

— 論文 —

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 *

小野寺 丈尚太郎[†]・高橋 孝三[‡]・大西 広二^{**}・築田 満^{**}

要 旨

珪藻沈降群集フラックスと海洋環境変動との対応関係を探るために、Station AB (ベーリング海) と Station SA (北太平洋北部中央亜寒帯) において、1990年8月から1999年1月上旬までに得られたセディメントトラップ試料を分析した。全珪藻フラックス変動の極大は、多くの年は両 Station ともに春と秋のどちらか年一回か、春と秋の年2回観察された。しかし、年によっては特異なフラックス変動が観測され、そのタイミングは Stations AB と SA で異なっていた。これらの経年変動は、おそらく冬季鉛直混合と、それに引き続く夏季成層構造の発達度合いとタイミングの違いが影響していると思われる。珪藻沈降群集の優占種は *Neodenticula seminae* で、8年間を通した平均優占率は AB で 80%、SA で 82% に達した。8年間を通して、珪藻沈降群集組成に若干の変化が両 Station で見られたが、これらの変動傾向が長期的な海洋環境変動と関係しているかどうかについては、9年目以降の試料分析を通して考察する必要がある。

キーワード：珪藻沈降群集フラックス、セディメントトラップ、Stations AB and SA、北太平洋亜寒帯、ベーリング海

1. はじめに

珪藻は、北太平洋亜寒帯海域における主要な珪質プランクトンの一つである (Aizawa *et al.*, 2005) が、沈降群集 (Sidocoenosis: Takahashi, 1995) においても、珪藻はもっとも重要な分類群である (Takahashi, 1991)。珪藻の生産と群集組成の変化は、物理・化学的かつ生物学的な海洋環境の変化と関係する (Smayda *et al.*,

2004) ことから、特に高緯度海域における古海洋環境復元研究においては生物環境指標としてよく用いられてきた (例えば Kanaya and Koizumi, 1966; Sancetta, 1982; Katsuki and Takahashi, 2005)。外洋域における珪藻沈降群集の時系列解析にとって、セディメントトラップ観測は有効な研究手段である。北太平洋亜寒帯における珪藻フラックスの研究は、1982年に Station PAPA において始まり (Takahashi, 1986)、最近では亜寒帯西部における成果が増えてきた (Tsoy and Wong, 1991; Onodera *et al.*, 2005; Shimada *et al.*, 2006)。そのなかで、北太平洋亜寒帯の北部中央域に位置する Station SA とアリューシャン海盆に位置する Station AB (Fig. 1) での沈降粒子は、この海域における継続期間最長の長期時系列のセディメントトラップ試料であ

* 2008年3月9日受領；2009年4月16日受理
著作権：日本海洋学会, 2009

[†] 高知大学海洋コア総合研究センター,
〒783-8502 南国市物部乙 200

主著者 e-mail address : jm-jo@kochi-u.ac.jp

[‡] 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門,
〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1

^{**} 北海道大学大学院水産科学研究院海洋生物資源科学部門,
〒041-8611 函館市港町 3-1-1

る (Takahashi *et al.*, 2000, 2002; 高橋ら, 2007)。この長期時系列試料の分析の結果, 有孔虫の沈降群集フラックスと海洋環境変動との間には一定の関係があることが示唆されており (Asahi and Takahashi, 2007, 2008), 珪藻についても同様の関係が期待された。Station AB および SA における珪藻フラックスのデータは, 1990 年夏から 1998 年春の試料まで確定しており, 1998 年夏から現在までの試料については未だ分析途中であった。1998 年春までの珪藻フラックスの概要については Takahashi *et al.*, (2000, 2002) で述べられている。しかし, より具体的な珪藻沈降群集フラックスの内容については栗原・高橋 (2002) による *Neodenticula seminae* のサイズ測定結果以外は, 基本的には未公表であった。そこで, 筆者らは, Stations AB および SA における 1990 年から 1998 年春までの珪藻フラックスと沈降群集についてまとめることと, それら珪藻沈降群集フラックスと海洋環境との対応関係を探ることを目的とした論文を国際誌に公表した (Onodera and Takahashi, 2009)。本論文は, 新たに 1998 年後半のデータをフルカバーした上で, Onodera and Takahashi (2009) の内容やデータを一部改訂したものである。

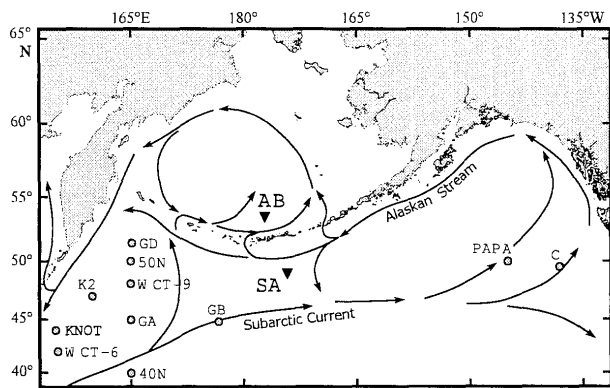


Fig. 1. The locations for the sediment trap stations occupied for diatom flux studies (▼: this study; ●: Other stations previously studied on diatom fluxes), and the schematic general surface circulation in the Subarctic Pacific (Harrison *et al.*, 2004).

2. 試料と方法

本研究で扱った 1990 年から 1998 年までの時系列沈降粒子試料は, 亜寒帯北部中央域の Station SA とベーリング海アリューシャン海盆の Station AB で得られた (Fig. 1)。本研究では, McLane Mark 7G-13 型のセディメントトラップが用いられた (Table 1)。セディメントトラップの設置, 回収, メンテナンスおよび再設置は, 北海道大学水産学部附属練習船「おしよる丸」によって毎年夏期に行われた。試料瓶に捕集された沈降粒子が直ちに固定されるように, 捕集に用いる試料瓶には四ホウ酸ナトリウムで pH 7.6 に調整されたグルタルアルデヒドが 3% 含まれる海水 (1994 年まで), または同様に調整されたホルマリン入りの海水 (1995 年以降) が, セディメントトラップの設置前に満たされた。回収された試料は, 1 mm メッシュの篩で Copepoda など大型のスイマーを取り除いた後, 回転式 1/4 スプリッターを用い珪藻粒子の含有量に応じて 1/1,024 から 1/16,384 まで分割した。分割した試料は, ゲルマン社製の野線付メンブレンフィルター (直径 47 mm, 孔径 0.45 μm) で濾過した。濾過面積は 540 mm^2 であった。濾過したフィルターは 50°C のオープンで一昼夜乾燥させた後, カナダバルサムを用いてプレパラートに封入された。珪藻種の同定には, 主に光学顕微鏡を用いた。ただし光学顕微鏡による種同定が困難な場合には, 走査型電子顕微鏡による確認を行った。珪藻殻の計数には光学顕微鏡を用いた。それぞれの種の殻サイズや種同定の難易度に応じて倍率 100, 200, 400 倍を用いた。計数時に観察したフィルター面積は, 100 倍でフィルター全面, 200 倍で 17 mm^2 , 400 倍で 2.3 mm^2 であった。珪藻殻は, 円形の種については殻の 2/3 以上と中心部を保存しているものを, 棒状の種については頂端部を残しているものについて計数をした。珪藻蓋殻 (valve) のカウント数は 1 試料につき 200 蓋殻以上とした。ただし, 珪藻含有量が非常に少なかった一部の試料は, カウント数が 100 殻に満たなかった。また, 沈降粒子の捕集量が極端に少ない試料は, 珪藻分析を行わなかった。*Chaetoceros* 属などの休眠胞子は, 栄養細胞殻のカウント方法と同様に, 1 休眠胞子を 2 valves としてカウントした。各倍率における計数結果から, 採

Table 1. Logistic summary of sediment trap experiments at Stations AB and SA during August 1990 through August 1998 in the Bering Sea and the central north Subarctic Pacific (Takahashi *et al.*, 2000, 2002).

