

## 2021 年度（公社）日本雪氷学会北信越支部 研究発表会プログラム

### I 雪崩 1 (9:10-10:00)

座長：勝島 隆史（森林総研）

1. Google Earth を用いた全層雪崩の発生危険度評価  
○榎並 凌・河島克久・松元高峰（新潟大）
2. 富山県における山岳雪崩の早期検知に向けた 5 km グリッド雪崩発生指標  
○杉浦幸之助（富山大）・飯田 肇（立山カルデラ砂防博物館）
3. UAV を利用した雪崩斜面におけるグライド量の面的計測  
○丸山ひかる・松元高峰・渡部 俊・河島克久（新潟大）
4. グライドと全層雪崩発生とに及ぼす低木広葉樹の倒伏過程と初冬の気象条件の影響 —3 冬季データの比較から—  
○松元高峰（新潟大）・勝島隆史（森林総研十日町）・宮下彩奈（森林総研）・小田憲一（日本大）・河島克久（新潟大）

### II 雪崩 2 (10:05-10:55)

座長：松元 高峰（新潟大）

5. 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 —調査内容と結果の速報—  
○竹内由香里・勝山祐太・勝島隆史（森林総研十日町）・安達 聖・荒川逸人（防災科研・雪氷）・河島克久（新潟大）
6. 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 —SNOWPACK モデルによる積雪状態の推定—  
○勝山祐太・勝島隆史・竹内由香里（森林総研十日町）
7. 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—  
○勝島隆史（森林総研十日町）・安達 聖・荒川逸人（防災科研・雪氷）・勝山祐太・竹内由香里（森林総研十日町）・河島克久（新潟大）
8. 道路雪堤の内部層構造と崩壊現象の分類  
○芝崎智貴・杉原幸信・上村靖司（長岡技科大）・町田 敬（町田建設（株））

### III 雪氷物理・利雪・克雪・計測 (11:00-11:50)

座長：藤野 丈志（（株）興和）

9. 放射製氷において製氷面の温度勾配が初晶成長に及ぼす影響  
泉野祥太郎・○吉田匡貴・杉原幸信・上村靖司（長岡技科大）
10. 新たな安全概念 Fool Education の適用例  
宍戸紀之・○安孫 周・杉原幸信・上村靖司（長岡技科大）
11. 実用的な可搬型雪冷房装置の試作と性能試験  
○青柳大輔・Bayanmunkh Tsatsral・辻野憲孝・杉原幸信・上村靖司（長岡技科大）
12. 連続引上製氷における引上げ力の測定  
○杉原幸信・水橋奈那・大瀧智宏・上村靖司（長岡技科大）

### IV 災害・気候 (14:20-15:10)

座長：杉浦 幸之助（富山大）

13. 2020/21 年冬季の局所的集中降雪にかかわる大気循環場の特徴  
○本田明治（新潟大）
14. 2020-21 年冬期の新潟県内の大雪災害発生状況  
○上石 勲・山下克也（防災科研・雪氷）・覺道由郎（長岡技科大）
15. 新潟県における積雪重量の過去 30 年間の変動から見た 2020/21 冬季の特徴  
○平島寛行（防災科研・雪氷）・河島克久（新潟大）・本谷 研（秋田大）・佐野浩彬（防災科研）

16. 寒候期の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・楊 柳・姫 玖玖・中村 賢・大谷卓也・森 絢三郎 (富山県立大)

V 降雪・吹雪 (15:15-16:15) 座長: 中井 専人 (防災科研)

17. 交差角板状の枝が付く立体状結晶の観察報告  
○藤野 丈志 ((株) 興和)・本吉 弘岐 (防災科研・雪氷)
18. 北陸平野部の大雪と降雪粒子の特徴 —2018年と2021年の大雪から—  
○石坂雅昭 (防災科研・客員)・本吉弘岐・山下克也・中井専人・山口 悟 (防災科研・雪氷)・橋本明弘 (気象研)
19. マイクロ波ドップラー装置を用いた降水観測  
○熊倉俊郎 (長岡技科大)・山崎正喜 (スノーテック新潟)・本吉弘岐・中井専人 (防災科研・雪氷)・齋藤隆幸 (スノーテック新潟)
20. レーダー観測と地上観測における降雪の時空間的な整合性について  
○柴田堅太・熊倉俊郎 (長岡技科大)・中井専人 (防災科研・雪氷)
21. スプラッシュ過程における粒子の3次元挙動の定量化  
○新屋啓文 (新潟大)・中山智靖 (新潟大)・富永禎秀 (新潟工科大)

VII 交通 (16:20-17:10) 座長: 平島 寛行 (防災科研)

22. 新雪除雪を対象とした最適除雪ルートの検討  
○高崎仁義 (元長岡技科大 現建設技術研究所)・伊藤 潤 (元長岡技科大 現開発技建)・佐野可寸志 (長岡技科大)
23. 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—  
河田剛毅・○永井悠都・本間翔大 (長岡高専)・上村靖司 (長岡技科大)
24. レーザ距離計による路面残雪深計測における表面下散乱現象  
山賀康平・○平田拓巳・上村靖司・杉原幸信 (長岡技科大)
25. 雪による車両滞留発生前の気象変化の特徴  
○村田晴彦・河島克久 (新潟大)

## Google Earth を用いた全層雪崩の発生危険度評価

榎並凌<sup>1</sup>・河島克久<sup>2</sup>・松元高峰<sup>2</sup>

(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)

### 1. はじめに

斜面特性をもとに雪崩発生の危険性が高い斜面を事前に評価することは、道路や鉄道など保全対象の雪崩対策するのに有効である。斎藤ら(2000)は、北陸新幹線の計画ルート付近の斜面において、積雪深・傾斜・樹高・樹冠密度を算出し、雪崩発生危険度を評価している。同様の方法にもとづき雪崩発生危険度の評価を行った例は多数挙げられる(庄司ら, 1988; 新山ら, 2003)が、これらをはじめとする従来の危険度評価手法にはいくつかの課題があると考えられる。

まず、これまでの先行研究は、すべて全層雪崩と表層雪崩とを区別せずに解析を行っている。両者の違いは、すべり面が地表面か積雪層内にあるかという点にあるが、このことは地表面の起伏や植生などが雪崩の発生に及ぼす影響に明らかな差が生じることを意味する。雪崩の発生/非発生と斜面の特性との関係を分析する上では、全層雪崩と表層雪崩とを分けることが望ましい。

加えて、これまでの研究では、雪崩発生域の特定や斜面の地形・植生情報の抽出に空中写真判読の手法が用いられることが多かった。空中写真判読は個人の技量や経験に依存するため、危険度評価の再現性にも課題がある。さらに、対象地域が狭い領域に限られることが多く、その結果を他の地域に適用することができるのか疑問が残されてきた。

そこで本研究では、次の2つの手法を用いることにより、雪崩発生に関する危険度評価技術の改良をはかることを目的とする。まず、解析対象を全層雪崩に限定することにより、雪崩の発生/非発生と各斜面特性との間に、よりシンプルで明瞭な関係性を見出すことを試みる。さらに、発生域・非発生域の判読や、斜面特性データ(とくに植生条件)の収集に Google Earth を用いることで、危険度評価手法の適用可能性を拡張する。雪崩の判読に Google Earth を用いた研究はすでにされており、秋山・関口(2018)は Google Earth を使って、富山県から岐阜県に至る北アルプス地域で発生した 580 件の雪崩を判読している。

## 2. 研究手法

### 2.1 全層雪崩の判読

本研究では、東北6県と新潟県の範囲において融雪期(3~4月)に撮影された Google Earth 衛星画像を使用し、地表面が露出して周囲の積雪との境界が明瞭であることなどを基準にして、全層雪崩の発生域を判読した。また、融雪期までに雪崩が起きておらず、クラックや雪しわなどの形成も確

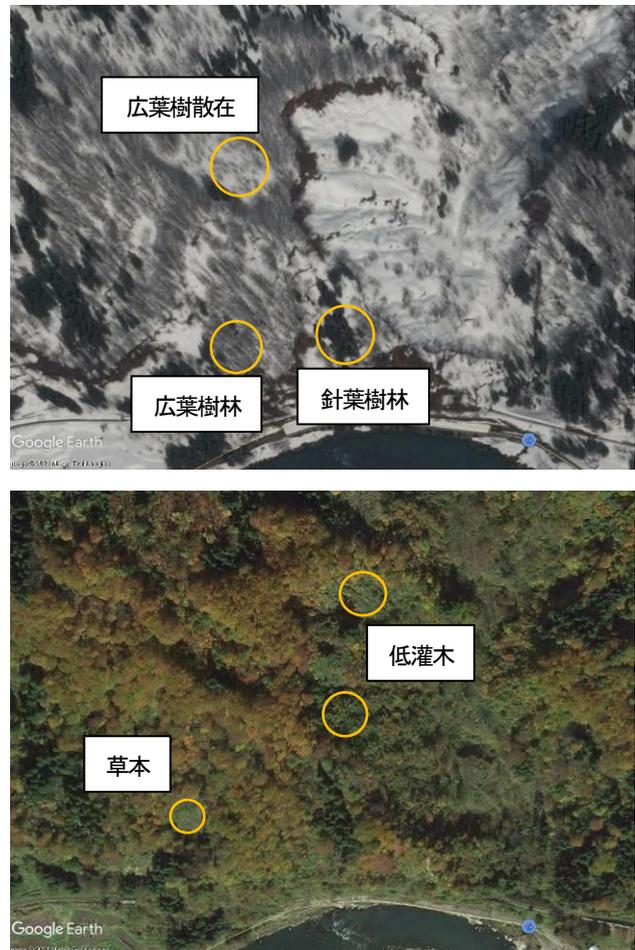


図 1 積雪期(上)及び無積雪期(下)の Google Earth 画像を使った植生判読結果

認できない斜面では、その後も全層雪崩が発生しないと考え、その領域から非発生域を抽出した。

### 2.2 斜面諸データの収集

斜面特性を示すデータとして、本研究は積雪深・斜面傾斜・斜面方位・植生を採用した。積雪深データには気象庁が公開しているメッシュ平年値 2010 の年最深積雪を使用した。斜面傾斜および斜面方位は、10 m メッシュの数値標高モデルから ArcGIS のツール「傾斜角」「傾斜方向」で算出し、発生/非発生域内の平均値を解析に用いた。

先行研究においては、主に樹幹密度や樹高が植生指標として用いられてきたが、発生危険度に影響を及ぼす植生の条件を全層雪崩の場合に限って考えると、草本類や低灌木のように「積雪層に埋もれて倒伏してしまうことで積雪層の

不安定化を促進する」植生か、広葉樹・針葉樹の高木のように「積雪があっても立っていることで積雪層を支持し安定化させる」植生かの違いが非常に大きく影響することが想定される。そこで本研究では、植生のタイプを裸地・草本・低灌木・広葉樹散在・広葉樹林・針葉樹林の6種類に分類することとし、Google Earth上で公開されている同じ地域の積雪期と無雪期の衛星画像を目視で比較することにより植生タイプの判別を行なうこととした。まず、積雪期の画像を見て広葉樹散在・広葉樹林・針葉樹林の判読を行う(図1上)。樹冠が小さく、葉が付いていれば針葉樹、枝の広がりで樹冠が大きく、葉が付いていなければ広葉樹である。また、対象とする領域内に高木が点在している状態、もしくは高木林の中にパッチ状に低灌木や草本が存在している状態を「広葉樹散在」と定義した。裸地・草本・低灌木の判読では、Google Earth上で積雪期と無積雪期の画像を切り替えながら見ると分かりやすい(図1下)。積雪期の画像では雪に埋もれて植生が見えない領域のうち、どの無積雪期の画像でも植生がなければ裸地、小さい樹冠が確認できれば低灌木、両者に該当しなければ草本とする。このように、植生が積雪に埋もれるか否かという基準を用いることで、全層雪崩の発生危険度に影響を及ぼす植生条件の判別を、個人の技量や経験に依存しない形で容易に行なうことが可能となる。

### 2.3 数量化Ⅱ類による解析

本研究では、上記の斜面特性をもとに、任意の斜面領域における全層雪崩の発生危険度を評価する手法として、先行研究の多くと同様に、数量化Ⅱ類分析を用いることにする。数量化Ⅱ類分析とは、定性的な外的基準(雪崩の発生/非発生)を定性的な要因(植生の種類など)に基づいて予測し、さらに各要因の寄与度を評価する統計的手法である。分析に際して、定性的な要因はそのままの形で用いられるのではなく、要因ごとに階級を設定し、その階級に対して最適な評価点(スコア)を与えて量的な変数に変換される。そして、要因ごとのスコアの合計点から雪崩発生危険度の大小が評価されることになる。また最大スコアと最小スコアの差(レンジ)から要因ごとの寄与度の評価も可能である。予測精度の確認には、雪崩発生実績とスコアから予測した推定結果との合致度(的中率)を用いることとする。

## 3. 解析結果

### 3.1 斜面特性と発生/非発生の関係

全層雪崩の判読の結果、7県で714地点の発生域と、735地点の非発生域とを抽出することができた。

各斜面特性に関して、発生域と非発生域における頻度分布を比較すると、植生条件で特に明瞭な違いが見出された。雪に埋もれて倒伏するような低灌木の分布する斜面で発生した全層雪崩事例が非常に多い一方で、広葉樹林や針葉樹林など、高木が密に生育した場所で発生した事例は見つからなかった(図2上)。この結果から、植生、とくに高木の有

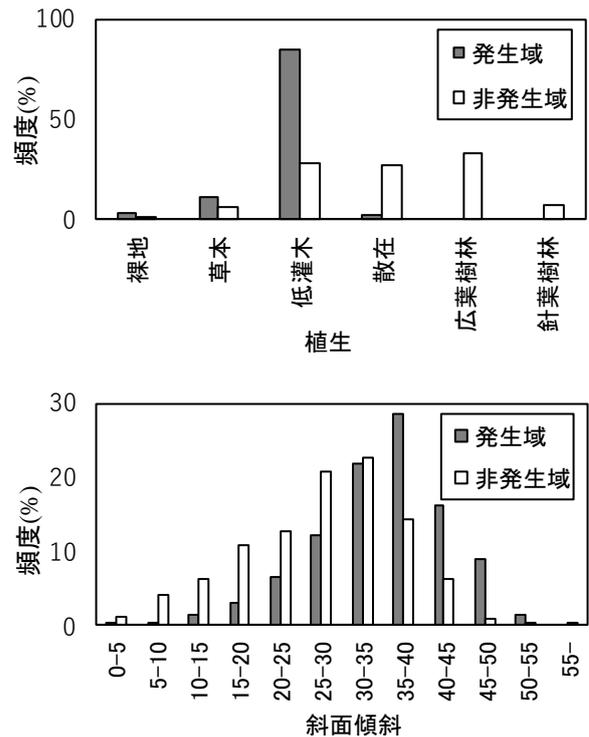


図2 全層雪崩発生域と非発生域における植生(上)と斜面傾斜(下)の頻度分布

要因	階級	スコア
傾斜	20° 未満または 50° 以上	-0.562
	20° 以上かつ 50° 未満	-0.165
	30° 以上かつ 35° 未満	0.028
	35° 以上かつ 40° 未満	0.249
	40° 以上かつ 50° 未満	0.404
斜面方位	西, 北西, 北	-0.245
	北東	0.075
	東	0.073
	南東	0.110
	南	0.085
	南西	0.029
植生	裸地, 草本	0.563
	低灌木	0.629
	散在, 広葉樹林	-1.213
	針葉樹林	-1.040

表1 数量化Ⅱ類によって得られたスコア

無が全層雪崩の発生/非発生に大きく影響するということが確かめられた。

また斜面傾斜に関しては、発生域と非発生域との間でピークの位置に違いがある。全層雪崩が多く発生したのは

20～50° の範囲で、最も頻度が高い範囲は35～40° であった(図2下).

### 3.2 発生危険度の評価

雪崩の発生/非発生と各斜面特性データの相関を調べた結果、積雪深と発生/非発生との間には有意な相関がないことが分かったため、積雪深をのぞいた3つの特性データを要因とする数量化II類分析を適用した.

その結果、表1に示した各要因のスコアは図1の頻度分布で示した特徴をよく反映した値となった.そして植生に注目すると、高木の有無によってスコアがプラスのものとマイナスのものとはっきり分かれていることがわかる.要因ごとのレンジの値からは、植生の寄与度が非常に大きいということも明らかとなった.この手法による的中率は83.9%であり、良い精度で雪崩発生危険度の高い領域を予測できる指標であるといえる.

### 4. まとめ

本研究では、全層雪崩及び植生の判読にGoogle Earthを使って雪崩発生危険度評価を行ったところ、高木の有無という違いが全層雪崩の発生に大きく寄与していることがわかった.

斜面上の高木の有無は、Google Earthに公開されている積雪期の衛星画像の色調から容易に判別することができるため、本研究で提案した植生指標とその判別手法は、全層雪崩の発生危険度評価において有効で、実用性も高いといえることができるだろう.さらに、Google Earth上では北海道から中国地方にかけての多くの領域で、全層雪崩の発生域を特定できる程度の高解像度画像が利用可能であるため、将来的にはこれによって危険度評価をより広域へ適用することも可能となる.

### 文献

- 斎藤 隆, 小島 隆, 松田 宏(2000):北陸新幹線の雪崩危険度評価. 雪氷, **62**, 29-39.
- 庄司 浩, 武田満子, 坊城智広, 赤沢義次(1988):雪崩発生危険度評価の事例. 先端測量技術, **39**, 84-94
- 新山 純一, 松田 宏, 飯倉 茂弘, 河島 克久, 藤井 俊茂(2003):東北新幹線盛岡・八戸間のなだれ危険度評価とその工学的意義. 日本雪工学会誌, **19**, 91-101.
- 秋山 一弥, 関口 辰夫(2018):Google Earthの広域写真判読で得られた雪崩の特徴と発生規模・発生数の関係. 日本雪工学論文集, **34**, 1-12

## 富山県における山岳雪崩の早期検知に向けた 5km グリッド雪崩発生指標

杉浦幸之助<sup>1</sup>・飯田肇<sup>2</sup>

(1:富山大学 2:富山県立山カルデラ砂防博物館)

### 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、山岳域では雪崩や吹雪が生じ、甚大な災害が生じている。自然災害の中でも、地震や火山噴火などは数年から数十年に一度、突発的に多くの死者や行方不明者をもたらすが、雪崩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。登山ツーリズム人口の増大とあいまって、山岳域では依然として社会に脅威を与える自然災害であり、大きな社会問題ともなっている(例えば 2021 年ゴールデンウィーク中に北アルプスで起こった遭難事故など)。そこで本研究では、まずはじめに雪氷災害の中でも特に富山県に特徴的な雪崩災害を対象とした。気象庁ではなだれ注意報を発表するが、このなだれ注意報の北信越 5 県における基準は県単位で異なっており、積雪深、降雪量、気温、風速、降水量といった気象データをもとに計算することが可能である。気象を観測する地点として気象庁の地域気象観測所(通称、アメダス観測所)があるが、富山県山岳域には設置されていない。そこで、2019 年 11 月より提供が開始された積雪深と降雪量の実況を推定する解析積雪深・解析降雪量に着目した。これはアメダス観測所が設置されていない地域を含めて、数値モデルにより出力された積雪深と降雪量の面的な状況の把握が可能でデータセットであり、これを利用することで山岳域の積雪深と降雪量をある程度に把握することができる。そこで、雪崩が発生する際の気象状況をより細かい範囲で把握して雪崩災害の早期対応に役立てるため、雪崩の早期検知に向けた雪崩発生指標を求めたので、今回報告する。

### 2. 方法

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)を使用した。いずれも 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)である。期間は 2021 年 1 月 1 日から 2021 年 3 月 31 日までの 3 か月間である。富山県のなだれ注意報の基準は、1) 24 時間降雪の深さが 90cm 以上あった場合、2) 積雪が 100cm 以上あって日平均気温 2°C 以上の場合、となっている。5km グリッドで基準 1 もしくは 2 に該当するか否かを示す雪崩発生指標を算出した。日時と地点を可視化するために、気象業務支援センターからの配信データを SFTP で受信し、雪崩発生指標の演算処理をして、HTTP により Web ブラウザで表示した。

### 3. 結果と今後

求められた雪崩発生指標の分布は時々刻々と変化した。図 1 に 2021 年 2 月 14 日正午の雪崩発生指標の 1 例を示す。富山県山岳域に雪崩発生指標が表示されるものの、同じ山岳域でも気温が低い地点には雪崩発生指標が当てはまらない様子が見られる。

今後は、雪崩発生指標の検証作業が必要である。実際に雪崩が発生した日時と場所との比較をするために、この指標をさらに広域に展開する必要がある。

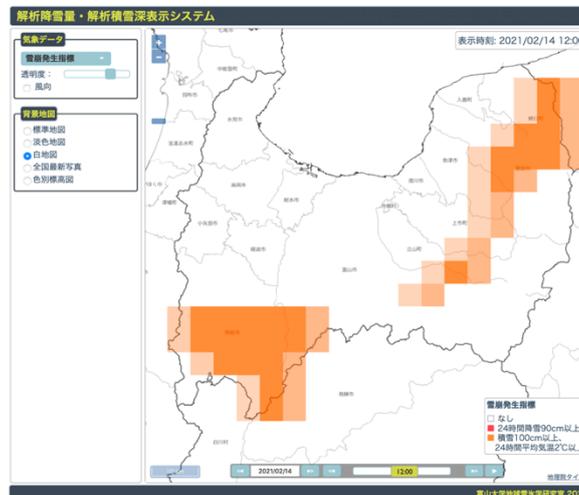


図 1 富山における長期積雪の終日(2021 年 2 月 14 日)正午の雪崩発生指標の分布

## UAV を利用した雪崩斜面におけるグライド量の面的計測

丸山ひかる<sup>1</sup>・松元高峰<sup>2</sup>・渡部俊<sup>2</sup>・河島克久<sup>2</sup>

(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)

### 1. はじめに

グライドの測定には、これまでソリ式グライドメーターや歯車型グライドメーターが用いられてきた。しかし、グライドは地形や植生の影響を受けるため、1つの斜面であっても均一であるとは限らない。そのため、グライドの進行が全層雪崩の発生につながる過程を詳しく理解して、雪崩の発生予測に応用するためには、斜面全体のグライドの動態を知る必要がある。グライドメーターによる点でのグライド量の観測によって積雪の面的な動態を把握することは難しいので、グライドの面的分布の計測が可能な方法を開発することは重要な課題といえることができる。

近年、Feick et al. (2012)は、高分解能光学衛星画像を利用したグライドクラックの検出とマッピングが可能であることを明らかにしている。しかし、衛星画像からグライド量を計測する方法は確立されていないうえに、衛星画像の分解能は高くても0.3 m程度であり、グライド量を詳細に観測することには限界がある。そこで、本研究では、低空での写真撮影が可能で、より空間解像度の高い画像を取得することのできる UAV を用いて、雪面に設置したマーカーを追跡することによってグライド量を計測する方法の可能性を検討した。

### 2. 研究方法

本研究では、新潟県魚沼市大白川における低灌木の生育する南東向き斜面(平均傾斜約 $30^{\circ}$ 、幅約90 m×斜面長約140 m)を対象とした。まず、2020年12月25日にグライドメーター本体(センサー)とソリを図1に示す位置に設置した。次に、2021年2月13日に対象斜面上部の計9か所に直径30 mm、長さ2 mの測量ポールを設置し、その周りの雪面上に

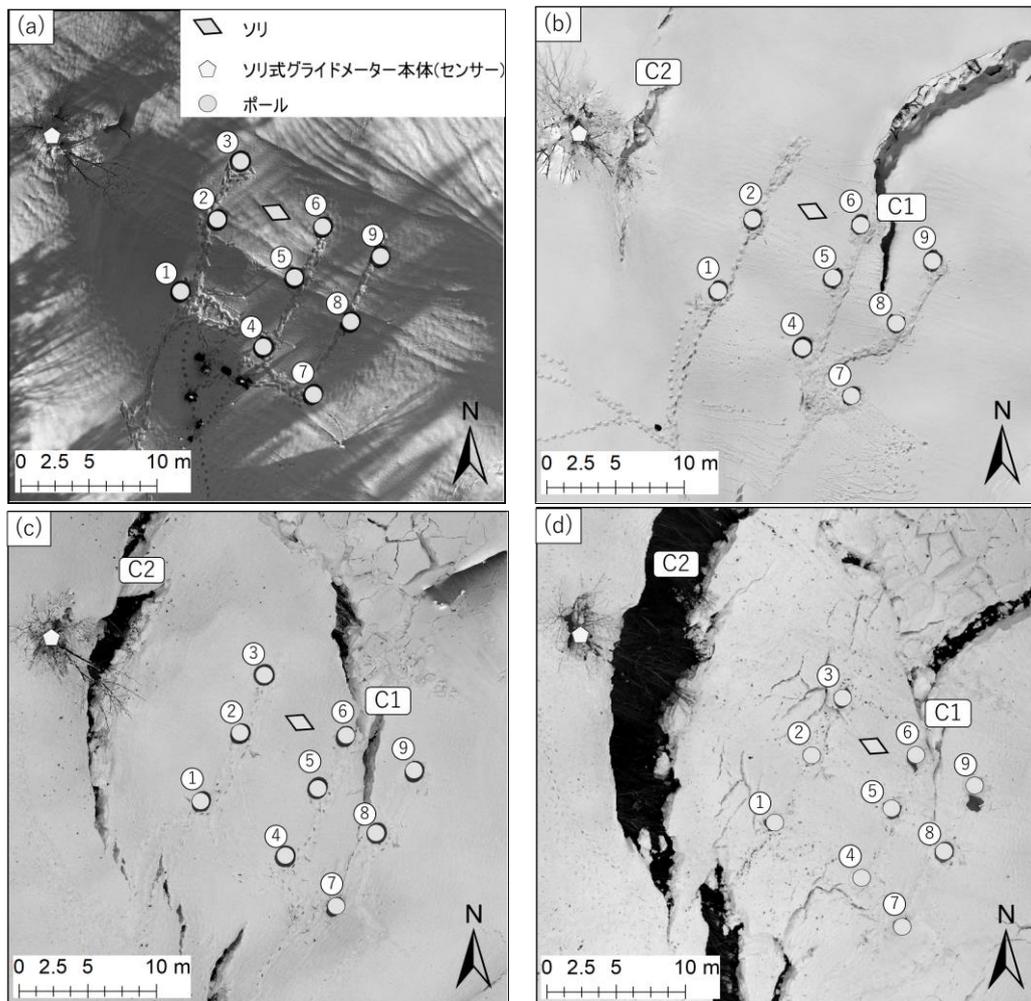


図1 対象地域の各観測日におけるポール、ソリの位置とクラックの様子((a)2月13日、(b)3月4日、(c)3月12日、(d)3月18日)

半径 0.9 m の円形のブルーシートを敷いた。測量ポールを設置後、2 月 13 日、3 月 4 日、3 月 12 日、3 月 18 日、4 月 1 日、4 月 21 日の計 6 回にわたって UAV による空撮を行った。用いた UAV は、2 月 13 日から 4 月 1 日は DJI 社製の Phantom4、4 月 21 日は測位精度の高い同社製の Phantom4RTK である。得られた画像から、Agisoft 社製 Metashape Professional を用いて、オルソモザイク画像と数値表層モデル（以下、DSM）を作成した。画像内の不動点を用いて Phantom4RTK の位置情報に基づき、Phantom4 の写真から作成したオルソモザイク画像に正確な位置情報を与える処理を行った。なお、対象斜面付近の積雪深は、254 cm(2 月 13 日)、264 cm(3 月 4 日)、239 cm(3 月 12 日)、220 cm(3 月 18 日)、148 cm(4 月 1 日)であり、4 月 21 日の観測時には斜面の積雪は完全に消失していた。

本研究では、2 月 13 日から 4 月 1 日までのデータで解析を行い、各インターバルのポールの移動量を ArcGIS 上で計測し、これをグライド量とした。ただし、ArcGIS 上で計測したグライド量は水平投影されたものであるため、ソリ式グライドメーターの値と比較するために、雪面傾斜を用いて、グライド量を斜面方向に直している。

### 3. 結果と考察

各地点における観測インターバルごとのグライド量を図 2 に示す。ここで、地点 3 では 3 月 4 日にポールが確認できなかったため、2 月 13 日から 3 月 12 日までのグライド量を示している。地点 1 から 9 の累積グライド量は、8627 mm ~ 10340 mm であり、地点により差が認められた。2 月 13 日から 4 月 1 日までの累積グライド量をグライドメーターの値と比較すると、ソリに近い地点 2, 3, 5, 6 の平均は 9869 mm であるのに対し、グライドメーターは 11196 mm であり、どの地点においてもグライドメーターの値より小さかった(82 ~ 92%)。その理由の 1 つは、グライドメーターが地形に沿って移動しているのに対し、UAV によるグライド量は 2 時期のポールの位置の直線距離により求めているためであると考えられる。

次に、時間的変化を見てみると、地点 8, 9 では、2 月 13 日から 3 月 4 日の期間で、他地点の 2 倍以上動いていることが分かる。これは、2 月 13 日から 3 月 4 日の間に地点 5, 6 と地点 8, 9 の間にクラック C1 が発生し(図 1(b))、地点 8, 9 のみ他の地点よりもグライドが促進されたためであると考えられる。また、3 月 12 日には上部クラック C2 が明瞭になり(図 1(c))、さらに 3 月 18 日には、C2 が急激に拡大している(図 1(d))。これを受けて、どの地点においても 3 月 12 日以降グライド量が急激に増加しており、UAV によるグライド量の測定結果は、クラックの形成とよく対応していることが分かる。

以上のことから、UAV を利用してグライド量を計測することは可能であると考えられる。ただし、グライドメーターの値と UAV で求めたグライド量には累積で 1.5 m 程度の差があるため、グライド量のより正確な値を求めるためには、何らかの補正を考える必要がある。

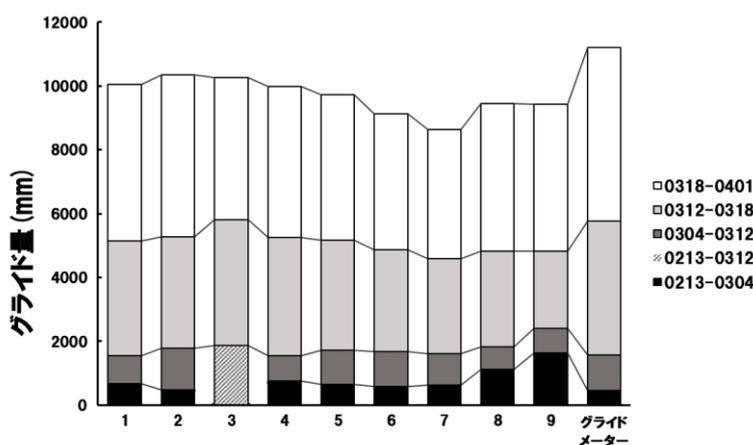


図 2 各地点における観測インターバルごとのグライド量

### 文献

Feick, S., Mitterer, C., Dreier, L., Harvey, S. and Schweizer, J. (2012): Automated detection and monitoring of glide-snow events using satellite-based optical remote sensing and terrestrial photography. *Proceedings of 2012 International Snow Science Workshop*, 603-609.

