

カリブ海のサンゴ記録と海洋環境復元

渡邊 剛¹⁾・石下 洋志²⁾・大場 忠道¹⁾

1. はじめに

カリブ海におけるサンゴ骨格を使った環境復元の研究は、この分野の開拓当初の1970年代から行われてきた(例えば, Dodge and Thomson, 1974)。しかし、近年になると、エルニーニョや西太平洋暖水塊などに関連した研究が活発に行われるようになり(例えば, Dunbar et al., 1996, Gagan and Chivas, 1995), カリブ海におけるこの種の研究はあまり目立たなくなってきた。それは、カリブ海のサンゴ記録にはエルニーニョによる影響が顕著に見られないという理由もあるだろうが、カリブ海におけるサンゴ記録の研究の意義がなくなったわけではない。地球温暖化などのグローバルで長期間に及ぶ海洋環境変化を高分解能で復元したり、過去の火山活動のような気候に影響を与える出来事を抽出する際には、エルニーニョの影響が少ないということが、むしろ利点になると考えられる。幸い、カリブ海には長寿なサンゴ群体が多く見られる。例えば、プエルトリコ沖に生息する群体サンゴのなかには全長7m、推定年齢が700年以上に及ぶものが確認されており(Winter et al., 1991)、長期間の環境復元に適したサンゴ骨格を入手することが期待できる。また、カリブ海でのサンゴ年輪研究に頻繁に用いられている *Montastrea* 属はカリブ海や大西洋に特有の属であるが、個体壁が特に厚いという特徴がある。Barnes and Lough (1993) は、個体壁より内側の骨格部分(ディセピメント)は、1ヵ月毎に断続的に形成される可能性があることを指摘したが、*Montastrea* 属では、連続的な記録を保持する

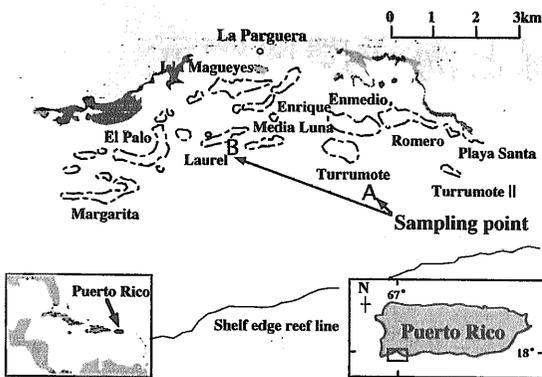
個体壁だけを取り出すことが可能なので、週単位での高分解能復元も可能である。本論では、カリブ海プエルトリコ産の *Montastrea* 属のサンゴの骨格記録に関して、酸素・炭素同位体比を中心とした最近の我々の研究成果を紹介する。

今回、我々が分析したプエルトリコ沖の *Montastrea faveolata* は、全長が約3mでその骨格には過去330年分の記録が保存されている。この330年の間には小氷期(Little Ice Age)とよばれる15世紀中期から19世紀末にかけての汎世界的な寒冷期が含まれている(Landsberg, 1985)。なかでも、最も寒冷であった時代は、18世紀初頭のマウンダー氷期(Maunder Minimum)と呼ばれているが、その寒冷化の規模や地理的広がりについてはあまり詳しく分かっていない。そこで、このマウンダー氷期の寒冷化が低緯度まで及んでいたかどうかを明らかにすることを目的として、プエルトリコ沖のサンゴコアから1980年代と1700年代にそれぞれ形成された骨格部分を取り出し、その酸素・炭素同位体比を分析した。

まず、サンゴ骨格が保持する環境記録がどのくらいの分解能と精度であるのかを検証するために、1980年代に形成された骨格部分の酸素・炭素安定同位体比を50~150 μ m間隔という高分解能で測定し、その結果にサンゴ採取海域の海水の酸素同位体比と全炭酸の炭素同位体比の測定結果や気象データを加えて考察した。次に、1700年代初頭のサンゴ骨格部分の酸素・炭素同位体比を測定し、1980年代のそれらの値と比較し、マウンダー氷期の頃の環境復元を試みた。

1) 北海道大学大学院 地球環境科学研究科：
〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目
2) NTT旭川支店

キーワード：カリブ海、サンゴ骨格、酸素同位体比、炭素同位体比、*Montastrea faveolata*、小氷期



第1図 本研究に用いられたサンゴコアの採取地点 (A: 1996年6月, B: 1994年11月).

