



極域海洋の鉄に関する生物地球化学的研究

漢那直也*

1. はじめに

海洋における鉄は、植物プランクトンが増殖するために必須の金属元素である。北太平洋亜寒帯域や南極海などの鉄濃度が極めて低い海域では、植物プランクトンは鉄による成長律速を受けている。海洋にどれだけの鉄が、どこから、どこまで、どのように流入するのか、また鉄が生物にとって利用できる形であるのかを明らかにすることは、生物地球化学分野の重要な研究テーマになっている。海洋への鉄の供給源・供給過程として、例えば大気エアロゾルの沈着や河川水の流入、陸棚堆積物からの溶出と海水中への再懸濁、熱水噴出などがこれまでに報告されている。近年の地球温暖化に伴い、氷床氷河や海水を介した鉄の供給過程が注目されるようになった。氷を介した鉄供給の重要性が南極海で認識され始めたタイミング (Lannuzel et al., 2007; Smith et al., 2007) は、著者が北海道大学大学院に進学した時期とも重なった。

このような背景のもと、著者は極域・寒冷域の海洋をフィールドに、海洋化学で発展したクリーン技術（汚染を防ぐ手段）を用いて、鉄に関する研究を行ってきた。本稿では、オホーツク海、北極海などの海水域、さらにグリーンランドの氷河フィヨルドで展開した鉄の生物地球化学研究について概説する。

2. 海水域における鉄の生物地球化学研究

2.1. オホーツク海

季節海水域であるオホーツク海では、海水が融解する春に植物プランクトンの大増殖（春季ブルーム）が起こる。春季ブルームが発生するためには、窒素、リンなどの主要な栄養素や、鉄などの微量な栄養素が海水中に十分に存在している必要がある。しかしオホーツク海の海水が、これら栄養物質の供給にどのように関与しているかよくわかっていなかった。とくに海洋環境で汚染しやすい鉄の取り扱いが難しく、クリーン技術を用いた研究手法が、海水域では十分に確立されていなかった。著者の研究では、このクリーン技術を海水サンプルにも適用できる技術に改良し、独自の研究手法を確立してきた (Kanna et al., 2014)。主な成果は漢那ほか (2016) で詳述されているが、オホーツク海の海水には、窒素、リンはほとんど含まれない一方で、鉄は海水中の濃度よりも数十から数百倍の高濃度で含まれることを解明した。また海水によってオホーツク海北部から南部へ輸送される鉄の総量（約 1.2 万トン）と、海水から海洋への鉄供給量（約 $740 \mu\text{mol m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ）を明らかにし、海水がオホーツク海表層への鉄の供給源であることを初めて見出した。

この研究により、オホーツク海の海水融解期には、海水から放出される鉄と、冬季の混合により表層へ供給される窒素、リンが混ざることによって、春季ブルーム発生の条件が整っていくことがわかってきた。一方で、海水に含まれる全鉄の 99% 以

*東京大学大気海洋研究所

上は粒子状の鉄であり、この粒子状の鉄が植物プランクトンにとって使えるのかどうかはよくわかっていなかった。そこで、海水から海水中へ放出された鉄の存在状態を調べ、海水中の鉄の使われやすさを評価する研究に取り組んだ (Kanna and Nishioka, 2016; Kanna et al., 2018a, 2020a)。主な成果は漢那ほか (2024) で詳述されているが、海水を加えた海水中で植物プランクトンを培養し、その増殖応答を観察することで、海水から放出された粒子状の鉄を使って植物プランクトンが増殖できることを解明した。この海水中粒子の起源推定を行ったところ、主に海洋に起源を持つ生物由来の粒子であることがわかった。大気エアロゾルなどの非生物粒子に比べ、生物粒子中の鉄は比較的海水中へ溶出しやすいことが知られており、植物プランクトンは生物粒子から溶出した鉄を利用したことが考えられた。

オホーツク海では、冬季の海水域の拡大とともに、鉄が海水によって広範囲へ運ばれ、植物プランクトンの鉄利用に繋がっていく (図1)。とくに陸から遠く離れた海盆域は、春から夏にかけて鉄が不足することで知られている。1971年以降、オホーツク海の海水域面積は縮小傾向にあり (気象庁HP: https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a_1/series_okhotsk/series_okhotsk.html)、これまで海盆域まで広がっていた海水が消えつつある。地球温暖化により、オホーツク海の基礎生産力、そして豊かな水産資源が今後どのように変わっていくのか注視する必要がある。

