

平成 17 年度 公益信託 エスペック地球環境研究・技術基金
研究助成研究報告書

地球温暖化に対する造礁性サンゴの応答

北海道大学大学院理学研究院 渡邊 剛

1.はじめに

熱帯～亜熱帯に広く生息する造礁性サンゴは、非常に速い速度で炭酸塩骨格を形成し、サンゴ礁という地球上で最も大きなバイオミネラリゼーション（生物鉱化作用）の産物を作り出す。造礁性サンゴの多くは、いくつものサンゴ個虫（polyp）が集まった群体（colony）となりサンゴ個虫の収納される骨格すなわちサンゴ個体（corallite）は、夾壁（thecal wall）、軸柱（columella）、隔壁（septa）、泡沫状組織（dissepiment）からなる基本構造を持っている。サンゴの最初のミネラリゼーションは、1匹のサンゴ幼生が、岩盤などの安定した基盤に着底した後、サンゴ虫に変態し、その基底部に生じることから始まる。この最初の1匹のサンゴ虫が無性生殖を繰り返し、群体を形成してゆく。こうして形成されたサンゴ骨格の3次元的なフレームワークは、貧栄養海域における多くの浅海性生物に安定した生息の場を与え、海の熱帯雨林といわれるほどの豊富な生態系を支えている。現在、人類活動による地球環境に対する影響が深刻さを増してきている。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）や京都議定書などに代表されるように地球規模の温暖化が危惧されており、世界各地の観察記録は、年気温平均が過去100年間で0.5°C上昇していることを示している。これらの地球温暖化は、サンゴ礁の発達形成や分布、サンゴ礁域に生息する生態系にどのような影響を与えるのか、また、将来の温暖化に伴いそれらはどのように遷移していくのかを見積もることは重要な研究課題である。我が国では、世界最高緯度で形成されている長崎県・壱岐の温帶域のサンゴ礁から日本最南端の沖ノ鳥島の亜熱帯のサンゴ礁まで、地理的に幅広い分布が認められる。本研究では、地球温暖化に対するサンゴ礁に生息する造礁性サンゴの応答を検討することを目的とし、我が国における温帶（壱岐）、亜熱帯（石垣島）、熱帯域（沖ノ鳥島）の3つの異なる気候区分のサンゴ礁から採取した造礁性サンゴの骨格形成過程をそれぞれ明らかにし、それらを比較検討した。また、同時に、水温、塩分、Ph、日射量などの環境をコントロールしたサンゴ骨格の形成過程をできる準閉鎖系でのサンゴ飼育技術を確立した。

2.研究手法

調査地域（壱岐、石垣島、沖ノ鳥島）において、航空写真でサンゴ礁の地形等を確認後、現地ダイバーと共にボートとスキンダイビングを組み合わせた調査により最適サン

ゴ群体を選定し、さらに、スクューバダイビングによりサンゴ郡体を採取した(図1)。得られたサンゴ郡体は乾燥をさせた後に、北海道大学大学院理学研究院まで搬送した。サンゴ郡体の骨格を岩石用カッターで半割し、さらに厚さ6mmの平板のスラブを作成した。スラブから、軟X線写真を取り骨格構造を観察すると共にそれぞれの白黒の密度バンドから採取日より遡った年代を計測した。選定された試料のスラブからさらに分析に最適な測線を決め、ミリングマシンにより酸素、炭素安定同位体比測定、微量元素分析用の粉末試料を約0.2mm間隔で連続的に粉末試料を採取した。得られた粉末試料から酸素、炭素同位体比を北海道大学大の質量分析計で分析した。また、水温、塩分、日射量、Phなどの環境要因をコントロールし、外からのインプットを可能な限り最小にする準閉鎖系のサンゴ飼育システムを開発し、石垣島、沖ノ鳥島から採取された生体試料を約1年間飼育した。



図1 スキューバダイビングにて試料採取

3.調査地域

3-1.沖縄県石垣島

沖縄県石垣島東部に位置する白保サンゴ礁は世界最大のアオサンゴ(*Heliopora coerulea*)群体やハマサンゴ類(*Porites spp.*)のマイクロアトールなどの多様なサンゴ群集が生息している(図2)。近年の地球温暖化に伴い、エルニーニョ現象の際に大規模な白化現象が観察され、造礁性サンゴの広範囲における死亡が確認されている。また、近年、1979年から1990年半ばまでの土地開発事業や新石垣島空港建設といった問題を抱えており、これらの開発に伴い陸上からの赤土等の流入によるサンゴ礁への影響が懸念されており、この地域の造礁サンゴの生育状況が地球温暖化に伴う水温

