

# サンゴ骨格による過去400年間の太平洋熱帯域の気候復元

鈴木 淳<sup>1)</sup>・川幡 穂高<sup>1, 2)</sup>

## 1. はじめに

サンゴ骨格は多様な古環境記録を保持した優れた試料である。Porites属など塊状のサンゴ群体の骨格に見られる年輪は、長い期間にわたって高い時間分解能で古気候記録の復元が可能である。低緯度海域のサンゴ記録はエルニーニョ・南方振動(ENSO)やアジアモンスーンなどの過去の気候変動の理解に貢献することが期待される。本論では、太平洋熱帯海域を中心に、過去300-400年間の環境変動について貴重な情報を提供したいいくつかの長尺サンゴコアの酸素同位体比記録を紹介する。また、サンゴ骨格について酸素同位体比分析とSr/Ca比温度計を組み合わせ、過去の水温と水収支(降水、蒸発や中深層水の湧昇など)を同時に復元する手法が最近開発された。今後これは、サンゴを用いた古気候復元の重要な方法となろう。

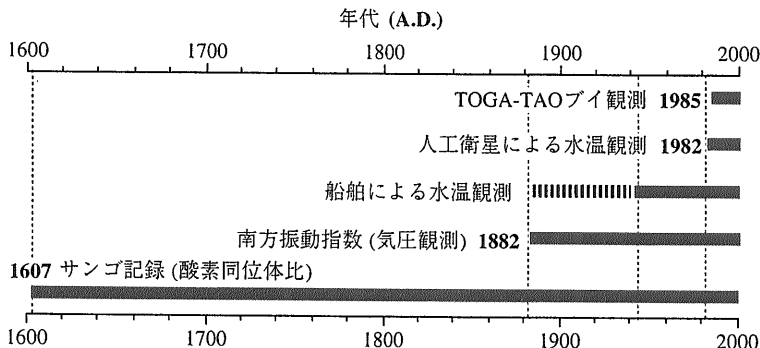
## 2. 測器による観測の限界

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℃増加し、平均海面が18cm上昇

していることを示している(Thomson, 1995; Douglas, 1991)。1970年代以降、太平洋では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(Nitta and Yamada, 1989; Trenberth, 1990)。また、1990年から1995年に掛けては、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。地球環境の変化は現実のものとなりつつある。この危機感を背景に、気候変動システムの解明をめざして赤道太平洋域を中心に、TOGA-TAOブイ(International Tropical Ocean Global Atmosphere program - Tropical Atmosphere/Ocean array; Hayes *et al.*, 1991)や人工衛星による表層水温観測(Reynolds and Smith, 1994)をはじめとする総合的な観測体制が近年強化されている(第1図)。エルニーニョおよびENSO変動の詳細については本誌の谷本(1998)を参照されたい。

しかし、数十年から100年スケールの気候変化が、人為的な二酸化炭素の放出に伴う温暖化現象の一環であるのか、あるいは自然の長期的な変動現象の一部であるのかを、短期間の観測データから判断することは難しい。

赤道太平洋域の総合的な観測体制が整備される



第1図 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のものを示した(Dunbar *et al.*, 1994)。

1) 地質調査所 海洋地質部

2) 東北大学大学院理学研究科(連携講座)

キーワード：サンゴ、酸素同位体比、Sr/Ca比、海水温、塩分、西太平洋暖水塊、エルニーニョ、ENSO

以前の ENSO 現象の研究は、船舶による水温観測のデータを用いることになる。測器による水温測定記録は 1850 年代まで遡るものの、精度の高い海域は島嶼部および商船航路上の一部に限られ、それも 1950 年以降のたかだか 50 年間ほどである。それ以前の ENSO 現象の研究には、南方振動指数 (Southern Oscillation Index; SOI) が有用である。海洋の現象であるエルニーニョと密接な関係にある南方振動は、インドネシア付近と赤道南太平洋の気圧に認められる現象であって、オーストラリア北部のダーウィンの気圧と南太平洋にタヒチの気圧が逆相関するという特徴を持つ。タヒチの気圧からダーウィンの値を差し引いた南方変動指数の偏差が数ヶ月にわたり負の値を取るとエルニーニョ (ENSO 変動の Warm Episode) が起きていると認識されることが多い。しかし、これらの陸上の気圧観測も 1880 年代以前は記録がない。

