HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高知県竜串湾に生息する造礁性サンゴ骨格を用いた温帯域の古環境復元
Author(s)	山崎, 敦子; 渡邊, 剛; 岨, 康輝
Citation	日本サンゴ礁学会誌, 11(1), 91-107
Issue Date	2009-12
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56144
Type	journal article
File Information	JCRS_11_91.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

日本サンゴ礁学会誌　第 11 巻，91–107（2009）

原著論文

高知県竜串湾に生息する造礁性サンゴ骨格を用いた温帯域の古環境復元

山崎敦子[1,*]・渡邊　剛[1]・岨　康輝[1]・中地シュウ[2]・山野博哉[3]・岩瀬文人[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] 財団法人黒潮生物研究財団黒潮生物研究所　〒788-0333 高知県幡多郡大月町西泊 560-イ
[3] 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　温帯域の造礁性サンゴは地球温暖化や海洋酸性化の影響を敏感に反映し，骨格に記録していることが期待される。温帯域に生息する造礁性サンゴ骨格を用いた古環境復元の可能性を検討するため，高知県土佐清水市竜串湾において塊状の *Porites lutea*（コブハマサンゴ）骨格のコア試料を採取し，骨格の酸素・炭素同位体比分析及び軟 X 線画像解析，蛍光バンド観察を行った。現場の水温変化と比較するとサンゴ骨格の酸素同位体比には低水温が反映されていなかった。また軟 X 線画像解析の結果，低水温時には高密度バンドを形成し，骨格伸長量及び石灰化量が高水温時に比べ大きく減衰することがわかった。以上の結果からも本研究試料のサンゴは低水温時に骨格成長速度が著しく低下していると考えられる。炭素同位体比の値は 2001 年から 2008 年にかけて増大傾向にあった。蛍光バンドは 2001 年から 2005 年の間で強く観察された。また，2001 年に竜串湾で起こった集中豪雨による懸濁物質の流入から竜串湾の濁度は数年間を経て減少しており，サンゴの光合成量が徐々に増大していることが示唆された。本研究試料は今後，コア全尺の分析により過去数百年間の海水温の変化を検出できる可能性がある。また，同時に竜串湾沿岸の開発や漁業，災害を記録していると考えられ，長期間にわたる竜串湾の歴史を復元できることが期待される。

キーワード　造礁性サンゴ，温帯域，酸素同位体比，炭素同位体比，軟 X 線画像，蛍光バンド

はじめに

主に熱帯～亜熱帯域に生息する造礁性サンゴは日本列島の温帯域でも広く確認されている (環境省，日本サンゴ礁学会 2004)。造礁性サンゴは海洋の構成物質を取り込みながら骨格を付加成長させ，樹木のように年輪を形成する。造礁性サンゴ骨格年輪の成長方向に沿って化学分析を行うことにより過去数百年間の海洋環境を高解像度で復元できる（例えば Gagan et al. 2000)。近年，熱帯性の造礁性サンゴの大型群体が温帯域でも確認され，今まで熱帯・亜熱帯域に限られていた長期間にわたる古環境復元を温帯域まで広げて行うことが可能になった。これまでの造礁性サンゴ骨格を用いた古環境復元は熱帯～亜熱帯域を対象としており，温帯域に生息するサンゴ骨格の分析例は少なく，さらに，温帯域で数百年間もの長期的な環境変動を復元した例は未だにない。温帯域のサンゴ骨格の分析例として Fallon et al.（1999）や Omata et al.（2006）が挙げられる。Fallon et al.（1999）は温帯域である高知県西南部に生息するサンゴの骨格中のストロンチウム/カルシウム比（Sr/Ca 比）とウラン/カルシウム比（U/Ca 比）を古水温指標として用い，過去 14 年間の水温を復元した。その結果，水温が 18 ℃以下のときに骨格成長がほぼ停止し，水温が記録されていないことを報告している。また，Omata et al.（2006）において，長崎県天草に生息するサンゴ骨格の酸素同位体比を用いて同じく古水温を復元した結果，冬の成長速度の減少が顕著に表れており，高緯度域では低水温によりサンゴの成長阻害が起こることが示された。今後，温帯域のサンゴ骨格を用いて長期的な古環境復元を行うには，熱帯～亜熱帯域とは海水

* 連絡著者
E-mail: zaki@mail.sci.hokudai.ac.jp

担当編集者 : 杉原　薫

温や気候の異なる温帯域でサンゴがどのような生息環境にあり，それがどのように骨格に記録されているかを詳細に知る必要がある。

本研究では，高知県土佐清水市竜串湾に生息する *Porites lutea* Edwards and Haime 1860（以下コブハマサンゴ）の骨格を用いて，古環境復元の主要な指標である酸素・炭素の安定同位体比の分析を行った。同位体比分析結果と軟 X 線画像から算出したサンゴ骨格の密度，年間伸長量，石灰化量と紫外線照射により観察される蛍光バンドの強度を比較し，温帯サンゴの骨格の形成過程，及びこれらの骨格に記録される生息環境情報を読み取った。これらの結果を基に，高緯度域に生息する造礁性サンゴ骨格の古環境復元への有用性を検討した。

試料と方法

サンゴ骨格試料の採取

高知県土佐清水市の竜串海中公園地区は，昭和 45 年に我が国最初の海中公園地区の一つとして指定され，特に海中公園地区 4 号地，見残し湾のシコロサンゴ群集は見事な海中景観をなし，多くの観光客が訪れている。近年，サンゴ群集の衰退傾向が見られるようになり，特に 2001 年 9 月の高知県西南部における局所的な集中豪雨により竜串湾にそそぐ河川上流から大量の泥土が流入し，サンゴ群集が大きな被害受けた（環境省自然環境局山陽四国地区自然保護事務所 2004）。本研究のサンゴ骨格試料の採取地点は竜串湾に注ぐ三崎川の河口から湾の東岸に沿って約 1 km 離れた地点である（図 1）。周りは岩壁に囲まれている。サンゴ骨格試料を採取する群体として，竜串湾内（北緯 32 度 46 分 38 秒，東経 132 度 52 分 13 秒）に生息するコブハマサンゴの塊状群体を選定した。群体の生息深度は 3 m，群体の大きさは約 1.5 m 径である。2008 年 10 月 13 日にエアドリル（Adachi and Abe 2003）を用いてボーリングを行い，サンゴ骨格試料を採取した（図 2a, b）。サンゴ骨格ボーリングでは，掘削コアの表面の部分は失われてしまうが，サンゴ群体そのものが死滅することはない。ボーリング後，コンクリート塊でボーリング跡に蓋をし，後にその表面を生きたサンゴが覆い，元の状態へ戻るようにした。直径 5 cm のコアを 1 つのサンゴ群体の隣接する 3 ヵ所から，合計 3 m 37 cm を採取した（図 2c）。3 本のコアのうち，図 2d-3 のコアの骨格表面は壊死している状態であった。

サンゴ骨格の密度バンド及び蛍光バンド観察

持ち帰ったコア試料から，岩石カッターで厚さ約 5 mm のスラブを切り出した。スラブは蒸留水で超音波洗浄を行った後，40℃のオーブンで乾燥させた。次に，海洋研究開発機構の非破壊透過 X 線 2D イメージングコアロガー（TATSCAN-X1）を用いて長尺コアの軟 X 線画像を撮影し，サンゴ骨格年輪を観察した（図 2d）。軟 X 線画像観察からサンゴ骨格の成長方向に沿って密度・蛍光バンド観察及び化学分析を行うための測線を決定した。蛍光バンド観察には UVP 社製 Chromato-Vue C-75 を用いた。暗所に置いたサンゴ骨格スラブに波長 365 nm の励起光を照射し，写真を撮影した。蛍光バンドの識別を容易にする目的で，撮影した画像を画像解析ソフト（Image-J, 1.38X）によりグレースケール（0–255 の 256 階調）に変換し，蛍光強度を数値化した（Sinclair and McCulloch 2004）。そのグレースケール値を 4 段階に分け，グレースケール 100 以下を「1」，100–120 を「2」，120–140 を「3」，140 以上を「4」とした。

サンゴ骨格の年間成長量 ～密度・伸長量・石灰化量～

サンゴ骨格の密度バンド（年輪）はその存在が Knutson et al.（1972）によって報告されて以来，サンゴの成長や古環境情報を提供するツールとして利用されてきた（例えば Lough and Barnes 1997, 2000）。本研究では，Cooper et al.（2008）が示した方法に従ってサンゴ骨格の年平均骨格密度・伸長量・石灰化量を算出するために，TATSCAN-X1 を用いて軟 X 線画像を 2 mA, 26 kV の条件下で撮影した。大型二枚貝シャゴウ *Hippopus hippopus* Linnaeus 1758 の殻から作成した厚さの異なる 10 枚の板状試料を，密度用標準試料（2.850±0.008（1σ）g/cm^3）として用いた。また，データ校正のためにアルミニウムバーをサンゴ骨格スラブの縦横二方向に置いて撮影した。軟 X 線画像は，0.10638 mm/pixel の解像度を伴ったグレースケール（0–255 の 256 階調）に変換して分析を行った。(1) 年間平均密度（g $CaCO_3$/cm^3）は，隣接した最大密度部分間

