

海洋細菌の新たな光エネルギー獲得戦略

—ロドプシンの集光アンテナと光サイクル加速色素の発見—

物性研究所・機能物性研究グループ 井上 圭一

研究概要

今回我々は、ロドプシン(注 1)の新たな光利用効率化システムを報告しました。

近年、植物などの光合成生物とは異なり、ロドプシンという光受容タンパク質を用いて光エネルギーを化学エネルギーに変換する微生物が数多く存在することが分かってきました。本研究グループは、海洋に最も多く存在するロドプシン(プロテオロドプシン)が、光の利用効率を高める2つの仕組み—「集光アンテナ」と「光サイクル(注 2)加速色素」—を備えることを発見しました。また、塩化物イオンを輸送するロドプシンにも集光アンテナが存在することを突き止め、これらのロドプシン-カロテノイド複合体の立体構造を初めて明らかにしました。

以上のことから、ロドプシンの光利用効率化システムが細菌の光環境適応を助け、より深層でも光を受容できる可能性を示しました。

研究の内容

海洋では植物プランクトンやシアノバクテリアなどの光合成生物だけが、太陽光エネルギーを利用できると長らく考えられてきました。ところが 2000 年、光合成とは異なる仕組みで光エネルギーを利用する「ロドプシン」を用いた光エネルギー受容機構が発見されました。ロドプシンは膜タンパク質と色素の一種であるレチナールから構成されており、レチナールが光を受容すると、水素イオンや塩化物イオン、ナトリウムイオンなどを輸送する光駆動型イオンポンプとして機能します。現在では、海洋表層に生息する細菌の半数以上がロドプシン遺伝子を保有し、特定の海域ではロドプシンは光合成に匹敵するほどの光エネルギーを受容していると試算されています。

2023 年、海洋細菌(*Tenacibaculum* sp. SG-28)を用いた実験から、海洋環境に最も広く分布するロドプシンであるプロテオロドプシン(Proteorhodopsin, PR)がレチナールだけでなくカロテノイドとも結合することを発見しました。このカロテノイドは、自身が受容した光エネルギーをレチナールに渡すことで、PR を駆動させる集光アンテナとして機能します。この働きにより、PR の利用できる光

の波長域が拡大し、光利用効率が大幅に向上することが示されました。このようなロドプシンの光利用効率化システムは、海洋細菌の生残にとって有利に働くことが予想されますが、これまで知られていたのは「集光アンテナ」という仕組みだけでした。

本研究では、次の2点の検証を行いました：「1.PR 以外のロドプシンも集光アンテナを持つのか?」「2.ロドプシンには集光アンテナ以外にも光利用効率を高める仕組みが存在するのか?」。海洋地球観測船「みらい」による研究航海(MR10-01)で、表層海水から分離された海洋細菌(*Nonlabens marinus* S1-08^T)株(図 1)を対象とし、PR 遺伝子(NM-R1)、および塩化物イオン輸送ロドプシン遺伝子(NM-R3)を大腸菌に異種発現(注 3)させ、タンパク質を精製しました。このタンパク質に、S1-08^T 株から抽出したカロテノイドを添加し再精製した結果、いずれのロドプシンもカロテノイドと結合することが確認されました。さらに詳細な分光・構造解析から、NM-R3 と結合したカロテノイドが集光アンテナとして機能すること、そして他の集光アンテナとは異なり縦向きに結合することが明らかになりました(図 2)。



図 1 : 海洋細菌(*Nonlabens marinus* S1-08^T)のイメージ図

研究開発機構超先鋭研究開発部門超先鋭研究開発プログラム・長谷川 万純ポストドクトラル研究員(兼務:変動海洋エコシステム高等研究所・ポストドクトラル研究員)、海洋機能利用部門生命理工学センター深海バイオリソース研究グループ・西村 陽介研究員、生産開発科学研究所・眞岡 孝至理事・室長、東京農業大学・高市 真一元教授との共同研究として行われました。

掲載論文: Takayoshi Fujiwara[†], Toshiaki Hosaka[†], Masumi Hasegawa-Takano, Yosuke Nishimura, Kento Tominaga, Kaho Mori, Satoshi Nishino, Yuno Takahashi, Tomomi Uchikubo-Kamo, Kazuharu Hanada, Takashi Maoka, Shinichi Takaichi, Keiichi Inoue*, Mikako Shirouzu*, Susumu Yoshizawa* (†共筆頭著者、*責任著者) “Carotenoids bind rhodopsins and act as photocycle-accelerating pigments in marine *Bacteroidota*” (2025) *Nature Microbiology*, **10** 10, pp 2603-2615.

(注1) ロドプシン

7 回膜貫通構造を持つ光受容タンパク質であり、発色団としてレチナールと共有結合している。脊椎動物ではロドプシンは視覚を担うが、ロドプシン遺伝子は細菌、古細菌、一部の真核微生物、さらに巨大ウイルスにも広く分布し、イオン輸送や光センシングなど多様な機能を担う。

(注2) 光サイクル

ロドプシンが光を受容すると、レチナールの異性化を起点として一連の中間体を經由しながら基底状態へと戻る。この一連の反応を光サイクルと呼び、サイクル一回転毎にイオンを一つ輸送する。

(注3) 異種発現

目的とする遺伝子の DNA を他の宿主生物に導入し、その発現産物であるタンパク質を生産させる手法。特に大腸菌や酵母などを用いた発現系は、タンパク質の機能解析や構造解析に広く用いられる。

(注4) 単粒子構造解析

クライオ電子顕微鏡 (cryo-EM) により取得した多数の生体分子の画像を統計的に解析・再構成することで、高分解能の三次元構造を決定する手法。試料の結晶化が不要なため、膜タンパク質など従来困難であった対象にも応用可能である。

(注5) 有光層

太陽光が海中に届く範囲の層で、光合成を行う植物プランクトンなどの主要な生息域である。有光層ではロドプシン遺伝子を保有する海洋細菌の存在量も高いが、有光層以深でのロドプシン遺伝子保有割合は減少する。

