

サンゴ・シャコガイ骨格による古環境の解析

中 森 亨¹⁾

1. はじめに

サンゴ礁は熱帯から亜熱帯にかけての浅海域に分布する生態系のひとつで、主に栄養塩濃度の低い外洋に発達する。他の海洋生態系と比較すると、群集の生息場所として利用できる面積が狭いにもかかわらず、そこには多様性の高い群集が異常に高い密度で生息していることが特徴である。また、温帯や寒帯海域の沿岸の生態系と大きく異なる点は、サンゴ礁群集が炭酸塩鉱物からなる枠組みを作り、自らの生息場所を作り出していることである。これらの炭酸塩堆積物はすべて造礁サンゴ、シャコガイ、石灰藻、有孔虫などの生物の骨格からなり、直径数十kmにおよぶ巨大な浅瀬を形成している。

造礁サンゴはさまざまな礁環境の中で水深0～100mの広い範囲に適應しており、造礁生物のなかでも最も主要なグループである。また、その生体量・生産量・石灰化量は他のグループと比較して圧倒的に大きく、生態系の炭素循環の観点からも重要と言えよう。造礁サンゴは肛腸動物門に属するクラゲに近縁な動物であるが、その細胞内に無数の共生藻類 *Symbiodinium microadriaticum* を住まわせていることが特徴である。両者を合わせたサンゴ体全体は自己栄養的な代謝を行っており、サンゴ礁生態系の一次生産者としての役割を担っている (Muscatine, 1990)。共生藻類は光合成以外にも造礁サンゴの炭素固定と密接に関係している。光合成によって作られた水酸化イオンは体内のpHを上げ、サンゴの石灰化、すなわち骨格形成を促進する (Barnes and Chalker, 1990)。これによって、造礁サンゴは通常の呼吸しか行なわない非造礁サンゴと比べて数倍～十倍の速さで成長

することが可能になったと言われている。実際に石灰化の早いミドリイシ (*Acropora* spp.) などの造礁サンゴは、年間に約 4kg/m^2 の CaCO_3 を沈積させることが知られている (Kinsey, 1985)。また、塊状のハマサンゴ (*Porites* spp.) は長期間に渡って成長し続け、直径5m以上の巨大な群体を作ることができる。一方、軟体動物であるシャコガイも造礁サンゴと同じ種類の共生藻類を体内に持ち、自己栄養的な代謝を行っている。また、その殻は直径1m以上に成長し、軟体動物のものとしては最も大きい。これらの特徴から、シャコガイも造礁サンゴと同じニッチを占めていると言えよう。

造礁サンゴ骨格から表面に対して垂直方向に薄板を切り出し、ソフトX線を用いて観察すると、幅数mm～1cmほどの明暗のバンドが平行あるいは同心円状に発達していることが読み取れる (写真1)。明暗のバンド一組みは骨格に残された核実験による放射性同位体の記録から年輪であることが明らかとなった (Knutson et al., 1972)。また、シャコガイ骨格は、同様の年輪の他、日輪と考えられる成長線も見い出されており、それらを利用して骨格に正確な時間軸をいれることが可能である。造礁サンゴやシャコガイ骨格は分析用の試料としても優れている。これらの造礁生物の骨格はその表面に新たなアラレイシ (CaCO_3) の針状結晶が次々と付加されていくことによって成長する。したがってサンゴなどの骨格から連続的な時系列データを容易に採取できる。成長速度の速い骨格から年輪の中をさらに細分して試料を削り出せば、季節変化を知ること可能である。また、これらの骨格の主成分は炭酸カルシウムであり、簡単な前処理によって同じ試料から酸素・炭素同位体比とSr/Caなどの

