

— 2012年度日本海洋学会岡田賞受賞記念論文 —

西部北太平洋，ベーリング海，および北極海における 珪藻・珪質鞭毛藻の沈降フラックスと古海洋環境復元研究*

小野寺 丈尚太郎†

要 旨

西部北太平洋，ベーリング海，および西部北極海において，7箇所の時系列セディメントトラップ観測点によって得られた沈降粒子試料を用い，珪藻および珪質鞭毛藻の沈降フラックスと海洋表層環境との関係を探った．各海域における両藻類の沈降フラックスの季節変動や経年変動，群集組成の特徴が見出された．また，データを過去にさかのぼり，ベーリング海堆積物試料に記録された珪藻殻及び珪質鞭毛藻骨格の化石群集分析の結果から過去4百万年間のベーリング海における寒冷化傾向を読み取った．また，北極海の中期始新世の堆積物に含まれる珪質鞭毛藻骨格の化石群集分析から約4500–5000万年前の北極海は，現在と比べて比較的温暖で，外海との海水交換が限られた閉鎖的な環境であったことが分かった．

キーワード：diatom, silicoflagellate, sinking flux, sediment trap, paleoceanography,

1. Introduction

珪藻をはじめとする植物プランクトン群集の種組成や生産力は，有光層環境の複雑な変化に応じて遷移していく（例えば Margalef, 1978; Boyd *et al.*, 2010）．海の珪藻は，主に高緯度海域や湧昇域，沿岸域における植物プランクトン群集のなかで優占することが多く，海洋低次生態系の重要な構成要素の一つである．一般的に，北太平洋亜寒帯では特に春から初夏にかけての有光層で珪藻生産の増加が見られる．外洋で生産された珪藻の一部

は，海洋深層へ向かって鉛直輸送される沈降粒子として生物ポンプの機能にも重要な役割を果たす（e.g., Takahashi *et al.*, 2000; Honjo *et al.*, 2008; Shigemitsu *et al.*, 2010）．数10年スケールの中長期的な視点で環境変化を捉える場合，表層海洋環境変動は植物プランクトン群集の生産と群集構造に大きな変化をもたらすことがある（例えば Harada *et al.*, 2012; Hinder *et al.*, 2012）．優占する基礎生産者とその生産力の変化は，生物ポンプ能力およびそれに関係した物質循環にも大きな影響を与えるとされる．そのため，珪藻は藻類としての生物学的な分野だけでなく，海洋物質循環や古環境学分野の側面においても幅広く研究がされてきた（Smol and Stoermer, 2010）．

古海洋環境復元研究の分野では，珪藻殻の化石群集を過去の海洋環境を指標するツールの一つ（示相化石）として利用することで，海洋環境変遷復元の研究に貢献して

* 2012年12月1日受領；2013年1月31日受理

著作権：日本海洋学会，2013

† 独立行政法人 海洋研究開発機構 地球環境変動領域

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15

TEL: 046-867-9507

e-mail: onoderaj@jamstec.go.jp

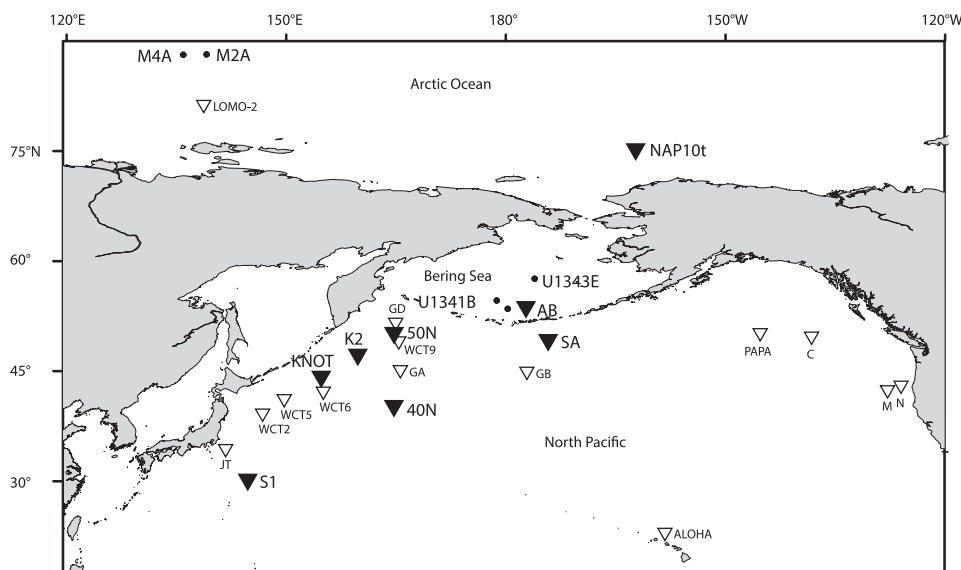


Fig. 1. The map for study area. The black triangular and circle symbols represent sediment trap station and IODP drilled hole in this study. The white triangular symbols represent sediment trap station with diatom flux study.

きた (例えば Koizumi, 1985; Katsuki and Takahashi, 2005; Stickely *et al.*, 2009). また, 全球規模の大きな環境変動は植物プランクトン種の絶滅や新種の出現を招くことがある。数万~10万年単位という地質学的な時間スケールで見ると, ある種の絶滅または新種の出現イベントは各海域でほぼ一様に見出されることが多い。そこで, 珪藻化石種の絶滅・出現を利用した年代指標 (示準化石) も, 深海掘削の現場を中心によく利用されている (例えば Koizumi 1973; Yanagisawa and Akiba, 1998; Barron, 2003)。

珪質鞭毛藻は世界中の汽水~海水域に広く分布する植物プランクトンの一分類群で, 汽水湖から沿岸域においては水産業に影響を与えるほど大増殖することがごく稀にある (Henriksen *et al.*, 1993; 品田・川尻, 2005)。しかし, 現在の北太平洋亜寒帯における珪質鞭毛藻の低次生態系の中での重要性は無視できるほど低い。なぜなら, 北太平洋亜寒帯外洋域において, 優占する植物プランクトンは珪藻またはパルマ藻である場合が多く (ジョルダンら, 2003; Tanimoto *et al.*, 2003), 珪質鞭毛藻の海水1Lあたりの細胞数は珪藻と比べると多くても1/100程度である (Komuro *et al.*, 2005)。また, 海洋深層へ鉛

直輸送される有機炭素量に対して, 珪質鞭毛藻による寄与は他の珪質プランクトン (珪藻, 放散虫) に比べると非常に少ない (Takahashi *et al.*, 1990)。物質循環研究の中では無視される存在であるが, 珪質鞭毛藻の骨格は化石として堆積物中に保存されるので, 古海洋環境復元の研究分野では珪藻化石と同様に年代指標や環境指標として利用されることがある (例えば Ling, 1977; Bukry and Monechi, 1985; Barron and Bukry, 2007)。珪質鞭毛藻は, 種組成が珪藻よりも比較的単純で骨格の顕微鏡観察も難しくない。北太平洋外洋域では主要な種の地理分布が大まかに調査されており, 亜寒帯では東部と西部で群集組成が異なる (Poelchau, 1976)。複数の表層水塊の影響を受ける海域では, 珪質鞭毛藻も水塊環境指標として利用できる可能性がある。

そのような背景の下, 筆者は主にセディメントトラップを用いた珪藻殻および珪質鞭毛藻骨格の沈降粒子フラックスと海洋表層環境との関係を明らかにする研究と, 統合国際深海掘削計画 (IODP) で得られる深海堆積物の掘削試料を用いた古海洋環境復元研究の2つを進めてきた。本稿では, 岡田賞受賞の評価対象となったこれまでに出版した論文の内容と, 最新のデータの一部も併せて

簡単に紹介したい。

2. 研究海域

筆者が現在までに扱わせて頂いているセディメントトラップ試料は、北西北太平洋の Stations 50N, K2, KNOT, 40N, および S1, 北太平洋亜寒帯アリューシャン列島の南方沖合 Station SA, ベーリング海南部の Station AB, 北極海ノースウィンド深海平原の Station NAP10t で得られた (Fig. 1). Station 50N は、西部亜寒帯循環 (Dodimead *et al.*, 1963) のほぼ中央域に位置する。Station KNOT は西部亜寒帯循環の南西縁にあたり、親潮、亜寒帯水、亜熱帯水が混合する水域である。Station K2 は、Station 50N と KNOT のほぼ中間に位置する。Station 40N は亜寒帯境界付近に位置している。Station SA では、観測点の北を西向きにアラスカン・ストリームが、南を東向きの亜寒帯海流が流れる。ベーリング海 Station AB の南部では、ベーリング海に流入したアラスカン・ストリームの分枝がアリューシャン列島の沿岸水と混合し、Aleutian North Slope Current としてアリューシャン列島の北側を東向きに流れる。この海流は、大陸棚縁辺に沿って Bering Slope Current を構成する。Station AB はこれらの海流に囲まれたアリューシャン海盆の南部に設置された。Station NAP10t は、ポーフォート循環の南西縁にあたる。また季節海水域であり、8月下旬から10月上旬を除く期間は海水で覆われる。

古海洋環境復元で用いた研究試料は、北極海ロモノフ海嶺上の多年氷域における IODP 302 次航海 Sites M0002 および M0004, ベーリング海ではパウワーズ海嶺斜面における IODP 323 次航海 Sites U1341 および北東部陸棚斜面突端の Site U1343 である。

3. 方法

3.1 セディメントトラップを用いた珪質プランクトン沈降フラックス分析

本研究で用いた沈降粒子試料は、時系列セディメントトラップ (Honjo and Doherty, 1988) によって得られ

た。捕集瓶と回収後の試料分割および保管には、4%ホルマリン海水またはグルタルアルデヒド海水を、pH を 7.6–8.3 に調整した上で用いた。試料は、1 mm メッシュで篩分けを行い、1 mm 以下の粒径画分を McLane 社の回転式スプリッターによって、含まれる珪質プランクトン殻の量が群集分析に適当な濃度になるまで等分割した (通常 1/1000–1/4096)。分割した試料は、3 mm 間隔の格子がプリントされたメンブレンフィルター (孔径 0.45 μm) を用いて静かに吸引濾過を行い、蒸留水または Milli-Q 水で脱塩後に乾燥させた。乾燥させた試料フィルターは適当なサイズに切り取り、封入剤のカナダバルサムを用いてスライドガラスに封入して、プレパラートとした。

作成したプレパラートは、光学顕微鏡を用いて倍率 200 倍、400 倍、600 倍および 1,000 倍で観察を行い、視野に現れた珪藻殻や珪質骨格を属または種レベルで同定・計数を行った。一日当たりの珪質プランクトン殻沈降フラックス (F) は、得られた計数値 (n), フィルターの濾過面積 (A1), 顕微鏡で観察した面積 (A2), 試料分割率 (Q=通常 1/1000–1/4096), 試料捕集期間 (d), およびセディメントトラップ捕集口の面積 (S=0.5 m²) をもとに、下記の式によって見積られる。

$$F = n \times (A1/A2) / S / Q / d \quad (1)$$

3.2 堆積物試料

本研究で用いた IODP 堆積物試料は、層厚 2 cm で分取された。凍結乾燥した試料 10–50 mg を入れた 100 ml ビーカーに、過酸化水素水と 1N 希塩酸を加えて加熱処理を行った。ヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液を加えて 1 時間放置した。その後、上澄みを捨てて蒸留水を加え再び 1 時間放置するデカンテーションを 5–10 回繰り返す。溶液に含まれる試薬や微細な粘土鉱物をできるだけ除去した。

珪藻化石を観察するプレパラートを作成する際は、デカンテーションを済ませた試料溶液を 25 ml にし、そのうちの 1 ml を事前にホットプレートに並べたカバーガラス (18×24 mm) に載せ、60–65°C で乾燥させた。乾燥したカバーガラスは、封入剤のマウントメディア

(和光純薬)を用いてスライドガラスに封入し、珪藻スライドとした。

珪質鞭毛藻やエブリディアン骨格や大型珪藻を観察するプレパラートを作成する際は、まずデカンテーションを済ませた試料を20 μ mメッシュの篩に通した。篩に残った20 μ m以上のサイズ画分をメンブレンフィルターで濾過をし、乾燥させたフィルターをカナダバルサムでスライドガラスに封入した。小型のエブリディアンを観察する際は、篩を通過した20 μ m以下のサイズ画分を珪藻スライドと同様の方法で処理し、プレパラートとした。

試料乾燥1gあたりに含まれる珪質微化石の個体数(I)は、計数值(n)、珪藻スライドの場合はカバーガラス面積(珪質鞭毛藻の場合はメンブレンフィルターの濾過面積)(A1)、顕微鏡で観察した面積(A2)、珪藻スライドの場合は分割率(Q)、処理した乾燥試料重量g(V)によって見積られる。

$$I = n \times (A2/A1) / Q / V \quad (2)$$

4. 珪質植物プランクトン沈降フラックスと海洋環境

4.1 各海域の全珪藻沈降フラックスと珪藻沈降群集

4.1.1 西部北太平洋 亜寒帯循環域

これまでに実施されたセディメントトラップ観測研究の結果をみると、北太平洋亜寒帯西部の全珪藻沈降フラックスは、4月~7月の間に最大を記録することが多い(Tsoy and Wong, 1999; Onodera *et al.*, 2005; Shimada *et al.*, 2006)。これまでに筆者が扱ったセディメントトラップ試料に基づく珪藻沈降フラックスは、沈降粒子を採取した期間や水深が大きく異なるため厳密な比較は難しいものの、概してベーリング海南部や北太平洋亜寒帯で高く、その中央値は $0.7 \times 10^7 - 4.5 \times 10^7$ valves $m^{-2} d^{-1}$ であった(Fig. 2)。

