

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01324

研究課題名(和文) 長寿二枚貝ピノスガイの現生及び化石試料の成長線解析による数十年規模気候変動の復元

研究課題名(英文) Reconstruction of multi-decadal climate variability based on sclerochronological analysis of long-lived bivalve shells *Mercenaria Stimpsoni*

研究代表者

白井 厚太郎 (Shirai, Kotaro)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：70463908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：ピノスガイの放射性炭素分析から岩手県沿岸の放射性炭素濃度の時系列変遷履歴を明らかにした。また、多くのピノスガイ死殻は2011年の津波により死亡したことを明らかにした。また、マルスタレガイ科二枚貝の南方種においても冬期に成長停滞が起こること、成長停滞の期間は加齢により長期化すること、などを明らかにした。酸素同位体ステージ5, 7, 9のピノスガイ化石標本を解析し、過去の温暖期についても100年以上の寿命を持つ個体がいたこと、現生試料で見られたような数十年周期の変動はそれほど明瞭には見られなかったこと、酸素同位体比は現生試料と比較して変動幅が小さかったこと、などを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動メカニズムの詳細な理解や産業革命以後の人為起源の地球温暖化影響を評価するためには、数年から数十年規模の周期的気候変動を定量的に指標化することが必要不可欠である。しかし、観測機器による気温などの環境記録は古くても1850年代以降に限られており、さらに海洋の観測データは1950年以降に限られているという問題がある。本研究で開発した手法や貝殻試料から得られた結果は、観測記録の無い過去の地球環境の自然変動の仕組みや履歴を提供した。気候変動は我々の生活に大きな影響を与えるが高解像度の古環境データが著しく不足している高緯度海域における新たなツールを確立したことは気候学的・社会経済学的に重要である。

研究成果の概要(英文)：We analyzed radiocarbon in the bivalve shell and revealed the time-series history of radiocarbon concentration along the Iwate Prefecture coast. We also found that most of the dead shells were killed by the 2011 tsunami. We found that growth cessation occurs during winter even in southern species of *Veneroidea* mollusks and that the period of it is prolonged with age. Analysis of fossil specimens from oxygen isotope stages 5, 7, and 9 revealed that some of the specimens had lifespans of more than 100 years even during the past warm period and that the variation in oxygen isotope ratios was smaller than in the present specimens.

研究分野：古環境学，地球化学

キーワード：古環境復元 二枚貝 成長線解析 化石 長周期気候変動

## 1. 研究開始当初の背景

地球の気候は様々な周期で変動している。気候変動メカニズムの詳細な理解や産業革命以後の人為起源の地球温暖化影響を評価するためには、数年から数十年規模の周期的気候変動を定量的に指標化することが必要不可欠である。しかし、観測機器による気温などの環境記録は古くても 1850 年代以降に限られており、さらに海洋の観測データは 1950 年以降に限られているという問題がある。一方、地質時代を通してみれば、気候変動の大きさは現在の地球温暖化の規模を遙かに凌ぐものもあったことが知られている。しかし、海洋における代表的な古環境指標である海底堆積物コアは時間解像度が不十分であり、代表的な高解像度指標であるサンゴ骨格は低緯度海域のみに限られるため、高緯度海域の高解像度古環境データは著しく不足している。高緯度の気候変動は我々の生活にも大きな影響を与えており、さらに地球温暖化の影響も低緯度～中緯度よりも早く生じるため、その理解は気候学的・社会経済学的に重要である。特に、太平洋においては数十年規模の周期で自然に変動していることが知られているが、地球温暖化によってどのように変動特性が変化するかを理解することの重要性は大きい。しかしながら、高緯度域における古環境記録は著しく欠如しており、我々の長周期気候変動に対する理解を妨げている。特に、

