

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15893

研究課題名(和文) 浮遊幼生期に着目した深海熱水噴出域固有動物における分散機構の解明

研究課題名(英文) Larval dispersal of animals endemic to deep-sea hydrothermal vents

研究代表者

矢萩 拓也 (Yahagi, Takuya)

東京大学・大気海洋研究所・助教

研究者番号：50808029

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：深海底に点在する熱水噴出域には、化学合成生産に支えられる特異な底生生物群集が存在する。これら生物は、浮遊幼生期の海洋分散によって個体群間の交流を維持していると考えられているが、1 mmに満たない幼生の分散過程は未解明な点が多い。本研究では、海底から表層圏を範囲に、熱水域固有動物幼生の生態、行動、鉛直・水平分布の包括的な調査を行い、腹足類複数種における、海底から海洋表層への幼生鉛直移動および表層流を用いた長期の分散生態を明らかとした。同幼生行動は熱水噴出域間の長距離移動を可能とするとともに、光合成生態系および化学合成生態系間の物質循環において興味深い生態学的知見と考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、世界の海洋底、特にプレート拡大軸や沈み込み帯付近に形成される熱水噴出域生態系を対象として、地理的分布の規定、生物群集の成立や機能および海洋物質循環に関する新たな知見を得た。深海熱水噴出域に生息する底生生物群集は光合成基礎生産に依存せず、海洋生態系において特異な位置付けにあるとみなせるが、本研究成果は、熱水域固有動物の複数種について、化学合成生態系および光合成生態系をダイナミックに行き来する生活史を明らかとした。これら生物学的知見は、海底熱水鉱床の開発に伴う生物への環境影響が懸念されている昨今において、絶滅危惧種評価や効果的な海洋保護区選定にも貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：Deep-sea hydrothermal vents harbor unique invertebrate assemblages supported by primary production of chemosynthetic bacteria. Larval dispersal contributes to the geographic distribution and population dynamics of the vent-endemic animals, but difficulties in observations of microscopic larvae have hampered the inference of their dispersal process in the ocean. The present study on the biogeography and early-life history traits of vent animals suggests that the planktotrophic larvae of the examined species (Gastropoda: Phenacolepadidae) migrate vertically from hydrothermal vents to the surface water as a compulsory part of their life cycle and utilize the advantages of high food supply and strong currents for growth and dispersal. This finding sheds light on the connectivity between photosynthetic and chemosynthetic ecosystems.

研究分野：海洋生態学

キーワード：深海熱水噴出域 化学合成生態系 底生生物 浮遊幼生 海洋表層

1. 研究開始当初の背景

1977年に東部太平洋ガラパゴス沖の深海熱水噴出域で、チューブワーム（環形動物）やシロウリガイ（二枚貝）などが極めて高密度で生息する特異な生物群集が発見された。このような生物群集は、化学合成細菌が作り出す一次生産に支えられており、海洋において光合成生産に依存しない生態系を形成している。これまでに世界中の熱水噴出域から 600 種を超える固有無脊椎動物が報告されており、それら動物が「深海底に飛び石状に分布する生息域間をどのように移動しているのか」という問いは、その発見以来 40 年にわたって研究者を魅了し続けている。

熱水噴出域の多くは、海底のプレート境界に沿って断続的に分布する。各々の熱水活動は永続的なものではなく、熱水域構成種の存続には、集団間の交流による個体群の維持が必要となる。熱水噴出域に固有な動物の多くは底生であり成体の移動能力が低いため、浮遊幼生期の海洋分散が集団の維持、種の地理的分布の決定ならびに進化過程に重要な役割を果たす。

熱水域動物幼生の発達様式は卵黄栄養型およびプランクトン栄養型に二分でき、前者は底層流により分散するとされる。一方、後者は孵化後に上方へ移動し、摂餌・成長すると考えられているが、1 mm に満たない幼生の直接観測は困難であり、実際の行動、特に分散水深についてはほとんど未解明であった。これまで研究代表者は、プランクトン栄養型の一部の熱水性動物幼生が深海から表層にかけて大規模に鉛直移動することを発見しているが (Yahagi et al., 2017, *Ecology*)、熱水域動物における表層分散の普遍性は明らかでない。

