

高塩濃度・高アルカリ環境に棲息する紅色硫黄細菌の光合成機構を解明

高塩濃度・高アルカリ環境下に棲息する紅色硫黄細菌が行う光合成において重要な役割を担うタンパク質複合体の構造と光エネルギー転送効率を、クライオ電子顕微鏡観察と計算機解析により調べました。その結果、特殊なタンパク質複合体の構造が、エネルギー変換能力を向上させることが示唆されました。

高塩濃度・高アルカリといった極限環境に適応して棲息する紅色硫黄細菌などの光合成硫黄細菌が行う光合成は、植物やシアノバクテリアとは異なり、硫化水素を使って太陽光エネルギーを化学エネルギーに変換します。この過程では、光を集めるタンパク質複合体である光捕集2複合体(LH2)とコア光捕集反応中心複合体(LH1-RC)が重要な役割を果たしています。紅色硫黄細菌の一種である *Halorhodospira halophila* (*Hlr. halophila*) は、LH2とLH1-RCが一体化しているかのように振る舞うことで、効率的に光合成を行なっていると考えられています。一方で、一般的な紅色非硫黄細菌ではLH2とLH1-RCの相互作用は弱いことが報告されており、この違いは謎に包まれていました。

そこで、クライオ電子顕微鏡を用いて、*Hlr. halophila*由来のLH2、LH1-RCを含む試料溶液をアミノ酸レベルで観察しました。その結果、LH1-LH2、LH1-RCという複合体を形成しており、LH1構造の最小単位は、通常とは異なるポリペプチド鎖で構成されていること、さらに、このLH1構造が、LH2あるいはRCを取り囲んでいることが明らかになりました。また分子間のエネルギー移動計測実験から、このLH1-LH2複合体は、光エネルギー転送効率がほぼ100%であることも分かり、このようなタンパク質複合体の構造が、エネルギー変換能力を向上させていることが示唆されました。

本研究成果は、多くの生物にとって有毒な硫化水素を硫黄に変換しながら、極限環境下でも高効率で光合成を行う細菌の仕組みを明らかにするものです。これにより、太陽光エネルギーの有効活用や環境保全への応用が期待されます。

研究代表者

筑波大学計算科学研究センター

谷 一寿 教授

研究の背景

光合成細菌は、植物やシアノバクテリアと異なり、光合成時に酸素を発生しないものの、非常に高い効率で太陽光エネルギーを化学エネルギー（酸化還元電位差）へ変換します。どの光合成細菌も、植物が利用しない近赤外領域の太陽光を利用するという点では同じ特徴を持っていますが、菌の種類ごとに棲息環境が異なり、淡水から海水、温泉まで幅広く、それぞれの環境に最適な光捕集メカニズムを有しています。

酸素非発生型の光合成細菌の光合成は、進化的に古く、酸素発生型である植物の光合成に類似している部分もありますが、効率を重視した独自の進化過程を遂げたことが分かっています。特に、硫化水素を使って光合成を行う紅色硫黄細菌^{注1)}は、高温・高塩濃度・高アルカリといった環境下で棲息できるものも多く、そのような極限環境下でも安定的に光合成を行うために、種ごとに独自の進化をしてきました。中でも *Halorhodospira halophila* (*Hlr. halophila*) では、光捕集に特化したタンパク質複合体 LH2^{注2)} と、光捕集およびエネルギー変換を行うタンパク質複合体 LH1-RC^{注3)} が強く結びつき一体化することで、効率的に光合成を行なっていると考えられています。しかしながら、通常、LH2 と LH1-RC の相互作用は弱いと考えられており、この強い一体化形成の仕組みは謎に包まれていました。そこで、本研究では、リビア砂漠の高塩分湖から分離され、塩分濃度 35%以上、pH 10.7 の高アルカリという極限環境に棲息する紅色硫黄細菌 *Hlr. halophila* が持つタンパク質複合体について解析を行いました。

