

— 総 説 —

## 北太平洋亜寒帯における鉄の供給過程\*

小畑 元<sup>1\*\*</sup>・金 泰辰<sup>1</sup>・西岡 純<sup>2</sup>

### 要 旨

北太平洋亜寒帯は、1年を通して表層水中の栄養塩が枯渇しない代表的な高栄養塩・低クロロフィル (HNLC) 海域の1つであり、海水中の微量必須栄養塩の鉄の不足によって植物プランクトンの増殖が制限されていることが知られている。このため、北太平洋亜寒帯域における一次生産を理解するためには、鉄の分布や供給過程を明らかにする必要がある。しかし、鉄は観測時に汚染を受けやすく、海水中の濃度レベルが極めて低いため、その分布や循環過程が十分に明らかにされているとは言いがたい。そこで本稿では、北太平洋亜寒帯における海水中の鉄の分布や供給過程について、これまでに得られている知見をまとめ、今後の課題を議論する。特に鉄の供給過程として、大気を経由したエアロゾルの降下、沿岸域からの水平輸送を取り上げ、最近の研究成果を紹介する。

キーワード：反応性粒子鉄，北太平洋亜寒帯，エアロゾル，中規模渦，中層水

### 1. はじめに

海洋の一次生産にとって海水中の栄養塩の欠乏は主な制限因子であるが、年間を通じて表層水中に窒素、リンなどの栄養塩が十分に存在している高栄養塩・低クロロフィル (High Nutrient, Low Chlorophyll, HNLC) 海域の存在は、他にも微量必須栄養塩があることを示唆している。Fig. 1 に世界海洋循環実験計画 (World Ocean

Circulation Experiment, WOCE) によって報告された北太平洋における表層海水中のリン酸塩濃度の分布を示す。北緯 40°以北については、表層水中にリン酸塩が十分に存在しており、硝酸塩についても同様の傾向を示すことが明らかとなっている。北太平洋亜寒帯は表層で栄養塩が枯渇しない HNLC 海域の一つであることが分かる。硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩に続いて植物プランクトンに必須の微量栄養塩は鉄であり (Martin *et al.*, 1989)、北太平洋亜寒帯では3回の大規模な鉄散布実験 (SEEDS, SERIES, SEEDS-II) によって「海水中の鉄の不足によって植物プランクトンの増殖が制限されている」という事実が明らかになっている (Tsuda *et al.*, 2003, 2007; Boyd *et al.*, 2004)。そのため、特に北太平洋亜寒帯域における一次生産を理解するには、微量必須栄養塩である鉄の供給過程を解明する必要がある。しかし、鉄は観測時に汚染を受けやすい元素であるとともに、海水中の濃度レベルが極めて低いため (< 0.1 ~ 数 nM),

\* 2016年9月23日受領; 2017年1月9日受理  
著作権: 日本海洋学会, 2017

1 東京大学大気海洋研究所 海洋無機化学分野  
〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5

2 北海道大学低温科学研究所  
〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

\*\* 連絡著者: 小畑 元  
TEL: 04-7136-6082  
FAX: 04-7136-6081  
e-mail: obata@aori.u-tokyo.ac.jp

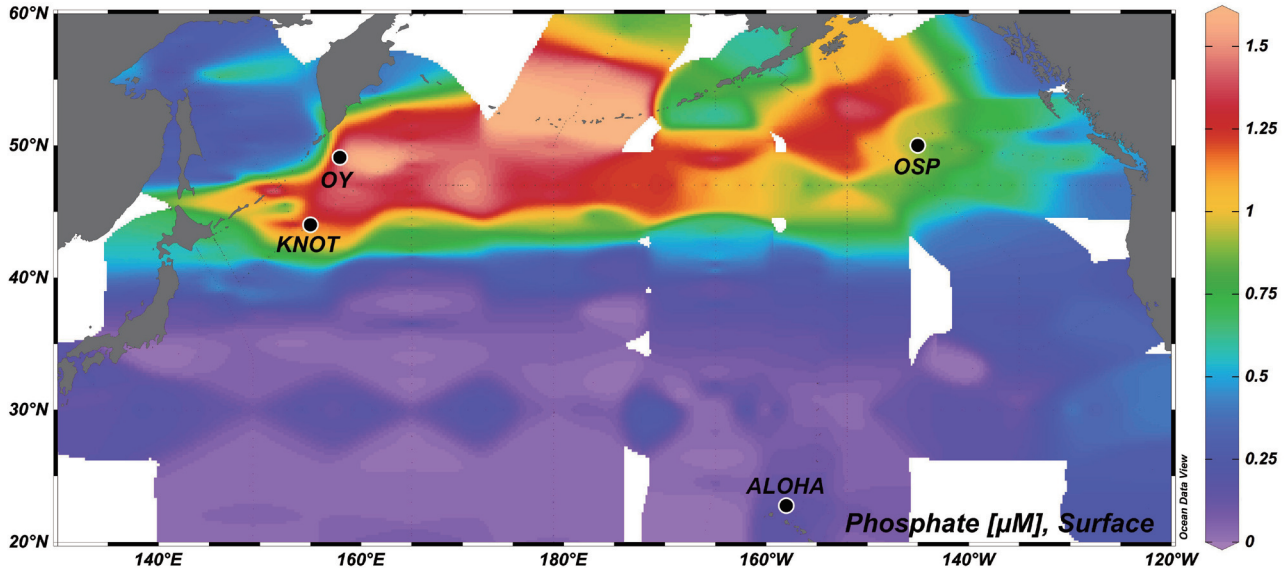


Fig. 1. Surface distribution of phosphate in the North Pacific (data from the World Ocean Circulation Experiment; <http://www.ewoce.org>; *eWOCE*). Locations of the stations OSP, KNOT, OY and ALOHA are also indicated.

データの取得が容易ではなく、北太平洋亜寒帯全体について鉄の分布や循環過程が十分に明らかにされているとは言いがたい。そこで、本稿では、北太平洋亜寒帯西部と東部における海水中の鉄の分布の違いや鉄の供給源についての知見をまとめ、北太平洋亜寒帯の一次生産にとってのキーププロセスを検討する。

## 2. 北太平洋亜寒帯における鉄の鉛直分布の東西比較

北太平洋亜寒帯における鉄の確からしい鉛直分布が初めて報告されたのは、カナダの定期観測点 Ocean Station P (OSP, 北緯 50°, 西経 145°) における観測結果である (Martin *et al.*, 1989)。海水の溶存態鉄濃度は表面では 0.05 nM 程度、深層では 0.62 ~ 0.70 nM という栄養塩型の分布であった。特に鉛直分布が硝酸塩の分布とよく相関していることが特徴として挙げられた。その後 (1998 年の 9 月), Nishioka *et al.*, (2001) は OSP での鉄の分布をサイズ別に、さらに詳しく調べた。Table 1 に、海水中の鉄をサイズ別に分画し、測定した場合の呼称を示す。アラスカ湾では、中空糸膜フィルターとメンブラ

ンフィルターによるサイズ分画法を用いて、海水中の鉄を真の溶存 (Soluble, < 200 kDa), コロイド粒子 (Colloidal, 200 kDa ~ 0.2 μm), 反応性粒子 (Leachable particulate, > 0.22 μm) の 3 つに分けて測定している (ただし、分画に用いるフィルターは各研究者によって異なる)。Nishioka *et al.*, (2001) は、表面ではコロイド粒子鉄と反応性粒子鉄は極めて微量にしか存在しないことを示した。また、真の溶存鉄の濃度は表層混合層で 0.06 ~ 0.07 nM であり、40 m 以浅の鉄の 85% 以上を占めていたこと、深層の 200 ~ 800 m では真の溶存鉄とコロイド粒子鉄の濃度が、それぞれ 0.18 ~ 0.44 nM, 0.14 ~ 0.20 nM と表層より高くなっており、コロイド粒子鉄が 24 ~ 47% を占めていたことを示した。コロイド粒子鉄の濃度が深度とともに増加する傾向は、窒素、リンなど他の栄養塩の増加と同じ傾向であることから、生物起源粒子が無機化される過程でコロイド粒子鉄が生成されている可能性があると考えられた (Nishioka *et al.*, 2001)。反応性粒子鉄は、真の溶存鉄やコロイド粒子鉄とは異なり、深層水中でも低い濃度を示した。西経 165° の北緯 29° ~ 45° 30' にかけて 2004 年及び 2005 年 7 ~ 8 月に観測された結果においても、反応性粒子鉄の濃度は極めて低くなっていた

Table 1. Size fractionation of iron in seawater.