このような状況の中で、サンゴ年輪記録には大きく 2 つの可能性が期待されている。まず第一に、南方振動指数でエルニーニョと推定された時期に実際、水温変動を伴う現象が起きていたかどうかを明らかにすることである。サンゴは測器記録の乏しい海側の代弁者となる。そして第二に、南方振動指数も存在しない 1880 年以前の ENSO サイクルを捉えることである。19 世紀以前の気候を知るためには、サンゴや樹木の年輪、歴史文書などの気候指標 (プロキシ) によるしかないのである。

### 3. 古気候プロキシとしてのサンゴ年輪の酸素同位体比記録

サンゴの骨格は、高密度部分と低密度部分が交互に重なり、これで 1 年の年輪を形成している。年代が解かりやすいことは、古気候を復元する際に有利である。太平洋インド域では *Porites* 属が、また大西洋域では *Montastrea annularis* が、直径 2–3 m に及ぶ大きな群体に成長し、数百年の年輪を有する。また、年間の成長速度は通常 5–20 mm の範囲にあって、これは微小試料を採取して月単位さらには週単位で古気候を復元できる可能性をもつ。サンゴの骨格は炭酸カルシウムできていても古環境解析の点で有利である。骨格はサンゴ体液や海水中から各種の元素や有機物を取り込み、こ

れらはそれぞれ特定の環境条件に規定されている可能性がある (岡井, 1998 ほか)。

サンゴ骨格からは、いままで多くの気候のプロキシが見いだされている。その中でも、炭酸カルシウム骨格の酸素・炭素同位体比は最も頻繁に測定される項目であり、特に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 (Weber and Woodhead, 1972 ほか)。骨格の酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) 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 ( $T$  (°C)) に依存する (McConnaughey, 1989)。

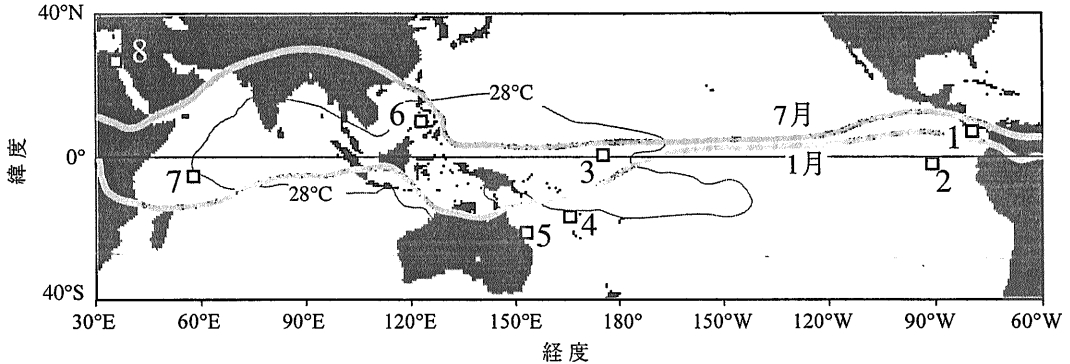
$$T \text{ (°C)} = 2.84 - 4.78 (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) \quad (1)$$

ここで、酸素同位体比は、標準物質 PDB (Pee Dee Belemnite) に対する千分偏差として定義されている。(1) 式は太平洋の *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。骨格の酸素同位体比は原理的に表層水温と海水の酸素同位体組成の変化の双方の影響を受けている。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、幸運なことに、熱帯域で卓越する ENSO 変動は、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。

