

B-5 気候モデルによる気候変動評価に関する研究

(5) 気候システムの変動特性に関する研究

② 海水温の長期的変動の精度向上に関する研究

研究代表者 国立環境研究所地域環境研究グループ 森田昌敏

環境庁国立環境研究所

地域環境研究グループ

化学環境部 動態化学研究室

森田昌敏

柴田康行

米田 穰

(国際共同研究相手先)

Western Australian Marine Research Laboratories

John S. Edmonds

(平成8年度予算額 1,958 千円)

[要旨] 気候モデルを用いた定量的な気候変動評価の精度を向上させるために、過去の海水温変化に関する詳細な情報を現在の海洋生物由来の試料から読み出すための手法開発をすすめ、実試料を用いてその評価を行った。サンゴコア、並びに魚の耳石の同位体比、並びにアルカリ土類元素の比率から海水温とその変化を推定し、SSTデータと比較した結果、全体的にはよい一致を示した。また、底棲魚の耳石を用いた深部水温変化の読み出しの可能性が示された。

[キーワード] サンゴコア、耳石、同位体比、Ca/Sr/Mg比、海水温変化の推定

1. 序

地球の気候システムは、太陽からの放射エネルギーで駆動されている。特に熱容量や潜熱等の大きさから、水は気候を決めるもっとも重要な因子であり、海洋の存在は、地球の特徴的な気候を決める要因となっている。

現在を含む過去の環境変化の記録は、大気、海洋間の相互作用を組み込んだ気候モデルの作成において、その評価、並びに精密化に欠かすことのできないものである。しかしながら、全球レベルの海水表面温度 (SST) の記録は比較的最近に限られており、より長期的な変動の評価に使える情報はわずかしかない。海の生物が作る炭酸塩鉱物にとりこまれる同位体や元素の比率は、作られた時の周囲の海水温に応じた分別効果によって変動し、逆にその変化を読み出すことで歴史的な水温変化が読み出せる可能性がある。特に、サンゴや魚の耳石等は、年々成長していく過程でその時々同位体比、元素比を記録しており、その年輪構造にそった詳細な分析によって、その間の詳しい海水温変化の記録を復元できることが期待される。本研究では、海洋生物起源の炭酸塩鉱物中に記録されている環境変化の記録を読み出すことで、長期的な海洋の温度変化に関する情報を得、それを気候モデルの評価、精密化に役立てることを目標としている。

サンゴや魚の耳石は、主としてアラゴナイト構造の炭酸カルシウムからなる。炭酸カルシウムの沈殿生成の際に同じアルカリ土類金属元素であるストロンチウムが共存していると、カルシウムに置き換わる形で結晶内に取り込まれる。その取り込みの比率は周囲の水温に反比例することが実験的に示されており、逆に結晶中のストロンチウム／カルシウム比から生成時の水温を推定できる¹⁻⁴⁾。また一方で、水と無機炭酸の間で同位体平衡にある酸素同位体の分配が水温に比例して決まることを利用して、炭酸カルシウム中の酸素の安定同位体比から海水温を推定することも可能である⁵⁾。本研究では、この2つの手法を用いて、サンゴを対象とした低・中緯度海域を中心とする海表面温度の歴史的記録の解釈、並びに魚の耳石を用いた全球レベルの場所別、深度別水温変化の解析の可能性の検討の2つの課題を立てて、検討を進めた。