## グライドと全層雪崩発生とに及ぼす低木広葉樹の倒伏過程と初冬の気象条件の影響

### —3 冬季データの比較から—

○松元高峰<sup>1</sup>・勝島隆史<sup>2</sup>・宮下彩奈<sup>3</sup>・小田憲一<sup>4</sup>・河島克久<sup>1</sup>

(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)

#### 1. はじめに

急斜面に生育する樹木と積雪との力学的相互作用を解明することは、全層雪崩発生へとつながる積雪の不安定化の過程を知る上で極めて重要であり、これまでに遠藤・秋田谷(1977)や山野井(2005)が、ササや樹木の倒伏過程とグライドなどとの関係を、現地観測や実験に基づいて議論している。著者らは、新潟県魚沼市大白川において、雪崩斜面における積雪動態や低木広葉樹の埋雪・倒伏過程などの観測を4冬季にわたって観測しており、2017/18年冬季における倒伏過程と降積雪およびグライドとの関係については、すでにその結果を報告している(松元ら, 2018; 松元, 2020)。

本研究では、2017/18年冬季のデータと、それ以降の(積雪の極端に少なかった2019/20年冬季を除く)2冬季のデータを比較することによって、低木広葉樹の倒伏過程と降積雪条件、グライド、全層雪崩の発生との関係を整理し、その特徴を見出すことを目的とする。なお、全層雪崩の発生には、その直前時期における積雪の状態とその変化も大きく影響すると考えられるが、本研究では、主に初冬(積雪季の初期)における気象条件と倒伏過程とに注目して議論を行なうことにする。

#### 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マルバマンサク・ヤマモミジ・ハンノキ類などの低木広葉樹に覆われており、斜面上方の傾斜は30~45°程度である。

2017/18年冬季以降、稜線から約10m下方に生えている同一のヤマモミジなど、複数の広葉樹に自記傾斜計を設置して、積雪季における樹幹傾斜の変化を計測している。同じ斜面では、ほかに広葉樹の幹の変形、積雪のグライド量、地温などの計測も継続して実施している。さらに、樹木と積雪の状況を稜線上の2カ所に設置したインターバルカメラで監視するとともに、破間川右岸の平坦地に設けた観測露場では、各種の気象・積雪観測を実施した。

#### 3. 結果と考察

##### 3.1 降積雪・グライド・全層雪崩発生の状況

図1に、大白川観測露場における3冬季間の積雪深と融雪ライシメーターを用いて計測した積雪底面流出量、そして雪崩斜面上部におけるグライド量とヤマモミジの樹幹傾斜の時間変化を示す。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した場合の値は130°前後となる。また、2020/21年冬季については、傾斜計の取り付け位置が少し変わった関係で、無雪期の傾斜や完全に倒伏したと考えられる時季の傾斜が、ほかの2冬季よりも10°ほど大きくなった。そこで、図1やこれ以降の議論では、便宜的に計測値から10°を引いた値を用いることにする。

2017/18年冬季は、12月中旬に平坦地の観測露場における積雪深が1m近く増加するような大雪があった後、積雪が次第に増加して2月中旬に最大積雪深(3.74m)に達した。この積雪深の推移は、2020/21年冬季の場合とかなり似かよ

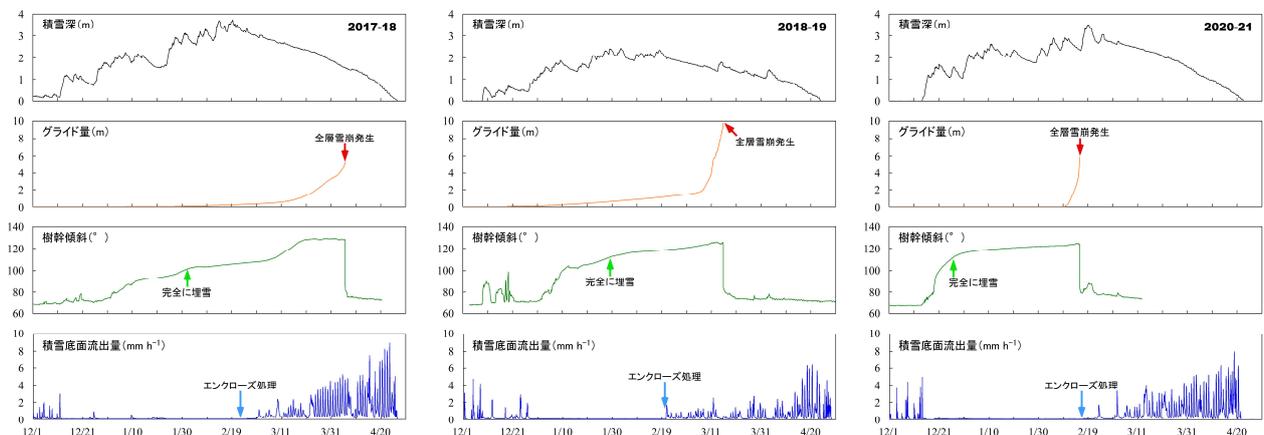


図1 2017/18年冬季, 2018/19年冬季, 2020/21年冬季における, 大白川観測露場での積雪深・積雪底面流出量と、雪崩斜面上部でのグライド量・ヤマモミジの樹幹傾斜の時間変化。

っている。12月中旬に積雪なしの状態から一気に1.5 mに達する大雪があり、その後、最大積雪深は同じ2月中旬に3.51 mを記録している。これらに対して、2018/19年冬季は12月上旬から少しずつ積雪深が増えてゆき、急激な増加はないまま2月上旬に最大積雪深(2.43 m)を記録した。

一方、グライド量の推移と全層雪崩の発生日には、年ごとに顕著な違いがみられた。2017/18年冬季は1月下旬ころから徐々にグライドが始まり、融雪水の底面への供給が連続し始める3月になって次第に活発になっていく。そして4月5日になって全層雪崩が発生した。2018/19年冬季は、早くも1月初旬からグライドが始まり、2月下旬までは徐々に進行していった。そして3月上旬になるとグライドは急激に活発化し、3月15日には雪崩の発生に至った。2020/21年冬季の場合は、2月上旬までグライドは全く発生しておらず、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日後には一気に雪崩の発生にまで至った。

### 3.2 低木広葉樹の埋雪・倒伏状況

斜面上部に生えているヤマモミジの樹幹傾斜の時間変化も、年ごとに著しい違いを示した。

2017/18年冬季の場合、12月中旬の大雪に際して、冠雪の発達と落下に伴う小刻みな傾斜変化は見られたが、埋雪して大きく幹が傾くことはなかった。その後、1月初旬から木の先端まで完全に埋雪した1月末までの期間には樹幹傾斜の増加が続き、木全体が雪に埋もれてしまうと、傾斜の変化はそれ以前より小さくなった。3月に入ると傾斜の増加はふたたび活発になる。このことは、グライドに伴う「抜け出し」(遠藤・秋田谷, 1977)が起こって倒伏が進むことを示すと考えられる。3月下旬になると傾斜は130°近くに達しており、地表面まで完全に倒伏したと考えられる。その後、全層雪崩が発生するまでの間には、樹幹傾斜の小さな増減がみられた。

2018/19年冬季では、やはり1月初旬から、積雪増加に対

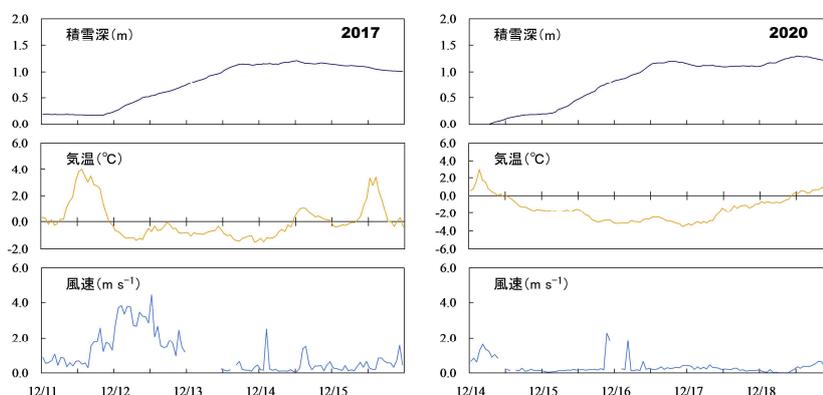


図2 2017年12月11日～15日と2020年12月14日～18日における、大白川観測露場での積雪深・気温・風速の時間変化。

応する大きな傾斜変化が続いて、1月中旬には100°を超えた。その後は緩やかな傾斜の増加が3月上旬まで続き、3月10日には125°に達した。雪崩発生の3日前くらいからは、2017/18年冬季と同様に樹幹傾斜の小さな増減がみられた。

そして2020/21年冬季では、(2017/18年冬季とは違って)12月中旬の大雪の際に一気に埋雪して倒伏が進み、1月中旬の段階で、ほぼ地表面近くまで倒伏したと考えられる状態に達してしまった。その後の変化は極めて緩やかであるが、雪崩発生前の数日間には改めて樹幹傾斜が少し増加していた。

### 3.3 降積雪状況・倒伏過程・グライドの関係

上にみたように、積雪深の推移には年によってそれほど大きな違いがなかったにも関わらず、樹幹傾斜とグライド量の推移には年ごとに著しい違いがあった。これら3つの要素の間にはどのような関係があるのか、既存の知見を踏まえながら整理してみることにする。

初冬の最初の大雪で低木広葉樹が一気に埋雪・倒伏してしまった2020/21年冬季には、極めて短期間で地表近くまでの倒伏が進んだ。積雪のない状態から、樹木が新雪層に取り込まれて急激に倒伏する場合、新雪層の圧密によってもさらに倒伏が進むと考えられるので、地表近くまで一気に傾くことが可能であったのであろう。これに対して、18/19年冬季の場合は0.5 m前後の積雪深になった後から、また17/18年冬季の場合には1 m以上の積雪深になった後から、埋雪・倒伏が始まっている。これらの場合には、たとえ大雪の際にかなり倒伏が進んだとしても、下位の積雪層を超えて一気に倒伏することは難しいであろう。したがって、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ものと考えられる。以上の結果は、これまでに指摘されてきたような、「初雪が大量に積もってそのまま根雪になると、植生は最初から地面に倒伏してしまう。この場合は全層雪崩の発生が稀な斜面

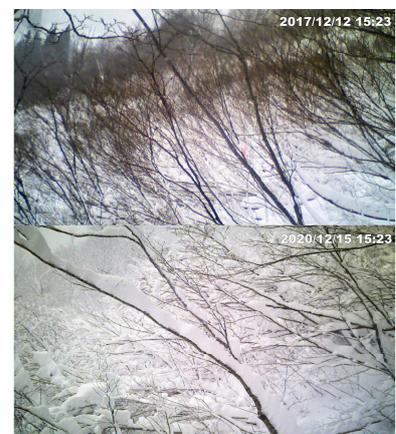


図3 雪崩斜面上部における低木広葉樹の冠雪状況。

でも発生に至ることがある。一方、少しずつ積雪が増加していく場合には、植生は倒れたり起き上がったりが、最終的には積雪層の中がっしりと食い込み、滑り抵抗は大きくなる。このような年では、長期間にわたって植生が雪を支えることになり、雪崩が起こることになるとしても融雪がかなり進んでからということになる」(例えば秋田谷ら, 2002)という知見を、具体的な計測データの形で裏付けるものだということができる。

一方で、3 冬季に共通している特徴としては、樹幹傾斜が 120~130° に達してはじめて、グライドの急速な進行や全層雪崩の発生につながるという点が挙げられる。このことは斜面上のほとんどの樹木が地表面まで完全に倒伏することが、グライドを促進する条件となることを示している。ただし、2018/19 年冬季と 2020/21 年冬季の場合には、その条件に達するとすぐにグライドが急速に進行して雪崩の発生に至ったのに対して、2017/18 年冬季の場合は、樹幹傾斜が 130° 近くに達しても、ほかの 2 冬季ほどの急速なグライドの進行はみられず、雪崩の発生までには約半月を要している。その原因についてはまだ分かっていない。

### 3. 4 初冬の大雪時の気象条件が及ぼす影響

ところで、2017/18 年冬季の場合、2020/21 年冬季と同じように、12 月中旬にかなりの大雪が降ったにも関わらず、なぜ低木広葉樹は全く埋雪・倒伏しなかったのであろうか。

図 2 に、両年の 12 月中旬における大雪前後 5 日間の積雪深、気温、風速の時間変化を示す。また図 3 の画像は、インターバルカメラで撮影した、2017 年 12 月 12 日午後と 2020 年 12 月 15 日午後とにおける、斜面上部の植生(樹幹傾斜を計測したヤマモミジの木を含む)の状況を示している。

両期間における積雪深の増加傾向は(大雪以前に 20 cm 程度の積雪があったか無かったかを除けば)ほぼ同じだが、図 3 に見られるように、2017/18 年冬季の場合は低木広葉樹への冠雪量が少なく、幹はあまり傾いてはいない。一方で、2020/21 年冬季の場合は、幹や枝に多量の冠雪が載っており、かなり傾いている木も多い。この冠雪状況の大きな違いが、埋雪・倒伏における大きな差につながったものと考えられる。

それでは、冠雪量の違いを生じた原因は何だろうか。気温については、両期間とも降り始めころにプラスからマイナスに低下し、その後は降雪期間を通じてマイナスであった。その一方で風速を比較してみると、とくに降雪期間の前半において、2020/21 年冬季よりも 2017/18 年冬季の方がかなり大きかったことが図 2 から分かる。すなわち、強風による頻繁な冠雪の落下のために、2017/18 年冬季の場合には、大雪に際しても埋雪・倒伏が全く進まなかったのであろう。このことは、「初雪が大量に積もってそのまま根雪になる」場合であっても、降雪時の気象条件によっては樹木への冠雪量が少なく、倒伏に至らないことがあるということを示す。したが

って、(草本やササではなく)低木広葉樹に覆われる雪崩斜面の場合には、単に初冬の降雪量だけではなく、冠雪(着雪)の形成・発達に関わる気温や風速などの気象条件も、その後のグライドの進行や全層雪崩の発生に影響を及ぼすということが明らかとなった。

## 4. まとめ

新潟県魚沼市大白川の低木広葉樹に覆われた雪崩斜面上で、2017/18 年、2018/19 年、2020/21 年の 3 冬季において実施した積雪動態や低木広葉樹の埋雪・倒伏過程などの観測データを比較した結果、積雪深の推移には年によってそれほど大きな違いがないにも関わらず、樹幹傾斜とグライド量の推移、全層雪崩の発生日には年ごとに著しい違いが生じていることが分かった。そして、初冬における降雪量と降雪時の気象条件の違いが、低木広葉樹の埋雪・倒伏過程に大きな差を生み、それが冬季を通じてのグライドの進行や全層雪崩の発生にまで影響を及ぼすことが明らかとなった。

## 謝辞

現地調査にあたっては、魚沼市大白川の浅井隣一さんをはじめとして多くの方々の御協力をいただきました。記して御礼申し上げます。また、本研究の一部は JSPS 科研費 18K18918、および新潟大学災害・復興科学研究所共同研究の助成を受けて実施されました。

## 文献

- 秋田谷英次, 成瀬廉二, 尾関俊浩, 福沢卓也(2002): 雪崩の発生メカニズム. 北海道雪崩事故防止研究会編: 決定版 雪崩学, 山と溪谷社, 39-64.
- 遠藤八十一, 秋田谷英次(1977): 笹地斜面における積雪のグライド機構 I. 低温科学 物理篇 **35A**, 91-104.
- 松元高峰(2020): 深い雪の中で形を変えて生きる低木広葉樹. 森林科学, **88**, 16-20.
- 松元高峰, 河島克久, 勝島隆史, 宮下彩奈, 伊豫部 勉, 渡部 俊(2018): 雪崩斜面における樹木の倒伏過程と降積雪およびグライドとの関係. 雪氷北信越, **38**, 28.
- 山野井克己(2005): 豪雪山地の低木広葉樹林が斜面積雪の安定性に及ぼす効果. 寒地技術論文・報告集 **21**, 269-275.

## 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

### — 調査内容と結果の速報 —

竹内由香里<sup>1</sup>・勝山祐太<sup>1</sup>・勝島隆史<sup>1</sup>・安達聖<sup>2</sup>・荒川逸人<sup>2</sup>・河島克久<sup>3</sup>

(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)

#### 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(令和 3 年 2 月 18 日白川村発表資料)に大規模な乾雪表層雪崩が発生した。破断面が 1 月 15 日に確認された(日本雪崩ネットワーク, 2021)ことから、雪崩は野谷荘司山山頂に近い稜線直下(標高 1700 m 付近)の東～北東向き斜面で発生したと考えられる。この雪崩による人的被害はなかったが、道路周辺の構造物、電柱が損壊したほか、スギをはじめ多数の樹木の折損が生じた(図 1)。そこで、雪崩の規模や流下経路、到達範囲を明らかにし、樹木の折損状況から雪崩の速度や雪崩層の高さを推定するための現地調査を行なった。本発表では、調査の内容や状況を中心に報告する。気象データに基づいた雪崩発生時の積雪状態の推定や雪崩の流下経路、到達範囲、堆積量については、それぞれ本誌の勝山ら(2021)、勝島ら(2021)が報告する。



図 1 雪崩で倒れたスギと雪崩発生区

#### 2. 調査方法

現地調査は積雪状態の変化に合わせて 6 回行なった。1/22-23 に堆積区の状態を確認し、デブリが融け始める前(3/17,18)に堆積量推定のための調査を実施した。まず UAV(無人航空機)による写真測量で堆積区の詳細な数値表層モデル(DSM)を取得し、併せて積雪断面観測によりデブリの厚さ、密度、含水率などを測定した。堆積区中央付近を縦断する測線上 11 箇所において、スノーサンプラーで採取したデブリの厚さと相当水量を測定し、さらに堆積区を通る道路沿いの除雪の断面を利用してデブリの厚さも 16 箇所測定した。デブリが雪面に現れた後(4/1-3)には、堆積区を踏査して雪崩の経路や到達地点を GPS で計測し、4/16 には UAV による 2 回目の空撮を行なった。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。スギ林内に幅 10 m、雪崩の進行方向に長さ約 165 m の調査範囲を設定し、範囲内の樹木(243 本)の位置、樹種、折損状況(幹折れ、根返りなど)、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た。

#### 3. 主な結果

踏査で確認した雪崩到達範囲を図 2 に示す。雪崩は水平距離で約 2800 m、標高差約 1000 m を流下して、標高 710～720 m まで到達し、現地測定した見通し角は 19.0～19.5 度であった。堆積区の面積は 30 ha 以上と推定した。デブリの乾き密度に厚さを乗じた相当水量は 166～1493 mm(平均 749mm)であった。堆積区全体のデブリの堆積量は、UAV による計測に基づいて少なくとも 46 万 m<sup>3</sup>(25 万 t)と推定された(勝島ら, 2021)。

図 2 の A 地点では樹高 30.3 m のスギの幹が地際(直径 48.7 cm)で折れていた。雪崩層の高さを枝折れ高(24.7 m)とみなし、流れ層(密度 300 kgm<sup>-3</sup>と仮定)の厚さを 1.5 m、スギの曲げ破壊強度を 50MPa とすると、この地点の雪崩速度は 29 m s<sup>-1</sup> 以上と推定された。なお、4 月現在、調査結果を解析中であり、今後、続報を発表する予定である。

謝辞 現地調査では、トヨタ白川郷自然学校、岐阜県森林公社、白川村にご協力いただいた。

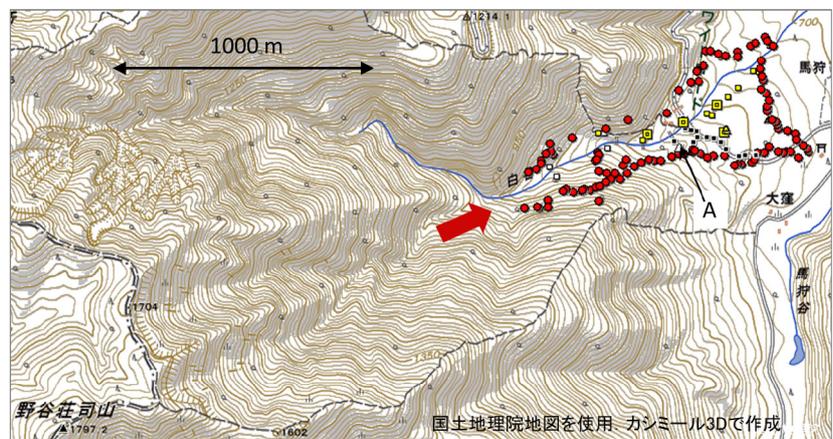


図 2 雪崩の到達範囲 ●: 雪崩到達地点. □: 断面観測地点.  
■: デブリ相当水量測定地点. ■: デブリ厚さ測定地点

## 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 — SNOWPACK モデルによる積雪状態の推定 —

勝山祐太・勝島隆史・竹内由香里  
(森林総合研究所十日町試験地)

### 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で乾雪表層雪崩が発生した。この雪崩は、サイズ5を最大とする雪崩の規模を示す指標(McClung and Schaerer, 2007)では、サイズ4(1月15日の速報; 日本雪崩ネットワーク, 2021)に相当する大規模なもので、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61mm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。この雪崩が発生するまでの積雪状況を把握するために、積雪変質モデル SNOWPACK を用いた発生区の積雪状態の推定を行った。

### 2. データと方法

気象データとして水平解像度 5km の気象庁メソスケールモデル(MSM)の初期値を用いた。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、白山の近傍点の北東隣の格子点における気象データを SNOWPACK モデルに入力した。この格子点は、標高約 1500m であり、今回の雪崩の発生区の標高とおおよそ対応している。下向き長波放射については、MSM 初期値の雲量から推定した(Kominami *et al.*, 2012)。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

1月7日から9日にかけて合計 120cm の降雪があり、雪崩発生時刻においては積雪深 320cm に達していたと推定さ

れた(図 1a)。この時の積雪安定度(SI)の鉛直プロファイルにおける最小値は、7日からの大量降雪の下部に対応する積雪深 200cm の位置において 0.78 となり、いつ雪崩が起きてもおかしくない状況だったと考えられる(図1b)。仮に、これに対応する上載積雪が雪崩となったとすると、考え得る発生区の最大面積( $2.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ )より雪崩の総量は $\sim 10^4 \text{ t}$  となり、サイズ4の雪崩に相当する。また、積雪深 120cm 付近には、12月30日からの降雪に起因する SI 1.39 の不安定な積雪層があり(図2b赤矢印)、これがすべり面となった場合は、サイズ5相当の雪崩となる潜在性があったと考えられる。

### 4. まとめ

気象庁 MSM モデルの初期値を SNOWPACK モデルに入力することで、野谷荘司山における積雪状態を推定した。その結果、雪崩の要因となり得る不安定な積雪層が再現され、この積雪層がすべり面となった場合の規模は、今回の雪崩事例とおおよそ一致していた。

### 文献

- Katsuyama, Y., M. Inatsu, and T. Shirakawa (2020): Response of snowpack to +2°C global warming in Hokkaido, Japan. *J. Glaciol.* **66**, 83-96.  
 Kominami, Y., H. Ohno, and O. Nagata (2012): Estimating downward long-wave radiation at the surface from MSM-GPV data (2), ISAM2012.  
 McClung, D. and P. Schaerer (2007): The avalanche handbook. 3rd ed., 342pp.  
 日本雪崩ネットワーク (2021), <https://nadare.jp>

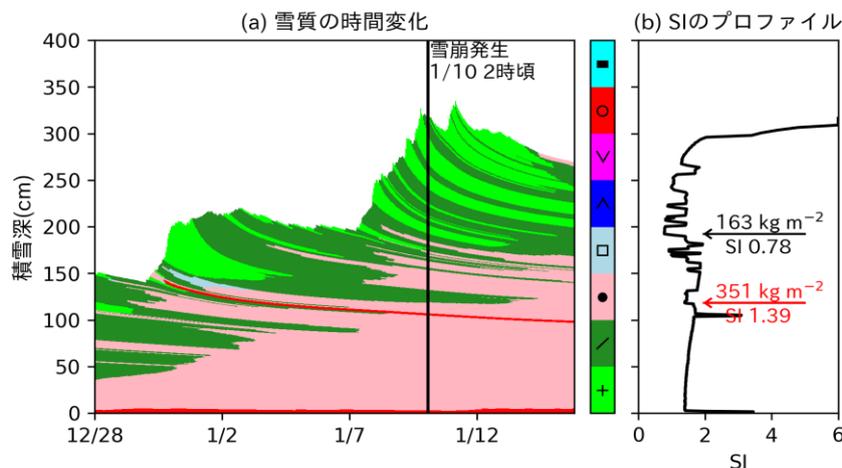


図1 SNOWPACK モデルで再現された(a)雪質の時間変化と(b)雪崩発生時刻における積雪安定度(SI)の鉛直プロファイル。(b)の黒矢印は最小の SI となる位置を表し、その値を矢印下部に記し、上載積雪荷重を矢印上部に記した。

## 岐阜県野谷荘司山で 2021 年 1 月に発生した大規模な乾雪表層雪崩

### — 雪崩の堆積量と到達範囲 —

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>

(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)

