2025 年 1~2 月 新潟県、福島県県境付近で発生した雪崩被害事例速報

○上石 勲¹・山口 悟¹ (1:防災科研雪氷技術センター)

1. はじめに

1

2025 年 1~2 月に新潟県と福島県境付近で雪崩が発生し、一部で被害が発生した事例と現地の被害事例を報告する.

- 2. 新潟県,福島県県境付近で雪崩被害の発生が確認された事例
 - 新潟県と福島県県境の近くで,報道や現地調査から雪崩被害の発生が確認さえた事例を図1に示す.



図1 2025/1-2 新潟県,福島県県境付近で雪崩被害が確認さえた事例 ①では、厳冬期に大規模な全層雪崩が発生し雪崩防護施設の一部が 破損した. ⑤⑥の雪崩事例は, 2 月の集中的な降雪時に発生した表層雪 ①新潟県長岡市栃尾 中地区 発生日 25/2? 全層雪崩・ 雪崩防護施設被害 ②新潟県魚沼市大白川 発生日 25/1/23 湿雪雪崩, 道路埋雪 ③福島県只見町 R252 出逢橋 発生日 25/2? 出逢橋流出 ④福島県南会津町国道 352 号タケナグラ沢 発生日 25/2/23 面発生乾雪表層雪崩·道路埋雪 ⑤福島県桧枝岐村下ノ台地区 発生日 25/2/9/AM11 乾雪表層雪崩 1軒住居被害 ⑥福島市本宮土湯温泉線 発生日 25/2/10 0340 発見 面発生乾雪表層雪崩·道路埋雪

崩と推定され,住宅被害や道路の通行止めなどの影響が出た.どの事例も人的被害は幸いにも無かった(図2).







図2 雪崩発生事例 左:①栃尾中地区,中:⑤桧枝岐村下ノ台地区,右:福島市本宮土湯温泉線

3. 降積雪状況

⑤の雪崩発生の2月9日の前には気象庁桧枝岐観測点では、5日間で積雪深が150cm程度増加していた(図3).また、 天気図やレーダーからも冬型が強まり、新潟県福島県県境あたりにも強い雪雲がかかっているのがわかる(図4).



図3 積雪, 降雪, 気象庁桧枝岐観測点(2025/2)



図4 天気図,気象レーダー(2025/2/9気象庁)

2025 年 3 月に白馬村源次郎沢で発生した大規模な湿雪表層雪崩(速報)

○勝山祐太¹・勝島隆史¹・竹内由香里¹・石川颯一郎²

(1:森林総合研究所十日町試験地 2:八方尾根スキーパトロール隊)

1. はじめに

2025年3月3日朝(正確な時刻は不明)に白馬村崩沢の東側に隣接する源次郎沢で大規模な湿雪表層雪崩が自然発生した.雪崩発生の前日に降雨が観測されており,rain-on-snowイベントをきっかけとして雪崩が発生した可能性がある.本講演では,この雪崩の現地調査の結果を報告する.

2. 方法

2025 年 3 月 10 日・11 日にドローンを使った写真測量を雪崩発生区と堆積区で行った.後処理キネマティック法 で写真データの正確な位置情報を求めた後に,SfM 処理で地表面モデル(DSM)とオルソ画像を作成した.国土 地理院 5m メッシュの数値標高モデル(DEM)と DSM との差分から積雪深分布を推定した.また,破断面で積雪 層構造の観察や破断面の厚さ,積雪水量,積雪深を計測した(図1左).雪崩堆積区では,測深棒の貫入抵抗の変 化によってデブリの厚さと自然積雪深をそれぞれ区別して複数個所計測した.また,デブリの密度についても計測 した.

3. 結果と考察

目視や写真測量の結果から発生区は複数存在し、主とする箇所は斜度約35°の南東向き斜面の標高1530m付近 を上端とする幅約360mの破断面を形成していた(図1左).2つの積雪層がすべり面となっており、それぞれ雪 面から98cmと112cmの深さに位置していた.これら積雪層は粒度の異なるざらめ雪の境界になっていた.このよ うな層境界は帯水層となりやすく、雪崩発生前の降雨に伴う浸透水によって急速に積雪不安定化が進み、雪崩発生 に至った可能性がある(cf. Wever et al., 2018).

雪崩は水平距離で 1660m 流下し,標高 860m の沢出会いにまで達していた. 堆積区末端から発生区上端を見上 げた見通し角は 22°だった。これは,表層雪崩の見通し角の限界値として知られる高橋の 18°則よりも大きく、全 層雪崩の見通し角の限界値の 24°よりも小さい値だった. ドローンによる写真測量から得られた堆積区の積雪深か ら測深棒で調べた自然積雪深 1.8m を差し引いてデブリ厚さを計算したところ,多いところで 8m を超える厚さの デブリが形成されており(図 1 右),総体積は 9.7×10⁴ m³だった. これに現地で計測したデブリの密度 629 kg/m³ を乗じると総重量は 6.1×10⁷ kg となり、size-4 に相当する規模の雪崩だった(McClung and Schaerer, 2006).



図1 (左)主とする雪崩発生区のオルソ画像. 破断面の観察を行った場所を〇印で示した.(右)堆積区のデブリ厚さの分布. 測深棒でデブリ厚さを計測した位置を〇印で示した. 標高 5m/50m 毎に細い/太い黒線で等高線を描いた.

文献

- Wever, N., Vera Valero, C., and Techel, F. (2018): Coupled snow cover and avalanche dynamics simulations to evaluate wet snow avalanche activity. J. Geophys. Res.: Earth Surface, 123, 1772–1796.
- D. McClung and P. Schaerer (2006): The Avalanche Handbook. 3rd Edition, Mountaineers Books.

今冬(2024/2025 冬期)の柵口地区降積雪状況と雪崩発生

○渡辺伸一・榊直人国立研究開発法人 土木研究所

1. はじめに

当センターでは昭和61年に13名が亡くなる雪崩災害が発生した 糸魚川市柵口地区(権現岳東側斜面,図1参照)において,継続し て雪崩の観測を実施している(秋山,2021).これまでカメラや地 震計,積雪計などの機器を山麓に設置し,雪崩発生の有無,発生時 の気象条件の把握を行ってきた.観測データは雪崩に関する研究の 基盤データとして利用している.

本報告では、今冬期の柵口地区での気象と雪崩発生状況を示すと ともに、昨年報告した乾雪雪崩の発生条件で評価した結果について も報告する.

2. 調査方法

2.1 雪崩発生の把握

図1 権現岳東側斜面 2025/2/25 撮影

生区

不明

不明 不明

不明

表1 近年4冬期に確認した流下長の長い乾雪雪崩

雪崩の発生は10分毎の静止画を記録した「自動撮影カメラ」画像と、1秒間隔のコマ送り「動画カメラ」画像 に加え、地震計の計測データより把握した. 乾雪・湿雪の雪崩種別の判別は「煙り型」の運動形態を示すものを「乾 雪雪崩」とした. 加えて運動形態の観察はできなかったものの、降雪中または降雪直後に発生し発生区の気温が氷 点下で推移していると推測されたものについても「乾雪雪崩」と判断した. また、「流れ型」の運動形態を示すも のを「湿雪雪崩」とした.

表1は近年4冬期に確認した流下長の長い乾雪 雪崩で,昨年度解析した乾雪雪崩発生条件の検討 の対象雪崩である(解析対象だった2023年2月 16日の雪崩は見直しの結果対象から外した).こ こに記した雪崩は何れも大雪積を乗り越え1号 誘導工前を流下している(推測を含む).

2.2 昨年度解析した乾雪雪崩発生条件での評価

昨年度,過去4冬期の雪崩発生データと新潟県田麦平観測所の気象観測値を用いて乾雪雪崩発生条件の検討を実施した(渡辺ら,2024).柵口では山麓で積雪深,気温等の観測を行っているが,雪崩等により欠測となることも 多く,安定的に観測値が得られることも重要であることから,約 1.6km 東側に位置する新潟県田麦平観測所の気 温と積雪深・時間降雪量(1時間毎の積雪深差)の観測値を用いることとした.解析された乾雪雪崩発生条件を以 下に示す(対象雪崩を見直したため再解析を実施している).

2023/24

2024年1月13日

2024年1月14F

17:16

乾雪雪崩

2日間積雪増加深が41cm以上,3日間積雪増加深が42cm以上,1日間累計降雪量が24cm以上,

1日間平均気温が-0.2℃以下,3日間平均気温が-0.1℃以下

これらの指標の値がこのしきい値を超えると乾雪雪崩が発生する可能性が高いものとして評価を行い、4 冬期で 15 期間が評価され、捕捉率は100%、的中率は40%(6÷15)という結果を得ている.これを今冬期の気象データ に適用して評価を行う.

3. 調査結果

3.1 雪崩発生と発生時の気象

上記の方法で今冬期(3月13日現在)確認した雪崩の発生回数は19回であった(表2).19回のうち8回を「乾雪雪崩」,11回を「湿雪雪崩」と判断した.この回数には小規模の雪崩は含んでいない.

図2は9時の積雪深(山麓・田麦平)9時の気温(山麓)の時系列変化である.1月末頃からまとまった降雪が 複数回発生,2月下旬には5日連続で積雪が500cmを超える3年ぶりの大雪年となった.

今冬期は積雪が多い時期があったものの,大雪積を越えて1号誘導工前を流下する流下距離の長い規模の大きな 雪崩は確認できなかった.



3

© 2025 (公社)日本雪氷学会

表2 今冬期発生を確認した雪崩



3.2 昨年度解析した乾雪雪崩発生条件での評価結果

今冬の田麦平観測所の観測値を使用し上記しきい値で評価すると,乾雪雪崩が発生する可能性が高い期間として 4期間が評価された(図3).昨年度の検討実施時に解析対象とした大雪積を越えて1号誘導工前を流下する流下距 離の長い雪崩は確認できていないため,4評価期間は全て空振りとなった.



図3 乾雪雪崩発生条件の評価 2024/25 冬期

柵口山麓観測点と田麦平観測所の積雪深の変化を比較(図2参照)すると、今冬は2/1以前(積雪が150cmに達する前)は田麦平の降雪量は山麓の概ね半分程度であったが、2/1以降(積雪が150cm以上)は山麓と同程度の降雪量を記録するようになった。

全て空振りとなったのは,発生条件を解析した期間(2020/21 冬期~2023/24 冬期の 4 冬期)と異なり,今冬 1 月末以降の田麦平の雪の降り方(降雪量)が,標高の高い山麓と同程度となる日が多かったことから,発生可能性 がより高く評価されたことも影響していると推測される.

4. まとめ

・今冬期,柵口地区(権現岳東側斜面)では8回の「乾雪雪崩」,11回の「湿雪雪崩」の発生を確認した.

- ・今冬期は積雪が多い時期があったものの、大雪積を越えて1号誘導工前を流下する流下距離の長い規模の大きな 雪崩は確認できなかった。
- ・田麦平の今冬期の観測値を使用し、昨年度解析した権現岳東側斜面で発生する乾雪雪崩発生条件を適用して乾雪 雪崩が発生する可能性が高い期間を評価すると、4期間が評価される結果になった(全て空振り).

文献

秋山一弥(2021):動態観測による雪崩の発生状況と発生規模・発生数の関係,日本工学会論文集,37(3),37-39 渡辺伸一,吉柳岳志,石井靖雄(2024):糸魚川市柵口地区での乾雪雪崩発生条件の検討,雪氷北信越,第44号, 13-14

渡辺伸一,吉柳岳志,石井靖雄(2024):乾雪雪崩発生条件の検討〜糸魚川市柵口地区での観測結果より〜,雪氷 研究大会(2024・長岡)講演要旨集,153

水文観測結果の雪崩災害警戒指標としての活用について

○藤平 大 国立研究開発法人 土木研究所

1. はじめに

4

雪崩災害については,発生するおそれがあると予想したときに気象台によりなだれ注意報として発表されている. 一方,降雨に起因する土石流や地すべり災害については,気象台と都道県庁が連携して,降雨量を指標として土砂 災害警戒情報が発表され,市町村が避難勧告を発表するなどの目安として活用されている.後者と比較して前者は, 住民の避難を訴える指標としては切迫性を明瞭に示すことができていない.

なだれ注意報は、新潟地方気象台の場合には、① 24 時間降雪の深さが 50cm 以上で気温の変化が大きい場合. または、② 積雪が 50cm 以上で最高気温が 8℃以上になるか、日降水量 20mm 以上の降雨がある場合に、発表されている.おおむね①は乾雪による雪崩、②湿雪による雪崩に対応しているものと思われる.積雪が多い地方では 気温が高くなる時期には②に連日該当することになり、予報精度や実質的な効果は低くなる.

雪崩に関する気象・積雪情報については、特に、気温と積雪量の関係が深いと思われる.気温と積雪量は標高との関係が深いことが一般に知られている.そこで、標高ごとに雪崩の発生危険度示すことができないかを検討していきたい.

本報告では、上記の狙いと類似した事例として過去に、融雪地すべりに関して、標高ごとに発生危険度を検討した事例を紹介する.

2. 調査方法

多雪地における地すべりについては、一般的な傾向とし て、融雪期に地下水位が上昇し、消雪直後に年最高地下推 移を記録する傾向があり、融雪水により地すべりが多発さ れると考えられている.このため、地すべり地内での地下 水変動等を観測することは地すべり活動を予測するうえで 極めて重要である.しかし、すべての地すべり地の地すべ り面に作用する地下水位を観測し、地すべり発生の可能性 を評価することは、経済性の観点などにより現実には困難 である.

一方,雪解けにより,ダム流入量や渓流水位が上昇する ことは経験的によく知られている.ダム流入量や渓流水位 は上流域の融雪量の増加に対応するものと考えられ,広域 的な地すべり発生危険度を示す指標として活用できる可能 性がある.

2. 1 調查対象地域概要

調査は、図1に示す新潟県中越地方を対象とし、対象期 間を2003年12月1日~2013年11月30日とし、地すべり 災害の発生時刻と渓流水位、流量との関係について分析を おこなった.表1に観測点及び流域の特徴をまとめた.地 すべり災害データ(発生件数と発生時刻)は国土交通省砂 防部が取りまとめたデータを用いた.

2. 2 調査手法

調査では、降雨やダム、渓流への流入と地すべり災害が 発生するまでの間には、時間の遅れ(地すべり性の変位が



図-1 分析に利用した水文観測点の位置(地すべり 災害発生箇所は2003年12月1日~2013年11月 30日に発生したものを表示)

継続して災害と認 識される規模に拡 大するまでの時間 や巡視等によりそ の現象を発見する までの時間)が生 じることを考慮し て,一定の継続時 間 (N 時間) にお ける各観測データ (渓流水位,流量, ダム流入量,降水 量)の積算値求め、 それぞれの偏差を 求めた. 次いで, 観測データごとに, 年平均超過日数 D が最少となるDmin 及び超過日数が最 小となる積算時間 Nmin を求めた(表 2).また表2では、 各観測データの積 算 N 時間ごとに, 期間中に発生した 地すべり災害捕捉 率 70%を補足でき る偏差 σ70 について も求めた.

3. 調査結果

図 2 に示す通り, 偏差が大きいとき に地すべり災害が

発生する傾向が確認できた.また、図1に赤丸で表示した地すべり災害発生17か所は、標高200m以上の箇所で 12件発生しており、通年の全災害発生個所では標高200m未満が約50%超を示すことを考慮すると、この時期に は標高200m以上の高標高地域において地すべりが多く発生している傾向が認められた.

4. まとめ

今後の雪崩研究の参考として、雪崩の類似性である標高依存の特性などをもつ融雪地すべりに関する事例をご紹介させていただいた.なお、本報告は、藤平ら(2016)を改変して作成したものです.

参考文献

1) 藤平大,鳥海貴裕,杉本宏之,桂真也,石井靖雄(2016):水文観測結果の地すべり災害警戒指標としての活用, 土木技術資料,58-2,20-23

表-1 観測点及び流域の特徴

観測点名	流域面積 (km²)	最高標高 (m)	観測点標高 (E.L.m)	流域の地質
三国川ダム	76.2	2085	394.0	深成岩類
大谷ダム	56.2	1350	184.1	火山岩類
大倉水位観測所	37.2	2076	237.3	付加コンプレックス
清水水位観測所	28.0	1900	576.5	深成岩類
塩沢雨量観測所	-	-		-

表-2 70%捕捉偏差と偏差日数

観測データ	超過日数が最小となる積算時間 Nmin	70%捕捉偏差 σ ₇₀	最小超過日数 Dmin(日/年)
三国川ダム流入量	48時間	0.83	55
大谷ダム流入量	72時間	0.36	64
清水水位	48時間	0.47	80
大倉水位	48時間	1.16	48
大倉流量	48時間	0.94	51
塩沢降水量	12時間	-0.36	153



斜面上の積雪状況を考慮した推定雪崩発生区の GIS 上における抽出へ向けた試み

- 糸魚川市柵口地区権現岳を例として-

○榊直人・渡辺伸一・藤平大[,] 国立研究開発法人 土木研究所

1. 背景

スイス(Bühler et al. (2013); Veitinger et al. (2016); Bühler et al. (2018); Bühler et al. (2022))やノルウェー(Issler et al. (2023))では、雪崩によるハザードエリアを作成すること等を目的として、特に雪崩発生の可能性の高い箇所(以下「推定雪崩発生区」と呼ぶ)を GIS 上で抽出する試みが行われてきている.日本においても近年こうした動きがあり(明石ら,2024),抽出に向けた動きが活発になりつつある.当研究所においても推定雪崩発生区の抽出へ向け、これまでUAVを用いた柵口地区における実際の雪崩発生区の調査を実施してきている(榊ら,2024).しかし、これまで斜面におけるその時々の積雪状況を考慮し、推定雪崩発生区を抽出する例は少なくとも日本では例がない.近年の気候変動により、日本においても局地的な「ドカ雪」が増える地域の存在が示唆されていることを考慮すれば、その都度ごとに斜面の積雪状況を踏まえた推定雪崩発生区を把握することが必要である.

本発表では、雪崩によるハザードエリアの提示を見据えた、斜面の積雪状況を踏まえた推定雪崩発生区を抽出す るプログラムの開発に向け、まずは先行研究と同様に、元地形データから推定雪崩発生区を抽出するプログラムを 作成することを目指した.なお、当研究所がこれまで取り組んできた UAV 撮影による雪崩斜面の3次元データに ついても活用する.

2. 手法

本研究の対象地として、雪崩が頻発することで知られる糸 魚川市柵口地区の権現岳の東側斜面を選定した(図1).山頂 (標高1104m)から標高600m付近までが急な斜面となってい る.その急斜面で雪崩が頻発する.また、標高600~250m付近 にかけては緩斜面となっている.また、権現岳には土木研究 所の雪崩観測サイトがあり、標高520m付近に、雪崩の発生区 から堆積区までを記録するカメラ(10分ごとの静止画・1秒 ごとのコマ送り動画)を設置しており、加えて雪崩の振動を 記録する地震計、積雪深や気温も計測している.標高290mに も東側斜面全体を見渡せるカメラ(1秒ごとのコマ送り動画) を設置し、温湿度計等の気象観測についても実施している. さらに、RTK-UAVによる当該斜面の自動航行による地形計測 を定期的に実施している.



