

中部山岳地域の高標高域の近年の冬は暖かくなっていない

○鈴木啓助¹・佐々木明彦²

(1: 信州大学山の環境研究センター 2: 国士舘大学文学部)

1. はじめに

1989年から2023年までの日本の年平均気温と季節平均気温の変動を検討すると、この間の気温上昇率は $2.56^{\circ}\text{C}/100$ 年であり、近年の気温上昇が顕著である(鈴木, 2024; 2025). 季節平均気温の変動については、夏季の上昇率が最も高く、次いで、春季、秋季となっている。しかし、冬季の変動は他の季節とは異なり、季節平均気温の変動が $-0.28^{\circ}\text{C}/100$ 年となり、低下傾向である。月平均気温の変化傾向では、最も上昇率が大きいのは3月であり、4月を除いた3月から9月までは大きな上昇率を示している。12月と1月の月平均気温は低下傾向である(鈴木, 2025).

信州大学山の環境研究センターでは、乗鞍休暇村での2002年11月18日からの観測を皮切りに、中部山岳地域の高標高域の14カ所(現在は13カ所)で気象観測を継続して実施している(鈴木, 2013). 山の環境研究センターによる気温の観測結果を用いて、近年の高標高域における気温変動の季節的な差異について検討を行う。鈴木(2024, 2025)の検討は、気象庁による気温観測データに基づく解析結果であり、富士山(標高3775 m)を除くと野辺山(1350 m)が最高所である。富士山と野辺山の間の高標高域での今後の気温変動を考える際にも大きな意義がある。

2. 観測方法

山の環境研究センターによる気象観測地点は、図1に示す14ヶ所である。気象観測地点ごとの観測期間や観測項目、さらに気象観測測器の形式、測定範囲、精度は、鈴木・佐々木(2019)で示した。標高としては、前述の気象庁による気温観測地点の富士山と野辺山の間を埋めている。

3. 結果と考察

地点によって観測期間が異なるが、すべての地点で年平均気温は上昇傾向にある。年平均気温算出年数10年の乗鞍夫婦松で、年平均気温上昇率が $1.90^{\circ}\text{C}/10$ 年と最も大きく、年平均気温算出年数23年の乗鞍休暇村が $0.208^{\circ}\text{C}/10$ 年と最も小さい。Mann-Kendall検定結果では、12地点のうち11地点で、有意水準5%以下で、年平均気温が統計的に有意に上昇傾向である。乗鞍休暇村のみが有意水準10%以下でも統計的に有意な上昇傾向が認められない。年平均気温上昇率は、観測期間が長ければ長いほど、年平均気温の上昇傾向が弱く、観

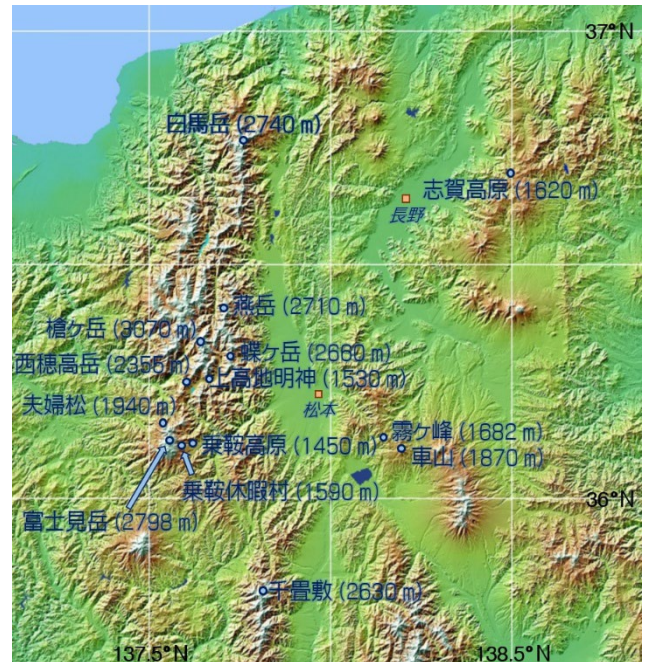


図1 観測地点の位置図

測期間が短いほど年平均気温の上昇傾向が統計的に有意であることを示す。

冬季平均気温についての変動傾向の解析では、上昇傾向も低下傾向も、すべての地点で統計的に有意ではない。一方、春季、夏季、秋季の季節平均気温については、多くの地点で上昇傾向である。各地点の季節平均気温変動のMann-Kendall検定結果のtau値と標高の関係を検討すると、冬季と春季では統計的に有意な相関はないが、乗鞍休暇村を除くと、夏季と秋季では統計的に有意な相関が認められる。夏季と秋季の季節平均気温は、標高が低い方が気温の近年の上昇傾向がより明瞭である。

文献

- 鈴木啓助(2013): 中部山岳地域における気象観測の現状とその意義. 地学雑誌, 122, 553-570.
 鈴木啓助(2024): 中部山岳地域の近年における冬季の気温変動. 山の科学, 7, 1-12.
 鈴木啓助(2025): 日本アルプス周辺地域における気温変動の季節による差異: 近年の冬は暖かくなっていない. 山の科学, 8, 1-16.
 鈴木啓助・佐々木明彦(2019): 中部山岳地域における気象観測網の展開. 地学雑誌, 128, 9-19.

気圧配置の観点で見た近年の日本における晩冬気候の変化とその要因

○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

近年の日本では温暖化の影響が明瞭に現れており、年平均気温は100年あたり1.23℃の割合で上昇している(気象庁)。日本における冬季の気温の長期変化を調べた先行研究では、12月よりも3月の方が気温の上昇傾向が顕著であり、特に2000年代以降、その差が大きくなっていることを指摘した(Tamura, 2025)。3月のような晩冬の高温は積雪地域においては融雪の早期化につながるため、雪崩などの雪氷災害の発生や水資源管理の観点から、気温変化の傾向とその将来変化を把握することは重要である。また、日本の冬季気候は、いわゆる西高東低の気圧配置に代表される総観規模の循環場の影響を強く受けることが知られている。このことから、近年の日本における3月の気温上昇には、気圧配置の変化が影響している可能性が考えられる。そこで本研究では、日本周辺の気圧配置に着目し、晩冬の日本における気温の長期変化の要因を調査した。

2. データと手法

大気場の解析には気象庁第3次長期再解析(JRA-3Q)を用いた。また、地域気象観測システム(AMeDAS)において長期間観測が継続され、かつ都市化の影響が小さい15地点(網走, 根室, 寿都, 山形, 石巻, 伏木(高岡市), 飯田, 銚子, 境, 浜田, 彦根, 宮崎, 多度津, 名瀬, 石垣島)の気温データを用いて、気温の長期変化を調査した。

3. 結果

日本周辺領域(北緯25度~55度, 東経120度~160度)の海面更正気圧(SLP)の長期変化傾向を調べたところ、3月には西高東低の気圧配置が弱まる方向への変化がみられた(図示せず)。さらに、各年の3月のSLPと4月のSLP気候値との差(RMSE)との関係を調べたところ、その差は近年減少傾向にあり、特に2000年代以降、その傾向が強まっていることが分かった(図1)。これは、近年の3月の気圧配置が4月の気圧配置に近づいており、気圧配置の観点でも春の訪れが早期化していることを示唆する結果である。さらに、この指標は3月の日本の平均気温偏差と有意な負の相関関係を示した(図1)。これらの結果から、近年の日本における3月の気温上昇傾向には、気圧配置の変化が大きく寄与していることが示唆される。発表では、気圧配置分類に基づく解析結果や温暖化の影響について議論する。

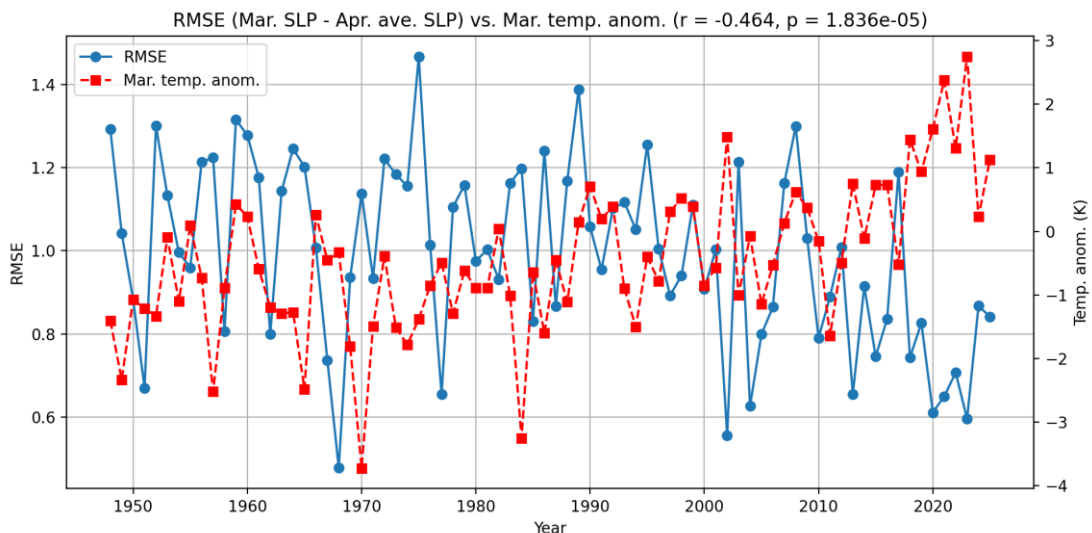


図1 日本周辺における3月の年々のSLPと4月平均SLPの差(RMSE)及び3月の日本の平均気温偏差

文献

気象庁: 気温・降水量の長期変化傾向, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/index.html> [2026年4月8日閲覧]

Tamura, K. (2025). Contrasting surface air temperature trends between early winter and early spring in Japan. *Journal of Disaster Research*. <https://doi.org/10.20965/jdr.2025.p0685>

日本海側温暖多雪地域の積雪深の気候応答
 — 気温・積雪・降水量各平年値間の関係から —

石坂雅昭¹・本吉弘岐²

(1: 防災科研客員 2: 防災科研)

1. はじめに

これまで気象庁発表の地上および地域気象観測平年値やメッシュ平年値の変化から（例えば2020年と2000年平年値の比較など）、雪質の変化や積雪と気温や降水量の関係を調べてきた（石坂，2006，2007）。その結果，近年の温暖な方向への気温のシフトの中でも積雪・気温・降水量間の関係，すなわち温暖な積雪地域の気温に対する積雪・降水量比の上限が維持されていることなどがわかった（石坂ほか，2024）。ここでは，上記の関係から導かれる降水量によって変化する気温・積雪深関係と関連する近年の日本海側温暖多雪地域の気候応答の特徴について述べる。

2. 積雪・降水量比の上限

積雪・降水量比は月最深積雪 HS を月降水量 P で除した値 HS/P である。そして対象とする平年値は，特にことわらない限り月平均気温，月最深積雪，月降水量の1，2月平均である。また，対象とした「積雪地域」は，地上および地域気象観測平年値において12月から3月までのいずれかの月最深積雪が10cm以上の地域である。図1にはその対象地域の地上および地域（アメダス）観測点の気温に対する当該比の

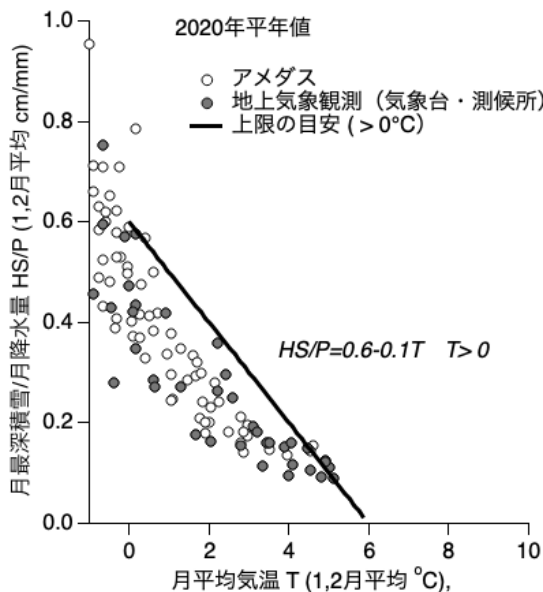


図1 2020年の地上気象観測・地域（アメダス）平年値の気温と積雪・降水量比の分布と上限。

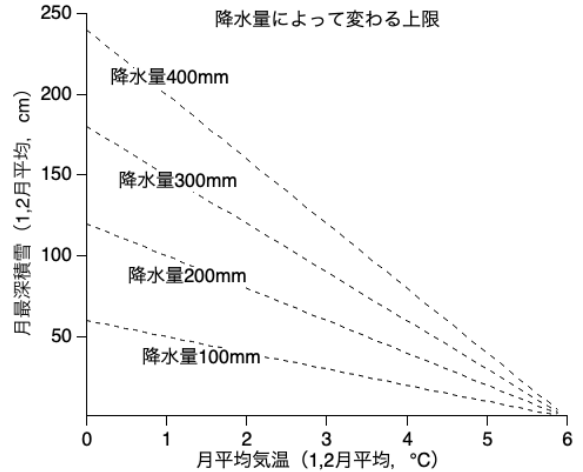


図2 降水量によって変わる気温に対する積雪深の上限。

分布と0°Cより高い気温領域で成立している上限の式とそれを表す直線を示した。0°Cより気温が低い領域では上限を超える地点が一挙に増えることから上限が融雪の影響を強く受ける地域で成り立つ関係であることが推測できる。上限の目安の直線は，月最深積雪 HS (cm)，降水量 P (mm)，気温 T (°C)として次の関係式で表される。

$$HS/P = 0.6 - 0.1T \quad T > 0 \quad \dots (1)$$

これを積雪深の大小関係で表すと

$$HS < P(0.6 - 0.1T) \quad T > 0 \quad \dots (2)$$

となり，積雪深の上限は降水量と気温によって決まることを表す式が得られる。式(2)で降水量を変えて上限の変化を見ると図2のように降水量に応じて決まる切片（積雪深）を持ち気温6°C，積雪0cmの点を結ぶ直線が得られる。降水量の小さい地域の積雪はこの上限によってより狭い範囲に制限されることを示している。そこで実際の観測点と上限の関係を見ることにする。

3. 降水量の多寡と気温・積雪深の関係

図3に2020年の地上および地域観測点の気温と積雪深との関係を降水量を100mm単位でグループ分けして（記号を変えて）示した。点線の直線は図2と同じく降水量に表示の各値を代入した上限である。

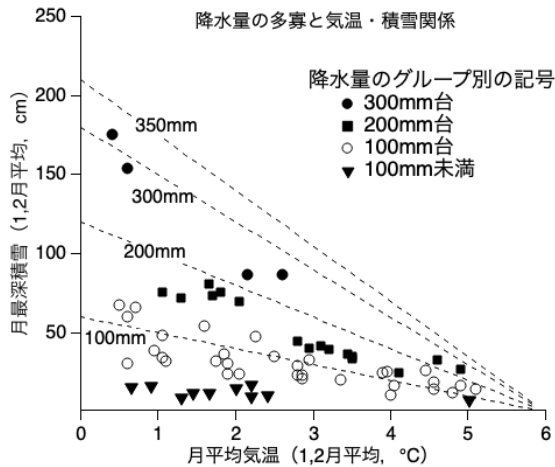


図3 降水量の大きさでグループ分けした地上および地域（アメダス）観測点の2020年平年値における気温・積雪深関係。

降水量の最大の値を350mmとしたのは、対象となった観測点での降水量の最大が高田の346mmなので、それより少し大きい値に設定したからである。300mm台の観測点は高田をはじめ以下アメダスの小出、安塚、能生の4地点（●）のみであるがいずれも350mmの直線より下に分布し、式（2）の関係を満たしている。以下、200mm台は300mmの、100mm台は200mmの、そして100mm未満は100mmの各上限の直線より下に分布し、式（2）の関係を満たしている。ただ、気温の低い領域では300mm台を除いて上限と実際の分布との乖離が大きくかなり緩い関係と言える。一方、分布に幅を持ちながらも、降水量が少ないグループほど分布領域が下方へ移る点や、それぞれ6°C、積雪0cmに向かって分布が絞られていく点など、上限の影響を反映した特徴も見て取れる。なお、100mm未満の地点（▼）はすべて太平洋側およびその内陸側の観測点であり、ここで対象としている日本海側多雪地域外なので以下では論じない。

4. 上限と気候変化に対する応答

前節では2020年平年値における気温・積雪・降水量の関係を見てきた。降水量で変わる積雪の上限が緩いながらも気温・積雪深関係をある程度既定していることがわかった。では近年の気温上昇の中で平年値の気温・積雪深関係がどのように変化してきたかを見ることにする（図4）。アメダスでは過去の平年値で観測期間が30年に達しない地点が多いことから、対象は地上気象観測点（气象台・測候所）に限った。記号を結んだ点で左から右へ1990年から順

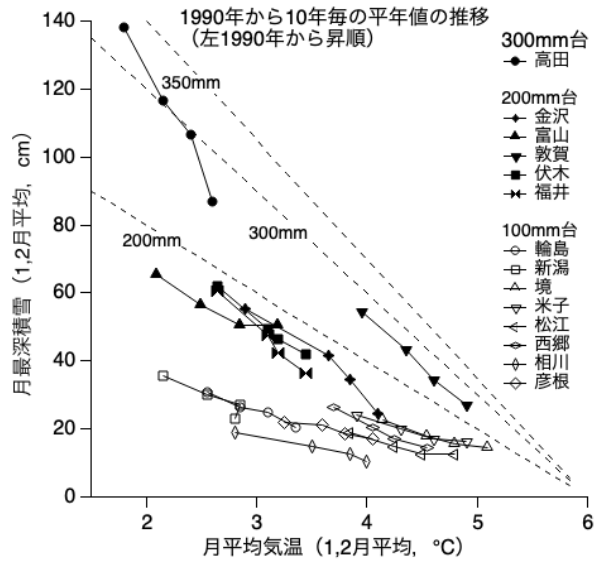


図4 主な地上気象観測地点における気温と積雪深平年値の1990年から2020年への変遷。それぞれの地点の記号で左から1990年、2000年、2010年、2020年の平年値。

次2020年までの10年毎4期の平年値が並ぶことから、この間、温暖な方向へのシフトしたことを表している。地点毎にばらつきがあるが、大まかにみると降水量の大きなグループほど気温に対する積雪深の減少割合が大きい傾向が読み取れる。また、大まかではあるが6°C、積雪ゼロへの収斂も見られ、いずれも上限の直線と同じ傾向を持つことがわかる。上限の存在は厳密な定量化までは無理であるが、前述のように温暖化による積雪の減少が降水量の多い多雪地域に特に強く現れることを示唆するなど気候応答の推定にヒントを与えてくれる。

今後とも平年値の推移に着目したいと思う。

文献

- 石坂雅昭 (2006) : 温暖な積雪地域「湿り雪地域」における平年値の上限について. 雪氷, **68**, 179-190.
- 石坂雅昭(2007) : 日本の積雪地域の月平年値における積雪・気温・降水量間関係. 雪氷, **69**, 591-599.
- 石坂雅昭・本吉弘岐 (2024) : 日本の積雪地域の気温・積雪・降水量間関係と気候応答—2000年と2020年の地上気象観測およびアメダス平年値の比較から—. 雪氷北信越, **44**, 38-39.

2026年冬季日本海海洋前線帯の大気海洋集中観測

○本田明治¹・柏野祐二²・西川はつみ³・天野未空⁴・岸琴心⁴・大久保柁⁴・戸川元貴⁵・坂本岳央¹・内堀可廉¹
 (1:新潟大学 2:水産大学校 3:北海道大学 4:三重大学 5:金沢大学)

1. はじめに

2026年1月22日から2月4日にかけて、水産大学校「耕洋丸」により日本海及び東北地方三陸沖の海洋前線帯において、高時空間分解能で大気海洋観測を実施した。科研費学術変革領域研究(A)「ハビタブル日本 島嶼国日本の生存基盤をなす大気・海洋環境の持続可能性」の豪雨豪雪班により、温暖化が進む近年も日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)などの带状降雪雲による豪雪をもたらす水蒸気源となる日本海において、海洋前線帯の詳細な大気海洋3次元構造を捉え、豪雪など極端気象の発現メカニズムの解明を目的とする集中観測である。今回は1月23日から30日にかけて実施した日本海の海洋前線帯の大気海洋集中観測の結果を報告する。

2. 観測

日本海の海洋前線は、北緯40度~41度帯を東西に延びる海面水温の南北勾配の大きい領域で、1年を通して存在する。冬季は海洋前線を挟む海面水温の温度帯は4°C~12°Cくらいである(図1)。前回2023年冬季の観測では、海洋前線の不連続な構造(~5°C/10km)と前線を挟む大気場構造の急変が確認されたが(本田他2023.)、前線を南北に縦断する1測線の南北断面的な観測だったため、海洋前線帯の水平分布構造や大気海洋場の空間的構造は捉えていない。今回の観測では1月25日~30日にかけて海洋前線帯に滞在し、ラジオゾンデ及びXCTD観測を1時間毎(測点間隔約6-10km)に実施し、詳細な海面水温分布と大気海洋3次元構造を捉えることができた。観測中の天候は、西高東低の冬型の気圧配置が持続したことで、低気圧などの擾乱の影響をほとんど受けることはなく、ほぼ定常場とも言える極めて恵まれた観測条件であった。また観測期間中は本州日本海側各地で記録的な大雪となっている。

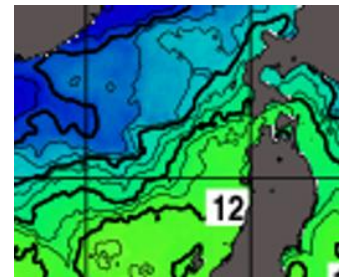


図1. 2026年1月18日の海面水温分布(気象庁HPより)。

図2に、耕洋丸により連続的に観測されている海洋前線帯の海面水温の水平分布を示した。インテイク水温と呼ばれて水深約5.5mの海水温を計測しているが、冬季の海洋表層は十分に混合されているため、ほぼ海面水温と見做すことができる。水温の幅は4.2°C~11.9°Cで、北緯40.5度より北は4°C台、北緯40~40.5度は5~6度台、北緯40度以南は10~11度台で東西に延びる前線構造が確認されるが、エリアの東側は前線が南北の延びる構造となっている。北緯40度付近では5°C/10km程度の大きな水温勾配も確認されるが、エリアの南東域は前線構造が不明瞭で冷水域と暖水域が入り交じる複雑な分布であることが分かる。図3は全観測期間の風速と海水温の鉛直分布である。27日や29日のように水温(実線)の低下に伴い風速の低下が確認できる事例もあるが、明瞭に見られない事例(28日、30日)も多い。なお風速変化は上空1000m付近まで及ぶことも分かる。また水温勾配は海面付近のみならず一般に水深100m付近まで及び、水温の「崖」とも言える構造である。当日は海洋前線帯の他の気象要素の特徴も含めた解析結果を報告する。

3. 結果

図2に、耕洋丸により連続的に観測されている海洋前線帯の海面水温の水平分布を示した。インテイク水温と呼ばれて水深約5.5mの海水温を計測しているが、冬季の海洋表層は十分に混合されているため、ほぼ海面水温と見做すことができる。水温の幅は4.2°C~11.9°Cで、北緯40.5度より北は4°C台、北緯40~40.5度は5~6度台、北緯40度以南は10~11度台で東西に延びる前線構造が確認されるが、エリアの東側は前線が南北の延びる構造となっている。北緯40度付近では5°C/10km程度の大きな水温勾配も確認されるが、エリアの南東域は前線構造が不明瞭で冷水域と暖水域が入り交じる複雑な分布であることが分かる。図3は全観測期間の風速と海水温の鉛直分布である。27日や29日のように水温(実線)の低下に伴い風速の低下が確認できる事例もあるが、明瞭に見られない事例(28日、30日)も多い。なお風速変化は上空1000m付近まで及ぶことも分かる。また水温勾配は海面付近のみならず一般に水深100m付近まで及び、水温の「崖」とも言える構造である。当日は海洋前線帯の他の気象要素の特徴も含めた解析結果を報告する。

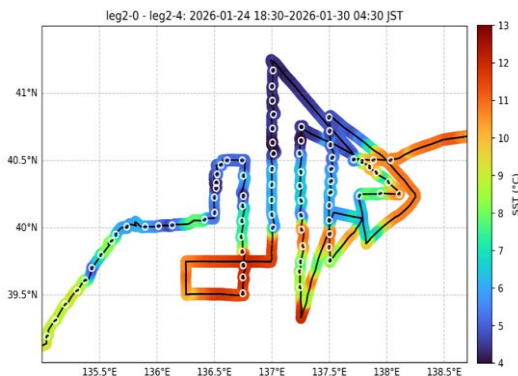


図2. 耕洋丸のインテイク水温計による表層水温の分布。

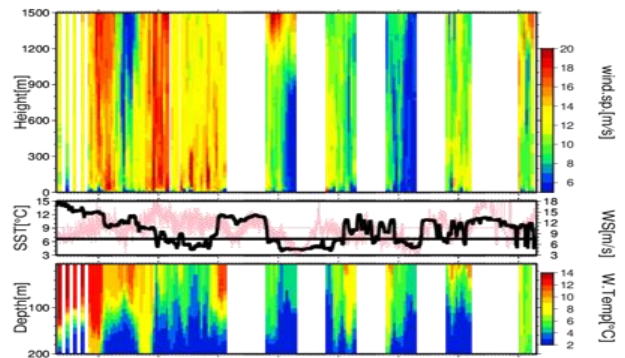


図3. (上)ラジオゾンデ観測による風速(m/s)、(中)海面水温(°C)と海上風速(m/s)、(下)XCTD観測による海水温(°C)。横軸は日にち。

スギ樹冠の冠雪成長に及ぼす新雪密度の影響

○勝島隆史¹・勝山祐太¹・竹内由香里¹

(1: 森林総合研究所十日町試験地)

1. はじめに

樹木に降り積もった雪（冠雪）の重みにより倒木が発生すると、林業被害にとどまらず、停電や交通障害などの影響も生じる。こうした被害の予測には、気象データに基づいて冠雪の成長を予測することが有効である。降水量に対する単位樹冠面積あたりの冠雪量の増加率を示す着雪率は、降雪時の気温と密接に関係することが知られている。また、新雪密度が高いほど着雪率が低下する傾向が報告されている(Schmidt and Gluns, 1991)。しかし、これは1降雪期間の平均値を用いて導出された知見であり、1時間間隔の時系列データに基づく着雪量の予測にそのまま適用することは難しい。本研究では、伐倒したスギの梢端部を用いた着雪量の野外観測と、降雪粒子の観測を組み合わせることで、スギ樹冠の着雪率に及ぼす新雪密度の影響を調査した。

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、着雪の観測を実施した。観測では、長さ6 m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、架台の下に設置したロードセルを用いて装置全体の質量を測定した。降雪前の質量からの増加分を樹冠投影面積で除すことで、単位樹冠投影面積あたりの着雪量を求めた。そして、1時間当たりの着雪量の増加量を、風よけネット内に設置された田村式降水強度計により測定した降水量で除すことで、1時間当たりの着雪率を求めた。また、これと同時にボリューメスキャン型ディストロメータ(VSVD)により降雪粒子の粒径と落下速度を測定し、Takami et al. (2022)により提案された降雪粒子の雲粒付着度と新雪密度の関係式を用いて、その時々の新雪密度を推定した。

3. 結果と考察

図1に、気温が -1.5 から 0°C の範囲のときの、新雪密度に対する着雪率の関係を示す。観測結果から、新雪密度が高いほど着雪率が低下する傾向が見られ、既往研究による知見と整合的な結果が得られた。新雪密度が 200 kg m^{-3} 程度の事例では着雪率は著しく低く、また、VSVDによる観測結果から、あられを主体とした降雪粒子であることが確認されている。これらのことから、着雪率は新雪密度や降雪種の影響を受けることが示唆された。ただし、着雪率のばらつきが大きく、決定係数は 0.12 と低く、より高精度な着雪率計測の必要性が示唆された。

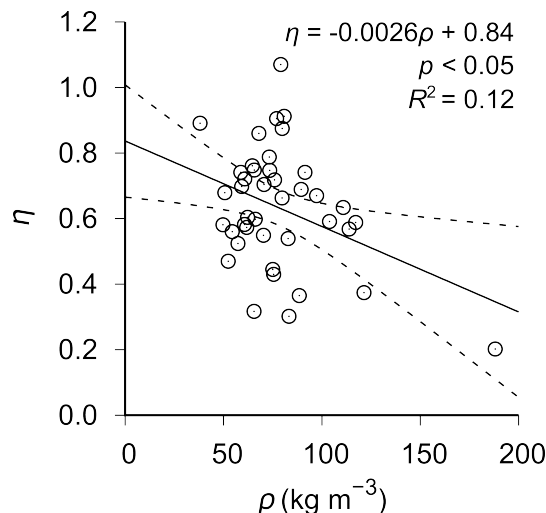


図1 新雪密度に対する着雪率の関係。実線は回帰直線、破線は95%信頼区間を示す。

文献

- Schmidt, R. A., and Gluns, D. R. (1991): Snowfall interception on branches of three conifer species. *Canadian Journal of Forest Research*, **21**(8), 1262–1269.
- Takami, K., Kamamoto R., Suzuki, K., Yamaguchi, K. and Nakakita, E. (2022): Relationship between newly fallen snow density and degree of riming estimated by particles' fall speed in Niigata Prefecture, Japan. *Hydrol. Res. Lett.*, **16**, 87–92.

ディストロメーターから推定した降水量の精度検証

○勝山祐太¹・勝島隆史¹・竹内由香里¹・高見和弥²

(1: 森林総合研究所十日町試験地 2: 鉄道総合技術研究所)

1. はじめに

ディストロメーターは、降水粒子の粒径・落下速度を計測する気象測器であり、降水粒子の空間数濃度や粒径分布、降水量などを算出することができる。しかし、降水量については、いくつかの仮定のもとにおける推定値であり、特に固体降水量の推定精度についての検証は十分ではない。本研究では、粒径・落下速度データから降水量を推定し、これと小型二重柵基準降水量計（SDFIR）による観測結果とを比較する。

2. データと方法

一般に普及しているディストロメーターとして、Laser Precipitation Monitor (LPM) と PARSIVEL² を森林総合研究所十日町試験地（新潟県十日町市）に設置し、2025年12月26日から翌年2月末まで観測を行った。得られた各降水粒子の粒径・落下速度から粒子質量を推定し（Ishizaka et al., 2013）、それらを合計することで降水量を推定した。また、SDFIR による同時観測を行い、この観測結果と比較することでディストロメーターから推定した降水量の精度を比較した。

3. 結果と考察

観測期間の間に SDFIR では合計 1017mm の降水が観測され、そのうち気温 0°C 以下のときの降水量は合計 602mm だった。LPM から推定された 1 時間降水量を SDFIR によるものと比較した結果、相関係数 0.91 となり、時間変動についてはよく一致していた（図 1 左）。一方で、平均誤差（ME）は -53% となり、LPM は大幅に降水量を過小評価していた（図 1 左）。PARSIVEL から推定された 1 時間降水量についても、SDFIR によるものとの相関は高いが、平均誤差は -60% となり、降水量を大幅に過小評価する結果となった（図 1 右）。LPM や PARSIVEL が粒子数を大幅に過小評価していることが降水量過小評価の一因として考えられるが（Fehlmann et al., 2020）、高い相関があることから、バイアス補正を行うことで降水量を推定できる可能性がある。

4. まとめ

2025/2026 年冬季に SDFIR と LPM・PARSIVEL の同時観測を行い、LPM・PARSIVEL から推定した降水量を比較した。その結果、LPM・PARSIVEL は大幅に降水量を過小評価しており、降水量を推定するには何らかのバイアス補正を行う必要があると分かった。

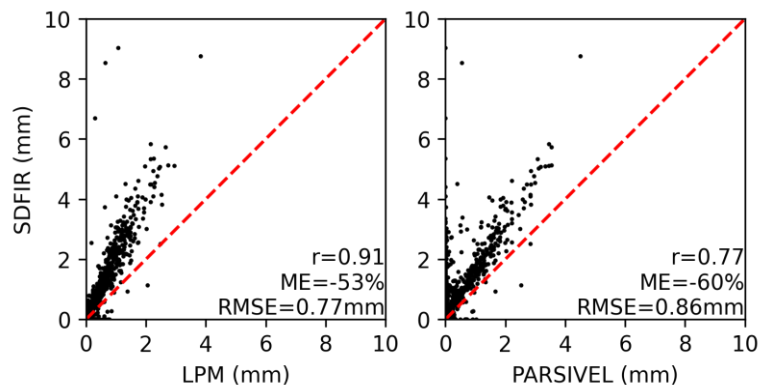


図 1 1 時間降水量に関する（左）SDFIR と LPM の比較と（右）SDFIR と PARSIVEL の比較

謝辞：LPM 観測は中井専人氏（防災科学技術研究所）の協力によって実施された。

文献

Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Shiina, T., Kumakura, T., and Muramoto, K. (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.

Fehlmann, M., Rohrer, M., Von Lerber, A., and Stoffel, M. (2020): Automated precipitation monitoring with the Thies disdrometer: biases and ways for improvement. *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 4683-4698.

