

NEWS RELEASE

極小サイズで卓越した光合成効率 を実現するタンパク質進化

淡水に棲む光合成細菌の極小光捕集構造の可視化により
効率的に太陽光を利用できる仕組みを明らかに

- 光合成の際に酸素を発生しない「光合成細菌」の一種であるロドバクター・カプシュラタスのコア光捕集反応中心複合体の三次元構造をクライオ電子顕微鏡により可視化することに成功
- 最小のタンパク質構成数で高効率に光捕集を行うメカニズムを解明
- 類縁の光合成細菌ロドバクター・スフェロイデスでは、光捕集反応中心複合体の二量体が形成されるが、本種では単量体のみで機能する理由の解明
- この細菌は、バイオテクノロジーで活用されている光合成細菌の1つで、淡水環境で非常に簡単に増殖することから、バイオマスによる環境保全にも利用できる可能性を示唆

【概要】

三重大学大学院医学系研究科の谷一寿特任教授、溝口明教授、沖縄科学技術大学院大学の Bruno M. Humbel 博士、茨城大学大学院理工学研究科の大友征宇教授らのグループは、水田などの淡水に棲息する紅色細菌^{*1} の *Rhodobacter capsulatus* (ロドバクター・カプシュラタス) の「膜タンパク質コア光捕集反応中心複合体^{*2} の立体構造」をクライオ電子顕微鏡 (Cryo-EM)^{*3} による可視化に成功しました。

コア光捕集反応中心複合体 (LH1^{*4}-RC) は、光合成細菌が太陽光エネルギーを集め、光から電子へ変換し、作り出した電子を渡す役割を担っている膜タンパク質です。これまで立体構造が報告されている紅色細菌の LH1-RC は、光捕集に特化したアンテナタンパク質である LH1 が反応中心 RC をリング状に取り囲むように並ぶものばかりでした (図1)。アミノ酸配列や立体構造での比較からも、非常によく似ているにもかかわらず、このような LH1 サブユニット数に違いが生じるメカニズムは、謎にまつまれています。

ロドバクター・カプシュラタスのコア光捕集反応中心複合体は、他の種とは異なり、LH1 サブユニット数が10個と最小構成数となっており、理論的には8個のサブユニット数で光合成が可能であることを支持する結果となっています。さらに、近縁種であるロドバクター・スフェロイデスでは同じ単量体^{*5} が二つ集まった二量体も形成できることが知られているのですが、本種ではその集合時のカギとなる PufX^{*6} の形が大きく異なるうえ、2021年に発見した二量体を安定化する protein-U^{*7} も存在しないことから、単量体として機能することが立体構造上からも明らか

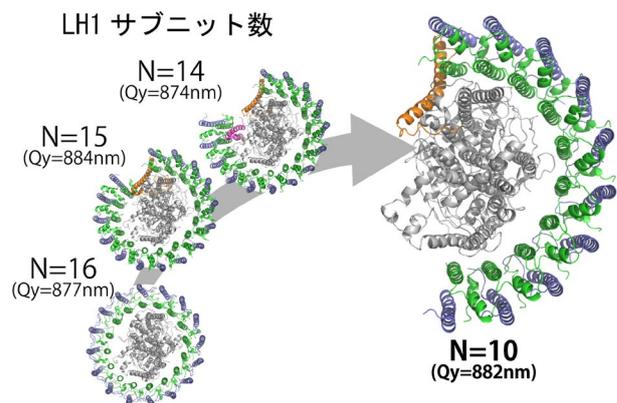


図1. LH1 サブユニット数の多様性とコア光捕集反応中心複合体
 これまでに決定されたコア光捕集反応中心複合体の立体構造と *Rba. capsulatus* 由来のもの LH1^{*4} サブユニット (α : 緑、 β : 青) の数にしたがって比較している。N=16 は、*Rsp. rubrum*、N=15 は *Rba. veldkampii*、N=14 は *Rba. sphaeroides* 由来の LH1-RC を表しています。()内は LH1 の近赤外領域にある Qy 遷移^{*8} とよばれる吸収極大波長を示しています。N の数に関わらず 880 nm 付近に吸収極大を示します。PufX^{*6} (オレンジ)、Protein-U^{*7} (マゼンタ)、反応中心 (灰色)。

