

ISSN 1340-7368

公益社団法人 日本雪氷学会北海道支部機関誌

北海道の雪氷

Annual Report on Snow and Ice Studies in Hokkaido

第40号



2021年9月

発行 公益社団法人 日本雪氷学会北海道支部

目 次

巻頭言	-----1
2021 年度日本雪氷学会北海道支部研究発表会発表論文	-----5
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2020 年度事業報告	-----65
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2021 年度事業計画	-----69
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2020 年度収支報告	-----71
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2021 年度予算	-----72
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2021 年度役員名簿	-----73
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 支部規程施行内規	-----74

表 紙

画： 斎藤新一郎

題字：福沢卓也

（表紙解説）冬の星座——おおいぬ座とこいぬ座

一般社団法人北海道開発技術センター
斎藤新一郎

冬になると、夜空の星々が冴えてくる。西から東へ、すばる（プレヤデス星団）～牡牛座（アルディバラン）～オリオン座（ペテルギウス）～大犬座（シリウス）～子犬座（プロキオン）が展開する。真冬に、ペテルギウス～シリウス～プロキオンを結ぶと、冬の大三角形となる。やがて、東に獅子座（レグルス）が現われると、春に近付く。

ただし、少雪年の冬の、縛れる宵なら、震えても眺めていられるが、豪雪・多雪年の星の见えない宵では、明朝の除雪を思うと、それどころではない。最近では、2011～12年の冬と、2020～21年の冬が、豪雪であって、わが終の棲み処では、積雪深が200cmを超えた。



巻 頭 言

副支部長 的場澄人（北海道大学 低温科学研究所）

2020 年度より副支部長を仰せつかっています。支部会員の皆様はいかがお過ごしでしょうか。私がこの文章を書いているのは 2021 年 8 月 8 日です。8 月 2 日には、まん延防止等重点措置が北海道に再適用され、8 月 5-6 日に東京オリンピック 2020 の競歩競技が、7-8 日にマラソン競技が札幌市内で行われました。私が所属している北海道大学では 7 月から在学生、職員を対象に新型コロナワクチンの職域接種が開始されています。新型コロナウイルスが様々な社会活動に引き続き影響を与え続けている中、「ウィズコロナ」、「アフターコロナ」、「新しい生活様式」というようなライフスタイルを表す言葉が提唱されていることを反映するかのよう、現状の捉え方、今後への取り組みについて、多種多様な意見が議論され、これからの社会活動が模索されているように感じます。

2020 年度は、北海道支部も試行錯誤をしながらの活動になりました。5 月に予定されていた支部総会はメール審議形式の開催になりました。前例のない形式での開催でありましたが、支部会員の皆様にご理解とご協力をいただき、総会が成立いたしました。北海道支部の主要な事業である研究発表会は残念ながら中止になりましたが、支部機関誌「北海道の雪氷」は例年通り発行され 22 編の論文が収録されました。社会貢献事業である雪氷災害調査チームにおいては、講演会、研集会、雪崩調査が実際に実施されました。支部事業のもう一つの柱である地域講演会は、オンラインでの開催も検討されましたが、中止（延期）となりました。これは、地域講演会の目的やこれまで果たしてきた意義が改めて議論され、現地で開催することの重要性を再確認した上での積極的な決定であったと思います。

北海道支部の 2021 年度の研究発表会はオンラインで開催されました。東北支部、北信越支部の研究発表会、関東以西支部の講演会もオンラインで行われたようです。オンライン会議の普及により、遠方で開催されていた学会への参加が容易になるだけでなく、学会間の交流など様々な可能性が広がっています。その一方で、雪氷学会内組織である支部においては、その存在意義や催行される事業の意味づけ、動機づけが問われ、それらを改めて強く打ち出す必要があるのではと感じています。北海道支部の長所といえる特徴は、お互いの顔が分かる規模であること、その規模で研究発表会、機関誌発行などの多くの事業が行われてきたということだと思います。小規模だからこそ感じられる「ホーム感」が支部のよさだと思うのです。私自身、北海道支部主催の事業の後の「ディスカッション」でいただいたアドバイスや情報が、自分の研究に役立った経験は多々ありますし、北海道支部の事業がきっかけで築かれた人間関係は、「特殊」に感じます。（いい意味です...）

昨年度、今年度は残念ながら支部会員が集う機会がなかなか設けられません。学会や支部の周りの状況が急速に変化しつつある中、今後の支部活動や存在意義などについての議論が必要です。膝を付け合わせて「ディスカッション」できる日が、早く訪れますように。

2021 年度日本雪氷学会北海道支部研究発表会発表論文 目次

【積雪】

1. アメダスデータを用いた少雪地域の降雪量推定 5
～ 2014 年 2 月関東甲信大雪時の降雪量試算～
大宮 哲, 原田 裕介, 西村 敦史 (土木研究所 寒地土木研究所)
2. 9 年ぶりに大雪となった岩見沢市での積雪断面観測 (2021 年 3 月) 9
白川 龍生 (北見工業大学)
3. 2020-2021 年冬期に大雪に見舞われた岩見沢の積雪と降雪の特徴 11
尾関 俊浩 (北海道教育大学札幌校),
金田 安弘 (北海道開発技術センター),
松岡 直基 (株式会社北海道気象技術センター)
4. 勾配屋根における積雪量と落雪量の周期的な時間変化に関する理論的考察 13
眞山 博幸, 室崎 喬之 (旭川医科大学 一般教育 化学),
東 乙比古 (NPO 法人 北海道産業技術支援協会),
吉田 光則 (北海道中小企業総合支援センター)
5. 各種木材の着雪および剥落雪の基本性状について 17
伊東 敏幸, 深瀬 孝之 (北海道科学大学 工学部建築学科)

【雪崩】

6. 2021 年 3 月 2 日に道央圏で同時多発した雪崩について 19
松下 拓樹 (土木研究所 寒地土木研究所)

【海水・湖水】

7. 積雪の影響を考慮した海氷厚推定アルゴリズムの改良 23
渡辺 由梨加 (北見工業大学大学院 工学研究科),
舘山 一孝 (北見工業大学 地球環境工学科),
東海林 尚登 (北見工業大学 機械工学科)

【結晶・ハイドレート・凍土】

8. 雪の結晶の非対称的な形態について 27
油川 英明 (NPO 法人 雪氷ネットワーク)

9. 積雪および粉末氷から生成したメタンハイドレートの純度
比表面積が及ぼす効果 31
矢作 大輔, 内藤 大智, 八久保 晶弘 (北見工業大学),
竹谷 敏 (産業技術総合研究所)
10. ハイドレート含有堆積物中における 35
包接ガスと堆積物ガス間の安定同位体分別
木村 宏海, 八久保 晶弘, 坂上 寛敏, 南 尚嗣, 山下 聡 (北見工業大学),
Oleg Khlystov (ロシア陸水学研究所),
Gennadiy Kalmychkov (ロシア地球化学研究所),
Marc De Batist (アントワープ大学)
11. メタン・ヘリウム系混合ガスハイドレート生成時のヘリウム組成分別 39
森谷 優希, 木村 宏海, 八久保 晶弘 (北見工業大学),
竹谷 敏 (産業技術総合研究所)
12. 北海道置戸町鹿ノ子ダム左岸の風穴地における凍土の消長 43
曾根 敏雄 (北海道大学 低温科学研究所)

【道路・交通】

13. 深層学習を用いた冬期路面すべり摩擦係数推定に関する基礎的検討 45
齊田 光 (土木研究所 寒地土木研究所),
徳永 ロベルト (元土木研究所 寒地土木研究所),
佐藤 昌哉 (北海道開発局 札幌開発建設部)
14. 除雪車運転支援システムの開発 49
～準天頂衛星システムを活用した作業ガイダンスモニター～
渥美 尚大, 臼井 和絵 (東日本高速道路株式会社 北海道支社),
栗原 啓伍, 河村 祐 (株式会社ネクスコ・エンジニアリング北海道)
15. 車載カメラ静止画像と CAIS を組合せた 53
冬期路面状態を面的に判別するシステムの開発
大廣 智則 (株式会社ネクスコ・エンジニアリング北海道,
現所属: 土木研究所 寒地土木研究所),
高瀬 智之 (北海道大学大学院工学院),
高橋 翔, 萩原 亨 (北海道大学大学院工学研究院),
岩崎 悠志, 森 徹平, 花塚 泰史 (株式会社ブリヂストン),
高橋 亮介 (東日本高速道路株式会社 北海道支社)

【生活】

16. 感染症ならびに低体温症対策を施した寒冷期災害の避難施設に関する検討 57
根本 昌宏, 尾山 とし子 (日本赤十字北海道看護大学 災害対策教育センター),
水谷 嘉浩 (J パックス株式会社)
17. コロナ禍における雪かきボランティアの受入意向からみる諸課題 61
小西 信義 (北海道開発技術センター),
筒井 一伸 (鳥取大学 地域学部 地域創造コース)

アメダスデータを用いた少雪地域の降雪量推定

～2014 年 2 月関東甲信大雪時の降雪量試算～

An estimation of snowfall amounts in light snow area using AMeDAS data - Case analysis of the heavy snowfall events in the Kanto-Koshin district, February 2014 -

大宮 哲¹, 原田 裕介¹, 西村 敦史¹
Satoshi Omiya¹, Yusuke Harada¹ and Atsushi Nishimura¹
Corresponding author: somiya@ceri.go.jp (S. Omiya)

In recent years, heavy snow disasters have frequently occurred even in light snow areas. In order to reduce various social damages, it is essential to grasp the actual conditions of snow depth and snowfall amounts over a wide area and at multiple points. In this study, we estimated the hourly snowfall amount using AMeDAS data (liquid precipitation, wind speed and air temperature) and observed new snow density.

1. はじめに

近年、普段あまり雪が降らない地域（以下、少雪地域）においても、集中的かつ記録的な大雪による交通障害が度々発生している。多雪地域に比べ除雪体制が整っていない中、被害を最小限に留めるためには、適時適切な通行規制の実施や道路利用者への情報提供が必要である。そのためには、広域かつ多点の道路上の降雪状況をリアルタイムに把握することが求められる。

現在、日本全域を対象とした積雪深や降雪量のリアルタイムメッシュ情報が複数の研究機関によって推定されており、各 Web サイトにて公開されている^{1),2)}。これらのメッシュ推定値は、いずれも積雪深計の実測値による補間・補正処理に基づいている^{3),4)}。したがって、積雪深計の設置数が少ない少雪地域の推定精度は、多雪地域に比べて低いと考えられる。なお、現

在積雪深計が設置されている気象庁の官署・アメダスは全国に約 330 地点あるが⁵⁾、例えば本研究の対象地域である関東平野には 9 地点しかない（図 1）。

本研究では、少雪地域における降雪状況を、積雪深計を用いずに、一般的なアメダスデータ（降水量・風速・気温）から把握することを目指している。ここでは、2014 年 2 月に関東甲信地方で発生した 2 度の大雪事例（8～9 日、14～15 日）を対象に、図 1 に示す 9 地点から両事例とも降積雪が観測されなかった銚子を除いた 8 地点において時間降雪量（1 時間に降り積もった雪の深さ）を推定し、実測値との比較を行った。

2. 雪水変換法について

本研究では、「雪水変換法」によって降雪量を推定した。雪水変換法とは、雪水比（ゆきみずひ）を用いて降水量から降雪量を求める方法である⁶⁾。雪水比は降水 1 mm が降雪何 cm に相当するかを示す指標であり、次式によって降水量から降雪量が求められる。

$$\text{降雪量 (cm)} = \text{降水量 (mm)} \times \text{雪水比}$$

雪水比は積雪密度 ρ と反比例の関係がある。 ρ は雪粒同士の焼結や自重による圧密、降雪種の違い等、多くの要素に影響を受けるが、一般には気温が高いほど大きくなる（雪水比は小さ

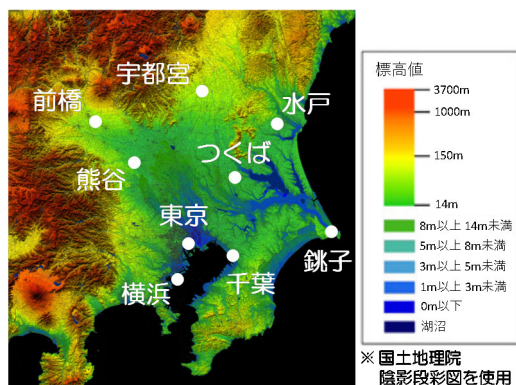


図 1 関東平野において積雪深計が設置されている気象庁の観測点（全 9 地点）

¹ 土木研究所寒地土木研究所

くなる)。したがって、降雪時の雨量計（降水量計）のデータから精度よく降雪量を推定するためには、気温と雪水比の関係を適切に仮定することが肝要となる。なお、新雪時の ρ は30~150 kg m⁻³程度である⁷⁾（雪水比に換算すると0.67~3.33）。

これまで、気象庁⁶⁾によって、過去23年間（1989~2012年）の降積雪事例を対象に、関東6都県の官署（東京・横浜・千葉・熊谷・前橋・宇都宮）における雪水比が統計的に整理されている。ここでは、積雪深計による実測値を雨量計による実測値で除することで雪水比が求められている。気象庁⁶⁾は、上記6地点を気象特性の違いに基づいて2つの地域（南部都市部・北部平野部）に分けたうえで、気温階級別に雪水比を示している（南部都市部：0.1~0.9、北部平野部：0.5~1.6）。しかし、官署の1つである水戸については、南部都市部・北部平野部両方の気象特性を併せ持つという理由から、雪水比が示されていない。また、通常の天気予報において関東地方南部に属する熊谷（埼玉県）が、ここでは北部平野部として扱われているなど、地域の区分けが統一されていない。

このような地域の区分けが曖昧な雪水比は、意思決定を担う実務者（道路管理者や自治体の防災担当者等）にとって使いやすい指標とは言えないだろう。実務的な観点からは、地域の区分けが明確、もしくは地域に依らない雪水比を提示することが望ましいと考える。

3. 降雪量の推定

本研究では、雪水比が地域に依らないと仮定したうえで、一般的なアメダスデータ（降水量・風速・気温）から少雪地域における降雪状況の把握を試みる。既往研究^{7),8)}で示されている新雪時の積雪密度 ρ から換算した雪水比を、アメダス雨量計による時間降水量（捕捉損失補正済のもの、3.2節で説明）に適用し、時間降雪量を求めた。なお、実測値については気象庁の定義にしたがうこととし、積雪深計で毎正時に計測した積雪深の変化量（増加分）を時間降雪量の実測値とした。

3. 1 使用した雪水比

降雪量の推定には次の3パターンの雪水比を使用した（①1.11、②0.67、③0.38もしくは

0.76）。ここで、雪水比①は $\rho=90$ kg m⁻³（既往研究⁷⁾の平均値）、雪水比②は $\rho=150$ kg m⁻³（既往研究⁷⁾の最大値）から換算した値にそれぞれ相当し、いずれも気温に依らない固定値とした。雪水比③は松田・清水⁸⁾の計測結果に基づく値である。松田・清水⁸⁾は2014年2月8日と14日に東京都内2地点（新宿区・千代田区）で新雪時の ρ を計測しており、気温+0.1~+0.6℃時の平均値が264 kg m⁻³、-0.4~-0.8℃時の平均値が132 kg m⁻³であったと報告している。ここでは、便宜的に、気温が0℃より高い時の雪水比は全て0.38（ $\rho=264$ kg m⁻³から換算）、0℃以下の時は全て0.76（ $\rho=132$ kg m⁻³から換算）と仮定し、降雪量を推定した。なお、比較のため、気象庁が示した地域別の雪水比⁶⁾（以降、雪水比④とする）を用いた推定も行った。

3. 2 雨量計の捕捉損失の補正

降雪粒子は雨滴に比べて軽いため、風の影響を受けやすく、雨量計への捕捉率が低下する^{9),10)}など。すなわち、雨量計による実測値は多くの場合において実際の値を過小評価する。そこで、本研究では大宮ほか¹⁰⁾が示した風除け付き温式雨量計への降雪粒子の捕捉率と風速の関係（図2）に基づき、雨量計の捕捉率低下による損失分を補正した。補正時には雨量計の高さ（受水口の高さ）における風速が必要となるが、ここでは風速の鉛直分布は対数則が成り立つと仮定し、各地点の風速計設置高さ¹¹⁾における実測値から雨量計の高さにおける風速を算出した。日谷¹²⁾によると、関東平野にあるアメダス観測点の地面粗度は、その大半が0.5 mもしくは1 mである。また、雨量計の設置高さは1~1.5 mのものが最も多い。そこで、簡単のため、本計算では全8地点とも地面粗度を0.5 m、雨量計の高さを1.5 mとした。

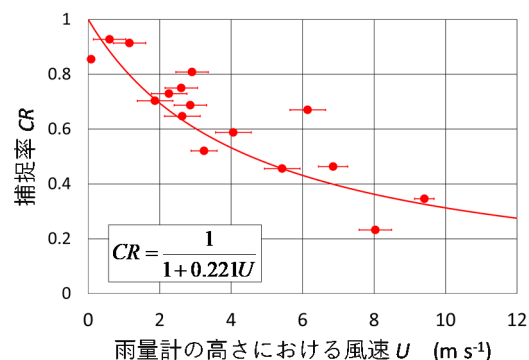
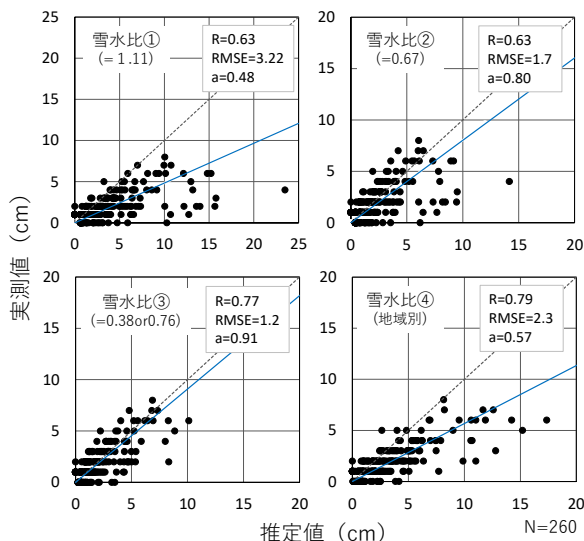


図2 雨量計の捕捉率と風速の関係¹⁰⁾を改変

4. 推定精度の検証

4. 1 時間降雪量の比較

推定値と実測値の比較結果を、雪水比ごとに図 3 に示す。比較対象としたデータは、積雪深計によって降雪が記録されてから最大積雪深に達するまでの各時間降雪量である。ここでは、紙面の関係上、全地点（8 地点）・全事例（2 事例）のデータをまとめた結果について示してある（データ数は 260）。図 3 中には、推定値と実測値の類似性を評価するための指標である相関係数 R 、誤差の絶対値を評価するための指標である二乗平均平方根誤差（RMSE）、量的な一致度を評価するための指標である回帰係数 a （青の実線で記した回帰直線の傾き）についても付記してある。この結果より、雪水比③を用いた推定結果の精度が最も高いことが確認され、その回帰係数は 0.91、RMSE は 1.2 であった。これはすなわち、時間降雪量を推定した際、その約 68 %は実測値との差が ± 1.2 cm に収まることを示している。雪水比③の次に推定精度が高かったのは雪水比②を用いた場合であり、回帰係数は 0.80、RMSE は 1.7 であった。一方、雪水比①や④を用いた推定結果は雪水比②や③を用いた結果よりも実測値を過大評価する傾向があった。その理由として、雪水比①については、新雪時の積雪密度 ρ の平均値（ $=90 \text{ kg m}^{-3}$ ）⁷⁾から換算したものである点が挙げられる。既往研究⁷⁾は積雪寒冷地における観測結果である。したがって、温暖な関東平野に適用する ρ としては小さすぎた（雪水比が大きすぎた）ためと考えられる。雪水比④については、雪水比の算出過程において雨量計の補足損失の影響が考慮に

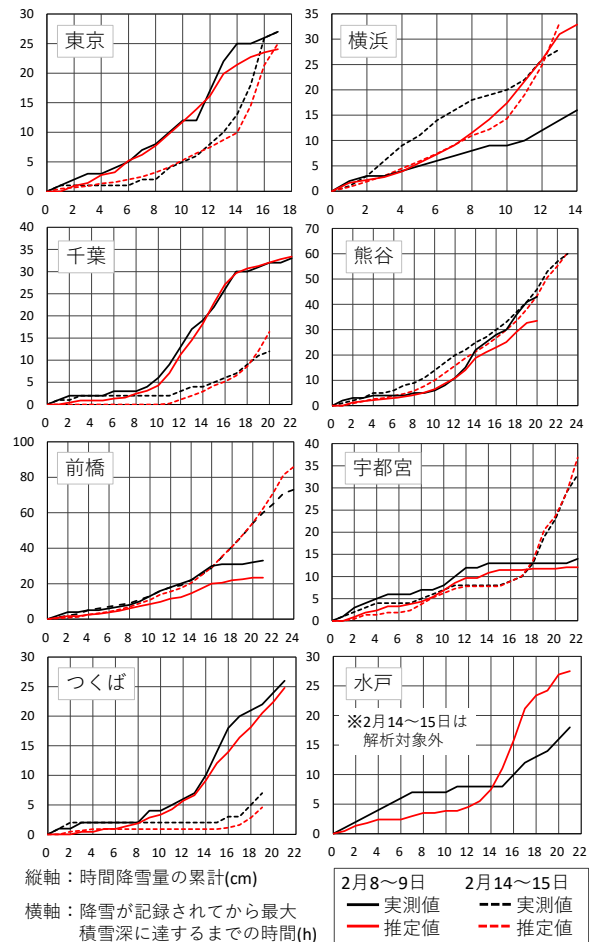


入れられていないことに起因していると考えられる。過小評価された実測時間降雪量を用いたことで、雪水比自体が過大評価されたものと考えられる。

4. 2 累計降雪量の比較

前節にて、雪水比③を用いた推定精度が最も高いことが示された。そこで、本節では雪水比③による推定累計降雪量について議論する。

図 4 に、時間降雪量の累計値の比較結果を示す。これは、積雪深計によって降雪が記録されてから最大積雪深に達するまでの時間降雪量の累計値の推移である。実測値を黒、推定値を赤で示してあり、実線が 2014 年 2 月 8～9 日、破線が同月 14～15 日の結果を示している（グラフごとに軸スケールが異なることに留意されたい）。なお、2 月 14～15 日の水戸は、総降雪量が 2 cm と少なく、積雪継続時間も約 2 時間と短時間であったことから、ここでは解析対象外とした。図 4 より、地点や事例による違いはあるものの、推定結果は実測値を概ね再現できていることが確認できる。



次に、最大積雪深に達した時点の時間降雪量の累計値について、実測値、推定値、誤差（推定値から実測値を引いた値）の一覧を表1に示す。ここで、推定値および誤差は小数第2位を四捨五入して表示してある。誤差が最も小さかったのは2月8～9日の千葉であり、実測値が33 cmに対して誤差が+0.4 cmであった。誤差が2番目に小さかったのは2月14～15日の熊谷であり、実測値が60 cmに対して誤差が+0.6 cmであった。また、他の事例や地点においても、2月8～9日の横浜と2月14～15日の前橋を除き、誤差は全て10 cm以内に収まっていた。

表1 時間降雪量の累計値の比較

	2014年2月8～9日			2014年2月14～15日		
	実測値	推定値	誤差	実測値	推定値	誤差
東京	27	24.1	-2.9	27	25.0	-2.0
横浜	16	32.9	+16.9	28	33.2	+5.2
千葉	33	33.4	+0.4	12	16.4	+4.4
熊谷	43	33.5	-9.5	60	60.6	+0.6
前橋	33	23.4	-9.6	73	86.0	+13.0
宇都宮	14	12.1	-1.9	33	36.9	+3.9
つくば	26	24.8	-1.2	7	4.6	-2.4
水戸	18	27.5	+9.5	解析対象外		

※単位はいずれもcm

5. まとめと今後に向けて

本研究では、一般的なアメダスデータ（降水量・風速・気温）から少雪地域における降雪状況を把握すべく、2014年2月に関東甲信地方で発生した2度の大雪事例を対象に降雪量を試算した。その結果、雨量計による実測データに対して捕捉損失補正¹⁰⁾を施したのち、松田・清水⁸⁾の積雪密度計測結果に基づき求めた雪水比（気温が0℃より高い時：0.38、0℃以下の時：0.76）を適用して求めた推定降雪量は、積雪深計による実測降雪量と概ね一致していた。

大都市圏は数cmの積雪であっても社会活動に与えるインパクトは甚大であるため、降雪量を推定する際には数cm単位の精度を求める必要がある。しかし、例えばひとえに誤差5 cmと言っても、推定1 cmに対する5 cmと推定100 cmに対する5 cmでは意味合いが大きく異なる。したがって、推定時には、全体の降雪量に対する誤差、すなわち相対誤差（誤差を実測値で割った値）が小さいことも重要である。

本研究の完成は、誰でも容易に入手できる一般的なアメダスデータから広域かつ多点の降雪状況をリアルタイムに把握することを可能とするものである。積雪深計のデータを必要としな

いことから、降雪観測網が手薄な少雪地域における雪氷災害対策の一助となることが期待される。今後は、推定誤差の許容範囲について、意思決定を担う実務者にヒアリングを行うほか、解析事例を増やすとともに、他の少雪地域への適用可能性についても検討する予定である。

【謝辞】

本研究の一部は、公益財団法人日立財団「2018年度 倉田奨励金」により実施された。ここに記して謝意を示す。

【参考文献】

- 1) 気象庁, 現在の雪（解析積雪深・解析降雪量）
<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/snow/jp/>
（2021年7月7日閲覧）
- 2) 新潟大学, 準リアルタイム積雪深分布,
<https://platform.nhdr.niigata-u.ac.jp/~snow-map/index.php?FrontPage>（2021年7月7日閲覧）
- 3) 気象ビジネス推進コンソーシアム, 解析積雪深・解析降雪量について,
https://www.wxbc.jp/wp-content/uploads/2019/12/seminar_191211_02.pdf
（2021年7月7日閲覧）
- 4) 伊豫部勉, 河島克久, 2020 : 準リアルタイム積雪分布監視システムの開発, 日本雪工学会論文集, Vol.36, No.1, 1-13.
- 5) 気象庁, 地域気象観測システム（アメダス）,
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html>（2021年7月7日閲覧）
- 6) 気象庁, 2014 : 量的予報技術資料, 19, 35.
- 7) 斎藤博英, 1974 : 雪の密度, 水利科学, 96, 35-48.
- 8) 松田益義, 清水孝彰, 2015 : 2014年2月大雪時の東京都心部の雪観測と雪荷重評価, 雪氷, 77(4), 303-311.
- 9) 横山宏太郎ほか, 2003 : 冬期における降水量計の捕捉特性, 雪氷, 65, 303-316.
- 10) 大宮哲ほか, 2020 : 降雪時の降水量計の捕捉率に関する再検討 -風速変化の小さな降雪事例に着眼して-, 北海道の雪氷, 39, 33-34.
- 11) 気象庁, 地域気象観測所一覧,
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf（2021年7月7日閲覧）
- 12) 日谷道夫, 2015 : 周辺環境から見積もったアメダス観測所の粗度 : 雨量計に関するメタデータ構築の試み, 天気, 62(5), 455-458.

9 年ぶりに大雪となった岩見沢市での積雪断面観測 (2021 年 3 月)

Snow profile observation in Iwamizawa (March 2021)

白川 龍生¹

Tatsuo Shirakawa¹

Corresponding author: shirakaw@mail.kitami-it.ac.jp (T. Shirakawa)

This report summarizes the snow profile observation in Iwamizawa (March 5, 2021). Observation data of snowfall and maximum snow depth at JMA Iwamizawa meteorological station on 2020/2021 winter reached a level comparable to the highest record (2011/2012 winter). Since 2012, the author has been observing snow profile in Iwamizawa every year. The results of 2021, snow depth was 181cm and snow water equivalent was 702mm in the site. Compared to 2011/2012 winter, granular snow was observed in many layers this season. However, for the snow depth and snow water equivalents showed almost the same values.

1. はじめに

2020/2021 年冬期, 岩見沢市と周辺の市町村では 9 年ぶりの記録的大雪に見舞われた. 気象庁岩見沢特別地域気象観測所における降雪量合計と最深積雪の推移を図 1 に示す. 2020 年 12 月 1 日に日降雪量 51cm (12 月の観測史上 6 位), 2021 年 2 月 25 日に最深積雪 205cm (観測史上 2 位) を記録するなど, 降雪・積雪ともに平年を上回る大雪となった. この影響により, 空間の閉塞や圧密沈降による雪害が複数発生し, 道路交通網の麻痺や鉄道の運休, 雪による建物の倒壊など, 地域経済や市民生活に大きな支障が生じた.

筆者は 9 年前 (2012 年) の 3 月に岩見沢で行われた積雪断面観測に参加し, 積雪深: 194cm, 積雪水量: 744mm の結果を得ている¹⁾. 今回も同水準の降積雪に迫っていたため, 2 月 21 日と 3 月 5 日の 2 回, 岩見沢市緑町にて積雪断面観測を実施した. うち本報告では, 融雪出水直前期にあたる 3 月 5 日の調査結果を述べる.

2. 調査方法

積雪断面観測は, 積雪観測ガイドブック²⁾および Fierz *et al.*³⁾ に準じて実施した. 調査項目は, 積雪の高さ, 層構造および積雪水量の 3 項目である. 平均的な堆積状況を調査した後, 雪面から地面まで観測ピットを掘削した. 図 2 は当日撮影した積雪断面である.



図 1 岩見沢の降積雪推移 (2020/2021 年冬期). ▽は観測実施日を示す.



図 2 2021 年 3 月 5 日 岩見沢の積雪断面 (積雪深: 181cm, 積雪水量: 702mm)

¹ 北見工業大学

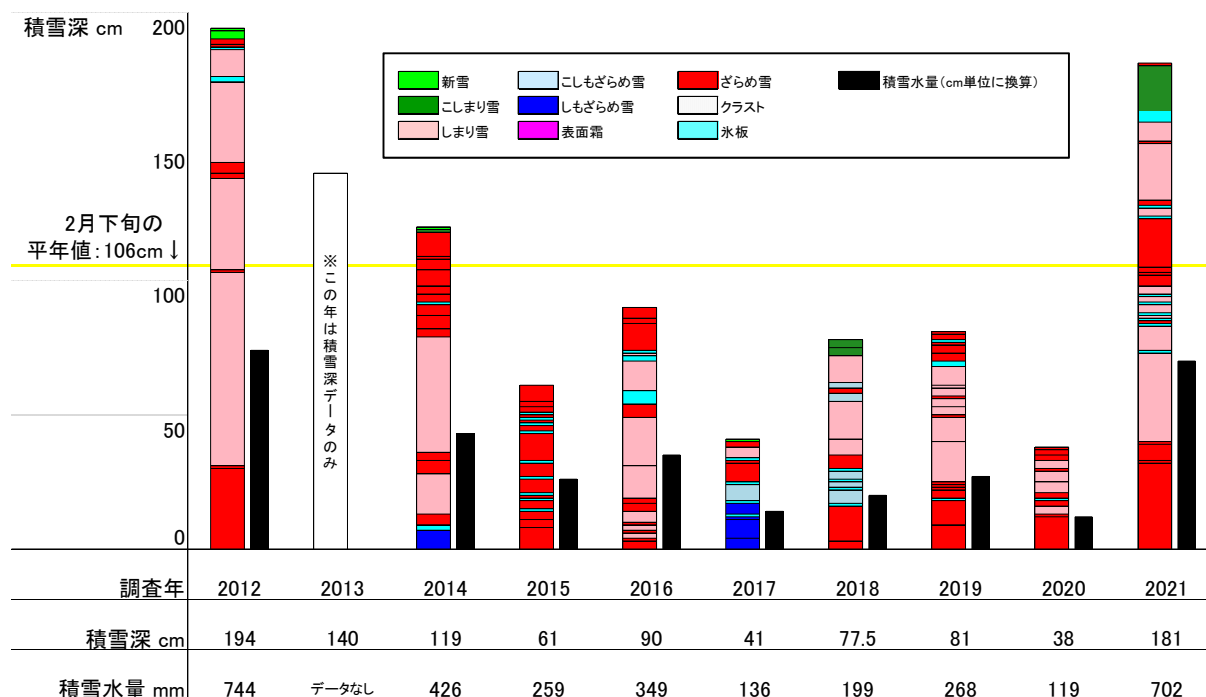


図3 岩見沢における2012年以降の積雪断面観測結果（融雪出水直前期；右端が今回の調査結果）

3. 調査結果と考察

岩見沢における2012年以降の積雪断面観測結果を図3に示す。いずれも融雪出水直前期に観測したもので、筆者は2011/2012年冬期以降、毎年岩見沢での観測を続けてきた（2013年は積雪深のみ）。このうち右端に示すのが今回の観測結果である。積雪深は181cm、積雪水量は702mmであった。

図3より、9年前と今回は、積雪深・積雪水量とも2月下旬の平年値（106cm）と比べ突出していることがわかる。いずれも、積雪層構造はざらめ雪としまり雪を主体とし、密度が高く、硬いのが特徴であるが、今回の観測結果は積雪の中層にざらめ雪が多く含まれる特徴がある。

積雪水量については2011/2012、2020/2021のいずれも700mmを超えており、雪の少ないシーズンと比べると2～6倍の水量が積雪として留まっていることがわかる。図4は大雪に見舞われた岩見沢市内の様子である。道路脇には高さ3mを超える雪山が連続し、これに伴い有効幅員が狭く見通しが悪い。図4の撮影当日、市内中心部にあった空き店舗が人通りの多い日中時間帯に突然倒壊し、店舗前の道路にがれきが散乱する雪害があった。この日、岩見沢では日中の最高気温が9.7℃に達するなど各地で気温が上昇し、空知地方では複数の建物被害が確認されている⁴⁾。これも2011/2012年冬期における雪害と傾向が類似していた。



図4 大雪の岩見沢市内（2021年3月5日）

【謝辞】 本研究の一部は、JSPS 科研費 19K04647 の助成を受け実施しました。また、岩見沢市総合体育館の皆さまに御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 白川龍生, ヌアスムグリ アリマス, 八久保晶弘, 荒川逸人, 野口泉, 尾関俊浩, 中村一樹, 2012: 2011-2012年冬期に北海道岩見沢市を中心として発生した大雪について(その4)ー広域積雪調査ー, 北海道の雪氷, **31**, 127-130.
- 2) 日本雪氷学会編, 2010: 積雪観測ガイドブック, 朝倉書店, 136pp.
- 3) Fierz, C. et al., 2009: The International Classification for Seasonal Snow on the Ground, IHP-VII Technical Documents in Hydrology N83, IACS Contribution N1, UNESCO-IHP, Paris.
- 4) 2021年3月5日付北海道新聞.

2020-2021 年冬期に大雪に見舞われた岩見沢の積雪と降雪の特徴 Observational Features of Snow Cover in Iwamizawa and Heavy Snowfalls in 2020-2021 Winter

尾関 俊浩¹, 金田 安弘², 松岡 直基³
Toshihiro Ozeki¹, Yasuhiro Kaneda², Naoki Matsuoka³
Corresponding author: ozeki.toshihiro@s.hokkyodai.ac.jp (T. Ozeki)

In the winter of 2020-2021, heavy snowfall hit around Iwamizawa area. The maximum snow depth was 205 cm, which was the second deepest after 208 cm in the winter of 2011-2012. Two snow surveys were conducted in Iwamizawa in February 2021 and compared to the 2012 snow survey. Although temperatures in this winter were normal, they fluctuated largely, and most of the grain shape had metamorphosed into melt forms by late February. The westerly wind was predominant in Iwamizawa this winter. As a result, there were many events where snow clouds flowed from Ishikari Bay toward Iwamizawa.