図1 権現岳の東側斜面の全景 (2025年2月3日10時5分ごろ撮影)

本研究では, Bühler et al. (2013) が開発したアルゴリズム

をベースに元地形データを処理した.元地形データとして,松本砂防事務所が平成25年度に撮影したLPデータ (1mメッシュ)を使用した.撮影日は平成25年12月9日である.元地形のLPデータに対して,勾配・曲率・ 粗度の閾値を設定し,その条件を満たす箇所を推定雪崩発生区のポリゴンとして抽出する.勾配は,28度から60 度を満たす範囲とした.曲率は、1m⁻¹以下を満たす範囲とした.また,粗度は、0.03以下を満たす範囲とした.こ れらの閾値はBühler *et al.* (2013)と同様の値を採用した.これらの抽出には、Esri 社の ArcGIS pro 3.4.3 を用いた。

また, Bühler et al. (2013) は植生が存在する箇所を推定雪崩発生区から除外していたが、判断する方法として、 正規化植生指数あるいは植生情報が記載された GIS データをもとにしていた.本研究においては、LP 測定日にマ ルチスペクトル画像の取得を行っていないこと、及び当該斜面における植生に関する GIS 情報は存在しないこと から、植生の存在の判断として、2024 年 2 月 13 日に UAV で撮影したオルソ画像より植生が存在する箇所を判読 し、そこの箇所を推定雪崩発生区から除外することとした.

面積の大きな推定雪崩発生区となったポリゴンに関しては Bühler et al. (2013) と同様に ArcGIS の flow direction という関数を用いて 8 つの流れ方向ごとに分解した.分解した後は、隣接しかつ流れ方向が隣り合う推定雪崩発生 区のポリゴン同士を合成し、1 つの推定雪崩発生区とした.また、推定雪崩発生区抽出のプロセス中、面積の小さ

なポリゴンは除外した.加えて,隙間の空いた推定雪崩発生区の場合,隙間を埋めた上で推定雪崩発生区とした. 3.結果

2.の手法により,抽出した推定雪崩発生区は図2のようになった.背景のオルソ画像は,2024年2月13日であり,ポリゴンで表示されたものがBühler *et al.* (2013)のアルゴリズムをもとに抽出した推定雪崩発生区である. 全部で88個抽出された.

本実装の定性的な validation として、柵口地区において、2022-23 冬期から 2023-24 冬期において実際に観測され た実際の雪崩発生区と重ね合わせた.図2の紫、黄土、緑、黄、青、赤色の線で囲われた箇所が、雪崩発生前後に おいて UAV で撮影した画像から SfM 処理して得られた3次元データをそれぞれ2時期比較した結果から得られた 雪崩発生区である.それぞれ 2023 年 2 月 28 日、2023 年 3 月 1 日、2024 年 1 月 18 日、2024 年 1 月 19 日、2024 年 2 月 18 日、2024 年 2 月 19 日に発生している.UAV 観測によって得られた実際の雪崩発生区と、Bühler *et al.* (2013) の手法をもとに抽出した推定雪崩発生区はある程度重なり合っていることが確認された.本アルゴリズムが問題な く作動していることがわかる.

4. まとめ

本研究では、その時々の積雪状況を反映した推定雪崩発生区抽出手法を開発することを念頭に、まずは、地形的 特徴のみから推定雪崩発生区を抽出する手法を実装させることを目指した.アルゴリズムは既往の研究のものをベ ースとした.対象とした場所は、糸魚川市柵口地区の権現岳東側斜面とした.得られた推定雪崩発生区のポリゴン は88 個であった.また、抽出した推定雪崩発生区の正当性を検証するために、柵口地区において実際に観測され た雪崩発生区の位置と比較した.その結果、抽出した推定雪崩発生区は、ある程度実際に観測された雪崩発生区の 位置と重なった.したがって、今回実装したアルゴリズムは正しく機能していることが保証された.

今後の展望として,積雪状況を加味するアルゴリズムを追加する予定である.湿雪雪崩を対象として,融雪量を 別途計算したうえで,UAVで計測した斜面の3次元モデルから積雪深を算出し,含水率を推定雪崩発生区ごとに 計算したいと考えている.含水率の大小により,今回得られたような地形条件から算出した推定雪崩発生区を絞り 込むことを想定している.



図2 権現岳東側斜面において抽出された推定雪崩発生区ポリゴンと実際に観測された雪崩発生区(背景:2024年2月13日 撮影のオルソ画像)

文献

- 明石亜子,砂子宗次郎,田邊章洋,新屋啓文(2024):数値標高モデルから潜在的な雪崩発生区を推定する手法の確立. 雪氷研究大会(2024・長岡)講演要旨集,133.
- Bühler, Y., Kumar, S., Veitinger J., Christen M., Stoffel A. and Suehmani (2013): Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **13**, 1321-1335.
- Veitinger J., Purves R. S. and Sovilla B. (2016): Potential slab avalanche release area identification from estimated winter terrain: a multi-scale, fuzzy logic approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 2211-2225.
- Bühler, Y., von Rickenbach, D., Stoffel A., Margreth, S., Stoffel L. and Christen M. (2018): Automated snow avalanche release area delineation – validation of existing algorithms and proposition of a new object-based approach for large-scale hazard indication mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 3235-3251.
- Bühler, Y., Bebi, P., Christen M., Margreth, S., Stoffel L., Stoffel A., Marty C., Schmucki, G., Caviezel, A., Kühne R., Wohlwend S. and Bartelt, P. (2022): Automated avalanche hazard indication mapping on a statewide scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 1825-1843.
- Issler, D., Gisnås K. G., Gauer P., Glimsdal S., Domaas U. and Sverdrup-Thygeson K. (2023): NAKSIN a New Approach to Snow Avalanche Hzard Idication Mpping in Norway. Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=4530311.
- 榊直人,高原晃宙,渡辺伸一,吉栁岳志(2024):新潟県糸魚川市柵口区で発生した雪崩事例に対する UAV-SfM 解析. 雪氷研究大会(2024・長岡)講演要旨集,14.

天狗山・国見岳で発生した巨大雪崩

○飯田 肇¹・福井幸太郎¹
 (1:富山県立山カルデラ砂防博物館)

1. はじめに

2024 年 3 月 24 日,北アルプス立山連峰の天狗山(2581m)・国見岳(2620m)において,幅約 1kmの破断面を 持つ巨大雪崩が発生した.この地域で発生した雪崩としては最大級のものと考えられる.同日,近隣の室堂平で積 雪断面観測を実施したので,その結果とあわせて雪崩の規模,発生要因等について検討した.

2. 雪崩の規模

図1に、雪崩発生地域の写真を示す、雪崩は①国見岳北東斜面、②天狗山北東斜面、③天狗山西斜面の3地域で 短期間に発生した.また、雪崩発生地域の様子を見ると、破断面は天狗山北東斜面のほぼ全域に広がる巨大なもの で、雪崩規模の大きさが示唆される.このうち②天狗山北東斜面の雪崩について、雪崩発生の約1ヶ月後の4月26 日にドローンによるレザー測量を実施した.図2に測量結果を示す.図より、破断面の幅は約1kmにも達しほぼ 天狗山北東斜面を覆いつくしている巨大なものだった.破断面の厚さは最大で1.1mであった.また、破断面から デブリ末端までの直線距離は最大で約300mに達した.



図1 雪崩発生地域.国見岳北東斜面①と天狗山北東斜面②に顕著な破断面がみられる.



図2 天狗山北東斜面の雪崩跡. 稜線(下側)直下の斜面に幅約1kmにわたり顕著な破断面(赤点線)が続く.

3. 積雪断面観測結果と雪崩発生要因

図3に、付近の室堂平(2450m)で3月24日に実施された積雪断面観測結果の一部を示す.図より、雪面より約1m下部に厚さ10~15cmの顕著なあられ層が存在した.あられの粒径は2~4mmで厚さは10~15cmに達した. 積雪上層で他に雪崩の弱層となる可能性のある層が存在しないこと,破断面の厚さとあられ層の位置に良い相関があることより、巨大雪崩は厚いあられ層が弱層となり発生した可能性が高いと考えられる.

しかし、一般的にあられ層は比較的狭い範囲に不均一に堆積するといわれている。今回の雪崩は、顕著な破断面 が見られ走路斜面がきれいに磨かれていたことから弱層を伴う面発生表層雪崩と考えられるが、弱層の形成範囲が 広大であることから、雪崩発生の要因となったのがあられ層の弱層だったかどうかについては、さらに気象面から の検討が必要である(石坂他、2025)。



図3 室堂平における積雪断面観測結果

雪面から 1m 下部に幅 10~15cm, 粒径 1~4mm に達する顕著なあられ層が存在する.

4. 引用

石坂雅昭,杉浦幸之助,飯田肇(2025): 霰による弱層をもたらす降雪の特徴とその検出手法-2024年3月の 立山での霰弱層に起因する広範囲の雪崩に関連して-. 2025年度日本雪氷学会北信越支部研究発表会予稿集.

霰による弱層をもたらす降雪の特徴とその検出手法 -2024年3月の立山での霰弱層に起因する広範囲の雪崩に関連して

石坂雅昭1・杉浦幸之助2・飯田肇3

(1:防災科研客員 2:富山大学 3:富山県立山カルデラ砂防博物館)

1. はじめに

7

2024年3月24日,北アルプス立山連峰の天狗山, 国見岳山頂直下で広範囲に起きた雪崩が確認され た.同日室堂平で行った断面観測では,直径2~ 4mm以上の大きな霰を含む霰層(厚さ10~15cm) が観測され,本雪崩がこの霰層に起因する可能性が が推測された(飯田ほか,2025).本稿はこの雪崩 の要因となった大きな霰をもたらした降雪の観測と 検出手法について述べる.

2. 観測場所と機器

降雪観測は立山カルデラ砂防博物館に設置された 富山大学所有の光学式ディスドロメーターLPMによ るものである.観測場所の博物館は雪崩現場とおよ そ10km離れた西側山麓に位置する(図1黒丸). 冬季の雪雲は一般に北西ないし西からもたらされる ことから,観測場所を通り雪崩現場を通過するとい う経路を通ることが多い.ただ,標高は雪崩現場の およそ25000mに対して観測場所の標高は約500mで あり,高標高の現場では地形上昇によってより多く の降雨・降雪が生じることは十分考えられる.

3. 大きな霰降雪の検出方法

降雪粒子は分単位でも数が多くかつ大きさ種類も 多様である.このような降雪に対してIshizaka et. al (2013)は、一定期間に観測される粒子の粒径、落 下速度を用いてその間の主要な降雪の種類を同定す る指標CMF(Centert of Mass Flux distribution)を導 入した.CMFは一定期間に観測された降雪粒子の 降水寄与(mass flux)で重み付けした平均の粒径と



図1雪崩現場と降雪観測場所(立山カルデラ砂防博物館).



図2 3月1日から雪崩発生日 (3/24) までのの5分間 のCMF (黒点:粒径・落下速度) と「大きな霰を含む 降雪」として設定した領域(薄い赤色).



落下速度であり,本指標を用いることによって粒 径・落下速度関係から当該期間の降水量寄与を代表 する降雪の粒径と落下速度及び種類を知ることがで きる.

図2は3月1日から雪崩が確認された3月24日まで のLPM観測から得られた5分毎のCMFと代表的な霰 の粒径・落下速度曲線(Locatelli and Hobbs, 1974) である.雨も含め様々な降水があったことがわか る.ここで大きな霰を含む降雪(以下,霰降雪)が あった期間を検出するため霰降雪と推定される場合 のCMFの領域を設定した.それは図2の中の薄い 赤色の領域で,粒径が2mm以上,かつばらつきを考 慮して塊状霰(Lump graupel)より2割速度が大き く紡錘状霰(Conicl graupel)より2割速度が小さい 範囲が設定されている.

図3は5分毎のCMFから霰降雪(黒)とそれ以外 の降雪・降水(灰色)を区分し時間相当の降雪強度 で示したグラフである.3月13日と同20日にまと まった霰降雪があったことがわかるが、中でも20日 の降雪は強度が大きくかつ継続時間も長いことか ら、雪崩をもたらした霰層の形成に関係した降雪で あると推定された.

4. 観測された霰とCMF

細かく見ると3月20日の大きな霰を含む降雪は12 時から翌21日0時までの間にもたらされていた.図 4はその期間の5分毎のCMFの分布である.多くが 大きな霰領域に観測されていることがわかる.図で 最も降雪強度が大きかった5分間は20日19時50分か らの5分間(矢印)で観測された粒子数は34392で ああった.その分布をLPMのクラス区分毎の数濃度



図4 3月20日12時から翌21日0時までの5分毎の CMF. 薄赤色は大きな霰降雪と指定した領域.



図5 LPM が観測した3/20 19:50 前5分間の降 雪の粒径と落下速度の数濃度分布.



図6 図5の粒子分布から求めた質量フラックス分布 とCMF.

分布で示すと図5のようになる.小さな粒径では観 測機器特有のエラー(雨より落下速度が大きいも の)を含むが確かに4から5mmを超える大きな霰 も降ったことがわかる.本分布に対してCMFを求 めるために作成したLPM用の推定質量分布図 (mass chart:補遺図11参照)を用いて各区分(ビ ン)の質量フラックス(降水量)分布とそれで重み 付けした平均の粒径・落下速度すなわちCMF(白 丸)を表したものが図6である.紡錘状から塊状霰 の落下速度をもつ4~5mmから,さらにそれを上 回る大きな粒径の霰粒子がこの間の降水に寄与して いたことがわかる.

5. 霰層の厚さの推定

本報告で霰降雪期間として抽出された3月20日の 午後に形成された霰層の厚さを推定を試みる.この



期間の降水量が推定されているので密度が分かれば その期間の積雪=層厚が計算できる。ここでは5分 間の降雪のCMFから密度を推定する手法を用いて 求めた (Ishizaka et. al, 2016)). 図7には集中的な 霰降雪が続いた3月20日の12時から翌21日0時の間の 降水強度(棒線)とCMFから求めた推定密度 (+),そして密度と降水量から求めた新雪層の厚 さの累積(実線)を示した。密度は大きい時で200 から250kg/m³, この期間の平均では125kg/m³で, 圧 密を考慮せずに求めた霰層の厚さは22.4cmとなっ た。図8にその推定された霰層の密度成層の様子を 示した.本推定の霰層の厚さは現場での観測10~ 15cmより厚いが、圧密を考慮していないことも要 因の一つと考えられる。それでも相当のまとまった 霰層が形成されたことが推定できる。また、その成 層は図8に示すようにさまざま密度からなり、かつ 大きい密度は大きな霰に対応することから、大小の 霰が複雑入り組んだ構造を持つことがわかる. その

ことが霰が弱層と なる要因の一つと 思われるが,詳し い議論は別に検討 する必要がある. 6. 大きな霰をも たらした降雪時の 気象

最後に参考のた めに本事象時の気 象場について簡単 に触れる.大きな 霰をもたらした時 の降雪は上空に寒 気を伴った低気圧 が日本海から日本



図8 霰層の推定密度成層.濃い色ほど 大きい霰を含み密度が大きい.

の東に通過した際のものであった(図9). この期 間の気象庁レーダー画像のスナップショットでも霰 が観測される時によく見られる強い反射強度を示す 領域(黒色)が多数認められ,この時の低気圧の通 過に伴う降水・降雪には大きな霰を含む雲域が含ま れ,その一部が現場付近を通り過ぎたと考えられ る.



図 9 2024年3月20日21時の天気図.



図10 2024年3月20日19時50分の気象庁レーダーの反射強 度.○は博物館の所在地点.

6. 終わりに

立山連峰の国見岳周辺から天狗山などにかけて広 範囲の雪崩が確認され、後に大きな霰を含む積雪層 が観測されたことから、本雪崩が霰に起因する弱層 によって生じた可能性が推測された。ここでは、雪 崩のあった山岳の麓に位置する立山カルデラ砂防博 物館に設置した光学式ディスドロメータの観測か ら,本雪崩をもたらすような大きな霰を含む降雪の 検出を試みた、その結果、降雪の種類と合わせて代 表的な降雪粒子の粒径・落下独速度を求めることが できる指標CMFを用いることによって推定可能であ ることを示した. その結果, 霰の弱層は数日前の寒 気を伴う低気圧通過時の約半日にわたる大きな霰を 含む降雪によって形成された可能性が高いと推測さ れた。また、霰層の密度成層及び層厚もCMFから 推定される密度から求めることができた。ただ、層 厚の推定には形成後の圧密過程が入っておらず、当 然観測された霰層の厚さより大きな値になった。ま た、ここで用いたLPMには粒径の最大クラスに上限 がありCMFの正確さに問題を生じている。さら に、観測点での霰層形成以降の降水量が少ない点は 現場での断面観測との違いがある。今後の検討課題 としたい.

7. 謝辞

図1に使用した地図は「国土地理院地図(電子国 土WEB)」を加工して作成したもの,また,図9 に使用の天気図は原典:気象庁「天気図」、加工: 国立情報学研究所「デジタル台風」によるもの,図 10は京都大学生存圏データベースの気象業務セン ター配信の全国合成レーダーGPVのデータを利用し ました.感謝します。

8. 補遺

CMFを求めるには粒径・落下速度の分布に対応 する質量フラックス(一定時間に水平面を通り過ぎ る質量)の表が必要である.その求め方については 参考文献(Ishizaka et. al, 2013)に述べた.そして, そこでは質量フラックスの表をFlux chartとしてい る.ただ,LPMでは設定された水平面を通り過ぎ る粒子数を観測しているので対応する質量がわかれ ば質量フラックスを「通り過ぎた粒子数」×「各粒 子に対応する質量」として求めることができる.し たがって,LPMの場合に必要なのは質量フラックス ではなく質量の表(Mass chart)である.それを LPMが設定している粒径・落下速度のクラス区分 (ビン)毎に求めると図11のようになる.参考まで に補遺とした.





- 飯田肇・福井幸太郎(2015):天狗山・国見岳で発生 した巨大雪崩. 2025 年度日本雪氷学会北信越 支部研究発表会予稿集.
- 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. Meteoro. Japan, **91**, 747-762.
- Ishizaka et al. (2016): Relationships between snowfall density and solid hydrometeors, based on measured size and fall speed, for sowpack modeling apprications. *The Cryosphere*, **10**, 2831-2845.
- Locatelli, J. D. and Hobbs P. V. (1974): Fall speed and mass of solid precipitation particles, *J. Geophys. Res.*, **79**, 21885–2197.

2024/2025年初冬の降水に対する日本海の海面水温の影響とその地域差

〇田村健太¹
 (1:防災科学技術研究所雪氷防災研究センター

1. はじめに

2024/2025年の冬季は度重なる寒気の流入と低気圧の通過により日本各地で大雪に見舞われた.冬の初めは日本海側の地域で降水量が多く,特に青森では12月の月降水量が統計開始以来最大となる318mmを記録した.また, 北陸地方平野部では降雪量は少なかったものの,大雨警報が発令されるほどの降水が度々観測されていた.先行研究では,日本海側地域における初冬の降雪は日本海の海面水温の影響を強く受けることが指摘している.本研究では,2025年12月上旬から1月上旬にかけて日本海側の地域を中心に発生した降水に着目し,降水に対する日本海の海面水温の影響を調査した.

2. データ

領域気象モデル WRF を用いて 2024 年 12 月 1 日から 2025 年 1 月 7 日を対象に日本周辺領域を 2km 格子の解像 度にダウンスケーリングする数値実験(再現実験)を実施した.初期値及び境界値として大気は ERA5,海面水温 は OISST を用いた.また,日本海の海面水温を気候値(1991 年から 2020 年までの日別平均値)に変えた海面水 温改変実験を実施し,2024/2025 年冬季の日本海の海面水温が降水に与えた影響を評価した.

