HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北太平洋亜寒帯の融氷期生物生産増大イベントの原因
Author(s)	関, 宰
Citation	低温科学, 74, 143-151
Issue Date	2016-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.74.143
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/61208
Type	departmental bulletin paper
File Information	143-151.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 74 （2016） 143-151
doi: 10.14943/lowtemsci. 74. 143

北太平洋亜寒帯の融氷期生物生産増大イベントの原因

関　宰[1)]

高緯度縁辺海を含む北太平洋亜寒帯域は生物生産が高いことで知られているが，オホーツク海やベーリング海東部を除く大部分は高栄養塩低クロロフィル（HNLC）海域と呼ばれ，鉄の供給不足により生物生産が制限されている海域でもある．近年の研究から高緯度縁辺海の大陸棚起源の鉄が北太平洋亜寒帯域における生物生産の鍵を握っている可能性が示唆された．一方，古海洋の研究からこの海域では気候変動に伴い海洋循環や生物生産が劇的に変動したことが明らかにされている．本稿では最終氷期から現在にいたるこの海域の生物生産の変遷を解説し，高緯度縁辺海から外洋への物質供給システムが外洋の生物生産に与えた影響について議論する．

Cause of the subarctic North Pacific productivity spike during the deglaciation

Osamu Seki[1]

The subpolar North Pacific region is one of the highest productive area in the ocean. This region is also characterized by high nutrient low chlorophyll (HNLC) region where iron is a key micronutrient that limits primary production in the ocean. Recent studies suggest that iron supply from the continental shelf in the Sea of Okhotsk potentially plays a substantial role in sustaining primary production in the subarctic North Pacific. On the other hand, paleoceanographic studies revealed that productivity has been dramatically changed in this region associated with the glacial-interglacial cycle. In this paper, I review changes in productivity in this region from the last glacial maximum period to the present and discuss a potential impact of iron transport from subpolar marginal sea to the subarctic North Pacific on the deglacial productivity spike.

キーワード：北太平洋亜寒帯，縁辺海，融氷期，大陸棚，海洋生物生産，鉄，陸起源物質
subarctic North Pacific, marginal sea, deglaciation, continental shelf, marine productivity, iron, terrigenous material

1．はじめに

北太平洋亜寒帯域は深層水大循環の終着点であることから，栄養塩に富む深層水の湧昇によって世界有数の高い生物生産性を誇る海域である（Moore et al., 2002）．またこの海域は微量栄養塩である鉄の供給が不足していることで生物生産が制限を受けていることでも知られる（Boyd et al., 2007; Moore et al., 2002）．そのような海域は高栄養塩低クロロフィル（HNLC）海域と呼ばれ，オホーツク海やベーリング海東部の大陸棚を除く北太平洋亜寒帯域の大部分がそれにあたる．HNLC 海域では表層に栄養塩が高濃度で存在するにもかかわらず，微量栄養塩の鉄が不足しているため，プランクトンが栄養塩を消費しつくすことができない．そのため鉄の供給が生物生産の鍵を握っている．

植物プランクトンは溶存鉄を利用するが，溶存鉄は栄養塩とは異なり海水中では不安定で，すぐに酸化鉄として粒子化し沈降除去されてしまう．よって，北太平洋 HNLC 海域のような外洋に鉄を供給するプロセスとしては陸上の乾燥地帯からのダストの長距離輸送が重要と考えられてきた．ところが，近年のアムール川やオホー

連絡先
関　宰
北海道大学低温科学研究所
〒060-0819　札幌市北区北 19 条西 8 丁目
Tel. 011-706-5504
e-mail：seki@lowtem.hokudai.ac.jp
１）北海道大学低温科学研究所
Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

ツク海の観測によりオホーツク海などの高緯度縁辺海の大陸棚もこの海域に鉄を供給していることがわかってきた（Nishioka et al., 2007; Nishioka et al., 2011; Nishioka et al., 2013）．これはロシア極東の大規模河川であるアムール川からオホーツク海北西の大陸棚への鉄の供給（Nagao et al., 2007），オホーツク中層水による大陸棚から外洋への物質輸送（Nakatsuka et al., 2002）と千島列島付近での活発な潮汐混合（Nakamura and Awaji, 2004）が奇跡的に連動した大陸と外洋をつなぐ大規模な陸海結合システムが存在するためである（図 1）．この発見によって，北太平洋亜寒帯域の豊かな生態系は深層から栄養塩の富む水塊の湧昇をベースとして，高緯度縁辺海の大陸棚を起源とする鉄の供給によって支えられているという新しい視点がもたらされた（Nishioka et al., 2007; Nishioka et al., 2011; Nishioka et al., 2013）．

この大規模な陸海結合システムの原動力はアムール川からの鉄の供給とオホーツク海北西の大陸棚における季節海氷の形成に伴う中層水の形成である．アムール川流域は降水をもたらすアジアモンスーンの影響下の北限であり，オホーツク海は北半球の季節海氷域の南限であることから，この陸海結合システムは気候変動に敏感に応答してきた可能性が高い．この陸海結合システムの実施的な役割を評価する上で過去の気候・環境変動の解析は重要な知見をもたらすと考えられる．

本稿ではこれまでの海洋堆積物コアの研究から得られた，最終氷期から完新世に至る北太平洋亜寒帯の外洋と縁辺海の海洋環境や生物生産，陸起源物質の供給の変動などについて解説し，陸海結合システムが過去の生物生産に与えたインパクトについて議論する．

