東北日本三陸沖 DSDP コアの珪藻化石群集に記録された鮮新世後期以降の海洋環境の変遷*

Marine environmental changes since late Pliocene, recorded in the diatom fossil assemblage of the DSDP cores off Sanriku, Northeast Japan*

Abstract

古屋克江**

Katsue Koya**

1994年6月10日受付.
1994年11月14日受理.

** 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻,
Department of Earth and Planetary Sciences,
Graduate School of Science, Hokkaido University,
Sapporo 060, Japan

Diatom assemblages of DSDP Sites 436, 440 and 438, off Sanriku, Northeast Japan, have been studied to reveal the history of the sea surface environments in the northwest Pacific since the late Pliocene.

Q-mode principal component analysis of Site 436 and the changes in relative abundance of each diatom in the three sites show that the warm and cold diatom assemblages changed almost synchronously. Transitions of cold assemblage reflect the following stepwise changes of the subarctic watermass in the northwest Pacific, cooling and lowering in salinity: paleosubarctic watermass had changed to be nearly in modern condition at 2.4-2.2 Ma; the modern Oyashio water was established at 1.0-0.9 Ma, and its source area came to form the sea ice on the modern scale.

Comparison of Twt values among three sites shows that the influence of the cold-current has been stable since late Pliocene.

On the other hand, the warm Kuroshio current flowed more north and coastal position during the late Pliocene, and had shifted southward (to the almost recent position) at about 1.8-1.7 Ma. This may represent that before 1.8 Ma the boundary between subarctic and subtropical regions in the northwest Pacific was in the similar condition with the middle to east region of the modern north Pacific, where the subarctic and subtropical water easily exchange their heat and salinity.

These processes, accompanied by feedback effect and the strengthening of atmospheric circulation, might have steepened temperature gradients between subtropical and subarctic region in the northwest Pacific, and also between eastern and western part of the subarctic Pacific. They would have changed heat transportation system from lower to higher latitudes especially in the northwest Pacific.

Key word : diatom, paleoceanography, subarctic watermass, sea ice, modern Oyashio water, Kuroshio, Perturbed Area

はじめに

現在を含む第四紀後期は、10万年周期の氷期・間氷期の繰り返しからなる激しい氷河の時代である。この変動は、鮮新世後期の2.4 Maに大規模な発達が始まった北半球大陸氷床の変動と深いつながりを持っている (Shackleton et al., 1984)。近年、この glacial/pre-glacial 境界を含んだ鮮新世後期までさかのぼる高精度の分解能を持つ古海洋学研究が活発に行われているが、その多くは有孔虫やその酸素・炭素同位体による研究で、海域も大西洋や太平洋の赤道域に集中している (例えば、Ruddiman et al., 1986; Sikes et al., 1991;

Downsett and Loubere, 1992; Raymo et al., 1990; Farrell and Prell, 1991 など)。しかし、北太平洋は堆積物中の有孔虫殻の保存状態が悪いので、こうした有孔虫殻を使った手法は適応できず、かわって珪藻や放散虫などの珪質微化石による研究がいくつか行われているにすぎない (Koizumi, 1985; Sancetta and Silvestri, 1986; Morley and Dworetzky, 1991 など)。

北太平洋の珪藻による古海洋学的研究は、これまで主に、亜熱帯・亜寒帯の大きな水塊区分に対応する群集や、温暖種・寒冷種の比率 (珪藻温度指数: Td 値)、ごく一部の種の産出頻度の変化をもとにしたものが中心であった (Kanaya and Koizumi, 1966; Donauhe, 1970; Koizumi, 1985 など)。

* 日本古生物学会第142回例会 (1993年 大阪教育大学) にて一部講演。

Fig. 1. Site location and schematic view of sea-surface oceanography off Sanriku, simplified and modified from Kawai (1972). W: warm watermass, C: cold watermass (in a narrow sense).

Koizumi (1985) では、北西太平洋で得られた DSDP の Leg 86 のコアを用いて過去 3.0 Ma 以上さかのぼり、珪藻温度指数 Td 値を用いた表層水温の変遷から、2.85, 2.5, 2.0, 1.6 Ma に大きな寒冷化のイベントがあったことを示している。

一方、Sancetta and Silvestri (1986) は北太平洋の表層堆積物中の珪藻遺骸の分布と水塊の対応について詳しい研究を行い、詳細な群集変化に基づいた古海洋研究の道を可能にした。表層堆積物中の珪藻遺骸群集のクラスター分析の結果、北太平洋の中～高緯度域は、亜熱帯、南部移行域、北部移行域、亜寒帯 (1)、亜寒帯 (2)、北西縁辺域、オホーツク、クリール、カリフォルニアの 9 つの海域 (クラスター) に分けられた。これは、大谷・永田 (1990) などにもまとめられている。亜寒帯域の海洋表層の水温・塩分、その諸量の鉛直方向の分布形式の違いに反映される水塊特性の違いや、その変質の過程を非常によく反映している。Sancetta and Silvestri (1986) では、さらに亜熱帯から亜寒帯域にかけて、6 本の深海底コアの珪藻群集変化を細かく調べ、亜熱帯・亜寒帯水塊の勢力とその境界の変化、亜寒帯水塊の変化について考察し、現在の亜寒帯水塊が、2.4, 1.6–1.5, 1.0, 0.8–0.7, および 0.35 Ma で段階的に発達したと述べた。しかし、鮮新世までさかのぼった試料は DSDP Leg 86 の Site 580 のみであり、北太平洋の古海洋の変化を明らかにして行くためには、今後さらに多くのコアについての解析が必要であるとしている。

その後 Barron (1992) も Site 580 のコアを用いて、鮮新世の中期から後期にかけて高精度の分解能で珪藻の群集解析を行った。Barron (1992) では、Sancetta and Silvestri (1986) の表層堆積物の研究を基に、主に鮮新世中期 (3.1–3.0 Ma) の pre-glacial モードの温暖期について細かい議論を行っている。

る。

DSDP Leg 56, 57 の三陸沖で得られたコアは、北太平洋の中～高緯度域においては、回収率が比較的良好な数少ないコアであり、保存の良好な珪藻化石を豊富に含んでいる。しかし、これらのコアは古海洋の研究を目的に採取されたものではないので、高精度の解析には向かず、古海洋について詳しい解析は行われていなかった。そこで、本研究では近年進んできた、表層堆積物中の珪藻遺骸の詳しい分布の研究 (Sancetta, 1982; Sancetta and Silvestri, 1986 など) を基に、これらの試料を用いて、鮮新世後期までさかのぼった珪藻化石の群集変化を調べ、古海洋の変遷を、水塊と海況の変化を中心に考察した。

亜寒帯北太平洋と三陸沖

亜寒帯北太平洋は、近年、環境問題や気候変動、物質循環のモデリングのための重要海域として、研究が活発にされてきている。

北太平洋の亜寒帯域は、東西 2 つのサブ循環 (アラスカ循環と西部亜寒帯循環) に分けられ、これに縁辺海のベーリング海やオホーツク海が加わって、大きな一つの循環系をなしている (永田ほか, 1992)。親潮はこの亜寒帯循環の一部であり、カムチャッカ半島からクリール列島沿いに南下する東カムチャッカ海流と、その一部がオホーツク海に入って大きな変質を受け、再び太平洋にでてきた海水とが混ざり合って形成されたものである (大谷・永田, 1990; 永田ほか, 1992)。

亜熱帯・亜寒帯境界の極西部にあたる本州東方の三陸沖は、この低温・低塩分の親潮と、日本列島の南岸から東流する高温・高塩分の亜熱帯性の黒潮の影響を受ける海域である (Fig. 1)。しかし、親潮と黒潮が直接接することはほとんどなく、この両海流の前線の間には二つの海流から派生する冷・暖水塊と、日本海から津軽海峡を通して太平洋に流出する津軽暖流とが複雑に分布する (Fig. 1)。このため、この海域は従来から混合水域と呼ばれている (川合, 1972)。

亜熱帯・亜寒帯境界は北太平洋の中央部から東部に向かって、亜熱帯・亜寒帯両水塊の混合が進行し、南北に遷移的な水温・塩分の勾配をみせ、季節・年変化も少ない比較的稳定した海域に変化してゆく (三宅ほか, 1990; 花輪ほか, 1990)。一方、三陸沖では、亜熱帯・亜寒帯両起源の水塊・海流がその特性を維持しながら分布するため、親潮・黒潮前線の南北で水温・塩分の南北の勾配が非常に大きい。さらに水塊や前線の位置は大きな季節・年変動を見せるため、水温や塩分は短期間で簡単に大きく変化する (花輪ほか, 1990)。

試料および年代

本研究には DSDP (国際深海掘削計画) の Leg 56 と 57 の航海 (1977 年 9 月～12 月) で採集された、Site 436, 438, および 440 のコア (Scientific Party, 1980) を使用した (Fig. 1, Table 1)。このうち Site 440 は Hole 440, 440 A, 440 B からなっている。また、Site 438 は Hole 438 と、438 A・438 B の 2 地点で掘削されており、このうち本研究では Hole 438 と 438 A の 2 本を併せて使用した。

Table 1. Location and water depth of DSDP cores off Sanriku, Northeast Japan.

