

# サンゴ骨格を用いた古海洋環境の復元

井上 麻夕里<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

サンゴはイソギンチャクなどと同様の腔腸動物門であるが、多数のポリプからサンゴ群体を形成し、外骨格として炭酸カルシウムの骨格を形成する。これが他の腔腸動物との大きな違いであり、サンゴの特質である。そして特に海水温20℃以上の貧栄養塩海域の浅瀬に棲息し、サンゴ礁を構成するサンゴを造礁サンゴと呼ぶ。造礁サンゴのポリプには、細胞内共生の形で共生藻が多数存在し、サンゴはその共生藻による光合成産物をエネルギー源として利用している。サンゴは海水中のカルシウムイオンと炭酸水素イオンを用いて炭酸カルシウムの骨格を形成するので、共生藻の光合成で二酸化炭素が吸収され、周辺海水のpH値が上昇することで炭酸カルシウムの飽和度が増加し、サンゴ骨格の成長はより促進される。またサンゴは骨格を作る際に、カルシウムイオンなどと同時に周辺海水の水

温・塩分などの情報や各種化学成分もその骨格に取り込んでいる。ハマサンゴ属 (Genus *Porites*) のような塊状サンゴでは、サンゴ骨格の成長量は1年に約1~2cmであり、中には直径3~5mにまでも成長する群体もある。このような群体のサンゴ骨格には、骨格の成長期間に応じて、過去数百年間の海水中の各種成分が記録されていると考えられる。

サンゴ群体の上部から骨格柱状試料を採取し、そこから厚さ7mm前後の薄板(スラブ)を切り出し、X線撮影を行ったものが写真1である(第1図)。写真からは高密度と低密度のバンドが交互に生じているのが見てとれる。このような異なったバンドの形成には、海水温や降水量などが関与していることが報告されており、密度の違いは骨格形成時の季節の違いを示していると考えられる (Highsmith, 1979; Lough and Barnes, 1990)。ただし、どのバンドがどの季節に対応しているかについては、いくつかの異なった報告があり、一概には断言できない (Dodge and Brass, 1984; Hudson, 1981 ほか)。いずれにせよ、この2つのバンドを対にして

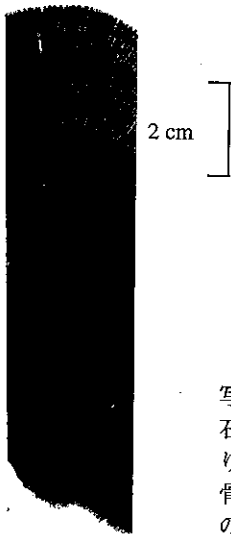
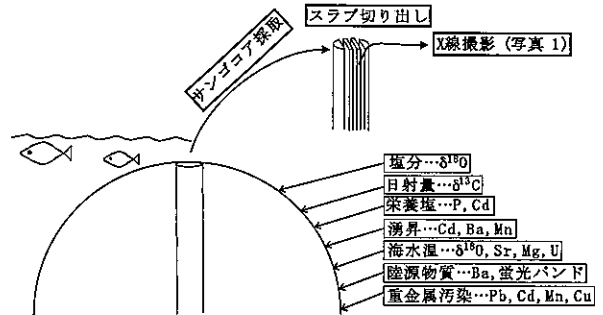


写真1  
石垣島東海岸より採取したサンゴ骨格 (*Porites* sp.) の軟X線写真。



第1図 サンゴ骨格に取り込まれる各種の情報とサンゴ骨格のX線撮影(写真1)までの作業の流れ。サンゴ骨格柱状試料(コア)を掘削の後、コアから薄板(スラブ)を切り出し、写真撮影を行う。

- 塩分... $\delta^{18}O$
- 日射量... $\delta^{13}C$
- 栄養塩...P, Cd
- 湧昇...Cd, Ba, Mn
- 海水温... $\delta^{18}O$ , Sr, Mg, U
- 陸源物質...Ba, 蛍光バンド
- 重金属汚染...Pb, Cd, Mn, Cu

1) 東北大学大学院理学研究科：  
〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉

キーワード：サンゴ骨格、酸素・炭素同位体比、Sr/Cz比、微量元素、古海洋環境復元

年数を数えることができ、サンゴ年輪と言われている。この年輪の成長方向に沿って、海水温や日射量、湧昇、海洋汚染などの間接指標となるものを測定すれば、当時の海洋環境を復元することが可能である。造礁サンゴの中でもこのような明瞭な年輪を刻む塊状サンゴが、古海洋環境の復元には用いられている。

## 2. サンゴ年輪を用いた研究の紹介

これまでに塊状サンゴのサンゴ年輪を用いて、過去数十年～数百年の古海洋環境の復元が行われており、いずれの研究においても各環境因子のプロキシとなるものを年輪に沿って測定するという手法が用いられている。近年ではこの手法を化石サンゴに応用し、各化石サンゴが生息していた当時の古気候復元も行われている。本章では、これまでにサンゴ年輪を用いて行われた古海洋環境復元の研究を特に最近のものに焦点を当てて紹介する。また、これらの研究については、川幡・鈴木(1999)、鈴木ほか(1999)、佐藤・大出(2001)などにも詳しく紹介されている。