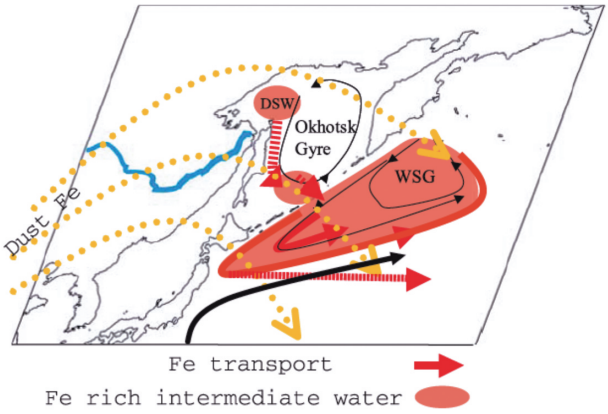

図 1：北太平洋高緯度における鉄の供給プロセスの概念図（Nishioka et al., 2007）．
Figure 1：Schematic of iron supply process in the northern North Pacific. Original figure is from Nishioka et al. (2007).

2．最終氷期から完新世にかけての生物生産の変遷

近年，オホーツク海やベーリング海などの縁辺海を含む北太平洋亜寒帯域の各海域から採取された海洋堆積物コアの研究が精力的に行われ（図 2），氷期－間氷期サイクルに伴い北太平亜寒帯域の海洋生物生産が質的・量的に大きく変動していたことが明らかになってきた．まず，この章では全生物生産量の変遷と共に，海洋における主要な一次生産者の珪藻と円石藻それぞれの生物生産の変遷についても解説する．

堆積物中の全有機態炭素の含有量や質量堆積速度（フラックス），色彩の記録などから亜寒帯全域の生物生産は最終氷期（1.8 万年以前）において現在よりも著しく低下していたこと，融氷期（約 1.8–0.7 万年前）や間氷期（完新世；過去 1 万年間）に生物生産が著しく増大したことが示された（Keigwin et al., 1992; Gorbarenko et al., 1996; Keigwin, 1998; Crusius et al., 2004; Seki et al.,

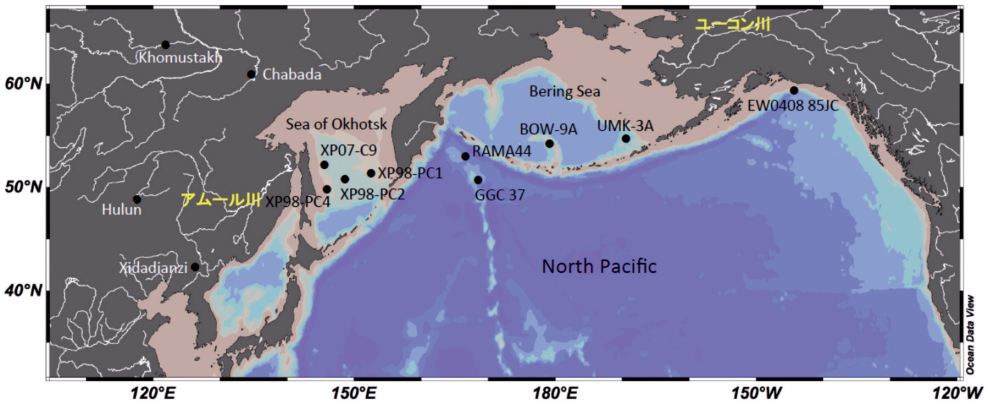

図 2：本稿で議論に用いられる海洋および湖沼堆積物コアの位置．
Figure 2：Map showing locations of sediment cores described in this paper.

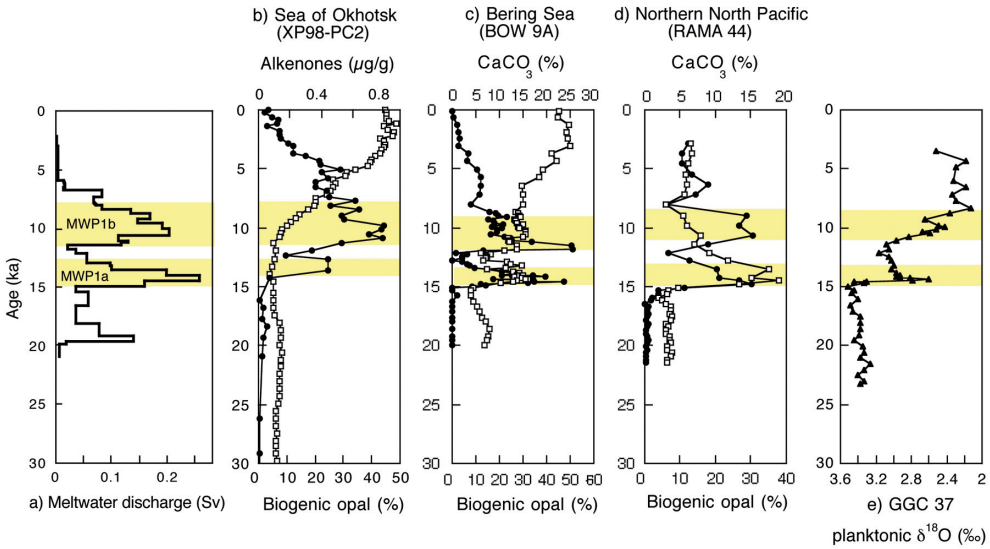

図 3：a）氷床融解水の流入量の年代変化．b）オホーツク海堆積物コア（XP98-PC2）（Seki et al., 2004），c）ベーリング海堆積物コア（BOW-9A）（Okazaki et al., 2005）および d）北太平洋亜寒帯堆積物コア（RAMA 44）（Gorbarenko et al., 1996）中の炭酸塩またはアルケノン（黒丸）および生物起源オパール（白抜き四角）含有量の年代変化．e）太平洋亜寒帯堆積物コア（GGC 37）の浮遊性有孔虫の酸素同位体比の年代変化（Lam et al., 2013）．図中の黄色で示した期間は Meltwater Pulse (MWP) 1a と 1b イベントを示す．