#### 1. はじめに

岐阜県白川村野谷荘司山で2021年1月10日に大規模な乾雪表層雪崩が発生した。雪崩危険個所のリスク管理では、再現期間の大きな大規模雪崩の到達範囲の評価が重要であり、それには大規模雪崩の堆積や停止過程などの動力学についての理解が必要であるが、詳細な調査事例は多くない。一方で、雪崩の堆積深の計測には測深棒やスノーサンプラーが用いられるが、堆積深の分布を得るのに十分な空間密度の測定点数を得ることは難しく、作業の危険性も高い。近年では、航空レーザ測量による計測も行われているが(Sovilla et al., 2010)、コスト面での課題がある。本研究では、今回新たに無人航空機(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る手法により雪崩の堆積深を計測し、今回の雪崩の堆積量と到達範囲の特徴について考察した。

#### 2. 手法

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、UAV(Phantom 4 RTK)により堆積区を空撮して写真測量を行い、10cmメッシュの地上の数値表層モデル(DSM)を作成した。作成した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)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自然積雪の層厚を計測した。この自然積雪の層厚が堆積区全体に一樣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、堆積深を求めた。4月1、2日に堆積区を踏査し、雪崩により損傷した樹木や、積雪表面に散乱した樹木の枝葉を目視により確認して、その位置をハンドヘルドGPSで計測して、雪崩の到達範囲を得た。

#### 3. 結果と考察

写真測量により得られた堆積深は、測量範囲の上流部で約10m、中流部で約5m、デブリ末端付近の堆積区の幅が広がる箇所では約2m以下であり、流下方向に減少する傾向が確認された(図1)。測量範囲の最上流部においても大きな堆積深が計測されたことから、更に上流の位置から堆積が開始したものと考えられる。踏査により確認し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 $46\text{m}^3$ (25万t)以上と推定される。航空レーザ測量による堆積深の詳細な計測事例では、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 $5\text{--}20^\circ$ であり、先行研究の調査対象より傾斜角が小さい。また範囲内の中流部には、多数の堰堤が設置されており、部分的に傾斜の緩やかな箇所が存在している。このような堆積区においては、流下とともに堆積深が減少するものと考えられる。また野谷荘司山および三方岩岳方面からの2つの谷が合流する付近の堆積深は、野谷荘司山方面からの谷の方が著しく大きいことから、堆積区のデブリは主として野谷荘司山方面から流下した雪崩によりもたらされたと考えられる。

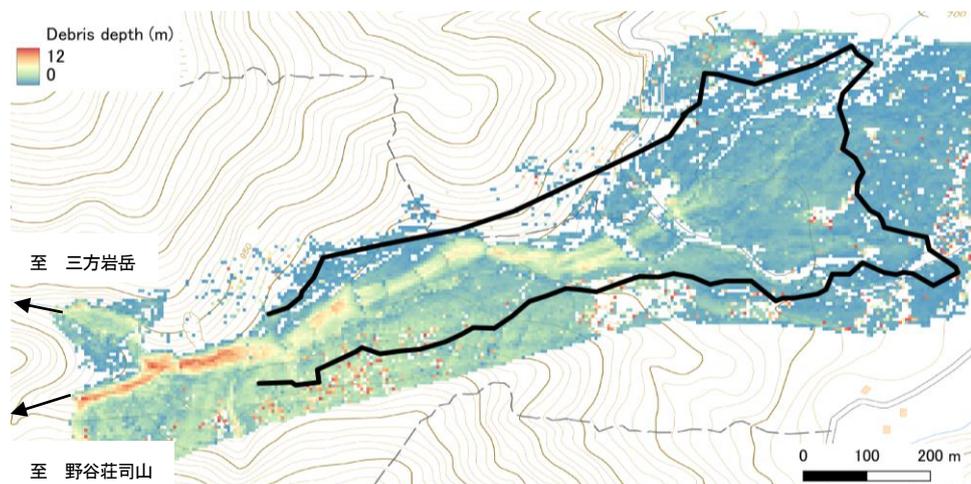


図1 UAVを用いた写真測量により計測した雪崩堆積区の堆積深分布と、雪崩の到達範囲(黒線)

## 道路雪堤の内部層構造と崩壊現象の分類

○芝崎智貴<sup>1</sup>・杉原幸信<sup>2</sup>・上村靖司<sup>2</sup>・町田敬<sup>3</sup>

(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 機械創工学専攻 3:町田建設株式会社)

### 1. はじめに

豪雪地帯では、冬期間の安定した交通流確保のための雪氷対策が必須であり、道路管理者が行っている雪氷対策は「除雪作業」と「路面の凍結防止剤散布作業」の2種に大別される。そのうち「除雪作業」ではまず、路面の積雪深がおおむね5cm以上にならないよう、プラウを装着した除雪トラックや除雪ドーザ、除雪グレーダにより新積雪を路肩に寄せる新雪除雪が行われる。次に、路肩に寄せた雪が道路の車線を圧迫してくるとロータリ除雪車を用いて道幅を確保する拡幅除雪が行われ、路側に雪が積み上げられる。これらの作業が繰り返されると、その間の自然積雪も加わり道路の路肩や中央分離帯に雪山が形成される。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可能性がある。図1は中央分離帯で大規模な崩壊現象が発生した事例である。こういった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<sup>1)</sup>。そのため、雪堤処理の効率化を図る定量的な手法の開発が期待されている。

本研究では、雪堤処理の効率化に向けて、雪堤の形成過程と崩壊メカニズムの解明を目的に、その足掛かりとして、実際に形成された雪堤内部の層構造を観察するとともに、密度・硬度・含水率等の物性値の測定を行い、雪堤がどのように成り立っているのかを調べる。加えて、雪堤崩壊が発生している箇所を探索・観察することで雪堤崩壊の類型化を試みたので、その結果を報告する。

### 2. 道路雪堤の内部層構造

#### 2.1 測定する物性値と使用する測定機器

雪堤の内部状態を調査するに当たり、選定した箇所を掘削して雪堤断面を露出させ、一定距離間隔で密度、硬度、含水率、雪温、雪質、粒径の全7種の物性値を測定した<sup>2)</sup>。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を用いた。

#### 2.2 物性値測定の結果と傾向

まず、2021年2月1日、2月26日、3月3日の計3日間に、関越自動車道上に形成された雪堤のうち5箇所において物性値測定を行った。測定箇所の選定にあたり、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



図1 大規模な崩壊現象で車線が塞がれた関越自動車道<sup>1)</sup>

ブル型の構造の違いを考慮した。また、3月4日には高速道路と比較するために一般道路についても形成された雪堤の調査を行った。なお、測定箇所は自動車の走行による影響や融雪剤の影響が少ないと考えられる駐停車専用区間を選定し、構造種別はガードレール型とした。測定箇所の外観と断面構造の模式図を図2～6に示す。

まず、雪堤断面から観察した層構造の傾向について述べる。地点(a)～(e)では、共通して雪堤内部に存在する構造物(ガードレール、ガードケーブル)の周辺で空洞が存在することが確認された。特に、多くの構造物が配置されている中央分離帯の地点(a)、(b)においては、その傾向がより顕著であることが分かった(図7)。空洞内表面が氷状態となっていることから、構造物を介した熱伝達によって内部が融解され、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示唆される。

次に、測定した物性値の傾向について述べる。なお、本報告では特に顕著な特徴が見られた密度のみを示す(図8)。自然積雪の場合、一般的に下層部から上層部にかけて密度が低下するが、地点(a)～(e)の中でも特に地点(b)と地点(d)では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。地点(b)は中央分離帯であることから、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の自然圧密が十分に進行していなかったことが示唆される。また、地点(d)はインターチェンジ内(越後川口IC)であり、ロータリ除雪車による積み上げが頻繁に行われている。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と考えられる。

- (a) 中央分離帯 <ガードケーブル型>  
 ・測定日時:2021年2月1日(月) 11:30  
 ・測定場所:関越自動車道(上り) 200.2Kp 付近



図2 高速道路の雪堤断面の例 ①

- (b) 中央分離帯 <ガードレール型>  
 ・測定日時:2021年3月3日(水) 13:00  
 ・測定場所:関越自動車道(上り) 201.7Kp 付近



図3 高速道路の雪堤断面の例 ②

- (c) 路肩 <ガードケーブル型>  
 ・測定日時:2021年3月1日(月) 13:30  
 ・測定場所:関越自動車道(上り) 199.2Kp 付近



図4 高速道路の雪堤断面の例 ③

- (d) 路肩 <ガードレール型>  
 ・測定日時:2021年2月26日(金) 11:00  
 ・測定場所:関越自動車道(上り) 220.9Kp 付近



図5 高速道路の雪堤断面の例 ④

- (e) 路肩 <ガードレール型>  
 ・測定日時:2021年3月4日(木) 15:30  
 ・測定場所:新潟県長岡市小国町 大貝トンネル付近



図6 一般道路の雪堤断面の例



図7 雪堤内部の空洞(左:地点(a), 右:地点(b))

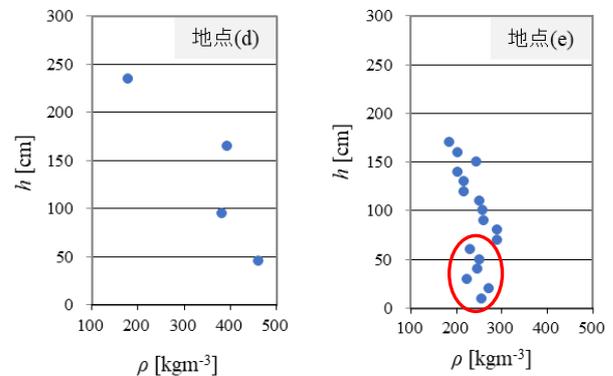
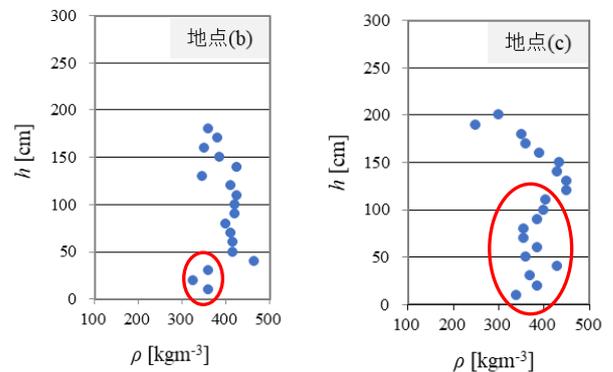


図8 密度プロファイル  
 ( $h$ :測定高さ,  $\rho$ :密度)

### 3. 雪堤崩壊現象の分類

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、雪堤崩壊が発生している箇所の探索とその箇所の状態観察を行った。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。それぞれの様子を図9～10に示す。「剥がれ型」の例は、(i)関越自動車道(182.6Kp付近)、(ii)国道8号線(新潟県長岡市古正寺町)、(iii)国道403号線(十日町市小白倉)、(iv)国道404号線(新潟県長岡市東谷)で撮影したもので、「滑り型」の例は、(i)国道117号線(長野県野沢温泉村)、(ii)国道351号線(新潟県長岡市日赤町)で撮影したものである。

まず、「剥がれ型」では、切断面は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る。また、「滑り型」では、雪堤上部が滑り落ちるように崩れている。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」の発生が顕著な傾向にあった。なお、高速度道路上では構造物が多いことから、そのほとんどが「剥がれ型」の雪堤崩壊であった。図1で示した大規模な雪堤崩壊も「剥がれ型」に近いと言えるのではないかと推察している。ただし、今冬期間中では小規模の雪堤崩壊がほとんどであり、大規模なものに関しては見られなかった。

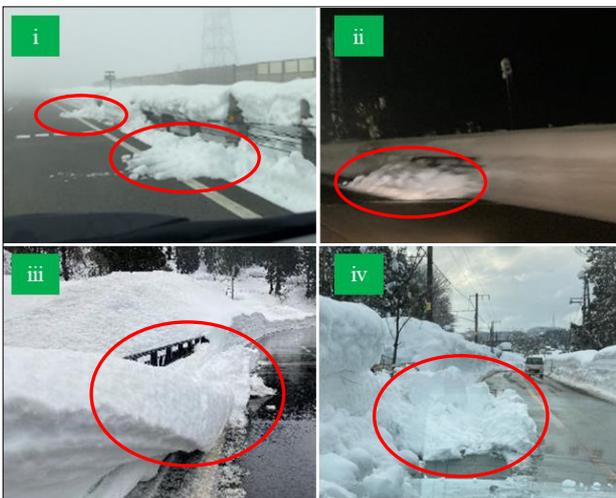


図9 「剥がれ型」雪堤崩壊の例



図10 「滑り型」雪堤崩壊の例

### 4. おわりに

本研究では、道路雪堤の崩壊現象を引き起こす基礎メカニズム解明の足掛かりとして、雪堤内部の層構造を観察するとともに、密度・硬度・含水率等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、凍結防止剤の崩壊現象への影響についても調査を進める予定である。道路管理者が行っている雪氷対策は「除雪作業」と「路面の凍結防止剤散布作業」の2種に大別され、寒冷化に伴って路上水分が凍結する恐れがある時に凍結防止剤(湿塩散布車を用いる場合の湿塩量:15gm<sup>2</sup>)を事前散布しているためである。また、その他の影響度の高い因子を抽出し、雪堤崩壊現象のメカニズムの解明に向けて取り組む予定である。

#### 謝辞

本論文の執筆において、関越自動車道における雪堤の断面観察を実施するに当たり、(株)ネクスコ・エンジニアリング新潟の岩崎伸一様、鶴見竜也様、(株)ネクスコ・メンテナンス新潟の奥潤一様、宮田勉様には、多大なるご協力とご支援を頂きました。心より感謝いたします。

#### 文献

- 1) 西ら, “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”, (株)ネクスコ・メンテナンス新潟, ゆき(97), 雪センター, p.p.86-89, 2014.
- 2) 伊藤陽一, “積雪の状態を雪の断面から読み取る—積雪断面観測法—”, 国立研究開発法人 防災科学技術研究所, 日本雪氷学会 雪崩対策の基礎技術研修会 (場所: 新潟県南魚沼郡湯沢町) 講義資料, 2018.

## 放射製氷において製氷面の温度勾配が初晶成長に及ぼす影響

泉野祥太郎<sup>1</sup>・○吉田匡貴<sup>1</sup>・杉原幸信<sup>2</sup>・上村靖司<sup>2</sup>

(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)

### 1. はじめに

高品質な氷(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での需要が高い. 当研究室では放射冷却を用い, 上記のような氷を製作する技術について研究を行ってきた. 氷を作る際に初晶が単一で発生し, 成長すれば大きな結晶を有する氷が出来るのではないかと考え, 初晶の発生位置や成長方向, 成長速度等に注目した. 泉野ら(2020)は, 初晶形成過程を観察するため, 製氷面の動画観察と熱電対による温度観察の手法を確立した<sup>1)</sup>. 本研究では, 不凍液の流入出や流量を変えることで, 6つの温度勾配を与え, 初晶形成への影響を調査した.

### 2. 実験装置

実験に用いた製氷装置の概略図を図1に示す.

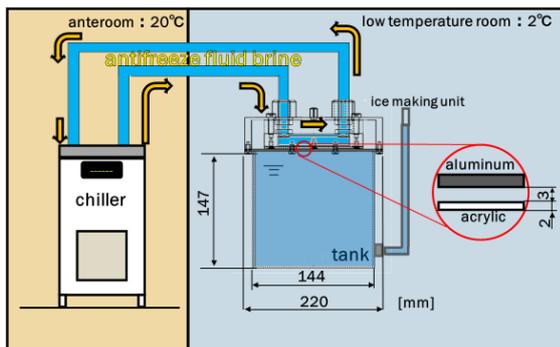


図1 製氷装置概略図

製氷装置は製氷ユニットと水槽から成り, 製氷ユニットは内層と外層に分かれている. まず, 水槽に原料水を満たし, 空気が入らないように製氷ユニットで蓋をする. 内層内には全室にある低温室循環水槽から不凍液が流れており, 不凍液により冷やされた内層下面のアルミ板が水槽内の原料水の熱を奪い取り, 氷が成長する仕組みとなっている. なお, 内層と外層の間には 3mm の隙間があり, これにより放射冷却を実現している.

### 3. 初晶の形成過程の観察

観察方法について, 製氷過程の中で特に初晶形成過程に着目し, 初晶形成のメカニズムを調査するために製氷面を撮影した動画観察と, 製氷面付近の水温の計測の 2 つを行った.

#### 3.1. 動画撮影と画像解析

初晶の拡がりの様子を真下から観察するために中央部分

に直径 100mm の円形の穴をあけた台座を作成した(165mm 四方, 高さ 250mm). 台座に製氷用水槽を置き, 中央部に空けた穴を通してビデオカメラで撮影を行った. 初晶の拡がりを観察するにあたり, 電灯の下などの周囲が明るい場所で観察を行うと初晶の拡がりをうまく撮影することが出来なかった. そのため, 低温室内に暗幕で仕切った暗室を用意し, その中で製氷面を光源で照らし観察を行った. 光源装置は日本ピー・アイ社製の近赤外線を照射するハロゲンランプ光源装置(PCS-UHX-150)を用いた. 暗室内を光源装置の発する熱で温めないためにライトガイドを用いて光源部のみ暗室内に入れ, 本体は暗幕の外に出して実験を行った.

初晶の拡がりの動画撮影を行い得られたデータのある時間から一定間隔ごとに切り取り, 並べたものを図2に示す. 図中の破線は初晶の拡がりの先頭部分を結んだものである. 左下から過冷却が破れ, 右上方向に向かって初晶が成長する様子が一応は観察された. しかし, 画像が大変見づらく, 初晶の拡がりがうまく観察できなかったため, 背景差分, コントラスト調整, 2値化による画像処理を行った(図3).

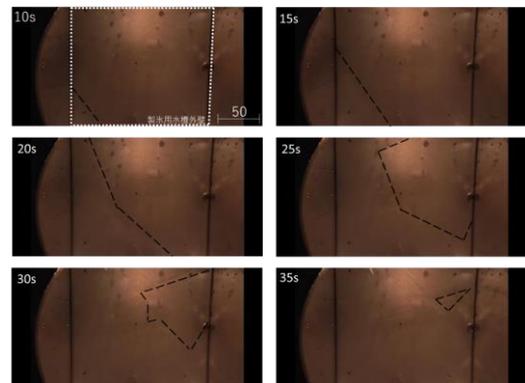


図2 初晶拡がりの様子

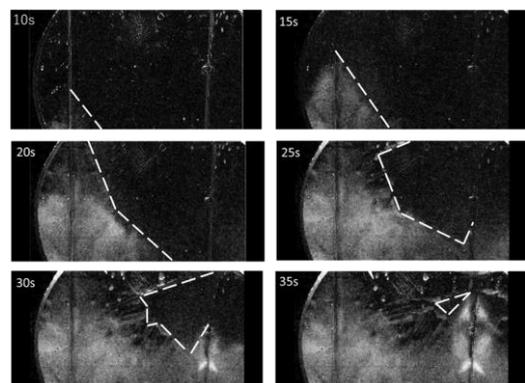


図3 初晶拡がりの様子を画像処理したもの

### 3.2. 熱電対による温度分布測定

製氷面の温度分布を計測するために製氷面に熱電対を直接貼りつけ、他にも不凍液の流入出口や雰囲気温度を合計で18箇所計測した。計測点を図4に示す。

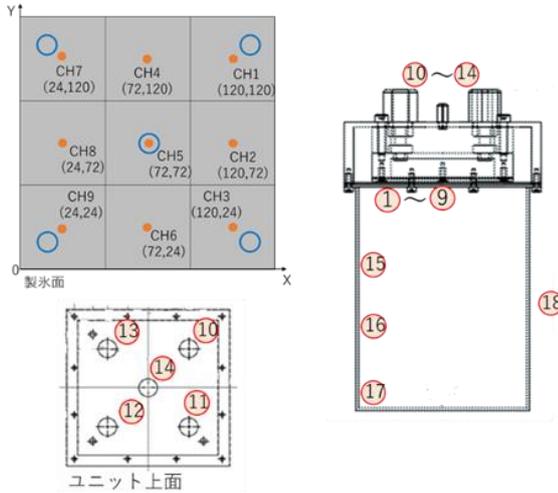


図4 熱電対による温度計測箇所

### 3.3. 初晶画像と温度分布の対応付け

本実験では初晶の発生、成長過程を製氷面の温度計測により得られたデータから定量的に明らかにしていくことを試みる。まず製氷面の撮影から得られた初晶の拡がり、製氷面の温度計測結果から類推する初晶の拡がりに対応していることが重要である。そこで、これらに対応しているか確認を行った。なお、動画及びデータロガーのデータの0点合わせ(経過時間合わせ)は、動画に見えるところで熱電対に触れ、温度が急激に上昇している点を基準にした。その結果、経過時間と温度計測上で0°Cとなった点を見比べたとき、数秒の誤差はあれど、おおむね動画上と、温度計測上のデータが一致することが確認された。そして、この時の誤差率の平均値は5.86%であった。よって、これら2つのデータを併用し、初晶発生点、初晶成長速度、初晶形成時間、過冷却度、伝播時間、平均等価円直径、最大等価円直径、温度勾配を読み取り、パラメータとした。

## 4. 製氷面の温度勾配が初晶成長過程に及ぼす影響

### 4.1. 付与した温度勾配

製氷面の温度勾配による初晶形成過程への影響を調べるため、不凍液の流出入口を変え、4 隅冷却型、中央冷却型、斜方成長型、2 極冷却型の4つの温度勾配を与えた。また、不凍液の流出入口を入れ替えて温度勾配に変化をつける以外にも、不凍液流路に追加してバイパスを設け、流路を分岐させ、ボールバルブを用いて流量を変化させることで、バイパスを設けない状態のもの[斜方強調型(温度勾配小)]とボールバルブを全開にした状態のもの[斜方強調型(温度勾配大)]の2種類の温度勾配を与え、合計で6つの温度勾配を与えた。よりクリアな温度勾配をつけるため、斜方強調型と流路分岐斜方強調型にはアルミ板にアルミテープを貼り、断熱し、クリアな温度勾配を与えた。また、この2つの温度勾配で実験を行った際、熱電対が初晶発生のきっかけとして作用する可能性があるため、製氷面の熱電対をとって実験を行った。6つの温度勾配を与えた際のアルミ板をサーモカメラで撮影した画像を図5に示す。

配大)]の2種類の温度勾配を与え、合計で6つの温度勾配を与えた。よりクリアな温度勾配をつけるため、斜方強調型と流路分岐斜方強調型にはアルミ板にアルミテープを貼り、断熱し、クリアな温度勾配を与えた。また、この2つの温度勾配で実験を行った際、熱電対が初晶発生のきっかけとして作用する可能性があるため、製氷面の熱電対をとって実験を行った。6つの温度勾配を与えた際のアルミ板をサーモカメラで撮影した画像を図5に示す。

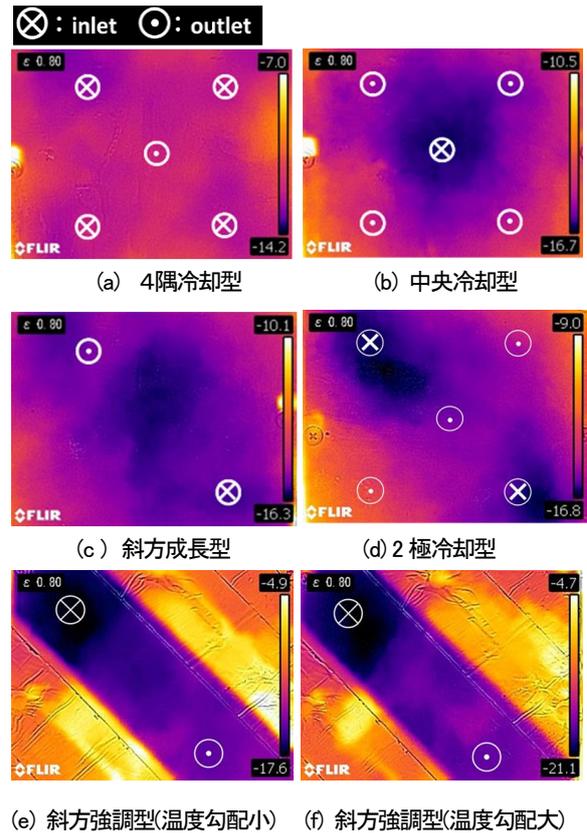
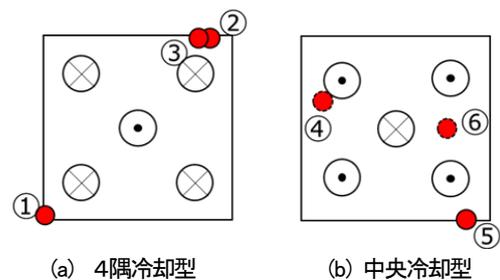


図5 与えた温度勾配

## 4.2. 実験結果

### (1) 初晶発生点

それぞれの温度勾配において、3回ずつ実験を行った。このとき、それぞれの初晶発生点を図6に示す。



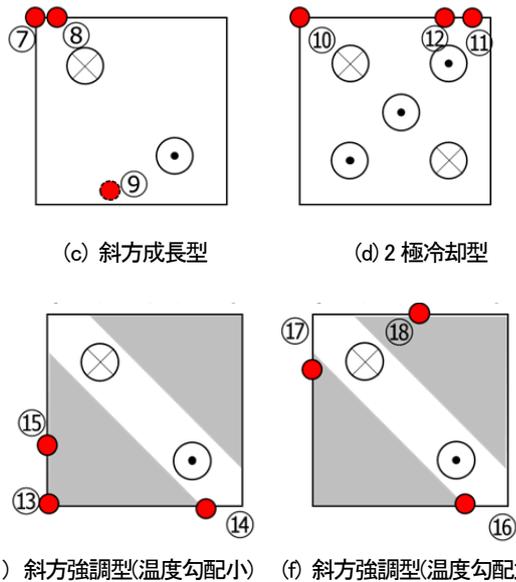


図6 初晶発生点

基本的に初晶は製氷用水槽の壁面から発生することが確認された。これは周囲が水面と異なる環境である壁面が初晶発生のきっかけとして働いたためであると考えられる。しかし、製氷面において最も冷えているところが中心部にある中央冷却型や斜方成長型の場合、初晶の発生点が壁面ではなく中央寄りに発生する様子が観察された(④, ⑥, ⑨)。このことから、初晶の発生点は多少、製氷面温度の影響を受けていることが確認された。また、斜方強調型においては、断熱部からも初晶の発生が確認できた(⑬, ⑮, ⑰, ⑱)。

## (2) 初晶成長速度

初晶成長速度と過冷却度の関係を図7に示す。

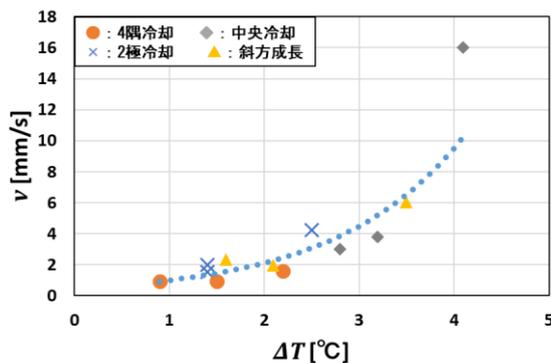


図7 初晶成長速度と過冷却度の関係

図7より過冷却度が高いほど初晶成長速度が大きくなるのが分かり、その関係は指数関数的に増大することが確認された。これもまた、過冷却度が大きくなるほど製氷面付近原料水温度が持つ負の温度エネルギーが大きいため、過冷却が破れたとき、一気に氷結晶が広がるためであると考えられる。

また、初晶成長速度と初晶形成時間の関係を図8に示す。

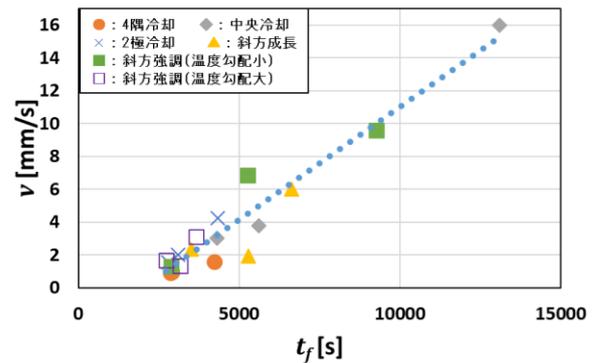


図8 初晶成長速度と初晶形成時間の関係

図8より初晶成長速度は初晶形成時間と正の相関があることが分かった。そして流路を分岐させ、製氷面の温度勾配の傾斜を大きくしても初晶成長速度に影響を及ぼさないことが分かった。この理由としては、初晶成長速度は温度勾配傾斜の影響よりも初晶形成時間や過冷却度への依存度が大きいためであると考えられる。また、熱電対の有無で初晶成長速度にかかる影響に大きな変化は見られなかった。このことからやはり、初晶成長速度は過冷却解消時の原料水の過冷却度に関わるパラメータであることが推察される。