北アルプス立山室堂における初冬季の降雪成分濃度

○横山新紀¹・森智晴¹・山本彩人¹・渡辺幸一¹

(1: 富山県立大学大学院工学研究科)

1. はじめに

北アルプス立山では、冬季のアクセスが困難な状況からアルペンルート開通後の4月中旬以降に室堂平で積雪断面観測が行われ、冬季に沈着した化学成分の検討が行われてきた。このなかで、成分濃度の変動と降雪時期の推定も行われ、気象条件と成分濃度の関係についても検討が行われてきた。そこで今回、初冬季に室堂平において降雪を直接採取し、気象条件と降雪成分について検討したので報告する。

2. 方法

2025年10～11月の14日間、降雪イベント毎に室堂山荘の周辺に開口部858cm²のポリプロピレン容器を雪面に設置し(図1)、1～2時間毎に降雪試料を回収した。試料は山荘内で融解させた後ポリビンに入れて持ち帰り、pHはガラス電極法、イオン成分はイオンクロマトグラフによりを測定した。



図1 サンプルング容器

3. 結果・考察

降水成分濃度は気象場の影響を受けることが想定されることから、表1に室堂で観測したイオン成分平均濃度を雲パターン毎に区分して示した。調査期間中はしばしば冬型気圧配置になったものの、Lモードの試料は11mm分しかなく、大半がTモードによるものだった。また気圧の谷による試料が510mmと多かった。Tモードと気圧の谷を比較するとpHは5.20、5.12と差は小さいものの、nss-SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Na⁺、Cl⁻などほぼすべての成分でTモードの濃度が高かった。また、nss-SO₄²⁻濃度はTモード、気圧の谷それぞれ6.8、5.4 μmol/Lであり、室堂平での2018年の積雪断面調査での全層平均値約5 μmol/Lに近かった。

図2に、日本海からの降雪雲の上陸地点にあたる気象庁アメダス羽咋の降雪イベント時の1時間平均風速と室堂の1時間平均の降水量(上段)、nss-SO₄²⁻濃度(下段)の関係を示した。ばらつきはあるものの、概ね降水量、nss-SO₄²⁻濃度とも風速が強まると増加する傾向が見られた。なお、この傾向は麓のアメダス地点では見られなかった。山形県月山志津での降雪成分観測でも同様の関係が見られることから、風速の強まりによる降水量とnss-SO₄²⁻濃度の増加は山岳で生じる地形効果によるものと考えられる。

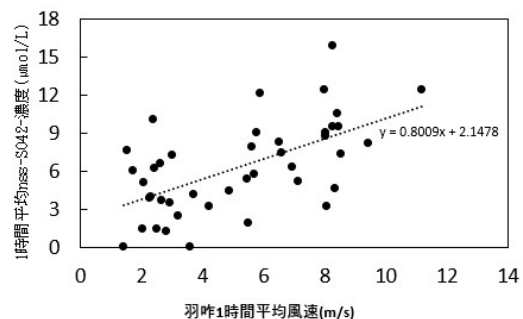
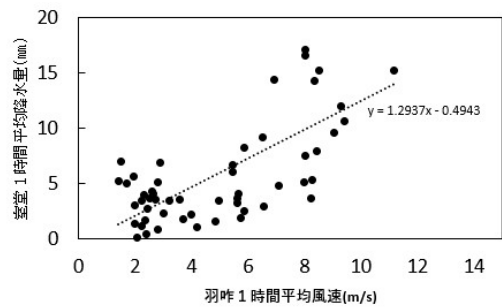
図2 羽咋の1時間平均風速と室堂の1時間平均の降水量(上段)、nss-SO₄²⁻濃度(下段)

表1 雲パターン毎に区分したイオン成分平均濃度

	降水量 mm	pH	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	nss-SO ₄ ²⁻
			μmol/L								
Lモード	11	5.68	9.7	7.8	49.2	5.1	42.6	1.5	4.6	5.4	7.1
Tモード	268	5.20	9.5	11.0	52.5	15.7	44.8	2.2	3.3	5.7	6.8
気圧の谷	510	5.12	6.3	7.6	20.5	8.6	15.4	1.6	2.3	2.4	5.4

文献

横山新紀、渡辺幸一：冬季季節風時における山形県庄内南部地域における降雪中 nss-SO₄²⁻濃度。大気環境学会誌、(投稿中)。

渡辺幸一(2025)：立山における積雪および霧水中の化学成分の特徴。水環境学会誌、48-7, 245-249。

中部日本における PM_{2.5} 中の化学成分および微生物粒子個数濃度の測定

○山本彩人¹・森智晴¹・渡辺幸一²

(1: 富山県立大学大学院工学研究科 2: 富山県立大学)

1. はじめに

微生物粒子（バイオエアロゾル）は細菌や真菌などを含む生物由来のエアロゾルであり、呼吸器系への健康影響が懸念させるだけでなく、氷晶核として雲の形成と気候変動に影響を及ぼす可能性が示されている。健康リスク評価や大気環境の将来予測に微生物粒子個数濃度の連続計測は重要であるが、国内での連続計測事例はほとんど報告されていない。本研究では、富山県において 2025 年 5 月から 2026 年 4 月に微生物粒子個数濃度の連続観測ならびに PM_{2.5} 中のイオン成分分析を行った。

2. 方法

富山県立大学（富山県射水市）中央棟 7 階において、2025 年 5 月から 3 時間毎にリアルタイム浮遊菌カウンタ（BioTrak 9510-BD, TSI 社）を用いて粒径別の全粒子個数濃度および微生物粒子個数濃度を測定した。本装置はレーザー励起蛍光法により微生物粒子を識別する。同時期に、中央棟屋上において晴天日を中心に、微小粒子状物質（PM_{2.5}）をサンプリングし、イオンクロマトグラフ法により主要イオン成分を分析した。

3. 結果と考察

2025 年 5 月から 2026 年 4 月の全粒子個数濃度と微生物粒子個数濃度の時系列を図 1 に示す。全粒子個数濃度は春季から夏季にかけて、微生物粒子個数濃度は初秋季（9 月）に高濃度となった。2025 年 5 月 20 日頃、粒径 1 μm 以上の全粒子および微生物粒子個数濃度が上昇し、また PM_{2.5} 中の Ca²⁺および SO₄²⁻濃度の増加が確認された。後方流跡線解析からアジア大陸由来の大気輸送が示され、汚染物質を伴う黄砂粒子および微生物の長距離輸送によるものと考えられる。

2025 年 7 月 3 日には、粒径 0.5 μm 以上の全粒子個数濃度ならびに PM_{2.5} 中の SO₄²⁻および NH₄⁺濃度が観測期間中で最大値を記録した一方、微生物粒子個数濃度は減少した。6 月下旬以降新燃岳の火山活動が活発化しており、火山噴煙に由来する硫酸塩エアロゾル増加による影響と考えられる。

2026 年 3 月 24 日には、全粒子および微生物粒子個数濃度の増加が確認され、PM_{2.5} 中の K⁺、NO₃⁻および NH₄⁺濃度がいずれも高濃度であった。K⁺の増加はバイオマス燃焼の有効な指標であり、後方流跡線解析の結果からも 2026 年 3 月に中国で発生した森林火災の影響が懸念される。

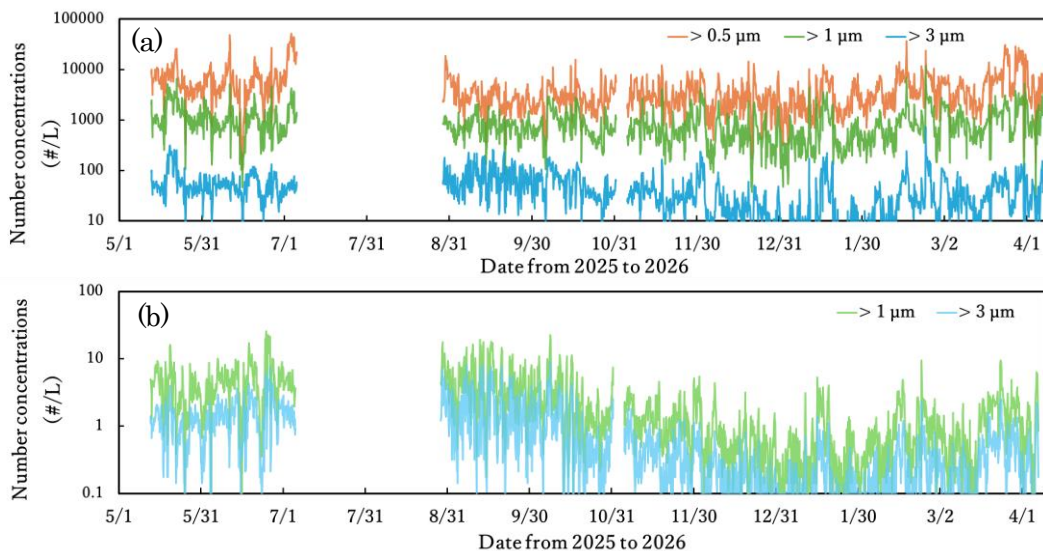


図 1. 富山県射水市における粒径別全粒子個数濃度 (a) および微生物粒子個数濃度 (b) の時系列

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（Ⅱ）

○森智晴¹・山本彩人¹・渡辺幸一²・新村拓己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の雪や、ブラックカーボンや鉱物粒子のような非水溶性成分の濃縮による汚れ雪が生成される。着色雪は、アルベドを低下させ融雪を促進し、気候変動を加速させる一因となっている。そのため、雪氷藻類や非水溶性成分と、表層雪中の化学成分との関係性を解明することが重要である。しかしながら、融雪期には積雪中の化学成分が溶脱するため、融雪期の化学成分についての調査事例は十分でない。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、それらの冷蔵保存中のイオン成分濃度の変化について評価した。

2. 方法

2024, 2025 年の融雪期の立山・室堂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。試料解凍後、ろ過（孔径 0.45 μm）、未ろ過試料に分け、主要イオン成分をイオン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。また、冷蔵保存した表層雪試料について、富山大学理学部の田中研究室で DNA 抽出および 1stPCR を行った後、16rRNA 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

2025 年の融雪期の立山・室堂周辺で採取された着色雪試料では、未ろ過状態で冷蔵保存中に SO_4^{2-} 濃度および NH_4^+ 濃度の大幅な増加がみられた。特に室堂東部で採取した試料において著しく SO_4^{2-} 濃度が増加した (図 1)。また、 NH_4^+ 濃度も上昇した。一方、ろ過試料では両イオンの冷蔵保存中の増加はみとめられなかった。

細菌叢解析の結果から、室堂西部の雪の大谷の試料において、硫黄酸化細菌である *Sulfuriferula* 属が有意に検出された。室堂東部の SO_4^{2-} の大幅な増加がみられた試料において、硫黄酸化細菌である *Thiomonas* 属や *Sulfuricellaceae* 科の存在もみとめられた。室堂東部の NH_4^+ の増加がみられた試料においては、窒素固定菌である *Paraburkholderia* 属の存在もみとめられた。 SO_4^{2-} 濃度が冷蔵保存中に激増したのは、室堂付近に存在する火山噴気孔（地獄谷）由来の非水溶性硫黄が融雪期に濃縮し、冷蔵保存中に硫黄酸化細菌により酸化されたためと考えられる。また、窒素固定菌が確認されたことは、貧栄養環境である室堂周辺における窒素循環の解明としての意義が大きいといえる。

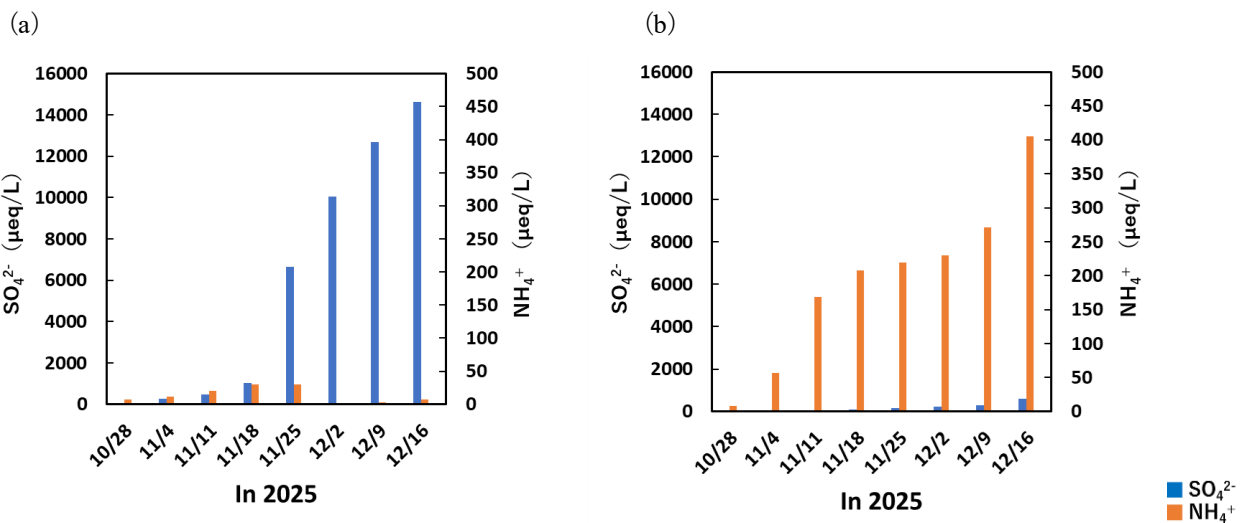


図 1 融雪期の未ろ過試料の冷蔵保存中の硫酸イオンおよびアンモニウムイオン濃度の時間変化
 (a; 黒色着色雪: 室堂東部 2025 年 7 月 2 日採取, b; 赤色着色雪: 室堂東部 2025 年 7 月 14 日採取)

新潟県大白川における積雪表層不純物の濃度と種類の時間変化

○船木明日奈¹・佐藤亮太^{2,3}・河島克久⁴・松元高峰⁴

(1:新潟大学大学院総合学術研究科 2:鉄道総合技術研究所 3:新潟大学大学院自然科学研究科 4:新潟大学)

1. 背景

融雪水は、重要な水資源である一方で、災害を引き起こす要因にもなり得る。そのため、融雪水の流出時期や流出量を高精度で予測することは、防災および水資源管理の観点から重要である。融雪を引き起こす主要な熱源は日射であり、雪面に入射した日射とその反射の割合は雪面アルベドによって表される。雪面アルベドは、積雪表層の不純物濃度や雪粒径などによって変化する。特に太陽放射エネルギーの約半分が含まれる可視域(波長0.4~0.8 μm)においては、不純物濃度の増加がアルベド低下に大きく寄与する(Warren and Wiscombe, 1980)。

積雪表層不純物濃度は、ブラックカーボンや黄砂などの沈着に加え、リターや土壌粒子などの降下によって増加する。国土の約7割を森林が占める日本において、森林地域ではリターや花粉など、植物由来の不純物がアルベド低下に大きく影響する可能性がある。植物由来の不純物は、植物のフェノロジーや気象条件によって降下量が時間的に変化すると考えられるが、日本の森林地域において、積雪表層不純物の変化特性は十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、森林の影響を強く受ける新潟県魚沼市の山間部を対象に、積雪表層不純物の濃度と種類の時間変化を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

本観測は山間部に位置する新潟県魚沼市大白川の平坦地で行った。観測地点は開地であり、人為的汚染の影響が小さい。また、約100 mの距離にはスギ林やブナ林が広がっている。観測は2025年1月~5月に計9回実施した。各観測日において、積雪表層2 cmと10 cmのサンプルを採取した。

不純物濃度の測定では、まず融解させた雪サンプルの質量を、電子天秤(分解能1 mg)を用いて測定した。次に、乾燥させたメンブレンフィルター(孔径0.2 μm)の質量を高精度電子天秤(分解能0.01 mg)で測定した後、ビフネルロートに設置して、雪サンプルをろ過した。最後に、ろ過後のメンブレンフィルターを乾燥させ、高精度電子天秤で質量を測定した。ろ過前後のメンブレンフィルターの質量差を不純物量とし、それを雪サンプルの質量で割った値を積雪不純物濃度(ppmw)とした。不純物の種類は、目視および光学顕微鏡を用いて判別した。

3. 結果

3. 1 積雪表層不純物濃度の時間変化

積雪表層2 cm及び10 cmにおける不純物濃度の時間変

化を図1に示す。1月から2月の堆積期にかけては積雪表層2 cmと10 cmで濃度の差が小さいが、3月以降は表層2 cmの方が顕著に高くなり、両者の間に3~10倍程度の差が認められた。表層2 cmに着目すると、1月から2月にかけては0.2~4 ppmwと低濃度であるのに対し、3月の融雪期に入ると濃度は急増し、融雪末期の5月8日には最大で779 ppmwに達した。このように森林付近の積雪表層不純物濃度は、融雪期に入ると急増し、その後も指数関数的に増加するという特徴を示した。

3. 2 積雪表層不純物の種類

2月18日の雪サンプルには、目視で確認できる不純物はほとんどなかった。このことから、堆積期の不純物は主に、大気中から乾性・湿性沈着によってもたらされたエアロゾルであると考えられる。3月5日から1~4 mmのリターが入り始めた。3月19日と26日は黄砂の飛来が確認され、26日のサンプルには黄砂と思われる鉱物が多く認められるようになった。4月以降には鉱物に加えて、5 mm以上のリターが含まれるようになった。リターとしては、ブナの芽鱗、スギの雄花、葉の断片や樹皮などが多く確認された。さらに5月以降には、比較的大きな鉱物(粒径0.25 mm以下が主体)が多く含まれるようになった。4月10日のサンプル(表層2 cm)に含まれていた不純物を顕微鏡で観察したところ、スギ・ブナの花粉、火山ガラス、珪藻、微粒炭、角閃石、単斜輝石などが確認された。これらのことから、3月の不純物濃度の急増はリターの降下に関係していると考えられる。その後の指数関数的な増加は、春先に飛来する黄砂に加え、植物のフェノロジーに伴うブナの芽鱗やスギ花粉といったリターの降下量増加や、消雪により露出した観測地周辺の土壌から運ばれた鉱物粒子によるものと解釈できる。

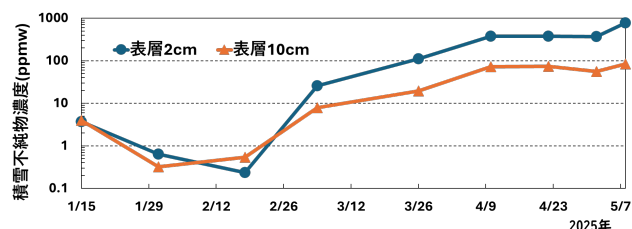


図1 積雪表層2 cm及び表層10 cmの不純物濃度の時間変化。

文献

Warren, S. G. and Wiscombe, W. J. (1980): A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2734-2745.

融雪に伴う積雪表層の不純物濃度の変化

○佐藤亮太^{1,2}, 船木明日奈³, 河島克久⁴, 松元高峰⁴

(1: 鉄道総合技術研究所 2: 新潟大学大学院自然科学研究科 3: 新潟大学大学院総合学術研究科 4: 新潟大学)

1. はじめに

融雪量推定に重要となるアルベドは、可視域の波長においては鉱物ダストなどの積雪不純物濃度に依存することが知られており¹⁾, わが国においても札幌を中心とした積雪不純物濃度の観測結果が報告されている²⁾.

積雪表層の不純物濃度の変化は、鉱物ダストや花粉などの飛来と、積雪表層よりも下層に含まれる不純物が融雪により表層に表れる濃縮, 融雪水や降雨の浸透に伴う積雪表層含まれる不純物が下層へ移動する浸透の3つの影響を受けると考えられる. しかしながら, 地上観測データは限られており, 特に融雪に伴う積雪表層における不純物の濃縮過程に関しては未解明な部分が多い.

そこで本研究では, 積雪表層における濃縮過程による不純物濃度の増加量を明らかにするための野外観測を行った.

2. 観測および分析方法

2026年3月10日~3月15日, および3月25日に塩沢雪害防止実験所(鉄道総研: 新潟県南魚沼市)において観測を実施した. 積雪表層における不純物の濃縮過程を明瞭に捉えるため, 3月9日に自然積雪の表面をコンテナボックスで覆い, 新たに花粉や鉱物ダストが積雪表面に飛来してくる影響を除外した. 3月10日より1日毎に, 設置したコンテナボックスを開けて, 覆われていた積雪表層の雪試料をサンプリングした. サンプリングは1日毎にコンテナボックスに覆われていた雪面に対して4ヶ所で実施した(3月25日のみ2ヶ所). サンプリングは, 鉛直方向に3cm毎に3層(積雪表層側を1層目とする)の雪試料を採取した. さらに, 実験所構内において, 自然積雪の積雪表層2cmおよび積雪表層10cmのサンプリングを2026年1月7日から3月30日まで日々実施した.

サンプリングした雪試料は低温室内(-30℃)に一度保管し, 後日不純物濃度を測定した. 測定方法は, まず, 雪試料を完全に融解させ, 乾燥させた孔径0.2μmのメンブレンフィルターで融解水に含まれる不純物をろ過する. ろ過したフィルターを再度乾燥器で乾燥させ, 電子天秤(最小表示0.1mg)で質量を測定した. ろ過前後のフィルターの重量差を不純物の質量とし, 雪試料の質量で除して不純物濃度(ppmw)を求めた.

3. 観測結果

図1に観測結果を示す. 3月8日~3月9日にかけて, 合計18cmの降雪があったため, 3月10日~11日の不純物濃度は若干小さい値を示した. 新雪層の影響がなくなったと考えられる3月12日~3月15日の4日間の観測結果に着目すると, 4日間において積雪深は約10cm減少しているものの, 各層の不純物濃度の値は同程度の範囲であった. また, 3月15日から3月25日にかけては積雪深が約35cm低下し, 1層目の不純物濃度は約60ppmwから約80ppmwに増加した. 一方, 積雪表層2cmの観測結果では, 3月15日は72ppmwであったのに対して, 3月25日は241ppmwに増加した. この差は花粉等の飛来量によるものと考えられる. これらの結果から, 融雪による不純物の濃縮過程により積雪表面の不純物濃度が増加する影響は確認されたものの, 花粉や鉱物ダストの飛来が不純物濃度に与える影響に比べると濃縮過程の影響は小さい可能性が考えられる.

文献

- 1) Warren, et al.,1980: A model for the spectral albedo of snow, II: Snow containing atmospheric aerosols, J. Atmos. Sci., 37, 2734-2745.
- 2) 青木ほか, 2016: 札幌における積雪観測と物理プロセスモデルの開発, 低温科学, 74, 163-174

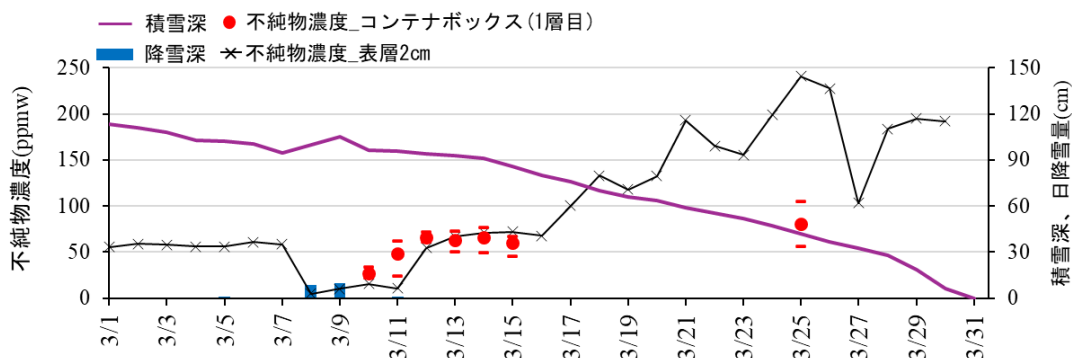


図1 不純物濃度, 積雪深, 降雪深の観測結果
(コンテナボックスのプロットの上下の線はそれぞれ最大値と最小値を表す)

長野県のなだれ注意報基準に関する基礎的検証

○太田あみ¹
(1: 気象庁長野地方気象台)

1. はじめに

長野県は積雪地域を広く有し、毎年のように雪崩災害が発生している。これらの雪崩は山間部の集落や道路、山岳レジャー利用者に影響を及ぼし、人的被害や交通障害を引き起こしてきた。長野地方気象台では、生活圏（標高約1,500m以下の人家、道路、スキー場等）において雪崩のおそれがある場合になだれ注意報を発表している。しかし、現行の発表基準は昭和期の気象条件および災害統計に基づいて設定されたものであり、近年の雪崩発生実態との対応関係については十分な検証が行われていない。

そこで本研究では、長野県における基準設定以降の雪崩発生事例を収集し、注意報の発表状況および気象条件との関係性を分析することで、現行基準の妥当性について検証することを目的とする。

2. 研究方法

本研究では、まず全国のなだれ注意報運用基準を整理し、長野県の基準の位置づけを確認した。次に、基準設定時の資料を整理した上で、1990年から2025年までの長野県における雪崩発生事例を収集した。収集した事例については、発生時の注意報発表状況および気象条件を整理し、基準との対応関係を分析した。

3. 長野県の基準の特徴

なだれ注意報の運用は昭和52年の通達に基づき、表層雪崩と全層雪崩に区分して基準が設定されている。長野県の現行基準は、1946年から1982年までの雪崩発生事例の相関分析をもとに作成され、その特徴として、

- ・表層雪崩において風速を指標として取り入れている
- ・全層雪崩において気温の平年差を用いている

という点が挙げられ、いずれも独自性がある運用となっている。一方、多くの官署では、積雪深と降雪量あるいは気温を組み合わせた基準が用いられている。

表1 現行のなだれ注意報基準（長野県）

区分	基準条件
表層雪崩	積雪が50cm以上、降雪の深さ20cm以上で風速10m/s以上、または積雪が70cm以上、降雪の深さ30cm以上
全層雪崩	積雪が70cm以上、最高気温が平年より5℃以上高い、または日降水量が15mm以上

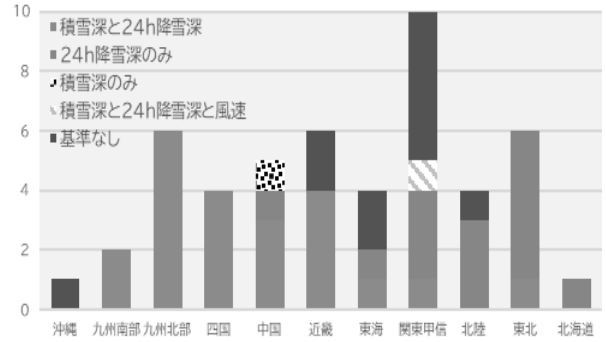


図1 地方別 表層雪崩の注意報基準

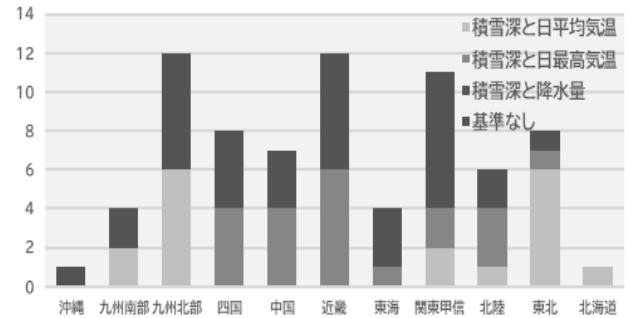


図2 地方別 全層雪崩の注意報基準

4. なだれ注意報の発表状況（

平年並みの降雪となった2024年12月から2025年4月を対象に発表状況を分析したところ、注意報は期間の約6割で継続しており、冬期間を通じて長期間にわたり発表される傾向が確認された。また、発表は大北地域、中野飯山地域および長野地域に多く、表層雪崩は主に厳冬期に、全層雪崩は融雪期に多く発生していた。

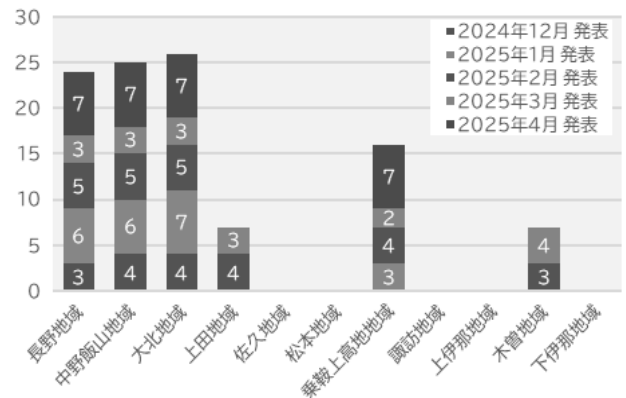


図3 2024年12月～2025年4月の注意報発表回数

5. 雪崩発生事例の分析

5-1. なだれ注意報の発表状況

収集した 222 件の雪崩事例のうち、生活圏を対象とした事例について検証を行った結果、確認可能な 50 件中 39 件で注意報が発表されていた。適中率は 78% であり、特に表層雪崩では 87% と高い値を示した一方、全層雪崩では 64% にとどまった。

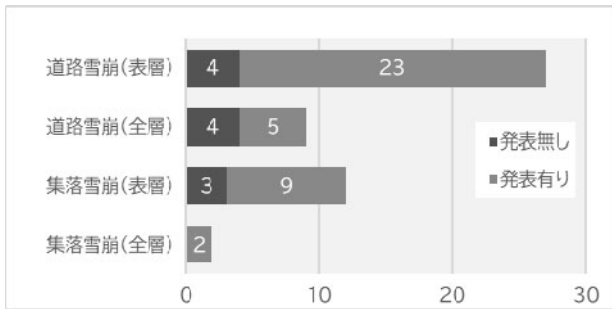


図4 雪崩分類別 注意報発表の有無

5-2. 表層なだれの検証

表層雪崩について検証した結果、積雪および降雪条件については基準設定時と同様の傾向が確認され、多くの事例が一定以上の積雪または降雪条件下で発生していた。一方、風速については 10m/s 以上に達した事例がほとんど見られず、積雪・降雪との明確な関係も確認されなかったことから、現行の風速基準は実際の発生条件と必ずしも整合していない可能性が示された。

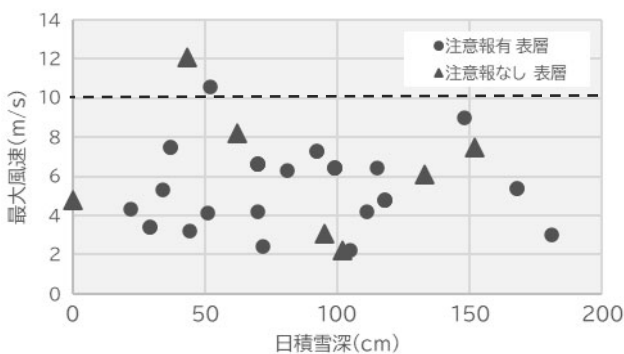


図5 表層雪崩事例「積雪×風速」相関図

5-3. 全層なだれの検証

全層雪崩については、気温指標として用いられている平年差では該当事例がほとんど確認されなかった。一方、当日の最高気温に着目すると、すべての事例が 5°C 以上と一定以上の気温条件に該当しており、相対値よりも絶対値の方が実態に適合する可能性が示唆された。また、降水量については、該当事例は多くないものの、一定の条件下で雪崩発生との対応が見られ、基準として概ね妥当

であると考えられる。

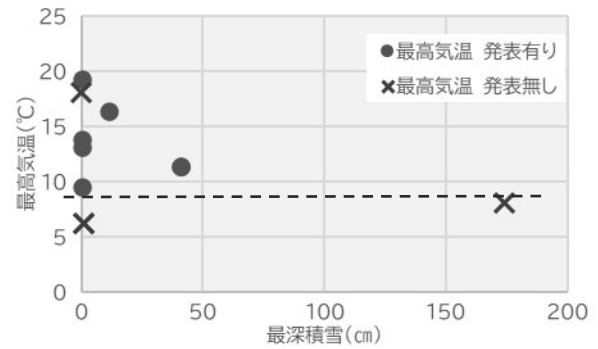


図6 全層雪崩事例「積雪×最高気温」相関図

6. まとめと考察

本研究により、長野県のなだれ注意報基準は一定の適中率を有しており、現行基準は概ね有効であることが確認された。一方で、表層雪崩における風速基準は実態との整合性が低く、全層雪崩における気温指標についても平年差より当日の気温の方が適合性が高い可能性が示された。さらに、注意報が冬期間の長期間にわたり継続する傾向が見られ、運用上の課題として検討の余地がある。

7. 今後の課題

本研究では近年の雪崩事例を用いて検証を行ったが、生活圏における全層雪崩の事例数は限られていた。今後は事例の蓄積を進めるとともに、

- ・表層雪崩は風速基準の再評価
- ・全層雪崩における積雪深の把握方法
- ・気温指標の相対値から絶対値への検討

などを進め、より精度の高いなだれ注意報運用に資する検証を深化させるとともに、本調査研究を通して雪崩事故防災の普及啓発に活かしていきたい。

文献

防災科学技術研究所雪氷防災研究センター, 2023 : 雪氷災害データベース.

<https://yukibousai.bosai.go.jp/obs/news/index.php>
(2025.10.30 閲覧).

新潟大学災害・復興科学研究所, 2010 : 日本の雪崩災害データベース.

https://www.nhdr.niigata-u.ac.jp/records/nadare_db
(2025.10.30 閲覧).