Figure 3：a) Meltwater discharge, $CaCO_3$ (solid circle) and biogenic opal (open square) contents in the b) Okhotsk Sea (XP98-PC2; Seki et al., 2004), c) Bering Sea (BOW-9A; Okazaki et al., 2005) and d) subpolar North Pacific (RAMA 44; Gorbarenko et al., 1996) sediments together with e) planktonic foraminiferal oxygen isotope ratio in the subpolar north Pacific (GGC 37; Lam et al., 2013) over the past 30 kyrs. Yellow areas represent Meltwater Pulse (MWP) 1a and 1b events.

2004; Kienast et al., 2004; Okazaki et al., 2005; Brunelle et al., 2007; Gebhardt et al., 2008; Jaccard et al., 2009; Davis et al., 2011; Riethdorf et al., 2013a; Riethdorf et al., 2013b）．ただし HNLC 海域では融氷期の生物生産増大のみが顕著であり，完新世における生物生産の増大はみられない（Keigwin et al., 1992; Gorbarenko et al., 1996; Crusius et al., 2004; Jaccard et al., 2005; Brunelle et al., 2007; Gebhardt et al., 2008; Jaccard et al., 2009）．また，融氷期の著しい生物生産の増大は最終氷期に発達した氷床が急速に融解した時期（Melt Water Pulse (MWP) と呼ばれ，MWP 1a（約 1.4 万年前）と MWP 1b（約 1.1 万年前）が顕著である）（Fairbanks, 1989）と同調していたと考えられている．

さらに堆積物中の炭酸カルシウムやアルケノン濃度などの円石藻生産のトレーサー記録から，円石藻の生産が最終氷期に特に著しく低下していたこと，MWP 1a と MWP 1b において円石藻の爆発的な生産増大が北太平洋高緯度全域で発生していたことが示された（Gorbarenko et al., 1996; Seki et al., 2004; Kienast et al., 2004; Okazaki et al., 2005; Riethdorf et al., 2013b）（図 3）．現在ではこの海域の円石藻の生産は限定されており（Seki et al., 2007; Harada et al., 2006）珪藻が主要な一次生産者なので（Honda et al., 2002; Takahashi et al., 2002; Nakatsuka et al., 2004），融氷期の一次生産者相は現在とは大きく異なっていた．

一方，堆積物コア中の生物起源オパール含有量やフラックスなどから推測される珪藻の生物生産の変遷は円石藻のそれとは異なり，地域によって大きく異なる結果が得られている（図 3）．例えば，北太平洋亜寒帯の外洋やベーリング海西部などの HNLC 海域では融氷期にのみ著しい珪藻生産の増大がおこっている（Keigwin et al., 1992; Gorbarenko et al., 1996; Crusius et al., 2004; Jaccard et al., 2005; Brunelle et al., 2007; Gebhardt et al., 2008; Jaccard et al., 2009）．この融氷期の生物生産のピークは北太平洋亜寒帯の東部（アラスカ湾）においても確認されている（Davis et al., 2011）．一方でベーリング海の東部では融氷期と完新世の両方で珪藻生産の増加が認められている（Okazaki et al., 2005）．それに対し，オホーツク海では融氷期の珪藻生産増大イベントは認められず，珪藻の生物生産が増加するのはずっと後の完新世に入ってからとなる（Gorbarenko et al., 1996; Seki et al., 2004）．

こうした氷期から間氷期へ移行する過程における生産変動の激変はなぜ引き起こされたのであろうか？植物プランクトンの生産は温度，栄養塩，微量栄養塩や光環境

などによって規定されている．それらに影響を与える要因としては，海氷の消長，表層および中深層の海洋循環の変化や陸域からの水・物質の供給量の変化などが考えられる．次に堆積物に記録された過去の生物生産の変動を引き起こした要因について考えてみたい．

3．海氷の影響

最終氷期から融氷期を経て間氷期（完新世）に至る生物生産の変動に影響を与えた要因として海氷の消長が考えられる．海面が海氷に覆われると光環境が悪化し，生物生産が著しく抑制されることがセジメントラップなどの研究から明らかにされている（Nakatsuka et al., 2004）．堆積物コア中の漂流岩屑や珪藻の群種組成などの海氷トレーサー記録から，北太平洋亜寒帯域では氷期には現在よりも海氷域が拡大していたことが示唆されている（Shiga and Koizumi, 2000; Sakamoto et al., 2005; Sakamoto et al., 2006; Caissie et al., 2010; Maier et al., 2015）（図 4）．従って，海氷の拡大がこの海域における最終氷期の生物生産低下に寄与した可能性がある．しかしながら，海氷の消長が氷期－間氷期サイクルの生物生産変動を規定していた主因とは考えにくい．その理由として，融氷期の MWP イベントにおける両者の変動パターンが一致していないことが挙げられる（Seki et al., 2004）．