1) 東北大学大学院理学研究科地圏進化化学講座：
〒980-8578 宮城県仙台市青葉区青葉山

キーワード：造礁サンゴ、シャコガイ、日輪、酸素同位体比、Sr/Ca比、水温、塩分、気候変動、エルニーニョ、西太平洋暖水塊

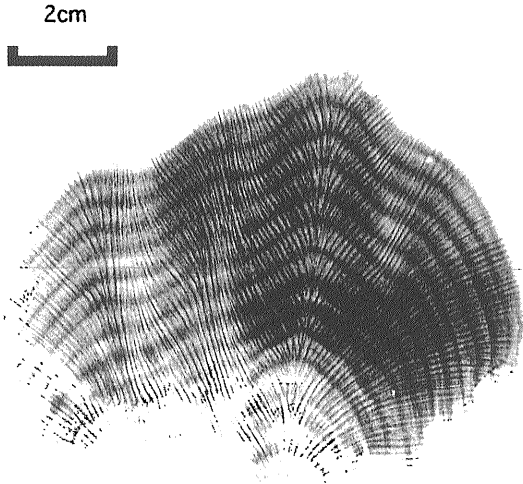


写真1 鹿児島県喜界島北部志戸桶沖の礁斜面(水深9m)から平成9年9月に得られたハマサンゴ(*Porites* sp.)のソフトX線ポジ写真。年平均成長速度は群体の頂部で5.98mm/年である。

化学成分の濃度を測定できる。さらに、レーザーアブレーションICP-MSを用いれば、骨格片からSrやMg濃度の時系列データを直接測定できる。

2. 西太平洋暖水塊とエルニーニョ

インドネシアからマーシャル諸島・ギルバート諸島にかけての太平洋西部の熱帯海域には、周囲の海域の海水よりもさらに高温な西太平洋暖水塊が発達する。この水塊はアジアのモンスーンやエルニーニョの活動と深く関与し、遠く離れた日本の気象にも影響を及ぼしている。エルニーニョは熱帯太平洋における大気・海洋系の固有振動と考えられているが、実際には2~5年の間隔で準周期的な活動を行っている。不規則に変動する西太平洋暖水塊の形成メカニズムを理解し、大循環モデルなどを用いてこの海域における大気・海洋の変動を予測するためには、海水温と降水量の空間分布と長期間にわたる時間変化を知る必要がある。現在の水塊の分布と時間変化は人工衛星による表層海水の観察によってモニターできるが、このような情報を利用できるのは最近の数十年間に限られている(Reynolds and Smith, 1994)。したがって、より長期間のデータを集めるためには造礁サンゴやシャコガイなどの骨格に記録された情報を解読しなければならない。

近年、国際的な問題となっている大気CO₂濃度の上昇とそれに由来する地球の温暖化についても、造礁サンゴを用いて検討することが可能である。大きなサンゴ試料の酸素・炭素同位体比とSr/Ca比等を測定することによって、過去数百年にわたる海水温と $\delta^{13}\text{C}$ のシュース効果を正確に求めることができる。この温暖化現象はエルニーニョなどの振動様式にも何らかの影響を与えたと考えられ、海水温に関する情報は気象モデルを検討する際のよい境界条件となる。西太平洋暖水塊の変動は、さまざまな過程によって海洋の炭素循環に何らかの影響を及ぼしていることが推定される。例えば、海水温の上昇は、海面を上昇させ、サンゴ礁の石灰化量を増加させると予想される。また、海洋プランクトン群集の生産構造が変化し、生物ポンプの働く場所と速度が大きく変わる可能性がある。水温の上昇によって海のCO₂の溶解度が減少し、表層から大気に向かってCO₂が移動する。大気CO₂濃度が増加すると、温室効果によって気温が上昇し、陸上でのCaCO₃の溶解が進む。これらの因果関係は複雑に入り組んでおり、中には正のフィードバックを持つ組み合わせもあるため、単純なモデル化は困難である。したがって、長期的な炭素循環を理解するためにはそれに関与すると考えられる海水温・塩分・日射量・pH・全アルカリ度・全炭酸・生産量・石灰化量などの量を化学的あるいは生物学的トレーサーを用いて推定する必要がある。