雪崩防護工（集落雪崩）における損傷状況の実態調査

○榊直人・渡辺伸一・藤平大
国立研究開発法人 土木研究所

1. はじめに

砂防関係事業の1つである集落雪崩対策事業が創設されてから、40年以上が経過した。点検要領は砂防関係施設点検要領（案）（国土交通省水管理・国土保全局砂防部保全課，2025）に準拠することとされている。しかし、急傾斜施設に準じるという記載があるのみで、雪崩防止施設に特化した具体的な点検手法は示されていない。現状では各施設管理者が独自に作成した点検要領に基づき点検を実施しており、評価方法に統一的基準が存在しない。そのため、標準的な点検要領の整備が強く求められている。本研究では集落雪崩対策事業のうち、人命保護に直結する雪崩防護工のみに着目した。雪崩防護工の点検要領作成に当たりまず、損傷の種類とそれぞれにおいてどの程度の損傷が発生予想されるのか把握する必要があるものの、そういった実態調査はこれまでなされてきていない。そうした背景から、雪崩防護工における損傷の実態調査を目的として、無雪期に現地調査を実施した。

2. 現地調査の対象と点検方法

損傷実態を効率的に把握するために、損傷が予測される施設を優先して現地調査を実施する必要がある。雪崩防護工の施設管理者より健全度（施設が健全な順からA、B、Cの3段階評価）等が記載された施設台帳の提供を受け、次の2つの基準に従って調査対象施設の選定を行った。

基準①：施設の健全度評価がBあるいは健全度評価を未実施の施設の中から（収集した資料では、Bが最も健全度が低かった）、B評価である場合その理由がなるべく施設本体の損傷によるもので、施工年数が古く、施設までのアクセス性が良く、かつ施設の種類に幅が出るよう選定した。

基準②：部材として、より損傷しやすいと考えられる角型鋼管またはH鋼を使用している施設のうち、施工年数が古くかつ施設までのアクセス性の良い箇所を選定した。

基準①については、防護柵工・減勢枠組み工・減勢柵工・防護擁壁工を計17施設、基準②については、防護柵工・防護擁壁工を計5施設対象として調査した（計22施設）。基準①②ともに、無雪期（2024年及び2025年の夏季）に現地調査を実施した。

各施設について部位ごとに損傷の種類を調査し、施設の構造特性に応じて2つのグループに分けて損傷種類をまとめた。防護柵工・減勢柵工・減勢枠組み工を1つのグループとしてまとめ（Aグループ、全16施設）、防護擁壁工を2つ目のグループとしてまとめた（Bグループ、全6施設）。

3. 現地調査結果

今回の現地調査の結果判明した損傷は、図1および図2のとおりである。それぞれ、AグループおよびBグループにおける損傷をまとめたものである。Aグループ、Bグループともに鋼材が主として使用されている部位（支柱・主柱等）では、腐食（軽微な防食塗膜の劣化によるはがれ等を含む）、ゆるみ・脱落、変形が主に確認された。また、コンクリートが主として使用されている部位（擁壁等）では、剥離、ひびわれ、漏水・遊離石灰、洗堀が主に確認された。いずれの施設についても損傷状況としては軽微であり、施設全体では大きな問題は見受けられなかった。したがって、今回の現地調査のみでは損傷種類並びに損傷の程度の全容を十分に把握できたとは言い難い。

4. まとめと今後の方針

本研究では、集落雪崩における雪崩防護工の点検要領整備を見据え、無雪期に現地調査を実施し、施設種類ごとに損傷の種類とその程度を整理した。いずれも軽微な損傷のみが確認され、雪崩防護工に生じうる損傷およびその損傷の程度を網羅的に把握しきれないものと考えられる。そのため、同じ部材を用いている他の分野の点検要領などを参照し、発生が予測される損傷やその程度の体系化を進める予定である。その上で、発生確認された、ないし発生予測される損傷の種類ごとに、変状の程度を評価する方法を提案する予定である。最終的に、各損傷の程度から雪崩防護工全体の健全度を評価する方法についても提案を行う予定である。

グループA（防護柵工・減勢柵工・減勢枠組み工）で確認された損傷		
全体	主柱・支柱	水平梁材，横板上弦材
・機能低下（土砂堆積）	・腐食	・腐食 ・変形
結合部	基礎部	
・腐食 ・ゆるみ	・剥離 ・ひびわれ ・漏水・遊離石灰	

図1 現地調査で確認されたグループA（防護柵工・減勢柵工・減勢枠組み工）における損傷種類

グループB（防護擁壁工）で確認された損傷		
擁壁	補助防護柵	結合部
・剥離 ・ひびわれ ・遊離石灰 ・洗掘	・腐食 ・変形	・腐食 ・ゆるみ
アンカー部		
・腐食 ・ゆるみ・脱落 ・変形		

図2 現地調査で確認されたグループB（防護擁壁工）における損傷種類

謝辞

雪崩防護工の点検資料をご提供いただいた全国地すべりがけ崩れ対策協議会雪崩部会の皆様に深く感謝申し上げます。

文献

国土交通省水管理・国土保全局砂防部保全課（2025）：砂防関係施設点検要領(案).
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/sabo/sabo_tenkenyouryou_202504.pdf (2026.04.07 閲覧) .

ナイトビジョンカメラによる雪崩の常時動態観測システムの構築

—糸魚川市柵口地区権現岳への適用—

○新屋啓文¹・田邊章洋²・砂子宗次朗²

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

1. はじめに

雪崩のハザードマップ作成において、雪崩運動モデルによる到達範囲や衝撃圧の評価が重要になる。しかし、適切なモデルパラメータを観測データから高精度に決定するには、到達範囲や堆積量といった静的情報だけでなく、雪崩速度等の動的情報も必要となる。複数の地震計や空振計の波形解析によって、雪崩の発生地点や規模を推定する手法は構築されているが、雪崩の動的情報の推定は難しい。インターバルカメラによる雪崩監視は簡潔であるものの、その時間帯は日中の撮影に限られる。本研究では、定点カメラによる雪崩の動態観測を昼夜を問わず継続するため、ナイトビジョンカメラを導入した観測体制を構築し、2026年冬期に試験したので、その結果を報告する。

2. 手法

雪崩の動態観測は権現岳の東側斜面を対象に新潟県糸魚川市柵口地区で実施され、定点カメラによる雪崩斜面の常時監視およびUAVによる定期的な空撮が行われた。2026年2月18日に対象斜面から1.8km程離れた土木研究所雪崩・地すべり研究センターの局舎観測所で定点カメラを固定し、2026年3月27日までカメラデータの回収とUAV空撮を約1週間毎に遂行した。常時監視について、HykeCam SP3の自動撮影カメラ(2台)とSIONYX Proのナイトビジョンカメラ(1台)の動画群から日中・夜間に発生した雪崩動画を抽出した。UAV空撮について、DJI Matrice 4E (RTK-UAV)の空撮画像をSfM処理し、対象斜面の数値表層モデル(DSM)を作成した。

3. 結果と考察

日中を対象とする自動撮影カメラは、低頻度の撮影エラーを除いて、観測期間中に途切れることなく対象斜面を監視することに成功した。一方、夜間を対象とするナイトビジョンカメラは、設定トラブルのため3月1日まで対象斜面を撮影できなかったが、3月2日以降、観測終了日まで継続的な撮影に成功した。得た全ての動画を目視で雪崩判別し、点発生雪崩や10秒程の流下時間といった小規模な雪崩を除外した結果、検出した雪崩の発生回数は日中で77回(2/18~3/1:37回, 3/2~27:40回)、夜間で28回(3/2~3/26)であった。注意として、曇りや降水の多い時間帯では、鮮明な画像を得ることができなかった。

図1は、ナイトビジョンカメラで撮影した雪崩画像(グレースケール)の一例であり、3月25日の深夜0時13分頃に発生したものである。画像の白と黒の部分は、それぞれ積雪と露出した地面を表している。この時間帯では、星空を確認できない程度の雲が確認されたが、その光量においても対象斜面の積雪状況を監視することが可能となっていた。雪崩は山頂に残存する積雪の崩落により発生し、図1(a)の32秒後の図1(b)において発生区から水平距離で約400m下った地点で雪崩先端が捉えられた。

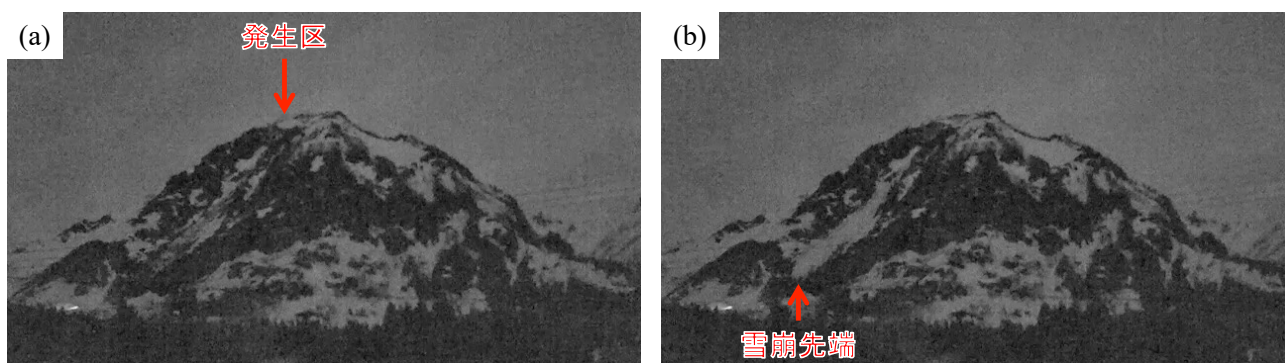


図1 2026年3月25日0時13分頃に発生した雪崩の様子：(a)発生前、(b)流下中

謝辞

観測機器の設置に協力いただいた土木研究所雪崩・地すべり研究センターの榊直人氏および渡辺伸一氏に深く感謝いたします。本研究は、新潟大学災害・復興科学研究所共同研究費(2025-12)の助成によって行われた。

斑尾高原で発生した全層雪崩

○出川あずさ¹

(1: 日本雪崩ネットワーク)

1. はじめに

2026年2月28日14時5分頃、斑尾高原スキー場の営業中のコースにて全層雪崩が発生し、来場者5人が巻き込まれ、怪我4人の事故となった。この雪崩は斜面上部で発生した全層雪崩をきっかけとし、斜面中間部の積雪上層が横方向に広く破断することで規模が拡大したことが調査で判明した。本講演では、この雪崩の現地調査の結果を報告する。

2. 調査方法

2026年3月1日、現場にスキーパトロールが同行することで日々のコース管理の手法等の聞き取りを行いつつ、破断面データの採取および写真撮影等を行った。また、同日に上越地域消防局が撮影したドローン映像の提供を受け、全体状況の把握を行った。

3. 結果

3.1 雪崩の範囲と発生区

雪崩の範囲を図1に示す。斜面方位は北東。上部破断面Tは標高1,300m、デブリ末端Bは標高1,030m。見通し角22.5°、直線斜辺650m、流下距離670m。

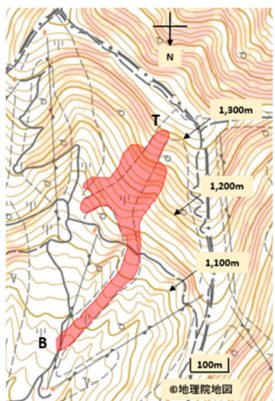


図1 雪崩の範囲

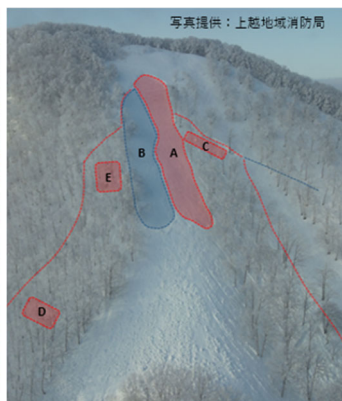


図2 発生区の状態

発生区を図2に示す。全層雪崩として始動したのはABの範囲。幅40m、長さ150m、厚み110-130cm。積雪底部から動いている箇所を赤で示し、積雪底部のざらめ雪層が残存していた部分を青で示した。積雪上層(55cm付近)にある硬度と雪質が大きく異なる箇所をすべり面として、雪崩は左右方向に拡大。最大幅180mとなった。また、クラックが30mほど走っている箇所(青線)もあった。

CDEの各箇所は、それぞれが局所的な急斜面となっており、雪崩が流下する刺激で、その部分のみが全層雪崩として崩落していた。

3.2 雪崩の走路と堆積区

雪崩の走路を図3、堆積区を図4に示す。走路には積雪上層を構成していた雪ブロックが残存しており、地表部は露出していない。堆積区では、積雪を削りながら雪が流下しており、それがデブリを構成していた。



図3 走路の状況



図4 堆積区の状態

3.3 積雪データ

気温-4.7°C、標高1,280m、斜度37°の側部破断面にて積雪観察を行った。積雪表層(0-16cm)の融解凍結クラスタは、前日まで濡れていたものが朝までに凍結。

16-55cmにしまり雪の層があり、主に1月下旬のまとまった雪で形成。焼結を進め硬度Pであった。この層は含水率がMoistであり、融雪水が流れた様子がないことから、2月下旬の降雨等の直接的な影響を受けていない。55-85cmの上端部は黄砂(1月16-17日)で汚れている。

85-110cmは十分に濡れており、最下層は粒径2-3mmのざらめ雪で硬度Fであった。全層雪崩は、このざらめ雪の層の底面から発生しており、同時に、この濡れた層の上端あるいはこの層自体が壊れる形で発生している。

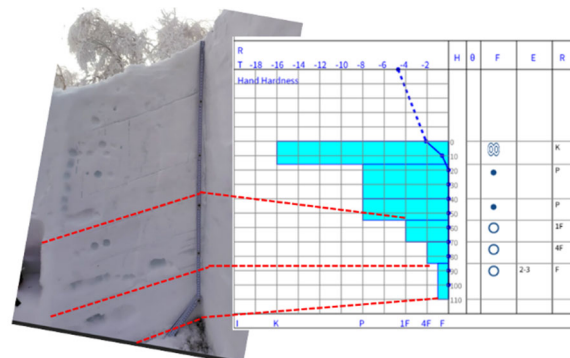


図5 側部破断面のデータ

謝辞

現地調査にあたり斑尾ホスピタリティ合同会社にご助力を、ドローン映像については上越地域消防局からご提供をいただいた。ここに御礼申し上げます。

鳥取県大山一ノ沢で 2025 年に発生した全層雪崩

○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

2025 年に鳥取県の大山一ノ沢(図 1)において大規模な雪崩が発生し、3 月 11 日に登山者により発見、通報された。発見者による写真を見ると、雪崩の発生区では黒い地面が現れていたことから、面発生湿雪全層雪崩と考えている。雪崩の発生日は不明であるが、気温や降水量の推移から推測して 3 月上旬に発生したと考えている。この雪崩は、積雪だけが地面を滑り落ちる一般的な全層雪崩とは異なり、土壌表層が浅い部分で崩壊し、植生やその上の積雪と一緒に流下したと考えられる痕跡が見つかった(図 2)。大山は標高 1729 m の成層火山で、火成岩の風化により崩壊が多発している。本件の雪崩の発生には大山の崩壊しやすい地質が関係した可能性が考えられるので、全層雪崩の特殊な事例として報告する。

2. 雪崩の概要

3~4 月に撮影された無人航空機(UAV)の画像から、雪崩は一ノ沢の傾斜 35 度を超える標高 1450 m~1250 m 付近の斜面で幅 100 m 程度に渡って発生したと推定された。雪崩は水平距離で約 1.3 km を流下して標高 890 m 付近まで達した。見通し角は約 24 度で全層雪崩としては流下距離が最長クラスといえる。この雪崩により沢に架かる県道の橋梁が損壊し、沢の治山施設の一部にも被害があった。

3. 雪崩発生状況の推察

融雪が進んだ 4 月 22 日に雪崩堆積区を踏査したところ、デブリ(雪崩堆積物)の表面のあちこちに灌木や草本が生えた状態の土層が転がっていることに気が付いた(図 2)。周囲のデブリの表面を覆っていた土砂をスコップで除くと下から雪が現れた。この状況から、土壌表層が崩壊し、灌木などが生えたままの状態ですべて雪崩に運ばれて堆積したと考えた。堆積時にはデブリの雪に埋まったが、融雪が進んでデブリに含まれていた土砂とともに表面に現れたと考えられる。そのため、土砂の下には雪が残っていたと考えた。全層雪崩の発生区では積雪だけが流下し、植生は残るのが一般的であるが、本件は、全層雪崩の発生時に土壌表層が崩壊して積雪とともに流下した特殊な事例と考えている。

大山一ノ沢の最寄りの気象庁アメダス観測点である大山(標高 875 m)の積雪深、降水量と、大山では気温を測定していないため、米子(標高 6.5 m)の気温を参考にして雪崩の発生状況を推察した。雪崩発生区(約 1500 m)と米子の標高差を考慮(気温減率 0.6 °C / 100 m で計算)すると、米子の気温が概ね 9 °C 以上のときには、発生区の気温が 0 °C 以上になって積雪表面で融雪が生じる可能性がある。2025 年冬期は米子で気温が 9 °C 以上になった 1 月中~下旬、2 月中旬、2 月 25 日~3 月 2 日に連日、発生区において融雪が生じ、融雪水が積雪や土層に浸透していた可能性がある。特に 3 月 2 日は気温が高く、まとまった量の降水があったので、雪崩発生区においても雪ではなく雨が降ったと考えられ、融雪水と雨水をあわせると土層に浸透した水の総量はかなり多くなっていたと推測される。積雪期には底面融雪により融雪水が常に土層に浸透していることに加えて、気温上昇により短時間にまとまった量の融雪水や雨水が浸透したために脆弱化した土層が耐えられなくなり崩壊したと思われる。

2025 年冬期は平年に比べて積雪が多く、特に 2 月の大雪で積雪深が急増したため、積雪による上載荷重が非常に大きくなっていったといえる。3 月上旬のまとまった量の降水が発生区の積雪荷重をさらに大きくし、水を含んで脆弱化した土層の崩壊を伴う全層雪崩の発生につながったと推察した。



図 1 大山一ノ沢(2025 年 4 月 22 日)



図 2 崩壊し植生ごと下流まで流された土層の様子。土砂の下には雪が残っていた。

妙高山域幕ノ沢において 2026 年に発生した雪崩の調査

○竹内由香里¹⁾・勝山祐太¹⁾・勝島隆史¹⁾・安達聖²⁾・西井稜子³⁾

(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

妙高山域の幕ノ沢では大規模な雪崩の発生検知観測を2000年から継続し、雪崩の観測データを蓄積するための現地調査を行ってきた¹⁾²⁾。2026年冬期には2022年以來となる9回目の雪崩を観測することができた。雪崩の発生日時は地震計の震動記録から1月25日9時58分と推定した。雪崩堆積区に近い標高810mで観測した発生時の気温は -7.0°C 、積雪深は267cm、雪崩発生までの24時間の降水量は74mmに達していた。雪崩は低温下の強い降雪の最中に発生していることから、乾雪表層雪崩と考えている。雪崩の堆積量や到達範囲を明らかにするための調査を3~4月に実施したので、調査結果について報告する。

2. 調査と解析の方法

雪崩の堆積量を調べるための調査はデブリが厚い自然積雪に覆われていた3月17~18日に実施した。積雪深分布を調べるため、無人航空機(UAV:DJI社製Matrice 4E)により堆積区の写真測量を行い、数値表層モデル(DSM)を作成した。DSMと国土地理院の数値標高モデル(5mDEM)との差を測深棒による実測値と比較して補正し、積雪深分布を求めた。また、堆積区の2箇所において積雪断面観測を行い、自然積雪の深さ、デブリ層の厚さや密度、含水率、相当水量などを測定した。さらに4箇所において神室型スノーサンプラーで積雪試料を採取し、自然積雪層とデブリ層それぞれの厚さとデブリ層の水量を測定した。雪崩の到達範囲は融雪が進んだ4月9日に堆積区を踏査して確認し、雪崩で運ばれたデブリに混入していた樹木の枝葉が雪面に現れた位置をGNSS受信機(RTK-rover)で計測した。4月17日にも汚れを含んだデブリの範囲をとらえるためにUAV(DJI社製Mavic 3)で堆積区上空撮を行った。

3. 主な結果と考察

図1に雪崩の到達範囲を示した。堆積区の一部(図中の破線の部分)は周囲に比べて明らかに雪面が汚れていて、土の付いた倒木や草が雪面に現れていた(図2)。これは雪崩が地面と接する下層の積雪まで取り込んで流下したことを表している。汚れを含んだデブリは、雪崩の最長到達範囲より約300m上流で止まっていた(図1)。一般に大規模な乾雪表層雪崩では上層に低密度の雪煙層、下層に高密度の流れ層があることが知られているが、雪崩堆積区で見られた状況は、このような雪崩の内部構造や流動形態を表していると考えた。すなわち、低密度層は高速で枝葉を巻き込んで遠くまで達した一方、高密度層は地面に接する積雪とともに土壌も取り込んで流下し、低密度層より低速で進んで堆積し、流下距離が短くなったと考えている。このように高密度層に含まれて運ばれた土壌などが、融雪期になって汚れた雪面として現れたと考えている。デブリ層の厚さを計測した地点を図1に◇で示した。汚れを含んだデブリ層の厚さは上流側から、30cm、66cm、15cm、41cm、30cm、0cmでデブリの乾き密度から算出した相当水量は平均して168mmであった。

文献

- 1)竹内由香里, 勝島隆史, 勝山祐太(2022):雪崩の発生検知と大規模雪崩の実態—新潟県妙高山域幕ノ沢における雪崩の調査・観測—。砂防の観測の現場を訪ねて3, 砂防学会出版プロジェクト委員会(編), 139-148.
- 2)竹内由香里, 勝山祐太, 勝島隆史, 大澤光, 安達聖(2022):妙高山域の幕ノ沢において2022年2月21日に発生した乾雪表層雪崩。雪氷北信越, 42, 16

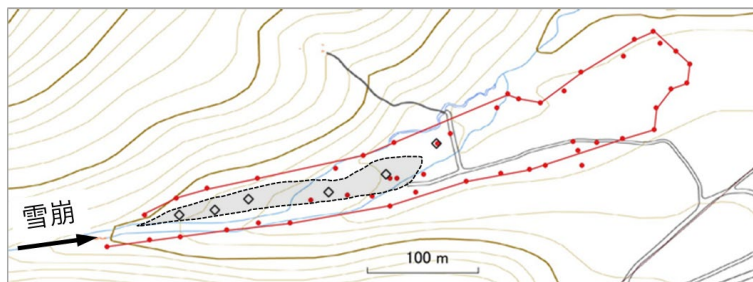


図1 雪崩の到達範囲(赤い実線:GNSSで計測)
破線は汚れを含んだデブリの堆積範囲(目視)
◇は汚れを含んだデブリ層の厚さを計測した地点



図2 デブリに含まれていた草と土

年輪解析に基づく妙高・幕ノ沢における雪崩発生頻度の復元とその精度評価

○西井稜子¹・Juan Antonio Ballesteros-Cánovas²・竹内由香里³・Markus Stoffel⁴・勝島隆史³

(1: 新潟大学 災害・復興科学研究所 2: National Museum of Natural Sciences-Spanish National Research Council 3: 森林総合研究所十日町試験地 4: University of Geneva)

1. はじめに

雪崩は、積雪地域において深刻な人的・物的被害をもたらす自然災害の一つである。雪崩リスクを評価するためには、過去に発生した雪崩イベントの規模や発生頻度の把握が重要である。過去の雪崩発生履歴を復元する手法として、年輪地形学的アプローチがある。雪崩の流下・堆積域が森林である場合、雪崩の流下・堆積過程で周囲の樹木が損傷される可能性があり、その影響は年輪の幅や傷として記録される。それらのシグナルを年輪解析によって抽出し、対象地域の雪崩発生履歴を復元する方法である。国外では年輪解析に基づく雪崩頻度の復元が北米や欧州を中心に積極的に取り組まれているものの、年輪解析による雪崩検出の精度について、定量的には十分に評価されていない。そこで、本研究では、雪崩観測が実施されている新潟県妙高・幕ノ沢において、樹木の年輪解析データと雪崩観測結果を比較し、その年輪解析による雪崩検出精度を評価した。そして、年輪解析による雪崩イベント復元に適した樹種等について検討した¹⁾。

2. 調査地と方法

調査地は、新潟県妙高山東麓に位置する幕ノ沢である。幕ノ沢では、雪崩発生検知システム等による雪崩観測が2000年から開始されており、2018年までの期間に計7回(2000, 2001, 2002, 2005, 2008, 2012, 2013年)の雪崩の流下が確認されている²⁾。これらの雪崩イベントは主に表層雪崩であり、源頭部付近(約1700 m a.s.l.)を発生域として、標高800 m a.s.l.前後の堆積域まで流下した。本研究では、この雪崩堆積域において、雪崩シグナルを年輪試料から検出するために、2019年4~5月にスギや広葉樹(計56本)を対象に成長錐を用いて年輪試料を採取した。樹木の成長攪乱として、成長抑制、あて、傷(カルス形成)に着目した。また、雪崩の影響を受けていない健全木(計30本)から年輪試料を採取した。年輪試料の処理・解析は、標準的な手法³⁾に則って行い、成長攪乱の強度分類を行った。年輪解析による雪崩発生判別は、対象試料を広葉樹、針葉樹、両方(針葉樹・広葉樹)の3タイプに分けた上で、成長攪乱の種類・強度に応じた重みづけ指数(Weighted index)⁴⁾を用いた。年輪解析による雪崩発生判別の精度検証として、雪崩観測結果(2000~2018年)との比較に基づき、正解率等を算出した。

3. 結果と考察

雪崩観測結果との比較によって、年輪解析による雪崩検出精度(正解率)は、対象木が広葉樹、針葉樹、両方(針葉樹・広葉樹)の順に高く、両方(針葉樹・広葉樹)で正解率89%、偽陰性率17%、偽陽性率8%を示した。雪崩発生年において、年輪試料に成長攪乱が認められた一方で、非雪崩発生年においても一部の年輪試料では成長攪乱が認められた。誤検知となった試料の多くは広葉樹に由来しており、中でも傷・カルス形成の成長攪乱による寄与が大きかった。一方、針葉樹の成長抑制はわずかな誤検知以外、すべて雪崩発生年にシグナルが検出されたことから、針葉樹の成長抑制が雪崩を検出するための最適なシグナルと考えられた。最適なシグナルを示した理由として、厳冬期(積雪深)においても樹冠が雪面から露出しているため、雪崩による樹冠や枝の損失が生じ、結果としてこれらの損失が成長抑制として年輪幅の狭化に反映されやすかったことが考えられた。一方、広葉樹の傷が検知ノイズとなった理由として、傷の年輪試料採取高が雪崩発生時には積雪表面下に位置しており、雪崩以外に由来する傷であったと考えられる。

文献

- ¹⁾ Nishii R., et al. 2026: Critical assessment of a tree-ring-based snow avalanche reconstruction: Makunosawa experimental site, *Japan. Geomorphology*, 494, 110087.
- ²⁾ 竹内由香里, 勝島隆史, 勝山祐太 (2022): 雪崩の発生検知と大規模雪崩の実態—新潟県妙高山域幕ノ沢における雪崩の調査・観測—。砂防の観測の現場を訪ねて3, 砂防学会出版プロジェクト委員会(編), 139-148.
- ³⁾ Stoffel M., Bollschweiler M. 2008: Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 187-202.
- ⁴⁾ Kogelnig-Mayer, B., et al., 2011: Possibilities and limitations of dendrogeomorphic time-series reconstructions on sites influenced by debris flows and frequent snow avalanche activity. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 43, 649-658.

昭和基地で観測された視程と RACMO の blowing snow スキームによる吹雪フラックスとの関係

○添田照樹¹・杉浦幸之助²・堀雅裕²

(1: 富山大学大学院理工学研究科 2: 富山大学学術研究都市デザイン学系)

1. はじめに

南極において、現地作業を行う上で視程の情報は必要不可欠である。一般的に南極氷床の上では、ブリザード時に著しい雪の吹き溜まりや視程の悪化が生じると報告されている。特に昭和基地のような南極沿岸域は、内陸からのカタバ風や低緯度からの擾乱の影響もあり、吹雪による視程への影響が大きい場所だと考えられる。過去に吹雪時の視程に関する研究が多くなされているものの、観測期間が短く変動特性を捉えるには不十分なものが多い。そのため、さらに長期視程統計や気象条件との関連解析を進める余地がある。そこで本研究では、昭和基地を対象に領域気候モデル RACMO の blowing snow スキームを用いて吹雪フラックスを算出し、視程との関係を明らかにすることを目的とする。最終的には、昭和基地における吹雪時の視程の季節変動を明らかにし、吹雪時の新たな行動制限の制定に貢献できる特性を把握する。

2. 方法

本研究で用いた blowing snow スキームは Gadde and Berg (2024) を基に作成し、高さ 1.5m の吹雪フラックスを用いて 10 分毎に算出した。このスキームでは粗度定数を $1.2 \times 10^{-3} \text{m}$ 、積雪密度を 360kg m^{-3} としている。解析データは、気象庁ホームページから取得した昭和基地の地上気象観測データ（風速、気温、相対湿度、気圧、視程）及び、高層気象観測データ（気圧、高度、気温、風速、露点温度）である。解析期間を 2020 年～2024 年とし、高層気象観測データは、ワイオミング大学 (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) から取得した。

3. 結果

図 1 に示すように、吹雪フラックスと視程との間に負の相関が見られた。この傾向は竹内・福沢 (1976) の結果と一致する。点線で示される松沢・竹内 (2002) の式は本解析データの下限近くで推移する挙動を示した。このことから、この式は昭和基地において視程の下限に近い状態を表していると考えられる。図 1 から季節変化に着目すると、同じ吹雪フラックスであっても夏は視程距離が長く、冬は短くなる傾向が見られた。また、吹雪フラックスと視程の関係に影響を与える気象要素を把握するために吹雪フラックスと視程の関係に対して相対湿度で区別した (図 2)。図 2 から、相対湿度が低くなると視程距離が長くなり、相対湿度が高くなると視程距離が短くなるという傾向が見られた。

4. 考察

雪フラックスと視程間に季節変動が見られたのは、夏に吹雪フラックスの見積もりが過大評価となったことが要因の 1 つだと考えられる。夏は雪面の融解・再凍結や、地面の露出の影響もあり、同じ風速で吹雪が発生したとしても吹雪フラックスは実際には小さいと考えられる。相対湿度によって視程距離の変化が見られたのは、昇華蒸発の度合いによるものだと考えられる。相対湿度が低い場合、活発に昇華蒸発が生じて粒径が減少したことで視程距離が長くなったと考えられる。今後は解析期間を延ばし変動特性を明瞭にする予定である。

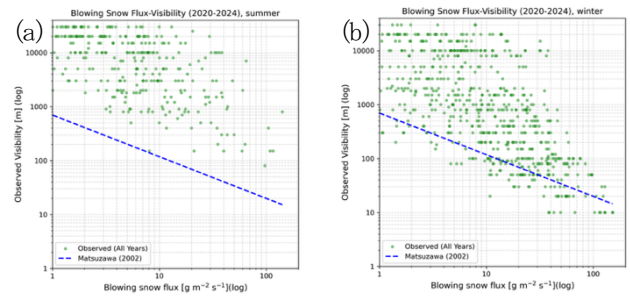


図 1 吹雪フラックスと視程の関係 (2020～2024 年)。

(a) 夏 (12～2 月), (b) 冬 (6～8 月)。点線は松沢・竹内 (2002) の式。

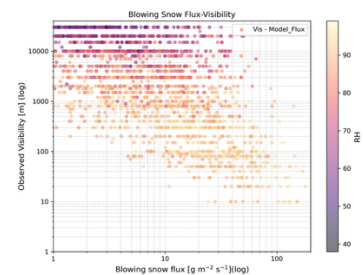


図 2 相対湿度で区別した吹雪フラックスと視程の関係 (2020～2024 年)。

文献

Gadde, S., Berg, W. (2024): Contribution of blowing-snow sublimation to the surface mass balance of Antarctica. *The Cryosphere*, 18, 4933-4953.

竹内政夫, 福沢義文 (1976) : 吹雪時における光の減衰と視程. *雪氷*, 38, 166-170.

松沢勝, 竹内政夫 (2002) : 気象条件から視程を推定する手法の研究, *雪氷*, 64, 77-85.

