第四紀海洋古環境—鹿島沖SK-1の研究—

高 柳 洋 吉*

Quaternary Marine Paleoenvironment—a Study in Well Off-Kashima SK-1

Yokichi TAKAYANAGI

I. 研究の背景

第四紀は最新の地質時代である。その堆積物には地球の近い過去を探る多種多様な手掛かりが残されており、それはまた人類の時代の記録として多分野の研究者の関心を集めている。沿岸浅海域より遠洋深海底に及ぶ海洋底の堆積物や、熱帯から亜熱帯にかけての低緯度域の潮間帯～亜潮間帯を特徴づけるさんご礁堆積物には、数年から数十万年あるいは数百万年と時間的規模に相違はあるが、この間の古環境の諸変動が記録されている。

近年の深海底掘削計画 (Deep Sea Drilling Project, 1968-1975, DSDP; International Phase of Ocean Drilling, 1975-1984, IPOD) によって、地球の全海洋にまたがる大規模な海洋底掘削が実施され、中生代特に白亜紀以降の古海洋変遷のあらすじが把握できるまでに知識は拡大した。また第四紀古海洋に関しては、CLIMAP 計画でなし遂げられた貢献が目立っている。この計画の本来の長い表題である Climate/Long Range Investigation, Mapping and Predictions (気候長期研究・図化・予測) が示すように、これは気候変動の機構を明らかにするのが目的であり、18,000年前の8月における地球表面の状態図を提示したことで広く知られている (CLIMAP Project Member 1976)。このグループの成果については、別にまとめた報告 (CLINE and HAYS 1976) があるので多言を要しないであろう。

CLIMAP の大がかりな研究の過程で、過去の海洋表面の状態を復元する手法として、Imbrie を中心とする研究者達によって提案された変換関数 (Transfer Function) 法は (IMBRIE and KIPP 1977; ほか)、かつて EMILIANI (1955) が提唱した酸素同位体層位学と並んで、その後の微化石による古海洋研究において重要な手段となっている。この方法は、海洋底表層堆積物に含まれるプランクトンの遺骸群集を表層水の海洋学的パラメータと関連づけ、その関係を堆積物コア中の化石群集の解析に応用して、後期第四紀の水温及び塩分の具体的推定値を求める変換関数の形で表現したものである。しかし、この関数の適用範囲には地域的限界があり、IMBRIE らが精度向上に努めた大西洋の関数を他の海洋区に適用しても誤差が大きく、利用にたえない。日本列島周辺海域の古海洋研究には、独自の関数の作成が必要となるのである。

中緯度域に位置する日本列島の周辺海域では、第四紀において、暖寒両水系の消長による激しい海況変動のみならず、氷河性の海面変動、あるいはまたこれらに伴う生物群の消長や生物生産の変動などが繰り起こされた。その意味で、日本列島周辺海域は、北東太平洋のカリフォルニア沖合、南西太平洋のニュージーランド周辺海域などと対になって、太平洋における第四紀海洋変動を解明するための、北西太平洋を代表する拠点的海域である。さらに日本列島が背弧海盆として抱える日本海の第四紀における変動は、海洋学的に独特の興味があるのみならず、自然史や人類史上で日本列島とアジア大陸との交流にかかわる問題を多

* 東北大学理学部地質学古生物学教室 Institute of Geology and Paleontology, Faculty of Science, Tohoku University

く提供している。

本州東方海域は、北上する亜熱帯暖水の黒潮と南下する亜寒帯冷水の親潮の会合域に当たる。南の黒潮前線と北の親潮前線との間には混合水域が形成され、これが東方海域の大部分を占めている。前線の位置は経年的にも季節的にも不安定で、海況変動の振幅が大きく、微妙な変動の影響も捕捉しやすい。このような海域での変動を過去にさかのぼって明らかにするには、当然これを記録した長い堆積物のコアを必要とする。しかし、利用可能な既存のピストンコアもなく、かつまた、それを新たに採取する機会にも恵まれなかった。そのため、これに代るものとして、鹿島灘において石油資源開発株式会社が試掘した“鹿島沖 SK-1” のカッティング試料の提供を受け、総合的古環境解析を実施した。この試掘井は鹿島灘沖合約 14km、北緯36°9'33.8"、東経140°43'49.8"、水深38mの地点にあって、全掘削孔長は2,100mに達する。

本研究には3大学に所属する8名の研究者（高柳洋吉・斎藤常正・岡田博有・石崎国熙・尾田太良・長谷川四郎・岡田尚武・S. MANICKAM）が参加した。堆積学・微古生物学・安定同位体比研究にかかわる成果の詳細は別に公表の予定であるが、以下そのあらましを述べる。

