

「みらい」MR02-K03 PC-2の珪藻化石群集に基づく 過去20万年間の黒潮系暖水の変遷

小泉 格^{*1} 入野 智久^{*2} 三島 稔明^{*3}
金松 敏也^{*3} 山本 浩文^{*4}

珪藻は環境変化に敏感な生物で、わずかな水質の変化にも反応し、その群集構成を著しく変化させる。珪藻は光合成を行い、大気中の二酸化炭素の同化に貢献している。また、自然界の重要な第一次生産者であり、多くの動物の餌となっている。

「みらい」MR02-K05次航海において、三陸沖東方の水深5,700m海域で採取された2本のピストンコアのうち、PC-2コア中に含まれる珪藻化石群集を過去20万年間について分析し、三陸沖東方海域における黒潮系暖水の変遷を明らかにした。

キーワード：黒潮続流域, 珪藻, 珪藻温度指数, 氷期／間氷期

Changes in the warm water Kuroshio Current system during the past 200 thousand years based on diatom fossils in the sediment core PC-2 sampled on the R/V Mirai cruise [MR02-K03]

Itaru KOIZUMI^{*5} Tomohisa IRINO^{*6} Toshiaki MISHIMA^{*7}
Toshiya KANAMATSU^{*7} Hirofumi YAMAMOTO^{*8}

Diatoms cause substantial changes in the composition of their assemblages because they react sensitively even to a slightest change in the waters. Diatoms photosynthesize, making a contribution to the assimilation of atmospheric carbon, and they supply foods to the animals as a primary producer in the nature.

Authors investigated the samples taken from the piston core PC-2 recovered from 5,700 meters deep in the eastern area off Sanriku on board "MIRAI cruise [MR02-K03]". We analyzed the diatom fossil assemblages to know changes in the warm Kuroshio Current system during the past 200 thousand years.

Keywords : Kuroshio Extension, Diatoms, Td value, Glacial/Interglacial

*1 海洋観測研究部 平成12年度客員研究員(北海道大学名誉教授)

*2 北海道大学大学院地球環境科学研究科

*3 深海研究部

*4 海洋観測研究部

*5 Ocean Observation and Research Department, Visiting Researcher in 2000 (The Professor Emeritus of Hokkaido University)

*6 Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

*7 Deep Sea Research Department

*8 Ocean Observation and Research Department

1. はじめに

海洋観測船「みらい」MR02-K03次航海において、三陸沖東方の水深5,712mの地点(36°00.4000' N, 146°30.0037' E)からピストンコアPC-02(無攪乱コア長18.185m)を採取した(図1)。表層堆積物を攪乱しないで採取するためにアシュラコアラをピストンコアラのパイロットコアラとして使用し、20.5cmの表層堆積物(PL-2, Hand 1)を採取した。

本研究は、このコアに含まれる珪藻化石群集を過去20万年間について分析し、三陸沖東方海域における黒潮系暖水の変遷を明らかにしようとするものである。

2. 分析試料の年代

コアPC-02の古地磁気強度から分析試料の年代を推定した(表1の上行)。コアPC-02の自然残留磁化強度(NRM)を15mTの交流消磁によって不安定な磁化成分を除去した時の磁化強度(NRM15)を、磁性鉱物の量を反映する15mT交流消磁後の非履歴性残留磁化強度(ARM15)で規格化したもの(NRM15/ARM15)を相対古地磁気強度の指標とし、これを地球磁場強度の指標であるSINT800(Guyodo and Valet, 1999)と対比した。

3. 分析試料

アシュラコアPL-2の2cmから20.5cmまでを約10cm毎に厚さ0.5cmの試料を3個とピストンコアPC-02の0cmから1300cmまでを132個、計135個の試料を取り出した。

4. 分析方法

4.1. 試料の処理とスライド作成

乾燥重量0.1gの試料を過酸化水素水約10mlの入った100mlのビーカ中に投入し、数秒間ガスバーナで沸騰・冷却後、蒸留水を水柱約10cmまで注入し、一昼夜放置する。上澄み液を流し出した後、100mlまで蒸留水を加えて攪拌、マイクロピペットを使用して0.5mlをあらかじめホットプレート上に並べておいた18×18mmのカバーガラスに移す。約60℃で乾燥させた後、封入剤(ブルーラックス)を数滴カバーガラス上に落とし溶剤のエタノールを蒸発・乾固させる。カバーガラスをアルコールランプであたため封入剤の表面が溶けた状態で、76×26mmのスライドガラスに張り付ける。

