

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04708

研究課題名(和文) 過去200年間の地球温暖化における海洋の窒素収支変動の復元

研究課題名(英文) Variation in Marine nitrogen budgets during the last 200-year global warming

研究代表者

山崎 敦子 (Yamazaki, Atsuko)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：40723820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年、地球温暖化に伴い海洋生物に必要な窒素が減少している可能性が議論されてきた。本研究では、温暖化に伴う海洋窒素収支の変動を、造礁サンゴ骨格の窒素同位体比測定法を用いて明らかにした。その結果世界最大の窒素固定海域である北大西洋のカリブ海、中央太平洋のハワイ、アラビア海に面するオマーンを比較し、温暖化に伴って海洋表層の窒素量は減少している傾向を示した。また、海洋表層においては水温の十年から数十年規模振動とともに発生する深層水の表層への供給が熱帯・亜熱帯域において重要な窒素起源であることが示唆され、気候の十年規模の周期変動の変遷によって表層の栄養塩濃度は支配されることも明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、人為起源の二酸化炭素に起因する地球温暖化によって、海洋の窒素量が減少している可能性が議論されてきましたが、十分な証拠がありませんでした。窒素は生物にとって必要不可欠な元素であり、海洋表層の窒素の存在量の均衡は生態系に大きな影響を与えます。本研究はサンゴ礁海域において地球温暖化に伴う海洋表層の窒素の存在量の変化を示したものであり、温暖化が生態系に不可欠な元素の供給量を変化させることを示す重要なデータを提供しました。

研究成果の概要(英文)：The possibility that nitrogen, essential for marine life, is declining in response to global warming has been discussed. This study investigated changes in the ocean nitrogen budget associated with global warming using nitrogen isotope ratio measurements of reef-building coral skeletons. The results showed that the amount of nitrogen in the ocean surface layer tends to decrease with warming by comparing the world's largest nitrogen-fixing oceans, the Caribbean Sea in the North Atlantic, Hawaii in the Central Pacific, and Oman, which faces the Arabian Sea. In addition, the supply of deep to the surface water with decadal to multi-decadal oscillations in water temperature is suggested to be an essential source of nitrogen and phosphorus in tropical and subtropical regions.

研究分野：サンゴ礁地球環境学

キーワード：海洋窒素収支 地球温暖化 サンゴ骨格 窒素同位体比

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

産業革命以降、大気中の二酸化炭素は著しく増大した。研究海洋の主要な栄養塩である窒素は生物生産を支え、大気中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) を海洋に固定するために重要な元素である (Falkowski, 1997)。現在の海洋の約 60% は窒素の少ない貧栄養海域であり、海洋全体に対する窒素の主な供給源は窒素固定生物 (溶存窒素ガスから窒素化合物を合成する) が担っている。またアラビア海や東部赤道太平洋の湧昇域で発生する貧酸素水塊では海水中の硝酸から酸素を取り出し、窒素ガスに換える脱窒が盛んにおこっている。海洋の窒素収支は主に窒素固定と脱窒の 2 つのプロセスによって決まる。海底堆積物による温暖期の記録や、海洋の成層化によって現代の地球温暖化において主要な栄養塩窒素化合物である硝酸が海洋から消えつつあるのではないかと危惧されてきた (Codispoti, 1995)。海洋の窒素循環のトレーサーとして海水中の無機態窒素および有機態窒素の窒素同位体比は広く活用されてきた。これまでの海洋の窒素収支の知見は海水中の窒素同位体比測定が可能になった 1970 年代以降の海洋観測が数万年スケールの海底堆積物の窒素同位体比によるものであり、現在進行している温暖化と同じスケールでの記録は存在しなかった。そこで、海水中の窒素同位体比の記録計として造礁サンゴ骨格に着目した。熱帯・亜熱帯域に生息する造礁サンゴは炭酸塩骨格に年輪を刻み、生息期間である過去数百年間の海洋環境を詳細に記録しており、その骨格中の微量の有機物の窒素同位体比を分析することにより、海洋表層の窒素起源の変遷を明らかにすることが可能である (Yamazaki et al., 2011a, b) よって本研究では、現生の造礁サンゴの窒素同位体比分析を用いた温暖化に伴う各海域の窒素収支の変動を復元する