Name	Definition	References
Total dissolvable Fe (TD-Fe)	Unfiltered Stand for one day at pH < 2.0	Cutter <i>et al.</i> (2010)
Dissolved Fe (D-Fe)	Filtered with 0.2 - 0.44 $\mu\text{m}$ pore size filter Stand for one day at pH < 2.0	Johnson <i>et al.</i> (2007)
Soluble Fe (S-Fe)	Filtered with 200K Dalton - 0.03 $\mu\text{m}$ pore size filter Stand for one day at pH < 2.0	Nishioka <i>et al.</i> (2013b)
Leachable Particulate Fe (LP-Fe)	[TD-Fe] - [D-Fe]	Nishioka <i>et al.</i> (2013a)
Colloidal Fe (C-Fe)	[D-Fe] - [S-Fe]	Nishioka <i>et al.</i> (2013b)

(Takata *et al.*, 2006; Kitayama *et al.*, 2009)。しかし、過去のデータ (Martin *et al.*, 1989) によると、西経 147° 30′ の北緯 55° 30′ 付近では深層の反応性粒子鉄濃度が高くなっている。このことから、アラスカの大陸棚からアリューシャン海流によって鉄が輸送されていると考えられる。

一方、北太平洋亜寒帯の西部と東部における鉄の鉛直分布の違いは顕著である。例えば、日本の亜寒帯北西太平洋定点 KNOT (北緯 44°, 東経 155°) とその周辺海域における 2000 年 5 月のサイズ別の鉄の鉛直分布 (Fig. 2, Nishioka *et al.*, 2003) では、真の溶存鉄の濃度は、表層混合層において 0.06 ~ 0.15 nM であり、100 m 以深で急速に濃度が増加している。また、コロイド粒子鉄の濃度は 50 m 以深で増加し、深度 600 m で 0.6 nM 程度にまで達している。一方、反応性粒子鉄の濃度は、表層混合層内では約 0.22 nM 程度であり、それ以深では深層まで 0.4 ~ 0.8 nM 程度の高い傾向となっている。また、東経 165° の北緯 41° ~ 47° における 2004 年及び 2005 年の 7 月の観測でも、反応性粒子鉄の濃度が深層で高くなっていることが報告されている (Takata *et al.*, 2006; Kitayama *et al.*, 2009)。さらに親潮域における全鉄濃度は北太平洋亜寒帯西部と比較して高いことも報告されている (Nishioka *et al.*, 2007)。

このように、東西の鉄の鉛直分布を比較すると、鉛直混合により有光層へ供給される鉄のフラックスに大きな

影響を与える全可溶性 (Total dissolvable, Table 1) 鉄の濃度は西部で明らかに高い。さらに、鉄のサイズ分布を比較すると、西部では中層において反応性粒子鉄とコロイド粒子鉄の濃度が高いことが顕著である。これらの結果は、北太平洋亜寒帯西部の中層に活発な鉄の供給過程が存在することを示している。コロイド粒子鉄の分布については、近年、研究が徐々に進展しつつある。例えば、北太平洋亜熱帯の定点観測点 ALOHA (北緯 22° 45′, 西経 158°) の表層におけるコロイド粒子鉄の時間変化に関する研究の中で、表層 50 m まではコロイド粒子鉄が 40 ~ 80 % を占めることが報告されている (Fitzsimmons *et al.*, 2015)。しかし、鉄のサイズ別分布と鉄の供給過程との間にどのような関連があるかについては、まだほとんど分かっていない。海水中的の鉄の存在状態についてのデータをさらに蓄積し、海洋における鉄の循環過程解明に繋げる必要がある。

### 3. 北太平洋亜寒帯における鉄の供給過程

これまで、多くの外洋域における、鉄の主な供給源は、大陸の砂漠地帯から大気を経由して輸送される鉱物粒子であると考えられてきた (例えば Duce and Tindale, 1991; Jickells *et al.*, 2005; Grand *et al.*, 2015)。大気由来の他には、堆積物、海底熱水、火山、海水、氷山由来の鉄が存在することが知られており、その重要性について

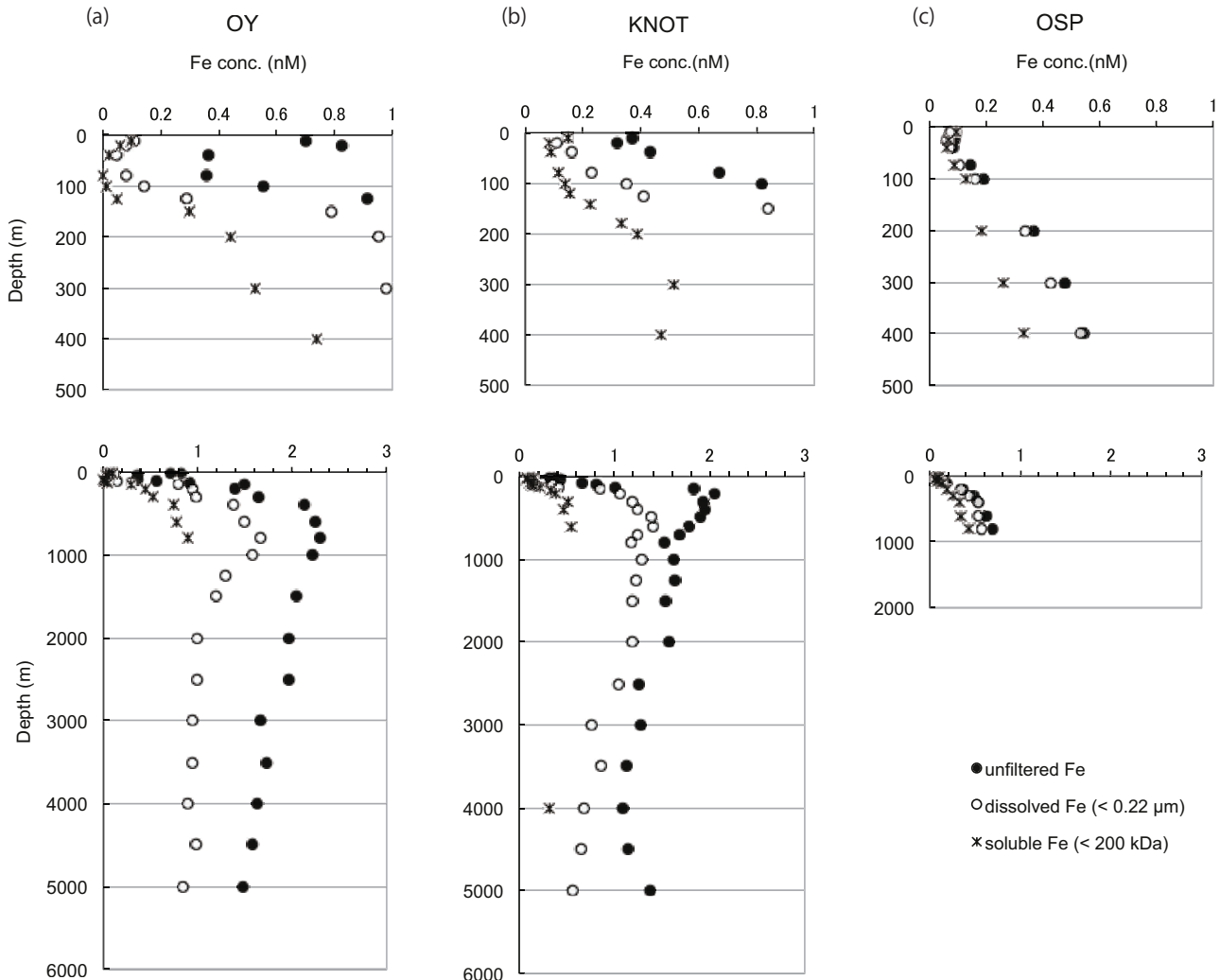


Fig. 2. Vertical distributions of size-fractionated iron in subarctic North Pacific reported based on Nishioka *et al.*, (2003). (a) at OY (Oyashio region) in May 2000. (b) at St. KNOT in May 2000. (c) at OSP in Sep. 1998.