4.2. 顕微鏡作業と分析法

4.2.1. 鏡下観察

光学顕微鏡を使用した鏡下観察では、対物レンズ63倍の油浸と広視野接眼レンズ10倍の組み合わせによって、カバーガラスの端から約1/3の測線から検鏡を始め、鏡下に現れた珪藻化石種を同定し、合計200個までを算定した(表1)。ただし*Bacteriastrum* spp.と*Chaetoceros furcellatus*以外の*Chaetoceros* spp.を除外した。

4.2.2. 珪藻殻数

乾燥重量1gの試料中に含まれる珪藻化石数を算出して、珪藻生産に関連すると考えられる珪藻生息時の環境復元を試みた(表1の下行、図2)。

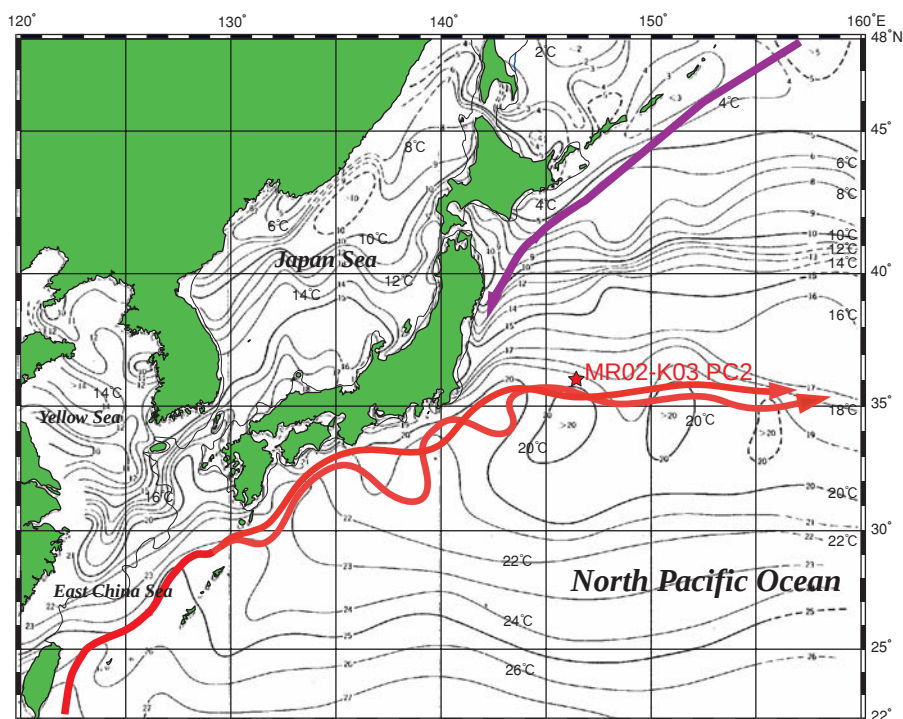


図1 ピストンコアMR02-K03 PC-2の位置、三陸沖の主要海流(赤の矢印=黒潮、紫の矢印=親潮)、春季0mの等温線(海洋環境図:1978改変)。

Fig. 1 The location of piston core MR02-K03 PC-02, major current systems off Sanriku (red arrows=Kuroshio Current, purple arrow=Oyashio Current), the isotherm of 0m depth at spring.

表1 ピストンコアMR02-K03 PC-2とアシュラコアPL-2における珪藻化石群集。
Table 1 Occurrences of diatoms in the piston core MR02-K03 PC-2 and ashura core PL-2.

