

## 古生物試料の同位体を用いた古環境解析

大 場 忠 道\*

Analysis of paleoenvironment based on isotopes of  
paleontological materials

Tadamichi OBA\*

**Abstract** This article is a historical review of paleoenvironmental studies based on isotopes of paleontological materials in Japan. In section 1, the historical background of this field in foreign countries is briefly surveyed for the period from the end of the 1940's to the 1960's. The historical development of this field in Japan can be divided into three stages (the 1960's, 1970's and 1980's). The outlines of about 30 papers published during these stages are given in section 2, 3 and 4, respectively.

The study of this field in Japan began at the end of the 1960's, using isotopic massspectrometers at Ocean Research Institute, University of Tokyo and Institute for Thermal Spring Research, Okayama University. For the first period, the fundamental problems of the oxygen isotope ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) method were investigated. Consequently, it was confirmed that the oxygen ( $^{18}\text{O}$ ) and carbon ( $^{13}\text{C}$ ) isotopes in fossil carbonates provided valuable information for the paleoenvironmental studies. In the 1970's, the isotopic massspectrometers at Kanazawa University and Tokyo University of Education were also used for the study of this field. About fifteen papers which included various aspects of paleoenvironmental reconstruction were published during the 1970's. Likewise, about ten papers in regard to paleoenvironmental analysis by  $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$  isotopes in living and fossil carbonate materials such as shell, coral and foraminifera were published from 1980 to the present (1983). New isotopic massspectrometers were installed at the departments of earth science and geology of Shizuoka, Yamagata and Kanazawa University in the 1980's. Further development of this field is expected by the use of these massspectrometers in addition to those which were already been utilized.

## はじめに

この小論では、わが国における 1970 年代から現在 (1983) までの同位体による古環境研究の歩みと現状を概観することが意図されている。

標題に示すように、古生物試料について同位体を用いた古環境解析の研究は、外国において 1940 年代末に着手され、1950 年代に入って開始される。そして、わが国では 1960 年代の後半から始まる。このように、地質学の多くの分野のなかでも、この分野は最も歴史の浅い学問のひとつである。わが国において、これまでに発表されたこの分野に関する論文はおそらく 30 編に満たないであろう。このような数少ない論文を基にして、わが国における同位体による

古環境研究の歩みを記録するには、個々の論文がこの分野の発展にいかに関与してきたかということをも具体的に記述しておくことが最良の方法だと考えられる。記述にあたっては、筆者の個人的見解をできる限り排除し、個々の論文の主要な要旨を正確に記述して、この分野の発展過程を読者御自身で御判断頂ければ幸いである。

本論では、まず外国における 1940 年代末から 1960 年代までの同位体による古環境研究の歴史的背景を概観し、次に、わが国における研究を、1960 年代、1970 年代、1980 年代の三つの時代に分けて眺めることにする。

## 歴史的 背景

1947 年、UREY は、水素・炭素・窒素・酸素などが関与する種々の分子間における同位体の分配を熱力学的に考察していた時、炭酸イオンと水との間で

\* 金沢大学教養部地学教室. Department of Geology, The College of Liberal Arts, Kanazawa University, 1-1, Marunouchi, Kanazawa, 920 Japan.

酸素同位体の分別係数の温度依存性が特に大きいことに気づき, "Suddenly, I found myself with geological thermometer in my hand." といって手を叩いたという。早速, UREY は彼の門下生達と共に, この酸素同位体比 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) による古水温測定法の開発に取り組み, 基礎的な問題点を次々に解決していった。MCKINNEY *et al.* (1950) は同位体比質量分析計の改良を行い, MCCREA (1950) は炭酸塩を分解し炭酸ガスを抽出する方法を開発して, この時点で測定法はほぼ確立された。また, EPSTEIN *et al.* (1951, 1953) は, 測定値を乱すと考えられる有機物の除去および測定値を水温に換算するための温度スケールを開発した。このように, UREY および彼の門下生達の努力によって, 1951 年には早くも古水温の測定についての第一報が公表された。それは, ジュラ紀の Belemnite の殻について酸素同位体比 ( $^{18}\text{O}$  濃度) を測定し, 古水温を算出したところ, その Belemnites が平均水温  $17.6^{\circ}\text{C}$ , 年較差  $6^{\circ}\text{C}$  の海域に生息し, 4 年目の春先に死亡したという画期的な内容のものであった (UREY *et al.*, 1951)。しかし, 同時に  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  法には, 炭酸塩でも適用できる生物種が限られること, 試料の前処理によって  $^{18}\text{O}$  濃度が変わること, 試料の続成作用による変質の問題のほかに, 試料となる炭酸塩殻を持つ生物が生息していた時の海水の  $^{18}\text{O}$  濃度が不明である, といういくつかの制約を含むことが指摘された。そのためか, UREY の門下生達は, その後若干の論文 (EPSTEIN & LOWENSTAM, 1953; LOWENSTAM & EPSTEIN, 1954, 1959; LOWENSTAM, 1961, 1964) を発表したに過ぎない。そうしたなかで, ただ 1 人 EMILIANI は, 1955 年以降, 深海底コアに含まれる有孔虫殻の  $^{18}\text{O}$  濃度を測定し続けた (EMILIANI, 1955, 1966)。しかし, 彼の結論も当時, 古環境研究に正統的な方法として認められていた微化石の群集解析に基づく第四紀の気候変化の結論 (ERICSON & WOLLIN, 1956; ERICSON *et al.*, 1961) と対立し, 両者の間の論争は 1960 年代後半まで続いた。このような状況下にあったためか, 1950 年代に新たに  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  法による古水温の測定を開始した人は, TEIS *et al.* (1957) と DORMAN & GILL (1959) だけである。

