



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	環オホーツクにおける鉄を中心とした物質循環研究
Author(s)	西岡, 純; Nishioka, Jun; 三寺, 史夫 他
Citation	低温科学, 82, 69-82
Issue Date	2024-03-29
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.82.69
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91810
Type	departmental bulletin paper
File Information	06_p069-082_LT82.pdf



環オホーツクにおける鉄を中心とした物質循環研究

西岡 純¹⁾, 三寺 史夫¹⁾, 大島 慶一郎^{1), 2)}, 江淵 直人^{1), 2)}, 白岩 孝行¹⁾,
中村 知裕¹⁾, 的場 澄人¹⁾, 中塚 武⁴⁾, 安田 一郎⁵⁾, 村山 愛子¹⁾,
小野 数也²⁾, 篠原 琴乃¹⁾, 若土 正暁³⁾

2023 年 11 月 24 日受付, 2023 年 12 月 14 日受理

環オホーツク観測研究センターでは、発足後の20年間に、北太平洋およびオホーツク海やベーリング海を含む環オホーツク海域を対象とした海洋循環・物質循環の研究を精力的に進めてきた。この海域を理解するにはデータの空白域であるロシアの排他的経済水域の観測が不可欠であり、同センターではロシア極東海洋気象学研究所との共同研究を積極的に推進してきた。結果、この海域の海洋循環・物質循環の知見は飛躍的に進み、北太平洋亜寒帯域における微量元素である鉄(Fe)を中心とした栄養物質供給プロセスと生物生産を生み出す仕組みについて鍵となる知見を明らかにしてきた。本稿では、環オホーツク観測研究センター発足後の20年間で進められてきた環オホーツク海域における海洋循環・物質循環研究を概観する。

Study on the biogeochemical cycles in the Pan-Okhotsk region

Jun Nishioka¹, Humio Mitsudera¹, Kay I. Ohshima^{1, 2}, Naoto Ebuchi^{1, 2}, Takayuki Shiraiwa¹,
Tomohiro Nakamura¹, Sumito Matoba¹, Takeshi Nakatsuka⁴, Ichiro Yasuda⁵, Aiko Murayama¹,
Kazuya Ono², Kotonno Shinohara¹, Masaaki Wakatsuchi³

Over the past 20 years, the Pan-Okhotsk Research Center has actively studied ocean circulation and material circulation in the North Pacific and its marginal seas, including the Sea of Okhotsk and the Bering Sea. Observation of the Russian EEZ area was essential to understanding this area, the Pan-Okhotsk Research Center had actively promoted joint research expeditions with the Far Eastern Hydrometeorological Research Institute, Russia. During this period, our knowledge of ocean circulation and biogeochemistry in the Pan-Okhotsk region has advanced dramatically, and we have clarified key findings regarding nutrient and iron supply processes that fuel biological production in the North Pacific. This paper provides an overview of the study which conducted over the past 20 years.

キーワード：環オホーツク海域, 生物地球化学的循環, 鉄(Fe), 植物プランクトン

Pan-Okhotsk region, Biogeochemical cycle, Iron, Phytoplankton

連絡先

西岡 純

北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター

〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

Tel: 011-706-7655

Email: nishioka@lowtem.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター

Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature
Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

2) 北海道大学 低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,
Sapporo, Japan

3) 北海道大学

Hokkaido University, Sapporo, Japan

4) 名古屋大学 大学院環境学研究科

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,
Nagoya, Japan

5) 東京大学 大気海洋研究所

Atmospheric and Ocean Research Institute, The University of
Tokyo, Kashiwa, Japan

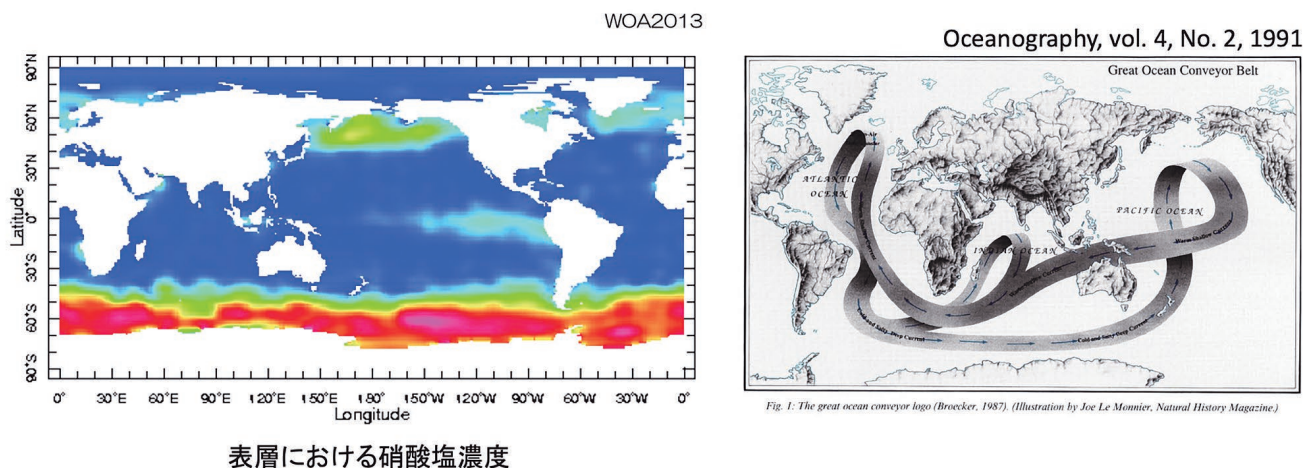


図1：北太平洋亜寒帯域表層の硝酸塩の分布（左）とBroeckerの提唱した海洋コンベアベルトの概念図（右）（Broecker et al., Oceanography, vol.4, No.2, 1991）

Figure 1: Distribution of surface nitrate concentration in the Ocean (Left), A schematic draw of the Global Ocean Conveyor Belt (Right)(Broecker et al., Oceanography, vol.4, No.2, 1991)

1. はじめに

「何故，日本の隣接する北太平洋やその縁辺海（オホーツク海・ベーリング海）では豊かな生態系が生み出されるのであろうか？」。環オホーツク観測研究センターでは，発足後20年間にわたりこの課題を明らかにすることに挑戦してきた。親潮域を含む北太平洋亜寒帯の西部海域は，北太平洋の外洋域で最も大きな植物プランクトン増殖を生み出す。また，この海域は，植物プランクトン活動による大気から海洋へのCO₂の吸収－放出量の変動が最も大きな海域であり，気候変動と密接に関わる（Takahashi et al., 2002）。しかし，何故この海域の植物プランクトン活動が高く維持されているのかについては，十分に理解されていなかった。本原稿を執筆している2023年から振り返ると，センター発足当時（2004年）の環オホーツク海域の物質循環研究に関する重要な課題として，下記の2つが考えられていた。

1) なぜ北太平洋亜寒帯域の表層にHNLC海域が存在するのか？

北太平洋亜寒帯域は，地球規模の海洋コンベアベルトの終焉部（深層水の出口）に位置しており，表層には高濃度で主要な栄養塩（硝酸塩，リン酸塩，ケイ酸塩）を含む High Nutrient Low Chlorophyll (HNLC：高栄養塩低クロロフィル) 海域が存在する（図1）。また深層水には古い栄養塩類が蓄積している（Broecker et al., 1982; Matsumoto, 2007; Matsumoto and Kay, 2004）。これまで北太平洋亜寒

帯域は漠然と「海洋コンベアベルトの出口で，栄養塩が豊富な深層水が表面にまで運ばれている海域」と認識されてきた。しかし一般的に密度成層の強い海洋において，水が上下に入れ替わる（混ざる）ことは難しく，深層の栄養塩が表層に回帰する仕組みは理解されていなかった。日本周辺の北太平洋の生物生産を生み出す仕組みを理解するためには，海洋コンベアベルト終焉部で起こっている栄養塩の循環を解明する必要がある。

2) 北太平洋亜寒帯域の植物プランクトン増殖を制御しているFe供給プロセスは何か？

2000年代前半には，表層のHNLC海域の植物プランクトン増殖は微量栄養物質である鉄（Fe）の不足で制限されていることが明らかになりつつあった。環オホーツク海域の高い生物生産（植物プランクトン量）を生み出す仕組みを理解するためには，微量栄養物質であるFeがどこからどのようなプロセスを経て供給されているのかを定量的に把握する必要がある。しかし，自然界でのFeの供給過程については，極めて汚染しやすい元素であるFeの観測の難しさから，広く未解明であった。Feの供給過程の中でも，大気中ダストによるFe供給は，海洋内部のFe循環の研究に先立って1970年代後半からよく研究されており（例えば，SEREXプロジェクト（Duce, 1989）），かつては多くの海域において大気ダストが唯一のFeの支配的な供給源であると考えられていた（例えば，Duce and Tindale, 1991; Jickells et al., 2005）。その後の海洋内のFeの分布の研究の進展によって，大気中のFe沈着に加え

て、河川流出、陸棚堆積物からの再懸濁、海底熱水、海水融解など、他の外部Fe源の多くが発見され、その重要性が強調された（例えば、Johnson et al., 1999; Elrod et al., 2004; Boyd and Ellwood, 2010; Conway and Seth, 2014; Tagliabue et al., 2014, 2017; Resing et al., 2015; Lam et al., 2006; Nishioka et al., 2007; Lam and Bishop, 2008; Lannuzel et al., 2007; Kanna et al., 2014）。

