

## 酸素・炭素安定同位体比・Mn/Ca 比を用いた 石垣島轟川河口付近のハマサングの壊死研究

川 島 龍 憲<sup>\*,\*\*\*\*\*</sup>・渡 邊 剛<sup>\*</sup>・白 井 厚太郎<sup>\*\*</sup>・前 川 聡<sup>\*\*\*</sup>  
島 村 道 代<sup>\*,\*\*\*\*</sup>・入 野 智 久<sup>\*\*\*\*\*</sup>・佐 野 有 司<sup>\*\*\*\*\*</sup>

(2008年1月17日受付, 2009年1月23日受理)

### Investigation on coral necrosis in massive *Porites* colony in the Mouth of Todoroki river, Ishigaki Island, Japan deduced from the $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$ and Mn/Ca ratios

Tatsunori KAWASHIMA<sup>\*,\*\*\*\*\*</sup>, Tsuyoshi WATANABE<sup>\*</sup>, Kotaro SHIRAI<sup>\*\*</sup>,  
Satoshi MAEKAWA<sup>\*\*\*</sup>, Michiyo SHIMAMURA<sup>\*,\*\*\*\*</sup>,  
Tomohisa IRINO<sup>\*\*\*\*\*</sup> and Yuji SANO<sup>\*\*\*\*\*</sup>

- \* Department of Natural History Science, Faculty of Science, Hokkaido University,  
N10W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan
- \*\* International Coastal Research Center, Ocean Research Institute, University of Tokyo,  
2-106-1, Akahama, Otsuchi, Iwate 028-1102, Japan
- \*\*\* WWF Coral Reef Research and conservation centre,  
118 aza shiraho, Ishigaki 907-0242, Japan
- \*\*\*\* Korea Ocean Research and Development Institute,  
Ansan P. O. Box 29, Seoul, 425-600, Korea
- \*\*\*\*\* Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University,  
N10W5, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan
- \*\*\*\*\* Ocean Research Institute, University of Tokyo,  
1-15-1, Minamidai, Nakano-ku, Tokyo 164-8437, Japan

Coral reefs are increasingly faced to the crisis of decline and death caused by climate changes and anthropogenic influence. These crises were reported in Shiraho coral reefs, the Ishigaki Island, Southwestern Japan, caused by the red soils runoff through the Todoroki River. In order to evaluate the influence of terrestrial inputs on coral skeletal growth and coral death, we have analyzed oxygen and carbon isotopic ratios, as well as Mn/Ca ratio, of coral *Porites*, skeleton collected from Shiraho reef. The coral colony used in this study was still alive but partly dead when the samples were recovered in 20th September 2006. Oxygen isotopic profile of necrosis part indicates that the death may have occurred in winter 2005 when a strongly positive peak of Mn/Ca ratio was observed in the same growth layer of living part, suggesting that increased terrestrial input during sugar cane harvest and closed water system during lower tide level in winter are a possible cause of coral necrosis in the Shiraho coral reefs.

**Key words:** *Porites* coral, Todoroki river, Oxygen isotopes, Carbon isotopes, Mn/Ca ratio

\* 北海道大学大学院理学院自然史科学部門  
〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目  
\*\* 東京大学海洋研究所国際沿岸海洋研究センター  
〒028-1102 岩手県上閉伊郡大槌町赤浜2-106-1  
\*\*\* WWF ジャパンサンゴ礁保護研究センター  
〒907-0242 沖縄県石垣市字白保118  
\*\*\*\* 韓国海洋研究院  
Ansan P. O. Box 29, Seoul, 425-600, 韓国  
現, 北海道大学大学院理学院自然史科学部門

\*\*\*\*\* 北海道大学大学院地球環境科学研究院  
〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西5丁目  
\*\*\*\*\* 東京大学海洋研究所  
〒164-8439 東京都中野区南台1-15-1  
\*\*\*\*\* 現, 三菱電機ビルテクノサービス株式会社  
〒920-0031 石川県金沢市広岡3-1-1

