

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15895

研究課題名（和文）海洋植物プランクトンの多種共存が生態系機能に与える影響の実験的解明

研究課題名（英文）Experimental investigation of the effects of phytoplankton diversity on ecosystem functioning in the ocean

研究代表者

遠藤 寿 (Endo, Hisashi)

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：80795055

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：海洋植物プランクトンは、形態や生理機能が異なる多様な種が同一環境に共存することで、高い多様性を維持している。しかし、この多種共存が生態系に対しどのような意味を持つのかについては知見が乏しい。本研究は、現場観測に基づいてデザインした合理的な植物プランクトン共培養実験により、多種共存が各種および群集全体の増殖動態に与える影響を見積もった。その結果、植物プランクトンの他種共存が、元素利用効率の増加や遺伝子発現の変化を介して、互いの増殖を促進することを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物プランクトンは海洋における基礎生産者であり、我々が呼吸に使う酸素の約半分を生産している。一方、温暖化や海洋酸性化に代表される気候変動の進行は植物プランクトンの多様性を低下させる可能性が指摘されており、植物プランクトンの多様性と増殖動態との関係解明は急務である。本研究では、海洋観測と室内培養実験の両方を主軸として、植物プランクトンの多様性が海洋の豊かな生産力を支える鍵であることを定量的に実証した。この知見は、気候変動下における海洋保全政策の重要な判断材料となり、私達の生存基盤である地球環境の持続可能性に貢献すると考える。

研究成果の概要（英文）：Marine phytoplankton maintain high diversity by coexisting in the same environment with a variety of species that differ in morphology and physiological functions. However, less is known about the effects of the coexistence on ecosystem functioning. In this study, we evaluated the effects of multi-species coexistences on the growth dynamics of each species and the whole community using rational phytoplankton co-culture experiments designed based on field observations. As a result, we demonstrated that the coexistence of phytoplankton species promotes the growth of others through increased element use efficiency and altered gene expression.

研究分野：生物海洋学

キーワード：海洋生態 植物プランクトン 生物多様性 共起ネットワーク 生態系機能

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

植物プランクトンは海洋における主要な基礎生産者であり、人為起源二酸化炭素（CO₂）が引き起こす気候変動の緩和にも大きく貢献している。また、同一環境に数十～数百の種が共存し、群集の多様性が極めて高いことが知られている。近年、遺伝子解析技術を用いた海洋観測から、植物プランクトン群集はランダムではなく、一定の組み合わせで構成されていることが明らかとなった。この観測事実に基づき、申請者は「植物プランクトンが共存（多様性）を介して機能を補完し合い、資源の利用効率を高めているのではないか」という仮説を着想するに至った。また、申請者らの過去の研究において、将来的な海水中 CO₂ 濃度の増加が植物プランクトンの多様性を低下させる可能性があることを報告した。よって、将来的な海洋生態系と物質循環との関わりを精度良く予測する上で、植物プランクトン群集の持つ2つの特徴である「生産力」と「多様性」との関係解明は喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

海洋植物プランクトンは、形態や生理機能が異なる多様な種が同一環境に共存し、極めて高い多様性を維持している。近年の遺伝子解析基盤技術の発展とその環境調査への応用により、海洋に存在する微生物の多様性やゲノムに関する情報は増加の一途を辿っている。一方で、植物プランクトンの多様性が生態系機能に及ぼす影響は知見が乏しく、特に実験によって直接的に定量化した例は皆無である。本研究は、植物プランクトンの多種共存が群集の多機能性と生産力に与える効果を定量化し、多様性の生態学的意義を明らかにすることを目的とする。過去の観測で得られた群集データをもとに合理的な疑似群集を設計し、培養実験によって人為的に多様性を創出することでその定量化を試みる。

3. 研究の方法

(1) 黒潮生態系におけるハプト藻類の多様性形成機構の解明

植物プランクトンの多様性形成における海洋物理化学的要因、および生理生態的要因の影響を調べるため、学術調査船白鳳丸（海洋研究開発機構）の KH15-4 研究航海において、北太平洋黒潮域の南北 46 測点において DNA 試料の採取を行った。得られた試料を元に 18S rRNA 遺伝子 V4 可変領域を対象としたアンブ離婚シーケンスを行い、群集構造および多様性データを取得した。また、高感度栄養塩分析などにより環境パラメータを採取し、環境条件と多様性との関係性を評価した。