[illegible]

表1の続き

[illegible]

表1の続き

[illegible]

4.2.3. 珪藻温度指数 (Td値)

過去20万年間の黒潮系暖水の変遷を明らかにするために、Kanaya and Koizumi (1966) が定義したした温暖種(暖流系種)と寒冷種(寒流系種), それらの個体数比率による珪藻温度指数 (Td値) を算定した(図2)。

温暖種(暖流系種): *Actinocyclus elongatus*

Alveus marinus

Asterolampra marylandica

Azpeitia africana

Azpeitia nodulifera

Fragilariopsis doliolus

Hemidiscus cuneiformis

Planktoniella sol

Rhizosolenia bergonii

Roperia tessellata

Thalassiosira leputopus

寒冷種(寒流系種): *Actinocyclus curvatus*

Actinocyclus ochotensis

Asteromphalus robustus

Bacterosira fragilis

Chaetoceros furcellatus

Coscinodiscus marginatus

Coscinodiscus oculus-iridis

Fragilariopsis cylindrus

Neodenticula seminae

Odontella aurita

Porosira glacialis

Rhizosolenia hebetata

Thalassiosira gravida

Thalassiosira hyalina

Thalassiosira kryophila

Thalassiosira nordenskioldii

Thalassiosira trifulta

4.2.4. Qモード因子分析

本海域は、黒潮水塊・親潮水塊・混合水塊・津軽暖流水の影響があり、過去においてもこれら水塊の混合率が複雑に変化してきており、それが珪藻群集組成に影響を与えてきたと予想される。そこで、今回用いた試料群に含まれる珪藻群集の変動が、どのような端成分群集の組み合わせの変化に基づくものか検討するために、ダウンコア試料セットに対するQモード因子分析を行った。

因子抽出の計算にはSPSS (TM)を用い、試料セットの全分散の90%以上を説明する因子数を決定した。その後、決定された数の因子をバリマックス回転し、各因子の因子負荷量および因子スコアを検討した。さらに、抽出された共通因子で説明されない各タクサの変動も調べるために、各タクサの変動量から共通因子で説明される変動の寄与を差し引いた残渣の変動も検討した。

5. 分析結果

5.1. 珪藻殻数

PC-2コアの珪藻殻数(平均 $2.23 \times 10^7/\text{g}$)に約2万年の周期的な増減が認められる(図2a)。最大の減少はMIS5bに相当する5.6m層準($3.96 \times 10^7/\text{g}$)からMIS4の4.1m層準($0.57 \times$

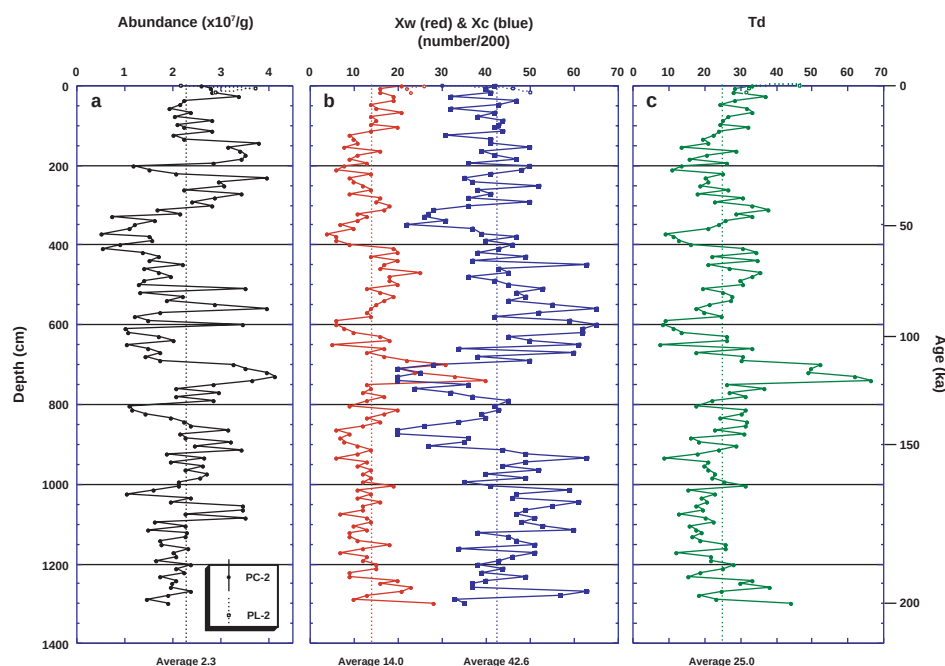


図2 珪藻殻数 (a), Xw=温暖種(暖流系種), Xc=寒冷種(寒流水系種) 頻度 (b), 珪藻温度指数 (Td) (c) の層序変化。

Fig. 2 Stratigraphic variations of the abundance of diatoms (a), Xw= frequency of warm-water species, Xc=frequency of cold-water species (b), and diatom temperature value (Td) (c).