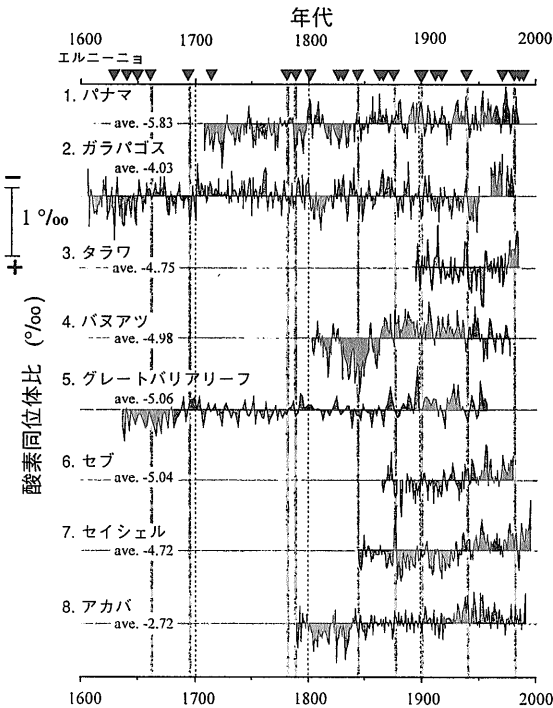
### 4. 長尺サンゴ試料と ENSO 変動

現在までのところ、太平洋では 6 地点から、インド洋では 2 地点から約 100 年以上のサンゴの酸素同位体比記録が報告され、ENSO 現象との対応を中心に議論されている (第 2 図)。ガラパゴス諸島とグレートバリアリーフから得られたサンゴ試料は 1600 年代初頭まで遡ることができた (第 3 図; Dunbar et al., 1994; Druffel and Griffin, 1993)。

まず、南方振動指数とサンゴ記録が対比可能な 1880 年以降について、典型的な ENSO パターンを



第2図 インド洋および太平洋における長尺サンゴコア採取地点. 各地点番号の詳細を以下に示す. 1. パナマ・チリキ湾 (7° 59' S, 82° 3' W, Linsley *et al.*, 1994), 2. ガラパゴス諸島ウルピナ湾 (0° 24.52' S, 91° 14.04' W, Dunbar *et al.*, 1994), 3. タラワ (1° N, 172° E, Cole and Fairbanks, 1990), 4. バヌアツ (15° S, 167° E, Quinn *et al.*, 1993), 5. グレートバリアリーフ・アブラハムリーフ (22° 06' S, 153° 00' E, Druffel and Griffin, 1993), 6. フィリピン・セブ島 (10° 17' N, 124° E, Pätzold, 1986), 7. セイシェル (4° 36.97' S, 55° E, Charles *et al.*, 1997), 8. アカバ (29° 26' N, 34° 58' E, Heiss, 1994). 図には, 年平均水温28°Cの海域を示した. このうち太平洋域に広がる部分が西太平洋暖水塊 (WPWP) である. また, 1月および7月における熱帯収束帯 (ITCZ) の位置も示した.