様々な議論が行われていた (例えば Johnson *et al.*, 1999; Measures, 1999; Elrod *et al.*, 2004, 2008; Lam *et al.*, 2006, 2012; Smith *et al.*, 2007; Aguilar-Islas *et al.*, 2007; Nishioka *et al.*, 2007, 2013a; Wu *et al.*, 2009; Hurst *et al.*, 2010; Boyd and Ellwood, 2010; Tagliabue *et al.*, 2014)。近年, 国際 GEOTRACES 計画 (海洋の微量元素・同位体による生物地球化学研究, An International Study of the Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Their Isotopes) による研究が進み, 大気由来の鉱物粒子以外の供給源の重要性も明らかとなりつつある (例

えば Nishioka *et al.*, 2013b; Conway and John, 2015; Rijkkenberg *et al.*, 2014; Hatta *et al.*, 2015; Resing *et al.*, 2015)。ここでは, 北太平洋亜寒帯に輸送される鉄の供給プロセスについての知見をまとめ, その問題点などを議論する。

### 3.1. 大気からの鉄の供給過程

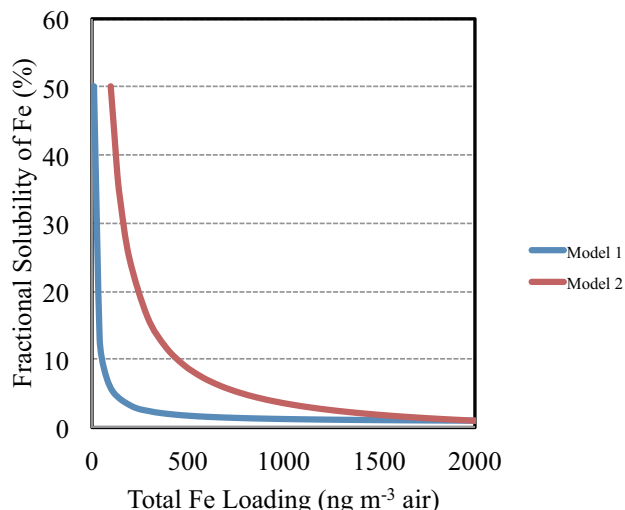
北太平洋亜寒帯は, 主に大気を経由して, アジアを起源とする鉄の供給を受けるが (Duce and Tindale, 1991),



東部亜寒帯域ではアラスカからの風送塵も重要な供給源であると言われている (Boyd *et al.*, 1998)。アジア起源の風送塵の北太平洋への輸送量には地理的な違いがあり、西部における風送塵の輸送量は東部よりも一桁高い (Duce and Tindale, 1991)。しかし、風送塵の輸送は上空の風向・風速の変化に依存しており、イベントごとに大きく異なる。札幌や新潟で採取されたエアロゾルの分析結果を数値モデルで検証したところ、アジアから北太平洋西部への鉄のフラックスは北緯 30°~40°で最も大きく、北緯 45°付近の年平均の全降下フラックスは  $5 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  となった (Uematsu *et al.*, 2003)。鉄の含有量を 3% とすると、鉄の降下フラックスは  $7400 \text{ nmol Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  と計算された。北海道の釧路沿岸域 (北緯 42° 57', 東経 144° 26') における 2008 年 3~5 月にかけての鉄の降下フラックスの観測値は、 $1300 \sim 8500 \text{ nmol Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であった (Okubo *et al.*, 2013)。これに対し、船上で採取したエアロゾルの分析から、鉄の降下速度を  $1 \text{ cm s}^{-1}$  と推定された北太平洋西部の北緯 40°~50°の海域における 2002 年 5~6 月の鉄の降下フラックスは、 $150 \sim 4300 \text{ nmol Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  であった (Buck *et al.*, 2006)。一方、同じ研究グループによる西経 152°線上における 2006 年 2~3 月の鉄の降下フラックスは、北緯 30°~50°付近に極大を示し、 $30 \sim 2350 \text{ nmol Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  と計算された (Buck *et al.*, 2013)。このように、鉄の降下フラックスの範囲は海域と時期により様々であるが、これらの結果はいずれも短時間での観測結果である。北太平洋亜寒帯における大気経路の鉄の降下フラックスの全体像を把握するためには、さらにデータを蓄積する必要がある。

大気を経由した鉄の粒子は海面に降下し、海水に鉄を供給するが、この鉄のうち、生物に利用されるのは主に海水に溶解した鉄であると考えられる。エアロゾルからの鉄の溶解度は 0.001~90% と非常にばらついた値が報告されている。このばらつきの原因は、エアロゾルの性質と溶解度を求める際に行われる溶解実験の手法の違いであると考えられている (Boyd *et al.*, 2010)。実際に北太平洋亜寒帯西部 (北緯 40°~50°) で採取されたエアロゾル中の鉄の海水への溶解度は 0.3~26% と報告されている (Buck *et al.*, 2006)。また、太平洋東部で同じ方法で求めたエアロゾル中の鉄の海水への溶解度は 5.2~

43% であった (Buck *et al.*, 2013)。これに対し、アジア大陸の鉄の粒子が北太平洋亜寒帯西部に降下した場合の溶解度は、約 0.4% であることが報告されている (Ooki *et al.*, 2009)。この鉄の粒子とエアロゾルの海水への溶解度の違いを生む要因の 1 つとして、燃焼起源エアロゾル中の鉄が考えられている。例えば、韓国の済州島で得たエアロゾルについては、元素炭素と溶解性の鉄の濃度との間に有意な相関があったことから、人為起源のエアロゾルが存在していたために鉄の溶解度が増加した可能性が指摘されている (Chuang *et al.*, 2005)。一方、サルガッソー海に降下するエアロゾルについては、化石燃料燃焼の指標となる V/Al 比や Ni/Al 比に鉄の溶解度が対応することから、燃焼起源エアロゾルが鉄の溶解度を上昇させる要因として考えられている (Sedwick *et al.*, 2007; Sholkovitz *et al.*, 2009)。さらに、沖縄で採取されたエアロゾルの単一微粒子質量分析法 (ATOF-MS) による分析結果から、鉄は燃焼起源粒子とともに存在していることが明らかとなった (Furutani *et al.*, 2011)。これらのエアロゾル中の鉄は約 33% が鉄 (II) であり、その溶解度は高いことが予想される (Moffett *et al.*, 2012)。これらの結果から、アジア大陸に起源をもつエアロゾルには、燃焼起源粒子と鉄の粒子が混在していることが定性的に示された。一方、これまでに得られたエアロゾル中の鉄の溶解度と鉄の全降下フラックスのデータをまとめ、その関係性について調べたところ、フラックスが小さいほど溶解度が高いという傾向が見られた (Sholkovitz *et al.*, 2012)。この結果は、フラックスは大きい溶解度の低いエアロゾル (例えば大陸起源の鉄の粒子) と、フラックスは小さい溶解度の高いエアロゾル (例えば燃焼起源粒子) の単純な混合によるモデルで説明されている (Fig. 3, Sholkovitz *et al.*, 2012)。しかし、アジア大陸で生成された燃焼起源粒子と鉄の粒子の混合エアロゾルが北太平洋亜寒帯にまで届いているとは断定できない。船上で採取したエアロゾルの溶解度を調べた研究では、北太平洋における鉄の溶解度とエアロゾル中のバナジウムや鉛の濃度には、北大西洋のような明確な関係性が確認できなかった (Buck *et al.*, 2013)。大西洋で観測される燃焼起源粒子がアメリカ東部の火力発電所での石油燃焼に起因しているのに対し、アジアでの燃焼起源粒子の最大の排出源は石炭燃焼であると考えられる (Buck *et*



**Fig. 3.** Relationship between total aerosol iron loading and fractional solubility of aerosol iron based on two end-member conservative mixing model (Sholkovitz *et al.*, 2012). Aerosol end members are total iron loadings of 10 and 2000 ng m<sup>-3</sup> in “model 1”, and 100 and 2000 ng m<sup>-3</sup> in “model 2”, corresponding to fractional solubilities of 50% and 1%.

*al.*, 2013)。排出源の違いが、海域の違いの原因である可能性がある。また、エアロゾル中の鉄の溶解度と鉄の全降下フラックスの関係性を、北太平洋の船上実験で調べたところ、上記のモデル (Fig. 3, Sholkovitz *et al.*, 2012) では説明できない結果となった (Buck *et al.*, 2013)。北太平洋でのエアロゾルの挙動については、今後も検証が必要である。

モデルを使った研究では、北太平洋亜寒帯西部における燃焼起源の鉄の降下フラックスは 80 ~ 300 nmol Fe m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> と推定された。これは、鉄の総降下量の 5 ~ 10% に相当し、外洋域における燃焼起源鉄から溶存鉄へ寄与は 20% 以上と推定された (Luo *et al.*, 2008)。さらに最近のモデル研究では、北太平洋西部における燃焼起源の鉄の降下フラックスは平均 124 nmol Fe m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>、燃焼起源鉄 (溶解度を 40% と仮定) の海水中の溶存鉄へ寄与は 87% と推定されている (Lin *et al.*, 2015)。この結果は、アジアの工業活動が海水中の溶存鉄の濃度を変化させ、北太平洋における植物プランクトンの鉄利用に大きな影響を与える可能性を示している。

アジアから大気経由で運ばれる鉄起源の鉄の溶解によって、北太平洋の一次生産が変化する現象については、これまで様々な研究で報告されている。ただし、表面海水中における鉄の溶解速度は遅いため、鉄起源粒子が引き起こす植物プランクトンブルームは稀であろうと考えられてきた (Boyd *et al.*, 2009)。しかし、中国で起きた砂嵐と、北太平洋西部の KNOT に設置されたセジメントトラップで捕集された陸起源粒子 (Al を指標とする) や生物ケイ酸には相関が見られるという報告がある (Yuan and Zhang, 2006)。また、アジアから輸送された鉄起源粒子の降下が海霧によって促進され、釧路沖の北太平洋西部において 1 イベント当たりの溶存鉄の供給フラックスが 360 ~ 5900 nmol Fe m<sup>-2</sup> event<sup>-1</sup> 増加した例も報告されている (Iwamoto *et al.*, 2011)。これらの観測結果は、突発的な鉄の供給が一時的に植物プランクトンのブルームを引き起こす可能性を示している。しかし、降下した鉄起源粒子が海水と接触した時の鉄の溶出や、その後の混合層に滞留した鉄起源粒子からの鉄の溶出について十分な知見は得られておらず、鉄起源粒子が北太平洋亜寒帯域の植物プランクトンの増殖に与える影響はまだ解明されていない。