3. 造礁サンゴおよびシャコガイ骨格に記録された環境

造礁サンゴの成長線は、Ma(1934)によって発見されて以来、現生、化石を問わず数多くのグループから報告されている。骨格中の⁸⁷Srの分布から、濃淡一組みのバンドは年輪であることが明らかになり(Knutson et al., 1972)。特定の環境を反映していることが期待された。しかしながら、推定された年輪の形成メカニズムは研究者によって異なり、光の強度・水温・生殖活動・栄養塩などが候補に上がっている。したがって、年輪幅や骨格密度などから古環境を復元する試みは、現在も成功していない。一方、シャコガイの仲間のオオジャコ(*Tridacna gigas*)とシャゴウ(*Hippopus hippopus*)骨

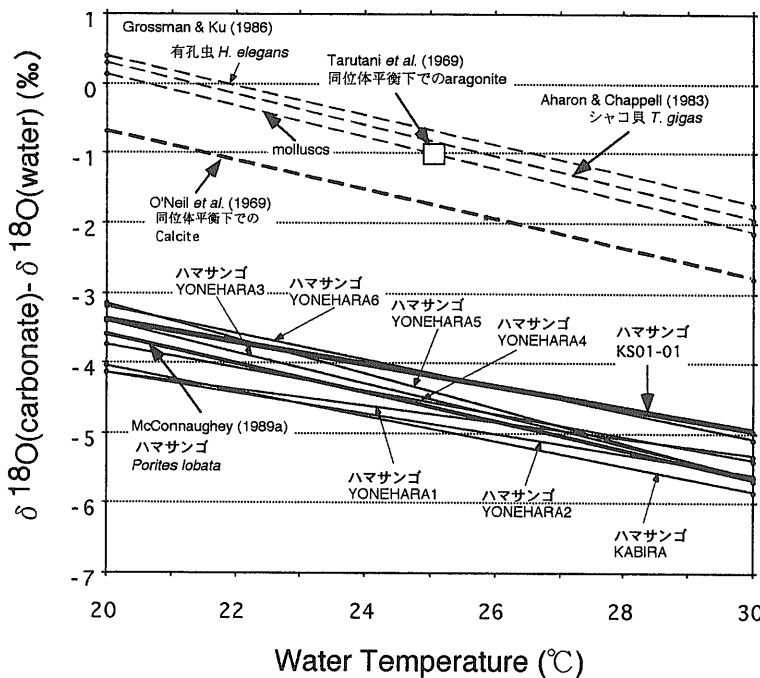
格には幅1cm程度の年輪と幅20~50 μ mの日輪に相当する成長線が発達することが明らかになった。これらの日輪幅は全日射量や海水温と極めて相関が高く、過去の水温や日射量を測定する道具として使用できる可能性が指摘された(Pätzold *et al.*, 1991; Hirunuma, 1996MS)。

Epstein *et al.* (1953)らは造礁サンゴ骨格の酸素同位体比を測定し、同位体比は海水と非平衡であるが、過去の海水温や塩分を反映していることを明らかにした。一方、近年の同位体比に関する研究では、造礁サンゴ(ハマサンゴ, *Montastrea annularis*など)とシャコガイ他の二枚貝殻の酸素同位体比が測定され、海水温との関係が検討された。その結果、シャコガイ殻は海水と同位体平衡であることが判明した(Aharon, 1991)。また、造礁サンゴ骨格は海水と同位体非平衡であるが、 δ 値-海水温回帰直線の傾きはどの種でも平衡下で析出した方解石の値とほぼ等しいため、誤差の少ない温度換算式を作れることが明らかになった(第1図)。その一方で、造礁サンゴ骨格の酸素・炭素同位体の分別が部位によって異なり、同じ群体の中でも成長速度の速い部分の同位体比が軽いことも判明し(McConnaughey, 1989)、温度計・塩分計としての役割に疑問を持つ研究者も多い。