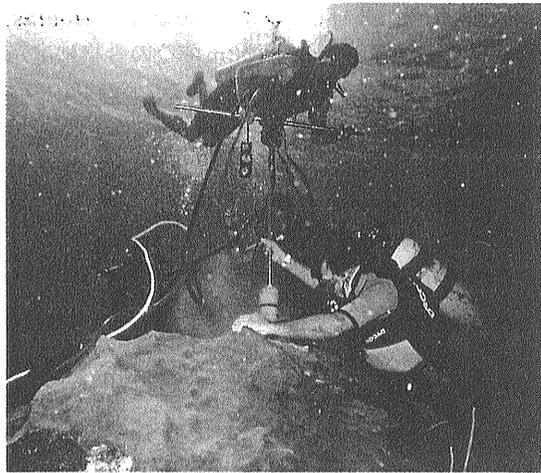


写真1 サンゴの水中ボーリング作業. サンゴ頂部の水深は約5m (写真はAndrew Bruckner氏提供).

2. 試料と方法

カリブ海に面したプエルトリコ南西海岸の水深5mの地点 (第1図, A地点) から, 1994年6月2日に全長約3mのサンゴコア (*Montastrea faveolata*) が採取された. このサンゴコアは, 写真1に示すように水中ボーリングによって切り出されたものである. 次に, このサンゴコアから厚さ4mmの平板を切り出し, 密度バンドを観察するために軟X線写真を撮った (写真2). その白黒の密度バンドは329対確認され, このサンゴコアには1665年からの記録が残されていることがわかる. 過去330年間の記録のうち, 現在の気候との対応をみるために1984年から1989年までの6年間分とマウンダー氷期を含

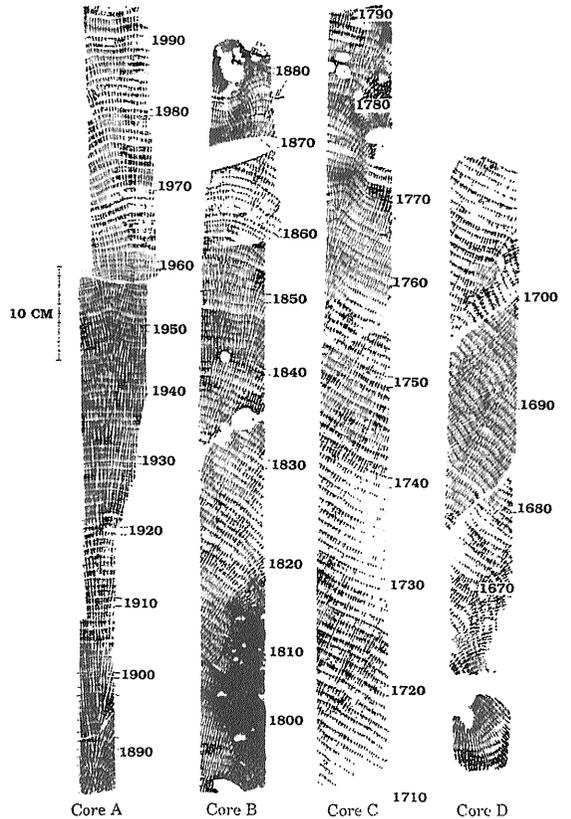
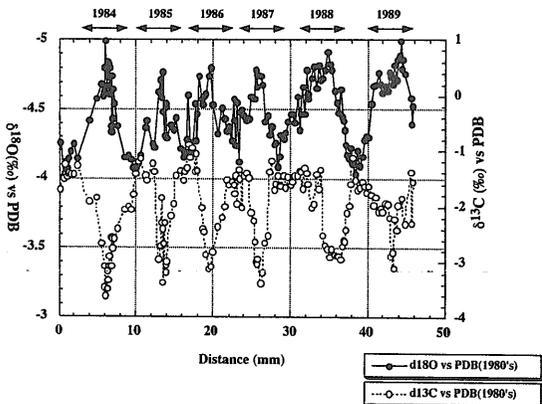
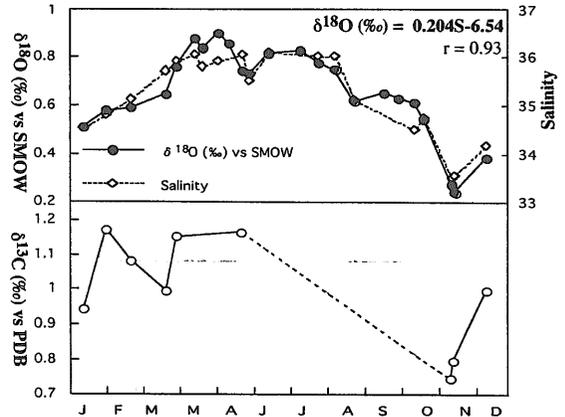


