

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  
(1) 酸素同位体比およびSr/Ca比を用いた水温と塩分(降水量)の復元に関する研究

独立行政法人産業技術総合研究所

地質情報研究部門 物質循環研究グループ 鈴木 淳、川幡穂高、野原昌人、  
菘島佳代、外西奈津美、井上麻夕里

平成13～17年度合計予算額 66,512千円  
(うち、平成17年度当初予算額 11,477千円)

[要旨] 熱帯域の海洋と大気は、全球への熱量と水蒸気の放出源であり、全球の気候システムに大きな役割を演じている。熱帯における海洋と大気の相互作用としてエルニーニョ・南方振動(ENSO)やアジアモンスーンなどの気候変動現象に近年注目が集まっている。特に世界の総人口の半分以上がアジアモンスーンの影響下にあり、その変動は、この地域の環境および経済にとって大きな影響を及ぼすと考えられる。しかし、熱帯・亜熱帯海域の大部分では、海水温や塩分など観測機器の記録は過去30-50年間しかない。気候の長期変動を解析し、将来の気候を予測するためには過去100年以上にわたる水温、塩分などの定量的データが不可欠である。サンゴの骨格を用いた海洋環境復元は近年急速に発展してきたが、西太平洋域では研究例が乏しい。そこで本研究では、日本近海から東南アジアおよびインド洋に至る海域よりサンゴ骨格を採取し、高時間解像度(週-月単位)で、過去100年以上の水温、塩分、降雨などを復元し、モンスーン地域における温暖化現象の実態を解明する。現在までに小笠原諸島父島ほか、石垣島、ミクロネシア、フィリピン太平洋岸のピコール地方より100年ないしそれ以上のサンゴ骨格酸素同位体比記録を得た。いずれの地点においても酸素同位体比の減少傾向、すなわち海水温上昇あるいは塩分低下の傾向が認められる。さらに、1) 西太平洋・東南アジア域における過去20年間のサンゴ記録の変動解析、2) 小笠原サンゴ試料に見られる十年スケールの気候変動の解析、3) 石垣サンゴ試料に見られる冬期モンスーン変動の解析、4) ジャワ海サンゴ試料に見られる ENSO とインド洋ダイポール変動、5) 海域ごとの海水温の上昇特性、についての5項目を中心に詳細な検討を行った。

[キーワード] 地球温暖化、海水温、サンゴ骨格、モンスーン、エルニーニョ・南方振動

## 1. はじめに

地球の低緯度域には、エルニーニョ・南方振動やアジアモンスーンのような海洋と大気の相互作用からなる気候システムがあり、これらの挙動について、地球温暖化との関係から近年注目が集まっている。特に、世界の総人口の半分以上がアジアモンスーンの影響下にあり、その変動はこの地域の環境および経済にとって非常に大きな影響を及ぼすと推定されている。しかし、熱帯域のほとんどの地域では、水温や塩分など観測機器に基づく気候の記録は過去30-50年間と短い期間に限られるので、これらのデータを基に10年単位やそれ以上の長期変動を解析することは難しく、21世紀の気候予測をするためには過去100年以上にわたる水温、塩分などの定量的データが不

可欠である。

サンゴ骨格を用いた高時間解像度（約1週間単位）の海洋環境復元は、この数年の間に急速に発展してきた<sup>1, 2)</sup>。特に長尺のサンゴ骨格を用いた研究は現在のところガラパゴス諸島やパナマ海盆などから数例報告されているが、これらはエルニーニョ・南方振動（ENSO）の影響などを研究対象としている。一方、日本が位置している西太平洋域では、ENSOよりもアジアモンスーンの影響の方が大きい。サンゴ骨格を用いた長期間にわたる高時間解像度のアジアモンスーンの研究はまだほとんど行われていない。そこで、琉球列島 - 東南アジア - インド洋に至る海域からサンゴ骨格を採取し、高時間解像度（週 - 月単位）で、過去200-300年の水温、塩分、降雨などを復元し、温暖化傾向とモンスーン変動の関係を解明することは、同地域での将来の温暖化に関連した気候・環境変動および農業などの経済予測をする上でも不可欠と考えられる。

## 2．研究目的

本研究は、モンスーン気候の影響下にある琉球列島から東南アジアおよびインド洋東部を対象として、これらの海域よりサンゴ骨格を採取し、高時間解像度（週 - 月単位）で、過去200-300年の水温、塩分、降雨などを復元し、モンスーン地域における温暖化現象の実態解明と、海水温上昇とモンスーン変動の関係を解明することを目的とする。独立行政法人産業技術総合研究所および独立行政法人国立環境研究所が共同して本研究を実施する。まず、琉球列島、フィリピン、インドネシア、オーストラリア等の沿岸海域より、各年度あたり、およそ1箇所を選定して現地調査を実施し、100-200年以上の記録を有するサンゴ柱状試料を採取する。サンゴ種としては、大型の塊状群体に成長し、年輪が明瞭なハマサンゴ属 (*Porites* spp.) を対象とする。このサンゴ骨格について、X線撮像によってサンゴ骨格の成長を確認するとともに、成長軸に沿って骨格微小試料を分取する。この微小試料について、水温および降水量の複合指標として有効な酸素同位体比を分析し、正確な年輪を計数する。さらに、この微小試料について、水温の単一指標として有効なストロンチウム/カルシウム比 (Sr/Ca比) 等を分析し、酸素同位体比の結果と併せて塩分や降雨量を推定する。最終的にこれらを総合し、高時間解像度（週 - 月単位）で、長期的な水温、塩分、降雨量等の変動を復元し、温暖化傾向とモンスーン変動の関係を解明する。

## 3．研究方法

気候変動復元のために、サンゴ骨格については、酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}_c$ ) とストロンチウム/カルシウム比 (Sr/Ca比) の2つの化学組成が注目されている。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 ( $T$ ) に依存する。

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

ここで、 $a$ 、 $b$  は定数である。炭酸塩と海水の酸素同位体比は、標準物質の同位体比との千分偏差による $\delta$ 表記法が用いられる。(1)式の定数 $a$ 、 $b$ については、多くの研究者により世界各地からいくつかのサンゴの種について報告されているが、一般的には $a$ について $4.5 \sim 6.2 \text{°C}/\text{‰}$ の範囲の値を取る<sup>3)</sup>。サンゴ骨格の酸素同位体比は、原理的に表層水温と降水等に支配される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が、海水の酸素同位体比の季節変化が十分小さい海域ではサンゴ骨格の酸素同位体比は良好な温度指標となる。この場合、酸素同位体比温度計の

推定精度は、分析の再現性からほぼ $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ とされている。また、低緯度域など、水温の季節変化が小さい海域では、サンゴ骨格の酸素同位体比は良好な塩分指標となる。一方、骨格中の Sr/Ca 比は温度指標としての有用性が指摘されている。海水中の Sr/Ca 比は  $10^7$  年の時間スケールで全海洋均一であるため、骨格の Sr/Ca 比は、ほぼ水温のみに依存する指標と考えられている。

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。この方法によれば、サンゴ記録から水温の変動とともに塩分の変動（多くの場合、降水量変動に対応）も抽出することができ、本研究課題においてもこの原理を利用する<sup>4,5)</sup>。以下、(1)長尺コア試料の採取、(2)骨格の微小試料採取、(3)酸素・炭素同位体比の測定、(4)Sr/Ca比の測定、の4つの項目について研究方法を詳述する。

### (1) 長尺コア試料の採取

サンゴ試料採取は、産業技術総合研究所が中心となり、国立環境研究所と共同で実施した。現在までに、フィリピン3地点（ルソン島東南部 Bicol 地方の太平洋岸、Visayas 地方 Bohol 島南岸、Palawan 島南東岸）、インドネシア・ジャカルタ北方の Seribu 諸島、および琉球列島石垣島、小笠原諸島父島より、現生サンゴ骨格の長尺柱状試料を採取した。柱状試料の採取には水中エアドリルおよびエンジンドリルを用いた。試料採取地点は、東アジアから東南アジアを経て、インド洋に及ぶ海域を網羅し、これらの地点から採取されたサンゴ骨格は、アジアモンスーン現象の長期的変動を解析するのに適していると考えられる（図1）。また、ENSO 変動の影響も受けると考えられるミクロネシア海域より採取された試料も併せて検討した。

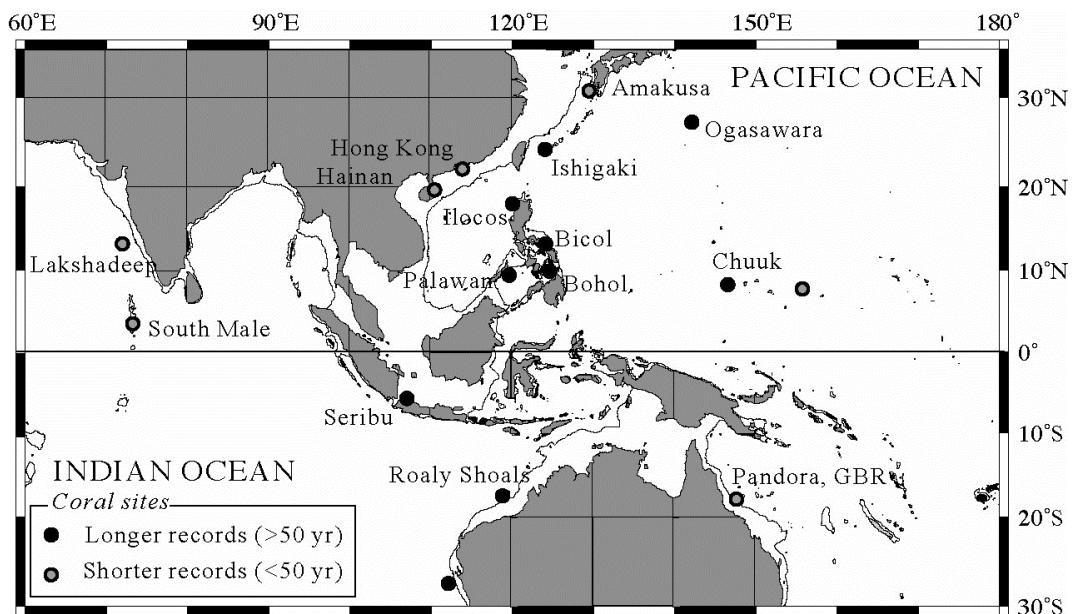


図1 .本研究課題による長尺サンゴ試料の採取地点。平成13年度にはフィリピン・ルソン島南東部のピコール地方、また平成14年度には小笠原諸島父島およびインドネシア・セリブ諸島、平成15年度には石垣島にて試料採取調査を実施した。平成16年度にはフィリピン・ルソン島西部イロコス地方、平成17年度にはフィリ

ン・パラワン島南東岸にて試料採取を実施した。海外共同研究機関より試料およびデータの提供を受けて検討を行った地点も含まれている。

## (2) 骨格の微小試料採取

1990年代前半までのサンゴ骨格の研究では、骨格から化学分析用の微小試料を採取するためのマイクロサンプリング技術の精度が低く、1年に4~6試料といったまばらな分析間隔であった。分析間隔が粗いと、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0.1mm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<sup>1,2)</sup>。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。本研究課題でも基本的にこの方法を採用した。

長尺のハマサンゴ骨格は通常、柱状試料として採取される。この柱状試料を厚さ約7mmのスラブに切断し、医療用のX線撮像装置および軟X線撮影装置を用いて年輪を可視化する。このX線画像の観察に基づきサンゴの最大成長軸を選び、さらにその連続性のよい部分を判別して、微小試料採取用の測線が決定される。まず、この測線に沿ってスラブを切断し、端部に成長軸が連続的に含まれるように整形する。この端部を上面・下面から2.5mmずつ削り込んで、厚さ2mm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2mm×2mm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0.2mmあるいは0.4mm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。この0.4mmのサンプリング間隔採取は、年間成長量を約15mmとすると、およそ10日間の成長量に対応する。微小試料の採取には、各種切削器具を用いた比較検討の結果、フライス旋盤を用いて、予備加工したサンゴ骨格片の成長軸方向に0.4mm間隔(断面2×2mm)で切削採取する方法を採用した(図1)。この方法により、水温および塩分(降水量)変動の復元に必要な酸素同位体比およびSr/Ca比分析に必要な約1mgの試料を1週間程度の時間分解能で採取することが可能となった。

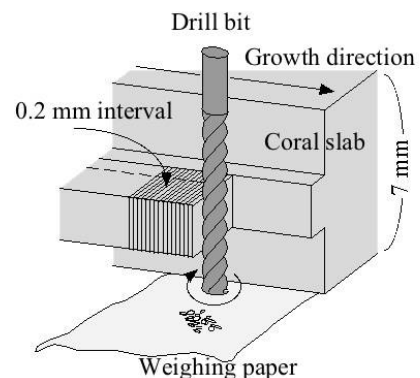


図1 骨格微小試料の切削方法

## (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およびISOPRIMEが用いられた。これら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、炭酸塩試料からの二酸化炭素ガスの生成が行われる。炭酸塩試料の溶解には100%リン酸が用いられ、反応温度は90°Cである。質量分析計OPTIMA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70~100μg)。もう一つの質量分析計ISOPRIMEについてもほぼ同様の分析精度が得られている。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‰・°C<sup>-1</sup>であることが知られている<sup>3,4)</sup>。したがって、この分析計に

よる酸素同位体比の測定精度は水温に換算して  $0.2^{\circ}\text{C}$  となり、十分に水温推定の実用レベルである。なお、一部のサンゴ試料についてはオーストラリア国立大学地球科学研究所およびブレイメン大学地球科学学部の安定同位体比質量分析計(Finnigan MAT 252)により酸素同位体比分析が行われた。

#### (4) Sr/Ca 比の測定

Sr/Ca 比(ストロンチウム/カルシウム比)に加えて、やはり温度指標としての有用性が指摘されている Mg/Ca 比(マグネシウム/カルシウム比)、U/Ca 比(ウラン/カルシウム比)の高精度測定法を検討した。これらの分析法の検討には、産業技術総合研究所地質調査総合センター(旧地質調査所;GSJ)が石垣島産のハマサンゴ骨格(*Porites* sp.)と久米島産オオジャコ化石殻(*Tridacna* sp.)から作成した炭酸塩標準試料 J Cp-1 および J Ct-1 を用いた<sup>6)</sup>。全ての測定は Hewlett Packard 社製 HP4500 ICP-MS を用いて行った。試料の分解には 2%硝酸のみを用い、他の試薬などからの汚染や異物混入を避けるため、濃縮やイオン交換などの前処理は行わなかった。容器は全て酸洗浄を施したテフロン容器を用いた。炭酸塩試料に含まれるカルシウムによるマトリックス効果を軽減し、さらに測定中の分析計によるドリフトを補正して正確な値を得るために、本研究ではスカンジウム、イットリウム、ビスマスを内標準として添加した(内部標準同位体希釈法)。

