

海水生産海域から放出される物質をグリーンランドの積雪から検出

～アイスコアを用いたノースウォーター・ポリニヤの海水変動と海洋生物活動の復元に期待～

ポイント

- ・グリーンランド氷床北西沿岸地域の積雪の化学的特性を犬橇^{いぬぞり}を使って観測。
- ・ノースウォーター海域の海洋生物活動と氷面上のフロストフラワー由来のエアロゾルを検出。
- ・アイスコア掘削によるノースウォーター海域の100年規模の環境変動の復元の可能性を示唆。

概要

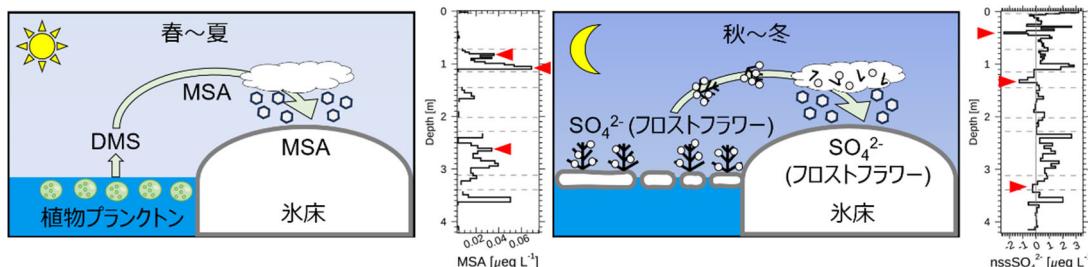
北海道大学低温科学研究所の黒崎 豊特任助教、的場澄人助教、飯塚芳徳教授らの研究グループは、グリーンランド北西沿岸部の氷河・氷床上を犬橇^{いぬぞり}で移動しながら積雪を採取し、この地域の積雪中の非海塩性硫酸イオン（ nssSO_4^{2-} ）濃度²とメタンスルホン酸³（MSA）濃度が隣接するノースウォーター海域の過去の海水変動と海洋生物活動を復元する指標になることを示しました。

ノースウォーター海域は、強い北風と暖流の影響を受けて海水の生成と流出が繰り返されるポリニヤ域です。ポリニヤの形成・維持機構の変化は、その周辺の海水変動や海洋生物活動、水・物質循環に大きく影響します。グリーンランド氷床の積雪やアイスコア⁴は、過去の降雪や大気中に浮遊する不純物（エアロゾル）を保存しており過去の環境変動を復元するための貴重なアーカイブです。本研究では、ノースウォーター海域の環境変動と周辺積雪の化学的特性の関係を明らかにすることを目的に、グリーンランド氷床北西沿岸地域において広域積雪観測を行いました。

観測地域の深さ4.20 mの積雪は4年間の環境情報を保存しており、春から夏の海洋植物プランクトンの増殖を起源とするMSA濃度と、秋から冬の薄氷上に形成されるフロストフラワー⁵起源の nssSO_4^{2-} 濃度のピークが検出されました。これらのエアロゾルの輸送経路を推定した結果、これらのエアロゾルの放出源はノースウォーター海域であったことが示唆されました。

本研究では、グリーンランド氷床北西沿岸地域の積雪が、ノースウォーター海域における海水変動と海洋生物活動を理解するためのアーカイブであることを示しました。今後、この地域でアイスコアを掘削し、過去100年間のノースウォーター海域の環境変動とそれが周辺環境に与えた影響を復元することを目指します。

なお、本研究成果は、2025年11月25日（火）公開のThe Cryosphere誌にオンライン掲載されました。



春～夏（左）と秋～冬（右）におけるノースウォーター海域を起源とするエアロゾルの輸送イメージと、グリーンランド氷床北西沿岸部の積雪中のMSA濃度と nssSO_4^{2-} 濃度の鉛直分布。MSAは植物プランクトンを起源とする硫化ジメチル（DMS）の酸化により生成される。