## 1. はじめに

近年、地球温暖化による水温上昇や海洋酸性化、環境汚染などにより、多くのサンゴ礁が減少の危機にある (Hoegh-Guldberg, 1999; Rogers and Beets, 2001)。サンゴ礁は造礁性サンゴ (以下サンゴ) が作り出す炭酸塩カルシウム (アラレ石) によって形成されている。造礁性サンゴは栄養源の90%近くをサンゴの細胞内に共生する褐虫藻の光合成による産物に依存している (Davies, 1984)。従って造礁性サンゴは光合成生産と石灰化生産がともに高く骨格成長も速いため、サンゴ礁としての地形を作り出すことができる。しかし、サンゴ-褐虫藻の共生システムの維持に光が必要なために、一般的に造礁性サンゴの生息域は透明度の高い貧栄養域の浅海に限られている。このサンゴと褐虫藻の共生関係はサンゴが受ける様々なストレスによって失われることがある。共生関係が崩れサンゴの細胞内から褐虫藻が極端に少なくなることをサンゴの白化現象と呼ぶ。白化したサンゴは直ちに死亡せずに、しばらくの間は自ら動物プランクトンなどを捕食することにより生き延びることもある。しかし、それだけでは栄養が十分ではないため共生関係が戻らなければいずれ死んでしまう (e.g. Grottoli *et al.*, 2006)。白化現象の要因には高水温や低水温、低塩分などのストレスや赤土の流出などによる光阻害 (e.g. Brown 1997; Goreau 1964; Steen and Muscatine, 1987) など様々な要因が挙げられる。しかし、白化現象の原因を特定できる場合は水温や塩分など連続した観測記録がある海洋のモニタリングが進んだ一部の海域に限られ、過去に起こった白化現象の原因を特定することは困難な場合が多い。サンゴは炭酸カルシウムの骨格に年輪を刻みながら成長させる。この骨格年輪をもとにした時間軸に沿って酸素・炭素同位体比や微量元素などの化学分析を行うことにより過去の様々な周辺環境の変動やサンゴの生理学的変化を復元することができる (Gagan *et al.*, 2000; Watanabe *et al.*, 2003; McCulloch *et al.*, 2003; 井上ほか, 2002; Isdale, 1984)。Suzuki *et al.* (2003) は、石垣島安良崎産のハマサンゴ骨格の年輪に沿って酸素・炭素同位体比を測定し、1998年に酸素同位体比曲線が正方向へシフトし炭素同位体比は負方向へシフトすることを見出し、白化現象時の光合成活性の低下と骨格成長の停滞が見られる部位を特定することに成功した。さらに、これらの手法をサンゴ骨格の長尺コアに応用し、サン

ゴ骨格の化学分析を行うことで過去の白化現象の原因を推定できることを示唆した。

石垣島の白保サンゴ礁は、世界最大のアオサンゴ (*Heliopora coerulea*) 群落やハマサンゴ類 (*Porites*) 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南北約10 kmの広がりを持つ裾礁である。しかし、近年、轟川の河口付近での土地開発事業や新石垣島空港建設に伴うサンゴ礁への赤土の流出がサンゴ礁生態系へ与える影響が懸念されている。白保サンゴ礁では1998年に高水温による白化現象が起こっているが、高水温以外の環境要因による白化も報告されている。2001年6月に観察された白保サンゴ礁での白化現象は、2001年5月31日の230 mm (最大一時間降水量46 mm) の大雨により大量の赤土が礁内に流れ込んだことが原因とされている (環境省自然環境局, 2002)。このように、轟川流域ではまとまった降雨のたびに流出する赤土が河口周辺に恒常的に堆積することにより、生物群集に何らかの負の影響を与えている可能性があり (安村ほか, 2004)、白保サンゴ礁におけるサンゴの白化現象を引き起こす原因の一つになっている可能性が指摘されている。白化現象は時にサンゴ礁生態系に大規模な損害を与えるためサンゴ礁保全を考慮する際に正しく評価することが重要である。

本研究では、白保サンゴ礁北部の轟川河口付近から採集されたハマサンゴ試料を用いて、河川からの陸源物質の供給がサンゴ骨格の成長へ及ぼす影響を酸素・炭素安定同位体比および微量元素分析の結果を元に議論する。

