

2026年3月16日

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学
国立大学法人茨城大学
国立大学法人神戸大学
国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学
学校法人沖縄科学技術大学院大学

酸素存在下でも生育する光合成細菌の高効率エネルギー変換機構を解明

多くの光合成細菌にとって酸素は有害ですが、海洋性紅色非硫黄細菌は酸素存在下でも生育できます。この細菌において光合成を担うタンパク質複合体の構造をクライオ電子顕微鏡で観察したところ、新たな膜タンパク質を発見し、酸素存在下でも効率よくエネルギー変換できる仕組みの一端を解明しました。

光合成細菌は光合成の際に酸素を発生しませんが、太陽光エネルギーを高効率で化学エネルギーへ変換する能力を持ちます。また、植物が利用しない近赤外光を利用でき、淡水や海水、温泉など多様な環境に適応しています。中でも海洋性紅色非硫黄細菌 *Rhodovulum sulfidophilum* は、酸素存在下でも高い環境耐性を持つモデル生物です。しかし、その光捕集・エネルギー変換を担うタンパク質 LH1-RC 複合体が高効率な光合成を実現する仕組みは未解明でした。

本研究では、クライオ電子顕微鏡を用い、1.8 Å という極めて高い分解能で LH1-RC 複合体を解析し、未知の膜タンパク質 protein-3h を同定しました。さらに、この膜タンパク質の近傍には、ヘム（鉄を中心を持つ環状分子）に結合していない孤立した鉄が存在することを明らかにし、この鉄が電子伝達の中継点として機能する可能性を示しました。これらの知見は、光合成の理解を深めるとともに、遺伝子改変によるバイオテクノロジー応用や、硫化水素を含む排水処理など環境インフラ維持への貢献につながると期待されます。

研究代表者

筑波大学計算科学研究センター

谷 一寿 教授

茨城大学学術研究院基礎自然科学野

大友 征宇 教授

神戸大学大学院農学研究科

木村 行宏 教授

名古屋大学大学院理学研究科

三野 広幸 准教授

沖縄科学技術大学院大学イメージングセクション

望月 俊昭 リーダー

研究の背景

光合成細菌は、植物やシアノバクテリアとは異なり、光合成の際に酸素を発生しませんが、太陽光エネルギーを高効率で化学エネルギーへと変換する能力を持っています。これらの細菌は、植物が利用しない近赤外光を利用できるという共通の特徴を持ち、淡水、海水、温泉など多様な環境に適応した光捕集の仕組みを発達させてきました。

通常、光合成細菌は酸素が存在する環境では生育しにくいとされていますが、そのような条件下でも生育できる紅色非硫黄細菌（注1）は独自の進化を遂げてきました。そのうちの一種である海洋性光合成細菌 *Rhodovulum sulfidophilum* (*R. sulfidophilum*) は、高い環境耐性を持つモデル生物です。この細菌の光捕集・エネルギー変換を担うタンパク質複合体「LH1-RC」（注2）では、シトクロムサブユニット（注3）に含まれるヘム（注4）の数が一般的な4個ではなく3個であり、少ないヘム数で高効率の光合成を実現する仕組みは長らく未解明でした。そこで本研究では、クライオ電子顕微鏡（注5）を用いて、*R. sulfidophilum* の LH1-RC 複合体の詳細な構造解析を行いました。

研究内容と成果

本研究では、クライオ電子顕微鏡観察において、約 1.8 Å（この種のタンパク質では、これまで X 線構造解析による 1.9 Å が最高）という世界最高レベルの分解能で構造を可視化することに成功し、電子密度マップからアミノ酸配列を推定することで、ゲノム上で LH1-RC 複合体中に新しい膜タンパク質（protein-3h）が含まれていることを発見しました（図1）。LH1 複合体（注6）は、16組の $\alpha\beta$ サブユニットからなる開いたリング構造を形成し、2種類のカロテノイド（注7）が配置されることで膜内部はほぼ密閉されています。この構造により、エネルギー変換に関わる分子（キノン（注8））の出入りは、リングの切れ目1か所に限定されます。これは、多くの紅色細菌が形成する閉じた LH1 リングとは対照的で、本種の特徴の一つです（図1）。