1960 年代になると, 深海底コアによる第四紀古水温の研究を継続していた EMILIANI のほかに, 古生

代・中生代・新生代第三紀の腕足類・頭足類・腹足類・斧足類などの殻の  $^{18}\text{O}$  濃度を測定して, 古い地質時代の水温を算出しようとする研究者が多く現われてきた (COMPSTON, 1960; BOWEN, 1961; LOWENSTAM, 1961; BOWEN & FRITZ, 1963; DORMAN, 1966; DEVEREUX, 1967)。特に, BOWEN (1966) はヨーロッパ各地の Belemnites 化石を使って中生代の水温を, DORMAN (1966, 1968) や DEVEREUX (1967) はオーストラリアおよびニュージーランド産の貝や有孔虫化石を使って第三紀の水温を, それぞれ算出した。しかし, 古い地質時代の水温算出には, 試料の変質のほかに大陸移動に伴う古地理の問題が関連して的確な判断を下し難い場合が多い (増田, 1975)。一方, 比較的新しい時代の貝化石や石灰岩について  $^{18}\text{O}$  濃度と共に  $^{13}\text{C}$  濃度を測定して古環境を還元しようとする試みも始められた (KEITH *et al.*, 1964; KEITH & WEBER, 1964; GROSS, 1964; LLOYD, 1964)。また, 現生のサンゴ礁の炭酸塩の殻を持つ生物について  $^{18}\text{O}$  と  $^{13}\text{C}$  濃度を測定し, 現在の海洋環境における同位体の分配に関する基礎的研究も行われるようになった (KEITH & WEBER, 1965; WEBER & RAUP, 1966; WEBER & WOODHEAD, 1970)。さらに, 炭酸塩中の酸素同位体の分配を合成実験によって明らかにしようとする研究 (CLAYTON, 1961; SHARMA & CLAYTON, 1965; O'NEIL *et al.*, 1969; TARUTANI *et al.*, 1969) や磷酸塩の温度スケールを作成して炭酸塩の温度スケールと共に古水温の絶対値を求めようとする試み (LONGINELLI & NUTI, 1965), それに, 降水・海水・氷のコアの  $^{18}\text{O}$  濃度の測定などが行われた (DANSGAARD, 1964; CRAIG & GORDON, 1965; DANSGAARD *et al.*, 1969)。このように, 1960 年代の中頃から後半にかけては, 世界的に同位体の研究者が急速に多くなった時期である。それには, 1965 年にイタリアの Spoleto で開催された第 3 回 Nuclear Geology の会合において主題となった "Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures" に関する多くの講演が TONGIORGI (1965) によって公表されたこと, さらに, BOWEN (1966) による  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  法の総説的な著書 "Paleotemperature analysis" が出版されたこと, の二つが大きな影響を与えたと思われる。

## わが国における研究

## 1. 1960年代

1960年代の後半には、わが国においても同位体比質量分析計の精度が古環境の研究に利用できるまでに達していた(堀部, 1966; 酒井, 1966; MIYAKE & WADA, 1967). このような状況下に、同位体を使用して研究を続けてきた地球化学者のなかに、古環境に興味を抱く人達が現われ、同時に地質学を専攻していた人達のなかにも、同位体という新たな武器を身に付けようとする人達が現われてきた。そうした人達の共同研究が開始されたのは1966~1967年頃である。そして、1968年に開催された日本古生物学会第100会例会において「化石硬組織内の同位体」というテーマのもとに、それぞれの研究成果が発表された。その内容は、翌1969年に「化石・増刊号」にまとめられたが、この時が、わが国における古生物試料の同位体による古環境解析に関する研究のスタートといっても過言ではなからう。

1969年に発表された論文は以下の6編であるが、そのうち3編は、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 法の有効性を確かめるための基礎的問題の再検討に当てられている。

中道ほか(1969)および堀部・大場(1969)は、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 法の試料となる炭酸塩中の有機物を除去するための燃焼条件を検討し、ある一定の燃焼条件下で試料の $^{18}\text{O}$ 濃度は再現性が得られることを確かめた。また、中道ほか(1969)は、試料の続成変質によって結晶形がアラレ石から方解石に転移する際、 $^{18}\text{O}$ や $^{13}\text{C}$ 濃度も著しく薄くなることを報告し、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 法では試料の変質の有無を検討することが重要であると強調した。

堀部・大場・新妻(1969)は、EPSTEIN *et al.* (1951, 1953)が実験的に求めた温度スケールを再検討し、より正確に古水温を算出するためには、アラレ石および方解石について別々の温度スケールを作らなければならないことを指摘した。このように、わが国においても、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 法はその基礎的問題が検討され古水温測定にも応用できることが確かめられた。

上述の基礎研究を経て、酒井ほか(1969)は、変質を受けていないシャコ貝の化石について、殻の成長段階に応じて $^{18}\text{O}$ と $^{13}\text{C}$ 濃度を測定し、 $^{18}\text{O}$ 濃度が水温の季節的変化を表わす周期的変化を示すのに対し、

それとは逆相関を示す $^{13}\text{C}$ 濃度の変化を見出した。そして、その $^{13}\text{C}$ 濃度の変化の原因を、共生藻類による海水の $^{13}\text{C}$ 濃度の季節的変化に起因すると解釈し、 $^{13}\text{C}$ 濃度も古環境解析に重要な手掛りを提供することを明らかにした。