研究内容と成果

まず、紅色硫黄細菌 *Hlr. halophila* に由来する LH1-RC と LH2 を含む試料溶液を、クライオ電子顕微鏡^{注4)}により観察したところ、これまで知られていた LH1-RC 複合体と、新規形態の共複合体 LH1-LH2 が共存していることが分かりました（図1）。共複合体 LH1-LH2 は、より大きな光捕集タンパク質複合体 LH1^{注5)} リングが LH2 リングを取り囲む、二重リング状の円筒構造を形成しています（図2）。特に、LH1 は α 鎖と β 鎖から成るサブユニット 18 個を含み、さらに、最大吸収波長が 797 nm のバクテリオクロロフィル *a* (BChl *a*)^{注6)} という色素分子（光を吸収する分子）を保持しています（LH1-B797 BChl *a*）。一方、LH2 リングは α 鎖と β 鎖から成るサブユニット 9 個で構成されており、共複体内の BChl *a* 分子は、複体内および複体間で広範なネットワークを形成し（図3）、分子間のエネルギー移動^{注7)}計測により周囲の LH1 へのエネルギー伝達効率をほぼ 100%に高めることが分かりました。さらに、追加の LH1-B797 BChl *a* 分子は、LH2 内の単量体 BChl から LH1 内の二量体 BChl へと励起子を効率的に伝達できるような配置になっています。このような LH1-LH2 共複合体の構造的特徴により、この光合成細菌は生理的に過酷な生態環境に適応し、最小限の LH2 複合体で励起エネルギー^{注8)}をコア複合体である LH1-RC に最大限伝達し、効果的に光を収集していると考えられます。

今後の展開

本研究結果に基づいて、紅色硫黄細菌の塩耐性や高アルカリ耐性へ向けた遺伝子改変・導入を行うことで、その生物工学的な利用における効率や安定性が向上すると考えられます。また、硫化水素を含む排水処理といった環境保全などにも活用できると期待されます。

参考図

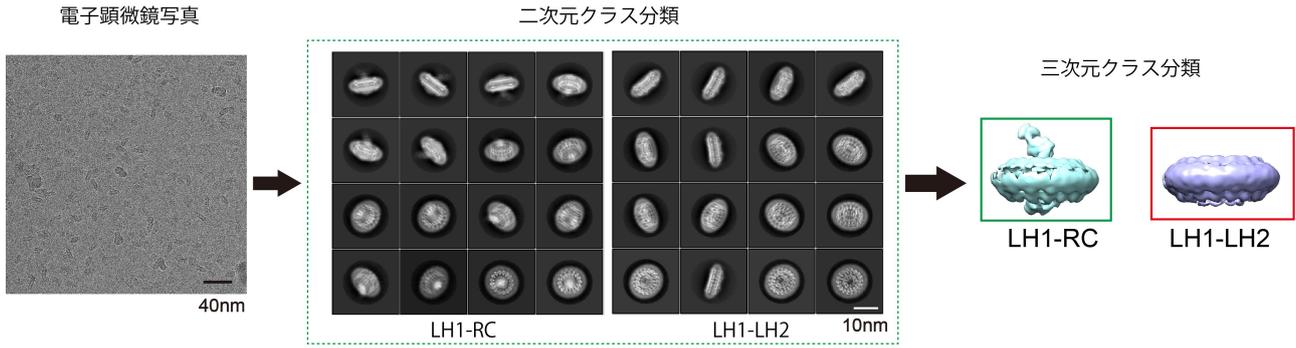


図1 クライオ電子顕微鏡写真から計算機により分類可視化された *Hlr. halophila* のコア光捕集反応中心複合体 (LH1-RC) と光捕集共複合体(LH1-LH2)。クライオ電子顕微鏡写真 (左図) から二次元クラス分類^{注10)} 後の平均化された投影像 (中図) は、LH1-RC と LH1-LH2 に分けて表示している。立体構造を基にした三次元クラス分類^{注9)} により2つの立体構造 (右図) に収束した。

