

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870147

研究課題名(和文) シャコガイ殻の微小領域分析による超高時間解像度古環境復元法の確立

研究課題名(英文) Super-fine temporal resolution past climate reconstruction from micro analysis of giant clam shell

研究代表者

白井 厚太郎 (Shirai, Kotaro)

東京大学・大気海洋研究所・助教

研究者番号：70463908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：極端現象の理解や将来予測のためには、日内スケールの高解像度な古環境情報が必要不可欠である。1日1本の日輪を刻みながら、百年以上にわたり通年で連続的に成長する高解像度の古環境復元に適した利点を持つシャコガイ殻に着目し、微小領域分析による日内スケールでの超高解像度古環境復元手法を確立することを目的とし研究を進めた。日輪間隔は夏期に成長速度が速く、冬期は成長速度が低下する季節周期を示す事が明らかとなった。成長方向に沿ってSr/Ca比を測定した結果、Sr/Ca比やMg/Ca比は明瞭な季節変動を示す事を明らかにした。一方、2マイクロメートルの高解像度分析の結果、明瞭な日周期を示す事を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For the understanding and future prediction of extreme events, establishing a new method to reconstruct past-environment at diurnal scale is required. Giant clam holds great advantages for this purpose, namely the shell forms daily growth line which enable to identify a time axis at hourly scale, and holds continuous and long term environmental records up to few hundreds years. The aim of this study is to examine the giant clam shell as very high resolution past environmental proxy. Incremental width of daily growth line in fossil shell from Holocene climatic optimum showed clear seasonal fluctuation, wide in summer while narrow in winter. The low-resolution profile of the shell Sr/Ca and Mg/Ca ratio showed seasonal fluctuation along a growth direction. The 2-micrometer resolution profile of Sr/Ca ratio in the fossil shell showed clear diurnal fluctuation, indicating daily insolation cycles.

研究分野：地球化学

キーワード：シャコガイ 極端現象 古環境復元 Sr/Ca比 古環境指標 成長線解析

## 1. 研究開始当初の背景

近年、世界的に極端な気象現象(極端現象)の頻度や程度が増加してきている。日本でも、毎年のように「記録的な豪雨」が観測され、台風被害が増大してきている一方で、各地で最高気温を更新するなど、極端現象による社会・経済への影響は深刻なものになってきている。IPCC第4次評価報告書によると、極端現象の頻度や程度が増加は主に1960年以降に起こった可能性が高いと結論付けているが、人間活動の寄与の可能性に関しては評価ができていない。人為起源の評価が困難な要因として、数十年周期の気候変動による影響評価の困難さや、観測データの不足などが指摘されている。極端現象の変遷の理解や将来予測、人為起源の評価のためには、日内スケールの高解像度な古環境情報が必要不可欠であり、そのような情報は社会的要請も強い。

これまで高解像度の古環境復元にはサンゴ骨格が主に用いられてきた。サンゴ骨格は数週間から数ヶ月の時間解像度を持つため、エルニーニョや地球温暖化など数年から数十年スケールの重要な古環境情報を明らかにしてきた。しかし、サンゴ骨格は複雑な微細骨格構造を持ち、生物石灰化作用に由来する微小領域での不均質がある。そのため、分析の空間解像度を高めたとしても時間解像度の向上につながらず、古環境復元の時間解像度は数週間が限度であり、極端現象を直接復元する事は困難であった。

それに対し沿岸域に生息する二枚貝の多くは1日1本または2本の「日輪」を刻みながら成長するため、微小領域分析を行うことで数時間の時間解像度で古環境復元を行える可能性がある。おおまかな傾向として、高緯度に生息する二枚貝は長寿命で、成長に適さない季節(多くは冬)では成長を止める。それに対し低緯度に生息する二枚貝は単寿命だが通年で連続的に成長するものが多い。ところが熱帯に生息するシャコガイは、1日1本の日輪を刻みながら、百年以上にわたり通年で連続的に成長するという、高解像度の古環境復元に適した両方の利点を持つ。例えば数十年周期の変動の中でも高温の年と低温の年のみに着目して、数時間という高い時間解像度で比較するという事も可能である。

## 2. 研究の目的

これまでの二枚貝殻を用いた古環境復元に関する研究は、成長線間隔解析と地球化学的手法の大きく二つの手法が主に用いられてきた。成長線間隔解析による研究の多くは長寿二枚貝の年輪幅の計測により数年から数十年の気候変動を議論する研究が多く、日輪幅を解析した研究例は比較的少ない(Schöne et al. 2002; Aubert et al. 2009)。また地球化学的手法による研究に関しては、水温(および塩分)を高精度で記録している酸素同位体比を用いた例が多いのに対し、微量