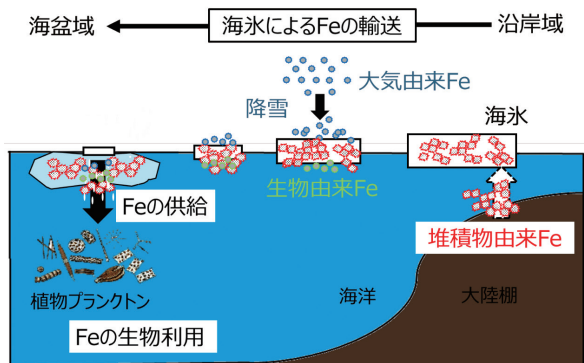


図1. オホーツク海の海水が関わる鉄の循環

2.2. 北極海

北極海には、ラプテフ海、東シベリア海から北極点を横断し、フラム海峡まで至る大規模な表層流が存在する。トランスポーラードリフトと呼ばれるこの海流は、淡水や陸起源の物質を北極海内部に輸送し、海盆域の基礎生産に影響を与えている。地球温暖化により、永久凍土の融解や河川水の流出が増加傾向にあり、トランスポーラードリフトを介した水・物質輸送の重要性が高まっている。一方で、その源流域であるラプテフ海、東シベリア海における研究は乏しく、とくにトランスポーラードリフトが関わる微量元素輸送過程の実態は不明であった。

このような現状にあって、2021年の9月から10月にかけて北極海国際共同観測航海 (NABOS: Nansen and Amundsen Basins Observational System Expedition) に参加する機会を得た。NABOS航海は、ロシア、アメリカ、日本などの研究者がロシアの砕氷船を利用して北極海を観測する航海で、2002年から継続的な調査が行われている。航海の主な目的は、温暖な大西洋水の流入量とその経年変化をモニタリングすることであるが、本航海でシベリア側北極海を観測する機会に恵まれた (図2)。

本航海により、知見の乏しい東シベリア海、ラプテフ海における鉄の表層分布を解明し、トランスポーラードリフト源流域の鉄の起源が主にシベ

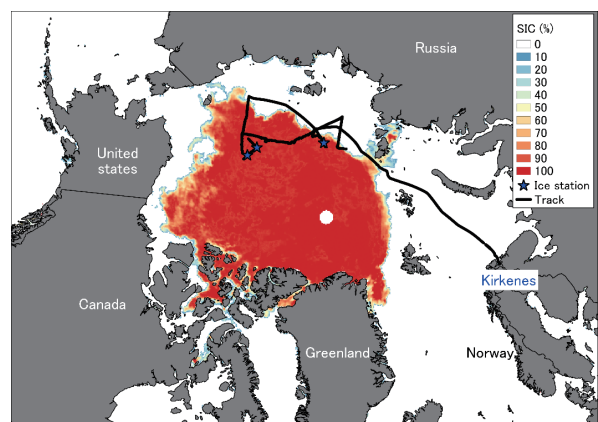


図2. NABOS航海の航跡。星印は海水上で観測を行った測点。海水氷接度 (SIC: Sea ice concentration) は宇宙航空研究開発機構から提供の2021年10月1日のGCOM-W/AMSR2データを使用。

リア河川にあることを突き止めた (Kanna et al., 2025). 一方、海水は、ラプテフ海、東シベリア海表層への鉄の供給源としてそれほど重要でないことも明らかになった。ラプテフ海、東シベリア海では、溶存有機炭素濃度が周辺海域よりも高く、一部の腐植物質が鉄と錯体を形成し、鉄の海水中への溶解性を高めていることが考えられた。シベリア河川から供給された鉄は、海水中での粒子化・除去を免れ、トランポーラードリフトの流れによって、中央北極海へ広く運ばれていることが考えられた。

シベリア沿岸域は、広大な大陸棚を形成し、河川水の滞留時間は数年と長い。シベリア河川の流域には永久凍土も多く、またラプテフ海は海水形成が盛んに行われる海域 (ポリニヤ域) としても知られる。シベリア沿岸域は、北極海の中でも温暖化の影響をとくに受けやすく、トランポーラードリフトを介した陸-大陸棚-海盆間の物質輸送により、北極海の生物地球化学循環に大きな影響を及ぼす海域といえるだろう。北極海では、温暖化により陸-沿岸-海盆システムが変化しつつある。とくにシベリア沿岸域から海盆域にかけての物質循環の総合的・定量的理解が、今後の北極海研究において最重要課題となっている (川合ほか, 2021)。日本が取り組んでいる北極海観測に加え、NABOS のような国際共同観測への積極的参入が今後ますます重要になる。