## (3) 温度勾配と角度差

結晶が温度勾配に沿って成長しているかを確認するため、温度勾配と結晶成長方向の角度差を調査した。角度差と温度勾配の大きさの関係を図9に示す。

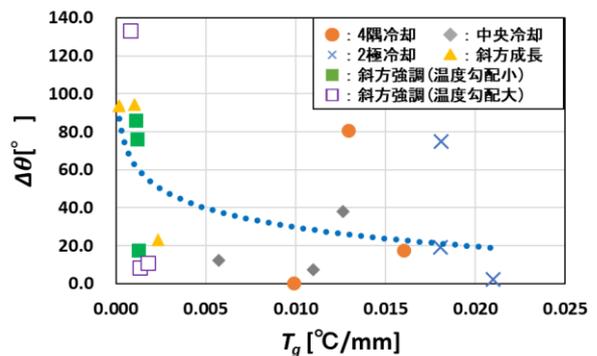


図9 角度差と温度勾配の関係

図9より、温度勾配が大きいほど初晶の成長方向と温度勾配との角度差は小さくなる傾向があることが確認できた。よって、初晶の成長は温度勾配角度に影響を受け、温度勾配に沿って成長すること考えられる。

#### (4) 結晶面積

平均等価円直径と初晶成長速度の関係を図 10 に示す。

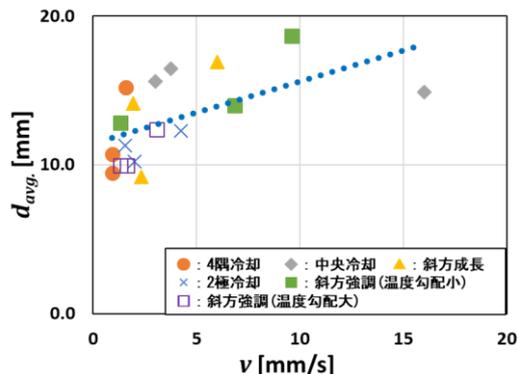


図 10 平均等価円直径と初晶成長速度の関係

図 10 より、平均結晶面積は初晶成長速度が速くなるほど、大きくなる傾向になることが分かった。これは初晶成長速度が速いと、他の初晶が発生する以前に、最初の方に発生した初晶が成長し、初晶の乱立が防がれたためであると考えられる。(2) で初晶成長速度は初晶が形成されるまでの時間及びその時の過冷却度に大きく依存することが分かっている。つまり、より大きな結晶を有する氷塊を製氷したい場合は、製氷面の材質を変更するなどして、過冷却が破れるまでの時間を遅らせることが有効であると考えられる。また、斜方強調型が、流路分岐斜方強調型に比べ、大きくなる傾向にあることが分かった。つまり、温度勾配が均一に近い場合、大きな結晶を有する氷塊を入手しやすい可能性が示唆された。

#### 5. まとめ

放射製氷における大きな結晶を有する氷の生成条件を検討するため、製氷面の温度勾配が初晶成長過程に及ぼす影響を調査した。そのために、製氷面の温度勾配を任意に変更できる製氷ユニットを用いて実験を行い、初晶発生点、初晶成長速度、結晶面積、温度勾配の角度と成長方向などについて考察を行った。結晶面積は、初晶成長速度が速く、温度勾配が小さいほど平均等価円直径が大きくなることが分かった。そのため、大きな結晶粒を含む氷塊を製氷したい場合、初晶成長速度を速くするために製氷面の材質を変更したり、過冷却を強制的に破る手段(衝撃など)を用い、過冷却が破れるタイミングを制御することで過冷却が破れるタイミングを意図的に遅らせることや温度勾配を均一に近づけることが有効であると思われる。

#### 文献

1) 泉野祥太郎, 上村靖司, 杉原幸信 (2020):放射製氷における初晶形成過程の観察 - その2 核成長と温度変化の対応付け -, 雪氷研究大会(2020・オンライン)講演要旨集, p10.

新たな安全概念 Fool Education の適用例

宍戸紀之<sup>1</sup>・○安孫周<sup>1</sup>・杉原幸信<sup>2</sup>・上村靖司<sup>2</sup>

(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)

1. 諸言

日本の国土の約半分は、積雪寒冷地域に指定されており冬季には多量の雪が降る。この雪や氷によって引き起こされる人的被害を人身雪害と呼び、平均して一冬に 1,000 人規模で起きている。この人身雪害の発生する要因とその割合を図 1 に示す<sup>[1]</sup>。約 8 割は除雪作業中に安全装備の不使用や道具の誤使用によって引き起こされていることから、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。道具の誤使用を防ぐ安全概念としては“Fool Proof”が広く知られている。これは、「誤使用に対し使用者を守り抜くように設計する」という概念であり、作業者の道具の熟練度が低くても危険なく扱えるという利点がある。しかし、熟練した作業者にとっては作業効率を悪化させる機能として邪魔になり、安全措置を無力化して事故を起こしてしまう事例もある。特に雪国特有の道具は野外で使用されることが多く、また除雪作業は過酷環境かつ重労働であることから、作業効率の低下を防ぐために安全措置の無力化は発生しやすい。<sup>[2] [3]</sup>

そのため、宍戸らは、雪国発の新たな安全概念 Fool Education を提案した<sup>[4]</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り、これは Assistive, Casual, Education という 3 つの指針を持つ。Fool Proof と Fool Education の

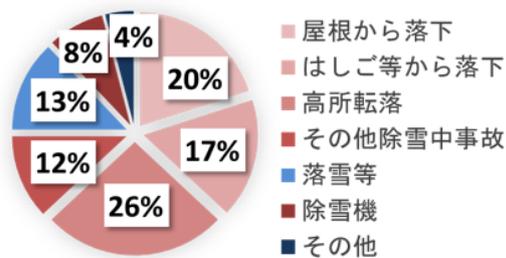


図 1 人身雪害の被害が発生する原因<sup>[1]</sup>

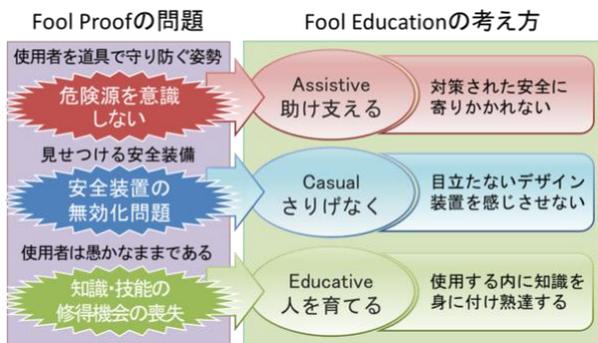


図 2 Fool Proof と Fool Education の違い

要点を比較して、現したものを図 2 に示す。

本研究では、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。「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」のことを指す古典的条件づけを主体とした学習方法を直接個人教育法と定義し、また「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」ことを指すオペラント条件づけを主体とした学習方法を間接個人教育法と定義する<sup>[5] [6]</sup>。この二つの教育法について Fool Education を対応づけて、直接個人教育法ではハシゴの「立てかけ角度」、間接個人教育法ではスマートコップの「持ち手位置」の教育の効果を調査する。

2. Fool Education とは

Fool Education とは、“Assistive”, “Casual”, “Education”の 3 つの指針によって定義されている。“Assistive”は国際安全規格 ISO/IEC Guide 51 および ISO 12100 に定義されるリスクアセスメントを行った際のリスクの優先度において「不休災害」以下となる優先度のリスクに対し、3 ステップメソッドにおける「本質的安全設計」をあえてスキップし、「防護によるリスク低減」から対処をスタートすることを指す。“Casual”は安全設計を行う上で外見に影響を及ぼさない程度の機能付加にとどめるか、後述する“Education”を行うための機能を満たすようにする程度に限ることを指す。“Education”は行動主義心理学の条件づけ学習に基づき、道具のインタラクションを通して人間に対して学習を促すことを指す。

提案する Fool Education の最大の特徴は上記の“Education”にある。使用者に対して潜在的、無意識的な学習を促すことによって、仮に Fool Education で実装した安全措置を無力化されてもなお安全な使用を維持し続けることができると考えている。本研究ではこの Fool Education の効果を調査するべく、“Education”のアプローチの仕方を変えた「直接個人教育」と「間接個人教育」を提案し実験を行った。

3. ハシゴたてかけ角度の学習

直接個人教育法では、許容できないリスクに対して「危険検知型システム」を構築し、そこに Fool Education の考え方を適応して、どのような効果があるのかを調査した。ケーススタディのハシゴの「立てかけ角度」の対策について、Fool Education を適応し、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である古典的条件づけ学習を用いて解決する<sup>[6]</sup>。

### 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大音量圧電ブザーを鳴動させる」だけのシンプルなデバイスとした。実験時の天気は雪で、地面には薄い積雪が確認された。実験は2人1組で行い、被験者はまず本安全装置を取り付けずに高さ 3.24m の屋根上へ登る想定でハシゴを立てかけてもらい、被験者2人組が「この立てかけ方で良い」と納得したらレーザー距離計の角度計機能でその時の立てかけ角度を計測した。次に、特に説明を入れずに本安全装置をハシゴに取り付けて同じように立てかけてもらい、角度に納得したら、レーザー距離計の角度計機能でその時の立てかけ角度を計測した。この計測後、本安全装置の機能を解説し、アンケートを取って実験終了とした。アンケートの設問と選択肢を以下に示す。

設問 1：本安全装置（鳴動して立てかけ補助する装置）は便利だったか：便利で分かりやすかった／便利だが分かりにくかった／無くて変わらないがあるだけまし／無くて変わらないしただ邪魔だった

設問 2：本安全装置を使わずに立てかけた際の安定性に対する自信はどうか：0点／50点／100点

設問 3： $75^\circ$  というハシゴの角度は自分が思っていた角度と比べてどうか：垂直に近い気がした／思っていた通りだった／水平に近い気がした

設問 4：自由記述欄

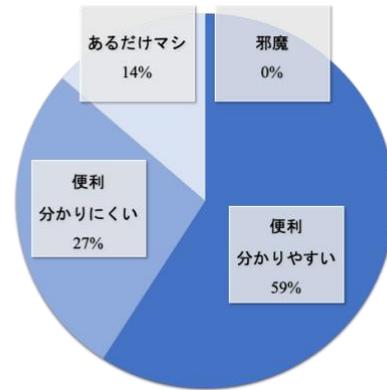


図5 アンケート結果(設問 1:N=22)

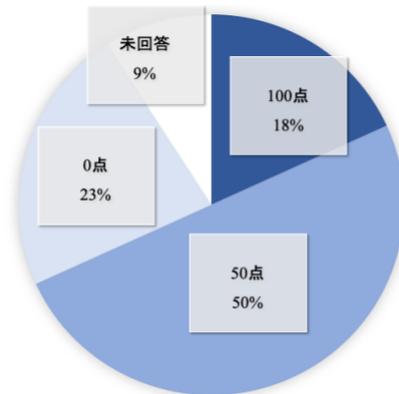


図6 アンケート結果(設問 2:N=22)

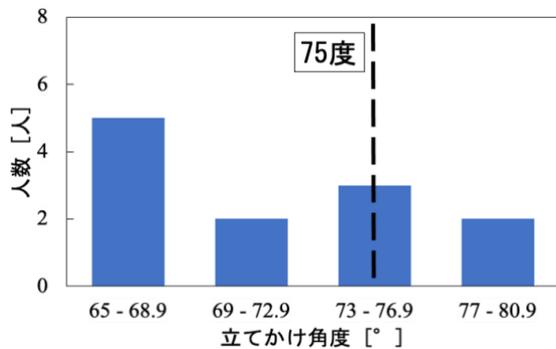


図3 安全装置なしの場合の立てかけ角度

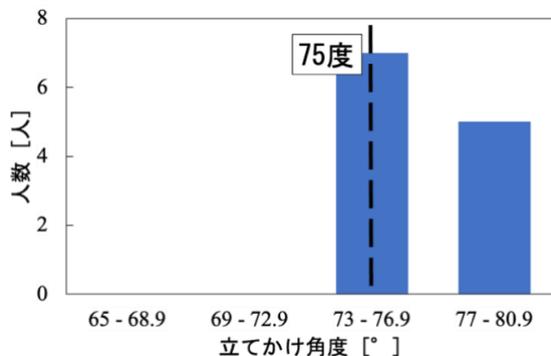


図4 安全装置ありの場合の立てかけ角度

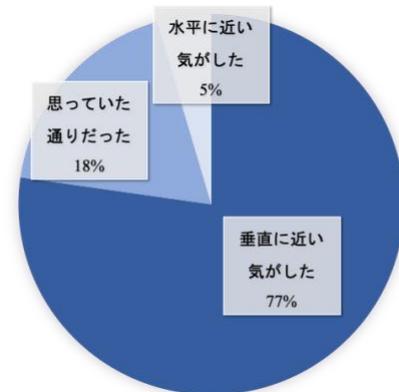


図7 アンケート結果(設問 3:N=22)

表1 自由記述欄の回答

<p>ありがとうございました！            急か／緩いかで音を分けるといいと思う            ブザーがうるさい！            75度を立てかけざるを得ない            倒れにくい自信になってよい(信頼感あり)            登ると倒れてしまいそう            思ったより垂直で怖い</p>
---

これらの実験とアンケートを10組20人に実施した。また、事情により2人1組を作れなかった被験者2人にも実験に参加してもらい、ハシゴの立てかけ角度12データとアンケート22データを収集した。

### 3.2 実験結果

本実験で得られた安全装置の有無によるハシゴの立てかけ角度の変化を図3、図4に示す。次に、各設問に対するアンケート結果をそれぞれ図5、図6、図7、表1に示す。

### 3.3 考察

まず、実験結果の図3より、安全装置を取り付けていないはしごでは被験者は各々バラバラな角度ではしごを屋根に立てかけていることが分かる。そして、図4より、安全装置を説明なく取り付けると、多くの被験者が、安全装置が鳴動しない $75^{\circ} \pm 5^{\circ}$ の範囲に立て掛けるようになったことが分かる。これより、本安全装置によって $75^{\circ}$ の立て掛けを教示することに成功していることが分かった。また、図5の「安全装置は便利だったか」という問いに対し、安全装置自体の説明をしていないにもかかわらず「便利で分かりやすかった」と答えた被験者が約6割存在し、自由記述欄にも「ブザーの音がうるさい」「 $75^{\circ}$ に立て掛けざるを得ない」という声もあった。このことから「大きな音が鳴動」している意味が受動的に「危険だろう」と学習され、「今のハシゴの角度」と暗黙に結びつけることに成功したことが分かった。

これらにより、古典的条件づけ学習による「はしごの安定立て掛けの熟達」を遂行することができた。

## 4. スコップ持ち手位置の学習

間接個人教育法では、定量的にスキルを判定するスマートスコップに対し、具体的にスキルをどのように上達させればよいかFool Educationを適応して調査した。スマートスコップにおいて言及されていなかったハンドリング位置に着目し、持ち手位置を教育するデバイスを取付けて実験を行う。

### 4.1 実験方法

本安全装置の実験は実験時点で雪が降っていなかったため、屋内で砂1kgをビニール袋に詰め厚手の靴下に入れて先端を結んだ模擬雪を用いた。実験は一人ずつ行い、被験者はまずグリップを取り付けない状態で約10kgの模擬雪を除雪してもらい、その後、グリップ部を取り付けて約20kgの模擬雪を除雪してもらい、最後に、もう一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い、実験終了とした。一連の実験はカメラを用いて動画を撮影しており、実験終了後に動画から被験者の持ち手位置を推定、親指付け根からさじ部までの距離を求めた。

また、この実験が終わってから約3か月後にこの実験に参加した被験者をもう一度招集し、「これから除雪をする想定して」スコップを構えてもらった。構えた際の写真を撮り、動画と同じように被験者の持ち手位置を推定、親指付け根からさじ部までの距離を求めた。

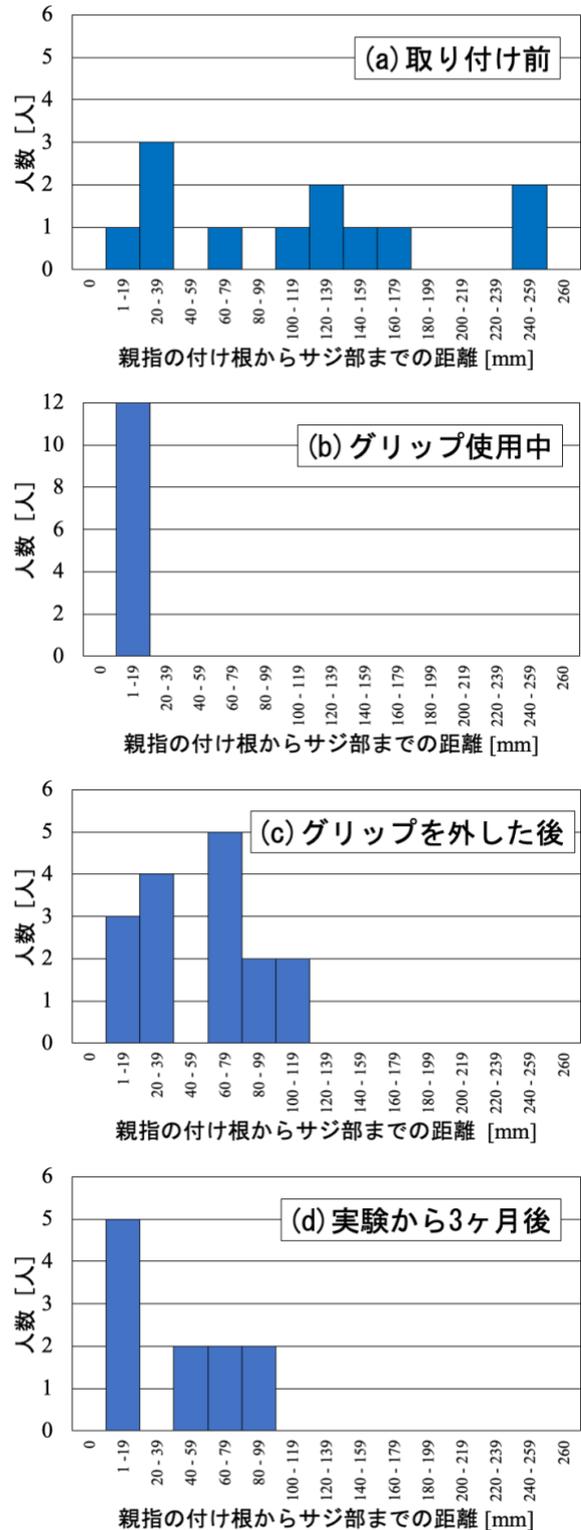


図8 持ち手位置の測定結果(N=16, (d)のみN=8)

## 4.2 実験結果

ハンドリング教育デバイスを用いた実験では、取り付け前は被験者がまばら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り、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した安全装置類をすべて外し、そのスコー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、Fool Education では「無力化されてもお安全を維持できる」ことが確認できた。

## 5. 結言

可搬はしごの安全な立てかけを使用者に促すため、古典的条件づけ学習を重視する Fool Education を適応し、はしごの立てかけにおいて安全装置の有無でどのような違いがあるか実験を行なった。その結果、安全装置を取り付けていないはしごの立てかけでは、被験者はバラバラな角度で立てかけていたが、そこで特に説明をせず安全装置を取り付けると多くの人がはしご立てかけの推奨角度 75° で立てかけるようになった。このことから Fool Education での「はしごの安全な立てかけを教示する」ことを達成した。

スマートスコープに関して、除雪スキルを上達させるための「道具の扱い方」に関する具体的な説明が無く、素人が真に受けて評価を受けると腰痛やぎっくり腰、椎間板ヘルニアを患うリスクがあった。このリスクに対し Fool Education を適応し、上達を促すための最適解と考えられるグリップを試作し、模擬雪を除雪する実験を行なった。その結果、グリップ無しの状態では、まばらな位置を持っていた被験者がグリップをしばらく使用した後にグリップを取り外し、再度除雪をさせるとグリップを取り付ける前とは明らかにスコープのさじ部に近い位置を持つようになった。また、この実験の3ヶ月後に被験者に対し不意にスコープでの除雪作業の構えを取らせると、やはりスコープのさじ部に近い位置を持った。これにより、Fool Education は安全意識を無意識下に刷り込む学習ができ、安全装置が無くとも安全を維持できることが分かった。

今後の展望として、Fool Education が多種多様な道具に適用され、IoT 技術も有効に導入することでより広い範囲で活用できることを目指している。

## 文献

- [1] 増田宗一郎(2017), 除雪作業中のハシゴ事故分析とその対策に関する研究.
- [2] 東奈樹沙・大垣直明・谷口尚弘・金子真司・山内剛(2004), 『除雪カルテ』の作成とその活用に関する研究 その1『地区カルテ』の作成と分析, 日本雪工学会.
- [3] 谷口尚弘・湯川崇・苔米地司(2011), 積雪寒冷地における戸建住宅居住者の除排雪行動に関する研究 第37巻, pp.35-39.

- [4] 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.
- [5] KUMAR Surender, KIM Yong Seob, OH Kun Seoku(2019), 筑紫女学園大学研究紀要 14号, p124.
- [6] 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.

## 実用的な可搬型雪冷房装置の試作と性能試験

○青柳大輔<sup>1</sup>・BAYANMUNKH TSATSRAL<sup>1</sup>・辻野憲孝<sup>2</sup>・杉原幸信<sup>3</sup>・上村靖司<sup>3</sup>

(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)

### 1. はじめに

国の雪冷熱エネルギーの活用促進<sup>1)</sup>を受け、近年雪冷房への関心が高まっている。雪冷房は雪の融解熱を用いて冷房を行うもので、省エネルギーによるCO<sub>2</sub>排出抑制効果が期待される。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が、システムを簡略することで小型化し、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のハンドリングの手間が多かったり、1時間毎に雪の装填が必要であったりして、未だ広く普及するには至っていない。

本研究室において、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)を直接搭載する冷房装置を開発している。これは豪雪地帯から雪を運搬する際のFCのまま直接冷房装置に装填することで、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っている。用途としては、屋外イベントでのスポットクーラーや災害時の非常用冷房装置としての運用を目指しており、実現すれば豪雪地帯以外での雪利用が広がることが期待できる。ここでは、装置の概要と性能試験の結果について報告する。

### 2. 可搬型雪冷房装置

#### 2.1 可搬型雪冷房装置の構成

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。

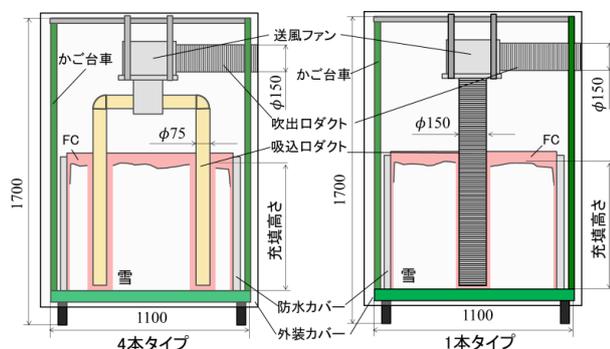


図1 可搬型雪冷房装置の概略図

装置はフレームとなるかご台車(積載量 500kg)と送風ファンユニット(吸入口ダクト, 送風ファン, 吹出口ダクト), 雪を充填したFC およびこれを覆う防水カバー, 融解水を排出する

バスポンプ, そして外装断熱カバーから成る。吸込管は4本のタイプと1本のタイプの2種類を製作した。また, 送風ファンは風量が異なる2種類を試した。使用手順は, かご台車下部に防水カバーを置き, 雪を充填したFCを防水カバー内に収める。そして, 充填した雪に通風用の穴を明け, 送風ファンユニットをかご台車上面に取り付けてダクトを雪孔に挿入する。そして, 最後に外装カバーを被せる。なお, 空気・雪間で熱交換が行われた際に発生する雪の融解水はバスポンプにて, 適宜外部に排出する。

#### 2.2 熱交換と空気の流れ

雪冷房ユニット内での熱交換と空気の流れを図2に示す。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吸気され, 装置に装填した雪と空気が直接接触することで熱交換が行われる。そして, 吸込口ダクトより吸い込まれ, 送風ファンを通過して吐出口から吹き出される。

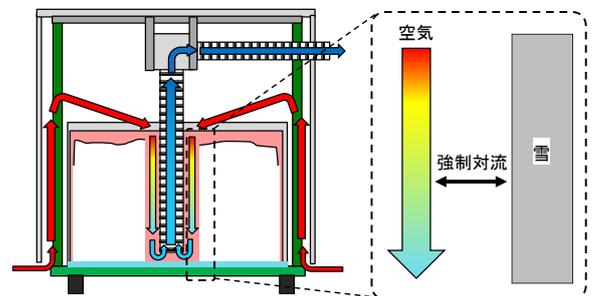


図2 装置での熱交換と空気の流れ

### 3. 性能試験

#### 3.1 試験概要

2020年夏季から2021年冬季にかけて, 試作した装置の性能を評価するため試験を行った。場所は屋外および屋内で行った。屋外実験はキューピットバレイスキー場雪室前および吉兆楽雪室前で行い, 装置をテント内に収容して実験を行った。雪は雪室に保存されたものを用いた。屋内実験では, 大学構内の鉄筋コンクリート造の2階の南向きの部屋で行い, 室内暖房を26°Cで設定し, 実験を行った。雪は大学構内の自然積雪を使った。屋外屋内実験ともにスコップを用いて雪を踏み固めながらFCに充填した。

#### 3.2 測定項目

装置の性能を評価するため, 外気温度および吹出口温度と吹出口の風速を測定した。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。吹出口温度の測定では、屋外実験では1か所、屋内実験では2か所熱電対を設置し、屋内実験では、この2か所の熱電対の平均値を用いて測定する。外気温は、屋外実験ではテント内に設置した熱電対で測定を行い、屋内実験では装置の上部と下部に設置した熱電対の平均値を用いる。吹出口の風速はベーン式風速計(GA06)を用いて測定した。

### 3.3 測定データの整理

装置の性能を評価するため、測定データより吹出口-外気温度差および冷房能力を求める。吹出口-外気温度差は次式で求める。

$$\Delta t = t_{in} - t_{out} \quad (1)$$

ここで $\Delta t$ は吹出口-外気温度差[°C]であり、 $t_{in}$ は外気温[°C]、 $t_{out}$ は吹出口温度[°C]である。また、冷房能力 $P$ は次式で求める。

$$P = \Delta t \rho Q C_p \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

ここで $\rho$ は空気の密度[ $\text{kg m}^{-3}$ ]、 $Q$ は風量[ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] (=  $v_{out} A_{fan}$ 、 $v_{out}$ は吹出口平均風速[ $\text{m s}^{-1}$ ]、 $A_{fan}$ はファン吐出口断面積[ $\text{m}^2$ ]、 $C_p$ は空気の比熱[ $\text{kJ/kg} \cdot \text{°C}$ ]である。

### 3.4 試験条件

各試験条件を表1と表2に示す。各条件の主な違いは、装置の吸込口の本数および直径が異なる点と使用しているファンが省電力型(風量小)か大風量型を使用しているかが異なる。また、表1が雪上面に整流板を置かない条件、表2が置いた条件である。

表1 試験条件(整流板無し)

装置の条件	省電力型4本	省電力型1本	大風量型4本
実験日時	9月30日	10月28日	1月29日
吸込口の本数	4	1	4
吸込口ダクト直径	75	150	75
吸込口ダクトの種類	自己消火性樹脂製ダクトパイプ	アルミフレキシブルダクト	自己消火性樹脂製ダクトパイプ
送風ファンの種類	省電力	省電力	大風量
実験場所	屋外	屋外	屋内
使用した雪	雪室	雪室	天然雪
平均(設定)温度	24°C	18°C	26°C

表2 試験条件(整流板有の場合)