II. 鹿島沖 SK-1 の第四系の年代

鹿島沖 SK-1 における微化石層序の概要を報告した米谷ら（1981）によると、第四系と第三系の境界は坑井深度 460m と 470m の間にある。この第四系にできるだけ詳しい時間尺度を目盛るため、一応 500m までの全試料についてプランクトン化石の生層序を検討したところ、次のような石灰質ナノプランクトンと浮遊性有孔虫の基準面が各深度に認められた。

<i>Emiliania huxleyi</i> の初出現	280m
<i>Emiliania annula</i> 及び <i>E. ovata</i> の最終出現	380m
<i>Globorotalia tosaensis</i> の最終出現	440m
<i>Globorotalia truncatulinoides</i> の初出現	460m
<i>Neogloboquadrina asanoi</i> の最終出現	470m
<i>Discoaster</i> spp. の最終出現	480m

以上によれば、*Discoaster* 属は鮮新世末に絶滅し、*G. truncatulinoides* は第四紀初頭に出現している。460m 以浅を第四系とするのは妥当である。しかし房総半島や掛川地域では、*G. truncatulinoides* と *N. asanoi* はごく短い層位区間ながら共存している。したがって両種が共存していないことは、460m と 470m の間に不整合の存在することを示唆している。不整合による欠如の大きさを房総半島の新生界との対比により見積ると、古地磁気層序における Matuyama 逆磁極期の Olduvai 亜期 (1.67-1.87 Ma) から Jaramillo 亜期 (0.92-0.97Ma) にわたっており、さらに *G. tosaensis* の上限が 440m にある点を重視すれば、間隙はもっと広がって、第四系のほとんどは Brunhes 正磁極期 (0.00-0.73 Ma) に属している可能性もある。なおこれらの年代値は HARLAND et al. (1982) によっている。

年代については酸素同位体の方からも手掛かりが得られる。酸素同位体比による深海堆積物の層位学的区分を最初に唱え、 ^{18}O 濃度の淡い層準に奇数の、濃い層準に偶数の番号を付けた stage 区分を行ったのは EMILIANI (1955) である。この方式を踏襲した SHACKLETON and OPDYKE (1973, 1976) は、太平洋のコアで古地磁気層序区分と対応させつつ、22の stage を識別している。同じコアで石灰質ナノプランクトンを検討した THIERSTEIN et al. (1977) は、*Pseudoemiliania lacunosa*（本論における *Emiliania annula* 及び *E. ovata*）の絶滅は Stage 12 中で約 0.46 Ma、*E. huxleyi* の初出現は Stage 8 の後期で約 0.27Ma と年代値を出している。この組合せを鹿島沖 SK-1 の同位体比記録に対応させると、第1図 G, H (以下 G 図, H 図と省略) に示すような結果となる。また、深度 155m と 160m の間で ^{18}O 濃度が濃から淡に変っているが、このような顕著な移化は 0.27 Ma 以後では、Stage 6 と Stage 5 の境界 (約 0.13 Ma) をおいて他にない。

第1図 鹿島沖 SK-1 の古環境解析総合図〔年代 (Ma) は本文参照〕

A. 底生有孔虫群集解析に基づく深度帯区分 (iN: 内部浅海帯, i-oN: 内部一外部浅海帯, oN: 外部浅海帯, uB: 上部半深海帯, U: 上部, L: 下部).

B. 構成鉱物中における石英及び方解石の産出頻度.

C. P/T比.

D. 石灰質ナンノグラントン群集中の *Florisphaera profunda* の産出頻度.

E. 浮遊性有孔虫のバリマックス群集 (F1-F4) の産出頻度.

F. 変換関数により求めた夏の表層水温.

G. 浮遊性有孔虫 (*Globorotalia inflata*) の酸素・炭素同位体比. $\delta^{18}\text{O}$ 及び $\delta^{13}\text{C}$ 濃度は横軸に標準試料 (PDB) からの偏差として千分率で表わしてある.

H. 底生有孔虫の酸素・炭素同位体比. 深度360m (*Cibicides aknerianus*), 440-560m (*Bolivina quadrilata*) を除き, 他はすべて *Ammonia scalaris* を用いてある. 横軸の尺度はGと同じ.

