

北限サンゴ礁から採取されたキクメイシ属サンゴ骨格中の酸素・炭素同位体比

渡邊 剛^{1,*}・島村道代¹・山野博哉²

¹北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門 〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目

²国立環境研究所地球環境研究センター 〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

要旨 世界で最も高緯度に位置する長崎県の壱岐サンゴ礁より採取されたキクメイシ属サンゴ骨格の酸素・炭素同位体比を莖壁と軸柱の骨格構造別に分析し、その結果を生育時の環境記録と比較を行った。その結果、軸柱と莖壁は形成のタイミングが異なっており、キクメイシ属サンゴの場合、莖壁の同位体比の方がより正確に環境を記録することがわかった。また、壱岐のキクメイシ属のサンゴ骨格は、主に水温や日射量などの環境変動を記録しており、今後、温帯域の古環境復元に用いることができる可能性があるが、より信頼性の高い指標として用いる場合は、分析に用いる骨格要素を厳密に選別しその形成時期を詳細に検討することが求められる。

キーワード 北限サンゴ礁, キクメイシ属, 酸素同位体比, 炭素同位体比, 骨格成長

はじめに

2001年、長崎県壱岐において世界で最も高緯度に位置するサンゴ礁が発見され、そのサンゴ礁を構成するサンゴ群集が塊状のキクメイシ属であると報告された(Yamano et al. 2001, 図1a)。それまで、サンゴ礁が形成されるには年最低水温が18℃以上であることが必要と考えられていた(Wells 1957; Hori 1977)が、壱岐の年最低水温はそれよりも5℃低い約13℃である。このことは、キクメイシ属が他の属に比べて分布が広く、強い環境耐性を持っていること(Veron 2000)と符合する。沖縄における化石サンゴ礁調査では、氷期の年代において、より多くのキクメイシ属が見つかる(大村・辻 1997)。これらのことは、水温が低い時代や地域では、キクメイシ属を主体とするサンゴ礁が発達することを示唆している。

塊状のキクメイシ属は、壱岐のような温帯ばかりでなく、熱帯～亜熱帯にも広く生息し、数十年から百年以上成長を続けて大型群体になることがある。

塊状サンゴの骨格には年輪が形成されることが多く、その化学分析から過去の海洋環境を復元する研究が1970年代から行われている。例えば、骨格のSr/Ca比からは水温が復元され(Beck et al. 1992)、酸素同位体比からは海水温や塩分が復元される(Weber and Woodhead 1972)ことが示されている。これらの研究で最も頻繁に用いられているのはハマサンゴ属であるが、キクメイシ科のノウサンゴ属(Quinn et al. 1996; Shimamura et al. 2008)、マルキクメイシ属(Watanabe et al. 2002)、ダイオウサンゴ属(Watanabe et al. 2003)なども有用であることが示されている。キクメイシ属もキクメイシ科のノウサンゴ属等と同様に塊状の群体を形成し、前述のように環境耐性を有しており熱帯から温帯にかけて広範囲に渡る生息域を持っているため、その骨格は海洋環境の復元手法として特に有望であると考えられる。本研究では、壱岐から採取された塊状キクメイシ属サンゴの骨格試料の酸素および炭素安定同位体比の分析を行い、その環境復元手段の有効性を評価した。