上昇に加えて危惧されている。

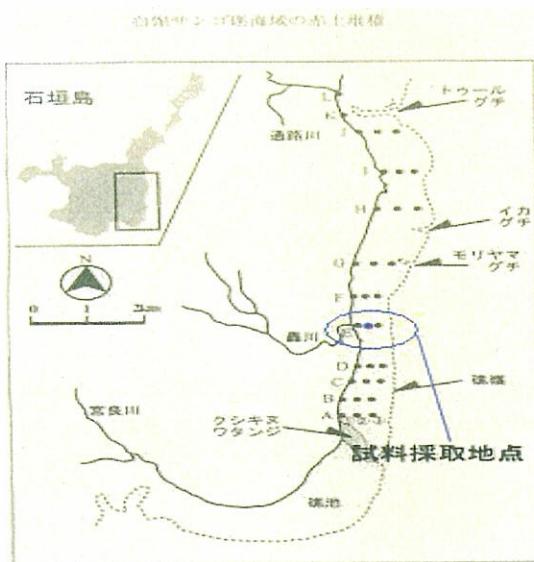


図2 調査地域（沖縄県石垣島）

3-2. 沖ノ鳥島

沖ノ鳥島(東経 $136^{\circ} 05' 57.4''$, 北緯 $20^{\circ} 25' 30.7''$)は東京都小笠原村に属し、日本最南端に位置する島である(図1)。また、日本で唯一の熱帯に区分され、サンゴ礁に囲まれた島である。沖ノ鳥島は日本や日本近海に接近する台風の通り道にあるとも言える。(図2)には1993年から1998年の6年間に発生した台風の移動経路を表した。6年間の間に157の台風が記録されているが、この内46件の台風は沖ノ鳥島より500km以内の距離を通過しており、図の赤い線で示されている。地球温暖化に伴う台風の増加やそれによる造礁サンゴの形成メカニズムの応答を調べることは重要な研究課題である。



図3 沖ノ鳥島の位置図 (国土交通省 東北地方整備局ホームページより掲載)
trajectory of typhoons 1993-1998.

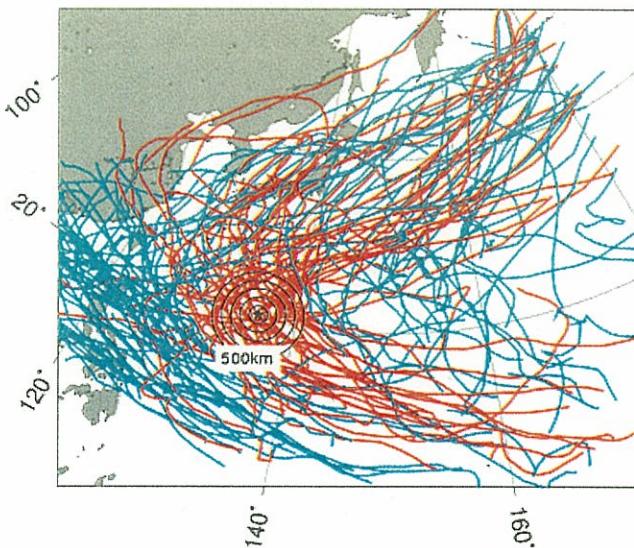


図4 台風の移動経路(JAMSTECのホームページより掲載)

3-3.長崎県壱岐

長崎県・壱岐で、主に、キクメイシで構成されているサンゴ礁が、世界最高緯度で形成されたと確認された (Yamano et al. 2001)。これまで、世界のサンゴ礁の北限は大西洋のバミューダ諸島（北緯 32 度 50 分）とされ、サンゴ礁が成長するには、最も寒い時期でも平均 18 度以上の水温が条件とされていた。しかし、壱岐では、サンゴ礁が見つかったのは、平均水温は 13.3 度で、北緯 33 度 48 分であり、冬の水温は、11.1 度にも達する。サンゴ礁にとっての北限域において、今後の地球温暖化に伴う水温上昇が造礁サンゴに与える影響を調べることは重要である。

