

課題名	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		
担当研究機関	独立行政法人産業技術総合研究所 独立行政法人国立環境研究所		
研究期間	平成13 - 17年度	合計予算額 (当初予算額 へス)	128,412千円(うち17年度 21,730千円)
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(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)</p> <p>(2) 炭素14を用いた表層炭素リザーバーの二酸化炭素交換に関する研究 (独立行政法人国立環境研究所)</p>		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. 序(研究背景等)</p> <p>熱帯域の海洋と大気は、全球の循環を駆動する熱エネルギーと水蒸気の放出源となっているので地球規模での気候システムに大きな役割を演じていると考えられている。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非常に大きな影響を及ぼすと推定されている。</p> <p>このようにアジアモンスーンの熱帯域は重要であるにもかかわらず、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年間しかない。一方、気象の文書記録などは1800年代後半にまでさかのぼることができるが、記録は非常に限られている。水温や塩分などのデータは、熱帯域での気候変動を理解するための最も基礎的なデータで、将来の気候予測をするための数値実験に供される。しかしながら、観測機器を用いて得られた定量的データは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。</p> <p>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。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などから数例報告されているが、これらはENSO(エルニーニョ・南方振動)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、インド洋東部からサンゴ骨格を採取し、高時間解像度(週~月単位)で、長期にわたって水温、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。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究は、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、そ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、地球温暖化に伴う海水温の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(図1)。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、モルジブ等の沿岸海域より、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、大型の群体に成長するハマサンゴ属を対象とする。このサンゴ骨格について、X線撮像によって骨格の成長を確認するとともに、成長軸に沿って炭酸カルシウム微量試料を分取する。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、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)を分析し水温を高精度で推定し、酸素同位体比の結果と併せて塩分や降雨量などを推定する。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。</p>		

また、上記のサンゴ柱状試料を対象に、国立環境研究所が所有する加速器質量分析施設 (NIES-TERRA) を用いてサンゴ骨格中の炭素 14 を分析する。サンゴが採取された海域の海洋表層リザーバーの炭素 14 は、各々の海域およびサンゴが形成された年代によって異なっていることが知られており、大気 - 海洋間の炭素の移動速度について重要な情報を与える。特に、海岸近くでの湧昇や沿岸流の影響について定量的な束縛条件を与えるものと期待される。現在のところ、アジアモンスーンとの関係では研究は実施されていない。

