

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：32670

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12206

研究課題名（和文）光を使って生き残る一海のユニークな従属栄養細菌

研究課題名（英文）Survival strategy with light-Unique photoheterotrophs in the ocean

研究代表者

高部 由季（TAKABE, Yuki）

日本女子大学・家政学部・助教

研究者番号：80635839

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：従来の海洋生態系の枠組みにおいて、その炭素循環への寄与が不明であった光従属栄養細菌に着目し、その実環境中での動態とその生理生態特性を明らかにすることを目指した。光従属栄養細菌は、その他の従属栄養細菌と異なり光エネルギーを生命活動に利用することで、細胞増殖と生残に優位性があり、海洋生態系内の炭素循環効率の上昇に寄与している可能性がある。本研究を通して、海洋生態系における光従属栄養細菌の炭素循環特性を明らかにすることで、従来の炭素循環像のパラダイムシフトへ取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、光従属栄養細菌として酸素非発生型好気性光合成細菌（aerobic anoxygenic phototrophic bacteria, 以下AAnPBと称する）という機能細菌群に注目した。AAnPBは全球海洋表層に普遍的に分布し、海洋炭素循環を駆動するキープレイヤーである。AAnPBは光合成によるエネルギー生産により従属栄養的増殖を補完することで、他の従属栄養細菌よりも高効率で炭素循環を駆動出来る潜在性がある。海洋炭素循環像にAAnPBという新たな存在を位置付けることにより、これまでの従属栄養細菌中心で見積もられていた循環効率と循環量がより正確なものになると予想される。

研究成果の概要（英文）：The present study focused on photoheterotrophic bacteria, whose contribution to the carbon cycle has been unclear within the framework of conventional ecosystem in the ocean, and aimed to clarify their dynamics and eco-physiological characteristics in the environment. Unlike other heterotrophs, photoheterotrophs utilize light energy for their biological activities and have an advantage in cell growth and survival, which may contribute to increasing the efficiency of carbon cycling in ecosystems in the ocean. Through this study, the present study has clarified the characteristics of the carbon cycle by photoheterotrophic bacteria in the ecosystems, and have worked toward a paradigm shift in the conventional image of the carbon cycle of the ocean.

研究分野：海洋微生物生理生態学

キーワード：光従属栄養細菌 光合成 炭素循環 カロテノイド

1. 研究開始当初の背景

AAnPB は、海洋表層に普遍的に分布し、有機物の同化と分解を通して、炭素循環を駆動するキープレイヤーとして認識されつつある (Koblížek, 2015)。AAnPB は基本的に従属栄養細菌であるが、光合成装置を持ち、光合成によるエネルギー生産により従属栄養的増殖を補完する。しかしながら、この光合成による従属栄養的増殖の補完機能が実海洋環境中で、AAnPB の生残に寄与しているのかは不明である。

本研究では、AAnPB が高率で存在する海域における高頻度の擬似現場実験を中心に、AAnPB の光利用戦略として、増殖強化と現存量維持 (生残) を定量的に実証することを目指す。AAnPB の高増殖活性と生残能はこれまで従属栄養細菌中心にその理解が進められてきた海洋生態系における細菌の有機物転送ポテンシャルの見積もりを一新する可能性がある。AAnPB は、近年、その高い増殖活性が注目されている“元気な”細菌であり、海洋生態系において、その食物連鎖経路の一つである微生物ループ (溶存有機物～細菌～原生動物) での役割が大きいことが明らかになりつつある。

本研究は、AAnPB 研究を海洋炭素循環における新しいフレームワークとして捉え、光エネルギーを介した海洋炭素循環像の理解する上での新たな視点を付与することを目指す。これまで従属栄養細菌による有機物利用、有機物転送の生態学的な重要性はよく認識されてきたが、光従属栄養細菌という、光合成と従属栄養的増殖の 2 つの栄養モードを併せ持つ AAnPB が、全球海洋表層に普遍的に、かつ高い増殖活性をもって存在していることは、海洋生態系における有機物利用、有機物転送の担い手は決して従属栄養細菌だけではないことを明確に示唆している。光従属栄養という栄養様式が、いかに AAnPB のニッチ確立に寄与しているのか、その理解は浅い。光エネルギーを利用して“元気に”増殖し“長く”生き残る AAnPB の環境中での動態は、海洋生態系における細菌の担う有機物利用と有機物転送の量と効率の見積もりを変えるのか?