大気を経由した鉄の供給源として、近年火山灰についても注目が集まっている。生物に利用可能な鉄の海洋表層への供給源として、火山灰は重要かもしれない (Duggen *et al.*, 2010)。アリューシャン列島の火山噴火によって 2008 年 8 月に北太平洋亜寒帯東部に大量の火山灰が広く降下し、その後、大きな植物プランクトン (ケイ藻) のブルームが観測された (Hamme *et al.*, 2010)。この植物プランクトンブルームを引き起こすために必要な火山灰による溶存鉄のフラックスは、モデルによると 60 ~ 6000 nmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> と計算されている (Langmann *et al.*, 2010)。火山灰を表面海水に添加することによりケイ藻が増殖することは、OSP における船上培養実験によっても確認されている (Melancon *et al.*, 2014)。特に可溶性粒子状鉄がケイ藻の増殖に影響している可能性が指摘されている点は興味深い。アリューシャン地域やカムチャッカ地域では火山の噴火がしばしば発生しており、火山噴火に対する北太平洋亜寒帯の植物プランクトンの応答への関心が今後も高まると考えられる。

### 3.2. 北太平洋亜寒帯域東部における鉄の水平輸送過程

北太平洋亜寒帯域東部、特にアラスカ湾での鉄の観測データがある程度、蓄積している。春季にはアジア起源の鉱物粒子 (Bishop *et al.*, 2002) やアラスカ起源の鉱物粒子 (Boyd *et al.*, 1998) の降下後に、夏季には火山灰の降下後 (Hamme *et al.*, 2010) に、バイオマスの増加が観測されているものの、OSPでの時系列観測結果では一次生産はほとんど一定して低くなっていることから、大気を経由した鉄の降下が一次生産全体に与える影響は小さいと考えられる (Frost, 1991; Wong *et al.*, 2002)。一方、アラスカ湾における海水中の鉄の分布の観測結果は、鉄がアラスカ湾沿岸から水平方向に供給されるプロセスの存在も示唆している (Takata *et al.*, 2006; Cullen *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2009; Lippiatt *et al.*, 2011 など)。カナダ・ブリティッシュコロンビア沿岸域の海底境界層においては、海水に鉄が付加され、この海水が潮汐やエクマン流によって沖合に輸送されるというプロセスが卓越している可能性が指摘されている (Cullen *et al.*, 2009)。また、アラスカ湾沿岸域に由来する粒子状鉄がOSPの表層でも観測されている。このような900 km以上に及ぶ水平輸送プロセスが存在することは数値モデルの計算結果からも示されている (Lam *et al.*, 2006)。

アラスカ湾の沿岸域における海水中の鉄の挙動についても、いくつかの報告がある。例えば、アラスカ湾北東部の沿岸域において2004年の5月と7月に行われた観測では、粒子鉄とコロイド粒子鉄は沿岸から外洋に向けて速やかに除去されていたが、真の溶存鉄は比較的ゆるやかに除去されていた (Wu *et al.*, 2009)。一方、アラスカ湾北西部のカッパー川 (Copper River) 河口域において2010年8月に行われた観測では、氷河融解水由来の鉄のうち、溶存鉄はその85%が河口域で除去されていたのに対し、全可溶性鉄はその42%が除去されていた (Schroth *et al.*, 2014)。このカッパー川からアラスカ湾北東部にかけての観測は2007年8月にも行われており、氷河融解水から供給された多量の鉄が沿岸水に含まれていることが報告されている (Lippiatt *et al.*, 2010)。ここで溶存鉄の濃度は0.5~4.1 nM レベルであるのに対し、反応性粒子鉄の濃度は< 5 nM~1  $\mu$ M に達していた。

これらの観測結果は、アラスカ湾沿岸域には高濃度の鉄 (特に反応性粒子鉄) を含む海水が存在することを示している。

アラスカ湾に反時計回りの中規模渦 (anti-clockwise-mesoscale eddy) が存在することは知られている (Tabata, 1982)。近年、この中規模渦が沿岸の高濃度の鉄を外洋域に輸送するプロセスに果たす役割が注目されている。この中規模渦は、渦が発生する場所にちなみ名前が付けられている。主な渦 (例えば、ハイダ渦 (Haida Eddy), シトカ渦 (Sitka Eddy), ヤクタト渦 (Yakutat Eddy), キナイ渦 (Kenai Eddy)) とその発生場所を Fig. 4 に示す。これらの渦の多くは、鉄、栄養塩、クロロフィルに富んだ沿岸水を内部に留めながら、そのまま陸棚域や斜面域に停まる。しかし、その中のいくつかの渦は沖合に移動して、鉄などの物質をHNLC海域に輸送する。その1つであるハイダ・グワイ (Haida Gwaii, 旧名 Queen Charlotte Islands) 沖で形成されるハイダ渦について、沿岸域の植物プランクトンや栄養塩をアラスカ湾中心部に運ぶ役割が Whitney and Robert (2002), Crawford (2002), Okkome *et al.*, (2003) によって研究されている。その後、カナダの定期観測によって、ハイダ渦内での海水中の鉄の挙動が明らかにされた (Johnson *et al.*, 2005)。特に同じ渦を19ヶ月にわたり観測し続けた結果は非常に貴重なデータとなっている。ハイダ渦において、表層中 (0~200 m) の全可溶性鉄濃度は4ヶ月以内に渦の外と同じ低いレベルに減少するが、渦の亜表層~中層 (200~600 m) の全可溶性鉄濃度は、16ヶ月にわたり周辺と比べて1.5~2倍であった。この有光層に深に存在する鉄は、渦が存在する間、鉛直方向に有光層まで定常的に輸送されており、この輸送過程が生物に利用可能な鉄の供給に重大な役割を果たしていると考えられる。その後、アラスカ湾の中規模渦中の鉄の分布については研究が続けられ、ハイダ渦 (Ladd *et al.*, 2009; Xiu *et al.*, 2011), シトカ渦 (Ladd *et al.*, 2009; Brown *et al.*, 2012), ヤクタト渦 (Ladd *et al.*, 2009), キナイ渦 (Lippiatt *et al.*, 2011) のそれぞれについての結果が報告されている。いずれも亜表層で濃度が高く、反応性粒子鉄が豊富に存在するのが特徴である。ハイダ渦については観測結果にもとづき、100 mの有光層への溶存鉄の鉛直方向のフラックスが計算され、90~2210 nmol Fe m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> という値が



