

雪おろシグナルを応用した屋根からの落雪危険度の推定にむけて

平島寛行¹・河島克久²・本谷研³・佐野浩彬⁴

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

1. はじめに

これまで屋根雪下ろしの判断の参考となる積雪重量分布情報を発信する「雪おろシグナル」を開発してきた(Hirashima et al., 2020)。雪おろシグナルは、準リアルタイム積雪分布監視システム(伊豫部・河島, 2020)で得られた積雪深の情報と近くのアメダスデータをもとに、積雪変質モデルSNOWPACKにより積雪重量を計算し、面的分布で示したものである。現在は北海道から東北、北陸までの全道県で公開している。屋根雪に関連した事故においては家屋の倒壊や雪下ろし中の転落事故のほか、屋根からの落雪による埋没による事故なども多数見られている。SNOWPACKでは様々な積雪情報が出力されるが、現行の雪おろシグナルで発信している積雪重量の情報では、落雪の危険度を推定することは難しい。そこで本研究では、雪おろシグナルにおける積雪重量以外の計算結果と新聞記事から収集した落雪事故との比較を行い、落雪事故時における積雪の計算結果から落雪危険性の推定が可能となるか検討を行った。

2. 研究方法

防災科研では、新聞やネット記事等から雪害事故に関する情報を記録し、雪氷災害データベースとしてまとめている。本研究では、それらのうち落雪の事故に関する情報を抽出してまとめた。記事に記載されている市町村地域や発見の日時の情報から、その発生地点から最も近い雪おろシグナルの計算地点を積雪荷重計算サイトから確認し、SNOWPACKの計算結果から雪質、含水率、積雪安定度、気温、降雨量、底面流出量の時系列グラフを落雪事故ごとに作成した。

3. 結果

一例として、2022年12月24日に山形県長井市で起きた落雪事故時における積雪の計算結果を示す(図1)。アメダス長井における計算結果によると、23日夜に多くの雪が積もり、厚い新雪層ができた後に、24日午後に気温上昇とともに降雨がありその時期に落雪した。この時、積雪上部が含水してざらめ雪に変質している。2022/23年度はこのようなRain-on-Snowによる落雪が6件みられたが、特に2022年12月の大雪の後に見られたケースが多かった。その後、北海道を中心に落雪が多く見られたが、SNOWPACKの計算によると、落雪事故の半数以上は全層が乾雪の時に起きていた。

4. 危険度推定にむけて

ここでは、雪質の影響がでやすい湿雪型の落雪をターゲットとして落雪危険度推定のためのモデル構築を試みた。湿雪による落雪に関連するパラメータとして、気温、降雨量、底面流出量、積雪深を時系列データとして取り出し、またSNOWPACKから出力される積雪層の情報から平均含水率、湿

雪の厚さ、新雪の厚さの時系列データに変換して、落雪に関連する説明変数のデータセットとして作成した。また、落雪事故の発見時の12時間前までを安全、そこから発見時までを危険という基準で目的変数を与え、機械学習を用いて落雪危険度を推定する手法を構築する。今回は、そのとりかかりとして、シンプルな決定木を作成した(図2)。その結果、湿雪の厚さ、積雪深、流出量、新雪の厚さ、気温が分岐のパラメータとなり、図1のような降雪後のRain-on-Snowによる落雪に限定した場合は8割以上の的中率で危険の判別ができた。ただし、落雪は様々な条件下でおこるため、それらにも対応していくにはより高度な機械学習手法や降水分布の情報を利用する等、推定方法の改良が必要である。本研究は新潟大学災害・復興科学研究所一般共同研究2022-4で行われた。

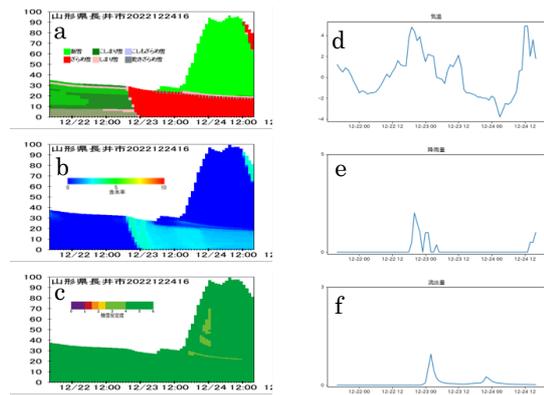


図1 落雪事故発生時における積雪や気象条件の変化。

a: 雪質、b: 含水率、c: 積雪安定度、d: 気温、e: 降雨量、f: 底面流出量

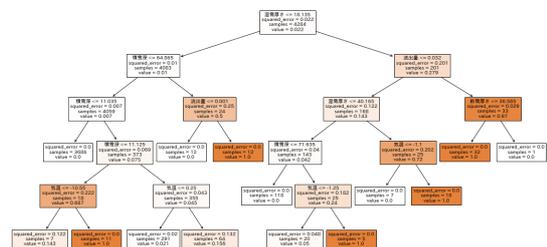


図2 決定木による安全危険判定基準の例
文献

Hirashima, H., Iyobe, T., Kawashima, K., Sano, H. (2020): Development of a Snow Load Alert System, “YukioroSignal” for Aiding Roof Snow Removal Decisions in Snowy Areas in Japan, J. Disaster Res., Vol.15, No.6, pp. 688-697.

伊豫部 勉、河島 克久(2020): 準リアルタイム積分布監視システムの開発, 日本雪工学会誌, 36, 1-13.

東南極沿岸域における年間涵養量変化の実態解明に関わる集中観測

岡田拓己¹・杉浦幸之助¹・栗田直幸²

(1:富山大学 2:名古屋大学)

1. はじめに

地球温暖化が進行する中で南極氷床がその質量を減らし、海水準の上昇をもたらすとされている。最新の IPCC の特別報告書(Meredith et al., 2019)では 1990 年代から南極氷床全体としての質量が減り始め、現在に向かって減少が続いているとしている。しかしながら、東南極のみに注目するとむしろその質量は増加しており、GRACE による衛星観測(Boening et al., 2012)からも東南極における質量の増加が確認されている。質量増加に関する現地観測は日本の南極観測隊が 1990 年代から行っている雪尺観測(本山, 2017)がある。この観測では積雪深の増加傾向が得られており、実測データとしては東南極の西部域における唯一のデータとなっている。地球温暖化の影響が南極にも現れている中で現地観測を行い、定量的な理解に向けたデータを得ることは現在の南極の質量増加の要因を知る上で重要である。

そこで本研究では、東南極の西部域に位置する H15 地点及び H128 地点にて積雪断面観測を集中的に実施し、質量増加に関連する積雪物理量データを得たので報告する。

2. 観測方法

第 64 次南極地域観測隊における一般研究観測「氷床中の宇宙線生成核種を使った太陽粒子嵐の定量評価」に同行し、大陸氷床沿岸の H15 地点と H128 地点の 2 地点にて観測を行った。2022 年 12 月に H15 地点、2023 年 1 月に H128 地点にて深度約 3 m の積雪ピットを手掘り掘削し、積雪断面観測を実施した。観測項目は、雪温、積雪密度、積雪層位、積雪粒子の接写である。なお、H15 地点では観測途中でブリザードにより積雪ピットが雪で埋もれてしまったため、積雪密度、積雪粒子の接写は深度約 1.5m までの観測となった。

3. 観測結果

雪温は H15 地点、H128 地点の 2 地点とも深度が深くなるにつれ温度が下がる結果となった(図 1)。表面付近は下層(深度 3.0m)と比べると 10°C から 15°C 程度高い雪温となった。また H15 地点では深度約 1.5 m の地点で雪温が上昇した地点があった。積雪密度は H15 地点、H128 地点ともに約 350 kg m⁻³ から 500 kg m⁻³ までの値をとっていた。また深度が増すにつれ密度が大きくなる傾向があった。積雪層位の目視観測では H15 地点、H128 地点で厚さ 1.0~3.0 mm 程度の氷板とみられる層が多数存在していた。また H128 地点の積雪層では特定の雪質を持つ層が交互に堆積していた。

4. 考察と課題

表面付近の雪温に関しては気温の日変化の影響を受けていると考えられ、測定時の気温が反映されている可能性がある。また H15 地点における深度約 1.5m の雪温は周囲よりも温度が高い結果となっていたが、これは雪温測定時に温度計が硬い雪面にすべて入らなかったために正確な雪温ではない可能性がある。

今後は、再解析データが示す気温や降雪量の季節変化と比較しながら、積雪層内の氷板の形成位置を目印にして、年間どれくらい堆積したのか、また積雪密度データを用いて年間の涵養量はどれくらいなのかを推定していく予定である。

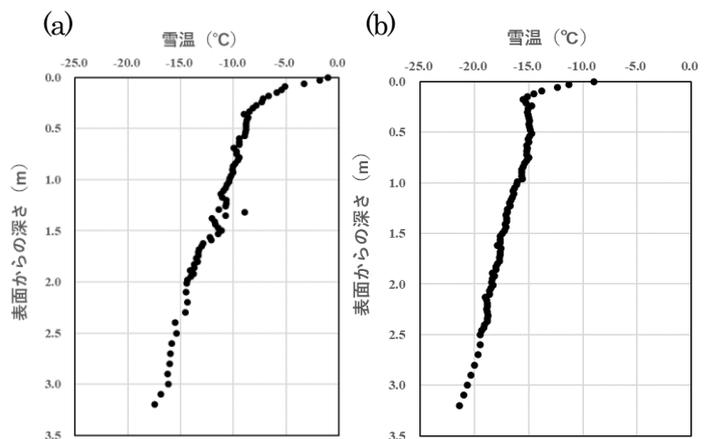


図1 積雪断面観測による雪温の鉛直プロファイル。(a)H15 地点、(b)H128 地点。

文献

- Boening, C., Lebsack, M., Landerer, F. and Stephens, G. (2012): Snowfall-driven mass change on the East Antarctic ice sheet. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L21501, doi:10.1029/2012GL053316.
- Meredith, M and 12 others. (2019): Polar Regions. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., N.M. Weyer. eds, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 203-320. doi:10.1017/9781009157964.005.
- 本山秀明(2017):雪尺観測から見える氷床表面質量収支の変動. 気象研究ノート, **233**, 日本気象協会, 193-204.

白山・千蛇ヶ池雪渓における3夏期間の雪面熱収支特性について

小川弘司¹・岩佐海杜²・藤原洋一¹

(1:石川県立大学生物資源環境学部 2:三重県庁四日市建設事務所)

1. はじめに

石川県と岐阜県の県境にまたがる白山にある、多年性の千蛇ヶ池雪渓(図1)を対象として、雪渓の雪面低下量計測と気象観測を2017年から2019年の3夏期間にわたって行った。夏期における雪面熱収支特性を明らかにするとともに、雪渓の融雪過程と気象との関係について分析し、気象条件や熱収支特性が雪渓の雪面低下量の年変化にどのような影響を与えているのかを検証した(小川ら, 2023)。

2. 結果

雪面低下量の計測は、8月10日前後に1回目、10月10日前後に2回目の計測を行い、両者の差を雪面低下量とした。各年雪面低下量は、2018年が6.8m、2019年が6.9mとほぼ同程度となり、2017年が4.2mで最も小さかった。

3夏期間における雪渓表面の熱収支項の平均値は、純放射量 447 W m^{-2} (短波放射量 309 W m^{-2} , 長波放射量 138 W m^{-2}), 顕熱輸送量 140 W m^{-2} , 潜熱輸送量 180 W m^{-2} , 降雨熱輸送量 39 W m^{-2} であった。融雪熱量から推定した雪面低下量は、2017年が4.3m、2018年が6.6m、2019年が7.0mとなり、実測した雪面低下量との誤差は $-0.2 \sim +0.1 \text{ m}$ の範囲に収まった。

夏期期間中の雪面低下量と積算雨量、強風日の日数などとの間には強い関係が見られたことから、推定した雪面低下量と雨量、風速の推移を日単位で見た(図2)。これを見ると、降雨日や風速の強い日には雪面低下量が大きく、無降雨日や風速の弱い日の雪面低下量は小さいことがわかった。

3. 考察

雪面低下がどのように進行するかを知るため、年ごとの日雪面低下量の累積値を図3に示す。各年において累積値が最もジャンプしている日をa, b, cで示しており、これらは図2のa, b, cと一致し、各年で最も雪面低下量が大きい日であり、降雨や風速の激しい悪天候イベントが発生している日である。仮に2019年のイベントcが生起していなかった場合は、2019年の雪面低下量は2018年より小さくなっていたと考えられる。つまり、年ごとの雪面低下量は、悪天候イベントの発生頻度と規模次第で、違いが生じることを示唆している。この悪天候イベント時の融雪熱量は潜熱輸送量、顕熱輸送量が大きく、次いで正味長波放射量となっている。

期間中の降雨時と無降雨時の割合は無降雨時の割合の方が大きく、無降雨時が71.2~76.7%を占めており(降雨時23.3~28.8%), 無降雨時の融雪熱量が大きいことには変わりはなく、無降雨時の融雪熱量の大きな割合を占めているのは、正味短波放射量である。



図1 千蛇ヶ池雪渓

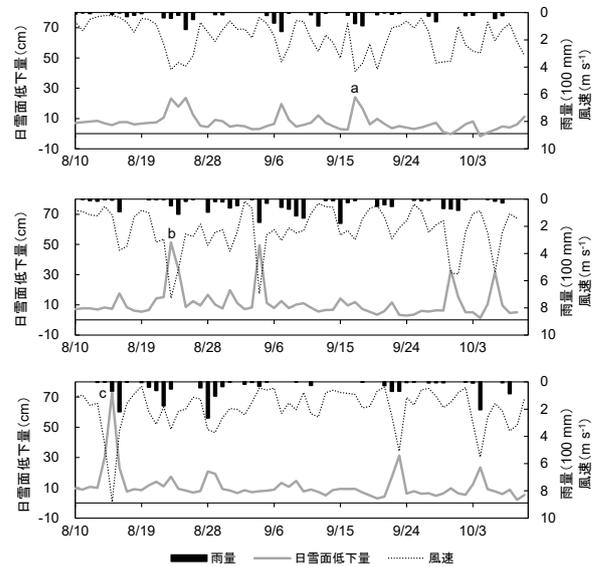


図2 日ごとの雪面低下量の推移

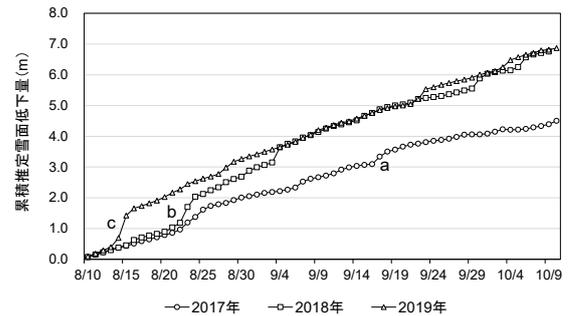


図3 累積推定雪面低下量の推移

すなわち、年ごとの雪面低下量への寄与が高い融雪熱量は、いずれの年でも正味短波放射量であるが、年ごとの悪天候イベントの発生頻度と規模次第で特に潜熱輸送量が大きく変動し、年ごとの雪面低下量に違いが生じるといえる。

文献

小川弘司ほか2名(2023):白山・千蛇ヶ池雪渓における3夏期間の雪面熱収支特性。雪氷, 85(2), 115-131.

立山連峰における地表面温度の分布

—山岳永久凍土分布の推定—

前田知秀¹・杉浦幸之助²・福井幸太郎³

(1:富山大学理工学研究科 2:富山大学学術研究部 3:富山県立山カルデラ砂防博物館)

1. はじめに

永久凍土は「連続した2年間以上0°C以下の温度状態にある土地」と定義され、シベリアやアラスカなどの高緯度地域や標高の高い山岳地域など北半球陸域に広く分布している。日本は全球的な永久凍土分布の南限に位置し、富士山(藤井・樋口, 1972)や大雪山(福田・木下, 1974)、立山(福井・岩田, 2000)の限られた場所で山岳永久凍土の存在が報告がされている。このうち立山では2000年に内蔵助カール内に存在するプロテラスランパートで永久凍土が発見されている。北アルプスは気温条件的にも永久凍土が分布可能であり、中部山岳域における永久凍土下限高度は2500~2800mとされている(柳町, 1992)。そのため立山では内蔵助カール以外にも点的に山岳永久凍土が現存する可能性が考えられる。しかし、立山における近年の永久凍土の分布や維持環境は長らく調査が行われていないため、その実態は明らかではない。しかし、将来の気候予測情報による永久凍土維持環境の推定では、北アルプスは将来的に永久凍土領域が消失してしまうと報告されている(Yokohata et al., 2022)。そこで本研究では、現時点で永久凍土が現存すると考えられている立山連峰地域を対象に、過去の観測との比較や山岳永久凍土の分布を明らかにすることを目的とし、約1年間の地表面温度及び内蔵助カール内に存在する永久凍土の地温プロファイルを観測したので報告する。

2. 観測方法

本研究対象は、北アルプスに位置する立山連峰の立山および薬師岳地域である。森林限界は標高2500~2600m付近にあり、森林限界を越える地域では植生に乏しい岩塊地・岩屑斜面、岸壁が占めており、植生はわずかにハイマツや高山植物が点在するのみである。

点的に山岳永久凍土が現存していると考えられる立山連峰のなかで、尾根沿いやカール内にて地表面温度観測を実施した。小型温度計を2021年に立山山域で24箇所に設置し、1時間毎に地表面温度が記録されている。また、山岳永久凍土の存在が報告されている内蔵助カールでは2021年9月末の掘削時に、0.2m, 0.5m, 1.0m, 1.4m, 1.6m, 2.0m深に温度計が設置され、各深度の地温が通年で記録されている。これらの温度計を2022年の9~10月にかけて回収・交換し、約1年分の観測データを取得した。

3. 観測結果

地表面温度観測から冬季に温度の日変化が顕著な地点と顕著でない地点に分かれた。これは積雪の有無によるものである。また、消雪の時期にも違いが見られ、年間を通して地温にほとんど変化が見られず低温を保っている地点もあった。内蔵助カールでの地温観測では2021年11月前半に全層凍結し、2022年4月後半まで地温の低下が見られた。その後、9月前半から融解が進み、9月後半には2m深まで融解が進んだ。2000年から2002年にかけて行われた地温観測(福井, 2004)と比較すると、今回回収されたデータは高い地温を記録していた。

4. 考察

永久凍土分布を推定するため、地表面温度観測データから冬季積雪底地表面温度(BTS)、年平均地表面温度(MAST)を求めた。この手法を用いることのできた18地点のうち、内蔵助カールと浄土山の東側に位置するカールではBTSとMASTが共に低い値を記録した。これらのカール中には永久凍土が存在する可能性が高いことが推定された。

地表面温度観測および内蔵助カール内永久凍土での地温観測データは約1年分であり、今後もデータを継続的に取得予定である。

文献

- 福田正己, 木下誠一(1974):大雪山の永久凍土と気候環境(大雪山の事例とシベリア・アラスカ・カナダとの比較を中心としての若干の考察). 第四紀研究, **121**, 92-202.
- 藤井理行, 樋口敬二(1972):富士山の永久凍土. 雪氷, **34**, 173-186.
- 福井幸太郎(2004):立山での山岳永久凍土の形成維持機構. 雪氷, **66**, 187-195.
- 福井幸太郎, 岩田修二(2000):立山, 内蔵助カールでの永久凍土の発見. 雪氷, **62**, 23-28.
- 柳町治(1992):現在の日本における周氷河帯およびその推移帯と永久凍土帯との関係. 地理学評論, **65A**, 143-157.
- Yokohata, T., Iwahana, G., Saito, K., Ishizaki, N.N., Matsushita, T. and Sueyoshi, T. (2022): Assessing and projecting surface air temperature conditions required to sustain permafrost in Japan. *Prog Earth Planet Sci*, **9**, 39.

メッシュ平年値が示す日本の積雪地域の雪質の変化 —2000年と2020年の比較から—

石坂雅昭¹・本吉弘岐²・杉浦幸之助³
(1: 防災科研客員 2: 防災科研 3: 富山大学)

1. はじめに

筆者の一人石坂（1995）は1990年のメッシュ平年値を用いて日本の積雪地域の雪質分布図を作成し、その後2000年の平年値（気象庁，2002）に基づき「しもざらめ雪地域」に「準しもざらめ雪地域」を設け同地域を二つに分ける改定を行った（石坂，2002）。一方，平年値は10年毎に改定され，それに合わせてメッシュ平年値も2010年，2020年と発表され，現在2020年のものが最新である（気象庁，2022）。そこで，ここでは最新の2020年と2000年のメッシュ平年値から得られる雪質分布からその変化の傾向を探ることとする。

2. メッシュ平年値の比較にあたって

両者の比較にあたって大きく二つの問題がある。一つは2000年メッシュでは，積雪の推定は西南日本を含む広い範囲であったが，2010年以降精度の関係で西南日本は除かれることになったこと，もう一つは2000年では日本測地系でメッシュ領域が設定されていたのに対して2010年以降は世界測地系に変わったことである。前者については，ここでの雪質推定の対象地域を2010年や2020年で限定されている西南日本を除いた地域とした。ただ，そうするとこれまで西南日本に広がっていた「非積雪地域（最深積雪10cm未満）」の多くはこの対象範囲に入らないので，対象地域の中での「非積雪地域」を改めて抽出した。

後者については，世界測地系と日本測地系の違いは400から450m，すなわち1メッシュがおおよそ1km四方なので約1/2メッシュしか変わらないことを考慮して同一メッシュとして扱うことにした。ただ，両測地系によるメッシュ領域のズレによって陸地が海や湖となり積雪の値が計算されていないメッシュが生じているので，当然それらは対象地域から除外した。結果，対象領域は271995メッシュとなった。

3. 2000年と2020年の雪質分布

図1に2000年および2020年の雪質分布図と各雪質

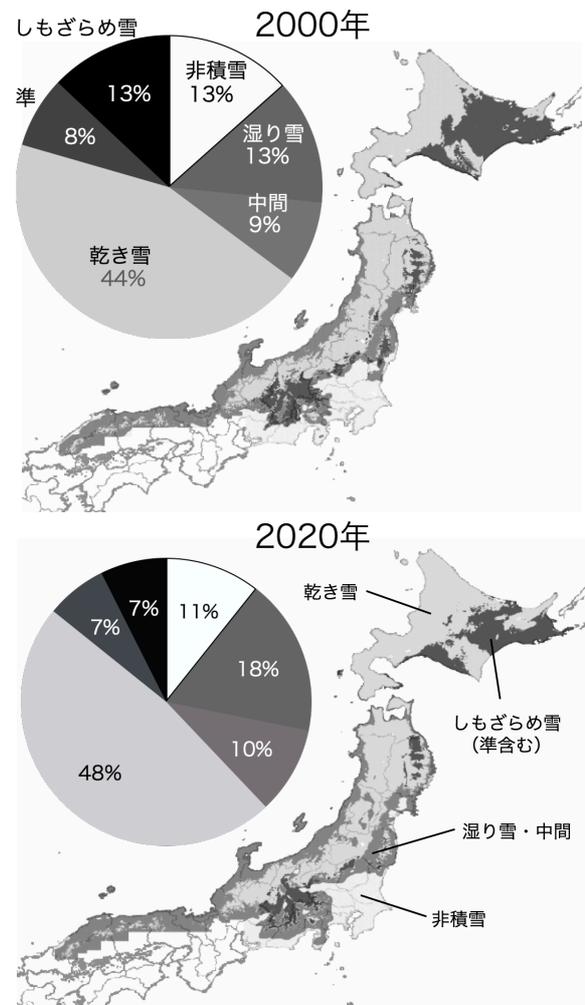


図1 メッシュ平年値から推定した雪質分布とメッシュ数の割合。上，2000年，下，2020年。

の割合（メッシュ数）を示す。白黒表示を考慮して「湿り雪地域」と「中間地域」，「しもざらめ雪地域」と「準しもざらめ雪地域」を同じ色合いで表示している。分布図からわかる大きな変化は北海道東の「しもざらめ雪地域」の減少である。また円グラフからは「湿り雪地域」の増加傾向がわかる。

4. 「湿り雪地域」の増加について

「湿り雪地域」は気温によってのみ規定されているので，その増加は2020年の平年値が2000年に比べ

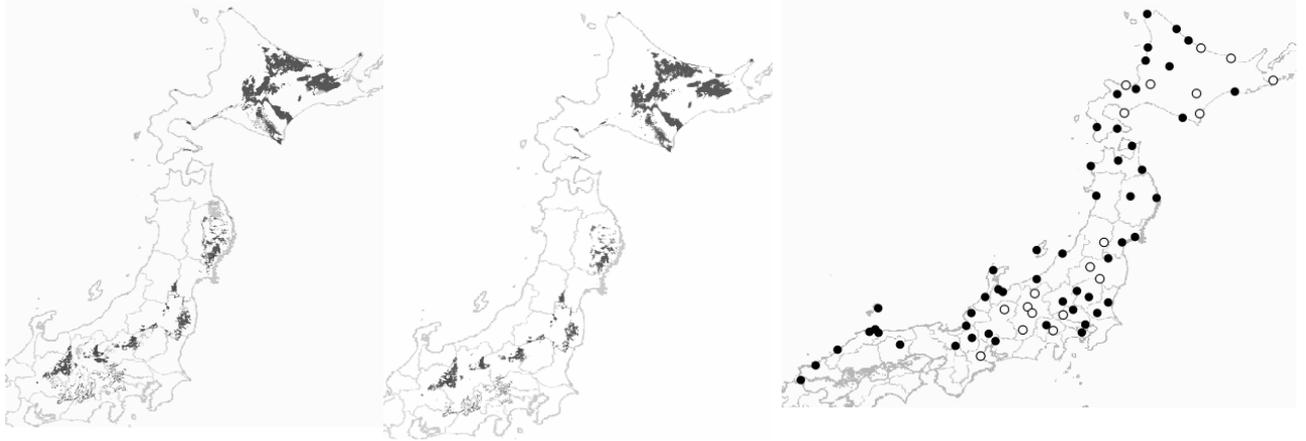


図2 (左) しもぎらめ雪地域の減少地域(黒色)と増加地域(灰色)。(中央)減少地域のうち積雪が増加した地域。(右)主な気象官署における積雪の増減。2000年に比べ増は白丸,減は黒丸。

高いことによる。ちなみに対象総メッシュの1,2月の平均気温は2000年の -3.1°C に対して2020年では -2.5°C と 0.6°C 高い。気象庁の観測点の高田でも2000年の 2.15°C が2020年では 2.6°C と 0.45°C 高くなった。気温の傾向は積雪のような極端な地域差がなくほぼ全メッシュに共通する傾向と考えられるので、「湿り雪地域」は気温の上昇にともなってより高緯度、そして内陸の高標高域へ広がったと推定される。例えば富山県でも「湿り雪地域」の平均標高は2000年の 90.7m に対して2020年では 106.2m と上がっている。

5. 「しもぎらめ雪地域」の減少について

図2(左)には2000年と2020年と比較した「しもぎらめ雪地域」(準しもぎらめ雪地域も含む)の増減を示した(増:灰色,減:黒)。圧倒的に黒色の減少地域が多い。「しもぎらめ雪地域」は主に1,2月の積雪の温度勾配の絶対値(1,2月の月平均気温を同期間の月最深積雪の平均で除した値;以下単に温度勾配)に左右され、温度勾配が大きいほど同地域になりやすい。気温については先に述べたように2000年と2020年ではほぼ全国的に 0.5°C 前後後者が高い。気温がマイナスの地域が対象なので絶対値は小さくなる。すなわち温度勾配を減少させる要因となっているが、温度の上昇が積雪の減少に働けば、逆に温度勾配を大きくする方向に働き、気温上昇の影響を消し去ることも考えられる。そこで積雪の影響を調べた(図2中央)。2000年における「しもぎらめ雪地域」や「準しもぎらめ雪地域」が2020年での別の区分に変わったケースを見ると、ほとんどは「乾き雪地域」への移行なので、それらの地域での

積雪の増減を見ると、95%が積雪が増えた地域であった。したがって図2(左)の「しもぎらめ雪地域」の減少領域と積雪増の地域はほとんど重なっている。すなわち2020年での「しもぎらめ雪地域」の減少は、気温の上昇に加え積雪の増加という温度勾配を小さくする要因が重なった結果といえる。図2(右)に主な気象官署における積雪の平年値の2000年と2020年との比較での増減を示したが、北海道東、福島、中部地方内陸部での積雪の増加が見てとれ、メッシュ平年値の結果と整合的である。

6. 終わりに

10年毎に改定される平年値は、そのたびに新たに加わった10年と切り落とされる10年があり、それらがより特徴的な10年であれば、その影響が強く出る。したがって平年値から得られる傾向がそのまま現在の傾向とは言えず常に過去の影響を引きずっていることに留意する必要がある。さらにメッシュ平年値の積雪については大きな誤差を含んでいることを前提に公表されている。特に観測点の少ない高標高域でのメッシュ・積雪の誤差は大きいことが予想され、そこでの積雪を用いる「しもぎらめ雪地域」の推定には課題が残る。

文献

- 石坂雅昭(1995):メッシュ気候値から推定した日本の雪質分布. 雪氷, 57, 23-34.
- 石坂雅昭(2008):「しもぎらめ雪地域」の気候条件の再検討による日本の積雪地域の質的特徴を表す新しい気候図. 雪氷, 70, 3-13.
- 気象庁(2002):メッシュ気候値2000. CD-ROM.
- 気象庁(2022):メッシュ平年値2010. CD-ROM.

