

— 2024 年度日本海洋学会賞受賞記念論文 —

北西太平洋および縁辺海における 鉄の輸送と生物生産との関わりの解明*

西岡 純[†]

要 旨

過去 30 年間における海洋学のブレークスルーの 1 つは、鉄 (Fe) が微量栄養素として植物プランクトン増殖を制御していることが発見されたことである。それにより、海洋における Fe の役割およびその生物地球化学的動態に関する理解が飛躍的に進んだ。本総説では、北太平洋亜寒帯域における Fe が一次生産に果たす役割と、北方圏縁辺海を含む自然界の Fe や栄養塩の供給プロセスについて、これまで分かってきた知見がどのように積み上げられてきたのかを、世界的な研究動向と比較しながら、我が国で実施されてきたプロジェクトを中心に振り返る。

キーワード：Fe, 北太平洋亜寒帯域, 北方圏縁辺海, HNLC 海域, 植物プランクトン増殖

1. はじめに

海洋学者の一部では、1990 年代を「Iron age in Oceanography」と呼んでいる (Coale *et al.*, 1999)。また、近年 50 年間の海洋学の歴史において「海洋における鉄 (Fe) の重要性の発見」は、3 つの主要なブレークスルーの 1 つとして位置付けられている (Coale *et al.*, 2015; National research council, 2000) (ちなみに他の 2 つは、プレートテクトニクスの発見、海底熱水活動の発見)。

古くから、南極大陸周辺の南大洋、東部太平洋赤道域、北太平洋亜寒帯域では、表層水中の主要栄養塩 (硝酸塩、リン酸塩、珪酸塩) が残存しているにもかかわらず、植

物プランクトンのバイオマス (例えば Chlorophyll 濃度を指標とする) は予想を大きく下回ることが知られていた。これらの海域は「High Nutrient Low Chlorophyll (HNLC) 海域」と呼ばれ、海洋学者たちは「なぜこの海域では年間を通じて主要栄養塩が残存するのか?」、「この海域の植物プランクトン増殖は何によって制限されているのか?」といった疑問について議論を重ねてきた。1990 年以降の 30 年間にわたり、世界中の海洋学者によって HNLC 海域の形成メカニズムに関する研究が精力的に行われ、海洋の生物地球化学分野が飛躍的に進展した。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)。

この近年の海洋学における一つのブレークスルーとして捉えられる研究の進展は、1980 年代にモスランディング海洋研究所 (以下 Moss Landing Marine Laboratories; MLML) の所長であった John H. Martin 博士らとその研究グループから始まった。彼らは、汚染を防ぐた

* 2025 年 1 月 7 日受領 2025 年 1 月 20 日受理
著作権：日本海洋学会, 2025 年

† 北海道大学 低温科学研究所 附属環オホーツク観測研究センター
〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目
e-mail : nishioka@lowtem.hokudai.ac.jp

めの厳密なクリーン技術を用いて、HNLC 海域の海水中の溶存 Fe 濃度を初めて正確に測定した。その結果、東部北太平洋亜寒帯（アラスカ湾）の溶存 Fe は栄養塩と同様の鉛直分布を示し、表層 Fe 濃度が植物プランクトンの増殖を制限するほど低いことを報告した (Gordon *et al.*, 1982; Martin *et al.*, 1989)。Martin らはこれらのデータを基に、「Fe が一次生産者における重要な栄養素であり、世界中の HNLC 海域における表層の植物プランクトンの増殖は、Fe の利用能の低さによって制限されている」と主張した。この主張は、「自然界における海洋への Fe 供給が、植物プランクトンの増減（海洋生物ポンプ）を通じて、氷期-間氷期サイクルを含む地球規模の気候変動を制御している」という内容を含む「Fe 仮説」として、*Paleoceanography* 誌に発表された (Martin, 1990)。この「Fe 仮説」を検証するため、Martin らのグループは、クリーン技術を駆使して極低濃度の Fe を制御した船上ボトル培養実験を行った。その結果、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, Martin *et al.*, 1990)。この「Fe 仮説」は、多くの海洋学者の注目を集め、HNLC 海域における植物プランクトン生産を制御する要因についての議論を加速させた (Chisholm and Morel, 1991)。その後、世界中の海洋学者によって、「Fe 仮説」を検証するための「Fe

散布実験」が実施された。これらの実験により、Fe が植物プランクトンの増殖および海洋生物地球化学的循環の制御において重要な役割を果たす必須栄養素であることが確認され、現代の海洋学ではこの知見が教科書に記載されるほどの常識となっていった。

一方で、1970 年代に行われた化学海洋学の大規模プロジェクト GEOSECS (Craig and Turekian, 1980; Moore 1984) では、海洋における栄養塩や放射性物質などの全球的な分布が観測されたが、その当時はクリーン技術が十分に発展していなかったため、Fe を含む微量元素の測定はできなかった。その後、「Fe 仮説」の時代に Fe の重要性が確実なものになっていくのと同時に、クリーン技術は普及し、分析法も急速に進展した (e.g. Sohrin *et al.*, 2008; Sohrin and Bruland, 2011)。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 2025 年現在も、世界中の海洋地球化学者たちによって、海洋の Fe を含む微量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。

このような国際的な時代背景の中で、世界に立ち遅れまいと国内でも「海洋における Fe 研究」がスタートすることになる。Martin らの研究には、北太平洋亜寒帯の HNLC 海域も対象に含まれていたが、主な対象は東側のアラスカ湾 (Fig. 1 の AG) であった。西側の HNLC 海域

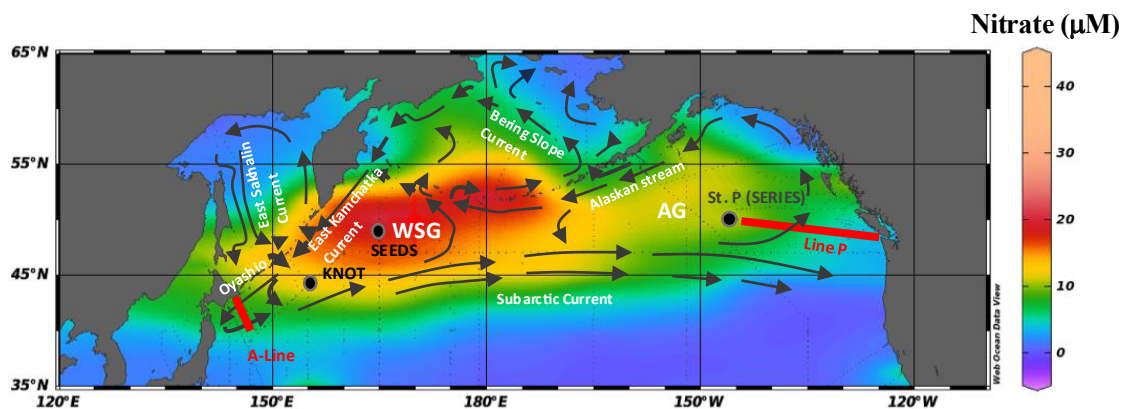


Fig. 1. Map of the subarctic Pacific HNLC region, showing general circulation patterns and gyres. “WSG” refers to the western subarctic gyre, and “AG” refers to the Alaskan Gyre. Currents and circulation patterns are based on Nagata *et al.* (1992), Harrison *et al.* (1999), Ohshima *et al.* (2002), Stabeno *et al.* (1999), and Hunt *et al.* (2010). Background nitrate concentrations were created using Web ODV (<https://explore.webodv.awi.de>) and the PACIFICA database.

では、より栄養塩が高濃度で残存しているが (Fig. 1), Fe に関する情報が不足している状況であった。また、海洋への Fe の供給過程に関しては、1970 年代中盤から 1980 年代に実施された大気ダストを対象とした SEAREX プロジェクト (Duce, 1989) が大きな成果を挙げ、大気経由で供給される Fe の重要性などが盛んに議論されていた (e.g. Duce and Tindale, 1991)。その後、国内でも「海洋における Fe の役割を明らかにするための研究プロジェクト」が立ち上がることになる。

日本の「海洋における Fe 関連プロジェクト」の進展と世界の動向を Table 1 に示す。これらのプロジェクトの中で、私は北太平洋亜寒帯域を主なフィールドとして、一次生産に果たす Fe の役割や、自然界における Fe の供給過程、その循環に関する研究を進めることになる。

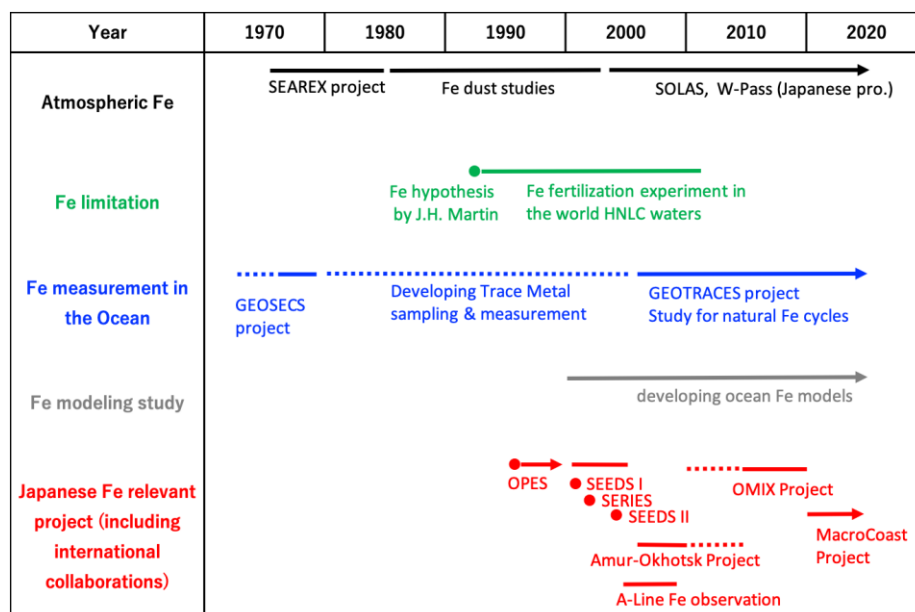
現在 (2025 年), Martin の「Fe 仮説」が提案されてから既に 30 年以上が経過した (Stoll, 2020)。今回 2024 年度日本海洋学会賞の受賞対象となった研究は、Martin の「Fe 仮説」がなければ成し得なかった研究である。この受賞対象となった研究の科学的な内容について

では、Nishioka *et al.* (2021) と西岡ら (2024) に詳しく総説としてまとめられている。そこで、本稿では特に、世界の動向と比較しながら、日本の「海洋における Fe 研究」の発展を、国内で立ち上がったプロジェクトを中心に紹介する。それらのプロジェクトが直面した課題や、その都度何を疑問に思い研究を進めてきたのかについて、私自身の視点から述べさせていただく。国内で行われた「海洋における Fe 研究プロジェクト」については、過去の日本海洋学会賞受賞者の論文など (Takeda, 2011; 津田, 2013; 武田, 2024) にも触れられているので、こちらも参考にさせていただきたい。

2. 海洋における Fe 研究との出会い

私が Fe 研究を始めた 1990 年代前半の「海洋における Fe 研究」は、今思えばまだ黎明期であった。当時、大気ダストが海洋における Fe の供給過程として主なものであると報告されていた。その頃、私には「西部北太平洋亜寒帯域の HNLC 海域には黄砂の飛来などによる

Table 1 Timeline of Fe-related studies, including the SEAREX project (Duce, 1989), GEOSECS (Craig and Turekian, 1980), Fe hypothesis (Martin, 1990), GEOTRACES (Anderson, 2020), OPES (Takeda *et al.*, 1999), SEEDS (Tsuda *et al.*, 2003), SERIES (Boyd *et al.*, 2004), SEEDSII (Tsuda *et al.*, 2007), W-PASS (Uematsu *et al.*, 2014), Amur-Okhotsk project (Shiraiwa *et al.*, 2012), and OMIX project (Yasuda *et al.*, 2021b). Modified from Nishioka *et al.* (2021), JO.



Fe 供給があるが、東部のアラスカ湾同様に Fe 制限海域なのか？」などの疑問があった。さらに西部北太平洋における Fe の分布は未解明であった。そのため、西部北太平洋における Fe の分布や循環については議論すらされていない状況であった。

私が北海道大学（北大）水産学部に入學した 1989 年頃、海洋学の世界ではまさに前述の「Iron age in Oceanography」が始まった時期であった。1992 年に、当時、松永勝彦教授の率いる海洋化学講座に所属したとき、研究室のゼミでは大気から海洋への Fe 供給過程の発見に関する論文や (Uematsu *et al.*, 1983; Duce and Tindale, 1991), 「Fe 仮説」を証明しようと Martin 自身が精力的に執筆していた論文 (Martin and Fitzwater, 1988; Martin and Gordon, 1988; Martin *et al.*, 1989; Martin *et al.*, 1990; Martin *et al.*, 1991) が紹介されていた。海洋化学講座の研究室では、多くの学生が海洋の微量金属に関わるテーマに取り組んでいた。当時研究室の助手でいらした久万健志先生（現 北大名誉教授）は、海洋の Fe 研究において世界の最先端の論文を書くことに挑戦されておられ、「海洋学は世界を相手にして研究しないとダメだ」と教えていただいた。このような環境の中で、私は修士論文の研究テーマを通じて初めて Fe に関わる研究に出会った。外洋の Fe 濃度の測定は極めて困難であり、研究室の修士課程の先輩 2 名が取り組み苦労されていた。一方で、研究室では「森林から河川を介して沿岸に運ばれる Fe の役割」に関する研究も進められており、私の研究テーマは「気仙沼湾における河川からの Fe 供給と一次生産に果たす役割」を明らかにするものであった。当初、船に乗れる外洋域の研究を志望していた私は、「陸と沿岸を結ぶ物質循環の研究」をテーマとして与えられたことに少しがっかりしたのを記憶している。しかし、この研究を通じて、学生だけで気仙沼湾に乗り込み、地元の漁師さんの協力を得ながら、学生主体で現地調査を実施し、研究のデザインから分析、成果の取りまとめに至るまでを任されたことは、研究のノウハウを学ぶ上で大変貴重な経験となった。また、今振り返ると、この「陸と海をつなぐ物質循環の研究」は、後に取り組むことになる「大陸と大洋の物質循環的つながりの研究」に結びつく研究であった。また、この修士論文の研究とは別に、松永先生は私に練習船おしよる丸の南方航海（インド洋の調査）と北星丸の北洋航海（北太

