

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11619

研究課題名(和文)石西礁湖のサンゴ年輪を用いた過去1500年間の表層海洋環境の復元

研究課題名(英文) Reconstruction of surface ocean environments for last 1.5 ka using coral annual bands collected from Sekisei Lagoon

研究代表者

阿部 理 (ABE, Osamu)

名古屋大学・環境学研究科・助教

研究者番号：00293720

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)：本研究は、琉球列島石西礁湖および周辺海域において採取した複数の現生および化石サンゴ年輪試料の酸素同位体比および金属元素濃度比による水温と塩分の復元を行った。また、U-Th法による生息年代の再評価を行った。U-Th法による年代決定の結果、二つの長尺サンゴ年輪試料がほぼ同期間に生息していたことが判明したため、環境復元の再現性に関する厳密な評価を実施した。中世気候異常期の水温は機関全体を通して、夏季は現在よりも約2℃低く、冬季は約1℃高かったことがわかった。また西暦1040年に気候のレジームシフト、具体的には、東アジア夏季モンスーンの弱化があったことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中世気候異常期の海洋環境を連続かつ高時間分解能で復元した例はこれまでになく、従来様に温暖とみなされていた海水温が、年平均では現在よりも低く、年較差が現在よりも小さい状態が長期間継続していたことが初めて明らかとなった。

同地点・同時期に生息した複数の長尺サンゴ年輪試料の同位体および金属元素分析を行った例はこれまでになく、本研究が初めての試みである。その結果、サンゴ年輪による水温復元には高い信頼性があることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We reconstructed surface water temperature and salinity using ratios of oxygen isotope and minor metal for living and fossil coral annual bands collected from the Sekisei Lagoon in the Ryukyu Islands. The U-Th dating method was used for re-evaluation of the age determination. The U-Th dating results indicated that the two long-lived fossil coral samples were inhabited during almost the same period, so a rigorous evaluation of the reproducibility of environmental reconstruction was conducted.

The water temperature during the medieval climatic anomaly was found to be about 2 deg. C lower in summer and 1 deg. C higher in winter than at present throughout the habitat period. It was also found that there was a climatic regime shift in C.E. 1040, specifically a weakening of the East Asian Summer Monsoon.

研究分野：環境学

キーワード：サンゴ年輪 古環境復元 古海洋

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の途上である現在の気候は、地球が本来持つ自然の変動に人為起源の要因が積み重なったものである。従って気候変動の将来予測を行うためには、地球本来の気候変動を知る必要があり、そのための最適な方法の一つとして、気候の長期変動の解明を挙げることができる。長期変動のうち、現在から約 100 年前までは気象・海洋観測データが充実し、氷期 - 間氷期サイクルに代表される数千年～数万年規模の変動については、海底堆積物や両極域の氷床コアの化学分析などによって、いずれも質の高いデータセットを用いての解析や数値計算が可能となっている。一方、両者の中間期にあたる 100 年～数千年間については、利用できる情報が限定されることから、たとえば全球規模の数値計算による復元を、高い正確さで行えるまでには至っていない。IPCC 第五次報告書によれば、紀元 950 年から 1250 年にかけて中世気候異常期 (MCA) と呼ばれる温暖な時期があり、紀元 1450 年から 1850 年にかけて小氷期 (LIA) とよばれる寒冷な時期があったことは確実視されているものの、アジアモンスーン域では MCA に比べ LIA がより乾燥していたことについては中程度の信頼性にとどめている。さらに、最近になって、紀元 536 年から 665 年の期間に古代末期小氷期 (LALIA) と呼ばれる全球的な寒冷期があったことが提唱された (Büntgen et al., 2016; Nature Geoscience) が、いまだ結論には至っていない (Helama et al., 2017; Nature Geoscience)。

