

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010 年度～2012 年度

課題番号：22310001

研究課題名（和文） 海氷の融解過程を含めた「環オホーツク海域」の鉄循環像の構築

研究課題名（英文） Pivotal roles of sea ice on biogeochemical iron cycles in the Pan-Okhotsk area

研究代表者

西岡 純 (NISHIOKA JUN)

北海道大学低温科学研究所・准教授

研究者番号：90371533

研究成果の概要（和文）：本研究では、冬季に砕氷船を用いた観測を実施し、得られたオホーツク海の海氷サンプルの化学分析を実施した。海氷中には高い濃度で大陸棚由来の鉄分が取り込まれており、オホーツク海の海氷が鉄など微量栄養物質を移送するのに大きな役割を果たしている事が示された。海氷が融解する際には、海洋表層の主要栄養塩は希釈されるが、鉄分は付加される傾向にある事が明らかとなった。本研究の結果から、海氷の広がり、極域・亜極域の栄養物質の循環に大きな影響を与え、春季の生物生産の質や量を変化させている事が示された。

研究成果の概要（英文）：Iron (Fe) data in the water column and in the sea ice which were collected during sea ice retreat season indicate that the ice melting processes supply substantial Fe to the surface of the water column. These results clearly indicate that the additional Fe input from melting sea ice could be biologically important. Variability in sea ice dynamics are likely to result in a varying supply of Fe to the southern part of the Sea of Okhotsk in early spring, and to contribute to changes in the timing of termination and community composition of the spring phytoplankton bloom, especially around the Kuril Islands.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2011 年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2012 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：海氷、鉄循環、環オホーツク、植物プランクトン

## 1. 研究開始当初の背景

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、海水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 (IPCC AR4)。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水生成量の減少が報告されている (Nakanowatari et al., 2007)。現在、このような極域・亜極域の海水の減少が、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。オホーツク海内部では、海水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。オホーツク海では、冬季の海水下で起こるアイスアレジの生産に加え、この春季以降の基礎生産が、豊かな海洋生態系を支える要因となっている (Sakurai, 2007)。一方で「オホーツク海の豊かな生態系は流氷 (海水) によって支えられている」との認識が一般に普及しているが、実のところ海水の生成や融解がこの海域の生態系にどのような影響を与えているかについては、科学的に十分な知見が集まっているとは言えない。確かに海水は冬季の氷下のアイスアレジに良好な光環境を与え、冬季オホーツク海の基礎生産を支える重要な役割を果たしていることは、サロマ湖などの観測等から推測される。一方で、春季の海水の融解は、低温・低塩分水・低栄養塩水を海洋表層に供給し、密度成層を発達させ、春季から夏季の植物プランクトンの増殖に (正・負の) 大きな影響を与える可能性がある。さらに海水は、冬季の間の大気降下物をオホーツク海表面にトラップし、または大陸棚浅海域や沿岸縁辺の底泥物質を巻き込むことで、植物プランクトン増殖のための必須微量栄養物質である鉄をオホーツク海の広範囲に移送し、海水融解後の春季の植物プランクトン生産に供給している可能性がある。この海水が融解した水塊は、親潮域にも影響を与えている。このように海水は、冬季のみならず春季から夏季にかけて、物理的・化学的な影響を与えることで基礎生産の増減に寄与していると考えられるが、これらを科学的に裏付けるデータは未だ存在しない。

## 2. 研究の目的

本研究では、親潮域からオホーツク海を含む「環オホーツク海域」をフィールドとして、海水の融解過程に着目した海洋内微量金属動態に関する研究を展開することを目的とした。海水の融解が表層にもたらす低温・低塩分水の化学的特徴 (鉄や栄養塩濃度など) と、密度成層の発達状態などを把握する。さらに、海水融解によって表層に付加される鉄分の化学形態や生物利用能を確認し、当該海域の植物プランクトン生産へ果たす海水融

解過程の役割を化学的な面から評価する。これらの結果を、これまでに明らかになっている「環オホーツク海域」の鉄循環の知見と融合することで、当海域全体の「海洋内の鉄循環像」を構築し、鉄や栄養塩の物質循環や植物プランクトン生産に対して、海水が与える影響を定量的に評価する。

## 3. 研究の方法

本研究は、特に海水によって移送される可能性が高く、植物プランクトン増殖へのインパクトの大きい微量栄養物質である「鉄分」に着目した研究を柱として展開した。海洋・海水の微量金属元素を研究するためには、海水中の金属濃度がピコモルからナノモルレベルであるため、サンプリングから分析にいたるまで「クリーン技術」と呼ばれる特殊なテクニックを必要とする。この「クリーン技術」を用いた化学的研究手法を海水-海洋研究に応用して次の観測研究およびフィールド実験を実施した。

