

PRESS RELEASE



公益財団法人
海洋生物環境研究所

〒162-0801

東京都新宿区山吹町 347 藤和江戸川橋ビル 7 階

令和 3 年 9 月 2 9 日

公益財団法人 海洋生物環境研究所

ケイ質殻プランクトンのシリカ定量方法を開発 ～北極海のケイ素循環における放散虫の役割を解明～

海洋生物環境研究所、海洋研究開発機構、オスロ大学（ノルウェー）、産業技術総合研究所の研究チームは、ケイ質殻プランクトンのシリカ（ SiO_2 ）を迅速、正確に定量する新たな手法を開発するとともに、西部北極海のケイ素循環における放散虫の役割を明らかにしました。本研究で開発した手法は、地質試料中のプランクトン化石にも適用可能であり、過去から現代までの海洋物質循環におけるケイ質殻プランクトンの機能解明を通して、地球温暖化による生物を介した環境変化の将来予測につながることを期待されます。

本成果は、2021 年 9 月 7 日に *Limnology and Oceanography* 誌に掲載されました (<https://doi.org/10.1002/lno.11928>)。

【キーワード】 原生生物、放散虫、ケイ素循環、マイクロフォーカス X 線 CT、北極海

【研究チーム】

公益財団法人海洋生物環境研究所：池上 隆仁

国立研究開発法人海洋研究開発機構：木元 克典、中村 由里子、小野寺 丈尚太郎、原田 尚美、本多 牧生、佐藤 都、渡邊 英嗣、伊東 素代、西野 茂人、菊地 隆

オスロ大学：Kjell R. Bjørklund

国立研究開発法人産業技術総合研究所：倉本 直樹、植木 正明、大田 由一

詳細は、添付資料をご覧ください。

<問い合わせ先>

担当：事務局 研究企画調査グループ

池上 隆仁、眞道 幸司

TEL. 03-5225-1161 FAX. 03-5225-1160

E-mail: kikaku@kaiseiken.or.jp

以 上

公益財団法人
海洋生物環境研究所JAMSTEC 国立研究開発法人
海洋研究開発機構
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

ケイ質殻プランクトンのシリカ定量方法を開発 ～北極海のケイ素循環における放散虫の役割を解明～

【概要】

西部北極海は地球温暖化による海氷減少が最も著しい海域であり、海氷減少に伴って生物ポンプ*1が活発化した場合、北極海が重要な二酸化炭素吸収域となることが想定されます。生物ポンプの効率を左右するケイ質殻プランクトン*2の組成を定量的に把握することは、地球全体の物質循環の変化を科学的に評価する上で重要です。

海洋生物環境研究所の池上隆仁研究員は、海洋研究開発機構、オスロ大学、産業技術総合研究所の研究グループとともに西部北極海の放散虫*3由来の生物源シリカ沈降フラックス*4を定量することに成功し、生物地球化学サイクルにおいてこれまで見過ごされてきた放散虫が西部北極海のケイ素循環に重要な役割を担っていることを初めて明らかにしました（*Limnology and Oceanography* 誌に掲載）。

本研究では最新のマイクロフォーカス X 線 CT スキャナー*5を用い、複雑な形態を持つ放散虫骨格の体積をサブミクロンの空間分解能で精密計測を行いました。また、一部の大型種については精密電子天びんを用いてその骨格の質量をサブマイクログラムの精度で計測し、体積と質量の測定結果から密度を見積もりました。その密度と他の放散虫骨格の体積を組み合わせることで、他の放散虫骨格の質量を求め、シリカの質量をかつてない精度で定量することに成功しました。その結果、西部北極海において、放散虫由来の生物源シリカ沈降フラックスは、秋から春季の海氷被覆期には 10 wt%以下であるが、夏季の開放水面期には最大で 35 wt%に達すると推定され、放散虫が夏季の北極海のケイ素循環に大きく寄与していることを明らかにしました。

本研究は、従来法では明らかにできなかった西部北極海における放散虫の物質循環への役割の重要性を初めて提唱するものです。本研究成果は、地球温暖化により変わりゆく西部北極海の生物生産と物質循環のモニタリングに役立つことが期待されます。さらに、本研究で開発した定量方法を地質試料中のプランクトン化石に応用することで過去から現代までの物質循環変遷の解明につながることを期待されます。