4.石垣島における造礁サンゴの骨格形成

過去 10 年間の骨格記録を持つハマサンゴについて、採集日まで成長を続けた部位の測線 (c') と部分白化のみられる部位の測線 (c'') で酸素・炭素安定同位体比測定を行った。そのうち、c' については NanoSIMS を用いて微量元素を測定した。さらに、これらのデータと蛍光顕微鏡、X 線写真 (図 5) を用いて気象データとともに比較、検討した。酸素・炭素同位体比測定の結果、c' では $d^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{MAX}$ (最大酸素同位体比) ; -4.06, $d^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{MIN}$ (最小酸素同位体比) ; -5.88, 平均変動幅 ; 1.23, c'' では $d^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{MAX}$; -3.96, $d^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}\text{MIN}$; -6.51, 平均変動幅 ; 1.43, であり、部分死亡したのが 2005 年の冬から春にかけてということがわかった (図 6)。また、X 線写真解析と酸素同位体比に記録された水温の季節性から推定された骨格の成長速度を

図 7 に示す。白化現象の原因については高水温による褐虫藻の放出では考えられず、轟川からの礁内への赤土の流出が原因とされる。蛍光顕微鏡や肉眼での観察から緑色層、緑色層を含む暗色層、蛍光部が観察された。NanoSIMS で測定した Mn/Ca 比は蛍光部と一致しており、蛍光部は河川からの影響と考えられる。酸素同位体比プロファイルと比較すると、季節に関係なく形成されたことがわかり、降水量との明瞭な関係はみられなかった。以上の結果、部分白化は河川からの影響によって 2005 年の冬から春にかけて起こり、このときの降水量は平均的である（図 7）。また、ほかの蛍光部や緑色、暗色部についても降水量の増加はみられない。このことから、集中的な降水による大規模な赤土の流入よりも、冬季(乾季)における少量でも持続した赤土の流入の方が白保サンゴ礁域のサンゴ骨格の形成に影響を与えていたことが示唆された（図 7）。

