

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 42 号



2023 年 10 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
2023 年度日本雪氷学会北海道支部研究発表会発表論文	-----7
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2022 年度事業報告	-----93
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2023 年度事業計画	-----97
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2022 年度収支報告	-----99
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2023 年度予算	-----100
公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2023 年度役員名簿	-----101
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	-----102

表 紙

写真：旭川西高校生徒

題字：福沢卓也

（表紙解説）割れない、凍るシャボン玉

北海道旭川西高等学校

浅田実希

旭川西高等学校はスーパーサイエンスハイスクールに指定されていて、様々な課題研究に取り組んでいます。私たちは「割れないシャボン玉」を作るテーマに取り組んでいましたが、旭川冬まつりで「屋外で遊べる凍るシャボン玉」イベントを依頼され、この研究を発展させて「割れない、凍るシャボン玉」づくりに取り組みました。“割れない”ことと“凍る”ことを同時に満たす条件を探すのに苦労しましたが、ハチミツを使うと両立できることがわかりました。ハチミツなら入手しやすく、イベントでも安全に取り扱うことができるので、うってつけの材料でした。この写真は、外気温が -10°C を下回った旭川の街で、割れない、凍るシャボン玉を作っている様子です。おもちゃのシャボン玉製造機を使うと、安定してシャボン玉が作れます。膨らませている最中にシャボン玉の表面に氷晶が成長していく様子は、神秘的です。皆さんも、冬になったら試してみたいはいかがでしょうか。



巻 頭 言

北海道支部支部長 松澤 勝（寒地土木研究所）

北海道支部は、日本雪氷学会の初めての支部として、昭和 34 年に設立されました。その当時の資料によると、昭和 30 年代に高度成長が幕を開けると、雪は北海道の発展を妨げる要因と見なされ、雪氷問題の解決がなければ北海道の近代化は不可能だという認識が行政や産業界で急速に広がりました。このような背景から、北海道大学、北海道開発局、北海道、札幌管区气象台、林業試験場、農業試験場、日本国有鉄道北海道支社、北海道電力などの協力を得て、北海道支部が設立されました。

令和時代に入りましたが、2021/22 冬期には、札幌圏で何度も大雪に見舞われ、大規模な交通障害が発生し社会活動に大きな混乱をもたらしました。また、その冬の北海道内での雪害による死者は 29 名、重軽傷者は 318 名に上り、雪氷がもたらす問題は未だに解決されていません。

日本雪氷学会は公益法人として、学術活動だけでなく社会貢献活動も期待されています。昨年まではコロナ禍の影響で、対面活動に多くの制約がありましたが、皆様もご存じの通り、令和 5 年 5 月 8 日以降、新型コロナウイルス感染症は第 5 類に指定変更され、対面活動への制約が大幅に緩和されました。そして、北海道支部研究発表会も 3 年ぶりに対面開催され、合計 23 件の発表が行われました。本誌『北海道の雪氷』にもこれらの発表論文が掲載されています。研究発表会のプログラムを見ても分かるように、社会基盤、氷河水床、結晶、ハイドレート、降水、積雪、海氷など、幅広いテーマにわたる発表が行われています。

また、北海道支部の雪氷災害調査チームにより 2021/22 冬期の雪害に対して迅速な調査を行い、昨年度の支部研究発表会で報告したほか、2022/23 冬期には、北海道内で発生した 3 件の雪崩に対して、発生直後に現地調査を行いました。これらの活動に加えて、地域講演会やサイエンスパークへの参加などを通じて、雪氷に関する多様な課題の解決と社会貢献に努め、皆様からのご支援を得ながら、北海道支部の発展に取り組んでいきたいと考えています。

最後になりますが、『北海道の雪氷』の第 11 号（1992 年）から第 40 号（2021 年）までの 30 年間、素晴らしい版面で表紙を飾ってくださった斎藤新一郎会員が、今年、お亡くなりになりました。故福沢卓也会員が揮毫した題字とともに、『北海道の雪氷』の表紙は多くの読者の目を楽しませてきました。ここに、斎藤氏への哀悼の意を表し、長年にわたるご尽力に心より感謝申し上げます。

2023 年度日本雪氷学会北海道支部研究発表会発表論文 目次

【雪氷と社会基盤】

1. 冬道での転倒者を対象としたアンケート調査 7
ー転倒時の路面状況や歩行時の行動および意識等についてー
富田 真未 (一般社団法人北海道開発技術センター),
金田 安弘 (一般社団法人北海道開発技術センター),
永田 泰浩 (一般社団法人北海道開発技術センター),
鈴木 英樹 (北海道医療大学)
2. 車載カメラの画像を用いた吹雪時の視界状況評価 11
永田 泰浩 (一般社団法人 北海道開発技術センター),
金田 安弘 (一般社団法人 北海道開発技術センター),
森本 勝己 (株式会社 道北土木),
高橋 翔 (北海道大学工学研究院),
萩原 亨 (北海道大学工学研究院)
3. 寒冷期災害を想定した低体温症予防に資する防寒資器材の検討 15
根本 昌宏 (日本赤十字北海道看護大学 災害対策教育センター),
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)
4. 多重事故の発生要因について 19
-多重事故と気象, 車・ドライバーと交通の関わり-
竹内 政夫 (日本雪氷学会 北海道支部, 雪氷ネットワーク),
米田 和広 (北海道交通安全協会)
5. 北海道における雪による建物被害の特徴について 21
千葉 隆弘 (北海道科学大学工学部),
堤 拓哉 (北海道立総合研究機構建築研究本部),
高橋 徹 (千葉大学大学院工学研究院)
6. 道内の流雪溝供用地区における地域インフラの持続的発展の可能性と課題について 25
三原 夕佳 (一般社団法人北海道開発技術センター),
小西 信義 (一般社団法人北海道開発技術センター),
西 大志 (苫前町まちづくり企画),

谷野 淳 (留萌開発建設部 道路計画課),
原文宏 (一般社団法人北海道開発技術センター),
倉内 公嘉 (一般社団法人北海道開発技術センター)

【氷河・氷床】

7. グリーンランド北西部カナック氷河における氷レーダー探査 29
佐藤 健 (北海道大学 低温科学研究所, 北海道大学 環境科学院),
杉山 慎 (北海道大学 低温科学研究所)
8. グリーンランド北西部カナック氷河における近年の流動変化 33
今津 拓郎 (北海道大学低温科学研究所, 北海道大学環境科学院),
杉山 慎 (北海道大学低温科学研究所)
9. グリーンランド北西部カナック氷河における UAV を用いた表面地形測量 37
鵜飼 真汰 (北海道大学低温科学研究所, 北海道大学環境科学院),
杉山 慎 (北海道大学低温科学研究所),
近藤 研 (北海道大学低温科学研究所, 北海道大学環境科学院)
10. マルチビーム・ソナーによるパタゴニア・グレイ氷河末端の水中観測 41
杉山 慎 (北海道大学低温科学研究所),
波多 俊太郎 (北海道大学低温科学研究所, 北海道大学創成研究機構),
森 尚仁 (株式会社マリン・ワーク・ジャパン),
Paul Sandoval (アウストラル大学理学部),
Marius Schaefer (アウストラル大学理学部)
11. 潮位と熱応力に起因する東南極ラングホブデ氷河棚氷の破砕メカニズム 45
箕輪 昌紘 (北海道大学 低温科学研究所),
Evgeny Podolskiy (北海道大学 北極域研究センター),
杉山 慎 (北海道大学 低温科学研究所)

【降雪・積雪・海水】

12. 融雪期まで存在した長期積雪初期の湿雪層 (2022/23 年冬期, 北海道北見) 49
白川 龍生 (北見工業大学)
13. 北海道オホーツク地域における湿雪と気象要素 53
-2022 年 12 月下旬の湿雪とその影響-
石井 日菜 (北見工業大学大学院 工学研究科),
白川 龍生 (北見工業大学 地球環境工学科)

14. 恵庭市の市街地における降雪傾向の把握 57
大八木 啓翔 (札幌日本大学高等学校),
古川 義純 (北海道大学)

15. オホーツク海から日本海と太平洋への海水流出頻度 61
小濱 悠介 (北見工業大学大学院 工学専攻),
舘山 一孝 (北見工業大学 地球環境工学科),
宇都 正太郎 (北海道大学 北極域研究センター),
泉山 耕 (北海道大学 北極域研究センター)

【結晶・ハイドレート】

16. 雪の結晶は氷晶核の必要なく生成する 65
油川 英明 (日本雪氷学会 北海道支部, NPO 法人雪氷ネットワーク)

17. ダイヤモンドダスト発生日の気象条件の特徴 69
ー2022-2023 年冬の旭川市における観測からー
長谷川 祥樹 (北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所),
山口 高志 (北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所),
濱原 和広 (北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所),
鈴木 啓明 (北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所),
野口 泉 (北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所),
牛島 健 (北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所)

18. 手袋の上に乗せても割れない“凍るシャボン玉”研究 73
浅田 実希 (北海道旭川西高等学校),
中村 桃華 (北海道旭川西高等学校),
小林 由依 (北海道旭川西高等学校),
杉尾 雪華 (北海道旭川西高等学校),
千葉 暖花 (北海道旭川西高等学校),
齋藤 寛幸 (北海道旭川西高等学校),
内田 努 (北海道大学大学院工学研究院)

19. 六フッ化硫黄ハイドレートの平衡圧データによる解離熱および水和数の推定 77
小笠原 恭也 (北見工業大学),
笠松 圭 (北見工業大学),
八久保 晶弘 (北見工業大学),

竹谷 敏 (産業技術総合研究所)

20. メタンハイドレート生成時のメタン水素同位体分別の温度・圧力依存性 81
八久保 晶弘 (北見工業大学),
根津 太一 (北見工業大学),
滝澤 楓 (北見工業大学),
竹谷 敏 (産業技術総合研究所)
21. 空気ハイドレートおよび窒素・メタン混合ガスハイドレート生成時の
ゲスト安定同位体分別 85
滝澤 楓 (北見工業大学),
八久保 晶弘 (北見工業大学),
竹谷 敏 (産業技術総合研究所)
22. N_2O ハイドレートの平衡圧測定およびラマン分光分析 89
笠松 圭 (北見工業大学),
小笠原 恭也 (北見工業大学),
八久保 晶弘 (北見工業大学),
竹谷 敏 (産業技術総合研究所)

冬道での転倒者を対象としたアンケート調査

— 転倒時の路面状況や歩行時の行動および意識等について —

Results of questionnaire surveys targeting fallers on icy roads

富田 真未¹, 金田 安弘¹, 永田 泰浩¹, 鈴木 英樹²
Mami Tomita¹, Yasuhiro Kaneda¹, Yasuhiro Nagata¹, Hideki Suzuki²
Corresponding author : tomita@decnet.or.jp (M.Tomita)

冬道での歩行者転倒事故の要因には、路面の滑りのほか、歩行者の身体能力や、転倒防止への意識や備えが関係していると考えられる。冬道での転倒の実態を把握するため実際に転倒した方を対象に、転倒要因（路面状況、意識、行動や歩行環境、服装など）等について、Web アンケート調査を実施した。転倒時の意識として、滑ると思って注意していた人は年齢とともに増えるほか、急いでいた人は若年層ほど多い。また、高齢になるほど転んでケガをする人が増えることから、転んだだけでは済まない状況であることがわかった。

1. はじめに

1. 1 背景 - 転倒事故の現状と取組み

札幌市では毎年、冬道での転倒による救急搬送者数が約 1000 人に及び（図 1）、転倒によりケガをした人数は、1 万人にも及ぶという調査結果も報告されている¹⁾。転倒による骨折を機に、外出を控えてしまい運動不足になってしまう人や、そのまま引きこもってしまう場合もある。札幌市に限らず、冬道での歩行者転倒事故は、積雪寒冷地が抱える大きな冬の問題の 1 つである。

道路・医療・気象・メディア関係など、様々な分野の技術者や研究者、企業などで構成される著者らが参画している「ウインターライフ推進協議会（以下、協議会）」では、冬道での歩行者の転倒事故防止を目指した調査研究や情報発信など、様々な普及啓発活動を行ってきた。協議会が運営する冬みちを安全・快適に歩くための総合情報サ

イト「転ばないコツおしえます。」では、翌日の歩道の路面の滑りやすさを予測する「つつる予報」や、転びにくい冬道の歩き方や滑りやすい場所、冬道を歩くための靴選びのポイントなど、転倒してケガをしないためのコツを情報発信してきた（図 2）。



図 2 「転ばないコツおしえます。」トップ画面

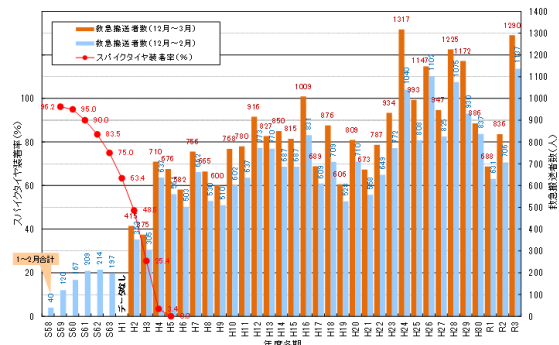


図 1 札幌市の冬期の転倒による救急搬送者数の推移（札幌市消防局データによる）

冬道で転倒しやすい人にはいくつかの特徴がみられることから、行動パターンと気を付けるポイントなどをあわせて注意喚起している（図 3）。これらの内容は、複数の関係者による冬道での歩行実態の実際の観察結果を基にしたものであるが、定量的なデータによる確認までには至っていない。

¹ 一般社団法人北海道開発技術センター

² 北海道医療大学



図3 冬道で転びやすい人の特徴
(サイトで注意喚起している内容)

滑りやすい路面でも夏と同じスニーカーを履いて、転倒しやすい状況を自ら作ってしまったり、手袋をせずにポケットに手を入れ、手に荷物などを抱えて歩いていると、転倒した際にケガに繋がります（写真1）。滑ることに対する事前の危機意識や備えなど、少しでも準備することができていれば、転倒防止に繋がります、転倒事故減少に繋がると考える。



写真1 スケートリンクのようなつるつる路面でスニーカー、ポケットに手を入れて歩く歩行者（札幌市中央区すすきの交差点）

1. 2 調査目的

冬道での歩行者転倒事故の要因には、路面の滑りのほか、歩行者の身体能力、さらには転倒防止への意識や備えが関係していると考えられる。

冬道での転倒による救急搬送データの分析等により、転倒事故被害者の属性や事故多発日の気象などについて、継続的に調査が実施され、多くの知見が得られている（例えば、文献2, 3など）^{2,3)}。しかし、実際にどんな路面で転び、ケガに繋がっているのか、転んだ時の意識とあわせた実態は把握できていない。

冬道での転倒の実態を把握することは、転倒事故を未然に防ぐための解決策を見出すことに繋がります、これまで発信してきた内容にも、より確実

な情報として信憑性が増し、個人の転倒予防に対する意識向上に繋がることも期待できる。

そこで今回、冬道での転倒の実態（冬道での転倒要因／路面状況、意識、行動や歩行環境、服装など）をより詳細に把握することを目的に、アンケート調査を行った。

2. 調査概要

アンケートは、Web上に作成したアンケートページ（図4）にアクセスして回答してもらう方法で実施した。以下に、調査内容を示す。

〔調査内容〕

- ・調査期間 令和5年1月27日～3月31日
- ・回答条件 令和4年度冬期に冬道で転倒した方（1回の転倒体験で1回答）
- ・調査項目 転倒した場所とその場所の路面状況／転倒時の時刻／行動（何をしてたか）／転倒でケガをしたか／転倒した時の意識や環境、服装／属性など



図4 web アンケートページ

3. 調査結果と考察

アンケートの回答総数は、158件であった。回答者は、居住地は85%が北海道在住者であった。年齢は50歳代が約30%と最も多く、次いで40歳代が約20%、70～80歳代は約10%であった（図5）。

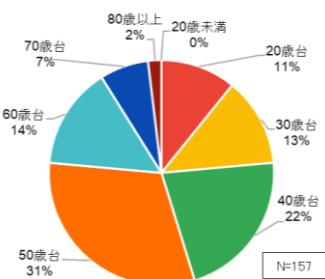


図5 回答者の属性（年代）

3. 1 転倒した場所と路面状況

転倒した場所は、「平らだった」が約 47%、「傾斜や凹凸があった」が約 43%であり、路面の傾きに関わらず転倒している傾向がみられた（図 6 左）。転倒した場所の路面状況は、「とてもツルツルだった」が約 48%、「少しツルツルだった」が 29%であった（図 6 右）。「その他」には「氷の上」にうっすら雪が積もった状態」などの回答も約 5%あり、合計するとつるつる路面での転倒が全体の約 8 割であった。

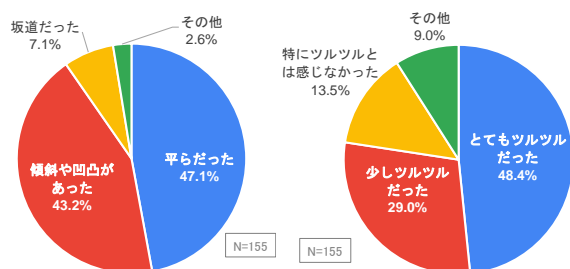


図 6 転倒した場所（左）と路面状況（右）

3. 2 転倒でのケガの性別による違い

「転倒でケガをした人」は、約 35%であった（図 7 左）。男女別でみると、男性は 91 名の転倒者のうちケガをした人は 22 名（約 24%）、女性は 67 名の転倒者のうちケガをした人は 32 名（約 48%）で、女性は男性の倍の割合でケガをしやすい傾向がみられた（図 7 右）。

「手に荷物を持っていた」「足元を見ていなかった」など、転倒した際の状況は様々であったが、女性のほうが転倒してケガをしやすいのは、転倒した際の行動（男性よりも手に荷物を持っていたり、おしゃべりをしながらの歩行が多いことなど）が、急な事態に対する判断遅れや歩行時のバランスに関係した結果が要因として考えられる。

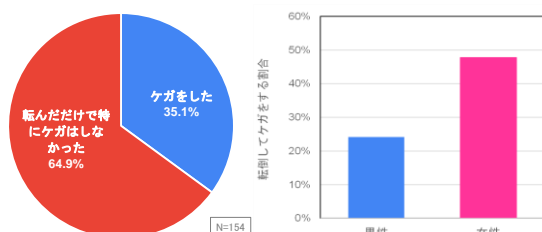


図 7 転倒してケガをした人の割合（左）と男女別の転倒してケガをした人の割合（右）

3. 3 転倒でのケガの年齢層による違い

転倒でケガをした人を年齢別でみると、70～80 歳代のほとんどの人がケガをしており、高齢にな

るほど転んだだけではすまない状況であることがわかった（図 8）。

「路面が見えなかった」「周囲が暗かった」などの回答があったことから、高齢の転倒者が多くになっている要因として、視力の低下により、路面判別がしにくいことや、筋力などの低下とあわせたバランス能力の低下も関係していると考えられる。

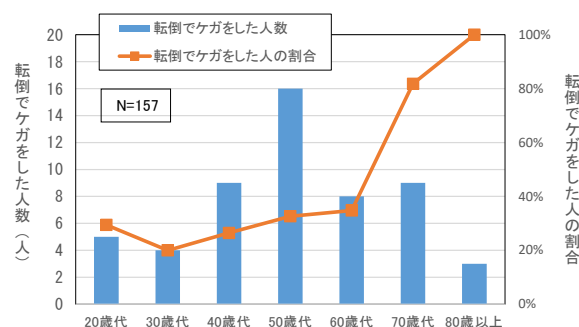


図 8 転倒によるケガの年齢別割合

3. 4 転倒した際の“意識”の違い

転倒した際の意識については、「滑ると思っていなかった」への回答が約 45%で最も多く、「考え事をして」「何かに気をとられていた」などを含めると、不意を突かれて転倒したケースが多いことがわかった（図 9）。一方、「滑ると思って注意はしていた」は約 38%と多かった。

滑ると思っていなかった人へは、これまでも情報発信してきた滑りやすい路面の種類や転びやすい場所などを、まずは知ってもらうことや、注意深く歩くことを意識づけるような工夫が必要である。注意していたにも関わらず転倒してしまった人へは、歩き方に注意をより一層払うことはもちろん、外出時の服装などにも気を付け、ケガに繋がらない工夫をすることが重要である。協議会が冬期間に毎日情報提供している「つるつる予報」なども参考にし、滑る予報が出ている日などは外出を控えることも選択の一つである。状況に即した情報提供が重要と言える。

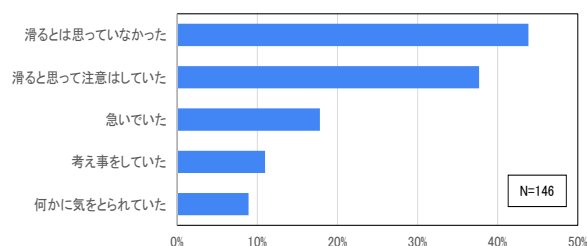


図 9 転倒した際の意識

3. 5 転倒してケガをした“意識”と年齢

転倒してケガをした人を年齢別でみた時の意識の違いでは、「急いでいた」は若年層の方が多く、冬道でも走ったりできる身体能力や歩き方、スニーカーなどの靴選びなどが関係していると考えられる。

「滑ると思っていたいなかった」人は、年齢が高くなるほど増える傾向がみられた。これが冬道路面に対する注意不足によるものなのか、あるいは転倒事故への危機意識の欠如によるものなのか、さらにデータを収集して分析する必要がある(図10)。

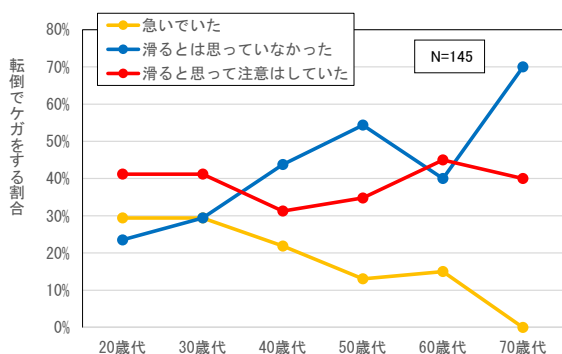


図10 転倒した人の年齢別の意識

3. 6 冬道にあった“装え”と心構え

「帽子をかぶっていなかった」「夏靴など冬道にあわない靴を履いていた」が多かった(図11)。

転倒事故によるケガの実態としては、最も多いのが頭部、次いで脚部、腰部、足部の順であり、頭部と脚部を合わせると全体の約70%を占めていることが報告されている⁴⁾。頭部を守るための帽子の着用や冬道に合わせた靴選びは、ケガを軽減させるためにも非常に重要である。滑って転ばないことに越したことはないが、外出前の服装について常に心掛けることは、転倒した際に大きなケガに繋がらないためにも重要な要素である。

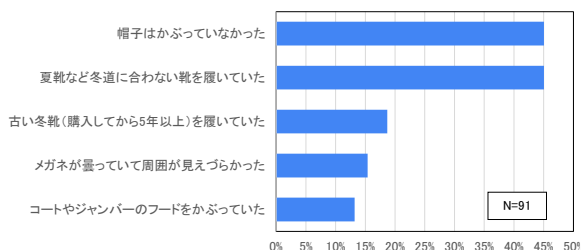


図11 転倒した際の服装や装備

4. まとめ

これまで注意喚起してきた転倒しやすい行動パターンについては、本調査結果から概ね同様の結果がみられた。

本調査では、道内在住者からの回答がほとんどであったが、昨今は、関東で大雪が降ると首都圏を中心に転倒者が多発しているため、今後は回答者を道外にも広げる工夫を行い、非雪国でごく稀に発生する冬道転倒の実態についても、アンケートの対象を広げたいと考えている。

また、転倒するとケガに繋がしやすい高齢者へは、本調査では回答件数が少なかったことから、Web以外での紙媒体でもアンケート調査を行うなど、回答しやすい手法を工夫する必要がある。より多くの回答数を集め、情報により一層の信憑性が増すよう、次年度以降も引き続きアンケート調査を実施する。調査項目にケガの内容(擦り傷・打撲など)やケガをした部位(手・足・頭など)などの設問も追加し、年齢や性別など、ターゲットにあわせた情報提供内容・手法を検討したい。より確実な情報を発信していくことで、ひとりひとりの転倒予防の意識向上に繋がることに期待する。

【謝辞】

本アンケート調査にご協力いただいた皆様に御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 高野伸栄, 戸部啓太朗, 金田安弘, 2015: 札幌市における冬期歩行者転倒事故実態について, 寒地技術シンポジウム, **31**, 124-127.
- 2) 橋本滯奈, 大橋一仁, 永田泰浩, 金田安弘, 2019: 札幌市における冬期の転倒に着目した救急搬送者の動向 その1—2018年度までの経年変化に着目して—, 北海道の雪氷, **38**, 39-42.
- 3) 大橋一仁, 橋本滯奈, 永田泰浩, 金田安弘, 2019: 札幌市における冬期の転倒に着目した救急搬送者の動向 その2—傷病程度と居住地に着目して—, 北海道の雪氷, **38**, 43-46.
- 4) 原文宏, 川端隆, 小林英嗣, 1990: 札幌市の冬期歩行環境の安全性について-路上転倒事故の実態調査-, 寒地技術シンポジウム, **6**, 151-157.

車載カメラの画像を用いた吹雪時の視界状況評価

Visibility Estimation in Snowstorm Using Road Images Recorded by On-board Video Camera

永田 泰浩¹, 金田 安弘¹, 森本 勝己², 高橋 翔³, 萩原 亨³
Yasuhiro Nagata¹, Yasuhiro Kaneda¹, Katsumi Morimoto², Sho Takahashi³, Toru Hagiwara³
Corresponding author: nagata@decnet.or.jp (Y. Nagata)

本研究では、小型カメラで撮影した静止画像から道路前方の視界状況を自動判別する「車載型カメラ画像収集システム」を、吹雪の多発区間を走行する道路パトロール車両に搭載し、ホワイトアウトを含む厳しい視界不良時の評価結果や、夜間の視界不良時の評価結果について検証した。その結果、夜間の評価について、人間の目視による評価と概ね一致するものの、対向車などの影響を考慮する必要があることがわかった。

1. はじめに

1. 1 背景

北海道における冬期の通行止めの原因としては、古くから吹雪による視程障害や吹きだまり障害が多くを占めてきた。これは近年でも変わらず、平成29年度から令和3年度の5冬期（12月～3月）の北海道内の国道の通行止め原因でも、吹雪が全体の57%と半数以上を占めている。吹雪による道路障害の対策、対応が難しい理由として、吹雪の状況が短時間で変化する（時間的な変動が大きい）ことと、吹雪の状況が局所的に変化する（空間的な変動が大きい）ことが挙げられる。

1. 2 既存技術のレビュー

吹雪時に現地道路状況を正確に把握する方法として、道路沿いに整備されたCCTVカメラの静止画像をインターネットで閲覧する方法がある。北海道開発局のサイト「北海道地区道路情報」では、15分間隔であった静止画像の更新間隔が、令和元年度から5分間隔に短縮された。時間的な変動が大きい吹雪時の道路状況の把握には効果的と考えられる。

北海道開発技術センターでは、CCTVカメラの静止画像に画像解析を行い、連続的な画像評価値として視界の状況を定量的に把握するとともに、人間が画像を目視して感じる視程との関係から、4段階の視界レベルに変換する視認性評価システムを、北海道大学とともに開発してきた¹⁾²⁾³⁾。技術の概要としては、CCTVカメラが撮影した静止画像の各画素の明るさの分布を2次元フーリエ変換によって空間周波数成分に分解し、人間の

感じることのできる空間周波数帯のパワースペクトル合計値を画像評価値 Weighted Intensity of Power Spectrum（以後、“WIPS”と称す）として、算出する方法である。WIPSの値は視界良好時に大きくなり、視界不良時には小さくなる。前述のCCTVカメラの静止画像の更新間隔の短縮は、視認性評価システムにとっても、非常に有益な変更であった。

一方、CCTVカメラは道路沿いに固定されているため、必ずしも吹雪の最も厳しい箇所の状況を捉えているとは限らない。そこで、局所的に変化する吹雪の状況の把握を目的として、道路パトロール車両にカメラを設置し、CCTVカメラと同様の画像解析によって道路前方の視界状況を定量的に評価する車載型カメラ画像収集システム（以後、“車載型システム”と称す）を開発した⁴⁾。車載型システムは、10秒間隔で道路前方の静止画像を収集するとともに、その場で4段階の視界レベルに変換し、道路沿いの視界状況を線的に把握、蓄積することができるものである。

1. 3 研究目的

車載型システムの動作状況については、北海道東部の釧根地域で検証を行ってきた⁵⁾。釧根地域は、降雪は多くないものの地吹雪の発生が多い地域である。本研究では、北海道内でも降雪を伴う吹雪の頻度が高く、厳しい吹雪が多発する北海道北部日本海側の地域に車載型システムを適用し、ホワイトアウトを含む厳しい視界不良時の評価結果の検証と、これまで課題となっていた夜間の視界不良時の評価の可能性検証を目的とした。

¹一般社団法人 北海道開発技術センター

²株式会社 道北土木

³北海道大学工学研究院

Hokkaido Development Engineering Center
Dohoku Doboku Co., Ltd
Faculty of Engineering, Hokkaido University

2. 研究方法～車載型システムの準備

2. 1 車載型カメラ画像収集システム

車載型システムは、図1のように、小型カメラ、GPS センサー、小型 PC、LTE 対応 USB ドングルで構成されている。小型カメラは、フロントガラスの内側に道路前方に向けて設置され、USB ケーブルで小型 PC に接続されており、小型 PC が 10 秒間隔で 3 秒間の動画データを収集している。GPS センサーは車両の屋根にマグネットで固定され、同様に USB ケーブルで小型 PC に接続されており、時刻データや位置情報、走行速度を 1 秒間隔で記録している。小型 PC では、小型カメラからの動画データに対してエッジ処理（静止画像の抽出、画像の軽量化、画像解析による視界状況データへの変換）を行い、動画データ撮影時の GPS データと紐づけした上でデータを保存する。さらに、小型 PC は、撮影時刻の GPS データ、軽量化した画像データ、視界状況データをセットにして、LTE 回線を用い、リアルタイムでクラウドサーバーへ送信している。LTE 回線が利用できない区間のデータは、一時的に小型 PC に保留し、通信状況が改善してからサーバーへ送信する。

2. 2 設置車両の走行区間と設置期間

本研究では、北海道北部の留萌地方を走行する道路パトロール車に、車載型システムを設置した。道路パトロール車の走行区間は、図2に示す初山別村、羽幌町、苫前町を日本海に沿って走行する一般国道 232 号で、遠別町と初山別村の境である 44.478 キロポスト（以後、“KP” と称す）から、苫前町と小平町の境である KP96.35 までである。

車載システムの設置期間は、2020 年度冬期が 12 月 18 日から 3 月 15 日、2021 年度冬期が 12 月 2 日から 3 月 15 日、2022 年度冬期が 12 月 13 日から 3 月 15 日までである。



図2 設置車両の走行地域（北海道の HP より）

3. 研究結果

3. 1 データの蓄積

3 冬期のデータの蓄積結果を表1に示した。車載型システムは車両の主電源がオンになると自動的にデータ収集を開始するが、ハンドル横に手動スイッチがあり、データ収集を行わない場合には、手動でオフにすることができる。3 冬期にわたってデータを収集、蓄積したが、主電源および手動スイッチがオンになっている状況では、車載型システムは安定的にデータを収集していた。

表1 データの蓄積状況（2020-2022 年度冬期）

	2020 年度	2021 年度	2022 年度
12 月	7 日間 4656data 12.9 時間	22 日間 14473data 40.2 時間	14 日間 11655data 32.4 時間
1 月	9 日間 3306data 9.2 時間	10 日間 4522data 12.6 時間	18 日間 13975data 38.8 時間
2 月	14 日間 4250data 11.8 時間	7 日間 3775data 10.5 時間	9 日間 4528data 12.6 時間

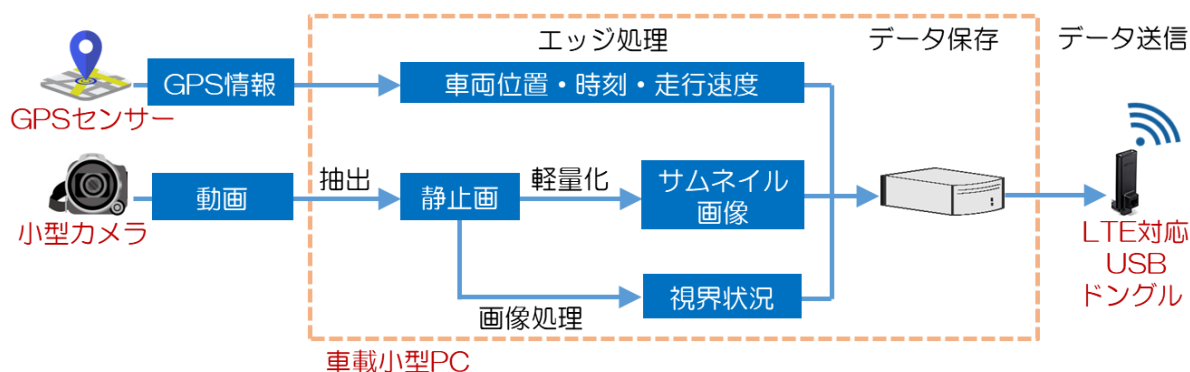


図1 車載型カメラ画像収集システムのデータフロー

3. 2 日中の厳しい視界不良時の検証

ホワイトアウトが発生するような、日中の厳しい視界不良時の視界状況評価について検証した。図3は、初山別村のKP57.8と羽幌町のKP76.1の間で吹雪によって通行止めが発生した2021年2月17日(通行止め時間帯:14時~17時30分)の、通行止め直前の状況である。視界状況を4段階の視界レベルに分類する前のWIPSの経過を折れ線で、車載型システムが収集した画像を図中に示した。図より、WIPSが7を下回るとかなり厳しい視界不良となり、6未満まで低下するとホワイトアウトの画像が多くなっていた。WIPSが8に近づくと、視界状況が改善していた。図中の●の色が4段階の視界レベルを示しているが、画像を見て人間が感じる視程とほぼ一致していた。

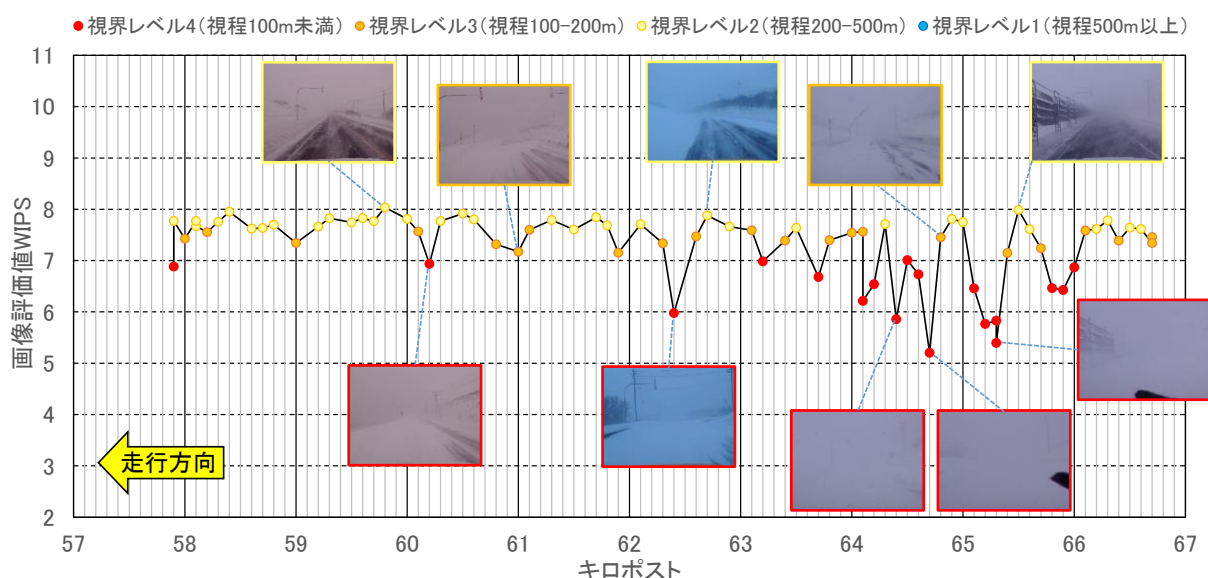


図3 日中の厳しい視界不良時の視界状況データ (2021年2月17日13時34分~14時01分)

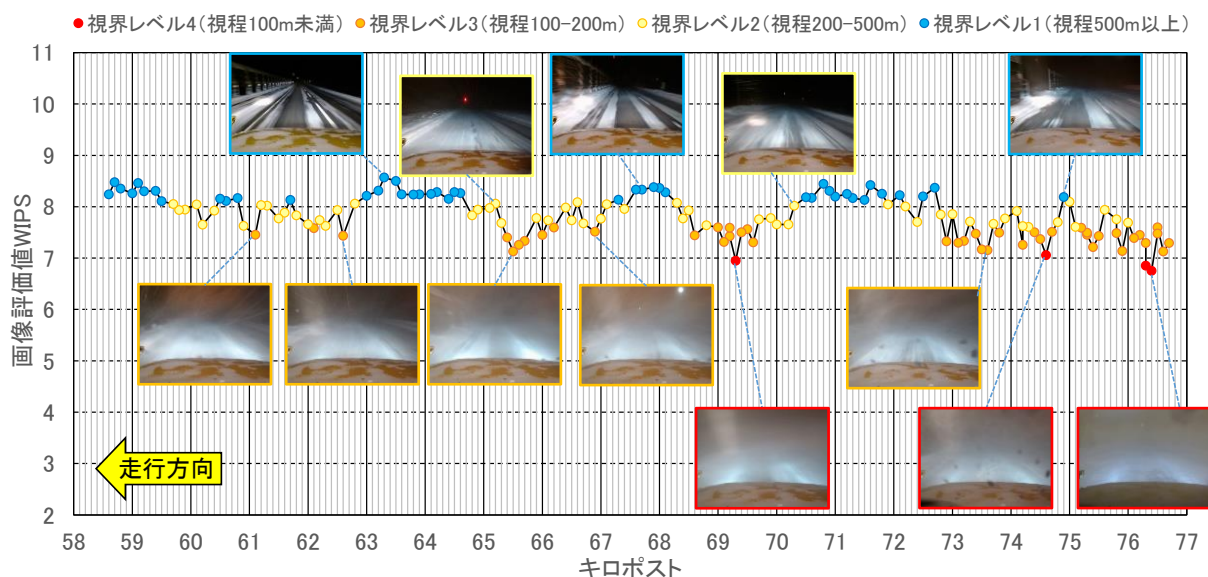


図4 夜間の視界不良時の視界状況データ (2023年1月25日19時30分~19時56分)

4. 成果と課題

4. 1 本研究の成果

本研究の成果は、以下の3点が挙げられる。

- 車載型カメラ画像収集システムは、冬期を通じて安定的に、データを収集、蓄積していた
- ホワイトアウトを伴うような日中の厳しい視界不良時については、WIPS と人間の感じる視認性の相関性は高く、視界レベルと人間の感じる視界状況はほぼ合致していた
- 夜間の視界不良時については、WIPS と人間の感じる視認性の相関性は高そうであった

4. 2 今後の課題

検証結果を踏まえると、夜間の視界状況については、いかにして WIPS から視界レベルへ変換するかが今後の課題と考えられる。

夜間のドライバーの視程は指摘目標物の影響が大きい。実際に運転しているドライバーも、道路照明や矢羽根、道路沿いの看板や建築物などの指摘目標物のない区間においては、前照灯の範囲しか視認できておらず、何メートル先まで見えているのか（視程何メートルなのか）を正確に把握できていないと考えられる。実際、表2の上段の2枚の写真はどちらも視界は良好であるが、道路照明のある右側の画像は数百メートルの視程があることがわかるが、指摘目標物のない左側の画像からは、視程を把握することができない。

表2 指摘目標物による WIPS への影響

照明なし←道路照明の影響→照明あり	
	
2023/1/25 19:59:25 WIPS 8.153	2023/1/25 19:59:55 WIPS 8.424 (+0.271)
対向車なし←対向車の影響→対向車あり	
	
2023/1/25 19:42:24 WIPS 7.564	2023/1/25 19:34:42 WIPS 8.187 (+ 0.623)

車載型システムの視点で考えると、表2に示したような、視界状況が同じような画像であっても、WIPS の値は道路照明や矢羽根などの影響を受けている。対向車の前照灯は、表2の下段のように WIPS の値に大きな影響を及ぼしていた。このように、夜間においては、ドライバーの視程と同様に、車載型システムも日中のようにシンプルに視界レベルを把握することは難しいと考えられる。一方で、図4のように、多くの画像では WIPS の低下とともに視界状況が悪化していくことが確認できている。対向車の前照灯の影響が大きい画像を評価に用いないなどの工夫により、おおよその視界状況を評価することは可能と考えられる。

【謝辞】

車載型カメラ画像収集システムによるデータ収集にご協力いただいた(株)道北土木のパトロール車のドライバーの皆様に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) Hagiwara, T., Ota, Y., Kaneda, Y., Nagata, Y. and Araki, K., 2006: A Method of Processing CCTV Digital Images for Poor Visibility, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, **1973**, 95-104.
- 2) Nagata, Y., Hagiwara, T., Kaneda, Y., Araki, K. and Sasaki, H., 2008: Application of Road Visibility Information System to Winter Maintenance, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, **2055**, 128-138.
- 3) 永田泰浩, 萩原亨, 金田安弘, 荒木啓司, 佐々木博一, 2009: 道路監視用 CCTV カメラの画像を利用した視認性情報システムの実用可能性についての研究, 機関誌「交通工学」, **44**, 89-99.
- 4) Nagata, Y., Hagiwara, T., Takahashi, S., Ohashi, K., Kaneda, Y. and Nakamura, 2008: Feasibility Study of Road Visibility Inspection System Using Driving Video Images Recorded by On-board Video Camera, Presented at 102nd Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- 5) 蔦田伊宏, 西城能利雄, 金田安弘, 永田泰浩, 2023: 車載型カメラの画像を用いた吹雪時の視界状況データの活用, ゆきみらい 2023in 会津.