写真2 サンゴ骨格 (*Montastrea faveolata*) の軟X写真.

む1700年から1704年までの5年間分についてそれぞれ酸素・炭素同位体比測定用の試料を採取した. その試料採取の方法は以下の通りである. まず, 厚さ4mmのサンゴの平板を同じ大きさの軟X線写真の上に置き, 各高密度バンドの部分にマジックで平板上に印を付ける. その後, 試料を採取しようとする年代について, 個体壁のみをマッチ棒状に切り出す. それを氷詰めにした後, -20°C の低温でマイクロームを用いて, $50\sim 150\mu\text{m}$ 間隔に試料を削り出す. この方法によって, サンゴ骨格の形成時期が異なるものを混入することなく連続的に採取することができる. また, サンゴ生息地点の海水試料は, 1996年11月から1997年5月までの間で毎月採取されたものである. 各海水試料は生物活動を停止させるために塩化第二水銀が加えられ, 冷暗所で保管された. 海水の酸素同位体比はYoshida and Mizutani (1986)に基づく方法, 全炭酸の炭素同位体比はKroopnic (1978)に基づく方法で試料を調整した. 同位体比の測定にはFinni-



第2図 1980年代のサンゴ骨格 (*Montastrea faveolata*) の酸素同位体比と炭素同位体比。

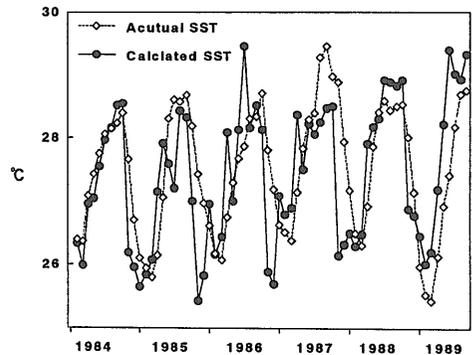


第3図 サンゴ採取地点の海水の酸素同位体比と全炭酸の炭素同位体比。海水の酸素同位体比は塩分(S)と高い相関 ($r = 0.93$) を示す。

gan MAT251 を使い、この測定器の誤差 ($\pm 1\sigma$) は、酸素同位体比で 0.03% 、炭素同位体比で 0.02% 以内である。また、サンゴ骨格の酸素・炭素同位体比と海水の炭素同位体比は PDB 基準で、海水の酸素同位体比は SMOW 基準で表している。

