

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 6 日現在

機関番号：82678

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26740006

研究課題名(和文)放散虫骨格構造の水平分布に基づく北極海環境指標の探求

研究課題名(英文)An exploration of environmental indices in the Arctic Ocean based on horizontal distribution of radiolarian skeletal structures

研究代表者

池上 隆仁 (IKENOUE, Takahito)

公益財団法人海洋生物環境研究所・海生研中央研究所・研究員

研究者番号：70725051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：劇的な海水減少が進行している北極海において、放散虫群集の環境指標としての有用性を明らかにすることを目的として研究を実施してきた。西部北極海で採集した海洋沈降粒子および多層曳きプランクトンネット試料から放散虫群集の生産量の季節変化と生息分布を調査した。その結果、放散虫群集の生産量および種組成は主に海水密度の季節変動に伴う表層水塊の変化に対応して変動していることが分かった。北極海太平洋冬季水に特徴的に生息する種を発見し、マイクロフォーカスX線CTスキャナー(MXCT)により骨格の内部構造を観察した。MXCTにより得られた3次元モデルを新種記載に初めて応用し、客観性に優れた形態情報として示した。

研究成果の概要(英文)：We have been studying to clarify application of radiolarian assemblages as environmental indices in the Arctic Ocean where drastic sea ice reduction has been observed. Seasonal variation and vertical distribution of radiolarian abundance were investigated by using time-series sediment trap system and a vertical multiple plankton sampler in the western Arctic Ocean. As a result, we found that the abundance and species composition of radiolarian assemblages varied in response mainly to variation of surface water mass conditions associated with seasonal changes in sea-ice concentration. We also found a new species from the western Arctic Ocean, which was restricted to the Pacific Winter Water, and observed in detail the internal structure of its skeleton using Microfocus X-ray Computed Tomography (MXCT). We applied three-dimensional imaging obtained by the MXCT for the first time in a species description and showed the morphological information with excellent objectivity.

研究分野：生物海洋学、微古生物学

キーワード：放散虫 動物プランクトン 北極海 海水減少 海洋生態系 物質循環 セジメントトラップ マイクロフォーカスX線CTスキャナ

1. 研究開始当初の背景

近年の北極海では、劇的な海水減少が観測されている。北極海海盆域はこれまで、一年を通して海水に覆われ、生物生産は低いと考えられてきた。しかしながら、2012年、北極海の海水面積が観測史上最小を記録する中、海水下に大量の藻類が繁殖し (Arrigo et al., 2012, Science, 336, 1408)、北極海の広い範囲で海底に堆積する現象が報告されるようになった (Boetius et al., 2013, Science, 339, 1430-1432)。

研究代表者は、海水下の有光層以深でも上記のような劇的な変化が記録されているのではないかと考えた。珪質殻動物プランクトンである放散虫は、多様な種が海洋表層から深層まで各水塊の環境に応じて棲み分けている。藻類の生息域は有光層に限られるため、海水下で進行する劇的な海洋環境変化を有光層以深で記録している可能性があるのは、様々な水深に生息する放散虫群集である。

これまで北極海における放散虫群集は、多様性が低く、限られた種が優占することが知られていたが (e.g., Bjørklund and Kruglikova, 2003, Mar. Micropaleontol., 49, 231-273)、近年になって優占種の中で北極海固有の骨格構造を持つ種の存在が指摘された (Kruglikova et al., 2009, Mar. Micropaleontol., 72, 26-48)。研究代表者は、北極海のさまざまな海域で採集された放散虫骨格の構造を比較し、予察的な観察を行った。その結果、これまで同種とされていた放散虫種に多様な骨格構造が存在し、各海域に特徴的な骨格構造を持つ放散虫種が存在することに気づいた。同種とされていた放散虫群集の生息環境はそれぞれの海域で異なる。そのため、各生息海域での海洋環境の違いが骨格構造に違いを持たせているはずである。以上のことから、北極海の海水減少に伴う他の海域からの水塊の流入や海流の変化を放散虫群集の骨格構造が反映しているという仮説を立て、北極海各地で特徴的な骨格構造を持つ放散虫群集が各地の環境にどのように対応しているか明らかにしたいと考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究では、北極海放散虫群集の水平分布を調査し、特徴的な骨格構造が北極海各地の環境とどのように対応しているかを明らかにする。その上で、西部北極海に係留された時系列セジメントラップ試料により、劇的な海水減少が進行している北極海の海水下の環境変化をモニターし、多様な骨格構造を持つ北極海放散虫群集の環境指標としての有用性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、以下の2つの方法で取り組むこととした。