2. 研究の目的

AAnPB は、基本的には従属栄養的に増殖するが、さらに補助的に光合成により ATP 生産を行うという、光従属栄養細菌という機能細菌群であり、海洋表層において高い炭素循環量と循環効率を導く潜在性を有している高生理活性細菌である。AAnPB の機能や海洋中での割合が明らかになったのは、極めて近年になってからである。申請者は、これまで海洋、河川、湖沼において AAnPB の現場観測や、海洋性 AAnPB 分離培養株を用いた室内培養実験を進めてきた。そこで、本邦沿岸域において、AAnPB の普遍的な分布、高い増殖活性として、速い増殖速度と大きな細胞サイズ、さらに高い捕食圧を受けていることから、海洋炭素循環における AAnPB の重要性が大きいことを発見した。本研究は、AAnPB の生態学的重要性を申請者自身の先行研究結果から認識したことを基点としている点で、独自性と創造性が高い。これまでの海洋生態系の枠組みの中で、「光エネルギー」を利用して生きる細菌としては、基礎生産者であるシアノバクテリアが中心であり、AAnPB といった光従属栄養細菌についての理解は浅い。しかしながら、海洋には AAnPB だけでなく光エネルギーを利用して生きる多様な細菌が存在しており、その動態解明を「光エネルギー」利用能の観点から明らかにすることは、海洋生態系の理解への新たな科学的基盤の創造を助けるに違いない。

3. 研究の方法

本研究では、AAnPB が高率で存在しているマダイ養殖場周辺海域を観測地点として、AAnPB 分離培養株の全ゲノム解析 (Sato-Takabe et al., 2021a;2021b)、生化学試験、生理性状試験 (新種としての記載実験を兼ねた, Kuwata and Sato-Takabe et al., 2024)、頻回の現場観測による AAnPB を含む全細菌群集構造の時間変動解析、光条件の異なる擬似現場培養実験による AAnPB を含む全細菌群集構造の比較を行った。

以上の実験結果から、熱および酸化ストレスが高まる高温・強日射下の夏季において優占する細菌の中にその耐性メカニズムがある可能性が示唆されたため、AAnPB 株を含む複数の細菌培養株について、その生産カロテノイド色素の同定、及び単離精製と抗酸化活性評価を行った (高部 他, 2023; 関根 他, 2023)。

4. 研究成果

(1) AAnPB 分離培養株のゲノムデータ公開

AAnPB が高率で存在しているマダイ養殖場周辺海域を観測地点として、分離した AAnPB 培養株 AI_61 及び AI_62 株の全ゲノム解読およびその生理性状試験を進めた。

加えて、他海域から分離した AAnPB 株も含め、これらの全ゲノムデータをグローバルオープンデータベース (National Center for Biotechnology Information, NCBI 他) に登録し、ゲノム情報は国際学術誌 *Microbiology Resource Announcements* に 2 報の主著論文として発表した (Sato-Takabe et al., 2021a;2021b)。

(2) AAnPB 新種株 AI_62 の比較ゲノム及び記載 (生理性状試験)

本海域における有機物循環量と循環効率を考える上で極めて重要なグループである可能性が示唆された、Rhodobacteraceae 科の細菌として、*Jannaschia* 属細菌・AI_62 株の生理性状試験および *Jannaschia* 属他種との比較ゲノム解析を進めた。本研究結果は、共同筆頭主著者として国際誌 *Antonie van Leeuwenhoek* 誌に受理された (Kuwata and Sato-Takabe et al., 2024)。