平洋の調査）に参加する機会を与えてくださった。これらの航海で実際に船に乗り、サンプルやデータを集めて研究していく楽しみを知った。また自分が船酔いをしない体質であることも判明し、その後の人生に大きな影響を与えた。これらの修士課程での体験を経て、「海の研究者という職業も面白そうだな」と考えるようになった。

3. 海洋における存在状態別 Fe 濃度の測定とメソコスム実験プロジェクトへの参加

世界では、1993 年と 1995 年に初の「Fe 散布実験」が MLML のグループによって実施され、Fe が海洋一次生産の制限要因であるか否かを明らかにする実証実験が進められていた。一方で、日本の「海洋における Fe 研究」の重要な進展として、当時、京都大学の小畑 元さん（現 東京大学）と中山英一郎先生（当時 滋賀県立大学）は、カラム濃縮と化学発光法を利用した超高感度の「超微量 Fe 分析計」の開発に精力的に取り組まれており、1993 年にはその成果が報告されていた (Obata *et al.*, 1993)。また、財団法人（当時）電力中央研究所（以下、電中研）では、武田重信さん（その後 長崎大学）が、白鳳丸を利用して北太平洋亜寒帯域、東部太平洋赤道域、南極海といった世界中の HNLC 海域で、精度の高いクリーン技術をもちいた船上 Fe 添加培養実験を実施し、その成果が報告されていた (Takeda *et al.*, 1995; Takeda and Obata, 1995; Takeda, 1998)。

1995 年 4 月に私は修士課程を修了し、電中研に入所した。当時、電中研では武田さんが「海洋生態系を介した CO₂ 固定に関する研究」として、Fe を海洋に散布することで CO₂ 固定を促進する方策について、科学的に検討する研究テーマを立ち上げた直後であった。私は武田さんの下で、本格的に海洋における Fe の研究を実施することになった。電中研には、小畑さんと中山先生が開発された「超微量 Fe 分析計」が一早く導入されており、私はこの Fe 分析計や武田さんが整備したクリーンルームなど、世界的にみても海洋における Fe 研究を進める上で非常に恵まれた環境で研究を始めることができた。

この「海洋生態系を介した CO₂ 固定に関する研究」では、カナダ海洋科学研究所 (Institute of Ocean Science, 以下 IOS) の C.S. Wong 博士をカウンターパー

トに、カナダ・ビクトリア州のサーニッチ入江での沿岸メソコスム実験や、HNLC 海域の代表例であるアラスカ湾 St. P (北緯 50 度, 西経 145 度; Fig. 1) で外洋メソコスム実験を実施する Open ocean plankton ecosystem study (OPES) プロジェクトが進められた (Takeda *et al.*, 1999)。この実験は、メソコスムと呼ばれる巨大ポリエチレンバックを海に浮かべ、その中に天然のプランクトン生態系を閉じ込め、人為的操作に対する生態系の応答を観察する研究手法である。私はこのプロジェクトの中で、人為的に誘発した植物プランクトンブルーム中の Fe の動態を研究した。この研究では、コロイド態を分画する存在状態別 Fe 濃度の測定法を活用し、Fe の化学形態や挙動に関する新たな知見を得ることを目指した。当時は海水中の Fe の化学形態について未解明な点が多く、さまざまな議論が行われている時代であった。Gledhill and van den Berg (1994), van den Berg (1995), Rue and Bruland (1995) などの電気化学測定法を用いた方法や, Kuma *et al.* (1996) などで実施された Fe 溶解度の測定などによって、海水中の Fe が有機配位子と結合し、有機錯体として存在していることが見えてきた時代であった。私は、「0.2 μm 以下で便宜的に分けられていた溶存 Fe と呼ばれる画分には、有機錯体など真に溶けている画分と、それ以外の微細なコロイド態が存在しているのではないか？」と考えた。また「それぞれの画分は生態系内での動態や、植物プランクトンによる利用され易さが違うだろう？」と考え、それらを観察することで海洋生態系における Fe の動態を観ようと試みた。以前からも限外濾過膜を利用して Fe コロイド態の測定を試みた研究例があったが、限外濾過膜への吸着等が防げず低濃度域の定量的な評価には至っていなかった。私は三菱レーヨン株式会社に就職した先輩の伝手を頼り、同社で開発されていたポリエチレン製の中空糸膜を使ってフィルターを特注で作成してもらい、それを用いて吸着を防ぎながらクリーンに真の溶存態 Fe とコロイド態 Fe を分画する方法を検討し、室内培養実験や、メソコスム実験の観測に持ち込んだ。その結果、Fe 供給の多い海域では、海水中に存在している Fe の主な形態はコロイド態であり、海洋植物プランクトンブルームが起こる際に、そのコロイド態はダイナミックに粒子態に移行し、最終的には沈降除去されていくことを、

室内実験や沿岸メソコスム実験で捉えることに成功した (Nishioka and Takeda, 2000; Nishioka *et al.*, 2001a)。この沿岸メソコスム実験では、その後、長く研究で一緒にすることになる、津田 敦さん (現 東京大学)、小畑さん、鈴木光次さん (現 北大地球環境) などと初めて協働させていただいた。また小畑さんには「超微量 Fe 分析計」の分析上の詳細なコツなどを丁寧に教えていただいた。

沿岸におけるメソコスム実験自体は、それまでにも IOS が数多くの実績を上げていた実験であったが、外洋域で実施するメソコスム実験は武田さんと Wong さんが計画した世界でも初めての試みであった。この外洋メソコスム実験では、HNLC 海域で実施することで、メソコスム内生態系への Fe 添加の影響を観ようというのが目的であった。この外洋メソコスム実験を遂行するために、1996 年から毎年夏に、私は武田さんと共同研究者らとともに IOS に滞在することになる。さらに私は、1998 年から 1999 年にかけて IOS に長期滞在する機会が得られ、現地で準備や実行のために奔走した。1997 年夏と 1998 年夏の 2 回、アラスカ湾の St. P で外洋メソコスム実験にトライしたが、入江で守られていた沿岸メソコスム実験とは違い、自然界の圧倒的な力に対して外洋メソコスムは耐えることができず大破し、実験としては失敗に終わっている。この経験を経て、日本主導の海洋 Fe 研究も世界で実施され始めていた実際の海に Fe を散布する「Fe 散布実験」へとシフトしていった。

4. 東西北太平洋亜寒帯域における Fe の分布に関する研究

前章に記したとおり、1998 年から 1999 年にかけて、私は IOS に滞在する機会が得られた。この滞在中に同研究所が実施する Line P (バンクーバー島南端から St. P をつなぐ測線) (Fig. 1) の定線観測に、季節を変えて参加する機会を得た。これが私の「北太平洋の Fe 循環の研究」の始まりであった。Fig. 2 に示すのは、1997 年に公表されたその当時の海洋における Fe の鉛直プロファイルのある観測点である (Johnson *et al.*, 1997)。当時、外洋域の Fe 濃度を正確に測定できる研究機関はまだ少なく、データの存在する海域も主に東部北太平洋に限られていた。この東部北太平洋の海域のデータも、その大

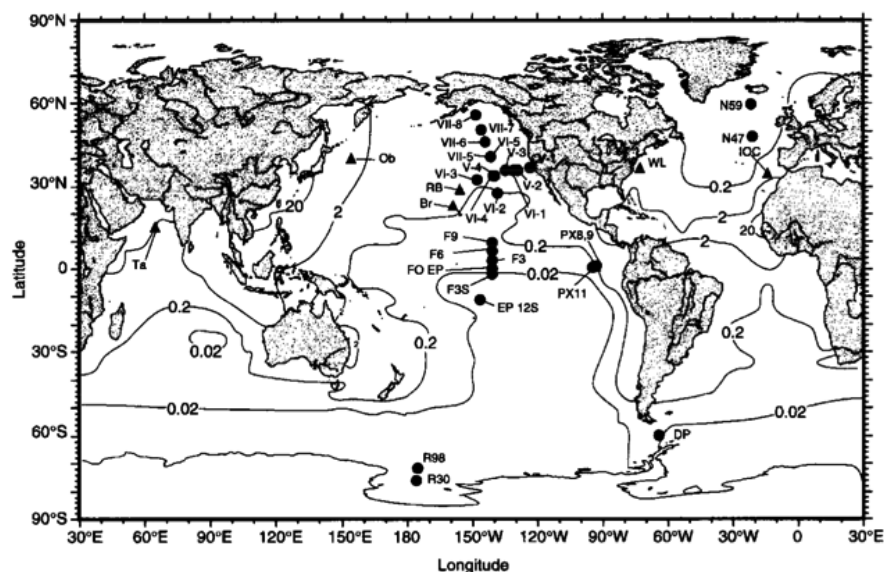


Fig. 2. Locations of stations where Fe measurements were conducted prior to 1997. The figure is adapted from Johnson *et al.* (1997), Fig. 1. Filled circles represent stations where Fe was measured by the Moss Landing Marine Laboratory.

部分がMLMLのMartinらのグループのものであった。そのような中、電中研とIOSはアラスカ湾のFe濃度を測定するための共同研究に取り組んだ。私はカナダ滞在中に「超微量Fe分析計」をIOSに持ち込んでいたため、分析計を船に寄せ、年3回、6月、9月、2月に実施された「P/V J.P. Tully」によるLine P航海に参加し、アラスカ湾における存在状態別Fe濃度の測定に取り組んだ。カナダ側でも同じ原理を用いた分析計の作成を試みており、我々の共同研究では両機関が協力しながらサンプルを集め、値を比較しながら正確なデータを集める努力を進めた。このプロジェクトでも、いかにクリーン技術を導入してサンプリングを実施するかが鍵であったが、そのノウハウについてはこの分野の第一人者であるKenneth W. Bruland博士に、E-mailのやりとりで直接教えていただいた (Bruland *et al.*, 1979; Bruland *et al.*, 1994; Bruland and Rue, 2001)。当時のクリーン採水は、今思えばまだ発展途上段階であり、1つの測点の鉛直分布のサンプルを集めるためには、テフロンコートされた30 LのGo-Flo採水器 (当時は液面の触れる表面積/体積比がなるべく小さいものを使う必要があると考えられていた) をケプラーロープに2本ずつ直付けし

て、繰り返し複数の深度から採水するという大変効率の悪い、苦勞の多い作業を実施する必要があった。このクリーン技術によるサンプリングの実施においては、IOSのテクニシャンであったW.K. Johnsonさんと苦勞を共にした。

アラスカ湾では過去にMLMLのFeデータが測定されていたが、3回の航海で私が実施した研究では、中空糸膜を用いてコロイド態を分けた存在状態別Fe濃度の測定に挑戦し、コロイド態のFeの分布を世界で初めて報告することができた (Nishioka *et al.*, 2001b)。ただし、この論文の出版と同じ年にWu *et al.* (2001)によってScience誌にコロイドFeの分布が掲載されている。後から聞いた話だが、このScience誌の論文の出版と私の出版時期は競争関係にあり、私の論文の出版をある査読者に引き伸ばされていた経緯があったことをEditorから聞いた。この時、私は、コロイド態のFeの分布の報告が自分の想定以上にインパクトのあることに気が付き、また、科学的発見を世界で初めに報告することに研究者がいかに熾烈に争っているのかを実体験し、大変勉強になった。

IOSから帰国した翌年の2000年になって、西部北太平

洋亜寒帯域およびオホーツク海で実施された「みらい」観測航海に乗船させてもらえる機会が巡ってきた。この頃、北太平洋亜寒帯域の生物地球化学的なパラメータについて東西比較が議論されており (Harrison *et al.*, 1999; Shiomoto and Asami, 1999; Suzuki *et al.*, 2002; Harrison *et al.*, 2004), 当時唯一の Fe 供給源と考えられていた大気ダスト起源の Fe 供給が, その東西差を生み出す議論に使われていた。私は当時, 「西部北太平洋の Fe の濃度はどのような分布であるのだろうか? 大気ダストなどの影響が鉛直分布にも現れるのだろうか?」という疑問を持っており, そのために, 東部アラスカ湾のデータと西部亜寒帯域のデータを比較したいと考えていた。北大海洋化学講座の先輩であった海洋研究開発機構の中林成人さんのお世話で, 「みらい」に搭載されていた 12 本掛けの CTD-CMS システムを専有で使っていただくことを許され, アラスカ湾で実施したクリーン技術を導入して, Fe の採水と観測を一人で実施した (もちろん船の多くの方のサポートを受けながら)。その結果, 北太平洋亜寒帯域の西部海域表層の Fe 濃度は, 東部とほぼ同様に極低濃度であったが, 中層水塊のもつ Fe 濃度は東部海域に比べて西部海域は 2 倍以上高く, そこには粒子やコロイド態の Fe が多く, その分布には大きな違いが見られた。この観測で得られた東西の分布の

違いは, 西部海域が中層でより多くの Fe の供給を受けている事を示唆した (Fig. 3) (Nishioka *et al.*, 2003)。しかし, この時点ではまだ知見が乏しく, 西部北太平洋の中層の高濃度 Fe 水塊を生み出す Fe 供給過程については理解できなかった。西部北太平洋亜寒帯域の Fe 観測結果を見て, 「なぜ西部北太平洋亜寒帯域は中層で高い Fe 濃度の分布を持つのだろうか?」と考えた。また, 「中層水塊で高い値をもつ西部北太平洋亜寒帯域の Fe の分布は, 本当に大気経由の Fe 供給で説明できるのか?」という疑問が強くなっていった。

5. 海洋 Fe 散布実験への参加

世界的な動向としては, MLML のグループが東部太平洋赤道域で実施した「Fe 散布実験」の後, 当時ニュージーランド国立大気水圏研究所 (National Institute of Water and Atmospheric Research : NIWA) に所属していた Philip Boyd 博士らが率いるグループが, 2000 年に南極海で「Fe 散布実験」を実施し大きな話題となっていた (Boyd *et al.*, 2000)。北太平洋亜寒帯域の HNLC 海域は, この時点ではまだ「Fe 散布実験」に関しては手付かずの状況であった。