(1) 西部北極海で採集したプランクトンネ

ット試料を用いて北極海放散虫群集の多様な骨格構造が西部北極海においてどのように水平分布しているかをまとめる。そして、特徴的な骨格構造と各地の環境との対応を明らかにする。

(2) (1) で得られた特徴的な骨格構造を持つ種について、セジメントラップ試料から季節・経年変化を、多層曳きプランクトンネット試料からは生息深度分布をまとめる。その上で、放散虫群集の季節・経年変化と北極海の各水塊の環境変化との関係を明らかにし、北極海の環境指標種として提案する。

4. 研究成果

(1) 西部北極海ノースウィンド深海平原とカナダ海盆域のプランクトン試料の比較から、各海域の水塊に特徴的な種を明らかにした。ノースウィンド深海平原の表層水塊では海水縁の水塊を好む *Amphimelissa setosa* が優占し、カナダ海盆域の表層水塊では *Actinomma* 属の幼形が優占することが分かった (図1)。

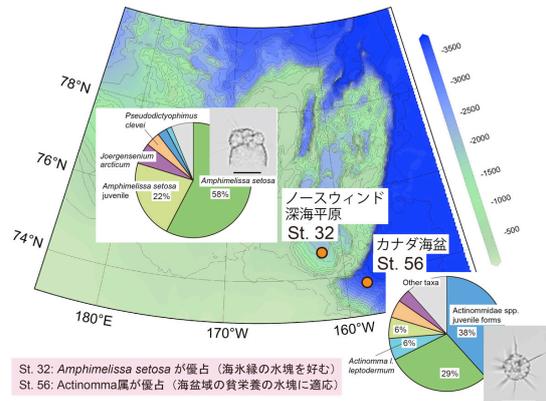


図1 北極海ノースウィンド深海平原とカナダ海盆域における放散虫群集組成の比較

また、季節海水域である西部北極海においてセジメントラップにより捕集した海洋沈降粒子試料 (2010年10月から2012年9月までの2年分) および多層曳きプランクトンネットにより採集したプランクトン試料 (2013年9月採集分) について放散虫群集解析を行った。その結果、ノースウィンド深海平原 (観測点 NAP) における放散虫群集の生産量及び種組成は、主に海水密度度の季節変動に伴う表層水塊の変化に対応して変動していることが分かった (図2)。西部北極海の海水下における放散虫群集の季節・経年変化を連続的に示すことができたのは本研究が初めてである。ノースウィンド深海平原において、2012年夏には2011年夏に比べほとんどの放散虫群集で生産量が減少する一方で、カナダ海盆域表層水塊に多産する群集 (*Actinomma* 属幼形、*Actinomma leptodermum*, *Actinomma boreale*) については生産量が増加していた。このことは、海水減少によるポーフォート循環強化とそれに伴うカナダ海盆域表層水塊の拡大を反映していると考えられた。以上のことから、海水