## 2. 試料および方法

石垣島は、北緯24度20分、東経124度10分に位置する東西17 km、南北35 km、周囲139.22 kmの島である (Fig. 1)。2005年9月に石垣島南東部の白保サンゴ礁から壊死したフカアナハマサンゴ (*Porites lobata*) の骨格試料を採取した。このサンゴ試料を、死亡部を含む測線と正常に成長した測線に沿って同位体組成を分析し、壊死時期とその当時の環境を復元し、壊死原因を推定することを試みた。分析に先立ってサンゴ試料を厚さ約3 mmのスラブに切断し、軟エックス線発生装置を用いエックス線撮影を行った。エックス線画像をもとにサンゴの最大成長軸を選定し、化学組成分析の微小試料採取測線 (Fig. 2b-A) とした。死亡部分についても成長が明瞭な成長軸を選定し、微小試料採取測線 (Fig. 2b-B) を決定した。

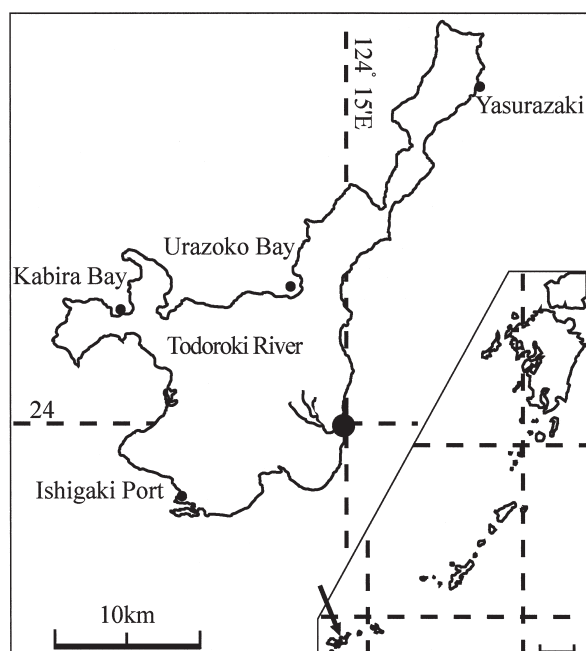


Fig. 1 Location map of studied area. The coral specimen of *Porites lobata* was collected from Shiraho coral reef near the mouth of Todoroki river. Daily records of sea surface temperatures (SST) were obtained both at Ishigaki port and Shiraho coral reef.

決定した測線に沿って（サンゴ虫一つの大きさに相当する）厚さを1 mm 程度に調整したスラブを作成し、マイクロドリルを用いて微小試料を測線 A（生存部位）については200  $\mu\text{m}$  ごと、測線 B（死亡部位）については400  $\mu\text{m}$  ごとにマイクロサンプリングを行い、酸素・炭素安定同位体比測定用の粉末試料を得た。また、同位体比測定試料を採取した後のスラブの一部を骨格の微量元素測定用の試料とした。

酸素・炭素安定同位体比測定には北海道大学大学院地球環境研究院のキールディバイス連結の Finnegan 社製質量分析計 MAT 251を用いて測定した。炭酸塩試料は70°Cで100%リン酸と反応させ、発生した二酸化炭素ガスを同位体比組成分析に用いた。この質量分析計において、国際原子力機関 (IAEA) の NBS 19（推奨値、 $\delta^{13}\text{C}=1.95\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}=-2.20\text{‰}$ ）の繰り返し測定により得られた酸素同位体比の標準偏差は0.06 ‰（ $2\sigma$ ;  $n=27$ ）であった。

微量元素分析には東京大学海洋研究所の Cameca 社製の二次イオン質量分析計 (Secondary Ion Mass Spectrometer) NanoSIMS NS50を用いてサンゴ骨格中の Mn/Ca を測定した (Sano *et al.*, 2005)。一次

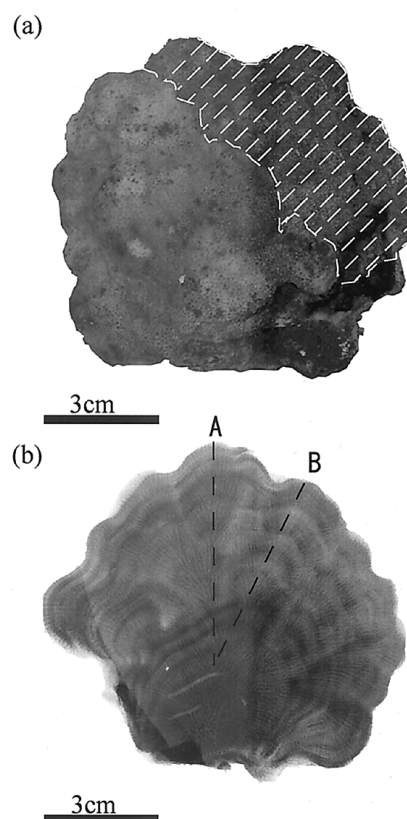


Fig. 2 Photograph of coral colony surface (a) and x-ray photograph (positive image) of coral slice (b). The shade area in (a) indicates dead part observed in 20<sup>th</sup> September 2005. Lines A and B in (b) indicate measured lines for geochemical analysis.