### 2. 研究の目的

本研究では、世界で最も脱窒が盛んな 1) アラビア海、最も窒素固定が盛んな 2) カリブ海と 3) 北西太平洋に加え、北太平洋の窒素固定・脱窒の観測地である 4) ハワイ、東部インド洋の湧昇域である 5) スマトラ沖において造礁サンゴ骨格コアの過去 200 年間の窒素同位体比変動を復元した。海水中の硝酸の窒素同位体比は海洋全体の平均値である +5‰ から、窒素固定が盛んな海域では大気中の窒素と同じ 0‰ に近づき、脱窒が起こると +25‰ 近くまで上昇する。この窒素同位体比の増減を造礁サンゴ骨格を用いて同時間軸で直接比較し、各海域における脱窒と窒素固定の変遷を明らかにした。

### 3. 研究の方法

サンゴ骨格コアの採取および一次処理：オマーン、ハワイ、ケイマン諸島、メンタワイ諸島、喜界島において長寿ハマサンゴ群体を選定、水中用の掘削ドリルを用いてサンゴ骨格コアを採取した。オマーンにおいては現生のサンゴ群体の成長量が早く、100 年以上の年輪のあるコアが採取できなかったため、化石サンゴ群体を用いて、産業革命前後の窒素同位体比を比較することとした。サンゴ骨格試料は喜界島サンゴ礁科学研究所において岩石カッターで切断し、5mm の厚さにスライスした。スライスした試料は軟 X 線画像を撮影し年輪と成長方向を観察し、測線を決定した。コアの下部は続成を受けている可能性があるため、走査型電子顕微鏡にて続成がないか確認を行った。

サンゴ骨格コアの地球化学分析：本研究で使用するサンゴ骨格コアは分析試料の前処理を九州大学にて行い、窒素同位体比の経年変動を名古屋大学に設置されている連続フロー型質量分析計 (Finnigan MAT252) を用いて検出した。本分析法は Yamazaki et al. (2011b, 2016) を参照する。また各サンゴ骨格コアは水温指標であるストロンチウム / カルシウム比及び水温 / 塩分指

標である酸素同位体比、海洋表層の炭素源の変遷を記録する炭素同位体比の変化を分析した。

#### 4. 研究成果

カリブ海リトルケイマン島で採取した造礁サンゴ骨格コアの過去 94 年間の窒素同位体比の平均値は+1.8‰であり、大気窒素 (0‰) の固定によって生成された窒素化合物の影響を大きく受けていることが示唆された。サンゴ骨格の窒素同位体比は北大西洋の水温の数十年規模振動 (AMO) と同調して振動しており、水温が高い時期に窒素同位体比が減少 (窒素固定量が增大) することを示した。一方で 94 年間を通じて窒素同位体比は約 4‰増大しており、温暖化に伴って窒素固定量が減少していることを示した。サンゴ骨格の窒素同位体比とリトルケイマン島の水温変動に相関がなかったことから、窒素固定量の変遷は AMO を支配している海流に依る南大西洋からカリブ海へのリン供給に支配されていると考えられる。さらに温暖化に伴う窒素固定量の減少は大西洋の南北熱塩循環の弱化により、南大西洋からのリンの供給量が減少しているためだと考えられる。カリブ海では主要な栄養塩である溶存無機態窒素が 20 世紀を通じて減少傾向にあった。