表 1 に炭酸塩標準物質 J Cp-1 および J Ct-1 の各々 10 試料の繰返測定の結果を示す。この繰返測定では、標準物質の不均一性が結果に影響する可能性が予想される。この効果を検討するため、試料量の違いによる分析結果の比較を試み、試料  $50\mu\text{g}$  と  $100\mu\text{g}$  の 2 種類について結果を比較したところ、両者は Sr/Ca 比、Mg/Ca 比、U/Ca 比のすべてについて良好な一致を示し、この標準物質が高い均質性を持つことが確認された。サンゴ骨格の標準物質である J Cp-1 について、各々の繰返再現性は、Sr/Ca 比について  $0.8\%$ 、U/Ca 比および Mg/Ca 比について各々  $1.8\%$ 、 $1.3\%$ であった。シャコガイ殻の各種元素濃度はサンゴ骨格に比べて著しく低いため、標準物質 J Ct-1 については測定精度が低下するが、それでも Sr/Ca 比については  $1\%$ 以下の良好な結果が得られている。従来の報告<sup>5,6)</sup>によると、これらのパラメータの温度依存性は、 $1^{\circ}\text{C}$  あたり Sr/Ca 比 =  $0.0615\text{ mmol/mol}$ 、Mg/Ca 比 =  $0.129\text{ mmol/mol}$ 、U/Ca 比 =  $0.0286\text{ }\mu\text{mol/mol}$  であるため、これらの分析誤差は水温に換算すると、Sr/Ca 比について  $1.1^{\circ}\text{C}$ 、Mg/Ca 比および U/Ca 比について各々  $0.4^{\circ}\text{C}$ 、 $0.8^{\circ}\text{C}$  となる。これらは、海洋環境を復元して気候変動を論じるために有用な精度である。水温に換算してもっとも精度が高い Mg/Ca 比は、試料のクリーニングの問題等、水温計としての有用性に疑問が指摘されており、その適用には慎重になる必要がある。一方、U/Ca 比についても海水の炭酸系の影響などを受けられる可能性が指摘されているが、Sr/Ca 比よりも高い精度が得られる点は注目に値する。これは、今後、サンゴ骨格を用いて過去の水温変動を復元する際に、塩分変動の分離などを容易にし、復元精度の向上を可能にするものである。また、サンゴ骨格に限らず、炭酸カルシウム一般に使用できる方法と考えられるため、他の生物殻への適用も可能と考えられる。

表 1 . ICP-MS による炭酸塩標準物質の Mg/Ca、Sr/Ca、U/Ca 比の分析精度。標準物質の不均一性を検討するため、試料 50 $\mu$ g と 100 $\mu$ g の 2 種類について結果を比較した。それぞれ 10 試料の繰り返し測定結果を示す。

	Coral (JCP-1)			<i>Tridacna</i> (JCT-1)		
	Mg/Ca	Sr/Ca	U/Ca	Mg/Ca	Sr/Ca	U/Ca
	mmol / mol		$\mu$ mol / mol	mmol / mol		$\mu$ mol / mol
(1) 試料 50 $\mu$ g / 溶液 5 mL						
Mean	4.21	8.79	1.25	1.22	1.66	0.03
s.d.	0.06	0.07	0.02	0.32	0.02	0.01
(%)	1.31	0.77	1.80	26.57	0.99	19.36
(2) 試料 100 $\mu$ g / 溶液 10 mL						
Mean	4.21	8.69	1.23	1.22	1.64	0.01
s.d.	0.08	0.05	0.03	0.11	0.01	0.01
(%)	1.84	0.61	2.62	8.83	0.82	39.82

#### 4 . 結果・考察

##### ( 1 ) サンゴ記録：水温指標としての有効性の検証

###### サンゴ酸素同位体比の時系列

現在までに採取されたサンゴ試料のうち、石垣島およびフィリピン・ビコール地方から得られたサンゴ試料のX線画像と年代モデルを図2に例示した。このほか、小笠原諸島父島、ミクロネシア・チュック環礁、フィリピン・イロコス地方およびパラワン島より約100年ないしそれ以上のサンゴ骨格酸素同位体比記録を得た。これらサンゴ記録の年代範囲を、太平洋における大気・海洋変動の各種観測期間と併せて示したのが、図3である。フィリピン・ビコール地方や石垣島では200年内外のサンゴ骨格が採取され、研究対象としている200～300年の時間スケールを概ねカバーすることができた。しかし、平成14年度中間評価（課題実施2年目）では「もう一歩進めて寒冷-温暖期を繰り返すAD1500年以降の気候変動の復元を可能ならば実施してほしい」との指摘を受けたところであり、サンゴ骨格記録の過去への延伸を重要な課題と認識して、より大型のサンゴ群体の探索を試みてきた。しかし、研究に適した形状の大型群体は稀で、そのような長尺試料を採取することは容易ではない。近年海外では、過去の台風によって海岸に打ち上げられた複数のハマサンゴ群体の骨格試料をつなぎ合わせてサンゴ記録を過去に延伸する試みが模索されている。そこで、本研究では過去に発生した大津波によってサンゴ礁から汀線付近に打ち上げられた、いわゆる「津波石」に注目した。南琉球地方では1771年に発生した「明和の大津波」とそれによって打ち上げられた津波石の存在が知られている<sup>7)</sup>。津波石は一般にサンゴ礁の岩盤（礁岩）が打ち上げられたものが多いが、石垣島東海岸の中北部を中心に、大型のハマサンゴ群体が津波により打ち上げられたと思われる例を発見し、群体の最上部より約250cmの柱状試料を採取した。この試料の群体表面部分の年代測定により、「明和の大津波」により打ち上げられたものと推定された。X線撮像による年輪計測の結果、およそ192年間にわたって成長したものと思われ、近傍で採取されている現生サンゴ試料と併せて、サンゴ記録を試料産業革命（17世紀後半）以前、そして16世紀へ延伸することが可能と思われる。図4には、各地点の酸素同位体比記録を時系列に変換して示した。酸素同位体比の減少は、水温上昇あるいは降水量の増加を指標する。熱帯域のチュック環礁では季節変化が小さいが、フィリピンから亜熱帯の石垣島および小笠原にかけて季節変化が増大し年周変動が卓越する様子がみられる。

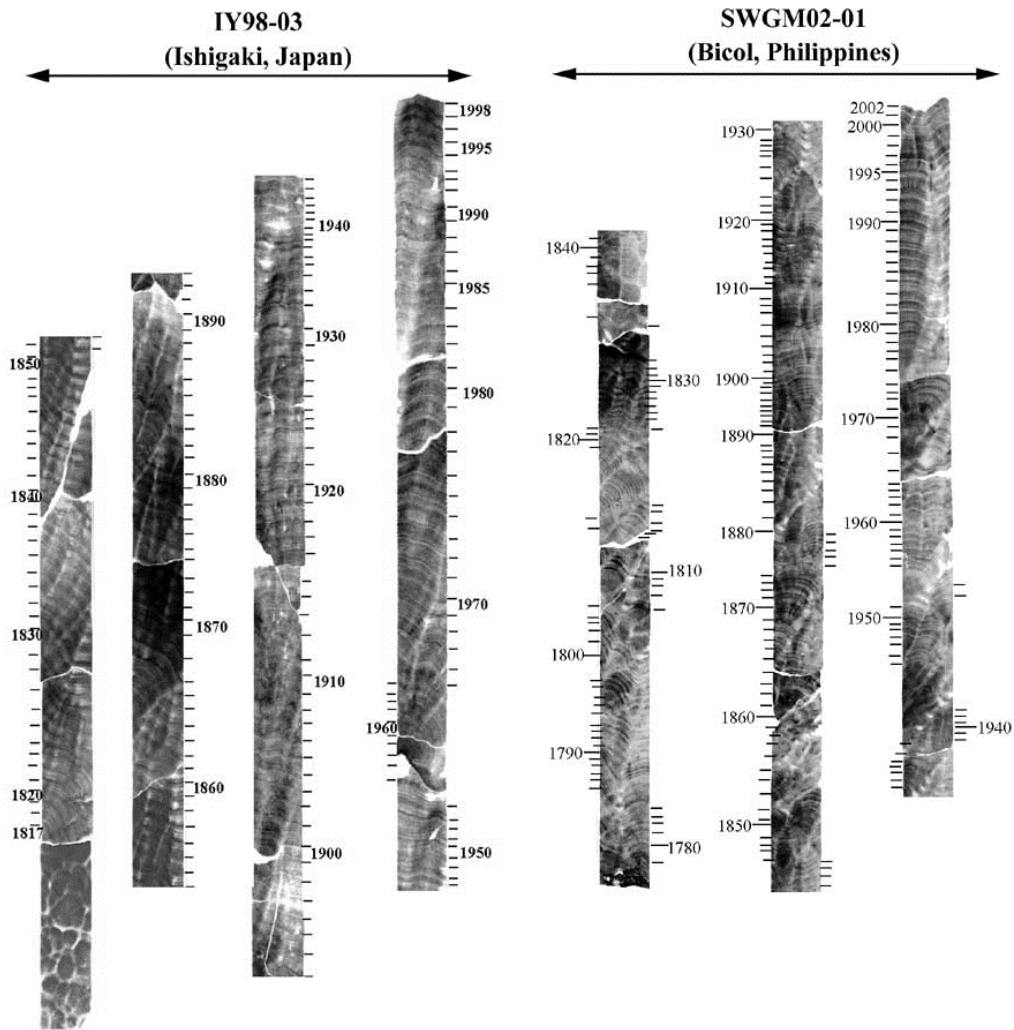


図3 石垣(IY98-03)およびフィリピン・ビコール地方(SWG02-01)のサンゴ試料のX線画像と年代モデル。

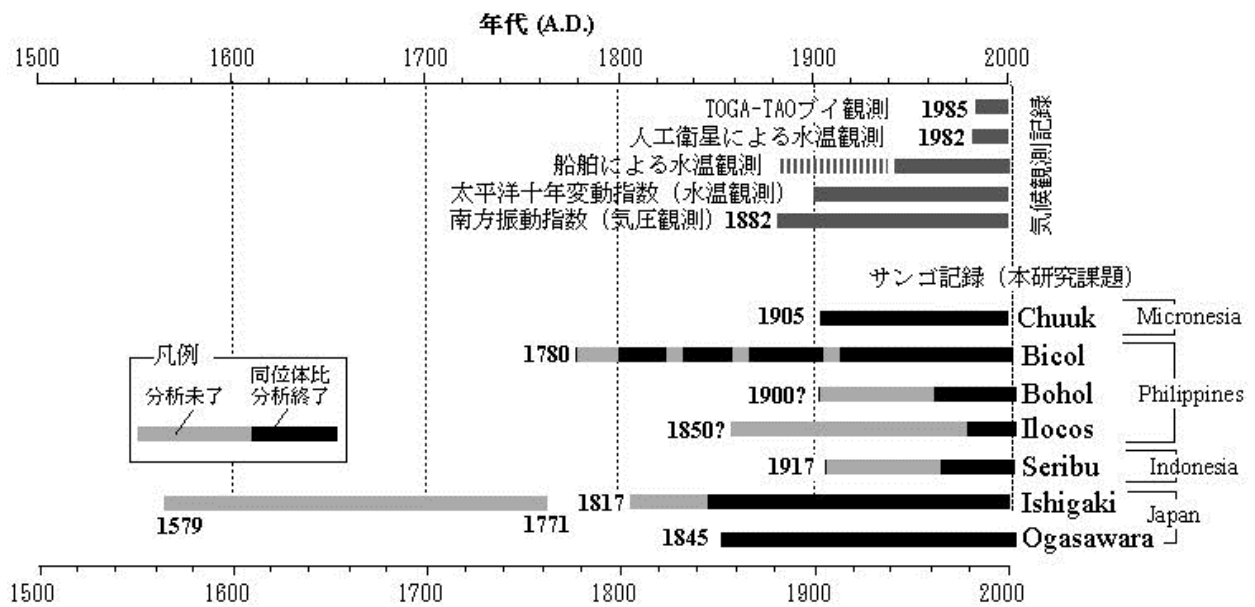


図3 太平洋における大気・海洋変動の各種観測期間と本研究課題で分析・検討するサンゴ記録の解析期間。石垣島で採取された1771年から1579年をカバーするサンゴ骨格試料は、1771年に発生した明和大海津波により打ち上げられたと考えられる群体から採取されたものである。

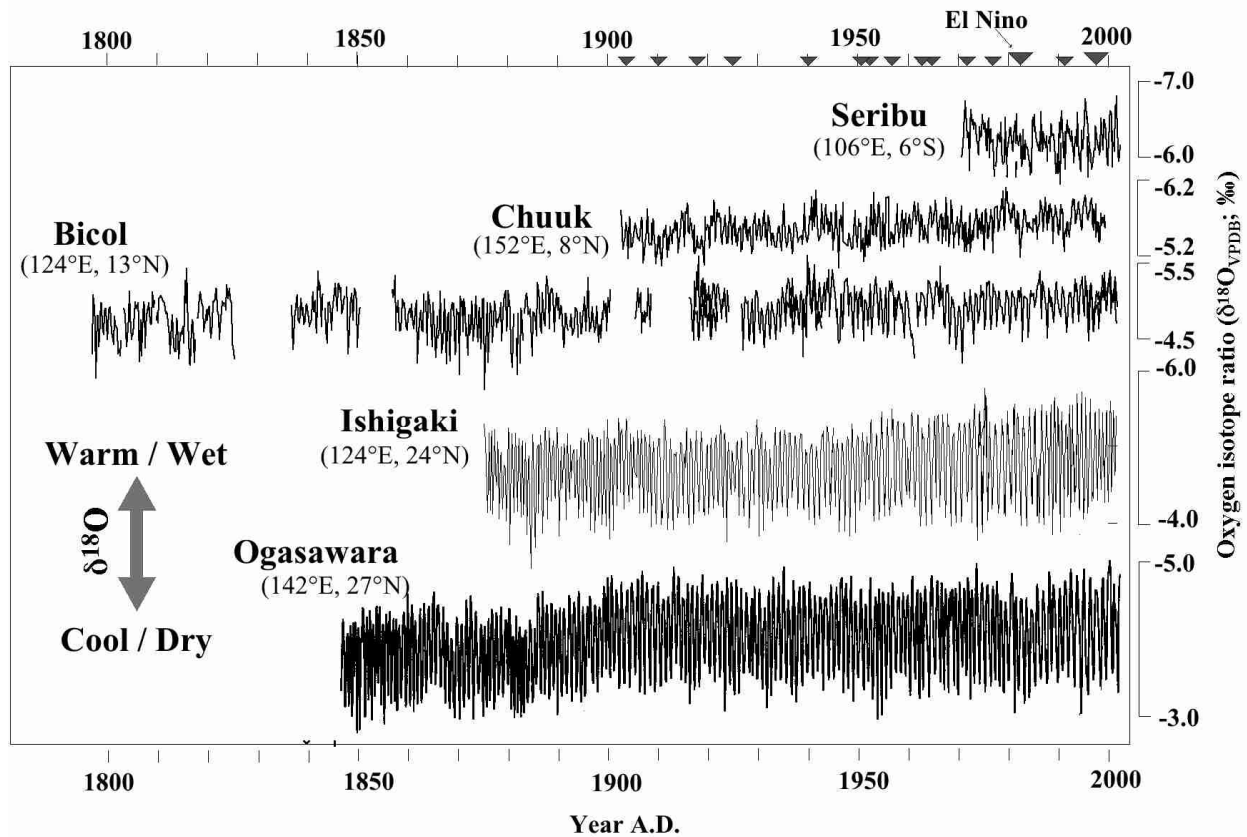


図4 本研究課題で分析されたサンゴ骨格の酸素同位体比。高温あるいは多雨を指標する酸素同位体比の負の方向を縦軸上向に示した。季節変化は低緯度のチュック環礁では小さく、緯度が高くなるとともに増大する。フィリピン・ビコール地方のサンゴ骨格試料は1780年まで、琉球列島石垣島の試料は1817年まで遡ることが可能と思われる（途中に未分析区間含む）。