イオンビームは4 nA の $^{16}\text{O}^-$ を用いた。 $^{44}\text{Ca}$ 、 $^{55}\text{Mn}$ の検出を電子倍增管の多重検出器で同時に行った。質量分解能は約4000で測定ピークに対する質量スペクトル干渉は見られなかった。メキシコの鉱床から採取された均質なカルサイトを標準試料として10測点毎に測定した。標準試料の繰り返し再現性は7.83% ( $2\sigma$ ) 以内であった。

サンゴ試料の酸素同位体比との比較に用いる水温データは WWF サンゴ礁保護研究センターが2002年から10分おきに測定しているものを用いた。しかし、2001年以前のデータがないため、石垣島地方気象台石垣検潮所の表面海水水温データ、及び 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補正した週毎の水温推定値を参照した (Reynolds and Smith, 1994)。石垣島の水温データは2月に最低水

温, 8月に最高水温を示す, 石垣港, 白保サンゴ礁, 衛星データと同様の周期性はあったが, 変動幅がそれぞれ $8.8^{\circ}\text{C}$ ,  $10.9^{\circ}\text{C}$ ,  $6.5^{\circ}\text{C}$ と違った。特に衛星データの水温は他の2つの測定値より振幅が小さい。これは IGOSS の水温データの最低水温が石垣港で $2.6^{\circ}\text{C}$ , 白保サンゴ礁で $4.2^{\circ}\text{C}$ と高い値を示しているためである。1996年から2001年までの白保サンゴ礁の未測定水温データを補うため, IGOSS の水温データより水温の振幅や最低と最高水温が近い値を示す石垣港と白保サンゴ礁の水温の相関を取り, 計算した値もあわせて示した (Fig. 3)。

轟川河川水と海水の微量元素量を測定するため, 2007年8月30日の晴天時と9月9日の雨天時 (降水量:  $31\text{ mm}$ ) に採水を行った。採水したサンプルは $0.45\text{ }\mu\text{m}$ のメンブレンフィルタで濾過し, 6%硝酸で pH

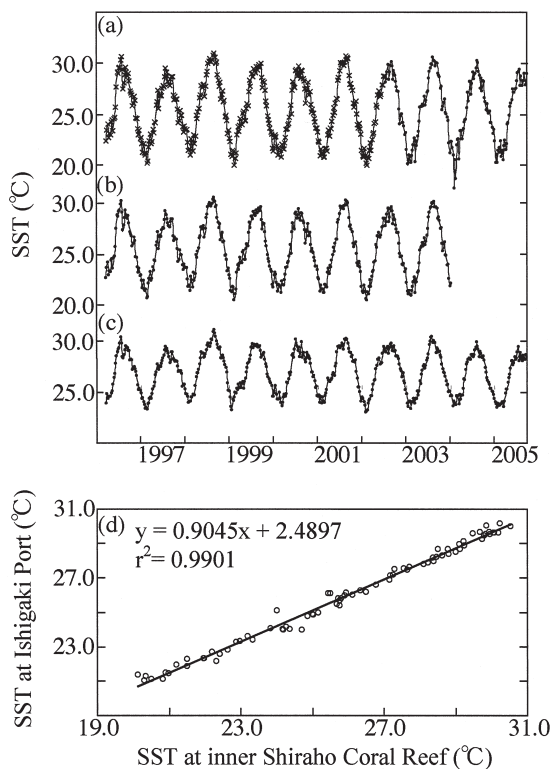


Fig. 3 Time series of sea surface temperature (SST) for Shiraho coral reef (a), Ishigaki port (b), and  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  grid area by the Integrated Global Ocean Services System (IGOSS) (c). Linear relationship between Shiraho SST and Ishigaki port SST from 2002 to 2003 (d). Cross symbols in (a) indicate Shiraho SST calculated from this relationship.

