeritus of Hokkaido University

## 氷上を進むカーリング・ストーンの軌跡に対する氷面の影響

## Effects of Surface Ice Condition for the Trajectory of a Curling Stone Moving on Ice

○ 亀田貴雄<sup>1</sup>, 斉藤茉由美<sup>1</sup>, 山浦高伸<sup>1,2</sup>, 原田康浩<sup>1</sup>, 柳敏<sup>3</sup>, 奈良浩毅<sup>4</sup>, 佐渡公明<sup>5</sup>

Takao Kameda, Mayumi Saito, Takanobu Yamaura, Yasuhiro Harada, Satoshi Yanagi, Hiroki Nara and Kimiteru Sado

## 1. はじめに

Kameda *et al.* (2020)<sup>1)</sup>は、氷上を進むカーリング・ストーンの軌跡に対してストーン下部のランニングバンドでの表面粗さが重要であることを指摘した。本研究では次の段階として、氷面でのペブルの数密度など、氷面の状況がカーリング・ストーンの軌跡に与える影響を調べたので報告する。

## 2. 実験方法

## 2.1 実験場所およびストーン的位置座標

実験はアルゴグラフィックス北見カーリングホールで実施した。ストーンの軌跡は Kameda *et al.*(2020)<sup>1)</sup>と同様、ストーンにトータルステーション用のターゲットを固定し、平均して測定間隔 20Hz で氷上を滑るストーンの位置座標を測定した。

## 2.2 実験で使った氷面の状況

氷面上に凹凸 (ペブル) を作成する際、使用する水の温度、ビーバーヘッド (ペブルを生成する時の散水口) の孔の大きさ、撒く回数を変えることにより、氷上に生成されるペブルの大きさと数密度を変化させた。氷面のペブルは紫外線硬化性樹脂を用いてレプリカ試料を作成し<sup>2)</sup>、それを用いてペブルの数密度、平均直径、ペブル上端面にストーンと接触した痕跡があるペブルの数密度などを調べた。ペブル生成時の条件とペブルの数密度などの情報を表 1 に示す。

## 3. 結果

図 1 に氷面でストーンと接触した痕跡があるペブルの数密度とストーンの曲がり幅との関係を示す。縦軸のエラーバーは標本標準偏差  $s$  で、データのバラツキを示す。ここで、ストーンはリリースから停止までの総回転数が 4~5 回転で、ハウスの中心から ±1m 以内に止まったストーンの軌跡データのみを用いた。また、ストーンの初期進行方向がカーリングホールの氷面 (アイスシート) の長手方向に平行になるように、Kameda *et al.*(2020) に記述した方法でストーンの軌跡データの角度補正を行なった。

図 1 より接触痕跡があるペブルの数密度が小さくなると、ストーンの曲がり幅が小さくなるのがわかる。特に、数密度が小さくなると曲がり幅のバラツキが大きくなる傾向があった。これは、ペブルの数密度が小さいと氷上でペブルの存在位置のバラツキが大きくなるため、ストーンの曲がり方が一様にならないことが原因であると考えられる。当日は氷上を滑るストーンの軌跡の特徴、ストーンの軌跡に対する角速度の影響も紹介する。

表 1 実験で使ったペブルの生成条件および数密度。氷面 1~3 は 2 つの水温でそれぞれのビーバーヘッドでペブルを生成した (合計で 2 回散水)。氷面 4 は 40°C の温水のみを用いた (1 回の散水)。

種類	水温	ビーバーヘッドの規格 (孔の直径)	ペブルの平均数密度 (個/cm <sup>2</sup> )	接触痕跡があるペブルの平均数密度 (個/cm <sup>2</sup> )
氷面 1	12°C	#76 (0.61 mm)	2.2	1.5
	40°C	#74 (0.73 mm)		
氷面 2	12°C	#76 (0.61 mm)	2.8	1.6
	12°C	#76 (0.61 mm)		
氷面 3	40°C	#70 (0.89 mm)	1.5	0.8
	40°C	#70 (0.89 mm)		
氷面 4	40°C	#70 (0.89 mm)	0.6	0.6

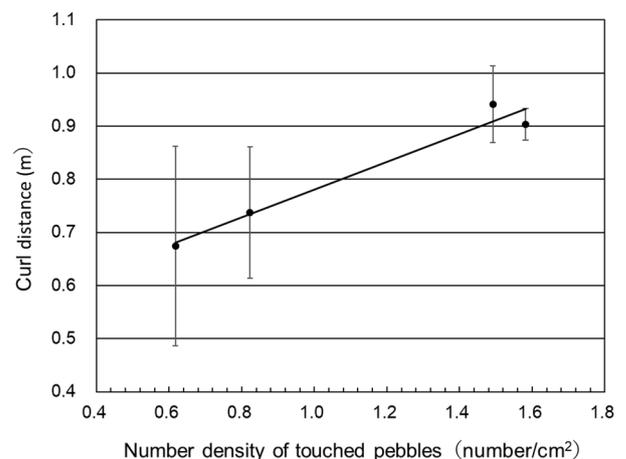


図 1 ストーンと接触した痕跡があるペブルの数密度とストーンの曲がり幅との関係。

## 参考文献

- 1) Kameda, T., D. Shikano, Y. Harada, S. Yanagi, and K. Sado (2020): The importance of the surface roughness and running band area on the bottom of a stone for the curling phenomenon. *Scientific Reports*, **10**, 20637. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76660-8>
- 2) 柳敏, 久保明彦, 亀田貴雄, 田牧純一, A.M.M.S. Ullah (2014): 樹脂包埋法による雪結晶のレプリカ作製およびそれを用いた雪結晶の表面構造計測とその精度. *雪氷*, **77**(1), 75-90.

1 北見工業大学  
2 東日本高速道路(株)  
3 北海道釧路明輝高等学校  
4 アルゴグラフィックス北見カーリングホール  
5 北見工業大学名誉教授

Kitami Institute of Technology  
East Nippon Expressway, Co. Ltd.  
Hokkaido Kushiro Meiki Senior High School  
Argo Graphics Kitami Curling Hall  
Professor Emeritus, Kitami Institute of Technology

# カーリング・リンクにおけるストーン通過時のペブル上端面の摩耗 Abrasion of an upper surface of ice pebbles caused by passing a curling stone

○柳 敏<sup>1</sup>, 亀田貴雄<sup>2</sup>, 齊藤茉由美<sup>2</sup>, 原田康浩<sup>2</sup>, 佐渡公明<sup>3</sup>  
Satoshi Yanagi, Takao Kameda, Mayumi Saito, Yasuhiro Harada and Kimiteru Sado

## 1. はじめに

カーリング場の氷面には、ペブルと呼ばれる小突起が存在する。ペブルはストーンが氷面と接触する部分であり、ここで生じる摩擦はストーンが曲がるメカニズムに関与すると考えられている<sup>1)</sup>。しかし、ペブルとストーンとの接触部で生じる現象は詳しくわかっていない。

そこで、筆者らは、ペブルの形状を精密に把握することを試みている。昨年の本大会では、ペブル頂部の平坦な部分（以下、上端面）に条痕と氷屑が見られることを報告した。今回は、ひとつのペブルに注目して、ストーンの通過がペブルの形状に及ぼす影響を調べたので報告する。

## 2. 方法

### 2.1 レプリカの作製

ペブルの形状は、カーリング・リンクの氷面を転写したレプリカを用いて測定した。レプリカは2020年6月7日に北海道北見市のアドヴィックス常呂カーリングホールで作製した。

レプリカの作製では、ストーン通過前、1回通過後、5回通過後、10回通過後における同一ペブルの形状をレプリカに転写した。レプリカ剤には紫外線硬化樹脂（NOA81, Norland社）を用いた。なお、NOA81によるレプリカの転写精度については、樹脂の硬化収縮で水平方向の寸法が1.1%、垂直方向の寸法が2.7%縮小することがわかっている<sup>2)</sup>。レプリカを作るとき、ストーンは時計回りに回転させて0.5 m/s程の速度で投射した。

### 2.2 形状測定

レプリカを用いた形状の測定では、ペブル上端面の面積とペブルの高さを測定して、ストーン通過に伴う形状の変化を調べた。条痕の形状も測定した。

上端面の面積は、レプリカの実体顕微鏡観察像から画像解析用のソフトを用いて求めた。ペブルの高さと条痕の形状は、三次元表面形状測定システム（Profilum 3D, Filmetrics社）で取得したレプリカの三次元プロファイルデータに基づいて測定した。

## 3. 結果と考察

図1に、ペブルのレプリカの実体顕微鏡観察像を示す。図1aでは、このペブルでストーン通過前は上端面が見られないことがわかる。しかし、ストーン通過後は、図1b～1dに示したどのレプリカでも上端面を認めることができた。

図1に示した画像から上端面の面積を求めると、図1bでは2.3 mm<sup>2</sup>、図1cでは4.0 mm<sup>2</sup>、図1dでは4.2 mm<sup>2</sup>となり、ストーンの通過に伴い面積が大きくなることがわかった。なお、ストーン通過時に上端面が拡大することは既に報告されており<sup>3)</sup>、ストーンがペブルを摩耗・変形するためだと考えられている。今回は、レプリカを用いて面積の変化を定量的に把握できた。

図2に、ペブルの高さの測定に用いた三次元プロファイルデータを示す。ここでは、三次元プロファイルデータを投影図で示してペブルの形状を表した。投影図では、レプリカの三次元プロファイルデータにおけるz軸を反転するとともに、ペブル周囲

の氷面に相当する部分をxy平面の基準に用いて座標軸を補正した。このため、各投影図では、zの値によりレプリカでのペブルの高さを把握できることになる。

図3に、図2からペブルの高さを求めた結果を示す。ここでは、上端面の平均高さを求めてペブルの高さを示した。上端面の平均高さは、図2に示した三次元プロファイルデータにおけるzの分布に基づいて、ペブル頂部の傾斜が緩やかな部分を抽出して算定した。この結果、上端面の平均高さは、ストーン1回通過後は139.2 μm、5回通過後は135.1 μm、10回通過後は129.6 μmであり、ストーンの通過に伴い低下したことがわかった。ストーンが1回通過する毎の高さの変化量は-1.1 μmであることもわかった。

なお、このペブルで条痕は、深さが0.5～1.1 μmの溝として認められた。図4に、条痕の形状を調べた結果を示す。これは、ストーンの通過に伴い生じていた。このため、上述したペブルの高さの低下もペブルの摩耗に起因すると考えることができる。

以上の結果、上端面の面積とペブルの高さで、ストーン通過に伴う形状の変化を把握できた。形状の変化は、ストーンがペブルを摩耗することに起因すると考えられた。

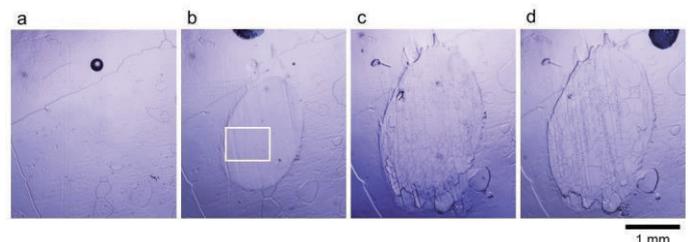


図1 ペブルのレプリカの実体顕微鏡観察像(a: ストーン通過前, b: ストーン1回通過後, c: ストーン5回通過後, d: ストーン10回通過後)。図1bでは、条痕の形状を調べた部分を方枠で示した。

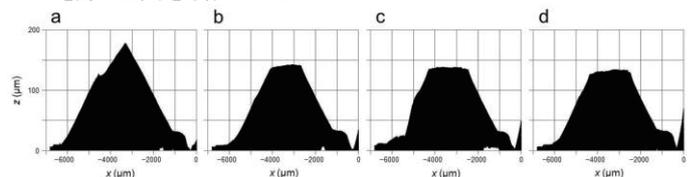


図2 レプリカの三次元プロファイルから作成したペブルの投影図。ここで、a～dの投影図は、図1に示した各レプリカの形状に基づいている。

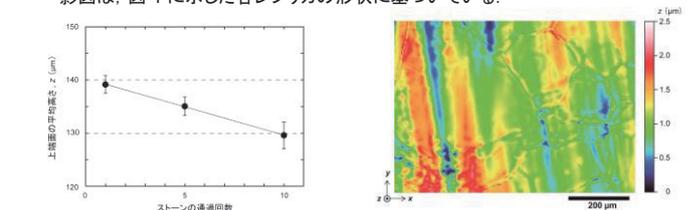


図3 ペブル上端面の平均高さ。

図4 条痕の形状(レプリカの三次元プロファイルデータのz軸を反転して表示)。

## 参考文献

- 1) Maeno, N. (2016): Curling, chapter 10, *The Engineering approach to winter sports*, edited by F. Braghin et al., Springer, 327-347.
- 2) Tamaki, J., et al. (2012): *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.* 6(6).
- 3) 鹿野他 (2018): 雪氷研究大会講演要旨集. A1-1.

1 北海道釧路明輝高等学校  
2 北見工業大学  
3 北見工業大学名誉教授

Hokkaido Kushiro Meiki Senior High School  
Kitami Institute of Technology  
Professor Emeritus, Kitami Institute of Technology

角運動量保存則を用いたカーリング・ストーンの曲がり

The curl of a curling rock using the law of conservation of angular momentum

○佐渡公明<sup>1</sup>  
Kimiteru Sado

1. はじめに

Penner (2001) は、カーリングの原因として、ストーンの合成速度の遅い側でランニングバンド(以下 RB)の接触点を中心に起こる選択的ピボット(旋回)を予想している. Shegelski & Lozowski (2016) は、これを力学的エネルギー保存則を用いて定式化し Pivot-slide モデルを提案している. しかし、掘起こし力が働いている場合は必ずしもエネルギー保存則は成り立たない. ストーンの運動に角運動量保存則を適用した文献は見当たらない. ここでは、角運動量保存則を用いて、曲り幅の直接計算を述べる.

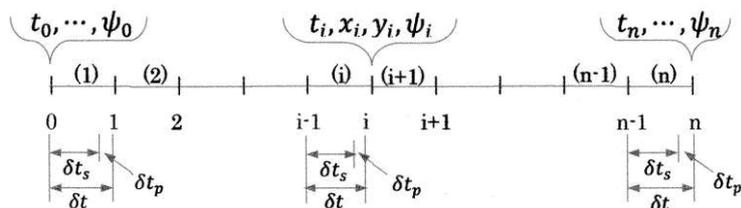


図1 差分区間 $\delta t$ がスライド・ピボット時間( $\delta t_s + \delta t_p$ )から成る差分法の計算区間. ( ) 内は計算区間番号を示す.

2. 角運動量保存則による曲がり幅の直接計算

2.1 第一差分区間の状態

図1は、差分法の一区間 $\delta t$ が平均スライド時間 $\delta t_s$ とピボット時間 $\delta t_p$ の和から成る、差分法の計算模式図である.  $\psi_i$ はy軸と並進速度方向の角である.区間(1)を詳細に表したのが図2である. ストーンの重心が、初期地点の原点からスライド距離 $\Delta L$ 滑って点Gに到達し、この時点でRB外径がペブルに点Aで衝突している. 平均スライド時間とスライド距離 $\Delta L$ は、次式で求まる.

$$\delta t_s = \frac{1}{4\bar{v}RN} \dots (1) \quad \Delta L = \delta t_s v_0 \dots (2)$$

$\bar{v}$ : 平均並進速度,  $v_0$ : y 方向並進初速度,  $N$ : ペブル数密度

$R$ : RB 外径の半径.  $\delta t_s \approx 2.0 \times 10^{-4} \text{s}$   $\Delta L \approx 0.5 \text{mm}$  である.

ストーンは運動形態が点Aの衝突直前までは並進と重心周りの回転運動であったものが、衝突により掘起こし力を受けて、不連続的に固定点Aを中心に旋回し、重心がGからG'に移動している. A点衝突直前のストーンのy方向速度 $v$ と重心周りの角速度 $\omega$ は、初期条件を用いて $\delta t_s$ 時間後のEuler法差分分解が得られるので、既知とする. x方向速度については、 $\Delta L$ 区間はペブルとの衝突がないので旋回運動がなく初速度のゼロのままである. ただし、 $\delta t_s \approx 2.0 \times 10^{-4} \text{s}$ と非常に小さいので、 $v$ や $\omega$ も初期値で近似できる.

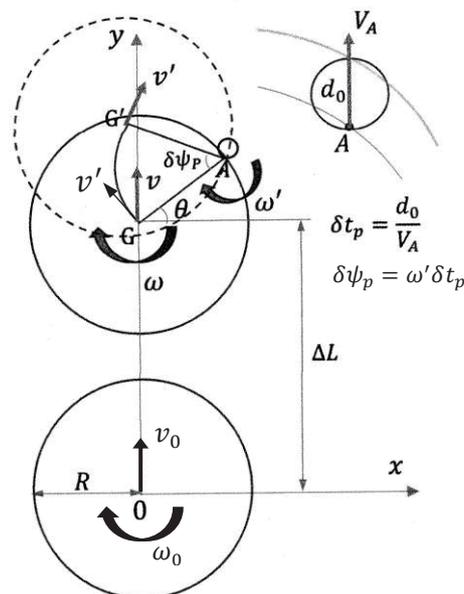


図2 第一差分区間の曲がり. 旋回運動は固定点Aを中心に $\delta t_p$ 時間継続する.  $d_0$ : ペブル先端直径,  $d_0, \Delta L$ を拡大している.

$$v' = \frac{2}{3} v \cos \theta \dots (7) \quad \omega' = \frac{2}{3R} v \cos \theta \dots (8)$$

2.2 角運動量保存則の適用

RBのペブル接触点には、凝着摩擦力と掘起こし摩擦力の外力が作用しているが、A点に作用する衝撃を伴う掘起こし力に比べこれらの外力は無視できる. 従ってA点周りの衝突直前、直後の角運動量保存則は次式となる. 解は(5), (6)と容易に得られる.

$$MvR \cos \theta + I_G \omega = I_A \omega' \dots (3) \quad v' = R \omega' \dots (4)$$

$$M: \text{ストーン}の質量, I_G = \frac{1}{2} MR^2, I_A = I_G + MR^2$$

$$v' = \frac{1}{3} (2v \cos \theta + R \omega) \dots (5) \quad \omega' = \frac{1}{3R} (2v \cos \theta + R \omega) \dots (6)$$

ストーンは回転が遅く  $v > R \omega$ , さらに  $|\theta| \leq 60^\circ$  のときは、 $2v \cos \theta > R \omega$  となり、(5), (6) は次式となる.

3. 曲がり幅  $x_c$  の計算式

図2の旋回運動が終了したときの重心G'のx座標が、曲り幅増分 $\delta x_c$ である. 図2の場合 $\theta < \delta \psi_p$ であり、まとめると次式となる.

$$1. \quad \theta > \delta \psi_p \dots \delta x_c = R \cos(\theta - \delta \psi_p) - R \cos \theta$$

$$2. \quad \theta = \delta \psi_p \dots \delta x_c = R - R \cos \theta$$

$$3. \quad \theta < \delta \psi_p \dots \delta x_c = R \cos(\delta \psi_p - \theta) - R \cos \theta$$

以上より、ストーンは曲り幅は、 $\theta, v, \omega, d_0$  で表される.

参考文献

1) A.R. Penner, 2001 : Am. J. Phys. 69(3), 332-339.  
2) M.R.A. Shegelski, E. Lozowski, 2016: Can. J. Phys. 94, 1305-1309.

1 北見工業大学名誉教授

Professor Emeritus, Kitami Institute of Technology

# 新型コロナウイルス感染症の影響を考慮した冬期の歩行者転倒事故の予測に関する研究 Prediction of Pedestrian Falls in Winter Considering the Impact of Covid-19 Pandemic

○高橋尚人<sup>1</sup>, 丹治和博<sup>2</sup>, 小松麻美<sup>2</sup>

Naoto Takahashi, Kazuhiro Tanji and Asami Komatsu

## 1. はじめに

札幌市内では、冬期の歩行者転倒事故が発生し、令和2年度には850人が救急搬送された<sup>1)</sup>。他方、新型コロナウイルス感染症(以下、コロナと略す)の流行によって外出頻度が変化するなど、雪道での自己転倒の発生機会に影響があったと考えられる。

本研究では、コロナの影響を考慮した雪道での自己転倒による救急搬送者数の予測モデルの構築に取り組む。

## 2. 研究の手法

### 2.1 既往研究

筆者らは、暦情報と気象データを用い、救急搬送者数を予測するニューラルネットワークモデルを構築した<sup>2)</sup>。気象データは、数値で取得できる指標を説明変数とし、当日～5日前までの気象データを説明変数とした場合に最も予測精度が高く、救急搬送者数を4段階に区分した場合の正解率が81.6%となった(表1)。

なお、当該モデルでは、コロナが人流に影響した可能性を考慮し、2020年1月末までの救急搬送データを使用した。

表1 当日～5日前までの気象データを投入した場合の予測結果(2020年1月末までのデータを使用)

		予測値									
		0-5人	6-10人	11-20人	21人-						
実測値	人数	976	645	235	51	正解率	81.6%				
	0-5人	995	890	90	14			空振り率	7.1%		
	6-10人	545	70	445	28					見逃し率	11.2%
	11-20人	281	14	91	175						
	21人-	86	2	19	18						

### 2.2 コロナの影響の考慮

コロナの流行によって外出を控えたり、公共交通機関の利用を控えるなど行動様式に変化があり、結果として雪道での自己転倒の発生機会に影響したと考えられる。本研究では、令和2年度までの救急搬送データを用い、以下の検証を行うこととした。

- ① 既往研究の手法で(すなわち、コロナの影響を考慮せず)、精度検証をする。
- ② 既往研究の手法の説明変数にコロナに関する指標を加えて精度検証をする。

コロナの流行が、雪道での自己転倒による救急搬送者数に影響を与えている場合、既往研究の手法(検証①)では精度(表1の正解率)が低下すると予想される。その上で、コロナに関する適切な指標を説明変数に加えることができれば、精度は検証①より向上し、既往研究と同等の精度が得られると予想される。

## 3. 予測の結果

### 3.1 コロナの影響を考慮しない場合の予測結果

コロナの影響を考慮しない、既往研究の手法を適用した結果を表2に示す。正解率は77.9%で、2020年1月末までのデータを使用した場合と比べ、正解率が3.7%低くなった。

### 3.2 コロナの影響を考慮した場合の予測結果

コロナに関する指標として、札幌市の日陽性者数<sup>3)</sup>を説明変数に加えた場合の結果を表3に示す。コロナの影響を考慮しない場合に比べて1.4%精度が向上した。

さらに有効な指標が無いか試行した結果、札幌の日陽性者数に加え、緊急事態宣言(北海道知事による緊急事態宣言、2020年2月28日から3月19日まで)の有無を説明変数にした場合、正解率は82.2%となった(表4)。

表2 コロナの影響を考慮しない場合の予測結果

		予測値									
		0-5人	6-10人	11-20人	21人-						
実測値	人数	1199	623	244	52	正解率	77.9%				
	0-5人	1122	1021	88	13			空振り率	6.5%		
	6-10人	590	149	408	31					見逃し率	15.7%
	11-20人	316	26	114	173						
	21人-	90	3	13	27						

表3 札幌の日陽性者数を加えた場合の予測結果

		予測値									
		0-5人	6-10人	11-20人	21人-						
実測値	人数	1140	623	292	63	正解率	79.3%				
	0-5人	1122	1003	100	19			空振り率	8.5%		
	6-10人	590	114	426	46					見逃し率	12.1%
	11-20人	316	19	81	204						
	21人-	90	4	16	23						

表4 札幌の日陽性者数と緊急事態宣言の有無を加えた場合の予測結果

		予測値									
		0-5人	6-10人	11-20人	21人-						
実測値	人数	1105	631	313	68	正解率	82.2%				
	0-5人	1122	1007	88	26			空振り率	8.3%		
	6-10人	590	79	464	46					見逃し率	9.4%
	11-20人	316	15	70	218						
	21人-	90	4	9	23						

## 4. まとめ

検証の結果から、雪道の自己転倒による救急搬送者数にはコロナの影響があったと考えられる。本研究では、札幌市の日陽性者数と緊急事態宣言の有無を説明変数に加えた場合の精度が高い結果となったが、コロナ流行初期と現在では陽性者数や緊急事態宣言が人々の行動に与える影響が異なると考えられるため、より有効な指標の選定などに取り組んでいきたい。

### 謝辞

札幌市消防局様に救急搬送者数データを提供頂きました。ここに深くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 札幌市消防局警防部救急課：令和2年度「雪道の自己転倒」救急搬送概要、<https://www.city.sapporo.jp/shobo/kyukyu/yukimiti/documents/r2.pdf>. (accessed 2021.6.16)
- 2) 高橋尚人, 丹治和博, 小松麻美, 2020: ニューラルネットワークを活用した「雪道の自己転倒」による救急搬送者数の予測に関する研究, 寒地技術論文・報告集, **35**.
- 3) 札幌市 ICT 活用プラットフォーム DATA-SMART CITY SAPPORO: 札幌市内の新型コロナウイルス(COVID-19)陽性患者発生状況, [https://ckan.pf-sapporo.jp/dataset/covid\\_19\\_patients](https://ckan.pf-sapporo.jp/dataset/covid_19_patients). (accessed 2021.6.17)

1 札幌市立大学 AI ラボ

2 (一財) 日本気象協会北海道支社

AI laboratory, Sapporo City University  
Japan Weather Association

## 福島県における雪害対策に関する基礎的研究 — 落雪事故発生時の気象要因について — Countermeasures against Snow Damage in Fukushima - About weather factors when a snowfall accident occurs -

○高橋真里<sup>1</sup>, 山形敏明<sup>1</sup>, 細川和彦<sup>2</sup>, 苫米地司<sup>2</sup>  
Mari Takahashi, Toshiaki Yamagata, Kazuhiko Hosokawa and Tsukasa Tomabechi

### 1. はじめに

前報<sup>1) 2)</sup>では、福島県内市町村の雪害発生状況と、近年の人身雪害の状況および、福島県内市町村の人身雪害のうち、落雪による人身事故発生時の状況と発生時の気象状況について報告した。本報では前報に続き、福島県内市町村の人身雪害のうち、落雪による人身事故発生時の気象要因について報告する。

### 2. 研究方法

福島県警察本部地域部総合運用指令課の平成14年～平成29年の16年間の人身雪害および建物被害について記録した資料(非公開資料)に基づき、分析する。なお、対象のn年度とはn-1年11月～n年5月を示す。また、アメダスによる事故発生時の気象状況を確認し、資料整理を行う。分析に用いる気象因子は、落雪事故発生日の「平均気温」・「最高気温」・「最低気温」・「事故発生時の気温」・「降雪量」・「最深積雪深」・「事故発生時の積雪深」の7因子とする。

### 3. 調査結果

図1に平成14年度から平成29年度までの落雪による人身事故の総数を示す。福島県内での落雪による人身事故は、平成18年豪雪時が最も多く14件だった。次いで平成24年豪雪時の平成24年度11件、平成25年度豪雪時の平成25年度9件の順となっており、両年度では豪雪地帯の会津地方以外にも中通りの川俣町、郡山市、岩瀬郡、浜通りのいわき市、川内村でも落雪事故が発生している。平成19年度から平成23年度の間は平成22年度の1件を除き事故は発生していない。

落雪による人身事故発生に影響する気象要因を抽出するため、前述の7つの気象因子を用いて主成分分析を行った。分析結果では、表1に示すように第三主成分までの累積寄与率が80%を超えた。主成分負荷量は第一主成分で事故発生時の気温が高く、第二主成分では事故発生時の積雪深が高くなっていた。このことから、始めに事故発生時の気温と積雪深の関係について検討することとした。落雪による人身事故発生時の気象状況について、事故発生時の気温と積雪深の関係を図2に示す。事故発生時の気温は-7.9℃から7.9℃の範囲であり、約-5℃から3℃の範囲で事故が多く発生している。また、事故発生時の積雪深は14cmから300cmの範囲であり、気温との関係を見ると0℃を超えると14cmから70cm程度の比較的少ない積雪深であっても事故が発生している。

### 4. まとめ

本報告では、福島県内の落雪による人身事故発生状況と発生時の気象状況を整理した。気温が約-5℃から3℃の範囲で落雪事故が多く発生しており、0℃を超えると14cmから70cm程度の比較的少ない積雪深であっても人身事故が発生していることが分かった。今後は平成30年度以降の雪害資料を追加して分析・検討する予定である。

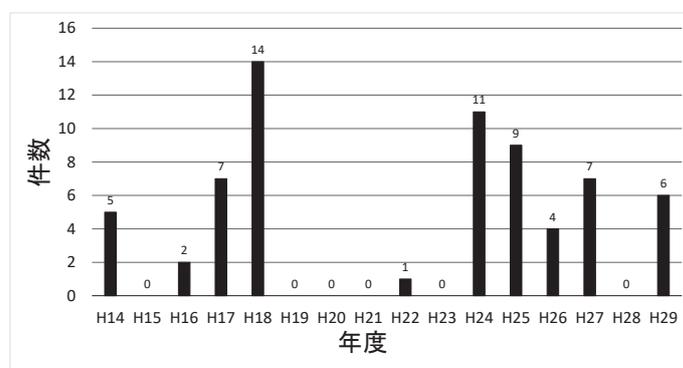


図1 落雪による人身事故数 (H14～H29)

表1 累積寄与率

7変量の総分散	6.87
第一主成分の寄与率	0.45
第二主成分の寄与率	0.22
第三主成分の寄与率	0.17
累積寄与率	0.84

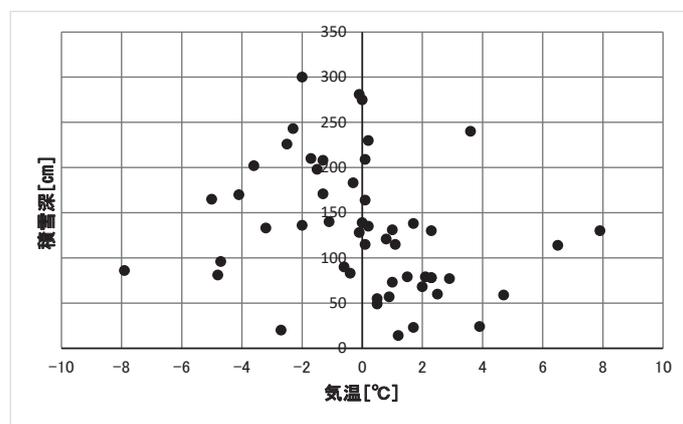


図2 落雪による人身事故発生時の気象状況

### 参考文献

- 1) 齋藤郁美, 山形敏明, 細川和彦, 苫米地司: 福島県における雪害対策に関する基礎的研究, 一近年の人身雪害の状況について—雪氷研究大会(2018・札幌)講演要旨集 p 33
- 2) 山形敏明, 齋藤郁美, 細川和彦, 苫米地司: 福島県における雪害対策に関する基礎的研究, 一人身雪害発生時の気象状況について—雪氷研究大会(2019・山形)講演要旨集 p 74

1 郡山女子大学  
2 北海道科学大学

Koriyama Women's University  
Hokkaido University of Science

## 屋根雪事故発生危険日予測結果の報告

-2020/21 冬期・山形県-

## Report on Prediction of Risky Days for Roof Snow Accidents

- 2020/21 Winter Season / Yamagata Prefecture -

○沼野夏生<sup>1</sup>

Natsuo Numano

## 1. はじめに

前報<sup>1)</sup>でおこなった日々の屋根雪事故発生の有無に関する判別の追試と改良を踏まえ、山形県を対象に行った2020/21年冬期の屋根雪事故事前予測の結果について報告する。

なお2019/20年冬期にも事前予測を試行したが、同冬期は県内4地点の最大積雪深の平均が31cmと超寡雪年であり、屋根雪事故発生日が10日と少なかったため評価を保留した。対象とした2020/21年冬期は最大積雪深平均114cm、並雪年と言え、屋根雪事故が発生した日数は43日に及んだ。

## 2. 事前予測の準備作業

**変数と閾値の再選択** 前回は10変数を採用したが、レンジが小さい変数から逐次減らして判別精度の比較を行った結果、[気温の日較差][曜日タイプ]を除外した8変数を用いることとした。各変数をクラス分けする閾値は、データの変動に対する安定性を考慮して4分点による相対閾値に統一した。

**予測のためのデータセットの選択** 前回の分析で豪雪年と寡雪年を分けた方が判別成績が向上したが、当初はその年がどちらになるか分からない。そこで今回は、寡雪年ベースで予測し、期間終了後に豪雪年ベースと比較する方法を採用した。

## 3. 事前予測の実施

**期間と作業の概要** 日ごとの予測を実施する期間は、4地点のいずれかで積雪が観測された日から、どこにも積雪がなくなる日までとした。実際は2020年12月14日～2021年3月23日となった。朝8時から9時頃に、その日の4地点の気象データを気象庁の「過去の気象データ・ダウンロードサイト」及び日本気象協会の「3時間天気」「アメダス積雪深データ」から入手し、あらかじめ作成した計算表(Excel)に入力して危険度を判定した。なお、予測した危険度は4段階に分け、地域社会デザイン研究所のホームページに参考資料としてその都度掲載した。

**未確定データの扱い** 日本気象協会のデータは3時間ごとの値の平均値を使用した。当日の予測値が多いため、実際のデータによる分析とは異なる結果となる可能性がある。そのため、後日実データに置換した確定値版と比較し、異同を確認した。なお前年の結果から特に実測値との乖離が大きかった[日照時間]は、前年の確定値に基づく係数による修正をおこなった。

## 4. 結果の考察

予測値と確定値を用いた計算結果それぞれについて、寡雪年ベース・豪雪年ベース別のFスコア(判別成功指数、前報参照)、見逃し率、空振り率、および判別率を示す(図1)。

予想に反し、事前予測と確定値による判別結果にはほとんど差がなく、寡雪年ベースの場合は同じで、豪雪年ベースでは事前

予測の方が若干よかった。寡雪年ベースのほうが豪雪年ベースより成績がよく、Fスコアは前報の豪雪年→豪雪年、寡雪年→寡雪年の模擬的な予測の結果を上回る、まずまずの結果だった。

寡雪年ベースと豪雪年ベースを使い分ける試みとして、対象冬期における最大積雪深の推移を踏まえ、積雪初期、積雪期前期、積雪期後期、消雪期(以下各A・B・C・Dと略)に4分割(図2)してFスコアと判別率を比較した(図3)。その結果に基づき、A・Cを寡雪年ベース、B・Dを豪雪年ベースで計算したところ、諸指標に大幅な改善がみられた(表1)。

このような時期の分割は、今のところ根拠の薄い後付けの操作にとどまる。再現性や、ホームページで試行的に公表する事前予測における切り替えの方法については、今後も試行を続けながら検討していきたい。

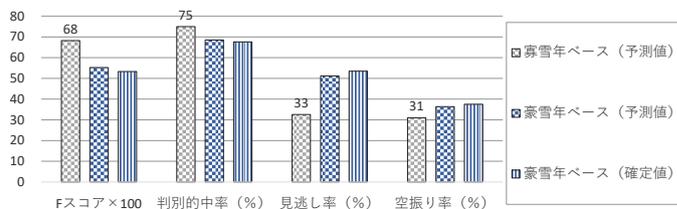


図1 寡雪年ベースと豪雪年ベースによる予測結果の比較



図2 日最大積雪深の平均値の変化と期間分割

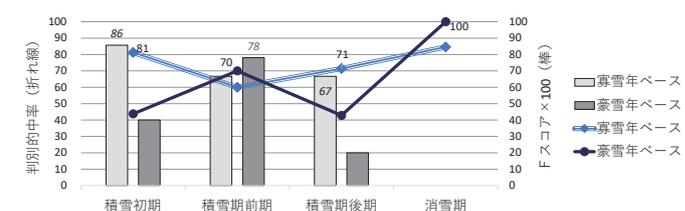


図3 各時期のFスコア・判別率の比較

表1 各期に適合する計算結果を用いた場合の判別関連指標

Fスコア×100	判別率	見逃し率	空振り率
76.74	80	23.26	23.26

## 参考文献

- 1) 沼野夏生, 2019: 数値化Ⅱ類による屋根雪事故発生危険日予測の試行—山形県における最近9冬期のデータを用いて—。雪氷研究大会(2019・山形)講演要旨集, A2-8, 75。

1 地域社会デザイン研究所代表・東北工業大学名誉教授・工博

Owner, New Community Design Laboratory for Mesomountainous Region, Professor Emeritus, Tohoku Institute of Technology, Dr. Eng.

アメダスデータを用いた各地の寒さの特性について (1)  
—各種気温指標による寒さランキング—

Features of Hokkaido's Cold Places in Temperatures Identified by Meteorological Stations Data, Part 1

○大橋一仁<sup>1</sup>, 金田安弘<sup>1</sup>, 小林利章<sup>2</sup>

Kazuhito Ohashi, Yasuhiro Kaneda and Toshiaki Kobayashi

1. はじめに

寒さは、凍上や凍害対策、結氷対策、寒地建築等、様々な分野に影響を与え、寒さに対応した寒地技術が開発されてきた。また、寒さを生かした冬のイベントが多く自治体で開催され、冬の観光面での1つの地域資源として定着している。亀田ほか(2016)は、過去10冬期のアメダスデータを用い、独自に考案した指標により寒さのランキングを報告している。一言で寒さと言っても、1冬期の年最低気温だけに着目するのか、期間を通じた寒さを対象にするのかなど、寒さを表す指標によって寒さの順位付けは異なる。本報告では、3つの気温統計値により各地の順位付けを行うとともに、寒さの要因について考察した。

2. 調査データ

- ・データ：日平均気温、日最低気温
  - ・地点：北海道内のアメダス地点
  - ・期間：2001年12月～2021年3月(1冬期：12～3月)
- 北海道のアメダスを対象としたが、標高1,000m以下に限れば国内の気温の低い地点は北海道内に位置すると考えられる。

3. 寒さの分析方法(寒さ指標)

以下の3つの統計値を寒さ指標として設定した。

- (1) 日最低気温の期間平均：日最低気温の各冬期の平均値を期間(20年)で平均した値
- (2) 期間最低気温：日最低気温の期間(20年)最低値(極値)
- (3) 積算寒度：日平均気温が氷点下の時において平均気温の絶対値の各冬期の積算値を期間(20年)で平均した値

4. 統計結果(寒さランキング)

3つの寒さ指標による寒い地点の上位10位までを表1に、各地点の位置を図1に示す。寒さ指標の種類により、寒い地点の順位は異なる。日最低気温の期間平均と積算寒度でもっとも寒い地点はともに陸別で、この2つの寒さ指標の上位10位までの地点は7地点が共通する。20冬期の期間最低気温がもっとも低いのは江丹別の-36.0℃である。期間最低気温の上位11位の内7地点は、他の2つの寒さ指標の上位10以内までに含まれていない。他の指標で1位であった陸別も、期間最低気温の上位10以内には表れない。単に気温が大きく下がる地点と、冬期を通して平均的に寒い地点は必ずしも一致しない。

表1 寒さ指標別の寒い地点の上位10位

統計値	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
日最低気温の期間平均(℃)	・陸別 -15.4	・占冠 ・糠内 -14.1	—	・川湯 ・生田原 -13.8	—	・大樹 -13.6	・阿寒湖畔 -13.5	・ぬかびら温泉郷 -13.4	・帯広泉 -13.3	・江丹別 -13.1
期間最低気温(℃)	・江丹別 -36.0	・朱鞠内 -34.8	・和寒 -34.5	・占冠 -34.4	・歌登 -33.9	・幌加内 ・生田原 -33.8	—	・下川 ・滝上 -33.3	—	・富良野 ・中頓別 -31.9
積算寒度(℃)	・陸別 953.1	・ぬかびら温泉郷 919.3	・阿寒湖畔 894.9	・占冠 851.8	・留辺蘂 845.8	・川湯 826.3	・生田原 823.4	・朱鞠内 821.9	・境野 818.8	・糠内 811.6

5. 寒い地点の環境条件

緯度と標高のほか、夜間の放射冷却も気温の低下に大きく影響する。夜間冷却の条件としては、(1)雲がない晴天、(2)風が弱い、(3)新雪が積もっている、(4)海や大きい湖から離れている、(5)冷気が溜まりやすい地形(盆地)などが挙げられる(例えば文献2)。図1によると、寒い地点として抽出された地点(図1の●)の多くは内陸に位置する(条件4)。北海道の脊梁山脈の東側の地点は、日本海からの季節風による影響が少なく晴天が多いため、夜間に気温が下がりやすい(条件1)。一方、脊梁山脈の西側の地点は東側に比べて降雪量が多く、条件3に合致している。例えば、期間最低気温が低い上位にランクされている朱鞠内、和寒、占冠、歌登、幌加内などは、12～3月の累計降雪量(平年値)が6mを越え、比較的降雪量の多い地点である。



図1 寒さの厳しいアメダス地点(表1)の位置

冷気が溜まりやすい地形の条件5について、国土数値情報の4次メッシュ標高データを基に分析したところ、周囲を山に囲まれた(メッシュ標高の閉塞率が概ね60%以上の盆地状の地形)地点の多いことがわかった。

5. おわりに

今後、他の寒さ指標(気象統計項目)について検討するとともに、国土数値情報の標高データを用いて、地形因子による寒さの環境要因について分析を進める予定である。

参考文献

- 1) 空井猛寿, 浜田始, 亀田貴雄, 高橋修平, 2016: 日本一寒い町, 北海道陸別 一気象庁による2007年から2016年までの10年間の観測データに基づく。天気, 63(11), 27-35.
- 2) 近藤純正, 1987: 身近な気象の科学. 東京大学出版会, 189pp.

1 (一社)北海道開発技術センター  
2 (株)北海道気象技術センター

Hokkaido Development Engineering Center  
Hokkaido Weather Technology Center

**凍結を利用した伝統的な食糧の保存・貯蔵文化**  
**－自然冷熱エネルギー利用の「フードライフヒストリー」－**  
**Traditional Food Preservation and Cache Using Frozen Environment**  
**- "Food Life History": usage and practices of natural freezing -**

○ 齊藤和之<sup>1,2</sup>, 岩花剛<sup>3</sup>, 久郷洋子<sup>4</sup>, 平澤悠<sup>5</sup>, 立澤史郎<sup>6</sup>  
 Kazuyuki Saito, Go Iwahana, Yoko Kugo, Yu Hirasawa and Shirow Tatsuzawa

### 1. はじめに

温暖化が顕著な北方圏では、凍土融解・乾湿条件などの広範な自然環境変化が現地住民の生活全般に様々な影響を与えているが、自然冷熱エネルギーを利用した凍結貯蔵が機能不全化した実態やその影響の把握、対策は十分に得られていない。そこで発表者らは、この凍結貯蔵文化の変容を、自然科学と人文社会科学の両面から分析し対策を図るために、伝統的生業システムや生態系の健康状態も含めた北方圏における「フードライフヒストリー」(食糧から見た風土・生活史、以下 FLH) という視点を提案し、2020 年度からベリンジヤ地域を主対象として総合地球環境学研究所(京都市)のプロジェクトを開始した。まだ基礎調査の段階だが、ここではその概要と若干の知見を報告したい。

### 2. ベリンジヤと日本

自然・社会双方の環境変化は、凍結貯蔵と FLH に深刻な変容をもたらし、文化継承を困難にする。また凍土圏に限らず、温帯に位置する日本でも自然冷熱エネルギーの利用・活用(例えば、氷室・風穴)に関わる FLH の変化が生じている(表 1)。本プロジェクトでは、当事者である現地住民とともに調査研究を進め、各コミュニティの今後を考えることをめざしており、その第一歩として基礎情報を整理・共有するための公開ワークショップを行った。これは総合地球環境学研究所とオンラインのハイブリッドで、昨年 11 月 12-13 日にアラスカ、シベリア、日本を中継して行なわれた。

### 3. 地下凍結貯蔵から氷室・風穴まで

ワークショップ<sup>1</sup>では、永久凍土帯から季節凍土帯に広がるこれら 3 地域での凍結貯蔵の特徴や現状が報告・共有された。

#### 3.1 永久凍土帯(シベリア、アラスカ)

地下に掘った穴(簡易的なものから建造物まで)を用いた保存・貯蔵が両地域で現在も行なわれており、文化・社会的に重要な要素となっている。温暖化や湿潤化(湛水・浸水)のような自然因、不適切あるいは不十分な管理などの社会因、生態系の変化など複合因によってその使用・継続が困難な地域も存在する。

#### 3.2 季節凍土帯(アラスカ)

地面の窪地で断熱材も用いて季節的あるいは一時的貯蔵庫として利用されたが、今では廃れた地域もある。次世代に継承すべき文化の紐帯として夏期体験教室が企画される地域もある。

#### 3.3 日本

文献等から古来より氷室・雪室は神事または政治的な目的を持って維持・管理されてきたことが窺える。風穴も日本全国に分布し、大正・昭和初期までは養蚕に多く利用された。観光・祭祀・付加価値食糧・遺伝情報保持など一部現在も活用される。

### 4. 今後の見通し

夏季にアラスカとシベリアで、現地住民への質問紙調査を行うとともに、今後の調査(物理観測や生物・化学的分析、聞き取り調査、空中測量など)のための情報収集と準備を行う。発表では、これらの予備的報告もあわせて行いたい。

### 参考文献

- 1) Hirasawa, Y. (ed) 2021. The 1st Workshop on "Food Life History of the North", The RIHN Project team on "Transformation and Heritage of Food Life History of the North under the Global Environmental Change", Yokohama, Japan, p. 10+iv. (<https://www.chikyu.ac.jp/publicity/events/etc/2020/1112-13.html>)

表 1. 各地域における凍結貯蔵の相違点と共通点

凍土状態	永久凍土		季節凍土		
	シベリア	アラスカ	シベリア	アラスカ	日本
地域	シベリア北極海沿岸	ノーススロープ	シベリア南部	アラスカ内陸	各地
代表的 コミュニティ	シベリア内陸	ベーリング海沿岸	Ardan	Iliamna 湖	
主たる形態	地中貯蔵庫 cellar/cache		貯蔵穴 pit		風穴、氷室・雪室
機能・用途	夏季の食料保存 冬季の水・食料貯蔵 発酵、分配・儀礼		季節的貯蔵 一時的保存 発酵		(過去) 献上氷、養蚕 (現在) 祭祀、蚕遺伝保存、 食糧付加価値、観光資源
現状と課題	・機能不全 ・温度上昇、湛水・浸水 ・使用法の継承不全		・冷蔵庫/冷凍庫による不十分な代替 ・伝統的使用の中断 ・世代間理解・文化継承の途絶		・共同体(地域、利益集団)での利用継続
方向性	・機能的な使用方法の継承 ・伝統文化の継承		・需要の喚起 ・担い手の継承		

1 海洋研究開発機構  
 2 総合地球環境学研究所  
 3 アラスカ大学フェアバンクス校国際北極圏研究センター  
 4 アラスカ大学フェアバンクス校北極・北方研究  
 5 東亜大学人間科学部  
 6 北海道大学大学院文学研究院/北極域研究センター

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)  
 Research Institute for Humanity and Nature (RIHN)  
 International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks  
 Arctic and Northern Studies, University of Alaska Fairbanks  
 Faculty of Human Sciences, University of East Asia  
 Humanities and Human Sciences/Arctic Research Center, Hokkaido University  
 ©2021 (公社) 日本雪氷学会

2021年2月にグリーンランドシオラパルクで生じた海氷流出  
—海氷の脆弱性が将来の地域住民の生活に与える影響—  
Unprecedented outflow of the sea ice on 12 February 2021  
in Siorapaluk in the northwestern Greenland  
- Influences of enhancement of fragility of sea ice on life of residents -

○的場澄人<sup>1</sup>, 山崎哲秀<sup>2</sup>, 青木輝夫<sup>3</sup>

Sumito Matoba, Tetsuhide Yamasaki, Teruo Aoki

### 1. はじめに

グリーンランドの北西部にあるカナック地域には、現在4つの集落に約800人が居住している。その中の最北の集落であるシオラパルクの人口は約40人で、成人男子の半分以上は主に狩猟を生業としている猟師であり、それ以外の成人男性もコミュニティーの仕事などをもちながら兼業で猟に携わっている人も多い。シオラパルク前のロバートソン・フィヨルドは、かつては10月～6月上旬まで結氷していたが、近年は11月～5月上旬が結氷期間になっている。結氷期間には海氷上を犬ソリで移動し、アザラシ、ホッキョクウサギ、キツネ、ホッキョククマなどを様々な方法で狩猟している。2000年代以降、フィヨルドの結氷が遅くなったことや、結氷後に成長が遅いためか度々流出することが増えてきている(的場と山崎, 2008)。

2021年2月12日の未明に、シオラパルク前のフィヨルドの海氷が全面的に流出したことが観測された。現地住民のFacebookでも流出後の写真が多く掲載され、現地住民が大きな関心を持っていることが想像できる。

本報告では、2月12日に生じた海氷流出の前後の海氷況、気象状況、流出の直接の要因となった氷床から吹き下ろす強風のメカニズム、この海氷流出が現地住民へ与えた影響を報告し、今後、さらに海氷の脆弱性が高まったときに生じる現地住民の生活への影響について考察した。

### 2. 海氷流出時の気象、海氷況

観測を開始した11月29日の時点では、シオラパルク村の前のフィヨルドは全面結氷しており、シオラパルク村近傍の観測点(北緯77.779度、西経70.607度)の氷厚は0.47m(12月7日)であった。その後、一度も流出することなく、海氷流出直前(2月9日)の氷厚は0.685mであった。この値は、現在の観測点で観測を行った過去4シーズンの中では最も低い。

(19/20:0.855(2/8), 18/19:1.015(2/20), 17/18:0.905(2/6)。村から西に1kmのところ観測している気象データから20/21年は冬の寒暖の繰り返しが多いことと、19/20年には見られる1月下旬から2月上旬にかけての-30度を下回る冷え込みがなかったことが特徴であり、このことが、海氷厚が小さかったことの要因の一つといえる。

2月9日に目視によりグリーンランドの氷床上にて雪煙が確認され、午後10時頃から風速が強まり、強弱を繰り返しながら2月13日の正午頃まで強風が維持された。その間、風向は北～北東であり、氷床からの吹き下ろしの風が常に吹いていたことが分かる(図1)。シオラパルク前の海氷が流出したのは2月12日の未明である。2月13日の午後以降、風速が弱まるとともに、

南西～北西の風が卓越した。その風によって、流された海氷が浮氷となってシオラパルク前に押し戻されてきたのが2月15日に観測された。浮氷間の海面の再凍結が2月18日に観測され、2月21日には海氷厚は0.18mまで成長した。海氷流出の直接的な要因となった、氷床からの強い吹き下ろしの風は、現地ではアバンナツ(ト)とよばれ、生活を営む上で警戒されている。

### 3. 住民生活への影響

20年以上におよぶこれまでの我々の観測および経験上、2月にシオラパルク村前の海氷が全て流出したことは初めてのことである。しかし2000年代以降、12月や1月に海氷が流出することが時々観測されていた。シオラパルク村住民にとっては、冬期に海氷が流出することは珍しいことではなくなっている。そのためか、冬期であっても、普段から犬やソリなどの狩猟道具を海氷上に留め置くことはしておらず、今回も大きな被害は無かった。海氷が流出した後、シオラパルク前のフィヨルドにはセイウチの群れが侵入し、猟師たちは何頭かのセイウチをモーターボートとライフル銃を使って捕獲した。例年秋口に捕獲していたセイウチが今シーズンは少ないために生じていた犬の餌不足が解消された。

本発表では、海氷流出時の気象場や海氷の成長などのデータを元に、長期的な海氷の脆弱性が住民生活に与える影響について、気候変動に伴う狩猟時期の変化、カナック地域の近年の経済状況など社会的な背景を含めて考察する。

### 参考文献

- 1) 的場澄人, 山崎哲秀, 2018: 2016年12月にグリーンランド北西部カナック村で生じた海氷流出事故と漁業被害 —グリーンランド北西部における社会・自然環境と生業の変化—。北海道の雪氷, **37**, 51–54.

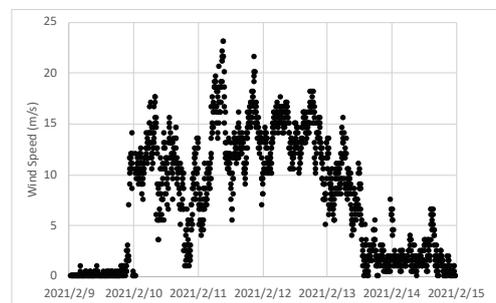


図1 シオラパルクの風速の変化 (2021/2/9～2/15)

1 北海道大学低温科学研究所

2 (一社)アバンナツ北極プロジェクト

3 国立極地研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Avangnaq Arctic Project  
National Institute of Polar Research

## 2020/21 冬季に発生した大雪に対する大気と海洋の温暖化の影響 Impacts of atmospheric and ocean warming on heavy snowfall events in 2020/2021 winter

○川瀬宏明<sup>1</sup>, 今田由紀子<sup>1</sup>, 渡邊俊一<sup>1</sup>, 本田明治<sup>2</sup>, 山崎哲<sup>3</sup>  
Hiroaki Kawase, Yukiko Imada, Shun-ichi Watanabe, Meiji Honda, and Akira Yamazaki

### 1. はじめに

2020年12月中旬, 新潟県中越から群馬県北部にかけて大雪となり, 関越自動車道などが通行止めになった。群馬県みなかみ町藤原では48時間降雪量が199センチを観測し, 観測史上1位の値を更新した。一方, 2021年1月上旬は富山県の平野部や新潟県上越の平野部が大雪に見舞われ, 72時間降雪量が新潟県上越市高田で187センチ, 富山市富山でも120センチを観測し, いずれも観測史上1位の値を更新した。北陸地方の大雪のパターンには山雪型と里雪型があることが知られている(例えば, Akiyama 1981)。今回の大雪は, 12月の事例が山沿いで降雪量が多い山雪型, 1月の事例が沿岸部や平野部で降雪量が多い里雪型であったとみられる。また, 1月事例は日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)が明瞭に見られたことから, JPCZに伴う大雪であったと考えられる。

一方, 地球温暖化の進行に伴い, 長期的な気温や海面水温の上昇が観測されている。今回の2度の大雪はこのような気候変化の中で発生した。過去の研究から地球温暖化に伴い, ひと冬に降る雪の総量は減少するが, 本州の内陸や北海道では, 厳冬期の最大日降雪量は増加する可能性も指摘されている(例えば, Kawase et al. 2020)。ただ, 今回発生した大雪に地球温暖化がどの程度影響したのかは, まだ評価されていない。本研究では, 2020年12月14日から17日(以後, CASE1)と2021年1月7日から11日(以後, CASE2)の2期間の大雪を対象とし, 工業化以降の気温及び海面水温の上昇が及ぼした影響を調査した。

### 2. 方法

#### 2.1 再現実験 (CTL)

気象庁非静力学モデル (JMA-NHM; Saito et al. 2007) を用いて2つの大雪事例の再現計算を行った。側面境界値には気象庁メソ客観解析 (MA), 海面水温 (SST) には HIMSST を使用した。格子間隔は外側が 5km, 内側が 2km である。5km 計算の初期値には, 12月11日 (CASE1) と1月5日 (CASE2) のそれぞれ 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18Z の7時刻を用いた。2km 計算は, 7つの5km 計算をもとに12月13日 00Z (CASE1) と1月7日 (CASE2) 00Z を初期時刻として実施した。

#### 2.2 気温上昇除去実験 (NonW)

工業化以降の気温上昇を算出には, 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF) を延長した過去実験と非温暖化実験を用いた。2010-2019年の100メンバーを用いて, 日本周辺 (120E-150E, 27.5N-47.5N) で平均した12月と1月の気温 (気圧面) 及び SST の変化を計算した。工業化以降の変化を MA から除去した境界値データを作成し, 再度, JMA-NHM を用いて2つの大雪事例を計算した。

### 3. 結果

CTL は山雪型の CASE1, JPCZ に伴う里雪型の CASE2 の降雪

分布をよく再現した (図1)。CASE1 では日本海から日本海沿岸部にかけて, 気温上昇に伴い降雪量が大幅に減少したが, 新潟県から群馬県にかけての山沿いでは, 降雪量の増加が見られた。一方, CASE2 では, 日本海の一部で減少が見られるものの, 北陸地方の沿岸部, 内陸とともに増加する傾向が見られた。降水量は CASE1, CASE2 のいずれにおいても増加した。CASE2 は CASE1 より気温が低かったため, 地球温暖化の影響を含む CTL においても, 降水量の増加が降雪量の増加につながったとみられる。

さらに, 気温と SST をそれぞれ個別に変えた実験を実施したところ, SST だけが上昇した場合は降水量が大きく増加し, 広範囲で降雪量も増加する一方, 気温だけが上がると, 大気の安定度が増し, 降水量が減少した。その結果, 降雪量はほぼ全域で大きく減少した。地球温暖化が進む中で季節進行や年々変動等の兼ね合いで SST が高い状況になると, 大雪の可能性が増すことが分かった。

### 参考文献

- 1) Akiyama, T., 1981: Time and spatial variations of heavy snowfalls in the Japan Sea coastal region part I. Principal time and space variations of precipitation described by EOF, *J. Meteor. Soc. Japan*, **59**, 591-601.
- 2) Kawase, H., et al., 2020: Regional characteristics of future changes in snowfall in Japan under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios, *SOLA*, **17**, 1-7.
- 3) Saito, K. et al., 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **85B**, 271-304.

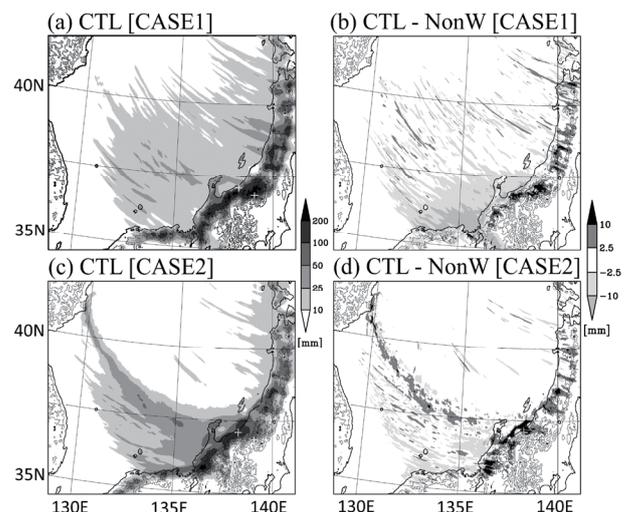


図1 モデルで再現された96時間積算降雪量と気温とSST上昇による変化。(上) CASE1, (下) CASE2。(左) CTLの結果, (右) CTLとNonWの差。+は高田(沿岸)と藤原(内陸)を示す。

1 気象庁気象研究所

2 新潟大学理学部

3 海洋研究開発機構アプリケーションラボ

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Faculty of Science, Niigata University

Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

## 2020/21 年冬季の日本海側の大雪にかかわる上空寒気の振る舞い Behaviors of Upper Cold Air associated with Heavy Snowfall Events along the Japan Sea Coast during 2020/21 Winter

○本田明治<sup>1,2</sup>, 川瀬宏明<sup>3</sup>, 山崎哲<sup>4</sup>  
Meiji Honda, Hiroaki Kawase, and Akira Yamazaki

### 1. はじめに

2020/21 年冬季は一冬を通してみると北日本はほぼ平年並だったが、東日本以西は高温傾向であった。降水量は日本海側で全般に多かったものの、降雪量は平年並かやや少なかった。一方最深積雪は各地で集中降雪が発生した本州日本海側では平年の倍を超える地点も多かった。この冬の特徴は、前半と後半で大きく北半球の大気循環場の状況が異なっていたことで、前半が全国的に低温・日本海側を中心に大雪に見舞われたが、後半は全国的に高温少雪となった。

日本海側を中心に大雪となった冬の前半は、ユーラシア大陸上の亜寒帯ジェットのスナップショットが顕著で、西シベリア上空にブロッキング高気圧が発生し、下流にあたる日本付近にかけて南に蛇行して寒気が流れ込みやすくなった。特に強い寒気が流れ込んだタイミングで、日本海側各地でしばしば集中降雪に見舞われた。特に12月中旬から1月中旬にかけては、全国的にしばしば寒気が入り、12月中旬は山沿いで、1月上旬は海岸平野部で集中降雪となったところが多く、各地の交通網に多くの影響が出た。本研究ではこの2回の集中降雪をもたらしたと考えられる上空寒気の振る舞いに着目する。

### 2. 2020 年 12 月中旬の大雪事例

12月15日～17日を中心に東北南部～北陸信越の山沿いを中心に各地で大雪に見舞われた。特に新潟県～栃木県県境一帯を中心に48時間降雪量が150～200センチに達する大雪となり、関越道で約1000台が立往生する事態を招いた。日本付近の天気図をみると等圧線の間隔が狭くほぼ南北に走る典型的な山雪型の気圧配置を示していた。図1上の実線は12月16日9時の対流圏上空200hPa面の高度分布である。シベリア沿岸につながる上空の気圧の谷が袋状にオホーツク海上に延びており北極起源の寒気が示唆される。図1上に示されているその他の量は最近提唱された寒冷渦指標 (Kasuga et al. 2021, MWR) である。寒冷渦は偏西風の蛇行に伴って低緯度側に張り出した寒気が切離されて形成される、対流圏上空を中心とした寒気を伴う低気圧である。本指標の特徴は気圧面高度場のスナップショットから、寒冷渦の中心位置 (丸)、影響半径 (円)、強度 (グレースケール) の3要素を出力できることである。この指標によると寒冷渦の中心は北海道付近にあり、オホーツク海から日本列島全体がその影響下にあることが分かる。寒冷渦は数日及び数百kmの時空間スケールを持ち、動きが遅く停滞しやすいのが特徴である。この時も13日～18日までこの寒冷渦の影響下にあった (図略)。

### 3. 2021 年 1 月上旬の大雪事例

1月8日～11日にかけては東北～北陸の海外平野部を中心に大雪となった。特に新潟県上越地域を中心に集中降雪に見舞われ、高田では24時間降雪量103センチを記録し、最深積雪も11日に249センチを記録した。図1下からは200hPa高度場でオホーツク海を中心に高度極小が見られる。一方寒冷渦指標ではそ

の中心は日本海上にあり、高度極小の500km以上南に上空寒気を中心が位置したことが示唆される。地上天気図をみると日本海上で等圧線の間隔が緩む里雪型であったが、寒冷渦を伴う上空寒気の影響で海外平野部の各地で大雪になったと考えられる。この時も7日～12日までこの寒冷渦の影響下にあった (図略)。

### 4. まとめ

2020/21 年冬季の大雪2事例について、新しく提唱された寒冷渦指標で評価したところ、両事例とも寒冷渦が上空に停滞しており、上空寒気を中心位置を明瞭に特定することができた。当日は2017/18 冬季の大雪事例に適用した結果も紹介する予定で、寒冷渦の振る舞いと大雪の定量的な関係性を評価していきたい。

本研究は、科学研究費補助金17H02067及び19H05698、国立極地研究所一般共同研究、新潟大学災害・復興科学研究所共同研究、ArCSII 北極域加速研究プロジェクトの助成を受けています。

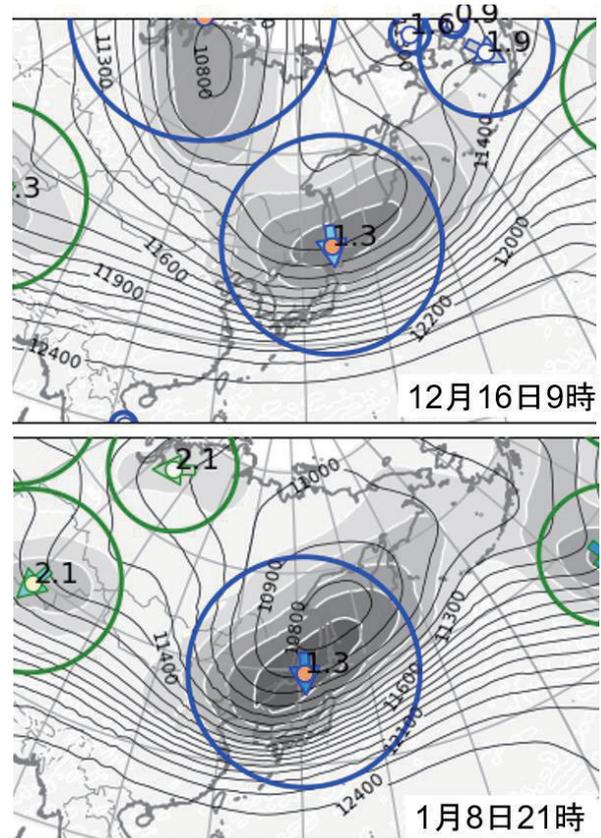


図1. (上) 2020年12月16日9時における200 hPa等圧面高度 (m: 実線)、寒冷渦指標 (○丸: 寒冷渦の中心位置、円: 寒冷渦の影響範囲、グレースケール: 寒冷渦の強度) (m/100 km) (等圧面の凹みの程度を平均勾配関数として評価した量でその種大値が寒冷渦中心)、矢印: 背景基本場勾配の方向、寒冷渦中心近傍の数値: 勾配比 (背景基本場勾配/平均関数勾配)、寒冷渦の目安は勾配比<1.3)。 (下) (上)と同じ、但し2021年1月8日21時。

1 新潟大学理学部  
2 新潟大学災害・復興科学研究所  
3 気象庁気象研究所  
4 海洋研究開発機構

Faculty of Science, Niigata University  
Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University  
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency  
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
©2021 (公社) 日本雪氷学会

## 日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) の理想化実験

## Idealized Numerical Experiment on the Japan Sea Polar Airmass Convergence Zone

○渡邊俊一<sup>1</sup>, 新野宏<sup>2</sup>, Thomas Spengler<sup>3</sup>  
Shun-ichi Watanabe, Hiroshi Niino and Thomas Spengler

## 1. はじめに

冬季の日本海上ではユーラシア大陸からの寒気が吹き出す際に、日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) と呼ばれる収束帯が形成される (浅井 1988)。JPCZ に伴う活発な対流雲による降雪は、しばしば北陸地方の豪雪の原因となる。JPCZ の形成メカニズムとしては、朝鮮半島北方の山岳による寒気のプロック、朝鮮半島と日本海の高陸熱コントラスト、日本海の南北温度勾配などの効果が指摘されてきた (Nagata et al. 1986, Nagata 1991)。この結果は、JPCZ の形成に海面からの熱・水蒸気フラックスが重要であることを示唆しているが、海面フラックスの効果はあまり調べられていない。また、JPCZ の北側と南側にはそれぞれ季節風の風向に直交する筋状雲 (T モード) と平行な筋状雲 (L モード) が見られ、いずれも鉛直シアに平行なロール状対流と考えられている (Eito et al. 2010)。しかし、南北非対称な鉛直シアの形成要因は明らかにされていない。そこで本研究では、理想化実験を行うことで、JPCZ の構造と形成メカニズムを調べた。

## 2. 実験設定

理想化実験に用いた数値モデルは気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) である。計算領域は東西 3000km、南北 2000km で水平解像度は 2.5km と 5km の 2 種類の実験を行った。東西の境界は開放条件、南北の境界は摩擦のない断熱壁とした。乱流クロージャーモデルには MYNN モデル (Level3) を用い、水平解像度 5km の実験では積雲パラメタリゼーションとして KF スキームを用いた。

JPCZ 再現のため、日本海の北西の海岸線を V 字型に単純化し、西側の陸地に標高 2000m のベル型の山を置いた。海面水温は一律に 10°C、コリオリパラメータは北緯 40 度の値を用いた。このような環境に、一様な鉛直成層をした 10m s<sup>-1</sup> の西風を与えた。以上のような実験設定で 120 時間の積分を行った。また、感度実験として山岳を取り除いた実験 (NoMt)、海岸線を直線にした実験 (Straight)、山岳を取り除き、海岸線を直線にした実験 (NoMt\_Straight) 海面からの Flux を取り除いた実験 (NoFlux) を行った。

## 3. 結果

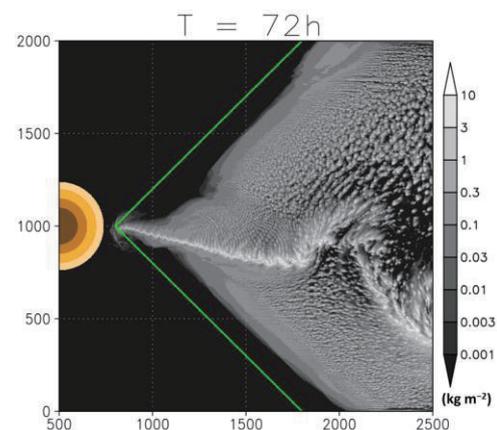
図 1 に水平解像度 2.5km の実験における計算開始 72 時間後の鉛直積算凝結水物質質量を示す。山岳の風下側に明瞭な帯状雲が形成された。その北側では南西-北東方向の走向を持つ筋状雲が見られ、南側には東西方向の走向を持つ筋状雲がみられる。これらの特徴は現実の JPCZ とよく類似している。水平解像度 5km の実験では、解像度が不十分なため筋状雲は再現できなかったが、JPCZ そのものや、南北非対称な鉛直シアの構造は見られたため、以降では 5km 解像度実験の結果を解析する。下層の温位分布をみると、海上の中央部に暖域が形成されており、その

暖域が低圧部に対応している (図略)。この低圧部と基本場の南北気圧勾配の重ね合わせにより、北側では南北方向、南側では東西方向の等圧線がみられ、その間に生ずるトラフが収束線に対応している。また、温度風平衡により、北側では南北風の、南側では東西風のシアが強まっている。

感度実験のうち NoMt、Straight では収束線が形成されたが、NoMt\_Straight、NoFlux では形成されなかった。このことから、JPCZ の形成には、地形と海面フラックスの両方が必要であることが分かる。後方流跡線解析を行ったところ、山岳や海岸線の形状によって吹走距離の差が生じ、それにより領域の中央に流入する粒子と外側の粒子の間で海面フラックスによる加熱の差が生じ、領域中央に暖域が形成されることで収束線が形成されることが分かった。

## 参考文献

- 1) 浅井富雄, 1988: 日本海豪雪の中規模の様相. 天気, **35**(3), 156–161.
- 2) Nagata, M., M. Ikawa, S. Yoshizumi, and T. Yoshida, 1986: On the formation of a convergent cloud band over the Japan Sea in winter; numerical experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 841–855.
- 3) Nagata, M., 1991: Further numerical study on the formation of the convergent cloud band over the Japan Sea in winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 419–428.
- 4) Nagata, M., 1991: Further numerical study on the formation of the convergent cloud band over the Japan Sea in winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 419–428.
- 5) Eito, H., M. Murakami, C. Muroi, T. Kato, S. Hayashi, H. Kuroiwa, and M. Yoshizaki. 2010: The structure and formation mechanism of transversal cloud bands associated with the Japan-Sea Polar-Airmass Convergence Zone. *J. Meteor. Soc. Japan*, **88**, 625–648.

図 1 計算開始 72 時間後の鉛直積算凝結水物質質量 (kg m<sup>-2</sup>)。

1 気象庁気象研究所  
2 東京大学大気海洋研究所  
3 ベルゲン大学

Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency  
Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo  
University of Bergen

## 2020-2021 年冬期の岩見沢の積雪観測の特徴と大雪をもたらした気象パターン Observational Features of Snow Cover in Iwamizawa and Heavy Snowfalls in 2020-2021 Winter

○尾関俊浩<sup>1</sup>, 白川龍生<sup>2</sup>, 金田安弘<sup>3</sup>, 松岡直基<sup>4</sup>

Toshihiro Ozeki, Tatsuo Shirakawa, Yasuhiro Kaneda and Naoki Matsuoka

### 1. はじめに

今冬, 岩見沢市とその周辺市町村は大雪に見舞われた. 岩見沢では 9 年前の 2011-2012 冬期に観測史上第 1 位の最深積雪 208cm を記録しているが, 今冬のも最深積雪は 205cm (2/25) でそれに匹敵する大雪であった (図 1). このため岩見沢では大雪による家屋の倒壊や雪下ろし事故が多発し, 道路交通網の麻痺や鉄道の運休が相次ぐなど地域経済や市民生活に大きな影響が生じた.

2011-2012 年の豪雪災害時には, 雪氷学会北海道支部が雪氷災害調査チームを組織し, 岩見沢を中心とした石狩・空知地方および北海道全域で詳細な積雪調査を行っている<sup>1)2)3)</sup>. 我々は 2021 年 2 月・3 月に岩見沢において複数回の積雪観測を行い, 2011-2012 年冬期の積雪調査と比較し考察することとした. さらに, 北海道の今冬の降雪を概観し, 北海道の今冬の降積雪の特徴とその背景となった気象パターンを調査した.

### 2. 調査結果

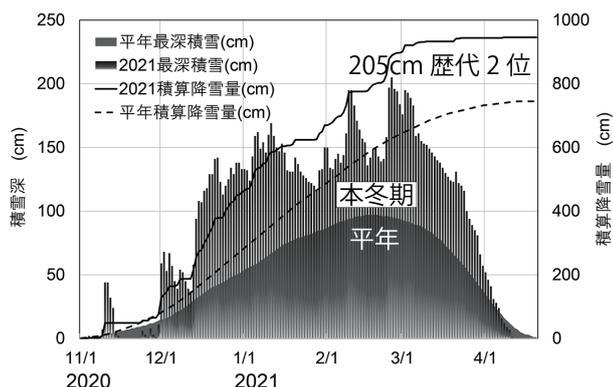


図 1 今冬の岩見沢の積雪深と積算降雪量 (岩見沢 AMeDAS).



図 2 融雪による道路の冠水. 左は除雪で堆く積もった雪壁.  
2021 年 2 月 28 日, 岩見沢市大和.

### 2.1 今冬の北海道の降雪の特徴

今冬における北海道 14 振興局の代表地点の冬期積算降雪量を調べたところ, 全道的に平年 (1981-2010 年の 30 年平均) を下回る降雪量であり, 岩見沢だけが大きく (図 1: 平年より 193cm 多い) 上回っていた. これは 2011-2012 冬期に匹敵する量であった. 上空 850 hPa の今冬の風向を調べると西北西の風向が卓越しており, 石狩湾から岩見沢付近に雪雲が入り易い傾向が見られた. また同じ様な寒気場での同じ様な雪パターンの日が多かったことも, 岩見沢に大雪が集中した背景と言える. なお, 今冬は太平洋側に大雪をもたらす顕著な低気圧が少なかったことも, 北海道全域で降雪が平年を下回る地点が多かったことにつながると言える.

### 2.2 2011-2012 冬期と今冬の気象および積雪の違い

2011-2012 冬期と今冬の岩見沢の気温を比較したところ, 2011-2012 冬期は平年より気温が全般に低かったのに対し, 今冬は気温の変動が大きく, 1 月中旬以降は平年より高い日が多い違いが見られた. 2 月中旬の積雪観測では降雨に見舞われ, 2 月末の観測では融雪による道路の冠水が発生するなど, 寒冷だった 2011-2012 冬期との違いが見られた. これを反映して積雪調査の結果では, 積雪水量は同程度だが, 2011-2012 冬期はしまり雪が大半を占めていたのに対し, 今冬は融解再凍結によるざらめ雪が多くなっていた.

### 3. まとめ

今冬の岩見沢は最大積雪深歴代 2 位の 205cm を記録する大雪であり, 累積降雪量, 積雪水量とも 2011-2012 冬期に匹敵する量であった. 一方, 気温は 2011-2012 冬期が寒冷だったのに対し, 今冬後半は平年より高かった. その結果として雪質の違いが観測された. 道内データを見ると降雪の偏りがあり, 岩見沢周辺のみが大雪であった. これは西寄りの風が継続し雪雲を岩見沢に運んだことによる.

### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 18K02929 の助成を受けた.

### 参考文献

- 1) 金田安弘, 永田泰浩, 丹治和博, 松岡直基, 尾関俊浩, 2012: 2011-2012 年冬期に北海道岩見沢市を中心として発生した大雪について (その 1) - 大雪の概要と気象の特徴 -. 北海道の雪氷, **31**, 115-118.
- 2) 尾関俊浩, ほか 12 名, 2012: 2011-2012 年冬期に北海道岩見沢市を中心として発生した大雪について (その 3) - 空知・石狩の積雪調査 -. 北海道の雪氷, **31**, 123-126.
- 3) 白川龍生, ヌアスムグリ アリマス, 八久保晶弘, 荒川逸人, 野口泉, 尾関俊浩, 中村一樹, 2012: 2011-2012 年冬期に北海道岩見沢市を中心として発生した大雪について (その 4) - 広域積雪調査 -. 北海道の雪氷, **31**, 127-130.

1 北海道教育大学札幌校  
2 北見工業大学  
3 北海道開発技術センター  
4 北海道気象技術センター

Hokkaido University of Education Sapporo  
Kitami Institute of Technology  
Hokkaido Development Engineering Center  
Hokkaido Weather Technology Center

## 対馬暖流が岩見沢の大雪に与える影響 Heavy snowfall at Iwamizawa influenced by warm Tsushima current

○佐藤和敏<sup>1</sup>, 亀田貴雄<sup>1</sup>

Kazutoshi Sato and Takao Kameda

### 1. はじめに

特別豪雪地帯である北海道岩見沢市では、風上に位置するシベリア大陸の山脈の影響を受けて形成された降雪バンドにより、記録的降雪が発生すると報告されている。冬の日本海地域の降雪は、一般的にシベリア大陸からの寒気流入時に比較的暖かい日本海上で発達した対流性雲が流入することで引き起こされるため、日本海の水温や日本海を流れる対馬暖流との関係性が指摘されている。そのため、岩見沢の降雪量は、雲バンドの形成だけでなく、日本海の水温の影響も受けていることが示唆される。

しかし、これまでの研究では、岩見沢の大雪と日本海の水温や対馬暖流との関係について十分に議論されていない。そこで本研究では、再解析データを用いて、岩見沢で12月に大雪が発生する年の大気場や海洋場の特徴を調べた。

### 2. 再解析データと解析手法

この研究では、アメリカ海洋大気庁が提供している再解析データ CFSR の月平均データを使用した。この再解析データは、大気の大気データだけでなく、海洋の水温や流速などの鉛直データも提供されている。また、岩見沢市での大雪が降った年を選定するため、岩見沢のアメダスで取得されている月降雪量データを使用した。

岩見沢で大雪が発生する年の大気場や海洋場を調べるため、冬(12~2月)の各月に対し、岩見沢の月降雪量偏差の時系列から一定の標準偏差を超える年を多雪年と少雪年と定義し、それぞれの月の多・少雪年の平均場の差を見るコンポジット解析を実施した。

### 3. 結果

図1は、950hPaの気温(T950)と300hPaの高度場(Z300)の12月の多雪年と少雪年の偏差を示している。日本付近では西太平洋パターンのような高度場偏差が見られており、大陸から日本への寒気移流偏差によりシベリア大陸から北日本では低温偏差となっていた。そのため、岩見沢で大雪になる年は、シベリア大陸からの寒気流入が強まる冬型の気圧配置の大気場偏差となっており、先行研究の結果と一致している。

次に、多雪年と少雪年の海面表層(深度5m)の水温と海流速度の偏差を調べた。12月の表層水温和、大陸からの寒気流入に伴い海洋から熱が放出されるため、明瞭な水温和偏差は見られなかった。一方、大雪となる1~2ヶ月前(10~11月)の表層水温和、北海道西部沖が高水温偏差になっていた(図2)。また、表層の海流速度は、南からの流速偏差が明瞭に見られており、対馬暖流が強いことを示唆している。そのため、12月の多雪年は、1~2ヶ月前に対馬暖流が強くなることで北海道西部の表層水温和高くなり、寒気流入時に海洋からの熱・水蒸気供給量が増加することで降雪量が増加していることがわかった。

### 4. まとめ

これらのコンポジット解析の結果から、12月の多雪年は、1~2ヶ月前に対馬暖流が強くなり、北海道西部の表層水温和高くなる傾

向にあることがわかった。そのため、岩見沢での12月の多雪年の予測可能性が示された。しかし、岩見沢の月降雪量と北海道西部の表層水温和の相関関の結果から、統計的に有意な正の相関関係にあるが、相関係数はあまり高くない(約0.35)。これは、北海道西部沖の水温和以外にも岩見沢の大雪に寄与している要素があることを示唆している。

他の月のコンポジット解析の結果から、他の月も多雪年は太平洋パターンのような高度場偏差が見られることがわかった。一方、海洋場偏差については、1月の多雪年には1~2ヶ月前に北海道西部の上流である大陸沿岸で水温和が高くなっていたが、2月の多雪年は1~2ヶ月前に日本海の水温和や海流に明瞭な偏差は見られなかった。これらの結果から、2月の岩見沢の大雪は、北海道周辺での水温和の影響が小さいことが示唆された。

T950 &amp; Z300 in DEC (Heavy - light snowfall years)

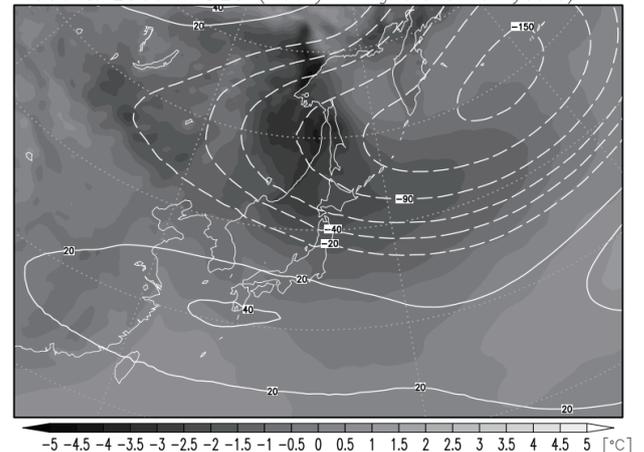


図1 12月の950hPaの気温(T950: °C)と300hPaの高度場(Z300: m)偏差(多雪年-少雪年)

Ocean temp. &amp; current (@5m depth) (Heavy - light snowfall DECs)

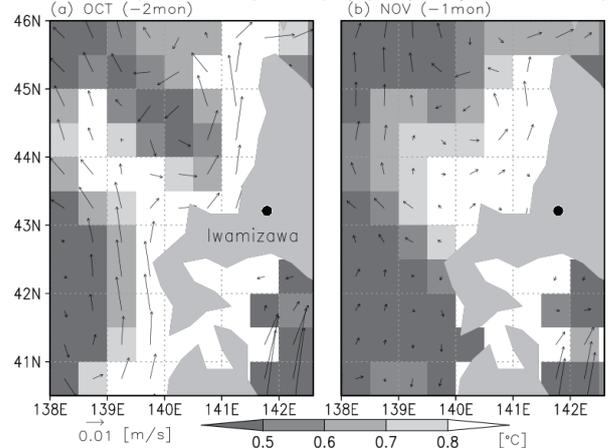


図2 (a)10月と11月の5m表層の水温和流速(m/s)の偏差(12月多雪年-12月少雪年)

1 北見工業大学工学部地球環境工学科

School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

## 2018年寒波を誘発したアラスカ沖の北極海の海水激減の影響は特殊事例だったのか？ Pacific Arctic sea-ice reduction forces mid-latitude Northern Hemisphere cooling

○立花義裕<sup>1</sup>, 太田圭祐<sup>1</sup>, 安藤雄太<sup>2</sup>,  
Yoshihiro Tachibana, Keisui Ota and Yuta Ando

### 1. はじめに

2017-18冬は、32年ぶりの記録的寒波年となり、北陸は記録的豪雪年となった。この年の北極振動指数は長期に亘り「負」の状態が続き、北極域の対流圏上層気温も史上最高となった。偏西風は大きく蛇行し、時には対流圏の極渦が分裂し、分裂した二つの「極渦」が東アジアと北米に移動することで寒気が両地域に居座り、この蛇行が日本に32年ぶりの記録的寒波と豪雪をもたらした。

### 2. 既存の説だけでは2018年寒波は説明できない

この年はラニーニャであった。ラニーニャ年は日本に寒波が襲来しやすいが、ラニーニャは約4年に一度程度発生することと、この年のラニーニャは弱めであったことから、ラニーニャだけでは大寒波は説明できない。一方、近年の厳冬頻発の一因として、バレンツ海の海水減少の影響が知られている(例 Honda et al.(2009)<sup>[1]</sup>)。バレンツ海の海水減少は約15年前頃から始まっているが、2017-18年のバレンツ海の海水は近年の中では多い方であった。従って、この海域の海水現象でも、32年ぶりの大寒波を説明できない。

太平洋セクターのチュクチ海の海水には数年前までは激減シグナルは無かった。ところが数年前にチュクチ海の海水の激減が始まり、2017-18冬にチュクチ海水は観測史上最少を記録した。

### 3. 新説(熱源のチュクチ海と冷源のベーリング海)

我々はチュクチ海の氷激減を暖穴(warm hole)と命名し、これを起因として日本と北米に寒波をもたらしたことを主にデータ解析により示した(Tachibana et al., 2019<sup>[2]</sup>)。

以下、Tachibana et al., 2019<sup>[2]</sup>が提起した説を記述する。チュクチ海の海水の激減に伴う海水の穴(warm hole)は太平洋からの atmospheric rivers の極域への流入を促進し、この暖湿な atmospheric rivers は北極域での upglide に伴い、北極上空をさらに暖めることが期待される<sup>[3]</sup>。よって、アラスカの北の上空大気は異常に暖かくなった。寒気と暖気の境界で吹く偏西風は、暖かい円柱部を避けるように迂回させられ、北極点近くまで侵入した。偏西風の北極への侵入の反動で、北極寒気を東西に引き裂き東アジアと北米方向に寒気が分裂し押し出され、両地域に寒波をもたらした。

Warm holeは大気・海洋・海水の正のフィードバックにより self-sustainable である。ベーリング海・チュクチ海共に海水が消えたことから、atmospheric rivers に伴う極向きの風応力が海洋に直接作用する。従って太平洋の暖水の北極海への流入を促す(図の上部の右向き矢印)。またベーリング海では、atmospheric rivers から海洋に熱を付加的に供給する(図の下向き矢印)。従って風応力により促進させられた海流による極向きの熱輸送量も増大する。

さらに warm hole 上では海から大気へ向かって熱が供給される(図の上向き矢印)。これら海洋・大気双方による極向きの熱輸送の増大により対流圏大気の異常高温も持続される。図に示すような、「ベーリング海では大気→海洋へ」、逆に「チュクチ海では

海洋→大気へ」熱が供給される。つまり大気にとって、北のチュクチ海が熱源で、南のベーリング海が熱源となる。従って、南北に熱源と冷源のダイポールが存在することと等価である。我々は、線形大気モデルに熱源南北ダイポールを附加させ、大気場の応答を調べた。その結果、図の模式図(下)のような「観測」された大気場をほぼ再現できることが示された。北の熱源または南の熱源のみでの再現性が低いことも示されたことから、南北の熱源冷源のペア(ダイポール)の存在が重要である。

次に、我々は、バレンツ海の海水指数、チュクチ海の海水指数、そしてラニーニャ指数を定め、これら3変数を予報変数と定め、寒波の強さを予測値(応答)として、重回帰解析を行うことで、2017-18年の寒波に対して、どの指数が dominant であるか、さらにおおの指標の寄与率を調査するとともに、他の代表的な寒波年に対する各々の指標の寄与率も調べた。その結果、チュクチ海が dominant に効いた年は、2017-18年のみであった。この重回帰手法は2021年豪雪にも適用可能である。

### 参考文献

- 1) Honda, M., Inoue, J. & Yamane (2009), S. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.* **36**, <https://doi.org/10.1029/2008GL037079>
- 2) Tachibana, Y., K. K. Komatsu, V. A. Alexeev, L. Cai, and Y. Ando, (2019), Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017-18, *Scientific Reports*, **9**, 5567, DOI: 10.1038/s41598-019-41682-4
- 3) Komatsu K. K., V. A. Alexeev, I. A. Repina, and Y. Tachibana (2018), Poleward upgliding Siberian atmospheric rivers over sea ice heat up Arctic upper air, *Scientific Reports*, **8**, 2872, doi:10.1038/s41598-018-21159-6

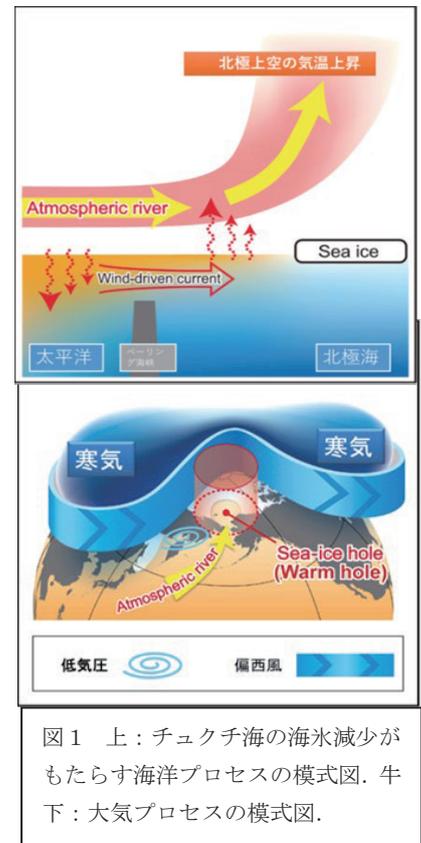


図1 上: チュクチ海の海水減少がもたらす海洋プロセスの模式図. 下: 大気プロセスの模式図.

