

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19960

研究課題名（和文）細菌の表面粗さが制御する海洋ナノサイズ粒子付着機構の解明

研究課題名（英文）Investigation of the relationship between bacterial surface roughness and marine nanoparticle attachment

研究代表者

山田 洋輔（YAMADA, Yosuke）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門（高知コア研究所）・研究員

研究者番号：80773720

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）：細菌表面粗さとナノサイズ粒子付着との関係を詳細に解明することにより、海洋炭素循環の鍵プロセスである細菌の有機物利用・分解過程の理解を深化させることを本研究の主目的として、研究を進めてきた。以下2点において特に重要な成果が得られ、一部は論文化に至った（Yamada et al. 2023）。細菌の表面粗さが細菌種により変化すると共に、ナノサイズ粒子の種類によっても、その細菌への付着に差があることが明らかになった。環境要因のうち、水温、栄養塩濃度などが主な細菌表面粗さの変動要因であることが明らかになった。今後はさらなる解析を行い、より普遍的な細菌とナノサイズ粒子付着メカニズムの解明を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はこれまでほとんど調査がされていなかった海洋細菌の表面性状に着目し、その性状把握と海洋物質循環に与える影響解明を目指した研究である。本研究により、海洋細菌の表面粗さが水温や細菌種などによって大きく異なり、ナノサイズ粒子の付着にも影響していることが明らかになった。本発見は海洋細菌に限らず、湖沼や生体内に生息する細菌にも応用できる可能性があり、普遍的な細菌生態現象の解明にもつながるかもしれない。今後はその応用の可否や海洋物質循環への影響をより深く追究することで、将来の気候変動に伴う海洋応答予測の高精度化につながる可能性も秘めている。

研究成果の概要（英文）：This research has been conducted with the main objective of deepening the understanding of the utilization and decomposition processes of bacterial organic matter, a key process in the marine carbon cycle, by elucidating in detail the relationship between bacterial surface roughness and the attachment of nano-sized particles. Particularly important findings have been obtained in two areas, some of which have been published (Yamada et al. 2023). 1) It has been revealed that bacterial surface roughness varies depending on the bacterial species, and there are differences in the attachment of nano-sized particles to these bacteria depending on the type of particle. 2) Among the environmental factors, water temperature and nutrient concentration have been identified as major factors influencing bacterial surface roughness variations. Further analysis will be conducted to aim for a more universal understanding of the mechanisms underlying bacterial and nano-sized particle attachment.

研究分野：環境動態解析

キーワード：海洋細菌 ナノサイズ粒子 表面性状

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 海水 1 mL 中には約 100 万もの細菌が存在し、海洋で 1 次生産により固定された炭素の約半分が細菌に利用され、本過程は海洋炭素循環の重要プロセスと考えられている(Azam 1998)。
- (2) 植物プランクトンの死滅時には多数のナノサイズ粒子が海水中に放出され、これらは細菌にとって極めて重要な炭素源と考えられている(Azam & Malfatti 2007)。
- (3) 細菌はこれらのナノサイズ粒子を表面に付着させ、分解・吸収すると考えられているが、本機構の初期過程であるナノサイズ粒子の細菌への付着については未だ不明な点が多かった。
- (4) 研究代表者の先行研究にて、細菌の表面性状がナノサイズ粒子の細菌への付着を制御している可能性が見いだされていた。

2. 研究の目的

本研究の仮説を以下のように設定した。「細菌の表面粗さはナノサイズ粒子の付着を制御する細菌の普遍的なパラメータであり、その値は海洋物理化学環境要因によっても変化し、細菌の炭素源獲得に大きく影響している」。そして、具体的に以下の 2 つの問いを本研究の課題とし、研究を進めてきた。

