

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04859

研究課題名(和文)堆積環境-生物攪拌-生痕相の関係性の解明：北西太平洋全域調査からのアプローチ

研究課題名(英文)Relationship between depositional settings, bioturbation, and ichnofacies: approach from the whole area survey in the northwest Pacific

研究代表者

清家 弘治 (Seike, Koji)

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

研究者番号：20645163

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,100,000円

研究成果の概要(和文)：生痕化石の解析に基づく古環境復元の有用性は広く認識され、今日では堆積学、古生物学、そして資源探査の分野で活用されている。しかしながら、生痕化石から古生態・古環境情報を正しく得るためには、まず現世の生痕についての知見を得て検証する必要がある。なぜなら、化石記録のみからの知見では推測の域を出ず、場合によっては循環論にもなりつるからである。しかしこれまでの現世生痕研究は、潮間帯などの極めて浅い環境で行われたものが大半であった。本研究では、海面下の堆積場、大陸棚や陸棚斜面、海溝、そして深海平原などの現世生痕を調べ、対応する海成の生痕化石について多くの重要な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の遂行によって、生痕形成者である海底の底生生物が海洋環境に与えるインパクトを報告するとともに、大規模災害である2011年大津波が海底生態系に及ぼす影響も解明できた。また、研究対象とした現世生痕に対応する生痕化石についても、多くの知見を得ることができた。つまり、本研究課題の波及効果は地質学、古生物学に留まらず、海洋学そして海洋生物学にもおよび。

研究成果の概要(英文)：It is widely recognized today that trace fossils provide information not only on the ecology of ancient organisms but also on the paleoenvironment where trace-producer lived. However, a detailed knowledge on trace fossils (i.e., their origin, paleoecology, and paleoenvironmental implications) requires identification and analysis of modern counterparts. Therefore, many studies on modern traces have conducted to allow reconstruction of modes of life, both past and present. In this research project, I conducted neoichnological survey in underwater settings such as coastal areas (sandy beaches and tidal flats), nearshore area, continental shelf, and deep-sea including trenches and abyssal plains. Sediment cores were analyzed using X-ray CT scan, yielding important results on the nature of bioturbation and trace fossils.

研究分野：古生物学、海洋生物学

キーワード：生痕化石 生痕 巣穴 X線CTスキャン 底生生物 海底 生物攪拌 津波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1-1 生物攪拌

生物攪拌(バイオターベーション [bioturbation], 生物擾乱とも呼ばれる)とは, 海底に生息する生物が巣穴を形成したり堆積物の表面または内部を移動したりすることで, 海底の堆積物が混合される現象である. 生物攪拌は原生代後期以降の全ての時代において存在し, 海底堆積物を混合してきた (Pecoit et al., 2012 Science).

生物攪拌は海底付近の物質循環に大きく影響し, 海洋生態系において非常に重要な役割を担っている. このことから, 海洋学の研究分野では生物攪拌は重要視されている (Lohrer et al. 2004 Nature). 一方で, 地質学の分野では, 生物攪拌は地質記録を乱す“悪者”として忌み嫌われてきた: 生物攪拌が生じる場所では, 保存される地質記録は上下方向に混合(平均化)されてしまう. すなわち, 「生物攪拌が及ぶ深さ(混合層の厚さ) = その地層が持つ時間解像度」といえる. その結果, 地質学の分野, 特に古環境を復元する分野では, 生物攪拌が存在しない地層, つまり堆積時に無生物状態であった地層が研究対象として好まれてきた. しかしながら, 地質記録のほぼ全てが生物攪拌により混合されているのも, また事実である. 生物攪拌の影響する深さ(混合層の厚さ)を認識することなしには, 地質記録がもつ古環境・古生態情報を正しく理解することができない.