(1) 地球温暖化に伴い数十年周期の気候変動はどのように変化したか？

(2) 過去の地球温暖期には長周期気候変動が存在したか？存在したのであれば、周期や強度はどの程度であったか？

などの、全球気温の変化に対する周期的な気候変動の応答については理解が進んでいない。

## 2. 研究の目的

このような課題に対する解決策として最も適した研究手法は、長寿かつ広く分布する二枚貝殻を用いた海洋古環境復元であろう。二枚貝殻は周囲の環境を元素・同位体組成として記録しながら付加成長するため、環境を時系列で記録する優れた環境記録媒体である。我々の研究グループは、日本で産出する二枚貝の中でも最も寿命の長い「ビノスガイ」に着目し、研究を進めてきた。ビノスガイは少なくとも 150 年の寿命を持ち、若齢期には潮汐輪を刻むため、日スケールの解像度で数百年にわたる環境を復元することが可能である。

そこで本研究は、ビノスガイ殻の成長線解析と地球化学分析により、

(a) 現生貝殻のマスタークロノロジー構築による過去数百年にわたる海洋環境復元

(b) 化石貝殻の解析による過去の地球温暖期における長周期気候変動の復元

を行い、最近数百年間と過去の温暖期の長周期気候変動の変動特性とメカニズムを理解することを目的とした。貝殻の年間成長量の経時変化は「貝にとって環境が殻形成にどれだけ適していたか」という指標となる。殻の酸素同位体組成からは水温の季節変動を明らかにできる。そして、成長期間(時期)の異なる個体について、成長パターンを複数個体で照合し時代を繋ぐことで(交差年代決定法)、代表的な成長パターンである「マスタークロノロジー」を構築するができ、環境記録をさらに延伸することが可能となる。さらに、ビノスガイは貝塚などの遺構や地層からも化石が産出するため、化石試料を解析することで有史以前・地質時代に遡って古環境情報を得ることができるといふ特徴がある。

## 3. 研究の方法

本研究では、

①岩手県大槌町から採取した現生ビノスガイ殻を用いた海水中放射性炭素濃度変遷履歴の復元。

②岩手県大槌町から採取したビノスガイ死殻を用いたマスタークロノロジー構築

③西表島のマルスダレガイ科二枚貝殻の成長様式の推定

④第四紀ビノスガイ化石を用いた過去の気候変動の復元

の 4 つの項目について中心的に研究を行った。いずれの項目についても、野外調査により貝殻試料を採取、貝殻の洗浄・切断・研磨により断面を観察可能な状態にする、顕微鏡により成長線を観察、マイクロドリリングにより成長方向に粉末試料を採取、粉末試料の酸素炭素安定同位体比の分析、必要に応じて放射性炭素濃度の分析、という手順で分析を行った。

## 4. 研究成果

①岩手県大槌町から採取した現生ビノスガイ殻を用いた海水中放射性炭素濃度変遷履歴の復元。

放射性炭素年代測定法は過去 6 万年程の化石試料について年代を推定するための重要な手法である。しかし、海産試料については海洋中溶存炭素の放射性炭素濃度の不均質性(リザーバー効果)と、1950 年代に行われた核実験由来の放射性炭素の放出(Bomb peak)による攪乱という 2 つの問題がある。二枚貝殻は成長線解析により過去にさかのぼって絶対年代の時間軸を決めることができるため、貝殻の放射性炭素を分析することで核実験由来の放射性炭素とリザーバー効果の影響の経時的変遷を復元することが可能である。

図1は、本研究により復元した岩手県沿岸の放射性炭素濃度の時系列変遷（赤）を示している。比較のため、大気中の放射性炭素濃度の時系列変遷（黒）とサンゴ骨格から復元したさまざまな海域の履歴についても示してある。大気中の放射性炭素濃度の時系列変遷（黒）と、貝やサンゴ骨格から復元した履歴との違いについては大気中二酸化炭素の移行過程の地域差を反映しており、炭素循環における移行過程のメカニズムについて重要なデータとなるだけでなく、北太平洋東部の海産試料の放射性炭素年代測定の確度向上に大きく貢献するデータである。本研究は Kubota et al. (2018) として発表した。

### ②岩手県大槌町から採取したビノスガイ死殻を用いたマスタークロノロジー構築

貝殻に刻まれた年輪の幅は「貝にとって環境が殻形成にどれだけ適していたか」という指標であり、成長パターンを複数個体で照合し時代を繋ぐことで、環境記録を個体の寿命を越えて延伸することが可能である。本研究では大槌町沿岸から採取したビノスガイ死殻について成長線解析と放射性炭素年代測定を行うことで、貝が死亡したタイミングを推定するとともに、マスタークロノロジーの構築を行った。