1 三重大学大学院 生物資源学研究所  
2 新潟大学理学部

Graduate School of Bioresources, Mie University  
Department of Science, Niigata University

# 南岸低気圧による首都圏の降雪における降雪結晶特性と大気環境場 Characteristics of Snow Crystals and Atmospheric Environments during Snowfalls Associated with South-Coast Cyclones in the Metropolitan Area in Japan

荒木健太郎<sup>1</sup>  
Kentaro Araki

## 1. はじめに

冬季には南岸低気圧によって首都圏で降雪がもたらされるが、その降雪結晶特性は観測例が少なく未知が多い。降雪結晶のうち、特に交差角板状・砲弾状などの $-20^{\circ}\text{C}$ 以下の環境で成長する低温型結晶などは安息角が小さく表層雪崩発生の要因になることがあり、雪氷災害や降雪現象の実態解明の観点で降雪結晶の特性やその大気環境場を理解することが必要である。本研究では、南岸低気圧による降雪時の降雪結晶特性と大気環境場の関係を明らかにすることを目的に、茨城県つくば市における2016～2019年冬季の降雪結晶観測データをもとに解析を行った。

## 2. 降雪結晶の特性

解析には気象研究所「#関東雪結晶プロジェクト」(荒木, 2018)で得られたつくば市内の降雪結晶観測データを用いる。2016～2019年冬季の南岸低気圧に伴う降雪事例(9事例)で、降雪結晶の画像データをもとに1時間毎に雪結晶を分類した(全76時間)。分類は成長環境場を考慮し、樹枝状(複合板状含む)、角板状、交差角板状、砲弾状、角柱状(鼓状含む)、針状、雲粒付、霰、その他(凍雨など)の9種類とした。

その結果、樹枝状(86%)、雲粒付(76%)、角柱状(50%)などの降雪結晶が観測され、他についても20～30%の頻度で見られた(図1)。一方、個々の事例を確認すると、交差角板状と砲弾状は概ね同時に観測されているものの、全く観測されない事例が半数ほどあった。交差角板状・砲弾状の観測の有無で低気圧A(4事例37時間)・B(5事例39時間)に分類したところ、Aでは角柱状・樹枝状・交差角板状・雲粒付がいずれも頻度60%以上であったのに対し、Bではほとんどが樹枝状・雲粒付であり、他の結晶は少ないという特徴があった。

## 3. 降雪結晶と大気環境場との関係

低気圧A・Bを地上天気図で確認したところ、Aは前線を伴う温帯低気圧(降雪終了直後に温帯低気圧として解析された1事例含む)、Bは前線を伴わない低気圧と、明瞭な違いがあった。

低気圧毎の降雪結晶の特性と大気環境場を把握するため、ひまわり8号赤外(B13, 2.5分毎)データから、つくばを中心とした約22km四方で領域平均した前1時間平均の雲頂温度を1時間毎に求めた。その結果、低気圧毎に平均した雲頂温度は、低気圧Aでは $-30.4^{\circ}\text{C}$ 、Bでは $-17.0^{\circ}\text{C}$ で、有意水準5%のt検定で有意な差が見られた。これは、温帯低気圧を主とする低気圧Aは背の高い雲構造を持っており、前線構造を持たない低気圧Bは逆に背の低い雲構造を持っていることを意味している。このような雲構造の違いにより、交差角板状・砲弾状などの低温型結晶が低気圧Aでのみ観測されたと考えられる。

気象庁局地解析(1時間毎)を用いて、低気圧A・Bについて上記と同じ領域で平均した気温・水蒸気密度・水蒸気フラックス量の鉛直分布を比較した。その結果、低気圧AではBに比べて850～400hPaで気温が $1\sim 5^{\circ}\text{C}$ ほど高く、これは有意水準5%のt検定でも有意な差だった(図2左)。水蒸気密度は低気圧Aのほ

うがBに比べて850hPaより上空で最大 $0.7\text{ g m}^{-3}$ ほど有意に大きく(図略)、水蒸気フラックス量も下層から上層まで最大 $20\text{ g m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ほど有意に大きかった(図2右)。これは、低気圧AではBに比べて境界層よりも上空での暖気移流が強く、かつ下層から上層まで水蒸気供給の盛んな環境であることを意味している。このことは、温帯低気圧に伴う前線・気流構造を持つ低気圧Aにおける、温暖コンベヤーベルトが影響していることが示唆され、このような高温高湿な環境で針状の降雪結晶が多く成長したと考えられる。

本研究では、南岸低気圧による首都圏の降雪について、低気圧構造の違いで降雪結晶の特性が異なるということが明らかになった。つまり、同じ降雪量が予想されている大雪であっても、背の高い低気圧による大雪では低温型結晶による表層雪崩のリスクが高い可能性を示唆している。今後は空間的にどのような降雪結晶の特性があるのかを調べる予定である。

## 参考文献

1) 荒木健太郎, 2018: シチズンサイエンスによる超高密度雪結晶観測「#関東雪結晶プロジェクト」。雪氷, **80**, 115–129.

謝辞 本研究はJSPS科研費「20K14557」を受けています。

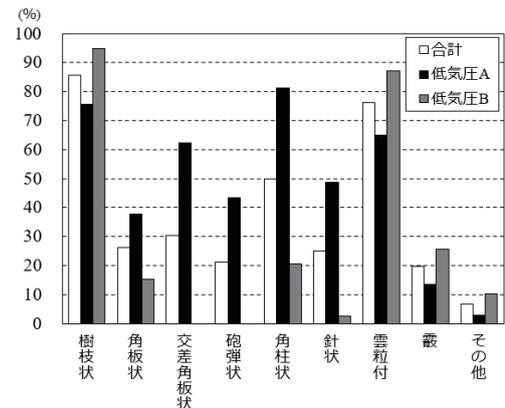


図1 降雪結晶の頻度

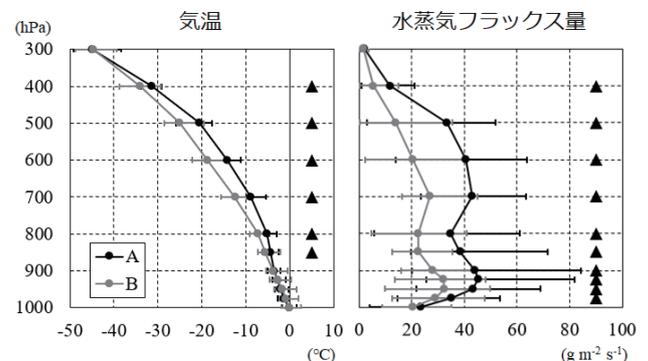


図2 つくばにおける降雪時の気温(左)、水蒸気フラックス量(右)の平均値の鉛直分布。各高度の横棒は最大値・最小値を示す。▲は低気圧A、Bで有意に差があることを示す。

## 2019/2020 冬季に秋田県内陸部で発生した着氷性降水の事例

— 雨氷災害に着目して —

## A case study of freezing precipitation in the inland of Akita Prefecture in the winter of 2019-2020

: Focusing glaze disasters

○鳥潟幸男<sup>1</sup>

Yukio Torigata

## 1. はじめに

着氷性の雨 (freezing rain) は、0°Cより低温の雨のことであり、地面や地物又は飛行中の航空機に当たって着氷 (水と0°Cの氷の混在) を起こす<sup>1)</sup>。この着氷性の降水が発生する気象条件は、上空に降雪粒子を融解して雨滴にする暖気層 (気温0°C以上)があり、その下層に雨滴を冷却して過冷却状態とする寒気層 (気温0°C以下)が存在することである<sup>2)</sup>。

秋田県の内陸北部において、2019年12月と2020年2月に着氷性の雨による雨氷 (glaze) が観察された。前者の事例では、市街地において歩行者の転倒や自動車の滑走事故が相次ぎ、後者の事例では登山道沿いの樹木から剥がれ落ちた雨氷の氷片が登山者に衝突する様子が観察された。本稿ではこれらの事例を雨氷災害に着目して報告する。

## 2. 解析データ

地上気象観測、高層気象観測のデータは気象庁から、歩行者の転倒などによる救急搬送人員 (一般負傷) は北秋田消防本部、大館市消防署、鹿角広域消防本部から、滑走事故件数は秋田県警察署から入手して分析した。

## 3. 2019年12月10日に発生した事例

12月10日朝秋田県内陸北部の盆地群 (鷹巣盆地、大館盆地、花輪盆地) において歩行者の転倒事故や車両の滑走事故が相次いだ。大館では氷点下の気温で雨が降り、大館のアメダス

では5時50分から8時10分にかけて2.5mmの降水が観測された

(図1)。10日9時の秋田 (大館の南西70km) の高層気象観測によれば、高度1440m付近より下層で気温が0°C以上であり、気温の逆転層が高度443m (気温7.0°C) 付近より下層に形成されていた。よって、高度440m付近で液体であった降水粒子は、盆地内の氷点下の気層を落下中に過冷却され、地表の地物に衝突して雨氷を形成したものと考えられる。

歩行者の転倒事故は大館市で多発し、10日の救急搬送人員 (一般負傷) は9人で12月としては突出して多かった (図2)。9人とも転倒によるものであるが、このうち6件は自宅前での転倒であった。滑走事故は鹿角市で多発し、10日に50件発生した。12月の月間滑走事故件数の45.8%を占めるほどの多さであった。

## 4. 2020年2月17日に発生した事例

2月17日大館市内の鳳凰山の標高400m付近から520.4m (山頂) にかけて、樹木の幹や枝葉を透明な氷で包んでいる雨氷が観察された。現地気温2.1°Cの中、融解しつつある雨氷が風により樹木から剥がれ落ち、無数の氷片が、登山者を直撃する様子が観察された。

## 5. おわりに

着氷性の雨は発生頻度が低いとはいえ、路面の凸凹を滑らかな雨水で覆うことで極めて滑りやすいブラックアイスバーンを形成するため、転倒事故や滑走事故を多発させる。また、融解時に樹木から剥離・落下する雨氷の氷片は登山者の身体を直撃することがある。これらの災害を減じるためには、住民がその危険度を認識し、当地域における雨氷発生のパテンシャルを認知することが肝要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 気象庁, 1988: 気象観測の手引き. [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku\\_guide/tebiki.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/tebiki.pdf) (2021.3.9 閲覧)
- 2) 松下拓樹・西尾文彦, 2004: 着氷性降水の気候学的特徴と地域性について. 雪氷, 66, 541-552.

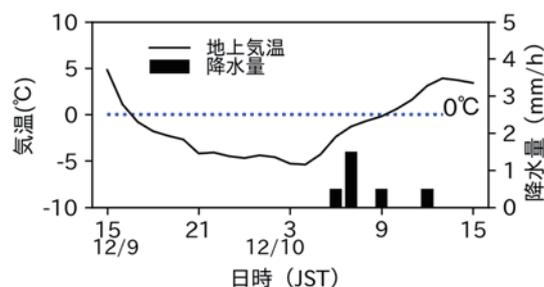


図1 大館 (アメダス) の地上気温・降水量・風向風速 (2019.12.9 15:00 - 12.10 15:00 JST)。

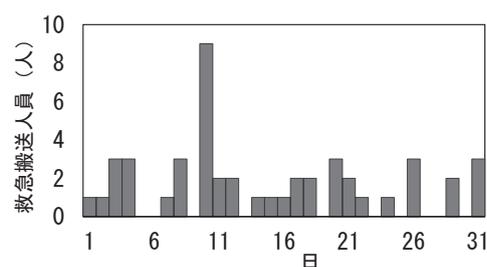


図2 大館市消防署管内2019年12月の救急搬送人員 (一般負傷分)。

1 大館市教育委員会

Odate City Board of Education

冠雪による送電用鉄塔の部材変形の原因と評価手法の考察

Study on member deformation of steel tower due to snowcap and evaluation method

○矢口 龍太<sup>1</sup>, 栗原 幸也<sup>1</sup>, 高橋 圭一<sup>1</sup>

Ryuta Yaguchi, Tatsuya Kurihara and Keiichi Takahashi

1. はじめに

送電用鉄塔 (以下, 鉄塔) の水平補助材は主に等辺山形鋼で構成され, 応力材に生ずる軸力, 細長比および塔上作業時の作業員重量などを考慮してサイズを決定する. しかし, 豪雪地区では, 鉄塔上の冠雪に起因する部材変形が課題となっている (図 1).

冠雪が発生する鉄塔のほとんどは, 厳寒期において頻繁な現地調査が困難であり, 部材変形の詳細な原因は明らかになっていない. このため, 筆者らは傾斜センサによる観測と構造解析を行い, 部材変形の原因と評価方法について検討した.



図 1 鉄塔の冠雪状況と部材変形の一例

2. 部材変形原因の確認

冠雪が部材変形にもたらす影響を確認するため, 2020年12月より, カメラと傾斜センサ (分解能: 約 0.0035[deg]) を鉄塔下部の部材に設置し, 画像と2軸の傾斜角を10分毎に記録した. 観測結果から, 冠雪量と傾斜量は比例し, 冠雪発生時の部材の微小変形は, ねじり方向が支配的であることを確認した (図 2). 上記より, 部材変形の対策には, 従来の設計手法で考慮している長手方向の曲げ応力に加え, ねじり方向せん断応力を加味する必要があることが判明した.

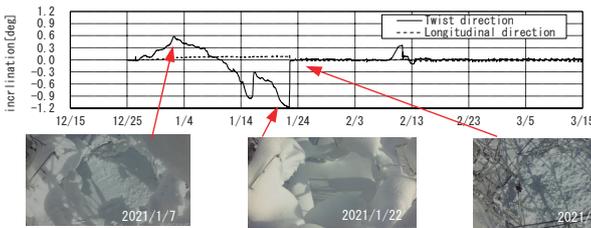


図 2 冠雪状況と部材傾斜量の時系列

3. 有限要素法 (FEM) による部材強度検討

3.1 荷重試験

後述の構造解析の妥当性を確認するため, 鉄塔の最下パネル対辺材を対象に, 重錘, ロープ, 傾斜計を用いた実荷重試験を実施した (図 3). 重量は 70,140,210[kg] の 3 ケースとし, 各重量時の部材長手方向の傾斜量を記録した.

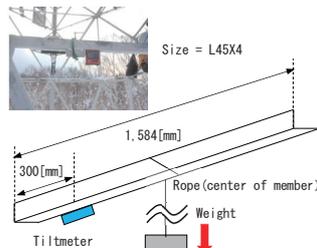


図 3 荷重試験の方法

3.2 構造解析

有限要素法による解析は, 汎用構造解析コードである ADINA を使用した. 解析モデルはシェル要素で構成し, 荷重条件は前項の荷重試験と同様とした. 妥当性を確認するため, 試験と解析の部材傾斜量を比較した結果, 両者の値は概ね整合し, 各種解析パラメータに問題がないことを確認した (図 4,5).

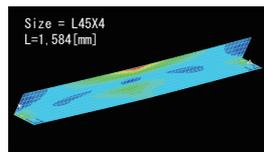


図 4 荷重重量 70[kg] 時の応力分布

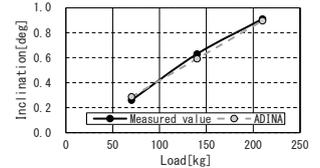


図 5 計測値と解析値の比較

4. 簡易評価式の考案

前項の冠雪観測結果を踏まえ, 前項の解析モデルに冠雪重量の偏心を考慮した解析を行った. 冠雪荷重の偏心距離は, 50, 100[mm] の 2 ケースを仮定した. 荷重点は, せん断中心点とし, 載荷方法は等分布とした. 解析結果を図 6 に示す. 荷重重量 70[kg] (約 1.15[kg]/節点) のとき, 偏心距離 100[mm] の際の応力は偏心がない場合に比べ約 2.5 倍となり, 偏心距離が部材変形に及ぼす影響が非常に大きく, 部材強度の評価式に考慮する必要があることを確認した.

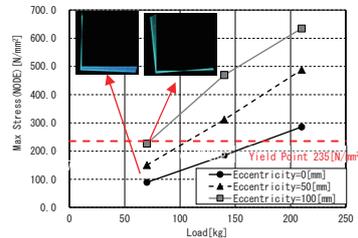


図 6 偏心量による発生応力の差異

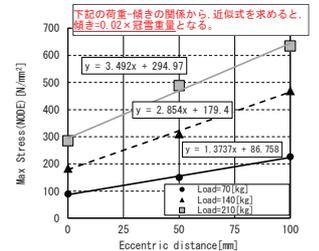


図 7 偏心量と発生応力の関係

部材断面がねじれる場合, 部材の断面性能が変形量に応じ変化する. このため FEM 解析が必要となるが, 平素の設計業務に適用することは現実的ではない. このため, 偏心量と応力の関係が線形であることに着目し, はり計算から求めることができる曲げ応力に, 図 7 から求めた係数, 偏心距離および冠雪重量を乗じた値を合算し, 合成応力を近似する簡易式を考案した (式 1).

$$\sigma_{max} = \sigma_M + 0.02 \cdot W \cdot E \quad \dots \text{式 1}$$

ここで,  $\sigma_{max}$ : 曲げ応力とせん断応力の合成値[N/mm<sup>2</sup>]  
 $\sigma_M$ : はり計算から求める曲げ応力[N/mm<sup>2</sup>]  
 $W$ : 冠雪重量[kg]  
 $E$ : 冠雪重心の偏心距離[mm]

5. 今後の展開

現地調査により冠雪の最大偏心量および重量を確認するとともに, 荷重試験による簡易式の妥当性評価を行い, 冠雪発生地域における部材サイズ決定手法を確立する.

以上

## 気象積雪条件による滑雪塗料の機能発現機構の解明に関する研究 (2)

## Study on elucidation of the functional expression mechanism of snow-sliding paints depending on the snowfall and meteorological conditions (2)

○今野奈穂<sup>1</sup>, 四戸大希<sup>1</sup>, 佐藤勲征<sup>1</sup>, 小杉健二<sup>2</sup>, 伊藤陽一<sup>2</sup>

Nao Konno, Daiki Shinohe, Noriyuki Sato, Kenji Kosugi, Yoichi Ito

## 1. はじめに

積雪地域における屋根雪は建築物の構造強度および耐久性に大きく影響することから、雪下ろし作業が必要となる。しかし、屋根の雪下ろしは高所での作業となるため、転落事故が毎年発生している<sup>1</sup>。筆者らが地域企業とともに開発したワックス添加塗料は、配合されたワックス成分の効果により、屋根に積もった雪が自重で滑り落ち、雪下ろし作業軽減の寄与が期待される。これまで筆者らは、曝露試験において、ワックス添加塗料が、市販塗料を塗布した模擬屋根よりも先行して積雪が滑り落ちることを報告している<sup>2</sup>。観測された降雪現象のほとんどは、気温の上昇により模擬屋根表面の雪が融けだしたことによるものであるが、気温の上昇がない状態でも、積雪が滑り落ちる現象が確認された。本研究では、曝露試験で観測された降雪について、人工降雪装置を用いて再現を試みた結果を報告する。

## 2. 実験概要

ワックス添加塗料を塗布した模擬屋根パネルを架台に載せ、所定の勾配に設置したものを試験体とした。また、比較として一般的な屋根用塗料であるシリコン系塗料および滑雪機能をもつフッ素系塗料を用いて同様に試験体を製作した。模擬屋根パネル表面および裏面には、予めシート型熱電対を貼り付けておき、試験中の温度を記録した。降雪実験は、国立研究開発法人防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター 新庄雪氷環境実験所の雪氷防災実験棟 (低温実験室) の人工降雪装置を用いて行った。低温実験室内に上記試験体を設置し、試験体上に球状の雪粒子を降雪させた。積雪後、室温を制御することにより、曝露試験下での日照等による気温上昇を模擬し、各種温度環境下での滑雪挙動を観察した。

## 3. 実験結果

## 3.1 気温の上昇がない状態での降雪現象の再現

実験室内温度-2℃下で降雪を続け、模擬屋根パネルに積もった雪の滑雪挙動を観察した。その結果、ワックス添加塗料は、積雪重量80~100kg、積雪深30~50cmで、自重で雪が滑り落ちた (図1)。一方、比較塗料では、積雪重量を約110kgまで降雪を継続したが、落雪は確認できなかった。このことは、曝露試験における気温の上昇がない状態でもワックス添加塗料が先行して滑雪する現象を再現している。実験室内温度-2℃下においてはパネル表面と積雪面に融雪水がなく、滑雪に働くと思われる温度変化による体積膨張・収縮や風などの外部力もないことから、この状況下でもワックス添加塗料は表面に選択的に存在するワックス成分の効果により積雪が自重で落ちる、すなわち運動方向の力の値が大きくなることで雪が滑り落ちたと考えられる。

## 3.2 気温の上昇による降雪現象の再現

実験室内温度-5℃下でパネル全体を覆うように降雪させた後、2枚のパネル上の積雪重量が同程度 (約20kg) となるまで降雪装置で作製した雪を篩いながら均一な厚みとなるよう追加した。

その後、室温を徐々に+2℃まで上昇させた後、+2℃に保持して滑雪挙動を観察した。その結果、ワックス添加塗料では、室温上昇に伴い積雪が屋根パネル下方に徐々にずり落ち始め、室温が+2℃に到達した後10時間43分後に完全に落雪した (図2)。一方、比較塗料では、室温が+2℃に到達した後15時間まで観察を継続したが、落雪は認められなかった。このことは、曝露試験における気温の上昇によりパネル表面の雪が融けだした状態でワックス添加塗料が先行して滑雪する現象を再現している。

## 4. まとめと今後の展望

曝露試験で観測された、気温の上昇により模擬屋根パネル表面の雪が融けだすことによりワックス塗料が先行して滑雪する現象と、気温の上昇がない状態でもワックス塗料が先行して滑雪する現象について、人工降雪装置を用いて降雪実験により再現することができた。ワックス添加塗料は一般的な屋根用塗料と比べて、夜間などの氷点下でも積雪が自重で落ちやすく、また、気温上昇時にも早期に落雪しやすいことから、屋根雪下ろし作業の低減に寄与することが期待される。一般的に、表面エネルギーが低い撥水性材料は乾き雪に対して相互作用が小さく落雪しやすいとされ、雪と材料間に水が濡れ広がりやすい親水性材料は、湿雪の方が落雪しやすいと考えられている。しかしワックス添加塗料はやや撥水性を示すことから、今後、ワックス添加塗料の撥水性が落雪にどのように寄与するのか解明するため、塗膜表面のワックスの分布状態などを詳しく分析していきたい。

## 参考文献

- 1) 消防庁発表資料「今冬の雪による被害状況等」(平成23年~令和3年) (<http://www.fdma.go.jp/>)
- 2) 佐藤勲征, 今野奈穂, 四戸大希, 小杉健二, 伊藤陽一, 2021: 気象積雪条件による滑雪塗料の機能発現機構の解明に関する研究. 2021年度 (公社) 日本雪氷学会東北支部 研究発表会要旨集, 2021年5月, 30-31.



図1 ワックス添加塗料の落雪状況(奥:フッ素系塗料)



図2 ワックス添加塗料の落雪状況(左:一液シリコン塗料)

1 宮城県産業技術総合センター

2 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

Industrial Technology Institute, Miyagi Prefectural Government  
Snow and Ice Research Center, NIED

## アクチュエータを用いた湿雪のせん断付着力測定 Measurement of wet snow shear adhesion using an Actuator

○麻生照雄<sup>1</sup>, 佐藤研吾<sup>2</sup>, 野村光春<sup>1</sup>, 松島宏樹<sup>1</sup>, 富樫数馬<sup>2</sup>, 松宮央登<sup>1</sup>  
Teruo Aso, Kengo Sato, Mitsuharu Nomura, Hiroki Matsushima, Kazuma Togashi, Hisato Matsumiya

### 1. はじめに

気象要素を用いた送電線への着雪量算定や着雪形状の再現、着雪対策品の効果発現メカニズム解明などのため、当所では着雪発達シミュレーションコード「SNOVAL」の開発・改良を行っている<sup>1)</sup>。このコードの中で用いる着雪・落雪モデルでは、着雪体の物性値(密度・含水率)と付着力(せん断・引っ張り)との関係が重要である。このため当所では、着雪時の温度・風速・降雪量によって含水率・密度を調整した着雪体に対して、付着力の計測を実施している<sup>2)</sup>。送電線は円形断面を有する素線を撚った形状が一般的であるが、電線着雪に即した付着力の測定方法は確立されていない。本実験では、現象を簡略化するためアルミ素線を張り付けた平板を用いたアクチュエータ方式によるせん断付着力計測を行い、妥当性の確認を行った。

### 2. 試験方法

防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの降雪装置で作成した人工雪を1~2℃の部屋で半日から1日程度放置して湿雪化し、風洞内に設置したアルミ素線(素線径4.0mm)を表面に付けた断熱材平板に付着させた。着雪体を専用カッターで切り出し、試験片の質量と体積から密度を算出するほか質量含水率を測定した。実験では風速・気温・降雪強度を変えることにより着雪体の物性値(密度・含水率)を変化させ、せん断付着力を測定した。

(図1参照)氷のせん断付着力は、移動速度により大きさが異なることが報告されており、着雪のせん断付着力についても同様の可能性があることから、アクチュエータの移動速度を変えて測定を行った。



図1 アクチュエータによる付着力測定

### 3. 結果

含水率とせん断付着力(アルミ素線と平行方向)の関係を図2に示す。いずれのアクチュエータ速度でも付着力は含水率の上昇に従って小さくなる傾向が見られる。含水率17%程度以上ではアクチュエータ速度によるせん断付着力の差は小さかったが、含水率が17%程度以下ではせん断付着力のばらつきが大きく、本実験では、アクチュエータ速度による付着力の明確の違いは確認できなかった。

次に着雪体が自重で滑り落ちることにより、せん断付着力を測定し比較した。(図2中の「自然移動」が該当)氷点以上の気温の実験室内では時間の経過に伴い着雪体の含水率が上昇して移動することを予想したが、含水率の計測値は試験の前後で数%低下した。この理由として時間経過に伴う着雪体からの水分の蒸発による含水率の低下や水分の移動による着雪体内の含水率の分布変化などが考えられ、アクチュエータ方式との比較には至らなかった。

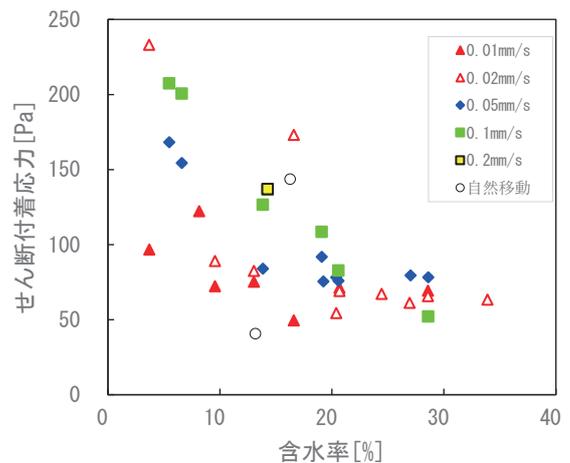


図2 アクチュエータ速度をパラメータとした含水率とせん断付着力の測定結果

### 参考文献

- 1)上之和人, 江口譲, 西原崇, 杉本聡一郎, 松宮央登, 2015: 融解過程を考慮した電線着雪・落雪モデルの開発, 電中研研究報告, N15001
- 2)山本啓太, 松宮央登, 松島宏樹, 根本征樹, 富樫数馬, 鈴木紘一, 杉本聡一郎, 2019: 電線への着雪・付着特性評価, 電中研研究報告, N18010

1 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部  
2 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

Sustainable System Research Laboratory, CRIEPI  
Snow and Ice Research Center, NIED

## 着雪状況把握のための検知技術の開発

## Study on detection methods for snow accretion

○佐藤研吾<sup>1</sup>, 中村一樹<sup>1</sup>, 富樫数馬<sup>1</sup>

Kengo Sato, Kazuki Nakamura, Kazuma Togashi

## 1. はじめに

近年、南岸低気圧に起因する湿降雪のために、九州地方から関東地方まで非雪国においても広域で着雪被害が報告されている。湿った雪は様々な物体に付着するため、樹木の倒木、電力・鉄道設備の倒壊など多量に着雪することより被害が発生する。また、着雪直後に被害がない場合でも、一定の重量がある場合は、構造物と着雪の界面の融解により落雪し、人的及び物的被害が発生し大きな問題となっている。大規模な着雪被害を引き起こす湿雪や霰が降る気象条件は限定的であり、また対象構造物周辺の温湿度条件だけでなく、上空の気温分布、降雪の粒径などの影響があるため、着雪重量や形状を予測することは困難である。

そのため本研究では、着雪の現況把握のための着雪検知機の開発について検討を行った。

## 2. 着氷雪の検知に関連する既存の特許技術

着雪の検知に関する特許は少なくなく、着霜検知装置（特願昭 60-242377）、電線への着氷雪検知方法および装置（特願 昭 和 63-10875）、物体検知装置（特願 2016-179866）などが公開されている。しかし、これらの特許技術は特定された対象物への着氷雪の検知を目的としており、特定されない外気にさらされている物体の着氷雪を検知する方法が開示されていない。また、着雪は風向に大きく依存するが、風向依存性が反映されるような検知器となっていないことが課題である。

## 3. 着雪検知機の開発

低気圧に起因する事例に着目すると、一定風向で長時間の場合が多いため、風向依存性の検知が重要である。そのため、垂直面は 8 方位となるように筐体は八角柱の形状とした。また弱風の場合の冠雪についても考慮し、垂直面だけではなく水平面への着雪にも対応可能となるように全 9 面にセンサを設置した。着雪検知のために、近赤外センサを用い、着雪の有無とともに厚さや重量の検知を試みた（図 1）。

精度検証のために、(国研) 防災科学技術研究所新庄雪氷環境実験所の露場に前述の検知機を設置した。検知データは 10 分毎に取得し、着雪状況はインターバルカメラを用いて垂直面の着雪状況を撮影した（図 2, 図 3）。

## 4. 検証結果と展望

定性的、相対的な着雪状況を把握することができた。今後はセンサの検知結果と着雪量、着雪厚さの関係性を明らかにし、精度向上に努める。

検知精度を向上させ多点観測を実施することにより、着雪状況の面的把握が可能となり、落雪対策や注意喚起などの被害軽減が期待される。

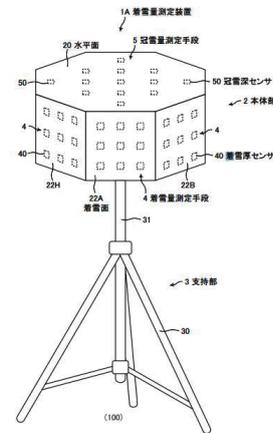


図 1 着雪検知機の概要  
(特願 2020-52168)



図 2 着雪検知機の検証試験

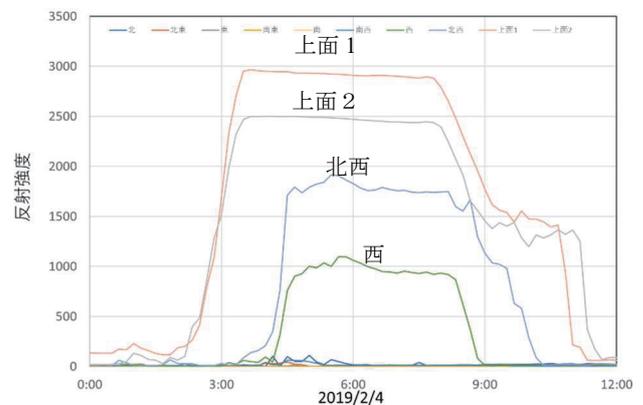


図 3 着雪時の反射強度の時系列

1 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

Snow and Ice Research Center, NIED

## 雪崩観測事例を用いた雪崩モデルパラメータ分布の決定とその適応性

Optimal parameter distribution of snow avalanche model  
for the avalanche site in Yamagata prefecture and its applicability○田邊章洋<sup>1</sup>, 安達聖<sup>1</sup>, 荒川逸人<sup>1</sup>, 伊藤陽一<sup>1</sup>

Takahiro Tanabe, Satoru Adachi, Hayato Arakawa and Yoichi Ito

## 1. はじめに

雪崩や地すべり、土石流のような重力流は、微視的には雪や土砂などの固体粒子で構成されているが、巨視的にはそれらの集団が固体同士および周囲流体と相互作用しながら流体的に振る舞う。このような観点から巨視的な流動状態を連続体としてモデル化する試みが古くから行われており、連続体近似した運動方程式が導かれてきた。このようなモデルのダイナミクスは摩擦係数等のパラメータで決まるが、その与え方は経験によるところがあり、厳密に与えることは困難である。そこで本研究では、観測事例と数値計算結果を比較することで、観測を再現するパラメータの分布を推定する Fischer *et al.*, (2015) の手法を、山形県で観測された小規模な雪崩に適用した。さらに、その分布を用いてほかの雪崩事例の再現が可能であるか調べた。

## 2. 手法

## 2.1 観測雪崩事例

本発表では山形県最上郡大蔵村にある防災科学技術研究所の雪崩観測サイトで2021年2月12日に発生した雪崩を対象とした。対象の雪崩は1秒ごとのタイムラプス画像が記録されており、また雪崩発生翌日の13日にUAV空撮測量が行われた。これらを用いて雪崩事例の解析を行い、初期条件として発生箇所や積雪深、比較変数として流動距離や先端速度などを推定した。

## 2.2 数値計算

OpenFOAMをプラットフォームとするオープンソースの雪崩計算ソフトfaSavageHutterFOAMを用いて雪崩ダイナミクスの再現を行った (Rauter *et al.*, 2018)。これは地形データから各地点の勾配を考慮し、浅水流近似をした粒子流の質量、運動量の保存則と、底面摩擦等の構成則を数値的に解くことでダイナミクスの再現を行う。本発表では底面摩擦則としてVoellmy則を仮定しており、底面摩擦 $\mu$ 、流体抵抗 $\xi$ 、雪の取り込み $e_b$ の3つのパラメータの推定を行った。

## 2.3 雪崩事例と数値計算の比較

雪崩事例と数値計算の一致度を定量的に評価するため、雪崩の観測で推定した比較変数 $\hat{X}$  (滑走距離や雪崩速度等) に対応する変数を数値計算結果から算出した。数値計算と観測事例の一致度を定量的に評価するために、Fischer *et al.*, (2015)で提案されている評価関数 $\alpha(\theta)$ を用いた：

$$\alpha_{X(\theta)} = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{X(\theta) - \hat{X}}{\sigma_{\hat{X}}}\right)^2\right), \quad \alpha(\theta) = \sum_X w_X \alpha_{X(\theta)}.$$

ただし、 $X(\theta)$ はパラメータの組 $\theta = \{\mu, \xi, e_b\}$ を与えた数値計算結果から算出した比較変数、 $w_X$ は各比較変数の重みを表す。 $\alpha_{X(\theta)}, \alpha(\theta)$ はともに一致度が高ければ1、低ければ0に漸近する関数であり、それぞれ各比較変数の評価関数、パラメータの組に対する評価関数を表す。

## 3. 結果

本研究では $\mu, \xi, e_b$ それぞれに初期分布を与え、一様に分布する $N$ 組のパラメータ $\theta$ を用いて数値計算を行った。 $\alpha(\theta)$ が閾値を超えた $\theta$ を最適パラメータとして、最適パラメータからなる分布を再構築した。発生時の体積と場所、積雪深は観測結果から推定し、地形データとして国土地理院の10mメッシュのDEMを用いた。確度が高い滑走距離の推定値に他の2倍の重みを与えたところ、 $N = 10^4$ に対しておよそ0.4%が閾値を超えた。

再構成されたパラメータ分布を図1に示す。底面摩擦 $\mu$ は初期に与えた分布に比べて狭い範囲で収束した一方で、流体抵抗 $\xi$ や雪の取り込み $e_b$ は初期分布の幅を保持し、幅広の分布のまま収束性が低かった。この原因として、雪崩規模が小さいためこれらのパラメータの寄与が小さいことや推定がうまくいかなかった一部の観測結果の影響を受けていることが考えられる。

発表ではパラメータ間の相関や再構成した分布を用いたほかの雪崩事例の再現可能性についても議論する予定である。

## 参考文献

- 1) J.T. Fischer, A. Kofler, W. Fellin, M. Granig, K. Kleemayr, 2015: Multivariate parameter optimization for computational snow avalanche simulation, *J. Glaciology*, **61**, 229.
- 2) M. Rauter, A. Kofler, A. Huber, W. Fellin, 2018: faSavageHutter-FOAM 1.0: depth-integrated simulation of dense snow avalanches on natural terrain with OpenFOAM, *Geosci. Model Dev.* **11**, 2923-2939.

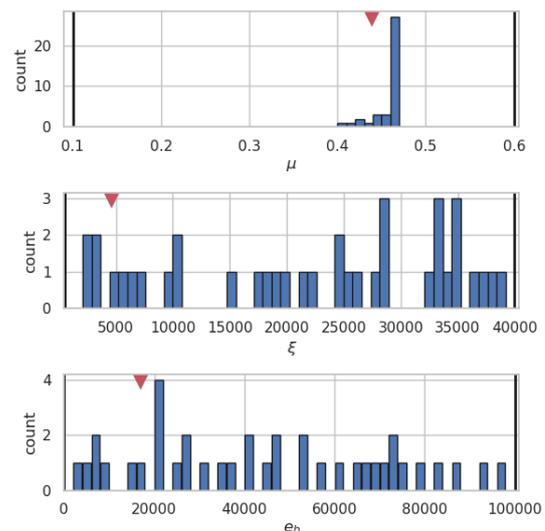


図1 再現性の高いパラメータのヒストグラム。縦軸は個数、両端の黒線は初期分布を表し、三角は $\alpha(\theta)$ が最大となったパラメータを表す。

20-km 解像度の大規模アンサンブル気候予測データを使った  
弱層形成頻度と上載積雪荷重の将来予測Future estimation of frequency of weak layer formation and slab loading to the weak layer  
using 20-km large ensemble climate projections○勝山祐太<sup>1</sup>, 勝島隆史<sup>1</sup>, 竹内由香里<sup>1</sup>

Yuta Katsuyama, Takafumi Katsushima and Yukari Takeuchi

## 1. はじめに

地球温暖化により、積雪量の減少、雪質の変化、短期間の降雪量の増加などが懸念されている。これら変化は、雪崩の発生頻度やその規模に影響を与えると考えられ、地球温暖化を考慮した雪崩災害軽減策のための雪崩頻度や規模の温暖化影響評価が求められている。しかし、雪崩の温暖化影響を推定した先行研究は非常に少ない (e.g. Castebrunet *et al.*, 2014) ほか、短期間の降雪量増加に着目した研究は例がない。そこで、本研究では、20 km 解像度の大型アンサンブル気候予測データを積雪変質モデルの入力値とすることで、弱層の形成頻度やそれに伴う上載積雪荷重の温暖化影響を推定する。

## 2. データと方法

気候予測データとして、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF; Mizuta *et al.*, 2017) のうち 20-km 解像度のデータを使用し、これを積雪変質モデル SNOWPACK の入力値とした。d4PDF のオリジナルデータには、現在気候 3000 年分、温暖化気候 5400 年分の大規模アンサンブル気候モデル実験の結果が収められているが、計算機リソースの制約により、本研究では、現在気候・温暖化気候それぞれ 1800 年分のデータを使用した。ここで、現在気候は、1951 年～2011 年を、温暖化気候は、全球平均気温が産業革命以前と比較して 4°C 上昇した年代を指す。SNOWPACK モデルの設定は、Katsuyama *et al.* (2020) と同様にした。弱層は、新雪/こしまり雪とこしもざらめ雪/しもざらめ雪のそれぞれについて、積雪安定度 (SI) が全積雪層の中で最も小さくなる値が 1.5 以下の場合とした。また、診断された弱層の上部に載っている積雪の重さを上載積雪荷重とした。

## 3. 結果

現在気候下では、北陸・新潟の山間部を中心に新雪/こしまり雪の

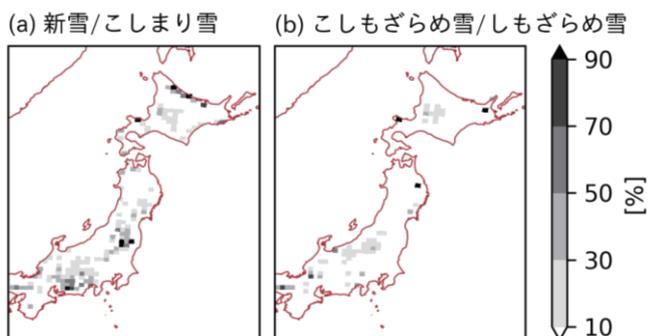


図1 (a) 新雪/こしまり雪の弱層と(b) こしもざらめ雪/しもざらめ雪の弱層に対する上載積雪荷重の将来変化。年最大積雪水量が 50 kg m<sup>-2</sup> 以下の地域は除外して描画した。

弱層形成の頻度が高く、全積雪期間のうち 20%以上で弱層が形成されていた。また、こしもざらめ雪/しもざらめ雪の弱層形成頻度は、北海道を中心に約 15%と高かった。北日本の多くの場所で、新雪/こしまり雪、および、こしもざらめ雪/しもざらめ雪の双方の弱層形成の頻度は、地球温暖化に伴い減少したほか、こしもざらめ雪/しもざらめ雪の弱層は、北海道の一部を除き、ほとんど形成されなくなった (図略)。一方で、北陸・新潟の山間部における新雪/こしまり雪の弱層形成頻度の減少は、相対的に他の地域に比べて小さかった。

現在気候における上載積雪荷重が多い地域は、北陸・新潟の山間部などの降雪量の多い地域であった。また、こしもざらめ雪/しもざらめ雪の弱層に対応する上載積雪荷重は、新雪/こしまり雪のそれと比べて二倍以上多かった。これは、こしもざらめ雪/しもざらめ雪の方が長期間弱層として存在することがあり、その間に降り積もる降雪量が多くなるためと考えられる。地球温暖化に伴い、多くの場所で上載積雪荷重は減少傾向を示した。一方で、新雪/こしまり雪の弱層に対する上載積雪荷重は本州太平洋側の地域や北海道中央部で 30～70%の増加を (図 1a)、こしもざらめ雪/しもざらめ雪の弱層に対する上載積雪荷重は北陸・新潟の山間部と北海道中央部で 10～30%の増加を (図 1b) 示した。

## 4. まとめと考察

20-km 解像度の d4PDF データを SNOWPACK モデルに入力することで、地球温暖化による雪崩ポテンシャルの将来変化を推定した。その結果、SI で診断される弱層の形成頻度は、新雪/こしまり雪による弱層とこしもざらめ雪/しもざらめ雪による弱層の双方において、北陸・新潟の山間部を除く広い地域で大幅な減少が推定された。一方で、上載積雪荷重は、本州太平洋側や北海道中央部で増加した。これら結果は、地球温暖化により雪崩の発生頻度は低下するが、一度弱層ができるとそれに伴う上載積雪荷重はこれまでより多くなり、起こりうる雪崩の規模は大きくなることを示唆している。

## 謝辞

本研究は、科研費 (20K22437) と (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト (202003) の支援を受けた。

## 参考文献

- 1) Castebrunet *et al.*, 2014: Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020–2050 and 2070–2100 periods. *The Cryosphere* **8**, 1673–1697.
- 2) Mizuta *et al.*, 2017: Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **98**, 1383–1398.
- 3) Katsuyama *et al.*, 2020: Response of snowpack to +2°C global warming in Hokkaido, Japan. *J. Glaciol.*, **66**, 83–96.

1 森林総合研究所十日町試験地

Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute

# 低気圧性降雪による表層雪崩危険度予測システムの改良 Improvement of a System for the Forecasting of Surface Avalanche Potential Caused by Snowfall from a Cyclone

○中村一樹<sup>1</sup>, 西田浩平<sup>2</sup>, 齋藤佳彦<sup>2</sup>  
 Kazuki Nakamura, Kohei Nishida and Yoshihiko Saito

## 1. はじめに

低気圧通過時の降雪が原因となった表層雪崩による被害がしばしば見られる。これらの雪崩の被害を減らすための課題のひとつが、低気圧性の降雪による表層雪崩発生危険度の可視化である。そこで、日本全国の低気圧性の降雪による表層雪崩危険度を5kmメッシュで面的に表示するシステムを新たに設計して実装し、2018年1月からシステムの検証と情報提供の実証実験を行った<sup>1)</sup>。本研究では、システム検証の結果明らかになった課題を明確化し、その解決策を検討した。

## 2. 雪崩発生メカニズム

図1に、低気圧による降雪時に降りやすい結晶形と降雪範囲の模式図を示す。低気圧の進行方向前面(北～東側)の層状雲からは、表層雪崩の弱層を形成する雲粒付着が少ない板状結晶や、崩れやすい形状をしている角柱状結晶等が降りやすいことが知られている。一方、低気圧からのびる寒冷前線や、低気圧が通過した後にユーラシア大陸からの季節風の吹き出しに伴う“冬型の気圧配置”に起因する対流雲からは、雲粒の付着が多い降雪やあられが降りやすい。

低気圧が原因で雪が降った場合、低気圧の進行方向前面の層状雲から降った雲粒付着が少ない板状結晶は、前に降った下部積雪の上に、空隙が多く、密度が小さく、軟らかい弱層を形成する(図1のAの位置)。その上に同じ低気圧が接近して雪が降ることで、上載積雪を形成する(図1のA'の位置)。あるいは、低気圧が通過して冬型の気圧配置になった時に雪が降り、上載積雪を形成する(図1のBの位置)。上載積雪が一定以上積もると、積雪が不安定になり、弱層が破壊されて表層雪崩が発生する。また、強風時の吹き溜まりが上載積雪となり、同様に弱層が破壊されて表層雪崩が発生する。以上が低気圧性降雪に起因する表層雪崩が発生するメカニズムである。

## 3. システムの概要

図1のA'の位置で雪崩が発生する場合をパターンA、Bの位置で雪崩が発生する場合をパターンBとする。パターンAに相当する過去の6つの雪崩事例について分析することで、図2に示す当初のアルゴリズムを作成した。2018年1月から実施した実証実験では、気象の各要素が約5kmメッシュで提供される気象庁のMSMデータを入力値として、アルゴリズムを用いて算定された低気圧性降雪による表層雪崩危険度分布を可視化するGISシステムの運用を試験的に実施した。

## 4. 課題と解決策

試験運用を通じ明確になった課題と解決策を以下に示す。

### 1) パターンBの雪崩に対するアルゴリズムの開発

例えば、2015年1月の新潟県妙高市粟立山・前山で発生した雪崩や、2015年1月に宮城県国道48号関山峠で発生した雪崩などパターンBの雪崩もしばしば発生する。そこで、図2のアル

ゴリズムを低気圧性降雪の後の冬型の気圧配置による降雪も判断できるように改良し、システムを再構築した。改良したシステムを用いて2019年1月からの試験運用を実施した。

### 2) 地形による下層風向の変化への対応

降雪時の下層風の風向を用いて低気圧性降雪の判断を行っているため、高山域や半島などの地形の影響を受けて風向が変化する場合に判断の誤差が生じた事例があった。そこで、気圧など他の気象要素を用いてアルゴリズムを改良し、2021-22年冬季の試験運用に適用する予定である。

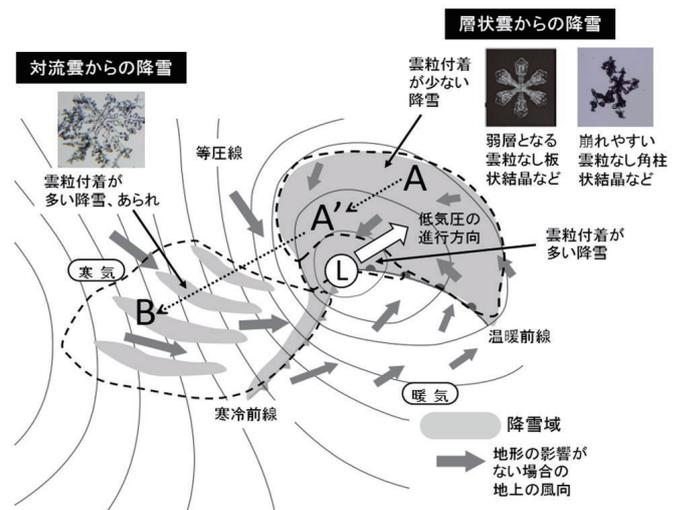


図1 低気圧性の降雪時に降りやすい結晶形と降雪範囲の模式図

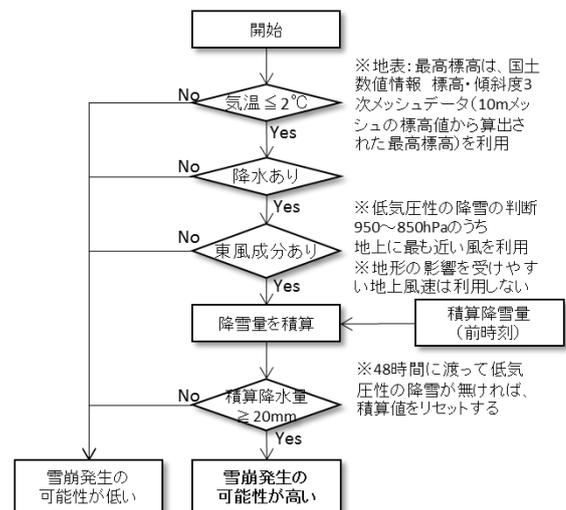


図2 低気圧性降雪による表層雪崩危険度の算定アルゴリズム  
 参考文献

1) Nakamura, K., 2019: Implementation and Demonstration of a System for the Forecasting of Surface Avalanche Potential Caused by Snowfall from a Cyclone, *JDR*, **14**, 1201-1226.

1 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター  
 2 (株)雪研スノーイーターズ

Snow and Ice Research Center, NIED  
 Yukiken Snow-eaters Co., Ltd.

## 2021.3.21 富士山で発生したスラッシュ雪崩 Slash avalanches occurred in Mount Fuji(2021.3.21)

○上石勲<sup>1</sup>, 中村一樹<sup>1</sup>, 伊藤陽一<sup>1</sup>

Isao Kamiisi, Kazuki Nakamura and Yoichi Ito

### 1. はじめに

2021年3月21日、富士山周辺部で大量の雪や雨となり、多数のスラッシュ雪崩が発生した(図1)。山梨県側の富士スバルラインでは、道路上にデブリが大量に堆積し、当日は通行止めにしていたため人的被害はなかったが、橋梁にも被害を与えた(図2)。調査は2021年3月27日、4月4日、4月27日に行った。

### 2. スラッシュ雪崩の発生状況

スバルラインでは四合目～五合目でスラッシュ雪崩が5か所道路上に到達し、多いところでは3m以上道路上に堆積していた。石楠花橋付近では、スコリアの含有量が少なく雪が多いデブリで、橋や樹木に被害を与えた。その下流の青草洞門付近では、スコリアの含有量が多いデブリも見られた(図3)。スラッシュ雪崩は、吉田大沢でも発生しており、スコリアと水の流れが途中の堆砂池で補足されつつ、一部が富士吉田市街地の宮川まで到達していた可能性がある(図1)。

### 3. 発生時の気象積雪状況

3月21日は日本海側を低気圧が通過し、スバルラインを管理する山梨県道路公社の記録によると五合目観測点で21日の一日で324mm、時間当たり30mm以上の降水が4時間続いた。気象庁富士山頂観測点の気温は-5℃から0℃となっており、山頂部では雪、5合目付近から上部では雪から雨に変化したものと推定される。この雪と雨が雪崩の大きな要因となった(図4)。石楠花橋付近で確認された雪主体のスラッシュ雪崩は、標高の高いところから発生して途中の雪を多く巻き込んで流れ、土砂の混入の大きい流れは、発生源もしくは流下中に土砂も巻き込んで流下したものと推定される。

### 4. まとめと今後の課題

今回はスラッシュ雪崩発生当日に、過去の発生状況と類似した条件になっていることから、その発生の可能性をあらかじめ山梨県に通知ができた。山梨県によれば、その後の道路管理に役立てることができたとのことである。土砂の混入の違いによる流動特性の解明や気象積雪条件とスラッシュ雪崩発生予測も今後の対策等には必要となってくる。

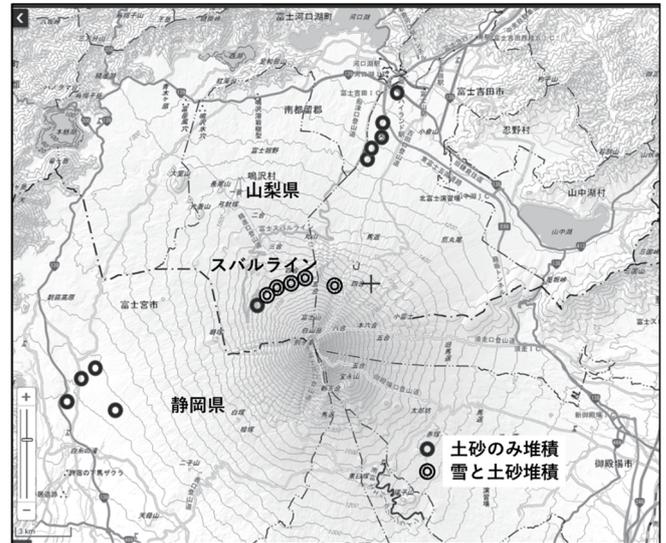


図1 富士山スラッシュ雪崩発生状況



図2 スバルライン・スラッシュ雪崩発生状況

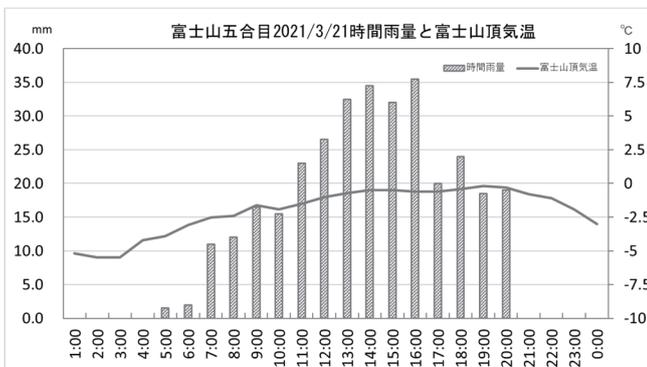


図4 富士山五合目の時間雨量(山梨県)と富士山頂気温(気象庁アメダス)



図3 石楠花橋付近のスラッシュ雪崩発生状況

1 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

Snow and Ice Research Center,  
National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience

## 灌木に作用する雪圧に関する研究 Study on Snow Pressure acting on Shrubs

○小田憲一<sup>1</sup>, 松元高峰<sup>2</sup>, 勝島隆史<sup>3</sup>, 中村 勝哉<sup>1</sup>, 宮下彩奈<sup>3</sup>, 勝山祐太<sup>3</sup>  
Kenichi Oda, Takane Matsumoto, Takafumi Katsushima, Katsuya Nakamura, Ayana Miyashita and Yuta Katsuyama

### 1. はじめに

雪が多く降る地域の山間部における急斜面には多くの灌木が自生しており、積雪の影響を受けて湾曲・倒伏など様々な形に変形した状態が多く見られる。このような灌木は周辺の積雪との間に力学的な作用を与え合い、斜面積雪の安定性に影響していることが予想される。しかし、この両者の間にある具体的な理論などは未だ解明されていない。また、これらの力学的な関係を明確にするためには積雪・灌木の両視点で未知数な部分が多い。そこで、本研究では、自然斜面上に自生する灌木の中から積雪期にほとんどが地表面まで倒木するものを対象にひずみゲージを取り付け、対象灌木に作用している雪圧について検討する。

### 2. 研究方法

本研究では、新潟県魚沼市大白川の破間川左岸に面した斜面を対象とした。観測地にて数種類の灌木を対象に、根本から約50cmの間隔で5箇所へひずみゲージを設置し、2020年12月～2021年1月の間30分毎にひずみ量を計測した。今回は対象とした灌木のうち、樹幹が比較的大きく、根曲がりも少ないものの中から、モミジ1本について報告する。また、灌木に作用している雪圧を評価する方法として、計測したひずみゲージの値から灌木の上縁応力を算出することで外荷重を推定した。図-1に灌木に設置したひずみゲージの位置と推定した荷重の状態を表した図を示す。また、灌木の弾性係数はあらかじめ無雪期に人為的な外荷重を作用させて得られたひずみ量から平均的に算出した。

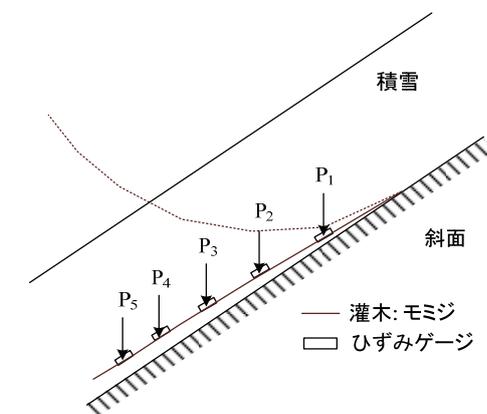


図-1 ひずみゲージの位置と推定した荷重の状態

### 3. 計算条件

斜面積雪が灌木に及ぼす直応力 $\sigma$ は以下の式で求められる。

$$\sigma = \frac{M}{I_w} y = E \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 $M$ は曲げモーメント、 $y$ は樹木断面の中立軸から樹木表面までの長さ、 $I_w$ は樹木の断面二次モーメント、 $\varepsilon$ はひずみゲージより得たひずみ量を表す。ひずみゲージの取り付け位置で作用する曲げモーメント $M$ と断面二次モーメント $I_w$ は以下の式で求められる。

$$M = \frac{EI_w}{y} \varepsilon \quad (2)$$

$$I_w = \frac{\pi R^4}{64} \quad (3)$$

ここで、 $R$ は樹木のひずみゲージ位置での直径とする。式(2)で得られた曲げモーメントは、着目している $P_1 \sim P_5$ の位置で生じている値となる。本研究では、図-1に示した倒伏後の灌木と荷重 $P$ の状態を自由体線図とした片持ちばりの状態で求めた曲げモーメント分布に式(2)から得られた曲げモーメントの値を代入することで荷重 $P$ を求めた。

### 4. 結果・考察

計算から得られた対象灌木に作用している荷重分布を図-2に、対象期の積雪深変化を図-3に示す。根本から2m未満の部分で荷重は積雪深の増加に伴い大きくなっている傾向にあり、特に根本付近は最大80kNと大きくなることがわかる。一方で灌木の先端付近は荷重を受けているものの、その大きさは根元に比べて1/10程度であることがわかる。今回は、灌木にひずみゲージのみを取り付けた計測を行ったが、灌木に作用する雪圧を圧力センサ等で直接計測し、本研究で得られた荷重の精度を引き続き検証する必要がある。

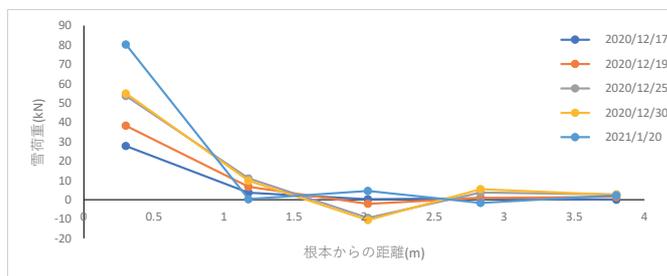


図-2 対象灌木に作用している荷重分布

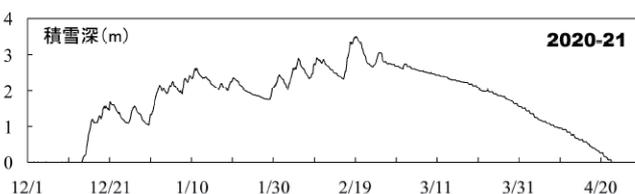


図-3 積雪深変化

### 5. まとめ

本研究では、自然斜面上に自生する灌木に設置したひずみゲージの観測データから、灌木に作用する雪圧を算出する方法について検証を行った。この結果、積雪の荷重によって灌木が倒伏する状況を力学的に把握できる可能性があることを確認した。今後は、灌木に作用している雪圧を圧力センサなどで直接計測し、ひずみゲージで得られる雪圧の変化や倒伏の状況をより詳細に分析する。

1 日本大学理工学部  
2 新潟大学  
3 森林総合研究所

College of Science and Technology, Nihon University  
Niigata University  
Forestry and Forest Products Research Institute

## ドローンによる雪崩パトロール - 定点撮影と 3次元点群共有 - Implementation of Avalanche Patrol Using Drone - Photo in the same position and sharing in 3D point cloud -

○町田敬<sup>1</sup>

Takashi Machida

### 1. はじめに

新潟県南魚沼郡湯沢町の国道 17 号においては、冬期間は毎日雪崩パトロールが実施され、雪崩の前兆現象を把握することにより雪崩災害防止対策が講じられ、これまでの雪崩発生履歴や兆候から 12 地区 25 斜面を雪崩発生の高い箇所として把握されている。

これまで、雪崩パトロールにおいては、雪崩発生区や堆積区の見通せない場合は、積雪安定度の測定や監視員の配置、避難通路の確保など安全対策を行い、図 1 に示すような斜面の登坂を行い、図 2 に示すような発生状況の確認を行っていた。本文においては、近年の発達したドローンの活用により、観測員への負担軽減や安全性の確保、効率的な点検の取り組みと運用について述べる。



図 1 斜面の登坂状況



図 2 雪崩発生調査状況

### 2. ドローン運用への取り組み

雪崩パトロール員によるドローン運用への取り組みとして、下記の項目の確立や取得登録を事前に行い運用を開始した。

#### ① 日常訓練の確立

図 3 に示すような GPS 機能のないトイドローンによる室内での飛行訓練を行い、操縦の習熟訓練を日常的に行える環境を整備した (図 4)。

#### ② 民間団体発行のライセンス取得

国土交通省に登録されているドローン講習団体にて、技能認定講習および試験により認定証を取得した。

#### ③ 無人航空機飛行許可申請 (DIPS)

航空法に基づく許可承認情報を申請し、運用するドローン機体と操縦者の情報を登録した。

#### ④ ドローン情報基盤システム (FISS) への登録

事前にドローン飛行する日時場所の登録を行った。



図 3 練習用トイドローン



図 4 操作習熟訓練状況

### 3. ドローンによる定点撮影

図 5 に示すように自動制御ソフトによりドローンの撮影位置情報、対地上高度、カメラアングル、飛行経路を記録した自動飛行ミッションを作成することにより、図 6 に示すような同じ画角の写真での斜面状況比較をすることが可能となった。汎用機を用いた撮影を行う場合はドローン機体の高度は離陸地点からの対地上高度となるため、離陸地点を事前に決定し飛行を行った。運用においては、離着陸は手動操縦を行い、目視内飛行にて撮影を行っており、撮影時にもプロポ画面を注視する必要がなく常に機体状況を監視しながらの撮影が可能となった。

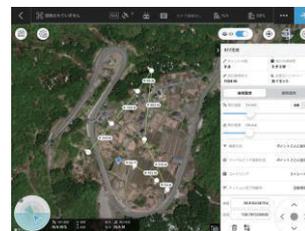


図 5 自動飛行ミッション



図 6 定点撮影画像

### 4. ドローン画像からの 3次元復元と共有

雪崩発生状況をドローンにて撮影したデータを現場からモバイル通信利用し、スタンドアロンフォトグラウンドメトリー (SfM) である Pix4Dcloud へアップロードし、3次元点群化とリンク URL による情報共有を行った。モバイル通信やクラウドの利用環境にもよるが、ドローン撮影時間 30 分、データアップロード (写真 120 枚 1.2GB) 20 分、SfM 処理時間 60 分の計 110 分であった。

なお、今回は測量専用の機体やグランドコントロールポイント (GCP) の設置は行っていないが、図 7 に示すように、3次元点群化されたデータにより、発生区の規模や面積、発生量、走路延長などを簡易的に把握することが可能であった。特に、デブリ末端からの道路までの距離など今後の対策を講じる上で必要となる情報を危険な現場へ立ち入らずに計測できたことは、安全性の確保や効率化として飛躍的な成果が得られたと考えられる。

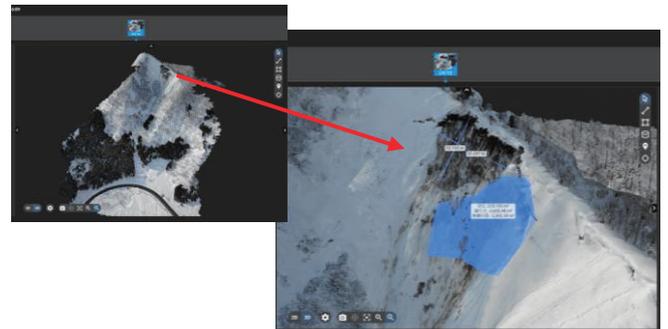


図 7 雪崩発生斜面の 3次元点群化

1 町田建設株式会社

Machida Construction Co.,Ltd.

寒冷地対応型小型ポータブル PM<sub>2.5</sub> 測定装置の開発

— 冬季札幌観測, 夏季アラスカ森林火災事例, 函館黄砂事例の紹介 —

Development of a Compact Portable PM<sub>2.5</sub> Measurement System for Cold Regions

- Introductions of Sapporo's winter observation, summer Alaskan wildfires, and an Asian dust event in Hakodate -

○安成哲平<sup>1,2</sup>, 若林成人<sup>3</sup>, 松見豊<sup>4</sup>, 的場澄人<sup>5</sup>

Teppei J. Yasunari, Shigeto Wakabayashi, Yutaka Matsumi, and Sumito Matoba

## 1. はじめに

近年世界中で、様々な要因の大気汚染が早期死亡率に影響を与えているが、PM<sub>2.5</sub>は大気汚染微粒子として大気汚染の指標となり、日本においても環境省により環境基準が定められている。しかし、そのPM<sub>2.5</sub>の観測が世界ではまだまだ欠けている地域が多々あり、例えば、北極域及び周辺域は、北半球中緯度と比較して観測が圧倒的に不足している<sup>2)</sup>。冬季に極寒になるこのような北極圏の地域で通年のPM<sub>2.5</sub>を定常観測できることは、これらの地域に住んでいる人々の健全な大気環境を考える上で極めて重要である。また、極寒の地でPM<sub>2.5</sub>を測定を安価で容易にできることは、南極など他の地域においても今後汎用性が高い。そこで、我々は、寒冷地対応型小型ポータブルPM<sub>2.5</sub>測定装置の開発とこれを用いた観測を展開してきたので紹介する。

## 2. 方法と観測

2.1 PM<sub>2.5</sub>測定装置の開発

鉄箱内に名古屋大学と(株)パナソニックが共同開発したPM<sub>2.5</sub>センサー<sup>3)</sup>を取り付け、それを木製断熱箱内に設置した。白熱電球ヒーター(25W x 2個; 60W x 2)を温度コントローラーで制御し、設定温度以下(5°Cで設定)になるとヒーターが自動で作動し、断熱箱内の温度が保てるようにした。また、通風の観点からファンによる強制通風の必要性や通風口の大きさ(4, 14, 24, 36 mm)や数を変化させた場合の測定への影響などを線香の煙を使って調べた。また、北大低温研内の-25°Cの低温室でヒーターの動作試験も行った。これらのテスト実験の結果を踏まえたものをプロトタイプとした。プロトタイプに、断熱箱の塗装、雨避けカバー追加などのアップデートしたもの(鉄箱とPM<sub>2.5</sub>センサー以外の部分)は、現在(株)タナカで作製依頼ができるようになっている(商用版と呼ぶ)。測定結果をPM<sub>2.5</sub>濃度に変換する方法は、Nakayama et al.<sup>3)</sup>の方法で行った。

2.2 国内外におけるPM<sub>2.5</sub>測定装置による観測

プロトタイプをアラスカ大学(UAF)国際北極圏研究センター(IARC)に2019年6月に設置した。また、商用版を2021年4月に函館市国際水産・海洋総合研究センター屋上に設置し、6月末には、弘前大学理工学部の屋上にも設置を行った。ロシアのハバロフスクとヤクーツクへこの商用版6台の設置を行う予定で機器設置申請を行ないヤクーツクでは設置許可も出ているが、現在、コロナ禍で設置延期となっている(来年度以降設置予定)。

本発表では、プロトタイプ開発時のテスト実験の結果の概要を説明し、アラスカへ設置したプロトタイプと函館に設置した商用版の観測結果について紹介する。

## 3. 結果

3.1 PM<sub>2.5</sub>測定装置の検証実験

断熱箱の通風口2つで大きさを変えた場合、断熱箱内外で

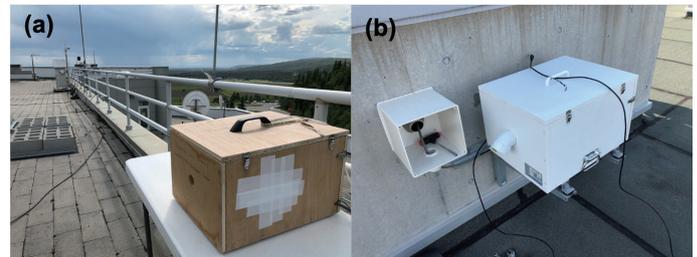


図1. PM<sub>2.5</sub>測定装置の外観. (a) アラスカ大に設置したプロトタイプ; (b) 函館に設置した商用版.

PM<sub>2.5</sub>の時間変化が大きく異なり、穴の大きさに関わらず大気環境が断熱箱内部へ反映できていないことがわかった。一方で、防水ファンにより、強制通風を行なったところ、断熱箱内外でのPM<sub>2.5</sub>濃度の変化はほぼ再現され強制的通風が必須であることがわかった。また、低温室で温度コントローラー設定温度5°C、通風口2つの設定で外気が-25°Cであっても断熱箱の中をプラスの温度に保てることがわかった。

3.2 札幌, フェアバンクス, 函館でのPM<sub>2.5</sub>観測

プロトタイプを使った観測においては、2019年2月の冬季札幌での観測(北大工学部屋上)で、札幌国設局(環境省そらまめくん)の1時間値とPM<sub>2.5</sub>測定装置(以下、装置の結果は全て1時間平均値)の結果を比較したところ決定係数約0.76という良い関係性が得られた。2019年6-7月のアラスカ・フェアバンクスでの観測では、夏季アラスカの森林火災時の高濃度PM<sub>2.5</sub>を捉えることに成功し、アラスカのPM<sub>2.5</sub>時間変動でも現地観測ステーションの1時間値と整合的な結果が得られた。また、商用版を使った初の観測では、2020年4月に函館市国際水産・海洋総合研究センターに設置した後、5月8-9日の黄砂飛来時に連動したPM<sub>2.5</sub>の上昇を捉えることに成功した。こちらも、環境省そらまめくんの近接地点(中部小学校)の1時間値と良く一致した。

## 参考文献

- 1) Lelieveld, J., J. Evans, M. Fnais, M. et al., 2015: The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* **525**, 367–371, <https://doi.org/10.1038/nature15371>.
- 2) Lary, D. J., F. S. Faruque, N. Malakar, et al., 2014: Estimating the global abundance of ground level presence of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>), *Geospat. Health*, **8**(3), S611-S630, <https://doi.org/10.4081/gh.2014.292>.
- 3) Nakayama, T., Y. Matsumi, K. Kawahito, and Y. Watabe, 2018: Development and evaluation of a palm-sized optical PM<sub>2.5</sub> sensor, *Aerosol Sci. Technol.*, **52**(1), 2-12, <https://doi.org/10.1080/02786826.2017.1375078>.

1 北海道大学北極域研究センター

2 北海道大学広域複合災害研究センター

3 北海道大学大学院工学院

4 名古屋大学宇宙地球環境研究所

5 北海道大学低温科学研究所

Arctic Research Center, Hokkaido University

Center for Natural Hazards Research, Hokkaido University

School of Engineering, Hokkaido University

Institute for Space-Earth Environment Research

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

## パーティクル偏光ライダーによる雨粒と雪片の鉛直分布観測

## Vertical distribution observation of raindrops and snowflakes using particle polarization lidar

柴田 泰邦<sup>1</sup>

Yasukuni Shibata

## 1. はじめに

降雪による交通インフラの停止や交通事故増加は、首都圏において重大な社会問題となっている。二重偏波レーダーによる降水粒子の種別判定法が研究・開発されているが、レーダーは指向性が広いので、照射空間領域で多数を占める種別が判別されている。このため、複数種の降水粒子が混在していると、誤判定の要因となる。そこで、指向性の狭いレーザー光を用いるライダーを用い、個々の降水粒子からの散乱光に含まれる偏光情報を元に、その降水粒子が雨か雪かを判別する手法を提案した<sup>1</sup>。本講演では、2021年1月23日夜の降雪前後に、東京都立大学日野キャンパスにおいて18時間にわたって観測した降水粒子中の雨粒と雪片の鉛直分布を示す。

## 2. パーティクル偏光ライダーによる雨雪判別

直線偏光したレーザー光が球形の粒子に照射されると、その後方散乱光の偏光面は保持され、非球形粒子の場合は偏光面が変化する。偏光解消度 $\delta$ は散乱体の非球形性を表すパラメータで、レーザー偏光面と平行の散乱光 $P_{\parallel}$ と垂直の散乱光 $P_{\perp}$ の比 $P_{\perp}/P_{\parallel}$ で表される。光散乱の偏光の乱れを利用して雲やエアロゾルの種別を判別する偏光ライダーは、黄砂のような非球形エアロゾルの観測や、水雲と氷雲の判別などに利用されている。本研究では従来型の偏光ライダーと違い、雲やエアロゾルと比べて大気中に疎に分布し、散乱強度の大きい降水粒子が対象となる。先行研究より雨粒の $\delta$ は0.1以下、雪片の $\delta$ は0.4~0.5程度であることが分かっている<sup>2,3</sup>。降水粒子は大気分子やエアロゾルより大きく、後方散乱係数は1桁以上大きい。したがって、大気に照射されたパルス光が降水粒子に当たれば、パルス状の散乱信号が受光される。これにより、個々の降水粒子からの $\delta$ を正確に計測できる。さらに曇の場合、雨と雪が混在しているのか、雪が溶けかかっているのかという状態を知ることが可能になる。個々の粒子(パーティクル)の偏光情報を計測するライダーをパーティクル偏光ライダーと呼ぶこととする。

## 3. 雨粒子と雪粒子の鉛直分布観測

2021年1月23日12:54から24日5:57に東京都立大学日野キャンパス(東京都日野市)において、図1に示すパーティクル偏光ライダーを用いて雨粒子と雪粒子の鉛直分布観測を行った。レーザー波長は1064nm、出力は10mJ、ビーム径は10mm、受光望遠鏡口径は50.8mmで、光検出器はAPD(アバランシェフォトダイオード)を用いた。降水粒子がレーザー光を横切るようにライダーは仰角42°に傾けている。望遠鏡で受光された光は、中心波長1064nmのバンドパスフィルターを通して背景光を除去し、偏光ビームスプリッター(PBS)で $P_{\perp}$ と $P_{\parallel}$ に分離される。

図2にパルス光1発での $P_{\perp}$ と $P_{\parallel}$ の受信信号例を示す。高さ分解能は7.5mである。高度200m付近の大きな盛り上がりは雲からのエコーである。高度110m付近のスパイク状の信号が降水粒子からのエコーで、 $P_{\perp}$ と $P_{\parallel}$ から $\delta$ を求め、雨雪を判別する。このようにパルス光1発ごとの受信データから降水粒子の有無を調べ、個々に雨雪を判別した。図3に降水粒子の雨粒と雪片

の鉛直分布、および地上気温の経時変化を示す。地上では18:00までは雨で時々雪が混じる程度だった。18:20ごろを境に降雪が強まった。このときの地上気温を見ると、ほぼ同じタイミングで3°C前後だった気温が0.6°Cまで急降下している。20:00過ぎに気温が上昇に転じ、降雪(降水)が22:00の段階で一度弱まり、その後降水に変わっている。これらの観測データから、パーティクル偏光ライダーによって雨粒と雪片の識別が可能であることが示された。

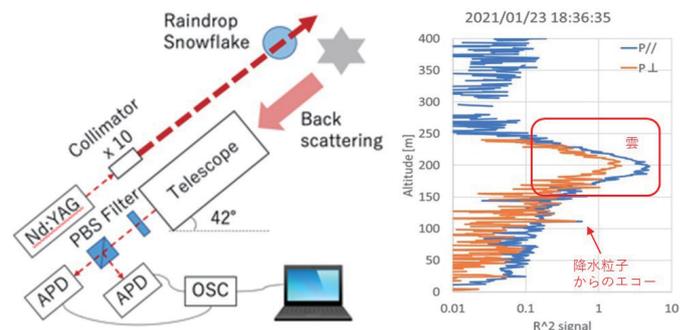


図1 パーティクル偏光ライダーシステムの概略図

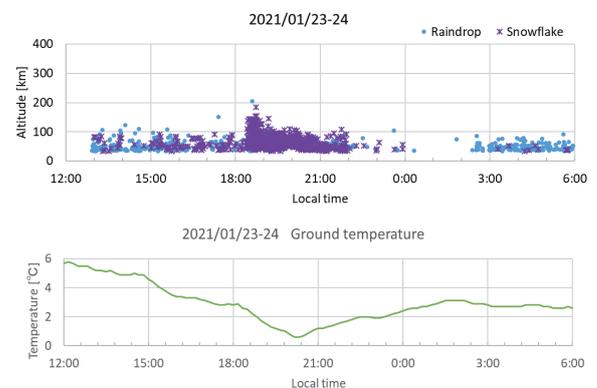
図2 パルス光1発での $P_{\perp}$ と $P_{\parallel}$ の受信信号例

図3 2021年1月23~24日に観測された降水粒子の雨・雪鉛直分布と地上気温の経時変化

謝辞：本研究はJSPS科研費JP19K22030の助成を受けた。

## 参考文献

- 1) 柴田泰邦, 2021: パーティクル偏光ライダーによって観測された雨粒子と雪粒子の鉛直分布とその経時変化. 日本気象学会2021年度春季大会, PR-36.
- 2) S. R. Pal, A. I. Carswell, 1977: The polarization characteristics of lidar scattering from snow and ice crystals in the atmosphere, *J. Appl. Meteor.*, 16, 70-80.
- 3) 斎藤典生 他, 1985: 偏光解消度測定用レーザーレーダーによる降雪雲の観測. 応用物理, 54, 952-958.

1 東京都立大学システムデザイン学部

Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

## 小型 UAV および SfM を用いた雪面粗さの現場測定

## In Situ Measurements of Snow Surface Roughness Using Small UAV and SfM

○高橋浩司<sup>1,3</sup>, 白川龍生<sup>2</sup>, 長沼芳樹<sup>3</sup>, 猿渡久人<sup>4</sup>

Koji Takahashi, Tatsuo Shirakawa, Yoshiki Naganuma and Hisato Saruwatari

## 1. はじめに

本研究は、積雪表面の性状と気象条件が撮影図化に及ぼす影響に着目し、低コストかつ特殊技術を要さない UAV (Unmanned aerial vehicle) および SfM (Structure from Motion) による積雪観測手法を確立することを目的とする。ここでは、冬期道路管理への応用を指向した雪面粗さの現場測定について記す。

## 2. 実験概要

実験は 2021 年 3 月 8 日に北海道ドローン協会当別練習場にて実施し、UAV による積雪表面の撮影および気象観測を実施した。撮影条件は、撮影高度が 3 ケース (15m, 30m, 50m)、画像形式 2 形式 (JPEG, RAW)、撮影方法については、俯瞰 (自動航法) および斜め 60° 下向き (手動) で撮影、オーバーラップ率については 80%以上とし、太陽高度の異なる時間帯で数ケース実施した。撮影範囲は、設置した防雪柵を中心に 20m×20m の範囲とした (図 1)。観測方法は、① 標定点 (30cm×30cm の木板) を観測範囲の周辺 5 か所設置して VRS 電子基準点による三次元測量にて公共座標付与、② UAV にて設置した標定点を含め観測範囲を連続撮影、③ 撮影データを Agisoft Metashape Professional にて公共座標付与の点群作成とした。同様の方法で、融雪後に地表面データを作成し、差分から積雪深を算出した。また、精度検証を目的に、観測範囲周辺を取り囲むよう 1m 間隔でスノープローブによる積雪深計測を行った。気象データは、新篠津アメダスの気温・風速、および現地観測した天候・短波放射・雪面アルベド・雪質判定結果を用いた。

## 3. 実験結果および考察

UAV-SfM および実測による雪面観測結果を示す (図 2)。どちらも地表面形状に沿った雪面を概ね捕らえており、特徴点が少ない積雪表面においても三次元データを得ることができる。計測誤差については、10%以上あった箇所は右側 (R 側) が 2/10 箇所、左側 (L 側) が 6/10 箇所であった (表 1)。L 側については、R 側に比べ地表面に緩勾配があり、この影響で実測位置に若干のずれが発生したと推察される。平均誤差は 8%程度であり、冬期道路管理の観点からは実用的な範囲と考える。

気象観測の結果については、気温: +0.4°C, 平均風速: 5m/s, 天候: 晴, 下向き短波放射: 600W/m<sup>2</sup>, 雪面アルベド: 0.65, 雪質: しまり雪であった。今回は欠損なく三次元データを作成できたが、別日の実験においては、三次元データが欠損する事例が確認されている。既往の研究においても曇天下で下向き短波放射が 400W/m<sup>2</sup> 以下の場合や新雪で雪面アルベドが極端に高い場合など、三次元データが欠損する事例が確認されている。したがって積雪表面の性状と気象条件は撮影図化に大きく影響を与えるものと推察されるため、精度向上に関する条件検討や閾値の設定、画像処理による再現方法の検討が重要と考える。

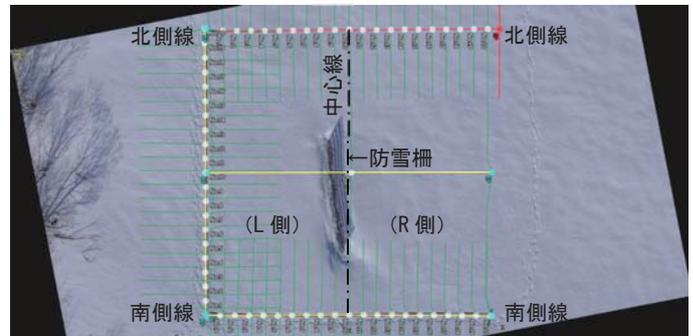


図 1 観測範囲と計測ポイント

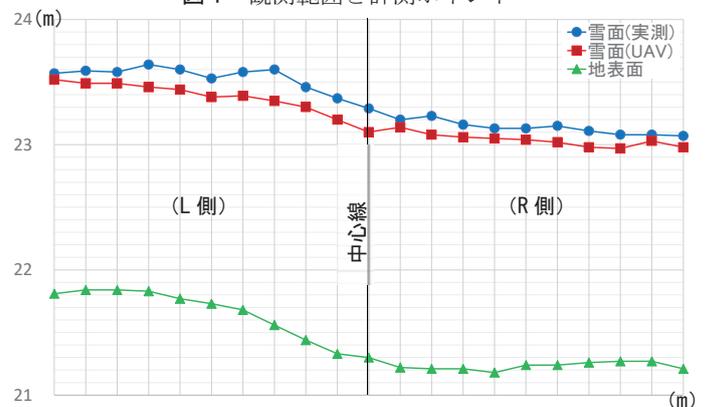


図 2 積雪観測結果 (北側線)

表 1 観測結果一覧表 (北側線) (■: 誤差 10%以上)

(L側)	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
実測(cm)	168	168	184	190	192	189	188	193	191	185
UAV(cm)	178	169	171	173	171	169	167	168	164	165
誤差(%)	-6%	-1%	7%	9%	11%	11%	11%	13%	14%	11%
誤差平均(%)	8%									
誤差(cm)	-10	-1	13	17	21	20	21	25	27	20

(R側)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
実測(cm)	184	181	177	179	182	183	183	186	169	169
UAV(cm)	169	168	165	167	172	173	161	166	165	163
誤差(%)	8%	7%	7%	7%	5%	5%	12%	11%	2%	4%
誤差平均(%)	7%									
誤差(cm)	15	13	12	12	10	10	22	20	4	6

## 謝辞:

本研究にあたり、実験場での除雪、防雪柵設置や積雪観測補助等、富安株式会社マルエイ三英事業部、北海道ドローン協会の皆さまより多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表する。

1 北見工業大学大学院工学研究科

2 北見工業大学

3 株式会社構研エンジニアリング

4 株式会社ジオリサーチ

Graduate School of Engineerig, Kitami Institute of Technology

Kitami Institute of Technology

Koken Engineering Co., Ltd

Geo Reseach Co., Ltd

# IoT タイムラプスカメラと衛星観測画像による湖沼の冬季湖面環境観測データの解析 Winter lake surface environmental data analysis using satellite observation and IoT time lapse camera images

○佐藤建<sup>1</sup>

Tatsuru Sato

## 1. はじめに

寒冷地、積雪地などでは凍結や積雪、雪崩や雪庇などの雪氷の崩落により行動や人間活動が制限されるため、UAVなどのIoTや衛星観測の活用は非常に有効なものとなる。宮城県伊豆沼・内沼ではハスが湖面の大部分を覆うなどしてかつての湖面環境が変化している(1, 2)。ハスは冬季に湖面から消失し、毎年冬の終わりには湖面には植生が確認できない状況になる。地域の情報によると渡り鳥の捕食による影響のほか湖面が凍結することによって湖面の植生に影響を与えていることが議論されており、冬季湖面環境の変遷の調査を行っている。

本研究では伊豆沼の近くに設置するカメラによる過去10年以上のタイムラプス撮影画像記録のほか、衛星による湖面全体のリモートセンシング観測データから伊豆沼の湖面環境データを使用して、この地域で積雪の多かった2020年度冬季の記録を調べた。

## 2. 手法

湖面環境調査のため環境省生物多様性センターが設置するWebカメラによるタイムラプス撮影画像を用いてデータ解析、画像処理から過去の湖面環境の調査を行った(3)。カメラは伊豆沼の北に位置する伊豆沼・内沼サンクチュアリセンターに設置され2002年から現在まで撮影を行っている。タイムラプスによる撮影から日中1時間に1回の撮影を行っている。Superpixelによるセグメンテーションによって凍結境界の情報を取得して湖面の凍結日の解析を行っている(4)。

衛星データの活用のためGoogleEarthEngineによるデータ解析を行った。利用した衛星はLandsat 8のマルチスペクトル画像であり、分解能は30m、の回帰周期は16日である。この中から雲による影響で湖面環境が確認できない日を除くとともにタイムラプスカメラの凍結日を確認して画像を取得した。

## 3. 結果と考察

タイムラプス画像や衛星画像解析から凍結情報を取得して2007年から2020年度までの凍結日数を求めたところ、2020年度は凍結日数が48日となった。2020年度は同様に凍結日数が多い2017年度冬を超えて過去5年間で最大となった。特に2020年度は1月の間は凍結期間が継続し、過去10年間で初めて1月の間の全日数での湖面の凍結が確認された。2010年代には40日を超える凍結日数の年が2回あり、2020年度冬はこれらに並んで凍結日数が多い年となった。一方で2019年度の冬季は凍結日数が非常に少なく、これまでのデータ解析の結果から近年の伊豆沼の結氷は毎年継続的に安定した凍結日数があるのではなく、数年ごとに凍結日数が多い年と少ない年が存在する。

## 参考文献

- 1) 鹿野秀一, 菊地永祐, 嶋田哲郎, 進東健太郎, 2008: 伊豆沼・内沼のハス群集の生育拡大状況. 日本陸水学会 講演要旨集 日本陸水学会第73回大会 札幌大会, 208-208.
- 2) 仲田信也, 梅田信, 嶋田哲郎, 藤本泰文, 2015: 伊豆沼におけるハス群落消長の年間変動と湖水・底質環境の関連. 土木学会論文集 B1 (水工学), 71(4), 757-762.
- 3) 環境省生物多様性センター, インターネット自然研究所. <https://www.sizenken.biodic.go.jp> (2021.7.3 取得)
- 4) 佐藤建, 小林健一, 藤本泰文, 2020: 伊豆沼の冬季環境モニタリングのためのタイムラプス画像解析, 伊豆沼内沼研究集会予稿集, 2020, 14, 3-4.