2. 試料並びに分析手法

2-1. サンゴ

造礁サンゴの中で、ハマサンゴの仲間 (*Polites* sp.) は周囲に向かって成長を続けながら、大きなものでは直径数メートル以上にも達する球状ないし円筒状のマイクロアトールと呼ばれる構造を作る。成長速度は年間1~2 cmで、長いものでは2、3百年にも渡って成長を続けている。こうした大型のハマサンゴは、水深数~10 m程度の深さの海底から海面下1 m程度まで、比較的孤立した状態で成長を続けている場合が多い。しかも、上記の目的で用いられるような水温変化の読み出しのためには、陸地からなるべく離れ、海水交換の良い場所にある試料を得なければならない。サンゴ本体へのダメージを最小限に止めながらその成長記録を残した試料を得るためには、表面から内部に向かって穴をあけ、コアを抜き取る必要がある。上記のような目的から、こうしたコアを得る作業は陸上からの支援が期待できず、しかも小型のボートしか使えないような場所で、少人数の研究者と潜水夫によって行われなければならない。国立環境研究所では、これまで所内研究ならびに科学技術振興調整費研究課題として、可搬式のサンゴコア採取装置の開発と試料採取を行ってきた。本研究においては、この装置を用いて、西オーストラリア州北西~西部沖合の珊瑚礁、即ちローリーショールズ、並びにアプロロス諸島でサンゴコアの採取を行った(図1参照)。これらの珊瑚礁は、いずれも陸地から数十km~300 kmほど離れており、陸域からの影響、河川水による同位体比への影響、人為的な活動の影響を無視できる場所に位置している。また、後述のルーウィン海流の発生場所付近、並びに下流に位置しており、エルニーニョの影響、ウォームプールの影響を観察するのに適した場所にある。

採取できたサンゴコアの長さは、ローリーショールズで約1.8 m、アプロロス諸島で総延長約3 mに達した。これらをダイヤモンド刃の丸鋸で厚さ約4~8mmの薄板に切断し、X線撮影で密度分布を明らかにした。年輪構造を元に解析した結果、ローリーショールズのコアは年平均約17mmの速度で連続して成長しており、現在からほぼ百年前まで連続して遡れることが明らかになった。一方、アプロロス諸島のコアは年平均成長速度約14mm程度で全体で200年以上に相当するものと考えられたが、途中でいくつか断絶があるため現在から連続的に遡れるのは約20年前までに限られることが明らかとなった。

薄切したサンゴコアは、超純水中で超音波洗浄した後50度で乾燥し、ついて直径1mmのドリルで穴をあけて削り取られたサンゴ粉を採取し、2分して、元素分析用及び安定同位体比分析用試料とした。

2-2. 魚の耳石

いわしの仲間で世界中に広く分布する *Sardinops sagax*、及びインド洋と太平洋西部の水深 100m 以深に生息するタイの仲間 *Pristipomoides multidentis* の 2 種の魚から平衡石 (Otoliths) を採取し、酸素安定同位体比を測定した。それぞれの種の採取位置を図 1 に示す。

2-3. 分析法

元素分析については、サンゴコア薄板から得られた粉末 (約 1mg ずつ) をあらかじめ硝酸につけて洗浄したポリプロピレン製遠沈管にとり、超純水で希釈した硝酸 (硝酸 : 水 = 1:100) を加えて溶解後、約 1 万倍に希釈し、分析用試料とした。元素分析は ICP 発光分光分析法 (日本ジャーレルアッシュ) で行った。

酸素の安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) は、無水リン酸処理で炭酸カルシウムから二酸化炭素を発生させ、真空ラインで精製後、安定同位体測定質量分析装置 (Optima、VG) で測定した。

3. 結果並びに考察

3-1. サンゴの分析

太平洋西部には表面海水温の高い暖水海域 (ウォームプール) があり、全球レベルの気候変動を支配する ENSO イベントとの関連で注目されている。特に ENSO イベントについては、これまで太平洋東部への影響が注目されてきたが、比較的最近になって、オーストラリア西岸を南に流れる海流の存在 (ルーウィン海流) とその強度との関連が注目されるようになってきた⁶⁾。本研究では、特にルーウィン海流との関連に着目し、図 1 に示すような採取地点を選んで試料を入手し、海水温との関連について解析を行った。

図 2 に、ローリーショールズから得られたサンゴコアの表層から約 7 年分の元素分析結果を示す。同じアルカリ土類元素である Sr と Ca との比をとると、X 線写真で認められた濃淡の縞模様 (年輪構造) に対応する明らかな変動が認められた。一方、Mg と Ca の比も同様に年変動パターンを示したが、それぞれの増減は図でわかるようにきれいな逆相関を示している。