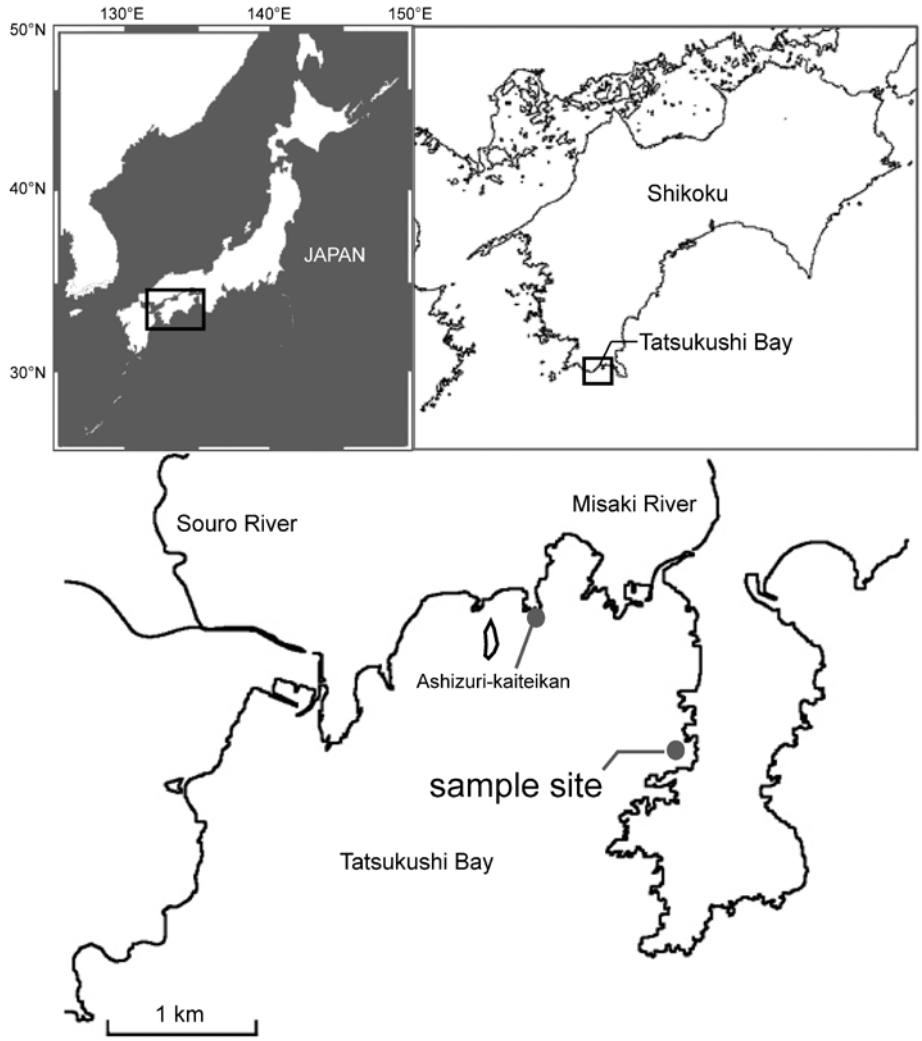


図 1　サンゴ骨格試料採取地点。高知県土佐清水市竜串湾（北緯 32 度 46 分 38 秒 , 東経 132 度 52 分 13 秒）において塊状のコブハマサンゴの水中ボーリングを行った。試料採取地点は三崎川の河口から湾の東岸に沿って約 1 km 離れた地点に位置する

Fig. 1　Location map of coral samples. Three coral cores were collected from a living massive *porites lutea* colony at Tatsukushi Bay, Tosashimizu, Kochi prefecture, Japan. Drilling site was 1 km left from the mouth of Misaki River along the east coast of Tatsukushi Bay

の平均密度として算出した。(2) 年間成長量（mm/yr）は，隣接した最大密度部分間の距離とした。(3) 石灰化量（g $CaCO_3$・cm^{-2}/yr）は，年間平均密度（g $CaCO_3/cm^3$）と年間成長量（cm/yr）の積によって算出した。なお，上記 3 つの項目は，2 測線の平均値として求めた。測線幅は約 3 mm で，1 つ目の測線は安定同位体比分析測線とし，2 つ目の測線を 1 つ目の測線と同じ期間になるよう選び，骨格密度と年間伸長量を計測した。

酸素・炭素安定同位体比の測定

試料の軟 X 線画像から決定した酸素・炭素安定同位体比分析の測線に沿って，微少試料の採取を行った。厚さ 5 mm のサンゴ骨格スラブの測線部分を切断し，デンタルドリルで縁辺に 1 mm 厚のレッジ（幅 5 mm）を作成した。表面に付着したサンゴ骨格の粉末や有機物を除去するため，25℃，15 分間の超音波洗浄を 5 回行ったのち，40℃のオーブンで 1 日乾燥させた。乾燥後，マイクロドリル（ϕ 2.1 mm）と精密制御ステージを用いた精密サンプリング法により，サンゴの群体の表面からレッジの厚さ

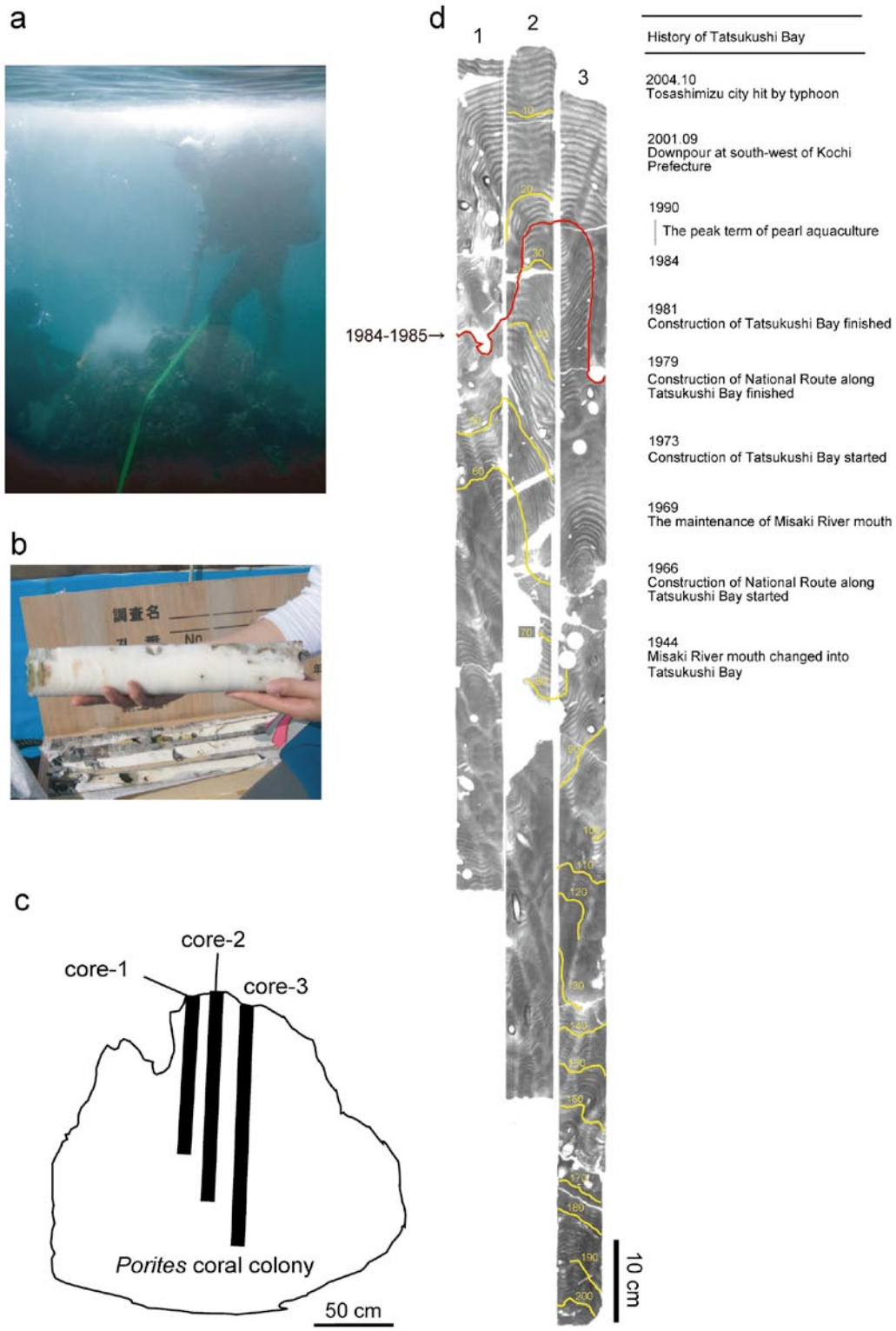


図 2　水中ボーリングとサンゴ骨格コア試料。a）エアドリルによるサンゴ群体ボーリング作業，b）得られたサンゴ骨格コア（径 5.5 cm），c）サンゴ群体のボーリング箇所，d）サンゴ骨格コアの軟 X 線画像。年輪を 216 本観察した。各年代の竜串湾及び沿岸における出来事を記載した