Station	Coordinate	Water Depth (m)	Trap Depth (m)	Sampling Interval (days)	Sampled Duration	Type of Sediment Trap
AB	53.5°N, 177°W	3788	3200	15-57	7 Aug. 1990 - 21 Jan. 1999	McLane Mark 7G-13
SA	49°N, 174°W	5406	4800	12-57	9 Aug. 1990 - 21 Jan. 1999	McLane Mark 7G-13

集瓶の捕集期間における 1 日当たり 1 平方メートルを通過する珪藻殻数として、以下の式によって種別の珪藻フラックス ($\text{valves m}^{-2} \text{d}^{-1}$) が求められた。

$$\text{Diatom Flux} = \frac{N}{S} \frac{1}{D} \frac{S_1}{S_2} V$$

ただし、N: 珪藻殻の計数値 (valve), S: セディメントトラップ開口部の面積 (0.5 m^2), D: 捕集瓶の捕集期間 (day), S_1 : フィルター面積 (540 mm^2), S_2 : 計数面積 (100 倍: 540 mm^2 ; 200 倍: 17 mm^2 ; 400 倍: 2.3 mm^2), V: 分割値。

全珪藻殻フラックスは、得られた各倍率における各種の珪藻フラックス (休眠孢子フラックスを含む) を全て合計して求めた。なお、これまでの珪藻フラックスに関する報告以降、一部の種分類の見直しとカウントのやり直しを行った。そのため、以下に示す分類群の総数や各分類群の相対出現頻度の値が過去に公表した結果と若干異なっている。200 倍および 400 倍を用いる場合は全面カウントを行っていないため、極めて産出頻度が希少な小型種のフラックスデータは優占種のデータよりも大きな誤差を含む。

3. 結果

3.1. 全珪藻フラックス

Station AB における全珪藻フラックスの時系列変動は、1991 年、1995 年および 1997 年を除き、3 月下旬頃から 6 月までの約 3 か月間の春期に増加した (Fig. 4)。夏期以降の全珪藻フラックス変動パターンは年によって異なっていた。1991 年は春期の全珪藻フラックスの極大が夏期にみられ、1995 年と 1997 年は顕著な極大が観測されなかった。一方 Station SA における全珪藻フラックスの時系列変動をみると、フラックスの極大は、

Table 2. Annual means of total diatom fluxes and *Neodenticula seminae* at Stations AB and SA.

	Total Diatom Flux ($\times 10^6 \text{ valves m}^{-2} \text{d}^{-1}$)		<i>Neodenticula seminae</i> (%)	
	AB	SA	AB	SA
1990	33.2	10.9	82.0	86.7
1991	33.6	11.7	71.6	83.8
1992	63.5	25.1	73.3	82.8
1993	54.1	18.6	67.7	79.2
1994	52.6	52.3	86.2	86.8
1995	45.3	39.1	84.9	90.5
1996	90.1	24.9	87.9	86.6
1997	56.7	14.1	79.1	82.1
1998	33.9	40.5	81.4	73.4

1996 年と 1997 年を除き、晩冬から春期にかけての時期と秋期の年 2 回観測された。全珪藻フラックスの最大値は、1996 年 4 月に Station AB で観測された $292.2 \times 10^6 \text{ valves m}^{-2} \text{d}^{-1}$ であった。最低値は、1993 年 8 月に Station SA で観測された $0.16 \times 10^6 \text{ valves m}^{-2} \text{d}^{-1}$ であった。観測期間を通した全珪藻フラックスの平均値をみると、Station AB ($57.7 \times 10^6 \text{ valves m}^{-2} \text{d}^{-1}$) の方が Station SA ($30.6 \times 10^6 \text{ valves m}^{-2} \text{d}^{-1}$) よりも約 2 倍高かった。ただし、各年の平均全珪藻フラックスをみると、1994 年と 1995 年は Station AB と SA の間に大きな違いがなく、また、1998 年は Station SA の方が高かった (Table 2)。また、全珪藻フラックスの振幅は、観測期間を通してみると、Station AB のほうが SA よりも大きい。

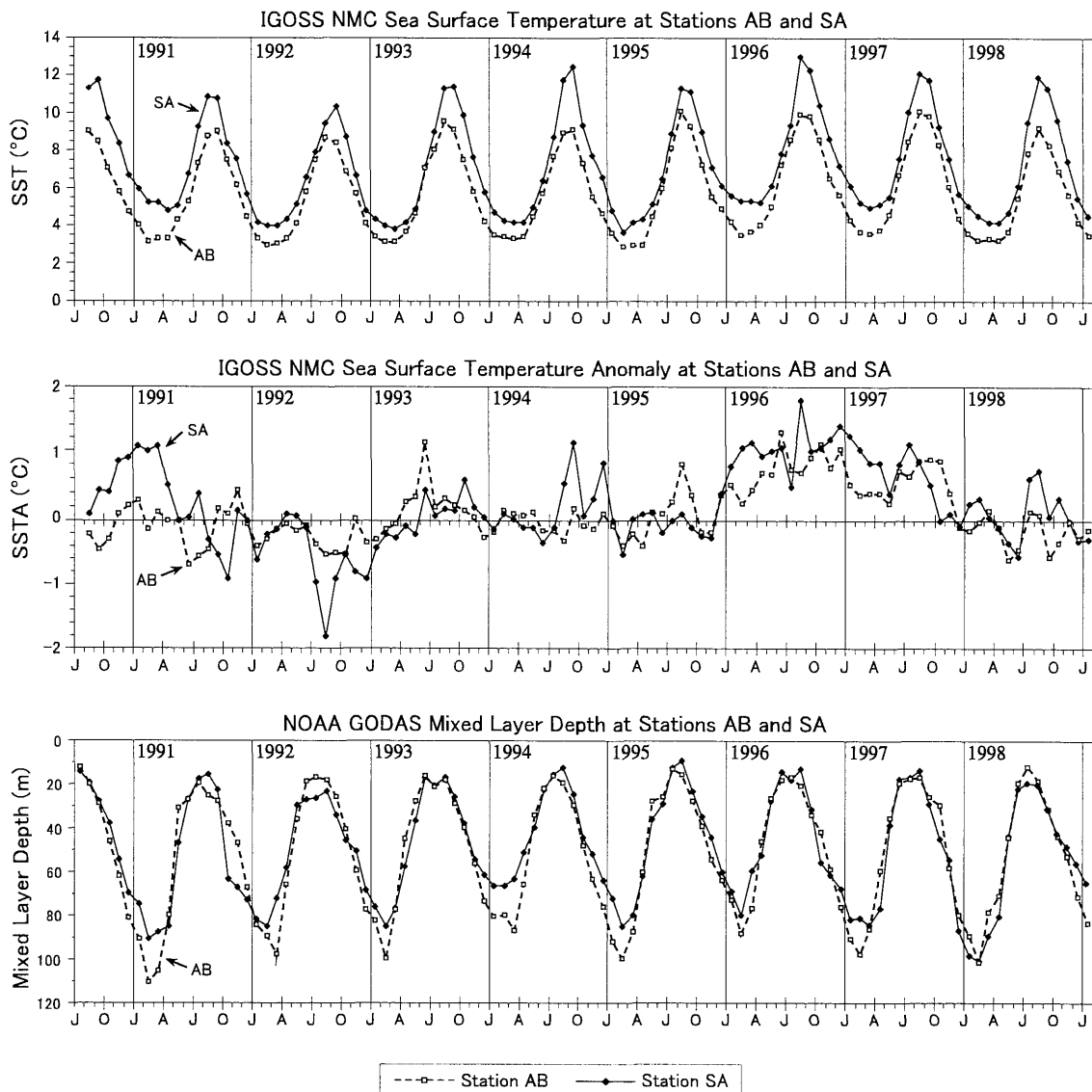


Fig. 2. The sea surface temperature (SST), the SST anomaly, and the mixed layer depth at Stations AB and SA during July 1990 throughout January 1999. Data are from IGOSS NMC (Reynolds *et al.*, 1994) and NOAA GODAS (Behringer and Xue, 2004).