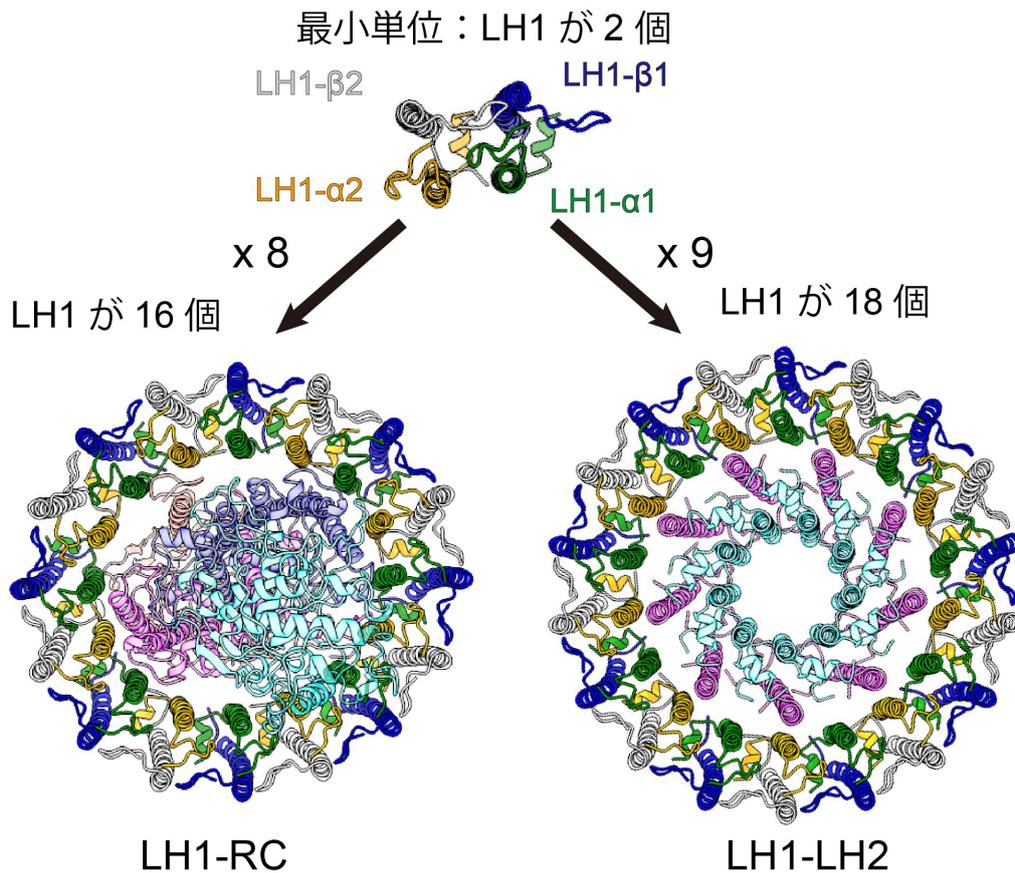


図2 クライオ電子顕微鏡により可視化された *Hlr. halophila* のコア光捕集反応中心複合体 (LH1-RC) と光捕集共複合体(LH1-LH2)の立体構造。LH1 サブユニットの α 、 β 鎖のそれぞれ2種類のアイソフォーム^{注10)} がペアとなって、リングの最小構造単位を形成している様子を図示化した。LH1 リングが RC と LH2 (半透明色部分) をそれぞれ取り囲むように並んでいる。