1. はじめに

2020-2021 年冬期, 岩見沢市周辺は大雪に見舞われた。岩見沢の最深積雪は 205cm (2/25) を記録し, これは 2011-2012 冬期の最深積雪 208cm¹⁾ に次ぐ調査記録であった。このため岩見沢では大雪による家屋の倒壊や雪下ろし事故が多発した。

我々は 2021 年 2 月に岩見沢において 2 度の積雪調査を行い, 2011-2012 年の雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チームが岩見沢で行った積雪調査結果²⁾と比較した。さらに, 北海道の今冬の降雪を概観し, 岩見沢の今冬の降積雪の特徴とそれをもたらした雲の進入パターンを調査した。

2. 調査方法

2011-2012 冬期の調査では, 岩見沢市内の北海道教育大学岩見沢校 (岩教大) グラウンドと岩見沢南小学校グラウンドで積雪断面調査を行った。そこで今冬期は 2 月 16 日と 2 月 28 日の 2 回, 岩教大グラウンドで断面調査を行った。

地上気象調査データは北海道内の 14 振興局の気象庁データを使用した。また, 札幌高層観測 850 hPa とひまわり 8 号の衛星画像を使用した。

3. 調査結果

3. 1 今冬の北海道の降雪の特徴

図 1 に, 岩見沢における 2020-2021 年冬期の日最深積雪と日降雪深の推移を示す。図には, 2011-2012 年冬期と平年 (1981~2010 年の 30 年平均) の日最深積雪も合わせて示した。岩見沢の 12 月

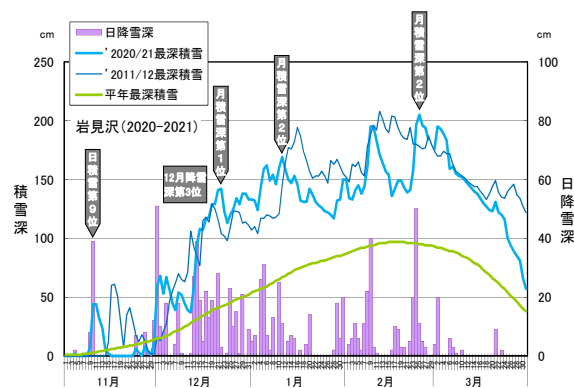


図 1 2020-2021 冬期と 2011-2012 冬期における岩見沢の降積雪の推移。

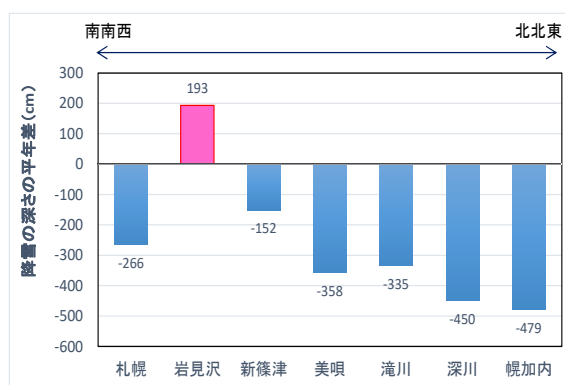


図 2 2020-2021 冬期における札幌から幌加内にかけての累計降雪深の年比較。

の降雪深は 382cm と平年よりかなり多く (平年比 191%, 調査史上第 3 位), 2 月も 227cm (平年比 142%) と平年を多く上回った。これは全道的には冬期を通して降雪深は全般に平年並みから

¹ 北海道教育大学札幌校

² 北海道開発技術センター

³ 株式会社北海道気象技術センター

平年よりやや少な目であったことと対照的である。図2に、岩見沢の位置する石狩平野に沿って、札幌から幌加内にかけての日本海側のアメダス地点の累積降雪深を示したが、平年を上回ったのは岩見沢だけであった。さらに北海道14振興局の代表地点について冬期累計降雪量を調べたところ、全道的に平年を下回る降雪量であり、岩見沢だけが大きく上回っていた。以上より、岩見沢付近に大雪が集中したことが今冬期の大きな特徴であった。

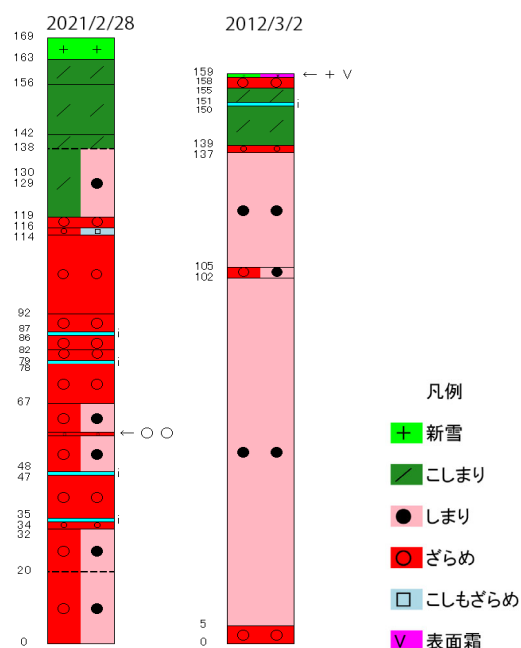


図3 岩教大グラウンドにおける積雪断面。
左：2021/2/28，右 2012/3/2。i は氷板。

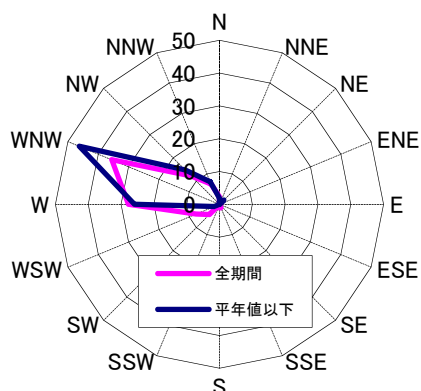


図4 札幌 850hPa 風向出現率 (%). 2020 年 12 月～2021 年 2 月の 09 時。

3.2 2011-2012 冬期と今冬の気象および積雪の違い

2020-2021 冬期における岩見沢での平均気温の

推移を調べ、2011-2012 冬期の気温および平年値と比較したところ、2011-2012 冬期は平年より気温が全般に低かったのに対し、2020-2021 冬期は気温の変動が大きく、1 月中旬以降は平年より高い日が多い違いが見られた。

2 月 16 日の積雪調査では前日から降雨に見舞われ、積雪内には帯水層が見られた。その後 2 月 23 日から 24 日にかけて大雪が降ったので、2 月 28 日の調査では上層の雪を除いて積雪はざらめ雪へ変態しており (図3 左)、寒冷だった 2011-2012 冬期の積雪がしまり雪主体だったこと (図3 右) と対照的であった。

3.3 岩見沢で降雪が多かった理由

雪雲の移動を支配する高度の札幌高層観測 850hPa の風向の出現率を図4に示す。気温が平年値以下の時の風向出現率は WNW の風向が 50%近くと卓越し、次いで W となっている。全期間でも WNW と W の順となった。日本海で発生した雪雲は、周辺の地形から西寄りの風では岩見沢方面、北寄りの風では札幌方面に進入し、降雪が多くなることが知られている。今冬期は岩見沢に雪雲の進入しやすい風向が卓越し、大雪の要因となったことを示している。

今冬期は 2012 年冬期³⁾にも見られたような、北海道の西岸海上を南下して先端が内陸に入り込む帯状雲や、沿海州の山岳の影響を受けた地形性雲バンドの特徴的な雲パターンが岩見沢に大雪をもたらしたことも確認された。

【謝辞】

本研究の一部は JSPS 科研費 18K02929 の助成を受けた。

【参考文献】

- 1) 金田安弘, 永田泰浩, 丹治和博, 松岡直基, 尾関俊浩, 2012: 2011-2012 年冬期に北海道岩見沢市を中心として発生した大雪について (その 1) - 大雪の概要と気象の特徴 -, 北海道の雪氷, **31**, 115-118.
- 2) 尾関俊浩, ほか 12 名, 2012: 2011-2012 年冬期に北海道岩見沢市を中心として発生した大雪について (その 3) - 空知・石狩の積雪調査 -, 北海道の雪氷, **31**, 123-126.
- 3) 松岡直基, 西山直樹, 2012: 2012 年冬季の岩見沢の大雪について, 細氷, **58**, 22-23.

勾配屋根における積雪量と落雪量の周期的な時間変化に関する 理論的考察

Theoretical considerations of snow on sloped roof with snowslide

眞山 博幸¹, 東 乙比古², 室崎 喬之¹, 吉田 光則³
Hiroyuki Mayama¹, Otohiko Azuma², Takayuki Murosaki¹, Mitsunori Yoshida³
Corresponding author: mayama@asahikawa-med.ac.jp (H. Mayama)

Time variations in amounts of snow and snowslide on sloped roofs under a constant rate of snowfall were discussed. Considering coupled time-differential equations, oscillating behaviors in the amounts of snow and snowslide were obtained, where the coupled time-differential equations are consisted of a first-order time differential equation of the amount of snow and a second-order time differential equation of the amount of snowslide. Furthermore, the oscillating behaviors were described as loops by suitable plots and the shapes and sizes of the loops reflect the calculation conditions.

1. はじめに

北海道では概ね 10 月中旬から 11 月上旬の時期に初雪が降り、年末から年始にかけては気温が下がるとともにまとまった量の雪が降り、1 月下旬から 2 月上旬の厳寒期を経た後のさっぽろ雪まつりの時期に一度気温が上がり、2 月中旬から 3 月下旬までの時期は周期的な寒暖と降雪があり、特に 3 月中旬以降では日中の気温上昇と直射日光による融雪が著しくなり、4 月になるとほとんど降雪がない状況で融雪が進む¹⁾²⁾。このような条件下では勾配屋根のある家屋では様々な原因で落雪が起きる。

本研究では雪が降っている条件で勾配屋根上の積雪量と勾配屋根からの落雪量の周期的な時間変化に注目し、理論的に取り扱うことを試みた。具体的には、一定の降雪量の下での勾配屋根上の積雪量と勾配屋根からの落雪量について連立微分方程式を考え、積雪量と落雪量の周期的な時間変化を記述することを試みた。

2. モデルと結果

2. 1 定義

議論を始める前に定義を説明する。図 1 に示したように時刻 t のときの勾配屋根への降雪量を $Q_{in}(t)$ 、勾配屋根上の積雪量 $Q_{roof}(t)$ 、勾配屋根からの落雪量 $Q_{out}(t)$ とすると、単位時間当たりの降雪量 $dQ_{in}(t)/dt$ (降雪率と定義する)、積雪量 $dQ_{roof}(t)/dt$ (積雪率と定義する)、落雪量

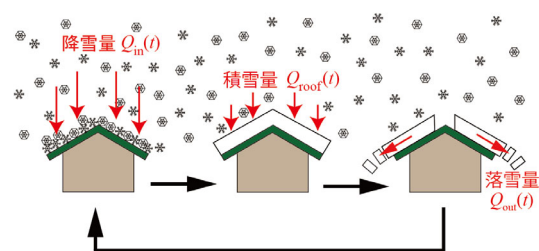


図 1 降雪条件下における勾配屋根上の積雪と落雪の周期的な時間変化 (模式図)。

$dQ_{out}(t)/dt$ (落雪率と定義する) を考えることができる。積雪率と落雪率の符号が正のときは増加、負のときは減少を意味する。

次に勾配屋根上への降雪量 $Q_{in}(t)$ 、勾配屋根上の積雪量 $Q_{roof}(t)$ 、勾配屋根からの落雪量 $Q_{out}(t)$ を式で定義する。まず、 $Q_{in}(t)$ は降雪率を積分した値に等しく、以下ようになる。

$$Q_{in}(t) = \int_0^t \frac{dQ_{in}(t)}{dt} dt \quad (1)$$

同様に、積雪量 $Q_{roof}(t)$ と落雪量 $Q_{out}(t)$ はそれぞれ積雪率と落雪率を積算したものとなり、以下のようにになる。

$$Q_{roof}(t) = \int_0^t \frac{dQ_{roof}(t)}{dt} dt \quad (2)$$

$$Q_{out}(t) = \int_0^t \frac{dQ_{out}(t)}{dt} dt \quad (3)$$

落雪が起きたときに積雪率と落雪率は変化をす

¹ 旭川医科大学 一般教育 化学

² NPO 法人 北海道産業技術支援協会

³ 北海道中小企業総合支援センター

Department of Chemistry, Asahikawa Medical University
Hokkaido Industrial Technical Service Association
Hokkaido Small Business Support Center

る。例えば、積雪率が正のときは(2)式に示されているように積雪量(積分値)が増加し、積雪率が負のとき積雪量は減少する。同じことは(3)式の落雪率と落雪量の関係でも成り立つ。(1)~(3)式は時々刻々変化する時間変化と総量の関係を表している。

2. 2 仮定

実際の勾配屋根上の積雪と落雪の現象は、気温の変化、単位時間当たりの降雪量の変化、屋根表面温度、勾配角度、勾配屋根の向き、日照条件、屋根表面材料等の様々な要因が関係している複雑な現象である^{3)~6)}。したがって、個々の要因を考慮した現実の現象を最初から理解することは困難であるので、現象のエッセンスを理解するために最も単純な仮定から出発することを試みた。

本研究では問題を単純化して現象全体を俯瞰するために以下の5つの仮定をした:①降雪率は一定である。②気温と屋根の温度は考慮しない。③勾配屋根の面積や形状や勾配角度等の因子は考慮しない。④降雪量、積雪量、落雪量の具体的な単位は考慮しない。これは降雪量、積雪量、落雪量をどの物理量(例えば質量、体積、高さ)にするのが妥当かは雪の状態に大きく依存するためである。⑤降雪量、積雪量、落雪量、降雪率、積雪率、落雪率、連立微分方程式の中の定数の値に現実的な意味はなく、あくまでも相対的な大きさで議論する。

2. 3 積雪量と落雪量の時間変化

上記の(1)~(3)式では降雪量、積雪量、落雪量を個別に記述したが、一方で積雪量がある一定の量に達すると落雪が起きることからも分かるように、落雪の条件は積雪量に関係している。落雪が起きたときに積雪量がどのように時々刻々と変化するか、これに加えて積雪量が増加したときに落雪量がどのように変化するかを考える必要がある。降雪量は仮定①に基づいて考える。

最初に積雪と落雪の関係を考える。ある時刻 t の積雪率を考えると、降雪率から落雪率を差し引いた値に等しいので、(4)式のようになる。

$$\frac{dQ_{\text{roof}}(t)}{dt} = \frac{dQ_{\text{in}}(t)}{dt} - \frac{dQ_{\text{out}}(t)}{dt} \quad (4)$$

(4)式の右辺の第1項と第2項の競合関係を考えると、次のようなことを記述できることが分かる。(4)式の右辺第1項目($dQ_{\text{in}}(t)/dt$)は降雪率

である。降雪率を(5)式のように定義する。

$$\frac{dQ_{\text{in}}(t)}{dt} = a \quad (5)$$

ここで a は正の定数である。

一方、(4)式の右辺第2項目($dQ_{\text{out}}(t)/dt$)は落雪率なので、落雪がないときはゼロ、落雪が起きるときだけ正の値になる。

2. 4 勾配屋根からの落雪の条件1~3と計算結果

(4)式では落雪が起きたときの積雪率について考えたが、積雪量が増加したときに落雪量がどのように変化するかについては何も説明していない。この問題を扱うために、積雪量が積雪上限値 $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}}$ に達したときに落雪率が最大になると仮定して、落雪率の関数を考える。以下に条件1~3のそれぞれにおいて落雪率の関数を考えて、積雪量と落雪量が周期的に時間変化するかどうかを計算で確認した。

条件1: 最初に、以下の(6)式のように落雪率が積雪上限値と積雪量の差($Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} - Q_{\text{roof}}(t)$)に対して正規分布の依存性になると仮定した。

$$\frac{dQ_{\text{out}}(t)}{dt} = \frac{A_1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp \left[-\frac{(Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} - Q_{\text{roof}}(t))^2}{2\sigma^2} \right] \quad (6)$$

(6)式中の A_1 と σ はそれぞれ定数と標準偏差である。正規分布は平均値で離れたところでも確率があるので、(6)式は $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}}$ でしか落雪が起きない訳ではなく、 $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}}$ よりも少ない $Q_{\text{roof}}(t)$ であっても落雪が起きることを意味している。つまり、少ない積雪量でも少量の落雪が起きることがあるこ

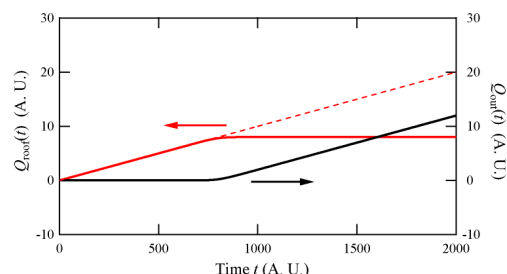


図2 条件1: (4)式と(6)式の連立微分方程式の計算結果。計算条件は $a = 0.01$, $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 10$, $A_1 = 1$, $\sigma = 1$ である。赤実線は積雪量 $Q_{\text{roof}}(t)$ 、赤点線は落雪がない場合の $Q_{\text{roof}}(t)$ の変化、黒実線は落雪量 $Q_{\text{out}}(t)$ である。

とも記述できる. 標準偏差がどれくらい少ないところから落雪が起きるのかを決める.

図2は(4)式と(6)式の連立微分方程式から得られた計算結果である. 計算条件は $a = 0.01$, $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 10$, $A_1 = 1$, $\sigma = 1$ である. $Q_{\text{roof}}(t)$ は最初は時間に比例して増加しているが, 一定値に達するとそのまま一定値を保って変化しない. $Q_{\text{out}}(t)$ は $Q_{\text{roof}}(t)$ が一定値に達するまでゼロのままであるが, その後は時間に比例して増加している. このように $Q_{\text{roof}}(t)$ と $Q_{\text{out}}(t)$ はいずれも周期的な時間変化を示さなかった. (4)式に(6)式を代入すると単なる1階微分方程式になるだけなので, 妥当な結果といえる.

条件2: 次に落雪量の時間変化の割合を(7)式の右辺のように加速度に相当する時間の2階微分方程式として記述した. これにより積雪量の変化に対して敏感に落雪が起きることを記述できる. さらに, 正規分布よりも $Q_{\text{roof}}(t)$ が $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}}$ に近づくにつれて加速度が急激に増大して無限大に発散する性質をもつ4次の反比例の方が大きな時間変化が得られやすいと考え, (7)式を仮定した.

$$\frac{d^2 Q_{\text{out}}(t)}{dt^2} = \frac{A_2}{(Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} - Q_{\text{roof}}(t))^4} - B_2 \quad (7)$$

(7)式中の A_2 と B_2 は定数である. 右辺第一項目が $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}}$ と $Q_{\text{roof}}(t)$ の差の4次の反比例の関係を示し, 右辺第二項目は計算結果のバックグラウンドの調整のために導入した便宜的な調整項である. (7)式が意味するところは $Q_{\text{roof}}(t)$ が $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}}$ に達すると屋根上の積雪が一度に落雪するイメージである. なお, 4次の反比例は1つの仮定であり, 必須条件ではない.

図3は(4)式と(7)式の連立微分方程式から得られた計算結果である. 計算の条件は $a = 0.01$, $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 10$, $A_2 = 5 \times 10^{-6}$, $B_2 = 5 \times 10^{-6}$ である. 上向きのスパイク状の周期的な時間変化を示している $Q_{\text{roof}}(t)$ が得られ, $Q_{\text{out}}(t)$ もバックグラウンドが時間とともにわずかに減少した後に増加しているものの, 挿入図で示したように周期的な時間変化を示す振る舞いが得られた. $Q_{\text{roof}}(t)$ と $Q_{\text{out}}(t)$ はともに周期的な時間変化を示しているので, (6)式ではなく(7)式のように落雪率を加速度に相当する量で扱うことが妥当であることが分かった.

条件3: 条件2で $Q_{\text{out}}(t)$ は周期的な時間変化を示しているものの, $Q_{\text{out}}(t)$ のバックグラウンドも増

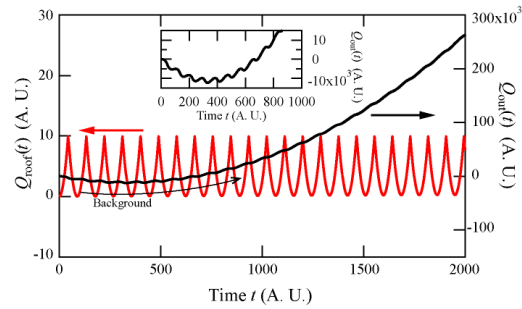


図3 条件2: (4)式と(7)式の連立微分方程式の計算結果. 計算条件は $a = 0.01$, $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 10$, $A_2 = 5 \times 10^{-6}$, $B_2 = 5 \times 10^{-6}$ である. $Q_{\text{roof}}(t)$ (赤実線, 左縦軸)と $Q_{\text{out}}(t)$ (黒実線, 右縦軸)の時間変化. 挿入図は $Q_{\text{out}}(t)$ の時間変化の拡大図である.

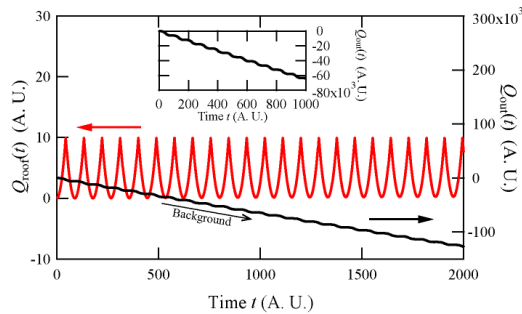


図4 条件3: (4)式と(8)式の連立微分方程式の計算結果. 計算条件は $a = 0.01$, $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 10$, $A_3 = 5 \times 10^{-6}$, $B_3 = 5 \times 10^{-6}$, $C_3 = 0.01$ である. $Q_{\text{roof}}(t)$ (赤実線, 左縦軸)と $Q_{\text{out}}(t)$ (黒実線, 右縦軸)の時間変化. 挿入図は $Q_{\text{out}}(t)$ の時間変化の拡大図である.

加している. このバックグラウンドの補正を考慮した(8)式を仮定した.

$$\frac{d^2 Q_{\text{out}}(t)}{dt^2} = \frac{A_3}{(Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} - Q_{\text{roof}}(t))^4} - B_3 - \frac{C_3}{t} \quad (8)$$

A_3 , B_3 , C_3 は定数である. 右辺の第三項目が時間とともに増加する $Q_{\text{out}}(t)$ のバックグラウンドを補正するために便宜的に導入した項である.

図4は(4)式と(8)式の連立微分方程式から得られた計算結果である. 計算の条件は $a = 0.01$, $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 10$, $A_3 = 5 \times 10^{-6}$, $B_3 = 5 \times 10^{-6}$, $C_3 = 0.01$ である. 挿入図に示されているように $Q_{\text{out}}(t)$ は周期的な時間変化を示しているが, $Q_{\text{out}}(t)$ は時間とともにバックグラウンドは減少していて, 図3のバックグラウンドの時間変化とは異なっている.

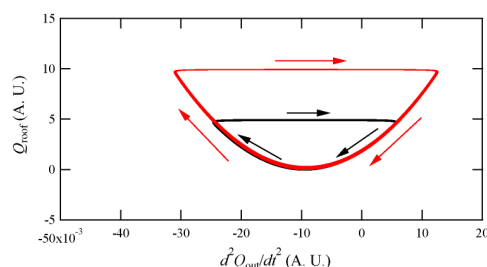


図5 条件3: $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 10$ (赤) と $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 5$ (黒) のときの計算結果を縦軸 $Q_{\text{roof}}(t)$, 横軸 $d^2 Q_{\text{out}}(t)/dt^2$ をとってプロットしたときに得られた閉じた軌道. 黒の軌道は赤の軌道と重なっていて見えない部分がある.

3. 周期的な積雪と落雪の可視化の試み

本研究の目的である積雪量と落雪量の周期的な時間変化を記述する試みについて, 積雪量の1階微分方程式と落雪量の2階微分方程式を組み合わせた連立微分方程式を考えればよいことが見出された. さらに一步進めて現象全体を分かりやすく俯瞰する方法を探索した.

周期的な時間変化が観察される現象として, カオスが知られている. カオスの周期的な現象では適当な物理量を縦軸と横軸に取って実験結果や計算結果をプロットすることで閉じた軌道(アトラクター)を描き, 軌道の大きさや形状から現象全体を俯瞰する手法を採用している⁷⁾. この手法に倣って条件3の計算結果を縦軸 $Q_{\text{roof}}(t)$, 横軸 $d^2 Q_{\text{out}}(t)/dt^2$ でプロットすると, 図5のような閉じた軌道が得られた. $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 10$ のときの結果(赤の軌道)と $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}} = 5$ のときの結果(黒の軌道)を比較すると, $Q_{\text{roof}}^{\text{limit}}$ の値に依存して軌道の大きさが異なることが示されている. 図5のように実際の観測結果をプロットして軌道にすると, 降雪, 積雪, 落雪の条件だけではなく, 気温の変化, 単位時間当たりの降雪量の変化, 屋根表面温度, 勾配角度, 勾配屋根の向き, 日照条件等といった様々な情報が軌道の大きさや形状に反映されると予想される.

4. まとめ

単純な仮定を設定し, 一定の降雪率の条件下での勾配屋根上の積雪・落雪に関する周期的な時間変化を理論的に記述することを試みた. 積雪量の速度に相当する1階微分方程式と落雪量の加速度に相当する2階微分方程式からなる連立微分

方程式を考えることで, 積雪量と落雪量の周期的な時間変化を記述できることを見出した. 今後の研究では観測結果に合わせて落雪量の2階微分方程式を決定することが重要である. また, 積雪と落雪の時間変化を閉じた軌道として描くことで現象全体を俯瞰できる可能性も提案した. このような観点で降雪・積雪・落雪の現象を考えると, 現象の詳細のみに注目した部品論ではなく, システム論を俯瞰できる. 現象全体の見通しがよくなることで部品論に還元できる可能性があり, 実用の立場からみても有益な知見が得られると期待される. また, 降雪がある下で積雪量と落雪量が周期的に変化する現象は物質とエネルギーの出入りのある条件下で起きる心臓の拍動のような非線形現象とも考えることができ⁸⁾, 物理学的にも大変興味深いテーマである.

【謝辞】

着雪氷勉強会において本研究の内容に関する議論の場を提供していただきました.

【参考文献】

- 1) 亀田貴雄, 高橋修平, 2017: 雪氷学, 古今書院, 99-108.
- 2) 伊東俊幸, 他4名, 2012: 2011年度冬季における岩見沢および三笠の屋根上積雪状態, 北海道の雪氷, **31**, 147-150.
- 3) 伊東俊幸, 深瀬孝之, 2020: 微小凹凸を設けた塗装金属板の滑雪性状, 北海道の雪氷, **39**, 17-18.
- 4) 伊東俊幸, 苔米地司, 2011: 屋根材の滑雪性能に対応した勾配屋根における暴露試験の滑落雪状況, 北海道の雪氷, **30**, 5-8.
- 5) 吉田光則, 他4名, 2003: 着雪氷防止技術に関する研究(第4報)一滑雪塗料の開発とその評価について一, 北海道立工業試験場報告, **302**, 87-91.
- 6) 吉田光則, 吉田昌充, 金野克実, 2000: 着雪氷防止技術に関する研究(第3報)一滑雪と材料表面の特性について一, 北海道立工業試験場報告, **299**, 13-17.
- 7) 例えば, 合原一幸, 2002: カオス学入門, 放送大学教育振興会, 44-56.
- 8) 吉川研一(監修), 森義人, 中田聡, 1994: 非線形現象, 産業図書.

各種木材の着雪および剥落雪の基本性状について

Basic properties of snow accretion to various timber

伊東 敏幸¹, 深瀬 孝之²

Toshiyuki Ito¹, Takayuki Fukase²

Corresponding author: itoto@hus.ac.jp (T. Ito)

建築物の外壁あるいは外装部材に用いる各種木材における着雪や剥落雪に関する基本特性を明らかにするため、外装用の各種木材および木材以外の建築材料を対象とした剥落雪実験を行った。実験の結果から、各種木材における剥落雪に及ぼす樹種および雪質の基本的な影響を明らかにした。付着した雪の剥落雪性状は、表面仕上げ状態、木目方向、防腐剤塗布量、凍着時間および着雪量の影響を受けることが分かった。

1. はじめに

木材利用の普及に伴い積雪地域においても高層建築物の外壁装飾に木材を使用することがある。よって、建物外装に用いる木材への着雪および剥落雪の諸性状に関する基礎資料を整える必要がある¹⁾。

本研究では各種木材における着雪および剥落雪の基本性状を明らかにすることを目的とし、木材の材種や表面仕上方法と剥落雪性との関係、経年劣化した木材の剥落雪性を明らかにすると共に、木材腐朽防止に欠かせない防腐剤の塗布量が及ぼす影響、雪質および着雪時の温度や水分量の影響に関する基本性状を明らかにする。

2. 研究の方法

表1に示すような建物外装に適した各種木材および比較材5種類を試料とし、試料上に積雪させた雪の剥落性状を実験的に評価した。試料の大きさは100×100 mm、厚さ10 mm程度（暴露材は30 mm程度）とした。木材の表面仕上は、かなな仕上後に80番の紙やすりで軽く研磨した状態を粗面仕上とし、かなな仕上後に1500番の紙やすりで研磨した状態を平滑仕上とした。防腐剤は表面塗膜を形成しない油性浸透型塗料塗料を用いた。防腐剤を塗布した試料は、表面油膜を除去するために粗面仕上は80番、平滑仕上は1500番の紙やすりで軽く研磨した。

上記の試料を用いて雪の滑落・剥落実験を行い、付着した雪が滑落・剥落するまでの経過時間を測定した。実験は、水平状態の試料上に新雪の自然雪をふるいで振りかけ、数時間融雪させた後に-10℃で凍着させた。凍着後に試料を傾斜60度に

表1 試料の概要

種類	表面状態	防腐剤塗布
針葉樹	エゾマツ (板目・柃目)	粗面仕上 0回,1回,3回
		平滑仕上 0回,1回,3回
		のこ引き 1回
		25年暴露材 0回,1回
	カラマツ	粗面仕上 0回,1回,3回
		20年暴露材 0回,1回
広葉樹	スギ	粗面仕上 1回
	ヒノキ	粗面仕上 1回
	ナラ	粗面仕上 0回,1回,3回
	タモ	粗面仕上 1回
比較材	カツラ	粗面仕上 1回
	セン	粗面仕上 1回
	ガラス	素面 —
	アクリル	素面 —
	ステンレス	素面 —
	塗装鋼板	素面 —
	コンクリート	素面 —

表2 剥落雪実験の概要

	着雪時の室温	融雪時の室温・時間	凍着時の室温・時間	雪の質量
条件I	-5℃	+5℃,2時間	-10℃,3時間	60 g
条件II	-5℃	+5℃,2時間	-10℃,2時間	35 g
条件III	-5℃	+5℃,2時間	-10℃,2時間	60 g
条件IV	-5℃	+5℃,1時間	-10℃,2時間以上	50 g
条件V	0℃	+5℃,1時間	-10℃,2時間	70 g
条件VI	0℃(2cm)	+5℃,2時間	-10℃,2時間	25 g
	-5℃	+5℃,1時間	-10℃,2時間	35 g
条件VII	0℃(2cm)	+5℃,1時間	-10℃,2時間	50 g + 水 10 g
条件VIII	0℃(2cm)	+5℃,2時間	-10℃,3時間以上	50 g + 水 10 g
条件IX	-5℃(3cm)	+5℃,2時間	-10℃,2時間	40 g
条件X	0℃(1cm)	—	-10℃,3時間以上	60 g + 水 50 g

・条件VIIは0℃で試料上に2cm積雪させ、融雪・凍着を行った後、更に-5℃で雪を振りかけて融雪・凍着させた。条件VII・VIIIは2cm積雪させた後、水を噴霧し、その上に雪を振りかけた。条件Xは試料上に1cm積雪させ、水噴霧の後に雪を振りかけ、その後にも水を噴霧した。

^{1, 2}北海道科学大学 工学部建築学科

Hokkaido University of Science, Faculty of Engineering, Dept. of Architecture

設置し、室温+5℃として写真1のような状態にて観測した。実験は表2に示す条件で10回行った。

3. 結果と考察

剥落雪性の木材種別特性を図1に示す。図のように、スギが最も剥落雪し難く、他の木材は同程度の剥落雪となり、タモが最も剥落雪しやすい木材であった。概ね針葉樹よりも広葉樹の方が剥落雪しやすい傾向が見られた。針葉樹は表面に繊維が毛羽立っていることが影響したと考える。比較材とした塗装鋼板は極めて滑落しやすいが、コンクリートは木材よりも剥落雪し難かった。

エゾマツにおける剥落雪性の表面状態特性を図2に示す。図のように、柾目と板目を比較すると、板目よりも柾目の方が剥落雪しやすいことが分かる。表面仕上別にみると、平滑仕上が最も滑落雪しやすく、粗面仕上、鋸引きの順に表面が粗くなるため剥落雪し難くなる。25年暴露材の防腐材1回塗布の縦目をみると、鋸引きよりも早く剥落雪しているが、防腐剤を塗布しない暴露材は塗布した暴露材の2倍程度の時間を要している。同様に、平滑仕上および粗面仕上においても防腐材なしと1回塗布において約2倍の時間差が生じた。このことから、木材表面における防腐材の有無が剥落雪性に大きく関わるが、防腐材の塗布回数の影響は小さいことが分かった。

剥落雪に及ぼす実験条件(着雪状態)特性を図3に示す。水分を多く含んだ雪質の方が剥落雪しやすい傾向がみられ、少雪の条件Ⅱと条件Ⅸの場合は、滑落や剥落せずに融雪が進行する状態がみられた。また、カラマツは融雪により試料表面に水分が多くなった状態となり剥落雪までの時間が長くなる傾向がみられた。

4. まとめ

本実験により、外装木材へ付着した雪の剥落性は、木目の方向、樹種、防腐剤塗布の有無、凍着時間、付着雪量および雪の水分量の影響を受けることが分かった。樹種はタモ、木目は縦目、防腐剤塗布、長時間凍着、付着雪多量および雪の水分量が多いときに剥落雪しやすい傾向にある。

【参考文献】

- 1) 伊佐治信一, 2016: 積雪寒冷地域で暴露される塗装木材の耐候性能と耐候性予測試験, MOKUZAI HOZON (Wood Protection), 42(2), 56-61



写真1 剥落雪実験の観察状態

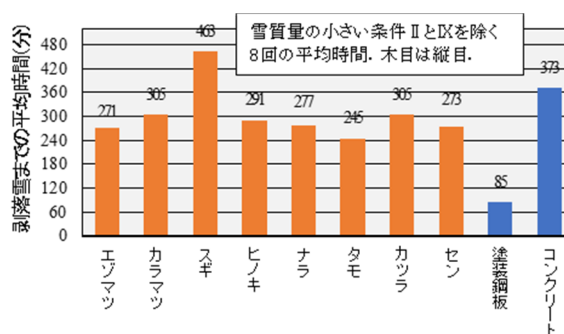


図1 剥落雪性の木材種別特性

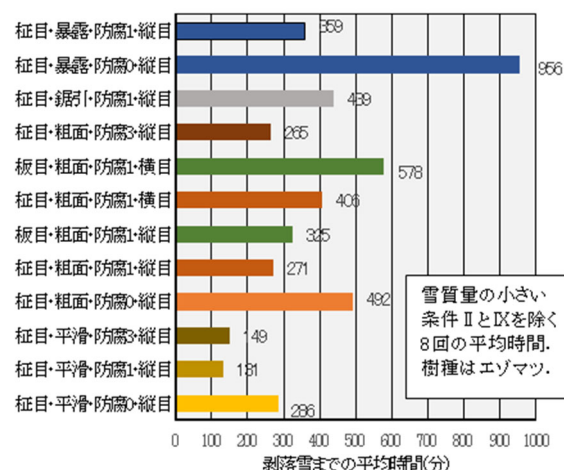


図2 エゾマツの剥落雪性の表面状態特性

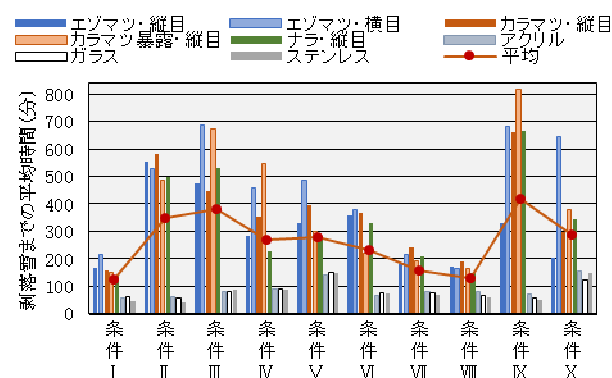


図3 剥落雪性の着雪条件特性

2021 年 3 月 2 日に道央圏で同時多発した雪崩について

Dry-snow avalanches occurred due to non-rimed precipitation particles on March 2, 2021

松下 拓樹¹

Hiroki Matsushita¹

Corresponding author: matsushita-h@ceri.go.jp (H. Matsushita)

2021 年 3 月 2 日、道央圏の複数箇所において同時多発的に雪崩が発生した。これらの雪崩は前日から降り続いた新雪層が崩れた乾雪表層雪崩で、降り始めから雪崩発生までの降雪量は 20~30cm 程度と通常の雪崩発生条件より少ない降雪量で雪崩が発生した。この降雪は東北北部を通過中の低気圧から延びる温暖前線に伴うもので、雲粒付着の少ない板状結晶や針状・鞘状結晶などからなる降雪であった。これらの降雪結晶により形成された積雪は脆弱なため、普段より少ない降雪量で雪崩が発生したと考えられる。