また，海氷の役割として外洋への微量栄養塩の運搬も考えられる．特にオホーツク海の海氷中の鉄の濃度は海水中のそれに比べ，数オーダー高い結果が得られており（Kanna et al., 2014），融氷期の生物生産イベントに貢献した可能性があるかもしれない．

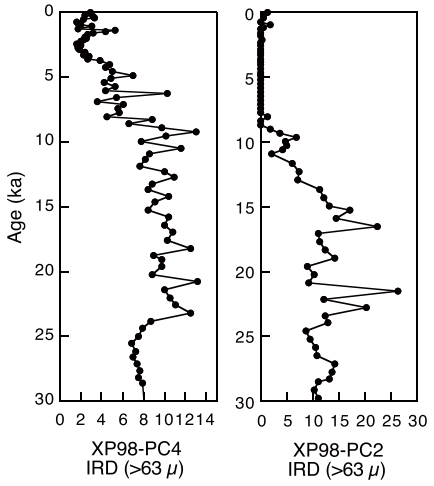

図 4：オホーツク海堆積物コア（XP98-PC4 と XP98-PC2）中の漂流岩屑（IRD）の過去の 3 万年の記録（Sakamoto et al., 2005）．
Figure 4：Ice rafted debris records in the Okhotsk Sea (XP98-PC4 and XP98-PC2) over the past 30 kyrs (Sakamoto et al., 2005).

4．海洋循環モードの再編

海水の鉛直的な循環の変化は中深層から表層への栄養塩の供給に影響を与える．鉛直的な混合が活発なら，栄養塩の豊富な中深層水が表層に供給されるが，海洋全体で成層化が強化されると表層への栄養塩の供給は低下する．これまでの研究で氷期－間氷期サイクルに伴って海洋循環の再編が起こっていたことが示唆されており，海洋循環の変化がこの海域の生物生産を支配している可能性が指摘されている（Jaccard et al., 2005）．北太平洋堆積物の底生有孔虫の安定炭素同位体比データを基に最終氷期にはこの海域で成層化が発達しており，栄養塩に富む水塊が深層に隔離され，水深 1500–2000 m 以浅は栄養塩濃度の乏しい水塊で満たされていたことが示唆されている（Matsumoto et al., 2002; Herguera et al., 2010）．

また堆積物中の浮遊性と底生有孔虫の放射性炭素年代を用いた手法により，北太平洋では融氷期において鉛直的な海洋混合が活発になったことが示され，強く成層化した氷期モードから現在のように栄養塩に富む中深層水が湧昇する間氷期モードへと移行したことが示された（Okazaki et al., 2010; Okazaki et al., 2012）．従って，融氷期と完新世における高い生物生産はこうした中深層から表層への栄養塩の供給増大が背景にあり，氷期－間氷期サイクルに伴う生物生産の大局的な変動パターン（氷期に低く，間氷期に高い）は海洋循環モードの変動によって概ね調節されているとみてよいだろう．

しかしながら，HNLC 海域において生物生産を増加させるには鉄の供給の増加も伴う必要がある．また，氷期から間氷期への移行に伴う海洋循環の再編と MWP イベントが開始された時期は完全には一致していない（Okazaki et al., 2012）．従って，MWP イベントにおける生物生産の急速な増加に関しては海洋循環の再編のみでは説明できそうになく，別の要因が必要である．

5．融解水による表層の成層化

MWP イベントにおける生物生産の急増の一因として，海洋最表層の成層化の発達による光環境の大幅な改善が考えられる．前述したように MWP イベントでは氷期に北アメリカ大陸や北欧などに発達した氷床の急速な融解が起こったとされている．その結果，MWP イベ