調整してナルゲンボトルに入れ, 測定まで冷蔵保管した。海水中の Mn は非常に少ないため, Statham (1985) の濃縮方法を用いて濃縮したサンプルを誘導結合プラズマイオン源質量分析装置 (ICP-MS) で分析した。

蛍光観察には $365\text{ nm}$ の波長の紫外線ランプとオリンパス蛍光顕微鏡画像解析装置 DP70を用いた。照射波長は紫外線ランプで $365\text{ nm}$ , 蛍光顕微鏡で $330\text{ nm}$ から $385\text{ nm}$ であった。

### 3. 結 果

サンゴ骨格軟エックス線画像には, 14年分の密度バンドが観察された。しかし, 壊死した部位では最近の約一年分に相当する密度バンドが欠損していた (Fig. 2)。また, サンゴ骨格の酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{coral}}$ ) は明瞭な周期的変動を示した (Fig. 4)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{coral}}$ は主に海水温と海水の酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ ) によって変動する。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ は海水の塩分

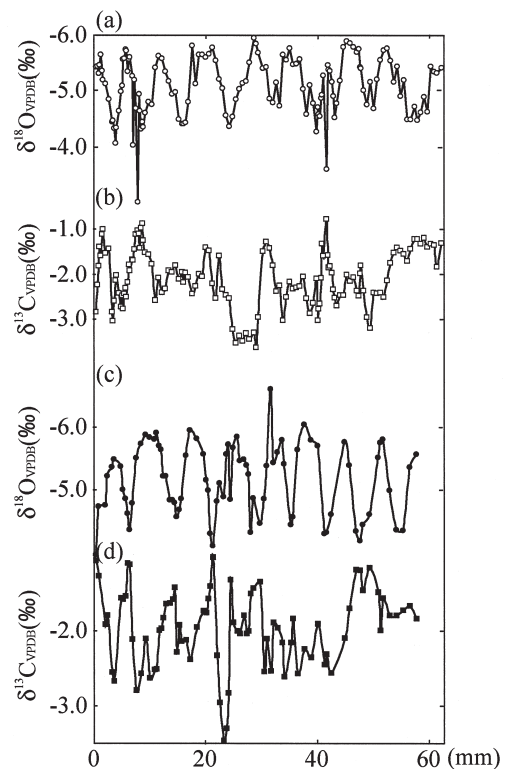


Fig. 4 Geochemical results of coral *Porites* from Shiraho coral reef. Skeletal oxygen isotopic ratio (a) and carbon isotopic ratio (b) in line A (living part). Skeletal oxygen isotopic ratio (c) and carbon isotopic ratio (d) in line B (dead part).

によって変動し、海水の塩分は降水量や蒸発量、水塊の移動などの影響を受ける。Oba (1988) では、東シナ海での塩分と  $\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}}$  の関係を以下のように報告している。

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}} = 0.203 \text{ Salinity} - 6.76 (\text{‰}) \quad (1)$$

石垣島における塩分の年変化は0.5であり (Suzuki *et al.*, 1999), サンゴ骨格の酸素同位体比に塩分が与える影響は年間0.10‰程度と見積もることができる。サンゴ試料の平均周期は測線 A, B でそれぞれ約 1.23‰, 1.43‰であり,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{coral}}$  に見られる変動は主に水温の変動 (それぞれ91.8%, 93.1%以上) を反映していると考えられる。ハマサンゴ属の  $\delta^{18}\text{O}_{\text{coral}}$  と水温の関係については, 最高水温時に  $\delta^{18}\text{O}_{\text{coral}}$  極小値を持つ骨格が形成されることが知られており (Weber and Woodhead, 1972; Suzuki *et al.*, 1999), この関係を用いて最高水温と最低水温の間のサンゴ骨格の骨格成長量は一定として  $\delta^{18}\text{O}_{\text{coral}}$  のデータを時系列への変換を行った (Fig. 5)。