令和4年度 滑雪テープ屋外試験結果報告 一条件の違いによる滑雪テープの性状について

佐藤 彰¹・原 敏彦²

(1:日本サミコン株式会社 2:(株)飯田コンサルタント)

1. 初めに

積雪が多い地域の道路では、冬季に道路の路面上部の施設へ堆積した雪が融雪に伴い路面上に落下し、通行車両の安全な走行を脅かす事例が報告されており、これらの施設からの落雪対策が求められている。本報文は、落雪対策として考案された滑雪テープによる早期の落雪が、滑雪テープを貼付するカバーの素材・形状によりどのような差があるか、屋外試験により確認したので報告する。

2. 試験の概要

滑雪という現象は、着雪する素材、滑雪面の角度、温度、湿度、平滑性など様々な要素の影響を受けることが考えられる。今回は6種類の試験体を製作して屋外試験に供し、現橋への適用効果を比較検討した。

2.1 滑雪テープの機能

今回の屋外試験適用した滑雪テープは、NETIS KK-220009-A に登録されている材料で、構造物に貼付することで着氷雪を防ぐことを目的として開発された、下記の性能をもった素材であった。

- (1)湿雪 20gが、0℃で、傾斜 60 度で一時間以内に滑雪する。
- (2)着雪防止性能 0.5N/cm² 以下(-20℃)
- (3)全光透過率 90%以上
- (4)耐久性能 4 年間

2.2 試験体

(1)試験体の種別

試験に供した試験体は下記の種別のものである。

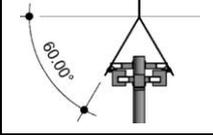
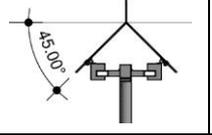
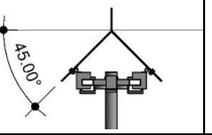
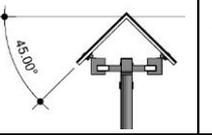
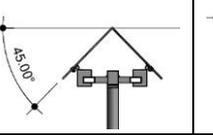
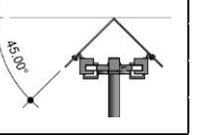
①	②	③	④	⑤	⑥
滑雪テープ貼付	滑雪テープ貼付	滑雪テープ貼付	滑雪テープなし	滑雪テープ貼付	滑雪テープ貼付
					
①下地：ポリカ、②傾斜角：60度、③留金具：低頭ボルト、④雪割付与	①下地：SUS、②傾斜角：45度、③留金具：低頭ボルト、④雪割付与	①下地：ポリカ、②傾斜角：45度、③留金具：低頭ボルト、④雪割付与	①下地：SUS、②傾斜角：45度、③留金具：低頭ボルト、④雪割なし	①下地：ポリカ、②傾斜角：45度、③留金具：低頭ボルト、④雪割なし	①下地：ポリカ、②傾斜角：45度、③留金具：普通ボルト、④雪割なし
目的：角度の影響を確認する	目的：滑雪テープを貼る素材による違いを確認する ③との比較	目的：②との比較	目的：滑雪テープがない場合の確認	目的：雪割有無による違いを確認する、②との比較	目的：表面突出大の普通ボルトと低頭ボルトの違いを確認する、⑤との比較

図.1 試験体区分

(2)測項目

計測期間中の

- 1)10 分毎の積雪状況
監視カメラ「Hyke Works」による 10 分間隔連続写真撮影。
- 2)②と③の表面温度
表面温度測定器によった。

(3)屋外試験場

屋外試験場は、想定している豪雪を考慮して下記の場所とした。

長野県下水内郡栄村大字堺 9231 番地 旧志久見分校校庭

(4)試験期間

令和4年12月15日～令和5年3月31日

3. 試験結果

3.1 試験期間中の降雪状況

試験期間中の試験場に直近の気象観測データがある野沢温泉村における、最深積雪深、降水量、降雪量合計を下表に示す。

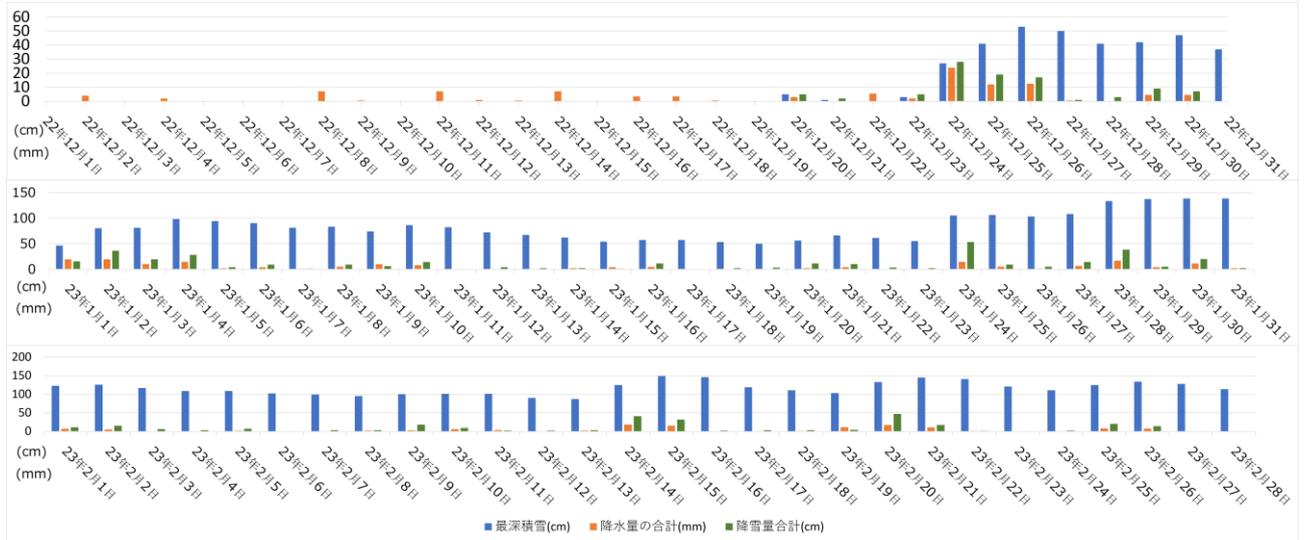


図2 降雪・積雪状況

3.2 評価方法

屋外試験において10分間隔で撮影された写真から、全ての試験体は下記のパターンで積雪と落雪を繰り返した。

降雪開始→②積雪→③落雪・積雪→④降雪終了→⑤落雪

試験体 No2 に着目した上記の②～⑤の写真を示す。

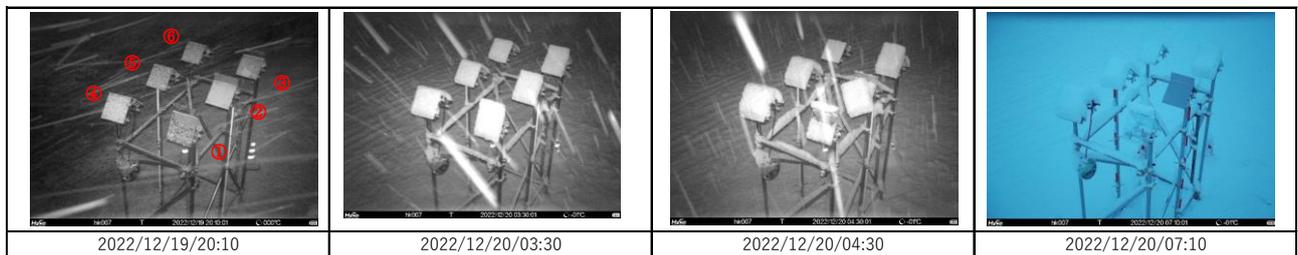


図3 積雪・降雪・滑雪状況

試験は、冬季にしばしば出現する強さの冬型の気象での降雪(①)と、年に1回程度出現する極めて強い冬型の気象での降雪(②)の下記の2期間について、試験体のテーブルから積雪した雪が滑り落ちた回数と形態を観測した。

① 2022年12月24日～26日

② 2023年1月27日～28日

3.3 試験結果

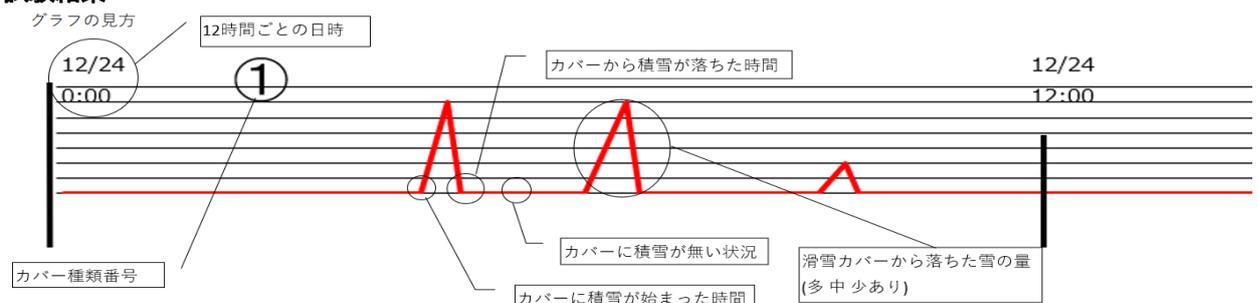


図4 結果図 凡例

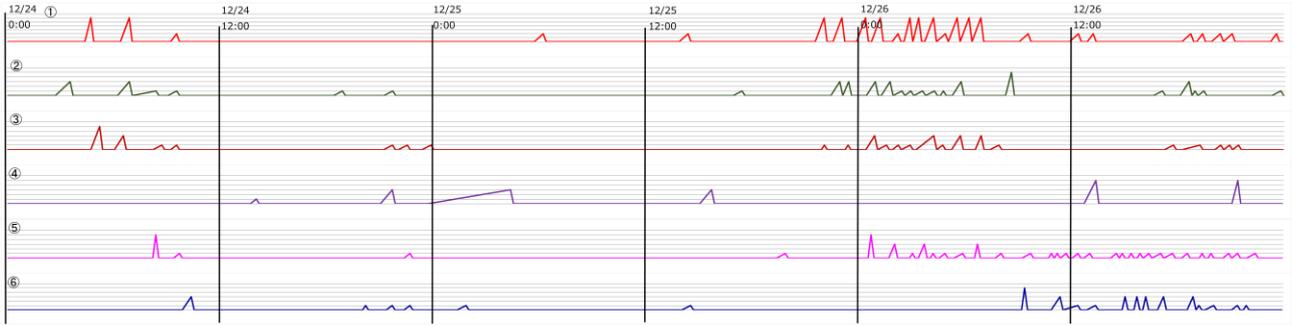


図.5 2022年12月24日～25日



図.6 2023年1月27日～28日

		①	②	③	④	⑤	⑥
形状							
区分		①下地：ポリカ、②傾斜角：60度、③留金具：低頭ボルト、④雪割付与	①下地：SUS、②傾斜角：45度、③留金具：低頭ボルト、④雪割付与	①下地：ポリカ、②傾斜角：45度、③留金具：低頭ボルト、④雪割付与	①下地：SUS、②傾斜角：45度、③留金具：低頭ボルト、④雪割なし、⑤滑雪シート添付無	①下地：ポリカ、②傾斜角：45度、③留金具：低頭ボルト、④雪割なし	①下地：ポリカ、②傾斜角：45度、③留金具：普通ボルト、④雪割なし
2022年12月6日	落雪回数	大：12 中：0 小：13 合計：25	大：1 中：8 小：14 合計：23	大：1 中：5 小：17 合計：23	大：2 中：3 小：1 合計：6	大：2 中：3 小：27 合計：32	大：1 中：7 小：11 合計：19
	落雪形態	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り
2023年1月8日	落雪回数	大：2 中：1 小：0 合計：3	大：1 中：0 小：0 合計：1	大：0 中：4 小：0 合計：4	大：1 中：0 小：0 合計：1	大：1 中：0 小：0 合計：1	大：1 中：0 小：0 合計：1
	落雪形態	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り	テープ面滑り 雪自重のせん断滑り

図.7 試験結果

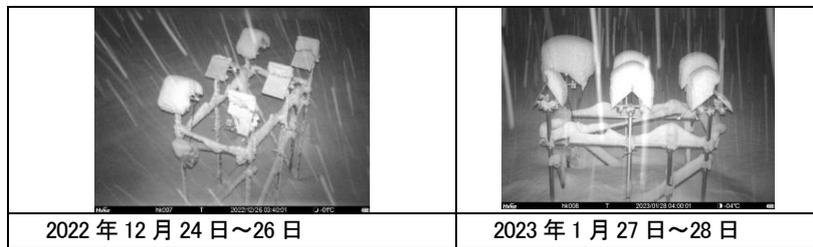


図.8 最大積雪の状況

4. 試験体の評価・考察

今回観測を行った2つの期間では、降雪量、外気温、降雪量、カバーへの積雪状況、落雪状況に大きな違いがあったので、2回の試験結果は最初に個別に評価し、それに基づいた全体的な評価を行うことにする。④の試験体はステンレス板の表面をもった対策無しの試験体として評価する。

4.1 2022年12月24日～26日

この期間の降雪に対して、カバーからの落雪回数の多さで評価した順位は下記のようにであった。

⑤>①>②③>⑥>④

この結果から下記のことが認められる。

- ・ 滑雪テープはカバー上に雪を貯めない明らかな効果があること。
- ・ シート下地の素材が、金属（ステンレス）とポリカーボネートとの明確な差異はみとめられない。
- ・ 低頭ボルトは普通ボルトに較べて滑雪に寄与している。
- ・ 雪割の滑雪への効果は不明である。

4.2 2023年1月27日～28日

上記と同様にカバーからの落雪回数の多さで評価した結果は下記のようにであった。

①>③>②④⑤⑥

強い寒波に伴う低温下での強い降雪に対して、明らかな効果を示した試験体は①と③のみで（屋根角度45度-ポリカーボネート）、その他の試験体間で、滑雪テープの下地の素材、ボルト頭の突出、雪割の有無による差異は認められなかった。

4.3 全体的な評価

今回の試験結果に基づいて考えられる滑雪シート及びカバーの評価は下記のようなものである。

- (1) 滑雪テープはカバー上に雪を貯めない明らかな効果がある。
- (2) 滑雪カバーの落雪角度は出来るだけ大きいことが望ましい。
- (3) 滑雪面は出来るだけ平滑なことが望ましい。取付金具として低頭ボルトを用いれば平滑の条件はクリアできる。
- (4) 低温下での強い降雪に対しては、どのようなカバーでもある程度の着雪は避けられない。

4.4 今後の課題

今回の試験では、落雪の評価は単に落雪回数で行ったが、1月27日～28日のような降雪の状態、落雪がどのように生じているかを理解することは大変重要なことである。下の写真は、試験体①の落雪前後の様子を示している。積もった雪の重量によるカバー方向の分力が、カバー面の摩擦力を上回った時点で滑りにより落雪していることが分かる。積雪により雪の重心が上がることによる回転モーメントも滑雪に作用していることが考えられる。

(1) 雪割の影響

上記を踏まえると雪割の存在が落雪に影響していることが考えられる。今回の試験では雪割部に滑雪テープを添付していないので、風による吹付で雪割に付着した雪が、カバー全体に積雪を広げているような状況も見られていた。雪割に着雪しない状況での滑雪を確認する必要がある。

(2) 下地の表面温度の影響

今回の試験では、①と②の試験体で下地がポリカーボネートとステンレスで表面温度の測定を行った。詳細は紙面の都合で割愛するが、日光が当たると表面温度はポリカの方がステンレスよりかなり高くなっていた。この違いが②と③の滑雪に影響している可能性があるため滑雪に関する温度の影響を確認したい。



図.9 ①試験体落雪の状況

2022/23 年冬期に新潟県内で発生した大雪による倒木被害における冠雪状況の解析

勝島隆史¹・大島信子²・塚原雅美³・田中樹己³・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 2: 新潟県農林水産部林政課 3: 新潟県森林研究所)

1. はじめに

2022年12月18日から19日および12月23日にかけて発生した大雪により、新潟県佐渡市や柏崎市、村上市を中心とした広い範囲で、冠雪による倒木や倒竹に伴って停電や道路の通行止めが相次いで発生した。これらの地域は新潟県内の他の地域と比較して普段の降雪量は少なく、このような倒木の発生は稀であることが想定される。当日の冠雪の状況や、過去に当地で発生した冠雪現象に対する今回の特異性を明らかにすることは、今後の被害対策に役立つと考えられる。本研究では、冠雪モデルを用いて当日の冠雪量を推定し、冠雪量の極値統計解析の結果と比較した。

2. 研究方法

気象データから樹木に生じる冠雪量を推定する冠雪モデル(Katsushima et al., in discussion)を用いて、当時の冠雪量の時間変化や分布を推定した。このモデルは、新潟県十日町市での4冬期のスギの冠雪量の測定結果から、冠雪量の時間変化と気象条件との関係を解析することで開発したパラメタリゼーションモデルである。本研究では、モデルの入力値として、気象庁MSMによる気温、風速、降水量、日射量の計算値を使用した。MSMの3時間毎に行われる計算の初期値と、その後の予報値を連ねて1時間データを作成し、これを入力値とした。また、気象庁DSJRA-55(Kayaba et al., 2016)を入力値として過去55年間の冠雪量を推定し、各年の最大冠雪量が一般化極値分布に従うと仮定して再現期間に対する確率冠雪量を算出した。

3. 結果と考察

図1に2022年12月17日0時UTCから12月24日23時UTCまでの期間の冠雪量の最大値を、図2に30年確率冠雪量を示した。冠雪量は、単位樹冠投影面積あたりの質量を水当量(mm)として示している。図1より、期間最大冠雪量は佐渡市の小佐渡山地周辺で10~20mm、柏崎市や村上市では20~30mmと推定された。これらの冠雪量は、柏崎市では30年程度、佐渡市や村上市では50年以上の確率冠雪量に相当していた。これらのことから、被害地に現在成育している森林が経験したことがないような再現期間の長い顕著な冠雪現象により、倒木被害が発生したと推定される。

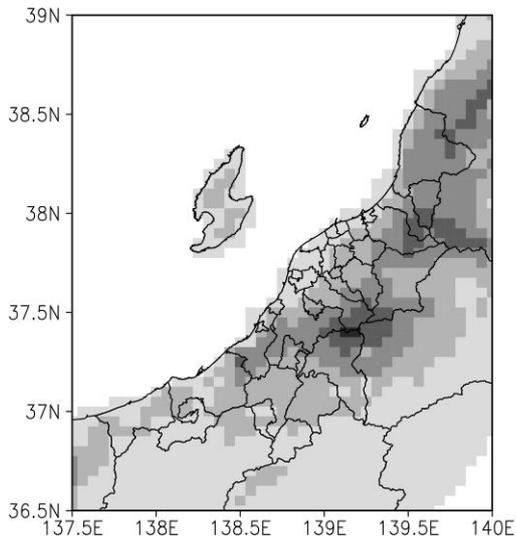


図1 冠雪量(mm)の期間最大値

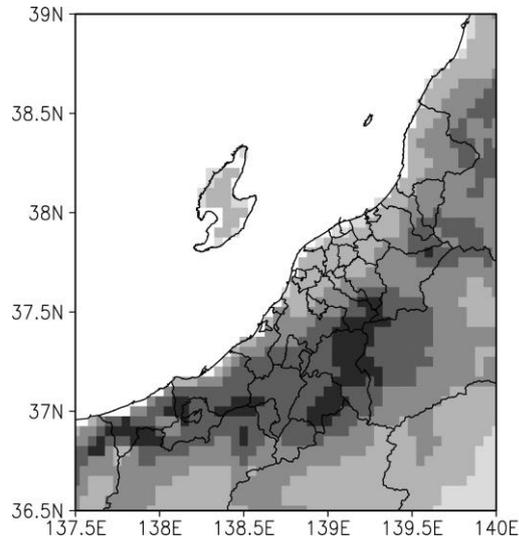


図2 30年確率冠雪量(mm)

文献

- Katsushima, T., Kato, A., Aiura, H., Nanko, K., Suzuki, S., Takeuchi, Y. and Murakami, S. (in discussion): Modeling of snow interception on a Japanese cedar canopy based on weighing tree experiment in a warm winter region. *Hydrol. Proc.*
- Kayaba, N., T. Yamada, S. Hayashi, K. Onogi, S. Kobayashi, K. Yoshimoto, K. Kamiguchi, and K. Yamashita, 2016: Dynamical Regional Downscaling Using the JRA-55 Reanalysis (DSJRA-55). *SOLA*, 12, 1-5.

道路除排雪に対する住民の要望・苦情の内容分析と事前予測

○石川大貴¹・小野寺誠²・上村靖司³・杉原幸信³

(1:長岡技術科学大学大学院 工学研究科 2:長岡技術科学大学 工学部 3:長岡技術科学大学 機械系)

1. はじめに

日本有数の経済都市でありながら、多量の雪が降る札幌市は冬季の経済と市民の生活を支えるために雪対策に大きな予算を費やして、その額は年間200億円にも及ぶ¹⁾。それにもかかわらず、市民からの除雪に対する要望・苦情は毎年1~2万件、雪の多い年にはそれ以上の件数の要望・苦情が寄せられる。本研究ではこれらの寄せられた要望・苦情を分析し、札幌市民が直面している除排雪の困り事への理解を深める。さらに、どのような気象条件でどの程度の要望・苦情が寄せられるのかを事前に予測する手法の開発を目指す。

2. 方法

2.1 内容分析

札幌市に寄せられた要望・苦情を分析する方法として、テキストマイニングを用いた。テキストマイニングとは自然言語解析の一手法で、文章を単語や文節に分割し、それらの出現頻度や相関関係を分析することで有益な情報を抽出することができる。本研究では、テキストマイニングソフトウェアであるKH-coderを用い、単語出現頻度表と共起ネットワーク、から平成26年度から平成28年度の間に札幌市に寄せられた52,622件の要望・苦情を分析した^{2,3)}。

2.2 予測手法

要望・苦情件数を事前に予測する方法として、機械学習による予測を試みる。機械学習は、コンピュータ内でデータを反復的に学習することによってデータの中に潜む特徴や規則性を見つけ出す手法である。本研究で行う機械学習を用いた予測手順を図1に示す。はじめに、学習に用いるデータを収集する。今回は平成26年度から平成28年度の札幌市の気象データ⁴⁾と要望・苦情件数を用いる。気象データと要望・苦情件数の相関係数を求め、要望・苦情件数の増減傾向を分析する。相関が強い気象データを用いて、教師あり学習の一つである重回帰分析を行うことで、要望・苦情件数の予測モデルを構築する。構築したモデルから要望・苦情件数を出し、実際の件数と比較を行い、精度を検証する。



図1 機械学習の流れ。

3. 内容分析結果

3.1 抽出語

3年度分の要望・苦情データにおける単語出現頻度表(上位10単語)を表1に示す。それぞれの年の出現回数が多い語はほぼ共通していることから、毎年同じような要望・苦情が寄せられていると考えられる。詳細な単語を見ると、3年間共通して「家」「前」「間口」「置く」「車」「道路」「ザクザク」といった語が多く出現していることが分かる。このことから、自動車や道路の状況に関する要望・苦情、家の前の除雪に関する要望・苦情が多く寄せられていると推測できる。

3.2 共起ネットワーク

テキストデータ内においてある語と他の語と一緒に出現することを共起といい、共起する語を線で結んだものを共起ネットワークという。共起ネットワークの読み方として、円の大きさは語の出現頻度、円を結ぶ線の太さは関連の強さを示す。似た出現パターンの語は同じ色の円で色分けされる。

札幌市全体における平成26年度から平成28年度の3年度分の要望・苦情の共起ネットワークを図2に示す。図2より、札幌市には自宅前の除雪に関すること、道路状況に関すること、現地確認の要望・苦情、砂箱に関する要望・苦情、交差点や道角の除雪に関する要望・苦情が寄せられていると考えられる。

3.3 月別の要望・苦情分析

図3に外部変数を月とした共起ネットワーク分析の結果を示す。図を見ると、11月、12月、1月、2月、3月というように月に応じてまとまりができていくことがわかる。それぞれの月を詳細に見ていくと、11月の周囲には「砂箱」、「砂」、「補充」が集まっており、砂箱関連の要望・苦情が多い。12月には「間口」、「駐車」、「均等」、「砂」、「砂箱」、「補充」、「処理」が結びついており、家および車庫の間口の除雪や砂箱関連の要望・苦情が多く寄せられたと考えられる。1月は交差点や路面の状態、現地確認の要望・苦情が多く寄せられている。そして、2月や3月になると路面の整正作業に関する要望・苦情が増加することがわかる。これらの結果から、月ごとに要望・苦情内容の傾向は変化することがわかった。また、月によって降雪量や平均気温などの気象条件は大きく変わるため、要望・苦情内容と気象条件には大きな関係があると考えられる。

表1 単語出現頻度表.

平成26年度		平成27年度		平成28年度	
抽出語	出現回数	抽出語	出現回数	抽出語	出現回数
雪	7871	雪	5290	欲しい	7677
欲しい	7592	欲しい	3814	雪	7349
除雪	5116	除雪	3619	除雪	5380
置く	4088	置く	3105	前	3989
前	3576	前	2245	置く	3939
ザクザク	3555	間口	1289	車	3599
車	3198	家	1193	道路	2964
道路	2764	車	1094	ザクザク	2871
間口	2273	雪山	1088	排雪	2183
家	1902	歩道	1068	歩道	2104

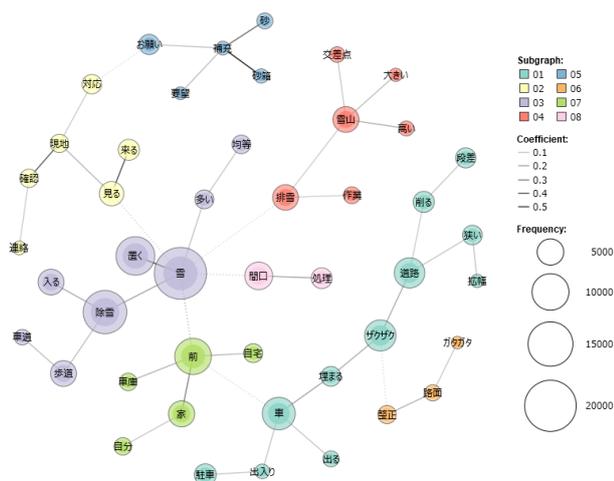


図2 札幌市の要望・苦情の共起ネットワーク.

