

令和元年5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01725

研究課題名(和文) 海洋における大規模な有機炭素鉛直輸送過程の新規制御機構の解明

研究課題名(英文) Evaluation of novel mechanisms involved in the regulation of large scale organic carbon vertical transport processes in the ocean

研究代表者

永田 俊 (Nagata, Toshi)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：40183892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：海洋表層の基礎生産で生成された有機物(凝集体)の沈降によって媒介される炭素鉛直輸送(生物ポンプ)は、海洋内部での炭素貯留を促進するプロセスとして重要であるが、その変動や制御には不明の点が多い。本研究では、凝集体の形成・沈降過程を、凝集体と海洋細菌群集の相互作用という新たな切り口から追及した。実験的解析の結果、海洋細菌群集には、大型凝集体の形成を顕著に促進する作用があることが示された。また、凝集体形成促進能を持つ細菌グループとしてシュードアルテロモナス属を特定した。海洋観測研究では、凝集体の大深度分布や、炭素の鉛直・水平輸送において果たす役割についての解明を進め、成果を論文として公表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後、海水温の上昇や気候変動による海流の変化が起きたときに、生物ポンプの機能がどのように変化するのかを予測することは人類にとっての重大な関心事である。本研究の成果は、気候変動に対する海洋炭素循環システムの応答とそれが気候に及ぼすフィードバックを考えるうえで重要な基礎的知見である。また、凝集体は、海洋における汚染物質(放射性物質やマイクロプラスチックなど)の分布や動態にも強い影響を及ぼすことから、本研究の成果は、新しい海洋環境浄化手法の開発といった応用的な分野にも重要なヒントを与える可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Vertical delivery of organic carbon from the sun-lit layer to the deep ocean is mediated by the sinking of large organic aggregates. This process, called biological pump, plays an important role in the carbon sequestration in the oceans' interior, yet the regulation of organic aggregate formation in seawater has yet to be clarified fully. This study examined the role of marine bacteria in the regulation of marine organic aggregates. Our data from a series of laboratory experiments revealed that marine bacterial assemblages can substantially enhance the formation of large organic aggregates. One group of bacteria possessing an outstanding capability of enhancing organic aggregate formation was identified to be the genus *Pseudoalteromonas*. Field studies were conducted to collect data on aggregate and microbial distributions in the oceanic water columns. These data provided novel insights into the role of aggregates in vertical and horizontal delivery of organic carbon in the sea.

研究分野：海洋生物地球化学

キーワード：海洋 微生物 凝集体 炭素循環 沈降フラックス 中・深層 ウィルス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 産業革命以降の人為起源の累積二酸化炭素排出量 5550 億トン (炭素換算) のうち、約 3 割に相当する 1550 億トンは海洋に取り込まれていると推定されている。海洋の表層 (有光層) における基礎生産と、生成された有機物の鉛直輸送 (有機粒子の沈降) は、大気中の炭素を海洋の中・深層へと運びこむ重要な炭素循環過程である。しかしその変動や制御メカニズムには不明の点が多く残されていた。

(2) 特に、凝集体の形成の制御要因としての細菌群集の役割については、その影響の可能性が指摘されてはいたものの、実態や機構については未解明のまま残されていた。

### 2. 研究の目的

(1) 海洋の表層から中深層への大規模な有機炭素輸送媒体であり、海洋炭素貯留の規模と変動に直接的な影響を及ぼす有機凝集体の形成・沈降過程に関わる未解明の制御機構を、凝集体と海洋細菌群集の相互作用という新たな切り口から実験的に解明する。

(2) 海洋における凝集体や細菌群集の分布を明らかにし、細菌群集による凝集体動態の支配過程についての理解を深化させる。

### 3. 研究の方法

(1) 室内培養実験系を用いることで、微生物群集の作用によって凝集体動態 (数、サイズ、沈降速度) がどのように制御されるのかを解析した。粒子解析、物質動態解析、微生物群集解析、遺伝子解析、粒子動態モデルといった複数手法を用い、異分野融合的なアプローチから研究を実施した。

(2) 船舶を用いた現場観測を実施し、海洋における凝集体の分布や存在量を明らかにするとともに、凝集体動態の支配要因としての微生物群集の役割を研究した。

### 4. 研究成果

(1) 二種の多糖類からなる小型凝集体を、回転培養実験装置を用いて培養し、生成された大型凝集体の物理化学的特性を調べた。その結果、海洋細菌群集の存在下では、大型凝集体の形成が顕著に促進されることが明らかになった (図 1)。大型凝集体の形成促進に関与する細菌グループを特定するために、蛍光現場交雑法を用いた細菌群集組成の解析を行った結果、シュードアルテロモナス属の細菌が候補に挙がった。そこで、シュードアルテロモナス属の 11 の単離株について、大型凝集体の形成能の有無を調べたところ、4 株で強い大型凝集体形成能が認められた (図 2)。次に、大型凝集体の形成能を有する菌株と、無い菌株のゲノム比較をすることで、凝集体大型化に関与する遺伝的形質を特定することを試みた。その結果、いくつかの候補遺伝子の選抜はできたが、研究期間内にそのタンパク質の特定にはいたらず、将来の検討課題として残された。一方、この実験系における粒子動態のモデル解析の結果から、凝集体の大型化は、小型粒子の接着係数の増加に起因する可能性が高いことが示唆された。つまり、シュードアルテロモナスは、粘着性の高い物質を排出することで、大型凝集体の形成を促進していたものと思われる。この成果は、論文として公表した。