3. 結果

再現実験における 2024 年 12 月 3 日から 2025 年 1 月 7 日までの積算降水量を図 1a に示す. 2024/2025 年の初冬 は日本海側を中心に平地では 300mm から 500mm,山間部では 1000mm 以上と降水量が多く,北海道から東北では 主に季節風による冬型の降水,北陸から中国地方では JPCZ による降水が発生していた.図 1b に再現実験と海面 水温改変実験の積算降水量の差を示す.本州の日本海側では新潟と青森周辺で実験間の降水量の差が大きいことが 分かる. 2024/2025 年の日本海の海面水温が降水量に与えた影響を評価するため,海面水温改変実験での降水量に 対する再現実験での降水量の変化量を地域ごとに調べたところ,新潟県では上越が+1.4%,中越が+8.3%,下越が +10.6%と各地で降水量が増加していた.また,青森では+41.6%と大きく増加しており,日本海の海面水温が降水 量に与えた影響が地域ごとに異なることが分かった.また,青森では降水量に対する降雪量の割合も減少しており, 再現実験では 69.7%,海面水温改変実験では 76.6%と約 7%変化していた.これらの結果から,青森では日本海の 海面水温の影響で水分の多い重い雪が増加した可能性が示唆される.



図1 (a)再現実験における積算降水量(2024年12月3日から2025年1月7日)と(b)積算降水量の実験間の差

文献

Kawase, H., Imada, Y., and Watanabe, S. (2022): Impacts of historical atmospheric and oceanic warming on heavy snowfall in December 2020 in Japan. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **127**(21). https://doi.org/10.1029/2022jd036996 ○本吉弘岐¹·石坂雅昭²·山下克也¹·中井専人¹

(1: 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター、2: 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター客員) 1. はじめに

防災科学技術研究所雪氷防災研究センター(新潟県長岡市)では、降雪粒子観測施設において降雪粒子観測を行っ てきた。施設内には天井開口部から自然降雪を取り込める 低温室があり、ベルトコンベアーを用いて連続的に降雪粒 子のマクロ画像を取得している。2009 年冬期以降はビデ オマイクロスコープによるマクロ画像、2016 年 1 月以降 はデジタルカメラを用いた高解像度のマクロ画像を取得 している。本研究では、これらの画像データと露場におい て実施している気象観測とから大雪時の特にに強い降雪 がみられたケースの降雪粒子の特徴を調べた。

2. 調査結果

9

解析対象期間を画像データがアーカイブされている 2009年から2025年の17冬期とした。雪氷防災研究セン ターの露場における1時間ごとの積雪深データから1時 間積雪深差を求めた。得られた積雪深差の頻度分布を図1 に示す。積雪深は1cm単位で計測されているため、その 差分も1cm単位となっている。積雪深差の最大値は10cm で、1cm以上が観測された4238回うち1回のみであり、 9cmが6回、8cmが15回であった。3cm以上の積雪深差 を強い降雪の目安とすると、その頻度は1090時間(1冬 期あたり64時間)であった。

表1に、1時間積雪深差が10cm(最大値)と9cmのケー スの時刻と気象要素を示す。これらのケースでは、1時間 平均気温は-2.2~-0.4 の間であり、風速は1つの欠測事例 を除き0.1~2.4m/sの間であった。いずれも寒気吹き出し に伴い日本海上にJPCZ(日本海寒帯気団収束帯)が生じ た降雪事例であったが、必ずしもJPCZに伴う帯状雲の中 でたらされたものではなかった。

表1の降雪イベントで観察された降雪結晶としては、塊 状霰、六花霰、霰状雪のほか、板状結晶としては樹枝状結 晶のようなものや、板状結晶の破片のようなもの、板状結 晶が複雑に重なりあったものや放射状に伸びたものが多

図1:1時間積雪深差の頻度分布

表 1: 積雪深差が 10cm と 9cm の時刻と気象要素

時刻	積雪深差	積雪深	気温	風速
	(cm)	(cm)	(°C)	(m/s)
2019-01-21 20:00	10	42	-0.4	
2018-02-06 01:00	9	170	-1.9	2.2
2020-12-31 23:00	9	66	-2.2	1.0
2022-02-05 03:00	9	107	-1.0	2.4
2022-02-16 22:00	9	113	-0.5	1.8
2022-02-16 23:00	9	122	-0.6	1.7
2022-12-19 07:00	9	98	-0.8	0.1



図 2: 表1のイベントで観測された降雪写真の例

数含まれていた。また、多重鼓様結晶¹⁾が多く見られる時間帯もあった。霰の大きさは大きくても数 mm 程 度であった。その他、整った形状の雪結晶は少ないものの樹枝状結晶、扇状結晶、針状結晶、鼓状結晶など が確認できた。霰以外の雪結晶には雲粒付きの場合が多いが、濃密雲粒付きのものや、逆に雲粒のつかない ものが多数を占める時間帯もあった。上記の降雪結晶の組み合わせが移り変わりながら降っており、多くの 時間帯でも概ね雪結晶には雲粒付着を伴っていたが、付着した雲粒からの板状成長を伴う結晶も多く見られ た点は降雪結晶の特徴と言える。これは、多重鼓様結晶が多数を占める時間帯もあったが、これも付着雲粒 からの板状成長によるものと考えられる¹⁾。この期間に観測された降雪結晶の写真の1例を図2に示す。

今後は、積雪深差が 9cm 以下のケースにも広げ、他の降雪観測(光学式ディスドロメータなど)や面的な 気象解析との比較により、この地域の大雪次の降雪粒子の特徴について解析を進めていく予定である。

1) 本吉弘岐,藤野丈志,神田健三,石坂雅昭,北陸地域における多重鼓様雪結晶の観察およびその成因について,雪 氷研究大会(2019・山形)講演要旨集, p. 38.

2025年2月7日の大雪時に新潟市で観察された雪結晶

○藤野 丈志¹
 (1:株式会社 興和)

1. はじめに

2025年2月7日,アメダス新潟において18時から21時の3時間に,1997年以降最大となる30 cmの3時間降雪量(気象庁,2025) を記録した.この間,新潟市西区において雪結晶の観察をおこなったので,雪結晶の特徴と結晶形の分類結果を報告する.

2. 観察方法

雪結晶の観察は2025年2月7日の18時28分から中断を挟み21時25分までおこなった.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,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を,グローバル分類(菊地ら,2012)に基づいて分類した. 鼓状結晶については『多重鼓様結晶』(本吉ら,2018)を判別した.また,交差角板状の枝が付いた雪 結晶も判別した.

3. 観察結果

撮影した写真より結晶形を判別できた 300 個の雪結晶の分類,および雲粒付着の程度の結果を図1に示す. 最も多く観測された雪結晶は放射状結晶(P7)で,約 28%を占めた.放射状結晶には、中心部が交差角板 状結晶であるものがみられた. 鼓状結晶(CP1)は約 12%観察されたが、その約 1/3 が『多重鼓様結晶』で あった. 雲粒付着量をみると、付着なし結晶が最も多く、雲粒付結晶(R1)程度と合わせて 8 割を占めた. 交差角板状の枝が付いた雪結晶は、扇状結晶(P2)、樹枝状結晶(P3)、複合板状結晶(P4)、放射状結晶(P7) で観察された. 雪結晶の形から、広い温度領域で結晶成長がおこなわれていたことが読み取られる.



文献

気象庁(2025):過去の気象データ検索, https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php(2025.4.7 閲覧)

菊地ら(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

本吉ら(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

過去最少となった白山・千蛇ヶ池雪渓

小川弘司¹•藤原洋一¹ (1:石川県立大学生物資源環境学部)

1. はじめに

白山にある、多年性の千蛇ヶ池雪渓を対象に、 本雪渓の長期変動を明らかにするために面積等 の規模を継続して計測している。2024年の千蛇 ヶ池雪渓は記録のある中で過去最少となった。 2024年の本雪渓の計測結果と過去のデータとあ わせた長期変動のトレンドについて報告する。

2. 調査方法

雪渓の測量は、UAV (Unmanned Aerial Vehicle)
を用いたデジタル写真測量によりおこなった.
2024年は、融雪期中期は8月9日に、融雪期末期は10月31日におこなった.撮影データは
Metashape (Agisoft 社製)を用いてオルソ画像を
作成し、GIS (ESRI 社製 ArcGIS)上で水平面積
(以下面積)、体積、雪面高をもとめた.

(以下面積), भ傾, 当面向をもとめた。

雪渓規模の長期変動のトレンド分析には, Mann-Kendall 検定を採用した(フリーソフト R4.4.2 使用). ここで,検定の際のp値が1%(0.01) 以下の場合は減少/増加している,同5%(0.05) 以下の場合は減少/増加傾向が現れている,同 10%(0.1)以下の場合は減少/増加しているとみ られる,これら以外の場合は,変化傾向はみられ ない,といった記述方式を用いた(気象庁,2023).

3. 結果

測量の結果は (図 1), 融雪期中期については面 積 2141 m², 体積 7951 m³, 雪面高 11.5 m, 融雪期 末期については, 面積 48 m², 体積は 31 m³とな



図1 2024 年の千蛇ヶ池雪渓の測量結果 (a) 融雪期中期(8月9日),(b) 融雪期末期(10月31日)



口は1980年9月15日撮影の空中写真から求めた値.参考値として掲載した.

り、雪面高は計測地点には雪渓が残存していなかったために値なしとなった.このうち融雪期末期は、例年雪渓が 残っている部分に池が形成され、雪渓は池の南側のふちにわずかに残るのみとなった.1960年代以降のこれまで の長期データと比較して、小さい方からの順位は、融雪期中期で、面積が2位、体積が3位、雪面高が5位、融雪 期末期では、面積が1位、体積が1位となり、2024年の千蛇ヶ池雪渓は、非常に小さな年であった.特に、融雪 期末期については、これまでの値と比較するとかなり小さくなった.なお、この池のふちにわずかに残った雪渓は、 過去の写真記録から1985年以前に堆積したかなり古いものであると考えられた.

2024年の計測結果を加えた雪渓の長期トレンドを見ると、融雪期中期の面積は減少しており(p値:0.001), 末期の面積も減少していた(p値:0.001).体積については、融雪期中期は減少傾向が現れており(p値:0.020), 末期は減少していた(p値:0.001).雪面高は、融雪期中期、末期とも減少しているとみられる(p値:0.0748, 0.055)となった.以上の結果から、千蛇ヶ池雪渓の面積および体積は減少しているあるいは減少傾向が現れてい ることとなり、雪面高においては融雪期中期、末期ともに減少しているとみられ、千蛇ヶ池雪渓の長期トレンドの 減少傾向がさらに顕著になった.

文献

気象庁(2023): "長期変化傾向(トレンド)の解説",気温・降水量の長期変化傾向. https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/trend.html.

槍ヶ岳を源流とする梓川と高瀬川の上流域における降積雪量の変動

鈴木啓助

(信州大学山の環境研究センター・大町市立山岳博物館)

1. はじめに

世界的な観光地である北アルプス・上高地では,梅 雨の時期に梓川での洪水災害が頻発するが,秋の台風 の影響による大雨を起因とする洪水は多くない.これ は,梓川上流域内の槍穂高連峰の高標高域に冬期間に 積もった雪が,夏になるまで大量に残ることに起因す る.積雪の多くは日射熱と気温・風による顕熱によっ て融解する.山岳地域での梅雨の季節の降雨時は,日 射量は小さいが気温が高く風も強いために,顕熱によ る融雪量が多くなる.これに降雨量が加算されるため に洪水が発生することになる.いわゆる「rain on snow (ROS)」型の洪水である.

山岳地域での降水量の観測は困難であることが多く, 電源の確保が難しい場所での固体降水(降雪)による 降水量の観測は,従来の方法ではほとんど不可能であ る.このことから,多量の降雪がある山岳地域では,冬 期間の降雪量を直接的に測定することができないため, その量の年々変動を議論することもできない.山岳地 域の積雪量は,航空レーザー測量などの方法で見積も ることはできるが,高頻度での測量は経費的にも容易 ではない.山岳地域の降積雪量は,融雪による下流域 での洪水のみならず,わが国の水資源として大きな役 割を果たしているため,その変動を探ることは重要で ある.そこで,山岳流域の融雪期流量から,当該流域内 の降積雪量を間接的に算定し,その年々変動を検討す る.

2. 研究対象流域

研究対象とする流域は、信濃川水系である梓川の上 高地大正池の上流域と高瀬川の高瀬ダムの上流域であ る.梓川にも高瀬川にも複数のダムが存在するが、大 正池も高瀬ダムもそれぞれ最上流部の貯水池である. 梓川も高瀬川も、南北に連なる北アルプス(飛騨山脈) のふたつの稜線に挟まれた山岳河川で、槍ヶ岳と大天 井岳を結ぶ稜線(東鎌尾根など)が両河川の分水嶺で ある.この分水嶺の南側に降った雨や雪は、南流し梓 川となり松本市内を流れ安曇野市の押野崎で犀川とな る.分水嶺の北側に降れば、北流し高瀬川となり大町 市などを流れ、押野崎で梓川と合流し犀川となる.犀 川は千曲川と合流し、やがて信濃川となって日本海に 注ぐ. 梓川と高瀬川の最高標高地点は, それぞれ, 奥穂 高岳の3190 m と槍ヶ岳の3180 m である. 大正池の標 高は1490 m であるから梓川流域の標高差が1700 m で あり, 高瀬ダムの標高が1270 m であるから高瀬川流域 の標高差は1910 m である. 大正池上流の梓川の流域面 積は106 km² で, 高瀬ダム上流の高瀬川の流域面積は 131 km² であり, 高瀬川の方が梓川よりも流域面積は2 割以上広い.

3. 結果

大正池と高瀬ダムのふたつの貯水池への流入量から, 梓川と高瀬川の流出高を算出する. その結果, 大正池 と高瀬ダムにおける降水量は、梅雨の時期に大きくな るが,梓川と高瀬川の月流出高は5月から7月の間で, 降水量よりも圧倒的に大きくなる. 基本的な水収支式 (降水量=蒸発散量+流出高)では、流出高が降水量 より多くなることはない. この矛盾をもたらしている のは、流域内に冬期間に降雪(吹きだまり効果も含む) としてもたらされた多量の積雪に起因すると考えられ る. つまり, 天然の白いダムとして流域内に堆積して いた積雪の多くが、5月から7月の間に融解するため に、その融雪量が降水量に付加され、流出高が降水量 よりも多くなるのである.このことから、流出高と降 水量の差が、前述した上流域に残っている積雪からの 融雪水量に相当すると考えられる. さらに, 高標高地 域とは言え、気温が高い時期でもあることから蒸発散 量も考慮する必要がある.なお、流域蒸発散量は気温 から推定することになるが、解析期間では気温の変動 傾向が認められないため、流出高の増減傾向を議論す る際には考慮しない.

梓川の融雪期の流出高は,解析期間では統計的に 有意に増加しており,降水の変動は有意ではない.そ の結果として,算定された梓川流域の降積雪量は統計 的に有意に増加傾向にある.

解析期間が短い高瀬川では、融雪期の流出高と降 水量の変動は統計的に有意ではなく、算定された高瀬 川流域の降積雪量の変動も統計的に有意ではないが、 減少傾向ではないことがわかる.

信越地方における年最深積雪の長期変化

〇栗林正俊¹ (1:長野県環境保全研究所)

1. はじめに

地球温暖化が積雪に及ぼす影響を明らかにするために は、長期間に渡る均質で精緻な気象観測が必要である. 信越地方(長野県と新潟県)には、100年以上に渡り積雪深 を観測している箇所がいくつかあり、年最深積雪の経年 変化に関する報告がいくつかある. 例えば, 鈴木(2021) は森林総合研究所十日町試験地(標高 200 m)において 1918~2020年の年最深積雪が減少傾向であることを報告 している. また, 鈴木(2022)は気象庁の大町(標高 784 m) と松本(標高 610 m)における 1898~2021 年の年最深積雪 の経年変化を評価し、大町では増減傾向が認められない のに対し、松本では減少傾向であることを報告している. しかしながら、信越地方の複数地点で年最深積雪の経年 変化を 100 年規模で解析し、標高や気候区分などの地理 特性に応じた違いを比較・考察した研究はほとんどない、 そこで、本研究では信越地方の年最深積雪の観測値を解 析し、その経年変化の特徴を地点間で比較するとともに、 気温や降水量の経年変化との関係を明らかにすることを 目的とする.

2. データと方法

本研究では、表1に示した7つの気象官署における年 最深積雪、冬季(前年12月~2月)の平均気温と3カ月積 算降水量(冬季降水量)の観測値を利用した.各観測値やそ の均質性に関する情報は、気象庁ホームページから取得 し、解析には気象観測統計指針の正常値と準正常値を使 用した.各観測値の経年変化の統計解析を行う期間は、 1926~2025年の100年間とした.各気象要素の経年変化 について、統計的な有意性を検定する際は、長期変動傾 向の統計解析に用いられるノンパラメトリック検定の一 つで、外れ値の影響を受けにくいとされる Mann-Kendall 検定を利用した.

表1 各気象官署の位置と積雪深の観測開始時期.

<u></u> 毎測能々	亩 奴(°)	北緯(゜)	栖古(m a a l)	積雪深の
	鬼祖()	れぞ()	伝可(III a.s.1.)	観測開始
相川	138.240	38.028	5.5	1911年12月
新潟	139.018	37.893	4.1	1891年1月
高田	138.247	37.107	12.9	1922年1月
長野	138.192	36.662	418.2	1892年1月
松本	137.970	36.247	610.0	1898年1月
飯田	137.822	35.523	516.4	1897年11月
軽井沢	138.547	36.342	999.1	1925年1月

3. 結果と考察

年最深積雪の変化率は全ての地点が負の値で、この100 年間で年最深積雪は減少していた(表2). この年最深積雪 の減少について、統計的な有意性を検定した結果、新潟 では有意水準10%以下,松本と飯田では有意水準5%以下, 相川と高田では有意水準1%以下、でそれぞれ有意と判定 された.冬季平均気温は100年あたり1.38~2.39℃の範囲 で上昇していて、この上昇傾向は全ての地点が有意水準 1%以下で統計的に有意と判定された(表2).冬季降水量の 変化率は全ての地点で負の値で、この100年間で冬季降 水量は減少していた(表2). この冬季降水量の減少につい て、統計的な有意性を検定した結果、長野では有意水準 10%以下、高田では有意水準5%以下、でそれぞれ有意と 判定された.

年最深積雪と冬季平均気温の相関関係を評価した結果, 全ての地点が有意水準 5%以下で統計的に有意な負の相 関を示した.特に,新潟県の3地点は長野県の4地点に 比べて相関がより強かった.年最深積雪と冬季降水量の 相関関係を評価した結果,飯田を除く全ての地点が有意 水準1%以下で統計的に有意な正の相関を示した.これら の結果から,温暖化に伴う冬季平均気温の上昇は年最深 積雪を減少させており,地点によっては冬季降水量の減 少も年最深積雪の減少を助長していると考えられる.

文献

鈴木啓助(2021):大町市とその周辺における近年の気候 変動.市立大町山岳博物館研究紀要, 6, 1-5.

鈴木啓助(2022):大北地域におけるアメダス観測以前の 積雪深変動.市立大町山岳博物館研究紀要,7,1-8.

表 2 各気象官署における 1926~2025 年の年最深積雪・冬 季平均気温・冬季降水量の変化率。

細測能々	年最深積雪	冬季平均気温	冬季降水量		
睨则角石	(cm/100年)	(°C/100年)	(mm/3カ月/100年)		
相川	-15.3	2.39	-46.5		
新潟	-13.6	1.74	-25.8		
高田	-104.0	1.47	-258.2		
長野	-6.5	2.03	-33.3		
松本	-8.9	2.38	-17.6		
飯田	-6.4	1.39	-1.4		
軽井沢	-3.9	1.38	-23.9		
は有意	は有意水準10%以下で統計的に有意.				