「環オホーツク海域」である親潮域およびオホーツク海において、冬季から海水融解期の海洋観測を実施した。2010 年 5-6 月にロシア極東水文気象学研究所クロモフ号による西部オホーツク海の航海を行い、海水融解期の水塊構造と生物・化学パラメータの観測を実施した。また、2011 年、2012 年の冬季に、海上保安庁砕氷巡視船そうやを用いた観測航海を行い、海水内に取り込まれる化学物質を明らかにするための海水・積雪サンプルと、海水下の化学物質環境を把握するための海水サンプルを採取した。さらに、2011 年の春季から夏季にかけて、淡青丸 (JAMSTEC) による親潮域の観測、おしよる丸 (北大) およびロシア極東水文気象学研究所ゴルディエンコ号による南部オホーツク海観測を実施し、海水の融解で放出された鉄分などの微量栄養物質が植物プランクトン増殖に与える影響を明らかにするために培養実験を実施した。

## 4. 研究成果

海水内の微量栄養物質である鉄分の濃度は、海洋表層の濃度に比べて 1~2 オーダー高い値を示した (図 1)。本研究で測定した酸素同位体比と鉄濃度には明瞭な関係が見られなかったことから、鉄分は単純に大気ダストの積雪への沈着だけが供給源でないことが示唆された。一方で、海水内の鉄分とアルミニウムの濃度には良い相関が見られたことから、海水内に鉄分が取り込まれる過程は、大陸棚上の鉱物粒子など陸起源の粒子が何らかの形で取り込まれていたものと考えられた。これらの結果より、冬季にオホーツク海西部陸棚域で海水が生成される時に、大陸棚上の鉄分が海水に取り込まれ、海水内に

は高濃度の鉄分が蓄積し、冬季のオホーツク海で海水が広範囲へ移送される際に、鉄分も同時に広範囲に移送されることが明らかになった。この移送量を定量的に評価したところ、毎年冬に8,300~36,000トンもの鉄が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に移送され、南部オホーツク海は $664 \pm 197 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{winter}$ のフラックスで鉄の供給を受けていると見積もられた。この値から、南部オホーツク海では、西部北太平洋に年間で降り注ぐ鉄と同等のレベルの鉄量が、春先の短い期間で一度に供給されていると考えられた。

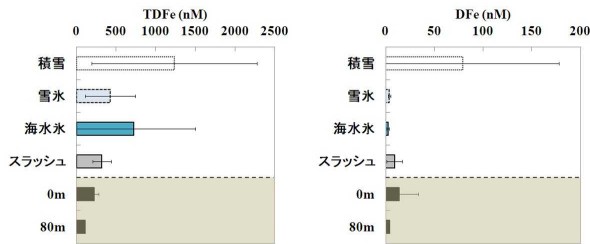


図1 海水および直下の海水の鉄濃度 (左：全鉄、右：溶存鉄)

さらに、春季の海氷融解期の観測の結果、冬季に広範囲に移送された海水の鉄分は、海氷融解期に海洋表層に放出され、海洋表層の鉄濃度が高められていることが確認された。一方で、主要な栄養塩(硝酸塩、リン酸塩とケイ酸塩)は、海氷内の濃度が表面海水の濃度よりも有意に低いことが分かった。これらの海氷内の主要栄養塩は、塩分との相関があることから、主に海氷生成時に脱塩効果で除去され海水の濃度が低濃度となり、その後海水がオホーツク南部まで移送される間に大きな付加が無かったと考えられた。これらの分析結果より、海洋表層の硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩濃度は、海氷の融解が起る事によって薄められると推測された。

海氷融解期の海洋観測結果を見ると、表層には海氷融解水の影響を強く受けた低塩分水が分布し、強い密度成層をつくっている事が確認された。この表層の低塩分水には、高い鉄濃度・低い栄養塩濃度の特徴がみられ、その直下には高い栄養塩が含まれている海水が存在していた。さらに観測では、植物プランクトンが、この表層の低塩分水と下層の海水の境界混合層で増殖をしている事が確認された。これらの観測結果より、海氷融解水は、その直下の海水と混ざり、融解水と海水の境界混合層で植物プランクトンの生息できる物理的に安定な水塊を表層直下に形成し、この境界混合層では、海氷融解水から付加される鉄分と海水の豊富な栄養塩を利用して植物プランクトンの増殖が起っていると考えられた。

