

NEWS RELEASE

酸性泉に適応した光合成細菌の タンパク質進化

酸性泉に棲む光合成細菌の光捕集構造の可視化により
酸性下でも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」の一種であるロドピラ・グロビフォルミスの膜タンパク質である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
- 酸性雨の目安より強い酸性環境下でも高効率な光捕集メカニズム解明への一歩
- 従来の光捕集反応中心複合体と大きく異なり、2種類の膜タンパク質が酸性の極限環境に適するよう独自進化
- 酸性雨のような環境でも増殖できるため、バイオテクノロジーで利用されている光合成細菌を環境保全にも利用できるヒント

【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、茨城大学大学院理工学研究科の友友征宇教授らのグループは、米国イエローストーン国立公園の酸性泉に棲息する紅色細菌^{*1}の一種 *Rhodospila globiformis* (ロドピラ・グロビフォルミス) 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}により可視化することに成功しました。

コア光捕集反応中心複合体 (LH1-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 では、膜貫通領域をもたないチトクローム (Cyt) サブユニット^{*4}、あるいは Cyt サブユニットの代わりに PufX^{*5} と呼ばれる膜タンパク質をもっているものばかりでした。この場合、ゲノム上の Cyt サブユニット遺伝子の位置が、pufX 遺伝子で置き換わっていることは知られていたため、2つの遺伝子の関連性は疑われていたものの、アミノ酸配列のレベルでは進化的に離れていることもあり、長年謎につつまれていました。

今回のコア光捕集複合体 (LH1) は、Cyt サブユニットの末端に膜貫通部分が存在する初めての例です。この膜貫通部分は、アミノ酸配列比較では PufX に近い関係性を示さないものの、複合体内部での立体配置関係としては良く似ており、特に細胞外側ループ部分の構造はほぼ重ね合わせることができました (図 1A)。この結果により、Cyt サブユニットと PufX の進化的空白を埋められる可能性ができました。

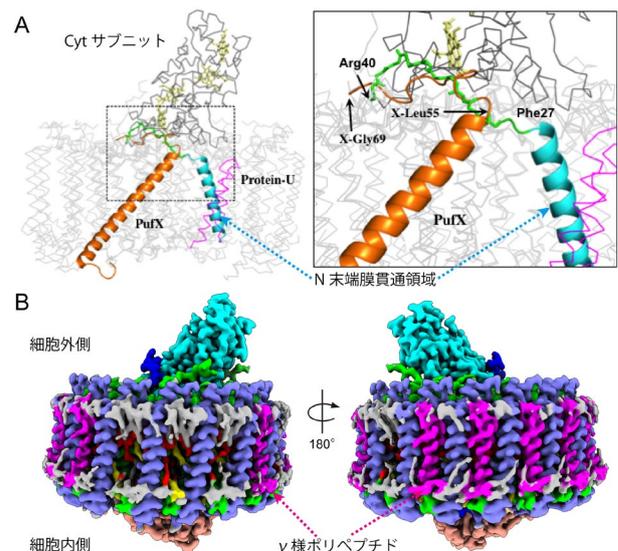


図 1. コア光捕集反応中心複合体と2種類のタンパク質進化 (A) Cyt サブユニット (灰色、膜貫通部分: シアン色)。左図の囲んだ領域を拡大した部分が右図。Cyt サブユニットを持たないロドバクター由来 LH1-RC の PufX (オレンジ)。(B) Cryo-EM 観察したデンシティマップ。Cyt サブユニット (シアン)。γ様ポリペプチド (マゼンタ)。

更に、発見した膜タンパク質 γ 様ポリペプチド*6は、バクテリオクロコフィル(BChl)^{*7} *a*を持つケースでは LH1-RC に組み込まれた初めての例となります(図 1B)。従来、 γ サブユニットは BChl *b* をもつ LH1-RC 特有のものと考えられてきたので、これまでの常識を書き換えるものとなりました。 γ ポリペプチドと、今回発見した γ 様ポリペプチドは同じような立体構造なのですが、アミノ酸配列には相同性がまったく見られません。このことからロドスピラ・グロビフォルミスの γ 様ポリペプチドは、BChl *a* と BChl *b* の LH1 複合体の進化的関連性を示すものであり、共通の祖先タンパク質が存在する可能性があることがわかりました。

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2種類の膜タンパク質の起源を示唆することが可能となり、これらの特徴を進化的に取り入れたことで、酸性雨のような環境下でも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、酸性雨のような極限環境下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、東京農業大学、神奈川大学、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、2022年11月7日、国際学術誌「Communications Biology」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コフィル(BChl)^{*7} 類や補助的な効果を持つカロテノイド*8 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、酸性泉に棲息する光合成細菌ロドスピラ・グロビフォルミスの特徴である、酸性雨のような酸性環境下でも、高い効率で安定に光合成を行える理由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。本種が含まれる紅色細菌を含め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。酸性雨のような環境下でも、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】