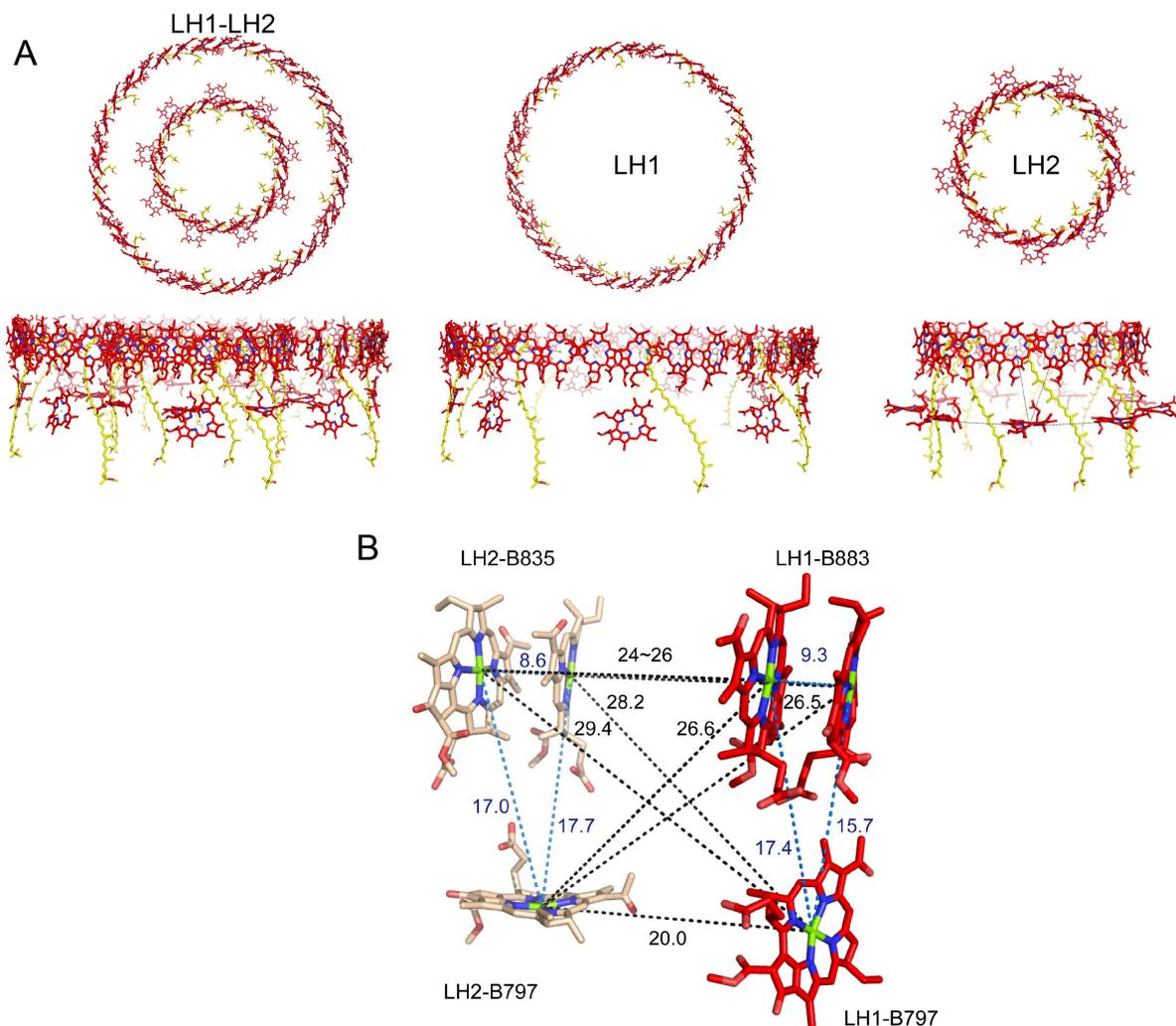


図3 LH1-LH2 共複合体中の色素分子配置

A) LH1-LH2 共複合体中での色素分子の立体配置。カロテノイド^{注1)} (黄色棒モデル) とバクテリオクロロフィル *a* (赤色棒モデル) を LH1-LH2、LH1、LH2 それぞれで表示している。B) 近接したバクテリオクロロフィル *a* (LH2 サブユニット由来: 茶色棒モデル、LH1 サブユニット由来: 赤色棒モデル)、並びに相互の Mg 間の距離を示し、互いに光伝達可能な距離に位置していることが分かる。

用語解説

注1) 紅色硫黄細菌

光合成細菌の仲間、含まれるカロテノイドの種類により赤、褐色などに見える。ほとんどが嫌気性で硫黄泉、湖などの硫化水素が溜まった酸素のない環境を好んで棲息している。植物などとは異なり、光合成時には水ではなく硫化水素を使うため、酸素を発生しない。

注2) LH2 (光捕集タンパク質複合体2)

光エネルギーをアンテナタンパク質である LH2 で効率的に捕集し、アンテナタンパク質 LH1 サブユニットへ光を効率よく伝達するタンパク質複合体。通常、 α 鎖と β 鎖と呼ばれる2種類の膜タンパク質から構成され、内側の α 鎖と外側の β 鎖の1対2本によるサブユニットを構成し、リング状に7~9個並ぶことが多い。

注3) コア光捕集反応中心複合体 (LH1-RC)

光エネルギーをアンテナタンパク質 LH1 で効率的に捕集し、反応中心 (RC) へ伝え、光から電子への変換を行い、キノン分子により電子を伝達するタンパク質複合体。

注4) クライオ電子顕微鏡 (Cryo-EM)

生体の高分子構造を立体的に解析する手法の一つ。本研究では、沖縄科学技術大学院大学の Titan Krios G1 を使用した。

注5) LH1 (光捕集タンパク質複合体1)

光を集めるための光捕集タンパク質 LH1 は、通常、 α 鎖と β 鎖と呼ばれる2種類の膜タンパク質から構成され、内側の α 鎖と外側の β 鎖の1対によるサブユニットがリング状に14~17個並ぶことが多い。

注6) バクテリオクロロフィル *a* (BChl *a*)