寒冷期災害を想定した低体温症予防に資する防寒資器材の検討

Verification of materials effective in preventing hypothermia for cold weather disasters

根本 昌宏¹, 尾山 とし子¹

Masahiro Nemoto¹, Toshiko Oyama¹

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

北海道の夜間の外気温は1年のうち9か月が10℃を下回り、低温による避難者のダメージは計り知れない。停電が起きれば暖房機器が使用不能となるため屋内においても低体温症の発症が危惧される。本研究では、低体温症の予防に必要な遮蔽・保温・加温・食事の4つの要素のうち保温のパートに焦点を当て、仮想避難所フィールドを用いた実践的な課題抽出と資器材の有用性を検討し、自治体を取りうる対策だけでなく避難者自身に求めたい対処についても考察した。

1. 背景と目的

令和3年12月、国は日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震の被害想定を公表した¹⁾。日本海溝の想定では津波に巻き込まれることによる直接死は19万人超、千島海溝の想定では10万人超に及ぶ。2011年3月に発災した東日本大震災をはるかに上回る被害想定であり、地震直後の迅速避難が求められる。寒冷地域である東北、北海道地方はさらに難しい対応を迫られる。この地域に襲来する津波は極めて低温だからである。図1に示すように東北から北海道の沿岸は海面水温が20℃以上になるのはごくわずかな期間であり、北海道東沿岸では1月から5月までの水温が10℃を下回る。低温の津波に巻き込まれれば瞬く間に低体温症を発症するだけでなく、津波から逃れたとしても体や足が部分的に濡れるだけでも低体温症を発症するリスクが高まる。地震発生後いかに迅速に避難行動を取るかとともに、いかに濡れずに避難場所までの移動を完結するかが求められている。逃げたとしてもさらなる困難に見舞われる。北海道の夜間の外気温は1年のうち9ヶ月が10℃を下回り、室内においても低温による避難者のダメージは計り知れない。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、電気を使用した灯油や重油を燃料とする暖房設備を使用しているため、停電時には稼働しない。避難所だけでなく、個人の住居においても、暖房は停止する。電気を使用しないポータブルストーブでは暖を取れないばかりか換気不足による二酸化炭素の貯留や使ってはならない資器材により一

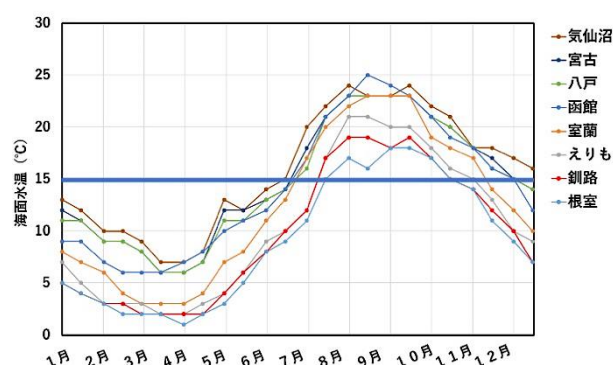


図1 東北から北海道太平洋岸の海面温度の変化（出典：気象庁海面水温データより）

酸化炭素中毒が発生することは東日本大震災でも頻発した²⁾。

このような課題を抽出するために、我々は2010年から冬期災害を想定した大規模避難所の開設・運営の検証を断続的に実施してきた³⁻⁶⁾。ブルーシートに毛布一枚の従来型の避難所展開では就寝は難しく低体温症を引き起こしかねないことを実証し、段ボールベッド、トイレ対策や熱交換式ジェットヒーターなどの冬事案の具体的な提案につなげてきた。

本研究は保温のパートに焦点を当て、毛布、冬用寝袋とディスポーザブル型の簡易寝袋（以下、ESB）+毛布の3種について仮想避難所フィールドを用いて比較検証し、積雪寒冷地域の防寒資器材としての有用性を検討した。

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

2. 研究方法

屋外の気温 $-0.7^{\circ}\text{C}\sim+0.4^{\circ}\text{C}$ 、室内気温が $+5.5\sim+6.0^{\circ}\text{C}$ の体育館の床面に、厚さ 5mm のアルミレジャーマットを敷設した仮想避難所を検証場所とした。被験者は 6 人とし、毛布、冬用寝袋、ESB+毛布の 3 種類について 1 時間ずつ順序をランダムに着用して検証した。被験者の服装は、通常の冬の服装（個人の所有物）で靴下履きのままとし、カイロ等加温装備の着用は不可とした。被験者内部表側ならびに内部背面温度を 5 秒ごとに K 熱電対を温度センサーとしたサーモログでモニタリングした。被験者の表面温度はサーモグラフィで把握し、被験者の温冷感覚、就寝時の感覚はアンケート法で主観的に評価した。本研究は日本赤十字北海道看護大学研究倫理委員会の承認を得たうえで実施した。（承認番号:30-310）

3. 結果

室内気温が 6°C 前後で推移する中、無暖房の体育館の床面（アルミマット表面）も $+5.9\sim+6.4^{\circ}\text{C}$ とほぼ同じ温度で推移した（図 2）。被験者の背面温度はすべての資器材とも開始 5 分まで体温の伝導に伴う温度上昇が見られた。冬用寝袋ならびに ESB は開始後 30 分まで緩やかに上昇し、 25°C 前後で推移した。毛布は温度上昇が見られず 21°C 前後で推移した。

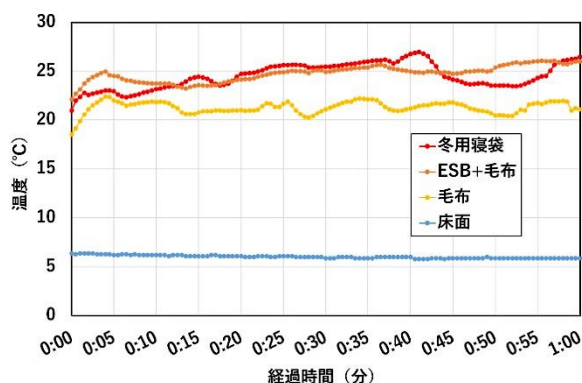


図 2 体育館床面温度ならびに各資器材を着用した際の背面部の温度推移 (n=6)

各資器材を着用 30 分後の表面熱画像を可視画像とともに図 3～5 に示した。白が $+15^{\circ}\text{C}$ 以上の温度域を示しており、赤が $+11^{\circ}\text{C}$ 前後、黄色が $+8^{\circ}\text{C}$ 前後である。毛布は赤及び白で表示された領域が多いことから被験者の体温が表面に伝導してい



図 3 毛布（左：熱画像、右：可視画像）

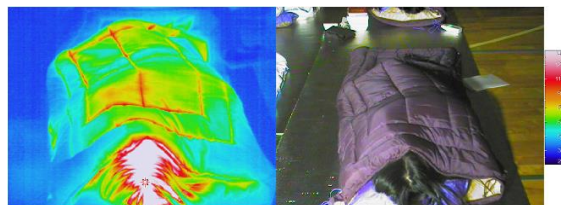


図 4 冬用寝袋（左：熱画像、右：可視画像）

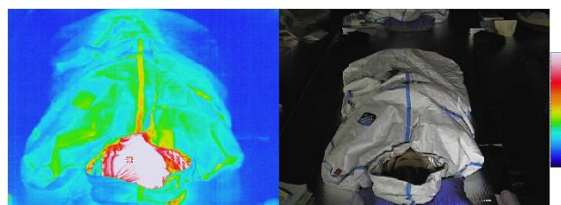


図 5 ESB+毛布（左：熱画像、右：可視画像）

た。冬用寝袋は縫製部分から黄色ならびにわずかに赤の領域が示された。ESB は中央のチャック部分から黄色ならびに若干の赤領域が示された。

図 6 に被験者から得られた主観評価結果を示した。毛布は床面の硬さや冷たさを感じやすく、寝ているときの寒さについても感じやすくなっていた。ESB は床面を硬く感じていたが、冷たさならびに寒さは改善していた。寝袋は床面の硬さを唯一改善しており、冷たさについても良好な結果が得られた。寒さについては毛布と ESB の中間に位置していた。

4. 考察

既報のとおり、室内空間の気温とその床面の温度は同じとなる⁴⁾。これはアルミマットを敷設しても変わらない。暖房で気温を上げたとしても床下からの冷気により床面は低く保たれるため寒冷期は床面に雑魚寝をさせてはならない。毛布ならびに ESB はともにそれら自身にクッション性がないことから床面を硬く感じていた。冬用寝袋は札幌式高規格寝袋と呼ばれるもので、寝袋背面部に特殊なクッション材が付加されている。これにより他の資材に比較して明らかに背面部から

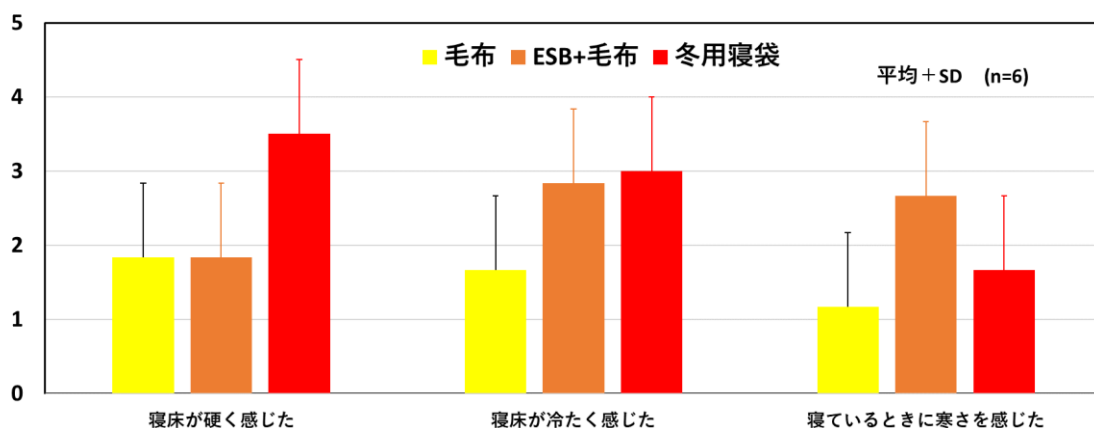


図6 3種の資器材の使用感に関する被験者の主観評価（数値が高いほど快適）

感じる硬さが軽減されていた。

寝床から伝わる冷たさの感覚については、毛布が明らかに冷たさを感じていた。毛布は繊維の温度保持と折り重なる空気層により温かさを生み出すが、外からの冷気を遮る作用ならびに体からの熱放散を抑制する作用は乏しい。図3で示した熱画像でも明らかとなっており、熱放散と冷気伝導が相まって冷たさにつながっていたと考えられる。ESBは感染症対策等で使用される防護服素材のタイベックにアルミが蒸着された素材（タイベックシルバー）から作り出されたディスポーザブル型寝袋である。タイベックシルバー単品では熱伝導が大きく寒さをしのぐことは難しいが、ESBの中に毛布を1枚入れるだけで毛布の保温性能を向上させつつ、床からの冷気を遮蔽したことから冷たさとともに寒さを軽減したと考えられた。図2においてESBや寝袋の温度が上下動しているのは被験者の寝返りに起因するもので、床からの冷気を感じるほど動きが大きくなっていた。

毛布は明らかに「寝ているときに寒さを感じた」と返答する被験者が多かった。ESBと寝袋の結果の解釈については注意を要する。本研究では実験中の睡眠を許可していたため、寝袋は眠りにつく被験者が多かった。これは背面部が柔らかく包まれ、音がほとんどせず温かいことに起因する。一度就寝した後に目覚めると体温変動により覚醒時よりも寒さを強く感じる人が多い。これが寝袋において寒さを感じた要因の一つと考えられる。ESBは不織布でできているため紙をこするような音を発生する。静寂化した避難所の就寝空間ではわずかな音でも気になりやすく、これが寝返り等の動作の妨げにつながりかねない。ESBは使用を重ねることで繊維が柔らかくなり音が発生

しづらくなることから、使用前に手順を踏むことで改善策につながる可能性がある。

本研究には何点かの限界がある。まず検証時間が1時間であり、実際の就寝を反映できていない。この室内条件で毛布一枚による就寝は低体温症を発症しかねず実験が不可能であることに起因する。しかし気温5℃の避難所は冬期停電下であれば本州であっても発生する。毛布一枚の防災計画を立てている自治体も少なくなく、冬の計画の見直しが求められる。さらに本研究はアルミマットを敷設した雑魚寝を条件とした。避難所はブルーシートが敷設されることが多いがこれはアルミマットよりもさらに硬く冷たいため本結果よりも厳しい結果となる可能性がある。逆に全国各地で段ボールベッドの整備が進められている。段ボールベッド化した状況下での温熱環境は本研究よりも良好となる可能性が高い。

5. 災害時の低体温症を予防するために

低体温症は寒さにさらされることで咽頭や直腸など身体中心の深部体温が35度未満になることである。軽症であれば個人の対応も可能であるが、中等症以上になると意識混濁、重症では心停止することがあり救急搬送が必要となる危険な疾患であり、低体温症は予防ありきの疾患と言われる由縁である⁷⁾。よって寒冷地域の防災計画として、低体温症を予防するための方策と、低体温症を発症した場合の方策には違いがあることに留意しなければならない。

低体温症を予防するために、遮蔽・保温・加温・食事の4つの要素を網羅することが求められる。遮蔽とは氷点下になるような外気や風から体を離す場の提供であり、本研究では体育館を表す。

保温は体温を奪われないように乾いた衣類, 防寒着を着用し, 靴, 手袋, マスク, 帽子など体の露出を防ぐことである。ここで重要なのは「乾いた」という条件であり, 万が一津波や雪等で濡れた場合には4~5倍の冷却効果に見舞われる。寝袋, 毛布などが潤沢にあれば良いが容積・重量そしてコストの面で避難者全員分を備蓄するのは難しい。その代案として山岳救助等でも使用されるアルミエマージェンシーシートを備蓄する自治体も多い。しかしこのシートは透湿性が全くなく, 真冬の使用では激しい結露を生じる。人間は就寝時に約200 mLの汗をかくとされ, その水分がすべてシートの中に溜まる。さらにこのシートはアルミホイル様の騒音を発生する。これらを踏まえ緊急事態の超急性期に短時間のみ使用するものであることに留意したい。ESBの素材であるタイベックシルバーは, アルミが蒸着されているにも関わらず透湿性に優れ, ジャンパーやズボンとしても提供可能な資材である。軽くコンパクトであり安価であることから濡れた衣服からの置換に使用できる。自治体の備蓄に依存するだけでなく, 個人装備としての持出品としても有用であろう。

防災備蓄品として毛布等を考えるときに再包装(リパック)問題が生じる。毛布, 寝袋とも容積の減量化と衛生を考慮して防災用は真空パックされていることが多く, 通常10年に一度リパックが欠かせない。毛布であると1枚2,000円, 寝袋であれば5,000円以上かかることも少なくない。クリーニング単価の値上がりにより購入価格よりも高くなるケースもあり, 限られた予算から運用される市町村単位の防災備蓄計画の難題の一つである。ESBは使い切りのディスプレイタイプであるためリパックの費用を生じない。毛布との併用で運用を考えることが「保温」を考える上でひとつの選択肢になると考える。

「加温」の対策として, 寒冷期の災害対策に挙げられるものは暖房であるが, 停電下で大空間を安全に加温することは極めて難しい。東日本大震災の避難生活において, 薪や炭による多数の一酸化炭素中毒事案が生じたことから明らかである²⁾。防災教育の中に, 安易な方法で暖を取らないよう啓発を組み込んでいく必要がある。前述したとおり, 低体温症の予防と治療では加温について異なる対処が必要である。元気の避難者の低体温症の予防としては手足を含め積極的な加温が

望まれる。避難生活は動き(運動量)が少なくなることが多く, 会話も途絶えがちである。低体温症を発症しやすい高齢者等に声がけを行い, 団らんを形成することも低体温症対策になり得る。既報のとおり足湯提供もその手段である⁹⁾。低体温症発症後は手足の冷たい血液が心臓へ戻ることを避けなければならない。体をわずかに動かすことでも心停止を引き起こす可能性がある。体幹部の加温を考えると大きめの湯たんぽを低温やけどに留意し下着の上から抱えさせることが介入できる一つの手段となる。

災害時の低体温症対策は道半ばである。避難者の命を護り健康を保持するために, さらなる検証を進める必要がある。

【謝辞】

本研究はJSPS科研費JP22K04658の助成を受けたものです。

【参考文献】

- 1) 内閣府(防災担当), 2021: 日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震の被害想定について(令和3年12月21日)。
- 2) 中永士師明, 五十嵐季子, 2013: 東日本大震災に伴う停電に関連して複数発生した急性一酸化炭素中毒, 日本職業・災害医学会会誌, **61**, 278-281.
- 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, 水谷嘉浩, 2021: 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, 北海道の雪氷, **40**, 57-60.
- 5) 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.
- 6) 根本昌宏, 2022: 冬期に開設される避難所避難所の問題点とその解決策, 生活と環境, **67**, 9-14.
- 7) 大城和恵, 2011: 災害に伴う疾患の治療とケア「低体温症」, 月刊薬事, **53**, 57-62.

多重事故の発生要因について

-多重事故と気象、車・ドライバーと交通の関わり-

Causes of multi-vehicle accidents in winter highway

竹内 政夫^{1,2}, 米田 和広³

Masao Takeuchi^{1,2}, Kazuhiro Yoneta³

Corresponding author: masao.takeuchi@gmail.com (M. Takeuchi)

多重（衝突）事故は発端から大規模化まで追突が関与し、多重事故をもたらす全ての要因（誘因、拡大要因、被害対象の素因）が影響し合い追突の発生を促していることが分かった。またドライバーや車の素因は、これまでの理解に加え、影響し合うことで素因の評価が正から負に変化し、発生危険度を高めることも分かった。これらにより多重事故の発生と拡大の防止対策や早期終息等への道筋が見えるようになった。

1. はじめに

多重事故は、地震のように圧倒的に大きな外力による災害と異なり、様々な要因が影響し合って発生する。このことが災害として規模は小さいが、理解や対応を難しくしている。視界不良事故をテーマに、気象を基に発生構造や要因を分析した¹⁾経緯がある。しかし事故状況の情報が乏しく不満が残る内容であった。ドライブレコーダーで撮られた事故状況の動画²⁾を用い、改めて多重事故の発生構造・要因などを見直した。

2. 多重事故の発生状況と要因

2. 1 多重事故発生状況・過程と拡大

調査対象は、北斗市の函館・江差自動車道で2022年2月21日に発生し、事故車両・渋滞車両合わせ約180台を巻き込んだ多重事故である。



写真1. 多重衝突事故翌日の函館・江差自動車道

事故当日の気象は、気温-5℃、瞬間最大風速

22m/s（アメダス北斗）の視界不良であった。

動画映像により、事故発生から収束までの流れ、事故の発生要因などの特徴等を述べる。

3. 追突事故から多重事故へ

① 多重事故の発端は追突事故

多重事故を含め視界不良事故で最も多いのは、停止中の車への追突事故である³⁾。当該事故の発端も停止車両への追突の確率が高い。視界不良時の追突事故は、停止車を認知しブレーキを掛けても間に合わないで発生する。即ちその時の視界の下では、スピードの出し過ぎである。

② 事故車群の形成

視界不良は停止車の発見を遅らせ、滑りやすい雪氷路面は追突の危険を高める。多重事故では追突を回避しても、後続車に追突され事故車群に吸収される例もある。次々と様々に、追突や玉突きを重ねて多重事故車群は形成されて行く。

③ 車から離れる危険

事故が小康状態になり車外へ出たために、玉突きされた後からの車に接触し受傷した事例も少なくない。高速での衝突の余波は時間が経っても続き遠くまで伝わる。

事故後路上に出るのは厳禁とされています。

停止と追突の連鎖が絶たれれば事故車群は一旦途切れる。以後無事故で停止する車が续けば、多重事故の収束である。多重事故の中には複数のグループに細分できるものがある。このこと

¹ 日本雪氷学会 北海道支部

² 雪氷ネットワーク

³ 北海道交通安全協会

Hokkaido Branch, the Japanese Society of Snow and Ice
Network of Snow and Ice Specialist
Hokkaido Traffic Safety Association

は視界不良の間は、停止車があり後続車が続く限り、新たな追突事故の危険が残ることを示す。後続車の流入管理が事故収束の鍵になろう。

4. 視界不良と多重事故

事故車の破損の激しさや事故車群の長さ（約1.5 km）は、高速で衝突したことを示す。視界不良が激しく長時間ホワイトアウトが続く場合は、車の走行は不可能になる。ホワイトアウトになるかどうかは、気象だけでなく、地形、植生や構造物などの沿道環境にもよる。様々な要因により発生するホワイトアウトの激しい変動も、高速走行車に影響し多重事故発生の要因になっている。

4. 1 視界不良時の車とドライバー

視界不良はドライバーに働き交通の流れを乱し多重事故の誘因になる。多重事故の発生には、車の性能、ドライバーの技能だけでなく視界不良時の運転経験、心理や個性なども影響する。

① 視界不良とドライバーによる運転の違い

ドライバーはホワイトアウトの直前に記憶していた道路線形等によって運転する⁴⁾。ホワイトアウトは短く回復も早いことが多く、危険を感じないで走り過ぎた経験がある。しかしこれは追突事故3大原因の1つの「見込み運転」になり潜在的危険は高い。逆に経験の少ないドライバーは視界不良に対して過敏で、低速度運転や停止への反応も早い。特に雪氷路面では、車やドライバーによる反応の違いが交通の流れを乱し追突事故の危険を高くする。

② 車種による視環境の違いと運転対応のずれ

大型車と小型車が混在した道路では、視界不良は小型車から始まり、運転席が高く視界の効く大型車は遅れる。小型車が吹雪に沈んでも、大型車には視界不良と感ぜないこともある（写真2）。



写真2. 大型車の運転席から見た吹雪時の道路

このような運転席の高さによる視界（視程）ギャップも追突事故の危険を高める。

③ 車種による危険認知速度の違い

ドライバーが危険を認知し危険回避をする直前の速度（危険認知速度）の統計³⁾がある。それには、高い危険認知速度で走る、大型車に視界不良時の追突事故が多いことを示している。視界不良時の高い危険認知速度は、即ちスピードの出し過ぎであり、死亡事故や多重事故など事故の重大化の一因となっている。

5. 多様なドライバーと車の混在交通の危険

車が少なく互いに自由に走る道路では、視認能力、運転技能や経験から大型車とそのドライバーが優れ、視界不良にも強いと考えていた。しかし多様なドライバーが運転する、車種や走行性能の異なる車が混在して走る道路では、正の要素が負の結果をもたらすことがある。多重事故で多い大型車の追突もその例である。大型車の視界不良に優れた性能は、それが劣る小型車と混在することで、危険認知速度にギャップを生じ追突事故を発生させ多重事故へと大きくしている。

6. まとめ

気象や沿道環境で急変し、車種によって異なる視界そして滑りやすい雪氷路面。ドライバーによって異なる運転反応、多種多様な車が高速で走る交通。これら一つ一つが追突事故の要因であり、互に影響し合い追突や多重事故の危険を高めている。ドライバーは追突しないさせないことを最優先に、後続車も先行車も互いを強く意識した運転が必要であろう。

【参考文献】

- 1) 竹内政夫, 2002: 吹雪災害の要因と構造, 雪氷, 64-1, 97-105.
- 2) 北海道交通安全協会: YouTube チャンネル, 「吹雪など視界不良時における交通事故の実態 2 白い闇の危険!!」, 交通安全教育映像.
- 3) 北海道警察本部交通部交通企画課, 2022: 「吹雪など視界不良時における交通事故の実態」, 北海道警察ホームページ.
- 4) 萩原享, 1990: 「吹雪時における運転者の視覚挙動について」, 土木計画学研究・論文集, No.8, 161-168.

北海道における雪による建物被害の特徴について

Characteristics of Structural Damage on Buildings due to Snow in Hokkaido

千葉 隆弘¹, 堤 拓哉², 高橋 徹³
Takahiro Chiba¹, Takuya Tsutsumi², Toru Takahashi³
Corresponding author: chiba@hus.ac.jp (T. Chiba)

In this study, to understand the structural damage on buildings due to snow, the authors analyzed the characteristics of the damage and the factors that contributed to the spread of the damage using statistic data about the structural damage. As the results, the damage to houses was partially destroyed, and damage to non-dwelling houses was dominated by the collapse of warehouses, vacant houses, and agricultural facilities. In addition, in the Sorachi Bureau, it was clarified that the damage increased when reached the safety limit weight calculated based on the previous design depth until 1999.

1. はじめに

北海道における雪による人身事故は、毎年のように発生している。図1に、北海道における雪による死傷者数および住家被害の推移を示す¹⁾。北海道全域で記録的な積雪の少なさとなった2020寒候年は雪による死傷者数が減少したものの、2021寒候年以降においては400名前後の死傷者数で推移している。一方、建物被害をみると、大雪に見舞われた年・地域で被害が発生しており、人身事故との相関性がみられるが、2011寒候年、2013寒候年、2014寒候年、および2023寒候年のように、人身事故が多く発生しているにも関わらず建物被害が少ない冬期もみられる。

このようなことから本研究では、北海道における効果的な雪害対策を検討するための基礎資料を得ること目的に、2013～2021寒候年の建物被害に関する統計資料と気象データを用いて雪による建物被害の特徴を把握するとともに、被害拡大の要因を分析した。

2. 研究方法

本研究では、北海道が総務省消防庁に報告している建物被害データを用いて建物被害の特徴や被害拡大の要因を分析することとした。建物被害データの統計期間は2013～2021寒候年の9冬期間であり、北海道の市町村ごとに建物被害状況がまとめられたものである。これらの9冬期間のうち、2013寒候年に岩見沢で年最大積雪深1.64mを、2015寒候年に羅臼で年最大積雪深1.79mを、2018

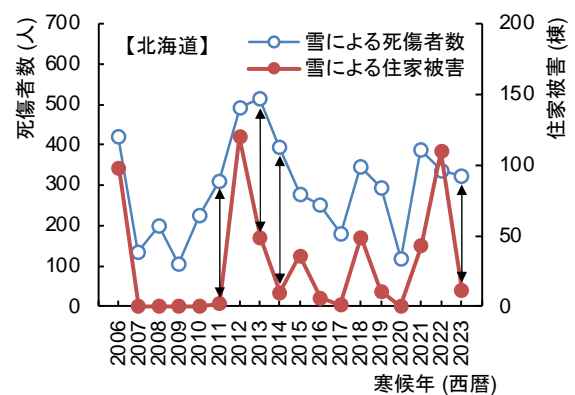


図1 雪による死傷者数・住家被害の推移

表1 建物被害の分類

区 分	種 別	内 容
住家被害	全壊	雪の重み・暴風雪による全壊
	半壊	雪の重み・暴風雪による半壊
	一部損壊	屋根・外壁などの損傷 庇・風除室・煙突などの損傷
非住家被害	公共施設	公共施設の雪による被害
	その他	倉庫・車庫等の雪による倒壊 空き家等の雪による倒壊 農業・漁業施設の雪による倒壊

寒候年に滝川で年最大積雪深1.67mを、2021寒候年に岩見沢で年最大積雪深2.05mを記録した。羅臼と滝川で記録した年最大積雪深は過去最深であり、2021寒候年の岩見沢で記録した年最大積雪深は過去2番目である。

建物被害の分類を表1に示す。当該建物被害データは、住家被害と非住家被害に大別されており、

¹北海道科学大学工学部

²北海道立総合研究機構建築研究本部

³千葉大学大学院工学研究院

Faculty of Engineering, Hokkaido University of Science
Hokkaido Research Organization
Graduate School of Engineering, Chiba University

住家被害は全壊、半壊、一部損壊に分類されている。非住家被害は公共施設とその他に分類されており、公共施設では一部損壊の被害が大半を占めていた。その他では倉庫、車庫、空き家、農業・漁業施設における雪による倒壊が大半を占めていた。このような建物被害データに基づいて北海道における建物被害の特徴を把握するとともに、被害拡大の要因を分析することとした。

3. 研究結果

3. 1 雪による建物被害棟数

2013～2021 寒候年における各振興局管内の雪による建物被害棟数を図 2 に示す。空知管内の被害棟数が最も多く、2013～2021 寒候年で 200 棟を超えている。空知管内では、2018 寒候年に滝川で過去最深の年最大積雪深を記録しており、さらに、2021 寒候年に岩見沢で過去 2 番目の年最大積雪深を記録している。このように、空知管内で被害棟数が多かった要因は、2 度の大雪に見舞われたことである。被害の内訳をみると、非住家被害が大半を占めており、住家被害においては一部損壊が大半を占めている。次いで被害棟数が多いのは根室管内および上川管内であり、非住家被害の占める割合が高い。非住家被害の内訳をみると、農業・漁業施設の倒壊が高い割合を占めている。その他の振興局管内をみると、道東地方では非住家被害が占める割合が高く、農業施設の倒壊が目立っている。なお、住家被害のうち、全壊は後志管内で 1 棟、半壊は空知管内で 3 棟、後志管内で 5 棟、渡島管内と檜山管内で 1 棟ずつであり、住家被害の大半はいずれの振興局においても一部損壊が大半を占めている。以上の結果をみると、北海道で発生した建物被害は、非住家被害が高い割合を占めており、住家被害では全壊や半壊に至るケースが極めて少なく、一部損壊にとどまる傾向が強いことがわかる。

次に、北海道内で被害棟数が最も多かった空知管内における被害棟数の推移を図 3 に示す。2018 寒候年の滝川で過去最深の年最大積雪深を記録した冬期と 2021 寒候年の岩見沢で過去 2 番目の年最大積雪深を記録した冬期において被害棟数が増加している。その他の 15～20 棟の被害が発生した冬期をみると、いずれも岩見沢の年最大積雪深が平年値 1.2 m を超えており、一方で、空知管内で建物被害が発生しなかった冬期をみると、岩見沢の年最大積雪深が 1.2 m を下回っている。この

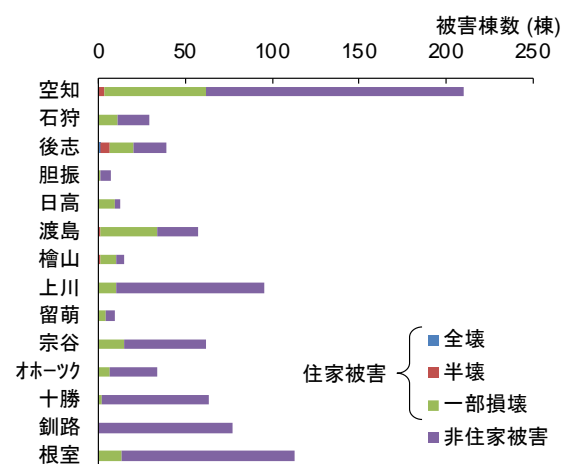


図 2 各振興局管内の被害棟数 (2013～2021)

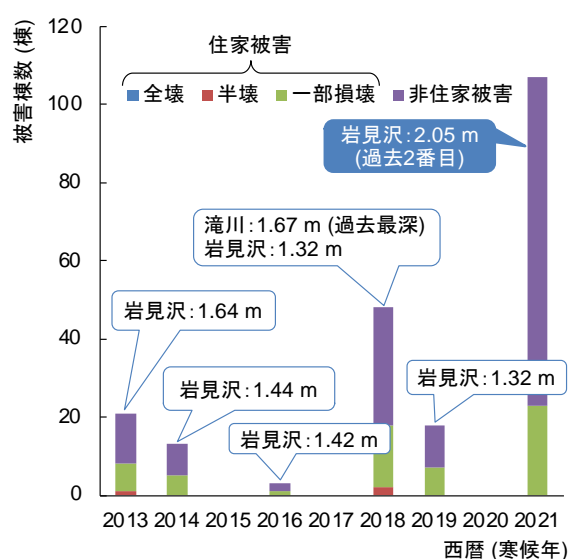


図 3 空知管内における被害棟数の推移

ような空知管内における被害棟数の推移をみると、空知管内では、岩見沢における年最大積雪深の平年値を境として、年最大積雪深が平年値を上回る冬期に建物被害が発生し、年最大積雪深の増加に伴い被害が拡大している様子が伺える。

3. 2 空知管内における建物被害の内訳

図 4 に、空知管内における 2013 寒候年、2018 寒候年、および 2021 寒候年の一部損壊の内訳を示す。2013 寒候年をみると、屋根からの落雪による被害が大半を占めており、屋根の一部損壊が全体の約 40%、外壁の一部損壊が全体の約 30%を占めている。庇・風除室の一部損壊および窓ガラス・シャッターの一部損壊も落雪に起因しており、それぞれ全体の約 20%を占めている。2018 寒候年をみると、屋根の一部損壊は 2013 寒候年と同様に全体の約 40%を占めている。外壁の一部損壊は

2013 寒候年に比べて割合が低下し、庇・風除室の一部損壊は確認されなかった。窓ガラス・シャッターの一部損壊は 2013 寒候年と同様の傾向であるが、2018 寒候年では煙突の損傷が全体の約 20% を占めるようになった。煙突の老朽化が進んで 2018 寒候年の大雪の際に損傷したものと考えられる。2021 寒候年をみると、屋根の一部損壊が全体の約 60% を占めている。2021 寒候年は岩見沢で過去 2 番目の年最大積雪深 2.05 m を記録しており、大雪になると屋根雪や落雪の重量が増加することによって屋根の一部損壊の占める割合が増加したものと考えられる。一方、煙突の損傷は 2018 寒候年と同様に確認されており、屋外階段の損傷も見受けられるようになった。煙突に加えて屋外階段の老朽化が進んで大雪により損傷したものと考えられる。さらに、その他として分類したが、2018 寒候年では確認されなかった一部損壊も 2021 寒候年では確認された。このように、住家被害は一部損壊にとどまる傾向が強いものの、煙突や屋外階段の老朽化に伴う損傷が確認されるようになり、大雪になると屋根雪や落雪の重量の増加に伴い屋根の一部損壊が占める割合が高くなり、被害が多様化していることがわかる。

図 5 に、空知管内における 2013 寒候年、2018 寒候年、および 2021 寒候年の非住家被害の内訳を示す。2013 寒候年をみると、倉庫等と空き家等の倒壊が全体を占めており、そのうち空き家等が全体の約 85% を占めている。倉庫等や空き家等は生活暖房がなく屋根雪が融雪しにくく、空き家等は老朽化が進んでいるため、倒壊による被害が集中したものと考えられる。2018 寒候年をみると、公共施設の被害がみられるが、その内訳は住家被害の一部損壊と同様である。倉庫等の倒壊は 2013 寒候年に比べて全体に占める割合が高くなっており、滝川で過去最深の年最大積雪深を記録したことに加えて老朽化が進んだことによって拡大したものと考えられる。2021 寒候年をみると、倉庫等と空き家等の倒壊は 2013 寒候年および 2018 寒候年と同様に確認され、農業施設の倒壊が全体の約 40% を占めている。これは、夕張において耐雪性能が低いビニールハウスが倒壊したことによるものである。以上の結果をみると、非住家被害の倒壊による被害は、倉庫等や空き家等の生活暖房がなく屋根雪が融雪しにくく、さらに、老朽化が進んだ建築物に集中している。また、建築基準法に基づかない農業施設でも倒壊が発生している。

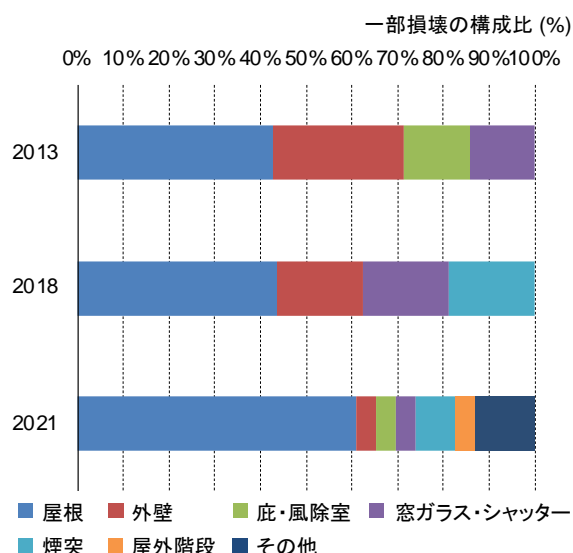


図 4 一部損壊の内訳 (空知管内)

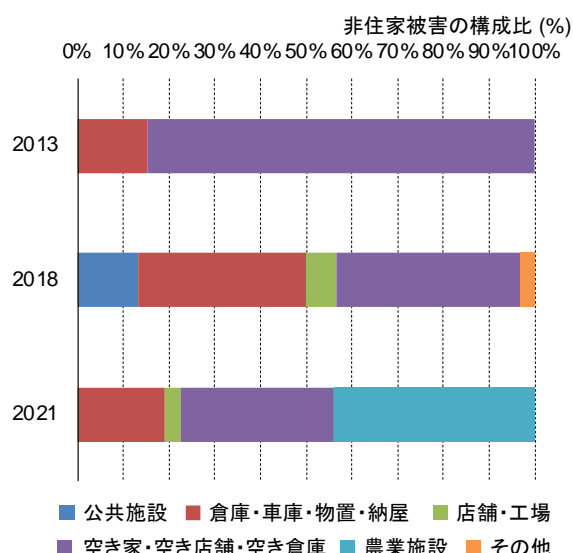


図 5 非住家被害の内訳 (空知管内)

3. 3 積雪深・積雪重量と被害棟数との関係

以上に示した空知管内における建物被害棟数を岩見沢周辺と滝川・夕張周辺に分けて年最大積雪深および年最大積雪重量と被害棟数との関係を検討した。なお、年最大積雪重量は日本建築学会建築物荷重指針・同解説²⁾に示されている気温と降水量に基づく方法により算定した。また、両者の関係と 2000 年改定前後の垂直積雪量 d_p , d_c , これらに中短期の荷重継続期間影響係数の逆数 ($3/1.6 = 1.875$) を乗じて算定した部材の応力が木材の材料強度に達する際の安全限界積雪深 d_{up} , d_{uc} , 垂直積雪量に単位積雪重量 3.0 kN/m^3 を乗じて算定した損傷限界積雪重量 S_p , S_c , これらを 1.875 倍した安全限界積雪重量 S_{up} , S_{uc} とを比較し

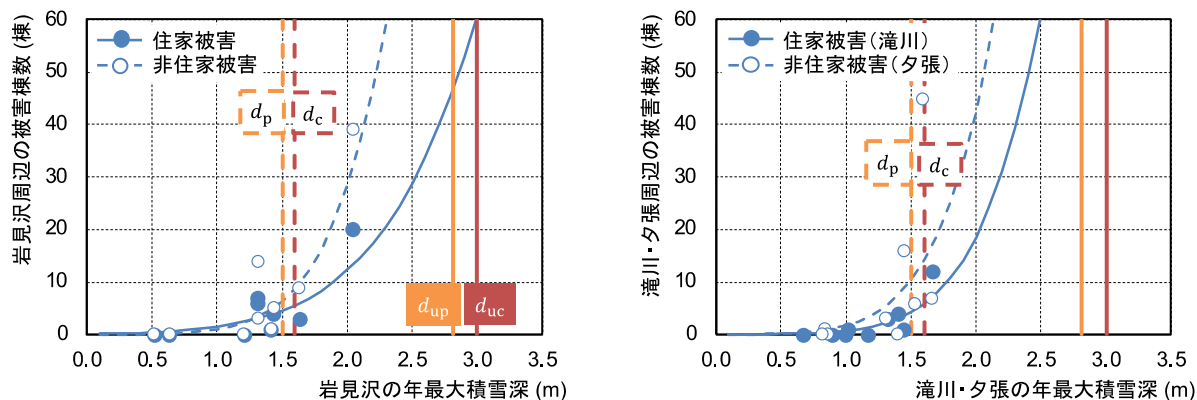


図6 年最大積雪深と岩見沢周辺および滝川・夕張周辺の被害棟数との関係

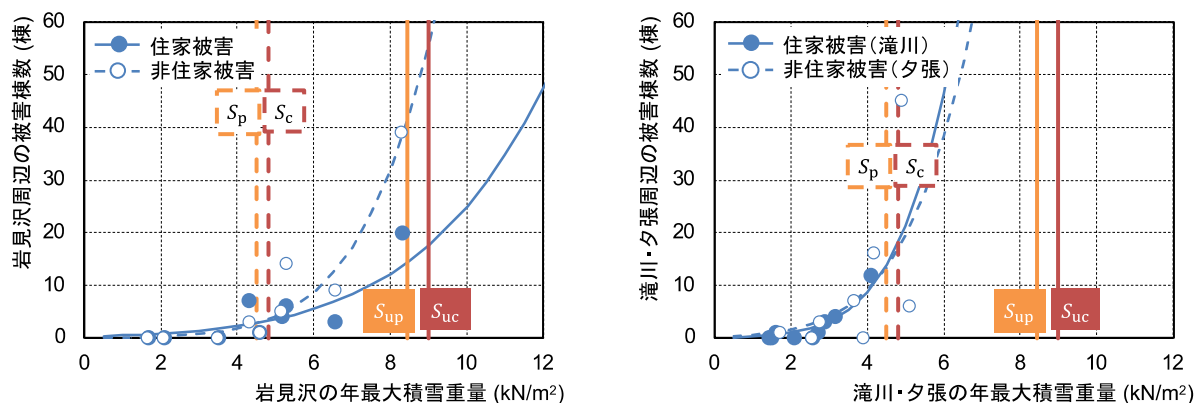


図7 年最大積雪重量と岩見沢周辺および滝川・夕張周辺の被害棟数との関係

た。図6に、年最大積雪深と岩見沢周辺および滝川・夕張周辺の被害棟数との関係を示す。岩見沢の場合をみると、年最大積雪深の増加に伴い被害棟数が増加する関係を示し、住家被害に比べて非住家被害が多くなる傾向を示す。滝川・夕張の場合をみると、岩見沢と同様に、年最大積雪深の増加に伴い被害棟数が増加する関係を示し、住家被害に比べて非住家被害が多くなる傾向も同様である。建物被害の発生・拡大状況は、2000年改正前の垂直積雪量 d_p に達する以前から被害が発生し、滝川・夕張では岩見沢に比べて少ない積雪深で被害が拡大する傾向を示す。

図7に、年最大積雪重量と岩見沢周辺および滝川・夕張周辺の被害棟数との関係を示す。岩見沢と滝川・夕張のいずれにおいても年最大積雪重量の増加に伴い被害棟数が増加する傾向を示す。岩見沢の場合では、非住家被害が住家被害に比べて多くなり、2000年改定前の安全限界積雪重量 S_{up} に達した段階で被害が拡大している。これに対し、滝川・夕張の場合では、非住家被害と住家被害との差が小さく、2000年改定後の損傷限界積雪重量 S_c を超えると被害が拡大しており、岩見沢の場合

に比べて建築物の耐雪性能が低い傾向を示す。このように、年最大積雪重量に基づいて建物被害の発生・拡大を説明することができる。

4. まとめ

本研究では、北海道における効果的な雪害対策を検討するための基礎資料を得ること目的に、2013～2021 寒候年の統計データを用いて雪による建物被害の特徴を把握するとともに、被害拡大の要因を分析した。その結果、岩見沢周辺では年最大積雪重量が2000年改定前の安全限界積雪重量に達すると被害が拡大した。滝川・夕張周辺では年最大積雪重量が2000年改定後の損傷限界積雪重量を超えた段階で被害が拡大し、岩見沢の場合に比べて建築物の耐雪性能が低い傾向があった。

【参考文献】

- 1) 北海道総務部 URL: <https://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/ktk/bsb/yukihigaizyoukyou.html> (2023年5月30日閲覧)。
- 2) 日本建築学会, 2015: 建築物荷重指針・同解説, 5章 雪荷重, 214-219。

道内の流雪溝供用地区における地域インフラの 持続的発展の可能性と課題について

三原 夕佳¹, 小西 信義¹, 西 大志², 谷野 淳³, 原文宏¹, 倉内 公嘉¹
Yuka Mihara¹, Nobuyoshi Konishi¹, Daishi Nishi², Jun Tanino³,
Fumihito Hara¹, Kimiyoshi Kurauchi¹
Corresponding author: y-mihara@decnet.or.jp (Y. Mihara)

第5期北海道総合開発計画で提唱された「ふゆトピア事業」の一環として、流・融雪溝が全道で整備された。供用開始から約30年以上が経過した今日において、地域社会の暮らしの基盤である地域インフラ、とりわけ流雪溝においては、社会情勢の変化等により、効果的に活用されていない状態が散見されることが指摘されている。

本稿では、道内の流雪溝供用地区に対するヒアリングや現地調査を行い、流雪溝の利用実態や管理運営等を明らかにするとともに、社会情勢の変化や時代のニーズに則した持続可能な地域インフラの在り方について考察した。

1. はじめに

1. 1 北海道における流雪溝について

流雪溝は、車道除雪で歩車道境界に寄せられた雪を沿線住民が各自で流雪溝に投雪し、流水で河川まで移動処理するインフラで、現在、道内22市町村で延べ延長104,964mにもわたり供用されている¹⁾。これらの大半は、第5期北海道総合開発計画（昭和60年）で提唱された「ふゆトピア事業」の一環で全道各地に整備された。ここで言う「ふゆトピア事業」とは、快適で活力あふれる都市環境と安全で豊かな生活環境を目指す施策の総称で、このうち「都市内総合雪対策モデル事業」と「北国のまちづくり事業」に基づき、流雪溝が整備された。

流雪溝の長所は、投雪作業が行われる限り、非積雪期とほぼ同様の道路空間を作り出すことができ、安全かつ円滑な道路利用を可能とする点にある。加え、商店街店舗の雪処理にも貢献するため、地域経済活動にも寄与する波及効果もある。流雪溝は豪雪地帯の暮らし全般を支える重要なインフラ（以下、「地域インフラ」）として、その役割が期待された。

1. 2 本研究の目的

道内の流雪溝の大半は、供用開始から約30年以上が経過し、様々な課題に直面している。例え

ば、取水ポンプや蓋等の流雪溝そのものの老朽化や、人口減少・少子高齢化の進行による投雪作業の担い手不足や投雪作業そのものに対する沿道住民の負担感増である。また、利用者たちのライフスタイルの多様化に伴い利用者が投雪したい時間帯と投雪可能時間帯が噛み合わない等の課題²⁾が挙げられ、流雪溝の持続可能性のあり方を検討すべき段階にあると言える。

これらの背景を踏まえ、留萌地域及び北空知地域の流雪溝を対象に、流雪溝の利用実態や利用上の課題、課題に対する対応等を把握するため、ヒアリング調査と現地調査を行った。本稿では調査結果の報告をするとともに、当該地域の社会情勢の変化、流雪溝の利用実態の変化等に注目することで、流雪溝の持続可能性について考察した。

2. 流雪溝の利用実態調査

本調査は砂川市、滝川市、苫前町で実施した。対象地域における流雪溝の概要を表1に示す。

2. 1 ヒアリング調査

令和4年11月に砂川市と滝川市の建設部土木課職員を対象にヒアリング調査を実施した。

調査項目は、流雪溝の利用率（使用した流雪溝投雪口（箇所）/全流雪溝投雪口（箇所））、運用ルール（投雪時間やハンドガイド式除雪機の使用

¹一般社団法人北海道開発技術センター

²苫前町まちづくり企画

³留萌開発建設部 道路計画課

表1 調査対象地域における流雪溝の概要

	砂川市	滝川市	苫前町
供用開始年	昭和 59 年	平成 2 年	平成 9 年
路線延長	総延長 8,554 m	総延長 7,040 m	総延長 3,271 m
水源	砂川火力発電所の温排水	石狩川（一級河川）	三毛別川（二級河川）

表2 ヒアリング調査結果の概要

調査項目	砂川市	滝川市
流雪溝の利用率	・ 約 4 割（194 箇所/458 箇所）	・ 約 3 割（箇所数不明）
運用ルール （投雪時間や除雪機の使用可否）	・ 6 ルートの流雪溝区間に分け、ルートごとに投雪時間を設定 ・ 降積雪状況に応じ投雪時間を延長 ・ 流雪溝手前までハンドガイド式除雪機の使用を許可	・ 3 ルートの流雪溝区間に分け、ルートごとに投雪時間を設定 ・ 運用ルール上、ハンドガイド式除雪機は使用禁止
管理運営体制	・ 投雪時間や注意事項等が記載された「流雪溝だより」を流雪溝利用開始前（11 月）と終了後（3 月）に発行 ・ 監視パトロールや違反者に対する指導、河川合流箇所の結氷防止対応等を民間委託	・ 平成 28 年 11 月に流雪溝の取水ポンプが故障したことで、故障防止対策を強化 ・ 監視パトロールや違反者に対する指導、河川合流箇所の結氷防止対応等を民間委託
その他利用上の課題	・ 令和 9 年の火力発電所廃止に伴う水源の確保 ・ 水源を河川水とした場合の整備費用支出	・ 施設の維持管理費用（定期点検、修繕）の支出 ・ 投雪時間の見直し

の可否）、管理運営体制、その他利用上の課題、とした。調査結果を表 2 に示す。

表 2 のうち特に重要な発言は以下の通りである。砂川市では、流雪溝の水源を砂川火力発電所の処理水としているが、同発電所が令和 9 年に廃止されることになった。そのため「流雪溝の維持・存続のための水源確保が最も大きな課題であり、流雪溝の運用を継続する場合、水源を河川水とする方法が考えられるが、その整備費用の支出が課題となる」と言う。

一方、滝川市では、平成 28 年 11 月に流雪溝の取水ポンプの故障が判明したことで、沿道住民は流雪溝による雪処理から運搬排雪による雪処理を 1 シーズン経験することになった。結果、住民は流雪溝の運用存続を希望したため、「市では流雪溝の点検回数の見直しや安全性の高い備品素材への交換等、故障防止対策を強化し、流雪溝の運用にあたっている」とのことであった。

2. 2. 現地調査

令和 5 年 2 月 18 日及び 19 日は苫前町古丹別

地区の有志からなる流雪溝への投雪作業日であったため、投雪作業に実際に参加する参与観察の手法で現地調査を実施した。また、当該投雪作業の世話人である A 氏に当該作業に至った経緯を聞き取った。

2. 2. 1 流雪溝協議会の規約改正

そもそも流雪溝は沿道住民による投雪が適切に行われることを前提に成り立っており、行政と住民が参画する流雪溝の管理運営協議会の設置は不可欠な手続きであることから³⁾、古丹別地区においても平成 9 年に協議会が設置されている。しかしながら、供用開始から 30 年以上が経過し、地域の過疎・高齢化が進む中で、協議会は活発に機能しているとは言い難く、流雪溝利用のあり方そのものを検討する必要に迫られていた²⁾。

以下、A 氏からの聞き取り調査に基づく。

令和 5 年 2 月 1 日、新型コロナウイルス感染症拡大を挟み 2 年ぶりに協議会の総会が開催された。供用開始以来はじめての協議会規約の改正が行われ、①事務局を行政（苫前町建設課）から

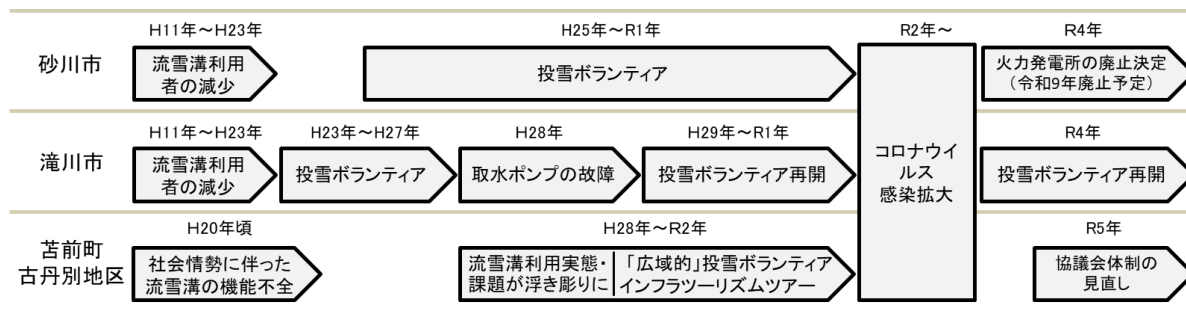


図1 流雪溝供用地区での主な出来事

住民（古丹別連合町内会）に移管，②協議会の構成員を拡大（「沿道住民及び苫前町」から「沿道住民及び関係機関」）へと変更された。

これにより，古丹別地区流雪溝の運用において住民のニーズ・提案が反映されやすく，協議会の活性化と流雪溝をめぐる協働性を高める体制が構築できた。そして，共助除雪体制づくりにも再び着手した。

2. 2. 2 共助除雪体制の再構築

新型コロナウイルス感染症拡大が収束しつつあった令和5年2月19日，2年ぶりに一斉投雪作業が行われた。感染症拡大以前に取り組まれていた広域的投雪ボランティアとは異なり，地域外からの雪処理の担い手は投入されず，前節で触れた協議会規約の改正に基づく「沿道住民及び関係機関」，つまり沿道住民や苫前町のほか国や道の道路管理者が主な担い手となった。

投雪作業は，空き地・空き家前の歩車道空間に積もった大きな雪山を除排雪する作業であった。一方，投雪作業の負担を軽減するため，前日には凍結した投雪口を掘り起こし，投雪口に凍結防止剤を散布する作業も行われ（写真1），当日は，投雪作業負担を軽減するため，ハンドガイド式除雪機による投雪口への直接的な投雪（機械投雪）が行われた。機械投雪が効率的に行えるよう沿道住民自らが開発した自製の機械投雪補助具が使用され，現有のリソースで投雪作業を効率的に行えるような工夫が見られた（写真2）。

2. 2. 3 小括

上記の調査結果について，各調査対象地域の流雪溝が社会情勢の変化や流雪溝の利用方法の変化等に着目し，整理した（図1）。

いずれの地域においても，設備の老朽化に伴う故障や少子高齢化といった社会的要因や官民連



写真1 （左：投雪口の掘り起こし 右：凍結防止剤の散布）



写真2 除雪機による機械投雪（右写真中の長方形の衝立が機械投雪補助具）

携による取組等を経験してきたことが明らかとなった。また，それらの経験の中には流雪溝の供用を継続するかどうかの判断に迫られる出来事もあった。

3. 考察

次に，前節の図1で示した流雪溝供用地区での主な出来事に基づき，流雪溝の持続可能性について探索的に考察する。

3. 1 流雪溝の持続可能性の可視化

流雪溝の持続可能性を検討する前に，インフラの性質を概観する。Star⁴⁾のインフラの定義によると，インフラは平時において人間の意識化に埋め込まれているが(embeddedness)，破綻した際に可視化(become visible upon breakdown)されることで，人間は改めてインフラの存在価値やその役割を再認識する。その後，日常に戻るとインフラは再び意識下に埋没してしまうと言う。本稿では，この言説を参考とし，「破綻」とまではいかなくとも，前節で示した流雪溝をめぐる出来事が流雪

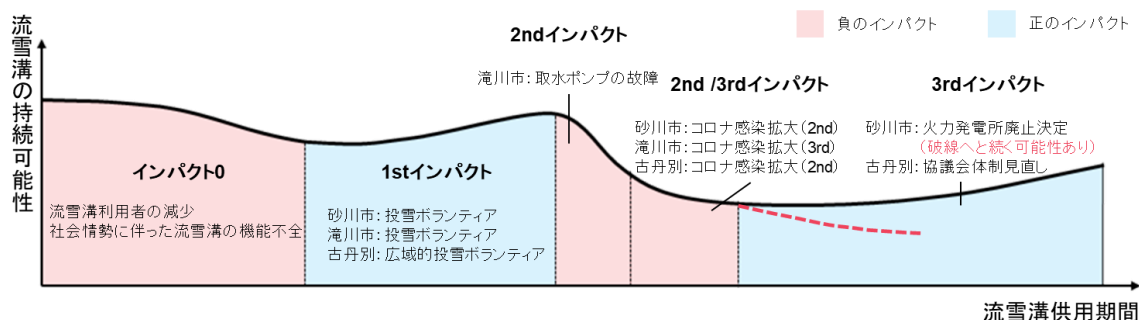


図2 流雪溝における持続可能性曲線 (イメージ)

溝の持続的可能性にどのように影響を与えたかを考察したい。

そこで、図1で整理した主な出来事を、流雪溝の持続可能性が左右される判断分岐点「インパクト」と表現する。特に流雪溝の利用を活性させる出来事や取組を「正のインパクト」、流雪溝の供用が危ぶまれる出来事を「負のインパクト」とする。これらの正負のインパクトが与えた流雪溝の持続可能性の変化を模式図として作図を試みた (図2)。

3. 2 インパクトがもたらす持続可能性

流雪溝の持続可能性は、正負のインパクトを経験することで、図2のとおり浮き沈みを繰り返し、現在に至っていると考えられる。

負のインパクトにより、当該流雪溝の利用者をはじめとするステークホルダーたちは流雪溝の将来性と潜在的な価値を再認識するとともに、それぞれの対応や判断に迫られた。しかし、いずれの地域においても官民連携による投雪ボランティアやインフラツーリズムツアーの開催による関係人口の創出、社会情勢に合わせた運用ルールの見直し等により正のインパクトを与え、流雪溝の持続可能性を取り戻してきたと考えられる。この変化はStar⁴⁾の「埋没」と「破綻」の繰り返しと類似する。

以上から流雪溝をめぐる正と負のインパクトは流雪溝の持続可能性と密接に関係していることが示唆された。

4. おわりに

豪雪地帯において、冬の暮らしを維持するためには除雪・排雪といった雪処理は必須である。流雪溝を利用した除排雪システムが適切に発揮されることで、持続可能で暮らしやすい地域社会づくりが実現できると考える。しかし、少子高齢化・都市一極集中・地域経済の縮小等、地域社会を維持していく

課題は雪処理問題以外でも山積していることは留意すべきである。

今後は流雪溝供用地区の利用実態や課題等について引き続き調査するとともに、本稿で提示した持続可能性を捉える指標 (地域コミュニティ力、商店街の空き店舗率、投雪ルールや利用時間等に対する満足度、生活の質、流雪溝自体のスペック等) を多面的に検討し、将来的には、実用性と妥当性を備えた指標であるかを検証する。加え、他の地域インフラの持続可能性を裏付ける条件や共通点も探っていきたい。

また、本調査対象地域が投雪作業の担い手不足や維持管理コストの増大等の共通の問題を抱えているにも関わらず、先行的な取組が参考情報として届いていないことも明らかとなった。そのため、各地域で抱える課題や課題解決のための柔軟なアイデアを共有しあえるプラットフォームとして、「流雪溝サミット (仮称)」の開催が実践上の課題として挙げられる。

【謝辞】

本調査にご協力いただいた砂川市・滝川市の方々、及び苫前町古丹別地区の皆様に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 小西信義, 野呂美紗子, 中前千佳, 原文宏, 西大志, 2016: 流(融)雪溝事始-苫前町古丹別地区を事例に-, 北海道の雪氷, **35**, 79-82.
- 2) 小西信義, 2018: 高齢化する人・街・インフラ, 文化人類学, **83** (3), 459-468.
- 3) 流雪溝マニュアル編集委員会, 1990: 積雪寒冷地における流雪溝マニュアル (案) .
- 4) Star Susan L, 1999: The Ethnography of Infrastructure. *American Behavioral Scientist*, **43** (3), 377-391.