1 国立高等専門学校機構一関工業高等専門学校

National Institute of Technology, Ichinoseki Collage

## 小樽市ガスロードヒーティングの省エネ可能性調査

## Survey of energy saving possibility in Otaru city Gas Road Heating

山田忠幸<sup>1</sup>, 山田健雄<sup>1</sup>, ○中山隆之<sup>1</sup>, 片山幸宏<sup>2</sup>, 長内尚平<sup>2</sup>

Tadayuki Yamada, Takeo Yamada, Takayuki Nakayama, Yukihiko Katayama and Syohei Osanai

## 1. はじめに

ロードヒーティング (以下 RH とする) は、寒冷地域に於ける融雪・凍結防止の道路管理に欠かせない施設である。ヒーティングの熱源としては、主に電気・ガスを使った設備が一般的であるが一部灯油や重油を使った施設がある。近年、RHに掛かる経費が自治体の財政を圧迫するとの観点から、政策的に RH稼働を止めている設備も見られる事を背景に RHの省エネが望まれている。今回、小樽市建設部様のご協力を頂き、小樽市内中央通り歩道に整備されているガス式 RHの稼働状況や路面温度等を調査し、RHの省エネ可能性を調査した結果を報告する。

## 2. 小樽市 RH 経費の概算

RH設備箇所数: 232箇所

設置面積: 70,000m<sup>2</sup> (14km) の内、57,000m<sup>2</sup>稼働概算費用: 57,000m<sup>2</sup>×¥5,000=約2億8500万円 (年間)

小樽市の年間除雪費は約12億円掛かっており、RHに係わる経費の概算として、年間約3億円が支出され除雪費全体の約25%となっている。稼働を止めている13,000m<sup>2</sup>は、砂散布による代替対応としている。(小樽市HPより抜粋)

## 3. 調査システムの概要

図1, 2は調査機器とガス盤内部の写真である。

(A) 路温計 (放射温度計) (B) Webカメラ

(C) 熱量式冬期気象センサ (SDA)

(D) 多極熱収支センサ (RDサーマルアイ)

(E) 制御盤 (変換器・通信ユニット)

(F) ガス制御盤内不凍液ポンプ運転ログ

(G) 不凍液温度 (行き) (H) 不凍液温度 (戻り)

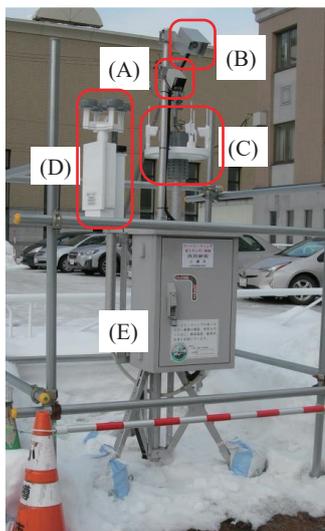
歩道脇に  
設置ガス盤内  
にロガー  
を設置

図1 観測センサの設置状況



図2 既設ガス盤内部

## 4. 観測データと分析

観測データの項目は、気温・路温・不凍液 (往戻) 温度・ポンプ運転時間・1°C保持熱量・3°C保持熱量・路面熱量・融雪熱量等を観測しサーバへデータを送るシステム構築を行なった。観測データは、リアルタイムに確認できる様専用表示アプリを作成、小樽市・弊社にてデータ共有した。

今回の調査では循環不凍液の行きと戻りの温度データがあるので、この温度から配管埋設10cmの路面内温度を想定した熱流量が求められ、そこから見える省エネ率を求める事とした。

コンクリートの熱伝達係数1.6W/m<sup>2</sup>・Kから平均路面熱伝達量を求め、RDサーマルアイで計測した1°C保持熱量と比較した結果、相似的グラフが得られた事からRDサーマルアイの熱量計測に大きな誤差は無いと考えた。

①平均路温熱量が実態の路面熱量と考え、④1°C保持熱量は、路温を1°Cに設定した場合の熱量と言えるので、その差分が省エネ可能熱量と解釈できる。

表1 毎月の集計値

項目	12月 [kW/m <sup>2</sup> ]	1月 [kW/m <sup>2</sup> ]	2月 [kW/m <sup>2</sup> ]	3月 [kW/m <sup>2</sup> ]
① 平均気温	-1.9 °C	-3.5 °C	-2.8 °C	-1.4 °C
② 平均路温	3.4 °C	2.4 °C	3.1 °C	3.8 °C
③ 0°C保持熱量	483	550	421	76
④ 1°C保持熱量	604	662	530	101
⑤ 3°C保持熱量	803	834	696	141
⑩ 平均路温熱量	807	827	694	161

12月: 25.2% 1月: 20.0% 2月: 23.6% 3月: 37.3%

また、当社のSDAセンサで観測した降雪融解熱量から、累積積雪量を逆算した結果、気象庁データ400cmに対して429cmであった。降雪融解熱量からの試算は大きな誤差は無いと考える。

## 5. まとめ

今回、ガス式RHの省エネ可能性を調査する為に、当社の熱量センサを使い、実際の⑩路温熱量と⑤3°C保持熱量、④1°C保持熱量を比較する手法で省エネ可能性の数値化を試算した。数値的には、路面温度を1°Cに抑制する制御により、20~35%の省エネになる事が見えてきた。

また、現状の設備更新での制御方法の方向性として、2台のガスボイラー (燃焼器) を交互に運転する仕組みを導入し基本的に1台運転とし、強い降雪時は2台運転を行なう制御を標準化する事を推奨する。

令和3年度は、電気式RH設備の調査を小樽市にて実施予定で、当社の熱量式計測技術による省エネ制御を北海道・東北地方に広めていきたい。

1 山田技研株式会社

2 小樽市建設部

Yamada Giken co.,Ltd.

Otaru City Construction Dept.

モンゴル北部・連続永久凍土地帯における盆地冷却に及ぼす湖水の影響

Influence of Lake Water on Cooling in Basin in Continuous Permafrost Regions, Northern Mongolia

○武田一夫<sup>1</sup>, 木村賢人<sup>2</sup>, 杉田明史<sup>3</sup>

Kazuo Takeda, Masato Kimura and Akifumi Sugita

1. はじめに

地球規模の気候変動が高緯度地域に現れやすいといわれて久しい<sup>1)2)</sup>. 本研究では, 気候変動の兆候を把握することを目的に, モンゴル北部・フブスグル地域の連続永久凍土地帯にある地形特性の類似した2つの盆地, フブスグル湖集水域(Hovsgol Lake: HL)とダルハド盆地(Darhad Basin: DB)で冬期間に発生する気温逆転層を調べてきた<sup>3)</sup>. 今回, 逆転層に及ぼす湖水の影響を年間通して解析し, その特徴を調べたので報告する.

2. 調査方法

フブスグル地域の北部中央には南北に連なる標高 3000m級の山脈があり, 東側にHovsgol L. (湖面の標高 1650m)が, 西側にDarhad B. (盆地底の標高 1580m)が位置する. 両盆地では, 2014年4月~2015年10月に山の斜面を利用して気温の鉛直分布を測定してきた. 今回の解析には, 気温の鉛直分布の他, 両盆地にある気象台の敷地内で観測した気温・地温, およびHLのハトガル気象台の湖水観測データも使用した. 初めに, 各盆地底で起こる湖水や土壌の凍結融解に関わる気象事象に基づいて, 年間を3つの期間に区分した. 毎時の気温鉛直分布が5時間以上継続して逆転するときを逆転層の発生として扱い, その上面を上限標高として日毎に表した(図1). 逆転層は, 両盆地で上限標高が1800m以上のものを高層逆転層, 1700m以下を低層逆転層に区別した. 発生率は, 各期間について発生日数を期間日数で除した値を用いた.

3. 結果および考察

**気象事象に基づく期間区分** 気象データから, HLでは無湖水期, 湖水成長期, 湖水融解期に, DBでは活動層凍結期, 凍土維持期, 凍土融解期に区分した(表1).

**逆転層の構造** HLでは, 逆転層が冬期の一部を除いて, 年間通して標高2000mまで形成された. 一方, DBでは, 冬期の凍土維持期に標高2300mまで, 活動層凍結期に標高2100mまで, 夏期の凍土融解期には標高1850mまで起って, 逆転層の上限標高が変動した.

**逆転層の発生率** HLでの発生率は, 湖水成長期の高層が75.0%, それ以外の期間では低層が約70%と高くなった. また, 無発生が無湖水期の10/1以降に集中した. 一方, DBでの発生率は, 凍土維持期の高層が88.2%と高く, 他の期間でも比較的高くなった. 低層や無発生は, HLほど偏らず, 年間通して起こった.

以上の解析から, つぎのような特徴が考えられる. 永久凍土地帯の盆地では, DBのように湖水がなければ, 盆地冷却が年間通して起こりやすい. 季節ごとの放射冷却の長さに応じて, 冬期には逆転層が長く継続し, 夏期には規模や発生率が減少する. その結果, 活動層の凍結融解の影響は限定的とみられる. 一方, HL

のように盆地に湖水が加わると, 湖水成長期に湖水の凍結潜熱の影響によって高層の逆転層の発生が抑制され, それ以外の期間には湖水の冷却効果によって厚さ50mの冷気層が常に湖表を覆う. 無湖水期後半の無発生は湖水の熱による影響が表れている. なお, HLの上限標高2000mは地形によるものとみられる.

参考文献

- 1) IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
- 2) IPCC (2014): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.
- 3) 杉田明史ら, 2017: モンゴル北部・フブスグル地域における気温鉛直分布に及ぼす湖水凍結の影響. 雪氷研究大会 (2017・十日町), P176.

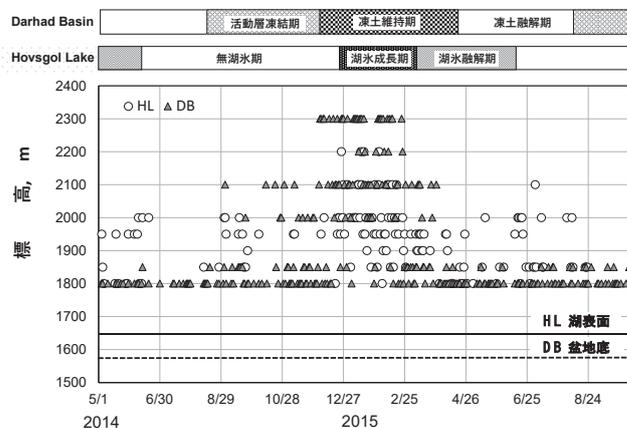


図1 永久凍土地帯の盆地における高層逆転層の上限標高

表1 逆転層の発生率

Hovsgol Lake			
	無湖水期	湖水成長期	湖水融解期
開始日	2014/6/7	2014/12/24	2015/3/10
終了日	2014/12/23	2015/3/9	2015/6/13
高層発生率 (%)	13.5	75.0	28.1
低層発生率 (%)	71.5	22.4	71.9
無発生率 (%)	15.0	2.6	0.0
期間日数	200	76	96
高層発生日数	27	57	27
低層発生日数	143	17	69
逆転層無発生日数	30	2	0
Darhad Basin			
	活動層凍結期	凍土維持期	凍土融解期
開始日	2014/8/20	2014/12/4	2015/4/18
終了日	2014/12/3	2015/4/17	2015/8/11
高層発生率 (%)	57.6	88.2	40.5
低層発生率 (%)	31.1	7.4	41.4
無逆転層発生率 (%)	11.3	4.4	18.1
期間日数	106	135	116
高層発生日数	61	119	47
低層発生日数	33	10	48
逆転層無発生日数	12	6	21

1 摂南大学  
2 帯広畜産大学  
3 株式会社 環器

Setsunan University  
Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine  
Kanki Co., Ltd.

## 永久凍土帯における地表面変位の経年・季節変化

—東シベリア・チュラプチャの事例—

## Interannual and seasonal surface displacement in a permafrost region

- A case study near the settlement in Churapcha, eastern Siberia -

○阿部隆博<sup>1</sup>, 飯島慈裕<sup>1</sup>

Takahiro Abe and Yoshihiro Iijima

## 1. 東シベリアにおけるサーモカルスト

サーモカルスト (thermokarst) は、含氷率の高いエドマ層における地下氷の融解によって引き起こされる不可逆的な地形変化現象であり、東シベリアやアラスカで広く観測されている。東シベリアのレナ・アルダン川中流域に囲まれた地域では、サーモカルストに伴う地形変化がこの30年で顕著にみられ<sup>1)</sup>、地盤沈下によるインフラ破壊や、水収支・生態系の変化など、近隣住民の生活に大きな影響を与えている。チュラプチャは、レナ・アルダン川中流域においてサーモカルストの進行が見られる代表的な居住地の一つである。チュラプチャでは、ドローン空撮による高分解能なサーモカルスト地形図の作成と1990年からの沈降量を推定した研究<sup>2)</sup>があるものの、街全体の沈降量の体系的な把握には至っていない。今後サーモカルストがどのような場所で進行するのかを予測し、永久凍土融解による人々への影響を最小限にするためにも、現在のサーモカルストの速度と空間分布を定量的に把握することが重要である。

## 2. 使用データと解析手法

本研究では、人工衛星搭載の合成開口レーダー(SAR)を用いて、地表面変位の経年・季節変化を調べた。2014年に打ち上げられた「だいち2号 (ALOS-2)」が2015年9月から2020年7月にかけて取得した北行軌道のストリップマップモード (10 m 解像度) のデータを用いた経年変化解析と、2019年の6月から2020年2月に取得した南行軌道のストリップマップモード (3 m 解像度) のデータを用いた季節変化解析を行った。解析ソフトウェアはGammaを用い、経年変化解析・季節変化解析ともにSBASによる干渉SAR時系列解析<sup>3)</sup>を行った。

## 3. 結果と考察

住宅街の北部にある耕作地 (T1, T2) と南側にある草原 (T3) では、地表面の顕著な経年沈下が検出された。沈降速度の大きさは T1, T2, T3 それぞれで、 $1.7 \pm 1.0 \text{ cm yr}^{-1}$ ,  $2.2 \pm 0.9 \text{ cm yr}^{-1}$ ,  $1.2 \pm 1.2 \text{ cm yr}^{-1}$  であった。これらの場所ではWorldView-2/3/4による高分解能光学画像から、いずれも無数のハイセンターポリゴン (サーモカルストの指標地形の一つ) の存在が確認できた。また、この地域における土地利用の履歴から、T1とT2は森林/草原から耕作地に改変されていたことがわかった。このことから、T1とT2では土地利用の改変により植生を失い、日射の影響や水収支が変わることで周囲に比べてサーモカルストが進行したと考えられる。しかしながら、T1・T2とほぼ同じ標高で数km東側に位置する耕作地Aでは経年的な沈降は検出されなかった。T3は1940年代から草原であり、土地利用の変化はないものの、この気候変動における影響 (気温・地温上昇, 水収支の変化) を受けていると考えられる。

同地域の季節変化解析の結果では、T1からT3では6月から10月にかけて2-3cm程度の季節的な沈降が検出され、その後2月にかけて1-2cmの隆起が検出された。一方、耕作地Aでは6月から翌年2月にかけて、明瞭な沈降や隆起は検出されなかった。これらの解析から、少なくとも耕作地AはT1やT2と比べ異なる地下氷構造や土質であり、季節的な融解沈降や凍上隆起が起こりにくい環境である可能性が考えられる。

## 参考文献

- 1) Crate, S., M. Ulrich, J. O. Habeck, A. R. Desyatkin, R. V. Desyatkin, A. N. Fedorov, T. Hiyama, Y. Iijima, S. Ksenofontov, C. Meszaros, H. Takakura, 2017: Permafrost livelihoods: A transdisciplinary review and analysis of thermokarst-based systems of indigenous land use. *Anthropocene*, **18**, 89-104.
- 2) Saito, H., Y., Iijima, N. I. Basharin, A. N. Fedorov, V. V. Kunitsky, 2018: Thermokarst Development Detected from High-Definition Topographic Data in Central Yakutia. *Remote Sens.* **10**, 1579.
- 3) Yanagiya, K. and M. Furuya, 2020: Post-wildfire surface deformation near Batagay, Eastern Siberia, detected by L-band and C-band InSAR. *JGR Earth Surface*, **125**, e2019JF005473.

1 三重大学大学院生物資源学研究所

Graduate School of Bioresources, Mie University

# タイムラプスカメラを用いた北アルプス池ノ谷氷河周辺に形成される雲の発達 Cloud Development around Ikenotan Glacier in the Northern Alps of Japan using a Time-Lapse Camera

○杉浦幸之助<sup>1</sup>, 吉田航<sup>1</sup>  
Konosuke Sugiura and Wataru Yoshida

## 1. はじめに

北アルプスの池ノ谷氷河は、地理的分布からみると緯度は低いながらも降雪量が多く、急峻な周囲斜面からの雪氷の涵養が加わる位置に現存している。池ノ谷氷河が大気に及ぼす影響も理解することで、池ノ谷氷河が維持されているメカニズムに迫ることが可能と考えられる。そこで本研究では、池ノ谷氷河を含む山岳周辺を対流スケールで把握可能な距離から通年で監視することにより、雪氷の被覆と雲の発達の関係を見出すことを目的とする。今回は半年間の観測により得られた結果をもとに、氷河の被覆が雲の発達に及ぼす影響を考察する。

## 2. 方法

池ノ谷氷河を含む山岳周辺を通年で監視するため、富山県上市町（北緯 36.7168°, 東経 137.3545°）に外部電源供給装置により駆動する改良型タイムラプスカメラ（GardenWatchCam, brinno 製）を設置した。得られた画像データのうち、2020年6月から11月までの画像を使用した。撮影時間は日出から日没までであり、撮影間隔は10分である。雲底高度および雲頂高度を算出するため、事前に実際の撮影画像と地理院地図 3D の画像を重ね合わせて 25m 単位の標高に関するルックアップテーブルを求めた。その後、タイムラプス画像を切り出し、解析範囲を池ノ谷氷河、早月尾根、立山川の3領域に分けて（図1）、それぞれの雲底高度および雲頂高度を汎用画像処理ソフトウェア（ImageJ, NIH 製）から求めた。

## 3. 結果と考察

2020年8月11日の雲の高度変化の例を図2に示す。図2によると時間の経過とともに雲底高度が低くなっている。また、タイムラプス画像からは積雲が発達していく様子がみられた。朝方は地点の違いによる雲の高度差は大きくないものの、昼前から昼過ぎにかけて早月尾根と立山川では雲底高度が高く、池ノ谷氷河では雲底高度が低い傾向がみられた。また、池ノ谷氷河では、右俣のほうが左俣と比べ 100~200m ほど高度が低かった。これは、7月以降に池ノ谷氷河近傍以外ではほぼ消雪することから、対象としている8月11日の池ノ谷氷河で雪面から大気への水蒸気供給が盛んになったために、池ノ谷氷河近傍で雲底高度が低かった可能性が考えられる。しかし、Ohata (1992) の大気-氷河間の相互作用に関するモデル解析によると、氷河風により雲の形成が抑えられることが報告されている。今回対象とする池ノ谷氷河は長さ 1km 程度であり幅も狭いことから（福井ら, 2018）、氷河風の頻度は小さいと考えられる。

本研究の解析結果から、さらに季節によっても雲の高度に変化が見られた。早月尾根では、春および秋には雲が厚く、夏は薄かったのに対し、谷部、特に池ノ谷氷河では、春および秋には雲が少なく、夏は積雲が谷に流れ込むケースがあった。季節や地形による雲の高度の違いが明らかとなったものの、谷部での風の流れや大気の流れに起因する雲底高度差のさらなる解釈には、雪氷の被覆面積、雪氷面と地表面の温度差、アルベドの違いなど

も今後調べていく必要がある。

## 参考文献

- 1) Ohata, T., 1992 : An evaluation of scale-dependent effects of atmosphere-glacier interactions on heat supply to glaciers. *Annals of Glaciology*, **16**, 115-122.
- 2) 福井幸太郎, 飯田肇, 小坂共栄, 2018: 飛騨山脈で新たに見出された現存氷河とその特性. *地理学評論*, **91**, 43-61.

## 謝辞

本研究は富山県上市町教育委員会の許可を得て実施された。タイムラプスカメラの設置には富山県上市町立宮川小学校にご協力をいただいた。深く感謝申し上げます。



図1 池ノ谷氷河を含む山岳周辺域の全体図（地理院地図）

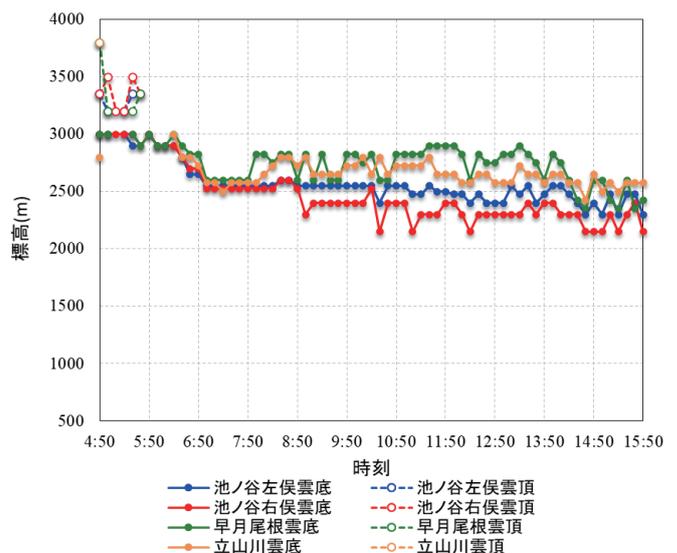


図2 2020年8月11日における雲の高度の時系列変化の例

## コリマ川流域の雪氷圏変動が河川流出に及ぼす影響

## Effects of Cryosphere Change on River Runoff in the Kolyma River Basin

○鈴木和良<sup>1</sup>, 朴 昊澤<sup>1</sup>, Olga Makarieva<sup>2</sup>, 金森大成<sup>3</sup>, 堀 雅裕<sup>4</sup>, 松尾功二<sup>5</sup>, 松村伸治<sup>6</sup>, Natalia Nesterova<sup>2</sup>, 檜山哲哉<sup>3</sup>

Kazuyoshi Suzuki, Hotaek Park, Olga Makarieva, Hironari Kanamori, Masahiro Hori, Koji Matsuo, Shinji Matsumura, Natalia Nesterova, Tetsuya Hiyama

## 1. はじめに

地球温暖化による永久凍土融解は、陸域生態系や水・炭素循環等に大きな影響を与える。シベリアの4大河川（オビ、エニセイ、レナ、コリマ）では、1978年から2016年にかけて、北極海への累積淡水フラックスが約4 km<sup>3</sup>/yr/yr増加した<sup>1)</sup>。一方、McClelland<sup>2)</sup>は河川流出量の増加率と連続永久凍土の存在割合に負の相関があることを示し、連続永久凍土域であるコリマ川流域では長期的にわずかに減少であることを示した。しかしながら、永久凍土融解が河川流出にどのような影響するかは明らかになっていない。地球温暖化と永久凍土の融解による流域水循環の変化を理解するためには、土壌の凍結・融解過程とともに水文気象学的観点から長期データを解析する必要がある。そこで我々は、北東シベリアに位置するコリマ川流域において、1979年から2012年までのデータを用いて、永久凍土融解が河川流出量に与える影響、ならびにダムと気候メモリーの効果を明らかにする研究を行った。

## 2. 方法

## 2.1 研究対象地域

本研究ではコリマ川流域を研究対象とした。コリマ川流域は、灌木等によるシュラブまたはステップと呼ばれる植生に覆われ、地下には100%永久凍土が存在し、連続永久凍土域になっている。

## 2.2 陸面モデル

永久凍土融解や陸面水文過程を推定するため、陸面モデルCHANGEを用いた。CHANGE<sup>3)</sup>は、大気-陸面系における熱・水・炭素フラックスに加え、土壌の凍結・融解過程と河川水文過程を計算するプロセスモデルである。CHANGEは、地表面付近を中心に、陸面水文過程を地下50.5mまで計算可能である。

## 2.3 使用データ

解析対象期間は1978年～2012年の34年間であり、CHANGEモデルのフォーシングとしてPrincetonデータ<sup>4)</sup>を用いた。河川流出量（日別値）としては、R-ArcticnetとArctic Great Rivers Observatoryの河川流出量データ<sup>5)</sup>を用いた。モデル計算値を検証するために、2週間毎の積雪被覆率データ(SCF)<sup>6)</sup>、および重力観測衛星GRACEによる陸水貯留量変動(TWSA)<sup>7)</sup>を用いた。

## 3. 結果と考察

## 3.1 冬季流出量変化

Majhi and Yang<sup>8)</sup>によると、コリマ川ではダムによる冬季流出

量の増加が明らかであることが指摘されている。本研究ではダム建設後の流域全体の冬季流出量の増加がダム支流の流出量増加に相当したことから、Majhi and Yangの結果と整合的であった。コリマ川の冬季流出量の増加は、主としてダム運用による人為的な影響と考えられる。一方、流域全体の年流出量は、ダムの建設前後で大きく変化しなかった。これは冬季流出量が小さいためと、ダム支流が全流域面積の15%程度を占めるに過ぎないためと考えられた。

## 3.2 夏季流出量変化

トレンドを除去した夏季流出量と夏の活動層厚の解析から、両者には明瞭な負の相関があることがわかった。すなわち永久凍土融解によって活動層が深くなることで、夏季流出量は減少する傾向にあると言える。さらに活動層厚が増加するとともに、流域貯留量と蒸発散量が増加する傾向が有意であった。すなわち、融解深が深くなることで流域内の貯水量が増加し、さらに蒸発散量が増加していることが示唆された。融解深が深くなり土壌水分量が増加したことで、植物がより深い層の土壌水を使い、蒸発散量が増加したものと考えられる。以上のことから夏季流出量の減少傾向は、夏季の貯水量と蒸発散量の増加によって引き起こされたと考えられる。

## 4. まとめ

コリマ川の冬季流出量はダムの影響を受けて増加傾向にあった。しかしながら、年流出量に対する冬季流出量の影響は非常に小さかった。一方、コリマ川の夏季流出量は永久凍土融解に伴い減少する傾向にあった。その理由として、活動層が深くなり、難透水の永久凍土面が下がることで流域内貯水能を増加させ、さらに植物による蒸散が活発になったためと考えられた。

謝辞：本研究は、科研費（19H05668・21H04934）とArCS IIの支援を受け実施された。

## 参考文献

- 1) Suzuki, K. et al. 2020: Hydrol. Process., 34(19), 3867–3881, doi:10.1002/hyp.13844
- 2) McClelland, J. W. et al. 2004: J. Geophys. Res. Atmos., 109(18), 1–12, doi:10.1029/2004JD004583.
- 3) Park, H. et al. 2011: J. Geophys. Res. Atmos., 116(15), D15102, doi:10.1029/2010JD015386.
- 4) Sheffield, J. et al. 2006: J. Clim., 19(13), 3088–3111, doi:10.1175/JCLI3790.1
- 5) Shiklomanov et al. 2018 Arctic Great Rivers Observatory. Discharge Dataset, Version 20180713.
- 6) Hori, M. et al. 2017 Remote Sensing of Environment, doi: 10.1016/j.rse.2017.01.023
- 7) Suzuki, K. et al. 2018: Remote Sens., 10(3), doi:10.3390/rs10030402.
- 8) Majhi, I., and D. Yang 2008: J. Hydrometeorol., 9(2), 267–279, doi:10.1175/2007JHM845.1

1 国立研究開発法人海洋研究開発機構  
2 メルニコフ永久凍土研究所  
3 名古屋大学宇宙地球環境研究所  
4 富山大学都市デザイン学部  
5 国土地理院  
6 北海道大学大学院地球環境科学研究院

JAMSTEC  
Melnikov Permafrost Institute  
ISEE, Nagoya University  
School of Sustainable Design, University of Toyama  
GSI  
Graduate School of Env. Science, Hokkaido University

## パタゴニアペリート・モレノ氷河の表面質量収支と気候 Surface mass balance and climate observed at Glaciar Perito Moreno in Patagonia

○箕輪昌紘<sup>1</sup>, 藤田耕史<sup>1</sup>, ペドロ・スクバルカ<sup>2</sup>

Masahiro Minowa, Koji Fujita and Pedro Skvarca

### 1. はじめに

南米の南緯 46–52 度に渡って広がるパタゴニア氷原は、世界最大の温暖氷塊であり、顕著な氷損失が報告されている。偏西風に起因する多量の降雪や、氷河末端での多量の融解とカービングによる消耗プロセスが、この地域の氷河質量収支の特徴である。同地域では、長期間に渡る表面質量収支観測や気象観測が限られており、気候変動がどのように近年の氷河変動を引き起こしているのか理解されていない。本研究では、南パタゴニア氷原ペリート・モレノ氷河近傍において 1996 年より 26 年間連続で測定されている気象観測データを解析した。また、同期間に測定された表面質量収支の定点観測の結果と気象データを用いて熱収支・表面質量収支計算を行なった。表面質量収支の計算結果を ERA5 気候再解析データより取得した海水面大気圧、海水面温度、風速と比較し、氷河変動と気候変動の関係を解明する。

### 2. データと手法

#### 2.1 自動気象観測

氷河末端近傍の露岩上に設置された自動気象観測装置 (AWS) (図 1▲, EMMO) で 1996 年 1 月より 1 時間ごとに気温、相対湿度、気圧、下向き短波放射、風向、風速を連続測定している。同地点では 2016 年 3 月より雨量計を設置し、毎時間測定を開始した。

#### 2.2 表面質量収支観測と数値計算

ペリートモレノ氷河の消耗域三地点において、ステーク法により表面質量収支を測定している (図 1×, S1–3)。最下流の S1 (標高 230 m) では、2003 年より平均 5 日の頻度で測定を実施している。本研究では特に、S1 における表面質量収支を熱収支式<sup>2)</sup>を解くことで算出した。AWS により取得した 1996–2020 年のデータと、次段落で述べる 1980–2020 年の気候再解析データを入力値として使用した。

#### 2.3 気候再解析データ, SAM, ENSO

表面質量収支の入力値として、1980 年から 2020 年の ERA5 気候再解析データから、氷河末端を含む格子の 1 時間毎の気温、露天温度、下向き短波放射、下向き長波放射、風速、降水量を取得した。これらを現地観測データと比較することで求めた補正式を使い入力値とした。また、総観気象を解析するために、同じく ERA5 から、南緯 10–80 度、西経 40–110 度の月平均海上気圧、風速、海水面温度を使用した。さらに、Southern Annular Mode (SAM) や El Niño–Southern Oscillation (ENSO) といった指標をそれぞれ取得し気象データや表面質量収支の結果と比較した。

### 3. 結果と考察

AWS で測定した 1996 年から 2020 年に渡る観測項目の内、気温の長期トレンドに有意な変化がみられた。年平均気温の変化率は  $0.2^{\circ}\text{C}/10$  年であり、その傾向は特に夏期 (12–2 月:  $0.31^{\circ}\text{C}/10$  年) と春期 (9–11 月:  $0.27^{\circ}\text{C}/10$  年) で顕著であった。

熱収支計算によって算出した S1 における年平均表面質量収支は、 $-16.2 \text{ m w.e. a}^{-1}$  であった。ステーク法により求めた表面質量収支との二乗平均平方根は  $0.65 \text{ m w.e. a}^{-1}$  である。表面質量収支

は 1996 年以来減少傾向にあり、減少率は  $0.9 \text{ m w.e. a}^{-1}/10$  年であった。熱収支の内訳は顕熱フラックスの寄与が最大で  $102 \text{ W m}^{-2}$ 、次に短波放射フラックス  $86 \text{ W m}^{-2}$  であった。表面質量収支の時系列変化は気温変化と良い相関を示した ( $r=0.89$ )。これらの結果は、気温上昇が表面質量収支の減少の主要因であることを示唆している。温度変化に対する表面質量収支の変化率は、 $-2.9 \text{ m w.e. a}^{-1}/^{\circ}\text{C}$  であった。

今後、近年の温暖化や表面質量収支減少を総観気象や SAM 及び ENSO と比較し、同地域の氷河変動に気候変動が与える影響を考察する。

### 謝辞

本研究は特別研究員奨励費 (JP20J00526) の助成を得て実施した。融解ステーク測定には、Berni Roil 氏や Carlos Domínguez 氏を始めとして Hielo y Aventura に勤める多くの方々から長年の支援を頂いた。表面質量収支モデルの入力値補正に際して、竹内由香里氏に氷河表面での気象観測データを共有して頂いた。

### 参考文献

- 1) Minowa, M. M. Schaefer, S. Sugiyama, D. Sakakibara and P. Skvarca, 2021: Frontal ablation and mass loss of the Patagonian icefields, *Earth Planet. Sc. Lett.*, **561**, 116811
- 2) Fujita, K. and Y. Ageta, 2000: Effect of summer accumulation on glacier mass balance on the Tibetan Plateau revealed by mass balance model, *J. Glaciol.*, **46**, 244–252

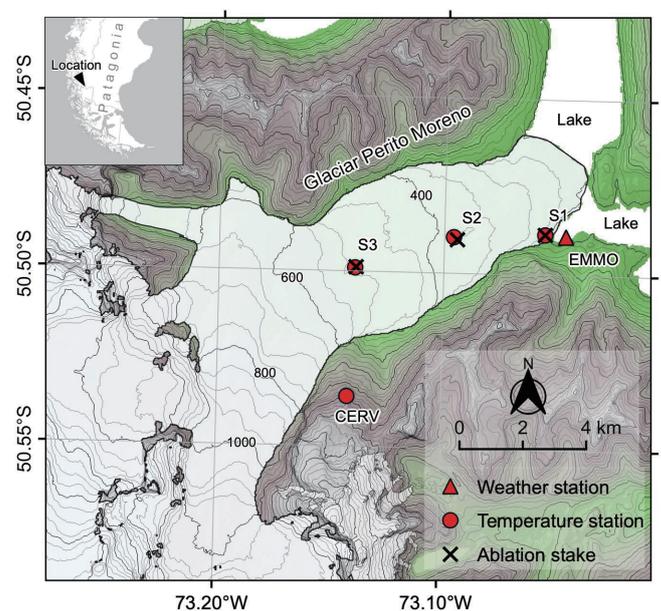


図 1 南パタゴニア氷原ペリート・モレノ氷河の地形図。地図上に複合気象局 (▲)、気温計 (●)、融解ステーク (×) の位置をそれぞれ示す。挿入図には南米におけるペリート・モレノ氷河の位置を示す。

1 名古屋大学 環境科学研究科

2 パタゴニア氷原博物館

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University  
Museo del Hielo Patagonico

## 気候インデックス法を用いた 23 世紀末までの南極氷床のシミュレーション Simulating the evolution of the Antarctic ice sheet until the year 2300 with a climate-index method

○グレーベ ラルフ<sup>1,2</sup>, チェンバース クリストファー<sup>1</sup>, 小長谷 貴志<sup>3</sup>, 齋藤 冬樹<sup>4</sup>, 陳 永利<sup>3</sup>, 阿部 彩子<sup>3</sup>  
Ralf Greve<sup>1,2</sup>, Christopher Chambers<sup>1</sup>, Takashi Obase<sup>3</sup>, Fuyuki Saito<sup>4</sup>, Wing-Le Chan<sup>3</sup>, Ayako Abe-Ouchi<sup>3</sup>

### 1. 背景 (Background)

As part of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [1], the Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6 (ISMIP6) was devised to assess the likely sea-level-rise contribution from the Antarctic and Greenland ice sheets until the year 2100 [2]. ISMIP6 used future climate scenarios as forcings for ice-sheet models developed by several international groups [3–5]. Results obtained with the model SICOPOLIS for the Antarctic ice sheet are summarized in Ref. [6]. Chambers et al. [7] extended the ISMIP6-Antarctica simulations with SICOPOLIS until the year 3000, using the original ISMIP6 climate forcings until 2100, while assuming a sustained late-21st-century climate without any further trend beyond that.

### 2. 概要 (Outline)

Here, we construct an ensemble of climate forcings for Antarctica until the year 2300, using results from a MIROC4m RCP8.5 simulation [8]. In the first step, we derive a set of atmospheric and oceanic climate indices from this simulation such that 1995–2014 averages are mapped to zero and 2091–2100 averages to unity. Specifically, for the atmosphere, we construct climate indices for the surface temperature, precipitation and surface runoff, and the oceanic climate index reflects the ocean temperature at intermediate depths (Figure 1).

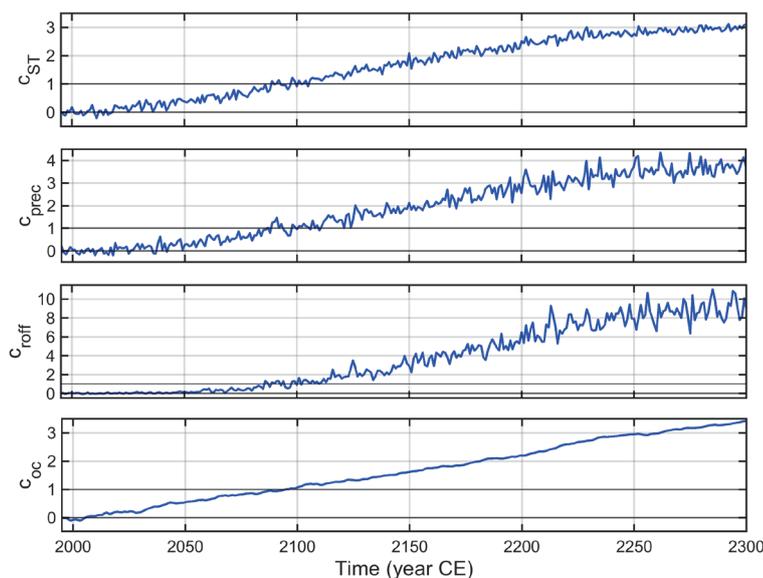


Figure 1: Climate indices for the surface temperature ( $c_{ST}$ ), precipitation ( $c_{prec}$ ), surface runoff ( $c_{roff}$ ) and oceanic thermal forcing ( $c_{oc}$ ), derived from a MIROC4m RCP8.5 simulation until the year 2300 [8]. The first three indices are based on the respective climatic fields averaged over the Antarctic ice sheet. The last index is based on the average ocean temperature south of  $62.5^\circ\text{S}$  and between 200 and 800 metres depth.

In the second step, we will use the climate indices to extrapolate the ensemble of ISMIP6 forcings (anomalies relative to 1995–2014, for 2015–2100) to the period 2101–2300. Together with the original ISMIP6 forcings, this method will provide smooth climate forcings for the entire period 2015–2300. We will use these forcings to run simulations for the Antarctic ice sheet with SICOPOLIS and assess its expected mass loss (contribution to sea-level rise) over this period.

### 参考文献 (References)

[1] Eyring et al. 2016, *Geosci. Model Dev.* 9, 1937–1958, doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016. [2] Nowicki et al. 2016, *Geosci. Model Dev.* 9, 4521–4545, doi: 10.5194/gmd-9-4521-2016. [3] Nowicki et al. 2020, *Cryosphere* 14, 2331–2368, doi: 10.5194/tc-14-2331-2020. [4] Seroussi et al. 2020, *Cryosphere* 14, 3033–3070, doi: 10.5194/tc-14-3033-2020. [5] Payne et al. 2021, *Geophys. Res. Lett.*, in press, doi: 10.1029/2020GL091741. [6] Greve et al. 2020, Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.3971232. [7] Chambers et al., 2021, *J. Glaciol.*, submitted, doi: 10.31223/X5CP7C (preprint). [8] Bakker et al. 2016, *Geophys. Res. Lett.* 43, 12252–12260, doi: 10.1002/2016GL070457.

1 北海道大学低温科学研究所  
2 北海道大学北極域研究センター  
3 東京大学大気海洋研究所  
4 海洋研究開発機構

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Arctic Research Center, Hokkaido University  
Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo  
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

## 南極 AWS の超音波積雪深計により検出される暖候期の雪面の沈降 Snow surface subsidence during warm season detected by ultrasonic snow depth sensors deployed to the Antarctic AWSs

○平沢尚彦<sup>1,2</sup>, 本山秀明<sup>1,2</sup>, ヌアスムグリアリマス<sup>1</sup>, 齋藤圭祐<sup>2</sup>, 杉浦幸之助<sup>3</sup>  
Naohiko Hirasawa, Hideaki Motoyama, Nuerasimuguli Alimasi, Keisuke Saito and Konosuke Sugiura

### 1. はじめに

地球温暖化が進行する中で、南極氷床がその質量を減らし、海水準の上昇をもたらすことが懸念されている。最新の IPCC 特別報告は、1990 年代から南極氷床の質量が減り続けていることを示した (Meredith *et al.*, 2019)。その一方で、東南極だけは 2000 年代半ばから質量が増加し、2016 年においてもそれが継続している。質量の増加が最も顕著な地域は Dronning Maud Land (以後、DML) と呼ばれる東南極の西部であり、そこは日本の主な活動地域である。

DML の氷床質量の増加には堆積量の増加が寄与していることが、日本が長期に実施してきた雪尺観測が唯一の実測値となっており、示唆されている (本山, 2017)。この堆積量の増加を起こしているメカニズムを明らかにし、将来、その傾向が変化するのであれば、その原因を特定していくことは、温暖化における南極氷床の変化を知るために重要である。これには、気候モデルや気候再解析データの利用が不可欠である。このために実測値として必要な要件は、日々の変動や日変化を捉えることである。そこで、自動気象観測装置 (以後、AWS) を DML の沿岸部とドームふじを結ぶ雪尺測線に沿って 4 基を新たに配置した (図 1)。

平沢他 (2021) は、AWS に配備した超音波積雪深計で観測した日々の雪面レベルの変化の特徴から、10 月～4 月の暖候期にゆっくりとした沈降が検出されることを示した。沈下量は寒候期に堆積した深さの 25% に及ぶ年もあり、堆積過程の長期変動を知る上で主要な因子である。現在、この沈下現象について、①季節進行として開始と終了を決定する要因、②沈下と昇華 (本稿では sublimation を意味する) 及び表面状態との関係性について調べている。表面状態は衛星データに基づき、赤外放射による表面温度、マイクロ波放射による表面融解 (Alimasi *et al.*, 2020 等)、可視・近赤外放射による雪面粒径を解析する。本講演では、平沢他 (2021) の結果、及び①、②について議論する。

### 2. 超音波積雪深計が捉えた暖候期の雪面の沈下

図 2 に H128 の各年の暖候期 (10 月～5 月) の雪面レベル (日平均値) の時系列を示す。降雪による上昇を挟みながら継続的に高度が低下する期間が確認される。例えば、2019/20 年には 11 月 13 日に始まって、3 月 8 日に終わる。期間の長さは 117 日である。2018/19 年には 12 月 1 日～4 月 14 日の 135 日となる。各年、開始時期は 11 月～12 月、終了時期は 3 月～4 月である。2019-20 年はこの期間の終了日には開始日と比べて雪面が 0.102 m 低下した。一方、2018-19 年には、1 月下旬の積雪により、最終的には雪面は 0.063 m 上昇した。

### 3. 昇華量の評価

雪面の沈下量から評価した昇華量を図 3 に示す。評価には

H128 で計測した積雪密度の値を参照する (0.3～0.4)。2019/20 には期間を通して約 45 mm w.e.、2018/19 には約 65 mm w.e. となる。これらの値は他の研究 (King *et al.*, 2001; Fujii&Kusunoki, 1982; Lenaerts *et al.*, 2019) と概ね一致する。また、前述の通り、2018/19 にはこの期間を通して雪面は上昇したが、昇華量は 2019/20 より多かった。

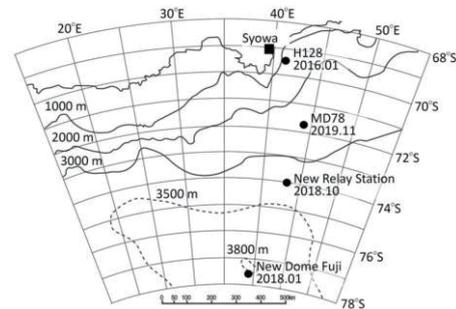


図 1 南極氷床上の新たに設置した 4 基の AWS の位置。

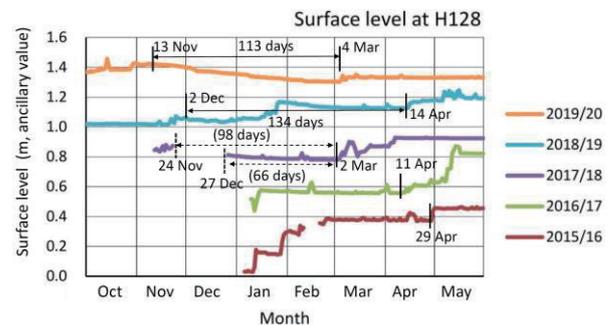


図 2 H128 における暖候期 (10 月～5 月) の雪面レベルの変化。

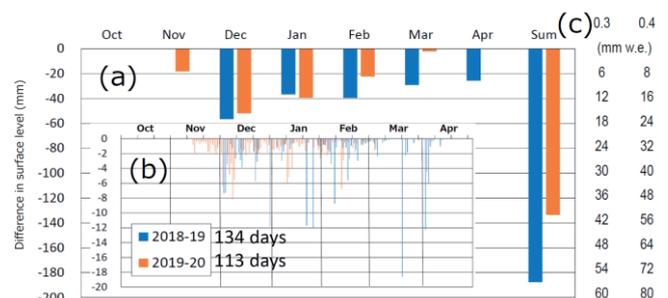


図 3 H128 における、2 か年 (2018/19, 2019/20) の暖候期の雪面の沈下量、及びそれに対応する昇華 (sublimation) 量。(a) 月、暖候期の合計量。左軸は累積の沈下量 (mm)、右軸 (c) に積雪密度 0.3、及び 0.4 とした場合の水当量を示す。(b) は日々の沈下量 (mm)。

1 国立極地研究所  
2 総合研究大学院大学  
3 富山大学

National Institute of Polar Research  
Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)  
University of Toyama

## 衛星搭載光学センサデータから抽出される積雪域分布の軌道時刻依存性 Dependence of satellite-derived snow cover extents on the local time of satellite orbit

○堀 雅裕<sup>1</sup>, 庭野 匡思<sup>2,3</sup>, 島田利元<sup>4,2</sup>, 青木輝夫<sup>3,2</sup>  
Masahiro Hori, Masashi Niwano, Rigen Shimada and Teruo Aoki

### 1. はじめに

北極域では、地球温暖化の進行に伴い、顕著な海氷域面積の縮小が報告されている。筆者らは極軌道衛星搭載光学センサのデータを用いて北半球の長期積雪域面積の解析を行い、北極海氷と同様全ての季節で積雪域が縮小傾向にあることを明らかにしてきた<sup>2)</sup>。しかしながら、衛星センサに MODIS を導入した 2000 年以降のデータについては、衛星の観測地方時刻が午前 (10 時半頃) と午後 (13 時半頃) の 2 種類の衛星データが存在し、両者を混ぜて解析した場合と午後のみを使用して解析した場合とでは抽出される積雪域面積の長期トレンドに差が生じうることを昨年の雪氷研究大会で報告した<sup>3)</sup>。またその後の解析で、午前のみと午後をのみデータを使用して解析して算出した積雪域面積は両者がほぼ一致していたことから、午前と午後で積雪域として判定される領域に差が生じており、午前と午後を合成する過程で積雪域が大きめに算出されていることがわかってきた<sup>4)</sup>。本報告では、MODIS の Terra (午前プロダクト), Aqua (午後プロダクト), および Terra・Aqua の両方 (午前・午後合成プロダクト) の 3 種類の入力データから抽出した積雪域分布を地上積雪深データを用いて精度評価を行った結果について報告する。

### 2. 解析方法

衛星データには、1979-2000 年 2 月までは午後軌道衛星 NOAA シリーズ搭載 AVHRR センサの 4km 間引き放射輝度 (GAC) を、2000 年 2 月以降は午前プロダクト用には Terra 搭載 MODIS の、午後プロダクトには Aqua 搭載 MODIS の、そして、午前・午後合成プロダクトには Terra, Aqua 両センサのそれぞれ 5km 間引き放射輝度 (MOD02SSH, MYD02SSH) を使用した。なお、Terra および Aqua のデータが欠損している期間については、AVHRR が利用できる期間は AVHRR を、AVHRR が利用できなくて Terra, Aqua 相互のデータが利用できる場合にはそのデータを使用した。

### 3. 結果と考察

図 1 は、2017-2020 年の 4 年間分のデータを使用して作成した、北半球積雪域面積の午後プロダクトと午前午後合成プロダクトの比較 (図 1 上) および午後プロダクトと午前プロダクトの比較 (図 1 下) を示す。図 1 下に示すように午前プロダクトは午後プロダクトと 1 対 1 のライン上でよく一致しているが、図 1 上に示す午前午後合成プロダクトは午後プロダクトに比べて過大評価傾向を示しており、雲域を積雪域と誤判定した画素が午前・午後の合成処理時に蓄積される可能性が考えられた。今後地上積雪深データを用いた各プロダクトの精度評価を行い、積雪抽出精度の時間安定性や地域依存性について報告、議論したい。

#### 参考文献

- 1) IPCC, 2013: Climate Change 2013. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- 2) Hori, M. et al., 2017: A 38-year (1978-2015) Northern Hemisphere daily snow cover extent product derived using consistent objective criteria from satellite-borne optical sensors. *Remote Sens. Environ.*,

191, 402-418.

- 3) 堀 雅裕, 庭野 匡思, 青木輝夫, 島田利元, 2020: 午後軌道衛星搭載光学センサデータを用いた JASMES 北半球積雪分布データセットの再解析, 雪氷研究大会 (2020・オンライン)
- 4) 堀 雅裕, 庭野 匡思, 青木輝夫, 島田利元, 2021: 複数の衛星搭載光学センサデータから抽出された北半球積雪分布の比較, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, ACG39-P11.

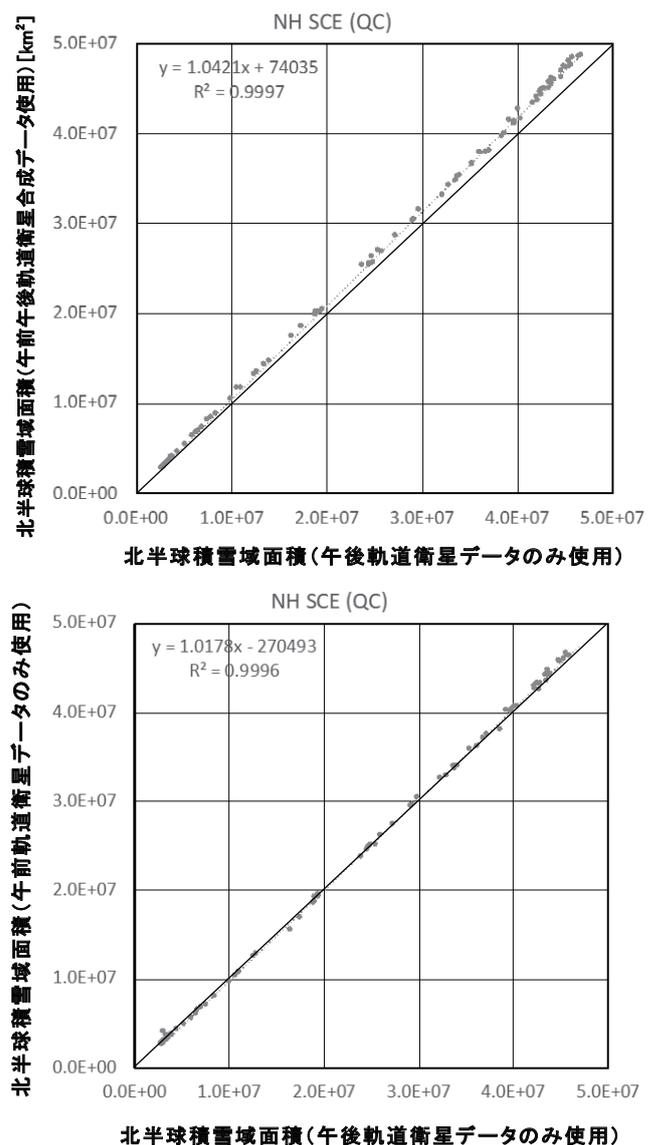


図 1 2017-2020 年の 4 年間分の MODIS データを使用して解析した北半球積雪域面積の (上) 午後プロダクトと午前午後合成プロダクトの比較結果, (下) 午後プロダクトと午前プロダクトの比較。

1 富山大学  
2 気象研究所  
3 国立極地研究所  
4 宇宙航空研究開発機構

University of Toyama  
Meteorological Research Institute  
National Institute of Polar Research  
Japan Aerospace Exploration Agency

# ヒマラヤ高山域における Sentinel-2/Landsat 画像を用いた雪線高度の検出 Snowline altitude in Himalayan glacierized catchments from Sentinel-2/Landsat imageries

○佐々木織江<sup>1</sup>, Evan S. Miles<sup>2</sup>, Francesca Pellicciotti<sup>2</sup>, 坂井亜規子<sup>1</sup>, 藤田耕史<sup>1</sup>  
Oriie Sasaki, Evan S. Miles, Francesca Pellicciotti, Akiko Sakai and Koji Fujita

## 1. 背景と目的

ヒマラヤ高山域における積雪量の減少は、下流域における水資源量や農作物収量に影響を与える可能性が高く<sup>1)</sup>、積雪量の変化やその気候的要因を理解することは重要な研究課題である。しかしながら、実地観測の不足や、夏期の厚い雲による衛星観測の難しさ、複雑な地形による気候モデルでの再現の困難さにより、降水量の絶対値や時空間的な変化はあまり把握されていない<sup>2)</sup>。一方で、雪線高度は積雪量の適切に反映するほか、雪線の一部を衛星から観測することが出来れば検出が可能であるため、ヒマラヤ高山域において有用な指標である。Girona-Mata<sup>ら</sup><sup>3)</sup>は Landsat 衛星を用いて雪線高度を調べることで、ネパールの Langtang 地域における積雪の季節変化の検出に成功している。

本研究では、Girona-Mata<sup>ら</sup>の手法を Google Earth Engine によって自動化することで、長期かつ広範囲での雪線高度抽出を可能とした。さらに、このフレームワークを用いてヒマラヤ高山域における5つの集水域で、1999年から2019年までの21年間を対象として雪線高度の検出を行い、雪線高度の時系列変化を調査した。また、この結果を気候値の変化との比較することにより、雪線高度を変化させる気候的要因について考察した。

## 2. データと手法

### 2.1 対象地域

ヒマラヤ山脈に位置する4つの集水域とチベット高原の南東部に位置する1つの集水域を対象とした(図)。本研究では東から順に、Satopanth (30.8°N, 79.4°E), Hidden Valley (30.8°N, 79.4°E), Langtang (30.8°N, 79.4°E), Rolwaling (30.8°N, 79.4°E), Parlung Zangbo Valley (30.8°N, 79.4°E) と呼ぶこととする。

### 2.2 使用データ

積雪域の検出には、Landsat 5/7/8 および Sentinel-2 の TOA (大気上端放射輝度) 画像より、可視光 (緑) と短波長赤外の2バンドを使用した。水平解像度は、Landsat 5/7/8 は 30 m, Sentinel-2 は 10m (可視光) および 20m (短波長赤外) であり、回帰日数は Landsat 5/7/8 は 16 日, Sentinel-2 が 10 日である。本研究では、画像取得期間 1999/1/1~2019/12/1, 雲被覆 ≤ 50% という条件で画像を取得し、合計 6,131 シーンを解析に使用した。標高データは水平解像度 30 m で全球をカバーしている ALOS World 3D - 30m (AW3D30) を使用した。雪線高度の変化と気候値の変化を比較するにあたり、気温、降水量、下方短波放射は、ERA5 の hourly プロダクト (水平解像度 0.25°) を用いた。

### 2.3 手法

積雪範囲の抽出には Normalized Difference Snow Index (NDSI) を使用し、閾値は既往研究<sup>3)</sup>にならひ 0.45 と設定した。なお、雲や影、水面、氷については、事前にマスクすることでその影響を除去した。その後、抽出された雪線の平均高度を算出し、その画像取得日の雪線高度とした。

上記の作業を全取得画像について行い、各月の平均雪線高度を求めることで雪線高度の monthly data を作成し、季節変化およ

び時系列変化について調査した。

## 3. 結果と考察・まとめ

雪線高度の季節変化を見ると、夏 (6-9 月) に雪線高度が後退する一方で、冬 (12-1 月) にも雪線高度の後退が見られた(図)。モンスーン気候により冬期の降水量が少ないことに起因すると考えられる。

次に、季節変化を前半 11 年 (1999~2009) と後半 10 年 (2010~2019) に分けて各月の変化を観察したところ、全体的に、1 月からプレモンスーンまでの期間の雪線高度は低下し、モンスーンから冬までの雪線高度は後退する傾向が見られた。T 検定により前半と後半とで雪線高度および気候値の有意差を調べたところ、春の雪線高度の低下は 1-2 月の気温低下や降水量増加によって、夏以降の雪線高度上昇は 7-9 月の気温上昇によって引き起こされていると推察された。

最後に、各集水域の雪線高度の時系列変化について、Mann-Kendall 検定 (有意水準 1%) によってトレンドの有無を調べた。結果として、雪線高度が低下傾向であったのは Satopanth (-15.6 m yr<sup>-1</sup>)、後退していたのは Hidden Valley (11.9 m yr<sup>-1</sup>)、Langtang (14.4 m yr<sup>-1</sup>)、Rolwaling (8.2 m yr<sup>-1</sup>) の3地域、トレンドが見られなかったのは Parlung Zangbo Valley であった。気候値との関係を重回帰分析により調べると、年々変動の場合は主に気温に誘引されている場合が多く、少し長期の変化 (60 ヶ月の移動平均) になると、降水量や日射の影響も大きくなること示された。

今後、このフレームワークを用いて、より広域において雪線高度の調査・解析を行い、積雪と気候のメカニズムについてより多くの知見を得ることで、将来の積雪量および水資源量の予測に貢献することを目指す。

## 参考文献

- 1) IPCC, 2019: *IPCC SROCC*
- 2) Immerzeel W. W. et al., 2013: Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds, *Nature Geosci.* 6(9), 742-745.
- 3) Girona-Mata et al., 2019: High-resolution snowline delineation from Landsat imagery to infer snow cover controls in a Himalayan catchment, *Wat. Resour. Res.* 55, 6754-6772.

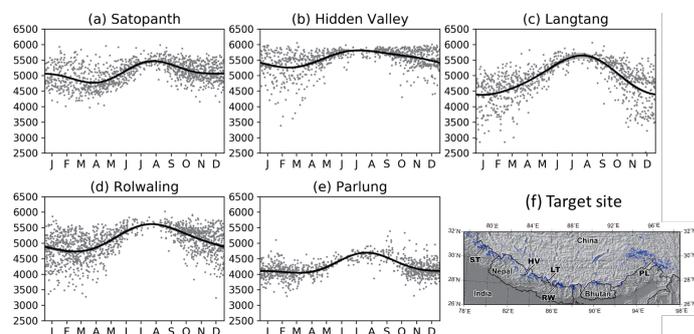


図 (a)-(e) 各集水域における雪線高度の季節変化および (f) 対象地域

1 名古屋大学大学院環境学研究科

2 スイス連邦森林・雪氷・景観研究所

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University  
Swiss Federal Research Institute WSL

## 2020-2021 年冬季における北海道の広域積雪分布の特徴 Characteristics of Snow Cover Distribution in Hokkaido, 2020–2021 Winter

○石井日菜<sup>1</sup>, 白川龍生<sup>1</sup>, 亀田貴雄<sup>1</sup>  
 Hina Ishii, Tatsuo Shirakawa and Takao Kameda

### 1. はじめに

2020-2021 年シーズンの冬、北海道岩見沢市において最深積雪 205cm(平年値\*119cm), 降雪の深さ合計 820cm(平年値\*515cm)という記録的な大雪となった。過去の同種事例では、北西季節風と北海道西部の陸風と衝突することにより発生する北海道西岸帯状収束雲(以下、西岸帯状雲)と、沿海州からの帯状収束雲(以下、村松バンド)のいずれかもしくはその両方の影響が指摘されている<sup>1)</sup>。そこで、岩見沢で過去に記録的な大雪となった 2011–2012 年冬季と、2020–2021 年冬季を比較し、北海道西部の記録的な大雪の原因を考察する。

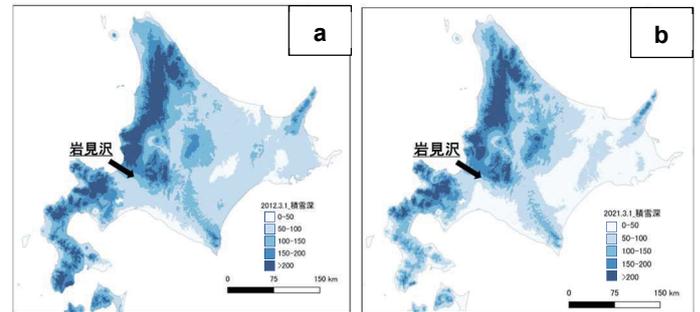


図1 北海道における積雪深分布の比較  
 (a)2012年3月1日, (b)2021年3月1日

### 2. 方法

本研究では、農研機構メッシュ農業気象データを用いて、融雪出水直前期である 2012 年 3 月及び 2021 年 3 月の積雪深および積雪水量の分布を求めた(図1, 図2)。この分布と、同時期に北海道内各地で実施した広域積雪調査結果のうち、道央および道北の結果を踏まえ、その原因となる気象について考察した(図3)。

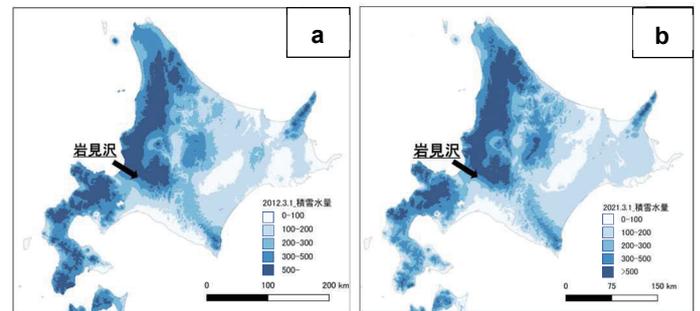


図2 北海道における積雪水量分布の比較  
 (a)2012年3月1日, (b)2021年3月1日

### 3. 結果および考察

積雪深、積雪水量の値が高い地点は、図1, 図2より、いずれも北海道西部を中心に分布している。このことは、図3の広域積雪調査結果(実測)からも読み取れる。

図4は、2021年2月24日における赤外画像と850hPa高層天気図である。ロシア極東部ハバロフスク周辺に寒気核(Cマーク)が見られる。日本海上では、低気圧の通過後に気圧傾度の高い状況が続き、大陸の乾燥した冷気が日本海に流入しやすい状況となった。このため、日本海上では村松バンドが明瞭に現れたと考えられる。2011–2012年冬季の事例では、12月15日18時頃に閉塞前線を伴う低気圧が通過した後、西岸帯状雲が発生していた。

2011–2021年冬季と2020–2021年冬季との共通点としては、日本海側では850hPa面で西～北西の風が卓越していること、風が等温線の温度の低い側から高い側に横断していること、寒帯前線ジェット気流が本州まで南下し、北海道全域を寒気が覆う構図になっていたことである。寒帯前線ジェット気流が本州に南下する傾向は、各年12～2月の500hPa高度および平年偏差の図でも確認できる。ただし、2020–2021年冬季は明瞭に見られた極渦は、2011–2012年冬季は不明瞭だった。

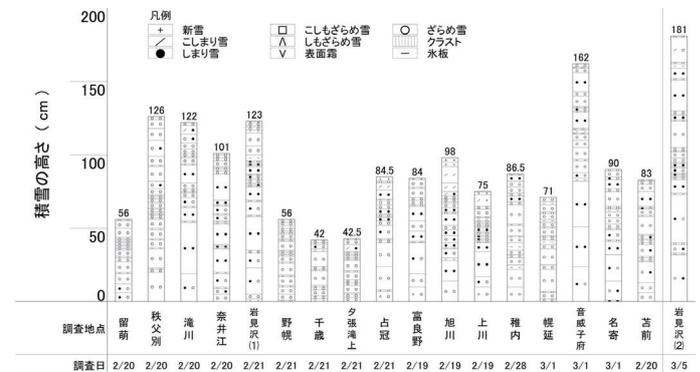


図3 融雪出水直前期における道央・道北の広域積雪調査結果  
 2021年2月20日～3月5日(岩見沢では計2回の観測を実施)

### 参考文献

- 1) 牛山朋来, 佐藤晋介, 遠藤辰雄, 藤吉康志, 武田喬男(1993): 石狩湾上における帯状雲の三次元風速場と発達過程 –1992年1月31日の事例解析–. 低温科学. 物理篇, **51**, 123–137.
- 2) 大野宏之, 佐々木華織, 大原源二, 中園 江(2016): 実況値と数値予報, 平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成. 生物と気象, **16**, 71–79.
- 3) GPV 気象予報 Web サイト <https://www.gpvweather.com/>
- 4) Sunny Spot 専門天気図アーカイブ [https://www.sunny-spot.net/chart/chart\\_archive.html](https://www.sunny-spot.net/chart/chart_archive.html)

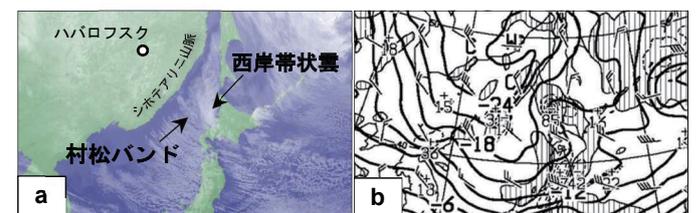


図4 2021年2月24日北海道, ロシア沿海州周辺図  
 (a)赤外画像(2021年2月24日6時),  
 (b)850hPa高層天気図(2021年2月24日9時)

\* 1991年から2020年までの観測値による。

1 北見工業大学地球環境工学科

## 十勝地方の融雪期における ROS イベント発生時の気象条件 Meteorological Conditions of ROS event during snowmelt period in Tokachi, Hokkaido

○及川凌雅<sup>1</sup>, 白川龍生<sup>1</sup>, 亀田貴雄<sup>1</sup>

Ryoma Oikawa, Tatsuo Shirakawa and Takao Kameda

### 1. はじめに

北海道十勝地方では、融雪期である2月～4月の間に、積雪上にまとまった降水が起きる Rain-On-Snow イベント (以下、ROS イベント) の発生が確認されている。2012年以降の過去10年間における ROS イベント発生日とそれぞれの日における日降水量、日降雪量、最深積雪を表1に示す<sup>1)</sup>。この期間において、ROS イベントは5回発生しており、平均で2年に一度の頻度である。このうち、上記3要素いずれも最も高い値を示した2015年3月10日の事例では、新得町岩松ダム付近で雪崩が発生し、乗用車の前方が雪に埋もれる事故などが報告されている<sup>2)</sup>。

そこで本研究は、2015年3月10日に ROS イベントが発生したときの気象条件について、地上天気図と高層天気図、気象庁の新得アメダスで観測された地上気象データを分析した。なお、本研究では ROS イベントがあった日の定義を「10cm以上の積雪がある状態で10mm以上の降水があった日」とした。

### 2. ROS イベント発生時の気象条件の分析

#### (1) 地上気象観測データ

図1は2015年3月10日の新得アメダスにおける地上気象データである。当日の新得アメダスでは、日降水量:76.9mm, 日降雪量:32cm, 最深積雪:84cmであった。このうち降雪がなく降水のみがある時間帯を ROS イベントとすると、該当するのは2～3時, 5～10時および18～20時である。また10～18時には降雪が記録されているが、雪水比を1.0cm/mmと仮定すると、降雪量に対し降水量が多いため、この時間帯は降雪とともに降水があった(みぞれのような性状)と推察される。

#### (2) 地上天気図

ROS イベント発生時刻に近い2015年3月10日9時の地上天気図を図2aに示す<sup>3)</sup>。この時刻において、日本付近は気圧の谷にあり、二つ玉低気圧の気圧配置となっている。

#### (3) 高層天気図

地上天気図と同時刻の850hPa高層天気図を図2bに示す<sup>3)</sup>。等高度線(実線)をみると、日本海にある低気圧の中心が十勝の西側に位置している。この低気圧の周辺では、風向が反時計回りとなるため、十勝では南東の風が観測されている。また、等温線(破線)をみると、この風向は相対的に暖気場から寒気場に向かって等温線を横断している。したがって、十勝付近は暖気移流の場になっていたと考えられる。また、湿域(図2bのメッシュ状の点)をみると、十勝の南東側(風上)で空気が湿っていることが確認できる。

### 3. まとめ

ROS イベント発生時である2015年3月10日の天気図を分析した結果、十勝周辺は低気圧の影響で暖気移流の場になっており、湿潤で暖かい空気が流入しやすい条件となっていた。この、暖湿空気が相対的な寒気場である十勝周辺に移流したとき、雲が発達して降水になったと推察される。

表1 Rain-On-Snow 発生日とそれぞれの日における日降水量、日降雪量、最深積雪(気象庁帯広測候所による観測結果)

	2015年 3月10日	2016年 2月14日	2018年 3月9日	2020年 3月10日	2021年 2月15日	2021年 2月16日
日降水量 (mm)	84.5	15	57	32.5	23.5	11.5
日降雪量 (cm)	21	1	0	0	1	0
最深積雪 (cm)	77	40	95	61	33	30

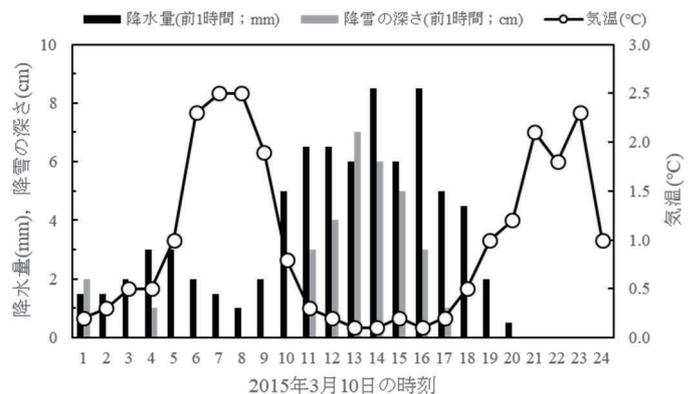


図1 新得アメダスにおける地上気象データ(2015年3月10日)

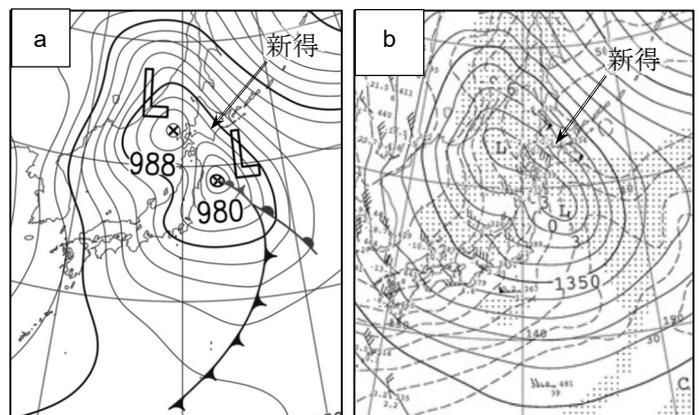


図2 2015年3月10日9時の天気図

(a) 日本域地上天気図(日本域抜粋)

(b) 850hPa高層天気図(日本域抜粋)

### 参考文献

- (1) 気象庁ウェブサイト「過去の気象データ検索」  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- (2) 十勝毎日新聞電子版2015年3月10日「道道忠別清水線で雪崩、36.4キロ通行止め トムラウシ地区孤立」  
<https://kachimai.jp/article/index.php?no=288970>
- (3) 原典: 気象庁ウェブサイト「天気図」, 加工: 国立情報学研究所「デジタル台風」  
<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/weather-chart/>

1 北見工業大学工学部地球環境工学科

School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

北海道釧路市の春採湖の結氷と気象データの関係

— 全面結氷日, 全面解氷日, 結氷期間の変化と将来予測 —

Ice phenological study of Lake Harutori, Kushiro, Hokkaido from 1985 to 2021, and possible meteorological effects for the phenological data

- Change and prediction of freeze-up date, breakup date and duration of ice cover -

○牛塚貴博<sup>1</sup>, 亀田貴雄<sup>1</sup>, 吉川泰弘<sup>1</sup>, 野本和宏<sup>2</sup>, 貞國利夫<sup>2</sup>, 加藤ゆき恵<sup>2</sup>, 山代淳一<sup>3</sup>

Takahiro Ushizuka, Takao Kameda, Yasuhiro Yoshikawa, Kazuhiro Nomoto, Toshio Sadakuni, Yukie Kato, Junichi Yamashiro

1. はじめに

釧路市立博物館では、博物館に面する春採湖の全面結氷日と全面解氷日を 1985 年 4 月の全面解氷日から毎年記録しており、2021 年現在で 36 年にわたる記録が存在する。

本研究では春採湖の全面結氷日と全面解氷日の変化がどのような要素に影響を受けているのかを調べ、変化の傾向および要因について明らかにし、今後の結氷状況の変化を予測することを目的とする。なお、全面結氷日とは湖面全体の結氷が数日以上続いたときの初日のことであり、全面解氷日とは湖面から氷がなくなった日のことである。

2. 全面結氷日, 全面解氷日, 結氷期間の変化

図 1 に全面結氷日, 全面解氷日, 結氷期間の経年変化を示す。全面結氷日, 全面解氷日, 結氷期間のいずれにおいても統計学的に有意な経年変化はなかった。一方、図 2 に示すように全面結氷日は 12 月平均気温, 全面解氷日は 3 月平均気温と高い相関があることがわかった。12 月, 3 月の月平均気温が 1°C 上昇すると全面結氷日は 4.7 days/°C 遅く, 全面解氷日は 3.9 days/°C 早くなることがわかり, 3 月と 12 月の月平均気温がそれぞれ 1°C 上昇した場合は結氷期間が 8.6 days/°C 短くなることがわかった。

釧路地方気象台で観測された 12 月と 3 月の月平均気温の経年変化およびこれらの気温から推定した 1910 年以降の全面結氷日, 全面解氷日, 結氷期間を図 3 に示す。図 3 より, 春採湖では全面結氷日が 10.5 days/100yr の割合で早く, 全面解氷日が 7.5 days/100yr の割合で遅くなっており, それに伴って結氷期間は 18.0 days/100yr の割合で短くなっている傾向があると推定できた。ただし, 推定では外挿を用いた (結氷日で合計 10 年間, 解氷日で合計 18 年間)。釧路の月平均気温は観測地点の移転補正済みのデータを利用した。

3. 他の気象データとの関係

12 月および 3 月の釧路沿岸の月平均海面水温 (SST) と月平均気温, 全面結氷日, 全面解氷日の間にはそれぞれ有意な関係があることがわかった。釧路沿岸の 12 月の月平均 SST は PDO (Pacific Decadal Oscillation) 指数とも有意であった。一方, 3 月については PDO 指数とは有意な関係がなかった。また, 全面結氷日と 12 月の PNA (Pacific-North American pattern) 指数および全面解氷日と 3 月の AO (Arctic Oscillation) 指数は有意であった。同様に 12 月平均気温と 12 月の PNA 指数, 3 月平均気温と 3 月の AO 指数にはそれぞれ有意な関係が存在した。

これらから, テレコネクションパターンの状態の変化と釧路の気温や沿岸 SST の変化は関係しており, それらの変化が全面結氷日や全面解氷日の変化とも関係していることがわかった。

当日は, 数値計算で推定したこれまでの春採湖の氷厚の変化についても説明するとともに, 将来の春採湖の結氷期間の変化などについても述べる。

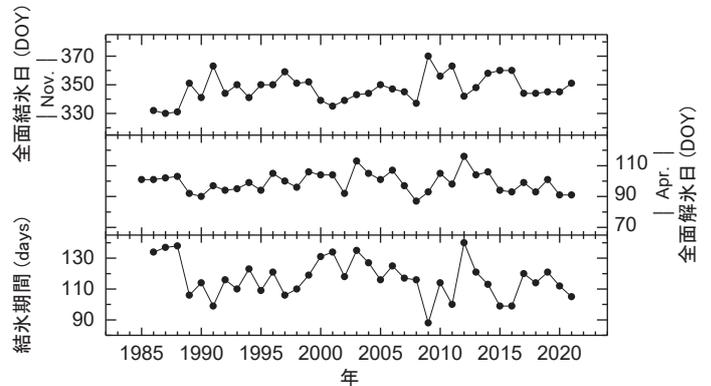


図 1 春採湖の全面結氷日, 全面解氷日, 結氷期間の経年変化 (全面結氷日と結氷期間は 1 月以降の年で示した)

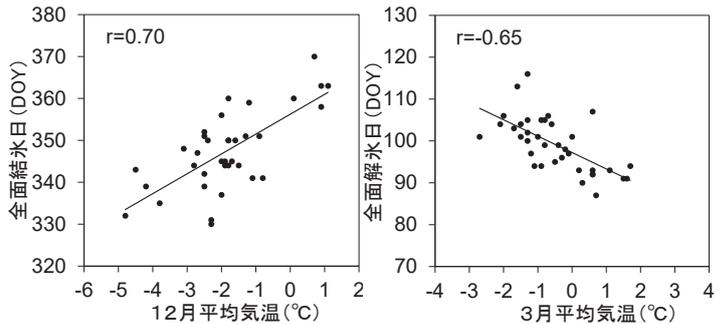


図 2 月平均気温と全面結氷日, 全面解氷日の関係

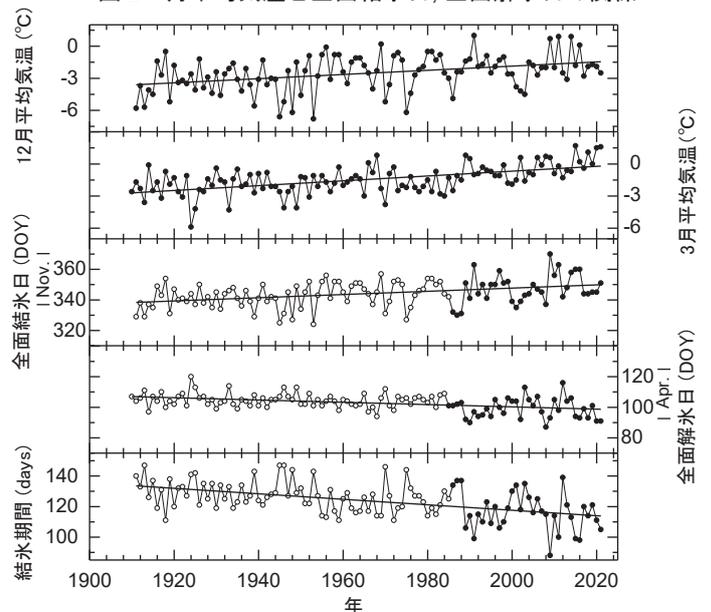


図 3 釧路の月平均気温と春採湖の全面結氷日, 全面解氷日, 結氷期間の経年変化 (白丸は気象データからの推定値。12 月平均気温, 全面結氷日, 結氷期間は 1 月以降の年で示した)

1 北見工業大学  
 2 釧路市立博物館  
 3 元釧路市立博物館

Kitami Institute of Technology  
 Kushiro City Museum  
 Former Kushiro City Museum

# 積雪初期に形成されたざらめ雪が積雪変質モデル計算に及ぼす影響 Effect of Granular Snow Formed in Early Period of Snow Season on Numerical Snowpack Model Calculations

○新免幸信<sup>1</sup>, 白川龍生<sup>1</sup>, 佐藤航<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>

Yukinobu Shimmen, Tatsuo Shirakawa, Wataru Sato and Akihiro Hachikubo

## 1. はじめに

積雪層構造は数ヶ月にわたる気象環境の蓄積であるため、極端な事象がその後の構造に大きな影響を及ぼすことがある。例えば、積雪初期に全層が融解・再凍結し、その後の温度勾配作用により昇華凝結し、通常はあまり起こらないざらめ雪からこしもざらめ雪、あるいはしもざらめ雪への変化が起り、長期にわたり維持されることがある。気象データから雪崩や大雪を正確に予測し、防災や減災に活用するためのツールとして積雪変質モデルがあり、研究・改良が進められている。しかし上述のような極端な現象を反映することができるについては未解明の部分も多い。そこで本研究では、積雪変質モデルとして広く普及している SNOWPACK を用いて、積雪初期に形成されたざらめ雪のその後の変化に着目し、計算結果を積雪断面観測データ（実測）と比較した。ここでは、積層構造の変化や積雪深、積雪水量の再現性について検証する。

## 2. 方法

気象観測データは北見工業大学グラウンドで測定されたデータを使用した。観測項目は、気温、湿度、風向、風速、降水量、気圧、長波放射、短波放射、積雪下熱伝導量である。SNOWPACK には初期設定（以下、標準モデル）と日本の雪氷環境に合わせた改良がなされた NIED モデルの 2 つの仕様がある<sup>1)</sup>。図 1 に 2017-2018 年冬季に実施した積雪断面観測の結果を示すが、12/25 に気温が高くなり、全層ざらめ雪となっている。この雪質の変化がその後の計算結果に及ぼす影響を調べるため、本研究では数値実験を行った。ここでは、モデルに入力する気象データに修正を加えない場合（以下、修正なし）と加えた場合（12/25 は 12/24 と同じ気象条件だったと見なす；以下、修正あり）とを比較する。積雪断面観測データは北見工業大学野球場での観測結果を使用した。

## 3. 結果および考察

モデル計算結果について、修正なしの場合を図 2 に示す。SNOWPACK による計算結果をみると、一度ざらめ雪に変質した層は、その後、他の雪質には変化していない。このため長期積雪の初期にざらめ雪が現れると、その後は消雪までざらめ雪として計算されることになる。しかし実測ではこしもざらめ雪やしもざらめ雪の変化が起きており（図 1）、計算結果と異なる。一方、図 3 は修正あり（数値実験）の場合である。NIED モデルの結果は実測とよく類似していることがわかる。

また、各モデルの再現性について、積雪深を図 4、積雪水量を図 5 に示す。いずれも実測に比べ、モデル計算の結果はやや値が小さい傾向がある。修正の有無については大差がなかった。

## 参考文献

- 1) Hirashima, H. (2019): Numerical snowpack model simulation schemes for avalanche prediction in Japan. *Bulletin of Glaciological Research*, **37S**, 31-41.

