

第3回「理想の追求」研究報告

研究期間：2012年4月1日～2015年3月31日

凍る海の豊かな生態系を生み出す機構の解明

プロジェクトリーダー

西岡 純 北海道大学低温科学研究所

プロジェクトメンバー

的場澄人 北海道大学低温科学研究所

渡邊 豊 北海道大学大学院地球環境研究院

中村知裕 北海道大学低温科学研究所

三寺史夫 北海道大学低温科学研究所



ロシア船マルタノフスキー号で実施したオホーツク海航海の集合写真

前から2列目左から4人目研究代表者、前から3列目左から3人目渡邊豊氏、右から4人目中村知裕氏

1. 研究の背景と達成目標

北極海、南極海、オホーツク海、ベーリング海など、冬季に海氷で覆われる極域・亜極域海洋は、地球上でも稀にみる豊かな生態系を持ち、水産資源を生み出す重要な場所となっている。しかし、凍る海の豊さの要因については科学的に十分に解明されているとは言えない。我々が挑戦した課題は、「何故凍る海が豊かな生態系を持つのか？」を明らかにすることである。このため、海氷が栄養物質の循環と植物プランクトン増殖にどのような役割を果たしているのかを生物・化学的視点から明らかにし、季節海氷域の豊かな生態系を生み出す仕組みを解明することに繋げ、得られた科学的知見を、海洋生態系の保全や将来予測に役立てることを目指した。主に研究対象のモデル海域としてオホーツク海をフィールドとして研究を進めた。また、次の①～④を具体的な達成目標とした。

- ①海氷によって運ばれる栄養物質の量の見積りと起源の推定
- ②海氷融解が作り出す水塊構造と栄養物質の分布の解明
- ③海氷の融解による栄養物質放出量の見積もり
- ④海氷融解が植物プランクトン増殖へ与えるインパクトの評価

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

●主な研究成果

- ①海氷中には海水に比べて1-2オーダー高い濃度で微量栄養物質である鉄分が含まれていること、これらの鉄分は陸棚上の堆積物由来であることが明らかとなった。一方、海氷中のリン、窒素、ケイ素は、海氷生成時に排出され海水に比べ濃度が低下していた。
- ②海氷生成エリアの北西部オホーツク海から南部北海道沖まで、毎冬最大30,000トンの鉄が海氷によって移送され、南部オホーツク海に放出されていると見積もられた。
- ③海氷融解期の南部オホーツク海と親潮海域の観測を実施した結果、海氷の融解によって、他海域に比べて1-2オーダーほど表層混合層内の鉄濃度が高められており、植物プランクトンの増殖を促進していることが明らかとなった。
- ④観測とモデルによるシミュレーションの結果、北太平洋側の親潮域においてもオホーツク海やベーリング海の海氷の融解水が生物生産に大きな影響を与えていることが推測された。

上記の①～④の結果より、オホーツク海から親潮域にかけて広い範囲で、海氷およびその融解水が鉄分を広い範囲に移送し、春季の植物プランクトンの大増殖を生み出す栄養環境を作り出している事が明らかとなった。この海氷による栄養物質移送は、融解水を介して周辺の亜寒帯域にまで達していることが示唆された。

●社会や学術に与える影響

海氷が関わる極域と亜寒帯域を繋ぐ物質循環過程は、現在の海洋学の物質循環研究の中ではほとんど取り扱われていない。本研究は、海氷の関わる物質循環や海氷が生物生産に与えるインパクトがいかに大きいかを示した例であり、激変している極域を考慮すると、今後、極めて重要な研究領域となる。海氷や海氷融解水の及ぶ範囲を極域-亜寒帯海洋システムとして捉え、生物生産を生み出す自然界の仕組みの変化を予測し、我が国の水産資源の変動を捉えていくことが今後の重要な課題となるであろう。