減少による海流や水塊の変化に対し、放散虫群集が有効な指標となることが示唆された。

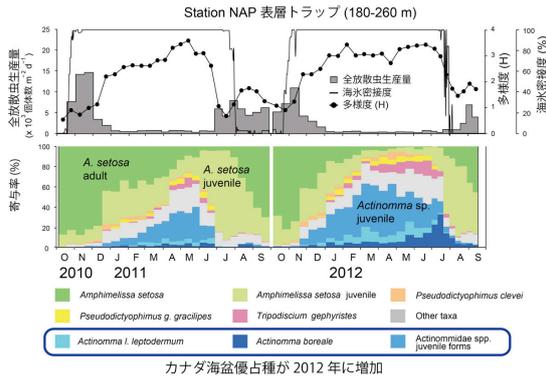


図2 ノースウインド深海平原における北極海放散虫群集の生産量および種組成の季節・経年変化。青色で示した群集の増加がカナダ海盆地表層水塊の拡大を反映している。

(2) 北極海各地で採集された放散虫骨格の構造を比較し、観察を行った結果、これまで同種とされていた放散虫種に多様な骨格構造が存在することを確認した。それらの中には、新種も存在し、本研究では *Joergensenium arcticum* と *Joergensenium clevei* の2種を新たに記載した。*J. arcticum* は現在までに北極海のみで生息が確認されている。また、*J. arcticum* (図3) はエンタクチナリア目 (Entactinaria) に属し、北極海放散虫群集の主要なグループの一つであるスプメラリア目 (Spumellaria) *Actinomma* 属のグループと外形が非常によく似ている。そのため、本種はこれまで *Actinomma* 属の種と混同されていたが、顕微鏡およびマイクロフォーカス X 線 CT による内部構造の詳細な観察の結果(図4)、別種であることが明らかになった。本種の記載には生物顕微鏡、走査型電子顕微鏡による従来の観察方法に加え、放散虫の種記載では初めての試みとなるマイクロフォーカ

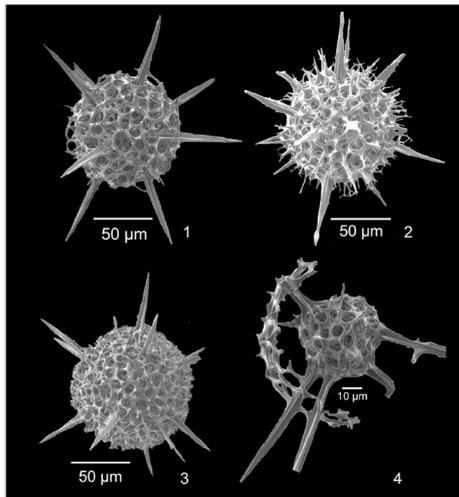


図3 走査型電子顕微鏡で撮影した *Joergensenium arcticum*。1-3は *J. arcticum* の外骨格を撮影したもので、4は外骨格が破損した個体から内骨格を撮影したもの。本種の同定には4の内骨格の更に内側に存在する内部骨針と呼ばれる構造の観察が決め手となった。

ス X 線 CT (MXCT) を用いた。放散虫の種の同定には放散虫骨格の外形だけでなく、内部構造の観察が重要であるため、MXCT を用いることでより客観性に優れた形態情報を示すことが可能となった(図4)。本種の記載に使用した標本は国立科学博物館に収蔵した。

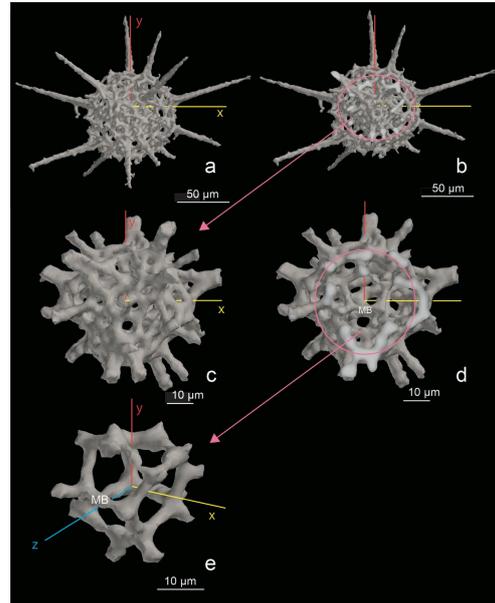


図4 マイクロフォーカス X 線 CT 撮影による *Joergensenium arcticum* の3次元モデル。aは *J. arcticum* 骨格の外形、bはaの最外殻をXY平面で切断し、内殻を露わにしたもの。cは内殻のみを切り出したものだが、この内殻の中にさらに内部骨針が存在する。dはcの内殻をXY平面で切断し、内部骨針を露わにしたもの。eは内部骨針のみを切り出したもの。マイクロフォーカス X 線 CT 撮影では検体を破壊することなく、これらの観察が可能である。

