

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244090

研究課題名(和文) 造礁サンゴ骨格による気候変動解析の新展開

研究課題名(英文) Inter- and intracolony variability of coral climate proxies and implication for coral climatology

研究代表者

鈴木 淳 (Suzuki, Atsushi)

独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・研究グループ長

研究者番号：60344199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,400,000円

研究成果の概要(和文)：造礁サンゴ骨格に記録された気候変動情報は、精度や時間分解能の点で他の間接指標と比較しても良好な性能を持つ。本課題では、サンゴ骨格の「間接指標(酸素同位体比・Sr/Ca比)の成長速度依存特性」、「炭素同位体比の制御因子」、「種内変異(群体間差異)が抑制/拡大されるメカニズム」について、琉球大学瀬底研究施設の屋外水槽で長期飼育されたハマサンゴ試料を対象に検討した。炭素同位体比>酸素同位体比>Sr/Ca比の順でサンゴの健康状態(そして骨格成長速度)に影響される。Sr/Ca比は頑強で、優れた水温の間接指標である。これらの結果は、サンゴ骨格による気候変動研究の確度の高さを支持するものである。

研究成果の概要(英文)：As application of coral-based climate reconstruction has become more frequent at tropical sites, increased attention is being paid to the potential ambiguities of coral thermometers that are intrinsic to the biomineralisation process. Here we studied how the growth rate influenced the skeletal oxygen and carbon isotope ratios and the Sr/Ca ratio in a common-garden experiment involving the long-term culture of *Porites australiensis* clone colonies. The Sr/Ca ratio was robust against both inter- and intracolony growth-rate variation. The seasonal fluctuation in carbon isotope ratios corresponded to photosynthetic efficiency as measured by pulse-amplitude photometry. These findings support the inference that coral skeletal Sr/Ca and oxygen isotope ratios in a long-lived colony can function as a palaeoclimate archive by recording signals of clonal growth. We also propose practical guidelines for the proper interpretation of coral records.

研究分野：生物地球化学

キーワード：サンゴ 水温 酸素同位体比 気候変動

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に伴う気候変動について強い関心が集まる中、産業革命以降、海水温がどのように変化してきたかを明らかにすることは重要である。2007年に公表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第一部会の第4次評価報告書では、これまでで初めて「古気候(Paleoclimate)」の章が作成され、数十年から氷期間氷期スケールまでの気候変動に関わる知見のレビューが行われた。この中で、熱帯・亜熱帯域の200年以上成長を続けるサンゴ骨格を用いた高時間解像度(約1~2週間)の海洋環境復元は、測器記録の代替として、サンゴ骨格の酸素同位体比など間接指標を用いた研究成果が数多く引用された。最近200年間の海水温がそれ以前に比べて明瞭に高い状態にあることを明確に証明してみせたのは、サンゴ骨格研究の成果の代表例である。

地球温暖化予測の高度化に向けて、今後もサンゴ骨格研究の必要性は一層高くなるであろう。また、IPCC第4次報告書によると、気候モデルによって亜熱帯域では降水量の減少が予測されているが、その確度は高くない。水温と合わせて、降水量と関係が深い過去の塩分変動を復元することは急務である。この期待に応えることができるのは、サンゴ骨格の $\delta^{18}\text{O}$ -Sr/Ca比複合指標法である。骨格の酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ )は水温と塩分(正確には海水の酸素同位体組成)の双方に依存し、ストロンチウム/カルシウム比(Sr/Ca比)は水温のみに依存する。したがって、骨格のSr/Ca比から水温を推定し、骨格の酸素同位体比の変動から水温による変化分を差し引けば、その残差として海水の酸素同位体比組成の変化あるいは塩分の変化を知ることができる。IPCCの第5次報告書は2013年頃に公表の予定である。この間、 $\delta^{18}\text{O}$ -Sr/Ca比複合指標法による気候変動解析を推進し、その結果を第5次評価報告書に反映させていくべきと考える。