図2はこれまでの研究で得られているビノスガイ生貝の成長パターンの時系列変遷（上）と、死殻の成長パターンの時系列変遷（下）である。死殻については放射性炭素年代測定を死亡直前の部位と内側の二箇所を分析することで、正確な年代決定を行った。しかし、放射性炭素年代測定は数十年の誤差を伴う。そのため、生貝の成長パターンと比較する交差年代決定法により1年の精度で年代を決定することに成功した。その結果、多くのビノスガイ死殻は2011年の津波により死亡していることが明らかとなった。海洋生物の多くは死骸が残りにくいため海洋での死亡要因を特定することは困難な場合が多いが、二枚貝は殻が保存されるため、本手法を応用することで死亡タイミングやその要因を特定することが可能であることがわかった。また、死に殻の交差年代決定により環境記録が1880年より遡れることが示された。この成果は Kubota et al. として Radiocarbon 誌にて査読中である。

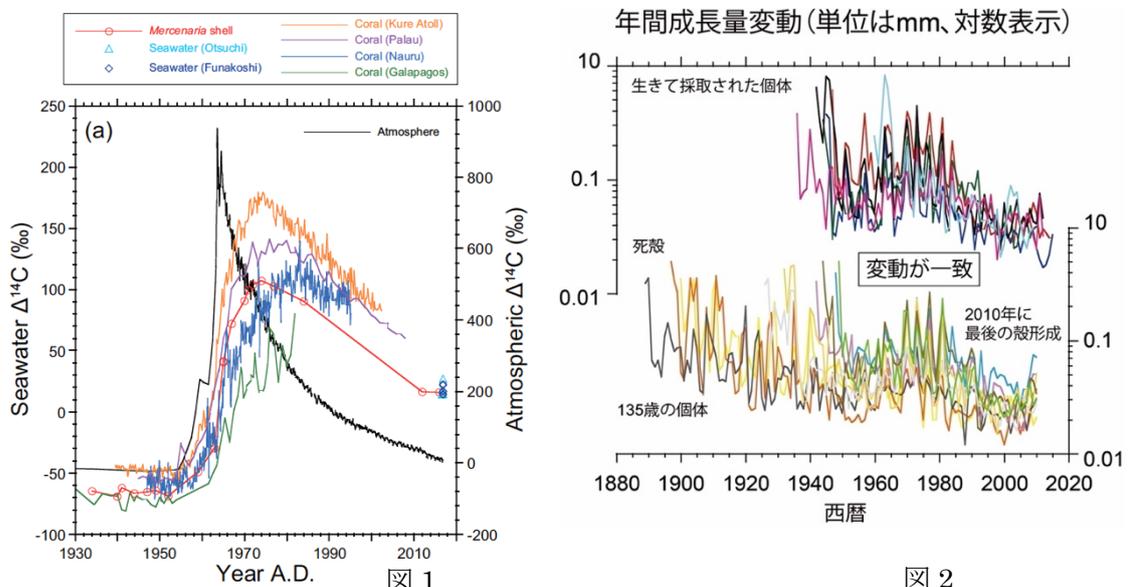


図2

### ③西表島のマルスダレガイ科二枚貝殻の成長様式の推定

二枚貝成長線のパターンから過去の環境を復元する際には、環境変化と成長の関係性が明確に評価されている必要がある。特に、水温・塩分・植物プランクトン量などの環境要因は成長に大きく影響を及ぼすため、成長パターンとの関係性を評価することが必要となる。ビノスガイは宮城以北に主要な分布範囲を持つが、過去の温暖期には関東まで分布を広げていたことがわかっており、*Secuella chitaniana* という南方系の化石近縁種がいたこともわかっている。そのため、温暖な環境でマルスダレガイ科二枚貝がどのような成長様式を有するかを評価することが必要である。

