



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	生物源炭酸塩の同位体比及び微量元素を用いた熱帯域海洋表層の高解像度古環境解析に関する研究（2003年度日本地球化学会奨励賞受賞記念論文）
Author(s)	渡邊，剛
Citation	地球化学，38(1)，29-43
Issue Date	2004-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56463
Type	journal article
File Information	GCj_38_29-.pdf



地球化学 38, 29-43 (2004)

Chikyukagaku (Geochemistry) 38, 29-43 (2004)

2003年度日本地球化学会奨励賞受賞記念論文

生物源炭酸塩の同位体比及び微量元素を用いた 熱帯域海洋表層の高解像度古環境解析に関する研究

渡 邊 剛^{*,**}

(2004年1月6日受付, 2004年1月27日受理)

High-Resolution Reconstruction of Palaeoclimates in tropical sea surface using Stable Isotopes and Trace Elements in Biogenic Carbonates

Tsuyoshi WATANABE^{*,**}

- * Center for Environmental Research
Ocean Research Institute, The University of Tokyo
Minamidai 1-15-1, Nakano-ku, Tokyo 164-8639, Japan
- ** Present address: Laboratoire de Sciences du Climat et de l'Environnement
Laboratoire Mixte CNRS-CEA
Domaine du CNRS, 91198 Gif sur Yvette Cedex, France
E-mail: tsuyoshi.watanabe@lscce.cnrs-gif.fr

My recent scientific interests have been to reconstruct palaeoclimates in the tropical and sub tropical areas using chemical tracer of biogenic carbonates including coral skeletons and molluscan shells, which have annual and daily growth bands. Understanding the past climate variability in the tropical ocean is a high priority in climate change research. The tropical climate variability has global consequences such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and Asian-Australian monsoon but the instrumental records in this area are limited only up to past several decades. Recently coral skeletons have been widely used to understand the past climate variability in the tropical ocean. The oxygen isotopic and trace elemental records of living and fossil coral skeletons have provided the sea surface temperature and precipitation over several hundred years. Despite such a great advance, there still remain problems to use coral skeletons for reconstructing palaeoclimates because of complicated biological and physical processes during their formation. Here I would like to introduce recent my works concerned with these problems and solutions using biogenic carbonates in the skeletons of coral reefs dwellers.

Key words: Biogenic carbonates, Isotopes, Trace elements, Corals, Shells, Climate changes, Tropical sea

1. はじめに

近年, 全球規模の地球温暖化が危惧されてきており, その将来の予測及び解決に向けて, 人類が気候変

動に与える影響を正確に評価, 見積もることが, 人類共通の重要な課題の一つになっている。著者は, これまで生物が作り出す炭酸塩骨格を用いた高解像度の古環境解析に関する研究を行ってきた。人類活動の気候変動への影響を精度よく見積もるためには, 過去の気候変動を地球上の広い範囲から少なくとも産業革命以前まで遡ることができ, かつ, 季節変化以上の時間分解能を有するデータを復元することが求められる。

* 東京大学海洋研究所海洋環境研究センター
〒164-8639 東京都中野区南台1-15-1

** 現在フランス留学中

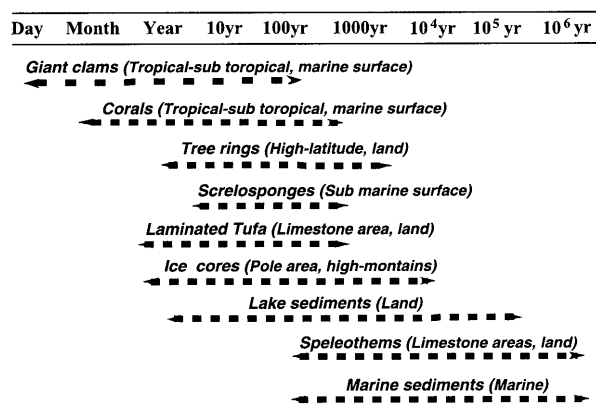


Fig. 1 Palaeoenvironmental recorders with various temporal resolutions. (modified from Watanabe, (2002a))

しかしながら、現在、我々が手にできる過去の記録は多くはない。寒暖計などによる長期間に及ぶ観測記録は、古くから文明の発達していた北半球陸地のごく一部に限られており、海域における船舶等による長期間に渡る実測記録も少なく、期間も精々過去100年間である。最近になって、人工衛星等によるモニタリングでほぼ全地球の気温、水温を観測できるようになったが、過去に遡れるのは20年程度である。木の年輪、氷床コア、湖底堆積物、古文書などは、これらの観測記録の代わりに過去の気候を復元する有効な指標として広く研究されており (Fig. 1)、産業革命以前からの気候復元を可能にしてきたが、それらの多くは、陸地や高緯度地域に限定されている。近年、エルニーニョ現象に代表されるように熱帯、亜熱帯の海洋表層の熱、水循環の変化が地球全体の気候システムに与える重要性が明らかになってくると共に、人工衛星や海洋ブイを設置しての熱帯域の海洋観測が盛んになってきている。しかし、熱帯域では、過去に遡れる記録はせいぜい過去50年程度で、熱帯域の過去の海洋環境を復元するための記録が極めて不足しているのが現状である。

熱帯・亜熱帯域のサンゴ礁に生息する造礁性サンゴの骨格は、熱帯、亜熱帯に広く棲息する年輪を形成しながら数百年間に渡って成長を続けるため、過去数百年間の環境変化が連続的に記録されており、熱帯地域の海洋表層の過去の変動を復元する強力なツールとして注目されてきた。さらに、測定機器の進歩から、同位体比や微量元素などの化学組成が、高精度、高解像度で測定できるようになり、上記の社会的な要請と相まって特に1990年代半ばからは急速に研究が発展して

きており、多くの重要な研究成果が報告されてきた。一方で、サンゴ礁の変化に富む環境や、生物の石灰化過程に関わる様々な生物作用が骨格の化学組成に与える影響も多く指摘されるようになってきた。本稿では、主に著者のこれまでの研究結果を基に、これらの研究の実際と問題点、これからの展望について述べる。

2. サンゴ、シャコガイに刻まれる年輪、日輪

サンゴ礁に広く生息するシャコガイ、造礁性サンゴの生体内には共生藻類が生息し、石灰化速度が速い。造礁性サンゴの骨格に軟X線を照射することによって、年輪に相当する成長輪が観測されることが1970代に明らかになった (Knutson *et al.*, 1972)。サンゴ群体は骨格を数百年間に渡って成長を続けるため、その骨格には、過去数百年間の環境変化が連続的に記録されていることになる (Fig. 2 A 左)。骨格の成長速度は種によっても異なるが (Fig. 2 A 右)、古環境復元に広く用いられている *Porites* 属は1年に1~2 cmと速く、数週間から月レベルの時間解像度での古環境復元が可能となる。これらのサンゴ骨格は、他の古気候指標を用いての高解像度古気候復元が困難であった熱帯、亜熱帯地域からの気候変動の記録を、また、海洋と大気の相互関係を知る上で重要な海洋表層の情報を提供してくれる。一方、シャコガイは二枚貝の中では最大の殻を形成し、その殻の内層には、明瞭な年輪 (Fig. 2 B 左) と日輪 (Fig. 2 B 右) が形成される。どちらも殻を成長方向に垂直に切断した面を研磨した後、年輪は透過光下で肉眼で、日輪は光学顕微鏡や電子顕微鏡でそれぞれ容易に観察することができる。

通常、これらの生物骨格試料のサンプリングはスクーバダイビングによって行うが、サンゴ骨格の場合は、現場での水中ボーリングによって群体の最大成長軸に沿った5~8 cm程度のボーリングコアとして採取する。研究室に持ち帰った試料は、上述のようにそれぞれの方法で年輪、日輪を観測した後、化学分析用にマイクロサンプリングにより、一定の間隔で成長方向により細かく削っていく。このマイクロサンプリング技術は、測定結果の時間分解能、精度を決定する上で重要な過程の一つとなる。著者は、取り扱う試料の性質により主に以下の2つの方法でマイクロサンプリングを行ってきた。シャコガイなどで日輪に沿った超微量の粉末試料を扱うためには、短冊状に切り取った