- (1) 細菌表面粗さは生物の死骸や破片、他のナノサイズ粒子の付着も制御しているのか？
- (2) 様々な海洋物理化学環境要因は細菌表面粗さに影響するのか？

3. 研究の方法

- (1) 海洋細菌の準備：沿岸域におけるバケツ採水および外洋域における研究航海に参加し、海水から細菌を回収する。サンプリング時には同時に各種環境パラメータの測定も行う。
- (2) 原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた海洋細菌の表面粗さ測定：天然の細菌および培養した細菌をフィルター上に回収し、その表面高さをナノスケールで測定した上で、個々の細菌において、表面の粗さを計算により求める。
- (3) 細菌とナノサイズ粒子の培養および付着数の定量：ナノサイズ粒子として、ポリスチレン粒子や天然ウイルス群集、植物プランクトン由来のナノ粒子などを用い、細菌と一緒に培養することで、その付着数を定量する。顕微鏡による付着ナノサイズ粒子の観察およびカウントの他、間接的に付着数を求める遠心法により定量を行う。

4. 研究成果

- (1) 1 つ目の問い：細菌表面粗さは生物の死骸や破片、他のナノサイズ粒子の付着も制御しているのか？ に関しては、細菌やナノサイズ粒子の種類を変えつつ、細菌表面粗さとナノサイズ付着の関係性を明らかにした。細菌は天然の海洋細菌群集の他、単離海洋細菌 9 種を実験に使用した。表面修飾を変化させたポリスチレン粒子や天然ウイルス群集、植物プランクトン由来のナノ粒子などをナノサイズ粒子として用いた。これらの細菌とナノサイズ粒子を使用した実験においては、ナノサイズ粒子の種類に関わらず、細菌表面粗さは、ナノサイズ粒子の付着都政の相関があることが明らかになった。
- (2) 2 つ目の問い：様々な海洋物理化学環境要因は細菌表面粗さに影響するのか？ に関しては、沿岸域から採取した細菌の分析の他、現場観測により、主に水温や有機物濃度が細菌表面粗さに影響している可能性が高いことが明らかになった。
- (3) 上記 2 つの成果の一部について、Yamada et al. (2023) にて論文としてまとめた。

当初の計画にはなかったが、本研究に関連して、新たな成果が得られたので以下列挙する。

- (3) 細菌表面性状と細菌種の関係性をより明確にするため、16S rRNA メタゲノム解析を行い、表面粗さとの関係を調べ、細菌種が重要な制御要因であることを示すデータセットが得られた。
- (4) 本研究で対象としたナノサイズ粒子の 1 種が実際の海洋中で、それ自身、そして大型の粒子を含めて、どのように物質循環に影響しているかを調べるため、沿岸域・外洋域での現場観測を行い、その影響を評価し、論文としてまとめた (Yamada et al. 2024)

(5) 以上の通り、Yamada et al. (2023; 2024)と、本研究の主目的に関する論文および派生・波及した論文が受理され、本年度までの研究で、海洋炭素循環の鍵プロセスである細菌の有機物利用・分解過程の理解を深化させるという本研究の主目的を概ね達成できたと考える。

(6) 海洋学の分野においては、トップジャーナルである *Limnology and Oceanography* に本研究の成果として論文が受理され、国内外問わず、本研究での発見が海洋学において重要な発見であると評価された。

(7) 今後はさらなる解析および付着モデルの検討などを行い、より普遍的な細菌とナノサイズ粒子付着メカニズムの解明を目指す。そして、未発表データに関してはできる限り速やかな論文化を目指す。

<引用文献>

Farooq Azam 1998 Microbial control of oceanic carbon flux: The plot thickens. *Science*, 280:5364, 694-696, doi: 10.1126/science.280.5364.694

Farooq Azam, Francesca Malfatti 2007 Microbial structuring of marine ecosystems. *Nature Reviews Microbiology*, 5, 782–791 doi:10.1038/nrmicro1798

Yosuke Yamada, Nirav Patel, Hideki Fukuda, Toshi Nagata, Satoshi Mitarai, Farooq Azam 2023 Bacterial surface roughness regulates nanoparticle scavenging in seawater. *Limnology and Oceanography*, 68(4), 780-789 doi:10.1002/lno.12309

Yosuke Yamada, Akiko Ebihara, Hideki Fukuda, Shigeyoshi Otsuka, Satoshi Mitarai, Toshi Nagata 2024 Functions of extracellular polymeric substances in partitioning suspended and sinking particles in the upper oceans of two open ocean systems. *Limnology and Oceanography*, in press, doi:10.1002/lno.12554