1. はじめに

2021 年 3 月 2 日の 12 時頃を中心に、北海道の道央圏において相次いで雪崩が発生し、道路の通行止め等の影響が生じた。本稿では、今回の雪崩が広域で同時多発的に発生した点を重視し、今後の対策や対応に資するため、これらの雪崩の概要と発生条件に関する考察について報告する。

2. 2021 年 3 月 2 日に道央圏で多発した雪崩

2. 1 雪崩発生の概要

2021 年 3 月 2 日の 10 時から 14 時頃にかけて、北海道の国道に関わる雪崩が 5 件発生した。雪崩発生箇所は、国道 5 号共和町稲穂峠、国道 393 号小樽市毛無峠、国道 453 号恵庭市北奥漁、国道 452 号芦別市芦別、国道 275 号幌加内町政和である（図 1）。いずれも降雪中に発生した乾雪表層雪崩で、デブリが道路の両側車線を覆った箇所もあった。また、雪崩発生箇所周辺では、道路に到達していない小規模な雪崩も複数確認された。

以下では、著者が雪崩発生箇所に赴いた 4 箇所の雪崩（幌加内町の雪崩以外）について、当日の気象概況や積雪の特徴などを述べる。

2. 2 気象概況と降雪状況

図 1 は、気象庁 AMeDAS により観測された 3 月 1 日と 2 日の降雪量の合計値である。この 2 日間で 40~50cm のまとまった降雪となった地点があるが、雪崩が多発した道央圏は 30cm 程度の箇所が多かった。図 2 は、雪崩発生箇所周辺の 3 月 1~2 日の降雪量（積雪深の 1 時間ごとの差）の累計値と気温の時系列である。1 日 13 時頃から

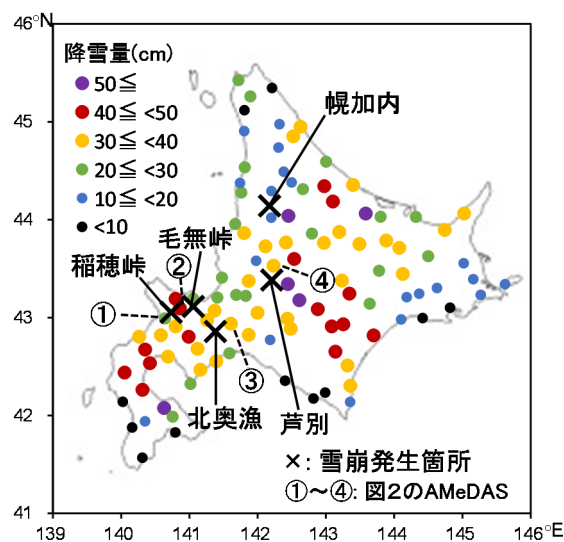


図 1 2021 年 3 月 1~2 日の降雪量の累計値

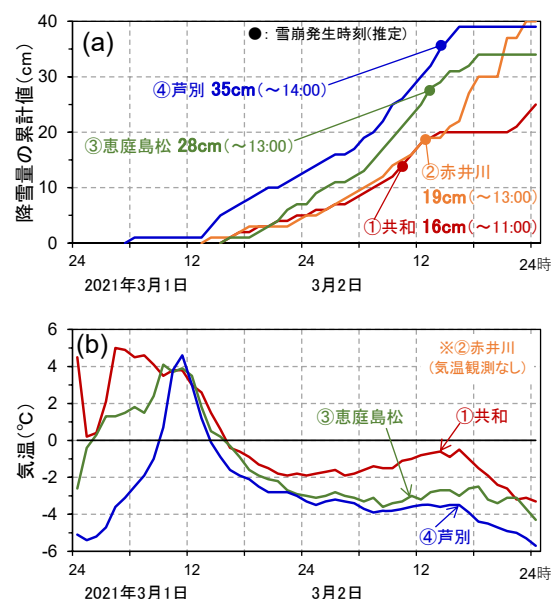


図 2 3 月 1~2 日の (a) 降雪量と (b) 気温の推移

¹ 土木研究所 寒地土木研究所

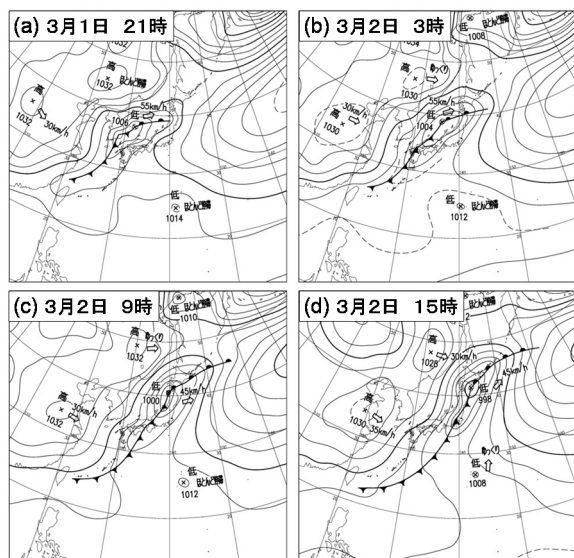


図3 3月1～2日の地上天気図(気象庁作成)

雪が降り始め、2日の雪崩発生時も降り続いていた。降り始めから雪崩発生時刻(推定)までの降雪量の累計値は16cmから35cmであった。特に20cm以下の普段より少ない降雪量で雪崩が発生した箇所があることが、今回の雪崩の特徴の一つである。また、降雪前の3月1日の気温は、各地とも0℃を上回っていた。

図3は、降雪期間中の地上天気図である。低気圧が日本海から東北地方北部を東進し、この低気圧の温暖前線が北海道の南岸に継続的に位置していた。今回の雪崩発生に関わった降雪は、この低気圧の温暖前線に伴う降雪であった。この低気圧が北海道の東海上に去った後は、目立った降雪はなく、3月3日の天候は晴れ、4日以降は各地で気温0℃以上となった。

2. 3 降雪結晶と積雪の特徴

図4は、3月2日深夜に札幌市で撮影した降雪結晶の写真である。今回積もった新雪層は、雲粒付着の少ない板状結晶(図4b)や鞘状または針状結晶(図4c)などから構成されていた。このような降雪結晶は雪崩発生箇所でも確認され、今回の雪崩はこの新雪層が崩れて発生した。また、同様な降雪結晶は札幌市北区¹⁾でも確認されており、道央の広い範囲で雲粒付着の少ない降雪結晶による脆弱な積雪が形成されたと考えられる。なお、雲粒付着の少ない降雪結晶が積もると、特に夜間において光を反射して雪面がいつも以上に輝く特徴がある¹⁾。

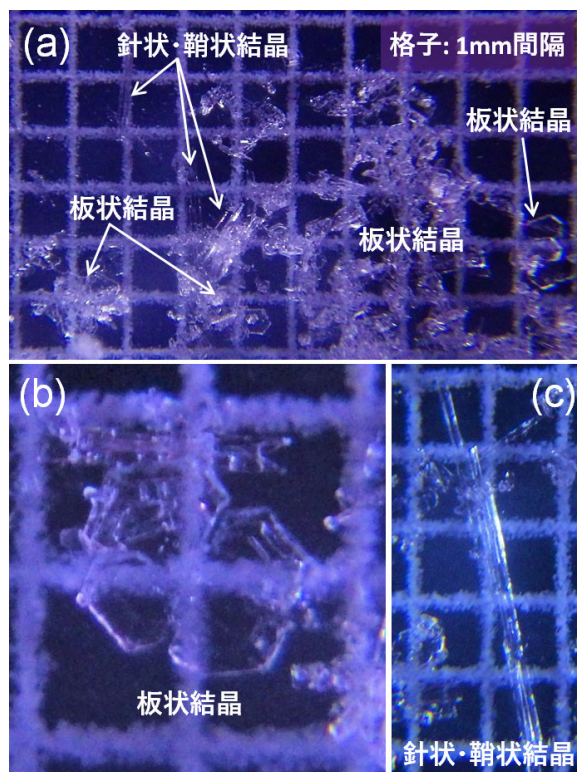


図4 降雪結晶(札幌市清田区, 3月2日24時頃)

3. 考察

3.1 降雪結晶が要因の雪崩に関する既往知見

乾雪表層雪崩の発生要因となる弱層形成に、雲粒付着の少ない降雪結晶が関与することは古くから指摘されており^{2)~4)}、降雪結晶弱層による雪崩発生箇所の積雪断面観測^{5),6)}や降雪結晶弱層の物理特性や脆弱性の持続性に関する観測^{7)~11)}が行われている。特に、大型で雲粒付着の少ない板状結晶により形成された積雪層は、他の新雪層よりも脆弱な状態が長期間継続する^{6),11)}。ただし、降雪結晶弱層の脆弱性が継続するのは、数日間に限られる場合が多い^{6),8),10)}。

弱層に着目した広域調査例¹²⁾によると、その約半数が降雪結晶による弱層との報告がある。最近では、2014年2月の関東甲信や東北地方において、南岸低気圧による多量降雪時に各地で多数の雪崩が発生したが、このとき雲粒付着の少ない針状、柱状、板状などの降雪結晶が弱層として関与した可能性が指摘されている^{13)~15)}。北海道でも、日本雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チームより、降雪結晶弱層が要因となった雪崩事例が報告されている^{16),17)}。

雲粒付着の少ない降雪結晶は、温暖前線や低気圧前面等に形成される層状雲から降ることが多

い^{18),19)}。この新雪層の上に、時間を置かず低気圧通過に伴う対流雲や冬型気圧配置によるまとまった雪が積もると、雲粒付着の少ない降雪結晶が弱層として作用するため、乾雪表層雪崩が発生しやすい状況になると考えられる^{6),18)}。

3. 2 今回の雪崩の特徴と発生条件について

今回の雪崩事例(2章)と降雪結晶による雪崩の既往知見(3.1節)を比較すると、温暖前線に伴う雲粒付着の少ない降雪結晶が要因だった点が共通し、このような降雪結晶が降りやすい気圧配置の継続が、広域における同時多発の雪崩につながったと考えられる。しかし、今回北海道で発生した雪崩は、雲粒付着の少ない降雪結晶による新雪層そのものが崩れた点で、既往研究の降雪結晶が積雪内部で弱層として作用する雪崩と異なる。また、20cm以下の普段より少ない降雪量で雪崩が発生したことも特徴の一つである。

そこで、20cm程度の新雪層が崩れて雪崩発生に至る可能性があるのかについて、著者の過去の検討例を引用して考察する。図5は、雲粒付着の少ない板状結晶と雲粒付着が顕著な雪片などからなる降雪に対して、降り始めから斜面積雪が不安定化(安定度 $SI \leq 2.0$)するまでの降雪量を試算した結果である²⁰⁾。安定度 SI は、斜面積雪のせん断方向の応力と強度の比²¹⁾で、北海道の国道で発生した雪崩に関する既往研究²²⁾によると、 $SI \leq 2.0$ になると発生数が著しく増加する。図5は、これらの新雪層の密度と上積積雪荷重の時間変

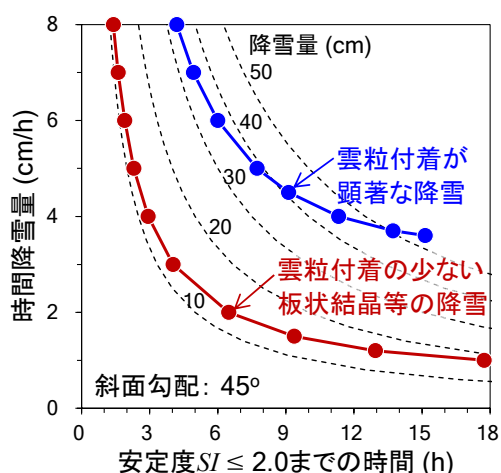


図5 降り始めから斜面積雪の安定度 SI が2.0以下になるまでの時間と時間降雪量、累計降雪量の関係。Matsushita *et al.*²⁰⁾の図を改変。

化に関する現地観測結果¹¹⁾から、遠藤²¹⁾の新雪層の安定性評価手法に用いる圧縮粘性率を定式化して求めたものである²⁰⁾。図5の縦軸は時間降雪量、横軸は斜面積雪の安定度 SI が2.0以下になるまでの降り始めからの時間であり、図中の破線が降雪量の累計値である。この図より、雲粒付着の少ない板状結晶からなる降雪の場合、15~20cm程度の降雪量でも安定度 SI が2.0以下となるため、雪崩発生の可能性があると考えられる。

ただし、図5は一回の観測に基づく結果である。今後、降雪結晶の種類による圧縮粘性率や安息角などの物理特性の違い^{23),24)}を考慮した、より系統的な検討が必要である。なお、今回の雪崩では、降雪前の気温上昇(図2)の影響を受けた雪面と、この降雪結晶との結合の弱さ(weak interface²⁵⁾)も要因の一つとして考えられる。

3. 3 今後の対策に向けた課題

今回のような雲粒付着の少ない降雪結晶が要因となる雪崩に対して、効果的かつ効率的な対策や対応を行うために、次のような課題がある。

降雪結晶による弱層が広域に形成される傾向があるため、雪崩発生の可能性の高い箇所の絞り込み(斜面方位や植生条件などによる特定)を可能とする知見が必要である。今回の雪崩は、雪崩発生履歴のない箇所でも発生した他、樹林が存在する斜面でも発生した。しかし、なぜこれらの箇所で発生したのか、現時点では、具体的な地形や植生などの条件は不明である。

また今回の事例のように、普段より少ない降雪量で雪崩が発生する場合があるので、発生条件や脆弱性の持続(斜面積雪の安定化に要する時間)に関するさらなる客観的かつ実用的な知見の蓄積が必要である。発生条件に関しては、3.2節が考察の一例である。脆弱性の持続については、現時点の既往知見^{6),8),10)}より、数週間に渡って持続することはないと考えられる。今回の雪崩では、雲粒付着の少ない降雪結晶の新雪層の上に降雪が生じなかったことと、2日後の3月4日には気温が0℃以上に上昇したため、斜面積雪が不安定だった期間は限定的だったと考えられる。

4. おわりに

降雪結晶が要因となる雪崩は、今回のように広域で発生する可能性があり、今後も留意すべき現象と考えられる。しかし、この雪崩の対策や対応

という観点からみると、まだまだ解明すべき点や課題が多いことも事実である。最近、数値気象モデルによる降雪結晶の雲粒付着の程度を考慮した予測実現に向けた取り組みがなされている²⁶⁾。将来、このような新たな技術も、雪崩対策の判断材料の一つとして活用することが期待される。

【参考文献】

- 1) 秋田谷英次, 日本雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チーム, 2021: さっぽろ積雪の情報 (2021-03-03), **29**, <http://avalanche.seppyo.org/snow/> (2021.07.07 閲覧).
- 2) 四手井綱英, 1953: 表層雪崩の一特異例, 雪氷, **14**, 116-119.
- 3) LaChapelle, E. R., 1967: The relation of crystal riming to avalanche formation in new snow, *Physics of Snow and Ice*, **1**(2), 1169-1175.
- 4) 秋田谷英次, 清水 弘, 1987: 積雪内の弱層形成に関する観察事例, 低温科学, **A46**, 67-75.
- 5) Bair, E. H., 2011: *Fracture mechanical and statistical properties of nonpersistent snow avalanches*, Ph.D. Thesis, University of California, 183pp.
- 6) 池田慎二, 2015: 無名沢雪崩事故の原因となった降雪結晶弱層による積雪不安定性の形成過程と持続性, 雪氷, **77**, 17-35.
- 7) 八久保晶弘, 秋田谷英次, 1996: プレート降雪結晶の弱層のせん断強度変化, 北海道の雪氷, **15**, 70-73.
- 8) Brown, C. and Jamieson, B., 2008: Shear strength and snowpack stability trends in non-persistent weak layers, *Proceedings Int. Snow Sci. Workshop (ISSW)*, 21-27.
- 9) 阿部 修, 望月重人, 2014: 雲粒のない板状結晶からなる弱層の観測と考察, 雪氷, **76**, 421-429.
- 10) 海原拓哉, 八久保晶弘, 尾関俊浩, 西村浩一, 秋田谷英次, 2011: しもぎらめ雪・あられ・降雪結晶からなる弱層のせん断強度変化の観測例, 雪氷, **73**, 133-142.
- 11) 松下拓樹, 石川 茂, 石田孝司, 2016: 南岸低気圧による降雪結晶弱層の密度と硬度の時間変化, 寒地技術論文・報告集, **32**, 120-125.
- 12) 尾関俊浩, 秋田谷英次, 1995: 弱層に着目した広域積雪調査, 北海道の雪氷, **14**, 32-35.
- 13) 和泉 薫, 河島克久, 伊豫部 勉, 松元高峰, 2014: 2014年2月中旬の大雪による雪崩災害の発生状況と特徴, 科研費研究成果報告書 (課題番号 25900003), 111-118.
- 14) 石坂雅昭, 藤野志志, 本吉弘岐, 中井専人, 中村一樹, 椎名 徹, 村本健一郎, 2015: 2014年2月の南岸低気圧時の新潟県下における降雪粒子の特徴ー関東甲信地方の雪崩の多発に関連してー, 雪氷, **77**, 285-302.
- 15) 中村一樹, 上石 勲, 阿部 修, 2014: 2014年2月の低気圧の降雪による雪崩の特徴, 日本雪工学会誌, **30**(2), 106-113.
- 16) 山野井克己, 中村一樹, 大西人史, 山本行秀, 菊池 基, 雪氷学会北海道支部雪氷災害調査チーム, 2013: 2012年12月に三段山で発生した雪崩の調査報告, 北海道の雪氷, **32**, 6-9.
- 17) 下山 宏, 阿部夕香, 双樹智道, 板垣 力, 山野井克己, 尾関俊浩, 雪氷災害調査チーム, 2020: トマム山で2020年1月30日に発生した雪崩の調査報告, 北海道の雪氷, **39**, 43-46.
- 18) 中村一樹, 佐藤友徳, 秋田谷英次, 2013: 降雪系弱層形成時の気象の特徴, 北海道の雪氷, **32**, 14-17.
- 19) 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, 北海道の雪氷, **32**, 10-13.
- 20) Matsushita, H., Takahashi, W., Matsuzawa, M. and Takahashi, J., 2018: Evolution of non-persistent weak layer and snowpack stability during snowfall. *Proceedings Int. Snow Sci. Workshop. (ISSW)*, 1001-1005.
- 21) 遠藤八十一, 1993: 降雪強度による乾雪表層雪崩の発生予測, 雪氷, **55**, 113-120.
- 22) 西村浩一, 平島寛之, Lehnig, M., 石本敬志, 河見博文, 2006: 雪崩発生危険度指標図の作成Ⅱ, 寒地技術論文・報告集, **22**, 31-35.
- 23) 梶川正弘, 小野 昇, 1990: 新積雪の圧縮粘性係数と降雪粒子の結晶形との関係, 雪氷, **52**, 283-287.
- 24) 成田英器, 竹内政夫, 2009: すり抜け雪崩と点発生乾雪表層雪崩を分ける安息角, 北海道の雪氷, **28**, 33-36.
- 25) Tremper, B., 2008: *Staying alive in avalanche terrain*, Mountaineers Books, 318pp.
- 26) 橋本明弘, 本吉弘岐, 三隅良平, 折笠成宏, 2018: 数値気象モデルによる降雪粒子予測の高度化, 北海道の雪氷, **37**, 63-66.

積雪の影響を考慮した海氷厚推定アルゴリズムの改良

Improvement of sea ice thickness estimation algorithm considering the effect of snow cover

渡辺 由梨加¹, 舘山 一孝², 東海林 尚登³

Yurika Watanabe¹, Kazutaka Tateyama², Naoto Shoji³

Corresponding author: m2052200226@std.kitami-it.ac.jp (Y. Watanabe)

本研究では、海氷と海氷上の積雪のマイクロ波放射特性を明らかにするために、積雪の種類や含水率などの状態による影響を調査した。結氷期のサロマ湖上で湖水及び湖水上の積雪について、小型マイクロ波放射計を用いて輝度温度の測定を行った。その結果を応用し、先行研究で開発された海氷厚推定手法に積雪深を用いて補正を施す手法を作成した。衛星搭載レーダー高度計から得られた全氷厚を正解値として使用した場合、本研究によって補正した衛星搭載マイクロ波放射から推定氷厚の平均二乗誤差は 0.09m であった。

1. はじめに

1. 1 研究背景

北極海における海氷の厚さの情報は、気候変動調査の指標としてだけでなく、北極海航路や北極海に存在する海底資源開発時の安全確保等に不可欠である。北極海は広大であり海氷上常時観測網を展開・維持することは困難であるため、人工衛星に搭載したマイクロ波リモートセンシングによる観測が最適であると考えられる。

Krishfiled¹⁾は Aqua 衛星搭載マイクロ波放射計 (AMSR-E : Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) で観測された 6GHz から 89GHz までの 7 つの周波数の輝度温度データを使用して海氷厚推定式を開発した。このアルゴリズムを用いた場合、一年氷の氷厚推定は過大評価される傾向にあることが分かっており、推定精度のばらつきの原因の 1 つとして、海氷上の積雪深の多寡や融解による積雪の含水率の変化が影響していると考えられる。

1. 2 マイクロ波と海氷上の積雪

マイクロ波とは周波数が 300MHz から 300GHz の範囲の電磁波のことを指しており、電場の振動が地面に対して垂直であるものを垂直偏波、水平であるものを水平偏波という。また、マイクロ波放射計によって測定される輝度温度とは、ある波長の輝度と等しい輝度の黒体の温度のことを指す。

これまでマイクロ波と海氷上の融解・積雪の関係と比較した研究が行われており、直木ら²⁾は南

極昭和基地沖において、融解期の多年氷の輝度温度を三菱電機特機システム社製の可搬型マイクロ波放射計 (Microwave Millimeter-wave Radiometer / MMRS2) を用いて測定結果、海氷上の積雪が湿雪である場合、雪面の輝度温度は積雪条件にのみ依存することを示した。中川ら³⁾は直木らと同様の MMRS2 を用いて結氷期のサロマ湖湖水と湖水上の積雪の輝度温度を測定した結果、湖水の浸み上がりが発生している地点では、積雪深の増加に伴って輝度温度が急激に上昇する傾向を示した。

1. 3 研究目的

本研究の目的は以下の 2 つである。

- 1) サロマ湖上で湖水のマイクロ波放射を測定し、積雪の性質や含水率による影響を調査する。特に、積雪含水率を定量的に測定してマイクロ波放射率と比較することが、本研究の新規性である。
- 2) AMSR2 によって測定された輝度温度と、Cryosat2 搭載のレーダー高度計 (SIRAL : SAR Interferometer Radar Altimeter) によって推定された海氷厚を比較し、上記の目的による結果を、薄氷域における GCOM-W 衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR2 の海氷厚推定精度向上に利用できるかどうか検討する。

2. 研究方法

2. 1 MMRS2 サロマ湖実験

本研究は結氷期のサロマ湖において MMRS2 を用いた実験を行った。サロマ湖は面積 150.4km²

¹ 北見工業大学大学院 工学研究科

² 北見工業大学 地球環境工学科

³ 北見工業大学 機械工学科

Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology
School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology
Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology

の日本で最も大きな汽水湖である。2つの湖口によってオホーツク海につながっており、湖水の塩濃度は31~33psuと、同時期の外海沿岸水とほぼ同程度であると言われている⁴⁾。観測期間は2021年2月22日から26日までである。図1のようにSt.1からSt.5の5地点で実験を行った。

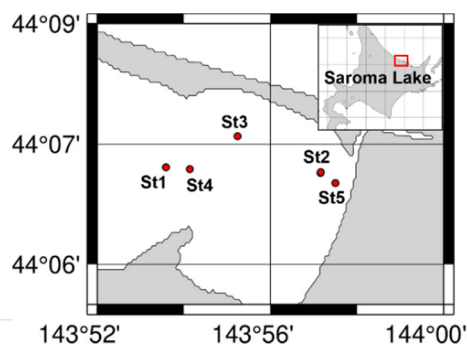


図1 サロマ湖上の各観測地点

実験で使用したMMRS2の観測周波数は6GHz, 18GHz, 36GHzの3周波であり、それぞれの垂直偏波(H)と水平偏波(V)を測定した。また同時に、MMRS2によって赤外温度も測定を行っている。周波数が18GHzの水平偏波(各周波数・偏波に対してここでは18Hというように呼ぶ)のみ、測定装置の不具合のため測定を行っていない。

観測項目は、輝度温度および赤外温度(この2つを観測項目1とする)に加えて、雪温、積雪深、積雪層分布、各積雪層の粒径および含水率(この5つを観測項目2とする)、氷厚、フリーボード、海水の塩濃度および温度(この4つを観測項目3とする)である。積雪含水率の測定には、秋田谷⁵⁾が開発した秋田谷式含水率計を使用した。

観測手順は以下の通りである。ここでは、積雪で覆われており、観測等で変化を加えていない自然状態の湖水観測面を「積雪表面」、積雪層の一部を除去した状態の観測面を「積雪内部層」、すべての積雪を取り除いた後の裸氷状態の観測面を「湖水表面」と呼ぶことにする。初めに、積雪表面において観測項目1を測定する。その測定と同時進行で積雪断面観測も行う。積雪断面観測では、観測項目2を測定する。その後、測定結果に基づいて最上部の積雪層を2m×2mの領域だけ取り除き、積雪内部層の観測項目1を測定する。同じようにこの作業を湖水表面が露出するまで繰り返す。湖水表面において観測項目1を測定し終えた後、湖水にアイスドリルで穴を開け、観測項目3を測定した。

また、St.3では湖水に1m×2mの穴を開け、解放水面から徐々に成長する海水を数日間かけて観測した。St.2にはいずれの観測日も積雪が見られなかったため、観測項目1および氷厚のみの測定となる。同様にSt.1も積雪が存在しないため、項目1および氷厚のみの測定となる。また、St.3はデータが欠損したため、観測項目1および氷厚のデータのみ解析で使用した。図2に観測風景を示す。



図2 サロマ湖実験の様子

2.2 衛星搭載マイクロ放射計 AMSR2 への応用

本研究ではAMSR2から推定した海水厚(以下、AMSR2海水厚)の比較対象として、SIRALの推定氷厚(以下、SIRAL氷厚)を使用した。SIRAL推定氷厚には、星野ら⁶⁾が作成した海水厚プロダクトESA Level2の推定手法を用いた。

解析の対象とする期間は2021年1月20日から同年3月21日までとした。また、対象範囲はカラ海ヤマル半島沖の緯度72°-74°、経度60°-65°とした。図3にヤマル半島沖のSIRAL海水厚の月平均海水厚分布図を示す。

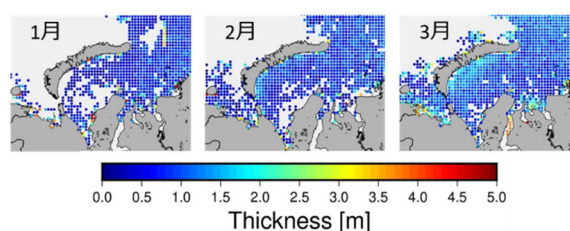


図3 ヤマル半島沖月平均海水厚分布図

3. 研究結果

3.1 MMRS2 用いたサロマ湖実験

表1に各観測地点の観測日および観測場所、氷厚、積雪深の結果を示した⁷⁾。また、図4に湖水の積雪表面を測定した際の放射率と、その時の海水厚(積雪は含めない)を比較したグラフを示す⁷⁾。

温度による輝度温度への影響を無視するため、輝度温度から赤外温度を除いて求められる放射率を用いて比較を行った。

表1 各観測地点の観測日および観測場所、氷厚、積雪深の結果

	St1	St3	St4	St5
日付	2月22日	2月25日	2月26日	2月26日
緯度	44° 07' 27"	44° 07' 55"	44° 07' 25"	44° 07' 13"
経度	143° 54' 14"	143° 55' 43"	143° 54' 43"	143° 57' 45"
積雪深	0.0cm	4.5cm	6.0cm	16.0cm
氷厚	41.5cm	18.0cm	40.3cm	51.0cm

	St2-1	St2-2	St2-3	St2-4
日付	2月23日	2月24日	2月25日	2月27日
緯度	44° 07' 23"	44° 07' 23"	44° 07' 23"	44° 07' 23"
経度	143° 57' 27"	143° 57' 27"	143° 57' 27"	143° 57' 27"
積雪深	解放水面	フラジライス	0.0cm	0.0cm
氷厚	解放水面	フラジライス	8.0cm	10.5cm

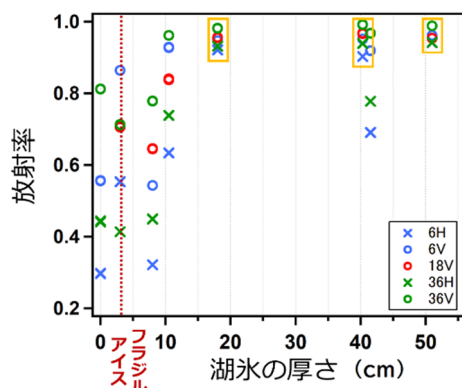


図4 湖氷の厚さと輝度温度の比較

図4のグラフのデータのうち、橙色の四角で囲んでいるデータは、積雪のある地点のデータである。このグラフから、湖氷の成長に従って放射率は増加する傾向にあることが分かる。また、積雪が存在することにより、36V以外のほぼすべての周波数・偏波において放射率が大きく上昇した。

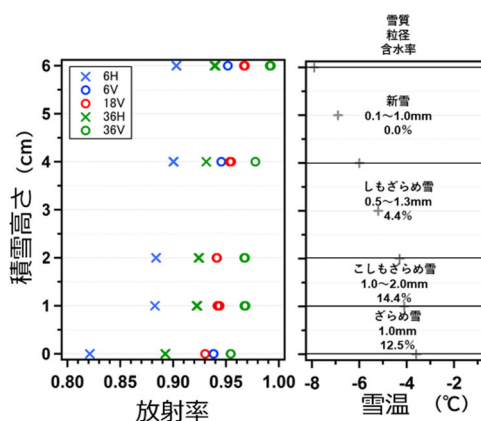


図5 積雪断面観測結果と各積雪層の輝度温度

また、図5には積雪断面観測結果と各積雪層の放射率を示した。結果はSt.4における測定結果を代表例として示している。グラフから、積雪量が多いほど放射率は増加することが分かる。この結果は中川ら³⁾による測定結果と同じ傾向を示した。図5に示した積雪断面観測結果の各項目を各積雪内部層の放射率と比較した結果を、図6に示す。この結果から、積雪深、含水率、雪温、粒径とともに弱いながらも放射率と相関があることが分かる。

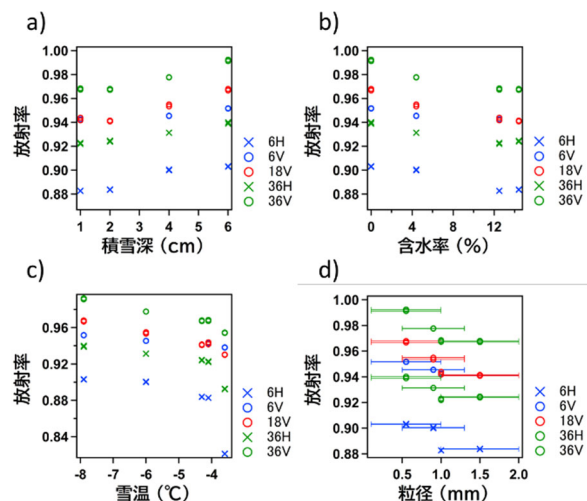


図6 積雪断面観測の各項目と放射率の比較
a) 積雪深, b) 含水率, c) 雪温, d) 放射率

以上の結果から、積雪深を用いて Krishfield¹⁾による推定海氷厚の補正式を作成する。図7に氷厚の推定誤差(推定海氷厚-測定で得た全氷厚(積雪を含める))と測定された積雪深を比較した結果を示す。

積雪深の値が大きくなるに従って、推定海氷厚は過小評価される傾向にあることが分かる。

この近似直線から以下の補正式を作成した。推定氷厚 H'_{MMRS2} (m) の補正式は次式で表される。

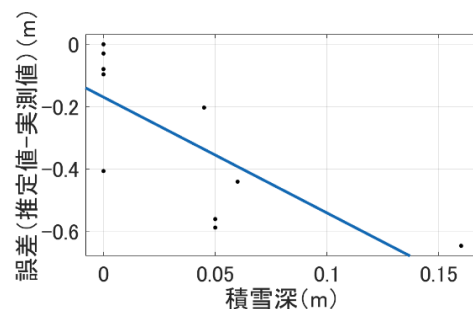


図7 推定誤差と積雪深の比較

$$H'_{\text{MMRS2}} = H_{\text{MMRS2}} + 3.723Z_{\text{snow}} + 0.169 \quad (1)$$

H_{MMRS2} (m) は MMRS2 による推定氷厚であり, Z_{snow} (m) は実測積雪深である. 補正前の H_{MMRS2} と実測全氷厚との相関係数は 0.69, 平均二乗誤差は 0.15m であったが, 補正後の H'_{MMRS2} と全氷厚の相関係数は 0.76, 平均二乗誤差は 0.02m と, この補正式を適用することによって海氷厚の推定精度に改善がみられた.

3.2 衛星搭載マイクロ放射計 AMSR2 への応用

前節で得られた手法を衛星搭載センサに応用して, AMSR2 全氷厚の推定誤差と ESAL2 データセット⁹⁾から提供されている積雪深 $Z_{\text{ESAL2, snow}}$ (m) を比較した結果を図 8 に示す.

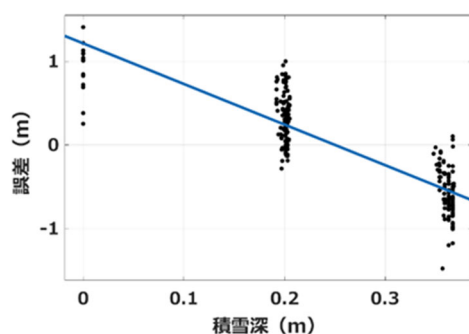


図 8 氷厚推定誤差と積雪深の比較

AMSR2 海氷厚の方が SIRAL 海氷厚よりも過大評価をする傾向にあるものの, 図 7 と同様に積雪深と誤差に負の相関が見られた. この結果から, AMSR2 海氷厚 H_{AMSR2} (m) を積雪深から補正した H'_{AMSR2} (m) の推定式 (2) を作成した.

$$H'_{\text{AMSR2}} = H_{\text{AMSR2}} + 4.843Z_{\text{SIRAL, snow}} - 1.574 \quad (2)$$

(2) 式を適用することによって, H_{AMSR2} と SIRAL 海氷厚との相関係数と平均二乗誤差はそれぞれ 0.12, 0.43m だったところ, 補正された H'_{AMSR2} と SIRAL 海氷厚の場合は 0.85, 0.09m と推定精度に大幅な改善がみられた.

4. まとめ

本研究では海氷上の積雪の状態とマイクロ波の輝度温度の関係性を調査した. サロマ湖実験の結果, 積雪量が多くなるほど, 輝度温度は増加する傾向にあり, 6GHz の水平偏波が最も顕著に積

雪の影響を受ける傾向にあることが分かった.

また, 積雪深が先行研究の誤差要因のひとつであることが得られた. 現段階では ESAL2 の積雪深データを利用して補正をすることができたが, ESAL2 データの観測頻度, 空間分布では毎日の観測に不十分である. 将来的には高分解能な客観解析データの積雪深データを使用し, AMSR2 海氷厚を補正する手法の開発を目指したい.

【謝辞】

本研究は, 日本学術振興会科学研究費助成事業, 認可番号 JP20H00206, JAXA 第 2 回地球観測研究公募および Arctic Challenge for Sustainability II (ArCS II) プロジェクトの支援を受けた. また, JAXA および ESA から提供されたデータを使用した.

【参考文献】

- 1) R. A. Krishfield, A. Proshutinsky, K. Tateyama, W. J. Williams, E. C. Carmack, F. A. McLaughlin, M.-L. Timmermans, 2014: Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 1297-1303.
- 2) 直木和弘, 長幸平, 牛尾収輝, 2017: 南極昭和基地沖における融解期の多年氷のマイクロ波輝度温度特性, 雪氷, **79** (1), 31-42.
- 3) 中川洋輔, 2019: 海氷上の積雪のマイクロ波放射特性について, 北見工業大学社会環境工学科学位論文 (未公刊), 2-14.
- 4) 館山一孝, 榎本浩之, 2011: 衛星リモートセンシングによるサロマ湖の結氷状況の推定とその経年変化, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), **67**(2), 727.
- 5) 秋田谷英次, 1979: 熱量計による積雪含水率計の試作, 低温科学 物理篇, **36**, 103-111.
- 6) 星野聖太, 館山一孝, 田中康弘, 2018: 北極海における衛星高度計 Cryosat-2 SIRAL を用いた海氷厚推定手法の改良と南極海への応用, 雪氷, **80**(4), 297-309.
- 7) Y. Watanabe, K. Tateyama, N. Shoji, 2021: Microwave remote sensing of first year ice with snow cover, *The International Workshop on Modern Science and Technology*, in press.