なお、本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金基盤研究 S（研究課題番号：15H05712）、基盤研究 A（研究課題番号 15H01736）、若手研究 B（研究課題番号：26740006）、基盤研究 C（研究課題番号 17K00539）、新学術領域研究（研究課題番号 20H04984）、および文部科学省の北極域研究加速プロジェクト ArCS I-II（研究課題番号 JPMXD1420318865）の一環として実施したものであり、本成果は、国際陸水海洋学会連合（ASLO）発行の学術誌 *Limnology and Oceanography* 誌に 2021 年 9 月 7 日付けで掲載されました（<https://doi.org/10.1002/lno.11928>）。

タイトル：New evaluation of species-specific biogenic silica flux of radiolarians (Rhizaria) in the western Arctic Ocean using microfocus X-ray computed tomography

著者：池上 隆仁¹、木元 克典²、中村 由里子²、Kjell R. Bjørklund³、倉本 直樹⁴、植木 正明⁴、大田 由一⁴、小野寺 丈尚太郎²、原田 尚美²、本多 牧生²、佐藤 都²、渡邊 英嗣²、伊東 素代²、西野 茂人²、菊地 隆²

1. 海洋生物環境研究所、2. 海洋研究開発機構、3. オスロ大学（ノルウェー）、4. 産業技術総合研究所

【背景】

ケイ藻や放散虫などのケイ質殻プランクトンは、海水から直接ケイ酸を取り込んで非晶質シリカ (SiO_2) の殻や骨格を形成します。このような生物起源の非晶質シリカの殻や骨格（以下、ケイ質殻と呼ぶ）は、総称して生物源シリカまたは生物源オパールと呼ばれます。ケイ質殻は、自身が海洋沈降粒子としてケイ素を深海に輸送するだけでなく、他の海洋沈降粒子を深海に運ぶバラスト粒子*6 の役割を果たすため、生物ポンプの効率を高め、生物地球化学サイクルに重要な役割を果たします。生物ポンプの効率は、海域のプランクトン組成によって変化するため、地球規模のケイ素・炭素循環をより深く理解するためには、海洋沈降粒子中の生物源シリカを構成するケイ質殻プランクトンの分類群を明らかにすることが重要です。しかしながら、個々の分類群の正確な定量は難しく、海域や季節ごとにどのケイ質殻プランクトンがどれだけの寄与をしているかはこれまでほとんど分かっていませんでした。

本研究で対象とした西部北極海は地球温暖化による海氷減少が最も著しい海域です。海氷減少に伴って生物ポンプが活発化することで、北極海が重要な二酸化炭素吸収域となることが想定されます。すなわち、北極海の生物ポンプの効率を左右するケイ質殻プランクトン群集の組成を定量的に把握することは、地球全体の物質循環の変化をより正確に捉えることにつながり、このことは将来の地球温暖化を予測する上で極めて重要です。そこで、本研究では生物地球化学サイクルにおいてこれまで見過ごされてきた放散虫のケイ素循環における寄与に着目しました。

放散虫の種ごとのシリカ含有量の値を推定する方法としてはこれまでに以下の3つの方法が試みられました。1つ目は、複数個体を集めて化学分析により直接ケイ素の量を測定する方法、2つ目は、精密電子天びんを用いて大型（数百 μm 以上）の分類群の質量を測定し、その平均値を取る方法、3つ目は球、円錐、円柱、楕円体、直方体などの幾何学的形状を組み合わせた単純な骨格モデルの体積から質量を推定する方法です。実際、放散虫の骨格は非常に複雑な構造をしているため、単純な幾何学的モデルでは正確に再現できません。また、放散虫1個体の質量は、市販されている電子天びんの分解能の限界である $0.1 \mu\text{g}$ よりも軽い場合が多く、そのような放散虫の質量は直接測定することはできず、また特定の種類だけを選択し大量に集めることは困難です。そこで本研究では、非破壊で3次元画像を得ることができるマイクロフォーカス X 線 CT の技術に着目し、これまで困難とされてきた放散虫1個体からのシリカの定量化を試みました。