#### サンゴ酸素同位体比と水温の対応関係

1990年代は、全球的に20世紀でもっとも暖かった10年間であるとともに、最近の千年間（第2千年紀；1000～1999年）でも、もっとも高温であった期間と考えられている。太平洋の低緯度域では、今世紀最大ともいわれたエルニーニョが発生し、それに関係する異常高水温現象によって世界各地でサンゴの大規模白化が発生した。ここでは、この特徴的な1990年代の海洋気候が、サンゴ骨格の酸素同位体比にどのように記録されているかを、北西太平洋・東南アジア海域のサンゴ試料（ポンペイ、チュック、ビコール、石垣）を用いて検討し、水温指標としてのサンゴ記録の有用性を検証する。

まず、サンゴが生育するサンゴ礁は、一般に水深が浅く、外洋から礁嶺などの地形的な高まりによって隔離されていることが多いため、サンゴ群体の地点の水温が沖合外洋の水温と一致して



いるかどうかは検証が必要である。サンゴ試料採取地点に自記記録式の水温センサーを設置して観測した結果と人工衛星による表層水温観測結果の比較を図5に示す。比較的高緯度に位置する石垣島では、夏期の水温はよく一致するものの、冬期は現場観測水温の方が、人工衛星水温よりも1~2ほど低いことが分かる。これは卓越する季節風と低い気温によりサンゴ礁に停留する海水が強い表面冷却を受けることによる。石垣島以外の低緯度域4地点においては、サンゴ採取地点の水温は、沖合外洋の水温とよく一致した。これらの地点では、サンゴ骨格に記録された水温が広域的な水温として解析できることを意味している。

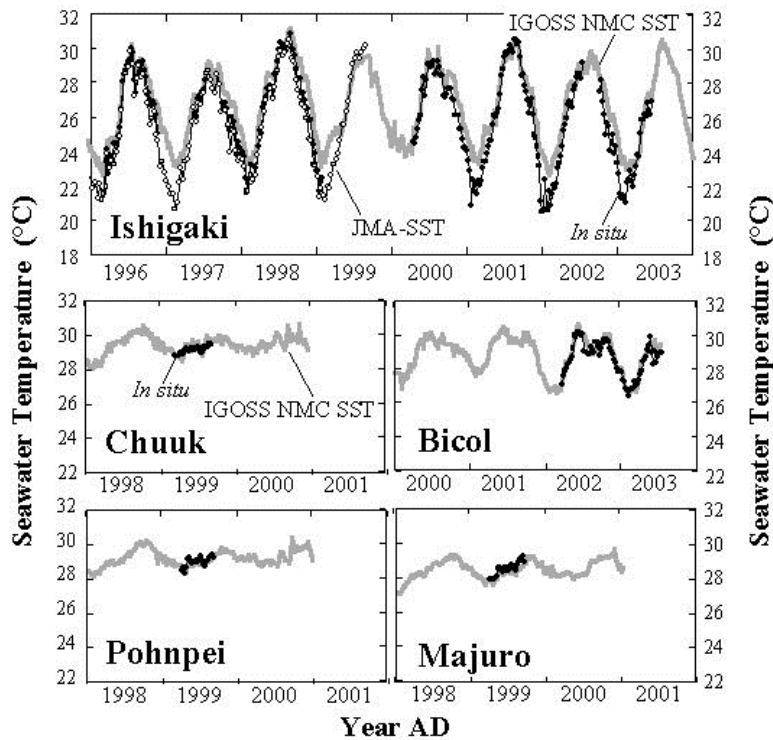


図5 サンゴ試料採取地点に自記記録式の水温センサーを設置して観測した結果 (*in situ*) と人工衛星による表層水温観測結果 (IGOSS NMC SST) の比較。石垣島については石垣島地方気象台による石垣港での観測結果も合わせて示した (JMA-SST)。

北西太平洋・東南アジア海域 (ポンペイ、チュック、ピコール、石垣) のサンゴ骨格の酸素同位体比と人工衛星観測による水温記録の対比図を図6に示す。ここで、サンゴ骨格の酸素同位体比は水温との単回帰式を用いてスケールリングし、観測水温のグラフに重ねて示してある。石垣島のように、塩分変化の季節性が小さな海域では、サンゴの酸素同位体比はもっぱら水温に依存するため、両者のグラフはよく一致する。一方、塩分の季節変化および年々変化が水温変化に比較して大きい低緯度海域では、水温との単回帰式によりスケールリングしたサンゴ骨格の酸素同位体比は、塩分変動の寄与を除去できていないため、“みかけの水温 (apparent SST)” とも呼ぶべきものであって、実測水温からの乖離は、海水の酸素同位体比の変化、すなわち塩分の変化があることを示す。低緯度の地点では、エルニーニョがピークに達した年の翌年に顕著なサンゴ酸素同位体比と実測水温の乖離が見られる。これは、この海域の塩分が平年に比して高かったことを示

しており、エルニーニョ期に見られる干ばつ（降水量低下）がその原因と考えられる。サンゴ酸素同位体比記録の正アノマリは、この海域の良好なエルニーニョシグナルとなっている。また、ポンペイ島を除き、各サンゴ記録に酸素同位体比の低下傾向が見られ、これは水温上昇と塩分低下傾向を示す。上昇率はより高緯度に位置する石垣島で顕著である（実測水温に基づく値0.57 /10yr）。そして、サンゴの“みかけの水温”も実測水温とほぼ同じ値を示していることは、サンゴ骨格記録の気候記録能力の高さを示唆するものである。このように、西太平洋におけるサンゴ骨格は、エルニーニョイベントを記録する能力を有し、近年の水温上昇傾向をも正確に記録している。なお、ポンペイ島のサンゴ酸素同位体比記録に水温の上昇傾向が認められないのは、エルニーニョによる水温低下イベントの影響に隠されてしまっているものと考えられる。

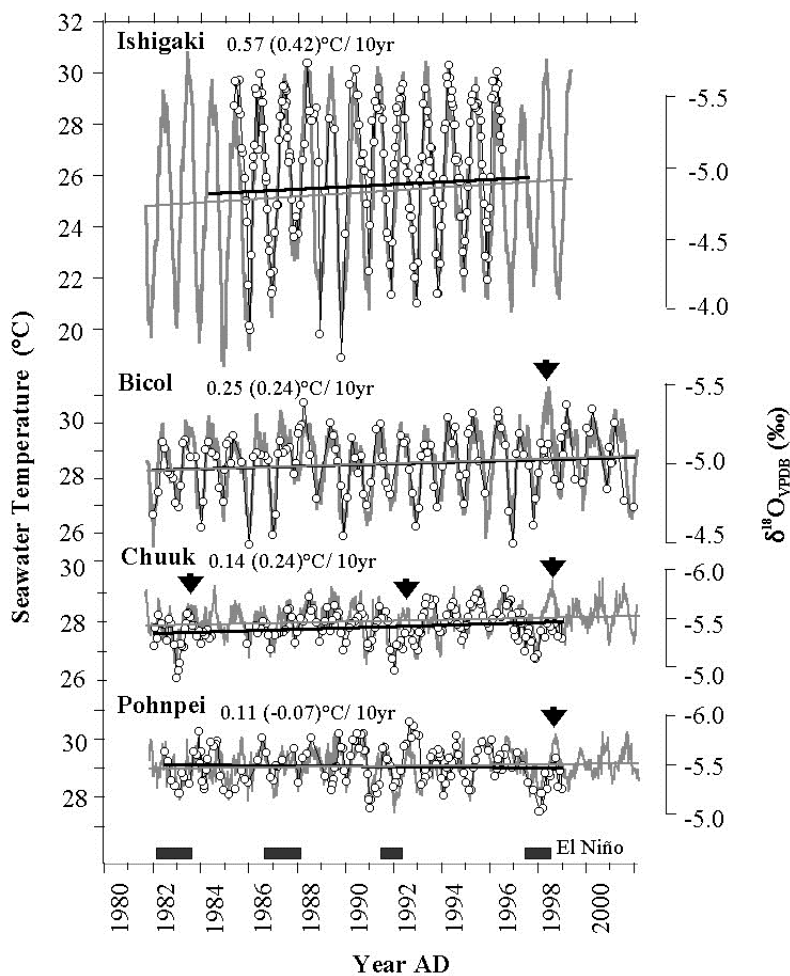


図6 西太平洋における長尺サンゴ試料最上部の酸素同位体比記録（ $\delta^{18}\text{O}$ ；実線と白丸）と人工衛星観測に基づく週平均水温記録（灰色線）それぞれについて単回帰直線を示した。地点名隣に10年間あたりの水温上昇率を示した。なお、（）内の値はサンゴ酸素同位体比から推定される水温上昇率である。矢印はエルニーニョに伴うサンゴ酸素同位体比記録の正アノマリイベントを示す。

#### 降水量と塩分がサンゴ酸素同位体比に与える影響

既に述べたように、サンゴ骨格の酸素同位体比は、原理的に表層水温と降水等に支配される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。したがって、降水量が多い海域では、サンゴの酸素同位体比変化に海水の酸素同位体比の寄与が見られる場合がある。ここでは、過去に報告された研究例と本課題により得られたデータを併せて、サンゴ骨格の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7

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 7B）。熱帯集束帯（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 7C）。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<sup>8,9)</sup>。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、海水温の変動がもっぱらサンゴの酸素同位体比の時系列変動を規定している<sup>10,11)</sup>。サンゴを用いた古気候解析には、その海域の塩分変動が大きいかどうかをあらかじめ把握しておくことが望ましい。

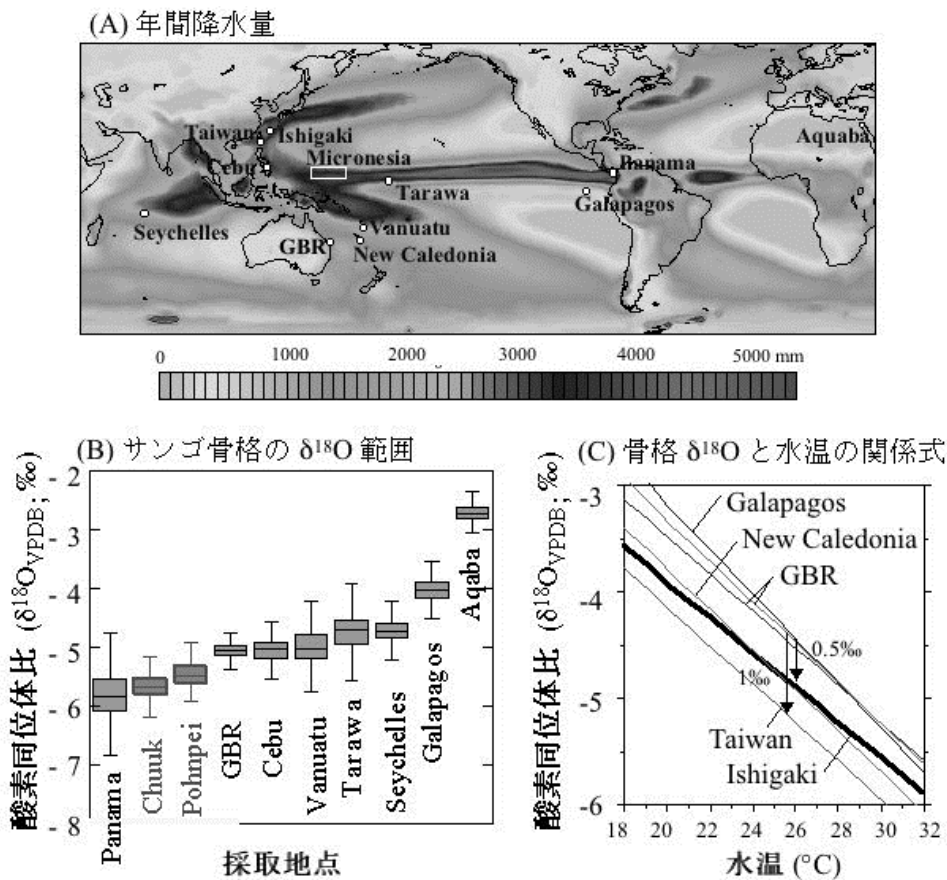


図 7 (A) 世界の年間降水量分布図（[http://tao.atmos.washington.edu/legates\\_msu/index.html](http://tao.atmos.washington.edu/legates_msu/index.html)）とサンゴ骨格研究の実施地点。(B)ハマサンゴ骨格の酸素同位体比の変動幅。(C)太平洋域から得られている骨格の酸素同位体比と水温の関係式<sup>4)</sup>。

水温指標としてのサンゴ Sr/Ca 比：琉球列島の現生および化石サンゴの例

炭酸塩標準試料に適応したものと同様の分析手法を、琉球列島石垣島より採取された現生ハマサンゴ骨格および与那国島の最終間氷期段丘から採取された化石ハマサンゴ骨格に適用した結果を図 8 に示す。北緯24度に位置するこの海域は、水温の年較差が約10 に達する一方、海水の酸素同位体比の季節変動が小さいため、サンゴ骨格の酸素同位体比変化は水温の良好な指標となる

ことが知られている。図2に示された現生サンゴの酸素同位体比とSr/Ca比は極めて類似した変動パターンを示すことから、骨格のSr/Ca比も水温の良好な指標となっていることが確認できる。同様に、U/Ca比も酸素同位体比およびSr/Ca比と同様の変動を示し、やはり水温指標として利用可能であることがわかる。

図2で興味深いのは、現生ハマサンゴと最終間氷期（約12万年前）の化石サンゴについて、Sr/Ca比とU/Ca比の変動幅にほとんど変化がみられないにも関わらず、酸素同位体比については化石サンゴの方が約1%大きいという点である。Suzuki et al. (2001)は、水温低下よりもむしろ当時の海水の酸素同位体比組成が現在と大きく異なっていた可能性を指摘した<sup>4)</sup>。図8に示されたSr/Ca比およびU/Ca比の結果はこの推論を支持する。