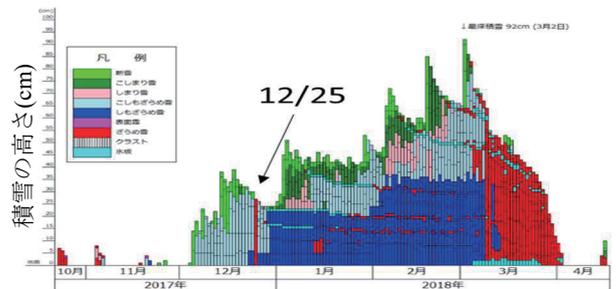


図 1 2017-2018 年冬季の積雪断面観測結果

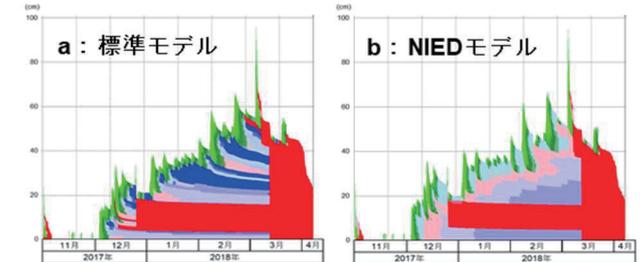


図 2 2017-2018 年冬季のモデル計算結果（修正なし）

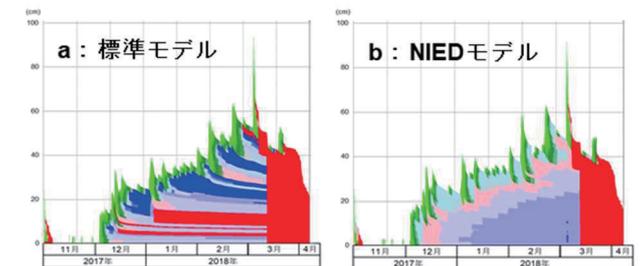


図 3 2017-2018 年冬季のモデル計算結果（修正あり）

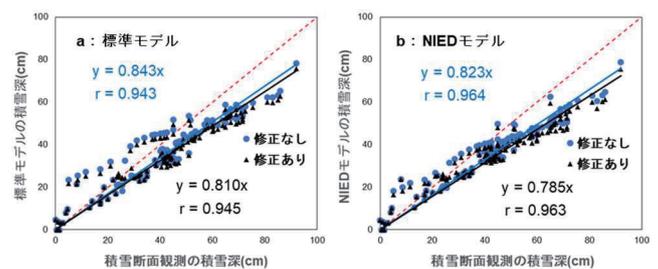


図 4 各モデルの再現性（積雪深）

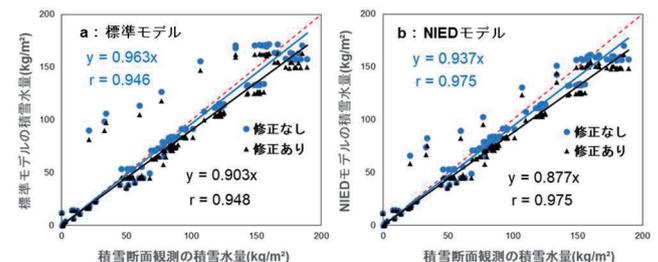


図 5 各モデルの再現性（積雪水量）

<sup>1</sup> 北見工業大学

Kitami Institute of Technology

こしもざらめ雪・しもざらめ雪のせん断強度  
 —濡れ雪に変化した場合のせん断強度, および寡雪地域におけるせん断強度の推移—  
 Shear Strength of Snow Layer Composed of Faceted Crystals and Depth Hoar  
 – Shear Strength in the Case of Wet Snow Metamorphism, and  
 Transition of Shear Strength in Little Snowy Region –

○佐藤航<sup>1</sup>, 白川龍生<sup>1</sup>, 新免幸信<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>

Wataru Sato, Tatsuo Shirakawa, Yukinobu Shimmen and Akihiro Hachikubo

1. はじめに

本研究は、昇華凝結過程によって積雪内に形成されるこしもざらめ雪・しもざらめ雪 (以下, しもざらめ系) のせん断強度に着目したものであり, (1)しもざらめ系の雪質が濡れ雪に変化した場合のせん断強度, (2)寡雪地域におけるせん断強度の推移について述べる。

2. 方法

本研究では、2016–17 年冬期および 2017–18 年冬期に北見工業大学敷地内で実施した積雪断面観測の結果, および同観測内で実施したせん断強度測定試験の結果を用いて解析を行った。

3. 結果および考察

(1) 濡れ雪に変化した場合のせん断強度

乾き雪が濡れ雪になった時の含水率とせん断強度の関係を示す指標としては、せん断強度の減少率  $A$  が用いられる<sup>1)</sup>。減少率  $A$  は含水率の増加とともに減少し、含水率が 0% の場合  $A=1$ 、含水率 > 0% の場合  $A < 1$  となる。  $A$  の値は濡れ雪のせん断強度の実測値と、その雪 (新雪・こしまり雪・しまり雪・ざらめ雪) の乾き密度より求められる。既往研究では、しまり雪が濡れてざらめ化した場合、含水率の増加とともにせん断強度は指数関数的に減少することが明らかにされている。この時の体積含水率とせん断強度の関係は、体積含水率  $\theta$  が 0% のとき、  $A=1$  として求めた式(1)が示されている<sup>1)</sup>。

$$A = e^{-0.235\theta} \quad (1)$$

一方、本研究ではしもざらめ系の雪が濡れた場合について同様の方法で求めた。結果、式(2)が得られた (図 1)。

$$A = e^{-0.571\theta} \quad (2)$$

この結果から、せん断強度は同じ含水率であっても、しまり雪に比べしもざらめ系の雪が濡れた場合の方が減少率は大きいことがわかった (図 1)。

(2) 寡雪地域におけるせん断強度の推移

2017–18 年冬期の観測では、12 月 13 日の降雪以降、 $-0.2^{\circ}\text{Ccm}^{-1}$  以上の温度勾配が積雪層全体にかかり、こしもざらめ雪主体の層構造が続いた。その後、同 25 日に急発達した低気圧の影響で、積雪は降雨、温度上昇の影響を受けて全層ざらめ化し、26 日には気温の低下と強風により、雪面にクラスト (後に氷板へ変化)、また積雪内に氷板が形成された。その後、同 29 日から 30 日にかけて、雪面近傍の氷板の直下でしもざらめ雪が形成された。このしもざらめ層の 12 月 27 日~1 月 24 日のせん断強度および関連する気象観測データを図 2 に示す。せん断強度の平均値は 624Pa となった。積雪は約 1 ヶ月にわたり圧密が進まず、せん断強度も大きく変化せず推移した。

寡雪地域として知られる北海道東部における積雪の物性調査は研究事例が少ないため、今後も観測を継続する予定である。

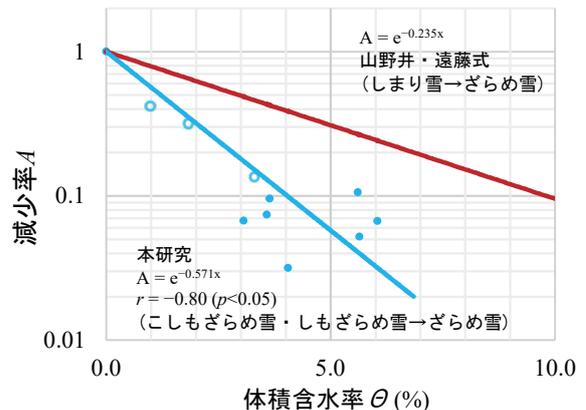


図 1 体積含水率とせん断強度の減少率の関係

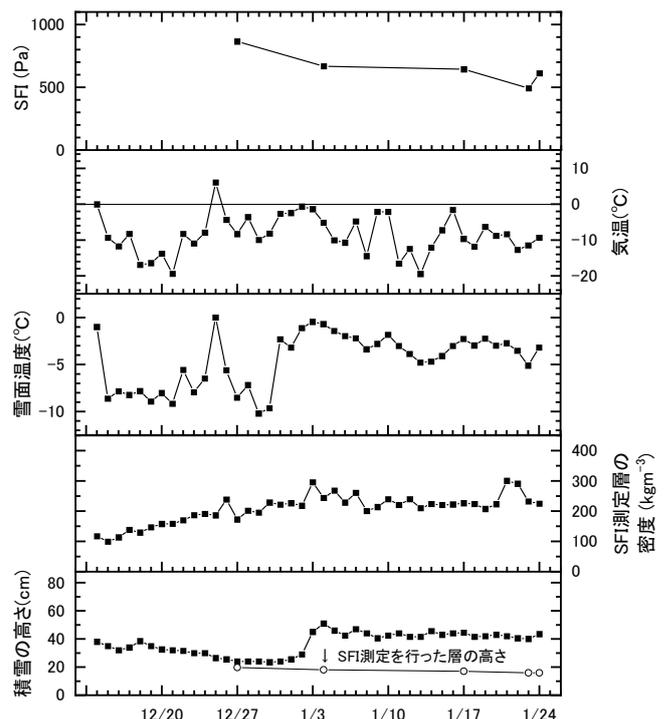


図 2 寡雪地域におけるせん断強度の推移 (2017–18 年冬期, 北見工業大学での観測結果)

謝辞 当時の積雪断面観測に参加した二川修輔氏・柳澤秀人氏 (北見工業大学卒業生) に感謝します。

参考文献

- 1) 山野井・遠藤 (2002) : 積雪におけるせん断強度の密度および含水率依存性. 雪氷, 64(4), 443-451.

1 北見工業大学

Kitami Institute of Technology

## カーリングにおけるスウィーピングの効果の解明

## Effects of Sweeping on Curling

○齊藤 茉由美<sup>1</sup>, 亀田 貴雄<sup>1</sup>, 山浦 高伸<sup>1,2</sup>, 柳 敏<sup>3</sup>

Mayumi Saito, Takao Kameda, Takanobu Yamaura, Satoshi Yanagi

## 1. はじめに

カーリングにおいてスウィーピングは氷上を進むストーンの到達距離を延ばすこと、曲がり幅を変化させることが出来ると言われている。ただし、スウィーピングによりストーン軌跡が変化するメカニズムは科学的には充分には解明されていない。また、カーリング場氷面にはペブルと呼ばれる小さい凸部があり、ここでのみストーンは氷と接触している。

そこで本研究では、カーリングにおけるスウィーピングの効果をもとに氷面のペブルの形状変化を用いて解明することを目的とする。また、スウィーピングによるストーン軌跡の変化を解明することも目的とする。

## 2. 測定方法

## 2.1 ペブルの形状変化

氷面のペブルは、紫外線硬化性樹脂(ノーランド社製光学接着剤 NOA81)を用いてレプリカを作成した。作成したレプリカ試料は光学顕微鏡(キーエンス社製 VHX-5000)で表面観察し、3次元形状測定システム(フィルメトリクス社製 Profilm3D)でペブルの立体構造を観察した。ペブル上端面でのブラシとの接触面積は Profilm 3D の写真を ImageJ で画像解析した。スウィーピングをかけていない氷面、スウィーピングを1往復かけた氷面、スウィーピングを5往復かけた氷面の3種類の氷面の同一ペブルを観察を行った。

## 2.2 カーリング・ストーン軌跡測定

自動追尾型トータルステーション(ニコン・トリンブル社製 S9, 以下 TS)を使用した。ストーンにターゲットを取り付け位置座標を測定した。

## 3 結果

図1はペブルの高さ測定結果であり、スウィーピングにより高さが減少することがわかった。

図2に、ペブルを VHX-5000 と Profilm 3D で観察した結果を示す。図2dより、ペブルの摩耗とスウィーピングによって付けられた条痕がペブル上端面および氷面に確認された。また、150倍で観察した図2dおよび2hではスウィーピングにより、ペブル上端面の稜が摩耗し、丸くなることわかった。

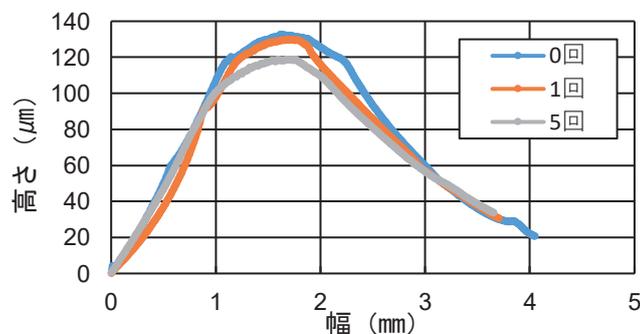


図1 スウィーピングによる高さ変化

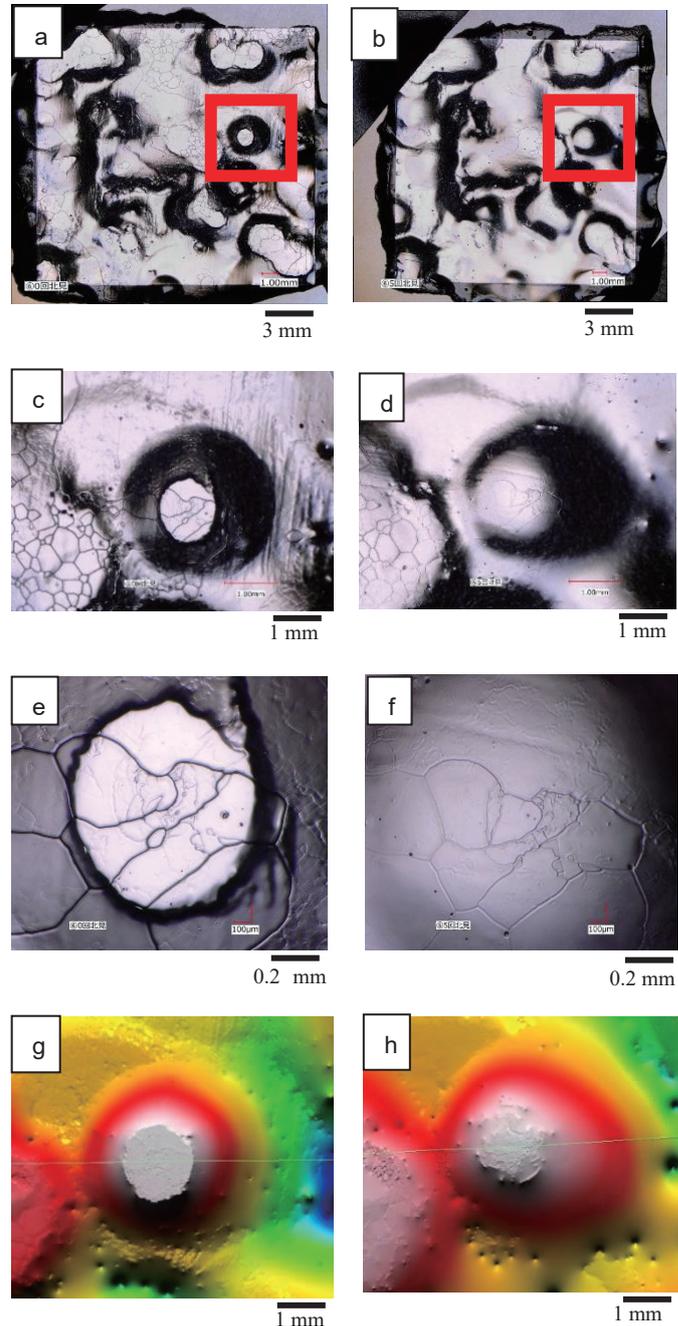


図2 a~fはVHX5000での観察結果 a:スウィーピング0回(20倍), b:スウィーピング5往復(20倍), c:スウィーピング0回(50倍), d:スウィーピング5往復(50倍), e:スウィーピング0回(150倍), f:スウィーピング5往復(150倍). Profilm 3Dによるペブルの観察結果, g:スウィーピング0回, h:スウィーピング5往復.

1 北見工業大学  
2 東日本高速道路株  
3 北海道釧路明輝高校

Kitami Institute of Technology  
East Nippon Expressway, Co.Ltd.  
Hokkaido Kushiro Meiki Senior High School

## 山形県月山の高山帯における赤雪の分布 Spatial distribution of red-snow algae blooms in Mt. Gassan, Yamagata-Prefecture, Japan

○鈴木拓海<sup>1</sup>, 竹内望<sup>2</sup>, 小野誠仁<sup>1</sup>

Takumi Suzuki, Nozomu Takeuchi and Masato Ono

### 1. はじめに

雪氷藻類とは寒冷環境に適応した光合成微生物で、世界各地の氷河や氷床、積雪の表面で繁殖することが知られている。日本国内では、北は北海道、南は愛媛県まで、全国各地の残雪から報告されている(Fukushima, 1967)。山形県月山山麓の樹林帯では、主に緑藻の大繁殖によって色付いた緑色の雪“緑雪”が報告されている(Muramoto *et al.*, 2010)。一方、2019年の調査の結果、月山の森林限界を超えた高山帯では、赤色の雪“赤雪”が見られることが明らかとなった。また、融雪初期には観察されない赤雪が、融雪中期から融雪末期にかけて観察された。このように、高山帯では樹林帯と異なる赤雪が出現することは、樹木がないことによる強い日射量が影響している可能性がある。しかしながら、なぜ赤雪が現れる時期は緑雪に比べ遅いのか、高山帯においてどのように分布するのかなど、詳しいことは分かっていない。そこで本研究では、山形県月山の高山帯において赤雪を高度別に採取し、藻類の種構成や色素構成がどのように分布しているのかを明らかにし、その要因を考察することを目的とした。

### 2. 調査地と方法

赤雪の採取は、2021年6月26日に山形県月山の前山である標高約1670mの姥ヶ岳と、標高約1984mの月山山頂の間の稜線沿いに計5地点の残雪上で行った。また、それぞれの地点で積雪深の測定を行った。採取したサンプルは、実験室に持ち帰り、冷凍、冷蔵保存した。まず光学顕微鏡によって赤雪中にどのような藻類が含まれるか観察を行った。分析は、サンプルを融解後、GF/F フィルターで濾過したものをジメチルホルムアミド(DMF)に色素を抽出し、蛍光光度計を用いてクロロフィル *a* 濃度、分光光度計を用いて吸光スペクトルの測定を行った。また高速液体クロマトグラフィー(HPLC)を用いて、藻類の構成色素の定量を行った。さらに光学顕微鏡によって、藻類細胞のカウントを行った。

### 3. 結果と考察

調査の結果、5地点のうち姥ヶ岳から月山山頂の間の下部4地点で赤雪が観察された。また、月山山頂付近の積雪深は3.20m程度であったのに対し、ほか4地点は0.35m~1.55m程度と比較的浅かった。観察によって、赤雪は残雪上の積雪深が比較的浅い、斜面上部付近によく広がっていることがわかった。特に、積雪深が約1.55m以下の4地点で赤雪が観察されたのに対して、積雪が3m以上残っていた山頂付近では赤雪は観察されなかった。藻類の発生を促進する光合成有効放射の1%が積雪深1mまで透過し得る(Curl *et al.*, 1972)ことから、光合成有効放射が届く深さまで融雪の進んだ地点のみで赤雪が現れた可能性がある。さらに、姥ヶ岳周辺の残雪上では、2019年7月初旬調査時と同じ場所で赤雪が観察された。このことは、前年に繁殖した藻類が、積雪が消失したのちに土壤中中で休眠し、積雪後に土壤中から積雪表面に移動して繁殖していることを示唆している。光学顕微鏡による観察の結果、赤雪中には、赤色球形細胞、橙色球形細胞、橙色楕円形細胞、緑色球形細胞、緑色ラグビーボール形細胞、緑色長方形細胞が含まれていることがわかった。特に、赤色球形細胞は赤雪の見られた4地点すべてで優占していた。今後、藻類細胞のカウント、クロロフィル *a* 濃度、吸光スペクトルの測定、色素の定量を行い、当日はその結果、考察を発表する予定である。

### 参考文献

- 1) Fukushima, H. 1963: Studies on cryophytes in Japan. *Journal of Yokohama Municipal University Series C. Natural Sciences*, **43**, 1-147.
- 2) Muramoto, K., Nakada, T., Shitara, T., Hara, Y., and Nozaki, H. 2010: Re-examination of snow algal species *Chloromonas miwae*(Fukushima) Muramoto *et al.*, comb. Nov. (Volvocales, Chlorophyceae) from Japan, based on molecular phylogeny and cultured material. *European Journal of Phycology*, **45**(1), 27-37.
- 3) Curl, H. Jr., Hardy, J. T. and Ellermeier, R. (1972): Spectral absorption of solar radiation in alpine snow fields. *Ecology*, **53**, 1189-1194.

1 千葉大学大学院融合理工学府

2 千葉大学大学院理学研究院

Graduate School of Science and Engineering, Chiba University

Graduate School of Science, Chiba University

TBAC ハイドレートの CH<sub>4</sub> および CO<sub>2</sub> 分離特性の温度圧力依存性Temperature and pressure dependences of gas separation performances of TBAC hydrate on CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> mixture

○藤原玲司<sup>1</sup>, 合田隼人<sup>1</sup>, 木田真人<sup>1</sup>, 坂上寛敏<sup>1</sup>, 南尚嗣<sup>1</sup>  
Reiji Fujiwara, Hayato Goda, Masato Kida, Hirotohi Sakagami and Hirotsugu Minami

## 1. はじめに

テトラブチルアンモニウムクロリドハイドレート (TBAC<sub>h</sub>) は、テトラブチルアンモニウムクロリド水溶液を固化させることで得られるクラスレートハイドレートの一種であり、水分子が結びついてできたホストケージに、比較的小さな分子径を持つガス分子を包接できる。このような水溶液から生成可能なクラスレートハイドレートにガスを包蔵させる方法として、気相と水溶液を接触させる「気液接触」、または、気相とクラスレートハイドレートとを直接接触させる「気固接触」がある。気相が混合ガスの場合、先行研究では、接触方法によってクラスレートハイドレート相へのガス包蔵選択性が変化することが明らかにされている<sup>1,2)</sup>。しかし、クラスレートハイドレートをを用いた多くの気固接触系のガス包蔵特性は十分解明されていない。そこで、本研究では、TBAC<sub>h</sub> のガス包蔵選択性をバイオガスのガス分離精製媒体として応用することを検討するために、TBAC<sub>h</sub> とバイオガスを模擬した CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 混合ガスとの気固接触における CO<sub>2</sub> 分離特性を評価し、その接触温度圧力依存性を解明することとした。

## 2. 方法

本研究では、一般的なバイオガスの組成を模擬した CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 混合ガス (ガス組成: CH<sub>4</sub> 61.3%, CO<sub>2</sub> 38.7%) と TBAC<sub>h</sub> を気固接触させる実験を所定の温度圧力条件下で行った。まず、TBAC<sub>h</sub> の化学量論組成である 3.3mol% のテトラブチルアンモニウムクロリド水溶液を 253 K で冷却し、TBAC<sub>h</sub> 試料を作製した。300 μm 以下に分級した TBAC<sub>h</sub> の粉末 5.000 g を体積約 31 cm<sup>3</sup> の耐圧容器に導入し、253~283 K の範囲で 10 K 間隔で温度条件を設定し、一定温度下において CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 混合ガスと TBAC<sub>h</sub> 粉末を所定時間接触させた。混合ガスとの接触圧力条件は約 3.0 MPa および 0.9 MPa の 2 条件である。接触後の気相のガス組成および TBAC<sub>h</sub> の分解後のガス組成は、ガスクロマトグラフィーにより測定した。各ガス組成データと気固接触前後の圧力変化から、CO<sub>2</sub> 回収率 ( $R_{CO_2}$ )、CH<sub>4</sub> 回収率 ( $R_{CH_4}$ ) および CO<sub>2</sub> 分離係数 ( $S$ ) を評価し、ガス分離特性を評価した。

## 3. 結果と考察

いずれの実験条件においても、初期封入した CO<sub>2</sub> の組成より、ハイドレート分解ガスの CO<sub>2</sub> 組成が高くなる傾向を示し、TBAC<sub>h</sub> 結晶内に CO<sub>2</sub> が選択的に固定された。

初期圧力が約 0.9 MPa の低圧条件の場合、 $R_{CO_2}$  の値は、283 K で 29.5%、253 K で 40.6% と見積もられ、接触温度が低下するにつれて高くなる傾向を示した。これは、接触温度が低温ほど CO<sub>2</sub> を分離できることを示唆している。初期圧力が約 3.0 MPa の高圧条件の場合、 $R_{CO_2}$  の値は 283 K で 21.1%、253 K で 23.3% であり、接触温度によらず、ほぼ一定の値を示した。接触温度が 283 K から 253 K に低下するにつれて、初期圧力約 0.9 MPa の場合、 $R_{CH_4}$  の値は 9.2% から 5.0% へわずかに減少し、約 3.0 MPa の場合、5.0% から 1.9% へわずかに減少した。

$S$  の値は、同一の接触温度条件において、高圧条件と低圧条件で顕著な差はみられなかった。一方で、接触温度が低下するにつれて、低圧条件の場合、 $S$  の値は 283 K で 4.5、253 K で 13.9、高圧条件の場合では、283 K で 5.1、253 K で 15.2 となり、値が高くなる傾向が確認され、低温ほど CO<sub>2</sub> の分離性能が高くなることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) Lee, Y.-J., Kawamura, T., Yamamoto, Y. and Yoon, J.-H., 2012: Phase Equilibrium Studies of Tetrahydrofuran (THF) + CH<sub>4</sub>, THF + CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub>, and THF + CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> Hydrates, *J. Chem. Eng. Data*, **57**, 3543–3548.
- 2) Kida, M., Goda, H., Sakagami, H., Minami, H., 2020: CO<sub>2</sub> capture from CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> mixture by gas–solid contact with tetrahydrofuran clathrate hydrate, *Chem. Phys.*, **538**, 110863–110869.

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 20K12269 の助成を受けたものです。

225–246 Kにおけるメタンハイドレートの水和数測定  
Measurement of Hydration Number of Methane Hydrate at 225–246 K○宅和聖悟<sup>1</sup>, 矢作大輔<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 竹谷敏<sup>2</sup>

Shogo Takuwa, Daisuke Yahagi, Akihiro Hachikubo and Satoshi Takeya

## 1. はじめに

ガスハイドレートの分子式は、ゲスト分子 (M) と水和数 ( $n$ ) を用いて  $M \cdot nH_2O$  で表される。水和数はゲスト分子に対する水分子の平均個数であるが、ガスハイドレートの場合、水和数は決まった値とはならない。現実には水分子で構成された空ケージが存在し、水和数は生成時の圧力に依存することが知られている<sup>1)</sup>。例えば、メタンハイドレートの結晶構造 I 型では、大小ケージ全てにメタンが 1 個ずつ包接されたときの水和数は 5.75 となるが、実際には 6 前後の値が報告されている<sup>2)</sup>。しかしながら、メタンハイドレートの水和数の温度・圧力依存性についてはまだ詳細には知られていない。これは、単位体積ないし単位質量あたりのメタンハイドレートに含まれるガス量が、正確には予測できないことを意味する。したがって、エネルギー資源やガス貯蔵媒体などの活用が期待されているメタンハイドレートの生成条件 (温度および圧力) が水和数に及ぼす影響を定量的に調べる必要がある。

我々の研究グループではこれまでに、メタンハイドレートの水和数の生成圧力依存性について調べてきた<sup>3-6)</sup>。一般には、生成圧力の増加とともに、ガスハイドレートの水和数は減少する<sup>1)</sup>。ただし、メタンハイドレートの場合、255~273 K の温度環境下およびハイドレート平衡圧から約 18 MPa 近辺までの圧力範囲では、水和数の変化はわずか 0.1 程度に過ぎない<sup>9)</sup>。一方、同じ圧力条件下では、生成温度の低下とともに水和数がやや低下する傾向がみられたが、水和数の生成温度依存性については断片的なデータしか得られていない。

そこで本研究では、250 K 以下の温度条件下で先行研究<sup>9)</sup>と同様に人工メタンハイドレート試料を生成し、ラマン分光法にてラマンスペクトルを測定し、統計熱力学モデル<sup>7)</sup>を用いて水和数を求め、その温度・圧力依存性について調べた。

## 2. 試料生成、ラマン分光分析および解析方法

まず、蒸留水を凍結させて生成した氷をマイクロームで削り、微粉末氷を作成した。この微粉末氷 0.1 g を容積 30 mL の耐圧容器に封入し、耐圧容器を液体窒素温度に保つことで、一定量のメタンを液化させて耐圧容器内に導入した。その後、耐圧容器を一定温度 (225 K および 246 K の 2 種類) まで昇温させることでメタンを気化させて加圧し、MH 試料を生成した。225 K では約 1 週間、246 K では約 1 日が経過した後、容器内圧力の変化がないことを確認した上で、液体窒素温度下でメタンハイドレート試料を取り出した。これらの試料について、ラマン分光分析装置 (RMP-210, 日本分光) を用いて、結晶構造 I 型の大小ケージそれぞれに包接されたメタン分子の C-H 対称伸縮振動モードのラマンスペクトルを 1 試料につき 5 回測定し、ピークフィッティングにより大小ケージそれぞれに由来するピークを分離した。これらのピークの面積比から先行研究<sup>2)</sup>と同様、統計熱力学モデル<sup>7)</sup>により水和数を計算して求めた。

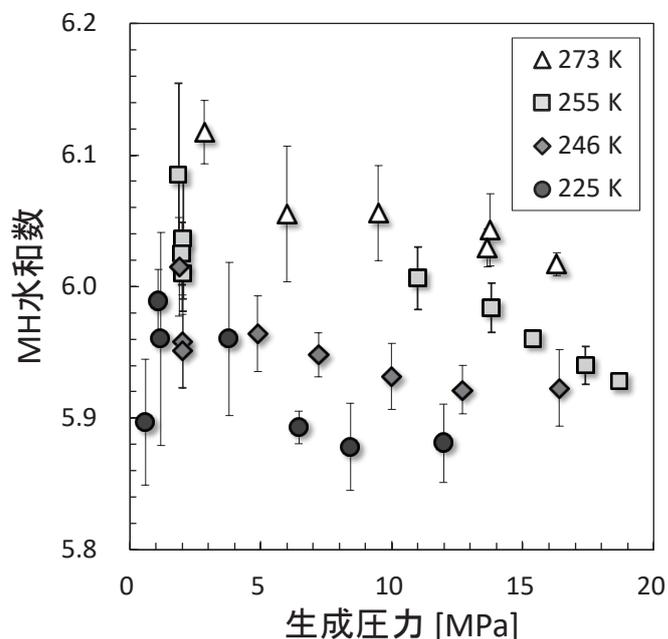


図 2 MH (メタンハイドレート) における生成圧力と水和数との関係。エラーバーは同一試料での測定値の標準偏差を表す。

## 3. 測定結果および考察

生成温度 225 K~273 K の範囲における、メタンハイドレートの生成温度・圧力と水和数との関係を上図に示した。先行研究<sup>9)</sup>による 255 K および 273 K のデータでは、生成圧力の増加とともに水和数が減少する傾向がはっきりみえる。こうした傾向は、キセノンや硫化水素等の他のガスハイドレートでも同様であるが<sup>1)</sup>、水和数の減少率は相対的に小さい。一方、246 K および 225 K では圧力に対する減少傾向がやや小さいようにみえる。また、同じ生成圧力では、より低温下で生成した場合に水和数が小さくなる傾向もみられた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、MH 生成装置については科学研究費補助金 (基盤研究 B : 26303021) の助成を受けた。

## 参考文献

- 1) Cady, G. H., 1981: *J. Phys. Chem.*, **85**, 3225–3230.
- 2) Sum, A. K., et al., 1997: *J. Phys. Chem. B*, **101**, 7371–7377.
- 3) 中山ほか, 2014: 雪氷研究大会 (2014・八戸) 講演要旨集.
- 4) 長谷川ほか, 2015: 雪氷研究大会 (2014・松本) 講演要旨集.
- 5) 太田ほか, 2016: 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.
- 6) 駒形ほか, 2020: 雪氷研究大会 (2020・オンライン) 講演要旨集.
- 7) van der Waals, J. H. and J. C. Platteeuw, 1959: *Adv. Chem. Phys.*, **2**, 1–57, doi: 10.1002/9780470143483.ch1

1 北見工業大学

2 産業技術総合研究所

Kitami Institute of Technology

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

窒素酸化物を包接するクラスレートハイドレートの生成実験  
Formation of Clathrate Hydrate Encaged Nitrogen Oxides○堀智貴<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 竹谷敏<sup>2</sup>

Tomoki Hori, Akihiro Hachikubo and Satoshi Takeya

## 1. はじめに

窒素酸化物には, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O 等の多くの種類が存在する。特に NO (一酸化窒素) は星間物質の一つであり, この単純な分子を包接するクラスレートハイドレートは, 地球惑星科学分野では興味深い物質といえる。しかしながら, NO ハイドレートを合成したとの報告はこれまでにわずか 1 例しかない<sup>1)</sup>。ガスハイドレートの多くの種類については, 氷とゲストガスとの接触により生成できるが, Hallbrucker は反応性の高い不安定な NO を低温・低圧環境下でアモルファス氷と接触させる方法で生成している。これまでにどれほどの NO ハイドレート生成実験が試みられ, そして失敗してきたのか, その理由等については不明な点が多い。本研究ではあえて, 微粉末氷とゲストガスを接触させる方法で結晶生成を試み, NO ハイドレートができるのかどうかについて調べた例を報告する。

## 2. 試料生成および分析方法

蒸留水を凍結させて生成した氷を, ミクロトームで 1 ストロークあたり 5 μm のステージ上昇速度で削ることにより, 比表面積の極めて大きい (~300 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>) 微粉末氷試料を作成した。この氷試料 3 g を容積 30 mL の耐圧容器に封入し, 液体窒素温度下で真空引き後, 一定量の NO (住友精化, 純度 99.7%) を耐圧容器内に導入した。その後, 耐圧容器の温度を 273 K 付近までゆっくりと昇温させ, 最終圧力約 12 MPa でハイドレート試料を生成した。約 1 日後, 容器内圧力の低下がないことを確認した上で, 液体窒素温度下で容器内の残ガスごと固定して, ガスハイドレート試料を取り出した。試料については, PXRD による結晶構造解析, およびラマン分光分析による包接ガス解析を実施した。PXRD とラマンではそれぞれ昇温実験を実施し, 温度変化にともなう各ピークの変動について詳細に調べた。なお, 純粋な NO を用いた試料のほか, CH<sub>4</sub> が 90%, NO が 10% の仕込み組成で生成した混合ガスハイドレートについても同様の方法で生成し, 分析を行なった。

## 3. 測定結果および考察

## 3.1 PXRD による結晶構造解析

純粋な NO から生成した試料の結晶構造は II 型であり, 先行研究による報告<sup>1)</sup>と一致する。分子サイズの点では, N<sub>2</sub> や O<sub>2</sub> が II 型を作ることから, NO が包接されて同じ II 型をとることは十分あり得る。格子定数については, N<sub>2</sub> ハイドレートと比較すると小さく, Ar ハイドレートよりわずかに大きいことがわかった。また, 昇温時にもない, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 固体および N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 固体に相当する回折ピークが観察された。これらは NO ハイドレート結晶の分解で生じた NO, ないしくエンチ時に試料とともに固定された残ガスの NO が, 空気中の酸素によって酸化されて生じたものと考えられる。

CH<sub>4</sub>+NO 混合ハイドレート試料については, 結晶構造は I 型

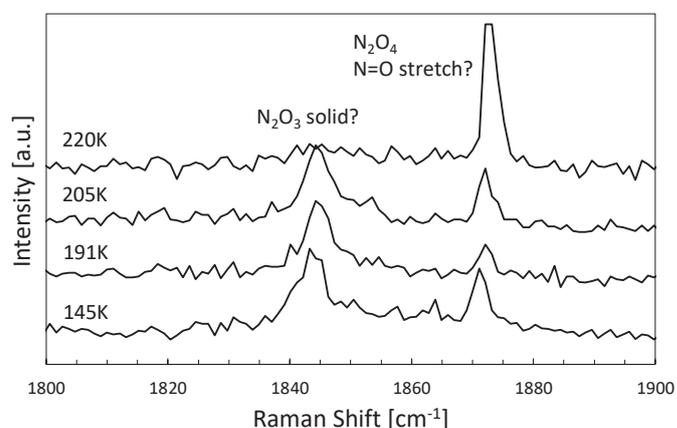
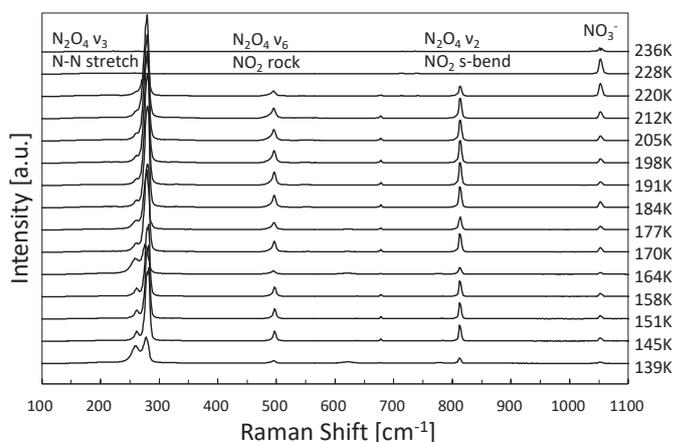


図 昇温時の試料のラマンスペクトルの変化。

であり, 格子定数は CH<sub>4</sub> ハイドレートよりわずかに小さかった。

## 3.2 ラマン分光分析による包接ガス分析

昇温実験における試料のラマンスペクトルの変化について, 一例を図に示す。なお, NO, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> や N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 等に関するラマンピークの情報は文献<sup>2-5)</sup>から得た。昇温途中で N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> に由来するピークが多数検出され, PXRD の結果と符合する。Hallbrucker によれば, 包接 NO 分子の N-O 伸縮振動は 1858.8 cm<sup>-1</sup> (II 型大ケージ) と 1868.8 cm<sup>-1</sup> (II 型小ケージ) に現れるが, 本研究ではこれらは観察されず, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> や N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 由来の小さなピークしかない。したがって, 本実験では結晶構造 II 型が生成したものの, どのような形態の分子を包接しているのか, 現段階では不明である。

## 参考文献

- 1) Hallbrucker, A., 1994: *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **33**, 691–693.
- 2) Hisatsune, I.C. and Devlin, J.P., 1960: *Spectrochim. Acta*, **16**, 401–406.
- 3) Bolduan, F. and Jodl, H.J., 1982: *Chem. Phys. Lett.*, **85**, 283–286.
- 4) Nour, E. M., et al., 1983: *J. Phys. Chem.*, **87**, 1113–1120.
- 5) Grothe, H., et al., 2006: *J. Phys. Chem. A*, **110**, 171–176.

1 北見工業大学  
2 産業技術総合研究所

Kitami Institute of Technology  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

## 亜酸化窒素ハイドレートの水和数測定 Measurement of Hydration Number of Nitrous Oxide Hydrate

○矢作大輔<sup>1</sup>, 宅和聖悟<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 竹谷敏<sup>2</sup>

Daisuke Yahagi, Shogo Takuwa, Akihiro Hachikubo and Satoshi Takeya

### 1. はじめに

亜酸化窒素 (一酸化二窒素,  $N_2O$ ) は  $CO_2$  の約 300 倍の温暖化係数を有するガスであり, 医療分野で全身麻酔に利用されるガスでもある.  $N_2O$  は古くからガスハイドレートを作ることが知られており, 結晶構造は I 型である<sup>2)</sup>.  $N_2O$  の分子径は  $CO_2$  と同程度で,  $CH_4$  より大きく  $C_2H_6$  より小さい. これまでのガスハイドレートのケージ占有率の圧力依存性の研究では, 数 MPa ~ 10 数 MPa の圧力領域では,  $CH_4$  は構造 I 型の大小ケージの大半に包接される一方,  $C_2H_6$  は小ケージにほとんど入らない. ただし, 数 100 MPa の高压域では  $C_2H_6$  も小ケージに包接される<sup>3)</sup>. つまり,  $CH_4$  と  $C_2H_6$  の中間サイズである  $N_2O$  は, より低圧力で小ケージ占有率の変化が観察されると期待できる.

$N_2O$  ハイドレートの平衡圧は 275.20 K で 1.20 MPa<sup>4)</sup> と  $CO_2$  のそれより若干低い程度であるため, 実験的にはハイドレート生成は容易である.  $N_2O$  ハイドレートの水和数については, 6.02 と見積もられている例<sup>5)</sup>があるが, 水和数, 大小ケージ占有率に関する圧力依存性についてはこれまで報告されていない.

我々の研究グループでは,  $CH_4$  ハイドレート生成時の水和数の温度・圧力依存性について調べている<sup>6)</sup>. 本研究では,  $N_2O$  ハイドレートを人工的に生成し,  $CH_4$  ハイドレートと同様にラマン分光測定によってラマンスペクトルを測定し, 統計熱力学モデル<sup>7)</sup>を用いて水和数およびケージ占有率を求め, その圧力依存性について調べた結果を報告する.

### 2. 試料生成, ラマン分光分析および解析方法

基本的な実験手順は  $CH_4$  ハイドレートの場合<sup>6)</sup>とほぼ同様である. 蒸留水を凍結させて生成した氷をマイクロトームで削って生成した微粉末氷 0.7 g を容積 30 mL の耐圧容器に封入し, 任意の量の  $N_2O$  (日産化学, 純度 99.99%) を液体窒素温度の耐圧容器内に導入した. その後, 耐圧容器をゆっくりと 273 K まで上昇させ,  $N_2O$  ハイドレートを生成した. 耐圧容器は 273 K を約 1 日保ち, 容器内圧力の変化がないことを確認した上で, 液体窒素温度下でハイドレート試料を取り出した. なお, ハイドレート試料を高圧で保ったまま耐圧容器をクエンチすると, 容器内の残ガスが固体  $N_2O$  となって試料のコンタミとなり, ラマン分光測定時に障害となるため, クエンチ時には真空ポンプによる脱気を合わせて行った.

ハイドレート試料については, ラマン分光分析装置 (RMP-210, 日本分光) を用いて, 試料温度を 164 K に保ち, 結晶構造 I 型の大小ケージそれぞれに包接された  $N_2O$  分子の NO 伸縮振動モードのラマンスペクトル (波数 1280~1290  $cm^{-1}$  付近) を 1 試料につき 5 回測定した. NO 伸縮振動モードは大小ケージにそれぞれ包接された  $N_2O$  分子による 2 つのピークに分かれるため, ピークフィッティングにより大小ケージそれぞれに由来するピークを分離した. これらのピーク面積比から統計熱力学モデル<sup>7)</sup>により水和数を計算して求めた.

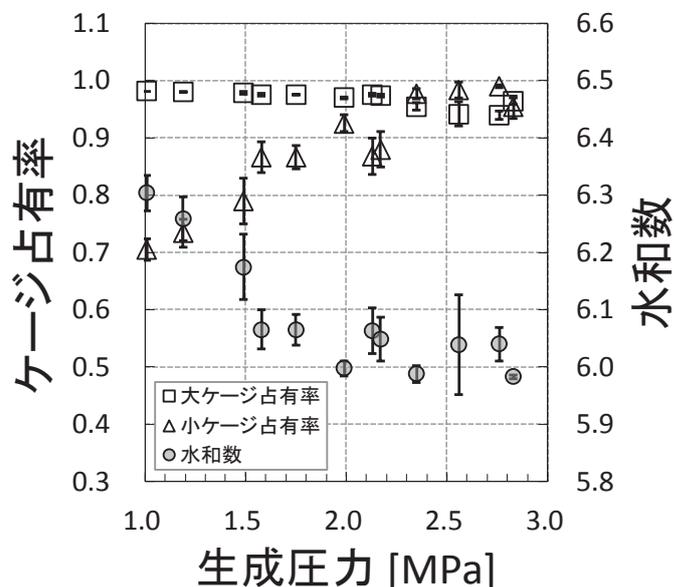


図  $N_2O$  ハイドレートの大小ケージ占有率および水和数の圧力依存性. エラーバーは 5 回測定時の標準偏差を表す.

### 3. 測定結果および考察

大小ケージに包接された  $N_2O$  の NO 伸縮振動モードのラマンスペクトルはそれぞれ, 1283  $cm^{-1}$  および 1291  $cm^{-1}$  で観察された. 上図は  $N_2O$  ハイドレートの大小ケージそれぞれのケージ占有率, および水和数の計算結果を生成圧力に対してプロットしたものである. 水和数は生成圧力 1 MPa で 6.3 であり, 2.8 MPa で 6.0 付近であることから, 273 K で生成した  $CH_4$  ハイドレートの結果<sup>6)</sup>と比較すると, 水和数の生成圧力依存性はメタンハイドレートよりもやや大きく現れていると言える. これは, 大ケージのケージ占有率が生成圧力 1~3 MPa の範囲で 0.94~0.98 であるのに対し, 生成圧力が小さい場合に小ケージのケージ占有率が約 0.7 と小さく, 液化圧付近 (273 K で 3 MPa) で 1 に近づくことに起因する.

#### 参考文献

- Villard, M., 1888: *Compt. Rend.*, **106**, 1602–1603.
- Sloan, E. D. and Koh, C. A., 2008: *Clathrate Hydrates of Natural Gases* (3rd ed.). CRC Press, Boca Raton, 721 pp.
- Morita, K., et al., 2000: *Fluid Phase Equilib.*, **169**, 167–175.
- Sugahara, T., et al., 2009: *J. Chem. Eng. Data*, **54**, 2301–2303.
- Kyung, D. and Lee, W., 2018: *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **76**, 32–38.
- 宅和ほか, 2021: 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン) 講演要旨集.
- van der Waals, J. H. and J. C. Platteeuw, 1959: *Adv. Chem. Phys.*, **2**, 1–57, doi: 10.1002/9780470143483.ch1

1 北見工業大学  
2 産業技術総合研究所

Kitami Institute of Technology  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

## 亜酸化窒素ハイドレート生成時のゲスト窒素安定同位体分別 Nitrogen Isotope Fractionation of Nitrous Oxide Hydrate Between Gas and Hydrate Phases

○鎌田諒也<sup>1</sup>, 木村宏海<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 竹谷敏<sup>2</sup>

Ryoya Kamata, Hiromi Kimura, Akihiro Hachikubo and Satoshi Takeya

### 1. はじめに

ガスハイドレート生成時には、ゲストガス分子の同位体分子種 (アイソトポログ) 間の平衡圧の違いに起因する安定同位体分別が起きる。混合ガス系では、平衡圧の低い分子が相対的にハイドレート相により多く取り込まれるように、アイソトポログ間でもハイドレート平衡圧のわずかな差が、質量分析装置で検出可能な安定同位体比の差を生み出す。これまでにメタンおよびエタン<sup>1)</sup>、プロパン<sup>2)</sup>、二酸化炭素<sup>3)</sup>、一酸化炭素<sup>4)</sup>、窒素<sup>5)</sup>等で、ゲストガス安定同位体分別が報告されている。

アイソトポログ間では重い分子が固相であるハイドレートに包接されやすいと考えられがちだが、現実には種類によって異なる。ハイドレート相に濃縮されるのは、 $\text{CH}_3\text{D}$  より  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{D}$  より  $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_7\text{D}$  より  $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $^{13}\text{CO}_2$  より  $^{12}\text{CO}_2$ 、 $^{12}\text{CO}$  より  $^{13}\text{CO}$ 、 $^{14}\text{N}_2$  より  $^{15}\text{N}^{14}\text{N}$  である。安定同位体分別の大きさは、ホストのケージサイズとゲストの分子サイズとの関係に依存する、との指摘もある<sup>6)</sup>。これまでにアイソトポログ間のハイドレート平衡圧の差が確実に検出されているのは  $\text{CH}_3\text{D} \cdot \text{CH}_4$  のみであり<sup>7)</sup>、安定同位体測定のほうが相対的に高感度で平衡圧の大小関係を予測可能である、と言える。

本研究で注目するのは、亜酸化窒素 (一酸化二窒素,  $\text{N}_2\text{O}$ ) である。 $\text{N}_2\text{O}$  ハイドレートは  $\text{CO}_2$  ハイドレートと同程度の平衡圧であり、分子量、臨界点ともにほぼ同じである。自然界における<sup>8)</sup>  $^{15}\text{N}$  の存在度から、 $\text{N}_2\text{O}$  の約 0.37% は  $^{15}\text{N}^{14}\text{NO}$  である。 $\text{N}_2\text{O}$  のアイソトポログのどちらがハイドレートに包接されやすいか、については未知であるため、 $\text{N}_2\text{O}$  ハイドレートを人工的に生成し、安定同位体測定を実施した。

### 2. 試料生成およびガス安定同位体分析

$\text{N}_2\text{O}$  ハイドレートの生成方法については、水和数測定を目的とした実験<sup>9)</sup>と同一である。蒸留水を凍結させた氷をマイクロームで削って生成した微粉末氷 0.7 g を容積 30 mL の耐圧容器に封入し、任意の量の亜酸化窒素 (日産化学, 純度 99.99%) を液体窒素温度の耐圧容器内に導入した。その後、耐圧容器をゆっくりと 273 K まで上昇させることで、亜酸化窒素ハイドレートを生成した。その後、耐圧容器温度を 273 K および平衡圧 (1 MPa) 以上を保ったまま、容器内の残ガスを採取し、さらにクエンチと真空ポンプによる脱気を同時に実施することで、残ガス成分のハイドレート包接ガスへの混入を排除した。液体窒素温度下でハイドレート結晶を採取し、これを真空ライン中で分解させる方法でハイドレート包接ガスを得た。

安定同位体分析では GC-IRMS (DeltaV, Thermo Fisher Scientific) を用いた。残ガス、包接ガスのいずれも 1 気圧程度に圧力調整し、シリンジインジェクションにより GC-IRMS に試料ガスを導入した。 $\text{N}_2\text{O}$  は 1,450°C の熱分解炉を通すことで  $\text{N}_2$  に完全に交換した。同位体比については、大気  $\text{N}_2$  を標準試料としたスケールで、 $\delta$  値 ( $\delta^{15}\text{N}$ ) で表記した。

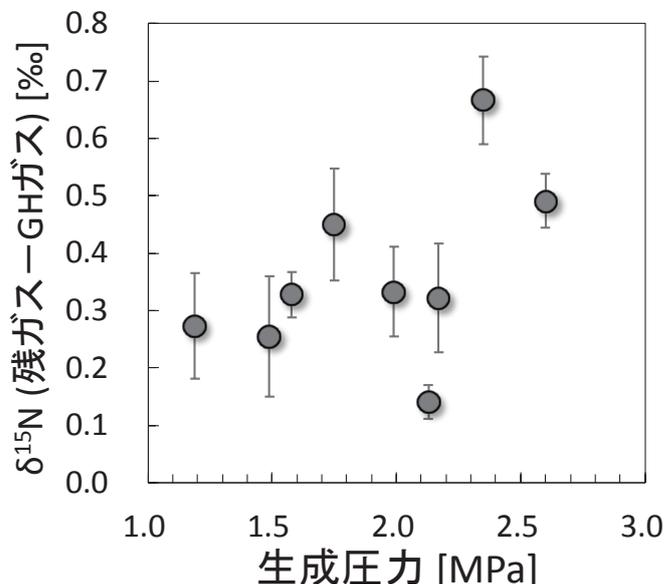


図 273 K における  $\text{N}_2\text{O}$  ハイドレート生成時の (残ガス  $\delta^{15}\text{N}$  - ハイドレート包接ガス  $\delta^{15}\text{N}$ ) の生成圧力依存性。

### 3. 測定結果および考察

残ガスの  $\delta^{15}\text{N}$  からハイドレート包接ガスの  $\delta^{15}\text{N}$  を引いたものを縦軸に取り、その生成圧力依存性を表したグラフを上図に示す。いずれのデータも正の値であることから、測定結果は残ガスよりもハイドレート包接ガスのほうが  $\delta^{15}\text{N}$  が小さいことを示している。すなわち、 $\text{N}_2\text{O}$  ハイドレートではハイドレート相に軽い分子 ( $^{14}\text{N}_2\text{O}$ ) を包接しやすい傾向を示している。ただし、グラフ縦軸の値は 0.14~0.67‰とややばらつきが大きい。 $\text{N}_2\text{O}$  は  $\text{CO}_2$  と同程度に水に溶存しやすいことから、真空ライン中にわずかに残存する水分への溶存の影響が考えられる。

### 参考文献

- 1) Hachikubo *et al.*, 2007: *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L21502, doi: 10.1029/2007GL030557.
- 2) 二階堂ほか, 2018: 雪氷研究大会 (2018・札幌) 講演要旨集.
- 3) 木村ほか, 2020: 北海道の雪氷, **39**, 67-70.
- 4) 木村ほか, 2021: 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン) 講演要旨集.
- 5) 山崎ほか, 2016: 雪氷研究大会 (2016・名古屋) 講演要旨集.
- 6) 鎌田ほか, 2020: 北海道の雪氷, **39**, 71-74.
- 7) Ozeki *et al.*, 2018: *J. Chem. Eng. Data*, **63**(6), 2266-2270.
- 8) 矢作ほか, 2021: 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン) 講演要旨集.

1 北見工業大学  
2 産業技術総合研究所

Kitami Institute of Technology  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

# 一酸化炭素ハイドレート生成時のゲスト炭素安定同位体分別 Carbon Isotope Fractionation at the Formation of Carbon Monoxide Hydrate

○木村宏海<sup>1</sup>, 矢作大輔<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 竹谷敏<sup>2</sup>

Hiromi Kimura, Daisuke Yahagi, Akihiro Hachikubo and Satoshi Takeya

## 1. はじめに

一酸化炭素 (CO) は星間分子として宇宙に豊富に存在し、これを包接するクラスレートハイドレートは彗星をはじめ、太陽系外惑星等の形成過程に重要な役割を担っている可能性が指摘されている<sup>1</sup>。また、冥王星ではメタンやCOを取り込んだハイドレート層が断熱層として内部海を維持し、窒素リッチな大気組成を作る原因となることが示唆されている<sup>2</sup>。将来のエネルギー資源として、また温室効果ガスのリザーブとして注目されてきたメタンハイドレートと比較すると、COハイドレートに関する情報は断片的であり、研究は進んでいない。とりわけ、ハイドレートのゲストガスとしての、一酸化炭素のアイソトポログ (同位体分子種) に関する振る舞いに関しては、ほぼ未知の状態であると言える。

一酸化炭素には、<sup>12</sup>CO と <sup>13</sup>CO の 2 種類のアイソトポログが存在し、質量数の違いにより物理的性質にわずかな差異を生ずる。例えば、<sup>12</sup>CO と <sup>13</sup>CO それぞれを包接するガスハイドレートの平衡圧はおそらく異なることから、COハイドレート生成時には結晶に取り込まれやすいどちらかのゲストを濃縮することで、安定同位体分別が起きると予想される。例えば、CO<sub>2</sub>ハイドレートについては<sup>13</sup>CO<sub>2</sub>より<sup>12</sup>CO<sub>2</sub>の方がわずかながらハイドレート相に取り込まれやすい、との結果が得られている<sup>3</sup>。しかしながら、COハイドレートについては生成時のゲストガス炭素安定同位体分別に関する報告がなく、<sup>13</sup>COハイドレート平衡圧に関するデータもないために予測ができない。

本研究では、CO<sub>2</sub>ハイドレート実験と同様の方法でCOハイドレートを生成し、ハイドレート相に取り込まれたガスと取り込まれなかったガスとの間に炭素安定同位体比の差を生じるかどうか、について調べた結果を報告する。

## 2. 試料生成およびガス安定同位体分析

水とガスを接触させる方法で、氷点下温度でCOハイドレート試料を生成した。まず、蒸留水を凍結させた氷をマイクロトームで削ることで、1試料につき微粉末氷0.7gを準備し、容積30mLの耐圧容器に封入した。その後、CO (日本酸素、純度99.95%) を液体窒素温度の耐圧容器内に適量導入し、低温室ないし温度制御された恒温槽にセットした。耐圧容器内部の圧力が上昇し、設定温度に達した後、COハイドレートの生成によりゆっくりと内圧は低下した。約1日後、設定温度におけるCOハイドレート平衡圧を下回らないように、残ガス (ハイドレートに取り込まれなかった分のガス) を別の小型耐圧容器に採取した。ハイドレート包接ガスについては、耐圧容器をクエンチした後、液体窒素温度下でハイドレート結晶を採取し、これを真空ライン中で分解させてハイドレート包接ガスを得た。なお、ハイドレート試料は取り出し作業時のクエンチにより液化COが若干混入するが、蒸気圧は液体窒素温度で0.06MPaのため、真空ラインで試料から容易に除去可能である。

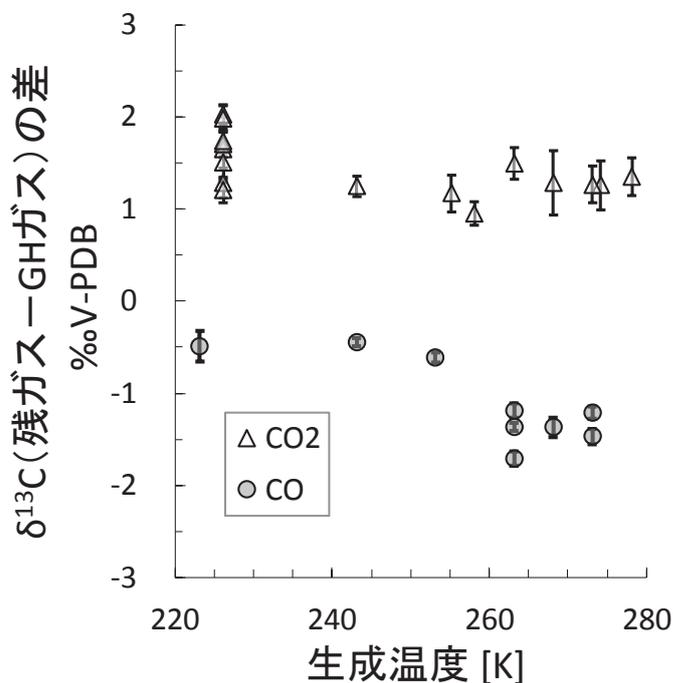


図 1 ハイドレート生成時の (残ガス  $\delta^{13}\text{C}$  - ハイドレート包接ガス  $\delta^{13}\text{C}$ ) の生成温度依存性。CO<sub>2</sub> は文献(3), CO は本研究。

安定同位体分析では GC-IRMS (DeltaV, Thermo Fisher Scientific) を用いて、残ガスおよびハイドレート包接ガスをシリンジーンジェクションにより導入した。CO は 1,030°C の燃焼炉で完全に酸化し CO<sub>2</sub> に変換した。安定同位体比については V-PDB スケールの  $\delta$  値 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) で表記した。

## 3. 測定結果および考察

上図は、残ガスとハイドレート包接ガスの  $\delta^{13}\text{C}$  の差を生成温度に対してプロットしたグラフである。CO<sub>2</sub> については +1.0 ~ +2.0‰ 程度であるのに対し、CO では符号が逆であり、-1.7 ~ -0.4‰ となった。このことは、<sup>12</sup>CO より <sup>13</sup>CO の方がわずかながらハイドレート相に取り込まれやすい傾向を示唆している。また、分別の度合いは高温ほど大きくなる傾向も確認された。これまでに調べられたゲスト分子の中で、重い分子が優先的にハイドレート相に取り込まれるケースは <sup>15</sup>N<sup>14</sup>N と <sup>13</sup>CO のみであり、その原因については調査中である。

## 参考文献

- 1) Lunine, J. I. & Stevenson, D. J., 1985: *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **58**, 493-531.
- 2) Kamata, S., et al., 2019: *Nature Geoscience*, **12**, 407-410.
- 3) 木村ほか, 2020: *北海道の雪氷*, **39**, 67-70.

1 北見工業大学  
2 産業技術総合研究所

Kitami Institute of Technology  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

## X線 CT による天然ガスハイドレートの微細構造の観察 X-Ray Computed Tomography Applied for Microstructure of Natural Gas Hydrates

○森谷優希<sup>1</sup>, 木村宏海<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 小西正朗<sup>1</sup>, 坂上寛敏<sup>1</sup>, 南尚嗣<sup>1</sup>, 山下聡<sup>1</sup>

Yuki Moriya, Hiromi Kimura, Akihiro Hachikubo, Masaaki Konishi, Hirotohi Sakagami, Hirotsugu Minami and Satoshi Yamashita

### 1. はじめに

天然ガスハイドレート (GH) は、将来のエネルギー資源として、また温室効果ガスの巨大な貯蔵庫として注目されている。メタンを主なゲストガスとする天然 GH、海底、湖底、永久凍土下に存在している。海底下では、堆積層深部から天然ガスが供給されることにより、ガス (気体) として湧き出し、ガスプルームを生じる地点が世界各地で発見されている。魚群探知機やマルチビーム測深機で容易に観測されるガスプルームの「根元」には、海底表層型天然 GH が存在する、と断定できる。

天然 GH は低温高圧下でガス (メタン) と水 (海水) が反応して生成する。水深 500 m 以深の深海底であれば、温度圧力条件は十分に満たしているため、堆積層深部から海底へのメタン供給があれば、海水や堆積物間隙水とガスが結びついて GH 結晶を生成する。それでもなお、余剰ガスが存在するために、海底面からガスプルームが発生する。したがって、海底下にはガスを供給するための「ガスの通りみち」が存在するはずだが、これまでに観測された例はない。原理的には「液体水のない、GH の壁で構成された通りみち」となるはずである。

本研究では、サハリン島北東沖および太平洋十勝沖で採取された、天然 GH 結晶のサブミクロン構造を X 線 CT で解析した結果、空隙の多い軽石のような構造だったことを報告する。

### 2. 天然 GH 試料の素性および X 線 CT 解析

これまでに、北見工大による海洋調査で塊状の天然 GH がいくつか採取されている。そのうち、サハリン島北東沖で 2005 年に採取された試料 (LV36-15H と LV36-39H)、および太平洋十勝沖で 2020 年に採取された試料 (C095-GC2002) について、バンドソーとマイクロトームを使用して数 cm 角の直方体に整形し、体積と質量を測定後、 $-30^{\circ}\text{C}$  の低温室温度環境下でポータブルマイクロ CT スキャナー (SKYSCAN 1074) を使用してサブミクロン構造を解析した。試料は低温室温度で大気圧下にさらされるため、GH はいくらか解離すると考えられるが、観察されるスケールでの構造変化等はみられなかった。

### 3. 測定結果および考察

LV36-15H, LV36-39H, C095-GC2002 の各試料のバルク密度はそれぞれ、 $663 \pm 6 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $585 \pm 5 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $607 \pm 6 \text{ kg m}^{-3}$  だった。LV36-15H のみ、いくらか堆積物が混じっているが、それでも純粋なメタンハイドレートの密度  $915 \text{ kg m}^{-3}$  と比較すると、空隙の多い構造であることは明白である。右図をみると、いずれも試料中に数 mm スケールの気泡由来の球体のような空洞が多数存在していることがわかる。そして、気泡同士の間の部分に注目すると、GH の気泡はサブミクロンオーダーの厚みの薄い隙間で隔てられている (右図下写真の白い筋状の構造)。これと同様の構造は、他の海域の天然 GH でも観察されている<sup>1)</sup>。また、加圧下で水中でガス気泡を噴出させて生成した、GH 膜で覆われた気泡を集積させてできた構造<sup>2)</sup>にも極めて類似している。

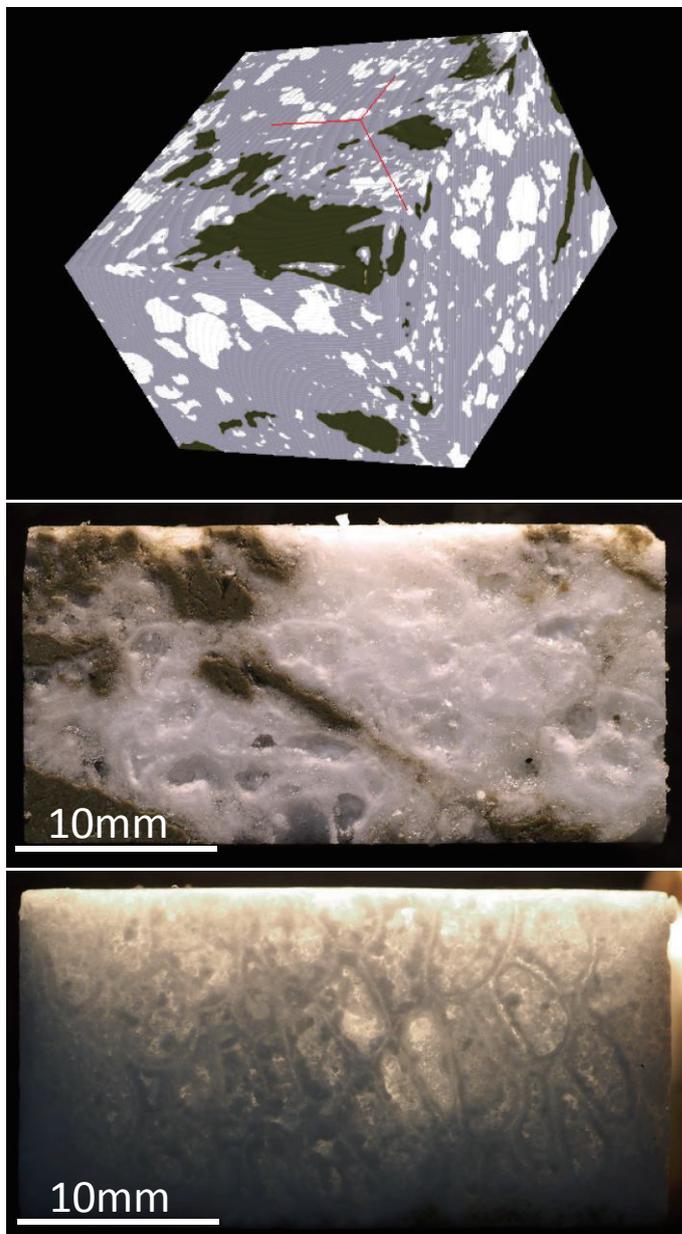


図 X 線 CT イメージ (上・LV36-15H, 白部分が気体, 明灰部分が GH ないし氷, 濃灰部分が堆積物), 試料表面の接写写真 (中・LV36-15H), およびその透過光撮影 (下・LV36-39H)。

なお、生成機構の異なる積雪とは単純に比較はできないが、 $600 \text{ kg m}^{-3}$  前後のバルク密度は十分通気性のある領域である。今後はこれらの試料に関する通気度測定実験を予定している。

#### 参考文献

- 1) Suess, E., et al., 1999: *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **170**, 1-15.
- 2) Shoji, H., et al., 2002: *Proc. 4th Int. Conf. Gas hydrates*, 839-843.

<sup>1</sup> 北見工業大学

Kitami Institute of Technology

## ICP 質量分析計を接続した連続融解分析装置によるアイスコア中の無機元素の多元素同時定量

## Simultaneous Multi-elemental Analysis of Inorganic Elements in Ice Core by Continuous Flow Analysis System Equipped with ICP Mass Spectrometer

○平林幹啓<sup>1</sup>, 尾形純<sup>1</sup>, 東久美子<sup>1,2</sup>, 藤田秀二<sup>1,2</sup>

Motohiro Hirabayashi, Jun Ogata, Kumiko Goto-Azuma, Shuji Fujita

## 1. はじめに

極域の雪氷は積雪時の環境を反映しており、過去をさかのぼることができる一種のタイムカプセルである。雪氷コアの分析から過去の大気環境、地球環境に関する情報を得ることが可能である。南極氷床などで採取される氷床コアは、堆積時の環境を過去数十万年以上にわたって連続的に記録している。しかしながら、雪氷コアの従来からの分析法では、試料の汚染除去など、手作業による分析に多大の労力と時間がかかり、同時に高時間分解能の分析が困難という問題点があった。分析の省力化、高速化、省試料量化のため、雪氷コアを連続的に融解しながら分析する装置 (Continuous Flow Analysis system; CFA 装置) の開発が求められてきた。ICP 質量分析計を接続した CFA 装置の開発を行い、多元素同時定量の可能性を検討した。

## 2. CFA 装置

CFA 装置は大きく分けると融解部と分析部から構成されている。融解部は、融解と同時に試料の汚染除去を行う融解ヘッドと、融解深度を精密に測定する距離計から構成されている。分析部は、気液分離器において気体と液体が分離され、各分析装置に接続されている。分析装置の構成は分析する雪氷コアとその目的によって変更するが、液体の分析は主に水安定同位体分析計、粒子分析計、ICP 質量分析計 (Agilent technologies 社, 7700 ICP-MS) から構成されている。ICP 質量分析計からは、ナトリウム (Na), マグネシウム (Mg), アルミニウム (Al), ケイ素 (Si), 硫黄 (S), カリウム (K), カルシウム (Ca), 鉄 (Fe) など、雪氷コアに含まれる無機元素の濃度が得られる。本報告では特に ICP 質量分析計に関する分析について、無機元素の多元素同時定量に関する検討結果と高感度化・高精度化、融解ヘッドの作成・改良の状況を報告する。

1 国立極地研究所  
2 総合研究大学院大学

National Institute of Polar Research  
SOKENDAI (The Graduate University of Advanced Studies)

## ひずみゲージを用いた全層雪崩斜面の灌木が持つグライドに対する抵抗力の計測 A measurement of force acting as drag to snow gliding by shrub on avalanche slope.

○勝島隆史<sup>1</sup>, 松元高峰<sup>2</sup>, 小田憲一<sup>3</sup>, 宮下彩奈<sup>1</sup>, 勝山祐太<sup>1</sup>, 河島克久<sup>2</sup>, 竹内由香里<sup>1</sup>

Takafumi Katsushima, Takane Matsumoto, Kenichi Oda, Ayana Miyashita, Yuta Katsuyama, Katsuhisa Kawashima and Yukari Takeuchi

### 1. はじめに

本州の豪雪地の中山間地にある全層雪崩の発生区の多くでは、匍匐した樹形の灌木が生育している。このような灌木は、多量の降雪により積雪内部に埋没し、その後、倒伏する。一方で、灌木は全層雪崩の発生に至る斜面積雪の移動(グライド)に対して抵抗となり、抵抗力の大きさは倒伏状態により変化することが知られている。しかし、灌木が斜面積雪の移動に与える力学影響を定量的に示すことが難しく、灌木の存在が全層雪崩の発生予測を困難なものにしている。本研究では、外力により物体表面に生じるひずみ量を測定することができるひずみゲージを用いて、全層雪崩の発生に至るまでの斜面積雪の移動に対する灌木の抵抗力を直接測定する手法の開発を行い、実際の雪崩斜面に適用を図った。

### 2. 手法

冬期間の全層雪崩斜面の灌木は、冠雪や積雪の沈降に伴って生じる曲げモーメントにより、樹幹が地面付近まで倒伏する。また、斜面積雪に作用する斜面に水平な方向への重力の分力によって、倒伏した樹幹には、この反力に相当した軸方向の引張力(軸力)が生じる。樹幹表面では、これら異なる2つの力の作用により、異なるひずみの成分が生じることから、樹幹の抵抗力を得るにはひずみ量の計測結果から軸力の成分のみを抽出する必要がある。そこで本研究では、樹幹が倒伏した際に樹幹内部に生じる曲げ応力の中立軸に相当する樹幹側面の位置にひずみゲージを設置し、測定したひずみ量から樹幹の軸力を推定した。計測では、複数のひずみゲージが同一軸上に2mm間隔で平行に並んだ応力集中測定用ひずみゲージ(東京測器, FYV-1-11-002LE)

(図1)を樹幹側面に設置し、人為的に曲げモーメントを生じさせたときのひずみ量の変化から中立軸の厳密な位置を事前に推定した。積雪期間中は、樹幹側面の2点の位置におけるひずみ量を測定して、これらの測定値から中立軸の位置でのひずみ量を推定し、これを樹幹の引張ひずみとした。また、この計測を樹幹側面の両側に対して行い、両者のひずみ量の和をとることで、樹幹の水平方向に生じる曲げひずみを相殺した。現地で曲げ試験を行いヤング率を測定し、これを用いて引張ひずみを軸力に変換した。新潟県魚沼市大白川の全層雪崩の斜面を対象として、斜面に成育するヤマモミジ(計測位置の直径63mm)の地際付近にひずみゲージを設置し、樹幹のひずみ量を30分間隔で計測することで、積雪初期から全層雪崩の発生時までの軸力の変化を推定した。

### 3. 結果と考察

図2に、2020/21年冬季に測定した樹幹の軸力の時間変化を示す。対象区においては、2/9にグライドが開始し、その後、2/15にグライド速度が急激に加速し、その日のうちに全層雪崩の発生に至った。測定された樹幹の軸力は、積雪初期に大きく増加

し、その後、徐々に減少していた。グライドが開始した時点において軸力が急激に減少しており、グライドの進行に伴って、軸力が更に減少する振る舞いが確認された。得られた軸力の最大値は4,000N程度であり、山野井(2006)によるロードセルを用いた灌木の抵抗力の測定事例と概ね同程度であった。これらのことから、今回の手法により測定した軸力は、斜面積雪の移動に対する灌木の抵抗力に関与した振る舞いを表すものと考えられる。一方で、雪崩発生直前の軸力の計測値は負の値となっており、より精度の良い測定を行うには、非常に困難であるが、ひずみゲージのより精密な設置と、曲げ試験のより精密な実施が必要と考えられる。今後、計測事例数を増やして、本手法の有効性について確認を行いたい。



図1 計測に使用したひずみゲージと、その設置状況。

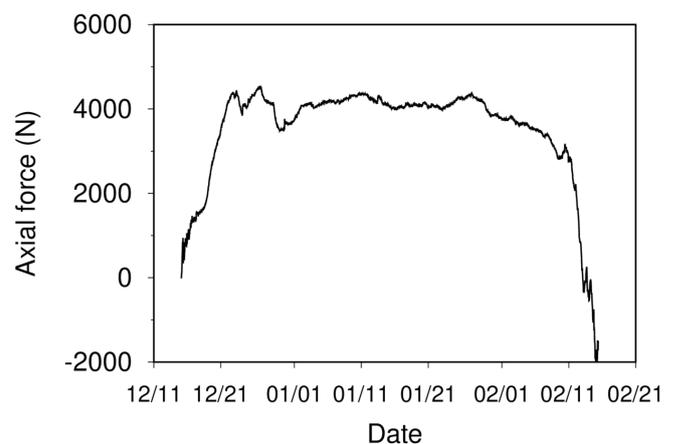


図2 2020/21年冬季に計測された全層雪崩斜面に生育する樹幹の軸力の時間変化。

1 森林総合研究所

2 新潟大学災害・復興科学研究所

3 日本大学理工学部

Forestry and Forest Products Research Institute

Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University

College of Science and Technology, Nihon University

## 模擬積雪を用いた氷河水形成過程のその場観察

## - 氷河水形成過程で圧力が結晶成長に与える影響と結晶軸方向 -

## In-situ observation of the glacier ice formation process using simulated model sample

## - Effect of pressure on crystal growth and crystal axis orientation during glacier ice formation -

○南 銀河<sup>1</sup>・島田 互<sup>2</sup>

Ginga Minami, Wataru Shimada

## 1. はじめに

近年、立山に存在する雪渓のいくつかが学術的に氷河であると認定された(福井ら, 2018)。これらの氷河は温暖氷河に分類され、その存在条件としては、充分な量の降雪や、気温といった気候要素に加え、谷の向き、風向きや、面積といった地形要素が必要である。氷河内部に存在する氷体の生成には、夏期の降水や雪解け水の流入および、帯水層での加圧が深く関わっている(Kawashima, 1997)。これまでに積雪薄片を圧縮する実験(若浜, 1960)や水が介在した場合の雪粒子の成長過程を観察する実験(若浜, 1965)は行われているが、それらの実験では、雪試料が加圧される過程での1つ1つの粒子の成長を追うことは難しい。

そこで本研究では、氷試料を一軸圧縮し、これに0°Cの水を加えて氷粒子の成長をその場観察し、その過程を解析した。

## 2. 実験装置および実験方法

図1に示すような2枚のガラス板によって作られた空間(厚さ1.3 mm)に雪試料を詰め、雪試料は、粒子の初期状態の差によって成長に優位性が発生しないように、サイズと粒径が均等なものを作成した。作成には、液体窒素に霧吹きで水を散布したものをふるいにかけた。(サイズは0.177 mm以上0.297 mm以下)これを恒温箱内部に設置した圧縮装置の空間に詰め、氷の温度が0°Cになるように温度制御する(±0.01°C)。試料を入れた空間にスライドガラスを挿入し、雪試料を一軸圧縮した(図1右→左方向)。試料の収縮が落ち着いた後、0°Cの水を注入した。実験1では注水後も加圧を続けた(0.2 MPa)。また、実験1の比較対象として、実験2では、注水後加圧をやめた。これらの過程をクロスノールの状態で観察し、4Kビデオカメラのタイムラプス機能を用いて記録した。

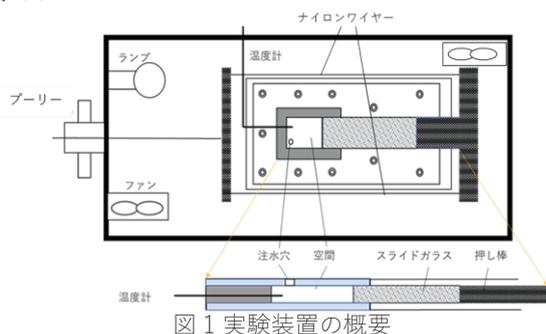


図1 実験装置の概要

恒温箱内部の温度はランプと2つのファンを用いて一定となるように制御してある。画像中央部および下部(断面図)は試料を一軸圧縮するための圧縮装置である。プーリーの部分におもりをつり下げることでナイロンワイヤーと連結した押し棒が、画像右から左方向へ試料に加圧する。

## 3. 解析方法

解析には「ImageJ」を用いた。各実験で撮影した動画から1~6時間後(1時間間隔)、24~168時間後(24時間間隔)の画像を静止画像として取り出し、その粒子数をカウントした。その後、168時

間後の画像に映っている全粒子のサイズを画像解析して測定した。これらの粒子を解析対象とし、取り出した画像すべてにおいて粒子のサイズを調べ、時間ごとの粒子の成長を調べた。

## 4. 結果

まず乾雪を圧縮したところ体積が縮小した。この時、粒子の成長が確認された。

つづいて、実験1で試料に水を加えたところ、体積は乾き雪を圧縮したときに比べて急速に縮小した。この時、粒子間の空隙が気泡として独立した。また、この気泡は試料全体に均一に分布していた。実験2でも実験1と同様に急速な収縮・気泡の独立が見られた。しかし、気泡の分布は、集中している部分や粗な部分など偏りが見られた。注水後、実験1・2の両方で粒子は急速に成長した。それぞれの画像を図2に示す。成長した粒子のサイズは、実験1では全体的に均等であったのに対し、実験2では比較的小さな粒子と大きな粒子ができた。画像向かって右側の粒子は大きなものが多く、左側の粒子は小さなものが多かった。また、実験2において粒子の大きさと気泡の分布には相関が見られ、気泡が集中している箇所の粒子サイズは小さく、気泡が少ない箇所では粒子サイズが大きなものが多かった。

結晶成長機構の詳細を調べるために、作成した粒子の結晶軸方位の測定を行った。詳細は発表で述べる

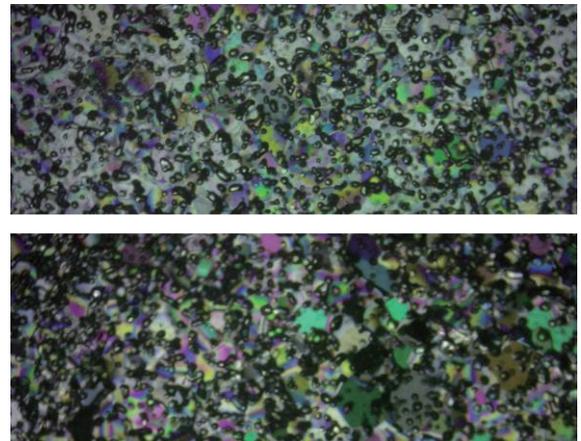


図2 各実験の成長過程粒子の比較

注水後90時間時点での実験1(画像上)と実験2(画像下)の比較。この地点で粒子の成長はほとんど止まっており、大きな変化は起こらない。

## 参考文献

- 福井幸太郎, 飯田肇, 小坂共栄(2018): 飛騨山脈で新たに発見された現存氷河とその特性. 地理学評論, 91, 1, 43-61
- Katsuhisa KAWASHIMA (1997): Formation processes of ice body revealed by the internal structure of perennial snow patches in Japan. Bulletin of Glacier Research, 15, 1-10
- 若浜五郎 (1965): 水を含んだ積雪の変態. 低温科学, 物理編, 23, 51-66
- 若浜五郎 (1960): 積雪の薄片を利用した積雪の組織と内部歪の研究 I: 静荷重における積雪薄片の圧縮. 低温科学, 物理編, 19, 37-71

1 富山大学理工学教育部 (理学)

2 富山大学学術研究部 理学系

Graduate School of Sci. and Eng. for Education, University of Toyama  
Faculty of Science, University of Toyama

## ブータンヒマラヤにおける末端氷河湖の形成に伴う氷河縮小の加速 Terminus detachment from land to lake accelerates surface lowering of a Bhutanese glacier

○佐藤洋太<sup>1</sup>, 藤田耕史<sup>1</sup>, 井上公<sup>2</sup>, 坂井亜規子<sup>1</sup>, Karma Toeb<sup>3</sup>

Yota Sato, Koji Fujita, Hiroshi Inoue, Akiko Sakai, and Karma Toeb

### 1. はじめに

近年アジア高山域では急速な氷河湖の増加と拡大が報告されており、このことは氷河湖決壊洪水の潜在的な危険性を高めることにも繋がっている。また氷河末端に形成される氷河湖は氷河の縮小、表面低下を促進する場合がある<sup>2)</sup>。したがってたとえ同様の気候条件下に存在する場合でも末端氷河湖の有無で氷河変動に差異が生じ、このことがアジアの氷河縮小量の推定や将来予測に不確実性をもたらしている。ヒマラヤ東部のブータン・ルナナ地域では複数の氷河末端において氷河湖が拡大しており、氷河湖-氷河の相互作用に関する研究が行われてきた。Tsutaki et al. (2019)<sup>3)</sup> は氷河末端がエンドモレーンに接している陸終端氷河 (Thorthormi 氷河) と末端が氷河湖に流れ込む湖終端氷河 (Lugge 氷河) を対象に、2004-2011 年の氷河ダイナミクスを推定・比較した。本研究はこの隣接した 2 氷河の 2011 年以降の動態を解析し、以前は陸終端氷河であった Thorthormi 氷河において、末端氷河湖の形成・拡大に伴い氷河変動メカニズムがどのように変化したかを推定するため、氷河の表面低下速度や表面流速の解析を行った。

### 2. データと手法

#### 2.1 対象地域

研究対象はブータン北部のルナナ地域に位置する Thorthormi 氷河と Lugge 氷河である (28.1° N, 90.2° E)。Thorthormi 氷河は以前は下流部に氷河上湖 (池) を持つ陸終端氷河であったが、2011 年に氷河末端がエンドモレーンから分離して完全な湖終端氷河へと変化した。Lugge 氷河は Thorthormi 氷河の東に位置する湖終端氷河であり、氷河湖は 1960 年代から拡大し続けている。

#### 2.2 航空写真測量と地形データの作成

2018 年 3 月に現地を訪れヘリコプターによる航空写真測量を実施した。ヘリコプターの脚に 4 個のアクションカメラ (GoPro HERO5) を装着して対象の 2 氷河を撮影し、氷河消耗域をカバーする約 7000 枚の空撮写真を取得した。取得した写真から画像解析ソフトウェア Agisoft Metashape v1.6 を用いて 0.5 m 空間分解能の Digital Elevation Model (DEM) を作成した。

#### 2.3 表面標高変化・氷河湖拡大速度・表面流動速度の推定

2011 年に現地で取得した干渉測位 GPS の標高データと 2018 年の空撮画像から作成した DEM から Thorthormi, Lugge 両氷河における近年の表面標高変化速度 (2011-2018) を算出した。また、Landsat7/8 (ETM+/OLI) の画像から氷河湖の外縁を抽出し 2011 年から 2018 年にかけての氷河湖拡大速度を算出した。そして、2016 年と 2017 年のポストモンスーン期 (11 月) に撮影された Sentinel-2 の画像に対してフィーチャートラッキング法を使用し、空撮前年の氷河表面流動速度を推定した。

これらの解析結果と先行研究によるデータを比較し、特に Thorthormi 氷河に関しては末端氷河湖形成前後の氷河動態の変化を議論した。

### 3. 結果と考察

2000 年以降の 18 年間の氷河湖拡大を追跡した結果、2018 年の Thorthormi・Lugge 氷河湖の面積は 3.05 km<sup>2</sup> と 1.58 km<sup>2</sup> であり、2000 年からそれぞれ 2.01 km<sup>2</sup>, 0.48 km<sup>2</sup> 増加していた。また、Thorthormi 氷河の末端がエンドモレーンから離れた 2011 年前後の氷河湖拡大速度はそれぞれ 0.07 km a<sup>-1</sup> (2000-2011), 0.13 km a<sup>-1</sup> (2011-2018) となり、Thorthormi 氷河の拡大速度は 1.9 倍に増加していた。

次に、2011 年の GPS データと 2018 年の空撮 DEM から表面標高変化速度を算出した (図 1)。Thorthormi 氷河と Lugge 氷河における 2011-2018 年間の平均表面標高変化速度はそれぞれ -2.78 m a<sup>-1</sup> および -2.87 m a<sup>-1</sup> であり、先行研究で求められた 2004-2011 年間の標高変化と比較すると、Lugge 氷河がこれまで通りの表面低下速度だったのに対し、Thorthormi 氷河の表面低下速度は約 2.0 倍に増加していた。

そして、2016-2017 年間の表面速度場を計算した結果 Lugge 氷河は 2011 年以前と比較して流動速度・流動分布ともに大きな変化が見られなかったが、Thorthormi 氷河では、2017 年の氷河末端付近で大幅な流速の増加 (~150 m a<sup>-1</sup>) が観測された。

Thorthormi 氷河における顕著な標高低下と流動速度の増加は末端氷河湖の形成に起因するものと考えられる。ポスターではそのメカニズムに関して議論を行う。

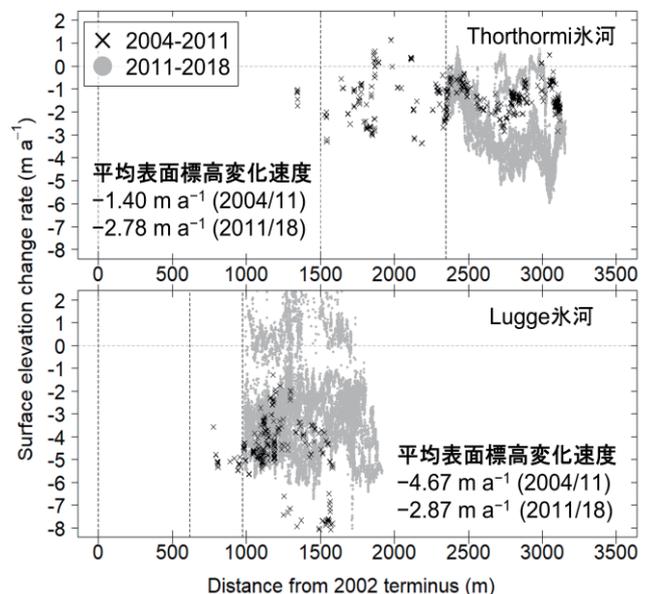


図 1 Thorthormi, Lugge 氷河の表面標高変化速度  
(縦の破線はそれぞれ 2002, 2011, 2018 年の末端位置)

### 参考文献

- 1) Shugar et al. (2020). *Nat. Clim. Chang.* 10, 939-945.
- 2) King et al. (2018). *Glob. Planet. Change.* 167, 46-60.
- 3) Tsutaki et al. (2019). *The Cryosphere.* 13, 2733-2750.

