

サンゴ骨格記録から復元される 近過去のENSO変動の変遷

鈴木 淳¹・菅 浩伸²・川幡 穂高^{1,3}

(¹独立行政法人 産業技術総合研究所 地質情報研究部門

²岡山大学 教育学部・³東北大学大学院 理学研究科)

摘 要

大型の塊状群体を形成するハマサンゴ属 (*Porites* spp.) の骨格は、現在から過去数百年間にわたるエルニーニョ・南方振動 (ENSO) の変動を記録している、優れた古気候研究試料である。科学技術振興調整費総合研究「炭素循環に関するグローバルマッピングとその高度化に関する国際共同研究」の一環として実施された西太平洋のミクロネシア海域でのサンゴ骨格研究の概要を報告するとともに、ENSO変動の歴史の変遷に関する近年の研究状況について紹介する。ミクロネシア海域ではエルニーニョ時に水温の低下と降水量の減少が起きる。これに対応して、ミクロネシア各地のサンゴ骨格の酸素同位体比に顕著な正のアノマリが認められた。この特徴を利用して、チュック環礁の約90年間のサンゴ骨格の酸素同位体比変動を検討したところ、1970年代以降のENSO変動に頻度と強度の増加傾向が見られるなど、従来指摘されているENSO変動のモード変化が確認された。また、90年間に酸素同位体比の年平均値について約0.2‰の低下が認められ、水温上昇と降水量の増加による塩分低下傾向が示唆される。

キーワード：エルニーニョ、塩分、酸素同位体比、水温、西太平洋

1. はじめに

世界各地での観測記録は、100年間で地球の全球平均気温が0.6°C増加し¹⁾、また、平均海面が18 cm (1.8 ± 0.1 mm/yr) 上昇していることを示している²⁾。また、地球全体でみた場合、1861年以降の観測記録では、1990年代は最も暖かい10年間であり、特に1998年は最も暖かい年であった可能性が高い³⁾。2001年に公表された気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第三次評価報告書では、最近50年間に観測された温暖化現象のほとんどは人間活動によるものであると踏み込んだ記述が取られている^{3),4)}。

熱帯赤道太平洋で発生するエルニーニョ・南方振動 (El Niño and Southern Oscillation; ENSO) は、地球上の他の地域への影響も大きな大気海洋変動現象である。20世紀の最も強い2つのエルニーニョは1983年と1997年であり、20世紀末の15年間に発生した。1970年代以降、エルニーニョの発生頻度が増加する傾向が認められている^{5),6)}。また、1990年から1995年にかけては、エルニーニョ状態が数年にわたって続くという事態が観測された。地球の温暖化による平均気温や海水温の上昇は、ENSOの発生頻度や強度にどのような影

響を与えるのだろうか？

進行する地球の温暖化への危機感を背景に、気候変動システムの解明をめざして大気・海洋の観測体制は近年著しく強化された。赤道太平洋域には60基以上の観測ブイが展開されて水温・塩分の鉛直分布をテレメトリーする一方 (TOGA-TAO計画)、人工衛星による観測を主として全球の表層水温が毎週、1度格子で報告されている⁵⁾。これらの取り組みの成果として、1997年から1998年にかけて発生した大規模なエルニーニョ現象は、その発生から終息までリアルタイムで総合的に観測され、またモデル研究にも大きな進歩がもたらされた⁶⁾。しかし、このような観測体制はわずか最近十数年のものであり、測候所や船舶による気象要素や水温の観測データも最近の50年間をカバーしているに過ぎない。地球温暖化が産業革命以降の長期にわたる現象であることから、気候変動システムの理解にも長期的な視点が求められる。そこで、測器による観測期間を越えて、過去に遡ることができる気候の代替指標が求められ、このために利用されるのが氷床コアや樹木の年輪、歴史文書であり、本論で紹介するサンゴ年輪である (図1)。樹木の年輪を用いた古気候復元の研究は「年輪気候学 (dendroclimatology)」と

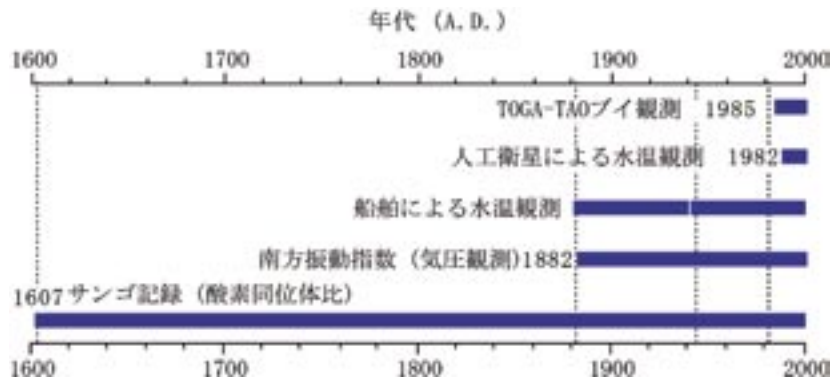


図1 太平洋における大気海洋変動の観測体制の整備。
サンゴ記録はガラパゴス島¹⁹⁾のものを示した。

呼ばれているが、一方、サンゴの年輪を試料として気候変動を復元する試みは「サンゴ骨格気候学 (coral skeletal climatology)」と呼ばれる。サンゴ骨格気候学はこの数年間に急速に進展し、ENSOやアジアモンスーン変動、インド洋ダイポールなど低緯度海域での大気・海洋結合系の変動現象の復元と、そのメカニズムの解明に大きく貢献するものと期待されている。

本論では、科学技術振興調整費総合研究「炭素循環に関するグローバルマッピングとその高度化に関する国際共同研究」(平成10~14年度)の一環として実施された西太平洋ミクロネシア域でのサンゴ骨格研究の結果を報告するとともに、長期的なENSO変動の変遷に関する最新の研究状況について紹介する。