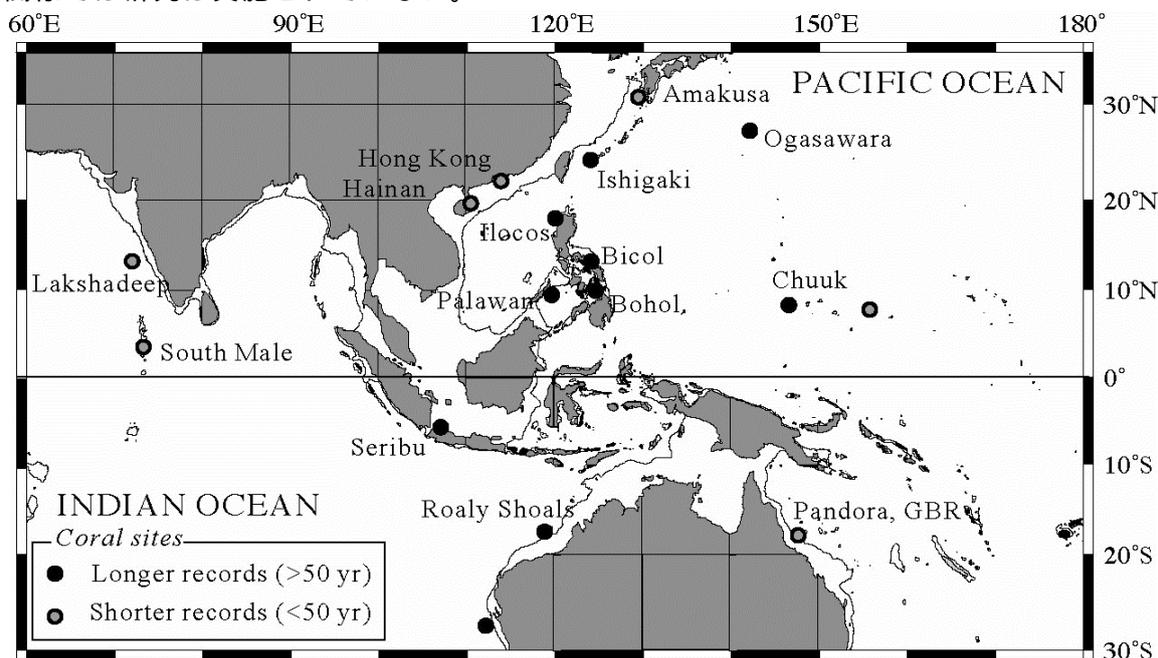


図 1 . 本研究課題による長尺サンゴ試料の採取地点。平成 13 年度にはフィリピン・ルソン島南東部のピコール地方、また平成 14 年度には小笠原諸島父島およびインドネシア・セリブ諸島、平成 15 年度には石垣島にて試料採取調査を実施した。平成 16 年度にはフィリピン・ルソン島西部イロコス地方、平成 17 年度にはフィリピン・パラワン島南東岸にて試料採取を実施した。

3 . 研究の内容・成果

(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

西太平洋・東南アジア域から現在までに採取されたサンゴ試料は、X 線撮像による年輪計測の結果、石垣島 181 年、小笠原諸島父島 157 年、ミクロネシア・チュック環礁 95 年、フィリピン・ピコール 222 年、インドネシア・セリブ諸島 85 年の期間の記録を保持していることが明らかになった。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 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。各地点の酸素同位体比記録を時系列に変換して図 2 に示した。いずれの地点においても酸素同位体比の減少傾向が認められるが、これは水温上昇、あるいは降水量の増加に関連した海水の塩分低下が進行していることを示すものである。

本研究では、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。

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。さらに最近の千年間でも、もっとも高温の期間であった可能性も指摘されている。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 1980 ~ 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 (フィリピン、石垣ほか) を用いて検討した。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復元能力の高さを示すものである。