Site	Hole	Latitude	Longitude	Water Depth
436	436	39° 55' N	145° 33' E	5240m
440	440,440A,440B	39° 44' N	143° 56' E	4509m
438	438	40° 38' N	143° 15' E	1552m
	438A	40° 38' N	143° 14' E	1565m

Table 2. Age controls of three sites. See text about the source.

HOLE	Depth(m)	Age(Ma)	Event		
436	19.9	0.3	<i>Rhizosolenia curvirostris</i>	LAD	D
	33.3	0.425	<i>Stylatractus universus</i>	LAD	R
	58.6	0.95	<i>Actinocyclus oculatus</i>	LAD	D
	61.8	0.97	<i>Eucyrtidium matuyamai</i>	LAD	R
	101.6	1.88	<i>Eucyrtidium matuyamai</i>	FAD	R
	101	1.9	<i>Pseudoeunotia doliolus</i>	FAD	D
	139	2.6	<i>Neodenticula kamtschatica</i>	LAD	D
	158.9	2.85	<i>Stichocorys peregrina</i>	LAD	R
	175.5	3.4	<i>Neodenticula koizumii</i>	FAD	D
HOLE	Depth(m)	Age(Ma)	Event		
438	5.95	0.275	<i>Emiliania huxleyi</i>	FAD	N
	12.4	0.425	<i>Stylatractus universus</i>	LAD	R
	13.3	0.47	<i>Pseudoemilliana lacunosa</i>	LAD	N
	36.55	0.97	<i>Eucyrtidium matuyamai</i>	LAD	R
	68.2	2.6	<i>Neodenticula kamtschatica</i>	LAD	D
	87.1	3.4	<i>Neodenticula koizumii</i>	FAD	D
438A	28.7	0.87-0.92	Jaramillo event		PM
	37.2	0.95	<i>Actinocyclus oculatus</i>	LAD	D
	40.8	0.97	<i>Eucyrtidium matuyamai</i>	LAD	R
	108-127.5	3.8-3.9	Cochiti event		PM
HOLE	Depth(m)	Age(Ma)	Event		
440	47.8	0.275	<i>Emiliania huxleyi</i>	FAD	N
440A	91.15	0.425	<i>Stylatractus universus</i>	LAD	R
	100	0.47	<i>Pseudoemilliana lacunosa</i>	LAD	N
440B	214.4-224.1	0.87-0.92	Jaramillo event		PM
	278.95	1.35	<i>Gephyrocapsa oceanica</i>	FAD	N
	304.5	1.67	Top Oldvai		PM
	317.1	1.88	<i>Eucyrtidium matuyamai</i>	FAD	R
	325.15	1.95	<i>Discoaster brouweri</i>	LAD	N
	404.65	2.85	<i>Stichocorys peregrina</i>	LAD	R
	444.6	3.4	<i>Neodenticula koizumii</i>	FAD	D

LAD : the last appearance datum, FAD : the first appearance datum
D : diatom, R : radiolaria, N : nannofossil, PM : paleomagnetism

地形的には Site 436 が日本海溝外側の海盆, Site 440 は日本海溝内側の陸側斜面の中腹で階段状地形になっている地点, Site 438 は海溝陸側斜面上部の高まりに位置している。Site 436 の堆積物は珪藻質軟泥, 珪藻質粘土, 珪藻質シルト質粘土から構成されている (Fig. 2)。Site 440 は主に粘土ないし珪藻質粘土, 珪藻質シルト質粘土よりなっており, 最上部数 m に砂やシルトと泥の互層が存在する。Site 438 の堆積物は Site 436, 440 と同様な珪藻質の泥で主に構成されるが, 他の 2 本と比べ全体に粗粒である。石灰質微化石は, 水深が最も深い Site 436 では完全に溶解しているが, Site 438 と 440 では部分的にその産出が認められる (Keller, 1980 a, b)。

これらのコアは, 微化石および古地磁気の層序によって一応の年代決定がなされている。しかし, 古地磁気層序につい

Fig. 2. Lithologic section of Sites 436, 440 and 438. The broken line showing the same age is derived from Fig. 3: mbsf, meters below sea-floor; FAD, the first appearance datum; A, Hole 440A; B, Hole 440B.

てはコア試料の採取技術と回収率の問題で精度が粗く, また石灰質微化石が溶解しているため, 珪藻質微化石層序を中心に年代の設定がなされている (Barron et al., 1980)。今回の研究では, 新たに得られた珪藻のデータと, 従来得られている古地磁気 (Hall and Smeltzer, 1980), 放散虫 (Sakai, 1980; Reynolds, 1980), 石灰質ナノ化石 (Haq and Goreau, 1980), 浮遊性有孔虫 (Keller, 1980 b) のデータを基に, 最近使われている基準面と, 年代値を考慮して新たな時間軸を設定し, 各コアの試料の年代を決定した。使用した基準面の年代と各コアにおける層準については Table 2 に, これらのデータを基にした堆積速度曲線を Fig. 3 に示す。

試料の採取層準を Fig. 2 に示す。本研究で取り扱った各コアの試料は, 上位より, 珪藻 *Neodenticula koizumii* の初産出層準 (3.4 Ma) の前後までである。その海底面からの深さは, Site 436 でおよそ表層から 176 m, 440 で 440 m, 438 で 80 m の層準までである。試料の間隔は厳密には一定ではないが, 平均すると Site 436 では約 3~4 m ごと, およそ 7, 8 万年間隔で 47 層準, Site 440 でもほぼ同様な時間間隔で 9.5 m おき 46 層準について検討した。Site 438 はコアの回収率が悪いので, 5~10 m 間隔で 18 層準について補足的に検討

Fig. 3. Sedimentation rate (age vs. depth) of three sites based on data from Table 2.

したが、今回使用した試料中には、およそ 2.5 Ma から 1.0 Ma までの間の層準は含まれていない。

試料処理と研究方法

各層準から得られた試料は以下の手順で処理した。

過酸化水素水で有機物を除去した後、蒸留水で満たして数時間放置し珪藻殻を沈澱させる。上澄み液を捨て再び蒸留水で検鏡に適度な濃度に薄め、超音波洗浄機に 3~4 秒かけ均質な懸濁液をつくった。検鏡用のプレパラートは懸濁液 0.25 ml をカバーガラスに滴下し、対流しないよう 60°C で乾燥させ封入剤（マウントメディア）でスライドガラスに接着して作成した。

作成したプレパラートは、光学顕微鏡で任意の測線に沿って 700 倍、必要に応じて 1,000 倍で種を同定し、1 試料につき 200 個体を越えるまで計数した。破片については、中心目の珪藻殻は中心部が存在するものにかぎり計数し、羽状目の珪藻殻は頂部を 1/2 とした。鑑定の結果得られた種の個数を産出頻度に換算し、これを基に群集の経時変化について、研究を行った。まず、群集の変化の大まかな傾向をとらえるために、Site 436 について Q モード主成分分析を行い、この結果を基に、各種の産出頻度の経時変化を 3 つのコアについて比較検討した。さらに、温暖種・寒冷種の比率（珪藻温度指数）を調べ、亜熱帯水塊・亜寒帯水塊の勢力変化を 3 つのコアについて調べた。