3. 氷河フィヨルドにおける鉄の生物地球化学研究

グリーンランドの氷床氷河は、地球温暖化によりかつてないスピードで融け始め、氷の融解が海洋の物質循環と生態系に与える影響が懸念されている。グリーンランドを含む北極の環境変化に世界的な注目が集まるなか、2015年に日本の新しい北極研究プロジェクト (ArCS: Arctic Challenge for Sustainability) が始まった。これまでも、グリーンランド北西部の氷帽 (帽子のように山頂を覆う氷河)・氷河の変動に着目した

研究で多くの成果が挙がっていたが、ArCSでは氷床氷河と海洋の相互作用を解明することが新たな課題となっていた。

このような背景のもと、著者はフィヨルド生態系を支える植物プランクトンの生産と、氷河の融解との関連を明らかにする研究に取り組んできた。グリーンランド沿岸には、氷河によって削られたフィヨルドがいくつも見られる。細長いフィヨルドの奥には、数百メートルの厚さのカービング氷河 (海に流れ込む氷河) がある。この氷河とフィヨルドの境界部は、アザラシなどの海棲哺乳類や、海鳥が密集する場所として古くから知られていた。一方で、境界部になぜ生物が多く集まるのか? という問いに対し、定量的な説明はほとんどなかった。フィヨルドが常に冰山や海水で覆われるため、研究船でアクセスすることが難しく、フィールド調査が敬遠されていたことが背景にあった。

本研究では、知見の乏しい境界部で集中的な観測を行い、鉄に富む氷河の融解水が、窒素、リン、ケイ素に富むフィヨルド中層の海水と混ざって湧昇することで、夏の間の植物プランクトンの生産を支えることを解明した (Kanna et al., 2018b, 2020b, 2022)。植物プランクトンは、湧昇により運ばれたこれらの栄養素を、光の届く海面で利用することで大増殖を起こしていた (図3)。また氷河前で生じる湧昇は、海鳥の摂餌環境にも影響を及ぼすことがわかった (Naito et al., 2019; Nishizawa et al., 2020)。氷河とフィヨルドの境界部では、潜って餌を採る海鳥 (潜水採食者) よりも、潜ることが苦手で、海面で餌をついばむ海鳥 (表面採食者) の種類が顕著に多かった。これは、湧昇域は動物プランクトンや魚などの餌生物が海面に運ばれるため、表面採食者にとって良い摂餌場になるが、流出した土砂でフィヨルドが濁るため、潜水採食者にとっては都合の悪い摂餌場になることに起因している。グリーンランドで行った著者の一連の研究は、氷河の動態研究 (Podolskiy et al., 2021a, 2021b, 2021c) や、フィヨルドの海水循環の数値モデル研究 (Hoshiba et