一方で、2000年代前半にはオホーツク海を含めた北太平洋をとりまく海洋物理的研究が大きく進展し（後述）、北太平洋の海洋循環と水塊形成に、オホーツク海やベーリング海など北方圏縁辺海が大きな影響を与えていることが明確になっていた。そのため、北太平洋亜寒帯域におけるFe供給プロセスを含めた物質循環を明らかにするためには、北太平洋とオホーツク海・ベーリング海とのリンケージを含めて研究する必要性があることが認識されつつあった。

2. 北太平洋におけるFeの研究の進展

北太平洋亜寒帯と北大西洋亜寒帯を比較すると低次栄養段階での一次生産過程の季節循環に大きな違いがあることが1980年代からよく知られていた。Parsons and Lalli (1988) は、北大西洋には、春に明確な植物プランクトンの大増殖（ブルーム）があり、北大西洋の一次生産と植物プランクトン増殖の季節的なサイクルは、春の混合深度（光の利用可能性）と夏の終わりの硝酸塩の枯渇によって制限されると指摘した。対照的に、北太平洋の亜寒帯域における一次生産と植物プランクトン増殖の季節的なサイクルは、春と夏の低温とマクロ・マイクロ動物プランクトンの捕食、そしておそらく（当時）未同定の栄養物質によって制限されると考えられていた（Parsons and Lalli, 1988）。北太平洋亜寒帯域では、南大洋や東部赤道太平洋と同様に、表層水中の主要栄養塩（硝酸塩とリン酸塩）濃度から予想されるよりも、低次栄養段階でのバイオマスがはるかに低いことが知られていた。海洋学者たちはこれらの主要栄養塩が残存する海域を「HNLC海域」と呼んだ。当時、この予想外の結果は海洋学の主要な論点の1つとなり、海洋学者たちは、なぜ年間を通じて海洋に主要栄養塩が残存する領域が出現するのかを議論した。その後この30年間で、世界の海洋でHNLC海域が形成される理由を理解するための研究が活発に行われ、その鍵は「海洋における微量栄養素としてのFeの役割」を理解することであった（Martin et al., 1991）。

1980年代、モスランディング海洋研究所所長のJohn H.

Martin博士らのグループは、汚染を防ぐための厳密なクリーンサンプリング法を用いてHNLC海域の海水中の溶存Fe濃度を初めて正確に測定し、北太平洋東部亜寒帯（アラスカ湾）の溶存Feは栄養塩と同様の鉛直分布を持ち、表層濃度は植物プランクトンの成長を制限するほど低いと報告した（Gordon et al., 1982; Martin et al., 1989）。Martinらは、Feは低次栄養段階での生物生産を制限するもう一つの栄養素であり、南極大陸周辺の南大洋、東部赤道太平洋域、北太平洋亜寒帯域などHNLC海域における表層植物プランクトンの成長は、Feの利用能の低さによって制限されると主張し、Paleoceanography誌に「Fe仮説」として発表した（Martin, 1990）。この「Fe仮説」には、「自然界における海洋へのFe供給は、氷期-間氷期サイクルを含めた気候を制御している」という内容も含まれていた。その前後、Martinらのグループは、「Fe仮説」を検証するためにクリーンな技術を用いて極低濃度のFeを制御した船上ボトル培養実験を行い、これらの実験結果から、HNLC表層水にFeを添加すると植物プランクトンが著しく増殖することを実証した（Martin and Fitzwater, 1988; Martin et al., 1989, 1990）。その後、海洋学者たちは「何がHNLC海域の植物プランクトン生産を制御しているのか？」という議論を加速させた（Chisholm and Morel, 1991）。この議論の中で、「Martinらの実施したボトル培養実験では、生態系に対するFeの役割を明確に判断する証拠としては十分ではなく、実際の海洋環境におけるプランクトン生態系におけるFeの役割を理解するためには、Fe供給に対するプランクトン生態系群集全体の反応を明らかにする必要がある」という主張があった。この問題に取り組むため、「中規模Fe施肥実験（Iron Fertilization Experiment (IFE)）」が実施された。このIFEは、1993年から2009年までに、世界中のHNLC海域で13回以上実施されている（Boyd et al., 2007）。これらの実験のほとんどは、すべてのHNLC海域で、Feが植物プランクトンの成長と低次栄養段階での生態系に強く影響することを示した（de Baar et al., 2005; Boyd et al., 2007）。北太平洋亜寒帯域でも、3つのIFE（SEEDS, SEEDS II, SERIES）（Tsuda et al., 2003; Boyd et al., 2004; Tsuda et al., 2007）が実施され、これらの実験結果から、北太平洋の西部と東部の亜寒帯域の両方で、植物プランクトンのバイオマスが広くFeの利用可能性によって制限されていることが明らかになった（Tsuda et al., 2003; Nishioka et al., 2003; Boyd et al., 2004; Tsuda et al., 2007）。これらの過程を経て、現代の海洋学では、Feが植物プランクトンの成長と海洋生物地球化学の制御に重要な役割を果たす必須栄養素であることが教

科書にも取り扱われる常識となっている。それ以来、多くの海洋学者が、天然の海洋におけるFeの生物地球化学的循環を調べることに力を注ぐことになる。2006年には、国際的なGEOTRACESプログラム（GEOTRACES Planning Group, 2006）が開始され、本原稿を執筆している2023年現在においても、海洋地球化学者たちによって世界中でFeを含む微量金属元素とその同位体の全球分布を明らかにするためのプロジェクトが進行中である（Nishioka and Obata, 2017）。

3. 環オホーツク海域における物質循環研究の進展

3.1 縁辺海と北太平洋を繋ぐ海洋循環研究から物質循環研究へ

環オホーツク海域の物質循環を理解するためには、このエリアの海洋循環の理解が欠かせない。環オホーツク観測研究センターの物質循環研究がこの20年で大きく進展した一番の大きな理由には、それ以前のプロジェクトにおいて、環オホーツク海域の海洋物理学的な研究が精力的に行われ、それまで未解明であったオホーツク海と北太平洋を繋ぐ海洋循環が明らかになっていったことが挙げられる。

環オホーツク観測研究センターの物質循環研究が行われるに至るまでの海洋循環研究を以下に概観する。詳しくは本低温科学82の大島（2024）に記載されている。また、一部は西岡・三寺（2012）でも取りまとめられている。1997年から2002年の間、北海道大学低温科学研究所（以下、北大低温研）が中心となって戦略的基礎研究（CREST）「オホーツク海水の実態と気候システムにおける役割の解明」（研究代表者：若土正暁 北大低温研 教授）が、ロシア極東海洋気象学研究所（Far Eastern Hydrometeorological Research Institute：以下FERHRI）（ロシア）、University of Washington（米国）、Scripps Institute of Oceanography（米国）との国際共同プロジェクトとして実施された（Wakatsuchi, 2006; Ohshima and Martin, 2004）。オホーツク海と北太平洋のシステムの理解には、ロシアの排他的経済水域を含むオホーツク海全体の研究が欠かせないものであった。それまで政治的な背景が理由で実現が難しかったオホーツク海の観測航海であったが、このCRESTプロジェクトでは、北大低温研とFERHRIとの間で共同研究が立ち上げられ、ロシア側の研究調査船を使用した観測体制が構築され、これまでほとんど実施できなかったオホーツク海内部で、合計4回の集中観測

が行われた。またCRESTプロジェクトでは、表層ドリフター、プロファイリングフロート、係留系観測を駆使して、オホーツク海西部の表層から中層にかけた流れが観測され、それまで未知であった東サハリン海流の構造や流量の季節変動（Ohshima et al., 2002; Mizuta et al., 2003）などが明らかにされた。さらに、北太平洋中層水（North Pacific Intermediate Water（NPIW））の起源水に関しては、アムール川河口が位置するオホーツク海北西陸棚域で、海水の生成に伴って多量の低温・高塩・高密度分水（ブライン）が陸棚に排出され（Shcherbina et al., 2003）、高密度陸棚水（DSW）が形成されるメカニズムを観測から捉えることに成功している。また、この水がサハリン東岸沖の中層等密度面を南下し、オホーツク海南部、さらには北太平洋の中層（400-800 m）へと広がっていく環オホーツク海域の「中層循環」を定量的に把握することに成功している（Itoh et al., 2003; Fukamachi et al., 2004）。このようにCRESTプロジェクトによって「オホーツク海と北太平洋を繋ぐ海洋循環」の実態が続々と明らかにされた。

このCRESTプロジェクトでは、環オホーツク海域の海洋循環に対する海峡部の重要な働きの実態も明らかにしている。特に、千島海峡の中でも一番深いブッソル海峡において集中観測がなされ、オホーツク海と北太平洋の間の海水交換量が定量的に捉えられた（Katsumata et al., 2004; Katsumata and Yasuda, 2010）。その後、千島列島沿いの主な海峡における乱流混合の直接観測が繰り返し実施され（安田ら, 2008）、海峡部で起っている乱流混合の強度の時空間的分布を明らかにするためのデータが蓄積されている（Ito et al., 2010, 2011; Yagi and Yasuda, 2012; Yagi et al., 2014）。さらには乱流混合がオホーツク海と北太平洋の水を混合して、水塊を変質させている様子も捉えられている（Ono et al., 2007）。これらのオホーツク海と千島海峡で得られた知見は、北太平洋側で実施されてきた観測やモデル研究の結果と結び付けられ、北太平洋の海洋循環に果たすオホーツク海の役割に関する理解が飛躍的に進展した。