### 2.1 骨格中の酸素・炭素同位体比

サンゴ骨格中の酸素同位体比は海水温の良い指標とされている(Weber and Woodhead, 1972ほか)。これまでの研究では過去数十年の観測記録を用いることにより、実際の海水温と骨格中の酸素同位体比の記録が比較され、温度計としての高い精度が確認されている(Gagan *et al.*, 1994; Suzuki *et al.*, 1999)。また近年では太平洋を中心に、長尺サンゴを用いて、測器による観測体制が整う以前の100～400年間の海水温や各地でのエルニーニョの消長とその影響が復元されたり(Dunbar *et al.*, 1994)、化石サンゴの酸素同位体比変化から、過去13万年にわたる氷期間氷期サイクルでのENSO変動とそれに連動した海水温変動や(McCulloch *et al.*, 1999; Tudhope *et al.*, 2001)、最終間氷期における北太平洋での海水中の酸素同位体比変動が復元されている(Suzuki *et al.*, 2001)。

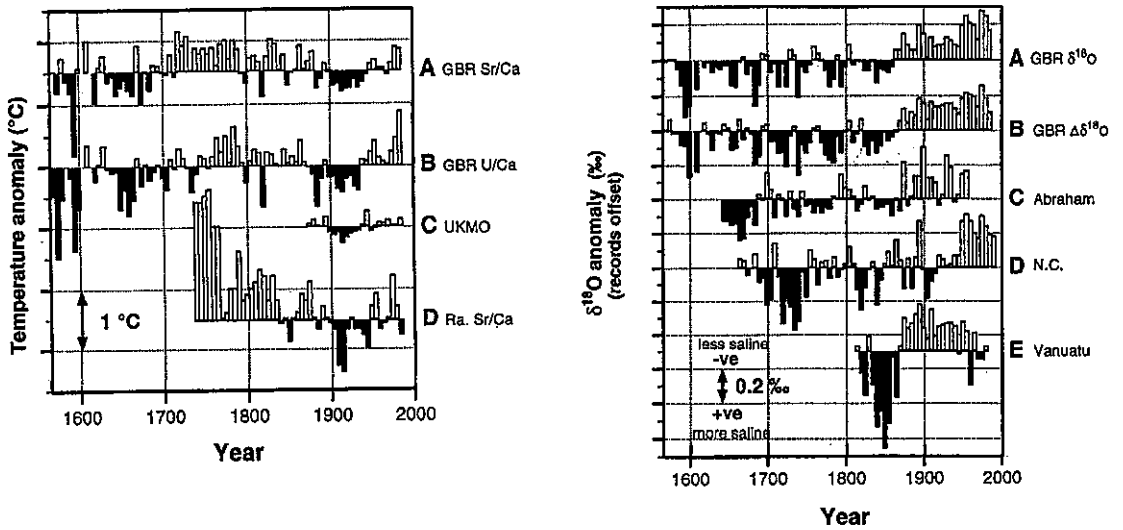
しかし骨格中の酸素同位体比は、表層水温と同様に海水中の酸素同位体比の影響も受ける。海水より軽い酸素同位体比をもたらす降雨は、骨格中の酸素同位体比を軽い方へシフトさせることから、

骨格中の酸素同位体比は降水量やひいては塩分の指標としても用いられる(Tudhope *et al.*, 1995)。水温の上昇も酸素同位体比を負の方向へシフトさせるので、降雨や陸水の影響を受けるサンゴだと、骨格中の酸素同位体比がどちらの指標となっているか判断できない。そこで近年では、海水温のみに依存して変動する骨格中のストロンチウム/カルシウム比(Sr/Ca比)を測定し、酸素同位体比と組み合わせることで、海水温と塩分を分離して復元する試みが行われている(McCulloch *et al.*, 1994)。これについての研究は次節で紹介する。

海水温や海水中の酸素同位体比に依存して変動することが明らかな骨格中の酸素同位体比に対して、炭素同位体比は、特に日射量や雲量の間接指標となることが指摘されている(Fairbanks and Dodge, 1979; McConnaughey, 1989)。これは骨格中の炭素同位体比が、共生藻類や海水中の生物群集による光合成の影響で変動すると考えられているからである。しかし、骨格形成に関わる炭素の反応経路は複雑で、成長時の環境要因やサンゴの代謝に関わる多くの情報に左右されるため、サンゴ骨格中の炭素同位体比に関しては明らかにされていない点が多い。そこで、Vaganay *et al.* (2001)は実験を通して、光と骨格中の炭素同位体比、共生藻類による光合成、呼吸、サンゴの石灰化との相互関係を明らかにした。その結果、光の強度と石灰化、骨格中の炭素同位体比の間に高い相関が認められた。共生藻類は光合成の際に<sup>12</sup>Cを選択的に摂取するが、日射量が多い時には<sup>12</sup>Cと共に<sup>13</sup>Cも摂取し、結果として骨格形成時の炭素同位体比が重い方へシフトする。このことから、Vaganay *et al.* (2001)はサンゴ骨格中の炭素同位体比は日射量の間接指標として有用であると指摘している。

### 2.2 海水温の指標となる骨格中の元素

近年他の環境因子に左右されず、海水温のみを復元するよい指標として骨格中のストロンチウム、マグネシウム、ウラン、ホウ素などが測定されている。特にSr/Ca比は1970年代に水温との相関が提唱されてから(Weber, 1973; Smith *et al.*, 1979)、酸素同位体比に次いで海水温復元の研究が盛んに行われている(Beck *et al.*, 1992; Alibert and McCulloch, 1997ほか)。その後、石垣島のサンゴ骨格からマグネシウム/カルシウム比(Mg/Ca比)