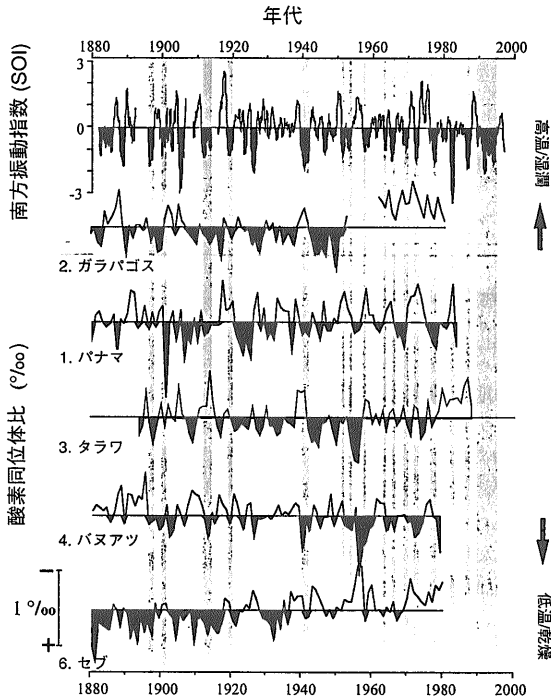
第3図

太平洋およびインド洋における長尺サンゴコアの酸素同位体比記録. サンゴ試料の詳細については第2図を参照のこと. 地点番号2, 3, 4, 5, 7, 8の分析記録はIGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology, NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/paleo/coral/](http://ftp.ngdc.noaa.gov/paleo/coral/)) による. 酸素同位体比は1年毎の平均値をグラフに示した. また分析期間全体の平均値を図左端に記した. 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と考えられる. 強いエルニーニョが発生した期間をハッチで示した. 各地点のサンゴ種名, 採取水深, および分析期間を以下に示す. 1. パナマ・チリキ湾 (*Porites lobata*, 3m, 1708-1984), 2. ガラパゴス諸島ウルピナ湾 (*Pavona clavus* and *P. gigantea*, 1607-1981), 3. タラワ (*Hydnophora microconos*, 2-4m, 1893-1989), 4. バヌアツ (*Platygyra lamellina*, <1m, 1806-1979), 5. グレートバリアリーフ・アブラハムリーフ (*Porites australiensis*, 1635-1957), 6. フィリピン・セブ島 (*Porites lobata*, 2m, 1859-1980), 7. セイシェル (*Porites lutea*, 7m, 1846-1995), 8. アカバ (*Porites* spp., 1m, 1788-1992).

サンゴ記録に探そう(第4図). Cook (1995)は, ガラパゴス諸島・ウルピナ湾のサンゴ記録から得られた表層水温と, グレートバリアリーフのアブラハムリーフのサンゴの酸素同位体比について, 数十年にわたる逆相関関係があることを指摘している. この結果は, 東部太平洋の表層水温を上昇させ, 同

時に北東オーストラリアで干魃とわずかな低温化をもたらすエルニーニョの状態と一致する.

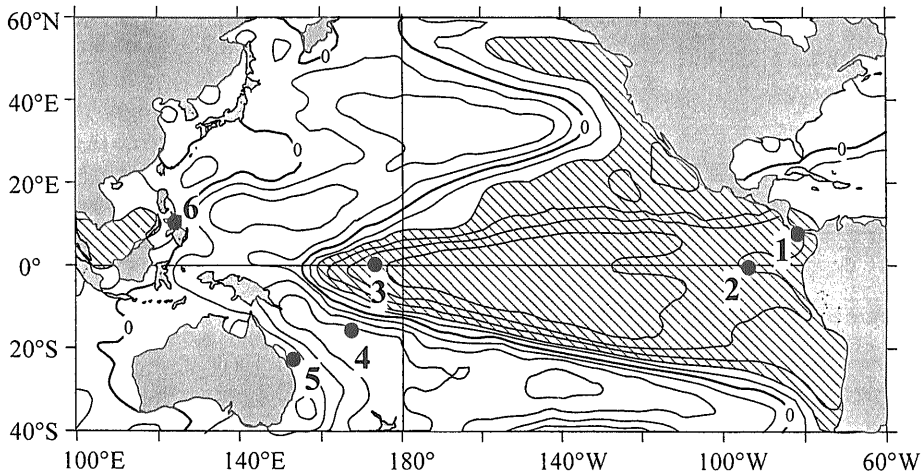
タラワ環礁のサンゴ記録の1950年代にみられる顕著な低温小雨期間は, 微妙なずれがあるもののバヌアツの記録でも同じような傾向が認められる. そしてタラワの低温/小雨期はフィリピン・セブの高