2. サンゴ骨格の酸素同位体比水温計

古気候の復元には、年輪が明瞭なハマサンゴ属 (*Porites* spp.) の塊状群体が適している。サンゴ骨格は炭酸カルシウムを主成分とし、高密度部分と低密度部分が交互に重なり、通常これで1年の年輪を形成している(図2)。年数が解かりやすいことは、古気候を復元する際に有利であり、直径2~3mに及ぶ大きな群体では数百年の年輪を有するものもある。年間の骨格成長速度は環境条件によって大きく左右されるが、通常5~20mmの範囲である。数百 μ m間隔で微小試料を切削する技術を用いることにより、サンゴ年輪から月単位、あるいはそれよりも高い分解能で古気候を復元できる可能性をもつ⁷⁾。樹木の場合は年輪幅が古気候の指標としてよく用いられるが、サンゴ骨格の場合は炭酸カルシウムに含まれる微量化学成分が注目されている。その中でも、特に骨格の酸素同位体比は骨格形成時の水温の指標として多くの研究が重ねられてきた⁸⁾。骨格の

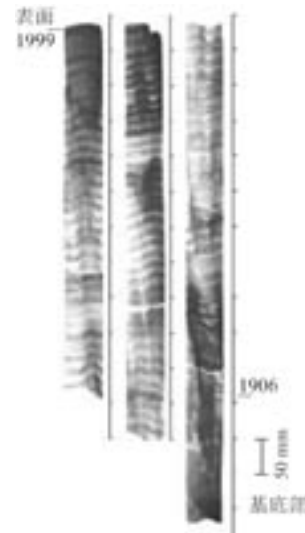


図2 *Porites*属サンゴの骨格のX線ポジ画像。

酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_c$) は次の関係式で、海水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_w$) と海水温 (T) に依存する⁹⁾。

$$T(^{\circ}\text{C}) = 2.8 - 4.78 (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) \quad (1)$$

ここで、酸素同位体比 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) は、標準物質 PDB (Pee Dee Belemnite) に対する千分偏差 $\delta^{18}\text{O}$ として定義されている(単位: per mil, ‰)。

$$\delta^{18}\text{O} = ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}} / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{std}} - 1) \cdot 1000 \quad (2)$$

(1)式は東太平洋の*Porites lobata* について求められたものであるが、他の種にもほぼ同様の関係式が得られている(図3)。

サンゴ骨格の酸素同位体比は、(1)式に示したように原理的に水温と海水の酸素同位体組成の双方に規定される。海水の酸素同位体組成に影響を与えるのは中深層水の湧昇や蒸発、降水などの水収支の変化である。降水の酸素同位体比は一般に海水のそれに比べて軽い。よって、降雨による海

水の塩分の低下は骨格の酸素同位体を軽い方向にシフトさせる。水温の上昇も骨格の酸素同位体比を軽くする方向に作用するので、降雨による塩分の低下と水温の上昇は、サンゴの酸素同位体比記録からは区別がつかない。しかし、好都合なことに熱帯域で卓越するENSO変動は、一般に高温多雨と低温小雨とが繰り返す特徴を有しており、水温上昇と塩分の低下が未分離の状態でもENSOのシグナルとして骨格の酸素同位体比は有用である¹⁰⁾。

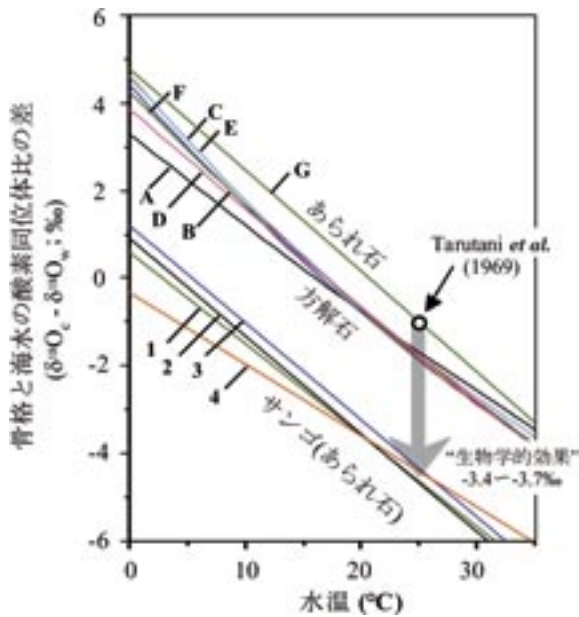


図3 サンゴ骨格の酸素同位体比温度計の原理¹⁰⁾。炭酸カルシウムと水の酸素同位体比の差と水温の関係。炭酸カルシウムの結晶形の違いにより、方解石(A~F)、貝類および有孔虫のあられ石骨格(G)、およびサンゴのあられ石骨格(1~4)の3群の研究例の関係式が示されている。図中に無機合成されたあられ石の25℃における酸素同位体比を示した³¹⁾。

3. サンゴ骨格微小試料採取と安定同位体比分析

3.1 ハマサンゴ群体の掘削

本研究では、ミクロネシア連邦のチュック環礁とポンペイ堡礁にて古気候研究に適したサンゴ試料の探索を行った。柱状試料の採取にはエアドリルおよび、水中油圧モータドリルを使用した。これらの島々は、東方のマージョロ環礁と、より西方のペラオ共和国のパラオ堡礁と共に北緯7度付近に位置して東西方向のトランセクトを構成し、西太平洋暖水塊の東西方向の移動や伸長・縮退をモニタリングするのに適していると考えられる(図4)。