1 名古屋大学 大学院環境学研究所  
2 防災科学技術研究所  
3 ブータン水文気象局

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED)  
National Centre for Hydrology and Meteorology (NCHM)

## ネパールヒマラヤ・ヤラ氷河における上流への表面標高低下伝番 Up-glacier propagation of surface lowering of Yala Glacier in Nepal Himalaya

○砂子宗次朗<sup>1</sup>, 藤田耕史<sup>2</sup>, 泉岳樹<sup>3</sup>, 山口悟<sup>1</sup>, 坂井亜規子<sup>2</sup>, Rijan B. Kayastha<sup>4</sup>  
Sojiro Sunako, Koji Fujita, Takeki Izumi, Satoru Yamaguchi, Akiko Sakai and Rijan B. Kayastha

### 1. はじめに

ヒマラヤ地域の氷河は質量が損失傾向にある。氷河変動を議論した研究の多くは、衛星データを基礎とした数値標高モデル (DEM) を用いているが、これらのデータは特に氷河涵養域での精度に課題が残る。近年無人航空機 (UAV) と Structure from Motion (SfM) 技術を利用した研究が普及している。UAV-SfM の利用により高精度の DEM を作成可能だが、高標高域での UAV 運用が物理的に困難であるため先行研究は依然として数例に留まっている。そこで本研究では、ネパールヒマラヤのヤラ氷河を対象に、2015年に UAV による空撮を実施した。併せて、航空機による空撮及び地上観測データから複数の DEM を作成し、1981年以降の表面標高変化を明らかにすることを目的とした。

### 2. データと手法

ヤラ氷河はネパール・ランタン谷に位置する小型氷河である (図1)。2015年10月にゴルカ地震調査の一環として UAV による空撮を実施した。氷河末端付近に5点の地上基準点 (GCP) を設置し、干渉測位 GPS 測量で位置情報を取得した。空撮画像を SfM 処理することで3Dモデルを作成し、GCP を付与することで1m解像度のDEMを作成した。また、2007年に小型ジェット機により取得された空撮画像を同様に処理することで2m解像度のDEMを作成した。この際GCPは2017年のPleiades衛星データから取得した。さらに、1981年の地上写真測量<sup>1)</sup>を元に作成されたDEM<sup>2)</sup>及び2009、2012年に実施したGPS測量データを用いて、1981–2015年における多時期の表面標高変化を求めた。

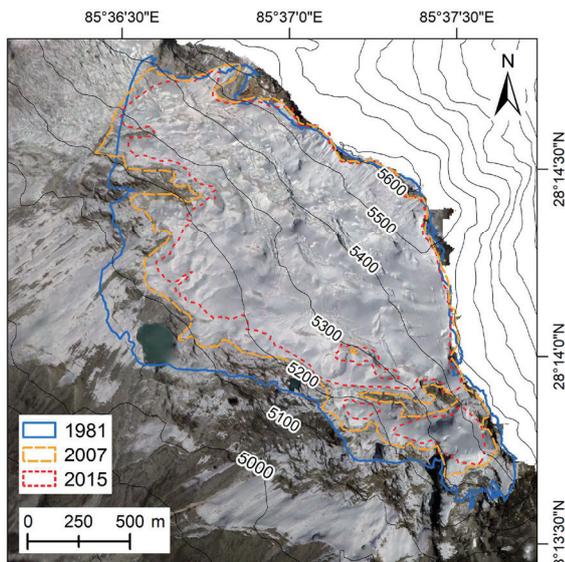


図1 ヤラ氷河のオルソ画像 (2007年) と面積変化。

### 3. 結果と考察

図2に1981–2007, 2007–2009, 2009–2012及び2012–2015年の表面標高変化を示す。各時期とも氷河末端付近 (5100–5200 m) で最大  $-3.33 \text{ m a}^{-1}$  の表面標高低下が確認され、特に近年表面標高低下速度が加速していることが明らかとなった。氷河面積は1981, 2015年でそれぞれ2.42及び1.53  $\text{km}^2$ を示し、氷河末端の最大後退距離は約400 mであった。さらに、2012–2015年は、氷河末端のみならず5200–5500 m付近においても顕著な表面低下が認められた。

表面標高変化と氷河面積高度分布を用いて各時期の氷河全体の質量収支を求めた結果、1981–2007年及び2012–2015年でそれぞれ  $-0.58 \pm 0.34$ ,  $-1.13 \pm 0.19 \text{ w.e. a}^{-1}$ を示し、2000年以降の顕著な質量損失を指摘した先行研究<sup>3)</sup>と矛盾しない結果となった。

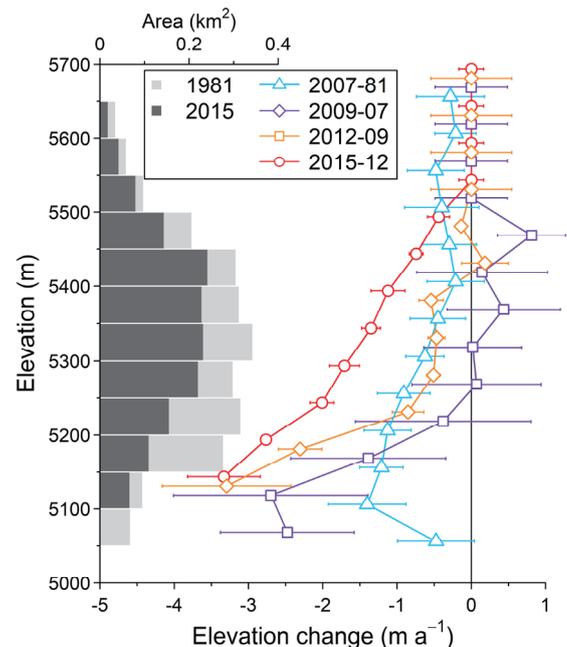


図2 ヤラ氷河の面積及び表面標高変化の高度分布。

### 参考文献

- 1) Yokoyama, K., 1984: Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, Tokyo, 2, 99–105.
- 2) Fujita, K. and T. Nuimura, 2011: *Proc. Natl. Acad. Sci.* **108**, 14011–14014.
- 3) Ragettli, S. et al., 2016: *The Cryosphere*, **10**, 2075–2097.

1 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター  
2 名古屋大学 大学院環境学研究科  
3 東京都立大学 都市環境科学研究科  
4 カトマンズ大学 理学部

Snow and Ice Research Center, NIED  
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University  
Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University  
School of Science, Kathmandu University

## モンゴル, アルタイ山脈におけるポターニン氷河のアルベド解析

## Analysis of albedo in Potanin Glacier, Mongol Altai mountains

○石田直也<sup>1</sup>, 坂井亜規子<sup>1</sup>

Naoya Ishida and Akiko Sakai

## 1. はじめに

氷河表面のアルベド (太陽放射の反射率) の変動は, 氷河表面の日射の吸収量を増減させ、ひいては氷河融解速度に影響を与える。アルベドの低下は, 氷河の融解を早め, 氷河縮小の加速につながる。半乾燥域であるモンゴルでは, 降水量が少ないため, 氷河融解水の水資源としての重要性は高く, 氷河が水の貯蔵の役割を果たしている。近年, モンゴルの山岳氷河では氷河面積の減少が報告されており, 2000~2009 年にかけては  $0.82\text{m yr}^{-1}$ , 2010~2020 年にかけては  $0.37\text{m yr}^{-1}$  で表面低下しており, 減少率としては小さくなっている<sup>1)</sup>。このように氷河は縮小しているが, 融解に大きな影響を与えるアルベドの長期的な傾向についてはほとんど調査されていない。本研究では, モンゴル西端に位置するポターニン氷河を対象として, 衛星画像を用いて 1997~2020 年の期間のアルベドについて解析を行った。

## 2. データと手法

本研究では, モンゴルのアルタイ山脈に位置するポターニン氷河を対象氷河とした。使用したデータは USGS earth explorer の Landsat5(TM), 7(ETM), 8(OLI)の画像である。アルベドの解析には氷河上に雲がかかっていない解析に適した衛星データを手動で選択し, メタデータに含まれる太陽高度などのデータを元に DN 値から反射率へと換算し, Liang(2001)に従って, アルベドを算出した。氷河域は Randolph Glacier Inventory (RGI 6.0) のポターニン氷河と同じものを用いた。7~9月の画像を夏の期間とし, 1~2月を冬の期間とした。

## 3. 結果と考察

全期間の平均アルベドは 0.52 で, 全期間を通して上昇低下等の一貫した傾向は見られなかった。夏の平均アルベドは 0.50, 冬の平均は 0.56 と冬のアルベドのほうが高い傾向にあったが, 年によっては夏のアルベドが冬を上回る年があった。これは, この地域が夏涵養型で, 夏に降水量が多く, アルベドもそれに伴い激しく変化していることが原因と考えられる。

今後, 氷河の影部分の除去や, 氷河後退部分の除去をし, アルベドの標高分布について解析する予定である。当日は降水と気温変化, 標高毎のアルベドについても併せて報告する。

## 4. 参考文献

- 1) Hugonnet, R., et al, 2021: Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, **592**(7856), 726-731.
- 2) Liang S, 2001: Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. *Remote Sensing of Environment*, **76**(2000), 213-238.

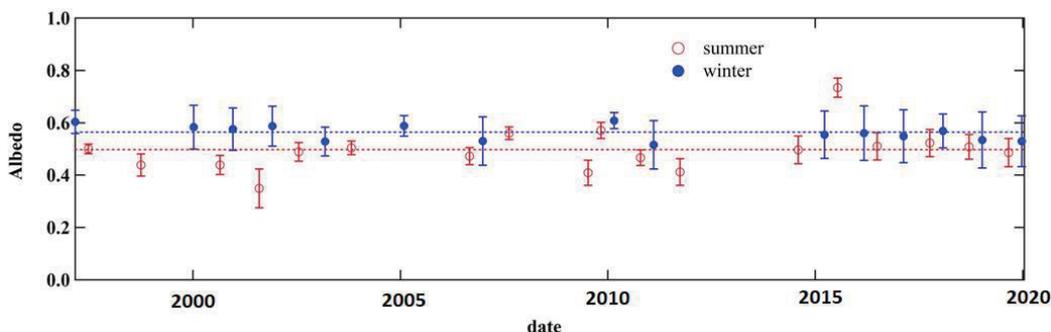


図1 アルベドの年変動 (点線は夏期と冬期の平均アルベド, エラーバーは標準偏差を示す)

1 名古屋大学大学院環境学研究科

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

## 氷河変動を制御する気候因子について Climatic factors controlling glacier fluctuation worldwide

○坂井亜規子<sup>1</sup>, 藤田耕史<sup>1</sup>

Akiko Sakai and Koji Fujita

### 1. はじめに

世界の氷河は縮小傾向にあり、融解した水は海に流れ込むため海水準上昇を引き起こす。また氷河は一時的に降水を貯留し、融解期に融解水を流出させ、水を供給するという、水壅としての役割があるが、氷河が縮小するとその水資源が枯渇するといった問題もある。

氷河の表面低下速度は地域毎に異なり、最近 20 年で低下速度が加速している地域や、減速している地域もある。例えばカラコラムや西崑崙などの氷河は質量がわずかながら増加しているが減少に転じつつあると報告され、またアイスランドやスカンジナビア、グリーンランド南東部は表面低下速度が近年減速しており、North Atlantic Anomaly と呼ばれている<sup>1)</sup>。

氷河変動は気温と降水量に影響されるが、それぞれの変化のみで氷河の変動は全て説明できるわけではなく、感度(例えば気温の 1 度昇温に対する氷河質量収支の変化)を考慮する必要がある。全球氷河の気温に対する感度はこれまで Radić and Hock (2011) などによって議論されてきたが<sup>2)</sup>、気温に対する感度は降水量の影響も受けるため、氷河上の降水量を正確に求める必要がある。一方、全球の気象データ、特に再解析データや、衛星データから得られる降水量データは、現実の氷河上の降水量とかけ離れた値であることが多く、降水量に強く依存する氷河の気温変化に対する感度は正確に求めることができなかつた。このため、地域によって異なる氷河の表面低下の原因について、気温や降水の変化と感度の両方の面から全球スケールで議論した例は無い。

本研究では、氷河の中央標高を平衡線高度と仮定し、その高度で氷河の質量収支がゼロとなる(平衡する)最適化した降水量を求めることで、氷河質量の気温に対する感度の精度を上げ、最近出版された<sup>3)</sup> 全球の氷河変動の地域的な違いについて、気温や降水に対する感度、また気温、降水量の変化から解析を行い、氷河変動の要因の地域的な違いについて議論した。

### 2. 解析方法・使用データ

#### 2.1 降水の最適化

Randolph Glacier Inventory ver.6 を使用し、0.5 度グリッドごと氷河の平均的な中央標高を平衡線高度、つまり質量収支が 0 である高度と仮定した。氷河の質量収支を熱収支法に基づいて計算するには気温の他に日射・湿度・風速が必要になるが、最も不確定性の高い降水量を調節し、氷河の中央高度の気温で質量収支がゼロとなるような降水量を求めた。気象データは ERA-Interim を使用している。

#### 2.2 降水制御、気温制御地域

氷河質量収支の変動について、短期(年々)と長期(20年間)に分けて考える。年々変動に関しては、気温による変動分、降水による変動分をそれぞれ気温に対する感度×夏気温(JJA/DJF)(1980-2000年)の標準偏差、降水量に対する感度×年降水量の標準偏差とし、気温による変動分と降水量による変動分の比で表

わすことで、氷河の年々変動が気温と降水量のどちらに制御されているかについて全球スケールで表現した。

長期の変動に関しては、気温による変動分、降水による変動分を気温に対する感度×夏気温(JJA/DJF)の差(ave(2010~2018)-ave(2000~2009)年)、降水量に対する感度×年降水量の差(ave(2010~2018)-ave(2000~2009)年)とし、年々変動と同じように、両者の比をとることで、長期変動が気温と降水量のどちらに主に制御されているかについて、全球スケールで表した。

#### 2.3 氷河変動データ

気温変動分や降水量変動分と比較するため、最近発表された全球を網羅する氷河変動データを用いた<sup>1)</sup>。このデータは年々変動を解析するには誤差が大きかったため、年々変動の解析には、World Glacier Monitoring Service が取りまとめている現地観測による質量収支のデータを使用した。

### 3. 結果

年々の氷河変動について気温/降水制御を全球の氷河で見たと、アンデス山脈北部とチベット高原、崑崙山脈において降水制御となり、他ほとんどの地域が気温制御となった。WGMSの氷河質量収支と夏気温(JJA/DJF)の年々変動の相関をとったところ、観測点は少ないが、気温制御地域で相関が高く、降水量制御地域で低くなり、年々変動については、気温/降水制御地域分けが妥当なものであるということがわかった。

長期の氷河変動について降水制御地域を見たところ、年々変動での降水制御地域に加え、カナダ、グリーンランド南部、アイスランド、スカンジナビアが加わった。

全球の氷河の表面低下速度(2000-2019)と気温の差(2000-2009/2010-2018年)、気温に対する感度について、0.5度グリッド毎に比較した。表面低下速度の誤差が 0.1m yr<sup>-1</sup> 以下のグリッドのみ選択して解析したところ、気温に対する感度と氷河表面低下速度との相関は 0.33(p<0.0001)と有意な相関があったが、気温差と氷河表面低下速度との相関は 0.23(p<0.0001)であり、本来相関がマイナス(気温上昇するところほど、氷河の表面低下が速い)になるところ、逆相関という結果になった。よって地域による表面低下速度の違いは、特に気温に対する感度の違いが重要であることが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) Hugonnet, R., et al, 2021: Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, **592**, 726–731.
- 2) Radić, V. and R. Hock, 2011: Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise. *Nat. Geosci.*, **4**, 91-94.
- 3) Oerlemans, J. and J. P. F. Fortuin, 1992: Sensitivity of glaciers and small ice cap to greenhouse warming. *Science*, **258**, 115-117.

1 名古屋大学大学院環境学研究科

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

## 摩周湖の全面結氷条件の解明およびそれに基づく 2021 年の全面結氷日の予測

## Studies on Meteorological Conditions for Freeze-up Date of Lake Mashu in Hokkaido, Japan Using Observational Data from 1974 to 2021, and a Prediction of Freeze-up Date in 2021 Season

○亀田貴雄<sup>1</sup>, 蜂谷 衛<sup>2</sup>, 仁平慎吾<sup>1,3</sup>, 細川音治<sup>2</sup>

Takao Kameda, Mamoru Hachiya, Shingo Nidaira and Otoji Hosokawa

1974 年から 2021 年までの摩周湖の結氷状況を現地観測に基づき調べた。その結果、摩周湖は 48 年間で 27 回全面結氷をしており、全面結氷率は 56.3%であった (図 1)。本研究では湖全体が結氷することを全面結氷、湖に結氷部と未結氷部 (開水面) が共存していることを部分結氷、冬季の最初に全面結氷になった日を全面結氷日と定義する。摩周湖に近い川湯と弟子屈のアメダスデータを用いて、摩周湖が全面結氷する条件を調べた結果、川湯アメダスの 1 月と 2 月の月平均気温のどちらかが  $-8^{\circ}\text{C}$  以下になった場合、72%の確率で全面結氷することがわかった。川湯アメダスの日平均気温の 41 日から 61 日の移動平均での最低気温でも全面結氷年と部分結氷年を分類できた。

摩周湖は一定の日積算寒度に到達すると全面結氷するのではなく、前年の夏の気温の影響を受けて、全面結氷に必要な日積算寒度に変化することもわかった。特に、全面結氷日は 6 月 1 日から 8 月 31 日の日最高気温の平均と最も相関が高いことがわかった (相関係数は 0.54, t 分布検定で有意)。摩周湖は継続的な流入河川とともに流出河川もないため、湖水中の温度分布に対して夏の気温の影響が大きく現れていることに加えて、摩周湖の透明度が高いため湖内深くまで日射が進入していることも影響している可能性が考えられる。

また、前年の夏の気温と全面結氷日との関係を用いて、2021 年の摩周湖の全面結氷日を 2020 年 9 月 1 日、2021 年 1 月 1 日、1 月 16 日時点で予測した。その結果、全面結氷日はそれぞれ 2 月 22 日、2 月 10 日、2 月 8 日と予測できた。2021 年は 2 月 14 日に全面結氷したため、予測誤差はそれぞれ +8 日、-4 日、-6 日であった。

摩周湖の全面結氷に最も影響を与えている 1 月と 2 月の気温を半年から 1 ヶ月前に正確に予測することは現時点では難しいため、全面結氷日の予測に誤差が生ずることがわかった。ただし、全面結氷している摩周湖は観光資源として考えられるため、今回の方法による全面結氷日予測は観光業の方々にとっても価値が高いと考えられる。

また、現在、摩周湖周辺では 1 月と 2 月の月平均気温が上昇しているため、摩周湖が全面結氷する確率は、今後減少すると考えられる。

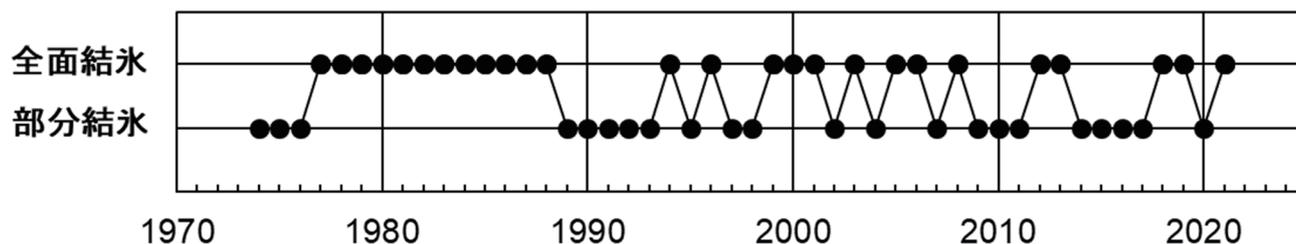


図 1 1974 年から 2021 年まで摩周湖の結氷状況。

1 北見工業大学  
2 無所属  
3 大子町役場

Kitami Institute of Technology  
none  
Daigomachi Town Hall

# 北極海最適航路探索システムの開発と実装 Implementation of the Arctic Sea Route Search System

○杉村剛<sup>1</sup>, 矢吹裕伯<sup>1</sup>, 山口一<sup>1</sup>

Takeshi Sugimura, Hironori Yabuki and Hajime Yamaguchi

## 1. はじめに

北極海の航路利用は、近年の海氷面積の減少に伴い、利用可能な期間が増加している。北極海航路を用いた東アジア-ヨーロッパ間の海上輸送は、従来のスエズ運河を経由するルートに比べて約30~40%の燃料消費量の削減が行える。このため、気候変動による海氷減少の適応策として北極海航路を利用することは、地球温暖化の緩和にもつながる環境に優しい緩和策ともいえる。ただし、夏場でも厚い氷が残る場所があるため、安全な航海のためには航路を慎重に選ぶことが重要である。北極圏は政治的にも商業的にも大きな関心を寄せており、将来的にも航路利用の増加が予想されるため、安全で効率的な航海を実現することが重要な課題である。また、商用船舶にとって北極海航路の利用は、経済的なコストパフォーマンスが高く、魅力的な選択肢である。安全性を確保することによる長期的なコストの削減も示すことができれば、北極海航路のさらなる利用促進につながる。これらの理由から、安全性と経済コストを最適化した航路を提案できる航行支援システムの開発は、北極海航路の今後の発展にとって喫緊の課題である。

航行支援システムは、海氷を含んだ気象・海象や、船舶性能、経済効率などのデータを基に、安全で最適な航路を提案するシステムである。短期的な気象・海象・海氷の予測を行い、船舶性能データを考慮したそれぞれの船舶に最も適した航路を計算することで実現される。本研究では、入力されたデータを基に最適な航路を計算する“最適航路探索システム”を開発し、北極域データ・アーカイブシステム(ADS)において公開した。

## 2. 最適航路探索システム

### 2.1 船速推定方法

氷海航行中の船舶の速度を推定する方法として、Ice Index 法を採用した<sup>1,2)</sup>。Ice Index は、国際北極海航路開発計画 (INSROP: International Northern Sea Route Programme)<sup>3)</sup>において提案された、船舶の砕氷能力と海氷の状態から算出される航行のし易さを示す指標である。この Ice Index を用いた船速推定法は Ice Index 法と呼ばれる。山口ら<sup>4)</sup>において提案された、AIS (Automatic Identification System)データに基づく実測値から導かれる以下の近似式を用いた船速推定法を本研究では採用している。

$$V = \begin{cases} 0.768 I - 3.84 & (I \geq 15) \\ 0.1647 I + 5.209 & (I < 15) \end{cases}$$

### 2.2 航路探索計算手法

A\*探索アルゴリズム<sup>4)</sup>を用いて最適航路の算出を行った。A\*探索アルゴリズムは、ヒューリスティック関数と呼ばれる推定量を用いて計算を行う手法を採用した経路探索問題ソルバである。ノードで構成されたグラフ上で、スタート地点からゴールまで進む様々な経路の中で、最小のコスト関数を持つ経路を見つけることを経路探索問題と呼ぶ。本研究では、入力データの格子位置に配置されたノードを、隣接する格子点に接続した探索グラフに対してアルゴリズムを適用した。

### 2.3 システムの公開

最適航路探索システムは、ウェブアプリケーションとして ADS において公開しており(<https://ads.nipr.ac.jp/routeSearch>)、誰でもアクセスして最適航路の計算が行える。出発/到着位置、出発時間の他に、最適化する項目、船舶の砕氷能力や大きさなどの条件を設定することができる。計算を開始すると、自動的に必要なデータを取得し、最適航路計算を実行する。計算結果は、画面上でグラフィカルに確認できるとともに、CSV 形式で出力して他のアプリケーションでの再利用も可能である。

### 2.4 計算結果

アルゴリズムの妥当性を検証するため、出発位置と到着位置は固定し、出発時間や最適化する対象などを変化させながらいくつかの計算を行った(図1)。海水の変化に合わせて航路が選択されており、その結果、総航行時間や総航行距離が減少していることが確認できた。また、似たような航路を航行した船舶の AIS データを取得し、平均的な航行時間、航行距離と比較したところ、ある程度妥当な結果が得られていることがわかった。

#### 参考文献

- 1) H. Yamaguchi, Y. Nakano, Research on navigation support system and optimum route search for the Northern Sea Route, Proc. 23rd IAHR International Symposium on Ice, ISSN: 2414-6331 (2016) 1-8.
- 2) H. Yamaguchi, T. Matsuzawa, Sea route optimization for the NSR to minimize the fuel consumption, Proc. USB of the CECAR8 (2019).
- 3) H. Kitagawa, N. Ono, H. Yamaguchi, K. Izumiyama, K. Kamesaki, The Northern Sea Route, the shortest sea route linking East Asia and Europe, Ship & Ocean Foundation, The Nippon Foundation, ISBN: 4-88404-027-9 (2001).
- 4) P.E. Hart, N.J. Nilsson, B. Raphael, A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 4(2) (1968) 100-107, doi:10.1109/TSSC.1968.300136.

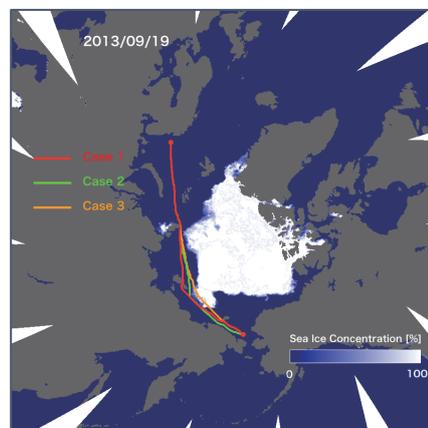


図1 最適航路探索システムの計算結果

## オホーツク海の海水変動に影響を与える熱帯海洋からの遅延効果 Lag Effect from Tropical Oceans on Sea Ice Variability in the Sea of Okhotsk

○竹端光希<sup>1</sup>, 立花義裕<sup>1</sup>, 安藤雄太<sup>2</sup>

Mitsuki Takehata, Yoshihiro Tachibana and Yuta Ando

### 1. はじめに

オホーツク海は世界で最も低緯度に海水が拡大する特異な海である。オホーツク海の海水変動を及ぼす要因として、冬季のシベリアからの北西風や、オホーツク海の海面水温 (SST) などが知られている<sup>1</sup>。また、オホーツク海の海水変動と熱帯の海洋との関係を示した研究が存在しており、エルニーニョ現象の年にはオホーツク海の海水面積が多くなる<sup>2</sup>。しかし、先行研究ではオホーツク海の海水変動と同時期のエルニーニョ現象との関係を見ており、熱帯海洋からの遅延影響については考察されていない。そこで本研究では1年前の熱帯海洋とオホーツク海の海水変動との関係に着目する。

一方、オホーツク海の海水変動には十年規模の長周期の変動成分も見られる。しかし、年々変動に比べて長周期変動の研究はあまり行われておらず、そのプロセスは解明されていない。

以上のことから、本研究ではオホーツク海の海水の年々変動について、熱帯の海面水温からの遅延影響について考察する。また、長周期変動について、その変動要因を考察する。

### 2. 使用データ・解析手法

オホーツク海の海水データには、気象庁の最大海水面積<sup>3</sup>を使用した。SSTのデータにはHadISSTを、大気場のデータにはJRA-55長期再解析データを使用した。いずれも月平均のデータで、解析期間は1970/71年の冬季から2018/19年の冬季までの49年間である。

まず、オホーツク海の海水データからオホーツク海の海水インデックスを作成した。続いて、Niño 3 海域 (5°S-5°N, 150°W-90°W) の SST を3ヶ月の領域平均した Niño 3 インデックスを作成した。各インデックスそれぞれ線形トレンド除去と標準化を行っている。そして海水インデックスに対して Niño 3 インデックスを作成する月を1ヶ月ずつずらしていき、両者の間の相関係数の時系列を作成した。また、作成した海水インデックス、Niño 3 インデックスと大気場や SST とのラグ回帰計算を行った。さらに、長周期の変動成分を見るため、海水インデックスに7年の移動平均をかけて回帰計算を行った。

### 3. 結果と考察

ラグ相関分析から、海水インデックスに対して、同時期の DJF の Niño 3 インデックスとの相関が 0.21 となった (図 1)。これは先行研究の結果<sup>2</sup>と整合的である。また、1年前の DJF の Niño 3 インデックスとの相関は -0.26 となり、信頼係数 90% で有意であった。この結果は、ラニーニャ現象が起こった翌冬には、オホーツク海の海水が発達する可能性があることを示唆している。

7年移動平均したオホーツク海の海水インデックスと SST の回帰からは、太平洋十年規模振動 (PDO) の正のパターンに類似した水温分布が確認された (図 2)。海水インデックスを 975hPa ジオポテンシャル高度に回帰すると、北太平洋上に低気圧偏差

が見られた。これは PDO が正のパターンの時にアリューシャン低気圧が強まること<sup>4</sup>と整合的である。これらのことからオホーツク海の海水の長周期変動は、太平洋の大規模な水温変動と同期していることが示唆された。

### 参考文献

- 1) 山崎孝治, 2000: オホーツク海の海水面積と冬の気候循環との相互作用, 雪氷, **62**, 345-354
- 2) Nishio and Cho 1996: Evaluation and improvement of sea ice closeness estimation algorithm using SSM / I data in the Sea of Okhotsk. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, **16**(2), 133-144
- 3) 気象庁 HP 海氷域面積の長期変化傾向(オホーツク海) ([https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a\\_1/series\\_okhotsk/series\\_okhotsk.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_1/series_okhotsk/series_okhotsk.html))(参照 2020-09)
- 4) Mantua, N. J. et al. 1997: A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069-1079.

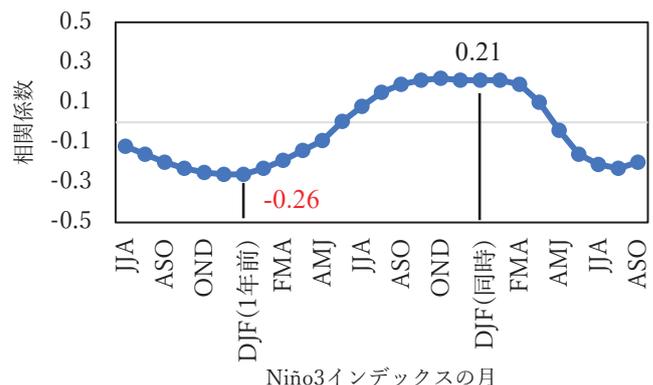


図 1 オホーツク海の海水インデックスと Niño 3 インデックスの相関係数の時系列

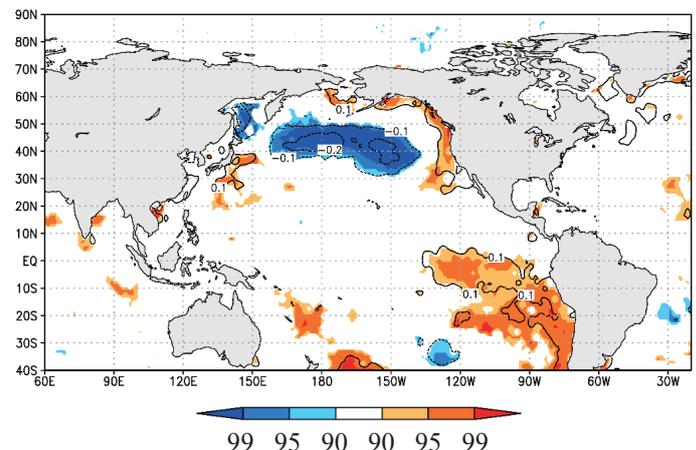


図 2 7年移動平均したオホーツク海の海水インデックスと SST の回帰 等値線: 回帰係数 (°C), 陰影: 信頼係数 (%)

1 三重大学大学院生物資源学研究所

2 新潟大学理学部

Weather and Climate Dynamics Division, Mie University  
Faculty of Science, Niigata University

# ブラインチャンネルの三次元構造と海水の曲げ強度の関係に関する実験的研究

## An Investigation on the Relationship between the Three-dimensional Structure of Brine Channels and the Bending Strength of Sea Ice by Laboratory Experiments

○布川大暉<sup>1,2</sup>,尾関俊浩<sup>2</sup>,安達聖<sup>3</sup>

Taiki Nunokawa, Toshihiro Ozeki and Satoru Adachi

### 1. はじめに

水海船舶の砕氷航行は、船体を氷盤に乗り上げ曲げ破壊を起こすことが主流のため、海水の曲げ強度は重要なパラメータである。海水の曲げ強度はブライン含有量に依存することが明らかになっている<sup>1)</sup>。しかし、海水はその生成履歴により、ブライン含有量のみならず内部構造に違いが見られる。そこで本研究ではブラインチャンネルの構造が海水の曲げ強度に与える影響を調べるために、塩水氷の曲げ試験とブライン含有量と MRI によるブラインの可視化を行った。

### 2. 実験方法

実験は $-20^{\circ}\text{C}$ の低温室において、水槽 (L45×W90×D45cm) に塩分濃度を調整した食塩水を入れ、表面から氷を成長させて平坦氷を作成した。水槽の塩水は濃度約 20%, 30%, 40% の 3 種類を用いた。また氷は平坦氷と、平坦氷を一度砕き、再度凍結させたブラッシュアイス<sup>2)</sup>の 2 種類を用いた。

曲げ強度は氷に短冊状にコの字に切れ目を入れ片持ち梁にして端部を押し下げ、氷が押し壊れた時の力と端から破断面までの距離を用いて曲げ強度を計算した<sup>2)</sup>。ブライン含有量は秋田谷式含水率計を用いて測定しブラインに換算した<sup>3)</sup>。ブラインチャンネルの構造は MRI を用いて画像を撮像し、Image J と Bone J でブラインチャンネル 1 つ 1 つの太さを表す  $Tb.Th$  とブラインチャンネル間の距離を表す  $Tb.Sp$  を数値化し、ブラインを可視化した。

### 3. 結果と考察

水槽の塩分濃度と海水の曲げ強度、ブライン含水量の関係は、平坦氷とブラッシュアイスの両実験ともに塩分濃度が上がるにつれてブライン含水率は増加し、曲げ強度は減少した。同じ塩分濃度では、ブライン含水率は平坦氷よりブラッシュアイスの方が小さく、曲げ強度は平坦氷よりブラッシュアイスの方が大きくなった (図 1)。MRI でブラインを可視化したところ、平坦氷はブラインチャンネルが鉛直方向に延びた構造であった (図 2)。これに対してブラッシュアイスはブラインチャンネルが複雑に入り組んだ網目状の構造であった。 $Tb.Sp$  は平坦氷では塩分濃度が上がるにつれて減少する傾向が見られたが、ブラッシュアイスでは塩分濃度依存性は見られなかった。また  $Tb.Th$  は平坦氷、ブラッシュアイスともに塩分濃度による変化は見られなかった。

MRI で可視化したブラインチャンネルの構造の違いから、平坦氷ではブラインを閉じ込める柱状結晶が鉛直方向に成長している様子が見られ、曲げ破壊の場合ブラインの伸びる方向に破壊が起きやすいことが示唆された。一方、ブラッシュアイスでは海水が細かく砕かれることによって組織的な結晶構造が壊れ、曲げ強度の増加につながった可能性がある。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 20K04938 の助成を受けた。

#### 参考文献

- 1) 佐伯浩, 1985: 海水の結氷機構と強度特性. 土木学会論文集, 357(2), 13-23.
- 2) ITTC, 2014: Test Methods for Model Ice Properties. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02-04-02, 3-5.
- 3) 大沼 友貴彦, 直木 和弘, 西尾 文彦, 2011: 塩分を含んだ湿雪の含水率測定. 雪氷研究大会講演要旨集(2011・長岡).

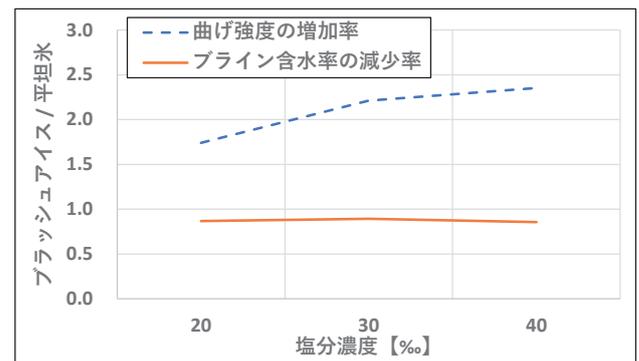


図 1 ブラッシュアイス/平坦氷の比と水槽の塩分濃度との関係。破線：曲げ強度，実線：ブライン量。



図 2 MRI による平坦氷中のブラインの 2D 画像。白がブライン。氷からの信号はない。縦構造が見られる。

1 (株)雪研スノーイーターズ

2 北海道教育大学札幌校

3 (国研)防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

Yukiken Snow-eaters Co., LTD.

Hokkaido University of Education Sapporo

Snow and Ice Research Center, NIED

## ロードヒーティング舗装上で観察された霜の花 Frost Flowers Observed on Pavement Heating System

○白川龍生<sup>1</sup>, 石井日菜<sup>1</sup>, 佐々木優太<sup>2</sup>  
Tatsuo Shirakawa, Hina Ishii and Yuta Sasaki

### 1. はじめに

霜の花は厳冬期に薄氷表面でみられる自然現象で、氷面から昇華した水蒸気が結晶となり、それが発達するに伴い花のような形に発達した霜の塊である。わが国では、北海道の阿寒湖や常呂川での観察事例が有名であるが、条件が揃えば人工的な環境下でも観察することができる。

2018年2月19日、筆者らは北見工業大学図書館前のロードヒーティング舗装上で霜の花を初めて観察した。翌2019年2月9日および10日にも同じ舗装上で観察されている。筆者らはこの現象に着目し、ロードヒーティング舗装上に霜の花が生成するメカニズムについて研究中であるが、ここでは最初の報告として2018年および2019年の観察事例を記す。

### 2. 観察事例

#### 2.1 2018年の事例

北海道の北見アメダスでは2018年2月17日に日降雪量21cmを記録した。当日は土曜日であり、週末は大学構内の除雪が行われていない。したがって舗装上は雪が積もった状態が翌日にかけて続いた。2月19日月曜日は大学の始業に備えてロードヒーティングの運転が開始された。このときに舗装上の積雪が融け、薄氷が形成された。当日、北見は無風かつ快晴で、放射冷却のため気温が低く、北見アメダスでは午前6時40分にこの日の最低気温 $-24.2^{\circ}\text{C}$ を記録している。そして同日午前7時頃、筆者らは霜の花が生成していることを確認した。大学図書館前のロードヒーティング舗装では全域に薄氷が形成され、その上を横たわった針状の結晶が覆い、これを基底として凝結し高さ方向に成長した樹枝状の霜の結晶（霜の花）が点在していた（図1、図2）。霜の花を上から見たときの大きさは約 $2\text{cm}\times 2\text{cm}$ であった。

#### 2.2 2019年の事例

2019年2月9日、前年と同じ舗装上で霜の花の生成を確認した。この日も放射冷却で、北見アメダスでは最低気温 $-28.2^{\circ}\text{C}$ を記録している。霜の花の外観や大きさも前年とほぼ同じであった。翌2月10日も放射冷却で最低気温： $-26.0^{\circ}\text{C}$ となり、この日も霜の花の生成を確認した。ただし、前日に比べ発生エリアは狭くなり、大きさもやや小さくなった。2月11日の朝（最低気温： $-20.6^{\circ}\text{C}$ ）も現地を確認したが、この日は霜の花は生成しなかった。

### 3. 霜の花生成の仮説

最初に観察した2018年の事例について、施設管理者へのヒアリングに基づき、ロードヒーティング上の霜の花生成の仮説を立てた。(1)前日の大雪で歩道の雪が残っていたこと（水蒸気供給源の存在）、(2)風が弱く低温で日の出直後であること、(3)ロードヒーティングの運転開始に伴い路面一大気間における鉛直方向の温度勾配が大きくなったこと、が挙げられる。これらの条件



図1 ロードヒーティング舗装上の霜の花（2018年2月19日）



図2 霜の花の外観（2018年2月19日）



図3 霜の花（樹枝状の霜の結晶）（2019年2月9日）

が重なった結果、霜の花の生成に至ったと考えられる。

なお、今回の観察時に撮影した画像は、Facebook ページ「北見の積雪観測情報（北見工業大学雪氷防災研究室）」に掲載しているのでご覧いただきたい (<https://www.facebook.com/kitamisnow>)。

1 北見工業大学地球環境工学科

School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

2 国土交通省北海道開発局（研究当時：北見工業大学大学院）

Hokkaido Regional Development Bureau, MLIT

## 暖湿移流増加に伴う南極表面の温度上昇 Antarctic skin temperature warming related to enhanced downward longwave radiation associated with increased atmospheric advection of moisture and temperature

○佐藤和敏<sup>1</sup>, Simmonds Ian<sup>2</sup>  
Kazutoshi Sato and Ian Simmonds

### 1. はじめに

南極域の気温は、南極の氷床収支に影響することから、長期変動やその原因について多くの研究が実施されている。東南極の気温変動は、統計的に有意ではないが、広範囲で長期的に寒冷化傾向にある。一方、西南極では、統計的に有意な温暖化傾向があり、特に南極半島の気温上昇は世界平均を上回っている。これらの気温変動は、熱帯や中緯度の水温変化に伴う南半球の大気変動が影響していると指摘されている。

これまでの研究では、南極域の地表付近の気温トレンドについて議論されてきたが、表面温度の長期トレンドやその原因について明らかになっていなかった。また、温暖化傾向にあった南極半島でも 2000 年代前半から寒冷化傾向にあり、期間が異なることで気温トレンドの傾向も異なることが指摘されている。そこで本研究では、再解析データを使用し、様々な期間の表面温度のトレンドやその原因を明らかにした。

### 2. データと解析方法

#### 2.1 再解析データ

この研究では、ヨーロッパ中期予報センターが提供している ERA5 の月平均データを使用した。再現性の不確実性を小さくするため、ERA5 の 10 アンサンブルメンバーの平均値を使用した。この研究では、大気データ（表面温度、短波・長波放射、潜熱・顕熱フラックス、気圧、雲量、鉛直積算雲量）や海洋データ（表面水温、海水密接度）を使用し、各季節（春：9-11月、夏：12-2月、秋：3-5月、冬：6-8月）のトレンドに着目した。

#### 2.2 解析方法

表面温度のトレンドとその原因を調べるため、以下の表面熱収支式を用いた表面熱収支解析を実施した。

$$G = S_d + S_u + l_d + l_u + F_{sh} + F_{lh} + R$$

$G$  は貯熱量、 $l$  は長波放射、 $S$  は短波放射、 $F_{sh}$  は顕熱フラックス、 $F_{lh}$  は潜熱フラックス、 $R$  は剰余項、 $u$  は上向き、 $d$  は下向きを示している。この表面熱収支式を微分することで、以下のよう各項のトレンド ( $\Delta$ ) の式で表すことができる。

$$\Delta G = \Delta S_d + \Delta S_u + \Delta l_d + \Delta l_u + \Delta F_{sh} + \Delta F_{lh} + \Delta R$$

この研究では限りなく薄い表面に着目していること ( $G=0$ ) や上向き長波放射と表面温度の関係 ( $\Delta l_u = -\epsilon\sigma\Delta T_s^4 = -\epsilon\sigma 4T_s^3\Delta T_s$ ,  $\epsilon$ : 射出率 (=1),  $\sigma$ : ステファンボルツマン定数,  $T_s$ : 表面温度) を考慮すると、以下の表面温度と各項のトレンドに対する等式に書き換えることができる。

$$\Delta T_s = (\Delta S_d + \Delta S_u + \Delta l_d + \Delta F_{sh} + \Delta F_{lh} + \Delta R) / (4\epsilon\sigma T_s^3)$$

この等式を使用し、表面温度と各項のトレンドを調査した。

### 3. 表面温度の長期トレンドとその原因

図 1 は、冬の表面温度の 71 年間 (1950-2020 年) トレンドを示している。表面温度の長期トレンドは、南極大陸全域で統計的に有意な温暖化傾向にあり、特に南極半島や東南極の内陸で顕著である。下向き長波放射に伴う表面温度トレンドは、表面

温度トレンドと分布や大きさがほぼ同じであった。一方、短波放射収支や乱流熱フラックスには明瞭な長期トレンドがなく、下向き長波放射が表面温度の長期トレンドに最も寄与していることがわかった。

下向き長波放射のトレンドの原因を調べるため、大気循環の長期トレンドを調べた。表面温度の昇温が大きい領域では、低緯度側からの暖気移流が増加傾向にあり、表面付近の気温が上昇することで下向き長波放射が増加していた。また、東南極の内陸では、下層雲の雲量が増加しており、下向き長波放射の増加に寄与していた。

### 4. まとめ

再解析データと表面熱収支解析から、下向き長波放射トレンドが表面温度トレンドに最も寄与していることがわかった。この関係は、短期期間のトレンドでも同様の傾向であった。また、夏はどの領域でも明瞭な長期トレンドが見られないが、春や秋には西南極や南極半島、東南極の内陸などの一部で冬と似たような温度トレンドがあった<sup>1</sup>。本講演では、他の季節や様々な期間のトレンドについても議論する。

### 参考文献

1) Sato, K. and I. Simmonds, 2021, Antarctic skin temperature warming related to enhanced downward longwave radiation associated with increased atmospheric advection of moisture and temperature, *Environ. Res. Lett.* **16** 064059

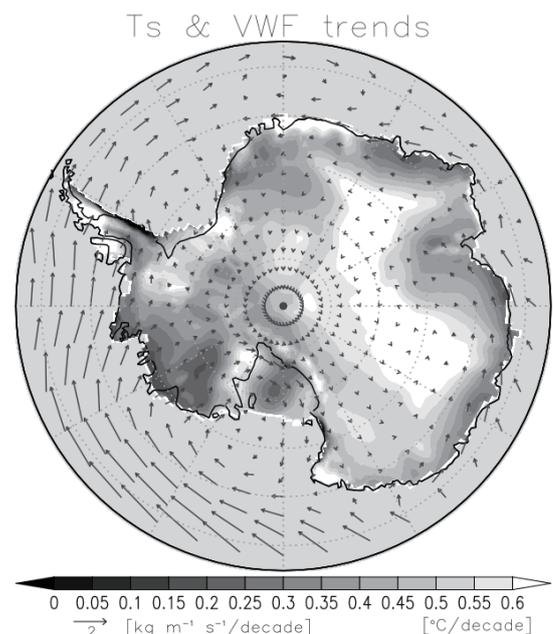


図 1 表面温度( $T_s$ : °C/decade)と鉛直水蒸気フラックス (VWF:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}/\text{decade}$ )の 71 年間(1950-2020 年)トレンド

1 北見工業大学工学部地球環境工学科  
2 メルボルン大学科学部地球科学科

School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology  
School of Earth Sciences, The University of Melbourne

## 東北 6 県における新・旧平年値に対応した積雪水量分布とその変化 - 1981~2010 年および 1991~2020 年の 30 年平均の比較 -

### Snow water equivalent distribution and its changes corresponding to the new and old normal values in the 6 prefectures of Tohoku region, Japan

- Comparison of 30-year averages from 1981 to 2010 and 1991 to 2020 -

○本谷 研<sup>1</sup>

Ken MOTOYA

#### 1. はじめに

気温・降水量・日照時間などの気象要素の基準となる平年値について、気象庁では西暦年の 1 の位が 1 の年から続く 30 年間の平均値をもって平年値とし 10 年ごとに更新している<sup>1)</sup>。2021 年 5 月よりこれまで使用されていた 1981 年から 2010 年までの 30 年間平均に代わって 1991 年から 2020 年までの 30 年間平均の新しい平年値が使用されるようになった。雪に関する平年値には降雪の深さや積雪の深さがあるが、積雪水量については不明である。今回、気象庁の観測データに診断型積雪水量分布モデルを援用することで、気象庁の新・旧平年値の期間に対応した東北 6 県における積雪水量の 30 年平均値の分布(1km 四方の平均)をそれぞれ計算し、両者の差異について調べたので報告する。

#### 2. 使用データ・診断型積雪水量分布モデル

##### 2.1 使用データ

日平均および最高・最低気温(°C)、日降水量(mm)、日平均風速(ms<sup>-1</sup>)、水蒸気圧(hPa)、日照時間(hr)、日平均気圧(hPa)などの気象要素分布をアメダス(解析領域およびその周辺で約 220 地点)と気象官署(同約 20 地点)のルーチン気象データから推定した。つまり、空間的に離散したデータから距離重み付き内挿と高度分布を仮定することによって面的な気象要素の分布を推定した。毎日の気象データは、気象庁ホームページ<sup>2)</sup>から取得し、地点ごとのファイルに一度分割保存した後に全地点をマージした日別ファイルに変換して使用した。また、標高・土地利用などは国土地理院のデジタル数値地図(それぞれ 50m および 100m 格子)から 20 万分の一地形図と同じ領域ごとのパラメータファイルとして事前作成してある。

##### 2.2 診断型積雪水量分布モデル

作成した入力気象データに基づいて、診断型積雪水量分布モデル<sup>3)</sup>により東北 6 県(青森, 秋田, 岩手, 山形, 宮城, 福島, 面積約 77000km<sup>2</sup>)における、日単位・1km 四方毎の積雪水量を、前年 10 月から翌年 3 月まで、1980~81 年冬季から 2020~21 年冬季まで計算した。気象庁平年値に対応させるため、1981~2010 年の 30 年間平均を「旧平年値」、1991~2020 年の 30 年間平均を「新平年値」として求めた。

#### 3. 結果

積雪水量分布の計算は日単位で行っているが、月平均に集計した結果について示す。2 月を例にみると、水域を除いた全領域で平均した積雪水量は「新平年値」で 330.9mm(「旧平年値」では 285.9mm)となり、45mm 程度の増加となった。但し、沿岸・平地の多くでは最大 20mm 程度減少するか、微増に留まっている。「新平年値」における積雪水量の最大値は 1740.2mm(新潟・群馬県境近くの中ノ岳付近)であるが、新旧差の増加幅最大は南魚沼の笠倉岳付近(341.5mm 増加)、減少幅最大は秋田・岩手県境の和賀岳付近(56.9mm 減少)であった。2 月における新旧平年値および差(「新」引く「旧」)を図 1 の a, b, c に示した。また、

2 月における新旧平年値に対応する 30 年間の積雪水量の年々変動における標準偏差について同じく新旧平年値および差(「新」引く「旧」)を図 2 の a, b, c に示した。標準偏差についての新旧差は判然としないが、日本海沿岸の平野部の多くでやや減少している一方、鳥海山や月山、飯豊山、燧ヶ岳などの高山域では標準偏差にして 200~300mm 程度の増加が見られ、積雪水量でみた年々変動が大きくなる傾向と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 気象庁ホームページ(気象統計情報, 過去の気象データ検索, ダウンロードなど), <http://www.jma.go.jp/>(2021 年 7 月 4 日確認).
- 2) 本谷 研, 2008: 東北地方における積雪水量の 27 年平均値と豪雪・寡雪, 雪氷, 70(6), 561-570.
- 3) Motoya et al., 2001: Evaluating the Spatial and Temporal Distribution of Snow Accumulation, Snowmelts and Discharge in a Multi basin Scale: An Application to the Tohoku Region, Japan, *Hydrol. Process.* 15, 2101-2129.

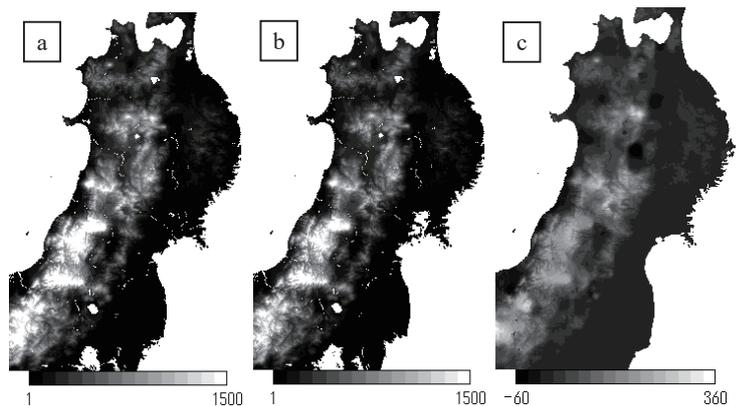


図 1 2 月における積雪水量の新・旧平年値およびその差の分布 (a: 「新平年値」, b: 「旧平年値」, c: 両者の差=新-旧; 単位は mm)

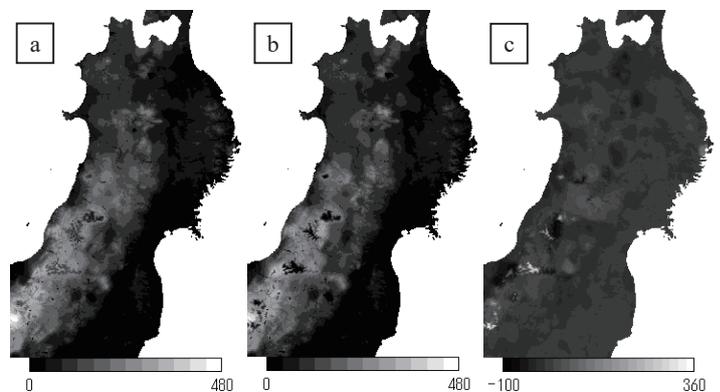


図 2 図 1 に同じ。但し、それぞれの 30 年変動の標準偏差を示す (a: 「新平年値」, b: 「旧平年値」, c: 両者の差; 単位は mm)

1 秋田大学教育文化学部

Faculty of Education and human studies, Akita University

©2021 (公社) 日本雪氷学会

# 長期気候再現計算に基づく中部山岳域の降雪・積雪の経年変化マップ Map of Long-term trends for Snowfall and Snow Cover over Central Mountainous Region in Japan Based on Long-term Climate Reproduction Calculation

○栗林正俊<sup>1</sup>

Masatoshi Kuribayashi

## 1. はじめに

中部山岳域の雪は、水資源や観光資源、高山生態系など様々な分野において重要であるが、地球温暖化により影響を受けることが懸念されている。例えば、長野県白馬村は全国の自治体で3番目に気候非常事態を宣言し、良質な雪の保全を重要な課題としている。鈴木(2013)<sup>1)</sup>は中部地方の気象庁の観測値を解析して、日本海側の低標高地域では降雪深と積雪深に有意な減少傾向が認められ、内陸域では有意な変化傾向は認められないことを示した。一方、Kawase et al. (2020)<sup>2)</sup>は非静力学地域気候モデル(NHRCM)を用いた大規模アンサンブル計算により、北アルプス北部の降雪は地球温暖化に伴い極端化し、積雪は減少すること予測した。しかし、気象庁の観測地点は標高1500m以上の地域にはほとんどなく、中部山岳域における降雪・積雪の経年変化の空間分布に関する知見は乏しい。そこで、本研究ではNHRCMによる長期気候再現計算の結果を解析して、中部山岳域における降雪・積雪の経年変化の空間分布を評価することを目的とする。

## 2. 方法

### 2.1 気象観測値

気象庁による長野県内の各気象官署とアメダスの気象観測値のうち、気象観測統計指針の正常値と準正常値(資料数が全体数の80%以上)に分類された値のみ解析に使用した。観測地点の移転などの情報は長野地方気象台から頂いた。また、移転前後での統計値の均質性については、気象観測統計指針に示されている条件に従った。

### 2.2 長期気候再現計算

長期気候再現計算は、気象庁55年長期再解析データ(JRA55)<sup>3)</sup>をNHRCMの初期値・境界値に用いて、2重ネスティングにより東アジアを20km格子、日本を5km格子で計算された。この計算は、1年毎に前年7月末から8月末までの約1年1か月間が連続積分され、1980~2015年の合計36分実行された。計算結果は1時間値として出力され、解析には1981~2015年の結果を使用した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 モデル再現性

長野県内の気象観測点における1981~2015年の年最深積雪の年変化率を観測とNHRCMで比較すると、開田高原、野沢温泉、信濃町は観測とNHRCMで大きな差があるが、他の地点は比較的よく整合している(図1)。開田高原は1992年以降しかデータがないこと、野沢温泉は2007年12月に移転していること、信濃町は1998年7月に移転していること、がそれぞれ不整合の原因と考えられる。

### 3.2 降雪・積雪の経年変化マップ

NHRCMで再現された1981~2015年の年最深積雪の経年変化マップによると、北アルプス北部を中心とする山岳域で積雪は増加傾向にあり、長野県の北側の新潟県や富山県で減少傾向にある(図2a)。この特徴は、降雪量の経年変化マップでも同様であ

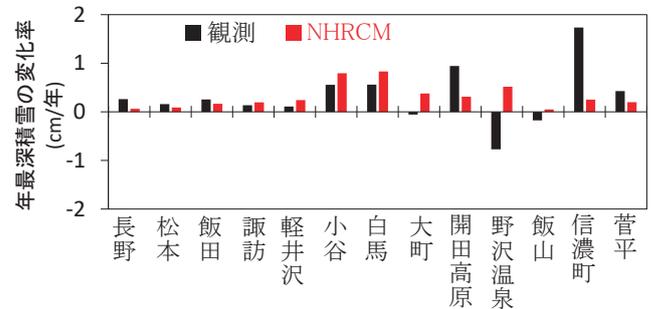


図1 長野県の気象観測点における1981~2015年の年最深積雪の年変化率

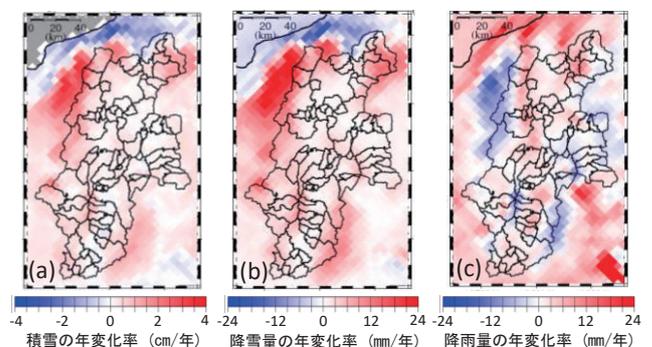


図2 NHRCMで再現された中部山岳域における1981~2015年の(a)年最深積雪、(b)降雪量、(c)降雨量、の年変化率の空間分布。黒線は長野県の市町村境界。

る(図2b)。降雨量の経年変化マップによると、山岳域で降雨量が減少傾向にあることが分かる(図2c)。月別の解析を行った結果、12月に気温が低下傾向にある反面、降水量が増加傾向にあり、積雪と降雪の増加傾向をもたらしていることが明らかとなり、この特徴は観測に基づく既往研究<sup>4)</sup>とも整合していた。

## 4. 謝辞

本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20192007)により実施した。

## 参考文献

- 1) 鈴木啓助, 2013: 中部山岳地域における気象観測の現状とその意義. 地学雑誌, **122**(4), 553-570.
- 2) Kawase, H., et al., 2020: Changes in extremely heavy and light snow-cover winters due to global warming over high mountainous areas in central Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, **7**, 10.
- 3) Kobayashi, S., et al., 2015: The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. *J. of the Meteorol. Soc. of Japan*, **93**(1), 5-48.
- 4) Yasunaga, K., and M. Tomochika, 2017: An increasing trend in the early-winter precipitation during recent decades along the coastal areas of the Sea of Japan. *J. of Hydrometeorology*, **18**, 2893-2906.

<sup>1</sup> 長野県環境保全研究所

Nagano Environmental Conservation Research Institute

## 近年の関東地方における降雪の極端化とそれをもたらす環境場の変化

## Recent increase of extreming snowfall events in Kanto and its relation to the shift of surrounding fields

○中村祐貴<sup>1</sup>, 立花義裕<sup>1</sup>, 安藤雄太<sup>2</sup>

Yuki Nakamura, Yoshihiro Tachibana and Yuta Ando

## 1. 序論

関東地方は降雪回数・降雪量ともに、日本海側に比べて少ない。そのため、大雪への対策は不十分で、一度大雪が降ると交通等に大きな影響が出る。今後の対策検討のために、関東地方の降雪の将来予測は重要である。数値モデル実験により 21 世紀末は現在と比べて日本のほとんどの地域で総降雪量は減少すると言われている<sup>[1]</sup>。しかし、数値モデルには予測の不確実性があるため、再解析データにより過去の長期的な変化を考察することも重要である。先行研究には 2014 年の関東の大雪事例<sup>[2]</sup>のもの、解析期間全体での東京の積雪とユーラシア (EU) パターンとの関係<sup>[3]</sup>や関東の大雪とブロッキング高気圧との関係<sup>[4]</sup>を調べたものなどがあるが、長期的な変化を見たものはない。以上より、本研究では再解析データを用いて関東地方の降雪とそれをもたらす環境場の長期的な変化を調べることを目的とする。

## 2. 使用データと解析方法

降雪・降水量は気象官署の観測データ、海面水温は HadISST、大気場は気象庁 55 年長期再解析データ JRA-55 を用いた。解析期間は 1961~2018 年の 58 年間で、降雪量の多い 1, 2 月に着目した。また、1988/89 年を境にアリューシャン低気圧が弱まり、日本付近で気温が上昇した<sup>[5]</sup>こと、1980 年代後半に東アジアの冬期モンスーンが弱まり北西太平洋のストームトラックの活動が活発になった<sup>[6]</sup>ことから、1988/89 年を境にするとの長期的な変化が見やすい。そのため、1961~1988 年を過去、1989~2018 年を近年と期間を分け、合成図解析により環境場の差を比較した。

## 3. 結果と考察

まず、一年あたりの総降雪量を過去と近年で比較した。結果、過去が 99cm、近年は 92cm だが、統計的に有意な差は無かった。しかし、総降雪量の多い年順に並べると近年の年が上位を占める (図略)。その要因として、近年は降雪量の多い事例数が増えたのではないかと、という仮説を立てた。これを調べるため、まずは降雪事例を抽出した。関東の降雪はほぼ南岸低気圧によるものなので、南岸低気圧による降雪で、都県庁所在地の気象官署と館野 (茨城県) の 8 地点中 5 地点以上で 1cm 以上の降雪を観測した事例を降雪事例とした。結果、過去 40 事例、近年 30 事例抽出された (表 1)。さらに、降雪量が多い事例数の変化を確認するため、抽出した事例の中で 8 地点合計 100cm 以上の事例を極端降雪事例とした。結果、極端降雪事例数は過去 5 事例、近年 9 事例と、近年の方が増えていた (表 1)。そこで、移動性高低気圧の個数や強度と関係のあるストームトラックの変化を確認すると、850hPa 面では日本の南海上から東海上で正偏差であった (図略)。また同様の場所で海面水温の

南北温度勾配も正偏差であった (図略)。次に、極端降雪事例の量についても比較した。比較した結果、過去と近年で平均降雪量に有意な差は無かったが、850hPa 面気温と平均降水量は有意に増加していた (図略)。そこで、降雪量を含む降水量が増加した要因を調べるため比湿を比較した。降雪日の 850hPa の比湿を比較すると、日本の南海上から東海上で増加していた (図 1a)。次に比湿が増加した要因を調べるため、潜熱フラックスを比較した。結果、日本海とオホーツク海で正偏差 (上向き) であった (図 1b)。また、極端降雪各事例で 54 時間の後方流跡線解析を行うと、日本海から関東地方へ向かう空気塊の流れが確認できた (図略)。

以上の結果より、極端降雪事例数の増加が近年における総降雪量の多い年の増加に大きく寄与していると考えられる。極端降雪事例数の増加の要因としては、海面水温の南北温度勾配が強化されたことによりストームトラックが強まったことが示唆された。また、近年の方が極端降雪事例の平均降水量が多いのは、潜熱フラックスの正偏差の強い日本海から関東上空に輸送される水蒸気量が多くなっていることが考えられる。

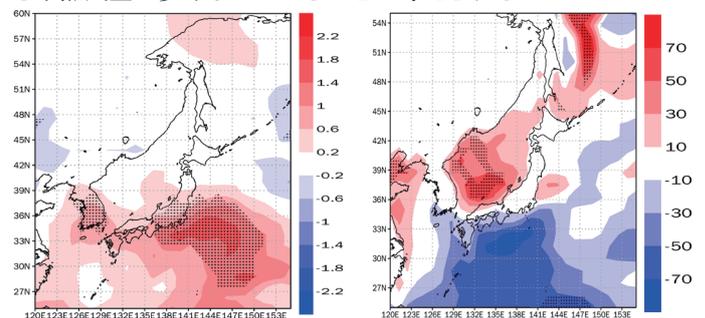


図 1 降雪日の (a)850hPa 面の比湿 (g/kg), (b)潜熱フラックス (W/m<sup>2</sup>) の近年と過去の差, ドット域は信頼係数 90% で有意な領域

表 1 抽出された全事例と極端降雪事例数

	過去	近年
全事例	40	30
極端降雪事例	5	9

## 引用文献

- [1] Kawase et al., 2016: *Climate Change*, **139**, 265-278  
 [2] Honda et al., 2016: *SOLA*, **12**, 259-264  
 [3] Tachibana et al., 2007: *SOLA*, **3**, 129-132  
 [4] Yamazaki et al., 2015: *SOLA*, **11**, 59-64  
 [5] Tachibana et al., 1996: *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 579-584  
 [6] Nakamura et al., 2002: *J. Climate*, **15**, 1855-1874

1 三重大学大学院生物資源学研究所  
 2 新潟大学理学部

Graduate School of Bioresources, Mie University  
 Faculty of Science, Niigata University

## 海上における塩を含む積雪の含水率測定 Methodology for Measuring Water Content of Salty Snow on Sea Ice

○木村宏海<sup>1</sup>, 八久保晶弘<sup>1</sup>, 館山一孝<sup>1</sup>, 谷川朋範<sup>2</sup>, 小嶋真輔<sup>3</sup>

Hiroki Kimura, Akihiro Hachikubo, Kazutaka Tateyama, Tomonori Tanikawa and Shinsuke Kojima

### 1. はじめに

積雪が融解した「ぬれ雪」は、0°Cの水と水との混合物である。その混合比は熱的状态を表わす重要なパラメータであり、積雪含水率は古くから直接測定の対象となっている。積雪含水率の測定には様々な手法が用いられるが、中でも熱量式含水率計は半世紀以上、標準的な装置として使用されてきた歴史がある。海上では、海水に含まれるブラインが上方に移動し、海上上に堆積する積雪に浸透することで、高塩分のぬれ雪を形成する可能性がある<sup>1)</sup>。これらの挙動により、海上上の積雪層は塩を含み、凝固点降下によって0°C以下でも塩を含む液体層が存在する。積雪中に存在する液体水はマイクロ波特性に大きな影響を与えることから、衛星搭載マイクロ波放射計データの解釈にも関わる。しかしながら、塩を含む積雪の含水率測定法については、熱量式含水率計で測定して補正を加える試みがあるものの<sup>2,3)</sup>、未だ確立されていなかった。一方、熱量式含水率計を使用せずに、ぬれ雪の雪温とその融解水の塩分の2つの情報から、モル凝固点降下の原理を用いて含水率を求める方法が考えられるが、この手法については未検証だった。

我々の研究グループでは、上記の2手法について検討を続けてきた<sup>4,5)</sup>。本研究では、これらの含水率測定手法にさらに改良を加え、海上における塩を含む積雪含水率の測定に適用した結果<sup>6)</sup>についてまとめる。

### 2. 野外調査およびデータ解析手順

本研究では、北極海海上上で採取された積雪、および北海道サロマ湖海上上で採取された積雪を用いた。北極海調査については、カナダ沿岸警備隊の砕氷船 *Louis S. St-Laurent* 号による調査航海 (Joint Ocean Ice Studies (JOIS) 2019, IOS Cruise ID 2019-87) にて、2019年に海上上の3地点で積雪調査を実施した。サロマ湖調査では、2020年に湖海上での積雪調査を実施した。サロマ湖の海水の塩分は海水のそれに近く、浸み上がりや冠水により海上上の積雪は塩分を有する<sup>3)</sup>。上記の2つの野外調査では、秋田谷式熱量計による海上上・湖海上の積雪試料の含水率測定、および雪温・塩分測定を行った。

まず、通常通りの手順で秋田谷式含水率計による含水率測定値  $W_i$  を導出した。ただし、塩を含むことにより試料温度が氷点下であるため、 $W_i$  は比熱の分だけ過小評価する。そこで、お湯と融解したぬれ雪との混合水の塩分を塩分計で測定し、雪温から0°Cまでの積雪試料の比熱補正を施すことで、この過小評価分を補正した含水率  $W_r$  を導出した。一方、積雪試料中の塩は全て、氷結晶の外部に塩水の形で存在すると仮定し、海水の結氷温度と塩分との関係式を用いることで、その塩水の塩分を推定できる。すなわち、前述の秋田谷式含水率計による試料で測定された、融解した積雪の塩分データとの比較によって、含水率計を使用しない、全く異なる原理で含水率  $W_{eq}$  を求められる。

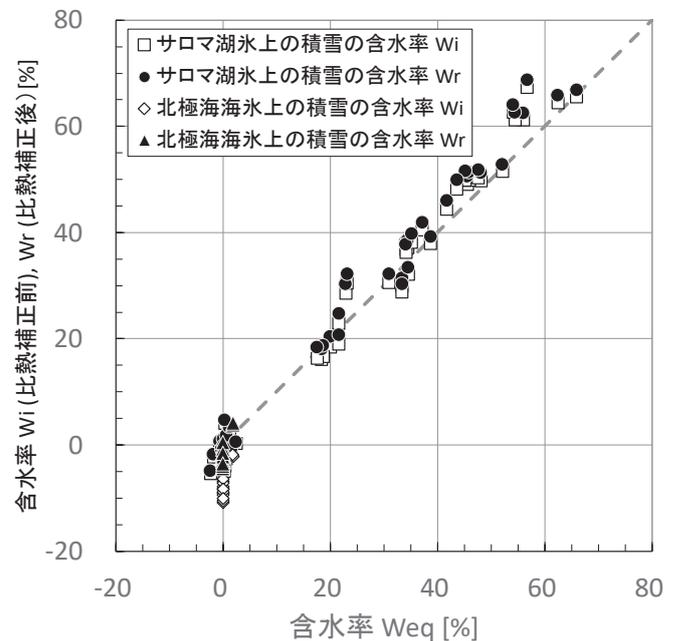


図 塩分と雪温の関係式で求めた含水率  $W_{eq}$  と、熱量計で求めた含水率 (比熱補正前:  $W_i$ , 比熱補正後:  $W_r$ ) との関係。破線は 1:1 のラインを表す。

### 3. 測定結果および考察

測定結果を上図に示す。このグラフから、雪温と塩分から求めた含水率  $W_{eq}$  と、熱量式含水率計による含水率  $W_i$  (比熱補正前) および  $W_r$  (比熱補正後) との関係は、おおむね 1:1 の直線上に乗っていることがわかる。詳細にみていくと、 $W_i$  は  $W_{eq}$  に対してやや過小評価である。また、サロマ湖試料は北極海試料と比較すると  $W_i$  と  $W_r$  との差が相対的に小さい。これは、前者が後者に対し雪温が高く、比熱補正が小さかったことに起因する。北極海では、雪温が-10°Cの環境下でも積雪が数%程度含水していることが  $W_{eq}$  と  $W_r$  の値から推定される。一方、サロマ湖では海水の冠水により、60%を超える含水率が観測された。今後の展望として、衛星搭載マイクロ波放射計データの利用を目的とした、海上上の積雪に関する地上検証観測への貢献が期待される。

#### 参考文献

- 1) 小嶋真輔ほか, 2008: 雪氷, **70**(4), 423–433.
- 2) 小嶋真輔ほか, 2005: 日本雪氷学会講演予稿集.
- 3) 大沼友貴彦ほか, 2011: 雪氷研究大会 (2011・長岡) 講演要旨集.
- 4) 木村宏海ほか, 2020: 雪氷研究大会 (2020・オンライン) 講演要旨集.
- 5) 木村宏海ほか, 2020: 北海道の雪氷, **39**, 9–12.
- 6) 木村宏海ほか, 2021: 雪氷, **83**, 印刷中.

1 北見工業大学

2 気象研究所

3 三菱重工冷熱株式会社

Kitami Institute of Technology

Meteorological Research Institute

Mitsubishi Heavy Industries Air-Conditioning & Refrigeration Corporation

## UAV-SfM 測量による湖水フリーボードの広域計測

## Wide Area Measurement of Lake Ice Freeboard Using UAV-SfM

○佐藤功坪<sup>1</sup>, 館山一孝<sup>2</sup>, 渡邊達也<sup>2</sup>

Kohei Sato, Kazutaka Tateyama and Tatsuya Watanabe

## 1. はじめに

海水厚分布の測定は気候変動の実態把握や将来予測, 氷海航行・氷海域での資源開発を行う上で重要である. 現地の海水厚はドリルによる掘削や船舶・航空機に搭載した電磁誘導式氷厚計など様々な手法で測定されている. しかし, 既存の現地測定手法は大きな作業労力, 機材・観測コストを必要とする. また, 衛星リモートセンシングによる海水厚観測は観測頻度が少なく, 空間分解能が低いため, 高頻度かつローカルスケールで海水厚変化を捉えるのは困難である. ゆえに, 海水厚を低コストかつ広範囲を効率的に測定する新手法の確立が望まれる. 渡邊<sup>ら</sup>は海水厚計測に UAV-SfM (Unmanned Aerial Vehicle with Structure from Motion) 測定の適用を検討している. UAV-SfM 測量により得られる結果は氷氷表面の高さ分布であり, 数値表層モデル(Digital Surface Model: DSM)である. DSM の高さデータの基準面を海水面とすることでフリーボード (海水面より上の海水厚と積雪深の和) を計測し, 静水圧平衡を用いて海水厚を推定する手法である. この手法は低コスト, 低労力, 高分解能での海水厚分布測定の可能性を示唆する一方で, フリーボードの精度検証がされていない課題がある. 本研究では UAV-SfM 測量によるフリーボードの計測手法を検討し, フリーボード測定の定量的な精度の検証を目的とする.

## 2. 方法

## 2.1 調査地域

空撮対象地域は北海道東部に位置するサロマ湖である. サロマ湖は2つの湖口でオホーツク海に繋がった汽水湖であるため, 外洋と似た塩分構造である. 空撮の範囲は海岸線から約 1.3 km の沖合地点を中心に約 1.0 km<sup>2</sup>とした. 空撮日は 2021 年 2 月 28 日である. 空撮日に掘削し, 計測した湖水の厚さは  $0.504 \pm 0.059$  m, フリーボードが  $0.110 \pm 0.037$  m であった.

## 2.2 空撮方法

空撮には固定翼型 UAV (UAV Mapper, Tuffwing LLC.) を使用した (図 1). 空撮は Mission Planer (ArduPilot Dev Team) による自動航行アプリケーションを使用し, UAV の自動制御により実施した. 空撮は撮影高度 100 m, オーバーラップが 80%, サイドラップが 50% となるように航行速度・航路間隔を設定した. UAV Mapper にはデジタル一眼カメラ (Sony α6000) を搭載し, 画像は JPEG 形式で保存した. 通常は SfM モデルに地理的空間座標を定義する地上基準点 (Ground Control Point: GCP) を空撮範囲内に多数配置する必要がある. 本研究では空撮の効率化を図るため, GCP 配置を省略する方法を採用した. その仕組みはシャッタータイミングを検知して搭載している GNSS モジュールにイベントログとして記録し, GNSS 基準局との後処理キネマティック (Post-Processed Kinematic: PPK) 解析により航空写真の撮影座標値を算出するものである.

## 2.3 対空標識の設置

海水面の楕円体高を計測するため, 水位計と GNSS を搭載した対空標識 (図 2) を空撮範囲内に 5 点設置した. これにより, 対空標識の楕円体高と水位計の計測値から対空標識直下における海水面の楕円体高の計測を行った. また, 対空標識 5 点のうち 1 点を GNSS 基準局とした.

## 2.4 フリーボード分布図の作成

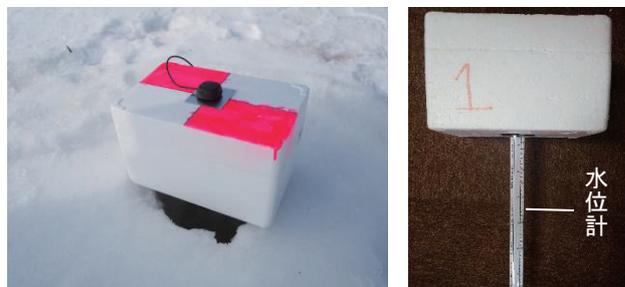
現地で取得した画像と撮影座標を基に, SfM 解析ソフトウェア (Metashape Professional Version 1.6.2, Agisoft LLC.) で湖水表面の DSM を作成し, 空間座標が定義された点群データとして出力した. 次に, 対空標識により計測した海水面の楕円体高を点群データから差分し, SurFer (GOLDEN SOFTWARE LLC.) に読み込むことでフリーボード分布図を作成した. 分布図の空間分解能は 1 m である.

## 3. 結果

SfM により作成した DSM は平らな雪氷面を忠実に再現することができた. 対空標識の GNSS 実測値と SfM 推定座標値の誤差は水平が 0.189 m, 鉛直が 0.016 m であった. フリーボード計測の精度は空撮範囲内において計 22 点のドリル掘削による計測値とフリーボード分布図上で合致する掘削点において算出した計測値を比較することで検証を試みた.



図 1 固定翼機 Tuffwing

図 2 水位計と GNSS 搭載の対空標識  
(左: 設置の様子, 右: 水位計)

## 参考文献

- 1) 渡邊達也, 館山一孝, 2021: UAV-SfM 測量による海水フリーボード計測の試み. 雪氷, **83**(2), 155-167

1 北見工業大学大学院工学研究科

2 北見工業大学地球環境工学科

Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology  
School of Earth, and Environmental Engineering Kitami Institute of Technology

## 極域の雪氷の融解・凍結および積雪被覆の変化に関するモニタリング観測

## Observations on melting and freezing of snow and ice and changes in snow cover in the Polar region

○ヌアスムグリ アリマス<sup>1</sup>, 榎本浩之<sup>1,2</sup>, シュリダー ジャワク<sup>3</sup>

Nuerasimuguli Alimasi, Hiroyuki Enomoto and Shidhar Jawak

## 1. はじめに

積雪域や氷河・氷床の融解は、気候変動の影響や水循環、防災などにとって重要な情報である。融解の観測には、衛星観測が活用されている。雪氷の反射特性の変化を可視、近赤外で調べる方法や、雪氷温度が融点に至ることを赤外観測で調べるもの、積雪が水分を含んだことをマイクロ波放射から調べる方法などがある。本研究では、北極域のモニタリング観測結果について報告する。また、スバルバルでは、スバルバル統合地球観測システム (SIOS) によるリモートセンシング利用観測の議論<sup>1)</sup>が行われており、そこへの情報提供と国内外の共同研究の拡大も目指して作業を進めた。

## 2. 観測手法および観測地域

本研究では衛星搭載の高機能マイクロ波放射計 AMSR-E (2002~2011)と AMSR2 (2012~現在)のデータを使用した。全天候、夜間でも融解が観測できるマイクロ波による観測は、1980年代に衛星マイクロ波観測が可能になったときより利用されてきた。観測地域はスバルバル諸島の10か所の氷河・氷帽域である(図1a, b, c)。主な観測アルゴリズムとしてXPGR (Cross-Polarization Gradient Ratio) という方法が1990年代後半から使用され、氷床融解の指標として気候変動研究に利用されてきた。また、陸上の積雪域の融解観測には、融解が起きる昼と凍結する夜のマイクロ波放射の差 (Diurnal Amplitude Variation: DAV) という手法が利用されている。本研究では、それぞれの特性を利用した。



図1a 北極域の観測サイト。1b 従来の二点(16, 17)と今回の追加観測サイト(E)の拡大図。1c 追加観測サイトの名前。

## 3. 観測結果

衛星マイクロ波観測では20 km以上の粗い空間スケールでのデータを見ているが、雪氷域の融解の短期変化が顕著であり、日々の変動が観察される。また、季節内の持続性、年による変化も見いだせる。スバルバル倍の10か所に共通のイベントや地域による差も確認できる。これらについて今後現地の気象データを含めて比較した。客観解析の気象データとの比較より、季節的な温暖時期については整合した特徴がみられるが、日々の変化特に、融解に達したかなどは衛星データの観測が有効である。

## 参考文献

- 1) Jawak et al. (2020), SIOS's Earth Observation (EO), Remote Sensing (RS), and operational activities in response to COVID-19. Remote Sensing, 13, <https://doi.org/10.3390/rs13040712>

1 国立極地研究所

2 総合研究大学院大学

3 スバルバル統合地球観測システム(SIOS)ノーリッジセンター

National Institute of Polar Research

Graduate University of Advanced Study

Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System (SIOS) Knowledge Centre

## 降雪量の重心位置 Centroid of snowfall amount

○藤野丈志<sup>1</sup>, 坂東 和郎<sup>1</sup>  
 Takeshi Fujino, Bandou Kazuro

### 1. はじめに

日本の人口の重心は岐阜県関市にある<sup>1</sup>という。では、日本の降雪の重心はどこにあるのだろうか?このような疑問を持ったことから、降雪量の重心を統計的手法で求めた。

### 2. 重心の算出

長期の降雪量観測が行なわれている気象官署のうち、2021 寒候年時点で観測が続けられている100 地点<sup>2)</sup>を対象として、寒候年ごとの降雪量の重心位置を、人口の重心位置の算出方法<sup>1)</sup>にもとづいた以下の式により算出した。

$$x_t = \frac{\sum H_{t,i} x_i \cos x_i}{\sum H_{t,i} \cos x_i} \quad y_t = \frac{\sum H_{t,i} y_i}{\sum H_{t,i}}$$

$x_i, y_i$  : 寒候年  $t$  年の降雪量重心の経度, 緯度  
 $H_{t,i}$  : 観測地点  $i$  における寒候年  $t$  年の降雪の合計  
 $x_i, y_i$  : 観測地点  $i$  の経度, 緯度

### 3. 結果

毎年の降雪量の重心位置を求めた結果を図 1 に示す。青森津軽地方を中心とし、北北東—南南西方向 350 km, 西北西—東南東方向 40 kmの範囲に分布した。1967~2021 寒候年の合計降雪量の重心は、青森県深浦町にある白神山の東 1.7 km と求められた。降雪量が少ない年ほど、重心は北に位置する傾向があり、記録的な小雪となった 2020 寒候年は日高沖に位置した。一方、1984 寒候年 (59 豪雪) は飛島の西約 32 km の海上に位置した。毎年の重心位置から移動傾向を求めた結果を図 2 に示す。平均重心位置は北北東方向に約 2.2 km/年で北上し、この移動傾向が将来そのまま続くと、2109 年頃に苫小牧へ到達する結果となった。

### 4. おわりに

降雪の深さの幾何学的な重心を求めた結果、青森県深浦町に降雪量の重心があること、北海道に向けて北上傾向にあることを示した。毎年の降雪量の重心位置には、その年の降雪の特徴が反映される。例えば、2014 寒候年は関東甲信地方で大雪となったが、重心の軌跡 ( 図 2 ) に対し重心位置は南南東方向に離れる、等である。降雪量の重心位置から降雪の特徴を考えるきっかけになれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 総務省統計局, 2017:統計トピックス No.102 我が国の人口重心—平成 27 年国勢調査結果から—。https://www.stat.go.jp/data/kokusei/topics/pdf/topics102.pdf, 2021/6/14 閲覧
- 2) 気象庁:アメダス地点情報履歴ファイル 観測概要と観測所一覧, https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/man/kansoku\_gaiyou.html, 2021/6/14 閲覧

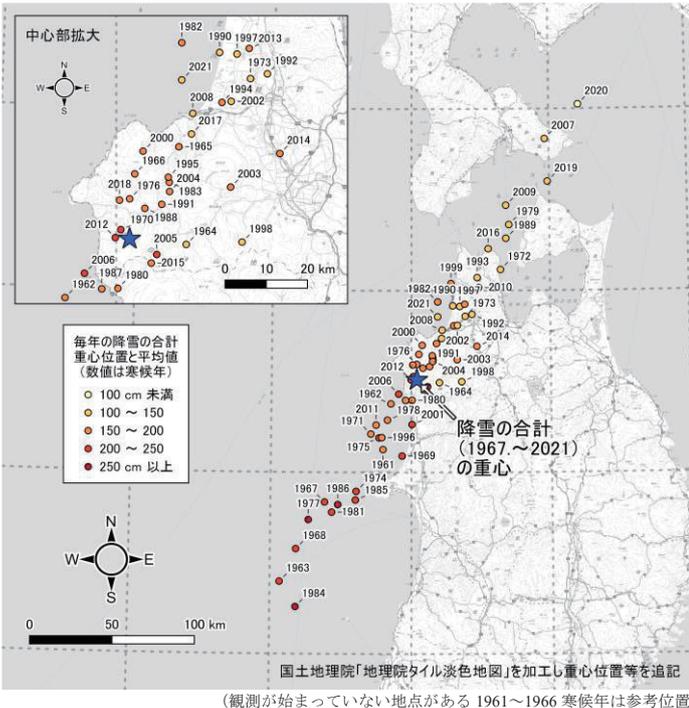


図 1 毎年の降雪の合計値から求めた重心位置

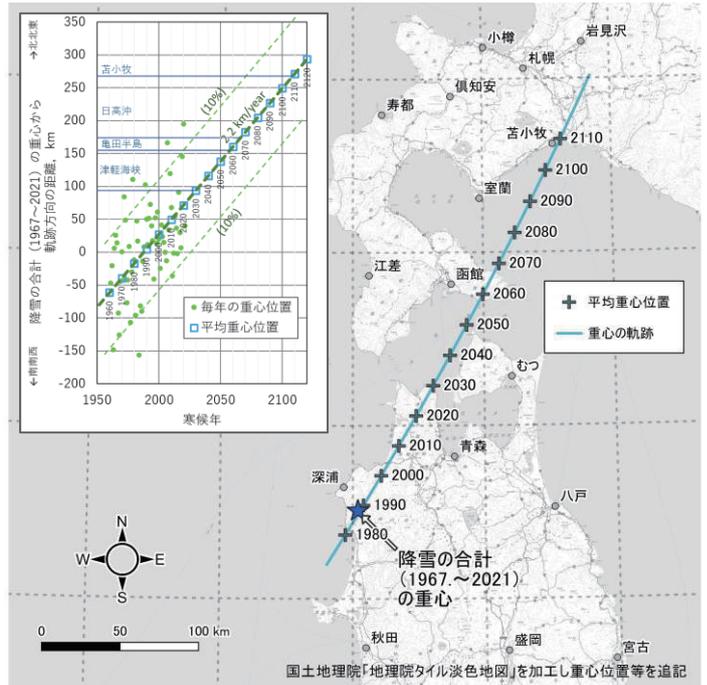


図 2 重心位置の移動傾向

<sup>1</sup> 株式会社興和

Kowa Co.,Ltd.