第2図 (左)各地のサンゴ骨格と計測器機を用いた海水温記録の比較。グラフは5年毎の平均値で示している。また、グラフ全体の平均値は1860年から1985年までの記録を用いて算出している。以下に各調査地点を示す。(A)グレートバリアリーフのサンゴ骨格よりSr/Ca比を測定 (Hendy *et al.*, 2002)。キャリブレーションにはAlibert *et al.* (1997)の関係式を用いている。(B)グレートバリアリーフのサンゴ骨格よりU/Ca比を測定 (Hendy *et al.*, 2002)。キャリブレーションにはMin *et al.* (1995)の関係式を用いている。(C)UKMO (U. K. Meterological Office)による西太平洋 (20° N to 20° S, 120° E to 170° W)の海水温記録。(D)ラロトンガ (21.5° S, 159.5° W)のサンゴ骨格よりSr/Ca比を測定 (Linsley *et al.*, 2000)。(右)サンゴ骨格中の酸素同位体比記録。グラフは5年毎の平均値で示している。またグラフ全体の平均値は、コア全長の分析における測定値から算出した値を用いている。サンゴ試料採取地点を以下に示す。(A)グレートバリアリーフ (Hendy *et al.*, 2002)。(B)グレートバリアリーフの酸素同位体比変動 (A)から、骨格中のSr/Ca比から見積もられた海水温による変化分を差し引いた値。(C)グレートバリアリーフ・アブラハムリーフ (22° S, 153° E)。(D)ニューカレドニア (22° S, 166° E)。(E)バヌアツ (15° S, 167° E)。

(Mitsuguchi *et al.*, 1996)が、ニューカレドニアとタヒチのサンゴ骨格についてウラン/カルシウム比 (U/Ca) 比も水温の指標となることが報告された (Min *et al.*, 1995)。最近では、これらの元素がまとめて測定され、各元素と海水温との関係がより詳細に議論されている (Sinclair *et al.*, 1998; Falloon *et al.*, 1999; Wei *et al.*, 2000)。

2.3 骨格中の酸素・炭素同位体比, Sr/Ca比の組み合わせ

上述のように、サンゴ骨格中の酸素同位体比は、水温と海水中の酸素同位体比の双方を反映し、骨格中のSr/Ca比, Mg/Ca比, U/Ca比は海水温のみに依存する。このことから、両者を測定し、酸素同位体比からSr/Ca比などで推定された海水温による変化分を差し引けば、海水中の酸素同位体比変動を復元することが可能である。海水中の酸素同位体比は、降雨量, 蒸発量, 塩分の指標として用いられる。

Hendy *et al.* (2002)は、グレートバリアリーフか

ら8本のコアを採取し、海水温の指標としてSr/Ca比, U/Ca比を測定し、塩分の指標としてSr/Ca比と酸素同位体比の温度分の差を算出して、過去420年間の海水温, 塩分変動を明らかにした。測定結果から、南太平洋西部では小氷期の終焉である1870年以降、急激に塩分, 海水温ともに低下していることが分かった(第2図)。これは、小氷期の最終期において氷床が後退し、小氷期に強大であった大気循環が弱まったことに起因しているのではないかと示唆している。また、Gagan *et al.* (1998)は同じくグレートバリアリーフより、現世と化石サンゴ (5,350yr. B. P.)の骨格中の酸素同位体比, Sr/Ca比をそれぞれ測定し、5,350年前は現在に比べ海水温が1°C高く、それに伴い海水の蒸発量が多かったことを示した。Watanabe *et al.* (2001)は、カリブ海, プエルトリコ島の南西部より3mのサンゴ柱状試料 (*Montastrea faveolata*)を採取し、骨格中の酸素同位体比, Mg/Ca比を測定、カリブ海において小氷期 (1699-1703)は現在より海水温が