雪の結晶の非対称的な形態について

On asymmetric forms of snow crystals

油川英明¹

Hideaki Aburakawa

Corresponding author: abu440407@yahoo.ne.jp

雪の結晶は、樹枝状などの板状結晶について、一般に対称性の整ったものとして知られているが、実際にはほとんどが非対称的である。中谷²⁾は、非対称的な雪の結晶の成長は水蒸気の供給が結晶の成長面に対して不均一になされるためであるとし、今日においてもそれが通説となっている。しかし、天然の雪雲内において、雪の結晶のスケールで水蒸気の分布が不均一であるということや、その状態が結晶の一定の成長まで継続するということは極めて想定し難いことから、ここでは、従来の中谷²⁾の気相（昇華）成長説ではなく、雲粒による液相成長説を基に、雪の結晶の非対称的な形態の形成について考察を行った。

1. はじめに

中谷²⁾は、雪の結晶を人工的に作製するに際して霜の結晶の成長を観察し、それに倣うことにより実験を遂行した。この過程はいわゆる三段論法的なものともみなされ、1) 雪の結晶＝霜の結晶、2) 霜の結晶＝水蒸気による気相（昇華）成長、よって、3) 雪の結晶＝水蒸気による気相（昇華）成長、というもので、この論理による仮説をもとに実験を行った。そして、その結果から上記の仮説は実証されたとして「中谷ダイヤグラム」²⁾が作成され、今日においても雪の結晶生成の通説となっている。

しかし、中谷のこの気相成長説には幾つかの問題点が見いだされる。その一つとして、雪の結晶が水蒸気から気相成長するとしたとき、「中谷ダイヤグラム」の縦軸に示されるような水蒸気の「過飽和」が要求されることである。しかし、天然には「過飽和」なる現象はほとんど見られない。ましてや降雪を伴う雪雲のなかは無数の雲粒や氷晶が激しい気流により攪拌されている状態にあり、ここに水蒸気の「過飽和」を求めることは極めて困難なことである。そして、雪の結晶の非対称的な成長については、過飽和による気相成長説ではさらに理解が難しいことになる。

上述のように、雪の結晶の生成について、実験では過飽和が必要とされるが、それは天然には存在しない。これは明らかに「矛盾」である。この場合、両者を単に妥協させるとか、一方を他方に対して優先させるとか等々では矛盾は解消され

ない。その解消には矛盾に関わる先人の教えに習い、現象観察の最初に立ち返り、既存の原理や法則に拘泥することなく自由に視野・思索を広げ、新たに論理を組み直すことであると考えられる。

中谷²⁾の人工雪の実験では、樹枝状などの典型的な結晶の成長は水飽和以上の過飽和の水蒸気によるとされているが、前述のように、雪雲にはそのような条件は存在しない。つまり、天然の雪の結晶は、雪雲内において飽和乃至は飽和に近い水蒸気のなかに浮遊する過冷却微水滴の雲粒から生成されるものと推断されるわけである。

著者は、このことを仮説として実験を行い、過冷却微水滴、つまり雲粒から雪の結晶の生成を得ることができた³⁾。これを基に、雪の結晶の非対称的な成長について考察した結果を報告する。

2. 非対称的な雪の結晶の観察

非対称的な雪の結晶は、平地や内陸の山地など、地域に特定されず一般的に観察されるが、平地の方が比較的多く見られるようである。その理由については後に述べる。

非対称的な結晶の観察例を図1に示す。これは2021年の冬季に札幌において観察・撮影されたもので、最大の径は2.5mmほどである。この結晶は中谷の一般分類²⁾では畸形に属するものであるが、結晶の各々の枝は、長短の違いはあるものの、普通樹枝に分類されるものである。つまり、中谷ダイヤグラムによれば、これは樹枝状結晶の領域において成長したことになる。そして、雪の

¹NPO 法人 雪氷ネットワーク

NPO Network of Snow and Ice Specialists

結晶成長に関する中谷の気相（昇華）成長説に基づくならば、図1の結晶は、各枝への水蒸気の供給が不均等な状態で成長したことになる。特に、この図の①と③の二つの枝に挟まれた②の枝の成長は極端に遅れていて、水蒸気の供給が結晶の枝に対してこのように特異なものであると考えることは極めて不自然であると言える。

さらに、中谷の人工雪の実験によれば、図1の樹枝状結晶が①の枝のような長さに成長するためには少なくとも30～60分程度の時間を要することから、この結晶の成長に際して、水蒸気の供給が上記のような不均等さで、その時間、一定に継続されなければならないことになる。このような現象が天然の雪雲のなかで一般的に起こっているとみなすことは、想像の域を越えて余りにも非合理的なことであると考えられる。

これまで、雪の結晶の対称性に関して、角板や樹枝状結晶などの板状結晶について調査を行ったところでは、完全な対称性を有する結晶は得られなかった⁴⁾。この調査の限りでは、雪の結晶は、雲粒の粒径が比較的小さな雪雲から得られる結晶は対称性が良く、また、粒径が大きい雪雲からの結晶は対称性が劣る傾向にあった。なお、雲粒の粒径が小さな雪雲はその粒径分布の分散が小さく、粒径の大きな雲粒の雪雲では、その粒径分布の分散は比較的大きくなっている。

前者の雪雲は雲粒の形成が穏やかな場合で、後者は海面等からの水蒸気の蒸発が活発な場合と見なされる。つまり、一般に観察される雪の結晶は、雪雲の雲粒によりその対称性の優劣が決められることから、先に述べたように、水蒸気の凝結が活発な海浜近傍の平地の方が、雪雲が穏やかに形成される内陸の山地よりも非対称的な雪の結晶が多く見られることになるとみなされる。

3. 実験による非対称的な雪の結晶の生成

図2は、過冷却微水滴を雲粒に見立てて行った氷晶の成長実験³⁾の結果で、撮影された動画の始めと終りの画像（図のAとB）を示している。

この図から、雪の結晶の成長が粒径30 μm ほどの雲粒の凍結・結晶化から始まっていて、結晶の各枝の成長は周囲の雲粒を捕捉することにより行われ、また、各枝の側枝は雲粒を捕捉して伸びている。そして、側枝の形は雲粒の大きさ及び雲粒の特性（形成時の水蒸気の凝結速さ）により、図のBのように非対称的な結晶が形成されてい

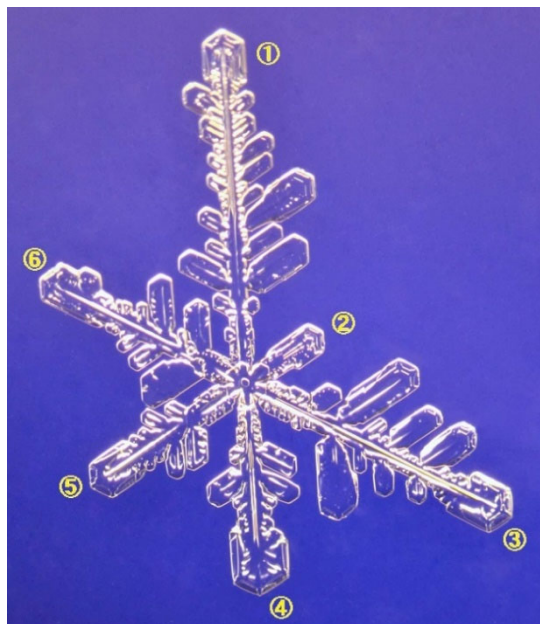


図1 非対称的な雪の結晶の一例。

（撮影：札幌 2021/02/27）

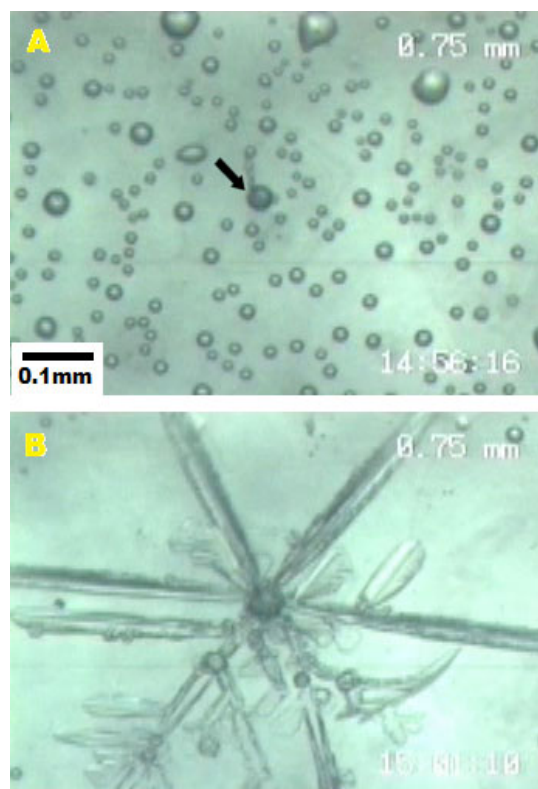


図2 過冷却微水滴（雲粒）から非対称性の雪の結晶が生成. Aの矢印を付した微水滴から結晶化が開始. BはAから4分54秒後. 実験温度は -15°C .

る。つまり、図のAとBを比較して、Aの上方の雲粒は完全な結晶化を示し、下方の雲粒は氷球

状の形態を留めて結晶化している。このように、過冷却微水滴は、その温度が同じであっても、凝結の過程で獲得した特性により、凍結形態が氷球、氷球状の結晶化、単独の結晶化、母結晶への同化（結晶化）と、種々の形態を示すことになる。この場合、余談ではあるが、図2のように一般的な潜熱放出の形跡が見られないのは興味深い。このようなことから、天然の雲粒は粒径及びその特性がそれぞれ異なるので、これらによって成長する天然の雪の結晶は、前述のように、ほとんどが非対称な形態に成長するものと見なされる。

さらに、天然の種々の結晶は、中谷の分類によるところの霰、雲粒付結晶、無定形、畸形そして正規六花型結晶などは、雲粒の一連の凍結・結晶化によるものである。そして、従来、中谷により、雪の結晶の類だけが水蒸気から昇華成長したものとされてきたが、上述のように、天然の降水現象としての雨、雹、霰、雪片、雪の結晶等は、全て雲粒の形態的な変化として理解できる。

ところで、図2のように雪の結晶を生成する過冷却微水滴は、天然の雲粒が形成される過程のように、氷点下で水蒸気からゆっくりと凝結して形成されたものであり（30分で $20\mu\text{m}$ ほどの径）、微水滴を単に過冷却させたものは氷球状にしか凍結せず、両者は異なる凍結形態を示す。

4. 中谷の人工雪の非対称性について

雪の結晶の非対称的な実験例として、中谷の人工雪を図3に示す。これらの結晶は、写真撮影のために兎毛を水平に張って固定し、その上に生成されたものである。いずれの結晶も下向きに伸び出た枝が上向きの枝に比して長く成長している、これについて中谷は、「水蒸気の供給が下方からなされるためである」として、このような結晶の成長は、上方と下方の枝が不均等な水蒸気の供給によるためであると結論している。このことが、先の図1に示したような天然の非対称的な雪の結晶の成因とされ、通説となっている。

ここで、下方の枝の成長が全て同じでないことについては言及されていない。さらに、人工雪を作製する装置の気流が完全な層流ならば、気流の向きに対する結晶の成長の影響を考慮することも一般的には必要かも知れない。しかし、この装置による上昇気流は、レイノルズ数が6000を超えると概算されることから、この気流は乱流が十分に発達した状態で、また、乱流渦の大きさも数

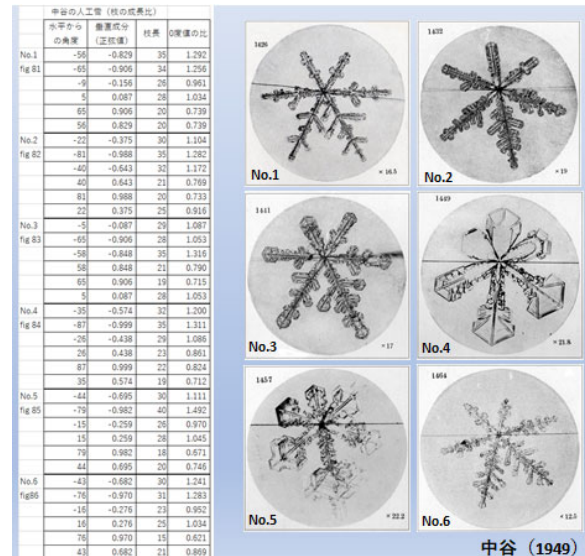


図3 中谷の人工雪（右）. 左の表は各結晶の枝の成長比と水平からの角度（正弦値）.

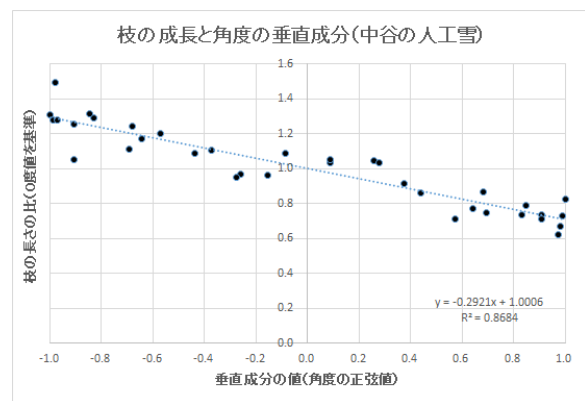


図4 中谷の人工雪における各枝の成長比とその枝の水平からの角度（正弦値）.

ミリの結晶よりはるかに大きいものと見なされ、雪の結晶に対する水蒸気の供給は全体的に均等であるとみなされるわけである。

それ故、図3の非対称的な結晶について、図2に示したように、また、Kuroda & Lacmann⁵⁾の理論により、雪の結晶の液相成長説に基づいて以下に考察を行うこととする。

雪の結晶の成長は、結晶を覆う液膜の厚さによって進行するものとすれば、図3のように結晶の姿勢が固定され、そして、その成長に1時間前後の長い時間を必要とすることから、結晶表面を覆う液膜は重力の作用により下方へ徐々に流下する傾向が考えられる。そのように推察すれば、下方に向かっている結晶の枝の液膜は、上方からの流れにより厚さを増して、成長が上方の枝よりも大きくなる。この成長の度合いは、下方に向いた枝であれば鉛直方向に近いほど液膜が厚くなり、

その成長が大きく、また、上方に向いた枝は、鉛直方向に近いほど液膜が薄く、その成長が小さくなることが推察される。このことを確かめるために図3の左に示したような表の作成を試みた。

図3の左の表は、右の結晶の各枝について、水平線（兎毛の線）からの角度を測り、上方は+、下方は-の値として、その正弦値（垂直成分）を示し、また、成長した枝の長さは、各々の結晶の水平方向の成長を基準にして、各々の長さの比を示している。そして、これをグラフに示したものが図4である。この図から、枝の角度と成長には高い相関が見られることから、図3の人工雪の非対称的な成長は、前述のように、液膜が関与しているものとみなされる。ところで、小林⁹⁾による拡散型の人工雪作製装置は、水蒸気が上方から供給される仕組みになっているが、成長した結晶のなかで下方へ向かう枝の大きなものも見られ、上に述べた考察に示唆を与えるものと考えられる。

図5は、上述の内容の概念図（図の左上）を示したもので、下方の枝ほど液膜を厚く描いている。また、中谷¹⁾は、人工雪の装置内には1~2μmの径の過冷却微水滴が浮遊していることを示し（図の左下）、雪の結晶がこれにより成長していると述べている。しかし、天然にはこのような微細な雲粒の雪雲は見られないことから、中谷は今後の研究課題であるとしてその著書²⁾を閉じている。

図5の右は中谷ダイヤグラムと、その縦軸に目盛られた Nakaya²⁾による過飽和度（氷飽和に対して）の定義である。湿度とは一般には気相の水蒸気に関することであるが、ここでは微水滴の液相をも水蒸気として扱い、湿度の値を求めている。その妥当性は別にして、これらのことから、中谷は、雪の結晶の成長について明らかに過冷却微水滴つまり雲粒の関与を考慮していたわけであるが、人工雪作製の出発点が水蒸気による気相（昇華）成長説であり、実験の成功によってこの説が確定化されることになったものと考えられる。そして、その帰結として、図5に示されたような、余り一般的ではない過飽和度（湿度）を新たに定義せざるを得なかったものと推察される。

5. おわりに

非対称な雪の結晶は、通説となっている中谷の気相成長説ではなく、雲粒による液相成長説によって生成するとした方が妥当のようである。

中谷の気相成長説は、三段論法的な仮説が人工

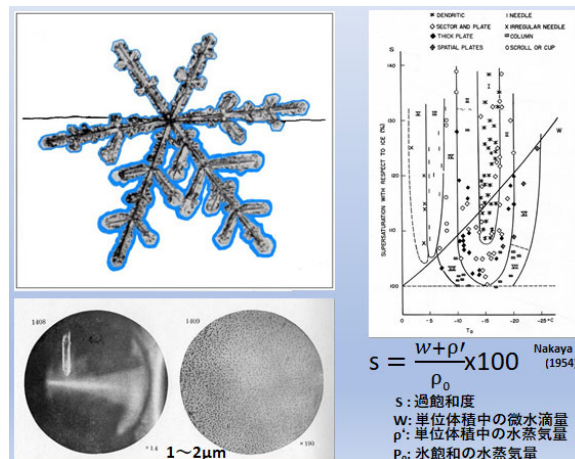


図5 非対称的な人工雪の成長概念図（左上）と人工雪装置内の微水滴の浮遊状態とその採集結果（左下）。右図は中谷ダイヤグラムと中谷による過飽和度の定義。

雪の作製実験により実証されたとして導かれたものであるが、この論法は、各段の命題が徹底して検証を必要とするもので、これが不徹底である場合には第三段目の結論が覆ることになる。すなわち、中谷は、「雪の結晶」＝「霜の結晶」としたが、両者は部分的な類似性は見られるものの、完全な同定には至っていない。また、「霜の結晶」＝「気相（昇華）成長」ということについては、本論でも触れたように、また、Nakaya²⁾も実験的に示したが、氷結晶の表面には疑似液体膜が存在し、この液膜を介して結晶が液相成長するものであることが、理論的、実験的に示されてきている。これらの結果から、第三段目の「雪の結晶」＝「気相（昇華）成長」の結論は成立しないことになる。

【参考文献】

- 1) 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究, 岩波書店, pp.161
- 2) Nakaya, U., 1954: Snow Crystals, Harvard Univ., pp.510
- 3) 油川英明, 2018: 「雪の結晶は二つと同じものがない」のはなぜか? 北海道の雪氷, 37, 55-58
- 4) 油川英明・尾関俊浩・丸藤貴弘, 2003: 雪結晶の対称性について, 北海道教育大学紀要(自然科学編), 第53巻, 第2号, 17-26
- 5) Kuroda and Lacmann, 1982: Growth kinetic of ice from vapour phase and its growth forms, *J Crystal Growth*, 56, 189-205
- 6) 小林禎作, 1957: Diffusion Cloud Chamber による雪結晶習性の研究, 低温科学, 物理篇, 16, 1-26

積雪および粉末氷から生成したメタンハイドレートの純度に 比表面積が及ぼす効果

Effect of specific surface area on the purity of methane hydrate formed from snow and ice powder

矢作 大輔¹, 内藤 大智¹, 八久保 晶弘¹, 竹谷 敏²
Daisuke Yahagi¹, Daichi Naito¹, Akihiro Hachikubo¹, Satoshi Takeya²
Corresponding author: hachi@kitami-it.ac.jp (A. Hachikubo)

ガスハイドレートは高いガス包蔵性を有することから、ガス貯蔵媒体としての活用が期待されている。その際、純度の高いガスハイドレートを簡便な方法で生成することが求められる。本研究では、積雪の利用を念頭に置き、氷とガスとの接触のみでメタンハイドレートを生成し、その純度を測定した。材料には自然積雪および粉末氷を使用した。材料となる氷の比表面積がメタンハイドレートの純度に及ぼす影響を調べた結果、氷の球相当粒径が約 260 ミクロン以下の新雪を用いることで、純度が約 8 割を超える高純度なメタンハイドレートが生成可能であることがわかった。

1. はじめに

天然ガスの利用に際しては、液化することで輸送しないし貯蔵が行われている。その際、天然ガスを大気圧下で約-160℃まで冷却する必要がある。この方式の欠点として、冷却に必要なエネルギーが大きいことが挙げられる。また、現在稼働している大規模な液化プラントにおいては、液化にかかるエネルギーは天然ガスの保有するエネルギーの約 15%に上る¹⁾。また、液化天然ガスは貯蔵タンク周囲からの入熱による気化損失が起こるため、長期の貯蔵には不利がある。

ガスハイドレートは、ガス分子が籠状の構造を形成する水分子 (H₂O) に包接された水和物である。包接されるガスの種類によって安定な温度・圧力条件が異なるものの、一般に低温・高圧環境下で安定である。例えばメタンガスを包接した水和物であるメタンハイドレートは、0℃で 26 気圧以上の圧力が必要である。また、ガスハイドレートは氷と同じく水素結合によって形成される固体結晶であるが、その特有の包接構造により、自身の体積をはるかに超える量のガス分子を有する。例えば、メタンハイドレートは標準状態において、自身の体積の約 160~170 倍のメタンを包接することが可能である。

したがって、メタンハイドレートはメタンの貯蔵・輸送媒体として注目されている²⁾。前述の通り、多くのメタンガスを包接できる点のみならず、大気

圧下・約-20℃付近でメタンハイドレートの分解速度が極端に遅くなる現象が報告されている³⁾。この現象は自己保存効果とよばれ、冬期の寒冷地においては外気温が保存条件に合うため、液化天然ガスのような形でメタンを貯蔵する方法と比較して、冷却に必要なエネルギーが大幅に抑えられる。

また、利雪という観点から積雪については様々な利用が行われている⁴⁾。しかしながら、自然積雪をガスハイドレートの原材料に用いた研究事例は少ない。例えば、積雪を用いてメタンハイドレートを生成し、積雪試料の 10~36%がメタンハイドレートに置き換わった、との報告例がある⁵⁾。ただし、この先行研究では積雪の粒径が一樣ではなく、また積雪の粒径そのものが評価されていないこと、生成温度範囲が狭いことなどが課題として挙げられる。そこで本研究では、これらの課題を考慮した上で、積雪を用いてメタンハイドレートを生成し、積雪がメタン貯蔵媒体の原材料として利用可能かどうかを調べた。

ガスハイドレートの生成方法は大きく分けて、攪拌装置を用いるか否か、の違いがある。メタン貯蔵媒体としてメタンハイドレートを生成する際、攪拌装置の導入には動力が必要となるため、エネルギー的なロスが多くなる。そこで本研究では、攪拌装置を用いずに、メタンと氷との接触のみでメタンハイドレートの生成を試みた。

¹ 北見工業大学

² 産業技術総合研究所

2. 本研究の実験内容

本研究では、自然積雪から生成するガスハイドレートが天然ガス貯蔵媒体として利用可能かどうかを調べることを主たる目的とした。このために、天然ガスの主成分であるメタンを用いてメタンハイドレートを生成し、重量測定により純度を調べた。なお、本研究で扱う純度は、最終的な試料中のメタンハイドレートの割合（重量濃度）で定義する。氷とガスを接触させて生成するガスハイドレートの純度は、生成温度⁶⁾、生成圧力⁷⁾、氷の粒径⁸⁾など、様々な要因に依存している。本研究では、上記の3つの要因に着目し、生成圧力は固定した上で、残る2つの要因のうちの1つを固定し、もう1つの要因を変動させることでメタンハイドレートの生成条件を変化させ、生成した試料の純度を調べた。

積雪の比表面積（単位質量あたりの表面積、SSA）は固気界面の反応面積そのものを表す重要な要素であり、降雪からの時間経過とともに減少していく。そこで、3種類の自然積雪および人工的に生成した氷球を用いることで氷粒子のSSAを変化させ、メタンハイドレートを生成し、その純度を調べた（実験A）。

また寒冷地においては、低温である自然環境を利用したメタンハイドレート生成が考えられる。その際、温度はメタンハイドレートの生成速度を決定する要素と考えられるため、SSAが一定である粉末氷を用いて、氷点下の異なる温度でメタンハイドレートを生成し、その純度を調べた（実験B）。

雪や粉末氷のSSAは、メタンハイドレート生成時の反応面積そのものである。そこで、ガス吸着式SSA測定装置⁹⁾を用いて、メタンハイドレート生成前の氷試料のSSAを測定した。

メタンハイドレートの純度[%]は、材料としての氷がどれだけメタンハイドレートに変換されたかを表し、前述のようにメタンハイドレートを構成する水重量を全体の水重量で除した重量比で定義される。純度を求めるためには、水和数（ゲスト分子1個に対して水分子が平均して何個必要かを表す数）を仮定する必要がある。ガスハイドレートの水和数は一定値ではなく、生成温度・圧力条件によって変化することが知られているが、メタンハイドレートの水和数はおおむね一定であることが報告されている¹⁰⁾。このことを利用して、水和数を仮定し、水重量および包接ガス重量を直接測定することによって、メタンハイドレート試料の純度を求めることができる¹⁰⁾。

3. 実験方法

3. 1 積雪、氷球および粉末氷の準備

実験Aでは、自然積雪および氷球を用いてメタンハイドレートを生成した。自然積雪については、いずれも北見市で採取した、降雪して間もない2020年12月の新雪、約-50℃の低温室で保存されたこしまり雪、約-20℃の低温室で保存されたしまり雪の3種類を用いた（図1）。氷球については、液体窒素に蒸留水をスプレーで噴霧する方法で作成した。噴霧後の氷試料を低温室にて乾燥させた後、大中小それぞれのメッシュ毎に篩掛けして分取することで、粒径分布の異なる3種類の氷球を得た。実験Bでは、凍結させた氷を低温室にてマイクロームで削り出し、SSAの大きな微粉末氷を得た。

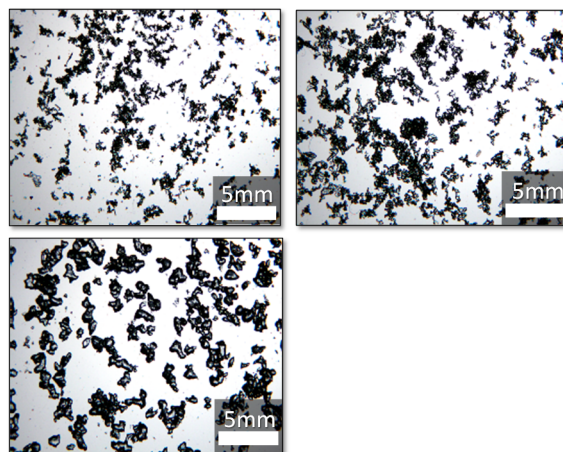


図1 本実験に用いた積雪の写真（左上：新雪，右上：こしまり雪，左下：しまり雪）

3. 2 氷試料の封入およびSSAの測定

前述の氷試料を実容積約42 mLの耐圧容器に封入した。その後、耐圧容器を液体窒素温度下で真空引きし、ガス吸着式SSA測定装置（図2）⁹⁾を用いて氷試料のSSAを測定した。詳細な測定手順は先行研究⁹⁾と同様である。

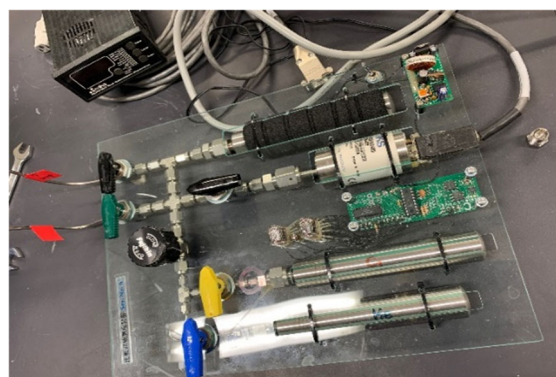


図2 ガス吸着式SSA測定装置

3. 3 メタンハイドレートの生成

氷試料の SSA の測定完了後、液体窒素温度下で再度真空引きし、高純度メタン (純度 99.99%, 高千穂化学工業) を耐圧容器内にトラップした。その際、実験 A では最終圧力が 6.5 ± 0.5 MPa、実験 B では最終圧力が 4.0 ± 0.5 MPa となるよう導入した。

ガス導入後、実験 A では試料を液体窒素温度から 0°C まで昇温させ、メタンハイドレートを生成した。生成による圧力降下が認められなくなった時点で、+1°C に設定した恒温槽に移し、約半日間静置した。

一方、実験 B ではガス導入後、試料を低温室ないし恒温槽に移し、約 1 週間静置することでメタンハイドレートを生成した。各温度制御方式の温度条件については、低温室が 224.7 ± 1.5 K, 245.6 ± 2.1 K, 253.8 ± 1.4 K、恒温水槽が 248.2 K, 253.2 K, 258.2 K, 263.2 K, 268.2 K である。

3. 4 重量測定による純度の導出

メタンハイドレートの生成完了後、液体窒素温度にて試料の真空引きを行った。余剰なメタンだけを排出することで、耐圧容器内にメタンハイドレートと未反応の氷試料だけが残る状態を実現した。その後、耐圧容器のバルブを閉めたまま、常温にてメタンハイドレートを解離させ、試料の重量測定を行った。次に、空気が混入しないように耐圧容器のバルブをゆっくり開放し、大気圧下まで減圧させ、再度重量測定を行った。耐圧容器内に残存するメタンの重量については、理想気体の状態方程式を用いて求めた。メタンハイドレートの水和数は 6.04 ± 0.03 と報告されていることから¹¹⁾、本実験ではこれを 6 であると仮定し、一連の重量測定値から、メタンハイドレートを構成していた水の重量を求めた。最後に容器を開け、全体の水重量を求めることで、試料中に存在したメタンハイドレートの純度 (メタンハイドレートに使用されていた水の重量比) を推定した。

4. 実験結果

4. 1 氷試料の SSA 測定結果

各氷試料の SSA を測定した結果、実験 A では新雪が $72.4 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ 、こしまり雪が $26.4 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ 、しまり雪が $10.0 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ だった。また、氷球の大・中・小サイズそれぞれの SSA は、 $14.9 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ 、 $29.8 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ 、 $74.3 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ だった。実験 B で用いた微粉末氷の SSA は $254.1 \pm 5.2 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ であり、複数回測定してばらつきを評価した結果、ほぼ均一な SSA の氷試料であることを確認した。

4. 2 実験 A の純度測定結果

実験 A の測定結果を図 3 に示す。氷試料の SSA が大きいケースで、メタンハイドレートの純度が高くなることがわかった。降雪後の新雪の場合、純度は約 93% に達し、氷の大半の部分がメタンハイドレートに変換したことがわかる。これは同程度の SSA を有する氷球でもほぼ同じ結果だった。一方、しまり雪や氷球 (大) などの SSA が小さい試料では、純度は半分以下に低下した。図 3 より、SSA が約 20~ $25 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ を境界に純度が SSA とともに急増し、約 8 割を超えることがわかった。

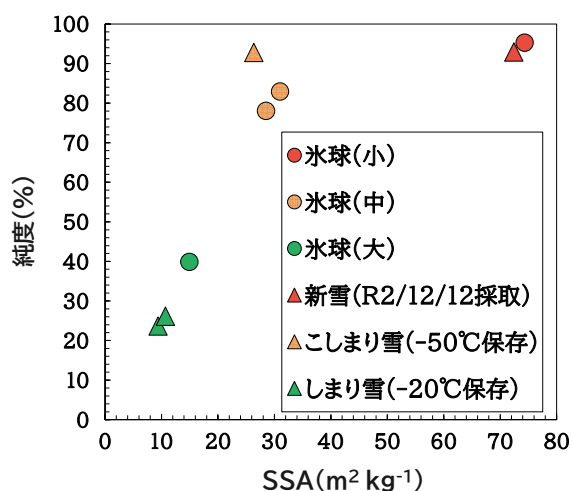


図 3 実験 A 測定結果

4. 3 実験 B の純度測定結果

実験 B の測定結果を図 4 に示す。図中の縦のエラーバーは、測定不確かさと試料数 4 つでのサンプル間のばらつきを合わせた、標準合成不確かさを示す。225 K では、純度は約 70% 程度に留まり、やや低いものの、246 K から 254 K で純度の最大値を迎え、

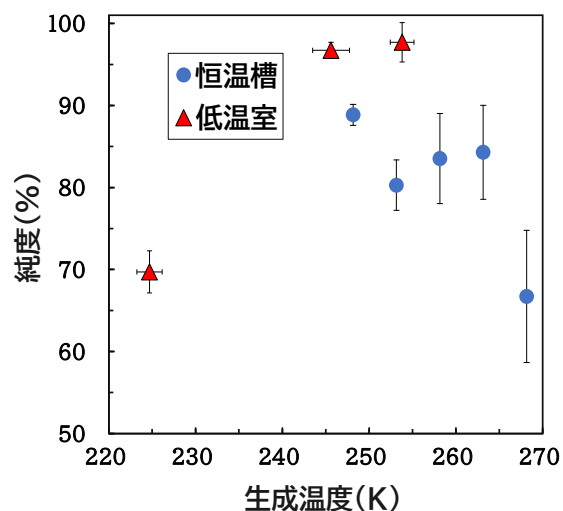


図 4 実験 B 測定結果

そこからさらに高温側では、純度はむしろ減少していくことがわかった。246 K から 254 K の温度範囲で比較すると、恒温槽で生成した試料よりも低温室で生成した試料の方が純度は高かった。

5. 考察

5. 1 実験 A

SSA が $25 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ を超える（平均球相当粒径は約 260 ミクロン以下）雪試料を用いた場合、高純度のメタンハイドレートを生成できることがわかった。本実験の結果では、こしまり雪でも高純度を達成できているものの、雪質と SSA との関係には大きな幅がある。例えば、新雪の SSA は $23 \sim 61 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ と報告されており¹²⁾、少なくとも新雪はほぼ確実に、高純度なメタンハイドレートの材料になることを示唆している。

5. 2 実験 B

246 K から 254 K で純度が最大となる理由を検討する。本実験では生成圧力を固定したため、高温になるにつれ、メタンハイドレート平衡圧の上昇により相対的にドライビングフォースが低下した、と考えられる。このため、アレニウス式で示されるような、生成温度とともに生成速度が上昇するモデルは、本実験の結果に対して単純には適用できない。一方、同じ温度帯において恒温槽で生成した試料と低温室で生成した試料の純度が異なる原因については、詳細は不明である。相違点としては、恒温槽と低温室では環境温度に馴染むまでの時間が異なることや、環境温度の偏差の違い（低温室の温度変動が相対的に大きい）などが挙げられる。

6. まとめ

積雪等の氷粒子とガスを接触させて生成するメタンハイドレートが、メタン貯蔵媒体として活用可能な生成条件を調べた。実験 A では、生成温度・圧力を固定し、様々な SSA の氷試料からメタンハイドレートを生成して、SSA と純度の関係を調べた。SSA が約 $25 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ （平均球相当粒径は約 260 ミクロン）を超える新雪を用いることで、高純度なメタンハイドレートが生成可能であることがわかった。一方、実験 B では生成圧力および初期氷の SSA を固定し、氷点下の様々な生成温度が純度に及ぼす影響を調べた。その結果、246 K から 254 K で純度は最大値を迎え、それよりも低温側・高温側のいずれも純度は低下することがわかった。

【謝辞】

本研究は、北見市・オホーツク新エネルギー開発推進機構との共同研究の下に実施された。

【参考文献】

- 1) 海老沼孝郎, 内田努, 成田英夫 (1999): ガスハイドレートの低温物性と工学的利用技術. 北海道工業技術研究所報告, **73**, 1–6.
- 2) 菅原武, 大垣一成 (2012): ガスハイドレートの科学と応用. 化学と教育, **60**(1), 8–13.
- 3) Stern, L. A. Circone, S. and Kirby, S. H. (2001): Anomalous Preservation of Pure Methane Hydrate at 1 atm. *J. Phys. Chem. B*, **105**, 1756–1762.
- 4) 媚山政良 (1996): 北海道の利雪. 雪氷, **58**(6), 481–483.
- 5) 鳥畑尚希, 媚山政良, 山森英明, 高橋俊太 (2008): 雪氷を用いたガスハイドレートに関する基礎研究 ～雪山貯蔵の雪を用いた場合～. 寒地技術論文・報告集, **24**, 186–188.
- 6) Nagashima, H. D., Oshima, M. and Jin, Y. (2021): Film-growth rates of methane hydrate on ice surfaces. *J. Cryst. Growth*, **537**, 125595.
- 7) Liu, W., Wang, L., Yang, M., Song, Y., Zhang, L., Li, Q. and Chen, Y. (2014): Experimental Study on the Methane Hydrate Formation from Ice Powders. *Energy Procedia*, **61**, 619–623.
- 8) Liu, W., Li, Y. and Xu, X. (2019): Influence factors of methane hydrate formation from ice: Temperature, pressure and SDS surfactant. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **27**, 405–410.
- 9) Hachikubo, A., Yamaguchi, S., Arakawa, H., Tanikawa, T., Hori, M., Sugimura, K., Matoba, S., Niwano, M., Kuchiki, K., and Aoki, T. (2014): Effects of temperature and grain type on time variation of snow specific surface area. *Bull. Glaciol. Res*, **32**, 47–53.
- 10) Uchida, T., Hirano, T., Ebinuma, T., Narita, H., Gohara, K., Mae, S. and Matsumoto, R. (1999): Raman Spectroscopic Determination of Hydration Number of Methane Hydrates. *AIChE J.*, **45**(12), 2641–2645.
- 11) Sum, A. K., Burruss, R.C. and Sloan Jr, E. D. (1997): Measurement of Clathrate Hydrates via Raman Spectroscopy. *J. Phys. Chem. B*, **101**, 7371–7377.
- 12) 八久保晶弘, Martin Schneebeli, 山口悟, 堀雅裕, 谷川朋範, 杉浦幸之助, 的場澄人, 庭野匡思, 朽木勝幸, 青木輝夫 (2014): 積雪の比表面積と粒径の関係. 北海道の雪氷, **33**, 121–124.