グリーンランド北西部カナック氷河における氷レーダー探査

Ground penetrating radar survey on Qaanaaq Glacier in northwestern Greenland

佐藤 健^{1,2}, 杉山 慎¹

Ken Sato^{1,2}, Shin Sugiyama¹

Corresponding author: tosa-0727@ees.hokudai.ac.jp (K.Sato)

近年、グリーンランド周縁の氷河氷帽が急速に氷を失っている。氷河の質量損失は、海面上昇や海洋環境に影響を与える。氷河の将来変動を推定する数値モデルでは、氷厚データが必要である。しかしながら、観測の難しさから、グリーンランド周縁の氷河では氷厚データが不足している。そこで、本研究ではグリーンランド北西部カナック氷河を対象に、地中レーダー（GPR）による現地観測を実施した。その結果から氷厚分布を測定すると共に、氷河の内部および底面の構造や水文環境についての理解を深めることを目的とした。

1. はじめに

グリーンランド沿岸部には、氷床から切り離された氷河や氷帽が位置しており、その総面積は約 $89,300 \pm 2,800 \text{ km}^2$ である¹⁾。また、これらの氷河氷帽は、2018年10月から2021年12月の期間で $42.3 \pm 6.2 \text{ Gt/yr}$ もの質量損失を示しており、グリーンランド全体の氷損失の $11 \pm 2\%$ を占めている²⁾。氷河変動を把握するには、衛星リモートセンシングによる解析が有用である。しかしながら、質量損失のメカニズムを理解し、将来予測を行うための数値モデルを開発するためには、詳細な現地観測が必要である。特にグリーンランドでは、そのような観測が不足している。また、本研究で行うカナック氷河の全貌の把握は、カナック氷河の流動特性の理解につながるだけでなく、末端に位置するカナック村において、氷河の水資源としての展望も知ることが可能である。このような背景から、GRENE (2012-2016)、ArCS (2016-2020)、ArCS II (2020-2025) のプロジェクトで、2012年からグリーンランド北西部のカナック氷帽の現地観測を実施している。その中で、我々はカナック氷河の氷厚分布の測定と氷総量の推定、底面地形のマッピング、氷河内部および底面の水文環境の理解を目的として、2022年夏にカナック氷河にて地中探査レーダー（GPR, Ground penetrating radar）を用いた現地調査を実施した。

2. 研究対象地域

カナック氷帽（ $77^\circ 28' \text{N}$, $69^\circ 14' \text{W}$ ）はグリーンランド北西部のカナック村から3 kmに位置し、標高範囲は15–1135 m、面積は312 km^2 である（図1）³⁾。カナック氷河は、氷帽から張り出す多数の溢流氷河の1つであり、カナック空港とカナック村から約3 kmに位置している。2012年夏には、氷河中央線に沿った表面融解速度、氷河の流動速度、氷の厚さが測定された⁴⁾。その後も現在に至るまで、質量収支、流動速度、表面高度などの測定が継続されている。本研究では、2022年7月18日から8月12日に、カナック氷河の上流部から末端にかけて、GPRを用いた測定を行った。測定は、氷河の流線に沿った5つの測線と氷河の流れに対して垂直な9つの測線で行った（図2）。

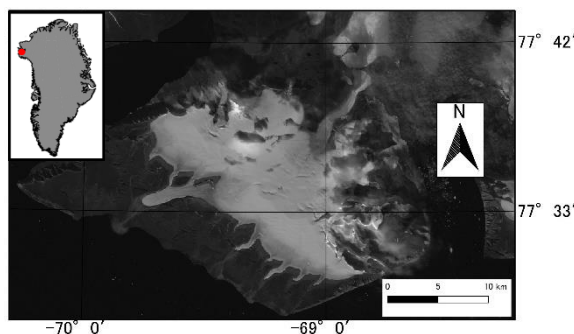


図1 カナック氷帽の衛星画像（2022年8月31日に Sentinel-2 によって撮影）。挿入図はグリーンランドにおけるカナック氷帽の位置。

¹北海道大学 低温科学研究所

²北海道大学 環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Graduate School of Environment Science, Hokkaido University

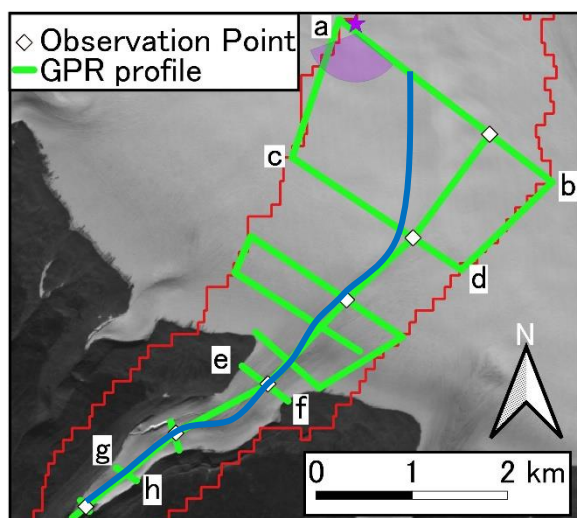


図2 カナック氷河に設定された GPR の測線と質量収支測定地点の位置. 紫点は図9の撮影地点と撮影方向. 青線は推定された底面の谷地形. 背景画像は2022年9月17日に Sentinel-2 によって取得された衛星画像.

3. 研究手法

GPR は、電磁波の反射を用いて、地中の構造を測定する装置である. 氷河で使用した場合、氷の厚さや底面形状、氷河内部構造に関する情報を得ることができる (例えば、Karušs ら⁵⁾). 本研究では、GSSI 社製の GPR システム (SIR-4000, 3200MFL) を用いた. このシステムは、コントローラ、発信機、受信機、長さ 2.4 m のアンテナから構成され、氷河内に発射された電磁波の往復時間と反射強度を測定する (図 3). 電磁波の中心周波数は 40 MHz であり、反射シグナルを 1 秒間に 30 回記録する. また、測定地点を 2 周波 GPS 装置 (Leica Geosystems, GS10) によるキネマティック測量で記録した. 氷河内における電磁波の伝播速度は 1.68×10^8 m/s を仮定して、反射信号の往復時間を氷河内の距離に換算した⁶⁾.

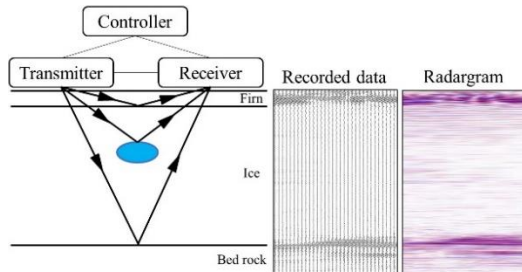


図3 GPR による氷河内測定の模式図と測定によって得られる反射シグナルと反射像.

4. 結果と考察

4. 1 氷厚

全ての GPR プロファイルの中で、最大氷厚は測線 c-d で観測された 201 m であった (図 4). また、氷河の流れに垂直な鉛直断面プロファイル全てを用いて、測定された氷厚をカナック氷河全域に線形補間して氷厚分布を推定したところ、平均氷厚は 99 m であった.

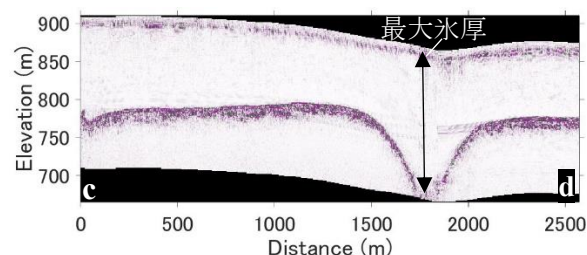


図4 測線 c-d (図2) に沿って得られたレーダグラム (カラースケールは反射強度).

4. 2 氷河底面地形

GPR で測定した氷厚分布と GPS で測定した氷河表面標高を組み合わせることで、氷河断面の地形を得た. 測線 a-b および測線 g-h に沿った鉛直断面プロファイルを図 5 および図 6 に示す. これらのプロファイルでは、表面の起伏よりも深い谷地形が底面に確認された. このような顕著な底面の谷地形は、全ての横断測線で確認された. このことから、カナック氷河の底面には、図 2 に示すような連続した谷地形が存在していることが明らかになった.

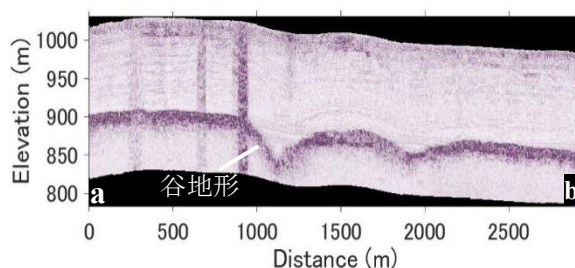


図5 測線 a-b に沿って得られたレーダグラム.

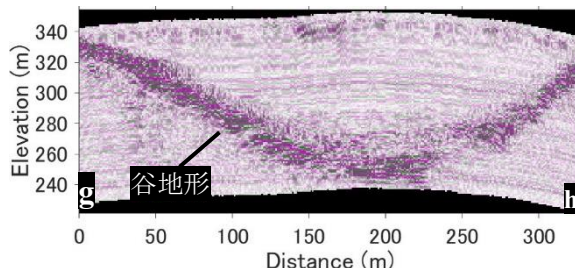


図6 測線 g-h に沿って得られたレーダグラム.

4. 3 氷河内部および底面の水文環境

標高の高い領域に位置する測線 B(図 7)では、基盤を示す反射に加えて、氷河表面付近から始まる連続した強い反射信号が得られている。この信号は、現地観測で確認された水で満たされたクレバス(図 8)の位置と一致していることから、この水からの反射であると解釈できる。また、氷河基盤付近には、上に凸の反射が確認された(図 7)。この凸状の反射源として 2 つの可能性が考えられる。ひとつは氷河底面の隆起地形、もうひとつはハイドロフラクチャリング(融解水の侵入による氷の破碎)によって形成された水路である。これらの可能性を検証するためには、さらなる調査・解析が必要である。さらに、調査ルート 3~6 の中標高域では、氷河表面の水流によって、電磁波の散乱が発生している(図 9)。氷が融点より冷たいために融解水は氷河内部に入らず、表面で水流を形成しているものである。また、氷河底面付近では、基盤を示す反射以外は確認されなかった。

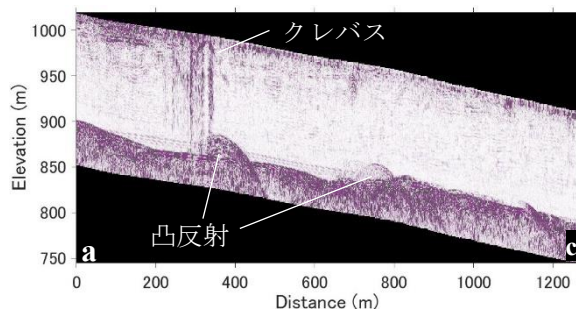


図 7 測線 a-c に沿って得られたレーダーグラム。

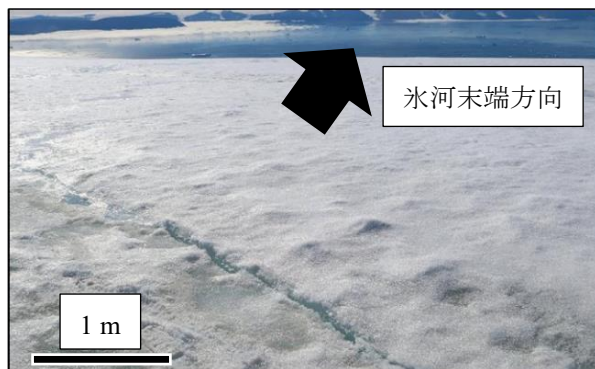


図 8 現地高標高域で観測された水で満たされたクレバス(撮影日: 2022 年 8 月 6 日)

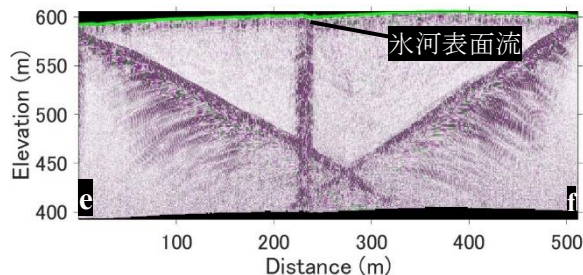


図 9 測線 e-f に沿って得られたレーダーグラム。

4. 4 カナック氷河の氷総量

GPS 測量で得られた氷河表面標高と GPR 調査で得られた氷厚分布について、氷河全域に線形補間することにより(図 10)、カナック氷河の氷量を推定した。その結果、カナック氷河には約 1.3 km^3 (1.2 Gt) の氷が存在すると推定された。

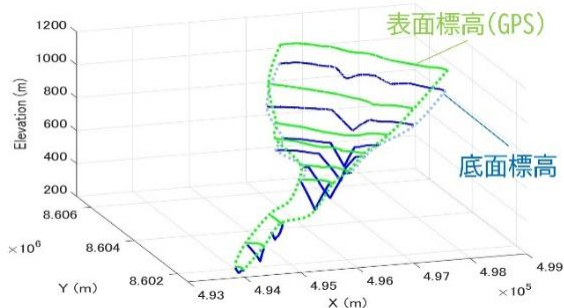


図 10 GPR 測線上の氷河表面(緑)および基盤(青)標高。

6. まとめと今後の展望

本稿では、グリーンランド北西部カナック氷河において、GPR を用いた現地観測を実施した。GPR 観測は 2022 年 7 月 18 日から 8 月 12 日の期間に、合計 14 本(総長 21.1 km)の測線で実施した。その結果、カナック氷河調査域の最大氷厚は 201 m、平均氷厚は 99 m と示された。また、カナック氷河の底面には、連続した谷地形(最大幅約 500 m、最大深約 100 m)が確認された。低標高域では氷河内部および底面に水文環境は確認されない一方で、高標高域では、水で満たされたクレバスからの反射が確認された。底面付近には基盤反射とは異なる反射が確認された。この反射は水路の存在を示す可能性があり、今後も更なる調査・議論が必要である。また、測定データの内挿によってカナック氷河の氷総量を推定した結果、約 1.3 km^3 (1.2 Gt) と示された。今後は GPR 観測における測定データの誤差の評価を行い、氷厚データの精度向上に取り組む。また、氷河の表面流動速度や表面質量収支のデータを用いて氷厚

を推定 (例えば, Farinotti ら⁷⁾) し, 測定データとの比較や検証を行う。

【謝辞】

本研究は, 北極域研究推進プロジェクト (ArCS) JPMXD1300000000, および北極域研究加速プロジェクト (ArCSII) JPMXD1420318865 の一環として実施した。カナックでの現地観測では日下稜氏, 渡邊果歩氏, 今津拓郎氏, 鶴飼真汰氏の助けを得た。また現地活動のサポートを得た Toku Oshima 氏, Kim Petersen 氏に謝意を表する。

【参考文献】

- 1) Rastner, P., T. Bolch, N. Mölg, H. Machguth, R. Le Bris and F. Paul, 2012: The first complete inventory of the local glaciers and ice caps on Greenland, *The Cryosphere*, **6**, 1483-1495.
- 2) Khan, S. A., Colgan, W., Neumann, T. A., van den Broeke, M. R., Brunt, K. M., Noël, B., et al. 2022: Accelerating Ice Loss From Peripheral Glaciers in North Greenland, *Geophysical Research Letters*, **49**, e2022GL098915.
- 3) Tsutaki S et al., 2017: Surface mass balance, ice velocity and near-surface ice temperature on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, from 2012 to 2016, *Annals of Glaciology*, **58**(75pt2), 181-192.
- 4) Sugiyama, S., Sakakibara, D., Matsuno, S., Yamaguchi, S., Matoba, S., & Aoki, T. , 2014: Initial field observations on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, *Annals of Glaciology*, **55**, 66, 25-33.
- 5) Karušs Jānis, Kristaps Lamsters, Jurijs Ješkins, Ireneusz Sobota, and Pēteris Džeriņš, 2022: UAV and GPR Data Integration in Glacier Geometry Reconstruction: A Case Study from Irenebreen, Svalbard, *Remote Sens*, **14**, 3 456.
- 6) Glen, J., & Paren, J., 1975: The Electrical Properties of Snow and Ice. *Journal of Glaciology*, **15**, 73, 15-38.
- 7) Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., & Truffer, M., 2009: A method to

estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers, *Journal of Glaciology*, **55**, 191, 422-430.

グリーンランド北西部カナック氷河における近年の流動変化

Change in the ice flow regime of Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland

今津 拓郎^{1,2}, 杉山 慎¹

Takuro Imazu^{1,2}, Shin Sugiyama¹

Corresponding author: takuro_imazu@lowtem.hokudai.ac.jp (T. Imazu)

近年, グリーンランド周縁部に分布する氷河氷帽の質量損失が著しい. 氷河氷帽の質量変化は, 表面質量収支だけでなく, 氷流動にも影響を受ける. そこで, 著者らは 2012 年からグリーンランド北西部カナック氷河において, 質量収支や標高変化の測定と合わせて, 流動速度を継続して観測している. 本研究では, 2012–2022 年に観測された流動速度をまとめ, 数値実験によって 10 年間の表面標高と氷河末端位置の変動を再現した. 今後は作成したモデルを用いてカナック氷河や氷帽の将来変動予測を行う.

1. はじめに

近年, グリーンランド周縁部に分布する氷河氷帽の質量損失が著しい. これらの質量損失は時空間的に一様ではない. 例えば, 本研究で着目する北西部の氷河氷帽では, 2003–2018 年に加速傾向であった質量損失が 2019 年以降減速傾向に転じたことが人工衛星観測によって明らかとなった¹⁾. このような氷河の質量変化は, 質量収支に加えて, 涵養域から消耗域への氷流動にも影響を受けるため, 質量変化のメカニズムを理解する上で長期間にわたる流動速度観測は重要である. しかし, グリーンランド北西部はアクセスが悪いため現地調査例が少ない. このような背景のもと, 著者らはグリーンランド北西部のカナック氷河において, 流動速度を 2012 年から継続して観測している. それらの観測結果をもとに, 数値モデルの開発も行われており²⁾, 数値計算は氷河変動の定量化とその要因を解明する上で有効な解析手法である. 本稿では(1) 2012–2022 年に観測された流動速度をまとめ, (2) 同期間の 10 年間の氷河変動(表面標高変化及び末端後退距離)を数値実験によって再現することを目的とした.

2. 研究対象地

カナック氷帽はグリーンランド北西部(77°28'N, 69°14'W)に位置する面積 289 km² の氷帽である²⁾(図 1a). 本研究の対象地域であるカナック氷河はカナック氷帽から南側に溢流する氷河のひとつであり, 2012–2022 年にかけて, 中央流線に沿った標高 243–968 m a.s.l の 6 地点で

流動速度と表面質量収支が観測されている³⁾(図 1b の●, 低標高域から高標高域にかけて Site1 から Site6 と呼ぶ). また, 氷河の中央流線(図 1b の破線)に沿って 2012 年 7 月 26–30 日に GPS とアイスレーダーによって表面標高と底面地形が²⁾, 2022 年 8 月 3 日には表面標高が測定された³⁾.

3. 研究手法

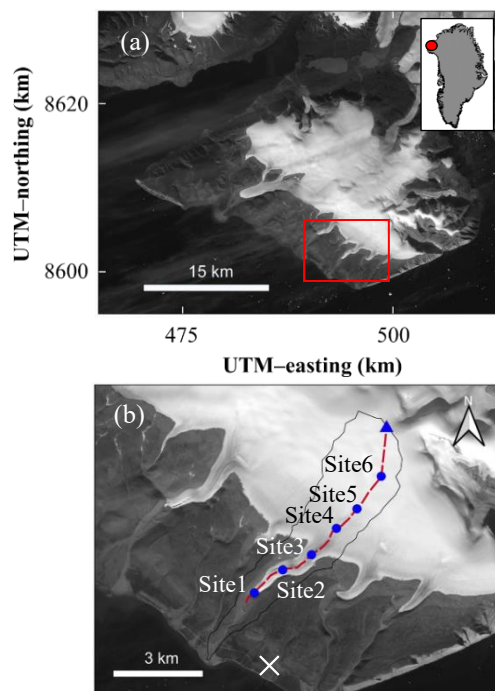


図 1 (a) カナック氷帽の衛星画像 (Landsat 8, 2022 年 8 月 27 日撮影). 赤枠は(b)の範囲を示す. (b) カナック氷河の流域(実線), 流動速度と表面質量収支の観測地点 (●), 氷河上端 (▲), カナック村に設置した GPS 基準局 (×), 底面と表面標高の測線 (破線).

¹ 北海道大学低温科学研究所

² 北海道大学環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

3. 1 流動速度の現地観測

氷河上に埋設したアルミポールの先端に GNSS アンテナ (Leica GS10, System1200 ; または Enabler Ltd, GEM-1) を固定し, カナック村に設置した基準局 (図 1b の×) との約 30 分のステイック干渉測位によって 3 次元座標を取得した. この測量を 2012–2022 年の 7–8 月に行い, ポールの座標変化から水平方向の流動速度を算出した. なお 2021 年は COVID-19 の影響を受けてデータ欠損となった.

3. 2 氷河数値モデル

氷河の流動モデルと質量収支の観測値を基に, 氷河変動モデルを構築した (図 2). このモデルを使った数値実験によって, 2012–2022 年の 10 年間で生じたカナック氷河の表面標高変化及び末端の後退を再現した.

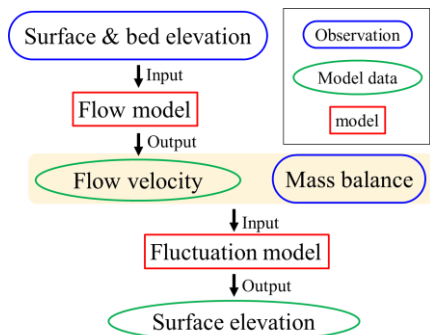


図 2 本研究で構築した氷河変動モデルの構造を示す. 観測値 (青), 計算値 (緑), 数値モデル (赤).

3. 2. 1 氷河流動モデル

先行研究²⁾で構築された 2 次元流動モデルを改良し, 観測された流動速度を再現するモデルを構築した. 氷河の中央流線 (図 1b の破線) に沿った流動方向と鉛直方向にそれぞれ x , z 軸をとった場合, x – z 平面内の運動量保存則と質量保存則はそれぞれ以下で表される.

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho g \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = C\eta U \frac{H}{W^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$\sigma_{ij}(i, j = x, z)$ は応力テンソルの成分, $\rho = 910 \text{ kg m}^{-3}$ は氷の密度, $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ は重力加速度, C は氷河側岸からの摩擦を表す係数 (氷河が谷地形

に溢流する領域では $C = -40.5$, それ以外の領域では 0 とする), η は氷の粘性係数, U は水平方向の流動速度, H は氷厚, W は氷河幅, u_i は $i = x, z$ 方向の流動速度成分を表す. 構成式を用いて式 (1) の応力テンソルの成分をひずみ速度に変換し, 式 (1) 及び式 (2) を解いた. その際に用いた構成式であるグレンの流動則は以下で表される.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = A\tau_e^{n-1}\tau_{ij} \quad (3)$$

$\dot{\epsilon}_{ij}$ はひずみ速度, A は氷体温度に依存する速度因子, τ_e は有効応力, τ_{ij} は偏差応力である⁴⁾. 本研究では, $n = 3$ を仮定した. 2012 年に観測された表面標高と底面標高から得た 2 次元縦断面を初期地形として, 有限要素で水平方向を 30 分割, 鉛直方向を 10 分割した (図 3). その有限要素上で式 (1)–(3) を有限要素法によって解き, 流動速度を算出した. 境界条件には, 2014 年の観測で得られた氷表面から 13 m 地点の氷体温度⁵⁾を与え, 底面から供給される地殻熱流量を 47 mW m^{-2} と仮定した. 式 (1) の C , 式 (3) の A 及び境界条件の地殻熱流量は, 2012/2013 年に観測された水平方向の流動速度を再現するように最適化した.

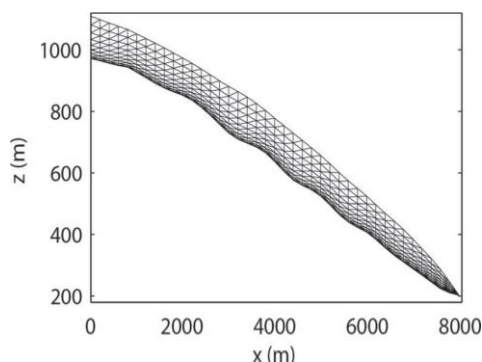


図 3 氷河流動モデルに使用したメッシュ化した 2 次元のカナック氷河縦断面 (Sugiyama, S. et al., 2014 より引用). 横軸に氷河上端 (図 1b の▲) からの距離, 縦軸に標高を示す.

3. 2. 2 氷河変動モデル

氷河流動モデルによって得られた氷河表面の流動速度 (u_x, u_z) と表面質量収支の観測値 (b) を用いて, 表面標高を 1 年毎に以下の式で計算した.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = b + u_z - u_x \frac{\partial h}{\partial x} + G \quad (4)$$

G は 2 次元の氷河変動モデルに対して 3 次元的な効果を補正する項であり, 図 3 の $0 \leq x < 2130 \text{ m}$ の領域, $2130 \leq x < 5160 \text{ m}$ の領域及び $x \geq 5160 \text{ m}$ の領域に対して, それぞれ式 (5)–(7) を適用した.

$$G = -C_1 \log(W_{ELA} + 1 - W) \quad (5)$$

$$G = C_2 \log(W) \quad (6)$$

$$G = C_3(T_{thd} - T) \quad (7)$$

式(5)は平衡線より上流部の領域において、氷河の中央流線から氷フラックスが発散する作用を考慮しており、 $C_1 = 0.01$ は発散係数、 $W_{ELA} = 2590$ m は平衡線の氷河幅、式(5)及び(6)の W は氷河幅を表す。式(6)は谷地形に溢流する境界より上流部から平衡線以下の領域において、中央流線に対して氷フラックスが収束する作用を考慮しており、 $C_2 = 0.16$ は収束係数を表す。式(7)は氷河が谷地形に溢流する領域において、谷地形の蛇行(図1bのSite2付近)が中央流線の氷フラックスに与える影響を考慮しており、 $C_3 = 4$ は傾き係数、 $T_{thd} = 0.45$ は中央流線の緯度に対する経度の傾きの閾値、 T はその傾き(ただし、 $T_{thd} \geq T$ のとき $C_3 = 0$)を示す。式(5)の C_1 、式(6)の C_2 、式(7)の C_3 及び T_{thd} は 2022 年に観測された表面標高を再現するように最適化された。

4. 結果と考察

4. 1 流動速度の観測結果

Site1-4 において 2012-2022 年の 10 年間で氷河の流動速度は減少傾向を示した(図4)。減少幅は Site1 から Site4 でそれぞれ -0.37 m a⁻¹、 -1.08 m a⁻¹、 -1.65 m a⁻¹、 -1.02 m a⁻¹ であり、Site3 での減速が最も著しい。一方、Site5 と Site6 の流動速度は 2016 年以降、それぞれ 0.14 m a⁻¹ と 0.21 m a⁻¹ の増加傾向を示した(図4)。

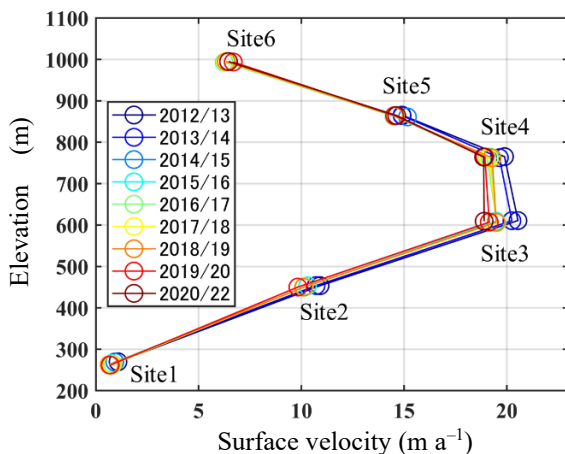


図4 2012-2022 年の 10 年間で観測された氷河表面の水平方向の流動速度。

4. 2 氷河流動モデルの較正及び検証

2012 年に観測した底面標高と表面標高を用いて氷河流動モデルで流動速度を計算した結果、図5aに示す流動速度が算出された。2012/2013 年の観測値に対する計算値の平均二乗根誤差は 0.91 m a⁻¹ となり、概ね良い一致が見られた(図5b)。また、2022 年の表面標高の観測値をもとに流動速度を算出した結果、同年の観測値に対する平均二乗根誤差は 1.03 m a⁻¹ であった(図5b)。以上より、流動モデルは氷河変動に伴って変化する流動速度を概ね良く再現することが示された。

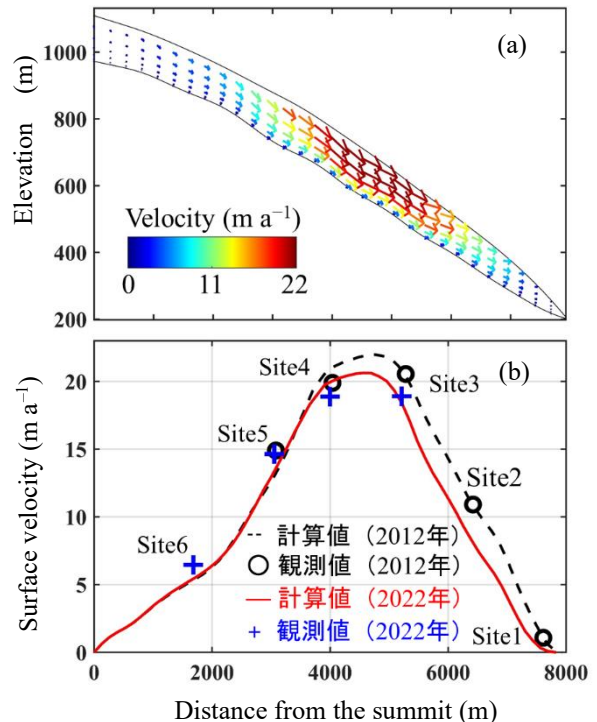


図5 (a) 2012/2013 年の流動速度を再現した氷河流動モデル結果。(b) 氷河表面の水平方向の流動速度。2012 年計算値(黒破線)、2012 年観測値(○)、2022 年計算値(赤線)、2022 年観測値(+).

4. 3 氷河変動モデルの結果及び検証

氷河変動モデルで 2012-2022 年の表面標高変化を計算した結果、平均表面標高変化は -4.95 m であった。同期間に観測された変化は -7.30 m であり、数値モデルは実際の表面低下を 32% 過小評価した(図6aの破線)。また、後退距離の計算値は 93 m であった一方、観測された後退距離は 105 m であった。土砂に覆われた末端位置の同定が難しいことを考慮すると、氷河変動モデルはカナック氷河の後退を概ね良く再現したといえる(図6b)。標高変化の観測値に着目すると、氷河上端から $6000-7000$ m 付近に 2 つの極大値があり(図

6a の↑), それぞれ谷地形の蛇行 (図 1b の Site2 付近) の始点と終点付近に位置する. すなわち, 極大値は氷河の 3 次元的な構造によって生じた標高変化である可能性が高く, そのような特徴は 2 次元縦断面に着目した本研究の数値モデルでは再現されてない. よって, 式(5)-(7)を用いて設定した 3 次元的な氷フラックスを与える項 G は今後改善の余地がある.

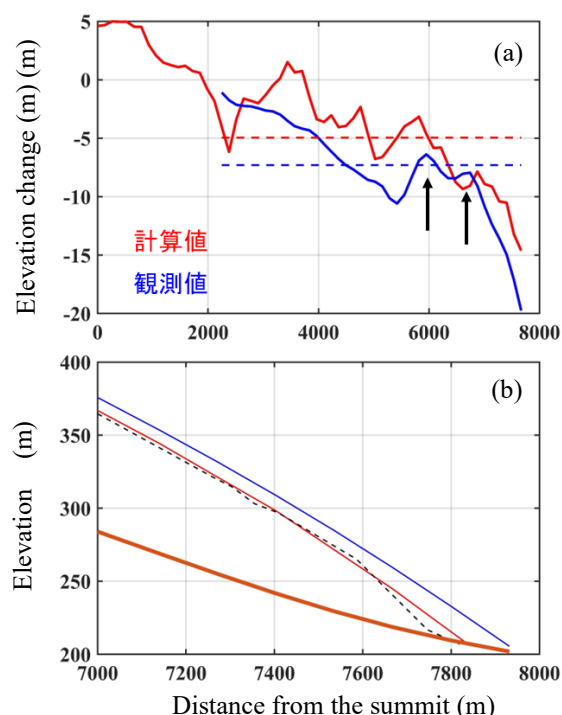


図6 (a)カナック氷河中央流線の2012年から2022年における表面標高変化の計算値(赤)と観測値(青), 破線はそれぞれ観測された領域での平均を示す. (b)表面標高の末端付近の拡大図. 2012年観測値(青), 2022年計算値(赤), 2022年観測値(黒), 2012年に観測された底面標高(茶).

5. まとめ

グリーンランド北西部カナック氷河において, 2012–2022年の流動速度を測定した結果, Site1–4において流動速度の減少傾向がみられた. 特に Site3 において 1.65 m a^{-1} の最も大きな減速がみられた. また, 上流部では流動速度の増加傾向が示された. 氷河流動モデルによって, 2012年及び

2022年の流動速度を再現した結果, 平均二乗根誤差はそれぞれ 0.91 m a^{-1} と 1.03 m a^{-1} となった. 氷河変動モデルによって, 2012–2022年の表面標高変化を計算したところ, 平均 -4.95 m と算出され, 観測値を 32%過小評価した. 後退距離の計算値は 93 m であり, 観測値の 105 m をやや下回ったが, 土砂に覆われた氷河末端位置の同定が難しいことを考慮すると, 概ね良い再現性を示した.

今後の展望として, 構築した氷河数値モデルを用いて, 過去の気候変動を入力してカナック氷河の変動を計算し, 光学人工衛星データをもとに検証する予定である. また, 将来の気候変動シナリオを用いてカナック氷河の将来変動を計算し, 気候変動が氷河の質量変化に与える影響を解明する.

【謝辞】

本研究は GRENE 北極気候変動研究事業, ArCS 北極域研究推進プロジェクト及び ArCS II 北極研究加速プロジェクトの下で実施した. 本研究にこれまで携わってこられた方々に謝意を表する.

【参考文献】

- 1) Khan, S. A. et al., 2022 : Accelerating Ice Loss From Peripheral Glaciers in North Greenland, *Geophysical Research Letters*, **49**(12), e2022GL098915.
- 2) Sugiyama, S. et al., 2014 : Initial field observations on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, *Annals of Glaciology*, **55**(66), 25–33.
- 3) 渡邊果歩, 2023 : グリーンランド北西部カナック氷帽における 2012–2022 年の表面質量収支, 北海道大学環境科学院修士論文.
- 4) Cuffey, K.M. and W.S.B. Paterson, 2010 : the physics of glaciers, Elsevier, Burlington, MA, USA, ISBN 978-0-12-369461-4.
- 5) Tsutaki, S. et al., 2017 : Surface mass balance, ice velocity and near-surface ice temperature on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, from 2012 to 2016, *Annals of Glaciology*, **58**(75pt2), 181–192.

グリーンランド北西部カナック氷河における UAV を用いた表面地形測量

Surface Topography Survey Using an UAV on Qaanaaq Glacier, northwestern Greenland

鵜飼 真汰^{1, 2}, 杉山 慎¹, 近藤 研^{1, 2},
Shinta Ukai^{1, 2}, Shin Sugiyama¹, Ken Kondo^{1, 2},
Corresponding author: ukaishinta@ees.hokudai.ac.jp (S.Ukai)

グリーンランド沿岸域では現在、北極圏の急激な温暖化の影響を受けて氷河の融解が顕著である。氷河変動の定量化とメカニズムの理解を目指し、我々は2012年からグリーンランド北西部に位置するカナック氷帽で調査を継続している。2022年の夏季には氷河上でドローンを用いた観測を実施した。ドローンから得た高解像度の画像データから、デジタル標高モデルとオルソ画像を作成し、表面高度の変化を定量化したので報告する。

1. 研究背景

グリーンランドは北極域の激しい温暖化の影響を受けており、特に沿岸部で氷河の急速な融解が発生している。氷河の融解には、気温以外にも様々なプロセスが関与する。例えば、氷河上に形成された水流では、氷河の融解を促進されることが知られている¹⁾。このような効果を定量化するためには、人工衛星画像よりも高い分解能で高頻度に氷河上を解析する必要がある。ドローンは衛星画像よりも高解像度の画像が取得可能なため、近年氷河学において注目されている機材である²⁾。そこで本研究では、グリーンランド北西部カナック氷河上でドローンによる観測を行って、氷河上に存在する水流の変化を観測した。本研究では、2022年夏期に得られたデジタル標高モデル(DEM)とオルソ画像から、観測域における氷河表面の高度変化と水流の発達を明らかにすることを目的とした。

2. 調査対象地域

調査を行ったのは、グリーンランド北西部に位置するカナック氷帽(77° 28' N, 69° 14' W)から溢流するカナック氷河である(図1)。著者らはこの氷河で2012年から観測を継続しており、質量収支、流動速度、表面高度の変化などが測定されている³⁾。2022年には7月から8月に現地観測

を実施した。ここで報告するドローン観測は、カナック氷河の中流域、標高550–750mで行った。この地域は氷河の消耗域にあたり、幅数10cmから数mまで様々なサイズの氷河上水流が存在する。

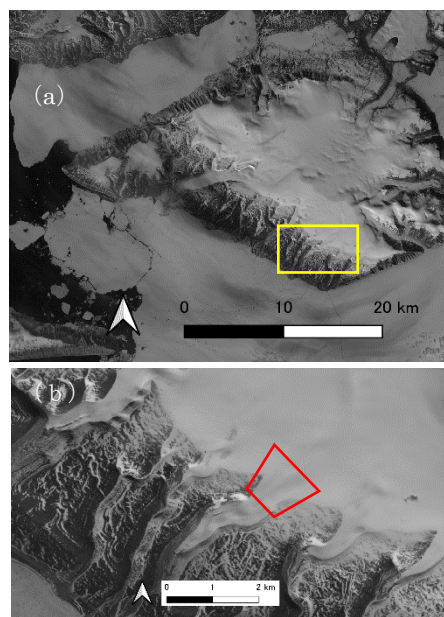


図1 (a) カナック氷帽の人工衛星画像 (Sentinel-2, 2023年6月16日撮影)。黄色枠は(b)の範囲を示す。(b) カナック氷河とその周辺域。赤枠はドローン観測を行った範囲を示す。

¹ 北海道大学低温科学研究所

² 北海道大学環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

3. 手法

3. 1 ドローン観測

観測には DJI 社のドローン phantom4pro V2.0 (図2)を使用した。この機器を氷河表面から高度 120 m の高さで飛行させ、地上解像度 33 mm の画像を連続的に取得した。撮影画像の重なり割合を示すオーバーラップとサイドラップはそれぞれ 70%と 65%に設定した。914000 m²の測定域において、1回の測定で 680 枚の写真を撮影した。観測は 2022 年 7 月 14, 18, 26, 8 月 1, 6, 10 日の 6 回行った。



図2 本研究で観測に使用したドローン (DJI phantom4pro V2.0)

写真測量から得たデータに正確な位置情報を与えることを目的に、氷河周辺の 6 か所、8 月 10 日の観測ではさらに氷河上に 3 か所、地上基準点 (GCP : ground control point) を設置した (図3)。赤く塗った一辺 30 cm の木の板を地上に固定し、(図4) 板の中心を後述する GPS 干渉測位により測量し、その三次元座標をドローン画像の処理に使用した。

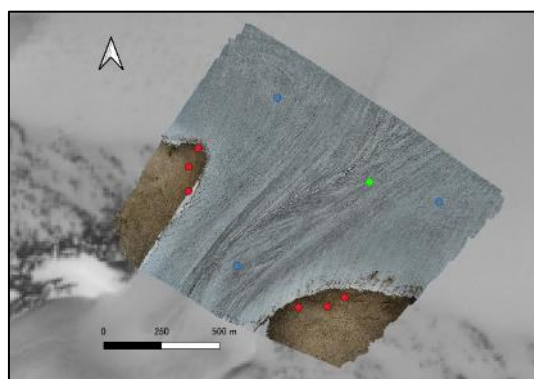


図3 観測域の人工衛星画像に重ねたドローン撮影画像に、GCP (赤:全測定, 青:8 月 10 日のみ) と飛行開始位置 (緑) の位置を示す。



図4 観測域の岩盤上に設置した地上基準点。

3. 2 GPS 観測

氷河上の表面標高と GCP の測量に二周波 GPS (Leica Geosystems 社, GS10) を用いた。GPS アンテナをバックパックの上蓋に入れ、氷河上を歩きながらデータを取得した (図5)。得られたデータとカナック村に設置した GPS 基準局のデータを用いて、キネマティック干渉測位によって三次元座標を得た。過去の測定から、測定精度は水平方向に 10 mm, 鉛直方向に 50 mm 程度と考えられる。この測量結果の鉛直座標からアンテナ高を差し引いて、ドローン画像から生成した DEM の精度を検証した。



図5 測量器具をバックパックに入れ、氷河上を歩く様子。

3. 3 DEM の生成と検証

Structure from Motion (SfM) と呼ばれる技術を用いて、ドローンで撮影した多数の画像から DEM を生成した。この作業には Agist 社のソフトウェア Meta shape を使用した。まずレンズのキャリブレーションを行った。レンズの歪みを補正するキャリブレーションを行って、3D モデルの精度向上を試みた。次に画像のアライメントによ

り、重なり合う連続した画像から特徴点を抽出し、点群のマッチングを行う。複数枚の写真から対応する特徴点を合わせることで、物体表面の三次元座標を示す点群を作成した。画像の歪みや解析のエラーによって大きく外れた値は、ソフトウェアにしきい値を設定して取り除いた。次に、アライメントから作成した点群をさらに高密度な点群にすることで、測量対象の詳細な地形を得た。この高密度な点群から DEM を作成した。さらに作成した DEM を基にして、撮影画像のモザイクからオルソ画像を作成した。

得られた DEM は GIS ソフトウェア (QGIS) のラスタ計算機を用いて解析を行った。まず GPS で測定した標高を DEM と比較して精度検証を行った。次に二つの DEM を比較して標高の変化量を計算した。本稿では 8 月 10 日の DEM の標高から 7 月 26 日の DEM の標高を差し引いて得られた、夏季 15 日間の氷河地形の変化を報告する。

4. 結果と考察

4. 1 精度検証

GPS で測量した標高値と、7 月 26 日の DEM (6 つの GCP を設置) の差の平均は 0.07 m, その標準偏差は 0.27 m であった。8 月 10 日の DEM (9 つの GCP を設置) は差の平均が 0.11 m, その標準偏差が 0.35 m であった。したがって、GCP の追加による精度の向上はみられていない。これらの誤差の要因として、上流域の GCP が足りていない標高 690 m 以上には比較的顕著な歪みが見られた。従って次回の観測では、観測地域に等間隔の GCP の設置が必要だと考える。

4. 2 標高変化

7 月 26 日から 8 月 10 日にかけて氷河上で顕著な標高低下が観測され (図 6), 観測域における平均高度変化量は -0.68 m であった。特に河川、氷河と岩盤の境界付近で顕著な高度変化が観測された。特に観測域における最大の河川の周辺では、他の氷河上よりも標高低下量が大きい。また、氷河の横断方向に測線をおいて標高とその変化を比較したところ、氷河上の右岸側より左岸側の表面の低下量が大きい傾向があると明らかとなった (図 7)。この原因として、氷河の左岸側の方の表面が右岸側の方が黒い (図 3) ことから、表面のアルベドの違いが要因である可能性が考えられる。

氷河の周縁部では、7 月 26 日には雪が広がっているのに対して、8 月 10 日には融解が進んで積雪域が減少している (図 8)。したがって、氷河と岩盤の境界で測定された標高変化は、雪の融解が原因である。

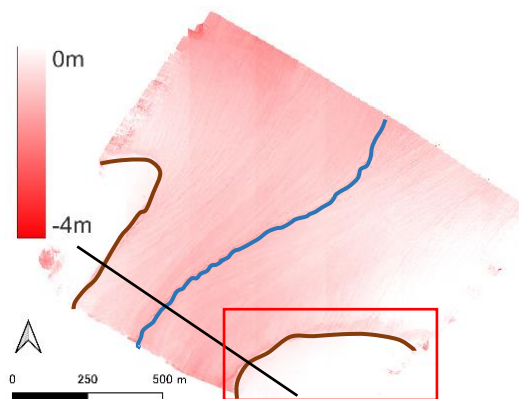


図 6 7 月 26 日の DEM と 8 月 10 日の DEM の標高差の図。青い線は観測域における最大の河川、茶色の線は氷河と岩盤の境界線を示す。赤枠は図 8 の画像の撮影範囲を示す。

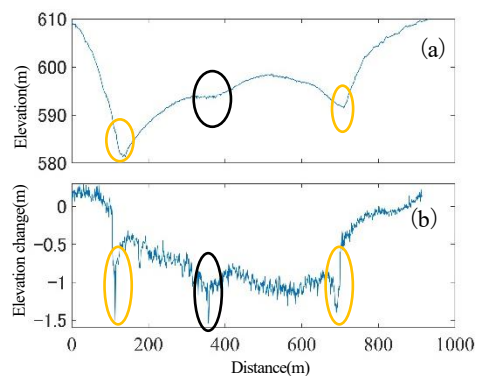


図 7 図 6 中の黒線の位置における (a) 7 月 26 日の DEM の標高と (b) DEM の標高差の断面図。黒で囲われた場所は観測域における最大の河川を示し、黄色で囲われた場所は氷河と岩盤の境界を示す。

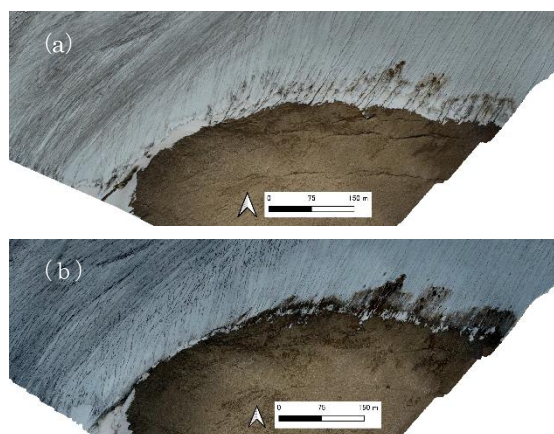


図8 氷河と岩盤の境界における (a) 7月26日および (b) 8月10日のオルソ画像。

5. まとめ

グリーンランド北西部カナック氷河において、2022年夏季にドローンを用いた調査を行った。撮影画像から生成したDEMの精度は、GPSで測量した標高値と、DEMの差から求めた。その平均は0.07–0.11 m、標準偏差0.27–0.35 mであった。この精度のばらつきは、氷河上流部でGCPが十分に設置できていなかったことが原因だと考えられる。DEMの精度向上させるために、次の観測では上流部に追加のGCPの設置が有効だと考える。また、7月26日と8月10日のDEMの比較から、観測域における15日間の平均高度低下量は−0.68 mであることが分かった。特に河川、氷河と岩盤の境界付近で大きな高度低下が観測された。また、氷河の横断方向に測線をおいて標高とその変化の比較から、氷河上の右岸側より左岸側の低下量が大きい傾向があると明らかとなった。この原因として、氷河の左岸側と右岸側の表面のアルベドの違いが要因である可能性が考えられる。

【謝辞】

本研究は、ArCS II 北極域研究推進プロジェクトの一環として実施されたものである。観測を行う際、所属する研究室のメンバー、先生方には多くのご支援を頂きました。心よりお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) Isenko E, Naruse R, Mavlyudov B. 2005: Water temperature in englacial and supraglacial channels: change along the flow and contribution

to ice melting on the channel wall, Cold Reg. Sci. Technol, **42**(1),53–62.