結 果

1. 構成種について

得られた珪藻のうち現生種は、従来の北太平洋を含んだ表

層堆積物中の珪藻遺骸群集の研究 (Kanaya and Koizumi, 1966; Jousé et al., 1971; Sancetta, 1982; Sancetta and Silvestri, 1986) で取り扱われている種がほとんどである。

これらの研究を基に、産出種を温暖域と寒冷域に多産する種に大きく分け、その経時変化を Fig. 4 に示した。絶滅種でも産出頻度が高く、寒冷域に棲息していたことが生層序学的な研究 (例えば、Koizumi and Tanimura, 1985; Akiba 1986; Yanagisawa and Akiba, 1990) などから明らかになっている種 (*Neodenticula kamtschatica*, *Neodenticula koizumii*, *Actinocyclus oculatus*, *Thalassiosira jouseae*) も寒冷種としている。

絶滅種のうち *Nitzschia fossilis*, *Nitzschia reinholdii* は、それぞれ現生種の *Pseudoenotia doliolus*, *Nitzschia marina* と、非常に類似した形態を持ち、類縁関係があるとされている。さらに過去の地理的分布も現生種のそれとほぼ類似していると推測されている (Koizumi and Yanagisawa, 1990; Sancetta, 1985; Sancetta and Silvestri, 1986, Barron, 1992) ため、これらを、現生種に組み込んで取り扱う。同様に *N. kamtschatica* は *N. koizumii* の、*N. koizumii* は現生種 *Neodenticula seminae* の子孫型であるが、それぞれ産出頻度が高いため、Fig. 4 には別に示してある。

Thalassionema nitzschioides は汎世界的に分布するため、これを沿岸種とする見解 (Venrick, 1971; Tanimura, 1981), 湧昇流域に特徴的な種とする研究 (Schrader and Sorknes, 1990; Abrantes, 1988) がある。しかし、北西太平洋を含む海域の表層堆積物の研究 (Jousé et al., 1971; Sancetta, 1982; Sancetta and Silvestri, 1986) は本種が亜寒帯前線の南、黒潮流域に非常に多産すると報告しており、

Fig. 4. Stratigraphic distribution of cold- and warm-current diatom species at three sites. Diatoms with stars are used Q-mode principal component analysis of Site 436. Legend is arranged in order following areas of each graph from right to left. Warm-current species are defined based on Kanaya and Koizumi (1966), and Koizumi (1985) as subtropical assemblage, and Sancetta and Silvestrii (1986) as species distributed in south transitional and subtropical area, and cold-current species on Kanaya and Koizumi (1966) and Koizumi (1985), and including a few extinct species known by many biostratigraphic and paleoceanographic study on deep-sea cores.

南半球の場合も極前線の北部に、他の典型的な温暖種と同様多産しているという結果も得られている (DeFelice and Wise, 1981)。したがって、本研究では本種を温暖種として取り扱う。

2. 主成分分析

次節で各コアの主な構成種の産出頻度について検討するのに先立って、安定した堆積状態を示すと思われる、Site 436のコアの珪藻群集について、各種の間の相関関係を基にQモード主成分分析を行った。

計算にはSYSTAT. Intelligence software社のSYSTAT version 5.2.1を使用した。結果は、成分の収束があまり良くないため、情報量が小さな、固有値(分散)が1.0未満の成分は検討していない。

ここではデータセットを簡潔にするため、まず浅海性種を除き、さらにいずれかの試料で3%以上産出する種のみを取り出した。このうち全試料中の平均産出頻度が、1%以上の18種を選んで (Fig. 4 参照)、その各試料の産出頻度をデータセットとした。

なお、過去の分布についての研究、分類学的な知見

(Sancetta, 1982; Barron, 1992)に基づき、*A. curvatulus*に、その類縁種とされている*A. ochotensis*と絶滅種*A. oculatus*を組み込んで変数とした。

計算に当たっては、まずデータセットのすべての種を変数として入力したが、寒暖両群集中の組成の変化が同様の時期に起こっているため(後述)、特定の温暖・寒冷種が正に相関を持つ成分がいくつか抽出された。ここでは、一般的に予想されるような、温暖・寒冷種が逆相関を示すような成分や、特定のパラメーター(水温・塩分)に対応するような成分は得られなかった。

したがって、群集を温暖種・寒冷種2つの群集に分けて、入力する変数を寒冷種のみとした場合(model 1)と温暖種のみとした場合(model 2)に分けて、それぞれ計算した。寒冷種のみを変数としたmodel 1に基づく計算の結果は、第4主成分までで、約75%の寄与率であった (Table 3)。

このうち第1主成分は、*Thalassiosira trifulta*, *Rhizosolenia hebetata* forma *hiemalis*, *Thalassiosira gravida*, および、およそ0.3 Maに絶滅する寒冷種の*Thalassiosira jouseae*に強い負の負荷量を示している。この

Table 3. Component loadings from Q-mode principal component analysis of diatom assemblage of Site 436.

MODEL 1				
	pc1	pc2	pc3	pc4
<i>T. trifulta</i>	-0.89	0.16	-0.14	-0.02
<i>R. hebetata f. hemialis</i>	-0.74	0.16	-0.35	-0.01
<i>T. gravida</i>	-0.72	0.01	-0.36	0.04
<i>T. jouseae</i>	-0.65	-0.35	0.08	0.05
<i>N. seminae</i>	0.09	-0.88	0.03	0.10
<i>Actinocyclus</i> spp.	0.12	-0.70	0.10	0.01
<i>C. marginatus</i>	0.36	0.66	0.27	0.33
<i>N. kamtschatica</i>	0.34	0.50	0.17	0.69
<i>N. koizumii</i>	0.39	0.32	0.24	-0.78
<i>B. fragilis</i>	-0.15	-0.05	-0.92	0.03
<i>N. grunowii</i>	-0.25	0.06	-0.88	0.02
(%)	25.1	20.2	18.7	11.0
cumm.%		45.3	64.0	75.0

MODEL 2		
	pc1	pc2
<i>T. nitzschoides</i>	0.80	0.01
<i>T. oestrupii</i>	-0.71	0.38
<i>H. cuneiformis</i>	0.67	0.05
<i>N. marina</i>	-0.32	0.67
<i>P. doliolus</i>	0.20	0.83
(%)	34.7	25.6
cumm.%		60.4

pc: principal component. model 1, calculated only cold-current species; model 2, calculated only warm-current species.

うち現生種の3種は、オホーツク海やベーリング海、北西太平洋の縁辺域に多く分布する種である (Sancetta and Silvestri, 1986).

第2主成分は *Actinocyclus* spp. (*A. curvatus*, *A. ochotensis*, *A. oculatus*) と *N. seminae* に強い負荷量を示し、*Coscinodiscus marginatus* と絶滅種 *N. kamtschatica* に正の比較的高い負荷量を示す。このうち、*A. curvatus* と *N. seminae* は双方とも亜寒帯北太平洋に広く分布する外洋種であるということが Sancetta and Silvestri (1986) の結果からわかっている。また *C. marginatus* は現在北部移行域 (中～東部北太平洋) に多産するが、鮮新世中期の、2.5–2.4 Ma 以前の北西太平洋には *N. kamtschatica* とともに多産している種で、この2種は古亜寒帯水塊の存在を示すとされている (Sancetta and Silvestri, 1986; Barron, 1992)。

第3主成分は、*Bacterosira fragilis* と *Nitzschia grunowii* の2種のみではほぼ代表されている。この2種は海水の分布域に多く見られる種である (Sancetta, 1982; Karpuz and Jansen, 1992)。

第4主成分は、それぞれ反対の符号を持つ、絶滅種 *N. koizumii* とその祖先種 *N. kamtschatica* の2種のみではほぼ代表されている。

これらの結果を各層準についてプロットしたものを Fig. 5 に示す。オホーツク–ベーリング–北西縁辺域群集で代表される第1主成分は1.0 Ma の頃から強くなっている。汎亜寒帯群集が負、古亜寒帯群集が正で示される第2主成分は2.4–

2.2 Ma で正から負に大きく変化を見せ、0.9–0.8 Ma 以降弱くなっている。海水指標種で示される第3主成分は、およそ0.9 Ma 以降に負に変化し、0.2 Ma 以降急激に強くなる。*Neodenticula* 属の2絶滅種で示される第4主成分は2.8 Ma で大きく正から負に変化し、2.2 Ma 付近で弱くなる。