装置の条件	大風量型4本	大風量型4本整流板有	大風量型1本整流板a	大風量型1本整流板b	大風量型1本整流板c
実験日時	1月29日	2月4日	2月11日	3月3日	3月3日
吸込口の本数	4	4	1	1	1
吸込口ダクト直径	75	75	150	150	150
吸込口ダクトの種類	自己消火性樹脂製ダクトパイプ	自己消火性樹脂製ダクトパイプ	アルミフレキシブルダクト	アルミフレキシブルダクト	アルミフレキシブルダクト
ファンの種類	大風量	大風量	大風量	大風量	大風量
実験場所	屋内	屋内	屋内	屋内	屋内
使用した雪	天然雪	天然雪	天然雪	天然雪	天然雪
屋内の設定温度	26°C	26°C	26°C	26°C	26°C

## 4. 試験結果

性能試験より得られた吹出口-外気温度差(整流板なし)を図3、冷房能力(整流板なし)を図4、吹出口-外気温度差

(整流板有)を図5、冷房能力(整流板有)を図6に示す。

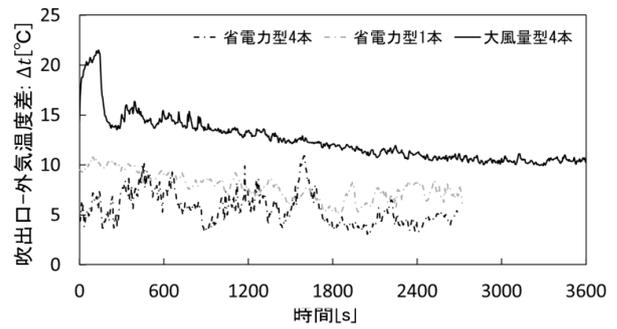


図3 吐出口-外気温度差(整流板なし)

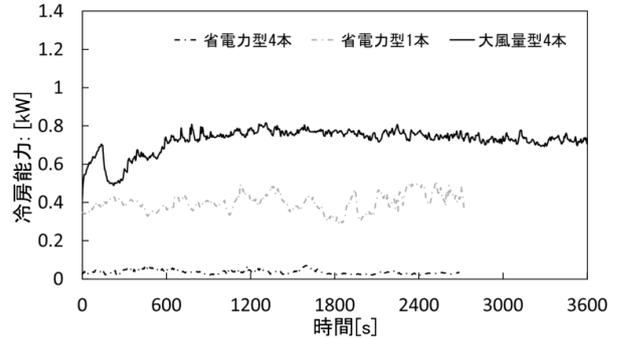


図4 冷房能力(整流板なし)

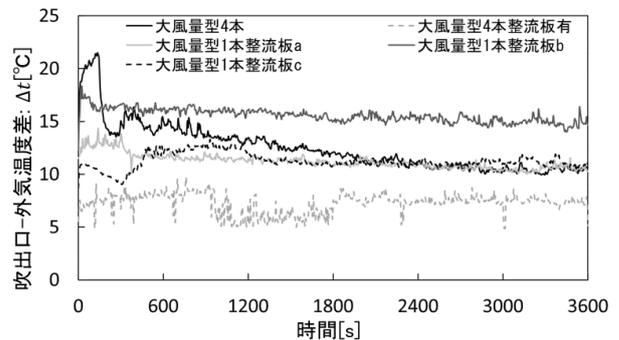


図5 吐出口-外気温度差(整流板有)

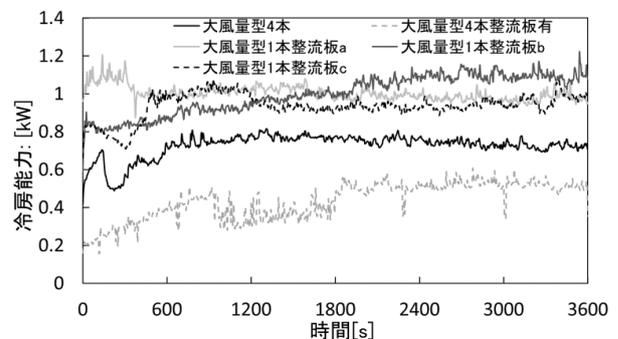


図6 冷房能力(整流板有)

試験結果より、整流板を置かない場合では大風量型4本での性能が最も高く、 $\Delta t$ は約10°C、冷房能力は約0.7kWで

安定していた。しかし、冷房能力について一般家庭用冷房機器と比較すると低く(一般的な冷房機器(6畳用)では2.2kW), 更なる性能向上が必要である。

整流板を置いた場合、整流板を用いない場合と比較して $\Delta t$ および冷房能力の向上が確認できた。中でも大風量型1本整流板**b**での性能が最も高く、 $\Delta t$ が約15°C、冷房能力が約1kWの安定した冷房性能を得ることができた。これは整流板によりFCに装填された雪の上面でも熱交換が積極的に行われたためだと考える。

次にCOP(成績係数)による評価を行った。COPは冷房機器の性能を表す一つの指標であり、ここでは冷房能力を消費電力で除することで求める。この値が高いほど性能が良いとされる。本研究にて最も性能が良い大風量型1本整流板**b**の場合のCOPは7.35となった。これは一般に普及しているエアコンの値が3~5であるため、COPについては今回製作した雪冷房装置の方が良いことが確認できた。

## 6. まとめ

雪の運搬時に使用されるFCを直接搭載できる可搬型雪冷房装置を試作し、性能試験を行った。

性能試験の結果より、冷房装置は外気温と吹出口の温度差: $\Delta t$ が約10°C、冷房能力は約0.7kW以上で安定した性能が示された。また、装填した雪上面に整流板を置いた場合、 $\Delta t$ および冷房能力が向上する結果が性能試験により示され、本研究で試作した大風量型1本整流板**b**においては $\Delta t$ が15°C、冷房能力が約1kWで安定した冷気を発生する性能を確認することができた。また、COPについても7.35と一般的なエアコンよりも高い値を得ることができた。

## 文献

- 1)国土交通省国土審議会第13回豪雪地帯対策分科会 資料1 豪雪地帯対策における施策の実施状況等

## 連続引上製氷における引上げ力の測定

○杉原幸信<sup>1</sup>・水橋奈那<sup>1</sup>・大瀧智宏<sup>1</sup>・上村靖司<sup>1</sup>  
(1:長岡技術科学大学)

### 1. はじめに

飲料用の氷には冷却効果だけでなく、透明さや形状といった外観の美しさも求められる。現在、厨房用として普及しているセル方式やオーガ方式を採用した製氷機で作る氷は、製氷業者によるアイス缶方式で製氷された氷と比較して亀裂が入っていたり、気泡の混入で白濁したりしており、美観の点で劣る。また現状では、複雑な形状の氷を得るには切削や融解による除去加工、型に水を流し込んで凍らせる方法に頼るしかない。

これら従来の製氷方式に対し、綱島・上村(2018)は着氷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、氷柱を製氷する厨房・カウンター用途を想定した連続引上製氷方式(Continuous Drawing Method, CD法)を提案し、125分で直径25mm、高さ25mmの氷を作製した。そして、CD法の氷はセル方式よりも気泡や亀裂が少なく透明で、平均結晶粒径が約3倍となることを示した。さらに水橋ら(2019, 2020)は、CD法において初期氷板作製時に生じる漏れや割れなどの現象と着氷力の関係性を示唆し、連続引上製氷装置へロードセルを組み込んで着氷力の測定を試みた。本研究では、引き続き初期氷板の形成過程に注目し、形成した初期氷板を傷つけることなく引上げ可能な条件を氷厚さと最大引上げ力の観点から整理する。また、引上げの際に観察された漏水、成功、剥離、破壊の4種類の現象と引上げ力の過渡期的変化について報告する。

### 2. 実験装置および実験手順

図1に連続引上製氷装置の概要を示す。上面に内径25mmの円筒(筒状製氷型, PTFE製)を取り付けた水槽へ給水槽から送水し、筒状製氷型上端まで水を満たす。水槽を載せた昇降ジャッキを上昇させ、筒状製氷型内の水面とアルミ製冷却棒の下端を接触させる。氷点下の低温循環水を通した冷却棒(設定温度 $-1^{\circ}\text{C}$ )によって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)冷却して水面に初期氷板を形成し、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0.2mm下降させる。この際の引上げ力を、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200N, (株)AND製)で測定する。そして、取り出した初期氷板の氷厚さを測定する。

実験装置の制御にはArduinoを用い、冷却棒の表面に取り付けたサーミスタによる測定温度と設定温度を比較し、低温循環水槽をPWM制御することで冷却棒の温度を調整した。昇降ジャッキを下降させる距離は、エンコーダ付きモーター

を使用することで制御した。なお、取り出した氷分の水補給のためにリザーバタンクを設置している。実験は全ておよそ $2.5^{\circ}\text{C}$ の低温室で実施した。

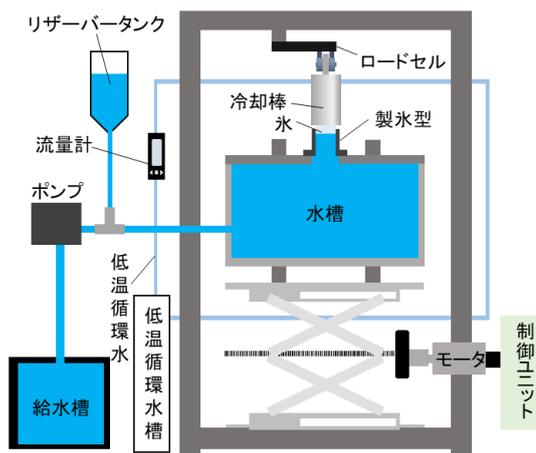


図1 連続引上製氷装置の概要。

### 3. 実験結果

#### 3.1 引上げ時に観察された4種類の現象

初期冷却時間を1分から23分の間で変化させて水面を冷却し、初期氷板を形成した。その後に昇降ジャッキを下降させて氷板を製氷型から取り出した。この一連の過程において、漏水、成功、剥離、破壊の4種類の現象が観察された。さらに、剥離と破壊の複合的な現象が見られた。それぞれの写真を図2に示す。図2の上側は冷却棒、下側は製氷型の写真である。漏水は初期氷板が十分に形成されておらず、リザーバタンクから送水される水が冷却棒と製氷型の間から漏れる現象である。成功は冷却棒下端に初期氷板が付着し、傷つけることなく取り出すことに成功した現象である。剥離は昇降ジャッキを下降させた際に初期氷板が冷却棒下端から剥がれ、製氷型内に残留して取り出すことができなかった現象である。破壊は初期氷板が割れて製氷型内と冷却棒の両方に残留する現象である。冷却時間が短いと漏水が生じ、長くなると破壊や剥離が頻繁に生じた。

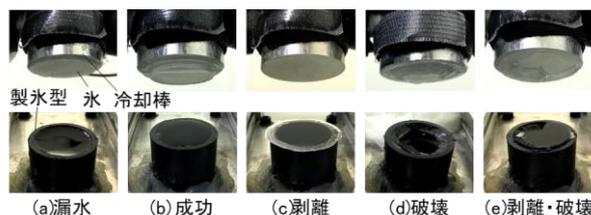


図2 引上げ時に観察された現象。

### 3.2 成功, 剥離, 破壊における引上げ力の過渡的变化

図 3(a)から(b)に成功, 剥離, 破壊における引上げ力の過渡的变化の一例を示す. 横軸は引上げ動作を開始した時刻をゼロとしている. 図 3(a)に示す成功は初期冷却時間を 7 分としたときの結果であり, 7 分経過した後に 5 秒ごとに 0.2 mm 昇降ジャッキを下降させる動作を 7 回加えている. 同様に, 図 3(b)の剥離は初期冷却時間が 11 分の結果で下降動作は 5 回, 図 3(c)の破壊は初期冷却時間が 13 分の結果で下降動作は 9 回である. また, 図中に引上げ力  $F$  が最大となった点を  $F_{max}$  として表した.

図 3(a)より, 成功時の引上げ力  $F$  はジャッキを下降させた瞬間に急増し, 次の動作まで緩やかに減少していることがわかる. また,  $F_{max}$  となる 2 回目の引上げ動作以降,  $F$  の下がりが急になり, 指数関数的減衰を見せている. 減衰過程において, 製氷型の内円筒と初期氷板の側面がせん断方向に擦れながら, すなわち動摩擦を生じながら氷板が引き上げられているのだと考えられる. さらに, 徐々に引き上げた瞬間の荷重の増加分が小さくなり, 最終的には引上げた瞬間の引上げ荷重の変化がなくなっていることから, 引上げ動作の度に製氷型内と接する氷板の氷厚さが減少していると推測できる.

図 3(b)と(c)より, 剥離と破壊では引上げた瞬間に  $F$  がステップ状に増加して一定の値を保つ現象が幾度か続くことがわかる. また, 剥離と破壊ともに成功のときとは異なり,  $F_{max}$  を示したのちに  $F$  がゼロとなる. したがって, 剥離と破壊では

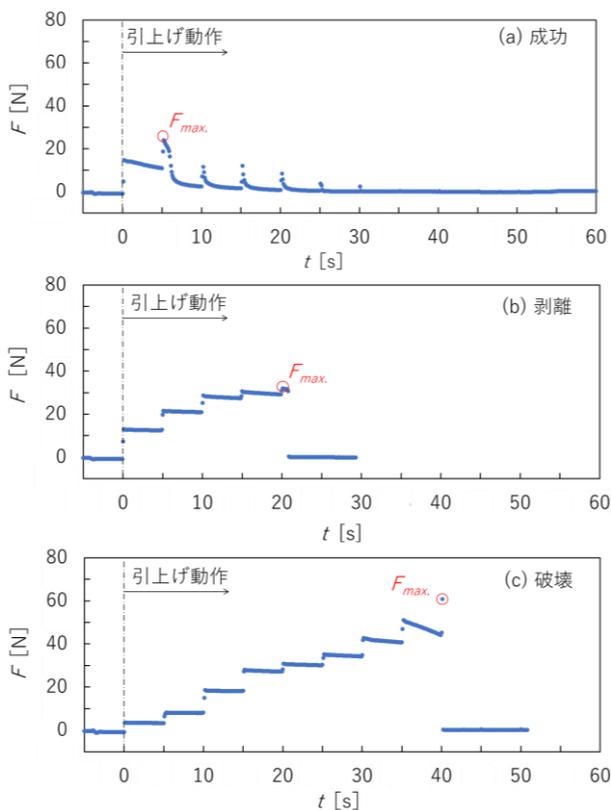


図3 引上げ力  $F$  の過渡的变化.

製氷型内円筒と初期氷板側面の間で動摩擦を生じることなく静摩擦を保ち,  $F_{max}$  に達した瞬間にある氷板が冷却棒から剥離したり, 割れたりするのだと考えられる.

### 3.3 4 種類の現象と氷厚さおよび最大引上げ力の関係

図 4 に初期氷板厚さ  $h$  と最大引上げ力  $F_{max}$  の関係を示し, 漏水領域, 成功領域, 剥離・破壊領域に分類した. この図より,  $h$  と  $F_{max}$  はおよそ比例関係にあり, 初期氷板の側面と製氷型内円筒との接触面積が氷板引上げの成否に影響すると考えられる. 初期氷厚さ  $h$  が 1.4 mm より薄いと漏水が生じ,  $h > 2.8$  mm かつ  $F_{max} > 30$  N の領域では剥離や破壊の頻度が増えることがわかった. したがって, 漏水せず, 引上げ時に剥離や破壊を生じさせないためには  $1.4 \text{ mm} \leq h \leq 2.8 \text{ mm}$  の氷板を  $F_{max} \leq 30$  N の範囲で引上げればよいことがわかった.

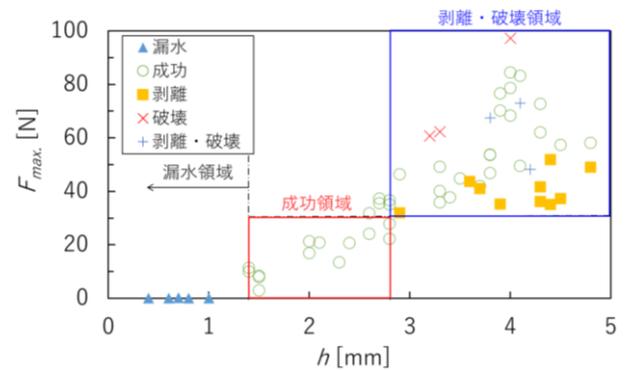


図4 初期氷板厚さ  $h$  と最大引上げ力  $F_{max}$  の関係.

## 4. まとめ

本研究では, CD 法において重要となる初期氷板の形成過程に注目し, 形成した初期氷板を傷つけることなく引上げることができる最適条件を調査した. その結果, 初期氷板の形成および引上げにおいて問題となる現象には漏水, 剥離, 破壊があることがわかった. 本実験装置の範囲では,  $h$  が 1.4 mm より薄いと漏水が生じ,  $h > 2.8$  mm かつ  $F_{max} > 30$  N の領域では剥離や破壊の頻度が増えることがわかった. また, 漏水が生じず, なおかつ引上げ時に剥離や破壊が起らない最適条件は,  $1.4 \text{ mm} \leq h \leq 2.8 \text{ mm}$  の氷板を  $F_{max} \leq 30$  N の範囲で引上げることであることを示した.

## 文献

- 網嶋匠, 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.
- 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.
- 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.

## 2020/21 年冬季の局所的集中降雪にかかわる大気循環場の特徴

本田明治（新潟大・理）

2020/21 年冬季は一冬を通してみると北日本を除いて高温傾向で、降雪量は北陸～東北南部が平年並の他は少雪であった。最深積雪は本州日本海側で平年より多く、特に北陸～新潟県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であった一方、後半は全国的に高温少雪となった。

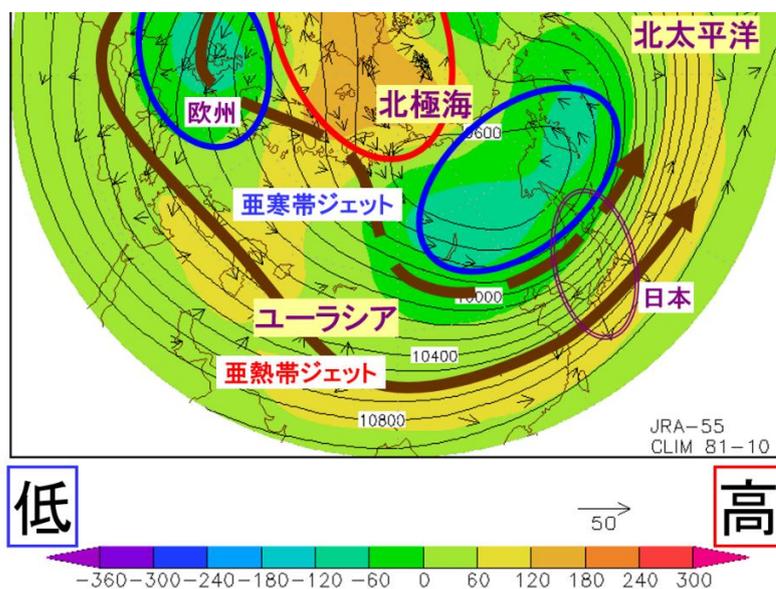
12月中旬から1月中旬にかけては、全国的にしばしば寒気が入り、北信越地方では特に強い寒気の入った12月中旬と1月上旬後半に集中降雪となったところが多く、各地の交通網に多くの影響が出た。新潟県では12月中旬に中越魚沼地域～栃木県県境一帯を中心に48時間降雪量が150～200センチに達する大雪となり、関越道で約1000台が立往生する事態を招いた。また1月上旬は海岸平野部でまとまった降雪が続き、特に8日～11日にかけては上越地域を中心に集中降雪となり、高田では24時間降雪量103センチを記録し、最深積雪も11日に249センチを記録した。

ユーラシア大陸一帯の大気循環場の特徴をみると（図1）、冬季（12月～2月）平均場では、欧州西部の本初子午線付近、日本を含む極東の東経120～150度付近で低気圧性偏差、北米及び北極海上空からカスピ海一帯に及ぶ東経60度付近と、亜熱帯ジェットに沿う一帯で高気圧性偏差となっており、気候平均場でみられる亜熱帯ジェットの蛇行をやや強化するような波列を形成している。またユーラシア大陸上の亜寒帯ジェットも亜熱帯ジェットとはほぼ同位相で蛇行しているが、高緯度では高度偏差が全般に大きく、蛇行の程度も平年に比べると強い。極東上空の低気圧偏差は極渦が分離したものとみられる。地上の気温偏差も概ね上空の高度偏差に対応し、特にユーラシア北部で低温偏差、北米～北極海と亜熱帯ジェットに沿う北緯30度付近一帯で高温偏差が明瞭であった（図略）。日本付近は北日本が前者の低温偏差に覆われているが、亜熱帯ジェットに近い本州以南はやや高温偏差となっている。

日本海側を中心に大雪に見舞われた冬の前半をみると、ユーラシア大陸上の亜寒帯ジェットの蛇行が顕著で、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強い寒気が流れ込みやすくなった（図略。但し図1の亜寒帯ジェットの蛇行が強化されたイメージ）。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が、冬の前半に平年より高かった日本海の海面水温が寄与している可能性も指摘されている。また2020/21年の冬季はラニーニャが発生しており、初冬を中心に日本付近の亜熱帯ジェットの南への蛇行を下支えしていた可能性もある。但し今冬は北日本中心に低温で、西日本を中心に低温になりやすい通常のラニーニャ年とは異なっている。

1月中旬以降の冬の後半は一転暖冬傾向となった。分離された極渦はユーラシア大陸上に留まっていたが、亜寒帯ジェットの蛇行が弱まり、日本付近への寒気の南下は散発的となった。1月に発生した成層圏突然昇温の寄与も示唆されているが、因果関係は不明である。しかしながら2月中旬には一時的に強い寒気による局所集中降雪が発生し、上越の高田では再び積雪深が200センチに達するなど、北日本を中心の冬の後半も極東上空に留まった寒気の影響を受けやすい状況が冬の後半も続いていたと考えられる。

図1. 2020/21年冬季平均（12月～2月）の250-hPa高度（m、実線）、偏差（m、寒暖色系陰影）、定常ロスビー波の活動度フラックス（ $m^2s^{-2}$ 、矢印）。偏差は1981年～2010年平均の気候値との差。JRA-55再解析データに基づく。茶色の太い矢印は亜熱帯ジェットの蛇行を模式的に示したものの。



## 2020-21 年冬期の新潟県内の大雪災害発生状況

上石勲<sup>1</sup>・山下克也<sup>1</sup>・覺道由郎<sup>2</sup>

(1:防災科研雪氷防災研究センター 2:長岡技術科学大学)

## 1. はじめに

2020年12月中旬から2021年2月にかけて新潟県内で大雪となった。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。

## 2. 集中豪雪と被害の状況

2020-21年冬期は、時間的に大量に降る集中豪雪とその被害が複数回発生した。

## ① 2020年12月15日～17日

新潟県中越地方を中心に2～3日間で2mの集中した降雪があり、関越道で2000台以上の車が滞留し、50時間以上の通行止めとなった。並行する国道17号でも多くのスタック車が発生した。

## ② 2021年1月7日～12日

新潟県上越地方の海岸平野部を中心に大雪となり、アメダス上越市高田観測点で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を記録した。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(図1、2)。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3)。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4)。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。

## ③ 2021年2月16日～18日

1月と同様に上越地方の平野部で大雪となり能生観測点で16日の日降雪量67cmを記録し、北陸道と国道8号の通行止めも発生した。

## 3. 被害状況とまとめ

2020-21年冬期の新潟県内の雪による犠牲者は147名、負傷者は448名、事故件数は730件(雪氷研調べ:地方紙より抽出・速報値)。除雪費は新潟市で108億円、新潟県や上越市では過去最高となった。とくに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ことが特徴である。狭い道路の除雪や渋滞の発生は社会的影響が大きく、新たな除雪機械の開発や効率的な除雪方法の確立など、今後の雪氷災害対策の検討課題となる。また、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、今後の課題である。



図1 建物の倒壊(上越市)



図2 ビニールハウスの倒壊(上越市)



図3 一斉雪下ろし(上越市)



図4 狭隘道路の堆雪状況(上越市)

## 新潟県における積雪重量の過去 30 年間の変動から見た 2020/21 冬季の特徴

平島寛行<sup>1</sup>・河島克久<sup>2</sup>・本谷研<sup>3</sup>・佐野浩彬<sup>4</sup>

(1:防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 2:新潟大学災害・復興科学研究所 3:秋田大学 4:防災科学技術研究所)

## 1. はじめに

2020/21 冬季は新潟県上越市を中心に記録的な大雪となり、住宅家屋の破損や空き家の倒壊等、大きな被害が見られた。そのような屋根雪被害を軽減するための対策の一つとして、屋根雪下ろしの判断材料に用いるための積雪重量分布情報「雪おろシグナル」を開発してきた(Hirashima et al, 2020)。現在秋田から福井までの 6 県で公開している。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(伊豫部・河島, 2020)で得られた積雪深の情報と近くのアメダスデータを入力して、積雪変質モデル SNOWPACK を用いて積雪重量を計算し、面的分布で示したものである。屋根雪による家屋倒壊リスクに基づいて、積雪重量が  $300\text{kg/m}^2$  を超えると雪下ろしの注意喚起をする黄色、 $700\text{kg/m}^2$  を超えると家屋倒壊リスクがあるという警鐘を示す赤でカラーリングし、地理院地図上に重ねてウェブ発信している。

これまで、雪おろシグナルはリアルタイムで積雪重量を発信するシステムとして開発を進めてきた。一方、家屋の設計積雪深や、住民の雪対策に対する熟練度等においては地域差があり、同じ積雪重量であっても平年の量が少ない地域ではリスクも大きくなる。そこで、平年の積雪重量に対する多寡の情報も重要となる。

そこで本研究では、新潟県において 1991/92 年冬季から 30 冬季にわたる積雪重量を計算し、今冬の積雪重量が近年 30 年に比べどのような年だったか、その特徴を解析した。

## 2. 計算方法

本研究では、新潟県内の気象庁の観測地点のうち積雪深が 30 年以上観測されてきた 16 地点を対象とした(図1)。本計算では、対象地点の 1 時間値のデータを用いて積雪変質モデル 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。本解析では、その年の指標として最大積雪重量を主に用いて解析した。また、豪雪であった高田に関しては今冬の積雪重量の経時変化の特徴についても解析した。

## 3. 結果

## 3.1 最大積雪重量の 30 年値と今冬の比較

図2に各地点における今冬の最大積雪重量を過去 30 年の最大値及び平均値と比較して示す。関山以外の地点では、いずれも過去 30 年平均より高い値を示した。一方、今冬が 30 年間で最大の値を示したのは新津のみであった。なお、

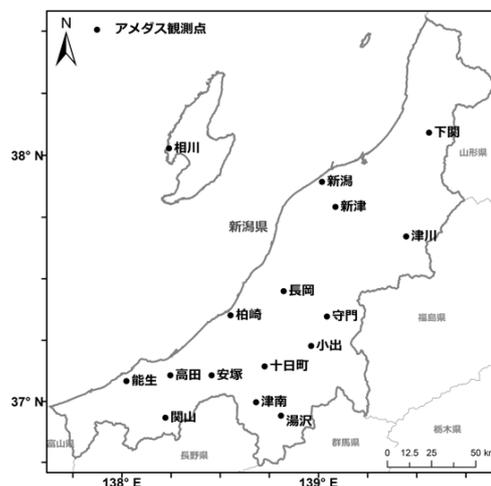


図1 新潟県における 30 年データ解析地点

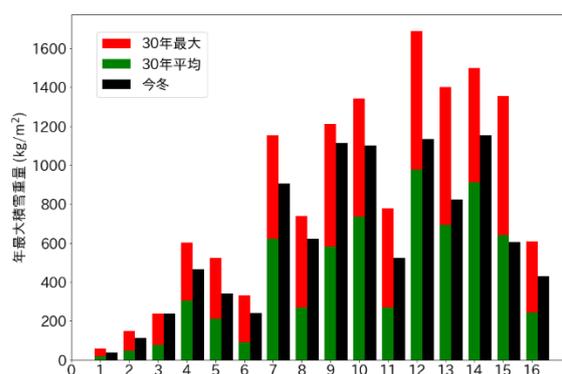


図2 各地点における最大積雪重量の 30 年平均、30 年最大値と比べて今冬の値 (1:相川, 2:新潟, 3:新津, 4:津川, 5:長岡, 6:柏崎, 7:小出, 8:高田, 9:安塚, 10:十日町, 11:能生, 12:津南, 13:湯沢, 14:守門, 15:関山, 16:下関)