反応中心には、3つのヘムを持つシトクロムサブユニットが結合していました。外側のヘムに配位するアミノ酸は、一般的なメチオニンではなくシステインであり、その結果、電子の受け渡しのしやすさ（酸化還元電位）が大きく変化していることが分かりました。さらに、その近傍には新規の非ヘム鉄（タンパク質と結合していない鉄）が存在し、ヒスチジン（アミノ酸）と水分子により結合していました。EPR（電子常磁性共鳴）測定（注9）の結果とも一致しており、この鉄は電子伝達の中継点として機能する可能性が高いと考えられます（図2）。

また、LH1 リング開口部に位置する protein-3h は、反応中心および複数の LH1 サブユニットと相互作用していました。このタンパク質はリングの一部として「フェンス」のような役割も果たし、複合体の安定化に寄与していると考えられます。

これらの知見から、*R. sulfidophilum* では複数の電子伝達経路を環境条件に応じて柔軟に使い分けている可能性が示されました。硫化物に加え、多様な電子供与体を利用できるという生態的特徴も、この柔軟な電子伝達機構に支えられていると考えられます。

今後の展開

本研究成果を基に、紅色非硫黄細菌の酸素や硫黄に対する耐性を高める遺伝子改変を進めることで、バイオテクノロジー分野における利用効率および安定性の向上を図ります。

近年、下水や汚泥に由来する硫化水素による下水管の腐食や、道路陥没事故の危険性が指摘されています。本研究の知見は、硫化水素を含む排水処理への対策など、インフラの維持・保全への応用につながる事が期待されます。

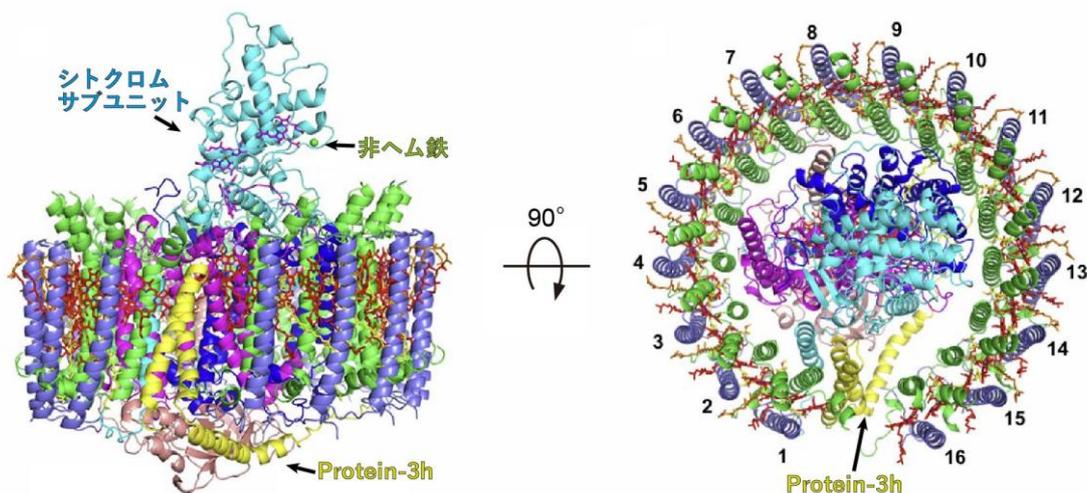


図1 海洋性紅色非硫黄細菌の光合成装置（LH1-RC 複合体）の構造。この複合体は、16 個の LH1 サブユニット（緑とスレート色）からなるリング状の構造を持ち、その一部に新たに発見された膜タンパク質 protein-3h(黄色)が位置している。protein-3h によって形成される開口部は、光合成に必要なキノン分子の出入り口として働き、効率的なエネルギー変換を支える重要な役割を担っていると考えられる。