紅色細菌などの酸素を発生しない光合成時に利用する色素(通常の光合成の葉緑体に相当)で、反応中心(RC)、LH1、LH2に結合し、光から電子への変換や、集光を行う際の中心的役割を担う。色素の形によってBChl *a*~*f*に分類される。BChl *a*単体の吸収波長は770 nm付近だが、周囲の環境依存的に長波長側へシフトする。本研究では、各バクテリオクロロフィル *a*の最大吸収波長に従って883 nmの場合「B883」と示している。

注7) 分子間のエネルギー移動

異なる分子間でエネルギーを交換する現象で、光合成系などの自然現象をはじめ、科学技術分野でも利用されている。光などのエネルギーを分子が受け取ることで励起され、光の放出を伴わずに近接する分子へエネルギーを移動させる。

注8) 励起エネルギー

分子や原子の電子が基底状態である最低エネルギー状態から高いエネルギー状態である励起状態へ遷移するために必要なエネルギーのこと。本研究では、光エネルギーによりLH2が励起されている。

注9) クラス分類

クライオ電子顕微鏡により収集された多数の粒子画像をグループ分けし、二次元または三次元のレベルで異なる状態を識別するための解析手法。二次元クラス分類では、類似性の高い粒子画像をグループ化し、平均像の計算によりコントラストの高い二次元画像が得られる。三次元クラス分類では、想定される三次元構造を基に粒子画像をグループ化する。

注10) アイソフォーム

単一の遺伝子あるいは遺伝子ファミリーに由来する類似のタンパク質。互いに同じ機能の場合もあるが、全く異なることもある。*Hlr. halophila*のLH1サブユニットでは、 α 鎖2種類と β 鎖2種類のアイソフォームが存在する。

注11) カロテノイド

植物、藻類、光合成細菌が生合成により産生する天然色素。光合成においては、光捕集の補助的役割や、光が強すぎるときの保護作用、抗酸化作用を担う。

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】 A distinct double-ring LH1–LH2 photocomplex from an extremophilic phototroph
(極限環境下に棲息する紅色硫黄細菌由来の光捕集複合体 LH1-LH2 の二重リング構造)

【著者名】 Kazutoshi Tani^{1,2}, Kenji V.P. Nagashima³, Risa Kojima⁴, Masaharu Kondo⁵, Ryo Kanno⁶, Issei Satoh⁷, Mai Kawakami⁷, Naho Hiwatashi⁷, Kazuna Nakata⁸, Sakiko Nagashima³, Kazuhito Inoue^{3,9}, Yugo Isawa⁴, Ryoga Morishita⁵, Shinichi Takaichi¹⁰, Endang R. Purba¹¹, Malgorzata Hall¹¹, Long-Jiang Yu¹², Michael T. Madigan¹³, Akira Mizoguchi², Bruno M. Humbel^{14,15}, Yukihiro Kimura⁸, Yutaka Nagasawa⁴, Takehisa Dewa⁵, Zheng-Yu Wang-Otomo⁷

¹ Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, ² Graduate School of Medicine, Mie University, ³ Research Institute for Integrated Science, Kanagawa University, ⁴ College of Life Sciences, Ritsumeikan University, ⁵ Department of Life Science and Applied Chemistry, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, ⁶ Quantum Wave Microscopy Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University ⁷ Faculty of Science, Ibaraki University, ⁸ Department of Agrobioscience, Graduate School of Agriculture, Kobe University, ⁹ Department of Biochemistry and Biotechnology, Faculty of Chemistry and Biochemistry, Kanagawa University, ¹⁰ Department of Molecular Microbiology, Faculty of Life Science, Tokyo University of Agriculture, Sakuragaoka, ¹¹ Scientific Imaging Section, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, ¹² Photosynthesis Research Center, Key Laboratory of Photobiology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, ¹³ School of Biological Sciences, Department of Microbiology, Southern Illinois University, ¹⁴ Provost Office, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, ¹⁵ Department of Cell Biology and Neuroscience, Juntendo University

【掲載誌】 *Nature Communications*

【掲載日】 2025年2月6日

【DOI】 10.1038/s41467-024-55811-9

問合わせ先

谷 一寿 (たに かずとし)

筑波大学 計算科学研究センター 教授

URL: <https://www.cryoem-tokai.jp/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学 計算科学研究センター広報・戦略室

TEL: 029-853-6260

E-mail: pr@ccs.tsukuba.ac.jp