本研究では西表島から採取したアラスジケマンガイ *Gafrarium pectinatum*, ユウカゲハマグリ *Pitar citrinus*, 及びスダレハマグリ *Katelaysia japonica* の3種のマルスダレガイ科二枚貝について成長様式と環境変化の関係性について明らかにした。図3は3種の代表として、アラスジケマンガイの微細成長線幅（下）と酸素同位体比から推定した水温の関係（上）について、年齢による時系列変遷を示した図である。3種の解析の結果、南方種においても冬期に成長停滞が起こること、成長停滞の期間は加齢により長期化すること、日成長量は水温・塩分・植物プランクトン量などの環境要因に制御されていること、などを明らかにした。この成果は Tanabe et

a1. (2020)として発表した.

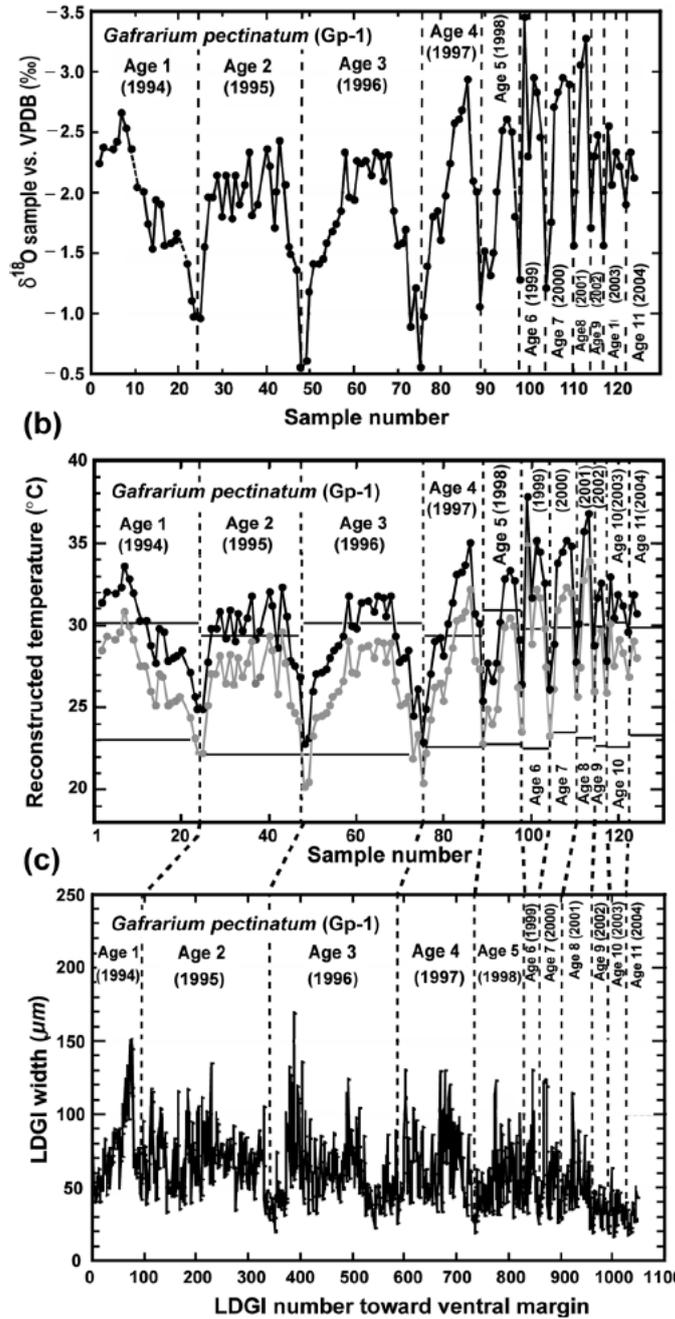


図 3

④第四紀ビノスガイ化石を用いた過去の気候変動の復元

二枚貝化石は多様な時代・場所から産出するため、はるか過去の地球環境について高解像度のスナップショット的な古環境記録を提供可能な有用な指標である。本研究では、過去の温暖期の環境復元に利用できる可能性があるビノスガイ化石について、博物館に保管されているビノスガイ化石の標本について検討・調査を行った。その結果、関東および東北の地層から採取された酸素同位体ステージ 5, 7, 9 のビノスガイ化石標本が利用可能であることがわかり、それらの試料について博物館から借用し、分析に供した。