10⁷/g)までに生じており、その後に最大の増加がMIS3に相当する3.7m層準の最少殻数(0.53×10⁷/g)から2.3m層準(3.96×10⁷/g)までに生じている。最大殻数はMIS5eに相当する7.3m層準の4.13×10⁷/gであり、コア下部の13~11m層準から2回の増減をくり返しながら到達している。

PC-2コア最上部の珪藻殻数は、PL-2コアの最下部20cm層準の値に近い。

5.2. 温暖種(暖流系種)と寒冷種(寒流系種), および珪藻温度指数

温暖種と寒冷種の殻数, および珪藻温度指数は小振幅と短周期をくり返しながら全体として約4万年の周期変動を示している(図2b, c)。*Fragilariopsis doliolus*を主体とする温暖種殻数の増加(Xw=40~20/200)と*Thalassiosira gravida*を主体とする寒冷種殻数の減少(Xc=20~28/200)による珪藻温度指数の著しい増加(Td=66.7~33.3)が7.4~7.0m層準に認められ、MIS5eに相当すると判断される(図2b)。珪藻温度指数はこの最大値層準(7.4m)から6.5m層準の最小値(Xw=5/200, Td=7.6)まで著しく減少している(図2c)。次いで、温暖種殻数と珪藻温度指数の増加はMIS7に相当する13~12.4m層準、MIS5aに相当する5.4~4.1m層準、MIS3に相当する3.1~2.8m層準、1.1m層準より上位に認められる。

珪藻温度指数からみて最終氷期末期から現間氷期への非氷河化は1.55m層準から1.05m層準までの間で生じていると判断される。一方、寒冷種の殻数は総じて下部の12.8~9.13m層準(*Coscinodiscus marginatus*を主体とする)

と中部の6.9~3.8m層準(*Thalassiosira gravida*を主体とする)で多く、その間の層準では少ない。3.0m層準より上部では平均値(43/200)付近を増減している。

温暖種と寒冷種の殻数, および珪藻温度指数については、PC-2コア最上部の値は、PL-2コアの10.5cmあるいは20cm層準での値に近い。

5.3. Qモード因子分析

ダウンコアデータセットに対するQモード因子分析の結果、4つの共通因子によって全分散の91.1%が説明されることが分った(表2)。そこで4因子に対してバリマックス回転を行い、各因子の古海洋学的意義を評価する(図3)。

因子1は沿岸浅海性の珪藻種群を主体とし、これに黒潮系外洋種が加わっている種群である(表3)。下部の13.0m層準から9.53m層準まで負荷量が増加した後、9m層準まで減少し、8.33~7.1m層準で平均値(0.60)より高い値となる。6.1m層準から上部0.78m層準まで増加し、3.9m層準より上部では平均値より高い値となる。なお、12.1m層準では唯

表2 主要4因子の因子負荷量。

Table 2 Variance explained by four significant factors.

Factor	Variance Explained	% of variance explained	Cumulative % of variance explained
1	53.5	39.6	39.6
2	31.9	23.6	63.3
3	26.1	19.3	82.6
4	11.4	8.4	91.1