第4図 1880年以降の南方振動指数(SOI)と太平洋における長尺サンゴコアの酸素同位体比記録。南方振動指数の負へのシフトはエルニーニョ(Warm Episode)に、正の方向への変動はラニーニャ(Cold Episode)に相当する。エルニーニョが発生した期間をハッチで示した。

温/多雨期とよく対応している。これは、ENSO変動による西太平洋暖水塊(Western Pacific Warm Pool; WPWP)やインドネシア低圧帯の移動と関連している。エルニーニョが発生し、高水温域が東方に拡大するとインドネシア低圧帯も東に移動しタラワ環礁がある中部赤道太平洋域に多くの降水をもたらす(Cole et al., 1993)。ラニーニャ期(ENSO変動のCold Episode)にインドネシア低圧帯が太平洋西端域に停滞すると、近傍のフィリピンでは降水が多くなるが、中部太平洋では降水量が減少する。

1950年以降の太平洋における海面水温の変動と南方振動指数の相関関係を第5図に示した(Trenberth and Hoar, 1996)。赤道上の東経160°付近から東方にエルニーニョ期に水温が上昇する海域が広がっている。この海域は、非エルニーニョ期に赤道を東から西に延びる冷水帯(Cold Tongue)に対応している。それを取り囲むように南・北太平洋の中緯度から西太平洋低緯度に掛けて、エルニーニョの際に水温の低下が見られる海域がある。南シナ海南部にも、エルニーニョの際に水温が上昇する海域が分布している。大局的に見ると、ガラパゴスとタラワ、フィリピン・セブのサンゴ記録は、エルニーニョ期に水温が上昇する海域の特徴を代表しており、一方、グレートバリア



第5図 南方振動指数の月平均値と月平均海面水温アノマリの相関値の分布。Trenberth and Hoar (1996)より。1950年から1994年までの記録からの計算値であり、相関係数0.3以上の正相関を示す海域にはドットが、また、-0.3以上で逆相関を示す海域には斜線のハッチが施されている。正相関の海域(ドット)はエルニーニョ時に水温が低下する海域であり、逆相関の海域(斜線)は水温が上昇する海域である。太平洋における長尺サンゴコアの採取地点を番号で示した(第2図参照)。

リーフとバヌアツのサンゴ記録は、エルニーニョ期に水温が低下する海域の特徴によく対応している。

東部太平洋では、パナマのチリキ湾の酸素同位体比は、200年間にわたって、ガラパゴス諸島のウルピナ湾のデータと逆相関を示している。これは、エルニーニョが一般的にガラパゴス諸島周辺の表層水温を上昇させ、パナマ周辺の中部アメリカでは相対的に干魃を引き起こすという気象学的な観測と一致する(Dunbar *et al.*, 1995)。パナマもエルニーニョの際に水温が上昇する海域であるが、雲量が多く降水をもたらす熱帯収束帯(Intertropical Convergence Zone; ITCZ)に近く、ENSO変動は水温よりもむしろ降水量の変化として現われる。

このように、サンゴ記録にみられる地域毎の酸素同位体イベントや変動パターンから、西太平洋暖水塊(WPWP)、東部赤道太平洋の冷水帯(Cold Tongue)、熱帯収束帯(ITCZ)などの気候要素の変動を推測することができる。また、これらのサンゴ記録は、ENSOタイプの気候変動が長い時間スケールにわたって起きてきたことを示すものである。

サンゴ記録は、過去の大気海洋変動の周期性についても情報を提供することができる。ガラパゴス諸島のウルピナ湾では、過去に遡るに伴い、ENSOや10年スケールの変動が集中する期間が、1800年代中期で増加する傾向を示し、再び1700年代中期でも同じように増加傾向を示す。これは、赤道太平洋の大気-海洋システムに大きな変化が起きていることを示唆する(Dunbar *et al.*, 1994; Knutson *et al.*, 1997)。インド洋セイシエルのサンゴ酸素同位体記録の周波数解析によると、ENSO変動にも関係する5.3年と3.5年周期成分については、20-40年スケールでの変動が顕著である(Charles *et al.*, 1997)。