(2) 高知県浦ノ内湾から単離した藻類の培養実験

天然群集から植物プランクトンを単離培養し、それらを組み合わせた共培養実験で多様性を人為的に創生することで、多種共存が各プランクトン株に及ぼす影響を評価した。本研究では、実現性の高い培養実験を行うための土台作りとして、過去の高知県浦ノ内湾の現場観測データから植物プランクトンの共起関係を学習し、合理的な疑似群集を設計した。これにより抽出された特定の植物プランクトンを現場から単離（あるいは購入）し、種数や組み合わせを変えて計 15 日間の培養実験を行った。得られた試料から、顕微鏡計数、クロロフィル蛍光測定、粒子態有機炭素（POC）および溶存態有機炭素（DOC）、主要栄養塩、定量 PCR、トランスクリプトーム

解析を実施し、分析化学的・分子生物学的側面の両方から共存関係が群集の多機能性や生産効率に与える効果を定量した。

4. 研究成果

(1) 黒潮生態系におけるハプト藻類の多様性形成機構の解明

調査海域におけるハプト藻類は 437 の系統型に分類され、*Chrysochromulina* 属が現存量、多様性ともに最も高かった。また、海水中の遺伝子密度は $3.9 \times 10^2 - 1.0 \times 10^4$ copies mL⁻¹ であった。東シナ海陸棚域に接するフロント付近で多様性と生物量が増加しており、陸棚から黒潮本流に固有種の流入が生じていたことが示された。共起ネットワーク解析により、出現したハプト藻種は黒潮上流域由来と東シナ海陸棚由来の系統に二分され、日本の本州南岸を流れる黒潮（下流域）では陸棚由来の種が優占していることが示された。また、異なるハプト藻種間の進化的な近縁度と共起度との間に正の相関が見られた。これは、同系統群の近縁他種間で競争的排除が生じにくく、多様性を高く維持する機構を有することが示唆された。

本研究は、海流による移流拡散が藻類の多様性維持を可能にするという過去のモデル研究とも整合性があり (Masuda et al., 2020)、大規模循環域における植物プランクトンの多様性形成において、物理的希釈効果と生物学的な内在的因子の両方が重要であることを強く示唆している。

(2) 高知県浦ノ内湾から単離した藻類の培養実験

浦ノ内湾から 9 つの植物プランクトン株を単離培養することに成功した。2017 年 1 月～2018 年 9 月にかけて実施した浦ノ内湾の群集解析データ (Proding et al., 2021) を用いて共起ネットワーク解析を行い、同一のコミュニティに属した単離藻類 3 種 (*Chaetoceros tenuissimus*, *Skeletonema costatum*, *Prorocentrum minimum*) を共培養実験の材料として選定した。最も増殖の早かった *C. tenuissimus* は他種の存在下で単培養時に比べ最大細胞密度が 39%～60%増加した。他の藻類においても、培養初期には他種存在下で増殖速度の増加が観察されたが、培養後半では密度効果あるいは資源の枯渇により競争的排除が生じ、細胞密度が著しく低下した。また、実験終了時までには消費された硝酸塩あたりの炭素固定量のモル比 ($\Delta\text{POC}/\Delta\text{NO}_3^-$) は、共培養におい