図 3 には、Sr/Ca 比と水温変化に関する既報の関係式¹⁾をもとに計算されたこの間の海水温変化の推定値、並びにローリーショールズにおける SST データ (月平均値)⁷⁾ との比較を示す。なお、推定値の横軸の年代は、X 線写真の濃淡に基づく仮のものである。温度変化の幅は推定値、SST とともに年間数度とよい一致を示しているが、絶対値としては多少の違いが認められる。比較のために、別の研究者²⁾による推定式を用いた場合を図 4 に記した。2 つの推定式に基づく数値の間にも、SST データとの差と同程度の差があることがわかる。これらの関係式そのものも、他の場所における SST データとサンゴ元素比の実測データから導かれたものであるが、まだ実測例が少なく十分な検証が進んでいるとは言い難い状況にある。また、サンゴの成長速度は年間を通じて一定とは限らず、長さの上で等間隔に試料を採取しても、時間間隔として等間隔になっているとは言えない。上記の少しの食い違いをこれ以上議論するためには、実際のフィールドを複数設けて海水温変化を実測しながら元素分析結果と比較してデータを積み上げていくことが必要であろう。さらに、もう一つの問題として、SST データには見られない水温の長期的な変動傾向が Sr/Ca 比に基づく推定値では見られる点も大きな違いである。衛星観測データに基づく SST

は海表面のごく表層（1mm以下）しか見ておらず、海面下1m前後に位置するサンゴの感じている水温変化とは異なる可能性がある。また一方で、アラゴナイト構造が完全に安定なものではなく、長い時間スケールではより安定なカルサイト構造に変化するとも知られている。こうした結晶構造の変化によって、アルカリ土類金属比が変化することは十分考えられる。しかしながら、こうした結晶構造の変化は通常地質学的タイムスケールで問題にされることで、常温でわずか数年単位で起こる現象とは考えにくい。この元素比の変化が温度変化だけに由来するものかは今のところはっきりしないが、上記のような時間経過にともなう「変質」現象ではなく、この間のなんらかの環境変化を反映しているのではないかと考えられる。もう一つの海水温推定法である酸素同位体比の解析を進め、詳細に比較検討することで、その原因解明の手がかりが得られよう。

3-2. 耳石の分析

各海域からとれた表層魚 *S. sagax* の耳石試料の酸素同位体比の測定結果、並びに海水温の推定値と SST（1989～1993年の間の平均値）との比較を表1に示す。推定法^{8,9)}によって海水温の推定値には違いがあるが、全般的に飼育実験に基づく関係式 $((2)^{9})$ の方が SST とはよい一致を示した。それぞれの場所で違う時期に採取された試料間の変動は少なく、また、各海域の SST の傾向とも定性的に良い一致を示した。一方、100m以深に棲息する *P. multidentis* の場合はやはり定性的な傾向は一致するものの、推定値は SST よりかなり低めになった（表2）。以上の結果は、それぞれの魚の生態的な違い、即ち *S. sagax* より深層に棲む *P. multidentis* の方がより低温環境下に暮らしていることと調和的であり、耳石データに基づく深度別海水温の過去に遡った推定法確立の可能性を示唆するものといえよう。魚の場合には、サンゴの場合とことなり、食物連鎖を通じた元素の蓄積が行われるため、分析結果の解釈は必ずしも単純にはいかない恐れがある。しかしながら、年輪構造を持ち、こまかい年変化の追跡が原理的に可能な点は、例えば堆積物中の微細藻類の炭酸塩の殻の分析ではえられない特徴であり、これまでの手法と相補的な情報を与える手法として、今後の研究が求められる。

4. まとめ

これまで得られた結果では、魚の耳石やサンゴ等の海洋生物起源の炭酸塩鉱物から空間的、時間的な海水温変化に関する詳細な情報を引き出すことは十分可能と考えられる。気候モデルの高度化、精密化のためには、現在の推定法の元になっている推定式そのものをさらに精密化していくことが求められる。また、複数の情報（異なる元素比、同位体比）の組み合わせによって、現在では区別できない複数の環境要因の影響を解析できるようになる可能性もあると思われる。今後、手法的な確立のための研究、並びに実試料の分析データの積み上げが求められる。