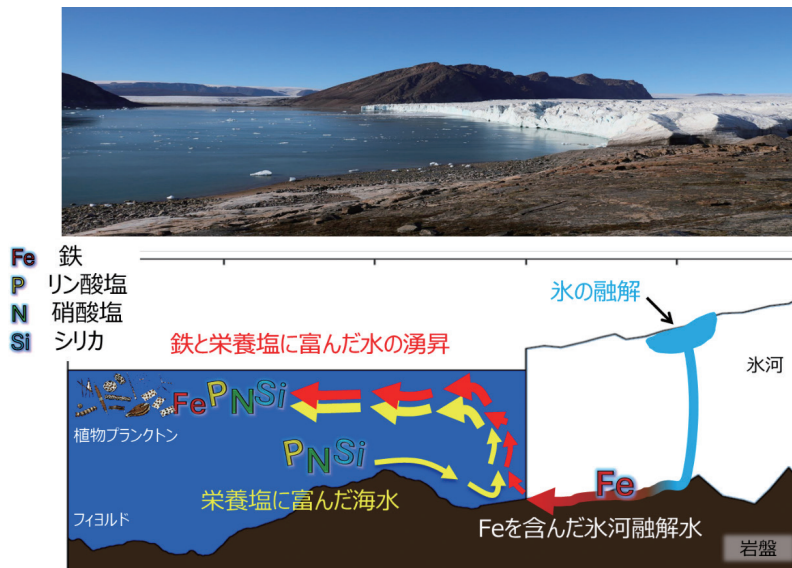


図3. グリーンランドのカービング氷河が関わる鉄と栄養塩の循環

al., 2024; Ohashi et al., 2020), 係留系を用いた水塊のモニタリング研究 (藤支ほか, 2019), フィヨルドに生息するプランクトン, 海鳥, 海生哺乳類に関連する生態系研究 (Naito et al., 2019, Nishizawa et al., 2020; Matsuno et al., 2020; Podolskiy et al., 2022) など, 多様な研究の創出にも貢献した. これらの研究により, 氷河融解水の流出は, フィヨルドの物質循環を活発化させることでグリーンランド沿岸の生物生産に影響を及ぼしていることがわかった. 一方で, 氷河フィヨルドの低次生態系は, 温暖化に対して非常に脆弱であることも示された.

グリーンランドのフィヨルドには多様で豊かな海洋生物が生息し, 現地です生活する人々に海の恵みをもたらしている. カービング氷河の融解が進むと, フィヨルドの栄養環境は良好になり, 基礎生産は増加に転じることが予想される. しかし温暖化でグリーンランドがカービング氷河を失うと, 氷河の融解が駆動するフィヨルド特有の循環が弱体化し, 海洋生態系への甚大な影響が懸念される. 気候と氷河の変動を注意深く観察し, 氷河の融解が海洋環境に与える影響をより深く理解していく必要がある.

謝辞

京都大学の宗林由樹教授をはじめ, 海洋化学奨励賞に選考して下さった皆様に深く感謝します. 恩師である北海道大学の西岡純教授には, クリーン技術を用いた観測と実験, 鉄分析など研究ノウハウを教わりました. 私は非常に手のかかる学生だったと思いますが, 私の成長をいつも心から喜んで下さいました. 東京大学の小畑元教授には, 本奨励賞にご推薦いただきました. 現所属の研究室で, 日々の充実した研究生活を送ることができると, 小畑教授をはじめ海洋無機化学グループの皆様のおかげです. 北海道大学の杉山慎教授には, グリーンランドのプロジェクトでお世話になりました. 本プロジェクトで多様なバックグラウンドをもつ人々と関わることができ, その経験は私の財産になっています. そしてこれまで一緒に調査・研究に取り組んで下さった多くの研究者と技術職員の皆様, 船員の皆様には, 現在に至るまで研究者として育てて頂きました. 皆様に心から感謝します.