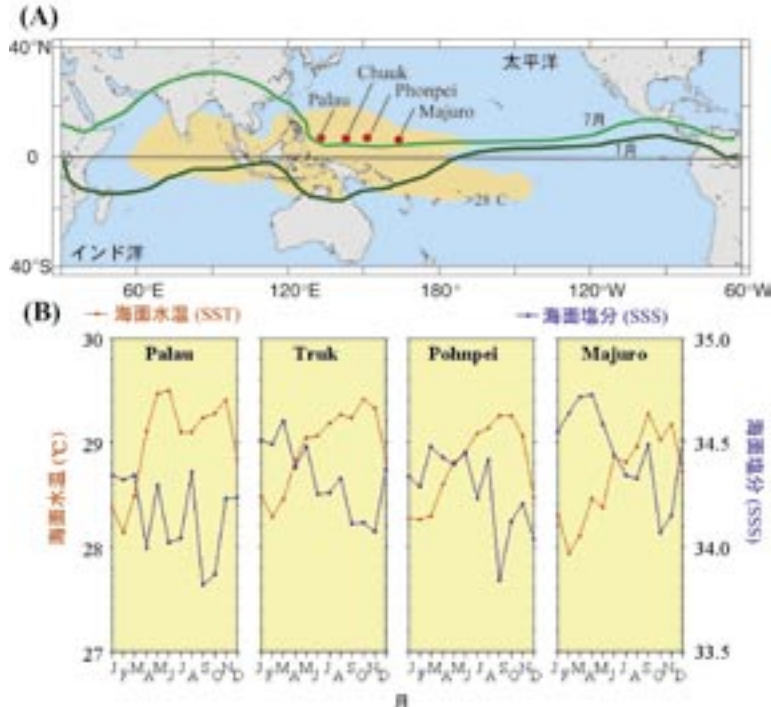


図4 (A) 調査海域位置図。1月および7月における熱帯収束帯(ITCZ)の位置と年平均水温が28℃以上の海域(西太平洋暖水塊)を図中に示した。(B)北緯7度付近に位置するパラオ、チュック、ポンペイ、マジロにおける海面水温と海面塩分の月別気候値³²⁾。海面水温は、西太平洋暖水塊の中心部に近いパラオで高く、東に位置する程低くなる傾向が認められる。一方、海面塩分は、西側で低く、東側で高い。また、パラオでは熱帯集束帯の通過による年2回の高温・降水量ピークが観察される。

3.2 骨格の微小試料採取

サンゴ骨格から化学分析用の微小試料を採取するサンプリング間隔が粗いと、冬や夏の水温の極値を逃す可能性があり、また形成時期の異なる部分からの試料の混合により分析値が平均化されるという問題が生じる。オーストラリア国立大学で開発されたサンゴ骨格用のミリングマシン(旋盤)は、成長軸方向に最小100 μ mまでの厚さで微小試料の採取(マイクロサンプリング)をすることができる^{7),11)}。この方法によると、平均化効果を最小限に押さえた状態で骨格の化学組成分析が可能となる。チュック環礁より得られた全長180 cmの長尺コア試料について、上述のオーストラリア国立大学で開発された手法に従い、精密サンプリングを施した(図5)。400 μ mのサンプリング間隔採取は、年間成長量を約15 mmとすると、およそ10日間の成長量に対応する。

3.3 酸素・炭素同位体比の測定

サンゴ骨格試料の酸素・炭素の安定同位体比の測定には、Micromass社製質量分析計OPTIMAが用いられた。この質量分析計には炭酸塩自動前処理装置MULTIPREP(Micromass社)が接続されており、リン酸添加による炭酸塩試料からの二酸化炭素ガスの生成が行われる。本装置導入後の稼働開始時における測定性能試験の結果、炭酸塩標準物

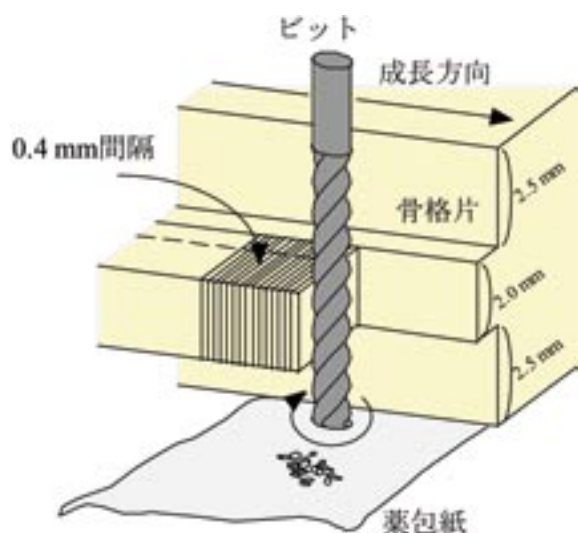


図5 サンゴ骨格の微小試料採取方法。
サンゴスラブの端部に成長軸が連続的に含まれるように整形し、この端部を上・下から2.5 mmずつ削り込んで、厚さ2 mmの棚を作り、この部分についてマイクロサンプリングを行う。この加工は形成時期の異なる部分の混入を極力避け、成長軸に沿った部分だけをサンプリングするための操作であり、試料の断面積は約2 mm \times 2 mmと小さくなっている。ミリングビットの側刃を使い、成長軸方向に400 μ m毎にサンゴ骨格を削り落としていく。試料はミリングビットの下に置いた薬包紙で受ける。

質NBS-19の繰り返し測定の標準偏差は酸素同位体比について0.04‰であった(n=6;炭酸塩重量70~100 μ g)。通常、サンゴ骨格の酸素同位体比の水温依存性はおおよそ0.21~0.17‰ $^{\circ}$ C⁻¹であることが知られている¹²⁾。したがって、酸素同位体比の測定精度は水温に換算して0.2 $^{\circ}$ Cとなり、十分に水温推定の実用レベルである。

4. ミクロネシアのサンゴ骨格記録

4.1 ミクロネシア海域のENSO変動とサンゴ記録

ENSO変動は、カロリン諸島など北西太平洋低緯度域では、エルニーニョ時に水温の低下と降水量の減少を引き起こす。特にエルニーニョ時の水温の低下は、太平洋の海面水温と南方振動指数(タヒチとダーウインの気圧差を指数化したもので、エルニーニョ期には負の値を示す)の相関図からも明瞭である(図6)。ミクロネシア・チュック環礁より採取された柱状試料の上部約160 cmについて、月相当の分解能の酸素同位体比曲線を測定し、その変動と各種気候要素(海水温、降水量など)の変動を比較した(図7)。サンゴ骨格の酸素同位体比にはエルニーニョ時に対応して明瞭な正のアノマリを示すが、これはエルニーニョピーク時(通例年末の12月ころ)の水温低下と降水量の減少に起因する周辺海水の塩分の増加によって説明される。チュック環礁周辺の水温はエルニーニョピーク後比較的短期間で平年値近くまで回復するが、サンゴ骨格記録ではエルニーニョピークの翌年も酸素同位体比曲線が通常の季節変化を示さず、夏期のピークが大きく圧縮されたカーブとなる。この酸素同位体比の挙動は、この海域の低降水量と高塩分の状態がほぼ1年間に渡って継続することを示唆するもので、この傾向は周辺海域における海洋観測の結果にも認められている¹³⁾。海域の高い塩分状態の原因としては、この付近の降水量の低下とともに付近の海流系の変化の影響が想定される。サンゴ同位体比記録に認められるエルニーニョピーク時の明瞭な正のアノマリとそれに引き続くカーブの変形は、過去の各エルニーニョの強度の復元に有効であるばかりでなく、個々のエルニーニョイベントの発達様式の違いなどについての情報を与える可能性もある。