サンゴ骨格の炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{coral}}$ ) の極小値は  $\delta^{18}\text{O}_{\text{coral}}$  の極小値よりも1ヶ月から2ヶ月程度のずれがみられた (Fig. 5)。  $\delta^{13}\text{C}_{\text{coral}}$  が主に光合成の影響を受けることが, 石垣島の日射量の最大値が水温の最大値よりずれているためと思われる (Suzuki *et al.*, 2003)。壊死部位のサンゴ骨格は酸素同位体比から2005年の冬に相当するところで成長を止めており (Fig. 5b), 本研究で用いた群体はこの時期に壊死したことが確認できる。

サンゴ骨格の Mn/Ca 比は, 標準試料の化学組成が未測定なため測定の数値比で示した。Mn/Ca 比には明瞭なピークが2003年と2004年に相当する部位にそれぞれ見られた。Mn/Ca 比と酸素同位体比の変動には相関関係は見られず, 2つあるピークのうち骨格表面に近いピークの方が高い値を示した。サンゴ骨格に紫外線を照射すると3本の蛍光バンドが観察され, そのうち2本が Mn/Ca 比のピーク付近に観察された (Fig. 5)。

轟川流域及びサンゴ試料採取地点付近の河川水, 海水のマンガン濃度を Fig. 6に示す。マンガン濃度は, 轟側中流域 (52.3 ppb), 河口付近 (14.9 ppb), サンゴ礁内 (平均0.71 ppb; n = 18) と濃度が急速に減少している。これらのことは轟川流域の白保サンゴ礁には, 陸上由来のマンガンが河川を経由して供給されていることを示している。海水試料は, 晴天時 (2007

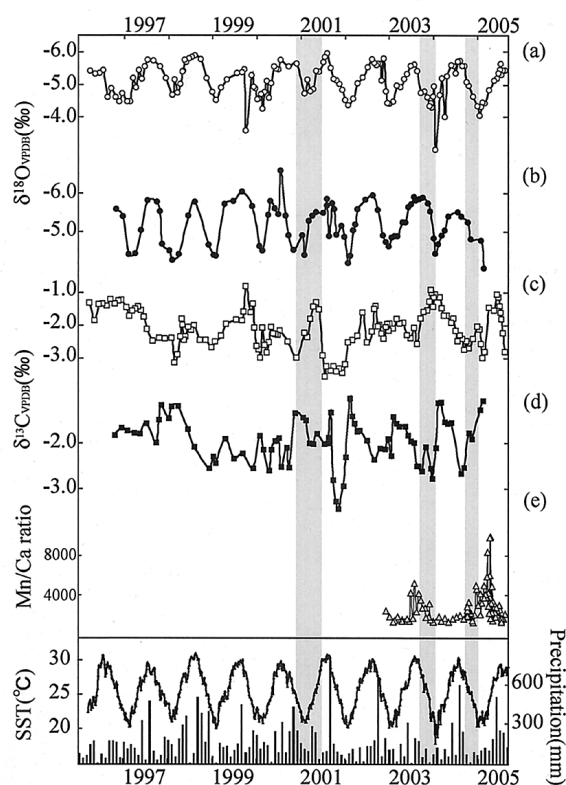


Fig. 5 Time series of geochemical results. Skeletal oxygen isotopic ratio in line A (a) and line B (b). Skeletal carbon isotopic ratios in line A (c) and in line B (d). Skeletal Mn/Ca ratio in line A (e). Also shown are Shiraho SST and precipitation records at Isigaki port (f). Grey areas indicate fluorescence bands observed by fluorescence microscope in coral skeletons.

年8月30日, 0.67 ppb; n = 9) のマンガン濃度の方が雨天時 (2007年9月9日, 0.73 ppb; n = 9) よりも若干低い。また, 雨天時, 晴天時ともに礁原の内側から外側に向かって濃度が高い傾向が見られた。これは河川より運ばれたマンガンが比較的速やかに外側まで運搬され, サンゴ礁地形の高まりである礁嶺近くで停滞しているためであると考えられる。白保サンゴ礁内の轟川河口付近の海流は南から北へ流れており, 約2 km 先で外洋に流れ出る (Tamura *et al.*, 2007)。特に, 雨天時に北よりでマンガン濃度が高いのは, 轟川の流に乗った高いマンガン濃度の水が北向きの流れに乗って北上したためであると考えられる。晴天時は礁内の水量が少なく, 礁内での海水の移動量も活発でないことから, 高いマンガン濃度の水は轟川の延長線上にある礁原の外側に停滞していると考えられる。