過去 30 冬季で最大積雪重量を記録した年は、津南、湯沢、十日町など中山間地の豪雪地帯では平成 18 年豪雪になった 2006 年であった。一方、高田、長岡、柏崎、新潟など平野部では 2012 年に積雪重量の最大値を記録した箇所が多かった。この解析のように、最大積雪重量の観点からも山雪型の年と里雪型の年に区別することが可能であると考えられる。

## 3.2 高田における今冬の特徴

今冬は上越市において記録的な豪雪となり、空き家の倒壊等、大きな被害が見舞われた。高田においては、今年の 1 月 11 日に過去 30 年で最大の積雪深を記録したが、最大

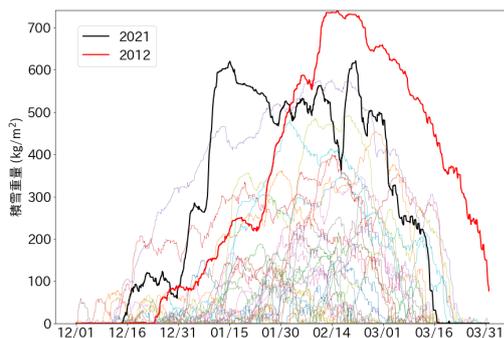


図3 高田における積雪重量の変化

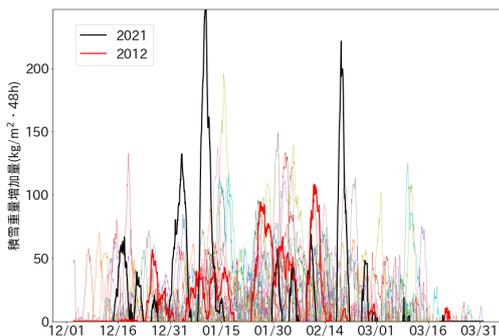


図4 高田における積雪重量の48時間増加量

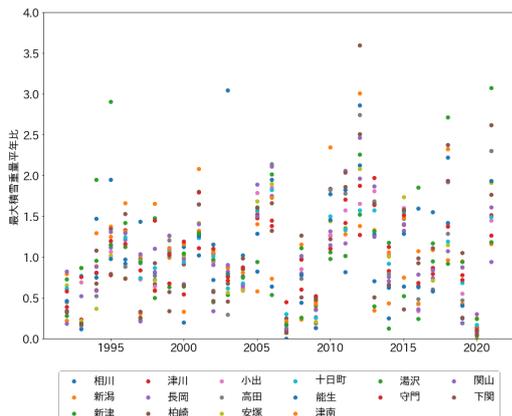


図5 各地点における最大積雪重量の30年平均に対する比

積雪重量は 2012 年に記録した最大値より小さかった。ここで、高田における各年の積雪重量の経時変化を図3に示す。2021年(今冬)と2012年に関しては強調するために太線でそれぞれ黒、赤で表示した。高田における過去30年間の積雪重量の最大値は、2012年2月15日に記録した740kg/m<sup>2</sup>である。一方、今年の最大値は620kg/m<sup>2</sup>程度であった。しかしながら、1月8日から11日にかけて極端な積雪重量の増加が見られ、雪下ろし推奨のしきい値としている300kg/m<sup>2</sup>より低い値から500kg/m<sup>2</sup>以上となる橙色になるまで2日かからなかった。ここで、図4に過去48時間の積雪重量増加量をグラフ化したものを示した。

1月8日から10日にかけて積雪重量の48時間増加量は250kg/m<sup>2</sup>にまで達し、このような急激な重量増加は他の年ではみられなかった。同様の解析を新潟県の16地点で行い、過去30年間に48時間で200kg/m<sup>2</sup>以上の積雪重量の

増加が見られたところを抽出したところ、守門で2005、2010、2011、2013年、津南で2006、2015、2017、2021年、十日町で2010年、安塚、高田、能生で2021年に見られた。高田、能生以外は多雪年では1000kg/m<sup>2</sup>を超える中山間地の豪雪地帯(図2参照)であるため、今冬に高田で見られた積雪重量の急激な増加は、平野部としてはこの30年で見られなかった非常に珍しいケースであった。

### 3.3 積雪重量の過去30年間の変化傾向

本計算結果を利用して、過去30年間の最大積雪重量の増加減少トレンドを解析した。年最大積雪重量の30年平均値に対する各年における最大積雪重量の比を図5にプロットした。目視からも増加傾向が伺えるが、各地点で一次近似直線を引いたところ津南、湯沢、関山の3地点以外は傾きがプラスになった。記録的少雪であった2019/20年までの範囲で傾向を見た場合でも、新津は減少傾向に転じたがあとの12地点は増加傾向を示した。本解析内では近年積雪は増加傾向を示しているが、豪雪の多かった80年代のデータを含めれば傾向が大きく変わることが予想されるので、今後はより長期間のデータを用いて積雪重量の増減傾向を解析する予定である。

## 4. まとめと今後の展望

本研究の解析により、積雪重量に関しては過去30年間の傾向において、今冬は多雪年ではあったものの、最大値を記録する量ではなかった。一方で、上越で見られた急激な積雪重量の増加は新潟県平野部では近年見られないものであった。今後は県外も解析対象に加えていく予定である。また、診断型積雪分布モデル(本谷ら, 2020)と組み合わせて山地を含む積雪重量分布の過去30年分のデータセットを作成し、より詳細な解析を可能にしていく予定である。

### 謝辞

本研究は新潟大災害・復興科学研究所共同研究「雪おろシグナルを利用した山地積雪重量の時空間分布の定量的評価」で行われた。

### 文献

- 伊豫部 勉、河島 克久(2020): 準リアルタイム積分分布監視システムの開発, 日本雪工学会誌, 36, 1-13.
- Hirashima, H., Iyobe, T., Kawashima, K., Sano, H. (2020): Development of a Snow Load Alert System, “YukioroSignal” for Aiding Roof Snow Removal Decisions in Snowy Areas in Japan, J. Disaster Res., Vol.15, No.6, pp. 688-697.
- 本谷研, 平島寛行, 佐野浩彬, 河島克久(2020): 診断型積雪モデルを応用した東北6県における積雪水量分布の準リアルタイム再現システムの試み, 東北の雪と生活, 35, 42-45.

## 寒候期の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<sup>1</sup>・楊柳<sup>1</sup>・姫玖玖<sup>1</sup>・中村賢<sup>1</sup>・大谷卓也<sup>1</sup>・森絢三郎<sup>1</sup>

(1: 富山県立大学工学部)

## 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 sulfon 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、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する。また、立山・室堂平における積雪層中の化学成分との比較を行う。

## 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。

## 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2450m)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、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、酸化剤が不足している状況であり、 $\text{SO}_2$ の硫酸への液相酸化が抑えられているものと考えられる。また、 $\text{H}_2\text{O}_2$ よりも $\text{HCHO}$ 濃度の方が高く、 $\text{SO}_2$ と $\text{HCHO}$ によるヒドロキメタン sulfon 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。

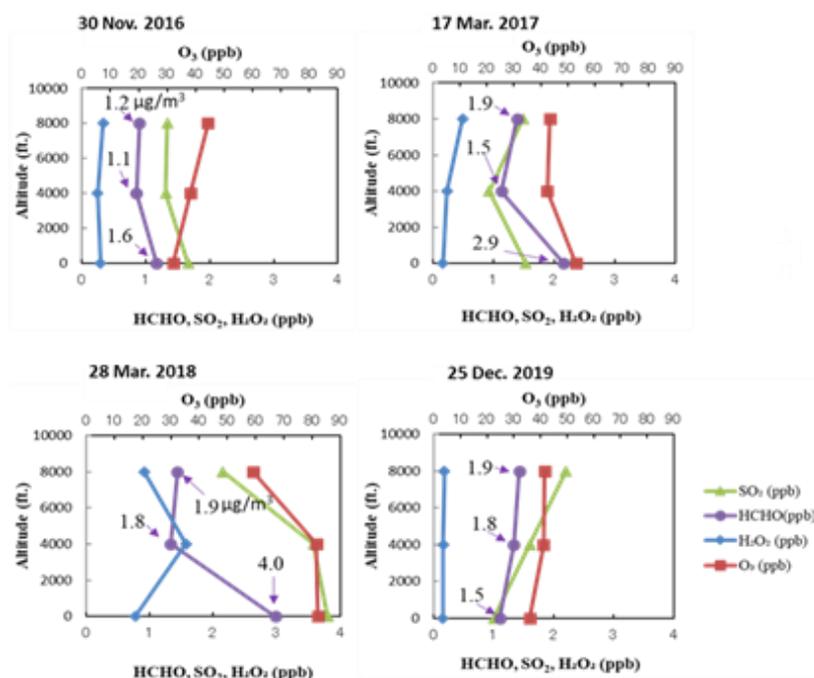


図1 寒候期の富山県射水市上空における $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{HCHO}$ 、 $\text{O}_3$ および $\text{SO}_2$ 濃度(ppb)の鉛直プロファイル

## 交差角板状の枝が付く立体状結晶の観察報告

藤野丈志<sup>1</sup>, 本吉弘岐<sup>2</sup>

(1:株式会社興和, 2:防災科学研究所)

### 1. はじめに

雪結晶のグローバル分類<sup>1)</sup>にある立体状結晶において、立体的に成長した枝には、扇状と交差角板状の2種類<sup>1)2)</sup>が見て取れる。このうち、交差角板状の枝が立体的に成長した雪結晶が12月31日から1月1日にかけての夜間と1月3日の夕方の2回新潟市で観察された。また同時に多重鼓様結晶<sup>3)</sup>も観察されたので、雪結晶の観察結果と結晶形の分類をおこなった結果を報告する。

### 2. 観察方法

雪結晶の観察は新潟市西区で実施した。結晶を受けるガラス板に自然に落ちてきた雪結晶のうち、個別に分離し形状がわかりやすい雪結晶を選んで観察及び撮影をおこなった。次に、写真に写りこんでいる形状判別可能な雪結晶について、グローバル分類に基づいて分類した。

### 3. 観察結果

1月1日0時43分に観察された交差角板状の枝が付いた立体扇付樹枝を図1に示す。わずかに雲粒が付いた広幅六花に交差角板状の枝が無数に成長したもので、広幅六花の枝先に多くみられた。交差角板の一方の角板は、広幅六花と同一の結晶方位を持つものが多いが、両方とも異なるものも見られた。12月31日から1月1日にかけての夜間に観察した雪結晶の分類結果を図2に示す。交差角板付きの雪結晶はP6立体状結晶に赤丸で示した。柱状結晶、板状結晶、柱状板状結晶いずれも確認され、多くの種類の雪結晶が降り続いた。CP4交差角板状結晶は観察期間中はほぼ継続して降っており、22時半過ぎからP6立体状結晶が降り始め、交差角板付きの結晶は23時少し前から0時半過ぎま

で観察された。多重鼓様結晶は交差角板付きの結晶が降っている時間帯の中で、より短い時間帯のみ観察された。

### 4. おわりに

交差角板付きの雪結晶は、2017-2018年冬期にも新潟市で観察され、2018年2月5日は長岡市でも観察された。交差角板状の枝が成長している立体状結晶は、成長過程において板状結晶と交差角板状結晶の成長温度領域を経験していると考えられる。多重鼓様結晶も異なる温度領域での成長過程を経ていると考えられており<sup>3)</sup>、両方が観察されるような降雪時は、非常に幅広い温度領域にわたり雪雲があったと推測される。



図1 交差角板状の枝が付いた立体扇付樹枝

### 参考文献

- 1) 菊地ほか, 2012: 中緯度と極域での観測に基づいた新しい雪結晶の分類—グローバル分類—, 雪氷, 74(3), 223-241
- 2) 菊地勝弘・梶川正弘, 2011: 「雪の結晶図鑑」, 北海道新聞社, 190pp
- 3) 本吉ほか, 2018: 北陸地域における多重鼓様結晶の観察及びその原因について. 雪氷研究大会(2018・札幌)講演要旨集, P1-26

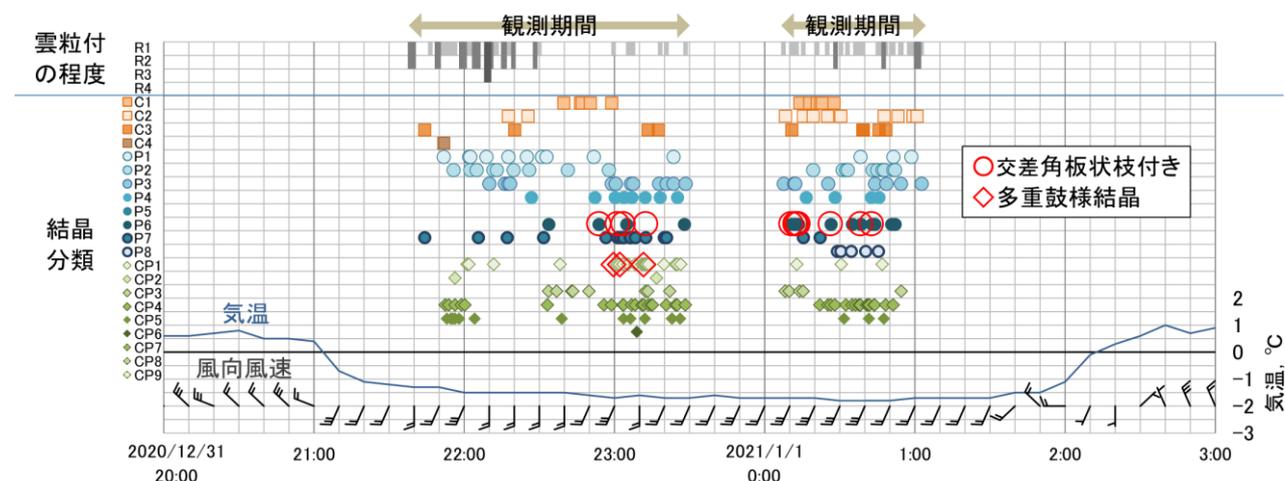


図2 2020年12月31日から2021年1月1日にかけての雪結晶の分類(気温と風向風速はアメダス新潟による)

## 北陸平野部の大雪と降雪粒子の特徴 —2018年と2021年の大雪から—

石坂雅昭<sup>1</sup>・本吉弘岐<sup>2</sup>・山下克也<sup>2</sup>・中井専人<sup>2</sup>・山口悟<sup>2</sup>・橋本明弘<sup>3</sup>

(1:防災科研客員 2:防災科研雪氷 3:気象研究所)

### 1. はじめに

今冬の福井県から新潟県にかけての北陸平野部はしばしば強い降雪に見舞われた。中でも1月8日前後の降雪では、福井や富山県内で車の立往生が長時間続くなど社会生活に大きな被害をもたらした。同様の雪による大規模・長時間の立往生については、2018年の2月5日前後の福井県内での事例が想起される。この時も、北陸平野部各所で強い降雪が観測された。そこで両事例を検討したところ、気象場に加え、降雪粒子にも共通点があることがわかった。降雪粒子と強い降雪との関連を探り、今後の大雪対処への参考としたい。

### 2. 気象場など共通点

二事例、すなわち2021年1月8日頃と2018年2月5日頃の北陸近隣の気象場の特徴は以下の通りである。

- ・一日あるいは半日の間に時間降雪数cmを超える強い降雪の連続が急速な積雪増をもたらした。
- ・日本海北部に寒気を伴う低気圧。輪島上空500hPa $-30^{\circ}\text{C}$ 以下。いわゆる里雪型(Akiyama, 1981)。
- ・海上では水平風シアー(850hPa)に対応するJPCZの発達した雪雲が北陸付近まで発生。
- ・平野部では脊梁山脈にそう南西風と海上北西風との間にシアー。
- ・気象衛星では北陸平野部から山間部にかけて背の高い雲(低温)の分布。

### 3. 降雪粒子観測と解析手法

2018年の事例は雪氷防災研究センター(長岡)での観測、今冬2021年の事例では同研究所が上越市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)および気象庁高田特別地域気象観測所の気象データを使用する(高田と総称)。対象期間の粒子の特徴をその期間内の観測粒子を降水量寄与で重み付け平均した粒径・落下速度、CMFで表し(Ishizaka et al., 2013)、CMFの粒径・落下速度関係から霰タイプとそれ以外を霰状雪の同関係を境界として区分した(図3)。

### 4. 結果 強い降雪と降雪粒子の特徴

両事例(図1, 2)とも強い降雪の期間の主要降雪粒子が霰以外(CMF速度で+記号)であることがわかる。特に図1のAの期間(12時間で73cmの急激な積雪増)の粒子のCMFは、落下速度が約 $1\text{m s}^{-1}$ 程度、粒径はおおむね $6\text{mm}$ 以下である(図3)。このような粒子が強い降雪をもたらすには多量でなければならないが、2018年事例の数濃度がそれを示している。2021年のA,Bでは、おそらく冠雪によると思われるが、正確な数濃度は得られなかった(観測の中断も発生)。また、2018年の長岡での詳細粒子観測では、強い降雪期間に低温型雪結晶(cold habits)を含む雪片が多く見られたが、今冬の高田のCMFの分布(図3)もそれと矛盾せず、その可能性がある。低温型雪結晶では無垢の各板・角柱などの小粒子を多く含み、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言え、立ち往生も降雪粒子に関係している可能性がある(本吉, 2016)。

### 5. まとめ

環境が類似の大雪事例から強い降雪と降雪粒子には特徴的な関係があることがわかった。また、立ち往生といった大雪から発生する災害の形態と降雪粒子の関係にも言及した。大雪の機構解明については雪雲の観測やモデル解析、降雪粒子についてはCMF観測と並行した降雪粒子の詳細観測などが必要である。今後の課題として、この方面の研究の進展を期待したい。

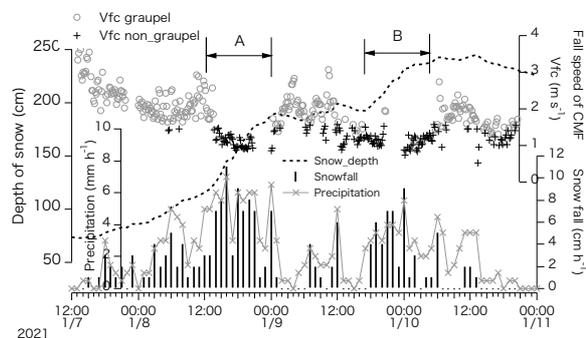


図1 霰とそれ以外に区分したCMF落下速度と降積雪、降水量(2021年, 高田)

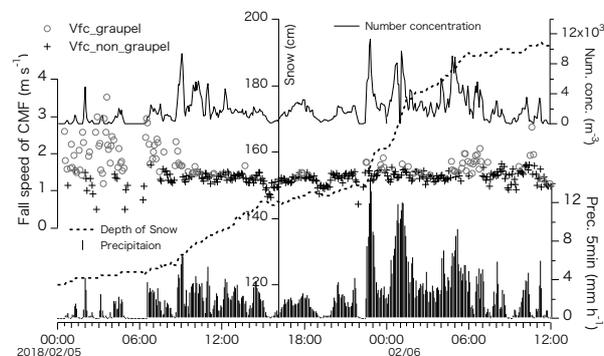


図2 霰とそれ以外に区分したCMF落下速度と粒子濃度、降水量・積雪深(2018年, 長岡)

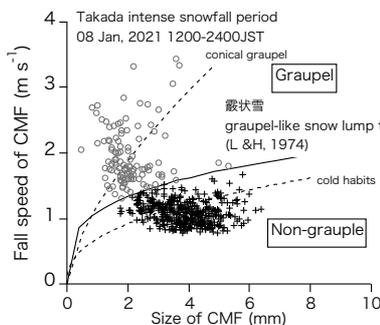


図3 高田での強い降雪の期間(図1のA)のCMF粒径・落下速度(霰とそれ以外で区分)

### 文献

- Akiyama (1981): Time and spatial variations of heavy snowfalls in the Japan Sea coastal region Part2. *J. Meteor., Soc. Japan*, **59**, 591-601.
- Ishizaka et al. (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.
- 石坂ほか(2018): 低気圧性降雪と低温型雪結晶および雪崩との関連. *雪工学誌*, **34**, 186-191.
- 本吉(2016): 降積雪観測からみた2016年1月下旬の新潟県中越・下越地域の大雪について. 「今年の雪速報会2015-16」資料集.

## マイクロ波ドップラー装置を用いた降水観測

○熊倉俊郎<sup>1</sup>・山崎正喜<sup>2</sup>・本吉弘岐<sup>3</sup>・中井専人<sup>3</sup>・齋藤隆幸<sup>2</sup>

(1:長岡技術科学大学 2:(株)スノーテック新潟 3:雪氷防災研)

### 1. はじめに

2019年度北信越支部研究発表会にて、吹雪計測をターゲットにマイクロ波ドップラー装置を用いた実験について発表したが、この研究は、その機器を降雪観測に利用しようとする研究である。今までに、2年間の野外計測、屋内降雪装置による室内実験を1回行っているが、ここでは、2021年1月以降に観測された野外観測を主に使って利用可能性を示す。



図1 センサー

### 2. 装置

24GHz帯Kバンドマイクロ波を用いたドップラーセンサー(図1)で、6.2mm/sから6.2km/sまでのセンサー向き速度を計測可能なもので、速度は出力中間周波数で出力し、反射強度は見かけの立体角に比例している。45度×38度の楕円形の指向性を持ち、その内部角内ではほぼ同じ大きさの信号を放射している。出力信号を5kHzでAD変換し、デジタルデータとして保存した。5kHzサンプリングでは、約10m/s程度の速度までは測定可能である。

### 3. 観測

観測は、雪氷防災研究センター長岡の露場で実施した。放射方向を真上とし、センサー前面にマイクロ波を透過する素材でかまぼこ型のドームをかぶせた。センサー収納箱には外乱防止のスチールウールで満たし、上方からの受信のみが有効になるように工夫した。2021年1月の降水量と気温(AMeDAS長岡)を図2に示した。ここで、降雪の降り出しとみられる1/7をターゲットとした。

### 4. 結果

図3に2021/1/7 17:47の1分間のAD変換生データを上段、1秒ごとにフーリエ変換後80Hz以上の振幅の平均を中段、周波数をドップラー速度に変換して縦軸に取った図を下段に、横軸は時刻を示した。降り始めで、みぞれかあられと思われる。

### 5. 考察

図3の時間帯の24秒、25秒の2秒間のデータを取り出し、フーリエ変換の時間窓の大きさを変えたものを図4に示す。最上段が生データ、次から、横軸がドップラー速度で、窓時間が2秒、1秒、0.5秒、0.25秒である。それぞれ2秒内を分割したデータごとに変換して表示した。例えば、1sでは青が前半1秒、赤が後半1秒の結果である。この例の場合には分割することにより、個々の粒子が分離できているように見える。

### 6. まとめ

ここでは測定の意味が分かる良い結果が得られたものを示した。実際にはこのような事例ばかりではない。発表では様々な例について示し、可用性を考える。

#### 文献

山崎正喜,熊倉俊郎,西内勇貴,遠藤優斗,中井専人,齋藤隆幸(2019):超小型 Doppler Radar を用いた地吹雪検知の検討,雪氷北信越 39号, P31

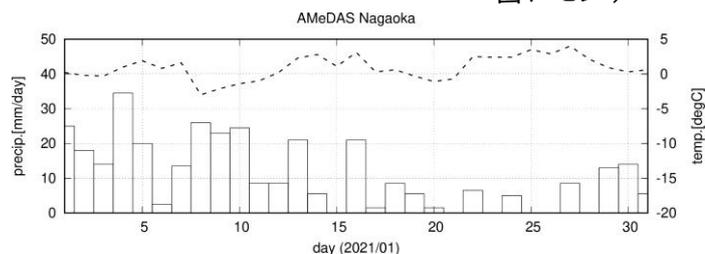


図2 AMeDAS 長岡での降水量(左軸)と気温(右軸)

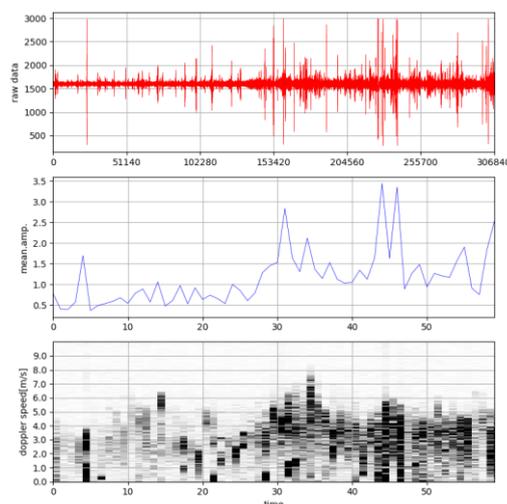


図3 2021/01/07 17:47 の観測結果

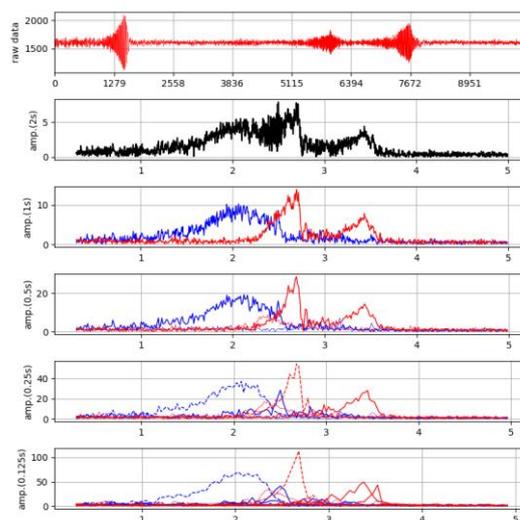


図4 17:47:24~25 の2秒間の解析

## レーダー観測と地上観測における降雪の時空間的な整合性について

○柴田堅太<sup>1</sup>・熊倉俊郎<sup>1</sup>・中井専人<sup>2</sup> (1:長岡技術科学大学, 2:雪氷防災研)

## 1. はじめに

降雪観測を行う手法としては、レーダー観測<sup>1)</sup>と地上観測<sup>2)</sup>がある。しかし、降雪粒子は落下速度が小さいため<sup>3)</sup>、レーダー観測データについて風による降雪粒子の移流を考慮しない場合、レーダーで上空に観測された降雪と地上観測点で観測された降雪との間に水平分布の差が生じる<sup>4)</sup>。ここで、レーダー観測は、グリッド内降水を観測し、その中で観測された降水量の平均値をその地点の降水量としている。一方地上観測では観測点の降水のみ認識するため、観測点付近に降水がないと観測されない。このことから、どちらかで観測点グリッド内の降水を確認しても、他方に地上観測点上に降水がない可能性がある。本研究はその様子を明らかにする。

## 2. 研究方法

本研究では、2018年2月における新潟県内のアメダス観測点のうち、主要な27地点を地上観測の対象とし、気象庁がホームページで公開している各観測地点の気象記録<sup>5)</sup>を用いた。レーダーデータは、気象業務支援センターから提供されたもの(高度約2000mを基準とした降水強度)を用いた。降水量比較を行うにあたって、レーダー降水量は10分毎に連続して1時間平均した。アメダスデータは、10分間隔の降水量で、これを10分毎に連続して1時間積算した。これら2つの収集した観測データを、a:両方降水がある、b:アメダスのみ降水あり、c:レーダーのみ降水あり、d:どちらも降水なしの4種類に分類した。次に、各地点の全収集数に対する(a+b+c)の割合e、(a+b+c)に対するa、b、cそれぞれの割合f、g、hを求めた。

## 3. 結果

結果を図1に示した。長岡では、アメダスのみ降水があるgの割合が大きかった。これは、別の地点で発生した降雪が水平移動して観測されたと考えられる。各地点の(a+b+c)に対するアメダスのみ降水がある比率gとレーダーのみ降水がある比率hの和が、アメダスとレーダーの両方で降水が観測されている比率fより大きい地点が23地点あることが確認できた。また、gとhを比較すると、19地点で、hが大きいことが分かった。つまり、19地点でレーダーしか降水が観測されていない事例が多いことが読み取れる。これは、降雪に水平分布の差があったこと以外に起因して違いが生じている可能性があると思われる。