チュック環礁の試料に加えて、ポンペイ島より採取された柱状試料について、微量試料を採取し酸素同位体比を分析したところ、両地点ともに1997年~1998年、1991年~1992年、1982年~1983年のエルニーニョに対応して、骨格の酸素同位体比に顕著な正のアノマリが認められた(図8)。約600 km

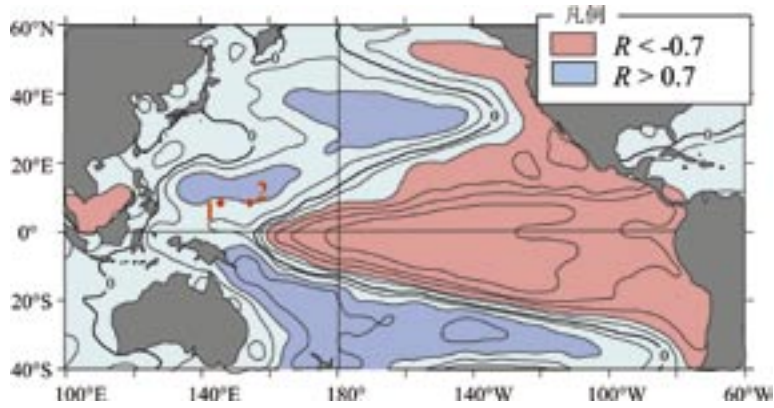


図6 南方変動指数と太平洋の海面水温偏差の相関の等値線図³³⁾。相関係数0.7以上の正相関、あるいは逆相関が見られる海域にはそれぞれハッチを施した。例えば、東赤道太平洋はエルニーニョ時には、南方変動指数が負となり、海面水温偏差は正の値を取る。図中に本研究のサンゴ採取地点を示した(1:チュック環礁, 2:ボンペイ島)。

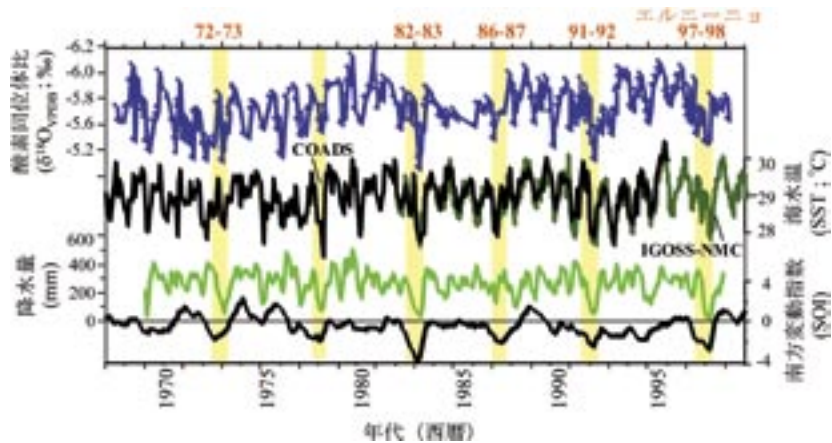


図7 ミクロネシア・チュック環礁のサンゴ記録と海洋気候諸量との関係。上段からサンゴ骨格の酸素同位体比、水温、降水量、南方変動指数を示す。エルニーニョ時にハッチを施した。エルニーニョの際の変化が下向きに表示されるように、骨格の酸素同位体比については正方向を下向きにプロットしている。

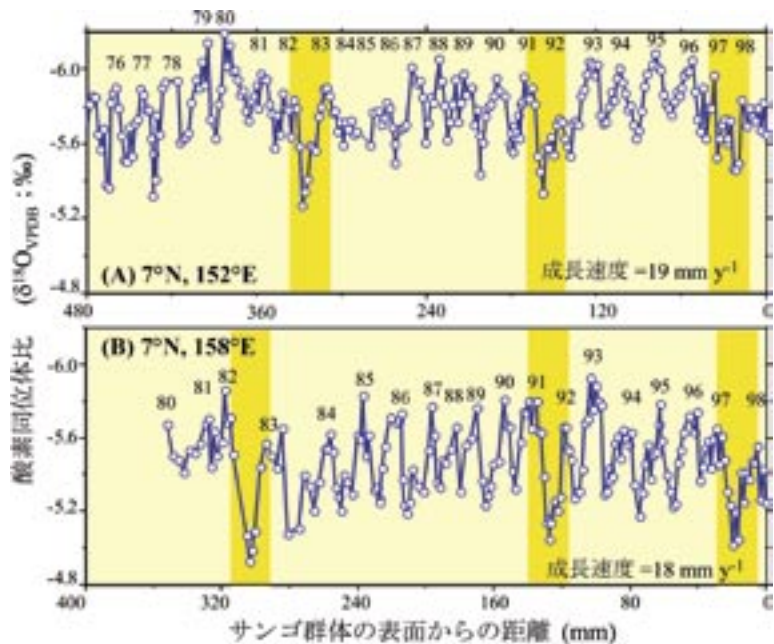


図8 ミクロネシア・チュック環礁、(A)およびボンペイ島(A)のサンゴ骨格の酸素同位体比記録^{34),35)}。エルニーニョ時にハッチを施した。

離れた2地点であるが、ともに北赤道反流の影響を受けて、相関の高い変動パターンを記録していることがわかる。

4.2 ミクロネシアのサンゴ記録にみられる長期的気候変動

チュック環礁の柱状試料の全長にわたる酸素同位体比分析結果を図9に示す。酸素同位体比に見られる正のアノマリから過去のエルニーニョ発生時期を特定することができ、文献記録に見られる20世紀初頭のいくつかのエルニーニョイベントがこのサンゴ骨格にも記録されていることが明らかになった。この約90年間のサンゴ骨格の酸素同位体比変動には、1920年代以前と1970年代以降に酸素同位体比の正のアノマリの振幅および頻度が大きい時期があり、一方、1930~1970年代には変化が小さい。この酸素同位体比変動がENSO変動に対応していると仮定すると、1920年代以前と1970年代以降は強いENSO変動が頻発した時期であったと推定される。より確実な結論を得るためには、時系列解析の結果を待つ必要があるが、基本的には従来から指摘されているENSO変動のモード変化^{14),15)}とよく対応している。