CREST研究のプロジェクトの成果には、一部オホーツク海の物質循環に関する知見も含まれる。DSWとその影響を受けて形成されるNPIWには、オホーツク海北西部で大陸棚上の粒子態有機炭素や溶存有機炭素が取り込まれ、オホーツク海から広域の北太平洋へ物質が輸送されていることが明らかになっていた（Hansel et al., 2002; Nakatsuka et al., 2002, 2004など）。また、海水生成時に溶け込んだCO₂やフロンなどのガス成分もDSWによって千島海峡まで中層を移送され、海峡部の混合で大気とも

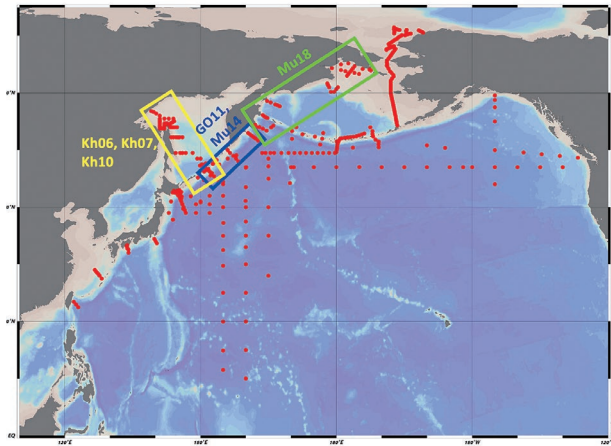


図2：環オホーツク観測研究センター発足後に実施したFe関連の物質循環研究航海の観測点図、色のついた四角内の測点はロシア船を用いた観測点

Figure 2: Location of observed site for biogeochemical parameter, including Fe, after Pan-Okhotsk Research Center launched. Color square indicate observed site which conducted by collaborative studies between Japan and Russia.

う一度交換を受けて、北太平洋の分布に影響を与えていることも把握されている (Wakita et al., 2003; Yamamoto-Kawai et al., 2004)。

2004年の環オホーツク観測研究センター発足直後には、CRESTプロジェクトで得られた環オホーツク海域の海洋循環の知見をベースにし、物質循環の研究を主軸として研究が展開された。2004年からの5年間は、「アムール川の流入や、オホーツク海の海洋循環が、栄養物質としてのFeを北太平洋に運び、親潮域や西部北太平洋亜寒帯域の生物生産を支えているのではないか？」という仮説を検証する事を目的とした「アムール・オホーツクプロジェクト」(研究代表者：白岩孝行：北大低温研，総合地球環境学研究所) が立ち上がり実施された。このプロジェクトでもCRESTプロジェクトで培ったロシアとの関係を継続し、2006年と2007年に、ロシア船を用いた北西部大陸棚から東サハリン海流、ブッソル海峡、北太平洋亜寒帯域につながる中層循環に沿った集中観測が実施され、生物地球化学的プロセスの理解を主目的とした生物・化学系のパラメータの観測が行われた。

CREST (1996-2001)，アムール・オホーツクプロジェクト (2004-2009) に引き続き、環オホーツク観測研究センターでは、FERHRIの所長であるロシアのY. N. Volkov博士と継続して共同研究を行い、オホーツク海、東カムチャツカ海流周辺、ベーリング海西部でロシア船を用いた共同観測調査を実施した。これまでに実施してきた全ての

表1：北太平洋および縁辺海における鉄 (Fe) 濃度の観測を実施した航海のリスト (2018年まで)

Table 1: A list of cruises for iron measurement in the North Pacific and its marginal seas

Year	Month	Ship	Cruise ID	area
1998	Aug-Sep	R/V J.P. Tully	9829	Gulf of Alaska LineP
2000	May-June	R/V Mirai	MR00-K03	Western subarctic Pacific, Kuril island, Okhotsk sea
2003	Jan	R/V Hokko-maru	HK0301	Oyashio area
2003	Feb	T/V Oshoro-Mar	OS0302	Oyashio area
2003	Mar	T/V Oshoro-Mar	OS0302	Oyashio area
2003	April	R/V Wakataka-Mar	WK0304	Oyashio, western North Pacific
2003	May	R/V Wakataka-Mar	WK0305	Oyashio, western North Pacific
2003	Sep-Oct	R/V Hakuho-Mar	KH-03-2	Western North Pacific, 155 E line
2005	Jan	R/V Hokko-maru	HK0501	Oyashio area
2005	May	R/V Hokko-maru	HK0505	Oyashio area
2005	Dec	R/V Hokko-maru	HK0512	Oyashio area
2006	Jan	R/V Hokko-maru	HK0601	Oyashio area
2006	July-Aug	R/V Pro. Khromov	Kh06	Kuril lcs, Okhotsk sea
2007	July-Aug	R/V Pro. Khromov	Kh07	Kuril lcs, Okhotsk sea
2008	Aug-Sep	R/V Hakuho-Mar	KH-08-2	Western North Pacific, 155 E line
2009	Aug-Sep	R/V Hakuho-Mar	KH-09-4	Aleutian Islands - Bering sea
2010	June-July	R/V Pro. Khromov	Kh10	Kuril lcs, Okhotsk sea
2012	July-Aug	R/V Hakuho-Mar	KH-12-3	Western North Pacific, 160 E line
2012	July-Aug	R/V Hakuho-Mar	KH-12-4	subarctic North Pacific, GP02 GEOTRACES
2013	July-Aug	T/V Oshoro-Mar	OS13	subarctic North Pacific, Bering Sea, Surface survey
2014	May-June	R/V Pro. Multanovskiy	Mu14	East Kamchatska current
2015	Nov-Dec	R/V Hakuho-Mar	KH-15-4	Kuroshio area
2017	June-Aug	R/V Hakuho-Mar	KH-17-3	subarctic North Pacific, GP02 GEOTRACES
2018	July-Sep	R/V Pro. Multanovskiy	Mu18	Western Bering Sea

表2：北大・低温研とロシア極東海洋気象学研究所 (FERHRI) との共同観測航海の実績

Table 2: A list of collaborative cruises between ILTS and FERHRI

クレスト時代: the first era

1998	Pro. Khromov	Japan/Russia/US
1999	Pro. Khromov	Japan/Russia/US
2000	Pro. Khromov	Japan/Russia/US
2001	Pro. Khromov	Japan/Russia/US



環オホーツク観測研究センター発足後: the second era

2006	Pro. Khromov	Japan/Russia	Kh06航海	西部オホーツク海
2007	Pro. Khromov	Japan/Russia	Kh07航海	西部オホーツク海
2010	Pro. Khromov	Japan/Russia	Kh10航海	西部オホーツク海
2011	Pavel. Gordienko	Japan/Russia	Go11航海	東部オホーツク海
2014	Pro. Multanovskiy	Japan/Russia	Mu14航海	東カムチャツカ海流
2018	Pro. Multanovskiy	Japan/Russia	Mu18航海	西部ベーリング海



共同観測のデータセットと、北太平洋側の日本の調査船による観測で得られたデータセットを統合することで、我々は環オホーツク海域におけるボーダーレスのデータセットを作成することができた (表1)。この観測データから、親潮域や西部北太平洋亜寒帯域の生態系を豊かにしている自然界のFeの供給システムの存在が明らかになった (次節以降に概説を記す)。

このようにCRESTプロジェクトの1998年を皮切りに、ロシア船を用いたオホーツク海の観測航海が2018年までに10回実施されている (表2)。CREST研究から引き継いで、長年継続してロシア船航海を実施できる体制が構築されたことが環オホーツク海域の海洋循環研究・物質循

環の理解に大きく結びついている。2006年以降のロシア船観測には国内外の15の研究機関(FERHRI, 北大・低温研・地球環境・水産学部, 北海道東海大学, 弘前大学, 東京大学大気海洋研究所, JAMSTEC, 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 静岡大学, 名古屋大学, 金沢大学, 九州大学, 長崎大学, 香港科学技術大学, MWJ)から, のべ113名の関係者が乗船している。

3.2 オホーツク海とベーリング海における物質循環観測

この節では, これまでに環オホーツク観測研究センターで実施してきた研究成果の中から, 環オホーツク海域のFeと栄養塩の動態に関連する物質循環研究の成果を海洋物理的なバックグラウンドも含めて概説する(Nishioka et al., 2014a; Nishioka et al., 2020; Nishioka et al., 2022a)。

3.2.1 オホーツク海

CREST終了後, 2006年, 2007年, 2010年, 2011年に, ロシア調査船を用いた海洋循環・物質循環の観測研究を西部オホーツク海の東サハリン海流域および千島列島周辺で実施した(Nishioka et al., 2014a)。これらの観測では, オホーツク海内の物質循環と, オホーツク海と北太平洋の物質循環リンケージを理解することを目的とした。そのためには, ロシアの排他的経済水域であるオホーツク海内部と千島列島周辺の海峡部の直接観測が不可欠であった(図2)。

オホーツク海は世界で最も低緯度の季節性海水域である(Alfultis and Martin, 1987; Kimura and Wakatsuchi, 2000)。毎年冬になると, 東シベリアから吹き込む冬の寒風により, オホーツク海の北西大陸棚のシベリア沿岸に大量の海水ができる。冬の間, 海水が形成されるとブライン排出により大量の低温・高塩の水が生成される。この水は密度が高いため, 北西大陸棚の底に沈降し, 高密度陸棚水(Dens Shelf Water: DSW, 密度 $26.8\text{--}27.0\text{ }\sigma_\theta$)を形成する(Kitani, 1973; Nagata et al., 1992; Martin et al., 1998; Gladyshev et al., 2000)。前述のとおりNakatsuka et al. (2002, 2004)は, DSWは海底堆積物の再懸濁に起因して濁度が極めて高いことを明らかにした。その後, Nishioka et al. (2013, 2014b)は, 北西部陸棚海域における溶存態Fe(D-Fe)濃度と全可溶性Fe(T-Fe)(可溶性粒子状Feを含む)濃度の鉛直分布を示し, DSW水塊において極めて高いFe濃度が観測されたことを報告した。還元的な影響を示すトレーサーとして利用できるN*指数(硝酸塩とリン酸塩で計算; Gruber and Sarmiento, 1997; Yoshikawa et al., 2006)を用いて, DSWに含まれる高濃度

