

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03366

研究課題名(和文) X線CT計測から拓くサンゴ骨格気候学の高度化研究

研究課題名(英文) Application of X-ray computed tomography on coral skeletal climatology

研究代表者

鈴木 淳 (Suzuki, Atsushi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：サンゴ骨格による気候復元は、化学組成を気候プロキシとして活用する手法を中心に進展してきたが、年輪や骨格密度についての研究は立ち遅れていた。産業技術総合研究所・地質調査総合センターに導入された最新型のX線CT撮影装置を用いて、サンゴ骨格密度に関する研究を実施した。まず、X線CT装置により、サンゴの柱状試料や群体試料から、最適分析測線の設定を支援する手法を開発した。また、従来の直線成長量(cm y<sup>-1</sup>など)に代わり、群体全体での石灰化量(群体あたりや群体表面積あたりのCaCO<sub>3</sub>重量など)を求める計測法を開発した。この手法により、海洋酸性化等の影響評価を正確に行うことが可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、サンゴ柱状試料から、気候変動復元分析のための最適測線の設定を支援する手法を開発した。これにより、サンゴ骨格の気候プロキシについて最適状態での分析が可能になり、気候変動復元の高精度化につながる。また、現在進行中の海洋酸性化に伴うサンゴ骨格密度の減少や石灰化量の減退について、定量的な検討が可能となることから、海洋酸性化現象の影響把握が進むことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Paleoclimate reconstruction based on coral skeletons has progressed mainly through the use of chemical composition as a climate proxy, but research on annual bands and skeletal density of corals has lagged behind. We conducted a study on coral skeletal density using a state-of-the-art X-ray CT imaging system installed at the Geological Survey of Japan of the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). First, a method was developed to assist in setting optimal analytical transects from coral slabs and colony specimens using the X-ray CT system. We also developed a measurement method to determine the amount of calcification (e.g., CaCO<sub>3</sub> weight per colony or per colony surface area) for the entire colony instead of the conventional linear growth rate (e.g., cm y<sup>-1</sup>). This method enables accurate assessment of the impact of ocean acidification on corals.

研究分野：生物地球化学

キーワード：サンゴ 石灰化 生物鉱化作用

## 1. 研究開始当初の背景

サンゴ骨格を用いた気候復元は、酸素同位体比などの化学組成を気候プロキシとして活用する手法を中心に進展してきたが、年輪や骨格密度についての研究は立ち遅れていた。産業技術総合研究所・地質調査総合センターに、最新型の X 線 CT (computed tomography) 撮影装置が導入されたことに合わせ、採取済みのサンゴ試料を最大限活用して、総合的なサンゴ骨格密度に関する研究を展開する。研究は次の 3 つのステップからなる。【第 1 ステップ】X 線 CT 装置により、サンゴ柱状試料や群体試料から、最適分析測線の設定を支援する手法を開発する。これにより、サンゴ骨格の気候プロキシについて最適状態での計測が可能になる。【第 2 ステップ】海洋酸性化に伴うサンゴ骨格密度の減少や石灰化量の減退が実際に起きているかどうかを、多くの海域について詳細に検討する。【第 3 ステップ】気候プロキシの成長速度依存性の問題は高精度気候復元の障害であるが、従来は成長軸に沿った直線成長量 (mm/y など) でしか評価できなかった。X 線 CT 装置により、石灰化量を計測し、気候プロキシの成長速度依存性についての再評価を目指す。

## 2. 研究の目的

低緯度浅海域に広く分布するサンゴは、刺胞動物門に属する石灰化生物で、細胞内に共生藻を持ち、その光合成の季節性を反映して、骨格には密度の大小の繰り返しからなる年輪が形成される。「サンゴ年輪の発見」(Ma, 1934) は、日本からの発信であって、その後の「サンゴ骨格気候学」の発展の出発点であった。しかし、サンゴの年輪や密度構造自体についての研究は立ち遅れていた。1970 年代から導入された軟 X 線撮像は、年輪の明瞭な可視化には成功したが、立体的な年輪構造を扱う際の原理的な問題点もあり (図 1)、2 次元画像から計測される直線的な成長速度と水温の相関は低く、年輪の幅は高精度な気候指標とはなり得なかった。研究代表者らは、骨格の石灰化様式と骨格の密度構造が、サンゴ酸素同位体比及び Sr/Ca 比の温度依存性に影響すると考えており、気候プロキシの高度化の観点からも、サンゴ骨格の密度研究は重要な課題である。この状況に応えるのが X 線 CT 装置による三次元成長解析である。