III. 古環境の多角的解析

1) 堆積相：第四系は深度90m付近を境にして、上部の細礫を含む細粒砂を主体とする層と、下部のシルトを主とする層とに層序区分される。鉱物組成では、石英と斜長石の量的変化がおおむね同傾向にあり、産出頻度は深度360~420m付近で最低となり、代って方解石が増加している (B図)。ここでは粘土鉱物もほとんど検出されない。石英の量は上方へ向かい増加している。長石/石英比もかなり変動があり、この比の大きい層準は島弧火山活動を反映していると思われる。粘土鉱物中にカオリナイトを欠いているのは、高温多湿地帯からこれを運搬してくる黒潮からの供給が房総半島により妨げられたためであろう。

2) 底生有孔虫：有孔虫群集の層位的変化の中で顕著なのは、群集を構成する全個体中で浮遊性種の占める割合 (P/T比) の変化である (C図)。坑井深部の 70% 台より浅部の 20% 台までの段階的变化は、沖合より沿岸への変化を示している。さらに底生種群集の種組成と頻度の類似度に基づくクラスター分析の結果を現生群集の生態的分布と照合し、A図に示したような上部半深海帯下部より内部浅海帯に至る古水深の変化を認めることができた。

3) 石灰質ナノプランクトン：群集の多様度と特徴的種群の産出頻度を層位的に追跡した。これらのなかでも代表的なものは、現海洋で100m以深に多産する *Florisphaera profunda* の変化である。この沖合型の種の産出頻度 (D図) と P/T 比との相関や古水深との対応は極めて密接である。

4) 浮遊性有孔虫による変換関数の作成：変換関数は次のような手順で作成された (尾田ら, 1983)。本州東方海域の表層堆積物中の浮遊性有孔虫群集の分布調査の結果 (高柳・尾田, 1983) をもとに、42測点での31種の産出頻度のデータマトリックスを作成し、Qモード主成分分析を行った。算定した固有値によれば、第1因子より第4因子までをとると全変動の90%余りが説明される。これら因子のバリマックス負荷量の地理的分布に照らして、第1因子は津軽暖流、第2因子は親潮、第3因子は黒潮のそれぞれの影響を表わすと判断される。第4因子は有意な負値のみが沿岸部に認められるので、反外洋性を示すのであろう。これらの因子評点を算定後、1.0以上の評点に着目し、バリマックス群集 (各因子の端成分を代表する種群) の組分けを行った。次いで42測点における上記群集の構成比を説明変数として、海洋環境図より判読した水温・塩分との間の回帰分析をした結果、ここで変換関数と称する回帰式が求められた。

5) 古水温：変換関数に鹿島沖 SK-1 の中の第1~第4バリマックス群集 (F1~F4) の産出頻度 (E図) を代入して、冬の表層水温を求め、その層位的変化をF図に示した。これによると、深度330m付近が境となっており、以浅ではF1とF3が対立的に変化し、北上する黒潮と南下する津軽暖流が鹿島灘付近で拮抗しつつ変動している古海況が推定される。これに対して以深部では対立が見られず、海況の相違が示唆される。水温の四つの山と二つの谷 (F図の白と黒の矢印) とF1~F4の変動とを照合すると、以深部の海況は親潮支配型であったが、以後時代と共に黒潮が強化されていったものと思われる。

6) 有孔虫殻の酸素・炭素同位体比：従来、この種の同位体比測定は深海底堆積物を主対象にして行われてきており、鹿島沖 SK-1 の第四系のように黒潮・親潮両水系の影響下にあり、かつ浅海堆積物を含むような場合の研究例は他に見られない。鹿島灘のような水域での酸素同位体比の変化には、氷床の消長のような地球規模の要因のみならず、沿岸水等の地域的要因も種々関与したであろうから、変動の意義の理解が容易ではない。その上、中期第四紀以来の黒潮・親潮等の海水の ^{18}O 濃度の推定が困難で、得られた結果を古水温に直結させるような単純な解釈は許されないのである。しかし全体的傾向を見ると、浮遊性有孔虫の ^{18}O 濃度は第四系基底より深度340m付近に向かって、いっそう濃くなり、そこから上方へ淡くなるのに対し、底生有孔虫の場合は深部から浅部へと次第に淡くなっている。

炭素同位体比的に見ると、海洋表層における光合成作用により軽い炭素が選択的に植物体に多く取り込まれる結果、表層水での ^{13}C の増加は植物プランクトンの生産性の直接的反映と見なすことができる。鹿島沖 SK-1 の場合、浮遊性種の ^{13}C 濃度は第四系基底より深度160m付近まで大きな変化がないが、それ

以浅になると大きく動揺する。また底生種の濃度は下部では不安定ながら、中部から上部に向かって漸増し浮遊性種のそれに近づいている。このような変化は浅海化に伴う一連の現象と理解され、表層水と底層水の濃度差がなくなったことを示すものであろう。