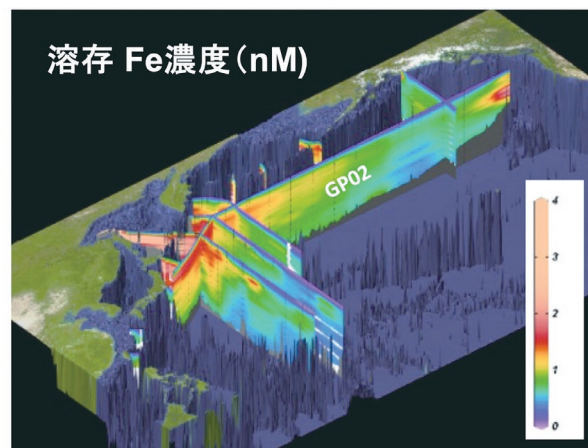


図3: 環オホーツク観測研究センターで実施してきた観測によって構築されたデータセットを用いて作成した溶存Fe濃度3次元分布図, Nishioka et al. 2020, Proc Natl Acad Sci, 参照 www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2000658117, under a CC BY 4.0 license

Figure 3: A draw of 3D Fe distribution in the North Pacific constructed by the data obtained from the cruises conducted by the Pan-Okhotsk Research Center, Nishioka et al. 2020, Proc Natl Acad Sci, cited from www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2000658117, under a CC BY 4.0 license

Feは海底堆積物の再懸濁によって供給されたと結論づけられた(Nishioka et al., 2014b)。DSWに由来する堆積物由来のFeは, この海域特有の中層水循環によって輸送される。水塊のトレーサーとして観測されたクロロフルオロカーボンの分析結果は, 換気されたDSW水塊の経路を示している(Wong et al., 1998; Yamamoto-Kawai et al., 2004)。DSWは, 約 $27.0\text{ }\sigma_\theta$ のオホーツク海中層水(OSIW)(Fukamachi et al., 2004)となり, OSIWは東サハリン沿岸を南下して南部オホーツク海に達する。Nishioka et al. (2013, 2014b)は, OSIWを介してT-FeとD-Feが大陸棚から輸送されることを報告し, オホーツク海南部の千島盆地に到達するFeは, 大陸棚のDSWに含まれるFeの約20%と推定した(Nishioka et al., 2014b)。

OSIWはブッソル海峡で強い鉛直混合を受けた後(Nakamura and Awaji, 2004; Ono et al., 2007, 2013), 北太平洋亜寒帯域に流出する(Katsumata et al., 2004; Katsumata and Yasuda, 2010)。さらに, オホーツク海から流出した中層水はNPIWの形成に寄与する(Talley, 1991; Yasuda, 1997; Nakamura and Awaji, 2004; Nakamura et al., 2006; Mensah and Ohshima, 2021)。特に親潮域の水質は, オホーツク海に由来する中層水の影響を強く受けている(Yasuda, 1997; Yasuda et al., 2001; Mensah and Ohshima, 2021)。Nishioka et al. (2020, 2021)は, ロシア船観測も含めて, これまでに環オホーツク海域で観測さ

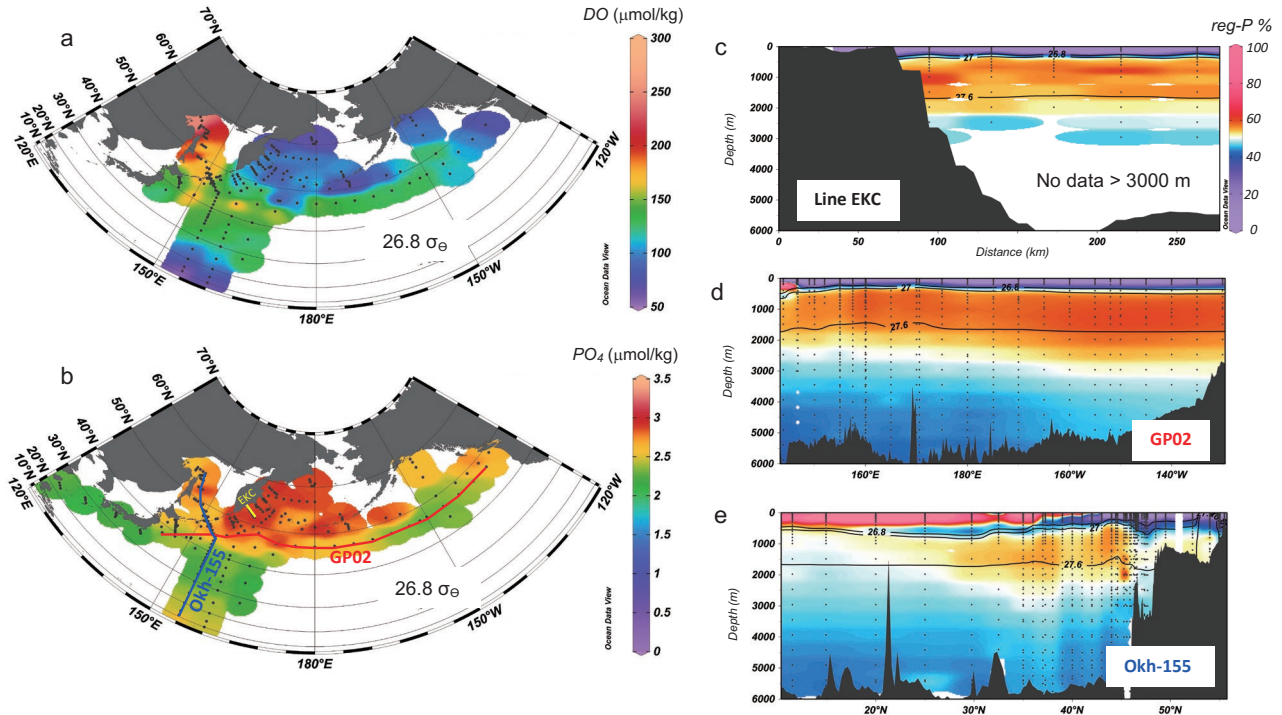


図4: 西部北太平洋亜寒帯域・ベーリング海盆地中層に広がる高濃度栄養塩プール(中層栄養塩プール), a: 中層水(密度 $26.8\sigma_\theta$ 等密度面)の溶存酸素濃度 ($\mu\text{mol/kg}$), b: 中層水(密度 $26.8\sigma_\theta$ 等密度面)のリン酸塩濃度 ($\mu\text{mol/kg}$), c: Line EKC (図b内)の再生循環で蓄積されるリン酸塩の割合, d: cと同様ただしLine GP02 (図b内), e: cと同様ただしLine Okh-155 (図b内). Nishioka et al. 2020, Proc Natl Acad Sci, 参照www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2000658117, (CC BY 4.0 license)

Figure 4: Subarctic Intermediate Water Nutrient Pool (SINP), a: Dissolved Oxygen concentration at the isopycnal surface of $26.8\sigma_\theta$, b: Phosphate concentration at the isopycnal surface of $26.8\sigma_\theta$, c: Proportion of regenerated phosphate along Line EKC (see b), d: Same as c, but for Line GP02 (see b), e: Same as c, but for Line Okh-155 (see b). These figures are cited from Nishioka et al. 2020, Proc Natl Acad Sci, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2000658117 under CC BY 4.0 license

れたデータをボーダレスにコンパイルしたFeを含むデータセットを作成し、溶存Feの等密度面分布の解析を行った結果を報告している。これまでの結果と統合すると、親潮域の中層やNPIWの上層部の溶存Fe濃度が高い理由は、オホーツク海の陸棚堆積物由来のFeが、この海域特有の中層循環の上層部に沿って、オホーツク海から親潮域および西部北太平洋に輸送されているからであると結論づけられた。親潮域や北太平洋に運ばれたFeは、海峡部の潮汐混合と冬季混合プロセスを介して海洋表層にもたらされ、広く北太平洋亜寒帯域の生物生産に寄与することが明らかになった (Nishioka et al., 2011, 2013, 2014b, 2020, 2021; Nakanowatari et al., 2017) (図3)。

3.2.2 ベーリング海

2014年と2018年には、ロシア調査船を用いた観測研究を東カムチャツカ海流周辺とベーリング海西部 (アリューシャン盆地とアナディール湾を含む) で実施した (Nishioka et al., 2022a)。これらの観測では、親潮上流と東カムチャ

ツカ海流の源流域の生物地球化学を調査し、北太平洋亜寒帯域の水塊の化学的な性質 (化学的プロパティ) の形成過程を理解することを目的とした。そのためには、ロシアの排他的経済水域である東カムチャツカ海流域とベーリング海西部の直接観測が不可欠であった (図2)。

