

## サンゴ年輪から読み解く海洋環境変動



山崎 敦子

(環境学研究科 地球環境科学専攻 大気水圏科学系)

### はじめに

気候変動や環境変動を記録する媒体にはアイスコアや木の年輪、海洋堆積物などがあるが、主に熱帯・亜熱帯に分布する造礁サンゴの年輪もその一つである。低緯度域はエルニーニョ南方振動など地球の気候を駆動する現象や、モンスーンや台風など重要な気象現象が発生する地域であるが、陸地が少なく、継続的かつ長期の気象・海洋観測記録が少ない。そこで、造礁サンゴ年輪に記録される海洋環境記録が熱帯域の気候変動の理解に用いられてきた。本稿では、造礁サンゴ年輪の特徴と、環境の解析方法を紹介する。

### 造礁サンゴとは

「造礁サンゴ」とは、サンゴ礁を作るイシサンゴ目のサンゴ（以下、サンゴ）の呼称である。サンゴはイソギンチャクやクラゲと同じ刺胞動物に属する動物であり、個体は袋状の体を持ち、中央に口があり、その周囲に触手が並び、分裂または出芽を繰り返して群体を形成する。体内には褐虫藻（渦鞭毛藻の一種）が共生しており、日中は褐虫藻が光合成を行って有機物を生産し、宿主であるサンゴに供給される。一方、夜間には触手を伸ばして動物プランクトンなどを捕食する。この光合成と捕食による二重の栄養獲得戦略と、体内での栄養塩の高効率リサイクルにより、貧栄養な熱帯、亜熱帯の海で繁栄することを可能にしている。サンゴは炭酸カルシウムの外骨格を体の下に付加しながら成長する。属・種によって枝状・塊状・

テーブル状など多様な形態をとり、様々な生物の棲家となることから、地球上で最も生物多様性の高いサンゴ礁生態系が形成される。造礁サンゴは、年に一度の産卵で有性生殖を行う。水中で受精した卵は一晚経つとプラヌラ幼生となり、1週間程度、海中を遊泳したのち、基盤を見つけて着底し、ポリプの形に変態する。その後は移動することなく骨格を成長させ、種によって様々な形の群体を形成する。ハマサンゴ属に代表されるドーム状（塊状）に成長するサンゴ群体の骨格には、樹木のように連続的かつ一定の成長方向に年輪が形成される。ハマサンゴの年輪幅すなわち炭酸カルシウムの堆積速度は平均して年間1～2 cmである。ハマサンゴ群体は大きいもので数mから10m規模に成長するため、過去数百年～千年弱ほど群体として生き延び、その場の海洋環境を年輪に記録している。

### 軟X線によるサンゴ年輪の観察方法

サンゴ骨格の年輪を連続的に得るために、陸上で行う地質ボーリングと同様の手法が海中でも用いられてきた。サンゴの海中ボーリングはドーム状の群体の頂部から、基盤に向かって鉛直方向に直径2.5インチのコアを掘削する。掘削するドリルの動力は空気圧であり、群体の真上にアンカリングした船上から、ダイビングタンクまたはコンプレッサーで圧縮空気をエアドリルに送る（Adachi and Abe, 2003）（図1a）。油圧式を用いることもあるが、空気圧により環境負荷を低減することを

意図している。掘削したコアの表面の数mmはサンゴの軟体部であるが、その下部は全て白色の炭酸カルシウム骨格である（図1b）。掘削後のコア孔にはコンクリートで成形した栓を取り付けることによって、周囲の生体部が分裂しながら表面を再被覆する。この処置により、サンゴ群体はその後にも生存、成長を継続する。採取したサンゴコアは、成長方向を確かめ、生物による侵蝕孔を避けて、連続的な年輪を追跡するため、X線CTを用いて切断面を決定する。その後、フライス盤で縦方向に5mm厚にスライスし、軟X線画像の撮影を行う。サンゴ骨格の密度は、主に水温の季節変動に応じて周期的に変化し、X線CTおよび軟X線画像では濃淡の縞として、高密度と低密度のバンドを一对とした年輪が観察される（図1c）。X線画像年輪の本数や年輪幅、密度の変化を解析することで、サンゴ群体の年齢、年間成長速度、石灰化量の変動を知ることができる（e.g. Lough and Barnes, 2000）。よって、サンゴ骨格年輪を研究する場合には、X線装置の確保が最初の課題となる。東ティモール大学との共同研究では、大学に研究用X線装置が存在しなかったため、現地の歯科医院の協力を得て歯科用レントゲン装置でサン