3.2. 珪藻沈降群集組成

本試料で確認された珪藻は、Station AB で 51 taxa, SA で 40 taxa, 両 Station を併せると 52 taxa であった。そのうち、相対出現頻度の観測期間を通じた平均が 1%以上であった taxon は、両 Station の結果を併せて 10 taxa であった (Table 3)。Station AB および SA における珪藻沈降群集の優占種は、*Neodenticula seminae*

であった (Figs. 4 and 5)。*Neodenticula seminae* の相対出現頻度は観測期間を通して両 Station で高く、その平均値は Station AB において 79.6%, SA において 82.4% であった。ただし、Station AB における 1991 年から 1994 年にかけての春期または夏期の一時期については、*Chaetoceros* spp. 休眠孢子など他の種群が増加したため、*Neodenticula seminae* の占有率は Station SA における

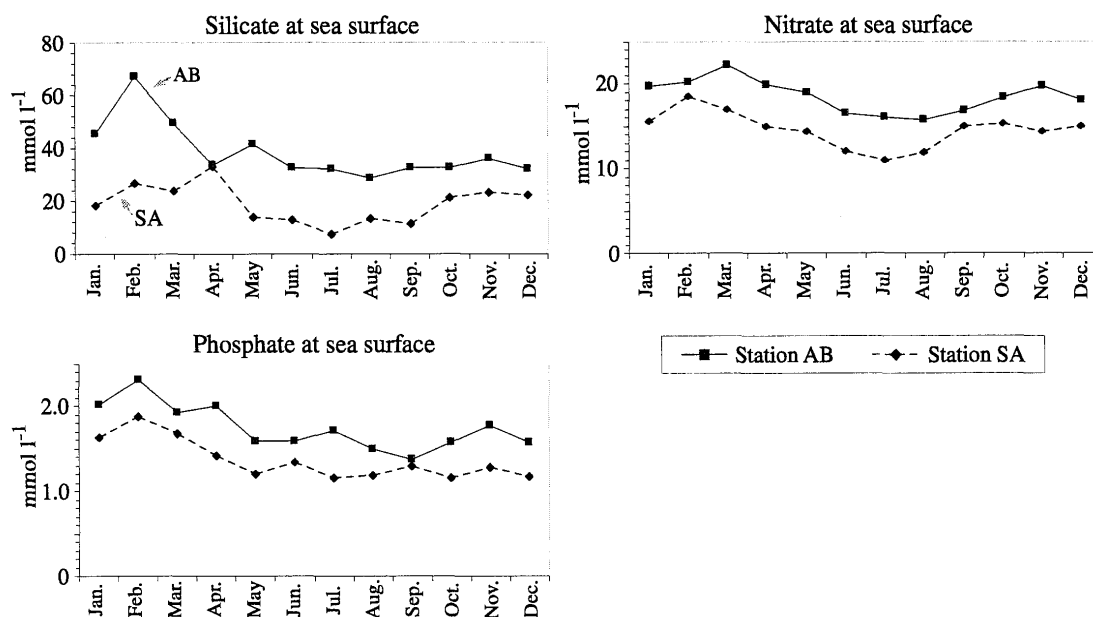


Fig. 3. The nutrient concentrations (mmol L^{-1}) at sea surface at Stations SA and AB: (a) Silicate; (b) Nitrate; (c) Phosphate. Data from World Ocean Atlas 2001 (Conkright, *et al.*, 2002).

Table 3. The major diatom taxa, which represented the mean relative abundance of greater than 1% in total diatoms at Stations AB and SA from 1990 through 1998.

Station AB	%	Station SA	%
<i>Neodenticula seminae</i>	78.3	<i>Neodenticula seminae</i>	82.4
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	3.5	<i>Thalassiosira oestrupii</i>	3.9
<i>Chaetoceros</i> Resting Spores	2.9	<i>Thalassiosira trifulta</i> Group	3.0
<i>Thalassiosira oestrupii</i>	2.1	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	2.8
<i>Thalassiosira trifulta</i> Group	2.0	<i>Thalassiosira lineata</i>	1.2
<i>Thalassiosira</i> spp.	1.6	<i>Actinocyclus curvatulus</i>	1.0
<i>Chaetoceros</i> spp. Vegetative Valves	1.4		
<i>Thalassiosira lineata</i>	1.1		
<i>Nitzschia</i> spp.	1.0		

結果と比べて有意に低かった。*Neodenticula seminae*に次いで出現頻度の高かった分類群は年によって多少異なるが、観測期間を通した平均値の場合、Station ABでは*Thalassionema nitzschioides* (観測期間平均 3.5%)、SAでは*Thalassiosira oestrupii* (3.9%)であった (Table 3)。

4. 考察

4.1. 沈降粒子フラックスと珪藻

北太平洋亜寒帯においては、一般的に沈降粒子に占める珪藻殻の寄与率が比較的高いことが知られている (Takahashi, 1987, 1991; Takahashi *et al.*, 2000, 2002;

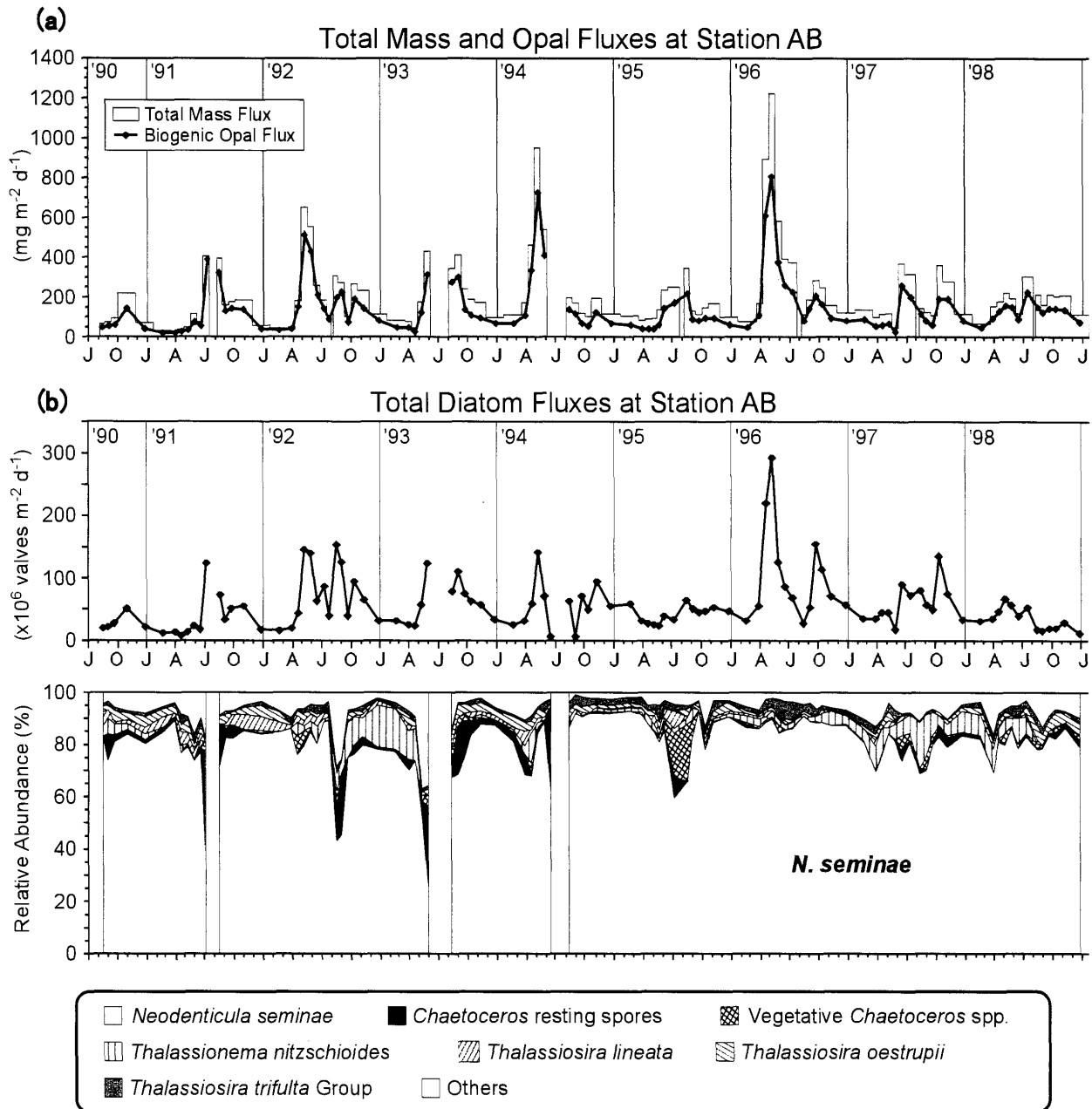


Fig. 4. Total mass, biogenic opal, and diatom floral fluxes at Station AB during August 1990 through January 1999: (a) Total mass and biogenic opal fluxes; (b) Total diatom fluxes and relative abundances of major diatoms.

