

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26281002

研究課題名(和文)北太平洋HNLC海域形成過程の解明

研究課題名(英文)Formation of HNLC region in the subarctic Pacific

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：東カムチャツカ上流域および千島海峡部の栄養物質(鉄や栄養塩など)の観測を実施し、水塊の混合過程を踏まえて、西部北太平洋亜寒帯域の水塊の化学的特徴を決める要因を調べた。また西部北太平洋亜寒帯域の水塊の特徴とアラスカ湾で過去に得られたデータを比較した。その結果、西部亜寒帯域には、北方縁辺海の影響を受けて「鉄：硝酸塩比」の高い水塊が中層に存在しており、その水が表層に影響することで、植物プランクトン増殖や生物的二酸化炭素吸収量が高くなっていることが明らかになった。これらの結果は、数値モデルでも表現されており、西部亜寒帯域が鉄制限海域でありながら植物プランクトン増殖が大きい理由が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：To investigate iron (Fe) sources controlling the seasonal variation in biogeochemical parameters in the subarctic Pacific, where phytoplankton growth is broadly limited by Fe availability, we examined the spatial variation in the distribution of dissolved Fe in the whole subarctic Pacific. Our results indicated that Fe-rich intermediate water is transported laterally and distributed across the western subarctic gyre. Spatial pattern of Fe to nutrient ratio supplied from the intermediate water to surface in comparison with Fe and nutrient demand in surface phytoplankton, and the analysis of dissolved Fe and nutrient fractionation in upper 200 m shallow water, quantitatively explains the differences in surface macronutrient consumption between the western and eastern gyre as well as the formation of the high nutrient and low chlorophyll region in the whole subarctic Pacific.

研究分野：化学海洋学

キーワード：北太平洋 鉄 HNLC海域 植物プランクトン

## 1. 研究開始当初の背景

北太平洋亜寒帯域には、硝酸塩、リン酸塩、珪酸塩など主要な栄養塩が高い濃度で残存し、光の条件など十分であるにも関わらず、植物プランクトンの増殖は低いレベルに抑えられているHigh Nutrient Low Chlorophyll (HNLC; 高栄養塩低クロロフィル) 海域と呼ばれる海域が広がっている。この海域では鉄分の不足によって植物プランクトンの増殖が抑制されていることが明らかにされている (Tsuda et al., 2003; Nishioka et al., 2003; Boyd et al., 2004)。その為、北太平洋で植物プランクトンが増殖するメカニズムやそれに纏わる炭素・窒素を含めた物質循環を理解するためには、海洋における鉄の供給過程を理解する必要がある。これまでの我々の研究で、縁辺海であるオホーツク海の大陸棚から、海氷が駆動する海洋中層の循環によって鉄が北太平洋へ移送され、親潮域や西部北太平洋亜寒帯域の高い植物プランクトン増殖が支えられている事が指摘された (Nishioka et al., 2007; Nishioka et al., 2013)。これらの研究成果は、西部北太平洋の高い生物生産 (Sakurai, 2008) を生み出すメカニズムを理解するためには、従来行われていた大気ダストの研究に加えて、大陸棚を含めた海洋内の鉄の循環を明らかにしなければならないことを示し、その後、北太平洋の中層循環による鉄の移送過程を対象にした観測研究や数値モデルによるシミュレーションが行われるようになった (Nishioka et al., 2011; Misumi et al., 2011; Uchimoto et al., 2011; Shigemitsu et al., 2012)。

このように様々な鉄供給プロセスが見えてきた現在においても、北太平洋の鉄供給と植物プランクトン増殖および物質循環の関係や、HNLC海域の形成過程を定量的に説明するには至っていなかった。