*連絡著者

E-mail: nabe@mail.sci.hokudai.ac.jp

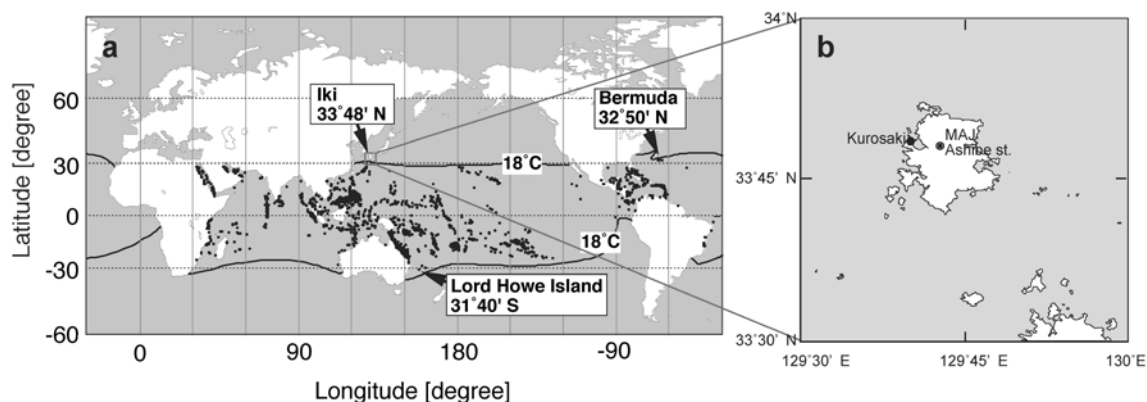


図 1 世界のサンゴ礁分布 (a) と研究地域 (b)。 (a) 図中の線は、海洋表層における最寒期の 18°C 等水温線。太平洋におけるサンゴ礁北限の壱岐、南限の Lord Howe 島と、大西洋北限の Bermuda 島の位置と緯度も併せて示す (Yamano et al. 2001 より引用)。 (b) 本研究の調査地域である壱岐島と、試料採取地点である黒崎 (黒丸) および降水量、日照時間を観測している芦辺測候所 (二重丸)

Fig. 1 Distribution of coral reefs in the world (a) and coral site in this study (b). Solid lines indicate 18°C contours for sea surface temperature in winter. Iki Island is located at higher latitude than those of Bermuda and Lord Howe Island, where the northernmost and southernmost coral reefs in the Atlantic and in the Pacific, respectively, occur (modified from Yamano et al. 2001). Locations of coral sampling site at Kurosaki (closed circle) and the meteorological station at Ashibe (double circle) for precipitation and sunshine hours are shown

材料と方法

1999 年 7 月 8 日、長崎県壱岐島黒崎 (北緯 33 度 48.3 分、東経 129 度 37.6 分、図 1b) において、水深約 2m から直径約 10cm の現生キクメイシ属サンゴ (以下キクメイシ) の試料が採取された。採取された骨格は、約 5mm 厚の平板に整形され、骨格構造を確認するため軟 X 線装置を用いて撮影が行われた (図 2a)。図 2a と b はそれぞれ平板試料の軟 X 線写真 (ネガ) と可視光写真 (ポジ) である。キクメイシの骨格では、莢壁 (theca wall) と呼ばれる筒型の壁状構造と、サンゴ個体の中心部に形成される軸柱 (columella) と呼ばれる柱状構造が顕著に発達する (図 2b)。これら 2 つの骨格構造はサンゴの成長と共に平行に形成されることから、これらには環境情報が記録されていると考えることができる。そこで本研究では、これらの骨格構造の酸素・炭素安定同位体比を分析し、環境記録との比較を行った。

同位体比測定に用いた粉末試料の作成を以下のような手順に従って行った。

- (1) 骨格表面から莢壁は 1mm×2mm×31.6mm (それぞれ幅、厚さ、伸張方向の長さ)、軸柱は

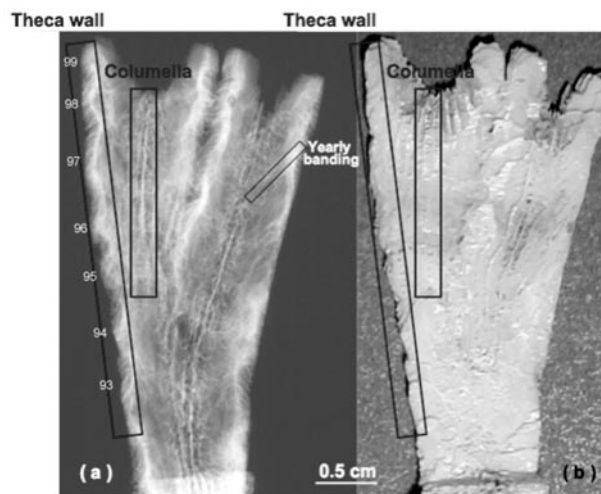


図 2 本研究で用いたキクメイシサンゴ骨格の断面。(a) 軟エックス線写真 (ネガ写真), (b) 断面写真。分析に用いた部位の莢壁 (Theca wall) と軸柱 (Columella) をそれぞれ四角で囲んだ範囲で示してある。軟エックス線写真で検出された年輪も黒の四角で併せて示す