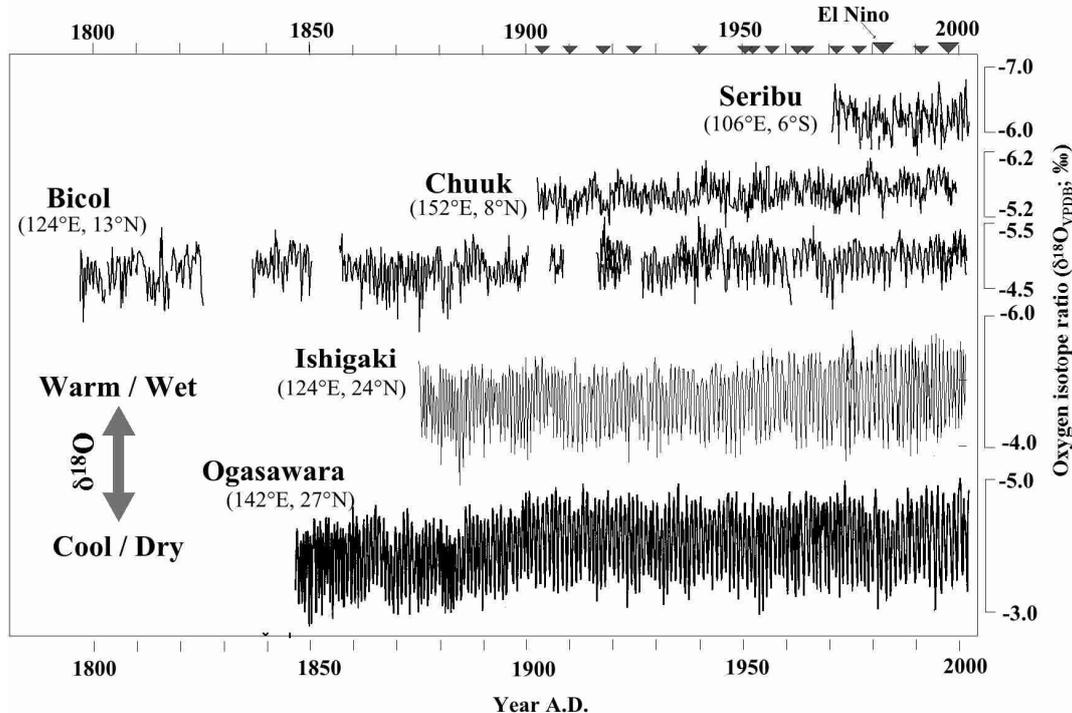


図2．本研究課題で分析されたサンゴ骨格の酸素同位体比。酸素同位体比の負の方向が水温上昇に対応し、縦軸上向に示した。熱帯域のチュックでは季節変化が小さいが、フィリピンから亜熱帯の石垣島および小笠原にかけて季節変化が増大し年周変動が卓越する様子がみられる。フィリピン・ビコールのサンゴ骨格試料は1780年まで、琉球列島石垣島の試料は1817年まで遡ることが可能である。

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(図3)。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。

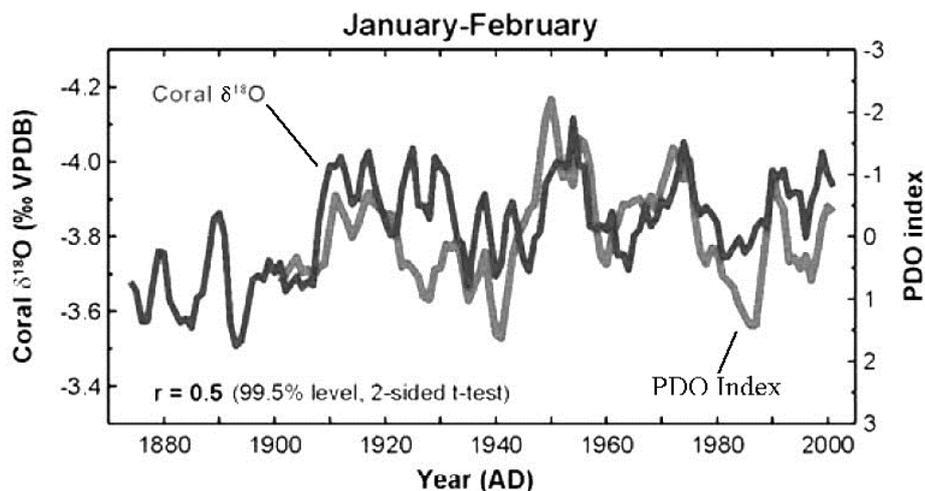


図3 小笠原諸島父島のサンゴ試料の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) と太平洋十年変動指数 (PDO) の対応。

石垣島北部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対応関係は失われ、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。