IV. 海洋古環境の変動

鹿島沖 SK-1 の第四系が形成された海洋環境が約 60 Ma 以降たどった変遷は第 1 図に総合される。古水深は多少の動揺を繰り返しつつ減少し、ここに一連の海退の過程が明らかにされている。海底環境の変化に基づいて、この第四系堆積期の前半は上部半深海帯（大陸斜面—大陸棚縁辺部）時代であり、後半は浅海帯（大陸棚）時代と規定できるであろう。

上部半深海帯時代では、古水温の推移はゆるやかで、表層水温と ^{18}O 濃度は平行的に変動し、主として親潮の消長に伴って 2 温暖期と 1 寒冷期が生じた。下から 2 番目の温暖期には、陸地の隆起量が少なかったため、陸地よりの物質供給が衰え、生物源炭酸塩の堆積量が相対的に増加した。第四系基底付近に石英が比較的多いのは不整合に由来するものかも知れない。

浅海帯時代に入り、長石／石英比に見られるような島弧火山活動の影響が堆積物に現われ始め、さらに石英の産出頻度の上でも後背陸地の隆起による陸上浸食の強化の徴候が顕著になる。また海水の ^{18}O 濃度の減は、底層水よりも表層水に顕著であるが、これも浅海化に伴って沿岸水との混合の影響が次第に現われたと見てよいであろう。古水温と表層水の ^{18}O 濃度の彷徨性の間に平行関係が認めにくくなったのも、大陸棚環境に起因するのかも知れない。この時代の今一つの特徴は、黒潮と津軽暖流との対立関係の発生で、黒潮の影響が強まり津軽暖流の影響が弱まった時期が温暖期となり、その逆が寒冷期になっている。しかし、海退の進行により鹿島沖 SK-1 の最上部ではプランクトン化石が貧困化し、解析不能となり、坑井深度 100m 以浅現在に至る間の海況変動が不明のまま残されることとなった。

謝 辞 本研究のため鹿島沖 SK-1 の試料を提供された石油資源開発株式会社に対して、厚く御礼申し上げる。なおこの研究は、文部省科学研究補助金により実施された特定研究（1）「海洋底の第四紀古環境」（課題番号 56117004, 57110004, 58102004）の一部である。

引用文献

- CLIMAP Project Members (1976) : The surface of the ice-age earth. *Science*, **191**, 1131-1137.
- CLINE, R. M. and HAYS, J. D., Eds. (1976) : Investigation of late Quaternary paleoceanography and paleoclimatology. *Geol. Soc. America Mem.*, **145**, i-x, 1-464.
- EMILIANI, C. (1955) : Pleistocene paleotemperatures. *Jour. Geol.*, **63**, 538-578.
- HARLAND, W. B., COX, A. V., LLEWELLYN, P. G., PICKTON, C. A. G., SMITH, A. G. and WALTERS, R. (1982) : *A geologic time scale*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 131pp.
- IMBRIE, J. and KIPP, N. G. (1971) : A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology; Application to a late Pleistocene Caribbean core. In *The Late Cenozoic Glacial Ages*, ed. TUREKIAN, K. K., Yale Univ., New Haven, pp. 71-181.
- 米谷盛寿郎・井上洋子・秋葉文雄(1981) : 鹿島灘。日本の新第三系の生層序及び年代層序に関する基本資料「統編」, 土 隆一編, 国際地質対比計画—114日本国内委員会, 静岡, pp. 13-17.
- 尾田太良・石崎国熙・高柳洋吉(1983) : 本州東方海域表層堆積物中の浮遊性有孔虫群集解析。海洋の動的構造ニュースレター, **11**, 3-9.
- SHACKLETON, N. J. and OPDYKE, N. D. (1973) : Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 year and 10^6 year scale. *Quaternary Res.*, **3**, 39-55.
- SHACKLETON, N. J. and OPDYKE, N. D. (1976) : Oxygen-isotope and paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V28-239, late Pliocene to latest Pleistocene. *Geol. Soc. America, Mem.* **145**,

449-464.

- 高柳洋吉・尾田太良 (1983) : 本州東方海域表層堆積物中の浮遊性有孔虫の分布. 海洋科学, 15, 138-144.
- THIERSTEIN, H. R., GEITZENAUER, K. R. and MOLFINO, B. (1977) : Global synchronicity of late Quaternary coccolith datum levels : validation by oxygen isotopes. *Geology*, 5, 400-404.