Honda *et al.*, 2002; 小野寺ら, 2003; Onodera *et al.*, 2005)。Station AB および SA においても, 珪藻フラックスと全粒子束および生物源オパールフラックスは有意な正の相関関係 ($r = 0.81 \sim 0.85$, $p < 0.01$) にあり

(Table 4), 珪藻フラックスの変動が全粒子束や生物源オパールフラックスの変動に対して大きく寄与している (Takahashi *et al.*, 2000, 2002 in prep.)。従って, 珪藻沈降群集において常に高い優占度を示す *Neodenticula*

Table 4. The correlation coefficients between major diatom fluxes and total mass/major chemical component fluxes at Stations AB and SA. The underlined values represent the significant correlations ($p < 0.01$).

		Total Mass	Opal	CaCO ₃	Org. Carbon
Station AB	Total Diatoms	<u>0.85</u>	<u>0.83</u>	<u>0.56</u>	<u>0.83</u>
	<i>N.seminae</i>	<u>0.84</u>	<u>0.8</u>	<u>0.57</u>	<u>0.75</u>
	Resting Spores	0.22	<u>0.29</u>	0.13	<u>0.40</u>
Station SA	Total Diatoms	<u>0.83</u>	<u>0.81</u>	<u>0.50</u>	<u>0.68</u>
	<i>N.seminae</i>	<u>0.77</u>	<u>0.74</u>	<u>0.51</u>	<u>0.65</u>

seminae は、本研究海域における全粒子束、生物源オパール、および有機炭素フラックスにとって重要な種である。Strathman (1967) が示した海生植物プランクトンの細胞容積と 1 生細胞当たりの有機炭素含有量との関係式と、栗原・高橋 (2001) のデータに基づく *Neodenticula seminae* の殻サイズデータ ($N = 39,000$) の平均値を用いた単純計算では、Station AB では有機炭素フラックスの 53% が、SA では 39.8% が *Neodenticula seminae* で説明されることになる (Fig. 6)。実際は、沈降過程における分解などを考慮すると、より低い寄与率になるかもしれない。また、生物源オパールについては Reynolds (1986) の関係式から、Station AB では生物源オパールフラックスの 10% が、SA では 12% が *Neodenticula seminae* の寄与によると計算された (Fig. 6)。Alaskan Gyre に位置する Station PAPA の研究例の場合、生物源オパールフラックスは珪藻と放散虫による寄与が大部分を占めており、珪質鞭毛藻、渦鞭毛藻類 *Actiniscus* 属などの寄与は出現頻度を考慮すると圧倒的に低い (Takahashi 1991)。Reynolds (1986) の関係式から得られた *Neodenticula seminae* フラックスの生物源オパールフラックスに対する低い寄与率の主な原因は、(1) 珪藻だけでなく珪質骨格が大型かつ強壮な放散虫の寄与がオパールフラックスに対して重要であることと、(2) *Neodenticula seminae* の殻が通常の珪藻よりも複雑な構造を持つのに対して、Reynolds (1986) の関係式ではそれが反映されていないこと、(3) 本研究の方法では破片化した個体が見積もりに反映されていないことと思われる。

4.2. 珪藻沈降群集フラックスと海洋環境

4.2.1. 全珪藻フラックスの最高値について

約 8 年間の観測記録の中で、Station AB の 1996 年 4 月および Station SA の 1998 年 4 月は、それぞれの Station における全珪藻フラックスの最高値を記録した月である。Station AB における 1996 年 4 月は、全粒子束やオパールフラックスの観測期間における最大値が記録されたときでもある。全粒子束やオパールフラックスの分析は 2006 年の試料まで終了しているが (高橋ら, 2007; Takahashi *et al.* in prep.), これによると、Station AB における 1996 年 4 月のピークは数年に一度の割合で観測されるフラックス極大の一つであると考えられる。本研究の 8 年間における観測のなかで、1996 年 4 月の Station AB における珪藻フラックスの極大は、群集組成に大きな変化が見られないので沿岸種のフラックスだけでなく *Neodenticula seminae* フラックスの増加も原因である。このとき、有孔虫フラックス (Asahi and Takahashi, 2007) や放散虫フラックス (Tanaka and Takahashi, in prep.) は例年と比べて目立った増加をしていないことから、全沈降粒子束に対する珪藻の貢献は通常より大きかったと思われる。

一方、Station SA における 1998 年 4 月の全珪藻フラックスピークには、*Neodenticula seminae* に加えて *Thalassionema nitzschioides* や *Thalassiosira* 属、*Coccolithus* 属が顕著に増加した。この Station SA における 1998 年春のピークは、全珪藻フラックスについては 1994 年秋の極大とも比較的近い値である (Fig. 5)。しかし、2006 年までの 16 年間にわたる試料の分析が終

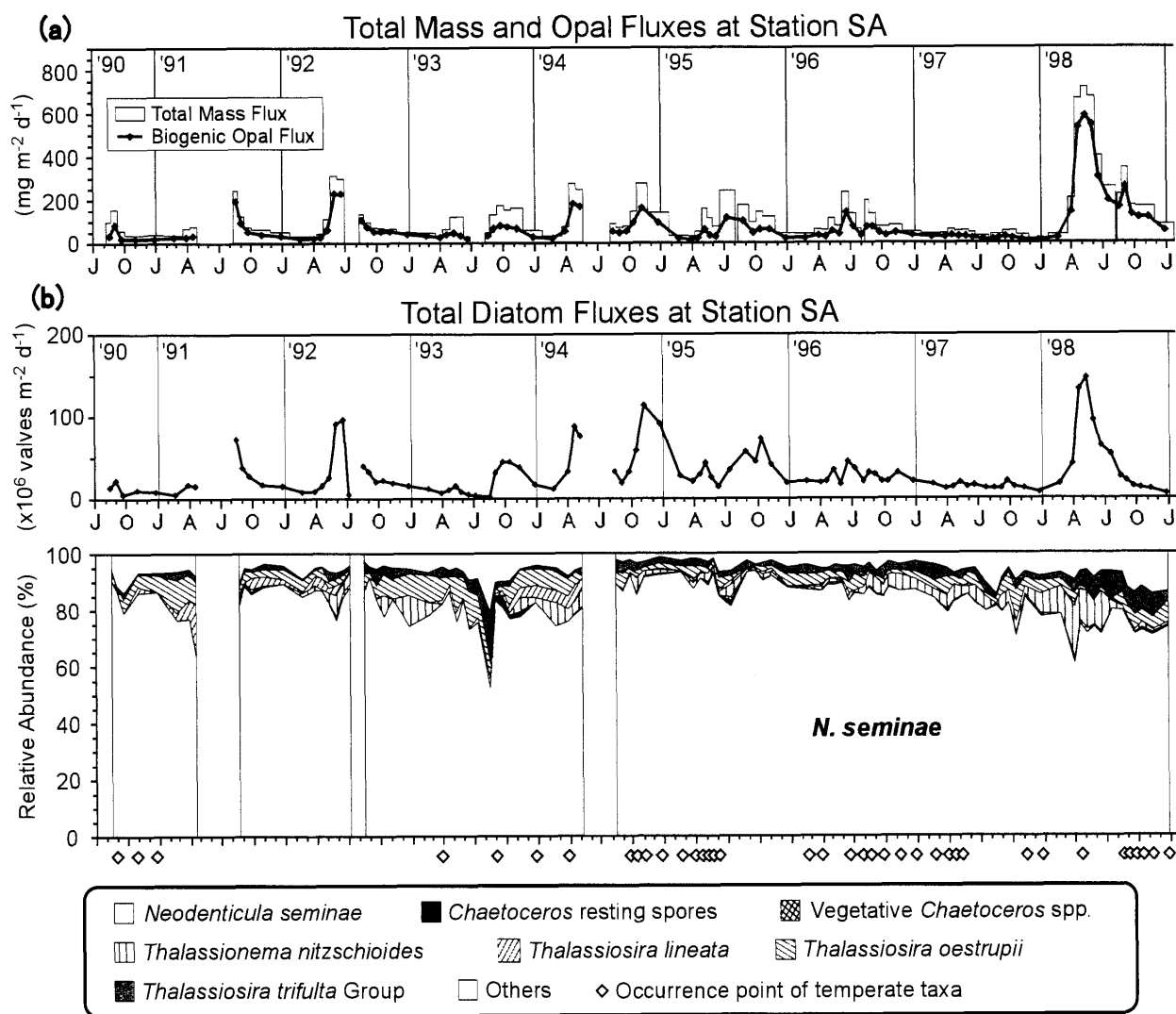


Fig. 5. Total mass, biogenic opal, and diatom floral fluxes at Station SA during August 1990 through January 1999: (a) Total mass and biogenic opal fluxes; (b) Total diatom fluxes, relative abundances of major diatoms, and occurrence points of temperate water species.