## 2. 研究の目的

造礁サンゴ骨格に記録された気候変動情報は、精度や時間分解能の点で他の間接指標と比較して抜群の性能を持つ。サンゴ骨格の元素・同位体比組成が、無機合成された炭酸塩中での平衡論的挙動と異なる「生物学的効果(vital effect)」の解明も近年大きく進んだ。本研究課題では、一連の研究の仕上げとして、「間接指標(酸素同位体比・Sr/Ca比)の成長速度依存特性」、「炭素同位体比の制御因子」、「種内変異(群体間差異)が抑制/拡大されるメカニズム」の3つの問題に集中し、サン

ゴ骨格による気候変動研究の確度・精度向上を推進する。

## 3. 研究の方法

研究分担者らにより、琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設の屋外水槽を用いて、ハマサンゴ(*Porites australiensis*)の長期飼育実験が実施された。実験には5つの元群体から切断されたクローン小群体が各光量区に配置され、約6年間にわたり飼育された。これらは、骨格化学組成の種内変異および群体間変異を検討するのに適した試料群である。5つの群体に由来するサンゴ片骨格試料について酸素同位体とSr/Ca比の分析を行ない、間接指標の頑強性を評価する。また、研究分担者により、パルス変調型(PAM)クロロフィル蛍光測定法による光合成活性と、水中骨格重量法による石灰化量の経時変化が飼育期間の後半3年間にわたり継続された。この計測記録と、骨格の炭素同位体比記録を対比して、炭素同位体比の規定要因を把握する。飼育期間中に計測された海水の溶存無機炭素の炭素同位体比、水温、塩分等の環境情報も併せて検討した。

また、これらのサンゴ骨格の間接指標について、化石サンゴを扱う場合の検討を実施した。まず、続成作用により各間接指標が受ける影響の程度についても検討を行った。統合深海掘削計画IODP Exp. 325のグレートバリアリーフ航海で大量に採取された氷期のニオウミドリイシについては、沖縄に分布する同属の種について多段階恒温飼育実験等による間接指標の特性把握を行なって、化石試料の分析結果の解釈の参考資料とした。

## 4. 研究成果

琉球大学熱帯生物圏瀬底研究施設の屋外水槽におけるハマサンゴの長期飼育試料を用いて、骨格化学組成の種内変異および群体間変異を検討した。一部の群体試料の骨格組成に、実験開始の切断時に骨格成長速度が低下した際に、酸素同位体比は季節変化の振幅が縮小したものの、Sr/Ca比には影響が見られなかった。これは、Sr/Ca比が酸素同位体比よりも群体の健康状態あるいは成長速度の影響を受けにくいことを示す結果である。

サンゴ骨格の炭素同位体比は、古くから頻繁に分析されてきたが、その変動要因については議論が多い。光量と相関とする光エネルギーモデルが1970年代に提唱されたが、反例も多く報告されている。この実験では、海水の溶存無機炭素の炭素同位体比、水温、光合成活性、骨格成長量など、骨格の炭素同位体比に影響する諸変量をすべて網羅しているため、確度の高い考察が行なえる。特に、予察的な解析によると、骨格の炭素同位体比とPAM法により計測された光合成活性( $F_v/F_m$ )に有意な相関が認められた。

一連の検討により、サンゴ骨格の間接指標の特性に関する次の3つの仮説が検証され

た。1)炭素同位体比 > 酸素同位体比 > Sr/Ca 比の順でサンゴの健康状態(そして骨格成長速度)に影響される。言い換えれば、Sr/Ca 比は頑強で、最も優れた水温の間接指標である。2)炭素同位体比は、光量や光合成量よりも、光合成の「効率」に規定される。3)適度な強光環境は、間接指標の健康状態や骨格成長速度への依存性を抑制し、間接指標の群体間差異を小さくする。この3つの仮説が検証されたことは、サンゴ骨格を用いた気候変動解析に追い風となる。気候復元に適したサンゴ試料の具体的な選定指針と解析方法についての新しいガイドラインを構築できる。例えば、浅海の光量が多いサンゴ群体の Sr/Ca 比は、最も確度の高い水温復元が期待でき、必ずしも1カ所から多数のサンゴ記録を生成して平均する必要はないであろう。また、このようなサンゴは、群体間差異が小さく、異なった海域・時代を比較する際に有意な結果を得やすいであろう。これらは、化石サンゴを用いる気候変動研究に取っても朗報である。