ゴ薄片の撮像を行った。また、ドイツでは、大型病院のX線CT装置を利用し、医療用検査の合間にサンゴコアの撮影を実施した。放射線イメージング技術は、サンゴ研究における基盤であると言える。

### サンゴ年輪による環境解析

サンゴ年輪の存在は、1970年代にマーシャル諸島・エニウェトク環礁のサンゴの結果から報告された（Knutson et al., 1972）。塊状のサンゴをスライスして撮影した軟X線画像上の密度バンドとオートラジオグラフィーに映るガンマ線の画像を比較し、密度バンドの本数と水爆実験が行われた年の間隔とが対応することから年輪として確認された。以降、サンゴの年輪はサンゴ骨格の身長量、密度、石灰化量の解析に用いられてきた。伸長量は年輪幅から、密度は軟X線画像を撮影する際に密度スタンダードを置いて撮影し、X線画像の濃淡により密度を算出する、石灰化量は伸長量と密度の乗算で求められる（e.g. Lough and Barnes, 2000）。

Grigg (1982) は、ハワイ島からハワイ諸島の最北のクレ環礁までに生息するハマサンゴ骨格の年

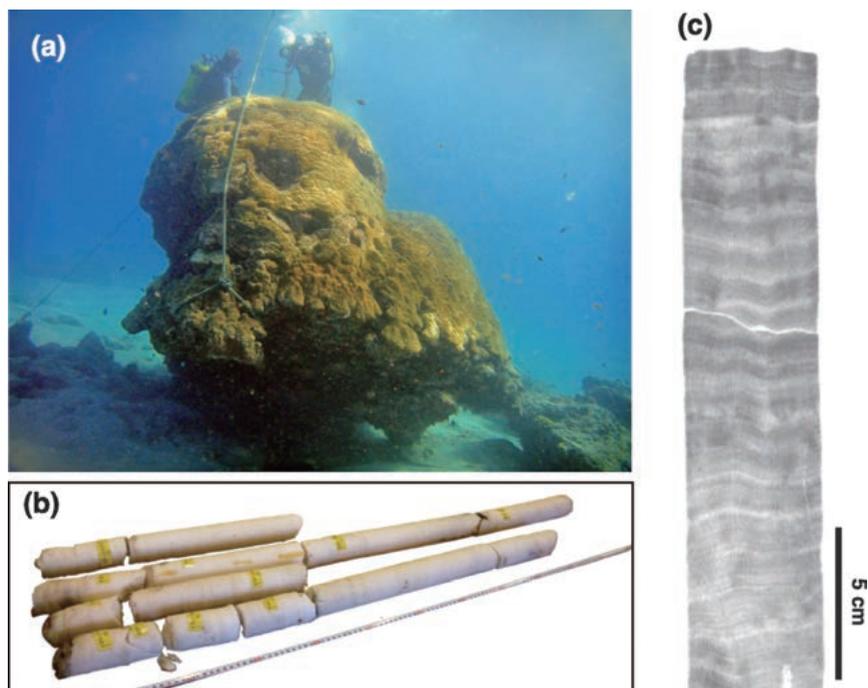


図1 ハマサンゴ属のサンゴの長寿大型群体とボーリング作業 (a)、サンゴ骨格の掘鑿試料 (b)、サンゴ骨格の軟X線画像でみられる年輪 (c)

輪を観察し、緯度が高くなる、すなわち水温が低くなるほど骨格身長量が減少していくことを示した。この結果は、サンゴ群体がサンゴ礁のフレームワークを作る機能が緯度が高くなるほど小さくなることを示しており、プレートテクトニクスによって沈んでいく島に対してサンゴ礁の成長が追いつかなくなることを説明した。グレートバリアリーフでは、400歳の群体を含む328群体のハマサンゴのボーリングコアから身長量、密度、石灰化量が解析され、1990年以降に造礁サンゴの石灰化量がグレートバリアリーフ全体で減少しており、地球温暖化の影響が懸念されている(De'ath et al., 2009)。