3. 結果と考察

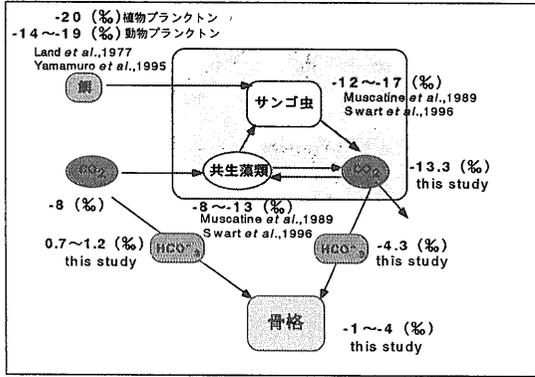
1980年代 (1984年から1989年の6年間) のサンゴ骨格の酸素同位体比は、第2図に示すように $-4.0 \sim -5.0\%$ の間 (平均 -4.58%) で季節変化を示す。サンゴ骨格の酸素同位体比の変化は水温と周辺海水の酸素同位体比によって決定されるので、水温変化を算出するためには、周辺海水の酸素同位体比の値を知る必要がある。プエルトリコ沖のサンゴ採取地点の水深 5m で採取された海水の酸素同位体比は、第3図に示すように $0.24 \sim 0.75\%$ (vs SMOW) の季節変化を示す。また、この海水の酸素同位体比は、塩分と非常に良い相関を示す ($r = 0.93$)。この理由は、海水の酸素同位体比の変動要因が降水量、蒸発量、河川等による淡水の流入量というように、塩分の変動要因と一致しているためである。したがって、両者の関係性がわかれば、海水の酸素同位体比を塩分から推測することもできる。今回は、この海水の酸素同位体比の季節変化が毎年ほぼ同じように繰り返されたという仮定のもとに水温を算出した。サンゴ骨格の酸素同位体比 (δc) と海水の酸素同位体比 (δw) を Leder *et al.* (1996) の変換式 ($T^{\circ}\text{C} = 5.33 - 4.519 \times$



第4図 算出水温と実測水温。

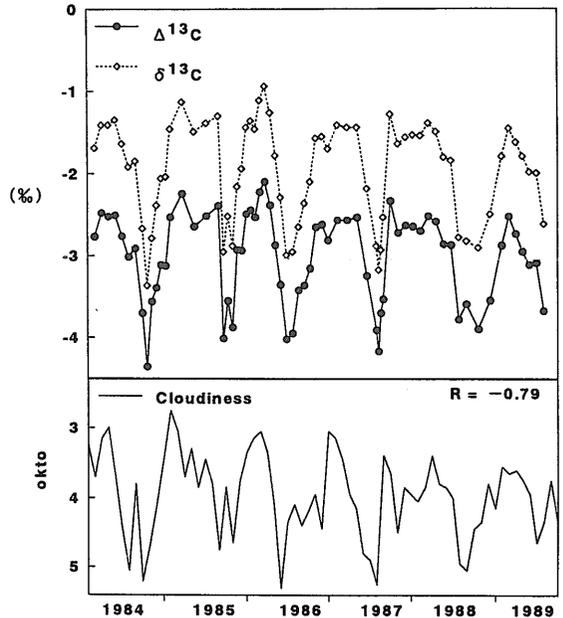
($\delta c - \delta w$) にそれぞれ代入し水温を算出すると、最低水温 25.5°C 、最高水温 29.7°C となり、試料採取地点の水温の季節変化 ($25.4 \sim 29.5^{\circ}\text{C}$) とよく一致する ($r = 0.81$)。

一方、1984年から1989年までのサンゴ骨格の炭素同位体比は、 $-0.89 \sim -3.62\%$ の間 (平均 -2.06%) で季節変化を示す (第2図)。サンゴ骨格の炭素同位体比の変動要因はより複雑で、今日でもその解釈には統一性が見いだされていない (例えば、次のような要因が考えられる。すなわち、日射量、共生藻類の光合成: Goreau, 1959ほか、海水の全炭酸の炭素同位体比: Nozaki *et al.*, 1978ほか、成長速度: McConnaughey, 1989ほか、産卵: Kramer *et al.*, 1993ほか、白色化: Porter *et al.*, 1989ほか)。このように、サンゴ骨格の炭素同位体比には環境要因やサンゴの代謝に関する多くの情報が含まれており、これらの変動要因を検討するこ



