

海水中の RNA からプランクトンの死滅を明らかに —海洋プランクトンの見えざる死を捉える新手法—

概要

京都大学理学研究科の菊矢咲季修士課程学生（研究当時）、同化学研究所の遠藤寿准教授、水産研究・教育機構水産技術研究所の外丸裕司グループ長、高知大学農林海洋学部の長崎慶三教授らの研究グループは、分子マーカーを用いてプランクトンの細胞溶解を計測する新たな手法を開発しました。

植物プランクトンは地球上の光合成の約半分を担い、動物プランクトン等との相互作用を介して海の物質循環を駆動しています。プランクトンが合成した有機物の行方を知るためには、彼ら死滅に関する情報が欠かせません。ところが、自然界でどのプランクトンがどの程度死滅しているかはよく分かっていません。本研究では、ウイルス感染等によって破壊されたプランクトン細胞から rRNA が海水中へ放出されることに着目しました。2 種の植物プランクトン（珪藻、ラフィド藻）を用いたウイルス感染実験を行い、細胞溶解によって新たに生産された細胞外 rRNA を速度論的に定量化しました。その結果、ウイルス感染によって細胞外 rRNA の生産速度は最大 46 倍および 302 倍に増加し、同分子が細胞溶解のマーカーとして優れていることが実証されました。また、見かけ上は増殖している時期でも、実際には活発な細胞溶解が同時に進行していることを明らかにしました。

本研究成果は、水圏環境におけるプランクトンの溶解死滅を系統群ごとに推定する手法として、炭素循環や生態系の理解に貢献することが期待されます。

本成果は、2026 年 9 月 9 日（米国東部時間）に国際学術誌「*MicrobiologyOpen*」にオンライン掲載されました。

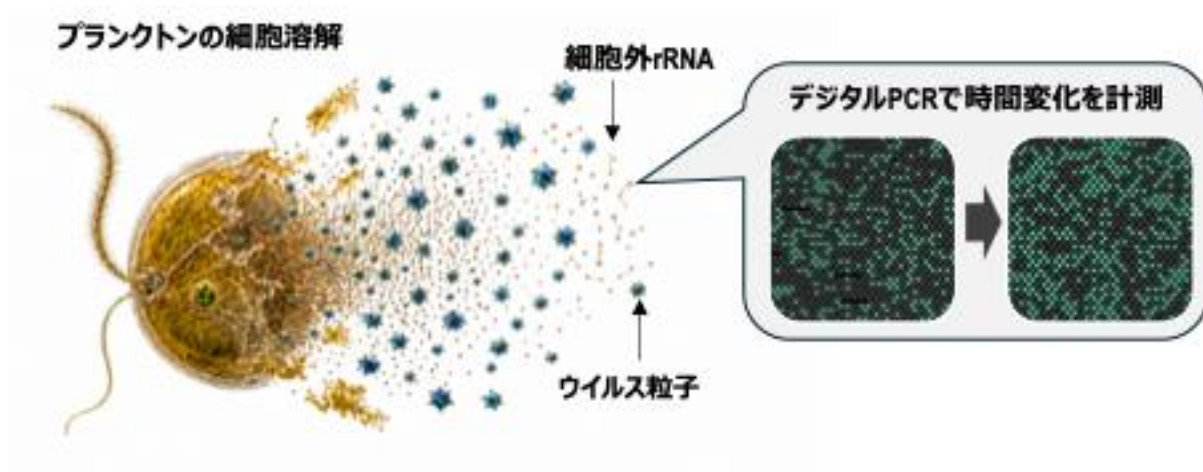


図1. 本研究の概略図（イラストは遠藤寿の図案を元に ChatGPT-5.5 で作成）

1. 背景

植物プランクトンを基盤とした海洋生態系は、光合成によって固定した炭素の輸送や貯蔵を介して地球環境の恒常性と海産資源の供給に大きく貢献しています。また、死滅したプランクトンの一部は溶存態有機物 (DOM) として海水中に蓄積し、大気 CO₂ 濃度を下げる働きを担っています。近年、海洋観測において膨大な種のウイルスや寄生生物の存在が明るみとなり、それらがプランクトンを死に至らしめることで生態系構造や物質循環の規模を調整しているという仮説が提示されました。つまり、海洋の高い生産力の仕組みを理解する上で、プランクトンの死滅を知ることはその増殖過程の理解と同等に重要です。しかし、数百種が共存するプランクトン群集から個々の種の死滅に関する情報を得るのは容易ではありません。本研究では、プランクトンの細胞溶解に伴い遺伝的情報を含む細胞内容物が環境中に放出されることに着目し、溶存態 rRNA の定量解析によってプランクトンの溶解を計測する技術の構築を目的としました。