2°C低く、また海水中の塩分の季節変動が大きかったことを明らかにした。

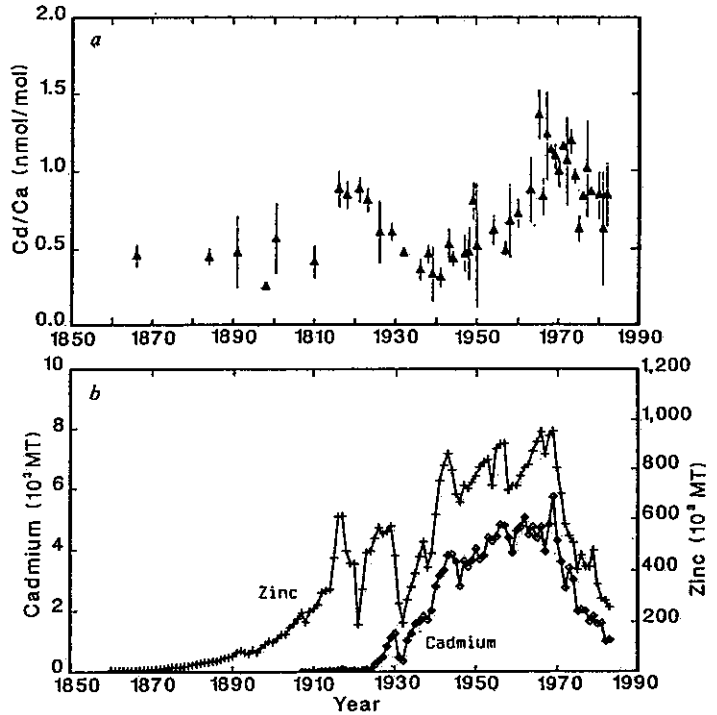
Sr/Ca比などと同様に、炭素同位体比を日射量や骨格の成長量の指標として用い、酸素同位体比と組み合わせることで、海水温、日射量、降水量、懸濁物量などの季節性や地域性が明らかにされてきている(Swart *et al.*, 1996)。例えば Chakraborty and Ramesh (1997)は、アラビア海東部ラクシャデーブ島より *Porites compressa* のコアを採取し、過去25年間にわたる骨格中の酸素・炭素同位体比を月単位の分解能で測定した。その結果、夏期モンスーン時の海水の濁度の上昇に応じた骨格中の炭素同位体比の低下と、地域的な湧昇に対応した酸素同位体比の低下が認められ、骨格中の酸素・炭素同位体比がモンスーン変動と密接に関わっていることが明らかにされた。

#### 2.4 骨格中の微量元素, 希土類元素, 蛍光バンド

1980年代以降、酸素・炭素同位体比やSr/Ca比, Mg/Ca比などに加え、分析が難しいとされていた重金属をはじめ、骨格中の各種微量元素の測定が行われるようになってきた。

骨格中のカドミウム/カルシウム比(Cd/Ca比)(Shen *et al.*, 1987; Linn *et al.*, 1990)、バリウム/カルシウム比(Ba/Ca比)(Lea *et al.*, 1989; Fallon *et al.*, 1999)、マンガン/カルシウム比(Mn/Ca比)(Linn *et al.*, 1990; Shen *et al.*, 1991)は、湧昇の有無や強弱を示す指標になると言われている。海水中のCdとBaは栄養塩が多く冷たい深層海水に多く含まれており、逆にMnは表層海水に多く深層では少ないため、Cd/Ca比, Ba/Ca比は湧昇と正の相関をMn/Ca比は逆相関をそれぞれ示す。またバリウムは、陸源物質の流入により濃度が上昇することが報告されており、降水量や河川流量の変化を捕らえる指標となることが指摘されている(Shen and Sanford, 1990)。

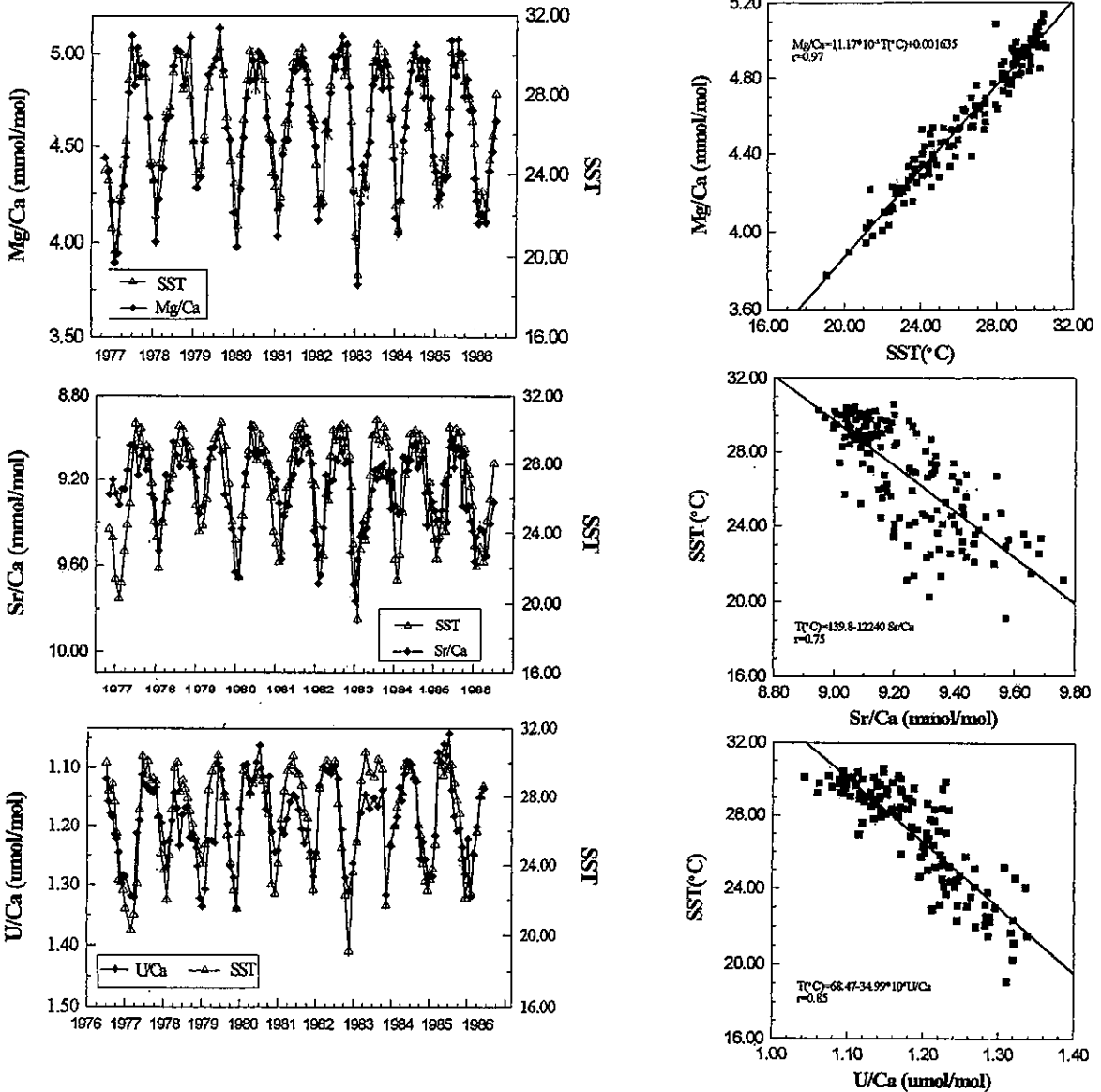
骨格中の重金属元素はこのような自然現象を反映するのみでなく、人為活動の影響による海洋汚