になりました。そのため二量体を形成することはなく、本当の意味で極小サイズの光合成ユニットであることを明らかにしました(図1)。

今回得られた立体構造から、光捕集複合体の進化的な謎であった最小構成数での機能ユニットを示唆することが可能となり、理論上 LH1 サブユニット数が 8 個以上なら近赤外領域の吸収極大波長に大きな影響を及ぼさないことも一致し、これらの特徴をうまく進化的に取り入れて効率的に生き残れる戦略を取っていることがわかりました。そのため本研究により、極小サイズの構成数でも高効率な太陽光エネルギー利用への貢献、環境保全への活用が期待されます。

三重大学、茨城大学、沖縄科学技術大学院大学、神戸大学、中国科学院植物研究所、南イリノイ大学の国際共同研究によるこの成果は、2023 年 2 月 15 日、国際学術誌「Nature Communications」に掲載されました。

【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へ変換できるように進化してきました。棲息環境は淡水から海水、温泉まで幅広く、種ごとに異なる環境下で棲息できるように適応し、光捕集において中心的役割を担うバクテリオクロロフィル(BChl) *⁸ 類や補助的な効果を持つカロテノイド*⁹ 類の種類・含有量にも差がみられるなどバリエーションに富んでいます。どの光合成細菌も太陽光を利用するという点では同じなのですが、菌の種類ごとに棲息環境が異なるなど、環境に合わせて光捕集メカニズムが最適な装置になるようそれぞれが進化のバイアスを受けています。

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、酸素非発生型として効率を重視した独自の進化過程を遂げたことがわかっています。一方で、独自に発展した立体構造と機能との相関性は不明な部分も多く、最小限の構成数による高効率でかつ安定的な光合成を行えるかは全くの謎にまつまれています。

また、光合成細菌は、田んぼや排水溝、養殖池など私たちの生活の身近なところにも棲息しています。本種のような紅色細菌は農作物にとっての有害物質を栄養とし、有益な栄養分を排出するようなものも多く、化学物質に頼らない農業への活用も進められてきました。身の回りの淡水環境下で、非常に高いエネルギー変換効率で光合成をおこなうメカニズムは、環境保全のためのバイオテクノロジー分野などからの期待が寄せられています。

【研究内容】

今回、可視化できたロドバクター・カプシュラタスの LH1-RC は、今までに観察されたなかで最小のタンパク質構成数で機能し、半月状に並ぶことがわかりました(図 1)。これまでは、構成するタンパク質の種類が増えるごとに、LH1 サブユニット数の減少がみられてきました。例えば、PufX が含まれると N=15 に、更に Protein-U の追加で N=14 へと LH1 サブユニット数が減少していました。本種は PufX をもつものの、Protein-U が存在しないため、アミノ酸配列や立体構造の比較結果から、進化的に LH1 サブユニット数が決まっている可能性を示唆することができました。

加えて、類縁種の光合成細菌ロドバクター・スフェロイデスでは二量体の結合部位形成に関与している膜タンパク質 PufX のアミノ末端部分の立体構造が、本種のものとは大きく異なるうえ、Protein-U が存在しないことから、本種が単量体で機能する理由を明示することができ、本当の意味でこの最小構成数でも機能できることを明らかにしました。

今回得られた立体構造から、光捕集複合体の進化的な謎であった最小構成数での機能ユニットを示唆することが可能となり、理論上 LH1 サブユニット数が 8 個以上なら近赤外領域の吸収極大波長に大きな影響を及ぼさないことも一致し、これらの特徴をうまく進化的に取り入れて効率的に生き残れる戦略を取っていることがわかりました。そのため本研究により、極小サイズの構成数でも高効率な太陽光エネルギー利用への貢献、環境保全への活用が期待されます。