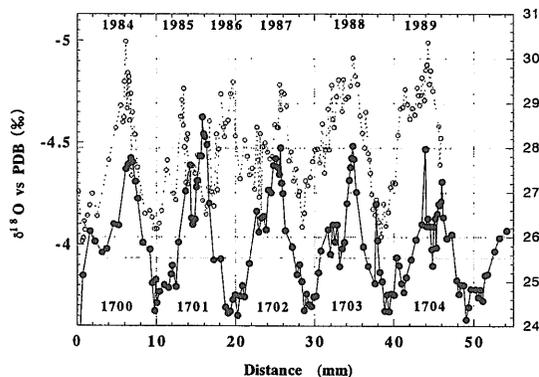
第5図 サongo骨格形成に関わる炭素経路の概念図。

とは重要である。第5図にサongo骨格が形成されるまでの炭素経路の概念図を示す。サongoが骨格を形成するには炭素源として重炭酸イオンが使用されるが、その重炭酸イオンの供給源は大きく2つに分けられる。すなわち、海水中に溶存しているものと、共生藻類やサongo自身の代謝由来のものである。したがって、サongo骨格の炭素同位体比は、この2つの供給源のそれぞれの同位体比とその分配比によって決められることになる。海水由来の重炭酸イオンは、大気から二酸化炭素が溶解する際の同位体分別によってまずは決定され、その後プランクトンなど周辺の生物群集の光合成や呼吸などの活動、さらには異なる炭素同位体比をもつ水塊の混入や小さい同位体比をもつ淡水流入などの影響を受ける。したがって、海水の炭素同位体比は水温、生物生産量、湧昇の強さ、水塊混合、淡水流入量などによって決定される。一方、代謝由来の重炭酸イオンの炭素同位体比は、共生藻類やサongoの代謝活動、サongoの捕食活動による餌の同位体比の影響を受け、日射量、成長速度、産卵、餌の種類などによって決定される。このように、サongo骨格の炭素同位体比の変動を解釈していく上で、この2つの重炭酸イオンの供給源が骨格形成に占める割合を検討する必要がある。1996年11月に採取した現生サongo (*Montastrea faveolata*, 採取地点、第1図、B地点)の最上部(ポリプが存在する部分)について、その骨格中に含まれる全有機物(塩酸処理し炭酸塩を除去したもの)の炭素同位体比を測定したところ、その値は-13.3‰であった(第5図)。共生藻類やサongo自身の呼吸による同

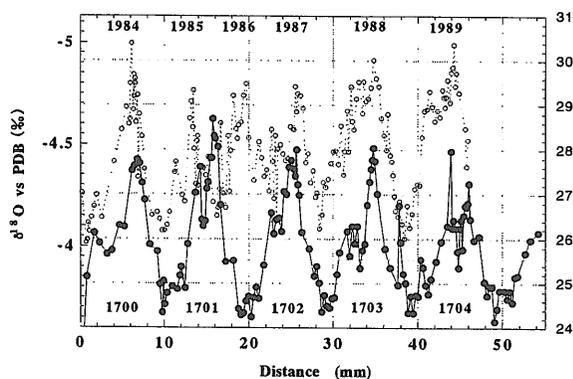


第6図 $\Delta^{13}\text{C}$ (代謝由来の重炭酸イオンの炭素同位体比 = サongo骨格の炭素同位体比 - 海水中の全炭酸の炭素同位体比)と雲量の関係. $r = -0.79$ は $\Delta^{13}\text{C}$ と雲量の相関係数。

位体分別はほとんどないと考えられるので、この値を共生藻類とサongoの代謝によって発生する二酸化炭素の炭素同位体比の初期値と考えることができる。この値に二酸化炭素が溶解して重炭酸イオンになる時の同位体分別(9‰)を加えて、11月における代謝由来の重炭酸イオンの値(-4.3‰)を算出し、同じく11月の海水の全炭酸の炭素同位体比の平均値(0.77‰)を海水由来の重炭酸イオンの値とし、11月のサongo骨格の炭素同位体比の平均値-2.6‰を評価すると、海水由来のものが34%、代謝由来のものが66%となる。それぞれの寄与率は、サongoの生息環境や生理学的状況により季節や時代によって変わると考えられる。そこで、代謝由来の重炭酸イオンの季節変化を見積もるために、骨格の炭素同位体比の変化(第2図)から海水の全炭酸の炭素同位体比の変化(0.24~0.75‰, 第3図)を差し引いた($\Delta^{13}\text{C}$)。その $\Delta^{13}\text{C}$ の変化を見ると、第6図に示すように、雲量と強い相関を示した($r = -0.79$)。これは、雲量が少ない時期、つまり日射量が大きい時期には、共生藻類の光合成の基質である二酸化炭素の炭素同位体比が海水中の生物群集の光合成による影響で小さくなり、また、サン



第7図 1980年代と1700年代の酸素同位体比.