- 2) Gaffey C, Bhardwaj A. 2020: Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Cryosphere: Latest Advances and Prospects, Remote Sens. 2020, **12**(6), 948.
- 3) Sugiyama et al., 2014: Initial field observations on Qaanaaq ice cap, northwestern Greenland, Annals of Glaciology, **55**(66), 25-33.

マルチビーム・ソナーによるパタゴニア・グレイ氷河末端の水中観測 Multibeam sonar survey of underwater ice at the front of Glaciar Grey in Patagonia

杉山慎¹, 波多俊太郎^{1,2}, 森尚仁³, ポールサンドバル⁴, マリウスシェーファー⁴

Shin Sugiyama¹, Shuntaro Hata^{1,2}, Takami Mori³, Paul Sandoval⁴, Marius Schaefer⁴

Corresponding author: sugishin@lowtem.hokudai.ac.jp (S. Sugiyama)

近年各地のカービング氷河で急激な変動が報告されている。その変動を理解するためには、水中融解やカービング等の氷河末端プロセスの解明が重要である。しかしながら、淡水性カービング氷河での研究が遅れている。そこで本研究では、チリ・パタゴニアで湖に流入するグレイ氷河において、マルチビームソナーを用いた氷河末端水中観測を試みた。2023年3月に4日間にわたる測定を行い、3つに分離した末端それぞれの水中形状と湖底地形のマッピングに成功した。氷河末端の水中形状を解析したところ、湖の深い部分で氷が前方にせり出す傾向にあることが示された。また複数回測定された末端形状の比較から、観測期間中に起きた水中カービングで約 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の氷が失われたことが明らかになった。以上の結果は、淡水性カービング氷河の末端水中形状を初めて直接観測し、カービングと水中融解について重要な示唆を与えるものである。

1. はじめに

気候変動の影響を受けて、世界各地の氷河氷床で質量減少が報告されている。2000年以降に生じた海水準上昇は、その45%が氷河氷床の融解が原因とされており、今後その影響が増加することが予測されている¹⁾。中でも山岳域で特に急激な変化を示しているのが、海や湖に流入するカービング氷河である。また21世紀に入って質量減少が著しいグリーンランド氷床では、海洋性カービング氷河の末端部で氷が急速に失われている。

カービング氷河の変動が激しい理由は、氷河末端のプロセスにある。通常の氷河は降雪と融解のバランスで変動するが、カービング氷河は末端の水中融解とカービング（冰山分離）によっても氷を失う（図1）。末端消耗と呼ばれるこれらのプロセスは、気温上昇以外の要素（水温、基盤地形、氷河流動）に影響を受け、急速な氷河後退の原因となる。特に水中融解の重要性が認識されたのは最近のことで、その理解は遅れている。

氷河末端の直接観測は非常に困難で、水中の氷が直接観測された例は稀である。そんな中グリーンランドでマルチビームソナーが氷河前で運用されて、末端上部が水中で突出する様子が確認された^{2,3)}。この観測結果は、先行研究によって提唱された、氷河底面から湧昇する融解水が海底近くの水で融解を促進する⁴⁾、とのメカニズムと整

合的である。オーバーハングした氷は崩れやすくカービングを促進すると考えられるが、これがどの程度普遍的な現象なのか、議論が続いている。

末端消耗に関する研究は、アラスカやグリーンランドの海洋性カービング氷河を中心に進められてきた。それに対して湖に流入する氷河の研究は遅れている。本研究の対象地パタゴニアの他、アラスカ、ニュージーランド、ヒマラヤに数多くの淡水性カービング氷河が分布し、その急激な後退が各地域の氷損失に大きな影響を与えている。したがって、カービング氷河の振る舞いを総合的に理解するためにも、淡水性氷河の末端プロセスの理解が重要となっている。

以上の背景に基づいて我々は、パタゴニアの淡水性カービング氷河で観測を実施している。これまでの研究で、氷河から流出する融解水が湧昇せずに湖底付近に滞留すること⁵⁾、比較的水温が高い湖水面近くで水中融解が進むことなどが明ら

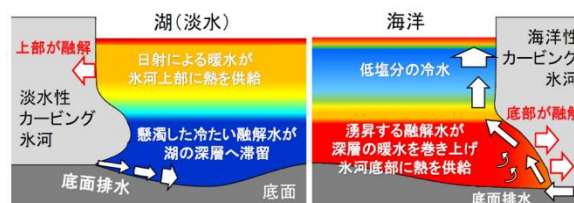


図1 (左) 本研究で注目する淡水性カービング氷河と、(右) 海洋性カービング氷河末端プロセスの比較。

¹ 北海道大学低温科学研究所

² 北海道大学創成研究機構

³ 株式会社マリン・ワーク・ジャパン

⁴ アウストラル大学理学部

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Creative Research Institution, Hokkaido University
Marine Works Japan Ltd.
Faculty of Science, Austral University of Chile

かになった⁶⁾ (図 1)。しかしながら、特に水深の深い領域の氷河末端形状は明らかになっておらず、水中融解の測定例もない。そこで 2023 年 3 月に、パタゴニアのグレイ氷河にて、湖では初めてとなるマルチビームソナーによる観測を実施した。本報ではその概要と結果の一部を紹介する。

2. 研究対象地

観測を行ったのは、南パタゴニア氷原の南東部、チリに位置するグレイ氷河である。氷河は標高 60–2360 m a.s.l. に表面積 243 km² に渡って広がり、3 つに分離した末端はいずれもグレイ湖に流入している (図 2)。グレイ湖は長さ 16 km、2017 年の時点での面積は 38 km²、最大深度は 410 m である⁷⁾。氷河は観光で賑わうパイネ国立公園にあるため、パタゴニアにおいては比較的アプローチが容易で、宿泊施設やボートなどの施設が得られる利点がある。

我々は 2016 年からグレイ氷河での現地調査を行っている。これまでに、係留系を使って水温の通年変化を明らかにした他⁷⁾、サイドスキャンソナーによる氷河末端観測に成功している⁸⁾。それらの結果、50–100 m 以深は一年を通じて水温が低いこと融解が抑制され、氷が湖側に突き出ていることが明らかになった。この他、ドイツとチリの研究グループによって、長期の気象観測や流動測定などが報告されている⁸⁾。

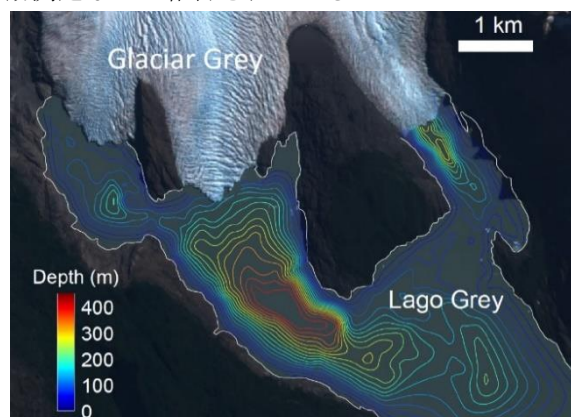


図 2 観測を行ったグレイ氷河末端部とグレイ湖。等値線は水深を示す。

表 1 使用したマルチビームソナーの諸元

音波の周波数	200, 300, 400 kHz
測定レンジ	最大 550 m
発信ピングレート	最大 50 Hz
スワス角度	最大 170°
ピングあたりの測深点数	最大 512 点

3. 観測手法

2023 年 3 月 1–15 日にグレイ氷河末端近くの宿泊地に滞在し、湖と氷河で観測を行った。本研究では、比較的コンパクトなマルチビームソナー (KONGSBERG 社製, EM2040P) を日本から輸送し、湖水中の氷河末端形状と湖底地形を測定した。最大 170°の扇状に 512 本の音波ビームを射出し、550 m の距離まで測定が可能とされる装置である (表 1)。測定深度や必要とされる分解能に応じて、発信周波数を 200, 300, 400 kHz から選択する。また氷河末端を測定する場合は、水中の氷にビームが照射されるようにビームの幅と方向を調整した。

観測には、現地で観光に使用されているボート (長さ約 5 m、幅約 2 m) をチャーターした。金属のパイプやラッシングベルトを使って、ソナー発信器、動揺センサ、GPS 等をボートに固定した。観測中はボート上に置いたコントローラーと PC でソナーが制御され、動揺センサと GPS のデータと共に解析された音波反射点の三次元座標がその場で PC に表示される。また、GPS の干渉測位によってソナーデータの精度を向上することを目的に、地上に GPS 基準局をおいた。

マルチビームソナーによる測定は、天候とボート稼働スケジュールに合わせて 3 月 4, 5, 11, 14 日に延べ 20 時間実施した。また湖の観測に加えて、氷流動とカービングの測定を目的に、氷河脇にカメラ (Canon 6D Mark II) を 4 台設置し、末端部を 15 分間隔で自動撮影した。

4. 結果および議論

4 日間の観測によって、東末端にて 3 回、中央と西末端にて各 1 回の水中末端観測に成功した。3 月 11 日に測定した中央末端では、深さ約 150 m の湖底に接地しており、氷河前縁は水深が大きくなるほど前にせり出す形状が認められた (図 3a)。この結果は、湖底付近の冷たい湖水が水中融解を抑制する、との仮説と整合的である。氷と湖底との境界も明瞭に観察され、マルチビームソナーによる水中氷河測定の有用性が確認された。

氷が最も厚い東末端でも、3 月 4–5 日の測定で氷河末端の深部が前にせり出す傾向が確認された。しかしながら 3 月 11 日には、氷河中央部の 150 m 以深で氷が大きくえぐれたオーバーハング形状が確認された (図 3b)。自動撮影カメラの写真では、3 月 7 日夜から 8 日早朝までの間に大

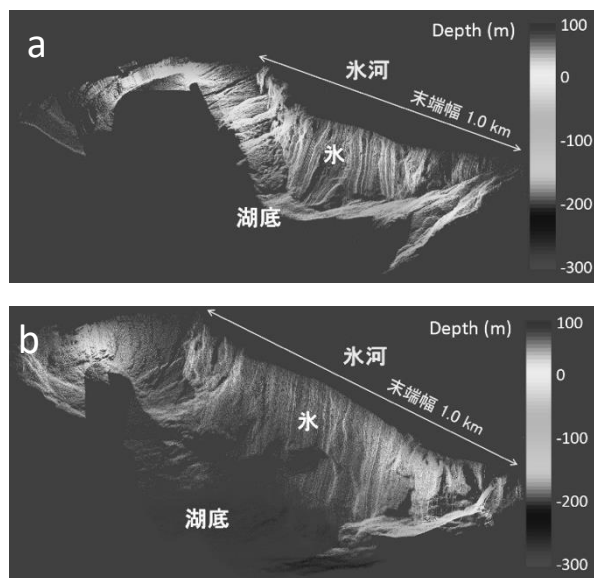


図3 2023年3月11日に測定された、グレイ氷河の(a)中央末端及び(b)東末端における水中氷形状。グレースケールは標高を示す(水面は標高約50 m)。

きなカービングイベントが確認されており、その際に水中で氷が失われたものと考えられる。3月11日と4-5日の氷河末端形状を比較したところ、この間に約 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の氷が分離したことが明らかになった。

この他、氷河近くの湖底をマルチビームソナーで測深し、約 12 km^2 にわたって詳細な底面地形マップを得た(図4)。このデータには、モレーン地形や複雑な基盤構造、堆積地形が確認され、氷河の変動や融解水の流出に関する情報を含むものと考えられる。

5. まとめと今後の展望

本研究では、パタゴニアのグレイ氷河において、淡水性カービング氷河では初めてとなる、マルチビームソナーによる末端水中測定を行った。その結果、氷河末端の詳細な水中形状をマッピングすることに成功した。氷の形状は、湖水温度の分布から予想される水中融解の特徴(水面近くで融解がより大きい)と整合的であった。また、複数回行った測定の比較から、観測期間中に起きた大きな水中カービングについて、氷が分離した場所とカービング量が明らかとなった。これらの成果は、淡水性カービング氷河の末端消耗を理解する上で重要なものである。

より精度の高い氷河形状の解析を目的に、現在ソナーデータの補正、較正、外れ値の除去などを

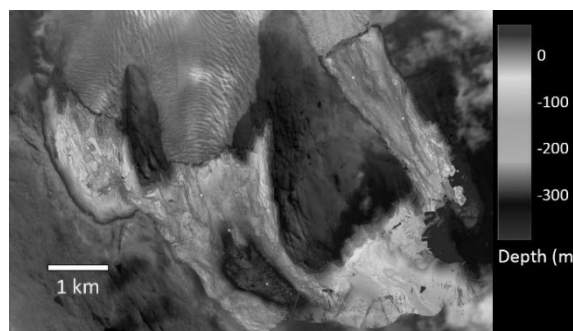


図4 マルチビームソナーで測定された湖底地形。グレースケールは標高を示す。

進めている。今後はカービングが観察されなかった期間の末端形状変化と氷流動速度から水中融解を定量化し、アラスカの海洋性氷河で報告された測定との比較を目指す⁹⁾。さらに湖底の詳細地形を解析し、過去の氷河変動、氷河からの融解水流出、土堆積等のメカニズムを明らかにする。

【謝辞】

グレイ氷河での観測にサポートを得た、アウトドアアクティビティー会社 Bigfoot のメンバー、および Nicolas. R. Traub に謝意を表す。マルチビームソナーの観測には株式会社マリン・ワーク・ジャパンの協力を得た。本研究は、JSPS 科研費基盤研究 A (20H00186) の助成を受けて実施したものである。

【参考文献】

- 1) IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- 2) Rignot, E., I. Fenty, Y. Xu, C. Cai, and C. Kemp, 2015: Undercutting of marine-terminating glaciers in West Greenland, *Geophysical Research Letters*, **42**, 5909–5917.
- 3) Fried, M. J., Catania, G. A., Bartholomaeus, T. C., Duncan, D., Davis, M., Stearns, L. A., Nash, J., Shroyer, E. and Sutherland, D. 2015: Distributed subglacial discharge drives significant submarine melt at a Greenland tidewater glacier, *Geophysical Research Letters*, **42**, 9328–9336.
- 4) Motyka, R. J., L. Hunter, K. A. Echelmeyer, and C. Connor, 2003: Submarine melting at the terminus of a temperate tidewater glacier,

- LeConte Glacier, Alaska, U.S.A, *Annals of Glaciology*, **36**, 57–65.
- 5) Sugiyama, S., M. Minowa, D. Sakakibara, P. Skvarca, T. Sawagaki, Y. Ohashi, N. Naito and K. Chikita, 2016: Thermal structure of proglacial lakes in Patagonia. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, **121**, 2270–2286.
 - 6) Sugiyama, S., Minowa, M., and Schaefer, M., 2019: Underwater ice terrace observed at the front of Glaciar Grey, a freshwater calving glacier in Patagonia., *Geophysical Research Letters*, **46**, 2602–2609.
 - 7) Sugiyama, S., Minowa, M., Fukamachi, Y., Hata, S., Yamamoto, Y., Sauter, T., Schneider, C. and Schaefer, M. 2021: Subglacial discharge controls seasonal variations in the thermal structure of a glacial lake in Patagonia. *Nature Communications*, **12**, 6301.
 - 8) Weidemann, S. S., Sauter, T., Malz, P., Jaña, R., Arigony-Neto, J., Casassa, G., and Schneider, C., 2018: Glacier mass changes of lake-terminating Grey and Tyndall Glaciers at the Southern Patagonia Icefield derived from geodetic observations and energy and mass balance modeling. *Frontiers in Earth Science*, **6**:81.
 - 9) Sutherland, D. A., Jackson, R. H., Kienholz, C., Amundson, J. M., Dryer, W. P., Duncan, D., Eidam, E. F., Motyka, R. J. and Nash, J. D. 2019: Direct observations of submarine melt and subsurface geometry at a tidewater glacier. *Science*, **365**(6451), 369–374.

潮位と熱応力に起因する東南極ラングホブデ氷河棚氷の破碎メカニズム

Tidal and thermal stresses drive fracture of the ice shelf of Langhovde Glacier, East Antarctica

箕輪 昌紘¹, Evgeny Podolskiy², 杉山 慎¹

Masahiro Minowa¹, Evgeny Podolskiy², Shin Sugiyama¹

Corresponding author: m_masa@lowtem.hokudai.ac.jp (M. Minowa)

南極氷床沿岸部に形成する棚氷は、氷床内陸の氷質量変化を制御する重要な構成要素である。棚氷の変動や破碎メカニズムを理解する為に、2018 年夏期に東南極ラングホブデ氷河棚氷上で氷河流動、氷震、気象等の野外観測を実施した。氷震データに階層クラスタリング法を適用することで、氷震の分類を行なった。7つに分類された氷震の発生頻度の時系列変化は、潮位に起因する短期の氷河変位や気温変化と関係を示した。このことは棚氷が潮位変動や熱応力によって破碎することを示すものである。

1. 研究の背景

南極氷床沿岸は、約 7 割を超える領域で棚氷や浮氷舌が形成する¹⁾。氷床内陸で形成した氷は相対的に流れの速い氷流を經由し沿岸部の棚氷や浮氷舌において氷質量を損失する。さらに、棚氷は内陸の氷河を力学的に押し留めておく抗力を有する。このため、棚氷や浮氷舌の変動メカニズムを理解することは、将来の南極氷床変動を理解する上で非常に重要である。

棚氷や浮氷舌は末端からの冰山分離（カービング）と海洋による底面融解により質量を失っている。南極氷床全体では凡そ両者が同程度の大きさの消耗量であることが知られている^{2, 3)}。

氷床が定常状態にある場合、カービングは比較的散発的な現象で、その速度は上流からの氷河流動速度と均衡する。一方で、近年の大気や海洋の変動に起因して棚氷においても急速な崩壊をし得ることが示されており⁴⁾、棚氷の変動や破碎メカニズムを高時間分解能で測定することが求められている。

氷河の変動や破碎メカニズムを測定する手法として注目されているのが地震計を用いた氷震の測定である⁵⁾。本研究では、東南極ラングホブデ氷河棚氷の末端近くで氷震の連続観測を実施した。測定した地震波にクラスタリング手法の一つである階層クラスタリングを適応するこ

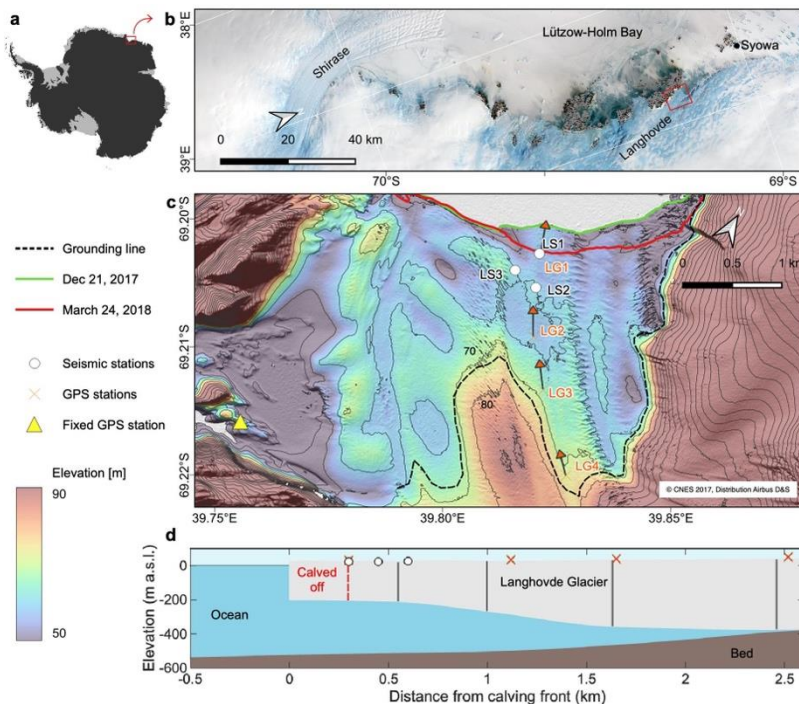


図1 (a) 南極氷床における観測対象地域を赤枠で示す。(b) 研究対象地域リュツォ・ホルム湾内において、観測を行ったラングホブデ氷河を赤枠で示す。(c) ラングホブデ氷河棚氷の表面地形図をカラースケールと等高線で示す。氷震測定場所を白丸で示す。橙色のベクトルは、GPSによって測定をした観測期間内の流動ベクトルを示す。(d) 熱水掘削により測定をしたラングホブデ氷河棚氷の縦断面図。灰色垂線の地点で掘削を行った。地震計（白丸）とGPS局の場所（橙罫印）を合わせて示す。

¹ 北海道大学 低温科学研究所

² 北海道大学 北極域研究センター

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Arctic Research Center, Hokkaido University

とで、氷震を分類し、氷震の発生メカニズムを考察する。

2. 手法とデータ

2. 1 地震計による氷震測定とその解析

2018年1月8日から24日にかけてラングホブデ氷河棚氷の末端から～500 mの領域で氷震の観測を実施した⁹⁾。地震計は一边が200 mを持つ三角形を描くように展開した。広域帯地震計を氷河上に20～30 cmの小穴を掘り、内部に設置した。氷震は400 Hzで記録した。氷融解による地震計の傾きによる影響を抑制するために、2～3日ごとに測器の水平を補正した。観測の詳細はMinowa *et al.* (2019)⁹⁾に詳しい。

2. 2 階層クラスタリング

階層クラスタリングを適応することにより、氷震の分類を行った。まず、LS1で取得した氷震データにSTA/LTAトリガー法⁷⁾を用いて、氷震を検出した。総当たりで各氷震の相関係数を計算し、相関係数が0.7以上であった氷震について線型スタック処理を行い、S/N比を向上させた氷震を合成した。その後、群平均法により、クラスタ内の全ての氷震間の距離の平均でクラスタ間の距離を定義することで、類似度の計算をした。計算される類似度に閾値を与えることで、計7つのクラスター（以後Cと記す）を作成した。

分類された各氷震について、テンプレートマッチングを行い、氷震を検出した。テンプレートマッチングでは、相関係数が0.8以上であるものを、同様のメカニズムにより発生した氷震であると仮定して検出している。

3. 結果と考察

3. 1 各クラスターの特徴

図2に分類された7つの氷震を示す。C1, 2は中心周波数をそれぞれ8 Hz, 10 Hzを持つ低周波の波が分類された。C3, 4はより高周波の15–30 Hzに平均波の中心周波数が見られる。C5, 6はさらに高周波の140 Hz付近に平均波の中心周波数が見られた。最後にC7では中心周波数の不明瞭な、広域の周波数成分を持つ氷震が分類された。

これらの各クラスターについて、三つの地震計でのデータを比較してみると、C1–4のクラスターに関しては、全ての地震計LS1–3で同様の波形が測定された。一方で、C5–7は単独の地震計でしか測定されていなかった。このことは、C1–4の氷震は、比較的大きなエネルギーを発生させる氷震発生メカニズムであるのに対し、C5–7は比較的小きなエネルギーを発生させる、狭域な範囲での氷震であることが示唆された。

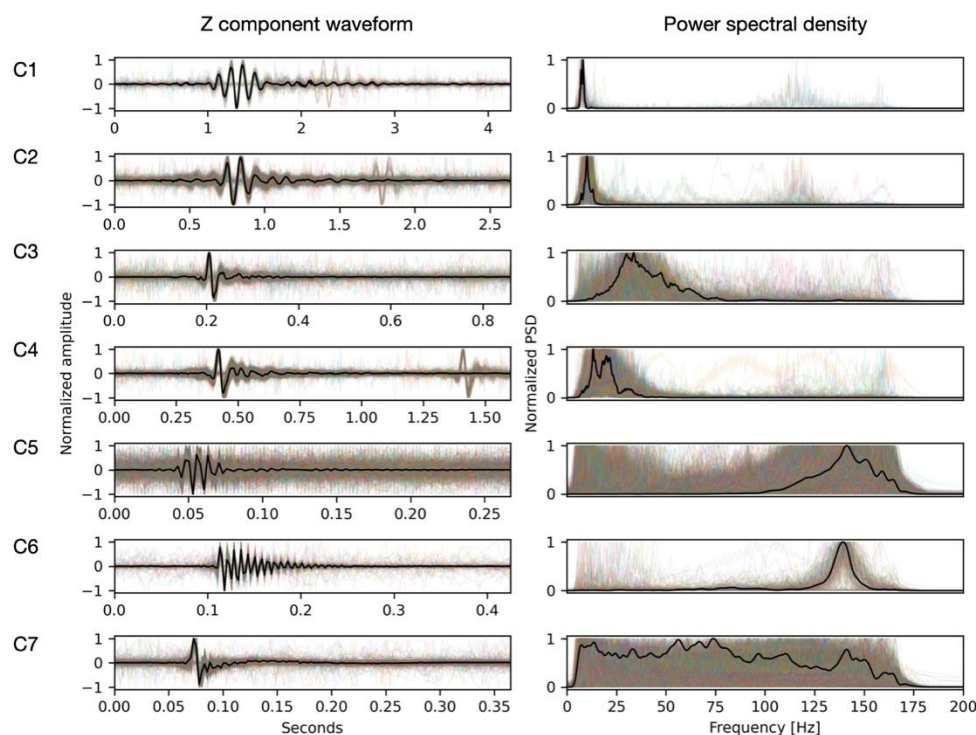


図2 分類された7つのクラスター(C1–7)。左列に氷震の鉛直成分波形、右列にパワースペクトル解析を行った結果を示す。黒実線は平均波形。

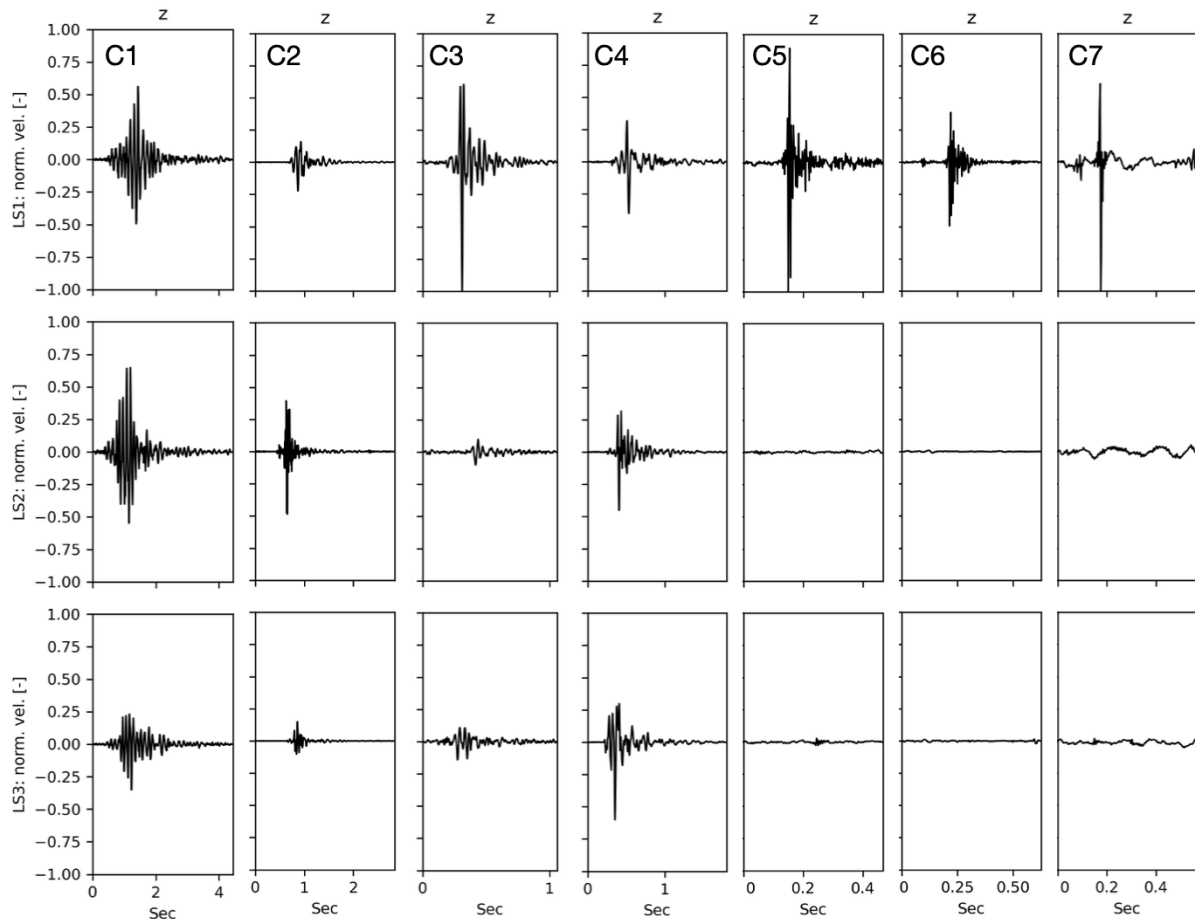


図3 三つの地震計 (LS1-3) で測定したそれぞれのクラスタにおける鉛直成分の波形。振幅は最大振幅で正規化している。

3. 2 各クラスターにおける氷震発生頻度の時系列分布

C1-7 の氷震について全ての測定データにテンプレートマッチングを行った結果を図4に示す。それぞれの発生頻度はそれぞれ、C1-81回, C2-855回, C3-601回, C4-1,299回, C5-11,852回, C6-230回, C7-2,198回であった。

各クラスターが検出される時刻は異なっている (図4)。例えば、C1, 2 と C3, 4 では氷震の発生頻度に日変動が見られたが、前者と後者では位相がおおよそ半日分ずれていた (図4)。これらの氷震の発生頻度は、潮位変動と同期していることが見出された。C1, C2 は潮位の低下速度が最大となる時に最も高頻度で氷震が観測された。その一方で、C3, 4 は潮位の上昇速度が最大となる時に高頻度で測定された。これまでの GPS 観測により、ラングホブデ氷河棚氷は潮位変動に弾性的に応答し、鉛直方向や水平方向に変位することが報告されている (Minowa et al., 2019)⁶⁾。氷河の応力変化による氷破砕が氷震の

原因であることが示唆される。

C5 も同様に日周期で氷震が増減の様子が見られた。これは、気温が低下するタイミングと一致する傾向が見られた。気温低下による氷の収縮による応力変化が氷震の原因として考えられる。C6, 7 は不明瞭な変動を示し、現段階で氷震の発生メカニズムは不明である。

4. まとめと今後の展望

東南極のラングホブデ氷河において 2018 年 1 月に測定をした氷震について、階層クラスタリングを応用し、氷震の分類を試みた。合計で 7 つのクラスターに分類された。C1-4 は潮位変動と同期した変動を示した。C5 は気温低下と同期した変動を示した。潮位変動や熱収縮による応力変化が氷震の原因となることを示唆する。

階層クラスタリングでは、氷震の波形の類似度を特徴量として分類に使用している。今後、クラスターを作成する際に、閾値をより客観的に決定したり、周波数領域で氷震間の類似度を算

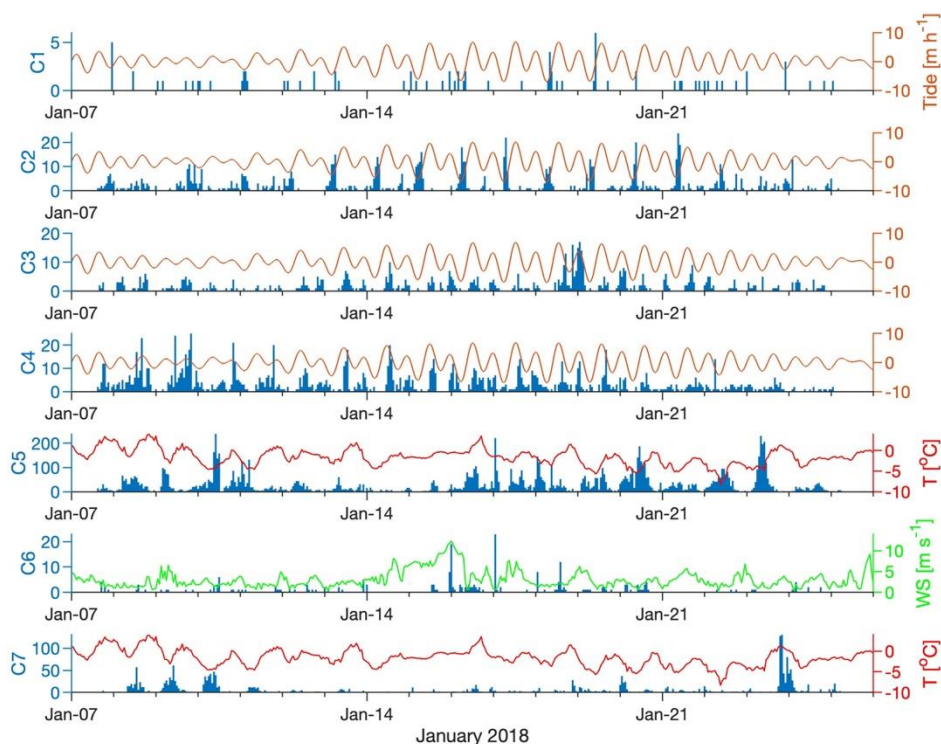


図4 各クラスタの発生頻度．各クラスタの平均波を全観測の地震波にテンプレートマッチングさせる事で検出した．昭和基地で取得した潮位変化速度と気温，風速を合わせて示す．

出したりといった改善が考えられる．また，C1-4 は設置した全ての地震計で測定された．今後，地震波の到達時間や振幅を比較することで，氷震の震源を特定することで，氷震の発生メカニズムの理解を深める必要がある．

【謝辞】

本研究は南極地域観測第9期重点研究観測の一部として実施した．また科研費新学術領域研究(17H06316)及び若手研究(22K14093)の助成を得て実施した．地震波データの解析には，Pythonの公開ライブラリであるObsPy⁷⁾を利用した．

【参考文献】

- 1) Bindshadler R *et al.*, 2011: Getting around Antarctica: New high-resolution mappings of the grounded and freely-floating boundaries of the Antarctic ice sheet created for the International
- 2) Rignot E *et al.*, 2013: Ice-shelf melting around Antarctica, *Science*, **341**, 266–270.
- 3) Depoorter M *et al.*, 2013: Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves, *Nature*, **502**, 89–92.
- 4) Joughin I *et al.*, 2021: Ice-sheet retreat drives recent Pine Island Glacier speedup, *Science Advances*, **7**, eabg3080.
- 5) Podolskiy E and Walter F, 2016: Cryoseismology, *Review of Geophysics*, **54**(4), 708–758.
- 6) Minowa M *et al.*, 2019: Tide-modulated ice motion and seismicity of a floating glacier tongue in East Antarctica, *Annals of Glaciology*, **60**(79), 57–67.
- 7) Krischer *et al.*, 2015: ObsPy: Abridge for seismology into the scientific Python ecosystem, *Computational Science & Discovery*, **8**, 014003.

Polar Year, *The Cryosphere*, **5**(3), 569–588.

融雪期まで存在した長期積雪初期の湿雪層 (2022/23 年冬期, 北海道北見)

Wet snow layer in the initial stage of long-term snow cover that showed characteristics until the melting period (case study of Kitami, Hokkaido, winter 2022/23)

白川 龍生¹

Tatsuo Shirakawa¹

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

On December 22, 2022, an extratropical cyclone with warm and moist air moved northward over the Pacific Ocean and then stalled off the coast of Abashiri. Strong winds with moist snow continued to blow from the same direction over Kitami and Monbetsu areas. The wet snow layer in the initial stage of long-term snow cover later froze and remained in the lower part of the snow cover until the snow melting period. In this study, we report on the transformation process of the wet snow layer based on snow profile observation during the winter of 2022/2023 at Kitami.

1. はじめに

2022 年 12 月 22 日, 北海道付近には暖湿空気を伴う温帯低気圧が太平洋を北上した影響で, 北海道内各地では暴風雪となった. 温帯低気圧はその後に網走沖で停滞し, オホーツク海側の北見・紋別地方では, 湿雪を伴う強風が同一風向から吹き続き, 着雪および大雪による雪害(信号柱や樹木の倒壊とそれに伴う停電など)や除排雪作業の遅れなど, 多くの影響が生じた(図 1).

長期積雪の初期に積もったこの湿雪層は後に凍結して積雪の一部となり, 融雪期まで存在した. 厳冬期の北海道において, 長期積雪初期に湿雪が降り, それが他の層と異なる特徴を維持したまま融雪期まで存在した事例はこれまでに報告されていない.

そこで本研究では, 北見工業大学敷地内で実施した 2022/23 年冬期の積雪断面観測(定点観測)の結果から, この湿雪層の経時変化と積雪層に及ぼす影響について報告する.

2. 2022 年 12 月 22 日から 27 日の気象経過¹⁾

2022 年 12 月 22 日は, 日本海と関東の南をそれぞれ低気圧が北東進した. 850 hPa 面には, 低気圧の暖域に相当温位の高い暖湿空気が流入している(図 2a). 北海道では雨または雪が降り始めた. 翌 23 日は冬型が強まり, 日本列島には強い寒気が流入した. 北海道付近の低気圧は前線を失い, 寒気場に停滞した(図 2b). この影響で, オホーツク地域では同一方向(北東象限)から風雪が強まり, 沿岸部や北見地域では湿雪, みぞれ,

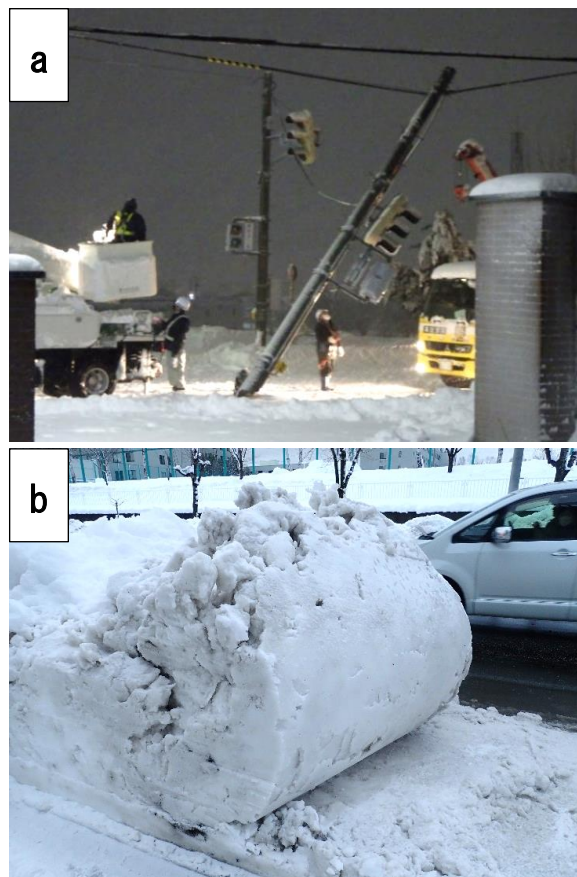


図 1 着雪および大雪による影響. (a) 着雪により折曲した信号柱, (b) 除雪作業で道路脇に寄せられた湿雪(後に凍結). いずれも 2022 年 12 月 23 日, 北見市内にて筆者撮影.

または雨が観測された. 内陸部では大雪となり, 遠軽町白滝では 6 時間降雪量が 56 cm に達した. 24 日以降も冬型の気圧配置となり, 北見では

¹ 北見工業大学

Kitami Institute of Technology.

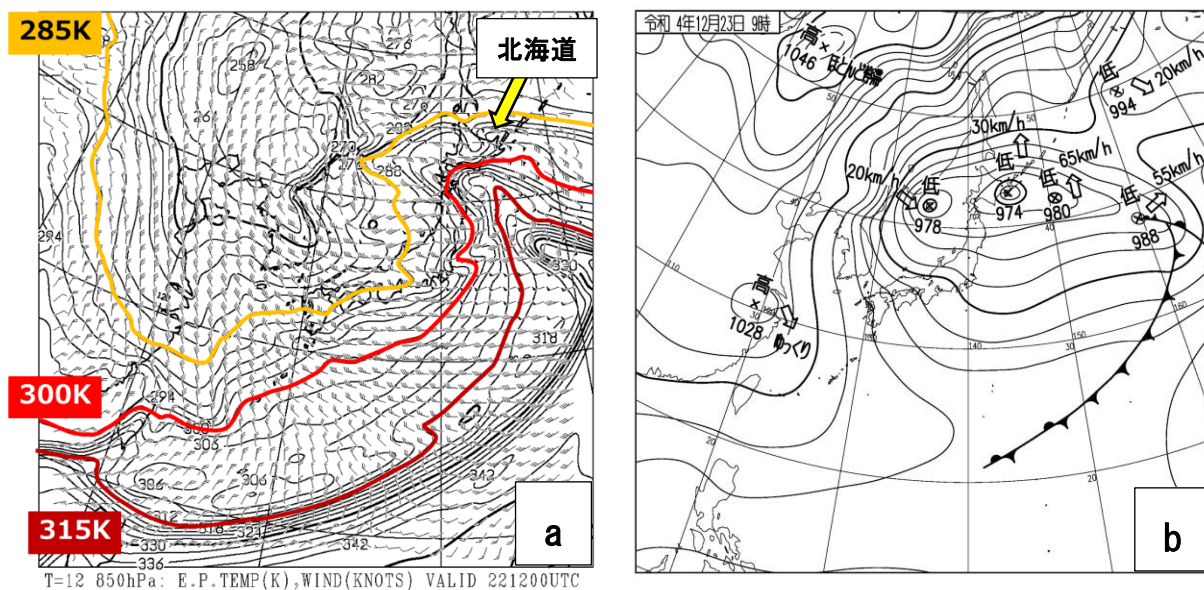


図2 本湿雪事例における天気図¹⁾。(a)FXJP 日本 850hPa 風・相当温位図(予想時刻 2022 年 12 月 22 日 21 時; 筆者による加筆あり), (b)SPAS 速報天気図(実況 2022 年 12 月 23 日 9 時)。

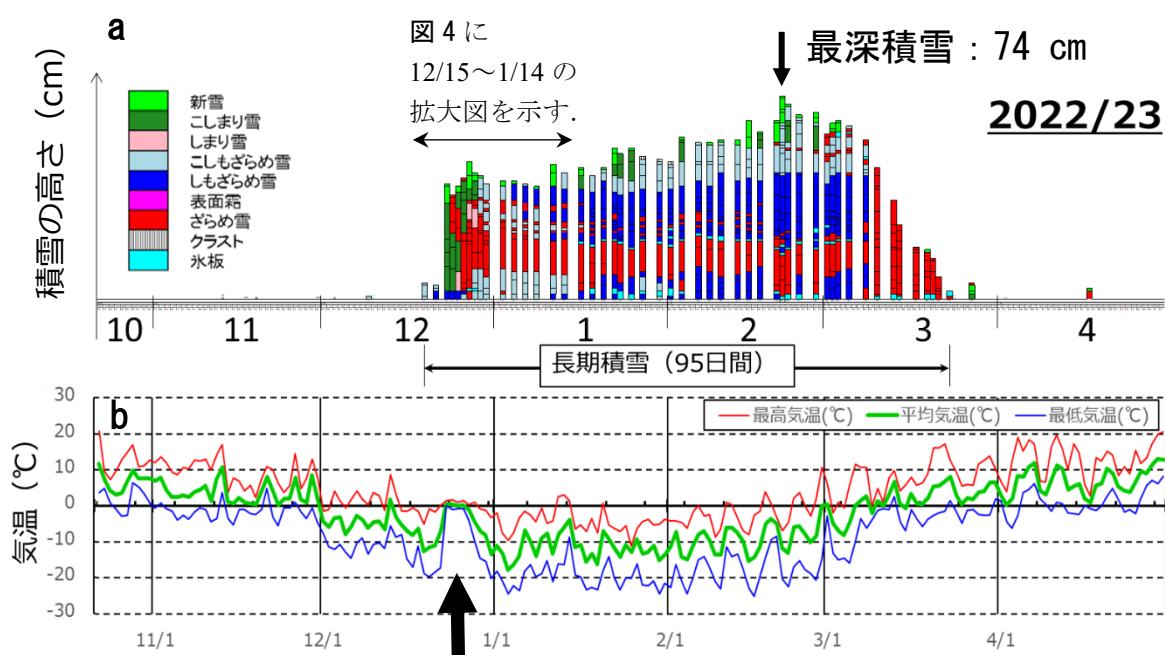


図3 2022/23 年冬期における北見の積雪と気温経過。a) 積雪図(北見工業大学内露場), b) 日最高・日平均・日最低気温(気象庁北見地域気象観測所)。図中 b の矢印は、本湿雪事例の期間を示す。

26 日まで断続的な降雪が記録された。気象庁北見地域気象観測所(以下「北見アメダス」とする)の日最深積雪は、21 日(湿雪前)に 2 cm であったが、ピーク時の 26 日には 51 cm に増加した¹⁾。

3. 2022/23 年冬期における積雪の特徴

図3 は、2022/23 年冬期における北見の積雪と気温経過をまとめたものである。図 3a は積雪図

であり、筆者が北見工業大学内の露場にて実施した積雪断面観測結果を並べたもの、図 3b は北見アメダスで観測された、日最高・日平均・日最低気温の推移である。積雪観測は積雪観測ハンドブックに準じて実施した²⁾。

2022/23 年冬期の長期積雪(いわゆる根雪; 露場による実測値)の初日は 12 月 19 日で、21 日までは積雪深 10 cm 未満で経過したが、本事例の

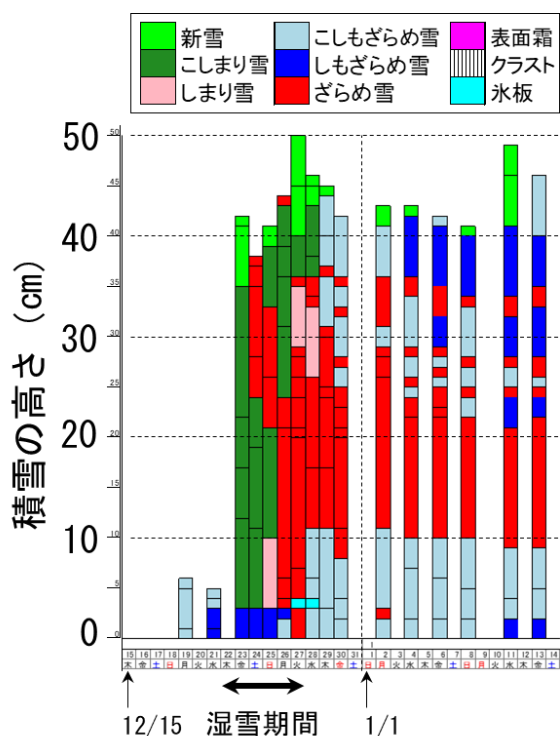


図4 湿雪期間に形成されたざらめ雪層とその上下層の雪質変化. 2022 年 12 月 15 日～2023 年 1 月 14 日, 北見工業大学露場.