## 2. 研究の目的

「なぜ北太平洋亜寒帯域は HNLC 海域になるのであろうか？」本研究はこの疑問に対して定量的な説明が可能な「鉄と栄養塩の供給プロセス」を提示する事を目的として実施した。そのためには、北太平洋に流れ込む「オホーツク海水」と「東カムチャツカ海流水」の化学的性質、千島海峡におけるこの2つの水塊の化学的性質の混合を把握し、西部北太平洋亜寒帯域の水塊の化学的性質の形成過程を把握する事が重要となる。また、アラスカ湾の栄養物質濃度のデータアーカイブを作成し、中層から表層への鉄と栄養塩の供給量に着目して西部亜寒帯域と東部亜寒帯域アラスカ湾で見られる水塊の化学的性質を比較した。さらに、得られたデータ解析と数値モデルを用いて、北太平洋亜寒帯域の HNLC 海域の形成プロセスを定量的に把握することを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究は、研究船による現場観測と試料分析、船上および室内培養実験、カナダ海洋科学研究所とのデータアーカイブ作成、データ解析、数値モデル研究から成る。鍵となる東カムチャツカ半島東岸および千島海峡付近のロシア領海内の海洋観測は、ロシア極東海洋気象学研究所所属研究船「マルタノフスキー号」を利用し2014年5月-6月に実施した。これらの観測で、鉄・栄養塩などの生元素濃度分布を存在状態別に明らかにすることを試みた。また、植物プランクトンの鉄・栄養塩取り込み量を把握するための培養実験を行った。さらに他航海で得られた西部北太平洋亜寒帯域のデータと統合することで、海峡部で起こる混合過程の役割を評価した。また、カナダ海洋科学研究所と共同で東部北太平洋アラスカ湾の既存の鉄データアーカイブを作成した。得られた知見を、別途開発中の鉄物質循環モデルも用いて、北太平洋亜寒帯域の東西の物質循環システムの違いを定量的に評価

し HNLC 海域の生成過程を抽出した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 千島海峡部にある水塊の化学的特徴

これまでに、千島海峡付近には、オホーツク海北西部陸棚域から海氷の駆動する中層循環によって大陸棚由来の鉄が移送されていることが確認されていた (Nishioka et al., 2013)。本研究により千島海峡部の溶存鉄濃度鉛直分布の変動を調べた結果、その時間的変動は大きい事が明らかになった。海峡表層では、観測のタイミングによって表層の溶存鉄濃度は最大で 2 nM 程度～枯渇している場合が見受けられた。また中層の溶存鉄濃度は 2nM～最大 5 nM まで変動しており、潮汐混合の起こっているタイミングによって得られる濃度に違いがあると考えられた (Nishioka et al., 2014)。この海峡部を通過してくる  $26.6 \sigma_\theta$  から  $27.5 \sigma_\theta$  の中層の水塊には、鉄が栄養塩に対して約  $0.05\text{-}0.1 \text{ nM Fe}/\mu\text{M N}$  で存在する水塊が見られ、周囲の等密度面の値よりも大きな「鉄：硝酸塩比 (以下 Fe:N 比)」を持つ水塊が存在することが示された。つまり、この高い Fe:N 比を持つ水塊は東カムチャツカ海流域での等密度面上には存在しておらず、千島海峡の混合を通じて、オホーツク海から流出された水塊が混じり合う事で形成されていることが明らかとなった (一部、Nishioka et al., 2014; Uchimoto et al., 2014)。

##### (2) 西部亜寒帯域とアラスカ湾データとの比較

過去の研究で (Nishioka et al., 2013) で報告されている通り、北太平洋亜寒帯域で行われた過去の時系列観測による栄養塩濃度の季節変動をみると、春季から夏季にかけての硝酸塩の減少量は、東部北太平洋アラスカ湾の約  $7 \mu\text{M}$  (Whitney et al., 1999, Whitney 2011) に比べて、親潮域では倍以上の約  $20 \mu\text{M}$ 、西部北太平洋亜寒帯域はほぼ