第8図 1980年代と1700年代の炭素同位体比.

ゴ体内でも共生藻類の活動、増殖が活発になるので体内の全有機物の炭素同位体比が低くなるためと考えられる。これは、共生藻類の光合成が活発になると骨格の炭素同位体比が大きくなるという McConnaughey (1989) らの考え方と矛盾しない。

これらのサンゴ記録と環境の関係をもとに、次は小氷期 (1700年代) のものについて検討する。第7図に示すように、1700年代のサンゴ骨格の酸素・炭素同位体比はともに季節変化を示した。酸素同位体比は $-3.6 \sim -4.5\%$ の間で変化しており、振幅は約 0.9% 、平均値は -4.02% である。これらの値を1980年代と比べると平均値において 0.46% の差が認められる (第7図)。海水の酸素同位体比に大きな変化がないとすると、小氷期には1980年代よりも約 2°C 水温が低かったということになる。

一方、1700年代の炭素同位体比は、 $0.1 \sim -1.6\%$ で季節変化しており、振幅は約 1.5% 、平均値は -0.86% である。それらの値を1980年代と比べると、1700年代は1980年代よりもサンゴ骨格の炭素同位体比が冬に 1.2% 、夏に 2.0% 大きくなっている (第8図)。その理由は、主に産業革命以降の化石燃料の消費に伴う ^{12}C の放出 (Suess 効果 1.4% ; Suess, 1953) による影響を1980年代のサンゴ骨格が受けているためと考えられる。また、そのほかに 2°C の水温上昇に伴う夏の雲量の増加、サンゴの成長に伴う水深の浅化 (330年間に 3m)、共生藻類の活動やサンゴ自身の代謝の変化などが考えられる。

以上の結果をまとめると以下のような結論が得られる。

1. サンゴ骨格の個体壁だけを抽出し、氷詰めにし

てマイクロームで試料を削り取るという手法を採用することで、形成時期の異なる部分が混入することなく、非常に高分解かつ高精度の分析を行うことが可能となった。

2. サンゴ骨格と現場海水の酸素同位体比から算出された表面海水温度は実際の水温とよく一致し、高い相関関係 ($R = 0.81$) を示した。
3. サンゴ骨格の炭素同位体比から海水の全炭酸の炭素同位体比を差し引いた $\Delta^{13}\text{C}$ はこの地点の雲量と高い相関 ($R = -0.79$) を示した。このことから骨格形成には、共生藻類の活動に因る代謝由来の重炭酸イオンがより多く使われると考えられる。
4. 1980年代と1700年代では、サンゴ骨格の酸素同位体比の平均値に 0.46% の差が認められ、小氷期には1980年代よりも表面水温が約 2.1°C 低かった。
5. 1980年代のサンゴ骨格の炭素同位体比は、1700年代に比べて冬に 1.2% 、夏に 2.0% 小さくなっている。この理由は主に以下のような3つの要因が考えられる。1) 産業革命以降の化石燃料の消費に伴う ^{12}C の付加 (Suess 効果: 1.4%)、2) 2.1°C の水温上昇に伴う夏の雲量の増加、3) サンゴの成長に伴う水深の浅化。

4. おわりに

今後、サンゴ骨格を用いた環境復元はますます盛んになっていくことが予想されるが、それぞれの研究目的にしたがった研究海域の選定はもとより、必要とされる分解能や時間スケールなどを考慮し

て用いるサンゴの種類を選定することが必要である。また、化石サンゴ記録を用いての過去の気候変動の議論は、厳密な現世での検証を行い、続成作用なども考慮したうえで展開されるべきである。