Smith, *et al.* (1979)は造礁サンゴ骨格中のSr濃度を測定し、濃度と海水温の相関が高いことを初めて見出した。また、サンゴや軟体動物骨格のその他の主要化学成分も年周変化を示すことから、これらは海水温・生物種・海水中の元素の濃度に依存しているものと結論された(北野, 1990)。このような初期の研究から造礁サンゴ骨格は環境を解析する上で最も重要な試料の一つであることが指摘され、その後多くの研究が重ねられてきた。最近では、誘導結合型プラズマ発光分光分析法や誘導結合型プラズマ質量分析計などの化学成分の分析機器の技術が急速に高まり、微小な試料からSr・Mg・Caなどの濃度を正確に測定することが可能になった。その結果、造礁サンゴ骨格のSr/CaやMg/Ca比が海水温との相関が高く、温度計として有望であることが示された(Mitsuguchi *et al.*, 1996)。

4. 古気候の復元に向けて

造礁サンゴの骨格は、古気候を復元する際にも非常に有効である。造礁サンゴは他の生物と比較して長寿であり、最も寿命の長いものは数百年以上に渡って一定の速さで成長を続ける。したがっ



第1図
生物骨格の酸素同位体比と水温の関係。縦軸は酸素同位体比であり、炭酸塩の δ 値から周囲の海水の δ 値を引いたもの。細い点線はシャコガイと有孔虫の値で、太い点線は実験室で同位体平衡下で析出した方解石の値である。白四角形はTarutani *et al.* (1969)による平衡下で析出したアラレイシ(25 $^{\circ}$ C)の同位体比を示す。実線は石垣島(YONEHARA1-6, KABIRA)と喜界島(KS01-01)で得られたハマサンゴとガラパゴス(McConnaughey)で得られたハマサンゴのグラフである。シャコガイと有孔虫のグラフが平衡下で析出したアラレイシの値の近くを通るのに対して、ハマサンゴはそれと傾きが同じで、値が3~4%低いことに注意。

て、産業革命から現在までの約250年間の海洋環境変動を連続的に観察するのに最も適した試料である。特に、サンゴは熱帯・亜熱帯海域に広く分布するため、西太平洋暖水塊およびエルニーニョやアジアモンスーンの活動を正確に追跡するのに最適であると考えられる。Cole and Fairbanks(1990)はイボサンゴのコア試料を用いてタラワ環礁における過去20年のエルニーニョに伴う水温と塩分の変化を検討した。パナマのチリキ湾では長さ3m程のハマサンゴのコアが掘削され、過去277年間の酸素同位体比が測定された(Linsley and Dunber, 1994)。彼らは降水量や水温の長期的な変動を復元し、エルニーニョとの関係を議論した。また、大西洋でも造礁サンゴ *Montastrea annularis* を用いて同様の長期的な気候変動が研究されている。たとえば、フロリダでは直径3m以上に成長した群体からコアラーを用いて長さ2mほどの柱状試料を採集し、その酸素同位体比から過去240年の大西洋の降水量の変化が復元された(Swart *et al.*, 1996)。

造礁サンゴやシャコガイの骨格は第四紀更新世・完新世の古気候を再現する場合にも優れている。なぜならば、U/Th法や¹⁴C法によってこれらの骨格の放射年代を直接測定し、他の地質時代と比べて格段に高い精度で年代を知ることができるからである。また、これらの中にはアラレイシの結晶構造がそのまま保存されているものもあり、その酸素同位体比と化学成分の濃度から過去の海水温などの情報を正確に再現できるからである。パプアニューギニアや喜界島の最終間氷期(125,000年BP)と完新世の段丘堆積物からは保存の良いハマサンゴが得られ、Sr温度計を用いて古水温を再現することが試みられている(McCulloch and Mortimer, 1994; McCulloch *et al.*, 1996)。しかしながら、いずれの場合も現在の水温よりも3~5℃低く推定され、続成作用の影響が心配される。また、パプアニューギニアの最終間氷期・亜間氷期・完新世段丘よりシャコガイ殻が集められ、それらの酸素同位体比から最終間氷期以降の酸素・炭素同位体比の変化が求められた。これから、各時代における水温と氷床量の酸素同位体比変化分に対する貢献の比率が求められた(Aharon, 1983)。同じ試料の炭素同位体比からはかつてのサンゴ礁の生産