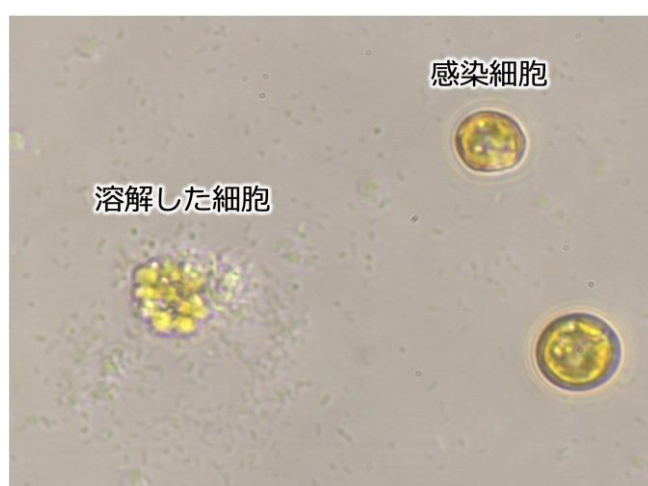


図2. ウイルスに感染して運動性を失ったラフィド藻細胞(右)と死滅溶解した細胞(左)。溶解時には細胞壁が破壊され、内容物の溶出が顕微鏡下でも観察される。

2. 研究手法・成果

培養実験に先立ち、海水に溶存状態の rRNA を高収率 (83%) で抽出し、デジタル PCR によってそれを正確に定量する手法を確立しました。しかし、海水中に放出された rRNA は時間とともに分解されるため、その量を測るだけでは実際の放出量を正確に評価できません。そこで本研究では、既知量の rRNA をリボソームの状態で実験系に加えて培養することでその分解速度定数を測定しました。これにより、宿主由来の溶存 rRNA の濃度変化と rRNA 分解速度とのフラックスモデルから rRNA の溶出生産速度 (細胞溶解の指数) を算出することが可能になりました。

植物プランクトン (珪藻とラフィド藻) を用いた培養実験の結果、ウイルス感染によって溶解を誘発した実験区では、対照区と比較して溶存 rRNA 生産速度が最大で約 46 倍および約 302 倍に増加しました。また、生細胞から能動的に排出される rRNA はごく少量でした。興味深いことに、珪藻では、ウイルス感染により個体群密度が減少に転じる前に溶存 rRNA 生産が最大となりました。これは、個体群が増殖を維持する最中に、すでに細胞溶解が活発に生じていたことを示しています。物質循環の視点に立てば、死滅によって環境中により多くの溶存有機物を供給するのは、見かけ上の群集が衰退する場面でなく、増殖の局面であったと言えます。このプランクトンの「見えざる死」を定量化する手法は、生態系における物質の流れを正確に捉える上で貴重な知見を提供しています。