ベーリング海の物理的背景については、Nagata et al. (1992) や Stabeno et al. (1999) に詳しく記載がある。以下に、物質循環的な理解のために重要と思われる部分を中心に概説する。ベーリング海は、大きく西部の海盆地 (アリューシャン海盆, 最大水深3500 m) と東部の大陸棚 (200 m未満) に分かれている。アリューシャン海盆には低気圧性循環 (ジャイア) が存在し、南西向きの境界流「カムチャツカ海流」と北向きの東の境界海流「ベーリング斜面海流 (Bering Slope current)」が流れている。アムチトカ海峡、ニア海峡、カムチャツカ海峡の3つの海峡だけが水深700 mより深く、中層水の出入りがある。アラスカ海流はアリューシャン列島の多くの浅い海峡を通してベーリング海に流入し、その総流入量は、カムチャツカ海峡からの

流出と釣り合っている。Nagata et al.(1992)によれば、ベーリング海の循環は、北太平洋の亜寒帯ジャイアの一部として考えることが適切であると指摘している。アリューシャン列島の主要な海峡を通してベーリング海に流入する流れは、流域の化学的プロパティに強く影響し、海盆地の中層水は、アリューシャン列島に沿った最も西側の海峡であるカムチャツカ海峡とニア海峡から太平洋側に流出する(Stabeno et al., 1999)。

我々の観測でも、アリューシャン海盆地と、西部北太平洋亜寒帯域の中層水を介したリンケージが確認されている。アリューシャン海盆地やアリューシャン列島東部周辺を含む西部北太平洋亜寒帯域の広い範囲の中層水下部(27.0–27.5 σ_θ)で、溶存Fe濃度が高く、酸素極小、栄養塩極大が見られた。このアリューシャン海盆地の中層水下部の特徴は、西部北太平洋の等密度水塊にあたるNPIW下層の化学的プロパティと一致していることが確認されている(Nishioka et al., 2022b)。したがって、中層水の下部の化学的プロパティは、アリューシャン流域を含む西部北太平洋亜寒帯域とNPIWの循環全体に分布していると考えられる(Nishioka et al., 2020)。アリューシャン海盆地の中層水に含まれる高Feの起源については、まだ議論が続いている。

3.3 亜寒帯中層栄養塩プールの重要性

植物プランクトンは海洋表層で栄養塩を取り込み有機物粒子となる。その後、死骸となった有機粒子は深層に向かって沈む。沈み込んだ有機粒子は再無機化され、無機態の栄養塩を中深層に放出する。北太平洋中層水循環の経路には世界で最も栄養塩濃度が高い水塊が分布している(図4)。このプロセスは表層から中深層へ栄養塩(硝酸塩、リン酸塩)を流出させるため、北太平洋亜寒帯域のHNLC海域表層の栄養塩を高い濃度で維持するためには、流出した栄養塩を補うための栄養塩供給メカニズムが必要となる。前述の通りBroecker (1991)は、全球的な全球循環として海洋コンベアベルトの概念を提唱した。これまで北太平洋亜寒帯域は、海洋コンベアベルトの終着点として認識されており、深層の高栄養塩水が湧昇し、表層に高栄養塩域(HNLC海域)が形成される場所として漠然と認識されてきた。

近年の海洋物理学によって、より詳細な北太平洋の全球的な水循環の詳細が明らかになってきた。Kawabe and Fujio (2010)は、北太平洋に北上した南極底層水(AABW)の大部分は北太平洋の上層に湧昇し、太平洋深層水(PDW)に変化し、2000～2500mの深度で再び南下し、upper

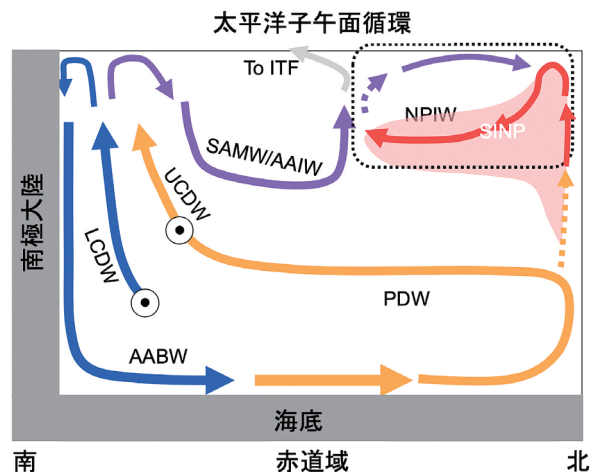


図5：太平洋子午面循環: NPIWを覆う破線の四角は、「北太平洋の中層水循環系」を示す。Nishioka et al., 2021から参照した図。Sigman et al., (2021)の図にTalley, (2013)のNPIWを含む循環系を追加したもの。NPIW 北太平洋中層水, PDW 太平洋深層水, AAIW 南極中層水, SAMW 亜南極モード水, AABW 南極底層水, ITF インドネシア通過流, UCDW 上部南極周極流水, LCDW 下部南極周極流水。右端の破線の矢印は、詳細な過程がまだ分かっていない場所を示す。色は栄養塩(硝酸塩またはリン酸塩)濃度レベルを示す(赤>橙>青>紫>灰色)。SINP; Nishioka et al., 2020 PNASが示した亜寒帯中層栄養塩プール。Nishioka et al. 2020, Proc Natl Acad Sci, 参照(CC BY 4.0 license)

Figure 5: A schematic draw of the Pacific meridional circulation: The dashed square overlying the NPIW indicates the “North Pacific Intermediate Water Circulation System”. The figure is modified figure of Sigman et al. (2021) with the addition of the circulation system including the NPIW of Talley, (2013). NPIW: North Pacific Intermediate Water, PDW: Pacific Deep Water, AAIW: Antarctic Intermediate Water, SAMW: Subantarctic Mode Water, AABW: Antarctic Bottom Water, ITF Indonesian Through Flow, UCDW: Upper Antarctic Circumpolar Current Water, LCDW Lower Antarctic Circumpolar Current Water. The dashed arrows indicate locations where detailed processes are not yet known. Colors indicate nutrient (nitrate or phosphate) concentration levels (red > orange > blue > purple > gray). The figure is cited from Nishioka et al. 2020, Proc Natl Acad Sci, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2000658117 under CC BY 4.0 license

circumpolar deep waterと混合することを示した。Talley (2013)は、北太平洋(NPIWを含む)の中層水系は、南極から連なる北太平洋全体の大きな子午面循環系の底層水セルと直接的にはほとんどつながっていないことを示した(図5)。このように、現在の物理学的・化学的海洋学の知見では、栄養塩に富む深層水が直接北太平洋亜寒帯域の表層にアウトクロップすることはないことが分かっている。したがって、栄養塩の動態や、深層水の栄養塩が表層に出てくる過程など、特にHNLC海域の高栄養塩濃度の表層水を形成するメカニズムは、海洋ベルトコンベヤー循環の末端では正確に記述できていない。日本周辺の北太平洋の「海の恵み」を生み出す仕組みを理解するために

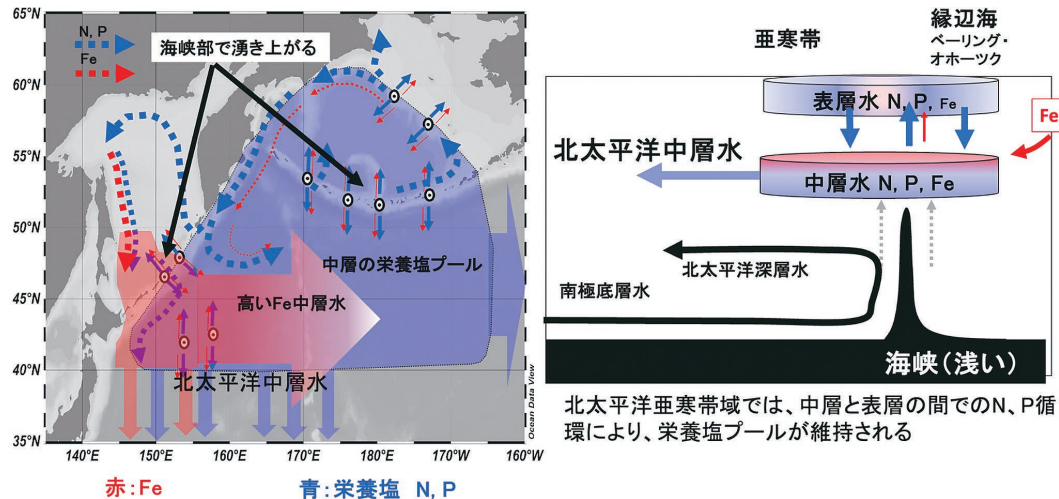


図6：これまでの成果から見てきた“新栄養物質循環像” Nishioka et al., 2020 PNASを改訂。

北方圏縁辺海であるベーリング海中層で形成され北太平洋中層水 (NPIW) の循環 (300-1000 m付近の循環) によって広がる中層栄養塩プール (主に硝酸塩とリン酸塩) と、海峡部で起こる鉛直混合が、中層と表層の栄養塩を間接的に繋いでいる (右図)。この中層栄養塩プールと、海水が駆動する中層水循環によってオホーツク海から流出するFeが混合することで、西部北太平洋の植物プランクトン生産が高められている (左図)。Nishioka et al. 2020, Proc Natl Acad Sci, 参照www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2000658117, (CC BY 4.0 license)

Figure 6: A new concept of nutrient circulation in the North Pacific cited. The Subarctic Intermediate Nutrient Pool (SINP: mainly nitrate and phosphate) formed in the Bering Sea and extended by the North Pacific Intermediate Water (NPIW) circulation (circulation around 300-1000 m) and the vertical mixing that occurs in the straits indirectly connect the intermediate and surface nutrients (right figure). The mixing of the subarctic intermediate water nutrient pool with Fe discharged from the Sea of Okhotsk by the sea-ice-driven intermediate water circulation enhances phytoplankton production in the western North Pacific. The figure is cited from Nishioka et al. 2020, Proc Natl Acad Sci, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2000658117 under CC BY 4.0 license.