【研究手法と成果】

本研究では、高分解能 X 線検出器（幾何学的分解能： $0.45 \mu\text{m}$ /ボクセル）を備えたマイクロフォーカス X 線 CT スキャナー：ScanXmate-DF160TSS105（コムスキャンテクノ株式会社）を使用して放散虫骨格の撮影を行いました。放散虫骨格の3次元モデルは、骨格のあらゆる角度から X 線透過画像を収集し、一連の2次元断面画像を生成することによって得られます。16ビット（65,536階調）のグレースケールで表現されたこれらの断層画像を積層し、3次元画像可視化処理ソフトウェア MolcerPlus（有限会社ホワイトラビット）により3次元モデルを構築しました。X 線 CT の撮影は通常、空気中で行われ、再構成された画像は図1に示す以下の要素で構成されます：①対象物（放散虫の骨格）、②対象物に付随するパーシャルボリューム、③対象物の周囲の空気。これらは互いに重なりあって累積ヒストグラムとなっており、それぞれの要素は撮影条件や撮影対象によっても大きく変動するため、放散虫骨格の3次元モデルの体積を直接求めることは困難です。そこで、本研究では放散虫の同一視野に隣接している周囲の空気のヒストグラムの分布を計測ごとに求め、その最大輝度（グレースケール）値を空気と対象物（放散虫）の境界と認定しました。この場合、空気のグレースケール値の最も高い値が、空気と放散虫骨格の間の閾値として示されたこととなります（図1）。したがって、この閾値以上のヒストグラム全体が放散虫骨格に由来すると考えることができます。これと同時に、本手法で得られた放散虫の3次元モデルと走査型電子顕微鏡（SEM）による画像を比較検討したところ、放散虫骨格の微細な構造を含めほぼすべてが欠損することなく解像されていることを確認しました（図2）。これにより本

手法の妥当性が高いことが示されました。

本研究では、2012年10月4日から2013年9月18日にかけて、西部北極海のチュクチ・ボーダーランド海域（ノースウィンド海嶺、Chukchi Plateau、チュクチ深海平原等からなる海域）の東側（観測点 NAP12t）と西側（観測点 CAP12t）に設置した2台のセジメント・トラップ*7で採取した海洋沈降粒子に含まれる放散虫を研究対象としました（図2）。主要な13分類群の放散虫を選択し、上記の手法を用いて3次元モデルを構成し（図3）、それぞれの体積をサブミクロンの空間分解能で精密計測しました。さらに、電子天びん（メトラートレド UMX5）を用いて400 μm前後の大型種である *Spongotrochus glacialis* の質量をサブマイクログラムの精度で計測し、その密度を見積もりました。各分類群の体積とその密度から個々の放散虫骨格の質量を求めることでシリカの質量を定量し、放散虫シリカ沈降フラックスとその組成を初めて明らかにしました（図4）。その結果、西部北極海の放散虫シリカの主要な運び手は、*Amphimelissa setosa*（平均値：NAP12tで55 wt%、CAP12tで71 wt%）と *Spongotrochus glacialis*（平均値：NAP12tで37 wt%、CAP12tで23 wt%）の2種であることが特定できました。マイクロフォーカス X線 CT を用いた本研究手法は個々のケイ質殻プランクトンのシリカ量を従来の手法よりもはるかに正確に定量できるため、種による特異的な生物源シリカ沈降フラックスを評価するための強力なツールとなります。また、バルク試料に含まれる生物源シリカと比較することで、生物源シリカ沈降フラックスに対する放散虫シリカの寄与を初めて明らかにすることができました。放散虫シリカの寄与は、海氷被覆期において10 wt%以下でしたが、2012年10月～11月および2013年8月～9月の開放水面期には、観測点 NAP12t において最大で35 wt%に達する高い寄与が観測されました（図5）。西部北極海では放散虫以外の生物源シリカの主成分はケイ藻類ですが、季節によってはケイ藻類だけでなく放散虫も生物地球化学サイクルの駆動に大きく貢献していることが示唆されました。本研究成果は海氷減少の著しい北極海における生物生産と物質循環のモニタリングおよび、生物を介した環境変化の将来予測に役立つことが期待されます。

【今後への期待】

近年の研究では、ケイ質殻プランクトンの殻に含まれる酸素同位体比とケイ素同位体比の測定が、新たな古海洋プロキシ*8として期待されています。そのため、生物源シリカを構成する主要なケイ質殻プランクトンの量比を決定することは、ケイ質殻から得られる同位体比のシグナルを解釈する上で有用な情報となります。マイクロフォーカス X線 CT の利点は、細胞の体積ではなく、ケイ質殻そのものの体積を測定しているため、地質試料中の化石にも適用できることです。微生物の3次元形態を観察する方法としては、レーザー共焦点顕微鏡がありますが、3次元での分解能が低いため、体積や密度の精密な測定には適していません。また、レーザー共焦点顕微鏡は蛍光観察が必要なため、生物の死骸には適用できません。したがって、私たちの開発したマイクロフォーカス X線 CT による生物源シリカの定量法は、化石を含む微細な骨格の体積を求めるのに最適な手法といえます。本研究の手法を北極海以外の海域や地質試料に適用することで、過去から現在にいたる地球全体の物質循環におけるケイ質殻プランクトンの役割を解明することが期待されます。