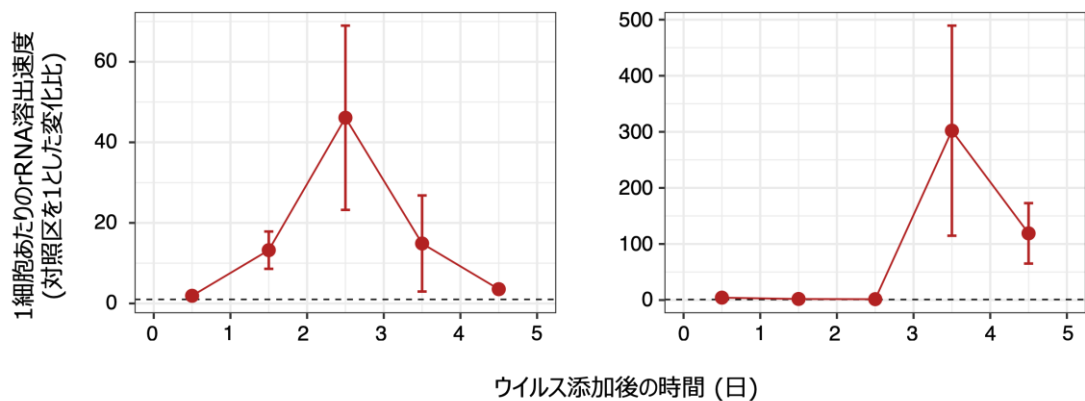


図3. ウイルス感染によって溶解が生じた系の細胞外 rRNA 生産速度の変化（左：珪藻、右：ラフィド藻）。各実験区で最大 46 倍および 302 倍の増加が見られたが、溶出のタイミングは生物種によって異なることが示された。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、水圏におけるプランクトンの溶解死滅を定量する新たな方法を提示するものです。rRNA は生物系統群ごとに配列が異なるため、本研究の手法を天然プランクトン群集に応用することで、全ての系統群に対して溶解死滅の情報を同時に取得できます。将来的に、生態系ごとに異なる物質循環の性質をプランクトン溶解種や DOM 生産の観点から明らかにできると期待しています。

一方で、実際の海洋環境においてプランクトンの死滅要因はウイルス感染以外にも寄生感染、捕食、アポトーシスなど多岐にわたります。本研究の手法はプランクトンの溶解速度を測定できますが、溶解の原因を区別することはできません。今後は、イメージングやプランクトン遺伝子発現データ等を統合し、溶解の規模と原因を種レベルで追跡可能な手法を探って行きたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JST さきがけ (JPMJPR23G3)、JSPS 科研費 (21H05057, 22H00384, 22H00385, 22H02420, 22K18351, 24H00528, JP23K14265, JP22KJ2366)、および京都大学化学研究所共同利用・共同研究 (2025-27, 2025-28) の支援を受けて行われました。

<用語解説>

プランクトン：自泳能力が乏しく、水中に漂って生活する生物の総称。ここでは、主に単細胞の微視的な浮遊生物を指す。光合成を行う植物プランクトンと、他の生物から資源やエネルギーを得る動物プランクトンとに大別される。本研究では、植物プランクトンに分類される珪藻 *Chaetoceros tenuissimus*、およびラフィド藻 *Heterosigma akashiwo* の培養株を使用した。

溶存態有機物 (DOM)：孔径 0.2–0.7 マイクロメートルのフィルターを通過する有機物。主に細胞から放出された生物分子やその分解産物で構成される。海洋には 700 ペタグラムもの膨大な炭素が DOM として貯蔵されている（なお、生物体として存在する炭素の総量は 3～6 ペタグラムと試算される）。

リボソーム：細胞内において mRNA の情報を読み取り、アミノ酸をつなぎ合わせてタンパク質合成を担う分子。主にタンパク質とリボソーム RNA (rRNA) から構成される。

18S rRNA：真核生物のリボソームを構成する rRNA の一つ。原核生物や細胞小器官のミトコンドリア、植物

の葉緑体は 16S rRNA が同等の機能を担う。

デジタル PCR：サンプル溶液を数千～数万の微小区画に分割して PCR 増幅反応を行い、増幅シグナルが観察された区画数から標的分子の濃度を絶対定量する手法。従来のリアルタイム PCR 法と比べて PCR 阻害物質の影響を受けにくく、夾雑物が多い培養・環境試料でも高感度かつ高精度の分析が可能となる。

<研究者のコメント>

本研究では、これまで定量的に捉えることが難しかった海洋プランクトンの溶解死滅に着目し、その実態を明らかにするための新たな手法の構築に取り組みました。細胞外 rRNA を指標とした本手法の開発にあたり、ご支援いただきました皆様に心より感謝申し上げます。本研究が、今後の海洋生態系や物質循環の理解を深める一助となれば幸いです。（菊矢咲季）

海水中に存在する多種多様なウイルスを知って以来、彼らの生態系における影響力を知りたいと考えてきました。本研究を足がかりに、プランクトン生態系の実像を明らかにしていきたいと思います。（遠藤寿）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Quantifying viral lysis in microalgae using cell-free rRNA（細胞外 rRNA を用いた微細藻類におけるウイルス細胞溶解の定量化）

著 者：Saki Kikuya, Yuji Tomaru, Keizo Nagasaki, Daichi Morimoto, Yuki Yamagishi, Hiroyuki Ogata, Hisashi Endo

掲 載 誌：MicrobiologyOpen DOI：10.1002/mbo3.70402