は、海洋コンベアベルト終焉部で起こっている栄養塩と必須微量元素であるFeの循環の詳細を解明する必要があった。

ロシアとの共同研究を含め、20年以上かけて実施してきた我々の研究によって、海洋コンベアベルト終焉部に位置する新たな栄養物質循環像 (以下“新栄養物質循環像”と記す) (図6) が提示され、北太平洋の栄養物質循環の理解が大きく進んだ (Nishioka et al., 2020)。この“新栄養物質循環像”は次のように説明できる。北方圏縁辺海であるベーリング海中層で形成され、北太平洋中層水 (NPIW) を含む循環 (以下NPIW循環; 300-1000 m付近の循環) によって広がる中層栄養塩プール (主に硝酸塩とリン酸塩) (図4) と、千島海峡部やアリューシャン海峡部で起こる鉛直混合が、中層と表層の栄養塩を間接的に繋いでいることが明らかになった。この中層栄養塩プールと深層水栄養塩プールは別なプールとして互いにゆるく繋がる存在と考えられる (繋がるメカニズムは未解明)。この中層栄養塩プールと、海水が駆動する中層水循環によってオホーツク海から流出するFeが混合することで、広く西部北太平洋の植物プランクトン生産が高められていることが解明

された。この研究成果は、これまでに予想されていた「深層に蓄積されている栄養塩が直接表層の高緯度海域を肥沃にしている」という考えを覆し、地球規模の深層循環の出口となるエリアで、新たにNPIW循環を介した物質循環像を提示した。また、約30年以上信じられてきた「西部北太平洋の生物生産を支えているFe供給過程として最も重要なのは大気ダスト由来のFeである」という定説を覆し、NPIW循環に乗って北方圏縁辺海から長距離移送されるFeの重要性を示した点は、近年の海洋地球化学の成果の重要な発見として評価されている (Anderson, 2020)。

4. おわりに

環オホーツク観測研究センターで実施されたロシアとの共同研究を含めた海洋科学プロジェクトにより、北方圏縁辺海であるオホーツク海やベーリング海の重要性の認識、北太平洋の物質循環と生物生産の制御機構の解明、大陸と縁辺海と外洋のリンケージの理解、自然界の大規模生物生産システムの全体像の把握等につながった。特に、1章で示したセンター発足当初の課題であった、1)な

ぜ北太平洋亜寒帯域の表層にHNLC海域が存在するのか？と2)北太平洋亜寒帯域の植物プランクトン増殖を制御しているFe供給プロセスは何か？については、この20年の研究で北太平洋亜寒帯域のHNLC海域形成過程や、主要なFe供給プロセスの全体像と植物プランクトン生産との関連性が明らかとなり、北太平洋亜寒帯域における生物地球化学の理解において大きな進歩を遂げた。今後、日本の豊かな水産業の維持機構や、将来の気候変動に対して海洋システムがどのように応答するかを理解することにつながる重要な知見にもなる。

上記の一連の研究を進めるに当たって、環オホーツク観測研究センターでは、政治的な理由で日本の研究船による観測が困難であったオホーツク海やベーリング海の観測を実施するため、ロシア極東海洋気象学研究所との共同研究を主体的に進め、ロシア船による観測プラットフォームを確保し、国内外の海洋研究者を取りまとめ、長年にわたって観測機会を創出してきた。これらの観測によって、これまでデータが欠落していた海域の観測を実現してきたことで、北太平洋とその縁辺海をボーダレスに多方面から理解することにつながり、我が国の海洋学の進展に大きく貢献できた。また、このオホーツク海やベーリング海と北太平洋のつながりを示した研究が起点となり、様々な物質の循環に関わる研究、詳細なプロセス研究、数値シミュレーション研究など、数多くの物理・化学・生物に跨る研究が展開されている。今後はこれまでの知見を発展させて、より広く世界に向けて、環オホーツクエリアの科学的研究の重要性を発信していくことを目指す。

謝辞

本稿で紹介した研究は、オホーツク海やベーリング海が果たす地球規模の役割を海洋学的に明らかにした研究である。この研究は、環オホーツク観測研究センターで長年にわたって実施されてきた研究で、数多くの国内外の研究者との共同研究および、当センターや低温研スタッフとの協働および支援があって成し得たものである。この執筆を機に、改めてこの研究に関わったすべてのスタッフおよび共同研究者の皆様にお礼申し上げる。また、本文でも触れたが、本研究で広大な海洋を理解するためにはすべての海をボーダレスに研究することが欠かせなかった。オホーツク海の大部分はロシアの排他的経済水域に当たるため、本稿で紹介した研究ではロシアとの共同観測が必須であった。長年に渡り北大低温研と共同研究を

実施してくれたロシア極東海洋気象学研究所 (FERHRI) Yuri N.Volkov所長、故Alexey F. Shcherbinin氏、Sergey Yarosh氏はじめとするFERHRIスタッフ、ロシア船*Pro. Khromov*, *Pro. Multanovskiy*, *Pavel. Gordienko*の船長および乗組員の方々、特に故Evgeniy Sklizkov船長に心よりお礼申し上げる。

2023年現在、国際情勢の悪化でロシアとの共同研究が難しい状況になってしまっている。今後、一刻も早く平和を取り戻し、再び世界の研究者が手を結んで海洋の神秘の探求に挑んでいける世の中になることを強く願う。

参考文献

- Alfultis, M. A. and S. Martin (1987) Satellite passive microwave studies of the Sea of Okhotsk ice cover and its relation to oceanic processes, 1978–1982. *J. Geophys. Res. Oceans*, **92**:13,013–13,028.
- Anderson, R. F. (2020) GEOTRACES: Accelerating research on the marine biogeochemical cycles of trace elements and their isotopes. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 9–85, doi: 10.1146/annurev-marine-010318-095123.
- Boyd, P. W., C. S. Law, C. S. Wong, Nojiri, Y., A. Tsuda, M. Levasseur, S. Takeda, R. Rivkin, P. J. Harrison, R. Strzepek, J. Gower, R. M. McKay, E. Abraham, M. Arychuk, J. Barwell-Clarke, W. Crawford, M. Hale, K. Harada, K. Johnson, H. Kiyosawa, I. Kudo, A. Marchetti, W. Miller, J. Needoba, J. Nishioka, H. Ogawa, J. Page, M. Robert, H. Saito, A. Sastri, N. Sherry, T. Soutar, N. Sutherland, Y. Taira, F. Whitney, S. E. Wong and T. Yoshimura (2004) The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom. *Nature*, **428**, 549–553.
- Boyd, P. W., T. Jickells, C. S. Law, S. Blain, E. A. Boyle, K. O. Busseler, K. H. Coale, J. J. Cullen, de H. J. W. Baar, M. Flows, M. Harvey, C. Lancelot, M. Levasseur, N. P. J. Owens, R. Pollard, R. B. Rivkin, J. Sarmiento, V. Schoemann, V. Smetacek, S. Takeda, A. Tsuda, S. Turner and A. J. Watson (2007) Mesoscale iron enrichment experiments 1993–2005: Synthesis and future directions. *Science*, **315**:612–617.
- Boyd, P. W. and M. J. Ellwood (2010) The biogeochemical cycle of iron in the ocean. *Nature Geo.*, **3**:675–682.
- Broecker, W. S. and T-H Peng (1982) Tracers in the sea. *Lamont-Doherty Geological Observatory, Columbia University*, 690 pp, doi:10.2307/1309641.
- Broecker, W. S. (1991) The great ocean conveyor. *Oceanogr.*,