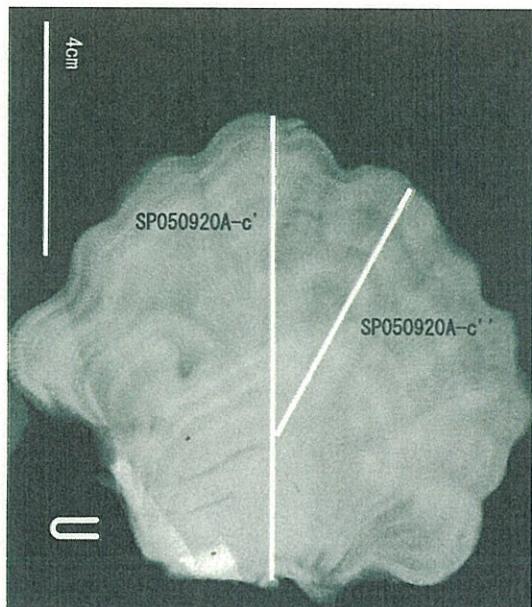


図 5 サンゴ骨格試料の X 線写真

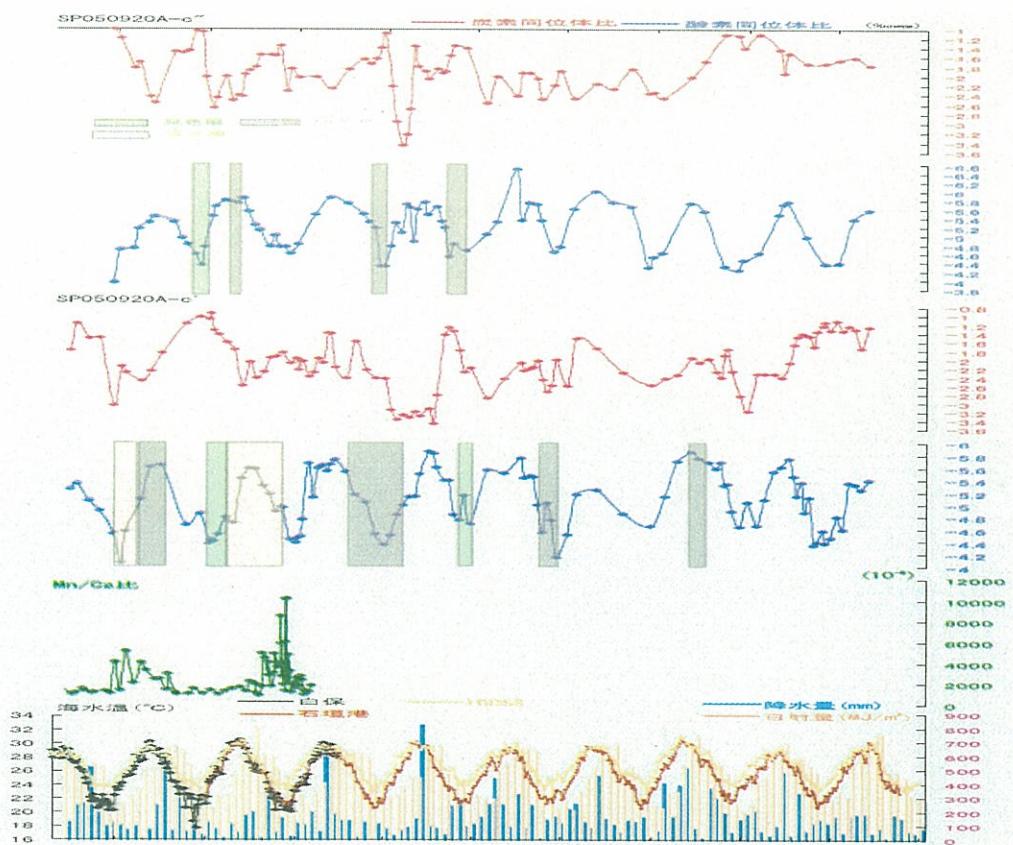


図 6 酸素・炭素同位体比プロファイル, Mn/Ca 比, 気象データ

図 2 地点		(μ mol/kg)	G 地点	海岸線付近	0.14
C 地点	海岸線付近	0.16	G 地点	海岸線付近	0.14
	礁池中央	0.19		礁池中央	0.15
	礁嶺付近	0.22		礁外	0.17
	礁外	0.15		轟川	0.59
E 地点	海岸線付近	0.19		轟橋上	0.59
	礁池中央	0.16		河口	0.51
	礁嶺付近	0.14		河口	0.52
	礁外	0.15			