一方、インド洋の深海底コアに含まれる有孔虫化石の $^{18}\text{O}$ 濃度を測定した堀部・大場(1969)は、EMILIANI (1955)が大西洋やカリブ海で報告した多くのコアと全く同様な $^{18}\text{O}$ カーブを描き出し、海底コアの $^{18}\text{O}$ カーブの普遍性を裏付ける結果を出した。当時、その $^{18}\text{O}$ カーブの周期的変化は、氷期と間氷期の間で、主に表面水温の変化に起因するという考え(EMILIANI, 1966)と海水の $^{18}\text{O}$ 濃度の変化によるという考え(OLAUSSEN, 1965; SHACKLETON, 1967)が対立していたが、OBA (1969)は、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 法による古水温の算出と共に浮遊性有孔虫群集の因子分析の結果から、表面水温と海水の $^{18}\text{O}$ 濃度の両方が変化したことを明らかにした。

堀部・新妻・酒井(1969)は、浮遊性有孔虫のうちで殻に crust と呼ばれる炭酸カルシウムの厚い沈着が見られる種に着目し、crust を持つ個体と持たない個体の $^{18}\text{O}$ 濃度を測定して、crust が形成された水深を算出した。また、彼らは、現生アカガイの殻についても $^{18}\text{O}$ 濃度を測定し、水温の季節変化を明らかにして、殻に観察される年輪が産卵期に形成されたと結論した。このように彼らは、現生生物の生態的側面で今までに解明できなかった現象を、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 法を使って明らかにすることができることを示した。

これら1969年に発表された一連の研究成果は、酸素同位体比や炭素同位体比が古環境解析に極めて有効な手段であることを改めて示したものだといえよう。

## 2. 1970年代

1960年代後半にスタートしたわが国の同位体研究グループの活動は、1971年になるとさらに多くの地質学者(古生物学者)、地球化学者、生物学者の参加を得て「化石硬組織の同位体」という研究課題のもとに総合研究(B)へと発展していった(課題番号73076:代表, 小西健二)。そして、1972年にはそれぞれの研究成果が「化石」第23・24号に発表された。また、1960年代後半から古環境の研究を行ってきた東京大学海洋研究所や岡山大学温泉研究所のほかに、東京教育大学においても同位体比質量分析計

が古環境解析に使用され始め、同大学の若手研究者がこれに参加した。さらに、1973年にはそれまで岡山大学温泉研究所において共同研究を行ってきた金沢大学理学部地学教室に古環境解析専用の同位体比質量分析計が設置され、古生物試料の同位体分析が開始された(大村, 1976)。このように、1970年代になると上述の四つの研究機関において同位体による古環境の研究が行われ、それぞれの機関で特色のある多彩な研究成果が発表されるようになった。以下に1970年代に発表された各論文の主要な要旨を記述する。

堀部・大場(1972)は、水温と海水の $^{18}\text{O}$ 濃度が一定条件下で生息したアカガイとホタテガイを用いて、アラレ石および方解石の温度スケールを作成した。その結果、両温度スケールは明らかに異なり、勾配もやや異なることが判明した。一般に、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 法は過去の海水の $^{18}\text{O}$ 濃度が不明なため、それを現在の値と変わらないと仮定して古水温を算出しているが、勾配の異なる二つの温度スケールを使えば、過去の海水の $^{18}\text{O}$ 濃度と水温の絶対値を求めることができる。堀部・大場(1972)は、貝殻の内層と外層にアラレ石と方解石をそれぞれに持つ化石ヒメゾボラについて、同時に形成されたと考えられる内層と外層部分の $^{18}\text{O}$ 濃度を測定し、二つの温度スケールを使用して過去の海水の $^{18}\text{O}$ 濃度と水温の絶対値を算出することを試みた。しかし、アラレ石温度スケールは、炭酸カルシウムの無機的な合成実験から予測されたもの(TARUTANI *et al.*, 1969)と著しく異なり、さらに検証する必要がある。

青島・鎮西(1972)は、掛川層群に含まれる火山灰層に沿って同一時間面から採集した浮遊性および底生有孔虫や貝化石の $^{18}\text{O}$ 濃度を測定し、古水温を算出した。そして、掛川層群が分布する北西から南東域にかけて、表層水温と底層水温およびそれらの季節変動幅を比較し、当時の水温構造を推定して南東程深かったと結論した。このように、青島・鎮西(1972)は $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 法を利用して過去の海洋の水塊構造が復元できることを示した。

菅野ら(1972)は、成田層群中から採集した貝化石について、貝の殻頂から腹縁までを粉末にして $^{18}\text{O}$ 濃度を測定した。その結果、古水温の時代的变化は貝化石の群集組成から推定された古環境変化と一致

した。さらに、増田・平(1974)は、測定数をふやし、各層堆積時の古水温の範囲を具体的な数値として算出して、下総層群における古水温の時代的変遷を論じた。

KONISHI & SAKAI (1972)は、二枚貝の化石(*Glycymeris*)の殻とその内側に晶出した針状アラレ石の $^{18}\text{O}$ 濃度を測定し、針状アラレ石の $^{18}\text{O}$ 濃度が殻のそれより著しく薄い値を示すこと、およびストロンチウム濃度の測定から、一般に海水起源とされる針状アラレ石セメントにも淡水起源のものがあることを見出した。このように、同位体を使って続成過程における鉱物晶出の研究を行った例は少ない。