また、約90年間に酸素同位体比について約0.2‰の低下が認められる。これは水温の上昇に起因する可能性が大きい。同時にこの海域の降水量の増加により、塩分が低下する傾向にある可能性がある。この両者の寄与の判別は、酸素同位体比測定のみからでは困難である。今後、水温のみに依存する骨格のSr/Ca比の測定等を行って検討を進めることが重要である¹⁶⁾。

5. サンゴ記録による過去のENSO変動の復元

5.1 長尺サンゴ試料の酸素同位体比記録

太平洋-インド洋区のサンゴ礁域を中心に、約100年以上の長尺サンゴ試料の分析結果が現在までに報告されている。まず、酸素同位体比の平均値の違いに注目しよう。長尺サンゴ試料の採取点を年間降水量の分布図に示したのが図10(A)であり、降水量の多い地点ほど骨格の酸素同位体比が小さい傾向がみられる(図10(B))。熱帯収束帯(ITCZ)直下に位置するパナマのサンゴの酸素同位体比が最も小さい値を示し、ミクロネシアのサンゴ骨格の値がこれに続く。これらのサンゴ試料は主に熱帯域から採取されているために各地の平均水温の差は小さく、地点による酸素同位体比平均値の違いは大局的に降水量の多寡に対応するものと思われる。海水の酸素同位体比の地域差は、骨格の酸素同位体比と水温の関係式にも認められる(図10(C))。サンゴの酸素同位体比の時系列変動について、タラワ環礁とパナマでは降水量変動の影響が卓越していることが報告されている^{17),18)}。一方、小雨域に位置する東太平洋ガラパゴス諸島やインド洋のセイシェルでは、海水温の変動がもたらしたサンゴの酸素同位体比の時系列変動を規定している^{19),20)}。

サンゴ骨格の酸素同位体比記録の長期的な変化傾向に注目すると、比較的赤道から離れて位置するフィリピンのセブ島²¹⁾、グレートバリアリーフのアブラハムリーフ²²⁾およびパナマ¹⁸⁾から採取されたサンゴは、 $\delta^{18}\text{O}$ 値が長期的に低下していくような傾向を示しており、これらの地域で表層水温が上昇するかあるいは塩分が低下しているこ

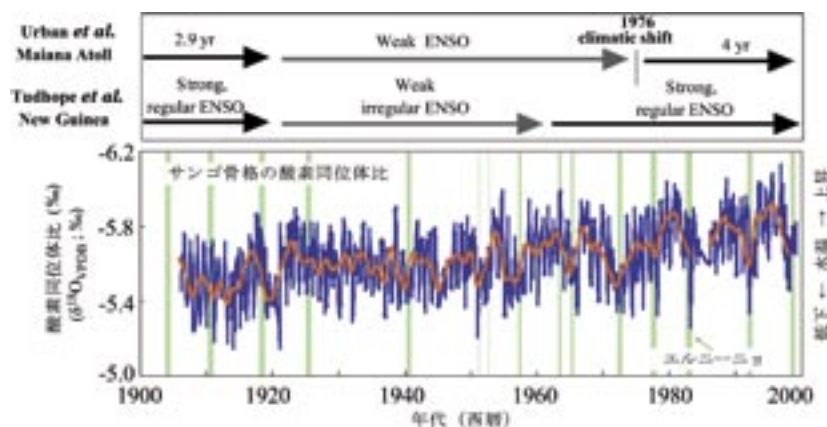


図9 ミクロネシア・チュック環礁の過去約90年間のサンゴ骨格の酸素同位体比記録³⁴⁾。約2ヶ月間隔の分析値を青線で、年平均を赤色線で示した。エルニーニョ時にハッチを施した。最近の90年間で酸素同位体比の年平均値が約0.2‰減少する傾向が認められる。ニューギニア¹⁵⁾および中部太平洋のMaiana環礁¹⁴⁾のサンゴ記録から復元された20世紀におけるENSO変動の強度および周期の特徴を併せて示した。

とになる(図11; 酸素同位体比の負の方向が縦軸上向きに示されている点に注意)。インド洋セシエルでも同様に、150年間のサンゴの $\delta^{18}\text{O}$ 値に 0.15‰ の低下が認められた²⁰⁾。

Cane *et al.*²³⁾ は、1900年以降の海水温記録を再解析し、全球的な海水温の上昇傾向とともに、東部太平洋での低温化傾向を見出した。地球温暖化により、貿易風を含めた風系が強化され、その結果、東部太平洋における冷湧水の湧昇が促進されるために東部太平洋が低温化する。この傾向は、エルニーニョの影響を取り除いてみた場合により顕著になる。Cane *et al.*²³⁾ の水温変化の分布図に長尺サンゴ試料の採取点を示したものが図11(B)である。我々の分析によるチュック環礁のサンゴ記録を含めて、各地の長尺サンゴ試料に見出された長期トレンドとCane *et al.*²³⁾ の水温変化傾向は、大局的には一致しているように思われる。

5.2 ENSO変動と地球温暖化

地球の温暖化による平均気温や平均海水温の上昇は、ENSOの発生頻度や強度にどのような影響を与えるのだろうか? 1983年と1997年に発生した20世紀の最も強い二つのエルニーニョは、中部赤道太平洋に見出された長周期の水温変動とより短周期のENSO変動の相乗効果によってもたらされたものと考えられている²⁴⁾。エルニーニョ

の発生頻度や強度は、(1)カオス的な振る舞いをするENSO変動機構²⁵⁾の内的要因によって専ら規定されているのか、あるいは(2)小氷期による平均気温の低下や地球温暖化による平均気温・海水温上昇などの背景的気候条件の方に敏感に影響されるのであろうか?