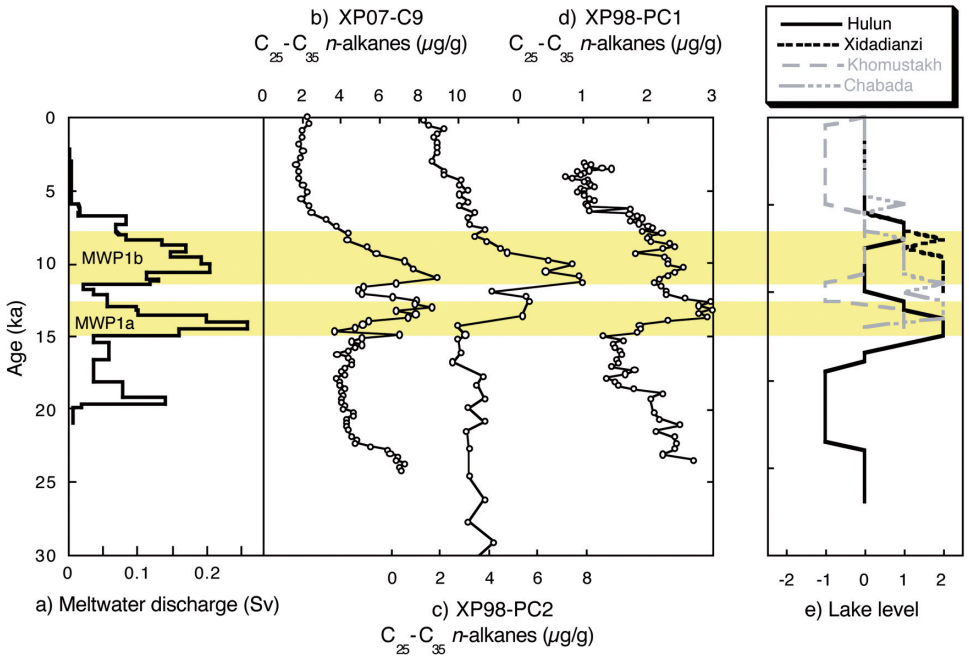

図 5：a）氷床融解水の流入量，b–d）オホーツク海堆積物コア（XP98–PC2，XP07 C9，XP98–PC1）（Seki et al., 2003; Seki et al., 2012）中の陸上起源 C_{25}–C_{35} *n*– アルカン濃度および，e）アムール川流域とその周辺（Hulun，Xidadianzi，Khomustakh，Chabara）の湖水位の年代変化（Yu et al., 2001）．図中の黄色で示した期間は Meltwater Pulse (MWP) 1a と 1b イベントを示す．

Figure 5：Down core profiles of C_{25}–C_{35} *n*–alkane concentration over the past 30 kyrs together with melt water discharge and lake level records: (a) Meltwater discharge (b) XP07–C9 (Seki et al., 2012), (c) XP98–PC2 (Seki et al., 2003), (d) XP98–PC1 (Seki et al., 2003) and (e) Lake level records in Hulun, Xidadianzi, Khomustakh and Chabara (Yu et al., 2001). Yellow areas represent Meltwater Pulse (MWP) 1a and 1b events.

ント期には大量の淡水が海洋へ流出し，海水準の急速な上昇が引き起こされた（Fairbanks, 1989）．最終氷期の極大期には海水準が現在よりも約 120 m ほど低下していたので（Fairbanks, 1989），オホーツク海やベーリング海の大陸棚の一部は陸地化していたと考えられている．現在の大陸棚はこの融氷期の海水準上昇によって形成されたのである．淡水は海水に比べて密度が低い．そのため，淡水が海洋へ流入することで海洋表層を強く成層化させることができる．これは表層の混合層を浅くさせ，光環境が良くなる．表層水温や表層塩分濃度の代理指標となる浮遊性有孔虫の酸素同位体記録から，MWP 1a および MWP 1b で水温の急激な上昇と塩分濃度の顕著な低下が各地で起こっていたことが示唆されている（図 3e）（Gorbarenko et al., 1996; Max et al., 2012; Lam et al., 2013; Riethdorf et al., 2013a）．さらにベーリング海堆積物中のネオジム同位体比の記録からはアラスカの大規模河川であるユーコン川起源の砕屑物の寄与が融氷期に増大した証拠が得られている（Horikawa et al., 2010）．これらの結果から，Lam et al.（2013）は融解水の流入によって表層の成層化が発達し，光環境が改善したことで，融氷期の爆発的な生物生産の増大が引き起こされたと考えた．氷期にはアラスカにコルディエラ氷床が発達していたので，それが最も重要な融解水のソースと考えられる．融氷期にはアラスカのユーコン川やその他の中小河川を通して，融解水がベーリング海やアラスカ湾に注ぎ込んだはずである．一方，シベリア極東では氷期に大規模な氷床は発達していなかったと考えられているので，オホーツク海への融解水の流入はアラスカ側ほど顕著ではなかっただろう．しかしながら，オホーツク海に大量の淡水を供給するアムール川の流域では融氷期に降水量が著しく増大していたことを示す証拠が湖沼堆積物に記録されている（An et al., 2000; Yu et al., 2001; Eugene et al., 2002; Seki et al., 2009）（図 5）．従って，オホーツク海においても MWP イベントで淡水流入の増加が起こっていたと推測される．

6．鉄の供給

前述したように，オホーツク海とベーリング海東部の大陸棚を除けば北大平亜寒帯域は HNLC 海域であり，現在においては鉄が生物生産の制限因子となっている（Boyd et al., 2007）．氷期から間氷期に至る生物生産変

動パターンに関して HNLC 海域とオホーツク海の決定的な違いは，融氷期の珪藻生産増大イベントが HNLC 海域にのみ発生している点である（Keigwin et al., 1992; Gorbarenko et al., 1996; Crusius et al., 2004; Jaccard et al., 2005; Brunelle et al., 2007; Gebhardt et al., 2008; Jaccard et al., 2009）．特に外洋域における融氷期のピークは顕著であり，当時の生物生産量は現在の数倍ほどあった可能性が指摘されている（Crusius et al., 2004）．融氷期の珪藻生産の増大を引き起こすには栄養塩供給の増大と光環境の改善だけでなく，鉄の供給の増大も伴っていなければならない．