ハイドレート含有堆積物中における 包接ガスと堆積物ガス間の安定同位体分別

Isotopic fractionation between hydrate-bound and sediment gases in hydrate-bearing sediment cores

木村 宏海¹, 八久保 晶弘¹, Oleg Khlystov², Gennadiy Kalmychkov³,
Marc De Batist⁴, 坂上寛敏¹, 南尚嗣¹, 山下聡¹

Hiromi Kimura¹, Akihiro Hachikubo¹, Oleg Khlystov², Gennadiy Kalmychkov³,
Marc De Batist⁴, Hirotohi Sakagami¹, Hirotsugu Minami¹, Satoshi Yamashita¹
Corresponding author: hachi@mail.kitami-it.ac.jp (A. Hachikubo)

多数の天然ガスハイドレートが発見・回収されているロシア・バイカル湖では、北見工業大学がロシア・ベルギーの各研究機関との共同研究調査を継続している。本研究では、ハイドレート包接ガスと堆積物中のガスとの間の炭化水素安定同位体比の差から、天然ガスハイドレートの状態に関する情報を得られる、との考えの下、バイカル湖のハイドレート包接メタンの安定同位体比に関する調査を実施した。その結果、深部からのガス供給が止まり、ガスハイドレートが分解しつつある地点を特定できる可能性が示唆された。

1. はじめに

ガスハイドレートとは水分子がカゴ状の構造を形成し、その中に気体分子を包接する、低温・高圧の条件下で安定な結晶である。天然に存在するガスハイドレートの大半は、メタンを主成分として包接する、いわゆるメタンハイドレートである。天然ガスハイドレートは、自然界では永久凍土の下層や海底・湖底表層堆積物などに広く分布しており、次世代エネルギー資源としても注目されている。しかしながら、その一方ではメタンは温室効果ガスの一種であり、天然ガスハイドレートの解離による地球温暖化への影響が懸念されている。したがって、天然ガスハイドレートの生成・解離プロセスの理解は、地球環境システムにおける天然ガスハイドレートの役割の解明に役立つと考えられる。

メタンは炭素と水素から構成され、複数種類のアイソトポログ(同位体分子種)が存在し、 $^{12}\text{CH}_4$ 、 $^{13}\text{CH}_4$ 、 CH_3^2H などがある。例えば水素に関しては、 ^2H は全体の天然存在比で 0.01% のオーダーであり、残りはほぼ ^1H である。人工的にメタンハイドレートを生成した場合、ハイドレート包接ガスとハイドレートに取り込まれなかった耐圧

容器内の残ガスとの間で、ゲストガス安定同位体分別が起こる¹⁾。メタンハイドレート生成時の炭素安定同位体分別は、通常の安定同位体質量分析装置の検出限界以下であり、差はほとんどない。一方、水素安定同位体分別に関しては、ハイドレート包接ガスの方が残ガスに比べて 5% 程度相対的に軽いメタンを包接する¹⁾。この事実は、 CH_3^2H ハイドレートの平衡圧が CH_4 ハイドレートの平衡圧よりも若干高く²⁾、 CH_3^2H が相対的にハイドレートに包接されにくいことと矛盾しない。このことを利用して、天然ガスハイドレートのハイドレート包接ガスと、結晶周りの環境ガスである堆積物中のガス(間隙水溶存ガスや気泡など)との間のメタン安定同位体比の差から、天然ガスハイドレートが採取された地点でそもそも結晶がどのような状態にあるのか、などのガスハイドレート生成・解離プロセスに関する情報が得られるのではないかと考えられる。

本研究で対象としているバイカル湖は、淡水環境下で唯一天然ガスハイドレートが存在する場所である。また北見工業大学では長年にわたり、ロシア・ベルギーとの共同研究体制を継続し、これまでに 200 本近くにも及ぶ天然ガスハイドレ

¹ 北見工業大学

² ロシア陸水学研究所

³ ロシア地球化学研究所

⁴ ゲント大学

Kitami Institute of Technology
Limnological Institute, SB RAS
Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS
Ghent University

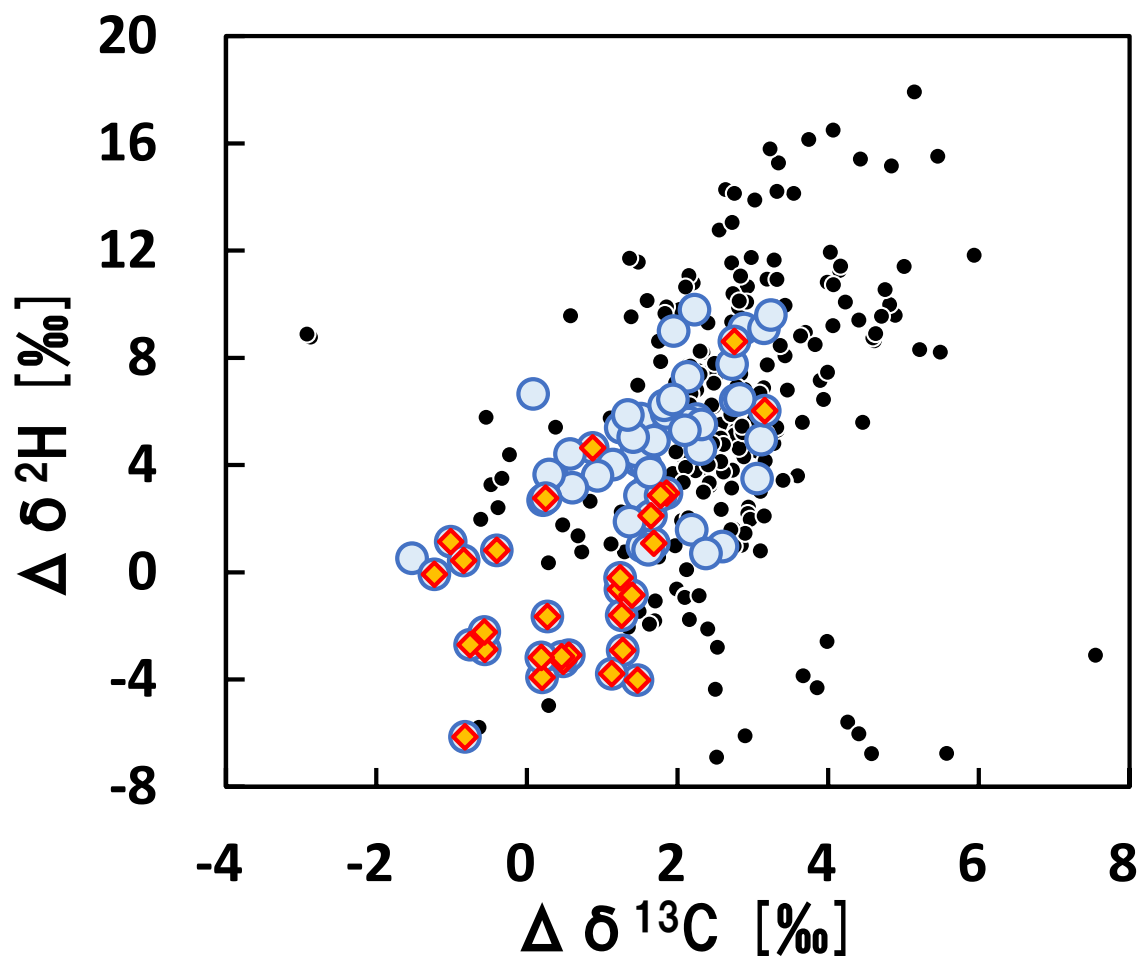


図1 $\delta^{13}\text{C}$ (横軸) および $\delta^2\text{H}$ (縦軸) に関する $\Delta\delta$ 値 (堆積物ガス δ 値 - ハイドレート包接ガスの δ 値) の関係 (2014~2019 年における全データ). 南湖盆 Kedoru 泥火山の全てのコア (記号●), そのうちガスハイドレート解離が予想されるコア (記号◆).

ート含有堆積物コアが得られている. 本研究では, 2014~2019 年のバイカル湖調査で得られたハイドレート包接ガス中および堆積物ガス中のそれぞれのメタン安定同位体比に関する分析結果を整理し, 堆積層深部からのガス供給が止まり, ガスハイドレート結晶が分解しつつある地点を特定できる可能性について紹介する.

2. サンプル採取方法

調査船 *G. Yu. Vereshchagin* 号による 2014 年から 2019 年での調査において, 計 97 本のガスハイドレート含有堆積物コアがバイカル湖の中央湖盆・南湖盆で採取されている. コア採取地点の選定については, ガス湧出地点ないし湖底地形が特徴的 (マウンドやポックマーク等が存在) である地点を選び, 重力コアラを用いて堆積物コアを採取した. その後, 船上にて速やかに回収された分解前の天然ガスハイドレート結晶を, 水上置換

法を用いてバケツの水の中で分解させ, バイアル瓶にハイドレート包接ガスを採取した. また, 堆積物ガスに関しては, 半割した堆積物コアの断面から, 天然ガスハイドレートの存在しない部分の堆積物に含まれるガスを, ヘッドスペースガス法により採取した. その後, ハイドレート包接ガスと堆積物ガスを, シリンジインジェクションにより安定同位体比質量分析装置 (CF-IRMS, Delta V, Thermo Fisher Scientific) に導入し, ハイドレート包接メタンおよび堆積物ガス中のメタンそれぞれの炭素・水素安定同位体比について測定を行った. スケールについてはそれぞれ, V-PDB および V-SMOW を基準とした δ 値に換算した.

3. 測定結果

炭素・水素の安定同位体比の結果を図 1 に示す. $\Delta\delta$ 値は, 堆積物ガスの炭素・水素のそれぞれの δ 値からハイドレート包接ガスのそれぞれの δ 値

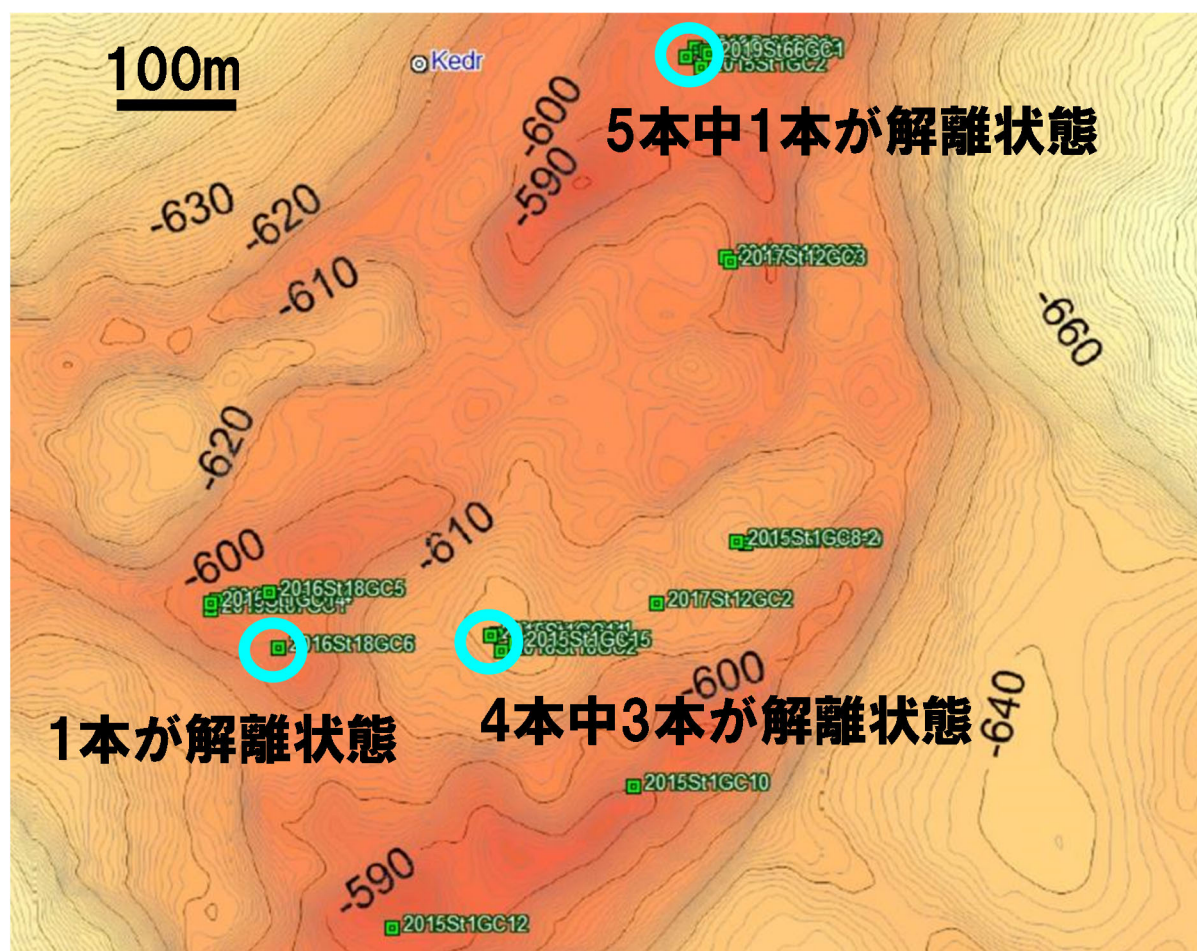


図2 南湖盆 Kedr 泥火山頂上部の複雑な湖底地形図. ガスハイドレート含有堆積物コアが採取された地点とそのコア名(記号■). $\Delta\delta$ 値の関係からガスハイドレートの解離が示唆されている地点(記号●).

を差し引いた値として定義する. また, 堆積物ガスに関しては, ハイドレート包接ガスの採取深度に最も近い位置のデータを用いた. 図1からは, $\Delta\delta^{13}\text{C}$ と $\Delta\delta^2\text{H}$ との関係はばらつきが大きいものの, ゆるやかな正の相関が認められる.

炭素安定同位体比に着目すると, $\Delta\delta^{13}\text{C}$ は+2%付近を中心に広く分布している. これに対し, 水素安定同位体比については, $\Delta\delta^2\text{H}$ は+5%付近が全データの平均値である. すなわち, データの大半は炭素・水素とも $\Delta\delta$ 値が正の値を示している. このことは, わずかな割合ではあるものの, 相対的に軽いメタンである $^{12}\text{CH}_4$ が, $^{13}\text{CH}_4$ や CH_3^2H よりもハイドレート包接ガスとして多く取り込まれていることを示している.

ここで, 南湖盆の Kedr 泥火山で得られたデータに注目する. 一見すると他地点のデータと同様の分布であるが, $\Delta\delta$ 値がゼロないし負の値を示すデータが特定のコアでみられた.

4. 考察およびまとめ

まず, 炭素安定同位体比に注目する. $\Delta\delta^{13}\text{C}$ は, 純粋なメタンハイドレートの生成時ではほぼゼロである¹⁾. また一方では, 多孔質体である珪藻土をまぜて生成した細孔中のメタンハイドレートの場合, $\Delta\delta^{13}\text{C}$ は $-1.1 \pm 0.6\%$ との報告がある³⁾. ゲストガス安定同位体分別に及ぼす堆積物粒子の細孔の効果については不明な部分が多いものの, $\Delta\delta^{13}\text{C}$ が負の場合, 重いメタンである $^{13}\text{CH}_4$ をハイドレート包接ガスに取り込みやすい傾向があることを示している. 本研究の結果は $\Delta\delta^{13}\text{C}$ の平均値が+2%であり, ゼロでも負の値でもないことから, 先行研究^{1),3)}とは異なっていた. これらを踏まえると, 現段階ではバイカル湖の天然ガスハイドレートの状態を $\Delta\delta^{13}\text{C}$ から議論することはできない. 堆積物粒子に起因する何らかの未知の要素が, ハイドレート包接メタンと堆積物中のメタンとの間の炭素安定同位体分別に影響を与えていると解釈される.

次に、水素安定同位体分別に注目する。本研究の $\Delta\delta^2\text{H}$ の平均値は約+5‰付近であり、軽いメタンをハイドレート中に濃縮しやすいとの先行研究の結果と定量的にも一致する。つまり、図1におけるばらつきは大きいものの、メタンの水素安定同位体比の測定結果は、現在のバイカル湖の天然ガスハイドレートが周囲の環境とおおむね平衡状態にあることを示している。

南湖盆の Kedr 泥火山の湖底地形図およびガスハイドレート含有堆積物コアの採取箇所を図2に示す。2014年から2019年までの間、Kedr 泥火山では計21本のガスハイドレート含有堆積物コアが採取されている。このうち、図2に示した特定の5本のガスハイドレート含有堆積物コア(2015St1GC15, 2016St18GC1, 2016St18GC2, 2016St18GC6, 2019St66GC4)に関しては、図1では $\Delta\delta$ 値が比較的小さいデータに相当する(記号◆)。 $\Delta\delta$ 値がゼロの場合、すなわちハイドレート包接ガスと環境の堆積物ガスの安定同位体比が等しいことを示し、これはガスハイドレートが今まさに解離状態にあり、ハイドレート包接ガスそのものを周辺環境に放出していると解釈される。特に、ほぼ同一地点から得られた2015St1GC15, 2016St18GC1, 2016St18GC2の3本のガスハイドレート含有堆積物コアは、Kedr 泥火山中央の比高10 m程度のポックマーク地形から得られている。状況を解釈すると、例えばこのポックマークでは、深部からのガス供給が既に停止しており、堆積物中のメタン濃度が低下した結果、ガスハイドレートが現在解離し始めている、などの状況が考えられる。特に2015St1GC15, 2016St18GC2の2本の堆積物コアでは、ガスハイドレート結晶が同一堆積物コア中に、深度方向に結晶構造I型、結晶構造II型、結晶構造I型の順に並んでおり^{4),5)}、またエタンの水素安定同位体比については、同一コア中でも結晶構造II型の方が結晶構造I型よりもハイドレート包接ガスの $\delta^2\text{H}$ が小さいことが報告されている⁴⁾。Kedr 泥火山では、結晶構造I型のメタン・エタン混合ガスハイドレートが分解すると同時に、 $\delta^2\text{H}$ の小さいエタンを包接した

結晶構造II型のガスハイドレートの二次生成が示唆される⁶⁾。今後は、メタンだけでなくエタンや CO_2 の安定同位体比も含めて、ゲストガス安定同位体分別が天然ガスハイドレートの状態を知るための指標になると考えられる。

【謝辞】

真空ライン等の実験系の一部については、科学研究費(基盤研究 B: 26303021)の助成を受けた。

【参考文献】

- 1) Hachikubo, A., Kosaka, T., Kida, M., Krylov, A., Sakagami, H., Minami, H., Takahashi, N. and Shoji, H. (2007): Isotopic fractionation of methane and ethane hydrates between gas and hydrate phases. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L21502, doi:10.1029/2007GL030557.
- 2) Ozeki, T., Kikuchi, Y., Takeya, S. and Hachikubo, A. (2018): Phase equilibrium of isotopologue methane hydrates enclathrated CH_3D and CD_4 . *J. Chem. Eng. Data*, **63**(6), 2266–2270, doi: 10.1021/acs.jced.8b00203.
- 3) 太田有香, 八久保晶弘, 竹谷敏 (2016): 細孔中に生成したメタンハイドレートの熱分析およびメタン安定同位体分析. 雪氷, **78**(5), 281–290.
- 4) 八久保晶弘, ほか10名 (2016): バイカル湖南湖盆の結晶構造 II 型天然ガスハイドレート. 北海道の雪氷, **35**, 95–98.
- 5) 八久保晶弘, ほか9名 (2017): 天然ガスハイドレート生成時のメタン炭素安定同位体分別—バイカル湖南湖盆のハイドレート含有湖底堆積物の例—. 北海道の雪氷, **36**, 85–88.
- 6) Hachikubo, A., and 10 others (2020): Characteristics of hydrate-bound gas retrieved at the Kedr mud volcano (southern Lake Baikal). *Sci. Rep.*, **10**, 14747, doi:10.1038/s41598-020-71410-2

メタン・ヘリウム系混合ガスハイドレート生成時のヘリウム組成分別 Molecular fractionation of guest gases at the formation of CH₄ and He mixed-gas hydrates

森谷 優希¹, 木村 宏海¹, 八久保 晶弘¹, 竹谷 敏²
Yuki Moriya¹, Hiromi Kimura¹, Akihiro Hachikubo¹, Satoshi Takeya²
Corresponding author: hachi@mail.kitami-it.ac.jp (A. Hachikubo)

ヘリウムは天然ガスの成分の一つであり、バイカル湖の天然ガスハイドレートの包接ガスから数 ppm 程度のヘリウムが検出された報告例がある。しかし、混合ガスハイドレートにおけるヘリウムの包接機構と結晶内での安定性は分かっていない。本研究では、メタン・ヘリウム系の混合ガスを用いて、この数 ppm 程度のヘリウムを包接するとみられるハイドレート結晶を人工的に生成した。包接ガスおよび結晶に取り込まれなかった耐圧容器中の残ガスのヘリウム濃度の関係を調べると同時に、液体窒素温度下で結晶を真空状態にした際に、ヘリウムが選択的に結晶から抜けていくかどうかの検証を行なった。

1. はじめに

ガスハイドレート（以下 GH）は、水分子の水素結合で作られたカゴ状構造にメタンなどのゲストガス分子を包接した水和物である。天然ガスを包接する GH は、メタン以外にもエタン、プロパン、硫化水素等、多くの種類のガスを含む混合 GH であり、そのゲストガス主成分がメタンであるがゆえに、一般にはメタンハイドレートと呼ばれている。GH は低温・高圧の環境下で安定状態な結晶であるため、天然 GH のほとんどは海底・湖底の表層堆積物中や永久凍土層下部から発見されている。

ヘリウムは、融点や沸点が非常に低いなどの特性を持つ最軽量の希ガスであり、天然ガスの成分の一つとして、大気中にも 5 ppm 程度存在する。産業用に流通するヘリウムも、天然ガスとして産出しているものを分離・濃縮・液化している。そうすると、天然 GH の包接ガス中にもヘリウムが検出されるのではないかと、との興味が湧いてくる。実際、過去に採取された天然 GH の包接ガス中から、ヘリウムが数 ppm 検出された例が報告されている¹⁾。しかしながら、天然 GH に包接されたヘリウムに関する研究は少なく、またヘリウムが GH 結晶中にどのように包接されるのかなど、未知の部分が多い。純粋なヘリウム GH の生成には、220 K で 0.28 GPa の高い圧力が必要とされている²⁾。一方、混合ガス系の GH 平衡圧は、それぞれの純ガス系でのハイドレート平衡圧の中間値となることから、ヘリウムと別のガスの混合系で

あれば、平衡圧が劇的に低下し、かつ微量ではあるものの、ヘリウムが包接ガスとして結晶中に取り込まれる可能性がある。

先行研究³⁾では、メタン・ヘリウム混合ガスを用いて混合 GH を人工的に生成し、試料生成後の結晶に包接されず容器内に残ったガス（以下、残ガス）と、結晶中に取り込まれた包接ガスを完全に分離して、それぞれのガス組成を分析する手法を確立した。その結果、最大で 6% に達するヘリウム組成の混合 GH の生成に成功している。しかしながら、この先行研究では GH 結晶に包接されにくいと想定されたヘリウムを確実に検出するため、生成に用いる初期ガス中のヘリウム組成が 5 割以上を占めていた。過去に採取された天然 GH から検出された数 ppm 程度のヘリウム濃度と比べると、包接ガス中の数%のヘリウム濃度は自然界では非現実的な値である。そこで本研究では、先行研究³⁾の実験手法を踏襲し、包接ガス中のヘリウム濃度が数 ppm オーダーとなるような低濃度領域における、メタン・ヘリウム系混合 GH の生成実験を実施した（実験 A）。

また、この実験手法では、残ガスと GH 結晶を分離するために液体窒素温度で GH 試料を固定し、残ガスが完全に排出されるまで真空ポンプで引き続け、その後速やかに GH 結晶を分解させて包接ガスの採取を行っている。こうした作業中に、分子径の非常に小さいヘリウムは、GH のケージに包接されずに結晶中を拡散し、結晶外に逸散する可能性が考えられる。そこで、真空引きの時間

¹ 北見工業大学

² 産業技術総合研究所

Kitami Institute of Technology
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

を1ヶ月程度まで延長し、同じガス組成を目指したメタン・ヘリウム系混合 GH 中のヘリウム濃度が、真空引きを行う時間に対して変化するかどうかを調べた(実験 B)。

本研究では、人工的に生成したヘリウムを包接するハイドレート結晶を用い、メタン・ヘリウム系の混合系 GH 生成時におけるヘリウム包接機構と結晶内での安定性の理解を目的としている。

2. 実験方法

2. 1 実験 A の方法

実験 A については、先行研究³⁾とほぼ同様である。実容積 42 mL の耐圧容器に微粉末状の氷 3 g を -20°C の低温室内で封入し、液体窒素温度下で容器内の空気を真空引きした後、高純度メタン(純度 99.99%, 高千穂化学工業)および高純度ヘリウム(純度 99.995%, エア・ウォーター)で適量加圧した。メタン導入量を固定し、ヘリウム導入量を変化させることで、容器内に任意組成の混合ガスを導入し、その後は容器を 0°C まで昇温させ、微粉末氷からの融解水と高压ガスを接触させる方法で GH 結晶を生成した。

耐圧容器を $+1^{\circ}\text{C}$ の恒温槽に約半日静置した後、GH を分解させずに残ガスを水上置換により 100 mL バイアル瓶に捕集した。その後、耐圧容器を液体窒素温度に冷却し、GH 結晶を容器内に固定して分解させることなく、真空ポンプで数時間引き続けることで、残ガス(ヘリウムおよび液化した余剰メタン)を完全に排出し、GH 結晶のみが耐圧容器に残存する状態を実現した。

この GH 結晶を、耐圧容器に封入されたまま常温で分解させ、残ガスと同様の方法で GH 包接ガスを 100 mL バイアル瓶に捕集した。残ガスおよび GH 包接ガス試料については、速やかにポータブルガスクロマトグラフ(CP-4900, Varian, 図1)で分析し、それぞれのヘリウム組成を求めた。なお、キャリアガスにはアルゴン(純度 99.999%, エア・ウォーター)を、カラムにはモレキュラーシーブ MS5A およびポラプロット PPQ (いずれもカラム長さ 10 m) を使用することにより、メタン・ヘリウム・酸素・窒素をそれぞれ分離し定量した。

2. 2 実験 B の方法

実験 B については、ハイドレート生成、ガス試料の分離および採取、ガスクロマトグラフィーに



図1 使用したガスクロマトグラフ装置

よるガス分析までは実験 A とほぼ同様である。ただし、混合ガスを容器内に導入する際、その導入量を固定することで、全て同一のガス組成の結晶を生成することを目指した。また、残ガスを真空引きする際、実験 A では先行研究³⁾にならない、5~6 時間程度で達成される残ガスの完全排出を圧力計で確認後、速やかに GH 結晶を分解している。これに対し、実験 B ではさらに真空ポンプを動作させ続けることにより、真空引き時間を延長した。具体的には、半日~1ヶ月程度の範囲で複数試料毎に真空引きの時間を変化させ、所定の時間が経過した後は試料を分解させて、ヘリウム組成が真空引き時間に対して変化(減少)するかどうかを分析した。

3. 結果および考察

3. 1 実験 A の結果

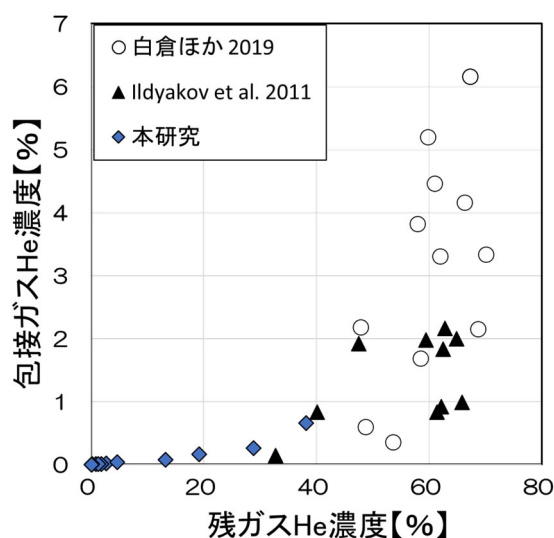


図2 混合 GH 生成時の残ガスおよび包接ガスそれぞれのヘリウム濃度の関係

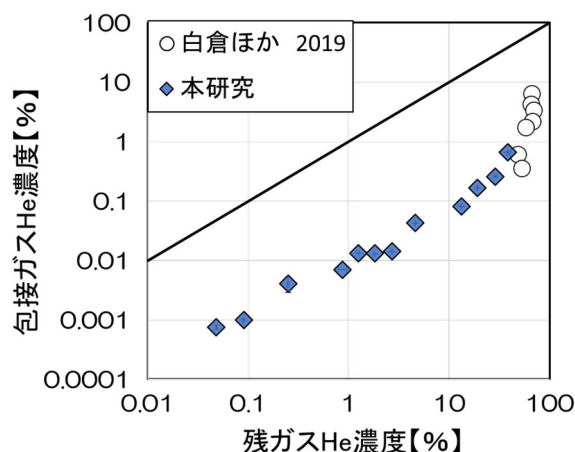


図3 混合 GH 生成時の残ガスおよび包接ガス中のヘリウム組成の関係（両対数表示）

実験 A について、先行研究^{3,4)}の結果とともに本研究の結果をプロットしたグラフを図2に示す。残ガスおよび包接ガスについては、これらの先行研究と比較してヘリウム濃度の小さい領域での実験結果が得られた。また、包接ガス中のヘリウム濃度は、残ガス中のヘリウム濃度を大きく下回り、残ガス相が数 10%であっても包接ガス相は 1%以下であることから、低濃度領域においても、先行研究と同様にヘリウムはハイドレート相に極めて包接されにくいことが示された。

低濃度領域の部分を見やすいよう、図2を両対数表示でまとめたのが図3である。本実験のデータの傾向から、残ガス中のヘリウム組成が 0.1%から 10%のとき、包接ガス中のそれは 0.001%から 0.1%程度であり、ガス相のヘリウムの約 100分の1が包接ガスとして取り込まれる、との結果を得た。すなわち、このことを踏まえると、過去に採取された天然 GH を分解して得られた包接ガス中のヘリウム濃度は、検出される試料で数 ppm のオーダーであったことから¹⁾、GH 生成時に母体となった天然ガスは、100~1,000 ppm 程度のヘリウム組成であったと推察される。

3. 2 実験 B の結果

実験 B の結果を図4に示す。包接ガス中のヘリウム濃度は 0.6~1.4%の範囲にあり、データのばらつきは大きいものの、時間に対するヘリウム濃度の低下傾向はみられなかった。このことは、ヘリウムが試料表面に吸着しているのではなく、液体窒素温度であれば少なくとも 1 ヶ月程度の

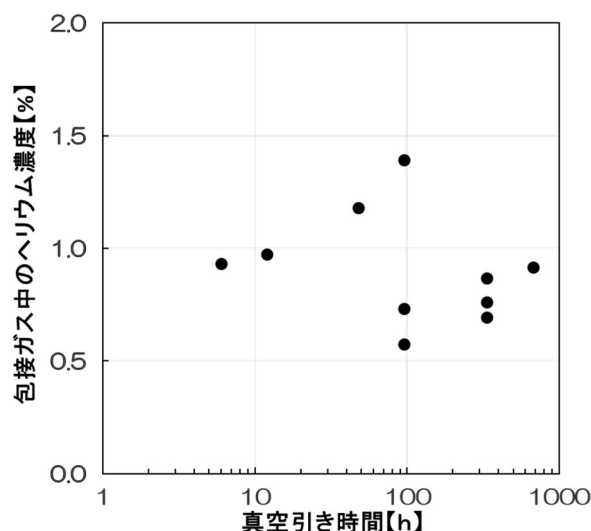


図4 真空引き時間による包接ガス中のヘリウム濃度の変化

期間は真空状態にさらされても、1%程度の試料中のヘリウム濃度は結晶内に維持されることが確認できた。

4. まとめと今後の展望

実験 A では、これまでに知られていなかったヘリウム低濃度領域でのメタン・ヘリウム系混合 GH のガス組成分別が定量的に明らかにされた。ヘリウムは GH 相に極めて包接されにくく、その割合は残ガス相の約 100 分の 1 程度であった。

実験 B では、ヘリウムを比較的多め(1%前後)に包接している GH 試料を多数作成し、試料ごとに真空引きの時間を変えて、真空引き時間に対する包接ガス中のヘリウム濃度の時間変化について調べた。その結果、ヘリウムが結晶内に維持されることが確認できた。

最大の懸案である「試料の解離ガス中に検出されるヘリウムは、本当に GH 結晶構造に包接されていたものなのか？」という疑問は依然として残っている。ヘリウム分子は小さく、GH 結晶構造の小ケージに包接される、あるいは大小ケージに多重占有の形で包接されるなど、水素分子の包接が確認されている水素ハイドレート⁵⁾と同様のケースが考えられる。本実験では生成圧力も最大で 20 MPa 弱に留まり、ゲスト分子を多重占有させるには圧力が小さすぎるとみられる。しかし、ヘリウムがケージの中に安定に包接されず、ケージ間拡散により逃げていくのなら、1 ヶ月も試料中のヘリウム濃度が 1%前後を保持している事実はいま説明できない。今後は、真空引きを行う

際の温度を上げるなどの実験条件の変更を検討している。

なお、本研究で生成した GH 試料は、全て結晶構造 I 型であると考えられる。結晶構造 I 型は、14 面体大ケージに対する 12 面体小ケージの個数が 3 分の 1 であり、もしヘリウムが小ケージに包接されているのであれば、主としてメタンを包接する大ケージに阻まれてヘリウムが移動しにくい可能性がある。一方、結晶構造 II 型では 16 面体大ケージに対する 12 面体小ケージの個数は 2 倍であり、小ケージ同士が隣接しているために、連なっている小ケージを介してヘリウムが抜けて行く可能性がある。したがって、今後は結晶構造 II 型で同様の実験を実施し、比較検討を行う必要がある。現在、メタンの代わりにアルゴンを用いて結晶構造 II 型を実現し、アルゴン・ヘリウム系混合 GH で同様の実験を実施中である。

【参考文献】

- 1) 白倉翔太 (2020) : 天然ガスハイドレート中のヘリウム濃度の測定. 北見工業大学工学部社会環境工学科卒業論文.
- 2) Londono, D., Finney, J. L. and Kuhs, W. F. (1992): Formation, stability, and structure of helium hydrate at high pressure. *J. Chem. Phys.*, **97**, 547–552.
- 3) 白倉翔太, 八久保晶弘, 竹谷敏 (2019) : メタン・ヘリウム混合ガスハイドレートにおけるヘリウム組成について. 雪氷研究大会 (2019・山形) 講演要旨集.
- 4) Ildyakov, A. V., Manakov, A. Y., Zavjalov, A. P. and Bardakhanov, S. P. (2011): Gas hydrate formation by methane-helium mixtures. *Chem. Eng. Technol.*, **34**, 1733–1738.
- 5) Wendy L. Mao, W. L. and 9 others (2002): Hydrogen clusters in clathrate hydrate. *Science*, **297**, 2247–2249.