表 1. 白保サンゴ礁地域の栄養塩測定結果

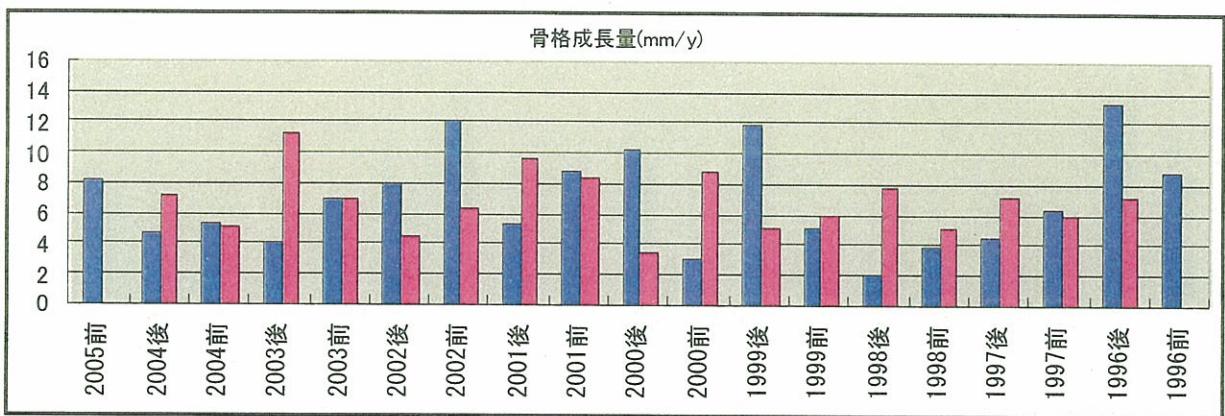


図 7 半期ごとの骨格成長量(青; c', 赤; c'')
サンゴの骨格成長量を酸素同位体比プロファイルから見積もった。

観測期間 (2000年10月-2001年10月) 中の
イベント数: 70
総赤土流出量: 1084 トン
総降雨量: 3312 mm

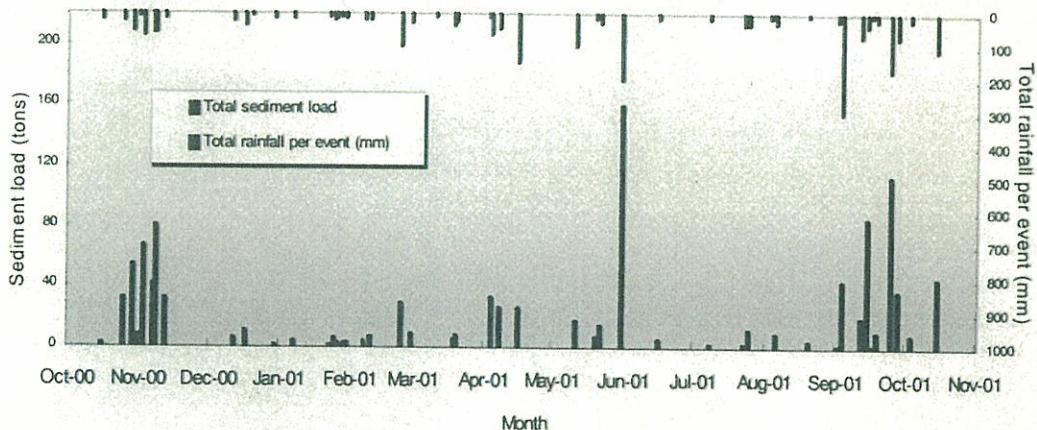


図 8 赤土流出量と降水量の関係 (環境省 2002一部改変)

5. 沖ノ鳥島における造礁サンゴの骨格形成

沖ノ鳥島で採取されたハマサンゴの郡体骨格は、エックス線画像による成長線解析と酸素同位体比と水温の関係の検討から14年間分の成長を記録していることが明らかとなった(図9)。また、炭素同位体比も明瞭な周期的な変化を持ち、日射量の変動とよく一致した。また、全体的には炭素同位体比は近年になるに従って値が低くなる傾向が認められ、これは石油や石炭などの炭素同位体比の低い燃料が使用されることにより大気中の炭素同位体比が低くなるというスウス効果が沖ノ鳥島のサンゴ骨格にも記録されている事によると考えられる。また、酸素同位体比およ

び炭素同位体比の変動は、大気の気圧の変動および外向き長波放射量の変動パターンとよく一致した。これは台風の接近による水温の一時的な低下と雲の発達による日射量の低下および成長速度の低下が原因であると考えられる。