北太平洋亜寒帯外洋域の沈降粒子に含まれる珪藻群集

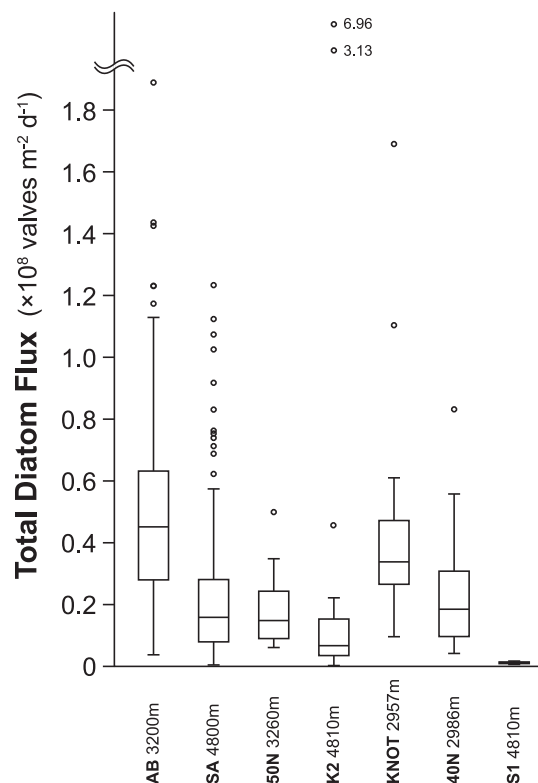


Fig. 2. The box plots on the monthly mean of daily total diatom flux at Stations AB, SA, 50N, K2, KNOT, 40N, and S1 (Onodera and Takahashi, 2009; Onodera *et al.*, 2005; unpublished). Note that the sampled period and sampled water depth are different among compared seven stations.

(沈降群集 Sidocoenosis, Takahashi, 1995) や第四紀堆積物に含まれる珪藻化石群集は、北太平洋亜寒帯域の固有種とされる *Neodenticula seminae* (Simonsen and Kanaya) Akiba and Yanagisawa によって特徴づけられる (Kanaya and Koizumi, 1966; Shimada *et al.*, 2006)。Station 50N や Station SA が位置する北太平洋亜寒帯外洋域の西部から北部においては、一年を通して本種の優占が見られる年もあり (Fig. 3), 観察された珪藻殻数の約 60–80% を *N. seminae* が占めた。この海域は、沈降粒子における生物源ケイ素/炭酸塩比および有機炭素/無機炭素比が 1 以上の “Silica Ocean” (Honjo, 1997; Honjo *et al.*, 2008) である。*N. seminae* の生産と沈降は、珪質殻のバラスト効果による有機物の深層への鉛直輸送 (Honjo *et al.*, 2008) に対して影響

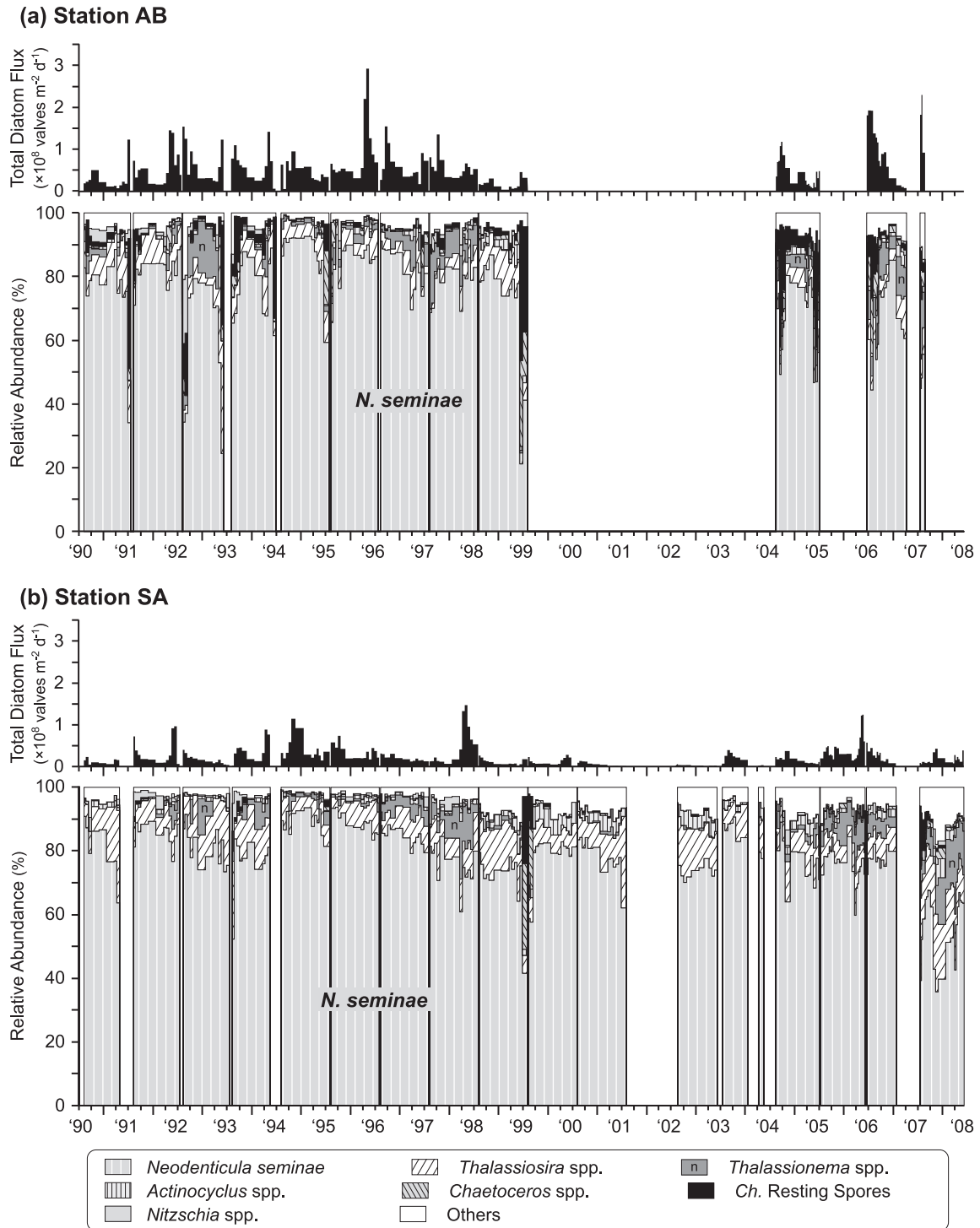


Fig. 3. The time-series records of total diatom flux and sinking diatom flora at Stations AB and SA in the southern Bering Sea and the northern Subarctic North Pacific from Aug. 1990 through Jun. 2008. (a) Station AB, and (b) Station SA (Onodera *et al.*, 2009, unpublished). No data periods are represented by blank in the relative abundance graph.

を与える場合があると考えられる (Takahashi *et al.*, 2002; Onodera and Takahashi, 2009). ただし, 約 19 年にわたって観測が継続された Station SA においては 1998 年春に小型放散虫骨格 (<63 μm) の著しく高いフラックスが観測されており (高橋ら, 2007; Tanaka, 2008), ときには珪藻よりも他の珪質プランクトンが沈降粒子の多くを占める場合もあるようである.

なお同海域の珪藻生群集においては, *N. seminae* よりも *Fragilariopsis pseudonana* (Hasle) Hasle の方が優占する場合が多い (例えば, 久道・高橋, 1999; Aizawa *et al.*, 2005). このような生群集と沈降群集との間における優占種の違いには, 基本的な生活形態が単独性か群体を作るか否かという点と, 珪藻被殻の形態の違いが影響していると思われる. *Neodenticula seminae* は珪藻としては小型の部類に含まれるが, 春に観測される増殖期にはリボン状の長い群体を構成し, 比較的大型の粒子として深海へ沈降していく. 一方の *F. pseudonana* は *N. seminae* よりもさらに小型であり群体を作らず単独性で見られることが多い. *F. pseudonana* は, その殻の小ささのため単独で沈降するよりは凝集体に付着する形で一部の個体が深層に輸送されると思われるが, 海洋深層のセディメントトラップ試料から本種を見いだすことは難しい. 大部分の *F. pseudonana* 殻は亜表層で分解されて栄養塩となり, 表層の珪質微小プランクトン殻の生産に寄与していると思われる.

Station KNOT では, 前述の Station SA や 50N と異なり沈降群集組成に明瞭な季節性が見られる (Fig. 4). *N. seminae* の優占は春に見られるが, 春以降に増える *Chaetoceros* 属とその休眠孢子も年間を通じて珪藻沈降群集組成への寄与が大きい (小野寺ら, 2003). また群集組成への寄与は少ないが, 亜寒帯境界~亜熱帯でよく観察される珪藻種は, 群集全体に占める割合が冬の時期に増加する傾向が見られた (Onodera *et al.*, 2005). Station KNOT における沈降粒子のアルケノン分析結果によると, アルケノンの一部は亜熱帯域から暖水渦によって運ばれてくるものも含まれていた (Harada *et al.*, 2006). Station KNOT の珪藻沈降群集は, 混合水域を反映したものと見える. Station K2 では, 2005 年から 2006 年前半にかけては Station 50N のように

Neodenticula seminae が沈降群集の 50%以上を占めていた (大橋・高橋, 2012 未公表). しかし, 2008 年 11 月から 1 年間の沈降粒子試料を調べてみると, *N. seminae* が春に優占した後で *Chaetoceros* 属とその休眠孢子, *Fragilariopsis oceanica* (Cleve) Hasle, *Thalassiosira nordenskiöldii* Cleve が 2009 年 6 月下旬に急増した (Fig. 4). そのため, 2009 年 6 月下旬には前年より 1 桁多い全珪藻フラックス (9.9×10^8 valves $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) が計測された.

北太平洋亜寒帯域西部の珪藻沈降フラックスは, 年々変動が大きい様子が見えてきた. 過去に実施された北太平洋亜寒帯西部における珪藻フラックス観測研究の場合, Stations GA, GB, および GD では, 全珪藻フラックスの中央値がそれぞれ 1.4×10^7 , 0.2×10^7 , 0.9×10^7 valves $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ であった (Tsoy and Wong, 1999). Station WCT-9 (2000 年 9 月~2001 年 8 月) では, 年間を通じた日別平均の全珪藻フラックスとして 2.32×10^8 valves $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ が報告されている (Shimada *et al.*, 2006). また, Station K2 4810 m でも, 前述の通り 2009 年 6 月に高い全珪藻フラックスを観測している. なお, このような高い全珪藻フラックスが, セディメントトラップ係留地点直上の有光層における珪藻生産の増加を反映していたかどうかは注意深く確認する必要がある. 例えば Station KNOT で 1999 年 6 月に観測した高い珪藻フラックスは, 内湾や湧昇域などの高い基礎生産海域に分布する *Chaetoceros* 属 (*Hyalochaete* 亜属) とその休眠孢子を多数含んでいた. Sasaoka *et al.* (2002) は, 1999 年 5 月に千島列島沿岸に沿って分布するクロロフィル濃度が 10 mg m^{-3} 以上もある水塊の分枝が, Station KNOT の約 100 km 北方にかけて張り出す様子を海色衛星および航海による観測で捉えている. この沿岸水には *T. nordenskiöldii* や *F. oceanica* が豊富に含まれていた (Mochizuki *et al.*, 2002). 水深約 3,000 m のセディメントトラップで捕集された珪藻沈降粒子フラックスは, 生物源オパールフラックスだけでなく, 陸起源物質の指標となりうるアルミニウム粒子の沈降フラックス (Honda *et al.*, 2002) とも有意な相関関係がある (小野寺ら, 2003). Station KNOT で得られた珪藻沈降フラックスには, Station KNOT 直上の有光層で生産されたものに加えて, 沖合に張り出した沿岸水起源の