KONISHI *et al.*, (1974)は、隆起サンゴ礁性石灰岩が発達する喜界島の各段丘から採集した貝化石について、各個体を粉末にしてその $^{18}\text{O}$ 濃度を測定した。その結果、各段丘ごとの平均的な $^{18}\text{O}$ 濃度は、それぞれの段丘の海拔高度と調和的に変化していた。すなわち、各段丘の平均的な $^{18}\text{O}$ 濃度は、高い海水準の間氷期に薄く、それより相対的に低い海水準を示す亜間氷期には濃くなっていった。彼らは、その原因を、間氷期には亜間氷期よりも海洋全体の海水の $^{18}\text{O}$ 濃度が薄くなり、同時に水温も高くなるため、両方の相乗効果によって貝化石の $^{18}\text{O}$ 濃度が薄くなったと解釈した。同様な論理に基づく議論は、喜界島の更新世(小西, 1976)や完新世(太田ほか, 1978)、大東海嶺の更新世(KONISHI *et al.*, 1978)の各段丘形成時についてもなされている。

増田(1976)は、日本各地の海岸から採集した*Glycymeris*の個体について、その殻の外層に含まれるSr含量とその海域の年平均水温との間に逆相関が存在することを見出し、Sr含量から水温を算出することを試みた。そして、以前に $^{18}\text{O}$ 濃度を測定した成田層の*Glycymeris*について外層のSr含量を測定し、 $^{18}\text{O}$ 濃度とSr含量の間にやはり逆相関があることを指摘した。その上で、増田(1977a)は、上述のSr含量と水温との逆相関を一次式に表わし、化石*Glycymeris*のSr含量から古水温を算出した。そして、その古水温の値と殻の $^{18}\text{O}$ 濃度から殻が形成された時の海水の $^{18}\text{O}$ 濃度を求めた。

さらに、増田(1977)およびMASUDA (1977)は、*Glycymeris*の殻の $^{18}\text{O}$ と $^{13}\text{C}$ 濃度から古塩分の推定も行った。増田の古塩分推定の原理は KEITH *et al.*

(1964)の結果に基づくものである。KEITH *et al.* (1964)は、海水・汽水・淡水産二枚貝の殻の $^{18}\text{O}$ と $^{13}\text{C}$ 濃度を測定し、それらの値が塩分低下に従って薄くなるという関係を見出した。増田は、その関係が海水産二枚貝についても成り立つと仮定して、古塩分を算出しようとしたのである。しかし、増田の古水温および古塩分推定法はさらに検討されるべき問題点が含まれている。

堀部・大場(1977)は、陸奥湾産現生アカガイについて、殻の成長段階に応じて採取した試料の $^{18}\text{O}$ 濃度とアカガイが生息していた海水の $^{18}\text{O}$ 濃度を測定し、アラレ石温度スケール(堀部・大場, 1972)を使って水温を算出した。その結果、算出された水温の季節変動幅は実際に観測された表面水温の季節変動幅とよく一致した。このことは、アラレ石温度スケールが実際に使用できることを示している。なお、アラレ石温度スケールは、アカガイばかりでなく他のアラレ石を持つ貝化石にも使用され(青島・鎮西, 1972; 増田・平, 1974; 増田, 1976, 1977), EPSTEIN *et al.* (1953)の温度スケールを使用するよりも、より妥当な水温が算出されている。

大場(1977)および KU & OBA (1978)は、南西太平洋の深海底コアについて浮遊性有孔虫殻の $^{18}\text{O}$ 濃度を測定し、同時に炭酸塩の溶解量の推定(大場・KU, 1977)を行って、各氷期の終末に深海底の炭酸塩があまり溶けなくなったという現象を見出した。

また、新妻・顧(1977)は、南東太平洋のコアについて底生有孔虫殻の $^{18}\text{O}$ と $^{13}\text{C}$ 濃度および古地磁気の測定を行い、 $^{13}\text{C}$ 濃度の変動が氷期と間氷期の間で起こる海進・海退に伴う大陸棚上の有機物量の変化に影響を受けていることを示した。さらに、海進・海退に伴わない生物量の急激な減少を古地磁気の逆転と結び付けて考察した。

NOZAKI *et al.* (1978)は、バミューダ島から採取した現生サンゴについて、過去200年間にわたる $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ 濃度を測定した。その結果、 $^{14}\text{C}$ 濃度が1900年から1950年にかけて減少し、1955年以後急速に増加していることを明らかにした。そして、その原因をSuess効果(産業革命以来の石炭・石油の燃焼による大気への $^{12}\text{C}$ の供給による $^{14}\text{C}$ や $^{13}\text{C}$ の割合の減少)と大気中の核実験による $^{14}\text{C}$ 濃度の増加によると判断した。また、サンゴの $^{14}\text{C}$ および $^{13}\text{C}$ 濃

度を木の年輪のそれらの値(DAMON *et al.*, 1978)と比較したところ、両者は19世紀の中頃にそれぞれ独自の変化を示していることがわかった。NOZAKI *et al.* (1978)はそのサンゴに見られる $^{14}\text{C}$ と $^{13}\text{C}$ 濃度の独自の変化を海洋環境が変化したためと説明したが、その後、再びこの問題を考察し、太陽活動、気候変動、生物生産量、海洋の鉛直循環などを巧みに組み合わせることで説明を試みている(野崎, 1980)。

以上述べてきたように、1970年代におけるわが国の研究者による同位体を用いた古環境研究は、さまざまな方向へ発展した時代といえよう。このことは、1970年代に発表された論文の研究テーマをもう一度振り返って見ることにより、一層はつきりする。以下に、各研究テーマを簡単な言葉で例記してみる。「アラレ石・方解石温度スケール」、「掛川層堆積時の水温構造」、「成田層の古水温」、「淡水源針状アラレ石セメントの同位体による識別」、「下総層群の古水温」、「喜界島の間氷期・亜間氷期段丘と酸素同位体比」、「Sr温度計」、「古塩分の推定」、「下総層群の古水温・古塩分」、「アラレ石温度スケールの検証」、「第四紀の古環境と炭酸塩の堆積」、「第四紀の酸素・炭素同位体比と古地磁気」、「サンゴ骨格中の $^{14}\text{C}$ ・ $^{13}\text{C}$ ・ $^{18}\text{O}$ 濃度」。これらの研究テーマのなかにはまだ仮説の段階のものも含まれるが、1970年代になって同位体が古環境解析にいかにも多方面に応用されてきたかということがわかる。