Fig. 2　Under-water drilling and coral core samples. a) Coral drilling under water using scuba diving and air drill, b) Coral core samples (5.5 cm diameter), c) Drilled parts in the coral colony, and d) X-radiographs of coral cores with chronology and local historical events in Tatsukushi Bay; 216 annual bands were observed

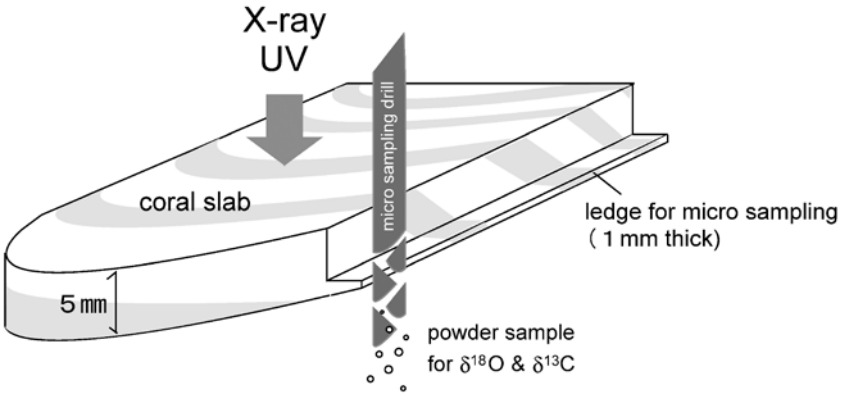


図 3　サンゴ骨格スラブの成形とマイクロサンプリング法。厚さ 5 mm に成形したスラブに軟 X 線，紫外線を照射し，骨格の密度バンド，蛍光バンドをそれぞれ観察した。酸素・炭素同位体比分析用の微少粉末試料の測線部分を切り出し，厚さ 1 mm までデンタルドリルで削り，レッジを作成した。測線に垂直な方向に 1 mm，成長方向に沿って 200 μm 間隔でマイクロドリルを用いて粉末試料を採取した

Fig. 3　Coral slabs and micro sampling technique. Coral cores were sliced 5 mm thick and radiated by soft X-ray and UV for observation of skeletal density bands and luminescence bands. Microsampring for $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ analysis was conducted at 1 mm by thick of slab edge, 1 mm by width along analysis line, and 0.2 mm intervals toward growth axis

1 mm×切削する奥行き 1 mm×200 μm 間隔で骨格粉末試料を採取した（図 3）。

酸素・炭素同位体比の測定にはカーボネイトデバイス（Kiel Device Ⅱ）を連結させた質量分析計（Finnigan MAT 251）を用いた。カーボネイトデバイスにより 70℃で炭酸塩骨格試料とリン酸を 5 分間反応させて発生した二酸化炭素を質量分析計に導入する。測定に必要な試料量は一試料につき骨格粉末試料 80～100 μg である。酸素・炭素同位体比は Vienna Pee dee belemnite（VPDB）とよばれる同位体比スケールに対して δ 値への変換を行い，測定値の補正は国際原子力機関（IAEA）の標準試料 NBS 19（推奨値；$\delta^{13}C_{VPDB}$＝＋1.95，$\delta^{18}O_{VPDB}$＝－2.20）を用いて行った。測定誤差は酸素同位体比で±0.10 ‰，炭素同位体比で±0.10‰以内（1 σ，n＝30）である。

表面海水温・水中透視度データ

竜串湾の表面海水温及び水中透視度は足摺海底館（図 1; 北緯 32 度 47 分 9 秒 東経 132 度 51 分 36 秒）において，毎日午前 10 時に水深約 5 m 付近にある海中展望塔観察窓の一つに設置された熱帯魚用水温計（精度 1℃程度）により計測されている。これらのデータを月平均に直し，安定同位体比の測定結果と比較する際に利用した（図 4a; 環境省自然環境局山陽四国地区自然保護事務所 2004, 2005）。また Integrated Global Ocean Services System（IGOSS）による人工衛星観測・船舶・ブイなどによるデータを用いて求めた，北緯 32.5°，東経 132.5° を中心とした 1° ×1° 内おける週毎の水温推定値を参照した（Reynolds and Smith 1994）（図 4b）。IGOSS の水温データを月平均に直し，足摺海底館の測定水温と比較すると季節変動のパターンは類似しているが，IGOSS の SST は足摺海底館の測定水温と比べて平均して約 3.7℃程高い。この二つの水温データの相関をとり，IGOSS の水温データから足摺海底館の水温データへの換算式を作成し，未入手である 2008 年 4 月～2008 年 10 月までの水温の推定値を算出した（図 4c）。竜串湾内の足摺海底館で測定された水温の月平均値は，過去 25 年間で最低水温が 15.3℃，最高水温が 28.3℃であった。

結果

サンゴ骨格コアの軟 X 線画像から約 216 本の年輪が観察され，この群体は 216 年以上生存していることが確認された（図 2d）。また，216 年間に成長

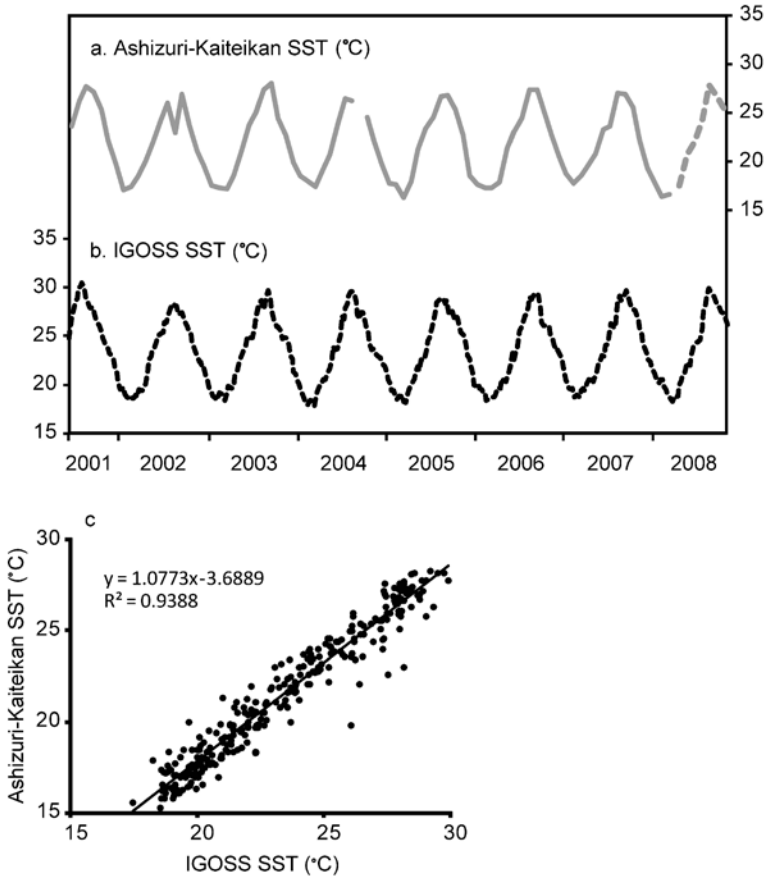


図 4　足摺海底館における観測水温と IGOSS による推定水温。a）足摺海底館で毎日観測された水温データの月平均値の変動，b）IGOSS の週間平均水温の月平均値の変動，c）対応する月の IGOSS の水温を横軸に足摺海底館の水温を縦軸にプロットして求めた相関（$y=1.08x-3.69$; $r^2=0.94$）。得られた換算式は今後，足摺海底館で水温を測定していない期間の水温の推定に用いることができる。足摺海底館水温変動における点線部分は C で得られた換算式から推定された水温である

Fig. 4　Comparison between observed (Ashizuri-Kaiteikan) and satellite based (IGOSS) sea surface temperature (SST). a) Ashizuri SST with monthly resolution calculated from daily record, b) IGOSS SST with monthly resolution calculated weekly data, and c) The relationship between IGOSS-SST and Ashizuri-Kaiteikan SST ($y=1.08x-3.69$; $r^2=0.94$). This equation is used for estimation of SST during the term lack of observation in Ashizuri-kaiteikan. Dotted line was estimated SST profile from the equation in (c)

方向が急激に変化している骨格構造が数回観察された。特に，1984 年～1985 年の前後で急激に成長軸が傾斜する構造が確認された。1984 年以降の 4 年間は伸長量が減少し，その間の年間伸長量は 4～6 mm/yr 程であったが，その後の 20 年間は年間伸長量が平均して約 8 mm/yr に増大した。

蛍光バンド観察の結果，1984 年から 1990 年代初頭にかけて蛍光強度が定常的に高かったが，その後，1 年毎の蛍光強度の季節変化が明瞭に見られるようになった。2005 年以降はそれ以前と比べ，蛍光強度が著しく低下した（図 5）。

酸素・炭素安定同位体比の分析結果及び骨格密度測定の結果を図 6 に示す。骨格の酸素同位体比の値は－5.89～－2.36‰の間で変動しており，平均は－4.35‰であった。骨格表面からの距離が 13.8～70.0 mm 間（2000～2006 年半ば）の酸素同位体比は周期的変化をしていたが，2006 年から 2007 年及び 2007 年から 2008 年の間の極大値は他の年と比べ小さかった。骨格の炭素同位体比の値は－2.79～0.10‰の間で変動しており，平均値は－1.42‰であった。