冒頭で述べたように，北太平洋の外洋に鉄を供給するメカニズムとして中国内陸の乾燥地帯などを起源とするダストの長距離輸送と，近年の観測により明らかになった大陸棚からの中層水循環輸送の 2 つが考えられるので（Nishioka et al., 2007; Nishioka et al., 2011; Nishioka et al., 2013），この時期にどちらか，もしくは両方からの鉄供給が増大していたはずである．例えば Davis et al.（2011）らは，直接的な証拠は無いものの，アラスカ湾の海洋堆積物の解析から，MWP イベントにおける生物生産のピークは海水準の上昇により水没した大陸棚から鉄が供給されたことで引き起こされた可能性を提案した．しかしながら，外洋の堆積物中の陸起源鉱物粒子のフラックスは最終氷期で高く，その後融氷期から完新世にかけて徐々に低下するという結果を示しており，MWP イベントにおける著しい増加は認められなかった（Lam et al., 2013）．この結果から，Lam et al.（2013）らは MWP イベントに外洋に供給された鉄はアジアの乾燥地域からのダストの長距離輸送によって概ねもたらされたものであり，周辺の大陸棚からの鉄はそれほど重要な役割を果たしていなかったと結論づけた．このように Lam et al.（2013）は融氷期における HNLC 海域の珪藻生産の急増は高い栄養塩と鉄の供給を背景に，表層成層化による光環境の大幅な改善がトリガーとなって引き起こされたと解釈した．

7．中層水起源の鉄の可能性

Lam et al.（2013）は外洋における融氷期の生物生産の極大イベントにおいては大陸棚起源の鉄の寄与は小さく，ダスト由来の鉄が利用されていたと結論づけた．しかしながらダスト鉄仮説にはまだ検証すべき問題が残されている．植物プランクトンの生産には植物プランクトンが利用できる溶存態の鉄が供給される必要があるが，ダストに含まれる鉄は粒子態である．そのため，ダストが海に沈降した後，海水中で鉄が溶出されなければならないが，実際にどの程度溶出しているのかはよくわかっていないのが現状である．また海水中におけるダストの滞留時間も重要な要素で，速やかに沈降して表層から除去されてしまうのであれば，生物が利用できるチャンスが失われる．近年の観測からは海水中におけるアジア起源のダストの沈降速度は比較的速いことが明らかになりつつある．またアジアの乾燥地帯から北太平洋へのダストの飛来は一年中発生しているわけではなく，ほぼ春先に限定されているが（Kawamura et al., 2003），北太平洋の海洋観測からダストの飛来時期と植物プランクトンのブルーミングの時期にはズレがあることが示され，ダスト由来の鉄では年間を通した生物生産の変動をうまく説明できそうにないこともわかりつつある（Nishioka et al., 2011）．このように，北太平洋に飛来するダスト由来の鉄が HNLC の生物生産に寄与しているという確実な証拠は得られていないのが現状である．

もし仮に，近年の観測から推測されるようにダスト由来の鉄が北太平洋の生物生産にあまり利用されていないとしたら，生物に利用可能な十分量の鉄が MWP イベントで他から供給されていなければならない．オホーツク中層水や河川水中には粒子態だけでなく溶存態の鉄も含まれているので（Nagao et al., 2007; Nishioka et al., 2007），中層水循環で外洋へ輸送される鉄なら生産に寄与することができる．しかし前述したように，陸起源の鉱物粒子トレーサーからは大陸棚や河川由来の鉄の流出が MWP イベントで顕著に増大したという証拠が得られていない（Lam et al., 2013）．やはりダスト由来の鉄が重要だったのだろうか？

ところが陸起源の有機物トレーサーに着目すると全く違うシナリオが描ける．代表的な陸起源の有機物トレーサーである植物ワックスの堆積物記録は無機トレーサーのそれとは全く異なり，河川や大陸棚起源の鉄が融氷期イベントに実質的に寄与していた可能性を示唆している．驚くべきことに，オホーツク海堆積物から得られた植物ワックス濃度の記録から MWP 1a と 1b において陸起源有機物の供給が劇的に増大していたことが示された（図 5）（Seki et al., 2003; Seki et al., 2012）．Seki et al.（2003）は，融氷期の陸起源有機物流入の増大は海水準上昇に伴うオホーツク海の大陸棚の水没によって陸面から削剥された陸起源有機物が中層水によって外洋に輸送されたことを反映していると解釈した．この植物ワックス記録の変動パターンは外洋における生物起源オパールのそれと類似しており，両者の間に関連があった可能性が示唆される．

ではなぜ無機物と有機物トレーサーで大きく異なる結果を示すのだろうか？これは無機物と有機物トレーサーでは異なる現象を反映していると考えると説明がつく．堆積物中の無機物トレーサーの含有量やフラックスは最終氷期のような寒冷な時期に増大する傾向があることから，主に乾燥地域から大気に放出されたダストや海氷によって削剥された土壌粒子などを反映したものと考えられる．一方で，有機物トレーサーはダストや土壌粒子というよりは有機物に富む湿原の泥炭からの寄与を強く反映している可能性が高い．例えばアムール流域の下流には広大な湿地帯が広がっており，河川有機物の最も重要なソースとなっている（Nagao et al., 2007）．

オホーツク海堆積物中の *n*-アルカンの分子組成を詳しく調べてみると，融氷期における植物ワックスは湿原に特有の植生である水苔由来の寄与が高いことが明らかになった（Seki et al., 2012）．また，融氷期のセクションには水苔由来の花粉が大量に検出されている（Morley et al., 1991）．このことから融氷期には湿原由来の有機物の供給が著しく増大したと考えることができる．また，湿原は鉄の重要な供給源としても知られている．湿原は還元的環境なので溶存鉄が溶出しやすいためである．アムール川においても下流に広がる湿原が最も重要な鉄のソースであることが観測により確かめられている（Nagao et al., 2007）．