1-2 生痕化石

生痕化石とは, 地質時代の生物攪拌の痕跡(這い痕や巣穴など)が地層中に保存されたものである. Seilacher (1967 Marine Geology)により生痕相(生痕化石群集)と堆積相との間に密接な関係があることが発見された. 生痕化石は基本的に現地性のものであり, 環境外から運ばれてくることが無い. このことは, 生痕相を調べることで地層形成時の堆積環境を読み取れることを意味する. 生痕相解析はコア試料のような観察面積の少ないサンプルにおいても適用できるのが長所である. 古環境復元ツールとしての生痕化石の有用性は広く認識され, 堆積学, 古生物学, そして資源探査の分野で活用されている (Taylor et al., 2003 Earth-Science Reviews).

前述の生物攪拌の場合と同様に, 生痕化石から古生態・古環境情報を正しく得るためには, まず現世の生痕についての知見を得て検証する必要がある. なぜなら, 化石記録のみからの知見では推測の域を出ず, 場合によっては循環論にもなりうるからである. しかしながら, 申請者らの研究を含め, これまでの現世生痕の研究の大半は, 半陸上環境である干潟や砂浜などでの実施に留まっていた. つまり, 地質記録の大半を占める海面下の堆積場—大陸棚や陸棚斜面, 海溝, そして深海平原などの環境で現世生痕が研究されることは極めて稀であり, 生痕化石の古環境復元ツールとしての有用性は検証されていない. また, 現世生痕の研究例が乏しいことは, 生痕相と生物攪拌の関係性も未解明であることを意味する.

2. 研究の目的

生物攪拌と生痕相の両者を合わせた総合的な知見が存在すれば, それは地質記録から地球史を読み解く全ての研究分野に波及する有益な情報をもたらすことは間違いない. しかしながら, 前述のように生物攪拌と生痕相を幅広い環境で網羅した研究例はこれまでなく, そのため限定的な知見しか得られてこなかった.

上記の背景を踏まえ, 本申請課題では北西太平洋各地 200 地点以上から採取した海底表層コア試料を調べ, 各地点における生物攪拌が及ぶ深さ, および生痕相を明らかにすることを目指した. 対象とするコア試料は北西太平洋の低緯度~高緯度, 浅海~海溝にかけて採取したものをを用いることで, 様々な堆積環境および気候帯を網羅した知見を得ることを目指した. それにより, 生物攪拌および生痕化石が持つ古生態・古環境情報を抽出し, 様々な海成層における生痕化石の古環境・古生態情報を取得した.

3. 研究の方法

本研究で対象とした海洋堆積物コアは, これまでの調査で既に採取済みのもの(200 地点以上, 500 本以上のコア試料)である. それに加えて, 新たなコアサンプリングを沿岸域および陸棚斜面~海溝で実施し, 太平洋の広い範囲をカバーした. 沿岸域において潜水調査を実施し, 既存のコア試料がほとんど存在しない極浅海域のサンプリングを充実させた. 深海平原においては, 生物攪拌の強度が地点あるいは環境間でどれくらい異なるかを 14C 年代測定等で解明し, またコアに含まれる生痕相を X 線 CT スキャンによって調べた. この作業により, 堆積環境—生