腐敗菌などが酸性溶液中で増殖できないように、他の光合成細菌も中性やアルカリ性溶液を好みますが、ロドスピラ・グロビフォルミスは酸性環境下を好み、酸性下でも高い効率で光のエネルギー変換をコア光捕集反応中心複合体(LH1-RC)で行えることが知られていました。酸性雨とみなされるような低いpH環境の下で、どうやって安定性や効率を高めているのかといったメカニズムについては未解明で、今回クライオ電子顕微鏡を用いてようやく明らかにすることができました(図1)。

これまで立体構造が報告されている紅色細菌の LH1-RC では、膜貫通領域をもたないチトクローム(Cyt)サブユニット*4、あるいは Cyt サブユニットの代わりに PufX*5 と呼ばれる膜タンパク質をもっているものばかりでした。ゲノム上の Cyt サブユニット遺伝子の位置が、pufX 遺伝子で置き換わっていることが知られていたものの、双方がアミノ酸配列レベルでは進化的に離れていることもあり、その関連性を疑われつつも長年謎にまつまれています。今回のコア光捕集複合体(LH1)は、Cyt サブユニットの末端に膜貫通部分が存在する初めての例です。この膜貫通部分は、アミノ酸配列比較では PufX に近い関係性を示さないものの、複体内での立体配置関係としては良く似ており、特に細胞外側ループ部分の構造はほぼ重ね合わ

せることができました(図 1A)。これまで Cyt サブユニットと PufX の進化的関係を示す証拠は見つかっていませんでしたが、今回の結果はミッシングリンクとして、これまでの研究結果をうまく説明することができました。

立体構造から新たに発見した膜タンパク質 γ 様ポリペプチド^{*6}は、バクテリオクロロフィル(BChl)^{*7} *a*を持つケースでは LH1-RC に組み込まれた初めての例です(図 1B)。特に、ゲノム情報中でも、タンパク質を転写していると予想されていなかった領域に存在した珍しい発見例でもあります。これまで γ ポリペプチドは BChl *b*をもつ LH1-RC を構成する特有の膜タンパク質だと考えられてきましたが、アミノ酸配列に関しては似ていないものの立体構造のレベルでほぼ同じかつ、LH1-RC 内部での位置も同じであることから、BChl *b* 型の γ ポリペプチドに相当するというので、 γ 様ポリペプチドと名付けました。そのため、 γ 様ポリペプチドは、BChl *a* と BChl *b*の LH1 複合体の進化的関連性を示しているうえに、2つの BChl 型由来の γ ポリペプチドに祖先タンパク質が存在する可能性につながります。

今回得られた立体構造から、進化的に大きな謎であった2種類の膜タンパク質の起源に迫ることが可能となり、酸性条件下の熱安定性や高変換効率に貢献している様子が明らかになりました。そのため生物の命を脅かす酸性雨のような環境下でも、大幅に進化したこれら2種類の膜タンパク質情報の有効活用により、バイオテクノロジーの環境保全分野への応用時のヒントになることが期待されます。

【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の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、光合成細菌の農作物で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、更に遺伝子改変や導入による生物工学的な利用による極限環境下での安定性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：光合成細菌の仲間で、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、干潟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) チトクローム(Cyt)サブユニット：光合成細菌の多くの種が持っている反応中心に結合しているチトクロームです。可溶性のチトクロームや高電位鉄硫黄タンパク質 HiPIP から電子を受け取る役割を担っています。
- *5) 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。
- *6) γ (様)ポリペプチド：BChl *a*をもつコア光捕集 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が、BChl *b*をもつものでは、この他に γ ポリペプチドも含まれます。今回はじめて、BChl *a*をもつ LH1 の γ 様ポリペプチドの存在を示すことができました。
- *7) バクテリオクロロフィル(BChl)：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。
- *8) 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: Communications Biology

掲載日: 2022/11/7 (On line 版)

(https://www.nature.com/articles/s42003-022-04174-2)

論文タイトル: An LH1-RC photocomplex from an extremophilic phototroph provides insight into origins of two photosynthesis proteins

著者: Kazutoshi Tani, Ryo Kanno, Keigo Kurosawa, Shinichi Takaichi, Kenji V. P. Nagashima, Malgorzata Hall, Long-Jiang Yu, Yukihiro Kimura, Michael T. Madigan, Akira Mizoguchi, Bruno M. Humbel, 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

TEL: 059-231-5687

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