近年のダイビング技術やROV(遠隔操作型無人探査機)の発達により、水深30 mより深場の中有光層(mesophotic zone)の造礁サンゴが世界各地で発見されている。深場のサンゴ礁生態系は、太平洋やカリブ海、紅海などで報告されており、造礁サンゴの生息の最深記録は、フレンチポリネシア・タヒチ周辺の水深172 mである(Rouzé et al., 2021)。中有光層は海洋表層よりも水温上昇や土砂の流入、台風などの環境の擾乱を受けにくく、造礁サンゴの種の避難場所として着目され、研究が進められてきた。深場のサンゴ礁は造礁サンゴの避難場所となりうるのか、浅場から中有光層の

環境伝搬や造礁サンゴの生態の違いなどが、サンゴ礁生態系保全の観点から研究が進められている(e.g. Rocha et al., 2018)。そこで筆者らはサンゴ骨格の年輪から中有光層に棲むサンゴの生態、環境情報を読み取る研究を行っている。沖縄県瀬底島の近海で、水深4 m、40 mのハマサンゴ骨格の年輪を比較した結果では、水深4 mのハマサンゴでは年間1 cm以上の成長が見られるのに対し、水深40 mのサンゴでは年間成長量が2~3 mm程度まで低下することが明らかになった(図2; Watanabe et al., 2019)。同時に、群体の形状も、水深が深くなるにつれて丸みを帯びた形から水平に広がる扁平な形へ変化し、限られた光を効率よく受け取る形であると考えられる。また、年輪の成長幅の経年変化を観察すると、4 mは4 mmの変動があるが、40 mでは1 mm程度の変動内に収まることから、環境の変化が小さいことがわかる。

#### 造礁サンゴ骨格の地球化学指標

サンゴ骨格年輪の発見後、1980~1990年代にかけて安定同位体比および元素分析技術が発展するとともに、サンゴ骨格の地球化学分析による気候・海洋環境解析が盛んに行われた。造礁サンゴ骨格を構成する炭酸カルシウムは、酸に対して溶解性が高く、その化学組成を湿式で容易に測定で

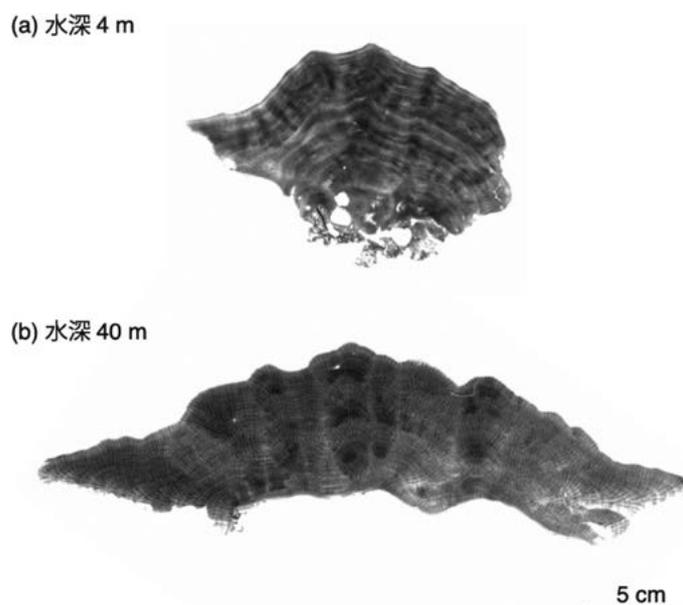


図2 沖縄県瀬底島の水深4 mと40 mから採取されたハマサンゴの軟X線画像(Watanabe et al., 2019を改変)

きる利点がある。サンゴ骨格の年輪1本をさらに細分化しながら微小粉末試料を採取し、地球化学分析を行うことで、季節スケール（週～月単位）の環境変動を得ることが可能となる。