放射冷却における氷単結晶作製条件の検討

篠原良輔¹, ○石田大季¹, 上村靖司², 杉原幸信²

(1:長岡技術科学大学 機械工学分野 2:長岡技術科学大学 機械系)

1. 緒言

1.1 研究背景

氷の利用は古く、日本では奈良時代に池や湖の水を切り出し、氷室に貯蔵して利用していたことが知られている。当時は人工製氷技術が存在せず、氷は貴重資源であり、その利用は主に上流階級に限られていた。19世紀になると機械式製氷技術の発展により氷の大量生産が可能となり、広く普及した^[1]。現在では食品保存にとどまらず、医療、工業、学術研究など多分野で利用されている。飲食業界、とりわけバーや高級飲料を提供する店舗において、氷は冷却媒体であると共に飲料の外観や提供価値を左右する重要な要素であるため、「気泡を含まず透明度が高く、かつ融けにくい氷」の需要が年々高まっている。また学術研究では、物性評価の精度向上のため、「等価円直径 100 mm 以上の単結晶氷」が求められる。氷は結晶方位に依存する異方性材料であるため、単結晶試料の利用が不可欠であり、氷河研究や光学特性評価などへの応用が進んでいる。

氷単結晶とは、試料全体が単一の結晶からなり、任意の結晶軸に対してその方位が一樣な氷である。このような氷は粒界や結晶方位差に起因する光の散乱が少ないため、高い透明性を示す。一方、多結晶氷は複数の結晶から構成され、通常の製氷機で得られる氷はこれに該当する。結晶構造を観察する手法として、偏光フィルタで氷を挟み観察する手法を偏光観察と呼ぶ。偏光とは、光の振動方向が一方に偏った光である。偏光が結晶を透過する際、結晶方位によって屈折率が異なるため、透過光の強度や色の違いによって結晶方位や結晶粒界を可視化することができる。図1は氷単結晶及び多結晶氷を偏光観察したものである。多結晶氷は、異なる色調の領域が現れており、複数の結晶方位や結晶粒界が観察される。これに比べ、氷単結晶では全体が同一の色調であり、結晶方位が一樣であるため結晶粒界も観察されないことが分かる。

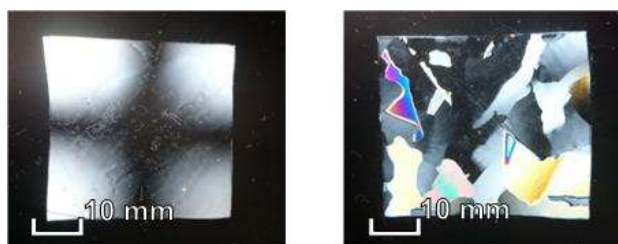


図1 氷単結晶と多結晶氷
(a) 氷単結晶, (b) 多結晶氷

1.2 研究課題と目的

本研究では放射冷却を用いて「無気泡かつ単結晶な氷」の作製を目指してきた。先行研究により、原料水の溶存気体低減や高電圧パルス印加によって、気泡の抑制方法は解明されている^[2]。しかし、結晶粒の大型化および単結晶化については、初晶発生時間の不安定さや、過冷却水中で急

速に成長するデンドライトによる結晶の分断が再現性を低下させる原因として残っている。

そこで製氷面の一部をアルミニウム合金製のプローブ(図2)による熱伝導で局所的に冷却し、初晶形成を促進する手法で製氷を行ったところ、結晶粒の大型化にはプローブ端面近傍の過冷却領域が局所的かつ小さいうちに初晶発生する必要があると示唆された^[2]。本研究では、プローブによる局所冷却を用いた製氷実験の結果に基づき、循環不凍液温度および原料水温度を変化させた際の界面近傍における拡散場への影響、ならびに初晶発生挙動への影響を明らかにすることを目的とする。さらに、これらの条件を制御することにより、結晶粒の大型化に対する有効性について検討する。加えて、結晶の大型化および氷単結晶の作製を目的としたより直接的な手法として、予冷室を用いた氷単結晶作製手法についても検討を行う。

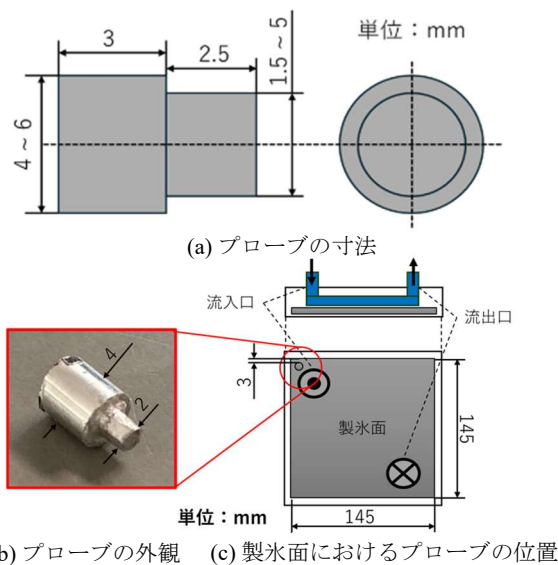


図2 熱伝導プローブの概要

1.3 実験装置の概要

本研究で使用した放射製氷装置の概略を図3に示す。本装置は、不凍液を循環させる低温循環装置、放射冷却を行う製氷ユニット、原料水を満たした水槽、およびこれらを収容する低温室(設定温度 2°C)で構成されている。製氷ユニットは2重構造となっており、内部側を不凍液が循環している。底部にはアルミニウム合金版が取り付けられており、その下部の亚克力板を介して水面を放射冷却する仕組みとなっている。

2. 循環不凍液温度と原料水温度の影響

2.1 実験概要

2.1.1 循環不凍液温度実験

この実験では、循環不凍液温度を変化させることによるプローブ端面温度の変化が、初晶発生挙動と製氷結果に及ぼす影響について調査を進める。従来の実験^[2]では、循環

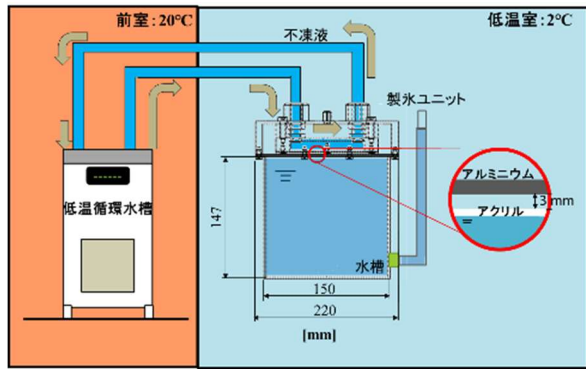


図3 放射製氷装置

不凍液温度を -10°C に固定していたが、新たに -8 、 -12 、 -13.5 、 -15°C の条件を追加して実験を行う。実験条件は表1に示すとおりであり、プローブの直径は $\phi 3\text{ mm}$ に固定して、実験装置および実験手順はこれまでと同様とした。

表1 実験条件 (循環不凍液温度実験)

循環不凍液温度 $[\text{C}^{\circ}]$	プローブ直径 $[\text{mm}]$	原料水温度 $[\text{C}^{\circ}]$	雰囲気温度 $[\text{C}^{\circ}]$	製氷期間 $[\text{h}]$
-8 、 -10 、 -12 、 -13.5 、 -15	3	4 (脱気水)	2	72

2.1.2 原料水温度実験

この実験では、原料水温度の変化が初晶発生挙動と製氷結果に及ぼす影響について調査を進める。従来の実験では、原料水温度を 4°C として実験を開始していたが、新たに 8 ～ 15°C の温度条件を追加して実験を行う。実験条件は表2に示すとおりであり、プローブの直径は $\phi 3\text{ mm}$ に固定して、実験装置および実験手順はこれまでと同様とした。

表2 実験条件 (原料水温度実験)

循環不凍液温度 $[\text{C}^{\circ}]$	プローブ直径 $[\text{mm}]$	原料水温度 $[\text{C}^{\circ}]$	雰囲気温度 $[\text{C}^{\circ}]$	製氷期間 $[\text{h}]$
-15	3	8 ～ 15 (脱気水)	2	72

2.2 実験結果・考察

2.2.1 循環不凍液温度実験

それぞれの循環不凍液温度における初晶発生時間と過冷却度の関係を図4に示す。図より、循環不凍液温度の違いによる初晶発生時間の有意な差は見られなかった。過冷却度に関してはこちらにも有意な差とは言えないが、 -15.0°C の結果と比較してわずかに -10°C 、 -8°C での過冷却度が低い傾向が見て取れる。これはプローブ端面温度が高いことによって、同じ初晶発生時間においても過冷却の進行が遅れたことによる違いだと考えられる。

図5に偏光観察の結果を示しており、図中の番号は図4の実験結果と対応している。また、図中には単結晶度も記載している。図4より、②、③、④の製氷結果で大きな結

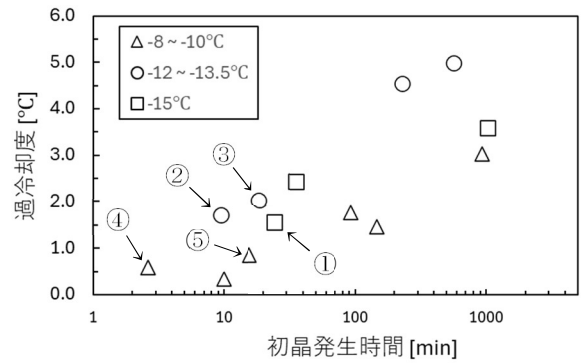


図4 初晶発生時間と過冷却度の関係 (循環不凍液温度実験)

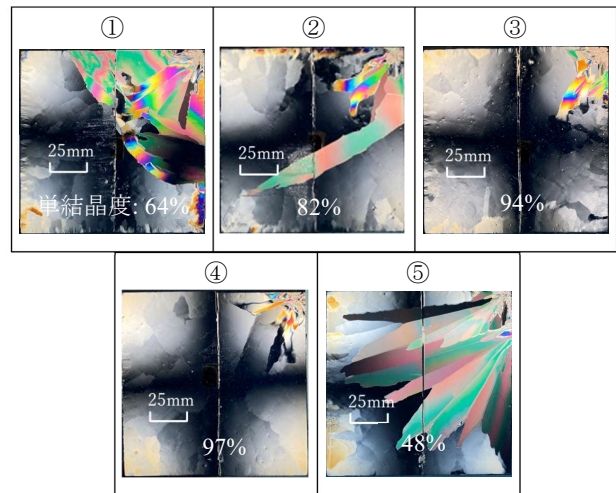


図5 偏光観察結果 (循環不凍液温度実験)

晶粒が得られており、もっとも単結晶度が大きい④の結果では初晶発生時間 3 min 、過冷却度 0.7°C と最も低い値となっている。②、③も同様に低い過冷却度で初晶発生しており、大きな結晶粒を得るためには低い過冷却度で初晶発生することが必要であるとわかる。しかし、過冷却度が②、③と同様に低い①、⑤の結果ではデンドライトの広範囲な成長が見られる。したがって、低い過冷却度であっても、プローブ付近および製氷面における温度分布や過冷却度領域の大きさによって製氷結果は異なる。すなわち、低過冷却度での初晶発生は結晶粒の大型化に必要な条件ではあるものの、それだけでは十分条件とはならない。

2.2.2 原料水温度実験

それぞれの循環不凍液温度における初晶発生時間と過冷却度の関係を図6に示す。図より、水温が高くなることによって初晶発生時間がおおむね 200 min 以上で分布しているとわかる。また、温度が上がるにつれて初晶発生時間のばらつきが小さくなる傾向が僅かに見て取れる。このことから、原料水温度を上げることで初晶発生時間は全体的に長くなる傾向があるが、ばらつきは小さくなる可能性が考えられる。一方、過冷却度に注目すると、原料水温度 4°C の条件と 10°C 以上の条件では、初晶発生時間には2倍以上の差があったが、過冷却度は同程度となっている。これは、原料水温度を高く設定したことで、プローブによる冷却が開始された後の過冷却の進行速度が緩やかになったため

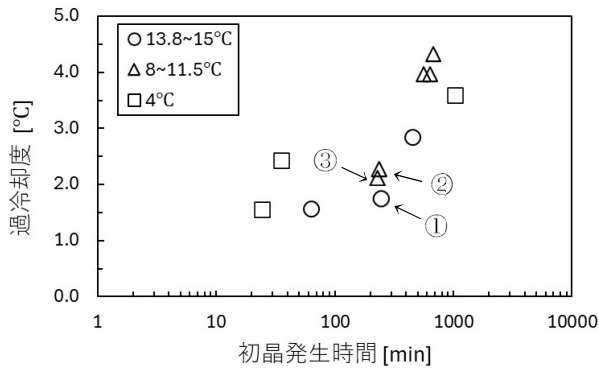


図6 初晶発生時間と過冷却度の関係（原料水温度実験）

と考えられる。

図7に偏光観察の結果を示しており、図中の番号は図6の実験結果と対応している。図より、①、②、③の製氷結果はデンドライトが初晶発生位置から対角線方向に長く成長しているが、成長範囲は小さく、デンドライトの周りには大きな結晶粒が見られる。また、循環不凍液温度-15°Cの条件（図5①）で見られていた側面からの初晶発生が抑制されていることも分かる。これは、原料水温度が上昇することにより、製氷初期における初晶発生可能な領域がプローブ周辺に限定され、製氷面全体として多点核生成が抑制されたためと考えられる。ゆえに、原料水温度を上げることで、過冷却度、過冷却領域の増大を抑制し、デンドライトの成長範囲を小さくできる可能性があると言える。

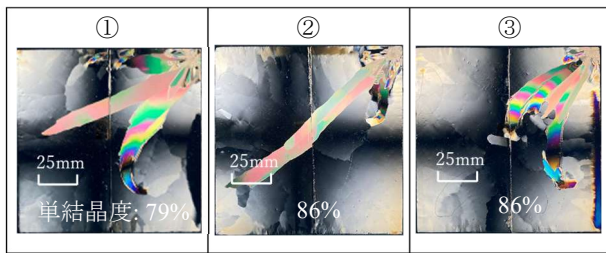


図7 偏光観察結果（原料水温度実験）

3. 予冷室を用いた氷単結晶作成手法の検討

3.1 予冷室の目的・概要

第3章の検討により、氷単結晶の作製に必要な条件は得られたものの、初晶から対角線方向へ成長するデンドライトが単結晶領域の減少と再現性の低下を招く課題が残った。そこで本章では、デンドライトの成長方向を物理的に制限する手法として、図8に示すような「予冷室」（プローブ先端周辺を囲った内寸15mm×15mm×15mmの立方体を導入し、製氷実験を行うこととした。

予冷室は、製氷面の対角線方向への結晶成長を物理的に遮断する一方、水槽の縁に沿った位置に成長口を設けている。この構造により、デンドライトの広がりを抑え、水槽側面に沿った方向からの成長を誘導することで、単結晶領域の増大を図ることを目的とする（図9）。

3.2 実験概要

今回、予冷室はアクリルとABS樹脂の2種類で作製し実験を行った。作製した予冷室および水槽に設置した様子を図10に示す。予冷室は水槽に弱く接着しており、氷を取り出す際は同時に予冷室も取り外される。製氷手順は

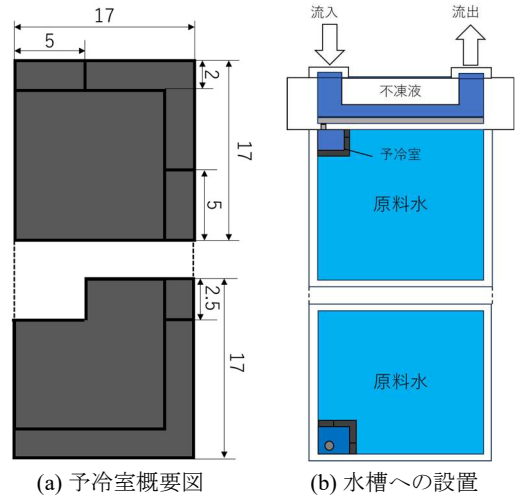


図8 予冷室の概要

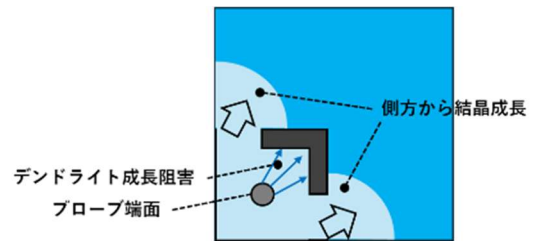


図9 予冷室の効果イメージ図

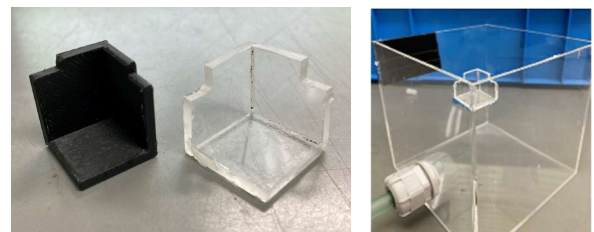


図10 予冷室の外観と水槽への設置

(左: ABS樹脂, 右: アクリル樹脂) した水槽

図10 予冷室の外観と水槽への設置

これまでと同様であり、初晶発生の撮影、過冷却度の算出を行い、偏光観察を用いて結晶構成の評価を行う。実験条件は表3に示す。

表3 実験条件

循環不凍液温度[°C]	プローブ直径[mm]	原料水温度[°C]	雰囲気温度[°C]	製氷期間[h]
-10	3	4 (脱気水)	2	72

3.3 実験結果・考察

予冷室を用いた製氷実験は計4回を行い、作製した氷の外観を図11、初晶発生の様子を図12、偏光観察の結果を図13に示す。

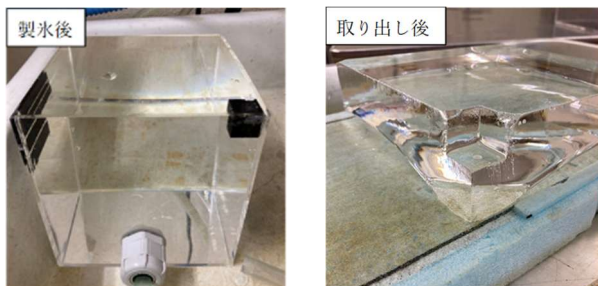


図 11 作製した氷の外観

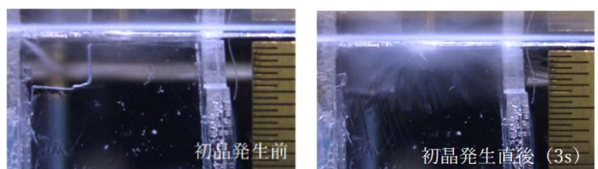


図 12 初晶発生の様子

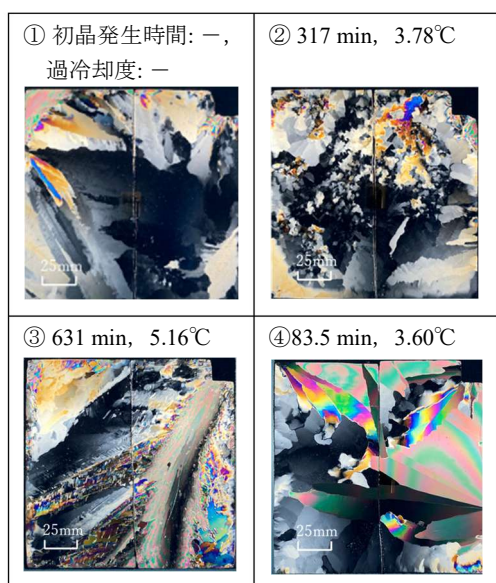
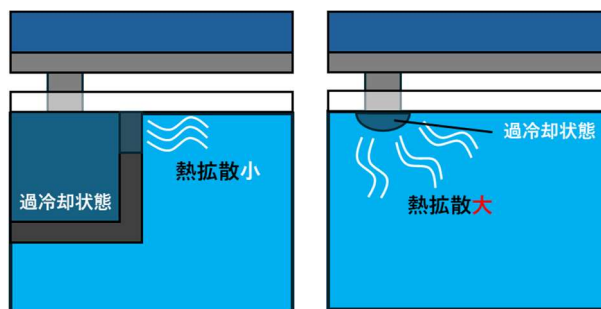


図 13 偏光観察結果 (予冷室を用いた製氷実験)

すべての実験において、初晶は予冷室内で発生し、偏光画像においても、対角線方向への成長はほぼ見られず、物理的な成長方向の制限には効果があることが確認された。しかし、成長方向の抑制には成功したものの、作製した氷はいずれも大きな結晶粒を持たない多結晶氷となっている。また、初晶発生時間が 317 min や 631 min と著しく遅くなり、それに伴い過冷却度も 3.60~5.16°C という極めて高い値を示している。

初晶発生が遅れた原因として、プローブ端面と周囲の温度勾配が考えられる。予冷室内部が水槽の他の部分から隔離されているため、プローブによる冷却が室内にのみ作用し、内部の水温が早い段階で均一に冷却される。第一章で述べた通り、初晶発生は局所的に強い過冷却状態を形成することにより促進されることが明らかとなっている。そのため、内部温度が均一な状態では、初晶発生の促進に必要な「プローブ端面と周囲の温度勾配」が得られず、初晶発生が大幅に遅れる原因となったと考えられる (図 14)。さらに、初晶発生が遅れて製氷面全体の過冷却が進んだことに加え、予冷室という構造物自体が「固体-液体界



(a) 予冷室あり (b) 予冷室なし
図 14 プローブ周辺の温度分布イメージ

面」を増やしたことで、多点核生成を促進する結果となった。また、予冷室によって氷が製氷面全体へ広がる速度が抑制されたため、その間に他の場所で新たな核が次々と発生し、多結晶化が進んだと考察する。

以上の結果は「初晶発生の促進には急峻な温度勾配が極めて重要である」という仮説を裏付けるものとなった。したがって、単結晶領域の増大には、物体による物理的な制限よりも、温度分布や温度勾配を間接的に制御する手法が有効であると示唆された。

4. まとめ

本研究では、プローブによる局所冷却を用いた製氷において、循環不凍液温度および原料水温度が初晶発生挙動と結晶成長に及ぼす影響を調査した。その結果、循環不凍液温度の変化は初晶発生時間および過冷却度に顕著な影響を与えない一方、低過冷却度での初晶発生が結晶粒の大型化に寄与する傾向が確認された。ただし、成長形態には温度分布や過冷却領域も大きく影響することが示唆された。また、原料水温度の上昇により初晶発生時間は長くなり、核生成領域がプローブ近傍に限定されることで多点核生成が抑制された。さらに、予冷室を用いた手法ではデンドライトの成長方向の制御は可能であったが、多結晶化を抑制できず、これは温度勾配の不足および過冷却の進行による多点核生成の影響と考えられる。

以上より、単結晶氷生成には低過冷却度での初晶発生に加え、温度勾配および温度分布の制御が重要であることが明らかとなった。

参考文献

[1]雪室推進プロジェクト:「第1章 世界と日本、雪や氷を利用した歴史」

<https://yukimuro.jp/history/h01/> (参照日:2026年4月15日)

[2]篠原良輔, 東條将也, 原祥栄, 上村靖司, 杉原幸信 (2025): 放射冷却における初晶発生促進と結晶の大型化, 雪氷研究大会 (2025・津) 予稿

積雪内の空隙径計測に基づく水分特性曲線の導出

○山口悟¹・安達聖¹・勝島隆史²

(1: 防災科学技術研究所 極端気象災害研究領域 雪氷防災研究センター 2: 森林研究・整備機構森林総合研究所 森林防災研究領域 十日町試験地)

1. 背景

湿雪に起因する雪崩を予測するためには、積雪内部における水の移動過程を正確に把握することが重要である。積雪内部の水分移動を記述するためには、毛管力と含水率の関係を表す水分特性曲線 (WRC) が不可欠である。既往研究では WRC を実験的に測定し、その係数と粒径や密度との関係が導出されている (Yamaguchi et al., 2012)。しかし低密度の試料では測定が困難であるという制約があり、提案されている関係式の適用範囲がどこまでかは疑問が残る。一方で、自然積雪における水の浸透初期過程では、低密度雪における挙動が支配的となる場合が多い。しかし低密度の雪は濡れることで急速に構造が変化するため、WRC を実験的に直接測定することは極めて困難である。そこで本研究では、雪氷 X 線 CT を用いて積雪の間隙径分布を計測し、その結果に土壌分野で広く用いられている Kosugi (1994) のモデルを適用することで、幅広い雪質、密度の雪の WRC を推定することを目的とする。

2. 実験手法

実験サンプルとしては、低温室で保存したざらめ雪を篩でふるい粒径を揃えたものをサンプルケースに充填した比較的高密度 ($400\text{--}600\text{ kg m}^{-3}$) の雪サンプルを使った。雪サンプルの微細構造 (粒径分布や空隙分布) の撮像には、防災科学技術研究所が所有する雪氷用 X 線 CT 装置 (SCANCO μ CT 35) を利用し、撮像した積雪の 3 次元画像において、ImageJ の 3D watershed 法を用いて、それぞれの粒径並びに空隙に分離をした (Yamaguchi et al., 2023)。

WRC の測定は、サンプルの密度並びに粒径によって、“雪氷用 MRI を使う測定 (Adachi et al., 2022)” または“重力排水カラム測定 (Yamaguchi et al., 2012)” のどちらかの方法で測定した。

3. 解析結果並びに考察

Kosugi モデル (1994) は、土壌分野のモデルであり、対数分布近似した空隙径分布から WRC を計算するというものである。

図 1a は測定された空隙径分布に対数分布近似を適用した 1 例である (密度: 428 kg m^{-3} , 粒径: 1.1 mm)。測定された空隙径分布は対数近似で表せることがわかる。図 1b は空隙径分布の対数分から Kosugi モデルを使って推定した WRC である。

他の測定サンプルも含めて、推定された WRC と実測された WRC を比較した結果、Kosugi モデルは、実測結果をよく再現できることがわかった。これは Kosugi モデルと X 線 CT の結果を組みわせることで、様々な雪質や密度の雪の WRC を求められる可能性を示している。

文献

Adachi, S., Yamaguchi, S., Ozeki, T. and Kose, K., 2020. Application of a magnetic resonance imaging method for nondestructive, three-dimensional, high-resolution measurement of the water content of wet snow samples. *frontiers*, doi:10.3389/feart.2020.00179.

Kosugi, K., 1994. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resour. Res.*, **30**, 891-901.

Yamaguchi, S., Watanabe, K., Katsushima, T., Sato, A., Kumakura, T., 2012. Dependence of the water retention curve of snow on snow characteristics. *Ann. Glaciol.*, **53**, 6-12.

Yamaguchi, S., Adachi, S., and Sunako, S., 2023. A novel method to visualize liquid distribution in snow: superimposition of MRI and X-ray CT images. *Ann. Glaciol.*, <https://doi.org/10.1017/aog.2023.77>

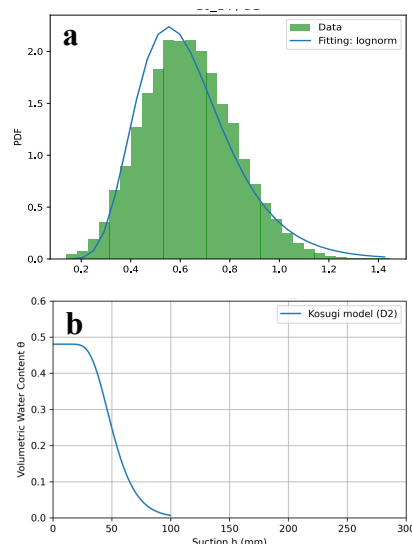


図 1a 測定された空隙径分布と対数分布近似
図 1b 空隙径分布から計算した WRC

積雪中の水分移動に伴う不純物移動の再現の試み

○平島寛行¹・的場澄人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: 北大低温研 3: 森林総合研究所)

1. はじめに

積雪中を水が移動する際には、毛管流や水みち流など、多様な浸透経路が存在するほか、粒径の異なる層の境界や氷板上では浸透が妨げられて帯水層が形成される。また斜面積雪では、帯水層に沿って水が斜面に平行に移動することがある。このように、積雪中の水分移動にはさまざまな過程が関与しており、積雪中に存在する不純物もこの水分移動に伴って移動する。不純物の種類によっては雪面アルベドや環境被害に影響を及ぼす一方、トレーサーとして用いることで水の移動経路の確認などに利用できる。本研究では、これまで開発してきた水分移動モデル²⁾を発展させるため、不純物の移動を計算するモジュールを新たに開発してモデルに組み込み、水分移動に伴う不純物移動の再現を試みた。

2. 方法

本研究では、3次元水分移動モデルに不純物移動を計算するモジュールを組み込むことで、不純物移動を計算可能にした。このモジュールでは、雪粒子表面への吸着量と溶液中に溶存して移動する量との配分を、分配係数により定式化した。また、同モデルを用いて不純物移動の再現性を検証した。北海道の中札内においては、一定期間において2回のブラックカーボン(BC)分布観測が実施されており、観測されたBC分布、積雪断面情報、第1回観測から第2回観測までの推定融雪量及び降水量などを入力に用いて、水分移動に伴うBC移動の再現計算を実施した。分配係数は線形平衡吸着モデルに基づいて調整した。計算では、第1回観測によるBC分布を初期条件として与え、第2回観測結果を検証に用いた。

3. 結果及び考察

テスト計算では、積雪表面に与えた仮想の不純物の移動を調べた。その結果、分配係数の大小に応じて、不純物の大半が表面に残留する場合、拡散して広範囲に広がる場合、大半が下方へ移動する場合など、複数の移動パターンを再現できることを確認した(図1)。

第1回観測で得られたBC分布(図2a)を初期条件として、降雨量及び推定融雪量に基づく水供給を与え、不純物移動の再現計算を行った。その結果、第2回観測時には、図2bに示すように、不純物の多くが下方へ移動した。なお、図2bは鉛直方向における不純物濃度のピーク位置が実測と一致するように分配係数を調節した計算結果である。しかしながら、プロファイル全体を観測と比較すると、図2cに示すように全体的な再現には至らず、計算では表

面にBCがほとんど残存しない結果となった。以上より、再現性の向上には、大気からの表面沈着量や分配係数の不均一性等を考慮した計算が必要であることが示唆された。

4. まとめ

水分移動モデルにより、さまざまなパターンの不純物移動が計算可能となった。一方、実測と計算結果の比較では、プロファイル全体を再現することは難しく、課題が残った。今回はBCを対象として1事例の再現計算を行ったが、今後はさまざまな不純物に対して計算を行う予定である。また、斜面積雪のトレーサー実験¹⁾に対しても再現計算を行い、発表時に結果を示す予定である。

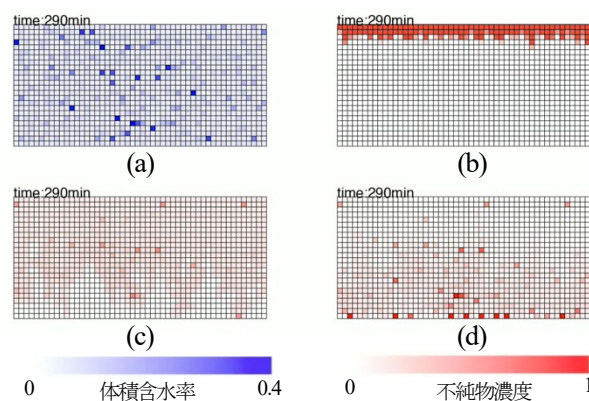


図1 分配係数を変化させて計算した不純物分布の変化。(a)含水率分布、分配係数(b)大、(c)中、(d)小で与えた時の不純物移動の結果

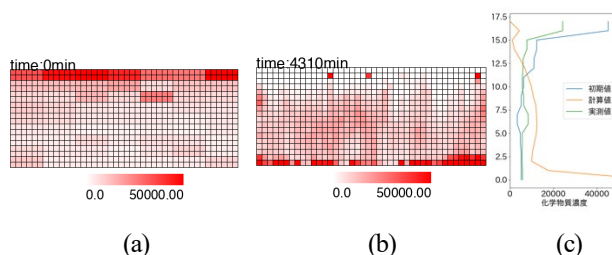


図2 水分浸透前後のBC分布の変化。(a) 第1回観測時、(b) 第2回観測時、(c)プロファイルの比較

謝辞

本研究は低温研一般共同研究(25G050, 26G050)及び科研費(24K07138)で行った。

文献

- 1)大澤ら(2022): 雪氷研究大会(札幌)講演要旨集, P1-21
- 2) Hirashima et al. (2014): *Cold. Res. Sci. Technol.*, 108, 80-90.