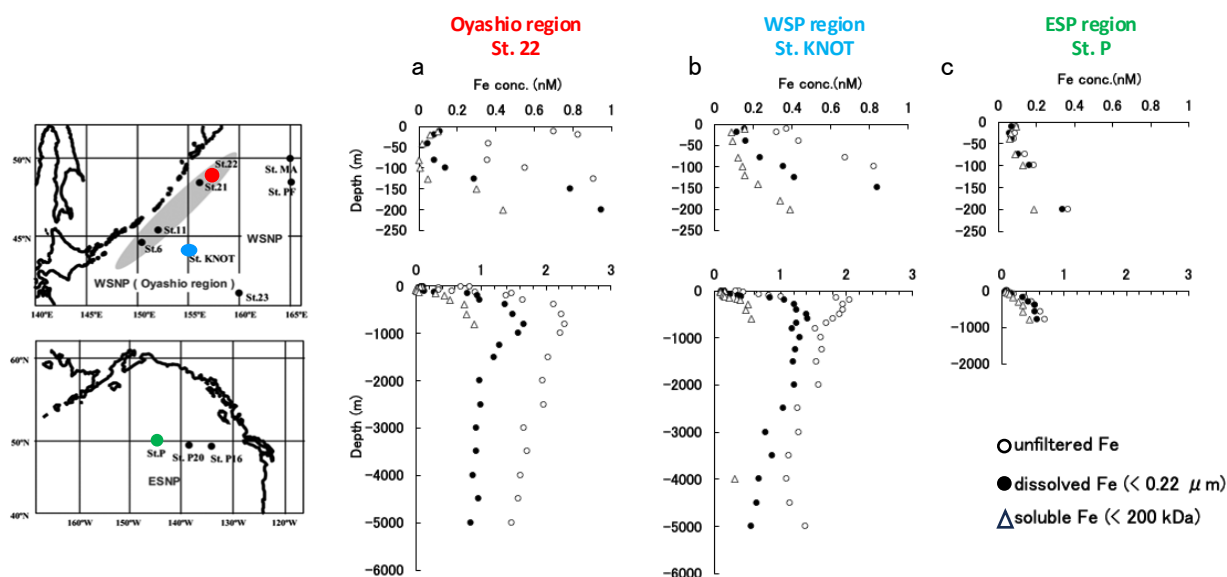


Fig. 3. Vertical distribution of size-fractionated Fe in (a) the Oyashio region, (b) the western subarctic Pacific (WSP), and (c) the eastern subarctic Pacific (ESP). Modified from Nishioka *et al.* (2003).

私は、東部太平洋アラスカ湾での存在状態別の Fe 濃度観測の結果を引っ提げ、2000 年 1 月に米国で実施された Ocean Science Meeting に参加した。ポスター会場で発表していると、オランダ王立海洋研究所 (Royal Netherlands Institute for Sea Research: NIOZ) の Hein J.W. de Baar 博士が、存在状態別の Fe 濃度分析に興味を持ち、私の話を聞きにきてくれた。その場で彼は、「2000 年 11-12 月に EU の研究者達が主導して南極海で実施する Fe 散布実験に参加しないか」と私を誘ってくれた。外洋メソコスム実験の失敗から、日本でも北太平洋亜寒帯域における「Fe 散布実験」が検討され始めていたことから、「実際に Fe 散布実験とはどのような手法で実施されているのか？」を視察してくる意味もあり、私が南極で実施される「Fe 散布実験：EisenEx」に日本から 1 人で参加することになった。この実験で私が Hein de Baar 博士から期待されていた任務は、コロイド態を含めた存在状態別 Fe 濃度測定法を用いて、散布した後の Fe の挙動を明らかにすることであった。実験の結果、人為的に散布された硫酸 Fe ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) は、最初 Fe (II) として放出されるが、海水中では速やかに Fe (III) に酸化されコロイド態の Fe となり、粒子化して、除去されていく様子を捉えることができた。この国際共同プロジェクトの参加では、複数の論文となる成果も得られ (Nishioka *et al.*, 2005; Croot *et al.*, 2005; Boye *et al.*, 2005; Boye *et al.*, 2010), 「Fe 散布実験」のノウハウを学ぶこともできた。しかし、私にとっての最も大きな成果は、多くの同世代を含む数多くの海外の研究者との交流ができたことであり、それらは大変刺激的であった。これらの経験は、その後の私の研究者人生の中で、多くの国際的な人脈形成につながった。

2000 年の年末に日本に戻るとすぐに、翌年の 6 月に日本のコミュニティが西部北太平洋亜寒帯域の HNLC 海域で「Fe 散布実験」を実施するための準備が始まった。この「Fe 散布実験」を主導したのは当時北海道区水産研究所に所属していた津田さん (現 東京大学)、東京大学農学部に移られていた武田さん (元 長崎大学) であり、国立環境研究所にいらした野尻幸宏さん (元 弘前大学)、東北区水産研究所にいらした齊藤宏明さん (現 東京大学)、北大水産学部の工藤勲さんなどと協働させていただいた。当時 30 代前半の私を含め、40 代前半から 30 代

の若い研究者達だけで実施したプロジェクトであった。津田・武田 (2005) には別の角度から詳しい立ち上げの経緯についてまとめられているので興味のある方は一読いただきたい。電中研からは、Fe 散布装置作製、Fe 散布海域形成、Fe 動態観測担当の私と、水塊トレーサー関連の物理担当の津旨大輔さん (現 筑波大学)、芳村毅さん (現 北大水産学部) が参加し、国立環境研究所にいらした今井圭理さん (現 北大水産学部) などと、Fe 散布海域を形成するという責任の重い部分を任せられ、プロジェクトを成功させるためには絶対に失敗できないという強いプレッシャーの中、「Fe 散布実験」の実動部隊として 6 ヶ月間準備に奔走した。2001 年夏に西部北太平洋亜寒帯域で初めて「Fe 散布実験」が実施され、私は Fe および水塊トレーサーの散布手法、Fe 散布水塊の観測手法の検討や、Fe の存在状態の変化と植物プランクトン増殖量に関する研究などで論文を執筆し、またプロジェクト全体でも大きな成果を挙げることができた (e.g. Nishioka *et al.*, 2003; Tsuda *et al.*, 2003; Tsumune *et al.*, 2005)。この実験が行われるまでは、西部北太平洋は黄砂などの大気ダストが降り注いでいるため、Fe が一次生産の制限要因にはなっていないという考えもあった。我々の実施した Fe 散布実験の結果は、それまで Fe 不足が議論されていた東部アラスカ湾だけでなく、北太平洋亜寒帯域の西部海域においても Fe の供給が植物プランクトン量を増大させ、生物種組成、有機炭素生成量をコントロールする要因であることを示し、当該海域における Fe の重要性を確実なものにした (Fig. 4)。北太平洋亜寒帯域では、計 3 つの「Fe 散布実験 (SEEDS, SEEDS II, SERIES)」(場所は Fig. 1) (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、西部と東部の北太平洋亜寒帯域の広い範囲で、植物プランクトンのバイオマスが Fe の利用可能な量によって制限されていることが明らかになった (e.g. Tsuda *et al.*, 2003; Nishioka *et al.*, 2003; Boyd *et al.*, 2004; de Baar *et al.*, 2005; Tsuda *et al.*, 2007; Saito *et al.*, 2009; Suzuki *et al.*, 2009; Nishioka *et al.*, 2009; Boyd *et al.*, 2007)。

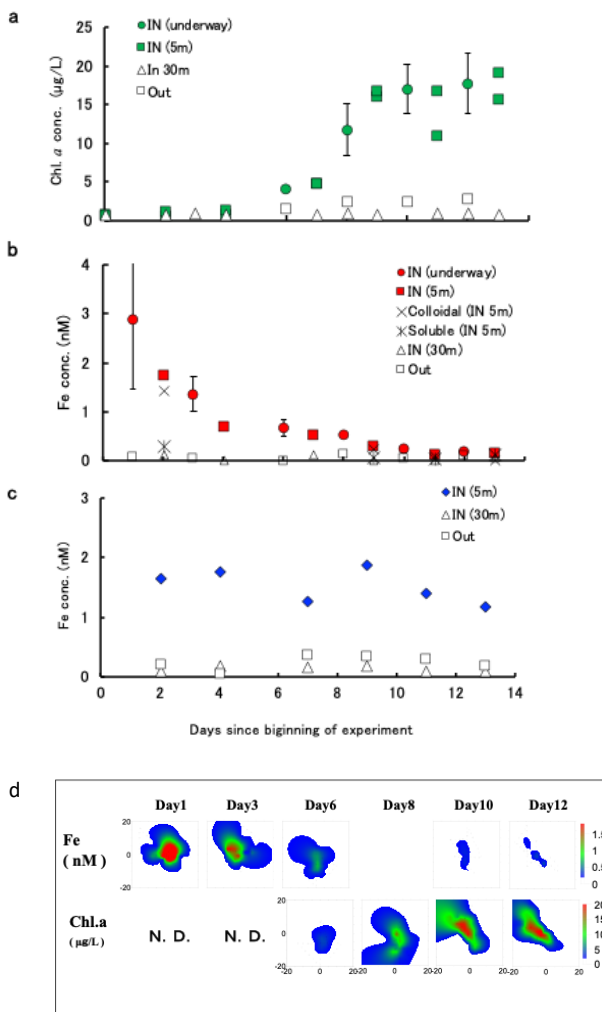


Fig. 4. Time-series measurements during the SEEDS I experiment, showing (a) chlorophyll *a* concentration, (b) dissolved Fe concentrations ($<0.22 \mu\text{m}$), (c) labile particulate Fe concentrations ($>0.22 \mu\text{m}$), (d) evolution of horizontal distribution in chlorophyll *a* and dissolved Fe concentrations during SEEDS I experiment. Modified from Nishioka *et al.* (2003) and Tsuda *et al.* (2003).

6. 親潮域の Fe 濃度季節変動の観測

一連の「Fe 散布実験」の結果、西部北太平洋亜寒帯域も他の HNLC 海域と同様に、Fe が植物プランクトンの増殖の制限要因となっていることが確実となった。一方で、親潮域や亜寒帯外洋域で実施されていた時系列観

測などから、西部北太平洋亜寒帯域および親潮域などでは、顕著な季節性の植物プランクトン増殖（春季ブルーム）が見られること、また春季ブルームは Fe 不足により終焉を迎えることなどが報告されていた（Takahashi *et al.*, 2002; Imai *et al.*, 2002; Saito *et al.*, 2002）。このため、自然界の植物プランクトン生産の変動を理解するために、実際の海洋における Fe 循環を理解する必要があった。この時点の私の中での疑問は、「西部北太平洋亜寒帯域の季節性の植物プランクトン増殖を生み出すための Fe は毎年どのように供給されているのか？」というもので、また「栄養塩が残存するという HNLC 海域の特徴が維持されるためには、その Fe の供給量は、植物プランクトンが栄養塩を使い尽くすほど十分な量ではないはずである」とも考えた。HNLC 海域の特徴が維持される程の微妙な量の Fe 供給が、それまで主な Fe 供給過程とされていた「スプラディックな大気ダスト由来の Fe で説明できるのか？」という点で疑問に思った。そこで、私は西部北太平洋亜寒帯域の親潮域における時系列観測に取り組み、Fe 濃度の季節変動とそれを支配する要因を明らかにすることにチャレンジした。この親潮域の観測では当時の水産研究所が実施していた定線 A-Line 観測網を利用させていただいた。当時、東北区水産研究所にいらした齊藤さん、北海道区水産研究にいらした小笠恒夫さん、黒田寛さんにお世話になり、2003 年から 2008 年まで集中的に、またその後 2014 年、2018 年に、さまざまな季節に実施されている北光丸航海や若鷹丸航海に乗船させていただいた。この期間、私は、クリーン技術を駆使した時系列観測を行うため、一年中採水器や採水ボトルの洗い物に追われて月日を過ごした。この時系列観測の結果、表層の Fe 濃度は、栄養塩の濃度と同様に冬季の混合によって高められ、春から夏にかけて植物プランクトンの増殖とともに減少し、再び秋から冬の混合によって増加するサイクルを繰り返すことが明らかになった（Fig. 5）。この結果は、それまで大気経路で飛来するダスト起源の Fe が海洋への供給源として重要だと考えられていた定説（e.g. Mahowald *et al.*, 2005）を覆し、前述した西部北太平洋亜寒帯域の特徴である中層で高められた高 Fe 濃度の水塊が、冬季混合で表層に回帰し、春季植物プランクトンブルームを生み出していることを突き止めた（Nishioka *et al.*, 2011）。

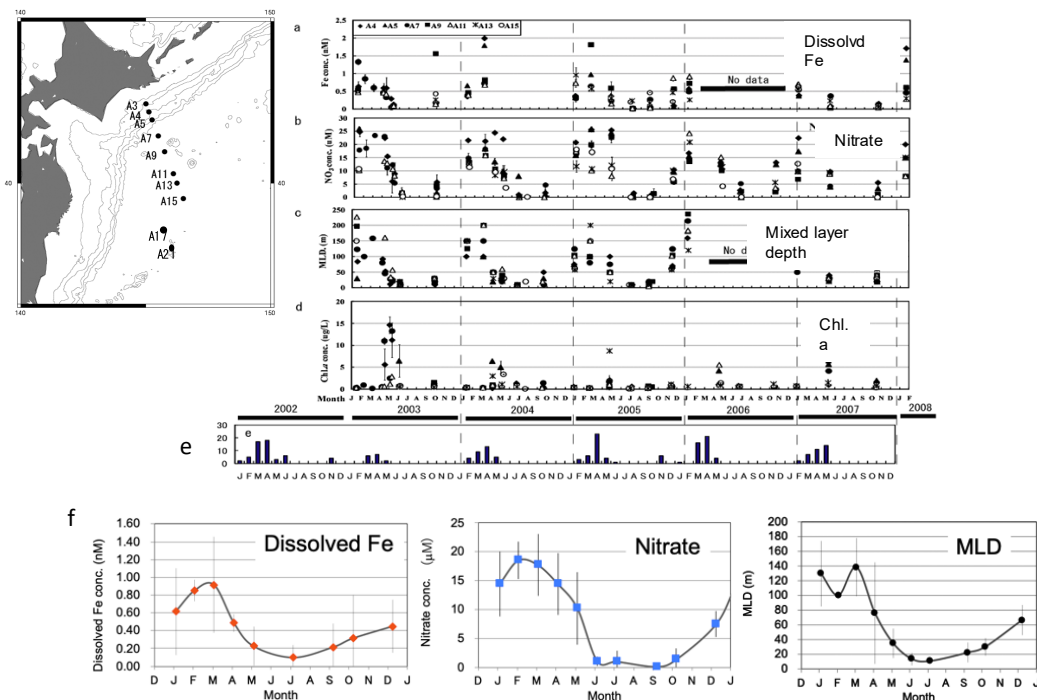


Fig. 5. Changes along the A-line, showing (a) surface dissolved Fe concentrations, (b) surface nitrate concentration, (c) surface mixed layer depth (MLD), (d) surface chlorophyll a concentrations, along A-line, and (e) number of the dust events (visually transmittance survey). (f) compile climatology data for dissolved Fe, nitrate, MLD along A-line. Modified from Nishioka *et al.* (2011).