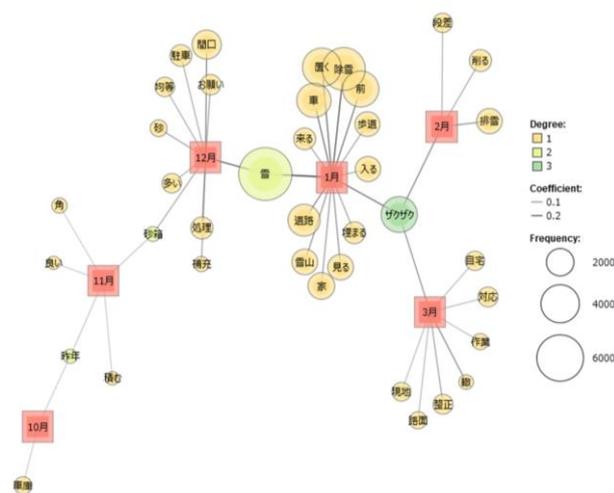


図3 外部変数を月とした共起ネットワーク分析.

4. 要望・苦情件数の予測結果

4.1 特徴量と相関係数

要望・苦情内容と気象条件の関係を踏まえて、札幌市の気象データから要望・苦情件数の予測を行う。予測を行うための特徴量として、札幌市の降雪量、前日降雪量、積雪深、平均気温、最高気温、最低気温、前日平均気温の計7つを使用する。目的変数は、平成26年度から平成28年度の1

日の間に寄せられた要望・苦情件数とする。特徴量と目的変数の相関係数を求めた結果を表2に示す。相関係数の値が大きいほど特徴量と目的変数の間に強い相関があり、予測に有効な特徴量であると判断することができる。表2より、前日降雪量の相関係数が0.5281と最も高く、次いで積雪深の値が高い結果となり、前日降雪量と積雪深の2つの特徴量が要望・苦情件数に大きく影響していることがわかった。いずれの相関係数の値も決して高いとは言えないが、本研究ではこれらの特徴量を使用して予測モデルを作成する。

表2 特徴量と要望・苦情件数との相関係数

No.	特徴量	相関係数
1	降雪量	0.2350
2	前日降雪量	0.4494
3	積雪深	0.5281
4	平均気温	0.3134
5	最高気温	0.2985
6	最低気温	0.3233
7	前日平均気温	0.2999

4.2 要望・苦情件数予測

重回帰分析による予測モデルの作成には、Pythonの機械学習ライブラリscikit-learn⁹⁾を使用する。3.3節に示した7つの特徴量のうち、使用する特徴量を変えて4つの予測モデルを作成した。それぞれの予測モデルに対する決定係数を求めた結果を表3に示す。決定係数は、0から1の間の値をとり、値が大きくなるほど予測値と実測値の誤差が少ない回帰式であることを意味する。表3より、積雪深と前日降雪量の2つの特徴量を用いた予測モデルの決定係数が0.3861と最も高くなったが、他の特徴量を用いた予測モデルとほとんど差はない。この理由の1つとして、使用した特徴量の相関係数がもともと低く、予測に有効な特徴量ではなかったことが考えられる。

また、平成26年度における実際の要望・苦情件数と、特徴量に積雪深と前日降雪量を用いた予測結果との比較を図4に示す。予測の結果、実際の要望・苦情件数の定性的な傾向を再現できていることがわかった。一方で、定量的な予測には改善の余地がある。今回は平成26年度から平成28年度に寄せられた全ての要望・苦情を用いて予測を行った。そのため、適用範囲が広く、1つ1つの要望・苦情に対する強い傾向がつかみにくくなってしまったことから精度も悪くなってしまったと考えられる。要望・苦情の内容と気象条件の関係から、期間を定めて重回帰分析を行うことで有効な特徴量も変化し、精度も向上することが期待できる。

表3 予測結果の決定係数

予測に使用した特徴量	決定係数
積雪深, 前日降雪量	0.3861
積雪深, 前日降雪量, 最低気温	0.3763
積雪深, 前日降雪量, 最低気温, 平均気温	0.3766
全ての特徴量	0.3741

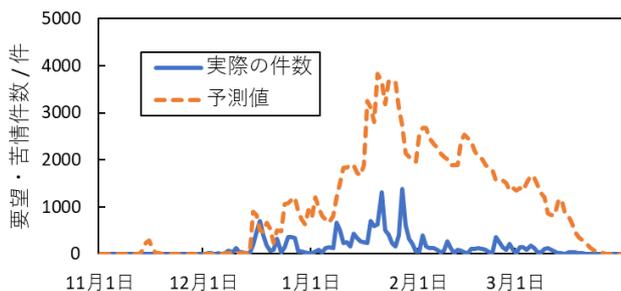


図4 要望・苦情件数の予測結果(平成26年度)

4.3 家の前の除雪に関する要望・苦情件数の予測

予測精度を向上させるために、機械学習の適用範囲を狭めて予測モデルの構築を行う。3.3節において、12月では家の前の除雪に関する要望・苦情が多く寄せられていることがわかった。そこで、使用する特徴量を札幌市の平成26年度から平成28年度の12月の気象データとし、目的変数を同年の12月に寄せられた家の前の除雪に関する要望・苦情件数に限定して予測モデルの構築を行った。

はじめに、特徴量と家の前の除雪に関する要望・苦情件数との相関係数を求める。4.1節で用いた特徴量に加え、平年比積雪深を用いた。平年値は1991-2020年の30年間の観測値の平均をもとに算出しており、平年比積雪深は1日の間の観測値と平年値との比をいう。特徴量と家の前の除雪に関する要望・苦情件数との相関係数を求めた結果、表4に示すように3つの特徴量が家の前の除雪に関する要望・苦情件数と強い相関をもつことが確認できた。使用するデータを12月に限定することで、相関係数の値が大きくなり、予測に有効な特徴量を準備することができた。

表4に示す特徴量を使用して予測モデルを構築し、予測を行った。その結果、予測モデルに対する決定係数は0.5952となり、精度の向上が確認できた。また、実際の家の前の除雪に関する要望・苦情件数と、予測結果との比較を図5に示す。図4と比較すると、定量的な予測に改善が見られ、定性的な傾向の再現度も高くなっていることがわかる。これらの結果から、適用範囲を狭めて予測を行うことで特徴量と要望・苦情件数の相関が強くなり、予測精度も向上することができた。

表4 特徴量と家前の除雪に関する要望・苦情件数との相関係数

No.	特徴量	相関係数
1	前日降雪量	0.7400
2	平年比積雪深	0.6483
3	積雪深	0.5595

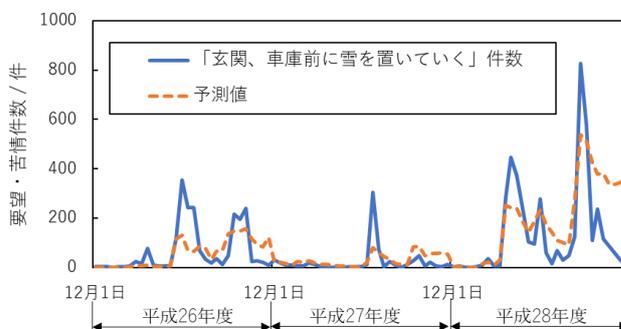


図5 家の前の除雪に関する要望・苦情件数の予測結果

5. 結言

本稿ではテキストマイニングにおいて用いられる単語出現頻度表と共起ネットワーク図を用いて、平成26年度から平成28年度に札幌市に寄せられた要望・苦情の分析を行った。分析結果より、札幌市に多く寄せられる要望・苦情の内容を把握し、要望・苦情の大まかな分類を行うことができた。要望・苦情内容と気象条件には大きな関係があり、分析をするうえで非常に重要な関係であると考えられる。

また、札幌市の気象データを特徴量として、教師あり学習の一つである重回帰分析を用いて要望・苦情件数の予測を行った。しかし、予測精度が低かったため、機械学習の適用範囲を定めて予測モデルの構築を行った。その結果、予測精度は向上し、要望・苦情件数の傾向を再現することができた。今後は更なる精度向上に向けて特徴量や分析方法を模索し、有効な予測モデルを検討する。

文献

- 1) 札幌市 HP (2023年4月10日閲覧): 雪対策費実績, <https://www.city.sapporo.jp/kensetsu/yuki/library/budget.html>
- 2) 杉原幸信ら, 2022: 札幌市の道路の除排雪に対する住民の要望・苦情のテキストマイニング分析, 日本雪工学会論文集, 83-95.
- 3) 石川大貴ら, 2022: 道路除排雪に対する住民の要望・苦情のテキストマイニング分析, 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, 14p.
- 4) 気象庁ホームページ (2023年4月10日閲覧): 過去の気象データ検索, https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php?prec_no=14&block_no=47412&year=2000&month=2&day=25&view=
- 5) scikit-learn (2023年4月10日閲覧) <https://scikit-learn.org/stable/>

事業所規模での雪国 ZEH の実現可能性の検討

BAYANMUNKH TSATSRAL¹, BAASANDORJ MUNGUNTUUL¹, ○藤田愛稀¹, 杉原幸信², 上村靖司²

¹長岡技術科学大学工学研究科機械系, ²長岡技術科学大学大学院工学研究科機械工学分野

1. はじめに

我が国では「ゼロエミッション戦略プロジェクト」^[1]を開始し、カーボンニュートラルな社会を目指すことを宣言した。枯渇が懸念され、かつその大量使用による環境影響が大きい化石燃料の消費量削減に向けて、再生可能エネルギー（地中熱、雪氷熱、バイオマス等）の開発と実装が進められ、地域特性を踏まえた低炭素社会の構築を形成することを目指している。豪雪地帯にある新潟県長岡市では、冬季の暖房等のためエネルギー消費量に占める化石燃料の割合が高く、一人当たりの二酸化炭素排出量は全国平均の約 1.17 倍（2019 年度）である。エネルギー効率と断熱性能の高い新築の ZEH は普及が緒についたところで、特に豪雪地帯においては Nearly ZEH すらまだごくわずかである。

本研究では、事業所規模を対象として、熱負荷が大きく太陽光発電等の創エネルギーの観点でも不利な豪雪地帯において、太陽光、雪氷熱、バイオマスおよび蓄熱を組み合わせることにより、ZEH を実現するための可能性調査を行う。

2. ZEH 及び ZEB とは

図 1 に ZEH 及び ZEB の概念を示す。ZEH (Zero Energy House) および ZEB (Zero Energy Building) とは使うエネルギーと創るエネルギーの 1 年間の総量がゼロになる住宅およびビルのことである。ZEH 及び ZEB は、エネルギーを外から実質的に購入しないで済むため環境に優しく、太陽光や雪氷熱等の再生可能エネルギーを利用した設備を用いるため省エネルギーに貢献できる住宅とされる。さらに、断熱性能が高いため、部屋ごとの温度差がなくなることでより快適に生活でき、健康面での効果もある。

ZEH 及び ZEB の種類を表 1 に示す。ZEH には、大きく分けて ZEH, Nearly ZEH, ZEH Oriented の 3 種類があり、それぞれ外から購入するエネルギー率で大きく異なる。通常、豪雪地帯では Nearly ZEH/ZEB が想定されているが、本研究では、これらの地域での ZEH/ZEB の実現可能性を検討する。

3. 事業所規模の ZEH の実現可能性検討

事業所を ZEH にするためのポイントは、「高断熱」「省エネルギー」「創エネルギー」の 3 つであるが今回は「高断熱」「創エネルギー」について以下で説明する。

3.1 高断熱

事業所の断熱性能は、新潟県の政策動向^[2]を参考に HEAT20-G1 以上、または UA 値 0.46 以下とし、事業所の窓、外壁、屋根、床などの外気に触れる部分の熱が伝わりにくい構造とする。ここで、UA 値とは外皮平均熱貫流率のことで、建物からの熱の逃げにくさを意味し、数値が小さい方が熱が伝わりにくく、断熱性能が高いとされる。UA 値を求める計算式を式(1)に示す。UA 値は各部の熱損失量の合計を延べ外皮面積から断熱性能を計算するものである。各地域の UA 値の比較を表 2 に示す。

$$UA \text{ 値} = \text{各部の熱損失量の合計} / \text{延べ外皮面積} \quad (1)$$

また冷暖房で消費するエネルギー量の計算式を(2)に示す。

$$UA \text{ 値} = \text{各部の熱損失量の合計} / \text{延べ外皮面積} \quad (1)$$

$$E = UA \text{ 値} \cdot S \cdot \Delta T \cdot t \cdot D / 1000 \quad (2)$$

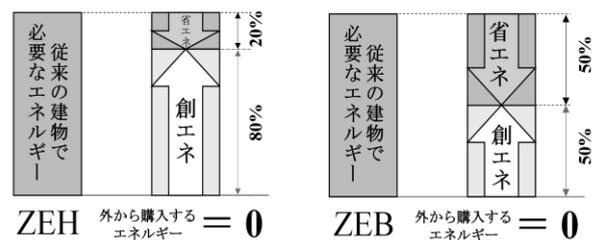


図 1 ZEH 及び ZEB の種類

表 1 ZEH 及び ZEB の種類

	ZEH	Nearly ZEH	ZEH Oriented
外から購入するエネルギー率	0 %	25 %	70 %
地域	—	豪雪地帯	都市部狭小地

ここで、E は必要なエネルギー量 (kWh) , S は外皮面積 (m²) , ΔT は温度差 (=冷暖房設定温度-平均外気温度(°C)) t は一日の冷暖房稼働時間 (h) , D は1ヶ月の日数/平均30日である。なお、今回は外皮面積を床面積 (5384 m²) とし、事業所の冷暖房稼働時間は1日中 (24h) とする。また、設定温度は冬季に20°C、夏季に26°Cと調整した。さらに、気象庁による2021年度の年平均気温データ^[4]を使い、人が快適と感じる20°Cを基準として、これ以下の場合は暖房を、以上の場合は冷房を稼働させるとした。

外皮面積5384 m²規模の事業所の月ごとの冷暖房で消費するエネルギー量を断熱性能基準ごとに計算した結果を表3に示す。モデル事業所の断熱性能をHEAT20-G1にすると、1年間の消費エネルギーを断熱等級2と比べて70%、ZEH基準と比べて23%削減できる。さらに仮に事業所の外皮面積を3680m²に縮減すると、同じHEAT20-G1でも消費エネルギーを29%削減できることが分かった。

3.2 創エネルギー

創エネルギーとは、自然の力を利用しエネルギーを自ら作り出すことを言う。表4に新潟県長岡市および東京都の2019年の冬季の日照量を示す。長岡市は東京都に比べ冬季の日照量が3分の1以下で、太陽発電量は十分には得られない。一方、表5に示す、2000年度に長岡市内の太陽光発電導入補助対象者から報告さ

れた1kW当たりの年間発電量は、全国平均の約85%であり、年間ベースでは遜色しない発電実績が得られている^[3]。また表6に2018年度の長岡市の月別期待発電量を示す。4月から9月の間の期待太陽発電量が大きく、1年間の発電量は1141kWh/年である事が分かった。このことから、長岡市でも雪対策を行えば太陽光発電は十分に活用できると考えられている。

さらに、雪国であるからこそ使用できる再生可能エネルギーもある。例えば、雪の冷熱エネルギーを用いれば、夏季の事業所の冷房を補うことができると考えられる。また、豊富な森林資源から木質バイオマスを活用すれば冬季の温熱需要の大きな部分を補うことができると考える。

次に図2に対象とする事業所の2018年度の月別の電力消費量を示す。夏季(7~8月)と冬季(12~2月)に明確なピークが現れている。このピークをカットするために、図2の横破線を太陽発電で賄うエネルギー量として、これを上回る夏季のピーク(斜線部)と冬季のピーク(斜破線部)をそれぞれ雪の冷熱エネルギーとバイオマスで補うと考える。すなわち、事業所の電力需要の概ね半分を太陽光発電で補い、残りを冷熱およびバイオマスで賄うことを提案する。

4. 雪に強い太陽光発電の垂直積上設置法の提案

積雪による発電効率の低下、許容荷重を超えた場合の除雪作業の簡素化を目指し、豪雪地帯ならではの太

表2 各地域のUA値

UA値 (外皮平均熱貫流率, W/(m ² K))							
地域番号	1・2	3	4	5	6	7	8
地域名	北海道	秋田・青森	新潟・長野・栃木	埼玉・群馬	東京・大阪	宮崎・鹿児島	沖縄
断熱等級2	0.8	1.3	1.5	1.7	1.7	-	-
ZEH基準	0.40	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	-
HEAT20-G1	0.34	0.38	0.46	0.48	0.56	0.56	-

表3 ある事業所の1年間の冷暖房で消費するエネルギー量(断熱性能基準ごと)

外皮面積(m ²)	月	消費エネルギー量(MWh)											合計(MWh/年)	
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2		3
5384	断熱等級2	48	22	42	45	66	28	25	52	84	104	92	69	677
	ZEH基準	19	9	17	18	27	11	10	21	34	42	37	27	272
	HEAT20-G1	15	7	13	14	20	9	8	16	26	32	28	21	209
3680	HEAT20-G1	10	4	9	10	15	6	5	11	19	23	21	15	148

表4 新潟県長岡市と東京都の冬季日照量比較

2019年度	12月	1月	2月	合計	比率
長岡市 (h)	48.9	28.9	63.9	141.6	28
東京都 (h)	145.3	222.2	138.0	505.5	100

表5 太陽光発電 kW 当たりの年間発電量の比較

2000年度	全国平均	長岡市	比率
太陽光発電量	955.8 kWh	809.5 kWh	85 %

表6 月別の期待太陽光発電量

2018年度	全天日射量 ⁵⁾ (kWh/m ²)	期待発電量 (kWh)
2018年4月	4.78	126
2018年5月	5.22	138
2018年6月	4.92	125
2018年7月	4.87	128
2018年8月	4.97	127
2018年9月	4.18	110
2018年10月	3.41	87
2018年11月	2.29	55
2018年12月	1.43	36
2019年1月	1.54	39
2019年2月	2.71	71
2019年3月	3.86	98
合計	1141 kWh/年	

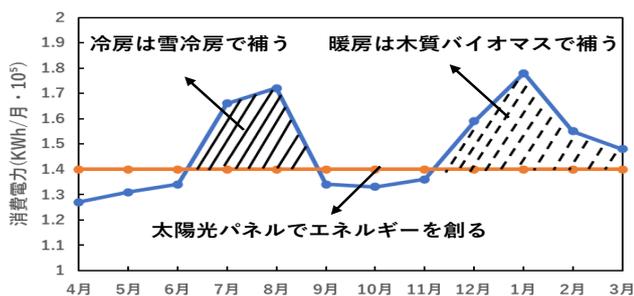


図2 事業所の消費電力および電気を補う提案

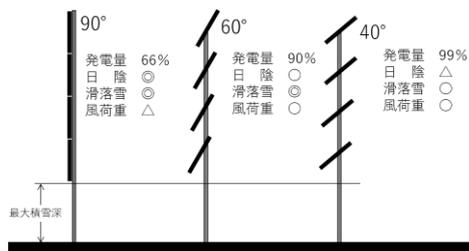


図3 雪国に適した垂直積上設置法 HASA の概要

太陽光発電パネルの新たな設置方法を提案する。図3に雪国に適した太陽光パネルの新たな設置方式の提案を示す。垂直積上設置法 (Heap-up Architecture for Solar cell Array, HASA) と名付けたもので、水平にパネルを並べるのではなく、パネルを垂直に積層する手法であり、スペース効率を高め、パネルに雪が積もる面積を減らすことが出来る。さらに、適切な傾斜を設けることによって、自動的に積雪が滑落するようにする。

夏や冬の発電量の差を小さくして、一年通して安定的な発電を可能とするために、太陽光発電パネルを傾斜させて設置した場合の、新潟県長岡市における年間発電量の計算を行った。本研究で用いた発電量計算式を式(3)に示す。

$$E_p = (H \cdot K \cdot P \cdot 365) / P \quad (3)$$

ここで、 E_p は年間発電量 (kWh) , H は年間全天日射量⁴⁾ (kWh/m²) , K は損失係数 (一般的に 85%) , P はシステム容量 (kW) , 365 は年間日数, 1 は標準状態日射強度 (kW/m²) である。計算期間は 2010 年から 2019 年の 10 年間データとし、容量を 1kW として、傾斜角度を 10 度から 90 度の範囲で 10 度きざみで変化させた。方位は南向き 0 度とした。年間全天日射量は、新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) の月平均データ MONSOLA-20^[5] の 2010 年から 2019 年までの 10 年間日射量データを用いた。

新潟県長岡市の年間発電量の計算および傾斜角度選定の結果を表7に示す。効率は傾斜角度 30 度の年間発電量を 100%として計算した。計算の結果、10 度から 60 度の範囲では 90%以上の効率が確保できることが分かった。一方、雪の滑り落ちやすさを考慮すると 40 度以上の勾配が望ましいことから、40~60 度で設置するのが、妥当であると考えられる。今後設置条件毎の詳細な年間の発電量見込みを試算してレイアウトの最適化を進めていく。

表7 年間発電量の計算および傾斜角度選定の結果

傾斜角度	H	K	P	E_p	効率
10度	3.54	0.85	1	1098	96 %
20度	3.64			1129	99 %
30度	3.67			1139	100 %
40度	3.62			1123	99 %
50度	3.49			1083	95 %
60度	3.30			1024	90 %
70度	3.05			946	83 %
80度	2.75			853	75 %
90度	2.41			748	66%

5. まとめ

本研究では、事業所規模を対象として、低炭素社会の実現に向けて、豪雪地における ZEH/ZEB の実現可能性を断熱性能や省エネルギーおよび創エネルギーの 3 つの観点に分けて検討を行った。新潟県長岡市のある事業所の月別の電気代を調べて、再生可能エネルギーで賄う部分について調査した。また、スペース効率を高め積雪の影響を軽減させつつ、発電効率を落とさない新たな垂直積上設置法を提案した。滑落雪によって荷重を軽減しつつ発電効率を落とさない角度として 40～60 度が妥当であると結論づけた。

今後は夏季の冷房需要を賄う雪冷熱および冬の暖房需要を賄うバイオマスの必要熱量について詳細な検討を進める事、省エネルギーによる使用電力の抑制について検討を行い、雪国 ZEH/ZEB を実現させる組み合わせを見出していきたい。

参考文献

1. Prime Minister's Office of Japan, 内閣官房内閣広報室(2020)「第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説」(2021年04月21日)
2. マエショウ, 「G1.G2.G3 の3つのグレードのUA値や体感温度の基準」, (2021年04月21日)
<https://www.maesho-c.co.jp/blog/post-4241/>
3. 新エネルギー財団, 「太陽光発電 kW 当たりの年間発電量の比較」, (2021年04月21日)
<https://www.nef.or.jp/energy/photovolataicpower/shikumi01.html>
4. 気象庁 HP, 「過去の気象データ検索」(2023年4月21日)
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
5. 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 月平均データ MONSOLA-20(2023年4月21日)
https://www.nedo.go.jp/library/ZZFF_100041.html
6. BAYANMUNKH TSATSRAL, BAASANDORJ MUNGUNTUUL, 杉原幸信, 上村靖司 (2022) : 豪雪地における事業所規模での ZEH の実現可能性検討, 雪氷研究大会(2022・札幌)講演要旨集(A1-1 P1)
7. BAYANMUNKH TSATSRAL, BAASANDORJ MUNGUNTUUL, 杉原幸信, 上村靖司(2022) : 事業所規模での雪国 ZEH の実現可能性, 寒地技術論文・報告集 Vol. 38 論文番号 II-025.