融雪末期の雪面に出現した汚れを伴うくぼみの形成過程

○福原さくら¹・河島克久²・渡部俊²

(1:新潟大学大学院総合学術研究科 2:新潟大学災害・復興科学研究所)

1. はじめに

2024/25年冬期の新潟県魚沼市大白川では、過去20年間で最大の積雪深4.8mを記録し、積雪が5月中旬まで残る大雪の年となった。融雪末期(4~5月)に平坦地の雪面では、汚れを伴うくぼみが出現した。そのくぼみは、平坦な底部と緩やかな傾斜面をもつ盃のような形状をしていたことから、これを「盃状くぼみ」と呼ぶことにした。本研究では、盃状くぼみの形成過程を明らかにすることを目的とし、くぼみの特徴(空間密度、形状、汚れ)をUAV測量等により調査した。

2. 研究方法

本研究では、2025年4月22日、5月2日、5月8日の計3回大白川の平坦地においてUAV測量を実施した。高解像度のオルソ画像とDSMを入手するため低空での撮影を行った。作成したオルソ画像とDSMから深さ3cm以上の盃状くぼみをArcGISProを用いて抽出し、空間密度や形状(直径、深さ)、汚れの特徴を調査した。また、5月8日には現地でも盃状くぼみの積雪断面を作成し、積雪内部構造を観察した。

3. 研究結果

3. 1. 盃状くぼみの特徴

盃状くぼみの空間密度は0.53~0.94個/m²、直径は41~152cm、深さは3~21cmであった。

盃状くぼみは汚れが特徴的であり、汚れにより底部が黒いものや、傾斜面に黒いリング模様がついているものがあった。その時間変化を調査したところ、いくつかのくぼみの底部の色が黒から白に変化するとともに傾斜面にリング模様が出現したことが確認された。5月8日に底部が黒くリング模様をもつ盃状くぼみの積雪断面を作成したところ、雪面付近に汚れた帯水層があり、それが露出することで底部が黒く見えていることが分かった。また、リング模様も汚れた帯水層によって形成されていた。

3. 2. 盃状くぼみ形成前の雪面形態

盃状くぼみの形成過程を明らかにするため、本研究での空撮に加えて、大白川の別の平坦地の空撮画像(2025年2月2, 17, 28日, 3月14, 26日, 4月10, 22日の計7回)を用いて、盃状くぼみ形成前の雪面を確認した。

2月2日、17日の雪面には明確な凹凸は認められなかったが、2月17~24日に1.7mの降雪があった後、気温が上昇した2月28日の雪面には「雪えくぼ」が出現していた。これは1か月後の3月26日の空撮でも認められた。

雪えくぼが形成された積雪層は4月上旬に融解し、4

月10日の雪面には盃状くぼみが出現していた。雪えくぼと盃状くぼみの分布を比較したところ、盃状くぼみは雪えくぼがあった場所に形成されていることが分かった。

4. 盃状くぼみの形成過程

以上の調査結果を踏まえると、盃状くぼみは以下の①から⑥の過程を経て形成されたと考えられる(図1)。

- ① 1.7mの降雪があった後の気温上昇により厚い新雪層(以下N層)に雪えくぼが形成される。雪えくぼの下には、水みち(図1のW)がある(納口, 1984)。
- ② 融雪が進むと、積雪層の粒径の違いによりN層とそれ以前の積雪層(以下O層)との間に帯水層A₁が形成される。
- ③ 融雪期には雪面の汚れ(鉱物粒子、花粉など)が増加するため、その汚れが融雪水とともに流下し、水みちや帯水層A₁に集中する。汚れが雪面アルベドを低下させることにより、水みち部分の融雪量が周囲と比較して大きくなる。
- ④ N層の水みち部分が融解し、汚れた帯水層A₁が露出することによって、底部が黒い盃状くぼみが出現する。このとき、汚れを含む融雪水が帯水層A₁から流下し、O層内の層構造によってある場所にとどまり、帯水層A₂を形成する。
- ⑤ 汚れた帯水層A₁が融けきると、帯水層A₁と帯水層A₂の間の白い積雪層が露出し、盃状くぼみの底部が黒から白に変化する。このとき帯水層A₁が傾斜面に露出することにより、黒いリング模様が現れる。
- ⑥ さらに帯水層A₂まで融解が進むと、再び底部が黒に変化する。

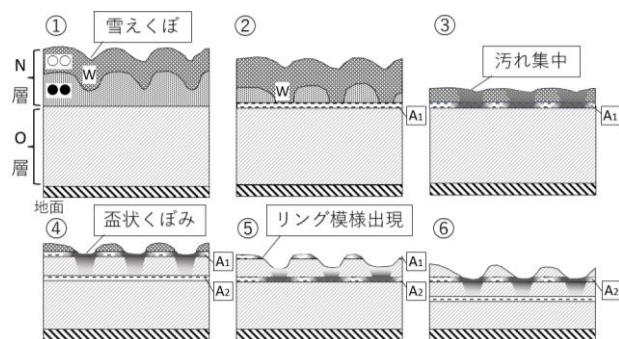


図1 盃状くぼみの形成過程文献

文献

納口恭明(1984):雪えくぼのパターン形成I. 国防防
災科学技術センター 研究報告, 33, 237-254.

スノーバンカーサイロにおける融雪形状の数値解析

西川詩音¹・○中野友翔¹・上村靖司²・杉原幸信²・伊藤親臣³

(1:長岡技術科学大学 機械工学分野 2:長岡技術科学大学 機械系 3:株式会社 SnowBiz)

1. はじめに

豪雪地特別措置法¹⁾に雪冷熱エネルギーの普及促進が明記されるなど、雪の利活用に対する需要・関心は高まっている。冬季の積雪を貯蔵し夏季に使うためには、数か月間にわたって雪を保存する必要がある。現在、雪保存には雪室か雪山のどちらかをを用いることが一般的である。しかし、前者は専用の建物を必要とするため導入コストが高く、経済的課題が大きい。後者は雪を堆積しておく広い場所の確保が必要になる。また、雪を長期間保存するには、適切な断熱方法の選択など、技術的課題もあるため、雪保存が広く普及する上でのハードルとなっている。一方、著者らは雪利用の一つとして持ち運び可能な雪冷房装置を開発し²⁾、大阪万博などのイベントに出展した。その際に雪の冷房能力を強く実感する一方で、雪保存に関する意見をいただくことが多く、雪の利活用として雪の保存がいまだに高いハードルであることを改めて確認した。

本研究では、雪冷房装置の社会実装という雪の利活用拡大を進めるうえでボトルネックとなる雪保存に着目し、新たな保存方法としてスノーバンカーサイロの可能性を検討した。ここで、スノーバンカーサイロとは、三面をコンクリート製の壁で囲った箱型の構造物であり、雪を保存するためのものである。具体的にはスノーバンカーサイロが雪保存に及ぼす影響を明らかにするために、CFDを用いた融雪解析を行う。さらに、熱量収支に基づいて融雪量を概算し、雪保存期間を見積もる。

2. 雪-空気非定常融雪解析

2. 1 非定常融雪解析の概要

本研究では時間経過ごとの雪の融雪形状を再現することを目的とした非定常融雪解析を行う³⁾⁴⁾。このとき、実際に解析領域内のメッシュが変形して融解するのではなく、メッシュの固相率が変化することで、融解を疑似的に再現している³⁾。本研究では市販の熱流体解析ソフトCradle CFD V2023.1のSTREAM(MSC Software)を用いた。

2. 2 解析モデル

本研究で検討するスノーバンカーサイロの寸法は、幅12 m、奥行き18 m、高さ5 mおよび1.1 mとした。壁の材質はコンクリート、断熱材は押出法ポリスチレンフォーム保温板3bAを想定し、雪上面の断熱を兼ねた簡易被覆材にはウッドチップを仮定した。

本研究では2つのモデルについて解析した。それぞれの解析モデルの全体図を図1に示す。一つ目は壁高さ5 m

のスノーバンカーサイロに雪を平坦に詰めたモデル、二つ目は壁高さ1.1 mとし、1.1 m以上は四角錐台(地上からの最大高さは5 m、側面の安息角45°)としたモデルである。雪密度を500 kg/m³とした場合の貯雪量は前者で約540 t、後者で約350 tとなる。解析を行う際に計算コストを抑えつつ、精度を確保するために幅方向の中心に対称面を設定し、1/2モデルで解析を行った。解析領域はx、z方向については解析モデルの2倍、y方向については3倍の大きさを確保している。

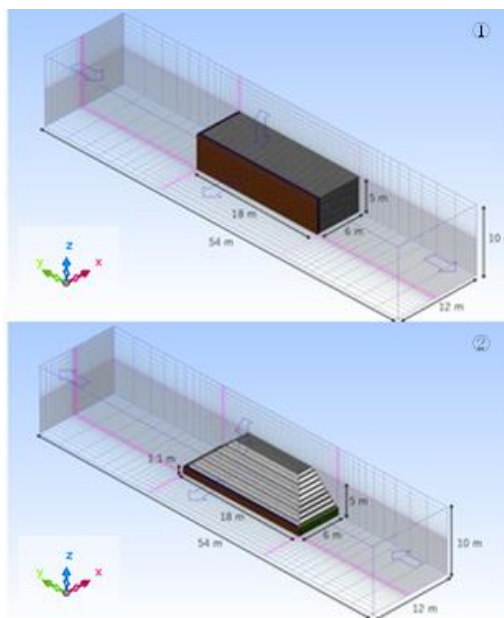


図1 解析モデル

2. 3 解析条件

解析条件を表1に示す。採用する乱流モデルは線形低レイノルズ数乱流モデルである。本来、雪の融解には日射、対流、降雨、壁や床からの輻射・伝導、地熱などが寄与する。一方で、本解析では、不動空気の固相率が変化するという特性を有するモデルを用いているため、雪の形状変化に伴うウッドチップの形状再現が困難である。このため、解析の安定性を考慮し、本解析ではウッドチップは考慮せず、壁からの輻射・伝導および大気からの対流熱伝達のみ限定したモデルを用い、融雪形状に着目した。さらに、解析の安定性確保のため、約3 m/sの流速を付与しており、これは実環境と比較して厳しい条件である。以上より、本解析は実環境よりも融解が促進される条件となっ

ている。

表1 解析条件

Cradle CFD V2025.1 STREAM (University Bundle)	
解析領域	X: 12 m Y: 54 m Z: 10 m
雪モデル	X: 6 m Y: 18 m Z: 5 m
壁モデル	X: 0.3 m Y: 18 m Z: 5 m X: 6.3 m Y: 0.3 m Z: 5 m (石灰岩コンクリート)
断熱材モデル	X: 0.1 m Y: 18.3 m Z: 5 m X: 6.4 m Y: 0.1 m Z: 5 m (ポリエチレンフォーム3bA)
圧縮性	非圧縮
流れ場・乱流モデル	線形低レイノルズ数モデル
定常/非定常	非定常
初期条件	雪: 0°C 壁, 解析領域内: 25°C
流れ境界条件	Ymax面, Zmax面: 圧力境界 0Pa Xmax面, Xmin面: 流速境界 (3, -3 m/s)
壁境界条件	壁面 (空気と接する面): 静止壁・ノースリップ壁
熱境界条件	Zmin面: 断熱
対象境界条件	Ymin面
凝固・融解設定	固・液相線温度 0°C 固液間の熱伝達率 0 W/(m ² ·K) 流動限界固相率 0.9 流れ計算可能な固相の割合 70% 潜熱量 166,800 kJ/kg
輻射設定	輻射率 0.9
解析サイクル	604800サイクル (一定時間間隔: 1s)
図化ファイル出力設定	一定サイクル間隔 (出力サイクル: 3600)
メッシュ分割数	512,000 (= 80 × 80 × 80)

2. 4 解析結果

図2に解析モデル①において風向き、壁面数、高さを変化させた際の融解形状を示す。以降の結果では(a)~(d)がY軸+方向、(e)~(h)がY軸-方向の風向き(矢印で示す)となり、左上から順に壁2面、壁3面、壁2+1/2面、壁2+1/3面としている。なお、すべて解析サイクル216000サイクルでの結果であり、全ての条件およびモデルにおいて安定して解析が完了した最高サイクル数である。

表2に各条件の残雪率を示す。残雪率の算出にはStreamのスカラ積分機能を用いた(固相率0.9を境界とし、それ以上の領域体積を算出)。

表2 残雪率

残雪率 [%]			
(a)	53.4	(b)	51.6
(c)	59.6	(d)	59.9
(e)	40.5	(f)	51.5
(g)	45.7	(h)	43.4

解析の結果、壁の有無や高さ、風向きによって雪の融解挙動は大きく変化した。特に壁がある場合、雪の残雪率は増加し、壁には融解抑制効果があることが確認された。一方で、完全な壁では流れが滞留して渦が発生し、局所的に

融解が促進される場合も見られた。

また、風下側で融解が進みやすく、風上側の壁が融解抑制に大きく影響することが分かった。さらに、壁の高さが低い場合でも一定の抑制効果が確認された。

次に解析モデル②の融解解析結果を図3に示す。この結果から雪の露出部や風下側で融解が促進されたことが分かった、特に上部角では離・渦による影響が大きいと考えられる。解析は約3600サイクルで不安定となり終了した。

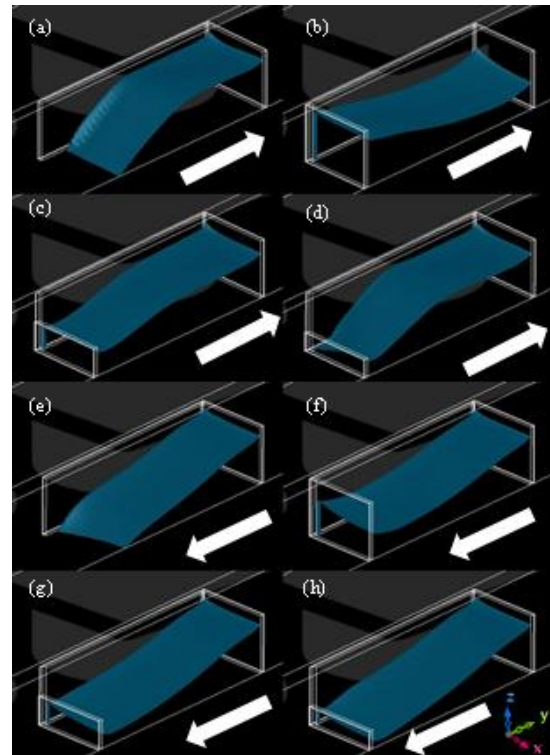


図2 解析モデル① 融解形状

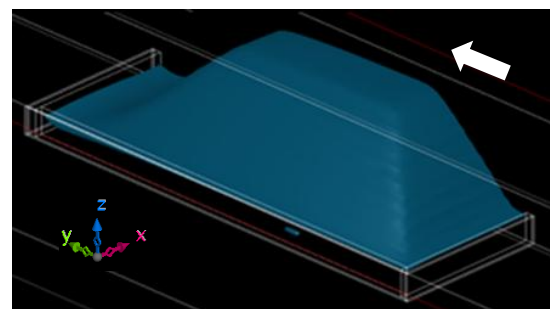


図3 解析モデル② 融解形状

3. 融雪量計算

3. 1 計算条件

融解解析では形状のみに着目した。スノーバンカーサイロを最適化するためには貯雪期間や雪冷房での雪使用量、断熱材などの決定も必要になってくる、そこで様々な条件における融雪量の概算及び、雪冷房使用量の計算を行った。計算には媚山らの雪室の熱設計⁹⁾を参考にし、壁

を通して侵入する熱量 q_w 及び床を通じて侵入する伝導熱量 q_e を次式のように定義した。

$$q_w = \sum_{k=1}^m K_k A_k (\theta_{sol} - \theta^*) \quad (1)$$

$$q_e = 4 \int_0^{\frac{X}{2}} \int_0^{\frac{Y}{2}} \lambda_e \left(-\frac{\theta}{Z} \right) dY dX \quad (2)$$

ここで、 K は熱通過率、 A は壁面積、 θ_{sol} は外壁表面温度、 θ^* は雪室内の保持温度、 λ_e は壁面の熱伝導率（コンクリート：1.6、ポリスチレン：0.028、珪殻：0.25 [W/m・K]）とした。

3. 2 計算結果

初めに、天井材、床材を変化させた壁高さ5 mのモデルで熱量計算を行った。計算モデル概略図を図4に示す。

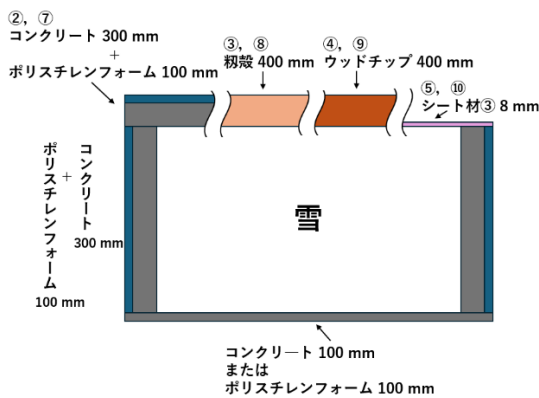


図4 計算モデル概略図

天井材としては4種類（コンクリート300 mm+ポリスチレンフォーム100 mm、珪殻400 mm、ウッドチップ400 mm、シート材③8 mm）と天井材無しを比較する。使用した条件および値を表3に、熱量計算から求めた残雪量推移を図5に示す。

この結果から、床材をコンクリート100 mmからポリスチレンフォーム100 mmに変更することによって、同時期の残雪率が約2倍となることがわかる。さらに、天井材が残雪率に及ぼす影響が大きいことがわかり、残雪率はコンクリート300 mm+ポリスチレンフォーム100 mm>ウッドチップ400 mm>珪殻400 mm>シート材③8 mm>天井材無しであった。天井材無しとシート材③8 mmでは、残雪率が約2倍ほど異なるため、何かしらの天井材を用意することが重要であると言える。

図6に、一日あたり1.5 cmの融解を仮定した場合の残雪率を追加した結果を示す。実際の雪山はウッドチップモデルと比較して約10%融解が促進されており、本計算モデルは現実に対して融解をやや過小評価していると考え

えられる。この要因として、計算において風や降雨の影響を考慮していないことが挙げられる。

一方で、天井材の有無による貯雪期間の差は再現されており、本モデルは相対的な傾向の評価には有効であると考えられる。以上より、本計算モデルによって得られる貯雪期間は絶対値としての精度には限界があるものの、実際との差が約10%程度であること、および断熱材の影響を適切に再現できていることから、大まかな貯雪期間や断熱材の効果を評価する上では有用であると考えられる。

条件④を基に、壁断熱材、コンクリートの厚さを変化させた結果を図7、図8に示す。壁断熱材の厚さを変化させた場合、計算期間での残雪率は最大52%の差が見られた。また、薄くなるにつれ、その差は大きくなる結果となった。

表3 壁5 mモデル熱量計算条件

番号	天井		壁		床 材質
	材質	厚さ [mm]	材質	厚さ [mm]	
①	-	-	C,PSF	300,100	C
②	C,PSF	300,100	C,PSF	300,100	C
③	珪殻	400	C,PSF	300,100	C
④	ウッドチップ	400	C,PSF	300,100	C
⑤	シート材③	8	C,PSF	300,100	C
⑥	-	-	C,PSF	300,100	PSF
⑦	C,PSF	300,100	C,PSF	300,100	PSF
⑧	珪殻	400	C,PSF	300,100	PSF
⑨	ウッドチップ	400	C,PSF	300,100	PSF
⑩	シート材③	8	C,PSF	300,100	PSF

※C：コンクリート、PSF：ポリスチレンフォーム

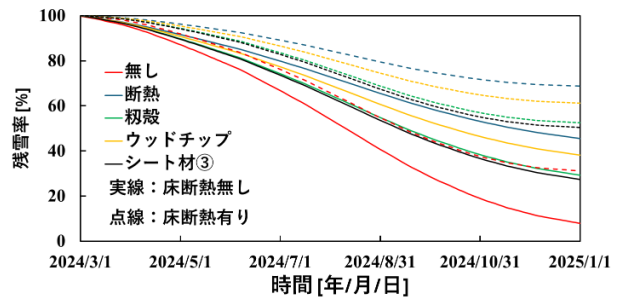


図5 天井材、床材を変化させた場合の残雪率推移

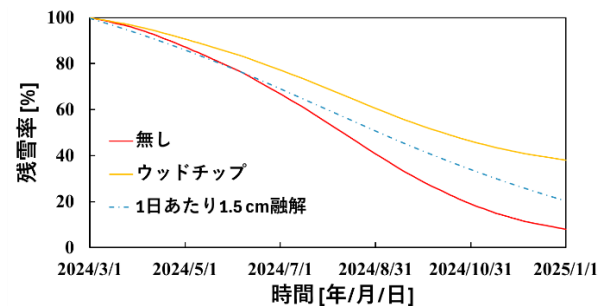


図6 計算モデルと実際の雪山における残雪率推移比較

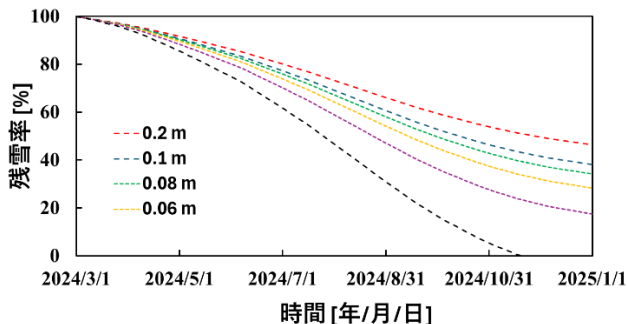


図7 壁断熱材厚さを変更した残雪率

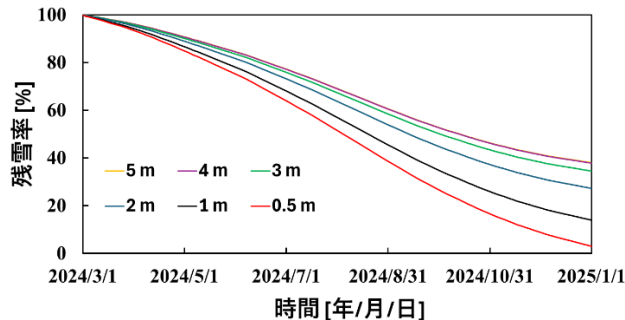


図10 壁高さを変更した残雪率（雪山盛り）

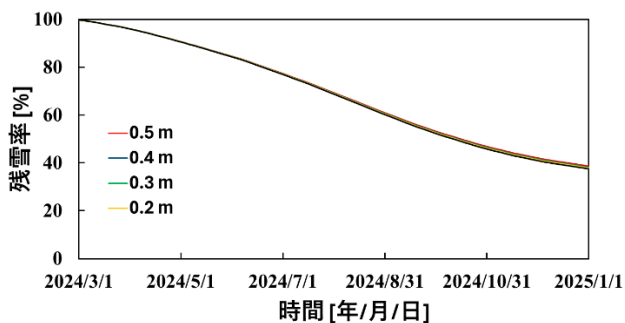


図8 壁コンクリート厚さを変更した残雪率

条件④を基にコンクリート壁高さを0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0mと変化させ、雪を壁高さまで平坦に充填した際の残雪率の結果を図9に示す。壁高さが低くなるにつれ残雪率が大きく減少する結果となった。

最後に解析モデル②のように、それぞれのコンクリート壁高さにおいて、コンクリート壁の上端から高さ5mまで雪を四角錐台状に積んだ場合の残雪率の変化を図10に示す。図9と比較して、壁高さの低下に伴う残雪率の減少幅は小さくなっている。このことから、四角錐台状の雪山をスノーバンカーサイロ壁上に設置することは、貯雪期間の延長に効果があると考えられる。

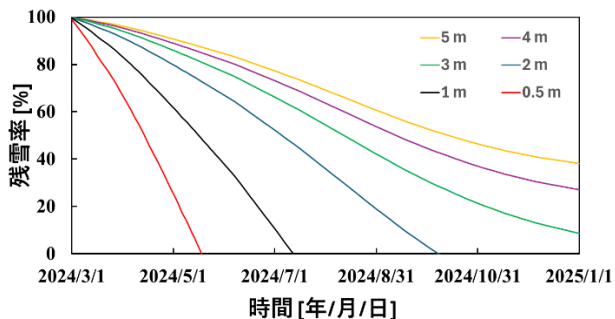


図9 壁高さを変更した残雪率（雪摺り切り）

4. まとめ

本研究ではスノーバンカーサイロの融解解析及び融雪量計算を行った。

初めに非定常熱交換シミュレーションにより雪の融解形状を再現した。特にバンカーサイロの構成要素である壁について検討した。風上・風下側の壁の有無が雪の融解抑制に大きく影響した。融解形状も大きく異なるため対流熱伝達や簡易被覆の挙動にも差異ができると考えられる。バンカーサイロにおいては開放面に対する工夫が必要になると考えられる。

次に融雪量計算を行った。様々な条件での計算を行った結果、壁断熱材は必須であることが分かった。また、床に断熱材を導入することで貯雪期間が大幅に増加する結果となった。

文献

- 1) 国土交通省国土政策局地方振興課豪雪地帯担当：豪雪地帯対策特別措置法 最終改定 令和4年3月31日法律第8号, 国土交通省 地方振興 活力と魅力のある地域づくりホームページ, 2022. <https://www.mlit.go.jp/common/001475891.pdf>, 閲覧日 2024年10月14日.
- 2) 西川ら(2024), 可搬型雪冷房装置「雪風君」の社会実装の取り組み
- 3) 佐々木ら(2022). 鉛直孔を有する雪塊と空気との熱交換に関する研究, 寒地技術論文・報告集 Vol.38.228-231.
- 4) 田中ら(2023). 可搬型雪冷房装置の実用機試験と雪の非定常融解解析, 寒地技術論文・報告集 Vol.39.121-126.
- 5) 媚山ら (1991). 雪氷の貯蔵施設「雪室」の熱設計, 日本雪氷学会誌 53巻3号 p.195-200.

雪さらしの効果

—利雪—

西脇 聖

(新潟大学大学院自然科学研究科)

1. はじめに

新潟県魚沼地方で立春を過ぎてから晴れた日に行われる雪さらしの光景は、雪国に春を告げる風物詩となっている(図1)。雪さらしは、麻織物「本製小千谷縮・越後上布」の製作技術において象徴的な工程である。晴れた日を選び、織り上がった麻織物を雪面に広げて雪にさらす。

筆者は「本製小千谷縮・越後上布」の伝承方法に関する研究を行っている。「本製小千谷縮・越後上布」は、1950年に重要無形文化財の指定を受け、2009年にユネスコ無形文化遺産に登録されている。歴史的、文化的価値が評価されているが、製作数が減少し、技術の後継者が高齢化かつ激減している。製作技術の継承が危機的状況にある中で、価値のある技術を未来へ繋いで行くための取組みが必要になっている。筆者の研究目的は、「本製小千谷縮・越後上布」の未来への伝承に寄与することである。

2. 目的と内容

本稿は麻織物の雪さらしについての検査と結果の考察である。目的は雪さらしのメカニズムの解明である。雪さらしをすると「本製小千谷縮・越後上布」は(白くなる、色柄が鮮明になる)と言説されているが、変化が起きるメカニズムは明らかにされていない。そこで、第1段階として、雪さらしによる麻織物の変化の科学的検証を行った。筆者がこれまでの研究で行った「本製小千谷縮・越後上布」の特性評価の検査結果を考慮した上で、雪と日光の影響、麻織物の水分調整力に着目し、検証を行った。

2.1 雪さらし

「本製小千谷縮・越後上布」の雪さらしは重要無形文化財の指定要件の一つである。雪さらしの効果は、雪面に日光が当たると雪が蒸発してオゾンが発生し漂白作用を起こすという説や水素イオンが発生して漂白作用を起こすという説がある。『雪国大全』によると「麻布は雪さらしをすると白地はますます白くなり、対照的に色彩は鮮やかになる。雪の表面、約二～三メートルの空間は、太陽熱と雪の反射作用で、ほかより高温で、雪がとけて蒸発する水蒸気は紫外線を吸収して酸素と水素に乖離しやすく、同時のオゾンを発生する。オゾンに殺菌、漂白作用があるというのが定説だ。」と記述されている「文献」。

2.2 オゾン

雪氷防災センターが行ったオゾン測定データによると、18日間の観測データ中に雪面上のオゾン濃度が70ppbを超える高い値が観測された日は、晴れの日だけではな



図1 雪さらし

く雪の日もあったが、全般的にオゾン濃度が高いという測定データではなかった「文献」。また、別の検査機関が雪上のオゾンを計測したが、雪面のオゾン濃度は低い数値であった「文献」。2つの検査によるオゾン量とオゾン濃度の計測値は文献の説明と一致していない。

2.3 雪下, 雪中, 雪室貯蔵

「本製小千谷縮・越後上布」の雪さらし以外にも、雪上や雪中を活用して物質の性質が変化、改善する利雪の手法がある。野菜や米等の農作物については品質の安定や甘味・旨味の増加の効果が認知され、日本酒やコーヒーの加工食品についても品質や食味の向上が報告されている。雪利用の貯蔵は、0℃前後の安定した温度と高湿度を保つことができるために、食品の鮮度を保ちながら品質保持や食味の改善に対して効果ありと、有効性が発揮されている。雪下, 雪中, 雪室貯蔵を利用した食品への効果とメカニズムは明らかにされているのだが、植物の繊維の雪さらしは不明な部分が多い。雪が麻織物を白くする効果はどのようなメカニズムなのだろうか。

2.4 「本製小千谷縮・越後上布」の特性

重要無形文化財の指定は「本製小千谷縮」と「本製越後上布」の2種の麻織物の製作技術に対して同列に指定されており、2種を「本製小千谷縮・越後上布」という。

「本製小千谷縮」は表面のザラザラしたシボが特徴であり、緯糸に強いヨリをかけて、シボとりという仕上げによって生み出される。「本製越後上布」は平織りという平らな表面である。両者は夏着物の最高峰と評されている。

筆者が実施した麻織物の特性評価の検査結果によると、麻織物、特に苧麻の手績み糸で製作された「本製小千谷縮・越後上布」は、吸水率等の水分調整力が高品質である。

3. 検査方法

雪さらしの技術者が行う方法を調査したところ、作業の内容は職人によって差異があるが、晴れた日に行う、織物を濡らしてから行うという共通点がある。

雪さらしの検査は、防災科学技術研究所 雪氷防災研究



図2 雪さらし検査の状況

センター(新潟県長岡市, 図2)で, 2026年2月26日, 3月6日, 3月11日の3回実施した。検査開始前に麻織物を霧吹きで濡らし, 雪あり日光あり, 雪あり日光なし, 雪なし日光あり等の条件を変えて行った。雪ありは雪面に麻織物を置き, 雪なしはパネル上に置き, 日光なしは人工的に日陰を作り日光を遮断した。1回目の結果を受け, 2回目以降の検査に麻織物が乾いた状態の条件を加えた。雪さらしの効果を数値化するため, 雪さらし検査の前後に素材応用技術センター(新潟県見附市)の測色計(KONIKA MINOLTA 製)を使用して, 麻織物の色彩変化を計測した。

4. 結果と考察

第1~3回検査時の気温, 紫外線量, 雪面温度等は雪氷防災センターの観測データである(表2)。照度と雪粒の状態は筆者が計測した(表2)。

4.1 雪さらし検査と色彩検査の結果

色彩検査は, 測色計の数値により雪さらし後の麻織物の変化の有無を判断する。測色計は明度と彩度を測定し色彩の数値化を行う。明度を表す L^* の数値は大きくなるほど明るさを示し, グラフ(表3)は, 明度 L^* の変化値 ΔL^* が, 雪さらし後に白い無地の麻織物が明るく(白く)なったことを示している。全ての条件(雪光:雪あり日光あり, 雪:雪あり日光なし, 光:雪なし日光あり)で変化が確認できた。その中でも, 雪さらし(雪あり日光あり)の変化が最も大きい。

雪さらし前に麻織物を水分ありの状態(湿)にした場合, 雪さらし(雪あり日光あり)の条件が最も変化が大きく, 変化の度合いは異なるが, 全ての条件下で変化が計測された。麻織物が水分ありの状態(湿)を維持していれば, 変化がある。

日光ありの方が日光なしよりも早く変化するが, 日光なしでも変化はゼロではない。晴天は雪さらしの効果が増幅するが, 日が陰っても変化する。気温が高くなり過ぎると麻織物の表面が乾き, 雪さらしの効果が下がる。水分なし乾(雪なし日光なし乾)の条件では変化しない。

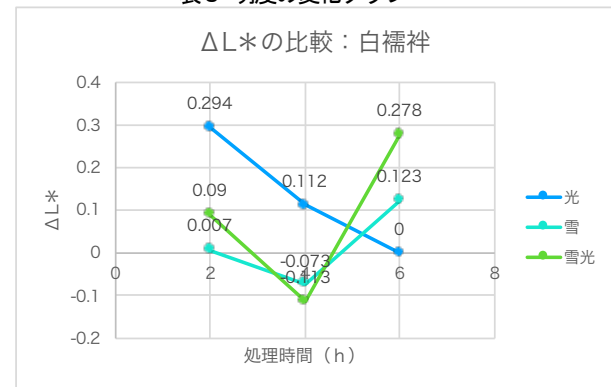
5. 結論と今後の展望

本稿の検査により雪さらしの(白くなる)という効果が立証された。解明したことは, 麻織物が雪面 0°C で安定して水分にさらされた状態によって変化すること。日光により温度が上がると変化が加速することである。水分なし乾は変化がないので, 雪面上で麻織物が水分を維持している状態が, 麻織物の変化を促す重要な要素といえる。

表2 検査時の気象条件と雪面状況

項目	単位	第1回 2026/2/26				第2回 2026/3/6				第3回 2026/3/11			
		9:00	11:00	13:00	15:00	9:00	11:00	13:00	15:00	9:00	11:00	13:00	15:00
時間		9:00	11:00	13:00	15:00	9:00	11:00	13:00	15:00	9:00	11:00	13:00	15:00
天気		快晴	快晴	快晴	快晴	晴れ	晴れ	晴れ	曇り	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ
気温	$^{\circ}\text{C}$	4.218	7.979	11.95	11.24	0.373	4.212	7.076	9.05	2.296	3.676	6.557	4.686
湿度	%	100	70.48	61.52	78.63	100	74.01	71.31	68.11	86.6	69.91	56.74	64.2
地温(20cm)	$^{\circ}\text{C}$	1.553	1.551	1.544	1.542	1.239	1.289	1.286	1.281	1.212	1.212	1.214	1.214
地温(50cm)	$^{\circ}\text{C}$	3.247	3.24	3.234	3.232	2.85	2.839	2.831	2.83	2.706	2.706	2.703	2.706
風速(検査付近)	m/s	0	0.269	0	0.748	0.172	0.564	0.165	0	0	1.182	1.452	1.217
雨量	mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
日射量	W/m ²	390.8	693.1	753.5	413.5	271.3	688.8	361.6	300.4	174.5	406.7	949	393.8
反射量	W/m ²	207.3	379.1	409.2	224	145.8	369.5	204	165.5	123.1	253	487	203.3
積雪深	cm	88	88	87	86	61	60	60	59	56	55	52	51
表面温度	$^{\circ}\text{C}$	0.554	1.96	1.98	1.359	-0.95	0.982	0.376	0.717	-0.085	0.292	1.422	0.239
照度(日光)	lx	68.5	155.4	138.6	85.8	61.8	81.7	77.7	37.4	48.8	62.5	66.7	21.1
照度(日陰)	lx	8.9	11.8	18.5	17.5	8.3	8.7	8.5	6	7.1	8.4	8.4	6.5
雪粒	mm	2	2	3	2	2	2	2	2	1	3	3	2
雪の状態		ざらめ	ざらめ	ざらめ	ざらめ	ざらめ	ざらめ	ざらめ	ざらめ	新雪	こしり	ざらめ	ざらめ