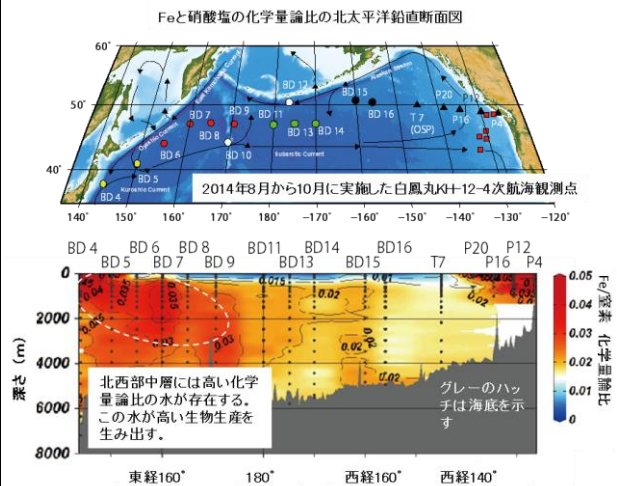


図1 上パネル：北部北太平洋の観測点、下パネル溶存鉄濃度と硝酸塩の化学量論比

倍の約  $15 \mu\text{M}$  と報告されている (Tsurushima et al., 2002; Whitney 2011; Yasunaka et al., 2014)。実際に植物プランクトンの硝酸塩の利用量や生物的  $\text{CO}_2$  吸収活動も西部で高い事が観測されている (Takahashi et al., 2002; Yasunaka et al., 2014)。植物プランクトンが硝酸塩を利用するためには、体内で硝酸を還元するために鉄が必須となる。親潮域や西部北太平洋亜寒帯域で、東部海域の 2 倍以上の高い硝酸塩の消費が起こるためには、東部北太平洋アラスカ湾のおよそ 2 倍以上の鉄分が供給されている必要がある。ただし、このとき供給される鉄量が過剰である場合は、硝酸塩の消費量がさらに多くなってしまい、西部北太平洋亜寒帯域の主要栄養塩が枯渇してしまい HNLC 海域が出現しない事になる。つまり、栄養塩が残存している西部北太平洋亜寒帯域を説明するには、東部北太平洋アラスカ湾の約 2 倍の硝酸塩を消費するが、枯渇はさせない程度で鉄が供給されている必要がある (以下 moderate Fe supply)。これまで報告されている複数の鉄の供給プロセスは、この moderate Fe supply を定量的に説明するには至っておらず、北太平洋亜寒帯域になぜ HNLC 海域が出現するのかは理解されていない。

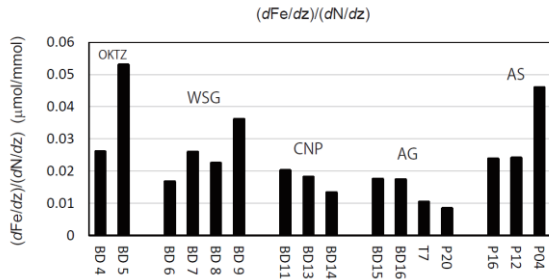


図2 中層から表層に供給される鉄フラックスと硝酸塩フラックスの化学量論比,OKTZ:親潮黒潮混合域,WSG:西部北太平洋亜寒帯域,CNP:亜寒帯中層太平洋,AG:アラスカ湾,AS:アラスカ海流