融雪期の山岳域における積雪中の化学成分の特徴および保存中の濃度変化

渡辺幸一¹・中西彩水¹・牧らさと¹・増田竜之¹・竹内由香里²・岩本玲佳³・田中大祐³・酒徳昭宏³・中村省吾³

(1: 富山県立大学工学部 2: 森林総合研究所十日町試験地 3: 富山大学理学部)

1. はじめに

立山などの融雪期の山岳域では、雪氷藻類や非水溶性物質の影響で赤や黒色などに着色した表層雪が観測される。雪が着色することによりアルベドが低下し、融雪を促進させることとなり、温暖化の影響が懸念される中、雪氷藻類や黒色炭素などの影響がグローバルな観点においても非常に重要視されている。通常、融雪期の積雪試料は化学成分の溶脱が大幅に進行しているため、水溶性のイオン成分などは非常に低濃度である。そのため、雪氷藻類などと化学成分との関連性について詳しく検討された事例は少ない。本研究では融雪期の立山などにおいて表層雪の採取を行い、化学成分の分析、冷蔵保存中の濃度変化および雪氷藻類などの観察を行った。

2. 方法

2021, 2022年4月の立山・室堂平において積雪断面観測(底部までは掘らず)を行い、積雪試料を採取した。試料は融解させないまま富山県立大学まで持ち帰り、冷凍保存した。試料融解後、主要イオン成分などをイオンクロマトグラフ法で分析した。また、融雪期の室堂周辺や弥陀ヶ原において、「赤雪」、「黒雪」など着色した表層雪試料を採取した。比較のために、森林総合研究所十日町試験地(新潟県)において「黒雪」試料の採取や、山形県の月山においても「赤雪」、「緑雪」の試料採取を行い、イオン成分の分析を行った。融雪期の表層雪試料については、ろ過(孔径 0.45 μm)、未ろ過試料別に分け、冷蔵保存中の化学成分の変質について評価した。さらに、一部の雪試料について、Fast DNA Spin Kit for Soil マニュアルに従い、富山大学理学部の田中研究室内でDNA抽出を行った。その後、16S rRNA V3/V4 領域のアンプリコンシーケンス解析(EzBioCloud 16S database 使用)を、株式会社生物技研(<https://gikenbio.com/>)に依頼した。

3. 結果と考察

2021年4月の積雪層は、主にざらめ雪で形成されており、化学成分の大幅な溶脱がみられたが、2022年4月の積雪については化学成分が比較的良く保存されていた。融雪期の室堂周辺で採取した表層雪のイオン成分は通常低濃度であったが「赤雪」試料については、NH₄⁺濃度や K⁺濃度が比較的高く、(通常の積雪断面観測ではほとんどみられない)リン酸イオンおよびギ酸イオンなどの有機酸類も検出された。ハイマツ林内からの栄養塩の溶出が雪氷藻類の生育に影響している可能性が考えられる。

立山・室堂周辺で採取された着色表層雪試料では、未ろ過状態で冷蔵保存している間に pH が大幅に低下し、SO₄²⁻濃度が大きく増加する現象が(特に黒く着色した雪試料で)みられた(図 1)。一方で、ろ過した試料については pH の低下(SO₄²⁻濃度の増加)はみとめられなかった。硫黄酸化細菌による(未酸化状態の硫黄成分からの)硫酸生成が起こっていた可能性が考えられる。また、「赤雪」試料については、冷蔵保存中に NH₄⁺濃度も大きく増加した。有機態窒素のアンモニア化が保存中に進化したものと考えられる。

十日町試験地や月山で採取した着色雪試料については、冷蔵保存中の大幅な SO₄²⁻濃度増加や pH の低下は認められず、保存中の硫酸生成は立山・室堂周辺に限られた現象であると考えられ、室堂近郊に存在する弥陀ヶ原火山(気象庁の表記)の噴気孔である地獄谷由来の硫黄が原因と考えられる。

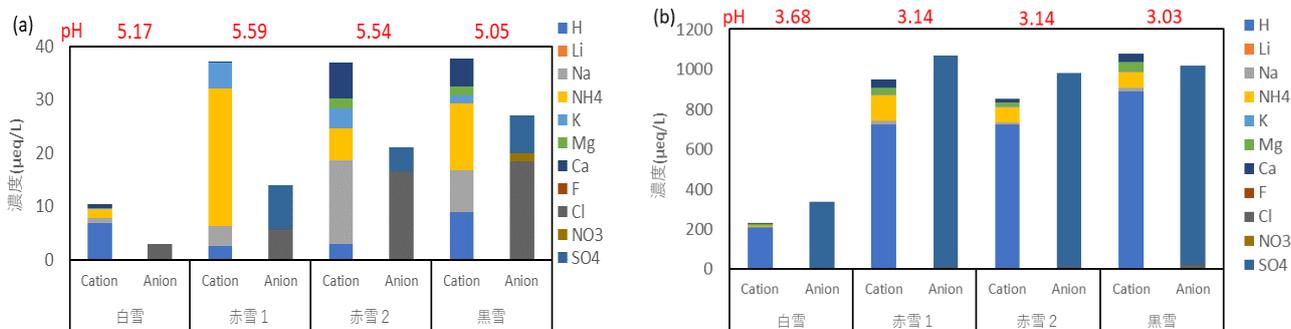


図 1 立山・室堂周辺における融雪期の表層雪(2022年7月7日採取)中の無機イオン成分濃度(a:7月8日分析, b:9月5日分析)

十日町で観察された雪えくぼの水平分布解析

—Pair Correlation 関数を用いた解析—

島田 互¹・鈴木歩空²・竹内由香里³

(1:富山大学学術研究部理学系 2:富山大学大学院 理工学教育部 3:森林総合研究所十日町試験地)

1. はじめに

日射や降雨による融雪時に、雪面上にくぼみが発生することがあり、“雪えくぼ”と呼ばれている。この雪えくぼの間隔はさまざまであり(納口, 1984a), 積雪層の密度と関連があることが報告されている(納口, 1984b)。今回は十日町で観察された雪えくぼについて、水平分布の特徴を調べた。

2. 観測と解析方法

観測は、森林総合研究所十日町試験地の露場において、高さ9.5mの観測やぐらからタイムラプス撮影することで行った。得られた画像を真上から見た画像に変換したのち、くぼみを手作業で選び出し、点として扱うことにした。

これらの点の分布を Pair Correlation 関数(島谷, 2001)を用いて解析した。Pair Correlation 関数は、一つの点に注目して、その周囲の点の距離をある程度の幅で重み付けた動径分布関数の一種である。

3. 解析結果



図1 2020年1月3日9:37 間隔の狭い雪えくぼ。枠の部分(縦6m x 横10m)を解析した。

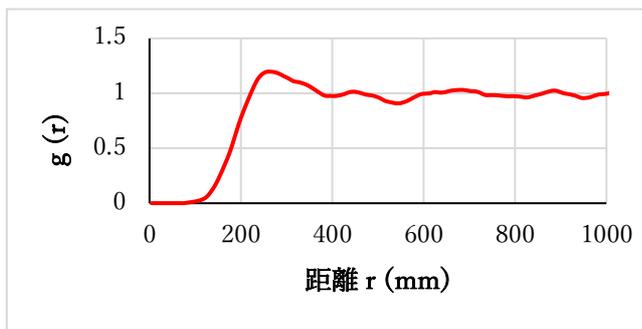


図2 Pair Correlation 関数で示した図1の雪えくぼの分布。

図1に2020年1月3日に、図3に2020年2月13日に観察された雪えくぼを示す。また、図2に図1の、図4に図3の雪えくぼの Pair Correlation 関数を用いた解析結果を示す。

図1の例では、第1近接は Pair Correlation 関数ではっきりピークとして表れているが、第2近接以降ははっきりしていない。一方、図3の例では第2近接もピークが見られるが、これは解析した点の数が不足しているためと考えられる(鈴木ら, 2020)。詳細は発表で述べる。

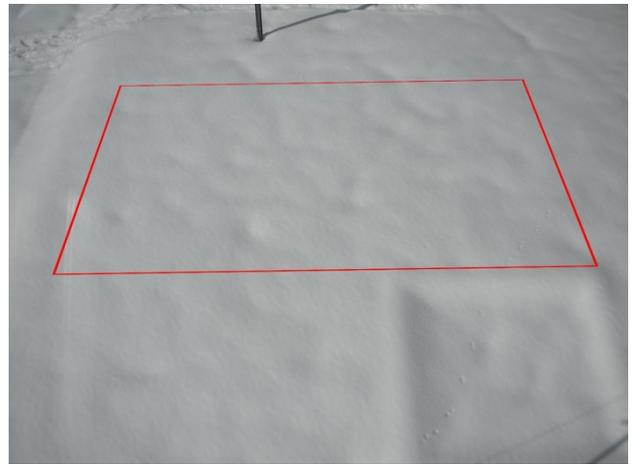


図3 2020年2月13日11:52. 間隔の広い雪えくぼ。

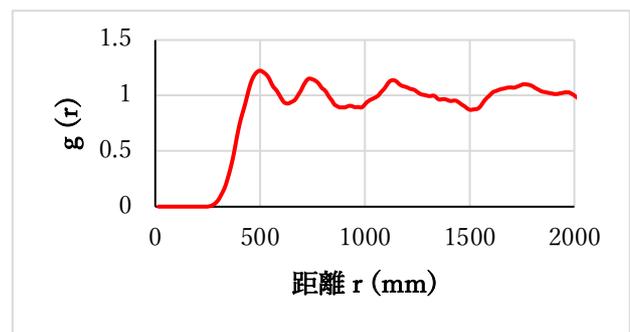


図4 Pair Correlation 関数で示した図3の雪えくぼの分布。

文献

- 島谷健一郎(2001):点過程による樹木分布地図の解析とモデリング. 日本生態学会誌, **51**, 87-106.
 鈴木歩空, 島田互, 飯田肇(2020):雪えくぼの水平分布解析. 雪氷北信越, **40**, 14-15.
 納口恭明(1984a):雪えくぼのパターン形成Ⅰ. 国立防災科学技術センター研究報告, **33**, 237-254.
 納口恭明(1984b):雪えくぼのパターン形成Ⅱ. 国立防災科学技術センター研究報告, **33**, 255-275.

室内実験による十二花結晶の再現

伊藤柊哉¹・島田亙²

(1:富山大学 大学院理工学研究科 2:富山大学 学術研究部理学系)

1. はじめに

雪結晶は、六花や六角板など六回対称性をもった形状がよく知られているが、まれに十二花結晶も見られることがある。十二花結晶は限られた気象状況でのみ見られ、12本の枝があり、枝間角度は約30°を持つことが知られている。他の雪結晶と比べると観測頻度は少ないため、十二花結晶を扱った研究は少なく、十二花結晶の形成機構は十分には解明されていない。

Uyeda and Kikuchi (1990) による天然降雪十二花結晶の観測より、十二花結晶は六花同士の併合によって形成されることが示唆された。ただし、実験による再現の例はほとんどない。そこで、本研究では十二花結晶は六花同士の併合によって形成されると仮定し、アイスクリームストッカーを用いた人工氷晶の衝突実験を行い、十二花結晶の再現を試みた。

2. 実験方法

実験装置には、アイスクリームストッカーを用いた。その深さの半分の位置に通気性の良い台を設置し、その上にシリコンオイルを塗ったスライドガラスを置いて、サンプリングする手法を用いた。

初めに超音波加湿器を用いて、アイスクリームストッカーの中を十分に加湿した後、液体窒素を用いて核生成を行い、氷晶を発生させた。その後、シリコンオイルを塗ったスライドガラスにカバーガラスを被せ、シリコンオイルに付着した氷晶を採取し、顕微鏡を用いて観察した。サンプリングした多くの氷晶中から十二花結晶を探した。

得られた十二花結晶は、Uyeda and Kikuchi (1990) の手法を参考にして、枝間角度などの測定を行った。枝間角度の測定は、十二花結晶の12箇所の枝間のうち、便宜上30°よりも小さい6箇所の枝間角度を測定し、それらの平均値をその十二花結晶の枝間角度(ϕ)とした。

3. 実験結果

湿度が高く、温度が-14~-18°Cといった六花の結晶が成長しやすい条件で、図1のような十二花結晶をいくつか見つけることができた。合計15回の実験で36個の人工十二花結晶を観察した。

図2は、得られた36個の人工十二花結晶の枝間角度分布である。人工十二花結晶の枝間角度は、1~29°に広く分布しており、伊藤・島田(2022)による天然降雪十二花結晶の枝間角度分布と比べるとランダムな分布となった。

4. 考察

今回見られた人工十二花結晶の枝間角度は、ランダムな分布となり、天然降雪十二花結晶の分布とは違いが見られ

た。これは、今回の人工十二花結晶は、枝の成長がないものや枝が短いものがほとんどであったことに起因すると考えられる。

結晶同士が併合する際に、天然の場合では、枝があることで空気の流れによる影響を受けながら、結晶同士の併合が行われる。一方、今回の実験で得られた十二花結晶は、枝がほとんどないため、空気の流れの影響を受けにくい状態であったことから、人工十二花結晶の枝間角度分布は、天然降雪十二花結晶の分布と比べると、ランダムになったと考えられる。

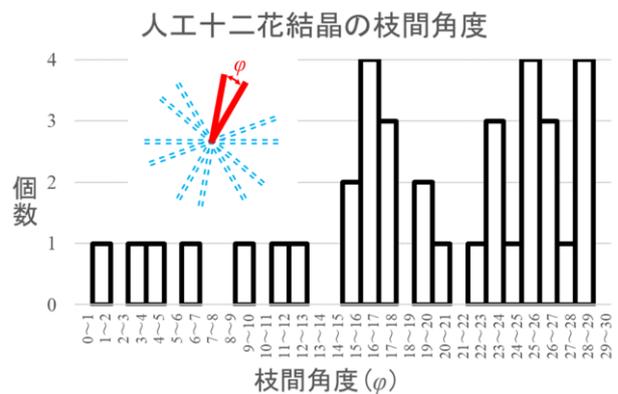
図1 人工十二花結晶 (ϕ :26.6°)

図2 人工十二花結晶の枝間角度分布

文献

伊藤柊哉, 島田亙(2022):十二花雪結晶の枝間角度測定. 雪氷研究大会(2022・札幌)講演要旨集, p195.

Uyeda, H., and Kikuchi, K. (1990): Formation mechanisms of twelve-branched snow crystals. J. Meteorological Society of Japan, **68**, 549-556.

氷柱連続引上げ製氷における引張/せん断着氷力測定

柏崎志武¹, ○丸山翔生¹, 上村靖司², 杉原幸信²

(1:長岡技術科学大学大学院工学研究科 2:長岡技術科学大学機械系)

1. はじめに

透明さや形状といった外観の美しさは飲料用の氷の付加価値を高める上で重要である。現在、その場で氷を製造して使用する技術として普及しているオーガ方式、アイストレー方式、セル方式に対し、綱島ら(2018)は薄い円板状の氷を作り、それを断続的に引き上げることで、氷柱を製氷する氷柱引上げ式連続製氷技術を提案し、125分で直径25mm、高さ25mmの氷を作製できることを示した。また、杉原ら(2021)は引き上げ式製氷を行う際の剥離、成功における引上げ力の過渡的变化と氷厚さと最大荷重の関係について述べた。本研究では、筒状製氷型の内径を従来の25mmから30, 35, 40, 50mmと変化させ、冷却棒温度も -1°C から -3 , -5 , -10°C へ変化させて、引張/せん断の着氷力を測定した結果を示す。

2. 氷板引上げ実験の方法

図1に引上げ製氷の概要を示す。まず上蓋に異径の筒状製氷型(PTFE製, 内径25, 30, 35, 40, 50mm)を取り付けた水槽を水で満たす。そして冷却棒(アルミ合金製, 外径55mm, 設定温度 -1°C)を水面に所定の初期冷却時間(2分から30分の間で変更)だけ接触させて初期氷板を形成する。その後に冷却棒の温度を保ちつつ昇降ジャッキで水槽を5秒ごとに0.2mm下降させる。この際、冷却棒に作用する力(以降、引上げ力と呼ぶ)を、冷却棒の上部に取り付けたカンチレバー式ロードセル(最大荷重200N, (株)AND製)で測定する。最後に、引上げた氷板の厚さを測定する。実験は約 2.5°C の低温室で実施した。

3. 引張とせん断の着氷力への影響

3.1 着氷面積と着氷力

成功は冷却棒側に氷板が冷却棒側に付着し引上げられる現象で、剥離は氷板が冷却棒から剥離し製氷型に残る現象を指す。ここで、成功時は氷-製氷型間のせん断着氷力を評価できると仮定し、製氷型から氷がはがれる際の引き上げ力 F_{Smax} を着氷面積 A_s で除すことでせん断着氷力 σ_s を算出した。剥離時は氷-冷却棒間の引張着氷力を評価できると仮定し、冷却棒から氷が剥離する際の引き上げ力 F_{Tmax} を着氷面積 A_T で除すことで引張着氷力 σ_T を算出した。種々の材料に対する着氷力は既往研究の知見を参照する。本実験では製氷型にPTFE, 冷却棒にアルミニウム合金を使用している。吉田ら(1993)の実験より -10°C におけるPTFEのせん断着氷力は150kPa, アルミニウムのせん断着氷力は250kPaと報告されている。また、前野(2006)は同じ材質でも引張着氷力はせん断着氷力の5~6倍程度大きくなると報告している。

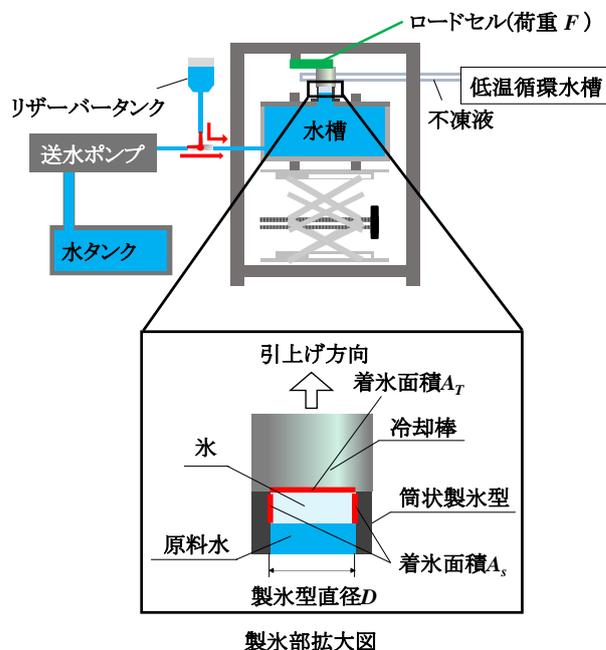


図1 引上げ製氷の概要。

そのため、吉田ら(1993)のせん断着氷力の結果よりアルミニウムでの引張着氷力はおおよそ1500kPaになると推測される。

図2に着氷面積 A_s とせん断着氷力 σ_s の関係を示す。また、図3に着氷面積比 A_T と引張着氷力 σ_T の関係を示す。ここで凡例は製氷型の内径を表し、それぞれの図中の実線は各材料における先行研究の着氷力を示す。図2より成功時のせん断着氷力は吉田ら(1993)の実験から得られたPTFEのせん断着氷力値150kPaとおおよそ一致している。一方、図3より剥離時の引張着氷力は100kPaで一定の値を示しており、吉田ら(1993)と前野(2006)の研究より推測した1500kPaより一桁ほど小さい値となった。その原因として、冷却棒温度が高いことが考えられる。氷-アルミニウムのせん断着氷力250kPaは -10°C での結果であり、低温になれば着氷力も増加する。これに対し、本研究における冷却棒の設定温度は -1°C 付近と融点に近い温度帯であるため、吉田ら(2000)より氷の表面融解が起き、着氷力が減少したと考えられる。

3.2 冷却棒温度による着氷力の変化

氷-アルミニウム間の引張着氷力に対する冷却棒温度の影響を調査するために氷板引上げ実験の方法を1部変更した追加冷却実験を行った。変更点として、 -1°C に設定した

冷却棒を水面に初期冷却時間(5min)接触させることで初期氷板を形成したのち、冷却棒の設定温度を -3 , -5 , -10°C と変更し、追加冷却した。このとき、剥離を生じやすくするために追加冷却時間を20分と長くしている。その後、冷却棒の温度を保ちつつ昇降ジャッキで水槽を5秒ごとに0.2mm下降させた。製氷型は内径30mmのものを使用した。図4に追加冷却温度と引張着氷力の関係を示す。白線の数値は各温度での着氷力の平均値である。図4より追加冷却温度が低くなるほど引張着氷力が増加していくことが明らかとなった。

3.3 引上げ製氷の成功領域

最後に、引上げ製氷の成功領域を検討する。まず、引張着氷力での最大荷重 F_{Tmax} [N]は着氷面積 A_T [mm^2]を用いると(1)のように表せる。ここで、 σ_T は氷とアルミニウム間の引張着氷力[Pa], D は製氷型直径[mm]である。

$$F_{Tmax} = \sigma_T A_T$$

$$F_{Tmax} = \sigma_T \frac{\pi D^2}{4} \quad (1)$$

せん断着氷力での最大荷重 F_{Smax} よりも引張着氷力での最

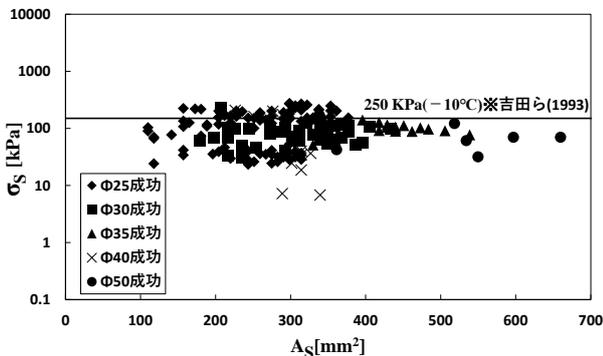


図2 せん断着氷力と製氷型側面の着氷面積との関係 (材料:PTFE).

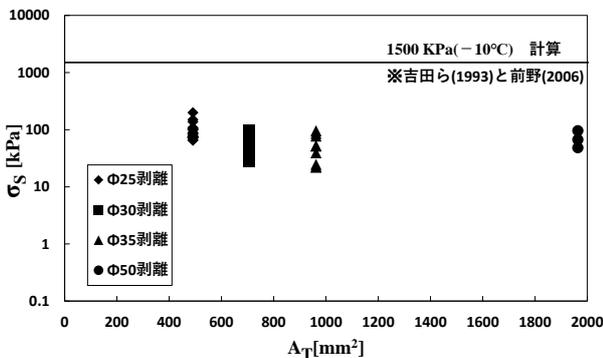


図3 引張着氷力と冷却棒底面の着氷面積との関係 (材料:アルミニウム合金).

大荷重 F_{Tmax} が大きいときに引上げが成功すると考え、このときの関係を表すと式(2)となる。これを式(1)を用いて整理すると、式(3)の関係を導くことができる。

$$F_{Tmax} > F_{Smax} \quad (2)$$

$$F_{Smax} < \sigma_T \frac{\pi D^2}{4} \quad (3)$$

図4の追加冷却実験から得られた各温度での引張着氷力の平均値を式(3)の σ_T に代入し、製氷型の各直径における成功から剥離へと移り変わる荷重を算出した。図5にこの算出した荷重を線で示し、冷却棒を 1°C に制御した状態で行った各直径の最大荷重の実験結果をプロットで示す。ここで、成功での最大荷重は氷—製氷型間のせん断着氷力を示し、剥離での最大荷重は氷—冷却棒間の引張着氷力を示している。図5に示す線を境に、これより F_{max} が大きくなれば剥離が生じ、小さくなれば成功するといえる。

以上をまとめると、図4より追加冷却実験では冷却棒の温度を低くすることによって氷—アルミニウム間の引張着氷力が大きくなることが分かった。また、着氷力が大きくなることで図5より同じ直径でも氷—アルミニウム間の最大荷重 F_{Tmax} が大きくなることが分かった。そのため、引き上げが成功す

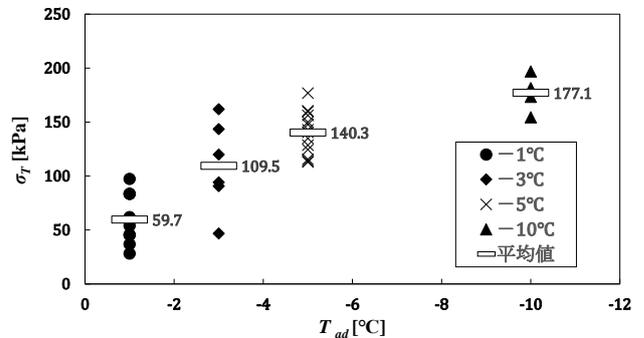


図4 追加冷却温度と引張着氷力の関係。(内径:30mm)

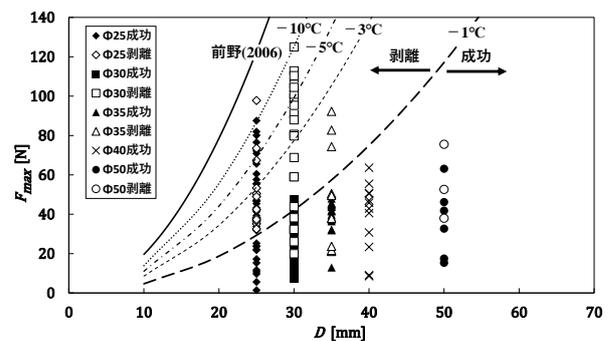


図5 追加冷却温度と引張着氷力の関係。

る限界の氷—製氷型間の最大荷重 F_{Smax} を増加できるので、氷厚さを大きくし、氷—製氷型間の最大荷重 F_{Smax} が増加しても氷板の引張が成功する。したがって、冷却棒の温度を低くすることで成功条件の拡大につながると考える。

4. まとめ

本研究では筒状製氷型の内径を変更した時の成功と剥離それぞれ最大荷重を測定し、引張とせん断着氷力の関係を示した。せん断着氷力は吉田ら(1993)の実験結果とおおよそ一致することを確認した。また、引張着氷力は前野(2006)の実験結果より低い値を示した。さらに、追加冷却実験として内径 30mm の筒状製氷型を使用し、冷却棒の温度を変更した時の引張着氷力を測定した。冷却棒の温度が低下すると引張着氷力が大きくなることが確認された。追加冷却実験では剥離しやすくするために冷却時間を長めにしていたが、今後は追加冷却した状態でこれまでと同様な冷却時間での実験を繰り返し行い、データを収集して求めた成功領域と比較、検討を行う。

文献

- 綱島匠, 上村靖司, 2018: 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発, 雪氷研究大会(2018・札幌)講演要旨集, p.32.
- 杉原幸信ら 2021: 氷柱引上げ式連続製氷技術の開発-その4: 異形製氷型における引上げ試験-, 雪氷研究大会(2021・千葉-オンライン)講演要旨集, p.86.
- 前野紀一, 2006: 氷の付着と摩擦, 日本雪氷学会誌(2006) 68 巻 5 号, p.449
- 吉田光則ら 1993: 着雪氷防止技術に関する研究(第 1 報)-各種材料の着氷力について-, 北海道立工業試験場報告(1993)No.292.
- 吉田光則ら 2000: 着雪氷防止技術に関する研究(第 3 報)-滑雪と材料表面特性について-, 北海道立工業試験場報告(2000)No.299.