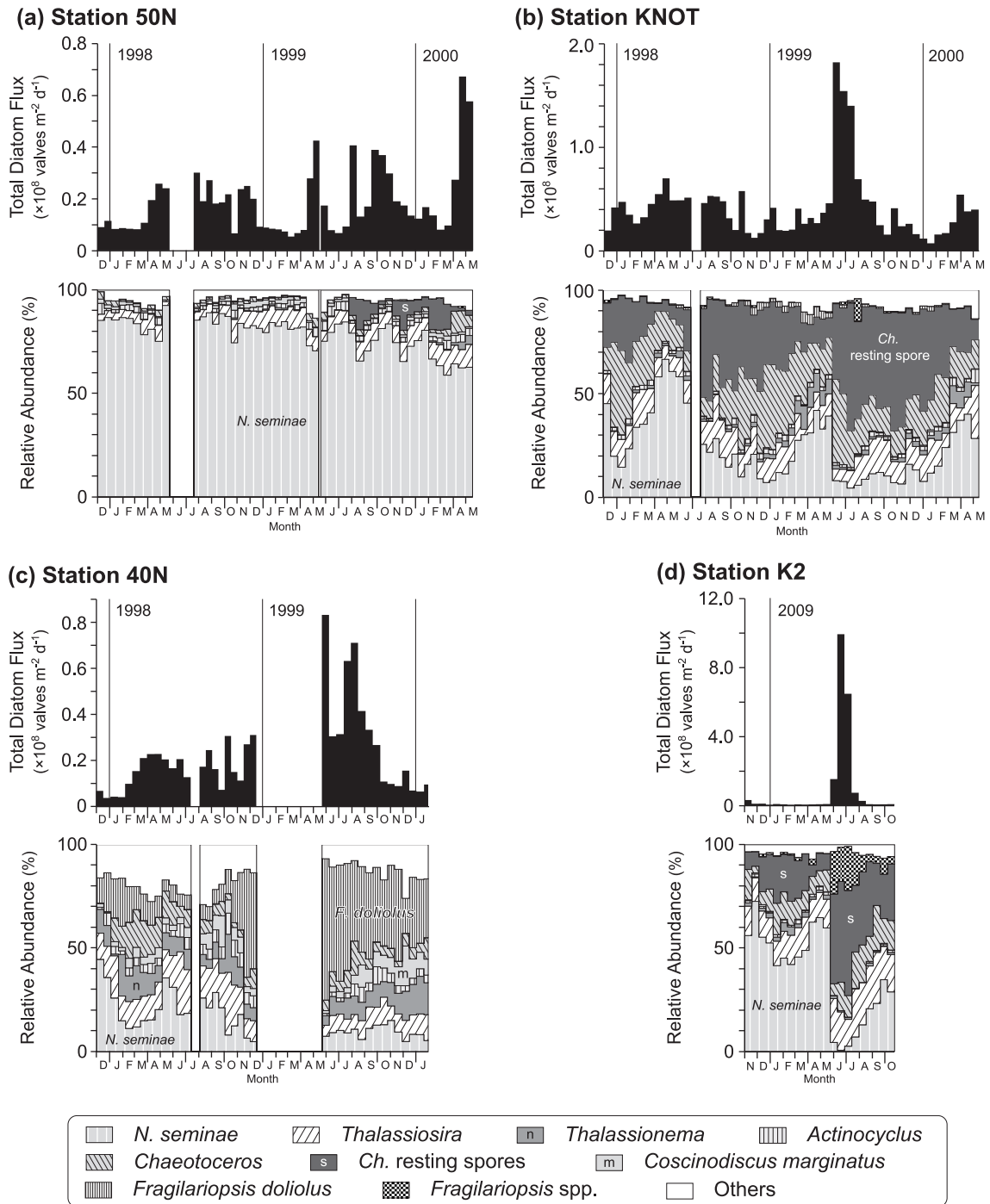


Fig. 4. The time-series records of total diatom flux and sinking diatom flora at Stations 50N, K2, KNOT, and 40N in the western Subarctic North Pacific (Onodera *et al.*, 2003; Onodera *et al.*, 2005, *in prep.*). The sampled period at Station K2 is different from other stations. The scale of vertical axis in total diatom flux is different among four stations. No data periods are represented by blank in the relative abundance graph.

移流によるものも一部含まれると考えられた (小野寺ら, 2003). 東カムチャッカ海流から親潮流域では中規模渦が観察され, その渦の位置と強さの時系列変化が, 千島列島沿岸域だけでなく沖合の西部亜寒帯循環の西部における生物生産や物質循環にも重要な影響を与える (Kusakabe *et al.*, 2002). Station K2 で 2009 年 6 月下旬に観測された高い珪藻フラックスも, 上記に挙げた優占種が春の寒冷水~季節海水域に特徴的なものであることから, カムチャッカ半島周辺の冷たい沿岸水が沖合に輸送されるイベントを反映した可能性がある.

4.1.2 西部北太平洋 亜寒帯境界

Station 40N の珪藻フラックスは季節変動に加えて年変動が目立って見える (Onodera *et al.*, 2005; Fig. 4). 珪藻沈降群集組成を見ると, 1997 年 12 月から 1998 年の 9 月までは *N. seminae* が多く見られ, 基本的に亜寒帯南部の群集であった. 1998 年 12 月から 1999 年にかけては, *N. seminae* のフラックスも 1998 年と同じ程度に増えたが, それ以上に *Fragilariopsis doliolus* (Wallich) Medlin and Sims のフラックスが大幅に増えたため, *F. doliolus* の優占が目立った (Fig. 4). 北太平洋外洋域における *F. doliolus* の主な分布域は, 亜熱帯循環と亜寒帯循環の境界で高い基礎生産が見られる水域と考えられる (Venrick, 1971). 1999 年は 1998 年よりも Station 40N の海面水温が高く, 同じ試料に含まれる放散虫沈降群集は, 1998 年よりも 1999 年のほうが亜熱帯種の割合が多かった (Okazaki *et al.*, 2005). Sasaoka *et al.* (2002) によると, 165°E に沿った衛星観測では, 海面水温の等温線が混み合う領域が 1998 年は 43°N 付近に位置していたのに対し, 1999 年は 41°N 付近に南下した. 珪藻群集から判断すると, 1998 年の Station 40N 付近の表層水塊は亜寒帯水の影響が強く, 1999 年は亜寒帯境界が Station 40N 付近により近づいたように見える. 1998 年の沈降群集で, 亜熱帯種の群集全体に占める割合が増えなかった理由は明らかにできていない.

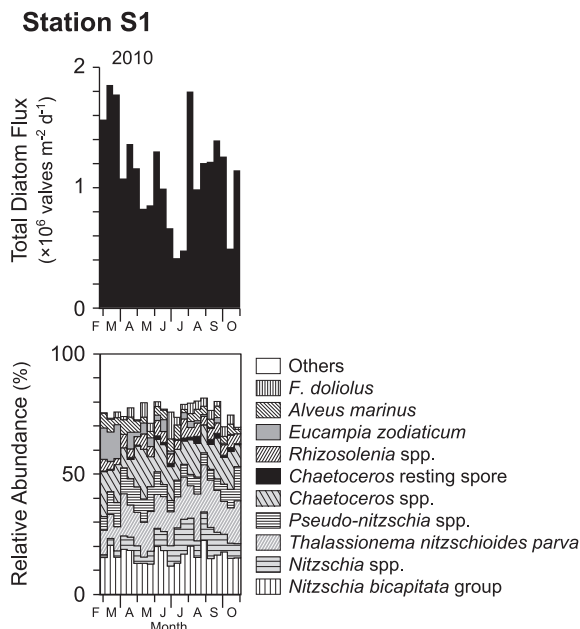


Fig. 5. The time-series records of total diatom flux and sinking diatom flora at Station S1 in the western Subtropical North Pacific (Onodera *et al.*, *in prep.*).

4.1.3 西部北太平洋 亜熱帯循環域

2010 年 2 月から 10 月までの Station S1 における全珪藻フラックスは, 前述の亜寒帯域や亜寒帯境界で得られた結果よりも低く, $0.4-1.9 \times 10^6$ valves $m^{-2} d^{-1}$ であった (Fig. 5). 全珪藻フラックスは, 2-3 月に高く 7 月に向かって減少したが, 8 月以降はフラックスが再び増加に転じた. 北太平洋亜熱帯循環域を代表する長期時系列観測地点 Station ALOHA (22°45'N, 158°W) では, 1992 年から 1994 年にかけて得られた試料を対象とした珪藻沈降フラックスの分析結果が報告されている (Scharek *et al.*, 1999). それによると, Station ALOHA の全珪藻沈降フラックスは 10^5 cells $m^{-2} d^{-1}$ 程度であるので, Station S1 の珪藻フラックスは Station ALOHA よりも同程度か少し高い. Station S1 の沈降群集組成は *Nitzschia bicapitata* group が優占し, 次いで *Thalassionema nitzschioides* var. *parva* が多かった. 群集組成の季節変動は小さいものの, 2-3 月には *Eucampia zodiacus* Ehrenberg が 10% を占め, 4 月以

降は数%に減少した。Station ALOHA とその周辺海域において優占する珪藻種は、*Mastogloia woodiana* のほか窒素固定ラン藻類 *Richelia* を共生させた *Hemiaulus hauckii* や *Rhizosolenia cf. clevei* である (Scharek *et al.*, 1999)。 *Richelia* を伴う *Hemiaulus* 属や *Rhizosolenia* 属を主体とする珪藻群集は、北太平洋亜熱帯循環の東部を代表するものといえる (Viralleal *et al.*, 2012)。 *Mastogloia* 属や *Hemiaulus* 属は本研究で扱った Station S1 試料では優占しなかった。

4.1.4. ベーリング海 アリューシャン海盆域

Station AB における全珪藻フラックスは、一年を通じて亜寒帯外洋域よりも高い傾向があり、Station SA と比較するとおよそ2倍高い (Takahashi *et al.*, 2000; 2002; Onodera and Takahashi, 2009; 小野寺ら, 2009) (Fig. 3a)。全珪藻フラックスの季節変動は年によって少し異なる。フラックスピークが春と秋の2回観測される年もあれば、春または秋のどちらか1回のみ観測される年もある (Takahashi *et al.*, 2000)。Station AB の珪藻沈降群集は、*Neodenticula seminae* に加えて、*Chaetoceros* 属とその休眠孢子、*Thalassionema* 属や *Thalassiosira* 属の寄与も時期によっては高い (Fig. 3a)。Station SA よりも Station AB で珪藻生産と珪藻フラックスが高い原因は、冬季鉛直混合により亜表層から供給される栄養塩に加えて、ベーリング海に流入するアラスカン・ストリームの分枝が、アリューシャン列島を通過する際に列島沿いの富栄養な水塊と混合して (Stabeno *et al.*, 1999)、東部アリューシャン海盆の南部に広がっていくプロセスも重要である (大西ら, 2008)。Station AB では物理観測測器を係留しなかったが、再解析データによる表層塩分推測値とフラックスデータを比較すると、表層塩分が低下した年ほど沿岸域で多い珪藻種の割合が高くなるパターンと、塩分が増加した年に *Chaetoceros* 属の休眠孢子の割合が増加するパターンがある (Onodera and Takahashi, 2009)。後者のパターンは、おそらく沿岸水の影響よりも現場の鉛直混合による亜表層からの栄養塩供給が珪藻の生産に重要であったことを示すと思われる。なぜ休眠孢子の割合が増えたのかは詳しくは分からないが、おそらく栄養塩環境の違い

Station NAP10t

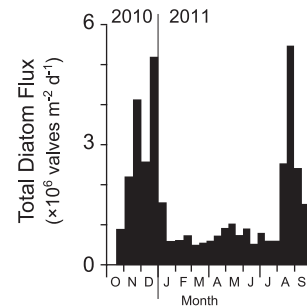


Fig. 6. The time-series records of total diatom flux at Station NAP10t in the Northwind Abyssal Plain, Arctic Ocean (Onodera *et al.*, *in prep.*).

(例えば Kuwata and Takahashi, 1990; Sugie *et al.*, 2010) が影響したと思われる。

4.1.5 北極海

北極海における珪藻生群集の研究は、海水による観測の難しさはあるものの古くから報告されてきた (例えば Cleve and Grunow, 1880; Melnikov, 1997; Katsuki *et al.*, 2009)。しかし、北極海の内海側において年間を通じた珪藻フラックスが報告されているのは、筆者が把握する限りラプテフ海北部 Station LOMO2 (81°04'N 138°55'E) において、1995年9月から約1年間にわたって観測された結果のみである (Zernova *et al.*, 2000)。本稿ではチャクチ海北部のノースウィンド深海平原 Station NAP10t の水深約180mにおいて2010年10月から1年間にわたり得られた沈降粒子について、珪藻分析結果の概要を紹介する。Station NAP10t は Beaufort gyre の南西縁辺に位置し、表層水塊は西側のチャクチ海盆域と比べると貧栄養環境にある (Nishino *et al.*, 2011)。Station NAP10t の全珪藻フラックスは、極夜を含む全捕集期間について中央値を見ると、北太平洋亜寒帯やベーリング海よりも約1桁低い値を示し (0.09×10^7 valves $m^{-2} d^{-1}$)、上記の亜熱帯域 Station S1 の観測値 (0.12×10^7 valves $m^{-2} d^{-1}$) と同等のレベルであった。水深180mにおける全珪藻フラックスのピークは、2010年11月と2011年8月に観測された (Fig. 6)。11

月のピークでは *Chaetoceros* 属とその休眠胞子を主体とした沈降群集が観察された。しかし、11月の Station NAP10t は極夜のシーズンに入っており、植物プランクトンの活発な光合成は期待できない。おそらく、11月に観測された高い珪藻フラックスを構成する珪藻殻の多くは、周辺の陸棚域から輸送されてきたものであると考えられる。8月に増加した *Fossula arctica* や *Fragilariopsis* 属は、多くが群体のまま沈降しており、一部の個体は被殻の内側に原形質を残したままであった。これは Station LOMO2 でも見られた (Zernova *et al.*, 2000)。8月に増加した珪藻フラックスの多くは、11月のフラックスとは異なり、Station NAP10t 周辺で生産された物が速やかに沈降してきたものが多いと考えられる。