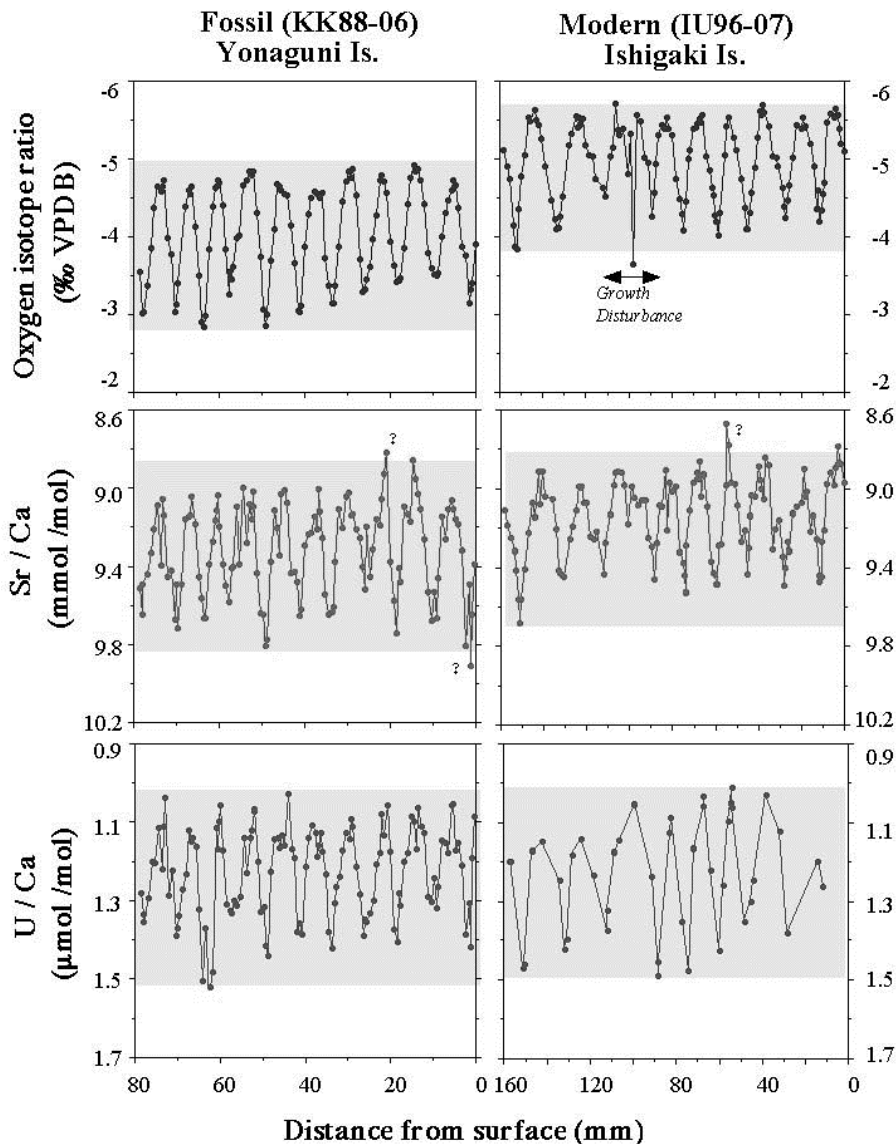


図8 琉球列島石垣島より採取された現生ハマサンゴ骨格および与那国島の最終間氷期段丘から採取された化石ハマサンゴ骨格 についての酸素同位体比、Sr/Ca比、U/Ca比の測定結果。石垣島産ハマサンゴ骨格は1985年から1996年までの期間に相当する。

## (2) 1998年大規模サンゴ白化現象とサンゴ記録

最近20年間程の間に世界各地でサンゴ白化現象 (coral bleaching) が頻発しているが、これは地球温暖化に関係した海水温上昇によると考えられている。長尺サンゴ骨格を用いて長期の海洋環境を復元する場合、サンゴに代謝異常や斃死を引き起こす白化現象の影響は看過できない問題である。この白化現象が、サンゴ骨格の化学組成にどのような影響を与えるかについては、明瞭な影響があるとする報告と、ほとんど変化が見られないとする報告の両方があり、論争が続いていた。白化現象はサンゴの石灰化の減退を引き起こすので、骨格の同位体組成の変化を捉えるためには、精密な微小試料採取が必要である。1997-98年には大規模なサンゴ白化現象が世界各地のサンゴ礁で発生した。琉球列島石垣島から採取された白化サンゴの骨格について、高分解能微小試料採取技術を用い、成長軸に沿って酸素・炭素の同位体比を分析したところ、サンゴ白化が劇的な骨格成長速度の低下を引き起こすこと、そして、同時に炭素同位体比に減少が見られることが見い出された(図5)。この炭素同位体比の挙動は、光合成の低下が炭素同位体比を増加させるとする一般的な理解と整合的である<sup>12)</sup>。これらの結果は、サンゴ骨格の高時間解像度での酸素同位体比測定が、骨格の中に存在する無成長期間の探索に有用であり、過去のサンゴ白化現象の復元、ひいては高水温イベント (>約32°C) の探索に利用できることを示している。

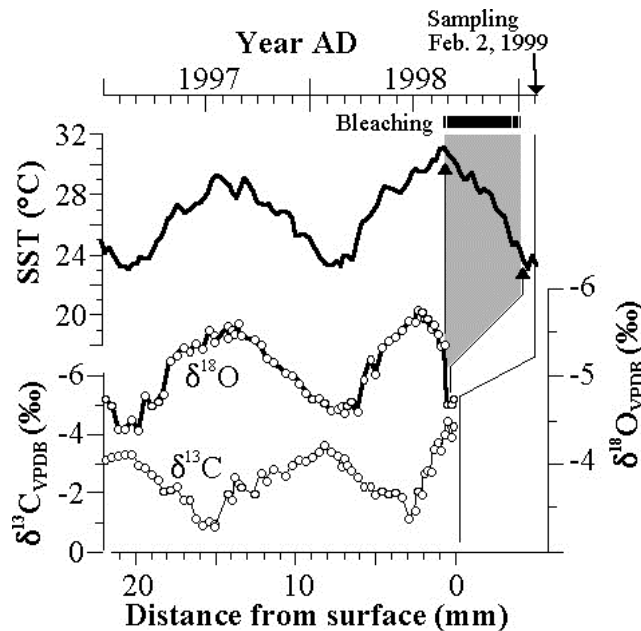


図9 石垣島安良崎地先のサンゴ礁から1999年2月2日に採取されたサンゴ骨格の最上部約2cmの酸素・炭素同位体比記録。この群体は1998年の8月から12月ころまで白化していたことが目視観察されており、骨格の酸素同位体比曲線からこの期間の記録が欠如していることがわかる。これは白化により骨格形成が停止していたためと解釈される。アメリカ合衆国大気海洋庁から公開されている人工衛星観測を主体として推定された海水温 (NOAA NMC SSTs) を併せて示した。

## (3) ミクロネシアのサンゴ記録：ENSOの影響

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（タヒチとダーウィ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 10）。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 160cm について、月相当の分解能の酸素同位体比時系列を作成し、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 11）。サンゴ骨格の酸素同位体比にはエルニーニョイベント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。この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、約 600km 東に離れたポンペイ島のサンゴの酸素同位体比記録にも、1997-98 年、1991-92 年、1982-83 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。両地点のサンゴ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。

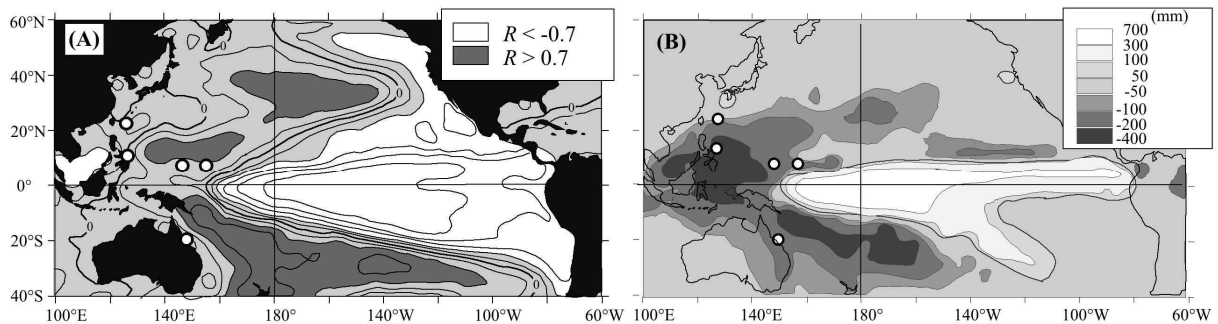


図 10 (A) 南方変動指数と太平洋の海面水温偏差の相関の等値線図。0.7 以上の正相関あるいは逆相関が見られる海域にはそれぞれハッチを施した。例えば、東赤道太平洋はエルニーニョ時には、南方変動指数が負となり、海面水温偏差は正の値を取る。(B) 中～大規模エルニーニョ時と平年時の年降水量偏差。1900 年～1998 年データより。図中に本研究のサンゴ採取地点を示した。

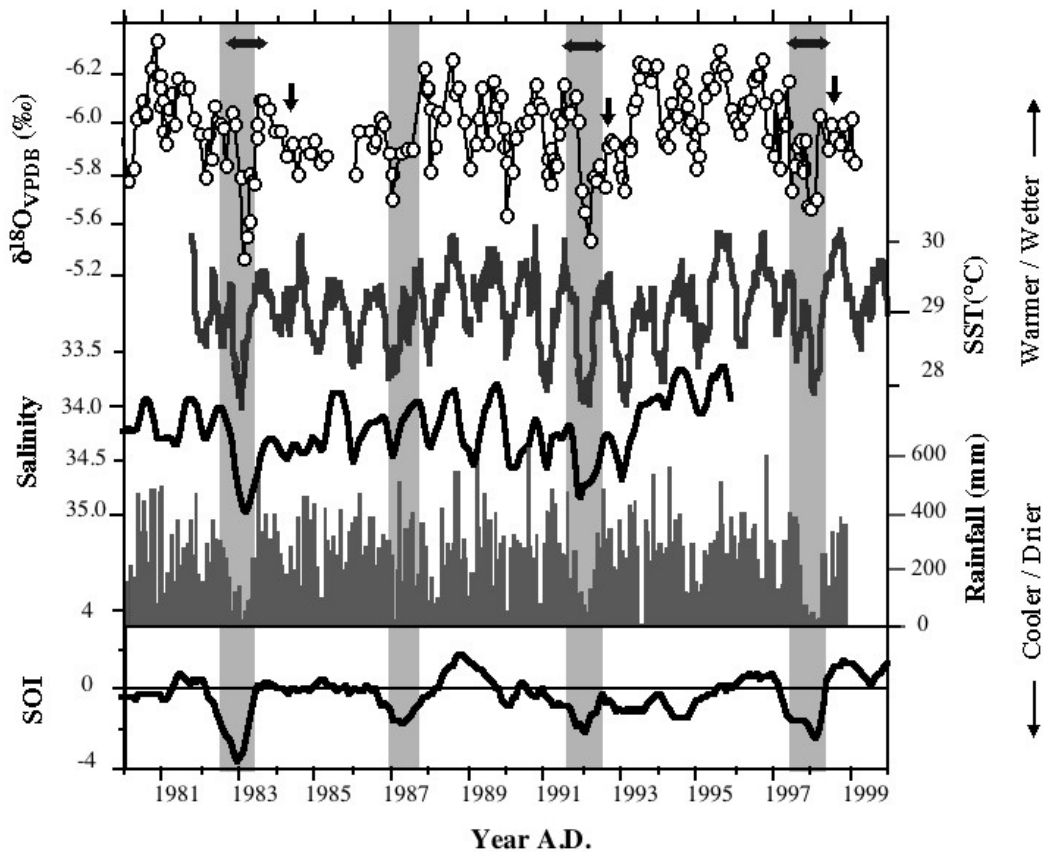


図 11 ミクロネシアのサンゴ記録と海洋気候諸量との関係。上段からサンゴ骨格の酸素同位体比、水温、降水量、南方変動指数を示す。エルニーニョ時にハッチを施した。エルニーニョに伴う低水温による酸素同位体比の増加期間を横向矢印で、また、それに引き続く高塩分による酸素同位体比の増大期間を下向き矢印で示した。エルニーニョの際の変化が、下向きに表示されるように、骨格の酸素同位体比については正方向を下向きにプロットしている。

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 12 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<sup>13,14)</sup>とよく対応している。また、この約 90 年の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ですが、同時にこの海域の降水量の増加による塩分の低下が寄与している可能性がある。

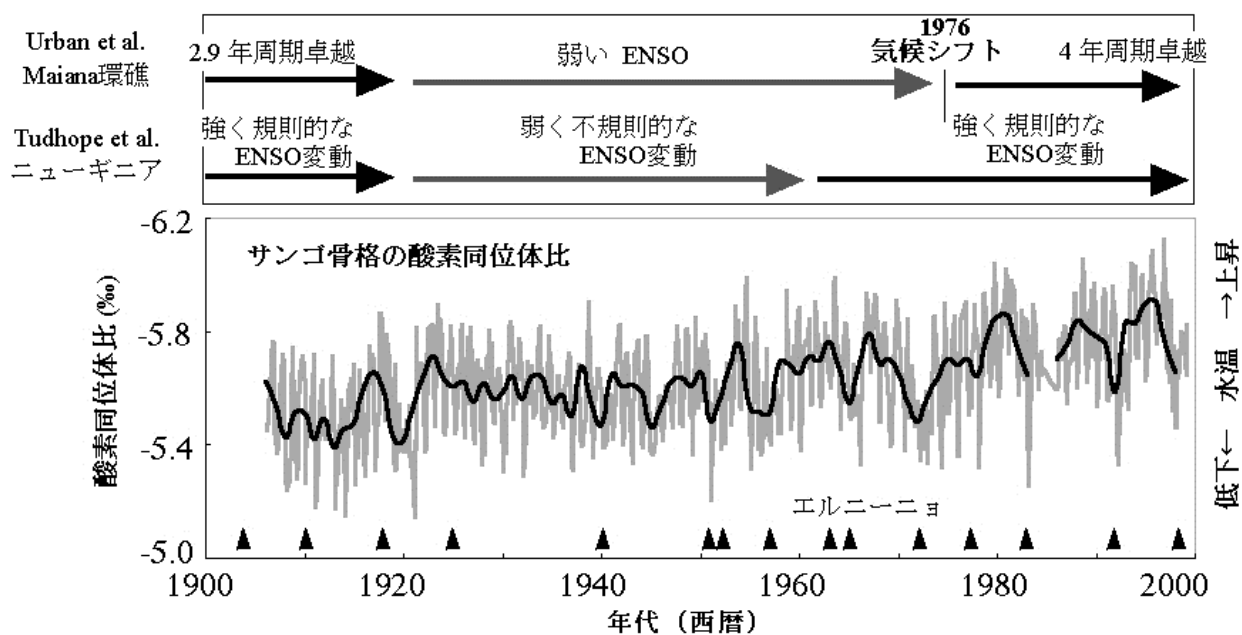


図 12 ミクロネシア・チュック環礁の過去約 90 年間のサンゴ骨格の酸素同位体比記録。約 2 ヶ月間隔の分析値を淡灰色線で、年平均を黒線で示した。エルニーニョ発生時期に三角記号を配した。最近の 90 年間で酸素同位体比の年平均値が約 0.2‰減少する傾向が認められる。ニューギニア<sup>14)</sup>および中部太平洋の Maiana 環礁<sup>13)</sup>のサンゴ記録から復元された 20 世紀における ENSO 変動の強度および周期の特徴を併せて示した。