(2) 細菌群集による凝集体形成促進能に加えて、これまで研究例の乏しいウイルスによる凝集体形成促進能についての研究を進めた。珪藻類 (Chaetoceros tenuissimus) とそれに感染する DNA ウィルス (CtenDNAV type II) からなる培養系を用いた実験の結果、珪藻にウイルスが感染することにより、凝集体の形成が促進されるという新たな現象を見出すことに成功した。また凝集体の形成に関わる因子と

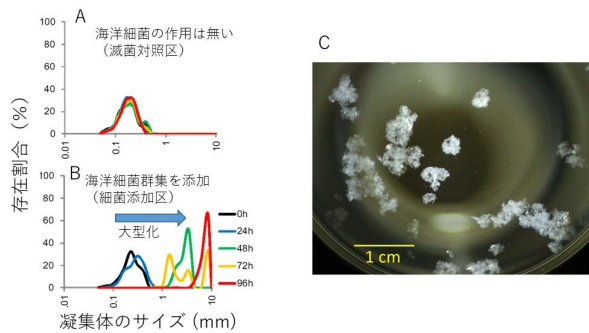


図 1 回転培養装置で培養した小型凝集体の粒径変化 (培養時間は 9 6 時間) (A) 細菌を添加しない滅菌対照区では粒径変化は見られなかった。(B) 海洋細菌群集を添加した実験区では、顕著な大型化が見られた。(C) 細菌添加区で見られた大型凝集体の写真。

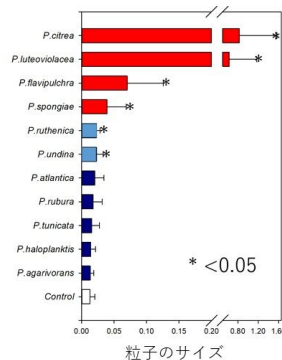


図 2 シュードアルテロモナス属の 11 株を用いて、培養実験を行い、凝集体の大型化が促進されるかどうかを調べた。粒子のサイズが大きいうことは、凝集体の大型化が促進されたということである。\* は対象区 (Control) に比べて有意な大型化が起きたことを示す。

して、多糖類やタンパク質の作用を検討した結果、タンパク質様粒子の存在が、凝集体の形成促進に関与している可能性が示唆された。興味深いことに、ウイルスに感染した珪藻の培養系の中には、沈降速度の速い大型凝集体が多量に生成するという結果が得られた。この結果は、「ウイルスが沈降フラックスを促進する」という仮説を支持する。大型凝集体の形成が促進されるメカニズムについては、現段階では不明であるが、以下の可能性が考えられる。(1) ウィルスによって細胞が破壊されるのに伴い、粘着性の高い細胞内ポリマーが海水中に放出され、それらが接着剤となって大型凝集体の形成を促進する。(2) ウィルス感染に対する防御反応として、珪藻がなんらかの細胞外多糖類を分泌し、これが大型凝集体の形成を促進する。今後、このようなウィルスの新たな役割とそのメカニズムを解明していくことが、海洋炭素循環の制御機構をより深く理解するうえで、重要な研究課題の1つになるであろう。以上の成果は論文に公表した。

(3) 海洋環境中での凝集体の分布について、太平洋および北極海で得られた観測データを解析し、海洋の深度による凝集体の分布特性や有機物に対する寄与についての検討を行った。その結果、両海域において、海洋深層では、表層に比べて、粒子状有機炭素に対する酸性多糖類(透明細胞外ポリマー粒子)の寄与率が高くなるという興味深い知見を得た(論文)。また、海洋における炭素沈降フラックスと中・深層の微生物炭素消費量の関係を解析し、両者の季節変動が、時間的なずれを伴う(非共役的である)ことを明らかにした(論文)。また、これまで知見の少ない海洋中層の微生物群集の代謝特性(増殖効率)や有機物組成(アミノ酸組成)を調べ、これまでの生物地球化学研究の中では見落とされていた、高プロリン含有成分の存在を明らかにした(論文)。さらに、北極海域における粒子動態と微生物群集活性の関連を調べた(論文)。特筆すべき成果として、凝集体が密度躍層上で活発に生成し、水平輸送により陸棚から海盆へ輸送されている現象を見出したことなどがあげられる。(論文)。以上の凝集体や粒子動態に関連する研究では、予想外の興味深いデータが得られ、このうち、中層で見出された高プロリン含有性のコロイド状有機物に関しては、平成29年度に採択された、挑戦的研究(開拓)において、より詳細な実態解明を進めているところである。