元素に関してはあまり研究が進んでいない。実際に極端現象の変遷の理解のためには水温や降水量など、日射量以外の環境因子に関しても同時に明らかにすることが必要不可欠である。

そこで本研究ではシャコガイ殻の微小領域分析による日内スケールでの超高解像度古環境復元手法を確立することを目的とする。具体的には成長線間隔・蛍光・微量元素組成・低解像度酸素同位体比・高解像度酸素同位体比の5つの代替指標を組み合わせる事で、台風や大雨などの極端現象がシャコガイ殻にどのような代替指標として、どの程度の精度で記録されているかを検証する。

## 3. 研究の方法

### (1) 化石シャコガイ殻の年代測定

採取したシャコガイ殻からデンタルドリルを用いて粉末試料を10mg程度採取した。粉末試料は山形大学の高感度加速器質量分析センターに放射性炭素年代測定を依頼した。

### (2) 年輪解析

化石試料はダイヤモンドソーで切断した後、回転砥石で平面になるように研磨した。断面をスケールと一緒にデジタルカメラで撮影し、画像解析ソフトを用いて成長線幅を計測した。

### (3) 日輪解析

試料を数センチにさらに切断し、表面を回転砥石で研磨後、研磨フィルムを用いて鏡面になるまで研磨した。研磨面はKeyence社のデジタルマイクロスコープで拡大顕微鏡写真を撮影し、画像解析ソフトを用いて微細成長線間隔を計測した。

### (4) 高解像度 Sr/Ca 比分析

化石シャコガイを2cm程度に切断し、エポキシ樹脂に包埋し、研磨フィルムを用いて鏡面になるまで研磨した。東京大学大気海洋研究所に設置された二次元高解像度二次イオン質量分析装置(NanoSIMS)を用いて試料表面を成長方向に沿ってSr/Ca比を分析した。分析方法はSano et al. (2005)に従った。詳細はHori et al. (2015)に記述されている。

### (5) 高解像度酸素同位体比分析

高精度マイクロミルシステム(いずも社, Geomill1326)を用いて鏡面研磨した試料から100マイクロメートル間隔で粉末を削り出した。得られた試料粉末は東京大学大気海洋研究所に設置された、炭酸塩自動前処理システムに接続された安定同位体比質量分析装置を用いて炭素・酸素の安定同位体比を分析した。炭酸塩標準試料であるNBS-19の組成からシャコガイ粉末試料の同位体比をPDBスケールに換算した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 化石シャコガイの年代測定結果

石垣島のサンゴ礫浜から採取したシャコガイ化石4個体から計7部位分取した試料の放射性炭素年代測定の結果、4個体とも全てが約5000BP程度の完新世気候最温暖期の年代のものであった。特にそのうちの1個体は川平湾の現在の海面より高い位置にあるビーチロックに埋もれていた保存の良いシャコガイ化石であり、川平湾のビーチロックの形成年代（もしくはその上限）を明らかにする事ができた。現在の石垣島ではオオジャコガイは生息していないのに対し、オオジャコガイ化石の年代が約5000BPを示す事は、海水準の高かった当時の時代は現在とは異なりオオジャコガイが成長可能な環境だった可能性を示唆している。

##### (2) 化石シャコガイの年輪解析

石垣島の化石シャコガイ4個体の成長線解析を行い、合計約200年分の成長パターンを検討した。シャコガイ殻の断面には透明帯と不透明帯を1対とする年輪が見られた(図1)。年間成長速度は、10歳程度まで比較的速い(5~20mm/年)のに対し、10歳以降は急激に成長速度が低下していく事が明らかとなった。また、透明帯と不透明帯の形成パターンについては、若齢期については不透明帯に対する透明帯の割合が小さいのに対し、成長に従ってその割合が増加する事がわかった(図1)。透明帯と不透明帯は連続的に遷移するため、その割合の増加は成長線幅を計測する際の誤差が大きくなる事につながる。200年分の成長線幅を解析した結果、経年変動を示すもの特に明瞭な周期性は見られなかった。