Fig. 2 Skeletal structures of the *Favia* coral in this study. A negative image of the X-ray photograph (a) and a positive image of the under-light photograph (b). Enclosed areas indicate skeletal parts of the theca wall and the columella used for the isotopic analysis

1 mm×2 mm×16.2 mm の棒状試料をそれぞれ切り出した。

- (2) 実体顕微鏡下でそれぞれ他の骨格要素を取り除いた後に、イオン交換水を満たした水槽内で超音波洗浄を行った。
- (3) イオン交換水で作成した角状の水に埋め込み、マイクロトームで 200 μm 間隔で削りだし、真空下で氷を除去した後に粉末試料を採取した (凍結マイクロトーム法; Watanabe and Oba 1999)。

得られた粉末試料を、真空容器中で 60°C の 100% リン酸で反応させ、発生した CO_2 を回収・精製後、同位体比質量分析計 (Finnigan MAT251) で分析した。この分析で用いられた標準試料は NBS-20 であり、値は PDB に対する千分率 (‰) で表される。NBS-20 の繰り返し測定による分析誤差 (1σ) は、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ でそれぞれ $\pm 0.08\text{‰}$ 、 $\pm 0.02\text{‰}$ ($n=15$) である。

同位体比値との比較に用いられた環境データは表

面海水温と降水量、日照時間であり、表面海水温は田崎真珠株式会社の真珠養殖場 (サンゴ試料採取地点から 150 m) において計測され、降水量と日照時間は壱岐島芦辺測候所 (サンゴ試料採取地点から 4 km) で観測された。

結果と考察

莖壁における骨格年輪形成

図 2a の軟 X 線写真を見ると、サンゴ個体は、その幅 (直径) を変化させながら成長方向に伸張しており、莖壁がサンゴ個体の内側へ向かって歪曲している部分で高密度のバンドが形成されているのがわかる。莖壁の軟 X 線写真と $\delta^{18}\text{O}$ データを比べると、莖壁がサンゴ個体の内側へ湾曲している部分 (高密度バンド) は冬季に対応し、莖壁がサンゴ個体の外側に湾曲している部分は夏季に対応している傾向がある (図 3a, b)。また、 $\delta^{13}\text{C}$ の変化も $\delta^{18}\text{O}$ と莖壁