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamada Yosuke, Patel Nirav, Fukuda Hideki, Nagata Toshi, Mitarai Satoshi, Azam Farooq	4. 巻 68
2. 論文標題 Bacterial surface roughness regulates nanoparticle scavenging in seawater	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Limnology and Oceanography	6. 最初と最後の頁 780 ~ 789
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/lno.12309	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 Nagata Toshi, Yamada Yosuke, Fukuda Hideki	4. 巻 7
2. 論文標題 Transparent Exopolymer Particles in Deep Oceans: Synthesis and Future Challenges	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Gels	6. 最初と最後の頁 75 ~ 75
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/gels7030075	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 -
1. 著者名 Yamada Yosuke, Fukuda Hideki, Umezawa Yu, Nagata Toshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Geographic Variation of Particle Size Distribution in the Kuroshio Region: Possible Causes in the Upper Water Column	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmars.2021.768766	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 -
1. 著者名 Yamada Yosuke, Ebihara Akiko, Fukuda Hideki, Otosaka Shigeyoshi, Mitarai Satoshi, Nagata Toshi	4. 巻 in press
2. 論文標題 Functions of extracellular polymeric substances in partitioning suspended and sinking particles in the upper oceans of two open ocean systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Limnology and Oceanography	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/lno.12554	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 -

1. 著者名 Chuang Po-Shun, Yamada Yosuke, Liu Po-Yu, Tang Sen-Lin, Mitarai Satoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Bacterial Community Shifts during Polyp Bail-Out Induction in Corals <i>Pocillopora</i>	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Microbiology Spectrum	6. 最初と最後の頁 e00257-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1128/spectrum.00257-23	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 -

[学会発表] 計10件(うち招待講演 3件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 山田洋輔, 望月俊昭, Nirav Patel, Farooq Azam, 御手洗哲司
2. 発表標題 海洋細菌の表面性状とナノサイズ粒子付着の関係解明
3. 学会等名 2022年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 海老原諒子, 福田秀樹, 山田洋輔, 横川太一, 永田俊
2. 発表標題 沈降性および懸濁性海洋粒子に特徴的な原核生物群集組成の海域間比較
3. 学会等名 2022年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 海老原 諒子, 福田秀樹, 山田 洋輔, 横川 太一, 永田俊
2. 発表標題 海洋沈降性粒子の微生物群集ネットワーク
3. 学会等名 2022年度日本微生物生態学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田秀樹, 山田洋輔, 斎藤宏明, 永田俊
2. 発表標題 黒潮周辺海域の表層部における粒径分布の変動特性と有機炭素の沈降フラックス との関係
3. 学会等名 黒潮生態系とその 変動を駆動する物理・化学・生物過程シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田洋輔
2. 発表標題 現場観測および顕微鏡観察・画像解析による海洋粒子の性状解明
3. 学会等名 日本海洋学会沿岸海洋研究会 日本海洋学会西南支部 九州沖縄地区合同シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田 洋輔・Nirav Patel・Farooq Azam・御手洗 哲司
2. 発表標題 海洋細菌の表面性状がナノサイズ粒子の付着へ及ぼす影響
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田洋輔
2. 発表標題 細菌・ウイルスによる海洋炭素循環の制御メカニズム
3. 学会等名 日本地球化学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yosuke Yamada, Toshiaki Mochizuki, Nirav Patel, Farooq Azam, Satoshi Mitarai
2. 発表標題 Bacterial surface properties and their effects on nanoparticle scavenging in seawater
3. 学会等名 ASLO Aquatic Sciences Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田洋輔
2. 発表標題 海洋物質循環における細菌の役割-細菌表面のナノスケール測定による新知見を交えて-
3. 学会等名 2023 年度日本農芸化学会中四国支部第 38 若手研究者シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田 洋輔, 望月 俊昭, 星野 辰彦, Nirav Patel, Farooq Azam, 福田 秀樹, 御手洗 哲司
2. 発表標題 溶存態有機物濃度による海洋細菌の表面性状変化とナノ粒子付着の関係解明
3. 学会等名 日本海洋学会 2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

細菌表面の粗さが海洋ナノ粒子の細菌への付着を制御していることが明らかに
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20230131/

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
---------	---------