

プロメテ古細菌から高感度な光駆動水素イオンポンプを発見 —真核生物の出現に関わる古細菌による新たな光利用—

物性研究所・機能物性研究グループ 井上 圭一

研究概要

真核生物(注 1)の共通祖先に最も近い現生生物種の一つであるヘイムダル古細菌が、カロテノイド色素(注 2)を用いて、高効率に太陽光のエネルギーを捉えることで、それを元に水素イオン(H^+)を輸送し、化学エネルギーへと変換するタンパク質である「ヘイムダルロドプシン」を持つことを明らかにしました。

本研究では先端的なレーザー技術を用いた分光計測により、ヘイムダルロドプシンのカロテノイド色素が光アンテナとして光を捉え、そのエネルギーを H^+ 輸送に利用することを世界で初めて明らかにしました(図 1)。また X 線結晶構造解析によって、多様なカロテノイド色素の結合に適した独自の構造を捉えることにも成功しています。これまでヘイムダル古細菌が高効率で光を捉え、自身の生育に役立っているという事実は全く知られておらず、生命の進化を考える上で重要な、この種のこれまでにない新たな一面を明らかにした点で本研究成果は大きな学術的意義を有します。またヘイムダルロドプシンはルテインなど、ヒトの体内にも存在するカロテノイドを利用することから、新たな生体分子ツールとして、今後高感度な視覚再生や、光を用いた神経疾患治療技術の開発に役立つことが期待されます。

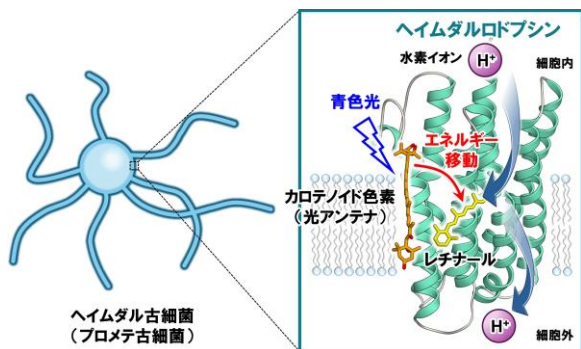


図 1: カロテノイド色素を使い、高感度で光を捉えるヘイムダル古細菌のロドプシン

研究の背景

微生物ロドプシン(注 3)は、ビタミンAの類縁体であるレチナルを使って太陽光を捉え、そのエネルギーを使っ

て細胞の中から外へ H^+ を輸送するタンパク質です。これにより細胞内と外との間で H^+ の濃度勾配が形成され、細胞のエネルギー通貨であるアデノシン三リン酸(ATP)の合成などが駆動されます。これまでに微生物ロドプシンは、海洋や河川、湖沼、土壌などの多様な環境中に幅広く生息する細菌や古細菌(アーキア)を持つことが知られており、特に海洋では藻類などが行う光合成に匹敵する、莫大な太陽光エネルギーが微生物ロドプシンを介して微生物の生存に用いられていることが近年の研究で明らかになっています。

一方、古細菌の中でヘイムダル古細菌は、我々ヒトを含む真核生物の共通祖先となった太古の古細菌に最も近縁な現生生物種であるとされ、生命の進化を考える上で、極めて重要な種として注目されているプロメテ古細菌の一つに分類されます。しかし、細胞の単離が困難なことなどから、ヘイムダル古細菌の生態の大部分は不明であり、真核生物へ至るプロセスを理解する上で大きな問題となっています。

研究の内容と成果

本研究では、これまで海や湖の底の泥などの中に生息すると考えられていたヘイムダル古細菌の一部が、太陽光が豊富に利用できる世界中の海域の海水中に浮遊しながら生息していること、さらにこれまで知られていなかったタイプの微生物ロドプシン(ヘイムダルロドプシン)を持つことを見いだしました(図 2)。

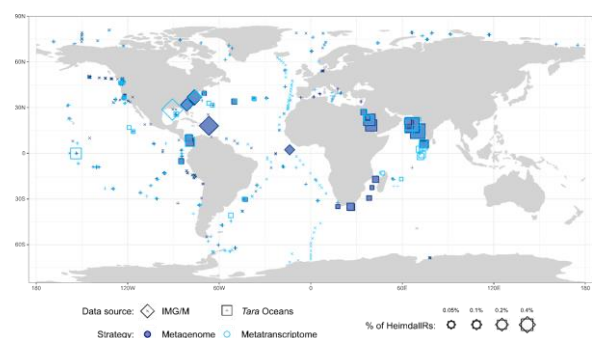


図 2: ヘイムダルロドプシンの世界的分布。四角および菱形で示された海域でヘイムダルロドプシンを持つヘイムダル古細菌が発見された。

掲載論文 : Gali Tzlil[†], María del Carmen Marín[†], Yuma Matsuzaki[†], Probal Nag[†], Shota Itakura, Yosuke Mizuno, Shunya Murakoshi, Tatsuki Tanaka, Shirley Larom, Masae Konno, Rei Abe-Yoshizumi, Ana Molina-Márquez, Daniela Bárcenas-Pérez, José Cheel, Michal Koblížek, Rosa León, Kota Katayama, Hideki Kandori, Igor Schapiro, Wataru Shihoya*, Osamu Nureki*, Keiichi Inoue*, Andrey Rozenberg*, Ariel Chazan* and Oded Béjà*

[†]共筆頭著者、*責任著者 “Light-harvesting by antenna-containing rhodopsins in pelagic Asgard archaea” (2025) *Nature Microbiology*, **10**, No. 6, pp. 1484-1500

(注1) 真核生物

細胞内に細胞核を持つ生物種の総称。生物全体は細菌、古細菌(アーキア)、真核生物の三つに分類され、遺伝学研究から、真核生物は 20 億年ほど前に、ヘイムダル古細菌が属するプロメテ古細菌に近縁な古細菌の一部から進化したと考えられています。

(注2) カロテノイド色素

主に 400~500 nm の波長の光を吸収し、黄色、橙色、赤色を示す天然色素群。

(注3) 微生物ロドプシン

7 回膜貫通型の光受容タンパク質であり、ビタミンAの類縁体であるレチナール色素と結合しています。これら微生物ロドプシンはレチナール色素を用いて太陽光を捉え、その光エネルギーを使って主に細胞内外への水素イオンを含むさまざまなイオンの輸送を行います。そして、微生物ロドプシンは細菌、古細菌(アーキア)、真核微生物のほか、巨大ウイルスにまで広く分布することが知られています。