4.1.6 長期時系列試料と海洋環境

ベーリング海アリューシャン海盆南部の Station AB およびアリューシャン列島南方沖合の Station SA では、北海道大学水産学部が同学部附属練習船「おしよろ」丸を使って毎年実施する北洋航海の協力によって、セディメントトラップ係留観測が1990年から2009年まで続けられた (Takahashi *et al.*, 2012)。Station SA では、ほぼ連続した係留観測に成功し、観測期間中の全珪藻フラックス変動の全容が明らかになりつつある (Fig. 3)。

沈降フラックスと表層環境を時系列で比較する場合、海洋表層からセディメントトラップに至るまでの粒子の沈降時間を考慮する必要がある。海洋深層における粒子の沈降速度は、複数層に設置したセディメントトラップ係留系において、各水深におけるフラックスピーク観測日のズレを比較することによって求められる場合が多い。たとえば、Honda *et al.* (2002) は、北西北太平洋の Station 50N の水深約 1,000, 3,000 および 5,000 m に設置したトラップ実験において、沈降粒子によるトラップの目詰まり現象が 1,000 m から 3,000 m および 3,000 m から 5,000 m へ、それぞれ 1 試料分ずつずれる形で観測されたことから、およそ 114 m d^{-1} の沈降速度を見積もっている。また、Station K2 では、同様の手法によって粒子の沈降速度が深さを増すほど速くなっていく様子が捉えられている (本多ら, 2007)。このように、沈降速

度は一定ではなく、たとえば粒子の大きさや組成によっても沈降速度は異なる (Honjo *et al.*, 2008)。沈降粒子の捕集は通常 1 週間~1 カ月程度の時間間隔で行われるが、例えば火山灰の降下のような特別なイベントを除けば、その時間解像度で表層環境と深層の沈降粒子フラックス変動を常に 1 対 1 で対応づけるのは現状では難しい場合が多い。従って、そのような時間解像度で表層環境と深層で得られる珪藻沈降群集フラックスを対応付けるのは、粒子の形成から沈降に至る一連の過程と沈降速度を各観測点で詳細に把握できていない現状では困難である。さらに、ある外洋に設置したセディメントトラップ係留点周辺の範囲において、衛星画像によるクロロフィル濃度の水平分布を日単位や週単位でみると、濃度分布の不均一性が目立つ場合が多い。しかし、年単位でみると、海域内のクロロフィル濃度分布のムラは外洋域では幾分目立たなくなる。そこで、筆者は年単位の時間スケールであれば、大まかな沈降速度の見積もりでも、表層環境変動と沈降フラックス変動との間で何らかの関係性が見出せるのではないかと考えた。長期時系列セディメントトラップ観測点 Stations AB および SA において 1990 年 8 月から 1998 年 6 月まで得られた週ないし月単位の沈降フラックスデータを 12 カ月単位でまとめ、年レベルの時間解像度で珪藻沈降フラックスデータと表層環境データを比較することを試みた (Onodera and Takahashi, 2009; 小野寺ら, 2009)。北太平洋亜寒帯の外洋における珪藻生産に必要な栄養塩は、冬季鉛直混合によって亜表層から供給されるものが中心であると予想される。そこで、冬季鉛直混合が始まる晩秋を起点とした 12 カ月で、珪藻フラックスデータを取り纏めた。Stations AB および SA では、それぞれ 1 層のセディメントトラップを継続的に係留したので、現場における沈降速度の見積もりはできない。ここでは、Station 50N で見積られた沈降速度 $\sim 114 \text{ m d}^{-1}$ (Honda *et al.*, 2002) を参考にし、水深約 3,200 m に係留された Station AB では 1 カ月、約 4,600 m に係留された Station SA では 1.5 カ月のタイムラグをとって、12 カ月ごとの海洋表層における衛星観測または再解析データによる水温、塩分、混合層厚平均値との比較を行った。結果として、この 12 カ月で累積させた 8 年間の珪藻フラックスは、混合層厚データと逆相関の関係を示した (Fig. 8; 小野寺ら,

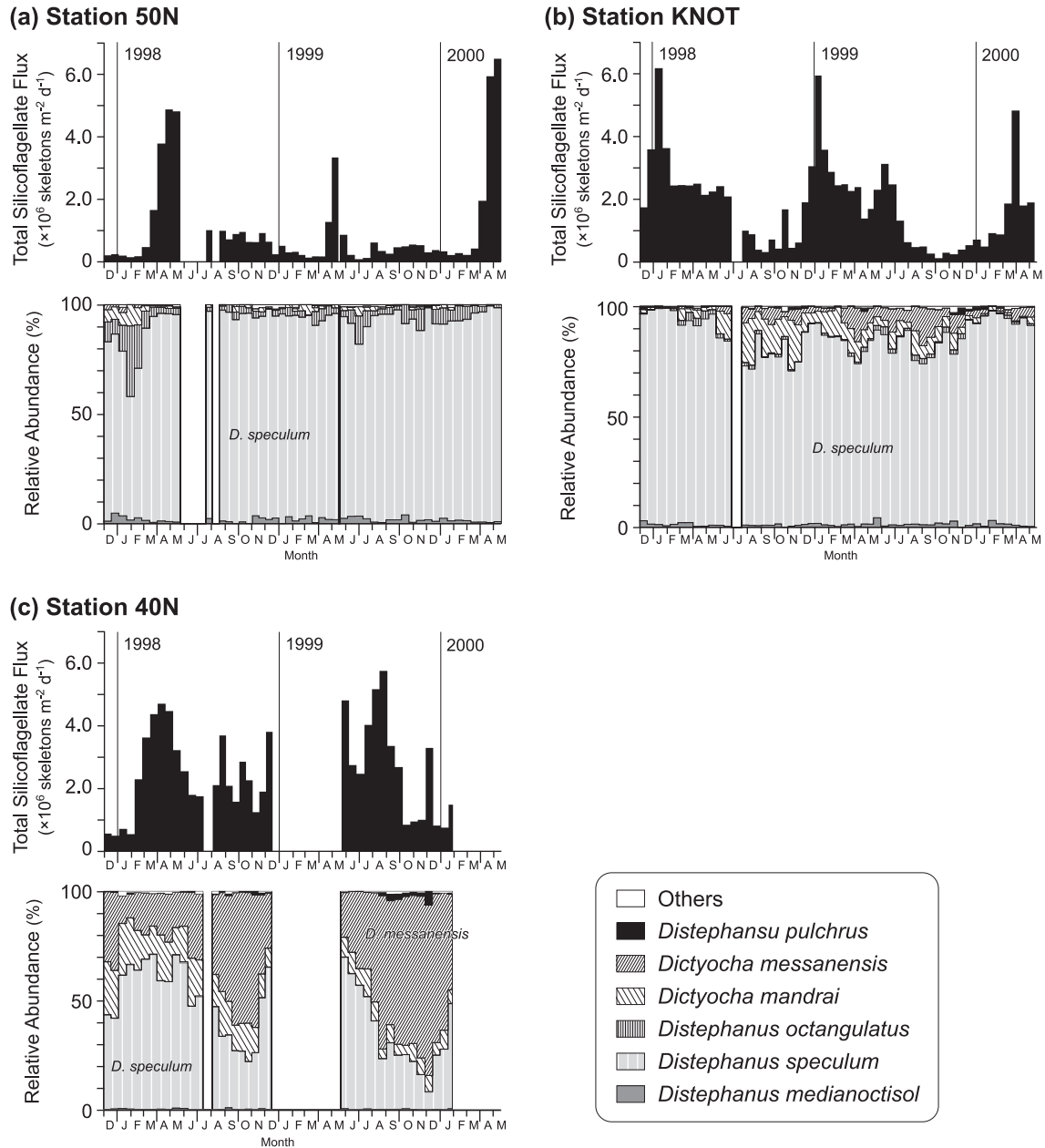


Fig. 7. The time-series records of total silicoflagellate flux and sinking silicoflagellate flora at Stations 50N, KNOT, and 40N in the western Subarctic North Pacific (Onodera and Takahashi, 2005). No data periods are represented by blank in the relative abundance graph.

2009). これらの結果の解釈として小野寺ら (2009) は, Sverdrup の Critical-depth model (Sverdrup, 1953; Smetacek and Passow, 1990) の考え方をもとに, 冬季鉛直混合とそれに続く夏季成層構造の発達のタイミング

の違いが珪藻生産と沈降に影響していると考えた. 冬季に水柱上部の鉛直混合が深くなることで亜表層からは豊富な栄養塩が供給される. しかし, 冬季鉛直混合が終わって海洋表層の成層化が始まるタイミングが遅くなると,

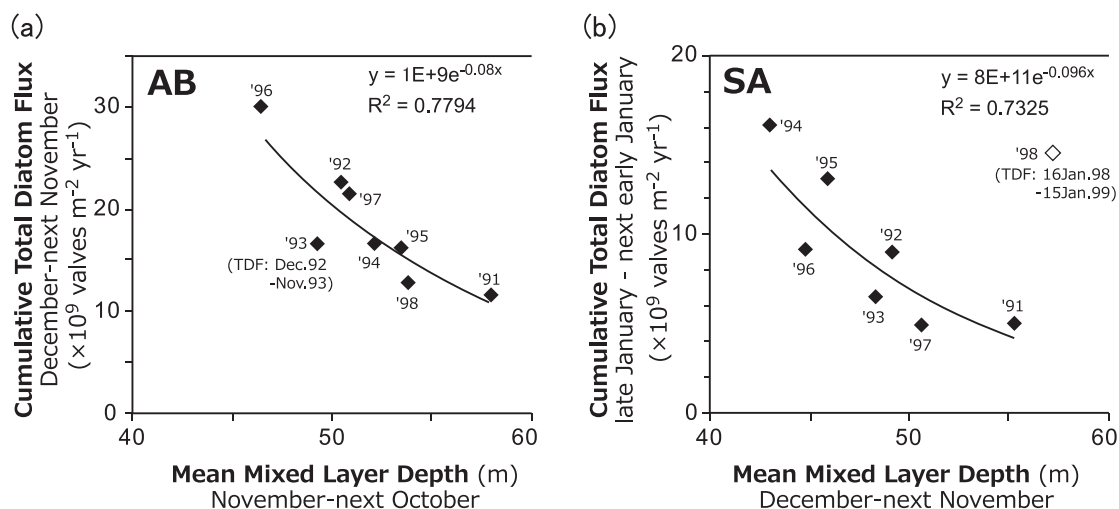


Fig. 8. The relationships between the mixed layer depth and the total diatom flux at Stations AB and SA. The data in 1990 (Aug.-Nov.) is not plotted because of their limited sampled period. The correlation coefficient and the regression curve at Station SA do not include the data in 1998 due to the unusual flux pattern. (Onodera *et al.*, 2009)

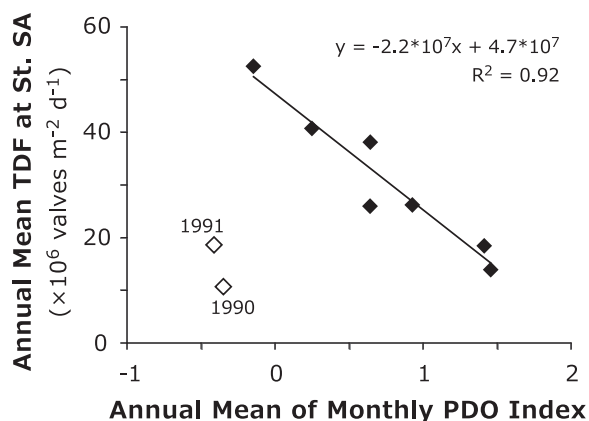


Fig. 9. The relationship between the annual means of total diatom fluxes and PDOI at Station SA. The data of 1990 and 1991 are the outliers (white rhomboids) due to the limited sampled period (no samples during spring flux maximum).