Timmermann *et al.*²⁶⁾ のモデル研究では、人為起源の温室効果気体によって地球が温暖化すると、エルニーニョの頻度と強度がともに増加することが示された。これはENSO変動が背景的気候条件に強く影響されていることになる。Urban *et al.*¹⁴⁾ による中部赤道太平洋Maiana環礁(1°N, 173°E)から採取された155年間のサンゴ記録も、ENSO変動がその海域の平均的な気候条件の変化に密接に影響されている様子を示している。すなわち、19世紀中後半、この海域が比較的冷涼で乾燥していた期間には10年変動が卓越し、20世紀初頭になると約2.9年の短周期変動が顕著になる。1920年以降は変動が減衰し、1976年の温暖湿潤状態への大きなシフトの後は4年周期が卓越する。

一方で、温暖化が顕在化する20世紀以前にも強烈なエルニーニョが発生していたことを見逃すことはできない。このような例として1396年、1685年~1688年、1789年~1793年のエルニーニョが知られている²⁷⁾。特に、1789年~1793年の

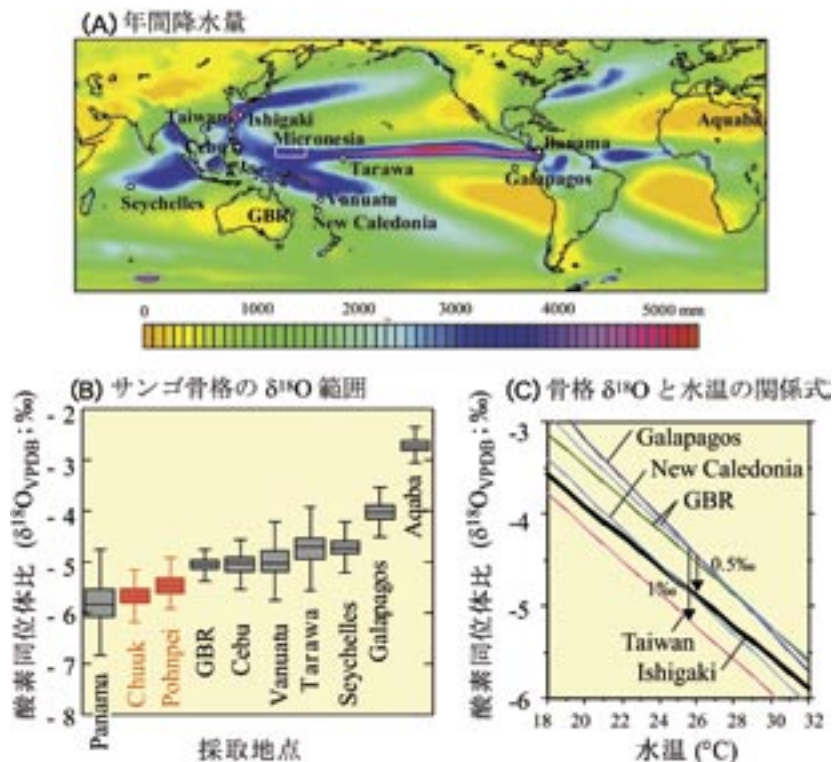


図10 (A)世界の年間降水量分布図(http://tao.atmos.washington.edu/legates_msu/index.html)とサンゴ骨格研究の実施地点(図11参照)。(B)ハマサンゴ骨格の酸素同位体比の変動幅。(C)太平洋域から得られている骨格の酸素同位体比と水温の関係³⁶⁾。

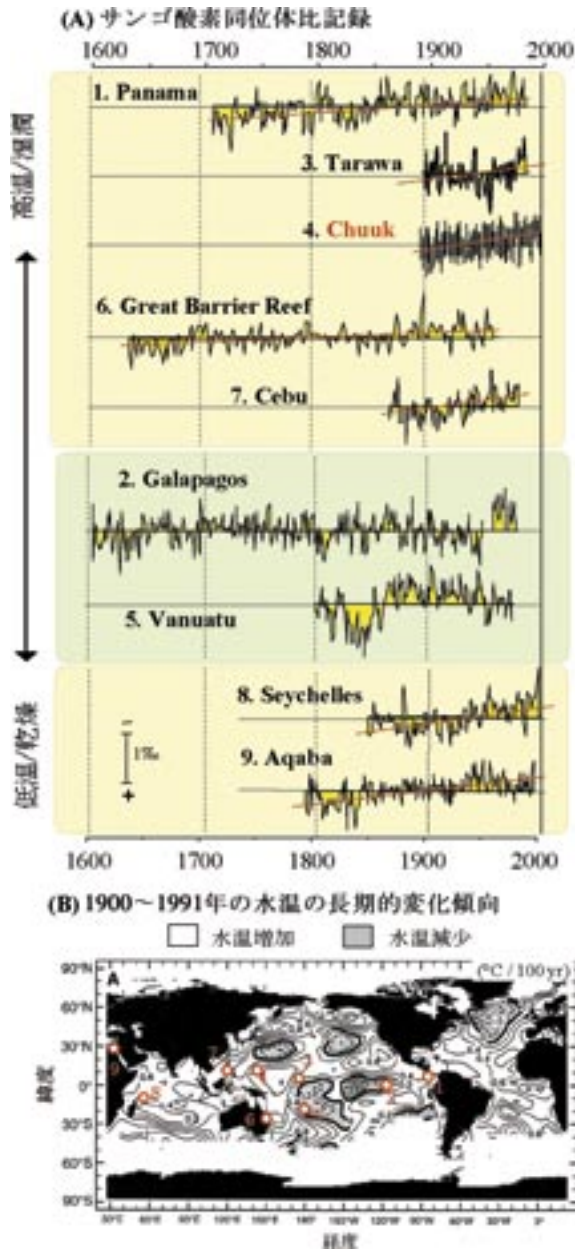


図11 (A) 太平洋およびインド洋における長尺サンゴ試料の酸素同位体比記録。これらのデータはアメリカ大気海洋庁地球物理データセンターの古気候プログラム (http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/coral/coral_data.html) より取得した。各地点のサンゴ種名を以下に示す。
 1. パナマ¹⁸⁾ (*Porites lobata*), 2. ガラパゴス¹⁹⁾ (*Pavona clavus*; *P. gigantea*), 3. タラワ¹⁷⁾ (*Hydnophora microconos*), 4. チュック³⁴⁾ (*Porites rom.*), 5. バヌアツ³⁷⁾ (*Platygyra lamellina*), 6. グレートバリアリーフ²²⁾ (*Porites australiensis*), 7. セブ²¹⁾ (*P. lobata*), 8. セイシェル²⁰⁾ (*P. lutea*), 9. アカバ³⁸⁾ (*Porites rom.*)。一般的に、酸素同位体比の負の方向へのシフトは水温上昇/降水量の増加, また正方向へのシフトは水温低下/降水量の減少を表している。
 (B) 20世紀における海面水温変化²³⁾。