ると報告した。ところが、本研究でのサング骨格試料に記録された Mn/Ca 比のピークの時期に降水量が多いことは確認できなかった。一方で、2006年5月から3ヶ月おきに実施した白保サング礁内の栄養塩測定において、冬時期に全窒素量が他の時期に比べ大きい値を示した（川島，2006）。轟川流域の土地利用の66.7%はサトウキビ畑で占められている（環境省自然環境局，2002）。サトウキビの収穫と植付けの時期は共に冬であり、収穫後から植え付けるまで裸地になっていることが多い。植えつける際に畑を耕すことにより畑からの河川に陸源物質が流れ出やすくなる。したがって、降水量の変化よりもむしろ土地利用によって白保サング礁の水質低下がもたらされたと考えられる。

1998年と2007年において石垣島では大規模な白化現象が起こったが、これは水温上昇が原因とされているが、一方で、水温上昇以外の要因による白化現象も石垣島では報告されている（環境省自然環境局，2002）。本研究の結果は、陸源物質の流入による水質低下がサングの白化を引き起こす一因になった可能性をサング骨格の元素・同位体比組成から明らかにしたものである。石垣島の開発によりサング礁の水質は低下してきている。1998年および2007年に起こった白化現象の要因としても高水温による環境ストレスに加えて、陸源物質のサング礁への流入による水質低下もストレスとして寄与しているかもしれない。

## 5. ま と め

本研究では、石垣島白保サング礁轟川河口付近から壊死したフカアナハマサング（*Porites lobata*）の骨格試料を採取した。採取時まで生きていた部位と壊死部位のサング骨格の酸素同位体比の結果から死亡時期が2005年の冬であり、その時期に形成された骨格の Mn/Ca 比が高い値を示すことが明らかになった。この海域でのマンガン濃度分布からこれらのマンガンは陸源のものであり、河川からの陸起源物質の流入が壊死の原因であると推定された。サングが死亡した時期はサトウキビの植え替え時期であり、畑の耕作に伴って陸源物質が河川を通じサング礁に流れ込み、水質の低下をもたらした可能性がある。

石垣島では1998年および2007年に高水温によるとされる大規模な白化現象が起こった。しかし、本研究を含め水温上昇による白化現象以外の白化現象も石垣島では報告されている。従来、高水温によると見なされてきた白化現象にも陸源から供給物質による水質低

下の環境ストレスが影響を与えている可能性があり、再検討が必要である。

## 謝 辞

本研究においてフィールド調査では環境省モニタリングセンター及びWWF サング礁保護研究センターの施設を利用した。北海道大学大学院理学院の岨康輝氏には調査補助で、同大学院の山崎敦子氏には図の作成で協力して頂いた。また、骨格試料のスラブ作成には北海道大学大学院理学研究院技術部の野村秀彦氏に協力していただいた。また、蛍光バンド観察では、北海道大学大学院理学研究院の沢田健講師が管理する蛍光顕微鏡を用いた。東北大学大学院理学研究科の中森亨准教授にはサングの同定をして頂いた。国士舘大学文学部の長谷川均教授、国立環境研究所の山野博哉博士、アジアプランニング株式会社の荒川浩成氏には白保サング礁及び轟川流域の土地利用についての助言をいただいた。また、2名の査読者の方には有益なコメントを頂いた。この場を借りて謝意を申し上げます。

本研究における分析の一部には、韓国海洋研究院科学研究費（POSEIDON-PP00720）を使用した。

## 引用文献

- Brown, B. E. (1997) Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs* **16**, 129–138.
- Davies, P. S. (1984) The role of zooxanthellae in the nutritional energy requirements of *Pocillopora eydouxi*. *Coral Reefs* **2**, 181–186.
- Gagan, M. K., Ayliffe, L. K., Beck, J. W., Cole, J. E., Druffel, E. R. M., Dunbar, R. B. and Schrag, D. P. (2000) New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Science Review* **19**, 45–64.
- Goreau, T. F. (1964) Mass Expulsion of Zooxanthellae from Jamaican Reef Communities after Hurricane Flora. *Science* **145**, 383–386.
- Grottoli, A. G., Rodrigues, L. J. and Palardy, J. E. (2006) Heterotrophic plasticity and resilience in bleached corals. *Nature* **440**, 1186–1189.
- Hoegh-Guldberg, O. (1999) Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine Freshwater Research* **50**, 839–866.
- 井上麻夕里・菅浩伸・鈴木淳（2002）サング骨格中の微量元素—海洋汚染指標としての可能性—。地

