



世界で初めて地下氷から北極海の海洋環境を復元

～北極海の海洋環境を包括的に復元する指標を提唱～

ポイント

- ・北極圏の地下氷に含まれるイオンの濃度から、過去の海洋環境の復元に成功。
- ・北極圏の陸地の多くは地下氷を含むことから、北極海の海洋環境を包括的に復元する指標として期待。
- ・この新しい環境指標は、温暖化が進む北極圏における、将来の環境変動の影響評価に有用。

概要

北海道大学低温科学研究所の飯塚芳徳准教授・北見工業大学の 大野 浩助教らの研究グループは、アラスカの地下氷（アイスウェッジ）に含まれるメタンスルホン酸イオン濃度から、過去の海洋環境の復元に世界で初めて成功しました。

同グループはアラスカ・バロー地域の永久凍土層内の地下氷に含まれるイオン種を分析し、いくつかあるイオン種のうちメタンスルホン酸イオンが過去の海洋生物由来物質であることを明らかにしました。メタンスルホン酸イオン濃度は約 1 万 2700 年前に起きた寒冷期（寒の戻り；ヤンガードリアス期）に高濃度であったことから、この寒冷期にも北極海アラスカ沖のビューフォート海が海氷によって閉ざされてはおらず、何らかの海洋生物の活動があったことが示唆されました。この寒冷期の北極海の海氷変動については様々な議論があり未だ結論は出ていません。北極圏の陸地のほとんどは地下氷を含む永久凍土であることから、今回の結果は、北極海の海氷変動を地下氷から復元する新しい環境指標（プロキシ）を提案したことになります。

この指標を用いて海氷面積変動のメカニズムが明らかになることで、近年の温暖化で著しく減少している北極海の海氷面積変動の将来予測の向上が期待されます。

なお、本研究成果は、2019 年 3 月 26 日（火）公開の Earth and Planetary Science Letters 誌にオンライン掲載されました。



アラスカ、バロー地域の地下氷トンネル（左）と採取された地下氷（右）

【背景】

・北極海

地球上の、北緯 66 度 33 分以上の地域のことを「北極圏」といいます（図 1）。大部分は夏季以外凍結しており、真夏には太陽が沈まず（白夜）、真冬には太陽が昇らない（極夜）日が 1 日以上ある地域です。氷と雪に囲まれた環境的にも厳しい場所ですが、現在、先住民族を始めおよそ 400 万人の人々が暮らしており、ホッキョクグマやトナカイなど、独特の生態系が育まれています。北極点を中心に広がる、北アメリカ・ユーラシア両大陸に囲まれた海域は「北極海」と呼ばれ、沿岸には、カナダ、米国、デンマーク、ノルウェー、ロシアの 5 か国があります。

近年、北極に関する大きな話題の一つは、海水面積の減少です。地球温暖化の影響で、1978 年以降、北極海の氷は縮小しています。また、北極の観測データに基づく研究によれば、北極海の氷の減少は今後も続くと予想されます。氷の減少に伴い、北極海航路の利用増加や資源開発という新たな可能性が広がってきた一方、環境問題などの課題も浮上してきています。

北極海は多くが陸地に囲まれており、外部海域との海水の循環が少なく、汚染物質が内部に滞留すると長期間循環するため、環境被害が加速しやすい傾向にあります。船舶や海底油田の事故などが起こった場合、油濁が自然に除去されるまでに長い時間を要すると言われています。また、北極は地球の平均と比べて、温暖化の進行がほぼ 2 倍速いとされています。北極域の急激な温暖化が、大気循環などを通じて、北極圏だけではなく、地球規模の大きな環境変化を引き起こす可能性があります。（これらの北極海に関する記述は外務省のホームページから引用し、一部改変しました）