研究代表者は琉球列島の石垣島と西表島間の石西礁湖において化石サンゴ年輪試料の採取を実施し、石垣島北部で採取した現生サンゴ年輪試料と併せてすべての酸素同位体比を約一か月の時間分解能で分析し、断続的ながら過去 1500 年間の記録を得た (当時)。サンゴ年輪の酸素同位体比は、水温と海水の酸素同位体比の二成分で決定される。また、海水の酸素同位体比は塩分と高い正の相関を示し、サンゴの酸素同位体比が低いことは、水温が高いまたは塩分が低いことを意味する。石西礁湖のサンゴ年輪の酸素同位体比極大値が見られた 1200 年付近は、MCA 期に相当し、インドネシア沖の海洋堆積物中の有孔虫殻より復元された海水の酸素同位体比 (Oppo et al., 2009; Nature) および屋久杉年輪セルロースの酸素同位体比 (佐野; 私信) のいずれにおいても過去 1500 年間での極大値、すなわち最乾期であることがわかった。IPCC 第五次報告書にはアジアモンスーン域では MCA が LIA よりも湿潤であるとされているが、サンゴ年輪の酸素同位体比記録はその傾向に反する。しかし、酸素同位体比記録のみでは判別はできない。

2. 研究の目的

そこで、本研究では石西礁湖の水温と塩分を復元するために、海水温のみに支配される骨格の化学成分である、ストロンチウム / カルシウム比 (Sr/Ca) およびマグネシウム / カルシウム比 (Mg/Ca) の分析を行うことを目的とした。

これまでに公表された 57 編のサンゴ年輪に関する論文をまとめた Tierney et al. (2015; Paleoceanography) によれば、フィジーで採取された 1617 年以降 380 年間のサンゴ年輪が連続記録としては最長であるが (Linsley et al., 2006; G-cubed)、石垣島で採取された本研究で用いる現生サンゴは 1550 以降 460 年間の連続記録を有しており、これまでで最も長期の記録であり、小氷期を大きくカヴァーした初めての研究となる。

サンゴ年輪は、海洋堆積物や樹木年輪と異なり、季節変化をとらえることができるため、小氷期の冬期と夏期それぞれの水温と塩分の変化を明らかにできる意義は大きい。例えば、Chen et al. (2015; QSR) のような東アジア陸域の乾湿の変化を東アジアの夏期モンスーンの変動に関連付けた研究に比べ、冬期モンスーンの変動を論じた研究は少ない。

また、これまで異なる年代に生息した複数のサンゴ年輪を組み合わせて過去約 1100 年間の断続的な水温変化を酸素同位体比から明らかにした例として、Cobb et al. (2003; Nature) による中部熱帯太平洋のパルミラ島における研究がある。彼らは化石サンゴ試料を、地震隆起によって離水したサンゴ礁から得ているが、離水したサンゴ骨格は降雨等の淡水と接触することにより、容易に方解石へと再結晶し、その際に金属濃度や酸素同位体比は初生値から大きく変化する可能性が高い。本研究で用いた化石サンゴ試料はすべて石西礁湖の水深 5m より大きい地点に点在する斃死した群体であり、斃死後も海水中に存在していたため、再結晶のリスクはほとんどない。また、試料群のカヴァーする期間も 1500 年間とさらに長期に及ぶ。

3. 研究の方法

本研究に用いるサンゴ年輪試料は、申請者らがこれまで琉球列島石垣島で採取した現生試料 (現在～450 年前) および石西礁湖から採取した化石試料 (750～1500 年前; 当時) であり、すべての試料について、酸素同位体比の分析が完了している。新たに同試料の Sr/Ca および Mg/Ca の分析を実施し、金属濃度比と酸素同位体比から過去 1500 年間の水温と塩分の変化を一ヶ月の時間分解能で復元する。紀元 535 年のインドネシアのクラカタウ火山の噴火をトリガーとして生じたとする古代末期小氷期については、その存在の有無を水温記録から検証する。中世気候異常期と小氷期については、琉球列島における温度変化の大きさと持続期間を定量的に評価する。さらに、これらの各時期について、琉球列島のみならず、中国を中心とした東アジア大陸部の乾

湿記録や、日本各地の樹木年輪セルロースの酸素同位体比に基づく乾湿記録、西部熱帯太平洋の海洋堆積物から得られた水温と塩分（海水酸素同位体比）の記録などと比較し、海洋を含む広域東アジアの過去 1500 年間の気候の変遷を、季節変化を含めて明らかにする。