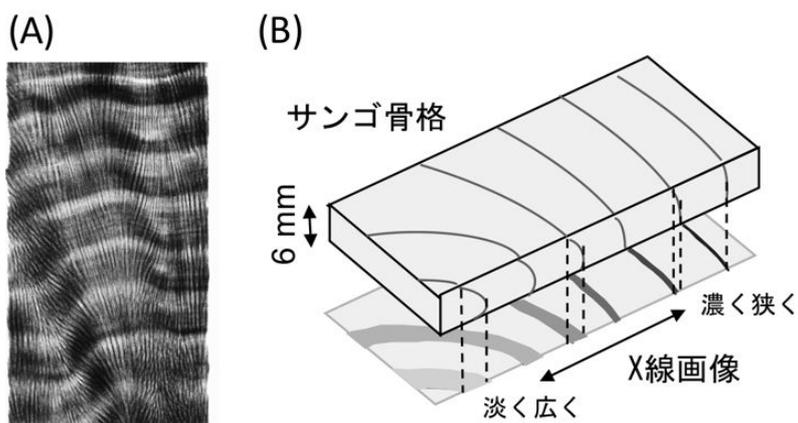


図 1 軟 X 線撮影の限界。(A) ハマサンゴ骨格の軟 X 線写真。一般的に厚さ 6 mm のサンゴ骨格片 (スラブ) を用いると年輪が明瞭に可視化される。(B) サンゴは球状群体で放射状に成長することから、厚さ 6 mm のスラブの中でも密度バンドは曲率を持ち、平面に投影すると各種の不適切な効果が生じ、精密な成長量評価の妨げとなる。

### 3. 研究の方法

本実験における測定には、産業技術総合研究所の保有する X 線 CT スキャン装置(Supria Grande, 日立製作所)を用いた。サンゴ骨格の撮影には、プラスチック容器やクッション材、ビニール袋等を用いて配置し、同時にアルミニウム製の階段状の校正体を配置して X 線 CT スキャン測定を行なった。典型的な測定パラメータの例として、CT 管電圧 140 kV、CT 管電流 150 mA、スライス厚 0.625 mm、ピクセルサイズ 0.48 8mm x 0.488 mm であった。得られた CT 値のバイナリデータを、DICOM(Digital Imaging and Communications in Medicine)形式と呼ばれる専用の閲覧、解析ソフトウェアで読み込むことができる形式に変換した。また、一部について、マイクロフォーカス X 線 CT スキャン装置の使用も試みた。

### 4. 研究成果

研究計画初年度は、サンゴ分析測線決定支援の高度化に取り組んだ。サンゴ群体や骨格柱状試料について、分析測線を決定する作業は、長年の経験と勘に頼る試行錯誤的な作業である。また、内部に一時的な斃死面や穿孔生物による空隙が存在することもあり、このような構造をあらかじめ把握した後に、分析測線を設定することができると、作業効率が大幅に向上する。骨格成長速度が化学組成に与える影響を避けるために、成長速度が  $5 \text{ mm y}^{-1}$  以上の成長軸に沿って分析することがルーチンとなっているが、X 線 CT 撮像により、この基準に照らして最適な分析測線を連続的に設定する方法を検討した。一例として、カリブ海産のサンゴ骨格試料を示す(図 2)。カリブ海産のサンゴ骨格は、インド太平洋区に一般的に見られるハマサンゴの骨格とは特徴が大きく異なる。X 線 CT 像から 3 次元モデルを構築し、骨格の成長方向を判別し、また最も長く成長記録が保持されていると考えられる骨格部分を判定し、スラブを作成する部位を決定した。