引用文献

- 1) グリーンランド北西部ボードイン氷河前縁フィヨルドにおける水温・塩分・流速の長期係留観測. 藤支良貴, 深町康, 漢那直也, 杉

- 山慎, 北海道の雪氷 **38** 号, 15–18 (2019).
- 2) Impacts of glacial discharge on the primary production in a Greenlandic fjord. Y. Hoshiba, Y. Matsumura, N. Kanna, Y. Ohashi, and S. Sugiyama. *Sci. Rep.* **14**, 15530 (2024).
 - 3) Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. N. Kanna, T. Toyota, and J. Nishioka, *Prog. Oceanogr.* **126**, 44–57 (2014).
 - 4) Bio-availability of iron derived from subarctic first-year sea ice. N. Kanna and J. Nishioka, *Mar. Chem.* **186**, 189–197 (2016).
 - 5) 陸海結合システム：オホーツク海における海水が関わる鉄の供給過程の解明. 漢那直也, 西岡純, 豊田威信, *低温科学* **74** 巻, 105–114 (2016).
 - 6) Winter iron supply processes fueling spring phytoplankton growth in a sub-polar marginal sea, the Sea of Okhotsk – Importance of sea ice and the East Sakhalin current – . N. Kanna, Y. Sibano, T. Toyota, and J. Nishioka, *Mar. Chem.* **206**, 109–120 (2018a).
 - 7) Upwelling of macronutrients and dissolved inorganic carbon by a subglacial freshwater driven plume in Bowdoin Fjord, northwestern Greenland. N. Kanna, S. Sugiyama, Y. Ohashi, S. Sakakibara, Y. Fukamachi, and D. Nomura, *J. Geophys. Res.-Biogeosci.* **123**, 1666–1682 (2018b).
 - 8) 環オホーツク圏の科学—環オホーツク観測研究センター20年目の歩み—：海水に含まれる鉄の生物利用能に関する研究. 漢那直也, 西岡純, *低温科学* **82** 巻, 93–101 (2024).
 - 9) Size fractionation and bioavailability of iron released from melting sea ice in a subpolar marginal sea. N. Kanna, D. Lannuzel, P. van der Merwe, and J. Nishioka, *Mar. Chem.* **221**, 103774 (2020a).
 - 10) Iron supply by subglacial discharge into a fjord near the front of a marine - terminating glacier in northwestern Greenland. N. Kanna, S. Sugiyama, Y. Fukamachi, D. Nomura, and J. Nishioka, *Global Biogeochem. Cycles* **34**, e2020GB006567 (2020b).
 - 11) Meltwater discharge from marine-terminating glaciers drives biogeochemical conditions in a Greenlandic fjord. N. Kanna, S. Sugiyama, T. Ando, Y. Wang, Y. Sakuragi, T. Hazumi, K. Matsuno, A. Yamaguchi, J. Nishioka, and Y. Yamashita, *Global Biogeochem. Cycles* **36**, e2022GB007411 (2022).
 - 12) Spatial distributions of iron and manganese in surface waters in the Arctic's Laptev and East Siberian seas. N. Kanna, K. Tateyama, T. Waseda, A. Timofeeva, M. Papadimitraki, L. Whitmore, H. Obata, D. Nomura, H. Ogawa, Y. Yamashita, and I. Polyakov, *Biogeosciences* **22**, 1057–1076 (2025).
 - 13) 海洋学の10年展望2021：極域. 川合美千代, 田村岳史, 渡邊英嗣, 西岡純, 野村大樹, 真壁竜介, 溝端浩平, 安中さやか, *海の研究* **30** 巻, 159–178 (2021).
 - 14) Distribution and biogeochemical behaviour of iron in the East Antarctic sea ice. D. Lannuzel, V. Schoemann, J. De Jong, J. L. Tison, and L. Chou, *Mar. Chem.* **106**, 18–32 (2007).
 - 15) Impacts of meltwater discharge from marine-terminating glaciers on the protist community in Inglefield Bredning, northwestern Greenland. K. Matsuno, N. Kanna, S. Sugiyama, A. Yamaguchi, and E. Yang, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **642**, 55–65 (2020).
 - 16) Surface zooplankton size and taxonomic composition in Bowdoin Fjord, north-

- western Greenland: A comparison of ZooScan, OPC and microscopic analyses. A. Naito, Y. Abe, K. Matsuno, B. Nishizawa, N. Kanna, S. Sugiyama, and A. Yamaguchi, *Polar Sci.* **19**, 120–129 (2019).
- 17) Contrasting assemblages of seabirds in the subglacial meltwater plume and oceanic water of Bowdoin Fjord, northwestern Greenland. B. Nishizawa, N. Kanna, Y. Abe, Y. Ohashi, D. Sakakibara, I. Asaji, S. Sugiyama, A. Yamaguchi, and Y. Watanuki, *ICES J. Mar. Sci.* **77**, 711–720 (2020).
 - 18) Vertical distribution of water mass properties under the influence of subglacial discharge in Bowdoin Fjord, northwestern Greenland. Y. Ohashi, S. Aoki, Y. Matsumura, S. Sugiyama, N. Kanna, and D. Sakakibara, *Ocean Sci.* **16**, 545–564 (2020).
 - 19) Co-seismic eruption and intermittent turbulence of a subglacial discharge plume revealed by continuous subsurface observations in Greenland. E. A. Podolskiy, N. Kanna, and S. Sugiyama, *Commun. Earth Environ.* **2**, 66 (2021a).
 - 20) Ocean-Bottom Seismology of Glacial Earthquakes: The Concept, Lessons Learned, and Mind the Sediments. E. A. Podolskiy, Y. Murai, N. Kanna, and S. Sugiyama, *Seismol. Res. Lett.* **92**, 2850–2865 (2021b).
 - 21) Ocean-bottom and surface seismometers reveal continuous glacial tremor and slip. E. A. Podolskiy, Y. Murai, N. Kanna, and S. Sugiyama, *Nat. Commun.* **12**, 3929 (2021c).
 - 22) Glacial earthquake-generating iceberg calving in a narwhal summering ground: The loudest underwater sound in the Arctic? E. A. Podolskiy, Y. Murai, N. Kanna, and S. Sugiyama, *J. Acoust. Soc. Am.* **151**, 6–16 (2022).
 - 23) Free-drifting icebergs: hot spots of chemical and biological enrichment in the Weddell Sea. K. L. Smith Jr, B. H. Robison, J. J. Helly, R. S. Kaufmann, H. A. Ruhl, T. J. Shaw, B. S. Twining, and M. Vernet, *Science* **317**, 478–482 (2007).