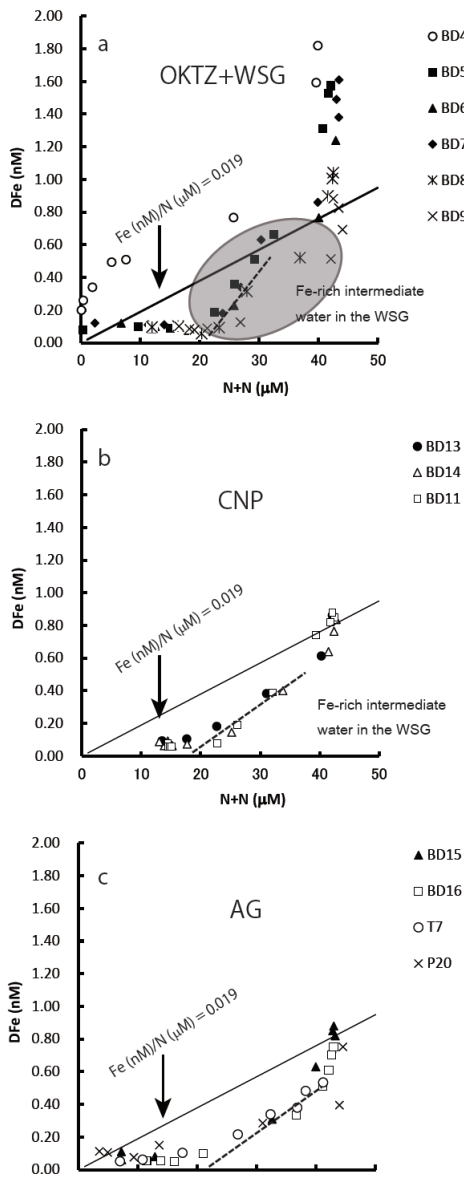


図3 植物プランクトンの要求する Fe:N 比 (実線ライン) と北太平洋亜寒帯中層に存在する水塊の Fe:N 比 (破線) の関係

本研究では,過去にアラスカ湾で得られた溶存鉄濃度と栄養塩濃度の観測結果を整理し,オホーツク海など北方縁辺海の影響のおよぶ西部海域と Fe:N 比を比較した(図1)。その結果,西部海域の表面混合層直下から約 3000m までの中層水で高い溶存鉄濃度を示し,北方の縁辺海を起源とする鉄に富む中層水が 2000 キロ以上の広範囲に分布している事が明らかになった(図1)。中層から表層に供給される鉄と硝酸塩のフラックスの比も,アラスカ湾に比べて約 2 倍大きく(図2),表層の栄養塩消費量が 2 倍大きくなる事を説明できることが明らかとなった。

また,中層から表層に供給される Fe:N 比と,表層に生息する植物プランクトンの要求する Fe:N 比を比較すると,表層の植物プランクトンは鉄制限となることが明らかとなった(図3)。これらの結果は,西部北太平洋亜寒帯域では栄養塩消費量や生物的 CO<sub>2</sub> 吸収量が多いが,北太平洋亜寒帯域全域が HNLC になる事を定量的に示している。

### (3) 鉄循環を組み込んだ高解像度モデルの開発

本研究で得られた北方縁辺海の鉄供給の影響を表現できる海洋物質循環モデルを構築した。モデルでは鉄循環とともに栄養塩であるリンの循環が表現され,観測で得られた知見とデータを基に西部北太平洋亜寒帯域が HNLC になることを定量的に説明できるものとなっている。このモデルを使って HNLC の形成過程を評価した結果,北太平洋亜寒帯域表層への鉄供給は,これまで言われていた大気ダストでは説明ができず,北方縁辺海を含めた海洋循環による鉄供給が重要であることが示された。

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 9 件)