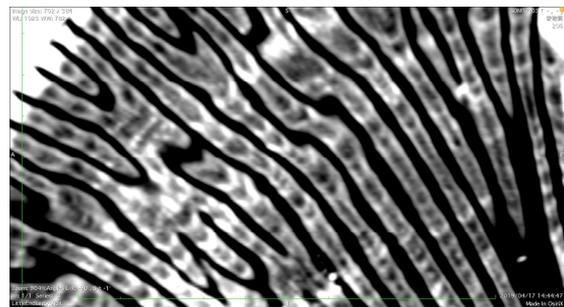


図 2 カリブ海のドミニカ共和国から採取されたサンゴ *Diploria strigosa* の X 線 CT 画像(試料 ID: SDM17-03)。

研究計画第 2 年度は、サンゴ骨格成長量についての 3 次元計測の実現に向けた検討を行った。従来の切断面に沿った直線成長量( $\text{cm y}^{-1}$  など)に代わり、群体全体での石灰化量(1 群体あたりや群体表面積あたりの  $\text{CaCO}_3$  重量など)を求める計測法を開発した。流速がハナヤサイサンゴの骨格成長に与える影響を検討した骨格試料(Suzuki et al., 2008)を用いた(図 3)。X 線 CT による 3D モデルを解析した結果、ハナヤサイサンゴは、流速の増大に対し、群体の重量、表面積及び体積を増加させる応答をすることが明らかとなった(図 4)。これは、枝の伸長速度の上昇に伴う変化であると考えられる。また、CT 値に関して有意な差が見られる一方で、水中重量と群体の堆積から算出した密度や、単位面積あたりの群体重量の違いは有意ではなかった。同様の方法により、現在進行中の気候変動の影響評価の高精度化に寄与できると期待される。特に、海洋酸性化に伴うサンゴ骨格密度の減少や石灰化量の減退が実際に起きているかどうかを、多くの海域について詳細に検討することが可能になる。

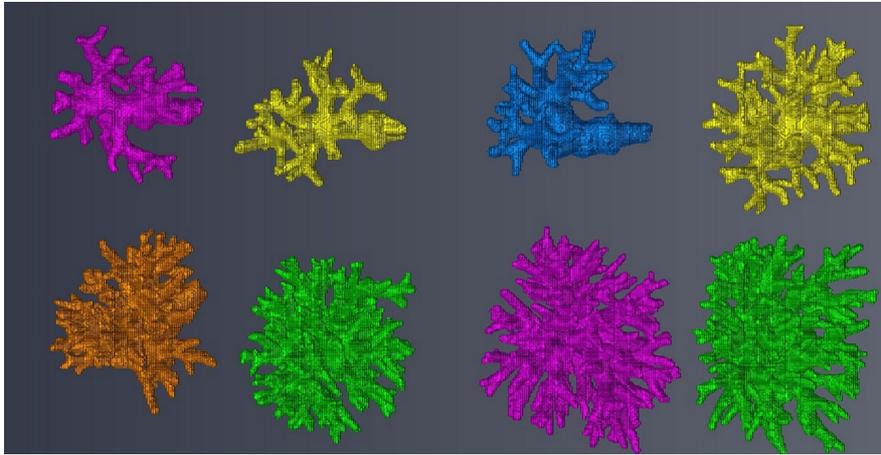


図3 流速がハナヤサイサンゴ (*Pocillopora damicornis*) の骨格成長に与える影響を検討した骨格試料 (Suzuki et al., 2008) の X線 CT による 3D モデルを示す。上段：流速が小さい実験区で飼育された群体、下段：流速が大きい実験区で飼育された群体。