(3) マダイ養殖場いけす周辺海域における現場観測

AAnPB が高率で存在しているマダイ養殖いけすにおいて通年を通して実施した現場観測の結果として、Rhodobacteraceae 科の動態に注目すべき特徴が見られた。特筆すべきは、夏季の高温・強日射下における本科の優占 (全リード数に占める割合 20%) である。本科は AAnPB を多く含むことは知られている代表的な系統であり、この現場観測結果から本課題において、着目すべき機能細菌グループは本科に属することが明らかとなった。また、昨年度、愛媛県愛南町マダイ養殖いけすからの AAnPB 分離株 *Jannaschia* sp. AI_62 のゲノム解読およびその生理性状試験を行ったが、本株は Rhodobacteraceae 科に属する。

以上の現場観測結果から本海域の有機物循環において重要なグループであることが示唆された。このことにより、来年度以降、より詳細な AAnPB 群集動態の解析を進める上での科学的基盤として、*Jannaschia* sp. AI_62 のゲノムデータ及びその生理性状試験結果の有用性が高まった。

(4) 擬似現場培養実験

上記マダイ養殖いけす周辺から採取した海水を用いて 7 月 (夏季) に実施した、擬似現場培養実験の結果として、Rhodobacteraceae 科の動態に注目すべき特徴が見られた。本培養実験においては、培養時に、透明なポリカーボネイトボトルと茶褐色のそれを養殖場いけす海中に沈め、それぞれを明条件と暗条件として、3 日間の培養を行った。培養前の細菌群集構造と比較すると、Rhodobacteraceae 科のグループの優先度は 2 倍以上に増加した (全リード数に占める割合として、培養前 20% => 培養後 40%)。さらに、明条件下で本科が、暗条件下のそれより優占度が高くなる傾向が見られた。AAnPB を多く含むことは知られている代表的な系統である本科のグループは、夏季の高温・強日射下において、高い優占率を示すこと、それは特に光存在下においてより顕著になることが明らかとなった。

(5) 光保護色素カロテノイドの生化学分析

本研究(3)、(4)の現場観測および擬似現場培養実験から、本研究海域において、AAnPB を含む Rhodobacteraceae 科の細菌グループが、夏季の高温・強日射下においてその優占度が顕著に高まることを発見した。高温・強日射下においては熱および酸化ストレスが高まるため、その耐性メカニズムがあると予想し、細菌がつくるカロテノイド色素に着目した。

そこで、本研究海域から分離したカロテノイド色素生産菌の色素分析を行った。結果として、本研究(1)、(2) に用いた AAnPB 新種株 AI_62 は Spheroidenone を有していることを確かめた (Sato-Takabe et al., 2021b)。さらに、30 種以上の培養株を色素分析した結果、多様なカロテノイド色素を検出した。その中で、既往研究 (Shindo et al., 2007) から高い抗酸化能を有する Myxol を生産する株が見つかった。そこで、Myxol と類似化学構造を有する 4- ketomyxol を生産する細菌培養株から各色素を単離精製し、その抗酸化能を比較することで、抗酸化能に関する構造活性相関評価を進めた (高部 他, 2023; 関根 他, 2023)。

以上の結果から、愛媛県愛南町の真鯛養殖場いけす周辺海域において AAnPB を含む Rhodobacteraceae 科の細菌グループが、高温・強日射下において高い優占率を示すことが明らかとなった。さらに、擬似現場培養実験の明条件下においてその優占率がより高まるということが明らかになり、それは熱および酸化ストレスへの耐性メカニズムがある可能性を示唆している。これは、光エネルギーを利用して“元気に”増殖し“長く”生き残るという AAnPB の特徴的な生態学的戦略を示している結果であると考察される。

さらに、上記の通り、AAnPB の生態学的優位性が高温・強日射下において発揮されるという結果を受けて、その熱および酸化ストレスへの耐性メカニズムへの展望を拓いている。AAnPB を含む Rhodobacteraceae 科に属する新種株 AI_62 は Spheroidenone というカロテノイド色素を有していることを確認したが、本色素の抗酸化活性についてはこれまで報告がない。Spheroidenone はその化学構造から高い抗酸化活性が期待される。今後、本色素の抗酸化能は詳細に評価されるべきである。海洋においてはカロテノイド色素を生産する細菌が広く分布しているが、その抗酸化能についての知見は極めて限定的である。光エネルギーを利用して生きる多様な細菌の動態及び生理メカニズムの詳細な解明のために、海洋細菌の生産するカロテノイド色素の生態学的意義にアプローチすることは、海洋生態系の理解へ向けての新希の科学的基盤を提供するに違いない。