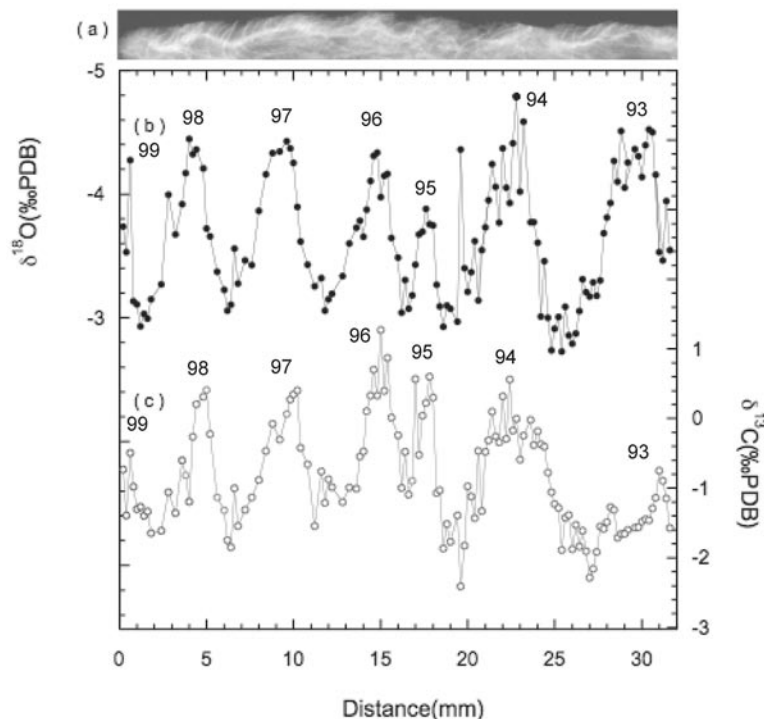


図 3 莖壁の酸素・炭素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$) の分析結果。(a) 分析部位の軟エックス線写真。紙面上側がポリプの外側方向、紙面下側がポリプ内側方向を表す。また、(b) 黒丸は $\delta^{18}\text{O}$ 、(c) 白丸は $\delta^{13}\text{C}$ の結果を示す。 $\delta^{18}\text{O}$ の縦軸は逆転されている

Fig. 3 Comparison of skeletal structure of theca wall observed by x-ray photograph (a) with oxygen (b; $\delta^{18}\text{O}$) and carbon (c; $\delta^{13}\text{C}$) isotopic profiles for the theca wall. The upper side of the x-ray photograph corresponds to the outer layer of the corallite

の伸縮パターンに概ね同調している。

莢壁の安定同位体比の制御要因

本研究で得られた $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動幅は1~1.7%程度である。一方、試料採取地点で観測された水温の変動幅は12~16°Cである(図4)。無機的に沈殿する炭酸カルシウムの $\delta^{18}\text{O}$ の温度依存性は0.2‰/°Cである(Urey 1947)が、報告されているサンゴ骨格の ^{18}O の温度依存性はサンゴの種類により若干異なる値を示す(ハマサンゴ: 0.16~0.23 [Shima-

mura et al. 2005], マルキクメイシ: 0.19 [Watanabe et al. 2001], ダイオウサンゴ: 0.18 [Watanabe et al. 2003], ノウサンゴ: 0.18 [Shimamura et al. 2006])。試料採取地点で観測された水温の季節変動幅(12~16°C)を考慮すると、本研究のサンゴ試料の $\delta^{18}\text{O}$ の季節変動幅としては2.4~3.2%程度が予想されるが、実際には1.0~1.7%となっており、その水温依存性はこれまで報告された研究のなかでも特に小さい。一般的には、海水で形成された炭酸カルシウムの骨格の $\delta^{18}\text{O}$ の変動は、形成時の水温と海水の $\delta^{18}\text{O}$