## 土壤凍結深の測定を通じたアウトリーチプログラム (10)

### Outreach program by measurements of frost depth (10)

○原田 鉦一郎<sup>1</sup>, 吉川 謙二<sup>2</sup>, 岩花 剛<sup>2</sup>, Julia Stanilovskaya<sup>3</sup>, 澤田 結基<sup>4</sup>, 曾根 敏雄<sup>5</sup>  
Koichiro Harada, Kenji Yoshikawa, Go Iwahana, Julia Stanilovskaya, Yuki Sawada and Toshio Sone

#### 1. はじめに

寒冷地における身近な自然環境の指標として、土壤凍結深の測定に注目したアウトリーチプログラムを2011–2012年冬季に開始した<sup>1)</sup>。このプログラムは、小学生・中学生に土壤凍結深の測定を実際に行ってもらうことによって、地球環境への興味を持ってもらい、理科の楽しさを伝えることを目的としている。2020–2021年冬季は観測10目となっている。ここでは2020–2021年冬季の活動を中心にこれまでの取り組みを紹介する。

#### 2. 概要

本プログラムでは、土壤凍結深の測定装置を北海道内の小中学校の校庭に設置し、実際に児童生徒が測定を行う。測定装置はチューブ内の色水の凍結を確認する土壤凍結深計を利用した<sup>1)</sup>。土壤凍結深の測定は自然積雪下で行い、1週間に1度の頻度で測定し、同時に積雪深も測る。また地表面温度と気温を自動記録装置で記録し(1時間間隔)、さらに2015–2016年冬季より自動記録できる多点式地温計も設置し、手動の観測値との比較を行った<sup>2)</sup>。加えて、この冬から最大凍結深計の設置も行った。

2020–2021年冬季には、新たに厚真町の上厚真小学校と更別村の更別小学校が加わり、設置校は合計で38校となった(図1)。

#### 3. 実施状況

2020–2021年冬季は、新型コロナウイルス感染拡大に伴い、小学校で直接児童に会って説明する機会が少なくなった。また児童などが直接凍結深を測定した学校は3校であった。

12月上旬に大成小学校(苫小牧市)を訪問し、前年度の測定を行った児童に対して結果の説明を行い、新たに測定を行う児童に本プログラムの説明と実際の測定を行った。12月から1月にかけて、駒場小学校(音更町)、更別小学校(更別村)、弟子屈小学校(弟子屈町)、上厚真小学校(厚真町)で観測機材の設置を行った。なお、上厚真小学校では児童に直接会わずに、説明ビデオを作成して渡し、学校で閲覧してもらった後に測定を開始した。上厚真小学校には3月に再訪問して、児童に改めて説明を行った。2021年度になった4月に、各校で児童への結果の説明、測定機材の撤収、データの回収などを行った。

今冬の最大凍結深は、凍結深計での測定では大成小学校で41cm、更別小学校で26cm、上厚真小学校で30cmとなった。また、最大凍結深計での測定値では、陸別小学校で52cmとなった。

大成小学校では、前年度と同様に校舎の前庭と裏庭の2ヶ所で土壤凍結深の測定を行った。児童たちは、日当たりの悪い裏庭の凍結深がより深くなるだろうと予想していたが、測定結果を見ると、前庭の凍結深が深くなった。児童たちはこの結果には驚いた様子であったが、前庭は風の通り道となり積雪が少ないた

めであるとの説明を聞き、土壤凍結深を決める要素が気温だけではなくことを認識したことであろう。

#### 4. おわりに

これまでの取り組みなどは以下のWebサイトで公開している。  
[http://www.myu.ac.jp/~haradak/frost\\_tube.html](http://www.myu.ac.jp/~haradak/frost_tube.html)

また、このプログラムを通して得られた凍結深のデータは、世界中の他の国のプログラムとともに、University of Arcticの地温観測ネットワークとして認められた。

#### 謝辞

土壤凍結深の測定は、各学校の多くの方々の協力を得ている。ここに感謝の意を表したい。本研究の一部は、北海道大学低温科学研究所共同研究の補助を受けて実施された。

#### 参考文献

- 1) 原田 鉦一郎, 吉川 謙二, 岩花 剛, Julia Stanilovskaya, 澤田 結基, 曾根 敏雄, 2017: 北海道における冬季土壤凍結深の測定を通じたアウトリーチ活動. 北海道の雪氷, 36, 7-8.
- 2) 曾根 敏雄, 原田 鉦一郎, 森 章一, 2016: 多深度地温測定装置を用いた凍結深観測—2016年十勝・釧路地方の例—. 雪氷研究大会(2016・名古屋)講演要旨集, 283.



図1 凍結深計設置校の位置図

1 宮城大学食産業学群

2 アラスカ大学フェアバンクス校

3 Total S.A.

4 福山市立大学

5 北海道大学低温科学研究所

School of Food Industrial Sciences, Miyagi University

University of Alaska Fairbanks

Total S.A.

Fukuyama City University

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

## 北米とスイスの雪氷防災に関するユース教育の比較研究 Comparative Study of Youth Education on Avalanche Disaster Prevention in North America and Switzerland

○上山大器<sup>1</sup>, 尾関俊浩<sup>2</sup>, 榊原健一<sup>3</sup>

Taiki Kamiyama, Toshihiro Ozeki and Ken-ichi Sakakibara

### 1. はじめに

日本の雪氷防災ユース教育はあまり普及していない。これは、実施主体の少なさと、教育内容・方法が確立されていないことに起因するのではないだろうか。本研究では、雪崩教育を主として欧米諸国の雪氷防災ユース教育を比較・考察し、これからの日本における雪氷防災教育の発展の一助になることを目的とする。日本ではそもそも雪氷防災ユース教育はあまり用意されていない。一般登山者・スキーヤー向けのレクリエーションコースに参加することはできるが、メインターゲットとされていない。

調査する諸外国は、雪氷防災教育の発展度、情報量、言語の面などを考慮し、カナダ、アメリカ、スイスとした。また、連邦国家であるカナダ、アメリカ、スイスはより深い情報収集のため、州を選び調査を行った。カナダからはブリティッシュ・コロンビア州、アルバータ州、ケベック州、アメリカからはコロラド州、スイスからはチューリッヒ州、ヴァレー州を選んだ。

### 2. 結果

調査結果を各国ごとにまとめると表1のようになる。

表1 3カ国の雪崩教育の実施期間と対象学年。

国	機関	対象
カナダ	アルバータ州カリキュラム	グレード4
	Avalanche Canada	グレードK~12
	ブリティッシュ・コロンビア州	グレード4~8 (K-4)
	Avalanche Quebec	12~18歳 (グレード6~12)
アメリカ	AdventureSmart	グレード4~6
	KBYG	全年齢
	A3	レクリエーション
	AIARE	レクリエーション
スイス	AAI	10~18歳 (ミドル・ハイスクール)
	CAIC	ミドル・ハイスクール
WSL	全年齢 (初等教育段階以降)	

### 3. 考察

カナダでは幅広い学年 (グレード) を対象にしていることが読み取れる。Avalanche Canada では就学前教育 (グレードK) 段階からグレード12までのスタンダードを用意している。他の機関を見てみると、グレード4~6で雪氷防災ユース教育を行う傾向がある。『気づき』から『自制』への移行、つまり好奇心を抑えるために正しい知識を身に着けるべき年齢であることが示されている。このような考えに基づき、カナダではこの年齢から雪氷防災ユース教育が活発になるのではないだろうか。

アメリカではミドルスクール、ハイスクールを対象にしているプログラムが多い。レクリエーションコースも多いが、その内容から、ある程度の発達段階以上であることが求められている。

スイスでは年齢や対象に対する記載はあまり見られなかった。スイスはWHITE RISKで学生プランを用意していることから、初等・中等教育段階からの使用が想定されていると推測できる。雪氷防災技術が進んでいる割に雪氷防災ユース教育が普及していないように見えるが、これは雪崩が頻発する地域などでは地域、家庭で早い段階から私的な教育を受けていることが想定できる。また、「Go Snow」というウィンタースポーツ支援事業を2014年から立ち上げており、子どもたちはスキー合宿などで雪とかかわる機会が多いことも一因として考えられる。3カ国の雪崩教育を内容によって分類し、2つのタイプに大別した (表2)。

### 4. 提案

3カ国の状況を勘案すると、日本では小学校中・高学年あたりから体系的に雪氷防災教育を実施していくことが望ましいのではないだろうか。本来であれば、就学前から『気づき』の段階に触れさせるべきであるが、日本はまだ雪氷防災ユース教育のしくみが整っていない。現在の中等教育後期段階以降を対象にしたしくみから、徐々に対象年齢を下げていく必要があるのではないか。

雪氷防災教育は学校教育を土台として成り立つと考える。表層雪崩は弱層の破壊により上積雪が滑り落ちることで発生する。このことを理解するためには『力』の概念が必要である。日本でこれらのことを理論として学習するのは中学一年生の『身近な物理現象』の『力の働き』である。つまり、日本においてメカニズム型の雪氷防災ユース教育を行う場合、中学1年生段階以降が望ましい。ユース向けの雪崩教育を実施する場合、小学校中・高学年段階から表2のリスクマネジメント型での実施を開始し、その後中等教育前期段階でメカニズム型の教育に移行していくことが望ましいのではないかと。

### 謝辞

Manuel Genswein氏にはスイスの雪崩防災教育についてアドバイスをいただいた。本研究はJSPS科研費18K02929の助成を受けた。

表2 雪崩教育の主たる内容と、ユース教育のタイプ。

内容		タイプ
(表層) 雪崩の発生機構		メカニズム型
(表層) 雪崩の起こりやすい場所	発生機構を踏まえる	
	地形の特徴のみ	リスクマネジメント型
雪崩に巻き込まれた時の対処法		
雪氷防災情報の入手方法		

1 東京学芸大学大学院

2 北海道教育大学札幌校

3 北海道医療大学

Graduate School of Education, Tokyo Gakugei University  
Hokkaido University of Education Sapporo  
Health Science University of Hokkaido

## コロナ禍オンライン授業にむけた平松式雪の結晶作成実験のインターバル動画撮影 A trial of an online experiment lesson of snow crystal growth using a Hiramatsu-device

○竹内望<sup>1</sup>

Nozomu Takeuchi

### 1. はじめに

千葉大学では、学部学生用授業である生物地球化学実験（地球科学科2年生対象）と教職向け授業である地学基礎実験B（全学部・学年対象）の内容の一つとして、平松式雪の結晶作成装置による雪の結晶の発達過程の観察を毎年開講している。2020年度の授業では、COVID19の感染流行によって、多くの大学同様に千葉大学でも、前期の授業科目は急遽すべてオンラインでの実施となった。そこで従来実施してきた平松式雪の結晶作成装置による雪の結晶作成実験について、オンライン化の可能性を検討することにした。しかし実際には、2020年9月以降、部分的に対面授業（実験科目）が許可されることになったので、オンライン実験を行うことはなかった。実験科目のオンライン実施については、その実施方法や学習効果という意味で非常に課題が多い。今後もオンライン実施を行わざるを得ない状況もあり得ることから、今回検討した内容、特に雪の結晶作成実験のインターバル動画撮影の方法を紹介しながら、オンライン授業の可能性と課題を整理する。また、実際撮影した結晶成長動画から、新たに気が付いた現象についても紹介する。

### 2. 方法

千葉大学の学生実験で使用しているのは、通常の平松式雪の結晶作成装置に一部改良を加えたものである。通常は発泡スチロールの保冷箱にペットボトルを1本セットして結晶成長の観察を行うが、実験では1つの保冷箱に2つのペットボトルをセットして実験を行っている。これは、ペットボトルの1つは結晶成長実験を行うもので、もう1つは温度の垂直分布を測定するためのものである。通常の実験では、実験装置をセットした後、ストップウォッチをスタートさせ、ペットボトル内の結晶の成長位置と形の記録と、ペットボトルの内部の温度分布の変化を10分ごとの記録を行っている。合計2時間の観察を行い、記録結果はレポート課題として、中谷ダイアグラムを使いながらペットボトル内の条件と成長する結晶の形の関係について考察させている。今回は実験のオンライン観察を行うために、この実験をインターバルカメラで撮影し、動画化することにした。インターバルカメラを使ったのは、実験観察時間を短縮するためである。実際の温度測定等の作業がないため、結晶成長は1秒インターバルで撮影して動画とした。撮影に使ったのはGoPro Hero5である。GoProを実験用スタンドに固定し、情報から結晶を撮影した。雪の結晶の成長を鮮明に撮影するために、ペットボトルは黒紙で包み、光ファイバー冷光源を使って左右から光をあてるなどの工夫をおこなった。

### 3. 結果と考察

試行錯誤の結果、約2時間の結晶成長を約2分の映像（画質1920x1080, 29fps, mp4, ファイルサイズ534MB）にすることができた。2分間の映像は、現象を観察するにはちょうど良く、オンライン用には適度なファイルサイズである。一方、所定の授業時間の確保という意味では、インターバル撮影にせず直接の動画にしたほうが良いかもしれない。ただし、結晶観察ができる画質を維持して2時間の撮影をすると、ファイルサイズが膨大になることと、変化のない実験映像に学生の集中力が維持されるかどうかは問題がある。この映像資料をオンライン授業で使用する場合、対面実験で実施している10分毎の温度測定等はできないので、実験の観察事項やレポート課題は別途設定する必要がある。また、対面実験では毎回1割程度の学生が、結晶がうまく発達しないなどの失敗が起き、失敗例からも実験条件の設定調整等の難しさ等を体験から学ぶことができるが、オンライン実験ではそのような想定外事象についての経験ができない。一方、映像資料からは観察からはできない測定や観察を行うことができる。結晶の発達位置や成長速度は、画像上で計測することによって、より正確に求めることができる。また、発達過程をくり返し自由な再生速度で観察できることから、実時間では気が付かなかった現象に気づくこともできる。例えば、理由ははっきりとはまだわからないが、糸上で結晶が大きく成長する位置は、必ず上下の2か所に存在するようにみえる。学生実験は対面で実施することが最も学びがあると考えられるが、事前現象の観察力や解析力の習得の目的を限定にすれば、雪の結晶の成長映像も利用できる可能性もある。

1 千葉大学大学院理学研究院

Graduate School of Science, Chiba University, Japan

## 野谷荘司山で 2021 年に大規模雪崩を引き起こした積雪状態の推定 Estimating snowpack induced an extensive avalanche at Mt. Nodanishoji in 2021

○勝山祐太<sup>1</sup>, 勝島隆史<sup>1</sup>, 竹内由香里<sup>1</sup>

Yuta Katsuyama, Takafumi Katsushima and Yukari Takeuchi

### 1. はじめに

2021年1月10日午前2時半頃に岐阜県白川村野谷荘司山(標高 1797 m)で大規模な乾雪表層雪崩が発生し、倒木被害などが発生した。白川村における気象庁アメダス観測では、1月9日に同月の観測史上第3位となる日降水量 61 mm を観測しており、野谷荘司山においても極端な大雪となっていたと推測される。この雪崩を引き起こすに至った原因を明らかにするために、気象庁メソスケールモデル(MSM)の気象データを使用して発生区の積雪状態の推定を行った。

### 2. データと方法

積雪変質モデル SNOWPACK に水平解像度 5km の MSM データを与えることで積雪状態の推定を行う。野谷荘司山は、MSM 地形においては白山の北東斜面に相当する場所であることから、白山の北東方向に標高 1652 m, 1487 m, 1081 m の3つの MSM グリッド地点について SNOWPACK の計算を行う。下向き長波放射については、MSM データの雲量から推定した(Kominami *et al.*, 2012)。標高 1652 m と 1487 m 地点については、下向き短波放射を今回の発生区の斜面の向き(東北東)に対応するように補正した。その他の SNOWPACK モデルの設定は、Katsuyama *et al.* (2020) と同様にした。

### 3. 結果と考察

雪崩発生時刻における雪質と積雪安定度(SI)の鉛直分布を図1に示す。堆積区に対応する標高 1081 m 地点では、積雪深 2 m と推定された。後日の現地調査により、堆積区の森林内の積雪深は約 1.7 m と推測され(竹内ら, 2021)、森林の降雪遮断効果を考慮するとモデル計算は現地積雪状態とおおよそ対応していると考えられる。積雪深の標高依存性は非常に強く、標高 1652 m 地点では堆積区の2倍の積雪深と推定された。一方で、SI が最も小さくなる深さは、いずれの地点においても雪崩発生3日前からの新雪層に対応した位置となった。仮に、これに対応する上載積雪が雪崩となり、同じ量の雪を巻き込みつつ流下したとすると、標高 1652 m と 1487 m いずれの地

点の場合においても雪崩の総量は $\sim 10^5$  t と計算され、現地調査によるデブリ総量の結果(勝島ら, 2021)と一致した。なお、発生区の面積と流下範囲の合計は $6.9 \times 10^5$  m<sup>2</sup>とした。また、標高 1487 m 地点では、こしもぎらめ雪に伴う局所的に SI の低い積雪層が再現された(図1b 右矢印)。しかし、1月15日の目視による現地調査によると、本件の雪崩以外にも多数の雪崩が発生しており、それらは斜面の向きに依らなかった(日本雪崩ネットワーク, 2021)ことから、こしもぎらめ雪による弱層の可能性は低いと考えられる。

### 4. まとめ

気象庁 MSM データを SNOWPACK モデルに入力することで、雪崩発生時の積雪状態を推定した。その結果、雪崩発生3日前からの大雪により発生した雪崩であることが示唆された。

### 参考文献

- 1) Kominami, Y., H. Ohno and O. Nagata, 2012: Estimating downward long-wave radiation at the surface from MSM-GPV data (2), ISAM2012.
- 2) Katsuyama, Y., M. Inatsu and T. Shirakawa, 2020: Response of snowpack to +2°C global warming in Hokkaido, Japan. *J. Glaciol.*, **66**, 83-96.
- 3) 竹内由香里, 勝山祐太, 勝島隆史, 安達聖, 荒川逸人, 川島克久, 2021: 岐阜県野谷荘司山で2021年1月に発生した乾雪表層雪崩による樹木の折損状況と雪崩速度の推定, 雪氷研究大会(2021・千葉-オンライン)
- 4) 勝島隆史, 安達聖, 荒川逸人, 勝山祐太, 竹内由香里, 川島克久, 2021: 野谷荘司山で 2021 年 1 月に発生した大規模な乾雪表層雪崩—雪崩の堆積量と到達範囲—, 雪氷北信越, **41**(印刷中)
- 5) 日本雪崩ネットワーク, 2021, <https://nadare.jp>

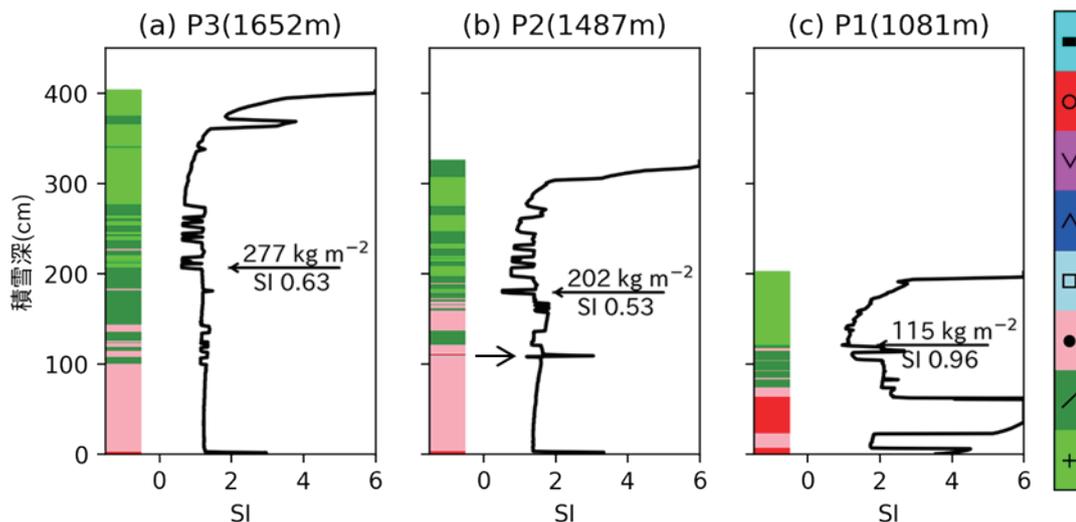


図1 SNOWPACK モデルで再現された雪崩発生時刻における標高 (a) 1652 m, (b) 1487 m, (c) 1081 m 地点の雪質と積雪安定度(SI)の鉛直分布。左矢印は最小の SI となる位置を表し、その値を矢印下部に記し、上載積雪荷重を矢印上部に記した。

## 岐阜県野谷荘司山で2021年1月に発生した乾雪表層雪崩による 樹木の折損状況と雪崩速度の推定

### The extent of damage to a forest by the dry snow avalanche and estimation of the avalanche velocity on Mt. Nodanishoji, Gifu in January, 2021

○竹内由香里<sup>1</sup>, 勝島隆史<sup>1</sup>, 勝山祐太<sup>1</sup>, 荒川逸人<sup>2</sup>, 安達聖<sup>2</sup>, 河島克久<sup>3</sup>

Yukari Takeuchi, Takafumi Katsushima, Yuta Katsuyama, Hayato Arakawa, Satoru Adachi and Katsuhisa Kawashima

#### 1. はじめに

岐阜県の野谷荘司山において2021年1月10日2時30分頃(2月18日白川村発表資料)に大規模な雪崩が発生した。1月15日に確認された破断面(日本雪崩ネットワーク, 2021)から, 雪崩は野谷荘司山山頂に近い稜線直下(標高1700m付近)の東~北東向き斜面で発生した面発生乾雪表層雪崩と考えられる。雪崩は水平距離で約2800m, 標高差約1000mを流下し, 標高約710~720mまで到達し, 道路周辺の構造物や電柱, 多数の樹木が損壊した(竹内ら, 2021)(図1)。雪崩の要因は, 1月7日から続いた強い降雪で上載荷重が急増して積雪が不安定になったことと推定された(勝山ら, 2021)。また, 堆積区の面積は30ha以上, 雪崩の堆積量は22万t以上と算出され, 非常に大規模な雪崩であることがわかった(勝島ら, 2021)。本発表では, 雪崩調査の続報として, 樹木の折損状況にもとづいた雪崩の流下状況や速度について報告する。

#### 2. 方法

樹木の折損状況の調査は, 融雪が進んで積雪に埋まった折損樹木が現れた後(4/6-8, 4/22-24)に行なった。雪崩堆積区末端に近いスギ林内に幅10m, 雪崩の進行方向に長さ約160mの調査範囲を設定し, 範囲内の全樹木(247本)の位置, 樹種, 折損状況, 樹高, 枝折高, 胸高直径, 幹折高とその直径, 倒れ方位などを測定した。雪崩速度を推定するために, スギ立木のヤング率も測定し, 澤田(1985)の関係式を用いてヤング率から曲げ破壊強度を求めた。

雪崩の速度は, 樹幹が曲げモーメントを受けたときに生じる曲げ応力が, 樹木の曲げ破壊強度を超えると幹の折損が生じるものとして, 折損状況の実測値にもとづいて竹内ら(2010)と同様の方法で計算した。

#### 3. 結果と考察

調査した樹木のうち198本(80%)はスギ, 他はミズナラ, シラカバなどの広葉樹であり, 折損状況は表1に示す。幹破断や根返りせず直立したスギには, 雪崩で樹皮が削剥されたものが見られた。削剥部分の下と上の高さ(平均で1.7mと3.8m)はそれぞれ積雪深と流れ層の高さを表し, 両値から流れ層の厚さは約2.1mと考えた。調査範囲の雪煙層の高さは, 枝が折れた高さ(13.5m)と推定した。これらに基づいて, 幹破断したスギの曲げ応力から推定した雪崩の速度を図2に×で示した。幹破断しなかったスギについても, 地際で折れるのに必要な雪崩の速度を計算した(○)。雪崩はスギ林内を実線以上の速度で約70m, 破線以下の速度で約60m流下し, 林内で停止したと推測できる。

表1 雪崩による樹木の折損状況

	被害なし	枝折	傾木	根返	幹折	幹破断		合計(本)
						根株	上部	
スギ	23	43	10	79	1	27	15	198
広葉樹	15	4	0	9	6	4	11	49



図1 雪崩で倒壊したスギ

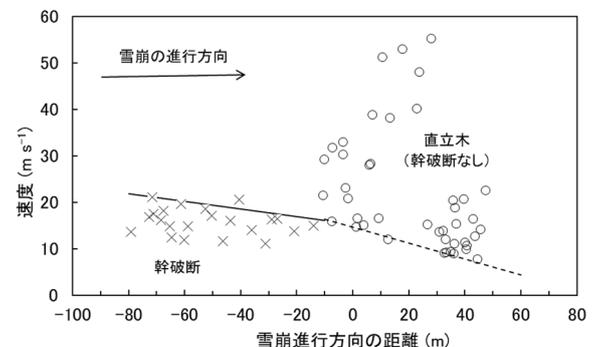


図2 雪崩速度の推定

1 森林総合研究所十日町試験地

2 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

3 新潟大学災害・復興科学研究所

Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute  
Snow and Ice Research Center, National Institute for Earth Science and Disaster Resilience  
Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University

## スキー場を対象とした面的風況分布・吹きだまり分布の推定と一冬期にわたる観測

## Wind and snowdrift map and its whole winter observation for ski resort

○田邊章洋<sup>1</sup>, 伊藤陽一<sup>1</sup>, 山口悟<sup>1</sup>, 齋藤佳彦<sup>2</sup>, イセンコ エフゲーニー<sup>2</sup>, 西村浩一<sup>2</sup>  
Takahiro Tanabe, Yoichi Ito, Satoru Yamaguchi, Yoshihiko Saito, Evgeny Isenko and Koichi Nishimura

## 1. はじめに

ニセコエリアでは、近年スキー場外のバックカントリーにおけるパウダースノーを求めて国内外から多くのスキー・スノーボード客が訪れる聖地となっており、こうしたバックカントリーを目的とする人々の安全を確保するために独自の“ニセコルール”が設けられ、冬季は日々ニセコなだれ情報が発信されている (<http://niseko.nadare.info/>)。ニセコなだれ情報では、雪崩発生危険度の判断材料の一つとして吹きだまりの安定度に言及している。吹きだまりの安定度は吹きだまりが形成されてからの経過時間等で判断され、安定化していない吹きだまりへの多量の降雪や外部刺激は、雪崩のトリガーの一つとして考えられている。そこで我々は、このような山域における雪崩発生危険度の指標として、いどこにどれだけ雪が吹きだまるか、を推定する手法を開発し、ニセコエリアを対象に一冬期を通じた観測を行い、また、自治体やスキー場関係者と連携することで実証実験を行っている。本発表では観測と推定手法について報告する。

## 2. 手法

防災科学技術研究所は地元自治体、スキー場関係者から構成されるニセコアンヌプリ地区なだれ事故防止対策協議会と共同で、ニセコエリアのスキー場 6 か所に風向風速計を設置している。これらのデータは関係者のみに閉じた形で公開しており、我々はこの地点データからニセコアンヌプリ全域の風況分布を準リアルタイムで推定する手法を開発した。風況推定を行うために、スキー場全域に対して 16 方位の流入条件を考慮した乱流計算を実施し、各風向に対する風速分布を予め計算する。これらの分布を地点データと組み合わせることで、スキー場全域の風況推定を行い、推定された風況分布から各場所（セル）における風向風速が求められる。吹雪輸送量を仮定することで、セルに流入、流出する雪の質量が推定され、これらの差分から各場所の堆積と浸食を表す面的な分布を計算する。

## 3. 結果

風況推定と吹きだまり推定の 2 つの面的分布を関係者に公開し、表示方法や使い勝手などについて現場からのフィードバックを得た (図 1)。また、20-21 冬季にニセコスキー場エリアで実施した一冬期にわたる観測で得られた吹きだまり情報と計算結果の比較や、観測点の風向風速実観測データと推定値を比較することで、手法の再現性を確認した。発表ではこれらの結果について報告する予定である。

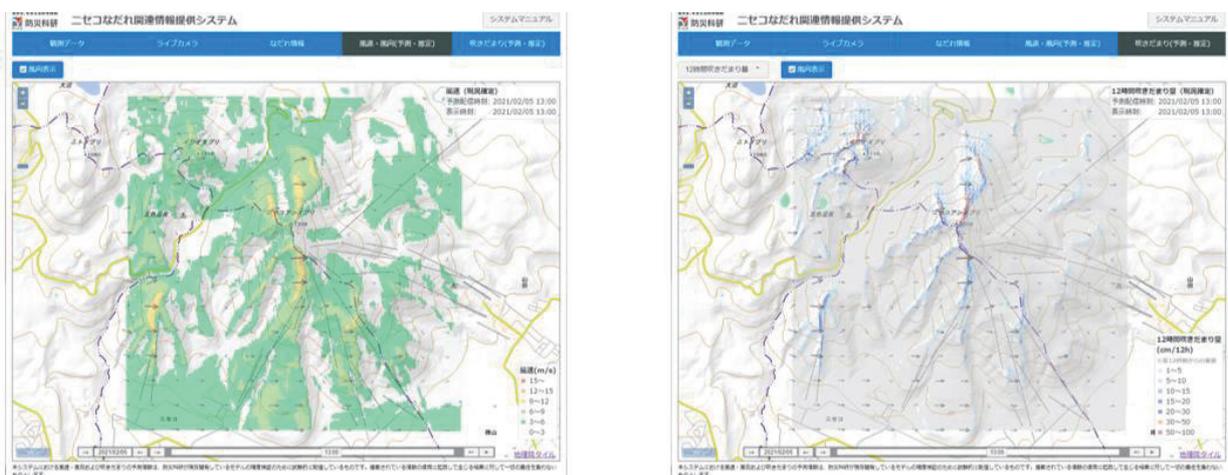


図 1 ニセコエリアを対象とした (左) 推定風向風速分布と (右) 推定吹きだまり分布。

1 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター  
2 (株) 雪研スノーイーターズ

Snow and Ice Research Center, NIED  
Yukiken Snow-eaters Co., Ltd

## UAV 空撮測量による全層雪崩堆積深分布の計測

## Measurement of deposition depth of full-depth avalanche using UAV

○安達聖<sup>1</sup>, 勝島隆史<sup>2</sup>, 荒川逸人<sup>1</sup>

Satoru Adachi, Takafumi Katsushima and Hayato Arakawa

## 1. はじめに

近年, 無人航空機 (UAV) は雪氷研究においても積雪深分布調査<sup>1)</sup>や広域な雪崩調査<sup>2)</sup>などに使用されており, その有用性が示されている. しかし, UAV 空撮測量より得られた数値表層モデル (DSM) から正確な積雪/堆積深を得るためには, 多数の標定点を設置したり, 事前に測量した基準点が必要であったりと未知の現場での運用には相応の準備が必要である. そこで, 本研究では既知点がなくとも高精度な DSM が取得可能な後処理キネマティック (PPK) の精度検証結果と, 雪崩発生直後の PPK-DSM から堆積深分布を求めた結果を報告する.

## 2. 手法

雪崩観測サイトには斜面を監視するための WEB カメラが設置されており, 斜面の様子は 1 時間毎に記録されている. 毎朝定時に確認することで前日発生した雪崩を確認することができる. そのため, 天候にも左右されるが, 雪崩発生からその翌日には UAV による写真測量を行うことができる. 2020/2021 冬期では 3 度の雪崩が確認された. UAV には Phantom 4 RTK を使用し, 数値表層モデルは空撮写真の持つ位置情報に PPK 処理を行ったのち, Pix4D mapper を用いて作成した. 積雪期の DSM と無積期の基準 DSM の差を求めることにより, 雪崩観測サイトの積雪深分布が得られた. 基準 DSM として, 2021 年 4 月 28 日の空撮結果を使用した. 雪崩観測サイトに設置された積雪深計と DSM を比較すると, DSM より得られた積雪深が 7 cm だけ大きかった.

## 3. 結果

図 1 は 2021 年 2 月 12 日に発生した全層雪崩を翌日 2 月 13 日に UAV 空撮を行い作成したオルソモザイク画像である. 図 2 は図 1 に破線で示した全層雪崩の路上の堆積深プロファイルである. A~D はそれぞれ, A: 上部破断面, B: 下部破断面, C: 堆積区の上端, D: 堆積区の下端であると考えられる. 周辺の積雪深は約 2 m であったが, A 地点では雪底が大きく成長していたため積雪深さは 3.7m と周囲よりも高くなっている. また, A-B 区間では基準よりも 1 m 程度低くなっているが, 灌木の繁茂の影響と考えられる. C-D 区間と周囲の積雪状況からデブリの高さは 2 m 程度と考えられる.

## 4. まとめ

PPK を行うことにより, 標定点や基地点がなくとも 7 cm 程度の誤差で積雪深分布が得られることが示された. また, DSM からはオルソモザイク画像などの画像からは判断が難しい下部破

断面を確認できることが示された. 不明瞭な破断面を持つ他の雪崩においても PPK-DSM を用いることで正確な破断面を得ることができるかと期待できる.

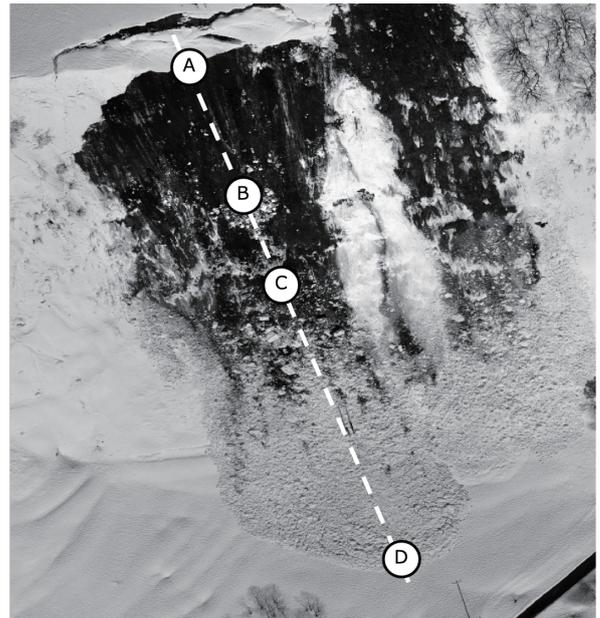


図 1 2021 年 2 月 12 日に発生した全層雪崩のオルソモザイク画像

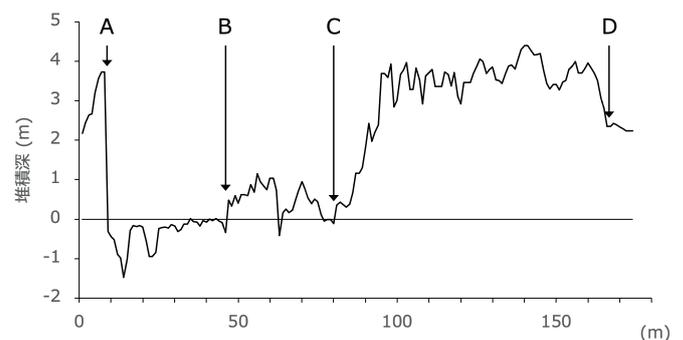


図 2 DSM より得られた図 1 破線上の堆積深プロファイル

## 参考文献

- 1) 小花和ら 2016: 小型 UAV を用いた積雪分布の 3 次元計測. 雪氷, 78 (5), 317-328
- 2) 勝島ら 2021: 野谷荘司山で発生した乾雪表層雪崩における堆積深分布の特徴, 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン) 講演要旨集 (印刷中)

1 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター  
2 森林総合研究所十日町試験地

Snow and Ice Research Center, NIED  
Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute

## 野谷荘司山で発生した乾雪表層雪崩における堆積深分布の特徴 Characteristics of deposition depth in dry snow slab avalanche at Mt. Nodanishoji

○勝島隆史<sup>1</sup>, 安達聖<sup>2</sup>, 荒川逸人<sup>2</sup>, 勝山祐太<sup>1</sup>, 竹内由香里<sup>1</sup>, 河島克久<sup>3</sup>

Takafumi Katsushima, Satoru Adachi, Hayato Arakawa, Yuta Katsuyama, Yukari Takeuchi and Katsuhisa Kawashima

### 1. はじめに

雪崩の堆積状況や到達範囲を詳細に把握することは雪崩の動力学的理解に繋がることから、いくつかの雪崩事例では堆積状況の詳細な調査がなされてきた。岐阜県白川村野谷荘司山で2021年1月10日に発生した大規模な乾雪表層雪崩においては、無人航空機(UAV)を用いた写真測量と公共の航空レーザ測量による標高データとを組み合わせた手法により雪崩の堆積深の分布を推定し、2000年に左俣谷で発生した国内最大規模の雪崩に次ぐ規模であることが明らかになった(勝島ら, 2021)。本研究では、これに引き続き当該事例における堆積深の分布と地形との関係について解析を行った。

### 2. 手法

UAVによる堆積区の写真測量を、融雪により積雪層内のデブリが積雪表面に出現する直前の3月18日に行った。Phantom 4 RTKにより空撮し、RTKLIBを用いて後処理キネマティック(PPK)により各写真の撮影時のUAVの位置を求め、Pix4Dmapperを用いて10cmメッシュの地上の数値表層モデル(DSM)を作成した。そして、UAVによるDSMと国土地理院の航空レーザ測量による5mメッシュ数値標高モデル(DEM)との差分から、堆積区の積雪深の分布を求めた。また、3月17, 18日にデブリの断面およびスノーサンプラーにより採取した積雪全層のコアからデブリを除いた自然積雪の層厚を計測した。そして、自然積雪の層厚が堆積区全体に一律に分布すると仮定して、得られた積雪深の分布から自然積雪の層厚を差し引くことで堆積深を推定した。堆積深の分布と地形の解析にあたり、河道を中心とした幅30mの横断面の堆積深の平均値を10m間隔で求め、また、各横断面の標高の平均値から流下方向に対する平均傾斜角を求めた。

### 3. 結果と考察

図1に、推定した堆積深の分布を示す。図より、谷筋の河道に沿った箇所では堆積深は大きく、斜面で小さくなっていった。測量範囲の最上流部において堆積深が最も大きくなっており、堆積は更に上流の位置から開始したと推測される。また、雪崩の到達範囲内の堆積深および計測したデブリの乾き密度の平均値 $530\text{kg/m}^3$ より、今回の雪崩の堆積量の総量は少なくとも61万 $\text{m}^3$ (32万t)以上と推定される。今回の解析では、UAVの位置の導出にあたりPPKを適用し、また、電子基準点の日々の座標値の変動を考慮した結果、推定した堆積量は勝島ら(2021)における初期の解析より大きくなっている。図2に、河道を中心とした横断面の平均堆積深と傾斜角の、流下方向への変化を示す。堆積深は流下方向に減少しており、上流部で約7m、中流部で約5m、末端で1m以下となっていた。傾斜は、上流部で $20^\circ$ 程度であったが、中流部では多数の堰堤が設置されており、部分的に $10^\circ$ 以下の箇所が多く存在していた。過去の航空レーザ測量による

堆積深の計測事例では、斜面の傾斜角が $21\text{--}33^\circ$ の範囲において、傾斜角の減少とともに堆積深が増加することが示されている(Sovilla et al., 2010)。今回の測量範囲の走路の傾斜角は、先行研究で堆積深と傾斜角の関係が見られた傾斜角の範囲外にあたる。そのため、流下とともに、また、傾斜角の減少とともに堆積深が減少する傾向は、緩やかな堆積区に特有な傾向の可能性もある。  
参考文献

- 1) 勝島ら 2021: 岐阜県野谷荘司山で2021年1月に発生した大規模な乾雪表層雪崩—雪崩の堆積量と到達範囲—。雪氷北信越, (印刷中)。
- 2) Sovilla, B., McElwaine, J. N., Schaer, M., and Vallet, J. 2010: Variation of deposition depth with slope angle in snow avalanches: Measurements from Vallée de la Sionne, *J. Geophys. Res.*, **115**, F02016, doi:10.1029/2009JF001390.

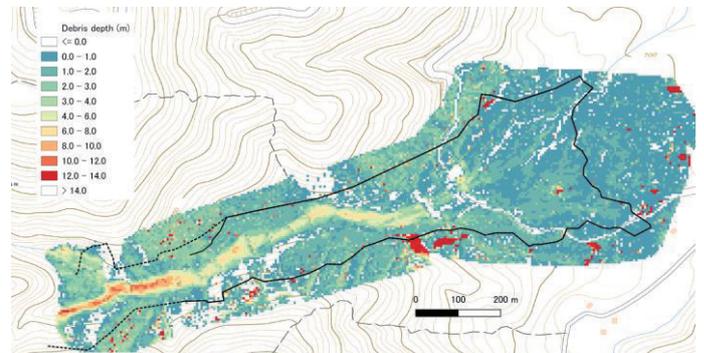


図1 UAVを用いた写真測量により計測した雪崩堆積区の堆積深分布と、雪崩の到達範囲(黒線)。背景の地図に、国土地理院の標準地図を使用した。

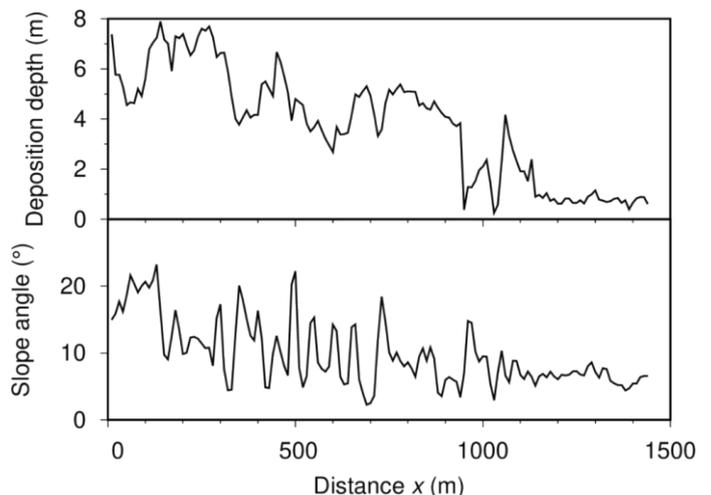


図2 河道を中心とした横断面の平均堆積深と傾斜角の、流下方向への変化。x軸は測量範囲の最上流部を起点とした距離を示す。

1 森林総合研究所十日町試験地

2 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

3 新潟大学災害・復興科学研究所

Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute  
Snow and Ice Research Center, NIED  
Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University

## 雲粒付着の少ない降雪結晶による乾雪表層雪崩事例について A Case of Dry-Snow Surface Avalanches due to Non-Rimed Precipitation Particles

○松下拓樹<sup>1</sup>  
Hiroyuki Matsushita

### 1. はじめに

乾雪表層雪崩の発生要因には、降雪結晶の種類により積雪内に形成される比較的短期間(数日)に限り脆弱性が維持される非持続型弱層(non-persistent weak layer)がある<sup>1)</sup>。本稿では、このような降雪結晶による雪崩への対策や対応に資することを目的として、これまでに得られている知見の整理を行い、2021年3月に北海道で発生した雪崩事例との違いについて報告する。

### 2. 降雪結晶による雪崩発生の主な既往知見

弱層形成には、雲粒付着の少ない降雪結晶が関与することが古くから指摘されており<sup>2)4)</sup>、降雪結晶弱層による雪崩発生箇所の積雪断面観測が行われている<sup>5)6)</sup>。特に、大型で雲粒付着の少ない板状結晶により形成された積雪層は、他の新雪層よりも脆弱な状態が長期間継続する<sup>6)</sup>。最近では、2014年2月の関東甲信や東北地方において、南岸低気圧による多量降雪時に各地で多数の雪崩が発生したが、このとき雲粒付着の少ない針状、柱状、板状などの降雪結晶が弱層として関与した可能性が指摘されている<sup>7)9)</sup>。このような雲粒付着の少ない降雪結晶は、温暖前線や低気圧前面等に形成される層状雲から降ることが多い<sup>10)11)</sup>。

以上を整理すると、低気圧前面の温暖前線等に伴い雲粒付着の少ない降雪結晶が降り積もり、その上に低気圧通過に伴う対流雲や冬型気圧配置によるまとまった雪が積もり、雲粒付着の少ない降雪結晶が弱層として作用して乾雪表層雪崩が発生する、降雪サイクルと雪崩発生機構の関係が考えられる<sup>6)10)</sup>。

### 3. 2021年3月に北海道で発生した雪崩事例

2021年3月2日、北海道の道央圏においてほぼ同時刻に複数箇所でも雪崩が発生した<sup>12)</sup>。このとき、東進する低気圧の中心が日本海から東北部にあり、温暖前線が北海道の南岸に位置していた。図1は、雪崩発生箇所周辺の気象庁 AMeDAS における降雪量(1時間ごとの積雪深差)の累計値の推移である。降り始めから雪崩発生時刻(推定)までの降雪量は16~35cmであり、特に20cm以下の普段より少ない降雪量で雪崩が発生した箇所があった。この日、札幌市で撮影された降雪結晶の写真(図2)から、板状(図2b)や鞘状または針状(図2c)などの雲粒付着の少ない降雪結晶が確認できる。このような降雪結晶は、雪崩発生箇所でも確認され、道央の広い範囲で雲粒付着の少ない降雪結晶による脆弱な積雪が形成されたと考えられる。

2.で述べた降雪結晶による雪崩は、この降雪結晶が積雪内で弱層として作用し、その後の降雪による上載積雪によって斜面積雪が不安定化または弱層の破壊が生じて発生する雪崩である。これに対して、今回北海道で発生した雪崩は、温暖前線に伴う降雪という点は共通するが、雲粒付着の少ない降雪結晶による積雪層そのものが崩れた点で、既往研究の雪崩と異なる。

ここで、たかだか20cm程度の新雪層が崩れるのかという疑問が生じる。雲粒付着の少ない板状結晶により形成された積雪層の密度と硬度の時間変化に関する現地観測結果<sup>13)</sup>に基づいて、降り始めから雪崩発生までの降雪量を試算<sup>14)</sup>したところ、15~20cm程度の新雪層でも雪崩発生の可能性がある結果となった。

### 4. おわりに

降雪結晶による雪崩は、それほど頻繁に発生するわけではないと考えられるが、効果的かつ効率的な対策や対応を行うためには、降雪結晶による弱層が広域に形成される傾向があるため、雪崩発生の可能性の高い箇所の絞り込み(斜面方位や植生などの条件による特定)を可能とする知見が必要である。また今回の事例のように、普段より少ない降雪量で雪崩が発生する場合があるので、発生条件や脆弱性の持続(斜面積雪の安定化)に関するさらなる客観的かつ実用的な知見が必要である。

### 参考文献

- 1) Jamieson, J. B., 1995: Ph.D. Thesis, University of Calgary, 255pp.
- 2) 四手井綱英, 1953: 雪氷, **14**(4), 116-119.
- 3) LaChapelle, E. R., 1967: *Physics of Snow and Ice*, **1**(2), 1169-1175.
- 4) 秋田谷英次, 清水 弘, 1987: 低温科学, **A46**, 67-75.
- 5) Bair, E. H., 2011: Ph.D. Thesis, University of California, 183pp.
- 6) 池田慎二, 2015: 雪氷, **77**(1), 17-35.
- 7) 和泉 薫, 河島克久, 伊豫部 勉, 松元高峰, 2014: 科研費研究成果報告書(特別研究促進費 課題番号 25900003), 111-118.
- 8) 石坂雅昭ら, 2015: 雪氷, **77**(4), 285-302.
- 9) 中村一樹, 上石 勲, 阿部 修 2014: 日本雪工学会誌, **30**(2), 106-113.
- 10) 中村一樹, 佐藤友徳, 秋田谷英次, 2009: 北海道の雪氷, **32**, 14-17.
- 11) 秋田谷英次, 中村一樹, 2013: 北海道の雪氷, **32**, 10-13.
- 12) 松下拓樹, 2021: 北海道の雪氷, **40**, 投稿中.
- 13) 松下拓樹ら, 2016: 寒地技術論文・報告集, **32**, 120-125.
- 14) Matsushita, H., et al., 2018: *Proc. Int'l Snow Sci. Work.*, 1001-1005.

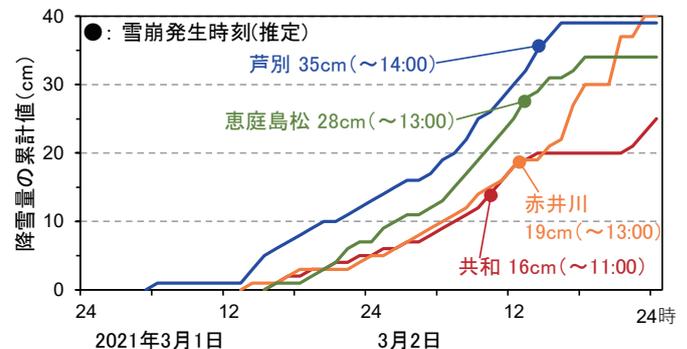


図1 雪崩発生箇所周辺の降雪量の推移(2021年3月1~2日)

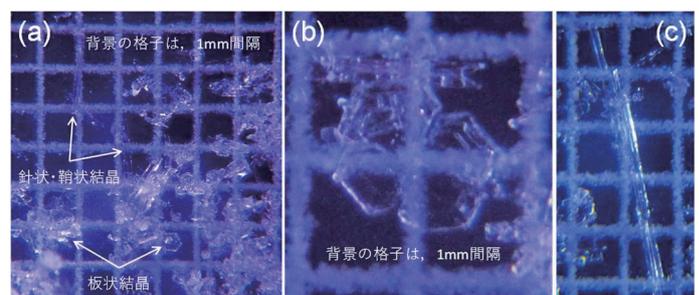


図2 降雪結晶の例 (2021年3月2日24時頃, 札幌市清田区)

<sup>1</sup> 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所

Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI

# 初冬における気象条件と低木広葉樹の倒伏とがグライドと全層雪崩発生とに及ぼす影響 Influences of weather conditions and tipping of deciduous shrubs in early winter on snow glide and glide-avalanche release

○松元高峰<sup>1</sup>, 河島克久<sup>1</sup>, 勝島隆史<sup>2</sup>, 宮下彩奈<sup>3</sup>, 小田憲一<sup>4</sup>

Takane Matsumoto, Katsuhisa Kawashima, Takafumi Katsushima, Ayana Miyashita and Kenichi Oda

## 1. はじめに

低木広葉樹やササの生育する急斜面における積雪グライドや全層雪崩の発生には、「初雪が大量に積もってそのまま根雪になるかどうか」が、植生の倒伏過程を通じて大きな影響を及ぼすということが知られている (例えば秋田谷ら, 2002). しかし, 実際の観測データに基づいてこの過程を議論した例は少ない.

本研究では, 新潟県魚沼市大白川の山地斜面において, 過去7冬季と4冬季にわたって観測してきた積雪グライド量と低木の樹幹傾斜との時間変化の特徴を, 降積雪状況などと比較することで, 初冬 (初雪前後) における気象条件と低木の倒伏とがグライドや全層雪崩の発生に及ぼす影響について議論を行なう.

## 2. 研究方法

現地観測は, 新潟県魚沼市大白川の破間川左岸に面した斜面で実施した. この斜面は主に匍匐した樹形をもつ低木広葉樹に覆われており, 斜面上部の傾斜は30~45°程度である. この斜面では積雪グライド量の観測を2014/15年冬季から実施しており, 2017/18年冬季以降には, 稜線から約10 m下方に生えているヤマモミジなどに自記傾斜計を設置して樹幹傾斜の変化を計測している. 同じ斜面では, ほかに低木広葉樹の幹の変形や地温などの計測と積雪観測を, また, 破間川右岸の平坦地に設けた観測露場では, 気象・積雪観測を実施している.

## 3. 結果と考察

過去7冬季のうち, 積雪グライドが進行して全層雪崩の発生に至ったのは, 14/15年, 17/18年, 18/19年, 20/21年の4冬季であった. 各冬季の大白川観測露場における積雪深と気温, また雪崩斜面上部における積雪グライド量とヤマモミジの樹幹傾斜の時間変化を図1に示す. なお, 樹幹傾斜は幹が鉛直上向きするとき0°, 水平に倒れて90°, そして地表面傾斜が約40°なので, 地表まで完全に倒伏すると130°前後となる.

積雪深とその推移には4冬季でそれほど大きな差はないが,

グライドの推移と全層雪崩の発生日には年によって際だった違いが見られる. 14/15年冬季は, 早くも12月中からグライドが進行し, 2月に入って急激に活発化すると5日に雪崩が発生した. 似た挙動を示したのが18/19年冬季で, 1月初旬から始まったグライドが3月上旬に活発化して15日に雪崩が発生した. これに対して20/21年冬季の場合は, 2月10日からいきなり急速なグライドが始まったかと思うと, 5日後に一気に雪崩の発生にまで至った. 逆に17/18年冬季は, 1月下旬ころから徐々にグライドが始まり, 急激な活発化の起こらないまま4月5日になって雪崩が発生した.

このような積雪動態の違いは, 主に初冬における低木の倒伏状況の違いに起因するものと考えられる (松元ら, 2021). すなわち, 20/21年冬季では, 最初の大雪で低木が一気に埋雪して地表面近くまで倒伏してしまったのに対して, 17/18年, 18/19年冬季では積雪深が0.5~1 mに達してから埋雪・倒伏が始まっている. この場合には, グライドが少しずつ進み始めてから, 幹や枝の「抜け出し」過程 (遠藤・秋田谷, 1977) を経た上で, ようやく地表面付近まで倒伏することになるであろう. なお, 17/18年冬季の場合, 12月中旬に大雪があったにも関わらず一気に倒伏が進まなかったのは, 降雪時の風速が大きく, 樹冠に着雪しにくい条件だったためと考えられる (松元ら, 2021).

また, 初冬から少しずつグライドが進行した14/15年, 18/19年冬季に共通しているのは, 1月の段階で積雪底部に硬度の小さなざらめ雪層があったことである. とくに14/15年冬季の場合は, 大雪直後の12月11日に日雨量46.3 mmという降雨が発生しており, このときに積雪が一気にざらめ化したと考えられる.

以上のように, 積雪深の推移には違いがない場合でも, 初冬における気象条件の差に起因する低木広葉樹の倒伏状況と積雪底部の雪質との違いが, グライドの発生とその推移, そして全層雪崩の発生時期に大きな違いをもたらすことが明らかとなった.

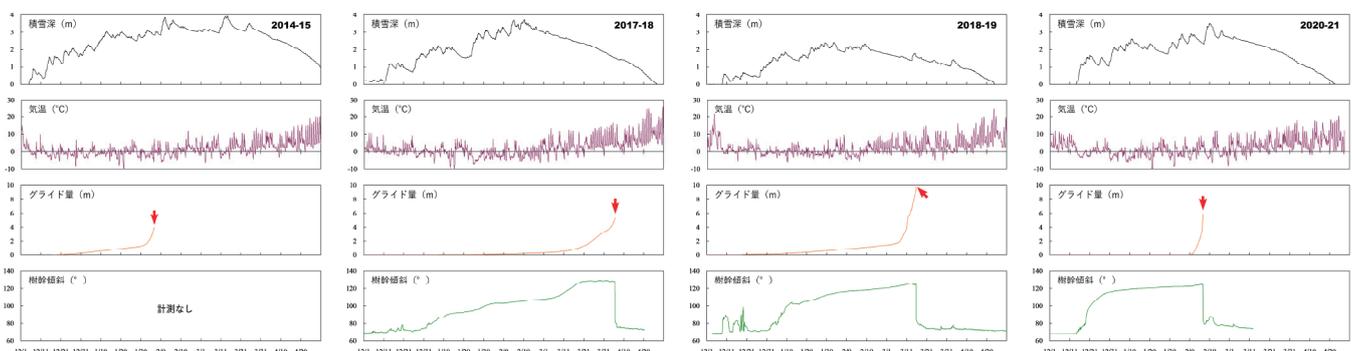


図1 2014/15年冬季, 2017/18年冬季, 2018/19年冬季, 2020/21年冬季における, 大白川観測露場での積雪深・気温と, 雪崩斜面上部でのグライド量・ヤマモミジの樹幹傾斜の時間変化. 矢印は全層雪崩の発生日を示す.

1 新潟大学災害・復興科学研究所  
2 森林総合研究所十日町試験地  
3 森林総合研究所  
4 日本大学理工学部

Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University  
Tokamachi Experimental Station, Forestry and Forest Production Research Institute  
Forestry and Forest Production Research Institute  
College of Science and Technology, Nihon University

# 中山間地で集落の孤立が発生した令和3年1月の富山における大雪 Heavy snowfall in Toyama in January 2021 caused isolated communities in the semi-mountainous area

○杉浦幸之助<sup>1</sup>, 堀田裕弘<sup>2</sup>  
Konosuke Sugiura and Yuukou Horita

## 1. はじめに

富山県は地震や台風が比較的少ないことから、自然災害に強い県といわれている。しかし一方で、令和3年1月の大雪は車の立ち往生を誘発し、また多地点で孤立集落が発生するなど、市民生活に大きな悪影響を及ぼすこととなった。このような雪氷に起因する災害は毎年のように発生しているのが現状である。

富山県の中山間地域に通信インフラを整備して各種センサを設置し、災害リスクの予測、森林資源の管理など、地域の安全・安心および環境保全に貢献するシステムを構築するプロジェクトが令和2年度から開始した。今回はこの中山間地域の安全安心・環境保全の実現-地球科学・社会基盤工学・材料工学の連携プロジェクトの一環として、積雪により集落が孤立するリスク評価に向けたIoT気象観測装置の設置と気象情報の受信を試みたので報告する。

## 2. 方法

中山間地の富山県氷見市老谷地区は、2021年冬に多点で発生した孤立集落の中で、最も解消が遅れた地域である。この氷見市老谷地区および同じ中山間地である富山市八尾地区に、複数の気象センサーとIoTクラウドシステムからなる気象観測装置を設置した(図1)。気象要素は、温度、湿度、風向、風速、日射、気圧、雨量、土壌水分である。各センサー情報は1分毎にELTRES(LPWA規格:一方向通信)でクラウドへ送信され、データが通年で蓄積されている。

また、富山県全域の気象情報を迅速に把握するため、気象業務支援センターを通じて提供される気象庁の解析積雪深・解析降雪量と毎時大気解析GPV(風のU成分、V成分及び気温)の1時間毎の配信データをSFTPで受信し、データを蓄積している。この配信データは1時間毎の約5km四方のグリッドデータ(格子間隔:緯度0.0500度×経度0.0625度)であり、受信期間は冬季の3か月間である(2021年1月1日から2021年3月31日まで)。

## 3. 結果と今後

図2に2021年1月9日20時の24時間降雪量の分布を示す。求めた過去24時間降雪量の分布は時々刻々と変化し、特に平野部での降雪量が目立っている。アメダス地点富山では、1月8日に35年ぶりに100cmを超え、氷見市老谷地区では1月9日に大雪の影響で倒木が発生し、通行止めや停電などをもたらすこととなった。氷見市老谷地区に最も近いアメダス地点氷見では、1月9日に99cmの積雪深を記録していた。これは1989年観測開始以来の112cmの積雪深(2011年1月30日)に次ぐ、記録的な大雪である。アメダス地点氷見のデータによると、年最深積雪となった日を含む2日前からの日降雪量の合計は、2021年では98cm(それぞれ、38cm, 34cm, 26cm)であり、2011年では62cm(それぞれ、7cm, 32cm, 23cm)であった。また、日降水量の合計は、2021年では118.5mm(それぞれ、44.0mm, 47.0mm, 27.5mm)

であり、2011年では57.5mm(それぞれ、9.0mm, 20.5mm, 28.0mm)であった。2011年の112cmは観測史上最も深い積雪深ではあるものの、倒木が発生した2021年は積雪深の増加に加えて、急激な降水量の増加が見られた。いわゆる重い雪のために樹木への積雪荷重が大きく、被害となる倒木が発生したことも要因と考えられる。今後は、気象観測の空白域である氷見市老谷地区をはじめとする中山間地に設置されたIoT気象観測装置からのデータをさらに蓄積し、空白域のデータの有無によって気象状況の把握にどのような違いが生じるかを明らかにする必要がある。



図1 富山県氷見市老谷地区および富山市八尾地区に設置したIoT気象観測装置

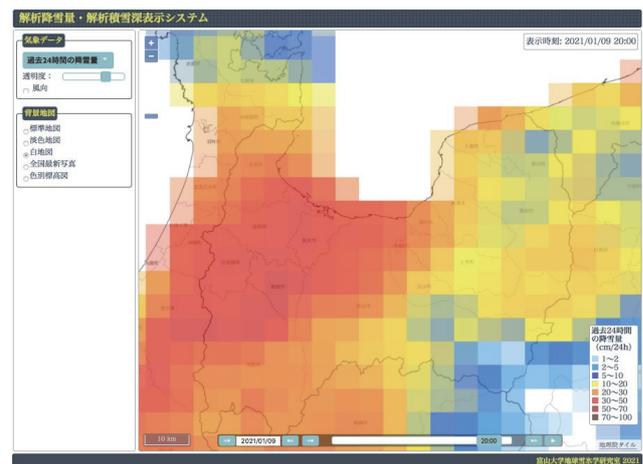


図2 配信データから求めた2021年1月9日20時の過去24時間降雪量の分布

1 富山大学都市デザイン学部地球システム科学科 Department of Earth System Science, School of Sustainable Design, University of Toyama

2 富山大学都市デザイン学部都市・交通デザイン学科 Department of Civil Design and Engineering, School of Sustainable Design, University of Toyama

## 塩沢での降雪粒子と降雪密度の観測

-2020年12月の大雪事例-

Observation of Snowfall Particles and Snow Density at Shiozawa  
- Including the case of heavy snowfall in December 2020 at Niigata -○高見和弥<sup>1</sup>, 竈本倫平<sup>1</sup>, 辻湜樹<sup>1</sup>, 高橋大介<sup>1</sup>, 鈴木賢士<sup>2</sup>, 山口弘誠<sup>3</sup>, 中北英一<sup>3</sup>

Kazuya Takami, Rinpei Kamamoto, Hiroki Tsuji, Daisuke Takahashi, Kenji Suzuki, Kosei Yamaguchi and Eiichi Nakakita

## 1. はじめに

本研究では最終的には偏波レーダーの観測値から面的に降雪密度を推定することを目的としている。本報告ではその前段として、降雪粒子の観測結果から降雪密度を推定することを目的とし、新潟県南魚沼市に位置する鉄道総合技術研究所塩沢雪害防止実験所（以下、観測点）にて2020年度冬期に実施した降雪密度および降雪粒子観測の結果を報告する。

また、2020年12月に発生した関越道の大雪による交通障害発生時の降雪密度の変化から除雪時の積雪状況について考察する。

## 2. 観測方法

- ・観測期間：2020/12/14~12/18、12/25~26、2021/1/7~8
- ・降雪密度：降雪板（45cm×45cm）上に1時間で10mm以上積もった雪（最小：11mm、最大97mm、平均45mm）の端部を除去して20cm×20cmに成形し、降雪深と重量を観測した（79事例）。
- ・含水率：降雪の表層2cm程度を採取し熱量式含水率計で含水率を観測した。
- ・降雪粒子：光学式ディストロメータ（OTT社：Parsivel<sup>2</sup>）で粒径・落下速度分布を1分間ごとに観測した。また、地上設置型降水粒子撮像・重量計測システム（G-PIMMS<sup>1</sup>）で粒子の映像を観測し、種別（雪/あられ）と形状に関するパラメータ（粒径、円形度、縦横比など）を取得した。

## 3. 降雪密度と落下速度の比較（乾雪）

降雪板を設置した時間帯で、最高気温が0°C未満、降水強度が1mm/h以上であった45事例を対象に、降雪密度とBukovcic et al.(2018)<sup>3</sup>を参考にディストロメータの観測データから求めたriming degree ( $F_{rim}$ 、non-riming aggregate)の経験的な落下速度<sup>3</sup>に対する比から算出)を比較した(図1)。その結果、降雪密度とriming degreeは、よい相関を持つことが確認された。

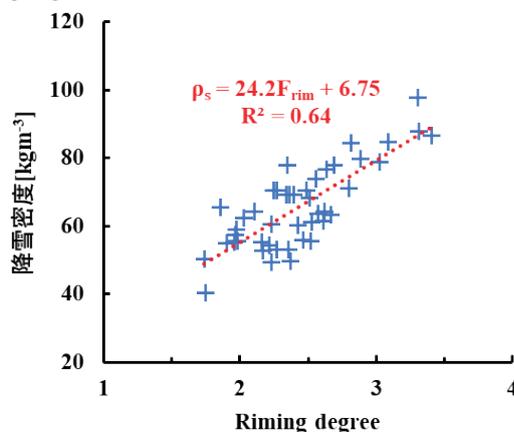


図1 Riming degree と降雪密度の分布及びその回帰式

## 3. 2020/12/14~2020/12/18の事例

2020年12月14日の降り始めから新潟県では記録的な大雪となり、観測点でも無積雪(12/14 10:00)から72時間で158cm(12/17 10:00)の積雪となった(図2)。この期間に観測点から南西へ約6kmに位置する関越道塩沢IC付近では、16日夕方頃に上り線でスタックした大型車を救出する間に後続車も雪に埋まって走行不能となり、最長約15kmの滞留が18日夜まで続いた。気象状況は、15日正午ごろまでは気温が0°C以上となる時間帯もあり湿雪を含む降雪であった。16日未明に時間降雪5~10cmの軽い雪( $F_{rim}$ が2程度、降雪密度欠測、図3)となり積雪深が急増した。16日の昼頃から $F_{rim}$ が3程度となって降雪密度が重くなり始め、17日午前にはG-PIMMSの映像でも霰が確認された。このように12月14日~18日の南魚沼市での降雪は湿雪→軽い雪片→重い雪片→霰混在と変化していったことが確認された。

## 参考文献

- 1) Suzuki, K., K. Nakagawa, R. Oki, and K. Nakamura, 2016: Microphysical features of solid/melting particles by ground-based direct observations for the GPM/DPR algorithm development, 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp.3941-3944.
- 2) Bukovčić, P., A. Ryzhkov, D. Zmić, and G. Zhang, 2018: Polarimetric radar relations for quantification of snow based on disdrometer data. J. Appl. Meteor. Climatol., 57, pp.103-120.
- 3) Brandes, E. A., K. Ikeda, G. Zhang, M. Schönhuber, and R. M. Rasmussen, 2007: A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer. J. Appl. Meteor. Climatol., 46, pp.634-650.

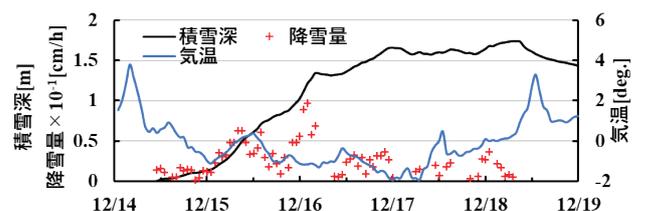


図2 積雪深、降雪量、気温 (2020/12/14 - 12/19)

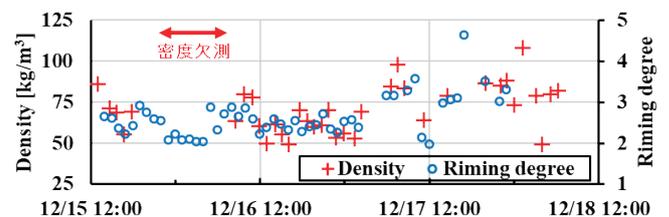


図3 降雪密度と Riming degree (12/15 12:00 - 12/18 12:00)

1 鉄道総合技術研究所  
2 山口大学大学院創成科学研究科  
3 京都大学防災研究所

Railway Technical Research Institute  
Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University  
Disaster Prevention Research institute, Kyoto University

## 基本形状模型を用いた着雪密度測定実験 Accreted Snow Density Measurement Experiment using a basic shape model

○鎌田 慈<sup>1</sup>, 辻 滉樹<sup>1</sup>, 高橋 大介<sup>1</sup>, 佐藤 研吾<sup>2</sup>  
 Yasushi Kamata, Hiroki Tsuji, Daisuke Takahashi and Kengo Sato

### 1. はじめに

積雪寒冷地域を列車が走行すると軌道上の雪が舞い上げられ、車両台車部等へ付着した着雪が成長し、これが落雪して地上設備へ衝突することで破損等の障害が発生することがある。新幹線では、落雪による障害抑制を目的として、駅部などで雪落とし作業が実施されている。このような雪落とし作業を効率的に実施するためには、明かり区間での着雪の成長、トンネル等の温暖な区間での落雪を考慮して着雪量を精度よく推定し、対策の要否を判断することが重要である。鉄道総研では、これまで沿線の気象条件から車両台車部の着雪量を推定する手法を検討してきた<sup>1)</sup>。現在は、落雪の危険度を考慮すべく研究を進めており、これを実施するにあたっては、落雪の発生条件を推定するとともに落雪した際の衝撃荷重を見積もる必要がある。落雪の衝撃荷重を推定するためには、落雪塊の密度(≒着雪の密度)や速度(≒列車の走行速度)が必要となる。着雪の密度は、気象条件や着雪する部位によって様々であるため、基礎検討として、基本形状模型を用いて着雪実験を実施し、着雪密度を測定した。

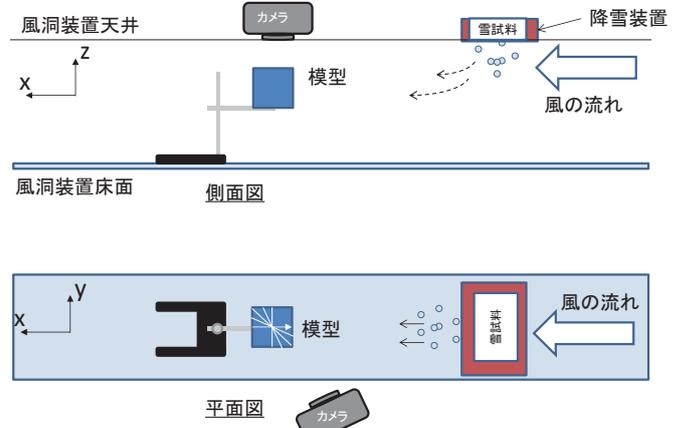


図1 着雪試験の概要図

### 2. 実験方法

防災科学技術研究所 新庄雪氷環境実験所 雪氷防災実験棟の風洞装置を用いて、着雪実験を実施した(図1)。立方体(一辺152mm)の模型を風洞内に設置し、一定風速下で風洞天井に設置した降雪装置から人工降雪装置A(樹枝状)の乾雪または湿雪を降らせて模型側面へあて、5~15分間着雪を成長させた。

実験条件は、気温は-10℃、-2℃、2℃、風速は2.5~17.5m/sまで2.5m/s刻みである。なお、気温-10℃と-2℃の実験では、雪密度が41.6~46.6kg/m<sup>3</sup>の乾雪を用いた。また、気温2℃の実験では、雪密度が137.2~167.2kg/m<sup>3</sup>、含水率0.5~4.8%の湿雪を用いた。実験終了後には、円筒サンプラー(断面積32.1cm<sup>2</sup>)を用いて着雪の密度を測定した。

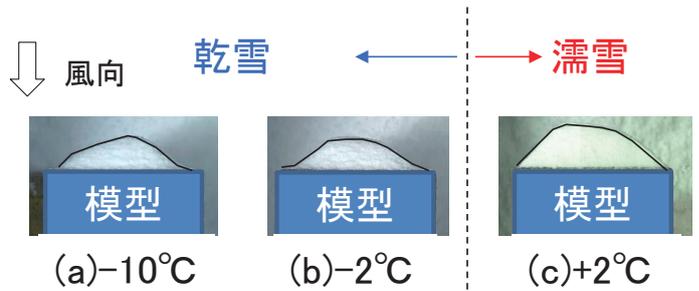


図2 気温が異なる場合の着雪状況の違い

### 3. 実験結果

風速5m/sで、気温が異なる場合の着雪状況を図2に示す。気温-10℃と-2℃の乾雪の実験では着雪状況はそれほど変わらないが、気温2℃の湿雪の実験では着雪量が多いことがわかる。

図3に気温別の風速と着雪密度との関係を示す。気温-10℃と-2℃の乾雪の実験では風速12.5m/s以上では着雪は生じなかった。いずれの気温でも風速が増加するにつれて、着雪密度が増加した。また、同じ風速では、気温が高い方が着雪密度は大きかった。

今後は、本実験結果を車両台車部の着雪解析が可能な着雪シミュレータへ反映し、実際に車両台車部で測定した部位ごとの着雪密度との比較・検証を行う計画である。

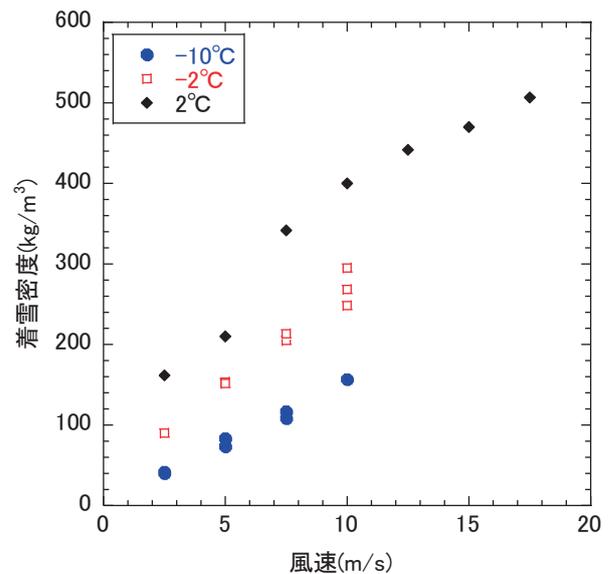


図3 風速と着雪密度との関係

### 参考文献

- 1) 鎌田 慈, 宍戸 真也, 佐藤 亮太, 2021: 沿線の気象情報を利用した新幹線台車の着雪量推定手法. 鉄道総研報告, 35(1), 11-16.

1 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部  
 2 防災科学技術研究所

Railway Technical Research Institute Disaster Prevention Technology Division  
 National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

## 着雪サンプリングを用いた静穏・弱風下での電線着雪観測 その2

—山形県新庄市における2020年度冬期の観測—

## Observations of snow accretion on short electric wires with weak wind Part 2

- Results from the 2020-2021 winter season in Shinjo city, Yamagata -

○野村光春<sup>1</sup>, 佐藤研吾<sup>2</sup>, 松島宏樹<sup>1</sup>, 麻生照雄<sup>1</sup>, 松宮央登<sup>1</sup>, 富樫数馬<sup>2</sup>

Mitsuharu Nomura, Kengo Sato, Hiroki Matsushima, Teruo Aso, Hisato Matsumiya and Kazuma Togashi

## 1. はじめに

架空送電線において、多量の雪が電線に着雪する「重着雪」により、電線や鉄塔等へ被害が及ぶことがある。そのような被害を低減するため、着雪量を低減させるための難着雪化対策を行っている。難着雪対策を効果的に行うためには、まずは電線への着雪が発生する気象条件と着雪体の性状を把握することは重要であり、様々な降雪タイプに対して信頼性の高いデータを数多く蓄積する必要がある。電中研では、簡易観測装置「ワイヤ支持式着雪サンプリング」<sup>1)</sup>を用いた観測を山形県新庄市(防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 新庄雪氷環境実験所敷地内)で実施している<sup>2)</sup>。

本研究では、静穏・弱風下における電線着雪特性を評価するため、2017年度冬期観測<sup>2)</sup>と同様に3種類のワイヤ支持式着雪サンプリングを用いた観測を実施し、2020年度冬期に得られた観測結果を示す。

## 2. 観測機器の設定

重着雪が発生する場合、着雪体は電線を筒状に覆う(以下、筒雪とする)ことが多い。筒雪は電線がねじれることにより形成されるため、電線のねじれやすさに大きく影響する。観測で用いた着雪サンプリングは、両端のワイヤの長さや径で電線のねじれやすさを調整することが可能であるため、実送電線の径間中央部における着雪特性を再現可能である<sup>1)</sup>。静穏・弱風下における着雪密度や最大着雪量のデータ取得、電線サイズや難着雪化対策品(難着雪リングとカウンタウエイト)の有無の違いがある、以下の3種類の着雪サンプリングを用いた観測を実施した。

①線種: ACSR240mm<sup>2</sup>電線, 対策品: なし, ねじり剛性: 径間長300m相当

②線種: ACSR240mm<sup>2</sup>電線, 対策品: 難着雪リング, ねじり剛性: 径間長90m相当(カウンタウエイト設置径間相当)

③線種: ACSR810mm<sup>2</sup>電線, 対策品: なし, ねじり剛性: 径間長300m相当

観測では、カメラにより着雪体の形状と外径を取得し、着雪量は各着雪サンプリングの両端に設置したロードセルにより計測した。

## 3. 観測結果

2020年度冬期において、いずれかの着雪サンプリングの着雪量が1kg m<sup>-1</sup>を超えた事例は7事例あった。なお、ここでは少なくとも一つの着雪サンプリングで着雪が発生してから、すべての着雪サンプリングの着雪が脱落するまでを一事例とした。各事例における着雪量が最大となった着雪サンプリングの最大着雪量(kg m<sup>-1</sup>)と種類、着雪体の最大外径(cm)、防災科研敷地内にて観測された気象データを表1に示す。各事例の期間中、平均気温はすべての事例で氷点下であり、平均風速は4m s<sup>-1</sup>より低い風速であったことから、弱風下での乾型着雪であった。このような気象場では、降雪粒子が電線上に冠雪することにより着雪が発生、成長す

る。着雪体がある程度成長すると電線がねじれることにより筒雪になる。表1のすべての事例において筒雪が形成された。特に着雪量が大きかった事例1と2では、他の事例と比較すると平均気温、平均湿度、平均風速には大きな違いはないが、期間が長く、積算降水量が多かった。着雪サンプリングの違いによる最大着雪量の違いは、事例1では着雪サンプリング③は他の2つより4kg m<sup>-1</sup>程度多かったが、他の事例では大きな差は見られなかった。

一部の事例、着雪サンプリングにおいて、カメラの不具合により着雪体の外径を得られないものがあったが、着雪量が最大となったときの着雪密度は25.0~123.2kg m<sup>-3</sup>であり、2017年度冬期観測での着雪密度と同程度であった<sup>2)</sup>。気温と着雪密度の関係を見ると、気温が-3℃より低い時、着雪密度が小さくなる傾向があった(図1)。

## 参考文献

- 1) 西原崇, 他6名, 2012: ワイヤ支持式着雪サンプリングの屋外着雪観測への適用性実証試験, 電力中央研究所研究報告, N12024.
- 2) 松宮央登, 他4名, 2018: 着雪サンプリングを用いた静穏・弱風下での電線着雪観測—山形県新庄市における2017年度冬期観測—, 雪氷研究大会(2018・札幌)講演要旨集, P. 82.

表1 着雪量が1kg m<sup>-1</sup>を超えた事例の一覧

事例	期間	最大着雪量	最大外径	平均気温	平均湿度	平均風速	積算降水量
1	12/13 23:00-12/18 14:00	8.5 ③	42.8	-1.7	87.4	2.5	333
2	12/31 16:00-1/4 12:00	6.2 ①	49.6	-3.9	91.5	2	242
3	1/4 14:00-1/5 12:00	1.5 ③	20.3	-2.7	95.2	1.7	43
4	1/7 14:00-1/11 12:00	2.8 ②	12.9	-4	89.1	2.2	178
5	1/18 15:00-1/20 16:00	2.7 ①	23.5	-2.6	84.9	3.7	110
6	2/2 12:00-2/4 12:00	1.1 ③	17.4	-3.7	89.7	2.5	95
7	2/17 2:00-2/18 12:00	1 ①	17.5	-2.6	91.9	2.1	121

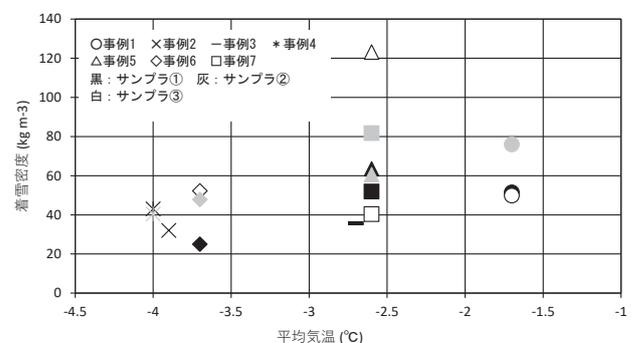


図1 各事例・着雪サンプリングの気温と着雪の関係

1 電力中央研究所サステナブルシステム研究本部

2 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

Sustainable System Research Laboratory, CRIEPI  
Snow and Ice Research Center, NIED

**尿素水を用いた飛沫着氷の低温室内実験**  
**—円筒試験体の直径の違いによる着氷形状と着氷量の比較—**  
**Laboratory Experiment of Spray Icing on Cylindrical Specimens Using Urea-doped Water**  
**- Comparison of icing shape and icing amount due to difference in diameter of cylinder -**

○尾関俊浩<sup>1</sup>, 松沢孝俊<sup>2</sup>, 徳留大樹<sup>3</sup>, 布川大暉<sup>4</sup>, 松田裕太<sup>1</sup>, 金野祥久<sup>3</sup>,  
Toshihiro Ozeki, Takatoshi Matsuzawa, Taiki Tokudome, Taiki Nunokawa, Yuta Matsuda and Akihisa Konno

### 1. はじめに

北極海では夏季の水勢力の弱化により北極航路の利用増加が見込まれている。今後、現行より耐氷レベルの低い船舶や大型船舶の通航が増加することが予想されるが、北極航路の運航安全性を評価する上で船体着氷は重要な要素の一つとなる。

船舶への着氷影響はこれまで比較的単純な経験式 (PR 式) に基づいて評価されており、個々の船舶の特性や着氷対策の有無は考慮されていない。したがって航行中に着氷の安全性を評価するには役立つものの、より詳細な安全性の検討が必要となるような場合、たとえば船舶の設計の際や運航計画策定に利用するには情報が不十分である。そこで、PR 式の改良に資するデータを取得することを目的に、船体上部構造の部材模型を用いた飛沫着氷実験を行った。

### 2. 飛沫着氷実験の方法

本実験では、ジャパン マリンユナイテッド (株) 技術研究所の水海水槽 (全長 20m × 全幅 6m × 水深 1.8m) 上に飛沫着氷の実験系 (図 1) を組み立て、単純形状の試験体を用いてブラインを含む海水飛沫着氷の着氷特性に関する実験を行った。

実験装置は水槽上に台車を用いて噴霧距離を可変できる実験計を組み、送風・スプレー部と試験体をそれぞれ設置した。スプレーノズルは扇型一流体ノズル 2 個また 4 個をファンの左右両側に設置し、噴霧した水滴が風によって試験体に供給されるようにした。スプレーの噴霧粒径分布はしぶき仕様 SPC により計測した。低温室の室温を $-10^{\circ}\text{C}$ に制御し、濃度約 20%の尿素水を噴霧することにより、試験体にブラインを含んだ湿潤着氷を成長させた。

試験体は船体上部構造物を構成する各要素 (船楼、タワー、手すりなど) を想定した形状について用意する予定であるが、本研究では円筒形を採用し、直径 500 mm または 150 mm、高さ 1.2 m の塩ビ製円筒模型を台車に立てて固定した。試験体周りの風速分布および飛沫の衝突量の分布は各着氷実験に先立ち別途計測した。

### 3. 実験結果

着氷試験は試験体直径、風速および噴霧粒径を変えて 5 回行なわれた。本実験系では風速は試験体の中央付近で約 10m/s または約 7.5 m/s であり、やや強い風での実験であった。噴霧は連続噴霧である。各 30 分 (1 試験のみ 20 分) の試験を行い、試験終了後には 1/4 高さ毎の着氷重量と塩分濃度を求めた。

着氷実験では着氷初生、成長、形状および着氷量に着目した。図 2 に  $\phi 500\text{mm}$  の塩ビ円筒試験体上の着氷例を示す。着氷の成長は塩水を用いて行った尾関らの室内実験<sup>1)</sup>と類似しており、尿素水においてもブラインを含んだしぶき氷が作成可能であっ

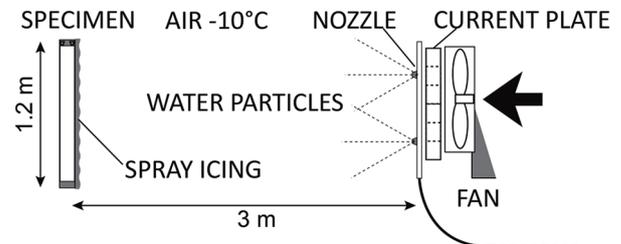


図 1 低温室内飛沫着氷実験の概要。



図 2  $\phi 500\text{mm}$  の塩ビパイプ上の飛沫着氷。左 : 10 m/s, 240  $\mu\text{m}$ , 中 : 7.5 m/s, 240  $\mu\text{m}$ , 右 : 7.5 m/s, 120  $\mu\text{m}$ 。

た。今回の 5 つの試験では、試験体全体への単位面積あたりの着氷量について大きな差は無かったが、着氷形状には違いが見られた。塩ビパイプは床に設置されているため、図 2 右の実験では結氷しながら流下した着氷が下端に積み上がる様子が見られた。一方、風速 10m/s の実験 (図 2 左) では飛沫が流下する過程で下流側へ筋状に流れながら凍る様子が観察された。

着氷の発達の要因は波しぶき粒子の飛来と衝突および凍結なので、本実験データを基に今後数値流体解析を用いて船体周りの飛沫粒子の軌道を推定することにより、船体上部構造物 (船楼、タワー、手すりなど) における着氷量を評価する予定である。  
謝辞

JMU 技術研究所氷海グループの水野滋也氏、中里直樹氏、前田晃氏には低温室内実験で協力をいただいた。本研究は北極域研究加速プロジェクト (ArCS II) JPMXD1420318865 の一環として実施されたものである。

### 参考文献

- 1) 尾関俊浩, 下田春人, 津田将史, 氷海水槽における海水飛沫着氷の実験 その 2 -親水性と撥水性のシート材料-, 雪氷研究大会 (2012・福山) 講演予稿集, 74.