- 球化学, **36**, 65–79.
- Isdal, P. J. (1984) Fluorescent bands in massive corals record centuries of coastal rainfall. *Nature* **310**, 578–579.
- 川島龍憲 (2006) 石垣島白保サンゴ礁に生息する造礁性サンゴの骨格成長メカニズム—轟川流域に生息するハマサンゴの酸素・炭素安定同位体比解析—, 20 pp.
- 環境省国際サンゴ礁研究・モニタリングセンター (2004) 2004年 (平成16年) 石垣島周辺海域サンゴ礁モニタリング調査結果概要. [http:// www. coremoc . go . jp / kekka / 2004 \\_ ishigaki . html](http://www.coremoc.go.jp/kekka/2004_ishigaki.html) (2008.1.2)
- 環境省自然環境局 (2002) 石垣島サンゴ群生地被害実態・原因究明緊急調査, 175 pp.
- McCulloch, M., Fallon, S., Wyndham, T., Hendy, E., Lough, J. and Barnes, D. (2003) Coral record of increased sediment flux to the inner Great Barrier Reef since European settlement. *Nature* **40**, 727–730.
- Oba, T. (1988) Paleooceanographic information obtained by the isotopic measurement of individual foraminiferal specimens. *Proceedings of the First International Conference on Asian Marine Geology*, 169–180, Ocean Press, Beijing.
- Reynolds, R. W. and Smith, T. M. (1994) Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *Journal of Climate* **7**, 929–948.
- Rogers, C. S. and Beets, J. (2001) Degradation of marine ecosystems and decline of fishery resources in marine protected areas in the US Virgin Islands. *Environmental Conservation* **24**, 312–322.
- Sano, Y., Shirai, K., Takahata, N., Hirata, T. and Sturchio, N. C. (2005) NanoSIMS analysis of Mg, Sr, Ba and U in natural calcium carbonate. *Analytical Sciences* **21**, 1091–1097.
- Shen, G. T., Campbell, T. M., Dunbar, B., Wellington, G. M., Colgan, M. W. and Glynn, P. W. (1991) Paleochemistry of manganese in corals from the Galapagos Islands. *Coral Reefs* **10**, 91–100.
- Statham, P. J. (1985) The determination of dissolved manganese and cadmium in sea water at low nmol-1 concentrations by chelation and extraction followed by electrothermal atomic absorption spectrometry. *Analytica Chimica Acta* **169**, 149–159.
- Steen, R. G. and Muscatine, L. (1987) Low temperature evokes rapid exocytosis of symbiotic algae by a sea anemone. *The biological bulletin* **172**, 246–263.
- Suzuki, A., Yukino, I. and Kawahata, H. (1999) Temperature-skeletal  $\delta^{18}\text{O}$  relationship of *Porites australiensis* from Ishigak Island, the Ryukyus, Japan. *Geochemical Journal* **33**, 419–428.
- Suzuki, A., Gagan, M. K., Fabricius, K., Isdal, P. J., Yukino, I. and Kawahata, H. (2003) Skeletal isotope microprofiles of growth perturbations in *Porites* corals during 1997–1998 mass bleaching event. *Coral Reefs* **22**, 357–369.
- 鈴木淳・川幡穂高 (2004) 骨格の酸素・炭素同位体比にみるサンゴ白化現象の記録. 地球化学, **38**, 265–280.
- Tamura, H., Nadaoka, K. and Paringit, E. C. (2007) Hydrodynamic characteristics of a fringing coral reef on the east coast of Ishigaki Island, southwest Japan. *Coral Reefs* **26**, 17–34.
- Watanabe, T., Gagan, M. K., Corrège, T., Gagan, H. S. and Hantoro, W. S. (2003) Oxygen isotope systematics in *Diploastrea heliopora*: New coral archive of tropical paleoclimate. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **67** (7), 1349–1358.
- Weber, J. N. and Woodhead, P. M. J. (1972) Temperature dependence of oxygen-18 concentration in reef coral carbonate. *Journal of Geophysical Research* **77**, 463–473.