<引用文献>

Koblížek, M. (2015) : Ecology of aerobic anoxygenic phototrophs in aquatic environments. FEMS Microbiol. Rev., 39, 854–870. doi:10.1093/femsre/ fuv032.

Shindo, K., K. Kikuta, A. Suzuki, A. Katsuta, H. Kasai, M. Yasumoto-Hirose, Y. Matsuo, N. Misawa & S. Takaichi (2007) : Rare carotenoids, (3R)-saproxanthin and (3R,2' S)-myxol, isolated from novel marine bacteria (Flavobacteriaceae) and their antioxidative activities. Appl. Microbio. Biotech., 74(6), 1350–1357. doi:10.1007/s00253-006-0774-y.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sato-Takabe Yuki, Nakajima Yu, Tsukamoto Yuya, Hamasaki Koji, Shiozaki Takehei	4. 巻 10
2. 論文標題 Draft Genome Sequence of the Aerobic Anoxygenic Phototrophic Bacterium <i>Roseobacter</i> sp. Strain OBYS 0001, Isolated from Coastal Seawater in Otsuchi Bay, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microbiology Resource Announcements	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1128/mra.00488-21	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 Sato-Takabe Yuki, Nakajima Yu, Suzuki Satoru, Sekiguchi Kota, Hanada Satoshi, Shiozaki Takehei	4. 巻 10
2. 論文標題 Draft Genome Sequences of Putative Aerobic Anoxygenic Phototrophic Bacterial Strains <i>Jannaschia</i> sp. Strains AI_61 and AI_62, Isolated from Seawater around a Coastal Aquaculture Area	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microbiology Resource Announcements	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1128/mra.00491-21	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 Suzuki Satoru, Ogo Mitsuko, Takada Hideshige, Seki Kanako, Mizukawa Kaoruko, Kadoya Aya, Yokokawa Taichi, Sugimoto Yuta, Sato-Takabe Yuki, Boonla Chanchai, Anomasiri Wilai, Sukpanyatham Nop	4. 巻 791
2. 論文標題 Contamination of antibiotics and sul and tet(M) genes in veterinary wastewater, river, and coastal sea in Thailand	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 148423 ~ 148423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2021.148423	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 Kuwata Koyo, Sato-Takabe Yuki, Nakai Ryosuke, Sugimura Yuya, Tazato Nozomi, Kunihiro Tadao, Morohoshi Sho, Iwataki Mitsunori, Hamasaki Koji, Shiozaki Takehei	4. 巻 117
2. 論文標題 Novel aerobic anoxygenic phototrophic bacterium <i>Jannaschia pagri</i> sp. nov., isolated from seawater around a fish farm	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Antonie van Leeuwenhoek	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10482-024-01971-z	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高山峻、鈴木聡、高部由季、門屋綾、佐野大輔
2. 発表標題 水環境由来細菌への薬剤耐性遺伝子の接合伝達評価
3. 学会等名 2021年度 日本水環境学会年会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 高部由季、新藤一敏
2. 発表標題 海洋における好気性光合成細菌のカロテノイドの生理生態学的意義
3. 学会等名 第35回カロテノイド研究談話会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 関根梨夏、翠川友香、高部由季、眞岡孝至、高谷直己、細川雅史、新藤一敏
2. 発表標題 4-ketomyxolとmyxolの抗酸化活性の比較
3. 学会等名 第35回カロテノイド研究談話会
4. 発表年 2023年～2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

好気性光合成細菌のドラフトゲノム
<http://ecosystem.aori.u-tokyo.ac.jp/microbiology-wp/category/publication/>

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