### 3.1980年代

1970年代に、わが国の同位体による古環境研究は様々な方向へ発展していった。それにもかかわらず、研究者の数は必ずしも多くなっていない。1980年代に入って、わが国の同位体による古環境研究は、東京大学海洋研究所と金沢大学の二つの研究機関を中心に行われ、1983年までに以下に述べるような8編の論文が発表されている。

鎮西ほか(1980)は、南関東各地の貝塚や自然貝層から産出した約20個のチョウセンハマグリについて貝殻の成長線解析を行い、数年間の夏と冬に成長した部分およびその前後から試料を採取し、 $^{18}\text{O}$ 濃度を測定して古水温の季節変動幅を算出した。そして、その季節変動幅を、現在から約7000年前までについておよそ300~500年間隔で求めた。その結果、南関東における古水温は約7000年前から4500年前

にかけて低下し、その後 2000 年前頃に一時上昇して現在に至るといふ変遷が示された。しかし、用いられた個体によっては淡水の影響を受けた海域に生息していたと考えられるものも含まれている。

大場ほか(1980)および新井ほか(1981)は、日本海の隠岐堆から採取した 2 本のピストンコアに含まれる底生および浮遊性有孔虫化石の群集解析を行い、同時にそれらの殻の $^{18}\text{O}$ 濃度を測定して古水温および古塩分の推定を行った。その結果、有孔虫の群集解析と $^{18}\text{O}$ 濃度から復元された日本海古環境変遷は両者の間でよく一致した。また、新井ほか(1981)は、広域示標テフラを使ってコアの対比や堆積物の時代決定を行い、海底コアの研究にとってテフラの重要性を強調した。さらに、この二つの論文によって、最終氷期の日本海には低塩分水が広がって海水が停滞したり、津軽海峡から親潮が流入してきたり、また、対馬暖流が約 8000 年前から本格的に流入してきたことなどが明らかにされた。

KONISHI *et al.* (1981) は、沖縄や東カロリン諸島で採集した造礁性サンゴについて、X 線透過による成長線解析と同時に、現在から約 70 年前までの骨格中の $^{14}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{18}\text{O}$ 濃度を測定した。その結果、沖縄産サンゴの $^{14}\text{C}$ 濃度には Suess 効果および核実験による $^{14}\text{C}$ の増加が記録されており、以前にバミューダ(NOZAKI *et al.*, 1978)やフロリダ(DRUFFEL & LINICK, 1978)で観察されたものと同様な変化を示した。一方、東カロリン諸島産サンゴの $^{14}\text{C}$ 濃度は沖縄産のものより全体に薄く、赤道域の海水の $^{14}\text{C}$ 濃度が薄かったことを反映しているという。また、沖縄産サンゴの $^{13}\text{C}$ 濃度は、1950 年代以降に減少の傾向を示し、人間活動による有機炭素の海洋汚染が起因していると述べている。さらに、沖縄産サンゴの $^{18}\text{O}$ 濃度の平均値が東カロリン諸島産のそれより約 1‰濃いのは、両海域の年平均水温の差(4°C)で説明できるという。このように、サンゴ骨格中の $^{14}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{18}\text{O}$ 濃度は、過去数百年にわたる海洋環境の変化を忠実にモニターしており、サンゴ骨格年代学(小西, 1983)とも呼ばれるこの種の研究は、今後ますます盛んに行われることが予想される。

同様に、井口ほか(1983)は、喜界島のポーリングによって得られた約 3500 年前のサンゴについて、X 線透過による成長速度の算定と $^{18}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ 濃度の

測定を行った。その結果、120 年にわたる長期の経年変化では成長速度と $^{13}\text{C}$ 濃度の間に正の相関関係があり、その原因を日射量の季節変化がサンゴの共生藻類の活動に影響を与えたためと解釈した。また、ストレスバンドが観察される短期間の部分の $^{18}\text{O}$ ・ $^{13}\text{C}$ 濃度はいずれも濃くなり、ストレスバンドが日射量の低下した冷夏に形成されたことを暗示するという。一方、 $^{14}\text{C}$ 濃度についても 100 年を越える周期が認められるほかに、成長速度とも関連がある可能性が指摘された。

OMURA (1983) は、富山湾の水深 140m から非造礁サンゴを採集し、サンゴ骨格の成長段階に応じて $^{18}\text{O}$ および $^{13}\text{C}$ 濃度を測定した。その結果、骨格の先端部を除き、 $^{13}\text{C}$ 濃度はほとんど変化を示さないのに対し、 $^{18}\text{O}$ 濃度は周期的な変化を示した。彼は、この結果を、海水の $^{13}\text{C}$ 濃度が季節的に変化しなかったのに対して、水温の季節変化がサンゴ骨格の $^{18}\text{O}$ 濃度に反映されたと解釈した。また、骨格の先端部に見られる $^{18}\text{O}$ および $^{13}\text{C}$ 濃度の著しい低下の原因を呼吸作用に伴う酸素・炭素が骨格に取り込まれた、いわゆる Vital effect (UREY *et al.*, 1951)によると説明した。この OMURA の論文は、同位体による現生非造礁性サンゴの基礎的研究が今後も必要であることを示唆している。