物擾乱—生痕相と3者の関係性を明らかにし、生痕化石が持つ古環境プロキシ、および生物攪拌が地質記録をオリジナルな状態からどれくらい乱しているかを調べた。

4. 研究成果

本研究課題における主な成果は以下の通りである。

4-1 浅海におけるイベント堆積物を観察し生痕の詳細な性質を解明

津波や嵐などのイベント発生から数年後のイベント層を調べることで、生物攪拌の特性を知ることが可能である。その理由としては、イベント堆積物の形成直後には生物攪拌構造が一切存在しない「白紙」の状態であり、その後新規に書き込まれる生物攪拌構造はサンプル採取時の生物攪拌の性質を反映しているからである。つまり、津波堆積物の場合は、津波発生から数年が経過した時期の津波堆積物を調べることで、津波後に回復した底生生物群集がどのような生痕を形成し、海底面からどの深さまで堆積物を攪拌（混合）し、さらには海底の物理特性をどのように改変しているかを理解できる。このような視点から、2011年震災後の岩手県船越湾におけるオカメブク（ウニ類）の生痕の観察（堆積物コアの目視観察、X線CTスキャン、放射性セシウム測定など）をおこなった。その結果、オカメブクの生物攪拌の最大深度は基質の粒径によって制限されていること、またオカメブクの生物攪拌によって海底地盤が軟化されていることがわかった（Seike et al., 2018 JGR Oceans）。また、生痕サイズがどのような古環境情報を有しているかを検討した（Seike et al., 2020 Palaeo-3）。さらには、生痕形成者であるオカメブクの潜砂能力についての知見を得た（Seike et al., 2022 ECSS）。また、イベント（大地震に伴う海底液状化）の発生時に、海底に生息する底生生物がどのような挙動をとるかを、各生物の比重測定に基づき予測した（Seike et al., 2019 ECSS）。

4-2 開放性海浜における下部外浜環境に卓越する現世生痕を報告

海底に開いた巣穴の数は、巣穴形成ベントスの生息密度の指標として用いることができる。つまり、巣穴の数をカウントすることで、フィールド調査が困難な環境においても、大型ベントスの生息密度を推定することができる。例えば、砂浜海岸では強い波が常に押し寄せるため沖合の海底での長時間のフィールド（潜水）作業が難しい環境であるが、巣穴数カウント手法によってこの問題を解決することができる。私が茨城県鹿島灘の水深10~20mに生息するナルトアナジャコの生息状況を巣穴数カウントから調べたところ、鹿島灘全体にわたってアナジャコ類の一種ナルトアナジャコが広く生息していることが明らかとなった。さらには、ナルトアナジャコによって砂浜海岸沖合の植物プランクトンの現存量が制限されていることが判明した。ベントスのろ過食による環境改変は干潟や内湾などの閉鎖性水域で報告されてきた。今回の結果は、外洋に面した開放性の砂浜海岸においてもベントスのろ過食による環境改変が生じていることを意味している。さらには、ナルトアナジャコの巣穴は生痕化石 *Ophiomorpha* 等に対応していることから、地質時代の砂浜海岸・下部外浜環境においてもベントスによるろ過作用が存在していたと考えられる（Seike et al., 2020 Geophysical Research Letters）。このように、本研究の成果は生痕学に留まらず、海洋学・生物学にも重要な意味を持っている。

4-3 大陸棚～斜面～海溝における現世生痕の観察

南海トラフ周辺海域を対象とした白鳳丸研究航海（首席研究者：芦寿一郎）に参加し、大陸棚～斜面における表層堆積物コアを採取した。得られた試料をX線CTスキャンし、堆積構造の詳細な観察を行った。その結果、*Thalassinoides*、*Zoophycos*、および *Scolicia* などの現世生痕の3次元形態を確認できた。そして、各生痕は特有の堆積環境に分布していた。したがって、対応する生痕化石が持つ古環境復元ツールとしての有用性を把握することができた。詳細な内容は、近日中に国際学術誌に投稿予定である。また、陸棚環境に生息する底生魚類イッテンアカチの特異な巣穴開口部を報告した（Seike & Yamashita 2022 Marine Biodiversity）。

4-4 深海平原における現世生痕の観察

東太平洋を対象とした研究船よこすかの研究航海（主席研究者：野牧秀隆）、北太平洋を対象とした学術研究船・白鳳丸の研究航海（主席研究者：小畑元）および南太平洋～南極海～南大西洋を対象とした学術研究船・白鳳丸の研究航海（主席研究者：津田敦、池原実）に参加し、様々な気候条件下で水深3000メートルを超える深海平原から表層堆積物試料を採取した。その結果、気候条件（緯度）によって生物攪拌が及ぶ深度に差があること、および生痕のサイズが異