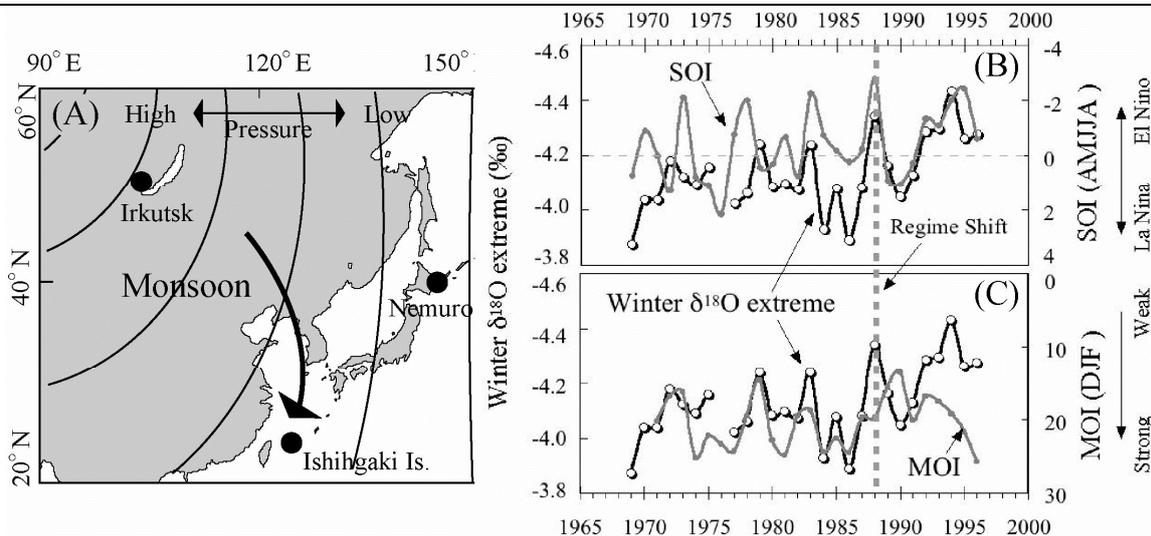


図4．冬期の東アジアモンスーンの模式図。冬の季節風の強さを示すモンスーン指数 (Monsoon Index, MOI) はイルクーツクと根室の気圧差で定義される。(B)冬期のサンゴ骨格酸素同位体比の極値と前年5月から8月の南方変動指数の平均値 (SOI) との比較、および(C) 冬期のサンゴ骨格酸素同位体比の極値とモンスーン指数 (MOI) との比較。冬期のサンゴ骨格酸素同位体比極値として示される石垣島沿岸部の最低水温は、1987年までは MOI と一致した変動を示すが、1988年以降、約半年の遅延を伴って南方変動指数と相関した変動を示すようになる。

サンゴ試料について酸素同位体比分析を推進する一方で、温度指標となる Sr/Ca 比および U/Ca 比の高精度測定法として、内部標準同位体希釈法により調整した試料を誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) で測定する方法を開発した。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、サンゴ骨格の 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 (多くの場合、降水量変動に対応) を知ることができる。この手法を、インドネシア・ジャカルタ沖のサンゴ試料に適用して、ENSO とインド洋ダイポール変動に伴うジャワ海の低塩分水の挙動について検討した。

(2) 炭素 14 を用いた表層炭素リザーバーの二酸化炭素交換に関する研究

本研究では、サンゴの骨格に記録された炭素 14 濃度の経年変化から、二酸化炭素のリザーバー間での動態と、酸素同位体比や微量元素に反映される水温、塩分、降雨などの環境因子の関係を検討している。二酸化炭素のリザーバー間での動態とモンスーン変動の関係を明らかにすることを目指し、琉球列島や東南アジア・インドから採取されたサンゴ骨格を分析し、あわせてより長いスパンで東アジア地域のモンスーン変動の歴史解明を目指したピート堆積層解析研究をおこなってきた。