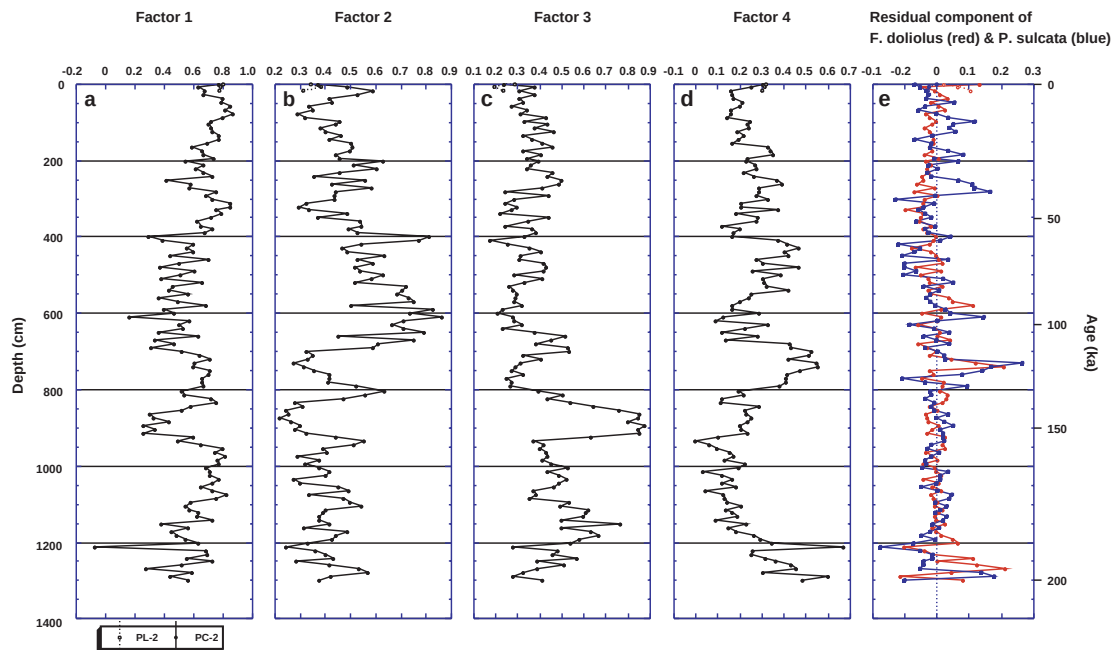


図3 珪藻化石群集のQ-モード因子分析に基づく各因子負荷量(a-d)および共通因子で説明されない*Fragilariopsis doliolus*と*Paralia sulcata*の残渣項(e)の層序変化。

Fig. 3 Stratigraphic variations of the loadings for each factor of Q-mode factor analysis of the diatom assemblage (a-d) and the residual components for *Fragilariopsis doliolus* and *Paralia sulcata* that are not explained by common factors (e).

一の負の負荷量となる(図3a)。

因子2は沿岸性の親潮系種群から構成される種群である(表3)。中部のMIS5に相当する6.9～3.6m層準で著しく高い値となり、下部では約2万年の周期性で増減し、上部4mでは2回の増減が認められる(図3b)。因子スコアの示す種構成はTd値の定義における寒流系種と一致し、因子負荷量の時間変動もXcの変動(図2b)と同調する。

因子3は沿岸浅海性種群と黒潮系外洋種に少数の親潮系種群が付加された混合群集からなる(表3)。8m層準より下部のMIS6に相当する層準で高い値を示し、上部では平均値(0.42)より総じて低い値となっているが、MIS7やMIS5d, MIS3で微増している(図3c)。

因子4は沿岸浅海性種群の黒潮系種群から構成されている種群である(表3)。MIS7, MIS5e～5d, MIS5aに相当する13.0～11.8m, 7.9～6.8m, 5.4～4.1m層準で増加しているが、MIS6に相当する11.7～8.0m層準では著しく減少している。7.4m層準から最上部18cm層準まで約2万年の周期で増減しながら全体として減少している。因子スコアの示す種構成はTd値の定義における暖流系種を多く含み、因子負荷量の時間変動もXwの変動(図2b)と同調するが、Xwの方が、完新世およびMIS5eにおける増加率が大きい。

因子負荷量最大値の層準が下位から上位へ因子3, 因子2, 因子1と移動している。因子1と因子2は、9m層準付近を除いて互いに希釈関係にあり、9m層準付近では両因子とも因子3の極大によって希釈されている。これらに対し、因子4の負荷量は比較的独立した変動を示している

Qモード因子分析の結果においても、PC-2コア最上部の値は、PL-2コアの10.5cmあるいは20cm層準での値に近い。

6. 考察

珪藻殻数、珪藻タクサ個別の解析結果および群集組成の多変量解析結果は、PC-2コアの最上部の組成がPL-2コア

の10.5から20cm層準の組成に近いことを示している。このことから、PC-2では、堆積物表層約10cmが回収されていない可能性がある。

Qモード因子分析の結果得られた因子2および因子4はそれぞれ、Td値の定義に用いる寒流系種(Xc)と暖流系種(Xw)とおおむね一致することから、本コアの珪藻化石群集は、全体としても黒潮と親潮の影響が変化することによる表層水温の変動を良く反映しているものと見られる。しかしながら、Xwと、Qモード因子分析によって抽出された因子4(黒潮群集)の因子負荷量は、おおむね一致して約4万年の周期性をもって変動しているとはいえ、完新世およびMIS5eにおいてはXw値の増加の度合いが大きい。これは共通因子では説明できていない温暖種の増加が、これらの時代に起きているからであると考えられる。そこで、各タクサの変動量から共通因子で説明される変動の寄与を差し引いた残渣の変動を検討したところ、完新世とMIS5eにおいて、共通因子では説明されない*Fragilariopsis doliolus*と*Paralia sulcata*の余剰が多いことが分った(図3e)。