深い混合層の中で春に増加する珪藻の生産が抑えられる可能性がある。その場合 12 カ月単位で累積した珪藻沈降フラックスは通常よりも低下すると思われる。Station SA では、微小動物プランクトン有孔虫の長期時系列フラックスが、Pacific Decadal Oscillation Index

(PDOI) で示される海洋環境の変化を反映していることが示唆されている (Asahi and Takahashi, 2008)。同様に Station SA における各年の全珪藻フラックスは、一部の年を除き PDOI と高い相関関係が見られた (Fig. 9; 小野寺ら, 2009)。アリューシャン低気圧は、冬季の混合層深度に重要な影響を与えていると考えられる。ベーリング海では、アリューシャン低気圧の挙動が生物生産の季節変動や経年変動に影響を与えることが指摘されている (Saitoh *et al.*, 2002; 溝端ら, 2006)。北太平洋亜寒帯域において、珪藻は生物ポンプの中心的な役割を果たす (Takahashi *et al.*, 2002; Honjo *et al.*, 2008)。本研究で PDOI と珪藻沈降フラックスにも一定の相関が見られたことは、アリューシャン低気圧の挙動が生物ポンプにも影響を与えていることを示唆している。ただし、高緯度海域の植物プランクトン生産にとっては、供給される栄養塩や表層水塊の安定度だけでなく、光環境も大変重要である (Boyd *et al.*, 2010)。発達したアリューシャン低気圧の下では光環境も下がると思われる。しかし、1990–1998 年の Station AB および SA における春から秋にかけての光環境が、現場の珪藻沈降フラックスにどのように影響したのかはよく分かっていない。

4.2 珪質鞭毛藻フラックスと群集組成

北太平洋亜寒帯およびベーリング海盆における珪質鞭毛藻骨格の沈降フラックスは、珪藻殻フラックスよりも1～2桁低く $1.0 \times 10^5 \sim 22.7 \times 10^5$ skeletons $m^{-2} d^{-1}$ であった。特に Station 40N で高い珪質鞭毛藻フラックスが観測された。これは、北太平洋外洋域の表層堆積物における珪質鞭毛藻骨格の含有量が、亜寒帯境界とその遷移帯に沿って高くなっている地理分布 (Poelchau, 1976) と調和的である。Stations 50N における珪質鞭毛藻フラックスのピークは、珪藻フラックスと同様に基本的に春に観測されるが、Station KNOT では1998年と1999年12～1月にピークが観測された (Fig. 7; Onodera and Takahashi, 2005)。Station SA における沈降フラックスのピークが見られる季節は年によって異なり、春か秋のどちらか1回観測された (Onodera and Takahashi, 2012)。Station AB の場合は珪藻フラックスと同様に、フラックスピークが春と秋の2回観測される年、春または秋の1回だけ観測される年がある (Onodera and Takahashi, 2012)。Station K2 の沈降粒子試料の珪質鞭毛藻分析は今後の課題である。ただし、2010年から2011年にかけて2月、4月、7月、10～11月に得られた海水試料を調べると、海水1Lあたりの骨格数は7月の試料で最も高かった (8.2×10^3 skeletons L^{-1}) (小野寺ら, 未公表)。

北太平洋亜寒帯の西部域における優占種は、Station 50N の沈降群集および Station K2 の生群集に基づく *Distephanus speculum* (Ehrenberg) Haeckel である (Onodera and Takahashi, 2005; 未公表)。亜寒帯北部 Station SA 付近では、*Distephanus octangulatus* Wailes も多く見られる。亜寒帯東部の Station PAPA では、*D. speculum* に加えて *Dictyocha mandrai* Ling も多い (Takahashi, 1987)。Station 50N および PAPA の平均的な沈降群集組成と Station SA の群集との類似度を調べると、Station SA では、Station 50N の群集に近い時と Station PAPA の群集に近い場合がある (Onodera and Takahashi, 2012)。この変化は、アラスカン・ストリームと亜寒帯海流の流量の変化を反映していると思われる。

ベーリング海 Station AB の沈降群集は、Station 50N の群集と基本的に類似している。この海域では亜熱帯域に分布の中心を持つ *Dictyocha* 属の出現は少ない。ベーリング海に出現する *Dictyocha* 属の個体は、基本的な表層海流系から推測すると、アラスカン・ストリームの分枝のベーリング海への流入と共に流されてきた可能性が高い (Onodera and Takahashi, 2012)。

北極海では、*D. speculum* および *Distephanus medianoetisol* Takahashi *et al.* が主に観察される (Melnikov, 1997; Takahashi *et al.*, 2009; 小野寺ら, 未公表)。特に北極点付近で2004年に採取した海水および海水試料では、*D. medianoetisol* の優占が目立った (Takahashi *et al.*, 2009)。また、8角形の骨格を有する *Distephanus* 属の種も僅かに出現する (Melnikov *et al.*, 2002; 小野寺ら, 未公表)。

Station KNOT では *D. speculum* だけでなく、亜寒帯/亜熱帯遷移帯で多く見られる *D. mandrai* (= *D. epidon* in Poelchau 1976) も観測期間を通じて含まれる。さらに1999年は亜熱帯種の *Dictyocha messanensis* Ehrenberg についても、群集に占める割合が増加した。

Station S1 では海水1Lあたりの骨格数が、Station K2 の生群集と比べると、1/2～1/10程度であった。生群集における優占種は *Dictyocha messanensis* *messanensis* で、*D. messanensis spinosa* や赤道太平洋東部湧昇域や亜熱帯沿岸水に多い *Distephanus pulchrus* (Hovasse) Ling and Takahashi も含まれる (小野寺ら, 未公表)。

Station 40N では、冬～春に *D. speculum* が優占し、夏～秋に *D. messanensis* が優占した (Fig. 7; Onodera and Takahashi, 2005)。ただし1999年には *D. pulchrus* も増加し、珪藻や放散虫群集と同様に亜熱帯種の割合が1998年よりも増えた (Onodera and Takahashi, 2005)。また、MR10-06航海で38°N 146.4°E で得られた採水試料では水柱上部50m水深で *D. messanensis* が優占し、50mより深い部分で *D. speculum* が増加していた (小野寺ら, 未公表)。

5. 珪質微化石と古海洋環境復元

微化石とは、珪藻殻など顕微鏡を使わないと観察が難

しい微小な化石を指し、古環境復元や海洋堆積物の年代指標として広く利用されている。特に有孔虫殻の化石は、古海洋環境復元で大変重要な役割を果たしてきた。しかし、炭酸塩補償深度の浅い北太平洋高緯度域の深海堆積物では有孔虫など炭酸塩質化石の保存が悪いため、堆積物の主要な構成物であるケイ酸質殻化石（珪藻、放射虫など）の幅広い活用も求められる。珪藻化石による古海洋環境復元については、最近の和書では小泉（2011）に纏められている。以下では、筆者が扱わせて頂いた北極海およびベーリング海の IODP 試料について、珪藻および珪質鞭毛藻の群集解析（Onodera *et al.*, 2008, in press; Onodera and Takahashi, 2009b）を紹介する。時間スケールは前述のセディメントトラップ研究と大きく異なり、以下に示す内容は、数千年～数万年単位での環境変動と生物群集変遷との関係を探るものである。なお、前章のフラックス観測研究で示したように、珪藻や珪質鞭毛藻の生産と沈降には季節性がある。珪質植物プランクトンの化石によって復元される古海洋環境には、ベーリング海では春～秋にかけて、極夜がある北極域では夏の状況が反映されやすいことに注意する必要がある。

5.1 珪藻と珪質鞭毛藻化石群集に基づく鮮新世～第四紀ベーリング海古海洋環境復元

IODP Expedition 323 は、2009 年にベーリング海バウワーズ海嶺の西麓に設定された掘削点 Site U1341 において過去約 4.3 百万～現世の珪質堆積物を採取した。ベーリング海では 1971 年に深海掘削計画 Deep-Sea Drilling Project Leg 19 が実施されており、ベーリング海の地質年代モデル構築の基礎となる珪藻化石層序は Koizumi (1973) によって、珪質鞭毛藻化石層序については Ling (1973) によって示されている。その後の研究で、北太平洋亜寒帯では Barron and Gladenkov (1995), Barron (2003), 日本周辺では Yanagisawa and Akiba (1998) が珪藻化石層序を取り纏めている。そこで、ここで紹介する Site U1341 の掘削試料の年代モデルの基礎となる化石層序は、これまでに構築された化石層序に基づいて決定された（Onodera *et al.*, in press）。

得られた堆積物に含まれる珪藻化石群集を調べてみる

と、Station AB の沈降群集のように *Neodenticula seminae* やその祖先種 *N. koizumii* Akiba and Yanagisawa および *N. kamtschatica* (Zabelina) Akiba and Yanagisawa が優占する場合もあるが、年代によっては他の種の占有率も増加していた (Fig. 10)。およそ 2.9Ma (1Ma=百万年前) までは *Neodenticula* 属に加えて *Coscinodiscus marginatus* Ehrenberg や *Stephanopyxis* 属も多く含まれる。*C. marginatus* は、現在の北太平洋外洋では中緯度で比較的多く Station 40N の沈降群集では最大 18% であった (Onodera *et al.*, 2005)。なお、本種は他の珪藻種に比べて殻が厚く、堆積物間隙水による殻の溶解に強いので、殻の薄い他の種の選択的溶解によって化石群集に占める割合が増加している可能性がある (例えば Takahashi, 1994)。*Stephanopyxis* 属も基本的に温暖種であるが、一部は高緯度に向かう暖流に沿うように高緯度域でも観察される (Round *et al.*, 1990)。3.4Ma 頃には寒冷種の *Thalassiosira antarctica* Comber の休眠胞子のごく僅かながら出現しはじめる。北太平洋亜寒帯における深海掘削 ODP Leg 145 のコア試料で指摘された約 2.7Ma の北半球氷河化作用 (NHG) の強化イベント (Haug *et al.*, 1999) に対応する形で、本研究でも 2.9Ma 頃には現在のベーリング海北部や北極海 Station NAP10t でも見られる *Fragilariopsis oceanica* Cleve や *F. cylindrus* (Grunow) Krieger in Helmcke & Krieger が僅かながら出現し始めた。この NHG 強化イベントでは、北太平洋亜寒帯域における海洋表層の塩分が低下し、水柱上部における明瞭な塩分躍層の形成または強化によって基礎生産力の低下が起こった (Haug *et al.*, 1999)。約 2.7Ma からは *Actinocyclus* 属が断続的に優占するようになった。表層堆積物における珪藻遺骸群集の分布を調べると、*Actinocyclus* 属はオホーツク海中央部の堆積物で比較的多く見出される (Sancetta and Silverstli, 1986)。このような珪藻化石群集の変動傾向は、ODP Leg 145 における北太平洋亜寒帯の珪藻化石群集変遷 (Shimada *et al.*, 2009) と大枠で一致する。さらに 2Ma 頃には、温暖系の *Stephanopyxis* 属の増加はほぼ見られなくなる一方、亜寒帯外洋域に広く分布する *Thalassiosira trifulta* や *T. antarctica* 休眠胞子の割合増加が見られることから、寒冷化が一段と進んだことが

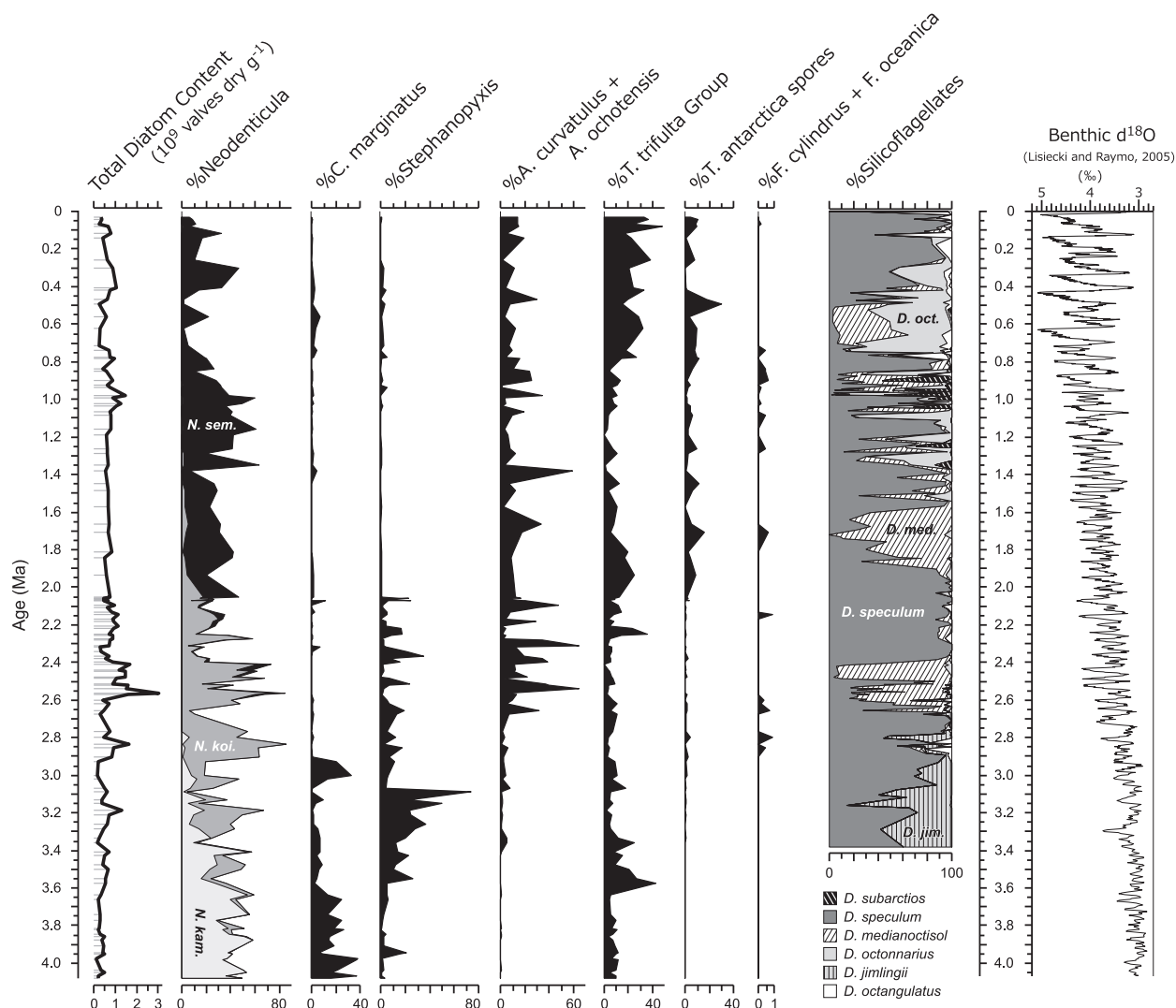


Fig. 10. Total diatom content in dry sediments, and relative abundances of some major diatoms and silicoflagellates at Site U1341 (Onodera *et al.*, in press). The $\delta^{18}\text{O}$ records of benthic foraminifers after Lisiecki and Raymo (2005) is also shown.