殻の解析の結果、過去の温暖期についても 100 年以上の寿命を持つ個体があったこと、現生試料で見られたような数十年周期の変動はそれほど明瞭には見られなかったこと、酸素同位体比は現生試料と比較して変動幅が小さかったこと、成長様式の季節性は現生と大きく変わらず秋から冬にかけて成長を停止していたこと、などが明らかとなった。この成果については現在論文を執筆中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tanabe Kazushige, Miyaji Tsuzumi, Murakami-Sugihara Naoko, Shirai Kotaro, Moriya Kazuyoshi	4. 巻 167
2. 論文標題 Annual shell growth patterns of three venerid bivalve mollusk species in the subtropical northwestern Pacific as revealed by sclerochronological and stable oxygen isotope analyses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Biology	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00227-019-3637-7	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 Zhao Liqiang, Shirai Kotaro, Tanaka Kentaro, Milano Stefania, Higuchi Tomihiko, Murakami-Sugihara Naoko, Walliser Eric O., Yang Feng, Deng Yuewen, Schoene Bernd R.	4. 巻 235
2. 論文標題 A review of transgenerational effects of ocean acidification on marine bivalves and their implications for sclerochronology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Estuarine, Coastal and Shelf Science	6. 最初と最後の頁 106620 ~ 106620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecss.2020.106620	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 Trofimova Tamara, Alexandroff Stella J., Mette Madelyn J., Tray Elizabeth, Shirai Kotaro et al	4. 巻 245
2. 論文標題 Fundamental questions and applications of sclerochronology: Community-defined research priorities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Estuarine, Coastal and Shelf Science	6. 最初と最後の頁 106977 ~ 106977
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecss.2020.106977	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 Zhao Liqiang, Zuykov Michael, Tanaka Kentaro, Shirai Kotaro, Anderson Julia, McKindsey Christopher W., Deng Yuewen, Spiers Graeme, Schindler Michael	4. 巻 520
2. 論文標題 New insight into light-enhanced calcification in mytilid mussels, <i>Mytilus</i> sp., infected with photosynthetic algae <i>Coccomyxa</i> sp.: $^{13}C$ value and metabolic carbon record in shells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Marine Biology and Ecology	6. 最初と最後の頁 151211 ~ 151211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jembe.2019.151211	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 Zhao Liqiang, Shirai Kotaro, Murakami-Sugihara Naoko, Higuchi Tomihiko, Tanaka Kiyoshi	4. 巻 260
2. 論文標題 Mussel periostracum as a high-resolution archive of soft tissue 13C records in coastal ecosystems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 232 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2019.06.038	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 Walliser Eric O., Tanabe Kazushige, Hikida Yoshinori, Shirai Kotaro, Schoene Bernd R.	4. 巻 52
2. 論文標題 Sclerochronological study of the gigantic inoceramids <i>Sphenoceras schmidtii</i> and <i>S. sachalinensis</i> from Hokkaido, northern Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lethaia	6. 最初と最後の頁 410 ~ 428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/let.12321	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 Zhao Liqiang, Shirai Kotaro, Murakami-Sugihara Naoko, Higuchi Tomihiko, Sakamoto Takashi T., Miyajima Toshihiro, Tanaka Kiyoshi	4. 巻 671
2. 論文標題 Retrospective monitoring of salinity in coastal waters with mussel shells	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 666 ~ 675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2019.03.405	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 Murakami-Sugihara Naoko, Shirai Kotaro, Hori Masako, Amano Yosuke, Fukuda Hideki, Obata Hajime, Tanaka Kiyoshi, Mizukawa Kaoruko, Sano Yuji, Takada Hideshige, Ogawa Hiroshi	4. 巻 3
2. 論文標題 Mussel Shell Geochemical Analyses Reflect Coastal Environmental Changes Following the 2011 Tohoku Tsunami	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Earth and Space Chemistry	6. 最初と最後の頁 1346 ~ 1352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsearthspacechem.9b00040	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 Zhao Liqiang, Tanaka Kentaro, Tazoe Hirofumi, Iizuka Tsuyoshi, Kubota Kaoru, Murakami-Sugihara Naoko, Shirai Kotaro	4. 巻 148
2. 論文標題 Determination of the geographical origin of marine mussels ( <i>Mytilus</i> spp.) using 143Nd/144Nd ratios	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Marine Environmental Research	6. 最初と最後の頁 12 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marenvres.2019.05.002	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 該当する