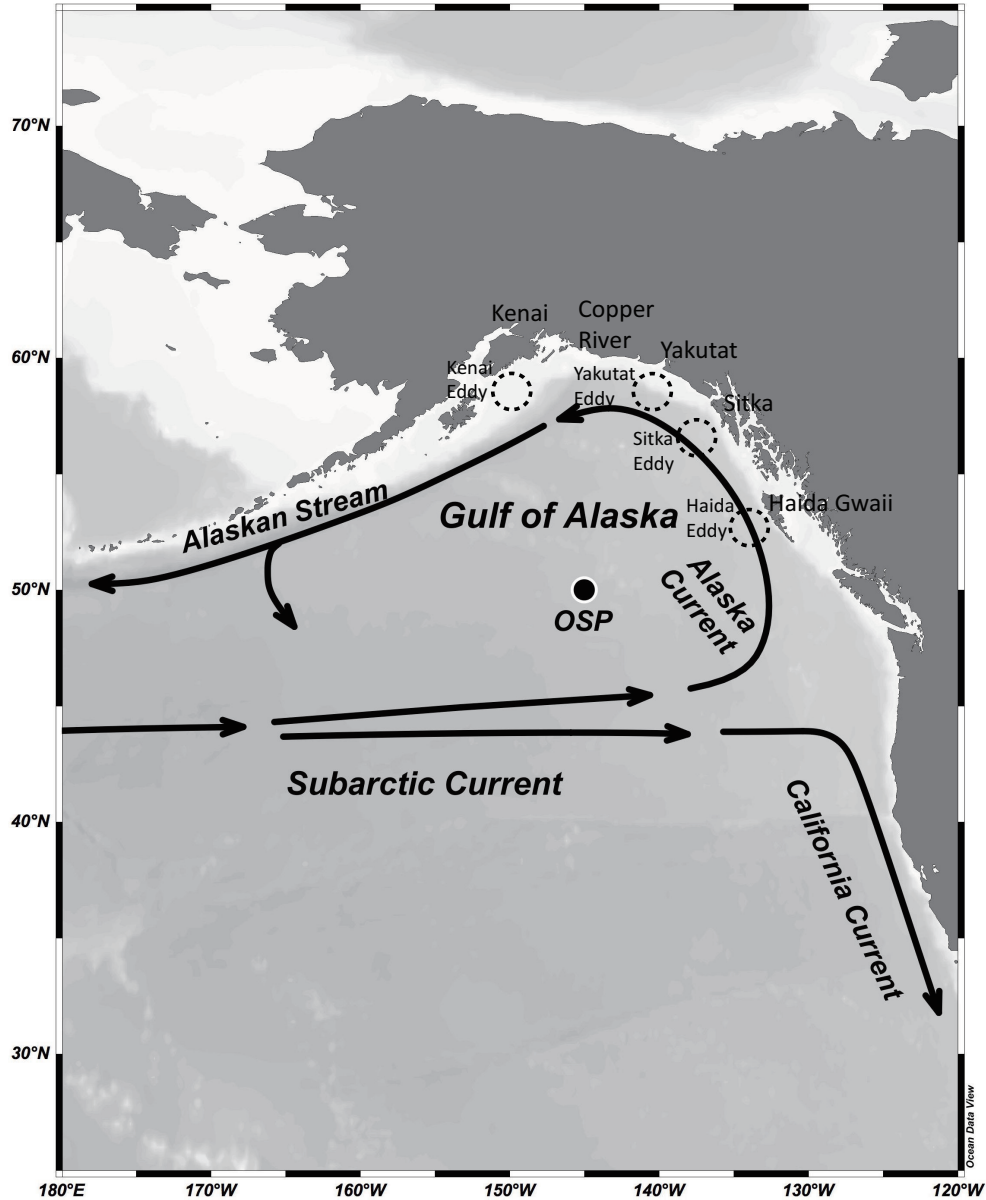


Fig. 4. Mesoscale eddies in the Gulf of Alaska.

得られた (Xiu *et al.*, 2011)。また、アラスカ湾全体への鉄の輸送量も計算されており、中規模渦による反応性の鉄の総輸送量は  $8 \times 10^6 \text{ mol Fe yr}^{-1}$ 、大気からの溶存鉄の総輸送量は  $1 \sim 10 \times 10^6 \text{ mol Fe yr}^{-1}$  という値が得られている (Brown *et al.*, 2012)。大気からの降下に匹敵する量の鉄が中規模渦によって輸送されている可能性が考えられる。しかし、これらの供給過程の空間的・季節的

変化が大きいことから、さらにデータを蓄積し、詳しいプロセスを明らかにしていく必要がある。また、最近では、アリューシャン列島に沿ったアリューシャン海流によって、中規模渦が東経  $180^\circ$  を越えて移動し、北太平洋亜寒帯中央部および西部まで、沿岸域からの栄養塩・生物を輸送している可能性も指摘されている (Ueno *et al.*, 2009)。



### 3.3. 北太平洋亜寒帯域西部における鉄の水平輸送過程

北太平洋亜寒帯域西部では、大気からの降下以外に、亜表層における鉄の水平輸送プロセスが注目されている。北太平洋亜寒帯西部では、亜表層に高濃度の鉄が観測されており、早春には植物プランクトンにとって重要な供給源となっている (Nishioka *et al.*, 2007)。生物は、成層が発達した夏にはこの鉄を利用できないが、春季には冬季鉛直混合によって上方に輸送された鉄を利用できると考えられる。この冬季混合によって有光層に輸送される鉄のフラックスは  $31 \sim 35 \text{ nmol Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  と推定され、エアロゾルからの溶解度を 0.4% と仮定した時の大気から降下フラックス ( $30 \text{ nmol Fe m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) に匹敵する。冬季混合によって有光層に輸送される鉄の全供給フラックスに対する割合は、親潮域では 59%、北太平洋亜寒帯西部では 32% と推定されている (Nishioka *et al.*, 2007)。しかし、下層から供給された鉄は、栄養塩が完全に消費し尽くされる前に枯渇する。これは亜表層水中の鉄：栄養塩比が植物プランクトン中の鉄：栄養塩比に比べて低いためと考えられる (Nishioka *et al.*, 2007)。この亜表層の鉄濃度を高める要因としては、オホーツク海の大陸棚で再懸濁された堆積物粒子を起源とする鉄を多量に含む海水が北太平洋中層水となり、北太平洋亜寒帯西部の広い海域に水平方向に輸送されるというプロセスが挙げられる (Nishioka *et al.*, 2007)。一方、千島列島からカムチャッカ半島の陸棚斜面もまた溶存鉄と反応性粒子鉄の北太平洋亜寒帯西部への水平輸送の供給源として提案されている (Lam and Bishop, 2008)。

2006年8～9月にはオホーツク海、2008年8～9月には東経155°線上でKNOTから南の測点において観測が行われ、オホーツク海と東経155°における溶存鉄の鉛直断面分布が得られた (Nishioka *et al.*, 2013a)。オホーツク海北西の大陸棚においては、高密度陸棚水 (Dense Shelf Water, DSW:  $26.8 \sim 27.0 \sigma_\theta$ ) が生成され、非常に高い濁度と低い温度によって特徴づけられている (Nakat-suka *et al.*, 2002)。2006年9月にDSWの海水中の溶存鉄、全可溶性鉄を測定したところ、海底付近では極めて高い値を示した ( $[\text{D-Fe}] = > 5 \text{ nM}$ ,  $[\text{TD-Fe}] = > 150 \text{ nM}$ , Nishioka *et al.*, 2013a)。この鉄の分布は高濁度・低温の

海水と対応しており、堆積物の再懸濁によって多量の溶存鉄と反応性粒子鉄がこの底層水に供給されていることが推定される。このDSWはさらにオホーツク中層水 (Okhotsk Sea Intermediate Water, OSIW) に貫入する。OSIWはサハリン島東海岸に沿って南下し、千島海峡、特にブツソル海峡を通して北太平洋西部に流入する (Ito *et al.*, 2003)。鉄の鉛直断面図もこの経路を辿ってオホーツク海から北太平洋西部に鉄が供給されていることを示している (Nishioka *et al.*, 2013a)。また、この鉄の分布は、オホーツク海だけでなく千島列島やカムチャッカ半島の沿岸域から鉄が供給されている可能性も示している。

一方、北太平洋中層水は  $\sigma_\theta = 26.8$  の深度に塩分極小を持ち、北太平洋の亜寒帯から亜熱帯にかけて影響を与える (Ueno and Yasuda, 2000; You, 2003; Mitsudera *et al.*, 2004; Masujima and Yasuda, 2009)。東経155°における鉄の鉛直断面分布を見ると、中層 ( $26.6 \sim 27.5 \sigma_\theta$ ) に広がる低い塩分の海水が、高濃度の鉄を含んでいることが分かる (Nishioka *et al.*, 2013a)。この中層水中の高濃度の鉄は東経155°では北緯30°まで (Nishioka *et al.*, 2013a)、東経165°では北緯35°まで (Nishioka *et al.*, 2007) 達している。この中層水中の高濃度の鉄がやがて表層に運ばれ、植物プランクトンに利用されるプロセスを考える時、千島列島周辺の潮汐によって強められた鉛直混合が重要となる (Nishioka *et al.*, 2013a)。北太平洋亜寒帯西部の一次生産を考える際には、冬季の鉛直混合と併せて、潮汐による鉛直混合を考慮する必要がある。北太平洋亜寒帯の中層に存在する高濃度の鉄が、北太平洋表層の一次生産にどの程度影響を及ぼしているのかは十分に解明されていない。また、オホーツク海以外の鉄の供給源として、ベーリング海からカムチャッカ半島、千島列島沿岸域に由来する海水が、どれほど重要であるかも今後の研究を待つ必要がある。これらの鉄供給過程の全体像 (Fig. 5) を描き、定量化していくことが現在の大きな課題となっている。