伺える。2Ma 頃の寒冷イベントは北太平洋中緯度域の珪藻化石群集に基づいて推定された水温変動にも表れている (Koizumi, 1985)。また、北極海でも中層水の起源が北大西洋水から、北極海陸棚域で海水が形成される際に排出されるブライン起源へと大きく変わった時代である (Haley *et al.*, 2008)。本研究の 2Ma 以降の珪藻分析層準の時間解像度は非常に粗いため詳細には触れられないが、約 0.8Ma 頃から 0.4Ma にかけては *N. seminae* の割合が減少した。一方、0.8Ma 頃からコ

ア最上部にかけては亜寒帯外洋で広く見られる *Thalassiosira trifulta* group の割合が増加した。ベーリング海陸棚斜面 Site U1343 では、約 2Ma 以降の珪藻化石群集が得られている (Teraishi *et al.*, in press)。その結果と比べると Site U1341 では海水種の群集に占める割合は小さく、少なくとも間氷期においては冬季から春先にかけて海水が Site U1341 付近まで張り出してくる年は多くなかったようである。

珪質鞭毛藻化石群集は、コア基底から海底面に至る

まで基本的に亜寒帯性の群集であった。現在の北極海に多い *D. medianoetis* の割合が 2.7Ma および 1.9Ma 頃に増加したのは、北半球の寒冷化イベントと関係していると思われる (Fig. 10)。約 1.35Ma から 0.75Ma にかけては、*D. medianoetis* のような寒冷種が優占するのに加え、ベーリング海以南の北太平洋亜寒帯で 1.8Ma に出現した *Dictyochoa subarctios* が優占する時代も断続的に見出された。1.25Ma から 0.78Ma にかけては北大西洋で *N. seminae* が連続的に優占種として出現した (Koç *et al.*, 1999; Reid *et al.*, 2007)。 *N. seminae* は、前述のとおり北太平洋亜寒帯～ベーリング海海盆部で多く見られる北太平洋北部の固有種であり、亜熱帯域には分布しない。したがって、*N. seminae* が北太平洋亜寒帯から北大西洋に進出するためには、本種を伴う北太平洋亜寒帯起源の水塊がベーリング海峡を通過し、さらに北極海を通過しなければならない。*D. subarctios* の分布の南限は *N. seminae* と同様に亜寒帯境界付近である (Ling, 1976)。一方、*D. subarctios* の分布の北限は、本種がベーリング海では連続的に産出しなかったことから、原則として亜寒帯北部に位置していたと思われる。したがって、1.35Ma から 0.9Ma にかけて見られた *D. subarctios* のベーリング海での断続的な優占は、おそらく *N. seminae* の北大西洋への進出イベントをサポートする北太平洋表層水のベーリング海および北極海への活発な流入や一時的な温暖化による生息域の北上を反映していた可能性がある (Onodera *et al.*, in press)。しかし、*D. subarctios* は大西洋には産出の報告がないので、おそらく北極海を通過できなかったものと思われる。およそ 0.7Ma 以降は 10 万年周期の氷期-間氷期サイクルが卓越する時代となるが、珪質鞭毛藻群集の組成変動は氷期-間氷期サイクルとは対応しない。0.75Ma から 0.5Ma にかけては、*Distephanus octonarius* と *D. medianoetis* が優占し、0.5Ma 頃から現在に向かって *D. speculum* の割合が増加していた。*D. octonarius* は寒冷種であるという以外に詳細な生息条件がはっきりしないが、現在の北太平洋亜寒帯-亜熱帯やベーリング海では滅多に見かけることが無い一方で、北極海 Station NAP10t の沈降群集には最大で 7% 含まれる (小野寺ら, 未公表)。0.8Ma-0.5Ma にかけては珪藻群集も *N. seminae* の割合が低く、間氷期においてもそれほど

温暖であったようには見えない。現在の珪質鞭毛藻群集と類似する種組成が見られたのは 0.12Ma の間氷期と、0.765Ma の間氷期であった。

5.2 珪質鞭毛藻化石群集から探る中期始新世の北極海

2004 年に北極海ロモノソフ海嶺で実施された IODP 302 次掘削では、海底から基盤岩までに至る一連の軟泥堆積物が得られた (Moran *et al.*, 2006)。回収された掘削孔最下部の試料は白亜紀の大陸沿岸で形成された砂岩で、ロモノソフ海嶺が現在のユーラシア大陸縁辺から北極海の手盆側へと引き離されてきたものであることが示唆されている (Backman and Moran, 2009)。得られたコア堆積物は、粘土鉱物などの碎屑粒子を主体とする上部層 (Lithologic Unit 1) と、有機炭素と珪質微化石を多く含む層 (Lith. Unit 2)、珪質碎屑物層 (Lith. Unit 3)、および黒色砂泥層 (Lith. Unit 4) で構成される。粘土鉱物を主体とする Lith. Unit 1 は下部の subunit 1/6 および 1/5 を除き多年氷環境下で形成されたことが判明している (Backman and Moran, 2009)。多年氷環境下の堆積物からは、渦鞭毛藻シスト、石灰質ナノ化石 (Lith. Unit 1 最上部のみ)、底生有孔虫化石が見出されているが、珪質微化石は産出しない (Backman and Moran, 2009)。珪質鞭毛藻骨格などの珪質微化石は、Lith. Unit 1 の最下部 (Lith. U. 1/6) と、その下に続く還元環境下で堆積した有機物に富む始新世 Ypresian (5600 万-4780 万年前) 末期および Lutetian (4780 万-4120 万年前) 前期に相当する地層 (Lith. Unit 2) に含まれている (Onodera *et al.*, 2008)。さらに古い時代の Lith. Unit 3 および 4 では、珪藻殻や珪質鞭毛藻骨格の成分であるオパール A (非晶質なオパール) がオパール CT (クリストバライトという結晶の基本構造を一部持つ状態。珪質殻の形態は失われる) へと変化する堆積続成作用のため (小川・高橋, 未公表)、黄鉄鉱による置換化石を除くと珪質微化石は産出しない。Lith. U. 1/6 および Lith. U. 2 における珪質微化石群集は珪藻を主体とするものの、一般的な遠洋堆積物の場合と異なり、放散虫がほとんど産出しない一方で、珪質鞭毛藻や Chrysophyte のシスト、エブリア類を多く含む (Stickley *et al.*, 2008)。Lith. Unit 2 における珪質

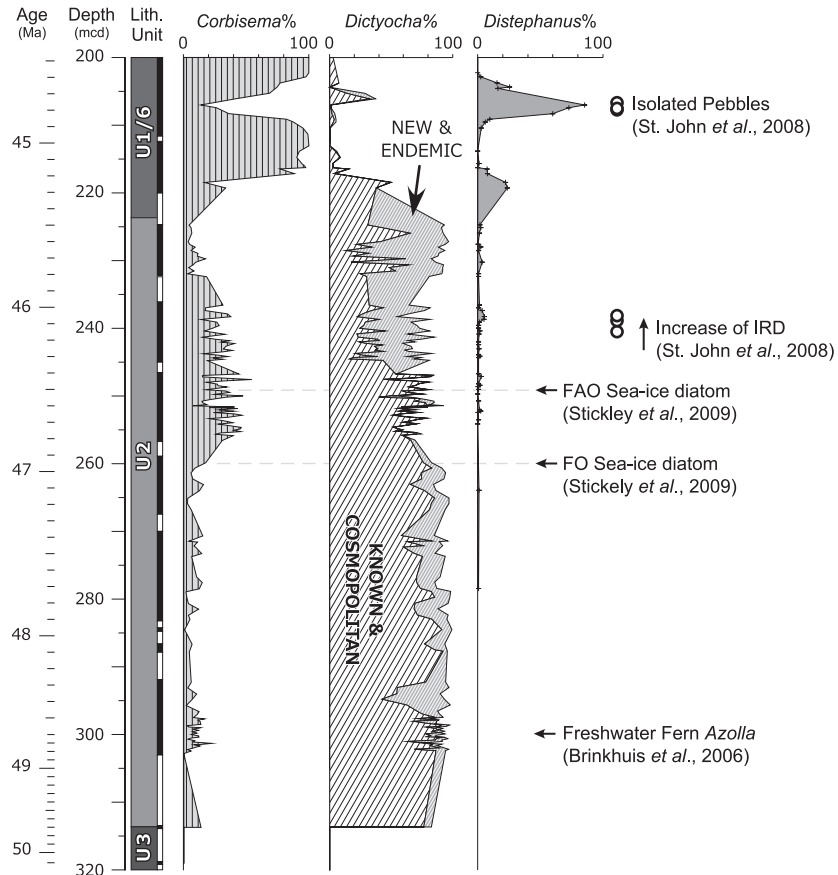


Fig. 11. Relative abundance of three genera *Corbisema*, *Dictyochoa*, and *Distephanus* in the middle Eocene sediments from Holes IODP302–M2A and M4A (Onodera and Takahashi, 2009).

鞭毛藻化石群集には複数の新種および北極海固有種も連続して見出された (Onodera *et al.*, 2008; Onodera and Takahashi, 2009b; Fig. 11). この群集は、北極海周辺で得られた同じ時代の化石群集との類似性が低かったことから (Onodera *et al.*, 2008), 当時の北極海には北大西洋や北太平洋とは異なる海洋環境が広がっていたことが想像される。どのようにして、当時の北極海では固有の群集が形成されたのか。Radionova and Khokhlova (2000) によると、北極海ガッケル海嶺のプレート拡大が新生代に入って活発になった。そのため、ユーラシア大陸北部の広域応力場は圧縮場となった。白亜紀からテチス海と北極海を繋いでいたツルゲイ水道および西シベリア海は、大陸の隆起によって遅くとも 45–50Ma 頃までには干上がってしまった (Radionova and

Khokhlova, 2000; Akhmetiev and Beniamovski, 2004). ベーリング海峡も当時はまだ開通していなかったとされる。北極海と北大西洋側域を繋ぐ経路はあったと思われるが、当時はまだフラム水道も深層部分は開通しておらず、北極海と外部の水域とを結ぶ水道は浅かった (Brinkhuis *et al.*, 2006). 北極圏で見つかる樹木化石群集や気候モデル研究から、当時の北極海周辺は降雨量の多い湿潤環境であったと推測されている (Brinkhuis *et al.*, 2006; Jahren and Sternberg, 2000). そのような状況下で、大陸の広大な集水域に囲まれた北極海の表層は低塩分水で覆われていたと考えられるので (Brinkhuis *et al.*, 2006; Wadell and Moore, 2008), 北大西洋起源の高塩分水は北極海の表層ではなく亜表層へ供給された (Ogawa *et al.*, 2009). Lith. Unit 2 の時代

に北極海で固有種を多く含む独特の珪質鞭毛藻群集が形成された背景には、このようなエスチュアリー型循環の発達に影響していたと考えられる (Onodera *et al.*, 2008). Lith. Unit 2 では低緯度～中緯度海域に広く分布する *Dictyocha* 属や鮮新世に絶滅した *Corbisema* 属が多く、高緯度で多く見られる *Distephanus* 属の産出は少なかった (Fig. 11), 植物プランクトンが北極海で増殖する夏季表層水は現在より温暖であったと思われる。ただし、Lith. Unit 2 の中頃からは氷漂岩屑 (ice-rafted debris) が少しずつ含まれるようになり (St. John, 2008), 海水指標とされる珪藻 *Synedropsis* 属も約 4700 万年前の試料から見つかっている (Stickley *et al.*, 2009). 新生代で最も温暖であった約 5600 万年前の暁新世—始新世温暖極大期 (PETM) から約 5000 万年前にかけて続いた北極海の温暖環境は、始新世中頃の Lutetian には寒冷化が進行して季節海水域へと移行していったと思われる。Lith. Unit 1/6 の時代に入ると、固有種や筆者らが Lith. Unit 2 で記載した新種はほぼ見られなくなり、*Corbisema* 属と *Distephanus* 属が断続的に優占した (Fig. 11). Lith. Unit 1/6 の平均的な珪質鞭毛藻群集組成は、北大西洋における群集と類似性が見られるようになった (Onodera *et al.*, 2008). おそらく、この変化は北極海表層環境の閉鎖的な状況が終焉し、大西洋水の流入が増えたことを表す。その後、北極海が季節海水環境から現在のような多年氷環境に、どのように移行していったのかは十分には解明されていない (Backman and Moran, 2009). それは、始新世までの温室地球から漸新世以降の氷室地球へと移行する約 3390 万年前を含む堆積物 (1820 万—4440 万年前) が、北極海で初めて実施された本掘削試料では完全に欠如しているためである。将来、新たな掘削研究が実現することによって解明されることを期待したい。

謝 辞

これまでに、実に多くの国内外の研究者や学生の皆様から暖かいご指導とご支援を頂きました。深く感謝申し上げます。また、名誉ある日本海洋学会岡田賞の候補として推薦して下さった会員の皆様と選考委員の先生方にお礼申し上げます。修士課程進学時に陸上地域地質学