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 2 つのエルニーニョは、中部赤道太平洋に見い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<sup>15)</sup>。エルニーニョの発生頻度や強度については、(1)カオス的な振る舞いをする ENSO 変動機構<sup>16)</sup>の内的要因によってもっぱら規定されている、とする考えと、(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、とする 2 つの対立する仮説がある。

Timmermann et al. (1999)<sup>17)</sup>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. (2000)<sup>13)</sup>による中部赤道太平洋 Mariana 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、1685-88 年、1789-93 年のエルニーニョが知られ



ている。特に、1789-93 年の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 1789-92 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 1787-88 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。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。1997-98 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、1685-88 年と 1789-93 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。

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、の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. (2001)<sup>14)</sup>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 5000 ~ 6000 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<sup>18)</sup>。

#### (4) 小笠原サンゴ試料に見られる太平洋十数年変動

東アジア地域のモンスーン変動(東アジアモンスーン)は、大局的には冬のシベリア高気圧と夏の小笠原高気圧の発達に規定される。小笠原諸島父島から採取された全長 180cm のサンゴ試料は、小笠原高気圧の影響域の水温変動を復元するためのものである。約 160 年間に渡って分析された酸素同位体比には、1900 年ころに大きな低下シフトが見られ、急激な水温上昇あるいは塩分の増加が示唆されるが、その後は明瞭なトレンドが見られない。本研究課題で得られたサンゴ試料を始め、世界各地のサンゴ記録の大部分が、20 世紀を通じて明瞭な水温上昇傾向を示すのと対象的な傾向が小笠原のサンゴ記録から得られた。長期的な変化傾向についての検討は(7)項で詳述する。

時系列解析による検討の結果、小笠原諸島父島のサンゴ試料の酸素同位体比記録には 10 年スケールの変動成分の卓越が認められた。そして、冬期には、太平洋十年変動指数との有意な相関が認められる(図 13)。太平洋十年変動指数は、全球 SST 平均を除いた SST の 20°N の第一主成分(EOF)モードの時系列と定義される<sup>19)</sup>。北太平洋の数十年スケールの変動は、基本的にはアリューシャン低気圧の変動と結びついているが、日本近海の海洋変動を考えるうえでシベリア高気圧の変動も重要である。日本海では水温の時系列に、北極振動あるいは北大西洋振動と関係の深いシベリア高気圧の十年スケール変動とよい一致が見られることが知られている<sup>20)</sup>。北極振動

/北大西洋振動がシベリア高気圧の変化を通じてアジアモンスーンの強弱を変化させ、西太平洋およびその付近の縁海の海洋に影響を与えていることが考えられ、小笠原諸島父島のサンゴ記録もこの可能性を示唆する。北緯 27 度に位置する小笠原諸島の水温は、南方の熱帯起源の大気海洋変動よりもむしろ北方由来の変動が東アジアモンスーンを介して影響している可能性がある。

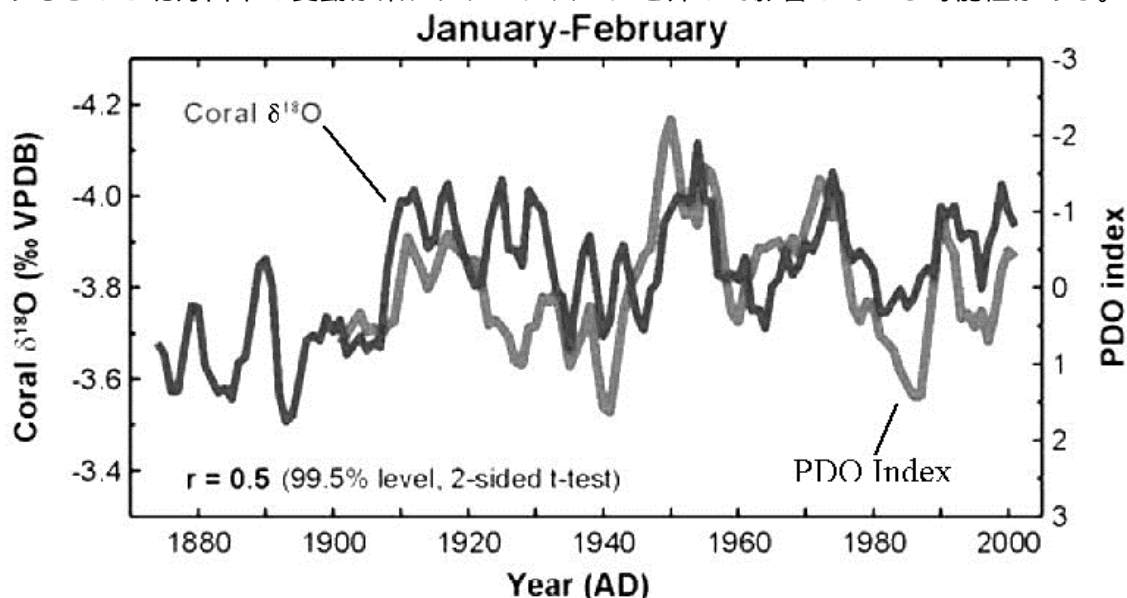


図13 小笠原諸島父島のサンゴ試料の酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) と太平洋十年変動指数 (PDO) <sup>19)</sup> の対応

#### (5) 石垣島サンゴ骨格にみる冬期水温変動と 1988/1989 年気候レジームシフト

石垣島産サンゴ長尺試料 (試料名: IY98-03) について、年間の骨格の直線成長量を計測したところ、6-21mm の間で変化しており、平均は 13mm であった。また、骨格の成長速度の増加と減少がくり返し起こっていることが認められた。年輪の成長速度は、水温を反映しているとする研究もあるが、光量など他の環境要因の影響も受けており、解釈が複雑なため、十分な研究対象となっていない。石垣島産サンゴ年輪の成長速度の周期解析の結果、4.7 年の周期が見られた。石垣地方気象台による石垣港における長期間の水温記録からも同じく 4.7 年の周期がみられた。4.7 年はモンスーン変動を反映しているとみられるインドの降水量変動の周期とも一致している。石垣島の海水温の変動周期が、モンスーンの変動と一致したことは、石垣島の海水温がモンスーン変動に規定されている可能性があること、また、モンスーン変動あるいは海水温がサンゴ骨格の成長速度に影響している可能性を示唆する。

次に、より厳密な水温変動解析のため、サンゴ骨格中の酸素同位体比の分析を行った。まず、最上部約 30 年間のサンゴ骨格中の酸素同位体比の極値と各年の水温の夏期・冬期の極値を用いてサンゴ骨格中の酸素同位体比の温度依存性 ( $\delta^{18}\text{O}/T$ ) を求めた。石垣島気象台が石垣港で観測している海水温記録について 1971~2000 年の年最高水温と最低水温 (旬値) を比較すると、最高水温は 28.7 (1985 年)~30.8 (1983 年)、平均 29.8 と比較的安定しているのに対し、最低水温は平均 20.2 であるが、17.2 (1971 年)~22.1 (1988 年)と年による差が大きい。サンゴ骨格の酸素同位体比の温度依存性の決定は、通常、夏冬両方の極値データを用いて行われるが、このサンゴ骨格試料の場合、冬期の極値のみについても有意な温度依存性を求めることが可能で、

-0.148‰°C<sup>-1</sup>という値を得た(図14)。また、これは冬期夏期両方について求められた値-0.147‰°C<sup>-1</sup>とよく一致しており、このサンゴ酸素同位体比が、水温指標として高い精度を持つことを示唆する。これらの温度依存性は、同じ安良崎のハマサンゴ骨格から報告されている Mitsuguchi *et al.*(1996)<sup>21)</sup>の値-0.134‰°C<sup>-1</sup>よりも傾きが大きく、他地域からの報告値に近い。Mitsuguchi *et al.*(1996)<sup>21)</sup>の温度依存性は他地域からの報告値よりも低いことが知られている。温度依存性の差異の原因については、今後の海水中の酸素同位体比の季節変動の測定、あるいは海水の水収支の影響を受けないサンゴ骨格中の Sr/Ca、Mg/Ca 比の測定によって検証する必要があるが、本研究では、得られた関係式を用いてサンゴ骨格の酸素同位体比から過去の水温を算出する。

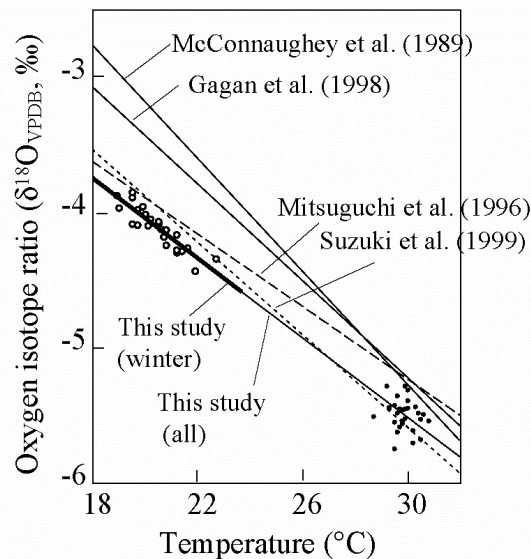


図14 ハマサンゴ骨格の酸素同位体比と水温の関係。白丸および黒丸は、石垣島サンゴ試料 98IY-03 の最上部約 30 年間のそれぞれ冬期および夏期の極値を示す。太線は冬期のデータについての回帰直線 ( $\delta^{18}\text{O} = -0.148 T(^{\circ}\text{C}) - 1.08, R^2 = 0.81$ ) で、冬期夏期両方を含めた回帰直線 ( $\delta^{18}\text{O} = -0.147 T(^{\circ}\text{C}) - 1.12, R^2 = 0.98$ ) とよく一致する。Mitsuguchi *et al.* (1996) および Suzuki *et al.* (1999)<sup>3)</sup> は、石垣島・安良崎および浦底湾のハマサンゴについて報告された関係式。また、Gagan *et al.* (1998)<sup>22)</sup> はグレートバリアリーフ、McConnaughey *et al.* (1989)<sup>23)</sup> は東太平洋ガラパゴス諸島のサンゴについての関係式である。

我が国は周囲をシベリア気団、オホーツク海気団、揚子江気団、小笠原気団の4つの気団に取り囲まれており、これらの消長により、季節ごとに卓越する風向が大きく異なる。これが季節風である。冬期にはシベリア高気圧が大きく発達し、いわゆる西高東低の気圧配置をとることにより、本土では北西の季節風が吹く(図15A)。石垣島の場合はその地理的な配置により、北東～北北東の風が卓越する。この季節風は本来、乾燥した冷たい風であるが、日本海、東シナ海を渡る際に大量の海水を蒸発させ、湿った風になる。これにより日本海側に大雪がもたらされることになるが、この蒸発の際の蒸発潜熱により、冬期の低水温がもたらされる。つまり、石垣島周辺海域の冬期の水温を決定する要因として、季節風の強さ、すなわちシベリア高気圧の発達度合いが挙げられる。冬期の季節風の強さを表す指標として、Hanawa *et al.* (1988)<sup>24)</sup> はロシアのイルク

ーツクと日本の根室の12月から翌年2月の気圧差の平均をその年の Monsoon Index (MOI)として定義している。

この MOI と石垣港の冬期(12月~翌2月)水温の平均の関係をみると、1971~1987年までは MOI の変動に一致した水温の変動がみられる。しかし、1988年以降については関係がみられない。1988年以前と以降の年ごとの冬期の平均水温を比較すると、1971~1987年の間については、20.2~22.0、平均21.1であるのに対して、1988年に観測史上最高の23.3を記録した後、2004年までの期間で21.4~23.3、平均22.4と、それ以前と比べてほぼ1のジャンプが認められる。1988/1989年に、中緯度太平洋、日本海、東シナ海において、それ以前とは不連続に水温が上昇するレジームシフトが認められている(Yasuoka and Hanawa, 2002)<sup>25)</sup>。石垣島の冬期の水温もこれに同調して上昇したものと考えられ、さらにこのレジームシフトと同時に MOI への依存性が消失している。つまり、1988/1989年のレジームシフト以前と以降で石垣島の水温を決定する主たる要因が、MOI、すなわち冬期の北寄りの季節風の強度から、別のものに遷移したものと考えられる。

次に、サンゴ骨格中の冬期の酸素同位体比極値とモンスーン変動との対応をみると、1981年を除き、1971~1998年期間について水温と同様、MOI の変動にほぼ対応した冬期の酸素同位体比極値の変動が認められ、一方、1989年以降については明瞭な対応関係は認められない(図15B)。この結果は、既に述べたように、このサンゴ試料の酸素同位体比が水温と明瞭な対応関係を持ち、水温の高精度な指標となっていることから予想される結果である。しかし一方で、石垣沿岸水を代表する石垣港水温よりも、水深が浅く熱容量が小さい安良崎サンゴ礁海水が季節風の冷却効果の影響を強く受けて変動し、大気現象をより鮮明に記録している、という効果も考えられる。

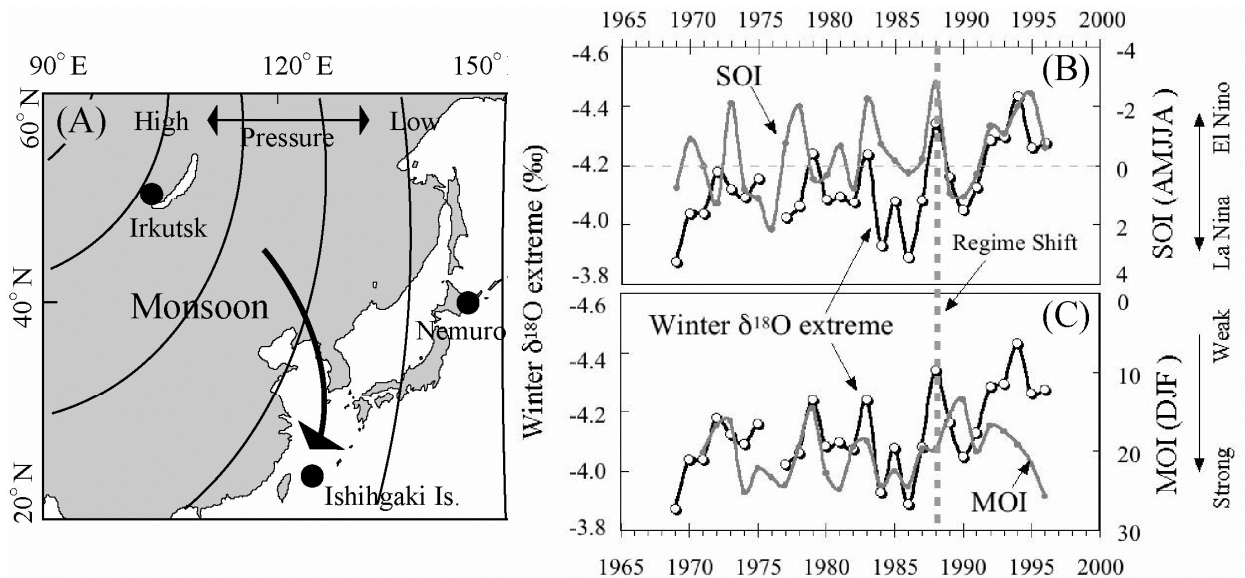


図15 (A) 冬期の東アジアモンスーンの模式図。冬の季節風の強さを示すモンスーン指数 (Monsoon Index, MOI) はイルクーツクと根室の気圧差で定義される。(B)冬期のサンゴ骨格酸素同位体比の極値と前年5月から8月の南方変動指数の平均値 (SOI) との比較、および(C) 冬期のサンゴ骨格酸素同位体比の極値とモンスーン指数 (MOI) との比較。冬期のサンゴ骨格酸素同位体比極値として示される石垣島沿岸部の最低水温は、1970~1987年までは MOI と一致した変動を示すが、