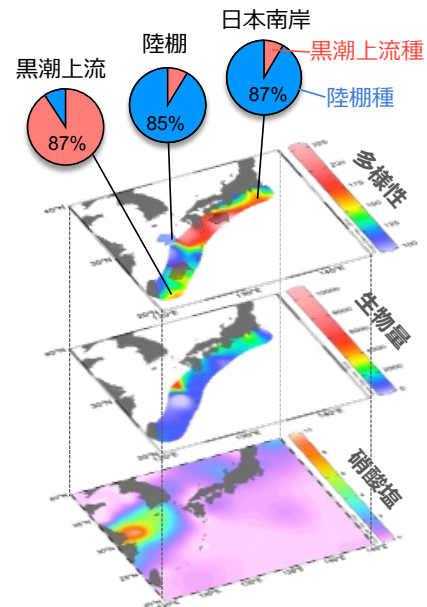


図 1. 18S rRNA 遺伝子から見積もったハプト藻類の多様性、生物量、および起源水。

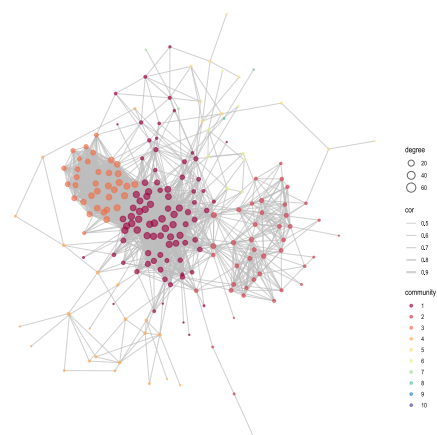


図 2. 高知県浦ノ内湾における植物プランクトン共起ネットワーク。同一コミュニティに属する種を競争排除が生じにくい組み合わせとみなして、培養実験の対象に選定した。

て単培養時よりも有意に高く、植物プランクトンの共生が栄養塩利用効率を向上させる効果を実証された。

さらに、トランスクリプトーム解析により *C. tenuissimus* の遺伝子転写プロファイルを評価した結果、他種の共存により全発現遺伝子の3-12%にあたる669-2,640遺伝子が転写改変されることが示された。特に、光合成や細胞増殖関連の代謝に関わる遺伝子が他種存在下で上方制御され、栄養塩の取り込みに関わる遺伝子が下方制御された。この結果は、他種の共存が栄養塩制限を緩和していた可能性を示唆し、種間で代謝物の交換を介した相互増殖促進が生じていたことを示唆している。

これらの結果は、本課題の仮説である正の種間相互作用の存在を増殖動態、化学量論、および生理応答の側面から検証しており、植物プランクトンの多様性と生産力との関係性を強く指示している。

<引用文献>

- [1] Masuda, Y., Yamanaka, Y., Hirata, T., Nakano, H., & Kohyama, T. S. (2020). Inhibition of competitive exclusion due to phytoplankton dispersion: A contribution for solving Hutchinson's paradox. *Ecol. Modell.*, 430, 109089.
- [2] Prodinge F, Endo H, Takano Y, Li Y, Tominaga K, Isozaki T, Blanc-Mathieu R, Gotoh Y, Tetsuya H, Taniguchi E, Nagasaki K, Yoshida T, and Ogata H. (2021) Year-round dynamics of amplicon sequence variant communities differ among eukaryotes, Imitevirales, and prokaryotes in a coastal ecosystem. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 97, fiab167.

