

令和 4 年 7 月 5 日現在

機関番号：97702

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K13447

研究課題名(和文) 造礁サンゴを用いた環境復元から解明する中東地域の気候変動と社会情勢の関係

研究課題名(英文) Coral proxy archives infer relationships between climate changes and social stabilities in the Near East

研究代表者

渡邊 貴昭 (Watanabe, Takaaki)

特定非営利活動法人喜界島サンゴ礁科学研究所・研究部門・特別研究員

研究者番号：00852310

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、本地域で採取された造礁サンゴ骨格を代替指標とし、中東地域での乾燥度や砂嵐を伴う地域風(シャマル)の変遷を復元することを目指した。気候要素を高精度に復元するために、塩分指標の算出法や河川流量の指標の分析方法を新たに確立した。さらに、人為的要因による現在の温暖気候と自然要因による過去の温暖気候を比較することで、現在の中東地域の環境が特異であるかどうかを検証した。オマーン国北東部に採取された造礁サンゴ骨格を用いて、現在と同程度に温暖であった12万年前の気候要素を復元した。その結果、当時は現在の記録で確認されるよりも冬季モンスーンが強く、地域風も強かった可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、サンゴ骨格を用いて古環境復元を行う際に最も頻りに用いられる指標の1つである塩分指標の新たな計算方法を確立することに成功した。また、過去の洪水や干ばつを復元することができる河川流量指標の簡便かつ低コストな分析手法を確立した。本研究で開発された2つの手法は、中東地域の古環境復元のみならず、世界中の地域を対象としたサンゴ骨格を用いた古環境復元への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：This research focused on reconstructing the past aridity and strong wind event with dust storms, so-called shamal, using the coral skeletal proxy. For accurate reconstruction, this study established a new method to calculate seawater oxygen isotope (for salinity proxy) and to analyze Ba/Ca ratio in the coral skeleton (for river runoff proxy). Furthermore, this study compared the present warm climate caused by anthropogenic forcing with the past warm climate caused by natural factors in order to examine whether the present environment in the Middle East region is unique or not. Using reef-building coral skeletons collected in northeastern Oman, this study reconstructed the strong wind event in the past warming era (ca 120 ka). The coral record revealed that the past winter monsoon and shamal wind was relatively stronger than the present.

研究分野：古気候・古海洋学

キーワード：サンゴ オマーン アラビア半島 Sr/Ca比 Ba/Ca比 酸素同位体比

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

中東地域は、チグリス・ユーフラテス川流域を中心に人類史の中でも早い時期から文明が発展し、交易の中心として文化・経済の重要な地域であり続けていた。しかし、紛争・戦争の多発や難民の増加などに代表されるように、近年の中東地域の社会情勢は不安定である。この近年の不安定な社会情勢には、気候変動の寄与が指摘されている。例えば、干ばつや砂嵐の多発といった気候変動は健康被害や農作物の不作を引き起こすため、社会情勢が不安定になる一因となりうると考えられている。近年の気候変動と社会情勢を比較するには、過去に発生した気候変動の影響を検証できる連続した観測記録が必要となる。しかしながら、不安定な社会情勢ゆえに本地域の観測記録は不足しており、近年の社会情勢と気候変動の関係の詳細は解明できていない。

2. 研究の目的

中東地域で採取された造礁サンゴを用いて、干ばつと砂嵐を伴う地域風(シャマール)の頻度および強さを復元することで観測記録の不足を補い、近年の中東地域の気候変動の実態を解明する。

3. 研究の方法

(1) Ba/Ca 比分析手法の確立

サンゴ骨格中の河川流量指標(バリウム・カルシウム比: Ba/Ca 比)を高精度かつ少ない粉末量で、誘導結合プラズマ発光分光分析計を用いて分析するための手法を開発した。サンゴ骨格中のバリウム濃度は、サンゴ骨格から得られる古環境指標として一般的に分析されているストロンチウムやマグネシウムと比べて 1000 倍濃度が低い。このため、Watanabe et al. (2020)などで紹介されている一般的な手法では、サンゴ骨格中のバリウムを誘導結合プラズマ発光分光分析計で検出することはできない。そこで、バリウムの分析シグナルを増幅するために、超音波ネブライザーを誘導結合プラズマ発光分光分析計に導入した。超音波ネブライザーは、溶液を振動子に接触させることで高い噴霧効率を有する。また、噴霧された試料を加熱・冷却することで、試料溶液を脱溶媒する。この高い噴霧効率と脱溶媒により、高感度で微量元素濃度を分析することができる。