は有意水準5%以下で統計的に有意.

は有意水準1%以下で統計的に有意.

UAV-LiDAR による 2025 年 4 月の立山黒部アルペンルートの標高毎の積雪深分布観測

○福井幸太郎¹・飯田肇¹・川瀬宏明²
 (1:富山県立山カルデラ砂防博物館 2:気象庁気象研究所)

1. はじめに

豪雪であった 2025 年の山地積雪の特徴を明らかにするため、2025 年 3 月 29 日と 4 月 7 日に立山黒部アルペン ルート沿い 5 つの観測エリアで UAV-LiDAR による積雪深分布観測を行った. この観測結果を 2024 年 4 月の積雪 深分布観測結果と比較した.

2. 方法

現地観測には DJI 社製 Matrice 350 RTK (UAV 本体) と Zemmuse L1, D-RTK2 を用いた. D-RTK2 の座標は 2 周 波 GPS (イネーブラー社製 GEM-1) によるスタティック測位で求めた. UAV による観測では,地形フォロー機能 を利用して ASTER-GDEM3 の楕円体高+100m で自動飛行を行った. 点群のデータ処理は DJI Terra, データ解析 は ArcGIS pro を用いた.

観測エリアは美女平(標高 1100m 前後),下ノ小平(標高 1200m 前後),大観台(標高 1450m 前後),弥陀ヶ原(標高 1900m 前後),室堂(2400m 前後),観測日は美女平と下ノ小平,大観台,弥陀ヶ原が 2025 年 4 月 7 日, 室堂が 2025 年 3 月 29 日である.

無雪期の地表面データとして,国土交通省立山砂防事務所が所有している航空レーザー測量による 1m メッシュ DEM (2021 年 10 月の観測データ)を使用した.誤差は 0.2m 程度と言われている.現地観測データ(積雪期 DSM) と無雪期 DEM の差分を ArcGIS Pro のラスタ演算で求め,積雪深分布を推定した.

3. 結果

UAV-LiDAR 観測による雪の大谷付近の積雪深は 15.9 m であった (図 1). これは雪の大谷の高さの公表値 (16 m) とほぼ一致し, 2024 年 4 月よりも 2m ほど高い結果となった.

各観測エリア全体の 2025 年の平均積雪深は室堂平が約 5.8m, 弥陀ヶ原が約 3.8m, 大観台が約 2.9m, 下ノ小平 が約 2.4m, 美女平が約 2.1m であった. 2024 年の平均積雪深は室堂平が約 5.3m, 弥陀ヶ原が約 3.2m, 大観台が約 1.4m, 下ノ小平が約 0.8m, 美女平がほぼ無積雪で, 2025 年の平均積雪深は室堂平や弥陀ヶ原で1 割前後, 大観台 や下ノ小平, 美女平で2 倍以上大きかったといえる.



図1 2025年3月29日の室堂平の積雪深分布

AMeDAS データを用いた初期積雪形成時の気象条件と標高特性

○杉浦幸之助¹・本井雅也¹ (1:富山大学)

1. はじめに

降り落ちた雪粒子が積雪を形成するかどうかは、雪氷対策にとって重要であるだけでなく、冬の絶景を生み出す ためにも欠かせない情報である.これまで雨雪判別に関する研究は数多くなされてきたが、降雪となって、雪が積 もるか積もらないかの気象条件や標高依存性については十分に調べられていない.先行研究では、富山を対象に野 外観測から積雪が形成される気象条件が解析された(杉浦・衛本,2020).本研究では、AMeDASデータを用いて、 積雪が初めて形成される時の気象条件が地域によってどのように異なるのかを調べたので報告する.

2. 解析方法

AMeDAS データのうち,気温,相対湿度,降雪量,積雪深,降水量,風速を使用した.なお,降水量に関して, 固体降水には大きな誤差が生じることが報告されているため,風による捕捉損失の補正をした.対象期間は, 2015/2016 年冬期,2016/2017 年冬期,2017/2018 年冬期の3 冬期である. 全国 AMeDAS 地点のうち,対象期間中 に実際に積雪が観測された 64 地点を解析対象とした.

3. 結果と考察

初期積雪形成時の気温と相対湿度の関係を図1に示す.日本海側では、気温+2℃以上でも積雪が形成されることがあり、気温が高いときには相対湿度は低い結果となった.太平洋側では、日本海側のような気温が高いときには積雪が形成されず、気温+1℃以下での積雪が目立っている.この傾向は3冬期で同じ傾向であった.また、北陸地方は、より高温かつ低湿度で積雪するパターンが特徴的に多く確認された(図省略).この傾向も3冬期で同じ傾向であった.さらに、北陸地方は、同じ日本海側の東北地方に比べて、降水量が多い場合にも積雪が形成されていた.よって、降水強度が強いと地表への雪粒子の供給量が多く、地表温度がより冷やされ、積雪しやすいため、北陸地方では特徴的により高温かつ低湿度でも積雪したのではないかと考えられる.

初期積雪形成時の標高と気温の関係をみると(図省略),積雪開始時の気温は,標高が高くなると低下していた. これは標高が高い AMeDAS 地点ほど,例えば降雪粒子が小さく降水強度が弱いために地表面で融解しやすいこと が推測されるが,今後の解析が必要である.また,約 0m~200m の低い標高の場合,日本海側では気温が高くて も積雪が形成する傾向が顕著であった.今後は,標高特性に関して,広い標高範囲で降雪粒子の粒径や高層気象デ ータなどを解析する必要がある.



文献

杉浦幸之助, 衛本雄太 (2020): 富山における降雪時の積雪形成時に関する気象条件非. 雪氷研究大会 (2020・オンライン), B2-2, https://doi.org/10.14851/jcsir.2020.0_60.

非積雪地域における雪による車両滞留発生時の気象条件

中島正太郎¹・〇河島克久² (1:新潟大学理学部 2:新潟大学災害・復興科学研究所)

1. はじめに

雪による大規模車両滞留は日本海側の地域だけでなく, 太平洋側の地域でも発生することがある。例えば,2024 年1月24日には強い冬型の気圧配置となり,太平洋側に も雪がもたらされ,名神高速道路関ケ原IC付近で合計約 1200台の車両滞留が発生した。ひとたびこのような車両 滞留が発生すると社会に大きな被害を与えることから, 国土交通省は予防的通行止めと集中除雪などの対策を道

路管理者に要請している.しかし,道路管理者が予防的 通行止めの実施を適切なタイミングで判断することは容 易ではなく,この判断を支援するための気象経過・予測 等に基づく基準の策定が望まれる.

予防的通行止めの基準を検討するためには、これまで の車両滞留発生時の気象の特徴を分析する必要がある. 積雪地域における大雪による車両滞留には、発生前10~ 30時間の降雪が関係しており、車両滞留発生時の気象の 特徴は、「発生前 24 時間の累積降雪量と平均気温がそれ ぞれ 40 cm 以上, 0℃以下 | であることが明らかになって いる(村田・河島, 2021). 非積雪地域でも降雪量と気温 が重要だと考えられるが、ドライバーが雪に不慣れであ る、冬用装備をしていない車両が多い、積雪地域と雪の 降り方が異なるなどの理由から、必ずしも積雪地域の条 件が当てはまるとは限らない. そこで本研究では、非積 雪地域における過去の車両滞留発生事例に基づいて、発 生前の気象(降雪量、気温)推移の特徴を調べ、降雪量 と気温の累積・平均時間を検討する. そのうえで, 決定 した時間幅の累積降雪量と平均気温を求めることによっ て、車両滞留発生時の気象条件を明らかにすることを目 的とした.

2. 研究方法

2.1 車両滞留事例の抽出

非積雪地域で大規模な車両滞留が多く発生した 2022/23年,2023/24年の2冬期(12月~3月)を対象に, 新潟大学災害・復興科学研究所の「雪による車両滞留イ ベントデータベース」を用いて,非積雪地域で発生した 事例を抽出した.その中から,発生地点と時間が明確な 事例を使用した.

2.2 使用データと解析方法

発生地点近傍の気象データが必要であるため,降雪量 は気象庁の解析降雪量(酢谷ら,2024),気温は国立研究 開発法人農業・食品産業技術総合研究機構の農研機構メ ッシュ農業気象データ(大野ら,2016)を使用した. 解析降雪量は5km メッシュデータである. これは, 積 雪変質モデル SMAP によって推定した積雪の深さをアメ ダス観測値で補正し,1時間ごとの差分をとったデータで ある. 農研機構メッシュ農業気象データの気温は, アメ ダス観測値と気温の平年値を基に標高を考慮して作成さ れた1時間データであり,1kmメッシュ格子点データと して提供されている.

気温データも降雪量データも、ともに発生地点に最も 近い格子点のデータを使用した.抽出事例の発生時の降 雪量推移に基づいて、降雪開始から降雪終了までの時間 (降雪継続時間)と、降雪開始から車両滞留発生までの 時間(発生前降雪時間)を求めた.また、発生前降雪時 間における平均気温と累積降雪量を求めた.

3. 抽出された車両滞留事例

データベースから合計23件の車両滞留事例が抽出された(2022/23年冬期:19件,2023/24年冬期:4件). その発生場所は関東地方から九州地方の広い範囲に分布しており、特に近畿地方で多かった.

23 件を道路別にみると,高速道路3件,国道13件,県 道4件,市道3件であった.月別に見ると,1月に発生し た事例が多かった(16件).23件のうち,冬型の気圧配 置時の事例が19件あり,残り4件は南岸低気圧通過時で あった.

4. 解析結果

4.1 降雪時間

各事例の降雪継続時間を調べた結果,6~28時間であり, 12時間以内の事例が17件と多かった.車両滞留発生事例 の多くが降雪継続時間の前半で発生しており,発生前降 雪時間が9時間以内の事例がほとんどであった(図1). これは積雪地域の発生前降雪時間に比べて極めて小さい. 発生前降雪時間が3時間以内の事例(10件)は全て国道, 県道,市道といった一般道路であるのに対し,高速道路 の事例(3件)は全て6時間以上であった.



4.2 発生前降雪時間の気象の特徴

発生前降雪時間の累積降雪量と平均気温を調べた結果, 累積降雪量が2 cm 以上,平均気温が0℃以下という特徴 があった(図2).平均気温については積雪地域と同じで あるが,累積降雪量は,積雪地域の「累積降雪量が40 cm 以上」とは大きく異なる結果となった.

5. 考察

5.1 降雪量と気温の累積・平均時間

予防的通行止めの基準を決定するためには、降雪量と 気温の累積・平均時間を決める必要がある.図1の発生 前降雪時間の頻度分布から、おおよそ発生前9時間以内 の時間幅の気象が車両滞留発生に関係している.このこ とから、本研究では、降雪量と気温の累積・平均時間を 発生前6時間とすることにした.

5.2 車両滞留発生時の気象条件

発生前6時間の平均気温と累積降雪量の関係を調べた 結果,累積降雪量が2 cm以上,平均気温が2℃以下とい う特徴が認められた(図3).

累積降雪量の変動幅をみると、2~21 cm まで幅広く分 布している.そのなかで、2~3 cm の小さい事例(7 件) は、すべてが国道,県道,市道であった.これらの一般 道路では、交通の妨げとなりにくい末明から早朝の時間 帯に新雪除雪が実施される.つまり、新雪除雪が行われ ない時間が長い一般道路では、短時間の少ない降雪量で 車両滞留が発生する可能性があることを意味している. それに対して、24 時間体制で新雪除雪が行われる高速道 路では、わずか3 件の事例ではあるものの、発生前6 時 間の累積降雪量が9~13 cm であり、一般道路より車両滞 留発生時の累積降雪量が大きい.

平均気温の変動幅も4℃~2℃まで幅広く分布している. そのなかで、0℃以上の事例(7件)は全てが一般道路で あった.これらの事例はいずれも累積降雪量が比較的小 さく、発生前降雪時間が短い(3時間以内)事例である. つまり、これらは発生前6時間のなかで降雪がない時間 が長く、その時間を含めた平均気温であるため、平均気 温が高くなっている.それに対して高速道路では、発生 前降雪時間が全て6時間以上であるため、平均気温が0℃ 以下と低い.

以上から,非積雪地域における車両滞留発生時の気象 条件は,降雪量と気温の累積・平均時間を発生前6時間 とした場合,「累積降雪量と平均気温がそれぞれ2 cm 以 上,2℃以下」である.ただし高速道路に限ると,累積降 雪量の閾値は若干大きくなり,平均気温の閾値は0℃程 度に下げることができると考えられる.

6. まとめ

非積雪地域における車両滞留発生時の気象を解析した 結果,非積雪地域では積雪地域よりも発生前降雪時間が 短く,おおよそ発生前9時間以内の気象が関係している



図3発生前6時間の累積降雪量と平均気温の関係

ことがわかった.降雪量と平均気温の累積・平均時間を6時間とした場合,非積雪地域における車両滞留発生時の 気象条件は,「累積降雪量と平均気温がそれぞれ2 cm 以 上,2℃以下」であると言える.

今後は、非積雪地域で発生した他の車両滞留事例を上 記の条件で良好に捕捉できるか調べる必要がある.その うえで、安全性と安定性の両面を考慮して予防的通行止 め基準を策定すべきである.

謝辞

本研究は, JSPS 科研費 22H01737 の助成を受けて実施 された.

文献

- 村田晴彦,河島克久 (2021):雪による車両滞留発生前の 気象変化の特徴.雪氷北信越, No.41, 64.
- 大野宏之, 佐々木華織, 大原源二, 中園江 (2016): 実況 値と数値予報, 平年値を組み合わせたメッシュ気温・ 降水量データの作成. 生物と気象, 16, 71-79.
- 酢谷真巳,畑中謙一郎,長屋幸一,庭野匡思(2024):解 析積雪深・解析降雪量及び降雪短時間予報について. 測候時報,91,1-25.

消融雪施設の冗長化設計に向けた降雪量の統計

藤野丈志¹・渡辺柚香²・○碓井大成¹ (1:株式会社興和 2:長岡科学技術大学)

1. はじめに

消融雪施設の設計において,融雪対象とする降雪量は 日降雪深の累積相対頻度 80%を基本としており,短時間 の大雪は対象外となっている(路面消・融雪施設等設計要 領編集委員会,2008).近年は短時間の大雪による交通障 害が問題となっていることから,消融雪施設においても 大雪への対応を考慮する必要がある.そこで,消融雪施設 が対象とする降雪量を検討する前段階として,全国のア メダス観測点を対象に寒候年ごとの総降雪量と6時間降 雪深の最大値について統計を行ったので報告する.

2. 方 法

2024 年 5 月末時点で観測データが 20 年以上あるアメ ダス観測地点を対象に, 寒候年ごとの総降雪量(310 地点) と 6 時間降雪深の最大値の変化(237 地点)について調べた.

3. 結果と考察

寒候年ごとの総降雪量の変化について調べた結果,増 加傾向にあるのは23地点のみであった.月別で見ると, 1~3月で増加傾向にあるのは50地点未満であったが,12 月のみ120地点で増加傾向が見られた.

寒候年ごとの6時間降雪深の最大値の変化について調べた結果,増加傾向にあるのは93地点であった(図1). 月別で見ると,1~3月は半数以上の地点で減少傾向にあるのに対し,12月のみ半数を超える132地点で増加傾向であった(図2).

総降雪量,6時間降雪深の最大値ともに12月のみ他の 月と比較して増加傾向の地点が多い結果となった.また, 6時間降雪深の最大値は日降雪深の累積相対頻度80%より算出した6時間降雪深の2~3倍であった.

川崎・河島 (2024) により,新潟県下越地方を中心とし た地点において,大雪 (3~48時間降雪量)の出現頻度が 増加していること,新潟県内の多くのアメダス観測地点 で大雪の12月出現割合が高くなっていることが報告され ている.本統計結果より,全国的にも同様の傾向が見られ た.増加傾向が見られた地域では,増加量を踏まえた消融 雪施設の冗長化設計も検討課題となる.

4. まとめ

寒候年ごとの総降雪量および 6 時間降雪深の最大値は ほとんどの地点で減少傾向であることが分かった. 月別 で見ると, 12 月のみ他の月と比較して多くの地点で総降 雪量,6時間降雪深の最大値ともに増加傾向であることが 分かった. 今回得られた知見は消融雪施設が対象とする 降雪量や冗長化設計について検討する際のデータになると考えられる.



図1 6時間降雪深の最大値の変化傾向(年間)



図2 6時間降雪深の最大値の変化傾向(12月)

文献

- 川崎・河島(2024):新潟県における大雪の出現頻度と出 現時期の近年の変化.雪氷研究大会(2024・長岡)講演 要旨集, B3-2.
- 路面消·融雪施設等設計要領編集委員会(2008):路面消·融 雪施設等設計要領,新潟県,社団法人日本建設機械化協 会北陸支部,21pp.

路面雪氷状態解析における車両通過と凍結防止剤散布の重要性について

○藤本明宏¹ (1:福井大学学術研究院工学系部門)

1. はじめに

筆者らは、熱、水質量、氷質量、空気体積、固相凍結防 止剤(以下、塩)質量および液相塩質量収支による路面雪 氷状態モデルを開発している.本モデルは、機械除雪に加 えて、塩散布の影響と通過車両の熱的および物理的影響 を考慮した点に特徴があり、世界的に見ても類がない.

本論文は、野外観測との比較を通じて本モデルの妥当 性検証の一部を紹介するとともに、数値シミュレーショ ンによって通過車両による飛散と塩散布が解析結果に及 ぼす影響について述べる.

2. 路面雪氷状態モデルの概要

本モデルは、気象、道路構造、交通、機械除雪・塩散布 条件を入力条件に、路面雪氷層の温度、水質量、氷質量、 空気体積、固相塩質量および液相塩質量を解析する.これ を基に、路面雪氷状態、塩分濃度、路面すべり摩擦係数な どが出力される.詳細は参考文献を参照されたい.

3. 野外観測

本研究では、北陸地域の国道(標高約180m)において 気象および道路雪氷の野外観測を実施した.当該地は、積 雪寒冷地に属し、冬期には機械除雪や塩散布が行われる. 観測期間は2023年1月21日~同月30日の9日間であ る.1月24日8:00頃から断続的な降雪があり、特に24日~26日は最強寒波が襲来し、時折強い降雪が観測され た.道路は密粒度アスファルト舗装であり、片側1車線 の2車線である.また、登坂区間であり、縦断勾配は約 7 である.

本観測では、気温、相対湿度、風速、降水量、天空長波 放射フラックスおよび短波放射フラックス、道路雪氷状 態(DSC111, Vaisala 製)を計測した.路面上の雪厚さお よび水厚さ、路面温度も計測した.加えて、道路状況をカ メラによって連続的に記録した.交通量は動画から車両 を自動抽出する技術を用いてカウントした.交通量のカ ウントは休日の1月22日(日)、最強寒波時の平日の1 月25日(水)および平常時の平日であった2月21日(火) に行った.

除雪と凍結防止剤散布については、道路管理者からそれらの稼働状況の記録を入手し、実際の稼働の有無を動 画でも確認した.除雪は除雪グレーターと除雪トラック で実施された.凍結防止剤散布は塩化ナトリウムの固形 散布であり、散布量は約20gm²が基準値として設定され ている.