これらの事実から，融氷期には湿原由来の有機物と共に溶存鉄の供給も著しく増大していた可能性が高い．アムール川流域では現在よりも融氷期の有効降水量は高く，河川流量もずっと多かったと考えられるので（Yu et al., 2001; Seki et al., 2009），湿原が著しく発達していても不思議ではない．融氷期に水没した大陸棚にもかつて広大な湿原が広がっていた可能性がある．

このように，河川由来の鉄が北太平洋の HNLC 海域における融氷期の生産増大に実施的な役割を果たしていた可能性を示唆するものとしてオホーツク海堆積物の陸起源有機物トレーサーの記録は意義深い．しかしながら，融氷期において湿原由来の有機物の流入が増大した証拠は，現在のところ他の海域では確認されておらず，HNLC 海域の生物生産に対する河川／大陸棚起源の鉄のインパクトを評価するには至っていない．融氷期の河川／大陸棚鉄仮説を検証するには，ベーリング海やアラスカ湾など他の地域でも湿原由来の陸起源有機物の流入の増大が融氷期に起きていたのか，またその影響がどの程度の範囲に及んでいたのかを確かめていく必要がある．そのためには北太平亜寒帯域において陸起源有機物トレーサー記録の時空間的なデータセットを構築していくことが重要である．

謝辞

本稿を執筆する機会を与えていただいた低温科学の編集者の方々（環オホーツク観測研究センターのスタッフ）に感謝の意を表します．

参考文献

Boyd, P. W. et al. (2007) Mesoscale iron enrichment experiments 1993_2005: Synthesis and future directions. *Science*, **315**, 612–617.

Brunelle, B. G. et al. (2007) Evidence from diatom-bound nitrogen isotopes for subarctic Pacific stratification during the last ice age and a link to North Pacific denitrification changes. *Paleoceanography*, **22**, doi:10.1029/2005PA001205.

Caissie, B. E. et al. (2010) Last Glacial Maximum to Holocene sea surface conditions at Umnak Plateau, Bering Sea, as inferred from diatom, alkenone, and stable isotope records. *Paleoceanography*, **25**, doi:10.1029/2008PA001671.

Crusius, J. et al. (2004) Influence of northwest Pacific productiveity on North Pacific Intermediate Water oxygen concentrateons during the Bolling Allerod interval (14.7–12.9 ka). *Geology*, **32**, 633–636.

Davies, M. H. et al. (2011) The deglacial transition on the southeastern Alaska Margin: Meltwater input, sea level rise, marine productivity, and sedimentary anoxia. *Paleoceanography*, **26**, doi:10.1029/2010PA002051.

Eugene, P. et al. (2002) Abrupt increase in precipitation and weathering of soils in East Siberia coincident with the end of the last glaciation (15 cal kyr BP). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **200**, 167–175.

Fairbanks, R. G. (1989) A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, **342**, 637–642.

Gebhardt, H. M. et al. (2008) Paleonutrient and productivity records from the subarctic North Pacific for Pleistocene glacial terminations I to V. *Paleoceanography*, **23**, doi:10.1029/2007PA001513.

Gorbarenko, S. A. (1996) Stable isotope and lithologic evidence of late-Glacial and Holocene oceanography of the Northwestern Pacific and its marginal seas. *Quat. Res.*, **46**, 230–250.

Harada, N. et al. (2006) Characteristics of alkenone particles in the northwestern North Pacific. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, **70**, 2045–2062.

Herguera, J. C. et al. (2010) Intermediate and deep water mass distribution in the Pacific during the Last Glacial Maximum inferred from oxygen and carbon stable

isotopes. *Quat. Sci. Rev.*, **29**, 1228–1245.

Honda, M. C. et al. (2002) The biological pump in the northwestern North Pacific based on fluxes and major components of particulate matter obtained by sediment-trap experiments (1997–2000). *Deep-Sea Res. II*, **49**, 5595–5625.

Horikawa, K. et al. (2010) Intermediate Water formation in the Bering Sea during glacial periods: Evidence from neodymium isotope ratios. *Geology*, **38**, 435–438, doi: 10.1130/G30225.1.

Jaccard, S. L. et al. (2005) Glacial/Interglacial Changes in Subarctic North Pacific Stratification. *Science*, **308**, 1003–1006.

Jaccard, S. et al. (2009) Subarctic Pacific evidence for a glacial deepening of the oceanic respired carbon pool. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **277**, 156–165, doi: 10.1016/j. epsl. 2008.10.017

Johnson, K. S. et al. (1997) What controls dissolved iron concentrations in the world ocean. *Mar. Chem.*, **57**, 137–161.

Kanna, N. et al. (2014) Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. *Deep-Sea Res. II*, **126**, 44–57.

Kawamura, K. et al. (2003) Four years observations of terrestrial lipid class compounds in marine aerosols from the western North Pacific. *Global Biogeochem. Cy.*, **17**, doi: 10.1029/2001GB001810.

Keigwin, L. D. et al. (1992) A 15,000 year paleoenvironmental record from Meiji Seamount, far northwestern Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **111**, 425–440.

Keigwin, L. D. (1998) Glacial-age hydrography for the far northwest Pacific Ocean. *Paleoceanography*, **13**, 323–339.

Kienast, S. S. et al. (2004) Export production in the subarctic North Pacific over the last 800 kyrs: No evidence for iron fertilization? *J. Oceanogr.*, **60**, 189–203.

Kohfeld, K. E. and Z. Chase (2011) Controls on deglacial changes in biogenic fluxes in the North Pacific Ocean. *Quat. Sci. Rev.*, **30**, 3350–3363.