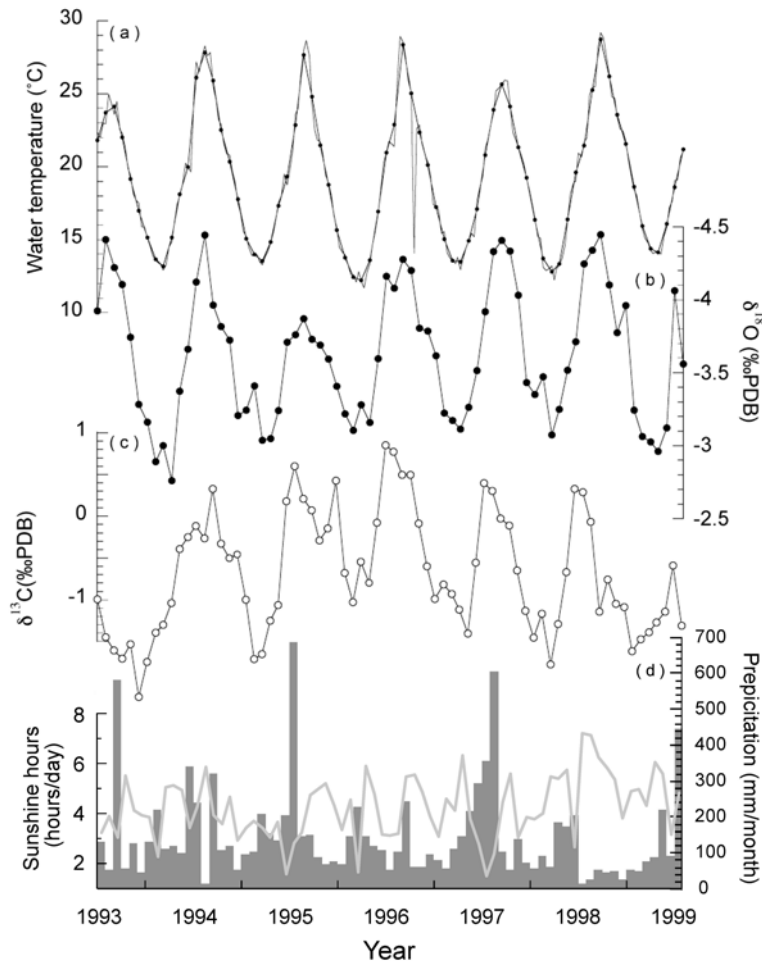


図4 1993年7月~1999年7月における莢壁の酸素・炭素安定同位体比, 水温, 降水量, 日照時間の比較。(a)観測された水温。黒丸のデータは月平均, 細線は10日平均を表す。(b)サンゴ骨格の $\delta^{18}\text{O}$ 。(c)サンゴ骨格の $\delta^{13}\text{C}$ 。(d)観測された降水量(一月の積算量; 棒グラフ)と日照時間(月平均時間)。同位体比のデータは、酸素同位体比のそれぞれの年周期の極大値と極小値の骨格部位が、その年の最低水温時と最高水温時にそれぞれ形成されたものと仮定して時系列に変換した後に、1年間に12点(1点の持つ時間分解能が水温と同じ1ヶ月)となるように統計的にサンプリングしたものである

Fig. 4 Monthly time series of sea surface temperature (a), theca wall $\delta^{18}\text{O}$ (b), theca wall $\delta^{13}\text{C}$ (c), and precipitation and sunshine hours (d)

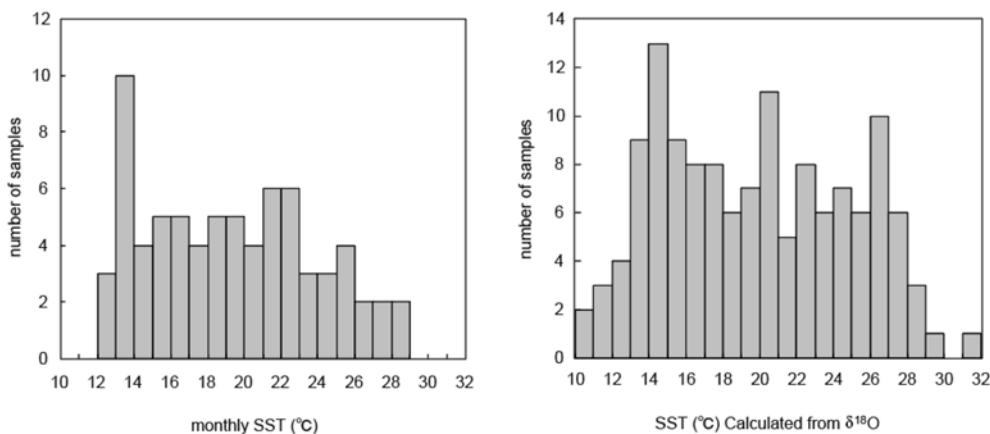


図 5 (a) サンゴ採取地点の水温の月平均温度毎のデータ個数分布図と (b) 骨格の $\delta^{18}\text{O}$ から換算した水温度毎のデータ個数分布図

Fig. 5 Histograms of sea surface temperatures (a) and of calculated sea surface temperatures (deduced from $\delta^{18}\text{O}$) (b)

の変化に支配されている。現場の降水量を見てみると夏季に降水量が高い(図4)。仮に、降水がサンゴ周辺の海水の $\delta^{18}\text{O}$ を変化させているとすると、降水は低い $\delta^{18}\text{O}$ を持つために、夏季のサンゴの $\delta^{18}\text{O}$ は低い方に変化し、サンゴの $\delta^{18}\text{O}$ の変動幅を逆に大きくする方向に影響を及ぼすことになる。ハマサンゴ属における先行研究では、Sr/Ca 比や Mg/Ca 比などの水温依存性がある指標の分析結果から、骨格は低水温時に形成を減水または停止させ、その間の環境変化を記録しないために、骨格記録の季節変動幅が小さくなると説明されている(高知県; Fallon et al. 1999, 沖縄県石垣島; Mitsuguchi et al. 2003)。サンゴ採取地点の水温の月平均温度毎のデータ個数分布図(図5a)と骨格の $\delta^{18}\text{O}$ から換算した水温度毎のデータ個数分布図(図5b)を見てみると、サンゴ骨格の $\delta^{18}\text{O}$ はやや低水温側に偏って記録されていることが分かる。このことと季節変動幅が小さいことを考慮すると、壱岐のキクメイシは夏の高温の時期にも成長を停滞させている可能性もある。