【背景】

グリーンランド北西部に隣接するノースウォーター海域では、冬から春にかけて強い北風と暖流の影響を受けて海水の生成と流出が繰り返され、海水が少ないポリニヤが形成されます（図 1a）。ノースウォーター・ポリニヤは、単位面積当たりの海水生成量が北極域で最大であり、周辺の環境に大きな影響を与えます。冬季に形成されるポリニヤは、海洋から大気へ熱と水蒸気を供給するため、雲の形成や降水分布に影響します。また、冬季のポリニヤで生じる湧昇は、海洋中・深層部から表面に栄養塩を輸送し、春～夏季の植物プランクトンの増殖に伴う高い生物生産を支えます。近年の温暖化によってノースウォーター・ポリニヤとその周辺の環境は変化していると考えられますが、現地における気象・エアロゾル観測データはほとんどなく、極夜期には人工衛星観測データも限られることから、実態は明らかになっていません。

グリーンランド氷床の積雪やアイスコアは、過去の降雪や人間活動、海洋、土壤などから放出されるエアロゾルを含んでおり、地球上の古環境を復元するための貴重なアーカイブとなります。これまでは、グリーンランド氷床北西内陸部において観測がなされてきたため、海水変動や、水蒸気・エアロゾルの輸送プロセスの復元は、南方のバフィン湾などを含めた比較的広域を対象としてきました。本研究は、ノースウォーター海域のような狭域な海域の情報抽出を目的に、犬橇を用いることでアプローチが可能となる海岸に近いグリーンランド氷床の沿岸部で観測を行いました。

【研究手法】

2023年4月9日から11日にかけて、ノースウォーター海域に隣接するグリーンランド氷床北西沿岸地域で広域積雪観測を行いました（図 1b）。黒崎特任助教、北海道大学大学院環境科学院博士後期課程の松本真依氏、一般社団法人アバンナット北極プロジェクトの山崎哲秀氏、シオラパルク村在住のイラングアッ・ヘンドリクセン氏の4名がフィールド観測に参加しました。氷河、氷床上の移動と荷物の輸送には2台の犬橇を用いました。シオラパルク村を起点として、1台あたり約10頭のグリーンランド犬が牽引する犬橇に乗り、ノースウォーター北東部の海氷上を北上し、比較的なだらかな氷河（Clements 氷河）を登り、氷床上を横断した後、最終目的地の St. 9 (78.13° N, 71.06° W, 海抜高度 1,279 m) に到達しました（図 1～3）。氷河上の St. 3 と氷床上の St. 9 ではテントで宿泊し、シオラパルク村と氷床上の往復に計3日を要しました。観測期間中の野外の最高気温は -15.9° C、最低気温は -30.9° Cでした。St. 1～9 の9地点において表面積雪を、St. 3において積雪表面から 1.01 m の積雪を、St. 9においてハンドドリルを用いて積雪表面から 4.20 m までの積雪を採取しました。採取した積雪試料は融解後、清浄なポリプロピレン瓶に移し、北海道大学低温科学研究所まで冷凍で輸送しました。試料を室温で融解した後、融解水の酸素・水素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$, δD ）を波長スキャン・キャビティリングダウン分光方式を用いた安定同位体比分析計を用いて測定しました。融解水の主要無機イオン濃度は、イオンクロマトグラフィーを用いて測定しました。

【研究成果】

St. 9 の積雪層構造、 $\delta^{18}\text{O}$ 、過剰重水素 ($d\text{-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$)、メタンスルホン酸 (MSA) の鉛直分布を用いて、積雪が堆積した時期を季節単位で推定した結果、St. 9 の 4.20 m の積雪は、2019 年の夏から 2023 年の春の間に堆積したことが分かりました。その堆積時間スケールから、本観測地域に供給されるエアロゾルの季節変動は、春に人間活動を起源とする非海塩性硫酸イオン濃度 (nssSO_4^{2-}) と硝酸イオン濃度 (NO_3^-) のピークが検出され、春から夏に海洋生物活動を起源とする MSA 濃度のピークが、秋から冬に薄氷上に形成されるフロストフラワーを起源とする nssSO_4^{2-} 濃度のピークと重なることが示されました。

度のピークが検出されることが明らかになりました（図4）。観測地域に降雪をもたらす空気塊の輸送経路を推定する後方流跡線解析の結果から、夏の MSA や秋から冬のフロストフラワーを起源とするエアロゾルは、主にノースウォーター海域から輸送されてきたことが明らかになりました。特に、秋から冬の積雪層におけるフロストフラワーに起因する nssSO_4^{2-} 濃度のピークは、グリーンランド氷床内陸部において観測された事例がなく、ノースウォーター海域に近接する氷床沿岸地域に特有の現象であることが考えられます。また、積雪中の $\delta^{18}\text{O}$ には、気温が低い冬季に、中・低緯度からの温暖湿潤な空気の流入による昇温イベントが記録されていました（図4）。