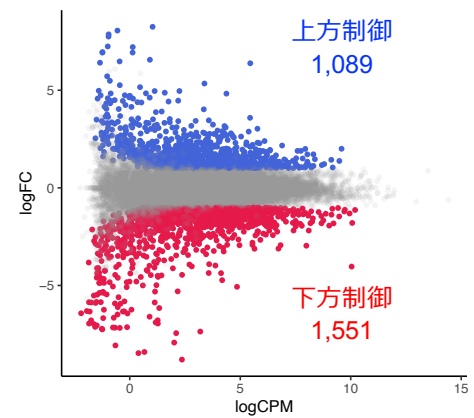


図3. 他種 (*S. costatum*) の共存下における *C. tenuissimus* の遺伝子転写変化を示したMAプロット。横軸は正規化した転写量、縦軸は転写量の比をlogで示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Meng Lingjie, Endo Hisashi, Blanc-Mathieu Romain, Chaffron Samuel, Hernandez-Velazquez Rodrigo, Kaneko Hiroto, Ogata Hiroyuki	4. 巻 6
2. 論文標題 Quantitative Assessment of Nucleocytoplasmic Large DNA Virus and Host Interactions Predicted by Co-occurrence Analyses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 mSphere	6. 最初と最後の頁 e01298-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1128/mSphere.01298-20	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 該当する
1. 著者名 Shiozaki Takuhei, Hashihama Fuminori, Endo Hisashi, Ijichi Minoru, Takeda Noriko, Makabe Akiko, Fujiwara Amane, Nishino Shigeto, Harada Naomi	4. 巻 66
2. 論文標題 Assimilation and oxidation of urea derived nitrogen in the summer Arctic Ocean	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Limnology and Oceanography	6. 最初と最後の頁 4159 ~ 4170
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/lno.11950	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 -
1. 著者名 Endo Hisashi, Blanc-Mathieu Romain, Li Yanze, Salazar Guillem, Henry Nicolas, Labadie Karine, de Vargas Colombaro, Sullivan Matthew B., Bowler Chris, Wincker Patrick, Karp-Boss Lee, Sunagawa Shinichi, Ogata Hiroyuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Biogeography of marine giant viruses reveals their interplay with eukaryotes and ecological functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Ecology & Evolution	6. 最初と最後の頁 1639 ~ 1649
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41559-020-01288-w	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 該当する
1. 著者名 Meng Lingjie, Endo Hisashi, Blanc-Mathieu Romain, Chaffron Samuel, Hernandez-Velazquez Rodrigo, Kaneko Hiroto, Ogata Hiroyuki	4. 巻 なし
2. 論文標題 Quantitative assessment of NCLDV-host interactions predicted by co-occurrence analyses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1101/2020.10.16.342030	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Kaneko Hiroto, Blanc-Mathieu Romain, Endo Hisashi, Chaffron Samuel, Delmont Tom O., Gaia Morgan, Henry Nicolas, Hernandez-Velazquez Rodrigo, Nguyen Canh Hao, Mamitsuka Hiroshi, Forterre Patrick, Jaillon Olivier, de Vargas Colombar, Sullivan Matthew B., Suttle Curtis A., Guidi Lionel, Ogata Hiroyuki	4. 巻 24
2. 論文標題 Eukaryotic virus composition can predict the efficiency of carbon export in the global ocean	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 iScience	6. 最初と最後の頁 102002 ~ 102002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isci.2020.102002	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 Endo H, and Suzuki K	4. 巻 -
2. 論文標題 Spatial variations in community structure of haptophytes across the Kuroshio front in the Tokara Strait	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AGU Geophysical Monograph Series	6. 最初と最後の頁 207-221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/9781119428428.ch13	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 -

1. 著者名 Endo Hisashi, Umezawa Yu, Takeda Shigenobu, Suzuki Koji	4. 巻 32
2. 論文標題 Haptophyte communities along the Kuroshio current reveal their geographical sources and ecological traits	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Molecular Ecology	6. 最初と最後の頁 110 ~ 123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/mec.16734	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9件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 遠藤寿
2. 発表標題 遺伝学的情報を通して探る海洋植物プランクトン・ウイルス生態系
3. 学会等名 海洋生物シンポジウム2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤寿
2. 発表標題 海洋植物プランクトンの生物地理学的研究
3. 学会等名 第121回化学研究所研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤寿
2. 発表標題 分子手法を用いた海洋プランクトン生態系の評価
3. 学会等名 ベントス・プランクトン合同大会2021シンポジウム~次世代プランクトン研究を開拓する新技術・方法論~(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Endo H., Blanc-Mathieu R., Li Y., Salazar G., Henry N., Labadie K., de Vargas C., Sullivan M.B., Bowler C., Wincker P., Karp-Boss L., Sunagawa S., Ogata H
2. 発表標題 Biogeography of marine giant viruses reveals their interplay with eukaryotes and ecological functions
3. 学会等名 ISME Virtual Microbial Ecology Summit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤寿、緒方博之
2. 発表標題 海洋巨大ウイルスの地理分布と物質循環における役割
3. 学会等名 北海道大学低温科学研究所 令和2年度共同利用研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤寿
2. 発表標題 大規模観測とメタゲノム解析による海洋微生物の多様性研究
3. 学会等名 メタオミクスワークショップ in 京都 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤寿
2. 発表標題 メタゲノミクスを用いた大規模海洋調査
3. 学会等名 京都化学者クラブ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤 寿、片岡 剛文、緒方 博之
2. 発表標題 海洋植物プランクトンの共生的相互作用が増殖動態に与える影響
3. 学会等名 微生物生態学会第35回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Endo H., Umezawa Y., Takeda S., Suzuki K
2. 発表標題 Spatial variation of haptophyte assemblages along the Kuroshio Current: Geographical source and ecological trait
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------