〔用語解説〕

*1 生物ポンプ：大気から海洋表層に吸収された二酸化炭素は、植物プランクトンの光合成によって有機物として固定される。その後、食物連鎖の一連の過程を経て、植物プランクトンの死骸やそれを食べた動物プランクトンの死骸や糞は凝集して海洋沈降粒子として沈降し、深海に炭素を隔離する。このような生物起源の粒子による炭素の輸送の仕組みを生物ポンプと呼ぶ。海洋の二酸化炭素吸収能力を把握するためには、この生物ポンプの仕組みを定量的に把握することが重要。

*2 ケイ質殻プランクトン：ケイ藻、放散虫、フェオダリア、ケイ質鞭毛藻などの非晶質シリカの殻や骨格を形成する微小プランクトンの総称。

*3 放散虫：ケイ質殻プランクトンの1グループで、海洋に生息する単細胞の微小動物プランクトン。シリカ (SiO_2) または硫酸ストロンチウムの内骨格を持つアメーバのような生き物。多くの場合、内骨格の大きさは1 mm の約 $1/20$ から $1/5$ 程度。死んだ後も骨格は腐らずに残り、海底に堆積し、化石となる。5億年以上前の地層からも化石が見つかる。放散虫のシリカが長い時間をかけて海底に堆積するとチャートと呼ばれる岩石になる。

*4 生物源シリカ沈降フラックス：生物源シリカはケイ質殻プランクトン等により形成された非晶質シリカ (SiO_2) の殻や骨格の総称。沈降フラックスは単位時間、単位面積あたりを通過する沈降粒子の量。生物源シリカ沈降フラックスは1日に 1 m^2 あたりどれくらいの量の生物源シリカが沈降粒子として降っているかを表す。

*5 マイクロフォーカス X線 CT スキャナー：マイクロメートルの大きさの検体に X線を照射することで得られた透過像を再構成することで、形態の3次元モデル化ができる装置。非破壊で、検体の表面構造と内部構造の観察が可能であり、回転したり断面を見たりが自在なほか、長さ・角度計測などもできる。

*6 バラスト粒子：海洋表層で形成された有機物が海洋深層に沈降する際におもりの役割を担う粒子。大陸棚から離れた北極海盆地では、他海域に比べてバラストとなるケイ藻の殻などが少ないために、生物生産量に対する有機物沈降量の割合が小さいことが報告されている。

*7 セジメント・トラップ：海水中を沈降してくる粒子をあらかじめ設定した時間間隔（本研究では2週間程度）で長期間（本研究では約1年間）、時系列で自動捕集するための装置。本体は大きなロートとロートの下の多数の捕集容器で構成される。浮き球・ロープ・切り離し装置・錨を用いて海中の任意の深さに係留し、一定期間後に回収することで海洋沈降粒子試料が得られる。

*8 古海洋プロキシ：地質時代の水温、塩分、栄養塩量など過去の海洋環境を知るための代替指標（プロキシ）のこと。放散虫は種類ごとに様々な水深に棲み分けているため、海洋中層や深層の古海洋プロキシとして重要。放散虫のケイ質殻に含まれる酸素やケイ素の同位体比からは過去の水温や栄養塩量を復元できる可能性がある。