第3図 工業活動の指標としてのサンゴ骨格中のカドミウム濃度の変動。(a)バミューダ・ノースロックのサンゴ骨格中(*Diploria strigosa*)のCd/Ca比変動。測定は、ほぼ全ての試料に関して3度の繰り返し測定を行っている(誤差:±1σ)。(b)1850年から現在までの米国における亜鉛の生産量と、亜鉛生産に伴うカドミウムの排出量の変動。

染も記録している。Shen *et al.* (1987)は北米における亜鉛生産に伴う大気中へのカドミウム排出の歴史とサンゴ骨格中のCd変動が類似していることを報告しており(第3図), Shen and Boyle (1987; 1988)やDodge and Gilbert (1984)は、北半球での工業化に伴い骨格中の鉛濃度が上昇していることを示している。このようにサンゴ骨格中の微量元素は、自然環境的・人為的要因の双方の指標となり得るが、分析法が研究者によって大きく違うなど様々な問題点を抱えているのが現状である(岡井, 1998; 井上ほか, 2002)。重金属元素以外にも、栄養塩の指標としてリンが(Dodge *et al.*, 1984; Kumarsingh *et al.*, 1998)、陸源物質の沿岸海域への流入の指標として希土類元素が骨格の成長方向に沿ってそれぞれ測定されている(Sholkovitz and Shen, 1995; Fallon *et al.*, 2002)。

一方、サンゴ骨格に紫外線を照射すると、明るい黄緑色蛍光を呈する部分があり、蛍光バンドと



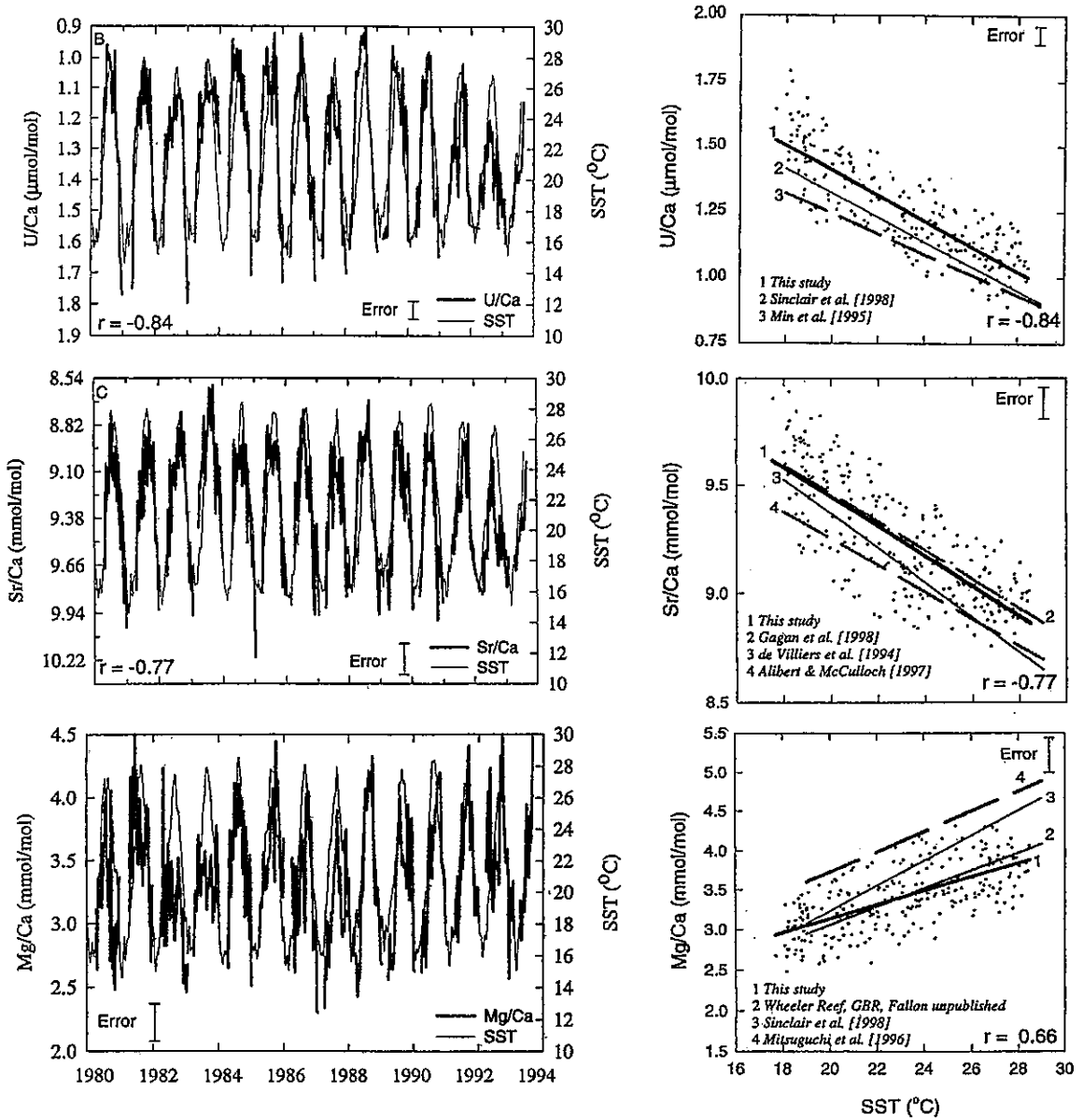
第4図 (左)海南島サンヤ湾のサンゴ骨格中のMg/Ca, Sr/Ca, U/Ca比変動とサンヤ湾から90km西のインハイにおける海水温変動。(右)サンゴ骨格中のMg/Ca, Sr/Ca, U/Ca比と海水温の関係。