4. 解析結果

4.1 モデルの検証

ここでは結果の一例として、2023 年 1 月 25 日~同月 27 日の結果を紹介する.図1は解析期間における路面雪 氷状態の推移である.図2(a)は雪氷層の厚さと水・氷・ 空気厚さの解析結果 (H_{wias_c} , H_{w_c} , H_{i_c} および H_{a_c}),雪・ 水厚さの計測結果 (H_{sn_m} および $H_{w,m}$)を、同図(b)は路面 雪氷状態の測定結果と計測結果 (CL_m および CL_c)を、同 図(c)は路面上の塩質量および塩分濃度の解析結果 (M_s お よびC)をそれぞれ示す.

1月25日16:00~翌日8:00までは断続的に降雪が観測 された. CLmは26日6:00まで圧雪状態であり、それ以降 は凍結防止剤散布や気温上昇によりシャーベットあるい は湿潤状態となった. CLcは CLmを概ね一致した. Hsn mに は上下の変動が見られる. これは、図1の写真から分か るように通過車両の飛散により道路横断方向に雪の凹凸 (凹はタイヤが通過して Han m が減少した箇所. 凸は飛散 によって雪が堆積して Han mが増加した箇所) が発生した ためと推察される. 6:00 に凍結防止剤が散布されたこと により, M_s=20g/m²となった. M_sは排水や通過車両によ る飛散が生じるまで減らない. そのため, 26日7:00まで Ms=20g/m2を維持した. 日射や気温上昇に伴い雪氷層の 温度が上昇したことにより、Hwcが増大し、Cは減少し た. 26 日 8:00 から雪氷層の水分が増えたことにより通過 車両による飛散が発生し、急激にHsn m は減少した. Hsn m・ Hwmと Hwias を見比べると、前述のとおり Hsnmの上下変 動を正確に再現できないものの, HwiasはHsn m・Hw mの時 間変化を概ね追随できている.

4.2 通過車両および塩散布の影響

図3(a)は通過車両と塩散布をともに考慮した結果を, 同図(b)は塩散布のみ考慮した結果を,同図(c)は通過車 両のみ考慮した結果をそれぞれ示す.なお,路面雪氷状態 の変化が分かり易いように,ここでの解析に限っては27 日10:00の除雪を考慮していない.

同図(b)では、凍結防止剤散布によって圧雪状態からシ ャーベット状態に変状しているが、飛散がないため*H_{wias_c}* に低下が生じない. そのため、同図(a)に比べて路面上に は厚いシャーベットが形成された. その後、12:00頃に日 射と気温上昇により*H_i*が低下し、主に排水によって*H_{wc}* が低下した. 同図(c)の場合、塩散布による融雪が生じな いために、水分が発生せず、通過車両による飛散が生じな い. なお、過去の実験に基づき、解析では質量含水率が



25%以上で飛散を生じさせている. その結果, 圧雪路面が 継続し, H_{wiss_c}は時間とともに増大した. このように, 通 過車両による飛散を考慮しない場合はシャーベット路面 の出現率が多くなり, 塩散布を考慮しない場合は圧雪路 面が継続し易くなる. 通過車両による飛散と凍結防止剤 の散布の両方を考慮しなければ, 解析において実際の路 面雪氷状態の変化を再現することは難しい.

文献

- Fujimoto, A. et al. (2012): A new approach to modeling-vehicleinduced heating and its thermal effect on road surface temperature. J. Appl. Meteor: Climatol., 51, 1980-1993.
- Fujimoto, A.,. et al. (2014): A Road Surface Freezing Model Using Heat, Water and Salt Balance and Its Validation by Field Experiments. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **106-107**, 1-10.
- 藤本ら(2006):通過車両に伴うシャーベットの飛散実験 ~その2~, 寒地技術論文・報告集, 22, 239-243.

新潟市における AI スマホ路面判定システムを活用した冬期道路管理に関する研究

-2024/25 年冬期観測速報-

○上石 勲¹・中村一樹¹・関根正道²・布川 亮²・神保 元²・岸田佐世子³
 (1:防災科研雪氷技術センター 2:新潟市 3:シルソナ)

1. はじめに

新潟市では、近年集中的な降雪により大規模な交通障害が発生しており、各種の新技術を用いた対応も検討されてきた. AI スマホ路面判定システムは、車載したスマホで撮影した画像から路面状況の 情報収集するもので、新潟市では 2022/23 年冬期から導入され、より効率的・効果的な道路管理への 適応のため防災科学技術研究所と共同研究を進めてきた.

2. 2024/25 年冬期の観測

2024/25 年冬期,新潟市では AI スマホ路面判定システムを活用した冬期道路管理に関する研究を継続して行った. 2025 年 2 月 7 日 17 時から 22 時までに,気象庁の新潟観測点で 1 時間 11cm,3 時間 30 cm,5 時間 41 cm の記録的な降雪を記録した(図 1).新潟市では,2024/25 年冬期から市内の8 区にそれぞれ 1 か所の路面の雪の深さを測る積雪深計と周辺の状況を撮影する簡易カメラを設置して監視を行ってきた.西区では,同じ時間帯に 1 時間 1 6 cm,3 時間降雪 30 cm,5 時間 45 cm というさらに集中的な降雪が記録された(図 2).カメラ画像からも,この後,降雪が小康状態になり,除雪が比較的スムーズに行われ,大きな混乱はなかったことがわかる(図 3).この集中降雪時の AI スマホによる観測結果を図 4 に示す.新潟市全体の道路が大量の降雪や圧雪に覆われたことが記録から読み取れる.さらに、今冬からは地元の交通事業者の協力の下,バス会社のパトロール車や地元タクシーにも AI スマホを設置することにより,大量降雪時の路面データや画像が取得できた(図 5,6).路面積雪深と各種画像データを利用して解析することにより道路管理に今後活用される可能性が示された.





図2 新潟市集中降雪時の路面積雪深と気温(新潟市降積雪量観測システム西区 2025.2.7-8)



図3 定点カメラ画像抽出(西区 2025.2.7-8)



図4 AI スマホ路面判定結果(新潟市 2025.2.7)



図5 バス、タクシー会社に協力を得た AIスマホ路面判定結果(中央区・西区 2025.2.7)

図6 取得された大雪時の AI スマホ画像(西区 2025.2.7)

3. おわりに

新潟市では、最近の大雪を受けて除雪体制に関する検証会議やその後のオブザーバー会議で、新技術の活用による除雪の効率化も目指すことにしている。今後、さらに研究を進め、AIスマホ路面判定システムの路面判定精度向上、側方余裕幅、路肩高さ判定等道路管理に役立つ活用方策の検討、冬期以外の活用など検討していきたい。調査に全面的に協力頂いた、新潟市の各区の除雪担当の方々に感謝いたします。

LiDAR を用いた道路上の雪氷の計測

○福原匠流¹・杉原幸信²・上村靖司²・藤野丈志³ (1:長岡技術科学大学・工学専攻・機械工学分野 2:長岡技術科学大学・技学研究院・機械系 3:株式会社興和)

1. はじめに

日本の降雪地帯の中において、比較的温暖な地域であ る北陸地域では、地下水を散水して路面上の融雪を行う 散水消融雪装置、いわゆる消雪パイプが広く普及してい る.この装置では比較的低コストで道路交通の維持が可 能であるが、一方で新潟県 HP によると過剰な地下水のく み上げによる散水停止や地盤沈下といった問題も発生し ている.田中らの先行研究(2023)において、残雪深制御の 導入により地下水の節水ができることが確認されている. 一方、杉原ら(2024)によると単一レーザー距離計を用いた 残雪深の計測では、測定箇所が一点であるため、解けむ らの計測ができないという課題がある.そこで本研究で は、LiDAR センサを用いた残雪深計測について検討し、 積雪路面を面的に測定することを目指す.さらに空間中 の雪情報を同時に判別し、その有効性を検討する.

2. 実験における各種条件

本研究では、電柱上部に取り付けた LiDAR センサで路 面上を計測するという想定の下、各種試験条件を設定し た.試験時は建物2階に LiDAR を設置し、屋外のアスフ アルト路面に向けて測定を行った。今回の試験で使用し た LiDAR センサの詳細を表1に示す.センサの位置と撮 影角度は表2に示す姿勢方位センサを用いて、地上約5m、 下向き30°に設定した.

距離測定方式	Time of Flight 方式	
最大測定距離	450m (0klx@反射率80%)	
点群データレート	240,000 点 sec-1	
角度精度	0.05° (1σ)	
測定範囲 (FoV)	70.4°(水平)×77.2°(垂直)	
測定精度	$2 \operatorname{cm} (1\sigma @20 \operatorname{m})$	
レーザー波長	905 nm	
まっ 佐田」 た次熱士はおいせの畑西		

表1 使用した LiDAR センサの詳細

表2 使用した姿勢方位センサの概要

ロール&ピッチ精度(静的)	0.1°
ヘディング精度(静的)	0.5°
速度精度	0.005 m sec ⁻¹

3. データの処理

LiDAR センサを用いて撮影したデータは、秒間 240,000 個の点群データとして記録され、各点はレーザー光の反 射強度によってカラースケールによる色分けが行われる. 図1に晴天時にアスファルト路面を撮影した際のデータ を示す.本研究ではLiDARによって撮影されたデータを 生データとし、編集ソフトである Cloud Compare を用い て解析を行った.この操作によって反射強度を示す色分 けを RGB255 階調によって数値的に表し、また各点群間 の距離から積雪の深さを測定した.



図1 LiDAR による撮影データの例(晴天時)

4. LiDAR を用いた路面の雪氷計測

4.1 積雪深の計測

令和 5~6 年度の冬季において,アスファルト路面上の 積雪を LiDAR で撮影し,積雪深測定の精度を確認した.



(b)積雪深測定図2 LiDAR による積雪の撮影

図 2(a)は積雪の有無を判断するため,積雪面と路面が 露出している部分を同時に撮影したものである. 図中で 青く示されている範囲がアスファルト路面が露出してい る部分であり,緑で示されている範囲が積雪面を表して いる.また図中から積雪上に存在する凹凸がレーザー光 の反射強度の変化として表されており,積雪面の状態が 判別可能であることが分かる.

また図 2(b)では積雪面に人工的に溝を掘り,路面と積 雪面上の高さから積雪深を算出した.検測ロッドを用い て実測した積雪深の値とLiDARによる撮影データの測定 値の比較を表3に示す.

表3 積雪深の測定値 単位 [mm]				
位置	① 実測値	2 LiDAR	1-2	
А	81	76	5	
В	79	73	6	
С	81	77	4	
D	79	74	5	

表3よりLiDARによる積雪深の測定では、約5mm実際よりも小さい値が生じた.これはレーザー光が氷のような光を透過する物質に当たる際に生じる表面下散乱によるものだと考えられ、実際の値とのずれを補正するための手段を今後検討していく必要がある.

4.2 天候の判別

LiDAR センサを用いる利点の一つとして, 広範囲を一 度に把握できることが挙げられる. そこで, LiDAR によ るレーザー光が空気中の雪粒子をとらえることで, 雪情 報センサとしての役割を持たせることが可能か試験した. 本研究中においては, 雨, 粒径の小さい雪, 粒径の大き い雪の3種に天候を分け, それぞれ LiDAR による撮影デ ータへの影響を測定した. 測定したデータを図3に示す.



図3 LiDAR による天候の判別

図中では、四角で示されている範囲内に存在する点群 データの数を右下に示している.ここでは雨粒に対し降 雪粒子がレーザー光を反射する頻度が非常に多いことが 分かる.この差を用いて降雪強度の推定が可能であると 考えられるため、LiDARのみで路面計測と雪情報センサとしての利用を同時に行うことができると考えられる.

4.3 凍結路面の計測

ここまでLiDARを用いた雪の計測に焦点を当ててきた が、一般的に道路路面において最も危険な状態は凍結で ある.特にブラックアイスバーンと呼ばれるような目視 でも判断が難しい危険な路面状況に対して、LiDAR セン サによる判別が可能か試験した.試験では冷凍庫で厚さ 約 10 mmの氷板を作成し、路面上に設置してLiDAR で 撮影した.



(a) 氷板設置直後



(b)氷板周辺濡れ状態 図4 路面状態による氷板の見え方



図5 RGB で表した氷板の反射強度

路面上に設置した氷板をLiDAR で撮影すると,図4の 丸で示す位置のように、周囲と比較して若干レーザー光 の反射強度が変化しているように見える.より変化が大 きい図4(b)の濡れ路面上での氷板について、RGB255 階調 によって数的に比較すると、図5に示すようにGの値が 周囲より大きくなっているため、氷板は濡れ路面よりも 反射強度が高いといえる.しかし、内部に気泡がなく、 透明な氷板を作成して同様に試験を行ったところ、図6 に示す通り、反射強度による色の変化は微小であった.



図6 透明氷板の撮影データ

これらの結果から、LiDAR センサを用いた路面凍結の 判別については、特に透明な氷が路面に張っている場合 は判別ができない.そのため、路面凍結についてはLiDAR センサだけでなく路面温度や湿度など複数のデータを用 いた予測が必要となる.

5. まとめ

残雪深制御の精度を上げるための試みとしてLiDARセ ンサを用いた路面状況の計測を行った.また LiDAR セン サの利点である面的な測定を活用するため、降雪検知と いった雪情報センサへの活用の可能性や、路面凍結のよ うな判別が困難な状況の計測について試験を行った.路 面状況の計測ではアスファルト路面と積雪面の違いだけ でなく、積雪面上の凹凸や轍などの表面形状を詳しく判 別することは可能であった. しかし積雪深の測定につい ては、表面下散乱現象によって実際の積雪深より小さい 値が生じるため、補正方法などの検討が必要である.次 に降雪検知への応用については、降雪の有無だけでなく 降雪強度についても予測可能な測定結果が得られたため、 雪情報センサへの活用が十分に可能であると考えられる. 路面凍結の判別は、結果からみると LiDAR センサ単体で は困難であると考えられるため、新たな判別方法を検討 する必要がある.

今後は、路面状況の変化をリアルタイムに計測し判定 する手段を考案し、実際に残雪深制御に取り入れる際の 有効性を検証していく.

文献

- 福原匠流,杉原幸信,上村靖司,藤野丈志,2024:LiDAR を用いた残雪深および路面状況の計測,雪氷研究大会 (2024・長岡)講演要旨集,271
- 新潟県ホームページ,長岡地域における地盤沈下,https://www.pref.niigata.lg.jp/site/kankyo/1331240506475.html(2024, 6, 24 閲覧)
- 杉原幸信,山賀康平,田中日菜,上村靖司,2024:汎用レ ーザー距離計による路面残雪深計測,日本雪工学会論 文集,40,2,1-13.
- 田中日菜,上村靖司,杉原幸信,2023: 道路消融雪施設に おける多段階出力制御の有効性評価,寒地技術論文・ 報告集,vol.39,103-107.

雪散布による夏季舗装養生時間短縮

 ○山田佳汰¹・齋藤進¹・杉原幸信²・上村靖司²・岩崎伸一³・荒川涼³・中川直人⁴・大久保忠彦⁴
 (1:長岡技術科学大学 工学専攻 機械工学分野 2:長岡技術科学大学 技学研究院 機械系 3:株式会社ネクスコ・エンジニアリング新潟 4:株式会社ネクスコ・メンテナンス新潟)

1. はじめに

道路走行時の快適性や安全性を維持するため,必要に 応じて,道路面の舗装補修を行う必要がある.図1にア スファルト舗装の施工工程図を示す.補修作業は降雪の ない時期に限定されるが,特に夏季の補修作業は路面温 度が下がりにくく,養生と呼ばれる施工工程に長時間を 要する.一般道では60℃以下で交通開放するのに対して, 高速道路では交通開放温度が40℃と低く,目標温度まで 冷えるのにより長い時間を要するといった問題がある. この問題に対して,施工時間を短縮し,迅速に交通開放 するための1つの手法として,舗装冷却工株式会社NIPP0 の噴霧水の気化熱で舗装冷却する方法がある.

本研究では降雪地域ならではの豊富な雪資源を利用し, 夏季のアスファルト補修施工時に雪を散布することで, 養生時間を大幅に短縮する可能性を検討する.その検討 の第一段階として,本報告では実際の舗装現場にて路面 の自然冷却過程を温度測定した.それに加え,どのよう な気象条件下において雪散布のような強制的な冷却が必 要となるかを熱伝導解析によって検討した.さらにアス ファルト舗装の表層上部に雪を模した平板を設置してシ ミュレーションを行い,表層内部が交通開放温度に達す るまでの時間を計算した.以上の結果について報告する.



図1 アスファルト舗装の施工工程図

2. 路面温度測定

2. 1 測定方法

実際の舗設現場にて,路面温度の測定を行った. 測定日時,地点,目視による天候は下記のとおり である.図2に2024年8月29日の舗設現場を示 す.

- A) 2024 年 8 月 29 日(11:30 から 14:00 まで)
 関越自動車道上り片貝高速バス乗り場前 (234.9KP) 曇りのち小雨,平均外気温 30.0℃
- B) 2024年9月11日(15:10~16:00)
 北陸自動車道上り曾地高速バス乗り場付近 (402.7KP)晴れ,平均外気温33.3℃

測定方法は、T型熱電対、接触型のデジタル温度計(図 3)、サーモグラフィーを用いて測定した.T型熱電対に よる測定は黒木(1981)の代表的な温度測定を参考にし、ア スファルト舗装路面に絶縁テープで熱電対計測部を貼り 付け、測定を行った.測定値は3か所の平均とした.デ ジタル温度計は本体センサーを路面に接触させて測定を した.いずれも仕上げ転圧後に施工確認が実施され、現 場監督の了承が得られてから測定を開始した.



図2 アスファルト舗装施工の様子(2024年8月29日)



図3 佐藤計量器製作所 防水型デジタル温度計



図4 熱電対による路面温度測定の様子

2. 2 測定結果

図5にサーモグラフィーによる仕上げ転圧後の舗設面 と付近の路面を撮影した写真を載せる.仕上げ転圧直後 の舗設面の温度はおよそ 90℃~100℃であった.70℃~ 80℃となっている箇所は,アスファルト付着防止のため に転圧機に噴霧した水が路面に流れ,揮発している箇所 と対応している.





図5 舗設面と付近の舗装との温度

8月29日と9月11日のアスファルト舗装路面の温度測 定結果をそれぞれ図6,図7に示す.8月29日は、測定 開始時から40分たったころに小雨が降り出し、雨による 冷却効果もあったため、交通開放温度である40°C付近ま で2時間半ほどで到達した.9月11日は、測定時と比較 すると気温が高く、日射量も大きかったこともあり、冷 却速度が遅かった.これにより交通開放温度に到達する までにさらに時間を必要とすると予想される.また付近 の既設路面温度は40℃を超えていた.



図7 路面温度測定結果(9月11日)

3. 路面温度の熱伝導解析

3.1 シミュレーション条件

本研究では熱流体解析ソフトとして Cradle CFD STREAM 2023.1 Student Edition を用いて、敷き均し後の アスファルトの自然冷却過程について熱伝導解析を行っ た 図8に解析モデルの概要を示す.解析領域は 300×300×300 cm³の立方体とし、領域下部に、表層(4 cm)、 基層 (6 cm), 上層路盤 (20 cm) のモデルを作成した. また表層の中心部には敷き均し時を想定した 160℃のア スファルトを配置した. 詳細なシミュレーション条件は 表1に示す. 今回のシミュレーションの気象条件は8月 の新潟県を想定して設定した. 天候は晴れ, 曇りとし, それぞれ次のように日射量と気温を変更した. 日射量は NEDO 日射量データベース閲覧システムより新潟県のデ ータを参照した.晴れは日射量 800 W/m², 気温 35℃と した. 曇りは日射量 400 W/m², 気温 30℃とした. さら に風速を 0.2, 2.0, 4.0 m/s とし, 晴れと曇りの気象条件 と組み合わせた計6種でシミュレーションを行った.