了している全粒子束やオパールデータをみると、1998年春は顕著な最大値を示しており、1998年春のStation SAの海洋環境が特異なものであったことが示唆されている(朝日ら, 2007; 高橋ら, 2007; Takahashi *et al.*, in prep.). 1998年春期は、全放散虫フラックスの最高値が観測された時でもある(高橋ら, 2007; Tanaka and Takahashi, in prep.). その特異な全粒子束および生物源オパールフラックスのピークは、小型($< 63 \mu\text{m}$)の放散虫が大きく寄与した可能性が高い(高橋ら, 2007;

Takahashi *et al.*, in prep.). ところで、この1998年4月に観測された全珪藻フラックスピークは、Station ABにおける全珪藻フラックスの時系列変動と比較すると、特別に高い値ではない(Figs. 4 and 5)。西部亜寒帯(165°E)では1998年春に1997年よりも表層の基礎生産が増加しており、その主な原因として1997/1998年冬における冬季鉛直混合が例年よりも強力だったことと、その後の水塊構造が安定していたことが示唆されている(Sasaoka *et al.*, 2002)。同様に Station SA

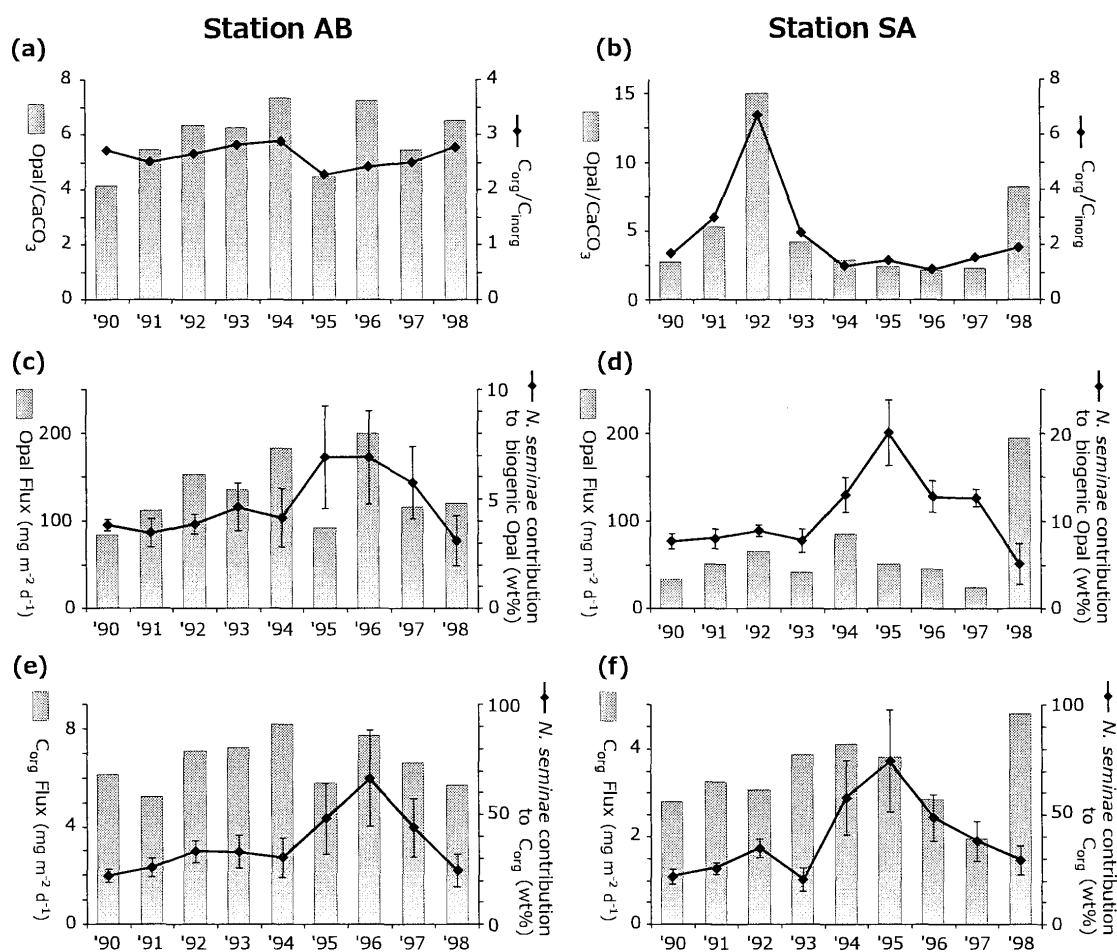


Fig. 6. The relationships in annual mean fluxes of diatoms and chemical components at Stations AB (Fig. 6a, c, e) and SA (Fig. 6b, d, f). (a) and (b): Opal/CaCO₃ and organic carbon/inorganic carbon ratios; (c) and (d): biogenic opal flux and contribution of *Neodenticula seminae* to biogenic opal flux; (e) and (f): total organic carbon flux and the contribution of *Neodenticula seminae* to organic carbon flux.

においても 1998 年春は珪藻などによる基礎生産がより活発であったことが予想される。1997/1998 年冬の Station SA における鉛直混合は約 100 m 水深近くまで達していたと予想され、その混合層厚は Station AB において見積もられる例年の冬季鉛直混合層厚に似ている (Fig. 2)。垂表層から例年以上に豊富に供給された栄養塩と鉛直混合の春の終息に伴って、例年よりも高い春季の珪藻生産と高珪藻フラックスが観測されたと考えられる。Station SA における 1994 年の全珪藻フラックスピークや Station AB における 1996 年 4 月の全珪藻フラックスピークでは、放散虫フラックスの顕著な増加が観測されなかったが、Station SA における

1998 年春の全珪藻フラックスピークについては、小型放散虫の急増に繋がる低次生物生産とも何らかの関係があった可能性がある。

4.2.2. 海洋環境変動と珪藻沈降群集フラックスとの関係

Asahi and Takahashi (2007, 2008) および朝日ら (2007) は、Station SA における生物源沈降粒子フラックス変動が Pacific Decadal Oscillation (Mantua *et al.*, 1997) と有意な関係にあることを示唆した。Station SA において珪藻沈降群集フラックスの年平均値と Pacific