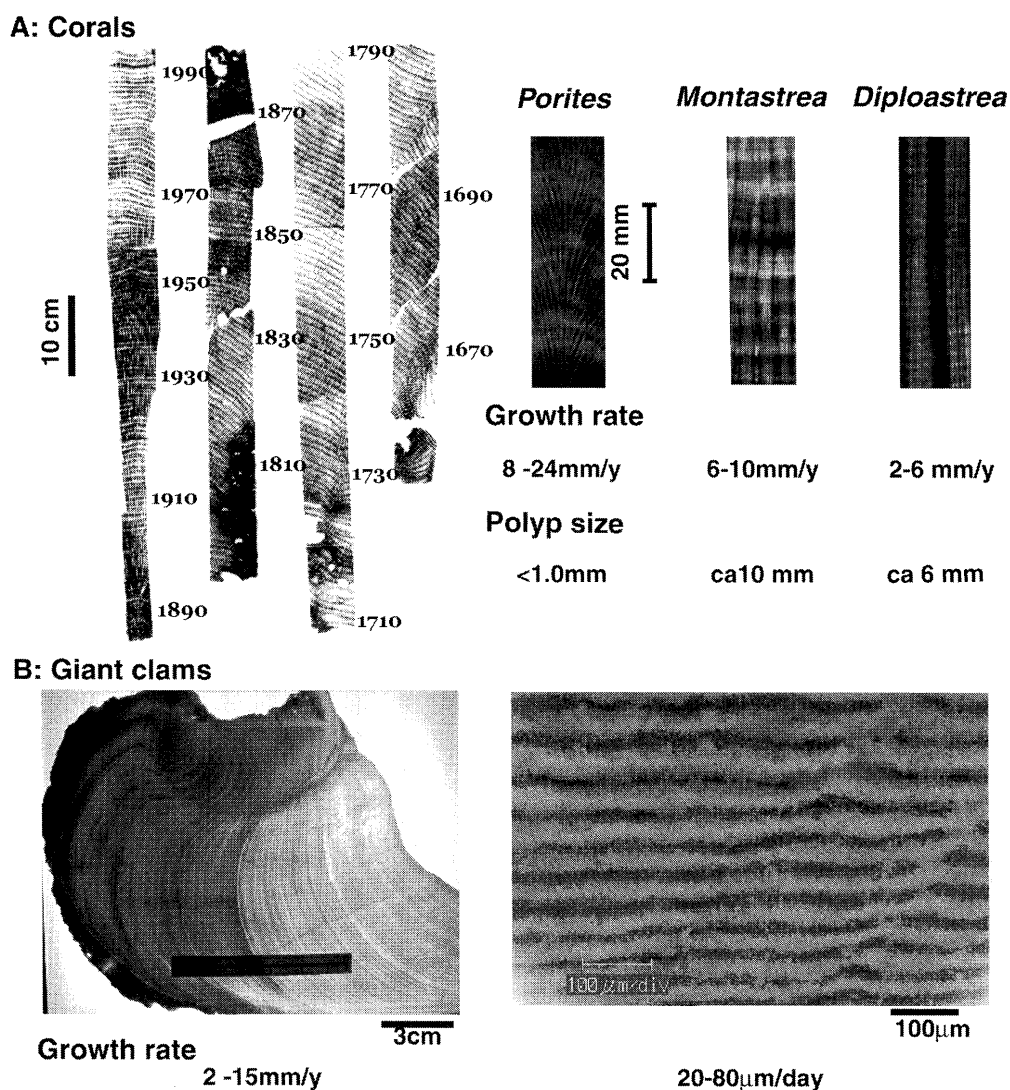


Fig. 2 A: X-radiographs of coral core *Montastrea faveolata* showing 360-years of banding collected from La Parguera, Puerto Rico, Caribbean Sea (left) and three different growth rates of coral *Porites*, *Montastrea*, and *Diploastrea*. Couplets of high skeletal density (dark bands) and low skeletal density (light bands) represent one annual growth increment. B: Optical transmitted light photograph (left) and microscopic image showing the daily growth bands (light) in inner shell layer of *Tridacna gigas* (modified from Watanabe *et al.*, 2001a, Watanabe *et al.*, 2002a, b, Watanabe 2003)

試料を氷詰めにして、 -20°C の冷凍室でマイクロトームを用いて削り取っていくという冷凍マイクロトーム法 (Watanabe and Oba, 1999; Fig. 3 A) を用いた。この方法により、試料は隣り合う試料と混合することなく、また、氷が試料と共に回収されるので、粉末を損失することなく回収率のよいマイクロサンプリングが可能となる。また、サンゴ骨格試料のよ

うに、高分解能分析が必要されると共に、測定試料が膨大になる場合には、削り出したい部位だけを棚状 (Ledge) に加工した後に、コンピューター制御のマイクロドリルを用いて半自動的にマイクロサンプリングをしていくという方法を用いた (Gagan *et al.*, 1994, Watanabe *et al.*, 2003; Fig. 3 B)。

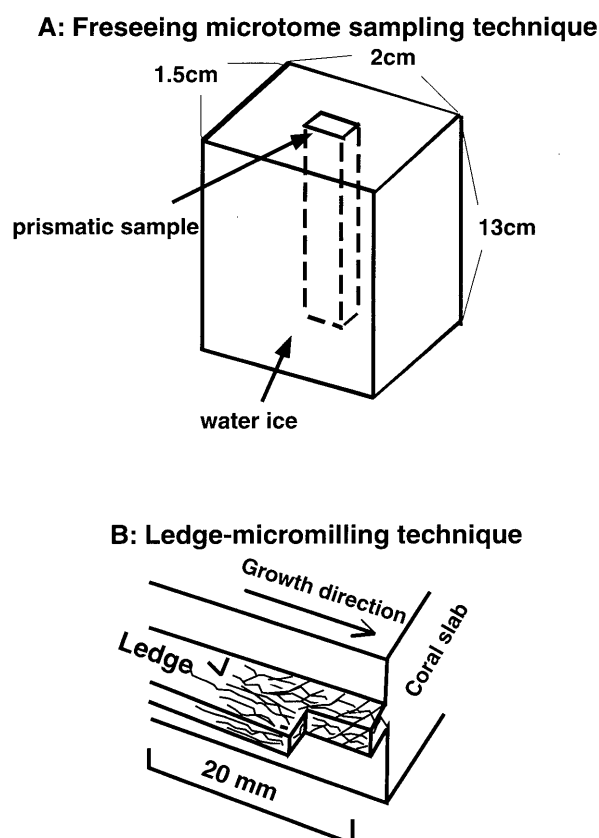


Fig. 3 Schematic diagram of micromilling technique and ledge-milling technique used for high-resolution microsampling. (after Watanabe and Oba, 1998, 1999, Watanabe *et al.* (2003))

3. 炭酸塩骨格中の化学組成に記録される環境情報

サンゴやシャコガイの骨格は、炭酸カルシウム（アラレ石）からなり、同位体比や微量元素などの環境指標となる様々な化学分析の測定が容易である。サンゴ骨格の環境記録保持者としての有用性が認められるようになると、他の有孔虫や二枚貝などの生物源炭酸塩を用いた古環境解析研究に続き、様々な微量元素や同位体組成が測定されるようになり、それらの環境指標としての有用性が検討されてきた。それらの研究史とそれぞれから復元される環境因子については、既に多くある国内外のレビュー論文に譲ることにする（例えば、Dunbar and Cole, 1992, Druffel, 1997, Gagan *et al.*, 2000, 鈴木ほか, 1999, 井上ほか, 2002）。この章では、それらの中でもサンゴ骨格を用いた古環境研究での中心的な手法である酸素同位体比と微量元素

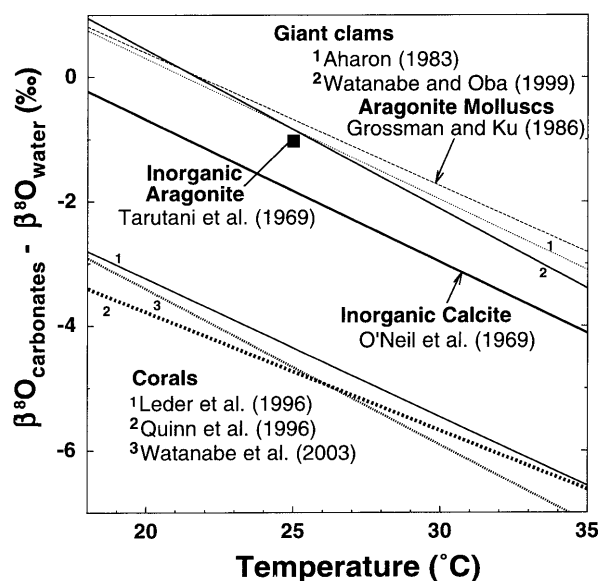


Fig. 4 Relationship between $\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w$ and temperature for coral skeletons and *Tridacna* shells. Also shown are inorganic calcite, aragonite mollusks, and inorganic aragonite. (modified from Watanabe (2002a))