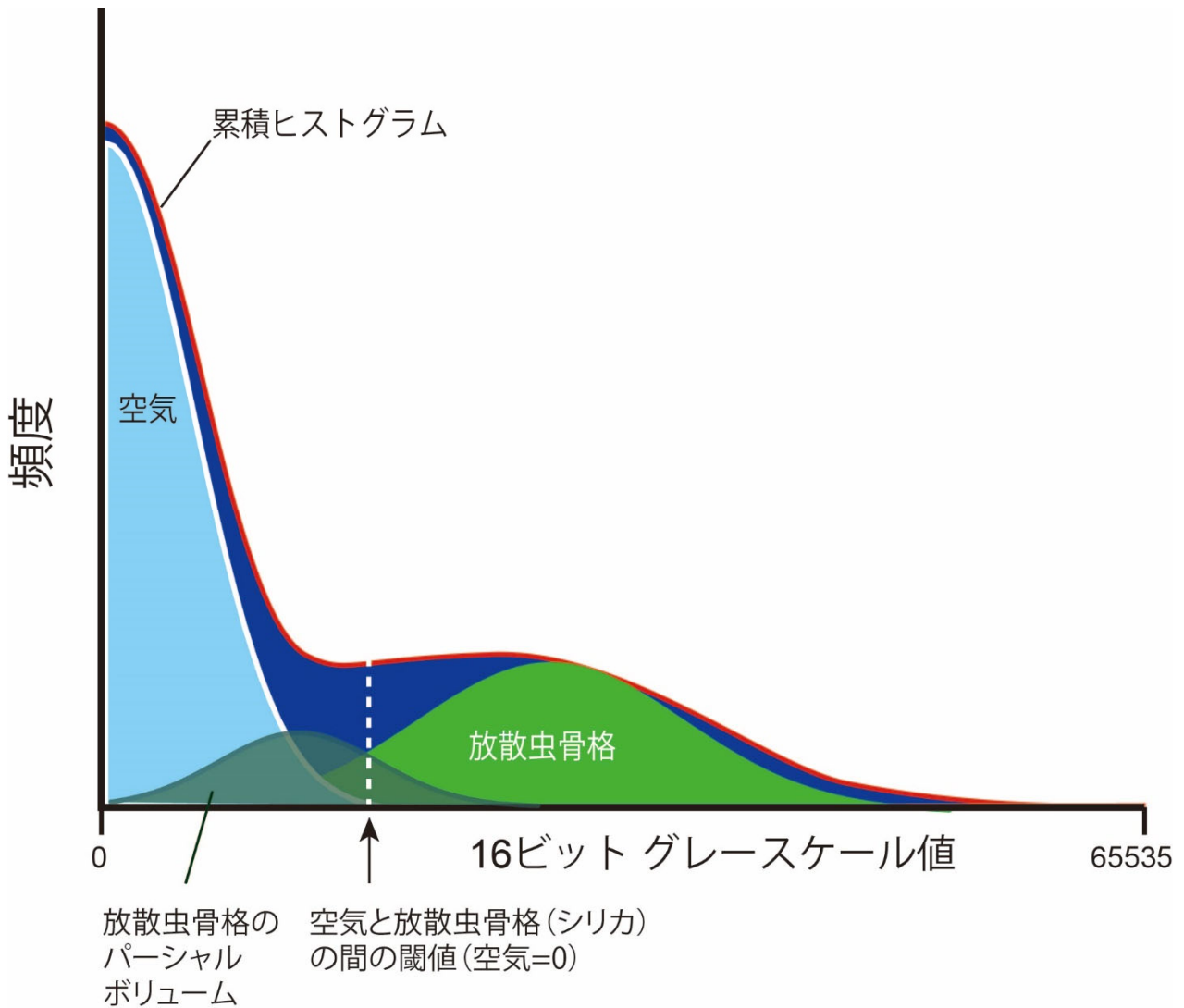


図1. マイクロフォーカスX線CT撮影により得られる16ビットグレースケール値のヒストグラムの概念図。累積ヒストグラムは以下の構成要素からなる。1)放散虫骨格、2)放散虫骨格の周囲に発生したパーシャルボリューム、3)周囲の空気。空気と放散虫骨格の間の閾値は、空気の最も高いグレースケール値で定義される。