ハワイオアフ島で採取した造礁サンゴ骨格コアの窒素同位体比の過去 70 年間の窒素同位体比の平均値は+4.3‰であった。また窒素同位体比は+1.3‰~+6.9‰の間で変動し、8 年から 10 年の周期で変動を繰り返していることがわかった。過去 70 年間において、その周期的変化の極大値は +6‰~+6.9‰で大きな変化はないが、極小値が 1950 年代~1980 年代で +3‰以上であったのに対し、1990 年代以降は+1.3~+2‰に減少するようになった。ハワイ沖の Station ALOHA の硝酸の窒素同位体比の鉛直分布 (Casciotti et al., 2008) からサンゴ骨格の窒素同位体比の極大値は深層水と同じ値を示しており、その期間に深層から表層へ硝酸が供給されていることが示唆された。極小値の減少は深層水の供給がない時に海洋表層における窒素固定量が大きくなっていることを示しており、ハワイ沖の深海サンゴの窒素同位体比の先行研究が小氷期 (1800 年代) の終わりから 1900 年代後半にかけて窒素固定量が增大していると報告した結果と整合的である。

オマーンで採取した造礁サンゴ骨格の窒素同位体比の 7~10 年間の平均値は、1100 年代で+8‰、1700 年代で+7.9‰、現生のサンゴで+8.8‰であった。産業革命前の 1700 年代においては 1100 年代の窒素同位体比と変化がなかったが、現生サンゴの窒素同位体比の上昇はオマーン周辺海域において脱窒が増大していることを示唆している。このことは、同じ造礁サンゴ骨格資料の水溫指標から示されるインド洋モンスーンの弱化の傾向と一致しており (Watanabe et al., 2021)、アラビア海南西から吹き込むモンスーンが運ぶ酸素に富む海水の供給の減少により、脱窒が盛んになったと考えられる。

以上の結果から、世界最大の窒素固定海域である北大西洋のカリブ海においては、温暖化に伴って窒素固定量が減少しているが、中央太平洋のハワイにおいては深層水の供給がない時に窒素固定量が增大していることがわかった。アラビア海に面するオマーンでは産業革命前と比べて、現生サンゴの窒素同位体比が増大していることから、脱窒が増大したことが示唆された。また、海洋表層においては水温の十年~数十年規模振動とともに発生する深層水の表層への供給が熱帯・亜熱帯域において重要な窒素・リン起源であることが示唆され、気候の十年規模の周期変動の変遷によって表層の栄養塩濃度は支配されることも明らかになった。他の海域における窒素収支の変化を明らかにする必要があるが、温暖化に伴って海洋表層の窒素量は減少している傾向が見られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tsuyoshi Watanabe, Takaaki K. Watanabe, Atsuko Yamazaki, Shiori Yoneta, Kohki Sowa, Frederic Sinniger, Gal Eyal, Yossi Loya, Saki Harii	4. 巻 12
2. 論文標題 Coral Sclerochronology: Similarities and Differences in the Coral Isotopic Signatures Between Mesophotic and Shallow-Water Reefs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mesophotic Coral Ecosystems, Coral Reefs of the World book series	6. 最初と最後の頁 667-681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-92735-0_36	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 Saori Ito, Atsuko Yamazaki, Yuichi Nishimura, Eko Yulianto, Tsuyoshi Watanabe	4. 巻 273
2. 論文標題 Coral geochemical signals and growth responses to coseismic uplift during the great Sumatran megathrust earthquakes of 2004 and 2005	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 257-274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2020.01.037	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 山崎敦子	4. 巻 53
2. 論文標題 造礁サンゴ骨格の窒素同位体比指標	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地球化学	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14934/chikyukagaku.53.1	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, T.K., T. Watanabe, A. Yamazaki, M. Pfeiffer, M.R. Claereboudt	4. 巻 9
2. 論文標題 Oman coral 180 seawater record suggests that Western Indian Ocean upwelling uncouples from the Indian Ocean Dipole during the global-warming hiatus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1887
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-38429-y	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, T.K., Watanabe, T., Yamazaki, A., Pfeiffer, M., Garbe-Schonberg, D., Claereboudt, M. R.	4. 巻 7
2. 論文標題 Past summer upwelling events in the Gulf of Oman derived from a coral geochemical record	5. 発行年 2017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/s41598-017-04865-5	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 山崎 敦子・渡邊 剛	4. 巻 60
2. 論文標題 顕生代の地球環境変動とサンゴ礁	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 月刊海洋 (号外)	6. 最初と最後の頁 133-141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 梶田 展人・山崎 敦子・伊藤 早織・渡邊 剛	4. 巻 60
2. 論文標題 鹿児島県喜界島の現生ハマサンゴを用いた環境復元	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 月刊海洋 (号外)	6. 最初と最後の頁 55-62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Takaaki K. Watanabe, Tsuyoshi Watanabe, Miriam Pfeiffer, Hsun-Ming Hu, Chuan-Chou Shen, Atsuko Yamazaki	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 e2021GL092432
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