1988-1989 年の北太平洋における気候レジームシフト以降、むしろ約半年の遅延を伴って南方変動指数と相関した変動を示すようになる。

サンゴ骨格中の冬期の酸素同位体比極値とモンスーン変動との対応は、1988/1989 年のレジームシフトの後は対応がみられなくなった。そして、むしろ南方振動指数との対応が顕著に認められる(図 15C)。Park and Oh (2000)<sup>26)</sup>によると、東シナ海の海水温は東太平洋の Nino 3.4 海域の海水温に 5-9 ヶ月のラグを持ちつつ高い結束性(coherency)を示す。レジームシフト以前は、冬期の水温を決定する主たる要因が季節風による冷却効果であったが、季節風の吹き出しが弱まると、本来存在していた南方振動指数とのテレコネクションパターンが顕在化してきたものと考えられることができる。石垣島サンゴ記録に見出された変動は、局所的な海洋気象的要因によってのみ決定されるものではなく、アジアモンスーン変動を反映して、少なくともシベリア東部から太平洋中緯度地域にかけて、あるいは赤道太平洋まで含めた数千キロ以上の空間的広がりもった地域と関連していると考えられる。このことは今後、長期間にわたるサンゴ記録解析を進める上で興味深い。地球温暖化が進行すると、インドを中心としてモンスーン変動が活発になり、年毎の降水量変動も大きくなると考えられている。一方で、冬のアジアモンスーンは地球温暖化に伴って弱まることが気候モデル研究から予測されている(Hu et al., 2000)<sup>27)</sup>。石垣島において認められた冬期水温とモンスーン変動との対応弱体化は、近年の地球温暖化傾向に対応したものか、それとも過去にも繰り返し発生していたものかについて、このサンゴ試料の解析により明らかにされる可能性が高い。

#### (6) ジャワ海セリブ諸島のサンゴ記録：ENSO とインド洋ダイポールの関連について

アジアモンスーン南東端部のジャワ海における海水温変動の解析を行うため、ジャワ島北方沖合のセリブ諸島にて、サンゴ試料の採取を行った。対象試料の探索は、現地のインドネシア科学研究所(Indonesian Institute of Science; LIPI)の協力を得て検討した。ジャカルタ湾からセリブ諸島中部に至る島々で複数のハマサンゴ柱状試料を採取した(図 16)。ここでは、その中で最長(2.5m)の St. 3 で採取された試料 SER03-05 について各種分析を実施した。X線像による骨格観察の結果、およそ 100 年の年輪記録が保持されていることが明らかになった。ここでは、柱状試料の上部、最近の約 20 年間分の分析結果について記述する(図 17)。

まず、この試料の酸素同位体比は-6.0~-6.7‰と極めて低い範囲で変動し、世界的にみてもバリ島やパナマのサンゴとほぼ同じく、これは、ジャワ海が、大河川の河口部などを除いて熱帯の一般的な海域としては最も塩分が低い海域であることと対応している(図 7)。ジャワ海の東部、特にマッカサル海峡の南側の海域には、塩分 31~32 の低塩分水が表層に分布して(図 18、Sprintall et al., 2003)<sup>28)</sup>、太平洋からマッカサル海峡を通過してインド洋に至るインドネシア通過流(Indonesian Throughflow, ITF)の流入を抑制している可能性が指摘されている(Gordon et al., 2003)<sup>29)</sup>。セリブ諸島から採取されたサンゴ骨格中の酸素同位体比変動から、ジャワ海の低塩分海水の挙動について、モンスーン変動に伴う季節スケールから、ENSO やインド洋ダイポール変動など数年スケールの変動を検討しつつ、過去に遡って復元することができる。

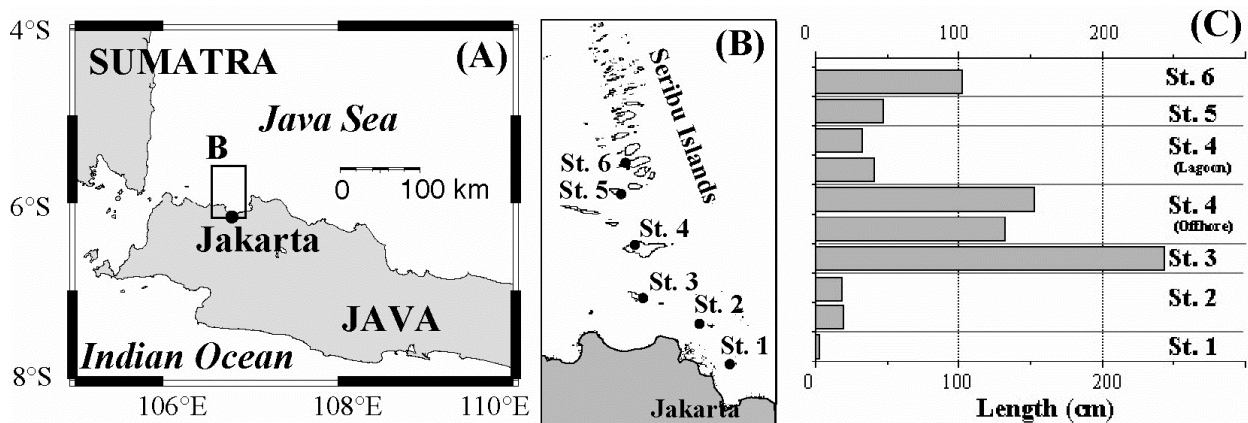


図 16 インドネシア・ジャワ島のジャカルタ湾沖合のセリブ諸島。(A)広域図。(B) セリブ諸島周辺図と試料採取地点。(C) 採取地点別の骨格試料の長さ。

1982 年から 2002 年の期間についてセリブ諸島サンゴの骨格分析値（酸素同位体比、Sr/Ca 比）と各種気候データ（降水量、海水温、東西風速）を図 17 に示した。サンゴ骨格の Sr/Ca 比は海水温の指標であり、酸素同位体比は水温と塩分の双方に影響される指標である。観測記録およびサンゴ記録ともに、水温の上昇および塩分の低下がグラフ上向きになるように配置されている。この海域の水温は半年周期が卓越するが、塩分は毎年 9 月に極小値をとる 1 年周期が卓越する。これに対応して、サンゴ骨格の Sr/Ca 比には 1 年未満の短周期変動が卓越し、一方、酸素同位体比は基本的に年周期の変動が卓越している。この海域の水温の年較差がおよそ 1°C であるのに対し、塩分の年変動が比較的大きいことも、サンゴ酸素同位体比の年周期変動を顕在化させていると思われる。この海域では、エルニーニョおよびインド洋ダイポール変動の Positive mode の発生期間には、わずかな海水温の低下と降水量の減少が見られる。これに対応して、サンゴ骨格の Sr/Ca 比にも低温イベントが認められる。特に 1994 年のインド洋ダイポール Positive mode は、エルニーニョとは独立であるが、これに対応したイベントは Sr/Ca 比でも明瞭である。インド洋ダイポール変動は、スマトラ島南西岸では湧昇に伴う顕著な水温低下現象の発生を引き起こすが、その影響が東方のジャワ海まで波及しており、さらにサンゴ骨格に記録されている点は興味深い。

サンゴ骨格の Sr/Ca 比が、水温とよく対応するのに比べて、サンゴ酸素同位体比の変動は複雑である。これは、酸素同位体比が水温と塩分の双方に影響されることに起因していると思われ、サンゴ酸素同位体比記録から海水の塩分変化寄与分を抽出するために、海水の酸素同位体比変化 ( $\Delta\delta^{18}O_w$ ) を次の関係式より算出した。

$$\Delta\delta^{18}O_w = \delta^{18}O_c - \delta^{18}O_t \quad (2)$$

$$\delta^{18}O_t = (A \text{ Sr/Ca} - B) \quad (3)$$

ここで、 $\delta^{18}O_c$  はサンゴ骨格の酸素同位体比、 $\delta^{18}O_t$  はサンゴ骨格酸素同位体比変化の水温による変化量、A, B は、このサンゴの Sr/Ca 比と水温の直線回帰分析より決定される係数、 $\delta^{18}O_t$  はサンゴ骨格の酸素同位体比の水温依存性でここでは  $-0.18\text{‰}\cdot\text{C}^{-1}$  を採用した。横軸の目盛は毎年の 9 月を示す。 $\Delta\delta^{18}O_w$  は、サンゴ骨格の酸素同位体比から、Sr/Ca 比によって推定される水温による変化分を差し引いたもので、塩分と相関する指標となる ( $\Delta\delta^{18}O_w$  が増加すると塩分も増加する)。通常は、海水の酸素同位体比の 1‰ の変化は塩分 4 の変化に対応する。しかし、式(3)で用いた  $\delta^{18}O_t$  には

誤差が含まれるため、ここでは塩分変化への換算は行わない。図 17 に示されるように、 $\Delta\delta^{18}O_w$  には、振幅が比較的大きく年周期が卓越する期間と、振幅が減少してより短周期変動が顕著になる期間が繰り返す様子が認められる。興味深いのは、小雨（干ばつ）イベントに際し、 $\Delta\delta^{18}O_w$  はむしろ低塩分化する傾向が見られる点である。これは局所的な小雨イベントによる塩分増加の効果よりも、ジャワ海の広域的な海流パターンが風系の影響を受けて変化したと考えるべきである。エルニーニョ発生時には西風が南シナ海起源の低塩分水をもたらし、インド洋ダイポール現象 Positive mode の発生時には東風がジャワ海東部の極低塩分水を西に移動させていた可能性が考察される。

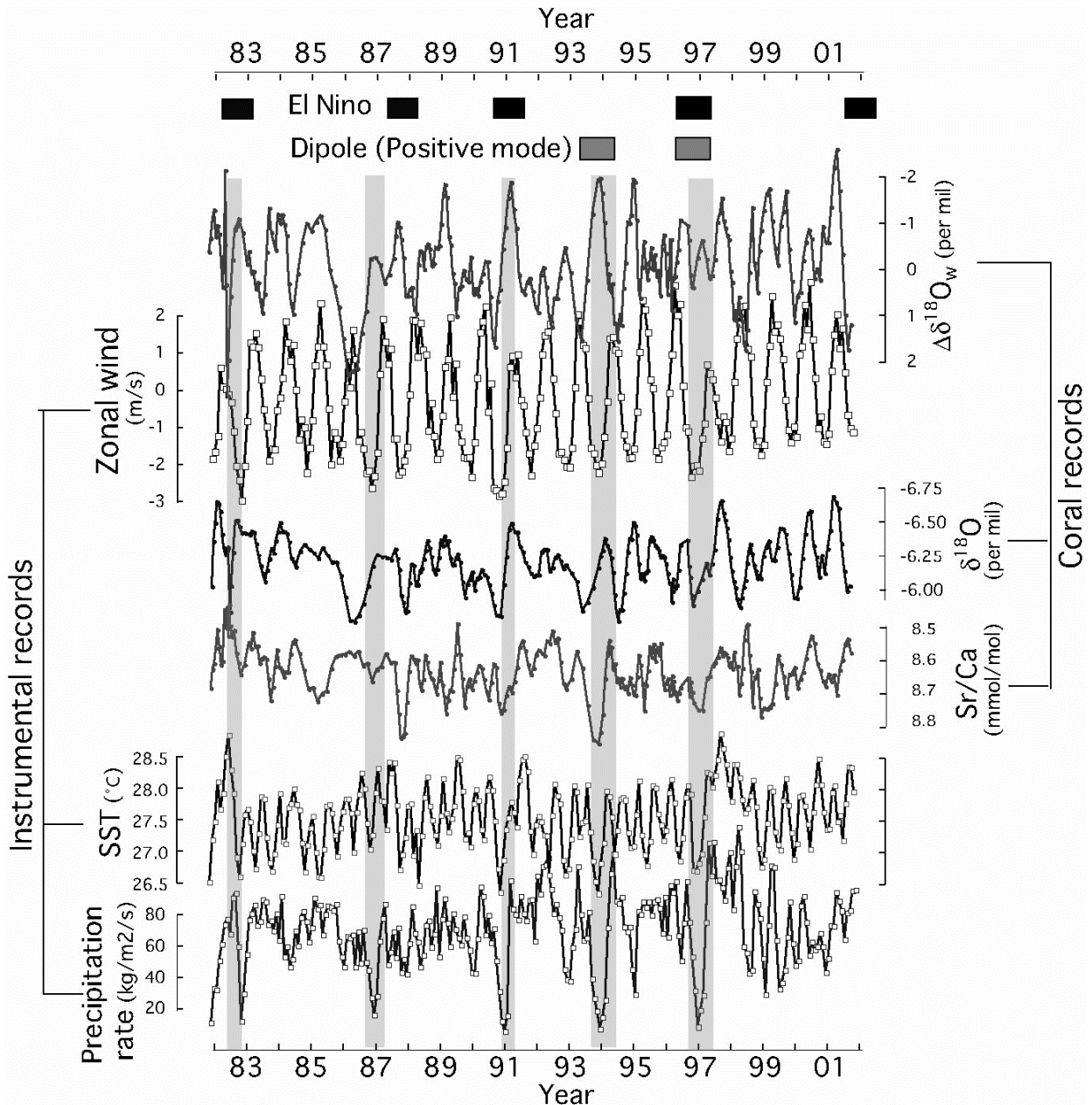


図 17 ジャワ海セリブ諸島のサンゴ記録と各種気候データ (1982 ~ 2002 年)。下から、降水量および海水温、サンゴ骨格の Sr/Ca 比および酸素同位体比、東西風速 (正が東向)、海水の酸素同位体比変化 ( $\Delta\delta^{18}O_w$ )。横軸の目盛は毎年の 9 月を