一方、骨格の $\delta^{13}\text{C}$ は、夏季($\delta^{18}\text{O}$ が低い時)に $\delta^{13}\text{C}$ が高く、冬季($\delta^{18}\text{O}$ が高い時)に $\delta^{13}\text{C}$ が低くなっている。骨格の $\delta^{13}\text{C}$ の変動要因は、より複雑で様々な要因が考えられているが、主に、日射量の変動に起因するもの(Fairbanks and Dodge 1979)と成長速度に起因する動的同位体効果と呼ばれるもの(McConnaughey 1989)がある。動的同位体効果で

は $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^{13}\text{C}$ が同時に影響を受けるが、本研究の $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^{13}\text{C}$ を見てみると、互いのピークに1~数ヶ月の時間差が見られ同時に変動しているようには見えない。壱岐における日照時間と炭素同位体比を比べてみると日照時間が少ないピーク(降水量のピーク)時には、 $\delta^{13}\text{C}$ が低い値を示す傾向にあるように見えることから、 $\delta^{13}\text{C}$ の主な変動は、試料採取地点における日射量の変動がポリブ内共生藻の光合成量を変化させた結果生じたもの(Fairbanks and Dodge 1979)であると考えられることができる。しかし、日照時間に明瞭な季節性が見られないこと、前述したように夏に成長が停滞している可能性があることから、これ以上の議論は現場の濁度のデータなどより詳細な環境データが必要である。

莢壁と軸柱の酸素・炭素同位体比

得られた莢壁と軸柱の $\delta^{18}\text{O}$ ・ $\delta^{13}\text{C}$ の結果を図6に示す。図の横軸にはサンゴ群体表面からの距離が示してある。この図では、莢壁については20mmまで、すなわち1994年の途中から1999年の途中までの約5年のデータが示され、軸柱については16.2mmまで、すなわち1995年の途中から1998年までの3年数ヶ月のデータが示されている。

莢壁と軸柱の $\delta^{18}\text{O}$ を比べると、両者の変動には類似の周期性が見られるが、莢壁のデータの方が $\delta^{18}\text{O}$ の振幅がより大きく、明瞭な周期性を持っている