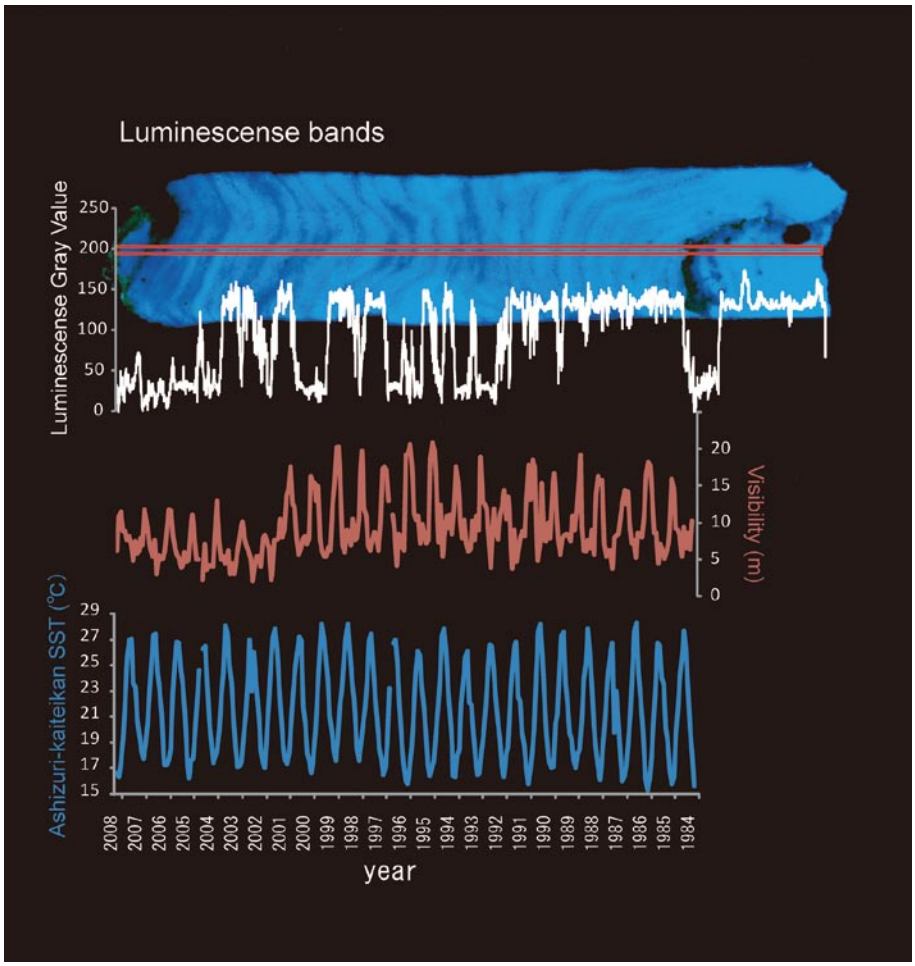


図 5　1984 年から 2008 年までの骨格の蛍光強度および足摺海底館で観測された水温，水中透視度の変動。蛍光強度は UV 蛍光下で撮影した蛍光画像（図最上部）を画像解析ソフト（Image-J）を用いてグレースケール強度に変換した

Fig. 5　Skeletal luminescent intensity and sea surface temperature, water visibility observed at Ashizuri-Kaiteikan during the period of 1984–2008. Luminescence grey values were obtained by using image-analysis software (Image-J) from scanning UV light photographs of coal skeletons (most upper part at this figure)

炭素同位体比は細かく振動しており，酸素同位体比のような明確な周期的変化は見られなかった。また，骨格表面に向かって炭素同位体比の値は増大傾向を示した。サンゴ骨格スラブ（5 mm 厚）の年間平均密度は 0.97～1.34 g/cm^3 で変動していた。骨格密度が高い時期（骨格の高密度バンド）は酸素同位体比の極大値と一致した。安定同位体比の振幅が小さい 2006 年の終わりごろから 2007 年のはじめにかけての期間では高密度バンドの幅が小さく，密度も他の極大値よりも小さかった。

サンゴ骨格の酸素同位体比は骨格形成時の海水温と海水の酸素同位体比によって変化する（Weber and Woodhead 1972; Dunbar and Wellington 1981; Gagan et al. 1994）。海水の酸素同位体比は降水や海水の蒸発，河川からの淡水の流入によって変化するため，塩分と正相関することが知られている（Lowenstam and Epstein 1957; Swart and Coleman 1980; Allison et al. 1996）。サンゴ骨格の酸素同位体比の極大値及び極小値が足摺海底館で観測された最低水温時と最高水温時にそれぞれ形成され，その間の成長速度が一定と仮定して骨格の各測定結果を時系列に変換した（図 7a）。縦軸を酸素同位体比，横軸を表面海水温（SST）として，2000～2008 年のサンゴ骨格の酸素同位体比とそれに対応する水温の極

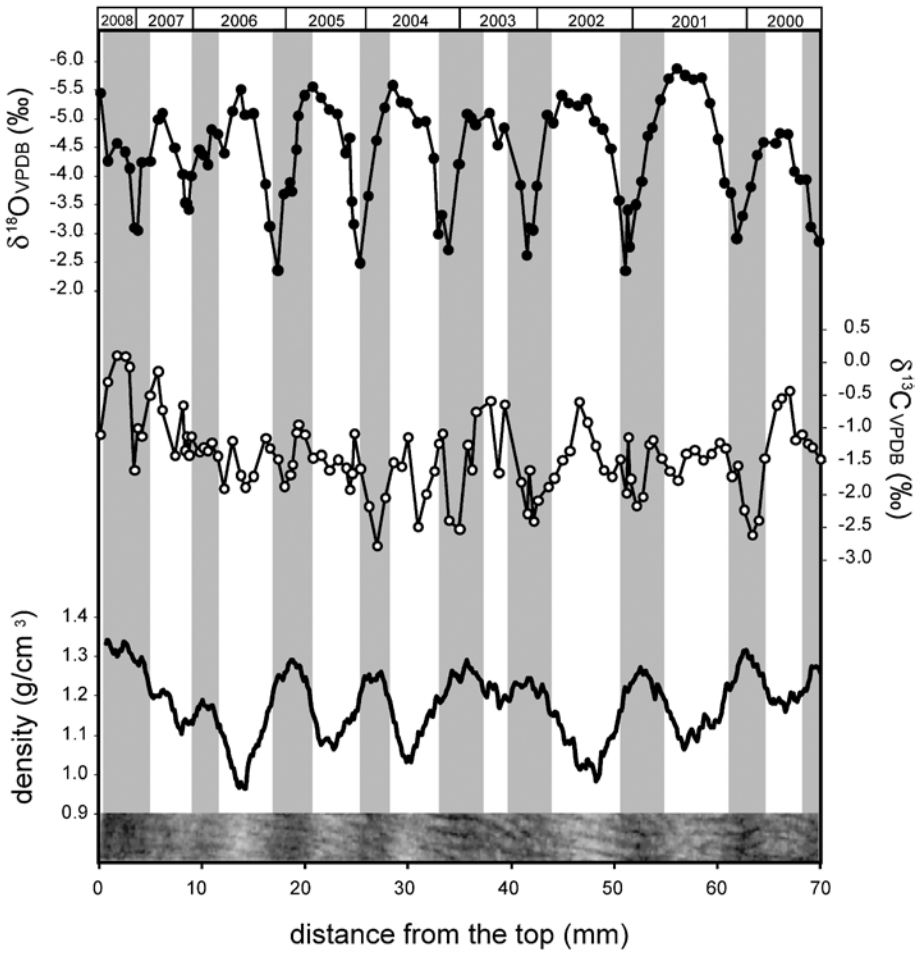


図 6 酸素，炭素同位体比と骨格密度の変動曲線。灰色の帯は軟X線画像（図中最下部）から観察される高密度バンドの幅を示す。サンゴ骨格の時間軸は酸素同位体比と足摺海底館の水温から定めた（図4参照）。

Fig. 6 Profiles of oxygen and carbon isotopes and skeletal density. Gray areas indicate the position of high density bands deduced from x-ray photograph (bottom)

大値と極小値，年平均値をそれぞれプロットした（図7b）。これらの極値と年平均値から得られた骨格の酸素同位体比（$\delta^{18}O_{VPDB}$）と水温（SST）との関係式は下記であった。

$$\delta^{18}O_{VPDB}(‰) = -0.26 \times SST(℃) + 1.44 \quad (R^2 = 0.88) \quad (1)$$