南部オホーツク海クリル海盆表層の海水

サンプルを用いて、コントロール系列、鉄分添加系列、海氷添加系列の3系列を作成し培養実験を行った結果を図2に示す。培養後半において、鉄添加系列および海氷添加系列ではコントロール系列に比べて、培養ボトル内で大きな植物プランクトン増殖が見られ(図2)、より多くの栄養塩が消費された。このことから、実験後半では、コントロール系列のボトル内の海水には、栄養塩を使い尽くすだけの十分な鉄分が存在していなかったと考えられた。また、海氷の添加は不足している鉄分を補って植物プランクトンの増殖を促進させていることが示された。この培養実験の結果より、実際のクリル海盆表層でも、春季の植物プランクトンの増殖期後半には最初に鉄が不足する可能性があり、海氷による鉄の供給は植物プランクトンの増殖に大きな影響を与えると考えられた。

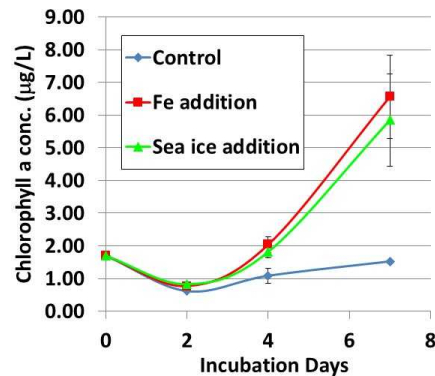


図2 海氷および鉄を添加した培養実験結果

オホーツク海では春季になると植物プランクトンの増殖が起る事が衛星や海洋観測などから確認されている。この植物プランクトンの増殖によって表層の主要な栄養塩は広い範囲で使い尽される。一方で、クリル海盆で実施した培養実験では、春季に起る植物プランクトンブルーム後半には鉄が不足すると考えられた。本研究の結果は、クリル海盆付近や融解の影響を強く受ける沿岸親潮海域では、海氷由来の鉄の供給の有無によって植物プランクトンの増殖量(ブルームの継続期間や規模)やブルームを構成する生物種組成などが変化する可能性がある事を示唆する。オホーツク海の海氷域が広がる範囲や規模には経年的に大きな違いがあり(Nakanowatari et al., 2010)、クリル海盆付近まで海氷が張り出すか否かによって、鉄の供給を介して、南部オホーツク海の春季の生物生産量や生物相に大きな違いをもたらしている可能性が示唆された。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① Sugie, K., J. Nishioka, K. Kuma, Y. N. Volkov, and T. Nakatsuka: Availability of particulate Fe to phytoplankton in the Sea of Okhotsk, Marine Chemistry, 査読有, 2013, doi: 0.1016/j.marchem.2013.04.006.
- ② Isada, T., Iida, T., Liu, H., Saitoh, S., Nishioka, J., Nakatsuka, T., and Suzuki, K., in press Influence of Amur River discharge on phytoplankton photophysiology in the Sea of Okhotsk during late summer, Journal of Geophysical Research-Ocean, 査読有, 2013, 118, doi:10.1002/jgrc.20159
- ③ Nishioka, J., Obata, H., Tsumune, D., Evidence of an extensive spread of hydrothermal dissolved iron in the Indian Ocean, Earth and Planetary Science Letters, 査読有, 2013, 361, 26-33, DOI: 10.1016/j.epsl.2012.11.040
- ④ Kondo, Y., Takeda, S., Nishioka, J., Sato, M., Saito, H., Suzuki, K., Furuya, K., Growth stimulation and inhibition of natural phytoplankton communities by model organic ligands in the western subarctic Pacific, JOURNAL OF OCEANOGRAPHY, 査読有, 2013, 69, 1 97-115 DOI: 10.1007/s10872-012-0160-6
- ⑤ Shigemitsu, M., Okunishi, T., Nishioka, J., Sumata, H., Hashioka, T., Aita, M.N., Smith, S. L., Yoshie, N., Okada, K., Yamanaka, Y., Development of a one-dimensional ecosystem model including the iron applied to the Oyashio region, western subarctic Pacific, Journal of Geophysical Research - Ocean, 査読有, 2012, 177, C06021, doi:10.1029/2011JC007689.
- ⑥ Misumi, K., Tsumune, D., Yoshida, Y., Uchimoto, K., Nakamura, T., Nishioka, J., Mitsudera H., Bryan, F., Lindsay, K., Moore, K., Doney, S. C., Mechanisms controlling dissolved iron distribution in the North Pacific: A model study, Journal of Geophysical Research - Biogeosciences, 査読有, 2011, doi:10.1029/2010JG001541
- ⑦ Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, K. Sakaoka, T. Yoshimura, The annual cycle of surface iron and the source of iron supporting the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic Pacific, Journal of Geophysical Research - Ocean, 査読有, 2011, 116, C02021, doi:10.1029/2010JC006321.
- ⑧ Yoshimura T, Nishioka J., Nakatsuka, T., Iron nutritional status of the phytoplankton assemble in the Okhotsk Sea during summer, Deep Sea Res. part I,