3. 研究成果

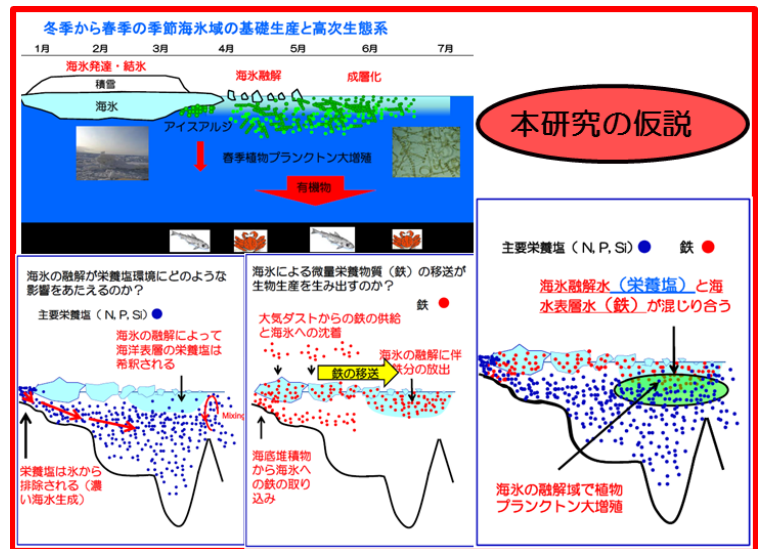
オホーツク海は、2月下旬から3月初旬にかけて海氷域面積が最大となり、海の50-90%が海氷で覆われる季節海氷域である(図1)。アムール川からの淡水流入に加え、シベリア東部の寒気が強まり、主に北西陸棚域の沿岸ポリニヤにおいて多量の海氷が生産されている。形成された海氷は、冬季のモンスーンによって強まった東サハリン海流に運ばれて、南部オホーツク海域に到達する。冬季に海氷が覆うオホーツクの海は、春以降、日本が面する海の中で最も豊かな水産資源を生み出す。



図1 海氷で覆われたオホーツク海

「オホーツク海の流氷(海氷)は栄養物質を運び、豊かな生態系を支えている」との認識が一般に普及しているが、これは本当なのだろうか？

これまで海氷の生成や融解が海洋の物質循環や生態系にどのような影響を与えているのかについては良く分かっていなかった。オホーツク海では、海氷融解後の春季から夏季にかけて、植物プランクトン大増殖が起こる。植物プランクトンが増殖するためには、光の条件が整う事に加えて、窒素、リン、ケイ素、鉄などの栄養分の供給が必要である。本研究では「海氷が春季の植物プランクトンの大増殖を生み出す鉄分を運搬し、広く海洋に供給している」という仮説(図2)を提案し、これを検証するために、海上保安庁砕氷船「そや」(2012年2月、2013年2月、2014年2月)、ロシア極東海洋気象学研究所研究船「マルタノフスキー号」(2014年6月)、北海道大学「おしよる丸」(2013年7-8月)、北海道区水産研究所「北光丸」(2014年1月)を用いた現場観測と培養実験から成る研究を進めた。



海氷による鉄の輸送と海洋表層への供給

まず初めに海氷が鉄や主要栄養塩の輸送に関与しているかを調べた。そのために、クリーン技術という海氷内の微量元素を測定するための技術を構築し、オホーツク海でこれまで知見が得られていなかった海氷上の雪と、海氷中、海水中の主要栄養塩と鉄を定量的に評価した。この結果、海氷中には直下に存在する表層海水にくらべて、1-2オーダー高い濃度で鉄分が含まれている事が明らかになった(図3)。また主な鉄の存在状態は粒子態であることが分かった。一方、海氷中の主要栄養塩は、海氷下の海水と比較して濃度が低いことがわかった。また海氷中の鉄の起源を推定するため、陸起源物質の指標であるアルミニウム(Al)の分析を行った結果(図4)、海氷中に取り込まれた鉄とア

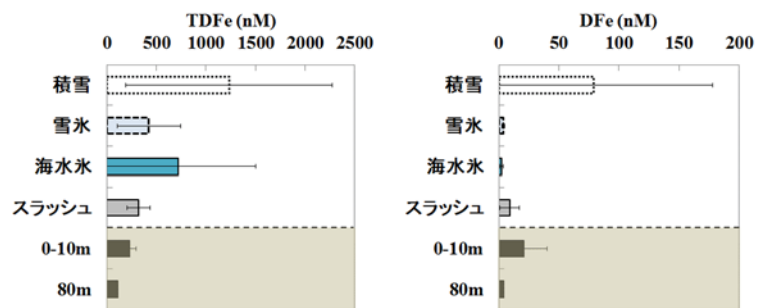


図3 海氷とその直下の海水に含まれる鉄濃度 (TDFe: 未濾過鉄、DFe: 溶存鉄)