降雪に伴い, 27 日の積雪深は 50 cm (露場での実測値) に増加した. 図 3b の矢印で示す部分を見ると, この期間の気温は 0℃前後で推移したことがわかる. 図 3a の積雪図でこの期間の雪質を確認すると, 22 日はこしまり雪主体であったが, 23 日には水を含んで粗大化したざらめ雪に変態し, 27 日までに積雪の中層から下層にかけ, ざらめ雪化が進行した (図 4). その後, 28 日に日平均気温が -4.3℃ (北見アメダス) へ低下したことに伴い, 湿雪層は積雪内で凍結した. 積雪内に温度勾配がかかったため, 28 日から 29 日にかけて当該層の上下にこしもざらめ雪が形成された.

凍結したざらめ雪の層は層厚が 10 cm 以上あり, 図 3a に示すように融雪期 (全層ざらめ雪となる 3 月 10 日) まで, 他の層とは特徴の異なる層として積雪内に顕在化した.

この凍結ざらめ雪層を境に, 積雪内に鉛直温度分布の不連続が発生し, 結果, 当該層の上下で異なる雪質の変化が見られた. 上部に形成されたこしもざらめ雪は, 1 月 4 日にしもざらめ雪主体に変化し, 融雪期まで存在した. 下部のこしもざらめ雪は, 上部に比べ変態が遅れ, しもざらめ雪が顕在化したのは 1 月 20 日である.

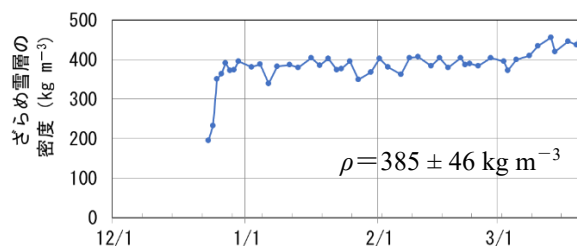


図5 湿雪期間に形成され, その後凍結したざらめ雪層の密度変化 (測定期間: 2022 年 12 月 23 日～2023 年 3 月 20 日).

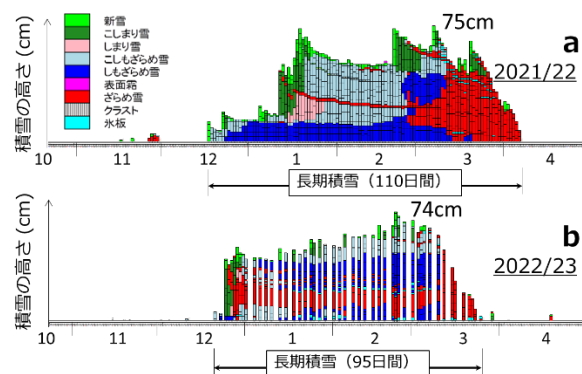


図6 北見における積雪図の比較. (a) 2021/22 年冬期, (b) 2022/23 年冬期 (本事例).

また, このシーズンの特徴としては, 1 月 8 日までに形成された積雪が, その後圧密による層位低下がほとんど生じていない点が挙げられる. この理由の一つとして, 凍結ざらめ雪層の密度が融雪期に至るまで $\rho = 385 \pm 46 \text{ kg m}^{-3}$ と高い値で推移した点が挙げられる (図 5). 北見における平均的な積雪パターンを示した 2021/22 年冬期と比較すると (図 6), 圧密による層位の低下が見られない特徴が顕在化する. このことから, 厳冬期に高密度層が形成され, その後の圧密が進まず, 通常とは異なるパターンで推移した.

2022/23 年冬期の長期積雪期間は 95 日間であった. 直近 10 年間における北見工業大学露場の長期積雪期間は 115 ± 15.3 日であり, 本事例は短いといえる. 特に全層ざらめ雪が確認された 3 月 10 日からの融雪の進行が早く, 14 日後の 3 月 24 日に消雪が確認された. 凍結ざらめ雪層の存在が融雪速度に及ぼす影響については今後の研究課題である.

なお, 北見アメダスにおける累計降雪量や最深積雪の値については平年と同程度であった. しかしながら降雪形態や気象条件の違いにより, 積雪の特徴は大きく異なるものとなった.

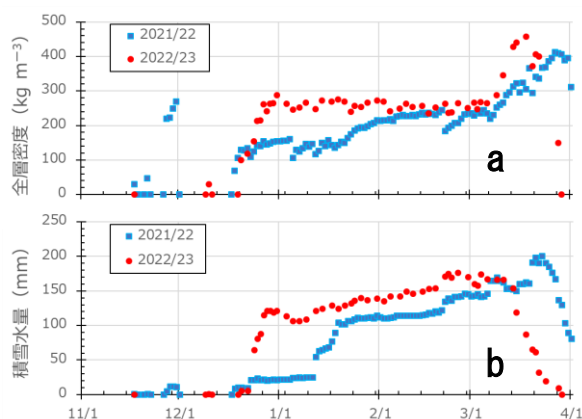


図 7 北見における全層密度・積雪水量の比較.
(a)全層密度, (b)積雪水量. 比較のため,
2021/22 年冬期のデータも記した.

4. 2022/23 年冬期における全層密度・積雪水量 の特徴

図 7 に, 2022/23 年冬期における全層密度と積雪水量の推移を示す. 比較のため, 図 6 と同様に 2021/22 年冬期の場合と比較した. 12 月 22 日からの湿雪後, 全層密度は図 7a のように高い水準で推移し, 1~3 月の値はほぼ一定で推移した. 一方, 図 7b の積雪水量は 3 月の融雪出水直前期まで漸増した. これは全層密度が積雪深とスノーサンプラーによる単位面積あたりの質量との比で決まるため, 両者の値が同様に増加すると値が一定である. これに対し, 積雪水量は後者のみで求まるため, 融雪出水が生じる前に漸増することはこれで説明できる.

図 7b におけるもう一つの特徴としては, 12 月に積雪水量が 100 mm を超えたことである. これは北見の積雪観測では初めての事例である.

5. 雪面の窪み模様の出現と積雪観測への影響

図 8 は, 湿雪時の 12 月 24 日に撮影した雪面の窪み模様である. 窪み模様は融雪期に積雪内で水みちが形成される過程で生じるが, 長期積雪期間の初期にこれが見られたのは初めてである.

湿雪は後に凍結したが, このとき窪み模様のパターンもそのまま凍結したため, 積雪内に全層密度の不均一分布が発生した. 下部には不連続氷板も形成された.

その後の新たな降雪により窪み模様は雪面から消失したが, 積雪水量測定のためスノーサンプラーにより積雪を採取する際, 不均一分布の影響を受けることとなった. 対策として測定回数を増

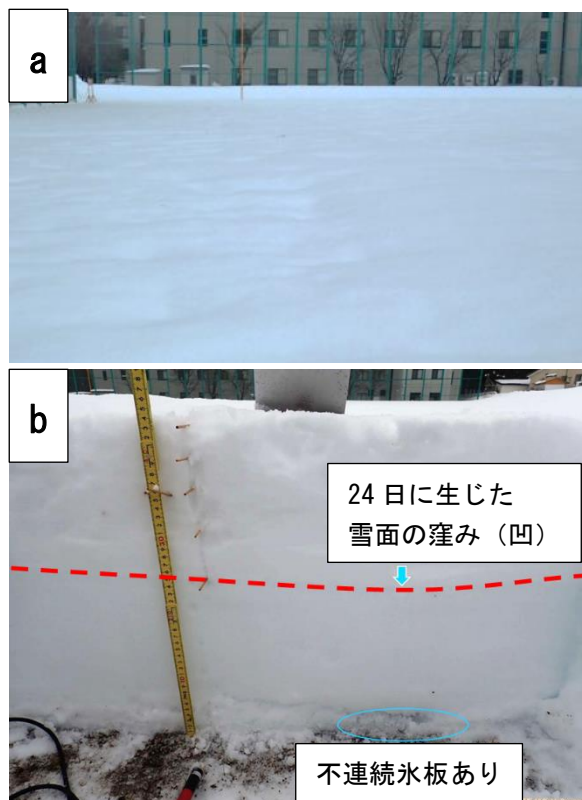


図 8 雪面の窪み模様. (a)雪面 (2022 年 12 月 24 日撮影), (b)積雪断面に残る窪みの影響 (2023 年 1 月 10 日撮影).

加させたが, これにより積雪観測に時間を要した. 今後の参考のため, ここに付記しておきたい.

6. まとめ

本研究を要約すると, 今回の湿雪は低気圧によりもたらされた暖湿空気と, 低気圧が停滞し, 雪を伴う風が同一風向から吹き続けたことが原因でもたらされたと考えられる. 大雪と着雪により雪害が発生し, 地域社会には大きな影響が生じた. 厳冬期のため, この湿雪は後に凍結し, 融雪期まで積雪内に存在し, 積雪内の雪質分布をはじめ, 例年と異なるパターンが見られた.

【参考文献】

- 1) 気象庁ウェブサイト
URL: <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>
(2022 年 12 月 23 日閲覧)
- 2) 日本雪氷学会編, 2010: 積雪観測ガイドブック, 朝倉書店, 136pp.

北海道オホーツク地域における湿雪と気象要素 -2022 年 12 月下旬の湿雪とその影響- Characteristics of Wet Snow and Its Meteorological Elements in the Okhotsk Region of Hokkaido, Japan -A Case Study of Wet Snow in Late December 2022-

石井 日菜¹, 白川 龍生²

Hina Ishii¹, Tatsuo Shirakawa²

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

2022 年 12 月下旬、北海道オホーツク地域では厳冬期としては異例の湿雪が断続的に降り、倒木や停電などの雪害が生じた。そこで本研究では、各地で雪害が相次ぎ発生した 12 月 23 日とその前後の事例に着目し、当時の湿雪特性と湿雪をもたらした気象要素について解析した。湿雪は、特に紋別地方から網走地方南部にかけて広く分布していた。同地域で湿雪が長時間持続した原因は、低気圧が北海道東方海上に停滞したことで雪を伴う強風が同一象限（北東：オホーツク海）から吹きつけたこと、さらに平均気温 0℃以上の日が 4 日間継続したことが挙げられる。

1. はじめに

2022 年 12 月下旬、オホーツク地域では湿雪が断続的に降り、その際、湿雪と強風が原因とみられる雪害が相次いだ。例えば、同年 12 月 23 日には紋別市で鉄塔が倒壊し、その 2 日後である 12 月 25 日には遠軽町白滝で倒木が原因による電線の断線が発生した¹。オホーツク地域において厳冬期に湿雪が持続することは異例である。松下・西尾 (2006) は、北海道東部では湿降雪の発生頻度は少ないが一度に湿降雪が発生することにより着雪が顕著に発生する可能性があることを示唆しているが²、2022 年 12 月下旬の湿雪はこれが顕在化した事例といえる。

そこで、本研究は雪害が多発した 2022 年 12 月 23 日とその前後の事例に着目し、オホーツク地域における湿雪の分布と、その湿雪をもたらした気象を解析した。

2. 研究方法

2. 1 雪水比と湿雪判定

本研究における湿雪の程度は、雪水比と積雪相当水量で示す。ここで用いる雪水比は、積雪深差 (cm) を日降雪相当水量 (mm) で割ったもの (日別値) とする。積雪深差は、12 月 23 日の日最大積雪深から、降雪前 (12 月 21 日) の差分とし、日降雪相当水量は降雪後の 12 月 22 日から 23 日までの総和とした。

解析に用いたデータは、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構が開発・運用している農研機構メッシュ農業気象データ (The Agro-Meteorological Grid Square Data, NARO : 大野ら, 2016)³である。また、紋別の湿雪判定では、気温と湿度から推測する気象庁の降水種別判定式⁴を用いた。ここでは、気象庁紋別特別地域気象観測所において観測された一時間ごとの降雪について判定を行った。なお、降水種別判定のグラフは遠藤ら (2020)⁵を参照した。

2. 2 オホーツク地域に湿雪をもたらした気象

当日の気圧配置は、日本周辺域を対象とする地上天気図 (SPAS : 速報天気図)⁶を参照した。日本周辺域における気圧・降水・風は、それぞれ初期時刻から一時間後のメソ数値予報モデル GPV(MSM)⁷を用いた。MSM は予報データであり当時の気象そのものを表現しているとは限らないが、初期時刻から一時間後のデータは現実の各気象現象との差が小さいと考えた。地上気象データは、紋別を事例に、気象庁紋別特別地域気象観測所における過去の気象データ (気温、相対湿度、風向風速)⁸を用いた。

3. 結果と考察

3. 1 12 月 23 日の湿雪

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

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

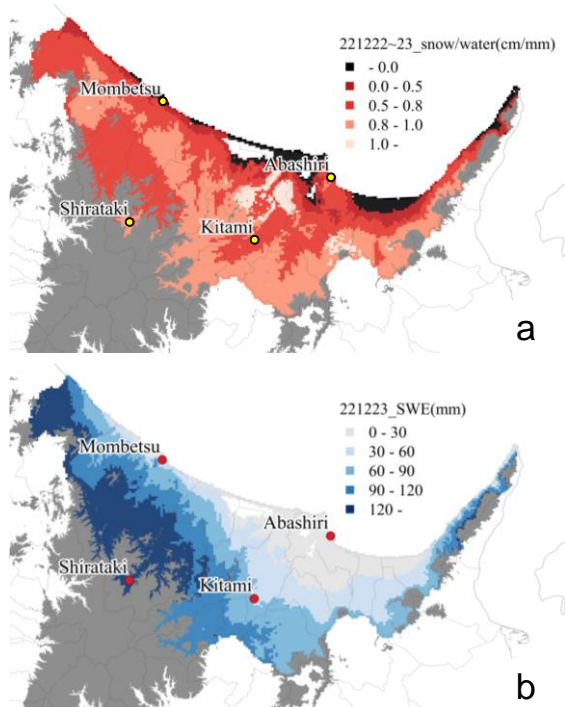


図1 北海道オホーツク地域における12月23日の雪水比と積雪水量。(a) 雪水比, (b) 積雪水量. 雪水比 0.0 cm/mm のエリアは雨により積雪深の値が減少している。

図1aは12/22~23の降雪の雪水比, 図1bは12/23 積雪相当水量の分布である。気象庁が湿雪の判定に使用している雪水比は0.5~1.0である⁴⁾。図1aでは、サロマ湖周辺を除いた紋別地方、北見地方、網走地方の南部において雪水比が1.0以下であり、湿雪の分布が認められる。一方図1bでは、紋別地方で多いが、網走周辺では少ない。これは、網走の降水形態がみぞれ(雨まじりに降る雪)主体であったため⁸⁾、積雪が増加せず、結果的に積雪相当水量の増加も顕著ではなかったためと考えられる。

3. 2 日本・北海道周辺の気象

3. 2. 1 気圧配置

図2は、12月22日3時から23日15時にかけての日本付近における地上天気図である。まず図2a~cに示すように、22日17:30に紋別でみぞれが降り始めるまでの間、前線を伴った3つの低気圧が日本列島とその付近を横断した。その後、低気圧は図2d~fのように北海道付近で停滞した。その際、低気圧の一つが北海道東部から東方海上に位置する形となり、長時間、オホーツク地域に降雪または降水をもたらした。このような低気圧の停滞は、北

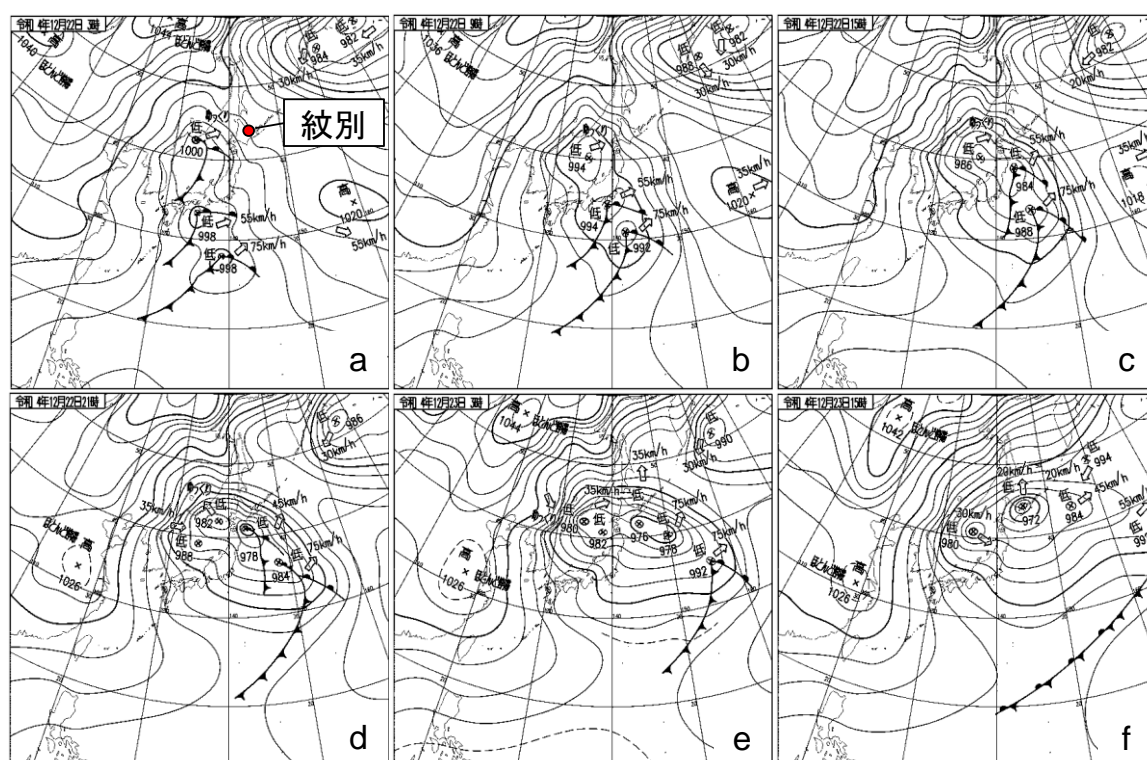


図2 12月22日~23日における速報天気図 (SPAS). (a) 22日3時, (b) 22日9時, (c) 22日15時, (d) 22日21時, (e) 23日3時, (f) 23日15時. 赤い○は紋別を示す。

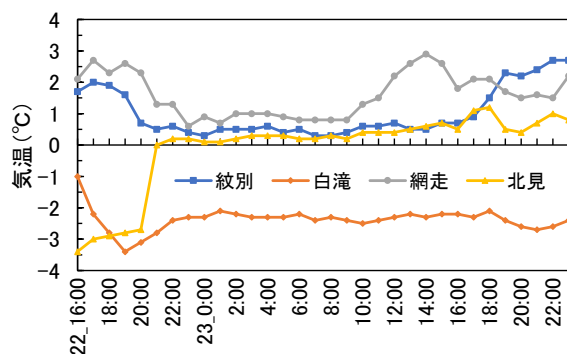


図3 12月22日16時から23日23時までのオホーツク地域における4地点の気温の推移。

北海道の北側にある複数の高気圧が低気圧の北上を阻む形で位置したことで生じた。その背景には、500 hPa 面における寒帯前線ジェット気流の蛇行がある。2022年12月下旬は蛇行が例年より大きく、北海道の北側に大規模な高偏差領域が形成された。その結果、広い範囲に複数の高気圧が出現したと考えられる。

3. 2. 2 気温

図3は、12月22日16時から23日23時までのオホーツク地域における4地点(紋別、白滝、網走、北見)の気温の推移である。紋別、網走の気温は、期間中常に0°C以上、北見は22日21時以降に0°C以上で推移した。このことから、紋別・網走・北見では湿雪(みぞれまたは雨)が降りやすい環境下だったと考えられる。一方、白滝は常に0°Cを下回っているが、これはアメダスの標高が他の地点と比較して高い位置にある(475.0m)ことがその原因の一つであると考えられる。

3. 2. 3 風と降水域・低気圧との関係

図4は、メソ数値予報モデルGPV (MSM) による気圧・降水・風の数値予報天気図であり、オホーツクのほとんどの地域で雨が分布している12月22日19時から、紋別で停電が発生した直後の12月23日16時までの代表的な状況を示す。低気圧が停滞した影響で、風向は北東象限に卓越していた。結果、オホーツク地域では長時間、同一風向から湿雪がもたらされた。

3. 3 紋別の停電を引き起こした気象

図5は、紋別においてみぞれが降り始めた12月22日17時から停電発生後の12月23日17時までの平均風向ベクトル、平均風速、気温、相対湿度である。平均風向は、4時間以上連続して同一風向が続く事象が繰り返し発生した。風速は、22日18時以降、5 m/s 以上で継続した。これは若浜ら(1979)による、湿雪かつ5~10 m/s 程度のとき電線の周りに着雪が発生する条件と一致する⁹⁾。相対湿度は、22日19時以降90%を超え、気温も23日20:00以降0°C~1°Cを推移した。なお、その際の降水の種類は、17:30からみぞれ、夜22時から雪に変わり、雪は朝9時まで断続的に記録された。図6に、降雪が観測された時刻の気温・相対湿度の関係を示す。一点鎖線が雪とみぞれの境界、破線が雨とみぞれの境界である。図6によると、紋別における12月22日から23日の降雪は、みぞれ(雪または雨)の領域に含まれる。

以上から、このとき紋別では長時間にわたり同一象限から湿雪がもたらされたことが分かった。この湿雪は着雪しやすい条件に一致する状態も続き、現

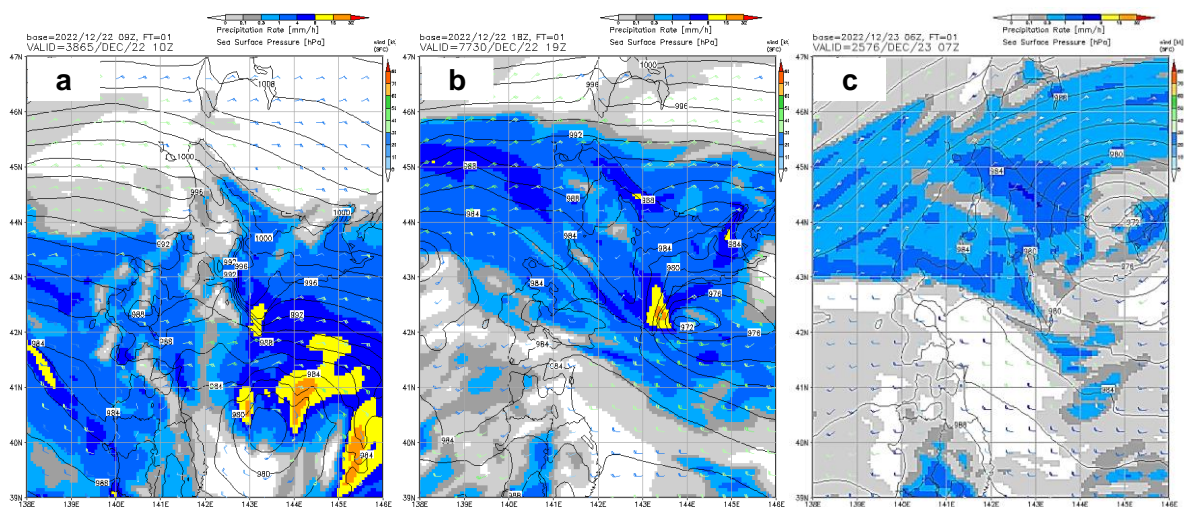


図4 12月22日~23日におけるメソ数値予報モデルGPV (MSM) による気圧、降水、風の分布。
(a)22日19時、(b)23日4時、(c)23日16時。いずれも初期時刻から一時間後の値。

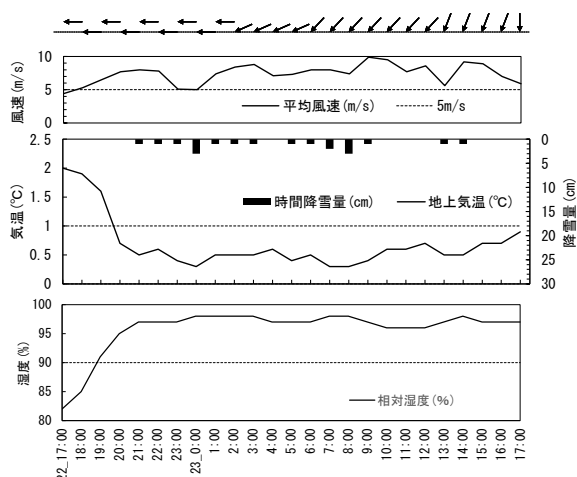


図 5 紋別特別地域気象観測所における正時の風向風速，気温，時間降雪量，相対湿度。

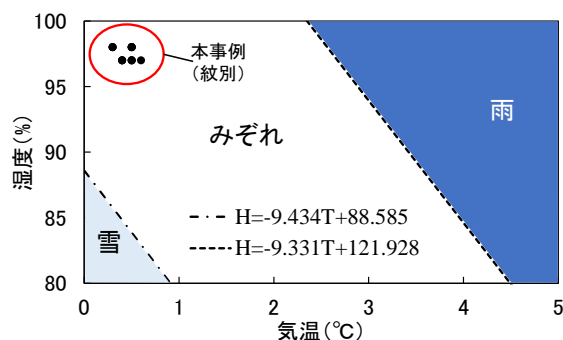


図 6 紋別特別地域気象観測所において降雪が観測された毎正時の気温・湿度分布の関係。気象庁降水種別判定グラフ^{3),4)}に加筆した。一点鎖線は雪とみぞれの境界，破線は雨とみぞれの境界を示す。

地で発生した送電線の倒壊にもつながる着雪が発生しやすい状況下であったことが考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究において得られた知見は以下の通りである。

(1) オホーツク地域における雪の特徴

オホーツク地域における 12 月 22 日から 23 日の湿雪分布は，特に紋別，北見，網走地方南部（サロマ湖周辺を除く）で表れた。

(2) 同地域に湿雪をもたらした気象

12 月 23 日前後，低気圧が北海道東部や東方海上に停滞したことでオホーツク地域の風は北東象限の風が卓越し，気温も地上で 0℃以上と高かったため，長時間同一象限から湿雪がもたらされた。

今後，オホーツク地域で含む過去の湿雪事例につ

いても同様に解析を行うとともに，将来の気温上昇シナリオをもとに今後の湿雪回数への影響について検証したい。また，同時期に実施された積雪断面観測の結果と本研究とを結びつけ，厳冬の湿雪の影響を受けた雪質に関し，さらに研究を深めたい。

本研究の成果は，厳冬期における異例の湿雪による被害拡大の可能性を具体的に裏付けるものであり，今後同様の事例が生じた際の事前対策になると考えられる。

【謝辞】

本研究に際し，土木研究所 寒地土木研究所の松下拓樹博士より湿雪判定について多くのご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 北海道紋別市でまた停電 復旧の矢先に倒木 午後 3 時ころ復旧めざす。朝日新聞デジタル，2022 年 12 月 25 日電子版。
<https://www.asahi.com/articles/ASQDT30ZHQDTI IPE003.html> (2023 年 6 月 27 日閲覧)
- 2) 松下拓樹，西尾文彦 (2006)：着雪を生じる降水の気候学的特徴。雪氷，**68** (5)，421-432。
- 3) 大野宏之，佐々木華織，大原源二，中園 江 (2016)：実況値と数値予報，平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成。生物と気象，**16**，71-79。
- 4) 気象庁予報部予報課 (2012)：雪に関する予報と気象情報について。
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minkan/koushu1 21207/shiryou2.pdf>
- 5) 遠藤悠ほか (2020)：気象庁降水種別判別を元にした着雪指標の検討。寒地技術論文・報告集，**36**，216-221。
- 6) Sunny Spot：専門天気図アーカイブ。
https://www.sunnyspot.net/chart/chart_archive.html?area=0 (2023 年 6 月 26 日閲覧)
- 7) Weathernews 社提供ウェブサービス「Labs Channel」
<http://labs.weathernews.jp/data.html> (2023 年 6 月 26 日閲覧)
- 8) 気象庁：過去の気象データ検索。
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/> (2023 年 6 月 26 日閲覧)
- 9) 若浜五郎ほか (1979)：電線着雪の風洞実験：高風速下での着雪の成長。低温科学。物理篇，**36**，169-180。

恵庭市の市街地における降雪傾向の把握

Understanding Snowfall Trends in Urban Areas of Eniwa City

大八木 啓翔¹, 古川 義純²

Hiroto Oyagi¹, Yoshinori Furukawa²

Corresponding author: Hiroto Oyagi (5-7-1Nijigaoka Kitahiroshima-shi HOKKAIDO 061-1103)

2021-22 年冬期, 恵庭島松のアメダスは初めて最深積雪 150 cm を超え, 観測史上 1 位の値を更新した. 市内全ての地域で大雪となったが, 短距離間での積雪量の差異は, 感覚的に実感できるものの, 数値として表現されることは少ない. そこで, 恵庭市街地での大雪傾向を掴むために, 2023 年 1 月より市内の小中学校 11 箇所に観測ポイントを設け, 恵庭市内中心部からおよそ半径 3 km 以内での積雪の特徴を解析した. 2022-23 年冬季は恵庭市周辺においては比較的小雪で, 多くの観測データを集めることは出来なかったが, 降雪量の多い場所は, 恵庭市街地内の範囲では固定化しないことがわかった.

1. はじめに

2021-22 年の冬季において, 恵庭市は局地的な大雪により大きな影響を受けたが, 市内地の狭い範囲内でも降雪量や, 降雪の時間帯に大きな差があることを実感していた. しかし, 降雪量を把握するためのアメダス地点は, 恵庭市の場合, 市内中心地から約 5 km 離れている恵庭島松のアメダス 1 点のみで, 市街地内にはない. 局地的な降雪傾向を把握するためには, 自ら観測ポイントを設ける必要があった.

また, 恵庭市は日本海側の気候と太平洋側の気候, いずれの影響も受ける場所に位置している. 地理条件としては, 北西方向に手稲山系, 西方向に羊蹄山系があるため, 西風による雪雲の流入は激しくない傾向にある. 一方, 北寄りの風による雪雲の流入は起こりやすいため, 総降雪量は少ないが, 大雪は起こるという特徴がある.

2. 仮説

これまでの研究から, 石狩地方に大雪をもたらす原因として, 石狩湾小低気圧の発生, 西岸带状雲の発生, 低気圧の通過, そして冬型の気圧配置による雪雲の流入などが挙げられている. 松岡ら¹⁾の分析によると, 2021-2022 年冬季においては, 爆弾低気圧の通過, 西岸带状雲の発生といった気象条件が頻発したことで記録的大雪になったとしている. このために札幌圏に限って顕著な大雪が見られたとしている²⁾. 恵庭市に影響を大きく与える気象条件を 3 つ抽出し, それぞれ恵庭市

の降雪傾向がどのようなものか, 以下 3 つの仮説を設定した.

・石狩湾小低気圧の発生時

この小低気圧は短命という特徴から, より石狩湾に距離が近い恵庭市の北部の地域の方が, 南部の地域よりも降雪量が多くなる (図 1).



図 1 石狩湾小低気圧、西岸带状雲発生時の降雪傾向の仮説³⁾ (降雪量の多い地域から順に, 赤, 黄, 緑, 青)

・西岸带状雲の発生時

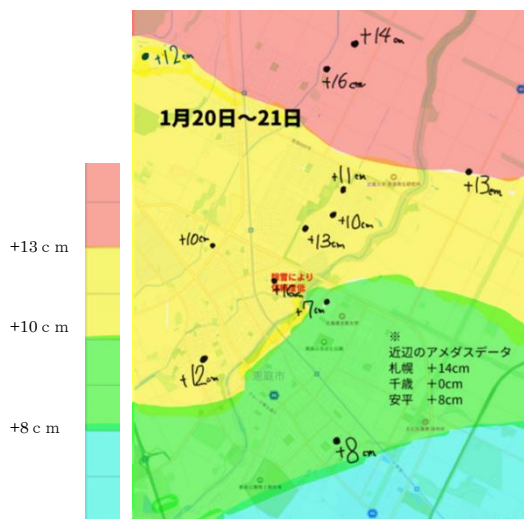
北寄りの風によって雪雲が流入するため, 北部の地域の降雪量が多くなる (図 1).

¹札幌日本大学高等学校

²北海道大学

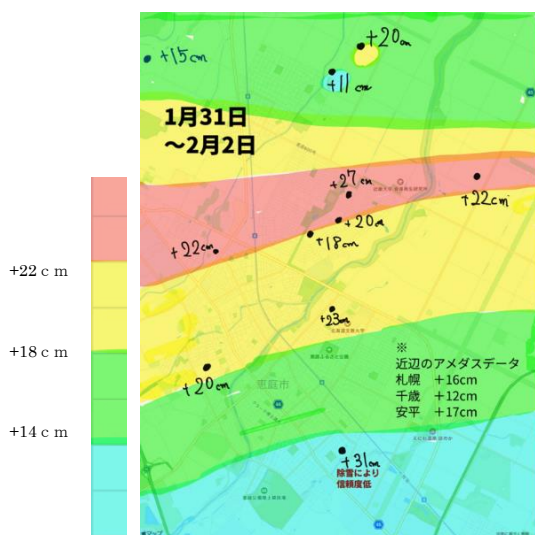
Sapporo Nihon University High School
Hokkaido University

Copyright©2023 公益社団法人日本雪氷学会
The Japanese Society of Snow and Ice

図4 1月20日～21日の観測データ³⁾⁴⁾

4. 3 2023年1月31日～2月2日

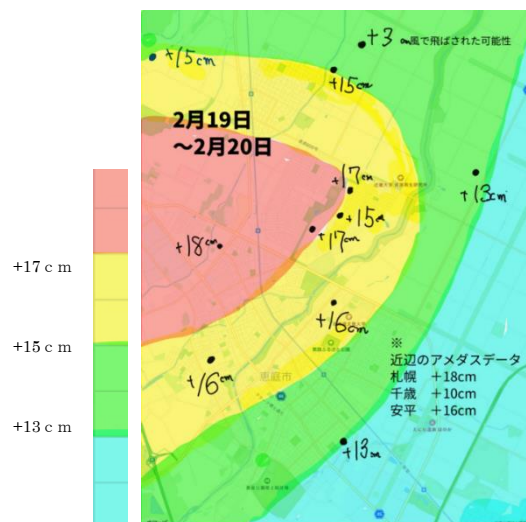
2023年1月31日17:00頃～2023年2月2日9:00頃の間に降り積もった雪の高さを示した降雪傾向を図5に示す。日本海で発達し、前線を伴う995 hPa程度のやや強い勢力の低気圧が、北海道の南岸付近を沿うように通ったことによる降雪である。降雪が見られた時間帯の風向は主に北、または北北西で、低気圧が恵庭市南方を通過した直後にもたらされた降雪と考えられる。

図5 1月31日～2月2日の観測データ³⁾⁴⁾

4. 4 2023年2月19日～20日

2023年2月19日16:00頃～2023年2月20日16:00頃の間に降り積もった雪の高さを示した降雪傾向を図6に示す。日本海で発達した1000 hPa

程度の低気圧が北海道の南部を比較早い速度で通ったことによる降雪である。降雪が見られた時間帯の風向は主に北、または北北西で、低気圧が通過する直前にもたらされた降雪と考えられる。

図6 2月19日～20日の観測データ³⁾⁴⁾

5. 結論

今回行った4回の計測においては、すべて低気圧が通過したことが起因となった降雪であった。スノーポール設置以降において、恵庭市付近、西岸帯状雲や石狩湾小低気圧の発生による大雪が見られなかったため、分析可能なデータは低気圧通過型のみである。

結論として、市街地内において降雪量に毎回差があることが検証された。毎回最高値と最低値の間で5 cm以上の差が生まれた。また、どの地点が多くなりやすいか、といった降雪量の傾向が異なることも、観測データから読み取ることができる。しかし、明らかにデータ不足であることから、このような結果が生まれた原因を分析、特定することは、現状では困難である。

6. 展望

今回の研究では低気圧型の観測データしか得られていないため、低気圧型に限り、重点的に考えた。現状の仮説では低気圧通過として一括りにしていた点は不十分だったと考え、今後データを分析する際、より細かく条件設定、分析をする必要があると考える。

Inatsu⁵⁾らはSelf-Organizing Mapによって、気圧配置によって降雪傾向を細かく分類している。

河村⁶⁾や原田ら⁷⁾は、冬季の北海道における低気圧通過ルートを12パターンに分類した。

これらを参考にし、恵庭市に影響を与える低気圧ルートを5パターン抽出した(図7)。①は日本海で発達、②は大陸で発達した低気圧が津軽海峡や北海道南部を通るルート、③は北海道北部を、④は日本を沿うように太平洋を進むルート、⑤は①と④が同時に起きて後に合体する二つ玉低気圧である。

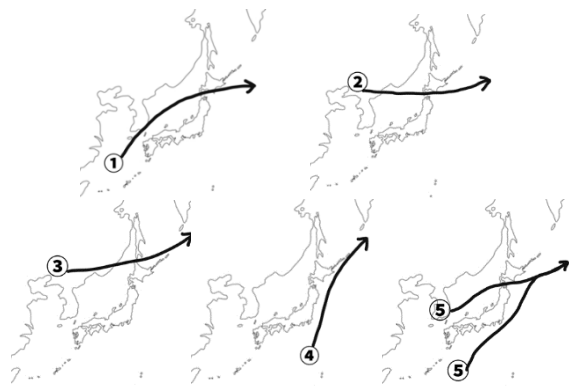


図7 低気圧ルート5パターン

また、低気圧が通過した後、冬型の気圧配置になることにより、雪雲は低気圧通過後の北寄りまたは西寄りの風によって運ばれてくる(図8)。

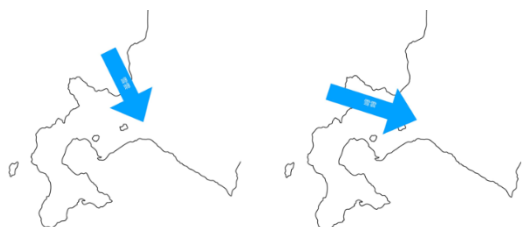


図8 低気圧通過後の主風向 左:北寄り
右:西寄り

今後は、低気圧ルートの5パターン、低気圧通過後の主風向の2パターン、5×2の10通りで検討する。また、アメダスデータを元にして過去に遡り、どの低気圧ルートが起こりやすく、また大雪になりやすいのかを調べていく。その上で、新たに検討すべき低気圧ルートや必要のないルートを削除しながら、次年度の観測へ向けて準備していく。

【謝辞】

スノーポールの設置を許可していただいた恵庭市教育委員会、各小中学校の先生方と、本研究に助言をしてくださった北海道大学大学院理学

研究院の稲津将教授、北海道大学大学院工学研究院の内田努准教授へ謝辞を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 松岡直基, 2022: 2021-2022年冬季の札幌都市圏における大雪について(その3), 北海道の雪氷 **No.41**, 13-16.
- 2) 白川龍生, 2022: 2021-2022年冬季の札幌都市圏における大雪について(その2), 北海道の雪氷 **No.41**, 9-12.
- 3) Google社: 地図データ@2023.
- 4) 気象庁: 過去の気象データ検索(恵庭島松, 札幌, 千歳, 安平).
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>
(2023年6月18日閲覧)
- 5) Masaru Inatsu, 2021: Trends and Projection of Heavy Snowfall in Hokkaido, Japan, as an Application of Self-Organizing Map, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **60** (10), 1483-1494.
- 6) 河村武, 1961: 北海道における冬季の降水分布の総観気候学的考察, 地理学評論, **34** (11), 583-595.
- 7) 原田裕介, 2013: 冬季の気圧配置と北海道における大雪, 暴風雪の地域別発生状況 寒地土木研究所月報=**No.719**, 33-41.