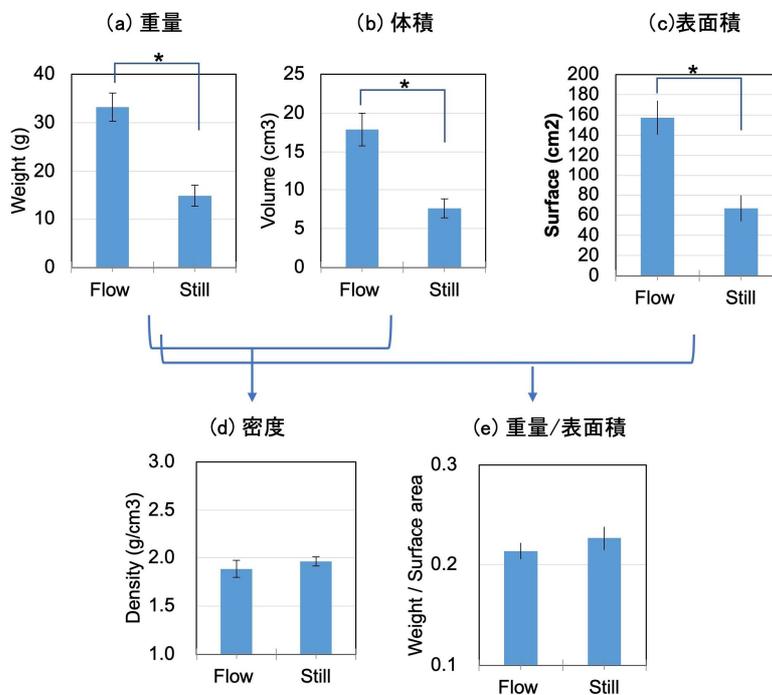


図4 流速の大小 (Flow, Still) により骨格成長に違いが見られたハナヤサイサンゴ (*Pocillopora damicornis*) 群体の形態パラメータ。X線 CT による計測結果を示す。(a) 重量 (g)、(b) 体積 (cm<sup>3</sup>)、(c) 表面積 (cm<sup>2</sup>)、(d) 密度 (g cm<sup>-3</sup>)、(e) 単位面積あたりの重量 (g cm<sup>-2</sup>)。重量と体積から密度が、また、重量と表面積から単位面積あたりの重量が算出される。Error bar = ± SE ( n = 4 )。

また、比較的サイズの小さい枝状サンゴ片を例に、表面積計測のルーチン化と精度評価を目的として、マイクロフォーカス X線 CT スキャン装置の使用も試みた。表面積の計測としては、従来はアルミ箔法と呼ばれる方法が一般に用いられているが、煩雑で精度も低く、代わりとなる手法が求められていた。マイクロフォーカス X線 CT による比較の結果、アルミ箔を用いた計測法よりも、約 7%ほど大きな値が得られた。これは、マイクロフォーカス CT 計測により、詳細な表面形状を読み採れたためと考えられる。

研究計画 3 年目に相当する期間については、サンゴ骨格成長量についての 3 次元計測の実現に

向けた検討を継続した。X線 CT スキャン画像によるハマサンゴ年輪の三次元構造の把握を目的とした。同一成長輪を追跡・対比して、1年分の成長量を群体全体で積分すれば、1年間の成長量が計測できる。さらに、密度情報を付加することができれば、群体全体での石灰化量(例えば1群体あたりの  $\text{gCaCO}_3 \text{ y}^{-1}$ )を求めることができる。これにより、海洋酸性化トレンドに対応したサンゴの石灰化量の変化を検討することが本研究課題の目的の一つである。琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設(沖縄県本部町)及び海洋生物環境研究所実証試験場(新潟県柏崎市)にて、高精度二酸化炭素濃度調整海水生成装置(いわゆる AICAL 装置)を用いた海洋酸性化実験を実施してきた。これら過年度の各種環境制御飼育実験によって得られた各種のサンゴ群体について、X線 CT 分析データの蓄積を進めた。