7. 環オホーツク海域の物質循環研究への展開

2005年6月に、私は電中研から北海道大学低温科学研究所（以下、北大低温研）附属環オホーツク観測研究センターに移籍した。親潮域の時系列観測を実施している最中であった。このセンターは、2004年4月に低温研の附属施設として、オホーツク海を中心とする北東ユーラシアから北太平洋、北極圏から亜熱帯にわたる地域（環オホーツク圏）が地球規模の気候変動に果たす役割を解明すること、また環オホーツク圏における気候変動のインパクトを正しく評価することを目的として設立された。移籍後、私はこのセンター内に自身の研究室を立ち上げ、以降、北大低温研や地球環境科学研究所所属の教員の皆さん、研究室のテクニシャンである村山愛子さん、低温研技術専門職員である小野数也さんをはじめとする技術部の皆さん、数多くの学生の皆さんと、篠原琴乃さん、水野紗希さんをはじめとする環オホーツク観測研究センター・スタッフの支援を受けながら研究を進めた。

環オホーツク観測研究センターに移籍後、私は北太平洋とその縁辺海であるオホーツク海やベーリング海において包括的な観測研究を実施した。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年間で大きく進展した主な理由の一つは、センター発足以前に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つなぐ海洋循環が明らかになっていったことにある。この点で、私は大変良いタイミングで低温研に移籍することができた。

我々が北太平洋で「Fe 散布実験」を実施していた同時期に、当時低温研にいらした若土正暁さん（現 北大名誉教授）が率いる戦略的基礎研究（以下、若土 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」が実施されていた。この若土 CREST プロジェクトでは、大島慶一郎さん（現 北大低温研）、深町康さん（現 北大北極域研究センター）、水田元太さん（現 北大地球環境）、

当時低温研におられた中塚武さん（現 名古屋大）らが活躍されており、環オホーツク海域の海洋物理循環（一部物質循環）に関わる数多くの成果が発表されていた（e.g. Ohshima and Martin, 2004; Ohshima *et al.*, 2002; Nakatsuka *et al.*, 2002; Nakatsuka *et al.*, 2004）。オホーツク海と北太平洋をつなぐ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。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、この若土 CREST プロジェクトでは、北大低温研とロシア極東海洋気象学研究所（Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute（以下 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ていた。この若土 CREST プロジェクトによって、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）、北太平洋中層水（NPIW）形成につながる環オホーツク海域の「中層循環」（Itoh *et al.*, 2003; Fukamachi *et al.*, 2004）など、「オホーツク海と北太平洋をつなぐ海洋循環」の実態が続々と明らかにさ

れていた。

2004 年からの5年間は、「ユーラシア大陸からのアムール川の流入が、栄養物質としての Fe をオホーツク海に運び、さらには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」という仮説を検証することを目的とした「アムール・オホーツクプロジェクト」（Shiraiwa, 2012）が立ち上がり、実施された。このプロジェクトは、当時、低温研から総合地球環境学研究所（京都）に出向していた白岩孝行さん（現 環オホーツク観測研究センター）、と中塚さんが率いており、私もプロジェクト初期に電中研に所属していた時から参加させていただいた。その後、このプロジェクトとの関わりもあり、環オホーツク観測研究センターに呼んでいただいた。

移籍した直後、低温研で明らかにされていた海洋物理的な環オホーツク海域における「中層循環」の知見を考慮し、私がそれまでに収集していた西部北太平洋および一部オホーツク海における Fe 濃度データの解析を進めた。その結果、「オホーツク海の北西部の大陸棚堆積物に由来する Fe が、環オホーツク海域の中層循環を通じて輸送され、北太平洋の生物生産を支えている」という「中層 Fe 仮説」（Fig. 6）を提唱した論文、Nishioka *et*

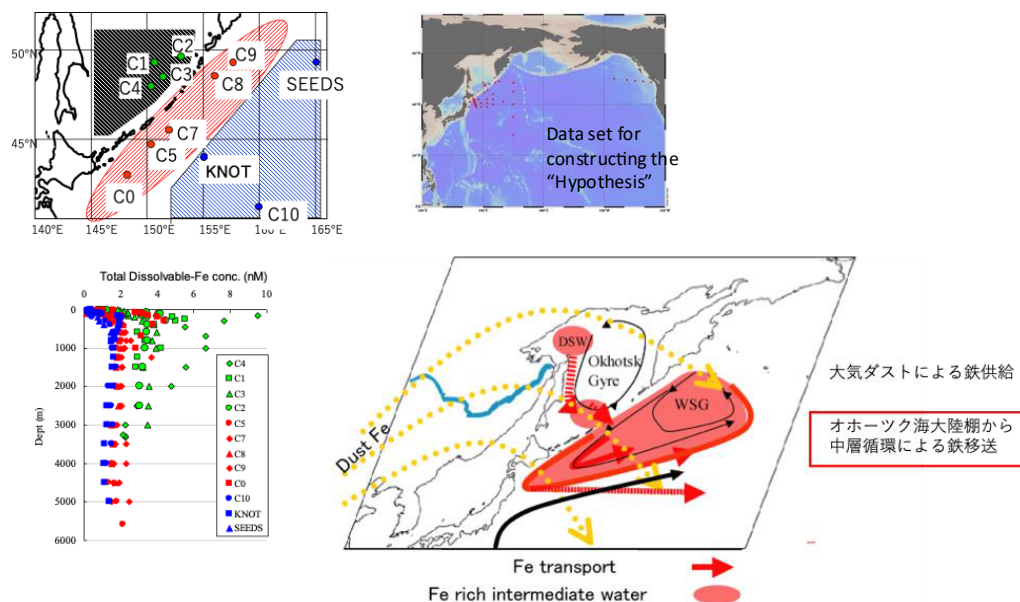


Fig. 6. Proposed hypothesis: “Intermediate water Fe hypothesis” suggests Fe is transported from the north-western continental shelf in the Sea of Okhotsk to the western subarctic North Pacific. Modified from Nishioka *et al.* (2007).

al. (2007) を執筆し、報告した。それ以降、私はこの仮説を検証していくためにロシア船を用いた観測研究を進めることになる。

8. 北方圏縁辺海におけるロシア極東海洋気象学研究所との共同観測

前述したとおり私は、「なぜ西部北太平洋亜寒帯域は中層で高い Fe 濃度の分布をもつのだろうか？」と疑問に思っていた。そこで、北太平洋の西部海域の高い Fe 濃度をもつ中層水塊がどのように形成されているのかを明らかにするために、中層循環を駆動する北方圏縁辺海（オホーツク海やベーリング海）に着目した研究を展開することになる（Nishioka *et al.*, 2014a; Nishioka *et al.*, 2022a）。この研究には、海洋物理のプロジェクト同様に、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。2004 年に環オホーツク観測研究センターが発足して以降、FERHRI との共同研究によるロシア船を使った共同観測は、2006 年、2007 年、2010 年に R/V Khromov 号、2011 年に R/V Gordienko 号、2014 年、2018 年の R/V Multanovski 号による計 6 回実施した。若土 CREST で培ってきた FERHRI の Y.N. Volkov 所長との関係を引き継ぎ、ロシア船を出していくための様々なノウハウを中塚さんから教えていただいた。これらのロシア船を用いた全ての研究航海は、東京大学大気海洋研究所の安田一郎さんと一緒に実施した。航海を実施するためには、ロシア側との様々な交渉、手続き、船との打ち合わせが必要であった。そのため、安田さんと私は、2004 年以降、ほぼ毎年 2 回以上、FERHRI が所在するウラジオストックを訪問した。最初の 2006 年の航海前には、中塚さんと共に訪れ、その後、若土さん、当時、海洋研究開発機構に所属されていた原田尚美さん（現 東京大学）、環オホーツク観測研究センターの江淵直人さん、三寺史夫さんとも、多くの機会にわたり共に FERHRI を訪問した。一方で、アムール・オホーツクプロジェクト終了後の 2010 年以降は、私はロシア船航海を実施するための予算の獲得にいつも頭を悩ませた。この予算獲得のために、さまざまなプロポーザルを申請する努力を継続して続けた。また、共同研究者である安田さん、江淵さん（当時、環オホーツク観測研究センター、センター長）、大島さん、

三寺さん、また海洋研究開発機構の原田さん、当時北大水産科学研究院にいらした平澤 享さん（現 国立極地研）にも予算獲得のために大変なご尽力をいただいた。また、実際にロシア船で観測をするためには、日本の研究船で観測を実施するのとは全く違う準備が必要であった。ロシア船を用いて Fe の観測を行うにあたり、特別な船の艤装と準備が必要であった。時には船をドックに入れて防錆のための塗装を施した。また、船の甲板上にクリーンに採水を可能とする TENT を設置したり、アーマードケーブルの被覆を行ったほか、クリーンルームとなるブースをラボ内に設置した。さらに、船に付随するあらゆる金属パーツをプラスチックや新品のステンレスに交換するなど、特別な艤装が必要であった。これらの船の艤装は、低温研の技術部が総力を上げて実施してくれた。また、観測に必要な CTD、乱流計、超純水装置、分析機器など、あらゆる機器類を搭載する必要があった。これらのロジスティックス手続きは複雑であり、大きな苦労を要した。観測の準備段階から実際の船上観測に至るまで、私と共に最前線で活動してくれたのは、研究室テクニシャンの村山さんおよび低温研技術専門職員の小野さんであった。さらに契約などの煩雑な事務手続きにおいては、低温研の事務スタッフの支援も欠かせないものであった。また、私が実施したロシア船観測の全ての航海で多くの科学的成果をあげることができた理由は、国内外から数多くの優秀な研究者が、それぞれの研究課題をもって乗船し、この共同研究に参加してくれたからである。2006-2018 年に実施したロシア船観測 6 航海で、乗船者数は延べ 113 名に達した。これらの研究者は国内外の 16 研究機関から参加し、さまざまな角度から環オホーツク海域の研究を推進してくれた。さらにロシア船による観測は、FERHRI の A. Scherbinin さんや S. Yarosh さん、船長など、強靱な体力と忍耐力をもつロシアの海の男たちの絶大なる現場サポートがなければ成し得なかった。彼らは気持ちのいい海の男ばかりで、我々をいつも海の仲間として扱ってくれ、「なんとしてでも成果を持ち帰らせてやる」という意気込みで航海を支えてくれた。

9. 国内観測研究との融合

前述したとおり、海洋物理的な観測研究では、「オホー

ツク海の海水によって生み出される海洋循環が、NPIWの形成過程を介して広く北太平洋の中層循環に影響を与えていることが明らかになっていた。「中層 Fe 仮説」を実証していくためには、日本の研究船で集めた北太平洋亜寒帯域側のデータと、ロシア船で集めた北方圏縁辺海であるオホーツク海とベーリング海のデータを統合して「北方圏縁辺海と北太平洋亜寒帯域をボーダーレスにつなぐ物質循環リンケージ」を理解する必要があった。そのころ北太平洋側では、我々以外にも、京都大学の宗林由樹さんや北大の久万健志先生のグループから、Feの鉛直分布の報告が蓄積されていた (e.g. Fujishima *et al.*, 2001; Ezoe *et al.*, 2004; Takata *et al.*, 2006; Kitayama *et al.*, 2009; Uchida *et al.*, 2013)。

私も、ロシア船観測を始める前から北太平洋側で集めていたデータをさらに充実させるために、国内の研究船で行われていた観測航海にも積極的に参加し Fe 濃度のデータを蓄積していった。その際には、海洋研究開発機構 学術研究船 白鳳丸、新青丸、北大練習船おしよる丸、

水産研究・教育機構 調査船 北光丸などにお世話になった。特に白鳳丸航海では、蒲生俊敬先生 (東京大学名誉教授)、宗林さん、小畑さん、張勁さん (現 富山大学)、近藤能子さん (現 長崎大学)、田副博文さん (現 弘前大学)、則末和宏さん (現 新潟大学)、南秀樹さん (現 東海大学) らと進めている国際プロジェクト GEOTRACES の一環で実施した航海でデータを集めることができた (Nishioka and Obata, 2017)。ここでも GEOTRACES の航海等すべてを率いてくださっている小畑さんには、大変お世話になった。また、小池勲夫先生 (現 東京大学名誉教授)、植松光夫先生 (現 東京大学名誉教授) や小川浩史さん (現 東京大学) が率いた白鳳丸航海でも鍵となるエリアの観測をさせていただいた。特に 2008 年の白鳳丸の航海では、NPIW の水塊を Fe 濃度で捉えることに成功し (Nishioka *et al.*, 2013) (Fig. 7), 「中層 Fe 仮説」が正しいことに確信を持つことができた。また、この航海では、主席研究員であった小川さんに、メンバーを取りまとめて大きな航海を率いて観測を実施していくための