1 北海道教育大学札幌校  
2 海上技術安全研究所  
3 工学院大学  
4 雪研スノーイーターズ

Hokkaido University of Education Sapporo  
National Maritime Research Institute  
Kogakuin University  
Yukiken Snow-Eaters Co., Ltd.

## 地すべり地における積雪期の流出水量観測 Runoff observation during the snow cover period in the landslide

○大澤光<sup>1</sup>, 平島寛行<sup>2</sup>, 岡本隆<sup>1</sup>, 土佐信一<sup>3</sup>, 松浦純生<sup>4</sup>,  
Hikaru Osawa, Hiroyuki Hirashima, Takashi Okamoto, Shinichi Tosa and Sumio Matsuura

### 1. はじめに

近年積雪地帯の地すべりにて、発生頻度が少ないと考えられていた融雪初期において長距離移動する地すべりが発生している。通常融雪期には数十~100 mm/day程度の融雪が日周期を伴って繰り返し発生するが、厳冬期には融雪イベントがない限り地中伝導熱による積雪底面の融解水は約 1 mm/day と極少ない。しかし、このような厳冬期にもしばしば地すべりは発生している(例えば、2020年2月19日発生の新潟県妙高市花立地すべり)。加えて、累積融雪量が少ない融雪初期に多くの水を必要とする中~長距離移動型も見られる(例えば2012年3月7日に発生した新潟県上越市国川地すべり、2021年3月4日同県糸魚川市来海沢地すべり)。これら融雪初期の地すべりの誘因は単なる融雪として片付けられることが多いが、被害軽減のためにも厳冬期から融雪初期における融雪現象の理解が必要とされる。

一方、積雪層内の選択的な浸透に伴う積雪底面流出の面的な不均一性が斜面災害や融雪洪水に影響することが指摘されている(e.g., Osawa et al., 2018; Webb et al., 2018)。著者らは山地でライシメータによる積雪底面水量の観測を行っており、実際は融雪が発生しているにも関わらず、観測水量が極端に少ないことが融雪初期によく見られる。これは積雪層内の選択的な浸透、特に斜面に沿った側方流の影響によって、地表へ到達する水が局所化していることに起因していると推察される。この現象は地すべり地において周辺斜面から水が積雪層内を選択的に浸透し、局所集中している可能性を示唆している。よって本研究は、融雪時期によって異なる融雪と流出水量、間隙水圧の応答の関係を明らかにするため、それぞれの項目を観測・推定し、その結果を検証した。

### 2. 対象地の概要および気象・水文観測方法

新潟県上越市安塚区伏野峠地区に位置し、新第三紀の強風化泥岩や凝灰岩で構成された典型的な再活動型地すべりを研究対象地とした。地すべりは標高 550-630 m の中山間地に位置し、幅 50-70 m、長さ約 300 m、すべり面深度 3-6 m であり、冬期は積雪深 3~5 m に達する豪雪地帯である。気象観測を地すべり地に隣接する不動地にて行った。地表面に浸透する水量は 4 m<sup>2</sup> の積雪ライシメータ 2 台にて観測した。降雨量は雨滴衝撃力を受感し水量に換算する WXT 520 を用いた。ほか、短波放射量、長波放射量、気温、湿度、風向、風速、積雪水量、積雪深を 10 分間隔で集録した。流量は 2020 年 12 月から地すべり地内中部ブロックの 1 次谷において三角堰を設置し、静水槽の水位を観測し、流量を求めた。間隙水圧は中部ブロックにて、すべり面直上の深度 5.2 m に圧力計を埋設し、これらを 5 分間隔にて記録した。

### 3. 結果と考察

雪面における融雪水量は、熱収支法を基礎とした積雪シミュレーション SNOWPACK により 1 時間毎に計算した。本計算結果に、観測した降雨量を加えることで雪面から供給される水量(Meltwater and/or Rainwater: MR)とした。結果、厳冬期から融雪

初期には雪面にて融雪が生じているものの、8 m<sup>2</sup> のライシメータは捕捉しておらず、流域スケールの流量(Q)は応答していることがわかった。この結果は積雪底面流出の面的な不均一性を示唆している。また、厳冬期において MR があるものの、ライシメータおよび Q の両方観測していないことから、水分は積雪層内に貯留されていることがわかった。以上から、地すべり地内において不均一な浸透が生じていることがわかった。一方、基礎的な MR に対する Q の応答関係を見るため、融雪イベント開始時刻から、流量の最大応答時刻までの MR を累積した有効雪面供給水量を  $\Sigma MR$  として計算し、次に Q の観測結果から、各イベント直前の Q の基底値と最大応答量の差を上昇量( $\Delta Q$ )として、30 イベントを抽出した。図 1 に  $\Sigma MR$  と  $\Delta Q$  の関係を示す。結果、 $\Sigma MR$  が大きくなるほど  $\Delta Q$  が線形の関係で大きくなり、また  $\Delta Q$  が大きいほどピークのタイムラグは小さくなる傾向が見られた。なお、図 1 右上にプロットされる応答の大きいものは融雪初期から中期に発生したフェーンに起因する。

謝辞: 筑波大学の山川陽祐氏に流量観測の資料提供を受けた。本研究は科研費 20K14562, 20K04068, 19H03009 の助成を受けた。ここに記し感謝いたします。

### 参考文献

- Webb, R. W., M. W. Williams and T. A. Erickson, 2017: The spatial and temporal variability of meltwater flow paths: insights from a grid of over 100 snow lysimeters. *Water Resources Research.*, **54**, 1146-1160.
- Osawa, H., Y. Matsushi, S. Matsuura, T. Okamoto, T. Shibasaki and H. Hirashima, 2018: Seasonal transition of hydrological processes in a slow-moving landslide in a snowy region. *Hydrological Processes*, **32**, 2695-2707.

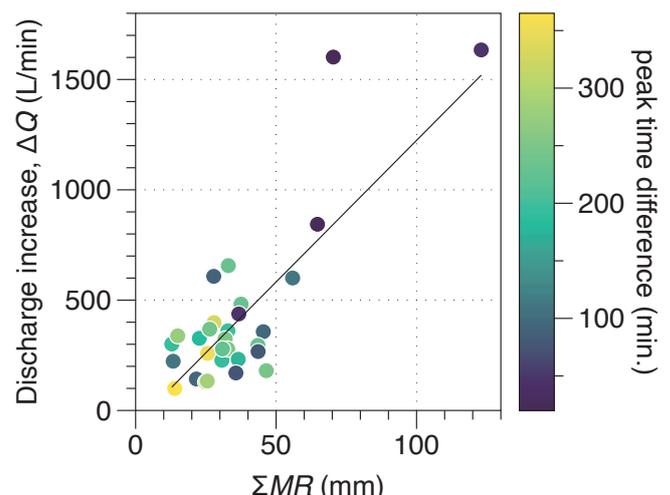


図 1 各融雪イベントの雪面における有効雪面供給水量  $\Sigma MR$  に対する流出の上昇量  $\Delta Q$  を示し色はそれぞれのピーク時刻差を表す。

1 森林総合研究所 森林防災研究領域  
2 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター  
3 国土防災技術(株)  
3 京都大学防災研究所

Forestry and Forest Products Research Institute  
Snow and Ice Research Center, NIED  
Japan Conservation Engineers & Co., Ltd.  
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

## 雪えくぼのその場観測実験で発生した2種類の窪み

## Two types of dents generated in the in-situ observation experiment of snow dimples

○鈴木歩空<sup>1</sup>, 島田互<sup>2</sup>, 小杉健二<sup>3</sup>, 荒川逸人<sup>3</sup>

Hodaka Suzuki, Wataru Shimada, Kenji Kosugi and Hayato Arakawa

## 1. はじめに

降雪の後、降雨や日射によって融雪が進み、積雪表面に窪みが現れることがある。この窪みは頬にできる「えくぼ」と似た形をしていることから「雪えくぼ」と呼ばれている(大沼, 1959)。北陸のような温暖多雪な地域では、降雪と気温上昇による融雪が繰り返されるため「雪えくぼ」がたびたび観察される。この「雪えくぼ」の形成には、帯水層の下部で生じる水みちが関係する(納口, 1984)と考えられている。しかし、雪えくぼの形成過程を実験によって再現した例は少ない。本研究では、人工降雪装置を用いて「雪えくぼ」を再現し、その成長過程を観測した。

## 2. 実験方法

## 2.1 人工降雪装置を用いた積雪

本実験は、雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の降雪装置Aを用いて行った。この装置は樹枝状に似た低密度の雪(約30kg/m<sup>3</sup>)を人工的に降らせることができる。

## 2.2 積雪層の作成

はじめに、降雪テーブルの上に断熱材(1.82 m×1.82 m)を敷き、その上に降雪装置を用いて雪を降らせ、低密度層を作成した。その後、一度降雪装置を止め、積雪表面を平らに擦り切った後に、ざらめ化した雪(直径1~2 mm)を篩で積雪表面に撒き、高密度層を作成した。高密度層の上に、再び低密度の雪を降らせることで、密度が異なる積雪の層構造を再現した。

## 2.3 融雪

断熱材の上に、図1のような積雪層を作成した後、室温を3℃まで上昇させた。その後、降雨装置を用いて水を降らせ、積雪表面の変化を観測した。本研究では、降水量を3 mm/hに設定した。



図1 融雪開始時の積雪の概略図

大きな窪みは範囲内に3個発生した。これまでも、同様の実験手法を用いて雪えくぼを再現した例がある(島田, 2017)。しかし、島田(2017)で観測された窪みの数は、観測範囲内(1.82 m×1.82 m)に1~3個で、本実験のように間隔の細かい窪みが発生した例はない。

## 3.2 断面観測

発生した窪みの断面図を観察したところ、細かい窪みの断面では水みちが確認できなかった。また、後に発生した間隔の大きな雪えくぼも、3個中2個は、はっきりとした融雪水の流下の痕跡が確認できなかった。しかし、積雪高0~1 cmの雪は含水率が40%を越えていたため、融雪水が何らかの形で積雪内部を流下していたことがわかる。

## 4. 考察

本実験では2種類の窪みが観測された。2種類の窪みが現れた例は自然界でも確認されており、納口(1984)は、2重周期の雪えくぼができる例として、積雪層内に二つ目の帯水層が形成された場合と、積雪内部に埋まっている、過去に発生した雪えくぼの影響を受けた場合の、2通りの形成過程を示している。しかし、本実験の積雪は、これらの発生条件とは一致していない。また、これまでの研究では、雪えくぼの窪みの下には水みちが形成されると考えられてきたが、多くの窪みが確認された本実験において、水みちのような流下が発生していた窪みは、1つのみであった。これらの結果から、これまで確認されてきた、水みちを伴う雪えくぼとは異なる形成過程を経て発生する窪みが存在すると考えられる。



図2 細かい窪みの発生(降水を始めて1時間後)

## 3. 実験結果

## 3.1 積雪表面の変化

降水を始めておよそ30分後に間隔が細かい窪みが発生した。その後、その一部が、大きな窪みへと成長した。細かい窪みは観測範囲内(1.82 m×1.82 m)に数多く発生した(図2)。一方、

## 参考文献

- 1) 納口恭明(1984): 雪えくぼのパターン形成 I. 国立防災科学技術センター研究報告, 33, 237-254.
- 2) 大沼匡之(1959): ゆきえくぼ. 雪氷, 21, 130.
- 3) 島田互(2017): 人工積雪を用いた雪えくぼ形成過程のその場観察実験. 雪氷, 76(6), 539-548.

1 富山大学大学院理工学教育部

2 富山大学学術研究部 理学系

3 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

Graduate School of Sci. and Eng. for Education, University of Toyama  
Faculty of Science, University of Toyama  
Snow and Ice Research Center, NIED

融雪型火山泥流の粘度計測に関する検討  
Study on viscosity measurement of lahar with snow○小田憲一<sup>1</sup>, 新屋啓文<sup>2</sup>, 桂木洋光<sup>3</sup>  
Kenichi Oda, Hirofumi Niiya and Hiroaki Katsuragi

## 1. はじめに

冠雪火山の噴火により発生する融雪型火山泥流は、火山砕屑物(テフラ)が雪、雪解け水、周囲大気などと混合しながら流下することにより発達していくと考えられている。このような多相が混合した複雑流体はその扱いが難しく、基礎流動特性の解明等が十分に進んでいない。このような複雑混相流の流動様式を調べるために、沖田ら<sup>1)</sup>は融雪型火山泥流を模擬したテフラ・水・雪の混合物を人工斜面に流下させ、その様子を観察する実験を0°Cの低温室内で行った。その中で、泥流は流下の初期段階で凝集体を形成し、その凝集体の影響により泥流の流れが阻害される可能性があることを明らかにした。しかし、どのような条件で凝集体が形成され、形成された凝集体がどのように泥流の流れ特性に影響を与えるかについての系統的な研究はこれまでにない。

そこで本研究では、融雪型火山泥流の状態を模倣したテフラ・水・雪の混合物を回転ドラム装置で混合させて凝集体形成条件を明らかにする実験に取り組んでいる。これまでに様々な条件を変化させて系統的低温室実験を行い、どのような条件で凝集体が形成されるのか、形成された凝集体がどのような力学特性を示すのか、また、実際の泥流条件と比較することで天然の泥流中での凝集体形成の可能性について調べた<sup>2)</sup>。

今回は、泥流の流動特性を最も良く特徴付ける量として粘度に着目し、その粘度を計測するための予備実験を行った結果を報告する。

## 2. 研究方法

本研究では、回転式粘度計(ブルックフィールド, DV-II)を用いてテフラと水の混合液の粘度を測定した。粒径が32-63 $\mu\text{m}$ , 120-250 $\mu\text{m}$ , 250-500 $\mu\text{m}$ のテフラを体積濃度5%, 10%含む混合液を作成し、回転粘度系で粘度の測定を行った。ただし、粒径の小さなテフラを用いた場合は安定的に分散した泥流状態が実現されたが、粒径の大きなテフラを用いた場合は、テフラが直ちに沈殿し、上澄み部での粘度測定となった。

## 3. 結果

粒径32-63 $\mu\text{m}$ , 120-250 $\mu\text{m}$ , 250-500 $\mu\text{m}$ のテフラを様々な濃度で水と混合させた懸濁液を作成したところ、図-1に示すように、粒径が大きい場合にはテフラが短時間のうちに沈殿してしまうことが分かった。これは現実の泥流でも起こり得る現象であり、泥流で活発に流れている部分は比較的小さい粒径のテフラと水あるいは雪の混合物で構成されている可能性がある。本研究では、粘度計測に用いた計測系の制約もあり、沈殿層上部の上澄み部のテフラ・水混合系の粘度を計測することとした。

テフラ・水混合系の計測に先立ち、標準校正液を用いて粘度計の校正を行い、校正係数を得てから系統的計測を行った。図-2に、粘度の計測結果を示す。上記の沈殿の効果もあり、上澄み部の粘度についてのテフラ濃度依存性は明確には見られなかった。また、せん断率の上昇に伴い、粘度が上昇する傾向は全ての混合液

で普遍的に見られた。粘度の値はいずれの場合も10-30 cP=0.01-0.03 Pa $\cdot$ sの範囲に分布しており、テフラと水混合液の実効粘度値を得ることに成功したと言える。

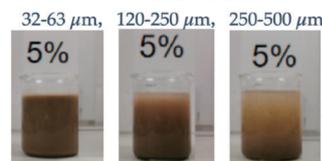


図1 テフラ・水混合溶液の分散と沈殿

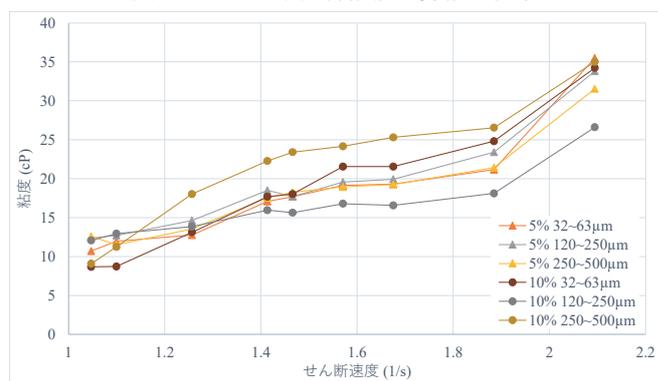


図2 テフラ・水混合系の粘性計測結果

## 4. 考察

今回の予備実験により、粒径の小さいテフラのみが泥流中で分散し、その粘度はおよそ10 cP程度ということが分かった。しかし、数値計算等で用いる粘度値を正確に議論するためには、大きなテフラが沈殿している底部に近い部分での粘度計測も必要となる。今後は、音叉式など異なる粘度計測手法を用いて、底部粘度を計測することが課題となる。また、今回は水とテフラのみの混合液の粘度を計測したが、実際の融雪型火山泥流の粘度を評価するためには、雪を混合させることも必要であり、それも今後の課題と言える。

## 5. まとめ

室内実験で形成された、テフラ・雪・水の混合物の粘度を把握するため、その予備実験としてテフラと水の混合物についての粘度測定を行った。その結果、テフラの沈殿等の問題は見られたが、小さなテフラが分散している状態では、粘度がおよそ10 cP程度となり、せん断率の上昇にともない粘度も上昇する傾向が見られた。今後は、沈殿している部分や雪を混合させた場合の粘度測定が課題となる。

## 参考文献

- 1) 沖田竜馬ほか, 2018: 融雪型火山泥流の流動性に与える雪の影響, 寒地技術論文・報告集, **34**, I-007(1-5).
- 2) H. Niiya, K. Oda, D. Tsuji, and H. Katsuragi: Formation conditions and mechanical properties of aggregates produced in tephrawatersnow flows, *Earth, Planets and Space*, **72**, 148:1-14 (2020).

1 日本大学  
2 新潟大学  
3 大阪大学

Nihon University  
Niigata University  
Osaka University

## 山形蔵王における雪氷現象の観測(2020/2021 冬季)

## Observation of icing and snow accretion Jyuhyo (Ice Monsters) at Mt.Zao (2020/2021 winter)

○沖田圭右<sup>1</sup>・山谷睦<sup>1</sup>・原田俊明<sup>1</sup>・沼澤喜一<sup>1</sup>

Keisuke Okita・Mutsumi Yamaya・Toshiaki Harada and Kiichi Numazawa

## 1. はじめに

当社では1997/1998冬季から24シーズンに亘って山形蔵王の地蔵山付近で着氷雪現象及び積雪の観測を実施している。観測の目的は、山形大学地球環境研究会(1995)で矢野が指摘した地球温暖化に起因するとみられる樹氷形成下限標高の上昇が、その後どのように変化しているのかを明らかにすることである。

## 2. 蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅付近での気象観測結果と樹氷形成状況

蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅における2020/2021冬季の積雪深、気温及び平均風速を図1に示した。今冬季は12月上旬から本格的な降雪となり、12月中旬の寒波で積雪量が増加した。降雪と共に樹氷形成も進み、地蔵山頂駅付近では12月下旬より樹氷鑑賞が可能となった。1月8日には強風により樹氷が部分崩壊し、1月下旬には気温上昇と日射の影響により樹氷が崩壊した。その後2月上旬には樹氷の再形成が進み再び樹氷が見られるようになったが、2月15日の降雨と気温上昇により樹氷が崩壊し、その後は樹氷が再形成されるほど寒気が続かなかつた。今冬季の樹氷は形成時期が早く、12月から観賞できたのは6冬季ぶりであった。樹氷鑑賞期間は12月下旬から1月下旬までと2月上旬から中旬迄の合計で約40日間であった。

## 3. 樹氷の高度変化

今冬季5回実施した目視による樹氷の高度変化観測より、今冬季に地蔵山頂(標高1736m)から連続的に分布が確認された樹氷形成下限標高は1560m付近(番号標85番付近)と判断した。図2にこれまでの樹氷形成下限標高と、冬季平均気温(12,1,2月午前9時データ:山頂駅観測)、及び冬季平均風速(12,1,2月8~16時平均データ:山頂駅観測)をまとめた。今冬季の平均気温は-7.8℃で、観測をした24冬季の平均値-8.4℃より0.6℃高い値を示した。今冬季の平均風速は8.8m/sであり24冬季の平均値(9.4m/s)よりも小さい値を示したが、山頂駅舎を建て替えた2003/2004年以降の平均値よりも大きな値を示した。

## 4. アオモリトドマツの枯木について

2013年~2016年の蛾の幼虫(トウヒツツリヒメハマキ)によるアオモリトドマツの針葉の食害被害と、2016年に確認されたトドマツノキクイムシの穿入被害によって、地蔵山頂駅周辺から標高1550m付近に分布するアオモリトドマツは殆ど枯れている。アオモリトドマツは樹氷の芯となる木であるため、樹氷の形状や着氷雪の剥落しやすさに影響を及ぼしていると考えられる。

## 5. まとめ

気象庁(2021)によると、平地の山形市における今冬季12月~2月の降水量は平年値の116%である266mm、最深積雪は57cmで平年値(50cm)の114%であった。山形市の12月~2月の平均気温は平年値と同じ0.7℃であった。

地蔵山頂駅の観測による今冬季の最深積雪は165cmで、これまで24冬季の観測結果の平均値である240cmよりはかなり少ない値であった。平地(山形市)では降水量と最深積雪は平年値以上であり、気温は平年並みに推移したが、山地(地蔵山頂駅)では積雪が少なめで気温は多少高い状況であったことから、降雪パターンは里雪型であったと言える。今冬季の樹氷形成下限標高は1560mと24冬季の平均値1553mと同程度であった。地蔵山頂駅付近では6冬季ぶりに12月中から樹氷鑑賞が可能となり、途中崩壊はあったものの再形成されて、樹氷鑑賞期間は合計で約40日間であった。

## 謝辞

蔵王ロープウェイ株式会社から研究に必要な気象観測データを提供頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1)山形大学地球環境研究会,1995: 検証・ヒトが招いた地球の危機, 東京, 講談社,37-56.
- 2)気象庁,2021: 冬(12~2月)の天候別紙.  
[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/stat/tenko2021djf\\_besshi.pdf](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/stat/tenko2021djf_besshi.pdf)  
(2021年3月2日)

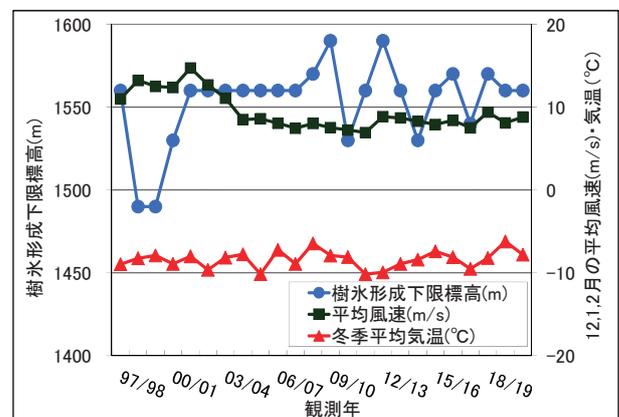


図2 樹氷形成下限標高と冬季平均気温・風速

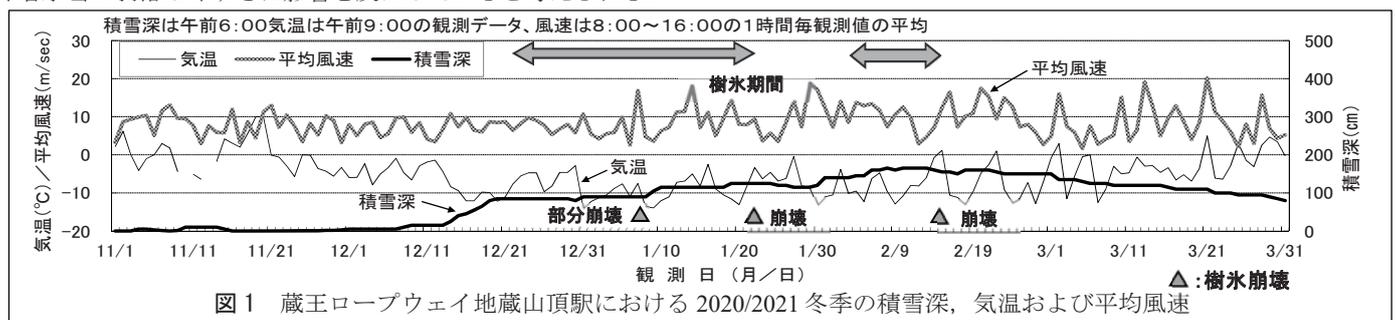


図1 蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅における2020/2021冬季の積雪深、気温および平均風速

## 積雪モデルを用いた積雪重量分布情報の長期データセットの作成

## Production of long-term dataset for snow weight distribution using numerical snowpack models

○平島寛行<sup>1</sup>, 本谷研<sup>2</sup>, 河島克久<sup>3</sup>, 佐野浩彬<sup>4</sup>

Hiroyuki Hirashima, Ken Motoya, Katsuhisa Kawashima and Hiroaki Sano

## 1. はじめに

毎年多数の犠牲者を出している屋根雪処理中の事故を軽減するため、効果的な雪下ろしの判断基準に用いるための積雪重量分布情報(雪おろシグナル)の開発を進めてきた<sup>1)</sup>。雪おろシグナルは準リアルタイム積雪分布監視システム<sup>2)</sup>で収集される積雪深と、近くのアメダスの気象データを入力に用いて積雪変質モデル(SNOWPACK)で積雪重量分布を計算するシステムである。雪おろシグナルでは積雪重量の計算値をリスクに換算して表示しているが、家屋の設計積雪深や住民の雪対策に対する熟練度等には地域差があり、同じ積雪重量であっても平年の量が少ない地域では豪雪地帯と比べてリスクが大きい。そのため、平年の積雪重量値と比べた多寡の情報も重要となる。本研究では、そのような相対値を得ることを可能とするため、SNOWPACKを用いて過去30冬期にわたるアメダス地点における積雪重量を計算し、診断型積雪分布モデル(SSDM)<sup>3)</sup>と組み合わせることで積雪重量分布情報の長期データセットの作成を試みた。

## 2. 方法

本研究では、2021年時点で雪おろシグナルの対象範囲である秋田から福井までの日本海側の県において、気象庁で積雪深が観測されてきた71地点を対象に、SNOWPACKの入力データを作成し、1991/92から2020/21までの30冬季分の積雪重量の時間変化を計算した。積雪深の観測間隔が1時間を超える地点については、入力データに用いるために線形内挿して1時間値に変換した。また、同じくアメダスの気象データを用いてSSDMで30冬季分の積雪重量分布を作成した。このデータを前回(平島ら, 2020)の時と同様に積雪深観測点におけるSNOWPACKとSSDMの積雪重量の値の差分をとり、その差分値に対して逆距離荷重法(IDW)を用いて内挿し、差分の分布情報を得る方法で双方のモデルを融合した積雪分布情報を作成した。

## 3. 結果

気象庁で積雪深が観測されてきた地点に対して、今冬の最大積雪重量の値を図1aに示す。また、30年平均に対する相対的な比を図1bに示した。71地点中49点で平均より大きかったことから、全体的には多雪年であったが、長野県及び秋田県北部で平均より少なめの場所が見られた。本解析範囲においては、30年で今年が最大の積雪重量を記録したのは新津、富山、輪島、横手の4地点で、その中では横手のみが豪雪地帯であった。

SNOWPACKとSSDMを融合した積雪分布の事例を図2に示す。雪おろシグナルでは準リアルタイム積雪分布監視システムで収集する932地点の積雪深を用いるが、長期データに用いることが可能なのはアメダスの積雪深観測地点の71地点のみのため、積雪分布は厳密には異なり、(a)の全積雪深データを用いた場合に比べ、(b)のアメダスのみを使用した場合の精度は低下す

る。2021年1月24日における積雪重量のアメダス地点以外の積雪深観測点の積雪重量の差を調べたところ、MBEで $-61.2\text{kg/m}^2$  (-21%)、RMSEで $155\text{kg/m}^2$  (55%)の誤差があった。

## 4. まとめと今後の課題

本研究において、SNOWPACKとSSDMを組み合わせることで、30年分の積雪重量分布のデータセット作成が可能になった。今後、精度の検証を進めるとともに、雪おろシグナルにおける積雪重量分布の平年に対する相対値を発信可能にしていく予定である。またこのような長期の分布は積雪水資源の推移や、複合災害を解析する際の積雪量のデータ等にも応用が可能であり、今後はそれらも視野に入れた改良を進めていく予定である。

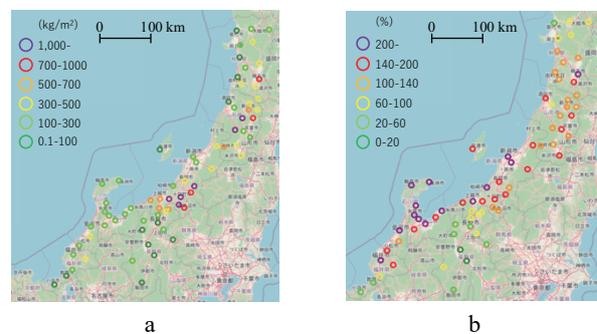


図1 最大積雪重量の30年平均値と今冬の値を比較した図。a: 今冬の最大積雪重量, b: 最大積雪重量の30年平均との比

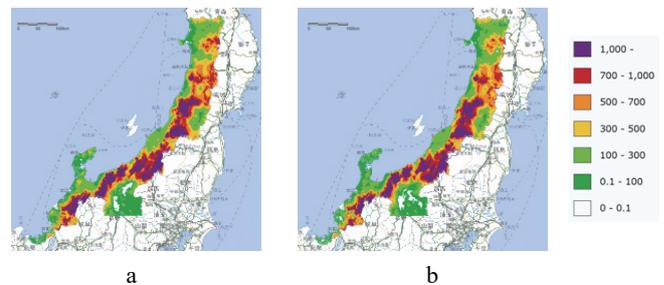


図2 2021冬期における1月24日時点での積雪重量分布(a)全積雪深観測点を用いたもの(b)アメダスのみを用いたもの

本研究は新潟大学災害・復興科学研究共同研究費(2021-4)の助成で行われた。

## 参考文献

- 1) Hirashima et al., 2020, *Journal of Disaster Research*, 15, 688-697.
- 2) 伊豫部・河島, 2020, 日本雪工学会論文集, 36(1), 1-13.
- 3) 本谷ら, 2020, 東北の雪と生活, 35, 42-45.
- 4) 平島ら, 2020, 雪氷研究大会講演要旨集, p161.

1 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター  
2 秋田大学  
3 新潟大学災害・復興科学研究所  
4 防災科学技術研究所

Snow and Ice Research Center, NIED  
Akita University  
Research Institute for Natural Hazards & Disaster Recovery, Niigata University  
National Research Institute for Ice Science and Disaster Resilience  
©2021 (公社) 日本雪氷学会

## 雪氷用 X 線 CT と MRI の三次元画像の合成による積雪中の液体分布の解析 Analyses of liquid distribution in snow: superimposing MRI on X-ray CT image

○山口 悟<sup>1</sup>, 安達 聖<sup>2</sup>, 砂子 宗次朗<sup>1</sup>

Satoru Yamaguchi, Satoru Adachi and Sojiro Sunako

### 1. はじめに

積雪中の水分移動を考える際に重要な水分特性曲線や飽和透水係数は、間隙分布に密接に関係する。しかし従来測定されている積雪の水分特性曲線や飽和透水係数はバルク的な値であり、実際にどの間隙にどれくらいの水が存在しているのかを直接測定した例はない。安達ら(2015)は、雪氷用 CT と雪氷用 MRI を組み合わせることで、積雪試料において液体で満たされた間隙と満たされていない間隙の分布を高分解能で測定可能とする手法を開発した。本研究では、この手法により取得されたデータを解析した結果を紹介する。

### 2. 実験方法

本研究では、主目的を解析手法の開発としたため、測定する積雪中の液体は真水の代わりにドデカンを使用した。低温室に保存された天然のざらめ雪をふるいでほぐし、粒径を揃えたものを再充填したものを雪試料として使用した。まず乾いた状態の CT 画像から粒径分布ならびに間隙直径分布をもとめ、その後ドデカンを注入し積雪底面からドデカンをしみあがらせた状態を MRI で撮影した。なお MRI 画像では、ドデカンの分布のみが測定される。そのため撮像された MRI 画像と先の CT 画像とを重ね合わせることで、ドデカンで満たされた間隙部分と満たされていない間隙部分をそれぞれ抽出した。より詳しい撮像方法は、安達ら(2015)を参考にしたい。

### 3. 解析結果

図 1 に解析事例を示す (空間分解能は  $72 \mu\text{m}$ )。図 1(a)は CT 画像から求めた粒径に関するヒストグラム、図 1(b)は CT 画像から求めた間隙直径に関するヒストグラム、図 1(c)は CT 画像と MRI 画像の重ね合わせによって求めた水面からの高さ ( $72 \mu\text{m}$  毎)において、水で満たされた間隙面積の占める割合を間隙直径ごとに白黒の濃淡で示している (色が濃い方が占める割合が大きい)。粒径と間隙直径のヒストグラムを比較すると、粒径に比べ間隙直径の方が大きさが揃っていることがわかる。また図 1(c)より水面からの高さが高くなるにつれて、間隙直径が大きいものから水で満たされる割合が小さくなっていくことが視覚的にわかる。このように本手法を用いれば、従来にない空間分解能で粒径分布と間隙直径分布との関係、間隙直径分布と積雪内部の液体分布との関係に関する情報を取得可能となる。

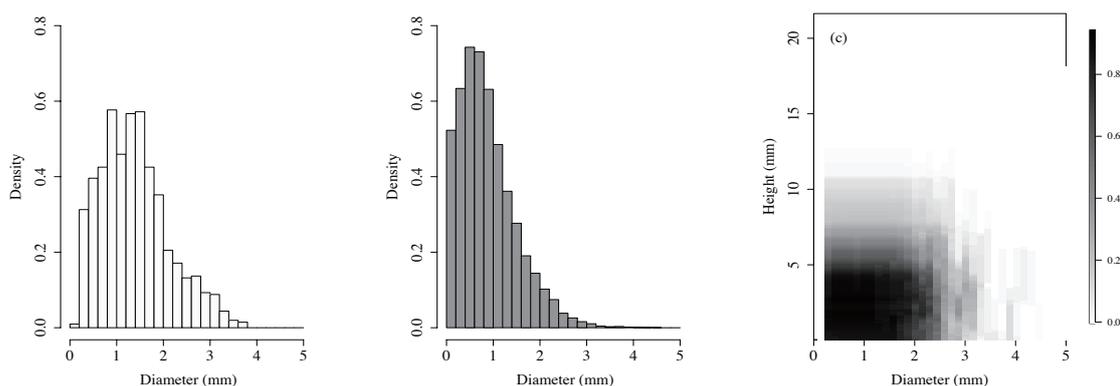


図 1 解析事例

(a) 粒径分布, (b) 間隙直径分布, (c) 各間隙直径において水で満たされた面積の占める割合

### 参考文献

- 1) 安達聖, 山口悟, 中村一樹, 2015:雪氷用 X 線 CT と MRI の三次元画像の合成による湿雪中の液体分布の可視化. 雪氷研究大会(2015・松本) 講演要旨集, 55.

1 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター  
2 防災科学技術研究所 新庄雪氷環境実験所

Snow and Ice Research Center, NIED  
Shinjo Cryospheric Environment Laboratory, Snow and Ice Research Center, NIED

## 札幌で 2021 年 2 月に発生した斑点濡れ雪の氷薄片観察 Observation of ice-thin section of white spotted wet snow in Sapporo, February 2021.

○波多 俊太郎<sup>1,2</sup>, 日下 稔<sup>1</sup>, 原田 康浩<sup>3</sup>, 庭野 匡思<sup>4</sup>, 的場 澄人<sup>1</sup>  
Shuntaro Hata<sup>1,2</sup>, Ryo Kusaka<sup>1</sup>, Yasuhiro Harada<sup>3</sup>, Masashi Niwano<sup>4</sup> and Sumito Matoba<sup>1</sup>

### 1. はじめに

自然積雪の融解や圧雪により不透水性の地面上に生成する「白い斑点を含む濡れ雪」を斑点濡れ雪と呼ぶ<sup>1)</sup>。これまで観察された斑点濡れ雪は基本的に 1–3 cm 程度の薄い積雪中で発生すると考えられている。そのため斑点濡れ雪の内部構造や生成・消滅過程は、上部からの観察によって解釈されてきた<sup>2,3)</sup>が、断面を切り出す等による直接観察の報告例はない。

2021 年 2 月 15 日に、北海道大学低温科学研究所駐車場に氷板の内部および下部に可動性を示す斑点模様が形成された。本研究では、この斑点模様を示した斑点濡れ雪の内部構造を断面の薄片解析による直接解析により明らかにすること、観測時の気象条件から形成過程を考察することを目的とした。

### 2. 手法

#### 2. 1. 氷薄片観察

2021 年 2 月 15 日に低温科学研究所研駐車場で形成した路面氷を、ピックルとシャベルを用いて切り出し採取した。採取した氷試料を -20°C の低温室内で保管したのち、ホットプレートを用いて厚さ ~1 mm の断面薄片を作成した。作成した薄片を偏光板で挟み、LED ライトを用いた透過光画像を用いて試料断面の構造観察を行った。

#### 2. 2. 気象データ

札幌管区気象台の AMeDAS および低温科学研究所気象観測露場で計測されている気温および積雪深データを用いた。

### 3. 結果

ここでは、断面薄片の初期観察結果を報告する。

断面薄片の透過光画像から、明瞭な二層構造が確認された (図 1)、上層および下層の厚さはそれぞれ 5 mm、10 mm だった。下層では <1 mm の微細な気泡を内包する細かな氷結晶が分布していた (図 1)。また、結晶の大きさと、氷内部に複雑に分布した気泡の存在によって、下層内部における氷結晶境界決定は困難であった。一方、上層の氷層中に細かな気泡は確認されず、5 mm

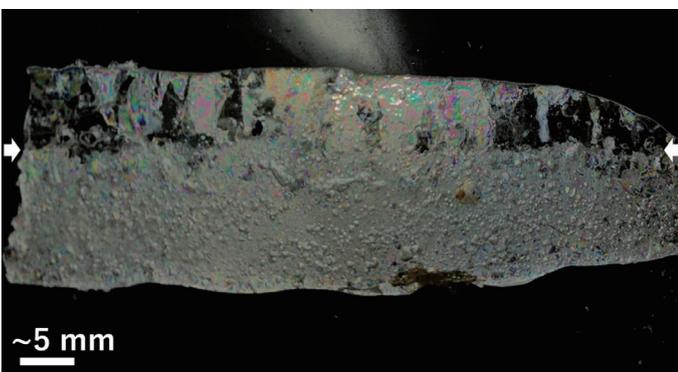


図 1. 路面氷断面薄片の偏光撮影写真。矢印で上下層の境界を示す。

程度の比較的大きな氷結晶が観察された。

2021 年 2 月 8 日から斑点濡れ雪が観測された 2 月 15 日まで、気温は増加傾向にあった (図 2)。2 月 8 日に 18 cm の降雪があり、その後 2 月 15 日まで大きな降雪は生じなかった。

### 3. 考察

路面氷の断面薄片から明瞭な 2 層構造が見られた。下層は細かな気泡を多く含み、氷結晶の大きさが気泡と同程度であることから、斑点濡れ雪が氷化して形成された構造であると考えられる。一方で、上層中の氷粒子の直径は数 mm 程度であり、鉛直上向きに結晶が成長した様子が見られる (図 1)。この上層の構造は、2 月 13–15 日の大きな気温の振幅 (図 2) により積雪融解水の再凍結が生じたことを示唆している。

気象条件を踏まえると、形成過程は次のように考えられる。2 月 8 日に氷点下 5–8 度内で 18 cm の積雪が生じ、その後の 13 日まで続く気温上昇によって積雪表面が融解し積雪中の空気が融解によって形成した濡れ雪に閉じ込められ、斑点濡れ雪が形成された。その後 13–15 日には昼間の融解と夜間の再凍結が繰り返されたことで上層に融解再凍結による氷層が形成され、2 層構造になった。

今後さらに氷断面薄片の作成・観察を進め、斑点濡れ雪の内部構造および形成過程を詳細に明らかにする予定である。

### 参考文献

- 1) 亀田ら (2012) 雪氷研究大会講演要旨集 pp.80
- 2) Kameda et al. (2014), J. Glaciol., 60 (224), 1075–1083
- 3) 亀田ら (2016) 雪氷研究大会講演要旨集 pp.59

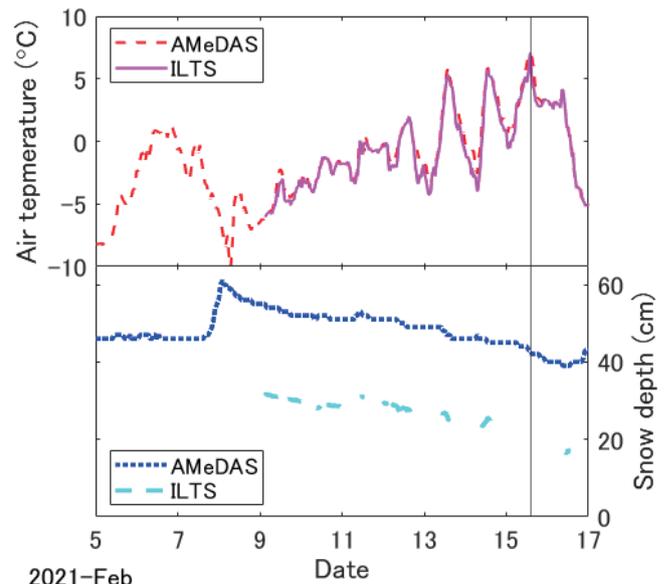


図 2. 2021 年 2 月の札幌市における気温変化および積雪深変化。

1 北海道大学低温科学研究所  
2 北海道大学大学院環境科学院  
3 北見工業大学工学部  
4 気象庁気象研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University  
Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology  
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

SEM-EDS 測定による air hydrate 結晶中のアルゴンの発見  
Discovery of Argon in Air-Hydrate Crystals by SEM-EDS Analysis

○内田努<sup>1</sup>, 繁山航<sup>2,3</sup>, 大藪幾美<sup>3</sup>, 東久美子<sup>2,3</sup>, 中澤文男<sup>2,3</sup>, 本間智之<sup>4</sup>, 川村賢二<sup>2,3,5</sup>, Dorthe Dahl-Jensen<sup>6</sup>,  
Tutomu Uchida, Wataru Shigeyama, Ikumi Oyabu, Kumiko Goto-Azuma, Fumio Nakazawa, Tomoyuki Homma, Kenji Kawamura,  
Dorthe Dahl-Jensen

## 1. はじめに

極地氷床氷は過去の大気成分を気泡として保有しており、過去の地球環境を直接観測することのできる貴重な試料である。例えば大気主成分の酸素 (O<sub>2</sub>) /窒素 (N<sub>2</sub>) 比は氷コアの年代決定に利用され、炭酸ガスやメタン等の温室効果ガスはその濃度変化と過去の平均気温との相関が見出されている。またアルゴン (Ar) も温度変化の指標として重要である。氷床深部では気泡は低温・高圧条件下で圧縮され、air hydrate と呼ばれる水和物結晶へと変化するが、気体成分は分別現象により気泡とは異なった組成で air hydrate 結晶中に取り込まれる。大気の主成分である N<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> に関しては分光法により air hydrate 結晶中に存在することが確認されている。しかしそれ以外の大気成分が air hydrate 結晶中で観測された例はなく、氷床深部氷中のどこに存在しているかはわかっていない。本研究では、分光法では測定が困難な Ar を観測するため、グリーンランド NEEM 氷コア中の air hydrate 結晶の SEM 観察-EDS 測定を行った。

## 2. 実験方法

観測に使用した試料は、2009~10年にグリーンランド NEEM 基地で掘削され、国立極地研究所の-50°C低温で保管されていた 1548m (最終氷期, 19.2 kyr BP), および 2406m (最終間氷期, 125.5 kyr BP) 深の氷コアである。NEEM 氷コア中の air hydrate 結晶分布の報告はないが、NEEM 基地における垂直温度分布の観測と air hydrate 結晶の相平衡条件から、これらの深さは気泡-air hydrate 結晶遷移帯より深いと予想される。

各氷コアから薄片試料(10~20mm×約 10mm×厚さ 1~4 mm)を整形し、光学顕微鏡で氷内に存在する air hydrate 結晶を 2~3 個選んで、冷却装置(PP3010; Quorum Technologies)を搭載した走査型電子顕微鏡(SEM: Quanta 450 FEG; Thermo Fisher Scientific, Inc.)測定に供した。air hydrate 結晶の急激な解離を避けるため、試料を装置に移動する際は温度を液体窒素温度に保った。SEM 試料室内で試料温度を-80~-50°Cに上昇させて氷試料表面を昇華させ、air hydrate 結晶の一部を露出させて観測した。試料表面電荷の蓄積を軽減するため、SEM 試料室内は N<sub>2</sub> ガスを圧力 120 Pa にパージして観測した。そして元素分析のためにエネルギー分散 X 線分光(EDS: X-Max 50; Oxford Instruments)測定を行った。

## 3. 結果と考察

光学顕微鏡で薄片試料を観測した結果、air hydrate 結晶の他に気泡等も観察され、氷コアの緩和が起きていることが確認された。しかしほとんどの air hydrate 結晶は解離せず観測されたことから、本研究に支障を及ぼすほど緩和は進んでおらず、-50°Cで良好な保管が行われていたことを確認した。また air hydrate 結晶上には、微粒子が観測される場合があった。この air hydrate 結晶について SEM 観察を行った結果、結晶内部が周囲の氷とは異なるコントラストの構造体で満たされていることを確認した(Fig. 1 右上図)。この構造体に対して EDS 測定を行った結果(Fig. 1), ホストの H<sub>2</sub>O とゲストの O<sub>2</sub> に由来する O, ゲストと試料室内ガスの N<sub>2</sub> に由来する N, および試料を SEM ホルダに固定する接着剤に由来する C が観測された。そして弱くブロードなバックグラウンドピークの中に、3 keV 付近に Ar とされるピークを観測した。このピークが周囲の水や微粒子からは観測されないこと、昇華実験によって air hydrate 結晶の構造体を除去するとこのピークが消滅することなどから、air hydrate 結晶に包接されている Ar であると判断した。

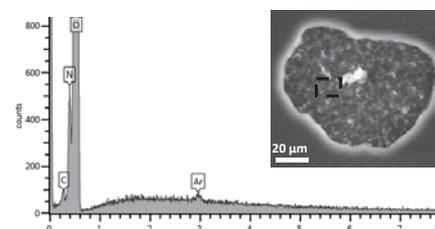


Fig. 1: SEM image of air-hydrate crystal in 1548 m NEEM ice core and the EDS spectrum in it (shown by square)

1 北海道大学大学院工学研究院  
2 総合研究大学院大学  
3 国立極地研究所  
4 長岡技術科学大学  
5 海洋研究開発機構  
6 Centre for Ice and Climate, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen

Faculty of Engineering, Hokkaido University  
The Graduate University for Advance Studies, SOKENDAI  
National Institute of Polar Research  
Nagaoka University of Technology  
Japan Agency for Marine Science and Technology (JAMSTEC)

## グリーンランド南東ドームにおけるアイスコア掘削と気象・雪氷観測 Ice Core Drilling and the Related Observations at the SE-Dome site, southeastern Greenland

○飯塚芳徳<sup>1</sup>, 的場澄人<sup>1</sup>, 箕輪昌紘<sup>2</sup>, 山崎哲秀<sup>3</sup>, 川上薫<sup>1,4</sup>, 角五綾子<sup>1</sup>, 宮原盛厚<sup>5</sup>, 藤田耕史<sup>2</sup>, 橋本明弘<sup>6</sup>,  
庭野 匡思<sup>6</sup>, 谷川朋範<sup>6</sup>, 青木輝夫<sup>7</sup>

Yoshinori Iizuka<sup>1\*</sup>, Sumito Matoba<sup>1</sup>, Masahiro Minowa<sup>1</sup>, Tetsuhide Yamasaki<sup>2</sup>, Kaoru Kawakami<sup>1,3</sup>, Ayako Kakugo<sup>1</sup>, Morihito Miyahara<sup>4</sup>, Koji Fujita<sup>5</sup>, Akihiro Hashimoto<sup>6</sup>, Masashi Niwano<sup>6</sup>, Tomonori Tanikawa<sup>6</sup>, and Teruo Aoki<sup>7</sup>

### 1. はじめに

極域氷床は過去の大気成分やエアロゾルを保存しているアーカイブである。過去の気候成分やエアロゾルを復元するために主に氷床の涵養域でアイスコアが掘削される。涵養が少ない南極内陸部などのアイスコアは過去 80 万年にもなる古環境情報を保存している一方で、時間解像度の悪さやエアロゾルなどのプロキシの変質が生じやすいなどの短所がある。他方で、涵養量の多いグリーンランド南東部などのアイスコアは、季節変動スケールでプロキシをよく保存していることが知られている<sup>1),2),3)</sup>。

2015 年に、グリーンランド南東ドームにおいて、90.45m のアイスコアが掘削された<sup>1)</sup>。このアイスコアを解析したところ、季節変動スケールの沈着エアロゾルデータベースを構築することができたが、その構築は過去 60 年間にとどまった<sup>2),3)</sup>。これは高涵養領域のアイスコアはその涵養量の高さのため、単位長さあたりに含む年代が短く、古い過去にまでさかのぼれないという短所をもつためである<sup>2)</sup>。時間解像度やエアロゾルの保存状態の良いアイスコアを用いて人為起源変動を詳細に解読するためには、産業革命前後の降雪が保存されている深度まで、高涵養量地域のアイスコアをより長く採取する必要がある。

産業革命から現在まで、いわゆる人新世(AD1850-present)の季節変動スケールの沈着エアロゾルデータベースを構築するために、グリーンランド南東ドーム(67°11'N, 36°28'W, 3160.7 m a.s.l.)において、2021 年 4-7 月に深さ約 250m のアイスコアを取得した。本発表はこの南東ドーム調査にかかわるロジスティクス、アイスコア掘削、気象・雪氷観測について報告する。

### 2. ロジスティクス

2021 年 5 月 9 日-6 月 14 日、5 名の隊員がグリーンランド南東ドームに滞在し、アイスコア掘削をはじめとする気象・雪氷観測を実施した。隊員は 4 月 26 日にグリーンランドヌークで合流し、28 日にクルスクに移動した。その後、4 月 28 日から 5 月 9 日までクルスクに滞在し、日本から発送した物資の整理、食料・燃料の確保や航空機チャーターの手配をした。クルスクから南東ドームへは Norlandair 社のツインオッターをチャーターし、物資 3.6 トンと人員 5 名を輸送した。南東ドーム滞在時は日本からの気象予報、掘削技術、チャーター手配などのサポートをうけ、掘削に従事した。6 月 14 日に掘削されたアイスコアとともにクルスクに戻り、アイスコアを空港の冷凍保管庫に保存した。隊員は 6 月 15 日にクルスクを離れ、6 月 20 日には全員が帰国した。この調査はコロナ禍の影響を強く受けた。例えば、本計画は 2020

年春に実施する予定であったが延期して、2021 年春の実施となった。具体的な影響については発表当日にその詳細を報告する。

### 3. アイスコア掘削と気象・雪氷観測

#### 3.1 アイスコア掘削

アイスコア掘削には地球工学研究所製の浅層メカニカル掘削機(model; SD303-RE1909)を九州オリンピア工業にて改良して使用した。この掘削機の特徴は 1) 750W のウインチモータを採用し、ケーブルの上げ下げが早いこと、2) 一回の掘削で最長 1m という長いアイスコアを取得できることが挙げられる。2021 年 5 月 11 日~6 月 2 日に 250.51m のアイスコアを取得した。アイスコアには厚さ 20 mm 未満の 15 層の氷板が観察された。このアイスコアは船便で冷凍状態のまま 9 月中旬に北海道大学低温科学研究所に輸送される予定である。

#### 3.2 気象観測

ハンドヘルド型の小型気象観測器を用いて、現在天気・気温・雪温・気圧・雲量・雲形・視程を滞在中に 116 回、自動気象観測装置(AWS)を設置して 5 月 10 日~6 月 6 日まで温度・湿度を 5 分毎に計測した。滞在前半の天候は良好であったが、滞在中に 3 回のブリザードがあり、後半は予報にない降雪を経験した。滞在中の気圧の平均値は 669.6hPa, AWS による気温の平均値、最低値、最高値はそれぞれ -16.9, -29.3, -2.1°C であった。

#### 3.3 雪氷観測

深度 3.3m の積雪ピットを掘り、積雪断面観測・および化学試料の採取をした。滞在中に表面雪を 26 回、降雪とエアロゾルの同時採取を 6 回行った。これらの試料はアイスコアを共に輸送され、化学成分などが解析される予定である。また、全地球測位システムと地中レーダーを用いて、掘削地点周囲約 3 km の表面高度と深度 100m までの内部構造を計測した。その結果、掘削地点はドームから約 2 km 北西に位置していることが分かった。

### 4. アイスコア解析

本プロジェクトは年齢や役職を問わず興味を持たれた方に積極的にアイスコアを配分し、データを迅速に公開する。ぜひ発表を聞きにいらしていただき、分析を希望される方と今後の新しい連携を進めていきたい。

### 参考文献

- 1) Iizuka et al., *Arc., Ant. Alp. Res.* 49, 13-27, 2017
- 2) Furukawa et al., *J. Geophys. Res.* 122, 2017(JD026716)
- 3) Iizuka et al., *J. Geophys. Res.* 123, 2018(JD026733)

1 北海道大学低温科学研究所  
2 名古屋大学環境学研究所  
3 (一社) アバンナット  
4 北海道大学環境科学院  
5 株式会社アノウィ  
6 気象庁気象研究所  
7 国立極地研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University  
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University  
Avangnaq  
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University  
Anori Corporation  
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency  
National Institute of Polar Research

グリーンランド・カナック氷帽上 SIGMA-B サイトで観測された雲の有無による表面熱収支の違い

## Cloud forcing effect on surface energy balance at the SIGMA-B site on Qaanaaq ice cap, northwest Greenland

○西村基志<sup>1</sup>, 青木輝夫<sup>1,2</sup>, 庭野匡思<sup>2</sup>, 的場澄人<sup>3</sup>, 谷川朋範<sup>2</sup>, 山口悟<sup>4</sup>, 山崎哲秀<sup>5</sup>

Motoshi Nishimura, Teruo Aoki, Masashi Niwano, Sumito Matoba, Tomonori Tanikawa, Satoru Yamaguchi, Tetsuhide Yamasaki

## 1. はじめに

北極域における近年の急激な温暖化によるグリーンランド氷床 (GrIS) の顕著な質量損失が確認されている。それに関連して、雲の形成と GrIS の表面融解、質量損失の関係性に関しては多くの既報 (例えば, Niwano et al., 2015) があり、雲の形成によって表面融解や質量損失が加速するか否か様々な議論が行われてきた (van Tricht et al., 2016; Hofer et al., 2017; Niwano et al., 2019)。

その雲の形成と GrIS の質量損失の関係に関する不確実性は、雲の形成による大気状態の変化や表面熱収支に対する強制力の複雑さに起因している。雲による放射強制力の仕組み、および、そのアルベドとの関係は、“Radiation Paradox” (Ambach, 1974) として古くから理解されていた。しかし、それらの関係の理解は定性的な議論に留まっており (例えば, Izeboud et al., 2020)、定量的な議論は不十分である。また、雲の形成が乱流フラックスへ与える影響まで議論を深めた報告は、極域に限れば Niwano et al. (2019) の他は稀有である。したがって、GrIS の表面融解および質量損失を駆動する重要な要因の一つである雲による強制力に関して、その理解の深化を行うことは極めて重要である。

そこで、本発表ではグリーンランド北西部に設置された自動気象観測装置 (AWS: Automatic Weather Station) の観測データ解析から、雲の有無による表面熱収支諸要素の違い、および、その要因について発表する。

## 2. 方法

本研究では、グリーンランド北西部に位置するカナック氷帽上 SIGMA-B サイト (77° 31' N, 69° 04' W, 944 m a.s.l.) の AWS で観測された、気温、相対湿度、風向、風速、気圧、上向き・下向き短波放射、上向き・下向き長波放射、積雪深のデータを用いた。本研究では 2012 年 8 月から 2020 年 8 月までの 1 時間間隔観測データを解析に用いた。熱収支解析では短波放射収支、長波放射収支、顕熱フラックス、潜熱フラックスの 4 つの熱要素を解析対象とした。また、上空の雲量の指標 ( $N_e$ ) を Conway et al. (2015) の手法を用いて算出した。 $N_e$  の算出式は以下の通りである。

$$N_e = (\varepsilon_{eff} - \varepsilon_{cs}) / (\varepsilon_{ov} - \varepsilon_{cs}), \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eff} = LW^{\downarrow} / \sigma T_a^4, \quad (2)$$

ここで、 $N_e$ : 雲量指数、 $\varepsilon_{eff}$ : 大気の射出率の推定値、 $\varepsilon_{cs}$ : 快晴時の大気の射出率の仮定値、 $\varepsilon_{ov}$ : 曇天時の大気の射出率の仮定値 (= 1)、 $LW^{\downarrow}$ : 下向き長波放射 [ $W m^{-2}$ ]、 $\sigma$ : ステファンボルツマン定数 [ $= 5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ]、 $T_a$ : 気温 [K] である。

(1) 式で算出した  $N_e$  を用いて、天気を快晴、晴れ、曇天の 3 つに分類した。その天気分類に基づき、雲の有無による各熱要素の熱量の違いを (3) 式のように計算した。なお、大気から雪面へ向

かう熱輸送の方向を正と定義する。

$$CFE = Q_{allsky} - Q_{clearsky}, \quad (3)$$

ここで、 $CFE$ : 雲の有無による熱量の差 [ $W m^{-2}$ ]、 $Q_{allsky}$ : 全天時の平均熱量 [ $W m^{-2}$ ]、 $Q_{clearsky}$ : 快晴時の平均熱量 [ $W m^{-2}$ ] である。

## 3. 結果・考察

全解析期間中の月毎に平均した  $CFE$  は下記の特徴を示した。正味短波放射に対する  $CFE$  は負の値であり、夏季 (JJA) にはその量はさらに負に大きくなった。正味長波放射に対する  $CFE$  は通年で正の値を示した。顕熱フラックスに対する  $CFE$  は通年で負の値であった。潜熱フラックスに対する  $CFE$  は他の熱要素に比べてその量は少なく、年平均値は  $1.2 W m^{-2}$  であったが、夏季には他の季節に比べて大きな正の値 (JJA 平均:  $3.4 W m^{-2}$ ) を示した。正味の全放射 (短波+長波) 収支に対する  $CFE$  ( $CFE_{Rnet}$  = 雲の放射強制力) および雪面熱収支に対する  $CFE$  は、夏季を除いて正の値であった。一方、夏季にはそれらは負の値を示し、7 月の  $CFE_{Rnet}$  は  $-1.6 W m^{-2}$ 、6 月、7 月の雪面熱収支に対する  $CFE$  はそれぞれ  $-2.1 W m^{-2}$ 、 $-1.2 W m^{-2}$  であった。

SIGMA-B サイトは、多量の表面融解が起こる年の夏季には裸氷が出現し、アルベドが大きく低下する特徴を有している。上記  $CFE_{Rnet}$  の季節変化の要因を調べるため、 $CFE_{Rnet}$  とアルベドの関係について調べた。7 月の月平均アルベドが 0.70 を下回った年は、2015 年、2016 年、2019 年、2020 年であり、そのうち 2015 年と 2019 年における  $CFE_{Rnet}$  の JJA 平均値は負であった。加えて、アルベドと  $CFE_{Rnet}$  のそれぞれの各年、各月の平均値には、有意な正の相関 ( $n = 42$ ,  $R^2 = 0.29$ ,  $p < 0.01$ ) が見られた。したがって、SIGMA-B サイトにおける  $CFE_{Rnet}$  は季節変動を示し、その変動は雪面アルベドによって支配されていることが示唆された。すなわち、雪面アルベドが低下したことで、正味短波放射に対する  $CFE$  (負) の絶対値が大きくなり、正味長波放射に対する  $CFE$  (正) の値を上回った結果、 $CFE_{Rnet}$  がアルベドの低い年の夏季に負に転じたと考えられる。

## 4. 引用文献

- 1) Niwano, M. et al. (2015). *Cryosphere*, **9** (3), 971-988.
- 2) van Tricht, K. et al. (2016). *Nat. Commun.*, **7**, 10266, 1-9.
- 3) Hofer, S. et al. (2017). *Sci. Adv.*, **3**, e1700584, 1-8.
- 4) Niwano, M. et al. (2019). *Sci. Rep.*, **9**, 10380, 1-8.
- 5) Ambach, W. (1974). *J. Glaciol.*, **13** (67), 73-84.
- 6) Izeboud, M. et al. (2020). *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL087315, 1-9.
- 7) Conway, J. P. et al. (2015). *Int. J. Climatol.*, **35**, 699-713.

1 国立極地研究所

2 気象研究所

3 北海道大学低温科学研究所

4 防災科学技術研究所

5 アバンナット北極プロジェクト

National Institute of Polar Research

Meteorological Research Institute

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Avanngaq Arctic Project

## 複数衛星を用いた 2018 年および 2019 年のグリーンランド氷床表面融解面積と領域気候モデルによる再現結果との比較

### The comparison of the Greenland Ice Sheet surface melt extent between multi-spaceborne sensors and regional climate model in 2018 and 2019

○島田利元<sup>1</sup>, 堀雅裕<sup>2</sup>, 庭野匡思<sup>3</sup>

Rigen Shimada, Masahiro Hori and Masashi Niwano

#### 1. はじめに

近年変動の著しいグリーンランド氷床において、雪氷面アルベド変動を監視することは雪氷面放射収支や表面質量収支の理解に対して非常に重要である。雪氷面アルベドを支配する要因として、光吸収性不純物による雪氷面の汚染や積雪粒径の変化、氷床縁辺部における裸氷域・暗色域の面積変化が挙げられる。表面融解は直接的な融解のシグナルとしてだけでなく、積雪粒径の急激な増大や裸氷域・暗色域の拡大を引き起こすことにより、氷床表面のアルベドを急激に低下させる。そのため、これまで人工衛星を用いた融解監視が進められてきた<sup>1)</sup>。代表的な例としては、複数の受動型マイクロ波センサを用いた 40 年以上に渡る長期データセットが構築されており<sup>2)</sup>、氷床監視の基礎的な情報として活用されている。一方、極地氷床に特化した領域気候モデル開発が進められており、その中で計算される氷床表面温度と含水率から得られる表面融解は、衛星による長期解析と同等の精度で再現されている<sup>3)</sup>。しかし衛星観測に基づく環境監視は依然重要な役割を果たしており、モデルの再現精度の向上のためにも表面融解を検知する手法の精度向上や衛星・モデル間の相互理解が必要である。

本研究では従来のマイクロ波放射計に基づく融解検知に、光学・熱赤外観測の情報を付加することにより検知精度の向上を目指した新たな手法の開発を行ってきた。本稿では、2018 年および 2019 年の 4 月から 8 月を対象に、複数衛星を用いて求められた融解面積を、領域気候モデルによる融解面積と比較することにより、本手法の妥当性を調査した結果を示す。

#### 2. 解析手法

##### 2.1 衛星データ

本研究ではマイクロ波、光学、熱赤外センサを搭載した衛星の観測データを複合的に使用した。マイクロ波観測は GCOM-W/AMSR2 を、光学・熱赤外観測は Terra および Aqua に搭載された MODIS および GCOM-C に搭載された SGLI の観測データを使用した。

マイクロ波を用いた融解検知にはこれまで実績のある XPGR 法および XPRG 法<sup>1)</sup>を改良した revXPGR 法を用いた。また、熱赤外検知手法は、雪氷面温度に基づいた手法を採用した<sup>4)</sup>。光学的検知手法には、可視・近赤外域の雪氷面における反射率の関係に基づいた手法<sup>5)</sup>を採用した。これらの複数手法による検知結果の統合には、AWS によって観測された雪氷面温度から得られる表面融解を真値とした各手法の融解検知精度を重みとした重み付き多数決法を使用した。

##### 2.2 領域気候モデル

領域気候モデルによって再現された表面融解面積解析には、NHM-SMAP の計算結果を用いた。本モデルはグリーンランド氷

床を対象に開発された極域気候モデルであり、氷床表面温度から表面融解を高精度で推定することが可能である<sup>3)</sup>。

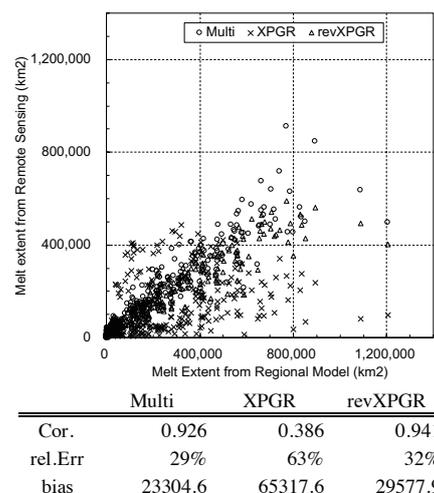
#### 3. 解析結果

複数衛星データを用いて求めた氷床表面融解面積は、モデルによって得られた融解面積と調和的な変動を示すことがわかった。モデルと衛星による融解面積を比較した結果、統合手法では両者の RMSE をモデル平均値で除した相対誤差で 29%、平均誤差が 23,304 km<sup>2</sup>であった (図表)。マイクロ波単体による従来手法である XPGR 法との比較では、相対誤差が 63%、改良手法である revXPGR 法では、相対誤差が 33%となった。相関係数に注目すると、revXPGR 法による結果が最も強い相関があるものの、相対誤差・バイアスは統合手法が最小となることから、マイクロ波単体の場合と比較して、光学・熱赤外の情報を加えた統合手法の方が妥当な融解面積変動が得られることがわかった。特に熱赤外による手法は雪氷面温度を基に融解を検知することから、モデルによる推定手法と同じ原理であるため、モデルの結果により近づいたと考えられる。

光学・熱赤外観測は雲による欠損が多いものの、観測可能な領域を統合することで、マイクロ波を単体で用いる場合に比べ高い精度で融解を検知することが可能であることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) Abdalati and Steffen, 1997, *J. Clim.*, 10, 165-175.
- 2) Mote, 2014, *NASA NSIDC*.
- 3) Niwano et al., 2018, *Cryosphere.*, 12, 635-655.
- 4) Hall et al., 2013, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2114-2120.
- 5) Chylek et al., 2007, *J. Geophys. Res.*, 112.



図表. モデルと衛星による氷床融解面積の比較と各統計量

1 宇宙航空研究開発機構  
2 富山大学  
3 気象研究所

Japan Aerospace Exploration Agency  
The University of Toyama  
Meteorological Research Institute

## 氷床流動モデル IcIES-2 の開発と理想的・現実的氷床の感度実験 Development of an ice-sheet model IcIES-2 and benchmark simulation on idealized and realistic ice-sheet configuration

○齋藤冬樹<sup>1</sup>, 阿部彩子<sup>2</sup>, 小長谷貴志<sup>2</sup>, 大石龍太<sup>2</sup>

SAITO Fuyuki, Ayako ABE-OUCHI, Takashi OBASE and Ryouta O'ISHI

三次元氷床流動モデル Ice sheet model for Integrated Earth-system Studies (IcIES) は 東京大学大気海洋研究所 (AORI) と国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の共同研究のもと開発が進められてきた。これまで南極氷床 (Saito and Abe-Ouchi, 2010 など)、グリーンランド氷床 (Saito et al., 2016 など)、過去の北半球氷床 (Abe-Ouchi et al. 2013 など) といった様々な氷床に様々な観点で適用されてきたモデルである。また、従来の氷床モデルの標準的な仕様である、Shallow-Ice 近似を元にし、かつ高次の力学近似 (Blatter 1995) のオプションを含んでいる。現在 IcIES の設計方針を一部受け継ぎ、新しい氷床流動モデル IcIES-2 の開発が進められている (以降、旧 IcIES を IcIES-1 と呼ぶ)。IcIES-2 は IcIES-1 と比べて、未実装あるいは実装中の課題も含めて以下のような特徴を持つ。

- オープンソースとして公開
  - MPI による並列化を実装 (IcIES-1 は非並列化モデルである)
  - IcIES-1 の特徴である数値計算手法における対称性の担保を (並列化を実現しながら) 継承
  - 数値計算用の外部 library を極力使用しない、独立した設計
  - Shallow-Shelf Approximation (SSA) を用いた棚氷過程の実装
  - Schoof (2007) などに基づく、Grounding line parameterization の実装
  - Polythermal 表現を改良するための Enthalpy scheme (Blatter and Greve, 2015) による熱力学計算
  - RCIP scheme (Xiao et al., 1996) など高精度移流・輸送スキームによる氷厚・熱力学・年代・物質輸送計算
- これまで IcIES-2 は応用が限定的であったが、氷床モデルの高解像化、高精度化への期待から、今後は IcIES-1 と並行して運用を増やしていく予定である。そこで、本研究では、多くの氷床モデルが使用している現実的な氷床と理想的な氷床の両方で、標準的な境界条件、典型的な実験設定下での、再現実験を示し、IcIES-2 の特徴について、計算速度などの技術的な側面、および再現された氷床分布結果などの側面から紹介する。

特に、現在開発の中心課題である、高精度移流計算の導入とその効果について、一次元年代計算について記述の Saito et al. (2020) とそれを踏まえた熱力学計算への発展について紹介する。

### 参考文献

- 1) Saito, F., & Abe-Ouchi, A. (2010). Modelled response of the volume and thickness of the Antarctic ice sheet to the advance of the grounded area. *Annals of Glaciology*, 51(55), 41-48. doi:10.3189/172756410791392808
- 2) Saito, F. et al. (2016). SeaRISE experiments revisited: potential sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice sheet, *The Cryosphere*, 10, 43-63, doi:10.5194/tc-10-43-2016
- 3) Abe-Ouchi, A. et al. (2013). Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. *Nature* 500, 190-193. doi:10.1038/nature12374
- 4) Blatter, H. (1995). Velocity and stress fields in grounded glaciers: A simple algorithm for including deviatoric stress gradients. *Journal of Glaciology*, 41(138), 333-344. doi:10.3189/S002214300001621X
- 5) Schoof, C. (2007). Ice sheet grounding line dynamics: Steady states, stability, and hysteresis, *J. Geophys. Res.*, 112, F03S28, doi:10.1029/2006JF000664.
- 6) Blatter, H. & Greve, R. (2015). Comparison and verification of enthalpy schemes for polythermal glaciers and ice sheets with a one-dimensional model. *Polar Science*, 9(2), 196-207. doi:10.1016/j.polar.2015.04.001
- 7) Xiao, F. et al. (1996). Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function, *Computer Physics Communications*, 93(1), 1-12. doi:10.1016/0010-4655(95)00124-7
- 8) Saito, F. et al. (2020). Implementation of the RCIP scheme and its performance for 1-D age computations in ice-sheet models. *Geosci. Model Dev.*, 13, 5875–5896. doi:10.5194/gmd-13-5875-2020

1 国立研究開発法人海洋研究開発機構

2 東京大学大気海洋研究所

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
Atmosphere and Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo

一回の極端な大雪の厳しさを評価する指標の検討  
 —その1: 大雪の強度・広がり・継続時間に着眼した評価指標の設定—  
 Investigation of Evaluation Indexes for Severe Snowfall Events

- Part 1: Setting up Evaluation Indexes Focusing on the Severity, Expansion and Duration of Snowfall Events -

○原田裕介<sup>1</sup>, 大宮哲<sup>1</sup>, 武知洋太<sup>1</sup>, 遠藤康男<sup>1</sup>, 西村敦史<sup>1</sup>

Yusuke Harada, Satoshi Omiya, Hiroataka Takechi, Yasuo Endo and Atsushi Nishimura

1. はじめに

近年、急速に発達した低気圧や収束帯によってもたらされる多量降雪に伴い、多数の車両の立往生や長時間に亘る通行止めなどの障害が度重なって発生している。大雪災害を軽減するためには、一回の極端な大雪の発生頻度や地域性の特徴を整理のうえ、通行規制や情報提供のタイミングなどをサポートするための基準を示すことが重要である。本稿では、一回の大雪の厳しさを評価する指標を、大雪の強度・広がり・継続時間に着目のうえ、『降雪強度の閾値 40cm 24h<sup>-1</sup>以上となる地点割合』と設定した。以降、評価指標の設定の過程と、今後の予定について示す。

2. 事例の収集と警戒レベルの設定

大雪の厳しさを評価するために、内閣府<sup>1</sup>および原田ら<sup>2</sup>を参考に、道路管理に資することを重点に置いた5段階の警戒レベルを提案する(表1)。ここでは、警戒レベル3以上で道路交通に影響が発生し、多量降雪の強度と広がりがレベル3から5に上がるとともに大雪の厳しさが大きくなるとした。つぎに、内閣府<sup>3</sup>や新聞記事等で収集した大雪災害19事例に、表1の大雪災害の規模を参照のうえ、5段階の警戒レベルをそれぞれ付与した。

3. 降雪強度の閾値の設定と地域割合との関係

降雪強度(時間あたりに降った雪の深さ)の閾値は、①対象時間と②降雪量の最適な組み合わせとした。はじめに、①と②の候補を選択した。①対象時間について、気象庁の大雪警報の発表基準で用いられる12時間、雪による車両滞留発生の10-30時間前に降雪が開始している<sup>4</sup>ことから24時間の2通りを選択した。②降雪量について、道路幅員に20cm以上堆雪した場合に軽自動車が行けなくなる<sup>5</sup>ことから、20cmおよび20cm単位で増加させた40cm、60cm、80cmの4通りを選択した。つぎに、積雪寒冷地域を11に分類した地域を対象に、過去31冬期(12~3月)の気象庁AMeDAS積雪深観測値から求めた時間降雪量を用いて、上記①と②を組み合わせた8通りの候補の地点割合(各分類地域における積雪深観測地点数に対して降雪強度の閾値以上となる地点数)の冬期最大値(N=31)の出現頻度を整理した。その結果、各分類地域の地点割合 $r$ が $0 < r \leq 0.9$ (偏りなし)となる20cm 12h<sup>-1</sup>、40cm 24h<sup>-1</sup>を降雪強度の閾値として設定した。

地点割合は、各分類地域における大雪の広がりを表現しているが、降雪強度の大小は考慮されていない。そこで、各分類地域における降雪強度の閾値以上(20cm 12h<sup>-1</sup>以上、40cm 24h<sup>-1</sup>以上)となる地点割合の冬期最大値(N=31)と、その時の平均降雪強度との関係を整理した。その結果、これらは概ね比例することが確認され、各分類地域における地点割合は降雪強度を考慮できることが示された。つまり、地点割合を用いて警戒レベル4(広範囲での多量降雪)と5(広範囲での極端な多量降雪)を区別できると考えられる。

4. 一回の大雪の厳しさを評価する指標の設定

事例数の多い北陸地方を対象に、2章で設定した大雪災害の警

戒レベル4(5事例)およびレベル5(4事例)と、降雪強度の閾値以上(20cm 12h<sup>-1</sup>以上、40cm 24h<sup>-1</sup>以上)となる気象庁AMeDASの観測地点数を調べた。その結果、2020年12月に発生した1例を除き、警戒レベル5の方が多かった。つぎに、警戒レベル4と5について降雪強度の閾値以上となる地点割合を図1に示す。これらの中央値の差は、40cm 24h<sup>-1</sup>以上の方が20cm 12h<sup>-1</sup>以上よりも大きく、警戒レベルを判断する指標としてより妥当と判断した。以上より、一回の大雪の厳しさを評価する指標は、『降雪強度の閾値 40cm 24h<sup>-1</sup>以上となる地点割合』と設定した。

5. 今後の予定

本稿で設定した大雪の評価指標について、警戒レベルの再現期間を検討する。また、国土交通省が想定する各除雪工区における1サイクルの除雪時間が約3時間であることを考慮し<sup>6</sup>、短時間で道路交通に影響を与える降雪強度を、別途障害の度合いを示す指標として整理することを予定している。

参考文献

- 1) 内閣府, 2019: 避難勧告等に関するガイドライン①, 92pp.
- 2) 原田ら, 2020: 第32回ふゆトピア研究発表会論文集, 97-100.
- 3) 内閣府: 防災情報のページ (HP: 2021年6月29日閲覧) .
- 4) 村田ら, 2021: 2021年度(公社)日本雪氷学会北信越支部研究発表会予稿集, 25.
- 5) 金子ら, 2013: 第32回ふゆトピア研究発表会論文集.
- 6) 国交省, 2018: 第4回冬期道路交通確保対策検討委員会資料 4.

表1 大雪災害における警戒レベル(案).

警戒レベル	大雪災害の規模	道路交通に影響する 通行困難・通行止め	降雪の 状況
レベル5	通行止め+集落孤立 (自衛隊派遣等)	広範囲かつ長期的	広範囲での 極端な 多量降雪
レベル4	通行止め+除雪作業 困難 (他地方整備局や開 発建設部に応援、災 害対策本部の設定)	広範囲	広範囲での 多量降雪
レベル3	通行止めまたは立ち 往生発生	局所的	局所的な 多量降雪
レベル2	平均旅行速度の低下	-	-
レベル1	除雪	-	-

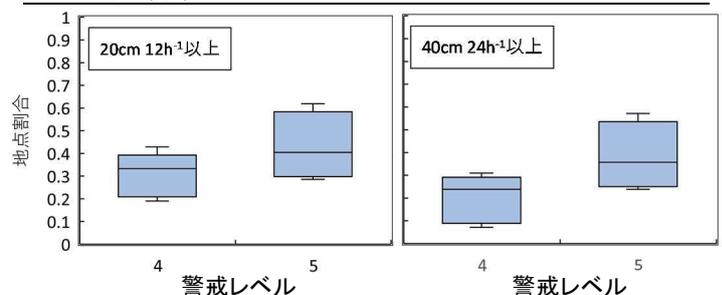


図1 降雪強度の閾値以上となる地点割合(於: 北陸地方).

1 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所

Civil Engineering Research Institute for cold region, PWRI

## 深層学習を用いた冬期歩行空間の路面すべり摩擦係数推定に関する基礎的検討 Basic study for friction inference on winter walkway using deep learning

○齊田光<sup>1</sup>, 徳永ロベルト<sup>1</sup>  
Akira Saida and Roberto Tokunaga

### 1. はじめに

積雪・凍結路面における歩行者の転倒事故は積雪寒冷地域を中心に多数発生しており、解決すべき課題の1つとなっている。冬期の転倒事故を防止するためには、路面凍結などによりすべりやすい箇所を予め把握し、すべりやすい箇所に関する情報提供を行う、または除雪や防滑材の散布を行うなどの対策が有効であると考えられる。路面すべりやすさの計測は多種多様な方法が提案されているが、計測機器が大型・大重量である、機器の運用に労力を要するなどの理由により、従来の手法を用いて簡単かつ精度良く歩行空間の路面すべりやすさを計測することは困難である。

そこで本研究では、深層学習の一手法である畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いて冬期歩行空間のすべりやすさを推定可能であるか基礎的な検証を行ったので結果を報告する。

### 2. CNN を用いた冬期歩行空間のすべりやすさ推定手法

本研究では路面すべりやすさの推定手法として、幅 112×高さ 112 ピクセルの RGB 画像から路面すべり摩擦係数 $\mu$ を 17 段階 ( $\mu < 0.05$ ,  $0.05 \leq \mu < 0.10$ , ...,  $\mu \geq 0.80$ ) で推定する CNN を用いた。CNN には MobileNet V2<sup>1)</sup> を使用し、CNN の学習用データには連続路面すべり抵抗測定装置 (Halliday Technology RT3)<sup>2)</sup> およびドライブレコーダー (JAF MEDIA WORKS DD-06 $\alpha$ ) が搭載された計測車両により 2018 年度・2019 年度冬期の北海道内一般道路車道部、ならびに富山県内の高速自動車道で収集した路面すべりやすさ実測データおよび路面画像データを用いた。

### 3. 冬期歩行空間のすべりやすさ推定結果および考察

本検証では、2020 年 12 月から 2021 年 2 月にかけて札幌市の歩行空間で撮影された非雪氷路面・雪氷路面画像 795 枚を用いて、画像中央部の幅 112×高さ 112 ピクセルの範囲内における $\mu$ 推定値、 $\mu_{inf}$ を求めた。併せて、 $\mu_{inf}$ の推定に用いた画像から路面雪氷状態を目視等で判別し、画像撮影地点のおおよその $\mu$ を求め $\mu_{inf}$ と比較した。なお、目視による路面雪氷状態判別結果から $\mu$ を正確に推定することは必ずしも容易ではなく、目視により非雪氷路面やシャーベット路面、氷膜・氷板路面と判別された路面では $\mu$ は広い範囲の値をとりうる<sup>2)</sup>。このため、本研究では目視による路面雪氷状態判別結果と $\mu$ の関係が比較的明確に表れている圧雪路面を対象として $\mu_{inf}$ の推定を行い、 $\mu_{inf}$ が圧雪路面における $\mu$  ( $0.15 \leq \mu < 0.55$ ) の範囲内であるかを確認することで $\mu$ が概ね正確に推定されているか否か確認した。併せて、本研究では非雪氷路面の $\mu$ 推定精度検証を行った。非雪氷路面の $\mu$ 推定精度検証では、画像中の路面に雪氷が存在しないことが明らかである画像 (積雪が発生していない 12 月上旬に撮影された画像および札幌市中心部のロードヒーティング稼働区間で撮影された画像) を用いて $\mu_{inf}$ を求め、 $\mu_{inf}$ が非雪氷路面における $\mu$  ( $\mu \geq 0.50$ ) の範囲内であるかを確認した。

図 1 は冬期歩行空間で撮影された路面画像および路面画像から推定された $\mu_{inf}$ の例を示す。なお、図中各写真中央の赤枠は $\mu$ 推定に用いた画像の領域を示す。図 1(a)および(b)に示す圧雪路面の $\mu_{inf}$ は 0.39 および 0.45 であり、 $\mu_{inf}$ は圧雪路面における $\mu$ の範囲内の値となった。また、図 1(c)および(d)に示す非雪氷路面の $\mu_{inf}$ は

0.69 および 0.73 であり、 $\mu_{inf}$ は非雪氷路面における $\mu$ の範囲内の値となった。他方、図 1(e)および(f)に示す圧雪路面の $\mu_{inf}$ は 0.61 となり、非雪氷路面の $\mu$ に相当する値となった。これらのケースでは雪氷表面への土などの付着や暗所での撮影などの理由により $\mu$ 推定に用いた画像に暗い領域が多く含まれたため、 $\mu$ を過大に推定したと考えられる。また、図 1(g)および(h)に示す非雪氷路面の $\mu_{inf}$ は 0.12 および 0.13 となり、圧雪路面における $\mu$ よりも低い値となった。この理由としては、本検証で用いた CNN の学習に用いた画像データはほとんどがアスファルト舗装上で収集したものであり、図 1(g)および(h)のようなアスファルト舗装以外の路面における $\mu$ を推定するための CNN の学習が不十分であったためと考えられる。なお、本検証における $\mu$ 推定の正解率 (圧雪および非雪氷路面を対象とした推定ケースから無作為に抽出した 100 回の推定ケースのうち、圧雪路面における $\mu_{inf}$ が 0.15 以上 0.55 未満であったケース数および非雪氷路面における $\mu_{inf}$ が 0.50 以上であったケース数の比率) は 74%であった。

### 4. おわりに

本研究により、深層学習を用いた路面すべり摩擦係数の推定手法は歩行空間においても適用できる可能性があることが示唆された。今後は歩行空間において路面すべり摩擦係数の推定精度検証をより詳細に行うとともに推定精度の向上を試みる。

### 謝辞

本研究の実施にあたり、ウインターライフ推進協議会および北海道大学をはじめとする多くの方に冬期路面画像の撮影にご協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) Mark Sandler et al. : MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks, Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2018.
- 2) 舟橋誠, 徳永ロベルト, 浅野基樹 : 連続路面すべり抵抗値測定装置 (RT3) の導入について、北海道の雪氷, No.26, pp.5-8, 2007.