謝辞：今回、投稿の機会を与えていただいた地質調査所の川幡穂高博士、鈴木 淳博士。また、サンゴ試料を提供して頂いたプエルトリコ大学のAmos Winter教授、試料採取法についてのご助言を頂いた北海道大学低温研究所の成田英器助教授に感謝致します。

文 献

- Barns, 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
- Dunbar, R. B., Linsley, B.K. And Wellington, G. M. (1996) : Eastern Pacific corals monitor El Niño/Southern oscillation, precipitation, and sea surface temperature variability over the past 3centuries. *Climatic Variation and Forcing Mechanisms of the last 2000 Years.* 373-405
- Dodge, R. E. and Thomson, J. (1974) : The natural radiochemical and growth records in contemporary hermatypic corals from the Atlantic and Caribbean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 23, 313-332.
- Gagan, M.K., and Chivas, A. R. (1995) : Oxygen isotopes in western Australian coral reveal Pinatubo aerosol-induced cooling in the Western Pacific Warm Pool. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 9, 1069-1072.
- Goreau, T. J., (1959) : The physiology of skeleton formation in corals, I. A. Method for measuring the rate of calcium deposition by corals under different conditions. *Biol. Bull.*, 116, 59-75.
- Kramer, P.A., Swart, P.K. and Szmant, A.M. (1995) : The influence of different sexual reproductive patterns on density banding and stable isotopic compositions of coral. *Proc. 7th Int. Coral Reef Symp.*, 1, 222.
- Kroopnick, P., (1974) : The dissolved O₂-CO₂-¹³C system in the eastern equatorial Pacific. *Deep-Sea Res.*, 21, 211-227.
- Land, L., and Lang, J. (1977) : On the stable carbon and oxygen isotopic composition of some shallow water, ahermatypic, scleractinian coral skeletons. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, 169-172.
- Landsberg, H. E. (1985) : Historic weather date and early meteorological observations. In : *Paleoclimate Analysis and Modeling.* A. D. Hecht (Ed.) . Wiley-Interscience, New York, 27-70.
- 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.
- Muscatine, L., Porter, J. W. and Kaplan, I. R. (1989) : Resource partitioning by reef corals as determined from stable isotope composition I. $\delta^{13}\text{C}$ of zooxanthellae and animal tissue vs depth. *Marine Biology*, 100, 185-193.
- McConnaughey, T. (1989) : ¹³C and ¹⁸O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I patterns. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 151-162.
- 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, 815-828
- Porter, J.W., Fitt, W. K., Spero, H. J., Rogers, C. S., White, M. W (1989) : Bleaching in reef corals : physiological and stable isotopic responses. *Proc. Natl. Sci. USA*, 86, 9342-9346.
- Suess, H. E. (1953) : Natural radiocarbon and the rate of exchange of CO₂ between the atmosphere and the sea. *Proc. Conf. Nucl. Process in Geol. Sett.*, Univ. Chicago Press, 52-56.
- Swart, P. K., Leder, J. J., Szmant, A. M. And Dodge, R. E. (1996) : The origin of variations in the isotopic record of scleractinian corals : II Carbon. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 60, 2871-2885
- Yamamuro, M., Minagawa, M., and Kayanne, H. (1995) : Preliminary observation on food webs in Shiraho Voral reef as determined from carbon and nitrogen stable isotopes. *Proc. 7th Int. Coral Reef Symp.*, 1, 358-361.
- Yoshida, N. and Mizutani, Y. (1986) : Preparation of carbon dioxide for oxygen-18 determination of water by use of a plastic syringe. *Anal. Chem.*, 58, 1273-1275.
- Winter, A., Goenaga, C. and Maul, G. A. (1991) : Carbon and oxygen isotope time series from an 18-year Caribbean reef coral. *J. Geophys. Res.*, 96, 16673-16678.

WATANAB Tsuyoshi, ISHIOROSHI Hiroshi and OBA Tadamichi (1998) : Coral records of Caribbean Sea and Marine environmental reconstruction.

< 受付：1998年6月12日 >