温暖種のみを変数とした model 2 は第2主成分までで、およそ60.4% を示している (Table 3)。第1主成分は、*T. nitzschoides* と熱帯から亜熱帯に多産する *Hemidiscus cuneiformis* に正の負荷量を示し、南部移行域に多産する *Thalassiosira oestrupii* (Sancetta and Silvestri, 1986) に負の負荷量を示している。第2主成分は南部移行域に多いとされている *P. doliolus* (Sancetta and Silvestri, 1986) と *N. marina* に強い負荷量が示され、*T. oestrupii* も小さいながら、同符号の値を示している。しかし、温暖種は種数が少なく *N. marina* に関する詳しい情報がないので、具体的に主成分を説明するところは今のところ難しい。

その経時変化 (Fig. 5) は、第1主成分が2.2 Ma の付近で正から負に変化し、第2主成分は2.4–2.3 Ma の辺りから0.9 Ma の付近までの間に正に強い値を示しており、寒冷群集の変化とはほぼ同ような時期に変化をみせていることがわかる。

3. 各 Site における主な構成種の頻度変化

Site 436 の主成分分析の結果を基に、主な種の産出頻度の経時変化を3地点のコアについて比較した (Fig. 6-a, b)。

北部移行域に多産する寒冷種である *C. marginatus* は2.2–2.4 Ma 以降に産出頻度が減少している (Fig. 6-a 上段)。絶滅種 *N. kamtschatica* は沿岸の Site 438 で非常に多産するが、Site 440, 436 と外洋に向かって漸次少なくなる。

N. kamtschatica の子孫型である *N. koizumii* の産出傾向は、Site 436 と440 で、*N. kamtschatica* が減少するのに代わって増加してくる。その後 *N. koizumii* の子孫型で、現在の亜寒帯域全般に産出し、亜寒帯北太平洋の特に中部から東部にかけて多産する *N. seminae* が2.4 Ma の頃から出現し始め、0.9–0.8 Ma 以降減少の傾向をみせる (Fig. 6-a 上段)。

汎亜寒帯種の *A. curvatus* (類縁種の *A. ochotensis* も含む) は、*A. oculatus* とともに Site 440 で最も多産し、*A. curvatus* (*A. ochotensis*) は特に Site 440 において2.4 から0.9 Ma までを中心に多産する (Fig. 6-a 中段)。 *A. oculatus* はその絶滅期が亜寒帯域における基準面として用いられる種であるが、2.4 Ma 付近から産出が目立ち始め、絶滅層準の直前まで著しい増加を示している。

オホーツク海やベーリング海に特徴的な外洋種の *T. trifulta* と *R. hebetata f. hiemalis* は、Site 438 では顕著ではないが Site 436 と440 で1.0 Ma 以降産出が増加する (Fig. 6-a 中段)。一方、*T. gravida* と *Odontella aurita* は亜寒帯太平洋の北西部縁辺の高生産域に多産する種 (Kanaya and Koizumi, 1966; Sancetta and Silvestri, 1986) であるが、3つのコアともに1.0–0.9 Ma 以降に増加をみせている (Fig. 6-a 下段)。

海水指標種の *B. fragilis* と *N. grunowii* は2.4 Ma 以前では Site 438 以外は産出が非常にまれであるが、2.0 Ma 頃から

MODEL 1

MODEL 2

Fig. 5. Plot of downcore loadings for each component derived from 2 models of Q-mode principal component analysis of diatom assemblage of Site 436 after late Pliocene.

は Site 436 と 440 にも多少の出現がみられるようになり、およそ 1.0–0.9 Ma 以降では 3 本のコアとともに増加する (Fig. 6-a 下段)。

H. cuneiformis は 1.8 Ma 以前において主な産出が認められ、鮮新世から第四紀にかけて減少の傾向がみられる (Fig. 6-b 上段)。本種は、3.0 Ma 前後に Site 436 で 20% 近く多産するが、この傾向は沖合の Site 580 でも同様の多産が報告されている (Barron, 1992)。*Azpeitia nodulifera* は、Site 436 において鮮新世後期から現在に向かって減少するが、他の 2 地点ではほとんど産出しない (Fig. 6-b 上段)。この 2 種は亜熱帯から熱帯・赤道域にかけて特徴的な種である (Jousé et al., 1971 など)。

T. nitzschioides は、Site 436, 440 において鮮新世に多産し、第四紀にかけて減少の傾向がみられるが、0.5 Ma の前後では 3 地点ともに増加している (Fig. 6-b 上段)。この種が鮮新世の間、北太平洋に多産するという傾向は Sancetta (1981) や Barron (1992), Sancetta and Silvestri (1986) でも報告されている。

H. cuneiformis, *A. nodulifera*, *T. nitzschioides* の 3 種の産出頻度は平均的に Site 436 で高く、第四紀よりも、鮮新世に多産する傾向を示している。

P. doliolus (*N. fossilis* を含む) と *T. oestrupii* (Fig. 6-b 下段) はともに、亜熱帯～熱帯域よりも南部移行域に多く分布する種とされている (Sancetta and Silvestri, 1986)。*P. doliolus* は Site 436 で全体を通してほぼ 0–8% の間で振幅しており、Site 440 では 2.0 Ma 以降に特に産出がみられるが Site 438 ではほとんど産出しない (Fig. 6-b 下段)。Site 436 において、*N. marina* (*N. reinholdii* を含む) と *T. oestrupii* の 2 種は 2.4 Ma 以降にそれ以前と比べて多産する。Site 440 では 436 に遅れて、2.0 Ma 頃から増加をみせる (Fig. 6-b 下段) が、Site 440 ではその直前で、温暖種自体が全体に少ないためである (Fig. 4 参照)。その後 *N. marina* はこの 2 地点で 1.0–0.9 Ma 以降産出が再び減少している。これら 3 種についても、前述の 3 種と同様に Site 436 が Site 440 より産出頻度が高い傾向にある。

4. 珪藻温度指数 Twt

次に、珪藻温度指数を用いて、3 地点の間の寒冷種と温暖

種の勢力の強さを比較することにした。

従来の珪藻温度指数の計算には *T. nitzschioides* は組み入れられてはいなかった (Kanaya and Koizumi, 1966; Donauhe, 1970; Koizumi, 1985 など) が、前述のように北太平洋の表層堆積物の研究からは、本種が寒冷域よりも温暖域に多産するという傾向がみられるため、珪藻温度指数の計算に含めることにする。

Barron (1992) でも本種を温暖種に含めて計算を行っている。しかし、本種は現在の北部移行域にも産出が認められること、そのまま温暖種に組み込んで従来の Td 値を計算した場合、南北のコアの値で矛盾がでる (北のコアが南のコアよりも高い—暖かい—値をもつ層準がいくつかみられる) ため、ともに北部移行域まで産出が認められる *T. oestrupii*, *C. radiatus* とともに、他の亜熱帯～熱帯域に多産する温暖種とは別に 0.5 の係数をかけて (Twt 値)、矛盾を解決している (Barron, 1992)。

このため本研究でも Barron (1992) の Twt 値を採用することにし、

$$Twt = (Xw + 0.5 Xwt) / (Xw + Xwt + Xc)$$

Xw: 温暖種 (ただし亜熱帯～熱帯域に多産する種) の産出頻度

Xwt: 温暖種だが移行域北部にも若干の産出が認められる種の産出頻度

Xc: は寒冷種の産出頻度を計算した。Xwt に含まれる種は本研究では、*T. oestrupii* と、*T. nitzschioides* が相当する。

それぞれのコアにおける Twt 値の経時変化 (Fig. 7) をみると、鮮新世後期の間、Site 436 では大体 0.4–0.7 の間で変動している。そして、1.8–1.7 Ma にかけて大きく値が低下し、その後第四紀の間は 0.1–0.4 の間を変動するようになる。Site 440 も 1.8–1.7 Ma に値が低下し、その後 1.6–0.9 Ma の付近に低い値を取っているが、全体を通してほぼ 0.1–0.4 の間で変動している。Site 438 については試料間隔が粗く数も少ないが、分析した範囲では、沖合の他の 2 つの Site のような大きな変化はなく、およそ 0.4 Ma 頃のおよそ 0.4 の値を取る 1 試料を除き、0.1–0.2 の値を示している。

3 地点の値を比較してみると、鮮新世後期には沖合の Site

Fig. 6. Relative abundance of diatom species of three sites. Note different scales on axis.
(a) cold-current species.
(b) warm-current species.
Broken lines show the boundaries changing the assemblage, the thick at about 2.4 and 1.0M are based on the result of the principal component analysis of Site 436.