・天水氷による古環境復元

氷河・氷床、一部の永久凍土地下氷は大気中に含まれる水（天水）を起源とし、北極圏をはじめとする寒冷圏（極域や高山地域）に分布しています。天水を起源とする氷（天水氷）は、海水が蒸発した水蒸気が大気の流れとともに寒冷圏に運ばれ、降雪が堆積し保存されたものです。この水循環の過程で、起源となる海水や輸送中の大気の情報も保存します。このため、過去の天水氷を調べることで、過去の水圏や気圏の環境を復元できます。特に天水氷による古環境復元の長所は、大気中の気体成分や大気微粒子（エアロゾル）を記録していることです。大気中の気体成分のうち温室効果ガスは地球表層を温暖化させ、大気微粒子の大部分は寒冷化させる主要因であり、地球温暖化問題のカギを握る物質を保存しています。

これまで天水氷についての研究には、氷河・氷床を垂直下向きに掘削して採取した氷（アイスコア）が用いられてきましたが、北極域の場合、極点や周辺陸域のほとんどに氷床がないことなどから、アイスコアによる研究には課題があります。

・本研究の目的

永久凍土にはアイスウェッジという天水起源の地下氷が存在します（図 2）。もし北極海を取り巻いている地下氷からも氷床アイスコアと同じように古環境復元ができれば、北極圏の古環境を包括的に復元できます（図 3）。上述したように北極海、とりわけ海水変動は地球温暖化の影響を受けやすく、北極海の海水変動のメカニズムを明らかにすることは重要です。そこで、地下氷から海水変動を復元することを目的に、研究に取り組みました。

【研究手法】

・ アラスカ、バロー地域の地下氷

先行研究によって、アラスカ、バロー地域の地下氷の年代が復元され、約 14000 年前から約 12300 年前までの降雪情報が連続的に保存されていました。約 14000 年前から約 12000 年前までは更新世の末期に相当し、最終氷期（約 20000 年前）から完新世（約 11700 年前から現在まで）にかけての急激に温度変動した時代（最終退氷期）に相当します。約 14000 年前から約 12900 年前までは最終退氷期のうち比較的温暖だったベーリングアデレード期、約 12900 年前から約 12300 年前までは比較的寒冷であったヤングドリラス期に相当します。研究グループはこの氷に着目し、先行研究と同じ年代の地下氷を 2016 年に採取しました（1p 図）。日本に氷を持ち帰り、水循環のプロセスを反映する「水の安定同位体比」と、古環境指標となる「不純物（イオン）濃度」を分析しました。

【研究成果】

・ イオン種による環境指標の検証

地下氷による水圏や気圏の環境復元の問題点は、地下氷中のイオン濃度がアイスコアとは異なり周辺の大陸起源物質の影響を少なからず受けていることです。そこで、まず各イオン種が水圏や気圏の古環境情報を保持しているかを精査しました。アイスコアの分野で海洋環境の指標として用いられている、硫酸イオン、臭素イオン、メタンスルホン酸イオンに着目しました。

硫酸イオンは、残念なことに地下氷周辺の土壌（たとえば石膏（CaSO₄）など）からの溶出の影響が大きく、水圏や気圏の環境指標としては不適合であることがわかりました。また、臭素イオンは地下氷周辺の土壌や湖からの寄与は少なく、大気輸送中の変質が大きいバロー地域では気圏の環境指標になる一方、水圏（周辺海域）の環境指標としては不適合であることがわかりました。他方で、メタンスルホン酸イオンは、硫化水素濃度やクロロフィル濃度などの追加分析による検証を経て地下氷周辺の土壌や湖からの寄与の可能性が否定され、水圏（周辺海域）の環境指標となることがわかりました。

・ メタンスルホン酸イオンによる古海洋環境の復元

地下氷に含まれるメタンスルホン酸イオンは、もともと北極海バロー沖のビューフォート海で発生した硫化ジメチルが大気中で酸化したものです。硫化ジメチル濃度はビューフォート海の海洋生物生産が活発なときに高くなります。ビューフォート海の海洋生物生産量は、季節海氷に付着するアイスアルジ（藻）や夏季のプランクトンの生産に起因します。