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 山崎 敦子, 矢野 恵美, 波利井 佐紀, 渡邊 剛
2. 発表標題 光条件がサンゴ骨格のBa/Ca比に与える影響
3. 学会等名 日本サンゴ礁学会第22回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamazaki, A., Hetzinger, S., J. von Reumont, Manfrino, C., Tsunogai, U., Watanabe, T.
2. 発表標題 Change in nitrogen fixation derived from Caribbean coral skeletons
3. 学会等名 Geobremen 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ito, S., Yamazaki, A., Yano, M., Watanabe, T. K., Putra, T. E., Nishimura, Y., Watanabe, T.
2. 発表標題 Earthquake and tsunami archives in coral growth parameters and geochemical records
3. 学会等名 Geobremen 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Watanabe, T. K., Yamazaki, A., Pfeiffer, M., Shen, C.-C., Watanabe, T.
2. 発表標題 Indian monsoon reconstruction using fossil coral skeletons from Oman
3. 学会等名 Geobremen 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Watanabe, T., Yamazaki, A.
2. 発表標題 Tropical to temperate coral archives around Japan
3. 学会等名 Geobremen 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamazaki, A.
2. 発表標題 Coral nitrogen isotopes as new tool for reconstruction of nutrient dynamics in tropical oceans
3. 学会等名 Geobremen 2017 Workshop on "Tropical coral archives" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Watanabe, T. K., Yamazaki, A., Pfeiffer, M., Shen, C.-C., Watanabe, T.
2. 発表標題 Indian Monsoon evolution during the last millennium
3. 学会等名 KIKAI international symposium for coral reef sciences 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山崎 敦子
2. 発表標題 造礁サンゴ骨格の窒素同位体比指標の開発と高解像度の古海洋窒素循環の復元
3. 学会等名 日本地球化学会年会第64回年会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山崎 敦子、渡邊 剛
2. 発表標題 造礁サンゴ骨格の窒素同位体比指標 -低緯度域の栄養塩動態の解明に向けて-
3. 学会等名 日本地球化学会年会第64回年会（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学サンゴ礁地球環境学研究室 <a href="https://kyushucrees.com">https://kyushucrees.com</a>
---

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
研究協力者	渡邊 剛  (Watanabe Tsuyoshi)  (80396283)		
研究協力者	角皆 潤  (Tsunogai Urumu)  (50313367)		
研究協力者	西村 裕一  (Nishimura Yuichi)  (20208226)		



## 6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	渡邊 貴昭 (Watanabe Takaaki)  (00852310)		
研究協力者	内山 遼平 (Uchiyama Ryohei)		
研究協力者	伊藤 早織 (Ito Saori)		
研究協力者	小山 都熙 (Koyama Toki)		
研究協力者	小野寺 那智 (Onodera Nachi)		

## 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			
ドイツ	GEOMAR	University of Hamburg	Kiel University	
米国	Hawaii Pacific University	Central Caribbean Marine Institute		
インドネシア	LIPI			
オマーン	Sultan Qaboos University			
台湾	国立台湾大学			