(4) なお、本科研費の研究成果を含め、これまでの代表者の学術的研究業績が認められ、2018年5月に日本海洋学会賞を受賞した。本科研費の研究成果の一部を、受賞記念論文において紹介した(論文)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9 件)

永田 俊 (2019) 「2018年度日本海洋学会賞受賞記念論文—海洋の炭素・窒素循環における微生物・ウイルス群集の役割に関する研究」 海の研究 28: 1-18. doi:

10.5928/kaiyou.28.1\_1. (査読無)

Uchimiya, M., Fukuda, H., Wakita, M., Kitamura M., Kawakami, H., Honda, M.C., Ogawa, H. and Nagata, T. (2018) Balancing organic carbon supply and consumption in the ocean's interior: Evidence from repeated biogeochemical observations conducted in the subarctic and subtropical western North Pacific. *Limnology and Oceanography* 63(5) 2015-2027 <https://doi.org/10.1002/lno.10821> (査読有)

Yamada, Y., Tomaru, Y., Fukuda, H. and Nagata T. (2018) Aggregate formation during the viral lysis of a marine diatom. *Frontiers in Marine Science-Marine Biogeochemistry* <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00167> (査読有)

Yamada Y., Yokokawa, T., Uchimiya, M., Nishino, S., Fukuda, H., Ogawa, H., and Nagata, T. (2017) Transparent exopolymer particles (TEP) in the deep ocean: Full-depth distribution patterns and contribution to the organic carbon pool. *Marine Ecology Progress Series*. 583:81-93. [doi.org/10.3354/meps12339](https://doi.org/10.3354/meps12339) (査読有)

Uchimiya, M., Ogawa, H., and Nagata, T. (2016) Effects of temperature elevation and glucose addition on prokaryotic production and respiration in the mesopelagic layer of the western North Pacific. *Journal of Oceanography*, 72(3): 419-426 10. DOI:

10.1007/s10872-015-0294-4 (査読有)

Yamada, Y., Fukuda, H., Tada, Y., Kogure, K. and Nagata, T. (2016) Bacterial enhancement of gel particle coagulation in seawater, Aquatic Microbial Ecology. 77:11-22. DOI: 10.3354/ame01784 (査読有)

Uchimiya, M., Motegi, C., Nishino, S., Kawaguchi, Y., Inoue, J., Ogawa, H., and Nagata, T. (2016) Coupled response of bacterial production to a wind-induced fall phytoplankton bloom and sediment resuspension in the Chukchi Sea Shelf, Western Arctic Ocean. Frontiers in Marine Science. Marine Biogeochemistry. DOI: 10.3389/fmars.2016.00231 (査読有)

Takasu, H., and Nagata, T. (2015) High proline content of bacteria-sized particles in the western North Pacific and its potential as a new biogeochemical indicator of organic matter diagenesis. Frontiers in Marine Science – Marine Biogeochemistry 10.3389/fmars.2015.00110 (査読有)

Yamada, Y., Fukuda, H., Uchimiya, M., Motegi, C., Nishino, N., Kikuchi, T. and Nagata, T. (2015) Localized accumulation and a shelf-basin gradient of particles in the Chukchi Sea and Canada Basin, western Arctic. Journal of Geophysical Research: Oceans. 120, DOI: 10.1002/2015JC010794 (査読有)

〔学会発表〕(計 3 件)

永田俊 (2018) 「海洋における微生物・ウイルス群集の炭素・窒素循環における役割に関する研究」(日本海洋学会受賞記念講演)日本海洋学会 2018 年度秋季大会(於・東京海洋大・品川キャンパス)(査読無)

山田洋輔、福田秀樹、永田俊 (2016)「黒潮粒軸付近において現場型光散乱・透過率粒子測定計で検出された粒子の鉛直分布と粒子サイズ分布」日本海洋学会 2016 年度秋季大会(於・鹿児島大学)(査読無)

永田俊 (2017) 「海洋の炭素循環の中で微生物が果たす重要な役割」(招待講演) 第 33 回国際生物学賞記念シンポジウム (於・つくば国際会議場)(査読無)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：横川 太一

ローマ字氏名：YOKOKAWA, Taichi

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：超先鋭研究開発部門(超先鋭研究プログラム)

職名：研究員

研究者番号(8桁): 00402751

研究分担者氏名：木暮 一啓

ローマ字氏名：KOGURE, Kazuhiro

所属研究機関名：東京大学

部局名：大気海洋研究所

職名：名誉教授

研究者番号(8桁): 10161895

研究分担者氏名：福田 秀樹

ローマ字氏名：FUKUDA, Hideki

所属研究機関名：東京大学

部局名：大気海洋研究所

職名：准教授

研究者番号(8桁): 30451892

研究分担者氏名：小川 浩史

ローマ字氏名：OGAWA, Hiroshi

所属研究機関名：東京大学

部局名：大気海洋研究所

職名：教授

研究者番号(8桁): 50260518

研究分担者氏名：岩崎 渉

ローマ字氏名：IWASAKI, Wataru

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科(理学部)

職名：准教授

研究者番号(8桁): 50545019

### (2)研究協力者 該当せず

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。