地下氷に含まれるメタンスルホン酸イオン濃度は約 12900 年前から約 12700 年前までの比較的寒冷であったヤングドリラス期に高い濃度であることが示されました（図 4）。これは、寒冷な期間にもかかわらず、多年海氷が北極海を覆っていたのではなく、開水域が存在してなんらかの海洋生物の活動があったことを示唆しています。更新世の最終退氷期の北極海をいつどのくらいの海氷が覆っていたのかは、様々な研究者によって議論されています。これまでの議論は主に海底堆積物コアを用いて行われていましたが、今回の研究成果は地下氷からのアプローチで北極海の家氷変動を復元することに世界で初めて成功しました。北極圏の陸地のほとんどは地下氷を含む永久凍土であることから、北極海の海洋環境を包括的に復元する環境指標を提唱したことになります。

【今後への期待】

・21世紀の北極海の海氷面積変動メカニズム究明

近年、北極に関する大きな話題の一つは、海氷面積の減少です。北極海の氷の減少は今後も続くと思われ、予想されます。こういったメカニズムで北極海の海氷面積が変動するのかを明らかにすることは、北極海航路の利用増加や資源開発・環境問題を考える戦略のベースとなります。北極圏の陸地に広く分布する地下氷の臭素イオン濃度やメタンスルホン酸イオン濃度が北極海の海洋環境を包括的に復元する潜在的な環境指標となることから、様々な地域の地下氷の研究から、北極海の海氷面積変動メカニズムの究明につながると考えられます。

【研究費】

本研究は文部科学省・日本学術振興会科学研究費補助金（16H05615, 26257201, 18H05292A）、環境省環境研究総合推進費（2-1605）、文部科学省北極域研究推進プロジェクト（ArCS）の支援を受けて行われました。

論文情報

論文名	Ion concentrations in ice wedges: an innovative approach to reconstruct past climate variability（地下氷のイオン濃度：過去の気候変動復元に向けた革新的アプローチ）
著者名	飯塚芳徳 ¹ ，宮本千尋 ² ，的場澄人 ¹ ，岩花 剛 ^{3,4} ，堀内一穂 ⁵ ，高橋嘉夫 ² ，漢那直也 ⁴ ，鈴木光次 ⁶ ，大野 浩 ⁷ （ ¹ 北海道大学低温科学研究所， ² 東京大学大学院理学系研究科， ³ アラスカ大学フェアバンクス校（アメリカ）， ⁴ 北海道大学北極圏研究センター， ⁵ 弘前大学大学院理工学研究科， ⁶ 北海道大学大学院地球環境科学研究科， ⁷ 北見工業大学工学部地球環境工学科）
雑誌名	Earth and Planetary Science Letters（地球惑星科学の専門誌）
DOI	10.1016/j.epsl.2019.03.013
公表日	2019年3月26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 准教授 飯塚芳徳（いづかよしのみり）

T E L 011-706-7351 F A X 011-706-7142 メール iizuka@lowtem.hokudai.ac.jp

北見工業大学工学部地球環境工学科 助教 大野 浩（おおのひろし）

T E L 0157-26-9467 F A X 0157-26-9467 メール h_ohno@mail.kitami-it.ac.jp

配信元

北海道大学総務企画部広報課（〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目）

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール kouhou@jimu.hokudai.ac.jp