5. 本研究により得られた成果

いまのところなし（発表準備中）

6. 参考文献

- 1) J.W. Beck et al., Science 257, 644 (1992)
- 2) S. de Villiers et al., Geochim. Cosmochim. Acta 58, 197 (1994)
- 3) S. de Villiers et al., Science 269, 1247 (1995)
- 4) G.M. Wellington and R.B. Dunbar, Coral Reefs 14, 5 (1995)
- 5) E.L. Grossman and T.L. Ku, Chem. Geol. 59, 59 (1986)
- 6) N. Caputi et al., Mar. Freshwater Res. 47, 147 (1996)
- 7) R.W. Reynolds and T.M. Smith, J. Climate 7, 929 (1994)
- 8) J.M. Kalish, Mar. Ecol. Prog. Ser. 75, 191 (1991a)
- 9) J.M. Kalish, Mar. Biol. 110, 37 (1991b)

表1 表層魚 *Sardinops sagax* の耳石の分析結果、並びに推定海水温と SST の関係

場所	採取年月	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ PDB)	推定海水温		SST (3)
			(1)	(2)	
Fremantle	Sept/Nov 1993	0.60 (0.54 - 0.99)	15.2	18.7	20.25
	Jan/Feb 1994	0.65 (0.51 - 0.77)	14.9	18.5	
Busselton	Oct, 1993	0.84 (0.67 - 1.02)	14.0	17.9	19.73
	Jan 1994	0.77 (0.70 - 0.85)	14.3	18.1	
Albany	Sept/Oct, 1993	0.88 (0.54 - 1.18)	13.8	17.8	17.73
	Jan/Feb 1994	0.98 (0.85 - 1.13)	13.3	17.5	
Bremer Bay	Sept/Oct 1993	1.00 (0.88 - 1.14)	13.2	17.5	18.20
	Jan/Feb 1994	0.92 (0.80 - 0.99)	13.6	17.7	
Esperance	Oct/Nov 1993	1.05 (0.87 - 1.15)	12.9	17.3	17.79
	Dec 93/Jan, 94	1.02 (0.94 - 1.10)	13.1	17.4	

- (1) $\delta^{18}\text{O}=3.58-0.196T$ (Kalish⁸⁾)
- (2) $\delta^{18}\text{O}=6.69-0.326T$ (Kalish⁹⁾)
- (3) Reynolds & Smith⁷⁾; 1989 ~ 93 年の平均値

表2 深層魚 *Pristipomoides multidens* の耳石の分析結果と SST との比較

場所	$\delta^{18}\text{O}$	推定海水温		SST (3)
		(1)	(2)	
Ashmore	-0.61 (-0.97 - -0.14)	21.4	22.4	28.6
Broome	-0.43 (-0.69 - -0.17)	20.4	21.8	28.0
Pilbara	-0.33 (-0.71 - -0.06)	20.0	21.5	26.6
Exmouth	0.34 (-0.16 - 0.60)	16.6	19.5	24.7