研究計画4年目に相当する期間について、サンゴ骨格成長量についての3次元計測の実現に向け、X線 CT スキャン画像によるハマサンゴ年輪の構造把握を目的とした検討を継続した。フィリピン及びインドネシアより採取されたハマサンゴ長尺試料については、Sr/Ca 比及び酸素同位体比( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ )の分析を進め、投稿論文原稿を作成した。特に、インドネシア・セリブ諸島から採取された試料については、海水温を反映する Sr/Ca 比と、海水温・塩分を反映する酸素同位体比について、採取された2003年までの約70年間の海水温と塩分の復元を実施した。復元した海水温データと、太平洋・インド洋の気候変動との関係を調べたところ、1950年代半ばを境に、それ以前にはインド洋の気候変動との相関が、以降は太平洋の気候変動との有意な相関関係が見られた。一方、塩分データと気候変動の間には相関関係がみられず、このことから、セリブ諸島周辺の海水温と塩分は異なる(気候)要素による影響を受けていることが示唆された。また、塩分データは1980年以降、低塩分化の傾向がみられた。北西モンスーン(12-2月)にジャワ海に出現する低塩分水は、マカッサル海峡内の通過流表層の輸送を妨げる働きをもつことが報告されていることから、近年の低塩分化は通過流の輸送に影響を及ぼしている可能性がある。このインドネシア・セリブ諸島のハマサンゴ骨格試料の最上部について、X線 CT スキャンデータから推定される密度構造と骨格の Sr/Ca 比及び酸素同位体比の詳細対応を検討した。

#### <引用文献>

Ma, T.Y.H. (1934) On the growth rate of reef corals and the sea water temperature in the Japanese Islands during the latest geological times. Science reports of the Tohoku Imperial University. 2nd series, Geology, 16(3), 165-189.