## 4. まとめ

北太平洋亜寒帯の東西において、鉄の鉛直分布が異なることは知られており、鉄の輸送過程の違いが大きな要因の一つとして考えられる。本稿では、東西における供

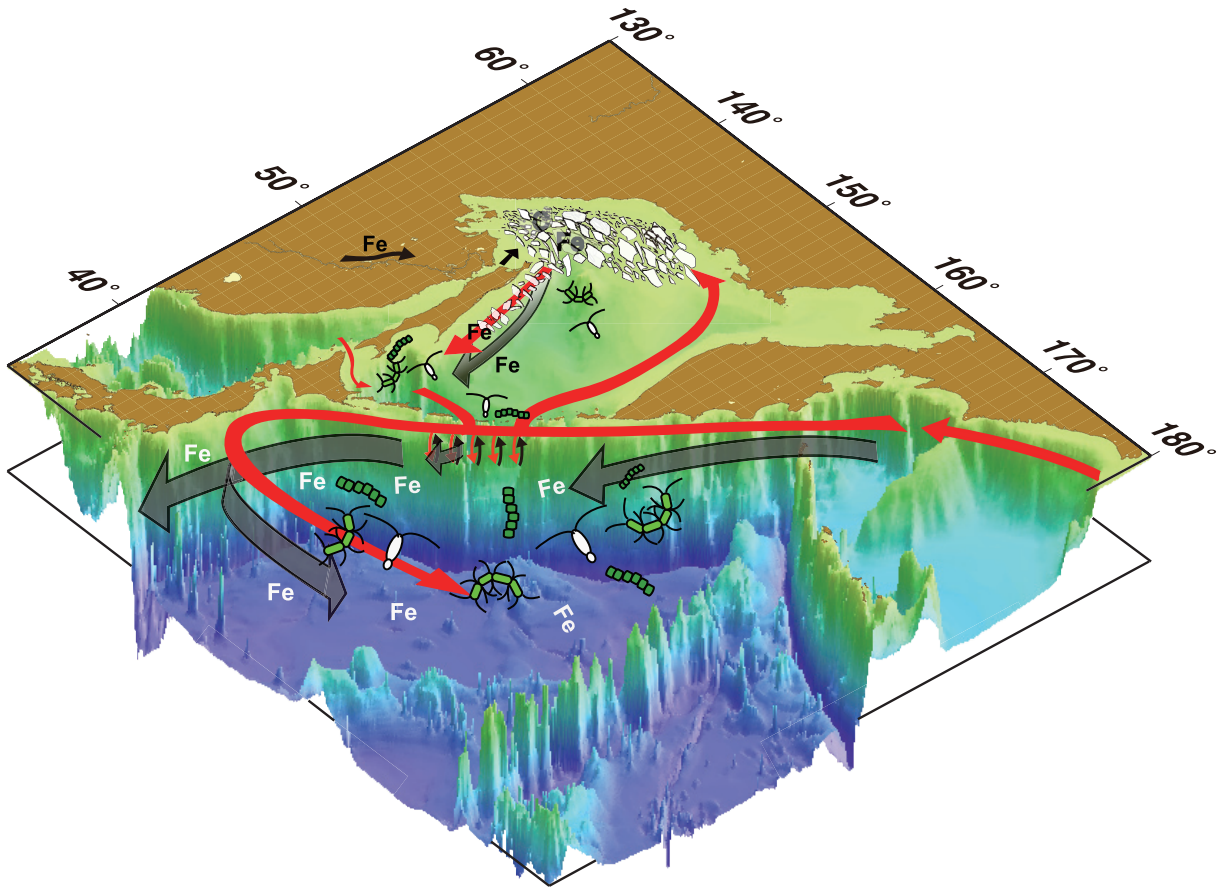


Fig. 5. Conceptual picture of horizontal transportation of iron from marginal seas and continental shelves to the western subarctic North Pacific. Red arrows indicate surface flows and grey arrows indicate subsurface flows.

給過程の違いに注目し、これまでの研究成果をまとめた。北太平洋亜寒帯西部では、オホーツク海などの縁辺海から供給される鉄が中層水中の鉄濃度を高め、表層にまで影響を及ぼしているが可能性が指摘されている。また、北太平洋亜寒帯東部では、中規模渦による水平輸送過程に注目が集まっており、様々な研究者がその実態解明に取り組んでいる。さらに、大気からの鉄の供給過程においては、エアロゾルからの鉄の溶解過程が長年の課題となっており、少しずつその実態が明らかになりつつある。一方で、海洋に供給された鉄はその存在状態によって生物の利用性が異なることが知られている。本稿では主にサイズ分画された鉄の分布に着目し、その成果を概説した。特に反応性粒子鉄がどの程度、生物に利用されているかという点については十分な知見が得られているとは

言いがたい。今後、さらに詳しく研究を進める必要がある。

本稿では紹介しなかったが、サイズ分画以外の方法で鉄の存在状態を調べていくことも重要である。例えば、海水中の鉄は有機配位子と錯体を作り (Rue and Bruland, 1995; Kondo *et al.*, 2012), 安定化することによってその滞留時間が長くなると考えられる。しかし、その有機配位子の実態は未だに明らかになっておらず、海洋で生成される、あるいは陸上から供給される腐植物質 (Tani *et al.*, 2003; Kitayama *et al.*, 2009; Laglera and van den Berg, 2009), 微生物が放出するシデロフォアという強力な有機配位子 (Mawji *et al.*, 2008), 植物プランクトン由来の多糖類 (Hassler *et al.*, 2011) など様々な可能性が挙げられている。また、海水中の鉄は酸化的な霧

囲気では主に Fe(III) として存在するが、光や微生物の活動によってその一部が Fe(II) になると考えられる (Hopkinson and Barbeau, 2007; Hansard *et al.*, 2009; Schallenberg *et al.*, 2015)。Fe(II) は生物にとって比較的取り込みやすい形態として知られており、その挙動も生物の利用性に関わる可能性がある。

このような研究を同時に進めながら、北太平洋亜寒帯の生態系に鉄が与える影響を明らかにしていく必要がある。なお、北太平洋亜寒帯における鉄と植物プランクトンの増殖については詳しい総説が出版されており (Takeda, 2011)、本稿と併せて参照されたい。

## 謝辞

本稿を執筆する機会を提供して下さった東京大学大気海洋研究所の安田一郎教授に感謝いたします。また、本稿は2名の査読者の貴重なコメントにより大きく改善されました。感謝いたします。本稿は文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究(研究領域提案型)海洋混合学の創設」(JPH05820 および JPH05817) の助成を受けています。

## References

- Aguilar-Islas, A. M., M. P. Hurst, K. N. Buck, B. Sohst, G. J. Smith, M. C. Lohan, and K. W. Bruland (2007): Micro- and macronutrients in the southeastern Bering Sea: Insight into iron-replete and iron-depleted regimes. *Prog. Oceanogr.*, **73**, 99–126.
- Bishop, J. B., R. E. David, and J. T. Sherman (2002): Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific. *Science*, **298**, 817–821.
- Boyd, P. W., and M. J. Ellwood (2010): The biogeochemical cycle of iron in the ocean. *Nature Geosci.*, **3**, 675–682.
- Boyd, P. W., C. S. Law, C. S. Wong, Y. Nojiri, A. Tsuda, M. Levasseur, S. Takeda, R. Rivkin, P. J. Harrison, R. Strzepak, J. Gower, R. M. McKay, E. Abraham, M. Arychuk, J. Barwell-Clarke, W. Crawford, D. 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. K. E. Wong, and T. Yoshimura (2004): The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom. *Nature*, **428**, 549–553.
- Boyd, P. W., D. S. Mackie, and K. A. Hunter (2010): Aerosol iron deposition to the surface ocean—Modes of iron supply and biological responses. *Mar. Chem.*, **120**, 128–143.
- Boyd, P. W., C. S. Wong, J. Merrill, F. Whitney, J. Snow, P. J. Harrison, and J. Gower (1998): Atmospheric iron supply and enhanced vertical carbon flux in the NE subarctic Pacific: Is there a connection? *Global Biogeochem. Cycles*, **12**, 429–441.
- Brown, M. T., S. M. Lippiatt, M. C. Lohan, and K. W. Bruland (2012): Trace metal distributions within a Sitka eddy in the northern Gulf of Alaska. *Limnol. Oceanogr.*, **57**, 503–518.
- Buck, C. S., W. M. Landing, and J. Resing (2013): Pacific Ocean aerosols: Deposition and solubility of iron, aluminum, and other trace elements. *Mar. Chem.*, **157**, 117–130.
- Buck, C. S., W. M. Landing, J. A. Resing, and G. T. Lebon (2006): Aerosol iron and aluminum solubility in the northwest Pacific Ocean: Results from the 2002 IOC Cruise. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **7**, Q04M07, doi: 10.1029/2005GC000977.
- Chuang, P. Y., R. M. Duvall, M. M. Shafer, and J. J. Schauer (2005): The origin of water soluble particulate iron in the Asian atmospheric outflow. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L07813, doi: 10.1029/2004GL021946.
- Conway, T. M., and S. G. John (2015): The cycling of iron, zinc and cadmium in the North East Pacific Ocean—Insights from stable isotopes. *Geochem. Cosmochim. Acta*, **164**, 262–283.
- Crawford, W. R. (2002): Physical characteristics of Haida Eddies. *J. Oceanogr.*, **58**, 703–713.
- Cullen, J. T., M. Chong, and D. Ianson (2009): British Columbian continental shelf as a source of dissolved iron to the subarctic northeast Pacific Ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, **23**, GB4012, doi: 10.1029/2008GB003326.
- Cutter, G. A., P. Andersson, L. Codispoti, P. L. Croot, R. Francois, M. Lohan, H. Obata, and M. Rutgers van der Loeff (2010): Sampling and sample-handling protocols for GEOTRACES Cruises, <http://www.geotraces.org/libraries/documents/Intercalibration/Cookbook.pdf>.
- Duce, R. A., and N. W. Tindale (1991): Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **36**, 1715–1726.
- Duggen, S., N. Olgun, P. Croot, L. Hoffmann, H. Dietze, P. Delmelle, and C. Teschner (2010): The role of airborne volcanic ash for the surface ocean biogeochemical iron-cycle: a review. *Biogeosciences*, **7**, 827–844.
- Elrod, V. A., W. M. Berelson, K. H. 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.
- Elrod, V. A., K. S. Johnson, S. E. Fitzwater, and J. N. Plant (2008): A long-term, high-resolution record of surface water iron concentrations in the upwelling-driven central California region. *J. Geophys. Res.*, **113**, C11021, doi:10.1029/2007JC004610.
- Fitzsimmons, J. N., C. T. Hayes, S. N. Al-Subia, R. F. Zhang, P. L. Morton, R. E. Weisend, F. Ascani, and E. A. Boyle (2015): Daily to decadal variability of size-fractionated iron and iron-binding ligands at the Hawaii Ocean Time-series Station ALOHA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **171**, 303–324.
- Frost, B. W. (1991): The role of grazing in nutrient-rich areas of the open sea. *Limnol. Oceanogr.*, **36**, 1616–1630.
- Furutani, H., J. Y. Jung, K. Miura, A. Takami, S. Kato, Y. Kajii, and M. Uematsu (2011): Single-particle chemical characterization and source apportionment of iron-containing atmospheric aerosols in Asian outflow. *J. Geophys. Res.*, **116**, D18204, doi: 10.1029/2011JD015867.
- Grand, M. M., C. I. Measures, M. Hatta, W. T. Hiscock, C. S. Buck, and W. M. Landing (2015): Dust deposition in the eastern Indian Ocean: The ocean perspective from Antarctica to the Bay of Bengal. *Global*