呼ばれている。蛍光バンドは河川流量の増大に伴う陸源物質(フルボ酸, フミン酸)の存在により発色強度が増すことから, 降水量, 河川流量変化の指標になるとされている(Klein *et al.*, 1990; Isdale *et al.*, 1998)。

### 3. 骨格中の元素に関する問題点

Fallon *et al.* (1999)は高知県尻貝湾から採取し

たハマサンゴ試料より, B/Ca比, Mg/Ca比, Sr/Ca比, U/Ca比を測定, それぞれの元素の季節変動を明らかにした。その結果, Sr/Ca比とU/Ca比は海水温との相関が認められたが(第4図), B/Ca比とMg/Ca比は季節変動が大きく, また季節とは無関係な変動もみられた。そしてホウ素とマグネシウムに関しては, 単純に水温のみに依存して骨格に取り込まれていないのではないかと指摘している。これに対して海南島から同じくハマサンゴ



第5図 (左) 高知県尻貝湾のサンゴ骨格中のU/Ca, Sr/Ca, Mg/Ca比変動と尻貝湾から2-3km南に位置する古満目における海水温変動。(右) サンゴ骨格中のU/Ca, Sr/Ca, Mg/Ca比と海水温の関係。

アを採取し、骨格中のMg/Ca比, Sr/Ca比, U/Ca比を測定したWei *et al.* (2000)では、Mg/Ca比のみが海水温の指標になり得ると報告された(第5図)。Wei *et al.* (2000)は海南島のように降水量が多く、陸域からの堆積物等の流出が多い地域では、Mg/Ca比が古気候復元には最も適していると指摘している。しかし、骨格中のMgについては、前処理を行うと濃度が上昇することが報告されており

(Mitsuguchi *et al.*, 2001)、海水温の指標としてMgを用いる場合、分析に関して注意が必要である。

また、骨格中のSr/Ca比が海水温のみでなく、共生藻 (Cardinal *et al.*, 2001; Cohen *et al.*, 2002)や再結晶など続成作用の影響 (Enmar *et al.*, 2000)を受けて変動しているとの報告や、骨格中でのストロンチウムの不均一性により、正確に海水温を反映していないのではないかと指摘もある (Allison *et*

al., 2001). このように海水温の最も良い指標として測定されてきたサンゴ骨格中のSr/Ca比に関して、近年はその精密性に対する疑問が浮上してきている。さらに、骨格中の微量元素に関しても、海洋環境や人間活動についての指標性を持っているにもかかわらず、骨格中での各種元素の存在状態など、明らかにされていない点がいまだ残されている。

今後、共生藻も含めた生物としてのサンゴと、結晶(アラレ石)としてのサンゴ骨格の双方の視点から、分析を重ね、サンゴ骨格中に元素が取り込まれるメカニズムを探究し、各環境因子の指標としての精密性、信頼性を高めていくことが望まれる。

謝辞：今回、投稿の機会を与えて頂いた東北大学大学院理学研究科川幡穂高教授、ならびに本原稿改善のための貴重な助言を頂いた産総研鈴木 淳博士、岡山大学教育学部菅 浩伸博士に心より感謝致します。