1. 著者名 Yoshimura Taro, Shirai Kotaro, Murakami-Sugihara Naoko, Sakai Saburo, Sasaki Takenori	4. 巻 85
2. 論文標題 Sexual dimorphism in shell growth of the oviparous boreal scallop <i>Swiftopecten swiftii</i> (Bivalvia: Pectinidae)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Molluscan Studies	6. 最初と最後の頁 253 ~ 261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mollus/eyz006	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 Tanaka Kentaro, Okaniwa Nobuyuki, Miyaji Tsuzumi, Murakami-Sugihara Naoko, Zhao Liqiang, Tanabe Kazushige, Schoene Bernd R., Shirai Kotaro	4. 巻 511
2. 論文標題 Microscale magnesium distribution in shell of the Mediterranean mussel <i>Mytilus galloprovincialis</i> : An example of multiple factors controlling Mg/Ca in biogenic calcite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 521 ~ 532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2018.10.025	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 Shirai Kotaro, Kubota Kaoru, Murakami-Sugihara Naoko, Seike Koji, Hakozaiki Masataka, Tanabe Kazushige	4. 巻 133
2. 論文標題 Stimpson's hard clam <i>Mercenaria stimpsoni</i> ; A multi-decadal climate recorder for the northwest Pacific coast	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Marine Environmental Research	6. 最初と最後の頁 49 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marenvres.2017.10.009	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 Seike Koji, Sassa Shinji, Shirai Kotaro, Kubota Kaoru	4. 巻 123
2. 論文標題 Lasting Impact of a Tsunami Event on Sediment-Organism Interactions in the Ocean	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 1376 ~ 1392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JC013746	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 Shirai K, Koyama F, Murakami-Sugihara N, Nanjo K, Higuchi T, Kohno H, Wananabe Y, Okamoto K, Sano M	4. 巻 593
2. 論文標題 Reconstruction of the salinity history associated with movements of mangrove fishes using otolith oxygen isotopic analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Marine Ecology Progress Series	6. 最初と最後の頁 127 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3354/meps12514	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 Shirai Kotaro, Otake Tsuguo, Amano Yosuke, Kuroki Mari, Ushikubo Takayuki, Kita Noriko T., Murayama Masafumi, Tsukamoto Katsumi, Valley John W.	4. 巻 236
2. 論文標題 Temperature and depth distribution of Japanese eel eggs estimated using otolith oxygen stable isotopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 373 ~ 383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2018.03.006	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 Kubota Kaoru, Shirai Kotaro, Murakami-Sugihara Naoko, Seike Koji, Minami Masayo, Nakamura Toshio, Tanabe Kazushige	4. 巻 123
2. 論文標題 Bomb-14C Peak in the North Pacific Recorded in Long-Lived Bivalve Shells ( <i>Mercenaria stimpsoni</i> )	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 2867 ~ 2881
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JC013678	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 Komagoe Taro, Watanabe Tsuyoshi, Shirai Kotaro, Yamazaki Atsuko, Uematu Mitsuo	4. 巻 123
2. 論文標題 Geochemical and Microstructural Signals in Giant Clam Tridacna maxima Recorded Typhoon Events at Okinotori Island, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 1460 ~ 1474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2017JG004082	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
研究分担者	中島 礼  (Nakashima Rei)  (00392639)	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   (82626)	
研究分担者	棚部 一成  (Tanabe Kazushige)  (20108640)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・名誉教授   (12601)	
研究分担者	窪田 薫  (Kubota Kaoru)  (80774075)	神戸大学・人間発達環境学研究科・助教   (14501)	

#### 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	University of Mainz			
-----	---------------------	--	--	--