の分野からグローバルな海洋の研究分野に飛び込んで以来、九州大学におられた高橋孝三先生からは指導教官として多くの貴重なご指導を頂きました。独立行政法人海洋研究開発機構の本多牧生博士には Station KNOT をはじめとする北太平洋西部の沈降粒子試料を分けて頂きました。Stations AB および SA の研究では、北海道大学水産学部の築田満先生、大西広二先生をはじめとする多くの皆様のお世話になりました。高知大学海洋コア総合研究センターでは、村山雅史教授をはじめとする皆様のお世話になりました。統合国際深海掘削計画 (IODP) では、多くの海外研究者と知り合うことができました。おかげさまで、現在は海洋研究開発機構で原田尚美チームリーダーのもと、古海洋研究や海洋環境変動が顕著に見られる北極海のセディメントトラップ係留観測に取り組める環境にあります。乗船した「かいいい」「みらい」「おしよる丸」「淡青丸」「ODEN」「JOIDES Resolution」「S. W. Laurier」「Louis S. St-Laurent」の船長や乗組員をはじめとする関係者の皆様にも大変お世話になりました。加えて、日本学術振興会特別研究員の助成および笹川科学研究助成を幸いにして受けられた事も、ここまで研究を続けることができた一因であったと思います。また、本原稿は 2 名の査読者からの指摘をもとに改訂されたものです。どうもありがとうございました。受賞したテーマは大変壮大なものであるため、本稿では筆者の理解が至らず上手く説明できていない部分が多々あります。自分の勉強不足と今後解明されるべき課題を意識しつつ、研究者でいられる間は少しでもこの分野に貢献していけたらと思います。

References

- Aizawa, C., Tanimoto, M., and R.W. Jordan (2005) : Living diatom assemblages from North Pacific and Bering Sea surface waters during summer 1999. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2186–2205.
- Akhmetiev, M. A., and V. N. Beniamovski (2004) : Paleocene and Eocene of western Eurasia (Russian sector) – Stratigraphy, palaeogeography, climate. *Neues Jahrb. Geol. Palaeontol. Abh.*, **234**, 137–181.
- Asahi, H., and K. Takahashi (2008) : A new insight into oceanography with multivariate and time-series analysis on the 1990–1999 planktonic foraminiferal fluxes in the Bering Sea and the central subarctic Pacific. *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth & Planet. Sci.*, **32** (1), 73–96.

- Backman, J., and K. Moran (2009) : Expanding the Cenozoic paleoceanographic record in the Central Arctic Ocean : IODP Expedition 302 Synthesis. *Cent. Eur. J. Geosci.*, **1**, 157–175.
- Barron, J.A. (2003) : Planktonic marine diatom record of the past 18 M.Y. : Appearances and extinctions in the Pacific and Southern Oceans. *Diat. Res.*, **18**, 203–224.
- Barron, J.A., and A. Gladenkov (1995) : Early Miocene to Pleistocene diatom stratigraphy of Leg 145. In : Rea, D.K., Basov, L.A., Scholl, D.W., Allan, J.F., (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Res.*, **145**, 3–19.
- Barron, J.A., and D. Bukry (2007) : Development of the California Current during the past 12,000 yr based on diatoms and silicoflagellates. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **248**, 313–338.
- Brinkhuis, H., Schouten, S., Collinson, M.E., Sluijs, A., Sinninghe Damsté, J.S., Dickens, G.R., Huber, M., Cronin, T.M., Onodera, J., Takahashi, K., Bujak, J.P., Stein, R., van der Burgh, J., Eldrett, J.S., Harding, I.C., Lotter, A.F., Sangiorgi, F., van Konijnenburg-van Cittert, H., de Leeuw, J.W., Matthiessen, J., Backman, J., Moran, K., and the Expedition 302 Scientists (2006) : Episodic fresh surface waters in the Eocene Arctic Ocean. *Nature*, **441**, 606–609.
- Boyd, P.W., Strzepek, R., Fu, F., and D.A. Hutchins (2010) : Environmental control of open-ocean phytoplankton groups : Now and in the future. *Limnol. Oceanol.*, **55**, 1353–1376.
- Bukry, D., and S. Monechi (1985) : Late Cenozoic silicoflagellates from the Northwest Pacific, Deep Sea Drilling Project Leg 86 : Paleotemperature trends and texture classification. In : Heath, G.R., Burckle, L.H., et al. (Eds.), *Init. Repts. DSDP*, **86**, 367–397.
- Cleve, P.T., and A. Grunow (1880) : Beiträge zur kenntniss der Arctischen diatomeen. *Kongl. Svenska vetenskaps-akademiens handlingar*, **17**, 1–121.
- Dodimead, A.J., Favorite, F., and T. Hirano (1963) : Salmon of the North Pacific Ocean : part II. Review of oceanography of the Subarctic Pacific region. *Bull. Int. N. Pac. Fish. Comm.*, **13**, 1–195.
- Haley B.A., Frank M., Spielhagen R.F., and A. Eisenhauer (2008) : Influence of brine formation on Arctic Ocean circulation over the past 15 million years. *Nat. Geosci.*, **1**, 68–72.
- Harada, N., Sato, M., Shiraishi, A., and M.C. Honda (2006) : Characteristics of alkenone distributions in suspended and sinking particles in the northwestern North Pacific. *Geochem. Cosmochim. Acta*, **70**, 2045–2062.
- Harada, N., Sato, M., Oguri, K., Hagino, K., Okazaki, Y., Katsuki, K., Tsuji, Y., Shin, K.-H., Tdai, O., Saitoh, S., Narita, H., Konno, S., Jordan, R.W., Shiraiwa, Y., and J. Grebmeier (2012) : Enhancement of coccolithophorid blooms in the Bering Sea by recent environmental changes. *Global Biogeochem. Cycles*, **26**, GB2036, doi:10.1029/2011GB004177.
- Haug, G., Sigman, D.M., Tiedemann, R., Pedersen, T.F., and M. Sarnthein (1999) : Onset of permanent stratification in the subarctic Pacific Ocean. *Nature*, **401**, 779–782.
- Henriksen, P., Knipschildt, F., Moestrup, Ø., and H.A. Thomsen (1993) : Autecology, life history and toxicology of the silicoflagellate *Dictyocha speculum* (Silicoflagellata, Dicyochophyceae). *Phycologia*, **32**, 29–39.
- Hinder, S.L., Hays, G.C., Edwards, M., Roberts, E.C., Walne, A.W., and M.B. Gravenor (2012) : Changes in marine dinoflagellate and diatom abundance under climate change. *Nat. Clim. Ch.*, **2**, 271–275.
- 久道研一・高橋孝三 (1993) : 1993年夏期の北太平洋亜寒帯表層域における珪藻の東西分布. 北海道東海大学紀要理工学系, **7**, 21–28.
- Honda, M.C., Imai, K., Nojiri, Y., Hoshi, F., Sugawara, T., and M. Kusakabe (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.
- 本多牧生・川上創・松本和彦・脇田昌英・渡邊修一 (2007) : Station K2における係留系, 観測船を用いた生物ポンプ研究と今後の展望. 月刊海洋, **39**, 68–79.
- Honjo, S., (1997) : The Northwestern Pacific Ocean, a crucial ocean region to understand global change : rationale for new international collaborative investigations. In : *Biogeochemical Processes in the North Pacific* edited by Tsunogai, S., Japan Marine Science Foundation, Tokyo, 233–248.
- Honjo, S., and K.W. Doherty (1988) : Large aperture time-series sediment traps; design objectives, construction and application. *Deep-Sea Res.*, **35**, 133–149.
- Honjo, S., Manganini, S.J., Krishfield, R.A., and R. Francois (2008) : Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump : A synthesis of global sediment trap programs since 1983. *Prog. Oceanogr.*, **76**, 217–285.
- Jahren, A. H., and L.S.L. Sternberg (2002) : Eocene meridional weather patterns reflected in the oxygen isotopes of Arctic fossil wood. *GSA Today*, **12**, 4–9.
- Jordan, R.W., 小室千佳・成田尚史 (2003) : 北西太平洋 Station KNOTにおけるマイクロプランクトン群集—1999年・2000年の観測結果—. 月刊海洋, **35**, 451–457.
- Kanaya, T., and I. Koizumi (1966) : Interpretation of diatom thanatocoenosis from the North Pacific applied to a study of Core V20–130. *Sci. Rept. Tohoku Univ., 2nd Ser., Geol.*, **37**, 89–130.
- Katsuki, K., and K. Takahashi (2005) : Diatoms as paleoenvironmental proxies for seasonal productivity, sea-ice and surface circulation in the Bering Sea during the late Quaternary. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2110–2130.
- Katsuki, K., Takahashi, K., Onodera, J., Jordan, R.W., and I. Suto (2009) : Living diatoms in the vicinity of the North Pole, summer 2004. *Micropaleontol.*, **55**, 137–170.
- Koç, N., Hodell, D.A., Kleiven, H., and L. Labeyrie (1999) : High-resolution Pleistocene diatom biostratigraphy of Site 983 and correlations with isotope stratigraphy. In : Raymo, M.E., Janse, E., Blum, P., and Herbert, T.D., (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Res.*, **162**, 51–62.
- Koizumi, I. (1973) : The late Cenozoic diatoms of Sites 183–193, Leg 19, Deep Sea Drilling Project. In : Creager, J.S., Scholl, D.W., et al., (Eds.), *Init. Repts. DSDP*, **19**, 805–855, Washington D.C. (U.S. Government Printing Office).
- Koizumi, I. (1985) : Late Neogene paleoceanography in the western North Pacific. In : Heath, G.R., Burckle, L.H., et al., (eds.), *Init. Repts. DSDP*, **86**, 429–438, Washington D.C. (U.S. Government Printing Office).
- 小泉格 (2011) : 珪藻古海洋学 完新世の環境変動. p. 211, 東京大学出版会, 東京.