図8 解析モデル概要

3.2 熱伝導解析結果

図9に敷き均しから480分後の表層表面から深さ0~ 10 cm の温度を示す. 熱伝導解析の結果,晴れ,曇りの日 中において自然冷却では交通開放温度である40°Cまで下 がらないことが分かった.またいずれの気象条件におい ても,内部温度より路面温度の方が高い結果となった. アスファルト混合物は日射吸収率が高いため,日中は路 面温度が下がりにくく,舗装内部の温度が低下しにくい ためと考えられる.また風速が高いほど路面温度,内部 温度ともに冷めやすいことが分かる.よって気温が30°C を超えるような条件下での夏季のアスファルト舗装施工 において,高速道路の交通開放温度である40°C以下の条 件を達成することは困難であり,外部からの強制冷却が 不可欠であるといえる.

表1 解析条件

Cradle CFD V2023.1	(STREAM) 非定常解析	
解析領域	$300 \times 300 \times 300 \text{ cm}^3$	
メッシュ分割数	$150 \times 150 \times 34 = 765000$	
乱流モデル	標準k-εモデル	
日射	800 or 400 W/m^2	
雰囲気温度	晴れ 35 °C or くもり 30°C	
初期条件	敷き均し時の表層:160℃ その他の層:35℃	
強制対流	風速 v [m/s]:0.2 or 2 or 4	
解析時間	480分(8時間)	
計算結果出力	10分毎	
拡散反射率	アスファルト:0.1	
吸収率	アスファルト:0.9	
輻射率	アスファルト:0.9	

4. 雪散布による熱伝導解析

4. 1 シミュレーション条件

解析モデルを図10に示す.解析条件は路面温度の熱 伝導解析と同様である.本シミュレーションソフトでは, 雪や氷などの物体の融解過程を再現することができない ため、表層上部に雪を模した平板を設置した. 平板温度 は0 ℃一定とし、アスファルト舗装表面に雪を十分に散 布し、常に0 ℃の氷水で表面を冷やし続けている状況を 想定した. この仮定において、どの程度の時間で表層内 部が交通開放温度まで冷却されるかを計算する.なお, この雪を模した平板の反射率はシップ・アンド・オーシ ャン財団(1999)から0.8とし、透過率を0.2とした.また、 雪ありでのシミュレーションでは、雪を散布するタイミ ングを仕上げ転圧後と想定し、2章で示した路面温度測 定の開始地点が該当するため、そのときの温度70℃を路 面温度の初期温度とした.またその際の基層の温度を前 節のシミュレーション結果より70℃とした. 詳細なシミ ュレーション条件は表2に示す.





図10 解析モデル概要

表2 解析条件

Cradle CFD V2023.1 (STREAM) 非定常解析		
解析領域	$300 \times 300 \times 300 \text{ cm}^3$	
メッシュ分割数	$150 \times 150 \times 34 = 765000$	
乱流モデル	標準k-εモデル	
日射量	800 or 400 W/m 2	
雰囲気温度	晴れ 35 °C or くもり 30°C	
初期条件	敷き均し時の表層:70℃ 敷き均し表層下の基層:60℃ その他の層:35℃	
強制対流	風速 v [m/s]:0.2 or 2.0 or 4.0	
解析時間	60分	
計算結果出力	1分毎	
拡散反射率	アスファルト:0.1	
吸収率	アスファルト:0.9	
輻射率	アスファルト:0.9	
雪の透過率	0.2	
雪の反射率	0.8	

4.2 雪散布による熱伝導解析結果

図11に雪と見立てた面をアスファルト舗装路面に設置した際に、各気象条件で表層の下端(路面から深さ4 cm)が交通開放温度である 40 ℃を下回ったときのアスファルト舗装内部温度と深さの関係を図11に示す.風速に寄らず、晴れの気象条件(日射量800 W/m²,雰囲気温度35℃)では表層の下端が交通開放温度である 40 ℃に達するまで46分、曇りの気象条件(日射量400 W/m²,雰囲気温度30℃)では45 分であった.熱伝導解析により、

気温が高く日射量の大きい気象条件でも、アスファルト 舗装路面上を0℃一定の面で覆うことで、仕上げ転圧終了 から1時間以内に表層を交通開放温度である40℃まで冷 却できることが示唆された。



5. まとめ

実際の舗設現場にて,路面の温度測定を行った結果, 舗設していない路面の温度が40℃以上であり,夏季のよ うな気温が高く,日射量が多い気象条件の際は,養生時 間を短縮するために,路面を強制的に冷却する必要があ ることが分かった.熱伝導解析を行った結果,晴れ,曇 りの日中において自然冷却では交通開放温度である40℃ まで下がらないことが分かった.雪散布による強制冷却 シミュレーションでは,路面温度が交通開放温度になる まで雪が十分にあると仮定したとき,表層内部まで目標 温度まで到達するのに晴れか曇りかによらずおおよそ45 分で済むことがシミュレーションにより分かった.

文献

舗装冷却工株式会社 NIPPO:アスファルト舗装の養生時 間短縮工法,https://www.nippo-c.co.jp/tech_info/general/ SG02053_g.html(2025.03.19 閲覧)

黒木勝一(1989), 熱物性 , 3(2), 94-101

- NEDO:日射量データベース閲覧システム,国立研究開 発法人,新エネルギー・産業技術総合開発機構
- シップ・アンド・オーシャン財団(1999):北極海航路-東 アジアとヨーロッパを結ぶ最短の海の道, 3.1.7 アル ベドの季節変化, https://nippon.zaidan.info/seikabutsu/199 9/00862/contents/029.htm(2025.03.19 閲覧)

機械学習を用いた新潟県長岡市の人身雪害発生予測 -人身雪害発生件数に基づく重み付けを施したモデルの作成と評価-

石川大貴¹, ○杉原幸信², 上村靖司²

(1:長岡技術科学大学 工学専攻 機械工学分野 2:長岡技術科学大学 技学研究院 機械系)

1. はじめに

日本は国土の51%が豪雪地帯であり、人口の15%に当 たる2000万人が豪雪地帯で生活している.この豪雪地帯 では毎年のように人身雪害が発生していて、例えば新潟 県長岡市では、平成21年から令和5年の間に537件発生 しており、雪の多い年では100件近くにものぼる.そこ で、著者らは人身雪害を未然に防ぐための注意喚起を目 的に、機械学習を用いた人身雪害発生予測モデルの開発 に取り組んでいる.新潟県長岡市の人身雪害を対象とし、 気象条件を説明変数として、人身雪害が生じるか否かを 日単位で予測する機械学習モデルをこれまでに作成し

(石川ら,2023),このモデルの説明変数に平年比および 平年差の気象条件を追加するなど予測精度の向上に取り 組んできた(石川ら,2024).

本報告では、引き続き新潟県長岡市の人身雪害を対象 とし、新たに人身雪害発生件数に基づく重み付けを施し たモデルを作成し、予測精度を評価した結果を報告する.

2. 人身雪害発生件数に基づく重み付けを施したモデル

機械学習を用いて人身雪害発生の有無を日単位で予測 するモデルを作成する. その手順を図 1 に示す. 人身雪 害データは,新潟県長岡市において平成 21 年度から令和 5 年度の 11 月から翌 3 月までの 2268 日間に発生した 537 件を対象とした. モデルの構築には Python の機械学習ラ イブラリである scikit-learn を用い,サンプリング,説明 変数の選定,モデル構築,評価を一貫して行った. それ ぞれの詳細は既報(石川ら, 2024) に譲る.



図1 機械学習を用いて人身雪害の発生を予測する流れ

本報告の人身雪害発生件数に基づく重み付けを施した モデルの構築には、決定木 (DT) とランダムフォレスト (RF)の機械学習アルゴリズムを使った.ここで、決定 木を例に重み付けの方法を説明する.決定木の分岐条件 を決定するため指標として、ジニ不純度を用いる.この ジニ不純度へ代入するクラスの割合を、石川ら(2023; 2024)では日数で求めていた.すなわち,総日数(=発 生日+非発生日,単位は日数)に占める人身雪害発生日 数(クラス A)の割合および非発生日数(クラス B)の 割合を算出し,ジニ不純度を計算していた.しかし,こ の方法では分岐条件の決定に1日当たりの人身雪害発生 件数が考慮されず,そのため,人身雪害が多く発生する 日の気象条件を,分岐条件を決定する際に重視させるこ とができなかった.

そこで本報告の人身雪害発生件数に基づく重み付けを 施したモデルでは、ある日の人身雪害発生件数に基づく 重みを「1日当たりの人身雪害発生件数+1」と定義して クラスの割合を求め、ジニ不純度を計算し、決定木モデ ルの分岐条件を決定した.すなわち、総重み(=発生日 の重み+非発生日の重み)に占める人身雪害発生日の重 み(クラスA)の割合および非発生日の重み(クラスB) の割合を算出し、ジニ不純度を計算することで、人身雪 害発生件数の多い日の気象条件をより重視させる予測モ デルとした.

3. 説明変数の選定

人身雪害発生件数に基づく重み付けを施したモデルは、 サンプリング方法を RUS (Random Under Sampling) と SMOTE,機械学習アルゴリズムを決定木 (DT) とラン ダムフォレスト (RF) とした合計4種類を作成した.そ れぞれのモデルでは、表1に示す計25の気象条件を説明 変数の候補とし、特徴量重要度に基づいてそれらを選定 した.その結果、表2の説明変数の組合せを得た.なお、 説明変数欄の気象条件の先頭の数字が、そのサンプリン グと機械学習アルゴリズムの組合せで人身雪害の発生を 予測するうえでの、説明変数の重要度の順位を示す.た とえば、SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique)と決定木 (DT) のモデルでは、七日間降雪量 と当日降雪量、平年比当日積雪深の3 つの気象条件によ

表1 説明変数の候補となる 25 の気象条件

No.	説明変数	No.	説明変数	No.	説明変数
1	当日降水量	10	当日最大風速	19	平年差当日最低気温
2	当日降雪量	11	当日最大瞬間風速	20	平年比当日降雪深
3	前日降雪量	12	平年比当日降水量	21	平年差当日降雪深
4	七日間降雪量	13	平年差当日降水量	22	平年比当日積雪深
5	当日最大積雪深	14	平年比当日平均気温	23	平年差当日積雪深
6	当日平均気温	15	平年差当日平均気温	24	平年比前日降雪量
7	当日最高気温	16	平年比当日最高気温	25	平年差前日降雪量
8	当日最低気温	17	平年差当日最高気温	$\overline{}$	
9	当日平均風速	18	平年比当日最低気温	\searrow	

表2 重要度の高い説明変数の組合せ

サンプリング	アルゴリズム	説明変数
RUS	DT	①平年比当日積雪深, ② 七日間降雪量 , ③当日平均気温, ④ 平年差当日最高気温
	RF	①当日最大積雪深,② 平年比当日積雪深 , ③ 七日間降雪量
SMOTE	DT	①七日間降雪量,②当日降雪量, ③平年比当日積雪深
	RF	①七日間降雪量, ②平年差当日積雪深, ③平年比当日積雪深

って新潟県長岡市のある日の人身雪害の発生を予測する ことができ、最も重要な気象条件は七日間降雪量であっ た.また、4種類の機械学習モデルの全てにおいて、七日 間降雪量と平年比当日積雪深が重要な説明変数に選定さ れていた.

4. モデルの評価

混同行列から見逃し率と空振り率を算出してモデルを 評価した.実際に人身雪害が発生しているが予測できな かった日を見逃し,実際は人身雪害が発生していないも のの発生と予測してしまった日を空振りとした.そして, 全ての予測結果に占める見逃しの割合を見逃し率,空振 りの割合を空振り率とした.

また、交差検証を用いてモデルの予測精度を検証した. これは、データを年度ごとに分割してそのうち1ヵ年度 をテストデータに、残りの年度を学習データとして評価 する方法である.本報告では平成21年度から令和5年度 までのそれぞれの年度をテストデータとして交差検証し、 1ヵ年度ごとに見逃し率と空振り率を求めた.そして、15 ヵ年度分の見逃し率と空振り率を平均することでモデル の予測精度を評価した.

図 2 に人身雪害発生件数に基づく重み付けを施した 4 つのモデルの予測精度を示す.例えば、サンプリング方法に SMOTE, 機械学習アルゴリズムに決定木を用いて作成したモデルの場合は、「SMOTE_DT」と表記する. なお、それぞれのモデルにおいて予測に用いた説明変数は表 2 の通りである.



図2より, SMOTE でデータを前処理した DT および

RFの見逃し率および空振り率はいずれも5%以内となり, 人身雪害発生件数の多かった日の気象条件をより重視さ せることで極めて高い精度の予測モデルを構築できた. これまでの研究で作成した SMOTE_RF および SMOTE_DT モデル(石川ら 2023; 2024)では,空振り 率が 12%以下となることはなかったため,人身雪害発生 件数に基づく重み付けを施すことで,特に空振り率を低 下させることが可能となったといえる.また,サンプリ ング方法を RUS にすることで,見逃し率は SMOTE の約 5分の1となるが,空振り率は約5倍となった.

本報告ではサンプリング方法を SMOTE としたモデル が、見逃し率および空振り率がともに低く、人身雪害の 発生を予測するにあたりバランスの良いモデルだと判断 した.

5. モデルの適用範囲

SMOTE_RF によって予測した 15 ヵ年度分の結果を詳 細に分析した結果,全予測対象日 2268 日のうち,見逃し が合計 88 日,空振りが合計 84 日発生していることがわ かった.

空振りが発生した日は 12 月, 1 月, 2 月に集中してお り,これらの月では降雪が多いことが確認された.本報 告の予測モデルでは,表 2 に示す説明変数の組合せ

(SMOTE_RF では七日間降雪量,平年差当日積雪深,平 年比当日積雪深)を用いているため、人身雪害が発生す ると学習した各説明変数のしきい値に当日の気象条件が 達したとしても、実際には人身雪害が発生しなかった場 合に空振りが生じたと考えられる.

さらに見逃しが発生した日を分析した結果,人身雪害 分類の発病,転倒,除雪機による事故において見逃しが 多いことが明らかとなった.また,七日間降雪量の少な い11月および3月に発生した人身雪害は,すべて見逃さ れていた.これらの時期については表2の説明変数の組 合せと本モデルでは予測困難であるといえる.ことが主 な原因と推測される.

6. まとめ

本報告では機械学習を用いて新潟県長岡市における人 身雪害発生の有無を日単位で予測するモデルを,人身雪 害発生件数の多い日の気象条件を重視させて作成した. その結果, SMOTE でデータを前処理した DT および RF の見逃し率および空振り率は5%以内となり,極めて高い 精度の予測モデルを構築できた.

文献

- 石川大貴,杉原幸信,上村靖司,諸橋和行. (2023):機械 学習を用いた長岡市の人身雪害発生予測. 寒地技術・ 論文報告集, 39, 254-258.
- 石川大貴,杉原幸信,上村靖司,諸橋和行. (2024):機械 学習を用いた新潟県長岡市の人身雪害発生予測. 寒地 技術・論文報告集,40, I-043-1- I-043-6.

図2 人身雪害発生件数に基づく重み付けモデルの予測精度

プローブ型積雪硬度計を用いた吹きだまり内部構造の解明

-断面観測との比較-

○新屋啓文¹・大宮哲²・松宮央登³・丹治星河⁴・大風翼⁵ (1:新潟大学災害・復興科学研究所 2:土木研究所寒地土木研究所 3:京都大学大学院工学研究科 4:京都大学防災研究所 5:東京科学大学環境・社会理工学院)

1. はじめに

防雪柵や防雪林の周りには、風で運ばれた雪粒子が堆積することで、吹きだまりが形成される.これまで我々は、防雪柵を模した仮設フェンスを雪原に設置し、その周囲に形成される吹きだまりを調査してきた. 具体的には、 UAV-SfM や LiDAR で吹きだまり形状を捉え、断面観測により積雪密度を得ることで、吹きだまり量に基づく防雪 柵の捕捉性能を論じてきた. しかしながら、断面観測で吹きだまりの内部構造を面的に調べることは、時間的に難 しい. 加えて、断面観測で吹きだまりを崩してしまうと、吹きだまりの時間発展を調べることができない. そのた め、断面観測に代わる簡易な方法で、吹きだまりの内部構造を計測する必要がある. 本研究では、プローブ型の積 雪硬度計により吹きだまりの内部構造を調べ、断面観測との比較を行ったので、その結果を報告する.

2. 手法

吹きだまり観測は、寒地土木研究所が構築した吹雪観測サイト(釧路圏摩周観光文化センターの敷地内)で実施 された. 仮設フェンスは、2025年1月7日に卓越風向と直交するよう空隙率34%のネットを長さ10m・高さ1m に設置された. そして、2025年2月16日まで複数の吹雪イベントによって形成された吹きだまりを観測した. 観 測では、卓越風向に沿って仮設フェンスの中央から風上10mの地点まで1m間隔で断面観測を実施した. 各地点 において積雪深を測るとともに、深さ10cm間隔で雪温・積雪密度・積雪硬度を計測した. さらに、断面観測と並 行して、プローブ型積雪硬度計による計測を仮設フェンスの風上10mから風下7mまで行った.

3. 結果と考察

図1は、仮設フェンスから風上1mの地点での断面観測とプローブ型硬度計(SSP)による積雪硬度を示している. 断面観測の結果は3回計測した平均値と標準偏差であるが、プローブ型硬度計の結果は1mm間隔で記録された生データと深さを実際の積雪深(61 cm)で規格化した補正データを表している. 雪質は、深さ17~19 cmの氷板(IF)を除いて、こしまり雪(DF)であった.

プローブ型積雪硬度計による積雪深は68.1 cm であり,実測値の61 cm より約11%の過大評価であった.この原因として,光学式センサーの変位から深さに換算しているため,空隙の多い箇所で誤差が生じた可能性が考えられる.ただし,補正したデータでは,深さ17~19 cm の氷板と合致するように積雪硬度の急増が確認される.そのため,積雪深の実測値による補正が有効であると判断できる.

プローブ型積雪硬度計で得られた積雪硬度を断面観測と比較すると,断面観測での積雪硬度の平均値と同程度の 値が記録された.さらに,断面観測での積雪硬度の標準偏差に焦点を当てると,積雪硬度の変動幅と標準偏差の大

きさが対応しているように見える. つ まり,積雪の不均一性の激しい箇所で は,プッシュプルゲージによる値が計 測毎に大きく異なったと判断できる.

4. まとめ

本観測では、吹きだまり形状を乱さ ずに内部構造を調べる新たな手法と してプローブ型積雪硬度計を導入し、 断面観測と比較することで精度検証 を行った.積雪深のズレは見られるも のの、得られた積雪硬度は断面観測と 一致するだけなく氷板の位置とも整 合した.