（Sr/Ca, Mg/Ca 比）を用いた古環境復元の実際を筆者のこれまでの研究から述べる。

3.1 サンゴ骨格を用いた環境復元

炭酸カルシウムが同位体平衡で沈積すれば、その炭酸カルシウムの酸素同位体比は、水温と環境水の酸素同位体比によって決定される (Epstein *et al.*, 1953)。海洋生物のように海水で骨格が形成される場合には、海水の酸素同位体比の季節変化が小さい地域では、その骨格の酸素同位体比は水温が主な変動要因というこになり、過去の海水温を復元するための古水温計になり得る。サンゴ骨格の酸素同位体比の値は、無機合成された炭酸カルシウムの値から大きくずれることが知られており (Fig. 4), それは *vital effect* (生物作用) と呼ばれ、酸素同位体比水温計の手法が開発された当初、サンゴ骨格には適応することが難しいとされた理由となった。近年の研究では、このサンゴ骨格の酸素同位体比と水温との関係は、絶対値が平衡値からずれるものの傾きは保存されており、現生でのキャリブレーションにより両者の関係式がわかっているならば、過去の水温計として用いることができるとして研究が進められている。

筆者らは、海水の酸素同位体比の変動が小さく、水温の季節変動が大きいニューカレドニアにおいて、これまで、古水温計としての有用性が検討されてい

かった造礁性サンゴ *Diploastrea* 属を新たな有用な古環境指標として提唱した (Watanabe *et al.*, 2003)。これまでインド、太平洋域におけるサンゴ骨格を用いた古環境研究は、これらの海域に広く生息している *Porites* 属を用いたものがほとんどであった。*Porites* 属は成長速度が速く、高解像度の古環境解析に適しており、多くの長尺コアからの連続した分析結果がこの属から報告されている (例えば, Dunbar *et al.*, 1994, Linsley *et al.*, 2000, Hendy *et al.*, 2002)。しかしながら、この属は400年を越える群体を見つけることが困難であること、群体を形成している個々のサンゴ個体のサイズが分離できないほど小さく形成時期が異なる様々な骨格組織が混入してしまうために、同位体比の測定結果が平均化されてしまったり、群体内の形状により同位体比の結果に不均質性が存在するなどの問題点も指摘されるようになってきた (Barnes and Lough, 1993, Barnes *et al.*, 1995, Cohen and Hart, 1997)。*Diploastrea* 属は1,000年を越えて群体が成長する。また、群体内のサンゴ個体のサイズが大きいため、異なる骨格組織を分けて測定することが可能である。成長速度が1年間に2~6 mmと *Porites* 属に較べると極めて遅いが、これは、最近のマイクロサンプリング技術と分析機器の精度の向上により容易に克服できる問題となった。この属を古環境解析に用いる上で特に重要性が高いと思われるのは、この属がエルニーニョ現象の発生源ともなり、また、長寿の *Porites* 属群体が極めて少ないことでも知られる西太平洋暖水塊に多産することである。

Diploastrea 属の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_c$) と現場の観測水温(T)から求めた両者の関係式は以下の通りであった。

$$\delta^{18}\text{O}_c = 0.23 - 0.18 \text{XT} (^{\circ}\text{C})$$

Diploastrea 属の酸素同位体比と水温の関係式の傾きは ($-0.18\text{‰}/^{\circ}\text{C}$)、同じく地域の *Porites* 属のもの (Quinn *et al.*, 1996; $-0.18\text{‰}/^{\circ}\text{C}$) と非常に近い。また、筆者らは西太平洋暖水塊の中心部である西インドネシアにおいても、これら2属の酸素同位体比の分析を行った。両者の酸素同位体比曲線は、エルニーニョからラニーニャへの気候システムのシフト (El Niño-Southern Oscillation; ENSO) を捉えている (Fig. 5)。エルニーニョの期間は、西太平洋に存在している暖水塊が東に移動しているために低温で、また、モンスーンによってもたらされていた降水が減少

するために乾燥化する。またエルニーニョの逆のモードであるラニーニャの期間は、高温で、モンスーンによりもたらされる降水により湿潤である。それぞれのモードが、エルニーニョ時の酸素同位体比の低い値、ラニーニャ時の高い値として、2属のサンゴ骨格の酸素同位体比変動パターンに記録されている。これらの結果は、西太平洋暖水塊における *Diploastrea* 属の環境指標としての有用性を示すと共に、エルニーニョ現象という熱帯域における数年サイクルの気候システムが、海域を越えた2つの異なる環境下における成長速度の大きく異なる2つの属のサンゴ骨格に同時に記録されているということを意味しており、サンゴ記録のもつ汎用性を示す上でも重要な結果である。

著者らは、さらにそれぞれの試料から Sr/Ca 比を測定した。ストロンチウムやマグネシウムなどの微量元素の炭酸カルシウムへの取り込みは、ほぼ水温の変化によって支配されているので、過去の水温を直接復元することが可能である (Beck *et al.*, 1992, Mitsuguchi *et al.*, 1996)。またその関係式を、海水の酸素同位体比と水温によって変動する骨格の酸素同位体比との関係式と組み合わせることによって、海水の同位体比の変動のみを抽出することができる (Gagan *et al.*, 1998, Watanabe *et al.*, 2001a)。西インドネシアのサンゴ骨格の酸素同位体比の変動から水温による影響を差し引いた残差は、インドネシアの大気圧の変動と非常によく一致した (Watanabe *et al.*, 2002b)。これは、サンゴ礁の海水の酸素同位体比が、降水量や蒸発発量などの海洋表層の水循環システムの変動の影響を強く受けているためと考えられ、今後、エルニーニョの発生源である西太平洋暖水塊の過去における変動パターンを解明していく上で重要な情報になる。

著者らはまた、カリブ海プエルトリコの長寿サンゴ骨格 (*Montastrea* 属) を用いて、その微量元素と酸素同位体比から小氷期における塩分の変動を推定した。ここでは、骨格の酸素同位体比と水温、海水の酸素同位体比の関係 (Watanabe, 1998, Winter *et al.*, 2000) と骨格の Mg/Ca 比と水温の関係に加えて、季節を通じての現場の海水の酸素同位体比と塩分の測定を通じて両者の関係式を明らかにした (Watanabe *et al.*, 2001a)。これら3つの関係式を長寿コアの末端部の1699~1703年に形成された部位に応用することによって、当時の塩分の季節変化を求めた。その結果、1700年代の小氷期には、この海域では、海洋表層の塩分の季節変動が現在よりも明瞭であったことがわかり