示す。上部にエルニーニョおよびインド洋ダイポールの Positive mode の発生期間をそれぞれ示した。また、これらのイベントに対応して発生する小雨期に灰色のハッチを施した。左側に目盛を配置したパラメータは、測器による観測項目であり、右側に目盛を配置したものはサンゴ骨格から化学分析により得られた代替指標である。海水の酸素同位体比変化 ( $\Delta\delta^{18}O_w$ ) は、サンゴ骨格の酸素同位体比から、Sr/Ca 比によって推定される水温による変化分を差し引いたもので、海水の酸素同位体比変化に相当し、塩分と相関する指標となる。観測記録およびサンゴ記録ともに、水温の上昇および塩分の低下がグラフ上向きになるように配置されている。

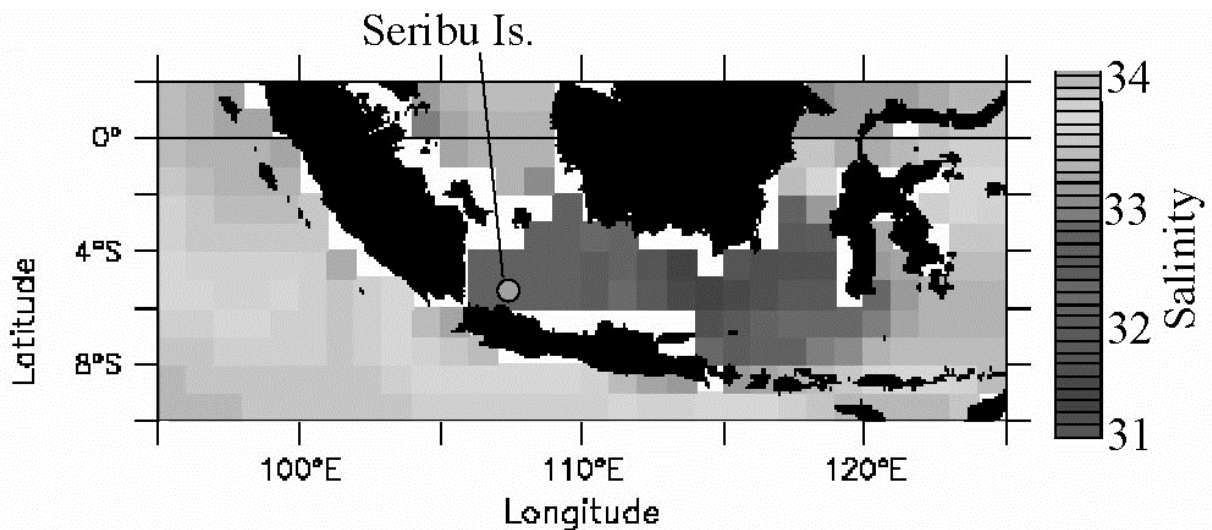


図 18 ジャワ海周辺における 4 月の水深 10m の平均塩分。カリマンタン島南岸付近に塩分が 32 以下の極めて低塩分の海水が分布する。Levi tus and Boyer (1998)<sup>30)</sup>より。

#### (7) 地球温暖化と海水温の上昇傾向について

東部太平洋や南太平洋、さらにインド洋を中心に、約100年以上の長尺サンゴ試料に基づいた水温復元の研究が数例報告されている(図19A)。本項では、これら従来の研究例に本研究課題により得られたデータを加えて、サンゴ骨格記録から明らかにされる長期的海水温変動の広域的パターンについて考察する。

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<sup>31)</sup>、グレートバリアリーフのアブラハムリーフ<sup>32)</sup>、およびパナマ<sup>9)</sup>から採取されたサンゴは、 $\delta^{18}O$ 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とになる(図19A; 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)。インド洋セイシェルでも同様に150年間のサンゴの $\delta^{18}O$ 値に0.15‰の低下が認められた<sup>11)</sup>。



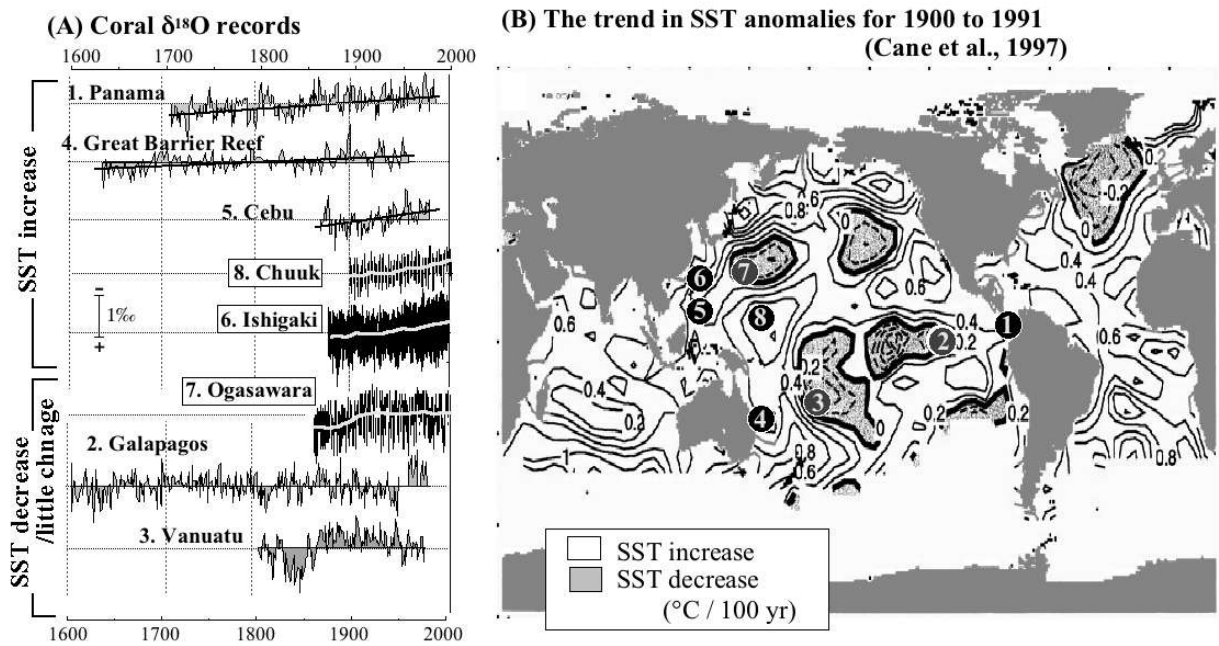


図19(A) 太平洋における長尺サンゴ試料の酸素同位体比記録。地点番号7～9は本研究課題による分析結果(全分析値をプロット)であり、それ以外のサンゴ記録はアメリカ大気海洋庁地球物理データセンターの古気候プログラム([http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/coral/coral\\_data.html](http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/coral/coral_data.html))より取得した(全期間の平均からの年平均値の偏差を示す)。各地点のサンゴ種名、分析期間を以下に示す。1. パナマ(*Porites lobata*, 1708-1984)、2. ガラパゴス(*Pavona clavus* and *P. gigantea*, 1607-1981)、3. バヌアツ(*Platygyra lamellina*, 1806-1979)、4. グレートバリアリーフ(*P. australiensis*, 1635-1957)、5. セブ(*P. lobata*, 1859-1980)。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<sup>5)</sup>。水温の低下域に灰色のハッチを施した。図中の白ヌキ数字は(A)のサンゴ記録の採取地点を示す。

本研究課題で採取したルソン島南部の太平洋岸に位置するピコール地方のサンゴ記録では、エルニーニョ時には水温の低下傾向が見られるものの、より東に位置するマイクロネシアほど顕著ではない(図4、図6)。ピコール地方産サンゴの約200年間に渡る酸素同位体比記録(途中に未分析区間含む)について、約0.3‰の低下傾向が認められるが、その主要な変化は最近50年間に集中している。

石垣島南部の石垣港は日本国内で最も長期間の海水温観測記録を有する測点の一つである。1914年以降の年平均水温は年間0.012℃の明瞭な温暖化傾向を示しており、冬期の海水温については上昇傾向がより急速である。1998年から1897年までのサンゴ記録(途中に未分析区間含む)には、約0.2‰の低下傾向が認められる。石垣島の気象観測記録はこの期間にわずかながら小雨化の傾向を示しているため、サンゴ骨格の酸素同位体比減少幅はもっぱら水温の上昇によるものかも知れない。

小笠原諸島父島の約160年間に渡って分析された酸素同位体比記録は、1900年ころに急激な水温上昇あるいは塩分の増加を示唆するが、その後は明瞭なトレンドが見られない。本研究課題で得られたサンゴ試料を始め、世界各地のサンゴ記録の大部分が、20世紀を通じて明瞭な水温上昇傾向を示すのと対象的な傾向が小笠原のサンゴ記録から得られた。

Cane et al. (1997)<sup>33)</sup>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. (1997)<sup>33)</sup>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19Bである。この図から明らかなように、20世紀に低温化傾向が認められる海域として、東部太平洋以外に北大西洋、西太平洋中緯度海域、日付変更線付近の南太平洋中低緯度域の4ヶ所が認められる。西太平洋では、北太平洋亜熱帯環流西部に若干の低温化域が、その周辺の赤道から西太平洋縁辺域に掛けて高温化域が存在していると報告されている。小笠原諸島父島のサンゴ記録に水温上昇傾向が見られなかったのは、この地点が、低温化傾向が認められる海域の縁辺部に位置しているからと考えられる。その他、本研究課題の分析によるミクロネシア、フィリピンおよび石垣島のサンゴ記録を含めて、各地の長尺サンゴ試料に見い出された長期トレンドとCane et al. (1997)<sup>33)</sup>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．本研究により得られた成果

### (1) 長尺サンゴ試料についての酸素同位体比分析

現在までに、小笠原諸島父島ほか、石垣島、フィリピン、ミクロネシアより150年ないしそれ以上のサンゴ骨格酸素同位体比記録を得た。ほとんどの地点で同位体比の減少傾向、すなわち海水温上昇あるいは塩分低下の傾向が認められる。近年の酸素同位体比の減少傾向は、石垣島およびフィリピン、チュック環礁で顕著であり、一方、小笠原では明瞭な変化は見られない。20世紀を通じた水温記録解析によって、北太平洋亜熱帯環流西部に若干の低温化域が、その周辺の赤道から西太平洋縁辺域に掛けて高温化域が存在していると報告されているが<sup>33)</sup>、サンゴ記録にみる水温変化傾向はこれと大局的に一致しているように思われる。

### (2) 西太平洋・東南アジア域における過去20年間のサンゴ記録の変動解析

1990年代は、全球的に20世紀でもっとも暖かかった10年間であると考えられている。太平洋の低緯度域では、今世紀最大ともいわれたエルニーニョが発生した。水温との単回帰式によりスケールしたサンゴ骨格の酸素同位体比は“みかけの水温”として、エルニーニョイベントの検出と近年の水温上昇傾向の推定に良好な結果を得た。これは、サンゴ骨格記録の気候記録能力の高さを示唆するものである。

### (3) 小笠原サンゴ試料に見られる十年スケールの気候変動の解析

小笠原諸島父島のサンゴ試料の酸素同位体比記録には10年スケールの変動成分の卓越が認められた。そして、冬期には、太平洋十年変動指数との有意な相関が認められた。十年スケールの北太平洋変動は、基本的にはアリューシャン低気圧の変動に関連していると思われるが、北極振動/北大西洋振動がシベリア高気圧の変化を通じてアジアモンスーンの強弱を変化させ、北西太平洋およびその付近の縁海の海洋に影響を与えていることも考えられ、小笠原父島のサンゴ記録も

この可能性を示唆する。

#### (4) 石垣島サンゴ骨格にみる冬期水温変動と1988/1989年気候レジームシフト

石垣島北部安良崎から得られたサンゴ試料は、冬期水温の経年変動を精密に復元できる。1971～1988年の期間について、冬期の最低水温はモンスーン指数とよく対応する。一方、1988/1989年に、中緯度太平洋においてそれ以前とは不連続に水温が上昇するレジームシフトの発生が知られているが、この時期以降、石垣サンゴ記録にモンスーン指数との明瞭な対応関係は認められず、むしろ南方振動指数との対応が顕著になる。レジームシフト以前は、冬期の水温を決定する主たる要因が季節風による冷却効果であったが、季節風の吹き出しが弱まると、南方振動指数とのテレコネクションパターンが顕在化してきたものと考えられることができる。

#### 6. 引用文献

- 1) Gagan, M. K., L. K. Ayliffe, J. W. Beck, J. E. Cole, E. R. M. Druffel, R. B. Dunbar, D. P. Schrag, (2000) New views of tropical paleoclimates from corals, *Quat. Sci. Rev.*, 19, 45-64.
- 2) 鈴木 淳、谷本陽一、川幡穂高: 「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 (1999).
- 3) 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.
- 4) Suzuki, A., Gagan, M.K., De Deckker, P., Omura, A., Yukino, I., 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.
- 5) 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.
- 6) Okai, T., Suzuki, A., Kawahata, H., Terashima, S., Imai, N. (2002) Preparation of New GSI Geochemical Reference Material: Coral JCp-1. *Geostandards Newslett.* 26, 95-99.
- 7) 河名俊男、中田 高 (1994) サンゴ質津波堆積物の年代からみた琉球列島南部周辺海域における後期完新世の津波発生時期、*地学雑誌*, 103, 352-376.
- 8) Cole, J. E., Fairbanks, R.G. Shen, G. T. Recent Variability in the Southern Oscillation: Isotopic Results from a Tarawa Atoll Coral. *Science* 260, 1790-1793 (1993)
- 9) Linsley, B.K., Dunbar, R.B., Wellington, G.M. (1994) A coral-based reconstruction of intertropical convergence zone variability over Central America since 1707. *J. Geophys. Res.*, 99, 9977-9994.
- 10) Dunbar, R.B., G.M.
- 11) Wellington, N.W. Colgan, P.W. Glynn (1994) Eastern Pacific climate variability since 1600 A.D.: stable isotopes in Galapagos corals. *Paleoceanogr.*, 9, 291-315.
- 12) 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.
- 13) Suzuki, A., Kawahata, H., Tanimoto, Y., Tsukamoto, H., Gupta, L. P. and Yukino, I. (2000) Skeletal isotopic record of a *Porites* coral during the 1998 mass bleaching event. *Geochem. J.*, 34, 321-329.