放射製氷プロセスによる不凍液濃縮の試行

沖田七海¹, ○村田隆太郎¹, 岡本忠次¹, 杉原幸信², 上村靖司²
 (1:長岡技術科学大学大学院工学研究科 2:長岡技術科学大学機械系)

1. 緒言

不凍液（ブライン）は冬期においても凍結しないという性質のため、車のエンジンや冷暖房装置の内部を循環する冷却液として使われている。また、食品加工現場において食品の衛生管理や長期保存のため、冷凍庫などの大型の冷却設備にも不凍液は用いられている。しかし、長時間の使用中に結露水の混入などにより不凍液の濃度は低下していく。濃度の低下した不凍液は、凝固点が上昇して冷却能力を維持することが困難となる。そうなると不凍液の交換、廃棄が必要となる。不要となった不凍液は産業廃棄物として処理しなければならない。そこで、低下した冷却能力を回復させるために、水分を蒸発させて濃縮することで再利用する方法もあるが、濃縮効率は低く加熱のためのエネルギー消費も大きい。結果として多くの場合、不凍液は産業廃棄物として処理されている。本研究室で開発された放射製氷プロセスを用いて不凍液を凍結濃縮する方法について試行した結果を報告する。

2. 放射製氷装置の概要

実験に用いた放射製氷装置の概略図を図 1 に示す。2°Cの低温室に置かれた放射製氷装置は製氷ユニットと水槽(50×50×145 mm)から構成されており、製氷ユニットは内層と外層に分かれている。水槽に濃度の薄まった不凍液を満たし、空気が入らないように製氷ユニットで蓋をする。内層内には前室(20°C)にある低温循環水槽から冷媒(-10°C)が流れており、冷媒により冷やされた内層下面のアルミ板が水槽内の濃度の薄まった不凍液の熱を奪い取り、外層下面の亚克力板直下から水槽の底に向かって一方方向に氷が成長する仕組みとなっている。なお、内層と外層の間には 3 mm の隙間があり、これにより放射冷却が優位な状況を実現している。

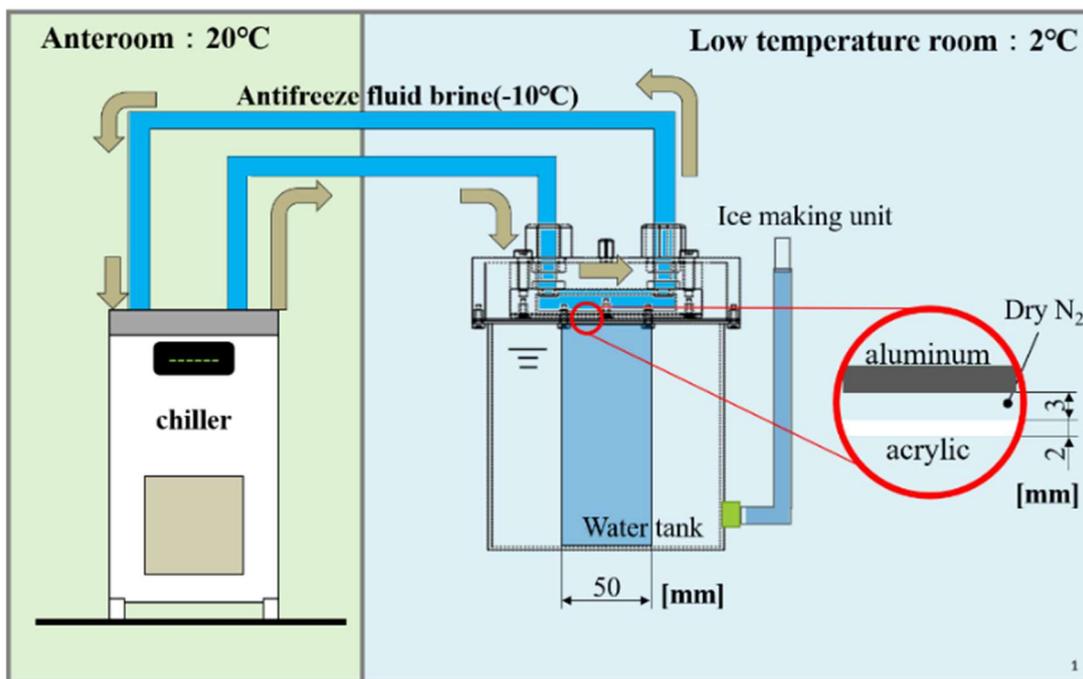


図 1 放射製氷装置の概要

3. 不凍液

実験では、不凍液としてショーワ株式会社のショウブラインブルー⁽¹⁾を希釈して使用した。不凍液の凍結温度と濃度の関係を図 2 に、成分情報を表 1 に示す。また、目的とした濃縮後の不凍液濃度 34 vol%と凍結温度-20℃を図 2 に破線で示す。

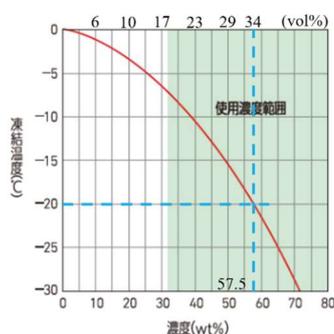


図 2 不凍液の凍結温度

表 1 不凍液の成分

成分	含有量 [%]
エチレングリコール	74 ~ 76
水	20 ~ 22
ホウ酸ナトリウム	< 1

4. 濃度測定

実験では、ブライン濃度屈折器(MASTER-BR)を使用した(図 3)。ブライン濃度屈折器を用いることで、グリコール系熱媒体の濃度と凍結温度を確認することができる。図 3 の(a)に不凍液を数滴滴下し、(b)ののぞき穴から図 4 の目盛りを読むことで濃度測定が可能である。今回使用した不凍液は主成分がエチレングリコールのため、図 4 の右側の目盛りを読むことで不凍液の濃度測定が可能である。



図 3 MASTER-BR

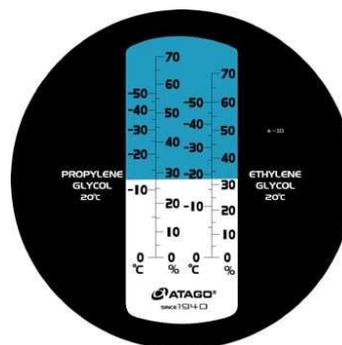


図 4 濃度計の目盛り

5. 多方向からの凝固による不凍液の凍結濃縮

細かい粒子状物質を含む液体が凝固するとき、微粒子は凝固の進行に伴い掃き出され、粒子を含まない凝固層を形成する掃き出し現象が起きる⁽²⁾。この掃き出し現象により、不凍液の濃縮ができるかどうか、単純に低濃度不凍液を入れた容器を冷凍庫に入れて確認する実験を行った。

特に断熱を施していないアクリル水槽(150×150×200 mm)に低濃度不凍液をおよそ 2.2 L 注ぎ、-20℃に設定された冷凍庫へ入れて凍結させた。不凍液にはショーワ株式会社のショウブラインブルーを用い、実験前の初期濃度は、15~20 vol%の範囲(凍結温度-10℃以上)とした。この場合、容器は断熱されていないためすべての方向から冷却されることとなり、多方向から氷が成長すると見込まれる。

図 5 に 362 分間、冷凍庫で冷却した後の不凍液の様子を示す。水槽内の低濃度不凍液は、冷気に触れている水面から、また冷気が伝わる水槽外壁から冷却されて、凍結が進む。図 5 を見ると、周囲から凍結が進んで中央部分は液体のままだった。水槽外周から 10 mmほど内側の部分はシャーベット状に凍っており、完全な氷にはなっていなかった。これは、冷却温度が高かったということ。さらに、多方向からの冷却だったため、凍結時の掃き出し現象による水分と不凍液の分離が十分になされなかったことが原因ではないかと考えられる。

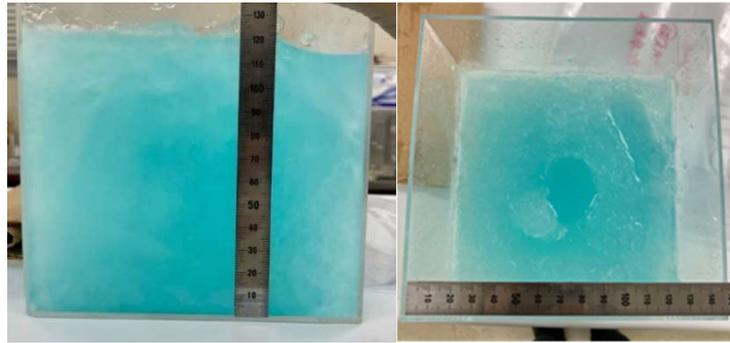


図5 冷却後の不凍液の様子

初期濃度を変えて行った4回の実験結果を表2に示す。初期濃度(図6実線)と濃縮後の不凍液の濃度(図6○), 凍結部の濃度(図6●)の関係を図6に示す。全ての実験において, 凍結後は不凍液の濃度が上がり, 氷となった部分の不凍液の濃度が下がる結果となった。このことから, 掃き出し効果により不凍液の未凍結部分で, 濃縮が実現できていることがわかる。4回の実験結果を比較すると, 初期濃度が低いほど濃度の増加量が上昇する結果となった。しかし, 濃度の割合は5 vol%未満であり, 目的としていた34 vol%に対しては不十分であった。

表2 実験前後の不凍液の濃度変化

Initial concentration [vol%]	Concentrated brine [vol%]	Ice [vol%]	Increase in concentration [vol%]	Time [min]
16.5	21.2	14.7	4.7	362
17.5	21.2	16.0	3.7	371
18.0	21.0	17.5	3.0	300
19.0	20.5	18.0	1.5	240

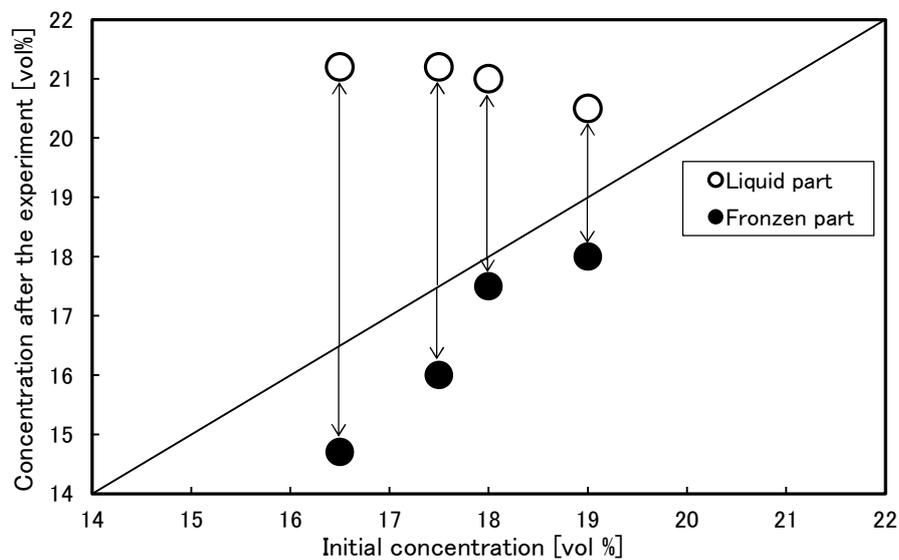


図6 濃縮後の不凍液の濃度

6. 一方向からの凝固による不凍液の濃縮

不凍液を効率よく濃縮するために, 一方向凝固を容易に実現できる放射製氷技術⁽³⁾を応用した。濃度が低下した不凍液を上方から下方に向けて凍結させ, その氷を取り出すことで低濃度の不凍液を濃縮する実験を行った。不凍液の水面温度を-14°Cとして5日間濃縮を行った結果を図7に示す。図7は放射冷却ユニットの濃縮によりできた凍結部(氷)の高さと, 不凍液の濃度(図7●), 不凍液濃度の理論値(図7実線)を示す。ここで, 図7の不凍液濃度の理論値は式(1)を用いて導出した。式(1)の h_0 は水槽の高さ(mm), c_L は濃縮された不凍液の濃度(%), c_F は凍結部の濃度(%), c_0 は不凍液の初期濃度(%)である。

$$\text{理論値 } h_F = \frac{h_0 \times (c_L - c_0)}{c_0} \quad (1)$$

放射冷却面を-14°Cにした放射製氷では、不凍液の上方から下方に向かって凍結が生じ、氷(およそ 50×50×45 mm)を得た。

初期濃度 16.0 vol%に対して、濃縮された不凍液の濃度は 20 vol%となり、4 vol%濃度を上昇させることが出来た。濃縮時間を変化させながら6回測定した本実験では、濃縮された不凍液濃度は凍結部(氷)の成長に伴い、理論値(図7実線)とおおむね一致する結果となった。一方、凍結部(氷)の不凍液濃度はおよそ 5.0 vol%となり、11 vol%濃度を低下させることができた。そして冷凍庫での実験で得られた 14.7 vol%よりも低濃度の氷となった。

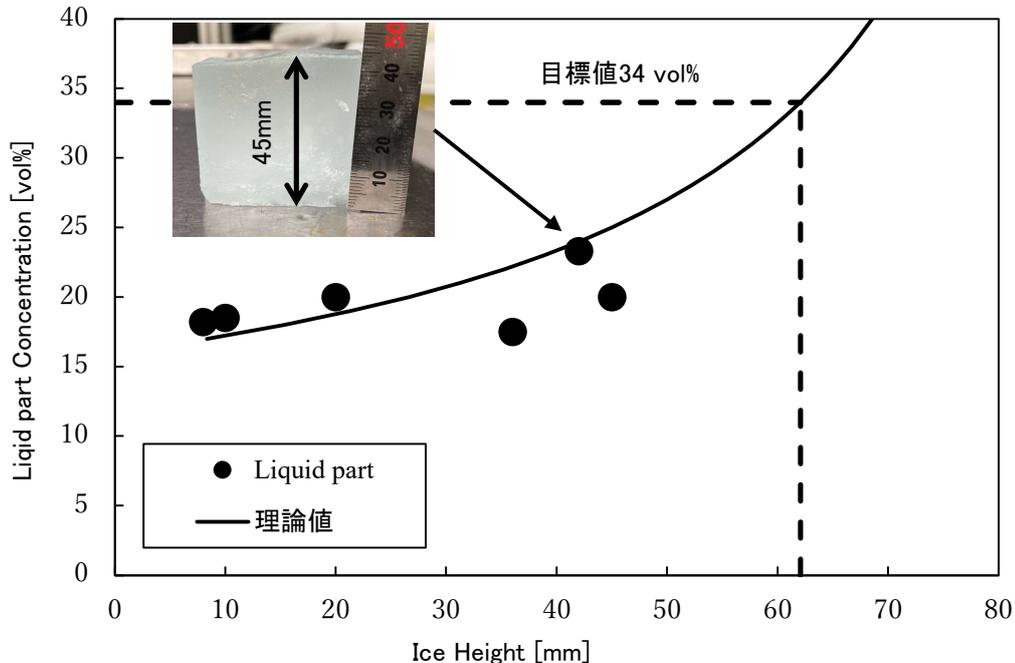


図7 放射冷却ユニットで濃縮した不凍液の濃度変化

7. 結言

溶液を凍結させるときに生じる掃き出し現象を利用し、濃度の低下した不凍液の濃縮を試みた。冷凍庫内で水槽及び水面などの周囲から中心に向かって凍結させた結果、すべての初期濃度において、凍結後は不凍液の濃度が上昇し、凍った部分の濃度は低下した。このことから、多方向からの凝固においても掃き出し現象によって不凍液をある程度濃縮できることがわかった。また、不凍液を効率よく濃縮するために、一方向凝固を容易に実現できる放射製氷技術を応用して凍結濃縮を試みた。冷凍庫での実験結果と比較すると、濃縮効果は冷凍庫には劣るが、凍結部の不凍液濃度は大きく低下した。そのため、放射冷却を利用することで、より効果的に不凍液の濃度を高めることができる可能性を示した。

文献

- (1) ショーワ株式会社 HP, 「一般工業用・食品工場用ブライン」 (2023年4月21日)
<http://www.showa-ind.co.jp/brine01.html>
- (2) 青木和夫, 赤堀匡俊, 鈴木良明, “凝固時における溶存気体の掃き出し・捕捉現象”, 環境工学総合シンポジウム講演論文集, 13巻 (2003), pp. 287-288
- (3) 上村靖司, 星野真吾, “放射冷却による製氷過程の観察” 日本雪氷学会誌雪氷, 70巻, 5号 (2008), pp.477-485
- (4) 沖田七海, 岡本忠次, 杉原幸信, 上村靖司 (2023年): 放射製氷プロセスによる不凍液濃縮の試行

珪質砂岩のせん断強度の温度依存性

堀 淳夫^{1,2}・杉浦幸之助³

(1:富山大学大学院理工学教育部 2:北日本地質(株) 3:富山大学学術研究部)

1. はじめに

土や岩石のせん断特性を求めることは地盤の安定性評価にとって重要であり、第四紀における地形発達を考える上でも重要である。しかしながら土や岩石のせん断強度が、氷期あるいは間氷期のように気温が大きく異なる条件下において、どのような挙動を示すかの研究については、低温環境におけるせん断試験の技術的困難さや岩石のせん断強度の大きさ等から研究事例が少ない。

そこで本研究では、0°C前後における温度条件下で一面せん断試験を実施し、せん断特性の温度依存性を調べたので報告する。

2. 試験方法

試験にあたり、富山県内の寒冷な多雪地で、かつ地すべりが多発する地域を代表できる試料を選定した。代表試料は新第三紀楡原層の珪質砂岩(軟岩相当)であり、砂岩をスラリー状に粉碎して試験を試みた。

一面せん断試験として現場用一面せん断試験機(マルイ社製 MIS-233-7 型)を用いた。試験では、まず対象土を10cm×10cm×10cmのせん断箱に均一に締固め、低温室にて定温状態に達した後、せん断試験を行った。また、せん断試験後に温度センサー(CENTER製 372dual)をせん断箱横穴から試料中央部まで差し込み、試料の温度を測定した。試験では、温度 T をおよそ-15°Cから 15°C、垂直応力 σ を 33 kPa から 111 kPa の範囲でそれぞれ変化させた。

3. 一面せん断試験の結果

図1に示すように、ピークせん断強度 τ には温度依存性が明瞭に認められた。すなわち、低温になるほどピークせん断強度が大きくなる傾向が示された。同時にピークせん断強度 τ は垂直応力 σ が増すにつれて大きくなった。

試料温度が-15°C程度から 0°C付近へ上昇するにつれてピークせん断強度が小さくなるだけでなく、さらに垂直応力が大きいほど温度上昇時の強度低下が顕著となる。すなわち、斜面を例にとると、温度が上昇するにつれてより深部での不安定化が進むことになる。

加えて、0°Cを境にしてピークせん断強度の変化が異なる(試料温度が上昇する際に、0°Cより低い温度域で急な低下、0°Cより高い温度域で緩やかな低下)。たとえば、垂直応力 σ が 111 kPa の場合、0°Cより低い温度域では5°Cの温度上昇でピークせん断強度 τ は約20%低下することになり、斜面安定度が大きく損なわれることとなる。

4. 今後の展望

物質の温度依存性についての先行研究は、既に氷や鋼材、コンクリートについて行われている。たとえば、氷については石本(1990)、鋼材については石川・谷村(1985)、コンクリートについては岡田・米沢(1975)の研究がある。このような研究を踏まえ、今後は一般に入手可能な絶乾土質試料や含水比を変えた土質試料などを対象とした比較試験を行う予定である。

おわりに、本研究に用いた現場用一面せん断試験機は、富山県立大学工学部の古谷元教授のご厚意によるものである。記して謝意を表す。

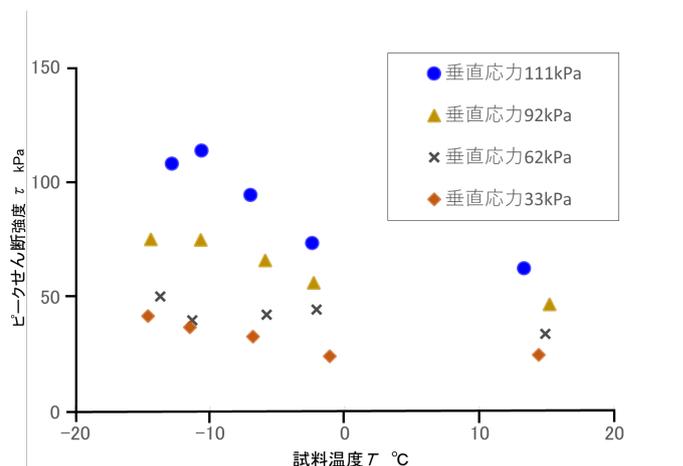


図1 砂岩(スラリー)のピークせん断強度 τ と試料温度 T との関係。

文献

- 石川皓一・谷村眞治(1985):ニッケルモリブデン鋼のせん断強度のひずみ速度および温度依存性。材料, **34**(387), 38-68。
 石本敬志(1990):氷の破壊強度。開発土木研究所月報, **441**, 34-35。
 岡田清・米沢敏男(1975):レジンコンクリートの材料特性の温度依存性について。材料, **24**(260), 38-44。

2022年12月の大雪による市街地での交通障害

—特に大雪となった12月19日、20日の長岡市、柏崎市における現地調査—

○上石 勲¹, 砂子宗次朗¹

(1:国立研究開発法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター)

1. 大雪による道路、交通への影響

2022年12月19日からは、新潟県内で大雪となり、特に新潟県柏崎市と長岡市での大雪は大きな被害を与えた。気象庁長岡アメダスの記録では、12月18日11時には0cm、12月19日1時には27cmだった積雪深が、12月20日16時には101cmとなった。特に19日8時～10時には、時間降雪量7cm以上の連続した大量の降雪となった。長岡市街地では図1のように、多くの車が自宅から出ることができず、事業所の多くでも雪によって車が入れない状況であった。図2は消雪パイプが設置されていない道路で、除雪が行われず、路面上の雪が1m近く堆積している状況である。消雪パイプが設置されている道路でも雪が消えずに残り通行困難な箇所も多く、図3のように長岡市街地の多くの個所で渋滞が発生し、自動車による移動が困難となっていたと推定される。



図1 大雪により埋まる自動車
(2022年12月19日 長岡市内)



図2 除雪が追いつかない道路
(2022年12月19日 長岡市内)



図3 渋滞発生状況
(2022年12月19日 長岡市内)

気象庁柏崎アメダスの記録では、12月18日11時には0cm、12月19日2時には22cmだった積雪深が、12月20日16時には88cmとなった。12月20日に柏崎市に現地調査に入り状況を把握した。市内の道路には除雪しきれなかった湿った圧雪が20cm以上残っており、多くの車がスタックしているのが見られた(図4)。図5に示すように歩道の除雪も追いつかず緊急車両の通行も困難になっている状況も見られた。この大雪では、国道や高速道路のような幹線道路が長時間通行止めとなったため、物流も滞り柏崎市内のスーパーやコンビニエンスストアでは特に食料品が品薄の状態となっていた(図6)。



図4 圧雪の残るの交差点でのスタック
(2022年12月20日 柏崎市内)



図5 圧雪の残る道路での緊急車両
(2022年12月20日 柏崎市内)



図6 食料品の品薄状況
(2022年12月20日 柏崎市内)

2. 今後の予定

今後、ここで調査した大雪による交通障害の原因や、同様に新潟県内で発生した倒木によるインフラへの影響など整理していく予定である。

スマホ AI 路面判定試験システムを用いた雪氷災害調査

中村一樹¹・上石 勲¹・砂子宗次郎¹・伊藤陽一¹・本吉弘岐¹・山口 悟¹・平島寛行¹・中井専人¹・山下克也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

2022/23年冬季は、全国的に寒気の影響を受けやすい時期と受けにくい時期が交互に現れた。2022年12月中旬から下旬や1月下旬は、冬型の気圧配置が強まって寒気の影響を受けた。新潟県では、12月18日から19日にかけて強い冬型の気圧配置となり下越と中越を中心に記録的な大雪となった。12月23日は強い寒気を伴った低気圧が発達しながら日本海を東南東に進んだため、海上を中心に雪を伴った暴風となり、佐渡市では非常に強い風を観測した。また、2023年1月24日から25日にかけては冬型の気圧配置が強まり、強い寒気の影響を受けて大雪となった所があった。

12月の寒波の際は、湿った重い雪や集中豪雪により、着雪による倒木や枝折れ等による停電、通信障害、除雪の遅れによる交通障害、国道8号や17号等での立ち往生発生、公共交通機関の運休、物流の遅れ等が発生した。1月の寒波の際には、交通障害、物流への影響、停電に加え、水道管の破裂の多発に起因する断水等も発生し、県内外でバックカントリースキーの雪崩事故が多発した。一方、高速道路と国道の同時一時通行止めによる集中除雪実施のような新たな対応の試みも行われた。

防災科学技術研究所(以下、防災科研)雪氷防災研究センターでは、従来からこのような雪氷災害に対して現地調査を実施しているが、2022/23年冬季から当センターで開発したスマホ AI 路面判定試験システムを用いた調査を開始した。本報告では、スマホ AI 路面判定試験システムの概要について紹介し、災害調査に用いた結果について報告する。

2. スマホ AI 路面判定試験システムの概要

図1及び図2に示すように、車両から前方画像をスマートフォンのアプリケーションで撮影し、1枚/2秒の画像をクラウドサーバーへ送信する。クラウドで画像の AI 処理を行い、Web サーバーに判定結果等を配置する。配置されたデータを基に、乾燥、濡れ、水たまり、冠水、湿雪(深さ4段階)、凍結、乾雪(深さ4段階)、圧雪の14区分の路面判定結果を地図上に可視化できるように試験システムを構築した。さらに、地図上の走行軌跡をクリックすることで、その区間の走行画像を表示確認可能とした。

3. スマホ AI 路面判定試験システムを用いた災害調査

図3に2022年12月19日夜の長岡市内の調査結果例を示す。このように、車両にスマートフォンを設置してアプリを立ち上げ走行するだけで、路面状態が判定され記録されるほか、走行した道路の2秒に1枚の画像が時間、位置情報付きで記録されるため、道路沿線に発生している災害状況

の記録と閲覧が容易に可能となった。また、複数の調査班の位置と状況がリアルタイムに共有され、どこからでも把握できるため、臨機応変な調査が可能となった。

2022/23年冬季には、スマホ AI 路面判定試験システムを用いて実施した複数の災害調査速報(道路や倒木等)を防災科研雪氷防災研究センターのホームページで公開した(<https://yukibousai.bosai.go.jp/kaiseki/20221218Gousetsu/>)。取得された画像等のデータは、路面だけではなく様々な要素をセンシングするための AI の教師データとなり得るほか、2秒に1枚の画像データをつないで動画にすると、被災状況がわかる説得力のある啓発情報として被害の拡大防止に役立つ可能性があることがわかった。

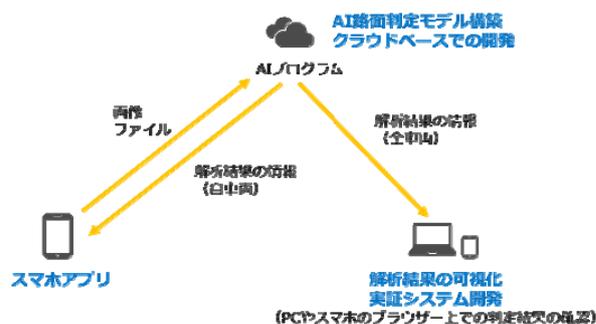


図1 スマホ AI 路面判定試験システム全体構成。



図2 スマホ AI 路面判定試験システムの概要。

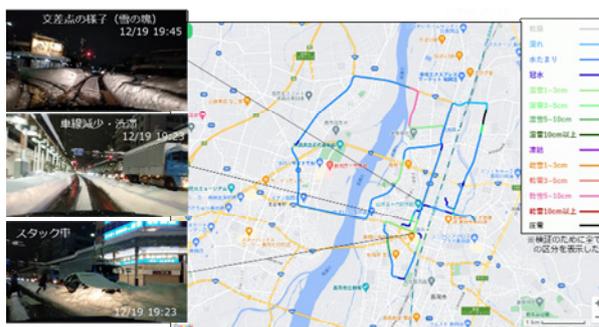


図3 2022年12月19日夜の長岡市内の調査結果例。

糸魚川市柵口地区における 2022-23 冬期の雪崩発生状況

高原晃宙¹・渡辺伸一¹・吉柳岳志¹
 (1:土木研究所雪崩・地すべり研究センター)

1. はじめに

当センターでは、毎年多数の雪崩が発生している糸魚川市柵口地区において、継続的に雪崩の調査・観測を実施している。2022-23 年冬期間において、新たに堆積区等の雪崩発生前後の状況確認のためインターバルカメラを追加設置するとともに、UAV を用いて定期的に地形の計測を行った。本報告では、観測結果をもとに雪崩発生区から堆積区までの雪崩発生前後の雪面地形の比較を行った結果を紹介する。

2. 方法

調査の対象地は、柵口地区西方にある権現岳の東側斜面である。当該斜面の標高 250~600m 付近は緩斜面であり、標高 600m から山頂(標高 1104m)付近までは急斜面をなし雪崩が毎年発生している。また、傾斜の変換点(標高 600m 付近)には、凹状の地形が存在し、当該箇所には堆積した残雪として残る。観測では、標高 600m 付近の図 1 に示す位置に観測機器を設置し、0.5 m/s²(ミリカイン:0.001cm/s²)以上の震動を記録した地震計データ、伝送されるインターバルカメラの画像(図 2)を確認し、雪崩発生とその流下状況の確認を行った。そのうち、凹状地形に留まらずに流下した雪崩(以下、規模の大きな雪崩)の発生前後の比較を行うため、令和 5 年 2 月 3 日及び 3 月 1 日に UAV 自動航行による連続写真撮影を行い、作成した三次元モデルから 2 時期比較を行った。

3. 結果

2022-23 年冬期の積雪深の経時変化、雪崩件数、雪崩発生日を図 3 に示す。地震計の観測結果から推定される雪崩発生件数は 135 回であった。そのうち、規模の大きな雪崩は 6 回であった。これらの雪崩について三次元モデルの 2 時期比較により、雪崩発生区・走路及び堆積区の範囲や発生区等の勾配等が把握された。

4. まとめ

インターバルカメラの追加設置により、雪崩発生の状況把握がより確実にできるようになり、雪崩発生直後に UAV 等により迅速な調査実施が可能となり、状況把握ができるようになった。また、積雪期間内での複数時期において UAV による撮影及び SfM 技術を活用することで、雪面地形の変化や雪崩諸元の把握が可能であることが確認された。

今後、今回取得したデータを用いて、発生範囲や地形的特徴などの分析を引き続き検討を進めてまいりたい。



図 1 インターバルカメラ、地震計、積雪深計設置状況

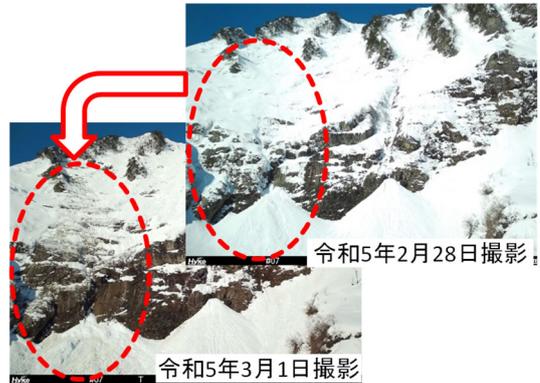


図 2 雪崩発生前後のインターバルカメラ画像

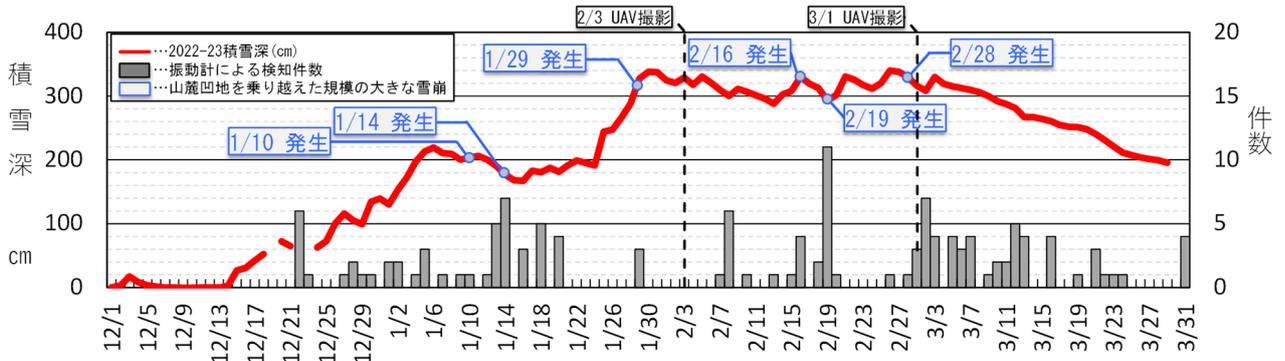


図 3 2022-23 一冬期での権現岳における積雪深及び雪崩検知件数

北日本における過去の雪崩災害発生件数と積雪安定度の統計的關係

勝山祐太¹・勝島隆史¹・竹内由香里¹

(1: 森林総合研究所)

1. はじめに

積雪変質モデルを用いて推定される積雪安定度に基づく雪崩災害リスク管理が世界的に普及しつつある(Morin et al. 2020). しかし、積雪安定度と雪崩災害件数の定量的な関係性についての理解が進んでおらず、推定される積雪安定度に応じてどれだけ雪崩災害リスクがあるかどうか判断することは難しい. そこで、本研究では、過去の雪崩災害件数と積雪変質モデルにより推定される積雪安定度の統計関係について調べた.