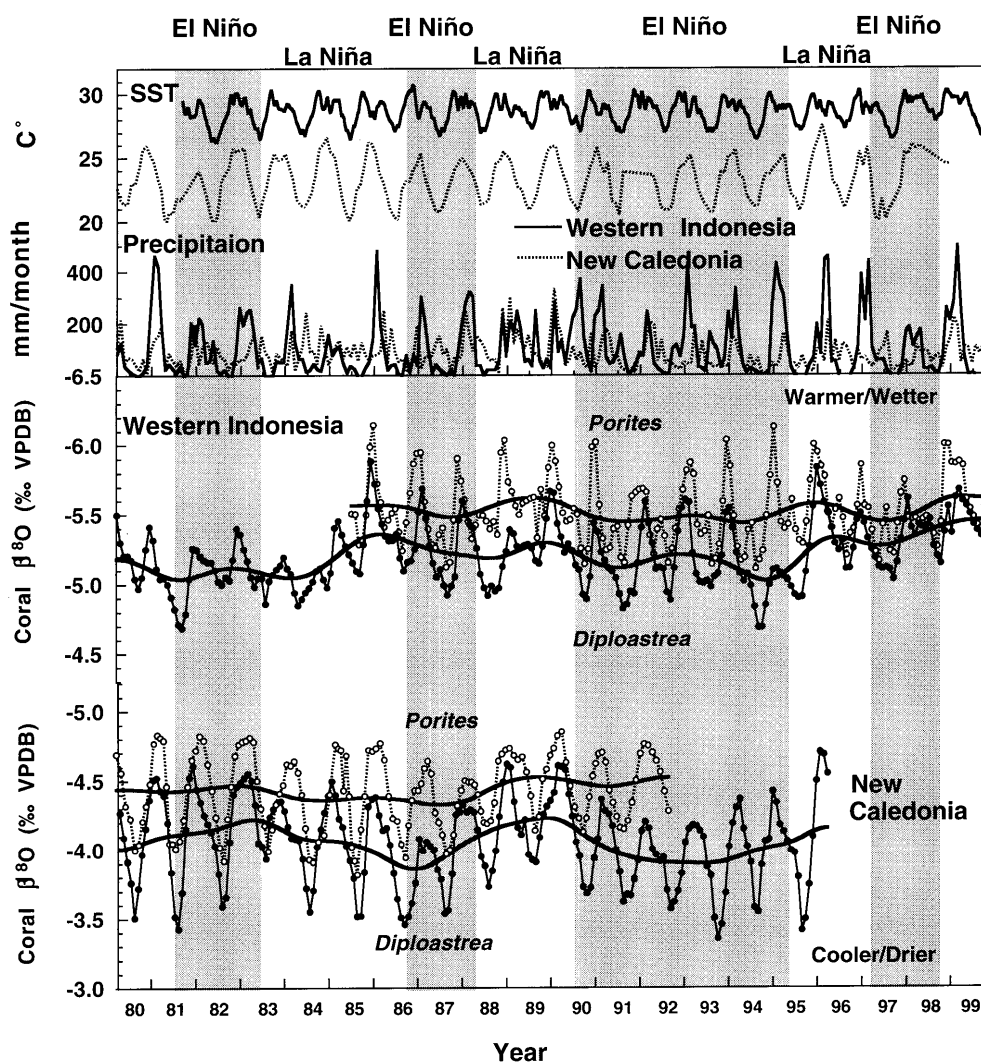


Fig. 5 Comparison of ENSO-related interannual variability in $\delta^{18}\text{O}$ for *Diploastrea heliopora* (solid lines with closed circles) and *Porites* (dashed lines with open circles) from New Caledonia and Alor, western Indonesia. Also shown are the weekly sea surface temperature (SST) records of IGOSS nmc blended ship and satellite data and the monthly precipitation records taken from NOAA precipitation station for two regions. The coral records are interpolated to a resolution of 12 samples per year (Paillard *et al.*, 1996) and then smoothed with a 48 point running average (thick solid lines) to remove the annual cycle in $\delta^{18}\text{O}$. Coral $\delta^{18}\text{O}$ values are reversed on Y axis to show warmer/wetter conditions upward. Shading indicates periods of cooler SST and higher salinity (higher $\delta^{18}\text{O}$ values) in the western Pacific region associated with El Niño events. (modified from Watanabe *et al.* (2003))

(Fig. 6), この理由として, 熱帯域における降水量の変動をもたらしている熱帯収束域 (Inter Tropical Convergence Zone; ITCZ) の季節による南北方向へのシフトが小氷期には現在よりも大きかった可能性が挙げられる (Watanabe *et al.*, 2001a, 渡邊, 2002 b)。海洋表層の塩分の季節変化を定量的に求めるこ

とのできる手法は数少ないことから, 今後この手法による塩分復元の精度の検討や他の長寿コアへの応用などが検討されていくであろう。

3.2 シャコガイに記録される日単位の環境変動

サンゴ礁に広く棲息するシャコガイは, 二枚貝のなかで最大の殻を形成する。その殻は100年以上にも

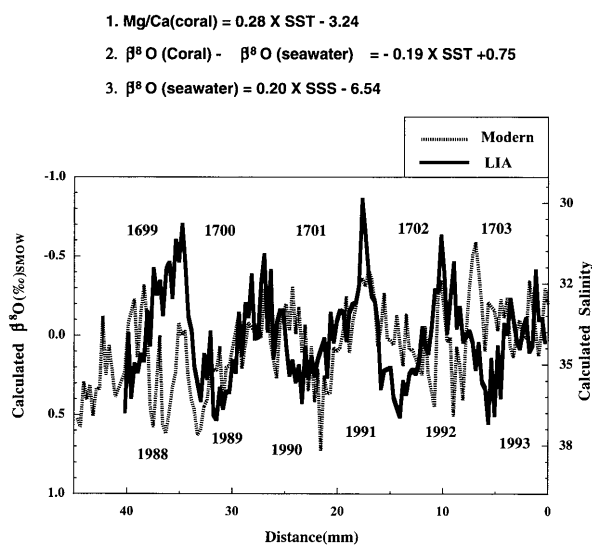


Fig. 6 Comparison between the calculated $\delta^{18}O$ and sea surface salinity (SSS) during the two periods of 1699-1703 (LIA; Little Ice Age, black lines) and 1987-1993 (Modern, dashed lines) deduced from Puerto Rican coral *Montestrea*. The $\delta^{18}O$ of seawater (δ_w) is calculated from the measured $\delta^{18}O$ (δ_c) and Mg/Ca ratio of coral skeleton using the eqn ($\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w$) = $-0.19 (\pm 0.04) \times SST (^{\circ}C) + 0.75 (\pm 0.61)$ and Mg/Ca ($mmol\ mol^{-1}$) = $0.28 (\pm 0.04) \times SST (^{\circ}C) - 3.24 (\pm 1.15)$. Also the SSS is estimated from the calculated $\delta^{18}O$ of seawater using the equation, $\delta^{18}O = 0.204 \times SSS - 6.54$. (after Watanabe *et al.* (2001a))

渡って年輪と日輪を形成しながら成長を続けるので、環境変動の記録を非常に高時間解像度で記録している (渡邊・大場, 1998, 渡邊, 2002a)。サンゴ骨格は複雑で空隙の多い微細構造をしているために、月単位以上の解像度での環境解析や化石を用いた研究の際には、特に注意が必要である。シャコガイの殻は日輪が観測されるなど非常に緻密な構造をしており、サンゴ骨格よりもさらに細かい環境解析に使うことが可能で、また、保存状態のよい化石試料も容易に手に入れることができる。シャコガイを用いた古環境解析は他の指標では困難な超高解像度の解析が期待できると言える。また、サンゴ骨格の酸素同位体比が同位体比平衡の値からずれるのに対して、シャコガイ殻のアラレ石は酸素同位体比において現場海水とほぼ同位体平衡で形成される (Fig. 4)。このこともシャコガイ殻の酸素同位体比を用いた古環境解析の大きな利点と言え

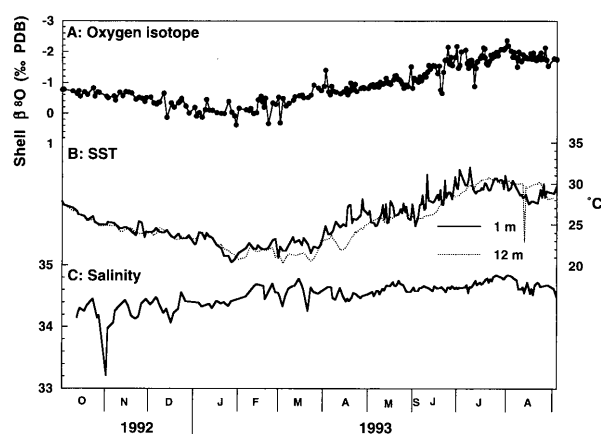


Fig. 7 The high-resolution time series of $\delta^{18}O$ records (50 μm interval) of giant clam (*Hippopus hippopus*) from Ishigaki Island (A), sea surface temperatures (SST) at Urazoko bay and at Ishigaki Port (B), and salinity change at Urazoko bay (C). (after Watanabe and Oba (1999))

よう。

Watanabe and Oba (1999) は、石垣島産の現生シャコガイ殻を上述の回収率の高いマイクロサンプリングである冷凍マイクロトーム法を用いることによって、50 μm 間隔で酸素同位体比を測定することに成功した。これはこのシャコガイ殻の成長速度 (30~80 μm) を考慮すると1~2日間の測定間隔である。同位体比の測線に沿って各成長線の間隔を試料の採取日から遡って、カウントし計測していくことによって、各同位体比の測定値に正確な形成日時を与えることができる。これにより、それぞれの同位体比測定値は現場の水温や降水量などの環境因子との一対一の対応が可能となる。通常、サンゴ骨格の環境解析のための化学分析では、年輪に垂直な測定ラインから一定間隔でサンプリングを行うが、サンゴ骨格の複雑な骨格組織と年輪以上の細かい成長線の観測が難しいために、季節変化以上の正確な年代軸を与えることは難しい。Fig. 7はこのようにして得られたシャコガイ殻の酸素同位体比と現場水温及び塩分 (現場から約8 km 地点) との対比である。殻の酸素同位体比 (δ_c) は主に水温(T)の変動によって決定されており、塩分から算出される海水の酸素同位体比の値 (δ_w) を考慮して水温スケールが次式のように求められた。