量が推定され、最終氷期(酸素同位体比ステージII, III)のサンゴ礁の生産量が現在の2倍と結論された(Aharon, 1985)が、この場合も続成作用を被っている可能性がある。

5. まとめと今後の課題

以上に述べた造礁サンゴとシャコガイ骨格を用いた古気候復元の研究成果をもとに、西太平洋熱帯海域の長期的な気候変動を解明するため、次の課題を模索した。

(1) 造礁サンゴおよびシャコガイの収集

西太平洋暖水塊の北側の境界部にあたる北緯8度ラインおよび暖水塊の中央部を縦断する東経140度ラインを重点的な調査測線として設定する。北緯8度ラインにはカロリン諸島のペラウ、チュック、ポンベイおよびマーシャル諸島のマジロの環礁や堡礁が位置し、暖水塊の東方への移動すなわちエルニーニョの発生をモニターするのに好適である。また、東経140度ラインには伊豆小笠原諸島およびマリアナ諸島のグアム、サイパンの裾礁が位置しており、暖水塊の変動が周辺の中緯度海域へ与える影響のモニターに適している。これらのサンゴ礁より、コアサンプラーを用いて200-300年間の連続した年輪を持つハマサンゴ群体のコア試料を採集する。また、その周囲からシャコガイを採集する。

(2) 気象データの収集

サンゴコア試料採取点周辺の気象台などに蓄積された海水温・気温・日射量・降水量に関する資料を収集する。また、人工衛星NOAAのAVHRRデータを利用すれば、過去数十年間の西太平洋海域の表層水温(SST)を集めることができる。

(3) シャコガイの成長線の解析

シャコガイ殻の薄板から薄片を作成し、光学顕微鏡によって写真を測定し、それから日輪幅を測定する。日輪幅から日射量を計算する式を求め、過去の水温あるいは日射量変化を明らかにする。

(4) サンゴ・シャコガイを用いた海水温推定精度の向上と塩分推定アルゴリズムの確立

気象台や人工衛星によって集められた過去数十年分の海水温データとサンゴコアのSr/Ca、あるいはMg/Ca比を比較し、最も精度の高い温度計を作成する。その換算式をコア全体に適用して過去

数百年の海水温変化を求める。同時に測定した酸素同位体比から水温変化分を除き、その残差を塩分の変化分と考える。

(5) 造礁サンゴ骨格による過去200-300年の西太平洋暖水塊の変動の解明

造礁サンゴコア試料の酸素・炭素同位体比とSr/Ca,あるいはMg/Ca比を測定し、暖水塊の変動を空間的に明らかにする。海水温の変動からエルニーニョの発生頻度と強度を復元する。同時に塩分の変動パターンから降水量を推定し、また日射量から推定される雲量変動とあわせて、熱帯収束帯の変動について明らかにする。

(6) サンゴ・シャコガイ化石を用いた第四紀気候変動に伴う海洋環境変動の復元

南西諸島喜界島の隆起サンゴ礁から化石ハマサンゴとシャコガイを採集し、現在から約6000年前までの最も暖かい時期の水温・塩分・日射量の変動を復元し、中緯度海域におけるエルニーニョ発生時の海況について検討する。さらに、パプアニューギニア・ヒュオン半島の段丘から採取したハマサンゴ試料を用いて比較的寒冷な亜間氷期と最終間氷期の気候を復元する。最終間氷期最盛期と完新世については、暖水塊の中心域と周辺中緯度域の2カ所でエルニーニョの発生頻度および強度についての情報を復元する。過去のエルニーニョを現在のものと比較検討することにより、この期間の暖水塊の変動の様相を解明する。