Fig. 7. Stratigraphic variations of Twt values, based on Barron (1992): $Twt = (Xw + 0.5 Xwt) / (Xw + Xwt + Xc)$; Xw, the relative abundance of warm, tropical to subtropical species; Xwt, warm but South Transitional taxa; Xc, cold-current species.

436 から沿岸よりの Site 440, 438 にかけて値が低くなっており、その差も大きい。ところがおよそ 1.8–1.7 Ma に Site 436 と 440 で大きく値が低下し、双方の値も接近してくる。その後、0.9–0.8 Ma になると、3 地点とも近い値を示すようになる。

考 察

1. *Thalassionema nitzschioides* の分布特性について

本研究では、*T. nitzschioides* を温暖種であるとしたが、本種の分布特性については前述のように、さまざまな意見がある。湧昇域など生産性の高い海域に多産するという研究 (Schrader and Sorknes, 1990; Abrantes, 1988) は、赤道域や熱帯・亜熱帯域の研究であるが、北西太平洋の亜熱帯域では黒潮の流域が生物生産量が高く、このため本種が生産性と密接に関わっている可能性は大きい。沿岸種であるという認識 (Venrick, 1971; Tanimura, 1981) についても、本種が生産性と密接に結びついており、一般に沿岸域が外洋に比べて生産性が高いことと関係しているとも考えられる。

北太平洋全般でみると、黒潮の生産量は、亜寒帯域、特に高生産性をほこる親潮 (川原田, 1975) と比較すると非常に小さい。*T. nitzschioides* は亜寒帯域にも産出が認められて

いるが、その頻度は黒潮の流域と比較すると少ないので、本種が温暖で生産量の多い海域に多産するであろうという予測はたてられるが、本海域のような亜寒帯・亜熱帯水塊の境界域では生産性の指標とはなりにくい。

また、本種を沿岸性種と仮定すると、最も沖合にある Site 436 が鮮新世から第四紀の初期で、3つのコアの中でもっとも大きな産出を示す (Fig. 6-b) ことは説明できない。

Twt 値の計算の際に Barron (1992) に基づいて、本種を *T. oestrupii* と同様に、北部移行域でも産出が認められることから温暖移行域種として 0.5 を係数とした。しかし、多産する海域という点では、この 2 種は違う特徴を持っている。*T. nitzschioides* は北部域まで産出するが、黒潮流域に、より多く産出する (Sancetta, 1982; Sancetta and Silvestri, 1986)。これに対して *T. oestrupii* は亜熱帯域や黒潮流域よりも、そのやや北方の南部移行域にむしろ目立った産出をする (Sancetta and Silvestri, 1986)。

主成分分析の結果、この 2 種が逆相関的な関係を示す原因としては、このことが利いてくるのかもしれない。

2. 群集の変化と水塊の変化

Site 436 の主成分分析および、3つのコアの群集の変化を検討すると、寒暖両群集は互いの勢力の変化以外に、それぞれの群集自身が変化し、時代とともに遷移してきたことがわかった。

寒冷群集は、現在似たような分布の傾向を示す種が、時間軸に沿った変化でも同じような変動を示しているため、この群集の変化は、表層水塊の変化をかなり反映しているといえる。

2.4 Ma 以前は北部移行域に多産する *C. marginatus* と絶滅種 *N. kamtschatica* の産出が特徴的で、2.4–2.2 Ma 以後、現在の亜寒帯域に広く分布する汎亜寒帯種 (*N. seminae*, *Actinocyclus* spp.) へと変化するようになる。

2.4 Ma 以前の *C. marginatus* と *N. kamtschatica* の多産は北西太平洋の DSDP Site 580 にもみられ、この傾向は 2.4 Ma 以前の亜寒帯水塊が現在とは違い、水温・塩分が高く亜熱帯域との水温・塩分勾配もゆるやかな状態であったことを示すと考えられている (Barron, 1992; Sancetta and Silvestri, 1986)。

およそ 1.0–0.9 Ma から、汎亜寒帯種の産出は減少しはじめ、亜寒帯北西部の外洋域で多産する種、親潮海域に特徴的な種、そして海水の指標種が増加してくる。親潮、およびその源流域は、亜寒帯域の中でも低温・低塩分で高生産の海域で、とくにオホーツク海周辺は、北太平洋の冷却源となっている海域である。1.0–0.9 Ma の変化は、北太平洋北西部の寒冷化が進み、現在に近い性質の親潮水の発達を反映していると思われる。

2.4–2.2 Ma と 1.0–0.9 Ma を境界に分けられる 3つのタイプの群集を現在の分布域 (Sancetta and Silvestri, 1986) から考察すると、順に亜寒帯北太平洋の南東にみられるタイプから北西の海域に特徴的なタイプに変化してきている。つまり、これらの群集の変化は、より低水温・低塩分な北西部型の水塊の発達を反映しているといえる。

Fig. 8. Showing the southward (and offshore) shift of Kuroshio current at 1.8-1.7 Ma, Kuroshio current had extended northward (and coastal position) during the late Pliocene (the dotted arrow).

それぞれの群集が現在分布する海域の、夏季における平均的な水温・塩分 (Sancetta and Silvestri, 1986) から、これらの水塊の変化を具体的に見積もると、2.4-2.2 Ma には 3~5°C, 1~0.5‰, 1.0-0.9 Ma には 0~6°C, 0~0.5‰ の低下に相当する。

しかし、亜寒帯域の水塊は、水温・塩分で示される水系特性以外に、鉛直方向のそれらの分布形式の違いによっても区分されている (永田ほか, 1992)。現在の亜寒帯域北西部の特徴は、単に低温・低塩分であること以外に、夏季表層の下部に水温の逆転層が発達することにある (大谷・永田, 1990)。表層の成層構造の違いが、珪藻の分布に影響を与えることは、十分に考えられることであり、Sancetta and Silvestri (1986) では、亜寒帯域の表層水が低塩分化してきたことにより、鉛直方向の中~深層水とのあいだの密度成層が発達し、珪藻の分布に影響を与えてきたと考察している。

温暖群集も亜寒帯群集とはほぼ同様の時期、2.4-2.0 Ma 頃と 0.9 Ma 頃にその組成が変化している。本研究では温暖種の種数が少なく、また各種の現世の詳しい情報が不足しているためこうした群集変化の具体的な要因を明らかにすることはできなかったが、こうした変化は Sancetta and Silvestri (1986) や Barron (1992) の Site 579, 580 の結果と調和的であるため、黒潮の性質も何らかの変化が起こったことを示している可能性が高い。

3. 亜寒帯・亜熱帯境界の変化

群集の変化を詳細に検討した結果、寒冷・温暖群集中で優占的に産出する種が、段階的に変化していることがわかった。このため、本研究のような時間スケールの場合、亜熱帯水塊・亜寒帯水塊それぞれの水塊の性質 (水温・塩分) も変化していると考えられる。したがって、実際的水温は、寒

暖水塊 (少なくとも寒冷水塊) の温度の低下に伴って、現在に向かって段階的に低下してきたことが予想される。そのため、寒暖群集の比率で示される Twt 値は、水塊が大きく変化するような長い時間スケールで見た場合、水温ではなく単に寒暖両水塊・海流の势力的な変化と見るのが妥当である (ただし、近い場所・近い時期の試料と比較する場合は、寒暖水塊のソースが同じものであるといえるので、異なった位置の間の Twt 値の違いは、水温差を示しているということではある)。

Fig. 7 に示された Twt 値の全体の変化は、沿岸のコアほど小さく、とくに、Site 438 は鮮新世後期からほとんど変化していない。本研究で使ったコアは、現在親潮の影響を強く受ける海域に位置するので、沿岸のコアの Twt 値が鮮新世後期から第四紀を通して、低い値を持ったまま大きく変化していないということは、鮮新世後期以降、寒流の勢力に大きな変化はなかったということがいえる。したがって、鮮新世後期に沖合ほど高い値を示していた Twt 値が、第四紀初頭に大きく値が下がっているのは、主に暖流の位置・勢力が変化したためと考えられる。