まず、Ba/Ca 比の分析条件を確立するために、均質なサンゴ骨格粉末(サンゴ骨格の標準試料, JcP-1)を硝酸で溶解し、超純水を用いてさまざまな濃度に希釈した試料溶液を作成し、テスト分析を実施した。このテスト分析の結果をもとに、最適な分析条件を決定した。決定した条件を用いて、均質なサンゴ粉末を 90 分間で複数回分析し、分析の精度および確度を計算した。また、およそ 1 年間で分析された標準物質の結果をまとめ、長期間にわたる精度を検証した。

(2) モンテカルロ法を用いた海水温および海水の酸素同位体比の算出

サンゴ骨格試料から過去の海水温および海水の酸素同位体比(塩分変動の指標)を計算するためには、サンゴ骨格中の酸素同位体比およびストロンチウム・カルシウム比(Sr/Ca 比)を用いる。この海水温および塩分変動を計算する際に生じる誤差をモンテカルロ法により簡便に計算する手法を検証した。サンゴ骨格中に含まれる Sr/Ca 比および酸素同位体比の分析には誤差が生じる。また、海水温と両指標との関係式も同様に誤差を含んでいる。さらに、近年ではサンゴ群体間において Sr/Ca 比の変動と絶対値に差異がある可能性が指摘されている。そこで、分析誤差や換算式の誤差、群体間の差異を正しく検証するために、モンテカルロ法を用いて海水温および海水の酸素同位体比の変動の分布を推定することで誤差を算出した。

Sr/Ca 比から算出した海水温変動をサンゴ骨格中の酸素同位体比から取り除く計算には、センタリング法とモンテカルロ法を組み合わせた手法を用いた。海水の酸素同位体比の計算には、各指標の分析誤差や海水温変動を算出する際の計算誤差が伝播する。とくに、Sr/Ca 比から海水温へ換算する際に用いられる換算式の切片の誤差は、他の誤差と比べて海水の酸素同位体比の計算誤差への影響が非常に大きいことが知られている。そこで、各指標の平均値を“0”にする(センタリング法, Cahyarini et al., 2008)ことで、この換算式の切片の誤差がもたらす影響を小さくした。また、各計算の過程で生じる誤差を正しく評価するために、指標や換算式の傾きに対して分析誤差や傾きの算出誤差に従う乱数を足して、複数回計算することで、海水の酸素同位体比の誤差範囲を確立分布として計算した(モンテカルロ法)。

さらに、上述の計算および誤差推定法を応用し、複数のサンゴ骨格コア試料から分析した年ごとの Sr/Ca 比および酸素同位体比記録から、平均を計算するための手法を開発した。本手法によって、化学分析の誤差、海水温換算式の誤差、コア間の変動の差異そして年解像度記録を分析する際の時間軸の誤差を含めて計算できるようになった。

(3) オマーン産の現生および化石サンゴ骨格試料への応用

上述の算出法を用いて、オマーン・北東部で採取された現生および化石サンゴ骨格試料から海水温および海水の酸素同位体比を計算し、地域風の強さの変動が現在と過去とで異なるかどうかを検証した。本研究に用いた現生サンゴ試料は 26 年間分の古環境を記録しており、化石サンゴ試料は U-Th 年代測定によっておよそ 12 万年前の試料であることが確認された。本研究試料から復元された海水温および海水の酸素同位体比の変動のうち、冬期(12~2月)の平均値を計算し、現在と過去との冬期の記録の標準偏差の差を算出した。

4. 研究成果

(1) Ba/Ca 比分析手法の確立

さまざまな濃度の試料溶液を誘導結合プラズマ発光分光分析計と超音波ネブライザーを用いたテスト分析では、カルシウム濃度が 9~10 mg/L で最も精度よく分析できることがわかった。9 mg/L のカルシウム濃度で均質な試料溶液 (JCp-1) を 90 分間分析した結果、繰り返し分析の誤差は $\pm 0.17 \mu\text{mol/mol}$ (標準偏差, 1SD, 図 1) であった。およそ 1 年間で分析された標準物質の誤差も $\pm 0.17 \mu\text{mol/mol}$ (標準偏差, 1SD, 図 1) 以内であった。この分析誤差は先行研究で報告されている Ba/Ca 比の変動幅と比べて非常に小さい。また、9 mg/L のカルシウム濃度の試料溶液を作成するために必要なサンゴの粉末試料はおよそ 0.13 mg である。一般的に、深さ 1.0 mm, 幅 1.0 mm, 1.0 mm 間隔でサンゴ骨格から粉末試料を採取した場合には、1 mg 程度の粉末試料を採取でき、これは 1~2 ヶ月程度の時間解像度を有する。したがって、採取した粉末試料から、骨格の酸素同位体比・Sr/Ca 比・Ba/Ca 比の月解像度分析に必要な試料量を十分に確保できると考えられる。本研究により、海水温変動と塩分変動と河川流量を同じ時間解像度で迅速に分析することが可能となった (Watanabe et al., 2021)。