Lam, P. J. et al. (2013) Transient stratification as the cause of the North Pacific productivity spike during deglaciation. *Nat. Geosci.*, **6**, 622–626.

Maier, E. et al. (2015) Deglacial subarctic Pacific surface water hydrography and nutrient dynamics and links to North Atlantic climate variability and atmospheric CO_2. *Paleoceanography*, **30**, 10.1002/2014PA002763.

Max, L. et al. (2012) Sea surface temperature variability and sea-ice extent in the subarctic northwest Pacific during the past 15,000 years. *Paleoceanography*, **27**, doi: 10.1029/2012PA002292.

Matsumoto, K. et al. (2002) Interior hydrography and circulation of the glacial Pacific Ocean. *Quat. Sci. Rev.*, **21**, 1693–1704.

Moore, J. K. et al. (2002) Iron cycling and nutrient-limitation patterns in surface waters of the World Ocean. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 463–507.

Morley, J. J. et al. (1991) Late Pleistocene/Holocene radiolarian and pollen records from sediments in the Sea of Okhotsk. *Paleoceanography*, **6**, 121–131.

Nagao, S. et al. (2007) Migration behaveor of Fe in the Amur River basin. *Report on Amur-Okhotsk Project No. 4*, edited by Shiraiwa, T., Amur-Okhotsk Project, 37–48.

Nakamura, T. and T. Awaji (2004) Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A threedimensional nonhydrostatic model experiment. *J. Geophys. Res.*, **109**, doi: 10.1029/2003JC001850.

Nakatsuka, T. et al. (2002) An extremely turbid intermediate water in the Sea of Okhotsk: implication for the transport of particulate organic carbon in a seasonally ice-bound sea. *Geophys. Res. Lett.*, **29**. doi:10.1029/2001GL014029.

Nakatsuka, T. et al. (2004) Biogenic and lithogenic particle flux in the western region of the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **109**, C09S13.

Nishioka, J. et al. (2007) Iron input into the western subarctic Pacific, importance of iron export from the Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, **112**, doi:10.1029/2006JC004055.

Nishioka, J. et al. (2011) The annual cycle of surface iron and the source of iron supporting the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic pacific. *J. Geophys. Res.*, **116**, doi:10.1029/2010JC006321.

Nishioka, J. et al. (2013) Intensive mixing along an island chain controls oceanic biogeochemical cycles. *Glob. Biogeochem. Cy.*, **27**, 1–10, doi:10.1002/gbc.20088.

Okazaki, Y. et al. (2005) Productivity changes in the Bering Sea during the late Quaternary. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2150–2162.

Okazaki, Y. et al. (2010) Deepwater formation in the North Pacific during the last glacial termination. *Science*, **329**, 200–204.

Okazaki, Y. et al. (2012) Ventilation changes in the western North Pacific since the last glacial period. *Clim. Past*, **8**, 17–24.

Riethdorf, J.-R. et al. (2013a) Deglacial development of (sub) sea surface temperature and salinity in the subarctic northwest Pacific: Implications for upper-ocean stratification. *Paleoceanography*, **28**, doi:10.1002/palo.20014.

Riethdorf, J.-R. et al. (2013b) Millennial-scale variability of marine productivity and terrigenous matter supply in the western Bering Sea over the past 180 kyr. *Clim. Past*, **9**, doi:10.5194/cp-9-1345–2013.

Sakamoto, T. et al. (2005) Ice-rafted debris (IRD)-based sea-ice expansion events during the past 100 kyrs in the Okhotsk Sea. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2275–2301, doi:10.1016/j. dsr2.2005.08.007.

Sakamoto, T. et al. (2006) Millennial-scale variations of sea-ice

expansion in the southwestern part of the Okhotsk Sea during the past 120 kyr: Age model and ice-rafted debris in IMAGES Core MD01–2412, *Global Planet. Change*, **53**, 58–77, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.01.012.

Seki, O. et al. (2003) Sediment core profiles of long-chain *n*-alkanes in the Sea of Okhotsk: enhanced transport of terrestrial organic matter from the last deglaciation to the early Holocene. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2001GL014464.

Seki, O. et al. (2004) Reconstruction of plaeoproductivity in the Sea of Okhotsk over the last 30 kyrs. *Paleoceanography*, **19**, 2002PA000808.

Seki, O. et al. (2007) Time-series sediment trap record of alkenones from the western Sea of Okhotsk. *Mar. Çhem.*, **104**, 253–265.

Seki, O. et al. (2009) Hydrogen isotopic ratios of plant-wax *n*-alkanes in a peat bog deposited in northeast China during the last 16 kyr. *Org. Geochem.*, **40**, 671–677.

Seki, O. et al. (2012) Assessment for paleoclimatic utility of terrestrial biomarker records in the Okhotsk Sea sediments. *Deep-Sea Res. II*, **61–64**, 85–92.

Shiga, K. and I. Koizumi (2000) Latest Quaternary oceanographic changes in the Okhotsk Sea based on diatom records. *Mar. Micropaleontol.*, **38**, 91–117.

Takahashi, K. et al. (2002) Long term monitoring of particle fluxes in the Bering Sea and the central subarctic Pacific Ocean, 1990–2000. *Prog. Oceanogr.*, **55**, 95–112.

Yu, G. et al. (2001) Lake status records from China: data base documentation. *Technical Report in Max-Plank-Institute for Biogeochemistry*, **4**, 243 pp.