つまり、本海域では鮮新世後期の間、沖合では現在よりも暖流の影響強く受け、沿岸は寒流が現在と同程度に卓越していたが、その後第四紀の初頭、1.8-1.7 Ma 頃に黒潮が大幅に南下 (離岸) して、その直接の影響が三陸沖で減少し、沖合の Site 436 と沿岸よりの Site 440 の間の水温が接近したということになる。そして 1.0-0.9 Ma には現在と同様に、3 地点とも寒流の影響下に置かれるようになったといえる。

現在の北太平洋の亜寒帯・亜熱帯境界部の極西部では、亜寒帯水塊と亜熱帯水塊とはそれぞれの特性を保持しながら複雑に分布し、大きな季節・年変動を示している一方、東に向うにつれ両水塊の混合が進み、水温・塩分の季節・年変化が小さい海域になっている。このため南北の密度勾配は、極西部の混合水域の場合、親潮・黒潮前線を挟んで、段階的な変化で示されるが、中央部から東部に向かって明瞭な前線構造はみられなくなり、南北に遷移的な変化を示すようになる (三宅ほか, 1990; 花輪ほか, 1990)。

Sancetta and Silvestri (1986) の研究では、亜熱帯・亜寒帯境界域の表層堆積物では、極西部には移行域群集がみられず、亜熱帯の群集からなる堆積物と寒冷種 (北西縁辺域) で構成される海域が接して分布している。北部移行域、南部移行域の海域は、前者がおおよそ 165°E 以東、後者は 150°E から東の海域に位置しており、北部移行域ではその南北の幅も東に向かって拡がる傾向を示している。これらは、現在の亜熱帯・亜寒帯境界についての研究結果 (三宅ほか, 1990; 花輪ほか, 1990) と調和的である。

本研究で用いられたコアの位置する海域は、現在この北西縁辺域に属するが、少なくとも、およそ 2.4 Ma 以前は両水塊の水温・塩分の差が現在より小さく、亜熱帯・亜寒帯間の混合が現在より活発であったことが、寒冷群集の組成から推測されるので、現在のような明瞭な黒潮・親潮の 2 つの前線が存在していたような状態ではなく、むしろ現在の北太平洋中央部から東部の移行域に近い状態であったと思われる。

現在のような混合水域が発達してきたのは、おそらく、1.8-1.7 Ma に黒潮が大きく南下し、亜熱帯・亜寒帯域の境界が広がったことに関係しているのではないかと考えられる (Fig. 8).

4. 津軽暖流の影響

現在の三陸沖の一般的な海況は、Fig. 1 に示すように、地形効果によって親潮が大陸斜面から海溝斜面に沿って親潮沿岸流 (親潮第1分岐) となって南下している。このため、津軽暖流の影響が小さい場合、沿岸ほど寒冷になる (黒潮起源の暖水塊は海溝に沿って北上するため、もし影響があったとしても本研究の資料採取位置では、この傾向を助長はするが、打ち消すことはない)。

三陸沖の3地点の群集の比較からは、鮮新世後期の間は黒潮の影響が強く、沿岸の方が寒冷で、沖合の方が温暖であるという傾向が示され (Fig. 4, 6-b, 7), 後期になると、その違いははっきりしなくなる。このことから、特に第四紀の前半とそれ以前は、“温暖水の供給源”としての日本海の影響は特に反映されていないといえよう。

この理由としては津軽海峡の状態、対馬暖流の日本海への流入状態が関係してくるが、対馬暖流については、中新世後期以降、日本海に本格的に流入するのが第四紀の後半になってからであることは小泉 (1992) や、日本海沿岸の貝化石の研究 (Chinzei, 1986) などからすでにいわれている。

しかしながら、現在の年平均の水温が示す限り、コア採取地点では特に津軽暖流の影響は現れておらず、津軽暖流が三陸沖に流出していても Twt 値に反映されるとは限らないかもしれない。

Fig. 7 では、第四紀の後半に沿岸の方がやや温暖な値を示している層準がある。しかし、年代の精度や、試料間隔、試料の採取方法の問題 (Leg 56, 57 では、ロータリー式コアラーが用いられているため、試料が採取の際、ある程度の攪乱を受けている) のため、この問題をさらに考察するためには、より沿岸の新たな試料を用いて、正確な年代値に基づいた高精度の解析を行うことが必要とされる。

4. グローバルな気候変動と北西太平洋

本研究で示された亜寒帯水塊の段階的な発達、亜熱帯・亜寒帯境界域の変化のようすは、世界的な気候・海洋の変化のうち、主に寒冷化のイベントと対応している。

2.4 Ma 付近の変化は、チベット・ヒマラヤの隆起とそれに

よるアジア北東域の寒冷化に密接に関係していると考えられる。現在の亜寒帯北太平洋の北西部やオホーツク海周辺域が特に寒冷になっている理由は、冬季のユーラシア大陸北東域の冷却により発達するシベリア高気圧の影響によるが、このような気圧配置が発達したのは、鮮新世後期以降、チベット・ヒマラヤ地域やロッキー山脈の隆起によるテクトニックな現象と密接に関係があると考えられている (Zhongli et al., 1992 など)。この影響と、3.0 Ma 頃のパナマ陸橋の形成による北大西洋の表層循環の変化によって、北半球に氷床が発達するに至ったという説は以前から提唱されている (岩田, 1991)。

その後、おそらく偏西風の強化とも関連して、三陸沖では1.8-1.7 Ma に黒潮の流軸が南東方向に移動した。そのため、北西太平洋では、亜熱帯水塊と亜寒帯水塊の間の境界域の性質が変化し、また、シベリア高気圧がさらに発達 (Sancetta and Silvestri, 1986) して、亜寒帯太平洋の北西部がさらに冷却され、1.0-0.9 Ma にオホーツク海やベーリング海での海水の本格的な発達と親潮水の成立が起こったといえる。

東部北大西洋のコアが示す1.7 Ma 以降の表層水温の変化 (Raymo et al., 1990) でも、1.0 Ma から0.8 Ma にかけて、それ以前の時代と比べると極めて顕著な水温の低下が示されている。また Herman and Hopkins (1980) では、北極海が1年中海水で閉ざされるようになったのが0.9 から0.7 Ma であるとしている。この時代の北半球の高緯度域における海水の本格的な形成の始まりは、極域・亜寒帯域の水塊の性質を変化させ、大陸氷床とともにアルベドの増加の一因になるなど、気候変動に与える影響は無視できない。

三陸沖にみられる海水の指標種は、現在はオホーツク海起源のものであるが、オホーツク海の海水の形成は、アムール川からの淡水の流入によるところが大きく、その河口は海水準の低下と関係して、氷期には日本海の間宮海峡南部に位置していたのではないかという説がある (Keigwin and Gorbarenko, 1992)。この場合には、オホーツク海における海水の形成は著しく妨げられることになり、オホーツク海のみならず、日本海や親潮域にもその影響が反映されるはずであり、今後の検討課題のひとつである。