リン酸でサンゴ骨格を溶解して発生するCO<sub>2</sub>は、その酸素、および炭素それぞれの安定同位体比が、有用な環境指標として利用されている。酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）は、水温と海水の酸素同位体組成（塩分とほぼ相関する）の両方に依存して変化する（図3）。例えば、エルニーニョ現象のように高水温かつ降水量の多い西太平洋暖水塊の移動による変動を捉えるのに、サンゴ骨格の酸素同位体比が用いられてきた。また、水温指標であるサンゴ骨格中のストロンチウムのカルシウムに対する濃度比から求められる水温（ $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の精度で過去の水温を記録している）の影響を取り除くことで、塩分の変動を復元することができる。サンゴ群体の生息期間である数百年以上の水温の変動は、低緯度域の温暖化の進行を示す重要な古気候記録である（Abram et al., 2016）。炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）は、人為起源二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の海洋への取り込みを評価するうえで重要な指標として用いられてきた。化石燃料由来のCO<sub>2</sub>の炭素同位体比は小さい値を持つため、大気から海洋へ溶解したCO<sub>2</sub>がサンゴ骨格に取り込まれると、その $\delta^{13}\text{C}$ は時間とともに低下する。人為起源CO<sub>2</sub>が各海域にどのタイミングで、どの程度で速度で溶け込みが進んできたかを読み取ることができる（e.g. Swart et al., 2010）。

また、サンゴ骨格中に取り込まれた有機物の窒素同位体比からは海水中の主要な栄養塩である窒

素化合物の起源を推定できる（山崎, 2019, 2022の総説参照）。サンゴ礁が分布する熱帯・亜熱帯域の表層海水は極めて貧栄養であり、「海の砂漠」と呼ばれている。しかし、サンゴ礁は非常に高い生物多様性を維持しており、外部からの栄養塩の供給源やサンゴ礁内での循環過程は十分に理解されていない。沿岸のサンゴ礁では、河川・地下水由来の陸起源栄養塩のほかに大気からの沈着、深層水の湧昇、窒素固定など、複数の窒素源が存在し得るが、表層海水中の硝酸濃度が極めて低いため、その挙動を把握することが困難であった。

この問題に対して、筆者はサンゴ骨格中に取り込まれた有機態窒素の窒素同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）に着目した。窒素の起源物質ごとに $\delta^{15}\text{N}$ が異なるため、サンゴ骨格から有機物を抽出・酸化してN<sub>2</sub>Oガスに変換し、その $\delta^{15}\text{N}$ を測定することで、サンゴ礁に流入した窒素の起源を推定できる。陸起源の栄養塩負荷が知られている石垣島・白保のサンゴ礁で行った調査では、河川の硝酸、沖合の外洋水の硝酸、そしてサンゴ骨格の $\delta^{15}\text{N}$ のサンゴ礁内での分布を比較した。その結果、河川の硝酸は約+8‰、外洋水は約+3‰程度であり、サンゴ骨格の $\delta^{15}\text{N}$ は陸から離れるに従って、外洋側の値へと変化していた（Yamazaki et al., 2011, 2015）。これは、海水試料では検出が困難な低濃度の硝酸であっても、その起源がサンゴ骨格中に保存されていることを示す。このように、サンゴ骨格の窒素同位体比は、従来の海洋観測だけでは把握が難しい見えない栄養塩の流れを可視化する手段として機能しつつあり、海の砂漠における栄養循環の理解を大きく前進させている。

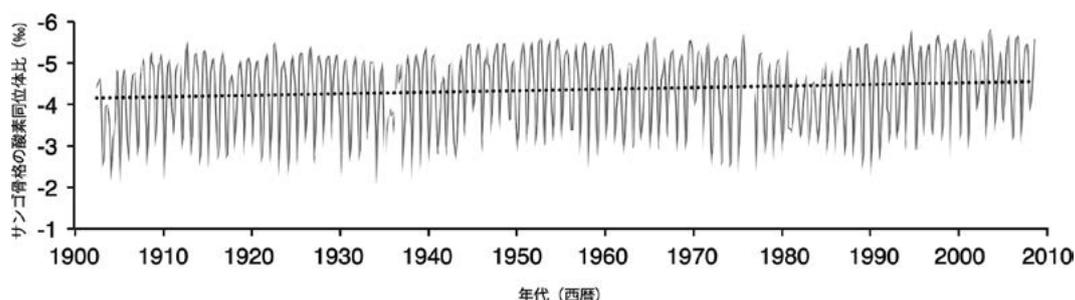


図3 鹿児島県甬島のハマサンゴ骨格の酸素同位体比記録（Watanabe et al., 2014を改変）。水温の季節変動によって、1年のサイクルが記録される。100年間の温暖化傾向も見られる。