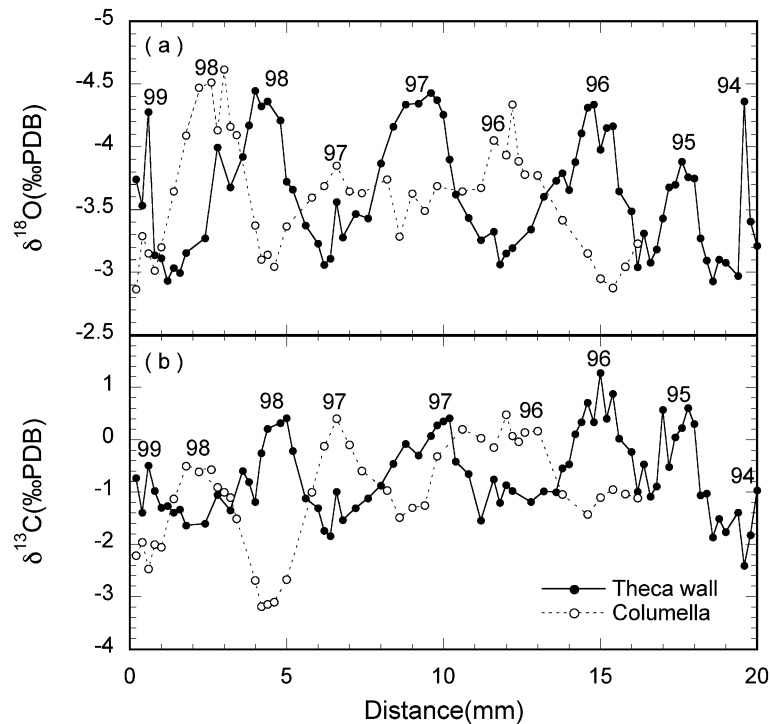


図 6 莖壁および軸柱の (a) 酸素・(b) 炭素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) の分析結果。黒丸は莖壁, 白丸は軸柱の結果を示し, $\delta^{18}\text{O}$ から判別される年代を図中に表す。 $\delta^{18}\text{O}$ の縦軸は逆転されている

Fig. 6 Results of oxygen (a; $\delta^{18}\text{O}$) and carbon (b; $\delta^{13}\text{C}$) isotopic analysis for skeletal parts of the theca wall (solid circles) and the columella (open circles)

(図 6a)。また, 莖壁のデータには 1999 年春~群体試料採取時 (1999 年 7 月) の間に記録されたと考えられる $\delta^{18}\text{O}$ の低下が見られるのに対し, 軸柱のデータにはそれが見られない。これらの結果から, キクメイシ骨格では, 軸柱よりも莖壁の方が過去の環境をより忠実に記録していると考えられる。

莖壁と軸柱の $\delta^{13}\text{C}$ を比べると, 両者の変動には類似の年周期性が見られ, $\delta^{18}\text{O}$ は主に海水温を反映し, $\delta^{13}\text{C}$ は主に日射量を反映していると考えられる。一方, これらの同位体比データには, 莖壁と軸柱の間にピークの高さや振幅の大きさなど有意な相違も見られる。これらの相違の原因の一つとして, 莖壁と軸柱の骨格形成機構や骨格成長リズムの違いが考えられる。よって, 今後, キクメイシ属を用いた古環境復元を行う場合には, 骨格構造に注意を払う必要があり, 環境変動を最も忠実に記録している部位だけを用いることが必須であるといえる。

謝辞

最初に, 本論文を投稿する機会を与えて下さった本特集号の編集委員の杉原薫博士に謝意を申し上げます。サンゴ試料の採取には, 東京大学 (当時) の堀和明氏・山内昌和氏, 長崎県壱岐郡郷ノ浦町役場 (現壱岐市役所) の山川修氏, スイス連邦工科大学の大村纂教授にご協力頂きました。田崎真珠株式会社には水温データをご提供頂きました。北海道大学の成田英器准教授 (当時) には低温室にてマイクロトームを, 北海道大学の太場忠道名誉教授には同位体比質量分析計を利用させて頂きました。北海道大学の中村隆志博士にはサンゴ骨格構造に関してご助言頂きました。最後に, 三ツ口丈裕博士, 匿名の査読者の方には粗稿を丁寧に読んで頂き, また, 改訂する上で非常に有益なコメントを頂きました。本論文のここに記し, お礼申し上げます。