- 4(2):79–89.
- Chisholm, S. W. and M. M. Morel (1991) What controls phytoplankton production in nutrient-rich areas of the open sea? *Limnol. Oceanogr.*, **36** (8), preface.
- Conway, T. M. and J. G. Seth (2014) Quantification of dissolved iron sources to the North Atlantic Ocean. *Nature*, **511**:212–215.
- de Baar, H. J. W., P. W. Boyd, K. H. Coale, M. R. Landry, A. Tsuda, P. Assmy, D. C. E. Bakker, Y. Bozec, R. T. Barbar, M. A. Brzezinski, K. O. Buesseler, M. Boye, P. L. Croot, F. Gervais, M. Y. Gorbunov, P. J. Harrison, W. Hiscock, P. Laan, C. Lancelot, C. Law, M. Levasseur, A. Marchetti, F. J. Millero, J. Nishioka, Y. Nojiri, T. van Oijen, U. Riebesell, M. J. A. Rijkenberg, H. Saito, S. Takeda, K. R. Timmermans and M. J. W. Veldhuis (2005) Synthesis of iron fertilization experiments: from the iron age in the age of enlightenment. *J. Geophys. Res. Ocean*, **110**. doi:10.1029/2004JC002601.
- Duce, R. A. (1989) SEAREX; The sea/air exchange program. *Chem. Oceanogr.*, **10**, Academic Press, London. 404pp.
- Duce, R. A. and N. W. Tindale (1991) Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **36**:1715–1726.
- Elrod, V. A., W. M. Berelson, K. Coale and K. S. Johnson (2004) The flux of iron from continental shelf sediment: A missing source for global budget. *Geophys. Res. Lett.*, **31**:L12307, doi:10.1029/2004GL020216.
- Fukamachi, Y., G. Mizuta, K. I. Ohshima, L. D. Talley, S. C. Riser and M. Wakatsuchi (2004) Transport and modification processes of dense shelf water revealed by long-term moorings off Sakhalin in the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res. Oceans*, **109**:C09S10. doi:10.1029/2003JC001906.
- GEOTRACES Planning Group (2006) GEOTRACES Science Plan, Baltimore, Maryland: Scientific Committee on Oceanic Research, https://geotracesold.sedoo.fr/libraries/documents/Science_plan.pdf.
- Gladyshev, S., S. Martin, S. Riser and A. Figureurkin (2000) Dense water production on the northern Okhotsk shelves: Comparison of ship-based spring-summer observations for 1996 and 1997 with satellite observations. *J. Geophys. Res. Oceans*, **105**:26, 281–26, 299.
- Gordon, R. M., J. M. Martin and G. A. Knauer (1982) Iron in north-east Pacific waters. *Nature*, 299:611–612.
- Gruber, N. and J. L. Sarmiento (1997) Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **11**:235–266.
- Hansell, D. A., C. A. Carlson and Y. Suzuki (2002) Dissolved organic carbon export with North Pacific Intermediate Water formation. *Glob. Biogeochem. Cycles*, doi, org/10.1029/2000GB001361.
- Itoh, M., K. I. Ohshima and M. Wakatsuchi (2003) Distribution and formation of Okhotsk Sea Intermediate Water. An analysis of isopycnal climatological data. *J. Geophys. Res.*, **108**(C8):3258. <http://dx.doi.org/10.1029/2002JC001590>.
- Itoh, S., I. Yasuda, T. Nakatsuka, J. Nishioka and Y. N. Volkov (2010) Fine- and microstructure observation in the Urup Strait, Kuril Islands, during August 2006. *J. Geophys. Res.*, **115**(C8):C08004, <http://dx.doi.org/10.1029/2002JC005629>.
- Itoh, S., I. Yasuda, M. Yagi, S. Osafune, H. Kaneko, J. Nishioka, T. Nakatsuka and Y. N. Volkov (2011) Strong vertical mixing in the Urup Strait. *Geophys. Res. Lett.*, **38**:L16607, <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL048507>.
- Jickells, T. D., Z. S. An, K. K. Andersen, A. R. Baker, G. Bergametti, N. Brooks, J. J. Cao, P. W. Boyd, R. A. Duce, K. A. Hunter, H. Kawahata, N. Kubilay, J. LaRoche, P. S. Liss, N. Mahowald, J. M. Prospero, A. J. Ridgwell, I. Tegen and R. Torres (2005) Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry and climate. *Science*, **308**:67–71.
- Johnson, K. S., F. P. Chavez and G. E. Friederich (1999) Continental-shelf sediment as a primary source of iron for coastal phytoplankton. *Nature*, **398**:697–700.
- Kanna, N., T. Toyota and J. Nishioka (2014) Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. *Prog. Oceanogr.* **126**:44–57, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.012.
- Katsumata, K., K. I. Ohshima, T. Kono, M. Itoh, I. Yasuda, Y. N. Volkov and M. Wakatsuchi (2004) Water exchange and tidal currents through the Bussol' Strait revealed by direct current measurements. *J. Geophys. Res. Oceans*, **117**:(C09S06). doi, org/10.1029/2003JC001864.
- Katsumata, K., I. Yasuda (2010) Estimate of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific. *J. Oceanogr.*, **66**:489–504.
- Kawabe, M. and S. Fujio (2010) Pacific Ocean circulation based on observation. *J. Oceanogr.*, **66**:389–403.
- Kimura, N. and M. Wakatsuchi (2000) Relationship between sea-ice motion and geostrophic wind in the Northern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, **27**:3735–3738.

- Kitani, K. (1973) An oceanographic study of the Sea of Okhotsk, particularly in regard to cold waters. *Bull. Far Seas Fish. Res. Labo.*, **9**:45–47.
- Lam, P. J., J. K. B. Bishop, C. C. Henning, M. A. Marcus, G. A. Waychunas and I. Y. Fung (2006) Wintertime phytoplankton bloom in the subarctic Pacific supported by continental margin iron. *Glob. Biogeochem Cycle*, **20**:GB1006, doi:10.1029/2005GB002557.
- Lam, P. J. and J. K. B. Bishop (2008) The continental margin is a key source of iron to the HNLC North Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **35**: L07608, doi:10.1029/2008GL033294.
- Lannuzel, D., J. de Jong, V. Schoemann, A. Trevena, J-L. Tison and L. Chou (2007) Development of a sampling and flow injection analysis technique for iron determination in the sea ice environment. *Analytica Chimica Acta*, **556**:476–483.
- Matsumoto, K. and R. M. Key (2004) Natural radiocarbon distribution in the deep Ocean. *Global Environmental Change in the Ocean and on Land*, Eds., M. Shiyomi et al., pp. 45–58. Terapub.
- Matsumoto, K. (2007) Radiocarbon-based circulation age of the world oceans. *J. Geophys. Res.* **112**:C09004, doi: 10.1029/2007JC004095.
- Martin, J. H. and S. E. Fitzwater (1988) Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature*, **331**:341–343.
- Martin, J. H. and R. M. Gordon (1988) Northeast Pacific iron distributions in relation to phytoplankton productivity. *Deep Sea Res., Part I*, **35**(2):177–196.
- Martin, J. H., R. M. Gordon, S. Fitzwater and W. W. Broenkow (1989) VERTEX: phytoplankton/iron studies in the Gulf of Alaska. *Deep Sea Res., Part I*, **36**(5):649–680. doi.org/10.1016/0198-0149(89)90144-1.
- Martin, J. H., S. E. Fitzwater and R. M. Gordon (1990) Iron deficiency limits phytoplankton growth in Antarctic waters. *Glob. Biogeochem Cycles*, **4**(1). doi.org/10.1029/GB004i001p00005.
- Martin, J. H. (1990) Glacial-Interglacial CO₂ Change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, **5**(1):1–13.
- Martin, J. H., R. M. Gordon and S. E. Fitzwater (1991) The case for iron. *Limnol. Oceanogr.*, **36**(8):1793–1802.
- Martin, S., R. Drucker and K. Yamashita (1998) The production of ice and dense shelf water in the Okhotsk Sea polynyas. *J. Geophys. Res. Oceans*, **103**:27,771–27,782.
- Mensah, V. and K. I. Ohshima (2021) Weakened overturning and tide control the properties of Oyashio Intermediate Water, a key water mass in the North Pacific. *Sci. Rep.*, **11**, 14526. doi:10.1038/s41598-021-93901-6.
- Mizuta, G., Y. Fukamachi, K. I. Ohshima and M. Wakatsuchi (2003) Structure and Seasonal Variability of the East Sakhalin Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 2430–2445.
- Nagata, Y., K. Ohtani and M. Kashiwai (1992) Subarctic gyre in the North Pacific Ocean. *Umino-Kenkyu*, **1**(3):75–104.
- Nakamura, T. and T. Awaji (2004) Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: a three-dimensional nonhydrostatic model experiment. *J. Geophys. Res. Oceans*, **109**:C09S07. http://dx.doi.org/10.1029/2003JC001850.
- Nakamura, T., T. Toyoda, Y. Ishikawa and T. Awaji (2006) Effect of tidal mixing at the Kuril Straits on North Pacific ventilation: adjustment of the intermediate layer revealed from numerical experiments. *J. Geophys. Res.*, **111**(C4):C04003, doi.org/10.1029/2005JC003142.
- Nakanowatari, T., T. Nakamura, K. Uchimoto, J. Nishioka, H. Mitsudera and M. Wakatsuchi (2017) Importance of Ekman transport and gyre circulation change on seasonal variation of surface dissolved iron in the western subarctic North Pacific. *J. Geophys. Res.- Ocean*, **122**(5):4364–4391. doi:10.1002/2016JC012354.
- Nakatsuka, T., C. Yoshikawa, M. Toda, K. Kawamura and M. Wakatsuchi (2002) An extremely turbid intermediate water in the Sea of Okhotsk: implication for the transport of particulate organic matter in a seasonally ice-bound sea. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(16):1757. doi.org/10.1029/2001GL014029.
- Nakatsuka, T., M. Toda, K. Kawamura and M. Wakatsuchi (2004) Dissolved and particulate organic carbon in the Sea of Okhotsk: transport from continental shelf to ocean interior. *J. Geophys. Res. Oceans*, **109**:C09S14. http://dx.doi.org/10.1029/2003JC001909.
- 西岡純, 三寺史夫 (2012) 生物地球化学過程に果たす環オホーツク圏の海洋循環・物質循環の役割. 月刊海洋, **44**, 10, 552–560.
- Nishioka, J., S. Takeda, I. Kudo, D. Tsumune, T. Yoshimura, K. Kuma and A. Tsuda (2003) Size fractionated iron distributions and iron-limitation processes in the subarctic NW Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **30**:1730, doi:10.1029/2002GL016853.
- Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, T. Nakatsuka, S. Takeda, T. Yoshimura, K. Suzuki, K. Kuma, S. Nakabayashi, D. Tsumune, H. Mitsudera, W. K. Johnson and A. Tsuda (2007)