1. Nishioka, J. and H. Obata, Dissolved iron distribution in the western and central subarctic Pacific - HNLC water formation and biogeochemical processes -, *Limnology and Oceanography*, 査読有, doi:10.1002/lno.10548 (2017) .
  2. Tanaka, T., I. Yasuda, K. Kuma, J. Nishioka, Evaluation of the biogeochemical impact of iron-rich shelf water to the Green Belt in the southeastern Bering Sea, *Continental Shelf Research*, 査読有, doi.org/10.1016/j.csr.2016.11.008, (2016).
  3. Inoue, M., Y. Shirotani, S. Nagao, H. Kofuji, Y.N. Volkov, J. Nishioka, Migration of the FDNPP-derived <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs along with <sup>226</sup>Ra and <sup>228</sup>Ra concentrations across the northwestern North Pacific Ocean, 査読有, *Journal of Environmental Radioactivity* 162, 33-38, (2016).
  4. 西岡純, 三寺史夫, 白岩孝行, 関幸, 中村知裕, 的場澄人, 江淵直人, 日本周辺に存在する「陸海結合システム」の理解に向けて, *低温科学* 74, 査読無, 2016, 175-180, doi: 10.14943/lowtemsci.74.175.
  5. 漢那直也, 西岡純, 豊田威信, オホーツク海における海水が関わる鉄供給過程の解明, *低温科学* 74, 査読無し, 2016, 105-144, doi: 10.14943/lowtemsci. 74. 105.
  6. 内本圭亮, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫, 三角和弘, 津旨大輔, 若土正暁, オホーツク海高密度陸棚水への鉄のポテンシャル供給域, *低温科学* 74, 査読無し, 2016, 95-104, doi: 10.14943/lowtemsci. 74. 95.
7. 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*, 査読有, 126, 180-193, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.011. (2014).
  8. Nishioka, J., H. Mitsudera, I. Yasuda, H. Liu, T. Nakatsuka, Y.N. Volkov, Biogeochemical and physical processes in the Sea of Okhotsk and the linkage to the Pacific Ocean; Preface, *Progress in Oceanography*, 査読有, 126, 1-7, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.027.(2014).
  9. Uchimoto, K., T. Nakamura, J. Nishioka, H. Mitsudera, K. Misumi, D. Tsumune, M. Wakatsuchi, Simulation of high concentration of iron in dense shelf water in the Okhotsk Sea, *Progress in Oceanography*, 査読有, 126, 194-210, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.018 (2014).

[学会発表] (計 8 件)

1. 西岡純・安田一郎, クリル海峡における混合過程が西部北太平洋亜寒帯域の物質循環に与える影響, セッション「海洋混合学」物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明, 2016JpGU 地球惑星連合大会, 2016.5.22, 幕張メッセ (千葉県、千葉市)
2. Nishioka, J., I. Yasuda, Y. N. Volkov, A. Scherbinin, Biogeochemical processes in the Sea of Okhotsk and the linkages

- to the Pacific Ocean, The 8 th science workshop program of the East Asian Cooperative Experiments (PEACE) WS, 2016.8.1-3, POI FEBRAS, Vladivostok (Russia)
3. Nishioka, J., N. Takesue, A role of sea ice melt water on iron supply to surface water in the Chukchi Sea, the Arctic Ocean, Goldshmid conference 2015, 21 August 2015, Prague Congress Centre, Prague (Czech republic)
  4. Kanna, N., J. Nishioka, T. Toyota, Iron Enrichment by sea ice melting in the surface water in the Okhotsk Sea, Goldshmid conference 2015, 21 August 2015, Prague Congress Centre, Prague (Czech republic)
  5. Nishioka, J., Biogeochemical system in the pan-Okhotsk area, ILTS International Symposium on Low Temperature Science, 2. Dec. 2015., Hokkaido University (北海道・札幌市)
  6. Nishioka, J., H. Obata, West-to-east Dissolved Iron Distribution in the Subarctic Pacific, Asia Oceania Geoscience Society 2014 Annual Meeting, 29 July 2014, Sapporo (北海道・札幌市)
  7. H. Obata, J. Nishioka, T. Kim, K. Norisuye, S. Takeda, Y. Wakuta, T. Gamo, Clean Seawater Sampling for Trace Metals During Japanese GEOTRACES Cruises, Asia Oceania Geoscience Society 2014 Annual Meeting, 29 July 2014, Sapporo (北海道・札幌市)
  8. Nishioka, J., T. Nakatsuka, Quantitative evaluation of iron transport processes in the Sea of Okhotsk, Asia Oceania Geoscience Society 2014 Annual

Meeting, 1 August 2014, Sapporo (北海道・札幌市)

[図書] (計 2 件)

1. 西岡 純, 低温の科学辞典, 朝倉書店, 総ページ数 411, 2016
2. 西岡 純・三寺史夫, 低温科学便覧, 総ページ 383, 2015

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://wwwoc.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

三寺 史夫 (MITSUDERA Humio)

北海道大学・低温科学研究所・教授  
研究者番号：20360943

(3) 連携研究者

安田 一郎 (YASUDA Ichro)

東京大学・大気海洋研究所・教授  
研究者番号：80270792