ただし，サンゴ骨格の酸素同位体比は海水の酸素同位体比の変動にも影響を受けるため，サンゴ骨格の酸素同位体比を用いた温度換算式はサンゴ骨格の酸素同位体比 - 海水の酸素同位体比（$\delta_C - \delta_W$）とSSTの一次関数で表わすのが一般的である。本研究で酸素同位体比とSSTとの値から求めた酸素同位体比と水温の関係式をこれまでの先行研究の酸素同位体比水温計と比較した（図7c）。本研究の換算式では傾きが0.26‰℃$^{-1}$であり先行研究と比較すると傾きが大きい（−0.21‰℃$^{-1}$; *P. lobata*, McConnaughey et al. 1989a, −0.19‰℃$^{-1}$; *P. lutea*, Quinn et al. 1996, 0.18‰℃$^{-1}$; *P. lutea*, Gagan et al. 1998, −0.19 ‰ ℃$^{-1}$; *M. faveolata*, Watanabe et al. 2001, −0.18 ‰ ℃$^{-1}$; *D. heliopora*, Watanabe et al. 2003, −0.18‰℃$^{-1}$; *Porites sp.*, Omata et al. 2006）。骨格の酸素同位体比を測定した2000年3月～2008年10月の実測月平均水温の温度毎の水温値の個数の分布は，18～19℃が最も多く，20～29℃間では大きな差はなかった（図7d1）。しかし，同様に（1）式を用いて酸素同位体比から復元した水温の温度毎の分布

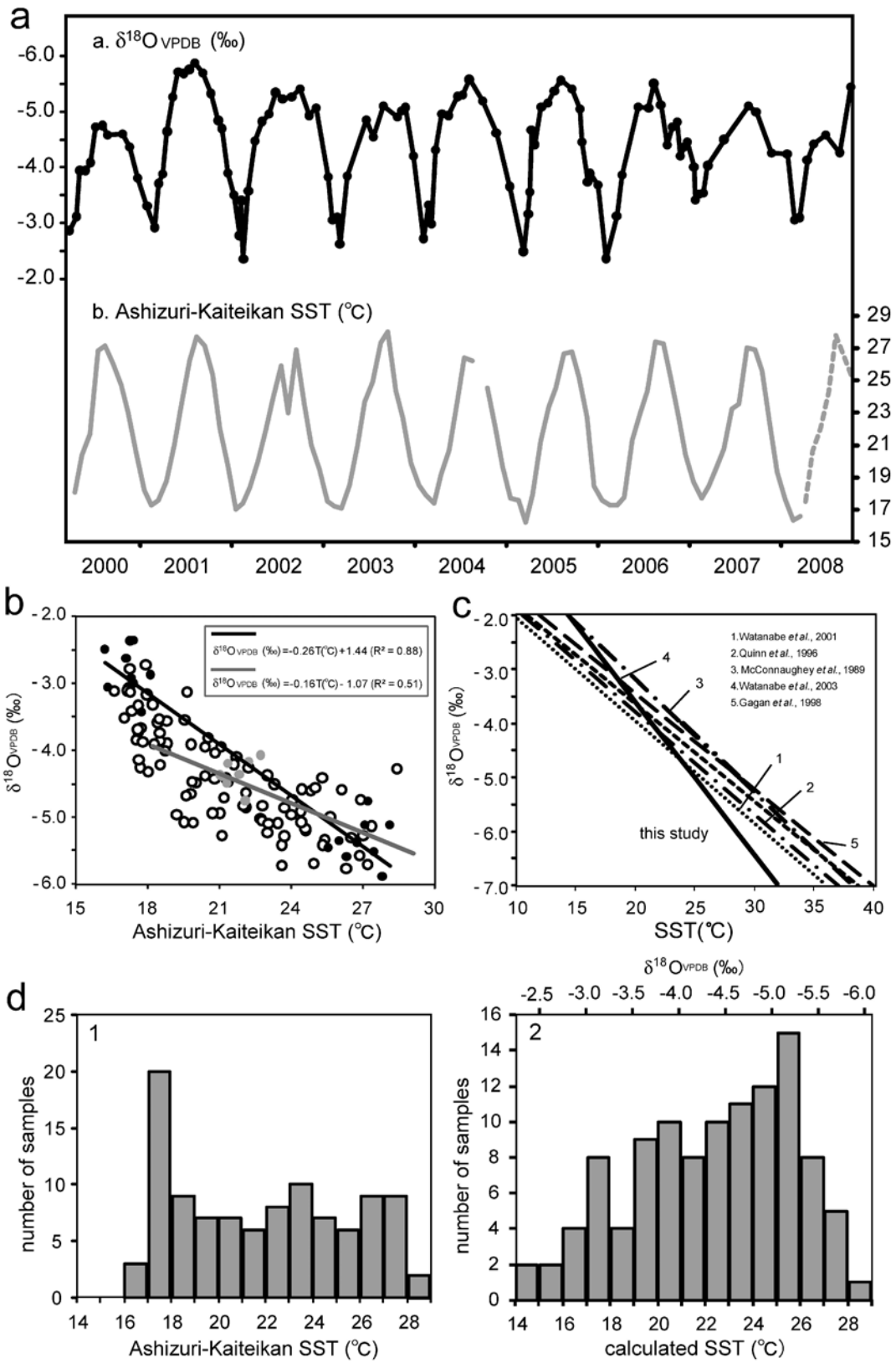
を調べると 25〜26℃が最も多く，分布はアーチ型をしており高水温側に偏っていた（図 7d2）。

考察

竜串湾のハマサンゴは 216 年以上の生育期間中に，地球温暖化などのグローバルな地球環境変動に加えて，港や国道の整備，養殖産業など多くの地域特有の環境変化にさらされながら，現在まで成長してきた（図 2c）。その間の大きな環境変化の様子は，年輪形成の一時的な断絶や成長方向の急激な変化に表れている。特に，1984〜1985 年の骨格成長が断絶した時期は試料採取地点で行われていた真珠養殖の盛んになった時期と一致する。当時，真珠母貝の給餌は行われていなかったが，養殖筏の下には糞塊が溜まってヘドロ化しやすく，近隣のサンゴに影響があった可能性が示唆されており（環境省自然環境局山陽四国地区自然保護事務所 2004），サンゴ骨格にそれらの影響が表れやすい環境にあったと考えられる。サンゴ骨格試料の採取地点付近は真珠養殖で出る貝殻やフジツボなど筏の汚損生物のゴミ捨て場であり，また養殖筏のアンカー設置場所になっていたという報告もある（岩瀬ほか 私信）。1984〜1985 年の前後で成長方向に傾斜が見られることから，本研究で用いたコブハマサンゴ群体は 1984 年頃に表面が壊死した後，なんらかの要因で骨格表面が削剥や溶解を受け，さらにその上を生きていたポリプが覆ったと考えられる。サンゴ骨格の蛍光強度は 1984 年から 1990 年代初頭の真珠養殖のピーク時には定常的に高かったが，その後は蛍光強度が一時的に低い値も示すようになり季節変動が認められるようになった。また，1990 年頃までの年間伸長量は 4〜6 mm/yr と他の期間に比べると遅い。これらの結果から，養殖というサンゴ生息地付近の人為的かつ局所的な環境変化の変遷やその応答がサンゴ年輪に記録されていることがわかる。

蛍光バンドは淡水流入時に形成され，河川の洪水や降水の指標になることが先行研究により報告されている（Lough et al. 2002, McCulloch et al. 2003 など）。本研究のサンゴ骨格には，2001〜2005 年の期間に相当する部位に特に強い蛍光が観察された（図 5 及び 8）。竜串湾に注ぐ三崎川の河口は試料採取地点の真北に位置し，1969 年に河口の導流堤が整備されており，それ以来，河川水の流入方向は南西向きから，試料となったサンゴが生息している南向きへ変化している（環境省自然環境局山陽四国地区自然保護事務所 2005）。従って，集中豪雨や台風が起こった際の河川からの懸濁物流入が本研究で用いたサンゴ骨格に記録されている可能性が高い。竜串湾では 2001 年の集中豪雨以来，足摺海底館で観測されている水中透視度が 2.9 m まで急激に低下した（図 5 及び 8）。その後，現在に向けて徐々に回復してきているが，それ以前の基準には達していない。2000 年から 2008 年のサンゴ骨格の炭素同位体比と蛍光強度の経年変動を見ると，サンゴ骨格の蛍光強度は 2005 年以降に低くなっており，骨格の炭素同位体比の値は 2004 年以降から年平均値が増大傾向にある。一方，年間変動幅はともに小さくなってきている。