世界最大のサンゴ礁である豪州沖グレートバリアリーフ(GBR)で実施された IODP Exp. 325 では、最終氷期最盛期を含むサンゴ礁堆積物の掘削に成功した。しかし、古環境解析に適した塊状ハマサンゴ化石は少なく、ニオウミドリイシ属(*Isopora* spp.)が多く含まれていた。ニオウミドリイシ属は、従来ミドリイシ属(Genus *Acropora*)の亜属とされてきたが、最近の形態学的・分子生物学的検討により、独立した属とされたものである。採取されたサンゴ化石は、塊状、被覆状、あるいは太枝状で、*Isopora palifera* (ニオウミドリイシ)あるいは *I. cuneata* (ヒラニオウミドリイシ)に比定されるが、種レベルの同定は困難であった。ハマサンゴ属は年輪が明瞭で月単位の時系列記録が得られるが、ニオウミドリイシ属は複雑な骨格成長様式を持ち、数年分の骨格を混合したバルク試料を採取して年平均値を議論する方法を採用した。薄片による二次生成物の有無、粉末 X 線解析による方解石含有量などにより試料の続成変質を評価して、良質の試料のみ選択した。その結果、GBR 北部(Noggin Passage, 17.1°S)では最終氷期最盛期から融氷期に掛けての過去2万年間の水温上昇は約 5℃と推定された。

ニオウミドリイシ属骨格組成を用いた水温復元能力を確認するため、沖縄産のニオウミドリイシを用いて水温 21~30℃の5段階で約1ヶ月間の恒温飼育実験を行った。期間中に形成された骨格の酸素同位体比は水温と直線関係を示し、水温依存性はおよそ -0.15‰/℃で、ハマサンゴ属と類似している。この結果は、ニオウミドリイシ属を用いた古環境解析の有効性を示すものである。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計11件)

- 1) Takagi, H., Moriya, K., Ishimura, T., Suzuki, A., Kawahata, H., Hirano, H. (2015) Exploring photosymbiotic ecology of planktic foraminifers from chamber-by-chamber isotopic history of individual foraminifers. *Paleobiology*, 41, 108 - 121, 査読有, DOI:10.1017/pab.2014.7
- 2) Felis, T., McGregor, H.V., Linsley, B.K., Tudhope, A.W., Gagan, M.K., Suzuki, A., Inoue, M., Thomas, A.L., Esat, T.M., Thompson, W.G., Tiwari, M., Potts, D.C., Mudelsee, M., Yokoyama, Y., Webster, J.M. (2014) Intensification of the Meridional temperature gradient in the Great Barrier Reef following the Last Glacial Maximum. *Nature Communications*, 5, 4102, 査読有, doi: 10.1038/ncomms5102
- 3) Nishida, K., Ishikawa, K., Iguchi, A., Tanaka, Y., Sato, M., Ishimura, T., Inoue, M., Nakamura, T., Sakai, K., Suzuki, A. (2014) Skeletal oxygen and carbon isotope compositions of *Acropora* coral primary polyps experimentally cultured at different temperatures. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 2840-2849, 査読有, doi:10.1002/2014GC005322
- 4) Tanaka, Y., Inoue, M., Nakamura, T., Suzuki, A., Sakai, K. (2014) Loss of zooxanthellae in a coral under high seawater temperature and nutrient enrichment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 457, 220-225, 査読有, doi:10.1016/j.jembe.2014.04.019
- 5) Kubota, K., Yokoyama, Y., Ishikawa, T., Obrochta, S., Suzuki, A. (2014) Larger CO<sub>2</sub> source at the equatorial Pacific during the last deglaciation. *Scientific Reports*, 4, 5261, 査読有, doi:10.1038/srep05261
- 6) Inoue, M., Ishikawa, D., Miyaji, T., Yamazaki, A., Suzuki, A., Yamano, H., Kawahata, H., Watanabe, T. (2014) Evaluation of Mn and Fe in coral skeletons (*Porites* spp.) as proxies for sediment loading and reconstruction of 50 yrs of land use on Ishigaki Island, Japan. *Coral Reefs*, 33, 363-373, 査読有, doi:10.1007/s00338-014-1128-3
- 7) Nishida, K., Iguchi, A., Ishimura, T., Sakai,