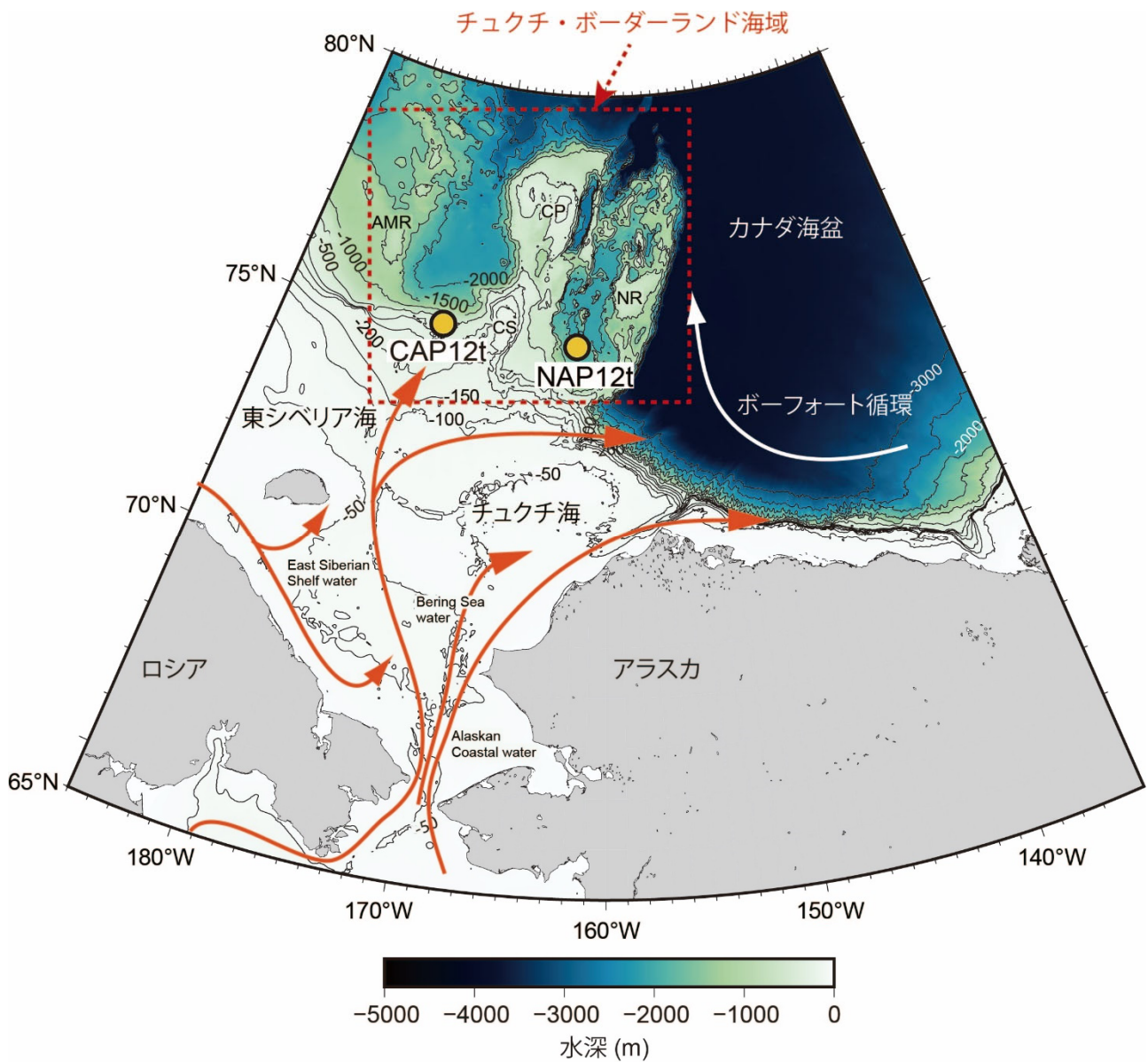


図2. 調査海域と観測点。図中の黄色の丸は、観測点 NAP12t および CAP12t のセジメント・トラップの係留位置を示す。実線矢印は表層の海流を表す。赤い点線の枠内はチュクチ・ボーダーランド海域を示す。NR は Northwind Ridge (ノースウインド海嶺)、NAP は Northwind Abyssal Plain (ノースウインド深海平原)、CS は Chukchi Spur、CP は Chukchi Plateau、CAP は Chukchi Abyssal Plain (チュクチ深海平原)、AMR は Alpha-Mendelev Ridge (アルファ・メンデレーフ海嶺) を表す。