- Biogeochem. Cycles*, **29**, 357–374. doi:10.1002/2014GB004898.
- Hamme, R. C., P. W. Webley, W. R. Crawford, F. A. Whitney, M. D. DeGrandpre, S. R. Emerson, C. C. Eriksen, K. E. Giesbrecht, J. F. R. Gower, M. T. Kavanaugh, M. A. Peña, C. L. Sabine, S. D. Batten, L. A. Coogan, D. S. Grundle, and D. Lockwood (2010): Volcanic ash fuels anomalous plankton bloom in subarctic northeast Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L19604. doi:10.1029/2010GL044629.
- Hansard, S. P., W. M. Landing, C. I. Measures, and B. M. Voelker (2009): Dissolved iron (II) in the Pacific Ocean: Measurements from the PO2 and P16N CLIVAR/CO2 repeat hydrography expeditions. *Deep-Sea Res.-I*, **56**, 1117–1129.
- Hassler, C. S., V. Schoemann, C. M. Nichols, E. C. V. Butler, and P. W. Boyd (2011): Saccharides enhance iron bioavailability to Southern Ocean phytoplankton. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 1076–1081.
- Hatta, M., C. I. Measures, S. Roshan, J. Wu, J. N. Fitzsimmons, P. Sedwick, and P. L. Morton (2015): An overview of dissolved Fe and Mn distributions during the 2010–2011 U. S. GEOTRACES North Atlantic cruises. *Deep-Sea Res.-II*, **116**, 117–129.
- Hopkinson, B. M., and K. A. Barbeau (2007): Organic and redox speciation of iron in the eastern tropical North Pacific suboxic zone. *Mar. Chem.*, **106**, 2–17.
- Hurst, P. M., A. M. Aguilar-Islas, and K.W. Bruland (2010): Iron in the southeastern Bering Sea: elevated leachable particulate Fe in shelf bottom waters as an important source for surface waters. *Cont. Shelf Res.*, **30**, 467–480.
- 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**, 3258. doi:10.1029/2002jc001590.
- Iwamoto Y, K. Yumimoto, M. Toratani, A. Tsuda, K. Miura, I. Uno, and M. Uematsu (2011): Biogeochemical implications of increased mineral particle concentrations in surface waters of the northwestern North Pacific during an Asian dust event. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L01604. doi:10.1029/2010GL045906.
- 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. la Roche, 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., E. Boyle, K. Bruland, K. Coale, C. Measures, J. Moffett, A. Aguilar-Islas, K. Barbeau, B. Bergquist, A. Bowie, K. Buck, Y. Cai, Z. Chase, J. Cullen, T. Doi, V. Elrod, S. Fitzwater, M. Gordon, A. King, P. Laan, L. Laglera-Baquer, W. Landing, M. Lohan, J. Mendez, A. Milne, H. Obata, L. Ossiander, J. Plant, G. Sarthou, P. Sedwick, G. Smith, B. Sohst, S. Tanner, S. Van den Berg, J. Wu, 2007. Developing standards for dissolved iron in seawater. *EOS*, vol. **88**, No. 11, 131–132.
- Johnson, K. S., F. P. Chavez, and G. E. Friedrich (1999): Continental-shelf sediment as a primary source of iron for coastal phytoplankton. *Nature*, **398**, 697–700.
- Johnson, W. K., L. A. Miller, N. E. Sutherland, and C. S. Wong (2005): Iron transport by mesoscale Haida eddies in the Gulf of Alaska. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 933–953.
- Kitayama, S., K. Kuma, E. Manabe, K. Sugie, H. Takata, Y. Isoda, K. Toya, S. Saitoh, 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 humic-type fluorescent dissolved organic matter. *J. Geophys. Res.*, **114**, C08019. doi:10.1029/2008JC004754.
- Kondo, Y., S. Takeda, and K. Furuya (2012): Distinct trends in dissolved Fe speciation between shallow and deep waters in the Pacific Ocean. *Mar. Chem.*, **134**, 18–28.
- Ladd, C., W. R. Crawford, C. E. Harpold, W. K. Johnson, N. B. Kachel, P. J. Stabenro, and F. Whitney (2009): A synoptic survey of young mesoscale eddies in the Eastern Gulf of Alaska. *Deep-Sea Res.-II*, **56**, 2460–2473.
- Laglera, L. M. and C. M. G. van den Berg (2009): Evidence for geochemical control of iron by humic substances in seawater. *Limnol. Oceanogr.*, **54**, 610–619.
- 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.
- 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. *Global Biogeochem. Cycles*, **20**, GB1006. doi:10.1029/2005GB002557.
- Lam, P. J., D. C. Ohnemus, and M. A. Marcus (2012): The speciation of marine particulate iron adjacent to active and passive continental margins. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **80**, 108–124.
- Langmann, B., K. Zaksek, and H. Hort (2010): Atmospheric distribution and removal of volcanic ash after the eruption of Kasatochi volcano: A regional model study. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **115**, D00L06. doi:10.1029/2009JD013298.
- Lin, Y. C., J. P. Chen, T. Y. Ho, and I. C. Tsai (2015): Atmospheric iron deposition in the northwestern Pacific Ocean and its adjacent marginal seas: The importance of coal burning. *Global Biogeochem. Cycles*, **29**, 138–159.
- Lippiatt, S. M., M. C. Lohan, and K. W. Bruland (2010): The distribution of reactive iron in northern Gulf of Alaska coastal waters. *Mar. Chem.*, **121**, 187–199.
- Lippiatt, S. M., M. T. Brown, M. C. Lohan, and K. W. Bruland (2011): Reactive iron delivery to the Gulf of Alaska via a Kenai eddy. *Deep-Sea Res.-I*, **58**, 1091–1102.
- Luo, C., N. Mahowald, T. Bond, P. Y. Chuang, P. Artaxo, R. Siefert, Y. Chen, and J. Schauer (2008): Combustion iron distribution and deposition. *Global Biogeochem. Cycles*, **22**: GB1012. doi:10.1029/2007GB002964.
- 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. -A*, **36**, 649–680.
- Masujima, M., and I. Yasuda (2009): Distribution and modification of North Pacific Intermediate Water around the Subarctic Frontal Zone east of 150° E. *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 1462–1474.
- Mawji, E., M. Gledhill, J. A. Milton, G. A. Tarran, S. Ussher, A. Thompson, G. A. Wolff, P. J. Worsfold, and E. P. Achterberg (2008): Hydroxamate siderophores: occurrence and importance in the Atlantic Ocean. *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 8675–8680.
- Measures, C. I. (1999): The role of entrained sediments in sea ice in the distribution of aluminium and iron in the surface waters of the Arctic Ocean. *Mar. Chem.*, **68**, 59–70.
- Melancon, J., M. Lefvasseur, M. Lizotte, P. Delmelle, J. Cullen, R. C. Hamme, A. Pena, K. G. Simpson, M. Scarratt, J. E. Tremblay, J. Zhou, K. Johnson, N. Sutherland, M. Arychuk, N. Nemcek, and M. Robert