オホーツク海から日本海と太平洋への海水流出頻度

Frequency of sea ice discharge from the Sea of Okhotsk to the Sea of Japan and the Pacific Ocean

小濱 悠介¹, 舘山 一孝², 宇都 正太郎³, 泉山 耕³
Yusuke Kohama¹, Kazutaka Tateyama², Shotaro Uto³, Koh Izumiyama³
Corresponding author: m3235200146@std.kitami-it.ac.jp (Y. Kohama)

オホーツク海の海水が日本海側や太平洋側に流出すると、地域産業に被害が生じる可能性がある。本研究は過去 20 年間の海水流出頻度を調査し、流出海水の危険度の評価と流出原因の海気象条件を明らかにすることを目的としている。海水流出頻度の調査にあたって、海水密度度分布は AMSR-E 及び AMSR2 の衛星データ、航行障害の発生の有無については第一管区海上保安本部による海水観測記録、気象と氷況の関係調査に ERA5 の客観解析データを使用した。流出した海水の密度度は 20-40‰ のときが最も頻度が高く、氷量と航行障害日数に相関関係が見られ、海水が大きく流出する際は強い低気圧の通過が関係することが示された。

1. はじめに

オホーツク海の海水は宗谷海峡を通して日本海側に、根室海峡を通して太平洋側に流出することがあり、特に日本海側への流氷の流出は稀である。海水が流出すると、漁業や海上交通などの地域産業に大きな被害が生じる可能性がある。木岡ら¹⁾によると氷海域において大量の海水をともなった津波は通常の津波より被害を拡大し、国民の生命・財産に甚大な損害を与える可能性がある。

本研究の目的は、稚内沖を超えて日本海側に流出する場合と根室沖を超えて太平洋側に流出する場合の流氷発生頻度を明らかにすることである。また、流氷量と航行障害の関係性と流氷が大きく流出するときの海気象条件について調査した。

2. 使用データ

研究では流氷発生頻度の調査において、Aqua 衛星搭載の改良型高性能マイクロ波放射計 AMSR-E 及び GCOM-W 衛星搭載の高性能マイクロ波放射計 AMSR2 の 2012 年から 2022 年までの海水密度度データを使用した。流氷量と航行日数の関係性の調査では海上保安庁第一管区海上保安本部が稚内港及び花咲港において観測した 1996 年から 2022 年までの視程内の流氷量 (図 1) と航行障害日数の記録²⁾を使用した。風と氷況の関係性の調査にあたって、風向・風速のデー

タは、ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) の再解析データである ERA5 を使用した。比較データとして、海上保安庁第一管区海上保安本部海水情報センターのホームページ内にある海水速報³⁾を用いた。

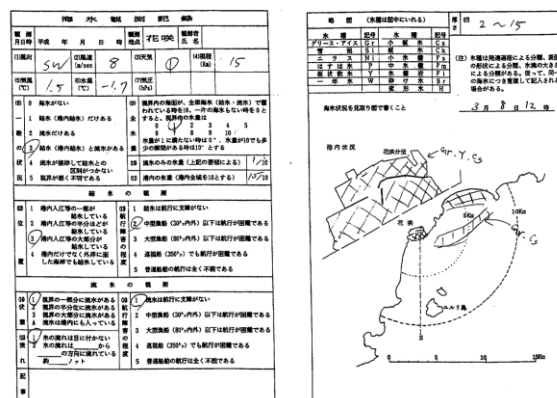


図1 海氷観測記録 (海上保安庁第一管区海上保安本部海洋情報部提供)

3. リモートセンシングによる解析手法と結果

3.1 解析手法

解析範囲は稚内沖と根室沖 (図 2) で、流出の程度によって 2 ケースごとに分類した。稚内沖では宗谷海峡を超えて日本海側に流出 (東経 142.0°以西) を Case-1、日本海側に大きく流出 (東経 141.5°以西) を Case-2 とした。根室沖では根室海峡を超えて太平洋側に流出 (北緯 43.2°以南) を Case-3、太平洋側に大きく流出 (北緯

¹ 北見工業大学大学院 工学専攻

² 北見工業大学 地球環境工学科

³ 北海道大学 北極域研究センター

Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology
School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology
Arctic Research Center, Hokkaido University

43.0°以南) を Case-4 とした。

解析期間は 2002 年 12 月～2022 年 4 月までの 20 年間で各年の海水が存在する月 (12 月～4 月) とした。海水流出頻度の定義として、各ピクセルに海水密度度(SIC)を 20%の範囲ごとに分け (例 : 0%越～20%, 20～40%, 40～60%, 60～80%, 80～100%), 解析期間内で海水が発現した日数とした。

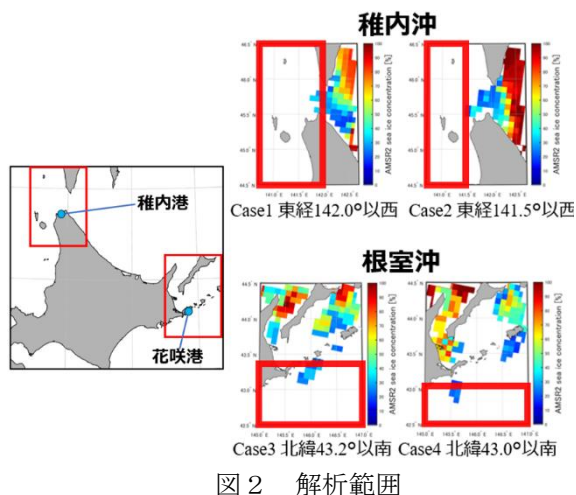


図 2 解析範囲

3. 2 日本海における解析結果

3. 2. 1 海水流出頻度

稚内沖での海水流出頻度を図 3 に示す。破線の 2012 年は衛星センサ切り替えのため欠測している。図 4 において海水が日本海側へと流出した Case-1 の海水流出頻度は 83 回で、年平均 4.6 回であった。海水が日本海側へと大きく流出した Case-2 では海水流出頻度は 2 回、年平均 0.1 回であった。

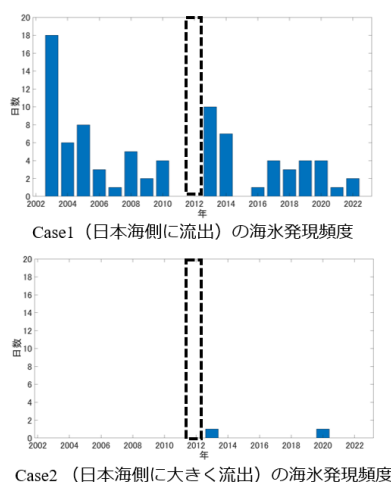


図 3 Case-1 と Case-2 の海水流出頻度

稚内沖での各 SIC の海水流出頻度を図 4 に示

す。カラーバーは頻度を 0 から 100%で、流出した海水の密度度がそれぞれの密度度範囲になる確率を示している。これより、Case-1 と Case-2 とともに海水密度度 20～40%が最も頻度が高い結果となった。また、Case-2 では海水密度度 60%以上の流氷は存在していない。礼文島周辺で海水が発現しているが、比較データである海水速報図には解析期間内に礼文島周辺で発現した海水はないことから、おそらく疑似海水ノイズだと思われる。

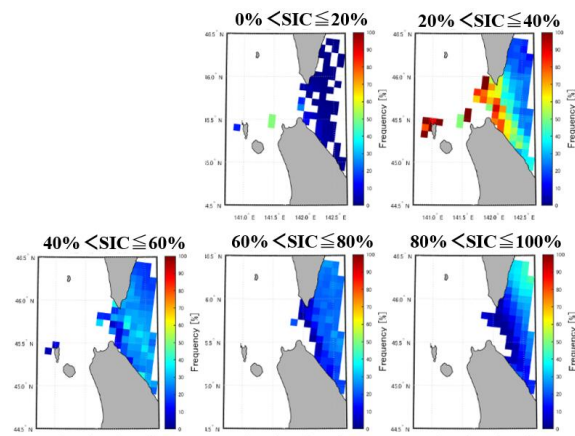


図 4 稚内沖での各海水密度度の海水流出頻度

3. 2. 2 現地海水観測記録に基づいた航行障害日数

稚内港での流氷量、航行障害日数、期間を表した 3 次元散布図を図 5 に示す。カラーバーは流氷量を表している。流氷量とは流氷に覆われている海面の占める割合のことであり、10 分位法で表している。観測点において流氷の状況から中型漁船 (30 トン内外) 以下は航行が困難とされた日数を流氷による航行障害日数としている。図 5 より、航行障害日数が多くなるにつれ、流氷量も多くなっている。

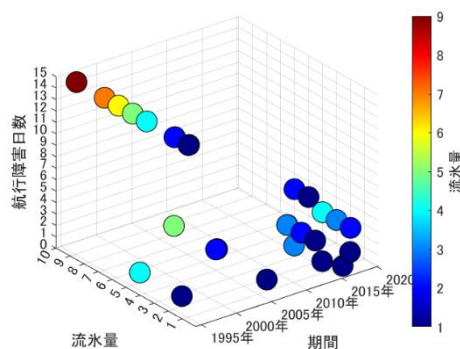


図 5 稚内港での流氷量と航行障害日数

3. 2. 3 海気象条件と海水の関係

流氷が大きく流出するときの原因の調査として、流氷が大きく流出する日の前後で海水密接度の図に風向風速を重畳した。日本海側へ大きく流出した2013年3月4日～6日（図6）と2020年3月6日～8日を調査した。

図6より2013年3月4日～6日では大きく流出する前日に平均風速3.6 m/sの東寄りの風、当日には平均風速4.3 m/sの西寄りの風、翌日には平均風速6.3 m/sの東寄りの風が吹いていた。2020年3月6日～8日も図8と同様に大きく流出する前日に東寄りの風（平均風速8.4 m/s）、当日には西寄りの風（平均風速3.9 m/s）、翌日には西寄りの風（平均風速5.5 m/s）が吹いていた。

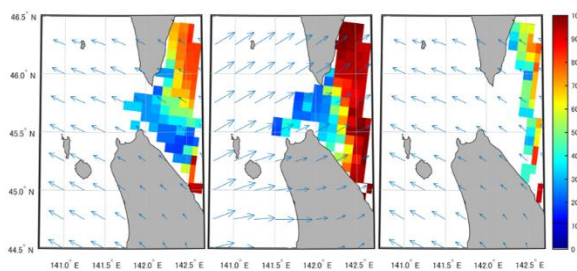


図6 2013年3月4日～6日の稚内沖での海水密接度に重畳した4時間平均の風向風速

3.3 太平洋における解析結果

3.3.1 海水流出頻度

根室沖での海水流出頻度を図7に示す。図7において海水が太平洋側へと流出した Case-1 の海水流出頻度 260 回、年平均 14.6 回であった。海水が太平洋側へと大きく流出した Case-2 での海水流出頻度 34 回、年平均 1.9 回であった。

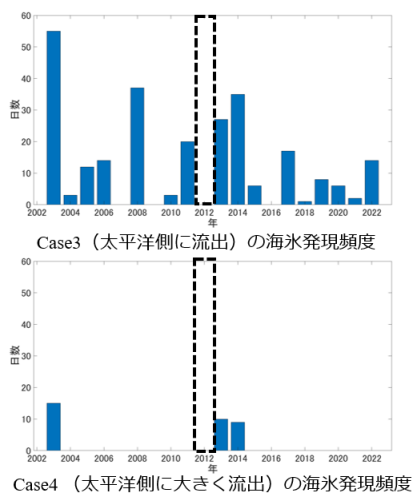


図7 Case-3 と Case-4 の海水流出頻度

図4と同様に、稚内沖での各海水密接度の海

氷流出頻度を図8に示す。Case-3 と Case-4 ともに海水密接度 20～40%が最も頻度が高い結果となった。また、Case-4 では海水密接度 60%以上の流氷は存在していない。

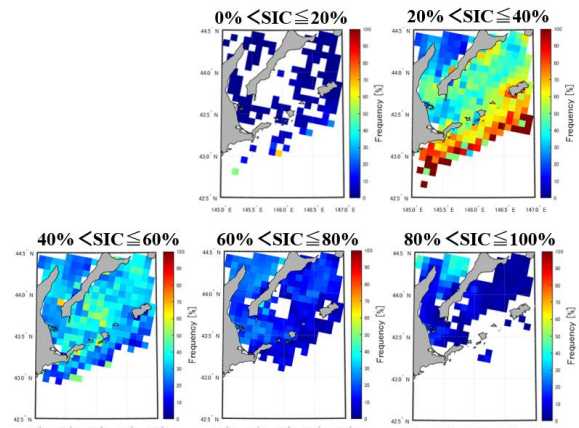


図8 根室沖での各海水密接度の海水流出頻度

3.3.2 現地海水観測記録に基づいた航行障害日数

図5と同様に、花咲港での3次元散布図を図9に示す。図9においても図5と同様に、航行障害日数が多くなるにつれ、流氷量も多くなっている。

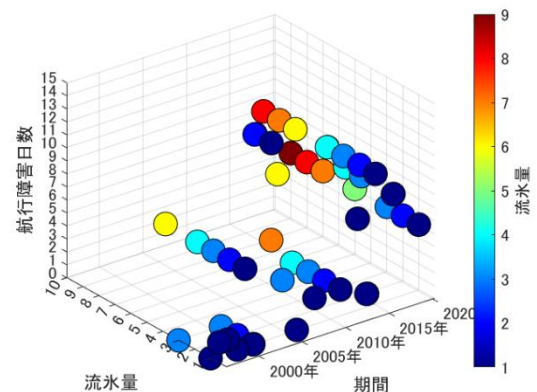


図9 花咲港での流氷量と航行障害日数

3.3.3 海気象条件と海氷の関係

根室沖では大きく流出した日が続いた2003年3月5日～7日を調査した。大きく流出した前日には南寄りの風、当日も南寄りの風、翌日には西寄りの風が吹いていた。

4. 考察

4.1 発現頻度、稚内と根室での頻度の相関

稚内と根室での海水流出頻度の相関を図10に示す。縦軸が根室、横軸が稚内の海水流出頻度

である。相関係数は 0.76 であり、強い正の相関がみられた。

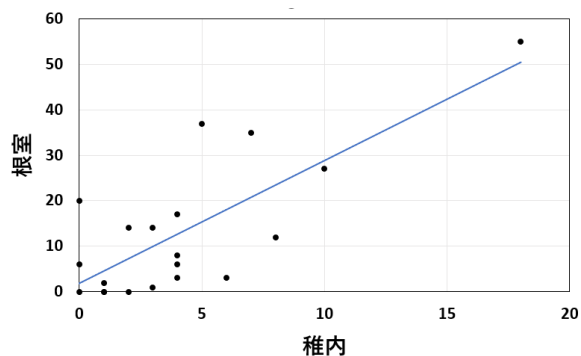


図 1 0 稚内と根室での海氷発生頻度の相関

4. 2 海氷観測記録の流氷量と航行障害日数の関係

稚内港と花咲港ともに、航行障害日数が多くなるにつれ、流氷量も多くなっている。つまり、航行障害日数が多い年は流氷量も増加しやすいことを示している。

4. 3 海気象条件と海水の関係

図 6 から海氷が日本海側に大きく流出するときは前日に東寄りの風が吹いていることが分かる。また、気象庁の天気図⁴⁾より流出の前日または当日に低気圧が通過していた。稚内沖では宗谷暖流が優勢になる⁵⁾。また、宗谷暖流の流量は 1 月に最小となるものの、稚内沖へ大きく流出した 2 例は 3 月であり、3 月は南東流である⁶⁾ことから稚内沖の海氷は大きく流出するときは東寄りの風が卓越し、低気圧が関係していると考えられる。一方で、根室沖においては海氷が大きく流出するとき、風の影響はみられなかった。

5. まとめ

本研究では稚内沖を超えて日本海側に流出する場合と根室沖を超えて太平洋側に流出する場合の流氷発生頻度、流氷量と航行障害の関係性、流氷が大きく流出するときの原因を調査した。

解析期間において、稚内沖での海氷流出頻度は 83 日で根室沖での海氷流出頻度は 260 日であった。

流氷量と航行障害日数の関係性では稚内港、花咲港ともに航行障害日数が多くなるにつれ、流氷量も多くなることが分かった。

流氷が大きく流出するときの原因として稚内沖の海水が日本海側に大きく流出するとき (Case-2) は東寄りの風が卓越し、低気圧が関係していることが分かった。

今後の課題としては海水が流出する場合の具体的な海気象条件の調査が必要である。

【謝辞】

本研究では海上保安庁第一管区海上保安本部海洋情報部より海氷観測記録のデータ提供の協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 木岡信治, 森昌也, 遠藤強, 竹内貴弘, 渡部靖憲, 2014: 海氷群を伴った市街地への津波遡上特性に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), **70**(2), I_821-I_825
- 2) 海上保安庁第一管区海上保安本部 海氷観測 30 年統計、2021 年 3 月
- 3) 海上保安庁第一管区海上保安本部 海氷情報センター 海氷速報図
URL: https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN1/drift_ice/ice_chart/calendar/past/calendar.html (2023 年 6 月 18 日閲覧)
- 4) 気象庁 日々の天気図
<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html> (2022 年 9 月 20 日閲覧)
- 5) 松山優治, 青田昌秋, 小笠原勇, 松山佐和, 1999: 宗谷暖流の季節変動, 海の研究, **8**(5), 333-338
- 6) 森山秀太, 2008: 宗谷暖流流量の季節・経年変動, 北海道大学大学院環境科学院地球圏科学専攻大気海洋物理学・気候力学コース修士論文, 51pp

雪の結晶は氷晶核の必要なく生成する

Snow crystals are formed without ice nuclei

油川 英明^{1,2}

Hideaki Aburakawa^{1,2}

Corresponding author: abu440407@yahoo.ne.jp

Snow crystals are commonly believed to be formed from ice nuclei. However, it has been shown that the number of ice nuclei observed in the natural atmosphere is extremely small compared to the number of crystals in actual snowfall. Since this discrepancy is due to the special nuclei assumed from the experiment of the artificial snow crystal, we attempt to resolve the discrepancy in this report by obtaining the formation of snow crystals directly from super cooled water droplets like as cloud droplets.

1. はじめに

雪の結晶は水蒸気が氷点下において特別な核、つまり氷晶核に昇華して成長するもの¹⁾とわられてきている。この氷晶核は昇華核とも呼ばれ、今から百年以上も前に「大陸漂移説」の提唱で著名なウェーゲナー (1911) が、グリーンランド探検の際に低温下での過冷却霧のなかに氷晶を見出し、これは特別な核、つまり氷晶核により生成するものと想定した。そして、氷晶核の物質としては水蒸気が昇華して結晶が成長するということから、氷と同じ六方晶系の石英を挙げている²⁾。

その後、中谷¹⁾は人工雪の実験で、他の繊維ではなく、特別に兎毛へ雪の結晶が成長したことから、兎毛の特質が雪の結晶を成長させるとみなした。そして、天然ではそれに相当するものを「ある種の核」と称してその調査を行い、中谷の指導の下に Kumai³⁾が電子顕微鏡により雪の結晶の中心部に核を見出し、その物質を粘土鉱物と特定した。Kumai は同時に、雪の結晶の枝の部分には核の粒径よりもはるかに微細な無数のチリ、つまり凝結核をも見出している。なお、人工雪が昇華成長とした兎毛や天然の雪の結晶から見出された粘土鉱物などの核は、いずれも六方晶系の物質ではない。

さらに、氷晶核の調査は実際の大气について行われ、また、氷晶生成のための効果的な核の物質が探求されてきている。天然の大气の中に含まれる氷晶核の調査は種々の測定装置により行われ、氷晶核の主な物質としては中国大陸からの黄砂や一般的な火山灰、粘土鉱物などが観測されてい

る⁴⁾。そして、特筆すべきことは、氷晶核の測定装置による核の測定個数についてであるが、大気 1 リットル当たり 1~2 個ほどで降雪結晶数の $1/10^4$ となっており、大気に浮遊するエアロゾルの $1/10^6$ 程度といわれている。

大気中におけるこのような氷晶核数の不可解な現象を解釈するために、核の物質の温度効果や昇華核に加え凍結核などを含めた氷晶形成核が考えられてきている。しかし、核の数に関わる不可解な現象はこれらの導入によっても直ちに解消されることにはならないようである⁵⁾。

一般に、調査研究と天然の現象との間に明らかな相違が見られる場合、調査研究をはじめに戻し、天然に即した研究方法により、その相違点の解消を図るべきであると考ええる。このようなことから、本稿においては、天然の雪雲を構成している過冷却微水滴により、氷晶核によらずに雪の結晶が生成することを示し、いわゆる氷晶核なるものは必要がないことを述べるものである。

2. 過冷却微水滴から生成する雪の結晶

2. 1 実験の方法

中谷は、「雪の研究」¹⁾の緒言冒頭において以下のように述べている。すなわち、「雪は低温に於いて水蒸気が或る種の核に昇華作用によって凝縮した氷の結晶である」と。つまり、雪の結晶が生成するためには「或る種の核」すなわち「氷晶核」と水蒸気の「昇華作用」が不可欠であるということである。この後の雪の研究はこれを前提として行われ、「氷晶核」についてもこの人工雪

¹⁾ 日本雪氷学会 北海道支部

²⁾ NPO 法人雪氷ネットワーク

Hokkaido Branch, the Japanese Society of Snow and Ice
NPO Network of Snow and Ice Specialists

の実験により実証されたものとして自然大気に関する調査が行われてきた。

ところで、天然の雪雲は過冷却の微水滴、すなわち雲粒により満たされており、このような中で雪の結晶が昇華成長するとした場合、水蒸気量はせいぜい水飽和の領域であることから、中谷ダイヤグラムにおいて示されているように樹枝状結晶などの一般的な雪の結晶を成長させるような昇華作用は期待できないことになる。つまり、天然の雪の結晶は、水蒸気の昇華とは異なる作用により雪雲内の雲粒の集まりから生成すると考えなければならないわけである。

雪雲の雲粒は、一般には大気中に無数に存在するエアロゾルを凝結核として、水蒸気が上昇して冷却され、飽和の後にはこれに凝結し、冬季であれば過冷却微水滴の雲粒が形成される。雲粒は、粒径が $20\sim 30\ \mu\text{m}$ であれば -20°C ほどでも安定的に微水滴として液相の状態が保持される。

過冷却微水滴から氷晶を生成させるためには、上記のような微水滴の凝結過程とその安定的な過冷却の状態を破るためのトリガーが肝要であると考えられ、以下のような過冷却微水滴による雪結晶の作製実験を行った。

図 1 に実験装置の概略を示す。この図において、顕微鏡と光源を除いて、装置全体は二重の断

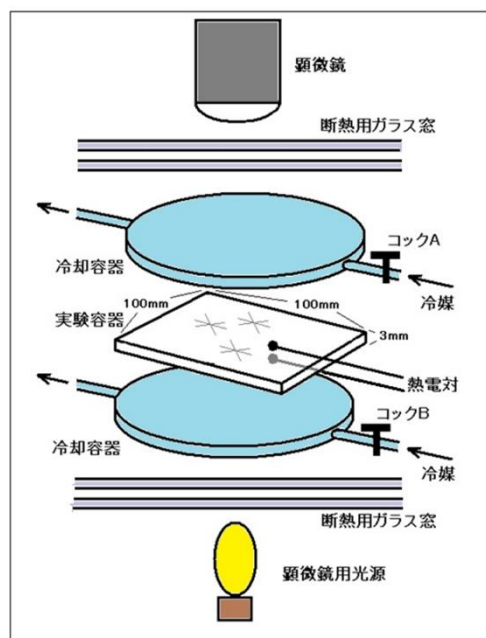


図 1 雪の結晶の作製装置。雪の結晶は、上下の円盤型冷却容器（青色）に挟まれた実験容器内の過冷却微水滴から生成して成長する。

熱用ガラス窓および断熱材で包み込み、常温の室で実験が行えるように組み立てられている。

実験の方法は、まず、厚さが $1\ \text{mm}$ で $10\ \text{cm}\times 10\ \text{cm}$ のアクリル板を 2 枚準備し、それにポリエチレンラップを貼り付け、その上に吸入用噴霧器で蒸留水の微水滴を一樣に散布する。そして、別途準備しておいた $1\ \text{mm}$ 厚さの細い枠を上記の 2 枚のアクリル板で挟み、これをラップで包んで固定して厚さ $3\ \text{mm}$ ほどの箱状の実験容器とする。

次に、この実験容器の外面に熱電対のセンサーを取り付け、それを冷媒が流出入する二つの冷却容器で挟み、これらを断熱材で囲んだ後に顕微鏡と光源をそれぞれ配置する。

そして、上面の冷却容器のコックは閉じて冷媒の流出入を止めて室温 ($+20^\circ\text{C}$ ほど) を保ち、下面の冷却容器のコックは開けたままで冷媒を循環させ、その温度を制御する恒温槽の設定温度を -5°C にして稼働する。

このままで数十分ほど経過すると、実験容器の上面の微水滴はほとんど蒸発して下面の水滴へ凝結する。このような状態になったなら、冷媒の恒温槽の温度を -15°C ほどに設定し、実験容器の上面に取り付けた冷却容器のコックを開き、下面と同じ冷媒の流出入を開始する。

実験容器の上面と下面が同じ温度になった時点から、水蒸気が上面に附着しているチリなどへ凝結し、過冷却微水滴が生成しはじめる。なお、この時の両面の温度は -5°C 以下の氷点下である。このままで $20\sim 30$ 分経過すれば、実験容器の上面の過冷却微水滴は $20\sim 30\ \mu\text{m}$ ほどに成長し、所々でこの微水滴が直接に氷晶（板状結晶）化し始める。この時の温度は -15°C ほどである。

また、柱状結晶を成長させるときは、実験容器の上下面の温度を -5°C のまま 20 分ほど保って微水滴を $20\ \mu\text{m}$ ほどに成長させ、その後、上下面の温度を -7°C ほどにして水蒸気の凝結を少し促進すれば、これがトリガーとなって実験容器の上面の微水滴は柱状結晶へと氷晶化する。

この実験でポイントとなることは、氷晶化する微水滴は、水蒸気の凝結が氷点下でゆっくりと行われて過冷却することであり、そして、次に、その微水滴に対してやや急激に水蒸気を凝結させて過冷却状態を破ることで、これにより過冷却微水滴から氷晶を生成させることができる。

実験容器に対しては特にシーディングなど行っておらず、実験室内のチリ以外には混入物が考

えられないことから、上記のような氷晶の形成は天然のチリ、つまりはエアロゾルによるもので、氷晶核などの特別な核は必要がない。

2. 2 雪の結晶の生成過程

図1に示した実験装置により、過冷却微水滴から雪の結晶が生成する過程をビデオ動画に撮影した。また、定性的ではあるが、チリの多寡と雪の結晶の生成数についても比較実験を行った。それらの結果について以下に示す。

図2は、過冷却微水滴から雪の結晶が成長する過程を撮影した動画から、各々の経過時間における静止画を抽出したものである。図2の①は、氷晶が形成される直前の画像で、過冷却微水滴は $30\mu\text{m}$ 内外のものが分布している。このような粒径の分布は天然の雪雲の雲粒にも一般的にみられることである。

図2の②は1分、③は2分の時間が経過した画像で、氷晶化した結晶の主枝は近くの微水滴を捕捉して成長し、また、その捕捉箇所から側枝を成長させている様子も見られる。主枝は昆虫の触手のように微水滴を捕捉する。図2の④は4分の時間が経過した画像で、ほぼ六花に成長している。周囲の微水滴は、氷晶との飽和水蒸気の差により蒸発するものも見られる。六花の中央は、氷晶化した微水滴の形がやや膨張した円形状になっているが、天然の結晶においても中心部に円形の文様がしばしば見られることから、雪の結晶は、このように過冷却微水滴、つまり雪雲内の雲粒により生成、成長するものと推定される。

図2の④の結晶は成長を続けて、数分後には径が 1mm を超えるまでに達している。この実験に

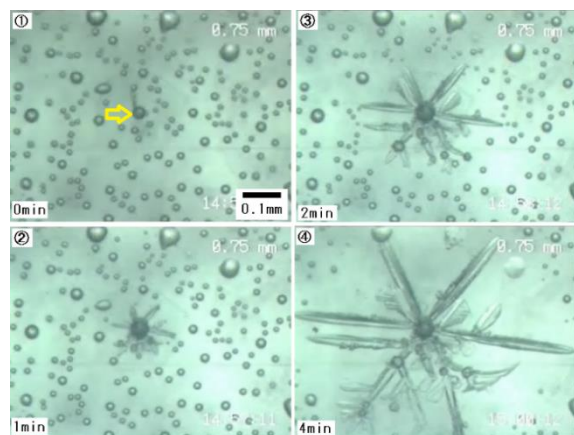


図2 過冷却微水滴 (図の矢印, $30\mu\text{m}$ 径) からの樹枝状結晶の成長。数分で 1mm 以上に成長。実験温度は -15°C 。

よる氷晶の成長は、中谷の人工雪¹⁾と比較しても速いが、何よりも樹枝状結晶の成長が水蒸気の過飽和を要しないということは特記される。

図3は、やや大きめの過冷却微水滴が、はじめは柱状結晶に氷晶化し、その後に樹枝状結晶へと成長する過程を、結晶の横方向から撮影した画像である。温度は -15°C とほぼ定常であるが、先ず、角柱の生成がなされ、そして二重構造の六花へと成長する。このような結晶は、天然の雪の結晶においてもよく見られる形態であるが、中谷ダイヤモンドには必ずしも則していない。

図4は、 -5°C での過冷却微水滴の結晶化を示したもので、近傍の微水滴とも接触して柱状へと氷晶化し、角柱の集合を形成している。

図5は、過冷却微水滴が上端から伸びてきた樹枝状結晶の枝先の接触により氷晶化する過程を

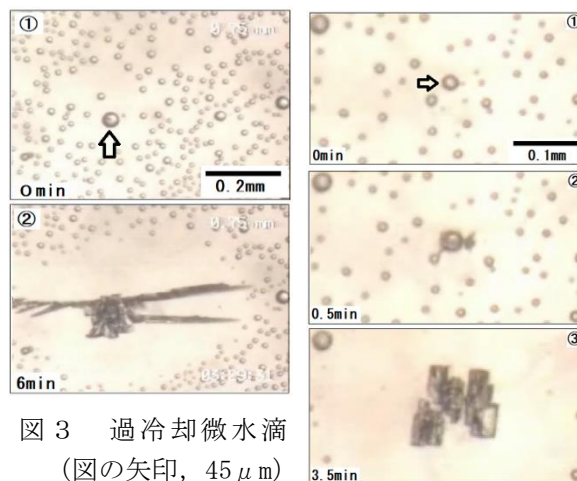


図3 過冷却微水滴 (図の矢印, $45\mu\text{m}$) が柱状結晶に氷晶化し、そこから樹枝状結晶へ成長の二重構造の結晶。 -15°C 。

図4 過冷却微水滴 (図の矢印, $30\mu\text{m}$) からの柱状結晶の成長。実験温度は -5°C 。

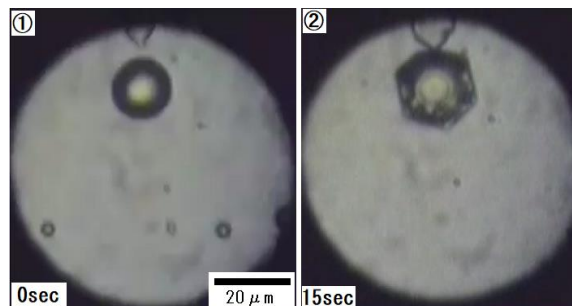


図5 結晶の先端の接触により六角形状に結晶化する過冷却微水滴。この後、六花に成長することから、雪片形成の一因とみなされる。実験温度は -15°C 。

示したものである。過冷却微水滴は、このように独立した氷晶になるか、図2のように母結晶に取り込まれるか、あるいは氷球状に凍結して霰を形成するかなど、多様な形態を示す。これは、過冷却微水滴の凝結形成の過程に依存している。

次に、天然の大気中に一般的に見られるエアロゾルが氷晶の生成を促進することについて、定性的ではあるが、図1の実験装置により検証を試みた。つまり、氷晶を作製する実験容器について、通常はラップを貼り付けてから即座に容器を組み立てるのであるが、この場合はチリを多く含んだ実験容器を得るために、実験容器を構成するアクリル板にラップを貼り付け、それを一昼夜ほど室内にさらしてから容器を組み立てた。その後これまでと同様の実験を行ったわけである。その結果を図6に示す。

図6の左右の写真を比較してみると、右のチリを多く含んだ実験容器の方がはるかに氷晶数の多いことがわかる。このことから、チリ、つまりエアロゾルによる氷晶の生成効果が示されていると言える。

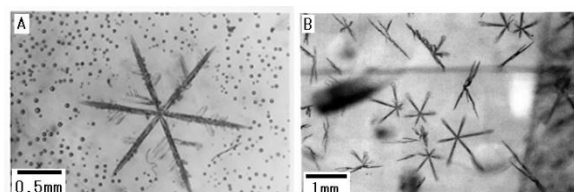


図6 チリを多く含んだ容器による実験結果（右）。写真の斑点や線分は容器の付着物。左は通常の実験による。温度は -15°C 。

3. 降雪機構に関する若干の考察

これまで述べてきた実験結果について図7のようにまとめ、これをもとに新たな降雪機構を構想してみたので、以下に概説する。

一般に、地表や海面などから蒸発した水蒸気は、上昇するとともに冷却され、飽和に達した後はその気塊に含まれるエアロゾルによって水蒸気が凝結して雲粒が形成される。夏季においては、水蒸気の蒸発が盛んになれば、雲粒は成長して併合し、雨滴となって落下する。他方、冬季においては、上昇気流が氷点下においてエアロゾルへの水蒸気の凝結により過冷却雲粒が形成された場合、図7に示したように、その凝結速度に応じて、過冷却の雲粒は各々の結晶形へと固相化する。この時、雲粒を固相化させるトリガーは凝結する水蒸

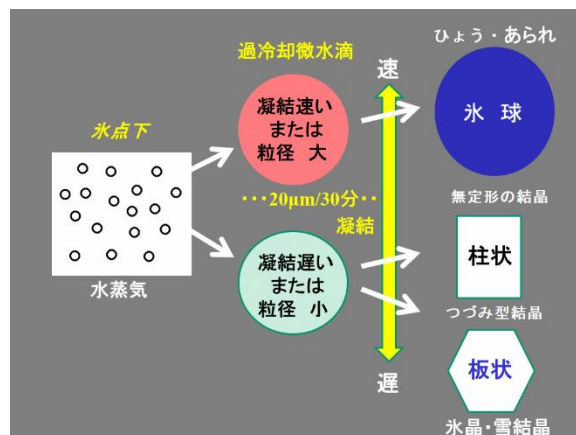


図7 過冷却微水滴（雲粒）の凝結速度と生成結晶の形態。

気そのもので、 $1\text{ }\mu\text{m}$ ほどの大きな凝結核³⁾を含んだ不安定な雲粒から先に結晶化し、微細な凝結核の雲粒は比較的安定して微水滴の状態を保持する。冬季の雪雲が氷晶と過冷却雲粒とを共存しているのはこのためである。そして、生成した氷晶は近傍の雲粒を捕捉して成長し、あるいは接触した雲粒が結晶化して複数の結晶による雪片を形成することになる。

また、霰は多数の過冷却雲粒が氷晶へ氷結して形成されたものであるが、その雲粒は、図7のように過冷却であっても結晶化せずに氷球となるものである。霰が水蒸気の蒸発が活発な海辺の降雪などに多く含まれるのはこのためである。

4. おわりに

これまで長い間、天然の大気における氷晶核の探索が行われてきたが、本稿において述べたように、雪の結晶は過冷却雲粒から直接的に生成することから、氷晶核を追い求めることはもはや必要がないものと言える。

【参考文献】

- 1) 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究, 岩波書店, pp.161
- 2) 磯野謙治, 1982: 1. 雲の形成と降水機構の研究の発展—微物理過程を中心として—, 天気, **29**, 477-490
- 3) Kumai, M., 1951: Electron-Microscope Study of Snow-Crystal Nuclei, J. Meteor., **8**, 151-156
- 4) 田中豊顕, 1974: 雲の氷晶化過程と氷晶核, 気象研究ノート, 第122号, 85-134
- 5) 當房 豊, 2019: 混相雲内でのエアロゾルの氷晶核としての役割, 大気化学研究, 第41号, 1-7

ダイヤモンドダスト発生日の気象条件の特徴

—2022-2023 年冬の旭川市における観測から—

Characteristics of weather conditions on the day of Diamond Dust -Observations in Asahikawa City in the winter of 2022-2023-

長谷川 祥樹¹, 山口 高志¹, 濱原 和広¹, 鈴木 啓明¹, 野口 泉¹, 牛島 健²
Yoshiki Hasegawa¹, Takashi Yamaguchi¹, Kazuhiro Hamahara¹, Hiroaki Suzuki¹, Izumi Noguchi¹,
Ken Ushijima²

Corresponding author: hasegawa-yoshiki@hro.or.jp (Y. Hasegawa)

2022-2023 年冬に旭川市においてダイヤモンドダストが計 11 日観測された。朝の気温が氷点下 15℃を下回る極めて低温の日には、8 割以上の確率でダイヤモンドダストが発生していた。また、朝の気温が氷点下 15℃から氷点下 10℃の間の日においては、相対湿度が 90%以上の高湿度の場合に発生しやすい傾向が確認された。これらの結果は、2021-2022 年冬の弟子屈町川湯における調査結果と調和的であり、ダイヤモンドダストが発生する気象条件を一般化できる可能性が示唆された。

1. はじめに

ダイヤモンドダストは「細氷」とも呼ばれ、冬季の大気中に浮遊する氷晶が、太陽光を反射・屈折してキラキラと光る現象¹⁾であり、北海道内陸部などで放射冷却により急激に温度が下がったときなどに観察され²⁾、北海道内陸部在住者にとっては比較的身近な自然現象である。一方で本州以南や海外などの比較的温暖な地域に暮らす人にとっては珍しい現象であるため、観光資源の 1 つとして注目されている³⁾。

ダイヤモンドダストの様な自然現象を観光資源として活用することを考えた場合、発生条件の明確化とそれに基づく短期的あるいは中長期的な予測が重要になると考えられる。しかし、ダイヤモンドダストに関しては、厳冬期の快晴かつ無風など限られた条件の時に発生する⁴⁾とされているものの、自然環境下での発生条件を明確に示した事例は見当たらない。そこで、筆者らは 2021-2022 年冬に弟子屈町川湯においてダイヤモンドダストの観測を実施し、発生の有無と当日の気温の関係を整理した⁵⁾。本研究では、ダイヤモンドダストの発生条件の一般化に向けて、北海道内の別地域において観測を実施し、発生の有無と気象条件の関係を検証することで、発生日の特徴を把握することを目的とする。

2. 1 ダイヤモンドダストの観測

観測地は道北内陸部の旭川市を選定した。旭川市は上川盆地の中央部にあり、朝晩の寒暖差が大きく、特に放射冷却により朝方の気温が下がりやすいためダイヤモンドダスト観測地として適している。ダイヤモンドダストは、旭川八景の 1 つでもあり⁶⁾、かねてより市民に親しまれてきたことが伺える。

観測期間は 2022 年 12 月 1 日から 2023 年 2 月 28 日までの 90 日間とし、日の出前後から 9 時頃までの間を観測時間帯とした。当日の最低気温の予報や朝の気温実測値が低く、ダイヤモンドダストが期待できる日に筆者らによる目視観測と動画および静止画の撮影を実施した。観測地点は図 1 に示す通り



図 1 観測地点

2. 方法

¹北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所

²北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所

Research Institute of Energy, Environment and Geology,
Northern Regional Building Research Institute,
(Hokkaido Research Organization)

忠別川に架かる橋上4地点(A,B,C,D)と、忠別川よりもやや高台にある2地点(E,F)の計6地点を設定し、日によって異なる地点に赴き観測を行った。

ダイヤモンドダストと細かい降雪の区別は、太陽の方角に直射光を反射・屈折している粒子のみが視認できた場合をダイヤモンドダストの発生とみなし、直射光に依らず全方位的に一様に粒子が確認できる場合は細かい降雪と判断した。

2. 2 気象条件の解析

気象要素として、旭川地方気象台の観測による気温、相対湿度、日照時間、天候を用いた。ダイヤモンドダストの観測時間帯を考慮して、各気象要素の午前7, 8, 9時の1時間値の平均値と発生の有無の関係を解析した。

3. 結果と考察

3. 1 ダイヤモンドダストの観測

ダイヤモンドダストは期間内に合計11日観測された。図2に観測地点ごとの撮影画像を、図3に拡大したダイヤモンドダストの画像例をそれぞれ示す。同時多点的な観測は実施していないが、設定した6地点全てでダイヤモンドダストを視認することができた。また、観測地点までの移動中において



図2 観測地点ごとの撮影画像

(数字は発生日に対して順に割り当てたイベントNo.を示す。ダイヤモンドダストが特に良く視認できた箇所を丸枠で囲んである。)

もダイヤモンドダストを視認できるケースもあったことから、ある地点で発生している時は他の地点でも発生している可能性が高いと考えられた。

ダイヤモンドダストは、いずれの地点においても太陽に正対し視界のやや下方の影が背景になる箇所でも最も良く視認することができた。橋の上は通常視界が開けていることが多く、河畔林などによる影を下方に見る構図を取りやすいため、ダイヤモンドダストの観測に適しているといえることができる。



図3 ダイヤモンドダストの撮影画像例

(河畔林の影を背にして太陽の直射光が入る箇所に密度の高い柱状の粒子群が確認できる。)

3. 2 発生の有無と気温・相対湿度の関係

図4に7-9時の平均気温とダイヤモンドダストの発生有無の関係を示す。発生は気温が低い日に集中しており、低温であることが発生に強く影響することが伺えた。気温の条件と発生有無の関係を発生率(発生した日数/気温条件を満たした日数)で表すと、 -16°C 以下の場合には発生率100%(7日/7日)、 -16°C 超 -12°C 以下の場合には発生率43%(3日/7日)であり、 -12°C 超の場合には発生が確認されたのは、わずか1日だった。

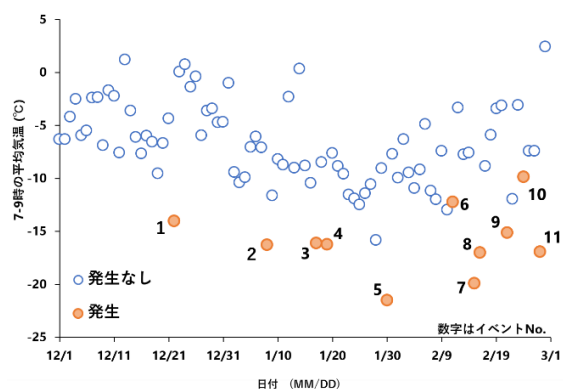


図4 7-9時の平均気温とダイヤモンドダストの発生有無の関係

2021-2022 年冬の弟子屈町川湯においては、合計 14 日の発生が確認されており、 -16°C 以下の場合には発生率 100% (9 日/9 日)、 -16°C 超- 12°C 以下の場合には発生率 33% (5 日/15 日) であり、 -12°C 超の場合には発生が確認されておらず⁵⁾、今回の結果と良く調和していた。

次に、相対湿度も加味して気象条件と発生の有無の関係を検証した。図 5 に 7-9 時の気温および相対湿度の平均値と発生の有無との関係を示す。気温が -15°C を下回る日は計 9 日あり、いずれも相対湿度が 80%-90%の範囲だった。その内 8 日でダイヤモンドダストが発生した。また、気温が -15°C を上回る日においては、ダイヤモンドダストは、いずれも相対湿度が 90%を超える高湿度の日に発生していた。前述した 2021-2022 年冬の弟子屈町川湯における観測においても同様の傾向が確認されており、そこまで気温が低下していない日においても、高湿度であればダイヤモンドダストが発生し得ることが明らかになった。

ダイヤモンドダスト発生日の気象条件について、北海道内の異なる 2 地域において、同じ様な結果が得られたことによって、発生条件が一般化できる可能性が示唆された。

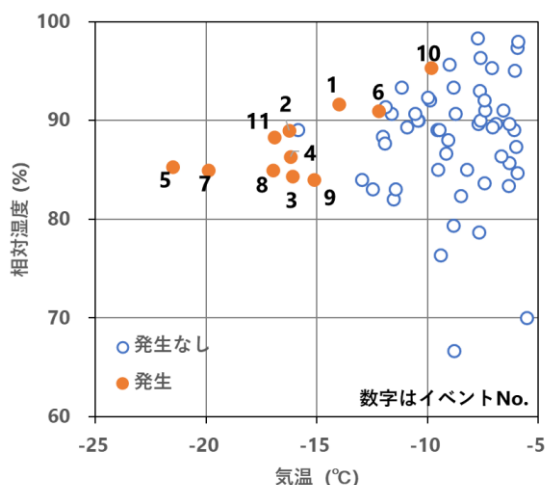


図 5 7-9 時の気温および相対湿度の平均値とダイヤモンドダストの発生有無の関係

3. 3 発生日の気象条件の特徴

発生日の気象条件について、特に低温だった 2023 年 1 月 30 日 (イベント No.5) の例を図 6 に示す。この日は、前日夜から当日の朝まで晴れが続き、放射冷却が進んだことにより気温が急低下し、朝 7 時

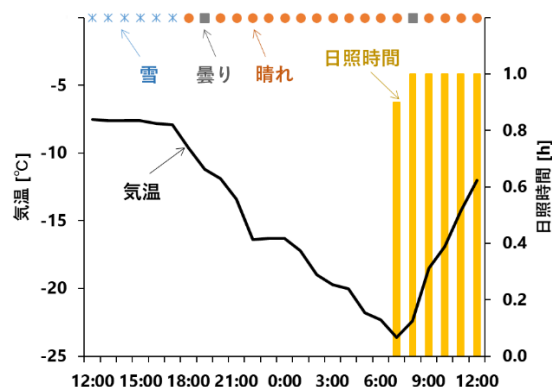


図 6 2023 年 1 月 30 日 (イベント No. 5) とその前日の気象条件

(日照時間は前 1 時間の累積で記録されているため、図中では 1 時間前倒しで表示)

の時点で -23.4°C を記録した。日の出後も晴天が続き十分な日照があったため、ダイヤモンドダストが観測できた。このように夜間に気温が急低下するパターンがこの日以外でも多く見られた。

そこで、前日の昼過ぎ (13-15 時の平均値) と当日の朝 (7-9 時の平均値) の気温差を用いてダイヤモンドダスト発生日の気象条件の特徴を解析した。図 7 に当日朝の気温および前日昼過ぎとの気温差と発生有無の関係を示す。発生日 11 日の内 9 日 (No.1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11) は、当日朝の気温が -15°C 以下あるいは前日昼過ぎから 10°C 以上低下した場合に集中しており、これらの日は、イベント No.5 と同じく放射冷却が進んだ気象パターンであることが推察された。

一方で比較的高い気温にも関わらずダイヤモンドダストが発生した日 (No.6, 10) に関しては、夜間

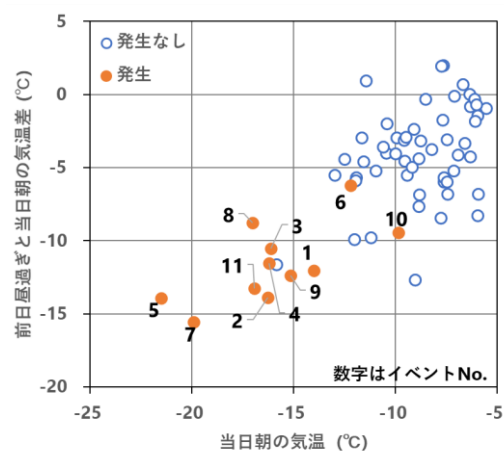


図 7 当日朝の気温および前日昼過ぎとの気温差とダイヤモンドダストの発生有無の関係

に晴れが継続せず、雪または曇りとなっていた。そのため放射冷却は進まなかったものの高湿度となりダイヤモンドダストが発生した可能性があると考えられた。

3. 4 短期的な発生の予測に向けた検討

ダイヤモンドダストを観光資源として活用することを考えると、短期的に発生を予測することが有益な情報になり得る。ここでは、前日時点でどの程度発生の予測が可能か検証を試みた。短期的な予測情報として一般的に入手可能である最低気温について、前日時点の予報と当日の実測およびダイヤモンドダストの発生有無の関係を表1に整理した。前日時点の予報は気象庁による午前5時発表の旭川の最低気温を参照し、当日の実測は旭川地方気象台の観測による0-9時の1時間値の内最も低い気温を採用した。

前日時点で最低気温-15℃以下の予報が出ていたケースは11日あった。その内7日は実測も-15℃以下であり、その全てでダイヤモンドダストが発生した。それ以外の4日は、実測が-15℃超-10℃以下の範囲であったが、内1日はダイヤモンドダストが発生した。このことから前日時点で最低気温の予報が-15℃以下であれば、7割超の確率でダイヤモンドダストが発生したことになる。また、前日時点で最低気温の予報が-15℃超-10℃以下のケースは33日あったが、その内発生が確認されたのはわずか2日であり、発生確率としては1割に満たなかった。

表1 最低気温に関する前日時点の予報と当日の実測およびダイヤモンドダスト発生有無の関係

前日時点の予報	当日の実測	発生有無の日数	
		有	無
~-15℃	~-15℃	7	0
	-15~-10℃	1	3
-15~-10℃	~-15℃	1	1
	-15~-10℃	1	18
	-10℃~	0	12
-10℃~	-15~-10℃	1	5
	-10℃~	0	25

※対象期間は12月16日から翌2月28日までの75日間とした

4. おわりに

本研究では、旭川市においてダイヤモンドダストの観測を行い、発生の有無と気象条件の関係を検証した。本研究による主な結果は次のとおりである。

- ・ 2022年12月から2023年2月までの90日間でダイヤモンドダストが11日観測された。
- ・ ダイヤモンドダストが発生した日は、朝の気温（7-9時の平均値）が-15℃を下回る極めて低温な日が大半を占めていた。
- ・ 朝の気温が-15℃を上回る日においては、ダイヤモンドダストは、いずれも相対湿度が90%を超える高湿度の日に発生していた。
- ・ ダイヤモンドダスト発生日の気象条件として、放射冷却により前日の昼過ぎから急激に温度が低下するパターンと、降雪や雲により放射冷却は進まなかったものの高湿度となるパターンの2通りあることがわかった。

上述した結果の内、温度と湿度に関する気象条件に関しては、2021-2022年冬に弟子屈町川湯で実施した観測結果と調和的であり、ダイヤモンドダストの発生条件を一般化できる可能性が示唆された。発生条件を明確にすることにより、短期的あるいは中長期的な予測が可能になる。今回は短期的な予測に関する基礎的な検討をするに留まったが、今後詳細な検証をすることでさらに予測精度を高めることが可能であると考えている。

【参考文献】

- 1) 亀田貴雄・高橋修平, 2017: 雪氷学, 東京, 古今書院, 71pp.
- 2) 公益社団法人日本雪氷学会編, 2014: 新版雪氷辞典, 東京, 古今書院, 115pp.
- 3) 例えば, 全日本空輸株式会社ウェブサイト, 「北海道の厳冬が生み出す奇跡の絶景」. URL: <https://www.ana.co.jp/travelandlife/article/002096/> (2022年4月28日閲覧)
- 4) 政府広報オンライン英語版サイト, HIGHLIGHTING Japan2022 年1月号. URL: https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/202201/202201_08_jp.html (2022年6月23日閲覧)
- 5) 長谷川祥樹ら, 2022: 北海道におけるダイヤモンドダストの発生頻度とその将来予測, 北海道の雪氷, 41, 67-70
- 6) 旭川市 HP. URL: <https://www.city.asahikawa.hokkaido.jp/kankou/2100/d053286.html> (2023年6月24日閲覧)

手袋の上に乗せても割れない“凍るシャボン玉”研究

Research on "frozen soap bubbles" that can survive on gloves

浅田 実希¹, 中村 桃華¹, 小林 由依¹, 杉尾 雪華¹, 千葉 暖花¹, 齋藤 寛幸¹, 内田 努²

Miki Asada¹, Momoka Nakamura¹, Yui Kobayashi¹, Kiyoka Sugio¹, Honoka Chiba¹,

Hiroyuki Saito¹, Tsutomu Uchida²

Corresponding author: goliken_hiro@yahoo.co.jp (H. Saito)

旭川雪まつりで「屋外で“凍るシャボン玉”で遊ぶ」イベントを依頼され、課題研究として取り組んでいた「割れにくいシャボン玉」の研究を発展させ、凍るシャボン玉づくりに取り組んだ。割れにくいシャボン玉は氷点下でも割れにくかったが、うまく凍らせることができなかった。そこで添加物をグリセリンからハチミツに替えたところ、膜が安定し凍りやすいシャボン玉を作ることになった。実際にイベントで使用した際には、凍ったシャボン玉は手袋の上に乗せても割れず形を保ち続けた。

1. はじめに

私達はなぜシャボン玉はすぐに割れてしまうのだろうか、もっと割れにくければより楽しむことができるのではないかと思います、課題研究のテーマとして「割れにくいシャボン玉」についての研究を行った。

シャボン玉が割れる原因は、シャボン玉が2枚の膜できていてその膜の間に含まれている水が蒸発することで割れてしまうと考えられている¹。そこでグリセリンの保水性に着目し、グリセリンをシャボン玉液に含ませることで水が蒸発しにくくなり、割れにくくなるのではないかと考えた。後述するシャボン玉の原液にグリセリンを4.4~40.5容量%の割合で加え、割れるまでの時間を計測した。その結果、グリセリン濃度が35.3%の場合が「もっとも割れにくい」シャボン玉であることがわかった。