Decadal Oscillation Index (以下 PDOI) の年平均値を比べると、1992 年以降は逆相関の関係にある (Fig. 7)。PDOI が正のときに Station SA の全珪藻フラックスが低下したのは、アリューシャン低気圧の発達によって表層水温の低下と表層水塊構造の安定が弱められたためではないかと考えられる。朝日ら (2007) は、Station SA において PDOI が負の時期 (1990, 1994, 1998–2001) に Subarctic Current の影響が増し、PDOI が正の時期には Alaskan Stream の影響が増した可能性を指摘した。このことは、1989–2002 年の PDOI の負の時期に、アリューシャン列島南部で西から東への風がそれ以前に比べて卓越していたこと (Bond *et al.*, 2003) とも共通している。しかしながら、これについて、PDOI が負の時期の Subarctic Current の影響強化については、Station SA における珪藻沈降群集では明瞭な変化が見られなかった。一方、PDOI が正の時期の Alaskan Stream の影響については、極僅かな出現頻度ながら温帯種の *Asteromphalus heptactis* と *Fragilariopsis doliolus* の同時期の出現と増加に反映された可能性がある (Fig. 5)。これらの種が Station SA で確認された時期には、通常より温暖な SST anomaly が記録されており (Fig. 2)、このことも Alaskan Stream の影響を示唆するかもしれない。これらの種は、分布の中心が比較的暖かい海域にあり (Hasle and Syvertsen, 1996)、特に *Fragilariopsis doliolus* の北部亜寒帯における産出は少なくとも中央域と西側では稀である。Semina (2003) の珪藻群集の生物地理区分によると、Station SA は “Arcto-Boreal Region” に位置するが、“Mixing Zone of Arcto-Boreal and Tropical Species” との境界に近い。1998 年夏以降の試料も併せて分析することで、Station SA における Alaskan Stream の影響と Subarctic Current の影響の度合い、または表層水温変動と珪藻沈降群集の組成変動との関係について、より詳しい検討が可能になると期待される。

Station AB では、全珪藻フラックスと PDOI の関係は見られなかった ($r = 0.20$)。これは、沿岸性珪藻フラックスは、1990 年と 1991 年を除き PDOI と正相関を示した ($r = 0.81$, $p = 0.05$) のに対して、沈降群集の大半を占める外洋性珪藻のフラックスは無相関であった ($r = 0.07$) ためである。Station AB の外洋性珪藻

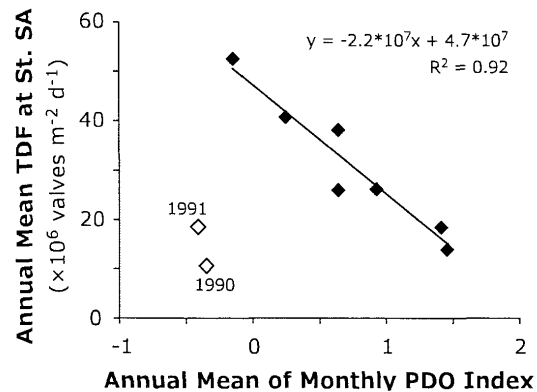


Fig. 7. The relationship between the annual means of total diatom fluxes and PDOI at Station SA. The data of 1990 and 1991 are the outliers (white rhomboids) due to the limited sampled period (no samples during the spring flux maximum).

が PDOI と無相関であった理由は定かでない。ところで、鉛直混合層厚と珪藻フラックスとの関係を探ると、Station AB における鉛直混合層厚の前年 11 月から 10 月までの平均は、前年 12 月から 11 月までの全珪藻の累積フラックスに対して逆相関を示した (Fig. 8a)。全珪藻の累積フラックスの期間が混合層厚平均の期間から 1 か月遅くずれているのは、混合層からトラップ深度までの粒子の沈降時間を考慮したためである。同様に Station SA では、1998 年のデータを除き、鉛直混合層厚の前年 12 月から 11 月までの平均が、1 月後半から翌年 1 月前半までの全珪藻の累積フラックスと逆相関の関係にあった (Fig. 8b)。これは、冬季鉛直混合については十分に発達して亜表層から栄養塩が豊富にもたらされなければならないが、一方で基礎生産の活発な時期に成層構造の発達が不十分だと、外洋性珪藻を主体とする研究海域の珪藻生産力が通常よりも低下する可能性を示していると考えられる (Margalef, 1978; Sasaoka *et al.*, 2002)。外洋性珪藻は一般に沿岸性珪藻に比べて増殖速度が遅いため、水塊の擾乱に対する適応力は沿岸性の浮遊性珪藻のほうが外洋性の浮遊性珪藻よりもあると考えられる (Margalef, 1978)。外洋性珪藻/沿岸性珪藻の比は、1992 年から 97 年にかけて PDOI が正の値のときほど小さくなる傾向がみられた (AB: $r = -0.94$; SA: $r = -0.86$)。これらの比較から、

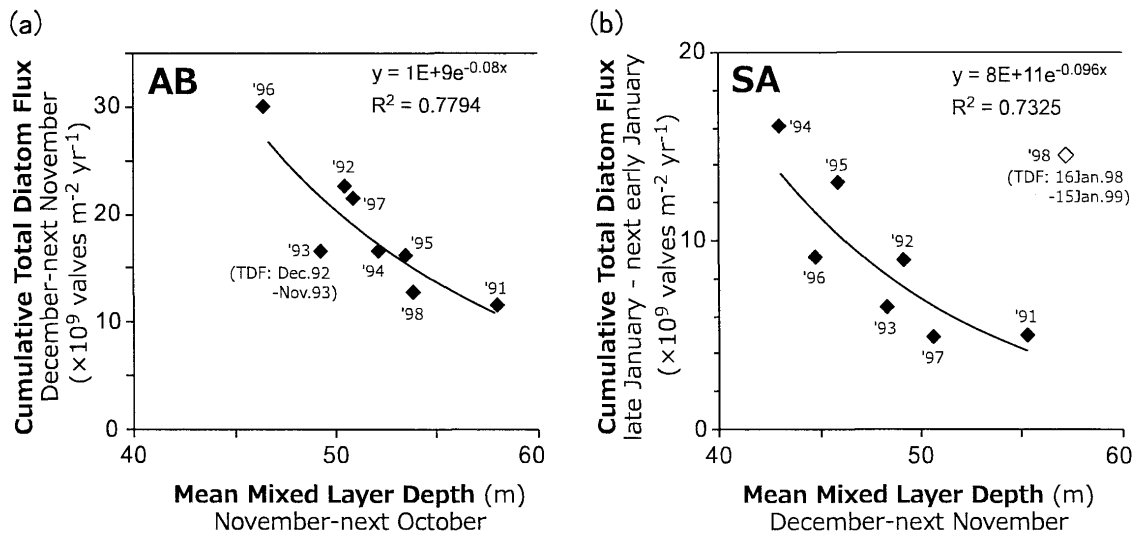


Fig. 8. The relationships between the mixed layer depth and the total diatom flux at Stations AB and SA. The data in 1990 (Aug.–Nov.) is not plotted because of their limited sampled period. The correlation coefficient and the regression curve at Station SA do not include the data in 1998 due to the unusual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

Station AB および SA では上部水塊構造の安定度と珪藻生産が重要な関係にあることが示唆される。しかし、珪藻沈降群集フラックスと PDOI や混合層厚との関係については、まだ不明な点が多い。例えば、これら逆相関の有意な相関係数は、Station AB では鉛直混合層厚平均が 11 月から始まる 12 か月間で見られるのに対し、SA では 1 か月遅い 12 月から始まる 12 か月間にみられる。Station AB と SA において 1 か月の“ずれ”が生じる理由は現時点では不明である。また年ごとの数値で議論する場合、本研究のデータ数は未だ不足であり、今後 1999 年以降の試料解析の結果も併せて考察していく必要がある。

4.2.3. 観測期間中で増減した分類群

1990 年から 1994 年までの平均フラックスデータと 1995 年から 1998 年までの平均フラックスデータを比較すると、いくつかの分類群について、前半と比べて後半に半減以下まで減少または 2 倍以上増加したものがあつた。Station AB では、*Chaetoceros* spp. 休眠胞子、*Thalassiosira nordenskiöldii*、*Odontella au-*

rita などのフラックスが観測期間の後半に減少した。逆に AB において後半に平均フラックスが倍以上に増加した分類群は、*Chaetoceros radicans*、*Chaetoceros decipiens*、*Rhizosolenia hebatata* f. *semispina*、*Coscinodiscus marginatus*、*Coscinodiscus oculus-iridis*、*Proboscia eumorpha*、*Proboscia subarctica*、*Asteromphalus heptactis* などである。また、*Chaetoceros* 属 (subgenus *Hyalochaete*) の栄養細胞殻フラックスと全休眠胞子フラックスの比は後半に大幅に増加したことから、特に夏期の栄養塩濃度のバランスが観測期間の前半と後半とで異なっていたと考えられる。また、観測期間後半は、東部亜寒帯の北部よりも南部で比較的良好に見られる種群 (Venrick, 1971, temperate taxa in Onodera and Takahashi, 2009) のフラックスが僅かに増加したように見える (Mean of 1990–1994: 3.0×10^3 valves $m^{-2} d^{-1}$ ($< 0.01\%$); 1995–1998: 7.8×10^3 valves $m^{-2} d^{-1}$ (0.02%)。これは、1996 年から 1997 年にかけては SST anomaly が高かったことと関係すると思われる (Fig. 2)。