2. データと方法

過去の雪崩災害データとして、新潟大学災害・復興科学研究所の「日本の雪崩災害データベース」(和泉 2010)のうち、新潟・福島県以北における日々の合計雪崩災害件数を使用した. また、積雪安定度は、SNOWPACK モデルに JRA-55 領域ダウンスケーリングデータ(水平解像度 5km)を入力し、傾斜 38°の一様な斜面を仮定することで日々の積雪安定度を新潟・福島県以北の広域で推定した. この積雪安定度を基にして日々の雪崩災害件数を説明する確率モデルをモンテカルロ法により推定することで、雪崩災害件数と積雪安定度の統計関係を調べた. また、この推定に際しては、湿雪雪崩事例を省くために、対象期間を 12 月から翌 2 月までとし、積雪変質モデルの計算結果において各市町村の平均積雪深が 5cm 以下の場合や積雪の半分以上がざらめ雪となっている場合を除いた.

3. 結果と議論

推定の結果、積雪安定度が閾値 1.89 を下回った地域の合計面積が広いほど指数関数的に雪崩災害件数が増加すると分かった. この積雪安定度の閾値は、標準偏差 0.09 の精度で推定された. Hirashima et al. (2008)によると、2004・2005 年冬に多発した雪崩災害事例においては、積雪安定度の閾値を 1.5~2.0 付近に設定すると雪崩予報精度が良いと報告されており、今回の推定結果はこれを支持するものとなった. 今回推定された確率モデルを用いて雪崩災害件数の年々変動を再現したところ、過去の雪崩災害件数の年々変動を凡そ再現することができた. 一方で、1962 年や 1973 年のような特異的に災害件数の多い年の再現はできなかった.

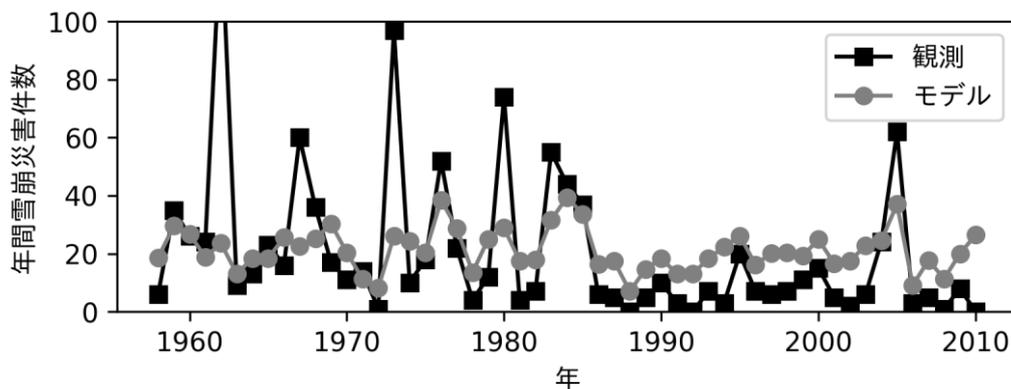


図1 雪崩災害件数の年々変動(黒色)とモデルにより再現された結果(灰色)の比較.

謝辞

本研究で使用した「日本の雪崩災害データベース」は、新潟大学災害・復興科学研究所より提供された.

文献

- Morin, S. and 16 others (2020): Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting: A status report on current implementations and prospects for the future. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **170**, 102910.
- 和泉薫(2010): 日本の雪崩災害データベース, https://www.nhdr.niigata-u.ac.jp/nadare_db/
- Hirashima, H., Nishimura, K., Yamaguchi, S., Sato, A., and Lehning, M. (2008): Avalanche forecasting in a heavy snowfall area using the snowpack model. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **51**, 191–203.

妙高山域幕ノ沢の雪崩堆積区における積雪深分布

竹内由香里・勝山祐太・勝島隆史
(森林総合研究所十日町試験地)

1. はじめに

妙高山域の幕ノ沢では、2000年から雪崩検知観測を継続し、これまでに流下距離が2000 mを超える大規模な雪崩を8件観測した¹⁾。2022年2月21日に発生した乾雪表層雪崩については、無人航空機(UAV)による写真測量に基づいて、雪崩堆積物(デブリ)の厚さ分布を推定することを試みた²⁾。一方、これまでの幕ノ沢における積雪調査は雪崩堆積後にのみ行なっていて、デブリが混入していない、自然に降り積もった積雪の分布を測定したことがなかった。それは、幕ノ沢は雪崩の危険があるので冬期には立ち入らないことに加え、積雪が多く測深棒で多点の測定を行うのは容易ではないからでもある。UAVを用いることにより、短時間で広範囲の積雪深分布データを得られるようになったので、幕ノ沢の雪崩堆積区における自然積雪の分布を把握するための調査を行なった。得られた積雪深分布に基づいて、2022年の雪崩のデブリ厚さ分布の推定結果について再度の検討を行なった。

2. 調査と解析の方法

積雪深分布の調査は幕ノ沢の雪崩堆積区を対象に2023年3月9日に実施した。UAV(DJI社製 Phantom 4 RTK)を用いて空撮を行い、後処理キネマティック方式(PPK)で位置座標を補正したうえでOpenDroneMap Version 3.0.3を使用して数値表層モデル(DSM)を作成した。PPKでは、雪崩堆積区近く(図1のM地点)にGNSS受信機(Drogger DG-PRO1RWS)を設置し、これを基準局として位置補正を行った。積雪深分布はDSMと、国土地理院の数値標高モデル(5mDEM)を5 cmメッシュに内挿した値との差で求め、15地点にて測深棒で測定した値と比較して+35 cmの補正をした。

3. 結果と考察

2022年の雪崩の堆積区と同じ範囲を対象に積雪深の分布傾向を調べた。図1の6つの区域ごとに求めた平均積雪深は2.7 m~3.9 mで、沢の左岸寄りに比べて右岸寄りが多く、上流ほど多い傾向がみられた(表1)。デブリの厚さは、UAVで得られた雪面高さから自然積雪層の厚さを差し引いて求めることができる。2022年の雪崩堆積区の自然積雪層厚さは、断面観測で測定した値が唯一であったため、やむを得ず堆積区全域で一様と仮定した。2023年の積雪深と同様に、2022年雪崩堆積後の自然積雪層厚さも上流ほど多かったと考え、堆積区全域で一様としたことにより、上流のデブリ厚さを過大評価した可能性があることがわかった。そこで試みに、2022年雪崩堆積後の自然積雪層の厚さ分布が、2023年の積雪深分布と同様と想定してデブリ厚さを再計算した。UAVにより雪崩調査は大きく前進したが、雪崩堆積量を求めるには、雪崩堆積後の自然積雪層の厚さが必要で、その推定は未だ難題のままであることを示す結果であった。

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.

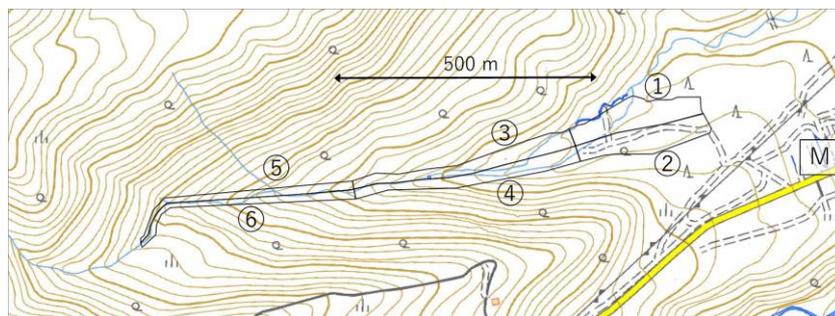


図1 幕ノ沢の雪崩堆積区と積雪深分布の解析範囲。右端のMは積雪深計の位置
(国土地理院地図を使用)

表1 区域ごとの積雪深平均値

	積雪深 (m)	標準偏差 (m)
①	2.7	0.6
②	2.9	0.4
③	2.7	0.6
④	3.3	0.6
⑤	3.5	0.8
⑥	3.9	0.7
M	2.2	—

Mは積雪深計測定値

気象モデルの降水量出力でみた 2022 年 12 月後半の大雪時の降水形態

○本吉弘岐¹・中井専人¹・山口悟¹・砂子宗次朗¹・上石勲¹・中村一樹¹・山下克也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

2022 年 12 月後半の大雪では新潟県を中心とした北陸地域で交通障害、倒竹木やそれに伴う停電など、さまざまな災害が生じた。降雪の量だけでなく、降水形態によって、大雪時の雪氷災害の様相も変わりうる。降水形態の変化は雲解像気象モデルを活用することで予測することが可能である。雲解像モデルで利用される雲微物理過程にバルクスキームでは、水蒸気、雲水、雲氷、雨、雪、霰などのクラス分けされた水物質の混合比や数濃度を予報変数としており、地上での降水量出力として雨、雪、霰のクラス別の降水量が予測される。本研究では、このようなバルクスキームの雲微物理過程から得られる雨、雪、霰のクラス毎の地上降水量から、降水状態を端的に表す降水形態のクラス分けを行うことで、2022 年 12 月後半の大雪時の降水形態について調べた。

2. 気象モデル計算と降水形態のクラス分け

本州日本海側を含む地域を対象に、気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) による気象予測計算を行った。初期値・境界値として気象庁メソスケールモデル (MSM) の GPV を用いて、5km 水平解像度、1.6km 水平解像度の 2 段階でのネスティングを行った。1.6km 水平解像度の雲物理計算では、積雲対流パラメタリゼーションを用いず、雲物理過程のみを用いた。降水形態のクラス分けを行うためのパラメータとして、雨滴割合 (F_R , 総降水量に対する雨による降水量の割合)、霰割合 (F_G , 固体降水 (雪と霰) の総降水量に対する霰による降水量の割合) を算出した。これら 2 つのパラメータを用いて表 1 のようなクラス分けを行った。

クラス名称	降水形態	雨滴割合	霰割合
rain	雨	$0.95 < F_R$	
slush	雨+湿雪	$0.5 < F_R \leq 0.95$	
sleet	雨+湿雪	$0.01 < F_R \leq 0.5$	$F_G \leq 0.1$
wet-grpl	雨+湿霰	$0.01 < F_R \leq 0.5$	$0.1 \leq F_G$
snow	雪	$F_R \leq 0.01$	$F_G \leq 0.01$
grpl<10%	雪+霰 (<10%)	$F_R \leq 0.01$	$0.01 < F_G \leq 0.1$
grpl<50%	雪+霰 (<50%)	$F_R \leq 0.01$	$0.1 < F_G \leq 0.5$
grpl>50%	霰 (>50%)	$F_R \leq 0.01$	$0.5 < F_G$

表 1: 降水形態のクラス分け

3. 結果

図 1 に計算の一例として、2022 年 12 月 18 日 12:00 (JST) に対する予測結果を示す。新潟県沿岸海域をみると、佐渡島の北側では雪であるが、本州沿岸に近い領域では、雨のみのクラスは見られないものの雨と固体降水の混合状態での降水が占めている。その領域の中にある佐渡島では、陸域の沿岸部で霰、内陸で乾雪、さらに標高の高いところでは霰を含むやや重い降雪が予測されていた。佐渡島では 12 月 18 日の 12 時ごろから最大で 9 日間におよぶ倒木や倒竹を原因とする停電や道路閉塞が生じており、18 日の午前中から降水形態において同様の状況が継続していたことから、冠雪が増加していたことが予想される。また、この図からは、同じく倒木の影響が大きかった能登半島も佐渡島と似た様な状況にあったと推測される。本発表では、同じく倒木の影響が大きかった新潟県村上地域の大雪についても述べたい。

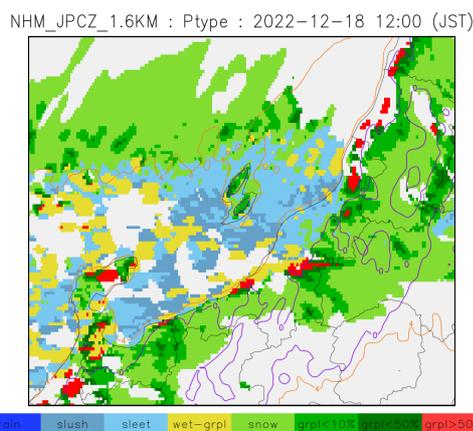


図 1: 2022 年 12 月 18 日 12:00 (JST) の新潟県付近の予測結果。降水形態を色で示す。実線は 0°C, 4°C の等温線。

降雪近接画像を用いた降雪粒子の表面形状に関する研究

吉田ありさ¹・熊倉俊郎²・本吉弘岐³・中井専人³

1:長岡技術科学大学 工学分野 2:長岡技術科学大学 環境社会基盤系

3: 国立研究開発法人防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

1. はじめに

雪氷災害の危険度を面的に把握するためには、降雪量分布とともに、どのような雪が降るかという降雪特性を知る必要がある。例えば、表層雪崩の発生原因である弱層の形成には、雲粒の少ない降雪結晶が関与することが指摘されている。降雪特性の把握のために、国立研究開発法人防災科学技術研究所 雪氷防災研究センターでは、降雪粒子観測施設を設け、自然降雪を撮影することで、降雪粒子の観測を行っている。

本研究では、降雪粒子の画像分類の自動化を行うことを目的として、表面形状として雲粒付着の有無を選択し、画像畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network)を用いてそれを判別するモデルを作成した。

2. 使用した画像

2-1. 撮影手法

本研究で用いた降雪結晶の近接画像は、国立研究開発法人防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの降雪粒子観測施設にて、2018年1月10日および2018年1月22～23日に撮影された。施設では、-5℃の低温室内へ、天井に備えられた開閉式の開口部から自然降雪を直接導入でき、ビデオマイクロスコープとマクロレンズを取り付けたデジタル一眼レフカメラを用いて、ベルトコンベア式の降雪粒子連続撮影装置を移動する降雪結晶のインターバル画像を取得している。本研究ではデジタル一眼レフカメラで撮影した画像(画素数6000×4000ピクセル、記録間隔1分)を使用した。



図1 降雪粒子観測施設
(本吉ら, 日本気象学会 2019 年度秋季大会より)

2-2. 観測期間の選定

撮影時の気象条件は2018年1月10日の低気圧が太平洋側に抜けた冬型の気圧配置による降雪結晶および2018年1月22～23日の南岸低気圧通過時の降

雪結晶の画像を用いた。この期間を使用したのは、これまで、南岸低気圧による降雪が表層雪崩をもたらしやすいことや、低気圧が日本付近を通過する際に、温暖前線に相当する層状雲から雲粒付着の少ない降雪結晶が降りやすいことが知られている。今回雲粒付着の有無を対象とするため、雲粒付き降雪結晶が降った可能性の高い上記の期間を選定した。

2-3. 雲粒付着の有無と雪氷災害の関係

雲粒が付かない幅広六花などの新雪結晶や、小さなほかの結晶形が表面に層になって積もると、表面が滑らかなため接触点が少なく、焼結による堆積後の結晶の結合が少なくなる。つまり、このような雲粒なしの新雪層はすべりやすく、多量の積雪が上に堆積すると弱層となり、表層雪崩の発生をもたらす。よって雲粒付着の有無を判別することで、雪氷災害の危険把握に役立てられると考え、今回雲粒付着の有無を対象とした。

2-3. 教師データの作成

学習には、降雪結晶の近接画像(6000×4000ピクセル)から、30×20分割(200×200ピクセル)の大きさに切り出しして使用した。クラス分けは雲粒なし降雪結晶と雲粒付き降雪結晶の2クラスとした。使用した期間の画像から、目視で雲粒なし結晶と雲粒付き結晶のそれぞれが顕著に表れていると判断した画像から、それぞれ700枚ずつを教師データとして与えた。判別例を図2に示す。

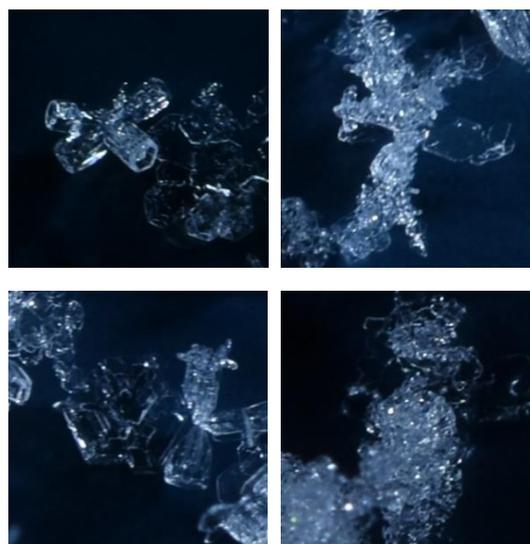


図2 雲粒なし降雪結晶(左2枚)と雲粒付き降雪結晶(右2枚)の判別例

3. 作成したモデルの概要

深層学習(ディープラーニング)とは、人間の脳の神経回路を模したアルゴリズム「ニューラルネットワーク」を利用した機械学習の一種である。深層学習は、特に画像認識の分野で圧倒的な性能を示した。深層学習を用いた画像認識が、従来の画像認識と異なる部分は特徴量の抽出である。従来の手法では、人間が機械に画像の特徴を指定していたのに対し、深層学習では、機械に大量データを学習させることで、機械が自ら画像の特徴を見つけ判別することができる。

CNN(Convolution Neural Network)は、「畳み込み層」と「プーリング層」の組み合わせを繰り返し構成し、画像分類を行う。今回画像数が少ないことから学習効率を高めるため、ImageNet で学習させた 50 層のモデルである ResNet50 を用いてファインチューニングを行った。画像は、ResNet50 に合わせて 244×244 ピクセルで 1400 枚(雲粒付き 700 枚、雲粒なし 700 枚)入力し、学習データと試験データを 7:3 の割合で分けて使用した。活性化関数は softmax、損失関数は binary_crossentropy を使用した。ハイパーパラメータを変化させながら、精度と損失を確認することで、最も制度の良いハイパーパラメータを選択し、結果、バッチサイズは 16、学習回数は 10 回、最適化関数は Adam、学習率は 0.001 に設定した。正解率向上のため、画像の回転による学習データの増し学習を行い、雲粒付着の有無を出力した。全結合層は自作の構造(クラス分類用の 2 ユニット 1 層)を用いた。

4. 結果と考察

作成したモデルの学習結果は、図 4 に示すように、精度 0.9169 (91%)、損失率 0.2442 で、学習を進めるごとに精度が上昇・損失が減少しており、学習できているといえる。しかし、作成したモデルを使用し、試験データの判別を行ってみると、精度は 0.5714 (57%) と判別できていなかった。この理由として、雲粒の有無ではなく、輪郭や形状の組み合わせも合わせて学習している可能性が考えられる。輪郭や形状の組み合わせを見ているのではないかと考えた理由については、輪郭や形状を考慮していると考えられる「降雪結晶が写っているかいないか」の場合のモデルで、図 5 に示すように試験データで判別を行った場合も 65% 程度の精度が得られており、「雲粒が付いているかいないか」のモデルより、試験の精度が高いためである。しかし、この場合でも試験で 65% の精度であり、十分な精度ではない。この理由としては、入力画像の解像度が低い点や学習データが少ない点が影響していると考えられる。

これらを踏まえ、今後精度を高めるために、訓練データを増やし、モデルの再構築を行なうことが必要である。また、今回は雲粒の付着具合をターゲットにモデルを作成したが、表面形状で輪郭や形状の組み合わせが判別に影響すると思われるもの(あられ、結晶)についてもモデルを作成し、今回のモデルと比較したいと思う。

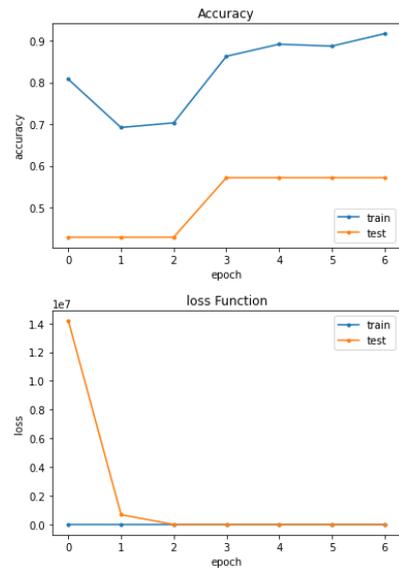


図 5 「雲粒が付いているかいないか」モデルの精度と損失

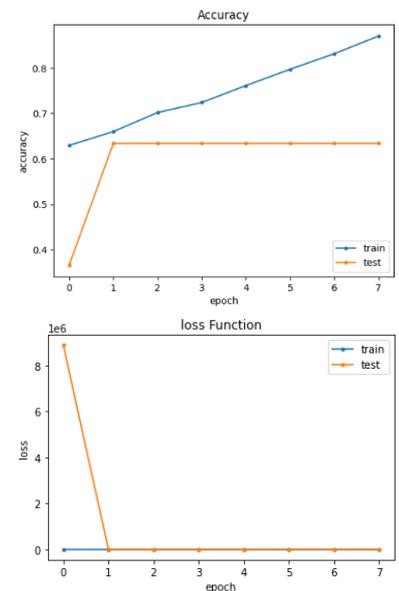


図 4 「降雪結晶が写っているかいないか」モデルの精度と損失

文献

- 秋田谷英次, 中村一樹(2013):低気圧前面の降雪結晶による弱層形成, 日本雪氷学会北海道支部, 北海道の雪氷 No.32.
- 石坂雅昭, 椎名徹, 中井専入, 佐藤篤司, 岩本勉之, 村本健一郎(2004):画像処理手法を用いた自動観測による降雪粒子の同定について その 2 長岡で観測された降雪粒子と自動観測による検出手法の検証. 雪氷, 66,647-659.
- 松下拓樹(2021), 雲粒付着の少ない降雪結晶による乾雪表層雪崩事例について, 日本雪工学会 雪氷研究大会

魚沼丘陵における融解層の観測

高見和弥¹・竈本倫平¹・鈴木賢士²・柴村哲也³

(1:鉄道総合技術研究所 2:山口大学大学院創成科学研究科 3:日本気象協会)

1. はじめに

気象レーダーの活用は降水の分布を把握する有効な手段である一方で、グラウンドクラッタの影響により地表に近い低高度を観測することは難しい。降雪粒子は併合・着氷成長や融解によって高度による変化が大きいため、レーダーの観測高度から地表面までの変化を考慮しなければならない可能性がある。Matsuo and Sasyo(1981)は雪片の粒径、密度および気温減率を一定と仮定することで 0 °C 高度より下の雪片の融解を計算するモデル(以下、融解モデル)を提案している。また、融解モデルの入力値である雪片の粒径や 0 °C 高度を気象モデル(上之ら, 2015)や偏波レーダー(高見ら, 2020)を利用して与えることが検討されている。融解モデルでは融解層内での雪片の併合がないことや、気温減率を一定(6 °C km⁻¹)で仮定しており改良の余地があるが、実際に融解層内の粒子の変化を観測した研究は少ない。そこで、本研究では標高差やドローンを利用して融解層の上下および融解層内での粒子や温湿度の鉛直分布を観測し、モデルの検証データを収集した。

2. 観測

図 1 に観測地点の位置を示す。鉄道総研塩沢雪害防止実験所(図 1d, 標高 195 m)では降雪粒子の観測機器として Parsivel²(OTT 社)、G-PIMMS(Suzuki et al. 2016)を常設した。上越国際スキー場山頂(図 1b パノラマクワッドリフトエリア, 標高 723 m, 塩沢との標高差 528 m)に温湿度計等の観測機器と Parsivel²を設置した。ただし、山の稜線にあるため風速が大きいこと、防風ネットを設置できていないことから落下速度の観測値はそのまま使用することができない。また、一部の観測事例では、シャトー塩沢スキー場内(標高 442 m, 塩沢との標高差 247 m)に一時的に温湿度計、雨量計を設置した。加えて、一部の事例では各地点に Rainscope を設置した。Rainscope は G-PIMMS と同様に降雪粒子の画像を撮影することができるが、カメラや画像の保存形式が異なりより鮮明な画像を得ることができる。

塩沢実験所から 3.4 km 離れた地点には X バンド偏波レーダー(FURUNO, WR2100)を設置し、谷筋(六日町方向)から上越国際スキー場上空までの 7 方位で RHI 観測を 1 分毎に行った。また、塩沢実験所には K バンド鉛直レーダー(METEK, Micro Rain Radar)を設置した。

一部の観測事例では塩沢雪害防止実験所よりドローン(DJI, Matrice210V2)の足に簡易温湿度計(SHTDL-3)を取り付け、温湿度の鉛直分布を観測した。ドローンは約 20 分間で地上高 350 m までを 50 m ごとにホバリングを行った。

3. 結果

塩沢実験所と上越国際スキー場で同時に降水を観測した事例の内、上越国際スキー場が気温 0 °C 未満の事例を対象に Parsivel²の観測から求めた粒径分布の中心値(D_m)の比を図 2a に示した。また、両地点の気温を図 2b に示した。図 2a より、塩沢での気温が 0 °C 以上の事例では粒子の融解に伴って気温に対して指数的に D_m の比が小さくなっている一方で、塩沢での気温が 0 °C 未満の事例と比べても D_m の比が大きい事例が気温 0 °C に近いところで多数観測されている。これは融解層の上部では融解と並行して併合が起こっていることに加え、雪片が湿ることにより併合しやすくなっている可能性が考えられる。このことから、単一雪片の融解のみの融解モデルでは表現できないことが示唆された。次に、図 2b より逆転層を除いて 2 地点の観測による気温減率はおよそ 6 °C km⁻¹ に近い値となっているが、塩沢実験所での気温が 0 ~ 2 °C の範囲ではばらつきが大きいことが確認できる。よって、融解層が地上に接するような事例では気温減率を一律の値で仮定することは雪片の融解量の推定誤差の原因となる可能性があることが分かった。

2023/3/2 の事例では、ドローンを用いて温湿度の鉛直分布(図 3a, b)を観測するとともに、上越国際スキー場とシャトースキー場に Rainscope を設置して粒子の画像を取得し、融解前(図 3c 上)と融解中(図 3c 下)の粒子の画像を取得した。この事例において、塩沢実験所では降水は全て雨滴であった。解析の詳細については当日発表する。

文献

上之和人ら。(2015): 融解過程を考慮した電線着雪・落雪モデルの開発. 電力中央研究所報告, 15001.