$$T(^{\circ}C) = 22.4 - 3.91(\delta_c - \delta_w)$$

殻の酸素同位体比の変動は細かい環境変動も記録して

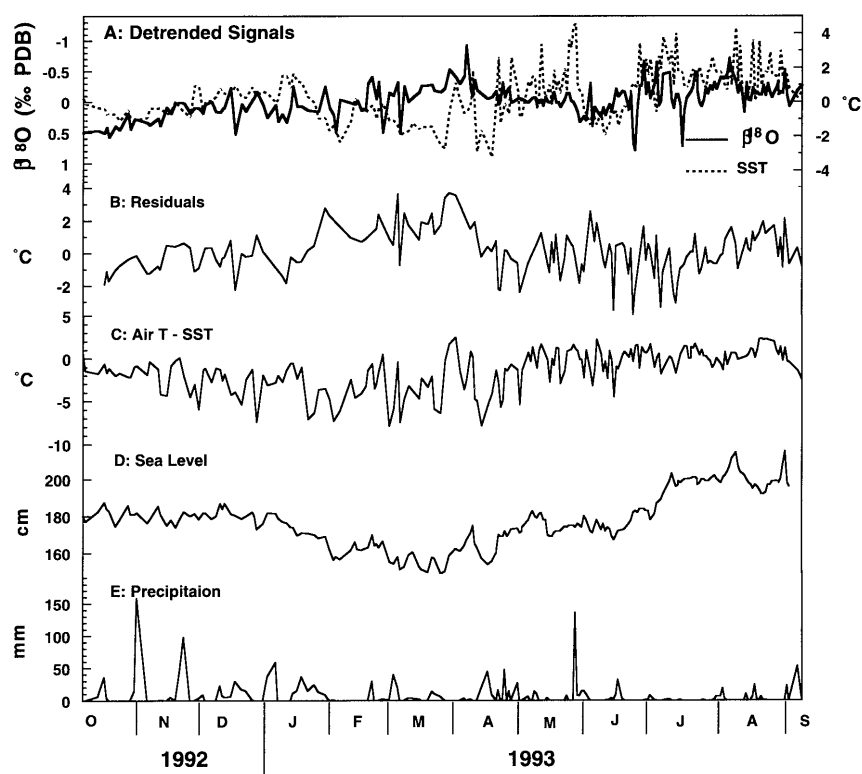


Fig. 8 Comparison of the detrended shell $\delta^{18}\text{O}$ with meteorological data. A: the seasonally detrended shell $\delta^{18}\text{O}$ and SST, B: Residual SST, C: Air temperature-SST, D: Sealevel, E: Precipitation, F: growth line thickness, and G: solar radiation. (after Watanabe and Oba (1999))

いるようにも見えるが、例えば、1992年11月の大幅な塩分低下の影響を反映していない。このような細かい変動の要因を考察するために、酸素同位体比の変動から年変動を差し引いたものを Fig. 8 に示す。1993年2月から1993年の3月は潮位が低く (Fig. 8 E)、この間、シャコガイ殻の酸素同位体比から算出された水温と実測の水温との差が大きい (Fig. 8 B) また、この間は気温と水温の差の変動に似た変動を示している (Fig. 8 C)。これは、このシャコガイが採取された川平サンゴ礁の地形で説明される。つまり、潮位が低い時期、このサンゴ礁は外洋とサンゴ礁の境界付近に発達する礁嶺によって、外洋からの海水が流入しにくく準閉鎖系になる。そのため、この時期は約 8 km 離れた水温観測点の水温と合わずに、むしろ気温の影響を受けている。逆に、潮位が高い時期は、外洋の海水は自由にサンゴ礁内の出入りすることができるために、1992年11月の大雨の塩分低下の影響も外洋水と混ざり、礁外に速やかに排出されるために殻の酸素同位体比には反映されないと考えられる。このように、サンゴ礁のように特殊な地形で生息する生物を高解像度で

分析し環境指標に用いる場合、現場のサンゴ礁の地形が復元記録に与える影響についても考慮する必要があることを示唆している。

4. サンゴ記録の精度と信頼性

シャコガイやサンゴ骨格に刻まれる過去の古環境記録を正確に読みとり、過去の熱帯域の気候変動を解明していくためには、これら記録の精度と信頼性を正しく認識することが重要である。しかし、未だに解明されていない石灰化時の生物作用や、複雑なサンゴ礁の環境変動のために、個々の試料から得られる分析結果からその地域の環境変動、さらには熱帯域の気候変動を論じるのは容易ではない。この章では、サンゴ骨格の分析値から、それを気候学的な一次データとして用いられるまでの過程において考えられる問題点を著者のこれまでの研究の中から述べる。

4.1 サンゴ礁の環境変化

サンゴ礁という特異な地形と変化に富む環境から得られた試料から復元された環境変動は、気候学的、海洋学的にどこまでの汎用性をもつのであろうか。

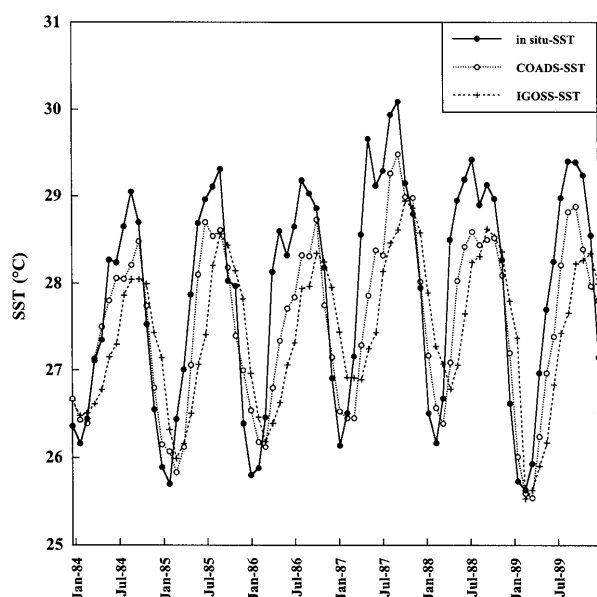


Fig. 9 Monthly sea surface temperature for 1984-1989 at La Parguera, Caribbean sea the monthly SST time series from the Comprehensive Ocean-Atmosphere Date Set of the Caribbean (COADS: $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ box centered at 18°N and 67°W), and the ship and satellite SST (IGOSS: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ box). (after Watanabe *et al.* (2002a))

Fig. 9, は前章で用いたカリブ海のサンゴ群体が生息していた現場の水温と、衛星、船舶による水温を比較したものである。現場の水温と衛星水温とは場合によって、特に夏に 0.5°C 以上の相違が見られる。このサンゴ礁は、礁嶺と呼ばれる外洋と礁内を隔てる壁のような地形が発達しておらず、礁内の海水は外洋と常に接している環境である。これが、前章の石垣島のサンゴ礁のように、礁嶺が発達し、時には外海から閉ざされるような地形では礁内と外洋の水温の差はより大きなものになるであろう。しばしば、水温記録が残っていないサンゴ礁から採取された試料などを扱う場合などで、キャリブレーションを行う際に衛星の水温データを用いている研究例があるが、それらの関係式には現場の水温を用いないことによる誤差が含まれている危険性がある。サンゴ記録から復元された水温を取り扱う場合には、その試料が採取されたサンゴ礁の地形や海域の特徴を知る必要がある。

さらに、サンゴ礁の海水の化学組成の季節変化、経年変化もそこで形成される炭酸塩骨格の化学組成に影響を与える。例えば、海水の酸素同位体比の値は、直接的に、酸素同位体比古水温計に影響を与える。

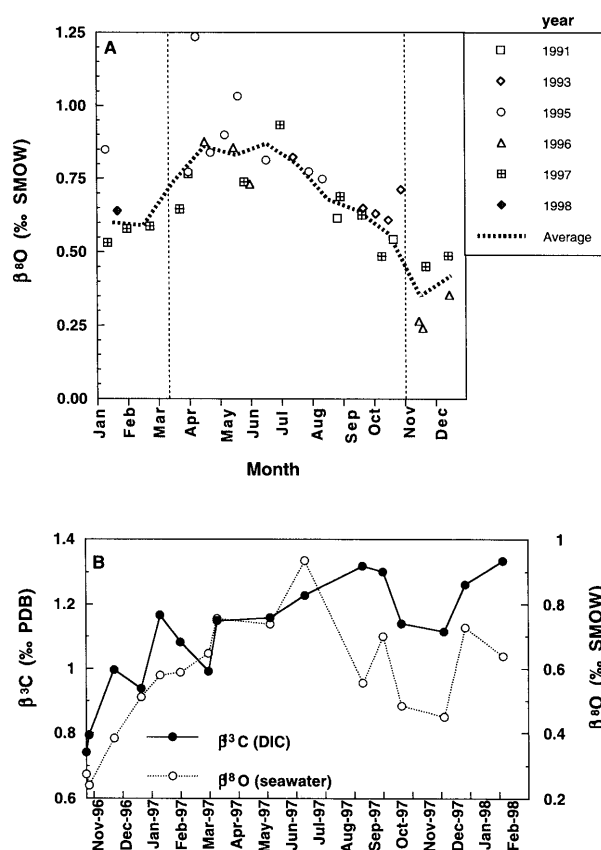


Fig. 10 A: The $\delta^{18}\text{O}$ of seawater at La Parguera from 1991-1998. Dashed line represents the overall collective monthly averages. B: The $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon (DIC) in seawater and $\delta^{18}\text{O}$ of seawater at La Parguera for 1996-1998. (after Watanabe *et al.* (2002a))

Fig. 10は前章で用いたプエルトリコのサンゴ群体が生息していたサンゴ礁の酸素同位体比及び海水中的全炭酸の炭素同位体比であるが、どちらも大きな季節変化が存在する。また、海水の酸素同位体比には各年間でのバラツキが見られ、海水の酸素同位体比の変動が年によっても値が異なる可能性があることを意味しており、これらの変化が酸素同位体比を用いた古水温計の精度に大きく影響を与える可能性がある。これまでに外洋域では様々な海域での海水の酸素同位体比の測定結果が多く報告されてきたが (Schmidt *et al.*, 1999), 浅海域、特に、サンゴ礁域の海水の酸素同位体比に関するデータが不足しており、これらのデータの蓄積が望まれる。