査読有, 2010 doi:  
10.1016/j.dsr.2010.08.003.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 漢那直也・豊田武信・村山愛子・西岡 純 海水融解が海洋表層の栄養環境と植物プランクトン増殖に与える影響、日本海洋学会春季大会、2013年3月24日、東京海洋大学
- ② 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 F E ( I I ) 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
- ③ 田中美菜子、漢那直也、村山愛子、西岡 純、オホーツク海南部・日本海北部の表層水中における鉄及び栄養塩の地理的分布、日本海洋学会春季大会、2013年3月24日、東京海洋大学
- ④ Kanna, N., Suzuki, K. Murayama, A., Nishioka, J., Bioavailability of sea ice-derived iron for phytoplankton growth, PICES annual meeting, Hiroshima, Japan, Oct.18, 2012, Hiroshima Univ.
- ⑤ Nishioka, J., Pivotal roles of sea ice on iron transport in the Sea of Okhotsk, SOLAS-Open Science Conference, Seattle, USA, May.7, 2012, Cle Elm conference center
- ⑥ 漢那直也・西岡 純・村山愛子・鈴木光次、オホーツク海氷に含まれる粒子態鉄の生物利用能、日本海洋学会春季大会、2012年3月27日、筑波大学
- ⑦ Kanna, N., Nishioka, J., Murayama, A., Toyota, T., Quantitative evaluation of iron and nutrients in sea ice in the southern Sea of Okhotsk, Ocean Science meeting, Salt-lake city, Feb.22, 2012, Salt-lake city Conference center
- ⑧ 西岡 純、的場澄人、村山愛子、小野数也、豊田威信、Y. Volkov、オホーツク海の海水融解過程が植物プランクトン増殖に与える影響-化学物質の付加の影響-、日本海洋学会秋季大会、2011年9月27日、九州大学
- ⑨ 漢那直也、西岡 純、村山愛子、豊田威信、オホーツク海氷中に含まれる主要栄養塩と鉄分、日本海洋学会秋季大会、2011年9月27日、九州大学
- ⑩ 西岡 純、西部北太平洋亜寒帯域の生物生産を支える鉄分の供給過程、日本地球惑星科学連合年大会、招待講演、2011年5月23日、幕張メッセ
- ⑪ 金浜幸治、西岡 純、村山愛子、渡辺 豊、安田一郎、アリューシャン列島海峡部における鉄供給過程と植物プランクトンの増殖応答、日本海洋学会春季大会、2011

- 年 3 月 23 日、東大海洋研究所
- ⑫ Nishioka, J., Ono, T., Saito, H., Sakaoka, K., Yoshimura, T., Matoba, S., Ocenic iron supply mechanisms supporting the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic Pacific, Dec. San Francisco, USA, Dec.14, 2010, Moscon center
- ⑬ 西岡 純、中塚 武、小埜恒夫、渡邊 豊、小野数也、久万健志、江淵直人、白岩孝行、北太平洋亜寒帯域への微量栄養物質供給に対するオホーツク海の役割、日本海洋学会秋季大会シンポジウム、2010 年 9 月 10 日、東京農業大学網走校
- ⑭ 南 秀樹、本間 歩、西岡 純、中塚 武、加藤義久、オホーツク海における懸濁粒子および堆積物の化学組成について、日本海洋学会秋季大会、2010 年 9 月 8 日、東京農業大学網走校
- ⑮ 重光雅仁、奥西武、西岡 純、須股 浩、橋岡豪人、相田真希、Smith, L. S., 吉江直樹、山中康裕、低次生態系モデルを用いた親潮域における海洋表層鉄循環の解析、日本海洋学会秋季大会、2010 年 9 月 8 日、東京農業大学網走校
- ⑯ 西岡 純、小埜恒夫、齊藤宏明、坂岡桂一郎、芳村 毅、Fe\*を用いた親潮域中層におけるオホーツク海からの鉄移送量の評価、日本海洋学会秋季大会、2010 年 9 月 8 日、東京農業大学網走校
- ⑰ 杉江恒二、西岡 純、久万健志、中塚 武、ブツル海峡周辺における珪藻の鉛直分布と増殖能、日本海洋学会秋季大会、2010 年 9 月 8 日、東京農業大学網走校

[図書] (計 2 件)

- ① 西岡 純、中塚 武、環オホーツク海域の物質循環と生物生産、2012、オホーツクの生態系とその保全、北海道大学出版会、19-25、2012
- ② 西岡 純、環オホーツク海域の豊かな生態系を生み出す鉄供給システム、環オホーツク海域の環境と経済、北海道大学出版、36-60、2012

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)  
なし

○取得状況 (計 0 件)  
なし

[その他]

ホームページ等  
<http://www.oc.lowtem.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西岡 純 (Nishioka Jun)  
北海道大学・低温科学研究所・准教授  
研究者番号：90371533

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし