

本州東方海域における過去2万年の海洋環境

山本 浩文*¹ 山内 守明*² 金松 敏也*³ 三島 稔明*³

過去100年の海洋観測の成果によると、黒潮は蛇行・非蛇行を繰り返しながら日本南岸から房総沖を東に流れ去っている。しかしながら過去数万年の歴史から推測すると、黒潮が九州南沖で離岸して日本列島に接岸せず流去していた時代、あるいは黒潮が東北地方沿いに北上していた時代の存在が示唆されている。それぞれの時代における海水温に適応した群集を形成して棲息していたプランクトンの遺骸は海底に堆積を続けているが、黒潮統流域における海底堆積物の解析によれば、過去の大規模水温変化の変動幅は約7℃に達していると推定されている。これを単純に黒潮統流の南北移動距離に換算すると1000kmにも相当するが、実際にその時代の黒潮がどのような流路をとっていたのかなど具体的な様子は未知のまま残されている。

このため2次元的に配列された観測点における堆積物コア試料を解析して各時代における平均的な黒潮流路を特定する。

キーワード：黒潮統流域, 放散虫, 氷期／間氷期

The ocean environment in the eastern area off Honshu from the 20,000 years B.P to the Present

Hirofumi YAMAMOTO*⁴ Moriyoshi YAMAUCHI*⁵
Toshiya KANAMATSU*⁶ Toshiaki MISHIMA*⁶

The Kuroshio current continue to run through meandering or non- meandering from south of Honshu to off Boso peninsula on the marine observation results about centurial. However we estimated the past tens of thousands years, there are suggest to exist the as blow periods, the Kuroshio current leave shore at the south offshore Kyushu which not come alongside the Japanese archipelago. The Kuroshio current pass through near Tohoku coastal area. The plankton fossils continue to accumulate on the bottom. These were flourishing each seawater temperature. We have on the fluctuation band of the past global water temperature changes. The fluctuation band estimated to arrive at 7 degrees C. This fluctuation possess is considerable energy about moving distance 1,000 km on north -south axis. We can't to clarify unknown condition the past Kuroshio and Oyashio current system.

We estimate to identify the average Kuroshio and Oyashio flow path by analyses sediment cores on the two-dimensional area.

Keywords : Kuroshio Extension, Radiolalia, Glacial/Interglacial

* 1 海洋観測研究部

* 2 甲南高等学校

* 3 深海研究部

* 4 Ocean Observation and Research Department

* 5 Konan boys' high school

* 6 Deep Sea Research Department

1. 本州東方海域における海洋古水温復元研究の背景

古環境を探る目的は様々であるが、本観測研究は水温変動に的を絞った研究であり、過去2万年程度の期間内における黒潮の大規模変動の履歴を調べる海洋物理学の調査である。

西岸を持つ大洋では亜熱帯循環は西岸境界流となって北上(南半球では南下)することにより、熱帯域で得た莫大な熱量を亜寒帯ならびに極域に輸送している。北太平洋亜熱帯循環(黒潮)も基本的には北上流であるが、日本周辺においては四国から本州南岸沿いにほぼ東向きに流れて黒潮統流域へと至る。この流路はごく短期的にも黒潮大蛇行・非蛇行(直進)を数ヶ月～数年スケールで遷移するなど、必ずしも安定な流路となっていない事は、過去数10年間の海洋観測データの蓄積により明らかとなっている。

しかし、離散的な観測例ではあるが、既に実施されている海洋古環境研究からは現在の様子から想像できないほど親潮が日本南岸まで南下して冷水で覆われていた時代が存在していた事も明らかとなりつつある。また、逆に、一部の海洋数値モデルの結果からは黒潮が房総沖で西方に流去せず、そのまま接岸しながら三陸沖を北上する例が示されている。

このように、黒潮が日本周辺においては四国から本州南岸沿いにほぼ西向きに流れて黒潮統流域へと至るという現在の姿は、たかだか過去数百年間にそうであったに過ぎない可能性もある。

気候変動のタイムスケールで見た場合、エルニーニョに代表される数年スケールの気候変動は非常に短い現象である。実際には数10年～数百年あるいはそれ以上のタイムスケールの気候変動が存在していることは明らかである。超長期の大規模気候変動の一部は極域を中心とする海水・陸水の大規模変動あるいは大規模な火山活動および地殻変動により、植生や生態系を含む大規模気候変動に至る場合などが考えられている。

ここで、北太平洋中高緯度海域における海洋古水温観測研究の目標とするのは超長期の気候変動ではなく、数百年～数万年のタイムスケールの気候変動に係わる海洋の大規模変動である。このため、大規模な地殻変動を伴わない過去2万年程度の期間内を対象とする。先述のように日本周辺海域の黒潮が北向きに輸送する熱量は莫大であり、その流路の大規模変動は必ず日本周辺における大気海洋結合系に大きな影響を与える。このような現象は高精度大気海洋結合モデルの発達によって、近年のうちにシミュレーションが可能となるかも知れない。しかしながら、日本周辺海域における黒潮の大規模変動の履歴はいまだ組織的に調査されているとは言えない。

今後、開発が見込まれる大気海洋結合モデルはこのような黒潮統流域を起源とする大規模気候変動を再現するであろうが、水温の南北勾配の大きな黒潮統流域における海洋古水温環境の履歴、すなわち黒潮流路の大規模変動の履歴を明らかとする研究は数値モデルの検証のために非常に重要である。

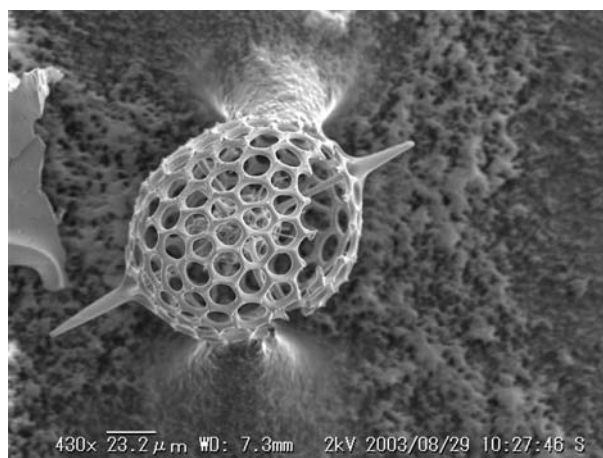


図1 プランクトン遺骸例 ガラス質の骨格を持つ放散虫化石。生息環境により種類や骨格が異なる(VE-7800にて撮影)

Fig. 1 Microfossil

Radiolaria fossil have hyaline bones. Radiolaria change species and bones by each native habitat. (use VE-7800)

幸いな事に、日本周辺海域は亜熱帯循環(黒潮)と亜寒帯循環(親潮)が黒潮統流域を中心にせめぎ合っている海域であり、表層水温変化が著しい。また、それにとまなう表層の生態系変化も著しく、プランクトン遺骸(図1)群集が海底に堆積している。従ってこれら海底堆積物の採集分析と年代測定との組み合わせによって、黒潮の大規模変動の履歴を調べる事が可能となる。

2. 採泥試料について

最終氷期以降の黒潮・親潮水塊の変動を把握するために、1997年より黒潮統流域から混合水域を中心に計14本のピストンコアを採取し、このうちの7本について古環境解析を実施した(図2)。

採取したコアのうち、三陸沖の親潮域および銚子沖黒潮前線域の2本のコアについては、酸素同位体・浮遊性有孔虫・放散虫・珪藻・石灰質ナノプランクトンおよび ^{14}C 絶対年代の測定の総合調査が、東経 145° 以東の4本のコアでは、放散虫・珪藻等の調査を実施した。この海域は水深がCCDよりも深いため、酸素同位体の測定に必要な浮遊性有孔虫が堆積物に含まれていない。従って、既知の火山灰層序への対比や、古地磁気の帯磁率、分光色測計による色相の変化とMartinson et al. (1987)で示された酸素同位体ステージへの対比を行った。これにより時間軸を得て古環境解析を実施した。

2.1. 採泥器(20mピストンコアラ)の挙動

深海底・湖底堆積物コアを用いた古地磁気解析においては、コア採取時にコアラの回転が生じるため、偏角を利用するためには同一地点で複数のコアを採取して各コアの偏角を比較するなどの工夫が必要となる。また、伏角を利用するにあたっては、コアラが本当に鉛直に刺さっているかどうかの検証はこれまで行われてこなかった。そこで、

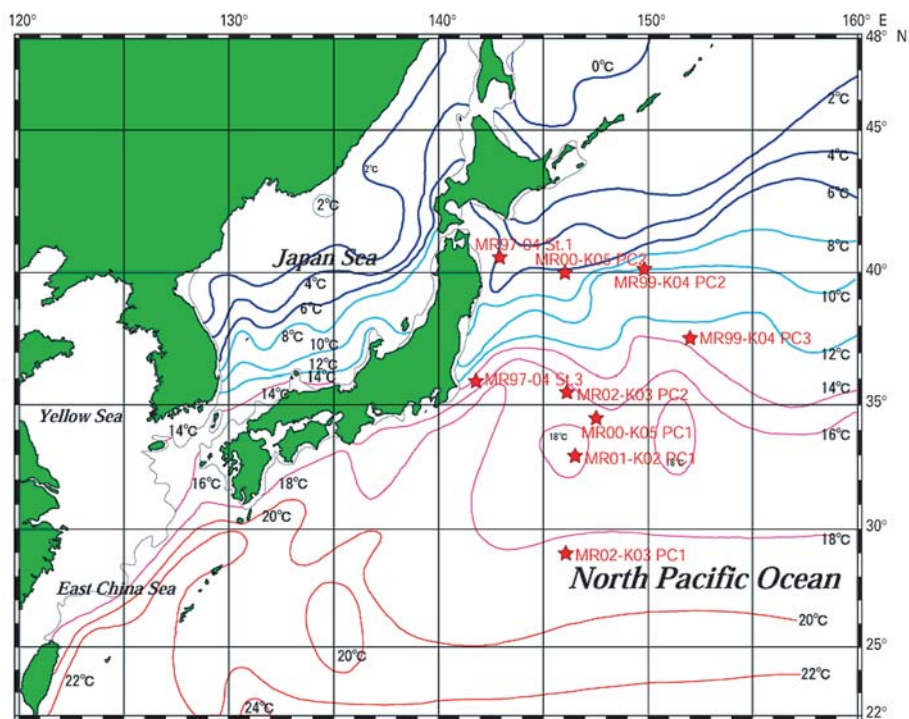


図2 ピストンコア採取位置。等温線は春季の水深100mの水温を示す。

Fig. 2 Location of piston corer sites by R/V 'MIRAI' and the isotherm of spring 100m



図3 ピストンコアラーモニター(方位・傾斜・深度)

Fig. 3 The piston corer monitor (direction, tilt, depth)



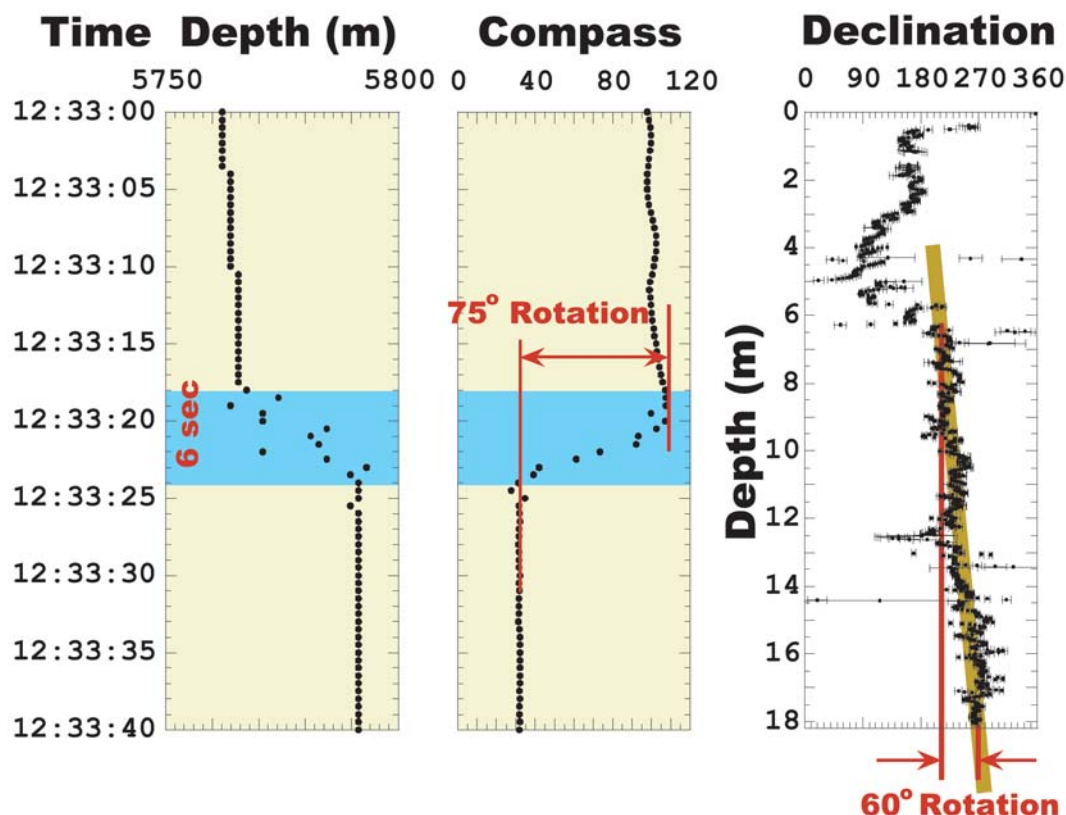


図4 傾斜方位計と古地磁気測定によるコアラーの回転の検証

Fig. 4 Verification of the corer rotation angle by the piston corer monitor and the paleomagnetism measurement

傾斜方位計を製作し、「みらい」MR02-K03 航海において、20m用ピストンコアラに取り付け(図3)、コアラの挙動を調査した(山本, 村木, 2001)。

コア MR02-K03 PC-1 は約2Ma, MR02-K03 PC-2は約290ka までの古地磁気記録を残していると推定される。このように両コアは堆積速度が比較的遅いため、その古地磁気記録を数10cm～数m以上のスケールで見ると、短周期の地磁気永年変化の影響を取り除いた地心双極子磁場の方向、すなわち採取された試料の地層中での方位を示す記録とみなすことができる。

両コアの着底前後40秒間の傾斜・方位・深度の記録と古地磁気記録の比較を図4に示す。両コアともコアの上部に偏角の大きな変化が見られるが、これは方位計には記録されていない。おそらく、堆積物の柔らかい部分がコアラ内部で回転していることを示すものだと考えられる。一方、コア下部の古地磁気偏角の変化と方位計によるコアラの方位の変化は調和的であり、コアラの回転が捉えられているように考えられる。

2.2. 調査海域の海底堆積物の特徴

これまで「みらい」で採取した日本東方海域の大水深堆積物コアの特徴は図5のように3つの堆積相に分類することができる。堆積相Ⅰは親潮域の堆積相である。親潮は栄養塩に富み、生物生産量が高いため、堆積物は珪藻を多

く含む珪質粘土で代表され、その色は暗いオリーブ色から灰色を示す。岩相は珪藻軟泥に移行する事がある。生物遺骸片は珪藻について放散虫が占める割合が多い(10%程度)。堆積速度は親潮の高い生産量を反映して4-5cm/ky程度と非常に早い。

堆積相Ⅱは現在の黒潮続流域を中心に分布する堆積相で、黄茶色を示し、粘土が50-90%, 生物源シリカが～20%を占める。堆積速度は1-2cm/kyである。堆積相Ⅲは現在の黒潮続流域よりも南を中心に分布し、暗茶色で90%以上が粘土からなり生物起源物質はほとんど含まない。堆積速度は数mm/kyと遅い。

さらに、一本の堆積物コアの中に複数の堆積相の特徴が見られる例もある。堆積相Ⅲに属するコアMR02-K03 PC-2 では、図6のように相対古地磁気強度の指標(NRM15/ARM15)と過去80万年間の標準古地磁気強度曲線(SINT800)とが対比できる。コアの上部では対比を行いづらい箇所もあるが、深度8m以深は良い対応を示す。ここから、氷期である酸素同位体比ステージ6・8の堆積速度はともに8cm/kyr程度と大きい、酸素同位体比ステージ7(間氷期)の堆積速度は3cm/kyr程度と、氷期の半分以下の値であったことが読み取れる。また、コアの色の明度を表すL*は、間氷期の堆積物の方が高い(明るい)値を示す。大きな堆積速度と暗い色が親潮域の堆積物の特徴であると考え、間氷期にはこのコアの採取域では親潮の影響

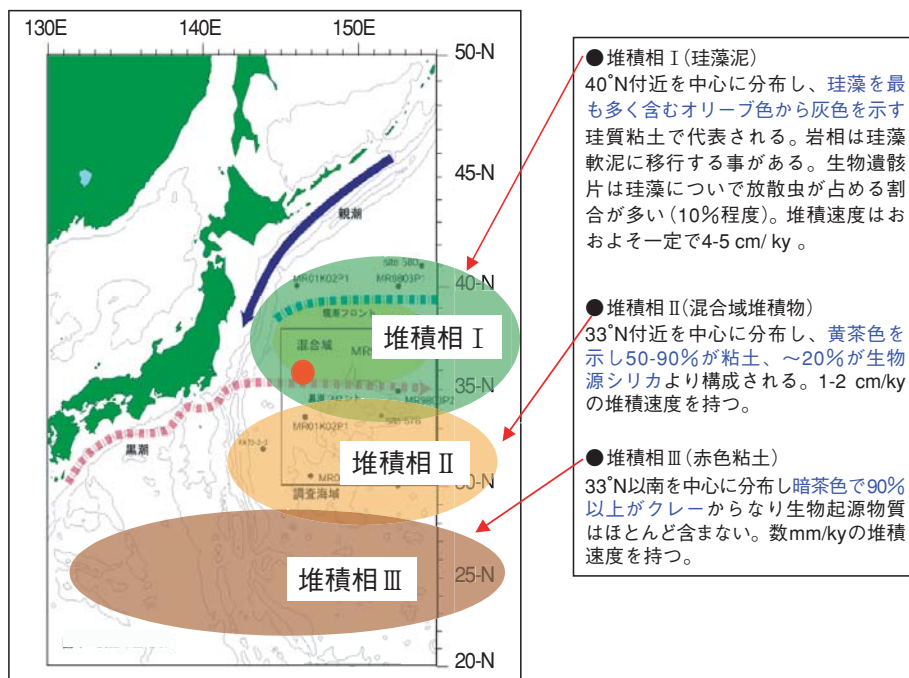


図5 北西太平洋の大水深堆積物

Fig. 5 The deep sea sediments of North Pacific Ocean

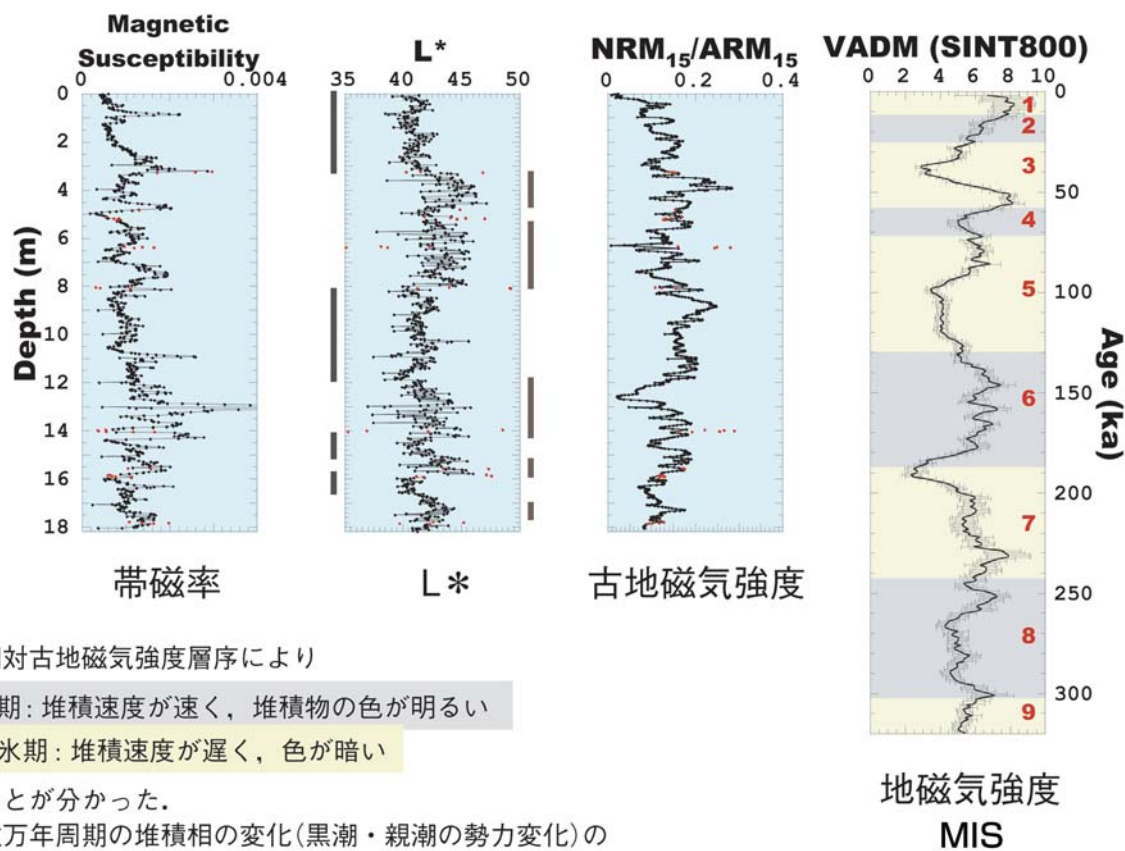


図6 堆積相Ⅰ・Ⅱの境界付近の堆積物

Fig. 6 The sediment on the seabed of the boundary depositional environment I・II

が弱まっていたことが予想される。

このように、黒潮と親潮の影響下にある堆積物は大きく性質が異なるため、特に両者の衝突する黒潮・親潮混合域の堆積物には過去の黒潮・親潮の勢力変化の記録が残されている。現在、この海域に焦点を当て、「みらい」のほか「かいいい」でも採泥航海を行ない、採取したコアの解析を行っている。

3. 黒潮続流域における古水温の復元

放散虫の群集解析は、各試料について500個体の種を同定し、その中に含まれる環境指標種から古水温を求めた。

3.1. 調査海域の海洋環境

観測海域の海洋環境と微化石群集を対比させるデータとして日本水路協会発行の海洋環境図(1978)を解析に使用した。この海洋環境図は、北西太平洋の50年におよぶ約11万測点のデータをもとに月別・水深別の水温、塩分、溶存酸素、力学的深度偏差を示している。

仮に堆積速度が20cm/kaのコアで、1cmの層厚でサンプリングを行えば、50年間の積算を見ることになるが、海洋環境図の積算されたデータと一致する。また、堆積速度が数cm/kaと遅い場所では、層厚1cmの試料で数100年間の積算された堆積物を見ることになるが、1年のある時期の水温と比較するよりは、50年間の積算されたデータの方が、より信憑性が高い。

海洋環境図に記される水温は、0m、50m、100m、200mの水深で、水温躍層の上部のみを知るようになるが、プランクトンの多くが100m付近で群集密度が最も高くなる(Brandt, 1885; Petrushevskaya, 1971)ことから必要な水深のデータを取り出すことが可能となる。古水温変換式を作成するため

表1 表層堆積物を採取した北緯28°～40°の14地点の水温年較差比較

Table 1 The annual range comparison of the observation seawater temperature at 14 cores site

	年較差平均	最大	最小
0m	11.4℃	16.0℃	7.5℃
50m	7.2℃	11.5℃	4.0℃
100m	4.2℃	7.0℃	1.0℃
200m	1.5℃	3.0℃	0.0℃

表2 表層堆積物を採取した北緯28°～40°の14地点の南北間の年間平均水温の差

Table 2 Difference of average yearly seawater temperature lie north and south at 14 cores site

	0m	50m	100m	200m
最高水温	24.4℃	23.3℃	21.6℃	19.1℃
最低水温	11.8℃	8.8℃	7.5℃	4.6℃
温度差	12.6℃	14.5℃	14.1℃	14.5℃

に用いた表層堆積物の採取地点の水温変化を読みとると、それぞれの水深別の最高水温と最低水温との年較差は表1のようになった。

本邦周辺の海域では黒潮域よりも混合水域での年較差の方が大きくなり、北緯40°付近では水深0mの年較差は16℃にも達する。一方、古環境解析で復元を目指す水温は、南北の海域間での温度差の中にある(表2)。

ここで水期の古水温を見積もる場合、注意しなければならないのは、寒冷種が増加して水温低下を示すということ、単にその海域の表層水の温度が低下したのではなく、有光帯下部の寒冷種を包括した冷たい水塊が南下し、その海域に卓越していることを意味するということである。従って、年較差の極めて大きい表層水0mの水温を求めるよりは、群集密度が高く年較差の小さい有光帯下部の水温を求める方が適切で、復元される水温の精度も高くなる。

3.2. 放散虫微化石による群集解析

各試料中に産出する放散虫のうち、北西太平洋の環境指標種として知られる90種に着眼しその挙動を調べ、山内(1986)に示される放散虫指数を算出した。

$$Sr = \sum (S \cdot n) / \sum n$$

S=1: 寒冷種
S=2: 温暖種
S=3: 暖海種
n: 個体数

求められたSrの値は、指標種の性格から群集の類似度および海水の温暖さを相対的に表すものと言える。このことより、以下のように水塊を区分することが可能となる。

Sr=3.0: 黒潮本流(温暖域)
3.0>Sr>2.0: 黒潮変質部(温暖～漸移域)
Sr=2.0: 黒潮前線
2.0>Sr>1.0: 黒潮・親潮混合水帯(漸移～寒冷域)
Sr=1.0: 親潮本流(寒冷域)

放散虫は他のプランクトンと同様の生態を示し、水深100m付近で群集密度が最も高くなっている。また中緯度域では春季と秋季の年二回の発生期が、高緯度域では夏季のみの発生が知られている。このことから本邦付近の海水温との相関は、季節躍層を除いた水温との相関を見る必要がある。山内(1986)は、上記の理由で年間の50～200mの平均水温とSrの相関を調べ、次の水温回帰式を作成している。

$$\text{Temp} = 7.12 \text{ Sr} + 0.685$$

求められた古水温は、その定義に従って50～200mの年間平均水温ということになるが、この値は6月から7月までの水深100mでの水温に近似していることから、古水温を初夏の100mとして解釈しても差し支えない。水深0mの8月と2月の相関が最も低くなった(表3)。

表3 月別深度別の古水温変換式と相関係数

右の列は相関係数の順位を表し、年間平均水温や水深100mでの相関が高く、表層水温0mの相関は低くなっている。

Table 3 Transfer function by monthly and each depth and correlation factor

		Regression Line	Correlation Coefficient	Min	Max	Rank		Correlation Coefficient
Annual mean	0-200m	6.70 Sr + 2.72	0.9902	9.4	22.8	1	Jul 100m	0.9916
	50-200m	7.07 Sr + 0.81	0.9914	7.9	22.0	2	50-200 m	0.9914
	0m	5.48 Sr + 8.60	0.9823	14.1	25.0	3	Jun 100m	0.9902
	50m	6.87 Sr + 3.59	0.9870	10.5	24.2	4	0-200 m	0.9902
	100m	7.22 Sr + 0.83	0.9900	8.1	22.5	5	100m	0.9900
	200	7.12 Sr - 1.94	0.9897	5.2	19.4	6	200m	0.9897
0m	Jan	6.71 Sr + 2.18	0.9701	8.9	22.3	7	Apr 100m	0.9890
	Feb	6.71 Sr + 1.35	0.9528	8.1	21.5	8	Nov 50m	0.9889
	Mar	7.33 Sr - 0.20	0.9739	7.1	21.8	9	Jul 50m	0.9886
	Apr	6.93 Sr + 1.96	0.9561	8.9	22.8	10	Nov 0m	0.9882
	May	5.72 Sr + 6.76	0.9632	12.5	23.9	11	50m	0.9870
	Jun	5.47 Sr + 9.59	0.9655	15.1	26.0	12	Mar 100m	0.9867
	Jul	4.51 Sr + 14.96	0.9730	19.5	28.5	13	Oct 0m	0.9860
	Aug	3.45 Sr + 18.76	0.9491	22.2	29.1	14	Dec 100m	0.9858
	Sep	3.69 Sr + 17.52	0.9747	21.2	28.6	15	Sep 100m	0.9838
	Oct	4.68 Sr + 13.20	0.9860	17.9	27.2	16	Jun 50m	0.9831
	Nov	4.99 Sr + 10.24	0.9882	15.2	25.2	17	Aug 50m	0.9826
	De	5.62 Sr + 6.79	0.9583	12.4	23.6	18	Aug 100m	0.9825
50m	Jan	6.55 Sr + 2.50	0.9753	9.0	22.1	19	0m	0.9823
	Feb	6.96 Sr + 0.57	0.9695	7.5	21.4	20	Feb 100m	0.9819
	Mar	7.13 Sr - 0.01	0.9739	7.1	21.4	21	May 100m	0.9800
	Apr	7.17 Sr + 0.44	0.9717	7.6	21.9	22	Sep 50m	0.9795
	May	6.81 Sr + 2.83	0.9653	9.6	23.3	23	Jan 100m	0.9784
	Jun	6.95 Sr + 2.89	0.9831	9.8	23.7	24	Jan 50m	0.9753
	Jul	7.46 Sr + 3.19	0.9886	10.6	25.6	25	Sep 0m	0.9747
	Aug	7.58 Sr + 4.07	0.9826	11.6	26.8	26	Mar 0m	0.9739
	Sep	8.10 Sr + 3.64	0.9795	11.7	27.9	27	Mar 50m	0.9739
	Oct	6.21 Sr + 8.48	0.9696	14.7	27.1	28	Jul 0m	0.9730
	Nov	6.05 Sr + 7.41	0.9889	13.5	25.5	29	Oct 100m	0.9724
	De	5.72 Sr + 6.55	0.9720	12.3	23.7	30	Dec 50m	0.9720
100m	Jan	7.22 Sr + 0.40	0.9784	7.6	22.1	31	Apr 50m	0.9717
	Feb	7.28 Sr - 0.69	0.9819	6.6	21.1	32	Jan 0m	0.9701
	Mar	7.38 Sr - 1.05	0.9867	6.3	21.1	33	Nov 100m	0.9700
	Apr	7.34 Sr - 0.58	0.9890	6.8	21.5	34	Oct 50m	0.9696
	May	7.15 Sr + 0.25	0.9800	7.4	21.7	35	Feb 50m	0.9695
	Jun	7.47 Sr - 0.55	0.9902	6.9	21.9	36	Jun 0m	0.9655
	Jul	7.20 Sr + 0.71	0.9916	7.9	22.3	37	May 50m	0.9653
	Aug	7.54 Sr + 0.56	0.9825	8.1	23.2	38	May 0m	0.9632
	Sep	7.60 Sr + 0.74	0.9838	8.3	23.5	39	Dec 0m	0.9583
	Oct	7.01 Sr + 3.14	0.9724	10.2	24.2	40	Apr 0m	0.9561
	Nov	6.76 Sr + 3.66	0.9700	10.4	23.9	41	Feb 0m	0.9528
	De	6.69 Sr + 3.34	0.9858	10.0	23.4	42	Aug 0m	0.9491

4. 採泥試料の概略と解析結果

採泥付近の海域ごとに各コアの海洋環境と放散虫の産状および古水温変化温について解析結果を述べる。各コアから求めた古水温を図7に示す。

〔MR97-04 St.1〕

St.1は久慈沖の水深1520mの大陸斜面から採取したコアで、親潮主軸の先端付近に位置する。水深50～200mの年間平均水温は7.0℃で、調査海域で最も寒冷な水塊であった。

このコアでは暖海種や温暖種の産出が極めて少なく、完新世の温暖な時期においてもそれぞれ1%に満たない。一方、寒冷種は完新世で36.2～57.6%の範囲で、最終氷期では48.6～69.5%の範囲で増減をする。したがって、本海域

での気候変動は、寒冷種の増減で特徴付けられている。コアトップから求められた水温は7.9℃で、海洋環境図から読みとった値よりも0.9℃高い値となった。完新世では終始8.2℃前後の水温を示すが、最終氷期では放散虫指数Srが1.00～1.02となり、水温は下限の7.8℃に達してしまう。現段階では放散虫指数が親潮水を細分する精度を持たないため、7.8℃以下の水温を見積もることができないが、極大期に寒冷種がさらに増えているので、本海域は親潮主軸の中に位置し、水温は7.8℃よりも低かったものと考えられる。

〔MR00-K05 PC02〕

本コアは混合水域の北限ないし親潮前線南限に位置し、水深5177mより採取した。ここでの年間平均水温は7.3℃で、MR97-04 St.1よりもわずかに0.3℃高い。

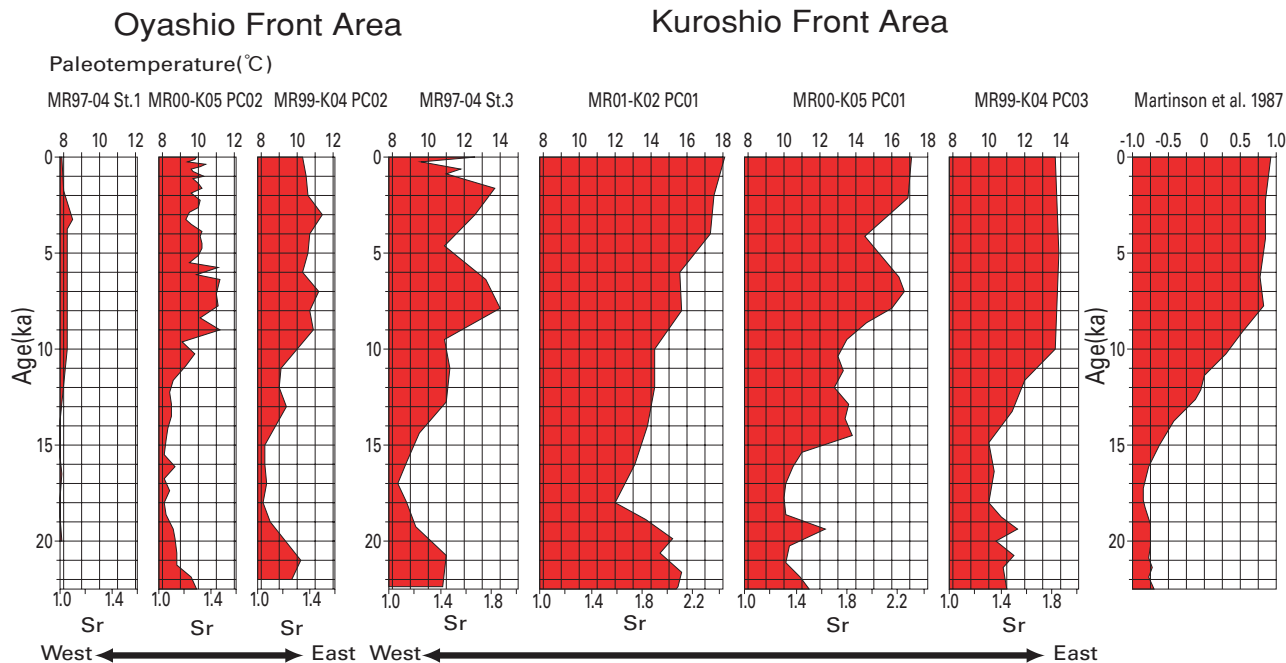


図7 各コアにおける最終氷期以降の古水温変化

Fig. 7 Changes of seawater Paleotemperature on each core since Last Glacial Maximum

指標種の構成は、暖海種が平均2.6%、温暖種が平均5.1%、寒冷種が平均35.9%と、明らかにMR97-04 St.1よりも暖かな水塊であることを示している。このためコアトップで求めた水温は9.9℃と、観測値よりも2.6℃も高い値となった。完新世における古水温は、6kaを境としてやや水温の高い前期と、現在と同じ水温を示す後期に大別される。最終氷期極大期では、1.8℃の水温低下が認められ、8.1℃となる。この水温は、MR97-04 St.1の完新世での水温と等しいので、本海域がこの時期はほぼ親潮の中にあったこととなる。しかし、St.1ほど多量の寒冷種を多産しないことから、亜寒帯水の中にはあるものの、親潮の主軸には位置していなかったものと見られる。

〔MR99-K04 PC02〕

PC02は水深5608mより採取したコアで、混合水域の北方に位置する。年間平均水温は10.6℃で、西側の2本のコアよりもさらに水温が高い。

指標種の構成は、暖海種が平均3.5%、温暖種が平均3.7%、寒冷種が平均35.1%となり、MR00-K05 PC02よりもわずかに暖かな種構成となる。コアトップから求められた水温は10.3℃で、観測値とほぼ一致した。完新世の古水温は10.0～11.4℃の範囲で変化するものの、MR00-K05 PC02で認められた完新世前期と後期の水温差は存在しない。一方、最終氷期極大期は、現在よりも2.2℃低下し8.1℃となり、MR00-K05 PC02と同じ値になった。

〔MR97-04 St.3〕

St.3は銚子沖の水深2308mの大陸斜面から採取したコアで、黒潮前線北限ないし混合水域南限に位置する。年間平均水温は14.8℃からなる。

指標種の構成は、完新世では暖海種の平均が7.9%、温暖種の平均が0.9%、寒冷種が平均22.0%となり、最終氷期では暖海種の平均が3.6%、温暖種が平均1.1%、寒冷種が平均33.2%となっている。コアトップから求められた水温は12.6℃で、観測値よりも2.2℃低い値を示した。完新世における古水温は、不安定な挙動を示し、9.6℃から14.0℃までの範囲で変動する。一方、最終氷期では極大期に水温が8.3℃まで低下するものの、水温低下の期間は短い。この最終氷期極大期における群集構成は、北方のSt.1の完新世の組成に類似することから、この時期には親潮主軸が銚子沖付近まで南下していたこととなる。

〔MR01-K02 PC01〕

本コアは黒潮統流の南方に位置し、水深5758mから採取した。水深50～200mの年間平均水温は18.5℃に達する。PC1(図8)では1試料500個体あたり平均120種前後が産出し、延べ260種を確認した。暖海種、寒冷種の増減はどちらも寒暖の程度を表すが、温暖化の傾向は暖海種が、寒冷化の傾向は寒冷種がより強く現れる傾向にある。北方のMR00-K05 PC1では、温暖種の産出量の変化は寒冷種の増加に弱い負の相関が見られたが、本コアではそれほど相関を示さない。この温暖種は、黒潮の変質部から混合水域までの軸流以西の栄養塩の多い海域で多産することから、本海域は比較的栄養塩の少ない外洋としての海域であったこととなる。このため、多様度についても顕著な挙動を振る舞うまでには至っていない。

放散虫指数Srは、パイロットコアのコアトップ0cmが2.38、ピストンコアのコアトップ0cmが2.44と、どちらの値も黒潮前線の南に位置していたことを示しており、現在の海況との

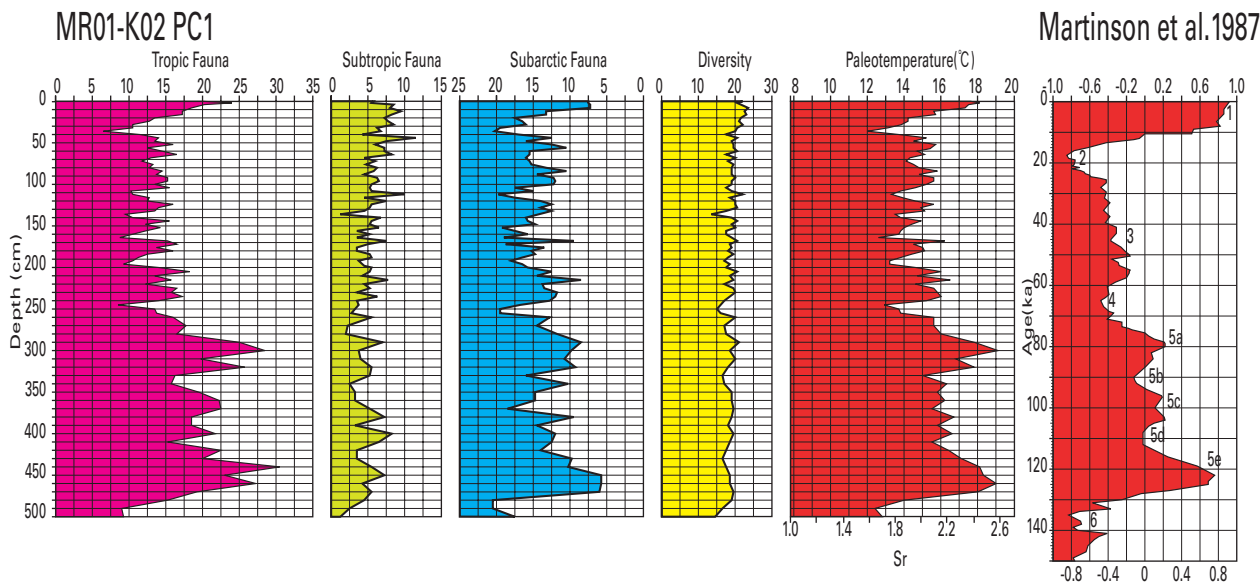


図8 MR01-K02 PC1における指標種, 多様度, Sr (古水温)
Fig. 8 Changes of index species, diversity, Sr, ratio

間に矛盾は存在しない。変換された古水温は、パイロットコア0cmが17.6℃、ピストンコア0cmが18.1℃となった。海洋環境図から読みとった値は18.5℃となり、堆積物から見積もられた水温は現在の水温よりも0.4～0.9℃低い値となっている。なお、2000年に実施されたMR00-K05 PC01は、1.5°北東に位置するが、この場所でのパイロットコアのトップ0cmから求められた古水温が17.1℃であることから、現在の海況を適切に反映した値となっている。

ピストンコアの500cmまでの放散虫指数の変化は、黒潮と混合水塊の境界を表す2.0を境に寒暖が繰り返している。放散虫指数が水塊を区分するという観点から過去13万年間を見ると、ステージ1(完新世)は黒潮統流の南側に、ステージ2(最終氷期最寒期)は混合水塊の中に、ステージ3は混合水塊から黒潮前線付近に、ステージ4は混合水塊の中に、ステージ5は黒潮前線の南に、ステージ6は混合水塊の中に位置していたこととなる。

コア深度36cmの最終氷期極大期の暖海種と寒冷種の割合は、それぞれ6.6%, 20.2%からなる。銚子沖で採取されたMR97-04 St.3のパイロットコア0cmの群集組成は、暖海種が8.8%, 寒冷種が17.6%であり、混合水塊の南端に位置するMR99-04 PC3のコアトップ0cmの群集組成は、暖海種が12.8%, 寒冷種が19.2%からなる。従ってPC1の最終氷期極大期は、この2地点の現状よりもやや冷たい群集組成から構成されている。3つの指標種より合成された放散虫指数もPC1が1.60 (12.0℃)となるのに対し、MR97-04 St.3では1.68 (12.6℃), MR99-04 PC3では1.82 (13.7℃)と、北方に位置する2地点よりもやや寒冷であったことになる。つまり、本海域では北方の水塊が約3°程度南下したことになるので、最終氷期極大期における黒潮の流路は北緯33°よりも南に位置していたこととなる。

下位のステージ3の暖海種と寒冷種の増減は、過去に

「みらい」で調査されたコアの中で最も変動が激しい。これはステージ3の期間、本海域が混合水塊から黒潮前線の南に位置していたことに起因し、水塊の水平移動が群集に顕著に現れたものと思われる。なお、ステージ3に見られる数千年周期の寒冷化は、北大西洋で知られるハインリッヒ・イベントに対応するものであるかもしれない。一方、ステージ4はステージ3の寒冷なピークとさほど変わらず、上位と下位の水塊変動の様子から認定されることとなった。また、ステージ5は通常3回の温暖なピークを持つことを特徴とするが、本コアでは5aと5eに相当する部分での顕著な温暖化が確認された。この5aと5eの古水温は現在の海水温とはほぼ等しくなっているものの、群集組成には相違がある。5eの方が、寒冷種がより少なく、北方の混合水の流入が少なかったことになる。ステージ6は、その層準に入るところまでしか検鏡が行えておらず、ステージ6の最低水温を表しているかどうかは不明である。この層準では88試料の中で最も寒冷種を多産するが、暖海種は最終氷期極大期ほど少なくならず、結果として水温低下は12.4℃にとどまった。

第四紀における酸素同位体の変化は、10数万年のサイクルでのこぎりの歯のような急激な温暖化とゆっくりとした寒冷化で特徴付けられるが、本コアでも同様な傾向が認められた。しかし、ステージ3の中には数千年周期での顕著な寒冷化が認められた。最終氷期より上位の層準は、堆積速度が遅いために時代的な精度が無く、細かな水温上昇の記録は読みとることができなかった。

〔MR00-K05 PC01〕 (図7)

本コアは黒潮統流の南方に位置し、水深5911mから採取した。水深50～200mの年間平均水温は17.9℃に達する。

放散虫指標種の構成は、完新世において暖海種の平均が15.7%, 温暖種が平均3.7%, 寒冷種が平均12.4%となり、暖海種が卓越し寒冷種の方が少なくなっている。しかし、

氷期における割合は暖海種の平均が8.4%, 温暖種が平均2.6%, 寒冷種が平均25.8%となり, 寒冷な水塊の影響が強くなったことを示している。コアトップから求められた水温は17.1℃で, 観測値より0.8℃低い。

最終氷期から完新世にかけての古水温は, 連続的に上昇するのではなく2回の停滞期または寒冷期を挟んでの上昇となることを特徴としている。このパターンはMR97-04 St.3でのパターンに似るが, 現世の水温が最も高くなっている。なお, Srが2.0以上となる層準は完新世の2層準しか無く, それ以外の時期は混合水域の北側に位置していた。最終氷期極大期では古水温は10.0℃まで下がることから, 混合水域は南下し, 黒潮統流もこれに伴って南下していたこととなる(山内, 山本, 2001)。

〔MR99-K04 PC03〕(図7)

水深5848mで採取したPC03は, 黒潮前線北限ないし混合水域南限に位置している。本海域の年間平均水温は13.8℃となる。

指標種の構成は, 完新世において暖海種の平均が13.5%, 温暖種が平均6.4%, 寒冷種が平均20.0%となり, 最終氷期における暖海種の平均が6.3%, 温暖種が平均4.7%, 寒冷種が平均28.8%となっている。コアトップから求められた水温は13.7℃で, 観測値とほぼ一致した。本コアは最終氷期までの分析試料の数が少ないため西側の試料のように完新世内での水温変化は読めない。しかし, 最終氷期の極大期には, MR00-K05 PC01と同じく10.0℃まで下がる。このため, 混合水域の北方に位置していたこととなる。

5. 完新世と最終氷期の水温

〔MR01-K02 PC01の古水温解析から〕

放散虫の示す古水温は, Srと観測で得られた50~200m

の年間平均水温との相関関係によって求められているが, 同様の変換関数を各水深の月別データと相関関係を調べることで作成できる。そこで観測値, コアトップおよび最終氷期のピークの水温変化を比較して見た(表4, 図9)。

放散虫指数Srから求められる古水温は, 水深別の黒潮域から親潮にかけての水温減率にしたがって復元されている。本邦周辺海域では, 北方になるほど表層水温の年較差が増大する傾向にあるので, 最終氷期の古水温として復元される水温は, 見かけ上水深が浅いほど夏季の水温低下は少なく, 水深が深くなるほど水温低下をおこしているように見える。水塊の区分は元々Srで定義されているが, ここで復元される水深50m, 100mの寒冷な水も, 黒潮, 混合水塊, 親潮といった水塊の違いを反映している。したがって氷期における寒冷化という意味合いで表層水を捉える場合, 暖かな夏季の水温に着眼するよりも冷たい冬季の水温を重視しなければならない。なお, 水深0mの表層水は大気との熱交換を伴うので, 風系を含めたローカルな季節・気候についての検討に有効となるものと見られる。

表4および図9に見られるように海洋環境図から求められた観測値とパイロットコア試料0cmから求めた古水温は, 水深の月別データと極めて良い一致をする。表4より観測値の年間平均からパイロットコア0cmより見積もられた年間平均との差(年間平均誤差)を比較すると, 水深0mで0.03℃, 水深50mで0.31℃, 水深100mで0.28℃となっている。また, 観測値から求められた各水深での最高値と最低値の差, つまり年較差は, 水深0mで9.5℃, 水深50mで6.5℃, 水深100mで3.0℃となる。一方, パイロットコア試料から換算された年較差との誤差はそれぞれ0.3℃, 0.2℃, 0.3℃となり, 年間変動の大きい各水深の誤差としてはその値が極めて小さいことになる。上記のことを踏まえて水深別に最終氷

表4 観測された水温と回帰式によって求められた完新世0kaと最終氷期18kaの水温比較

Table 4 Comparison of the observation temperature, core top value and the peak value of the LGM

MR01-K02 PC1

	Observed	Holocene	Residual	LGM	Residual		Observed	Holocene	Residual	LGM	Residual		Observed	Holocene	Residual	LGM	Residual
	value	pilot 0cm	pl 0cm-Ob	36cm	18-0ka		value	pilot 0cm	pl 0cm-Ob	36cm	18-0ka		value	pilot 0cm	pl 0cm-Ob	36cm	18-0ka
Jan 0m	18.5℃	18.1℃	-0.4℃	12.9℃	-5.2℃	Jan 50m	18.5℃	18.1℃	-0.4℃	12.9℃	-5.2℃	Jan 100m	18.5℃	17.6℃	-0.9℃	11.9℃	-5.7℃
Feb 0m	17.5℃	17.3℃	-0.2℃	12.1℃	-5.2℃	Feb 50m	17.5℃	17.1℃	-0.4℃	11.7℃	-5.4℃	Feb 100m	17.5℃	16.6℃	-0.9℃	10.9℃	-5.7℃
Mar 0m	17.5℃	17.2℃	-0.3℃	11.5℃	-5.7℃	Mar 50m	17.5℃	17.0℃	-0.5℃	11.4℃	-5.6℃	Mar 100m	17.0℃	16.5℃	-0.5℃	10.7℃	-5.8℃
Apr 0m	17.5℃	18.5℃	+1.0℃	13.0℃	-5.5℃	Apr 50m	17.5℃	17.5℃	0.0℃	11.9℃	-5.6℃	Apr 100m	17.0℃	16.9℃	-0.1℃	11.1℃	-5.8℃
May 0m	20.0℃	20.4℃	+0.4℃	15.9℃	-4.5℃	May 50m	19.0℃	19.0℃	+0.0℃	13.7℃	-5.3℃	May 100m	18.0℃	17.3℃	-0.7℃	11.7℃	-5.6℃
Jun 0m	21.5℃	22.6℃	+1.1℃	18.3℃	-4.3℃	Jun 50m	21.0℃	19.4℃	-1.6℃	14.0℃	-5.4℃	Jun 100m	17.5℃	17.2℃	-0.3℃	11.4℃	-5.8℃
Jul 0m	25.5℃	25.7℃	+0.2℃	22.1℃	-3.6℃	Jul 50m	21.0℃	20.9℃	-0.1℃	15.1℃	-5.8℃	Jul 100m	19.0℃	17.9℃	-1.1℃	12.2℃	-5.7℃
Aug 0m	26.5℃	27.0℃	+0.5℃	24.3℃	-2.7℃	Aug 50m	21.5℃	22.1℃	+0.6℃	16.2℃	-5.9℃	Aug 100m	18.5℃	18.5℃	0.0℃	12.6℃	-5.9℃
Sep 0m	27.0℃	26.3℃	-0.7℃	23.4℃	-2.9℃	Sep 50m	24.0℃	22.9℃	-1.1℃	16.6℃	-6.3℃	Sep 100m	20.0℃	18.8℃	-1.2℃	12.9℃	-5.9℃
Oct 0m	25.0℃	24.3℃	-0.7℃	20.7℃	-3.6℃	Oct 50m	22.5℃	23.3℃	+0.8℃	18.4℃	-4.9℃	Oct 100m	18.0℃	19.8℃	+1.8℃	14.3℃	-5.5℃
Nov 0m	22.5℃	22.1℃	-0.4℃	18.2℃	-3.9℃	Nov 50m	22.0℃	21.8℃	-0.2℃	17.1℃	-4.7℃	Nov 100m	19.0℃	19.7℃	+0.7℃	14.4℃	-5.3℃
Dec 0m	21.0℃	20.2℃	-0.8℃	15.8℃	-4.4℃	Dec 50m	21.0℃	20.2℃	-0.8℃	15.7℃	-4.5℃	Dec 100m	19.5℃	19.3℃	-0.2℃	14.0℃	-5.3℃
Average	21.67℃	21.64℃	-0.03℃	17.35℃	-4.20℃	Average	20.25℃	19.94℃	-0.31℃	14.56℃	-5.30℃	Average	18.3℃	18.01℃	-0.28℃	12.34℃	-5.70℃
Maximum	27.00℃	27.00℃	0.00℃	24.30℃	-2.70℃	Maximum	24.00℃	23.30℃	-0.70℃	18.40℃	-4.90℃	Maximum	20.0℃	19.80℃	-0.20℃	14.40℃	-5.40℃
Minimum	17.50℃	17.20℃	-0.30℃	11.50℃	-5.70℃	Minimum	17.50℃	17.00℃	-0.50℃	11.40℃	-5.60℃	Minimum	17.0℃	16.50℃	-0.50℃	10.70℃	-5.80℃
Max-Min	9.50℃	9.80℃	0.30℃	12.80℃	3.00℃	Max-Min	6.50℃	6.30℃	-0.20℃	7.00℃	0.70℃	Max-Min	3.0℃	3.30℃	0.30℃	3.70℃	0.40℃

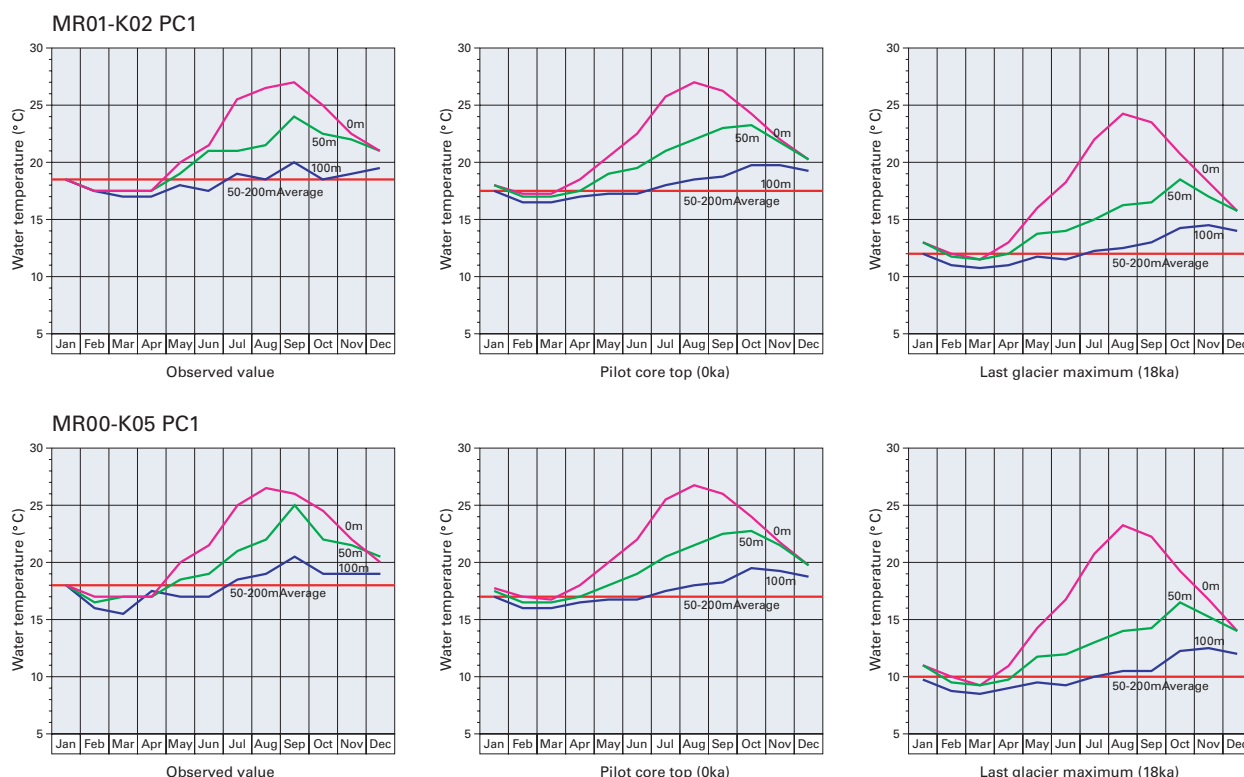


図9 観測された水温と回帰式によって求められた完新世0kaと最終氷期18kaの水温

Fig. 9 Annual seawater temperature by each depth of 0 ka observation data and 18 ka estimate due to the regression equation

期の年平均水温を見てみると、水深0mでは4.2℃、水深50mでは5.3℃、水深100mでは5.7℃の温度低下があった。また水深0mにおける最終氷期の年較差は12.8℃に達し、パイロットコアより求められた水深0mの年較差との差が、3.0℃広がったことになる。なお、パイロットコア試料0cmと比較すると、最高水温が2.7℃の低下、最低水温が5.7℃の低下となり、現在とさほど変わらない暖かな夏と冷たい冬があったことになる。最終氷期の水深50mでの年較差は7.0℃で、表層堆積物から求められた値より0.7℃しか拡大しないが、最高水温は4.9℃、最低水温は5.6℃低下し、明らかに北方の冷たい水塊に変わったことを示している。水深100mでの年較差は3.7℃で、表層堆積物の値よりも0.4℃しか拡大しないが、最高水温が5.4℃、最低水温が5.8℃とそれぞれ低下するため、水深50mと同様、明らかに北方の冷たい水塊に置き換わったこととなる。

6. 最終氷期最寒期の黒潮と親潮の分布

7本のコアトップから産出する指標種は、その海域の海況を良く反映しており、放散虫指数Srから求められた水温もほぼ適正な値であった。最終氷期最寒期における水温低下は、北方で約2℃の低下に留まるのに対し、南方では4～7℃と水温低下の割合が大きい。

最終氷期最寒期の海況は、それぞれのコアの解析結果から判断すると、おおよそ図10、図11のようになるものと見られる。

最終氷期における親潮は、その流路を変えることなく、北海道の南方から本州の東岸に沿って、北緯36°付近まで南下していた。北緯40°線上のMR00-K05 PC02、MR99-K04 PC01の水期における群集は、暖海種、温暖種ともに1%未満となり、寒冷種が50%を越えるため、この海域は亜寒帯水が優勢であったこととなる。

一方、南に位置する3本のコアでは、それぞれ暖海種が6%以下で寒冷種が30～40%となり、北緯40°に位置する2本のコアの完新世の産状と等しくなる。従って、この海域は混合水域の北方に位置していたことになり、親潮前線が北緯36～37°付近に存在していたものと見られる。

7. 考察

現在の海況では、黒潮の勢力は親潮に比べ圧倒的に強く、氷期において親潮の南下で黒潮が南へ押し下げられるほどのことは予測しがたい。ここ数十年間の観測では、黒潮の大蛇行(A型)と直進時(N型)の流路は、どちらも三宅島付近を流れ、C型やD型といった弱い蛇行の時に、八丈島の南まで離岸することが報告されている(川辺,1994)。また、2000年の海上保安庁水路部の黒潮流路と潮位の観測から、八丈島の日平均潮位が高いときは八丈島の北を黒潮が流れ、潮位が低いときは八丈島の南を流れていたことが示されている(図12)。

しかし、海洋情報研究センターのホームページより、1975年から2000年の26年間の海洋速報をもとに作成された黒

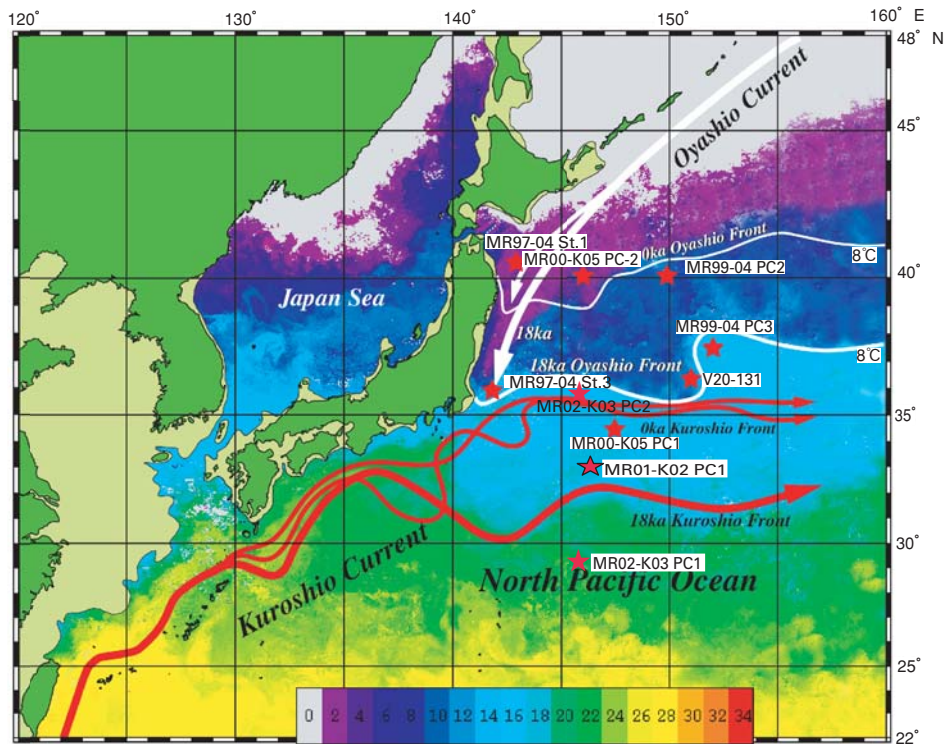


図10 最終氷期最寒期(18,000年前)の黒潮と親潮及び前線の関係

Fig.10 The allocation of Kuroshio current, Oyashio current and the front on the Last Glacial Maximum

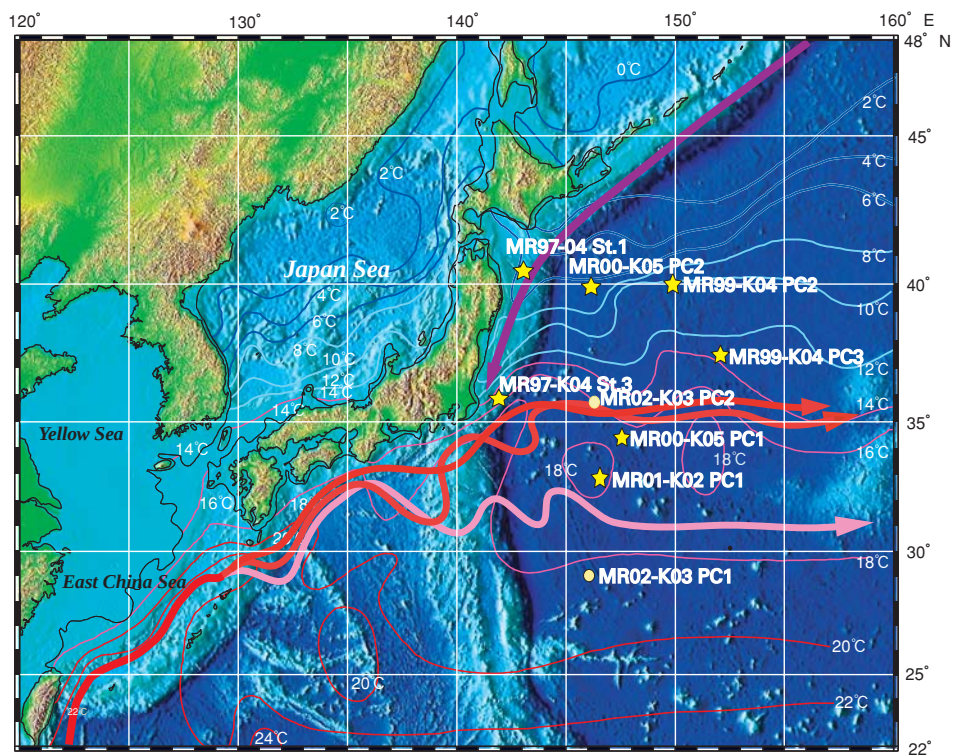


図11 最終氷期最寒期の黒潮と親潮及び海底地形

Fig.11 Bottom topography of Kuroshio and Oyashio current on the Last Glacial Maximum

潮のGIF画像を調べてみると、八丈島の南を流れる年が22年あり、青ヶ島の南を流れる年が少なくとも15年はある。もともと黒潮の大蛇行は安定した流路の1つであるが、現在までの古環境解析の結果から最終氷期極大期には北緯33°より南を流れていたことになるので、この時期、伊豆海嶺の南、特に青ヶ島の南を東進していた可能性が高い(図13)。なぜ、黒潮が北上せず離岸してしまったのかという点については明言できないが、最終氷期の水面低下に伴い伊豆海嶺がより障害になったこと、偏西風などの風系が変化したこと等が考えられる。いずれにせよ、北緯30°付近での黒潮の東進に伴い、勢いの弱い親潮を南方へと引き込みやすくしていたと考えられる。

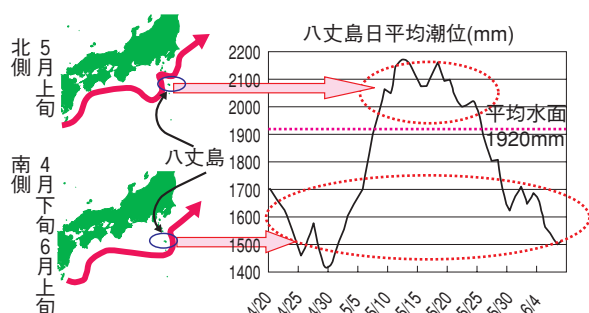


図12 黒潮の位置と八丈島の日平均潮位の関係(2000年海上保安庁潮位観測データによる)

Fig.12 The linkage of the Kuroshio current and daily mean height of tide at Hachijō island

従って、氷期における黒潮は、大蛇行と離岸が重なり、八丈島の南を北上したあと流路を東偏し、続流へと展開した可能性が高い。

一方、完新世では全球的に温暖化しているにもかかわらず、MR97-04 St.3とMR00-K05 PC01で5ka前後に特有の寒冷化が認められた。この層準は暖海種の減少と寒冷種の若干の増加で特徴付けられる。従って、黒潮の一時的な蛇行と東偏により、北方の冷水塊が引き込まれやすい状況にあったものと見られる。

8. おわりに

亜熱帯循環(黒潮)と亜寒帯循環(親潮)が黒潮続流域を中心にせめぎ合っている北西太平洋の中緯度域は、第四紀の気候変動を最も如実に現す良い調査海域で、今回の調査からも暖水塊や冷水塊のダイナミックな変動をかいま見ることができた。今後、コア間の間隔を狭め、また調査海域を南方に広げることで黒潮・親潮の挙動がさらに詳細に捉えられるものと確信する。

本観測研究は、1997年から2002年まで海洋観測船「みらい」を使用した。「みらい」赤嶺正治船長他乗組員の方々、(株)マリン・ワーク・ジャパン及び(株)グローバル・オーシャン・ディベロップメントの研究支援員のご協力と北海道大学大学院地球環境科学研究科の大場忠道教授、村山雅史助手(現:高知大学助教授(海洋コア研究センター)),北海道大学小泉格名誉教授(地球科学)らの共同観測研究を得て実施した。観測研究に関わられた方々に心からお礼申し上げる。

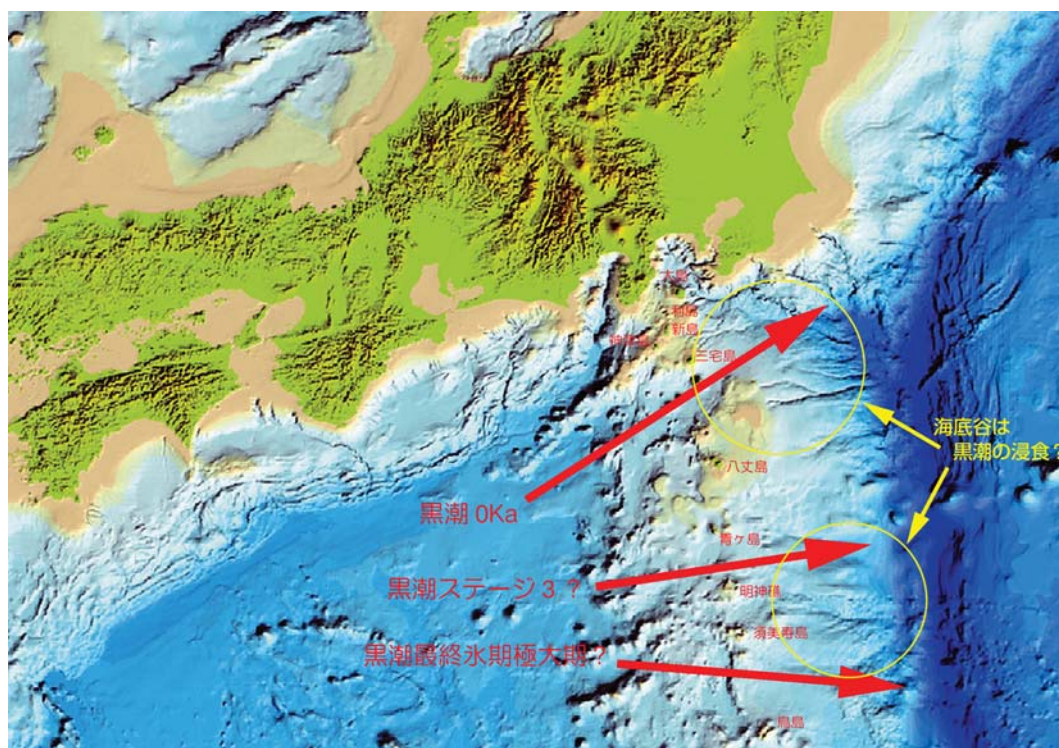


図13 伊豆海嶺を通過する黒潮の推定流路

Fig.13 Extrapolate flow path of Kuroshio current pass through Izu ridge

10. 参考文献

- 1) Brandt, K.(1885): Die koloniebildenden Radiolarien (Sphaeroeen) des Golfes von Neapel und der angrenzenden Meeresabschnitte. Berlin, 276pp.
- 2) 海上保安庁海洋情報部ホームページ：
<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>
- 3) 海洋資料センター編 (1978)：海洋環境図外洋編－北西太平洋・－. 日本水路協会発行, pp.157.
- 4) 海洋情報研究センターホームページ：
<http://www.mirc.jha.or.jp/fushigi/kuroshio>
- 5) 川辺正樹 (1994)：黒潮.月刊海洋号外6, p.135-139.
- 6) Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., Imbrie, J., Moore, T. C. Jr. and Shackleton, N. J. (1987): Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. Quat. Res., 27, p.1-29.
- 7) Petrushevskaya, M. G. (1971): Spumellarian and Nassellarian radiolaria in the plankton and bottom sediments of the central Pacific. in Funnell, B.M., and Riedel, W.R., eds., The Microlaleontology of Oceans, p.309-318.
- 8) 山内守明 (1986)：日本近海表層堆積物中の放散虫群集.大阪微化石研究会誌特別号第7号, p.141-156.
- 9) 山内守明, 山本浩文 (2001)：海洋科学技術センター試験研究報告第44号, P41-53
- 10) 山本浩文, 山内守明 (2002)：海洋科学技術センター試験研究報告第46号, P47-57
- 11) 山本浩文, 村木広明 (2001)：海洋科学技術センター試験研究報告第44号, P73-80

(原稿受理：2003年11月28日)