北海道置戸町鹿ノ子ダム左岸の風穴地における凍土の消長

Aggradation and degradation of frozen ground at wind hole slope on the left bank of Kanoko dam, Oketo town, Hokkaido

曾根 敏雄¹

Toshio Sone¹

Corresponding author: tsone@lowtem.hokudai.ac.jp(T. Sone)

置戸町鹿ノ子ダムの左岸の斜面では、かつて存在していた永久凍土は衰退したと考えられていた。ところが、特に寒冷であった 2001 年に越年性凍土が形成され、寒冷な年が継続すれば、再び永久凍土が形成される可能性が指摘された。しかし、その後気温は温暖化傾向にあり、越年性凍土は形成されていないものと考えられた。ところが、以前ほど寒冷ではなくても、越年性の凍土が形成されていたことが判った。

1. はじめに

北海道では、道東地方を中心に気温に比べて地温が異常に低い地点が散在する。置戸町鹿ノ子ダムの風穴地では、永久凍土が 1990 年には衰退したが¹⁾、気温が低かった 2001 年に越年性凍土（1 年以上存続する凍土）が形成された²⁾。しかしその後、気温は温暖化傾向にある（図 1）。そこで、その後越年するような凍土は形成されたのか、凍土がどのような状態であったのかを地温観測から考察した。

2. 調査地点と調査方法

北海道置戸町鹿ノ子ダム上流おけと湖の左岸にある崖錐斜面（標高約 480m）で調査を行った

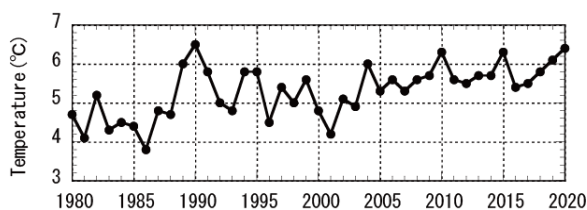


図 1 1980-2020 年の境野における年平均変化

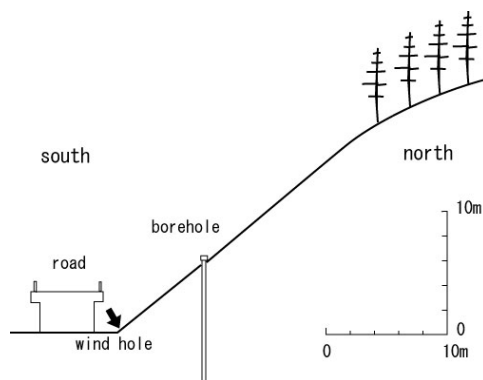


図 2 観測斜面の様子（曾根, 2004 に加筆）

（図 2）。ここでは、1980 年の道路工事の際に、奥行き 10m、高さ 2m の凍土とその内部に地下水が発見された³⁾。この地点の斜面下部には風穴が存在する⁴⁾。この地点で掘削された掘削孔での地温観測から、永久凍土が存在したと考えられたが、残存していた永久凍土は 1990 年には消滅した¹⁾。この掘削孔に温度センサーを挿入して地温の観測を行った。温度記録計には 1992 から 2006 年まで KADEC-U（分解能 0.1°C、精度±0.4°C 以内、コーナースystem）を 2006 年以降はおんどとり Jr.TR-52（分解能 0.1°C、精度±0.3°C、ティアドロイ）を用いた。気温データには近くのアメダス境野のデータを用いた。

3. 結果と考察

1992 年から 1993 年にかけての観測結果を図 3 に示す。ここでは、2、4m 深で季節凍土が観測された。2m 深の地温が最も低く年平均値は氷点下となり、8m 深では地温は氷点下には低下していないが 2°C を下回る。年平均気温が 4~5°C の地点としては、これらの地温は異常に低い。深度 2m では融解期が数か月程度と期間が短く、もう少し

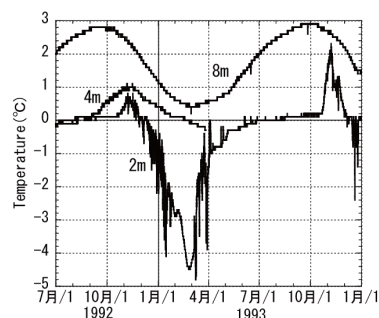


図 3 1992-1993 年の地温観測結果

¹ 北海道大学低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

寒ければ越年性凍土となりうる可能性を示している。

次に1996年から2017年までの深度4mの地温観測結果を図4に示す。2000年1月から2001年9月まで 0°C 以下の状態が継続した。しかし継続期間は2年以内なので永久凍土とはならなかった。越年性凍土の形成された2001年は、アメダス境野で凍結指数の値が $1300^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と大きくまた融解指数の値は小さめであった(図5)。しかし翌2002年は、凍結指数が約 $800^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と小さかったために、越年性凍土は形成されなかったと考えられた。

また2012年から2013年にかけても越年性凍土が形成されたとみられる。この期間の凍結指数は約 $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ とやや大きめであったが、融解指数は約 $3000^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ と特に小さいわけではなかった。欠測があり2年以上 0°C 以下の状態が継続したかは不明である。2005年から2007年にかけては、融解期間が短く低温な地温状況が継続した。この期間も、凍結指数が大きい値を示してはおらず融解指数も特に小さいということもなかった(図5)。2015年以降も低温な状況が生じている様であるが、温度精度が良くないので明確な判断は困難である。これらのことから、この斜面の地温は2004-2005年から、それまでと地温状況が変化して以前よりも低温化し、同じ寒さでもより冷え易くなったのではないかと考えられる。

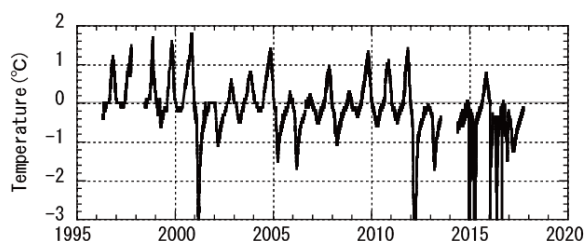


図4 1996-2017年の4m深の地温観測結果

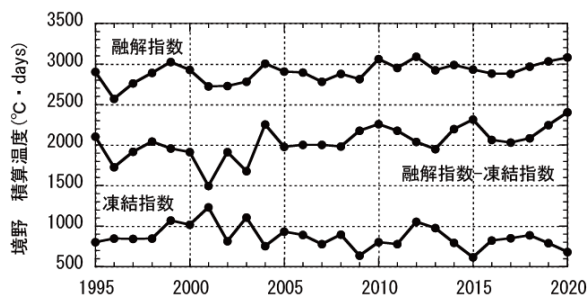


図5 1995-2020年の境野における温度指標

この斜面では、表面に施工された亀甲棒が歪んでおり、斜面物質移動が生じていることが観察される。またかつて地下水の存在した場所では、地下水の融解沈下に伴う凹み状の変形もみられる。このような変形による地下の構造の変化により、風穴斜面としての風の通路に変化生じた可能性がある。別の要因としては、2002年に斜面下部に積雪下でも通風のある風穴の風の通り道を人工的に作ったことが挙げられる。これにより、冬の寒気がより効果的に風穴内部を冷却するようになり、その影響がゆっくりと掘削孔の地温に及ぶようになった可能性もある。

また今回述べた4m深の地温よりも低いことが想定される2m深では、越年性凍土が形成される可能性がより高い。したがって、現在あるいは今後、越年性凍土や永久凍土が存在する、あるいは形成される可能性がある。現在この掘削孔は閉塞しており、老朽化した温度センサーを引き出したり、新たなセンサーを挿入したりすることが出来ない。今後、再掘削を行い、地温の観測を行うことが望まれる。

【謝辞】

北海道大学名誉教授福田正己先生には研究の機会を与えて頂き、宮城大学准教授原田鉦一郎博士、株式会社工学気象研究所森淳子博士には調査に協力して頂いた。

【参考文献】

- 1) 曾根敏雄,1996:北海道置戸町鹿ノ子ダム,鹿ノ子大橋左岸の永久凍土の衰退,季刊地理学,48,293-302.
- 2) 曾根敏雄,2004:北海道置戸町鹿ノ子ダム左岸の風穴地における越年性凍土,雪氷,66,227-233.
- 3) 福田正己,成田英器,1980:置戸町で発見された地下水について.低温科学物理篇,39,201-205.
- 4) 高橋修平,榎本浩之,沢田正剛,百武欣二,安達寛,福田正己,1991:北見地方置戸町に見られる氷穴の観測,北海道の雪氷,10,28-31.
- 5) 曾根敏雄,2015:風穴風の吹き出しと吸い込みー北海道置戸町鹿ノ子風穴での観測から,清水長正・澤田結基編「日本の風穴」,92-101.

深層学習を用いた冬期路面すべり摩擦係数推定に関する基礎的検討

Basic Study for Friction Coefficient Inference on Winter Road by Using Deep Learning

齊田 光¹, 徳永 ロベルト², 佐藤 昌哉³

Akira Saida¹, Roberto Tokunaga², Masaya Satou³

Corresponding author: saida-a@ceri.go.jp (A. Saida)

冬期道路管理の効率化やスリップ事故の防止等を実現する上で、路面のすべりやすさを把握することは重要である。本研究では、近年発展が著しい深層学習を用いて車載カメラで撮影した画像から路面すべり摩擦係数を推定可能であるか基礎的な検証を行った。その結果、本研究で提案する手法を用いて冬期の積雪および非積雪路面の路面すべり摩擦係数を概ね良好な精度で推定できる可能性があることを確認した。また、路面すべり摩擦係数の推定をより精度良く行うためには、より多様な路面雪氷条件下で学習用データを多量に収集する必要があること、道路照明灯の反射光の映り込みなどによる影響を考慮した推定手法が必要となることが明らかになった。

1. 研究の背景および目的

冬期の安全・快適な道路交通を維持する上で、路面のすべりやすさを把握することは重要である。例えば、道路管理者が路面すべりやすさを正確に把握できるようになれば、冬期のスリップ事故や車両スタックに起因する大規模な渋滞等を防止するための対策（除雪、凍結防止剤の散布や道路通行止めの実施）を従来以上に適切かつ効率的に行うことが可能となる。また、道路利用者自らが事前に路面すべりやすさを把握することが出来れば、すべりやすい路面でのスリップ事故回避や雪氷路面における車両の適切な制御などに用いることが可能である。一方で、既存の路面すべりやすさ計測手法は、冬期道路維持管理作業の意思決定支援や道路利用者自身による路面状態の把握に用いるためには解決すべき課題が複数存在する。例えば、路面のすべりやすさを定量的に計測する手法としては振り子式スキッドレジスタンステストを用いた手法¹⁾が広く用いられているが、この手法は機器を路面に設置して計測を行う必要があるため、計測時に交通規制を要するなどの課題を有している。また、このような欠点を解消するための手法としては、計測輪と制動装置を搭載した車両を走行させ、計測輪にのみブレーキをかけることで生じた路面－計測輪間の摩擦力を計測することで、一般車両の通行を妨げることなく路面すべりやすさを計測する手法²⁾が開発されている。近年では広範囲の道路網にお

けるすべりやすい区間を把握することを目的として、車両進行方向に対して斜めに取り付けられた計測輪に生じる横力から路面すべりやすさを計測する手法³⁾が開発されている。これらの手法は交通規制を行うことなく路面のすべりやすさを精度良く計測することが可能であるが、計測機器が非常に高価（数百万円～数千万円）かつ大型である。このように、既存の路面すべりやすさの計測手法は機器の導入・運用に要する費用や労力に改善の余地があり、より安価かつ簡単に路面のすべりやすさを計測する手法が必要とされている。

本研究ではこれらの課題を解決する一手法として、深層学習による画像分類を用いて路面すべりやすさを推定可能であるか基礎的な検討を行ったので結果の一部を報告する。

2. 深層学習を用いた路面摩擦係数推定の方法

本研究では、深層学習の一種であるConvolutional Neural Network（畳み込みニューラルネットワーク、以下 CNN）による画像分類手法を用いて路面すべり摩擦係数 μ を推定可能であるか検討を行った。CNNによる画像分類は畳み込み・プーリング等の処理により入力した画像の特徴量を抽出し、得られた特徴量を用いて入力画像をいくつかのクラスに分類する手法である。本研究で作成したCNNは幅112×高さ112ピクセルのRGB画像を入力することで路面のすべりやす

¹ 土木研究所 寒地土木研究所

² 元土木研究所 寒地土木研究所

³ 北海道開発局 札幌開発建設部 Sapporo Development and Construction Departments, Hokkaido Regional Development Bureau

Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI

Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI (former affiliation)

さを 17 段階 ($\mu < 0.05$, $0.05 \leq \mu < 0.10$, ..., $\mu \geq 0.80$) で推定するものである。CNN は一般に推論処理に要する計算量が大きく、スマートフォンのような携帯機器を用いて CNN による推論を行うと推論処理に長時間を要する可能性がある。これは車載カメラ画像を用いたすべりやすい路面の検知のような、リアルタイムな推論処理が要求される用途では好ましくない特徴である。このような理由から、本研究ではリアルタイムな路面すべり摩擦係数の推定を可能とするために、CNN の構造として推論処理が高速かつ予測器のサイズが小さい MobileNet V2⁴⁾を用いた。

上記の CNN を作成するためには、学習用データとして路面すべりやすさの実測データと路面画像データの組が多数必要となる。本研究では、図 1 に示す連続路面すべり抵抗測定装置 (Halliday Technology RT3)³⁾およびドライブレコーダー (JAF MEDIA WORKS DD-06 α) が搭載された路面雪氷状態計測車両を用いて、2018 年度および 2019 年度冬期の北海道札幌市、石狩市、苫小牧市の一般道路および北陸自動車道富山 IC～小矢部砺波 JCT、東海北陸自動車道小矢部砺波 JCT～福光 IC で路面すべりやすさ実測データおよび路面画像データを収集した。その後、これらのデータから生成した学習用データ (日中のデータ数：566,618 個および夜間のデータ数：846,672 個) を用いて CNN の学習を行い、日中または夜間の μ を推定する CNN を生成した。

3. 路面すべり摩擦係数の推定精度検定方法

本研究では、2. で述べた方法で生成した CNN を用いて μ の推定精度検定を行った。 μ の推定精度検定に用いる検定用データには、上記の学習用



図 1 路面雪氷状態計測車両

データとは異なる日時および路面雪氷条件下で収集した路面画像および路面すべりやすさデータ (2019/2/8 日中および 2020/2/12 夜間に一般国道 231 号 KP0～KP19 の上り・下り両方向で得られたデータ) を基に作成したデータを用いた。検定では、路面すべり摩擦係数の実測値 μ_{obs} および CNN による推定値 μ_{inf} を比較することで μ_{inf} の推定誤差 (二乗平均平方誤差, RMSE) を求めた。なお、CNN の学習および検定は市販 PC (CPU : AMD Ryzen Threadripper 3970X×1, GPU : NVIDIA Geforce RTX 2080Ti×1, メモリ : DDR4-3200 16GB×4) を用いて、Python 3.7.7, TensorFlow 2.1.0 および OpenCV 3.4.2 で実装したソフトウェアにより行った。

4. 路面すべり摩擦係数の推定精度検定結果および考察

表 1 は 2019/2/8 日中および 2020/2/12 夜間の検定用データを CNN に入力することで得られた μ_{inf} と μ_{obs} の混同行列を示す。なお、表中各項目の背景色の濃淡は μ_{inf} と μ_{obs} が当該項目の範囲内であったケースの出現回数を示す。 μ_{obs} が 0.20 から 0.30 程度 (概ね圧雪路面の μ に相当) または 0.70 から 0.80 程度 (非積雪路面の μ に相当) である場合の μ_{inf} は μ_{obs} と同程度の値となるケースが多く、本手法を用いると路面のすべりやすさが圧雪路面や非積雪路面に相当する場合においては μ を概ね良好な精度で推定できる可能性があることが分かる。一方で、 μ_{obs} が上記の範囲内の値である場合、 μ_{inf} が μ_{obs} よりも低い値となるケースも少なからず見られた。

図 2 は 2019/2/8 日中の一般国道 231 号における μ_{obs} (図中●) と μ_{inf} (図中実線) の空間分布を示す。本検定用データ計測時の目視による路面状態は計測起点である北 33 西 2 交差点から 17～18km および 21～22km の区間では湿潤路面、それ以外の区間では圧雪または凍結路面であり、湿潤路面区間における μ_{obs} は 0.60 から 0.70 程度、圧雪・凍結路面区間における μ_{obs} は 0.15 から 0.45 程度であった。 μ_{inf} の空間分布は概ね μ_{obs} と同様の傾向を示し、計測起点から 17～18km および 21～22km の区間における μ_{inf} は最大で 0.80 と大きい値となり、その他の区間における μ_{inf} は 0.05 から 0.30 程度であった。一方で、 μ_{inf} は μ_{obs} と比較して値が偏る傾向にあり、計測起点から 1～11km の区間などでは μ_{inf} の大部分が 0.10 程度または

表 1 路面すべり摩擦係数推定結果の混同行列

	路面すべり摩擦係数実測値, μ_{obs}																	
	0.00 -	0.05 -	0.10 -	0.15 -	0.20 -	0.25 -	0.30 -	0.35 -	0.40 -	0.45 -	0.50 -	0.55 -	0.60 -	0.65 -	0.70 -	0.75 -	0.80- -	
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80		
路面すべり摩擦係数推定値, μ_{inf}	0.00 – 0.05	2	7	6	9	24	25	4	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
	0.05 – 0.10	1	5	3	7	21	19	5	1	0	1	1	0	0	0	2	2	0
	0.10 – 0.15	1	0	9	16	58	50	8	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1
	0.15 – 0.20	1	3	17	41	95	80	14	1	1	0	1	0	0	0	0	2	0
	0.20 – 0.25	0	5	7	64	155	179	43	5	1	4	0	0	0	2	4	2	0
	0.25 – 0.30	0	1	23	93	260	336	67	9	2	2	0	0	0	1	1	2	1
	0.30 – 0.35	0	0	7	51	215	277	33	11	5	4	0	0	0	4	0	2	1
	0.35 – 0.40	0	1	1	16	46	63	11	3	4	0	1	0	0	3	0	0	0
	0.40 – 0.45	0	0	1	1	13	9	3	2	1	1	0	1	1	1	1	5	1
	0.45 – 0.50	0	0	0	3	4	1	6	0	3	3	4	1	1	3	4	4	1
	0.50 – 0.55	0	0	0	3	5	5	7	8	8	10	13	8	6	5	3	3	0
	0.55 – 0.60	0	0	0	3	2	3	5	8	10	10	17	20	13	10	22	30	5
	0.60 – 0.65	0	0	0	1	1	2	3	13	9	10	27	26	28	29	34	56	16
	0.65 – 0.70	0	0	1	0	0	1	2	7	13	19	33	57	58	65	87	151	59
0.70 – 0.75	0	0	0	0	0	1	6	7	11	18	31	63	72	99	130	234	86	
0.75 – 0.80	0	0	0	0	1	0	0	3	6	14	20	29	39	67	124	231	79	
0.80-	0	0	0	0	0	0	0	2	2	7	13	17	23	26	76	139	56	

0.30 程度のいずれかとなった。この結果は本手法で開発した CNN が μ の細かな変化の検出を不得手としていることを示している。この理由としては、本研究で用いた日中の学習用データの大部分が $\mu=0.10$ 程度の凍結路面、 $\mu=0.30$ 程度の圧雪路面または $\mu=0.50$ 以上の非積雪路面で得られたデータを基に作成されたものであり、それ以外の条件下で得られたデータを基に作成した学習用データの数は限られているためであると考えられる。このため、 μ の推定精度を改善するためにはより多様な路面雪氷条件下で路面画像および路面すべりやすさデータを収集し、学習用データを追加することが必要であると推察される。なお、本ケースの全区間における μ_{inf} の RMSE は 0.135、 μ_{obs} と μ_{inf} の差の絶対値が 0.125 未満であった場合を推定的中としたときの推定的中率は 73.1%であった。

図 3 は 2020/2/12 夜間の一般国道 231 号における μ_{obs} (図中●) と μ_{inf} (図中実線) の空間分布を示す。本検定用データの計測時の路面状態は約 15km 地点では凍結路面、それ以外の区間では湿潤路面であり、凍結路面における μ_{obs} は 0.30 以下、湿潤路面における μ_{obs} は 0.60 から 0.80 程度の値であった。 μ_{inf} は μ_{obs} と同様に大部分の区間で 0.80 程度の値となったが、計測起点から 1~6km 区間および 16~22km 区間などでは μ_{inf} が局所的に 0.10 から 0.35 程度まで低下し、 μ_{obs} と比

較して大幅に小さくなる現象が見られた。本ケースの全区間における μ_{inf} の RMSE は 0.169、 μ_{obs} と μ_{inf} の差の絶対値が 0.125 未満であった場合を推定的中としたときの推定的中率は 63.7%であった。

本ケースで見られた μ_{inf} の局所的な過小評価は、道路照明灯の反射光などが原因の 1 つになっていると考えられる。一例として、図 4 に計測起点から約 17km 地点で発生した μ の過小評価例を示す。本画像中の図中枠内の領域における μ_{obs} は 0.70 であったが、同領域の画像を用いて推定された μ_{inf} は 0.20 であった。図中枠内の領域に映っている路面は道路照明灯により照らされており、同領域の画像の明度は図中左側の雪氷路面における画像の明度と同程度である。このため、CNN による推論では、入力画像の特徴が雪氷路面に類似していると判別され、その結果 μ_{inf} が低い値になったと推察される。道路照明灯の反射光などが μ の推定に及ぼす影響を軽減するためには、道路照明灯で照らされていない範囲の路面画像を CNN の入力として用いるなどの手法が考えられる。

5. 結論

本研究では、冬期の路面すべりやすさを安価、簡単かつ精度良く把握するために、深層学習の一手法である CNN (畳み込みニューラルネットワーク) を用いて路面を撮影した画像からすべり摩

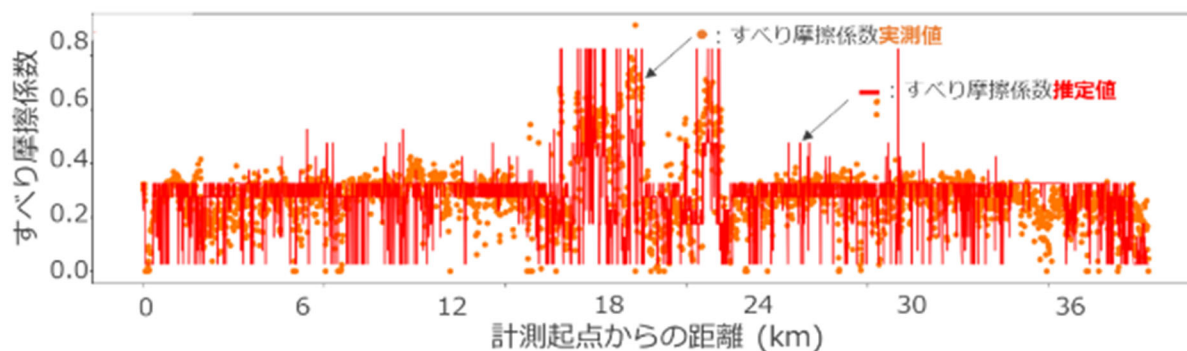


図2 2019/2/8 日中の一般国道 231 号における路面すべり摩擦係数の実測値および推定値

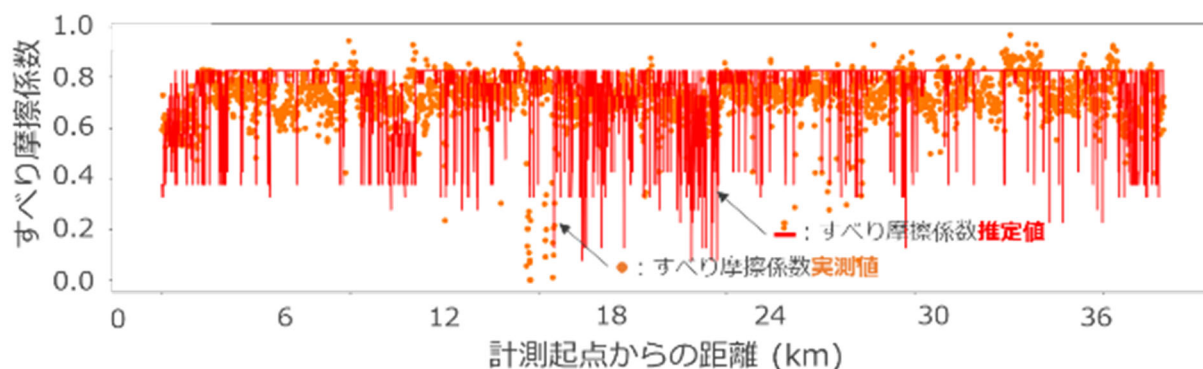


図3 2020/2/12 夜間の一般国道 231 号における路面すべり摩擦係数の実測値および推定値

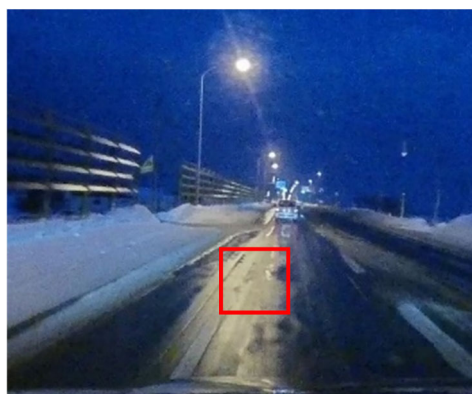


図4 路面すべり摩擦係数の過小評価例
($\mu_{inf}=0.20$, $\mu_{obs}=0.70$)

擦係数を推定する手法を開発し、推定精度について基礎的な検証を行った。その結果、本手法を用いることで路面すべり摩擦係数を把握できる可能性があることが示唆された。一方で、本手法では学習用データの偏りや道路照明灯の反射光などの影響などにより路面すべり摩擦係数の推定精度が低下する現象が見られた。今後はより多様な路面雪氷条件下で路面画像および路面すべり

やすさ実測値を収集し学習用データの拡充を行うとともに、道路照明灯などの有無によらず精度良く路面すべり摩擦係数を推定する手法の開発を行い、路面すべり摩擦係数の推定精度向上を試みる。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会, 2007: 舗装調査・試験法便覧, [1]-92-[1]-97.
- 2) 舟橋誠, 徳永ロベルト, 高橋尚人, 葛西聡, 2008: 冬期路面のすべり抵抗値計測試験について, 北海道の雪氷, **27**, 57-60.
- 3) 舟橋誠, 徳永ロベルト, 浅野基樹, 2007: 連続路面すべり抵抗値測定装置 (RT3) の導入について, 北海道の雪氷, **26**, 5-8.
- 4) Mark Sandler, Andrew Howard, Menglong Zhu, Andrey Zhmoginov, Liang-Chieh Chen, 2018: MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*.

除雪車運転支援システムの開発

～準天頂衛星システムを活用した作業ガイダンスモニター～

渥美 尚大¹, 臼井 和絵¹, 栗原 啓伍², 河村 祐²
Naohiro Atsumi¹, Kazue Usui¹, Keigo Kurihara², Yu Kawamura²
Corresponding author: n.atsumi.aa@e-nexco.co.jp (N. Atsumi)

雪氷作業は、視界不良や夜間等の厳しい作業環境下、熟練オペレータによる高度な技術と経験により行われている。一方、熟練オペレータの高齢化により技術伝承が困難な状況となっている。そこで、非熟練オペレータでも安全・確実に作業ができる環境構築のため、ロータリ除雪車運転支援システムの開発を行った。

1. はじめに

高速道路における除雪等の雪氷作業は、24 時間 365 日の道路交通確保のため視界不良や夜間等の厳しい作業環境下、熟練オペレータによる高度な技術と経験により行われている（図 1、写真 1）。一方、道路における更なる定時性の確保が強く求められることや、熟練オペレータの高齢化により技術伝承が困難な状況となっていることから、新技術を用いた雪氷作業を支援するシステムが求められていた。

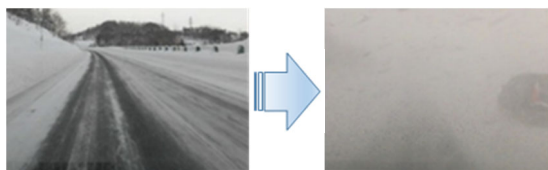


図 1 吹雪で前が見えづらい状況



写真 1 夜間の除雪作業

そこで、非熟練オペレータでも安全・確実に作業ができる環境構築のため、ロータリ除雪車運転支援システム（以下、“本システム”という）の開発を行った。また、除雪車は一般の乗用車や商業トラック等とは異なる特殊車両であり、単に自動車メーカーが開発したシステムを購入すれば運転支援システムが実現できるものではないことから、高速道路会社自らが企画立案して開発をリードしていく必要があった。

NEXCO 東日本グループにおいて 2013 年から本システムの研究開発に取り組んでおり、その内容を報告する。

2. 開発内容

準天頂衛星システム「みちびき」（以下、“「みちびき」”という）からの cm 級測位補強信号とあらかじめ作成した高精度地図情報を組み合わせ、除雪車の運転席に設置したモニターに正確な自車位置を表示し、運転操作を視聴覚的に支援するシステムを開発し実証した（図 2、3）。

これにより積雪でレーンマークが見えない状況や吹雪による視界不良等過酷な条件下でも、走行車線へのはみ出しやガードレール等への接触を回避し、複雑な運転操作を要する除雪作業に有効であることを確認した。



図 2 運転支援システムの概要



図 3 ガードレールや外側線の認識イメージ

¹ 東日本高速道路株式会社 北海道支社

² 株式会社ネクスコ・エンジニアリング北海道

Hokkaido Regional Head Office, East Nippon Expressway Co., Ltd.
Nexco-Engineering Hokkaido Co., Ltd.

主な開発内容は以下のとおりである。

2. 1 高精度測位方法の選定

視界不良や堆雪している条件下での運用が前提のため、市販自動車で一般的に用いられているカメラやミリ波レーダーの利用は困難と判断し、衛星測位システムにより位置情報を取得する方法を選択した。準天頂衛星システムの信号は、これまでの GPS 信号の受信が不安定であった山間部でも安定して受信が可能であり（図 4）、「みちびき」の cm 級測位補強信号に対応し高精度測位が可能な受信機（以下、“受信機”という）を用いることで、道路上の車両等の位置を正確かつ安定して把握できる有効な手段である。

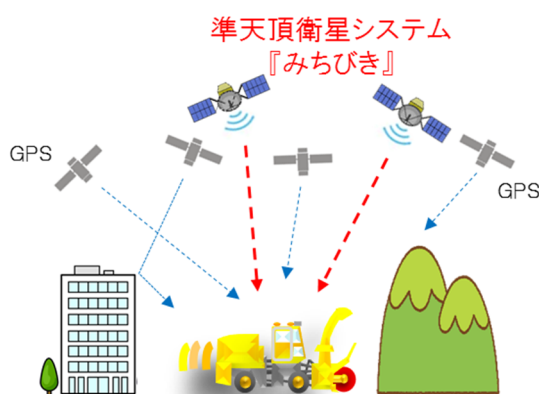


図4 受信イメージ

2. 2 高精度3次元地図の整備

正確な位置情報検出には高精度な地図情報が必要なことから、路肩外側線や縁石等の道路地物の3次元位置情報を測量にて取得した。取得した位置情報から縦断方向に1m毎の高精度3次元地図を作成し、本システムに登録した（図5）。



図5 高精度3次元地図の取得地物情報

2. 3 受信情報の補正

受信機で得られる測位情報は“受信した時点”における“アンテナ位置”の情報であり、本シス

テムを高精度に運用するために以下の補正を行う必要があった。

2. 3. 1 地殻変動補正

高精度測位情報は受信時点における位置（今期）である一方、地図は元期（北海道地域は1997.1.1基準日）の測量成果値を基準としているため、測位情報をそのまま利用すると地殻変動分の経年誤差が生じる。これを解消するため、国土地理院で公表されている地殻変動補正パラメータファイル geonetF3¹⁾（4回/年更新）を用いて受信時点（今期）の位置から地図の元期（1997.1.1）の位置へ変換し、地図との誤差を最小限とした（図6）。



図6 地殻変動補正のイメージ

2. 3. 2 傾斜補正

車体の傾斜によるズレをジャイロセンサ（IMUセンサ）により傾き角度を取得して、アンテナ位置取得座標に対し3次元座標の回転計算を行い、路面位置座標に変換することで地図に対し正確な自車位置を反映させた（図7）。

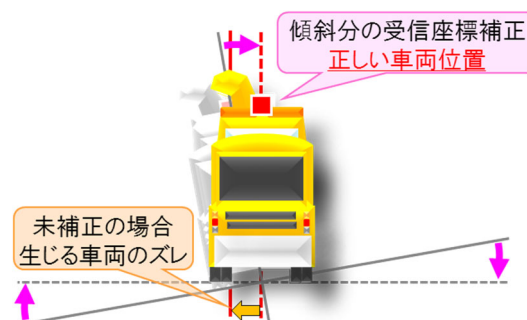


図7 傾斜補正のイメージ

2. 3. 3 進行方向補正

本システムではアンテナ 1 つでの運用を想定し、受信機の走行軌跡を繋げて進行方向を決定する方法を採用しているため、受信機固有の誤差から特に微低速時には軌跡間隔が狭くなることで進行方向誤差が大きくなる課題が生じた。対応策として、受信機の走行軌跡の角度変化量が大きい場合には、ジャイロセンサの角度変化量を正として進行方向を決定することで、進行方向の精度を全車速域において向上させた（図 8）。

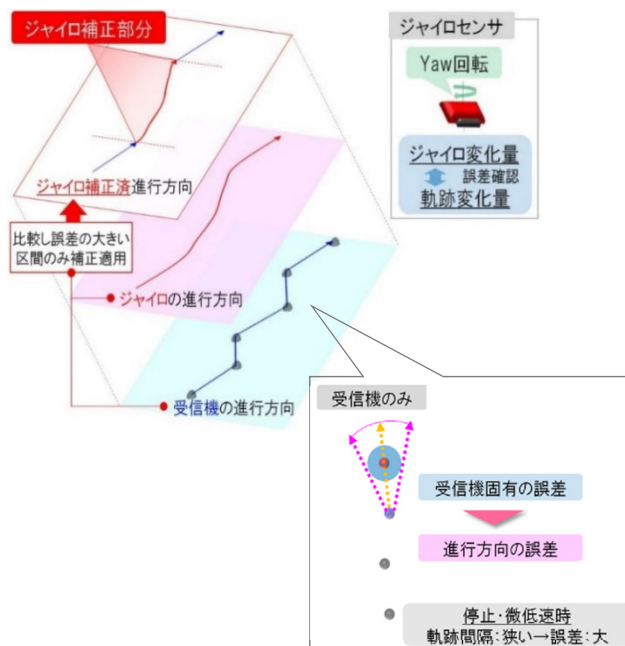


図 8 進行方向補正のイメージ

2. 3. 4 モニター表示・警告内容

実際に除雪作業するオペレータへのヒアリング結果から必要情報を整理し、モニター表示を検討・改良し、警告音を出力させた（図 9）。①の部分には外側線からの余裕幅を表示し、はみ出した場合は赤色で表示し警告音が鳴る。②の部分には排水マスや非常電話などのシューター等の除雪装置操作に関わる注意情報を 10m 手前から表示する。

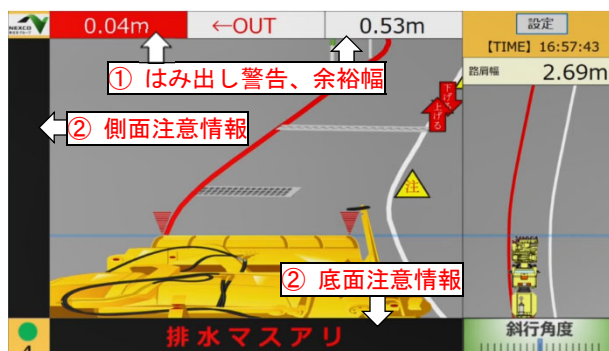


図 9 運転支援システムのモニター映像

3. 有用性の検証

2020 年 10 月における横断方向の誤差精度は、夕張テストコース（以下、「夕張 TC」という）にて行った実験の結果 $\pm 13\text{cm}$ （注 1）であり、北海道支社で設定したシステム全体の誤差目標値 $\pm 20\text{cm}$ 以内を満たすことから、実用可能と評価した。なお、本システムについては 2021 年 3 月に岩見沢（管）の一部区間にて試験運用を行っている（写真 2）。