ルミニウムの比から、海氷に高濃度で含まれる鉄の起源は、結氷期に海氷中へ直接取り込まれた陸棚上堆積物に由来する鉄であることが示唆された。

また2012～2014年の2月に、海洋表層の鉄濃度とともに淡水の起源を識別できるアルカリ度を測定した結果、南部のオホーツク海の表層には、海氷の融解水と共に、北太平洋表層の鉄濃度に比べ1-2オーダー高い濃度で海氷由来の鉄分が分布している様子を捉えることが出来た。

オホーツク海の海氷の生成が起こる北西部陸棚域から南部オホーツク海へ海氷によって輸送される淡水量の報告値を基に、海氷による鉄の移送量を見積もったところ、北西部陸棚域から南部オホーツク海に毎冬8,300～30,000トンもの鉄が移送されていると推定された。これは、夏季のアムール川由来の淡水によって移送される鉄分の量にくらべ、3オーダー大きな量であることが分かった(図5)。また、西部北太平洋に年間降り注ぐ鉄と同等レベル(664±197 μmol/m²/winter)の鉄量が、春先の短い期間で南部オホーツク海に供給されると考えられた。これらの結果より、海氷の融解は、春季の南部オホーツク海の栄養環境にとって最も大きな影響を与える鉄供給プロセスであることが示された(図5)。

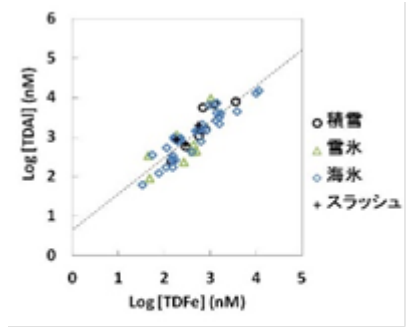


図4 海氷中に含まれるアルミニウム(Al)と鉄(Fe)の濃度

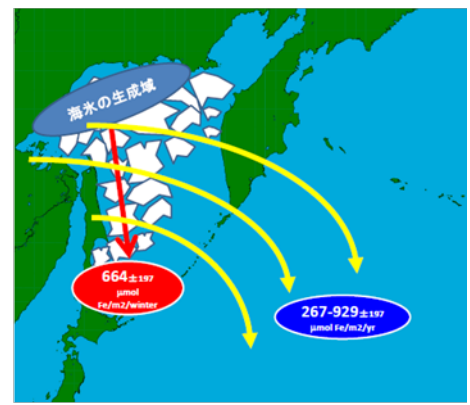
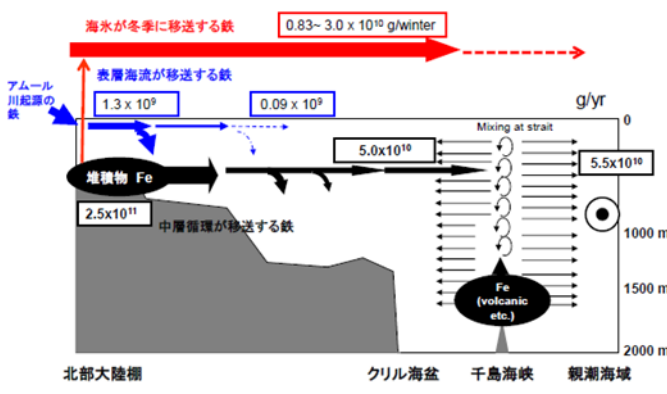


図5 オホーツク海における鉄の供給過程の定量的な評価 (赤が海水、移送量: g/yr) 左)、南部オホーツク海表層における春季の鉄フラックス (右)

植物プランクトン増殖を支える海氷融解による鉄供給

海氷融解期の南部オホーツク海で採取した表層海水を用いて、鉄分を添加する培養実験を実施した。表層海水中に生息していた植物プランクトンを含む海水に、鉄を添加した系列と無添加のコントロールの系列の培養水を用意し、水温 3°C、光量 140 μmol photons m⁻² s⁻¹、14 h light: 10 h dark の条件下で 12 日間培養した。その結果、どちらも差が無く大きな増殖が見られた(図6)。この培養実験の結果、海氷融解期の南部オホーツク海は、主に 10 μm 以上の大型の珪藻類が優占しており、大型の珪藻類が大増殖するために必要な栄養塩および鉄分が十分に存在している環境であることが分かった。