Matsuo, T., Sasyo, Y. (1981): Melting of snowflakes below freezing level in the atmosphere. *JMSJ*, 59, 10-25.

Suzuki K et al. (2016). Microphysical features of solid/melting particles by ground-based direct observations for the GPM/DPR algorithm development. *Proceedings of the 2016 IEEE GARSS*, 10-15, 2016.

高見和弥ら。(2020): 冬期の降水形態の判別を目的とした偏波レーダーを用いた 0 °C 高度推定手法. 土木学会論文集 B1 (水工学), 76, I_205-I_210.



図1 (a)観測地点の位置および各観測地点の位置と(b, c, d)設置状況, 地理院地図に加筆

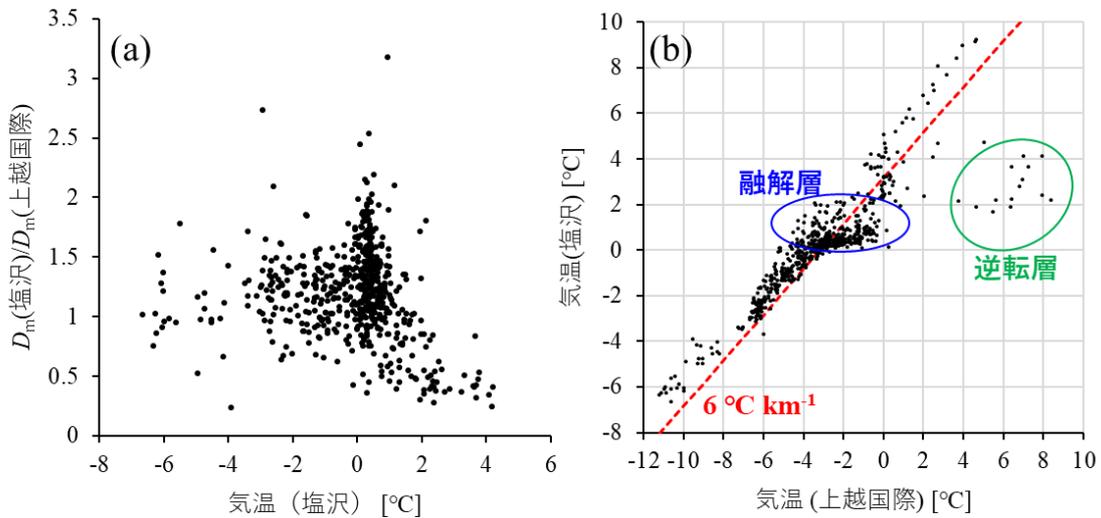


図2 塩沢雪害防止実験所と上越国際スキー場の観測における(a)塩沢の気温と2地点の D_m の比, (b)2地点の気温

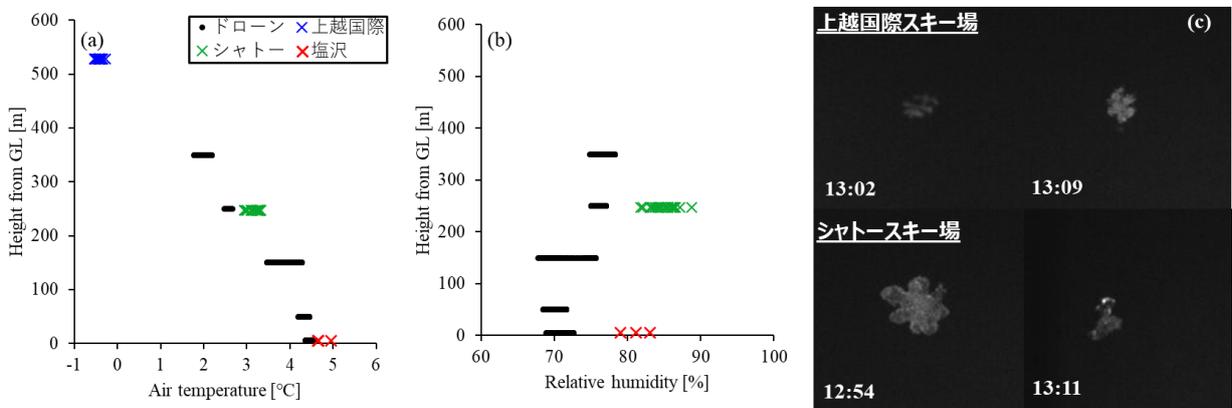


図3 2023/3/2 12:54 - 15:14, ドローン, 地上観測による(a)気温, (b)相対湿度と

(c)上越国際スキー場, シャトースキー場で観測した粒子画像の例, 画像の幅は 2 mm

地上ネットワーク観測を用いた降雪強化メカニズムに関する研究構想

○山下克也¹・本吉弘岐¹・中井専人¹・橋本明弘²・

(1:防災科学技術研究所 2:気象研究所)

1. はじめに

降雪強化メカニズムの研究は、雪の多い山岳や丘陵に降雪量分布を把握できるような複数の観測点を設けることが難しいため、主に数値シミュレーションにより進められてきた。しかしながら、地上の降雪量分布を把握することが難しいため、定量的な理解が不足している。我々は、特別豪雪地帯の新潟県中越地域に独自に開発した既存の融雪装置を活用して降雪量分布を測定する地上稠密ネットワーク観測システム(Yamashita et al., 2020)を所有している。また、そのシステムで、新潟県長岡市周辺で起こる降雪強化の影響範囲を把握できる可能性を気象レーダーとの比較等により確認している。本稿では、地上ネットワーク観測により得られる降雪量分布を用いた降雪強化に関する研究の構想を記す。

2. 研究構想

冬季季節風時の日本海側の山沿いから山岳地域は、地形斜面の影響を受けた山岳性降雪が降ることが多い。そのため、降雪強化メカニズムの研究を行うのに適した場所である。降雪強化により地上降雪量分布がどのように変わるのかを理解するためには、影響を受ける範囲や量の把握が必要である。我々は、日本海側の山沿いに位置する新潟県長岡市を中心に地上直接観測、地上リモセン観測及び気象モデルを用いて降雪研究を行っている。それらと新潟県長岡市とその周辺を観測範囲としている他機関の複数の気象レーダー(気象庁の新潟レーダー、国交省の中ノロレーダー、薬師岳レーダー、聖高原レーダー)のデータを用いることで、未だ未解明な点の多い降雪強化による降雪量分布の変化やそのメカニズムの解明ができると考えている。具体的には、降雪強化による降雪量分布の変化を定量的に評価することを目的として、降雪強化事例が確認されている新潟県長岡市とその周辺をフィールドとし、冬季の連続観測データや気象モデルを用いて、これまでに知られている典型的な降雪パターン(例, Nakai et al., 2005)ごとの降雪強化過程の同定及び増雪量の推定を行うことを構想している。この構想を実現するために、以下の研究項目を今後実施する予定である。

① 地上ネットワーク観測と気象レーダーの面的分布を用いた降雪強化による増雪量の推定

開発した地上降雪量分布取得システムと気象レーダーの冬季連続観測の実施及び他機関の気象レーダーデータの収集を行う。それらのデータを解析することにより、複数高度の面分布から降雪強化領域を抽出し、様々な降雪パターン時の増雪量を地上降雪量分布から推定する。

② 観測データを用いた降雪強化過程の分析

直接及びリモセン観測装置を用いて、上空での変化の履歴情報を持つ降雪粒子の雲微物理量(サイズ、数濃度、落下速度等)の冬季連続観測を行い、そのデータを解析する。解析データを用い降雪強化により降雪雲内の雲微物理量がどのように変化するかを分析し、変化の主要因となる過程を同定する。

③ 気象モデルを用いた降雪強化による増雪量の推定とメカニズム解明

気象モデルによる降雪量分布の予測値を観測値と比較検証した上で、地形有り無しの数値シミュレーションを行い、増雪量を推定する。また、雲微物理素過程追跡スキームを用いて降雪強化メカニズムを解明する。

講演では、既存の観測事例等を示しながら構想をより詳細に説明する予定である。

参考文献

- Yamashita, K., S. Yamaguchi, T. Saito, Y. Yamakura, E. Kanda, S. Nakai, and H. Motoyoshi, 2020: Quantitative Snowfall Distribution Acquisition System with High Spatiotemporal Resolution Using Existing Snowfall Sensors, SOLA, 16, 271-276.
- Nakai, S., K. Iwanami, R. Misumi, S. G. Park, and T. Kobayashi, 2005: A Classification of Snow Clouds by Doppler Radar Observations at Nagaoka, Japan, SOLA, 1, 161-164.

「針付鼓」の観測報告

藤野丈志¹

(1: 株式会社興和)

1. はじめに

2022年12月18日から19日にかけて、新潟県では中越地方と下越地方で大雪となった。柏崎、長岡、守門では80 cmを超える24時間降雪を記録し、国道等で大規模な立ち往生が起きた。この大雪の始まりとなる18日夕方から夜に、新潟市で鼓状結晶を中心とする降雪を観測したが、その中に鼓状結晶の板状部分から針が伸びた雪結晶が見つかったので、その形の特徴と、観測時刻前後の雪結晶の形状について報告する。

2. 形の特徴

鼓状結晶に針が成長した雪結晶を図1に示す。板状結晶部分は縁高となった広幅六花であり、その角から針が伸びていた。このような形の特徴からここでは「針付鼓」とした。針は片方の板状結晶で長く多数のびており、その長さは $350\mu\text{m}$ であった。「針付鼓」の針部分を除くc軸方向の長さは $640\mu\text{m}$ 、板状部分の直径は $450\mu\text{m}$ であった。

3. 気象状況

雪結晶の観察場所は弥彦山と角田山の間にある五ヶ峠近くの標高約96 m、日本海から約700 mの地点である。気温は測定していないが、湿った降雪であったことと、雪結晶が観察中に融けていく様子から、ほぼ 0°C であったとみられる。「針付鼓」が観測されたときの雲画像をみたところ、日本海寒帯気団収束帯に伴う降雪雲が観察場所上空を通過中であった。

4. 観測時刻前後の雪結晶の形状

18日15時12~36分の24分間に撮影した85枚の写真より、結晶の形を判別できた雪結晶をグローバル分類の雪結晶の形状 (Kikuchi et al., 2013) にもとづいて分類し、鼓状結晶に対しては多重鼓様雪結晶 (多重鼓様雪結晶観測グループ, 2018) かどうかも判別した。その結果を図2に示す。最も多く観測された雪結晶は鼓状結晶 (CP1) で、観測期間中は継続して降っていた。鼓状結晶の約2/3が樹枝鼓、約1/4が多重鼓であった。鼓状結晶に次いで鞘状結晶 (C2) が多くみられ、そのほとんどは鞘であった。「針付鼓」は、鼓状結晶が降り続くなかで鞘状結晶が混じりだしたタイミングで降ってきたことがわかる。観測期間中の雪結晶は、結晶の形が明瞭に判別できる、雲粒付結晶 (R1) 程度の付着量のものが最も多く、雲粒がまったく付着していないものも多数あり、「針付鼓」もそのうちの一つである。

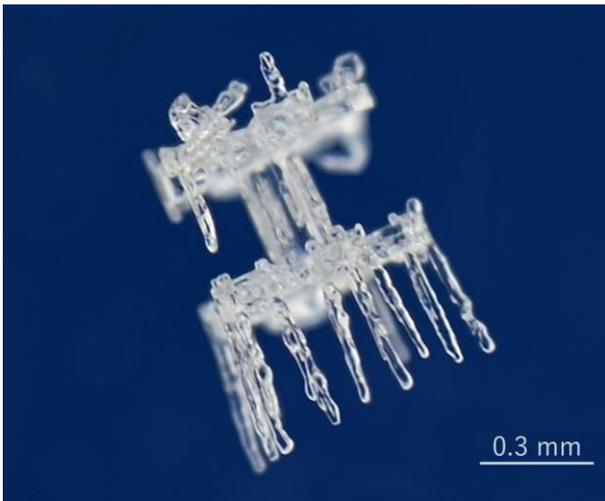


図1 鼓状結晶に針が成長した「針付鼓」

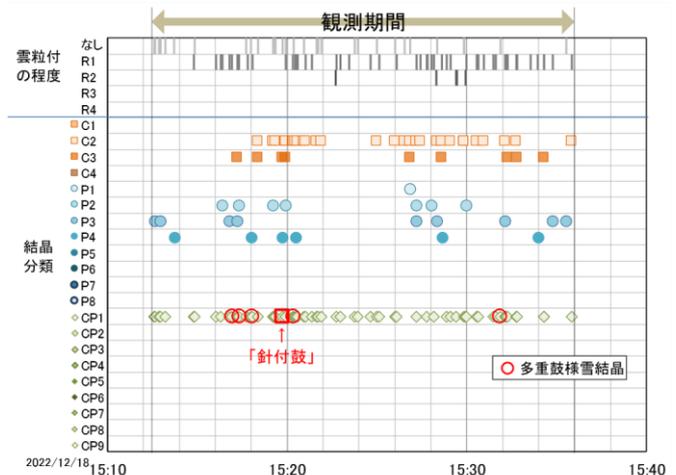


図2 雪結晶の分類

文献

Kikuchi et al. (2013): A global classification of snow crystals, ice crystals, and solid precipitation based on observations from middle latitudes to polar regions. *Atom. Res.*, 132-133, 460-472.

多重鼓様雪結晶観測グループ(2018): 2018年北陸の大雪時に観測された「多重鼓様雪結晶」、*雪氷*, **80**, 4, Pi-ii.

光学式反射型固体降水種別判別・降水強度計の物理量推定手法の改良について

小柳颯輝¹・熊倉俊郎¹・瓜生大地¹・山崎正喜²・中井専人³・安達聖³・鈴木紘一³・斎藤隆幸⁴・山倉祐也⁴

(1:長岡技術科学大学 2:工房雪測 3:防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 4:(株)スノーテック新潟)

1. 背景

現在、主流となっている降雪観測機器は高価であるため、多観測地点を実現することは難しい現状にある。そこで、多観測地点を実現するための安価な降水種別・降水量観測機器として、熊倉ら(2018)が光学式反射型固体降水種別判別・降水強度計(PDS)を提案した¹⁾。本発表では、このPDSの実用化に向けて、人工降雪実験装置を用いた室内実験において短時間間隔の降水量の推定を行った際の解析結果から、PDSの物理量推定手法の改良を行う。

2. 観測機器と室内実験

2.1. PDS¹⁾

PDS(図-1)は水平に並んだ近赤外線発光素子と受光素子を備えており、照射領域を通過する降水粒子の反射光強度を5kHzでサンプリングし、降水粒子の反射強度継続時間と、近赤外線照射域における最大電圧を求める。この観測値と、常に保持している平均値との差を変化率として、平均値を修正し、降水粒子の実際の直径、落下速度と比例すると考えられる疑似直径 \hat{D} [A.U.]や疑似落下速度 \hat{W} [A.U.]、任意の時間内に観測される粒子の個数 \hat{N} が推定される。ここで、終端速度を層流と仮定した場合の降水量 \hat{P}_r [mm/min]は、式(1)のように推定される¹⁾。



図-1 PDS

$$\hat{P}_r = K_{pr} \hat{N} \hat{D} \hat{W} \quad (1)$$

ここで、 K_{pr} は経験的に求める適当な定数である。

2.2. LPM

本研究では、光学レーザー方式によって個々の降水粒子の粒径 D や落下速度 W を連続測定できるLaser Precipitation Monitor(以下LPMとする)を併用し、 D [mm]と落下速度 W [m/sec]を得た。

2.3. 室内実験²⁾

前述したPDSとLPMに加えて、0.1g単位まで計測が可能な電子天秤を人工降雪実験装置下部に設置し、一般的な降雪に近いような結晶型(降雪A)とあられに近い雪片(降雪B)の2種類のパターンの降雪を降らせ、観測実験を行った。

3. 解析結果

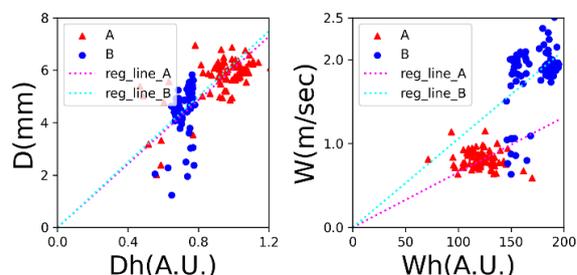


図-2 降雪A、Bにおける $\hat{D} - D$ 、 $\hat{W} - W$ 関係

$\hat{D} - D$ と $\hat{W} - W$ の散布図を図-2に示した。図-2の $\hat{D} - D$ 関係からは、降雪AとBの回帰直線の傾きはおおよそ一致したが、 $\hat{W} - W$ 関係では、降雪AとBの回帰直線の傾きは一致しなかった。

また、降雪Aにおいて、 \hat{P}_r と電子天秤から推定される降水量 P_r [mm/min]の波形は一致しており、 $\hat{P}_r - P_r$ 関係の回帰直線の傾きにおいて1.05を示した。降雪Aにおける \hat{P}_r は5%ほど P_r を過大評価したものの、 P_r はほぼ同じ挙動を示した。降雪Bの $\hat{P}_r - P_r$ 関係における回帰直線の傾きは0.48となり、降雪Bでは P_r のおよそ2倍の \hat{P}_r が推定されている。式(1)によると、 \hat{P}_r は、 $K_{pr} \hat{N} \hat{D} \hat{W}$ によって決定される¹⁾。 \hat{P}_r を過大評価してしまった要因として \hat{W} の誤評価や、あられに近い降雪Bにおいては K_{pr} が適当でなかった可能性が考えられる。

4. 物理量推定手法の改良

前述したように、 \hat{P}_r を過大評価してしまった要因として \hat{W} の過大評価と、降雪Bにおいては K_{pr} が不適当だったことが考えられる。 \hat{W} の過大評価に着目してアルゴリズムの検討を行う。PDSは照射領域において代表される落下距離 h [A.U.]をどの距離においても一定と考えて物理量を推定している。実際には落下速度は粒子の大きさによって変化しており、粒子の大きさに依存して h が変化する。この特性により、粒子の大きさによっては、 \hat{W} を適切に評価できない可能性が考えられる。そこで、粒子の大きさによって h を変化させることで \hat{W} の評価精度の向上を試みた。

文献等

- 1) 熊倉, 他: 光学反射を利用した個体降水測定機器の開発と出力の物理量化について, 雪氷研究大会, 2018
- 2) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター新庄支所 雪氷環境実験所, 2022年8月

野外観測による降雪時の視程変化の特徴

碓井大成¹・杉浦幸之助²・堀雅裕²・飯田肇³

(1:富山大学理工学研究科, 2:富山大学学術研究部, 3:富山県立山カルデラ砂防博物館)

1. はじめに

吹雪が発生すると、舞い上がった雪粒子により視程が悪化し、場合によっては交通事故や遭難事故の原因にもなる。吹雪による視程障害が原因の事故を減らすには、吹雪の発生とその時の視程を正確に予測する必要がある。近年では乱流変動とそれに伴う飛雪流量の変動に着目した研究(池田ら, 2022)や、視程の予測に関する研究(松沢ら, 2002)も進んでいる。そこで本研究では、2021/2022年冬季の野外観測データをもとに、降雪時の視程変化の特徴を調べたので報告する。

2. 方法

データには立山カルデラ砂防博物館の屋上に設置されたディストロメータ(Thies製 Laser Precipitation Monitor)から得られた視程の1分値データを用いた。解析対象期間は2022年1月11日から3月5日である。ディストロメータから出力される視程 Vis [m]は以下の式から算出される。

$$Vis = 3 / \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{A \cdot t} \cdot \sum \left(\frac{D_i^2}{V_i} \right) \right)$$

A : センサー面積[m²], t : 測定時間[s], D_i : クラス i の雪粒子の粒径[m], V_i : クラス i の雪粒子の速度[m/s].

この視程が悪化するときと好転するときで場合分けをし、視程と視程の変化量の散布図を作成した。ここで用いた視程の変化量は変化後の視程から変化前の視程を引いた値である。

3. 結果

ディストロメータの視程をもとに、視程変化を求めた(図1)。マイナスは視程が悪化し(図1a)、プラスは視程が好転する(図1b)ことを意味する。図1aから視程は1分間当たり最大で約700m(1秒間当たりでは約11.7m)も悪化することが分かった。また、図1bから視程が悪い条件下(400m以下)では視程が急激に好転することは少ないことが分かる。

4. 課題

雪道において、時速40km/hのスタッドレスタイヤ着用车が急ブレーキをかけた場合の停止距離は、圧雪路面で約21m、凍った路面では約78.7mである(松沢ら, 2002)。このような状況下において、視程が1秒間で10m以上悪化するというのは非常に危険である。また本解析で、視程が悪い状況というのはしばらく続くことが分かった。今回は視程の時間変化に関する解析のみであるが、今後は気象要素との関係についても解析することで、降雪時の視程変化の特徴について、より明らかにしていきたい。

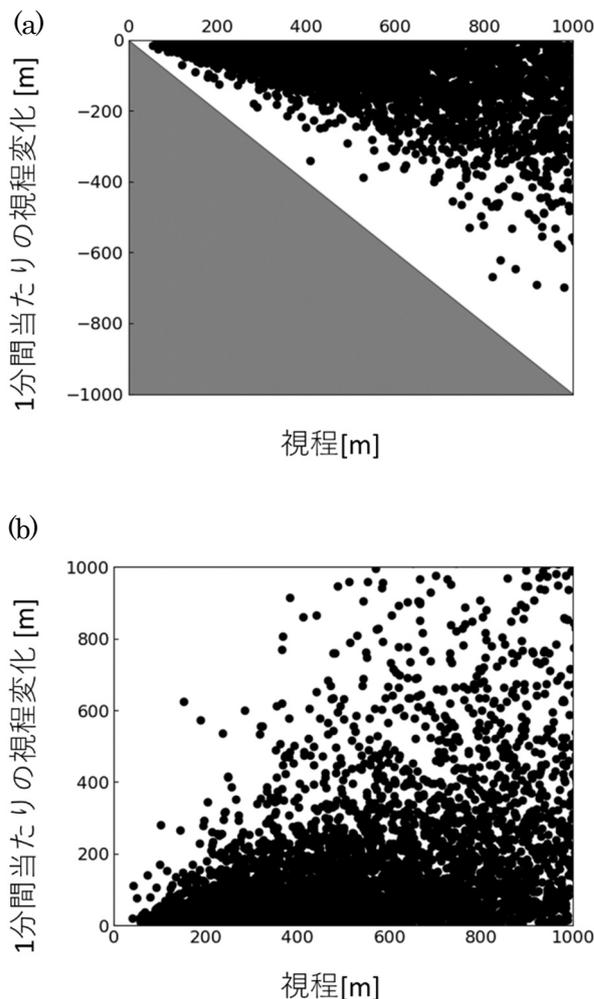


図1 視程の変化。(a)は視程悪化時、(b)は視程好転時。
陰影部は対象外領域。

文献

- 池田侑樹, 川島理沙, 大宮哲, 新屋啓文, 西村浩一, 大風翼 (2022): 発達した吹雪境界層における飛雪流量の最大瞬間値と平均値の関係. 雪氷, 84, 213-227.
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.