## おわりに

サンゴは、一度基盤に定着すると、数百年という時間スケールで同じ場所にとどまり続ける。そのあいだに体の下に積み重ねる炭酸カルシウム骨格には年輪として、多様な情報が記録される。放射線イメージング（X線やX線CT）と、安定同位体比や微量元素といった地球化学分析を組み合わせることで、造礁サンゴ骨格は観測データの少ない海域や時代の環境情報を提供している。

## 参考文献

- Adachi, H. & Abe, O. (2003) "Air drill" for submerged massive coral drilling. *Marine Technology Society Journal*, **37**, 31–36
- De'ath, G., Lough, J. M., Fabricius, K. E. (2009) Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science*, **323**(5910), 116–9. <https://doi.org/10.1126/science.1165283>.
- Lough, J. M. & Barnes, D. J. (2000) Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **245**, 225–243.
- Grigg, R. W. (1982). Darwin point: A threshold for atoll formation. *Coral Reefs*, **1**, 29–34. <https://doi.org/10.1007/BF00286537>
- Knutson, D. W., Buddemeier, R. W., & Smith, S. v. (1972). Coral Chronometers: Seasonal Growth Bands in Reef Corals. *Science*, **177**(4045), 270–272. <https://doi.org/10.1126/science.177.4045.270>
- Swart, P. K., Greer, L., Rosenheim, B. E., Moses, C. S., Waite, A. J., Winter, A., Dodge, R. E., & Helmle, K. (2010). The  $^{13}\text{C}$  Suess effect in scleractinian corals mirror changes in the anthropogenic CO<sub>2</sub> inventory of the surface oceans. *Geophysical Research Letters*, **37**(5). <https://doi.org/10.1029/2009GL041397>
- Rocha, L. A., Pinheiro, H. T., Shepherd, B., Papastamatiou, Y. P., Luiz, O. J., Pyle, R. L., & Bongaerts, P. (2018). *Mesophotic coral ecosystems are threatened and ecologically distinct from shallow water reefs*. *Science*, **361**, 281–284. <https://doi.org/10.1126/science.aaq161>
- Rouzé, H., Galand, P. E., Medina, M., Bongaerts, P., Pichon, M., Pérez-Rosales, G., Torda, G., Moya, Under The Pole Consortium, Raina, J. B. & Hédouin, L. (2021) Symbiotic associations of the deepest recorded photosynthetic scleractinian coral (172 m depth). *ISME Journal*, **15**(5), 1564–1568. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-00857-y>
- Watanabe, T., Watanabe, T. K., Yamazaki, A., Yoneta, S., Sowa, K., Sinniger, F., Eyal, G., Loya, Y., & Harii, S. (2019). Coral Sclerochronology: Similarities and Differences in the Coral Isotopic Signatures Between Mesophotic and Shallow-Water Reefs. In *Coral Reefs of the World* (Vol. 12, pp. 667–681). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92735-0\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92735-0_36)
- Yamazaki, A., Watanabe, T., & Tsunogai, U. (2011). Nitrogen isotopes of organic nitrogen in reef coral skeletons as a proxy of tropical nutrient dynamics. *Geophysical Research Letters*, **38**(19). <https://doi.org/10.1029/2011GL049053>
- Yamazaki, A., Watanabe, T., Tsunogai, U., Hasegawa, H., & Yamano, H. (2015). The coral  $\delta^{15}\text{N}$  record of terrestrial nitrate loading varies with river catchment land use. *Coral Reefs*, **34**(1), 353–362. <https://doi.org/10.1007/s00338-014-1235-1>
- 山崎敦子 (2019) 造礁サンゴ骨格の窒素同位体比指標. *地球化学*, **53**, 1–12. <https://doi.org/10.14934/chikyukagaku.53.1>.
- 山崎敦子 (2022) サンゴ礁の栄養塩ダイナミクス. *日本サンゴ礁学会誌*, **24**, 29–45. <https://doi.org/10.3755/jcrs.24.29>.