また、今まで変化が少ないとされてきた海水の Sr/Ca 比においても、海水準が現在と異なる氷期などで

は、その組成が異なり、Sr/Ca 比を用いた古水温計に影響を及ぼすことが指摘されている (Stoll and Schrag, 1998)。サンゴ記録の精度と信頼性を正確に判断するために、サンゴ骨格が形成された現場の環境因子及び化学組成などの知識、情報の蓄積が求められている。

4.2 サンゴ記録の持つ時間解像度—微細構造と化学組成の不均質性—

近年の分析機器の測定精度の向上やマイクロサンプリング技術の開発により、サンゴ試料の高解像度分析が可能になってきている。このような高分解分析の結果をもとに過去の環境変動を細かく議論するには、サンゴ記録が保有する時間解像度を厳密に検討する必要がある。著者らは、水温の年変動の最高水温、最低水温をサンゴ骨格から復元するのに最低必要な解像度を見積もるために、一年間あたり40試料 (1~2週間)、12試料 (1ヵ月)、6試料 (2ヵ月) と解像度を変えた試料を作成して酸素同位体比の測定を行った (Watanabe *et al.*, 2002a)。その結果、一年間あたり12試料の測定間隔でも水温の季節変化の変動幅を損なうことなく復元できることがわかった (Fig. 11)。長寿サンゴ群体を用いて過去数百年間分の試料を全て高分解能で測定するには、膨大な手間と時間を要する。また、前項でも述べたように、サンゴ礁の変化に富む環境下で形成された炭酸塩を用いる性質上、その分析の解像度が上がれば上がる程、その結果にはよりローカルな環境変動が反映されていくことにもなる。分析を開始する際には、どのくらいの解像度が必要とされるのかを把握した上で、測定間隔を決定していくことが必要である。例えば、同一の長寿サンゴ群体などから、エルニーニョ現象などの数年間の周期パターンを読みとりたい場合は、上述の水温変化の大幅な季節変化を捉えられれば十分であろう。但し、他の古環境プロキシ及び観測記録との季節変化や絶対値の比較、気候モデルの数値シミュレーションに組み込もうとする場合に、サンゴ記録の持つ精度と信頼性を正しく認識し、説明できるようにしておく必要がある。

Fig. 12A は *Diploastrea* 属と *Montastrea* 属の骨格組織の模式図である。一般に、サンゴ骨格は個体壁、軸柱、セプタ、泡沫状組織と呼ばれる様々な骨格組織から構成されており、それぞれの組織は発達様式や形状も異なる。これまで、多くの古環境解析に用いられてきた *Porites* 属では、群体を形成している個々のサンゴ個体のサイズが小さいために、形成時期が異なる

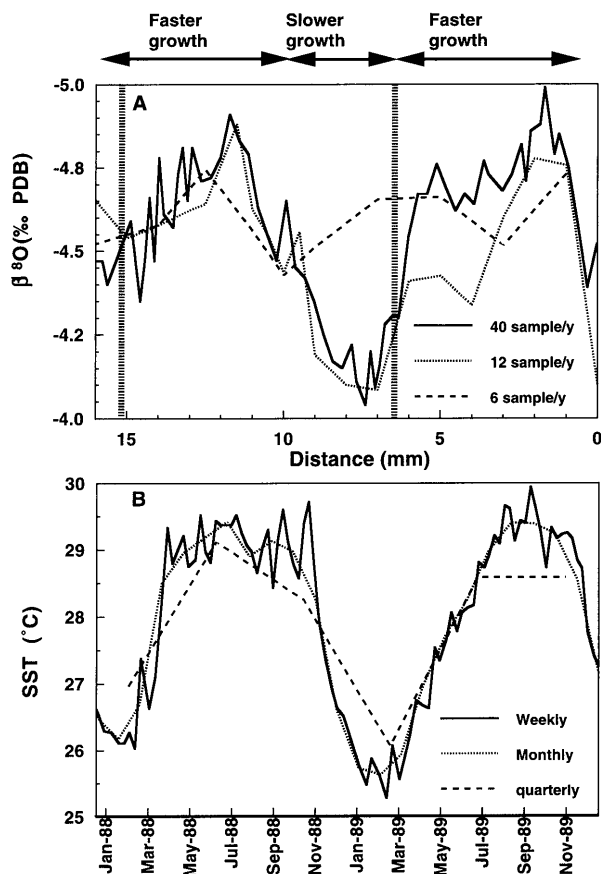


Fig. 11 A: Comparison of skeletal $\delta^{18}\text{O}$ for different sampling resolution. Vertical lines indicate high density bands of coral skeletons. B: Time series of weekly, monthly, and quarterly SST compiled from daily SST at La Parguera for 1988-1989. (after Watanabe *et al.* (2002a))

様々な骨格組織を分離して測定することが困難であった。*Diploastrea* 属と *Montastrea* 属はポリプのサイズがそれぞれ直径が約10 mmと6 mmと *Porites* 属 (約1 mm) に比べて大きく、各骨格組織を分離して測定することが可能である。時間軸に対して平行に形成されていくと思われる個体壁 (theca wall), 軸柱 (columella) のみをそれぞれ抽出して、他の組織または全ての組織の同位体比の結果と比較した。その結果、各骨格組織は、その形成時期が異なり、そのため様々な骨格組織が混ざったバルクの分析は、全体の分析結果を平滑化してしまうことが示唆された (Fig. 12 B)。

また、筆者らは、様々なスケールでのサンゴ記録の同一時間面に対する均質性と再現性を考察した。Fig. 13A は、同群体内の隣り合う個体同士での酸素、

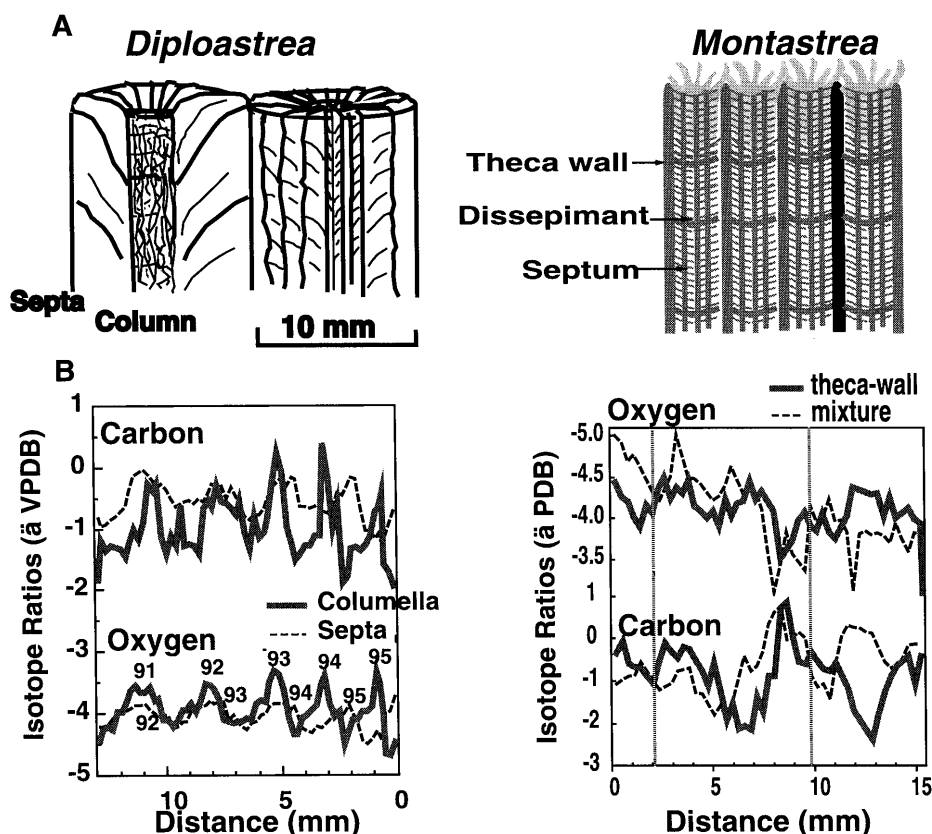


Fig. 12 A: Anatomy of coral skeletal structure for coral *Diploastrea* (left) and *Montastrea* (light). B: (left) Comparison of seasonal range in skeletal $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ for high-resolution sampling transects from the columellar (solid line) and septal (dashed line) areas of the *Diploastrea heliopora* from Amédée, New Caledonia. The smoothing and offset of the seasonal $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ signals in the septal area are caused by the $\sim 45^\circ$ slope and thickening of septal skeletal elements through time (averaging of signal). Years are labeled in $\delta^{18}\text{O}$ profile (1991-95) to show ~ 6 to 12-month offset (one-half to one seasonal cycle) between data collected from septal and columellar transects. (light) Comparison of skeletal $\delta^{18}\text{O}$ (above) and $\delta^{13}\text{C}$ (bottom) for mixture and theca-wall samples for *Montastrea*. Vertical lines indicate high density bands of the coral skeletons. (after Watanabe et al., 2002a, 2003)