路温を用いた路面積雪状態の推定

中野 翔太¹・河島 克久²・渡部 俊²・村田 晴彦³・松元 高峰²

(1:新潟大学理学部 2:新潟大学災害・復興科学研究科 3:新潟大学大学院自然科学研究科)

1. はじめに

路面積雪の厚さや雪質といった路面積雪状態の変化は、冬期道路交通機能の低下を誘発する。そのため、道路管理者は路面積雪状態に応じて除雪作業を行い、道路利用者の安全確保に努めている。より効果的かつ効率的に冬期道路管理を行うためには、路面積雪状態の正確な把握が重要である。

路面積雪状態を把握するために、道路にはセンサーが設置されている。路面積雪状態をリアルタイムで可視化するセンサーは道路管理のために活用されているが、設置費用の観点から多地点に設置することは困難である。そのため、様々な研究機関において路面積雪状態を推定するモデルの構築が行われてきた。しかし、モデルには多くの気象要素が必要であるため、現在は観測環境の整った限られた地域のみでしか活用されていない。したがって、道路管理のために既に取得されているデータを活用するなど、より入手しやすい気象データから簡便に路面積雪状態を推定できることが望ましい。

路温は路面凍結対策のために多地点で取得されており、その値は路面の熱収支の結果で決まる。例えば路面に積雪がない場合、路面は直接大気の影響を受ける一方で、路面に積雪がある場合には熱伝導率が非常に小さい積雪層を介して大気の影響を受ける。そのため、積雪がない場合と比較して積雪がある場合の路面は大気の影響を受けづらくなる。とくに、積雪が水を含む湿雪の場合、積雪層全体が 0°C となり温度勾配がなくなるため、路面はほとんど大気の影響を受けないと考えられる。

このように、積雪の有無や雪質などの路面積雪状態の変化は路面の熱収支に影響を与え、路温を変動させている。そこで、路温データを分析することで逆に路面積雪状態を推定できるのではないかと考えた。本研究では路温を用いて路面積雪状態を推定する方法を確立することを目的に、実際の道路における路温のデータ分析と冬期の野外観測を行った。

2. 研究方法

2.1 実際の道路における路温データの分析

路面積雪の有無による路温の特徴の違いを明らかにするため、実際の道路で観測された路温データの分析を行った。分析には関越道の湯沢 IC～土樽 PA 間において 2020/21 年冬期 (12 月～2 月) に観測された路温データと気象観測データ (NEXCO 東日本新潟支社提供) を使用し

た。積雪の有無に注目するにあたり、路面の積雪深データがないため、本研究では、1 時間降雪量 3 cm 以上の時間を積雪あり、前 24 時間降雪量 0 cm の時間を積雪なしとそれぞれみなして、積雪の有無による路温の特徴の違いを分析した。

2.2 冬期の野外観測

路面積雪の雪質の違いによる路温の特徴を分析するために冬期に路温の野外観測を行った。この観測では、アスファルトで作成した円筒状の供試体 (直径 15 cm, 高さ 6 cm) の表面に温度センサー (Pt100) を埋め込んだ装置を地中に埋めて路温を測定した。また、気温と供試体上の積雪深の測定を行うとともに、降雪時には路面積雪の雪質 (湿雪, 乾雪, 凍結) を記録した。観測地点は新潟大学構内 (新潟市西区) と魚沼市大白川の 2 ヶ所である。

3. 研究結果

3.1 積雪の有無と路温の関係

分析対象とした冬期の 3 ヶ月間において、上記の降雪量の条件でデータの抽出を行った結果、113 個の積雪ありのデータと 1096 個の積雪なしのデータが得られた。これらについて路温 T_r (°C) の分布域に注目すると、図 1 に示すように積雪ありのデータは $-3 \leq T_r \leq 0$ の範囲に全体の 88% が集中していた。一方、積雪なしのデータは $6 \leq T_r \leq 20$ の幅広い範囲に分布していた。

積雪がある時、路温の値が限定的な範囲内を示すことから、路温から積雪の有無を判別できる可能性がある。しかし、積雪がない時も積雪がある時の路温範囲 ($-3 \leq T_r \leq 0$) になることもあるため、路温のみでは積雪の有無を正確に判別することが困難である。そこで、 $-3 \leq T_r \leq 0$ に

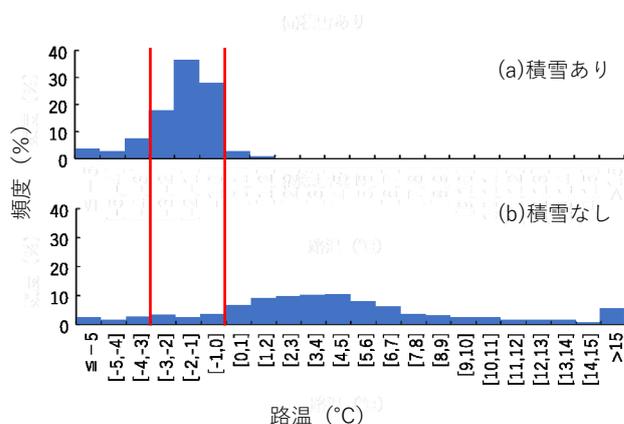


図1 路温の頻度分布 (a: 積雪あり, b: 積雪なし)

おける積雪ありと積雪なしのデータについて、路温と気温 T_a (°C) の関係を分析した。その結果、積雪ありのデータは $T_r \geq T_a$ であるのに対して、積雪なしでは $T_r < T_a$ になるという傾向がみられた。

3.2 雪質の違いと路温の関係

野外観測の結果、63 個の積雪ありのデータと 430 個の積雪なしのデータが得られた。積雪ありのデータを雪質別に分類をすると、湿雪が 31 個、乾雪が 6 個、凍結が 24 個であった。これらについて雪質別の路温の分布を分析した結果、湿雪は 0°C 付近に集中する一方で、乾雪は $-2 \leq T_r \leq -0.5$ の範囲に分布し、凍結は $T_r \leq -2$ のみに分布するというように出現範囲に違いがみられた。さらに、路温と気温の分布を雪質別にみると、図 2 に示すように出現範囲が分かれた。乾雪の分布域は 3.1 節の積雪ありの結

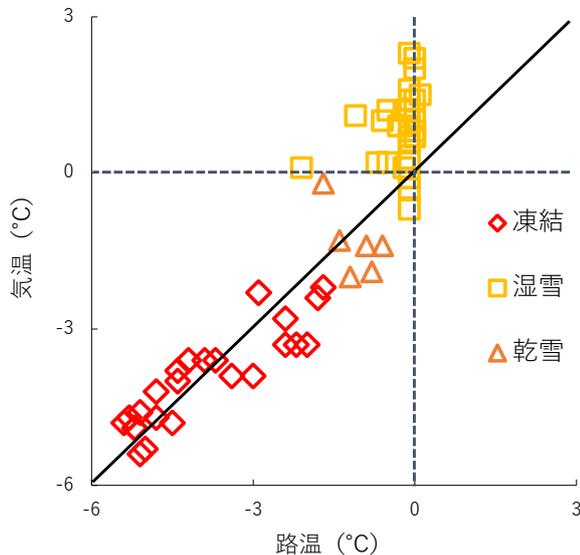


図2 雪質別にみた路温と気温の関係

果と同様に $-3 \leq T_r \leq 0$ かつ $T_r \geq T_a$ であった。したがって、路温と気温の範囲によって雪質が異なることが明らかになった。

4. 路面積雪状態の推定方法の提案と精度評価

以上の結果を踏まえ、路温と気温から「湿雪」、「乾雪」、「凍結」、「積雪なし」の 4 種類の路面積雪状態を推定する方法として図 3 のフロー図を提案する。この推定方法について、分析に使用した野外観測のデータを用いて積雪の有無の推定精度を適中率、空振り率、見逃し率、スレットスコアで確認した。各スコアを算出すると、適中率 96%、空振り率 19%、見逃し率 16%、スレットスコア 70% となった。また、積雪があると判別された内の各雪質の判別正解率を求めたところ、湿雪 88%、乾雪 100%、凍結 74% となった。

5. まとめ

本研究では、雪質による路温と気温の出現範囲の違いに注目して条件を設定することで、路面積雪状態を推定する方法を提案することができた。この推定方法によって、路面積雪状態は湿雪、乾雪、凍結、積雪なしの 4 種類に分けることができる。本研究では推定精度の評価に十分なデータを得ることができなかつたが、路温と気温のみで路面積雪状態の推定がある程度の精度で可能であることから、本手法の精度向上を図ることによって冬期道路管理への適用が期待される。

謝辞

路温データ等をご提供いただいた NEXCO 東日本新潟支社の関係各位に謝意を表します。本研究は、JSPS 科研費 20K05043, 22H01737 の助成を受けて実施された。

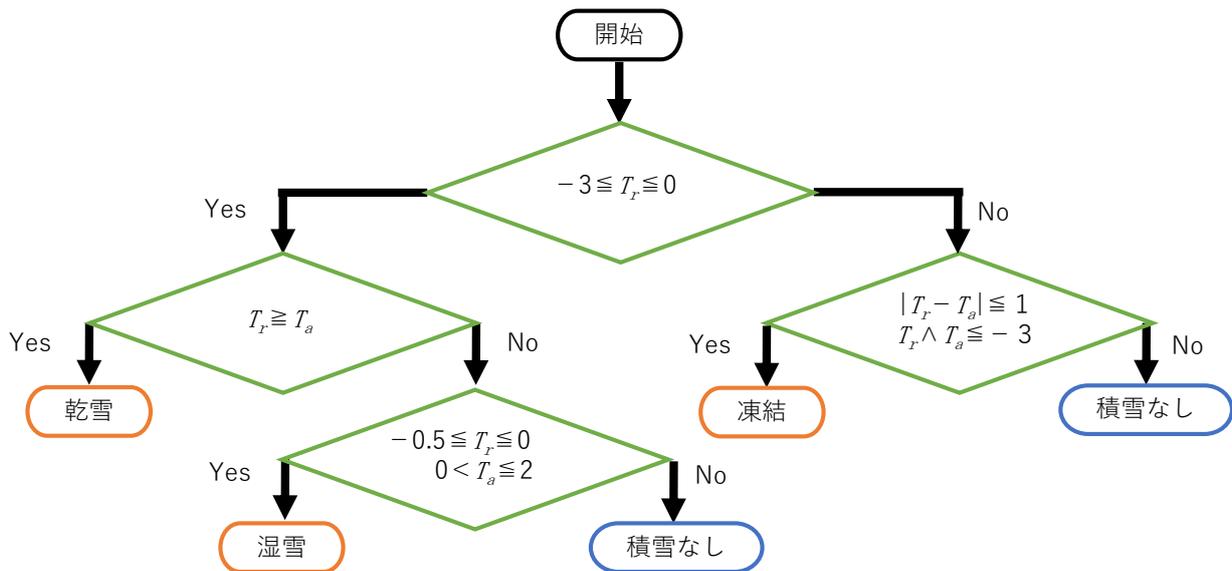


図3 路面積雪状態の推定フロー図

堆積圧によるガードレールの脱落とその防止策の検討

渡邊香歩¹・杉原幸信²・〇齋藤進¹・上村靖司²・大久保忠彦³・中川直人³・森山健太郎³・西澤遥耶³

(1:長岡技術科学大学大学院工学研究科 2:長岡技術科学大学機械系 3:(株)ネクスコ・メンテナンス新潟)

1. はじめに

寒冷地の道路施設において、ガードレール等を含む防護柵への雪害がしばしば問題となっている。特に除排雪の影響から堆雪量が多くなる切土法面下の堆雪敷において、部材同士を締結する部品が破損してガードレールが脱落する事例が多数報告されている^[1](写真 1)。部品の変形や破損が発生するとガードレールの安全性能が損なわれるため、修理・交換が必須となる。しかし、修繕費はもちろん交通規制や人員の確保に加え、雪の解ける春先に工事が集中することが問題となっている。本研究では堆雪圧によるガードレールの破損事例を分類し、耐雪型ブラケットおよび雪害対策型ブラケットに作用する応力を数値解析で評価する。



写真1 ガードレールの脱落事例^[1]

2. ガードレールの構成と破損事例の分類

2-1. ガードレールの構成

図1にガードレールの基本構成および各部名称を示す。なお袖ビームとはガードレールのVビーム端部に取り付ける部品である。

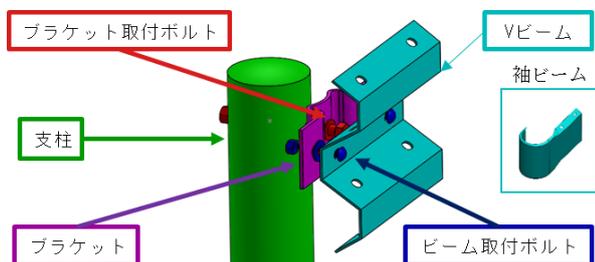


図1 ガードレールの構成

2-2. ガードレールの破損事例の分類

新潟県内で観察されたガードレールの代表的な破損事例を4つの分類に整理した(図2)。ビームが堆積圧を受けることで、ガードレール構成部品に引張りや、せん断、曲げが作用し、破損に至ると考えられる。以下に4つの分類の詳細を示す。

(1) 支柱曲げ破損

ビームが堆積圧を受けることでブラケット取付ボルトに引張り力が作用する。その力がブラケット取付ボルトナット側の角座金に作用し支柱上部に曲げが生じると推測される。予防策として、ブラケット下部に回転変形を防ぐ荷重支持部を取り付けてボルトに働く引張り力を小さくすること、支柱の厚みを増やすことなどが考えられる。

(2) ブラケット取付ボルト引抜け破損

ブラケット取付ボルトの引張り力がナットおよび座金を介して支柱表面に作用し、支柱のボルト取付穴の周囲の応力が高まる。そして、ボルト取付穴からき裂が進展し、ブラケット取付ボルトが引き抜けるのだと考えられる。また、ブラケットのボルト取付穴の周囲においても同様の現象が生じ、ブラケットがブラケット取付ボルトからの脱落すると考えられる。予防策として、座金を大きくして支柱およびブラケットのボルト取付穴周囲表面に作用する応力を小さくすること、ブラケット下部に回転変形を防ぐ荷重支持部を取り付けてボルトに働く引張り力を小さくすること、支柱の厚みを増やすことなどが考えられる。

(3) ビーム取付ボルト引抜け破損

ビーム取付ボルトのボルト頭が、ビームのボルト取付穴から引き抜けることで生じる破損である。この事例は交換する部品がビームのみのため、メンテナンスの観点で考えると他の破損に比べ修理が安く済む。そのため大きな負荷が予想される地域においては、意図的にビーム取付ボルト引抜け破損が生じる状態とし、メンテナンスにかかる費用を最小にするという方法も考えられる。

(4) ビーム変形破損

支柱曲げやボルト引抜けに至っていないものの、ビームが変形している破損形態である。特に袖ビーム末端は支柱に締結されないため、袖ビームの支柱締結部を支点としたモーメントが作用し、破損しやすいと考えられる。そのため、予防策として袖ビーム末端をアンカー等で地面や斜面に固定するなどが考えられる。

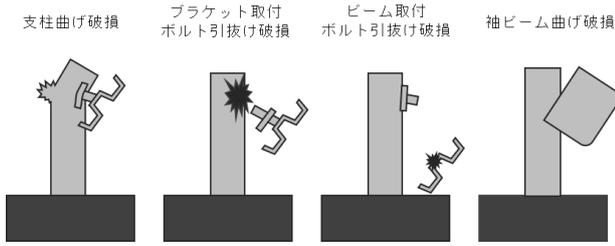


図2 破損の種類

3. ブラケット取付ボルト引抜き破損のメカニズムの考案

本研究ではブラケット取付ボルト引抜け破損に注目する。図3に切土法面下のガードレールに加わる力の模式図を示す。時間経過とともに積雪が圧密されることで、構造物には堆雪の自重に加えて沈降力が働く。伊東ら^[2]の報告には、『防護柵に関する一般的基準として用いられている「防護柵の設置基準・同解説」^[3]で参考掲載されている耐雪型防護柵では、既往研究の成果を基に、鉛直方向の積雪沈降力のみを考慮している^[4]。』と述べられている。そのため、雪に埋もれた構造物の破損には、堆雪の層間で起こる変形(クリープ)および堆雪と地面の境界面で起こる滑動(グライド)による斜面移動雪圧の影響が大きいと考えられる。したがって、堆雪がビームを押すことで、ブラケットが回転中心となり、ブラケット取付ボルトに強い引張方向の力が作用し引抜け破損に至ると考察する。

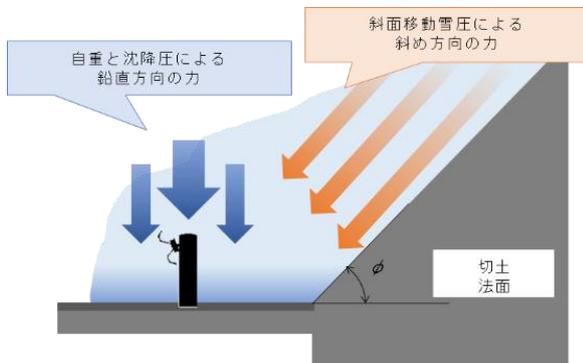


図3 切土法面下の防護柵に加わる力

4. ガードレール脱落事例の数値解析シミュレーション

4-1. ガードレールに働く力の概算

斜面移動雪圧がガードレールに及ぼす影響は認知されているものの、それを検証した例は少ない。本研究ではHaefeliの雪圧論^[5]を流用し、斜面と直角な面に働く力成分が減衰することなくそのままガードレールに作用すると仮定し、簡易的な計算を行った。また、求めた値を北海道で行われた切土法面直下にあるガードレールのブラケット取付ボルトの軸力測定実験^[6]の値と比較し、その妥当性を検証した。

図4に計算モデルを示す。計算を簡単にするため、積雪密度は高さに依らず一定とし、積雪深は雪面から地面までの鉛直方向の深さとした。また、表1, 2に計算に用いる各値

を示す。

(1) 防護柵に働く水平方向の力 F_H

任意の地点上の斜面に平行する雪圧がそのまま防護柵に伝播すると仮定して、次式より防護柵に働く水平方向の力 F_H (kN m^{-1})を算出した。

$$F_H = S_N \times \cos \varphi \quad (1)$$

$$S_N = \gamma_S \times \frac{H_S^2}{2} \times K \times N \times g \quad (2)$$

ここで、 S_N が斜面に平行な斜面雪圧成分 (kN m^{-1})、 φ は斜面傾斜角 [$^\circ$]、 g は重力加速度 [m s^{-2}]である。 H_S が積雪深 (m)、 K がグライド係数、 N がクリープ係数である。

(2) 防護柵に働く鉛直方向の力 F_V

F_V は S_N の鉛直方向成分と防護柵にかかる堆雪の沈降圧との合力とし、次式により算出した。

$$F_V = (0.8270\alpha - 44.17 + S_N \times \sin \varphi) \times g \quad (3)$$

ここで、 $0.8270\alpha - 44.17$ はガードレールの沈降力^[5] (kg m^{-1})である。また、 α は標準尺による沈降力 (kg m^{-1})で、次式^[5]で求める。

$$\alpha = 103.7 + 0.6991 \times W + 0.0003961W^2 \quad (4)$$

ここで W は積雪重量 (kg m^{-2})であり次式より求める。

$$W = H_S \times \gamma_S \quad (5)$$

ここで γ_S は積雪密度 (kg m^{-3})である。

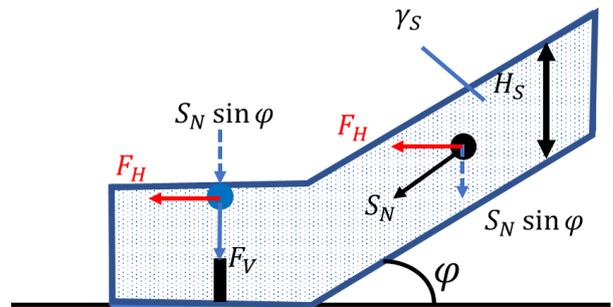


図4 計算モデル

表1 計算に用いる値

積雪密度 γ_S (kg m^{-3})	350
積雪深 H_S (m)	1~5
クリープ係数 N	0.8

表2 グライド係数

グライド係数 K	北向き	南向き
斜面 φ 30	2.6	3.2
斜面 φ 40	3.3	4.0

図5に積雪重量と防護柵に加わる力の関係を示す。グライド係数は $K = 2.6$ とした。今回の計算方法では、水平方

向に加わる F_H よりも鉛直方向に加わる力 F_V の方が大きいことが分かった。また、積雪重量を増加させたとき水平方向に加わる力 F_V の方が、増加量が多いことも分かった。

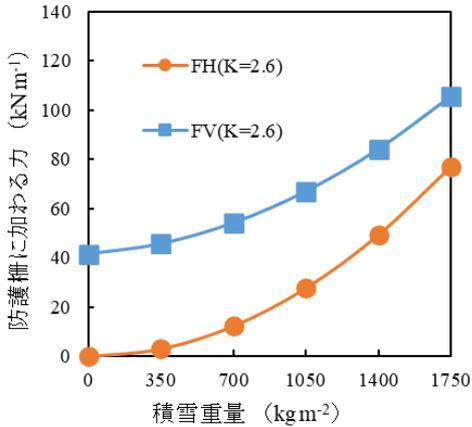


図5 積雪重量と防護柵に加わる力の関係

図6に斜面角度と防護柵に加わる力の関係を示す。鉛直方向に加わる力 F_V は水平方向に加わる力 F_H に比べ、その増加が小さいことが分かった。加えて、耐雪型防護柵は沈降の影響を加味し設計されている。また、破損事例では、いずれも曲げまたは引抜けによる変形・破損が見られ、せん断による破壊は見受けられなかった。

以上の結果から、本報告では鉛直方向に加わる力 F_V を無視し、水平方向に加わる力 F_H のみを考慮として、破壊への影響を考えることとした。

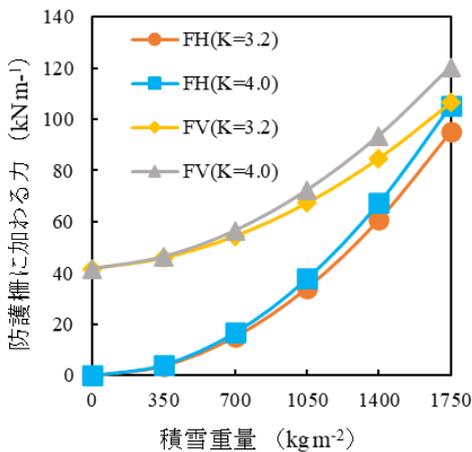


図6 斜面角度と防護柵に加わる力の関係

4-2. ブラケット取付ボルトに働く力の概算

過去に見受けられた破損事例よりブラケットの下端が支柱と接触している様子を確認した。そのため、これらの作用・反作用からブラケット取付ボルトに働く力を試算した。ブラケットとビームを一体とした剛体の平板を仮定し、力のつり合いを考える。その力の関係を図7に示す。計算を簡単にするた

め静定問題とし、変形・平行移動・回転は生じないと仮定した。斜面雪圧 S_N の水平方向成分、すなわち防護柵に働く水平方向の力 F_H がビーム上端へ静的荷重として作用し、ビーム中央に回転中心を取るものとした。

まず、力のつり合いを考えると次式となる。

$$(F_H \times b) + P = Q \quad (6)$$

ここで、 P はブラケットが支柱を押す力[kN] (すなわち、支柱がブラケットを押し返す力と等しい)、 Q はブラケットがブラケット取付ボルトを引っ張る力[kN] (すなわち、ブラケット取付ボルトがブラケットを引っ張る力と等しい。以降、軸力と表記する。)である。ここで、 b はガードレールの支柱間隔[m]である。支柱間隔は北海道で行われた実験の際に用いられた Gr-A2-4E タイプを想定し、北海道開発局道路設計要領⁶⁾を準拠し $b = 4 \text{ m}$ とした。

次に、回転中心まわりのモーメントのつり合いを考える。

以下に計算過程を示す。

$$P \times L_1 + Q \times 0 = (F_H \times b) \times L \quad (7)$$

$$P \times L_1 = (F_H \times b) \times L \quad (8)$$

ここで、 L はビーム上端からブラケット中心までの距離[m]、 L_1 はブラケット中心からブラケット下端までの距離[m]である。伊東ら²⁾の報告によると、「耐雪型は、ブラケット部が一般型に比べて板厚や幅が大きくなっており、積雪沈降力に対抗している。(板厚: 4.5 mm → 6.0 mm, 幅: 70 mm → 120 mm)」と述べられている。そのため、今回は $L = 175 \text{ mm}$ 、 $L_1 = 60 \text{ mm}$ とした。したがって、式⑥と式⑧よりブラケット取付ボルトに作用する軸力 Q は次式となる。

$$Q = \left(1 + \frac{L}{L_1}\right) \times F_H \times b \quad (9)$$

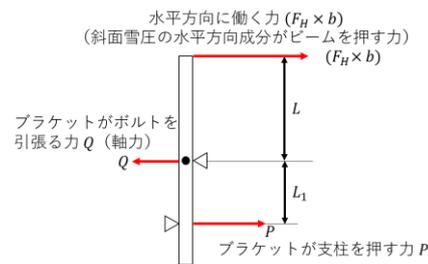


図7 ブラケットおよびビームを一体の平板とした簡易剛体モデルに働く力

図8に式⑨より得られた軸力 Q と積雪深 H_s の関係を示す。グライド係数を変更し、 Q を評価した。ここで、伊東ら²⁾は北海道の旭川門別自動車道のうち、比布 JCT~愛山上川 IC 上にある切土法面直下にあるガードレールにかかる雪圧の被害状況の調査の中で、ブラケット取付ボルトの軸力測定を行った。実験に使われたボルトは M20 の普通ボルトで、許容軸力は 31.3 [kN] である。このボルトが 2 月中旬、積雪深 80 [cm] 時にボルト穴の一部が破損し応力開放が起こった。このときの軸力は 42.6 [kN] で許容値を超えていたと報告し

ている。図8を見ると、積雪深 80 [cm]のときの軸力は 30.3 ~ 41.3 [kN]となり、伊東ら^[2]の北海道で行われた結果と近いものとなった。そのため、本報告では、伊東らの軸力の測定結果 42.6 [kN] を次項の解析に用いることとした。

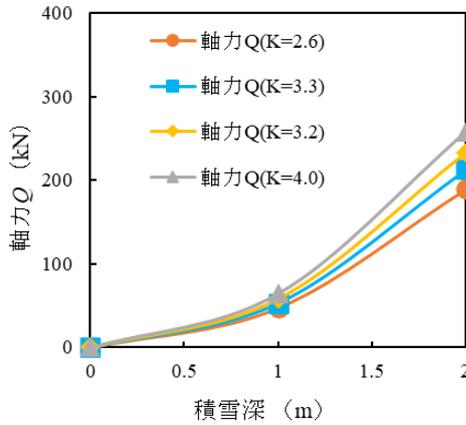


図8 軸力と積雪深の関係

4-3. ブラケット解析方法と結果

Solidworks2019を使用し、ブラケット表面の応力解析を行った。図9に解析モデルを示す。このモデルはVビーム、ブラケット、座金によって構成されている。それぞれの部品は結合されておらず、独立している。シミュレーション上、ブラケット中心線の下端、座金を完全固定とし、Vビーム上部の鉛直面に対して水平に負荷をかけた。このときの負荷 F_H は、11 [kN]とした。(軸力 42.6 [kN] を式⑧の Q に代入し導出)座金、ボルトはステンレス鋼 (sus304)とした。そのほかの部品は材料を普通鋼 (ss400)とした。

解析結果を図10に示す。図10(a)より、ブラケット表面の応力は座金接触面上部において大きくなっており、座金の片当たりが起きていることが確認できた。ブラケット取付ボルトがブラケットから引抜ける破損パターンの防止策として座金の外形を大きくし受圧面を広げることなどが考えられる。

荷重支持機構を取り付けたモデルを図10(b)に示す。図10(a)と比較すると、座金接触面上部に集中していた応力が分散していることが確認できた。よって図10(b)に示す雪害対策ブラケットは、ブラケット取付ボルト引抜け破損の防止に有用であることが分かった。

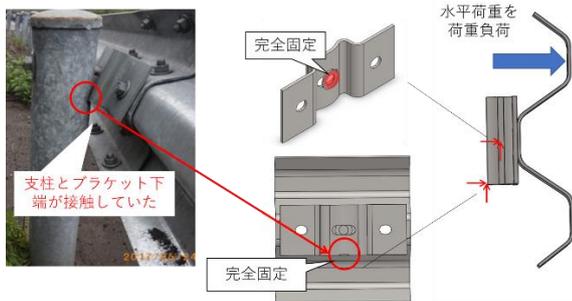
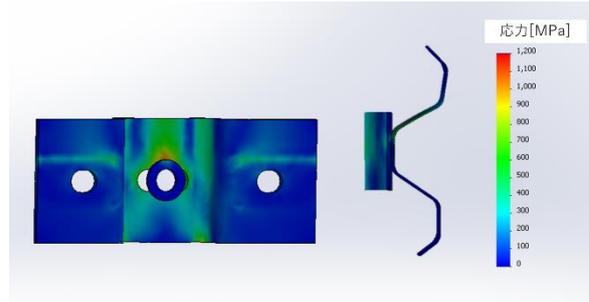
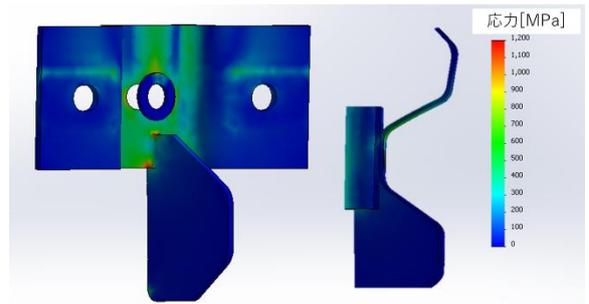


図9 ビーム-ブラケット-座金モデル



a. 耐雪型ブラケット



b. 雪害対策型ブラケット(荷重支持機構取付)

図10 ブラケット表面の応力分布

5. まとめ

本研究では、本研究では堆雪圧によるガードレールの破損事例の分類および構成部品の変形を数値解析で再現した。また、座金接触面上部に強い片当たりが起きていたことへの防止策として取り付けした荷重支持機構は、有用であることがシミュレーション上で分かった。

文献

1. 渡邊香歩, 杉原幸信・上村靖司, 大久保忠彦・中川直人(2022): 堆雪圧によるガードレールの脱落とその防止策の検討, 寒地技術論文・報告集, Vol.38, 論文番号 II-009
2. 伊東靖彦, 山田毅, 加治屋安彦(2008):切土法面直下の路側に設置された防護柵にかかる堆雪圧, 寒地土木研究所月報, 660, 28.
3. (社)日本道路協会(2004):防護柵の設置基準・同解説, (株)丸善
4. (株)日本道路協会(1986):防護柵の設置要領・資料集(橋梁用防護柵・耐雪型防護柵), (株)丸善
5. 社団法人日本建設機械化協会(2004):2005 除雪・防雪ハンドブック
6. 国土交通省北海道開発局(2022):令和4年度北海道開発局道路設計要領 第2集 道路付帯施設