【今後の展望】

酸素を発生しない光合成で生育する光合成細菌ですが、植物が利用しない近赤外光の波長を利用できるうえ、非常に高いエネルギー変換効率を実現できています。近赤外光は、家電のリモコンなどで使用され、たいいてい物質は透過するため、逆に太陽光エネルギーとしては未利用となっています。一方で、淡水に棲息する光合成細菌の農作物への利用は既に実績をあげており、化学物質に頼らない農業・養殖への活用だけでなく、更によりコンパクトなLH1-RCを求めた遺伝子改変や導入による生物学な利用による高効率・高安定性の向上も期待できるため、この安全な太陽光エネルギーの利用へ向けた発展貢献ができると考えられます。

【用語解説】

- *1) 紅色細菌：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、橙、黄、褐色などに見えます。嫌気性で硫黄泉、湖、干満により水没と空気中への露出を繰り返す潮間帯などに棲息しています。植物などとは異なり、光合成時に水ではなく硫化水素や無機物などを使いますので、酸素を発生しません。
- *2) 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、電子を伝達する複合体タンパク質。
- *3) 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できる手法の一種。2017年ノーベル化学賞。
- *4) LH1 サブユニット：光を集めるためのアンテナタンパク質 LH1 では、通常 α ポリペプチドと β ポリペプチドと呼ばれる2種類の膜タンパク質から構成されています。これまでの知見から17あるいは16ペアで隙間なくリング状に並ぶ場合が多く、ロドバクターの仲間では15あるいは14ペアであったが、今回はじめて10ペアの最小構成数の存在を示すことができました。
- *5) 単量体と二量体：同じ種類の分子やサブユニットが1つ、あるいは2つ集まった状態をそれぞれ単量体、二量体呼びます。今回は、コア光捕集反応中心複合体単量体が2個まとまった状態を二量体と呼びます。
- *6) PufX：光合成細菌の一種であるロドバクター属では、ゲノム中で Cyt サブユニット遺伝子がなくなり、その位置に pufX 遺伝子が置き換わっているものが多いのが特徴です。最近 LH1-RC 複合体中での立体構造が明らかになった膜タンパク質で、これまでのノックアウト株の結果から欠損あるいは変異箇所によっては光栄養成長ができなくなることがわかっています。
- *7) protein-U：私たちが発見した2回膜貫通型膜タンパク質であり、そのノックアウト株の作製により、その機能は LH1-RC 二量体化を安定させることであることがわかっています。
- *8) バクテリオクロロフィル(BChl)と Qy 遷移：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で、反応中心や LH1 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っています。色素の形によって BChl a~f に分類され、BChl b は BChl a より長い波長の光を吸収します。LH1 サブユニットにおける Qy 遷移とよばれる吸収極大は室温で 880 nm 前後となります。一方で、BChl a 単体では 770 nm 付近となり、LH1 サブユニットに組み込まれることで長波長側へシフトします。
- *9) カロテノイド：植物、藻類、光合成細菌が生合成している天然色素で、トマトに含まれているリコピンもこの仲間です。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、抗酸化作用を担っています。

【論文情報】

- 掲載誌： Nature Communications
- 掲載日： 2023/2/15 (On line 版)
(<https://www.nature.com/articles/s41467-023-36460-w>)
- 論文タイトル： *Rhodobacter capsulatus* forms a compact crescent-shaped LH1-RC photocomplex
- 著者： Kazutoshi Tani, Ryo Kanno, Xuan-Cheng Ji, Itsusei Satoh, Yuki Kobayashi, Malgorzata Hall, Long-Jiang Yu, Yukihiko Kimura, Akira Mizoguchi, Bruno M. Humbel, Michael T. Madigan, Zheng-Yu Wang-Otomo

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, and JP20H02856)等の助成を受けて実施されました。

<本件に関するお問合せ>

三重大学大学院医学系研究科 谷 一寿 特任教授

E-mail: ktani@doc.medic.mie-u.ac.jp

沖縄科学技術大学院大学研究支援ディビジョン Bruno M. Humbel 博士

E-mail: Bruno.Humbel@oist.jp

茨城大学大学院理工学研究科 大友 征宇 教授

E-mail: seiu.otomo.sci@vc.ibaraki.ac.jp