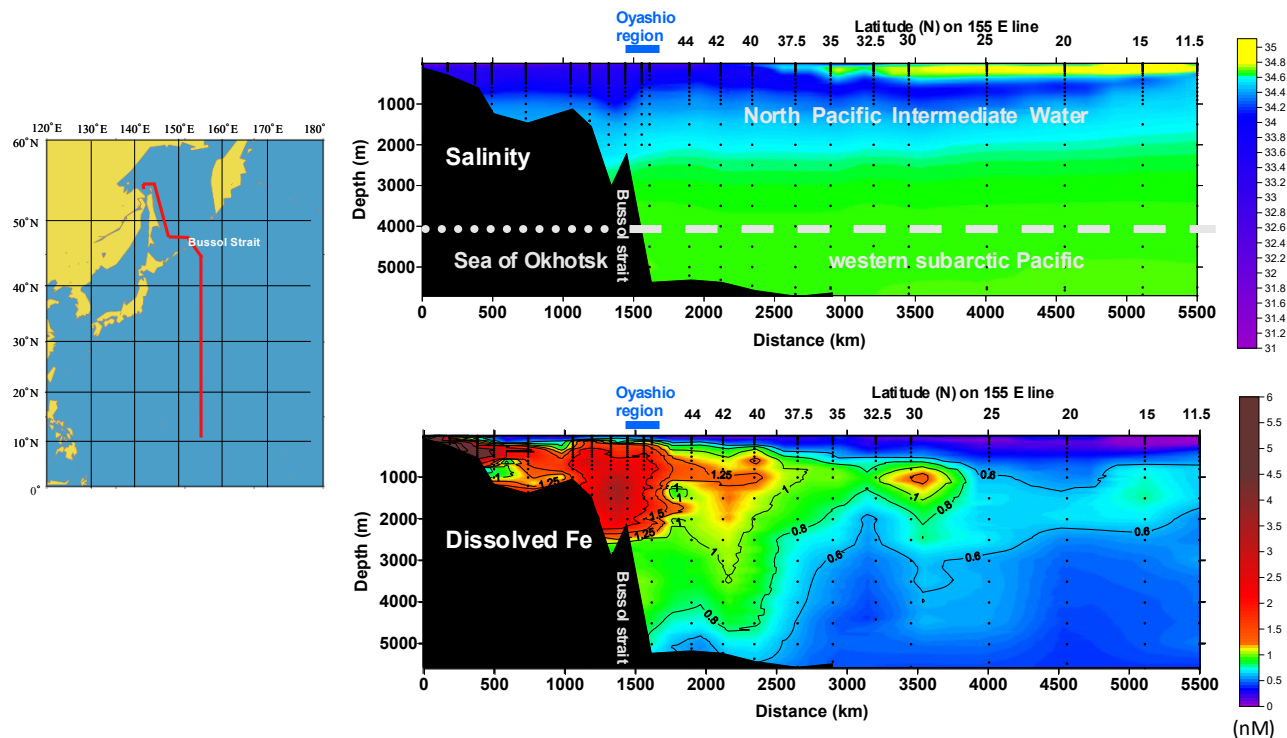


Fig. 7. a) Vertical profiles of salinity (upper) and dissolved Fe (lower) along a transect from the Sea of Okhotsk to 155°E in the western North Pacific. Modified from Nishioka *et al.* (2013).

ノウハウなどを教えていただいた。これは、後に私自身がロシア船を率いて観測するために大いに役立った。

10. 北方圏縁辺海と北太平洋亜寒帯域をつなぐ物質循環リンケージの解明

前述したロシア船を用いた北方圏縁辺海や日本の研究船を用いた北太平洋亜寒帯域の観測によって、環オホーツク海域のFe濃度のボーダーレスなデータが蓄積され、「中層Fe仮説」の検証につながる成果を得ることができた (Fig. 8)。ここで特筆すべき点として、全てのロシア船航海と多くの北太平洋で実施された日本の観測船による航海において、安田さんのチームとご一緒したことで、乱流混合パラメータの観測と共にFeや栄養塩データを取得することができたことである。これらの混合パラメータとFeを含む栄養物質のプロファイルのデータセットを、これまで得られている海洋物理的な知見と統合することで「オホーツク海・ベーリング海を含む北太平洋のFeと栄養塩の3次元循環像」が見えてきた (Fig. 8)。このFe循環の概要を以下に記す。また

Nishioka *et al.* (2020), Nishioka *et al.* (2021) および西岡ら (2024) により詳しく記載しているので興味のある方はそちらもご一読いただきたい。

オホーツク海は世界で最も低緯度の季節性海水域であり (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氷ができる。海氷が形成されるとブライン排出により高密度陸棚水 (Dense Shelf Water: DSW, 密度 $26.8\text{--}27.0\sigma_\theta$) が形成される (Kitani, 1973; Nagata *et al.*, 1992; Martin *et al.*, 1998; Gladyshev *et al.*, 2000)。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ているが、我々のロシア船観測では、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) (可溶性粒子態Feを含む) 濃度の鉛直分布を観測し、DSW水塊は極めて高いFe濃度を持つことを報告した (Nishioka *et al.*, 2013; Nishioka *et al.*, 2014b)。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) から、DSW

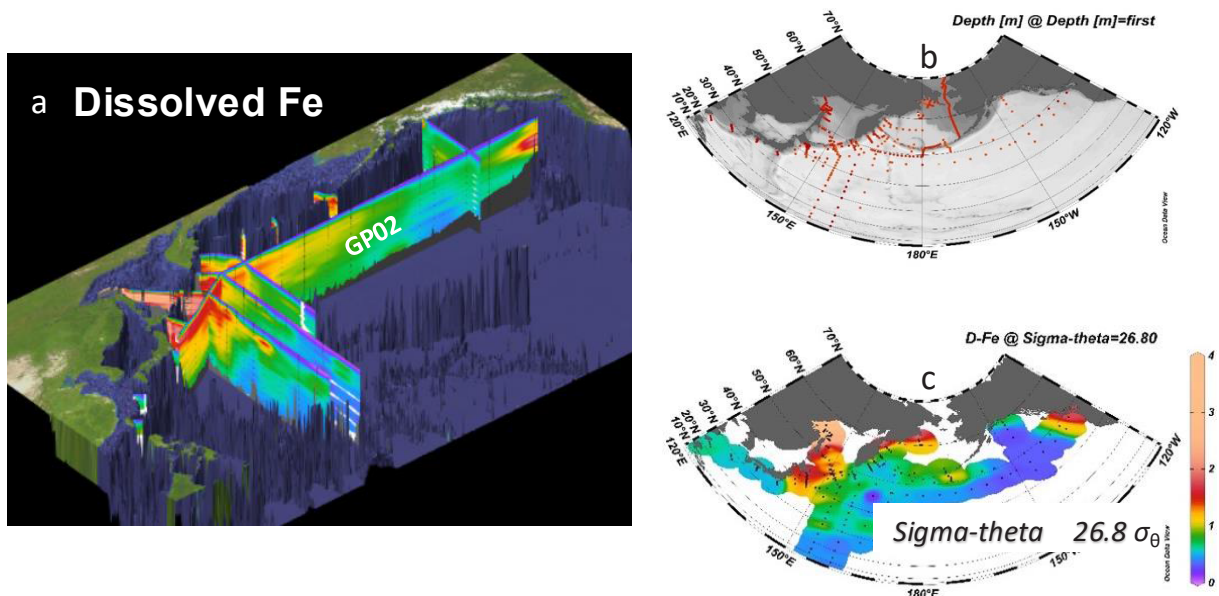


Fig. 8. Compiled dissolved Fe dataset for the sub-polar marginal seas and the North Pacific: (a) 3D diagram of dissolved Fe in the Sea of Okhotsk and the North Pacific (GP02 indicates a GEOTRACES program line), (b) Observation points where dissolved Fe measurements were taken, (c) Horizontal distribution of dissolved Fe concentrations at the 26.8 sigma-theta isopycnal surface. Modified from Nishioka *et al.* (2020).

に含まれる高濃度 Fe が海底堆積物での還元と再懸濁によって供給されたと結論づけた (Nishioka *et al.*, 2014b)。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、潜り込んだ DSW 水塊の中層循環の経路を示している (Wong *et al.*, 1998; Yamamoto-Kawai *et al.*, 2004)。DSW は、約 $26.8\text{--}27.0\sigma_\theta$ のオホーツク海中層水 (Okhotsk Sea Intermediate Water: OSIW) 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 (Fukamachi *et al.*, 2004)。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、オホーツク海南部の千島海盆に到達することを報告した (Nishioka *et al.*, 2014b)。OSIW に含まれる高 Fe 濃度水塊はブッソル海峡を通過して強い鉛直混合を受け (Nakamura and Awaaji, 2004; Ono *et al.*, 2007; 2013; Itoh *et al.*, 2010; Itoh *et al.*, 2011; Yagi and Yasuda, 2012; Nishioka *et al.*, 2013; Nishioka *et al.*, 2014b; Yagi *et al.*, 2014), 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 Awaaji, 2004; Nakamura *et al.*, 2006; Mensah and Ohshima, 2021) ことで、北太平洋の Fe 濃度分布に強く影響を与えている (Nishioka *et al.*, 2013; 2020; 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おり (Yasuda, 1997; Yasuda *et al.*, 2001a; Mensah and Ohshima, 2021), 親潮中層の高い Fe 濃度水塊を形成している (Fig. 9) (Nishioka *et al.*, 2011; Nishioka *et al.*, 2020)。親潮域や北太平洋に運ばれた Fe は、千島列島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ていることが明らかになった (Fig. 10) (Nishioka *et al.*, 2011, 2013, 2014b, 2020, 2021)。さらにベーリング海の中層に貯まっている高濃度の栄養塩プールが、アリューシャン列島海峡部で起こる強い混合により表層までもたらされ、深層と表層の栄養塩をつなぐ重要な役割を果たし、北太平洋亜寒帯域の HNLC 海域を形成していることを示した (Fig. 10) (Nishioka *et al.*, 2020; Nishioka *et al.*, 2022b)。また、

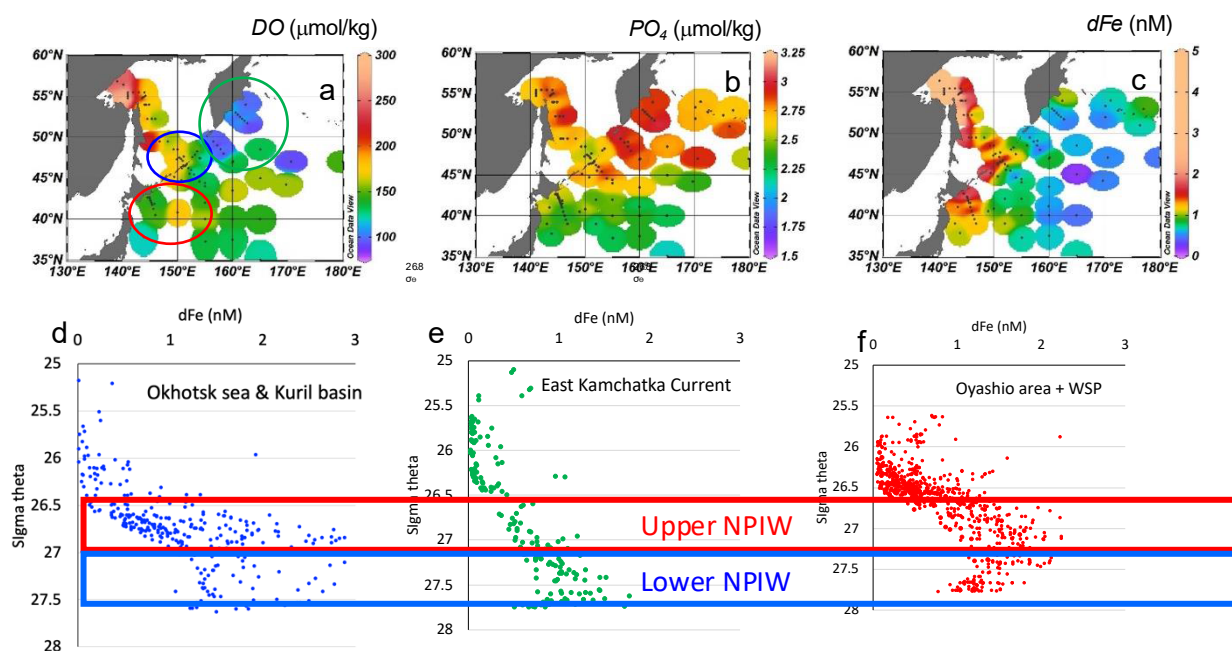


Fig. 9. (a) Horizontal distribution of dissolved oxygen concentration at the $26.8\sigma_\theta$ isopycnal surface, (b) Same as (a), but for phosphate concentrations, (c) Same as (a), but for dissolved Fe concentrations, (d) Vertical profiles of dissolved Fe vs. density in the Kuril Basin and Sea of Okhotsk (blue circle in (a)), (e) Same as (d), but along the East Kamchatka Current (green circle in (a)), (f) Same as (d), but in the Oyashio and WSP areas (red circle in (a)). Modified from Nishioka *et al.* (2020).

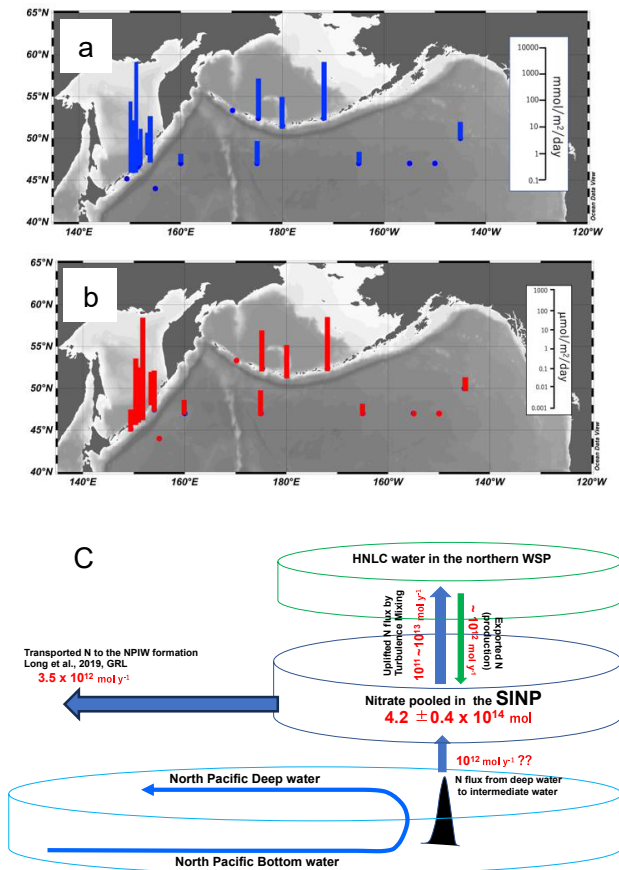


Fig. 10. (a) Vertical upward fluxes (100–500 m) of nitrate, estimated from vertical profiles and direct measurements of turbulent mixing parameters ($K\rho$), (b) Same as (a), but for dissolved Fe, (c) Estimated nitrate budget among surface water, the subarctic intermediate nutrient pool, and deep water. Modified from Nishioka *et al.* (2020).