図1 仮設フェンスから風上1m地点での積雪硬度の鉛直分布

温暖多雪地における積雪期間を通した積雪底面流出の推移

○竹内由香里¹•勝島隆史¹•勝山祐太¹ (1:森林総合研究所十日町試験地)

1. はじめに

融雪水や積雪期に降った雨は積雪底面から土壌へ浸透し、河川へ流出する.積雪底面からの流出量を把握するこ とは雪氷災害や土砂災害の防災上、また流域の水収支や物質循環に関わる研究上も重要であるが、雨水や雪面で生 じた融雪水は、積雪内の流下過程を経て底面から流出するため、流出量の把握は容易ではない. よく知られている ように、融雪水や雨水は積雪内を一様に流下するより、水みちを集中的に流下することが多く、その過程で積雪の 層境界に沿って側方へ移動することもあり、底面流出量の測定や数値モデルによる再現を難しくする要因となって いる. ライシメーターを用いた融雪流出の研究は早くから行われてきたが、近年は積雪期に雨が降ること(Rain on snow: ROS) による融雪災害に関連して積雪底面流出への関心が高い.そこで、積雪期を通した積雪底面流出量の 変化を調べ、時期による融雪量、降雨量の違いや積雪状態の変化との関係を明らかにするために解析を行った¹⁾.

2. 方法

解析には森林総合研究所十日町試験地(新潟県十日町市)において観測した気温,湿度,風速,降水量,正味放 射量,地中熱流量,積雪深,積雪底面流出量の1時間値とほぼ10日毎に実施した積雪断面観測のデータを使用し た.積雪底面流出量の測定に使用したライシメーターは、底面が 3.6 m×3.6 mの大きさで、転倒ますの容積は 500 cm³, 1回の転倒は約0.04 mmの水量に相当する.降雨量は降水時の気温で降水量を雨と雪に配分し²,風速に基 づいた捕捉率で補正した.雪面融雪量は熱収支法で算出し、底面融雪量は、地面から 2cm の深さに設置した地中 熱流板で測定した上向きの地中熱流量が底面融雪熱量に等しいとみなして算出した.

3.結果と考察

図1に2022年の積雪期間に観測した積雪底面流出量と、積雪に流入した雪面融雪量+底面融雪量+降雨量の変 化を各時期の特徴を表す3日間について示した.1~2月の厳冬期は底面流出量の日変動がほとんどなく、たまに

降雨や雪面融雪があっても流出量の増加はみられず、底面融雪量 だけが観測された(図 la). 融雪期に入り, 雪面での融雪が連日生じ ると、底面流出量が増加するとともに融雪量を反映して規則的な 日変動が現れるようになった (図 1b). 融雪最盛期になると流入量 と同じか流入を上回る量の流出が観測されるようになった(図 1c).

積雪断面観測結果から,積雪初期から厳冬期には粒径の小さな 新雪、こしまり雪、しまり雪の層が存在したこと、さらに融雪初 期にかけては積雪全層の含水量が徐々に増加したことが明らかに なった、流入した水の一部が積雪内に保持されたことにより、こ の時期は日流出量が日流入量より少なくなったといえる.融雪期 には、雪面融雪量が増加し、全層がざらめ雪に変化したため、流 入から流出までの時間が縮まり流出率が増加したと考えられる. さらに融雪最盛期には、積雪深の低下に伴い積雪内に保持されて いた水も流出したために流出量が流入量を上回る日があったと考 えられる. 積雪期間を通して積雪のほぼ全層が湿った状態で経過 する温暖な積雪地域であっても、1~2月に多量の雪が積もる多雪 地においては、融雪水や雨水が積雪内に保持され、一部だけが積 雪底面から流出する期間が長く、そのような時期の積雪底面流出 応答は融雪期とは大きく異なることが確かめられた.

文 献

1) 竹内由香里ら, 2024: 水利科学, 68(3), 130-147.

2) 竹内由香里ら, 2016: 森林総合研究所研究報告, 15(4), 145-149.



数値モデルによる積雪中の水分凍結に伴う氷板形成過程の再現の試み

○平島寛行¹・八久保晶弘²・白川龍生²・大澤光³
 (1:防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 2:北見工業大学 3:森林総合研究所)

1. はじめに

斜面積雪中を水が移動する際には、粒径の異なる層境 界や氷板上で浸透が妨げられて帯水し、斜面に平行に移 動することがある.層境界における毛管障壁による帯水 層は帯水量の増加や粒径成長の進行によりバランスが崩 れて下層に流出する.一方で、氷の不透水性による帯水は 氷板の孔等を通って下層に浸透する.このように氷板に よる側方流はその形状が影響するため、氷板の形成過程 もモデル化する必要がある.本研究では積雪変質モデル SNOWPACK 及び凍結過程を組み込んだ3次元の水分移 動モデルを用いて氷板の再現計算を試みた.

2. 方法

本研究では、まず、北見工業大学の露場で観測された氷板¹⁾を再現するため、露場の気象データを入力して水みちを考慮した積雪変質モデルSNOWPACK²⁾で氷板の再現を試みた.続いて、3次元水分移動モデル³⁾に熱伝導及び凍結過程を組み込む改良を加えて下記の計算を行った. 30cm 幅、10cm 奥行き、28cm 高さを持つ2cm メッシュの3次元空間を設定し、初期密度は300 kg m³、粒径は上半分を0.5mm、下半分を1.2mm に設定して毛管障壁により帯水する条件にした.積雪の初期温度は全層を-5℃、-10℃、及び-20℃に設定した3パターンで上部から1時間に2mmの水を供給し、24時間分の計算を行った.

3. 結果及び考察

北見における 2023/24 冬期の SNOWPACK による計算 結果を図1に示す.3月11日に高さ 29cm の所で氷板が 形成され,その後融雪によって消失するまで残った.この 氷板の層は次のメカニズムで形成された.1)2月27日の 降雪で古い雪の上に新しい雪が堆積し,それらの雪層の 間で粒径に差が見られた.2)その後の融雪により浸透し た水が,古い雪との境界部分で毛管障壁により帯水した. 3)その後の気温低下に伴い積雪内部も冷やされ,帯水層 の水の凍結が進んだ.4)密度が700kgm³を超えた段階 で SNOWPACK では氷板と分類された.

この計算で現れた氷板は実際の断面観測でも、同じ箇 所で確認されていたが、形成のタイミングが異なったこ とや、観測で確認されたが計算で再現できなかった氷板 もあり、改善の余地が見られた.

続いて、3次元水分移動モデルで計算した、計算終了後 の含水率分布及び密度の分布を図2に示す. 粒径の異な る層境界で含水率の高い層が見られたが、その層の一部 で乾燥密度が大きく増加した.また、水みちとなった部分 も凍結により乾燥密度が増加した.これらは氷板やアイ スパイプに相当し、北見で確認された氷板周辺の様子を よく再現していた.

4. まとめ

2つの数値モデルを用いて氷板の再現計算を行なった. 氷板の再現性は水分移動過程やそれに影響する粒径等の 再現精度が大きく影響する. 今後も実験, 観測による検証 やモデル間比較を進めてより正確な再現を目指す.

本研究は科研費 24K0713 及び防災科研雪氷と北見工業 大学 SAFER の連携協定のもとで行なった.



図 1 SNOWPACK による北見における雪質の計算結果. 3 月中旬から高さ 25~30 cm の所で氷板が形成された.



図 2 3 次元モデルで計算した含水率(a)及び乾燥密度(b) の分布.密度は初期値からの増加量で着色した. 文献

- 八久保ら(2024):積雪中の水の移動にともなう水安定
 同位体比プロファイルの移動,雪氷研究大会 (2024・長岡) 講演要旨集,145.
- 2) Wever et al. (2016): Simulating ice layer formation under the presence of preferential flow in layered snowpacks, *The Cryosphere*, 10, 2731–2744.
- 3) Hirashima et al. (2014): A multi-dimensional water transport model to reproduce preferential flow in the snowpack, *Cold. Res. Sci. Technol.*, 108, 80-90.

富士山頂における微生物粒子個数濃度の連続測定

渡辺幸一¹•村田浩太郎²•加藤俊吾³

(1:富山県立大学工学部 2:埼玉県環境科学国際センター 3:東京都立大学都市環境学部

1. はじめに

近年,バイオエアロゾル(微生物粒子)についての関心が高まっているが,中でもその一部が強力な氷核活性を持つなど,気象学や雪氷学においても注目されている(牧ら,2020).そのため,雲活動が活発な高高度において,微生物粒子の連続的な計測が重要となる.しかしながら,国内において微生物粒子個数濃度の連続計測例は非常に少なく,山岳域などの高所での測定はほとんどなされていない.本研究では,リアルタイム浮遊菌カウンタにより,微生物粒子数の連続的な計測を夏季の富士山頂で行い,その変化特性や氷晶核への影響について考察した.

2. 方法

2024年7月23日から8月22日までの1カ月間,富士山頂(富士山測候所内)にTSI 社製リアルタイム浮遊菌カウンタ (BioTrack MODEL 9510-BD)を設置し,粒径別エアロゾル粒子個数濃度および微生物粒子個数濃度を連続的に測定した.計測は2時間毎に1分間行った.なお,本計測器の概要および予備的な富山県での測定結果を,Watanabeら(2022) に報告している.本浮遊菌カウンタで計測できる微生物粒子は粒径1µm以上の粗大粒子モードであるため,微小な(<1 µm)微生物粒子の測定はできない.計測した微生物粒子個数濃度について,富士山頂で測定されている微量気体成分 や氷晶核実験の結果との比較を行った.

3. 結果と考察

図1に2024年夏季の富士山頂における微生物粒子個数濃度の時系列を示す.富士山でのエアロゾル粒子および微 生物粒子個数濃度は共に富山県の平野部で測定された個数濃度より低かったが,日中に高く、夜間に低くなる明瞭な日 変化が観測された.山岳域の大気循環の特徴によるものであり,日中に下層から微生物が輸送されているものと考えられ る.また,台風の影響による(海塩粒子によると考えられる)粗大粒子の増加現象が度々観測されたが,同期間中の微生物 粒子は比較的低かった.

微生物粒子個数濃度は、海洋性の大気中で低く、日本国内や大陸由来の気塊中で高くなる傾向を示し、特に一酸化炭素濃度の変化と良く対応していた。また、微生物粒子数が高かった7月31日については、氷晶核実験においてバイオエアロゾルの影響がみとめられた。今後、更に微生物粒子数とエアロゾルの氷晶核活性との関連性を詳しく評価していくことが重要となる。



図1 2024 年夏季の富士山頂における微生物粒子個数濃度の時系列

文献

牧輝弥, 北和之, 保坂健太郎, 三星かおり, 五十嵐康人(2020):森林大気のバイオエアロゾル. 大気化学研究, 43, No. 043A02.

Watanabe, K., Satoh, H. and Maki, T. (2022): Continuous measurements of microbial particles in central Japan using a Real Time Viable Particle Counter. *SOLA.*, **18**, 104-109.

融雪期の山岳域における表層雪中の化学成分の特徴および冷蔵保存中の濃度変化

○森智晴¹・大納涼雅²・山崎雄太²・渡辺幸一²・岩本玲佳³・酒徳昭宏³・田中大祐³
 (1:富山県立大学大学院工学研究科 2:富山県立大学工学部 3:富山大学理学部)

1. はじめに

立山などの山岳域では融雪期に、雪氷藻類の繁殖による赤色に着色した雪や,非水溶成分の濃縮による汚れ雪が 生成されるが,融雪期の積雪はイオン成分が溶脱するため,融雪期の積雪表面における化学成分および濃度の時間 変化について調査された事例は必ずしも多くない.本研究では,融雪期の立山などにおける表層雪の採取を行い, 化学成分の分析および冷蔵保存中の濃度の時間変化について評価した.

2. 方法

2024 年の融雪期の立山・室堂平周辺および乗鞍岳において着色した表層雪の採取を行い, 試料を融解させない まま富山県立大学に持ち帰り冷凍保存した. 試料融解後, ろ過(孔径 0.45 µm), 未ろ過試料に分け, 主要イオン 成分をクロマトグラフ法で測定した. 解凍後の試料は冷蔵保存し, 同試料を1週間おきに主要イオン成分の分析を 行った. ろ過したフィルターについては SEM-EDX 解析を行った. また, 冷蔵保存した立山・室堂周辺の表層雪試 料について, 富山大学理学部の田中研究室内で DNA 抽出および 1stPCR を行った後, 16S rRNA V3/V4 領域のアン プリコンシーケンス解析を株式会社生物技研 (https://gikenbio.com/) に依頼した.

3. 結果·考察

融雪期の立山・室堂周辺で採取した試料では、未ろ過で冷蔵保存中に硫酸イオン濃度およびアンモニウムイオン 濃度が大幅に増加し、一時的なpHの低下がみられたが、その後pHが増加した.特に、「室堂東部」と「雪の大谷」 で採取した試料において硫酸イオン濃度が著しく増加した(図 1).融雪期に濃縮した非水溶性の硫黄が(硫黄酸 化細菌の働きにより)硫酸へと酸化されたためと考えられる.また、「雪の大谷」試料ではアンモニウムイオン濃 度の有意な増加もみられた.一方、乗鞍岳で採取した試料では、硫酸イオンの顕著な増加はみられなかった.室堂 周辺の試料をろ過したフィルターを SEM-EDX 解析した結果、非水溶性の硫黄が有意にみとめられた.特に室堂東 部の試料において、付近に存在する地獄谷由来の硫黄成分の影響を大きく受けていたものと考えられる.

細菌叢解析の結果から、室堂東部と雪の大谷の試料で硫黄酸化細菌である Sulfuriferula 属が検出された.また、 同試料においては強力な窒素固定菌である Paraburkholderia 属もみとめられ、貧栄養環境である室堂周辺の窒素循 環としての意義が大きいといえる.



図 1 融雪期の未ろ過試料の冷蔵保存中の硫酸イオンおよびアンモニウムイオン濃度の時間変化 (a;室堂東部 2024 年 7 月 5 日採取, b;雪の大谷 2024 年 8 月 11 日採取)

滴下法による氷柱花作成

ー気泡発生位置の予測と花氷の形状変化が気泡発生に与える影響ー

丸山翔生¹・○東條将也¹・上村靖司²・杉原幸信² (1:長岡技術科学大学大学院 工学専攻機械工学分野 2:長岡技術科学大学 技学研究院 機械系)

1. はじめに

氷柱花は外観の美しさから飲食業界や観光業界で需要 がある.しかし,藤田ら(2022)によれば飲料用の透明度が 高い小さな氷柱花を作ることは容易ではなく,放射製氷 装置の途中に,食用花を直接投入し,製氷を継続すること で氷柱花の作製を試みたが,この方法では,氷の成長に伴 って食用花下方に多数の気泡が発生し,濁った氷となっ た.そこで,本研究では滴下法を用いて花や葉を取り込ん だ氷(以下「花氷」と称する)を作製し成形する行程(STEP1) の後に花氷を放射製氷過程の途中に投入して取り込ませ る工程(STEP2)を行う2段階製氷によって,高品質な氷柱 花を作ることを試みた.透明度の高い氷柱花を作製する ためには STEP1 と STEP2 のそれぞれで気泡発生を抑え ることが重要である.

本報告では、花氷作製段階(STEP1)と氷柱花作製段階 (STEP2)で発生する気泡の原因および抑制方法について 検討した結果を報告する.

2. 氷柱花作製方法

花氷作製段階(STEP1)について説明する.花氷作製装 置の概要を図1に示す.断熱槽内の上部に熱交換器を取 り付けて-20°Cの不凍液を循環させることで,槽内を任意 の温度(-2, -5, -7°C)にした.また,槽内温度を一定に保つ ため、底部から380mmの温度測定点が設定以上になっ た場合には不凍液の循環を開始し,設定値以下になった 場合には不凍液の循環を停止するという温度制御を行っ た.

花氷作製の手順は次のとおりである.まず温度制御により一定に保たれた断熱槽内に花や葉を設置する.その後,水滴の滴下間隔を 0.12 mL min⁻¹に調整し,水を花や葉に供給する.水滴の滴下をおよそ 24 時間継続し,氷を成長させ,十分に成長した花氷をバンドソーで切り出す.

3. 花氷作製段階(STEP1)での気泡発生

第2章の方法で作成した花氷を観察すると、ある位置 から白濁していることが確認できた.これは気泡の発生 によるものであり、透明度の高い氷柱花を作製するため に花氷作製段階では、花や葉の周りは気泡発生を抑える 必要がある.そのため、この滴下法による花氷作製にお ける気泡発生位置を予測し、気泡が含まれない花氷を作 成する条件を検討する必要がある.気泡発生位置の予測 は以下の手順で行う.



図1 花氷作製装置の概略図

(1)花氷作製環境のモデル化と仮定

滴下法を用いた花氷作製環境の液滴の形状,熱の授 受,溶存気体の種類と変化についてモデル化 (2)流下速度の実験式の導出

各槽内温度の花氷表面を流れる液滴の速度を測定し, 実験式を導出

(3)凍結速度の算出

熱収支計算より凍結速度を算出

(4)液滴の溶存酸素濃度が飽和に達する時間の算出

時間によって変化する液滴の体積および溶存酸素濃度 を考慮

(5)気泡発生位置の推定

液滴が移動する距離,形状予測式から気泡が発生し始める位置を推定

これらの詳細について以下の節で説明する.

3.1 気泡発生位置の予測

(1) 花氷作製環境のモデル化と仮定

気泡の発生メカニズムは,前野(1966)によって解明さ れている.まず,原料水が凍結する際に原料水の溶存気 体が掃き出されるように未凍結の原料水に移動する.掃 き出された溶存気体は凍結面を離れて水中に拡散する が,この拡散速度よりも凍結により掃き出される溶存気 体の移動速度が速い場合,凍結面前面の未凍結水では溶 存気体濃度が増加する.この未凍結水の溶存気体濃度が 飽和に達することで未凍結水中に気泡が発生し,氷の成 長とともに気泡が取り込まれる.

花氷作製環境についてモデル化を行う.モデル図を図 2 に示す.まず,花氷表面に流れる液滴の形状では底面が 円の半扁平楕円体とし,その形状を維持した状態で凍結 により液滴のサイズが縮小するとした.また,熱の授受で は液滴が流下することで空気の相対的な流れが発生する ため液滴と空気間の強制対流を考慮し,さらに熱交換器 で槽内を冷却するため液滴と熱交換器との放射も考慮す る.最後に,液滴に溶存する気体は代表して酸素のみを考 慮する.液滴は空気と触れていて酸素が常に供給される ため液滴の溶存酸素濃度は時間変化するとした.

(2) 流下速度の実験式の導出

強制対流の熱伝導率や液滴が移動する距離を求める際 に必要となる花氷表面での液滴の流下速度を求める実験 式を導出する.初めに,槽内温度-2°C,-5°C,-7°Cにお いての,0.0~2.0sまでの0.2s間に流下した距離を測定 し,流下速度を求めた.次に,その結果を時間ごとに整 理し,槽内温度と流下速度の関係の近似式を算出した. その結果を図3に示す.なお,0sは測定開始時点の結 果であるため,測定結果の不安定性が高いと考え,排除 した.この近似式の決定係数 R^2 は R^2 =0.95~0.99>0.80 であるためこの近似式は有効であると考えられる.最後 に近似式により求めた流下速度を使用して任意の槽内温 度での流下速度を時間を変数として近似し,近似式を算 出した.

(3) 凍結速度の算出

時間とともに変化する液滴の体積を求めるには液滴の 凍結速度が必要となる.凍結速度は熱収支計算により液 滴から奪われる熱量と液滴が放出する熱量から求める. 液滴から奪われる熱量では、強制対流と放射を考慮し、 液滴が放出する熱量では液滴の温度変化分の顕熱と水か ら氷への状態変化分の潜熱を考慮した.

まず強制対流による熱量 Q_a[W]はニュートンの冷却法 則より

$$Q_a = Ah(T_1 - T_2) \tag{1}$$

と表すことができる. ここで,Aは水滴表面(底面は考 慮しない)の熱伝達面積で $9.08 \times 10^4 \text{ m}^2$,hは水滴と空気 との 熱伝達率[Wm²K⁻¹]で, T_1 は水温で276.65 K, T_2 は 槽内温度[K]である. 熱伝達率の算出は西川ら(1982)の平 板に沿う流れ(壁温一定)での層流の式を使用した.