(1), (2), (3): 表1 に同じ。

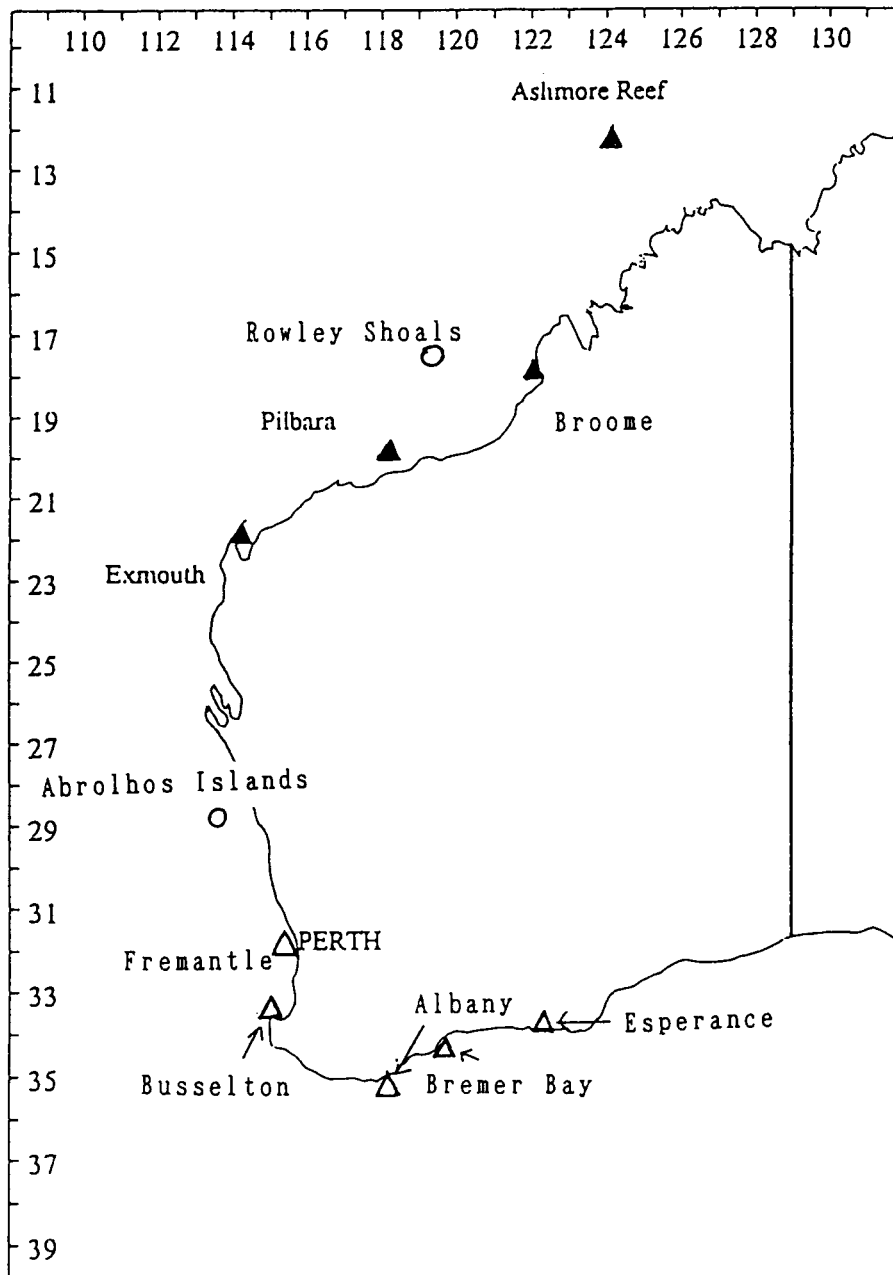


図1 試料採取地点
 ○サンゴ； △ *Sardinops sagax*； ▲ *Pristipomoides multidens*

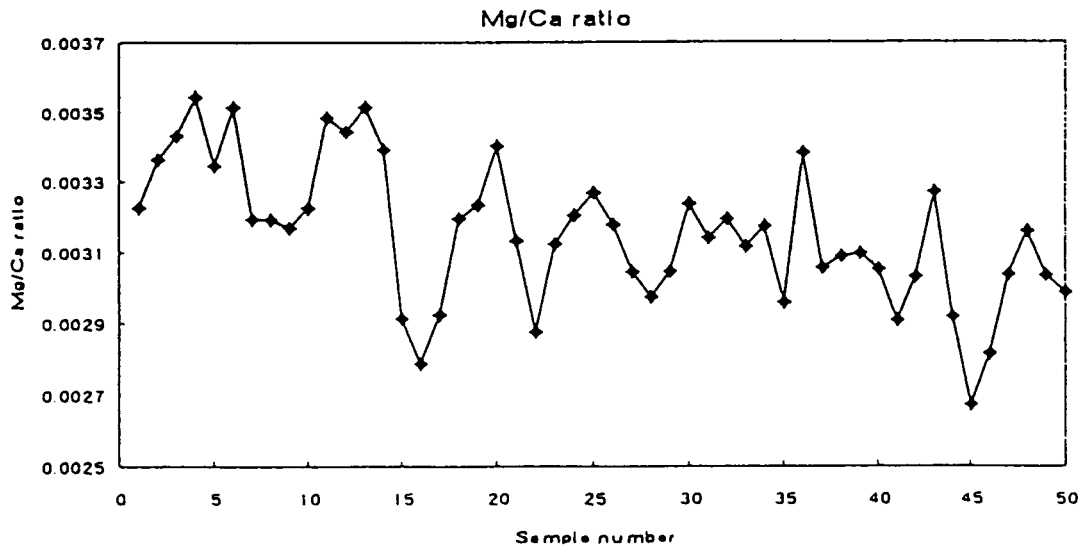
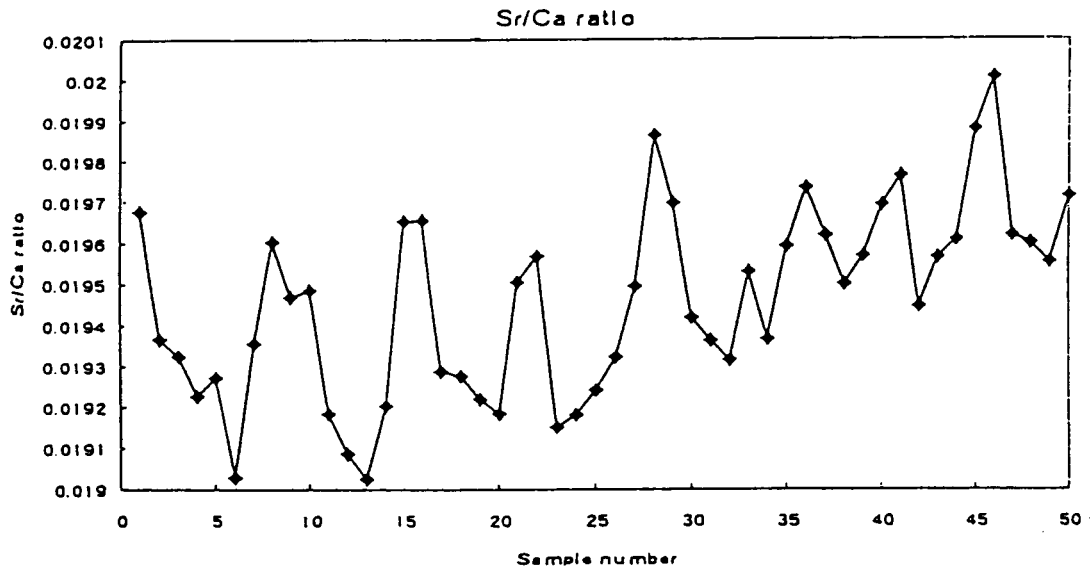