大場(1983)は、前述した日本海隠岐堆のコアについて $^{18}\text{O}$ 濃度の追加測定を行い、 $^{13}\text{C}$ 濃度についても考察を加え、新たに得られた $^{14}\text{C}$ 年代値に基づいて現在から約 6 万年前までの日本海古環境変遷史を論じた。さらに、大場ほか(1983)は、房総半島沖のピストンコアについて有孔虫殻の $^{18}\text{O}$ 濃度から古水温を算出し、日本海側の結果と比較して、最終氷期以降の日本南部海域の海洋環境変遷を論じた。この房総半島沖のコアは、微化石(コッコリス、珪藻、放散虫、有孔虫)についても研究が行われており(鎮西ほか, 1983)、わが国において同位体と微化石の総合研究が最初に行われたコアとして、その成果が注目されている。

## む す び

わが国における同位体による古環境研究の歴史は、同位体比質量分析計を所有する研究機関の活動と共に発展してきたといえよう。1960 年代の後半からス

タートしたわが国の地球化学者と地質学者の共同研究は、東京大学海洋研究所と岡山大学温泉研究所の測定器により、最初は $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 法の基礎的問題の検討から始められた。1970年代には、東京教育大学と金沢大学の測定器がこれに加わり、四つの研究機関を中心に研究が進められ、酸素および炭素同位体比が古環境のさまざまな問題解明のために非常に有効な手段であると広く認められ、同位体が古環境研究に本格的に応用され始めた時代である。1980年代になると、1970年代から稼動していた金沢大学理学部地学教室の同位体比質量分析計のほかにも、山形大学理学部地球科学教室、静岡大学理学部地球科学教室、金沢大学教養部地学教室などに地質学古生物学関係の研究者専用の同位体比質量分析計が設置され、わが国における同位体による古環境研究の新たな息吹きが感じられ始めている。

#### 文 献

- 青島睦治・鎮西清高, 1972: 化石硬組織の酸素同位体比に基づく掛川層群堆積時の古水温推定. 化石, nos. 23・24, 80-91.
- 新井房夫・大場忠道・北里 洋・堀部純男・町田 洋, 1981: 後期第四紀における日本海の高環境—テフロクロノロジー, 有孔虫群集解析, 酸素同位体比法による—。第四紀研究, 20, 209-230.
- BOWEN, R., 1966: Paleotemperature analyses of Belemnoida and Jurassic paleoclimatology. *Jour. Geol.*, 69, 309-320.
- , 1966: Paleotemperature analysis. *methods in geochemistry and geophysics*, 265p., Elsevier Pub. Co., New York.
- and FRITZ, P., 1963: Oxygen isotope paleotemperature analyses of Lower and Middle Jurassic fossils from Pliensbach, Württemberg (Germany). *Experientia*, 19, 461-470.
- 鎮西清高・大場忠道・小池裕子・松島義章・北里 洋, 1980: 貝塚産貝殻の酸素同位体比組成の時代的変遷と先史時代の古環境. 文部省科学研究費特定研究「古文化財」総括班, 「自然科学の手法による遺跡・古文化財等の研究」, 103-117.
- ・岡田尚武・尾田太良・大場忠道・北里 洋・小池裕子・小泉 格・酒井豊三郎・谷村好洋・藤岡換太郎・松島義章, 1983: 外洋堆積物に記録された縄文・弥生時代の環境変遷. 同上, 「古文化財に関する保存科学と人文・自然科学」, 397-417.
- CLAYTON, R. N., 1961: Oxygen isotope fraction between calcium carbonate and water. *Jour. Chem. Phys.*, 34, 724-726.
- COMPSTON, W., 1960: The carbon isotopic composition of certain marine invertebrates and coals from the Australian Permian. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 18, 1-22.
- CRAIG, H. and GORDON, L. I., 1965: Deuterium and  $\text{O}^{18}$  variations in the ocean and the marine atmosphere. In TONGIORGI, E. ed., *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, 9-130.
- DAMON, P. E., LERMON, J. C. and LONG, A., 1978: Temporal fluctuations of atmospheric  $^{14}\text{C}$ : Causal factors and implications. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 6, 457-494.
- DANSGAARD, W., 1964: Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-468.
- , JOHNSEN, S. J., MOLLER, J. and LANGWAY, C. C. Jr., 1969: One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet. *Science*, 166, 377-381.
- DEVEREUX, I., 1967: Oxygen isotope paleotemperature measurements on New Zealand Tertiary fossils. *New Zealand Jour. Science*, 10, 988-1011.
- , HENDY, C. H. and VELLA, P., 1970: Pliocene and early Pleistocene sea temperature fluctuations, Mangaopari Stream, New Zealand. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 8, 163-168.
- DORMAN, F. H., 1966: Australian Tertiary paleotemperatures. *Jour. Geol.*, 74, 49-61.
- , 1968: Some Australian oxygen isotope temperatures and a theory for a 30-million-years world-temperature cycle. *Jour. Geol.*, 76, 297-313.
- and GILL, E. D., 1959: Oxygen isotope paleotemperature measurements on Australian fossils. *Proc. Roy. Soc. Victoria*, 71, 73-98.
- DRUFFEL, E. M. and LINICK, T. W., 1978: Radiocarbon in annual coral rings of Florida. *Geophys. Res. Lett.*, 5, 913-916.
- EMILIANI, C., 1955: Pleistocene temperature. *Jour. Geol.*, 63, 538-578.
- , 1966: Paleotemperature analysis of Caribbean cores P6304-8 and P6304-9 and a generalized temperature curve for the past 425,000 years. *Ibid.*, 74, 109-124.
- EPSTEIN, S., BUCHSBAUM, R., LOWENSTAM, H. A. and UREY, H. C., 1951: Carbonate-water isotopic temperature scale. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 62, 417-426.
- , ———, ——— and ———, 1953: Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Ibid.*, 64, 1315-1326.
- and LOWENSTAM, H. A., 1953: Temperature-shell-growth relations of recent and interglacial pleistocene shoalwater biota from Bermuda. *Jour. Geol.*, 61, 424-438.