なる傾向があった。このことは、従来は単一の環境と考えられがちであった深海平原においても、生物攪拌の度合いや性質が、環境により異なっていることを示唆する。詳細な内容については、近日中に国際学術誌に投稿予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Seike Koji, Banno Masayuki, Watanabe Kenta, Kuwae Tomohiro, Arai Masahito, Sato Hajime	4. 巻 47
2. 論文標題 Benthic Filtering Reduces the Abundance of Primary Producers in the Bottom Water of an Open Sandy Beach System (Kashimanada Coast, Japan)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2019GL085338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL085338	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 Quiroz Luis I., Buatois Luis A., Seike Koji, Mangano M. Gabriela, Jaramillo Carlos, Sellers Andrew J.	4. 巻 9
2. 論文標題 The search for an elusive worm in the tropics, the past as a key to the present, and reverse uniformitarianism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 18402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-54643-8	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 Seike Koji, Sassa Shinji, Shirai Kotaro, Kubota Kaoru	4. 巻 223
2. 論文標題 Fate of benthic invertebrates during seabed liquefaction: Quantitative comparison of living organism body density with liquefied substrate density	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Estuarine, Coastal and Shelf Science	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecss.2019.04.025	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 Seike K, Sassa S, Shirai K, Kubota K	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Seike Koji, Goto Ryutaro	4. 巻 15
2. 論文標題 Trophic segregation in a burrow: the stable carbon and nitrogen isotope ratios of the burrowing shrimp <i>Upogebia major</i> and its commensal bivalve <i>Cryptomya busoensis</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plankton and Benthos Research	6. 最初と最後の頁 220 ~ 227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3800/pbr.15.220	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 Seike Koji, Shirai Kotaro, Kubota Kaoru, Ota Yuki, Sassa Shinji	4. 巻 557
2. 論文標題 Does trace fossil size correspond with burrower population density? An example from the modern counterpart of the trace fossil <i>Bichordites</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology	6. 最初と最後の頁 109946 ~ 109946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.palaeo.2020.109946	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 Seike Koji, Sassa Shinji, Shirai Kotaro, Kubota Kaoru	4. 巻 267
2. 論文標題 Sediment hardness and water temperature affect the burrowing of <i>Echinocardium cordatum</i> : Implications for mass mortality during the 2011 earthquake-liquefaction-tsunami disaster	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Estuarine, Coastal and Shelf Science	6. 最初と最後の頁 107763 ~ 107763
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecss.2022.107763	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7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Seike Koji
2. 発表標題 Biogenic sedimentary structures in tsunami deposits provide useful information on the nature of bioturbation
3. 学会等名 34th IAS Meeting of Sedimentology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清家 弘治
2. 発表標題 生痕化石から復元する古生物の生態：行動と分布様式
3. 学会等名 日本古生物学会 第168回例会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清家 弘治
2. 発表標題 津波堆積物中の現世生痕から読み取る生痕化石の古生態学的情報
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清家 弘治、小森 康太郎、田村 亨
2. 発表標題 開放性海浜沖合の海底に高密度で発達する底生生物の巣穴：ベントスの過食が海底生態系に及ぼす影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清家弘治，佐々真志，白井厚太郎，窪田薫
2. 発表標題 Most benthos floats up in liquefied sandy substrates: quantitative evaluation by measuring living-organism density
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清家 弘治
2. 発表標題 イベント堆積物と生物攪拌：津波堆積物の例
3. 学会等名 日本堆積学会2019年大阪大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅原 実悠、清家 弘治、古山 精史朗
2. 発表標題 C T スキャンによって明らかになるニシキテッポウエビの巣穴の成長過程
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 清家 弘治	4. 発行年 2020年
2. 出版社 中央公論新社	5. 総ページ数 200
3. 書名 海底の支配者 底生生物	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>清家弘治 個人ホームページ https://sites.google.com/site/kojiseikejp/</p> <p>清家弘治 Google Scholar http://scholar.google.com/citations?user=Fz10STkAAAAJ</p> <p>清家弘治 Researchmap https://researchmap.jp/kojiseike</p> <p>清家弘治 ORCID https://orcid.org/0000-0002-6938-0350</p>

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
---------	---------