同様に Station SA においてフラックスが前半よりも減少した主な分類群は、*Thalassiosira lineata*、*Chaeto-*

ceros spp. 休眠孢子, *Asteromphalus robustus*, *Proboscia alata*, *Rhizosolenia styliformis* などであった。逆に前半よりもフラックスが増加した分類群は, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiosira trifulta* Group, *Chaetoceros* 属 (subgenus *Chaetoceros* ex *Phaeoceros*), *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Rhizosolenia hebetata* f. *semispina*, *Thalassiosira punctigera* などであった。Station SA においては観測期間の後半に, 休眠孢子フラックスが減って外洋種フラックスも沿岸種フラックスも期間前半より増加していたことから, Station AB の場合と同様に, 栄養塩濃度のバランスが観測期間の前半と若干異なっていたと考えられる。

4.3. 全珪藻フラックスの Station AB と SA との違い

全珪藻フラックスが Station SA より AB で高いこと, 沈降群集の種数が AB で多いことは, 両 Station の地理的な違いによる。沿岸や湧昇域に多く見られる珪藻種について, それらの Station SA における相対出現頻度は, 主にアラスカ海流と亜寒帯海流の影響を受けるために Station AB よりも少ない。その代わり, Station SA を含む北部亜寒帯海域における珪藻の生群集では, *Fragilariopsis pseudonana* という小型種が約 50~70% の相対出現頻度で優占する (久道・高橋, 1994; Aizawa *et al.*, 2005)。Station AB および SA 間の全珪藻フラックスに見られる大きな差は, 生群集の現存量にはみられない。むしろ, 珪藻生群集の現存量は Station SA のほうが若干高いこともある (Aizawa *et al.*, 2005)。*Fragilariopsis pseudonana* は, 光学顕微鏡では観察が難しいほど小型であり, 大きな群体を構成しない。したがって, その殻は選択的溶解作用 (例えば Takahashi, 1994; 鎌谷・武田, 2007) などによって深層まで沈降することなく分解され, 珪質プランクトン殻の再生産に利用されていると考えられる (Treguer, 2002; Aizawa *et al.*, 2005)。本種は, 本研究で扱った沈降粒子試料には走査型電子顕微鏡を用いても確認できなかった。そのため, 本研究試料で扱った沈降群集や研究海域の化石群集の優占種は *Fragilariopsis pseudonana* ではなく, 生群集において多産する本種のような選択的に溶解・破壊されやすい分類群の次に優占する *Neodenticula seminae* となる。し

たがって, Station SA の全珪藻フラックスが AB の約半数のレベルである理由には, *Fragilariopsis pseudonana* 殻の損失による影響も大きいと思われる。*Neodenticula seminae* の殻は比較的小型であるが群体を構成するため, 本研究試料の沈降粒子にも群体のまま観察されることが多い。*Neodenticula seminae* の沈降群集および化石群集における優占は, 北太平洋亜寒帯におけるこれまでの研究例でも示されており (Sancetta, 1982; Takahashi, 1986; Tsoy and Wong, 1999; Takahashi *et al.*, 2000, 2002; Katsuki and Takahashi, 2005; Onodera *et al.*, 2005; Shimada *et al.*, 2006), 前述のような珪藻殻の溶解過程や沈降輸送過程を知る上でも重要な特徴である。また, Station SA は AB よりも捕食圧が高い傾向も指摘されている (Hashimoto *et al.*, 1998)。これらの違いから, 珪藻殻の沈降粒子束にたいする影響は, Station AB のほうが SA よりも大きいように思われる。

4.4. *Chaetoceros* spp. 休眠孢子

Station AB において SA よりも多く出現した *Chaetoceros* spp. 休眠孢子は, 一般的に湧昇域や大陸棚などの比較的栄養塩の豊富な海域に見られ, 栄養塩濃度のバランスが *Chaetoceros* 属の生育に適さなくなった際 (とくに夏期) に多く形成される (例えば McQuoid and Hobson, 1996)。Station AB で休眠孢子が多く観測されるのは夏期であり (Fig. 4), したがって *Neodenticula seminae* の場合と違って全粒束との有意な相関関係も見られない (Table 4)。ベーリング海において *Chaetoceros* 属の休眠孢子が多いのは, ベーリング海南東部, アリューシャン列島沿いである (Karohji, 1972; Kawarada, 1978; Sancetta, 1982; Aizawa *et al.*, 2005; Katsuki and Takahashi, 2005)。Station AB において休眠孢子的割合が SA よりも高い原因として, Station AB の有光層における栄養塩濃度が Station SA より高いこと (Fig. 3), 現地性だけでなく Aleutian 列島沿いに豊富に出現する *Chaetoceros* spp. が, 北太平洋からベーリング海へ流入する海流に乗って運ばれてくる可能性の 2 点が考えられる。Station SA における *Chaetoceros* spp. 休眠孢子的産出は, 生群集では確認されなかった (Katsuki *et al.*, 2003)。しかし, Station SA の沈降

群集では数年に一度程度の頻度で、特に観測期間前半に休眠孢子が僅かに確認されている。高橋ら (1996) や Takahashi *et al.* (2002) によると、Station SA の沈降群集に産出する休眠孢子は、Aleutian 列島またはアラスカ半島南東部から流されてきたものである。前述のように *Chaetoceros* spp. 休眠孢子的相対出現頻度は、Station AB および SA とともに観測期間の前半で高く後半で低い傾向にあり (Figs. 4 and 5), 珪酸塩, 硝酸塩, およびリン酸塩などの栄養塩供給量や各種栄養塩濃度のバランスに違いがあった可能性も考えられる。

謝 辞

本研究の継続したセディメントトラップ観測は、北海道大学水産学部および同学部附属練習船「おしよる丸」の船長、士官、船員、乗船研究者の長年の協力によるものである。この珪藻フラックスデータの大部分は、高橋 孝三研究室卒業生の久道 研一氏の修士研究 (1994 MS) と石川 真由氏の卒業研究 (1998 MS) によって得られた。原稿改訂にあたり 2 名の査読を頂いた。以上の皆様にお礼を申し上げます。本研究は、文部科学省科研費基盤研究 (B1)13440152; 日本学術振興会科研費基盤研究 (B)1731009; 基盤研究 (B-2)15310001 の助成を受けた。

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.
- Asahi, H. and K. Takahashi (2007): A 9-year time-series of planktonic foraminifer fluxes and environmental change in the Bering sea and the central subarctic Pacific Ocean, 1990-1999. *Prog. Oceanogr.*, **72**, 343-363.
- Asahi, H. and K. Takahashi (2008): A new insight into oceanography with multivariate and time-series analyses on the 1990-1999 planktonic foraminifer fluxes in the Bering Sea and the central subarctic Pacific. *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth & Planet. Sci.*, **37**, 73-96.
- 朝日 博史, 高橋 孝三, 梁田 満 (2007): ベーリング海および北太平洋における長期時系列沈降粒子束変動の季節、経年周期性と気候変動との相互関係. 月刊海洋, **39**, 88-96.
- Behringer, D. W. and Y. Xue (2004): Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean. *Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, AMS 84th Annual Meeting, Washington State Convention and Trade Center, Seattle, Washington*, 11-15. (WWW Data Site: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.GODAS/>)
- Bond, N. A., Overland, J. E., Spillane, M., and P. Stabeno (2003): Recent shifts in the state of the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2,183, doi:10.1029/2003GL018597.
- Conkright, M. E., Locarnini, R. A., Garcia, H. E., O'Brien, T. D., Boyer, T. P., Stephens, C., and J. I. Antonov (2002): World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 17 pp. www page: <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NODC/.WOA01/>.
- Harrison, P.J., Whitney, F.A., Tsuda, A., Saito, H., and K. Tadokoro (2004): Nutrient and plankton dynamics in the NE and NW gyres of the Subarctic Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, **60**, 93-117.
- Hashimoto, S., Maita, M., Yanada, M., and K. Takahashi (1998): Annual and seasonal variations of amino acid and hexosamine fluxes in the deep Bering Sea and the deep central Subarctic Pacific. *Deep-Sea Res. I*, **45**, 1,029-1,051.
- Hasle, G. R. and E. E. Syvertsen (1996): Marine diatoms, p. 5-385. In *Identifying Marine Phytoplankton*, edited by C. R. Tomas, Academic Press.
- 久道 研一, 高橋 孝三 (1994): 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**, 5,595-5,625.
- 鎌谷 明善, 武田 重信 (2007): 生物ケイ酸の溶解度と溶解速度について. 海の研究, **16**, 471-512.
- Kanaya, T. and I. Koizumi (1966): Interpretation of diatom thanatocoenosis from the North Pacific applied to a study of Core V20-130. *Sci. Rep., Tohoku Univ., 2nd Ser., Geol.*, **37**, 89-130.
- Karohji, K. (1972): Regional distribution of phytoplankton in the Bering Sea and western and northern subarctic regions of the North Pacific Ocean in summer,