- ERICSON, D. B. and WOLLIN, G., 1956 : Micropaleontological and isotopic determinations of Pleistocene climates. *Micropal.*, **2**, 257-270.
- , EWING, M., WOLLIN, G. and HEEZEN, B. C., 1961 : Atlantic deep-sea sediment cores. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **72**, 193-286.
- GROSS, M. G., 1964 : Variations in the  $O^{18}/O^{16}$  and  $C^{13}/C^{12}$  ratios of diagenetically altered limestones in the Bermuda Islands. *Jour. Geol.*, **72**, 170-194.
- 堀部純男, 1966 : 軽元素の同位体比測定法, 質量分析, **14**, 113-120.
- , 1967 : 古代海水温度の測定. 第四紀研究, **6**, 180-185.
- ・新妻信明・酒井豊三郎, 1969 : 生物遺骸の示す古水温. 化石増刊号, 31-37.
- ・大場忠道, 1969 : インド洋深海底コアの炭酸塩温度計法による古水温. 同上, 21-29.
- ・———・新妻信明, 1969 : 水温変化と酸素同位体比. 同上, 15-20.
- ・———, 1972 : アラレ石-水および方解石-水系の温度スケール. 化石, nos. 23・24, 69-79.
- ・———, 1977 :  $^{18}O/^{16}O$  法による古海水温度測定の基礎的研究-アラレ石温度スケールの検証- . 考古学と自然科学, **10**, 11-19.
- 井口真二・佐藤野廣・岩原豊起・小西健二, 1983 : イシサンゴ群体の骨格年代学を用いた完新世海洋古環境の精密解析. 月刊地球, **5**, 739-752.
- 菅野三郎・平一弘・増田富士雄, 1972 : 酸素同位体比からみた“成田層準”産具化石の古水温とその古生物学的検討. 化石, nos. 23・24, 92-107.
- KEITH, M. L., ANDERSON, G. M. and EICHLER, R., 1964 : Carbon and oxygen isotopic composition of mollusk shells from marine and fresh-water environments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **28**, 1757-1786.
- and WEBER, J. N., 1964 : Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. *Ibid.*, 1787-1816.
- and ———, 1965 : Vital effects on the carbonate isotopic composition of reef communities. In TONGIORGI, E. ed., *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, 267-283.
- 小西健二, 1976 : サンゴ礁堆積物. 「海洋地質」, 奈須紀幸(編), 67-81, 東京大学出版会.
- , 1980 : 隆起サンゴ礁からみた最終氷期以降のアジア・フィリピン海プレート境界付近の地史. 第四紀研究, **18**, 241-250.
- , 1983 : イシサンゴ骨格年代学. 平野敏行(編), 海の環境科学, 540-561, 恒星社厚生閣.
- KONISHI, K., KOMURA, K. and MOTOYA, Y., 1978 : An early Wisconsin reef on the Daito ridge, north Philippine sea, isotopic evidences. *Proc. Japan Acad.*, **54**, 516-521.
- , OMURA, A. and NAKAMICHI, O., 1974 : Radiometric coral ages and sea level records from the late Quaternary reef complexes of the Ryukyu islands. *Proc. 2nd Int. Coral Reef Symp.*, Brisbane, **2**, 595-613.
- and SAKAI, H., 1972 : Fibrous aragonite of fresh-water origin in sealed Pliocene *Glycymeris yessoensis*. *Japan. Jour. Geol. Geogr.*, 19-30.
- , TANAKA, T. and SAKANOUÉ, M., 1981 : Secular variation of radiocarbon concentration in sea water : sclerochronological approach. *Proc. 4th Int. Coral Reef Symp.*, Manila, **1**, 181-185.
- 小西健二・辻喜弘・後藤十志朗・田中武男・二口克人, 1983 : サンゴ礁の多孔浅層掘削-喜界島における完新統の例-. 海洋科学, **15**, 154-164.
- KU, T. L. and OBA, T., 1978 : A method for quantitative evaluation of carbonate dissolution in deep-sea sediments and its application to paleoceanographic reconstruction. *Quat. Res.*, **10**, 112-129.
- LLOYD, D. M., 1964 : Variation in the oxygen and carbon isotope ratios of Florida Bay mollusks and their environmental significance. *Jour. Geol.*, **72**, 84-111.
- LONGINELL, A. and NUTI, S., 1965 : Oxygen isotopic composition of phosphate and carbonate from living and fossil marine organisms. In TONGIORGI, E. ed., *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, 183-197.
- LOWENSTAM, H. A., 1961 : Mineralogy,  $O^{18}/O^{16}$  ratios and strontium and magnesium contents of recent and fossil Brachiopods and their bearing on the history of the oceans. *Jour. Geol.*, **69**, 241-260.
- , 1964 : Palaeotemperatures of the Permian and Cretaceous periods. In NAIRN, A. E. M. ed., *Problems in Palaeoclimatology*. 227-248, Interscience, New York.
- and EPSTEIN, S., 1954 : Paleotemperatures of the post-Aptian Cretaceous as determined by oxygen isotope method. *Jour. Geol.*, **62**, 207-248.
- and ———, 1959 : Cretaceous paleotemperatures as determined by the oxygen isotope method, their relations to and the nature of rudistid reefs. *Int. Geol. Congr., 20th, Mexico, 1956, Symp. Cretaceous*, 65-76.
- 増田富士雄, 1975 : 酸素同位体比法による古水温の推定. 地学雑誌, **84**, 32-54.
- , 1976 : 二枚貝 *Glycymeris* の殻のストロンチウム含量について. 地質雑, **82**, 565-572.
- , 1977 : 貝化石の酸素・炭素同位体比および Sr 含量による古水温・古塩分濃度の推定. 同上, **83**, 315-323.