サンゴ骨格の主な炭素源は溶存無機態炭素（DIC）と動物プランクトンの摂食であり，サンゴの炭素代謝の際に起こる同位体分別効果（Metabolic effect）及び，石灰化に伴う動的同位体分別効果（Kinetic effect）の二つの同位体分別効果により骨格の炭素同位体比が決定すると考えられている（Grottoli and Wellington 1999）。Metabolic effect は共生藻の光合成及びサンゴ全体の呼吸量によって変化するため，Kinetic effect の影響が少ない場合，炭素同位体比の変動は主に光合成を支配する日射量が反映されると考えられている（Swart 1983; Muscatine et al. 1989; McConnaughey 1989a,b; Allison et al. 1996; McConnaughey et al. 1997）。サンゴ骨格の炭素同位体比が蛍光強度の低くなる 2005 年以降から増大傾向にあることは，水中の濁度の低下に伴いサンゴが受ける日射量が増大したことを示しているのではないだろうか。海水中の懸濁粒子がサンゴ表面に届く日射をさえぎり，共生藻類の光合成量を減少させ，結果的に，骨格の炭素同位体比を低下させていたと考えられる。サンゴ骨格の炭素同位体比と蛍光強度，足摺海底館の海中展望塔で毎日観測されている水中透視度はそれぞれ季節変動を示した（図 8）。夏季には水中透視度は低く，サンゴ骨格の炭素同位体比の値と蛍光強度は共に高い。一方，冬季には水中透視度は高く，サンゴ骨格の炭素同位体比と蛍光強度は共に低い。定常状態における季節変動では，夏季には，水温分布の勾配やプランクトンの発生などにより水中透視度は低くなるが，日射量が高


a
a. δ18OVPDB (‰)
-6.0
-5.0
-4.0
-3.0
-2.0
b. Ashizuri-Kaiteikan SST (℃)
29
27
25
23
21
19
17
15
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
b
δ18OVPDB (‰) =-0.26T(℃)+1.44 (R² = 0.88)
δ18OVPDB (‰) =-0.16T(℃) - 1.07 (R² = 0.51)
δ18OVPDB (‰)
Ashizuri-Kaiteikan SST (℃)
c
1.Watanabe et al., 2001
2.Quinn et al., 1996
3. McConnaughey et al., 1989
4.Watanabe et al., 2003
5.Gagan et al., 1998
this study
δ18OVPDB (‰)
SST(℃)
d
1
number of samples
Ashizuri-Kaiteikan SST (℃)
δ18OVPDB (‰)
2
number of samples
calculated SST (℃)

いために共生藻類の光合成量は高く，結果として，骨格の炭素同位体比は夏に高く冬に低い傾向を示すが，台風や大雨などの影響により大量の土砂や栄養塩が供給されると，共生藻類の光合成はこれらの土砂や栄養塩の挙動により影響を受けるようになり，骨格の炭素同位体比と蛍光強度の季節変動幅は小さくなる。その結果，年間の炭素同位体比の平均値と年平均の透視度には正の相関があったと考えられる（図 9a）。

2006～2007 年の骨格の酸素・炭素同位体比の振幅は小さい。この間の酸素同位体比極大値は他の期間のそれに比べて低く，冬季の成長が停滞していた可能性がある。毎年の最低水温は安定してほぼ同じ値をとっているにも関わらず，骨格の酸素同位体比の極大値にバラつきがあるため，サンゴ骨格は毎年低水温により成長を止めるタイミングが異なる可能性がある。Fallon et al.（1999）による高知県西南部に生息するハマサンゴを用いた古環境復元では水温の指標として Sr/Ca 比及び U/Ca 比を用いており，両者ともに 18℃より低い水温を記録していなかったと推測している。図 7d2 ではサンゴ骨格に記録される水温は高温側に偏っており，Fallon et al.（1999）による Sr/Ca 比・U/Ca 比の結果と一致する。低水温時には骨格伸長量が低下し（Barnes et al. 1995），骨格の酸素同位体比には低水温が反映されないことを示唆する。また 2006～2007 年の低水温時の骨格伸長量が小さかったことは高密度バンドの幅が小さいことにも表れている。そこで，図 7b の水温―酸素同位体比図にプロットした点のうち，水温が 18℃以上の点を用いて関係式をつくると下記のようになった。その結果，過去の酸素同位体比古水温計の傾きとほぼ同じ傾きとなった（図 7c）。

$$\delta^{18}O_{VPDB}(‰) = -0.16 \times SST(℃) - 1.07 \quad (R^2 = 0.51) \qquad (2)$$

実際の各年の水温変化は，最高水温，最低水温とも

図 7　酸素同位体比水温計キャリブレーション。a）サンゴ骨格の酸素同位体比変動（a-1）と足摺海底館における観測水温の月平均値変動（a-2）。b）サンゴ骨格の酸素同位体比の極大値が最低水温時に，極小値が最高水温時にそれぞれ形成されたとして，その間の成長速度を一定と仮定して年代軸を定めた。b: 横軸に足摺海底館観測水温，縦軸にサンゴ骨格の酸素同位体比の極値（●）と年平均値（●）をそれぞれプロットして近似直線を引いた。また，全点をプロットした（○）。酸素同位体比-水温の換算式は $\delta^{18}O_{VPDB}(‰) = -0.26 \times SST(℃) + 1.21$ ($R^2 = 0.94$) となった。c）水温換算式（実線）と先行研究の酸素同位体比水温計と比較した（1. Watanabe et al., 2001, 2. Quinn et al., 1996, 3.McConnaughey et al., 1989, 4. Watanabe et al., 2003, 5. Gagan et al., 1998）。d）1. 足摺海底館観測水温の月平均温度毎のデータ個数分布図，2. 酸素同位体比から B の換算式を使って求めた水温毎のデータ個数分布図。d1 と d2 を比較することにより，サンゴ骨格の酸素同位体比は高水温に偏って記録されていることが分かる。

Fig. 7　Calibration for coral oxygen isotope thermometer. a) Comparison between coral oxygen isotopes and observed SST. Coral oxygen isotopic time series (a-1) and monthly SST observed at Ashizuri-Kaiteikan (a-2). For conversion of distance to time series, we assumed that maximum and minimum oxygen isotope values in corals were formed when minimum and maximum SST occurred, respectively. Skeletal growth rate was supposed to be constant between each oxygen isotopic extremes. b) Linear regression between Ashizuri-Kaiteikan SST and coral skeletal oxygen isotopes over the period 2001–2004. Oxygen isotope values were sorted by extremes (●), annual averaged values (●) and other all values (○). The regression line was calculated using the points extremes (●) and annual averaged values (●). The regression equation for the temperature dependence of oxygen isotopes for this study was $\delta^{18}O_{VPDB}(‰) = -0.26 \times SST(℃) + 1.21$ ($R^2 = 0.94$). c) The regression equation in "b" was compared with published calculation lines (1. Watanabe et al., 2001, 2. Quinn et al., 1996, 3. McConnaughey et al., 1989, 4. Watanabe et al., 2003, 5. Gagan et al., 1998). d) 1. Histogram of monthly Ashizuri-Kaiteikan SSTs, number of observations vs. SSTs. Notice a higher abundance of data points sampled between 18°C and 19°C. 2. Histogram of oxygen isotope values. Notice a higher abundance of data points sampled between −5.9 and −4.3‰, which was approximately equivalent to 23–28°C

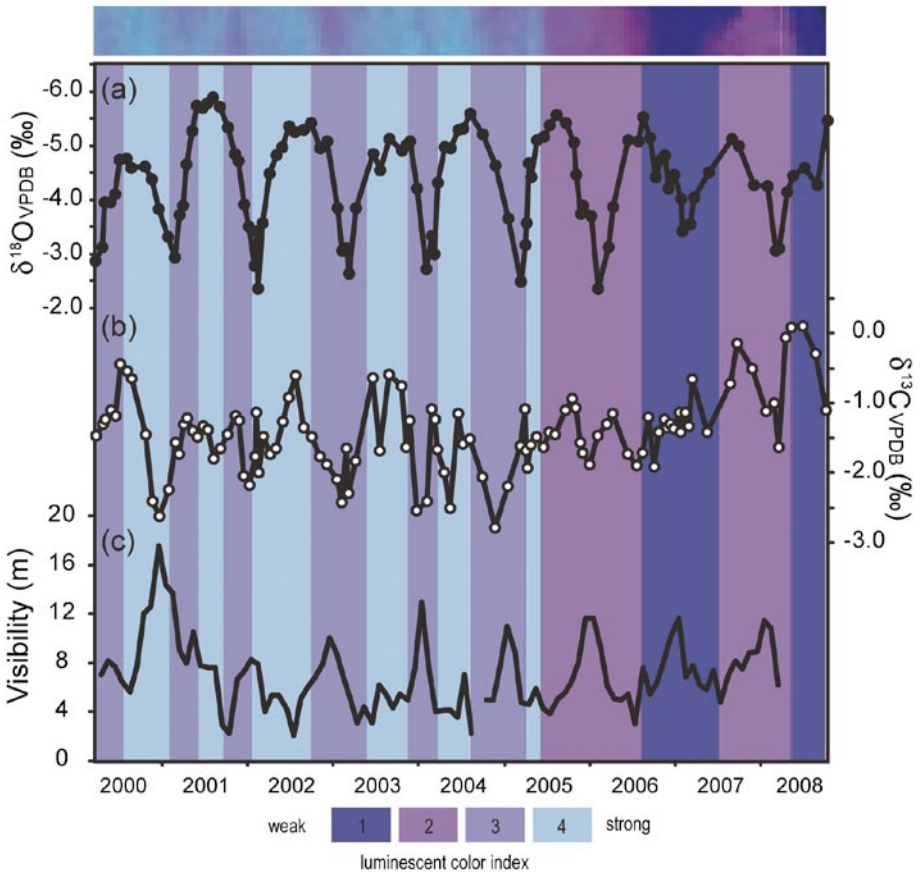


図 8　サンゴ骨格の酸素・炭素同位体比および蛍光強度の変動と水中透視度の比較。図上からそれぞれ蛍光バンド画像，酸素同位体比（a）及び炭素同位体比（b），水中透視度変動（c）である。水中透視度は足摺海底館で毎日観測された値の月平均値を算出した。蛍光強度は UV 蛍光下で撮影した画像を画像解析ソフト（Image-J）を用いてグレースケール強度に変換し，100 以下を「1」，100–120 を「2」，120–140 を「3」，140 以上を「4」として 4 段階に分けて表示した