多層曳プランクトンネットにより本種の生息深度を調査した結果、北極海の水深100-250 m に存在し、最も水温の低い太平洋冬季水 (-1.7°C) と呼ばれる水塊にのみ特徴的に生息することが分かった(図5)。セジ

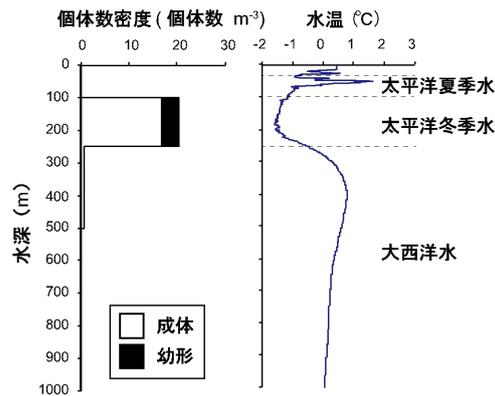


図5 西部北極海における *Joergensenium arcticum* の生息深度分布

メントラップによる時系列観測からは本種の生産量が海氷生成に伴うブライン水 (低温・高塩分水) の沈み込みと関連している可能性が示された。太平洋冬季水は表層の太平洋夏季水に比べ栄養塩豊富なため、貧栄養な海盆へ陸棚の栄養塩を供給する重要なソースになっている。また、太平洋冬季水は pCO2

が高く、炭酸塩飽和度 Ω が低いため、北極海における海洋酸性化のリスク評価や将来予測を進める上で注目すべき水塊である。この水塊の消長は、今後海水が消失していくであろう夏季の生物生産を左右するため、北極海の生態系に大きな影響力を持っている。太平洋冬季水に生息する種を追跡することで、急激に変わりゆく北極海の海洋環境をモニターする指標生物として今後役立つことが期待される。

まとめ

本研究課題では、劇的な海水減少が進行している北極海の海水下の環境変化をモニターし、多様な骨格構造を持つ放散虫群集の環境指標としての有用性を明らかにすることを目的とした。

海洋沈降粒子およびプランクトン試料の生物群集解析を行い、西部北極海の海水下における放散虫群集の生産量・種組成の季節・経年変化を初めて連続的に示した。放散虫群集の季節・経年変化に生息深度の情報を加えることで、北極海の各水塊に対応する指標種を特定した〔雑誌論文③、④〕。本研究で特定した環境指標種を、並行して進めていたベーリング海の放散虫生層序および古海洋環境変動の研究に応用した〔雑誌論文①〕。放散虫新種 2 種を発見し、記載には生物顕微鏡、走査型電子顕微鏡による従来の観察方法に加え、放散虫の種記載では初めての試みとなるマイクロフォーカス X 線 CT スキャナー (MXCT) を用いた〔雑誌論文②〕。

本研究を通して以下のことが明らかになった。

(1) 北極海放散虫群集の生産量および種組成は主に海水密接度の季節変動に伴う表層水塊の変化に対応して変動していることが分かった。

(2) 北極海放散虫群集の種組成の経年変化は海水減少によるポーフォート循環強化とそれに伴うカナダ海盆域表層水塊の拡大イベントを反映していた。このことから、放散虫群集は、海水減少による海流や水塊の変化に対し有効な指標となることが分かった。