炭素同位体比の測定結果であり、Fig. 13B は互いに50 m 離れた群体間でのそれぞれの比較である。酸素同位体比は群体間では、その変動パターンに違いが見られるものの季節変動の絶対値は個体間、群体間での差は少ない。一方、炭素同位体比は、群体間での差が大きい。これは2つの群体の大きさが異なるために（3 m と 1 m）、海水面からの距離の差（4 m と 6 m）がそれぞれの群体に届く光の差を生じさせ、共生藻類の活動に影響を与えたためと解釈される。最後に、同じ海域での異なる属間での比較を Fig. 14 に示す。サンゴの属が異なる場合は、この結果が示すように、平均値自体が大きく異なる。これが、石灰化速度の違いに

起因するものなのか、生物作用の違いなのかについては、現在のところは特定はできない。このように、著者らはサンゴ記録の持つ再現性を様々なスケールで検討してきた。

近年、イオンマイクロプローブの発達により、さらに細かい、マイクロスケール、ナノスケールの超微小領域での化学組成の分析が可能になってきており、既に興味深いいくつかの研究結果が報告されてきている（例えば、Cohen et al., 2002, Rollion-Bard et al., 2003）。サンゴ記録の信頼性に古気候学者の一部で疑問が持たれているもっとも大きな理由の一つに、化石のサンゴを用いて復元された氷期の水温の結果が、他

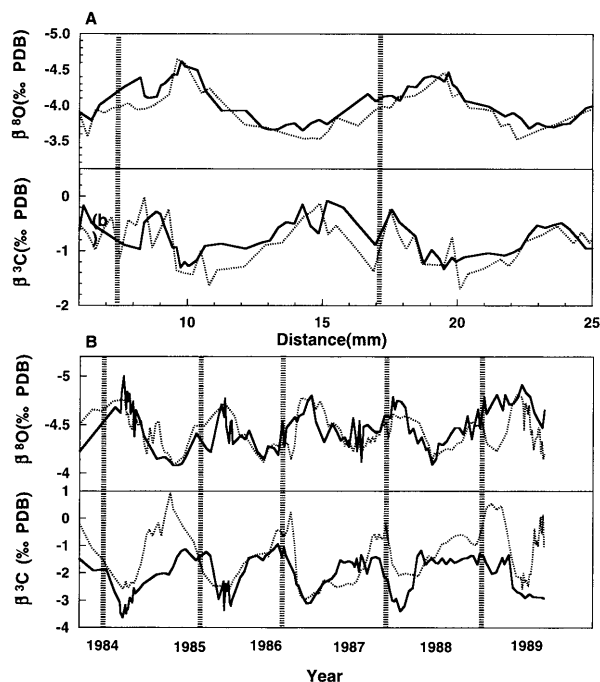


Fig. 13 Comparison of skeletal $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ time-series for adjacent corallites (A) and different colonies (B). (after Watanabe *et al.* (2002a))

のプロキシーやモデリングの予想と大きく異なることが挙げられる (Guilderson *et al.*, 1994)。これに対しては、前述したように、サンゴ礁の特異な環境などが単純な対比を困難にしているということも考えられるが、これらの理由の一つに、続成過程における微量元素の選択的な溶脱の可能性が指摘されている (McGregor and Gagan, 2003)。筆者らは、サンゴ骨格の粉末に様々な化学処理を施し、微量元素がどのように炭酸塩の結晶の中に組み込まれているのかについて検討を試みたが (Watanabe *et al.*, 2001b)、今後、これらのイオンマイクロプローブ測定技術に発展により、直接的に結晶レベルでの測定が可能になり、これらの疑問に対する貴重な結果を与えてくれることが期待される。

5. これからの展望—問題点の克服と発展に向けて

1990年代半ばからは、主にアメリカやオーストラリアの研究チームにより、過去数百年間分という長尺サンゴコアからの連続した分析が精力的に進められるようになった (例えば, Dunbar *et al.*, 1994, Hendy *et al.*, 2002)。それらの分析結果は、熱帯域の水温や降

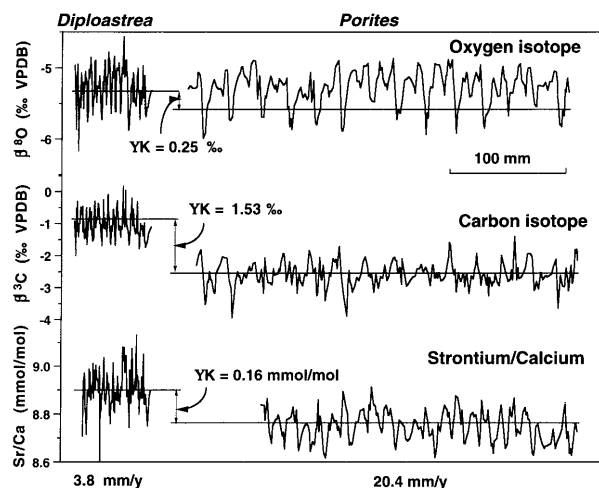


Fig. 14 Comparison of skeletal records of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ and Sr/Ca ratios for *Diploastrea* and *Porites* corals. (after Watanabe *et al.* (2002b))

水量などの環境変動を衛星や海洋ブイによる観測では補えなかった過去に遡る一次データとして、気候モデリングなどの計算や年輪やアイスコアなどの他の古気候指標との比較に用いられてきており、その重要性和有用性が認知されてきた。一方で、サンゴ骨格の石灰化作用、生物作用の過程がサンゴ記録に及ぼす影響は未だに未解決の部分が多い。特に、最近のイオンマイクロプローブによる微小領域のサンゴ骨格の分析は、これまで観察されていない大きな化学成分の不均質性を見出した (例えば, Meibom *et al.*, 2003, Rollin-Bard *et al.*, 2003)。今後、これらの研究が進めば、サンゴ骨格の石灰化のメカニズムが明らかになるのと同時に、これまでのサンゴ記録の解釈に再考が迫られる可能性もでてきた。現状では、サンゴ骨格を用いた古環境解析の際には、誤った解釈の危険性を回避するために、異なった解像度を持つ試料、異なった生物間、異なった複数の化学組成からの結果を比較検討することが必要であると思われる。

サンゴ骨格を用いた研究は、発展から10年を過ぎた今、大きな岐路に立たされているように感じられる。地球温暖化の予測への社会的要請はこれからも続くと思われ、我々は、地球の気候変動システムの解明に繋がる熱帯域からの気候変動の一次データの蓄積とサンゴ骨格の結晶内に注目し石灰化機構を解明するという2つの方向の異なる目標を同時に進めて行かなくてはならない。しかし、サンゴ骨格を用いた地球化学の研究が、多くの分野との結びつきを強め広く貢献してい

くためには、避けては通れない過程であると思われる。

謝 辞

修士論文、博士論文を通じて指導をしていただいた北海道大学地球環境科学研究科大場忠道教授、南川雅男教授、長谷川四郎教授、故王律江博士、北海道大学理学部岡田尚武教授、高知大学村山雅史助教授に心から感謝いたします。産業技術総合研究所川幡穂高博士、鈴木淳博士、蓑島佳代氏、井上麻由里氏、国立科学博物館斎藤靖二地学部長、横山一巳地学第一室長、オーストラリア国立大学 Mike Gagan 博士、John Chappell 教授、Malcolm McCulloch 教授、Graham E. Mortimer 博士、Joe Cali 氏、Heather Scott-Gagan 氏、Joan Cowley 氏、東京大学海洋研究所佐野有司教授、高畑直人博士、仏国立科学研究所の Anne Juillet-Leclerc 博士、Francois Le Guern 博士には、それぞれ筆者が所属し滞在していた間、研究に対する数々のアドバイスだけではなく、慣れない環境での様々な便宜を計って頂き、これまで研究を続けることができました。また、北海道大学理学部加藤誠名誉教授、東北大学理学部中森亨助教授、山田努博士、米国プエルトリコ大学 Amos Winter 教授、北海道大学低温研究所成田英器助教授、北海道大学地球環境科学研究科豊田和弘助教授、島村道代氏、国立環境研究所山野博哉博士、三ツ口丈祐博士、岡山大学教育学部菅浩伸助教授、国立科学博物館加瀬友喜博士、仏国 IRD の Thierry Correge 博士、インドネシア国立科学研究所 Wahyoe Hantoro 教授、名古屋大学環境学研究科森本真紀博士、パリ大学地質学教室 Jean-Pierre Cuif 教授には、共同研究やフィールド調査、室内実験を通じて研究の重要性とおもしろさを教えて頂き、研究に必要な助言と助力を頂きました。最後に、これまでの所属した機関においては、常によい先輩、後輩、先生方に恵まれました。ここに、心からの感謝の意を表したいと思います。(2003年9月、Goldschmidt 2003で講演)