その中で、オーストラリア北西 Rowley Shoals サンゴコアにおける約 80 年の炭素 14 濃度の経年変化から、大気圏核実験による放射性炭素の一過性の上昇とその後の経過の概要を明らかにすることに成功し、サンゴ骨格が大気と海洋の二酸化炭素の動態を反映する有効な指標であることを示すことができた。さらに、核実験の影響をうける前の当海域の見かけ上の炭素 14 年代がおよそ 800 年と、全球的な海洋リザーバー年代の平均値 400 年よりも大きな値であったことがしめされた。これは、今までに報告されている北部および北西部オーストラリア沿岸における R の平均値、 68 ± 24 年よりも明らかに大きい値であり、インド洋における海水循環の様子を探る上で貴重なデータとなる可能性がある。そこで、(1) 大気圏内核実験が行われる以前に採取された貝殻試料の炭酸カルシウムに含まれる放射性炭素を測定し、海洋リザーバー年代の面的な変動を復元し、海洋リザーバー年代から海水循環の変動などを理解するための基礎的なデータを収集した。モンスーン地域における海洋リザーバー年代はこれまで報告されたデータが限られており、この基礎データは古環境や海洋学にも資するものである。このデータによって、Rowley Shoals の大きな海洋リザーバー年代が当海域全体を反映するものであるか、それとも環礁環境によって局所的に現れた現象であるかを検討することが可能となる。

海域を代表する表層海水の炭素 14 年代を調べるため貝類は、潮間帯ではなく沖あいに生息し、かつ 75 m 以浅を中心に生息すると考えられる二枚貝種を中心に採取した。肉食や底泥食の貝類は、河川などから運搬された古い有機物を体内に取り込んでおり、海水の溶存無機炭酸の炭素 14 濃度と非

平衡状態である危険があるので、植物プランクトン食の二枚貝を中心に試料を採取した。分析に供された貝殻試料は、東京大学総合研究博物館で保管されている、1879年から1933年に理学部動物学教室によって採取された現生標本である。北海道、本州、九州、沖縄諸島、小笠原を含む日本沿岸から69試料と、台湾沿岸7試料、香港やフィリピン、インドネシア、シンガポールの東南アジアから5試料、ミクロネシア（パラオ、ヤルート、ポナペ、クサイエ）6試料、豪州トレス海峡から2試料、計89試料を分析した。

貝殻中の炭素14分析の前処理法は、個体が死亡する直前に形成されたと考えられる最外側の貝殻を10mg程度採取し、超純水中で超音波洗浄後、表面を弱塩酸で洗浄した。それを乾燥して、メノウ乳鉢にて粉碎した。各画分の一部を秤量後、一昨年度までに作成、評価を終えた元素分析計ベースの前処理システムを使ってサンゴ骨格中の炭素を二酸化炭素に燃焼して精製、捕集し、さらにガラス真空ラインの中で鉄触媒のもと水素で還元してグラファイトに変換し、加速器質量分析施設NIES-TERRAにより分析を実施また一部試料については、安定同位体測定用の試料を採取するため、リン酸で処理して骨格中炭素を二酸化炭素として採取したあと、一部は安定同位体測定用として別途とりわけ、残りを上記と同様に処理して¹⁴C測定を実施した。分析結果を図5に示す。