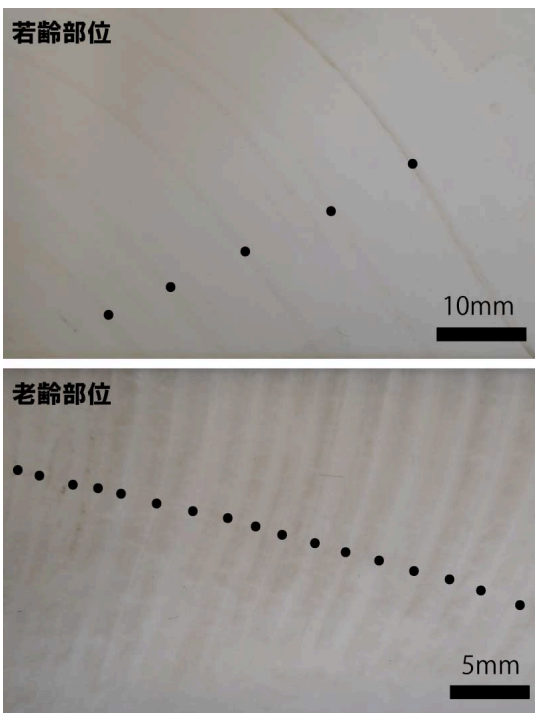


図1 シャコガイの年輪(黒点)

##### (3) 化石シャコガイの日輪解析

化石シャコガイ1個体の成長速度の速い若齢部位について微細成長線の解析を行った。成長線間隔は季節周期を示し、夏期に成長速度が速く、冬期は成長速度が低下する事が明らかとなった。また、年輪1本あたり約350本の日輪が見られた事から、成長線は1日1本形成される日輪である事が示された。

##### (4) シャコガイ殻の蛍光分析

現生シャコガイ殻を紫外線による励起蛍光を観察したが、サンゴ骨格のような明瞭な蛍光バンドを示さない事が明らかとなった。サンゴ骨格に見られる蛍光はフミン酸などの有機物に由来すると考えられている。シャコガイではそれほど明瞭な蛍光を示さない事は、海水-石灰化母液間の元素輸送の際に海中の有機物が殻に取り込まれず除去されている事を示していると考えられる。

##### (5) 化石シャコガイの高解像度Sr/Ca比分析

化石シャコガイ1個体の若齢部位についてNanoSIMSでSr/Ca比を測定した結果、Sr/Ca比やMg/Ca比は明瞭な季節変動を示す事を明らかにした(図2)。一方、2マイクロメートルの高解像度分析の結果、明瞭な日周期を示す事を明らかにした(図2)。Sano et al. (2012)で明らかにしたSr/Ca比と日射量の関係式に基づいて日射量を推定したところ、完新世気候最温暖期と現代では大きく異なる事が明らかとなった。なおこの研究成果は基盤研究S「NanoSIMSを用いた超高解像度海洋古環境復元」(代表:佐野有司,分担者として参加)と連携した成果であり、Scientific Reportsに掲載された(業績(1))。

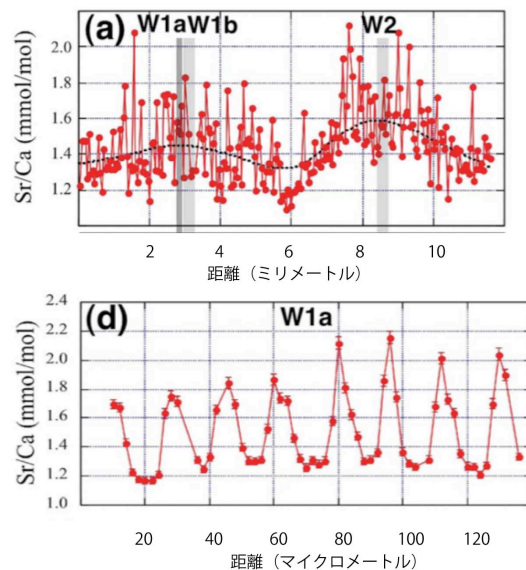


図2 化石シャコガイ中のSr/Ca比変動

(6) 化石シャコガイの高解像度酸素同位体比分析

微細成長線解析を行った化石シャコガイの同一部位についての酸素同位体比の結果、酸素同位体比は水温を反映して明瞭な季節周期を示す事が明らかとなった。また、日成長量の極小と酸素同位体比の極大の部位が一致する事から、冬期の低水温時に成長速度が低下する事を支持した。日成長量の極小が年間最低水温の2月に対応すると仮定し、180本の成長線をさかのぼった時期を8月として時間軸を決定し、その時間軸に従って酸素同位体比の変動を検討した。酸素同位体比は2月から徐々に低下していき、その低下は8月を過ぎててもまだ継続した。最も高水温に相当する時期は9月から10月に相当し、その後2月にかけて急激に酸素同位体比が上昇する事が明らかとなった。この事は、完新世気候最温暖期は現在と比べ夏の期間がより長く、最高水温になる時期が現在よりも遅かった事を示している。完新世気候最温暖期は地球温暖化が進んだ後のアナログ環境であると見なす事ができ、従来のサンゴや有孔虫を用いた手法では不可能であった年内変動パターンの復元、シャコガイの日輪スケールの分析により初めて明らかとなった。