この研究発表がきっかけで、旭川冬まつりのイベント使用のため「凍るシャボン玉」の製作を依頼された。そこで自分達のレシピを用いて割れにくい、かつ凍るシャボン玉づくりに取り組んだ。その結果、割れにくいシャボン玉はできるが凍りにくいことがわかった。そこで先行研究²を参考に、グリセリンの代わりにハチミツを用いることとした。ハチミツは成分が複雑であるため解析は難しいが、安価で安全であるという点から、イベント使用には適していると考えた。また、凍りやすく壊れにくいシャボン玉の理由を探るため、シャボン玉液の融点を測定し、観察結果と比較した。

2. 実験方法

2.1 割れにくいシャボン玉のレシピ

シャボン玉の原液として、水道水、洗濯糊（ポリビニルアルコール合成洗濯のり）、台所用合成洗剤（P&G社製JOY、成分：アルキエーテル硫酸エステルナトリウム、ポリオキシエチレンアルキルエーテル、アルキルグリコシド、クメンスルホン酸ナトリウム、アルキルアミンオキシド、エチルアルコール、クエン酸三ナトリウム二水和物、塩化マグネシウム、香料、クエン酸、防腐剤、水酸化ナトリウム、着色料）の割合を8:2:1とした水溶液を用いた。

2.2 グリセリン含有水溶液によるシャボン玉凍結実験

グリセリンを18.5, 35.3%含むシャボン玉原液でシャボン玉を作り、凍結実験を行った。シャーレ（東京硝子器械社製：直径9cm、高さ2cm）を使って、直径約10cmのシャボン玉を作り、約-10℃の気温条件下で日陰の積雪の上にシャボン玉を静置した。そしてシャボン玉の様子を1~2時間観察し、シャボン玉膜の様子の変化で凍結の程度を、棒を接触させることで膜の強度を評価した。

2.3 ハチミツ含有水溶液によるシャボン玉凍結実験

グリセリンの代わりに市販のハチミツ（菜の花（中国産）、ビテックス（西洋人参木、中国産））を加えた凍結実験を行った。シャボン玉原液に

¹ 北海道旭川西高等学校

² 北海道大学大学院工学研究院

4.4~40.5 重量%の割合でハチミツを加えたものをシャボン玉水溶液とし、2.2と同様にして凍結の程度、膜の強度などを評価した。

2. 4 融点測定

2.2, 2.3 で用いたシャボン玉水溶液を各 1 mL ずつクライオチューブ(Thermo Fisher Scientific 社製 1.8 mL)にとり、銅・コンスタンタン熱電対(T 型)で温度を測定しながら、 -80°C ~ -20°C のディープフリーザー中で凍結させた。1 時間ほどたって完全に凍結したことを確認した後、室温に取り出して融解させ、その時の温度変化を記録した。温度の測定(内部補償)・記録にはデータロガー(グラフテック社製 GL200A)を用いた。得られた融解曲線から、融解潜熱放出による変曲点を読み取り、融点を計測した。様々な温度で凍結させ解凍させたデータから、それぞれの水溶液試料で共通する融点を選んで平均して、その水溶液の融点とした。

3. 実験結果

3.1 グリセリン含有水溶液によるシャボン玉凍結実験

約 -10°C の温度環境下でシャボン玉を積雪面に置き、約 15~25 分観察した結果、グリセリン 35.5%含有水溶液の方は割れずにいたが、最後まで透明で凍らなかった(図 1)。



図 1 グリセリン 35.5%含有水溶液のシャボン玉

一方 18.5%の方は、下の方だけ半透明になり、部分的に凍結したことがわかった(図 2)。このことから、グリセリンを使ったシャボン玉水溶液ではイベント時に凍結しないことが予想されたため、ハチミツを使ったシャボン玉水溶液の実験を行った。



図 2 グリセリン 18.5%含有水溶液のシャボン玉

3.2 ハチミツ含有水溶液によるシャボン玉凍結実験

約 -10°C の温度環境下でシャボン玉を積雪面に置き、約 15~20 分観察した結果、ハチミツ 35.5%含有水溶液の方は割れずにいたが、うっすらと全体が半透明になったように見えた(図 3)。一方 18.5%の方は、全体が半透明になり、しっかりと凍結したことがわかった(図 4)。



図 3 ハチミツ 35.5%含有水溶液のシャボン玉



図 4 ハチミツ 18.5%含有水溶液のシャボン玉

そこでシャボン玉水溶液に加えるハチミツの量を 8.3~21.4%の範囲で変えて、 -8°C の環境下でシャボン玉を作って観察した。その結果、8.3~15.4%の範囲内では完全に凍結したが、21.4%の溶液では全く凍らなかった。

これらの結果から、もっとも凍りやすく割れないシャボン玉液としては、ハチミツを 15~18%含む条件が良いと判断し、ハチミツを 18.5%含む水溶液を用いて異なる温度環境下で凍結実験を行った。その結果、 -7.8°C では完全に凍ったが、 -2.8°C では凍らなかった。

以上の結果を、完全凍結：◎、薄い凍結：○、

部分凍結：△，未凍結：×として定性的に表して表にすると，表1のようになる。

表1 ハチミツ含有水溶液によるシャボン玉の凍結度合

濃度 温度	8.3 %	15.4 %	18.5 %	21.4 %	35.5 %
−2.8℃			×		
−8℃	○	○	◎	×	
−10℃			◎		△

3.3 シャボン玉水溶液の融点測定

融解曲線の変曲点は，ほとんどの水溶液試料で0℃に近い変曲点とより低温の変曲点が観測された。図5，6では，前者を白抜き□で，後者を黒塗印で記載した。前者は凍結時の凍結濃縮による濃度の低い氷であると判断され，より低温の融点を各シャボン玉水溶液の融点と考えた。その結果グリセリン含有水溶液の融点は，濃度が増加するとともにほぼ線形に融点が低下した（図5点線， $R^2 = 0.99$ ）。これはグリセリンによるモル凝固点降下であると考えられる。原液の融点が約−1℃であったことから，グリセリンによるモル凝固点降下は $-6.5^{\circ}\text{C mol}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ 程度であると見積もられた。

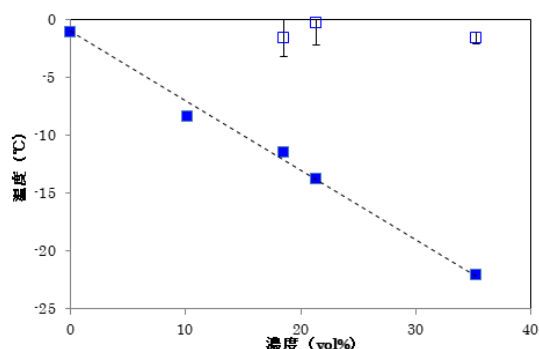


図5 グリセリン含有水溶液の融点（点線は黒塗印のデータの回帰直線）

一方ハチミツ含有水溶液の融点は，ばらつきが大きかった。これはハチミツの成分が複雑であるため，融点の計測が難しいことと，凍結時の凍結濃縮の度合いにより融点自体が変化することによると考えられる。しかし全体的な傾向として，グリセリンと同様ハチミツ濃度が増加するほど，融点が低くなった（図6点線， $R^2 = 0.39$ ）。濃度による融点の降下度は，グリセリンに比べると6割程度と小さく，計測した温度範囲では融点は全て

−15℃以上であった。

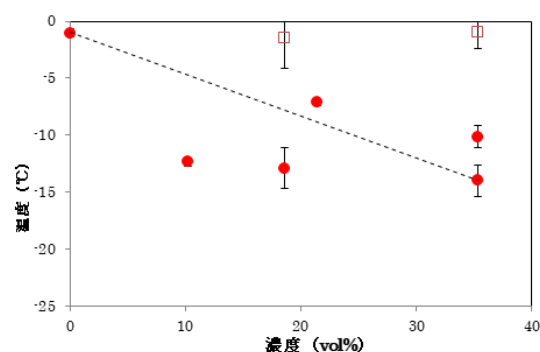


図6 ハチミツ含有水溶液の融点（点線は黒塗印のデータの回帰直線）

4. 考察

表1より，濃度と温度との間に関係があり，シャボン玉水溶液の融点と関係していることが予想された。そこで図6と表1の結果をあわせたものが図7となる。

この結果から，シャボン玉水溶液の融点（図中点線）以下の温度条件下でなければシャボン玉は凍らないことが確認できた。またハチミツの濃度が低いほどシャボン玉は割れやすくなる（薄い凍結になる）ので，なるべく濃度が濃く，かつ外気温程度の温度で凍結するシャボン玉を作るには，適当な濃度が必要であることがわかった。

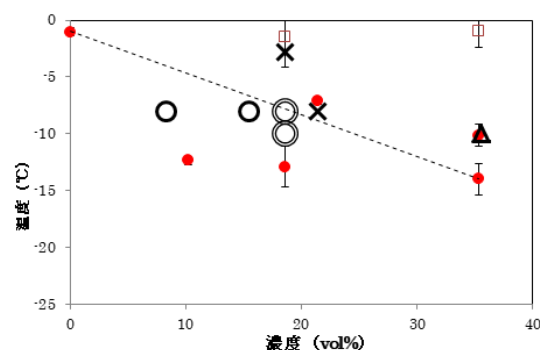


図7 ハチミツ含有水溶液の融点とシャボン玉の状態（◎：完全凍結，○：薄い凍結，△：部分凍結，×：未凍結）

イベント会場の気温は，あまり低すぎると参加者が少なくなることを考えると，−10℃程度の気温で実施すると想定する。その場合準備するシャボン玉水溶液のハチミツ濃度は，図7の結果から15～18%程度が良いということがわかった。2023年2月に行われた旭川冬まつりのイベントで，実際に上記のレシピで準備したシャボン玉水溶液を使い，イベントを開催した（図8）。



図8 旭川冬まつりイベント会場で「凍る割れないシャボン玉」で遊ぶ来場者

5 まとめ

凍りやすく割れにくいシャボン玉をつくるには、シャボン玉原液への添加剤としてグリセリンよりもハチミツの方が良いことがわかった。そしてハチミツの濃度は薄いと割れやすく、濃いと凍りにくいので、15～18%程度がちょうど良い。そ

の時の外気温が -8°C 以下の条件であれば、シャボン玉が均一に凍ることがわかった。

【謝辞】

本研究の実施にあたり協力してくださった特定非営利活動法人スキーホリデーで冬季滞在型観光を振興する会 星宏聡氏、北海道旭川西高等学校の先生方に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) S. Farzad Ahmadi, Saurabh Nath, Christian M. Kingett, Pengtao Yue, Jonathan B. Borevko 2019: How soap bubbles freeze. *Nature comm.*, **10**, 2531.
- 2) 小久保慶一, 2013: 高校生による凍るシャボン玉の研究活動と地域貢献活動. *日本理科教育学会北海道支部*.

六フッ化硫黄ハイドレートの平衡圧データによる 解離熱および水和数の推定

Estimation of dissociation heat and hydration number of sulfur hexafluoride hydrate from phase equilibrium data

小笠原 恭也¹, 笠松 圭¹, 八久保 晶弘¹, 竹谷 敏²
Yukiya Ogasawara¹, Kei Kasamatsu¹, Akihiro Hachikubo¹, Satoshi Takeya²
Corresponding author: hachi@kitami-it.ac.jp (A. Hachikubo)

六フッ化硫黄ハイドレートの平衡圧データに関する文献は少なく、特に 4 重点以下のデータは皆無であるため、平衡圧データから求められる解離熱および水和数の検証がなされていない。本研究では、 -4°C から $+9^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で平衡圧を測定し、測定結果を用いてクラウジウス＝クラペイロン方程式から解離熱を求め、熱量計を用いて直接測定した解離熱と比較するとともに、4 重点の温度・圧力における水和数を推定した。水和数は 16.9 で、結晶構造 II 型の小ケージは空であること、ゲストはほぼ大ケージのみに包接されることが示唆された。また、4 重点以下／以上での解離熱についても、熱量計による直接測定値、および文献値と調和する結果を得た。

1. はじめに

ガスハイドレートは、水分子が水素結合によって構成したかご状構造の中に気体分子（ゲスト）が包接された結晶で、低温・高圧な環境で安定する。また、結晶はゲストの分子径によって異なる結晶構造を構成することが知られており、結晶構造 I 型、II 型、H 型の 3 種類が自然界に存在する。結晶中の全てのかごにゲストが包接されるわけではないため、包接されたゲスト 1 個あたりの水分子の平均個数で定義される水和数は一定値ではない。SF₆を包接するガスハイドレートは結晶構造 II 型を構成し、重量測定から見積もられた水和数は 17.0 であることが報告されている¹⁾。これは結晶構造 II 型を構成する 16 面体大ケージのみにゲストが包接され、12 面体小ケージは空であることを示す。

六フッ化硫黄 (SF₆) は優れた絶縁性能を持つ気体であり、ガス遮断機やガス絶縁開閉装置などの電気機器に用いられる。電力の安定供給には欠かせない人工ガスで、無毒・無臭なガスで人体に対して安全である。一方、赤外線吸収を吸収して熱を外へ逃がさない性質を合わせ持ち、その地球温暖化係数は 22,800 倍であり、大気中に安定して存在している時間が約 3200 年と極めて長いので、京都議定書では温室効果ガスとして排出規制対象となっている。そのため、SF₆ ガスを使用している機器の

点検や撤去にはガスを大気放出させないように、SF₆を液化圧まで加圧し回収、再利用する取り組みが実施されている。現在、SF₆に代わる有効な絶縁ガスは発見・開発されておらず、これまで同様に継続的な使用が予想される。SF₆液化の代替技術として、例えばガスハイドレート結晶にして固定する方法が考えられる²⁾。

SF₆を包接するガスハイドレートは、ガス濃縮・固定技術の観点からも興味深い。その基礎物性についてはあまり知られておらず、既存の平衡圧データは氷点以上の温度領域のみである^{2,3)}。また、平衡圧データにクラウジウス＝クラペイロン方程式を適用して解離熱を導出することも、平衡圧データが断片的であるために困難である。氷点下での SF₆ハイドレートの解離熱（ハイドレート→ガス＋氷）については、平衡圧データがないために、当然のことながら未知である。4 重点（ガス・氷・水・ハイドレートの各相が共存する温度・圧力）前後では、平衡圧グラフの傾きが変化すると考えられ、その傾きの差から SF₆ハイドレートの水和数を推定することが可能であるが、この手法が SF₆ハイドレートに適用された前例はない。

本研究では、SF₆ハイドレートを人工的に生成し、4 重点付近および、氷点以下温度領域の SF₆ハイドレート平衡圧の精密測定を行った。さらに、熱量

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)

計を用いて SF_6 ハイドレートの解離熱を直接測定した。また、平衡圧データにクラウジウス＝クラペイロン方程式を適用して得られた解離熱と、熱量計によって直接測定された解離熱を比較するとともに、平衡圧曲線の傾きの差から、4 重点の温度・圧力における水和数を推定した。

2. 実験方法

-20°C の低温室内でマイクロームを用いて削り出した微粉末氷（比表面積 $> 280 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ）1 g を、容積 42 mL の耐圧容器内に封入し、液体窒素温度下で真空引きした後、高純度 SF_6 （純度 99.99%，高千穂化学工業）を適量加圧した。その後、試料温度を 0°C まで昇温させ、微粉末氷から生じた融解水とガスを接触させてハイドレート結晶を生成した。ハイドレートの生成による内圧の変化がみられなくなつてから、耐圧容器を 0°C の恒温槽に移し、1 日静置して耐圧容器内の微粉末氷を完全にハイドレート化させた。その後、液体窒素温度下でガスハイドレート試料をクエンチして回収した。その際、容器内に残存する未反応の SF_6 ガスが昇華凝結して、固体としてハイドレート試料に混入することを防ぐため、クエンチ時に耐圧容器を真空ラインに接続し、耐圧容器内の残ガスの脱気を同時に行った。

解離熱測定においては、昇温時の自己保存効果の発現を抑制するために、液体窒素温度下で試料を予め微粉末に加工した。この試料約 1 g を専用の小型耐圧容器に封入し、約 -180°C まで冷却した Tian-Calvet 式熱量計（BT2.15, Setaram）に耐圧容器をセットした後、昇温速度 $0.15^\circ\text{C min}^{-1}$ で $+25^\circ\text{C}$ まで約 1 日かけて昇温することで、ハイドレート試料が氷点下の温度領域でガスと氷に分解する際の解離熱を直接測定した。

平衡圧測定においては、微粉末氷 1 g を容積 8 mL の耐圧容器に封入し、前述の方法と同様にして SF_6 を一定量導入し、 SF_6 ハイドレートを生成した。耐圧容器には防水仕様の圧力センサ（ATM.1ST, Sensor Technik Simach AG）を接続した。容器内のガス量を調節し、3 相（ガス・氷・ハイドレート）が共存する状態を実現した後、これを精密恒温水槽にシステムごと完全に沈め、 -4°C から $+9^\circ\text{C}$ の温度範囲で 0.4°C 昇温、 0.2°C 降温を繰り返した。昇温によってハイドレートが分解した際の圧力と、降温によってハイドレートが生成された際の圧力は平衡圧に限りなく近づくものの、平衡圧の真値には達しない。そのため、昇温・降温による 2 点の平均値を

SF_6 ハイドレートの平衡圧とした。

3. 実験結果

SF_6 ハイドレートの熱量測定時の熱流量・圧力の時間変化の例を図 1 に示す。熱流量の変化をみると、 -80°C 付近からハイドレートの解離が始まり、 -30°C 付近で負のピークが現れ、 -20°C 付近で解離が終了している。このハイドレートの解離に対応し、容器内圧力が増加している。また、 0°C から $+10^\circ\text{C}$ までの範囲では、ハイドレートの解離で生じた氷の融解熱による熱流量の負のピークが確認できる。ハイドレートの解離熱については、ハイドレートの解離前後の熱流量を基準としてベースラインを引き、負の熱流量ピークを時間積分し、これを解離ガス量 [mol] で除して求めた。解析方法の詳細については文献⁴⁾を参照されたい。計 4 回測定された結果は $29.3 \pm 0.5 \text{ kJ mol}^{-1}$ となり、同じく結晶構造 II 型をとり、大ケージのみに包接されるプロパンハイドレートの解離熱の値⁵⁾である $27.00 \pm 0.33 \text{ kJ mol}^{-1}$ に概ね近く、またわずかに大きい値となった。

本研究で測定された SF_6 ハイドレートの平衡圧データを図 2 に示す。得られたデータは氷点以上で先行研究^{2,3)}とおおむね一致しており、かつ精細な平衡圧データセットが得られたことがわかる。また、平衡圧曲線における傾きの変化点については、図 3 のグラフの交点から求められ、ハイドレート、ガス、水、氷の 4 相が共存する 4 重点の温度・圧力は、それぞれ 0.0°C および 0.082 MPa となった。

平衡圧曲線の傾きは、ガスハイドレートの解離熱に関する情報を有している。クラウジウス＝クラペイロン方程式を用いて 4 重点の温度・圧力における解離熱を導出した結果、ハイドレート→ガス＋氷の解離熱は 30.2 kJ mol^{-1} 、ハイドレート→ガス＋水の解離熱は $131.6 \text{ kJ mol}^{-1}$ だった。前者は熱量計による直接測定値の $29.3 \pm 0.5 \text{ kJ mol}^{-1}$ とほぼ一致しているが、約 1 kJ mol^{-1} ほどの差がある。現時点では詳細は不明であるが、前者では -80°C から -20°C にかけて、広い温度範囲で解離が継続したのに対し、後者では 4 重点における推定値であるため、解離熱の温度依存性が原因の一つであると考えられる。また、後者は先行研究²⁾による $136.5 \pm 2.3 \text{ kJ mol}^{-1}$ と比較してわずかに小さいものの、相対誤差は 3% 程度だった。

4 重点の温度・圧力下における水和数について、ハイドレート→ガス＋氷と、ハイドレート→ガス＋水、の 2 つの解離熱の差から推定した。前述のよ

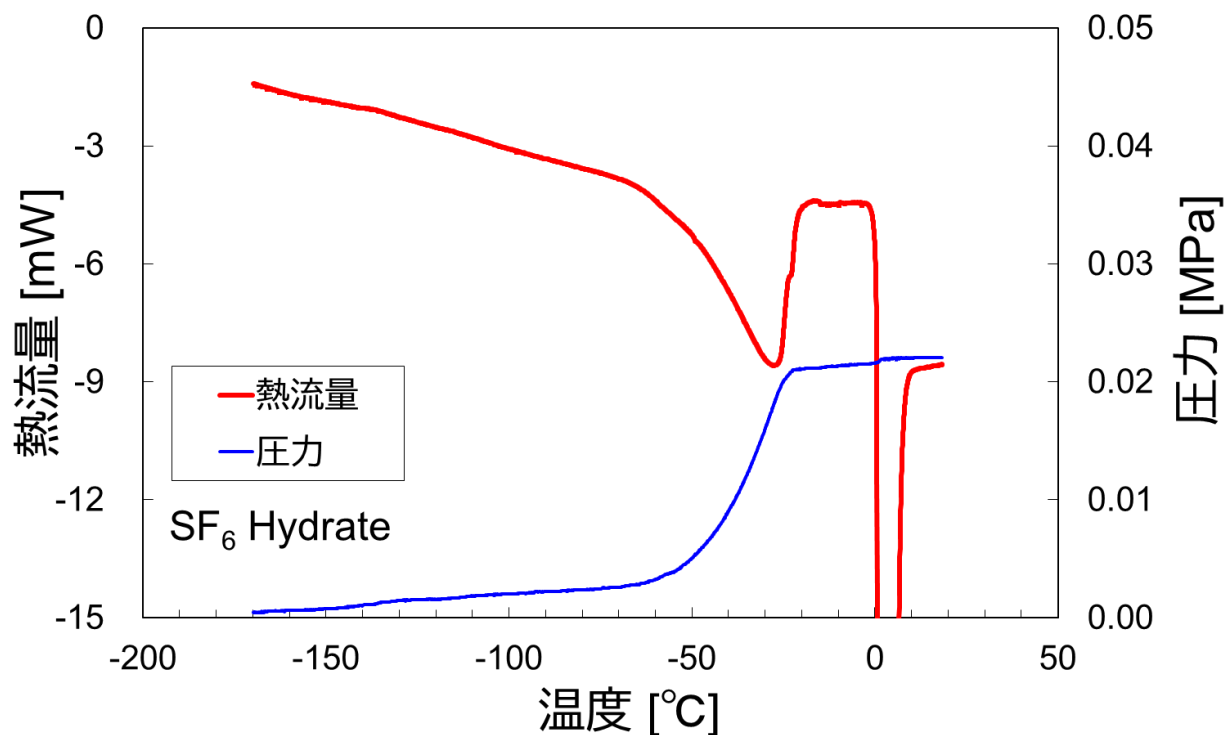


図1 SF₆ハイドレート解離時の熱量測定結果の一例

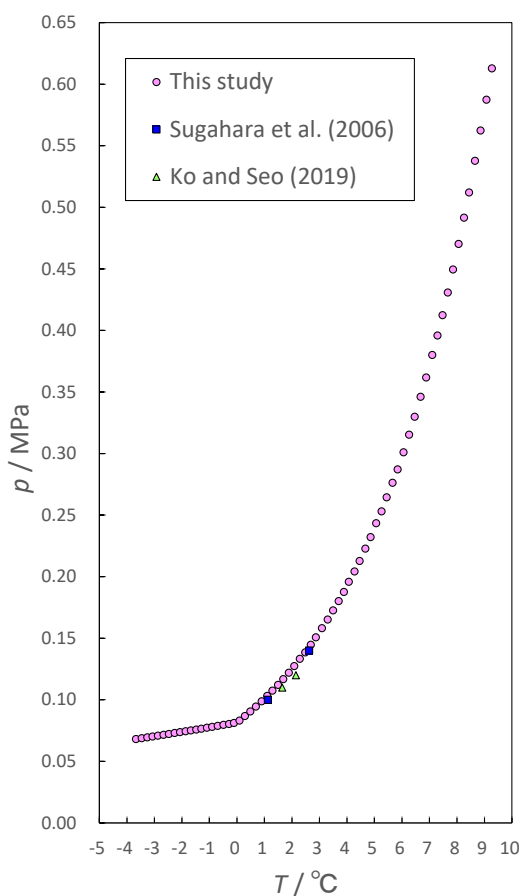


図2 SF₆ハイドレートの平衡圧および先行研究^{2, 3)}との比較

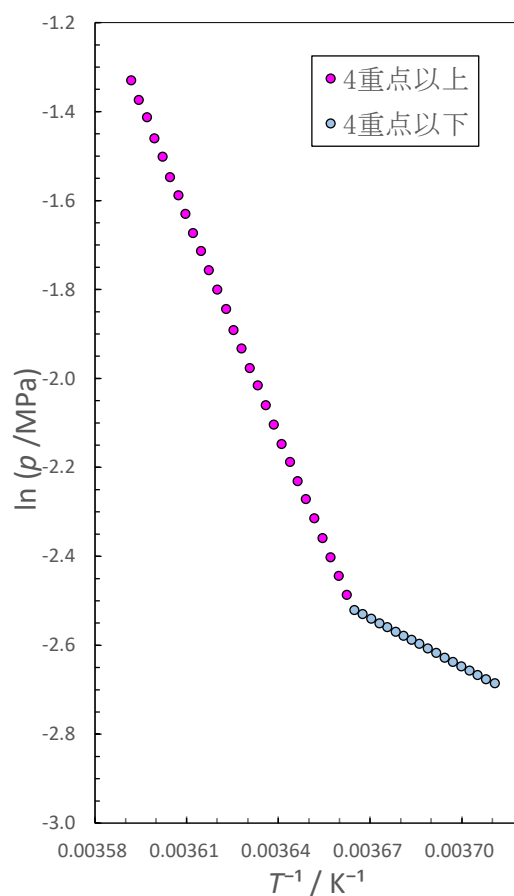


図3 SF₆ハイドレート平衡圧の対数を絶対温度の逆数に対してプロットした図

うに、前者は 30.2 kJ mol^{-1} 、後者は $131.6 \text{ kJ mol}^{-1}$ であり、これらの差は SF_6 の 1 分子当たりの H_2O の融解熱に相当する。これを 0°C における氷の融解熱 6.01 kJ mol^{-1} で除することにより、水和数が求められる。計算すると水和数は 16.9 となり、先行研究¹⁾の測定結果である 17.0 と比較すると、ほぼ一致していると言える。

4. まとめ

本研究では、 SF_6 ハイドレートを人工的に生成し、 SF_6 ハイドレートの解離熱の直接測定、および平衡圧の精密測定を行った。また、得られた平衡圧データをもとに、クラウジウス＝クラペイロン方程式を用いて解離熱を導出し、熱量計による解離熱の直接測定値との比較を行った。さらに、 SF_6 ハイドレートの 4 重点における解離熱の値から水和数を推定した。なお、4 重点以下の領域における SF_6 ハイドレートの平衡圧データおよび 4 重点の温度・圧力は、本研究によって初めて求められたものである。ハイドレート→ガス＋氷への解離熱については、熱量計で直接測定された値 ($29.3 \pm 0.5 \text{ kJ mol}^{-1}$) とクラウジウス＝クラペイロン方程式で導出された計算値 (30.2 kJ mol^{-1}) は概ね一致している。水和数については、求められた値は 16.9 であり、先行研究とほぼ一致し、かつ結晶構造 II 型の大ケージのみを包接するハイドレートであることを示唆する。分子径から想定される結晶構造と包接の仕方とは矛盾がなく、また逆に 4 重点付近での SF_6 ハイドレート平衡圧データが精密かつ正確に測定できたと考えられる。

【謝辞】 本研究を遂行するにあたり、実験系については科学研究費補助金（基盤研究 C：22K03712）の助成を受けた。

【参考文献】

- 1) Cady, G. H. (1981): Composition of clathrate gas hydrates of CHClF_2 , CCl_3F , Cl_2 , ClO_3F , H_2S , and SF_6 . *J. Chem. Thermodyn.*, **85**, 3225–3230.
- 2) Ko, G. and Seo, Y. (2019): SF_6 Hydrate formation in various reaction media: A preliminary study on hydrate-based greenhouse gas separation. *Environ. Sci. Technol.*, **53**, 12945–12952.
- 3) Sugahara, K., Yoshida, M., Sugahara, T., and Ohgaki, K. (2005): Thermodynamic and Raman spectroscopic studies on pressure-induced structural transition of SF_6 hydrate. *J. Chem. Eng. Data*, **51**, 301–304.
- 4) 八久保晶弘, 木田真人, 奥田充, 坂上寛敏, 庄子仁, (2009): メタン・エタンからなる混合ガスハイドレートの解離熱, 雪氷, **71**(5), 341–351.
- 5) Handa, Y. P. (1986): Compositions, enthalpies of dissociation, and heat capacities in the range 85 to 270 K for clathrate hydrates of methane, ethane, and propane, and enthalpy of dissociation of isobutane hydrate, as determined by a heat-flow calorimeter. *J. Chem. Thermodyn.*, **18**, 915–921.

メタンハイドレート生成時のメタン水素同位体分別の温度・圧力依存性

Temperature and pressure effects on hydrogen isotope fractionation of methane at a formation of methane hydrate

八久保 晶弘¹, 根津 太一¹, 滝澤 楓¹, 竹谷 敏²

Akihiro Hachikubo¹, Taichi Nezu¹, Kaede Takizawa¹, Satoshi Takeya²

Corresponding author: hachi@kitami-it.ac.jp (A. Hachikubo)

メタンハイドレート生成時、メタンの水素同位体分別によって相対的に軽いメタンがハイドレート相に包接されやすい。本研究では、 $-50\sim-5^{\circ}\text{C}$ および $1.7\sim19.5\text{ MPa}$ の広い温度・圧力範囲でメタンハイドレートを人工的に生成し、メタン水素同位体分別の温度・圧力依存性を詳細に調べた。同位体分別係数は $0.9881\sim0.9932$ の範囲にあり、温度依存性は小さいものの、生成圧力に対して増加する、すなわち同位体分別が小さくなる傾向がみられた。このことは、天然ガスハイドレートの包接メタンおよび生成元のメタンが得られれば、これらの水素同位体比の差から結晶生成時の温度・圧力環境が読み取れる可能性を示唆する。

1. はじめに

メタンハイドレートは、水分子がカゴ状構造を形成してゲスト分子を包接するガスハイドレートの中ではよく知られた存在であり、非在来型エネルギー資源、あるいは温室効果ガスリザーバとして注目されている物質である。炭化水素を主成分とする天然ガスでは、炭素原子1個からなるメタンが第一成分であり、天然ガスハイドレートの生成・維持・解離過程を知る上で、メタンハイドレートに関する知見の集積は重要課題である。

天然ガスハイドレートがいつ、どのような環境で生成したのか、という基本的事項ですら、情報を得ることは困難である。例えば、生成年代については ^{14}C を用いた放射性炭素年代測定法がよく知られており、包接メタンそのものにも適用可能である。しかしながら、求められる年代はそのメタンの起源である有機物が生きていた年代であり、ハイドレート結晶がいつ生成したか、を表わすわけではない。メタンについては、炭素同位体比、水素同位体比から経験的ダイアグラムを利用して、その起源や経路（微生物起源、熱分解起源、etc.）を推定する方法が広く用いられてきた¹⁻³⁾。ゲストガスが堆積層のどの深度からどのように供給されているか、については一定の情報を得られるものの、究極的にはゲストガスの起源そのものに関する情報に過ぎない。すなわち、ガスハイドレート結晶の経歴等の情報を得るための新たな方法が期待される。

メタンハイドレート生成時、ホストである水分子については、酸素・水素同位体分別があり、その程度は水の凝固・融解時の同位体分別とほぼ同程度である⁴⁾。これに対し、ゲストであるメタン分子については、炭素同位体分別は検出限界以下であるものの、約5%の水素同位体分別が確認されており⁵⁾、わずかな割合ではあるものの、メタンハイドレートは CH_3^2H よりも CH_4 を優先的に包接する。例えば、メタンハイドレートが環境に存在するメタンと水から生成し、結晶が維持されている状態にあれば、包接ガスと環境のガスとの間に上記の分別が確認されるはずである。また、結晶が分解過程にあれば、包接ガスは環境に放出されることで両者の水素同位体比に違いはみられなくなる。つまり、メタンハイドレート生成時の水素同位体分別を利用すれば、年代推定までは行かないまでも、堆積層深部からのガス供給が止まって解離しつつある地点の特定等、天然ガスハイドレートの状態に関する一定の議論が可能となる⁶⁻⁸⁾。

前述の水素同位体分別の大きさは、 $+1^{\circ}\text{C}$ では $4.8 \pm 0.4\%$ であり、さらに低温の氷点下では約9%に達することから⁹⁾、生成温度依存性があると考えられる。しかしながら一方で、生成圧力依存性についてはこれまで全く検証されていない。本研究の目的は、メタンハイドレート生成時のメタンの水素同位体分別について、その生成温度・生成圧力依存性を詳細に記述することである。

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)

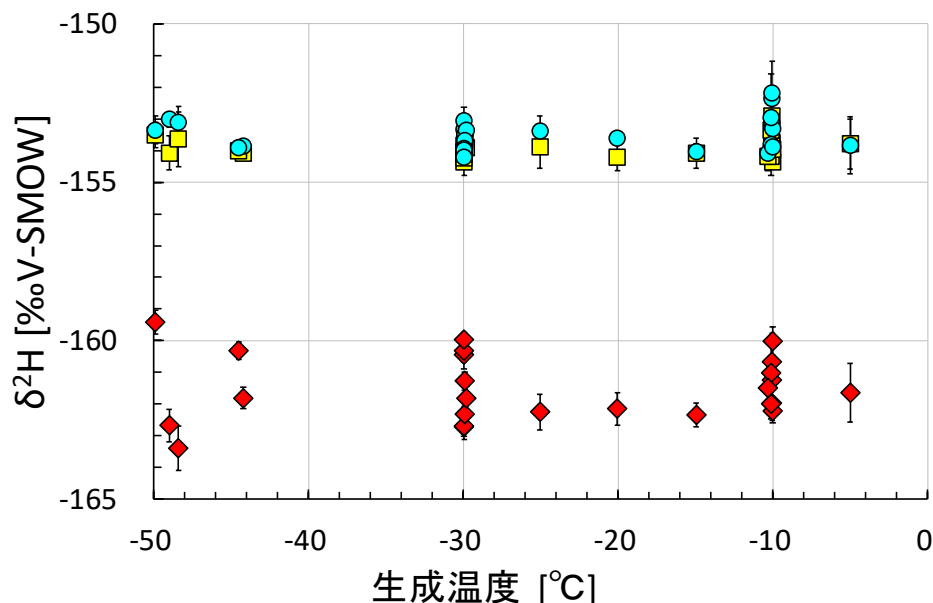


図1 各生成温度におけるメタン水素同位体比の測定値（初期ガス：□，
残ガス：○，包接ガス：◇）

2. 実験方法

実験系および解析方法の詳細については、文献⁹⁾を参照されたい。ハイドレート試料については、実容積 42 mL の耐圧容器を用いて、高純度メタン（純度 99.99%，高千穂化学工業）および微粉末氷から生成した。低温室環境下（ -50°C ）で耐圧容器内に微粉末氷 0.7 g を封入し、試料を液体窒素温度に保ち、耐圧容器内の空気を真空ポンプで脱気した後、一定量のメタンをセル内に導入し、精密恒温水槽（ $-30\sim-5^{\circ}\text{C}$ ）ないし低温室に設置した冷媒（ $-50\sim-44^{\circ}\text{C}$ ）を用いて温度を一定に保った。ハイドレートの生成については、内圧の低下によって確認した。生成時間は、速度論的效果を検証するための 2 つの試料（ -10°C でそれぞれ 1 時間と 3 時間）を除いた計 23 試料で約 2 日とした。耐圧容器内の温度・圧力については、それぞれサーミスタ温度計（D617，テクノ・セブン）および圧力計（AP-14S，キーエンス）を用いて測定した。温度と圧力の測定値の不確かさは、それぞれ 0.1°C と 0.05 MPa である。

ハイドレートの生成後、結晶に包接されていないガス（以後、残ガス）については、制御温度におけるメタンハイドレートの平衡圧以上に圧力を保ちながら、専用のサンプリング容器を用いて回収した。その後、耐圧容器を液体窒素温度まで急冷し、ハイドレート試料を回収した。ハイドレート結晶に包接されたガス（以後、包接ガス）につ

いては、結晶を液体窒素温度に保ちながら、試料に混入した液体窒素と固体メタンを真空ライン内で脱気した。真空ラインの内圧を測定して、液体窒素と固体メタンが完全に蒸発・昇華したことを確認した後、試料を加熱してハイドレートを分解した。真空ラインに導入された残ガスおよび包接ガスを、ガスタイトマイクロシリンジを用いてそれぞれ採取し、安定同位体質量分析装置（Delta V，Thermo Fisher Scientific Inc.）に導入した。

メタンの水素同位体比は $\delta^2\text{H}$ で表記し、NIST RM8561（NGS3）中のメタン水素同位体比を標準試料とした。分析精度は 0.6‰ であった。同位体分別係数 $\alpha_{\text{H-V}}$ は、残ガスに対する包接ガスの $^2\text{H}/\text{H}$ の比で表現される。レイリー過程で生じる、有限のサイズの耐圧容器内で生成するハイドレート結晶中のメタン水素同位体比の不均一性を考慮するために、残ガスの残存率の情報を用いることで、残ガスおよび包接ガスのメタン水素同位体比の測定値から $\alpha_{\text{H-V}}$ を求めた。

3. 実験結果および考察

メタンハイドレート試料は $-50\sim-5^{\circ}\text{C}$ ，圧力 $1.7\sim19.5\text{ MPa}$ の広範囲で計 25 試料を生成した。初期ガス（メタンボンベ），残ガスおよび包接ガスそれぞれの安定同位体比の測定結果について、生成温度を横軸にプロットしたグラフを図1に示す。初期ガス，残ガス，包接ガスの水素同位体比はそれぞ

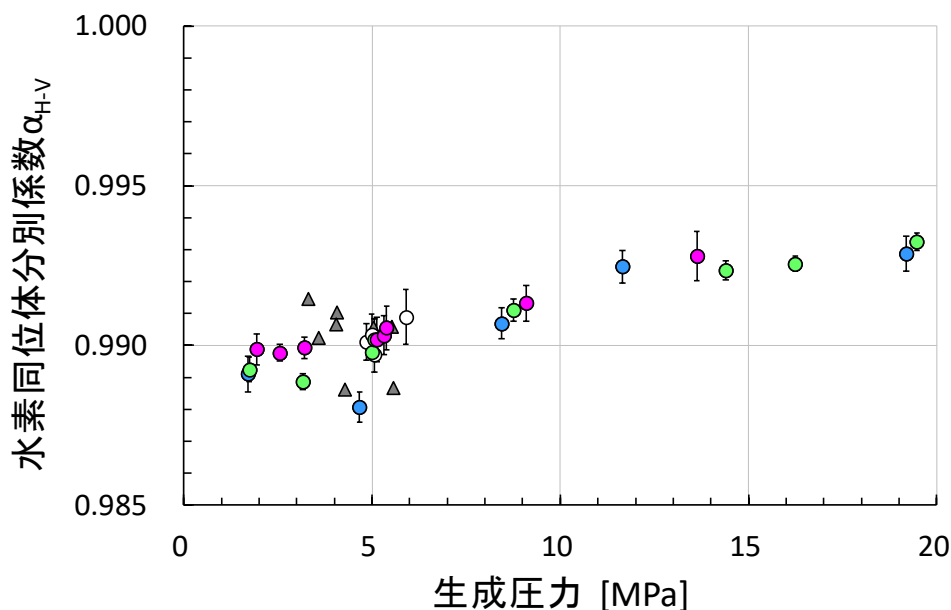


図2 水素同位体分別係数の生成圧力依存性（青：-50～-44 °C，緑：-30 °C，ピンク：-10 °C，白：その他の設定温度，灰色三角：文献値⁵⁾）

れ、 $-154.4 \pm 0.3\text{‰}$ 、 $-154.2 \pm 0.5\text{‰}$ 、 $-163.4 \pm 1.0\text{‰}$ であり、いずれの温度においても同位体比の小さい、すなわち軽いメタンが包接される傾向が示された。また、耐圧容器内に導入されたメタンの91.2～99.8%が残ガスとして容器内に残留しており、初期ガスと残ガスの水素同位体比がほぼ同じであることと整合する。これらのデータから求められた $\alpha_{\text{H-V}}$ は 0.9907 ± 0.0014 であり、先行研究⁵⁾において $-29.5 \sim -8.0^\circ\text{C}$ 、3.3～5.6 MPaで得られた 0.9893 ± 0.0008 とほぼ重なる。なお、 -10°C で生成した試料のうち2個については、生成時間（1時間および3時間）が他試料より極端に短く、微粉末氷からのハイドレート化率も低かったものの、同温度・圧力条件下における試料の $\alpha_{\text{H-V}}$ は変わらなかった。

次に、 $\alpha_{\text{H-V}}$ を生成温度に対してプロットしたグラフを図2に示す。いずれの温度領域においても、 $\alpha_{\text{H-V}}$ は生成圧力とともに増加する傾向があり、5 MPaでは約0.990、20 MPaでは約0.993となっている。 $\alpha_{\text{H-V}}$ が1の場合は同位体分別がないことを示すため、 $\alpha_{\text{H-V}}$ が1に近づくこれらの結果は、メタン水素同位体分別が生成圧力の上昇にともない、小さくなることを示唆している。また生成圧力5 MPa付近のデータに限ると、より高温環境下で $\alpha_{\text{H-V}}$ はわずかに増加する、弱い温度依存性が確認できる。

以上の結果は、メタンハイドレート生成時のメタン水素同位体分別に生成圧力依存性があることを示しているが、ここでは、より高圧な条件下でメタンハイドレートの生成速度が増加することに

よってメタン水素同位体分別が見かけ上小さくなったのではないかと、この可能性について検証を行う。耐圧容器のサイズに対し、メタンハイドレートの生成量は少ないことから、試料生成にともなう耐圧容器内の圧力減少は小さいものの、検出は可能である。そこで、耐圧容器を所定の温度環境に静置した後、容器内の圧力が最大値に達してから5時間後までの平均圧力減少率 $\Delta P/\Delta t$ について解析を行った。その結果、 $\Delta P/\Delta t$ は、 -30°C で生成した試料では1.7～19.5 MPaの圧力範囲で $-0.009 \pm 0.003 \text{ MPa h}^{-1}$ であった。一方、 -10°C で生成した試料では1.9～9.1 MPaの圧力範囲で $-0.019 \pm 0.002 \text{ MPa h}^{-1}$ であった。生成温度がより高温であれば $\Delta P/\Delta t$ の絶対値は大きい、つまりメタンハイドレートの生成速度が大きいことは理に適っている。しかしながら、いずれの生成温度条件においても $\Delta P/\Delta t$ は広い圧力範囲でほぼ一定であったことから、本実験ではより高圧な条件下で生成速度が増加したわけではないことが示された。したがって、図2に示されるような圧力上昇にともなう $\alpha_{\text{H-V}}$ の増加は、生成速度の増加ではなく、単純に生成圧力の増加に起因すると考えられる。

4. まとめ

本研究の結果から、メタンハイドレート形成時のメタンの水素同位体分別は、明瞭な生成圧力依存性、および弱い温度依存性を有することが明らかとなった。このことは、ハイドレート結晶構造

に包接されたメタンと環境のメタンとの間の水素同位体比の違いが、ハイドレート生成時の温度・圧力情報を保持していることを示している。

ハイドレート包接ガスの安定同位体比は、ガス起源の推定だけでなく、天然ガスハイドレートの生成過程の評価にも有用である。すなわち、包接ガスと間隙水中の溶存ガスとのメタン水素同位体比の差は、現在の環境のガスと平衡状態にあって生成・維持されているのか、あるいはハイドレートが解離しつつあるのか、を表す指標となる。加えて本研究では、包接ガスと環境に存在するガスとのメタン水素同位体比の差から、ハイドレート形成時の圧力情報が読み取れる可能性を示した。ただし、ハイドレート生成時の環境中のガスをハイドレート結合ガスとともに入手し、メタン水素同位体比を高精度で測定する必要がある。また、本研究で得られた知見は現段階では、生成温度 0°C 以下、かつ生成圧力 20 MPa 以下の温度圧力環境下に限定される。今後は海底・湖底・永久凍土下の天然ガスハイドレートのみならず、地球外惑星^{11,12)}やその衛星¹³⁻¹⁵⁾に存在すると予想されるガスハイドレートの理解に向けて、より高压かつ低温度領域の広い範囲における実験データの蓄積が望まれる。また、ハイドレート塊を構成する単結晶粒子の大きさや、不純物（塩分）、堆積物粒子の存在等がゲスト安定同位体分別過程に与える影響についても、さらなる研究が必要である。

【謝辞】

本研究の遂行にあたっては、科学研究費補助金 22K03712 の助成を受けた。

【参考文献】

- Whiticar, M.J., Faber, E. and Schoell, M. (1986): Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO₂ reduction vs. acetate fermentation—Isotope evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 693–709.
- Whiticar, M.J. (1999): Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chem. Geol.*, **161**, 291–314.
- Milkov, A.V. and Etiope, G. (2018): Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of >20,000 samples. *Org. Geochem.*, **125**, 109–120.
- Maekawa, T. (2004): Experimental study on isotopic fractionation in water during gas hydrate formation. *Geochem. J.*, **38**, 129–138.
- Hachikubo, A., Kosaka, T., Kida, M., Krylov, A., Sakagami, H., Minami, H., Takahashi, N., Shoji, H. (2007): Isotopic fractionation of methane and ethane hydrates between gas and hydrate phases. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L21502.
- Hachikubo, A., Khlystov, O., Manakov, A., Kida, M., Krylov, A., Sakagami, H., Minami, H., Takahashi, N., Shoji, H., Kalmychkov, G., *et al.* (2009): Model of formation of double structure gas hydrates in Lake Baikal based on isotopic data. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L18504.
- Hachikubo, A., Krylov, A., Sakagami, H., Minami, H., Nunokawa, Y., Shoji, H., Matveeva, T., Jin, Y.K. and Obzhairov, A. (2010): Isotopic composition of gas hydrates in subsurface sediments from offshore Sakhalin Island, Sea of Okhotsk. *Geo-Mar. Lett.*, **30**, 313–319.
- Hachikubo, A., Minami, H., Yamashita, S., Khabuev, A., Krylov, A., Kalmychkov, G., Poort, J., De Batist, M., Chenskiy, A., Manakov, A., *et al.* (2020): Characteristics of hydrate-bound gas retrieved at the Kedr mud volcano (southern Lake Baikal). *Sci. Rep.*, **10**, 14747.
- Hachikubo, A., Fuseya, G., Sugimori, E. and Takeya, S. (2022): Effect of pressure on the hydration number of argon hydrate. *J. Chem. Eng. Data*, **67**, 3757–3762.
- Hachikubo, A., Nezu, T., Takizawa, K. and Takeya, S. (2023): Effect of pressure on hydrogen isotope fractionation in methane during methane hydrate formation at temperatures below the freezing point of water. *Methane*, **2**, 129–136.
- Pellenbarg, R.E., Max, M.D. and Clifford, S.M. (2003): Methane and carbon dioxide hydrates on Mars: Potential origins, distribution, detection, and implications for future in situ resource utilization. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8042.
- Kamata, S., Nimmo, F., Sekine, Y., Kuramoto, K., Noguchi, N., Kimura, J. and Tani, A. (2019): Pluto's ocean is capped and insulated by gas hydrates. *Nat. Geosci.*, **12**, 407–410.
- Loveday, J.S., Nemes, R.J., Guthrie, M., Belmonte, S.A., Allan, D.R., Klug, D.D., Tse, J.S. and Handa, Y.P. (2001): Stable methane hydrate above 2 GPa and the source of Titan's atmospheric methane. *Nature*, **410**, 661–663.
- Prieto-Ballesteros, O., Kargel, J.S., Fernández-Sampedro, M., Selsis, F., Martínez, E.S. and Hogenboom, D.L. (2005): Evaluation of the possible presence of clathrate hydrates in Europa's icy shell or seafloor. *Icarus*, **177**, 491–505.
- Bouquet, A., Mousis, O., Waite, J.H. and Picaud, S. (2015): Possible evidence for a methane source in Enceladus' ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 1334–1339.