このベーリング海中層水由来の栄養塩と (Nishioka *et al.*, 2022b) オホーツク海から中層へ流出する Fe (Nishioka *et al.*, 2007) が混合し、表層に回帰することで、北部北太平洋の西部海域における生物生産が高い状態で維持されていることが明らかになった (Fig. 11) (Nishioka *et al.*, 2020; Nishioka *et al.*, 2021)。

これらの研究成果は、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海洋表面に出てくることで、北太平洋高緯度海域の表層を肥沃にしている」という漠然としていた考えを改め、また、「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、地球規模の海洋コンベアベルト (海洋大循環) (Broecker, 1991) の終焉部となるエリアで、新たな栄養物質循環像を提示した (Nishioka *et al.*, 2020)。また北太平洋が、隣接する北方圏縁辺海を介して陸域の多大な影響を受けていることを科学的に実証した点で、これまでの海洋学の概念を大きく覆した (Anderson, 2020)。また、この一連の研究成果は、オホーツク海の重要性の認識、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。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がどのように応答するかを理解することにも役に立つ知見になる。

また、安田さん、鈴木さん、山下洋平さん (現 北大地球環境)、渡辺豊さん (現 北大地球環境)、宗林留美さん (現 静岡大学)、野村大樹さん (現 北大水産学部)、伊藤幸彦さん (現 東京大学)、藤尾伸三さん (現 東京大学)、柳本大吾さん (現 東京大学)、川口悠介さん (現 東京大学)、三寺さん、中村知裕さん (北大低温研)、三角和弘さん (現 電中研)、坪野考樹さん (現 電中研) をはじめ、ロシア船観測と観測結果を用いたモデル研究において共同研究を行った多くの研究者により、北方圏縁辺海と北太平洋のつながりが続々と明らかになった。これらの研究では、Fe だけでなく炭酸系、溶存有機物などの物質循環、さらには生物生産に関わる研究や、詳細な物理過程の解明、数値シミュレーションを活用した Fe 動態研究など、物理・化学・生物の分野にまたがる広範な研究の展開へとつながった。これらの成果の一部は、2 冊の Progress in Oceanography の特集号 (Nishioka *et al.*, 2014a; Nishioka *et al.*, 2022a) や、他多くの学術論文にまとめられている (e.g. Yoshimura *et al.*, 2010; Itoh *et al.*, 2010; Isada *et al.*, 2010; Itoh *et al.*, 2011; Yagi and Yasuda, 2012; Sugie *et al.*, 2013; Shigemitsu *et al.*, 2013; Sohrin *et al.*, 2014; Suzuki *et al.*, 2014; Nakanowatari *et al.*, 2017; Yamashita *et al.*, 2020; Kawaguchi *et al.*, 2020; Yamashita *et al.*, 2021; Misumi *et al.*, 2021; Kondo *et al.*, 2021; Watanabe *et al.*, 2021; Nomura *et al.*, 2021)。

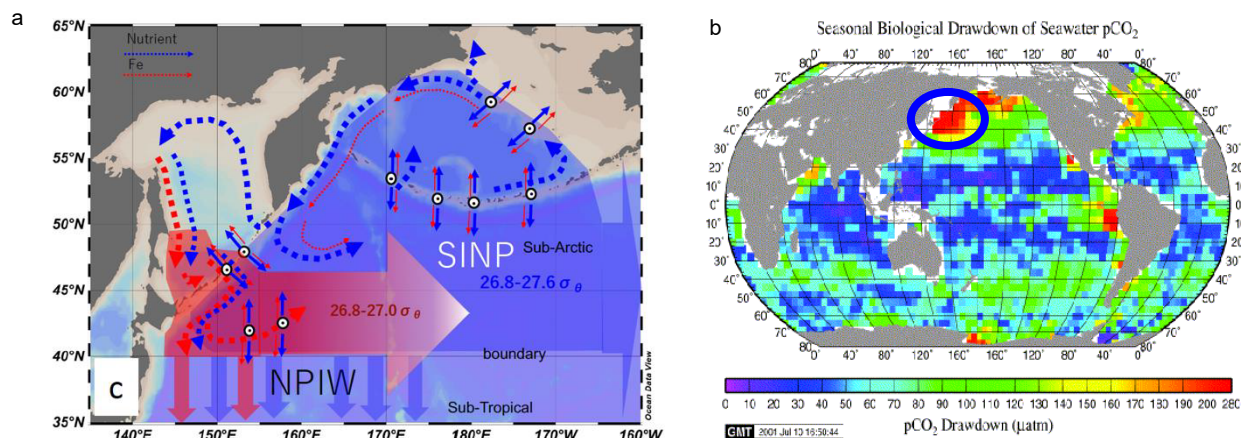


Fig. 11. (a) Schematic of horizontal circulation of nutrients and dissolved Fe in the North Pacific. Modified from Nishioka *et al.* (2020). (b) Seasonal biological drawdown of pCO_2 , as reported in Takahashi *et al.* (2002), Fig. 7. Areas with high Fe supply (a) exhibit higher biological drawdown of pCO_2 in the western subarctic Pacific (blue circle in (b)).

11. オホーツク海における海氷と Fe の研究

北大低温研（附属 紋別流水研究施設時代を含めて）では、古くからオホーツク海の水氷を対象とした研究が精力的に行われてきた。海水の物性やブライン生成メカニズムなどの物理学的研究や、流水レーダーによる海水の現場観測など、海氷に関する研究が先駆的に実施され、数多くの成果が挙げられてきた。私も低温研に移籍が決まってから、海氷（流水）に関わる物質循環研究を実施したいと考えていた。ちょうどその頃、世界的には南極海の水氷を対象とした Fe の研究が精力的に進められており、EU やオーストラリアのグループから海氷内の Fe 濃度などが報告され始めた時期であった (e.g. Lannuzel *et al.*, 2007; Lannuzel *et al.*, 2008)。低温研に移ってから数年間はロシア船のプロジェクトなどで忙しかったこともあり、海氷の研究を本格的に始めることができたのは 2010 年になってからであった。この研究では、低温研が長年実施している海上保安庁の砕氷巡視船「そうや」を用いた観測航海に参加させていただいた。この観測は現在も継続している。観測を率いているのは豊田威信さん（現 北大低温研）であり、豊田さんと低温研から極域海洋学の第一人者になられた野村さん（現 北大水産学部）には海氷研究のことをいろいろ教えていただいた。海氷の研究は、私の最初の博士課程の学生であっ

た漢那直也さん（現 東京大学）や La Kenya Evans さんをはじめ、多くの学生と一緒に進めることができた (Kanna *et al.*, 2014; Kanna *et al.*, 2018; Evans and Nishioka, 2018; Evans and Nishioka, 2019)。これまでに、「海氷には堆積物由来の Fe が含まれており、冬季にそれらは海氷によって広範囲に運ばれ、春季に海氷が融解すると海水中に放出され、陸棚起源の Fe とともに南部オホーツク海やクリル海盆周辺の一次生産を高めていること」などが見えてきている。これらのオホーツク海における海氷と Fe の研究は、低温研の大島さんらの進める海氷の物理的知見とも融合されて議論が進められるようになった (e.g. Kishi *et al.*, 2021; Kuga *et al.*, 2023)。また、低温研で育った若者たちによって、北極海や南極海の水氷と Fe の研究に展開されつつあるなど、今後の発展が楽しいな課題である。

12. おわりに

海洋における Fe の研究は 2025 年の現在でも活発に続けられて発展している。GEOTRACES プロジェクトなどの進展とともに、多くの大洋の海盆レベルで、大気 (e.g. Ooki *et al.*, 2009; Uematsu *et al.*, 2003; Jickells *et al.*, 2005)、大陸棚 (e.g. Lam *et al.*, 2006; Nishioka *et al.*, 2007; Blain *et al.*, 2007)、熱水活動 (e.g. Resing *et al.*,

2015; Fitzsimmons *et al.*, 2017), 海水 (e.g. Lannuzel *et al.*, 2008; Kanna *et al.*, 2014) などのさまざまな Fe のソースが見つかり、全球海洋での Fe の 3 次元の分布とそれを支配する供給プロセスなどが明らかになりつつある。今後は本格的に、「それらの Fe 供給フラックスを定量的に把握すること」や、「将来の海洋の変化によって各 Fe 供給過程がどのような影響を受け、生態系や物質循環がどのように変化していくのか」などの研究へと展開が図られる (e.g. Conway *et al.*, 2014; Tagliabue *et al.*, 2014; Tagliabue *et al.*, 2017)。日本においては、高野祥太朗さん (現 京都大学) や栗栖美菜子さん (現 東京大学) をはじめとする優れた若い研究者たちが、既に微量元素の安定同位体を用いた Fe の起源同定とそのフラックスの定量化に取り組んでおり、世界的に顕著な成果を挙げている (e.g. Takano *et al.*, 2022; Takano *et al.*, 2024; Kurisu *et al.*, 2016; Kurisu *et al.*, 2024)。これまでの海洋の Fe 研究は、Fe を対象とした研究をすること自体が主要な目的でもあったが、今後、Fe の研究が海洋学の一部として自然に組み込まれ、不可欠な存在となる時代が訪れるだろう。既に低次生態系の研究や数値モデルの研究においては、栄養塩とともに Fe のデータを取得する (取り扱う) ことが前提で研究をすることが多くなり、Fe 分析を担う化学海洋学者のニーズはますます高まっている。グローバルレベルでは、海洋微生物のゲノム情報と微量金属元素分布やそのフラックス情報を同時に観測研究する計画である BioGeoSCAPES (<https://biogeoscapes.org>) などの国際プロジェクトも立ち上がりつつあり、今後いかに化学と生物、化学と物理の研究者が互いに協働していくかは、海洋学を発展させていくための重要な鍵となる。この化学海洋学へのニーズに応えるためには、Fe や微量元素を取り扱う現在の若手研究者の活躍に加えて、次世代の化学海洋学者の継続的な育成が必須である。また、煩雑なクリーン技術を海洋学のルーティンに乗せるためには、実験室や船で活躍するテクニシヤンの育成と安定的なポジションの確保も重要になってくる。

私がこの世界に入ったばかりの 1990 年代の海洋微量元素研究は、正確な鉛直分布 1 本を測定し、1 次元のボックスモデルを用いてその分布を示す要因を明らかにすることで、論文になった時代であった。2025 年の現

在は、センサーを搭載した自動昇降観測ブイやグライダーなどのプラットフォームの普及で、観測を基にした海洋学への取り組み方そのものに大変革が起きている時代でもある。これらのプラットフォームによって、水温、塩分などの基礎パラメータに加え、クロロフィル、溶存酸素、栄養塩など生物地球化学的データを含めて、全球海洋のビックデータを容易に入手することが可能な時代が来つつあり、その分、求められるサイエンスの知見もより高度に、分野横断的に、総合的になっている。この流れは今後加速し、総合科学としての海洋学は発展していくだろう。一方で、未だセンサーで分析ができない元素も多く、本稿で紹介した Fe の分析例に見られたように、今後もある元素に特化した分析技術を地道に開発していくことで、正確な分布データが得られ、それが新たな発見やブレイクスルーにつながる可能性があるのも事実である。そのためには、最新の自動観測プラットフォーム開発やビックデータ解析を進める一方で、海に出て、現場を見て、サンプルを採取し、それを丁寧に処理し、分析法も開発しつつ、新たなパラメータやその化学種などの分析に挑戦していく分野も、今後は意識的に重視し守り続ける必要があるのではないだろうか。

謝 辞

このたびは名誉ある日本海洋学会賞をいただくことになり大変光栄に思うと同時に、未だ信じられない思いです。推薦いただいた先生方、選考委員会の先生方、海洋学会員の皆様へ心より感謝申し上げます。今回受賞対象となった研究は、私が研究者の道に入ってから 30 年かけて実施してきた「北太平洋における Fe に関する研究」です。この 30 年間、本当に数多くの方々と出会い、一緒になって築きあげてきた成果です。本稿の冒頭でも触れましたが、「海洋における Fe の重要性の発見」は、近年の海洋学におけるブレイクスルーの一つとして捉えて良いと思います。本稿では、私が経験してきた時代背景も踏まえて、日本のグループが取り組んできた「海洋における Fe の研究」に関して、研究者としてそれぞれのステージにいた私の視点から見てきたことを書かせていただきました。世界中の海洋学者が競争しながら進めてきたこの分野の目覚ましい展開のなかで、日本の海洋

学コミュニティは、翻弄されながらも果敢に世界に食らいついて、その進展に貢献してきたと考えています。その経緯を残しておきたいと思い、僭越ではありますが、多くの諸先輩方が率いたプロジェクトにも触れて執筆させていただきました。この文書が、ほんの少しでも後世の研究者に役に立てば嬉しく思います。私は何かの縁で、これらの研究プロジェクトのほとんどに関わらせていただき、そこで育てていただき、海洋学者としての道を歩ませていただいたことになります。Fe の時代に Fe の研究を 30 年近く続けさせていただけた研究環境やファンに恵まれたのは本当に幸運だったのだと思います。また Fe という一つの元素にこだわって研究ができる時代であったことにも恵まれておりました。

本稿でお名前を上げさせていただいた方はもちろんですが、全てのプロジェクトや航海は、数多くの方に支えられました。北海道大学水産学部 旧海洋化学講座の諸先生方と諸先輩および学生の皆様、財団法人電力中央研究所の皆様、カナダ海洋科学研究所の皆様、オランダ王立海洋研究所の皆様、A-Line 観測に関わる皆様、OPES, SEEDS I, SEEDS II, SERIES, アムール-オホーツクプロジェクト, OMIX, MacroCoast プロジェクト関係者の皆様、GEOTRACES プロジェクト, SOLAS プロジェクト関係者の皆様、東京大学大気海洋研究所共同利用関係者の皆様・推進室の皆様、ロシア極東海洋気象学研究所の皆様、北海道大学地球環境科学研究所の皆様、北海道大学低温科学研究所および環オホーツク観測研究センターの同僚・スタッフ・所属された学生の皆様にこの誌面を借りて感謝の意を表します。またこれまでの航海でお世話になった、おしよ丸、北星丸、うしお丸、開洋丸、白鳳丸、淡青丸、新青丸、北光丸、若鷹丸、みらい、そうや、J.P Tully, Polarstern, Pro. Khromov 号, Pro. Gordienko 号, Pro. Multanovsk 号の船長はじめ乗組員の皆様、航海で一緒に過ごした皆様に心よりお礼申し上げます。Fe 研究をサポートいただいた、電力中央研究所、文部科学省及び日本学術振興会 科学研究費 (17710021, 19681001, 19030002, 21014001, 22310001, 23651001, 25121501, 26281002, 15H05820, 15H05817, 17H00775, 20K21838, 21H05056, 22H05205, 22H05200), キヤノン財団研究経費 (理想の追求), 北大低温研共同利用経費,

ArCS 研究プロジェクト経費等すべてのファンにお礼申し上げます。

本稿出版でお世話いただいた「海の研究」編集委員長である久保川厚先生、研究と査読でお世話になった大木淳之さんにお礼申し上げます。

最後に私の率いた 2018 年のロシア船航海後に、残念ながら故人となられた Mr. Alexey Fedorovich Shcherbinin さん、船長 Evgeniy Sklizkov さんに、お悔やみ申し上げますと共に心よりお礼申し上げます (Fig. 12)。お二人は、私の関連したプロジェクトに限らず、長年に渡り日本とロシアとの共同研究を支えてくださり、日本の海洋学の発展にご尽力くださいました。日本とロシアとの共同研究は、1990 年代後半から続く 30 年間にわたり、非常に良好な関係のもとで進展してきました。この成功は、時代に恵まれていたことはもちろんですが、ロシア側のカウンターパートである FERHRI 所長の Volkov さんをはじめ、Shcherbinin さんやスタッフの皆様、そして Sklizkov 船長との深い絆に支えられた結果だと考えています。本稿で示したように、広大な海洋を理解するためには、すべての海をボーダーレスに研究しなければなりません。しかし、現在は国際情勢の悪化でロシアとの共同研究が



Fig. 12. We express our deepest condolences to Mr. Alexey Fedorovich Shcherbinin and Captain Evgeniy Anikovich Sklizkov. Their professional leadership of scientists and crew during numerous expeditions is deeply appreciated and remains etched in the memories of many researchers. (From left to right: Dr. Ichiro Yasuda, Mr. Shcherbinin, Captain Sklizkov, and the author.)