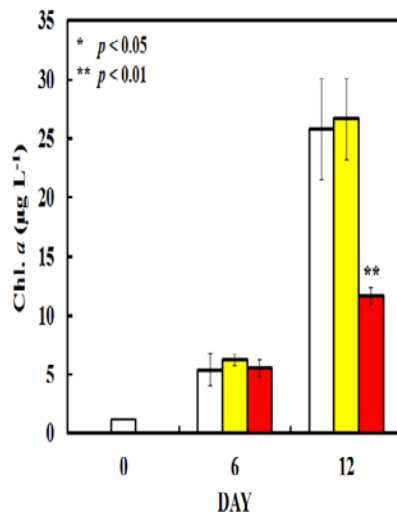


図6 海氷融解期の南部オホーツク海で実施した培養実験の結果 (白: 無添加コントロール区、黄色: 鉄添加区、赤: DFB (鉄利用阻害物質) 添加区)

海氷融解が周辺海域へ与える影響

2013年北極海チュクチ海域において海氷融解水の分布と鉄濃度の関係を精査するために観測を実施した。その結果、北極海においても海氷の融解によって海洋表層に鉄分が供給されている様子を定量的に捉えることが出来た。海氷融解水によって鉄分が供給されているエリアでは、硝酸塩の枯渇が見られ、植物プランクトンの増殖が起こった痕跡が見られた。さらに、2014年1月および6月にオホーツク海と隣接する亜寒帯太平洋の親潮海域およびカムチャツカ半島東方海域の観測を実施した。この観測においても、オホーツク海やベーリング海由来の海氷融解水と見られる高い鉄濃度の水塊が表層に分布している様子を捉えることが出来た(図7)。また、モデルによるシミュレーション結果でも、オホーツク海で起こる海氷の融解は親潮側にも低温・低塩分の水を供給していることが示された(図8)。この淡水の影響の見られる範囲では、春季に植物プランクトンの大增殖が起こることが衛星画像で確認されており、海氷の融解水が極域周辺の海域で植物プランクトン増殖を促進していることが示唆された。

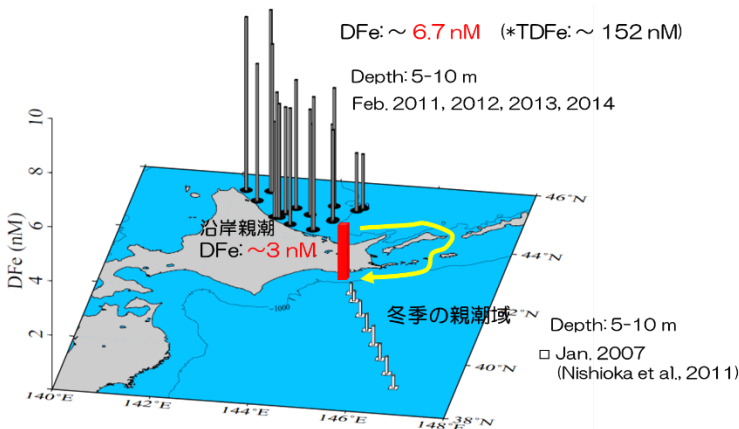


図7 海氷到来期のオホーツク海および親潮域表層における鉄濃度

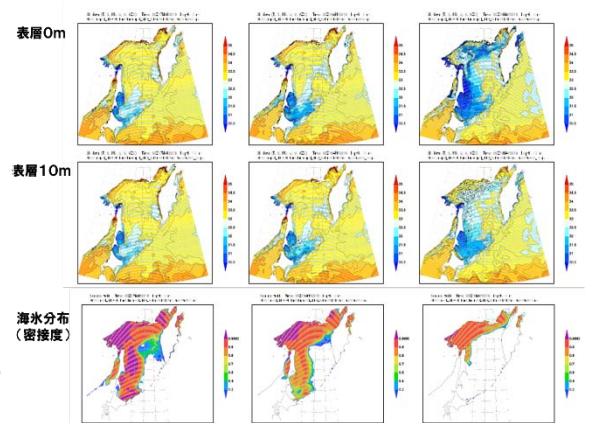


図8 オホーツク海の家氷融解と融解水の分布(モデルシミュレーション結果) 図2

本研究のまとめ

本研究によって「海氷が春季の植物プランクトンの大增殖を生み出す鉄分を運搬し、広く海洋に供給している」という仮説を、主にオホーツク海において実証することが出来た。これまでに一般に広く伝えられてきた「オホーツク海の流氷(海氷)は栄養物質を運び、豊かな生態系を支えている」という認識は、窒素、リンなどの主要栄養塩を考えた場合間違ったものであるが、微量栄養物質である鉄分を考慮して始めて科学的にも正しい認識であるといえることが本研究によって示された。また、他海域でも研究を展開したことで、海氷融解の影響は、海氷生成の起こる極域海洋だけでなく、海流などを通じて、隣接している亜寒帯海洋の生物生産にも影響を及ぼしている可能性を示唆する結果が得られた(図9)。