これら2種は、黒潮水塊中に普遍的に見られると同時に、日本海を流れる対馬暖流を特徴づける種でもある。対馬暖流は、現在では津軽海峡を通過して日本海から流出し東北地方東岸に津軽暖流を形成するが、過去の低海水準期においては、津軽海峡が浅いために津軽暖流は存在しないか、極めて微弱であったと考えられる。*Fragilariopsis doliolus*や*Paralia sulcata*が、完新世・MIS5eといった高海水準期のみに黒潮水塊の寄与から期待されるよりも過剰に存在することは、津軽暖流の太平洋への流出が活発な時期に、対馬暖流－津軽暖流に棲息していたこれらの種が本海域の表層水に付加されたことを示唆する。

沿岸水群集や親潮群集を主体とし、一部に黒潮群集をも含む因子1・2・3は、その負荷量の変動において複雑な希釈関係を示している。これは、混合水域から親潮水域

表3 各因子における主要珪藻上位20種の因子得点。

Table 3 Major diatom species with top 20 factor scores.

Factor1		Factor2		Factor3		Factor4	
Score	Species	Score	Species	Score	Species	Score	Species
11.501	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	8.3161	<i>Thalassiosira gravida</i>	11.02	<i>Stephanopyxis</i> spp.	6.4014	<i>Thalassionema nitzschioides</i> v. <i>parva</i>
1.4224	<i>Coscinodiscus marginatus</i>	6.5796	<i>Fragilariopsis oceanica</i>	3.9388	<i>Coscinodiscus marginatus</i>	4.4963	<i>Paralia sulcata</i>
0.8403	<i>Ditylum</i> spp.	2.2044	<i>Thalassiosira oestrupii</i>	3.1536	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	4.3886	<i>Thalassiosira oestrupii</i>
0.7433	<i>Rhizosolenia setigera</i>	2.1571	<i>Bacterosira fragilis</i>	0.9616	<i>Nitzschia interruptestriata</i>	3.0747	<i>Fragilariopsis doliolus</i>
0.6518	<i>Thalassiosira oestrupii</i>	2.0635	<i>Thalassiosira lineatus</i>	0.7578	<i>Melosira albicans</i>	2.7961	<i>Azpeitia tabularia</i>
0.6243	<i>Cyclotella striata</i>	1.919	<i>Melosira albicans</i>	0.6098	<i>Neodenticula seminae</i>	2.7075	<i>Stephanopyxis</i> spp.
0.5664	<i>Actinocyclus senarius</i>	1.8168	<i>Thalassiosira nordenskioldii</i>	0.3327	<i>Thalassionema hirosakiensis</i>	2.2692	<i>Thalassiosira eccentrica</i>
0.4954	<i>Actinocyclus octonarius</i>	1.7786	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	0.3297	<i>Pseudosolenia calcar-avis</i>	1.8759	<i>Actinocyclus curvatulus</i>
0.4496	<i>Thalassiosira pacifica</i>	1.7041	<i>Azpeitia tabularia</i>	0.2354	<i>Thalassiosira hyalina</i>	1.8198	<i>Thalassiosira lineta</i>
0.4387	<i>Fragilariopsis doliolus</i>	1.6112	<i>Thalassiosira trifulta</i>	0.2294	<i>Thalassiothrix longissima</i>	1.5009	<i>Alveus marinus</i>
0.4288	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	1.449	<i>Thalassiosira eccentrica</i>	0.1978	<i>Thalassiosira leputopus</i>	1.4648	<i>Denticula seminae</i>
0.4092	<i>Paralia sulcata</i>	1.3014	<i>Fragilariopsis cylindrus</i>	0.1798	<i>Pseudopodosira elegans</i>	1.3899	<i>Rhizosolenia styliformis</i>
0.3497	<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	0.9835	<i>Actinocyclus octonarius</i>	0.1603	<i>Actinocyclus octonarius</i>	1.3713	<i>Roperia tessellata</i>
0.2686	<i>Thalassiosira leputopus</i>	0.9808	<i>Actinocyclus curvatulus</i>	0.1474	<i>Actinocyclus senarius</i>	1.0199	<i>Delphineis surirella</i>
0.2622	<i>Pseudosolenia calcar-avis</i>	0.8782	<i>Thalassiosira hyalina</i>	0.1278	<i>Nitzschia bicapitata</i>	0.9424	<i>Actinocyclus senarius</i>
0.2528	<i>Stellarima stellaria</i>	0.7671	<i>Stephanopyxis</i> spp.	0.1119	<i>Rhizosolenia imbricata</i>	0.9375	<i>Rhizosolenia styliformis</i>
0.2411	<i>Thalassiosira eccentrica</i>	0.7486	<i>Thalassiothrix longissima</i>	0.107	<i>Coscinodiscus perforatus</i>	0.879	<i>Thalassionema hirosakiensis</i>
0.2212	<i>Odontella aurita</i>	0.7426	<i>Rhizosolenia styliformis</i>	0.1035	<i>Thalassiosira subtilis</i>	0.8285	<i>Thalassiosira leputopus</i>
0.2116	<i>Thalassiothrix longissima</i>	0.7152	<i>Porosira glacilis</i>	0.0858	<i>Nitzschia capuluspaleae</i>	0.7816	<i>Ditylum</i> spp.
0.1964	<i>Neodenticula seminae</i>	0.6681	<i>Paralia sulcata</i>	0.0803	<i>Bacillaria paradoxa</i>	0.7394	<i>Rhizosolenia hebetata</i>