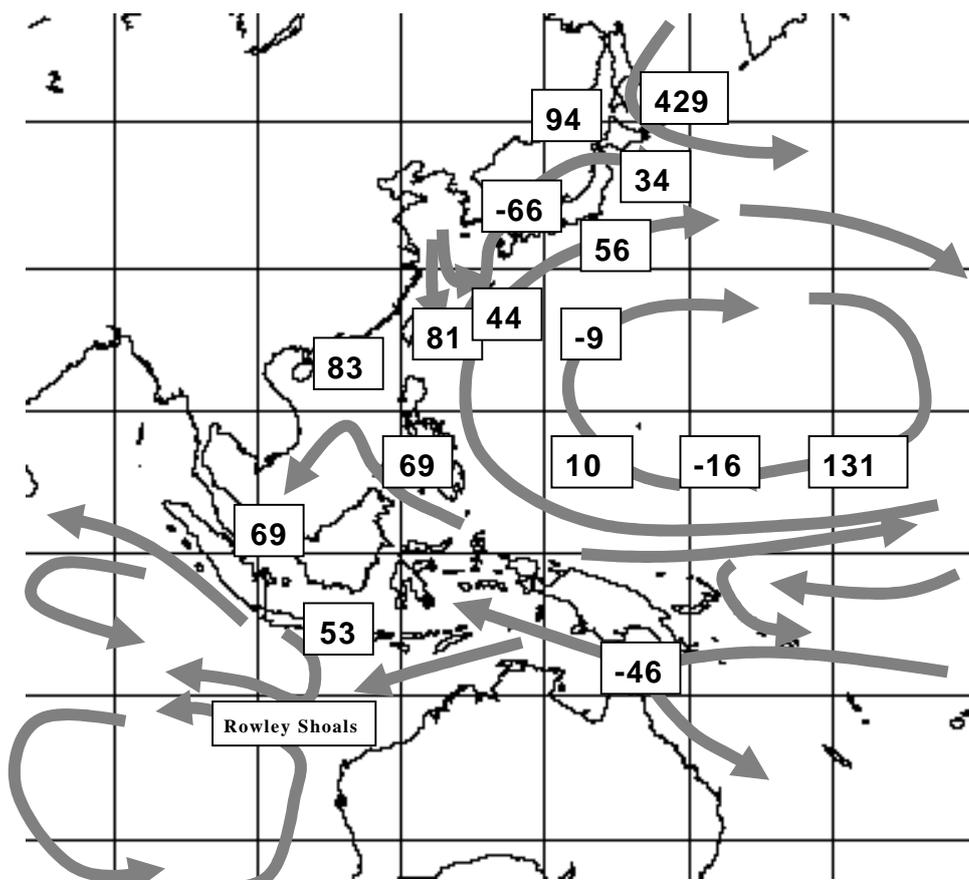


図5 モンスーン地域における R値の地域変動

北赤道流に由来する黒潮系の水塊では、平均表層水の海洋リザーバー年代との差（R値）はやや古くなっており、ミクロネシアでは100年程度の古い海水が存在する可能性が示された。しかし、ミクロネシア内での地域的な変異も認められ、この傾向についてはさらにデータを集める必要がある。東南アジア地域では、おおむね60年から80年という値になっている。これは既存の研究データと一致する。一方、亜寒帯フロント以北には平均よりも400年以上古い海水が存在しており、親潮やリマン海流の影響を受ける地域では、大きなR値が存在しており、R値の分布では日本沿岸で急激な断絶が存在することが明らかになった。

4. 考察

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 (Cane et al., 1997, Science, 275, 957-960)、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。

インド洋東部Rowley Shoalsで採取されたサンゴコアに記録された1950年以前の ^{14}C 濃度から、海洋リザーバー年代の補正值 (R値) が400年と非常に大きな値であることが示された。この結果はどのような海水の動きによってもたらされたかを検討するために、太平洋西部における海洋リザーバー年代の地理的変動を、核実験以前に採取された貝殻試料の炭素14濃度から復元した。その結果、Rowley Shoalsで観察されたような大きな R値は、周辺海域の試料では認められなかった。一方、同じインド洋のアフリカケニア沖、並びにスマトラ西岸で採取されたサンゴコアの測定報告 (Grumet et al., J. Geophys. Res., 109, C05003, doi:10.1029/2003JC002087, 2004) では、いずれも核実験前の ^{14}C が-60~-70あたりで実験後の最大濃度が100前後と、このRowley Shoalsコアの値に比較的近いデータを示している。Rowley Shoalsのサンゴ骨格に記録された炭素14濃度の変動については、局所的な環境、例えば環礁内で炭素循環の影響が支配的だった可能性も否定はできないものの、インド洋におけるデータのさらなる蓄積が重要なことを示唆する結果といえる。

サンゴ骨格に残された炭素14年代の経年変化は、大気と海洋での二酸化炭素の動態を復元する上で非常に重要な指標となることが示された。モンスーン活動のような気候変動をおさえるためには、より広範囲の環境を反映する試料との比較検討も必要であると考えられる。この後の研究で、広範囲での炭素14動態と局所的な炭素14動態の関係をさらに比較、検討する必要がある。