表3 明度の変化グラフ



今季の検査を改善し, 来季も雪さらしの検査を実施する。改善点としては, オゾン濃度を含む大気成分の計測と検証, 麻織物の品質変化の検証, 苧麻のアクの除去と色彩変化の検証である。今後も筆者は雪面の水分と麻織物が持つ高い水分調整力との関係性に着目しながら, あらゆる可能性を視野に入れて雪さらしのメカニズムを解明するための検証を続けていく。雪さらしに関して, 皆さまからの知見を得ることができましたら幸いです。

謝辞

防災科学技術研究所雪氷防災研究センターにおける雪さらしの検査に多大なご尽力を賜りました首席研究員の山口悟様, 研究員の上石勲様に心より感謝申し上げます。

新潟県工業技術総合研究所素材応用技術支援センターにおける繊維検査に多大なご尽力を賜りましたセンター長の明歩谷英樹様に心より感謝申し上げます。

文献

- 石坂雅昭 山口悟(2008):『雪氷北信越』28, 38pp, 日本雪氷学会北信越支部
- 佐藤国雄(2001):『雪国大全』雪さらし, 248pp
- 新潟県工業技術総合研究所 素材応用技術センター(2025): オゾン測定検査

参考文献

- 神山伸 曾根英行(2021):『雪利用貯蔵による食品の新しい高付加価値化』日本家政学会誌 72-1

人身雪害予測モデルの地域展開と新潟県内のブロック分けの検討

大掛蒼平¹・〇宇都慶祐¹・上村靖司²・杉原幸信²

(1:長岡技術科学大学 機械工学分野 2:長岡技術科学大学 機械系)

1. はじめに

豪雪地帯では毎年屋根雪処理中の滑落や除雪中の事故等の人身雪害が発生しており、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件の人身雪害が発生し、雪の多い年には一冬で100件近くに上っている。そこで著者らは人身雪害を未然に防ぐための情報提供を目的に、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(石川ら, 2024)。

これまでに、新潟県長岡市における人身雪害を対象として、人身雪害の発生有無を日単位で予測する機械学習モデルを構築した。その際、データの不均衡に対処するために Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE) を用いて人身雪害データの前処理を行い、さらに人身雪害発生件数に基づく重みを導入して、決定木(DT)の分岐条件に用いられるジニ不純度を算出した。その結果、見逃し率4.2%、空振り率4.3%を達成する長岡市版人身雪害予測モデル(SMOTE_DT)を構築した(石川ら, 2025)(図1)。

本研究では、新潟県長岡市において構築した人身雪害発生予測モデルを、他地域へ適用可能な手法として展開することを目的とする。具体的には、長岡市版人身雪害予測モデルを新潟県上越市、十日町市、魚沼市、妙高市に適用し、その適用性を検証するとともに、地域特性の違いが予測精度に及ぼす影響を明らかにする。さらに、気象条件および人身雪害リスクの類似性に基づく地域のブロック分けを行い、ブロック単位での予測モデル構築および水平展開の有効性について検討する。

2. 新潟県内の4つの市への適用

2.1. 上越市、十日町、魚沼市、妙高市の概要

表1に水平展開の対象地域(新潟県上越市、十日町市、魚沼市、妙高市)の人口、気象データ、人身雪害の発生件数についてまとめた。気象データは1991年~2020年までの年平均値を参照している。人身雪害件数は、長岡市と同様に平成21年度から令和4年度に発生した14冬季分の人身雪害を分析の対象とした。

表1より、気象と人口当たりの人

身雪害件数の傾向は、長岡市と上越市、十日町市と魚沼市と妙高市の2つのグループに分けることができると考えられる。十日町市と魚沼市と妙高市は、長岡市と上越市と比べて1月の降雪量と最深積雪の年平均値が約2倍であり、平均気温は低い。さらに、人口1万人当たりの人身雪害件数は約3倍である。

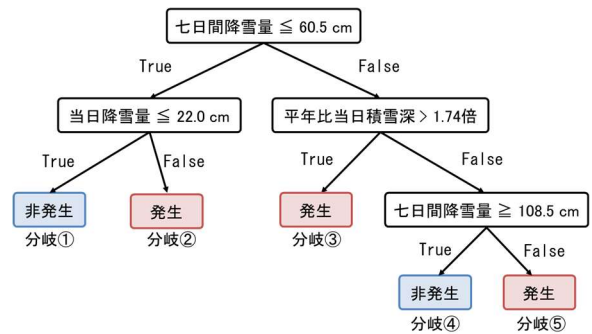


図1 長岡市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT)

表1 長岡市、上越市、十日町市、魚沼市、妙高市の比較

	人口 (2020年)	降雪量 (1月)	最深積雪 (1月)	平均気温 (1月)	人身雪害 (14冬季)	人口当り
	万人	cm	cm	℃	件	件/万人
長岡市	26.5	197	70	1.6	536	21.4
上越市	18.0	171	79	2.5	335	18.6
十日町市	4.5	345	176	-0.1	321	71.3
魚沼市	3.1	327	154	0.3	176	56.8
妙高市	2.8	385	172	0.3	161	57.5

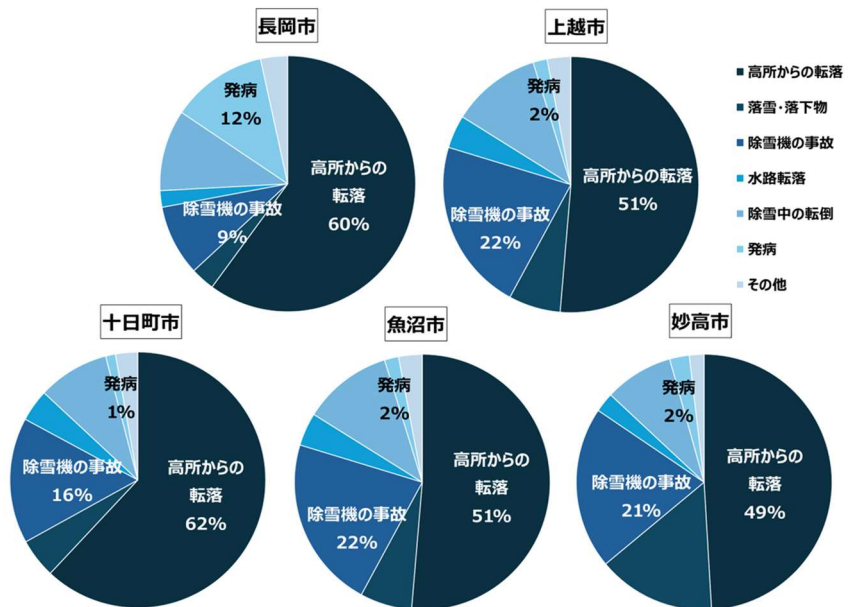


図2 5つの市の人身雪害の内訳

また、各市で発生した人身雪害を分類し、図2にまとめた。どの地域でも雪下ろし時などに発生する高所からの転落が最も多く5割程度を占めていた。また長岡市と比較して降雪量の多い地域では除雪機による被害が多かった。また、妙高市は落雪・落下物の割合が他の市に比べて多かった。

2. 2. 長岡市版人身雪害予測モデルの適用結果

新潟県上越市、十日町市、魚沼市、妙高市へ長岡市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT) を適用した際の見逃し率と空振り率を算出した。ここで、長岡市版人身雪害予測モデルに使用する当日を含む七日間降雪量、平年比当日積雪深、当日降雪量は、それぞれの市のアメダスの観測値を用いた。

図3にその結果を示す。長岡市と気象および人口1万人当たりの人身雪害件数の傾向に近い上越市では、見逃し率が約4%、空振り率が約7%と高い精度で人身雪害の発生を判定できており、長岡市の気象条件と人身雪害の関係から構築したモデルをそのまま適用できることがわかった。一方、十日町市、魚沼市、妙高市においては長岡市と見逃し率に大きな変化は見られないものの、空振り率がおよそ5倍となっている。

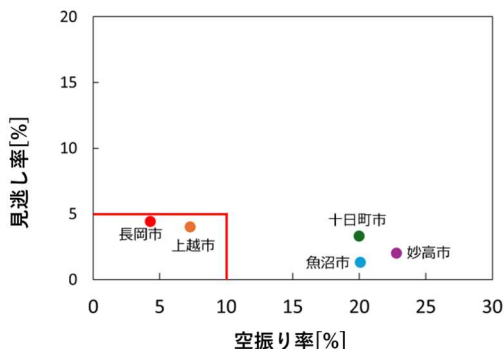


図3 長岡市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT) を4市へ水平展開した際の見逃し率と空振り率

3. 十日町市、魚沼市、妙高市の人身雪害予測モデル

3. 1. 人身雪害予測モデルを適用する地域のブロック分け

十日町市、魚沼市、妙高市で空振り率が増加した原因を精査した結果、図1の分岐②において空振りが頻発していることが明らかとなった。これは、十日町市、魚沼市、妙高市の降雪量は長岡市より大きく、日常的な降雪であっても長岡市の降雪状況を基準に作成された決定木の閾値を容易に超過することが考えられる。

また、十日町市、魚沼市、妙高市は長岡市に比べて人口1万人当たりの人身雪害件数が多い。そのため、人身雪害に遭遇するリスクが高いと言える。上村ら (2003) の新潟県における人身雪害のリスク分析によると、十日町市、魚沼市、妙高市は人身雪害の個人的リスクの高いBlock Iの

地域 (上村らはこの地域を山村豪雪地帯と呼んでいる) に分類されており、長岡市と上越市は次にリスクの高いBlock IIに分類されている。そして、新潟県において市町村ごとの死傷者数が最も多いのは長岡市で、2番目が十日町市であることから、上村らは十日町市をBlock I、長岡市をBlock IIを代表する市町村として取り扱うこととしている。

以上から、同じ人身雪害予測モデルが適用できる地域は、説明変数の観点から気象データ、目的変数の観点から人身雪害の個人的リスクの類似性の高い市町村でブロック分けできると仮説を立てた。そこで、十日町市の平成21年度から令和4年度の計321件の人身雪害データと十日町アメダスの気象データを機械学習を用いて分析し、十日町市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT) を作成し、魚沼市と妙高市へ水平展開させることとした。

3. 2. 十日町市版人身雪害予測モデルの構築と適用結果

図4に十日町市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT) を示す。このモデルでは当日を含む七日間降雪量、平年比当日積雪深が分岐条件となっている。十日町市版モデルにおいて人身雪害が発生と判断される日に至る分岐条件は、当日を含む七日間降雪量が64.5cmを超過し、なおかつ平年比当日積雪深が1.78倍を超える日である。なお、十日町市版人身雪害予測モデルは、長岡市版の分岐③に至る流れで人身雪害の発生有無を判定するモデルとなっており、当日を含む七日間降雪量を平年比当日積雪深のしきい値はいずれも長岡市版の値よりも大きい。

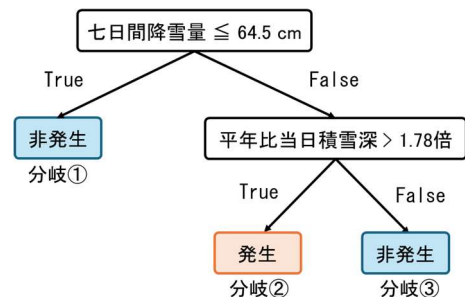


図4 十日町市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT)

図5に十日町市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT) を十日町市、魚沼市、妙高市へ適用した際の見逃し率と空振り率を示す。気象データはそれぞれの市のアメダス観測値を用いた。図5より、長岡市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT) を適用した際と比較して、見逃し率が若干増加したが、空振り率が大きく減少しており、いずれの市においても10%以下に抑えられている。

このことから、市町村を気象データおよび人身雪害の個人的リスクの類似性の高さに基づいてブロック分けすることで、そのブロックの中で人身雪害予測モデルを水平展開できることを明らかにした。これは人身雪害件数

が少なく、単独では高精度の予測モデルの作成が困難な市町村に対しても、ブロック内でデータをまとめることで、高精度な予測モデルを構築できる可能性を示唆している。

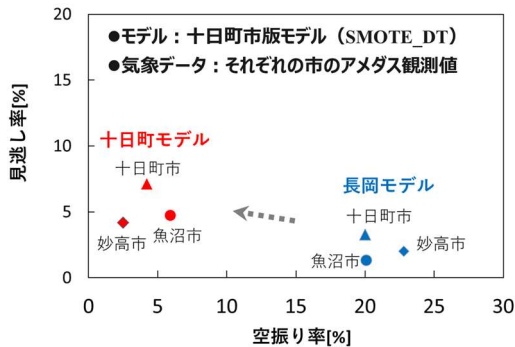


図5 十日町市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT) の見逃し率と空振り率

図6に十日町版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT) をBlock Iの地域の中でも特に雪害リスクの高い山間部へ適用した際の見逃し率と空振り率を示す。十日町版の人身雪害予測では人口と人身雪害発生件数の少ない湯沢町や津南町に対して適用した場合、見逃し率には大きな変化は見られないが空振り率が大きくなることわかる。そこで、表4に示す、気象データの近い山間部5市町の気象データ、人身雪害の発生件数を複合して学習し、教師データの不足している湯沢町、津南町に適用できる山間部版人身雪害予測モデルの作成を行った。

人身雪害データを複合し、モデルを作成する際の気象データの検討を行った。地理的に5市町を中心に近く、人身雪害発生件数の多い十日町の気象データを代表して学習させたモデル、5市町の気象データを平均し、広域的な気象傾向を学習させたモデル、各日で最も気象条件の厳しい値を学習させたモデルの3種類のモデルを構築し

た。それぞれの精度比較を図7に示す。十日町を代表して学習させたモデルでは気象データの乖離により津南町で20%以上の空振り率を示した。次に5市町の気象データを平均して学習させたモデルでも、データの平滑化により決定木の閾値が低下し、高い空振り率を示した。厳しい気象データを学習させたモデルでは、ワーストケースの学習により、決定木の閾値が上昇し、空振り率に改善が見られた。このことから、湯沢町や津南町など、教師データの不足している地域においては厳しい気象条件を学習させた山間部版人身雪害予測モデルを適用することで精度の向上が得られることが分かった。

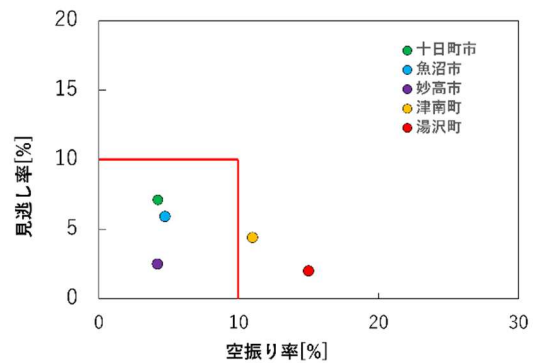


図6 十日町市版人身雪害予測モデル (SMOTE_DT) を湯沢町と津南町へ適用した際の見逃し率と空振り率

表4 十日町市、魚沼市、妙高市、湯沢町、津南町の比較

	人口 (万人)	降雪量 (1月) (cm)	最深積雪 (1月) (cm)	平均気温 (1月) (℃)	人身雪害件数 (14冬季)	人口当り (件/万人)
十日町市	4.5	345	176	-0.1	321	71.3
魚沼市	3.1	327	154	0.3	176	56.8
妙高市	2.8	385	172	0.3	161	57.5
湯沢町	0.83	377	173	-0.4	48	57.8
津南町	0.85	436	324	-1.2	61	71.8

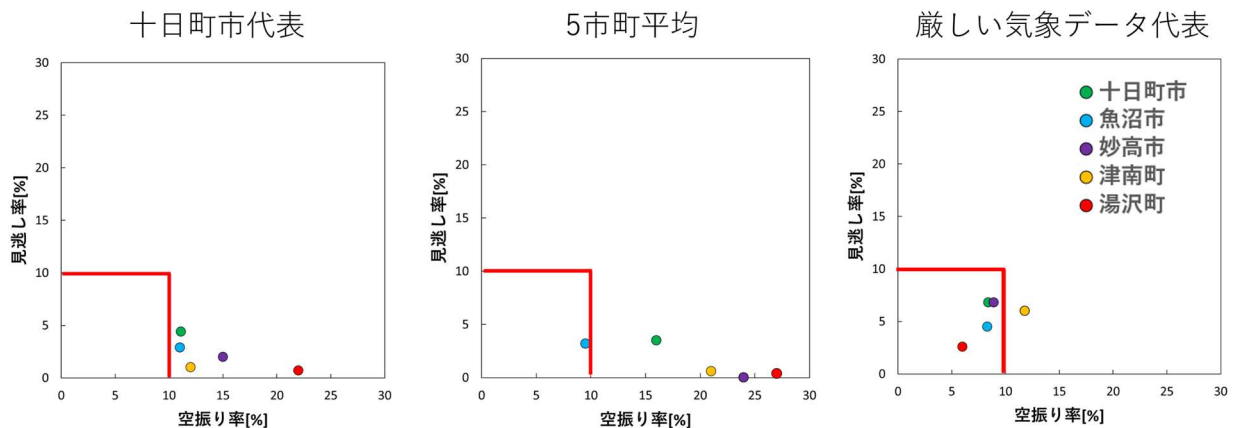


図7 山間部版人身雪害予測モデルの精度比較

4. まとめ

本研究では、長岡市の気象データと人身雪害の関係に基づいて構築した人身雪害予測モデルを、新潟県上越市、十日町市、魚沼市、妙高市へ適用した。その結果、長岡市と気象条件および人口当たりの人身雪害発生件数が類似する上越市では、高い予測精度が得られ、モデルの直接適用が可能であることが示された。一方、降雪量が多く人身雪害リスクが高い十日町市、魚沼市、妙高市では、空振り率が増加し、長岡市版モデルの適用には限界があることが明らかとなった。

そこで、これらの地域を対象に十日町市版人身雪害予測モデルを構築し、魚沼市および妙高市へ適用した結果、空振り率の大幅な低減が確認され、ブロック単位でのモデル構築の有効性が示された。また、過酷な気象データを学習した山間部版人身雪害予測モデルを構築することで、津南町、湯沢町のようなデータの不足した地域に対しても適用可能であることが示された。以上より、気象条件および人身雪害リスクの類似性に基づく地域分類により、複数市町村に対する実用的な人身雪害予測モデルの展開が可能であることが示唆された。

参考文献

- 石川大貴, 杉原幸信, 上村靖司, 諸橋和行, 本吉弘岐, 村一樹 (2024) : 機械学習を用いた新潟県長岡市の人身雪害発生予測. 雪氷研究大会 (2024・長岡) 講演要旨集, 46
- 石川大貴, 杉原幸信, 上村靖司 (2025) : 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 –. 2025 年度(公社)日本雪氷学会北信越支部総会および研究発表会・製品発表検討会予稿集, 22
- 上村靖司 (2003) : 新潟県における人身雪害のリスク分析, 雪氷, 65(2)

機械学習を用いた長岡市除雪事故注意情報実証実験の試み

○中村一樹¹・本吉弘岐¹・諸橋和行²・杉原幸信³・上村靖司³

(1: 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター、2: 中越防災安全推進機構、3: 長岡技術科学大学)

1. はじめに（研究の目的）

2023年度には、長岡技術科学大学（以下、長岡技大）が、長岡市の2011年度～2022年度の各年度の11月から3月の527件の長岡市内の雪害発生データと長岡アメダスの気象データを用いて、機械学習により長岡市内全域で発生する人身雪害の有無を予測するアルゴリズムを検討した。2024年度には、防災科学技術研究所（以下、防災科研）が、長岡技大が検討したアルゴリズムをシステム化し、長岡アメダスの観測データを入力し、リアルタイムで現在（当日）の人身事故発生可能性の有無を判定する情報の試験配信と検証を行った。

これらの研究結果を踏まえ、2025年度は、明日、明後日の除雪事故を事前に予測し注意喚起可能なシステムを構築して試験配信を行い、検証を行うことを目的として、研究を実施した。長岡技大は、新たに改良した予測アルゴリズムを検討した。防災科研は、長岡アメダスの観測値のほかに気象予測データを利用する試験システムの仕様を検討し、試験システムの構築と協力者への配信試験を行い、中越防災安全推進機構と協力して、アンケート及びヒアリングによる検証を行った

2. 実証実験の方法と結果

図1と図2に示すように、除雪事故注意情報を2026年1月から2月にかけて1日2回除雪関係者へメールで試験配信する実証実験を行い、結果の検証のため、情報配信期間が1か月を過ぎた2026年2月以降に協力者へのアンケート及びヒアリング調査を行い、調査結果を取りまとめた。

その結果、注意喚起につながるという肯定的な意見のほか、試験配信した内容に加え実際の事故発生の情報があると、さらに注意喚起につながるという意見をいただいた。また、情報の対象の明確化や情報のわかりやすさ、周知の仕方、使い方を明確にする必要があるという意見があった。一方、危険を伴う雪下ろし作業につながる情報にもなり得るため、誤解を生まないように留意する必要があるという意見や、事故発生の可能性を段階的に判定するとよいという意見もいただいた。

謝辞

本研究は、豪雪地帯安全確保緊急対策交付金制度を活用し、防災科学技術研究所が長岡市からの受託研究として実施した。長岡市地域振興戦略部のほか、ご協力いただいた皆様、長岡技術科学大学大学院の修士研究として、本研究で利用した機械学習のアルゴリズム構築に取り組んだ石川大貴氏に感謝致します。



図1 協力依頼説明リーフレット。

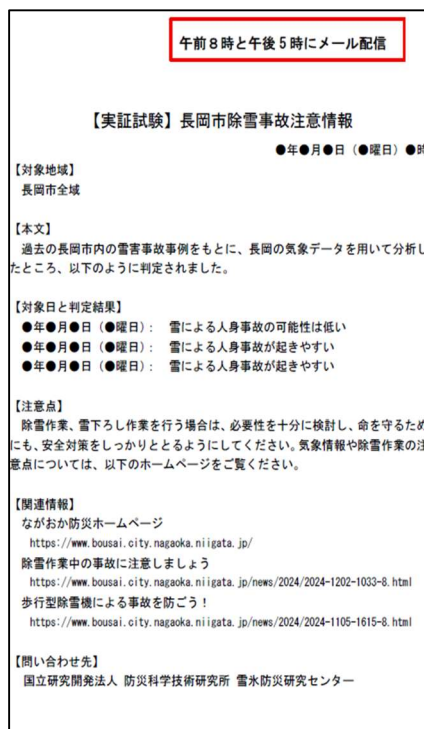


図2 メール配信文案。

MODIS 地表面温度プロダクトを用いた北半球全域における永久凍土分布推定手法の検討

○佐藤志海¹・堀雅裕²・杉浦幸之助²

(1: 富山大学大学院理工学研究科 2: 富山大学都市デザイン学部)

1. はじめに

永久凍土は「連続した2年以上にわたり0°C以下の状態にある土地」と定義される。この永久凍土には、氷期に堆積した動植物遺骸が分解されにくい状態で保存されており、有機炭素が大量に蓄積されている。近年、地球温暖化に伴う永久凍土の融解により微生物活動が活発化し、温室効果ガスが放出されることで、温暖化をさらに加速させる正のフィードバックが懸念されている。そのため、永久凍土を広域かつ高精度に把握することが重要である。

従来、永久凍土分布は地中温度の現地観測により評価されてきたが、観測には多大な労力を要し、空間的な制約も大きい。そこで本研究では、気温・積雪・地表条件から地中の熱状態を経験的に計算する CryoGrid1.0 モデル (Obu *et al.*, 2019) に基づき、MODIS 地表面温度プロダクトを用いて北半球全域の永久凍土分布を推定した。さらに、推定結果の精度評価を行い、本手法の有効性を検証した。

2. 方法

CryoGrid1.0 モデルは、地表面温度を使用して永久凍土上面温度 (MAGT) を推定するモデル (式 (1)) である。

$$\text{MAGT} = \begin{cases} (n_f FDD + r_k n_t TDD) / \tau & \text{for } (n_f FDD + r_k n_t TDD) \leq 0 \\ \frac{n_f}{r_k} FDD + n_t TDD / \tau & \text{for } (n_f FDD + r_k n_t TDD) > 0 \end{cases} \quad \text{式 (1)}$$

FDD , TDD はそれぞれ年間の積算寒度・積算暖度を表す。 n_f は積雪断熱効果、 n_t は植生断熱効果、 r_k は活動層の熱伝導特性の影響を考慮する半経験的係数、 τ はモデル期間[日]である。本研究では、MODIS の地表面温度から FDD , TDD を算出し、AMSR の積雪深および ESA の土地被覆データから n_f と n_t を推定した。また、 r_k は Che *et al.* (2023) に従った。

推定した MAGT の検証には、Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) および Russian Research Institute of Hydrometeorological Information (RIHMI) の現場データを用いた。このデータには 2000~2024 年の約 1000 地点のボーリングデータが含まれているが、地温の鉛直分布と既存の MAGT データが混在していたため、前者から MAGT を算出して衛星

データから推定した値との比較に用いた。

3. 結果と考察

推定 MAGT の検証結果を図 1 に示す。検証点数 6528 点、RMSE=4.73°C、Bias= -2.75 であり、全体的に低温側に偏る分布を示した。また、実測値が 0°C、5°C 付近の 2 つのピークが存在し、0°C 付近の推定精度は実測値と良く一致するのに対し、5°C 付近では実測値に対して過小に推定された。過小に推定されたデータは主にロシア中緯度地域に分布しており、先行研究と比較しても低温側に推定された。誤差要因としては、使用した積雪深データの違いが挙げられる。先行研究では ERA5 の再解析データから算出した積雪深を、本研究では AMSR の積雪深プロダクトを使用した。誤差の大きかったロシア中緯度地域では、AMSR 積雪深が ERA5 積雪深に比べて浅く、積雪断熱効果が働かないため、MAGT がより低温に推定されたと考えられる。

4. 今後の課題

上記の結果から、MAGT には積雪深が大きく影響し、積雪深データの精度が MAGT 推定精度に直結すると考えられる。今後、積雪深データおよび積雪断熱効果の与え方を見直し、ロシア中緯度地域における推定誤差を減少させることで、北半球全域の MAGT 推定精度の向上が期待される。

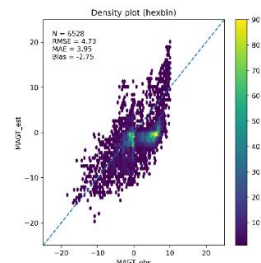


図 1 永久凍土上面温度 (MAGT) の実測値と推定値の 2 次元頻度分布。

文献

Che, L., Zhang, H., Wan, L. (2023): Spatial distribution of permafrost degradation and its impact on vegetation phenology from 2000 to 2020, *Science of The Total Environment*, **877**, 162889.

Obu, J. and 20 others (2019): Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale, 193, 299-316, *Earth-Science Reviews*, **193**, 299-316.

日本における積雪面積の長期変動

一積雪面積の標高依存性と気温変動に対する応答一

廣澤祐誠^{1,2}・〇堀雅裕²・杉浦幸之助²

(1:氷見市役所 2:富山大学都市デザイン学部)

1. はじめに

近年、地球温暖化による気温上昇と積雪減少が顕著となっており、気候変動が積雪に与える影響を把握することは重要な課題である。積雪の長期変動については、これまでも多くの地上観測に基づく研究が行われ、地域ごとの変動の違いが明らかになってきた。しかし、これらの研究では観測地点の空間分布に依存し、山岳域をはじめとする観測所が希薄な地域の実態把握には限界がある。衛星観測はこうした地上観測の空間的制約を補う手段として有効であり、広域かつ均質な積雪分布の面的把握を可能にする。本研究では、衛星データを用いて日本全域における積雪面積の長期変動を解析するとともに、標高および気温に対する依存性とその変動の有無を明らかにすることを目的とする。

2. 解析方法

日本全域における積雪面積の変動を面的に把握するために、JAXA が提供する MODIS 日本域積雪マップ(CSF)プロダクトを使用した。本プロダクトは MODIS の観測データをもとに、日本列島周辺域の積雪域を半月毎に 500m 解像度で識別したものであり、積雪域の画素数をもとに半月毎に積雪面積を算出した。解析期間は 2003 年から 2022 年までの 20 年間である。半月毎の積雪面積に対して最小二乗法による線形回帰を適用し、長期変動の評価を行った。また、標高データとして国土数値情報の 3 次メッシュデータ、気温データとして気象庁の再解析データ(JRA-55)の等圧面気温を使用し、それぞれ CSF プロダクトの解像度に合うようダウンスケーリングを行った。標高については 0m から 2500m 以上までを 500m 間隔の 6 つに区分し長期変動の評価を行った。

3. 解析結果

日本全域の積雪面積は、全ての各半月で減少傾向がみられた。特に 1 月から 6 月にかけての期間で有意な減少がみられ、冬季に比べて春季の減少が顕著であった。地域別にみると北海道から本州全域にかけての減少が際立っていた。標高帯毎の解析では、積雪初期と融雪期の 2 つの時期で顕著な減少がみられた(図 1)。また積雪安定期においては、2000m 以下の標高帯では減少傾向を示したのに対し、2500m 以上の高標高帯ではあまり変化がみられなかった。気温に関しては、積雪面積の減少が顕著なのは 0°C 以上の標高帯がほとんどであるのに対し、10 月から 11 月にかけて 2500m 以上の高標高域で積雪面積の増加が確認された。

4. 考察

標高帯毎の変動の違いは、地球温暖化が積雪に与える 2 つの影響を示唆している。低標高域における減少は、気温上昇に伴う降雪の降雨化が主因とみられる一方、積雪初期の高標高域で見られた積雪面積の増加は、温暖化に伴う水蒸気量の増加が降雪量の増大に寄与したためと考えられる。この結果は Kawase et al. (2023) による予測モデルの傾向と一致しており、気候変動の影響が前兆としてすでに現れていることが考えられる。また解析期間の前後 10 年間で気温等値線の内側へのシフトがみられ、積雪を維持できる期間が短くなっていった。特に融雪期のシフト幅が大きく、温暖化による正のフィードバックが考えられ、冬季に比べて春季で積雪面積の減少が顕著であったことと整合的である。

5. まとめ・今後の展望

本研究では、CSF プロダクトを用いた衛星データに基づき、日本全域の積雪面積の変動を捉え、標高と気温の 2 つの要素との関係性を評価した。その結果、積雪初期と融雪時期に顕著な減少傾向を、また、10-11 月には 2500m 以上の高標高帯において増加傾向を確認した。しかしながら、解析期間は 20 年間と短く、さらなるデータの蓄積による継続的な監視が必要である。また、今回は湿雪と乾雪をまとめて積雪として解析を行ったが、これらを区別して評価することで、表面雪質の変化を加味した変動を捉えられると考えられる。

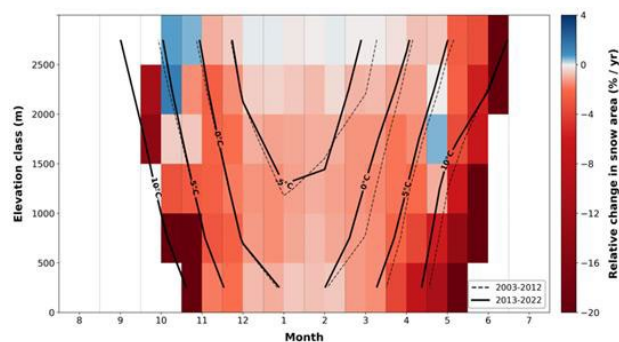


図1 日本全域の各標高帯における半月毎の積雪面積の相対的な変化率と前後 10 年間の気温等値線

文献

Kawase et al. (2023): Historical regional climate changes in Japan in winter as assessed by a 5-km regional climate model with a land surface process. *Progress in Earth and Planetary Science*, **10**, 7.