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 8 件)

全て査読有り

(1) Masako Hori, Yuji Sano, Akizumi Ishida, Naoto Takahata, Kotaro Shirai, Tsuyoshi Watanabe (2015) Middle Holocene daily light cycle reconstructed from the strontium/calcium ratios of a fossil giant clam shell. *Scientific Reports*, 5, 8734, doi:10.1038/srep08734

(2) Yuji Sano, Kosaku Toyoshima, Akizumi Ishida, Kotaro Shirai, Naoto Takahata, Tomohiko Sato, Tsuyoshi Komiya (2014) Ion microprobe U-Pb dating and Sr isotope measurement of a protoconodont. *Journal of Asian Earth Sciences*, 92, 10-17, doi:10.1016/j.jseaes.2014.05.024

(3) Kazuto Ohmori, Tsuyoshi Watanabe, Masaharu Tanimizu, Kotaro Shirai (2014) Lead concentration and isotopic composition in the Pacific sclerosponge (*Acanthochaetetes wellsi*) reflects environmental lead pollution. *Geology*, 42, 287-290, doi: 10.1130/G34316.1

(4) Kotaro Shirai, Bernd R. Schöne, Tsuzumi Miyaji, Pascal Radarmacher, Richard A. Krause Jr., Kazushige Tanabe

(2014) Assessment of the mechanism of elemental incorporation into bivalve shells (*Arctica islandica*) based on elemental distribution at the microstructural scale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 126, 307-320, doi:10.1016/j.gca.2013.10.050

(5) 白井厚太郎 (2014) 微小領域分析法を用いた生物起源炭酸塩骨格の微量元素変動メカニズムに関する研究 (2013年度日本地球化学会奨励賞受賞記念論文), *地球化学*, 48, 147-167 (総説)

(6) Yosuke Amano, Masayuki Kuwahara, Toshiro Takahashi, Kotaro Shirai, Kodai Yamane, Hiroshi Amakawa, Tsuguo Otake (2013) Otolith elemental and isotopic composition as a natal tag for Biwa salmon *Oncorhynchus masou* subsp. in Lake Biwa. *Aquatic Biology*, 19, 85-95. doi:10.3354/ab00520

(7) Koji Seike, Kotaro Shirai, Yukihiisa Kogure (2013) Disturbance of shallow marine soft-bottom environments and megabenthos assemblages by a huge tsunami induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake. *PLOS ONE*, 8, e65417, doi:10.1371/journal.pone.0065417

(8) Takashi Kitagawa, Toyoho Ishimura, Rena Uozato, Kotaro Shirai, Yosuke Amano, Akira Shinoda, Tsuguo Otake, Urumu Tsunogai, Shingo Kimura (2013) Otolith  $\delta^{18}\text{O}$  of Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* as an indicator of ambient water temperature. *Marine Ecology Progress Series*, 481, 199-209, doi:10.3354/meps10202

[学会発表] (計 2 件)

Taro Komagoe, Tsuyoshi Watanabe, Tsuzumi Miyaji, Kotaro Shirai, Atsuko Yamazaki, Strong Typhoon in 2005 Recorded in the Shell Growth Lines and Geochemical Signals of *Tridacna Maxima* from Okinotori Island, Japan, Asia Oceania Geoscience Society 11<sup>th</sup> Annual Meeting, 2014年6月30日, Hokkaido, Sapporo

Mayumi Suzuki, Tsuyoshi Watanabe, Atsuko Yamazaki, Tsuzumi Miyaji, Kazuto Ohmori, Kotaro Shirai, Multidecadal Climate Reconstruction Using Sclerochronological and Geochemical Approaches on Freshwater Peal Mussels in Hokkaido, Japan, Asia Oceania Geoscience Society 11<sup>th</sup> Annual Meeting, 2014年6月30日, Hokkaido, Sapporo

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白井 厚太郎 (SHIRAI, Kotaro)

東京大学・大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター・助教

研究者番号：70463908