引用文献

- Beck JW, Edwards RL, Ito E, Taylor FW, Recy J, Rougerie F, Joannot P, Henin C (1992) Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios. *Science* 257: 644-647
- Cole JE, Fairbanks RG, Shen GT (1993) Recent variability in the Southern Oscillation: isotopic results from a Tarawa Atoll coral. *Science* 260: 1970-1973
- Fairbanks RG, Dodge RG (1979) Annual periodicity of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in the coral *Montastrea annularis*. *Geochim Cosmochim Acta* 43: 1009-1020
- Fallon SJ, McCulloch MT, Woesik RV, Sinclair DJ (1999) Corals at their latitudinal limits: laser ablation trace element systematics in *Porites* from Shirigai Bay, Japan. *Earth Planet Sci Lett* 172: 221-238
- Gagan MK, Ayliffe LK, Hopley D, Cali JA, Mortimer GE, Chappell J, McCulloch MT, Head MJ (1998) Temperature and surface-ocean water balance of Mid-Holocene tropical western Pacific. *Science* 279: 1014-1018
- Hori N (1977) A morphological study on the geographical distribution of coral reefs. *Geogr Rep Tokyo Metropol Univ* 12: 1-75
- McConnaughey T (1989) ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochim Cosmochim Acta* 53: 151-162
- Mitsuguchi T, Matsumoto E, Uchida T (2003) Mg/Ca and Sr/Ca ratios of *Porites* coral skeleton: Evaluation of the effect of skeletal growth rate. *Coral Reefs* 22: 381-388
- 大村明雄, 辻 喜弘 (1997) 琉球列島の島棚堆積物とその堆積年代—宮古島南西沖を例に—. *月刊地球* 19: 594-599
- Quinn TM, Crowley TJ, Taylor FW (1996) New stable isotope results from a 173-year coral from Espiritu Santo, Vanuatu. *Geophys Res Lett* 23: 3413-3416
- Shimamura M, Hyeong K, Yoo CM, Watanabe T, Irino T, Jung H-S (2008) High resolution stable isotope records of scleractinian corals near Ishigaki Island: Their implication as a potential paleoclimatic recorder in middle latitude regions. *Geosci J* 12: 25-31
- Shimamura M, Oba T, Xu G, Lu B, Wang L, Murayama M, Toyoda K, Winter A (2005) Fidelity of $\delta^{18}\text{O}$ as a proxy for sea surface temperature: Influence of variable coral growth rates on the coral *Porites lutea* from Hainan Island, China. *Geochem Geophys Geosyst* 6: Q09017, doi:09010.01029/02005GC000966
- Urey HC (1947) The thermodynamic properties of isotopic substances. *J Chem Soc*: 562-581
- Veron J (2000) Corals of the world. Australian Institute of Marine Science, Townsville
- Watanabe T, Oba T (1999) Daily reconstruction of water temperature from oxygen isotopic ratios of a modern *Tridacna* shell using freezing microtome sampling technique. *J Geophys Res* 104: 20667-20674
- Watanabe T, Winter A, Oba T, Anzai R, Ishioroshi H (2002) Evaluation of the fidelity of isotope records as an environmental proxy in the coral *Montastraea*. *Coral Reefs* 21: 169-178
- Watanabe T, Gagan MK, Corrège T, Gagan HS, Cowley J, Hantoro WS (2003) Oxygen isotope systematics in *Diploastrea heliopora*: New coral archive of tropical paleoclimate. *Geochim Cosmochim Acta* 67: 1349-1358
- Weber JN, Woodhead PMJ (1969) Factors affecting the carbon and oxygen isotopic composition of marine carbonate sediments - II. Heron Island, Great Barrier Reef, Australia. *Geochim Cosmochim Acta* 33: 19-38
- Weber JN, Woodhead PMJ (1972) Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonates. *J Geophys Res* 77: 463-473
- Yamano H, Hori K, Yamaguchi M, Yamagawa O, Ohmura A (2001) Highest-latitude coral reef at Iki Island, Japan. *Coral Reefs* 20: 9-12

2009年6月2日 受領

2009年9月29日 受理

Original paper

Oxygen and carbon isotopic compositions in *Favia* coral skeletons from the northernmost coral reef

Tsuyoshi WATANABE^{1,*}, Michiyo SHIMAMURA¹, and Hiroya YAMANO²

¹Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, N10W8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

²Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

*Corresponding author: T. Watanabe
E-mail: nabe@mail.sci.hokudai.ac.jp

Communicated by Kaoru Sugihara

Abstract We conducted oxygen and carbon isotopic analyses for *Favia* coral skeletons collected from Iki island, Japan, where the northernmost coral reef in the world occurs. Two skeletal structures, theca wall and columella in the single corallite were analyzed separately and compared with meteorological factors during the growth period. The result suggested that two skeletal structures formed in different timing, and the isotopic signals in theca walls could be a more faithful environmental recorder such as past sea surface temperatures and insolation. Further investigations about selective sampling for chemical analysis based on skeletal growth mechanisms should be done prior to use the high-latitude *Favia* corals as a paleoenvironmental proxy.

Keywords: northernmost coral reef, *Favia* coral, oxygen isotope, carbon isotope, skeletal growth pattern

Received: 2 June 2009/Accepted: 29 September 2009

© Japanese Coral Reef Society