難しい状況になってしまっています。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科学の探求に挑んでいける世の中になることを強く願っています。

References

- 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**, 13013–13028.
- Anderson, R.F. (2020): GEOTRACES: Accelerating research on the marine biogeochemical cycles of trace elements and their isotopes, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **12**, 49–85, doi: 10.1146/annurev-marine-010318-095123.
- Blain, S., *et al.* (2007): Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature* **446**, 1070–1074.
- Boyd, P.W. *et al.* (2000): A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature*, **407**, 695–702.
- Boyd, P.W., C.S. Law, C.S. Wong, Y. Nojiri, 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, H.J.W. de 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.
- Boye, M., J. Nishioka, P.L. Croot, P. Laan, K.R. Timmermans, and H.J.W. de Baar (2005): Major deviation of iron complexation during 22 days of a mesoscale iron enrichment in the open Southern Ocean, *Mar. Chem.*, **96**, 257–271.
- Boye, M., J. Nishioka, P.L. Croot, P. Laan, K.R. Timmermans, V.H. Strass, S. Takeda, and H.J.W. de Baar (2010): Significant portion of dissolved organic Fe-complexes in fact is Fe colloids, *Mar. Chem.*, **122**, 20–27, doi: 10.1016/j.marchem.2010.09.001.
- Broecker, W.S. (1991): The great ocean conveyor. *Oceanogr.*, **4**(2), 79–89.
- Bruland, K.W., R.P. Franks, G.A. Knauer, and J.H. Martin (1979): Sampling and analytical methods for the determination of copper, cadmium, zinc, and nickel at the nanogram per liter level in sea-water. *Anal Chim Acta*, **105**, 233–45.
- Bruland, K.W., K.J. Orians, and J.P. Cowen (1994): Reactive trace metal in the stratified central North Pacific. *Geochim Cosmochim acta*, **58**(15), 3171–3182.
- Bruland, K.W., and E.L. Rue (2001): Analytical methods for the determination of concentrations and speciation of iron. In: Turner, D.R., Hunter, K.A. (Eds.), *Biogeochemistry of Fe in Seawater. SCOR-IUPAC series*. J Wiley, Baltimore, pp. 255–289. Chapter 6.
- Chisholm, S.W., and F.M.M. Morel (1991): What controls phytoplankton production in nutrient-rich areas of the open sea? *Limnol. Oceanogr.*, **36**(8), preface.
- Coale, K.H., P. Worsfold, and H.J.W. de Baar (1999): Iron age in oceanography. *EOS*, **80**(34), 377, 382.
- Coale, K.H., *et al.* (2015): John Holland Martin from picograms to petagrams and copepods to climate. *Bulletin Limnol. Oceanogr.*, **24**, 1–17.
- Conway, T.M., and S.G. John (2014): Quantification of dissolved iron sources to the North Atlantic Ocean. *Nature*, **511**, 212–215.
- Croot, P.L., P. Laan, J. Nishioka, V. Strauss, M. Boye, K.R. Timmermans, R.G. Bellerby, L. Goldson, P. Nightingale, and H.J.W. de Baar (2005): Spatial and Temporal distribution of Fe (II) and H₂O₂ during EisenEx, an open ocean mesoscale iron enrichment, *Mar. Chem.*, **95**, 65–88.
- Craig, H., and K.K. Turekian (1980): The GEOSECS program: 1976–1979. *Earth. Planet. Sci. Let.*, **49**, 263–265.
- 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. Oceans*, **110**, doi:10.1029/2004JC002601.
- Duce, R.A. (1989): SEAREX; The sea/air exchange program. *Chem. Oceanogr.*, **10**, Academic Press, London. 404 pp.
- Duce, R.A., and N.W. Tindale (1991): Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **36**, 1715–1726.
- Evans, L.K., and J. Nishioka (2018): Quantitative analysis of Fe, Mn and Cd from sea ice and seawater in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Polar Sci.*, **17**, 50–58, doi.org/10.1016/j.polar.2018.07.002.
- Evans, L.K., and J. Nishioka (2019): Accumulation processes of trace metals into Arctic sea ice: distribution of Fe, Mn and Cd associated with ice structure, *Mar. Chem.*, **209**, doi.org/10.1016/j.marchem.2018.11.011.
- Ezoe, M., T. Ishita, M. Kinugasa, X. Lai, K. Norisuye, and Y. Sohrin (2004): Distributions of dissolved and acid-dissolvable bioactive trace metals in the North Pacific Ocean. *Geochemical Journal*, **38**, 535–550.
- Fitzsimmons, J.N., S.G. John, C.M. Marsay, C.L. Hoffman, S.L. Nicholas, B.M. Toner, C.R. German, and R.M. Sherrell (2017): Iron persistence in a distal hydrothermal plume supported by dissolved-particulate exchange. *Nature Geo.*, **10**, 195–201, doi:10.1038/ngeo2900.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JC001906>.
- Fujishima, Y., K. Ueda, M. Maruo, E. Nakayama, C. Tokutome, H. Hasegawa, M. Matsui, and Y. Sohrin (2001): Distribution of Trace Bioelements in the Subarctic North Pacific Ocean and the Bering Sea (the

- R/V Hakuho-Mar cruise KH-97-2). *J. Oceanogr.*, **57**(3), 261–273.
- GEOTRACES Planning Group (2006): GEOTRACES Science Plan. Baltimore, Maryland: Scientific Committee on Oceanic Research. https://geotracesold.sedoo.fr/libraries/documents/Science_plan.pdf.
- Gledhill, M., and C.G.M. van den Berg (1994): Determination of complexation of iron (III) with natural organic complexing ligands in seawater using cathodic stripping voltammetry. *Mar. Chem.*, **47**, 41–54, doi.org/10.1016/0304-4203(94)90012-4.
- 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.
- 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**, 26281–26299.
- Harrison, P.J., P.W. Boyd, D.E. Varela, S. Takeda, A. Shimoto, and T. Odate (1999): Comparison of factors controlling phytoplankton productivity in the NE and NW subarctic Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **43**, 205–234.
- Harrison, P.J., F.A. Whitney, A. Tsuda, H. Saito, and K. Tadokoro (2004): Nutrient and plankton dynamics in the NE and NW gyres of the subarctic Pacific Ocean, *J. Oceanogr.*, **60**, 93–117.
- Hunt, G.L. Jr, *et al.* (2010): Status and trends of the Bering Sea region, 2003–2008, pp 196–267 in S.M. McKinnell and M.J. Dagg [Eds.] *Marine Ecosystems of the North Pacific Ocean*, 2003–2008. PIC-ES Special Publication 4, 393.
- Imai, K., Y. Nojiri, N. Tsurushima, and T. Saino (2002): Time series of seasonal variation of primary productivity at station KNOT (44° N, 155° E) in the sub-arctic western North Pacific. *Deep Sea Res. II*, **49**, 5395–5408.
- Isada, T., A. Hattori-Saito, H. Saito, T. Ikeda, and K. Suzuki (2010): Primary productivity and its bio-optical modeling in the Oyashio region, NW Pacific during the spring bloom 2007. *Deep Sea Res. II*, **57**, 1653–1664.
- 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. *Science*, **308**, 67–71.
- Johnson, K.S., R.M. Gordon, and K.H. Coale (1997): What controls dissolved iron concentrations in the world ocean? *Mar. Chem.*, **57**, 137–161.
- 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.
- Kanna, N., Y. Sibano, T. Toyota, and J. Nishioka (2018): 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. *Mar. Chem.*, **206**, 109–120, doi.org/10.1016/j.marchem.2018.08.006.
- 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., and I. Yasuda (2010): Estimate of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific. *J. Oceanogr.*, **66**, 489–504.
- Kawaguchi, Y., J. Nishioka, S. Nishino, S. Fujio, K. Lee, A. Fujiwara, D. Yanagimoto, H. Mitsudera, and I. Yasuda (2020): Cold water upwelling near the Anadyr Strait: Observations and Simulations, *J. Geophys. Res.-Ocean*, **125**, doi:10.1029/2020JC016238.
- 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. *Bulletin Far Seas Fisheries Research Laboratory*, **9**, 45–47.
- Kishi, S., K.I. Ohshima, J. Nishioka, N. Isshiki, S. Nishashi, and S.C. Riser (2021): The prominent spring bloom and its relation to sea-ice melt in the Sea of Okhotsk, revealed by profiling floats. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, doi.org/10.1029/2020GL091394.
- Kitayama, S., K. Kuma, E. Manabe, K. Sugie, H. Takata, Y. Isoda, K. Toya, S. Saito, S. Takagi, Y. Kamei, and K. Sakaoka (2009): Controls on iron distributions in the deep water column of the North Pacific Ocean: Iron (III) hydroxide solubility and marine humic-type dissolved organic matter. *J. Geophys. Res.*, **114**, C08019, doi:10.1029/2008JC004754.
- Kondo, Y., R. Bamba, H. Obata, J. Nishioka, and S. Takeda (2021): Distinct profiles of size-fractionated iron-binding ligands between the eastern and western subarctic Pacific. *Sci. Rep.*, **11**, 2053, doi.org/10.1038/s41598-021-81536-6.
- Kurisu, M., Y. Takahashi, T. Iizuka, and M. Uematsu (2016): Very low isotope ratio of iron in fine aerosols related to its contribution to the surface ocean, *J. Geophys. Res.*, **121**, 11, 119–11, 136, doi:10.1002/2016JD024957.
- Kurisu, M., K. Sakata, J. Nishioka, H. Obata, T.M. Conway, H.R. Hunt, M. Sieber, K. Suzuki, T. Kashiwabara, S. Kubo, M. Takada, and Y. Takahashi (2024): Source and fate of atmospheric iron supplied to the subarctic North Pacific traced by stable iron isotope ratios. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **378**, 168–185, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.06.009>.
- Kuga, M., K.I. Ohshima, S. Kishi, N. Kimura, T. Toyota, and J. Nishioka (2023): Backward-tracking simulations of sea ice in the Sea of

- Okhotsk toward understanding of material transport through sea ice. *J. Oceanogr.*, **80**, 59–70, <https://doi.org/10.1007/s10872-023-00706-4>.
- Kuma, K., J. Nishioka, and K. Matsunaga (1996): Controls on Iron(III) hydroxide solubility in seawater: The influence of pH and natural organic chelators. *Limnol. Oceanogr.*, **41**, 396–407.
- 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.
- Lannuzel, D., V. Schoemann, J. de Jong, L. Chou, B. Delille, S. Becquevort, and J.-T. Tison (2008): Iron study during a time series in the western Weddell pack ice. *Mar. Chem.*, **108**, 1–2, 85–95, <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.10.006>.
- 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. Cycles*, **20**, GB1006, doi:10.1029/2005GB002557.
- Mahowald, N.M., A.R. Baker, G. Bergametti, N. Brooks, A. Duce, T.D. Jickells, N. Kubliay, J.M. Prospero, and I. Tegen (2005): Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **19**, GB4025, doi:10.1029/2004GB002402.
- Martin, J.H. (1990): Glacial-Interglacial CO₂ Change: The iron hypothesis. *Paleoceanography*, **5**(1), 1–13.
- 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. 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. 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., 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, 771–772, 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.
- Misumi, K., J. Nishioka, H. Obata, D. Tsumune, T. Tsubono, M.C. Long, K. Lindsay, and J.K. Moor (2021): Slowly sinking particles underlie dissolved iron transport across the Pacific Ocean. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **35**, doi:10.1029/2020GB006823.
- 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.
- Moore, W.S. (1984): Review of the GEOSECS project. *Nuclear instruments and method in physics research*, **223**, 459–465.
- 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.
- 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.*, **109**, C09S14. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JC001909>.
- Nakanowatari, T., Nakamura T., Uchimoto K., Nishioka J., Mitsudera H., and Wakatsuchi M. (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.
- National Research Council, 50 years of Ocean discovery, <https://nap.nationalacademies.org/catalog/9702/50-years-of-ocean-discovery-national-science-foundation-1950-2000>.
- Nishioka, J. and S. Takeda (2000): Change in the concentration of iron in different size fractions during growth of the oceanic diatom *Chaetoceros* sp.: importance of small colloidal iron. *Mar. Biol.*, **137**, 231–238, 2000.
- Nishioka, J., S. Takeda, and C.S. Wong (2001a): Change in the concentration of iron in different size fractions during a phytoplankton bloom in controlled mesocosm enclosures. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **258**, 237–255, 2001.
- Nishioka, J., S. Takeda, C.S. Wong, and K. Johnson (2001b): Size-fractionated iron concentrations in the northeast Pacific Ocean: distribution of soluble and small colloidal iron. *Mar. Chem.*, **74**, 157–179.
- 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., S. Takeda, H.J.W. de Baar, P. Laan, P.L. Croot, M. Boye, and K.R. Timmermans (2005): Change in the concentrations of iron in different size fractions during an iron fertilization experiment in the open Southern Ocean. *Mar. Chem.*, **95**, 51–63.
- 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., S. Takeda, Y. Kondo, H. Obata, T. Doi, D. Tsumune, C.S.