【今後への期待】

本研究では、グリーンランド氷床北西沿岸地域の積雪中の nssSO_4^{2-} 濃度や MSA 濃度が、ノースウォーター海域における海水変動や海洋生物活動の指標になることを示しました。今後、研究グループでは同地域においてより深くまでのアイスコアを掘削し、人工衛星観測が開始される以前のノースウォーター海域のポリニヤの形成・維持機構と、それに関連する海水変動と海洋生物活動を復元することを目指します。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費 (JP22J10351、JP18H05292、JP23H00511、JP24H00757)、北極研究加速プロジェクト (ArCS II; JPMXD1420318865)、国立極地研究所特別共同研究 (B24-02) の一環として行われたものです。

論文情報

論文名	Characteristics of snowpack chemistry on the coastal region in the northwestern Greenland Ice Sheet facing the North Water (ノースウォーター海域に隣接するグリーンランド氷床北西沿岸地域の積雪の化学的特性)
著者名	黒崎 豊 ¹ 、的場澄人 ¹ 、松本真依 ^{1,2} 、山崎哲秀 ³ 、Ilannguaq Hendriksen ⁴ 、飯塚芳徳 ¹ （ ¹ 北海道大学低温科学研究所、 ² 北海道大学大学院環境科学院、 ³ 一般社団法人 アバンナット北極プロジェクト、 ⁴ Siorapaluk, Avannaata Kommune, Greenland）
雑誌名	The Cryosphere (雪氷学の専門誌)
DOI	10.5194/tc-19-6171-2025
公表日	2025年11月25日（火）（オンライン公開）

お問い合わせ先

北海道大学低温科学研究所 特任助教 黒崎 豊（くろさきゆたか）

TEL 011-706-7361 メール yutaka_kurosaki@lowtem.hokudai.ac.jp

北海道大学低温科学研究所附属環オホーツク観測研究センター 助教 的場澄人（まとばすみと）

TEL 011-706-5485 FAX 011-706-7142 メール matoba@lowtem.hokudai.ac.jp

配信元

北海道大学社会共創部広報課（〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目）

TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

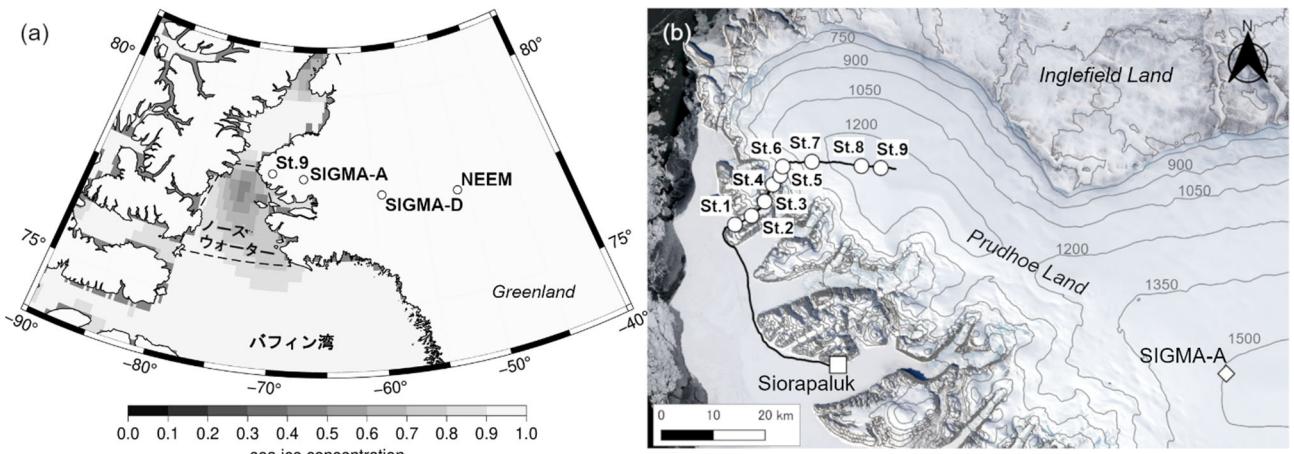


図 1. (a) 本研究の積雪観測地点 (St. 9) と先行研究のアイスコア掘削地点 (SIGMA-A、SIGMA-D、NEEM)。グレースケールは、ERA5 気象再解析データの 2023 年 2 月 20 日の海氷密接度を示しており、点線で囲われたノースウォーター海域の海氷密接度が小さい領域がポリニヤである。(b) 犬橇の移動ルート (黒実線) と積雪の採取を行った地点 (St. 1～St. 9)。背景は、Landsat-8 の可視画像である。