Suzuki, A., Nakamura, T., Yamasaki, H., Minoshima, K., Kawahata, H. (2008). Influence of water flow on skeletal isotopic composition in the coral *Pocillopora damicornis*. Coral Reefs, 27, 209-218.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kuroyanagi Azumi, Irie Takahiro, Kinoshita Shunichi, Kawahata Hodaka, Suzuki Atsushi, Nishi Hiroshi, Sasaki Osamu, Takashima Reishi, Fujita Kazuhiko	4. 巻 11
2. 論文標題 Decrease in volume and density of foraminiferal shells with progressing ocean acidification	5. 発行年 2021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/s41598-021-99427-1	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 Bell Tomoko, Manullang Cristiana, Kumagai Naoki H., Sakai Kazuhiko, Suzuki Atsushi, Iguchi Akira	4. 巻 24
2. 論文標題 Calcification responses of subtropical corals to ocean acidification: a case study from Sesoko Island, Okinawa, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Galaxea, Journal of Coral Reef Studies	6. 最初と最後の頁 51~61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3755/galaxea.G2020_S20	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 Bell Tomoko, Manullang Cristiana, Sakai Kazuhiko, Suzuki Atsushi, Iguchi Akira	4. 巻 24
2. 論文標題 Near-future levels of pCO2 impact skeletal weights of coral primary polyps (Acropora digitifera)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Galaxea, Journal of Coral Reef Studies	6. 最初と最後の頁 63~68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3755/galaxea.G2020_S1N	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 4.Hirabayashi, S., Yokoyama, Y., Suzuki, A., Esat, T., Miyairi, Y., Aze, T., Siringan, F., Maeda, Y.	4. 巻 455
2. 論文標題 Local marine reservoir age variability at Luzon Strait in the South China Sea during the Holocene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 171-177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2018.12.001	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 5.Hirabayashi, S., Yokoyama, Y., Suzuki, A., Miyairi, Y., Aze, T., Siringan, F., Maeda, Y.	4. 巻 61
2. 論文標題 Insight into Western Pacific Circulation from South China Sea Coral Skeletal Radiocarbon.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Radiocarbon	6. 最初と最後の頁 1923-1937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/RDC.2019.145	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 Suzuki, A., Iguchi, A., Sakai, K., Hayashi, M., Nojiri, Y.	4. 巻 17
2. 論文標題 Succession of ocean acidification and its effects on reef-building corals.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Coral Reefs of the World "Coral Reefs of Eastern Asia under Anthropogenic Impacts"	6. 最初と最後の頁 97-112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-27560-9_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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 安元剛 (北里大・海洋生命)・飯島真理子 (産総研・地質情報)・井口亮 (産総研・地質情報)・鈴木淳 (産総研・地質情報)・安元純 (琉大・農)・中村崇 (琉大・理)・酒井一彦 (琉大熱生研)・廣瀬美奈 (トロピカルテクノプラス)・天野春菜・水澤奈々美・神保充・渡部終五 (北里大・海洋生命)
2. 発表標題 サンゴ稚ポリブに対する CO2+リン酸塩の複合ストレス実験
3. 学会等名 第21回マリンバイオテクノロジー学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯島真理子 (産総研・地質情報)・安元剛 (北里大・海洋生命)・安元純 (琉大・農)・井口亮 (産総研・地質情報)・中村崇 (琉大・理)・酒井一彦 (琉大熱生研)・廣瀬美奈 (トロピカルテクノプラス)・水澤奈々美 (北里大・海洋生命)・鈴木淳 (産総研・地質情報)・神保充・渡部終五 (北里大・海洋生命)
2. 発表標題 蓄積型栄養塩の地域間比較と稚サンゴの骨格形成への影響
3. 学会等名 第21回マリンバイオテクノロジー学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯島真理子（北里大・海洋生命）・安元純（琉大・農）・井口亮（産総研・地質情報）・中村崇（琉大理・琉大熱生研）・酒井一彦（琉大熱生研）・廣瀬美奈（トロピカルテクノプラス）・安元加奈未（東京理科・薬）・水澤奈々美（北里大・海洋生命）・鈴木淳（産総研・地質情報）・天野春菜・神保充・渡部終五・安元剛（北里大・海洋生命）
2. 発表標題 沿岸域の底質に吸着したリン酸塩はサンゴ稚ポリプの骨格形成を阻害する
3. 学会等名 2021年度日本地球惑星連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 儀武滉大（筑波大）・池内絵里（産総研・地質情報）・中村崇（琉大・理）・鈴木淳（産総研・地質情報）・井口亮（産総研・地質情報）
2. 発表標題 造礁サンゴにおける褐虫藻の多様性とサンゴ石灰化速度の関係
3. 学会等名 2021年度日本サンゴ礁学会大会第24回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池内絵里（産総研・地質情報、宮大・農）・儀武滉大（産総研・地質情報）・中村崇（琉大・理）・鈴木淳（産総研・地質情報）・井口亮（産総研・地質情報、産総研・E-code）・安田仁奈（宮大・農）.
2. 発表標題 褐虫藻の多様性はサンゴ石灰化速度に影響するか
3. 学会等名 第69回日本生態学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 淳, 井口 亮
2. 発表標題 海洋炭酸系の基礎と海洋酸性化
3. 学会等名 2018年度地球環境史学会年会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔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
研究分担者	千徳 明日香 (Sentoku Asuka) (00722802)	琉球大学・理学部・助教  (18001)	
研究分担者	新垣 誠司 (Arakaki Seiji) (10452963)	九州大学・理学研究院・准教授  (17102)	
研究分担者	林 正裕 (Hayashi Masahiro) (20444870)	公益財団法人海洋生物環境研究所・海生研実証試験場・研究員  (82678)	
研究分担者	天野 敦子 (Amano Atsuko) (20467848)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員  (82626)	
研究分担者	垣田 浩孝 (Kakita Hirotaka) (40356754)	日本大学・文理学部・教授  (32665)	
研究分担者	井口 亮 (Iguchi Akira) (50547502)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員  (82626)	
研究分担者	石村 豊穂 (Ishimura Toyoho) (80422012)	京都大学・人間・環境学研究科・准教授  (14301)	

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
研究分担者	岩崎 晋弥  (Iwasaki Shinya)  (70751006)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・特別研究員（PD）    (82706)	
研究分担者	大野 良和  (Ohno Yoshikazu)  (30814298)	沖縄工業高等専門学校・生物資源工学科・助教    (58001)	削除：2018年12月13日

	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	岩田 裕也  (Iwata Yuya)		

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