2. 研究の目的

深海熱水域動物における幼生鉛直移動・表層分散は、どの程度普遍的な現象であり、熱水噴出域生態系の成立や機能にどのような役割を果たしているのだろうか。本研究課題は、海底から表層圏を範囲に、熱水域固有動物幼生の生態、行動、鉛直・水平分布を包括的に調査し、分散機構を体系的に理解することを目的に実施した。

3. 研究の方法

具体的な手法として、1) 深海熱水域固有動物の幼生分散過程における既往研究で得られた知見、今後の課題や発展性の整理を行い、2) プランクトン栄養型の熱水域腹足類を材料として、地理的分布の把握・形態観察・集団遺伝学的解析に基づく幼生生態および集団動態の検討、さらに、3) 熱水域動物の幼生行動を簡便に推定するための、腹足類の殻体を用いた新規の成育環境履歴復元手法の確立を行った。

研究に用いる標本は、スウェーデン自然史博物館および海洋研究開発機構より借用し、研究代表者が所属する東京大学大気海洋研究所にて、幼生・成体の形態観察、ならびに成体の地理的・水深分布を網羅する遺伝的解析を実施した。また、ミトコンドリア COI 遺伝子領域に基づく集団解析結果の一部は、米国デューク大学との共同研究によって取得した。

貝殻化学分析に基づく成育環境履歴復元については、北西太平洋および南太平洋の熱水噴出域に生息するユキスズメ科シンカイフネアマガイ属貝類複数種(プランクトン栄養型)を対象に、着底稚貝の幼生殻を用いた酸素安定同位体比分析を行い、熱水域固有動物の幼生期における環境水温の復元を試みた。また、東京大学大気海洋研究所が保有する二次元高分解能二次イオン質量分析装置 NanoSIMS を用い、熱水に特徴的な元素 (ex. Mn, Ba) の含有量を幼生殻と変態後の殻で対比する、成長履歴復元の新手法開発に取り組んだ。対照標本として、潮間帯および潮下帯に生息するアマオブネ科およびユキスズメ科の近縁分類群の解析も実施した。

4. 研究成果

1) 深海の化学合成生態系動物群集の幼生分散過程について生物学および海水動態の観点からレビューし、日本海洋学会誌 *海の研究* において論文発表を行った (矢萩・CHEN・川口, 2019)。同論文では、熱水域固有動物の幼生分散過程を「移出」「移動」「移入」の各段階に分解し、幼生分散に関連する諸要因について生物学および海水動態の観点から既知の知見を整理した。また、既往研究に基づく生態・物理指標数値を用いて、沖縄海域における幼生分散過程の成否を試算するとともに、幼生分散研究における難点や調査・技術的制約を挙げ、現状を打破する実験手法や発展の見込み、海洋観測を基盤とする将来展望について述べた。

2) 南太平洋マヌス・北フィジー・ラウ海盆の熱水噴出域 (水深 1300–2700 m) に生息するシンカイフネアマガイ属の 1 種 *Shinkailepas tollmanni* において、幼生の孵化・着底サイズおよび成貝殻径の計測、ミトコンドリア COI 遺伝子に基づく集団解析を行った。その結果、同種は、海洋表層環境において 1 年を超える長期の浮遊幼生期間をもつと推定され、4000 km に及ぶ地理的分布全域において任意交配集団を形成することを明らかとした。他分類群で得られている知見と対比することで、プランクトン栄養型および卵黄栄養型それぞれの幼生行動が、同海域の熱水域固有動物における集団構造によく反映されていることが示唆された。同成果を原著論文にまとめ、オープンアクセス誌 *PLoS ONE* において公表した (Yahagi, Thaler, Van Dover & Kano, 2020)。

3) 付加成長する殻体をもつ貝類は、殻の形態観察や化学分析により個体の成長履歴を追うことができる点で、幼生分散研究において優れた分類群である。本研究では、熱水域固有腹足類の幼生殻について初の化学分析を行い、浮遊幼生期における生育履歴の復元を試みた。酸素安定同位体比に基づく生育水温の推定では、解析に用いたシンカイフネアマガイ属の個体全てが、浮遊幼生期に海洋表層と同程度の水温を経験していることが示唆された。さらに、二次元高分解能二次イオン質量分析法 NanoSIMS を用いた貝殻微量元素分析の結果、上述種の幼生殻は、成体の殻に比べて熱水環境水に特徴的な元素の含有量が低いことを明らかにした。これらは、浮遊幼生期に深海熱水環境から表層環境へ鉛直移動し分散する生態を示すデータと考える。貝殻酸素安定同位体比および微量元素分析に基づく本手法は、深海熱水域固有軟体動物の幼生分散復元にあたり極めて有効であると期待される。