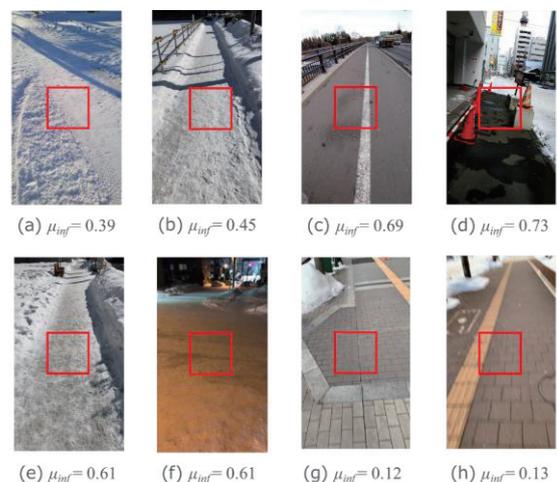


図 1 冬期歩行空間における路面すべり摩擦係数の推定例

<sup>1</sup> 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所

Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Public Works Research Institute

## 除雪作業で形成される雪堤の力学的特性の基礎的評価

— 雪層境界面の明瞭化による強度測定 of 改善 —

## Evaluation on the Mechanical Properties of Snow Bank Formed by Snow Removing Work

- Improved strength measurement by clarifying boundary surface of adjacent snow layers -

○永井悠都<sup>1</sup>, 河田剛毅<sup>1</sup>, 本間翔大<sup>1</sup>, 上村靖司<sup>2</sup>

Yuto Nagai, Yoshitaka Kawada, Shodai Honma and Seiji Kamimura

## 1. はじめに

道路除雪により路肩に形成される雪堤は、高さが増すほど崩れたときの危険性が増す。図 1 に示すように、雪堤は層構造を持つことに加えその強度には様々な要素が影響する。そこで著者らはそうした複雑な雪堤をなるべく単純化し、「1つの雪層(単層)」と「2つの雪層の境界面」の2カ所に着目して、それぞれの箇所での崩れに関する力学的特性と主要因子の関係を明らかにすることに取り組んでいる。これまで単層の強度について、時間経過とともに増加する傾向はつかめたが、境界面の強度についてはデータ不足に加え、データのばらつきが大きく定性的な傾向も不明確であった<sup>1)</sup>。その原因の1つとして、2層の境界面が不明瞭であることが考えられたので、著者らは強度に影響を与えることなく2層の境界面を明瞭にする方法を考案した<sup>2)</sup>。今回はそれを適用して強度試験を行った。

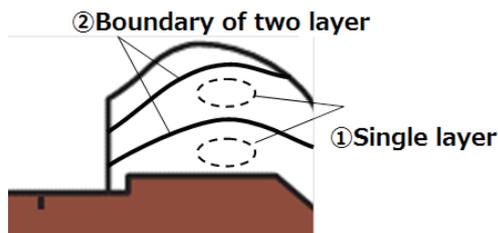


図1 調査対象箇所

## 2. 実験計画

## 2.1 内容

試料雪は製氷機で作った氷を削氷機で削って作成した人工ざらめ雪である。この雪をふるいにかけて粒径を4mm弱以下に揃えた。試料雪の保存ならびに強度試験はいずれも気温0~1℃の低温室で行った。単層の強度試験用に、内径270mm、厚さ40mm、高さ1mの発泡パイプ内に試料雪を自然充填した。2つの雪層の境界面の強度試験用に簡易2層モデルを作成した。内寸法300mm×300mm、厚さ40mmの発泡角パイプ内に、まず1層目として高さ300mmの雪を積み上げ、その7日後に2層目として高さ300mmの雪を積み上げ、さらに約1mの積雪に相当する荷重がかかるよう重りを載せた。2層の境界面を明瞭にするため、図2のような型を用いて1層目の上面に試験片の輪郭(60mm×100mmの長方形)に沿って粒度60のアルミニウム砥粒を0.2mm程度の厚さで均一に撒いた。発泡パイプの周囲は砕氷で囲い、内部の試料雪が融けないようにした。

## 2.2 強度試験

前節で説明した保存試料から所定寸法の直方体形状の試験片を切り出し、せん断強度試験を行った。実験条件として、単層の強度試験は保存してからの経過日数、2つの雪層の境界面の強度試験は2層目を積み上げてからの経過日数を変えた。また境界

面の強度試験については重りを無しとした(すなわち境界面にかかる荷重を小さくした)場合のデータも取った。

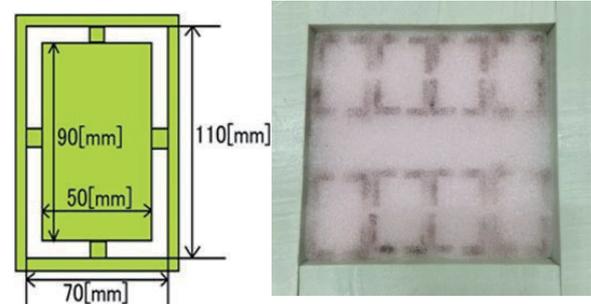


図2 砥粒の撒く型及び散布後の1層目上面

## 2.3 結果

図3に単層、および2つの雪層境界面のせん断強度と経過日数の関係を示す。どちらも測定値にある程度の分布幅があるが日数経過とともにせん断強度が増す傾向が認められる。それだけでなく強度分布そのものが両者でかなり近い。2つの雪層境界面のせん断強度について、経過日数7日の条件で重りを無しとした場合のせん断強度は重りありの場合とほとんど差がなかった。これらのことから、積み上げてからの経過日数が1週間程度の雪層表面と新たに積み上げた雪の間の結合力は、最初から一体として保存された雪塊の結合力とほとんど変わらないこと、およびその結合力には積雪1m程度の加圧力は影響しないことが示唆される。但し後者については2層目積み上げ後の経過日数をより大きくした場合にどうなるかなど更なる検証が必要である。

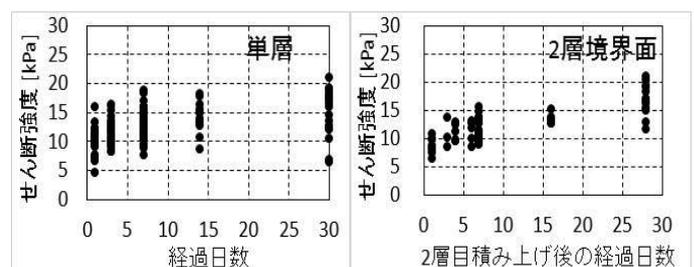


図3 単層、および雪層境界面のせん断強度と経過日数の関係

## 2.4 文献

- 1) 河田, 永井, 上村, 2019: 除雪作業で形成される雪堤の力学的特性の基礎的評価—測定値のばらつき低減の工夫と結合度合いの評価—, 雪氷研究大会講演要旨集, 277.
- 2) 河田, 永井, 上村, 2020: 除雪作業で形成される雪堤の力学的特性の基礎的評価—雪層境界面の明瞭化—, 雪氷研究大会講演要旨集, 150.

1 長岡工業高等専門学校  
2 長岡技術科学大学

National Institute of Technology, Nagaoka College  
Nagaoka University of Technology

## 凍結防止剤が雪堤の強度に与える影響に関する基礎的評価

## Fundamental Evaluation about Effects of Antifreezing Agent on the Strength of Snow Bank

○本間翔大<sup>1</sup>, 河田剛毅<sup>1</sup>, 永井悠都<sup>1</sup>, 上村靖司<sup>2</sup>

Shodai Homma, Yoshitaka Kawada, Yuto Nagai and Seiji Kamimura

## 1. はじめに

冬場の道路の除雪によって路肩や中央分離帯に形成される雪の壁のことを「雪堤」と呼ぶ。この雪堤が崩壊した場合、図1に示すように多量の雪塊が車線に飛び出し、最悪、交通事故を引き起こす可能性がある。その重大性は一般道よりも走行速度が高い高速道路の方が大きい。

積雪地域の幹線道路や高速道路では、気温に応じて凍結防止剤(塩化ナトリウム)が散布される。そして、その後の降雪等により路面に塩水がたまると、走行車両がこの塩水を跳ね飛ばすことで道路脇の雪堤下部に塩水がかけられる状況が発生する。この状況は特に走行速度が高い高速道路で多く発生すると考えられる。雪に塩水がかかると凝固点降下による融解などが発生し、粒子構造も変化するため、雪堤の崩れ現象にも何らかの影響を与えると考えられる。

そこで本研究はそうした影響を調べるための第1段階として、まずは雪堤下部に塩水がかかることによって、雪堤がどのように変形するか、および塩水がかかった部分の強度がどのように変わるかについて調べることにした。



図1 中央分離帯で発生した雪堤崩れ

## 2. 実験方法

## 2.1 試料雪

試料雪はしまり雪を想定し、低温室で削氷機により細かく削った氷を、発泡板で作った内寸 300mm×300mm×400mm の囲いに充填し、1週間保存したものを初期の雪試料として用いた。

変形の観察で用いる試料雪は-3~-4℃の低温室で、強度試験で用いる試料雪は-15℃の低温室で保存を行った。

## 2.2 塩水浸漬による変形の観察

2.1で説明した試料雪を約 180mm×140mm×130mm の大きさの立方体に切り分けた。これを濃度 20%の塩水に浸し、すぐ引き上げ保存した。保存開始から3日後と7日後に寸法を測定した。

この実験は保存時と同様に-3~-4℃の低温室で行った。

## 2.3 強度試験

塩水による影響を評価するために、「塩水に浸さない」条件と「塩水に浸した」条件で場合分けをした。

「塩水に浸さない」条件の場合は、2.1で説明した試料雪から 140mm×100mm×60mm に切り出し、1週間保存した後にせん断強度試験を行った。

「塩水に浸した」条件の場合は、2.1で説明した試料雪から

200mm×150mm×150mm に切り出し、濃度 20%の塩水に浸しすぐ引き上げ、1週間保存した。その後、140mm×100mm×60mm に切り出し、せん断強度試験を行った。

この試験は保存時と同様に-15℃の低温室で行った。

## 3. 結果

## 3.1 塩水浸漬による変形

今実験では試料雪の立方体を2つ用意し測定を行った。そのうち片方の測定結果を図2に示す。各寸法すべて減少していたが、特に高さの減少が著しいことがわかる。

1週間経過すると両方とも、縦・横の寸法は約3mm、高さは約15mm減少していた。

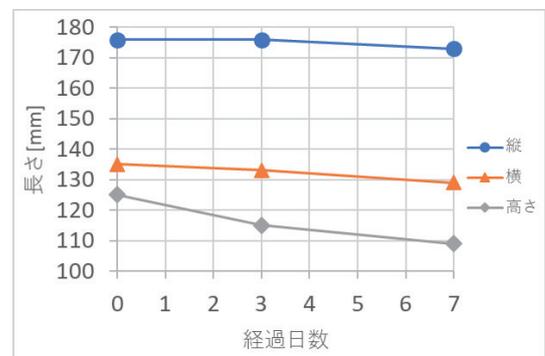


図2 塩水に浸した雪試料の寸法変化

## 3.2 強度試験

塩水浸漬の有無によるせん断強度の違いを図3に示す。塩水に浸けることで強度が低くなるという結果が得られている。強度試験の試験片は、元の保存試料から周辺部を除去した中心部を使っているため、ほぼ融解はしていない。したがって、融解していない箇所であっても塩水に浸かったことで強度が低下することを示唆している。

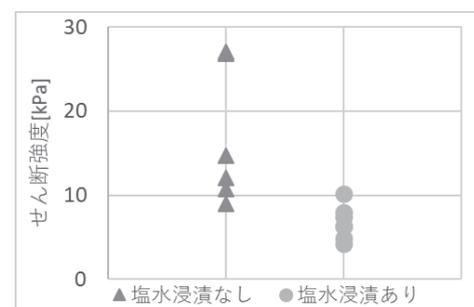


図3 塩水浸漬の有無による雪試料のせん断強度の違い

## 4. 今後の予定

今後は、塩水による強度減少の具体的な数値を割り出すためにデータ数を増やす必要がある。また、粒子観察を行い、雪粒子同士の結合の減少が視覚的にわかるような評価を行いたい。

1 長岡工業高等専門学校

2 長岡技術科学大学

National Institute of Technology, Nagaoka College  
Nagaoka University of Technology

## 鉄道安全データベースを用いた雪害事象分析 Analysis for Snow Disasters of Railway using Railway Accidents DataBase

○高橋大介<sup>1</sup>, 鎌田慈<sup>1</sup>, 辻澁樹<sup>1</sup>

Daisuke Takahashi, Yasushi Kamata and Hiroki Tsuji

### 1. はじめに

鉄道は、軌道や高架橋などの土木施設、電車線や変電所などの電気施設、車両などによって構成されるシステムであり、そのいずれもが正常であることで安全安定輸送がなされる。これらの多くは降積雪による影響（例：降雪や落雪の挟み込みによる分岐器不転換、パンタグラフ上の積雪による離線、車両台車部への雪の抱き込みなど）を受け、冬季に輸送障害（ここでは雪害と総称する）が発生することがある。

雪害は降雪ならびに積雪の変化に伴って発生するが、雪が降れば必ず雪害が発生する訳ではなく、システムの構成物の雪に対する耐力と降積雪状況とのバランスで発生が決まると考えられる。しかし、どれくらいの降雪量や気温などで、どのような雪害が発生するかは明らかでないため、鉄道事業者では、経験的に各雪害事象に対する対応を実施していることが多い。そこで、雪害の発生原因と降積雪状況の関係が明らかになれば、降積雪状況の値をモニタリングすることで、雪害に対する警戒準備が可能となると考えられる。

本研究では、雪害の発生原因と降積雪状況の対応を明らかにするために、過去の雪害事例を用いて、発生原因と発生時の降積雪状況について分析を実施した。

### 2. 分析方法

雪害事例については、（公財）鉄道総合技術研究所が鉄道事故の防止に寄与する目的で整備している鉄道安全データベースから2001年1月～2019年3月に富山県で発生したものを抽出した。なお、雪害事例と発生原因は、鉄道事業者が地方運輸局に届けたものであるため、報告者の主観的なものも含まれると考えられるが、本分析ではそのまま使用した。

鉄道事業者が報告した発生概況に基づいて、発生原因を分類し、雪害事例が発生した駅、もしくは駅間の近傍アメダスで取得された観測値を用いて、発生時の気温と降水状況について分析した。

### 3. 分析結果

分析した事例数は117件である。雪害事例の種類は、多い方から走行不能、不転換、倒木、パンタ離線、除雪、機器破損、地絡・短絡、脱線の順であった。これらの雪害の発生原因（図1）は、多い方から降積雪（43%）、着雪・落雪（31%）、雪崩（20%）であり、全体の約9割を占めていた。発生原因別に、発生までの気象状況について分析を行った。ここでは、紙面の都合上、気温と降水量に関する分析結果を示す。

図2は発生時刻を含む10分間において観測された気温のヒストグラムである。降積雪や着雪・落雪が原因の雪害は、発生時の気温範囲が雪崩に比べて狭く、 $-1^{\circ}\text{C}$ ～ $1^{\circ}\text{C}$ の範囲に集中する傾向

があった。一方、雪崩は、降積雪や着雪・落雪に比べて気温範囲が広く、プラスの気温で発生するケースが多かった。

図3は発生時刻の前6時間における積算降水量のヒストグラムである。雪崩は、降積雪や着雪・落雪とは異なり、前6時間積算降水量が少ない状況で発生するケースが多いことがわかる。

本発表では、降雪量などの他の気象状況を示す観測値との分析をもとに、雪害が発生する気象状況の特徴ならびにその他の地域での雪害事例についても報告する予定である。

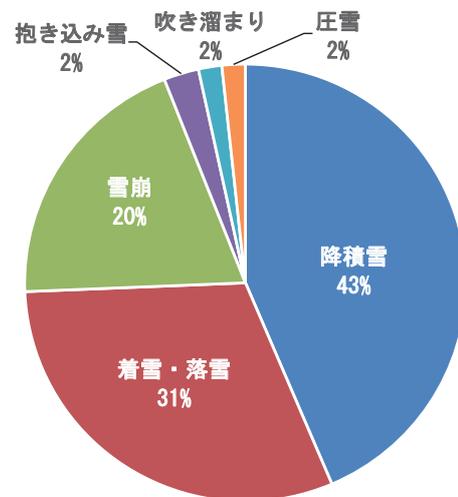


図1 雪害事例の原因

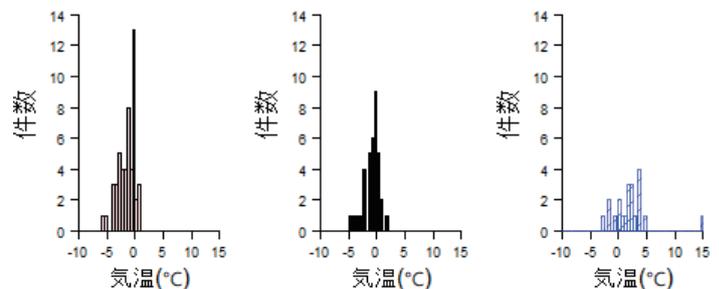


図2 発生時刻を含む10分間の気温のヒストグラム

(左)：降積雪，(中央)：着雪・落雪，(右)：雪崩

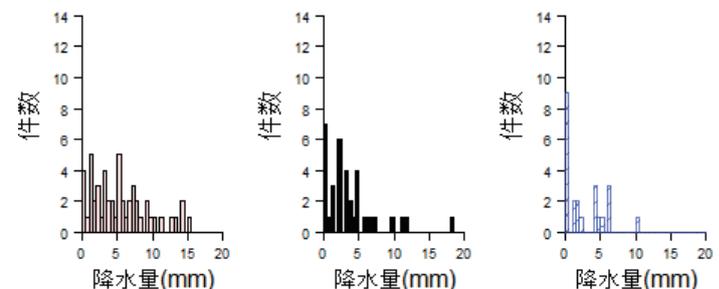


図3 発生時刻の前6時間における降水量のヒストグラム

(左)：降積雪，(中央)：着雪・落雪，(右)：雪崩

## ホッキョクギツネ毛皮と防水透湿性素材の低温下での透湿性能

## Arctic Fox Fur and Waterproof Breathable Fabric Breathability in Low Temperature Environment

○日下 稜<sup>1</sup>, 杉山 慎<sup>1</sup>, 原田亜紀<sup>2</sup>

Ryo Kusaka, Shin Sugiyama and Aki Harada

## 1. はじめに

北グリーンランドに暮らすイヌイットは現在でもキツネや野生トナカイ, アザラシ, ホッキョクグマ等の哺乳類の毛皮を用いた衣類を日常的に着用している<sup>1)</sup>。イヌイットは冬期に長期間の犬ぞりによる狩猟に出かけることがあり, 毛皮の衣類が低温下で透湿性に優れることは経験的に知られていた。また, ダウンジャケットのように中綿を有する衣類は低温環境で使用する場合, 内部で結露することが問題となっている<sup>2)</sup>。しかし, 低温下での衣類の透湿性能を定量的に評価した例は少ない。そのため寒冷地で使用するウェアの透湿性評価も「JIS L 1099 繊維製品の透湿度試験方法」で定められている常温下(試験法により 30°C もしくは 40°C)での試験に頼らざるを得なかった。そこで筆者らは, -10°Cを下回る低温環境下での透湿性能試験方法を開発し, ダウンジャケットのように内部に保温材を有する場合に比べ, 毛皮は断熱材となる下毛(綿毛)が皮の外側にあることで, 透湿性能に優れていることを示した<sup>3)</sup>。

本研究では, 毛皮の断熱層の温度勾配の測定と防水透湿性素材の透湿性試験を行い, 断熱層が衣類の透湿性に与える影響について考察した。

## 2. 試験方法

## 2.1 試験体

使用した試験体は以下のとおりである。

- ・ホッキョクギツネの毛皮(毛足の長さ: 5 cm)
- ・防水透湿性生地(ティフオン®ウォーム 50,000)
- ・防水透湿性生地(ティフオン®タブ)
- ・フリース生地(厚さ: 4 mm)

## 2.2 透湿度試験装置

透湿性試験の概要を図1に, 使用した機材を以下に示す。

- ・アクリル容器(内寸200×200×50 mm)
- ・防水ラバーヒーター(180×180 mm, AC 100 V, 107 W)
- ・温度調節器(Panasonic KT4R)
- ・T型熱電対
- ・データロガー(HIOKI LR8431)
- ・ステンレス鋼板(216×216 mm, 厚さ: 1 mm, φ = 10 mm のパンチ穴 81ヶ所。セロファン紙貼り付け)

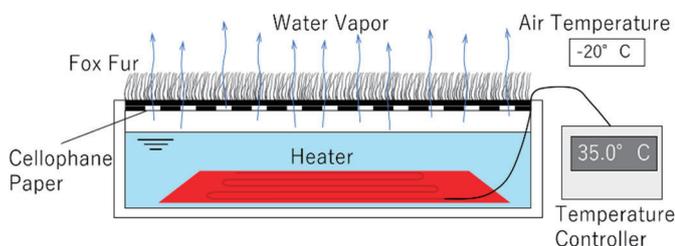


図1 透湿度試験装置

## 2.3 透湿度試験方法

側面及び底面をスタイロフォームで断熱したアクリル容器に水を張り, 温度調節器を用いて, ヒトの皮膚温に近い 35°C に保

温した。水蒸気のみを透過させるため, パンチ穴を開けたステンレス鋼板にセロファン紙を張り付け, アクリル容器に蓋をした。その上に試験体となる毛皮もしくは防水透湿性生地を載せ, 低温室(-20°C)で約 1.5 時間放置した。

試験前後の水量及び試験体の質量変化から, 水の透湿度, および試験体への吸水量を測定, 単位時間単位面積当たりの透湿度を算出した。

## 3. 試験結果

図2に透湿度試験中の毛皮の鉛直温度勾配と飽和水蒸気量を示す。温度は皮の表面で+8.6°C, 皮から 1 cm の高さで+1.5°C, 2 cm で-4.8°Cであった。皮の表面付近では最大 7.1°C/cm の温度勾配があり, この勾配は上に向かい緩くなるのがわかる。

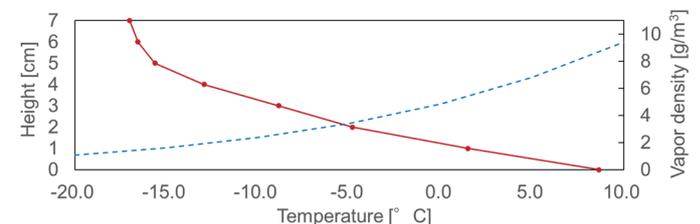


図2 毛皮の鉛直温度勾配(実線)と飽和水蒸気量(点線)

表1に防水透湿性生地(ティフオン®ウォーム 50,000 およびティフオン®タブ)単体で透湿度を計測した場合と, 断熱材としてフリースを挿入して計測した場合の試験結果を示す。フリースを使用した場合, 防水透湿性生地がより低温となり透湿度が低下することがわかる。

water vapor transmission rate	TYPHON	TYPHON + Fleece
TYPHON WARM [mg cm <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup> ]	54.6	49.4
TYPHON TOUGH [mg cm <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup> ]	53.1	18.9

表1 防水透湿性生地の透湿度試験結果

## 4. 考察

低温環境下で使用される毛皮には, 皮の表面から毛の先端方向にかけて大きな温度勾配が生じる。その結果, 皮を透過した水蒸気の一部は毛の先端方向へ向かう過程で凝結するが, 空気の流れにより, そのほとんどが大気中に放出される。

皮の外側に断熱層となる毛があることで, 皮が保温され, 皮の内部で水蒸気が凝結することを防いでいる。このことが毛皮が低温下において優れた透湿性を示す要因と考えられる。また, 防水透湿性生地は, 皮膚に近い側に断熱層があり, 外側に生地がある場合, 生地がより低温になることから内部での凝結量が増加し, 衣類全体での透湿性を低下させると考えられる。

## 参考文献

- 1) 大島育雄, 1989: エスキモーになった日本人, 文藝春秋。
- 2) 田村照子, 1997: 寒さと衣類の役割, 臨床環境医学, 6(1), 19-24。
- 3) 日下稜, 杉山慎, 原田亜紀, 2020: 北グリーンランドで使用されるホッキョクギツネ毛皮衣類の透湿・保温性能, 雪氷研究大会講演要旨集, 雪氷研究大会(2020・オンライン)。

1 北海道大学低温科学研究所

2 NPO 北海道自然エネルギー研究会

近年の東北地方における雪氷による人的被害の発生状況について

On snow accidents in Tohoku area in the recent years

○小杉健二<sup>1</sup>  
 Kenji Kosugi

1. はじめに

東北地方には豪雪地帯が広く分布し、積雪期に雪氷による様々な被害が発生する。本発表では、近年の東北地方における人的被害の発生状況について述べる。

2. 雪氷による人的被害の発生状況

東北地方における雪氷による被害者数（死亡者および重軽傷者の総数）の2013/14冬期から2020/21冬期までの推移を図1に示す。一冬のその数はおおよそ200人から600人の範囲にあるが、少雪だった2019/20冬期は100人以下であり、一転して大雪となった2020/21冬期には1100人以上に達した。

積雪の多寡と人的被害の発生の関係を山形県を対象に示したものが図2である。縦軸に山形県内の雪氷による死亡者数を取り、横軸には積雪の多寡を表す数値として新庄の最大積雪深を取り、2005/06冬期から2020/21冬期までの16冬期について対応する点を図上に表示している。データに散らばりがあるが、最大積雪深とともに死亡者数は直線的に増加する関係が示され、2020/21冬期もその関係に沿うものだった事が分かる。

図3は、2013/14冬期から2020/21冬期の山形県における雪氷による死亡者数の原因別推移を表す。2020/21冬期は落雪による被害が大きな割合を占めた。

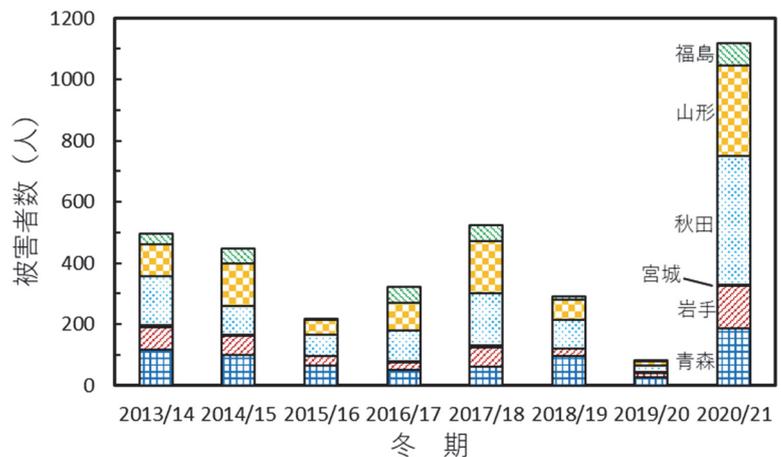


図1 2013/14冬期から2020/21冬期の東北地方における雪氷による被害者数の推移。データは消防庁による。

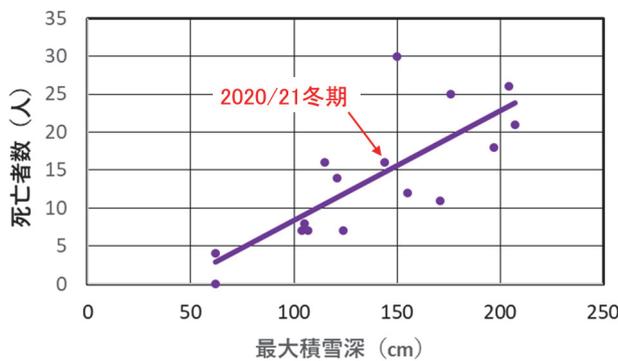


図2 2005/06冬期から2020/21冬期の、山形県における雪氷による死亡者数（縦軸）と新庄における最大積雪深（横軸）の関係。

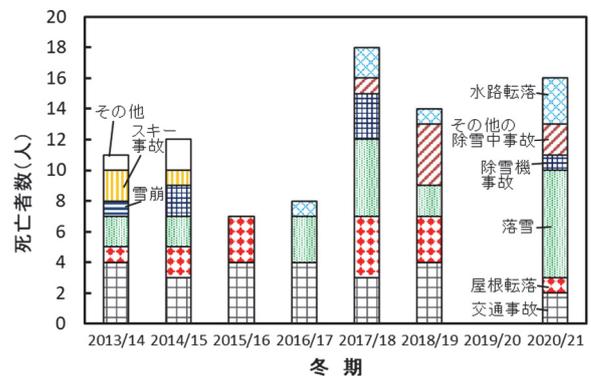


図3 2013/14冬期から2020/21冬期の山形県における雪氷による死亡者数の原因別推移。

1 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

Snow and Ice Research Center, NIED

勝山雪室内の熱環境計測

Measurement of thermal environment in KATSUYAMA YUKIMURO

○大倉康平<sup>1</sup>, 寺崎寛章<sup>2</sup>, 上西淳予<sup>3</sup>, 古市健二<sup>3</sup>, 福原輝幸<sup>4</sup>

Kohei Okura, Hiroaki Terasaki, Atsuyo Uenishi, Kenji Furuichi and Teruyuki Fukuhara

1. はじめに

2021年6月よりHACCPが完全義務化され、食品保存に関する衛生管理への意識は高まりつつある。自然エネルギーを用いた食品の長期貯蔵方法の一つである雪室は、低温かつ高湿度な空間を保ち続けることができ、貯蔵した食品の水分含量および糖度が增大することが既に報告されている<sup>1)</sup>。しかしながら、自然対流方式の雪室は室内温度の偏在が生じやすく、雪室内の熱環境を正確に把握することは食品貯蔵を目的とした雪室を利用する上でとりわけ重要である。また空き倉庫から転用した勝山雪室<sup>2)</sup>の場合、搬入口および換気口からの局所的な熱流入も考えられる。そこで本研究では勝山雪室内における空間的な温度分布を調べたので、その結果を報告する。

2. 調査概要

勝山雪室内の熱環境計測は2019年2月6日から12月2日の10ヶ月に亘って実施した。図1に勝山雪室の概要を示す。図1のA、BおよびC地点で、高さ1m毎に温湿度センサーをそれぞれ設置し、各地点における気温 $T_s$ (°C)および相対湿度RH(%)を調べた。なお、本論文では $T_s$ およびRHの日平均値を示す。また定期的に雪氷体積および雪密度を計測し、残雪量 $W$ (ton)を算出した。

3. 調査結果

図2は代表例としてB地点の高さ2mにおける $T_s$ および $W$ の経時変化を示す。3月18日時点の $W$ は約154tonであり、その後は線形的に減少した。また $W$ の減少に伴い $T_s$ は上昇し、最後に残雪を確認した10月11日時点の $T_s$ は5.9°Cであった。なお、同地点における雪室内気温の日変化については、3月は0.2~1.0°C、8月は0.2~2.7°Cと増大したが、いずれも外気温の日変化と比較して十分に小さかった。

図3はAおよびC地点における $T_s$ の月変化を示す。紙面の都合上B地点は割愛する。まず3月の両地点における $T_s$ の中央値を比較すると、両地点ともに熱が滞留しやすい天井付近で最も高く、AおよびC地点の1mと3mの(鉛直方向)温度差 $\Delta T_v$ (°C)はそれぞれ0.1°Cおよび0.4°Cであった。なお、(水平方向)温度差 $\Delta T_h$ (°C)は0.1~0.5°Cであり、 $\Delta T_v$ と大差はなかった。融雪が進むにつれて $T_s$ の上昇とともに $\Delta T_v$ は増大し、8月における両地点の $\Delta T_v$ は最大で1.3°Cとなり、それ以降は減少に転じた。

したがって、勝山雪室を利用する際は上記のような空間的な温度分布を考慮した食品貯蔵方法を検討することが望ましいと考えられる。なお、調査期間におけるRHは $W$ の減少とともに徐々に低下したものの、その平均値は90%を超えており、高湿度な環境が維持されていることを再確認した。

4. おわりに

本研究では自然対流方式の勝山雪室内における温熱環境を正確に把握し、その知見を食品貯蔵に適用することを最終目標として、長期に亘る温度計測を実施した。その結果、鉛直方向および水平方向に最大で1°C以上の温度差が生じており、とりわけ鉛

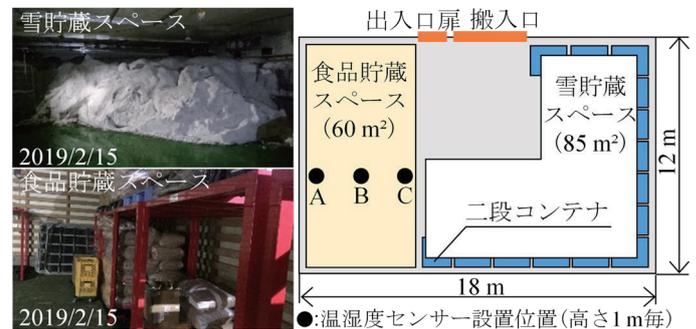


図1 勝山雪室の概要

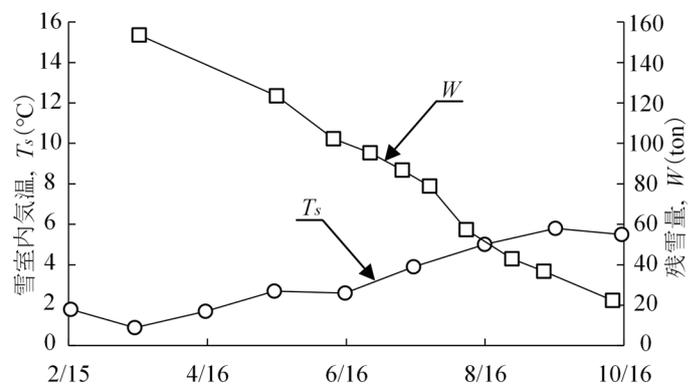


図2 勝山雪室内の気温および残雪量の経時変化

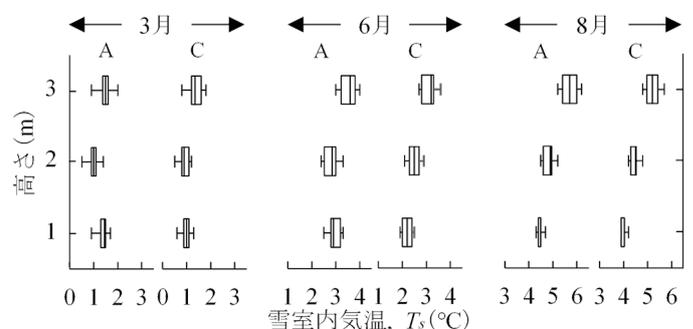


図3 雪室内気温の月変化(AおよびC地点)

直方向の温度差については残雪量の減少および外気温の上昇とともに顕著になることが確認できた。今後はこれらを考慮した上で勝山雪室を効率的に利用していく。

謝辞 本研究は勝山市雪氷熱エネルギー利用促進協議会および福井大学の鈴木遥介君、賈子芸さん、相岡美咲さんの協力を得て行われた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 村松謙生, 1986: 野菜の雪中貯蔵に関する研究, 雪氷, 48(3), 153-155.
- 2) 寺崎寛章ら, 2016: 空き倉庫の“雪室”再利用と地域活性化, 雪氷研究大会, 322.

1 福井大学工学部 建築・都市環境工学科  
 2 福井大学 学術研究院工学系部門  
 3 元福井大学大学院  
 4 福井大学名誉教授

Department of Architecture and Civil Engineering, University of Fukui  
 Faculty of Engineering, University of Fukui  
 Former Graduate School of Engineering, University of Fukui  
 Emeritus Professor, University of Fukui

## 2018年冬季大雪における降雪粒子特性のJMA-NHMによる再現性の検証 Validation of the ice particle properties simulated by JMA-NHM for heavy snowfall events during the 2018 winter

○橋本明弘<sup>1</sup>, 山下克也<sup>2</sup>, 石坂雅昭<sup>2</sup>, 本吉弘岐<sup>2</sup>, 中井専人<sup>2</sup>, 山口悟<sup>2</sup>

Akihiro Hashimoto<sup>1</sup>, Katsuya Yamashita<sup>2</sup>, Masaaki Ishizaka<sup>2</sup>, Hiroki Motoyoshi<sup>2</sup>, Sento Nakai<sup>2</sup> and Satoru Yamaguchi<sup>2</sup>

### 1. はじめに

2018年冬季北陸地方の大雪事例の降雪・積雪粒子特性や降水機構に関する研究を進めている。雪氷研究大会(2019・山形)では、数値実験をもとに日本海寒帯気団収束帯にともなう降水機構について考察した<sup>1</sup>。本稿では、降雪粒子の粒径・落下速度について、数値モデルによる再現性を、地上観測との比較をもとに検討した結果を報告する。

### 2. 数値実験

#### 2.1 数値モデル

数値実験には、気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)を使用した。大気中の水粒子として雲粒・雨滴・氷晶・雪粒子・霰粒子の5つのクラスを持っている。雨滴・雪・霰については、落下速度 $v_x$  ( $m s^{-1}$ )がそれぞれの体積平均直径 $D$  ( $m$ )の関数として与えられている。

$$v_x = a_x D^{b_x} \quad (1)$$

$x$  は、雨滴( $r$ )、雪( $s$ )、霰( $g$ )を表す。JMA-NHM オリジナル版では、雪粒子について $a_s = 17.0$ ,  $b_s = 0.5$  が与えられている。これを $a_s = 25.5$ ,  $b_s = 0.5$  と一部変更した。さらに、オリジナル版では定数として与えられる雪-雪、雪-氷晶の間の凝集係数を温度の関数として与えた。

橋本ほか(2019)<sup>1</sup>と同様に、水平解像度1 kmで日本海全域を覆う計算領域を設け、変更したモデルを用いて数値実験を行った。

#### 2.2 CMF解析

Ishizaka et al. (2013)<sup>2</sup>の定義をもとに、数値モデルの出力データからCMF粒子直径 $D_c$ とCMF落下速度 $v_c$ を、以下の式により求めた。

$$D_c = \frac{\sum_{x=r,s,g} [\int D \cdot f_x(D) \cdot n_x(D) dD]}{\sum_{x=r,s,g} [\int f_x(D) \cdot n_x(D) dD]} \quad (2)$$

$$v_c = \frac{\sum_{x=r,s,g} [\int v_x(D) \cdot f_x(D) \cdot n_x(D) dD]}{\sum_{x=r,s,g} [\int f_x(D) \cdot n_x(D) dD]} \quad (3)$$

$D$ ,  $n_x(D)$ ,  $v_x(D)$ ,  $f_x(D)$ は、それぞれ、粒子直径、粒径分布、落下速度、降水粒子質量フラックスを表す。

### 3. 結果

図1は、雪氷防災研究センター(長岡市)における2018年2月3-7日の各日03時から翌日03時(日本時)までの10分間隔のCMF粒子直径 $D_c$ とCMF落下速度 $v_c$ の観測(Yamashita et al., 2019<sup>3</sup>)と数値実験の結果である。観測(図1a, 黒)、数値実験(図1a, 紫)ともに、 $v_c$ は $1.5 m s^{-1}$ にピークをもち、数値実験は観測をよく再現していた。 $D_c$ については、数値実験(図1c, 紫)は観測(図1c, 黒)よりもやや小さい値に偏っていた。 $D_c$ と $v_c$ いづれ

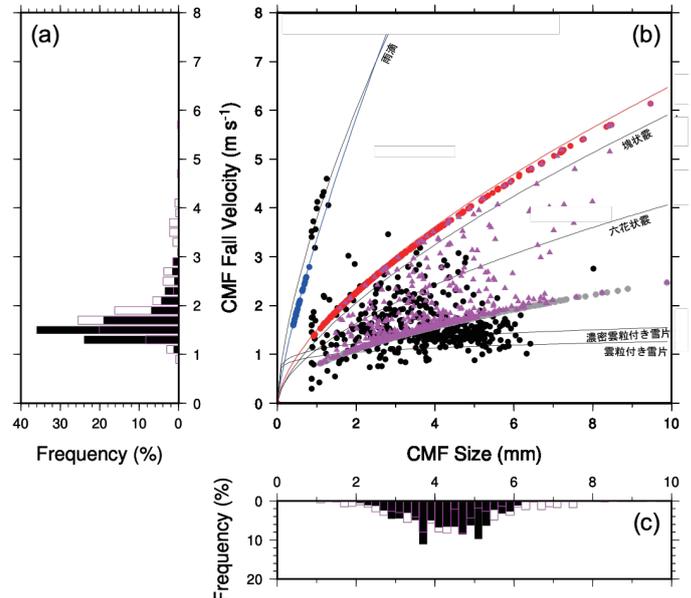


図1 (a) 観測(黒)と数値実験(紫)から得られたCMF落下速度の降水強度相対頻度分布。(b) 観測(●)と数値実験(●)雨滴、●雪、●霰、▲雨・雪・霰を含めた値)から得られたCMF粒子直径・落下速度。黒実線は先行研究による落下速度関数、青・赤・灰色の実線はそれぞれ、モデルに組み込まれた雨滴・霰・雪の落下速度関数。(c) (a)と同じ。ただし、CMF粒子直径の降水強度相対頻度分布。

もオリジナル版JMA-NHM(図略)よりも再現性が向上していた。 $D_c$ と $v_c$ を軸にとった散布図を見ると(図1b)、雨、または、塊状霰から雲粒付き雪片の特徴をもつ粒子が観測されていた(●)。数値実験の結果(▲)は、ほぼ同じ範囲にプロットされているものの、観測から求めたCMF粒子直径にはほとんど見られない6 mm以上の粒子が現れていたほか、モデルに組み込まれている雪(灰実線)と霰(赤実線)の落下速度関数に強く影響を受けていた。

#### 謝辞

本研究の一部はJSPS科研費16K05557, 19K04978の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- 橋本ほか, 2019, 雪氷研究大会(2019・山形), P1-21, [https://doi.org/10.14851/jcsir.2019.0\\_183](https://doi.org/10.14851/jcsir.2019.0_183).
- Ishizaka et al., 2013, JMSJ, 91, 747-762, [doi:10.2151/jmsj.2013-602](https://doi.org/10.2151/jmsj.2013-602).
- Yamashita et al., 2019, BGR, 37S, 21-30, [doi:10.5331/bgr.18SR01](https://doi.org/10.5331/bgr.18SR01).

1 気象研究所  
2 防災科学技術研究所

Meteorological Research Institute  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

## 2021年1月7-9日上越大雪時降雪粒子のLPM PEによる観測

## LPM PE observation of snowfall particles during Joetsu heavy snowfall on January 7-9, 2021

○中井専人<sup>1</sup>, 山下克也<sup>1</sup>, 熊倉俊郎<sup>2</sup>, 本吉弘岐<sup>1</sup>  
Sento Nakai, Katsuya Yamashita, Toshiro Kumakura and Hiroki Motoyoshi

## 1. はじめに

2021年1月には、富山で平年の十倍の積雪となったことが報道されるなど、6日から15日にかけて交通障害、休校、住宅破損などの被害が多発した。新潟県上越市(高田(気象庁))においては6, 12, 24, 48時間降雪量が統計開始以来の極値を更新し、その全ての起時が8日にあった。防災科学技術研究所では上越市にある農研機構北陸研究拠点内において降雪観測を行っており、このとき測器も多く冠雪で観測が中断したが、降雪の一部について光学式ディストロメーター(OD)の1機種、LPM(Thies製)による観測値が得られていた。これについて報告する。

通常、ODの出力は研究用であっても粒径-落下速度2次元のヒストグラムになっていることがほとんどであるが、本研究では全粒子の測定値を得るためLPMのPE(Particle Event)という送信設定(telegram)を用いた(PEの詳細は既報<sup>2)</sup>を参照)。

## 2. 2021年1月8日前後の雲と降水の広域分布

気象衛星ひまわり赤外画像の時系列によると、数十～数百kmスケールの渦状降雪雲が北陸地方を通過した後、高田と富山で最も降雪の多かった1月8日は、午前から昼過ぎまではJPCZの発達した積乱雲、それ以後はJPCZ西側の筋雲が発達した雲が入り続けていた。気象庁全国合成レーダー(以下、合成レーダー)降水強度分布の時系列を用いて、1月5日2100JSTから11日1800JSTまでの積算降水量分布を求めたところ、この期間の積算降水量の多い領域は、通常の里雪大雪の事例によく見られるように、陸上だけでなく海上にも大きく張り出した、海岸に沿って伸びる分布となっていた(図略)。

## 3. 2021年1月7-9日の上越の降雪

## 3.1 降雪パターンの時間変化

高田では1月8日を中心にまとまった降水があり、様々な降水分布パターンが現れていた。図1は気象庁観測点の時別値に合成レーダーの降水分布パターンに基づく期間区分を書き加えたものである。気温はほとんど0°C以下であり、降雪が続いたことを示している。期間1～9で示したのは分布パターンで分けた期間であり、特に高田の降水が強かった期間は、期間2, 8: Tモード筋雲, 期間3, 4: 西から糸魚川沖を回り込んだ雪雲, 期間5, 6, 7: 富山湾で発達したりそこから新潟県にかけて停滞した雪雲, というパターンであった(図略)。期間3, 6では中越地域で陸風が出ており(図1), このため西から移動してきた雪雲が東進できずに、高田で強い降雪になっていた可能性がある。

## 3.2 LPM PEに見られた期間による差異

期間4以後LPM PE観測は冠雪でかなりのデータ欠落があったとみられる。そこで、期間2と3を定性的に比較した。図2は期間2と3の粒径・落下速度分布図である。期間2は霰が30%近くあったが、期間3は雪片と小粒子でも落下速度の小さめの

ものが多かったことがわかる。数としてはどちらも小粒子が2/3以上を占めたが、その比率は期間3の方が大きかった。

## 5. おわりに

本稿では降雪粒子の種類ごとの相対的な多寡を定性的に述べるにとどまった。降水量には大きい粒子が強く影響するので、今後、CMF<sup>3)</sup>等粒子の質量を考慮した議論をしていきたい。

## 参考文献

- 1) 東京管区気象台, 2021: 令和3年1月7日から11日にかけての急速に発達した低気圧及び強い冬型の配置に関する気象速報.
- 2) 中井専人・山下克也・本吉弘岐・熊倉俊郎・村上茂樹・勝島隆史, 2020: 球体を用いた室内試験と全粒子ロギングによる1ビーム光学式ディストロメーターの特性評価. 天気, 67, 89-108.
- 3) Ishizaka, M., H. Motoyoshi, S. Nakai, T. Shiina, T. Kumakura and K. Muramoto, 2013: A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship. J. Meteor. Soc. Japan, 91, 747-762.

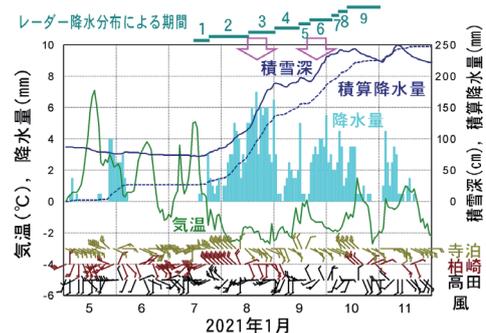


図1 気象庁高田の観測値及び寺泊、柏崎の風向風速の時系列。矢羽根は長羽根が $2\text{ m s}^{-1}$ 。強い降雪による積雪急増時(↓印)には、中越地域海沿い(寺泊、柏崎)で陸から風が吹いていた(一部欠測有り)。

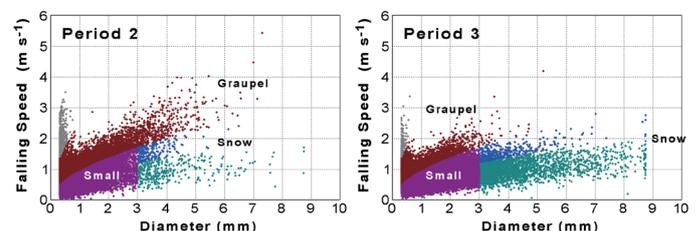


図2 LPM PE観測した、左)期間2、右)期間3の粒径-落下速度分布。見やすさのため粒子数を1/20に間引いて表示している。約 $8.7\text{ mm}$ より大きい値は丸められて計測される<sup>2)</sup>。

謝辞: 防災科研『変容する雪氷災害軽減のための危険度把握と面的予測技術の融合に関する研究』及びJAXA ER2GPN104

1 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

2 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻

Snow and Ice Research Center, NIED

Department of Civil and Environmental Engineering, Nagaoka Univ. Tech.

## 長岡における融解層に伴う 0°C 等温層の観測事例

## A case study of observation of 0°C isothermal layer associated with melting layer in Nagaoka

○本吉弘岐<sup>1</sup>, 中井専人<sup>1</sup>, 山下克也<sup>1</sup>

Hiroki Motoyoshi, Sento Nakai and Katsuya Yamashita

## 1. はじめに

雪氷防災研究センター (新潟県長岡市, 標高 97m) では, 2014 年 12 月 31 日午後降水形態が雨から霰, 雪へ推移する事例が観測された. 雪氷防災研究センターおよび 3.8km 離れた位置にある八方台 (新潟県長岡市, 標高 560m) で同時に観測された気温の解析から, 融解層に伴い生じる 0°C 等温層の特徴が明瞭に見られる事例であった. 霰の観測事例が比較的多い長岡でも, 0°C 等温層の特徴が明瞭に認識される事例は珍しく, これについて光学式ディストロメータを用いた降水粒子観測を含めた観測結果について報告したい.

## 2. 観測データ

雪氷防災研究センター (以下 SIRC) では, 光学式ディストロメータ PARSIVEL (OTT 製) を用いた降水粒子観測, 田村式降雪/降雨強度計 (田村雪氷計測研究所製) による降水強度, 強制通風筒を用いた気温, 湿度観測を実施した. PARSIVEL で得られる 5 分毎の粒径-落下速度分布から質量フラックス中心 (CMF)<sup>1)</sup> おび雨滴割合 ( $F_R$ )<sup>2)</sup> を求めた. また, 八方台 (以下 HPD) では, 自然通風筒を用いた気温計測を実施した<sup>3)</sup>.

## 3. 結果と考察

本事例について, 2014 年 12 月 31 日 15:00 から 2015 年 1 月 1 日 02:00 にかけての時系列データを図 1 に示す. このときの, 気象条件は, 降り始めの 17 時ごろから 23 時ごろにかけては北陸を通過する低気圧の影響下にあり, その後は冬型へ移行していた. 図 1(a) の  $F_R$  の時系列から, 18:50 から 20:00 にかけて雨 ( $F_R = 1$ ) から, 雨と固体降水が混じった霰を経て, 雪 ( $F_R=0$ ) へと推移していたことが明瞭に見て取れる. 図 1(b) の降水強度変化をみると, 雨から霰に移る 18:50 の時点では 1mm/h 以下と弱い強度だったが, 雪へ変化した 20:00 付近では 3mm/h 超と降水強度へと増していた. 図 1(c) は SIRC と気温と湿度, HPD での気温が示されているが, SIRC の気温の変化に注目すると, 18:50 の時点で 1.7°C だった気温が, 20:00 には 0°C に近い温度まで低下している. これは霰の期間に急激に低下したというよりは, それ以前からの気温低下が継続したものように見える. その後, 23:10 まで気温はほぼ 0°C 付近で推移しており, このことから, この時間帯は融解層の上部に発達した 0°C 等温層の影響下にあったものと考えられる. 23:10 以降は, 気温はわずかに 0°C 以下に減少していた. HPD の気温も 15 時過ぎから 19 時頃まで 0°C 付近を維持している時間帯があり, その後気温は 0°C 以下に低下している.

図 2 は横軸に SIRC の気温, 縦軸に HPD の気温をプロットしたものである. 雨→霰→雪 (0°C) →雪 (0°C 未満) という推移を点の種類で表している. HPD と SIRC で同時に 0°C となる時間帯がないことから, 2 地点の水平距離の違いはあるものの, この例では 0°C 等温層は 2 地点の標高差の約 460m よりも薄いことが推定される.

本講演では, 降水形態の変化について降水粒子観測結果に基づ

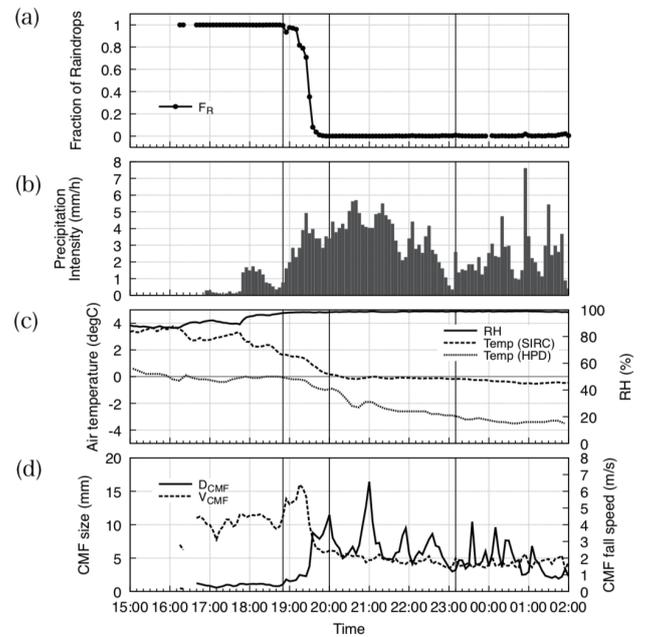


図 1 : 2014 年 12 月 31 日 15:00 から 2015 年 1 月 1 日 02:00 までの観測データの時系列. (a) 雨滴割合  $F_R$ , (b) 降水強度, (c) SIRC の気温, 湿度と HPD の気温, (d) 降水粒子の粒径落下速度の CMF.

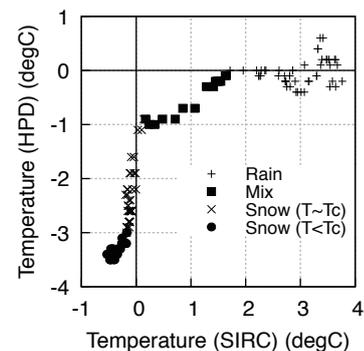


図 2 : SIRC と HPD の同時刻の気温の散布図.

く特徴について報告する.

## 参考文献

- 1) Ishizaka, M., et. al. 2013: Journal of the Meteorological Society of Japan., 91, 747–762.
- 2) 本吉弘岐他, 2015: 雪氷研究大会(2015・松本)講演要旨集, 61.
- 3) 中井専人他, 2014: 日本気象学会 2014 年度春季大会講演予稿集, 312.

## 2020/21 年冬季の降雪量と積雪深の時空相関特性

## Spatiotemporal correlation characteristics of hourly snowfall and snow depth in winter 2020/21

○鈴木和良<sup>1</sup>, 松村伸治<sup>2</sup>

Kazuyoshi Suzuki and Shinji Matsumura

## 1. はじめに

2020年12月から2021年1月までの期間、みなかみや東北、上越、ならびに北海道の一部など広範囲で、記録的な降雪と積雪深が記録された。それらの記録は、アメダスなどの地点観測データに基づいている。一方、こうした地点観測が代表性を有しているのか、さらに時間降雪量の時空間特性についても明瞭ではない。2019年11月より気象庁は時間分解能1時間、空間分解能5kmで日本全域の解析降雪量と解析積雪深プロダクトの公開を開始した。本研究では、2020/2021冬季を対象に解析降雪量と解析積雪深、ならびにアメダスデータを用いて、記録的な72時間降雪量が観測された高田、藤原、湯田を対象として、豪雪イベントの時空間相関を明らかにすることを目的とした。

## 2. 方法

## 2.1 研究対象地域

Wikipediaによる令和3年豪雪 (<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BB%A4%E5%92%8C3%E5%B9%B4%E8%B1%AA%E9%9B%AA>)で、72時間降雪量が観測記録となった地点のうち、上越地方の高田、みなかみ地方の藤原、東北地方の湯田の3地点を解析対象とした。

## 2.2 使用データ

## 2.1 アメダス

アメダス (AMeDAS: Automated Meteorological Data Acquisition System) は気象庁の自動気象データ収集システムである。本研究では、高田、藤原、湯田のサイトの時間降雪量と時間積雪深を使用した。

## 2.2 解析積雪深

解析雨量や局地数値予報モデルなどの降水量、気温、日射量などを積雪変質モデルに与えて積雪の深さを計算した後、積雪深計の観測値で補正することで、約5km四方の格子(緯度3分・経度3.75分)で面的に推定したのが解析積雪深である。積雪変質モデルでは、新たに積もる雪の量、融雪の量、時間の経過により積雪が沈み込む深さ等を計算することで積雪深を求める。

## 2.3 解析降雪量

解析積雪深が1時間前から現在までに増加した量を解析降雪量とする。なお解析積雪深が1時間前から現在までに減少した場合、解析降雪量は0となる。

## 2.4 大雪イベント

解析期間は2020年11月～2021年4月であり、各アメダス地点の積雪深データから、2期間の大雪イベントを抽出した。それぞれ藤原と湯田ではA期間(2020年12月15日0時～12月18日6時)、ならびに高田ではB期間(2021年1月7日4時～1月11日11時)である。

## 3. 結果と考察

## 3.1 アメダスと解析値の比較

解析値とアメダスの積雪深と降水量を比較した。湯田と藤原ではアメダス積雪深と解析積雪深は非常に良く一致した。しかしながら、高田ではB期間の大雪イベントに伴って増加した解析積雪深は、アメダス積雪深に比べて過小となった(図1参照)。さらに大雪イベント以後についてみると、大雪イベントの誤差が、その後もアメダスと解析値との差となって現れている。この理由として、風が強いと解析値の誤差が大きくなることが報告されており、高田の大雪イベントに伴う強風が解析積雪深の過小評価に影響したと考えられる。

## 3.2 積雪深の空間相関

図1で高田と北陸平均の積雪深を比較してみると、期間Aや12月下旬までは北陸平均の積雪深が、高田の積雪深を上回っていた。期間Bの大雪の期間は、高田の積雪深は北陸平均積雪深に比べ著しく大きくなり2.5mに近づいている。一方、北陸全体の積雪深は1.4m程度であり、アメダス高田とは1m程度の差が生じた。このことから、期間Bにおける高田の大雪は、北陸全体の積雪変動とは連動していないと言える。

発表時には、高田、藤原、湯田のアメダスと解析値の時間降雪量の特性についても報告する。

謝辞: 本研究は、科研費(19H05668・21H04934)の支援を受け実施された。解析降雪量と解析積雪深は気象庁より提供された。ここに感謝申し上げる。

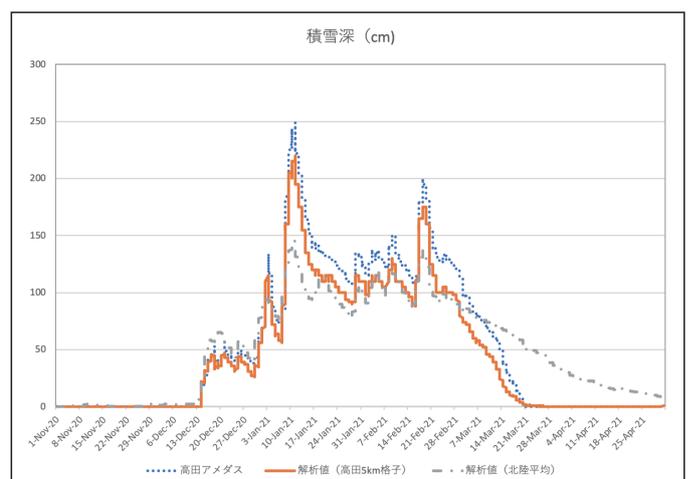


図1 アメダス高田、解析値(アメダス高田に相当する格子の値)、解析値(北陸平均)による積雪深の季節変化の比較

1 国立研究開発法人海洋研究開発機構  
2 北海道大学大学院地球環境科学研究院

JAMSTEC  
Graduate School of Env. Science, Hokkaido University

## 気象再解析データでの 2018 年 2 月の福井豪雪 Heavy snowfall event of February 2018 in Fukui in meteorological reanalysis data

○山崎哲<sup>1</sup>, 福井真<sup>2,3</sup>, 村田昭彦<sup>3</sup>

Akira Yamazaki, Shin Fukui and Akihiko Murata

### 1. はじめに

2018 年 2 月の初旬に、福井市では大雪が発生し、昭和 56 年の豪雪以来の 37 年ぶりの記録的な積雪を観測した。福井地方気象台では 2 月 5、6 日に 24 時間で 65 cm、6 時間で 32 cm という記録的な降雪となり、交通網の停止、生活物資の不足、休校・休業などの大きな雪氷被害が生じた (福井県 2018)。

この降雪イベントには、福井県の西部の日本海で発生した日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) による帯状の筋雲が福井市内への流れ込みが関与したことが示唆されている。今回の研究では、この JPCZ の再解析データ (2 節) での再現性と、JPCZ が発生した際の大気大循環場の特徴を分析する。

### 2. 再解析データ

再解析データとは、大気モデルと観測データをデータ同化手法で融合させて作った、擬似的な観測データである。モデルと同じ大気変数についての、モデルと同様な領域について時空間的に均質なデータとなっている。

#### 2.1 JRA-55

気象庁が作成する全球の大気再解析データで、1958 年以降から準リアルタイムに作成されている。全球を水平解像度約 50 km で覆う。

#### 2.2 日本域領域再解析 (RRA)

東北大学と気象研究所が作成する、日本域を 5 km 解像度で覆う再解析データである (Fukui et al. 2018)。JRA-55 を境界値として用いながら、実際の観測を同化している。再解析データの中で、2018 年 2 月初旬の JPCZ イベントや、それに伴う降雪がどのくらい観測と整合的なのか、そしてその際の大気大循環場の特徴を調査する。

### 3. 結果とまとめ

RRA の中で、対流圏下層での風の収束で特徴付けられる JPCZ が再現されていた (図 1)。この JPCZ は、福井市内に 2 月 5 日から 3 日程度継続する降雪を起こしていた。さらに、福井地方気象台最近傍点での RRA の降水 (雪) 量を観測値と比較すると (図 2)、観測に比べて小さいものの、2 月 5 日から 7 日にかけて継続した降雪を再現していた。

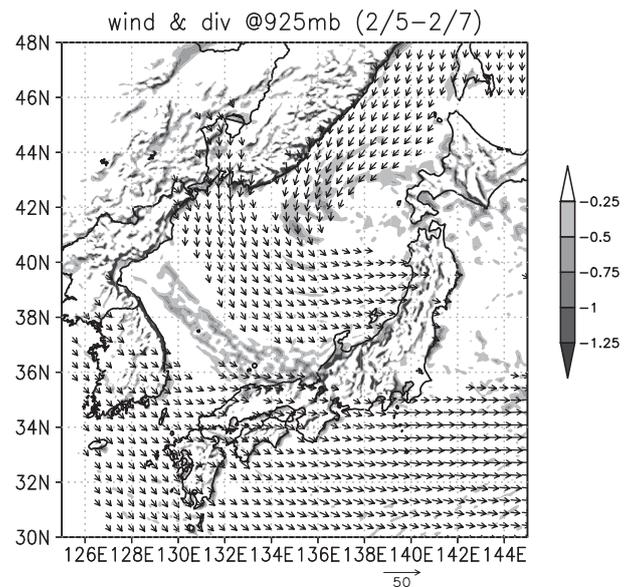
この JPCZ イベントの発生に伴う大循環場の特徴について JRA-55 を使って調査した。まず、JPCZ の発生時に、シベリアから西日本の西部、黄海付近を南下する大規模な寒気の流れが、平年よりも強くなっていることがわかった。一方で、北海道付近を通過して東へ向かう寒気の流れは弱くなっていた。つまり同期間で寒気の流れが平年の冬季より日本の西側を通過していた。さらに対流圏上層の様子は、東シベリア付近に発生したブロッキング高気圧が、寒気の流れを変調し、シベリアから西日本西部～黄海を南下する寒気の流れを導いていることがわかった。

#### 参考文献

1) 福井県, 2018: 今後の大雪に関する対策【平成 30 年 2 月豪雪】。福井県「災害に関する情報」, 69pp,

[https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/kikitaisaku/setsugai/h30\\_taisaku.html](https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/kikitaisaku/setsugai/h30_taisaku.html).

2) Fukui, S., T. Iwasaki, K. Saito, H. Seko, and M. Kunii, 2018: A Feasibility Study on the High-Resolution Regional Reanalysis over Japan Assimilating Only Conventional Observations as an Alternative to the Dynamical Downscaling. *J. Meteor. Soc. Japan*,



96, 565–585.

図 1 2018 年 2 月 5 日から 7 日で平均したでの RRA で再現された大気循環場。925 hPa での風[m/s]とその発散[ $10^{-4}$  1/s]を示す。

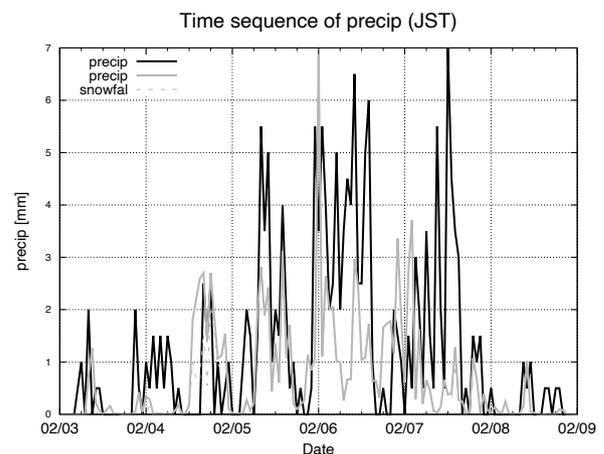


図 2 2018 年 2 月 3 日より 2 月 9 日までの福井地方気象台での観測された降水量[mm] (黒線) と、RRA で再現された降水量 [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] (灰色実線) と降雪量 [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] (灰色点線)。RRA での値はモデル格子での観測位置近接点での値を示す。

1 海洋研究開発機構アプリケーションラボ  
2 東北大学大学院理学研究科  
3 気象庁気象研究所

Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
Graduate School of Science, Tohoku University  
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

## 地域気候モデルによる積雪の再現性について Reproducibility of Snow Cover Simulated by A Regional Climate Model

○山崎剛<sup>1</sup>, 高橋直也<sup>2</sup>, 川瀬宏明<sup>3</sup>, 山口悟<sup>4</sup>

Takeshi Yamazaki, Naoya Takahashi, Hiroaki Kawase and Satoru Yamaguchi

### 1. はじめに

温暖化に伴い、一般的に積雪は減少するとみられるが、中部日本の山岳域ではむしろ豪雪が強化し、極端化が起こる可能性が指摘されている<sup>1)2)</sup>。これらの将来予測には地域気候モデルが用いられているが、積雪に関する再現性の検討は観測データに限られる山岳域では十分に行われていない（将来と現在気候のモデル同士での差を見ることにより、モデルの癖の影響を軽減している）。そこで広く気候の将来予測に使われている気象庁気象研究所の地域気候モデル NHRCM について、防災科学技術研究所で実施している山岳域の積雪観測などにより再現性、バイアスの評価を行った。

### 2. 方法と使用データ

気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) で作成した全球再解析 JRA-55 を初期値・境界値とする水平解像度 5 km のシミュレーション結果 (SI-CAT DDS5TK)<sup>3)</sup> を 1 km へダウンスケーリングした。対象地域は北信越と南東北とし、多雪の 2005-2006 年、少雪の 2006-2007, 2015-2016 年の 3 冬について計算した。

比較検証には防災科学技術研究所で行われている山岳積雪観測データ (15 地点) と AMeDAS (NHRCM の格子と観測地点の標高差が 50m 以内である北信越 35 地点, 南東北 37 地点) の積雪深を用いた。

### 3. 結果

図 1, 図 2 に多雪であった 2005-2006 年の冬について、1 km および 5 km のダウンスケーリングの結果と観測値を比較したものを示す。1 km の積雪深は 5 km に比べ地形をより反映したものになっている。山岳域では 5 km では顕著な過大評価であるが、1 km ではやや過小評価である。日本海側平地での負のバイアスは 1 km でも解消されていない。同様の傾向は南東北や少雪年でも見られた。

5 km での過大評価は、今回シミュレーションでは NHRCM での地形をエンベロープ地形と呼ばれる、各グリッドでの最高標高をそのグリッドの標高とする設定としたことが関連していると考えられる。日本海からの季節風のせき止めが強く出すぎている可能性がある。水平解像度を細かくしていくとモデルの地形設定と現実地形の差は小さくなる。

観測地点での積雪深の時系列を見ても、1 km はやや過小評価傾向、5 km は過大評価傾向であることがわかる。ただし、地点レベルではローカルな影響が強く出ている (図省略)。

謝辞：本研究は文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマ C JPMXD0717935561 の助成を受けた。

参考文献：1) Kawase, H., and others, 2020: *Progress in Earth and Planetary Science*, 7, 10. 2) Sasai, T., and others, 2019: *J. Geophysical Research*, 124, 13,975–13,990. 3) 山崎剛ほか, 2019: シミュレーション, 38(3), 145-149.

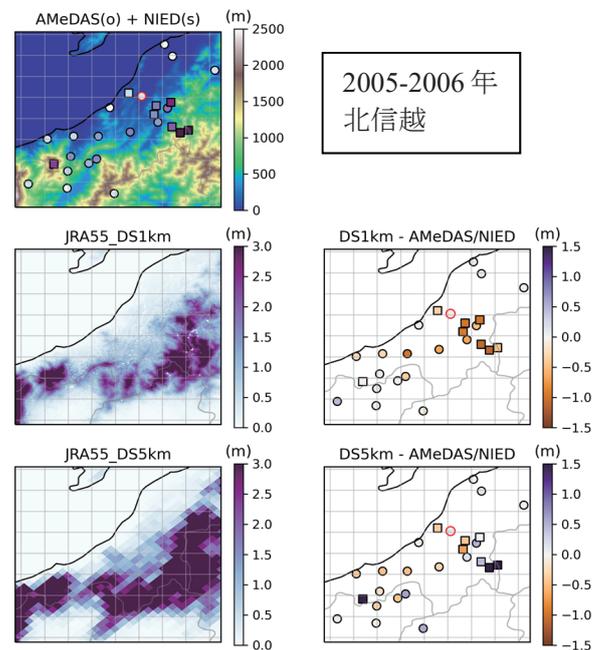


図 1 ダウンスケーリングによる積雪深 (12~3 月の平均) の観測値との比較 (北信越). 上段: 地形と観測地点の標高. ○: AMeDAS, □: 防災科学技術研究所の観測点. 中段: 1 km の差. 下段: 5 km .

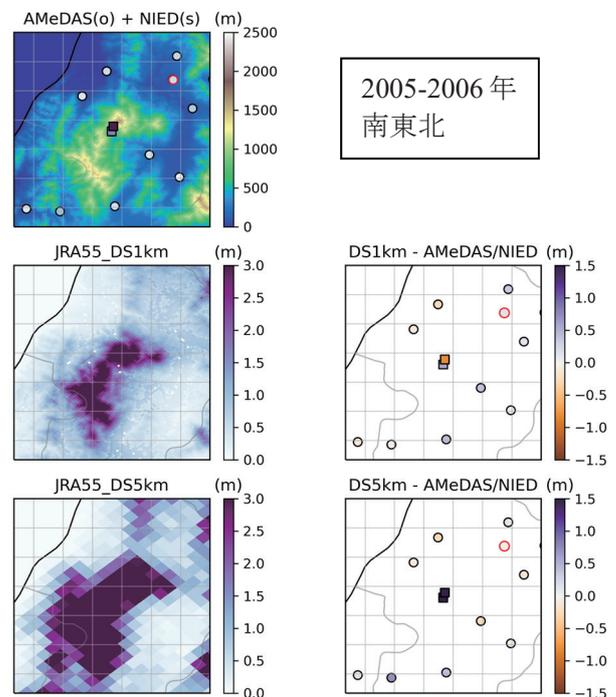


図 2 図 1 と同じ (南東北).

1 東北大学大学院理学研究科

2 ハワイ大学マノア校

3 気象庁気象研究所

4 防災科学技術研究所

Graduate School of Science, Tohoku University

University of Hawaii at Manoa

Meteorological Research Institute

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience









## 技術学術展示

展示期間:2021年9月13日(月)~9月16日(木)

展示形式:オンライン形式

### 出展一覧 (五十音順)

企業・機関・団体名	URL	連絡先
<b>クリマテック(株)</b>	<a href="http://www.weather.co.jp/index.html">http://www.weather.co.jp/index.html</a>	〒171-0014 東京都豊島区池袋4丁目2-11 CTビル6F
展示: 雪氷に関する計測機器をご紹介		TEL: 03-3988-6616
業務: クリマテックは自然計測のシステムインテグレータです		FAX: 03-3988-6613 担当者: 清田 和徳 E-mail: seida@weather.co.jp
<b>(株)アイ・アール・システム</b>	<a href="https://www.irsystem.com/">https://www.irsystem.com/</a>	〒206-0041 東京都多摩市愛宕4-6-20
展示: 視程の定量化、小型軽量でシステムへの組み込みに最適な「超小型視程計」		TEL: 042-400-0373
業務: 赤外線を主とする光学機器・測定器および部品の輸入販売		FAX: 042-400-0374 担当者: 鈴木 公治 Email: suzuki_k@irsystem.com



雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）開催に際し、以下の企業・団体から、広告掲載，協賛のかたちでご協力いただきました。

ご支援を頂いた企業・団体各位に厚く御礼申し上げます。

## 広告掲載（五十音順）

株式会社環器

クリマテック株式会社

株式会社興和

株式会社スノーテック新潟

東光計測株式会社

新潟電機株式会社

日本地下水開発株式会社

山田技研株式会社

株式会社雪研スノーイーターズ

## 協 賛（口数・五十音順）





# 製品情報



## 路面状態センサー CVS-MD30



CVS-MD30 本体 ¥880,000

このセンサーは除雪車やパトロール車両、観測車などの移動体に取り付けて道路の状態(乾燥/湿潤/濡れ/氷/雪/シャーベット)、気象、氷や水分の膜圧、摩擦係数などを計測します。

リアルタイム情報から、凍結予測、ドライバーへの情報提供など、様々な道路管理に役立てることができます。



## 3D ディストロメーター



CTC-3DLPM ¥1,700,000~

粒子画像から雨雪だけでなく、雹、霰、種子、昆虫も判別できるようになりました。

- ・ステレオカメラによる、精度の高い粒径速度の分布計測を実現
- ・天気コード出力
- ・出力はイーサネット、シリアルインターフェイス、SDカード保存から選択
- ・可動部が無いため、ほぼメンテナンスフリー

## 積雪相当水量計(SWE)



CHI-SnowFox ¥3,400,000~

このセンサーは、地面上に設置して、センサー上部から積雪を通過してくる2次宇宙線の強度を測定します。

この強度は、センサー上部にある積雪の相当水量(SWE)に比例します。



センサー部



コネクタ部



変換器

# クリマテック株式会社

東京都豊島区池袋 4-2-11 CTビル 6F

TEL:03-3988-6616 FAX:03-3988-6613 E-mail sales2@weather.co.jp

※詳細は Web をご参照下さい  <http://www.weather.co.jp/>



— 快適な生活と美しい自然環境の保全 —

この両者こそが興和のテーマです。

私たちは「雪」から確実に社会を守り続けることを使命に、  
消融雪技術・防災技術の開発と研鑽を積み上げてきました。  
再生可能エネルギーを活用した持続可能な消融雪技術で、  
雪国の暮らしに安全と安心を提供するとともに、  
雪国の未来、地球の未来に貢献いたします。

地下水保全  
雪崩監視  
下水熱  
地中熱  
道路融雪

### 消雪パイプ用節水タイマー

低コストで消雪施設の地下水節水対応&節電



気温が高いとき間欠運転することで消雪能力をあまり落とさずに運転時間を2~4割削減します。既存施設に追加設置するだけで、地下水低下の抑制と節電を簡単に行うことができます。

### 遠隔監視制御システム

道路防雪設備の効率的運用



消融雪設備の運転制御、設備状況監視を遠隔地から行えるシステムを構築し、複数の設備を効率よく運転させることができます。

### 雪崩検知システム

ソリ式による積雪グライド検知



斜面積雪の動き(速度・変位)を常時監視し、基準値を超える値を検知すると直ちに警報発信(web、e-mail)します。

### ヒートポンプレス下水熱交換融雪

SCOP10を超える省エネ融雪



下水管の底に並べた採熱管で下水熱を集め、高熱伝導の舗装に伝えて融雪します。ヒートポンプを省略することで、電気代を抑えられるほか、点検等の維持管理費用も抑えられます。

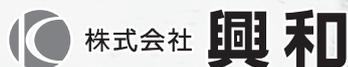
### 地中熱ヒートパイプ融雪

CO<sub>2</sub>排出ゼロ<sup>※</sup>ランニングコストゼロで融雪<sup>※</sup>



ヒートパイプが地中熱を舗装へ自動的に伝えて融雪します。機械設備がなく、冬になれば自動で動き出すので、維持管理費用がかかりません。

地中熱ヒートパイプ融雪は  
電線もない山岳道路でも活躍中



株式会社

興和

本社 / 〒950-8565 新潟市中央区新光町6番地1  
TEL 025-281-8811 FAX 025-281-8833  
支店 / 東北・北陸・新潟・中越・上越・佐渡  
営業所 / 札幌・青森・山形・富山・長野・阿賀野・魚沼・十日町・糸魚川・東京  
URL : <https://www.kowa-net.co.jp/>

お問い合わせ・資料請求は水工部へ

T E L : 025-281-8816

F A X : 025-281-8835

E-MAIL : [ans@kowa-net.co.jp](mailto:ans@kowa-net.co.jp)

## 積雪センサー SDS-105(D)

- 設定した積雪値になると出力信号が出ます。
- 0cm基準設定がボタン一つで操作可能。
- 電源電圧はDC12V-1A以下(AC100~230/DC12Vアダプタを使用)。



*Snow  
Technology  
Economy × Ecology*  
これが私たちのテーマです。

## 観測機器



積雪深計 SDM 積雪重量計 MN

## 降雪センサー



SNK・SN SHK[省エネ型] FS[簡易型]

飛雪粒子計数装置 SPC



New model  
2022年 発売予定



降雪検知装置の  
**新潟電機株式会社**

TEL (0258) 32-8222 (代) FAX (0258) 37-0501  
〒940-1101 新潟県長岡市沢田1丁目3535番地41



**株式会社 スノーテック新潟**

TEL(0258)31-8220(代) FAX(0258)31-8221  
〒940-1101 新潟県長岡市沢田1丁目3535番地41

<http://www.snowcon.com>

Think  
Globally,  
Act  
Locally.



# 15℃ さ て

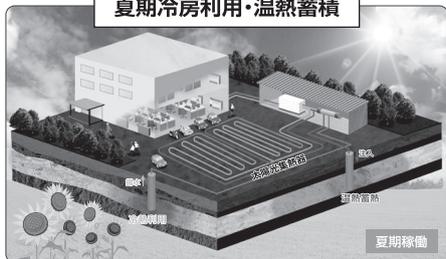
と  
っ  
て  
も  
暖  
か  
い  
。

と  
っ  
て  
も  
涼  
し  
い  
。

## 高効率帯水層蓄熱冷暖房システム

帯水層蓄熱冷暖房システムは、地下水熱を熱エネルギーとして地下に広がる帯水層に蓄熱して、建物の冷暖房を効率的に行う技術です  
JGDの高効率帯水層蓄熱冷暖房システムは、省エネルギーと温室効果ガス排出量の大幅削減を実現します

夏期冷房利用・温熱蓄積



冷房排熱(温熱)を暖房熱源に



交互利用



暖房排熱(冷熱)を冷房熱源に

冬期暖房利用・冷熱蓄積



令和2年度 新エネ大賞  
経済産業大臣賞  
高効率帯水層蓄熱  
冷暖房システムの導入



令和2年度  
気候変動アクション  
環境大臣表彰



JAPAN GROUNDWATER DEVELOPMENT CO., LTD.

日本地下水開発株式会社

本社/〒990-2313 山形県山形市松原777 TEL.023-688-6000 FAX.023-688-4122

営業所

青森営業所・岩手営業所・秋田営業所・庄内営業所・福島営業所・富山営業所・長野営業所・鳥取営業所・島根営業所・東京営業所・仙台営業所

関連会社

日本環境科学株式会社・日本水資源開発株式会社

# 道路雪氷対策の最適なソリューションを提供

## 車載式塩分濃度システム

凍結防止剤散布の最適化を支援！

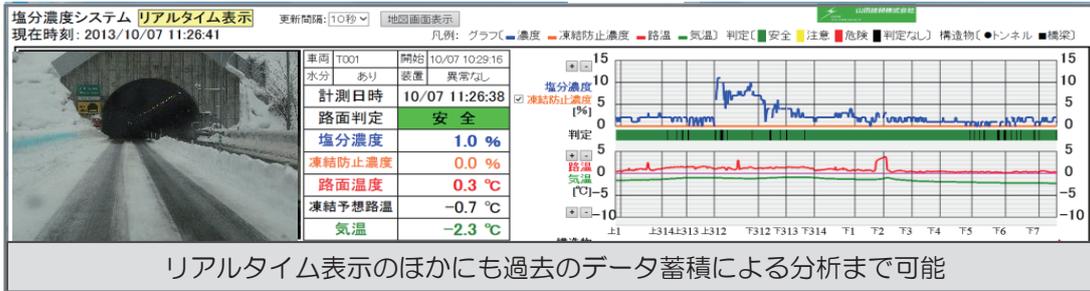


塩分濃度装置で跳上げ水の塩分濃度を測定



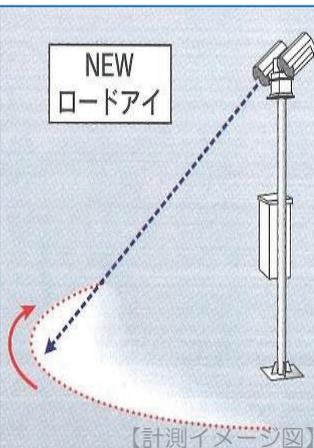
塩分濃度センサー

### 【データ表示画面】



## 路面状況センサー 〈NEWロードアイ〉

本線上の積雪深・路面温度・路面性状を  
非接触で面的に計測！



NETIS登録 №KK-160052-A

計測データと路面画像をリアルタイムで管理事務所に伝送

## 熱量式気象センサー 〈ウィンターセンサ〉

リアルタイム降雪強度を  
熱量で計測！

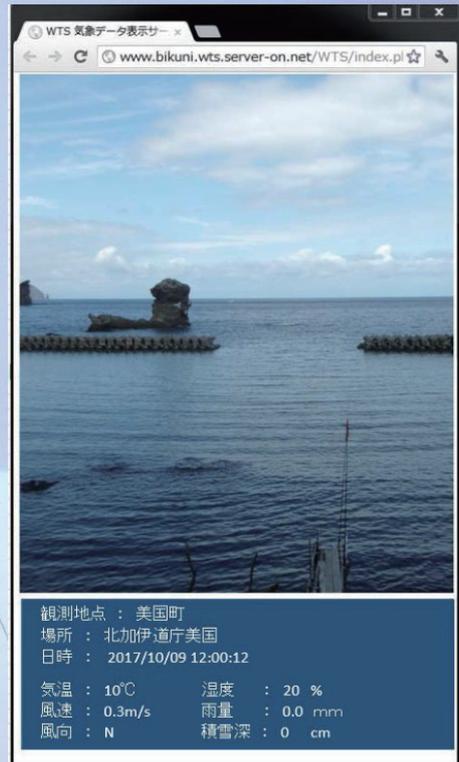


〒918-8015 福井県福井市花堂南2-5-12  
TEL : 0776-36-0460 FAX : 0776-36-0623  
HP : <https://yamada-giken.co.jp>

# KANKI®

Weather Observation

気象・雪況・水文  
環境調査をサポートします。



観測地点 :	美国町		
場所 :	北加伊道庁美国		
日時 :	2017/10/09 12:00:12		
気温 :	10°C	湿度 :	20 %
風速 :	0.3m/s	雨量 :	0.0 mm
風向 :	N	積雪深 :	0 cm

株式会社 環器 【本社】〒003-0826 札幌市白石区菊水元町6条3丁目2-20 TEL:011(876)9230  
http://www.kankinet.jp 【事務所】〒060-0004 札幌市中央区北4条西6 北四条ビル9F TEL:011(215)1840

販売・修理・設置工事・保守業務

気象 水文 水質 地震観測器械 計測器械  
試験機 地すべり観測器械 測量器

## 東光計測(株)

本 社 〒990-2161 山形市大字漆山字梅ノ木1985番4  
☎(023)686-4952(代)  
庄内営業所 〒998-0824 酒田市大宮町四丁目7番1号  
☎(0234)24-5222

# S N O W E A T E R S

私たちは雪と氷  
自然との共生を考えます。

北の大地における  
「雪のプロ」として  
様々な機関と協力し  
総合的な取り組みで、  
雪氷技術を駆使し  
地域社会に貢献します。



**株式会社 雪研スノーイーターズ**

札幌市中央区南2条西7丁目5-6第3サントービル8F  
TEL011-272-3540 FAX011-272-3550

<http://www.snow-eaters.com>

2021年8月24日印刷

2021年8月31日発行

雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）講演要旨集（ISSN 1883-0870）

編集・発行及び著作権：

（公社）日本雪氷学会

〒162-0801

東京都新宿区山吹町 358-5

アカデミーセンター

TEL: 03-6824-9386

FAX: 03-5227-8631

E-mail: jim@seppy.org

日本雪工学会

〒100-0003

東京都千代田区一ツ橋 1-1-1 パレスサイドビル

株式会社毎日学術フォーラム内

TEL: 03-6267-4550

FAX: 03-6267-4555

E-mail: maf-snow@mynavi.jp

印刷所：

佐藤印刷株式会社

〒310-0043 茨城県水戸市松が丘 2-3-23

TEL: 029-251-1212 FAX: 029-251-1047

E-mail: info@satoprint.co.jp