(3) 北極海放散虫群集は水深に応じて明確な棲み分けを行っており、各水塊の変化に応じて、生産量や分布が変化することが分かった。

(4) 放散虫新種 2 種を記載し、そのうち *Joergensenium arcticum* は、北極海の水深 100-250 m に存在し、最も水温の低い太平洋冬季水 (-1.7°C) と呼ばれる水塊にのみ特徴的に生息することが分かった。

(5) 放散虫の種の同定には放散虫骨格の外形だけでなく、内部構造の観察が重要であることから MXCT を用いることでより客観性に優れた形態情報を示せることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- ① Ikenoue, T., Okazaki, Y., Takahashi, K. (2016). Bering Sea radiolarian biostratigraphy and paleoceanography at IODP Site U1341 during the last four million years. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* (査読あり), 125-126, 38-55. DOI:10.1016/j.dsr2.2015.03.004.
 - ② Ikenoue, T., Bjørklund, K. R., Dumitrica, P., Krabberød, A. K., Kimoto, K., Matsuno, K., Harada, N. (2016). Two new living Entactinaria (Radiolaria) species from the Arctic province: *Joergensenium arcticum* n. sp. and *Joergensenium clevei* n. sp.. *Marine Micropaleontology* (査読あり), 124, 75-94. DOI:10.1016/j.marmicro.2016.02.003.
 - ③ Ikenoue, T., Bjørklund, K. R., Kruglikova, S. B., Onodera, J., Kimoto, K., Harada, N. (2015). Flux variations and vertical distributions of siliceous Rhizaria (Radiolaria and Phaeodaria) in the western Arctic Ocean: indices of environmental changes. *Biogeosciences* (査読あり), 12, 2019-2046. DOI:10.5194/bg-12-2019-2015.
 - ④ Ikenoue, T., Bjørklund, K. R., Kruglikova, S. B., Onodera, J., Kimoto, K., Harada, N. (2014). Flux variations and vertical distributions of microzooplankton (Radiolaria) in the western Arctic Ocean: environmental indices in a warming Arctic. *Biogeosciences Discuss* (査読なし), 11, 16645-16701.
- 〔学会発表〕 (計 3 件)
- ① Ikenoue, T. (2016). An exploration of environmental indices based on seasonal and vertical distribution of radiolarians in the Arctic Ocean through collaborative research with Norway, Japan-Norway Arctic Science and Innovation Week 2016 (ASIW2016), 2016 年 6 月 3 日, 東京国際交流館 プラザ平成 (東京都・江東区) .
 - ② Ikenoue, T., Bjørklund, K. R., Kruglikova, S. B., Onodera, J., Kimoto, K., Harada, N. (2015). Seasonal and annual flux changes of microzooplankton (Radiolaria) in the western Arctic Ocean: environmental indices in a

warming Arctic, ASSW 2015 (Arctic Science Summit week), 2015年4月28日, 富山国際会議場 (富山県・富山市) .

- ③ Ikenoue, T., Bjørklund, K. R., Kruglikova, S. B., Onodera, J., Kimoto, K., Harada, N. (2015). Seasonal and annual flux changes of radiolaria under the seasonally sea-ice covered conditions in the western Arctic Ocean, The 14th Meeting of the International Association of Radiolarists, 2015年3月26日, Antalya (Turkey).

[その他]

- ① オスロ大学 (ノルウェー) が運営する放散虫データベース
<http://www.radiolaria.org/>
本研究で新種記載した北極海放散虫を紹介した。
- ② ASIW2016 で講演したオスロ大学 (ノルウェー) との共同研究成果に関する web ページ
<http://in.japan.no/arctic2016-day2/speaker/takahito-ikenoue/>
- ③ 共同研究機関 (海洋研究開発機構) の web ページによる論文内容の紹介
トピックス「北極海太平洋冬季水で放散虫新種を発見～変わりゆく北極海における新たな海洋環境指標種～」
<https://ebcrpa.jamstec.go.jp/rcgc/j/topics/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池上 隆仁 (IKENOUE, Takahito)
公益財団法人海洋生物環境研究所・海生研
中央研究所・研究員
研究者番号：70725051