(2) モンテカルロ法を用いた海水温および海水の酸素同位体比の算出

本研究では、モンテカルロ法を用いて誤差伝播を計算した。モンテカルロ法を用いた方法で算出した誤差の値は従来の方法(誤差伝播を直接計算する)で算出したものと同様の結果となった。またモンテカルロ法を用いることで、個々のデータに対して固有の誤差を計算することが可能となった (Watanabe et al., 2022)。さらに、このモンテカルロ法を応用して複数のサンゴ骨格コア試料から復元記録の平均を求められるようになった。計算に先立って、複数のサンゴ骨格コア試料から分析された結果のうち各年においてランダムにデータを抽出し、海水温と海水の酸素同位体比を計算することで Sr/Ca 比および酸素同位体比記録のコア間の差異を含めて計算できるようになった (図 2, Zinke et al., 2022)。

(3) オマーン産の現生および化石サンゴ骨格試料への応用

オマーン・北東部で採取された現生サンゴ骨格試料からは、先行研究によって 2013 年から 1987 年までの 26 年間の海水温および海水の酸素同位体比が復元されている (Watanabe et al., 2017; Watanabe et al., 2019a)。冬期の海水の酸素同位体比記録は、マス

カットで観測された風速記録から推定したシャマルの発生日数とよく相関しており (Watanabe et al., 2019b) 冬期の海水の酸素同位体比からシャマルの発生日数を推定できる可能性がある。この結果を 12 万年前の化石サンゴ骨格試料に応用した結果、12 万年前のオマーン北東部

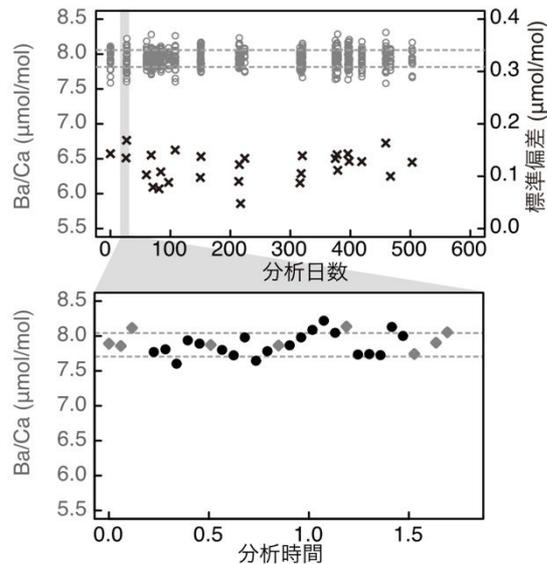


図 1. 超音波ネブライザーと誘導結合プラズマ発光分光分析計を用いた JCp-1 中の Ba/Ca 比の分析結果。上図は、長期間にわたる JCp-1 中の Ba/Ca 比の分析結果 (白丸) を示す。X 印は各分析回における Ba/Ca 比の標準偏差を示す。下図は、90 分間の JCp-1 中の Ba/Ca 比の連続測定の結果を示す。

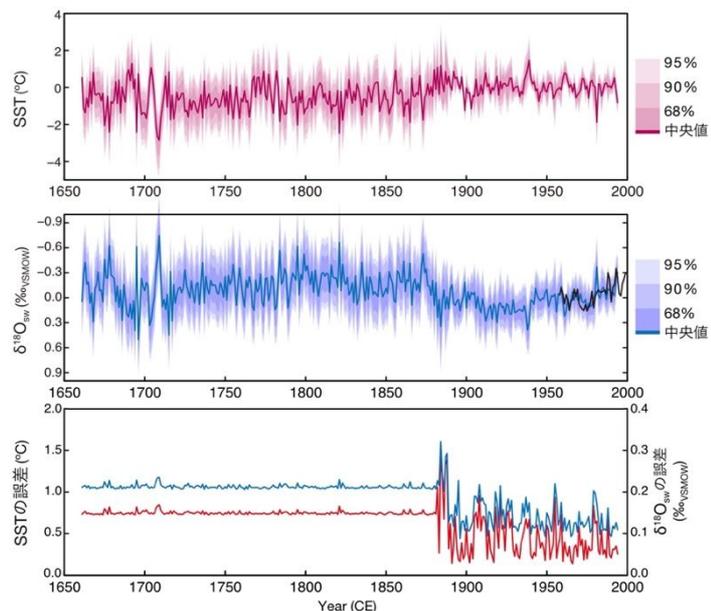


図 2. 3 本のサンゴ骨格コア試料から復元した海水温 (上図)、海水の酸素同位体比 (中央)、海水温 (下図; 赤色)・海水の酸素同位体比 (下図; 青色) の計算誤差。