長期間に渡るエルニーニョの影響は世界各地で記録されており、インドでは1789～1792年の間、連続的なモンスーンの欠落と大干ばつが発生し、

西ヨーロッパでの1787～1788年の異常気象はフランス革命の遠因になったともいわれている²⁷⁾。このような大規模なエルニーニョは、南アジアや東南アジアのモンスーン欠落を伴うことは興味深い。1997～1998年のイベントでは東南アジアのモンスーン欠落が顕著であり、1685～1688年と1789～1793年のエルニーニョは両地域でモンスーンの欠落が発生している。

5.3 地質時代のENSO変動の復元

より長いタイムスケールでは、ENSO変動はどのように変化してきたであろうか？ここでも議論の中心になるのは、エルニーニョの発生頻度や強度の規定要因として、(1) ENSO変動機構の内的要因と(2) 氷期-間氷期変動に伴う平均海水温の変化などの背景的・平均的気候条件、どちらがより重要であるかの検討である。この問題については、サンゴ骨格記録を用いた研究に限らず、様々な地質学的試料の解析と数値モデル研究が活発に行われている。氷期-間氷期スケールでのENSO変動の変遷を検討した例として、Tudhope *et al.*¹⁵⁾がある。彼らはニューギニアのサンゴ礁および隆起段丘から採取したサンゴ化石の分析により、過去13万年間のENSO変動の強度の変化を検討して、低温な氷期にはENSO変動が弱く、間氷期には相対的に強かったことを明らかにした。この研究はENSO変動が平均海水温や地球の軌道要素、特に日射量の季節性を規定する歳差などの外的要因に大きく影響されている可能性を示した点で注目される。さらに、20世紀のENSO変動の強度は、最終間氷期と比べても大きいことから、人為的な地球温暖化もENSO変動に影響を与えているものと思われる。

現在から5,000～6,000年前の完新世中期は、気温などの平均的な気候条件が現在とほぼ同じでありながら、歳差の違いにより日射量の季節性が現在と大きく違っていた時代である。当時のENSO変動の復元が各地で試みられているが、現在よりもENSO変動が弱かったことを示唆するデータが多く得られており、ENSO変動が微妙な平均的気候状態に敏感に応答していることを示す²⁸⁾。

他に地質時代のENSO現象の研究例としては、新生代始新世(Eocene; 5,500～3,500万年前)のENSO変動を検討したHuber and Caballero²⁹⁾の例がある。このモデル研究によると、始新世は高緯度海域の表層水や熱帯域の深層水が現在よりも10℃以上暖かかったと推定される時代でありながら、熱帯のENSO変動の頻度や空間構造は現在と大きくは変わらないことが示され、熱帯の大気海洋結合システムが平均気温や熱帯深層水の水温などの変化に対

して影響を受けにくいとする仮説が提示された。これは、温暖化した気候条件(いわゆるhothouse climate)では、エルニーニョが恒常的に発生するとする従来の仮説³⁰⁾と対立するものであり、今後の研究の進展が注目される。Huber and Caballero²⁹⁾はサンゴ化石を用いて、始新世のENSO変動を復元することに期待を示している。現在と気候条件が大きく異なる時代のENSO変動を研究することによって、今後の温暖化する地球のENSO変動について理解が深まるものと考えられる。

6. まとめ

本論では、サンゴ骨格を用いて過去の気候変動を復元するための原理・手法の解説と共に、ミクロネシアにおける研究例を報告し、併せて、ENSO現象の変遷についての最近の研究動向をレビューした。西太平洋ミクロネシア海域からのサンゴ試料についての分析・解析の結果は以下の通りである。

(1) ミクロネシア・チュック環礁の最近20年間のサンゴ骨格について、酸素同位体比変動と各種気候要素(海水温、塩分、降水量など)の変動を比較した。エルニーニョに対応して骨格の酸素同位体比に顕著な正のアノマリが認められ、これはエルニーニョ期間中のこの海域の水温低下と降水量の減少に起因すると考えられる。約600 km離れたポンペイ島より採取されたサンゴ試料についても、ほぼ同様の骨格記録が得られた。

(2) チュック環礁の約90年間のサンゴ骨格の酸素同位体比変動を検討したところ、1970年代以降のENSO変動が顕著であること、そして1930~1970年代にはENSO変動がやや減衰したと思われる傾向がみられた。これは従来、指摘されているENSO変動のモード変化と矛盾しない。また、90年間に酸素同位体比について年平均で約0.2%の低下が認められ、水温上昇と降水量の増加による塩分低下傾向が示唆される。

謝辞

本研究は、文部科学省・科学技術振興調整費総合研究「炭素循環に関するグローバルマッピングとその高度化に関する国際共同研究」、環境省・地球環境保全等試験研究費「サンゴ年輪気候学に基づく、アジアモンスーン域における海水温上昇の解析に関する研究」、および産業技術総合研究所運営交付金による研究の成果である。ミクロネシア大学のA. Edward助教授には調査全般に渡って御協力頂いた。安定同位体比測定は産業技術総合研究所蓑島佳代氏に、試料調製は同じく吉永弓