K., Suzuki, A. (Corresponding author)  
(2014) Skeletal isotopic responses of the Scleractinian coral *Isopora palifera* to experimentally controlled water temperatures. *Geochemical Journal*, 48, e9-e14, 査読有,  
doi:10.2343/geochemj.2.0317

- 8) Kawakubo, Y., Yokoyama, Y., Suzuki, A., Okai, T., Miyairi, Y., Alibert, C., Kinsley, L., Eggins, S. (2014) Precise determination of Sr/Ca by laser ablation ICP-MS compared to ICP-AES and application to multi-century temperate corals. *Geochemical Journal*, 48, 145-152, 査読有,  
doi:10.2343/geochemj.2.0295
- 9) Hirabayashi, S., Yokoyama, Y., Suzuki, A., Kawakubo, Y., Miyairi, Y., Okai, T., Nojima S. (2013) Coral growth-rate insensitive Sr/Ca as a robust temperature recorder at the extreme latitudinal limits of *Porites*. *Geochemical Journal*, 47, e1-e5, 査読有,  
doi:10.2343/geochemj.2.0259
- 10) Liu, G., Kojima, K., Yoshimura, K., Okai, T., Suzuki, A., Oki, T., Siringan, F. P., Yoneda, M., Kawahata, H. (2013) A model-based test of accuracy of seawater oxygen isotope ratio record derived from a coral dual proxy method at southeastern Luzon Island, the Philippines. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 118, 853-859, 査読有, doi:10.1002/jgrg.20074
- 11) Hayashi, E., Suzuki, A., Nakamura, T., Iwase, A., Ishimura, T., Iguchi, A., Sakai, K., Okai, T., Inoue, M., Araoka, D., Murayama, S., Kawahata, H. (2013) Growth-rate influences on coral climate proxies tested by a multiple colony culture experiment. *Earth and Planetary Science Letters*, 362, 198-206. 査読有, doi:10.1016/j.epsl.2012.11.046

〔学会発表〕(計4件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

[https://staff.aist.go.jp/a.suzuki/index\\_jpn.html](https://staff.aist.go.jp/a.suzuki/index_jpn.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 淳 (SUZUKI, Atsushi)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・  
研究グループ長

研究者番号：60344199

### (2) 研究分担者

酒井一彦 (SAKAI, Kazuhiko)

琉球大学・熱帯生物圏研究センター・教授

研究者番号：50153838

中村 崇 (NAKAMURA, Takashi)

琉球大学・理学部・講師

研究者番号：40404553

岡井 貴司 (OKAI, Takashi)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・

研究グループ長 研究者番号：20356679

加藤亜記 (KATO, Aki)

広島大学大学院・生物圏科学研究科・助教

研究者番号：00452962

張 勁 (ZHANG, Jing)

富山大学大学院・生物圏科学研究科・教授

研究者番号：20301822

中島 礼 (NAKASHIMA, Rei)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・

主任研究員 研究者番号：00392639

磯野良介 (ISONO, Ryosuke)

海洋生物環境研究所・実証試験場・

主任研究員 研究者番号：80588583

吉川 貴志 (KIKKAWA, Takashi)

海洋生物環境研究所・実証試験場・

主任研究員 研究者番号：50541091

### (3) 連携研究者

井口 亮 (IGUCHI, Akira)

産業技術総合研究所・地質情報研究部門・

助教 研究者番号：505447502

井上 麻夕里 (INOUE, Mayuri)

岡山大学・理学部・助教

研究者番号：20451891

村山 昌平 (MURAYAMA, Shohei)

産業技術総合研究所・環境管理技術研究部

門・研究グループ長

研究者番号：30222433

林 正裕 (HAYASHI, Masahiro)

海洋生物研究所・実証試験場・主査研究員

研究者番号：20444870