Fig. 8　Comparison between the skeletal records of oxygen (a) and carbon (b) isotopic profiles and luminescence bands and water visibility (c). Monthly data of visibility was calculated from daily data of Ashizuri-Kaiteikan. Luminescence color index was obtained by flowing steps. 1) Scanning UV light photographs of coal skeletons 2) Converting grey scale using image-analysis software (Image-J) 3) Gray scale (GS) intensity was classified as 1 (GS＜100), 2 (GS; 100–120), 3 (GS; 120–140), and 4 (GS＞140)

に大きな変動はないが，酸素同位体比の極大値にはばらつきがあった。また，Omata et al.（2006）の結果と同様に，低水温時の酸素同位体比は V 字型を示し，高水温時の酸素同位体比のピークの横幅は大きくなった。これらの結果から，サンゴ骨格の酸素同位体比には低水温が記録されておらず，骨格形成をしていないことが示唆される。

本研究で使用した 2002～2007 年の水温・透視度，測定した酸素・炭素同位体比，年間骨格伸長量，年間平均骨格密度，年間平均石灰化量を表 1 にまとめた。骨格伸長量と骨格密度の年平均値の相関を取ると負の相関を示し，他の先行研究（Scoffin et al. 1992; Lough and Barnes 1997, 2000）と同様に骨格伸長量が低下するほど骨格密度は増大していることが明らかになった（図 9b）。骨格伸長量の増大は骨格構造を密にすることよりも優先されると考えられる（Barnes and Lough 1993）。また骨格伸長量は石灰化量と正の相関を示すため（図 9c），骨格密度と石灰化量は負の相関を示す（図 9d）。高水温時には低密度バンドが形成され，低水温時には高密度バンドが形成されるのは，骨格伸長量の季節変化が骨格密度に現れるためだと考えられる。

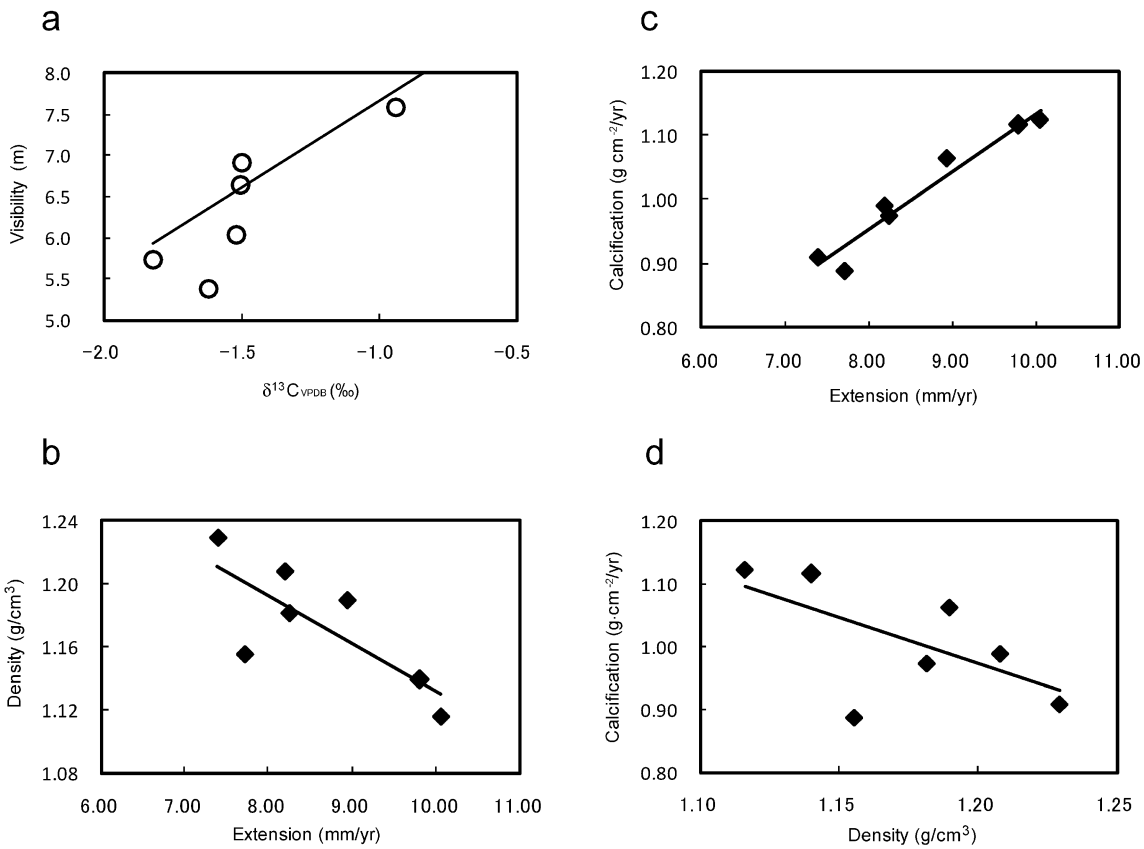


図 9　骨格物理量の相関関係及び炭素同位体比と水中透視度の関係。a）炭素同位体比（$\delta^{13}C_{VPDB}$）-水中透視度（Visibility），b）骨格年間伸長量（mm/yr）-骨格密度（g/cm^3），c）骨格年間伸長量（mm/yr）-石灰化量（g・cm^{-2}/yr），d）骨格密度（g/cm^3）-石灰化量（g・cm^{-2}/yr）

Fig. 9　Scatter diagrams of skeletological parameters and relationship between coral carbon isotopes and water visibility. a) extension (mm/yr) vs. density (g/cm^3), b) extension (mm/yr) vs. calcification (g・cm^{-2}/yr), c) density (g/cm^3) vs. calcification (g・cm^{-2}/yr), and d) carbon isotope ($\delta^{13}C_{VPDB}$) vs. Visibility (m). Regression lines were shown in each diagram

表 1　2002 年から 2007 年の足摺海底館観測水温（SST），水中透視度（Visibility），サンゴ骨格の酸素同位体比（$\delta^{18}O_{VPDB}$），炭素同位体比（$\delta^{13}C_{VPDB}$），骨格年間伸長量（Extension），骨格密度（Density），石灰化量（Calcification）の年平均値

Table 1　Annual mean values of Ashizuri sea surface temperature (SST), water visibility, skeletal oxygen isotope ($\delta^{18}O_{VPDB}$), skeletal carbon isotope ($\delta^{13}C_{VPDB}$), skeletal extension (Extension), skeletal density (Density), and skeletal calcification (Calcification) during the periods from 2002 to 2007

year	SST (℃)	$\delta^{18}O_{VPDB}$ (‰)	$\delta^{13}C_{VPDB}$ (‰)	Visibility (m)	Extension (mm/yr)	Density (g/cm^3)	Calcification (g•cm^{-2}/yr)
2007	22.0	-4.16	-0.94	7.6	8.19	1.21	0.99
2006	21.8	-4.35	-1.49	6.9	7.71	1.16	0.89
2005	21.6	-4.39	-1.50	6.6	8.94	1.19	1.06
2004	21.5	-4.48	-1.82	5.8	8.25	1.18	0.97
2003	21.9	-4.19	-1.61	5.4	7.39	1.23	0.91
2002	21.6	-4.38	-1.51	6.0	10.05	1.12	1.12
2001	22.1	-4.76	-1.54	8.1	9.79	1.14	1.12

まとめ

高知県土佐清水市竜串湾内にてコブハマサンゴ（*Porites lutea*）の塊状群体をボーリングし，サンゴ骨格のコア試料を採取した。コア試料の軟X線画像から年輪を数えた結果，試料となった群体は216歳以上であり，このサンゴ骨格年輪には現場の環境変動による骨格成長の停止や骨格表面の壊死から再び骨格成長を始めた様子が記録されていることがわかった。2001年6月から2008年10月までのサンゴ骨格の酸素同位体比分析の結果から，低水温時には骨格成長量が低下していることが明らかになった。また低水温時には高密度バンドを形成しており，骨格伸長量及び石灰化量が高水温時に比べ小さかった。

2001年の集中豪雨以来，竜串湾内の濁度は高くなったが，サンゴ骨格の蛍光バンド観察から，近年，河川からの懸濁物質流入が減少傾向にあり湾内の濁度が低下していることが推測された。また水中透視度と炭素同位体比が正相関し，炭素同位体比が現在に向かって増大していることから，濁度の減少によりサンゴが受ける日射量が増大し，共生藻類の光合成量が増加していることが示唆された。高緯度域のサンゴ骨格は水温に敏感に反応し，石灰化量，骨格成長量，骨格密度を大きく変化させている可能性がある。今後，長尺コアの年輪幅や骨格密度，酸素同位体比の分析を行うことにより，地球温暖化に伴う水温の上昇を敏感に検出できるかもしれない。また竜串湾のサンゴは河川からの懸濁物質の流入や湾岸工事，漁業などの地域的な環境変動の影響を強く受けている可能性があり，今回採取したコアを用いて長期間の炭素同位体比分析や蛍光強度解析を行うことにより，竜串湾及びその沿岸地域の歴史の変遷を復元できることが示唆された。