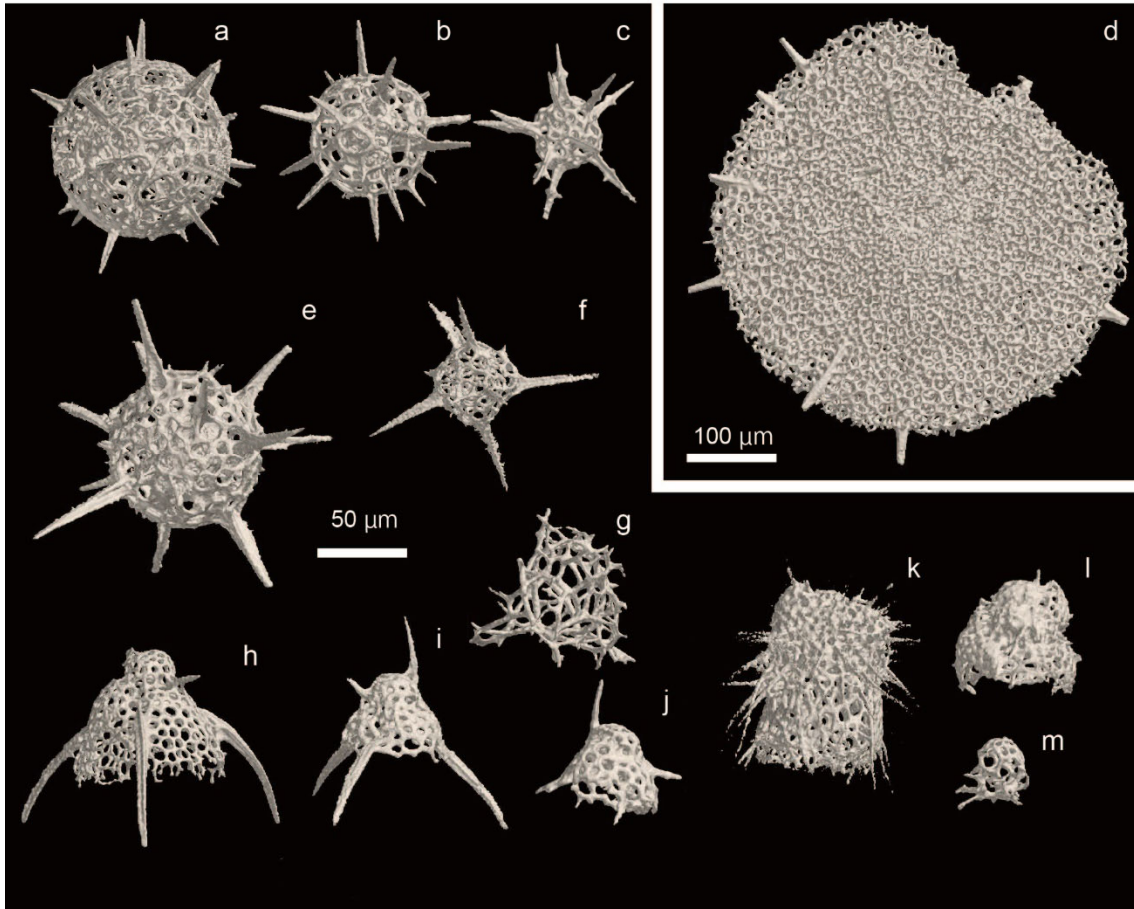


図 3. 西部北極海の放散虫の主要な 13 分類群を CT スキャンして得られた 3 次元モデル。d は *Spongotrochus glacialis*、k は *Amphimelissa setosa* の 3 次元モデルを表す。