インド洋のセイシエルは、南緯4°で緯度的にはENSOの影響を強く受ける場所に位置していると同時に、周辺の海流系はアジア・インドモンスーンの影響も強く受けており、ENSOとアジアモンスーンの相互作用を検討するために適した海域である(Charles *et al.*, 1997)。セイシエルのサンゴ記録には、アジアモンスーンの特徴である2年周期変動(Tropical biennial oscillation; Meehl, 1994)が認められた。南アジアでは、強いモンスーンと弱いモンスーンが交互に繰り返す傾向があり、顕著な強ま

り・弱まりは、太平洋でそれぞれエルニーニョとラニーニャと対応するとも考えられている(Webster, 1995)。

## 6. サンゴ記録のバリデーション

第3図において目を引くのは、多くのサイトで長期的に酸素同位体比が低下していく傾向である。これは、比較的赤道から離れて位置するフィリピンのセブ島、グレートバリアリーフのアブラムリーフ、およびパナマのチリキ湾から採取されたサンゴで明瞭であり、表層水温が上昇するかあるいは塩分が低下していることになる。逆に、ガラパゴス諸島のウルピナ湾では、酸素同位体比がより大きくなる傾向にあり、近年低温化が起きていることを示す。これは近年のエルニーニョの多発傾向と食い違っている。インド洋セイシエルでも同様に150年間のサンゴの酸素同位体比に0.15‰の低下が認められ、水温に換算し0.8℃に相当するが、この海域の測器記録により示されている水温上昇幅よりも少し大きい(Charles *et al.*, 1997)。これらサンゴ記録で認められる傾向は丁寧に検証する必要がある。

タラフ環礁からのサンゴ試料は、外洋側の礁斜面(水深3-5m)から2つの群体を採取して分析し、その合成データについて気候変動との関係を議論している(Cole and Fairbanks, 1990)。一方で、*Porites*属の大型群体は礁湖の内側の方に多く分布する。これらを用いればより長期間の記録を復元できる反面、礁湖の水温や塩分変動が外洋のそれらとは対応していない可能性も懸念される。礁湖からのサンゴ試料の可能性については今後の検討が必要である。サンゴ骨格の長期記録には、気候学的要素以外に、サンゴ群体の成長に伴う生物学的な作用や地域的な影響が入り込みやすい。1地点で1群体だけの解析結果は、このような気候要素以外の影響を受けている可能性が高い。1地点からいくつかの群体を採取して分析し、それを総合して気候変動による変化を抽出することも重要である。また、10年あるいはそれ以上のスケールでのENSO変動を議論する場合、小氷期の存在、火山の噴火の影響などについても考慮が必要となる(Trenberth and Hoar, 1997; Crowley *et al.*, 1997)。

## 7. 水温と塩分変動の分離：Sr/Ca- $\delta^{18}\text{O}$ コンビネーション

骨格の酸素同位体比は、降水量や湧昇による海水の同位体組成の変化が相対的に大きい海域では、単純に温度のみに依存する指標として使うことはできない。そこで、水温のみに依存し、他の生物学的な影響を受けない指標が求められ、最初に注目されたのはストロンチウムである (Smith *et al.*, 1979)。Beck *et al.* (1992) は、同位体希釈法を用いて表面電離型質量分析法 (TIMS) によりサンゴ骨格中のストロンチウム濃度を高精度で分析し、温度指標としての有用性を示した。後に Beck *et al.* (1994) により改訂された Sr/Ca 比と温度との関係式を次に示す。

$10^3\text{Sr/Ca (atomic ratio)} = 10.479 - 0.06245T(^{\circ}\text{C})$  (2)  
骨格の Sr/Ca 比は、塩分への依存性が極めて小さく、ほぼ水温のみに依存する指標と考えられている。また、海水中のストロンチウムおよびカルシウムは停留時間が極めて大きいため、海水中の Sr/Ca 比も全海洋で均一であると予想される。