謝辞

本研究試料の採取を行うにあたり，（株）ジオアクトの安達寛氏，環境省土佐清水自然保護官事務所，土佐清水市漁業協同組合三崎地区理事の西本一俊氏，竜串ダイビングセンター，（財）黒潮生物研究財団 黒潮生物研究所の皆様にご協力を頂いた。サンゴ試料の同定は福岡大学理学部地球圏科学科の杉原薫博士にお願いした。サンゴ骨格の酸素，炭素同位体比測定では北海道大学大学院地球環境科学研究院の入野智久博士に協力して頂いた。蛍光バンド観察では北海道大学大学院理学院の沢田健博士に機器を貸して頂いた。軟X線画像の撮影及び解析では海洋研究開発機構の坂本竜彦博士，飯島耕一氏に協力して頂いた。竜串湾の水温データは足摺海底館で測定されたものを使用した。匿名の査読者2名及び編集委員の方々には大変有意義なご助言をいただいた。この場を借りて謝意を申し上げる。本研究は，環境省平成20年度地球環境研究総合推進費「北限域に分布する造礁サンゴを用いた温暖化とその影響の実態解明に関する研究」及び平成20年度黒潮生物研究財団研究助成「黒潮が育む高緯度域のサンゴ礁環境変動の復元」の研究課題として実施した。

引用文献

Adachi H, Abe O (2003) “Air drill” for submerged massive coral drilling. Mar Tech Soc J 37: 31–36

Allison N, Tudhope W, Fallick AE (1996) Factors influencing the stable carbon and oxygen isotopic composition of *Porites lutea* coral skeletons from Phuket, South Thailand. Coral Reefs 15: 43–57

Barnes DJ, Lough JM (1993) On the nature and causes of density banding in massive coral skeletons. J Exp Mar Biol Ecol 167: 91–108

Barnes DJ, Taylor RB, Lough JM, (1995) On the inclusion of trace materials into massive coral skeletons, Part II, Distortions in skeletal records of annual climate cycles due to growth processes, J Exp Mar Biol Ecol 194: 251–275

Cooper TF, De’ath G, Fabricius KE, Lough JM (2008) Declining coral calcification in massive *Porites* in two nearshore regions of the northern Great Barrier Reef. Glob Change Biol 14: 529–538

Dunbar RB, Wellington GM (1981) Stable isotopes in a branching coral monitor seasonal temperature variation. Nature 293: 453–455

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, Chivas AR, Isdale PJ (1994) High-resolution isotopic records from corals using ocean temperature and mass spawning chronometers. Earth Planet Sci Lett 121: 549–558

Gagan MK, Ayliffe LK, Hopley D, Cali JA, Mortimer GE, Chappell J, McCulloch MT, Head MJ (1998) Temperature and surface-ocean water balance of the mid-Holocene tropical western Pacific. Science 279: 1014–1018

Gagan MK, Ayliffe LK, Beck JW, Cole JE, Druffel ERM, Dunbar RB, Schrag DP (2000) New views of tropical paleoclimates from corals. Quat Sci Rev 19: 45–64

Grottoli AG, Wellington GM (1999) Effect of light and zooplankton on skeletal $\delta^{13}C$ in the eastern Pacific corals *Pavona clavus* and *Pavona gigantea*. Coral Reefs 18: 29–41

Knutson DW, Buddemeier RW, Smith SV (1972) Coral chronometers: seasonal growth bands in reef corals. Science 177: 270–272

環境省自然環境局山陽四国地区自然保護事務所（2004）平成 15 年度竜串地区自然再生推進計画調査（海域調査）報告書

環境省自然環境局山陽四国地区自然保護事務所（2005）平成 16 年度竜串地区自然再生推進計画調査（海域調査）報告書

環境省・日本サンゴ礁学会（2004）日本のサンゴ礁. 環境省，東京

Lough JM, Barnes DJ (1997) Several centuries of variation in skeletal extension, density and calcification in massive *Porites* colonies from the Great Barrier Reef: a proxy for seawater temperature and a background of variability against which to identify unnatural change. J Exp Mar Biol Ecol 211: 29–67

Lough JM, Barnes DJ (2000) Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. J Exp Mar Biol Ecol 245: 225–243

Lough JM, Barnes DJ, McAllister FA (2002) Luminescent lines in corals from the Great Barrier Reef provide spatial and temporal records of reefs affected by land runoff. Coral Reefs 21: 333–343

Lowenstam HA, Epstein S (1957) On the origin of sedimentary aragonitic needles of the Great Bahama Bank. J Geol 65: 364–375

McConnaughey T (1989a) ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. Geochim Cosmochim Acta 53: 151–162

McConnaughey T (1989b) ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates: II In vitro simulation of kinetic isotope effects. Geochim Cosmochim Acta 53: 163–171

McConnaughey TA, Burdett J, Whelan FJ, Paul CK (1997) Carbon isotopes in biological carbonates: respiration and photosynthesis. Geochim Cosmochim Acta 61: 611–622

McCulloch M, Fallon S, Wyndham T, Hendy E, Lough J, Barnes D (2003) Coral record of increased sediment flux to the inner Great Barrier Reef since European settlement, Nature 421: 727–730

Muscatine L, Porter JW, Kaplan IR (1989) Resource partitioning by reef corals as determined from stable isotope composition.I. $\delta^{13}C$ of zooxanthellae and animal tissue vs. depth. Mar Biol 10: 185–193

Omata T, Suzuki A, Kawahata H, Nojima S, Minoshima K, Hata A (2006) Oxygen and Carbon isotope systematic in Porites coral near its latitudinal limit: The coral response to low-thermal temperature stress. Global Planet Change 53: 137–146

Quinn TM, Taylor FW, Crowley TJ, Link SM (1996) Evaluation of sampling resolution in coral stable isotope records: A case study using records from New Caledonia and Tarawa. Paleoceanography 11: 529–542

Reynolds RW, Smith TM (1994) Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. J Clim 7: 929–948

Scoffin TP, Tudhope AW, Brown BE, Chansang H, Cheeney RF (1992) Patterns and possible environmental controls of skeletogenesis of *Porites lutea*, South Thailand. Coral Reefs 11: 1–11

Sinclair DJ, McCulloch MT (2004) Corals record low mobile barium concentrations in the Burdekin River during the 1974 flood: evidence for limited Ba supply to rivers? Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol 214: 155–174

Swart PK, Coleman ML (1980) Isotopic data for scleractinian corals explain their palaeotemperature uncertainties. Nature 283: 557–559

Swart PK (1983) Carbon and oxygen isotope fractionation in scleractinian corals: A review. Earth-Sci Rev 19: 51–80

Watanabe T, Winter A, Oba T (2001) Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea. Mar Geol 173: 21–36

Watanabe T, Gagan MK, Corrége T, Gagan HS, 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 (1972) Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonates. J Geophys Res 77: 463–473

2009年6月1日 受領
2009年9月14日 受理

Ⓒ日本サンゴ礁学会

Journal of the Japanese Coral Reef Society 11: 91−107（2009）

Original paper

Reconstructing palaeoenvironments of temperate regions based on high latitude corals at Tatsukushi Bay in Japan

Atsuko YAMAZAKI[1,*], Tsuyoshi WATANABE[1], Kohki SOWA[1], Shuu NAKACHI[2], Hiroya YAMANO[3], and Fumihito IWASE[2]

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

[2] Biological Institute on Kuroshio, Kuroshio Biological Research Foundation, 560 Nishidomari, Otsuki, Kochi 788−0333, Japan

[3] Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 16−2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305−8506, Japan

* Corresponding author: A. Yamazaki
E-mail: zaki@mail.sci.hokudai.ac.jp

Communicated by Kaoru Sugihara

Abstract Reef building corals in temperate region could be a powerful tool for reconstructing climatic/environmental changes such as global warming and ocean acidification. To demonstrate the possibility of high latitude corals for reconstruction of paleoenvironments, we analyzed oxygen and carbon isotopes in core specimens of living massive colony, *Porites lutea*, taken from Tatsukushi Bay, Kochi prefecture, Japan. Isotopic variations were compared with the coral skeletology deduced from X-ray photographs and luminescence bands. Comparing with observed sea surface temperature (SST), oxygen isotope profile showed the lack of geochemical records during low temperature. This result was corresponding with the occurrences of high density bands, low skeletal extension rate, and low calcification rate in winter. Annual averages of carbon isotopes increased from 2001 toward 2008 and coral luminescence bands observed in the period from 2001 to 2005. These results suggested that the calcification significantly decrease or cease in low temperature. Coral in this study recorded the local history of marine environments at Tatsukushi Bay caused by terrestrial inputs due to heavy rainfall event occurred in 2001. Coral isotopic compositions and skeletal structure were sensitive to response on SST changes. Future analysis using the full length of coral cores could be expected to capture both global environmental changes and local history at Tatsukushi Bay.

Keywords: reef building corals, temperate region, oxygen isotopes, carbon isotopes, X-radiographs, coral luminescence bands

Received: 1 June 2009/Accepted: 14 September 2009
© Japanese Coral Reef Society