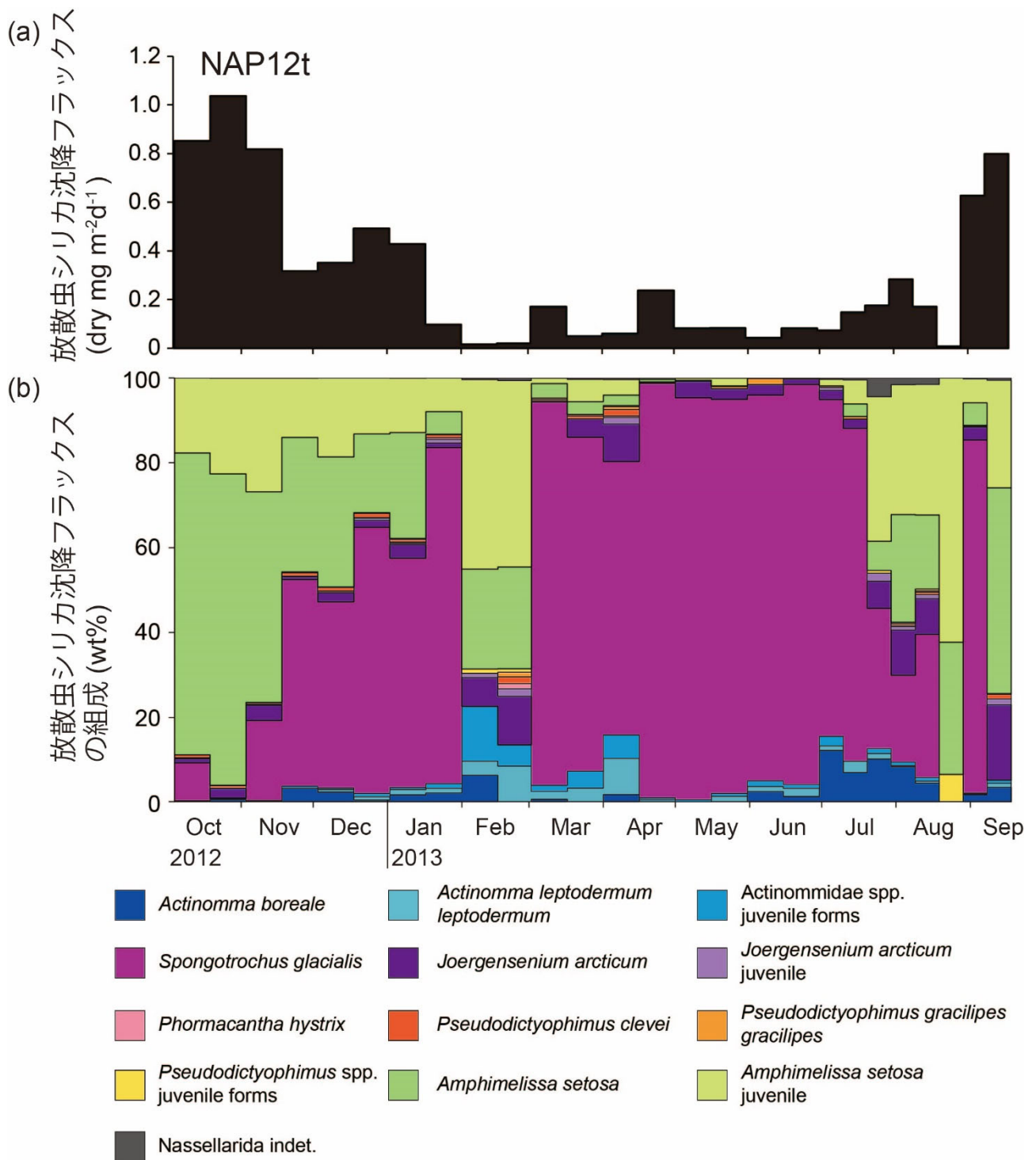


図4. 2012年10月4日から2013年9月18日までの観測点NAP12tにおける時系列データ。(a)放散虫シリカ沈降フラックス、(b)放散虫シリカ沈降フラックスの組成。

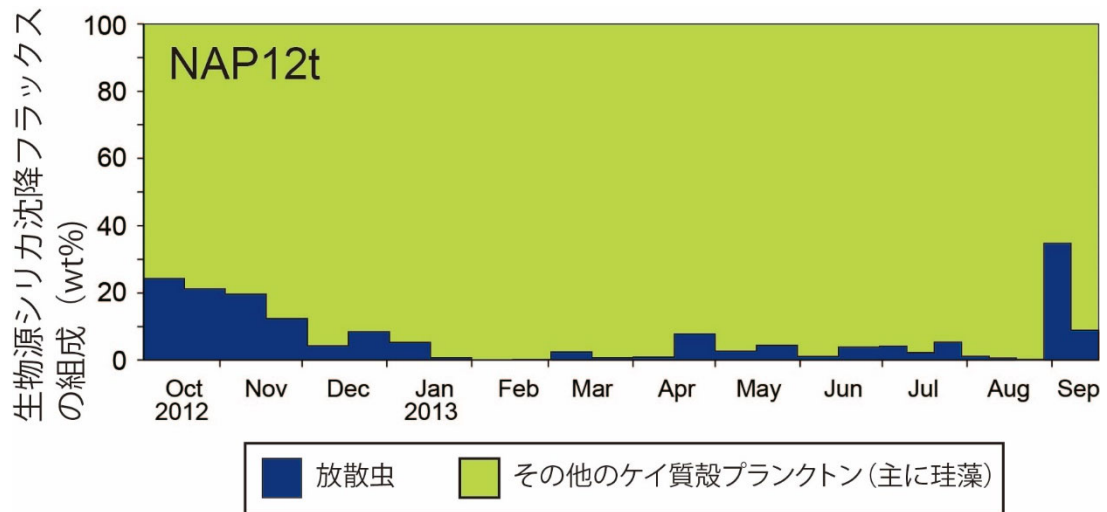


図5. 2012年10月4日から2013年9月18日までの観測点NAP12tにおける生物源シリカ沈降フラックス組成の時系列変化