子・高岡光枝両氏による。東北大学大学院、井上麻夕里氏には原稿を読んでいただき、改善のためのコメントを頂いた。サンゴ柱状試料掘削は(株)ジオアクト安達寛氏によって行われた。以上の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) Thomson, D.J. (1995) The seasons, global temperature, and precession. *Science*, 268, 59-68.
- 2) Douglas, B.C. (1991) Global sea level rise. *J. Geophys. Res.*, 96, 6981-6992.
- 3) IPCC (2001) IPCC Third Assessment Report-Climate Change 2001, Summary for Policymakers. A report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- 4) 気象庁 (2001) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第三次評価報告書第一作業部会報告政策決定者向けの要約.
- 5) Reynolds, R.W. and T.M. Smith (1994) Improved global sea surface temperature analyses. *J. Climate*, 7, 929-948.
- 6) McPhaden, M.J. (1999) Genesis and Evolution of the 1997-98 El Niño. *Science*, 283, 950-954.
- 7) Gagan, M.K., A.R. Chivas and P.J. Isdale (1994) High-resolution isotopic records from corals using ocean temperature and mass-spawning chronometers. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 121, 549-558.
- 8) 鈴木 淳・渡邊 剛・川幡穂高 (2000) サンゴ骨格の酸素同位体比温度計. 月刊地球, 22, 631-637.
- 9) McConnaughey, T. (1989) ¹³C and ¹⁸O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 151-162.
- 10) 鈴木 淳・谷本陽一・川幡穂高 (1999) サンゴ年輪記録：過去数百年間の古海洋学的情報の復元. 地球化学, 33, 23-44.
- 11) Gagan, M.K., A.R. Chivas and P.J. Isdale (1994) High-resolution isotopic records from corals using ocean temperature and mass-spawning chronometers. *Earth Planetary Sci. Lett.*, 121, 549-558.
- 12) Suzuki, A., I. Yukino and H. Kawahata (1999) Temperature-skeletal $\delta^{18}\text{O}$ relationship of *Porites australiensis* from Ishigaki Island, the Ryukyus, Japan. *Geochem. J.*, 33, 419-428.
- 13) Delcroix, T. and C. Henin (1991) Seasonal and interannual variations of sea surface salinity in the tropical Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 96, 22135-22150.
- 14) Urban, F.E., J.E. Cole and J.T. Overpeck (2000)

- Influence of mean climate change on climate variability from a 155-year tropical Pacific coral record. *Nature*, 407, 989-993.
- 15) Tudhope, A.W., C.P. Chilcott, M.T. McCulloch, E.R. Cook, J. Chappell, R.M. Ellam, D.W. Lea, J.M. Lough and G.B. Shimmield (2001) Variability in the El Niño -Southern Oscillation through glacial-interglacial cycle. *Science*, 291, 1511-1517.
 - 16) McCulloch, M.T., M.K. Gagan and G.E. Mortimer (1994) A high-resolution Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982-1983 El Niño. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 2747-2754.
 - 17) Cole, J.E., Fairbanks, R.G. and G.T. Shen (1993) Recent Variability in the Southern Oscillation: Isotopic Results from a Tarawa Atoll Coral. *Science*, 260, 1790-1793.
 - 18) Linsley, B.K., R.B. Dunbar and G.M. Wellington (1994) A coral-based reconstruction of intertropical convergence zone variability over Central America since 1707. *J. Geophys. Res.*, 99, 9977-9994.
 - 19) Dunbar, R.B., G.M. Wellington, N.W. Colgan and P.W. Glynn (1994) Eastern Pacific climate variability since 1600 A.D.: stable isotopes in Galapagos corals. *Paleoceanogr.*, 9, 291-315.
 - 20) Charles, C.D., D.E. Hunter and R.G. Fairbanks (1997) Interaction between the ENSO and the Asian monsoon in a coral record of tropical climate. *Science*, 277, 925-928.
 - 21) Pätzold, J. (1986) Temperature and CO_2 changes in tropical surface waters of the Philippines during the past 120 years: record in the stable isotopes of hermatypic corals. *Reports, Geol.-Palaont. Inst. Univ. Kiel*, No. 12.
 - 22) Druffel, E.R.M. and S. Griffin (1993) Large variations of surface ocean radiocarbon: evidence of circulation changes in the southwestern Pacific. *J. Geophys. Res.*, 98, 20246-20259.
 - 23) Cane, M.A., A. C. Clement, A. Kaplan, Y. Kushnir, D. Pozdnyakov, R. Seager, S. E. Zebiak and R. Murtugudde (1997) Twentieth-century sea surface temperature trends. *Science*, 275, 957-960.
 - 24) Kerr, R.A. (1999) Big El Niños ride the back of slower climate change. *Science*, 283, 1108-1109.
 - 25) Tzipermann, E., L. Stone, M.A. Cane and H. Jarosh (1994) El Niño chaos: Overlapping of resonances between the annual cycle and the Pacific ocean-atmosphere oscillator. *Science*, 264, 72.
 - 26) Timmermann, A., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Esch, M. Latif and E. Roeckner (1999) Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, 398, 694-697.
 - 27) Grove, R.H. (1998) Global impact of the 1789-93 El Niño. *Nature*, 393, 318-319.
 - 28) Cole, J. (2001) A slow dance for El Niño. *Science*, 291, 1496-1497.
 - 29) Huber, M. and R. Caballero (2003) Eocene El Niño: Evidence for robust tropical dynamics in the "Hothouse". *Science*, 299, 877-881.
 - 30) Fedorov, A. V. and S. G. Philander (2000) Is El Niño changing? *Science*, 288, 1997-2002.
 - 31) Tarutani, T., R.N. Clayton and T.K. Mayeda (1969) The effect of polymorphism and magnesium substitution on oxygen isotope fractionation between calcium carbonate and water. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 33, 987-996
 - 32) Levitus, S., R. Burgett and T. Boyer (1994) "World Ocean Atlas Volume 3: Nutrients", NOAA Atlas NESDIS, 3, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.
 - 33) Trenberth, K.E. and T. J. Hoar (1996) The 1990-1995 El Niño-Southern Oscillation event: Longest on record. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 57-60.
 - 34) Suzuki, A., H. Kawahata, H. Kan, Y. Tanimoto and A. Edward. Coral oxygen isotope record of ENSO-related environmental variability in Chuuk Atoll, the north equatorial Pacific. (to be submitted.)
 - 35) Inoue, M., A. Suzuki, M. Nohara, H. Kan, A. Edward and H. Kawahata (2004) Coral skeletal tin and copper concentrations at Pohnpei, Micronesia: possible index for marine pollution by toxic anti-biofouling paints. *Environmental Pollution*, 129, 399-407.
 - 36) Suzuki, A., M.K. Gagan, P. De Deckker, A. Omura, I. Yukino and H. Kawahata (2001) Last Interglacial coral record of enhanced insolation seasonality and seawater ^{18}O enrichment in the Ryukyu Islands, northwest Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3685-3688.
 - 37) Quinn, T.M., F.W. Taylor and T.J. Crowley (1993) A 173 year stable isotope record from a tropical South Pacific coral. *Quat. Sci. Rev.*, 12, 407-418.
 - 38) Heiss, G. A. (1994) Coral reefs in the Red Sea: Growth, production and stable isotopes. *GEOMAR Report*. 32, 1-141.

(受付2004年3月16日、受理2004年6月28日)