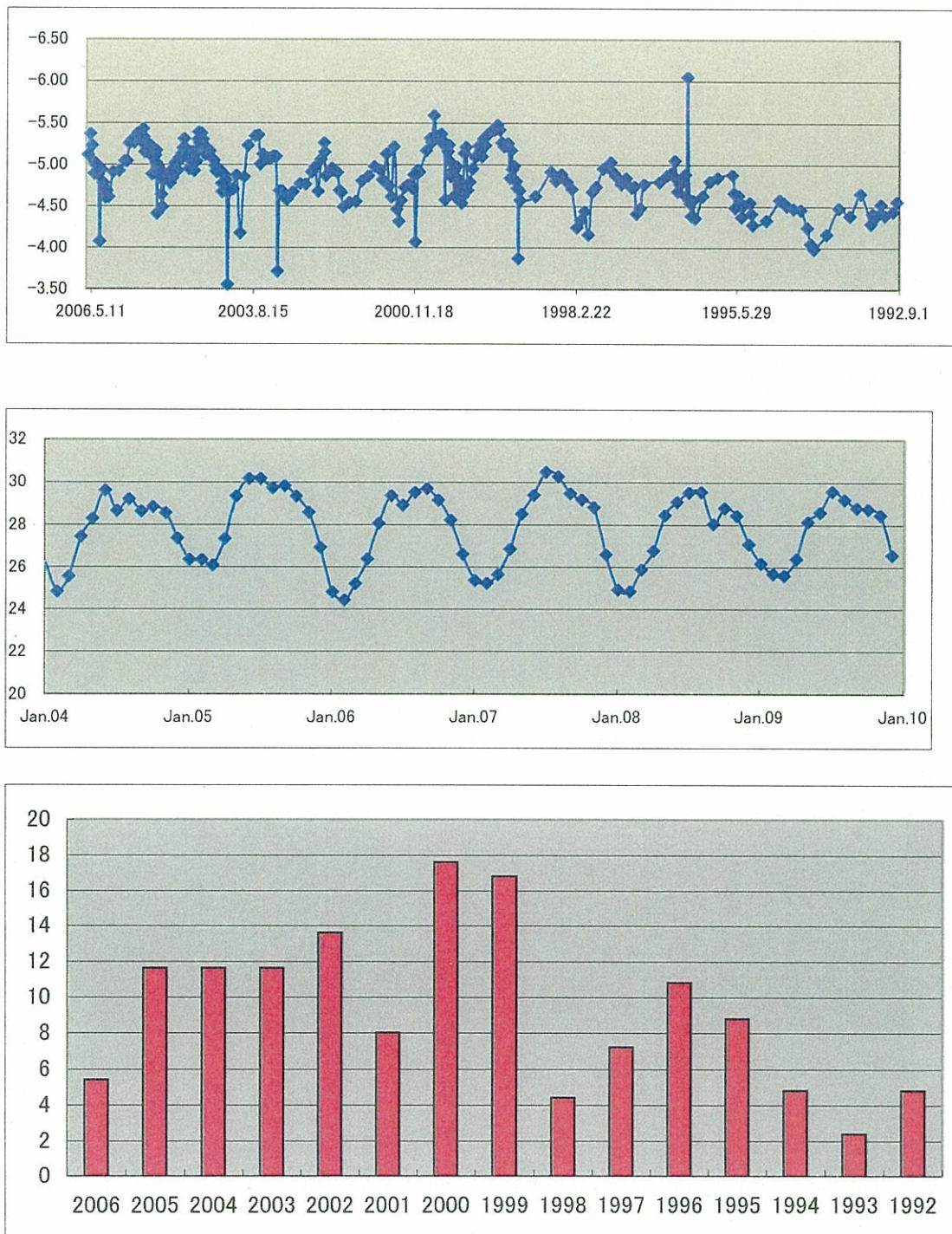


図9 上から酸素同位体比（‰）、IGOSSによる水温変動（℃）、骨格の形成速度（mm）

6. 長崎県壱岐における造礁サンゴの骨格形成

長崎県壱岐のサンゴ、キクメイシ属の酸素、炭素同位体比を図10に示す。酸素同位体比の振幅は、現場の水温の変化のそれに比べると小さく、また、冬に下に凸のピークの形状を示すことから、この海域では、冬の低温期には骨格を形成されていないことが明らかになった。また、年によっては著しく形成速度が遅い年も見られた。これは、通常、高温のストレスにより成長が阻害される他の地域のサンゴ骨格の形成機構とは大きな違いである。