にいたる日本列島東岸域において、黒潮前線の氷期—間氷期にともなう南北方向の変動の他に、暖水塊や冷水塊の発達といった、不規則な変動が時代とともに起こってきたことを示唆する。

7. まとめ

珪藻化石群集組成から見て、ピストンコアPC-2の最上部は、アシュラコアPL-2の10.5から20cm層準にあたる。また、珪藻温度指数(Td)からみて、コアPC-2の古地磁気強度から推定したコアの年代は極めて妥当である。

珪藻殻数の増減に約2万年の周期変動が認められる。

黒潮前線に位置するコアPC-2では、暖流系種殻数(Xw)の変動幅が寒流系種殻数(Xc)のそれよりも大きい。そのためXwや珪藻温度指数(Td)の層序変動が過去の海況変動を直接的に記録している。

XwとTdの最大値は7.4~6.8m層準に認められ、MIS5eに相当する。この層準では寒冷種の殻数が最少である。次いで、温暖種殻数と珪藻温度指数の増加は13~12.4m層準(MIS7)、5.4~4.1m層準(MIS5a)、3.1~2.8m層準(MIS3)、1.1m層準より上位(MIS1)である。また、Tdからみて最終氷期末期から現間氷期への非氷河化は1.55m層準から1.05m層準までの間で生じている。Xw, Xc, Tdには、約4万年の

周期変動が認められる。

ダウンコアデータのQモード因子分析結果は、本コアに含まれる珪藻群集が4つの端成分の混合によって説明できることを示す。そのうち3因子は、混合水域から親潮水域における表層水塊の複雑な変動を反映しており、1因子は黒潮水塊の寄与を表している。

完新世およびMIS5eにおいては、これら共通因子の変動から予測される以上に、*Fragiraliopsis doliolus*や*Paralia sulcata*の割合が高まっている。これは、高海水準期には日本海経由の暖流水塊が津軽暖流を経て日本列島東岸混合水域に影響を与えたことを示唆する。

引用文献

- 1) Guyodo, Y. and Valet, J.P., Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr, *Nature*, 399, 249-252, (1999).
- 2) 海洋資料センター編, 海洋環境図 外洋編—北西太平洋—, 日本水路協会, (1978).
- 3) Kanaya, T. and Koizumi, I., Interpretation of diatom than at ocoenoses from the North Pacific applied to a study of core V20-130 (Studies of a deep-sea core V20-130. part IV), *Sci. Rep. Tohoku Univ., 2nd ser. (Geol.)*, 37 (2), 89-130, (1966).

(原稿受理: 2003年8月6日)