骨格の酸素同位体比は水温と塩分 (正確には海水の酸素同位体組成) の双方に依存し、Sr/Ca 比は水温のみに依存する。したがって、骨格の Sr/Ca 比から温度を推定し、骨格の酸素同位体比変動から温度による変化分を差し引けば、海水の同位体比組成の変化あるいは塩分の変化を知ることができる (McCulloch *et al.*, 1994)。言い換えれば、式 (1) と式 (2) を、温度と塩分についての連立方程式として解を求めることに相当する。海水の同位体比組成と塩分の関係性を事前に知ることが必要であるが、これはサンゴ試料から水温の変動とともに塩分の変動をも抽出することができる重要なアイデアである。温度-水収支推定法の詳細については Gagan *et al.* (1998)、あるいは鈴木ほか (投稿中) の解説を参照されたい。

## 8. おわりに

エルニーニョ現象は、西太平洋暖水塊に余剰に蓄積された熱量の放出過程と捉えられることもできる。人間活動による大気中の二酸化炭素濃度の増加が、地球のエネルギーバランスに影響を与え、

その結果として西太平洋暖水塊の熱収支にも長期的な変動が生じている可能性がある。しかしながら、太平洋の測器による水温記録は1950年代前半よりも前のものは極めて少ない。熱帯太平洋域の多くの地点からサンゴ年輪を用いて、過去の水温と塩分の変化を復元できるならば、暖水塊および ENSO 現象の長期的変動を明らかにし、熱帯太平洋の気候システムの変動様式と周期に変化があったかどうかについて解答を与えるデータとなろう。過去数百年間のサンゴ記録は、大気海洋変動のモデル研究に新たな制約条件を提起するとともに、現在進行中のプロセス指向の観測研究と総合して、地球の気候変動システムの解明に寄与することが期待される。

謝辞：オーストラリア国立大学地球科学教室の M.K. Gagan 博士ならびに、オーストラリア海洋科学研究所の P.J. Isdale 博士、J.M. Lough 博士にはサンゴ年輪研究全般に渡って貴重な助言を頂いた。

## 文 献

- 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.
- Beck, J. W., Edwards, R. L., Ito, E., Taylor, F. W., Recy, J., Rougerie, F., Joannot, P. and Henin, C. (1994) : Errata to Beck *et al.* (1992), *Science*, 264, 891.
- Charles, C. D., Hunter, D. E. and Fairbanks, R. G. (1997) : Interaction Between the ENSO and the Asian Monsoon in a Coral Record of Tropical Climate. *Science*, 277, 925-928.
- Cole, J. E. and Fairbanks, R. G. (1990) : The southern oscillation recorded in the  $\delta^{18}\text{O}$  of Corals from Tarawa Atoll. *Paleoceanogr.*, 5, 669-683.
- Cole, J. E., Fairbanks, R. G. and Shen, G. T. (1993) : Recent variability in the southern oscillation: isotopic results from a Tarawa Atoll coral. *Science*, 260, 1790-1793.
- Cook, E. R. (1995) : Temperature histories from tree rings and corals. *Climate Dyn.*, 11, 211-222.
- Crowley, T. J., Quinn, T. M., Taylor, F. W., Henin, C., and Joannot, P. (1997) : Evidence for a volcanic cooling signal in a 335-year coral record from New Caledonia. *Paleoceanogr.*, 5, 633-639.
- Douglas, B. C. (1991) : Global sea level rise. *J. Geophys. Res.*, 96, 6981-6992.
- Dunbar, R. B., Wellington, G. M., Colgan, N. W. and Glynn, P. W. (1994) : Eastern Pacific climate variability since 1600 A.D.: stable isotopes in Galapagos corals. *Paleoceanogr.*, 9, 291-315.
- Dunbar, R. B., Linsley, B. K., Cole, J. E. (1995) : Central Pacific Coral Project (CP<sup>2</sup>): North-South transects through the Warm