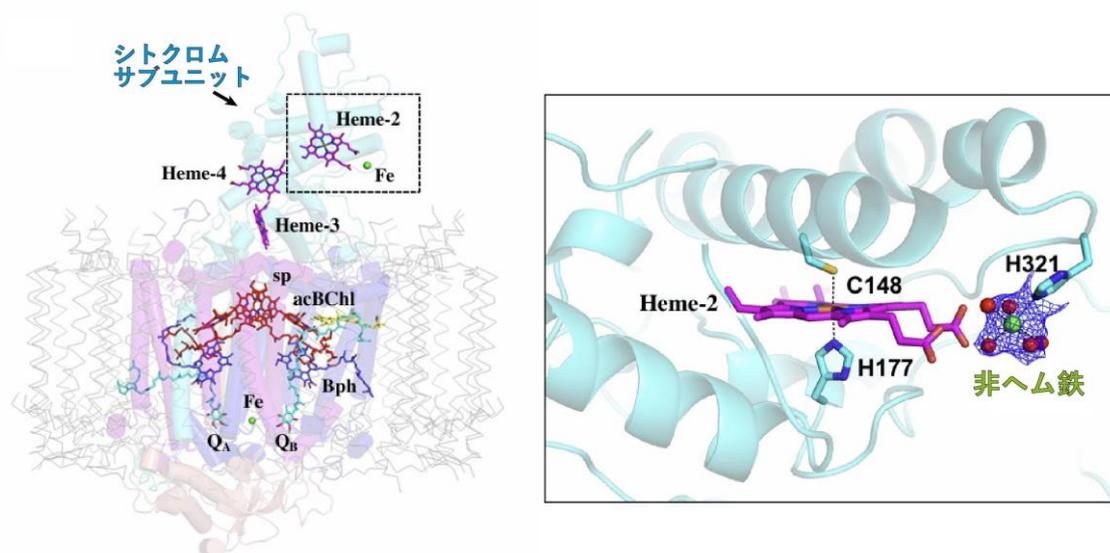


図2 特徴的な 3 へム型 LH1-RC 複合体の構造。海洋性紅色非硫黄細菌に見られるシトクロムサブユニットは、一般的な 4 へム型とは異なり、外部から電子を受け取る役割を担うへム-1 を欠く 3 へム型構造をとっている。通常、へム-1 を欠く場合にはへム-2 の酸化還元電位が高くなり、電子の受け渡しが不利になると考えられる。しかし本種では、配位アミノ酸がメチオニンからシステイン（C148）へ置換されていることに加え、新たに非ヘム鉄が結合していることが明らかとなった。これにより電子を受け渡すための補助的な経路（電子リレー機構）が形成され、構造的に外部からの電子伝達を可能にしていると考えられる。

用語解説

注1) 紅色非硫黄細菌

酸素を発生しないタイプの光合成を行う細菌の一群で、含まれるカロテノイドの種類により赤色や褐色に見える。多くは低酸素または無酸素環境を好み、海水、湖底、沼、田んぼなどさまざまな環境に生息する。植物とは異なり、光合成の際に水ではなく有機物や低濃度の硫化物などを電子供与体として利用するため、酸素を発生しない。高濃度の硫化水素環境では生育が抑制されるが、低濃度の硫化物に適応した種や、本研究の対象種のように比較的高い耐性を持つものも報告されている。

注2) コア光捕集反応中心複合体 (LH1-RC)

光合成において中心的な役割を担うタンパク質複合体。アンテナタンパク質 (LH1) が光エネルギーを効率よく集めて反応中心 (RC) へ伝え、電子の流れに変換する。

注3) シトクロムサブユニット

反応中心を構成するタンパク質の一部で、鉄を含むヘム分子を結合し、外部から受け取った電子を反応中心の色素分子へ伝える。これにより、光エネルギーを化学エネルギーへ変換する過程を支える。

注4) ヘム

鉄を中心に持つ環状の分子で、タンパク質に結合して電子の受け渡しを担う。呼吸や光合成などのエネルギー変換過程において重要な働きをし、血液中のヘモグロビンに含まれる分子としても知られる。