- Komuro, C., Narita, H., Imai, K., Nojiri, Y., and R.W. Jordan (2005) : Microplankton assemblages at Station KNOT in the subarctic western Pacific, 1999–2000. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2206–2217.
- Kusakabe, M., Andreev, A., Lobanov, V., Zhabin, I., Kumamoto, Y., and A. Murata (2002) : Effects of the anticyclonic eddies on water masses, chemical parameters and chlorophyll distributions in the Oyashio Current region. *J. Oceanogr.*, **58**, 691–701.
- Kuwata, A., and M. Takahashi (1990) : Life-form population responses of a marine planktonic diatom, *Chaetoceros pseudocurvisetus*, to oligotrophication in regionally upwelled water. *Mar. Biol.*, **107**, 503–512.
- Ling, H.Y. (1973) : Silicoflagellates and ebridians from Leg 19. In : Creager, J.S., Scholl, D.W., *et al.*, (Eds.), *Init. Repts. DSDP*, **19**, 751–775, (U.S. Government Printing Office, Washington D.C.).
- Ling, H.Y. (1976) : Distribution and biostratigraphic significance of *Dictyocha subarctica* (silicoflagellate) in the North Pacific. *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan, N.S.*, **101**, 264–270.
- Ling, H.Y. (1977) : Late Cenozoic silicoflagellates and ebridians from the eastern North Pacific region. *Proc. First Int. Cong. Pacific Neogene Stratigr., Tokyo 1976*. pp. 205–233.
- Lisiecki, L.E., and M.E. Raymo (2005) : A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanogr.*, **20**, PA1003.
- Margalef, R. (1978) : Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanol. Acta*, **1**, 493–509.
- Melnikov, I.A. (1997) : *The Arctic Sea Ice Ecosystem*. pp. 204, Gordon and Breach Science Publishers, The Netherlands.
- Melnikov, I.A., Kolosova, E.G., Welch, H.E., and L.S. Zhitina (2002) : Sea ice biological communities and nutrient dynamics in the Canada Basin of the Arctic Ocean. *Deep-Sea Res. I*, **49**, 1623–1649.
- 溝端浩平・齊藤誠一・久万健志・目黒敏美・梶原善之・高木省吾・亀井佳彦・坂岡桂一郎 (2006) : おしよろ丸による夏季ベーリング海陸棚・陸棚斜面観測. 月刊海洋学外, **50**, 116–126.
- Mochizuki, M., Shiga, N., Saito, M., Imai, K., and Y. Nojiri (2002) : Seasonal changes in nutrients, chlorophyll a and the phytoplankton assemblage of the western subarctic gyre in the Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 5421–5439.
- Moran, K., Backman, J., Brinkhuis, H., Clemens, S.C., Cronin, T., Dickens, G.R., Eynaud, F., Gattacceca, J., Jakobsson, M., Jordan, R.W., Kaminski, M., King, J., Koc, N., Krylov, A., Martinez, N., Matthiessen, J., McInroy, D., Moore, T.C., Onodera, J., O'Regan, M., Pälike, H., Rea, B., Rio, D., Sakamoto, T., Smith, D.C., Stein, R., St John, K., Suto, I., Suzuki, N., Takahashi, K., Watanabe, M., Yamamoto, M., Farrell, J., Frank, M., Kubik, P., Jokat, W., and Y. Kristoffersen (2006) : The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean. *Nature*, **441**, 601–605.
- Nishino, S., Kikuchi, T., Yamamoto-Kawai, M., Kawaguchi, Y., Hirawake, T., and M. Itoh (2011) : Enhancement/reduction of biological pump depends on ocean circulation in the sea-ice reduction regions of the Arctic Ocean. *J. Oceanogr.*, **67**, 305–314.
- Ogawa, Y., Takahashi, K., Yamanaka, T., and J. Onodera (2008) : Significance of euxinic condition in the middle Eocene paleo-Arctic basin : A geochemical study on the IODP Arctic Coring Expedition 302 sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **285**, 190–197.
- Okazaki, Y., Takahashi, K., Onodera, J., and M.C. Honda (2005) : Temporal and spatial flux changes of radiolarians in the northwestern Pacific Ocean during 1997–2000. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2240–2274.
- 大西広二, 広瀬哲也, 北大作, 築田満 (2008) : 南東ベーリング海における海洋環境変動が与える沈降粒子フラックスへの影響. 平成 151 年度～平成 18 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B)) 研究成果報告書, **15310001**, 53–66.
- Onodera, J., and K. Takahashi (2005) : Silicoflagellate fluxes and environmental variations in the northwestern North Pacific during December 1997–May 2000. *Deep-Sea Res. I*, **52**, 371–388.
- Onodera, J., and K. Takahashi (2009) : Long-term diatom fluxes in response to oceanographic conditions at Stations AB and SA in the central Subarctic and the Bering Sea, 1990–1998. *Deep-Sea Res. I*, **56**, 189–211.
- Onodera, J., and K. Takahashi (2009b) : Taxonomy and biostratigraphy of middle Eocene silicoflagellates in the central Arctic Basin. *Micropaleontol.*, **55**, 209–248.
- 小野寺丈尚太郎, 高橋孝三, 本多牧生 (2003) : 北西太平洋 Station KNOT における珪藻殻フラックス. 日本プランクトン学会報, **50**, 1–15.
- Onodera, J., and K. Takahashi (2012) : Oceanographic conditions influencing silicoflagellate flux assemblages in the Bering Sea and subarctic Pacific Ocean during 1990–1994. *Deep-Sea Res. II*, **61**–**64**, 4–16.
- Onodera, J., Takahashi, K., and M. C. Honda (2005) : Pelagic and coastal diatom fluxes and the environmental changes in the northwestern North Pacific during 1997–2000. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2218–2239.
- Onodera, J., Takahashi, K., and R.W. Jordan (2008) : Eocene silicoflagellate and ebridian paleoceanography in the central Arctic Ocean. *Paleoceanogr.*, **23**, PA1515.
- 小野寺丈尚太郎, 高橋孝三, 大西広二, 築田満 (2009) : ベーリング海 Station AB 及び北太平洋 Station SA における珪藻沈降群集フラックス 1990–1998. 海の研究, **18**, 307–322.
- Onodera, J., Takahashi, K., and R. Nagatomo (in press) : Diatoms, silicoflagellates, and ebridians at Site U1341 on the western slope of Bowers Ridge, IODP Expedition 323. *Deep-Sea Res. II*.
- Poelchau, H.S. (1976) : Distribution of Holocene silicoflagellates in North Pacific sediments. *Micropaleontol.*, **22**, 164–193.
- Radionova, E.P., and I.E. Khokhlova (2000) : Was the North Atlantic connected with the Tethys via the Arctic in the early Eocene? Evidence from siliceous plankton. *GFF*, **122**, 133–134.
- Reid, P.C., Johns, D.G., Edwards, M., Starr, M., Poulin, M., and P. Snoeijis (2007) : A biological consequence of reducing Arctic ice cover : arrival of the Pacific diatom *Neodenticula seminiae* in the North Atlantic for the first time in 800000 years. *Glob. Ch. Biol.*, **13**, 1910–1921.
- Round, F.E., Crawford, R.M., and D.G., Mann (1990) : *The Diatoms*. Cambridge University Press, Cambridge, 649pp.
- Saitoh, S., Iida, T., and K. Sasaoka (2002) : A description of temporal and spatial variability in the Bering Sea spring phytoplankton blooms (1997–1999) using satellite multi-sensor remote sensing. *Prog. Oceanogr.*, **55**, 131–146.
- Sancetta, C., and S.-M., Silvestri (1986) : Pliocene-Pleistocene evolution of the North Pacific Ocean-atmosphere system, interpreted from fossil diatoms. *Paleoceanogr.*, **1**, 163–180.
- Sasaoka, K., Saitoh, S., Asanuma, I., Imai, K., Honda, M., Nojiri, Y.,

- and T. Saino (2002) : Temporal and spatial variability of chlorophyll-a in the western subarctic Pacific determined from satellite and ship observations from 1997 to 1999. *Deep-Sea Res. II*, **49**, 5557–5576.
- Scharek, R., Tupas, L.M., and D.M. Karl (1999) : Diatom fluxes to the deep sea in the oligotrophic North Pacific gyre at Station ALOHA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **182**, 55–67.
- Shigemitsu, M., Watanabe, Y.W., Yamanaka, Y., Kawakami, H., and M.C. Honda (2010) : Relationship between sinking organic matter and minerals in the shallow zone of the Western Subarctic Pacific. *J. Oceanogr.*, **66**, 697–708.
- Shimada, C., Tanaka, Y., and Y. Tanimura (2006) : Seasonal variation in skeletal silicification of Neodenticula seminae, a marine planktonic diatom : Sediment trap experiments in the NW Pacific Ocean (1997–2001). *Mar. Micropal.*, **60**, 130–144.
- Shimada, C., Sato, T., Yamasaki, M., Hasegawa, S., and Y. Tanaka (2009) : Drastic change in the late Pliocene subarctic Pacific diatom community associated with the onset of the Northern Hemisphere Glaciation. *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.*, **279**, 207–215.
- 品田晃良・川尻敏文 (2005) : 2004 年秋に能取湖で大増殖した珪質鞭毛藻について. 北水試研報, **69**, 159–161.
- Smetacek, V., and U. Passow (1990) : Spring bloom initiation and Sverdrup's critical-depth model. *Limnol. Oceanogr.*, **35**, 228–234.
- Smol, J.P., and E.F. Stoermer (2010) : *The diatoms : Applications for the environmental and earth sciences, 2nd edition*. Cambridge University Press. 667pp.
- Stabeno, P.J., Schumacher, J.D., and K. Ohtani (1999) : The physical oceanography of the Bering Sea. In : Loughlin, T.R., Ohtani, K. (Eds.), *Dynamics of the Bering Sea*. University of Alaska Sea Grant AK-SG-99-03, Fairbanks, pp. 1–28.
- St. John K. (2008) : Cenozoic ice-rafting history of the central Arctic Ocean : Terrigenous sands on the Lomonosov Ridge. *Paleoceanogr.*, **23**, PA1S05.
- Stickley, C.E., Koç, N., Brumsack, H.-J., Jordan, R.W., and I. Suto (2008) : A siliceous microfossil view of middle Eocene Arctic paleoenvironments : A window of biosilica production and preservation. *Paleoceanogr.*, **23**, PA1S14.
- Stickley, C.E., St. John, K., Koç, N., Jordan, R.W., Passchier, S., Pearce, R.B., and L.E. Kearns (2009) : Evidence for middle Eocene Arctic sea ice from diatoms and ice-rafted debris. *Nature*, **460**, 376–379.
- Sugie, K., Kuma, K., Fujita, S., and T. Ikeda (2010) : Increase in Si : N drawdown ratio due to resting spore formation by spring-bloom forming diatoms under Fe- and N-limited conditions in the Oyashio region. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **382**, 108–116.
- Sverdrup, H.U. (1953) : On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *J. Cons. Cons. Int. Explor. Mer.*, **18**, 287–295.
- Takahashi, K. (1987) : Seasonal fluxes of silicoflagellates and *Actiniscus* in the Subarctic Pacific during 1982–1984. *J. Mar. Res.*, **45**, 397–425.
- Takahashi, K. (1994) : From modern flux to paleoflux : assessment from sinking assemblages to thanatocoenosis. *NATO ASI Ser.*, **117**, 413–424.
- Takahashi, K. (1995) : Opal particle flux in the subarctic Pacific and Bering Sea and sidocoenosis preservation hypothesis. In : Tsunogai, S., Iseki, K., Koike, I., Oba, T. (Eds.), *Global Fluxes of Carbon and its Related Substances in the Coastal Sea-Ocean-Atmosphere System, Proceedings of the 1994 Sapporo IGBP Symposium*. M and J International, Yokohama, Japan, pp. 458–466.
- Takahashi, K., Billings, J.D., and J.K. Morgan (1990) : Oceanic province : Assessment from the time-series diatom fluxes in the northeastern Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, **35**, 154–165.
- Takahashi, K., Fujitani, N., Yanada, M., and Y. Maita (2000) : Long-term biogenic particle fluxes in the Bering Sea and the central subarctic Pacific Ocean, 1990–1995. *Deep-Sea Res. I*, **47**, 1723–1759.
- Takahashi, K., Fujitani, N., and M. Yanada (2002) : Long term monitoring of particle fluxes in the Bering Sea and the central subarctic Pacific Ocean, 1990–2000. *Prog. Oceanogr.*, **55**, 95–112.
- 高橋孝三, 築田満, 小野寺丈尚太郎, 朝日博史, 兼松芳幸 (2007) : ベーリング海および北太平洋亜寒帯中部海域における長期時系列セディメントトラップ観測研究 (1990–2006). 月刊海洋, **39**, 80–87.
- Takahashi, K., Onodera, J., and K. Katsuki (2009) : Significant populations of seven-sided *Distephanus* (Silicoflagellata) in the sea-ice covered environment of the central Arctic Ocean, summer 2004. *Micropaleontol.*, **55**, 313–325.
- Takahashi, K., Asahi, H., Okazaki, Y., Onodera, J., Tsutsui, H., Ikenoue, T., Kanematsu, Y., Tanaka, S., and Iwasaki, S. (2012) : Museum archives of the 19 years long time-series sediment trap samples collected at central subarctic Pacific Station SA and Bering Sea Station AB during 1990–2010. *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth & Planet. Sci.*, **32**, 1–38.
- Tanaka, S. (2008) : *Vertical distribution and temporal flux changes of radiolarians corresponding to the environmental factors in the Bering Sea and the central subarctic Pacific*. Ph.D. Thesis, Kyushu University, 245pp.
- Tanimoto, M., Aizawa, C., and R.W. Jordan (2003) : Assemblages of living microplankton from the subarctic North Pacific and Bering Sea during July-August 1999. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, **244**, 83–103.
- Teraishi, A., Suto, I., Onodera, J., and K. Takahashi (in press) : Diatom, silicoflagellate and ebridian biostratigraphy and paleoceanography in IODP 323 Hole U1343E at the Bering slope site. *Deep-Sea Res. II*.
- Tsoy, I.B., and C.S. Wong (1999) : Diatom fluxes and preservation in the deep northwest Pacific Ocean. In : *Proceedings of the 14th International Diatom Symposium*, edited by S. Mayama, M. Idei, and I. Koizumi, Koenigstein, Koeltz Scientific Books, Germany, 523–549.
- Venrick, E.L. (1971) : Recurrent groups of diatom species in the North Pacific. *Ecology*, **52**, 614–625.
- Villareal, T.A., Brown, C.G., Brzezinski, M.A., Krause, J.W., and C. Wilson (2012) : Summer diatom blooms in the North Pacific Subtropical Gyre : 2008–2009. *PLoS One*, **7**, e33109. doi : 10.1371/journal.pone.0033109
- Waddell, L.M., and T.C. Moore (2008) : Salinity of the Eocene Arctic Ocean from oxygen isotope analysis of fish bone carbonate. *Paleoceanogr.*, **23**, 1–14, PA1S12.
- Yanagisawa, Y., and F. Akiba (1998) : Refined Neogene diatom biostratigraphy for the northwest Pacific around Japan, with an introduction of code numbers for selected diatom biohorizons. *J.*

Geol. Soc. Japan, **104**, 395–414.

Zernova, V.V., Nothig, E.-M., and V.P. Shevchenko (2000) : Vertical microalga flux in the Northern Laptev Sea (From the data collected by the yearlong sediment trap). *Oceanol.*, **40**, 801–808.

Sinking flux and paleoceanographic study of diatoms and silicoflagellates in the western North Pacific, Bering Sea, and the Arctic Ocean

Jonaotaro Onodera †

Abstract

The biogeographic characteristics and interannual variation of diatom and silicoflagellate floral fluxes are outlined in the western North Pacific, the Bering Sea, and the Arctic Ocean, based on the time-series sediment trap studies at Stations NAP10t, AB, SA, 50N, K2, KNOT, 40N, and S1. In this paper, two paleoceanographic studies are also introduced. In the paleoceanographic study in the Bering Sea for last 4 million years, long-term cooling trend were inferred from the assemblage secession of major diatoms and silicoflagellates. As the another paleoceanography topic, it was estimated by silicoflagellate fossils that the sea surface condition in the middle Eocene Arctic Ocean (ca. 45–50Ma) were relatively warm and isolated from other oceans such as the North Atlantic.

Key words: diatom, silicoflagellate, sinking flux, sediment trap, paleoceanography,

(Corresponding author's e-mail address: onoderaj@jamstec.go.jp)

(Received 1 December 2012; accepted 31 January 2013)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2013)

† Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Natsushima-cho 2-15, Yokosuka, 237-0061, Japan