- Pool, Cool Tongue, ITCZ, and SPCZ. A Community-Based Initiative as a Contribution to PAGES Stream I Objectives. submitted to NSF.
- Druffel, E. R. M. and Griffin, S. (1993) : Large variations of surface ocean radiocarbon: evidence of circulation changes in the south western Pacific. *J. Geophys. Res.*, 98, 20246-20259.
- 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.
- Hayes, S.P., L.J. Mangum, J. Picaut, A. Sumi, K. and Takeuchi (1991) : TOGA-TAO: a moored array for real-time measurements in the tropical Pacific Ocean. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 72, 339-347.
- Heiss, G. A., (1994) : Coral reefs in the Red Sea: Growth, production and stable isotopes. *GEOMAR Report*, 32: 1-141.
- Knutson, T. R., Manabe, S. and Gu, D. (1997) : Simulated ENSO in a global coupled ocean-atmosphere model: Multidecadal amplitude modulation and CO<sub>2</sub> sensitivity. *J. Climate*, 10, 138-161.
- Linsley, B. K., Dunbar, R. B. and Wellington, G. M. (1994) : A coral-based reconstruction of Intertropical Convergence Zone variability over Central America since 1707. *J. Geophys. Res.*, 99, 9977-9994.
- McCannaughey, T. (1989) : <sup>13</sup>C and <sup>18</sup>O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochim. cosmochim. Acta*, 53, 151-162.
- McCulloch, M. T., Gagan, M. K. and Mortimer, G. E. (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.
- Meehl, G.A. (1994) : Coupled land-ocean-atmosphere processes and South Asian monsoon variability. *Science*, 266, 263-267.
- Nitta, T. and Yamada, S. (1989) : Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 375-383.
- 岡井貴司 (1998) : サンゴ年輪中の微量重金属元素で何がわかるか. *地質ニュース*, no.527, 48-52.
- Pätzold, J. (1986) : Temperature and CO<sub>2</sub> changes in tropical surface waters of the Philippines during the past 120 years: record in the stable isotopes of hermatipic corals. *Reports, Geol.-Palaont. Inst. Univ. Kiel*, No. 12.
- Quinn, T. M., Taylor, F. W. and Crowley, T. J. (1993) : A 173 Year stable isotope record from a tropical South Pacific coral. *Quat. Sci. Rev.*, 12, 407-418.
- Reynolds, R. W. and Smith, T. M. (1994) : Improved global sea surface temperature analyses using optimal interpolation. *J. Climate*, 7, 928-948.
- Smith, S. V., Budermeier, R.W., Redalje, R.C. and Houck, J.E. (1979) : Strontium-calcium thermometry in coral skeletons. *Science*, 204, 404-407
- 鈴木 淳・谷本陽一・川幡穂高: サンゴ骨格による古海洋学的情報の復元. *地球化学*, (投稿中).
- 谷本陽一 (1998) : 熱帯太平洋の水温復元の海洋物理学的意義. *地質ニュース*, no.527, 7-12.
- Thomson, D. J. (1995) : The seasons, global temperature, and precession. *Science*, 268, 59-68.
- Trenberth, K. E. (1990) : Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 988-993.
- Trenberth, K. E. and Hoar, T. J. (1996) : The 1990-1995 El Niño-Southern Oscillation event: Longest on record. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 57-60.
- Trenberth, K. E. and Hoar, T. J. (1997) : El Niño and climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 24, 3057-3060.
- Webster, P. J. (1995) : The annual cycle and predictability of tropical coupled ocean-atmosphere system. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 56, 33-55.
- Weber, J. N. and Woodhead, P. M. J. (1972) : Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonate. *J. Geophys. Res.*, 77, 463-473.
- 
- SUZUKI Atsushi and KAWAHATA Hodaka (1998) : Paleoclimatographic Climate from Coral Skeletal Records in the Tropical Pacific.
- 

<受付: 1998年6月12日>