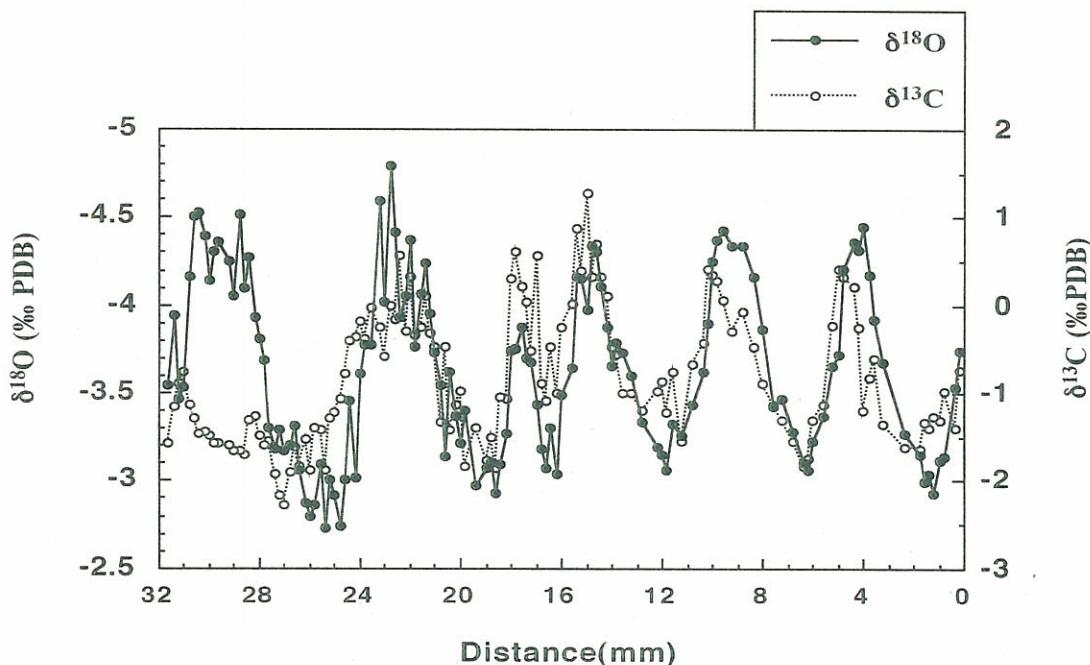


図10 長崎県壱岐のサンゴ骨格の酸素、炭素同位体比

7. 準閉鎖系サンゴ飼育システムの開発

造礁性サンゴの閉鎖系システムの開発とその飼育実験から得られる見地は、その後の海水型の閉鎖系飼育システムの確立へ向けて多くの情報を与え、また、将来の海洋生物をも組み入れた閉鎖系生態系および物質循環モデル（図11）を組み立てていく際の基礎的情報が得られることが期待される。本研究では、水温、塩分、Ph、日射量をコントロールして外部からのアウトプットは蒸留水のみという条件で約1年間、様々な種の造礁性サンゴを飼育することに成功し、現在も継続中である（図12）。残念ながら、

準閉鎖系における長期間の飼育には成功したが、エックス線実験などで骨格の成長部位を調べたところ天然の個体に比べると骨格成長が著しく遅く、今後の改良が求められる。

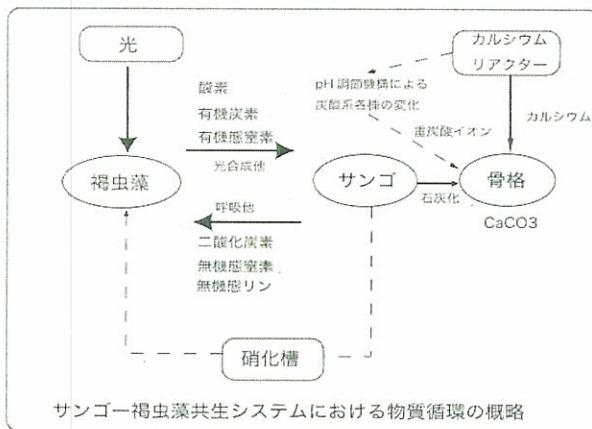


図 11 準閉鎖系サンゴ飼育システムにおける物質循環



図 12 サンゴ飼育水槽内で飼育されている造礁サンゴ（ナガレサンゴ）

8. サンゴ骨格の形成機構と成長・阻害因子

サンゴ骨格の成長を規制する外的な要因として、水温、塩分、光量、 CO_2 分圧、pH、栄養塩、サンゴが捕食する餌の量などが考えられる。今回の研究でも、それぞれ異なる気候区分におけるサンゴ骨格の形成とそれを起因する外的な要因は一定ではなく、様々な気象現象や地域特有の要因によって規定されていることがわかった。石垣島のような陸上の開発が進む地域では、地球温暖化による水温上昇だけではなく、陸から流れ込む赤土等の汚

染がサンゴ骨格の形成に影響を及ぼす。また、長崎県の壱岐のサンゴ礁に見られるサンゴの骨格の形成機構では、むしろ、冬の低水温が成長を阻害していることがわかった。また、人の生活の影響が最も遠い沖ノ鳥島では、台風による骨格形成に与える影響が大きかった。このように、今後の地球温暖化におけるサンゴ礁の応答を判断するときには、現在のサンゴ礁それぞれのローカル、グローバルな環境を共に考慮した上で推定しなくてはならないと思われる。

9. 今後の課題

造礁性サンゴは、豊富な海の生態系を支えるだけでなく、熱帯域の大気海洋相互作用の変動を記録しているため、骨格の形成メカニズムの解明が重要な課題である。そのためにはサンゴの石灰化が起っている、1) 変化に富むサンゴ礁環境、2) それぞれのサンゴ礁の持つローカル、グローバルな環境、3) 共生藻類の活動を含む生理学的環境を理解しなくてはならない。