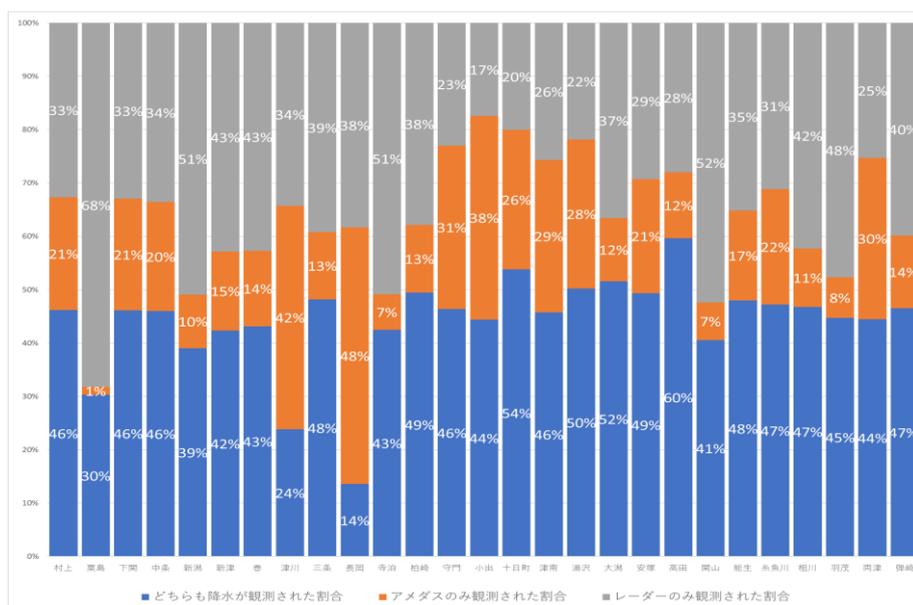


図1 各観測点のf,g,h. 縦に割合を示す。

## 4. 文献

- 1)気象庁,気象庁気象レーダー,<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>, 2021年4月27日参照
- 2)福岡管区气象台,雨量計の仕組み,<https://www.jma-net.go.jp/fukuoka/kansoku/raingauge.files/raingauge.htm>, 2021年4月27日参照
- 3)孫野長治:「雪片の落下速度」雪氷の研究-I, 1943
- 4)レーダーによる降雪観測 について佐々木 憲孝ら 水工学論文集,第43巻,1999年2月
- 5)気象庁,過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2021年4月27日参照

## スプラッシュ過程における粒子の3次元挙動の定量化

新屋啓文<sup>1</sup>・中山智靖<sup>2</sup>・富永禎秀<sup>3</sup>

(1:新潟大学研究推進機構 2:新潟大学理学部 3:新潟工科大学工学部)

### 1. はじめに

地表面に降り積もった雪が風により舞い上げられる現象を吹雪と呼ぶ。吹雪は、視程障害や吹きだまり、着雪といった付随現象を引き起こすため、時として大規模な雪氷災害を引き起こす。2021年1月19日に宮城県大崎市の東北自動車道で発生した吹雪による多重衝突事故(約140台)は記憶に新しく、局所的に発生していた吹雪の視程障害が事故の原因と指摘されている。他方で、吹雪発生後の地表面に目を向けると、多様な雪面模様を確認することができる。例えば、飛雪粒子の堆積地形であるスノーバルハン、風による侵食地形であるサスツルギが挙げられる。Kochanski *et al.* (2019)によると、降雪時または降雪直後の吹雪では堆積地形が形成されるのに対し、積雪焼結後に発生した吹雪では侵食地形が雪面に生じると報告されている。つまり、新雪による柔らかい雪面や焼結で硬化した雪面など雪面状態の違いが、吹雪に伴い形成される侵食・堆積地形の変化に現れていると示唆される。吹雪において雪面で生じる物理素過程の1つとして、雪面への飛雪粒子の衝突過程(以後、スプラッシュ過程)がある。スプラッシュ過程は、衝突によって新たな雪粒子を飛散させる侵食過程や衝突した雪粒子の運動停止による堆積過程を担っている。そのため、上記で述べた雪面硬度に依存した地形変化は、スプラッシュ過程の効果で生じた可能性がある。

雪のスプラッシュ過程を測定した先駆的研究として、Sugiura and Maeno (2000)の風洞実験が知られている。高速カメラを用いて、スプラッシュ過程を風向-高さの鉛直2次元断面で撮影することに成功し、雪粒子の2次元挙動の衝突角度・速度依存性が明らかにされている。また、Ammi *et al.* (2009)による粉体物理実験では、無風状態で樹脂製粒子のスプラッシュ過程が計測されており、衝突粒子の反発(Rebound)と新たな飛散粒子(Splash)を区別した解析が3次元で行われている。さらに、O'Brien and Neuman (2016)による飛砂の実験では、風洞上部から照射したレーザーシートの向きを風向に直交する奥行(スパン)方向へ変えることで、飛砂のスパン方向の運動を抽出することに成功している。スプラッシュ過程に関する地表面近傍の粒子挙動の解明は雪氷分野に限らず取り組まれているものの、スプラッシュ過程における粒子の3次元挙動の計測は技術的困難さのため研究例が少ない状態である。

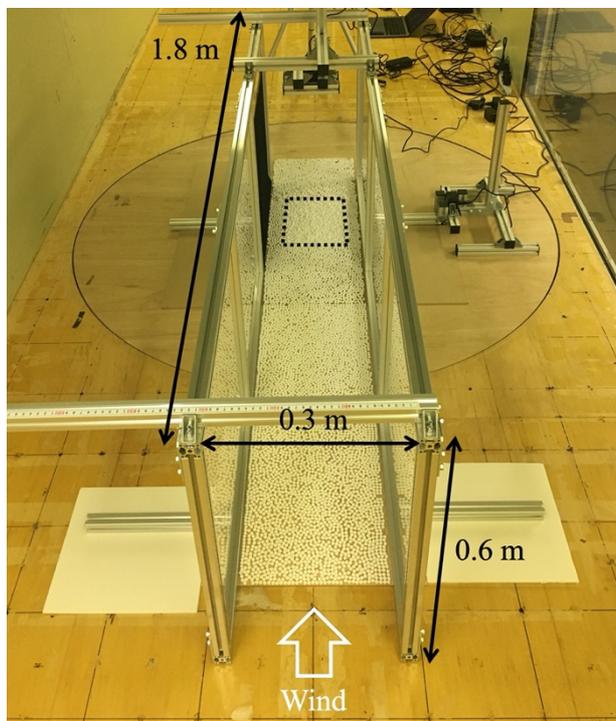


図1 実験系の全体像。黒の点線内は粉体層の位置を示す。

本研究では、雪や砂のスプラッシュ過程を3次元で計測するための実験系構築および幅広い粒径分布を示す雪や砂のスプラッシュ過程の基準値取得を目的とし、均一粒径の発泡スチロール球を用いた風洞実験を実施したので、その結果を報告する。

### 2. 風洞実験

本実験は、新潟工科大学 風・流体工学研究センターの大型境界層風洞(測定部:長さ13 m,幅1.8 m,高さ1.8 m)で行われた。風洞内にアルミフレームとアクリル板を組み合わせた風路を配置し、その底面に発泡スチロール球(直径8 mm,質量13.7 mg,密度 $51.1 \text{ kg m}^{-3}$ )を接着させたベニヤ板を敷いて粗度を与えた(図1)。加えて、スプラッシュ過程を発生させるため、風路の風下側に粒子を堆積させた粉体層(充填率60%)を作成した。実験を行う度、粉体層の表面が平坦になるように均した。

粉体層表面で生じるスプラッシュ過程を撮影するため、デジタルスチルカメラ(Sony, DSC-RX0M2)を風路の上部および側面に2台設置した(図1)。風路内への粒子供給は、風上からの手動散布とした。そして、粉体層をLEDビデオライト(Yonguno, YN-600)で照らしつつ、スプラッシュ過程をフレームレート960 fps・撮影時間4秒で動

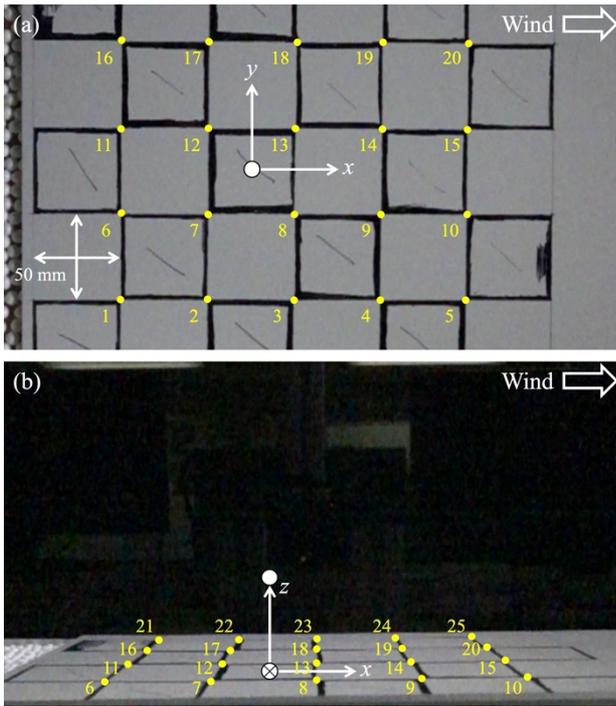


図2 チェッカー盤によるカメラキャリブレーション：(a)上部カメラ、(b)側面カメラ。(b)の×印は盤上の粒子位置を示す。

画撮影した。撮影時の風洞中心風速は、粉体層表面の粒子が風によって飛散しない風速  $5, 7 \text{ m s}^{-1}$  の2条件を採用した。

### 3. 画像解析

同期した2台のカメラで捉えたスプラッシュ過程における粒子挙動を定量化するため、画像解析によって粒子の3次元座標を推定した。座標推定の手順は以下のとおりである。

画像のピクセル座標と実座標の対応関係を把握するため、1辺50 mmの自作チェッカー盤を地表面へ水平に配置し、上部・側面画像に写る交点から画像解像度と画像間の位置関係を整理した(図2)。ここで、実座標は、風向を  $x$  座標、奥行方向を  $y$  座標、鉛直方向を  $z$  座標と定義した。図2の数値は交点の番号を示しており、番号6-20の交点は上部・側面の両画像に写っていた。

動画編集ソフト (FFmpeg) を用いて、スプラッシュ過程を撮影した動画から1コマ毎の静止画を作成した。本研究では、粉体層への粒子の衝突前後に着目するので、粒子の水平座標を上部画像から算出した(図2(a))。一方、粒子の鉛直座標は側面の画像から推定されるが、粒子の高さは水平座標に基づくチェッカー盤上の位置(図2(b)の×印)から実際に撮影された位置までの距離として計算した。その際、画像解像度は  $y$  方向で異なるため、 $x$  方向の解像度を用いてピクセル距離から実際の高さに変換した。

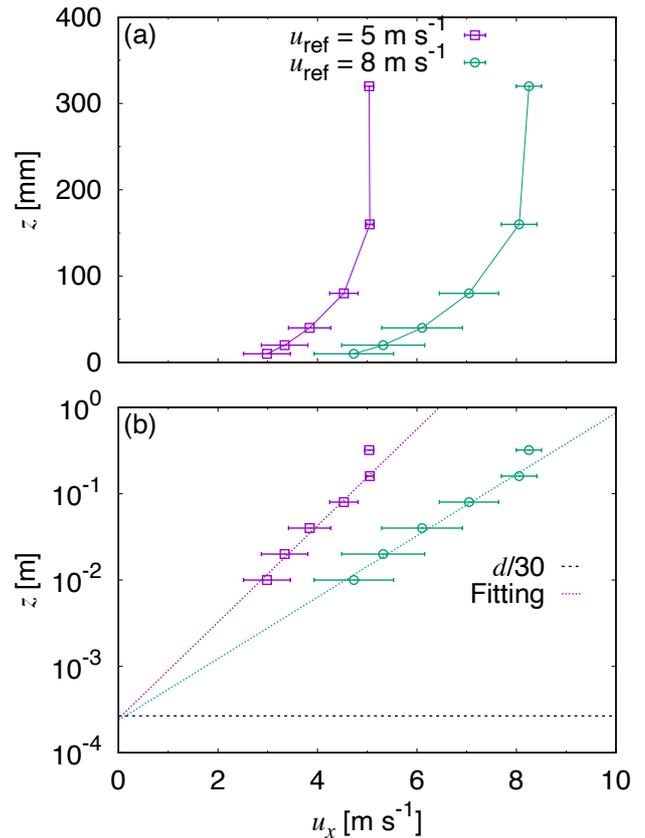


図3 風速の鉛直分布(跳躍粒子なし)。(a)と(b)は同一データであり、点とエラーバーはそれぞれ平均風速と標準偏差を表している。 $u_{ref}$ は風洞中心の風速、 $d$ は粒径(8 mm)である。

## 4. 結果

### 4.1 風速分布

本実験系では、風路内に境界層が発達するよう底面に粗度を与えていた(図1)。そこで、スプラッシュ過程を撮影する前段として、熱線風速計 (DANTEC, 90C10) を用いて、風路内の風速の鉛直分布を計測した。計測は粉体層の風上10 cmの地点で行い、ベニヤ板に接着した粒子の頂点を高さ0 mmと定義し、高さ10, 20, 40, 80, 160, 320 mmの計6点で  $x$  方向の風速  $u_x$  を測定した。

図3は、風洞中心風速  $u_{ref} = 5, 8 \text{ m s}^{-1}$  における風速分布を示している。図3(a)で示されるように、風速勾配は地表面近傍で大きくなっており、高さ160 mm以上で風洞中心風速に達していた。また、高さ320 mmの風速を除いて、風速分布が対数則に従っていることも分かった(図3(b))。ここで、粗度の影響を評価するため、風速分布に次式を適用した。

$$u_x(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式(1)において、 $u_*$ は摩擦速度、 $\kappa$ はカルマン定数(0.4)、 $z_0$ は粗度長である。図3(b)の点線は、高さ320 mmを除い

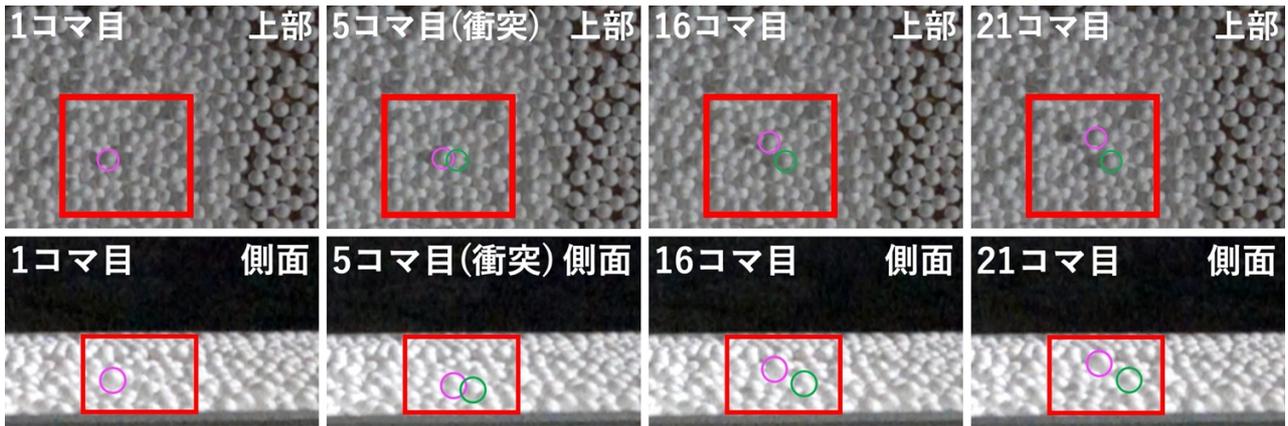


図 4 スプラッシュ過程のナップ写真. 1コマ毎の時間間隔は1/960 sである. 写真中の丸は粒子の反発と飛散を示している.

て式(1)をフィッティングしたものである. Bagnold(1941)によると, 境界層における粗度長は粒径の30分の1に相当すると知られている. 図 3(b)に示されるフィッティング曲線の切片が粗度長であり, これらは本実験で使用した発泡スチロール球の粒径 8 mm から推測される粗度長 ( $d/30$ ) と良く一致していた. 従って, 本実験系で境界層が形成されていたと言える.

#### 4.2 スプラッシュ過程における粒子挙動

図 4 は, 上部と側面に設置した高速度カメラで捉えたスプラッシュ過程における粒子挙動の様子を示している. 各画像は動画から切り出された静止画の拡大図であり, 1コマ毎の時間間隔は1/960 sである. 5コマ目は粉体層への入射粒子の衝突状態を表しており, 衝突後, 入射粒子は大気中へ跳ね返っている. さらに, 衝突により粒子が新たに粉体層から飛散した様子も確認された (図 4 の5コマ目以降の丸).

撮影されたスプラッシュ過程の内, 粒子が反発・停止 (堆積) した代表例に関して, 画像解析により粒子の3次元挙動を定量化した. 図 5 は, 粒子の3次元座標の時間変化を示しており, 縦の破線と一点鎖線は粉体層への粒子の衝突を確認できた時間を意味する. 図 5(a), (b)は, それぞれ衝突後に粒子が反発・停止した解析例である. 図 5(a)を見ると, 衝突前の粒子は風向に移動しつつ下降しているが, 奥行方向にほとんど動いていないことが分かる. 衝突後の反発粒子は, 風向に移動しつつ上昇していることに加え, 奥行方向への移動も確認された. これに対して, 図 5(b)を見ると, 衝突前の粒子は風向・奥行ともに移動しながら下降しているものの, 衝突後の停止粒子はいずれの方向にも移動が抑えられていた.

図 5 の粒子座標の時間変化に基づき, 風向・奥行の水平断面と風向・高さの鉛直断面における反発・停止の粒子飛跡を図 6 に示す. 縦の破線と一点鎖線は, それぞれ反発と停止で粒子が粉体層に衝突した  $x$  座標を表している. 反発粒子は, 図 6(a)で衝突による進行方向 (方位角) の変化と1/960 s 間隔の点線から速度の低下を, 図 6(b)で入射

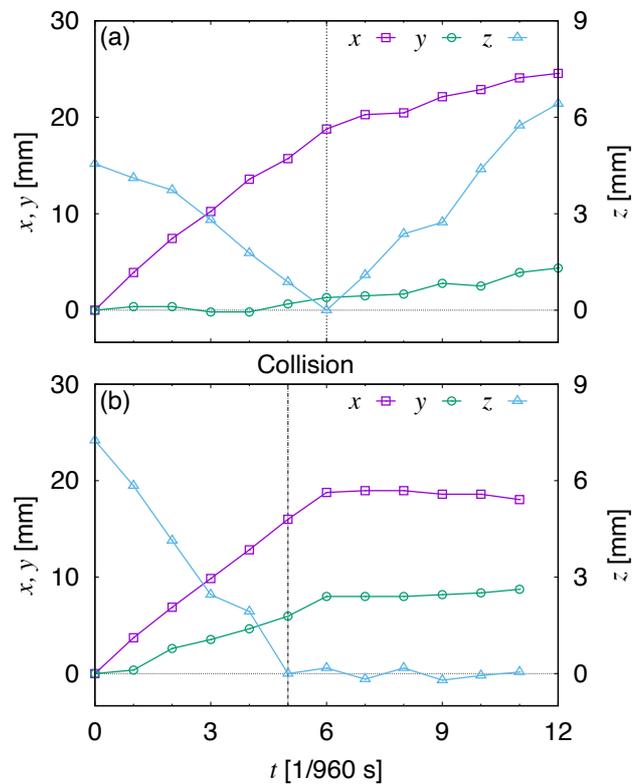


図 5 スプラッシュ過程における粒子座標の時間変化: (a)反発, (b)停止. 風向と奥行方向は0コマ目を  $x=y=0$  mm, 鉛直方向は衝突時を  $z=0$  mm とする.

角を上回る反発時の仰角を確認できる. 一方, 停止粒子は, 衝突点近傍に留まっていたことが分かる. 現状, 解析数は2例と非常に少ないもの, 風洞実験でスプラッシュ過程における粒子の3次元挙動を定量化できると考えられる.

#### 5. まとめ

本実験では, 雪や砂のスプラッシュ過程を3次元で計測するための実験系構築および幅広い粒径分布を示す雪や砂のスプラッシュ過程の基準値取得を目的とし, 均一粒径の発泡スチロール球を用いた風洞実験を実施した. 本実験系で, 風路内に底面粗度を反映した境界層を形成

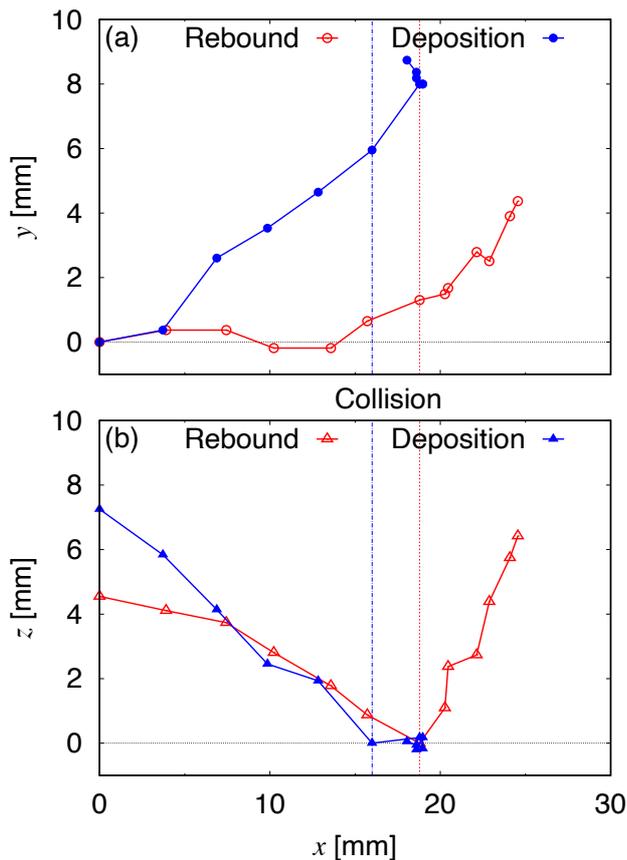


図 6 スプラッシュ過程における反発・停止粒子の飛跡：(a) 水平断面、(b) 鉛直断面。座標データは図5 と同一である。

するとともに、風路の上部と側面から同期した小型カメラによるスプラッシュ過程の高速度撮影に成功した。そして、撮影した動画を1コマ毎の静止画に変換し、画像解析によって粒子の3次元座標の推定手法を構築した。スプラッシュ過程を捉えた動画から粒子衝突後の反発と停止の代表例を選択し、画像解析手法を適用した結果、反発粒子の移動方向と速度の変化や停止粒子の粉体層上への堆積過程を定量化することに成功した。今後、雪や砂の基準値となるスプラッシュ過程の3次元特徴を明らかにするだけでなく、本実験系を用いて雪・砂のスプラッシュ過程の3次元計測を予定している。

#### 文献

- Ammi, M., Oger, M., Beladjine, D., and Valance, A. (2009): Three-dimensional analysis of the collision process of a bead on a granular packing. *Phys. Rev. E.*, **79**, 021305.
- Bagnold, R. A. (1941): *The physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London.
- Kochanski, K., Anderson, R. S., and Tucker, G. E. (2019): The evolution of snow bedforms in the Colorado Front Range and the processes that shape them. *The Cryosphere*, **13**, 1267–1281.

O'Brien, P. and Neuman, C. M. (2016): PTV measurement of the spanwise component of aeolian transport in steady state. *Aeolian Res.* **20**, 126–138.

Sugiura, K. and Maeno, N. (2000): Wind-tunnel measurements of restitution coefficients and ejection number of snow particles in drifting snow: determination of splash functions. *Boundary-Layer Meteorol.* **95**, 123–143.

## 新雪除雪を対象とした最適除雪ルートの検討

高崎仁義<sup>1</sup>・伊藤潤<sup>2</sup>・佐野可寸志<sup>3</sup>

(1:元 長岡技術科学大学 現 (株)建設技術研究所 2:元 長岡技術科学大学 現 開発技建(株) 3:長岡技術科学大学

### 1. はじめに

我が国は面積のおよそ半分が豪雪地帯に指定された雪国である。人口ベースでは約15%程度の豪雪地帯であるが、近年の集中的・局所的な降雪や非積雪寒冷地域における大雪が頻発する傾向にある点、高度に発達した物流は全国規模のネットワークを構築していることを鑑みれば、その影響は豪雪地帯に限った話とは言えない状況になっている。このように、「雪」は単に雪国における交通環境の悪化のみならず全国的に大規模な社会経済損失を発生させるトリガーであり、我が国全体の課題と言える。

この課題解決に向け、道路管理者サイドでは新たな道路整備によるネットワーク強化、除雪技術の高度化・効率化等に鋭意取り組まれているところであるが、道路整備には多くの時間と費用を費やす必要があるゆえ、近年の大雪による除排雪費用高額化といった財政上の問題や、少子高齢化による機械除雪オペレータの担い手不足も生じており、中長期的視点で考えなければならぬ部分がある。

以上のことから、現状の除雪体制を継続することは困難である。そこで本研究は、冬期交通の円滑化や除雪等道路管理の効率化を図るための施策を検討することとし、なかでも除雪ルートに着眼し、除雪技術者の経験に基づき機械除雪ルートを決定している現状から、機械除雪ルートの最適化問題としてモデル化し、最適解を求めることで除雪ルートを検討することを目的とする。

### 2. 対象路線

本研究では、新潟県長岡市の県管理路線と市管理路線を対象とする。高速道路と直轄国道を対象外とした理由として、除雪方法や除雪車の規格が大きく異なるためである。

### 3. 現況の除雪体制の整理

管理主体ごとのヒアリングを通して、現況の除雪体制の調査を行った。以下に、現況の課題と対応方針を示す。

第一に、県管理路線は、消融雪施設区間の回送距離が長いことが課題として挙げられる。機械除雪距離に対する回送距離の割合が約40%を占める除雪車も存在する。これは、管理主体ごとに除雪路線計画を行っているため、県管理路線のみで除雪ルートを決定しなければいけない制約があり、やむを得ず回送区間を通過する必要があるからである。第二に、市管理路線は、除雪STから除雪作業路線までの回送距離が長いことがあげられる。回送距離が約4kmに及ぶ除雪車も存在する。これは、除雪担当者不足により、一つの業者が受け持つエリアが非常に広がっているためである。

これらの課題の対応方針として、以下の2点考えた。第

一に、管理路線別の除雪から、県と市の管理体制を統合したエリア除雪への移行することによって、消融雪施設区間を回避することが可能となり、回送距離の短縮につながると考えられる。第二に、除雪STの共有を行うことによって、除雪STから除雪作業路線までの距離が最短である除雪STから出発することができ、回送距離の短縮ができると考えられる。

### 4. 除雪優先路線の検討

除雪ルートの最適化問題において、本来であれば優先的に除雪されるべき路線が後回しになってしまう最適解が、計算上、最適なルートとして出力される場合がある。そのため、最適化問題を解く際、本来優先的に除雪されるべき路線が後回しになる最適解が出力されることを防ぐことを目的に、除雪優先路線を設定する。

除雪優先路線は、降雪による影響を受けやすい区間、路線の重要性を考慮して設定する。降雪による影響を受けやすい区間は、降雪による損失時間を算出し、損失時間が大きい路線とする。重要性の高い路線は、緊急時の時間信頼性を確保するため緊急輸送道路、公共交通の定時性を確保するためにバス路線とする。降雪による影響を受けやすい区間、路線の重要性より、除雪優先度を各路線に設定する。

本分析では、降雪による損失時間を、冬期速度予測モデルから算出する。モデルより、降雪による影響がある場合と、影響がない場合の速度を推定し、各路線の損失時間を算出する。速度情報を持つETC2.0のデータを用いたほうが正確な損失時間を算出できるが、今回はモデルより算出する。ETC2.0のデータを使用しない理由としては、県道や市道のETC2.0のサンプル数が非常に少ないため、データにばらつきがあることが想定されるためである。特に市道では、サンプルが確認できないような路線も存在するため、現段階ではETC2.0データから損失時間を算出することは困難である。よって、本分析では冬期速度予測モデルより降雪による損失時間を算出する。