文 献

- Aharon, P. (1983) : 140,000 year isotope climatic record from raised coral reefs in New Guinea. *Nature*, 304, 720-723.
- Aharon, P. (1985) : Carbon isotope record of late Quaternary coral reefs: Possible index of sea surface paleoproductivity. In: Sundquist, E. T. and Broecker, W. S. eds., *Geophysical Monograph*, no.32, The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂: Natural Variations Archean to Present, AGU.
- Aharon, P. (1991) : Recorders of reef environment histories: stable isotopes in corals, giant clams, and calcareous algae. *Coral Reefs*, 10, 71-90.
- Barnes, D. J. and Chalker, B. E. (1990) : Calcification and photosynthesis in reef building corals and algae. In: Dubinsky ed., *Ecosystems of the World*, 25, 109-131, Coral Reefs, Elsevier.
- Cole, J. E. and Fairbanks, R. G. (1990) : The Southern Oscillation recorded in the $\delta^{18}\text{O}$ of corals from Tarawa Atoll. *Paleoceanography*, 5, 669-683.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H. A., and Urey, H. C. (1953) : Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 64, 1315-1325.
- Hirunuma, N. (1996MS) : Environmental changes recorded in the giant clam shell. Master Thesis of Tohoku University.
- Kinsey, D. W. (1985) : Metabolism, calcification and carbon production in coral reefs. In: *Proc. 5th Coral Reef Congr.*, Tahiti, 4, 505-526.
- 北野 康 (1990) : 炭酸塩堆積物の地球化学. 東海大学出版会, 391pp.
- Knutson, D. W., Buddemeier, R. W., and Smith, R. W., (1972) : Coral chronometers: seasonal growth bands in reef corals. *Science*, 177, 270-272.
- Linsley, B. K. and Dunbar, R. B. (1994) : A coral-based reconstruction of Intertropical Convergence Zone variability over Central America since 1707. *Jour. Geophys. Res.*, 99, 9977-9994.
- Ma, T. Y. H. (1934) : On the seasonal change of growth in reef coral, *Favia speciosa* (Dana), and the latest geological times. *Proc. Imp. Acad.*, 10, 353-356.
- McConnaughey, T. (1989) : ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 151-162.
- McCulloch, M., and Mortimer, G. (1994) : High fidelity Sr/Ca record of sea surface temperatures: 1982-83 El Nino and MIS-5e. *8th Int. Conf. Geochronology Cosmochronology Isotope Geol.*, p.21.
- McCulloch, M., Mortimer, G., Esat, T., Xianhua, L., Pillans, B., and Chappell, J. (1996) : High resolution windows into early Holocene climate: Sr/Ca coral records from the Huon Peninsula. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 138, 169-178.
- Mitsuguchi, T., Matsumoto, E., Abe, O., Uchida, T., and Isdale, P. J. (1996) : Mg/Ca thermometry in coral skeletons. *Science*, 274, 961-963.
- Muscantine, L. (1990) : The role of symbiotic algae in carbon and energy flux in reef corals. In: Dubinsky ed., *Ecosystems of the World* 25, Coral Reefs, 75-87, Elsevier.
- Pätzold, J., Heinrichs, J. P., Wolschendorf, K., and Wefer, G. (1991) : Correlation of stable isotope temperature record with light attenuation profiles in reef-dwelling *Tridacna* shells. *Coral Reefs*, 10, 65-69.
- Reynolds, R. W. and Smith, T. M. (1994) : Improved global sea surface temperature analyses using optimal interpolation. *Jour. Clim.* 7, 928-948.
- Smith, S. V., Buddemeier, R. W., Redalje, R. C., and Houck, J. E. (1979) : Strontium-calcium thermometry in coral skeletons. *Science*, 204, 404-407.
- Swart, P. K., Dodge, R. E., and Hudson, H. J. (1996) : A 240-year stable oxygen and carbon isotopic record in a coral from south Florida: Implications for the prediction of precipitation in southern Florida. *Palaios*, 11, 362-375.
- Tarutani, T., Clayton, and Mayeda, T. K. (1969) : The effect of polymorphism and magnesium substitution on oxygen isotope fractionation between calcium carbonate and water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, 987-996.
- NAKAMORI Toru (1998) : Paleo-environments reconstructed from hermatypic coral skeleton and giant clam shell.

<受付: 1998年6月8日>