次に液滴と熱交換器表面との放射熱 Q_t [W]は、ある面での放射熱 Q_t の和から求めることができ、

$$Q_r = \sum Q_k \tag{2}$$

と表せる.

続いて顕熱 Q.[J]と潜熱 Q.[J]はそれぞれ

$$Q_s = mC_{pw}(T_1 - T_3)mC_{pw}T_1 \qquad (3)$$
$$Q_i = L_f m \qquad (4)$$



図2 花氷作製環境のモデル図



より求めることができる.ここで*m*は液滴の質量[kg], c_{pv} は水の比熱で4.22×10³Jkg⁻¹K⁻¹(西川, 1982), T₃は 0°C (=273.15 K), L_f は水の凝固潜熱で333.55×10³Jkg⁻¹ である.以上の奪われる熱量と放出する熱量の関係を整 理して凍結速度 v_s [m³s⁻¹]を求めると,式(1)~(4)より

$$Q_s + Q_i = Q_a t + Q_r \tag{5}$$

$$mc_{pw}T_1 + L_f m = Q_a t + Q_r t \tag{6}$$

$$v_{s} = \frac{m}{t} \frac{1}{\rho_{w}} = \frac{Q_{a} + Q_{r}}{c_{pw}T_{1} + L_{f}} \frac{1}{\rho_{w}}$$
(7)

と表わすことができる.ここで、tは経過時間[s]、 ρ_w は水の密度[kg m⁻³]である.

(4) 液滴の溶存酸素濃度が飽和に達する時間の算出

液滴の溶存酸素濃度が飽和に達するまでに移動する距離を求めるには液滴の溶存酸素濃度が飽和に達するまでに要する時間が必要となる.凍結による液滴の体積変化 *V*[m³]は式(7)を使用すると

$$V_t = -v_s t + V \tag{8}$$

と表わすことができる.ここで, V は液滴の初期体積 [m³]である.また,式(8)および黒澤(2013)の酸素移動速度 の式より時間変化する液滴の溶存酸素濃度 a₄[mg L⁻¹]

$$a_{t} = \frac{1000 \left\{ C_{s} - (C_{s} + C_{i}) \left(1 - \frac{v_{s}}{V} t \right)^{\frac{K_{L}A}{v_{s}}} \right\} MV}{-v_{s}t + V}$$
(9)

となる. ここで, K_L は液側境膜での酸素移動係数[ms⁻¹], C_i は時間変化する溶存酸素濃度[mol m⁻³], C_s は飽和溶存 酸素濃度で 0.458 mol m⁻³(0°C)(理科年表, 2007), C_i は初期 の溶存酸素濃度 0.4125 mol m⁻³ である. a_i が飽和溶存酸素 濃度 a_s =14.67 mg L⁻¹(0°C)(理科年表, 2007)となる時に液滴 が飽和に達するため a_i = a_s となる時間 f(s)を求める必要が ある. そこで, 図4 に示すように式(9)のグラフを作成し, 近似を利用して計算した.





(5) 気泡発生位置の算出

これまでに測定,算出した結果を利用して気泡が発生 する位置を算出する.流下速度 v_l と液滴が飽和に達する までの時間 t_s を使用すると液滴が気泡発生までに移動す る距離 L[m]は

$$L = \int_0^{t_s} v_l dt \tag{10}$$

と表わせる. 液滴は花氷表面上を流れ落ち, その表面上で 液滴の溶存酸素濃度が飽和に達するため花氷の形状も考 慮する必要がある. 時間によって変化する花氷の形状に ついては既に予測を行っており(丸山ら, 2023), 成長する 氷柱の先端 l と半径 r を熱平衡方程式と物質平衡方程式 の微分方程式を解くことで求め, その 2 点から 1 次式 (y=ax+b)を算出して花氷の形状予測式とした. 気泡発生ま での移動距離 L と形状予測式を利用して花氷上で気泡が 発生する座標 (x,y)を求めると, 気泡発生位置の x 座標が 花氷上部の半径 r より小さい (x < r) ことを考慮して

$$x = \frac{-(ab-r) - \sqrt{(ab-r)^2 - (a^2+1)(b^2 - L^2 + r^2)}}{a^2 + 1}$$
(11)
$$y = a \frac{-(ab-r) - \sqrt{(ab-r)^2 - (a^2+1)(b^2 - L^2 + r^2)}}{a^2 + 1} + b^2$$
(12)

となる. したがって式(11), (12)より気泡が発生する位置 を予測する.

3.2 予測結果と評価

-2℃における気泡発生位置の予測結果と作製した花氷 を図5に示す. 作製した花氷と比較するために,花氷の 透明度D[%]を測定した.透明度測定では,レーザー光を 氷に透過させた強度値から局所的な透明度Dを評価した. 測定点は花や葉の上部を基準点として10mm上方向の位 置と下方向に20mm毎に花氷の下端まで測定した. 氷の 透明度Dはレーザーの透過率によって評価し,以下のよ うに定義する.

$$D = \frac{I_1}{I_o T} \times 100[\%]$$
 (13)

$$T = (1 - R)^2 \tag{14}$$

ここで、*I*/は氷透過時のレーザー光強度[µW], *I*/は空気 中のレーザー光強度[µW], *T*は透過率[-], *R*は反射率[-] を示す.透明度測定では花氷の中心付近にレーザー光を 入射させることで垂直入射での透過率 *T*=0.96 を使用し た. 槽内温度-2℃での透明度測定の結果を図5の中央に 示す. なお、本研究では透明度が 90%未満で気泡が発生 しているとした. 槽内温度-2℃では透明度測定の結果よ り約150 mm で 90%を下回っているため、この位置で気 泡が発生していると考えられる. 予測では133.0 mm で気 泡が発生するためその差は約20 mm である. 同様に-5℃, -7℃における予測と結果を比較した結果、それらの差は 最大でも±20 mm 程度であった. 気泡発生位置の予測は 様々な近似式を用いて行っていることを考慮すると、こ れらの実測値との差は許容範囲であり、実際の現象の予 測精度は高いと考える.



図 5 槽内設定温度-2°Cにおける気泡発生予測(左)および花 氷の透明度測定結果(中央),花氷の写真(右)

4. 氷柱花作製段階(STEP2)での気泡発生

4.1 氷柱花の作製

2℃の低温室に設置した放射製氷装置で氷を成長させ、 一定厚さの氷ができた後に連結している水槽から放射製 氷装置へと花氷を投入し、氷に花氷を取り込ませる.作成 した氷柱花を観察すると、放射製氷装置による氷の成長 面と花氷との接触面で気泡が多く発生していることが確認できた.この気泡発生の原因を検討するために立方体および円柱の氷での氷取り込み実験を行った.

4.2 氷の取り込み実験の概要

放射製氷装置に取り込む氷は一辺が 30 mm の立方体お よび直径 38 mm,高さ 40 mm の円柱を用いた.ここで, 立方体の氷は表面が粗いものと,滑らかなものを用い,円 柱の氷も表面が滑らかなものを用いた.それらの氷をそ れぞれ,放射冷却によって,氷の成長速度 0.5,1.2 mm hour ¹で取り込んだ.また,透明度は図 6 の白点を式(13)を使 用して測定を行った.その後,これらの氷を 50 mm の立 方体へとバンドソーで切り出した.



図6 透明度測定点

4.3 結果·考察

氷の写真と透明度測定の結果を図7および図8に示す. 氷の写真を見ると表面が粗い氷を取り込んだ場合では全 面に気泡が発生しているのに対して,滑らかな氷は中央 部に偏り,縮小していることがわかる.また,円柱氷を取 り込んだ場合は,中央ではなくその上下方向に気泡が多 く取り込まれていることがわかる.そしてどの条件にお いても成長速度が速いほど気泡量が増加した.

次に透明度からも、同様の傾向が見られ、最小値に注目 すると、滑らかな氷より、円柱の氷の方が透明度が高いと いう結果になった.

表面の粗さの違いによる気泡量の違いは表面粗さの違いに起因する接触角の違いによるものだと考えられる. 西谷(2004)によると接触角が小さいほど核生成に必要な エネルギーが小さくなる,つまり,気泡の核が発生しやす くなる.そして,表面が粗いほど接触角は小さくなるため, 気泡が多く発生したのだと考えられる.



図7 取り込み後の写真



図8 それぞれの氷の透明度測定結果

また、円柱氷を用いた際に透明度が高くなったのは、放 射製氷による氷と取り込み用氷との接触面積が小さくな り、接触面に取り残される未凍結水がなくなったためで あると考えられる.

以上より、気泡を発生させない取り込み用氷としては 円柱形状が適していると考える.

5. まとめ

本報告では、二段階製氷による透明度の高い氷柱花を 作製するために、花氷の気泡発生位置予測式の導出およ び放射製氷装置に取り込ませた氷の形状が気泡発生にど う影響するかを報告した.

導出した気泡発生位置と実際の花氷を比較した結果, 温度による最大でも±20 mm 程度であり,実際の現象を 高い精度で予測することができた.

また,放射冷却氷との接触面積を小さくなるような花 氷を用い,放射冷却装置による氷の成長速度を遅くする ことで,より透明度の高い氷柱花作製することができる ことが分かった.

文献

- 藤田愛稀, 杉原幸信, 上村靖司 (2022): 水滴下による 氷 柱花製造の試み, 雪氷研究大会 (2022・札幌) 講演 要 旨集, 23
- 黒澤尋 (2013):培養細胞への酸素供給,生物工学,91(11), P.648.649

前野紀一 (1966):氷の中の気泡, 雪氷, 28(1), 11

- 丸山翔生,杉原幸信,上村靖司(2023):二段階製法による氷 柱花作製-花氷の形状予測-,日本雪氷北信越支部予 稿集,P.29
- 西川兼康 ほか (1982): 伝熱学, 理工学社, P.172・297・305・ 457・458

西谷滋人(2004):核生成と界面, nucleation, pp.5-8

自然科学研究機構 国立天文台 (2007):理科年表平成 20 年 (卓上版),丸善株式会社, P.503

不凍液濃縮のための冷却ロール型連続製氷技術の開発

村田隆太朗¹・〇原 祥栄¹・上村靖司¹・杉原幸信¹ (1:長岡技術科学大学)

1. はじめに

近年,生鮮食品の長期保管に高湿度冷蔵庫の利用が広 がっている.この冷蔵庫は湿度の安定性に優れており,生 鮮食品の品質を保ちやすいことが特徴である.一方で,冷 却システム内部において冷媒の不凍液に結露水が混入し, 不凍液が希釈されてしまうという問題が生じている.こ れにより冷却能力が低下し,性能が維持できない.さらに, 濃度が低下した不凍液は交換が必要で,廃棄や補充にか かるコストが新たな課題となっている.

これらの問題の解決策として、不凍液を蒸発濃縮によ り再利用する方法があるが、従来の蒸発濃縮法では濃縮 効率が低く、処理のたびに不凍液を取り出さなければな らず、冷蔵庫の稼働を一時的に停止させる必要がある.

そこで本研究では、冷蔵庫を稼働させたまま、希釈され た不凍液を効率的に濃縮するための凍結濃縮技術の開発 を目的とする.

2. 濃縮プロセス

一般的に、水溶液の濃縮には蒸発濃縮および凍結濃縮 の2つの方法がある.図l(a)に示す蒸発濃縮は、水溶液に 減圧下で熱を加えることで、常圧下よりも低温で水分を 蒸発させ、溶液を濃縮する手法である.一方、図l(b)に示 す凍結濃縮は、水溶液を冷却して液中の水分を氷として 凍結させ、その凝固層を取り除くことで濃縮を行う方法 である.水の相変化に必要な熱エネルギーを濃縮に必要 な熱エネルギーと仮定して両者の熱効率の比較を行うと、 蒸発濃縮は2442 kJ/kg、凍結濃縮は333 kJ/kg である.し たがって、凍結濃縮は蒸発濃縮よりエネルギー効率が高 い濃縮技術であるといえる.



3. 製氷・除氷プロセス

本研究では、製氷部に可撓管を用いた「冷却ロール式」に よって、連続製氷技術の開発に取り組む.図に、冷却ロー ルと可撓管の断面図を示す.本方式では、可撓管として軟 質の熱交換チューブを採用し、その内部に低温の不凍液 を流し、チューブ表面に氷を生成させることとした.可撓 管を巻き付けた冷却ロールを回転させ、チューブ表面に 生成された氷を除氷板ではがすことで、連続製氷が実現 される.



4. 連続製氷実験

4. 1 実験装置および条件

試作した冷却ロール式製氷機を図3に示す.実験条件 を表1に示す.冷却ロールの回転は、ステッピングモー タとArduinoにより制御した.本実験は、低濃度不凍液の 濃縮を目的としたものではなく、製氷機の試運転および 製氷能力の確認を目的として実施した.そのため、水溶液 には不凍液ではなく水道水を使用した.



図3 実験装置概要

不凍液温度	-15°C
室温	20°C
水溶液	水道水
ロール回転速度	1 rpm

4. 2 結果

15分経過後の氷厚さと製氷量はそれぞれ 1 mm, 30 g であった.この結果から推測した1時間および1日の製 氷量を表2に示す.

122	衣 小里
	製氷量 [g]
15 min	30
1 Hour(予測)	120
1 Day (予測)	2880

制シー

主う

5. 低濃度不凍液濃縮実験

5.1 実験条件

次に水道水を用いた連続製氷実験と同様の方法で,水 溶液を低濃度不凍液に置き換えた凍結濃縮実験を行った. 使用した低濃度不凍液(20 wt%)は、原液の不凍液(75 wt%)に水道水を加えて希釈し、調整した.実験は、空調 温度を20℃に設定した室内で実施し、チラーの設定温度 を-25℃から-5℃まで5℃刻みで変化させながら、各 条件で180分間連続運転を行った.

5.2 結果

図4に、30分ごとに計測した水槽内の低濃度不凍液の 濃度変化を示す.いずれのチラーの不凍液温度(実測値) においても、180分間の凍結濃縮により濃度が上昇する傾 向が確認された.特に、-16.7℃の条件では、3.9wt% の濃縮が達成され、濃縮後の不凍液濃度は23.9wt%とな った.しかしながら、本実験において目標濃度である25 wt%には到達しなかった.この目標値を達成するには、さ らに約120分間の運転継続が必要であると予測される. なお、濃縮効率の低下要因として、水槽内の水位低下によ り熱交換チューブと不凍液との接触面積が狭くなったこ とが挙げられ、このことも目標濃度未達の一因と推察さ れる.



図5に、180分間の氷収量と氷濃度の関係を示す.ここで、氷濃度とは、30分ごとに回収した氷を1つの容器に入れ、すべて融解させた後の不凍液の濃度として定義した.氷収量および氷濃度は、ともに-16.7℃の条件で最大となることが確認された.

図6に、氷収量と濃縮度の関係を示す.ここで、濃縮

度は濃縮後の不凍液濃度から初期濃度を差し引いた値, 濃縮効率は単位濃縮度あたりの氷収量として定義した. 濃縮度は - 16.7℃において3.9wt%と最も高く,一方 で濃縮効率は-14.6℃において最大であることが確認さ れた.これは,-14.6℃の条件下では凍結過程において エチレングリコールを取り込まずに氷が生成されており, 不凍液中の水分を効率よく抽出できていることを示して いる.



図5 氷収量と氷濃度の関係



6. まとめ

本研究では、表面に氷を生成させ、生成された氷を 除氷板にて可撓管を弾性変形させて除氷を行う原理を 考案し、これを冷却ロールに巻きつけることで連続的 に製氷と製氷を行う装置を試作した.これを用いて15 分間で30gの氷を連続製氷することができた.不凍液 の凍結濃縮実験においては、-16.7°Cの条件で氷収量 および氷濃度が最も高く、濃縮度は3.9wt%、濃縮後 の不凍液の濃度は23.9wt%であった.目標濃度であ る25wt%には到達しなかったものの、水槽内の低濃度 水溶液の水位低下を抑制しつつ、さらに120分程度濃 縮を継続すれば、目標値に到達可能であると予測され た.

文献

明和工業:凍結濃縮事業,https://www.meiwa-ind.co. jp/our-business/freezing-concentration/(2025年4月10日閲 覧)

前川製作所:凍結濃縮の基礎とその利用技術,https://rdc. mayekawa.co.jp/column/02-7.shtml (2025 年 4 月 10 日 閲覧)

野外計測によるスギ樹冠の抗力係数に及ぼす着雪の影響評価

○勝島隆史¹・勝山祐太¹・竹内由香里¹
 (1:森林総合研究所+日町試験地)

1. はじめに

強風を伴う大雪により、甚大な倒木被害が生じることが知られている.このような倒木は、着雪の荷重や風圧力 が樹木に作用することで生じる.樹木に生じる風圧力は、風速と抗力係数、受風面積を用いて推定することができ るが、着雪時の抗力係数の測定事例は、風洞装置によるスギ枝葉を対象とした限定的な結果にとどまる(勝島ら、 2023).樹木の抗力係数は、測定に使用する試験体の大きさに影響を受ける可能性があるが、実木スケールの樹木 の試験体を風洞装置内に設置することは、物理的な制限から困難である.本研究では、伐倒したスギの梢端部を用 いた着雪の野外計測の結果から、樹木の抗力係数に及ぼす着雪の影響を調査した.

2. 手法

森林総合研究所十日町試験地の気象観測露場において,長さ6m程度のスギの梢端部を試験体として自立用の架 台に設置し、樹冠に生じる着雪量と風圧力を測定した. 2021-22年および 2022-23年の2冬期にわたり測定を実施 した.試験体は、各冬期で異なるものを使用した.架台の下に設置したロードセルにより、降雪時の装置全体の質 量の時間変化を測定し、その増加分から、単位樹冠投影面積あたりの着雪量を求めた.枝下の樹幹の4方向にひず みゲージを設置し、風により生じる曲げモーメントを測定した.そして、樹冠を水平方向に投影したときの重心位 置に、風圧が集中荷重により作用する状態を仮定して、樹冠投影面積と曲げモーメント、その時の風速から、風圧 力と抗力係数を求めた.抗力係数は、10分間の最大瞬間値に対応するものとした.樹冠投影面積は、着雪が生じ ていない状態で測定したものを使用し、期間を通して一定の値を使用した.

3. 結果と考察

図1に、最大瞬間風速が3ms⁻¹から7ms⁻¹の範囲のときの、着雪量に対する抗力係数の関係を示す.抗力係数は ばらつきが非常に大きいが、着雪量の増加とともに、抗力係数が増加する傾向が見られた.風洞装置による抗力 係数の測定結果では、着雪量が13kgm⁻²以下のときに、着雪量の増加とともに流体抵抗が減少する傾向が見られた が、今回の結果では、そのような傾向は見られなかった.着雪の成長は樹冠投影面積の増加をもたらすが、樹冠投 影面積を一定として抗力係数を求めた場合には、抗力係数は見かけ上大きくなる.今回の結果は、着雪による樹冠 投影面積の増加の影響が、抗力係数の見かけ上の変化として現れたものと考えられる.



図1 単位樹冠投影面積あたりの着雪量に対する抗力係数 C_Dの関係.エラーバーは平均値と標準偏差を示す. 文献

勝島隆史,安達聖,南光一樹,竹内由香里(2023):スギ枝葉の抗力係数に及ぼす着雪の影響に関する風洞実験. 雪氷,85(2),101-114.

© 2025 (公社)日本雪氷学会