（注 1）実験条件：[日付]10/15, [コース]直線～曲率半径 R100, [回数]2 周結果（図 10, 図 11（次頁））



写真 2 岩見沢（管）での試験運用の様子



図 10 有用性の検証

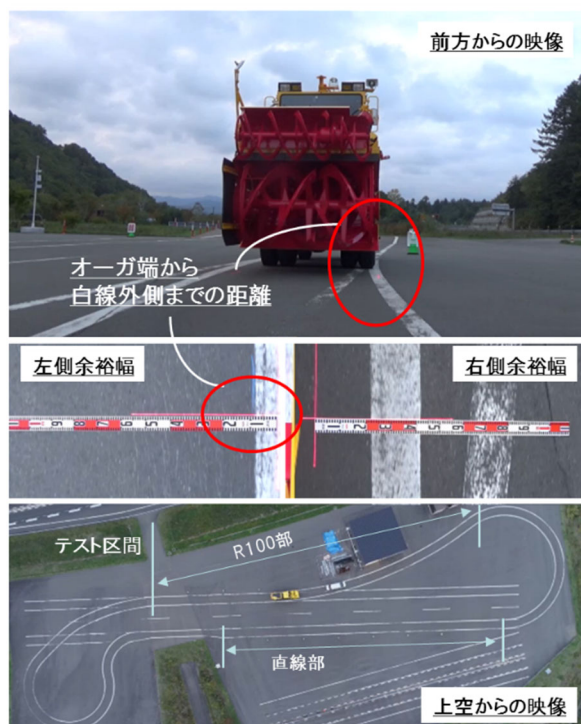


図 11 有用性の検証

4. 今後の展開

本システムによる正確な位置情報をベースに次のステップとしてロータリ除雪車の自動化に向けて、自律走行ならびに除雪作業の自動化の開発を車両メーカーと連携して進めている。また、2020年9月に夕張TCにて自律走行を確認し、11月のマスコミ公開をはじめ内外部に現場公開をしている(図12)。引き続き、本線での自律走行確認や除雪作業の自動化を進め、2022年度の完成を目指す。



図 12 自律走行のマスコミ公開の様子

5. おわりに

本システムの開発により、除雪作業の省力化、効率化、安全性の向上が図られ、冬の高速道路の「安全安心」に繋がる。更には、本システムの実用拡大はもとより、道路維持管理分野での新たな衛星利用の展開が期待でき、労働者不足や熟練オペレータの高齢化、また、現在のコロナ禍での作業環境等の課題への対応が可能になるものである。本システムを含む北海道支社が手掛ける雪氷対策高度化システムを「ASNOS (アスノス) (注2)」(図13, 写真3)と総称し、今後も各種開発に取り組んでいく。



図 13 ASNOS ロゴマークと PV の QR コード



写真 3 ロータリ除雪車 ASNOS ロゴマーク

(注2) **A**dvanced/**A**utonomous **S**now and ice control **O**peration **S**ystem の略で、「明日(未来)の雪氷対策高度化システム」を称する。

本研究にあたり、ご協力いただいた関係各位に感謝を申し上げる。

【参考文献】

- 1) 国土地理院：定常時地殻変動補正システム POS2JGD 計算サイト
<https://positions.gsi.go.jp/cdcs/>
(2020年5月31日閲覧)

車載カメラ静止画像と CAIS を組合せた 冬期路面状態を面的に判別するシステムの開発

Development of a road surface condition estimation system that combines road images and CAIS

大廣 智則^{1,2}, 高瀬 智之³, 高橋 翔⁴, 萩原 亨⁴, 岩崎 悠志⁵, 森 徹平⁵, 花塚 泰史⁵, 高橋 亮介⁶
Tomonori Ohiro^{1,2}, Tomoyuki Takase³, Syo Takahashi⁴, Toru Hagiwara⁴, Iwasaki Yuji⁵, Teppei Mori⁵,
Yasushi Hanatsuka⁵, Yusuke Takahashi⁶

Corresponding author (Current address): oohiro-t@ceri.go.jp (T. Ohiro)

北海道の高速道路では、スマート凍結防止剤散布システムを運用し、凍結防止剤散布量を低減している。このシステムでは、冬期路面状態判別の信頼性が重要であり、補完システムへの依存を軽減する必要がある。本研究では、車載カメラから得られた静止画像から冬期路面状態を面的に判別する 79%の精度を有する新たな画像識別器を開発した。画像のみと比べ、画像と CAIS を組合せた識別器により、精度が 15%向上できたことを明らかにした。

1. はじめに

NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路では、凍結防止剤を 100m 区間毎に自動散布するスマート凍結防止剤散布システムを運用し、凍結防止剤散布量を低減している¹⁾。また、凍結防止剤の散布方法を自動化する一方、補完システムを開発し、システム制御に組入れ、冬期道路交通の安全性が損なわれない冬期路面管理となるようなシステムとし実用化してきた²⁾。今後、散布量を更に低減するには、走行軌跡のみの CAIS³⁾の路面判別の課題を解消し、連絡員あるいは道路管理者による路面状態の再判定などの関与(補完システムへの依存)を軽減し、100m 区間散布の実施を可能とする場面を増やすことが必要である。

一方、筆者ら⁴⁾は、道路画像配信システムにより、道路管理者が雪氷巡回時の線的な路面積雪状況をリアルタイムに把握することで、巡回員と道路管理者が情報を共有し、効率的な雪氷作業を判断することができることを示している。また、国土交通省国土技術研究会⁵⁾や平井ら⁶⁾は、可視画像式路面センサが路面状態の変化を面的かつリアルタイムに把握でき、道路管理への展開が可能であることを明らかにしてきた。しかし、これらは CCTV カメラ等の定置式のシステムであり、車両など移動式への設置が検討されていない。

本研究では車載カメラから得られた静止画像(以降、画像)から冬期路面状態を面的に判別する新たな識別器を構築する。この画像の識別器と CAIS による判別結果を組合せることで画像のみのときよりも精度が向上することを定量的に示す。

2. 実験方法

2. 1 画像識別器

2. 1. 1 データセット

本実験で用いたデータは、2020 年 1 月 27 日から 31 日までに、道央道・札幌道・道東道・旭川紋別道で取得した。本実験で用いた画像を図 1 に例示する。Dry(乾燥), Semi-wet(半湿), Wet(湿潤), Slush(シャーベット), Snow(積雪・圧雪・凍結)の 5 種類を識別する路面状態とした。車載カメラより得られた画像の下部 2/3 を対象とした。データ数は、Dry:304 枚, Semi-wet:852 枚, Wet:620 枚, Slush:546 枚, Snow:1,774 枚, 全体:4,096 枚である。

2. 1. 2 画像識別器の構築方法

図 2 に示す手法で車載カメラから取得した画像から、冬期路面状態を面的に識別する画像識別器を構築した。画像識別器の構築は、3 つの Step で行った。まず、前項で取得した大量の画像データをコンピュータで AI に反復的に学習させた(図 2 (a))。

¹⁾ 株式会社ネクスコ・エンジニアリング北海道

²⁾ 現所属：土木研究所 寒地土木研究所

³⁾ 北海道大学大学院工学院

⁴⁾ 北海道大学大学院工学研究院

⁵⁾ 株式会社ブリヂストン

⁶⁾ 東日本高速道路株式会社 北海道支社

Nexco-Engineering Hokkaido Co., Ltd.,
Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Public Works Research Institute
Graduate School of Engineering, Hokkaido University
Faculty of Engineering, Hokkaido University
Bridgestone Corp.,
Hokkaido Regional Head Office, East Nippon Expressway Co., Ltd.,

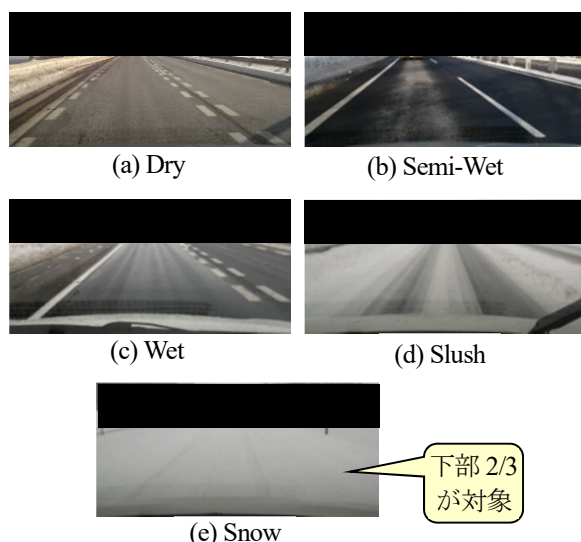


図1 本実験で用いた入力画像の例

次に AI がパターンを発見してそれに基づき識別モデルを構築した(図2 (b)). 最後に, 未知のデータから Step2 で構築した画像識別器を用いて冬期路面状態を自動識別した(図2 (c)).

画像識別器の構築には, ディープラーニングの手法である CNN⁷⁾を用いた. また, CNN の識別モデルは Mobile Nets⁸⁾を使用した. Mobile Net は CNN のソフトであり計算量が少ないという特徴がある. CNN は AI(機械学習)の一種であり, 畳み込み層とプーリング層を有し, 画像認識の分野で高い性能を持つことで知られている.

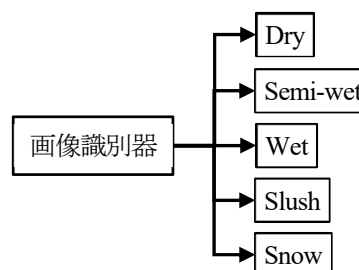
車載カメラより得られた画像の下部 2/3 を Mobile Nets を転移学習させて 5 分割交差検証法により路面状態を判別する識別器を新たに構築した.

2. 2 画像と CAIS を組合せた識別器

接触式センサと非接触式センサの良いところを組合せれば精度が向上すると仮説をたて, 図3に示す, 画像と CAIS を組合せた識別器を開発した. 画像識別器は前節で構築したものである. 画像識別器により 5 クラスに識別することが可能である. 一方, CAIS は, タイヤの内面に取り付けた加速度計とマイク, 路面温度データから, CAIS アルゴリズムにより 7 クラス(Snow を Snow cover, Compacted snow, Ice に分類)に判別可能である. 画像と CAIS を組合せた識別器は, 画像識別器による 5 クラスの解析結果と CAIS による 7 クラスの解析結果を機械学習のランダムフォレストで 5 分割交差検証法により得意な路面を担当させて路面状態を判別する手法である.



(a) STEP1 Training Data



(b) STEP2 Model



(c) STEP3 Estimation

図2 冬期路面状態を面的に識別するための画像識別器の構築方法

2. 3 評価方法

正解データに対する実験結果について, 真陽性, 偽陰性, 偽陽性, 真陰性の関係を図4に示す. ここで, 評価指標は, 適合率(Precision), 再現率(Recall), F 値(F-measure)があるが, Mobile Nets で構築した識別モデルは F 値(式(1))を用いて評価する.

$$F \text{ 値}(F - \text{measure}) = \frac{2 \times \text{再現率} \times \text{適合率}}{\text{再現率} + \text{適合率}} \quad (1)$$

3. 実験結果

3. 1 画像のみの路面判別精度

表1に画像のみの識別結果を示す. Mobile Nets を転移学習させて構築した識別器によって, 画像のみから路面状態を識別する精度は, F 値の平均で 0.782 であった. また, 表2に示す混同行列から, Dry と Wet の識別精度が低く, Semi-wet, Slush, Snow が高い. 特に Snow の精度が高い.

3. 2 画像と CAIS を組合せた路面判別精度

3. 2. 1 画像と CAIS の個別の精度

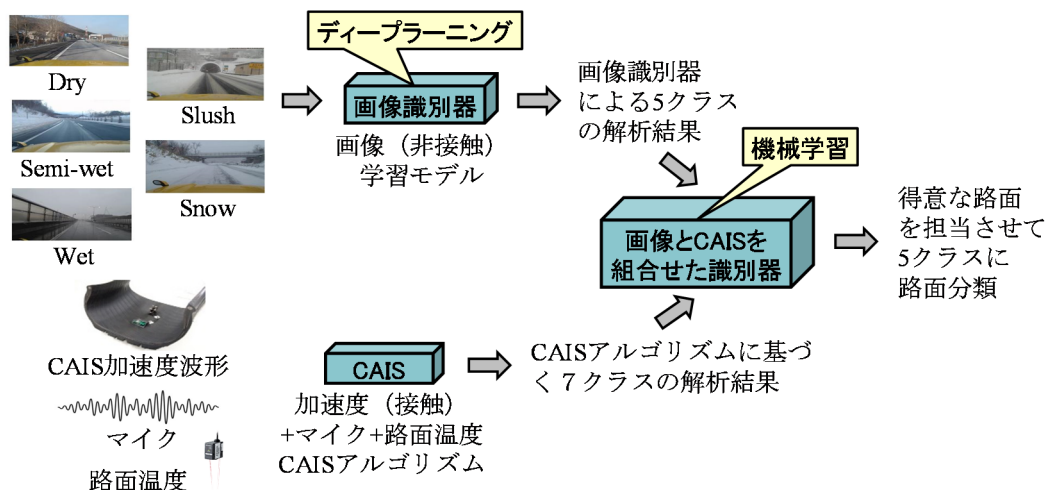


図3 画像とCAISを組合せた識別器の構築方法

実験結果

正解率	真陽性 TP	偽陰性 FN
	偽陽性 FP	真陰性 TN

図4 実験結果の真陽性・偽陰性・偽陽性・真陰性

表1 画像のみの識別結果

	Dry	Semi-wet	Wet	Slush	Snow	Ave
Recall	0.689	0.748	0.623	0.891	0.988	0.788
Precision	0.701	0.833	0.689	0.705	0.958	0.777
F-measure	0.694	0.788	0.654	0.787	0.973	0.782

表2 画像のみの混同行列識別結果

		Dry	Semi-wet	Wet	Slush	Snow	計
正解レベル	Dry	213	30	61	0	0	304
	Semi-wet	93	710	47	2	0	852
	Wet	2	180	427	9	2	620
	Slush	0	27	115	385	19	546
	Snow	1	2	35	36	1700	1774
	計	309	949	685	432	1721	4096

データセットは、前節と同一であるが、画像とCAISが関連したデータが必要なため、データセットの枚数が画像のみのときよりも383枚少なく、データ数は、Dry:304枚、Semi-wet:831枚、Wet:599枚、Slush:478枚、Snow:1,501枚、全体:3,713枚である。表3に画像とCAISの個別の混同行列識別結果を示す。画像識別器は、Semi-wet、Slush、Snowの成績が良く、CAISは、Dry、Wetの成績が良いことが

確認できる。

3. 2. 2 画像とCAISを組合せた精度

表4に画像とCAISを組合せた識別結果を示す。画像とCAISを組合せた精度は、F値の平均で0.931であった。画像識別器のみのF値は前記したとおり78%であったが、画像とCAISを組合せることで93%まで向上させることができた。また、表5に示す混同行列から、画像が苦手だったDryとWetの精

表3 画像とCAISの個別の混同行列識別結果

(a) 画像識別器
識別結果

		Dry	Semi-wet	Wet	Slush	Snow	計
正解レベル	Dry	213	30	61	0	0	304
	Semi-wet	87	696	46	2	0	831
	Wet	2	169	418	8	2	599
	Slush	0	25	100	337	16	478
	Snow	1	1	28	34	1437	1501
	計	303	921	653	381	1455	3713

(b) CAIS
判別結果

		Dry	Semi-wet	Wet	Slush	Snow	計
正解レベル	Dry	267	21	16	0	0	304
	Semi-wet	333	122	375	1	0	831
	Wet	0	0	599	0	0	599
	Slush	103	37	221	3	114	478
	Snow	460	9	4	1	1027	1501
	計	1163	189	1215	5	1141	3713

表4 画像と CAIS を組合せた識別結果

	Dry	Semi-wet	Wet	Slush	Snow	Ave
Recall	0.841	0.910	0.970	0.953	0.991	0.933
Precision	0.819	0.931	0.980	0.929	0.987	0.929
F-measure	0.830	0.920	0.975	0.941	0.989	0.931

表5 画像と CAIS を組合せた混同行列識別結果
識別結果

	Dry	Semi-wet	Wet	Slush	Snow	計
正解 レベル Dry	249	54	0	1	0	304
Semi-wet	44	774	11	2	0	831
Wet	0	10	587	1	1	599
Slush	1	13	7	444	13	478
Snow	2	0	0	18	1481	1501
計	296	851	605	466	1495	3713

度が向上している。苦手だった路面の精度向上にと
もない、全体的に精度が向上していることが確認で
きる。つまり、画像と CAIS を組合せた識別器は、
それぞれの得意な路面を担当させることで路面識
別精度を向上させることができている。

4. おわりに

走行軌跡のみの CAIS の路面判別を画像処理によ
る路面識別がカバーし、接触しなければ判らない凍
結路面の判別などを CAIS が担当することをコンセ
プトに、車載カメラ画像と CAIS を組合せた冬期路
面状態を面的に判別するシステムを開発した。本研
究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) 冬期間を通した検証はこれからであるが、
Mobile Nets に基づく画像のみで冬期路面状態を面的
に把握する 78%の精度を有する画像識別器を開
発した。

(2) 画像と CAIS による路面解析結果を組合せ、
それぞれの得意な路面を担当させる画像と CAIS を
組合せた識別器を開発することで、路面識別精度を
93%と向上させることを定量的に示した。

(3) 画像+CAIS は、冬期路面を面的に精度良く判
別することが可能である。

今後、夜間等 24 時間とおして冬期路面状態を自
動判別する識別器を構築する必要がある。また、デ
ータセットの充足により Snow を凍結・圧雪・積雪
と分けた判別、車線別(走行車線/追越車線)の判別、
画角の統一がなされていない場合の入力画像のエ

リア補正, Mobile Nets V2 や V3 の検討等, 手法構
築が必要となる。冬期路面状態判別の信頼性が向上
すれば、凍結防止剤散布量のさらなる低減が期待で
きる。

【参考文献】

- 1) 大廣智則, 高倉清, 桜庭拓也, 花塚泰史, 萩原
亨 (2019): 自動路面状態判別システムを活用
したスマート凍結防止剤散布システムの開発。
交通工学論文集, 5 (4(特集号 B)), B_7-B_15.
- 2) 大廣智則, 萩原亨, 花塚泰史, 高倉清, 中村広
美: 道路管理者と協調した凍結防止剤散布の低
減に資するスマート凍結防止剤散布システム
の開発, 日本雪氷学会誌「雪氷」, 第 82 巻, 6 号,
pp.299-316, 2020.11
- 3) 花塚泰史, 後藤嵩人, 若尾泰道, 中澤一真
(2015): 高度車両制御への適用を目指したタ
イヤ振動を用いた路面状態判別技術の開発。
公益社団法人自動車技術会 2015 年春季大会学
術講演会講演予稿集, 341-345.
- 4) Tomonori Ohiro, Shin Tozuka, Takeshi Kobayashi,
“ADVANCED SNOW AND ICE CONTROL
MEASURES FOR HOKKAIDO’S
EXPRESSWAYS “ XIII INTERNATIONAL
WINTER ROAD CONGRESS, Session T3-1,
Québec, February 8 to 11 (2010).
- 5) 国土交通省国土技術研究会 (2005): IT 技術を
活用した道路管理の効率化. 土木技術資料, 47,
40-45.
- 6) 平井節生, 牧野浩志, 山崎勲, 大久保康雄
(2005): 冬季道路管理業務への可視画像式路
面センサの活用. ITS シンポジウム, 4, 1-6.
- 7) LeCun, Y., Boser B.E., Denker J.S., Henderson D.,
Howard R.E., Hubbard W.E., and Jackel L.D.
“Backpropagation applied to handwritten zip code
recognition,” *Neural Computation*, Vol. 1, No. 4,
pp.541-551, 1989.
- 8) Howard, A.G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D.,
Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M. and Adam, H,
“MobileNets: Efficient Convolutional Neural
Networks for Mobile Vision Applications,” CoRR,
1704.04861, 2017.

感染症ならびに低体温症対策を施した寒冷期災害の避難施設に関する検討 Evaluation of evacuation facility considering infection and hypothermia for winter disaster

根本 昌宏¹, 尾山 とし子¹, 水谷 嘉浩²

Masahiro Nemoto¹, Toshiko Oyama¹, Yoshihiro Mizutani²

Corresponding author: nemoto@rchokkaido-cn.ac.jp (M. Nemoto)

予期せず発生する大規模災害は命を奪い健康を悪化させる。2010 年から断続的に検証してきた冬期の大規模避難所対策では、「保温」「加温」「換気」のバランスが重要であることを明らかにした。2020 年からは新型コロナウイルス感染症対策が必須となったが、この対策は我々が進めてきた低体温症対策と相通ずる部分が多い。本報告ではこれらを総括して積雪寒冷地域の災害対策を考察する。

1. 背景と目的

地震・津波、大雨・洪水。日本は地理的特性から毎年様々な災害に見舞われる。大規模災害は一瞬で我々の命を奪い、生活に多大なダメージを与える。防災の取り組みとして多いのは「難を避ける」ための避難行動である。リードタイムのある大雨災害には、事前にアラートを発信し、個々人の安全を守る行動を促すことは、令和3年度の災害対策基本法の改正にも盛り込まれた¹⁾。さらに高齢者等要配慮者の個別避難計画の作成に関する明文化は、令和元年東日本台風ならびに令和2年九州豪雨災害等の教訓を踏まえたものである。

大規模災害の被災後は、長期にわたる避難生活が待ち受けている。この中で、阪神淡路大震災から問題視されているものが災害関連死である。災害で助かったはずの命が、その後の避難生活で健康を害して命を亡くすというこの事案は、避難生活の厳しさを表すものである。発生要因は複雑で一つの施策だけで解決するものではなく、未だ方策が見いだせていない。

北海道・東北などの積雪寒冷地域はさらに厳しい問題を抱える。2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震により生じた全域停電(ブラックアウト)は、冬期に発生すると甚大な被害を生じる恐れがある。なぜなら避難所として指定されている小中学校などの大規模公共施設は、電気・灯油や重油を燃料とした暖房設備を使用しているからである。暖房は電気がなければ稼働しない。避難所だけでなく、個人の住宅、マンション等においても、停電と暖房停止はセットである。暖房

の停止によって、避難者の低体温症リスクを高めることは明らかであり、津波により衣服の濡れを生じた際にはさらに顕著となる。

さらに、2020年初頭から蔓延し始めた新型コロナウイルス感染症は、我々のこれまでの生活を一変させた。残念ながら感染症蔓延下でも自然災害は待ってくれない。国ならびに地方自治体は地域防災計画や避難所運営マニュアルの改訂を鋭意進め、これまでのところ避難所でのクラスター発生を許していない。

我々は2010年から冬期災害を想定した大規模避難所の設営・運営対策を断続的に検証し、問題・課題の抽出を行ってきた²⁾⁴⁾。数多くの失敗を繰り返す中で、避難生活に必要な最低限の質の確保方策が見えてきた。新型コロナウイルス感染症対策は我々が進めてきた低体温症対策と相通ずる部分が多い。本報告ではこれらを総括して積雪寒冷地域の災害対策を考察する。

2. 感染症ならびに低体温症を考慮した施設計画

2.1 避難生活の基本となるトイレ対策

人が生きるために、生理現象としての排泄は欠かすことができない。平時であれば、人は我慢せずにトイレに向かうが、災害時はその普段ができなくなる。市町村が定める地域防災計画の中で、トイレ対策は工事現場で使用されているような仮設トイレを基本としているところが多い。しかし仮設トイレは明かりがなく、ステップも3段あり、女性や足の不自由な方、小さな子どもたちが安全に行けるトイレとは言い難い。トイレに行き

¹⁾ 日本赤十字北海道看護大学 災害対策教育センター

Center for disaster management and education,
Japanese red cross hokkaido college of nursing
J-Packs Co. Ltd.,

²⁾ J パックス株式会社

たくなために水の摂取を控え食事を控え、これらが災害関連疾患の要因の一つとして寄与している可能性がある。

我々の検証の中で有用性が見出されているコンテナ型トイレは、胆振東部地震や令和元年東日本台風においても展開された（写真1）。



写真1 令和元年東日本台風で展開されたコンテナ型トイレ

このトイレは男性と女性に分かれているとともに多目的トイレを完備し、完全水洗式で明かりが煌々と灯り、暖房も稼働する。掃除も容易であり、感染症蔓延下では衛生に配慮したトイレ展開を実現できる。タラップ式のため足の不自由な方の使用が厳しいが、これを解決するには写真2で示すようなホーム式の設営が考えられる。



写真2 北見市の河川敷公園に設営されている移動式トイレ

北見市の常呂川河川敷に約20年前に設置されたこのトイレは、洪水発生時に移動ができるよう牽引部と車輪が付いている。このような仕組みで

平時運用ができれば、万が一の災害時に移動展開が可能となろう。防災用途のみでなく、普段使いの中に災害対策を盛り込むことで、災害時においても安心してほっとできるトイレ空間を創り出すことにつながる。

2. 2 低体温症にも寄与する食対策

感染症ならびに低体温症の両方に有効な対策が食事である。旧来の災害時の食と言え、おにぎり、菓子パンならびにカップラーメンである。栄養素は偏り、便秘がちになり、必要とするカロリーも摂れない。嚥下の難しい高齢者や、アレルギー対策も軽視される。災害時においても、可能な限り炊き出し設備を稼働させ、野菜の入った温かいスープを提供することは、体温を上げ、免疫を活性化することにつながる。我々は厳冬期災害演習においてバス型キッチンカーの有用性を検討したり、真冬環境においても400人分の食事を約3時間で炊きだすことが分かった。寒冷期の屋外の炊き出しは運営スタッフに過大な労力を強いる。さらに保健所の許認可が得られた衛生設備であることも重要である。平時には観光地におけるグランピングのような用途に、有事には被災者の命を護る用途に活躍することが望まれる。

2. 3 生活ならびに就寝空間の対策

ブルーシートに毛布一枚の避難所から、最近は段ボールベッドや紙管パーティションが展開される避難所に変わりつつある。2020年からはこれに感染対策が必須となった。

段ボールベッドは床面から35cm距離を置くことで、床からの接触感染を防ぐとともに、ほこりの吸引や床面の風の流れから逃れることができる。国のコロナ対策補助金もあり、感染症の蔓延に伴い市町村自治体においては数多くの簡易ベッドの備蓄が進められている⁹⁾。ベッドとともに不可欠の資材となったものがパーティションである。ベッドに座った状態では、高さ140cm以上のパーティションが有効であるが、逆に160cm以上になると保健師を始めとする健康と安全を守る職員の目が届きにくくなる。適度な高さのパーティションであることと、家族構成に合わせて専有面積を可変できるものであることがパーティションには求められる。

就寝時にはさらに注意を要する。人は仰臥位で寝ることで咳が出やすくなる。就寝状態で咳を



写真3 段ボールベッドと段ボールパーティション

するとパーティションを容易に超えて周囲への拡散が危惧される。写真4に示したのは、顔を覆う段ボールのカバーである。これを設置することで就寝時にマスクをする必要がなくなる。さらに、周りからの音が聞こえにくくなるとともに、明かりも遮断されることから、避難所の集団生活下でも寝やすくなる。感染症下に限らず、顔を覆う段ボールの有用性が期待される。



写真4 段ボール顔カバー（はこマスク）

加えて、写真4には令和元年東日本台風でも使用された電気毛布とマットレスが展開されている。段ボールベッド単体では硬さにより背中への痛みを感じるがあるが、マットレスによって軽減され、さらに電気毛布は気温が低くても一人ひとりを加温してくれる。電気毛布に必要な電力は25~70Wと暖房機器に比べてかなり低いため、貴重な電力を効率良く使用することにもつなが

る。写真5は、2021年1月に北海道庁が実施した避難所検証において展開した水素燃料電池車（MIRAI）である。この車はマフラーから水蒸気しか発しないため、一酸化炭素中毒になる心配がない。左下に見えるユニットにより6kWの電力を一晩中供給することができる。すなわちこの車一台のみで100人分の電気毛布を提供することが可能となる。



写真5 水素燃料電池車と電力供給ユニット

停電した際、避難所用の電源は、ガソリンを使用した小型自家発電機が一般的であるが、ガソリンタンクの容量が小さく、施設管理者が絶えず見回りをしてガソリンの供給を続けなければならない。供給時にはすべての電源をオフにする必要性もある。水素燃料電池車をはじめ、プラグインハイブリッド自動車や電気自動車などは、持続的に長時間の運用ができる電源ユニットであり、平時に移動手段で使用している車両を有事には避難所の電源対策として計画されることを希望する。

2. 4 換気と暖房対策

感染症対策において換気は欠かせない。しかし、換気をすることは暖気を外に逃がすこととなり施設内は寒冷化してしまう。従来から使用されている開放型のストーブは室内の酸素を使用して暖気を放出することから、室内には副産物として二酸化炭素が充満することとなる³⁾。冬期の暖房対策と換気は相反する事案であり、解決策を導くことが難しい。

我々は開放型ストーブの課題を解決するために熱交換式ジェットヒーターの展開について検証を続けてきた（写真6）⁷⁾。



写真6 熱交換式ジェットヒーター

このヒーターは外気をバーナーで温め、バーナーから生じる二酸化炭素は屋外に放出し、室内には新鮮な温められた空気のみが送り込まれる。すなわち、暖房からの二酸化炭素問題を解決するだけでなく、室内の避難者が生じる呼気を新鮮な空気へと置換する換気扇の役目も果たしてくれる。実際に避難所で導入された事案はないが、感染症蔓延下の冬期避難所において有用な資機材となる。

3. 感染症蔓延下の冬期避難を実現するために

感染症の蔓延により、避難所対策の向上が求められている。令和2年九州豪雨では、密を避けるため多くの避難所が満員となった。一人ひとりの専有面積に対して避難者数を制限することは、生活の質の向上に寄与し、避難所が一定数で満員となることは当然のことであろう。

避難生活は避難所には限らない。安全な場所に存立する家であれば自宅での避難すなわち在宅避難が考えられる。普段から自分の愛用しているベッドや枕で就寝できること、家族のプライバシーが守られることは避難生活をより良いものとする。しかし、在宅避難においても2.1で記述したように断水時のトイレ対策がなければ避難所に行かざるを得なくなる。飲料水や食事についても同様である。行政のみに依存せず、在宅避難を可能にする自宅対策を進めることが感染症蔓延下にこそ必要である。

避難所に避難する際、一人ひとりの感染対策も欠かせない。マスクや消毒用エタノールをはじめ、

下靴からの汚染（特にトイレ）を防ぐための上履き、持病のための常用薬、さらにはワクチンの接種済書も避難時には必要となる。万が一自分が自宅療養や濃厚接触者となっている場合には、保健所からの指示を受ける必要がある。避難所においてクラスターを発生させないためには、避難所のルールを順守することも大切で、運営と避難者とのより良い関係性が求められるであろう。

自然災害は防げない。北海道庁危機対策課が啓発するように、「まさかは必ずやってくる」。さらに、大規模災害は必ず想定を超えてくる。津波発生予想時など、数秒単位の速やかな判断を求められる事案は、訓練なしでは体が動かない。新型コロナウイルス蔓延下であるからこそ、万が一を想定し、一人ひとりに生じるリスクを想像し、何か一つでも対策を施しておくことが大切であろう。柔軟性のある避難生活の質の向上によって、発災後の健康を守る仕組みづくりが進むことを願う。

【参考文献】

- 1) 内閣府, 2021: 災害対策基本法等の一部を改正する法律（令和3年法律第30号）
- 2) 根本昌宏, 尾山とし子, 高橋修平, 2013: 寒冷地の冬期被災を想定した実証的災害対策への取り組み, 北海道の雪氷, **32**, 74-77.
- 3) 根本昌宏, 尾山とし子, 2014: 冬期被災を想定した体育館型避難所演習の実践内容に関する考察, 寒地技術論文・報告集, **30**, 122-127.
- 4) 根本昌宏, 尾山とし子, 山本美紀, 水谷嘉浩, 2018: 無暖房の冬期大規模収容避難所において睡眠に影響する因子, 寒地技術論文・報告集, **34**, 51-56.
- 5) 根本昌宏, 尾山とし子, 水谷嘉浩, 2020: 厳冬期災害に対応した防寒型避難所の展開・支援策の検討, 寒地技術論文・報告集, **36**, 71-76.
- 6) 内閣府, 2021: 避難所における新型コロナウイルス感染症への対応に関するQ&A（第3版）について
- 7) 根本昌宏, 水谷嘉浩, 2019: 冬期の避難所におけるダクトヒーターを用いた暖房方法の有効性と安全性, 寒地技術論文・報告集, **35**, 102-107.

コロナ禍における雪かきボランティアの受入意向からみる諸課題

Expectations and Concerns of Persons Needing Support about Snow Removal Volunteer Activities under the COVID-19 Pandemic

小西 信義¹, 筒井 一伸²

Nobuyoshi Konishi¹, Kazunobu Tsutsui²

Corresponding author: konishi@decnet.or.jp (N. Konishi)

2020-2021 年冬季, コロナ禍での雪処理をどう進めていくか, 特に地域外からの雪かきボランティアを受け入れている地域は, 降雪前から雪かきボランティア受入についての悩みを抱えていた. そこで, 寒冷積雪期直前の雪かきボランティアの受入意向について, 雪かきボランティアを必要とする世帯を対象とした調査を実施した. 結果, 雪かきボランティアの居住地が遠方になればなるほど, 「来てほしい」の割合が減り, 「来てほしくない」の割合が顕著に増え, 今後の広域的な雪処理支援の再構築に向けた課題が浮かび上がった.

1. はじめに

2020-2021 年冬季, 我々はコロナ禍での寒冷積雪期をはじめて経験した. 降雪前から, 共助除雪をどう進めていくか, 特に地域外からの雪かきボランティアを積極的に受け入れて共助除雪を進めている地域から, 著者らは相談を受けていた.

筆者らはその課題に着目し, 寒冷積雪期直前の雪かきボランティアの受入意向について, 雪かきボランティアを必要とする世帯を対象としたアンケート調査を実施した. その結果として, 雪かきボランティアの居住地が遠方になればなるほど, 「来てほしい」の割合が減り, 「来てほしくない」の割合が顕著に増えていることを小西ら¹⁾にて報告した.

本稿では上記調査結果について属性別等のクロス集計を行うことで, コロナ禍における広域的な共助除雪体制を提示し, その体制を構築するための課題を抽出することを目的とする.

2. 調査概要

本アンケート調査の実施概要については以下のとおりであり, 詳細は小西ら¹⁾を参照いただきたい. また, 調査対象地域の最深積雪深や調査当時の感染症警戒ステージ等については次頁表 1 で記す.

調査時期: 2020 年 11 月末 (一部 12 月中旬)
調査対象地域: 1 道 5 県 12 市町村
調査方法: 調査対象地域の代表者・担当者に調査協力依頼を行い, 郵送法や聴き取り調査

など調査手段は地域ごとの裁量に委ねた.

調査項目: 性別・年齢の基礎情報, 雪かきボランティアの希望の有無, 雪かきボランティアの募集範囲の意向, 昨冬までの雪かきボランティアをしてもらった箇所, 昨冬までの雪かきボランティアとの交流内容, その他雪かきボランティアを受け入れることで気になること

3. 調査結果

①回答者の居住地

群馬県, 山形県の順に計 127 件の回答があった (図 1). 7 割以上は「国警戒ステージ 1」相当の警戒レベルの段階での回答であったが, 2020 年 11 月末頃は地域によって警戒ステージの段階が引き上げられ, 移動自粛の程度に違いが生じ出した時期でもあった.