図2 サンゴコア中の Sr/Ca 比、Mg/Ca 比の変動

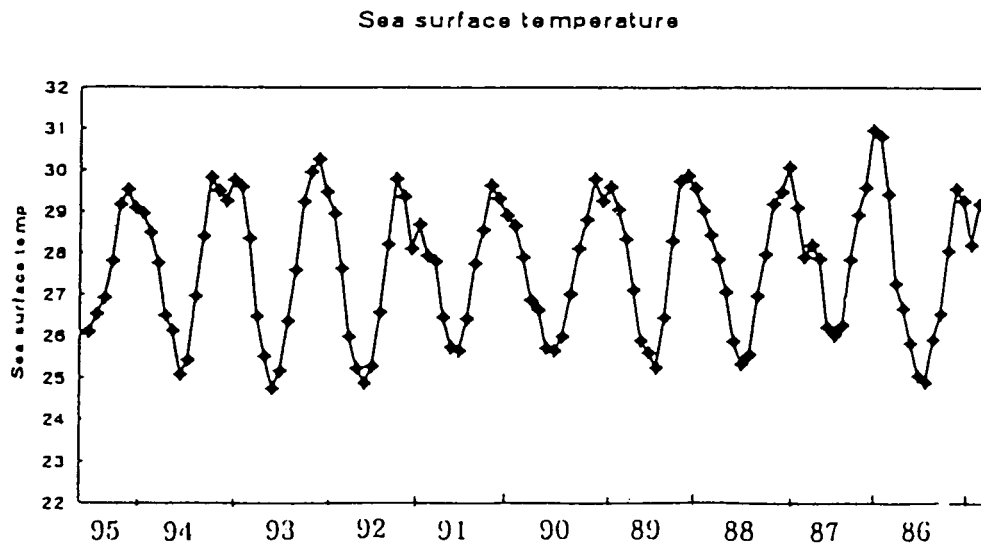
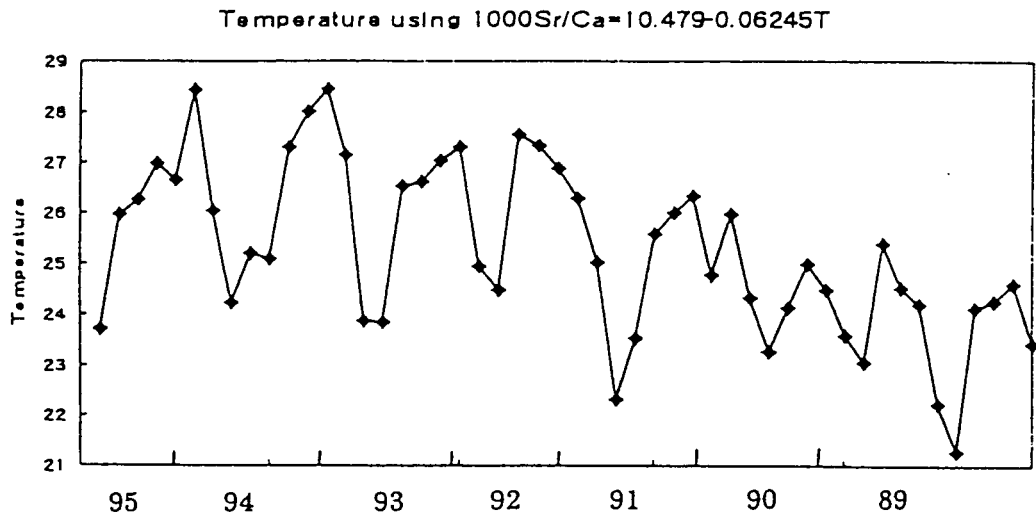


図3 Sr/Ca比からの海水温の推定値と SST (月平均値)との比較
Beck ら¹⁾の推定式に基づく。SST データは Reynolds ら⁷⁾による。

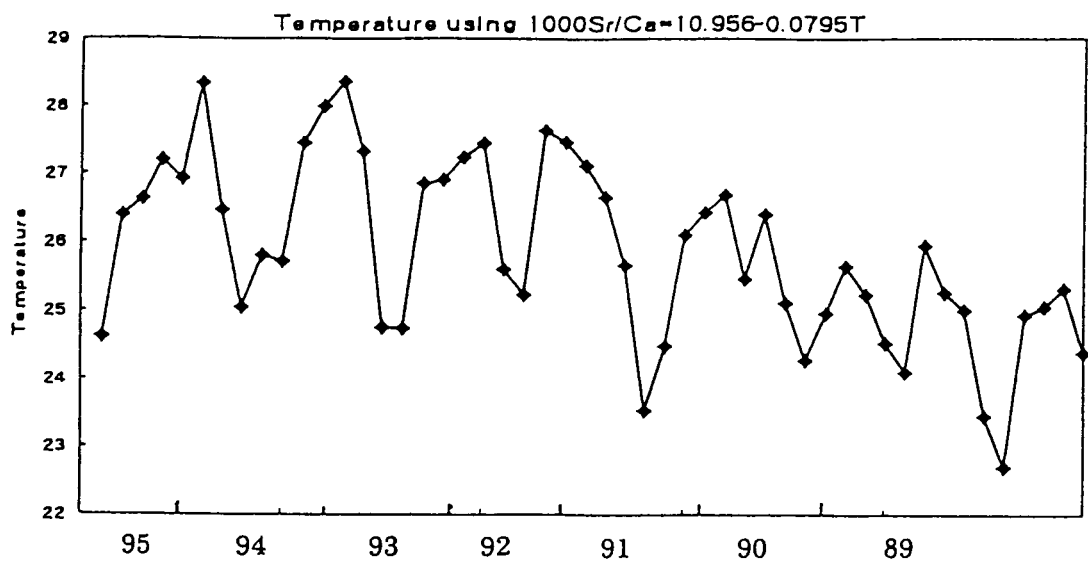


図4 de Villiers ら²⁾の推定式に基づく、Sr/Ca比からの海水温の推定値