- p. 99–115. In *Biological oceanography of the northern North Pacific Ocean*, edited by A. Y. Takenouchi, Idemitsu Shoten, Tokyo.
- 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., and M. Okada (2003): Diatom assemblage and productivity changes during the last 340,000 years in the subarctic Pacific. *J. Oceanogr.*, **59**, 695–707.
- Kawarada, Y. (1978): A contribution of microplankton observations to the hydrography of the northern North Pacific and adjacent seas—II Plankton diatoms in the Bering Sea in the summer of 1955. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **14**, 62–71.
- 栗原 真基, 高橋 孝三 (2002): *Neodenticula seminae* 細胞殻サイズの長期時系列変動と生活史パターン: 北太平洋亜寒帯およびベーリング海における観測. 日本プランクトン学会報, **49**, 77–87.
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., and R. C. Francis (1997): A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**, pp. 1,069–1,079. (Website of PDO index Year-Month Data Table: <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>)
- Margalef, R. (1978): Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanol. Acta*, **1**, 493–509.
- McQuoid, M. R. and L. A. Hobson (1996): Diatom resting stages. *Jour. Phycol.*, **32**, 889–902.
- 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 (2009): Long-term diatom fluxes in response to oceanographic conditions at Stations AB and SA in the central subarctic Pacific and the Bering Sea, 1990–1998. *Deep-Sea Res. I*, **56**, 189–211.
- Onodera, J., Takahashi, K., and M. C. Honda (2005): Pelagic and coastal diatom fluxes and the environmental changes in the northwestern North Pacific during December 1997–May 2000. *Deep-Sea Res. II*, **52**, 2,218–2,239.
- Reynolds, C. S. (1986): Diatoms and the geochemical cycling of silicon, p. 269–290. In: *Biom mineralization in lower plants and animals*, edited by Leadbeater, B. S. C. and R. Riding, Clarendon Press, Oxford.
- Reynolds, R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C., and W. Wang (2002): An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, **15**, 1,609–1,625. www page: http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/.nmc/.Reyn_SmithOiv2/.
- Sancetta, C. (1982): Distribution of diatom species in surface sediments of the Bering and Okhotsk seas. *Micropaleontology*, **28**, 221–257.
- 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**, 5,557–5,576.
- Semina, H. J. (2003): SEM-studied diatoms of different regions of the world ocean. *Iconogr. Diatomol.*, **10**, 1–363.
- 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). *Marine Micropal.*, **60**, 130–144.
- Smayda, T. J., Borkman, D. G., Beaugrand, G., and A. Belgrano (2004): Responses of marine phytoplankton populations to fluctuations in marine climate, p. 49–58. In *Marine Ecosystems and Climate Variation*, edited by Stenseth, N. C. and G. Ottersen, Oxford University Press, New York.
- Strathmann, R. R. (1967): Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. *Limnol. Oceanogr.*, **12**, 411–418.
- Takahashi, K. (1986): Seasonal fluxes of pelagic diatoms in the subarctic Pacific, 1982–1983. *Deep-Sea Res.*, **33**, 1,225–1,251.
- Takahashi, K. (1987): Response of Subarctic Pacific diatom fluxes to the 1982–1983 El Niño disturbance. *J. Geophysic. Res.*, **92**, 14,387–14,392.
- Takahashi, K. (1991): Mineral flux and biogeochemical cycles of marine planktonic protozoa, p. 347–360. In *Protozoa and Their Role in Marine Process*, edited by Reid, P. C., Turley, C. M., and P. H. Burkil, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Takahashi, K. (1994): From Modern Flux to Paleoflux: Assessment from sinking assemblages to thanatocoenosis. *NATO ASI Series, I* **17**, 413–424.
- Takahashi, K. (1995): Opal particle flux in the subarctic Pacific and Bering Sea and sidocoenosis preservation hypothesis, p. 458–466. In: *Global Fluxes of Carbon and its Related Substances in the Coastal Sea-Ocean-Atmosphere System, Proceedings of the 1994 Sapporo IGBP Symposium*, edited by Tsunogai, S., Iseki, K., Koike, I., and T. Oba, M and J. International, Yokohama, Japan.
- 高橋 孝三, 久道 研一, 築田 満・米田 義昭 (1996): 海洋植物プランクトン生産性の季節変動—セディメント・トラップ実験より. 月刊海洋, 号外, **10**, 109–115.

- 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)-現状と今後の展望-. 月刊海洋, **39**, 80-87.
- 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**, 1,723-1,759.
- 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.
- Treguer, P. (2002): Silica and the cycle of carbon in the ocean. *C. R. Geosciences*, **334**, 3-11.
- Tsoy, I. B. and C. S. Wong (1999): Diatom fluxes and preservation in the deep northwest Pacific Ocean, p. 523-549. In: *Proceedings of the 14th International Diatom Symposium*, edited by Mayama, S., Idei, M., and I. Koizumi, Koeltz Scientific Books, Germany.
- Venrick, E. L. (1971): Recurrent groups of diatom species in the North Pacific. *Ecology*, **52**, 614-625.

Diatom floral fluxes at Stations AB and SA in the Bering Sea and the northern Subarctic Pacific, 1990–1998

Jonaotaro Onodera[†], Kozo Takahashi[‡], Hiroji Onishi^{**}, and Mitsuru Yanada^{**}

Abstract

In order to decipher the relationship between the changes in diatom floral fluxes and the oceanographic conditions, we've deployed sediment traps at Stations AB (the Aleutian Basin) and SA (the central subarctic Pacific) from August of 1990 to the present. For the first eight years, we've conducted a diatom flux study. Total diatom fluxes (TDF) at both stations usually showed spring and/or fall peaks in a year. However, significant interannual variations of TDF were observed at both stations. At Station SA, significant correlation coefficient was obtained between mean TDF of each year and Pacific Decadal Oscillation index. These interannual variations are possibly due to the differences in the strength and timing of winter mixing and the subsequent summer stratification. The dominant species at both stations was *Neodenticula seminae* with mean abundances of 80% (Station AB) and 82% (Station SA) of TDF throughout the sampled duration. Coastal species were more abundant at Station AB than Station SA. At Station SA, relatively small numbers of *Chaetoceros* resting spores occurred in summers of some years as the result of lateral advection from the Aleutian Islands. During the eight years, the slight changes of diatom sinking flora were observed at both stations. Whether or not these trends suggest the changes in oceanographic condition for long-term, a further observation is warranted and to be continued.

Key words: Diatom floral flux, Sediment trap, Bering Sea, Northern central subarctic Pacific

(Corresponding author's e-mail address: jm-jo@kochi-u.ac.jp)

(Received 9 March 2008; accepted 16 April 2009)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2009)

[†] Center for Advanced Marine Core Research, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku, 783–8502, Japan

[‡] Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, Hakozaki6–10–1, Fukuoka, 812–8581, Japan

^{**} Graduate School of Fisheries Science, Hokkaido University, 3–1–1 Minato-cho, Hakodate 041–8611, Japan