注5) クライオ電子顕微鏡

生体高分子の立体構造を解析する手法の一つ。タンパク質などの試料を急速凍結して観察することで、結晶化することなく、アミノ酸や原子の位置に近いレベルまで構造を明らかにできる。構造をどこまで細かく観察できるかは「分解能」という数値で表され、数値が小さいほど、より詳細な構造が分かる。

注6) LH1 複合体 (光捕集1タンパク質複合体)

光を集める役割を持つ光捕集タンパク質複合体の一つ。LH1 は、 α 鎖と β 鎖という2種類の膜タンパク質からなり、内側の α 鎖と外側の β 鎖が1対となったサブユニット14~17個がリング状に並んで構造を形成する。

注7) カロテノイド

植物、藻類、光合成細菌などが生合成する天然色素の総称。光合成では、光エネルギーの吸収を助けるとともに、強い光から細胞を守る保護作用や抗酸化作用を担う。

注8) キノン

光合成において電子を運ぶ役割を担う分子。反応中心で電子を受け取ると、細胞質側の水素イオン (H^+) と結合して複合体から離れ、電子を次の反応へと運ぶ。

注9) EPR (Electron Paramagnetic Resonance、電子常磁性共鳴)

不対電子を持つ物質の電子状態を調べる分光法です。不対電子は磁場中でエネルギー準位が分裂し、マイクロ波を照射すると準位間を遷移します。その吸収を測定することで電子の状態や周囲の環境を解析できます。本研究では、ヘム由来ではない鉄の存在を確認するために用いました。

研究資金

本研究は、国立研究開発法人日本医療研究開発機構 (AMED) 創薬等ライフサイエンス研究支援基盤事業 (BINDS) JP21am0101118、JP21am0101116、JP22am121004、科研費 (JP20H05086、JP20H02856、JP23K05822、JP24K01620、JP22K06144、JP24H02084、JP22K18694、JP21H01985、JP22H05416、JP24H01128、JP22K19060)、量子情報生命科学研究センター等の助成を受けて実施されました。

掲載論文

【題名】 Structural insights into the photochemistry of the LH1–RC complex from the marine purple phototrophic bacterium *Rhodovulum sulfidophilum*

(海洋性紅色光合成細菌 *Rhodovulum sulfidophilum* 由来 LH1–RC 複合体の構造学的知見)

【著者名】 Xing-Yu Yue^{1,2}, Guang-Lei Wang^{1,2}, Shinya Kosaki³, Kenji V. P. Nagashima⁴, Yu-Lu Wu^{1,2}, Yuki Kobayashi⁵, Tomoya Sugiyama⁶, Ryo Kanno^{7,8}, Endang R. Purba⁸, Shinichi Takaichi⁹, Toshiaki Mochizuki⁸, Akira Mizoguchi¹⁰, Bruno M. Humbel^{11,12}, Michael T. Madigan¹³, Hiroyuki Mino³, Kazutoshi Tani^{14,15}, Yukihiro Kimura⁶, Zheng-Yu Wang-Otomo⁵ & Long-Jiang Yu^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Forage Breeding-by-Design and Utilization, Institute of Botany, Chinese Academy of Science, ² University of Chinese Academy of Sciences, ³ Department of Physics, Graduate School of Science, Nagoya University. ⁴ Research Institute for Integrated Science, Kanagawa University, ⁵ Faculty of Science, Ibaraki University. ⁶ Department of Agrobioscience, Graduate School of Agriculture, Kobe University. ⁷ Quantum Wave Microscopy Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST), ⁸ Scientific Imaging Section, Core Facilities, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST), ⁹ Department of Molecular Microbiology, Faculty of Life Sciences, Tokyo University of Agriculture, ¹⁰ Graduate School of Medicine, Mie University. ¹¹ Optical Neuroimaging Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST), ¹² Department of Cell Biology and Neuroscience, Juntendo University, Graduate School of Medicine. ¹³ School of Biological Sciences, Department of Microbiology, Southern Illinois University, ¹⁴ Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, ¹⁵ Center for Quantum and Information Life Sciences, University of Tsukuba

【掲載誌】 *Communications Biology*

【掲載日】 2026年3月2日

【DOI】 10.1038/s42003-026-09755-z