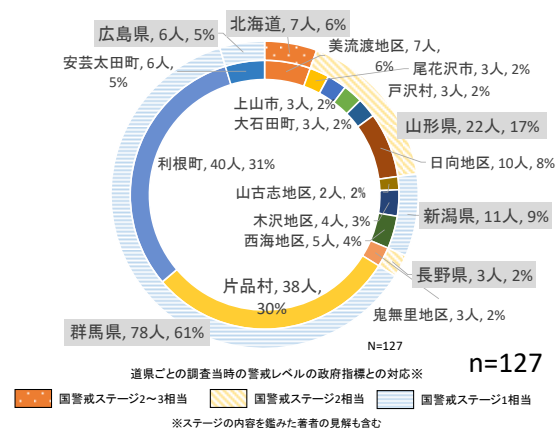


図 1 回答者の居住地

¹北海道開発技術センター

²鳥取大学 地域学部 地域創造コース

表1 対象地域の概要と調査方法

	調査地区	2月の最深積雪(平年値)	観測地点	調査時期	アンケート時の道県ごとの警戒ステージ	政府指標との対応(ステージの内容を鑑みた著者の見解も含む)	ステージの内容	自粛の程度	調査方法
北海道	美流渡地区	119cm	岩見沢	11月下旬	北海道警戒ステージ3(11月7日～)(札幌市は警戒ステージ4相当(11月17日～))	国ステージ2	感染者がさらに増加し、医療提供体制への負荷がより一層高まる段階(札幌市は、「感染者の急増及び医療提供体制における大きな支障の発生を避けるための対応が必要な段階」)	【札幌市】不要不急の外出自粛・市外との不要不急の往來を控える 【北海道】札幌市との不要不急の往來を控える	町内会役員が分担して聴き取り
山形県	尾花沢市	134cm	尾花沢	11月下旬	山形県注意・警戒レベル3【警戒】(11月26日～)	国ステージ2	感染の広がりが懸念される状態	注意喚起を実施。ただし、県民に対する自粛・休業要請等は実施しない	社協職員による聴き取り調査
	山市	45cm	山形	11月下旬					社協職員による聴き取り調査
	大石田町	134cm	尾花沢	11月下旬					社協職員による聴き取り調査
	戸沢村	120cm	新庄	11月下旬					社協職員による聴き取り調査
新潟県	日向地区(升田、大台野、上草津)	123cm	金山	12月中旬	山形県注意・警戒レベル4【特別警戒】(12月11日～)	国ステージ2	感染が拡大傾向にある状態	政府指標のステージ3の状態にある地域との不要不急の往來は、できる限り控える	民生委員による聴き取りもしくは手交後の回収
	木沢地区	193cm	小出	11月下旬	新潟県注意報(11月11日～)	国ステージ1	状態を表現する表現無し	注意喚起を実施。ただし、県民に対する自粛・休業要請等は実施しない	地域住民による手交後の回収
	西海地区	110cm	能生	11月下旬					地域支援員(市非常勤職員)が聴き取り
長野県	山古志地区	193cm	小出	11月下旬	長野県新型コロナウイルス注意報(11月13日～)(長野圏域は特別警戒(11月16日～))	国ステージ2	感染拡大に警戒が必要な状態(警戒)。感染が拡大しつつあり、特に警戒が必要な状態(特別警戒)	注意喚起を実施。ただし、県民に対する自粛・休業要請等は実施しない	地域NPO職員による手交後の回収
	鬼無里地区	96cm	白馬	11月下旬					住民自治協議会職員の電話による聴き取り調査
群馬県	利根町	150cm	みなかみ	11月中旬	群馬県警戒度2	国ステージ1	県内、都内ともに感染リスクが抑制されている	注意喚起を実施。ただし、県民に対する自粛・休業要請等は実施しない	独居高齢者等に社協職員(在宅介護、ホームヘルパー、デイサービス職員など)が聴き取り
	片品村	206cm	藤原	11月中旬					独居高齢者等に社協職員(ホームヘルパー職員)が聴き取り
広島県	安芸太田町	103cm	八幡	11月中旬	国ステージ1	国ステージ1	感染者の散発的発生及び医療提供体制に特段の支障がない段階	注意喚起を実施。ただし、県民に対する自粛・休業要請等は実施しない	社協職員と地区担当集落支援員で訪問しての聴き取り調査を実施

引用：小西ら(2021, 66)

②性別・年齢の基礎情報

回答者は6割以上が女性を占めた。80代・70代女性が全体の4割強を占め、70代男性が1割を占め、自宅の自助による雪処理が困難と思われる世代を中心に回答を得ることができた(図2)。

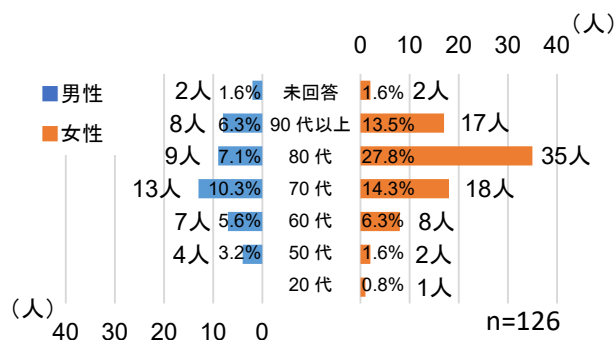


図2 回答者の性別と年代

③雪かきボランティアの希望の有無

回答者の7割以上が「来てほしい」という回答をした。回答者の年齢が高齢になるほど、「来てほしくない」と割合が増え(図3)、国警戒ステージが「1」の地域では全員が「来てほしい」と回答したが、「2」の地域では「来てほしくない」の割合が3割に増えた(図4)。

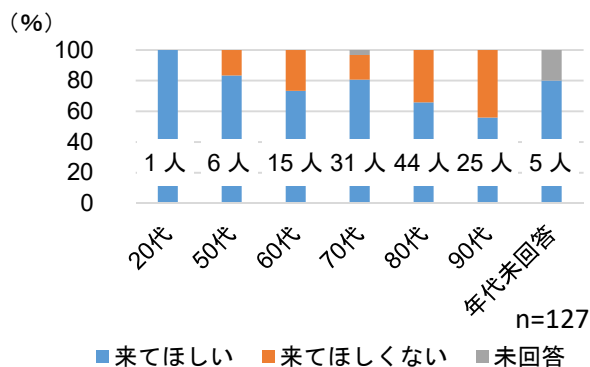


図3 年代別でみた
雪かきボランティアの希望の有無

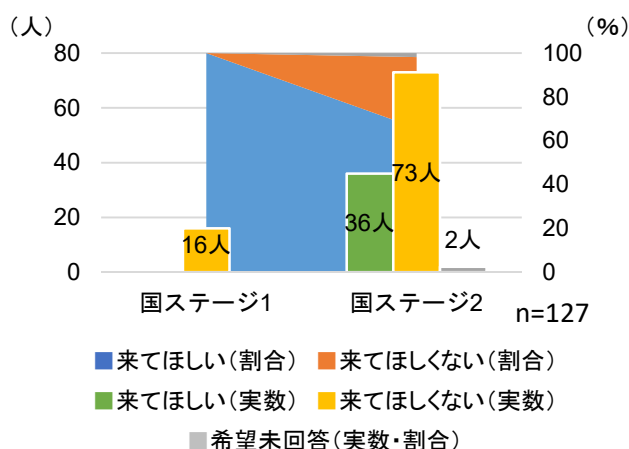


図4 回答者の居住地における国警戒ステージと
雪かきボランティアの希望の有無

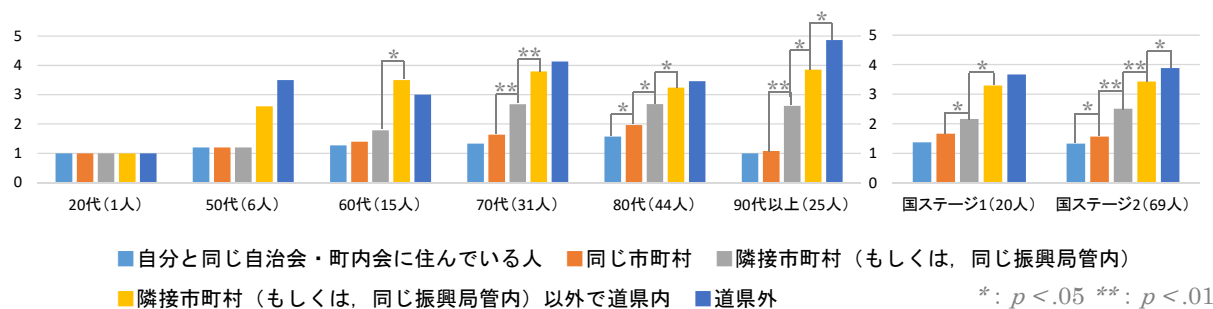


図5 雪かきボランティアの居住地の範囲（左年代別、右国ステージ別）

④コロナ禍でも許容するボランティアの居住地

雪かきボランティアの募集範囲の意向、言い換えればコロナ禍でも許容する雪かきボランティアの居住地の範囲を、5段階（1:「来てほしい」～5:「来てほしくない」）で尋ね、年代別・ステージ別でその平均値を図5に表し、隣接する藩域でt検定を行った。

年代別では70年代以降から、雪かきボランティアの居住地が遠くなればなるほど、受入に否定的な回答が有意に増えた。また、政府指標に準拠した警戒ステージ別では、特に、国警戒ステージ2の地域では募集範囲が広がるにつれ、否定的な回答が有意に増えた。

⑤昨冬までのボランティアによる除雪箇所

昨冬までに受けた除雪支援内容については、「窓下などの家屋の周辺」が8割近くを占めた。除雪支援ごとの経験別からみた除雪ボランティアの希望では、これまで雪下ろしの支援を受けた世帯においては除雪ボランティアを希望する割合が微増したが、全体としては経験別と受入希望の間に有意差は見られなかった（図6）。

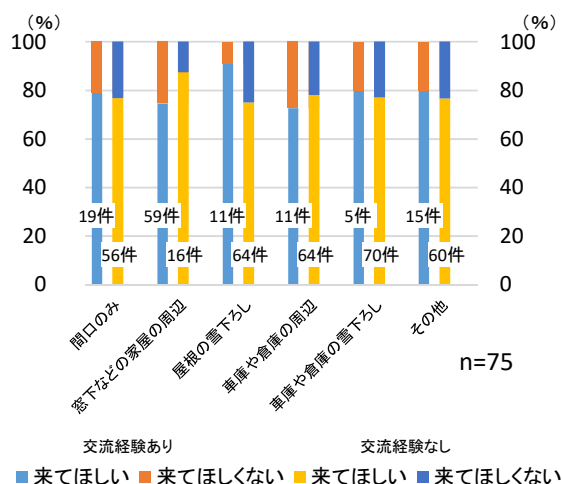


図6 昨冬までの雪かきボランティアの経験と雪かきボランティアの希望の有無

⑥昨冬までのボランティアとの交流内容

コロナ禍以前の雪かきボランティアとの交流の内容については、「雪かき前後の挨拶程度」が4割を超え、いわゆる濃厚接触とはなりにくい交流がこれまで行われたようである。交流の「経験あり」のほうが「経験なし」よりも、「来てほしい」の割合が高い傾向となった（図7）。

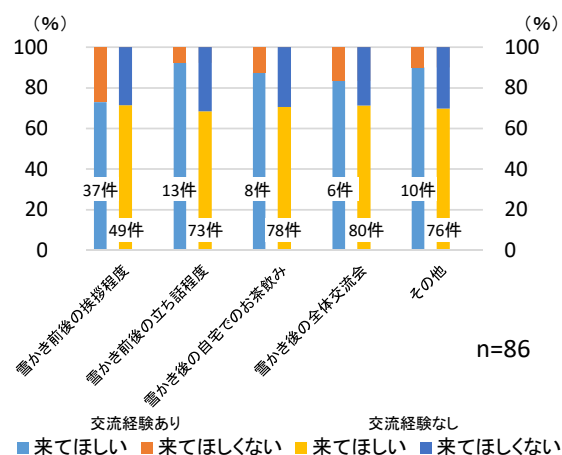


図7 昨冬までの雪かきボランティアとの交流内容と雪かきボランティアの希望の有無

4. まとめと今後の課題

4-1. アンケート調査結果のまとめ

雪かきボランティアの居住地が遠方になればなるほど受入に対して否定的な回答が増え、さらに、回答者の年齢・警戒レベルが引き上がるにつれ、上記の傾向はより顕著となった。重症化リスクの自覚や羅漢への警戒度の高まりが、除雪ボランティアを受け入れる心理的なハードルを高くすることを示唆する。

これまで受けた除雪支援内容によって、雪かきボランティアの希望の有無に対する影響は生じにくく、支援を受ける雪処理の程度は雪かきボランティアを受け入れるか否かの判断材料とはならないようである。

また、コロナ禍以前の雪かきボランティアとの交流の内容は「雪かき前後の挨拶程度」が大半で、一般的に見て濃厚接触とはなりにくい交流内容と言える。ただ、交流の「経験あり」のほうが「来てほしい」の割合が高く、特に、挨拶程度以上の接点のある交流内容では、「来てほしい」の割合が高くなることから、交流の親密さが受入の心理的ハードルを下げる効果として確認された。

4-2. 今後の諸課題

2021-2022 年度冬季もコロナ禍との共存が想定される中で、7 割にもなる雪処理ニーズをどのように充たすかが今後のもっとも大きな課題となる。本調査により、ある程度許容できる雪かきボランティアの募集範囲や交流機会が受入のハードルを下げる効果が見出されてきた。これらの成果をもとに、支援する側と支援を受け入れる側が互いに安心感と納得感が得られる「妥協点」を探っていくことが必要であると考えられる。

図 8 の通り、隣接市町村までの居住者の受入については肯定的な回答が占め、かつ「隣接市町村以外で県内の居住者」の範囲以上から「来てほしくない」の割合が顕著に増えたことから、隣接市町村以内／以外が雪かきボランティアの募集範囲の妥協点のひとつとなり得ると考えられる。

「隣接市町村以内」のボランティアについては、感染症予防対策を徹底する限り、ある程度納得感が得られると考えられる。一方、「隣接市町村以外」のボランティアについては、双方の感染症拡大状況が低リスクであることや、支援者／受援者を限定的にして実施するなどの対応が求められると思われる。

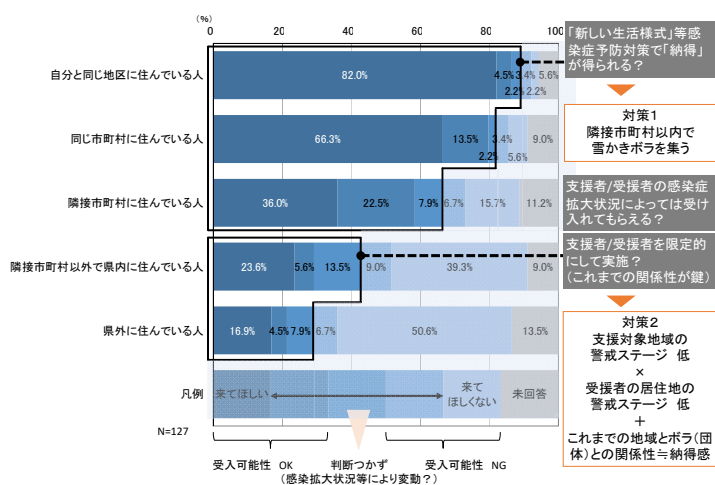


図 8 コロナ禍における共助除雪体制の検討

また、本調査から導かれる実践上の課題も指摘しておきたい。共助体制を再構築していくために、支援する側と支援を受け入れる側が互いに安心感と納得感が得られる「妥協点」を見出すことを指摘したが、具体的には 2021-2022 年冬期の雪処理の在り方について地域ごとに降雪前に議論を積み上げておく必要がある。議論すべき論点としては、「除雪ボランティアを受け入れるには、地域としてどのような基準(雪かきボランティアの募集範囲や感染症対策等)を設けたら良いのか?」^{注1)}、「どのように除雪ボランティアの受入に向け受援者と合意形成をしたらよいのか?」などが挙げられる。

さらに、研究上の課題として、今後、実際に雪かきボランティアを受け入れたのか、もしくは地域内共助をどのように再構築したかなどの今季の実態を把握する調査を行う予定である。

引き続き、コロナ禍においても雪処理の担い手をどのように確保するか模索していきたい。

【謝辞】

調査の実施にあたっては各地の関係する皆さまにご協力をいただきました。ありがとうございました。

【注】

- 1) 2020 年 10 月 12 日「with コロナ期における雪かきを考えるオンラインミーティング」での根本昌宏氏(日本赤十字北海道看護大学)による、「とにかくできることからやっていただきたい。できない理由を並べてしまうと(コロナ禍によって)何事もできなくなってしまう。支援者と受援者それぞれの感染症対策の考え方や裏付けを見出していただきたい」の言説を参考とした。

【参考文献】

- 1) 小西信義・筒井一伸, 2021: コロナ禍における雪かきボランティア～受入の意向に関するアンケート調査結果～, 日本雪工学会誌, 37, 64-67.

公益社団法人日本雪氷学会北海道支部 2020 年度事業報告

1. 支部総会の開催

開催形式：文書審議（メール審議）

審議期間：2020 年 5 月 7 日（木）～28 日（木）

主要議題：(1) 支部総会の文書審議について
(2) 2019 年度事業報告・収支決算報告
(3) 2020 年度事業計画（案）・収支予算（案）
(4) 2020 年度支部役員について
(5) 支部規約施行内規の改正

返信者数：51 名

2. 理事会の開催

第 1 回理事会

開催形式：文書審議（メール審議）

審議期間：2020 年 6 月 10 日（水）～17 日（水）

主要議題：(1) 評議員・顧問の選出
(2) 理事の役割分担の確認
(3) メーリングリストについて
(4) サイエンスパーク・ファンへの参加について
(5) 雪氷災害調査チームの活動予定

第 2 回理事会

開催日時：2020 年 8 月 3 日（月）15:30～17:40

開催場所：北海道開発技術センター（札幌市）・オンライン（zoom）

主要議題：(1) 2020 年度支部総会について
(2) 支部印章取扱規程について
(3) 地域講演会について
(4) 「北海道の雪氷」関連・発行準備状況について
(5) 2021 年度北海道支部総会等・研究発表会の日程と会場について
(6) 雪氷研究大会（2020・オンライン）の準備状況
(7) サイエンスパーク・ファンの状況
(8) 評議員の交代について

第 3 回理事会

開催日時：2020 年 12 月 9 日（水）15:30～17:55

開催場所：北海道開発技術センター（札幌市）・オンライン（zoom）

主要議題：(1) サイエンスパーク・ファンの報告
(2) 雪氷災害調査チームの活動について
(3) 地域講演会について
(4) 「北海道の雪氷」関連について
(5) 支部 HP 掲載内容の更新問題について
(6) 2021 年度北海道支部総会等・研究発表会の日程と会場について
(7) 2021 年度北海道支部予算について
(8) 2021 年度の役員体制について
(9) 2022 年度雪氷研究大会について

第4回理事会

開催日時：2021年3月24日(水) 15:30-17:30

開催場所：北海道開発技術センター(札幌市)・オンライン(zoom)

主要議題：(1)雪氷災害調査チーム活動報告
(2)地域講演会について
(3)次年度の総会・研究発表会について
(4)総会提示資料について
(5)2021年度役員案について
(6)2022年度雪氷研究大会について

3. 顧問・評議会の開催

2020年5月の開催を準備していたが、感染症に伴う社会情勢を鑑み中止することにした。

4. 研究発表会の開催

2020年5月の開催を準備していたが、感染症に伴う社会情勢を鑑み中止することにした。

5. 北海道雪氷賞の表彰

○2019年度北海道雪氷賞の表彰

2020年5月29日に、以下のとおり2019年度北海道雪氷賞の受賞者を決定。

受賞式は、2020年度北海道雪氷賞の授賞式と同時に開催する予定。

【北の風花賞】

受賞者：藤支良貴氏(北海道大学低温科学研究所、北海道大学大学院環境科学院)

論文名：「グリーンランド北西部ボードイン氷河前縁フィヨルドにおける
水温・塩分・流速の長期係留観測」

【北の六華賞】

受賞者：白川龍生氏(北見工業大学)

論文名：「機械学習を用いた積雪粒子画像の自動判定法」

【北の蛍雪賞】

受賞者：竹内政夫氏(NPO法人雪氷ネットワーク)

受賞名：「雪氷防災に関する社会貢献と啓発活動」

○2020年度北海道雪氷賞の選考

以下の通り、2020年度北海道雪氷賞を選考。

【北の風花賞】

受賞者：渡辺由梨加氏(北見工業大学大学院)

論文名：「AMSR2 データを用いた北極海一年氷の海氷厚推定アルゴリズムの改良」

【北の六華賞】

受賞者：下山 宏氏(北海道大学低温科学研究所)、日本雪氷学会北海道支部 雪氷災害調査チーム

論文名：「2020年冬季に北海道で発生した雪崩に関する一連の調査報告」

【北の蛍雪賞】

受賞者：前野紀一氏(北海道大学名誉教授)

受賞名：「雪氷物理学への功績、及び雪氷の面白さの普及啓発活動」

6. 機関誌「北海道の雪氷」39号の刊行

発行日：2020年9月24日
収録論文数：22件

7. 社会貢献事業

○雪氷災害調査チームの活動

- ・第12回研修会（オフシーズンミーティング）
2020年6月10日（水）
参加者：27名（ガイド部門15名、研究部門12名）
開催地：オンライン
- ・第28回講演会「雪崩から身を守るために」の開催
開催日時：2020年10月31日（土）10:00～17:30
参加者：350名
開催場所：北海道大学（札幌市）
主催：北海道大学体育会山スキー部・雪崩事故防止研究会・（公社）日本雪氷学会北海道支部
- ・雪氷災害調査チームプレシーズンミーティング
開催日時：2020年10月31日（土）17:30～19:30
参加者：27名（ガイド部門16名、研究部門11名）
開催場所：北海道大学高等教育推進機構 大講堂（札幌市）
- ・雪氷災害調査チーム記者会見 ※資料投げ込みに変更
開催日時：2020年11月20日（金）
開催場所：北海道庁 道政記者クラブ（札幌市）
- ・出動訓練研修会
開催日時：2020年12月7日（月）
参加者：23名（ガイド部門15名、研究部門8名）
開催場所：朝里岳周辺（札幌市）
- ・2021年1月26日に赤井川村のキロロバックカントリーで発生した雪崩調査
調査日時：2021年1月26日（火）
調査場所：北海道余市郡赤井川村 1107峰-969峰
調査内容：積雪断面調査等

○雪氷教育等

- ・「サイエンスパーク・ファン」への参加
開催期間：2020年7月20日（月）～8月31日（月）
場所：オンライン（北海道庁ウェブサイト上に各出展のリンク）
主催：北海道、（地独）北海道立総合研究機構
対象：小学生
出展内容：雪氷教育レシピの紹介、YouTubeチャンネルの開設と動画4本の公開

8. 支部ホームページの更新

- ・各種イベント（研究発表、主催・後援行事など）の告知
- ・「北海道の雪氷」公開

9. 北海道支部地域講演会

「ジュエリーアイスのサイエンス」と題した講演会の豊頃町での現地開催を企画・準備し、さらに感染症対策に伴う社会情勢を鑑みオンライン開催の検討も行ったが、オンラインでは参加者が限定される可能性があることと、地域講演会の目的である「雪氷」に関する啓蒙普及活動の観点から豊頃町での現地開催に意味があること等を勘案し中止することにした。

10. 雪氷関連行事の共催・後援・協力・監修（研究成果普及事業）

【後援】

・誌上シンポジウム 「気象災害に強い物流の確保に向けた展望」

開催時期：2021年2月22日(月)～3月31日(水)

開催方法：冊子PDFのホームページでの公開、希望者への配布

主 催：(一財)日本気象協会北海道支社

公益社団法人日本雪氷学会北海道支部 2021 年度事業計画

1. 支部総会の開催

開催形式：文書審議（メール審議）
審議期間：2021 年 5 月 10 日(月)～24 日(月)
主要議題：(1) 2020 年度事業報告・収支決算
(2) 2021 年度事業計画案・収支予算案
(3) 2021 年度支部役員について

2. 理事会の開催

第 1 回 理事会

開催形式：文書審議（メール審議）
審議期間：2021 年 5 月 31 日(月)～6 月 3 日(木)
主要議題：評議員・顧問の選出

第 2 回 理事会

開催日時：2021 年 6 月中旬または下旬
開催場所：未定(札幌市)・オンライン
主要議題：(1) 理事の役割分担の確認
(2) 今年度の支部活動について
上記を含み年 4～5 回開催する。

3. 顧問・評議員会の開催

開催日時：2021 年 6 月中旬または下旬
開催場所：未定(札幌市)・オンラインまたはメール審議
主要議題：今年度の雪氷学会北海道支部の活動予定について

4. 研究発表会の開催

開催形式：オンライン
開催日時：2021 年 5 月 28 日(金) 13:00～18:00

5. 北海道雪氷賞の表彰および受賞論文の選考

- ・北海道における雪氷研究の活性化のために、「北海道の雪氷（第 40 号：2021）」での投稿論文または支部活動への貢献者を対象として表彰を行う。
- ・表彰選考委員会、選考基準、受賞者の決定、授章は、支部表彰規程に従う。
- ・2020 年度北海道雪氷賞の表彰は 2021 年 5 月、2021 年度受賞論文の選考は「北海道の雪氷」の発行後に実施する。
- ・2019 年度北海道雪氷賞の授賞式は、2020 年度北海道雪氷賞の授賞式と同時に 2021 年 5 月頃執り行う。ただし、2019 年度北海道雪氷賞の賞状の日付は総会議案締切日の翌日（2020 年 5 月 29 日）とし、賞状と記念品の謹呈のタイミングは個別に対応する。

6. 機関誌「北海道の雪氷」40号の刊行
 - ・冊子体の有料化を継続する一方、電子媒体として支部ホームページ上に掲載する。
7. 社会貢献事業
 - 7-1 雪氷災害調査チームの活動
 - ・第13回研修会
開催日：2021年4月1日
開催地：赤井川村キロロスキー場付近
内 容：実技研修、ミーティング
 - ・第29回講演会「雪崩から身を守るために」
開催日：未定
開催地：未定
 - ・プレシーズンミーティングの開催
 - ・出動訓練研修会の開催
 - ・雪崩災害発生への随時対応
 - 7-2 雪氷教育等
 - ・サイエンスパークへの参加
開催日：7月29、30日（オンラインは7月中旬～8月末）
場 所：札幌駅前地下歩行空間、道庁赤れんが庁舎およびオンライン
主 催：北海道、地方独立行政法人北海道立総合研究機構（道総研）
内 容：ステージイベント、展示コーナー（簡単な科学体験や科学展示）、体験コーナー（教室形式の科学実験や工作体験など）およびオンラインコンテンツ
8. 支部ホームページの運営
 - ・雪氷関連情報の提供
 - ・会員向け情報の掲載
 - ・既存ホームページ項目、およびコラムやエッセイ等の充実
 - ・雪氷災害調査チームの活動報告
 - ・支部活動成果の紹介：支部関連雪氷イベントのポスター、リーフレットなど
会員向け情報（総会や講演会、研究発表会など）を支部ホームページに掲載する毎に、メーリングリスト（hokkaido@seppyo.org）を使って会員にその旨通知するサービスを継続する。
9. 地域講演会の開催
 - ・テーマ：「ジュエリーアイスのサイエンス（予定）」
 - ・開催時期：未定
 - ・会場：未定
10. 雪氷関連行事の共催・後援（研究成果普及事業）
 - ・研究成果普及事業の一環として、他分野や他組織による雪氷関連行事を共催又は後援する。

公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2020 年度収支報告

雪氷災害調査				2020 年度予算	2020 年度決算	備考
収入				700,000	600,000	
資産勘定(雪氷災害調査基金)からの繰入				0	0	
寄附金				700,000	600,000	
前期繰越金				0	0	
支出				700,000	217,835	
事業費 計				700,000	217,835	
1 調査・研究	調査	雪氷災害調査		700,000	217,835	
		旅費交通費		400,000	132,455	
		通信運搬費		20,000	0	
		消耗品費		120,000	17,380	
		印刷費		70,000	68,000	
		会議費		0	0	
		保険料		20,000	0	
		謝金		70,000	0	
		振込手数料			0	
収支差額				0	382,165	

雪氷災害調査以外				2020 年度予算	2020 年度決算	備考
収入合計				130,000	124,000	
当期収入				130,000	124,000	
事業収入	出版収入			130,000	124,000	
雑収入	受取利息			0	0	
	寄付金			0	0	
支出合計				417,300	176,209	
事業費				334,300	173,689	
1 調査・研究	調査	雪氷災害調査		-	-	
2 研究会研修会	研究発表会	支部研究発表会・支部表彰		126,800	0	感染症対策のため会中止
	研修会等	北海道支部講演会		27,500	0	
	普及・啓発	雪氷教育ほか		26,000	1,485	感染症対策のためサイエンスパークオンライン開催
	褒賞	北海道雪氷賞		23,500	22,440	
3 出版事業	支部等機関誌	北海道支部機関誌		130,500	149,764	
	その他出版物			0	0	
管理費				83,000	2,520	
	事務局費			60,000	0	
	会場費			19,500	0	
	支払手数料			1,000	0	
	雑費			2,500	2,520	
収支差額				-287,300	-52,209	

公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2021 年度予算

雪氷災害調査				2021 年度予算	2021 年度決算	
収入				700,000	0	
資産勘定(雪氷災害調査基金)からの繰入				0	0	
寄附金				700,000	0	
前期繰越金				0	0	
支出				事業費 計	700,000	0
1 調査・研究	調査	雪氷災害調査	700,000	0		
		旅費交通費	400,000	0		
		通信運搬費	20,000	0		
		消耗品費	120,000	0		
		印刷費	70,000	0		
		会議費	0	0		
		保険料	20,000	0		
		謝金	70,000	0		
		振込手数料		0		
収支差額				0	0	

雪氷災害調査以外				2021 年度予算	2021 年度決算
収入合計				130,000	0
当期収入				130,000	0
事業収入	出版収入			130,000	0
雑収入	受取利息			0	0
	寄付金			0	0
支出合計				423,440	0
事業費				340,440	0
	1 調査・研究	調査	雪氷災害調査	-	-
	2 研究会研修会	研究発表会	支部研究発表会・支部表彰	134,000	0
		研修会等	北海道支部講演会	27,500	0
		普及・啓発	雪氷教育ほか	26,000	0
		褒賞	北海道雪氷賞	22,440	0
	3 出版事業	支部等機関誌	北海道支部機関誌	130,500	0
		その他出版物		0	0
管理費				83,000	0
	事務局費			62,500	0
	会場費			19,500	0
	支払手数料			1,000	0
	雑費			0	0
収支差額				-293,440	0

公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2021 年度役員名簿

No.	職名		氏 名	所 属
1	理事	支部長	松澤 勝	(国研) 土木研究所 寒地土木研究所
2	理事	副支部長	的場 澄人	北海道大学 低温科学研究所
3	理事	副支部長	高橋 尚人	札幌市立大学
4	理事	庶務担当	松下 拓樹	(国研) 土木研究所 寒地土木研究所
5	理事	庶務担当	東 忍	(株) ネクスコ・エンジニアリング北海道
6	理事	会計担当	千葉 隆弘	北海道科学大学
7	理事	会計担当	永田 泰浩	(一社) 北海道開発技術センター
8	理事	広報担当	澤田 学	Code for Snow
9	理事	事業担当	今西 伸行	(株) ドーコン
10	理事	事業担当	大島 基	(国研) 産業技術総合研究所
11	理事	事業担当	石川 守	北海道大学 地球環境科学研究所
12	理事	事業担当	廣川 敬二	北海道電力(株) 総合研究所
13	理事	事業担当	舘山 一孝	北見工業大学 工学部
14	理事	社会貢献担当	山野井克己	(国研) 森林研究・整備機構 森林総合研究所 北海道支所
15	理事	社会貢献担当	日下 稜	北海道大学 低温科学研究所
16	理事	社会貢献担当	飯沼 弘一	野外科学 (株)
1	監事		高橋 修平	北海道立オホーツク流氷科学センター
2	監事		大槻 政哉	(株) 雪研スノーイーターズ
1	評議員		太田 広	(国研) 土木研究所 寒地土木研究所
2	評議員		早野 亮	(株) ドーコン
3	評議員		須田 力	NPO 法人雪氷ネットワーク
4	評議員		東海林 明雄	北海道教育大学 名誉教授
5	評議員		佐藤 隆光	(一財) 日本気象協会 北海道支社
6	評議員		阿部 幹雄	雪崩事故防止研究会
7	評議員		笹森 穰	北海道 総合政策部 地域創生局 地域政策課
8	評議員		浅井 義孝	札幌管区気象台 気象防災部
9	評議員		岡下 淳	北海道開発局 開発監理部 開発調整課
10	評議員		白岩 孝行	北海道大学 低温科学研究所
11	評議員		竹腰 稔	(一社) 北海道開発技術センター
12	評議員		村上 昌仁	(一財) 北海道道路管理技術センター
13	評議員		島村 昭志	北海道旅客鉄道(株) 鉄道事業本部
14	評議員		八木 直之	札幌市 建設局 土木部 雪対策室
15	評議員		田中 則和	北海道電力(株) 土木部
16	評議員		竹内 政夫	NPO 法人雪氷ネットワーク
17	評議員		阿部 勝義	東日本高速道路(株) 北海道支社 技術部 技術企画課
1	顧問		秋田谷 英次	NPO 法人雪氷ネットワーク
2	顧問		菊地 勝弘	北海道大学 名誉教授・秋田県立大学 名誉教授

公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 支部規程施行内規

(名称)

第1条 本支部は、公益社団法人日本雪氷学会（以下、「本学会」と記す）北海道支部（以下、「本支部」と記す）と称する。

(事業)

第2条 本支部は、本学会定款第3条に定めた本学会の目的達成に必要な次の事項を行う。

- (1) 雪氷及び寒冷に関する調査・研究.
- (2) 雪氷及び寒冷に関する研究会、講演会、展示会などの開催.
- (3) 支部会誌その他資料の刊行.
- (4) 本部理事会が委嘱又は承認した事項.
- (5) その他本学会の目的達成に必要な事項.

(会員)

第3条 本支部の会員は、北海道に在住する本学会の会員とする。また、他支部に所属する会員であっても、本支部に所属することを希望する場合は、重複所属することを妨げない。

(役員)

第4条 本支部に次の役員をおく。

支部長	1名
副支部長	若干名
支部理事	若干名
支部監事	2名

(支部長の選出)

第5条 支部長は、本学会定款施行細則第28条により本学会定款第20条に定める本部理事の中から本部理事会において選出される。

(役員を選出)

第6条 支部理事および支部監事は支部総会において、支部会員の中から選出する。

- 2 副支部長は、支部理事会の議決を経て支部理事から選出し、支部長がこれを委嘱する。

(役員の職務)

第7条 支部長は本支部を代表しその会務を総理する。

第8条 副支部長は支部長に事故ある場合、その職務を代行する。

第9条 支部理事会は、支部長、副支部長、支部理事で構成され、支部会務執行に必要な協議、支部事業の企画、会計ならびにその他の会務、および支部長候補たる本部理事の推薦を行う。

- 2 支部理事会は、文書審議理事会をもって代えることができる。文書審議理事会には電子メールによる審議を含む。
- 3 支部理事会は支部長が招集し、議長は支部長とする。
- 4 支部理事会は、支部理事の3分の2以上の出席がなければ開会することができない。但し、他の出席理事に表決を委任した者及び書面にて議決に参加した者、双方向通信により遠隔から参加する者は出席者とみなす。
- 5 支部理事会の決議は、決議について特別の利害関係を有する支部理事を除く支部理事の過半数が

出席し、その過半数をもって行う。

6 議事録は本内規第 14 条に定めるところによる。

第 10 条 支部監事は支部の事業ならびに会計を監査する。

(役員の任期)

第 11 条 支部長は本学会定款第 24 条に基づくが、候補者の推薦にあたって任期を 2 年、再任は 1 回に限り可能とする。支部長を除く役員の任期は 2 年とし、再任は 1 年単位で 2 年までとする。その他は本学会定款第 24 条の定めるところによる。

(顧問、評議員)

第 12 条 本支部に顧問および評議員を置くことができる。

2 顧問および評議員は支部理事会の議決を経て支部長がこれを委嘱する。顧問および評議員は本支部の発展に寄与するものとする。

3 評議員および顧問の任期は 2 年以内とし、支部理事会が決定する。再任を妨げない。

(総会)

第 13 条 本支部は毎年 1 回定時総会を開くほか必要に応じ臨時総会を開く。

2 議長は出席者の互選とする。

3 総会においては下記事項の承認を受けなければならない。

(1) 会務ならびに会計の報告

(2) 新年度の事業計画

(3) 役員の決定

(4) 施行内規の変更

(5) その他重要な事項

4 議事録は本内規 14 条に定めるところによる。

(議事録)

第 14 条 支部理事会及び支部総会の議事録は議長が作成し、速やかに支部ホームページに掲示し、支部会員の閲覧に供さなくてはならない。

附 則

本内規は平成 25 年 5 月 17 日より施行する。

本内規の一部を改訂し、平成 29 年 5 月 13 日から施行する。(資産及び会計に関する第 15 条を削除)

本内規の一部を改訂し、令和 2 年 6 月 25 日より施行する。

北海道の雪氷 No.40

Annual Report on Snow and Ice Studies in Hokkaido

ISSN 1340-7368

2021 年 9 月 13 日発行

発行 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目

北海道大学 低温科学研究所内