- Wong, W.K. Johnson, and A. Tsuda (2009): Changes in iron concentrations and bio-availability during an open ocean mesoscale iron enrichment experiment in the western subarctic pacific, SEEDS II, *Deep Sea Res. II*, doi:10.1016/j.dsr2.2009.06.006.
- Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, K. Sakaoka, and T. Yoshimura (2011): Oceanic iron supply mechanisms which support the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic Pacific. *J. Geophys. Res.*, **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. Cycles*, **27**, doi:10.1002/gbc.20088.
- 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, doi: 10.1002/lno.10548.
- Nishioka, J., H. Obata, H. Ogawa, K. Ono, Y. Yamashita, K.J. Lee, S. Takeda, and I. Yasuda (2020): Subpolar 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. Scherbinin, 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.*, **198**, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102662.
- 西岡純, 三寺史夫, 大島慶一郎, 江淵直人, 白岩孝行, 中村知裕, 的場澄人, 中塚武, 安田一郎, 村山愛子, 小野数也, 若土正暁 (2024): 環オホーツクにおける鉄を中心とした物質循環研究. *低温科学*, **82**, 69–82, doi: 10.14943/lowtemsci.82.69.
- Nomura, D., H. Abe, T. Hirawake, A. Ooki, Y. Yamashita, A. Murayama, K. Ono, and J. Nishioka (2021): Formation of dense shelf water associated with sea ice freezing in the Gulf of Anadyr estimated with oxygen isotopic ratios. *Prog. Oceanogr.*, **196**, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102595.
- Obata, H., H. Karatani, and E. Nakayama (1993): Automated determination of iron in seawater by chelating resin concentration and chemiluminescence detection. *Anal. Chem.*, **65**, 1524–1528, doi:10.1021/ac00059a007.
- 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.
- 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. Oceanogr.*, **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. I*, **79**, 62–73.
- Ooki, A., J. Nishioka, T. Ono, and S. Noriki (2009): Size dependence of iron solubility of Asian mineral dust particles. *J. Geophys. Res.*, **114**, D03202, doi:10.1029/2008JD010804.
- 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.
- Rue, E.L., and K.W. Bruland (1995): Complexation of iron (III) by natural organic ligands in the Central North Pacific as determined by a new competitive ligand equilibration/ adsorptive cathodic stripping voltammetric method. *Mar. Chem.*, **50**, 117–138.
- Saito, H., A. Tsuda, and H. Kasai (2002): Nutrient and plankton dynamics in the Oyashio region of the western subarctic Pacific Ocean. *Deep Sea Res. II*, **49**, 5463–5486.
- Saito, H., A. Tsuda, Y. Nojiri, T. Aramaki, H. Ogawa, T. Yoshimura, K. Imai, I. Kudo, J. Nishioka, T. Ono, K. Suzuki, and S. Takeda (2009): Biogeochemical cycling of N and Si during the mesoscale iron-enrichment experiment in the western subarctic Pacific (SEEDS II). *Deep Sea Res. II*, doi:10.1016/j.dsr2.2009.06.010.
- Shigemitsu, M., J. Nishioka, Y.W. Watanabe, Y. Yamanaka, T. Nakatsuka, and Y.N. Volkov (2013): Fe/Al ratios of suspended particulate matter from intermediate water in the Okhotsk Sea: Implications for long-distance lateral transport of particulate Fe. *Mar. Chem.*, **157**, 41–48.
- Shiomoto, A., and H. Asami (1999): High-West and Low-East distribution patterns of chlorophyll a. primary productivity and diatoms in the subarctic North Pacific surface waters, mid winter 1996. *J. Oceanogr.*, **55**, 493–503.
- Shiraiwa, T. (2012): “Giant Fish-Breeding Forest”: A new environmental system linking continental watershed with open water. *Global Environmental Studies book series*, 77–85.
- Sohrin, Y., S. Urushihara, S. Nakatsuka, T. Kono, E. Higo, T. Minami, K. Norisuye, and S. Umetani (2008): Multielemental determination of GEOTRACES key trace metals in seawater by ICPMS after preconcentration using an ethylenediaminetriacetic acid chelation resin. *Anal. Chem.*, **80**, 6267–6273, doi. 10.1021/ac800500f.
- Sohrin, Y., and K.W. Bruland (2011): Global status of trace elements in the ocean. *Trends in analytical chemistry*, **30**(8), 1291–1307,

- doi:10.1016/j.trac.2011.03.006.
- Sohrin, R., K. Imanishi, Y. Suzuki, K. Kuma, I. Yasuda, K. Suzuki, and T. Nakatsuka (2014): Distribution of dissolved organic carbon and nitrogen in the western Okhotsk Sea and their effluxes to the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 168–179.
- Staben, P.J., J.D. Schumacher, and K. Ohtani (1999): The physical oceanography of the Bering Sea. *Dynamics of the Bering Sea* 1–59.
- Stoll, H. (2020): 30 years of the iron hypothesis of ice ages. *Nature*, **578**, 370–371.
- Sugie, K., J. Nishioka, K. Kuma, Y.N. Volkov, and T. Nakatsuka (2013): Availability of particulate Fe to phytoplankton in the Sea of Okhotsk. *Mar. Chem.*, **152**, 20–31, doi.org/10.1016/j.marchem.2013.03.005.
- Suzuki, K., H. Liu, T. Saino, H. Obata, M. Takano, K. Okamura, Y. Sohrin, and Y. Fujishima (2002): East-west gradients in the photosynthetic potential of phytoplankton and iron concentration in the subarctic Pacific Ocean during early summer. *Limnol. Oceanogr.*, **47**(6), 1581–1594.
- Suzuki, K., H. Saito, T. Isada, A. Hattori-Saito, H. Kiyosawa, J. Nishioka, R.L.M. McKay, A. Kuwata, and A. Tsuda (2009): Community structure and photosynthetic physiology of phytoplankton in the northwest subarctic Pacific during in situ iron fertilization experiment (SEEDS-II). *Deep Sea Res. II*, doi:10.1016/j.dsr2.2009.06.001.
- Suzuki, K., A. Hattori-Saito, Y. Sekiguchi, J. Nishioka, M. Sigemitsu, T. Isada, H. Liu, and R.M. McKay (2014): Spatial variability in iron nutritional status of large diatoms in the Sea of Okhotsk with special reference to the Amur river discharge. *Biogeosciences*, **11**, 2503–2517, doi:10.5194/bg-11-2503-2014.
- Takano, S., W.H. Liao, T.Y. Ho, and Y. Sohrin (2022): Isotopic evolution of dissolved Ni, Cu, and Zn along the Kuroshio through the East China Sea. *Mar. Chem.*, **243**, 104135, https://doi.org/10.1016/j.marchem.2022.104135.
- Takano, S., H. Kanamura, and Y. Sohrin (2024): Multielemental Isotopic Analysis for Trace Metals in Geochemical Samples, Part 1: Dissolved Iron, Nickel, Copper, Zinc, Cadmium, and Lead in Seawater. *ACS Earth and Space Chemistry*, **8**(4), https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.3c00305.
- Takata, H., K. Kuma, Y. Saito, M. Chikira, S. Saito, Y. Isoda, S. Takagi, and K. Sakaoka (2006): Comparing the vertical distribution of iron in the eastern and western North Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02613, doi:10.1029/2005GL024538.
- Takahashi, T., S.C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R.A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson, and Y. Nojiri (2002): Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep Sea Res. II*, **49**, 1601–1622.
- Takeda, S. (1998): Influence of iron availability on nutrient consumption ratio of diatoms in oceanic waters. *Nature* **393**, 774–777.
- Takeda, S. (2011) Iron and phytoplankton growth in the subarctic North Pacific. *Aqua-BioScience Monographs*, **4**(2), 41–93, doi:10.5047/absm.2011.00402.0041.
- 武田重信 (2024) : 微量金属による海洋一次生産の制御機構に関する生物地球化学研究. *海の研究*, **33**(3, 4), 31–46, doi: 10.5928/kaiyou.33.3-4_31.
- Takeda, S., and A. Kamatani, and K. Kawanobe (1995): Effect of nitrogen and iron enrichments on phytoplankton communities in the Northwestern Indian Ocean. *Mar. Chem.*, **50**(1–4), 229–241, 1995.
- Takeda, S., and H. Obata (1995): Response of equatorial Pacific phytoplankton on subnanomolar Fe enrichment. *Mar. Chem.*, **50**(1–4), 218–227, 1995.
- Takeda, S., J. Nishioka, C.S. Wong, F.A. Whitney, W.K. Johnson, and T.J. Sotuar (1999): Application of open-ocean enclosures to study the control of biological CO₂ Pump in the subarctic North Pacific Ocean. *Proceeding, CO₂ in the Ocean*, Tsukuba 1999.
- 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.
- Talley, L.D. (1991): An Okhotsk Sea Water anomaly: Implications for ventilation in the North Pacific. *Deep Sea Res. I*, **38**, S171–S190.
- 津田敦 (2013) : 亜寒帯太平洋における動物プランクトンを中心とした低次生態系の動態に関する研究, *海の研究*, **22**(3), 85–96.
- 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, K. Oguma, T. Ono, T. Sakuragi, M. Sasakawa, M. Sato, A. Shimamoto, H. Takada, 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 (SEEDS II). *J. Oceanogr.*, **63**, 983–994.
- 津田敦, 武田重信 (2005) : 北太平洋における鉄散布実験—プロジェクトの立ち上げと成果—, *日本生態学会誌*, **55**, 514–519.
- Tsumune, D., J. Nishioka, A. Shimamoto, S. Takeda, and A. Tsuda (2005): Physical behavior of the SEEDS iron-fertilized patch by sulphur hexafluoride tracer release. *Prog. Oceanogr.*, **64**(2–4), 111–127.
- Uchida, R., K. Kuma, A. Omata, S. Ishikawa, N. Hioki, H. Ueno, Y. Isoda, K. Sakaoka, Y. Kamei, and S. Takagi (2013): Water column iron dynamics in the subarctic North Pacific Ocean and the Bering Sea. *J. Geophys. Res.*, **118**, 1257–1271, doi:10.1002/jgrc.20097.
- Uematsu, M., R.A. Duce, J.M. Prospero, L. Chen, J.T. Merrill, and R.L. McDonald (1983): Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **88**, 5343–5352.
- Uematsu, M., Z. Wand, and I. Uno (2003): Atmospheric input of mineral dust to the western North Pacific region based on direct measurement and regional chemical transport model. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(6), 1342, doi:10.1029/2002GL016645.

- Uematsu, M., Y. Yokouchi, T.W. Watanabe, S. Takeda, and Y. Yamanaka (edit) (2014): *Western Pacific Air-Sea Interaction Study*. TERRAPUB, 284 pp.
- van den Berg CMG (1995): Evidence for organic complexation of iron in seawater. *Mar. Chem.*, **50**, 139–157, doi.org/10.1016/0304-4203(95)00032-M.
- Watanabe, Y.W., Y. Nakano, J. Nishioka, and M. Ito (2021): Change of nitrogen chemical tracer N_2^* between the Okhotsk Sea and the subarctic North Pacific. *Progr. Oceanogr.*, **199**, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102693.
- 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.
- Wu, J., E. Boyle, W. Sunda, and L-S. Wen (2001): Soluble and colloidal iron in the oligotrophic North Atlantic and North Pacific. *Science*, **293**, 847–849, doi: 10.1126/science.1059251.
- 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.
- 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.
- Yamashita Y., J. Nishioka, H. Obata, and H. Ogawa (2020) Shelf humic substances as carriers for basin-scale iron transport in the North pacific. *Sci. Rep.*, **10**, 4505, https://doi.org/10.1038/s41598-020-61375-7.
- Yamashita, Y., T. Tosaka, R. Bamba, R. Kamezaki, S. Goto, J. Nishioka, I. Yasuda, T. Hirawake, J. Oida, H. Obata, and H. Ogawa (2021): Widespread distribution of allochthonous fluorescent dissolved organic matter in the intermediate water of the North Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **191**, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102510.
- 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 (2001a): 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.
- Yasuda, I., S., Masuda, J. Nishioka, X. Guo, N. Harada, S. Ito, T. Hibiya, and H. Hasumi (2021b): Ocean mixing processes (OMIX): impact on biogeochemistry, climate and ecosystem. *J. Oceanogr.*, **77**, https://doi.org/10.1007/s10872-020-00578-y.
- 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.
- Yoshimura, T., J. Nishioka, and T. Nakatsuka (2010): Iron nutritional status of the phytoplankton assemblage in the Okhotsk Sea during summer. *Deep Sea Res. I*, **57**, 1454–1464.

Transport of Fe and its relationship to biological production in the northwestern subarctic Pacific and sub-polar marginal seas

Jun Nishioka[†]

Abstract

One of the most significant breakthroughs in oceanography over the past 30 years has been the discovery that iron (Fe) regulates phytoplankton growth in high-nutrient, low-chlorophyll (HNLC) regions of the global ocean. This finding has profoundly enhanced our understanding of the role of Fe and its biogeochemistry in the ocean. This paper reviews the accumulation of knowledge regarding Fe's control of primary production and the processes governing Fe supply in the subarctic Pacific and its marginal seas. Special attention is given to research projects conducted in Japan, contextualized within the broader global research landscape.

Key words: Fe, subarctic Pacific, sub-polar marginal seas, HNLC region, phytoplankton growth

(Corresponding author's e-mail address: nishioka@lowtem.hokudai.ac.jp)

(Received 7 January 2025; accepted 20 January 2025)

(doi: 10.5928/kaiyou.34.2_55)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2025)

[†] Pan-Okhotsk research center, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-0819, Japan
e-mail: nishioka@lowtem.hokudai.ac.jp