- (2014): Early response of the northeast subarctic Pacific plankton assemblage to volcanic ash fertilization. *Limnol. Oceanogr.*, **59**, 55–67.
- Mitsudera, H., B. Taguchi, Y. Yoshikawa, H. Nakamura, T. Waseda, and T. Qu (2004): Numerical study on the Oyashio water pathways in the Kuroshio-Oyashio confluence. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 174–196.
- Moffet, R. C., H. Furutani, T. C. Rodel, T. R. Henn, P. O. Sprau, A. Laskin, M. Uematsu, and M. K. Gilles (2012): Iron speciation and mixing in single aerosol particles from the Asian continental outflow. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **117**, D07204, doi: 10.1029/2011JD016746.
- 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**, 1757, doi:10.1029/2001GL014029.
- 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 (2013a): Intensive mixing along an island chain controls oceanic biogeochemical cycles. *Global Biogeochem. Cycles*, **27**, 920–929.
- Nishioka, J., H. Obata, and D. Tsumune (2013b): Evidence of an extensive spread of hydrothermal dissolved iron in the Indian Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **361**, 26–33.
- Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, T. Nakatsuka, S. Takeda, T. Yoshimura, K. Suzuki, K. Kuma, S. Nakabayashi, 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, doi:10.1029/2006JC004055.
- 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, C. S. Wong, and W. K. Johnson (2001): Size-fractionated iron concentrations in the northeast Pacific Ocean: distribution of soluble and small colloidal iron. *Mar. Chem.*, **74**, 157–179.
- Okkonen, S. R., T. J. Weingartner, S. L. Danielson, D. L. Musgrave, and G. M. Schmidt (2003): Satellite and hydrographic observations of eddy-induced shelf-slope exchange in the northwestern Gulf of Alaska. *J. Geophys. Res.-Oceans*, **108**, 3033, doi: 10.1029/2002JC001342.
- Okubo, A., S. Takeda, and H. Obata (2013): Atmospheric deposition of trace metals to the western North Pacific Ocean observed at coastal station in Japan. *Atmos. Res.*, **129**, 20–32.
- 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.
- Rijkenberg, M. A., R. Middag, P. Laan, L. J. A. Gerringa, H. M. van Aken, V. Schoemann, J. T. M. de Jong, and H. J. W. Baar (2014): The distribution of dissolved iron in the west Atlantic Ocean. *PLoS One*, **9**, doi: 10.1371/journal.pone.0101323.
- 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.
- Schallenberg, C., A. B. Davidson, K. G. Simpson, L. A. Miller, and J. T. Culen (2015): Iron (II) variability in the northeast subarctic Pacific Ocean. *Mar. Chem.*, **177**, 33–44.
- Schroth, A. W., J. Crusius, I. Hoyer, and R. Campbell (2014): Estuarine removal of glacial iron and implications for iron fluxes to the ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 3951–3958, doi: 10.1002/2014GL060199.
- Sedwick, P. N., E. R. Sholkovitz, and T. M. Church (2007): Impact of anthropogenic combustion emissions on the fractional solubility of aerosol iron: Evidence from the Sargasso Sea. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **8**, Q10Q06, doi: 10.1029/2007GC001586.
- Sholkovitz, E. R., P. N. Sedwick, and T. M. Church (2009): Influence of anthropogenic combustion emissions on the deposition of soluble aerosol iron to the ocean: Empirical estimates for island sites in the North Atlantic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 3981–4003.
- Sholkovitz, E. R., P. N. Sedwick, T. M. Church, A. R. Baker, and C. F. Powell (2012): Fractional solubility of aerosol iron: Synthesis of a global-scale data set. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **89**, 173–189.
- Smith, K. I., B. H. Robinson, J. J. Helly, R. S. Kaufmann, H. A. Ruhl, T. J. Shaw, B. S. Twining, and M. Vernet (2007): Free-drifting icebergs: Hot spots of chemical and biological enrichment in the Weddell Sea. *Science*, **317**, 478–482.
- Tabata, S. (1982): The anticyclonic, baroclinic eddy off Sitka, Alaska, in the Northeast Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **12**, 1260–1282.
- Tagliabue, A., J.-B. Sallée, A. R. Bowie, M. Lévy, S. Swart, and P. W. Boyd (2014): Surface-water iron supplies in the Southern Ocean sustained by deep winter mixing. *Nature Geosci.*, **7**, 314–320.
- Takata, H., K. Kuma, Y. Saitoh, M. Chikira, S. Saitoh, 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.
- Takeda, S. (2011): Iron and phytoplankton growth in the subarctic North Pacific, p. 41–93. In *Aqua-BioScience Monographs*, Vol. 4, Terrapub, Tokyo.
- Tani, H., J. Nishioka, K. Kuma, H. Takata, Y. Yamashita, E. Tanoue, and T. Midorikawa (2003): Iron(III) hydroxide solubility and humic-type fluorescent organic matter in the deep water column of the Okhotsk Sea and the northwestern North Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.-I*, **50**, 1063–1078.
- 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, Y. 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 HN-LC ecosystem to iron enrichment in the western subarctic Pacific (SEEDS II). *J. Oceanogr.*, **63**, 983–994.
- 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, Y. 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.

- Uematsu, M., Z. Wang, and I. Uno (2003): Atmospheric input of mineral dust to the western North Pacific region based on direct measurements and regional chemical transport model. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1342, doi:10.1029/2002GL016645.
- Ueno, H., H. J. Freeland, W. R. Crawford, H. Onishi, E. Oka, K. Sato, and T. Suga (2009): Anticyclonic Eddies in the Alaskan Stream. *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 934–951.
- Ueno, H., and I. Yasuda (2000): Distribution and formation of the mesothermal structures (temperature inversions) in the North Pacific Subarctic Regions. *J. Geophys. Res.*, **105**, 16,885–16,898.
- Whitney, F. and M. Robert (2002): Structure of Haida eddies and their transport of nutrient from coastal margins into the NE Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **58**, 715–723.
- Wong, C. S., N. A. D. Waser, Y. Nojiri, F. A. Whitney, J. S. Page, and J. Zeng (2002): Seasonal cycles of nutrients and dissolved inorganic carbon at high and mid latitudes in the North Pacific Ocean during the Skaugran cruises: determination of new production and nutrient uptake ratios. *Deep-Sea Res.-II*, **49**, 5317 – 5338.
- Wu, J. F., A. Aguilar-Islas, R. Rember, T. Weingartner, S. Danielson, and T. Whittedge (2009): Size-fractionated iron distribution on the northern Gulf of Alaska. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L11606, doi: 10.1029/2009GL038304.
- Xiu, P., A. P. Palacz, F. Chai, E. G. Roy, and M. L. Wells (2011): Iron flux induced by Haida eddies in the Gulf of Alaska. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L13607, doi: 10.1029/2011GL047946.
- You, Y. (2003): Implications of cabbelling on the formation and transformation mechanism of North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **108**, 3,134, doi:10.1029/2001JC001285.
- Yuan, W., and J. Zhang (2006): High correlations between Asian dust events and biological productivity in the western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L07603, doi: 10.1029/2005GL025174.

## Iron supply to the subarctic North Pacific

Hajime Obata<sup>1\*</sup>, Taejin Kim<sup>1</sup> and Jun Nishioka<sup>2</sup>

### Abstract

The subarctic North Pacific Ocean is a high-nutrient, low-chlorophyll area in which nutrients remain undepleted in surface waters throughout the year. In this area, phytoplankton growth is limited by the availability of Fe in seawater. To improve our understanding of primary production in the subarctic North Pacific Ocean, it is important to determine Fe distributions and supply processes for this area. However, Fe distribution and biogeochemical cycling have not been fully clarified, because Fe is a contamination-prone trace metal during onboard sampling and analyses in the laboratory. In this review, we compile information on Fe distribution and supply processes in the subarctic North Pacific Ocean from previous studies, with a focus on the atmospheric transportation of aerosols from continents and lateral transportation from coastal areas as Fe supply processes. Moreover, we discuss future studies that should be undertaken to address knowledge gaps in this research topic.

**Key words** : leachable particulate iron, subarctic North Pacific, aerosol, mesoscale eddy, intermediate water

(Corresponding author's e-mail address : obata@aori.u-tokyo.ac.jp)

(Received 23 September 2016 ; accepted 9 January 2017)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2017)

---

<sup>1</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277–8564, Japan

<sup>2</sup> Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, N19W8, Sapporo, Hokkaido 060–0819, Japan

\* Corresponding author : Hajime Obata

TEL: +81471366082 FAX: +81471366081

e-mail : obata@aori.u-tokyo.ac.jp