- 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) Kerr, R.A. (1999) Big El Niños ride the back of slower climate change. *Science*, 283, 1108-1109.
- 17) Tzipermann, E., L., Stone, M.A. Cane, H. Jarosh (1994) El Niño chaos: Overlapping of resonances between the annual cycle and the Pacific ocean-atmosphere oscillator. *Science*, 264, 72.
- 18) Timmermann, A., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Esch, M. Latif, E. Roeckner (1999) Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, 398, 694-697.
- 19) Cole, J. (2001) A slow dance for El Niño. *Science*, 291, 1496-1497.
- 20) Mantua, N. J., S. R. Hare, Y., Zhang, J. M. Wallace, R. C. Francis (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Am. Met. Soc.*, 76, 1069-1079.
- 21) Minobe, S. (2000) Spatio-Temporal Structure of the Pentadecadal Variability over the North Pacific. *Prog. in Oceanogr.*, 47, 99-102.
- 22) Mitsuguchi, T., Matsumoto, E., Abe, O., Uchida, T. and Isdale, P. J. (1996) Mg/Ca thermometry in coral skeletons. *Science* 274, 961-963.
- 23) Gagan, M. K., Ayliffe, L. K., David, H., Cali, J. A., Mortimer, G. E. Chappell, J., McCulloch, M. T. and Head, M. J. (1998) Temperature and surface-ocean water valance of the Mid-Holocene tropical western Pacific. *Science* 279, 1014-1018.
- 24) McConnaughey, T. (1989)  $^{13}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochim Cosmochim Acta* 53, 151-162.
- 25) Hanawa, K., T. Watanabe, N. Iwasaka, T. Suga and Y. Toba, 1988: Surface Thermal Conditions in the Western North Pacific during the ENSO Events. *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 445-456.
- 26) Yasunaka, S., and Hanawa, K. (2002) Regime shifts found in the Northern Hemisphere SST field. *J. Meteorol. Soc. Jpn*, 80, 119-135.
- 27) Park WS, Oh IS (2000) Interannual and interdecadal variations of sea surface temperature in the East Asian Marginal Seas. *Progr Oceanogra* 47:191–204.
- 28) Hu, Z.-Z., Bengtsson, L., Arpe, K. (2000) Impact of global warming on the Asian winter monsoon in a coupled GCM, *J. Geophys. Res.*, 105, 4607–4624.
- 29) Gordon, A. L., Susanto, R.D., Vranes, K. (2003) Cool Indonesian throughflow as a consequence of restricted surface layer flow. *Nature*, 425, 824-828.
- 30) Sprintall, J., Potemra, J.T., Hautala, S.L., Bray, N.A., Pando, W.W. (2003) Temperature and salinity variability in the exit passages of the Indonesian Throughflow. *Deep-Sea Research II* 50, 2183-2204.
- 31) Levitus, S., Boyer, T.B. (1998) *World Ocean Atlas*. National Oceanic and Atmos. Admin., Silver Spring, Md.

- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) 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.

[ 研究成果の発表状況 ]

( 1 ) 誌上発表 ( 学術誌・書籍 )

- A. Suzuki, H. Kawahata, T. Ayukai, and K. Goto: Geophys. Res. Lett. 28, 1243-1246, (2001) "The oceanic CO<sub>2</sub> system and carbon budget in the Great Barrier Reef, Australia"
- 鈴木 淳: 『海と環境: 海が変わると地球が変わる』、日本海洋学会編、講談社、pp. 51- 63 (2001) 「サンゴの年輪は語る」
- A. Suzuki, M. K. Gagan, P. De Deckker, A. Omura, I. Yukino, H. Kawahata : Geophys. Res. Lett., 28, 3685-3688 (2001) "Last Interglacial coral record of enhanced insolation seasonality and seawater <sup>18</sup>O enrichment in the Ryukyu Islands, northwest Pacific"
- 鈴木 淳・川幡穂高: 日本海水学会誌、56, 103-107 (2002)  
「サンゴ骨格による気候変動解析」
- 井上麻夕里・鈴木 淳・菅 浩伸: 日本海水学会誌、56, 113-117 (2002)  
「海洋汚染指標としてのサンゴ骨格中の重金属元素」
- 鈴木 淳・川幡穂高: 月刊海洋「総特集 熱帯海洋変動」、34, 380-386 (2002)  
「熱帯太平洋のサンゴ骨格気候学」
- 井上 麻夕里、菅 浩伸、鈴木 淳 : 地球化学、36 , 65-79 (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 - 」
- T. Okai, A. Suzuki, H. Kawahata, S. Terashima, N. Imai: Geostandards Newslett. 26, 95-99 (2002)  
"Preparation of New GSJ Geochemical Reference Material: Coral JCp-1"
- 鈴木 淳、川幡 穂高: 月刊地球、24-6 , 416-422 (2002)  
「サンゴ骨格気候学と古海洋変動」
- A. Suzuki, and H. Kawahata : Tellus B, 55, 428-444 (2003) "Carbon budget of coral reef systems: an overview of observations in the fringing reefs, barrier reefs and atolls in the Indo-Pacific regions"
- K. Ohkushi, A. Suzuki, H. Kawahata, and L.P. Gupta: Mar. Micropaleontol., 48, 281-290 (2003)  
"Glacial-interglacial deep-water changes in the NW Pacific inferred from single foraminiferal  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ "
- A. Suzuki, M.K. Gagan, K. Fabricius, P.J. Isdale, I. Yukino and H. Kawahata: Coral Reefs, 22,

357-359 (2003) “Skeletal isotope microprofiles of growth perturbations in *Porites* corals during the 1997-1998 mass bleaching event”

M. Inoue, A. Suzuki, M. Nohara, H. Kan, A. Edward, and H. Kawahata: Environmental Pollution 129, 399-407 (2004) “Coral skeletal tin and copper concentration at Pohnpei, Micronesia: Possible index for marine pollution by toxic anti-biofouling paints”

M. Inoue, M. Nohara, T. Okai, H., and A. Suzuki, H. Kawahata: Geostandards and Geoanalytical Research, 28, 411-416 (2004) “Concentrations of trace elements in carbonate reference materials coral JCp-1 and giant clam Jct-1 by inductively coupled plasma mass spectrometry.”

A. Szuuki, and H. Kawahata: Global Environmental Change in the Ocean and on Land, (M. Shiyomi, H. Kawahata, H. Koizumi, A. Tsuda, and Y. Awaya ed.), Terra, Tokyo, pp.229-248. (2004) “Reef water CO<sub>2</sub> system and carbon production of coral reefs: Topographic control of system-level performance”

R. Nakashima, A. Suzuki, and T. Watanabe: Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 211, 299-307 (2004) “Life history of the Pliocene scallop *Fortipecten*, based on oxygen and carbon isotope profiles”

T. Watanabe, A. Suzuki, H. Kawahata, H. Kan, S. Ogawa: Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 212, 343-354 (2004) “A 60-year isotopic record from a mid-Holocene fossil giant clam (*Tridacna gigas*) in the Ryukyu Islands: physiological and paleoclimatic implications”

鈴木 淳、川幡穂高：地球化学、38, 265-280 (2004)

「骨格の酸素・炭素同位体比にみるサンゴ白化現象の記録」

鈴木淳、菅 浩伸、川幡穂高：地球環境、9-2, 171-180 (2004)

「サンゴ骨格記録から復元される近過去のENSO変動の変遷」

T. Omata, A. Suzuki, H. Kawahata, M Okamoto: Geochim. Cosmochim. Acta, 69, 3007-3016 (2005) “Annual fluctuation in the stable carbon isotope ratio of coral skeletons: The relative intensities of kinetic and metabolic isotope effects”

A. Suzuki, K. Hibino, A. Iwase, H. Kawahata : Geochim. Cosmochim. Acta, 69, 4453-4462 (2005) “Intercolony variability of skeletal oxygen and carbon isotope signatures of cultured *Porites* corals: temperature-controlled experiments”

M. Inoue, A. Hata, A. Suzuki, M. Nohara, N. Shikazono, W. W.-S. Yim, W. S. Hantoro, D. Sun, H. Kawahata: Environmental Pollution, “Distribution and temporal changes of lead in the surface seawater in the western Pacific and adjacent seas derived from coral skeletons” (in press)

T. Omata, A. Suzuki, H. Kawahata, S. Nojima, A. Hata: Global and Planetary Change “Oxygen and carbon stable isotope systematics in coral near its latitudinal limit: the coral response to low thermal stress” (in press)

角田友明、川幡穂高、鈴木 淳、蓑島佳代、鹿園直建 地球化学: 「石垣島安良崎のサンゴ骨格の酸素同位体比にみる冬期の水温変動 1988/1989 年気候レジームシフト」 (in press)

## ( 2 ) 口頭発表

A. Suzuki, H. Kan, H. Hodaka, A. Edward : 7th International Conference on Paleoceanography,

Sapporo, Japan (2001) “Coral oxygen isotope record of marine environmental variability in the Chuuk Atoll, the North equatorial Pacific”

A. Suzuki, H. Kan, H. Hodaka, A. Edward : First ARTS Open Sciences Meeting, Numea, New Caledonia (2001) “Coral oxygen isotope record from the Chuuk Atoll, the North Equatorial Pacific”

井上麻夕里、菅浩伸、野原昌人、鈴木 淳、川幡 穂高：2001 年度古海洋学シンポジウム (2002) 「サンゴ骨格中の重金属元素について—ミクロネシア・ポンペイ島の海洋環境変遷」

鈴木 淳、菅 浩伸、井上 麻夕里、谷本陽一、A. Edward、川幡 穂高：地球惑星関連学会 2002年合同大会「ミクロネシア東カロリン諸島域のサンゴ骨格酸素同位体比によるENSO変動の復元」

井上 麻夕里、菅 浩伸、鈴木 淳、A. Edward、野原 昌人、川幡 穂高：地球惑星関連学会 2002年合同大会 (2002) 「海洋汚染指標の可能性としてのミクロネシア・ポンペイ島のサンゴ骨格中の重金属について」

岡井貴司、鈴木 淳、寺島 滋、川幡 穂高、今井 登：2002年度日本地球化学会第49回年会 (2002) 「産総研地球化学標準試料JCt-1 (シャコ貝) の調製とその化学組成」

A. Suzuki, H. Kan, A. Edward H. Kawahata : Western Pacific Geophysics Meeting , Wellington New Zealand (2002) “Coral Records of ENSO-related climate variability in East Caroline Islands, northern Equatorial Pacific”

A. Suzuki, M. K. Gagan, K. Fabricius, P. J. Isdale, I. Yukino, and H. Kawahata : EGS-AGU-EUG Meeting , Nice, France, 2003. “Skeletal isotope records of growth perturbations in *Porites* corals during the 1997-1998 mass bleaching event”

鈴木 淳、M. K. Gagan、K. Fabricius、川幡穂高：地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会 (2003) 「骨格の酸素・炭素同位体比変動からみたサンゴ白化現象」

小俣 珠乃、鈴木 淳、川幡 穂高、岡本峰雄：地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会 (2003) 「サンゴ骨格内中の炭素及び酸素同位体比記録に示されるキネティックと代謝活性の関係」

榎尾友里子、鈴木 淳、塚本すみ子、川幡 穂高：地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会 (2003) 「与那国島の化石サンゴに記録された最終間氷期の気候変動」

井上 麻夕里、野原 昌人、岡井 貴司、鈴木 淳、川幡 穂高：地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会 (2003) 「ICP-MS によるサンゴ、シャコガイ炭酸塩標準物質中の微量元素測定」

A. Suzuki, H. Kawahata, T. Ayukai: 13th Goldschmidt Conference, Kurashiki, Japan, 2003 “The oceanic CO<sub>2</sub> system and biogeochemical processes in the Great Barrier Reef, Australia”

M. Inoue, M. Nohara, T. Okai, A. Suzuki, H. kawahata : 13th Goldschmidt Conference, Kurashiki, Japan, 2003 “Trace element concentrations in carbonate reference materials; coral JCp-1 and giant clam JCt-1 by inductively coupled plasma mass spectrometry

T. Omata, A. Suzuki, H. Kawahata, M. Okamoto : 13th Goldschmidt Conference, Kurashiki, Japan, 2003 “The relative intensities of kinetic and metabolic isotope effects for skeletal carbon and oxygen isotopes in *Porites* corals”

鈴木 淳、川幡 穂高、M. K. Gagan、K. Fabricius、雪野 出：日本地球化学会年会 (2003) 「白化サンゴ骨格に見られる酸素・炭素同位体比変動：代謝効果と反応速度論的效果」

岡井 貴司、鈴木 淳、寺島 滋、井上 麻夕里、野原 昌人、川幡 穂高、今井 登：2003 年度日本地球化学会年会 (2003) 「産総研地球化学標準試料 JCp-1 (サンゴ), Jct-1 (シャコガイ) の共同分析結果」

A. Suzuki, H. Kawahata, H. Kan, A. Edward : Workshop on Global Carbon Cycle and Related Mapping Based on Satellite Imagery and Climatic Change, Tsukuba, Japan, 2004

“Coral Records of ENSO-related climate variability in East Caroline Islands, Northern Equatorial Pacific”

A. Suzuki, K. Hibino, H. Kawahata : 10th International Coral Reef Symposium , Ginowan, Japan, 2004 “Variability of skeletal oxygen and carbon isotopes of cultured *Porites* corals”

T. Felis, A. Suzuki, H. Kawahata : 10th International Coral Reef Symposium , Ginowan, Japan, 2004 “A coral record of northwestern Pacific climate variability from 27 degrees north”

M. Inoue, M. Nohara, A. Hata, A. Suzuki, H. Kawahata, N. Shikazono, D. Sun, T. Felis : International Conference on Paleoceanography VIII , Biarritz, France, 2004 “Reconstruction of Pb variation in the surface water of the western Pacific by using annually banded corals”

Y. Yokoyama, A. Suzuki, H. Kawahata : International Conference on Paleoceanography VIII , Biarritz, France, 2004 “Last Interglacial sea-surface temperature recorded in *Porites* corals obtained from Hateruma, Japan”

A. Suzuki, K. Hibino, A. Iwase, H. Kawahata : AGU 2004 Fall Meeting , San Francisco, USA, 2004 “Intercolony variability of skeletal oxygen and carbon isotope ratios of cultured corals: temperature-controlled experiments”

Y. Yokoyama, A. Suzuki, H. Kawahata, T. M. Easat : AGU 2004 Fall Meeting , San Francisco, USA, 2004 “Last Interglacial sea-surface temperature recorded in *Porites* corals obtained from Hateruma, Japan”

L. P. Gupta, A. Suzuki, H. Kawahata : AGU 2004 Fall Meeting , San Francisco, USA, 2004 “Annual variations in aspartic acid content of coral skeleton: A new proxy for changes in biological activity of coral”

H. Kawahata, M. Inoue, A. Suzuki : AGU 2004 Fall Meeting , San Francisco, USA, 2004 “Stable isotope and chemical composition of pearls - Biomineralization in cultured pearl oysters in Ago Bay, Japan –“

T. Felis, A. Suzuki, N. Rimbu, H. Kawahata : PAGES-DEKLIM Conference, Mainz, Germany, 2005 “Pacific decadal oscillation documented in a subtropical North Pacific coral record”

( 3 ) 出願特許

なし

( 4 ) 受賞等

なし

( 5 ) 一般への公表・報道等



しんぶん赤旗（15年4月6日、全国版、「科学のひろば」サンゴの白化現象）

（6）その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

本研究で得られた分析結果は、学术论文で報告するだけでなく、気候シミュレーションなどに供されるべく、国際的なデータ収集サイト（例えば、アメリカ合衆国大気海洋局古気候研究センター）にデータを提出して広く利用されるように努める。