### 5. 除雪ルートモデルの構築

除雪ルートモデルを混合整数計画法より定式化し、以下に示す。

式(1)は、除雪車の総除雪距離及び、優先路線後回しペナルティ値の最小化の目的関数である。式(2)は、除雪ステーションを出発した除雪車は、各除雪路線を通過し、再び除雪ステーションに戻ることを表している。式(3)は、機械除雪が必要な路線は、除雪車の除雪ルートのどれかに必ず割り当

$$\text{minimize } \left\{ \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \mathcal{N}} (DT_{ij} \times x_{ij}^k), \sum_{(i,j) \in \mathcal{N}} (P_i \times U_i) \right\} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{j \in \delta^+(i)} x_{0j}^k = \sum_{i \in \delta^+(i)} x_{i0}^k = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} J_{ij} \times x_{ij}^k = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} (DT_{ij} \times x_{ij}^k) \leq 30000 \quad (4)$$

$$\sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ij}^k - \sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ij}^k = 0 \quad (5)$$

$$(u_0 + u_{ij}^k) - \text{big}M(1 - x_{0j}^k) \leq u_j \quad (6)$$

$$(u_i + u_{ij}^k) - \text{big}M(1 - x_{ij}^k) \leq u_j \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} x_{ij}^k = 0 \quad (8)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad (u_i, u_j) \geq 0 \quad (9)$$

てられ、一回以上通過する必要があることを意味している。式(4)は、除雪車一台当たりの作業可能距離を超えないようにするための制約である。除雪可能距離は、除雪車の速度が5km/hと仮定し、作業時間が6時間を超えないような距離となっている。式(5)は、フロー保存則である。式(6),(7)は、部分巡回路の除去を行うための制約である。式(8)は、接続されていないノード同士の組み合わせとなっているリンクは選ばれないことを示している。式(9)は、変数数 $x_{ij}^k$ と $u_i$ の整数条件、非負条件を示している。

## 6. 除雪ルートモデルに基づく対応方針の評価

前章で構築した除雪ルートモデルに基づき、第3章で検討した対応方針の評価を行う。

第一に、管理路線別の除雪から、県と市の管理体制を統合したエリア除雪への移行した場合の評価を行う。除雪ルートモデルによるシミュレーションの結果、消融雪施設区間の回送がなくなったことにより、図1に示すように、1サイクル当たりの総除雪距離が、現況と比べ約15%減少した。また、降雪による損失時間が大きい路線を早期の段階で除雪完了したこと、総除雪距離が短縮されたことにより、1サイクル当たりの降雪による総損失時間が、現況と比べ、約10%縮小された。

第二に、除雪STの共有を行った場合の評価を行う。同様

にシミュレーションを行った結果、除雪STから除雪作業路線までの長距離に及ぶ回送がなくなったことにより、図2に示すように、現況と比べ、1サイクル当たりの総移動距離が約50%減少した。

## 7. 総括

本研究では、重要道路と降雪による損失時間が大きい路線を除雪優先路線とし、除雪ルートモデルに基づき最適除雪ルートの検討を行った。管理路線別の除雪から、県と市の管理体制を統合したエリア除雪への移行した場合、また、除雪STの共有を行った場合においては、2つの対応方針ともに、総除雪距離、降雪による総損失時間の減少が確認できたことから、除雪ルートモデルの有用性、並びに対応方針の有効性を確認することができた。

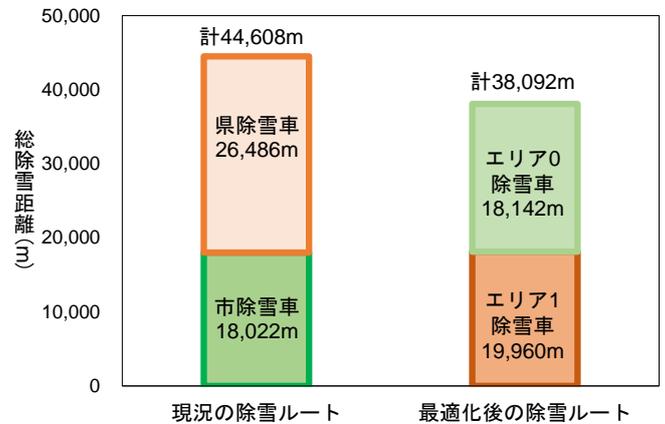


図1 エリア除雪を行った場合の総除雪距離の比較

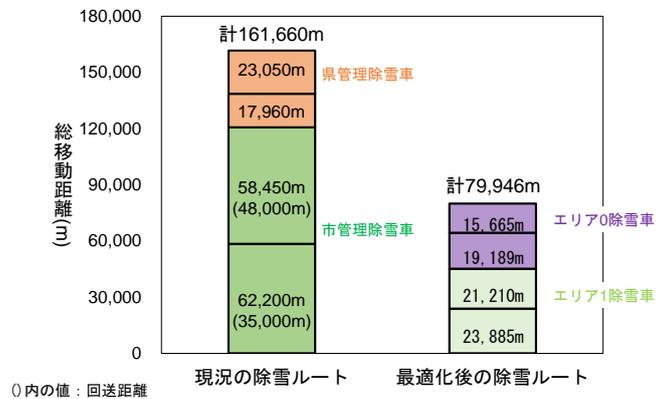


図2 除雪ST共有を行った場合の総移動距離の比較

## 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 —

河田剛毅<sup>1</sup>・永井悠都<sup>2</sup>・本間翔大<sup>2</sup>・上村靖司<sup>3</sup>

(1:長岡工業高等専門学校 2:長岡工業高等専門学校専攻科 3:長岡技術科学大学)

#### 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(河田ら, 2019)。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(河田ら, 2020)。今回はそれを適用して強度試験を行った。

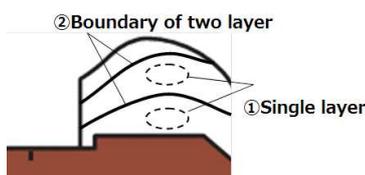


図1 調査対象箇所

#### 2. 実験方法

##### 2.1 試料雪

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4 mm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°Cの低温室で行った。単層の強度試験用に、内径270mm、厚さ40 mm、高さ1 m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300 mm×300 mm、厚さ40 mmの発泡角パイプ内に、まず1層目として高さ300 mmの雪を積み上げ、その7日後に2層目として高さ300 mmの雪を積み上げ、さらに境界面に約1 m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(60 mm×100 mmの長方形)に沿って粒度60のアルミニウム砥粒を0.2 mm程度の厚さで均一に撒いた。

発泡パイプの周囲は砕石で囲い、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。

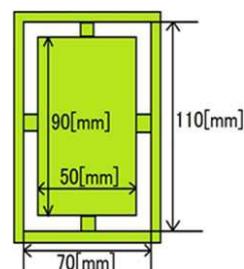


図2 砥粒を撒く型

#### 3. 結果

図3と図4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1 m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。

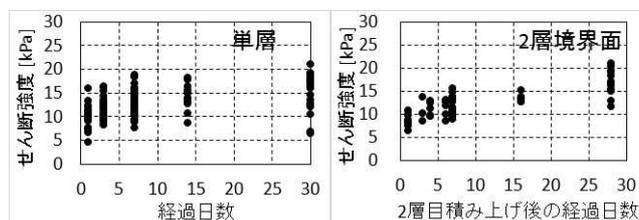


図3 単層、および雪層境界面のせん断強度と経過日数の関係

#### 文献

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.  
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.

## レーザー距離計による路面残雪深計測における表面下散乱現象

山賀康平<sup>1</sup>, ○平田拓巳<sup>1</sup>, 上村靖司<sup>2</sup>, 杉原幸信<sup>2</sup><sup>1</sup>長岡技術科学大学大学院 工学研究科 <sup>2</sup>長岡技術科学大学 機械創造工学専攻

## 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（消雪パイプ）は、比較的低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。しかし、地下水を過剰にくみ上げて地下水位を過度に低下させないために、無駄な散水を減らせる高精度の制御が必要である。

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上に削減され、運転時間の短縮につながることを示されている。

本研究では、路面における積雪有無の検知のみならず、その積雪深を計測し、積雪深によって精密に稼働判定する融雪システムの実用化を目指す。そのために、散水融雪装置が設置されている路面に残っている雪の深さ、すなわち「残雪深」を安価な汎用レーザー距離計を用いて精度良く計測する方法について検討する。

山賀ら(2020)は、汎用レーザー距離計で残雪深の計測実験を行い、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を報告した。本報告では、残雪深計測において確認されたバイアスが「表面下散乱現象」によって引き起こされていると考え、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. 路面積雪深計測実験

## 2.1 実験方法

散水融雪装置を積雪深で制御するには、5 cm 以下の積雪深を高精度（±1 cm）に測定することが求められる。そこでまずは、路面上の積雪深を正しく測定できるか、実際の計測環境を想定して測定実験を行った。本実験では路面上の模擬雪にレーザー距離計（SICK 社製 DT-35-BT15551）のレーザー光を照射し、測定された距離から積雪深を算出した。レーザー距離計は図1に示すように高さ5 m、角度30°の位置に設置した。レーザー距離計の設置高さとは実際の路面積雪深の計測環境と合わせた。含水率を変えて2種類を用意し、0～10 cmの1 cm刻みに積んだ。模擬路面は黒路面と白路面の2種類を用意した。

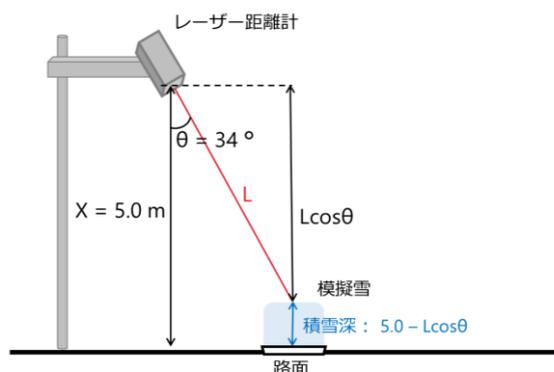
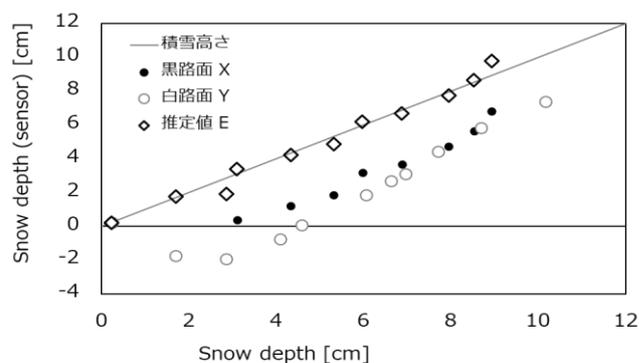


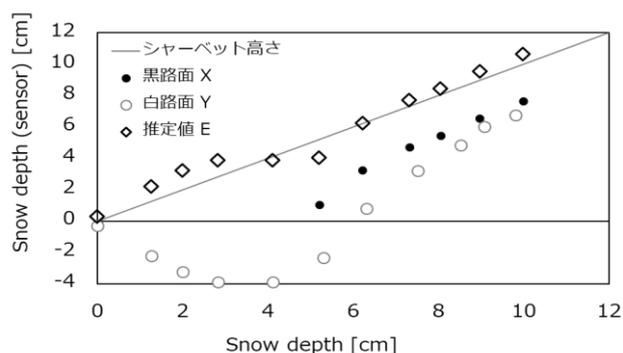
図1 路面積雪深計測実験の模式図

## 2.2 実験結果

計測実験の結果を図2に示す。実験の結果、積雪・シャーベット双方で積雪深測定値が直線で示した実際の積雪深よりも小さい値となった。このバイアスの大きさは積雪深と路面色によって変化し、白路面では積雪深4, 5 cm以下の積雪深測定値がマイナスの値になることも確認された。黒路面では2～4 cm以下の積雪深でレーザー光の反射強度が足りず、積雪深を測定できなかった。以上の結果により、レーザー距離計を用いて10 cm以下の積雪深を直接、精度良く測定するのは困難であることが分かった。



(a) 模擬積雪(含水率41%)



(b) シャーベット(含水率73%)

図2 異なる路面色における積雪深の測定結果と推定結果

### 3. 表面下散乱

#### 3.1 積雪面の表面下散乱現象

レーザー光が照射された模擬雪を横から見ると、図3のように積雪粒子内部にレーザー光が入り込んでいることが確認された。これは「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である。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残雪深の測定値が小さくなる(図4)。

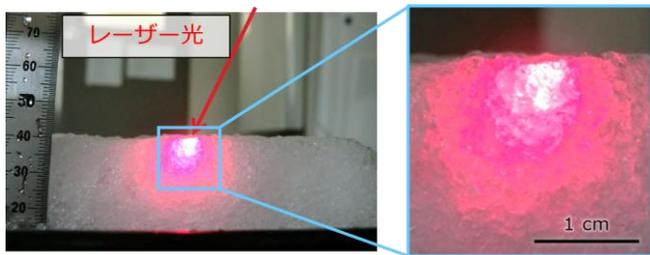


図3 表面下散乱を起こしたレーザー光の様子

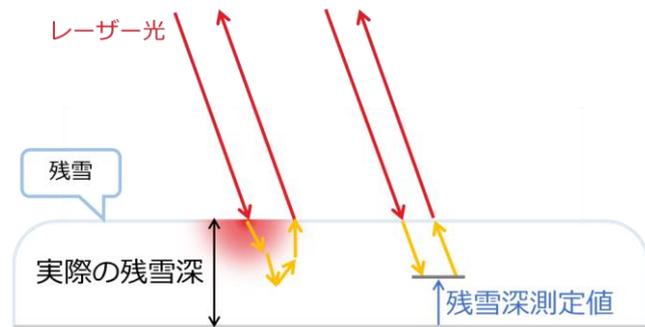


図4 表面下散乱現象と残雪深測定誤差の模式図

図2に示したとおり、5 cm以下の浅い残雪深での計測値は黒路面と白路面で明らかに異なる。このことから、残雪深が浅くなると、残雪深測定値に路面による影響が表れると考えられる。図5に表面下散乱による路面の影響を示す。レーザー光の光子が路面に達すると、黒路面では光子の吸収、白路面では光子の反射が起こる。黒路面では光子の一部が吸収されることで、反射強度が弱くなり、浅い残雪深が測定できなくなる。白路面ではレーザー光が表面下散乱を起こし、さらに白い路面で反射することで、計算によって導かれた残雪深測定値がマイナスになると考えられる。

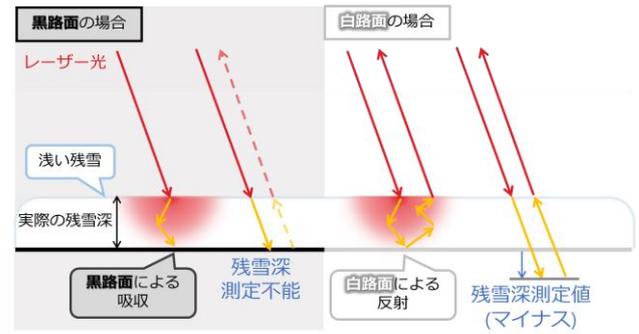


図5 表面下散乱と路面の影響

#### 3.2 モンテカルロ法による表面化散乱シミュレーション

雪などの散乱媒質に入射した光の伝播解析方法として、モンテカルロ法によるシミュレーションがある。これはヒトの皮膚などの散乱媒質中の光のふるまいを調べる手法として実績があり、積雪による光散乱の解析への適用例もある。本研究ではこのモンテカルロ法を用いたシミュレーションを用いて、残雪に入射したレーザー光のふるまいを調べる。モンテカルロ法 (Monte Carlo method, MC) 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6にシミュレーションの模式図を示す。

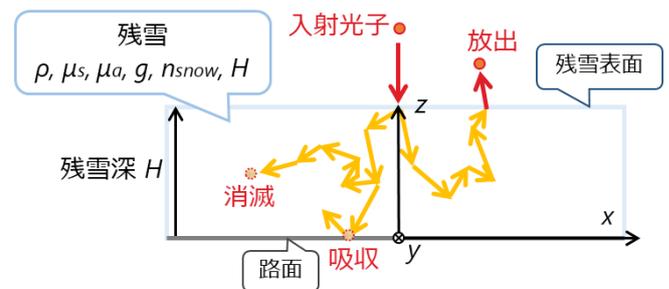


図6 モンテカルロ法による残雪内光子伝播シミュレーションの模式図

本シミュレーションにおいて、散乱媒質は残雪である。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。ここでは、残雪は光学特性が一樣で、 $z$ 方向は残雪深 $H$ を、 $x, y$ 方向は無限の広がり方を仮定する。図7に残雪内光子伝播シミュレーションのフローチャートを示す。原点から残雪に入射した単位エネルギー( $W=1$ )の光子は、内部で移動、減衰、散乱を繰り返し、最終的には消滅、あるいは残雪から放出される。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。減衰により光子のエネルギーがあるしきい値を下回った場合は、光子が消滅したとみなして計算を終了し、新たな光子を入射する。光子が残雪深  $H$  を超えて路面に接触する場合は、黒路面または白路面の反射率に基づいて吸収と反射の処理を行う。光子が残雪中で消滅せずに残雪表面から放出した場合は、光子の放出と伝播した距離を記録する。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見積もることができる。

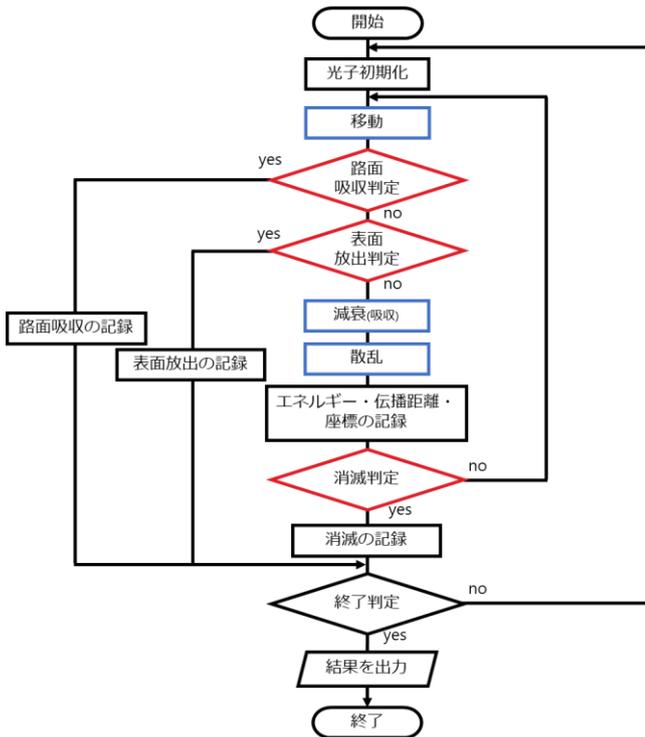


図7 残雪内光子伝播シミュレーションのフローチャート

### 3.3 シミュレーション結果

シミュレーションによって求めた放出光子の伝播距離の平均値について、残雪深と路面ごとに比較してグラフにプロットした結果を、図8に示す。

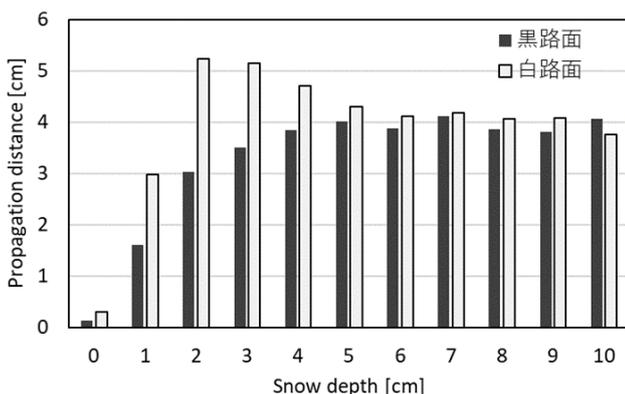


図8 残雪深と放出光子の残雪内伝播距離の関係

伝播距離は光子が積雪表面から入射して放出するまでの移動距離である。しかし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。すなわち伝播距離から残雪深測定値への変換式は(1)式の通りとなる。

$$\text{残雪深測定値} = \text{残雪深} - (\text{伝播距離}/2) \quad (1)$$

つまり、伝播距離が4.00 cmの場合、2.00 cmが残雪深測定値へのバイアスとなり、測定時の残雪深が8 cmの場合、残雪深測定値は6 cmとなる。図9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。四角形で示すプロットがシミュレーション結果、丸で示すプロットが実測値である。

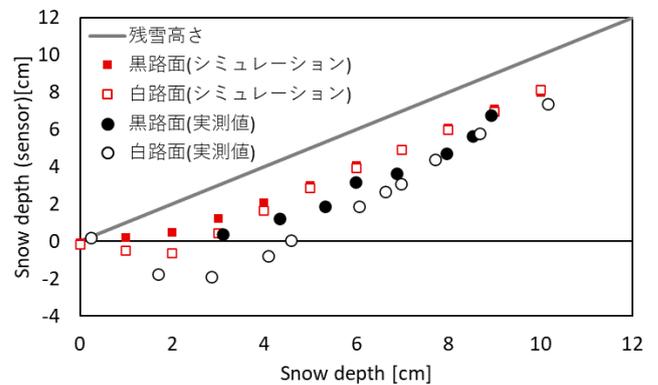


図9 シミュレーション結果と実測値の比較

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がわかる。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。

黒路面のプロットから、実測値で3cm以下の積雪深を測れたと仮定した場合、シミュレーション結果のように、残雪深が浅くなるにつれて測定値が残雪深0 cmに漸近すると考えられる。白路面のプロットを比較すると、実測値の方が、およそ5 cm以下となる浅い積雪深において、路面色の違いによる測定値の差が大きい。シミュレーション結果と実測値の間に見られる差は、残雪の実際の光学特性とシミュレーションで求めた値との違いによるものと考えられる。なおシャーベットについては、シャーベットの散乱係数と吸収係数が不明なため、今回はシミュレーションできなかった。残雪についても、散乱係数と吸収係数の実測値を用いてシミュレーションすれば、実測値と同じようなプロットが得られると考えられる。

## 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 0.13~5.23 cm の伝播距離を持っていることが確認できた。伝播距離から残雪深測定値を計算し、グラフにプロットしたところ、測定実験の実測値と同じように、残雪深が実際の値よりも小さくなるバイアスが確認できた。さらにおよそ 5cm 以下となる浅い残雪深において、黒路面と白路面で測定値に差が出ることを確認できた。表面下散乱によって光子が残雪内部を伝播すると、レーザー距離計による残雪深測定値が低くなることを確認された。シミュレーションによる調査の結果、残雪深測定値のバイアス、そして路面による浅い測定値の違いが、表面下散乱現象によって起こりうるということが明らかになった。

## 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.
- [3] Lihong Wang, Steven L.Jacques, Liqiong Zheng (1995) 「MCML - Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues」 Computer Methods and Programs in Biomedicine, 47, pp.131-146.
- [4] 原田康浩, 鳥羽啓太, 館山一孝, 神田淳, 大前宏和, 三宅 俊子 (2015) 「積雪による光散乱のモンテカルロシミュレーション解析」, 雪氷研究大会 (2015・松本) 講演要旨集, p.52.

## 雪による車両滞留発生前の気象変化の特徴

村田晴彦<sup>1</sup>・河島克久<sup>2</sup>

(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)

### 1. はじめに

近年、雪による大規模車両滞留が多発しており、長時間車内で待機することによる健康被害や道路の寸断による経済活動の停止などを誘発し、社会に大きな被害をもたらしている。このような大規模車両滞留を受けて、道路管理者は大雪時のチェーン規制や予防的通行止めなどの対策を行っている。これらの規制を最小限にとどめ、道路交通の安全・安定性を確保するためには気象情報から車両滞留の発生危険度を時空間的に推定・予測する手法を確立し、早期に集中的・効率的な除雪体制を整えるとともに、道路利用者への的確な情報提供を行うことが望まれる。そのためには過去の車両滞留事例を分析し、発生に影響する気象特性を解明することが不可欠である。一方で、過去の車両滞留事例の調査は十分には行われておらず、発生前の気象変化についてはわかっていない。そこで本研究では、過去の車両滞留事例を抽出し、発生前の気象変化の特徴の分析を行った。

### 2. 車両滞留事例の抽出

まず、2010年1月～2021年3月の期間に積雪地域で発生した車両滞留事例をインターネット上の新聞資料などを用いて検索し、「交通事故、雪崩、倒木による発生ではない」、「滞留台数や滞留距離などから総合的に判断し、比較的規模が大きい事例」、「発生場所と時間が明確」を判断基準として事例を抽出した。

次に抽出事例について発生地点近傍のアメダスもしくは県管理の道路気象テレメータの観測データの内、車両滞留の発生に影響すると考えられる降雪量、風速、気温の1時間値を用いて気象解析を行った。

### 3. 車両滞留の発生状況

新聞資料などから計47件の車両滞留事例が抽出された。その発生場所は北海道から山陰地方まで広く分布していた。発生した道路は、高速道路や国道といった広域的な交通や物流を担う幹線道路の割合が高く(94%)、また、発生月は厳冬期にあたる1, 2月に集中していた(74%)。

### 4. 車両滞留発生前の気象変化の特徴

各事例の気象特性を調べた結果、ほとんどの事例で発生の10～30時間前から降雪(「直前降雪」と呼ぶ)が始まっていたため、発生前24時間の累積降雪量に着目した結果、累積値が大きい事例と小さい事例が見られた。そこで、風速や気温の変化にも着目した結果、発生事例は大雪タイプ(31件)と累積降雪量は小さいが発生前の風速が大きい強風タイプ(16件)の2つに分類できることがわかった。以下にそれぞれのタイプの特徴を示す。

#### 4.1 大雪タイプの気象の特徴

大雪タイプは24時間累積降雪量が大きい事例で、その値は多くの事例で40 cm以上であった(図1(a))。また、他の気象要素については車両滞留の発生に関係すると考えられる直前降雪開始以降の変化に着目した結果、気温は0°C以下、風速は5 m s<sup>-1</sup>以下で推移していた。これらの特徴に加え、多数の事例で発生直前の6時間の間に4～13 cmの1時間降雪量を観測しており、連続的な降雪に加えて発生直前の強い降雪も車両滞留の発生に影響している可能性がある。

#### 4.2 強風タイプの気象の特徴

強風タイプは24時間累積降雪量が小さい事例で、5～40 cmで発生していた。また、風速については発生の6時間以上前から5 m s<sup>-1</sup>以上の強風状態が継続しているという特徴が見られた(図1(b))。気温は強風期間も含め直前降雪開始以降は0°C以下で推移していた。

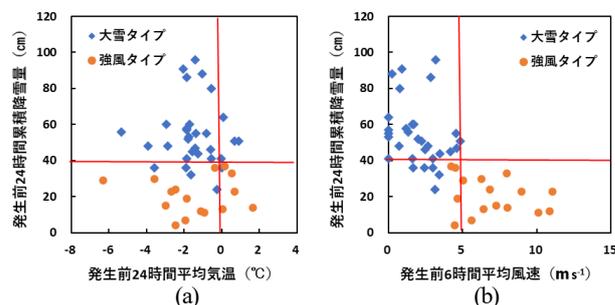


図1 前24時間累積降雪量と前24時間平均気温、前6時間平均風速との関係

#### 4.3 雪による車両滞留が発生しやすい気象条件

発生前の気象変化の特徴から雪による車両滞留が発生しやすい気象条件は以下の通りである。

大雪タイプ: 前24時間累積降雪量40 cm以上

: 前24時間平均気温0°C以下

強風タイプ: 前24時間累積降雪量5 cm以上40 cm未満

: 前24時間平均気温0°C以下

: 前6時間平均風速5 m s<sup>-1</sup>以上

### 5. まとめ

積雪地域を対象に過去の雪による車両滞留事例を分析した結果、発生前の気象変化の特徴として大雪と強風の2つのタイプがあり、それらは降雪量、気温、風速の変化によって特徴づけられることがわかった。また、車両滞留が発生しやすい気象条件と気象の実測値や予測値を比較することで、車両滞留の発生危険度を評価することができ、効率的かつ効果的な道路管理につながると考えられる。