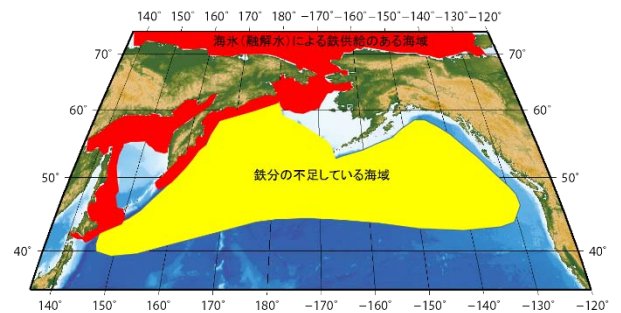


図9 海氷とその融解水による鉄供給の影響が見られる海域(赤)、と鉄不足海域(黄色)

4. 今後の展開

近年の衛星観測手法の発達によって、気候変動が原因で起こっている地球規模の環境の変化が明らかになりつつある。極域海洋においても、海氷の減少が大規模なスケールで起こっていることがこの20年以上の観測データより確認されており、今後の動向が注視されている。わが国の北方に面しているオホーツク海でも、シベリア

寒気の弱化による冬季の海氷生成量の減少が報告されている。現在、このような極域・亜極域の海氷の減少が、気候変動や水産資源にどのように影響してくるのかが危惧されており、科学的知見を基にその影響を予測することが緊急の課題となっている。今後は、本研究によって明らかになった海氷の関わる物質循環や海洋生物生産過程を、広く極域-亜寒帯域をつなぐ海洋研究に応用する事で、激変している極域環境変動が地球規模物質循環や水産資源に与える影響を炙り出していく。

5. 発表実績

○論文

Kanna, N., T. Toyota, J. Nishioka, Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea, *Progress in Oceanography*, 126, 44-57, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.012 (2014).

Lisa A Miller, Francois Fripiat, Brent GT Else, Jeff S Bowman, Kristina A Brown, R Eric Collins, Marcela Ewert, Agneta Fransson, Michel Gosselin, Delphine Lannuzel, Klaus M Meiners, Christine Michel, Jun Nishioka, Daiki Nomura, Stathys Papadimitriou, Lynn M Russell, Lise Lotte Sørensen, David N Thomas, Jean-Louis Tison, Maria A van Leeuwe, Martin Vancoppenolle, Eric W Wolff, Jiayun Zhou, Methods for biogeochemical studies of sea ice: The state of the art, caveats, and recommendations, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 1-53, DOI 10.12952/journal.elementa.000038.(2015).

Nishioka, J., T. Nakatsuka, K. Ono, Y.N. Volkov, A. Scherbinin, T. Shiraiwa, Quantitative evaluation of iron transport processes in the Sea of Okhotsk, *Progress in Oceanography*, 126, 180-193, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.011. (2014).

○学会発表

Jun Nishioka, Takeshi Nakatsuka, Asia Oceania Geoscience Society 2014 Annual Meeting, Sapporo, 1 August 2014
Quantitative evaluation of iron transport processes in the Sea of Okhotsk

Kanna Naoya, Takenobu Toyota, Jun Nishioka, Asia Oceania Geoscience Society 2014 Annual Meeting, Sapporo, 1 August 2014

Iron and Macro-nutrient Concentrations in Sea Ice and Their Impact on the Nutritional Status of Surface Waters in the Southern Okhotsk Sea.

Jun Nishioka, SOLAS-Open Science meeting, Cle Elum, USA May 6, 2012

Pivotal roles of sea ice on iron transport in the Sea of Okhtosk

漢那直也・西岡純・豊田威信・村山愛子・武居信行

オホーツク海の表層鉄濃度を高める海氷融解プロセス2015年度日本海洋学会春季大会、2015年3月29日、東京海洋大学

稲垣成一、漢那直也、村山愛子、西岡 純、冬季オホーツク海における鉄(II)の定量的評価、日本海洋学会春季大会、2013年3月24日、東京海洋大学

○学術講演

西岡純、極域海洋の物質循環と生物生産の研究における我が国の砕氷研究船の必要性、極地研シンポジウム、2013年10月