三陸沖の3本のコアで認められた北西太平洋の水塊の段階的な寒冷化と海況の変化は、世界的な気候変動を反映しているだけではなく、北太平洋の循環系・水塊の発達などへ影響

Fig. 9. Diatoms discussed in text as environment indicator. Scale bar a: 1~8, 12, 13, 15~21, b: 9~11, 14. 1. *Azpeitia nodulifera* (Schmidt) Fryxell and Sims. Sample 436-9 cc, 9-10 cm. 2. *Hemidiscus cuneiformis* Wallich. Sample 436-18-1, 23-24 cm. 3. *Nitzschia reinholdii* Kanaya ex Barron and Baldauf. Sample 436-12-5, 20-21 cm. 4. *Nitzschia marina* Grunow. Sample 436-5-1, 60-61 cm. 5. *Thalassionema nitzschioides* Grunow. Sample 436-5-1, 60-61 cm. 6. *Nitzschia fossils* (Frenguelli) emend. Kanaya ex Schrader. Sample 436-15 cc, 7-8 cm. 7. *Pseudoenotia doliolus* (Wallich) Grunow. Sample 440-2 cc. 8. *Thalassiosira oestrupii* (Ostfeld) Proskina-Lavrenko. Sample 436-5-1, 60-61 cm. 9. *Neodenticula seminae* (Simonsen and Kanaya) Akiba and Yanagisawa. Sample 440-2 cc. 10. *Neodenticula kamtschatica* (Zabelina) Akiba and Yanagisawa. Sample 436-19-1, 39-40 cm. 11. *Neodenticula koizumii* Akiba and Yanagisawa. Sample 436-14-1, 39-40 cm. 12. *Coscinodiscus marginatus* Ehrenberg. Sample 436-18-1, 23-24 cm. 13. *Rhizosolenia hebetata* forma *hiemalis* (Bailey) Gran. Sample 436-5-1, 60-61 cm. 14. *Nitzschia grunowii* Hasle. Sample 436-1-5, 15-16 cm. 15. *Odontella aurita* (Lyngbye) Agardh. Sample 440-2 cc. 16. *Actinocyclus curvatulus* Janisch. Sample 440-13 cc. 17. *Actinocyclus ochotensis* Jouse. Sample 440 A-5-1, 109-110 cm. 18. *Actinocyclus oculatus* Jouse. Sample 436-8-4, 90-91 cm. 19. *Thalassiosira gravida* Cleve. Sample 436-3-1, 7-8 cm. 20. *Bacterosira fragilis* (Gran) Gran. Sample 436-9-1, 100-101 cm. 21. *Thalassiosira trifulta* Fryxell. Sample 436-3-1, 7-8 cm. cc: core catcher.

を与えてきたと考えられる。

本研究の結果では、亜寒帯水塊自体は、およそ 2.4-2.2 Ma と 1.0-0.9 Ma で、より低温低塩分な性質へと段階的に変化してきた。また、亜熱帯・亜寒帯境界域の変化は、北西太平洋における亜熱帯・亜寒帯両水塊の間の熱（および塩分）の交換に影響を与え、これらの水塊の変化と、亜熱帯・亜寒帯境界の性質の変化はお互いに正のフィードバック効果を起こして、大気循環系の変化と共に北西部縁辺海域のより寒冷な水塊の形成を引き起こしてきたのではないだろうか。このことは北西太平洋の高緯度海域への熱輸送のシステムを変化させ、北西太平洋の亜熱帯域と亜寒帯域、さらには亜寒帯北太平洋の西部・東部の温度格差をさらに増大させたであろう。

Sancetta and Silvestri (1986), Barron (1992) で扱ったコアは、表層堆積物の珪藻遺骸による海域区分 (Sancetta and Silvestri, 1986) では現在の南部移行域に位置するが、本研究で使用了コアはより西側の北西縁辺域に位置する。本研究の結果は南部移行域のコアの解析結果と大まかな傾向では、一致しているが、より西に位置するため、おそらくオホーツク海沿岸や、クリール列島周辺の影響をより鋭敏に反映していると思われる。

そのほかに Sancetta and Silvestri (1986) にはみられなかった亜寒帯・亜熱帯境界の極西部特有と思われる変化がみられ、より親潮に特徴的な種、および海水指標種に関する情報も得られた。

今後は、さらに異なる海域（少なくとも Sancetta and Silvestri, 1986）で区分された海域）間でのコアの対比を行うことも重要であろう。

ま と め

1) 三陸沖の深海底コアから得られた珪藻化石群集の変化は海洋表層の変動をよく反映し、鮮新世後期以降、寒暖海流の位置・勢力の変化以外に、亜寒帯水塊自体の性質や、亜寒帯水塊と亜熱帯水塊との間に形成される境界域の性質が変化してきたことがわかった。

2) 温暖・寒冷それぞれの群集内での変化は近い時期に起こっている。

3) 2.4-2.2 Ma 頃に、古亜寒帯水塊から現在の亜寒帯水塊に近い性質に変化した。

4) 1.0-0.9 Ma に、現在の親潮と同様な水塊が成立し、その起源であるオホーツク海などでの海水の本格的な形成も 0.9 Ma 頃から始まった。

5) 鮮新世後期以降、寒流の勢力はほとんど変化しなかった一方、黒潮は、鮮新世後期には現在より北の、沿岸よりに位置していたが、1.8-1.7 Ma 頃に大きく南下（離岸）した。このことから、鮮新世後期には、亜熱帯・亜寒帯境界は現在の三陸沖より東側の移行域のような状態であったと思われる、第四紀に入ってから現在のような海況になったと考えられる。

謝 辞

本論文は、筆者が北海道大学地質学鉱物学教室（現地球惑星科学教室）で取り組んだ修士課程の研究が元になってい

る。研究を進めるに当たって、同教室の教官である小泉 格教授、退官された佐藤誠司博士（当時助教授）、福沢仁之博士（現在東京都立大助教授）には親切なご指導、ご助言をいただいた。また、大学院生の坂本竜彦氏には貴重な討論をしていただいた。地質調査所の柳沢幸夫博士には、来札の折に有義なご助言をいただいた。また、小泉教授には粗稿を精読・校閲していただき、貴重なご意見、ご批判をいただいた。

以上の方々に心から感謝の言葉を述べさせていただく。

文 献

- Abrantes, F.F., 1988, Diatom productivity peak and increased circulation during latest Quaternary: Alboran basin (Western Mediterranean). *Mar. Micropal.*, **13**, 79-86.
- Akiba, F., 1986, Middle Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy in the Nankai Trough and Japan Trench, and modified Lower Miocene through Quaternary diatom zones of middle-to-high latitudes of the North Pacific. In Kagami, H., Karig, D.E., Coulbourn, W. T. et al., eds., *Init. Repts. DSDP*, U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., **87**, 393-481.
- Barron, J.A., 1992, Pliocene paleoclimatic interpretation of DSDP Site 580 (NW Pacific) using diatoms. *Mar. Micropal.*, **20**, 23-44.
- Barron, J.A., Harper, H.E. Jr., Keller, G., Reynolds, R.A., Sakai, S., Shaffer, B.L. and Thompson, P.R., 1980, Biostratigraphic summary of the Japan Trench transect, Leg 56, 57, Deep Sea Drilling Project. In Scientific Party, eds., *Init. Repts. DSDP*, U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., **56**, **57**, 505-519.
- Chinzei, K., 1986, Faunal succession and geographic distribution of Neogene Molluscan faunas in Japan. In Kotaka, T., ed. *Origin and Migration of the Cenozoic Molluscan faunas in Japan (Paleontological Society of Japan Special Papers)*, 17-32.
- DeFelice, D.R. and Wise, S.W. Jr., 1981, Surface lithofacies, biofacies, and diatom diversity patterns as models for delineation of climatic change in the southeast Atlantic Ocean. *Mar. Micropal.*, **6**, 29-70.
- Donahue, J.G., 1970, Pleistocene diatoms as indicators in the North Pacific sediments. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **126**, 121-138.
- Downsett, H.J. and Loubere, P., 1992, High resolution late Pliocene sea-surface temperature record from the Northeast Atlantic Ocean. *Mar. Micropal.*, **20**, 91-105.
- Farrell, J.W. and Prell, W.L., 1991, Pacific CaCO_3 preservation and $\delta^{18}\text{O}$ Since 4 Ma: Paleocene and paleomagnetic implications. *Paleoceanography*, **6**, 485-498.
- Hall, J.M. and Smeltzer, D., 1980, Paleomagnetism of sediments, Sites 438, 440, Leg 57, Deep Sea Drilling Project. In Scientific Party, eds., *Init. Repts. DSDP*, U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., **56**, **57**, 1159-1166.
- 花輪公雄・谷本陽一・佐伯理郎, 1990, 西部北太平洋の海面水温前線. 月刊海洋, **22**, 216-220.
- Haq, B.U. and Goreau, M., 1980, Calcareous nannofossils from the Japan Trench upper slope, Leg 56, Deep Sea Drilling Project. In Scientific Party, eds., *Init. Repts. DSDP*, U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., **56**, **57**, 633-639.
- 岩田修二, 1991, 氷河時代はなぜ起こったか. 科学, **61**, 669-680.
- Herman, Y. and Hopkins, D.M., 1980, Arctic oceanic climate in Late Cenozoic time. *Science*, **209**, 557-562.
- Jousé, A.P., Kozolova, O.G. and Muhina, V.V., 1971, Distribution of diatoms in the surface layer of sediment from the Pacific Ocean. In Funnell B. M. and Riedel W. R., eds., *The Micropaleontology of the Ocean*. London: Cambridge University Press, 263-269.
- Kanaya, T. and Koizumi, I., 1966, Interpretation of diatom thanatocoenoses from the North Pacific applied to a study of core V 20-130 (Studies of a deep-sea core V 20-130). *Sci. Repts. Tohoku Univ. 2nd ser. (Geol)*, **37**, 891-30.
- Karpuz, N.K. and Jansen, E., 1992, A high-resolution diatom