また、各期についてそれぞれ数百年間の連続記録が得られることから、長期傾向および数年から数十年スケールの周期性について、パワースペクトルやウェーブレット等の時系列解析のほか EOF 解析、空間スペクトル解析を行い、モンスーン変動、ENSO、PDO など現在の東アジア域の気象・気候の支配要因であるこれらの周期変動が過去 1500 年間でどのように変化してきたかについて明らかにする。

4. 研究成果

まず、サンゴ骨格年輪の Sr/Ca および Mg/Ca の高速・高精度分析法の開発を行った。無機定量分析化学における金属分析は、一般に、試料濃度を求めることを目的として、厳密に秤量を行うが、本研究は少量金属である Sr や Mg の、主成分である Ca との比を求めることのみを目的とするため、人手と時間のかかる天秤による秤量過程をなくした。化石サンゴ試料分析には、定量マイクロパチュラ法を導入し、その後実施した、現生サンゴ試料の高分解能分析では、定量削り出し法を導入し、コスト低減を達成した。なお、いずれの手法も秤量誤差が約 10 % 生じることがわかった。サンゴ骨格試料をそのまま溶解した硝酸溶液中の Sr/Ca や Mg/Ca を ICP 発光分光分析によって決定する際、Ca 濃度が測定結果に影響を与えることがあるが、Ca 濃度のばらつきが 10% 程度である場合はその影響はほとんど見られないことを確認した。以上の検討の結果、従来法と同程度の再現性、 $1\sigma = 0.3\%$ 、を維持したまま高速分析できるようになった。

本方法により、化石サンゴ 2 群体について計 8,000 試料の Sr/Ca および Mg/Ca の分析を総合地球環境学研究所の ICP 発光分光分析計を用いて実施した。

本研究の対象となる化石サンゴは、放射性炭素による年代測定によって、1) 9~12 世紀に生息し約 300 年輪を有す中世試料および 2) 5~7 世紀に生息し約 200 年輪を有す古代試料であることがわかっている。本研究では Sr/Ca および Mg/Ca 分析に並行して、U-Th 法による、より誤差の小さい年代決定を、国立台湾大学の C.-C. Shen 博士に依頼して実施した。その結果、中世試料については放射性炭素年代と誤差範囲内で一致していたが、古代試料については、約 400 年、放射性炭素年代よりも新しい結果となった。そこで後者について、以前に放射性炭素年代を行った機関とは別に、改めて放射性炭素年代測定を依頼して実施したところ、今度は U-Th 年代と誤差範囲内で一致した。以上よりこれまで古代と考えていた試料については中世に生息していたものであり、放射性炭素法でも U-Th 法でも中世であった試料とほぼ同時期に生息していたことが明らかとなった。したがって当初目的よりも全体の復元期間は短縮せざるを得なくなったものの、過去に同地点・同時期の長尺サンゴ年輪試料の同位体および金属元素分析を並行して行った例は現生でもなく、結果として本研究が世界で初めてとなった。そこで本研究では新たに、従来の単一群体試料による環境復元に比べ統計的信頼性が向上した分析結果を提供すること、および水温・塩分プロキシとしての酸素同位体比・Sr/Ca および Mg/Ca などの結果について、群体間の差を長期間にわたって比較することによりプロキシとしての厳密評価を行った。

これまで得られた石垣島の現生サンゴ記録、観測水温、観測塩分および海水の酸素同位体比より Sr/Ca と海水温の関係式、酸素同位体と海水温および海水酸素同位体比の関係式を再構築し、Abe et al. (2009) によって得られた海水酸素同位体比と塩分の関係式と組み合わせることで、化石サンゴ年輪の Sr/Ca および酸素同位体比を水温と塩分へと変換した。なお、年輪データを時系列変換するための方法として動的時間伸縮法 (DTW 法) を新たに導入した。従来は、夏季と冬季の水温極値を水温指標である Sr/Ca 比の極値と対応させ、極値間は等分配する方法が一般に用いられているが、成長速度が年間を通して一定、の仮定を必要としており、成長速度が季節変化すると、極値間のサンゴ記録が現実の成長時点とずれる。世界のサンゴ礁のうち、最も高緯度に生息する琉球列島では、実際に塊状ハマサンゴの成長に季節変化があることが確認されていることから、一定成長の仮定を必要としない DTW 法を適用した。