の冬季は現在よりも湿潤な環境であったが、より数年規模の変動幅には有意差が認められなかった。この結果は、過去の温暖な時代よりも現在のシャマルルの発生日数が少なかった、あるいは規模が小さかった可能性を示唆している。一方で、より社会への影響が大きい数年ごとの変動においては、現在と過去との間で差は確認されなかった。12 万年前は現在と同程度に暖かい時代であるが、ヨーロッパ地域は現在よりも温暖な環境であったことが気候モデルの結果から指摘されており、陸と海との間の気温勾配が現在とは異なっていた可能性がある。したがって、今後の地球温暖化が引き起こす気温および海水温の不均質な上昇が、今後のシャマルルの強さや日数を変化させる可能性も認められる。今後さらなる発展研究によって、人為起源の強制力が中東地域の乾燥度の変遷や砂嵐を伴うシャマルルの変化に与える影響が詳細に議論されることが期待される。また、本研究成果は社会情勢と気候変動の関係を紐解く知見となりえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Watanabe Takaaki K., Watanabe Tsuyoshi, Ohmori Kazuto, Yamazaki Atsuko	4. 巻 18
2. 論文標題 Improving analytical method of Sr/Ca ratios in coral skeletons for paleo <scp>SST</scp> reconstructions using <scp>ICP OES</scp>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Limnology and Oceanography: Methods	6. 最初と最後の頁 297 ~ 310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lom3.10357	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 Kahng Samuel E., Watanabe Takaaki K., Hu Hsun-Ming, Watanabe Tsuyoshi, Shen Chuan-Chou	4. 巻 39
2. 論文標題 Moderate zooxanthellate coral growth rates in the lower photic zone	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Coral Reefs	6. 最初と最後の頁 1273 ~ 1284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00338-020-01960-4	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 Ito Saori, Watanabe Tsuyoshi, Yano Megumi, Watanabe Takaaki K.	4. 巻 10
2. 論文標題 Influence of local industrial changes on reef coral calcification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-020-64877-6	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 Watanabe Takaaki K., Watanabe Tsuyoshi, Pfeiffer Miriam, Hu Hsun Ming, Shen Chuan Chou, Yamazaki Atsuko	4. 巻 48
2. 論文標題 Corals Reveal an Unprecedented Decrease of Arabian Sea Upwelling During the Current Warming Era	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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) 10.1029/2021GL092432	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 Fousiya A. A., Alberti Matthias, Achyuthan Hema, Chakraborty Supriyo, Watanabe Takaaki K., Gandhi Naveen, Reddy A. Phanindra, Lone Aasif Mohmad	4. 巻 -
2. 論文標題 Anomalous 180 signal in a giant clam shell (<i>Tridacna maxima</i>) from the Lakshadweep Archipelago, India: signature of thermal stress during a coral bleaching event	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Coral Reefs	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) 10.1007/s00338-022-02263-6	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 Watanabe Takaaki K., Pfeiffer Miriam	4. 巻 23
2. 論文標題 A Simple Monte Carlo Approach to Estimate the Uncertainties of SST and $\delta^{18}O$ Inferred From Coral Proxies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	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) 10.1029/2021GC009813	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 該当する

1. 著者名 Watanabe Takaaki K., Watanabe Tsuyoshi, Ohmori Kazuto, Yamazaki Atsuko	4. 巻 22
2. 論文標題 Coral Ba/Ca Analysis Using ICP OES With an Ultrasonic Nebulizer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	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) 10.1029/2021GC009646	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 該当する

1. 著者名 Zinke Jens, Watanabe Takaaki K., Ruhs Siren, Pfeiffer Miriam, Grab Stefan, Garbe-Schonberg Dieter, Biastoch Arne	4. 巻 18
2. 論文標題 A 334-year coral record of surface temperature and salinity variability in the greater Agulhas Current region	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Climate of the Past	6. 最初と最後の頁 1453 ~ 1474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/cp-18-1453-2022	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 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------