#### 引用文献

- Alibert, C. and McCulloch, M. T. (1997) : Strontium/calcium ratios in modern Porites corals from the Great Barrier Reef as a proxy for sea surface temperature; Calibration of the thermometer and monitoring of ENSO. *Paleoceanogr.* 12, 345-363.
- Allison, N., Finch, A. A., Sutton, S. R. and Newville, M. (2001) : Strontium heterogeneity and speciation in coral aragonite: Implication for the strontium paleothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65, 2669-2676.
- 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.
- Cardinal, D., Hamelin, B., Bard, E. and Patzold, J. (2001) : Sr/Ca, U/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  records in recent massive corals from Bermuda: relationship with sea surface temperature. *Chem. Geol.*, 176, 213-233.
- Chakraborty, S. and Ramesh, R. (1997) : Environmental significance of carbon and oxygen isotope ratios of banded corals from Lakshadweep, India. *Quat. Int.*, 37, 55-65.
- 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.
- de Villiers, S., Shen, G. T. and Nelson, B. K. (1994) : The Sr/Ca-temperature relationship in coralline aragonite: Influence of variability in (Sr/Ca) seawater and skeletal growth parameters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 197-208.
- Dodge, R. E. and Brass, G. W. (1984) : Skeletal extension, density and calcification of the reef coral, *Montastrea annularis*: St. Croix, U. S. Virgin Islands. *Bull. Mar. Sci.*, 34, 288-307.
- Dodge, R. E., Jickells, T. D., Knap, A. H., Boyd, S. and Bak, R. P. M. (1984) : Reef-building coral skeletons as chemical pollution (phosphorus) indicators. *Mar. Pollut. Bull.* 15, 178-187.
- Dodge, R. E. and Gilbert, T. R. (1984) : Chronology of lead pollution contained in banded coral skeletons. *Mar. Biol.* 82, 9-13.
- Dunbar, R. B., Wellington, G. M., Colgan, M. W. and Glynn, P. W. (1994) : Eastern Pacific sea surface temperature since 1600 A. D.: The  $\delta^{18}\text{O}$  record of climate variability in Galapagos corals. *Paleoceanogr.*, 9, 291-315.
- Enmar, R., Stein, M., Bar-Matthews, M., Sass, E., Katz, A. and Lazar, B. (2000) : Diagenesis in live corals from the Gulf of Aqaba. I. The effect on paleo-oceanography tracers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 3123-3132.
- Fairbanks, R. G. and Dodge, R. E. (1979) : Annual periodicity of the  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in the coral *Montastrea annularis*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1009-1020.
- Fallon, S. J., McCulloch, M. T., van Woesik, R. and Sinclair, D. J. (1999) : Corals at their latitudinal limits: laser ablation trace element systematics in Porites from Shirigai Bay, Japan. 172, 221-238.
- Fallon, S. J., White, J. C. and McCulloch, M. T. (2002) : Porites corals as recorders of mining and environmental impacts: Misima Island, Papua New Guinea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66, 45-62.
- 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.
- 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 Age. *Science*, 295, 1511-1514.
- Highsmith, R. C. (1979) : Coral growth rates and environmental control of density banding. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 37, 105-125.
- Hudson, J. H. (1981) : Growth rates in *Montastrea annularis*: a record of environmental change in Key Largo Coral Reef Marine Sanctuary, Florida. *Bull. Mar. Sci.*, 31, 444-459.
- 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-。地球科学, 36, 65-79.
- Isdale, P. J., Stewart, B. J., Tickle, K. S. and Lough, J. M. (1998) : Palaeohydrological variation in a tropical river catchment: a reconstruction using fluorescent bands in corals of the Great Barrier Reef, Australia. *Holocene*, 8, 1-8.
- 川幡穂高・鈴木 淳 (1999) : サンゴ年輪を用いた高時間解像の環境解析 - アジアモンスーン, ENSOに伴う海洋表層環境の復元-。海の研究 8, 141-156.
- Klein, R., Loya, Y., Isdale, P. J. and Susic, M. (1990) : Seasonal rainfall in the Sinai Desert during the late Quaternary inferred from fluorescent bands in fossil corals. *Nature*, 345, 145-147.
- Kumarsingh, K., Laydoo, R., Chen, J. K. and Siung-Chang, A. M. (1998) : Historic records of phosphorus levels in the reef-building coral *Montastrea annularis* from Tobago, West Indies. *Mar. Pollut. Bull.* 36, 1012-1018.
- Lea, D. W., Shen, G. T. and Boyle, E. A. (1989) : Coralline barium records temporal variability in equatorial Pacific upwelling. *Nature* 340, 373-376.
- Linn, L. J., Delaney, M. L. and Druffel, E. R. M. (1990) : Trace metals in contemporary and seventh-century Galapagos coral: Records