- record of the last deglaciation from the SE Norwegian Sea : Documentation of Rapid Climatic Changes. *Paleoceanography*, **7**, 499-520.
- 川合英夫, 1972, 黒潮と親潮の海況学. 海洋科学基礎講座, 東海大学出版会, **2**, 129-309.
- 川原田裕, 1975, 植物プランクトンの生態. 海洋科学基礎講座, 東海大学出版会, **6**, 1-48.
- Keigwin, L. D. Jr. and Gorbarenko, S. A., 1992, Sea level, surface salinity of the Japan Sea, and the Younger Dryas Event in the Northwestern Pacific Ocean. *Deep Sea Research*, **37**, 346-360.
- Keller, G., 1980a, Benthic foraminiferal and paleobathymetry of the the Japan Trench area, Leg 57, Deep Sea Drilling Project. In Scientific Party, eds., *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **56, 57**, 335-353.
- Keller, G., 1980 b, Planktonic foraminiferal biostratigraphy and paleoceanography of the Japan Trench, Leg 57, Deep Sea Drilling Project. In Scientific Party, eds., *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **56, 57**, 809-825.
- Koizumi, I., 1985, Late Neogene paleoceanography in the western North Pacific. In Hess, G. R., Burckle, L. H., et al., eds., *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **86**, 429-438.
- Koizumi, I. and Tanimura, Y., 1985, Neogene diatom biostratigraphy of the middle latitude western North Pacific, Deep Sea Drilling Project Leg 86. In Hess, G. R., Burckle, L. H., et al., eds., *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **86**, 269-300.
- Koizumi, I. and Yanagisawa, Y., 1990, Evolutionary change in diatom morphology—An example from *Nitzschia fossilis* to *Pseudoeunotia doliolus*—. *Trans. Proc. Paleont. Soc. Japan N. S.*, **157**, 347-359.
- 小泉 格, 1992, 日本海掘削と珪藻化石. 月刊海洋, **6**, 217-222.
- 三宅秀夫・安間 元・目黒敏美, 1990, 北太平洋西部亜寒帯境界域の平均海洋構造. 月刊海洋, **22**, 181-186.
- Morley, J. J. and Dworetzky, B. A., 1991, Evolving Pliocene-Pleistocene climate : A North Pacific perspective. *Quat. Sci. Rev.*, **10**, 225-237.
- 永田 豊・大谷清隆・柏井 誠, 1992, 北太平洋亜寒帯循環. 海の研究, **1**, 75-104.
- 大谷清隆・永田 豊, 1990, 北太平洋亜寒帯循環—水塊の特性と変質—. 月刊海洋, **22**, 169-173.
- Raymo, M. E., Ruddiman, W. F., Shackleton, N. J. and Oppo, D. W., 1990, Evolution of Atlantic-Pacific $\delta^{13}\text{C}$ gradients over the last 2.5 m. y. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **97**, 353-368.
- Reynolds, R. A., 1980, Radiolarians from the Western North Pacific, Leg 57, Deep Sea Drilling Project. In Scientific Party, eds., *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **56, 57**, 735-767.
- Ruddiman, W. F., Backman, J., Baldauf, J., Hooper, P., Keigwin, L., Miller, K., Reymo, M. and Thomas, E., 1986, Leg 94 paleoenvironmental Synthesis. In Ruddiman, W. F. Kidd, R. B., Thomas, E. et al., eds., *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **94**, 1207-1215.
- Sakai, T., 1980, Radiolarians from Sites 434, 435, and 436, Northwest Pacific, Leg 56, Deep Sea Drilling Project. In Scientific Party, eds., *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **56, 57**, 695-713.
- Sancetta, C., 1981, Neogene diatoms from Deep Sea Drilling Project Leg 62. In Thiede, J., Vallier, T. L. et al., eds., *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **62**, 355-360.
- Sancetta, C., 1982, Distribution of diatom species in surface sediments of the Bering and Okhotsk seas. *Micropaleontol.*, **28**, 3, 221-257.
- Sancetta, C., 1983, Effect of Pleistocene glaciation upon oceanographic characteristics of the North Pacific Ocean and Bering Sea. *Deep Sea Research*, **30**, 851-869.
- Sancetta, C., 1985, Late Pleistocene (Brunhes) diatom record at Site 580. In Hess, G. R., Burckle, L. H., et al., eds., *Init. Repts. DSDP*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **86**, 423-427.
- Sancetta, C. and Silvestri, S. M., 1986, Pliocene-Pleistocene evolution of the North Pacific ocean-atmosphere system, interpreted from fossil diatoms. *Paleoceanography*, **1**, 163-180.
- Schrader, H. and Sorknes, R., 1990, Spacial and temporal variation of Peruvian coastal upwelling during the latest Quaternary. In Suess, E., von Huene, R., et al., eds., *Proc. ODP, Sci. Result*, College Station, Tx (Ocean Drilling Program), **112**, 391-406.
- Scientific Party, 1980, *Initial Reports of Deep Sea Drilling Project*. U. S. Govt. Printing Office, Washington D. C., **56, 57**.
- Shackleton, H. J., Backman, J., Zimmerman, H., Kent, D. V., Hall, M. A., Roberts, D. G., Schnitker, D., Baldauf, J. D., Desprairies, A., Homrinhausen, R., Krumsiek, K. A. O., Morton, A. C., Murray, J. W. and Westberg-Smith, J., 1984, Oxygen isotope calibration of the onset of ice-rafting and history of glaciation in the North Atlantic region. *Nature*, **307**, 620-623.
- Sikes, E. L., Keigwin, L. D. and Curry, W. B., 1991, Pliocene paleoceanography : Circulation and Oceanographic changes associated with the 2.4 Ma glacial event. *Paleoceanography*, **6**, 245-257.
- Tanimura, Y., 1981, Late Quaternary diatoms of the Sea of Japan. *Sci. Repts. Tohoku Univ. 2nd ser. (Geol.)*, **51**, 1-37.
- Venrick, E. L., 1971, Recurrent groups of diatom species in the North Pacific. *Ecology*, **52**, 614-625.
- Yanagisawa, Y. and Y. Akiba, F., 1990, Taxonomy and phylogeny of the three marine diatom genera. *Crucidentacula*, *Denticulopsis* and *Neodenticula*. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **41**, 97-301.
- Zhongli, D., Rutter, N., Jingtai, H. and Tungsheng, L., 1992, A coupled environmental system formed at about 2.5 Ma in East Asia. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleocol.*, **94**, 223-242.

(要 旨)

古屋克江, 1995, 東北日本三陸沖 DSDP コアの珪藻化石群集に記録された鮮新世後期以降の海洋環境の変遷. 地質雑, **101**, 148-161. (Koya, K., 1995, Marine environmental changes since late Pliocene, recorded in the diatom fossil assemblage of the DSDP cores off Sanriku, Northeast Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **101**, 148-161.)

三陸沖 DSDP Site 436, 440, 438 の鮮新世後期以降の珪藻化石群集の変化から, 北西太平洋における水塊と海況の変化が明らかになった. およそ 2.2-2.4 Ma 頃に現在に近い亜寒帯水が発達し, 1.0-0.9 Ma 頃に親潮水塊が成立, そして, この頃からオホーツク海などで海水の本格的な形成が始まった. また, 3 地点の寒暖両海流の勢力変化の比較から, 第四紀初頭に黒潮前線が大きく南下し, 現在のような混合水域が発達するようになったのは第四紀になってからであろうと推測された. これらの亜寒帯水塊の低温・低塩分化と混合水域の発達は, 鮮新世後期以降の世界的な寒冷化によって, 北太平洋の南北および東西の温度勾配が変化してきたことを示唆する.