UAV-LiDAR による 2026 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

例年より顕著に雪が少なかった 2026 年の立山の積雪分布の特徴を明らかにするため、2026 年 4 月 8~9 日に立山黒部アルペンルート沿い 4 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 2023 年と 2024 年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-RTK3 を用いた。D-RTK3 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。ASTER-GDEM3 の高度から 110 m の高さ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。

観測エリアは下ノ小平 (標高 1200 m 前後), 大観台 (標高 1450 m 前後), 弥陀ヶ原 (標高 1900 m 前後), 天狗平 (2300 m 前後), 室堂 (2450 m 前後) 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機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。現地観測データ (積雪期 DEM) 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 12~14 m であった (図 1)。これは雪の大谷の高さの公表値 (12 m) とほぼ一致した。なお、雪の大谷の高さ 12 m は過去 30 年間で最低の値である。

各観測エリア全体の 2026 年の平均積雪深は室堂平が約 4.6 m, 弥陀ヶ原が約 3.1 m, 大観台が約 1.4 m, 下ノ小平が約 0.8 m であった。2025 年の平均積雪深は室堂平が約 5.8 m, 弥陀ヶ原が約 4.1 m, 大観台が約 2.9 m, 下ノ小平が約 2.4 m, 美女平が約 2.1 m, 2024 年の平均積雪深は室堂平が約 5.3 m, 弥陀ヶ原が約 3.5 m, 大観台が約 1.4 m, 下ノ小平が約 0.8 m であった。2026 年の平均積雪深は室堂平や弥陀ヶ原で 2025 年よりも 2 割以上少なく、大観台や下ノ小平で 2025 年の 1/2~1/3 であった。

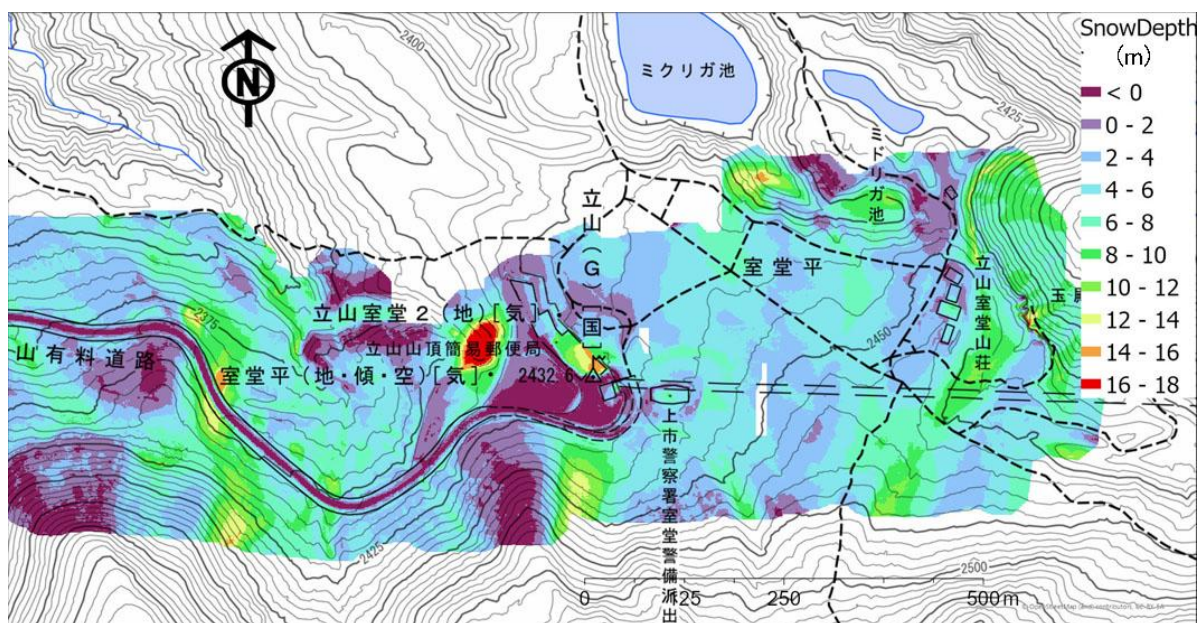


図 1 2026 年 4 月 8 日の室堂平の積雪深分布

新潟県における終戦直前の未曾有の豪雪と鉄道輸送

○河島克久¹・立花義裕²
(1:新潟大学 2:三重大学)

1. はじめに

科研費「気候異常を加味した戦中から終戦に至る新しい歴史像の構築」(研究代表者:立花義裕)の研究グループは、戦中期の気候復元を行っている。戦争終焉直前の冬が観測史上最強の寒波と未曾有の豪雪年であり、続く夏(1945年夏)も観測史上最強の突出した冷夏年であった。また戦前から戦中期に冷夏や豪雪が頻発していた。気候が暴れた時期と日本が激動した時期が一致していた。そこで「1945年の未曾有の異常気象が終戦の決断に影響を及ぼした可能性は?」という問いを立て、歴史の転換点を「自然と人間の関係」の観点から再考することが本プロジェクトの目的である。このプロジェクトの一環として、本研究では、1944/45年冬期の豪雪が鉄道輸送へ与えた影響を考察することを目的として、新潟県を対象として降積雪データを収集し、豪雪の実態(最深積雪、累計降雪量、最大日降雪量、降雪日数)を明らかにした。なお、1944/45年冬期の新潟県内の最深積雪分布については鈴木・河島(2018)の研究があるが、本研究では使用データ数を増やしてより詳細な実態の解明に努めた。

2. 使用した資料

1944/45年冬期の降積雪データは、「降積雪量調査 雪害対策調査委員会 昭和19年度～昭和37年度」(国鉄新潟支社施設部)、「多雪線区の確率雪量(2)」(鉄道技術研究所防災研究室)、「新潟県気象累年報(昭和19年～昭和25年)」(新潟地方气象台)から収集した。これらの資料に含まれている新潟県内の観測地点数はそれぞれ72, 24, 57である。また、終戦時における新潟県内の鉄道路線の把握には「車窓展望鉄道新旅行圖(附満州國・中華民國鐵道圖)」(日本統制地圖株式會社)を主に用いた。

3. 1944/45年冬期の降積雪の分布

(1) 最深積雪

最深積雪は全体的にみると上・中越地方で大きく、比較的雪が少ない海岸部でも250～400cmに達していることが分かった。上・中越地方の山間部では最深積雪がさらに大きく、特に新潟・長野県境に近い信越本線・飯山線沿線、新潟・群馬県境に近い上越線沿線、新潟・福島県境に近い只見線沿線では、最深積雪が500cmを超えているエリアが認められた(最大は信越本線二本木駅と只見線大白川駅の660cm)。

(2) 累計降雪量

累積降雪量も最深積雪と同様に上・中越地方の山間部で大きく2500cmを超えていた(最大は只見線大白川駅

の3555cm)。この値は、アメダス津南・守門・湯沢・関山の現在の平年値の約2.5～3倍である。

(3) 最大日降雪量

最大日降雪量は新潟・長野県境に近い信越本線沿線で特に大きく140cmを超えるエリアが認められた(最大は信越本線二本木駅の195cm)。これに次いで新潟・群馬県境に近い上越線沿線が大きく120～140cmであった。

(4) 降雪日数

降雪日数は中越地方のほぼ全域で80日を超えており、上越線・只見線沿線では90～100日に達していた(最大は只見線入広瀬駅の99日)。

4. 鉄道輸送への影響

1944/45年冬期において、新潟県内には国有鉄道13路線、私設鉄道5路線が存在していた。戦時下においては、戦争の長期化による深刻な物資不足、ガソリンの規制強化と自動車輸送の減退、シーレーンの脆弱性などのため、鉄道輸送の強化が求められていた。そのような状況下で、新潟港の軍事・経済上の理由(北海道・樺太・大陸産石炭の中継港、東京と満州国の首都を結ぶ最短ルートなど)によって新潟港から首都圏への鉄道輸送も益々重要度が増した(新潟市, 2014)。戦前の新潟から東京への鉄道路線としては信越本線経由、上越線経由、磐越西線経由の3ルートがあったが、その中でも距離・輸送力の点から上越線経由が幹線路線であった。

本研究で明らかになった1944/45年冬期の異常な豪雪は、大雪の量と頻度から考えて線路除雪に難渋を極めさせるとともに、深刻な雪崩災害を引き起こしたものと推察される。「日本の雪崩災害データベース」には1944/45年冬期に新潟県内の鉄道で発生した9件の雪崩災害が収録されている。また、鈴木ら(1996)は上越線で25件もの雪崩が発生したと報告している。今後、当時の鉄道輸送障害に関する資料を探索し、1944/45年冬期の未曾有の豪雪が鉄道輸送へ与えた影響を明らかにする予定である。

文献

鈴木博人, 河島克久(2018):鉄道の観測データでみる新潟県とその周辺地域における豪雪年の積雪分布とその鉄道への影響。土木学会論文集 B1(水工学), **74**, I_301-I_306.

鈴木博人, 熊谷茂, 島村誠(1996):なだれ防止林の防災機能評価。第14回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, **11**, 239-240.

新潟市編(2014):新装版鉄道と新潟。新潟日報事業社。

的確な冬季交通規制に向けた土壌面と舗装面の積雪形成条件の違いに関する研究

○菅結太¹・杉浦幸之助²・河島克久³・堀雅裕²

(1: 富山大学大学院理工学研究科 2: 富山大学学術研究部都市デザイン学系 3: 新潟大学災害・復興科学研究所)

1. はじめに

近年、気候変動の影響により積雪期間は短縮傾向にある一方で、顕著な大雪により車の立ち往生が後を絶たない。また、これを契機として大規模な渋滞や物流の停滞が発生する事例も少なくない。雪氷災害に強い社会を構築するためには、降水が雨か雪かを予測するだけでなく、降雪時に積雪を形成するか否かを、地域特性を踏まえて予測することが求められる。

これまで積雪形成の有無に関する先行研究が行われてきた。例えば、杉浦・衛本(2020)は草地を対象とした野外観測に基づき積雪が形成される気象条件を見出すことを試みている。一方でこれまでの研究では道路で使用されているアスファルトやコンクリートについては十分な検討が行われてきていない。本研究では、冬季の観測露場内の一部に18 cm×18 cm×18 cmのコンクリートブロックを埋設し、土壌及びコンクリートそれぞれの表面温度の時系列変化を観測する。さらに両者の表面温度と積雪形成との対応関係を明らかにすることを目的とする。

2. 手法

富山大学五福キャンパス露場において、土壌及びコンクリートの表面温度を測定するために、赤外放射温度計(Calex製PC151LT-0, 2台)と防水ボックスに格納したデータロガー(T&D製TR-55i-mA)を設置した。また、地表面状態の変化を把握するため、可視赤外インターバルカメラを併設した。さらに、露場に自動気象観測装置も設置し、土壌面に向けた赤外放射温度計(Apogee製SI-411)、気温計(クリマテック製C-109)などによる観測も同時に行った。積雪深等のデータは富山市石坂に設置されているAMeDASデータを利用した。観測期間は2025年12月25日から2026年2月26日である。

3. 観測結果と考察

図1に、2台の赤外放射温度計(PC151LT-0)によって観測された土壌とコンクリートの表面温度と、富山市石坂に設置されたAMeDASによって観測された積雪深との関係を示す。対象の地表面状態の違いに関係なく、表面温度は、日中に高く夜間に低くなる明瞭な日変化が認められた。また、日中では土壌の方が表面温度は高く、夜間ではコンクリートの方が表面温度は高くなるといっ

た対照的な挙動が見られる。これは、土壌とコンクリートにおける熱的特性(熱伝導率や熱容量など)の違いに起因すると考えられる。カメラ画像によって積雪が確認された期間(12月26日から27日)においては、土壌及びコンクリートの双方で表面温度が0℃以下になっている。12月27日以降では両地表面で表面温度の上昇が認められた。これは積雪の不均一な分布や局所的な融雪過程の影響によるものであると考えられる。

一方、2026年1月1日以降、PC151LT-0による土壌の表面温度の観測値に異常が生じた。これは防水ボックス内での断線が発生していたことが原因と判明した。さらに2026年3月中旬のセンサ撤収時には、コンクリート側のボックス外部のケーブルについても害獣による切断が確認された。なお、同露場の土壌面に向けて設置したSI-411は問題なく観測ができていた。今後は土壌面に向けて設置したPC151LT-0の欠測期間を補完するために、PC151LT-0とSI-411とのデータ互換の検証や、土壌及びコンクリートにおける熱物性値を考慮した上で、表面温度の時間変化についてより定量的な検討を進める必要がある。また、安定した観測を実施するためにケーブル接合部を十分に圧着すると同時に、外部ケーブルへの保護カバーなどを講じる必要がある。

なお本研究は、新潟大学災害・復興科学研究所共同研究費(2025-15)の助成によって行われた。

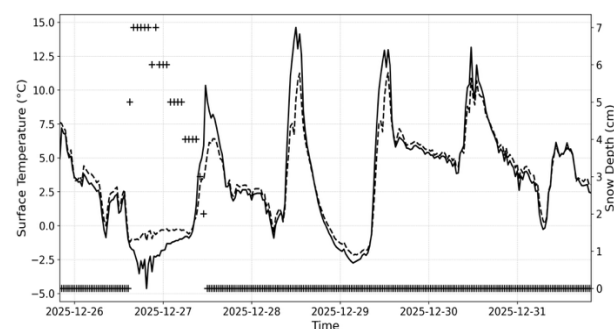


図1 2025年12月25日20:00から12月31日20:00までの表面温度(実線:土壌、破線:コンクリート)と積雪深(+の時系列変化。

文献

杉浦幸之助・衛本雄太(2020):富山県における積雪形成時の気象条件。雪氷研究大会講演要旨集, 60。

レーザー距離計の降雪粒子検知特性 — 消融雪施設の積雪深制御に関連して —

○藤野 丈志¹・大川 滋¹・木村 浩和¹・鈴木 鉄人²・上村 靖司³・矢野 昌平⁴

(1: 株式会社興和 2: ジオテクサーサービス株式会社 3: 長岡技術科学大学 4: 長岡工業高等専門学校)

1. はじめに

2025年に改訂された路面消・融雪施設設計要領では、道路上の残雪量を考慮した散水消雪施設の設計と運転制御が明記された¹⁾。汎用レーザー距離計による積雪検知制御の効果は把握されている²⁾が、積もる前に稼働させるレベルの高い消雪には、安定した降雪検知が必要とされる。そこで、レーザー距離計による降雪検知制御を目的として、レーザー距離計の降雪粒子捕捉特性を調べた。

2. レーザー距離計

レーザー距離計は積雪面や降雪粒子からの後方散乱光を検知し距離を計測する。降雪中に複数回レーザー距離計で距離計測すると、積雪面と降雪粒子どちらかの距離が計測されるので、統計処理により積雪面を確定させ、積雪面より高い位置に計測された場合を降雪検知とした。

2. 実験方法

実験は長岡技術科学大学(長岡市)構内駐車場と株式会社興和(新潟市)の駐車場出入口の2箇所で行った。レーザー距離計は高さ4mから路面とのなす角を55度となるように設置した。写真撮影と気温計測は10分間隔で行った。レーザー距離計の計測は10分間に600回行い、路面(積雪面)位置と、それより高い計測値を降雪粒子の捕捉としてカウントした。観測期間は2025年12月から2026年3月である。

3. 実験結果

積雪深差(10分間の差を1時間当たりに換算)と降雪粒子捕捉率の関係を図1に示す。積雪深差が大きい(降雪強度が強い)ほど降雪粒子捕捉率は対数的に高くなる傾向がみられ、積雪深差5cmではおおむね30%となった。気温と降雪粒子捕捉率の関係を図2に示す。気温が高いほど低下する傾向がみられ、気温0°Cをこえると低下傾向が強くなり、気温2°C以上ではほとんど捕捉しない結果となった。気温がプラスで曇りが降っているとき、路面が白く見え始めるまで降雪粒子を捕捉しないケースがあったが、積雪を検知した時点までには捕捉していた。

4. 考察

降雪強度が強いほど降雪粒子の空間占有率が上がるので、降雪粒子捕捉率が上昇することは自明である。気温が高いほど捕捉率が低下するのは、複雑な表面を持つ乾いた雪片では後方散乱強度が大きく、湿った雪片や曇りは後方散乱が小さくなることによると考えられる。積雪検知においても、乾いた積雪面は計測できてもシャーベット

状の積雪は検知できないことがあることも、同様の原理と考えられる。

消雪施設の制御において、路面が積雪状態となる前に稼働させるレベルの高い制御を行なう場合は降雪検知をトリガーとし、多少積もってから稼働させてもよい場合は積雪検知を主とするハイブリッド制御が適切である。本実験の結果、気温が高く弱い降雪で検知困難であったが、積雪を検知するまでには降雪粒子を捕捉できており、ハイブリッド制御は実現可能と考える。

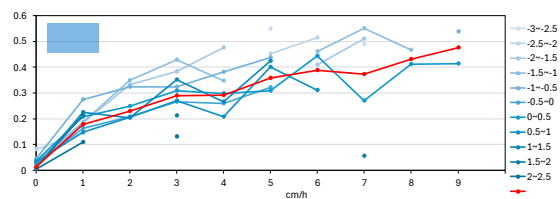


図1 積雪深差と降雪粒子捕捉率の関係

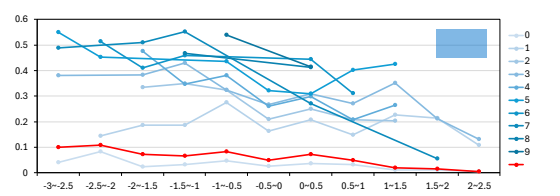


図2 気温と降雪粒子捕捉率の関係

本研究は長岡技術科学大学 技術開発センタープロジェクトで実施したものである。

文献

路面消・融雪施設等設計要領編集委員会(2025):路面消・融雪施設等設計要領(設計編), 106-109
藤野丈志, 中村大輔, 五十石浩介(2022):汎用レーザー距離計による消雪施設制御実験. 雪氷北信越, 42, 51.

雪散布によるアスファルト舗装の冷却促進と品質評価

○杉原幸信¹, 山田佳汰¹, 上村靖司¹, 高橋修¹, 後藤和浩², 荒川涼²

(1: 長岡技術科学大学 2: 株式会社ネクスコ・エンジニアリング新潟)

1. はじめに

アスファルト舗装の補修においては、仕上げ転圧後のアスファルト混合物を交通開放温度まで冷却する養生が必要である。交通開放温度は一般道路で 50°C 以下、高速道路では 40°C 以下とされている。しかし近年の猛暑により既設のアスファルト舗装路面においても夏季は表面温度が高くなり、自然冷却のみでは養生時間が長期化することが課題となっている。養生時間の長期化は交通規制時間の延長につながり、道路利用者への影響や施工効率の低下を招く。

そこで本研究では、降雪地域で利用可能な冷熱資源である雪に着目し、雪散布によるアスファルト舗装の冷却促進効果を明らかにすることを目的とした。具体的には、熱収支に基づき舗装冷却に必要な雪量を算出するとともに、供試体実験により冷却効果を検証した。さらに、雪散布による急速冷却がアスファルトバインダーの物性および化学的性状に及ぼす影響を評価し、養生時間短縮と品質の両立可能性について検討した。

2. アスファルト舗装冷却実験

2. 1 冷却に必要な雪量の算出

本研究では、アスファルト舗装を施工温度 80°C から交通開放温度 40°C まで冷却するために必要な雪量を、アスファルトの保有熱量と雪の吸熱量との熱収支に基づいて算出した。アスファルトの比熱 0.92 kJ/(kg・K)、密度 2120 kg/m³、厚さ 0.04 m より、単位面積当たりの保有熱量は約 3.12×10³ kJ/m² となった。

雪の吸熱量については、①融解潜熱のみを考慮する場合と、②融解潜熱に加えて融雪水が 0°C から 40°C まで昇温する際の顕熱を考慮する場合の 2 通りで評価した。その結果、雪 1 kg 当たりの吸熱量は、①334.7 kJ/kg、②501.9 kJ/kg となった。

アスファルトの保有熱量と雪の吸熱量は等しいと仮定して必要雪量を算出した結果、単位面積当たりの必要雪量は、①約 9.3 kg/m²、②約 6.2 kg/m² となった。さらに、雪密度を 400 kg/m³ とすると、それぞれ雪の深さは約 2.3 cm および約 1.6 cm に相当する。

また、道路幅員 4 m を想定すると、延長 1 m 当たりに必要な雪量は、①約 37 kg/m、②約 25 kg/m となる。

なお、本結果は雪の初期温度を 0°C と仮定し、日射、外気との対流熱伝達、雪と舗装間の接触状態および融雪水の流下等の影響を考慮していない理論的評価であり、実際の必要雪量はこれより増減する可能性がある。

2. 2 実験方法

供試体内部に熱電対を埋設し、表面から 10 mm 毎に深さ 50 mm までの温度を測定した。冷却性能は、深さ 40 mm が交通開放温度 40°C に到達するまでの時間によって評価した。供試体は乾燥炉にて 100°C まで加熱した後、自然放冷により 80°C まで温度を低下させ、これを冷却開始条件とした。冷却条件は、(1) 自然冷却、(2) 水散布、(3) 雪散布 (-30°C、雪の深さ 7.5 cm) の 3 条件とした。実験は 2025 年 8 月下旬に大学内の屋外で実施した。

2. 3 冷却実験結果

図 1 に自然冷却の結果を示す。自然冷却では 2 時間経過後も深さ 40 mm の温度は交通開放温度 40°C に到達せず、夏季高温条件下では自然冷却のみでの速やかな交通開放が困難であることが示された。

図 2 に水散布の結果を示す。水散布では約 23°C の水道水約 4L をじょうろを 10 分毎に合計 7 回散布した。図 2 より、水散布を行うことで自然冷却よりも冷却は促進され、温度低下開始直後の冷却速度は大きく向上した。ただし、40°C 到達までにはなお一定の時間を要した。

図 3 に雪散布の結果を示す。雪散布では初期の急激な温度低下に加え、深さ 40 mm の温度が他条件よりも早く 40°C に到達したことから、雪散布は養生時間短縮に最も有効な条件であることが示された。

また、到達時間を比較すると、深さ 40 mm の温度が 40°C に到達するまでの時間は、自然冷却では 2 時間以上、水散布では 55 分、雪散布では 26 分であり、雪散布により水散布比で約 53%、自然冷却比で 78% 以上の短縮が確認された。

3. 雪散布が舗装品質に及ぼす影響

3. 1 試験方法

評価項目は、針入度試験、組成分析試験および赤外分光分析 (FT-IR) とした。これらにより、物理的性状および化学的性状の両面から雪冷却の影響を検討した。

評価試料として、90°C までの加熱と 40°C までの冷却を雪散布により 10 回繰り返したアスファルトバインダーおよび、自然冷却により同様の温度履歴を 10 回繰り返したアスファルトバインダーを作製した。さらに、比較対象として加熱・冷却を行っていないオリジナルのアスファルトバインダーを用意した。加えて、赤外分光分析においては、加熱により促進劣化させた劣化アスファルトバインダーも準備した。

3. 2 試験結果

(1) 針入度試験

全ての試料において針入度は規格値である 60~80 1/10 mm を下回る結果となった。また、加熱・冷却工程を経た試料は、加熱・冷却を行っていない試料と比較して針入度が若干低下する傾向が確認され、繰り返し冷却がアスファルトバインダーの硬化に影響を及ぼした可能性が示唆される。一方で、自然冷却供試体と雪冷却供試体の針入度を比較した結果、両者の間に明確な差は認められなかった。このことから、本試験条件においては、冷却方法の違いによるアスファルトバインダーの物理的性状への影響は小さいと考えられる。

(2) 組成分析試験

各供試体のバインダー組成は、多少の数値のばらつきは認められるものの、加熱・冷却を行っていない試料と比較して大きな差は見られなかった。また、冷却方法や冷却回数の違いによる組成割合の顕著な変化は確認されず、本試験条件においては、冷却条件の差がアスファルトバインダーの化学的劣化に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

(3) 赤外分光分析 (FT-IR)

加熱・冷却を行っていない試料のカルボニルインデックス (CI) は 0.23、劣化アスファルトバインダーは 0.84 と著しく高く、CI が酸化劣化の指標として有効であることが確認された。自然冷却 (CI=0.19) および雪冷却 (CI=0.27) は加熱・冷却を行っていない試料と同程度であり、劣化アスファルトバインダーと比較して十分に低い値を示した。スペクトルにおいても、劣化アスでは 1700 cm^{-1} 付近にカルボニル基 (C=O) の明瞭なピークが確認されたが、自然冷却および雪冷却では顕著な増加は認められなかった。以上より、本研究条件下では冷却方法の違いによる酸化劣化は極めて小さいことが示された。

4. まとめ

本研究では、雪散布によるアスファルト舗装の冷却促進効果と舗装品質への影響を検討した。

熱収支に基づく理論計算の結果、舗装を 80°C から 40°C まで冷却するために必要な雪量は約 6.2~9.3 kg/m^2 と算出され、雪厚に換算すると約 1.6~2.3 cm に相当することが示された。

冷却実験の結果、雪散布は自然冷却および水散布と比較して最も高い冷却性能を示し、深さ 40 mm の温度が 40°C に到達するまでの時間は、自然冷却では 2 時間以上、水散布では 55 分、雪散布では 26 分であった。このことから、雪散布により水散布比で約 53%、自然冷却比で 78% 以上の養生時間短縮が確認された。

また、アスファルトバインダーの針入度、組成分析および FT-IR 分析の結果から、自然冷却と雪冷却の間に明確な差は認められず、雪散布による急速冷却が物性および化学的性状に及ぼす影響は小さいことが示された。

以上より、雪を夏季舗装施工時の冷却材として活用することで、舗装品質を大きく損なうことなく養生時間を大幅に短縮できる可能性が示された。

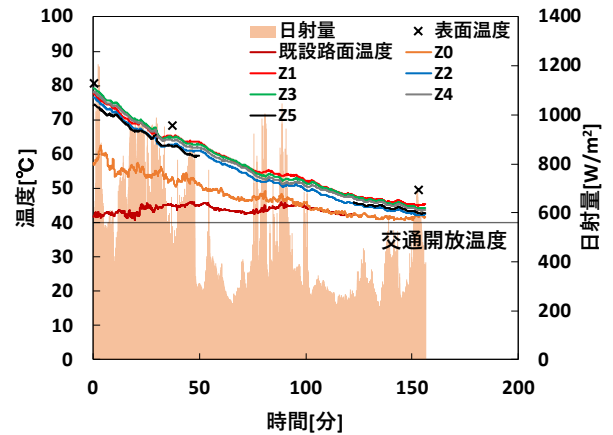


図1 自然冷却時の供試体内部温度の経時変化

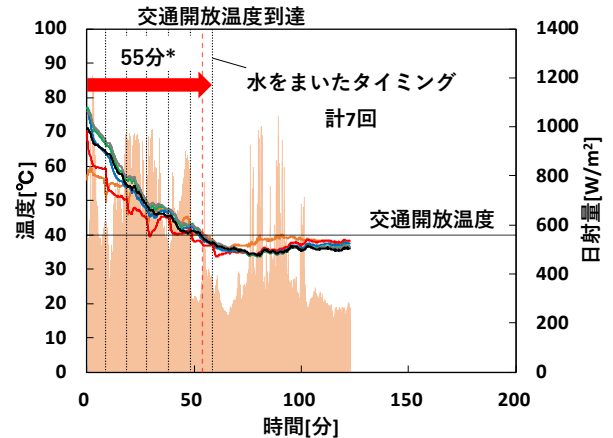


図2 水散布時の供試体内部温度の経時変化

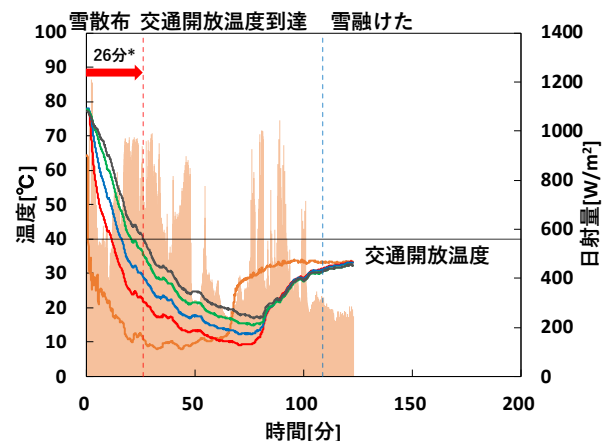


図3 雪散布時の供試体内部温度の経時変化

不織布シートによる圧雪路面におけるスタック脱出効果の評価

○藤本明宏¹・河島克久²

(1: 福井大学学術研究院工学系部門 2: 新潟大学災害・復興科学研究所)

1. はじめに

筆者らは、2018年度から実車試験を実施し、車種別、タイヤ種別、チェーン装着の有無・チェーン種別を考慮してスタック脆弱性を圧雪路面に生じた窪み深さ（スタック発生圧雪窪み深さ d_{sp} ）で評価してきた（藤本ら、2021, 2023 および 2025）。これまでのスタック試験を通じて、チェーンは駆動輪を圧雪内部へ沈み込ませることがあり、必ずしもスタック脱出に効果的でないこと、スタック状態の車両には装着が難しいことが分かった。また、駆動輪と圧雪の間に布、板、シートなどを挟めて駆動輪と圧雪との間の摩擦力を高める器具（以下、スタック脱出器具と呼ぶ）も駆動輪の回転によって後方に抜けてしまい、殆ど効果がないことも分かった。

本研究では、新たなスタック脱出器具の開発を目指す。これまでの研究より、駆動輪の回転時にスタック脱出器具を駆動輪の下に維持させることが重要と考えた。そこで、面状シートを採用し、その一部を前輪で踏ませることで面状シートを動かないように工夫して、予備試験を実施した。その結果、前輪で押さえたとしても面状シートが駆動輪の空転に巻き込まれ、そのスタック改善効果が限定的であった。その中、不織布シートが特別に高いスタック脱出の効果を示した。この理由は、他のシートに比べて、不織布シートと圧雪との間の摩擦係数が高いためと推察した。

以上を踏まえて、本研究では、不織布シートを用いてスタック試験を繰り返し実施し、不織布シートのスタック脱出効果をより詳しく調べるとともに、駆動輪下への不織布シートの敷設方法を検討したので、その一部を紹介する。

2. スタック試験

スタック試験は、令和8年1月20日および21日に新潟県魚沼市大白川地先にて実施された（写真1）。期間中の平均気温は -2.9°C であり、累計降雪量は69cmであった。試験前の試験地は130cm程度の積雪があったため、試験6日前に全て取り除き、その後の積雪で試験を実施した。試験初日に積雪を締固めて圧雪路面を作成した。圧雪の雪質は水分を全く含まないしまり雪であり、その硬度および密度は約3MPaおよび約 380kg/m^3 であった。

試験車は、燃費が良いことから運送業界で使用されることが多く、かつスタックし易い後輪駆動の中型トラックを対象とした。タイヤは令和7年の冬前に新品に履き替えたスタッドレスタイヤである。



写真1 スタック試験の様子

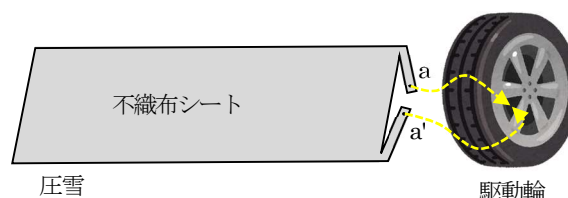


図1 かり付け法

本研究では、不織布シートのスタック脱出効果を調べる試験（スタック脱出試験）と駆動輪と圧雪との間に不織布シートを敷設させる方法を検討する試験（スタック脱出器具敷設試験）を行った。

昨年度のスタック脱出試験では、後輪の駆動輪に加えて前輪の従動輪でも不織布シートを踏ませたが、今回の試験は駆動輪のみに踏ませることにした。この変更の理由は、前輪と後輪で同時に不織布シートを踏ませた状態にすることが簡単でないことと、スタック脱出器具をより簡素にすることにある。不織布シートはポリエステル製であり、その密度と厚みは 100kg/m^3 および2.0mmである。試験では、幅が1mと2mの2種類、長さが1m、2mおよび4mの3種類のものを用いた。

スタック脱出器具敷設試験では、不織布シートの敷設方法として、(i)駆動輪に不織布シートの端部が接触するように設置し、駆動輪の回転によって巻き込ませて敷設する方法（巻き込ませ法）、(ii)不織布シートの端部を図1のように加工し、不織布シート端部の細長い部分（図中のa, a'）を駆動輪のホイールに通して両者をかり付け、その状態で駆動輪を回転させることで不織布シートを巻き込ませて敷設する方法（かり付け法）を試みた。

3. 試験結果

3. 1 スタック脱出試験

スタック脱出試験の結果、スタック状態から脱出できた場合とできなかった場合があった。スタック状態から脱出できた場合は、駆動輪が載っていた箇所において圧雪と不織布シートが凍着していた(写真2)。これは、駆動輪からの熱が不織布シートを介して圧雪に伝わり、圧雪表面で発生した融解水の一部を不織布シートが吸い込んだ状態で再凍結した結果と考えられる。一方、スタック状態から脱出できなかった場合は、不織布シートと圧雪との凍着が弱く、不織布シートが駆動輪の空転によって巻き込まれ、駆動輪の下から不織布シートが無くなった。

本試験から、スタック脱出時の駆動輪に回転に伴う巻き込まれに対して、圧雪との凍着が発生した場合には凍着部のせん断に抵抗するような強大な力が作用し、巻き込まれに強く抵抗することが分かった。ただし、凍着が十分でない場合、不織布シートと圧雪との間の摩擦力だけでは、駆動輪に巻き込まれる力に及ばず、スタック脱出効果としては高くないと推察する。

3. 2 スタック脱出器具敷設試験

スタック脱出器具敷設試験の結果について述べる。巻き込ませ法は、アクセルの踏込が強い場合に写真3のように不織布シートが駆動輪の後方に飛び出した。また、不織布シートの端部と駆動輪との接触状態によっては不織布シートが巻き込まれない場合も多かった。その他、不織布シートが駆動輪に巻き込まれた後に後方に飛び出すことを防ぐために、写真4のように頬冠り状に駆動輪に被せるや、ゆっくりと駆動輪を回転させるために前進と後進で試みるなど、工夫したものの、確実に不織布シートを駆動輪の下に敷設することはできなかった。

一方、括り付け法は、写真5のように駆動輪を回転させると、不織布シートが駆動輪に巻き込まれ、アクセルの強弱に関係なく、駆動輪の下に確実に不織布シートを敷設することができた。

4. おわりに

本研究では、圧雪路面において不織布シートによるスタック脱出効果を調べた。その結果、不織布シートと圧雪の凍着によって高いスタック脱出効果が得られることが分かった。駆動輪下への不織布シートの敷設に関しては、不織布シートの端部をホイールに通して括り付ける方法(括り付け法)が有効であることが分かった。ただし、この凍着力は、駆動輪の温度、圧雪の温度、気温など熱環境、圧雪表面の状態、輪荷重、停止時間などが影響すると考えられるが、不明な点が多い。今後、これらが凍着力に及ぼす影響を定量的に評価することが望まれる。また、スタック脱出の観点からは、凍着力がスタック脱出に必要な駆動力を上回る必要があり、スタック脱出に必要な凍着力も明らかにする必要がある。

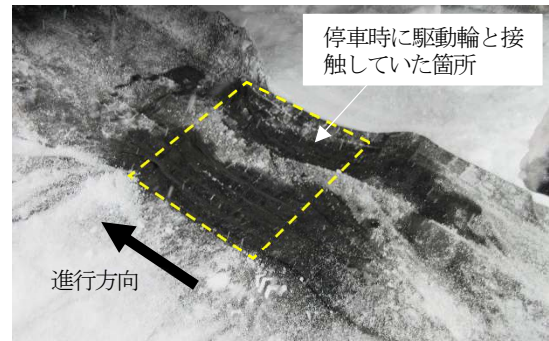


写真2 スタック車両脱出後の不織布シート

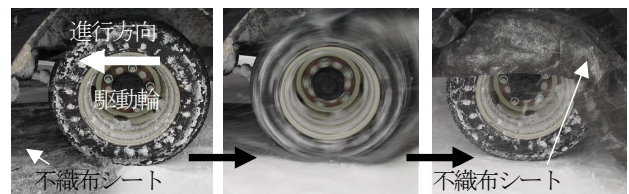


写真3 巻き込ませ法



写真4 巻き込ませ法(頬冠り)



写真5 括り付け法

本研究は、新潟大学災害・復興科学研究所共同研究費(2025-1)の助成によって行われた。

文献

- 藤本明宏, 河島克久, 渡部俊, 村田晴彦(2021): 大雪時のスタック車両発生メカニズムの解明. 雪氷, **83**, 5, 507-522.
- 藤本明宏, 河島克久, 河本ひかる, 渡部俊, 村田晴彦(2023): 圧雪路面における車両のスタック脆弱性評価. 雪氷, **85**, 4, 223-240.
- 藤本明宏, 河島克久, 渡部俊, 村田晴彦, 向山諒(2025): 圧雪路面でのスタックに対するタイヤ種類の影響とチェーン装着効果. 雪氷, **87**, 1, 3-22.