図 2. (a) シオラパルク村において犬橇に荷物を積む様子。(b) 氷床上を登っていく様子。(c) St. 3 における積雪断面観測。(d) St. 9 における浅層アイスコア掘削。(e、f) 海氷上を移動する様子。



図3. St. 9 における集合写真。左から山崎氏、イラングアッ氏、松本氏、黒崎特任助教。

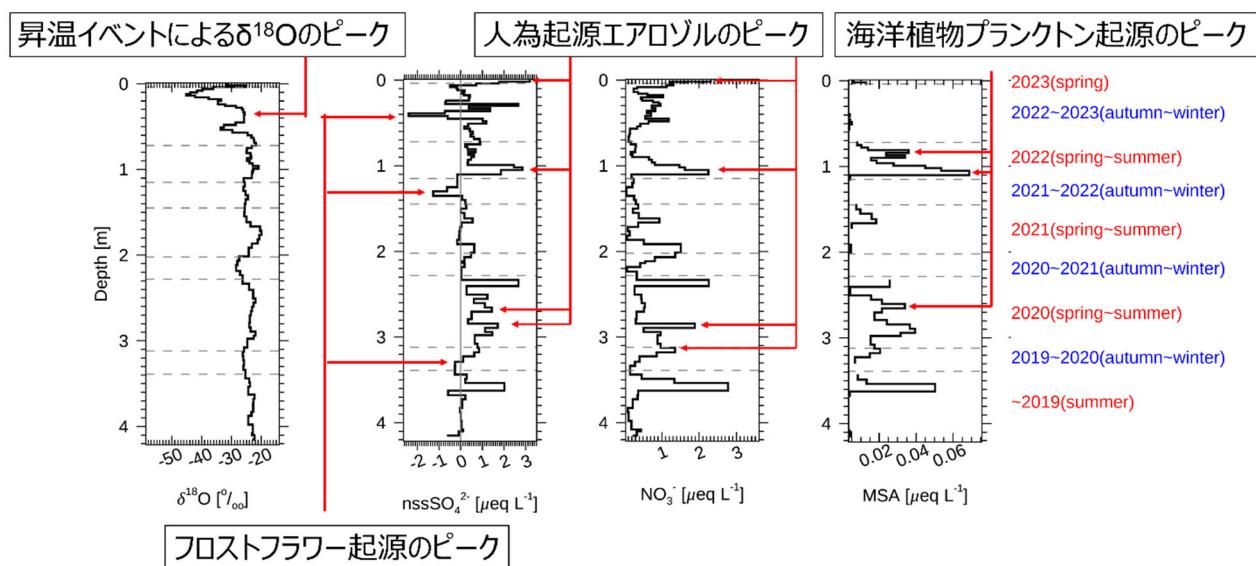


図4. St. 9 における $\delta^{18}\text{O}$ 、非海塩性 (nss) SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、MSA の鉛直プロファイル。黒の点線は、季節の区切りを示している。

【用語解説】

- *1 犬橇 … グリーンランド北西部のシオラパルク村を含むカナック地域では、主に狩猟・漁業や村と村の間の交通手段として用いられている。
- *2 非海塩性硫酸イオン濃度 … 積雪中の硫酸イオン濃度の内、海塩起源を除く濃度。ナトリウムイオン濃度が全て海塩起源であると仮定し、海水の硫酸イオン濃度とナトリウムイオン濃度の比を用いて算出される。主な起源は石炭燃焼、火山ガス、植物プランクトンである。
- *3 メタンスルホン酸 … 海洋植物プランクトンを起源として生成される硫化ジメチル (DMS) が大気中で酸化することにより生成される。
- *4 アイスコア … 極域氷床などで鉛直方向にくり貫かれる円柱状の氷試料のこと。
- *5 フロストフラワー … 薄い湖氷や海水上に水蒸気が昇華して形成される氷の結晶のこと。