- Iron supply to the western subarctic Pacific: Importance of iron export from the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **112**:C10012, <https://doi.org/10.1029/2006JC004055>.
- Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, K. Sakaoka and T. Yoshimura (2011) The annual cycle of surface iron and the source of iron supporting the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic pacific. *J. Geophys. Res.-Ocean*, **116**:C02021. doi:10.1029/2010JC006321.
- Nishioka, J., T. Nakatsuka, Y. W. Watanabe, I. Yasuda, K. Kuma, H. Ogawa, N. Ebuchi, A. Scherbinin, Y. N. Volkov, T. Shiraiwa and M. Wakatsuchi (2013) Intensive mixing along an island chain controls oceanic biogeochemical cycles. *Glob. Biogeochem Cycle*, **27**:920–929.
- Nishioka, J., H. Mitsudera, I. Yasuda, H. Liu, T. Nakatsuka and Y. N. Volkov (2014a) Biogeochemical and physical processes in the Sea of Okhotsk and the linkage to the Pacific Ocean. *Prog. Oceanogr.*, **126**:1–7. doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.027.
- Nishioka, J., T. Nakatsuka, K. Ono, Y. N. Volkov, A. Scherbinin and T. Shiraiwa (2014b) Quantitative evaluation of iron transport processes in the Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.*, **126**:180–193.
- Nishioka, J. and H. Obata (2017) Dissolved iron distribution in the western and central subarctic Pacific: HNLC water formation and biogeochemical processes. *Limnol. Oceanogr.*, **62**(5):2004–2022.
- Nishioka, J., H. Obata, H. Ogawa, K. Ono, Y. Yamashita, K. J. Lee, S. Takeda and I. Yasuda (2020) Sub-polar marginal seas fuel the North Pacific through the intermediate water at the termination of the global ocean circulation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **117**(23):12665–12673. doi. 10.1073/pnas.2000658117.
- Nishioka, J., H. Obata, T. Hirawake, Y. Kondo, Y. Yamashita, K. Misumi and I. Yasuda (2021) A review: iron and nutrient supply in the subarctic Pacific and its impact on phytoplankton production. *J. Oceanogr.*, **77**, 561–587. <https://doi.org/10.1007/s10872-021-00606-5>.
- Nishioka, J., I. Yasuda, T. Hirawake, T. Nakamura, Y. Kondo and Y. N. Volkov (2022a) Biogeochemical and physical linkages between the Arctic Ocean and Sub-Arctic Pacific through marginal seas. *Prog. Oceanogr.*, **203**. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102768>.
- Nishioka, J., T. Hirawake, D. Nomura, Y. Yamashita, K. Ono, A. Murayama, A. Shcherbinin, Y. N. Volkov, H. Mitsudera, N. Ebuchi, M. Wakatsuchi and I. Yasuda (2022b) Iron and nutrient dynamics along the East Kamchatka Current, western Bering Sea Basin and Gulf of Anadyr. *Prog. Oceanogr.*, **203**. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102662>.
- Ono, K., K. I. Ohshima, T. Kono, M. Ito, K. Katsumata, Y. N. Volkov and M. Wakatsuchi (2007) Water mass exchange and diapycnal mixing at Bussol' strait revealed by water mass properties. *J. Oceanog.*, **63**:281–291.
- Ono, K., K. I. Ohshima, T. Kono, K. Katsumata, I. Yasuda and M. Wakatsuchi (2013) Distribution of vertical diffusivity in the Bussol' Strait: a mixing hot spot in the North Pacific. *Deep Sea Res., Part I*, **79**, 62–73. doi:10.1016/j.dsr.2013.05.010.
- 大島慶一郎 (2024) 地球流体力学としてのオホーツク海, 低温科学, **82**, 1–5.
- Ohshima, K. I., M. Wakatsuchi, Y. Fukamachi and G. Mizuta (2002) Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. *J. Geophys. Res.*, **107**(C11). doi. org/10.1029/2001JC001005.
- Ohshima, K. I. and S. Martin (2004) Introduction to special section: oceanography of the Okhotsk Sea. *J. Geophys. Res.*, **109**:C09S01. <http://dx. doi. org/10.1029/2004JC002604>.
- Parsons, T. R. and C. M. Lalli (1988) Comparative oceanic ecology of the plankton communities of the subarctic Atlantic and Pacific oceans. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **26**:317–359.
- Resing, J. A., P. N. Sedwick, C. R. German, W. J. Jenkins, J. W. Moffett, B. M. Sohst and A. Tagliabue (2015) Basin-scale transport of hydrothermal dissolved metals across the South Pacific Ocean. *Nature*, **523**:200–203. doi:10.1038/nature14577.
- Shcherbina, A., L. D. Talley and D. L. Rudnick (2003) Direct Observations of North Pacific Ventilation: Brine Rejection in the Okhotsk Sea. *Science*, **302**, 12, 1952–1955.
- Stabeno, P. J., J. D. Schumacher and K. Ohtani (1999) The physical oceanography of the Bering Sea. *Dynamics of the Bering Sea*, **1**–59.
- Takahashi, T., et al. (2002) Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep Sea Res. Part II*, **49**, 1601–1622.
- Talley, L. D. (1991) An Okhotsk Sea Water anomaly: Implications for ventilation in the North Pacific. *Deep Sea Res. Part I*, **38**:S171–S190.
- Talley, L. D. (2013) Closure of the global overturning circulation through the Indian, Pacific, and Southern Oceans.

- Oceanogr.*, **26**(1):80–97. doi.org/10.5670/oceanog.2013.07.
- Tagliabue, A., O. Aumont and L. Bopp (2014) The impact of different external sources of iron in the global carbon cycle. *Geophys. Res. Lett.*, **41**:920–926. doi:10.1002/2013GL059059.
- Tagliabue, A., A. R. Bowie, P. W. Boyd, K. N. Buck, K. S. Johnson and M. Saito (2017) The integral role of iron in ocean biogeochemistry. *Nature*, **543**:51–59.
- Tsuda, A., S. Takeda, H. Saito, J. Nishioka, Y. Nojiri, I. Kudo, H. Kiyosawa, A. Shiimoto, K. Imai, T. Ono, A. Shimamoto, D. Tsumune, T. Yoshimura, T. Aono, A. Hinuma, M. Kinugasa, K. Suzuki, Y. Sohrin, Y. Noiri, H. Tani, D. Deguchi, N. Tsurushima, H. Ogawa, K. Fukami, K. Kuma and T. Saino (2003) A mesoscale iron enrichment in the western subarctic Pacific induces large centric diatom bloom. *Science*, **300**:958–961.
- Tsuda, A., S. Takeda, H. Saito, J. Nishioka, I. Kudo, Y. Nojiri, K. Suzuki, M. Uematsu, M. L. Wells, D. Tsumune, T. Yoshimura, T. Aono, T. Aramaki, W. P. Cochlan, M. Hayakawa, K. Imai, T. Isada, Y. Iwamoto, W. K. Johnson, S. Kameyama, S. Kato, H. Kiyosawa, Y. Kondo, M. Levasseur, R. Machida, I. Nagao, F. Nakagawa, T. Nakanishi, S. Nakatsuka, A. Narita, Y. Noiri, H. Obata, H. Ogawa, T. Ono, T. Sakuragi, M. Sasakawa, M. Sato, A. Shimamoto, H. Takata, C. G. Trick, Y. W. Watanabe, C. S. Wong and N. Yoshie (2007) Evidence for the grazing hypothesis: grazing reduces phytoplankton responses of the HNLC ecosystem to iron enrichment in the western subarctic Pacific (SEED II). *J. Oceanogr.*, **63**: 983-994.
- Wakatsuchi, M. (2006) Natural condition of the Sea of Okhotsk. *New Era in Far East Russia & Asia ed. by Ship & Ocean Foundation*, 159-180.
- Wakita, M., Y. W. Watanabe, S. Watanabe, S. Noriki and M. Wakatsuchi (2003) Oceanic uptake rate of anthropogenic CO₂ in a subpolar marginal sea: the Sea of Okhotsk. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2252. http://dx.doi.org/10.1029/2003GL018057.
- Wong, C. S., R. J. Matear, H. J. Freeland, F. A. Whitney and A. S. Bychkov (1998) WOCE line P1W in the sea of Okhotsk: 2. CFCs and the formation rate of intermediate water. *J. Geophys. Res. Oceans*, **103**:15625–15642.
- Yamamoto-Kawai, M., S. Watanabe, S. Tsunogai and M. Wakatsuchi (2004) Chlorofluorocarbons in the Sea of Okhotsk: ventilation of the intermediate water. *J. Geophys. Res. Oceans*, **109**:C09S11. http://dx.doi.org/10.1029/2003JC001919.
- Yagi, M. and I. Yasuda (2012) Deep intense vertical mixing in the Bussol' Strait. *Geophys. Res. Lett.*, **39**:L01602. doi.org/10.1029/2011GL050349.
- Yagi, M., I. Yasuda, T. Tanaka, Y. Tanaka, K. Ono, K. I. Ohshima and K. Katsumata (2014) Re-evaluation of vertical structure of turbulent mixing in the Bussol' Strait and its impact on water-masses in the Okhotsk Sea and the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 121-134.
- 安田一郎 (2008) 潮汐混合とオホーツク海・ベーリング海の物理・化学・生物過程. *月刊海洋*, **43**(11), 629-640.
- Yasuda, I. (1997) The origin of the North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **102**(C1):893–909.
- Yasuda, I., Y. Hiroe, K. Komatsu, K. Kawasaki, T. M. Joyce, F. Bahr and Y. Kawasaki (2001) Hydrographic structure and transport of the Oyashio south of Hokkaido and the formation of North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **106**(C4):6931–6942.
- Yoshikawa, C., T. Nakatsuka and M. Wakatsuchi (2006) Distribution of N* in the Sea of Okhotsk and its use as a biogeochemical tracer of the Okhotsk Sea Intermediate Water formation process. *J. Mar. Syst.*, **63**:49–62.