文 献

- Aharon P. (1983) 140,000-yr. isotope climatic record from raised coral reefs in New Guinea. *Nature* **304**, 720-723.
- Barnes D. J. and Lough J. M. (1993) On the nature and causes of density banding in massive coral skeletons. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **167**, 91-108.
- Barnes D. J., Taylor R. B. and Lough J. M. (1995) On the inclusion of trace materials into massive coral skeletons. Part II: distortions in skeletal records of annual climate cycles due to growth processes. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **194**, 251-275.
- Beck J. W., Edwards R. L., Ito E., Taylor F. W., Recy J., Rougerie F., Joannot P. and Henin C. (1992) Sea-Surface Temperature from Coral Skeletal Strontium/Calcium Ratios. *Science* **257**, 644-647.
- Cohen A. L., Hart S. R. (1997) The effect of colony topography on climate signals in coral skeleton. *Geochim. Cosmochim. Acta* **61**, 3905-3912.
- Cohen A. L., Owens K. E., Layne G. D. and Shimizu N. (2002) The Effect of Algal Symbionts on the Accuracy of Sr/Ca Paleotemperatures from Coral. *Science* **296**, 331-333.
- Druffel E. R. M. (1997) Geochemistry of Corals: Proxies of past ocean chemistry, ocean circulation, and climate. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **94**, 8354-8361.
- Dunbar R. B. and Cole J. E. (1992). Coral records of ocean-atmosphere variability. *NOAA Climate and Global Change Program Special Report*, **10**.
- Dunbar R. B., Wellington G. M., Colgan M. W. and Peter W. (1994) Eastern Pacific sea surface temperature since 1600 A. D.: The $\delta^{18}\text{O}$ record of climate variability in Galapagos corals. *Paleoceanograph* **9**, 291-315.
- Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H. A. and Urey H. C. (1953) Revised carbon-water isotopic temperature scale. *Bull. Geol. Soc. Am.* **64**, 1315-1356.
- Gagan M. K., Chivas A. R. and Isdale P. J. (1994) High resolution isotopic records from corals using ocean temperature and mass-spawning chronometers. *Earth Planet. Sci. Lett.* **121**, 549-558.
- Gagan M. K., Ayliffe L. K., Hopley D., Cali J. A., Mortimer G. E., Chappell J., McCulloch M. T. and Head M. J. (1998) Temperature and surface-ocean water balance of the mid-Holocene tropical Western Pacific. *Science* **279**,

- 1014–1018.
- Gagan M. K., Ayliffe L. K., Beck J. W., Cole J. E., Druffel E. R. M., Dunbar R. B. and Schrag D. P. (2000) New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Sci. Rev.* **19**, 45–64.
- Grossman E. L. And T. L. Ku (1986) Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: temperature effects. *Chemical Geology* (Isotope Geoscience Section), **59**, 59–74
- Guilderson T. P., Fairbanks R. G. and Rubenstone J. L. (1994) Tropical temperature variations since 20000 years ago: modulating interhemispheric climate change. *Science* **263**, 663–665.
- Hendy E. J., Gagan M. K., Alibert C. A., McCulloch M. T., Lough J. M. and Isdale P. J. (2002) Abrupt Decrease in Tropical Pacific Sea Surface Salinity at End of Little Ice. *Science* **259**, 1511–1514.
- 井上麻夕里・菅浩伸・鈴木淳 (2002) サンゴ骨格中の微量元素—海洋汚染の指標としての可能性—. 地球化学, **36**, 65–79.
- Knutson D. W., Buddemeier R. W. and Smith S. V. (1972) Coral Chronometers: Seasonal Growth Bands in Reef Corals. *Science* **177**, 270–272.
- Leder J. J., Swart P. K., Szmant A. M. and Dodge R. E. (1996) The origin of variations in the isotopic record of scleractinian corals: I. Oxygen. *Geochim. Cosmochim. Acta* **60**, 2857–2870.
- Linsley B. K., Wellington G. M. and Schrag D. (2000) Decadal Sea Surface Temperature Variability in the Subtropical South Pacific from 1726 to 1997 A. D. *Science* **290**, 1145–1148.
- McGregor H. V. and Gagan M. K. (2003) Diagenesis and geochemistry of porites corals from Papua New Guinea—Implications for paleoclimate reconstruction. *Geochim. Cosmochim. Acta* **67**, 2147–2156.
- Meibom A., Stage M., Wooden J., Constantz B. R., Dunbar R. B., Owen A., Grumet N., Bacon C. R. and Chamberlain P. R. (2003) Monthly Strontium/Calcium oscillations in symbiotic coral aragonite: Biological effects limiting the precision of the paleotemperature proxy. *Geophysical Research Letters* **30**, 1029/2002 GL 016864.
- Mitsuguchi T., Matsumoto E., Abe O., Uchida T. and Isdale P. J. (1996) Mg/Ca thermometry in coral skeletons. *Science* **274**, 961–962.
- O'Neil J. R., Clayton R. N. and Mayeda T. K. (1969) Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *J. Chem. Phys.* **51**, 5547–5558.
- Paillard D., Labeyrie L. and Yiou P. (1996) Macintosh program performs time-series analysis. *Eos Trans. AGU* **77**, 379.
- Quinn T. M., Taylor F. W., Crowley T. J. and Link S. M. (1996) Evaluation of sampling resolution in coral stable isotope records: A case study using records from New Caledonia and Tarawa. *Paleoceanography* **11**, 529–542.
- Rollion-Bard C., Chaussidon M. and France-Lanord C. (2003) pH control on oxygen isotopic composition of symbiotic corals. *EarthPlanet. Sci. e Lett.* **215**, 275–288.
- Schmidt G. A., Bigg G. R. and Rohling E. J. (1999) Global Seawater Oxygen-18 Database. <http://www.giss.nasa.gov/data/o18data/>
- Stoll H. M. and Schrag D. P. (1998) Effects of Quaternary sea level cycles on strontium in seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta* **62**, 1107–1118.
- 鈴木淳・谷本陽一・川幡穂高 (1999) サンゴ年輪記録：過去百年間の古海洋学的情報の復元. 地球化学, **33**, 23–44.
- Tarutani T., Clayton R. N. and T. K. Mayeda (1969) The effects of polymorphism and magnesium substitution on oxygen isotope fraction between calcium carbonate and water. *Geochim. Cosmochim. Acta* **33**, 987–996.
- 渡邊剛・大場忠道 (1998) 冷凍マイクロトーム法による現生シャコガイ殻の酸素同位体比より推定される詳細な水温変化. 地球化学, **32**, 87–98.
- Watanabe T. (1998) Paleoenvironments of the Little Ice Age in the Caribbean Sea using stable isotopes and trace elements in coral skeletons. PhD Dissertation. Hokkaido university, 100 pp.
- Watanabe T. and Oba T. (1999) Daily reconstruction of water temperature from oxygen isotopic ratios of a modern *Tridacna* shell with freezing microtome sampling technique. *J. Geophys. Res.* **104**, 20667–20674.

- Watanabe T., Winter A. and Oba T. (2001a) Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea. *Mar. Geol.* **173**, 21–36.
- 渡邊剛 (2002a) シャコガイが記録する日単位の環境変動. 地質ニュース, **575**, 42–47.
- 渡邊剛 (2002b) サンゴ骨格に記録された小氷期における熱帯域の気候変動. 日本海水学会誌, **56**, 118–122.
- Watanabe T., Minagawa M. Oba T. and Winter A. (2001b) Pretreatment of coral aragonite for Mg and Sr analysis: Implications for coral thermometers. *Geochem. J.* **35**, 265–269.
- Watanabe T., Winter A., Oba T., Anzai R. and Ishioroshi H. (2002a) Evaluation of accuracy in coral isotope records for environmental proxy. *Coral Reefs*, **21**, 169–178.
- Watanabe T., Gagan M. K., Corrège T., Hantoro W. S., Scott-Gagan H., Cowley J., Mortimer G. E. and McCulloch M. T. (2002b) Palaeoclimate Reconstruction using *Diploastrea* and *Porites* Corals from Alor in Eastern Indonesia. *Proceeding of Convention of Indonesian Association of Geologists*, **1–11**.
- Watanabe T., Gagan M. K., Corrège T., Gagan H. S. and Hantoro W. S. (2003) Oxygen isotope systematics in *Diploastrea heliopora*: New coral archive of tropical paleoclimate. *Geochim. Cosmochim. Acta* **67**, 1349–1358.
- Winter A., Ishioroshi H., Watanabe T., Oba T. and Christy J. R. (2000) Caribbean sea surface temperatures: two-to-three degrees cooler than present during the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters* **27**, 20, 3365–3368.