タンクモデルによる長岡市千手小学校地下水観測井の水位変動シミュレーション

小野寺誠¹, ○中川零聞¹, 上村靖司¹, 杉原幸信¹, 藤野丈志², 野内冴希²

(1:長岡技術科学大学 2:株式会社興和)

1. はじめに

温暖かつ多量の雪が降る北陸地域では、円滑な交通を維持するために、年間を通して温度がほぼ一定な地下水を散水して道路上の雪の消融雪を行う散水型消融雪装置、いわゆる「消雪パイプ」が広く普及している。しかし、新潟県では大量の地下水を汲み上げ続けていることにより、地下水位の低下傾向が指摘されており¹⁾、消雪パイプの今後の持続的な稼働が危ぶまれている。小野寺ら²⁾によれば、新潟県長岡市の特に人口が集中している中心部において地下水位の顕著な低下が確認された。このため、節水を目的として、積雪状況に応じて散水消融雪装置を制御すること(残雪深制御と呼ぶ)を著者らは提案してきた。田中ら³⁾の研究では、消雪パイプを残雪深制御かつ高出力で稼働することで、省資源化かつ高効率化が見込めることを予測した。

本研究の最終目的は、散水型消融雪装置の運転制御による地下水位低下の抑制効果を明らかにすることである。その第一段階として、本研究では長岡市千手小学校観測井を対象に、短期間の地下水位変動を再現可能な簡易モデルの構築を目的とする。具体的には、拡散方程式に基づくタンクモデルに消雪パイプの稼働による地下水位低下項を導入し、降雪検知制御を想定した地下水位変動の再現性を検証する。

2. タンクモデルを用いた地下水位シミュレーション

地下水位の変動をシミュレーションするにあたり、タンクモデルの概念を用いる⁴⁾。一般的には複数層のタンクをモデル化することにより、表面浸透と河川流出などをシミュレーションする場合に広く利用されている。図1にタンクモデルの概念図を示す。地下水位の変動は、地下水の流動を表す式

$$Q = T \frac{\partial h}{\partial x} \cdots (1) \quad \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial x} \cdots (2)$$

から導かれる拡散方程式

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \cdots (3)$$

により推定する。ここで、 T [m^2/s]は透水量係数、 S [-]は貯留係数、 Q [m^3/s]は地下水位の流量、 h [m]は地下水位を表す。式(3)の拡散方程式は差分化することで

$$h_n^{p+1} = \Theta(h_{n+1}^p + h_{n-1}^p) + (1 - 2\Theta_x)h_n^p - a \cdot h_s \cdots (4)$$

$$\Theta = \frac{S}{T} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}, a = 0, 1$$

と表され、第3タンクの地下水位を表す。また散水による地下水位の低下を表すパラメータ h_s を拡散方程式に追加することで地下水位の変動を再現する。 h_s は消雪パイプの稼働1回あたりの地下水位低下量を意味し、常に一定であると仮定する。また、 a は消雪パイプの稼働判定のための項であり、消雪パイプが稼働した時は1、非稼働の時は0とする。

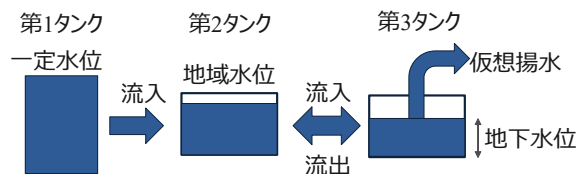


図1 タンクモデルの概念図

3. 地下水位変動シミュレーションおよび予測条件

地下水位データは新潟県環境局が毎年発表している新潟地域の地盤沈下に関する報告書⁵⁾の地下水位月次平均値を用いる。分析対象の観測井は長岡市における消雪パイプの主要取水層の観測井であり、地下水位の長期的な低下が顕著であった千手小学校観測井⁶⁾を選定する。この観測井は長岡市における消パイの主要取水層の観測井であり、シミュレーション対象の帯水層と合致している。分析に用いる地下水位は2010年11月から2015年10月までの5年間とした。本研究では2010年11月から2011年10月の地下水位を訓練データとし、2010年11月から2015年10月までを検証データとした。

消雪パイプの稼働方式は、降雪検知制御を想定する。本研究では降雪検知制御は時間降雪深が正のときに消雪パイプが稼働する仕組みとした。

地下水位変動シミュレーションおよび予測の流れは図2の通りである。

- (i) 元データをモデル学習用のデータ(訓練データ)とモデルの予測用のデータ(検証データ)に分割する。
- (ii) 気温、降水データから、上村ら⁹⁾による改良 Degree-Day 法を用いて積雪重量を計算することで1時間ごとの消雪パイプの稼働をシミュレーションする。
- (iii) 得られた消雪パイプの稼働シミュレーションデータ a

および暫定的な T, S, h_s の値を用いて訓練データにおける地下水位シミュレーションモデルを構築する。

- (iv) 1時間ごとのシミュレーション結果から月平均値を算出し、モデルの精度を差分化アルゴリズム⁷⁾を用いて検証する。前ループよりも精度が向上すればパラメータの値を保持する。評価関数はRMSE(式5)を用いる。
- (v) 最適化されたパラメータを用いて検証データでのモデルの精度をRMSE, MSE, 決定係数(式5~7)を用いて確認する。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs,i} - y_{pred,i})^2}{n}} \dots (5)$$

$$MSE = \frac{(y_{obs,i} - y_{pred,i})^2}{n} \dots (6)$$

$$\text{決定係数 } R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (y_{obs,i} - y_{pred,i})^2}{\sum_{i=0}^n (y_{obs,i} - \bar{y}_{obs})^2} \dots (7)$$

y_{obs} … 実測値 y_{pred} … 予測値
 n … データ数 \bar{y}_{obs} … 実測値の平均値

4. 短期間の地下水位変動シミュレーションの結果

図3に短期間の地下水位変動シミュレーションの結果を

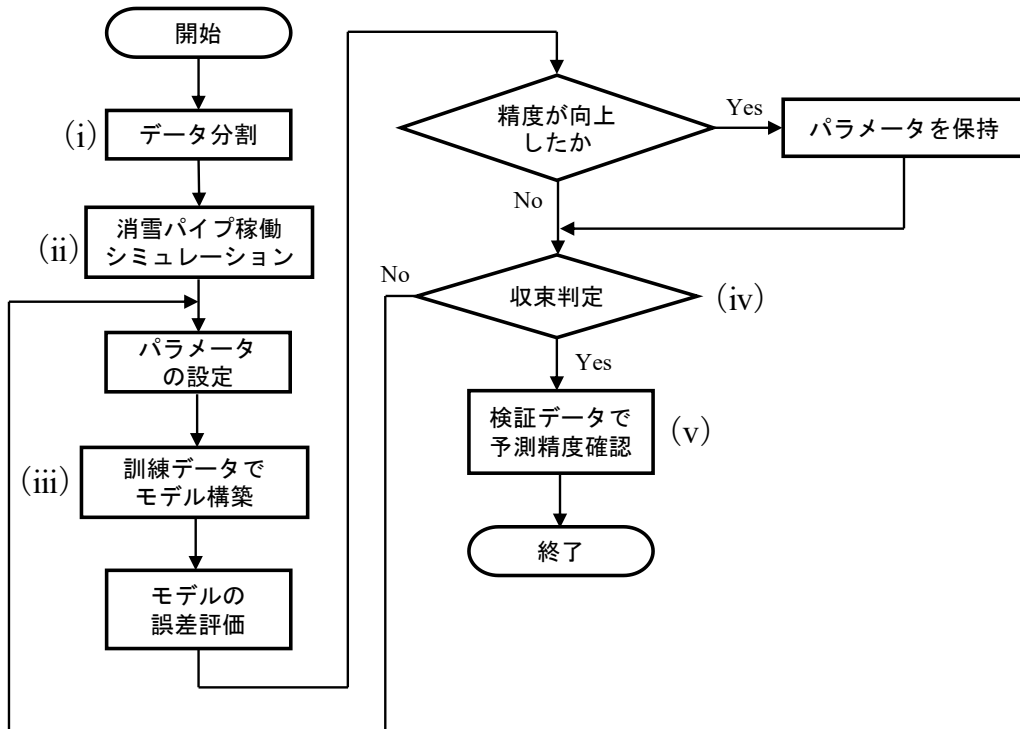


図2 シミュレーションの流れ

示す。差分化アルゴリズムにより同定されたパラメータは、 $S/T = 0.041[s/m^2]$ および消雪パイプ1回あたりの地下水位低下量 $h_s = 0.34$ mであった。図3よりモデルは冬季における地下水位低下および次の冬季までの回復過程を概ね良好に再現している。月平均地下水位を用いた評価では、 $RMSE = 0.524$ mであった。これは地下水位変動幅(約5 m)に対して10%程度であり、概念モデルとして許容範囲と判断した。

2013年度および2014年度の冬季最低値に若干の差が見られるが、これは実際の消雪パイプが完全に降雪検知器により制御されていない可能性や、降雨等の外部要因をモデルで明示的に考慮していないことによる影響と考えられる。

以上より、本モデルは季節スケールの地下水位応答を再現可能であることが確認された。

5. まとめ

本研究では、拡散方程式とタンクモデルを組み合わせた簡易モデルを構築し、長岡市千手小学校観測井における短期間の地下水位変動の再現を試みた。その結果、冬季の地下水位低下およびその後の回復過程を概ね良好に再現でき、 $RMSE$ は0.524 mと変動幅に対して約10%程度であり、概念モデルとして妥当な精度を確認した。

一方で、降雨や実際の運転条件のばらつきなど、モデルで考慮していない外的要因により一部再現精度に差が見られた。

今後は、長期間の地下水位変動を対象としたモデルへの

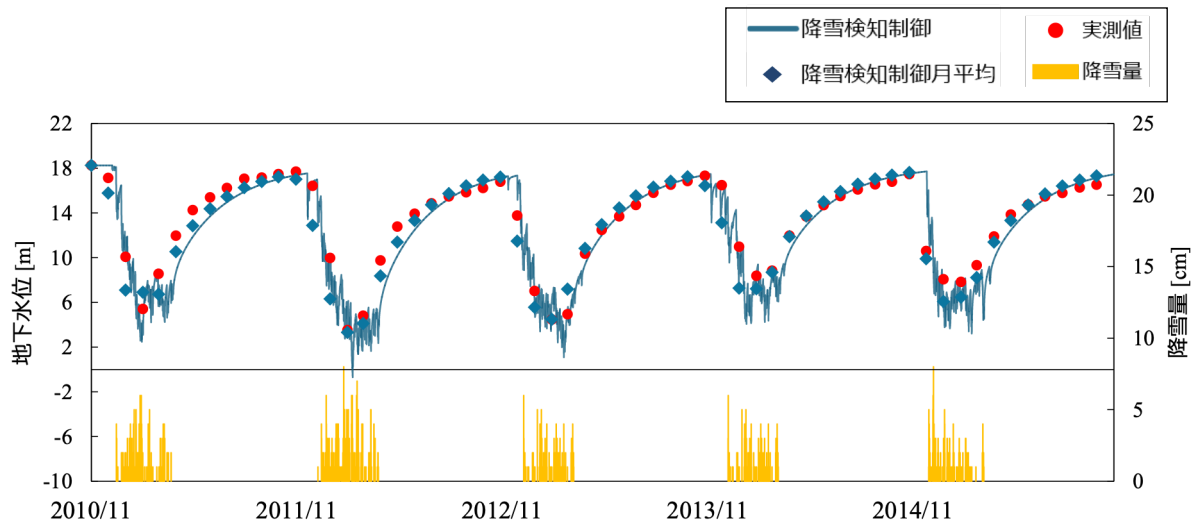


図3 降雪検知制御における短期間解析結果

拡張および他観測井への適用を進めるとともに、地下水保全と融雪性能を両立する運転条件の検討を行う。さらに、既存消雪施設における高出力運転の許容範囲の評価を行い、社会実装に向けた指針の構築を目指す。

6. 参考文献

1. 八木信一, 遠藤嵩浩, 坂東和郎, 中谷仁(2020):地下水ガバナンスの動態に関する研究—地下水の社会的価値を分析枠組みとして—. 地下水学会誌, **62(2)**, 219-232.
2. 小野寺誠, 上村靖司, 杉原幸信, 藤野丈志(2024):新潟県における散水型消融雪施設の稼働に伴う地下水位変化の傾向分析. 第40回寒地技術シンポジウム寒地技術論文・報告集, 210-215.
3. 田中日菜, 杉原幸信, 上村靖司(2022):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, **38**, 125-128.
4. 藤野丈志, 坂東和郎(2023):簡易な地下水位シミュレートによる地下水節水散水時の地下水位低下予測. 雪氷研究大会講演要旨集, 126.
5. 新潟県環境局, 長岡地域における地盤沈下,
<https://www.pref.niigata.lg.jp/site/kankyō/1331240506475.html>
6. 上村靖司, 梅村晃由(1996):屋根融雪装置の能力設計に関する提案. 日本雪工学会誌, **12(3)**, 212-217.

機械学習による雪堤崩壊の発生予測モデルの検討

長嶺俊介¹, ○佐々木和也¹, 大津草介¹, 杉原幸信², 上村靖司²後藤和浩³, 荒川涼³, 町田敬⁴

(1: 長岡技術科学大学 機械工学分野 2: 長岡技術科学大学 機械系)

(3: 株式会社ネクスコ・エンジニアリング新潟 4: 町田建設株式会社)

1. はじめに

高速道路の路肩や中央帯に形成される雪堤は、崩壊時に車線を閉塞させ、交通事故や車両損傷を引き起こす可能性がある。安全確保のためには崩壊前に雪堤を除去する必要があるが、現場での除雪判断は依然として巡回員の経験に依存する部分が多い。

先行研究において長嶺ら(2025)は2022年度から2024年度の冬季を対象に、ウェブカメラシステムを用いて関越自動車道(水上IC~小千谷IC: 図1参照)での雪堤崩壊を調査した。ここで、長嶺らは雪堤崩壊の規模を道路管理者の観点から図2に示す3つの崩壊ランクに分類した。長嶺らの研究により、崩壊発生地点の空間的な偏り(ヒートマップ)や、気温・積雪深といった各気象要素との



図1 雪堤崩壊を調査した区間

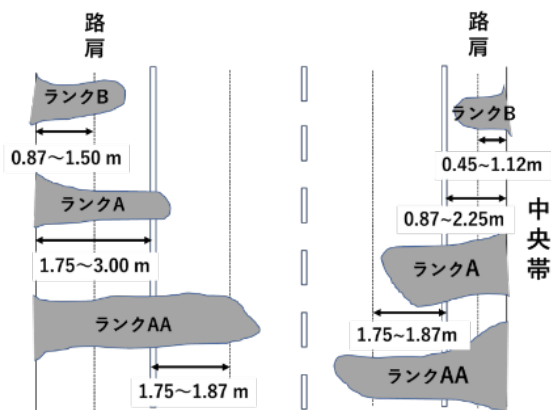


図2 雪堤崩壊規模のランク分け

相関関係が明らかになった。さらに、雪堤崩壊の主因は①降積雪による荷重の増加(積雪崩壊)、②気温上昇に伴う雪の融解(融雪崩壊)と、それらが複合して発生ものに分類されるとしている。

本研究では長嶺らの知見を基に、現場の意思決定を支援する雪堤崩壊の予測アルゴリズムの確立を目指すものである。本報告では過去の雪堤崩壊事例と気象の観測値を用いて、日単位の雪堤崩壊の発生の有無を二値で評価する機械学習モデルの構築を検討した結果について報告する。

2. 雪堤崩壊の発生確率の予測方法

2.1. 関越自動車道の分析区間と観測期間

本研究では、アメダス観測地点との整合性を考慮し、湯沢区間(土樽PA~六日町IC間)および小出区間(六日町IC~越後川口IC間)を分析対象とした(図1)。また、雪堤崩壊の観測期間は12月1日から翌年3月31日とした。機械学習による予測モデルは、湯沢区間と小出区間のそれぞれに対して作成した。

機械学習に用いる雪堤崩壊のデータとして、2013年度から2022年度および2024年度の11カ年度を用いた。ここで、2013年度から2021年度は、除雪作業員の巡回記録(日報)に記載されている雪堤崩壊の記録を使用した。また、2022年度と2024年度はウェブカメラシステムを用いて観測した崩壊ランクB, A, AAの全てのデータを用いた。なお、2023年度冬季は崩壊が少ないため比較対象から除外した。

2.2. 説明変数と目的変数の選定

本研究において、説明変数にはアメダスから得られる日平均気温や日降雪量などの観測値に加え、長嶺らの研究で有効性が示された推定積雪重量を用いた。さらに崩壊発生日時から遡って7日間の期間統計量を説明変数として加えた。上記に関する合計34種類の気象パラメータを採用した。目的変数として、雪堤崩壊の有無を二値(発生=1,非発生=0)として1日単位で整理した。

2.3. 予測モデル構築の流れ

コーディングにはPythonを用い、二値分類に適したロジスティック回帰を採用した。図3にモデル構築のプロセスを示す。以降、各プロセスについて説明を加える。

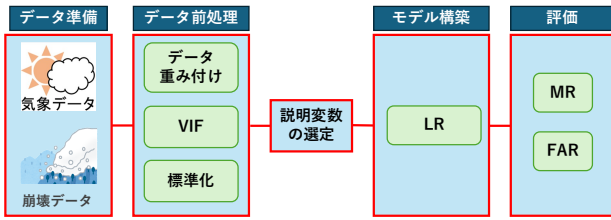


図3 モデル構築の流れ

2.3.1. データ前処理 (欠測値補完, 重み付け, 標準化)

機械学習ではモデルの精度を向上させるために品質の高いデータを用意する必要がある。今回、説明変数として使用しているアメダスの観測値には欠測値が存在する。本研究では、データの連続性を維持し学習への影響を最小限に抑えるため、欠測値の前後の観測値から自動的に近似値を算出する補完処理を行った。

使用するデータセットが片方のデータに偏っており、データの不均衡が存在する場合、モデルが多数派データばかりを予測してしまい、少数派データを適切に学習できない問題が発生する。雪堤崩壊の場合は、非発生日が多数派、発生日が少数派であって、データの不均衡が存在する。例として、2022年度の湯沢区間では発生21件に対し、非発生100件であった。そこで、少数派である発生日に対して重み付けを行うことで不均衡を解消する処理を行った。重み付けは機械学習のコード「class_weight='balanced'」を組み込むことで行った。

さらに、異なる尺度を有する説明変数を適切に扱うための前処理として、標準化を施した。標準化とは、各説明変数の平均値を0、標準偏差を1となるように変換する処理である。

ロジスティック回帰などの重回帰モデルを実装する際は、複数の説明変数（独立変数）同士が互いに強く相関している状態である多重共線性を回避することが重要になる。そこで、VIF (Variance Inflation Factor : 分散拡大係数) を用いることで適切な説明変数を選定した。VIFとは、重回帰分析において説明変数（独立変数）間の強い相関（多重共線性）の度合いを測る指標である。値が大きいほど多重共線性が高くなるため、説明変数からの除外を検討する。本研究では、統計学的に多重共線性の懸念が強いとされる一般的な基準に基づき、VIFの閾値を10とし、VIF ≥ 10の説明変数を候補から削除した。

2.3.2. 選定された説明変数と特徴量係数の関係

図4に最終的に選定された説明変数と特徴量係数の関係を示す。特徴量係数とは、機械学習モデルが学習に使用する入力データの各要素の影響を示す指標である。特徴量係数が正の場合はその値が大きいほど崩壊が起きやすく、負の場合は値が小さいほど崩壊が起きにくいことを示す。分析の結果、以下の傾向が確認された。

まず、7日間の連続的な気象観測値を基にした説明変数が予測に強く影響していることから、短期的な変動よりも累積的な気象変化が崩壊の要因となる可能性が高いと考えられる。

次に積雪重量については、小出では「7日間平均積雪重量」が正の相関を示したが、湯沢ではVIFにより除外された。さらに、湯沢区間では積雪重量に関連する「7日間最深積雪」や「平年比7日間降水量」が正の値として説明変数に残っていることから、間接的に雪堤崩壊に関与していると推測される。

気温に関する変数は寄与度が高かった。また、7日間の最大・平均風速に関する説明変数はいずれも負の相関を示しており、風速が大きいほど雪堤崩壊が発生しにくくなることがわかった。

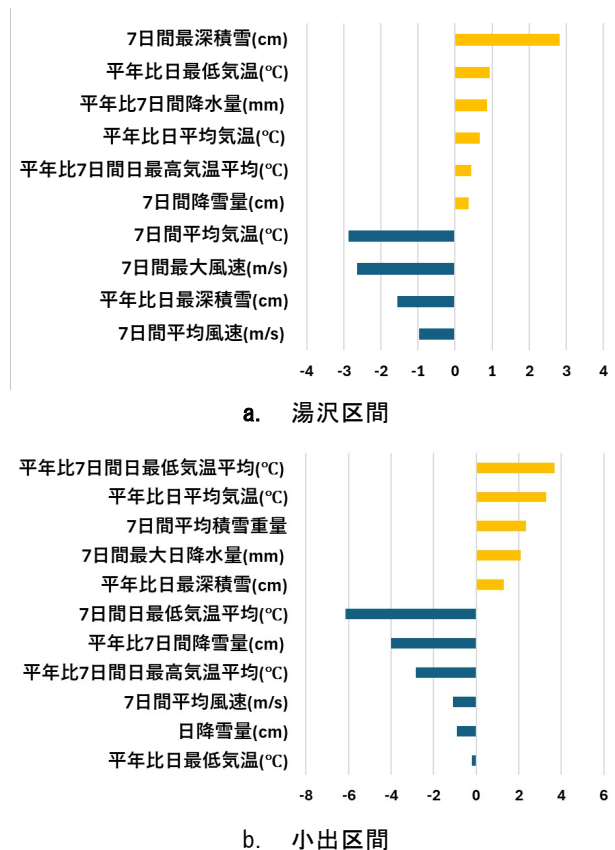


図4 最終的に選定された説明変数（縦軸）と特徴量係数（横軸）の関係

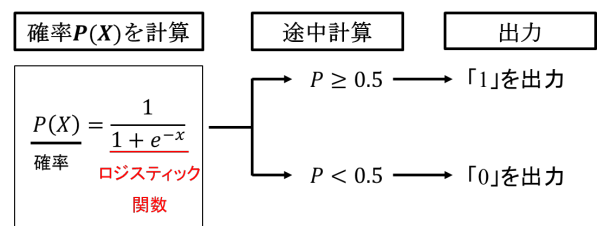


図5 ロジスティック回帰の概念図 (閾値 0.5)

2.3.3. モデル構築 (ロジスティック回帰)

本研究では複数の気象因子から「崩壊の有無」を予測するため、分類アルゴリズムとして広く用いられるロジスティック回帰 (Logistic Regression, LR) を採用した。この手法は、入力されたデータに基づき、事象が発生する確率を0~1の範囲で算出するものである (図5)。算出した確率に対して閾値を設けることで、雪堤崩壊の有無を二値 (発生=1,非発生=0) で予測可能になる。

ロジスティック回帰の閾値のデフォルト設定は0.5である。しかし、事前に閾値を0.5に設定して予測を行った際、検証データの見逃し率が0.6程度と高い数値になったため、見逃し率が低くなるように、本研究では閾値を振って最適と判断された0.1に設定した。

2.3.4. k分割交差検証

未知データへの適応性を高めるため、本研究ではk分割交差検証を適用した。図6にk分割交差検証の概念図を示す。分割数はk=5とし、対象データ (2013年度冬季~2021年度冬季および2024年度冬季) を5分割して、各分割において4/5を訓練データ、1/5をテストデータとしてモデルの学習および評価を行った。各分割で得られた評価指標の平均値を用いることで、特定のデータ分割に依存しない汎用的なモデルを構築した。最後に2022年度をテストデータとして構築したモデルで予測精度を評価した。



図6 k分割交差検証の概念図

2.3.5. モデルの予測精度の評価指標

評価指標には混同行列から算出される見逃し率 (MR) および空振り率 (FAR) を用い、目標値をMR 20%以下、FAR 40%以下と設定した。特に道路管理者の観点から、崩壊を確実に検知するためにMRの低減を重要視した。

3. 日単位での雪堤崩壊発生の予測結果

構築した小出区間と湯沢区間のロジスティック回帰モデルを用い、2022年度における日単位の雪堤崩壊の

発生有無を予測し、その精度を評価した。その結果を図7に示す。参考として2013年度~2021年度および2024年度の予測精度についても併記した。

3.1. 予測精度の評価

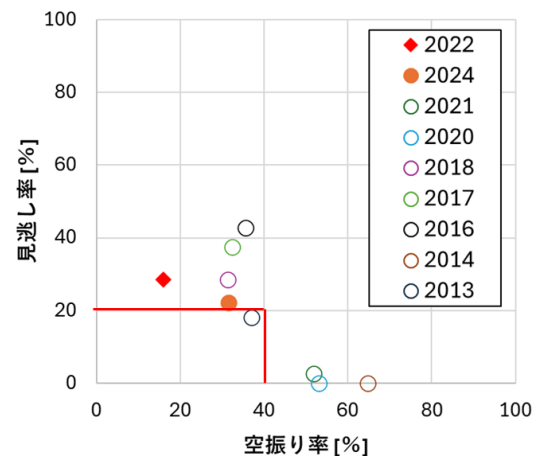
図7より、テストデータとした2022年度の結果を見ると、小出区間では見逃し率・空振り率ともに目標値を達成しており、安定した予測性能が得られていることが確認できる。

一方、湯沢区間では見逃し率が28%となり、目標値には収まらない結果となった。

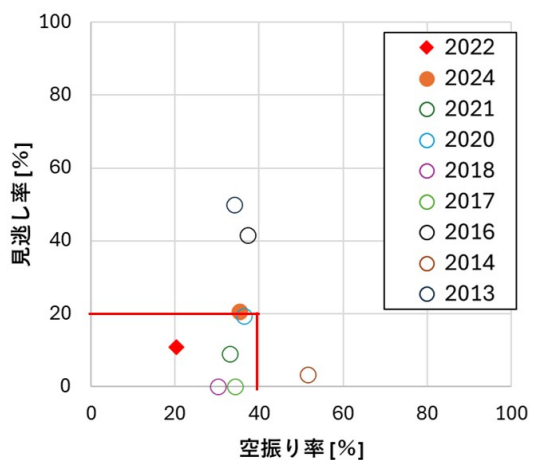
また、訓練データとして用いた2013年度~2021年度および2024年度の予測結果においても、小出区間では概ね良好な精度を示したが、湯沢区間では多くの年度で基準値を満たせなかった。

3.2. 崩壊ランクAおよびAAの予測精度

予測精度が悪化した要因の一つとして、訓練データに崩壊ランクB, A, AAの全てのデータを用いたことが考えられる。崩壊ランクBは側帯内に収まる小規模な崩壊であり、道路管理上の優先順位は低い。しかし、2022年度と2024年度の崩壊ランクBの発生件数は合計481件で



a. 湯沢区間



b. 小出区間

図7 日単位の雪堤崩壊の発生有無の予測精度

全体の約 65% を占め、本研究で構築した予測モデルは崩壊ランク B の発生条件の影響を強く受けたものであると考えられる。一方、崩壊ランク A および AA は外側線を越えて走行車線に崩壊した堆雪が飛び出す道路管理上優先順位が高い崩壊であるが、同期間の崩壊ランク A の発生件数は 238 件（全体の約 32%）、崩壊ランク AA の件数は 22 件（全体の約 3%）と少数である。

そこで、崩壊ランク B を含む全データを用いて構築した雪堤崩壊予測モデルが、道路管理上、把握することの優先度の高い崩壊ランク A および AA の発生を捉えられているかについて、2022 年度と 2024 年度のモデルの予測結果と崩壊ランク別の発生日を照らし合わせることで再検証した。その結果を図 8 に示す。2013 年度～2021 年度の結果は図 7 から変わらないが、参考として載せる。図 8 より、湯沢区間と小出区間ともに崩壊ランク A および AA については見逃し率 5% 以下で発生を予測できていることがわかった。

一方、モデルが崩壊を見逃した事例を精査したところ、その 76% が橋梁部で発生していることが判明した（図 9）。本研究で構築したモデルでは道路造成種別や構造物種別

で雪堤崩壊を分類することなく、全てのデータをひとまとまりとして訓練データとして用いたが、分類によって予測精度が向上する可能性が示唆された。

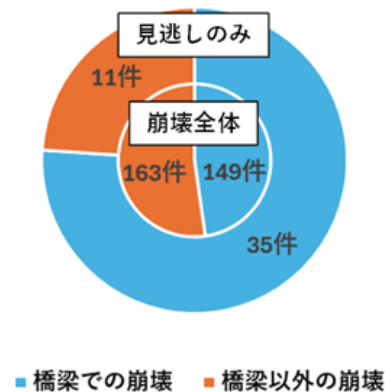


図 9 見逃し事例の崩壊場所

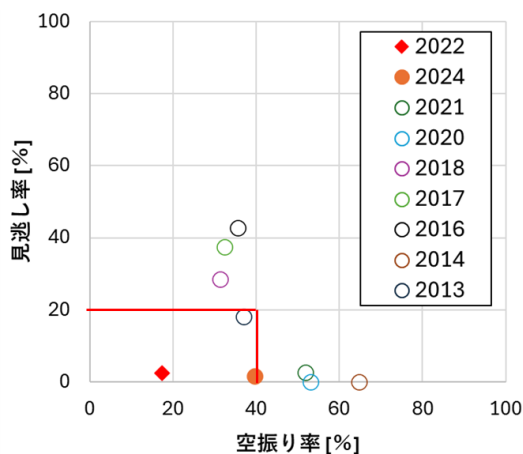
4. まとめ

本研究では、ロジスティック回帰を用いた雪堤崩壊予測モデルを構築し、その実用性を検証した。分析の結果、累積的な気温変化や積雪重量が予測に大きな影響を与えていることが明らかとなった。Web カメラによる詳細な全数調査データに基づき大規模崩壊（ランク A、AA）に限定して再検証したところ、湯沢・小出の両区間において目標精度を達成した。これにより、本モデルによって危険な規模の崩壊の予測が可能であり、現場の除雪判断を支援するツールとして高い実用性を備えていることが証明された。

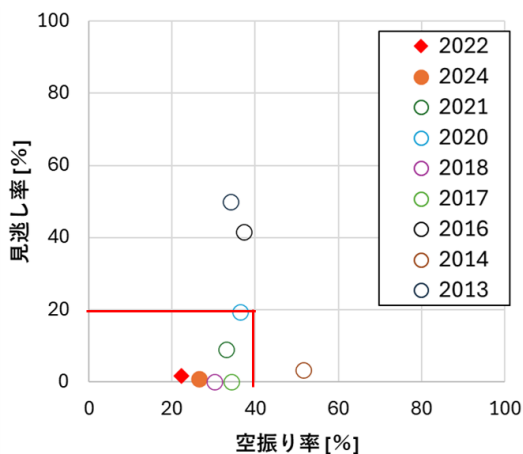
一方、見逃し事例の約 7 割が橋梁部に集中しているという新たな課題も浮き彫りとなった。今後は気象因子に加え、床版の振動や強風等の構造物特性を考慮したモデルへの拡張を図り、さらなる見逃し率の低減と効率的な道路管理体制の構築を目指す。

文献

長嶺俊介, 松村優友, 杉原幸信, 上村靖司, 後藤和浩, 荒川涼, 町田敬 (2025) : 雪堤崩壊の危険度評価と予測, 雪氷研究大会 (2025・津) 講演要旨集, 16.



a. 湯沢区間



b. 小出区間

図 8 崩壊ランク A と AA の発生有無の予測精度