- of seasonal and annual variations. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 387-394.
- Linsley, B. K., Dunbar, R. B., Wellington, G. M. and Mucciarone, D. A. (1994) : A coral-based reconstruction of intertropical convergence zone variability over central America since 1707. *J. Geophys. Res.*, 99, 9977-9994.
- Lough, J. M. and Barnes, D. J. (1990) : Possible relationship between environmental variables and skeletal density in a coral colony from the central Great Barrier Reef. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 134, 221-241.
- Min, G. R., Edwards, R. L., Taylor, F. W., Recy, J., Gallup, C. D. and Beck, J. W. (1995) : Annual cycles of U/Ca in coral skeletons and U/Ca thermometry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 2025-2042.
- Mitsuguchi, T., Matsumoto, E., Abe, O., Uchida, T. and Isdale, P. J. (1996) : Mg/Ca thermometry in coral skeletons. *Science*, 274, 961-963.
- Mitsuguchi, T., Uchida, T., Matsumoto, E., Isdale, P. J. and Kawana, T. (2001) : Variations in Mg/Ca, Na/Ca, and Sr/Ca ratio of coral skeletons with chemical treatments: Implications for carbonate geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65, 2865-2874.
- McConnaughey, T. (1989) :  $^{13}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 151-162.
- McCulloch, M. T., Tudhope, A. W., Esat, T. M., Mortimer, G. E., Chappell, J., Pillans, B., Chivas, A. R. and Omura, A. (1999) : Coral record of Equatorial sea-surface temperatures during the penultimate deglaciation at Huon Peninsula. *Science*, 283, 202-204.
- McCulloch, M. T., Gagan, M. K., Mortimer, G. E., Chivas, A. R. and Isdale, P. J. (1994) : A high-resolution Sr/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982-1983 El Nino. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 12, 2747-2754.
- 岡井貴司 (1998) : サンゴ骨格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.
- 佐藤悠介・大出 茂 (2001) : サンゴ骨格のSr/Ca温度計. *地球化学* 35, 1-11.
- Sholkovitz, E. and Shen, G. T. (1995) : The incorporation of rare earth element in modern coral. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 2749-2756.
- Shen, G. T., Boyle, E. A. and Lea, D. W. (1987) : Cadmium in corals as a tracer of historical upwelling and industrial fallout. *Nature* 328, 794-796.
- Shen, G. T. and Boyle, E. A. (1987) : Lead in Corals: reconstruction of historical industrial fluxes to the surface ocean. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 82, 289-304.
- Shen, G. T. and Boyle, E. A. (1988) : Determination of lead, cadmium and other trace metals in annually-banded corals. *Chem. Geol.* 67, 47-62.
- Shen, G. T. and Sanford, C. L. (1990) : Trace element indicators of climate variability in the reef-building corals. *Global Ecological Consequence of the 1982-1983 El Nino-Southern Oscillation*. Glynn, P. W. (Ed.), Elsevier, Amsterdam, 25-283.
- Shen, G. T., Campbell, T. M., Dunbar, R. B., Wellington, G. M., Colgan, M. W. and Glynn, P. W. (1991) : Paleochemistry of manganese in corals from the Galapagos Islands. *Coral Reefs* 10, 91-100.
- Shen, G. T. and Dunbar, R. B. (1995) : Environmental controls on uranium in reef corals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 2009-2024.
- Sinclair, D. J., Kinsley, L. P. J. and McCulloch, M. T. (1998) : High resolution analysis of trace elements in corals by laser ablation ICP-MS. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, 1889-1901.
- Smith, S. V., Buddemeier, R. W., Redalje, R. C. and Houck, J. E. (1979) : Strontium-Calcium thermometry in coral skeletons. *Science*, 204, 404-407.
- Suzuki, A., Yukino, I. and Kawahata, H. (1999) : Temperature-skeletal  $\delta^{18}\text{O}$  relationship of *Porites australiensis* from Ishigaki island, the Ryukyus, Japan. *Geochem. J.* 33, 419-428.
- 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.
- Suzuki, A., Gagan, M. K., Deckker, P. D., Omura, A., Yukino, I. and Kawahata, H. (2001) : Last Interglacial coral record of enhanced insolation seasonality and seawater  $^{18}\text{O}$  enrichment in the Ryukyu Islands, northwest Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3685-3688.
- Swart, P. K., Healy, G. F., Dodge, R. E., Kramer, P., Hudson, J. H., Halley, R. B. and Robblee, M. B. (1996) : The stable oxygen and carbon isotopic record from a coral growing in Florida Bay: a 160 year record of climatic and anthropogenic influence. *Palaeogeogra. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 123, 219-237.
- Tudhope, A. W., Shimmield, G. B., Chilcott, C. P., Jebb, M., Fallick, A. E. and Dalgleish, A. N. (1995) : Recent change in climate in the far western equatorial Pacific and their relationship to the Southern oscillation; oxygen isotope records from massive corals, Papua New Guinea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 136, 575-590.
- Tudhope, A. W., Chilcott, C. P., McCulloch, M. T., Cook, E. R., Chappell, J., Ellam, R. M., Lea, D. W., Lough J. M. and Shimmield, G. B. (2001) : Variability in the El Nino-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle. *Science*, 291, 1511-1517.
- Vaganay, S. R., Juillet-Leclerc, A., Jaubert, J. and Gattuso, J. -P. (2001) : Effect of light on skeletal  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ , and interaction with photosynthesis, respiration and calcification in two zooxanthellate scleractinian corals. *Palaeogeogra. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 175, 393-404.
- Watanabe, T., Winter, A. and Oba, T. (2001) : Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ratios in corals. *Mar. Geol.*, 173, 21-35.
- Weber, J. N. and Woodhead, P. M. J. (1972) : Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonates. *J. Geophys. Res.*, 77, 463-473.
- Weber, J. N. (1973) : Incorporation of strontium into reef coral skeletal carbonate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 2173-2190.
- Wei, G., Sun, M., Li, X. and Nie, B. (2000) : Mg/Ca, Sr/Ca and U/Ca ratios of a porites coral from Sanya Bay, Hainan Island, South China Sea and their relationships to sea surface temperature. *Palaeogeogra. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 162, 59-74.

INOUE Mayuri (2002) : Reconstructions of paleoceanographic environments by using coral skeletons.

<受付: 2002年6月19日>