【参考図】



図 1. 北極海とアラスカ・バロー地域 <地図の出典 JCAR, 2015>

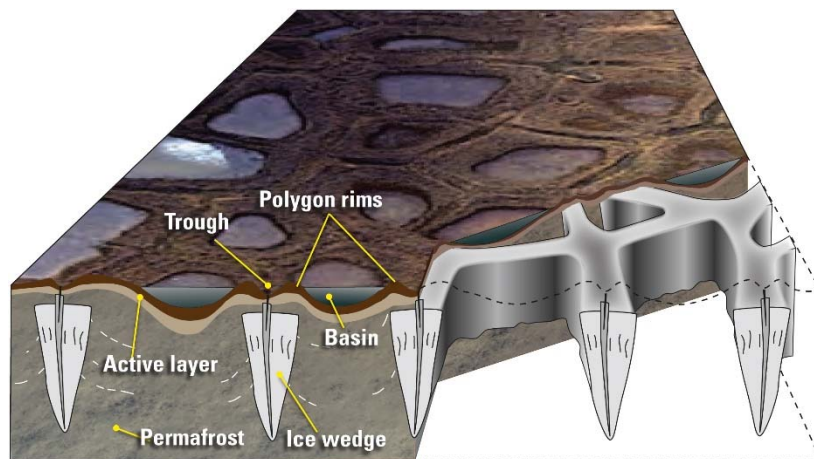


図 2. 永久凍土層に分布する地下水 (ice wedge) のイメージ<出典 ARCUS Internet Media Archive>

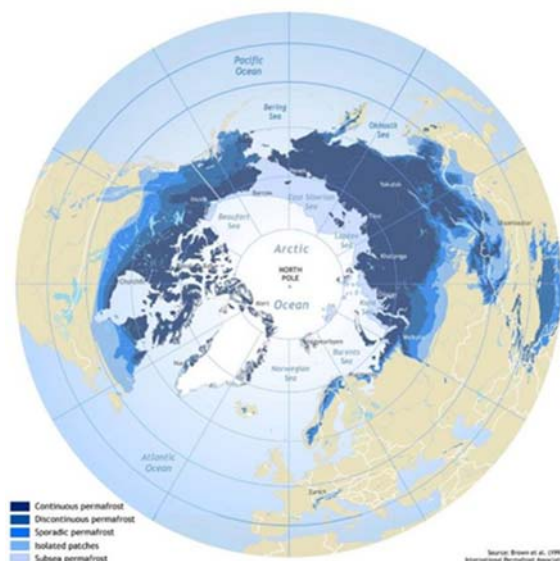


図 3. 永久凍土の種類を色分けした地図：連続永久凍土（濃紺），不連続永久凍土（紺色），散発的永久凍土（青），部分的永久凍土（水色），海中の永久凍土（薄水色）<出典 国際永久凍土学会>

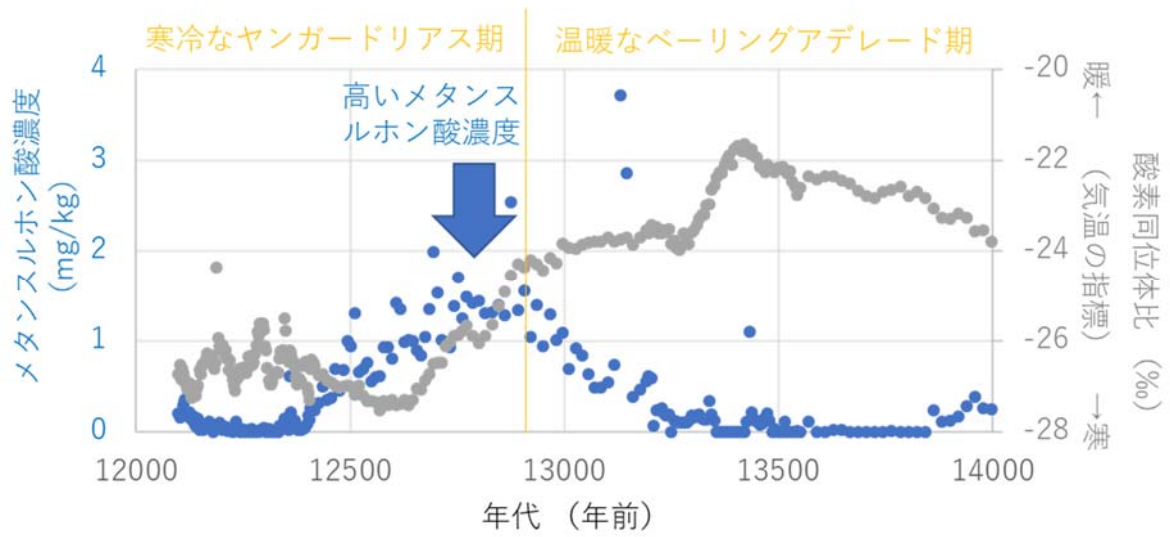


図4. アラスカ・バロー地域の地下氷のメタンスルホン酸濃度（青）と酸素安定同位体比（灰）