本研究によって、深海熱水域腹足類の複数種において、地理的分布全域に渡る任意交配集団の形成、海底から海洋表層への幼生鉛直移動、ならびに表層流を用いた長期の分散動態を明らかとした。同知見は海洋表層–深海底および光合成生態系–化学合成生態系間の物質循環を考える上でも興味深い。これまで、深海熱水噴出域固有動物の地理的分布や進化史において、海底の地質学的背景や底層流の重要性が議論されている (Tunnicliffe & Fowler, 1996, *Nature*; Van Dover et al., 2002, *Science*)。よって、深海熱水域固有動物幼生における海洋表層分散は、これまでと全く異なる観点、すなわち、表層海流や海面水温、浅海生物との相互作用などと関連付けた生物地理および進化生態学的考察を可能とし、今後、熱水域動物群集の成立・進化史・生態系機能に関する革新的な仮説検証に繋がると期待される。

本研究期間中にこれら成果について、日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会、日本貝類学会大会、World Congress of Malacology、および Deep-Sea Biology Society 主催のセミナーで発表を行うとともに、2021 年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会にて自由集会「分野横断で挑む海洋幼生生態学」を企画開催し、議論の場を設けた。今後、本研究で得られた新規の未発表データについて原著論文を進め、国際学術誌上で公表する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 頼末 武史・佐藤 允昭・矢萩 拓也 | 4. 巻 76 |
| 2. 論文標題 報告 2021年日本ベントス学会・プランクトン学会合同大会 自由集会「分野横断で挑む海洋幼生生態学」 開催報告 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Benthology | 6. 最初と最後の頁 130 ~ 130 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5179/benthos.76.130 | 査読の有無 無 |
| 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 Yahagi Takuya, Thaler Andrew David, Van Dover Cindy Lee, Kano Yasunori | 4. 巻 15 |
| 2. 論文標題 Population connectivity of the hydrothermal-vent limpet <i>Shinkailepas tollmanni</i> in the Southwest Pacific (Gastropoda: Neritimorpha: Phenacolepadidae) | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 PLoS ONE | 6. 最初と最後の頁 e0239784 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0239784 | 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 矢萩拓也・CHEN Chong・川口慎介 | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 深海の化学合成生態系動物群集の幼生分散過程 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 海の研究 | 6. 最初と最後の頁 97 ~ 125 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5928/kaiyou.28.4-5-6_97 | 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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yahagi Takuya |
| 2. 発表標題 Ontogenetic migration of gastropod larvae between deep-sea hydrothermal vents via surface waters |
| 3. 学会等名 5th Deep-Sea Biology Society Seminar（国際学会） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yahagi Takuya, Kano Yasunori |
| 2. 発表標題 Anti-tropical distribution and larval ecology of Plesiothyreus cinnamomeus (Neritimorpha: Phenacolepadidae) |
| 3. 学会等名 World Congress of Malacology 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kano Yasunori, Yahagi Takuya |
| 2. 発表標題 Bouchet 's theory - vertical migration and surface dispersal of planktotrophic larvae from the deep sea - applies to hydrothermal vent endemics |
| 3. 学会等名 World Congress of Malacology 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 矢萩拓也 |
| 2. 発表標題 深海熱水噴出域ベントスにおける幼生鉛直移動と海洋表層分散 |
| 3. 学会等名 2021年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会 自由集会：分野横断で挑む幼生生態学 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 矢萩拓也・狩野泰則 |
| 2. 発表標題 汽水性笠貝ミヤコドリ(ユキスズメ科)の幼生生態および個体群構造 |
| 3. 学会等名 日本貝類学会令和2年度大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 矢萩拓也・田中健太郎・樋口富彦・白井厚太郎・狩野泰則 |
| 2. 発表標題 深海熱水性腹足類の初期生活史：貝殻酸素同位体比および微量元素分析による推定 |
| 3. 学会等名 2019年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会 |
| 4. 発表年 2019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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

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 | | | |
|----------|------------------------------|--|--|--|
| 米国 | Duke University | | | |
| その他の国・地域 | Queen ' s University Belfast | | | |