空気ハイドレートおよび窒素・メタン混合ガスハイドレート生成時の ゲスト安定同位体分別

Stable isotope fractionation of guest gases during the formation of air hydrate and nitrogen + methane mixed-gas hydrate

滝澤 楓¹, 八久保 晶弘¹, 竹谷 敏²
Kaede Takizawa¹, Akihiro Hachikubo¹, Satoshi Takeya²
Corresponding author: hachi@kitami-it.ac.jp (A. Hachikubo)

空気ハイドレートは南極やグリーンランド氷床に存在し、その包接ガスの窒素同位体比は過去の気候変動解明に利用されている。本研究では、空気が水分子と反応して空気ハイドレートに変化する際の窒素同位体分別を測定し、 $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ がハイドレート相に $0.16 \pm 0.03\text{‰}$ 濃縮する傾向を確認した。加えて、メタン+窒素混合系での窒素およびメタンの水素について同様の測定を行った。メタンの水素同位体分別については、ハイドレート中の窒素の割合に依存しないのに対し、窒素同位体分別に関しては、ハイドレート中の窒素の割合が少ないほど $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ がより多く包接される傾向を確認した。

1. はじめに

空気ハイドレートは南極やグリーンランド氷床深部で発見されている^{1,2)}。そのゲスト分子の起源は積雪中の空隙にあった空気である。降雪後の積雪内の空気は移動可能であるが、圧密によって積雪密度が増加し、氷の中に気泡として空気が閉じ込められる。氷床コア中の気泡の酸素/窒素比は過去の日射量変動等、気候に関する情報を保存していることから、氷床コア解析分野で注目されてきた。氷床コア中の気泡は、圧密によってやがて空気ハイドレートに変化する。気泡から空気ハイドレートに遷移する際に、気泡と空気ハイドレートの間にガス分別が生じるため³⁾、そのメカニズムについて詳細な調査が行われている^{4,5)}。

ガス組成に関する分別以外にも、例えば同じ窒素でも $^{14}\text{N}_2$ および $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ のアイソトポログ（同位体分子種）に関する分別（いわゆる安定同位体分別）が同時に起こりうる。後者は中性子が1個多いだけであるが、これらの物理的性質の差がハイドレート構造に包接されやすいかどうかの違いを生じる。ガスハイドレート生成時のゲスト安定同位体分別については、メタン、エタン、二酸化炭素、窒素について調べられており⁶⁻⁸⁾、重い分子ないし軽い分子のどちらが包接されやすいか、はゲストによって異なる。

空気ハイドレートは主として窒素と酸素からな

る混合ガスハイドレートである。複数成分のゲストガスからなる混合ガスハイドレートの場合、ゲスト分子のサイズやハイドレート結晶のケージ（カゴ状構造）サイズに応じて棲み分けや競合が起こる。したがって、ゲスト安定同位体分別に関しては、純ガスハイドレートとは異なる挙動がみられる可能性がある。混合ガスハイドレートでは、それぞれの成分の純ガスハイドレート平衡圧の大小関係に対応して、平衡圧の低い成分がハイドレート相に取り込まれやすい傾向がある。空気ハイドレートでは酸素が、窒素+メタン系ではメタンが包接ガス中に濃縮される。また、結晶構造に関しても、空気ハイドレートは結晶構造 II 型をとるのに対し、窒素ハイドレートは同じ結晶構造 II 型、メタンハイドレートは結晶構造 I 型である。したがって、窒素+メタン混合系ではガス組成に応じて I 型、II 型のどちらかを取りうると考えられる。

本研究では、混合ガスハイドレート形成時におけるゲスト（窒素および水素）安定同位体分別の機構の解明を目的としている。空気（窒素+酸素）ハイドレートおよび窒素+メタン混合ガスハイドレートについて、結晶生成時の窒素同位体分別およびメタンの水素同位体分別を測定した。また、包接ガスおよび包接されずに耐圧容器中に残り残されたガス（残ガス）に関するガス組成分析、および結晶に関するラマン分光分析を実施した。

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)

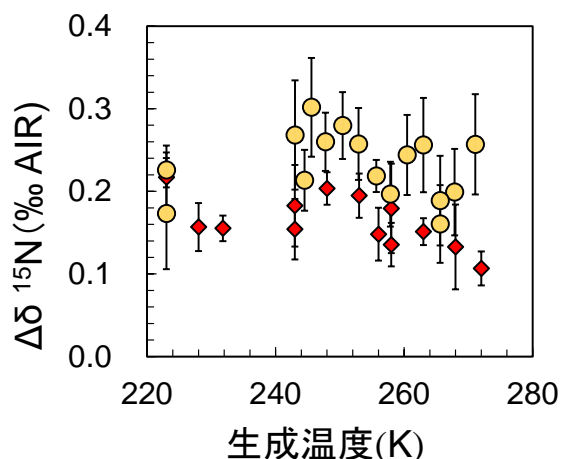


図1 各生成温度における空気および窒素ハイドレート中の窒素同位体分別の測定値
(本研究：◇，窒素ハイドレート⁸⁾：○)

2. 実験方法

255 K の低温室にて、蒸留水を凍結させた氷からミクロトームで削り出した粉末氷 0.7 g を容量 42 mL の耐圧容器に封入した後、純空気（空気組成、大陽日酸）を耐圧容器内に導入した。その後、任意の温度に設定した精密恒温水槽に耐圧容器を入れ、空気ハイドレート試料を生成した。生成開始後 1～2 日経過したのち、試料の予想平衡圧を下回らないように注意しながら残ガスを採取し、さらに液体窒素温度下で耐圧容器からハイドレート試料を取り出した。包接ガスについては、真空ライン中でハイドレート試料を分解させて得た。残ガス・包接ガスのいずれについても真空ライン中で 1.2 気圧程度に圧力調整した後、シリンジインジェクションで安定同位体質量分析装置およびガスクロマトグラフに導入し、残ガス・包接ガスそれぞれの窒素同位体比およびガス組成を測定した。

窒素+メタン混合ガスハイドレートの場合は、窒素（純度 99.999%，エア・ウォーター）およびメタン（純度 99.99%，高千穂化学工業）を任意組成でそれぞれ導入し、空気ハイドレートの場合と同様の方法でハイドレート試料を生成した。なお、生成温度については精密恒温水槽を用いて 263 K に固定した。その後、空気ハイドレートと同様に試料を採取し、残ガス・包接ガスそれぞれの窒素同位体比、メタンの水素同位体比、およびガス組成を測定した。また、ハイドレート結晶のラマン分光分析を実施し、メタンの C-H 対称伸縮振動モードに対応するラマンピークを観察した。このラマンピークはハイドレート結晶の大小ケージでラマ

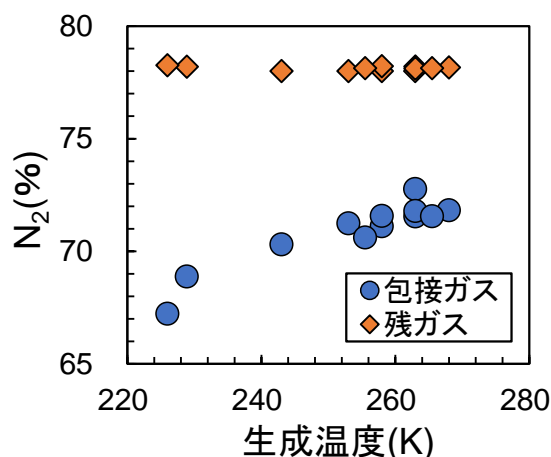


図2 各生成温度における包接ガスおよび残ガス中の窒素組成

ンシフトが異なり、2 つに分離してみえるため、これらのピーク面積比からメタンの存在比を求め、結晶構造を推定した。

3. 実験結果および考察

空気ハイドレート試料については、223～272 K の温度範囲で計 13 試料を生成した。安定同位体比は δ 値（標準試料の安定同位体比からの偏差を千分率で表記）で表し、本研究では包接ガスの δ 値から残ガスの δ 値を差し引いた値を $\Delta\delta$ 値と定義する。この $\Delta\delta$ 値について、生成温度を横軸にプロットしたグラフを図1に示す。空気ハイドレートの窒素同位体分別は、いずれの温度においても $\Delta\delta^{15}\text{N}$ が正の値であり、包接ガス相に $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ を濃縮する傾向が示された。 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ は $0.16 \pm 0.03\text{‰}$ であり、先行研究⁷⁾ で求められた純粋な窒素ハイドレートの $\Delta\delta^{15}\text{N}$ である $0.23 \pm 0.04\text{‰}$ と比較するとやや小さい。空気ハイドレート、窒素ハイドレートのいずれについても、この温度範囲では $\Delta\delta$ 値の生成温度依存性はみられず、概ね一定値であることが示された。

これらのガス組成分析の結果を図2に示す。縦軸は窒素組成、横軸は生成温度を表す。生成時に耐圧容器内に導入したガスのほとんどが残ガスとして残存するため、残ガスの窒素組成はほぼ初期ガス組成と同じ 78% で一定である。これに対し、包接ガスの窒素組成は 223 K で 67%，272 K で 71% であり、より低温で包接ガス相に酸素を濃縮しやすい傾向が明らかとなった。この傾向の原因としては、低温になるほど窒素ハイドレートに対する酸素ハイドレートの平衡圧の比が小さくなり、酸素

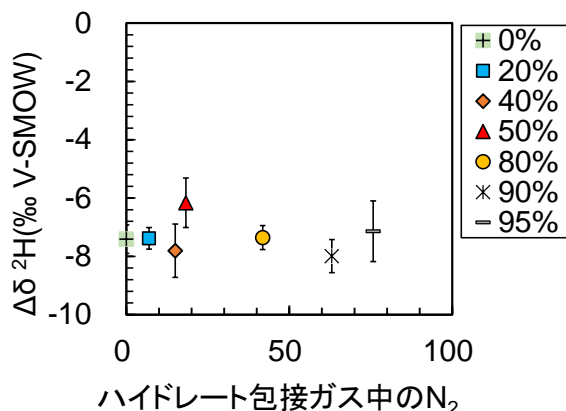


図3 各組成の窒素+メタン混合ガスハイドレートのメタンの水素同位体の測定結果 (0%は純粋なメタンハイドレートの文献値⁹⁾)

が包接されやすくなるからと考えられる。それにもかかわらず、 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ は概ね一定 (図 1) であることから、空気ハイドレート中の酸素の濃縮は窒素同位体分別にさほど影響を与えないことが示唆される。

窒素+メタン混合ガスハイドレート試料については、全て 263 K で生成し、実験ごとに窒素・メタン組成を変更することで 6 試料を得た。ラマン分光分析の結果、C-H 対称伸縮振動モードに相当するラマンピークは、いずれの試料でも大小ケージに対応する 2 ピークに分離した。大ケージに起因するピークは小ケージのそれよりも明らかに大きいことから、今回生成した窒素+メタン混合ガスハイドレート試料はいずれも結晶構造 I 型であると推定される。

窒素+メタン混合ガスハイドレートの同位体分析 (メタン $\Delta\delta^2\text{H}$, 窒素 $\Delta\delta^{15}\text{N}$) を包接ガス中の窒素組成に対してプロットした図をそれぞれ図 3, 図 4 に示す。凡例はハイドレート生成時の初期ガスの窒素組成である。窒素ハイドレートの平衡圧はメタンハイドレートのそれよりも高く、窒素+メタン混合ガスハイドレートを生成すると、メタンがハイドレート相に優先的に取り込まれ、包接ガス中のメタンは濃縮される傾向にある。凡例にある初期ガスの窒素組成と横軸の包接ガスの窒素組成が大きく食い違っているのはこのためである。

図 3 から、メタンの水素同位体分別については、包接ガスの窒素組成にかかわらず $\Delta\delta^2\text{H}$ は -8 ~ -6‰ 程度であり、窒素組成が 0% (メタン 100%) の結果⁹⁾ とほぼ変わらない。したがって、包接ガス中の

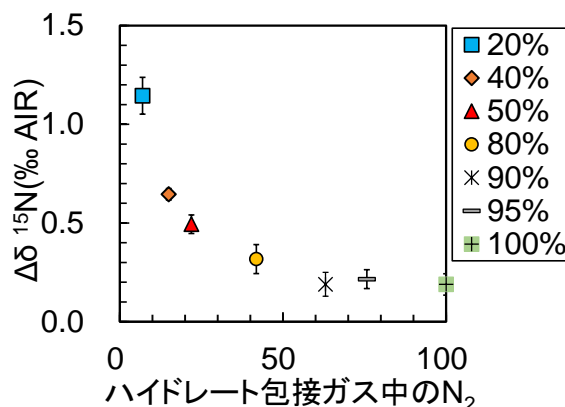


図4 各組成の窒素+メタン混合ガスハイドレートの窒素同位体の測定結果 (100%は純粋な窒素ハイドレートの文献値⁸⁾)

窒素組成はメタンの水素同位体分別に影響を及ぼさないと結論される。一方、窒素同位体分別については、包接ガス中の窒素組成が小さいほど $\Delta\delta^{15}\text{N}$ は増加する、つまり $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ が多く包接される傾向を得た (図 4)。窒素 100% での $\Delta\delta^{15}\text{N}$ は $0.23 \pm 0.04\text{‰}$ ⁸⁾ であるのに対し、包接ガス中の窒素組成が 7% のケースでは、 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ は 1.15‰ に達した。

4. まとめ

空気ハイドレート生成時の窒素同位体分別を定量的に明らかにした。包接ガス相は $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ をわずかながら濃縮する傾向があった。 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ は $0.16 \pm 0.03\text{‰}$ で、純粋な窒素ハイドレートで報告されていた差 ($0.23 \pm 0.04\text{‰}$) と比較するとわずかに小さかった。223~272 K の実験温度範囲では、 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ の生成温度依存性はないことが確認された。一方、メタン+窒素混合ガスハイドレートを任意の組成で生成し、窒素およびメタンの水素について同様の測定を行った。メタンの水素同位体分別については、ハイドレート中の窒素の割合に依存しないこと、 $\Delta\delta^2\text{H}$ は純粋なメタンハイドレートの水素同位体分別とほぼ同じであることが明らかとなった。これに対し、窒素同位体分別に関しては、窒素の割合が少ないほど $\Delta\delta^{15}\text{N}$ が増加することがわかった。

【謝辞】本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金 (基盤研究 C : 22K03712) の助成を受けた。

【参考文献】

1) Shoji, H. and Langway, C. Jr. (1982): Air hydrate inclusions

- in fresh ice core. *Nature* **298**, 548–550.
- 2) Shoji, H. and Langway, C. Jr. (1987): Microscopic observations of the air hydrate-bubble. Transformation process in glacier ice. *J. Phys. Colloques*, **48**, C1-551–C1-556.
 - 3) Ikeda-Fukazawa, T., Hondoh, T., Fukumura, T., Fukazawa, H. and Mae, S. (2001): Variation in N₂/O₂ ratio of occluded air in Dome Fuji antarctic ice. *J. Geophys. Res.* **106**, 17799–17810.
 - 4) Huber, C. and Leuenberger, M. (2004): Measurements of isotope and elemental ratios of air from polar ice with a new on-line extraction method. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **5**, Q10002.
 - 5) Ohno, H., Lipenkov, V. Y. and Hondoh, T. (2004): Air bubble to clathrate hydrate transformation in polar ice sheets : A reconsideration based on the new data from Dome Fuji ice core. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L21401.
 - 6) 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.
 - 7) Kimura, H., Fuseya, G., Takeya, S. and Hachikubo, A. (2021): Carbon isotope fractionation during the formation of CO₂ hydrate and equilibrium pressures of ¹²CO₂ and ¹³CO₂ hydrates. *Molecules*, **26**, 4215.
 - 8) Hachikubo, A., Takizawa, K. and Takeya, S. (2023): Stable isotope fractionation of nitrogen between gas and hydrate phases. *J. Chem. Eng. Data*, **68**, 694–697.
 - 9) Hachikubo, A., Nezu, T., Takizawa, K. and Takeya S. (2023): Effect of pressure on hydrogen isotope fractionation in methane during methane hydrate formation at temperatures below the freezing point of water. *Methane*, **2**, 129–136.

N₂O ハイドレートの平衡圧測定およびラマン分光分析

Equilibrium pressure measurements and Raman spectroscopic analysis of N₂O hydrate

笠松 圭¹, 小笠原 恭也¹, 八久保 晶弘¹, 竹谷 敏²

Kei Kasamatsu¹, Yukiya Ogasawara¹, Akihiro Hachikubo¹, Satoshi Takeya²

Corresponding author: hachi@kitami-it.ac.jp (A. Hachikubo)

本研究では N₂O ハイドレートの 4 重点近傍における平衡圧の精密測定を行い、解離熱および水和数を求めた。平衡圧曲線からクラウジウス＝クラペイロン方程式を適用して、4 重点における解離熱を求めた結果、 $24.3 \pm 0.8 \text{ kJ mol}^{-1}$ (ハイドレート→ガス+氷)、および $68.1 \pm 0.4 \text{ kJ mol}^{-1}$ (ハイドレート→ガス+水) となった。熱量計を用いて直接測定された解離熱は $22.5 \pm 0.2 \text{ kJ mol}^{-1}$ (ハイドレート→ガス+氷) であり、平衡圧曲線から求めた値よりやや小さかった。また、4 重点における 2 つの解離熱から推定された水和数は 7.3 ± 0.2 となり、大ケージ占有率 100% を仮定した場合、小ケージ占有率は 7～24% であることがわかった。また、4 重点近傍の温度圧力にて生成した N₂O ハイドレートの水和数をラマン分光分析によって求めた。その結果、水和数は 6.6 ± 0.2 の範囲にあり、4 重点近傍の生成圧力では水和数が大きく変化することが示唆された。

1. はじめに

ガスハイドレートは水分子で構成されたカゴ状構造にゲスト分子が包接されてできる結晶であり、ゲストの種類によって結晶構造が変化する。本稿で扱う N₂O (亜酸化窒素) は、CO₂ の約 300 倍もの地球温暖化係数を有する温室効果ガスとして知られており、京都議定書においては排出規制ガスの一つに定められている。CO₂ と同様、N₂O はハイドレートを形成することが古くから知られており¹⁾、結晶構造 I 型を構成する²⁾。これは CH₄ ハイドレートや CO₂ ハイドレートと同じ結晶構造であるが、エネルギー資源や CO₂ 貯留技術等で注目されてきたこれらに対し、N₂O ハイドレートに関する研究は少ない。特に、平衡圧に関する先行研究のデータは断片的であり、クラウジウス＝クラペイロン方程式を用いて平衡圧曲線からガスハイドレートの解離熱と水和数を推定する方法が適用できない。本研究では、精密な平衡圧測定を実施することで、4 重点 (ハイドレート・ガス・氷・水の共存する温度・圧力) における解離熱および水和数を求めた。また、これらの値については、熱量計を用いた熱量測定で得られた解離熱の直接測定値、およびラマン分光分析で得られた水和数との比較もあわせて行った。

2. 平衡圧、解離熱、水和数について

ガスハイドレートの平衡圧は、任意の温度にお

いてハイドレート・ガス・氷、もしくはハイドレート・ガス・水の 3 相が共存する圧力である。また、これらの平衡圧曲線 2 本が交わる 4 重点が存在し、これを境に平衡圧曲線の傾きが大きく変化する特徴がある。N₂O ハイドレート平衡圧の文献値は 2 例あり^{3,4)}、4 重点前後のデータは存在するものの、クラウジウス＝クラペイロン方程式を適用して解離熱を推定するにはデータが少なく、また精度的にも問題があった。

ガスハイドレートの解離熱は、ガスハイドレートがガスと氷、ないしガスと水に分解する際に必要な熱量 [kJ mol^{-1}] である。前述のように、平衡圧曲線の傾きから解離熱を推定することが可能である。これに対し、熱量計を用いることにより、ガスハイドレートがガスと氷に分解する際の解離熱を直接的に測定できるため、異なる手法での解離熱値の相互検証が可能である。

ガスハイドレートの水和数は、ゲスト分子 1 個に対する水分子の個数である。結晶構造 I 型は水分子 46 個により、大ケージ 6 個、小ケージ 2 個で単位胞を構成するため、全てのケージにゲスト分子が包接される場合の水和数は 5.75 となる。しかしながら、CH₄ ハイドレートの水和数は 6.00 ± 0.01 ⁵⁾ と報告されていることから、全てのケージにゲスト分子が包接されるわけではない。C₂H₆ ハイドレートの場合、水和数は 7.67 ± 0.02 ⁵⁾ の報告例があり、大ケージのみにゲスト分子が包接され、小ケージはほ

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)

ぼ空であることを示す。N₂O ハイドレートの水和数については、粉末X線回折での報告例⁹⁾があり、2点のみのデータではあるものの、高圧になるほど水和数が減少する傾向が示された。最近の我々の研究グループによる報告例では、ラマン分光分析でも N₂O ハイドレートの水和数に同様の生成圧力依存性があることが明らかとなっている⁷⁾。

3. 実験方法

3. 1 解離熱測定

-20℃の低温室内でマイクロームを用いて削り出した粉末氷 3 g を容積 42 mL の耐圧容器内に封入し、これに N₂O ガスを導入して加圧した。その後、耐圧容器内の温度を 0℃まで上昇させ、粉末氷からの融解水と高圧 N₂O ガスを接触させる方法でハイドレートを生成した。耐圧容器は 0℃を 1 日保ち、容器内の圧力が変化しないことを確認した上で、液体窒素温度下でハイドレート試料をクエンチして取り出した。その際、固体となった N₂O がコンタミになることを防ぐため、クエンチと同時に真空ポンプによる脱気をあわせて行った。得られたハイドレート試料については、Tian-Calvet 式熱量計 (BT2.15, Setaram) を用いて約-180℃から+25℃まで 0.15℃ min⁻¹ で昇温し、N₂O ハイドレートがガスと氷に分解する際の解離熱を直接測定した。

3. 2 平衡圧測定

粉末氷 1 g を容積 8 mL の耐圧容器に封入し、N₂O (日産化学、純度 99.99%) を適量導入して N₂O ハイドレートを生成した。その後、容器内の過剰ガスを一部排出して、3 相共存 (ハイドレート・ガス・氷) の状態を実現した。耐圧容器や圧力センサごと精密恒温槽に沈め、先行研究⁸⁾の手法を踏襲して、-4.0℃から+4.0℃まで、0.4℃上げては 0.2℃下げる作業を繰り返し行うことで、N₂O ハイドレートの平衡圧を求めた。この作業により、ある設定温度につき 2 点の平衡圧データが求まる。平衡圧の真値はこれらの間にあると考えて、2 点の平均値を平衡圧とした。

3. 3 ラマン分光分析

粉末氷 0.1 g を 42 mL の耐圧容器内に封入し、N₂O ガスを 4 重点直上の温度・圧力 (-0.7℃・約 0.9 MPa) 付近で加圧し、-0.7℃に設定した恒温槽に 1 日静置することで N₂O ハイドレートを生成した。ハイドレート試料については、液体窒素温度で固定し、

耐圧容器から取り出した。この作業時に、耐圧容器内で加圧されていた約 0.9 MPa 分の N₂O ガスが昇華凝結して固体 N₂O となり、ラマン分光分析時にコンタミとなる。そこで、試料をラマン分光分析装置にセットした後に、試料ステージ温度を -136℃から-83℃まで昇温させて固体 N₂O を昇華させ、さらに-136℃に冷却することで、ハイドレート試料のみのラマンピークを観察した。結晶構造 I 型の大小ケージにそれぞれ包接された N₂O 分子の NO 伸縮振動に起因するラマンピークを、Voigt 関数でピークフィッティングにより分離し、それぞれのピークの面積比から熱力学モデル⁹⁾を援用して水和数の算出を行った。

4. 実験結果

4. 1 解離熱の測定結果

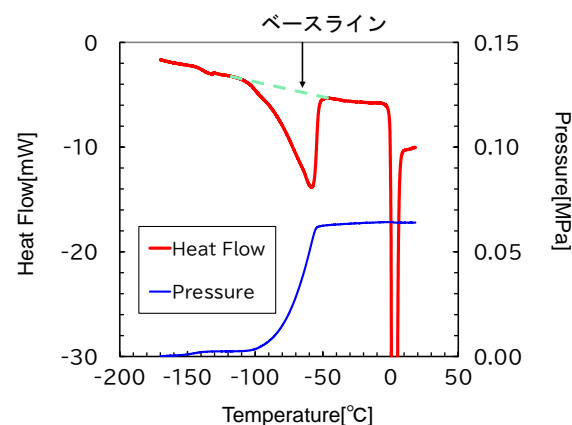


図1 N₂O ハイドレートの解離過程における熱流量と容器内圧力の変化

熱量計による解離熱の測定結果を図1に示す。赤線は試料温度の上昇によって変化する熱流量 (試料の発熱を正方向とする) を表し、ハイドレートの解離によって-110℃から-50℃付近にかけて吸熱反応が起きていることがわかる。これと同時に、ハイドレートの解離によって生じたガスが容器内圧力 (図中の青線) を増加させている様子もわかる。また、図中に示すようなベースラインを引き、熱流量の負のピークを時間積分することで解離熱が求まる。計3回の測定による解離熱の平均値および標準偏差は、 $22.5 \pm 0.2 \text{ kJ mol}^{-1}$ (ハイドレート→ガス+氷) となった。N₂O ハイドレートと同じ結晶構造 I 型で、ゲストガスの分子径がやや小さい CH₄ ハイドレートの解離熱は $18.13 \pm 0.27 \text{ kJ mol}^{-1}$ (ハイドレート→ガス+氷)⁵⁾ である。ガスハイドレートの解離熱は、「解離ガス 1 [mol]を得るため

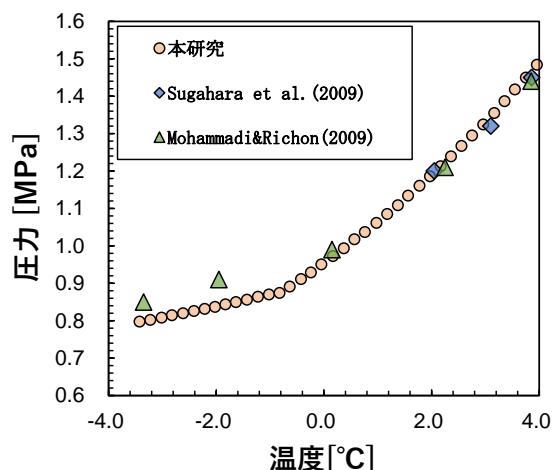


図2 本研究で得られた N_2O ハイドレートの平衡圧、および文献値との比較

に必要な熱量」で定義されていることから、これらの解離熱の差は、主として水和数の違いに起因すると考えられる。

4. 2 平衡圧測定結果

N_2O ハイドレート平衡圧の測定結果を図2に示す。先行研究^{3,4)}の結果と比較すると、氷点以上の温度領域におけるデータは概ね一致しているものの、氷点下におけるデータは食い違っている。今回の研究では、4重点の存在とその上下温度で平衡圧曲線の傾きが変化する様子が見て取れる。平衡圧曲線から温度の逆数、圧力の対数のグラフを取り、4重点前後で傾きが変わる2本の回帰直線の交点から、4重点における温度・圧力を求めた結果、4重点の温度は -0.7°C 、圧力は 0.846 MPa となった。加えて、グラフの傾き dP/dT 、気体定数 R 、解離熱 H とすると、クラウジウス＝クラペイロン方程式は(1)式で表される。

$$H = \frac{dP}{dT} \frac{RT^2}{P} \quad (1)$$

ここで、ハイドレート→ガス+氷、ないしハイドレート→ガス+水に分解する際の解離熱をそれぞれ H_1 、 H_2 とする。(1)式に4重点におけるそれぞれの値を代入すると、 H_1 は $24.3 \pm 0.8\text{ kJ mol}^{-1}$ 、 H_2 は $68.1 \pm 0.4\text{ kJ mol}^{-1}$ となった。また、水和数は(2)式で計算できる。

$$\text{水和数} = \frac{H_2 - H_1}{H_{\text{water}}} \quad (2)$$

ここで、氷の融解潜熱である H_{water} は 6.01 kJ mol^{-1} である。(2)式にこれらの値を代入すると、水和数は 7.3 ± 0.2 となった。この数値は、大ケージ占有率を

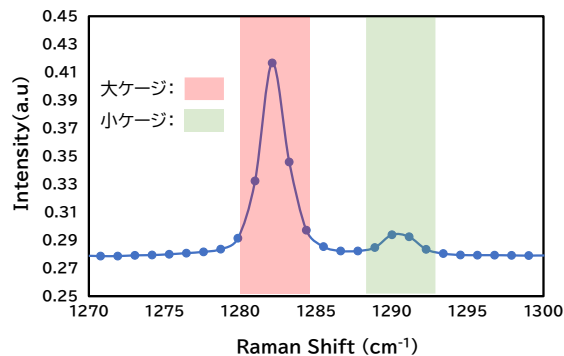


図3 結晶構造I型の大小ケージに包接された N_2O 分子のNO伸縮振動に対応するラマンピーク

生成圧力 MPa	水和数
0.86	6.3 ± 0.2
0.90	6.7 ± 0.1
0.91	6.5 ± 0.2
0.96	6.6 ± 0.2

表1 4重点近傍の温度圧力下で生成した N_2O ハイドレート試料のラマン分光分析による水和数測定結果

100%と仮定すると、小ケージ占有率が7~24%程度であることを示している。これに対し、先行研究⁷⁾では水和数は $6.0 \sim 6.2$ の範囲に収まっており、小ケージ占有率は70%以上と見積もられることから、本研究と先行研究では小ケージ占有率に大きな差がある。

4. 3 ラマン測定結果

ラマン分光分析の結果の一例を図3に示す。 N_2O 分子のNO伸縮振動に起因するラマンピークは、結晶構造I型の大小ケージにそれぞれ対応した2つのピークに分かれる。これらのピーク面積比は、大小ケージそれぞれのケージ占有率の比を表すと仮定すれば、熱力学モデル⁹⁾によって水和数を求めることができる。そこで、大小ケージそれぞれのピークをフィッティングにより分離し、ピーク面積比から推定された水和数と試料の生成圧力との関係を表1にまとめた。4重点近傍の温度圧力環境下では、試料毎の水和数のばらつきはやや大きいものの、4試料の水和数平均値とその標準偏差は 6.6 ± 0.2 となった。この値は、 $0^\circ\text{C} \cdot 1.0 \sim 2.8\text{ MPa}$ の温度圧力条件で生成した試料についての結果(水和数が $6.0 \sim 6.2$ の範囲)⁷⁾と比較すると、かなり大きい。

一方、前節で平衡圧データから求められた、4 重点すなわち 0°C 近傍で最も低圧な環境での水和数推定値である 7.3 ± 0.2 と比較すると、水和数はいくらか小さく、先行研究⁷⁾との中間の値を示している。

5. 考察およびまとめ

-4.0~+4.0°C の範囲における、N₂O ハイドレート平衡圧の精密測定を行った。得られた平衡圧曲線にクラウジウス=クラペイロン方程式を適用して、4 重点における解離熱を求めた結果、 24.3 ± 0.8 kJ mol⁻¹ (ハイドレート→ガス+氷)、および 68.1 ± 0.4 kJ mol⁻¹ (ハイドレート→ガス+水) と見積もられた。一方、熱量計を用いて直接測定された解離熱は 22.5 ± 0.2 kJ mol⁻¹ (ハイドレート→ガス+氷) であり、平衡圧曲線から求めた値よりわずかに小さかった。4 重点における 2 つの解離熱から推定された水和数は 7.3 ± 0.2 となり、大ケージ占有率 100% を仮定した場合、小ケージ占有率は 7~24% であることを示唆する。平衡圧曲線から求めた解離熱と熱量計から求めた解離熱が約 2 kJ mol⁻¹ 異なることについては、解離温度条件が大きく異なることによる N₂O ハイドレートと氷との比熱の差⁹⁾であると考えられるが、一方では試料の水和数の違いが影響している可能性もある。また、4 重点近傍の温度圧力にて生成した N₂O ハイドレートの水和数をラマン分光分析によって求めた結果、水和数は 6.6 ± 0.2 の範囲にあった。この値は、大ケージ占有率 100% を仮定した場合、小ケージ占有率は 38~59% であることを示す。平衡圧から求めた 4 重点における水和数、ラマン分光分析から求めた水和数、先行研究⁷⁾による水和数をまとめて比較すると、4 重点近傍の生成圧力では小ケージ占有率が大きく変化することで水和数に影響している様子が示唆された。

【謝辞】本研究を遂行するにあたり、実験系については科学研究費補助金（基盤研究 C：22K03712）の助成を受けた。

【参考文献】

- 1) Villard, M. (1888): *Compt. Rend.*, **106**, 1602–1603.
- 2) Sloan, E. D. and Koh, C. A. (2008): *Clathrate Hydrates of Natural Gases* (3rd ed.). CRC Press, Boca Raton, 721 pp.
- 3) Sugahara, T., Kawazoe, A., Sugahara, K. and Ohgaki, K. (2009): High-pressure phase equilibrium and Raman spectroscopic studies on the nitrous oxide hydrate system. *J. Chem. Eng. Data*, **54**, 2301–2303.
- 4) Mohammadi, A. H. and Richon, D. (2009): Equilibrium

data of nitrous oxide and carbon dioxide clathrate hydrates. *J. Chem. Eng. Data*, **54**, 279–281.

- 5) Handa, Y. P. (1986): Compositions, enthalpies of dissociation, and heat capacities in the range 85 to 270 K for clathrate hydrates of methane, ethane, and propane, and enthalpy of dissociation of isobutane hydrate, as determined by a heat-flow calorimeter. *J. Chem. Thermodyn.*, **18**, 915–921.
- 6) Takeya, S. and Hachikubo, A. (2022): Crystal structure and guest distribution of N₂O hydrate determined by powder X-ray diffraction measurements. *Cryst. Growth Des.*, **22**(2), 1345–1351.
- 7) 矢作 大輔, 宅和 聖悟, 八久保 晶弘, 竹谷 敏 (2021): 亜酸化窒素ハイドレートの水和数測定. 雪氷研究大会 (2021・千葉-オンライン) 講演要旨集.
- 8) Ozeki, T., Kikuchi, Y., Takeya, S. and Hachikubo, A. (2018): Phase equilibrium of isotopologue methane hydrates enclathrated CH₃D and CD₄. *J. Chem. Eng. Data*, **63**(6), 2266–2270.
- 9) van der Waals, J. H. and Platteeuw, J. C. (1959): Clathrate solutions. *Adv. Chem. Phys.*, **2**, 1–57.

公益社団法人日本雪氷学会北海道支部 2022 年度事業報告

1. 支部総会の開催

定時支部総会

開催形式：メールによる文書審議

審議期間：2022 年 4 月 25 日(月)～5 月 11 日(水)

主要議題：(1) 2021 年度事業報告・収支決算報告・監査報告
(2) 北海道支部総会を文章審査とする件
(3) 2022 年度事業計画(案)・収支予算(案)
(4) 2022 年度支部役員(案)について

返信者数：77 名 賛成：77 名

臨時支部総会

開催形式：メールによる文書審議

審議期間：2023 年 1 月 16 日(月)～30 日(月)

主要議題：(1) 北海道支部の臨時総会を文章審査とすることについて
(2) 支部規程施行内規の改訂について

返信者数：85 名 賛成：85 名

2. 理事会の開催

第 1 回

開催形式：メールによる文書審議

審議期間：2022 年 5 月 18 日(水)～23 日(月)

主要議題：評議員・顧問の選出

第 2 回

開催日時：2022 年 6 月 15 日(水) 15:30～17:00

開催場所：札幌市立大学会議室・オンライン(Zoom)

主要議題：(1) 支部研究発表会の総括
(2) 「北海道の雪氷」印刷製本業務について
(3) サイエンスパークの参加について 他

第 3 回

開催日時：2022 年 8 月 25 日(木) 15:30～16:20

開催場所：札幌市立大学会議室・オンライン(Zoom)

主要議題：(1) 「北海道の雪氷」の発刊準備状況
(2) 雪氷災害調査チームの活動について
(3) 広報について 他

第 4 回

開催日時：2022 年 12 月 8 日(木) 15:30～17:10

開催場所：オンライン(Zoom)

主要議題：(1) 地域講演会について
(2) 雪氷賞授賞者(候補者)の選定について
(3) 「支部規程施行内規」の改訂について 他

第 5 回

開催日時：2023 年 3 月 3 日(金) 13:30～15:10

開催場所：オンライン(Zoom)

主要議題：(1) 2023 年度の支部総会、研究発表会について

(2) 2023 年度役員案について 他

3. 顧問・評議会の開催

開催日時：2022 年 6 月 15 日(水) 15:00~15:30
開催場所：オンライン (Zoom)
主要議題：今年度の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 (Zoom)
開催日時：2022 年 5 月 13 日(金) 9:00~17:00
発表件数：24 件
参加者数：75 名

5. 北海道雪氷賞の表彰と選考

・2022 年度の北海道雪氷賞を、「北海道の雪氷(第 41 号)」の投稿論文または支部活動への貢献者を対象として選考し、以下の受賞者を決定。12 月 21 日に支部 HP に掲載。

【北の風花賞】

受賞者：波多俊太郎氏（北海道大学低温科学研究所）
論文名：「利尻島ヤムナイ沢雪渓における 2021 年現地調査報告」

【北の六華賞】

受賞者：日本雪氷学会北海道支部 雪氷災害調査チーム（2022・札幌大雪）
論文名：「2021-2022 年冬期の札幌都市圏における大雪について」

受賞者：曾根敏雄氏（北海道大学低温科学研究所）
論文名：「北海道置戸町鹿ノ子ダム左岸の風穴地における地温変化」

【北の蛍雪賞】

受賞者：高橋修平氏（北海道立オホーツク流水科学センター所長、北見工業大学名誉教授）
受賞名：「雪氷学や雪氷防災研究の発展ならびに支部活動や社会への貢献」

6. 機関誌「北海道の雪氷」41 号の刊行

発刊日：2022 年 9 月 12 日
掲載論文数：21 件
発刊の形態：冊子体および電子媒体として支部ホームページ上に掲載

7. 社会貢献事業

○雪氷災害調査チームの活動

・第 14 回研修会（オフシーズンミーティング）

開催日：2022 年 4 月 8 日(金)
参加者：14 名
開催地：蘭越町シャクナゲ岳周辺

・第 30 回講演会「雪崩から身を守るために」の開催

開催日：2022 年 10 月 29 日(土)
参加者：400 名
開催場所：北海道大学 高等教育推進機構 大講堂（札幌市）
主催：北海道大学体育会山スキー部、日本雪氷学会北海道支部、雪崩事故防止研究会

・雪氷災害調査チーム記者会見

開催日時：2022 年 11 月 24 日(木)
開催場所：北海道庁 道政記者クラブ（札幌市）
出席者：4 名（尾関、塚原、丹治、立本）

- ・ 出動訓練研修会
開催日時：2022 年 12 月 6 日(火)
参加者：14 名
開催場所：札幌国際スキー場～朝里岳（札幌市）
- ・ 2023 年 1 月 13 日に羊蹄山で発生した雪崩調査
調査日時：2023 年 1 月 14 日(土)
調査場所：虻田郡京極町 羊蹄山比羅夫コース
調査内容：発生状況等の情報収集
- ・ 2023 年 3 月 5 日に羊蹄山で発生した雪崩調査
調査日時：2023 年 3 月 6 日(月)
調査場所：虻田郡喜茂別町 羊蹄山喜茂別コース
調査内容：積雪調査および情報収集
- ・ 2023 年 3 月 5 日にペケレベツ岳で発生した雪崩調査
調査日時：2023 年 3 月 6 日(月)
調査場所：上川郡清水町 ペケレベツ岳
調査内容：積雪調査および情報収集

○雪氷教育等

- ・ サイエンスパークへの参加
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）
対 象：小学生
会場体験プログラム
開催日：2022 年 8 月 4 日(金)
場 所：札幌エルプラザ（札幌市）
内 容：アイロンビーズによる雪の結晶作り、人工雪の雪結晶観察。
参加者：①コマ 7 名、②コマ 4 名（定員 8 名）
- オンラインプログラム
開催日：2022 年 7 月 19 日(火)～8 月 31 日(水)
場 所：オンライン（「2022 サイエンスパーク|オンラインプログラム」web サイト）
内 容：上記 web サイト上で、動画 5 件(YouTube)と雪氷教育レシピを公開。

8. 支部ホームページの更新とメーリングリストの運営

- ・ 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
- ・ メーリングリスト（hokkaido@seppyo.org）による会員への情報発信
- ・ SNS を活用した情報発信の検討

9. 北海道支部地域講演会

テ ー マ：「防災フォーラム 2021/22 年冬に札幌都市圏が見舞われた大雪を振り返る，この冬にそなえて「雪」のことを考える」
開 催 日：2022 年 12 月 3 日(土)
参 加 者：38 名
開催場所：紀伊國屋書店札幌本店 1F インナーガーデン（札幌市）
主 催：紀伊國屋書店札幌本店
共 催：日本雪氷学会北海道支部、自然災害研究協議会北海道地区
後 援：札幌市、北見工業大学 地域と歩む防災研究センター、日本気象学会北海道支部、(一財)日本気象協会

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】

- ・シンポジウム 「札幌都市圏での大雪災害による道路交通への影響と将来に向けて」

開催日：2022 年 11 月 2 日（水）

開催場所：ホテルポールスター札幌（札幌市）

主催：（一財）日本気象協会北海道支社

- ・特別研究講演会 「大雪山 ―地形・永久凍土・昆虫・植物・気象の 40 年―」

開催日：2023 年 3 月 4 日（土）

開催場所：北海道大学 学術交流会館（札幌市）、オンライン（Zoom）

主催：岩花剛（北大北極センター・アラスカ大）、曾根敏雄（北大低温研）

公益社団法人日本雪氷学会北海道支部 2023 年度事業計画

1. 支部総会の開催

開催日時：2023 年 5 月 13 日（土）

開催場所：北海道大学 学術交流会館 第 1 会議室

主要議題：(1) 2022 年度事業報告・収支決算
(2) 2023 年度事業計画案・収支予算案
(3) 2023 年度支部役員について

2. 理事会の開催

第 1 回理事会

開催日時：2023 年 5 月 13 日（土）

開催場所：北海道大学 学術交流会館 第 1 会議室

主要議題：(1) 理事の役割分担の確認
(2) 評議員・顧問の選出
(3) 今年度の支部活動について 他

上記を含み年 3～4 回開催する。

3. 顧問・評議員会の開催

開催日時：2023 年 5 月 13 日（土）

開催場所：北海道大学 学術交流会館 第 1 会議室

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

開催場所：北海道大学 学術交流会館 第 1 会議室

開催日時：2023 年 5 月 13 日(土)～14 日(日)

5. 北海道雪氷賞の表彰および選考

- ・ 2022 年度に選考された北海道雪氷賞の受賞者の表彰を行う。
- ・ 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 42 号：2023）」での投稿論文または支部活動への貢献者を対象として北海道雪氷賞の選考を行う。
- ・ 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。

6. 機関誌「北海道の雪氷」42 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 15 回研修会
開催日：未定
開催地：未定

内 容：実技研修、ミーティング

- ・第31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・場所は予定）

開催日：2023年8月5日（土）

場 所：北海道大学フード&メディカルイノベーション国際拠点
（札幌市北区北21条西11丁目）

内 容：体験教室形式（前年度と同形式）

8. 支部ホームページの運営

- ・支部活動の紹介や支部関連イベントなどの会員向け情報（総会や講演会、研究発表会、雪氷災害調査チームの活動報告など）を支部ホームページに掲載し、メールマガジン（hokkaido@seppyo.org）を使って会員に通知する。
- ・その他、雪氷関連情報の提供
- ・既存ホームページ項目の充実

9. 地域講演会の開催

- ・テ ー マ：未定
- ・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または後援する。

【後援】（予定）

- ・第10回 紋別わくわく科学教室

開催日時：2023年7月16日（日）10:00～15:00

場 所：北海道立オホーツク流氷科学センター
（紋別市元紋別11）

内 容：教育関係者や研究機関、大学関係者のブース出展（10回記念として大規模な祭典）

公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2022 年度収支報告

雪氷災害調査				2022 年度予算	2022 年度決算	備考
収入				700,000	300,000	
資産勘定(雪氷災害調査基金)からの繰入				0	0	
寄附金				700,000	700,000	
謝金				0	22,000	
前期繰越金				0	0	
支出				700,000	254,716	
事業費 計						
1 調査・研究	調査	雪氷災害調査		700,000	309,290	調査
		旅費交通費		400,000	309,122	
		通信運搬費		20,000	168	
		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	412,710	

北海道支部研究発表会・支部表彰ほか				2022 年度予算	2022 年度決算	備考
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	121,274	
事業費				340,440	121,274	
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	感染症対策のためオンライン開催
	研修会等	北海道支部講演会		27,500	7,440	
	普及・啓発	雪氷教育ほか		26,000	0	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		22,440	25,284	
3 出版事業	支部等機関誌	北海道支部機関誌		130,500	88,550	
	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	550	
収支差額				-293,440	-121,274	

公益社団法人日本雪氷学会 北海道支部 2023 年度予算

雪氷災害調査				2023 年度予算	2023 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	450,000	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	20,000	0	
		振込手数料		0	
収支差額				0	0

北海道支部研究発表会・支部表彰ほか				2023 年度予算	2023 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 2023 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	東 忍	(株)ネクスコ・エンジニアリング北海道
5	理事	庶務担当	小松 麻美	(一財)日本気象協会
6	理事	会計担当	永田 泰浩	(一社)北海道開発技術センター
7	理事	会計担当	齋藤 佳彦	(株)雪研スノーイーターズ
8	理事	広報担当	澤田 学	
9	理事	広報担当	星野 聖太	札幌市立大学
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	西田 浩平	(株)雪研スノーイーターズ
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	箕輪 昌紘	北海道大学 低温科学研究所
14	理事	事業担当	原田 康浩	北見工業大学
15	理事	事業担当	桑原 尚司	北海道立オホーツク流氷科学センター
16	理事	社会貢献担当	原田 裕介	(国研)土木研究所 寒地土木研究所
17	理事	社会貢献担当	飯沼 弘一	野外科学 (株)
18	理事	社会貢献担当	大鐘 卓哉	小樽市総合博物館
1	監事		伊東 敏幸	北海道科学大学
2	監事		金村 直俊	札幌総合情報センター(株)
1	評議員		河上 聖典	(一社)北海道開発技術センター
2	評議員		武田 宣孝	北海道電力(株) 土木部 土木エンジニアリング
3	評議員		早野 亮	(株)ドーコン
4	評議員		中塚 純	(一財)日本気象協会 北海道支社
5	評議員		空閑 健	北海道開発局 開発監理部 開発調整課
6	評議員		平澤 朋美	札幌管区气象台 気象防災部
7	評議員		西 弘明	(国研)土木研究所 寒地土木研究所
8	評議員		東 貴弘	北海道 総合政策部 地域創生局 地域政策課
9	評議員		八木 直之	札幌市 建設局 土木部 雪対策室
10	評議員		進藤 州弘	北海道旅客鉄道(株) 鉄道事業本部
11	評議員		八幡 一夫	東日本高速道路(株) 北海道支社
12	評議員		阿部 幹雄	雪崩事故防止研究会
13	評議員		白岩 孝行	北海道大学 低温科学研究所
14	評議員		油川 英明	NPO 法人雪氷ネットワーク
15	評議員		石本 敬志	NPO 法人雪氷ネットワーク
1	顧問		前野 紀一	北海道大学名誉教授
2	顧問		竹内 政夫	NPO 法人雪氷ネットワーク

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等による審議を含む。
- 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。

(支部総会)

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

2 支部総会は、文書審議総会をもって代えることができる。文書審議総会には電子メール等による審議を含む。

3 議長は出席者の互選とする。文書審議総会の場合、支部長が議長に代わるものとする。

4 支部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

5 議事録は本内規第 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。

本内規の一部を改訂し、令和 5 年 3 月 17 日より施行する。

北海道の雪氷 No.42

Annual Report on Snow and Ice Studies in Hokkaido

ISSN 1340-7368

2023 年 10 月 11 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