得られた中世気候異常期の水温は期間全体を通して、夏季は現代よりも約 2 °C 低く、冬季は現代よりも約 1 °C 高く、さらに、西暦 1040 年を境に明瞭に上昇したことがわかった。その上昇量は年平均で 0.9 °C、夏季平均で 0.7 °C、冬季平均で約 1.1 °C であった。また、塩分も西暦 990 年を境に有意に上昇したことが明らかとなり、その上昇量は年平均、夏季平均、冬季平均いずれも 0.8 ‰ であった。

本研究で見られた西暦 1040 年以降の水温と塩分の上昇は、Liu et al. (2014) が示した東アジア夏季モンスーン (EASM) の弱体化と調和的であった。本研究海域においては梅雨期の降水量の低下が塩分の上昇をもたらすとともに、雲量の低下によって海水温の局所的な上昇につながったと考えられる。また、ほぼ同時期に生息した 2 つの化石サンゴの 200 年間の重複データを比較したところ、Sr/Ca については平均値・周期性とも一致した結果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Fujiki Tetsuichi, Inoue Ryuichiro, Honda Makio C., Wakita Masahide, Mino Yoshihisa, Sukigara Chiho, Abe Osamu	4. 巻 65
2. 論文標題 Time series observations of photosynthetic oxygen production in the subtropical western North Pacific by an underwater profiling buoy system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Limnology and Oceanography	6. 最初と最後の頁 1072 ~ 1084
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lno.11372	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kodama Satoshi, Takayanagi Hideko, Yoshii Kosuke, Nhu Ha Thuy Thi, Asami Ryuji, Abe Osamu, Iryu Yasufumi	4. 巻 25
2. 論文標題 Carbon and Oxygen Isotope Records of Tridacna squamosa Shells from two Different Latitudes in the Ryukyu Islands	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Paleontological Research	6. 最初と最後の頁 79-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2517/2020PR003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Mino Y., Sukigara C., Honda M. C., Kawakami H., Wakita M., Sasaoka K., Yoshikawa C., Abe O., Kaiser J., Kimoto K., Kitamura M., Fujiki T., Matsumoto K., Saino T.	4. 巻 125
2. 論文標題 Seasonal and Interannual Variations in Nitrogen Availability and Particle Export in the Northwestern North Pacific Subtropical Gyre	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JC015600	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Katsuta Nagayoshi, Miyata Yoshiki, Murakami Takuma, Mino Yoshihisa, Naito Sayuri, Yasuda Koji, Ochiai Shinya, Abe Osamu, Yasuda Atsushi, Morimoto Maki, Kawakami Shin-ichi, Nagao Seiya	4. 巻 102
2. 論文標題 Interannual changes in radiocesium concentrations in annually laminated tufa following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Geochemistry	6. 最初と最後の頁 34 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apgeochem.2019.01.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jurikova Hana、Abe Osamu、Shiah Fuh-Kwo、Liang Mao-Chang	4. 巻 -
2. 論文標題 New constraints on biological production and mixing processes in the South China Sea from triple isotope composition of dissolved oxygen	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biogeosciences Discussion	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/bg-2020-448	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 阿部理, 森本真紀, 浅海竜司, 中塚武
2. 発表標題 石垣島化石サンゴ年輪を用いた中世気候異常期の海水温および塩分の復元
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥平早香・浅海竜司・高柳栄子・阿部理・井龍康文
2. 発表標題 石垣島で採取されたサンゴ化石による中期完新世の古環境復元
3. 学会等名 日本古生物学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 阿部 理・森本真紀	4. 発行年 2021年
2. 出版社 臨川書店	5. 総ページ数 288
3. 書名 水温・塩分-サンゴ in 気候変動から読みなおす日本史 第2巻	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
その他の国・地域	National Taiwan University			