- MASUDA, F. 1977: Paleotemperature and paleosalinity during a period from 400,000 to 120,000 years B. P. in the Boso Peninsula, central Japan. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **3**, 32-36.
- 増田富士雄・平 一弘, 1974: 貝化石の酸素同位体比による房総半島中部更新統の古水温. *地質雑*, **80**, 97-106.
- MCCREA, J. M., 1950: On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *Jour. Chem. Phys.*, **18**, 849-859.
- MCKINNEY, C. R., MCCREA, J. M., EPSTEIN, S., ALLEN, H. A. and UREY, H. C., 1950: Improvements in mass spectrometers for the measurement of small differences in isotope abundance ratios. *Rev. Sci. Instr.*, **21**, 724-730.
- MIYAKE, Y. and WADA, E., 1967: The abundance ratio of  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  in marine environments. *Rec. Oceanogr. Works Japan*, **9**, 37-53.
- 中道 修・小西健二・酒井 均, 1969: 生物源炭酸塩硬組織中の酸素・炭素同位体比の測定に関する若干の考察. *質量分析*, **17**, 500-508.
- 新妻信明・顧 徳隆, 1977: 地球磁場逆転時に何がおこったか. *科学*, **47**, 671-678.
- 野崎義行, 1980: 炭素の循環—サンゴの記録から—. *うみ*, **18**, 229-236.
- NOZAKI, Y., RYE, D. M., TUREKIAN, K. K. and DODGE, R. E., 1978: A 200-year record of carbon-13 and carbon-14 variations in a Bermuda coral. *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 825-828.
- OBA, T., 1969: Biostratigraphy and isotopic paleotemperature of some deep-sea cores from the Indian Ocean. *Tohoku Univ. Sci. Rep., 2nd series (Geol.)*, **41**, 129-195.
- 大場忠道, 1975:  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  法による古代海水温度. 堀部純男編, 「海洋学講座 6, 海洋無機化学」, 171-195, 東京大学出版会.
- , 1977: 第四紀の海水温度—酸素同位体比( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ )温度と炭酸塩の堆積—. *科学*, **47**, 607-614.
- , 1983: 最終氷期以降の日本海古環境. *月刊地球*, **5**, 37-46.
- ・堀部純男・北里 洋, 1980: 日本海の2本のコアによる最終氷期以降の古環境解析. *考古学と自然科学*, **13**, 31-49.
- ・KU, T. L., 1977: 深海底堆積物中の炭酸塩溶解量の測定. *化石*, no. 27, 1-14.
- ・新妻信明・斎藤常正, 1983: 日本周辺海域の上部第四系の同位体層準. *海洋科学*, **15**, 130-137.
- OLAUSSEN, E., 1965: Evidence of climatic changes in north Atlantic deep-sea cores, with remarks on isotopic paleotemperature analysis. *Progress in Oceanogr.*, **3**, 221-252.
- 大村明雄, 1976: 生物源炭酸塩の酸素および炭素同位体比の測定について. 金沢大学日本海域研究報告, no. 8, 15-25.
- OMURA, A., 1983: Oxygen and carbon isotopic composition in the skeleton of an ahermatypic scleractinian coral, *Dendrophyllia japonica* REHBERG. *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan*, no. 131, 159-167.
- 太田陽子・町田 洋・堀 信行・小西健二・大村明雄, 1978: 琉球列島喜界島の完新世海成段丘—完新世海面変化研究へのアプローチ. *地理評*, **51**, 109-130.
- O'NEIL, J. R., CLAYTON, R. N. and MAYEDA, T. K., 1969: Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *Jour. Chem. Phys.*, **51**, 5547-5558.
- 酒井 均, 1966: Balance法による同位体比の測定法— $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  比の測定について—. *質量分析*, **14**, 121-126.
- ・小西健二・中道 修, 1969: 南西諸島および台湾産二枚貝ならびにさんご化石の炭素・酸素同位体比. *化石増刊号*, 1-14.
- SHACKLETON, N., 1967: Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures reassessed. *Nature*, **215**, 15-17.
- SHARMA, T. and CLAYTON, R. N., 1965: Measurement  $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$  ratios of total oxygen of carbonates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **29**, 1347-1353.
- TARUTANI, T., CLAYTON, R. N. and MAYEDA, T. K., 1969: The effect of polymorphism and magnesium substitution on oxygen isotope fractionation between calcium and water. *Ibid.*, **33**, 987-996.
- TONGIORGI, E., 1965: *Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures*. 337p., Consiglio nazionale delle ricerche laboratorio di geologia nucleare-Pisa.
- UREY, H. C., 1947: The thermodynamic properties of isotopic substances. *Jour. Chem. Soc.*, **1**, 562-581.
- , LOWENSTAM, H. A., EPSTEIN, S. and MCKINNEY, C. R., 1951: Measurement of paleotemperatures and temperatures of the upper Cretaceous of England, Denmark, and the southeastern United States. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **62**, 399-416.
- WEBER, J. N. and RAUP, D. M., 1966: Fractionation of the stable isotopes of carbon and oxygen in marine calcareous organism-Echinoidea (in two parts). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **30**, 681-703.
- and WOODHEAD, P. M. J., 1972: Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonates. *Jour. Geophys. Res.*, **77**, 463-473.