

NEWS RELEASE

光合成細菌の高エネルギー変換を支える 新しいタンパク質を発見

産業利用されている光合成細菌ロドバクター・スフェロイデスの光捕集構造の可視化により、太陽光エネルギー活用に新たな示唆

- 光合成の際に酸素を発生しない「光合成細菌」であるロドバクター・スフェロイデスの光捕集反応中心複合体をクライオ電子顕微鏡により立体的に可視化することに成功
- ロドバクター・スフェロイデスの非常に高効率な光捕集メカニズムは、肥料や食品の原料として使用されている5-アミノレブリン酸の生合成などに利用されており、太陽光エネルギーの多様かつ効率的な利用のヒントになると期待
- 光合成細菌は農業や環境分野での活用が進められてきたが、今回高エネルギー変換を支える新しいタンパク質(命名 protein-U)を発見したことで、今後の光合成細菌の品種改良に貢献
- 長らく構造未知であった光合成タンパク質 PufX を含んだ状態で可視化でき、その相互作用やキノンの経路も解明
- 他種と比較して含量が2倍にもなるカロテノイドに関し、光捕集光反応中心複合体での新たな結合位置と特徴を解明

【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大友征宇教授、沖縄科学技術大学院大学のBruno Humbel博士らは、微生物発酵などでの利用が進んでいる光合成細菌の一種 *Rhodobacter sphaeroides* (ロドバクター・スフェロイデス)の「膜タンパク質コア光捕集反応中心複合体^{*1}」をクライオ電子顕微鏡^{*2}により立体的に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、光合成細菌が光エネルギーを集め、電子変換し、伝達することを可能にしている膜タンパク質です。特に、今回は、高エネルギー変換を支える新奇の膜タンパク質が複合体の中に含まれていることを突き止め、それが結合した状態で可視化できた初めての例となります。さらに、遺伝子研究の技法(ノックアウト細菌)を活用し、この新奇タンパク質の機能も明らかにしました。

加えて、可視化により、光捕集反応中心複合体へのキノンの流入出に参与していると考えられてきた膜タンパク質の一種である PufX^{*3}の立体構造とその位置、および光の捕集からキノンを介した電子伝達の経路も明らかにすることができました。

また、ロドバクター・スフェロイデスの複合体は、こ

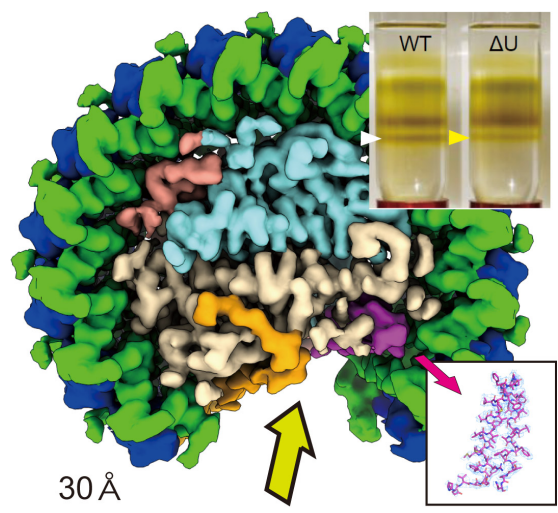


図1. コア光捕集反応中心複合体をペリプラズム側から見た構造
 黄矢印で指した部分はキノンの出入口。
 発見した protein-U(マゼンタ色)。可視化できた PufX(橙色)。右
 上写真: protein-U ノックアウト細菌(ΔU)で二量体(矢頭)減少。

れまで立体構造が解明されている他の光合成細菌のものに比べて、カロテノイド^{*4}の含量が2倍であることが知られていました。しかし、どこにカロテノイドが結合し、相互作用しているのかわかっておらず、本研究により、初めて新たな結合サイトが存在することも確認しました。

三重大学、茨城大学、沖縄科学技術大学院大学、神奈川大学、中国科学院植物研究所、神戸大学、南イリノイ大学の国際共同研究によるこの成果は、2021年11月2日、学術誌「Nature communications」にオンライン掲載されました。

【背景】

光合成を行う際、植物やシアノバクテリアでは酸素を発生しますが、光合成細菌は酸素を発生せず、非常に高い効率で太陽の光を電子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まで幅広く、種ごとに適応し、光捕集において補助的な効果を持つカロテノイド類の種類・含有量にも差がみられるなどバラエティーに富んでいます。どの光合成細菌も太陽の光エネルギーを利用するという点では同じなのですが、環境に応じ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。

また、光合成細菌の光合成は、酸素発生型である植物の光合成と類似の部分もありますが、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、発酵培養などで広く利用されている光合成細菌ロドバクター・スフェロイデスの光捕集反応中心複合体も謎とされてきました。

光合成細菌は、田んぼや温泉など身近なところに生息しています。本種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が多く、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。また、非常に高いエネルギー変換効率を持つことが知られており、酸素を発生しない光合成のメカニズムの解明は、微生物発酵を含む様々な分野から期待が寄せられています。

【研究内容】

ロドバクター・スフェロイデスのコア光捕集反応中心複合体は、他の種とは異なり、二量体形成(同じ単量体ユニットが二つ集まった分子)もできることが知られており、そのカギとなるPufXの寄与メカニズムを明らかにするために様々な研究が行われてきました。しかし、複合体内の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)。

さらに、実際には確認されておらず、ゲノム情報上のみの仮想存在となっていた膜タンパク質が複合体に含まれていることを発見し、当研究チームによりそれを「protein-U」と命名しました。研究により、protein-UがLH1-RCの二量体形成を安定化させるよう機能していることが示されました。

また、カロテノイドについても、可視化により、新しい結合位置の存在を認め、新規様式で相互作用していることを明らかにしました。

また、今回の詳細な三次元構造は、PufXとともに、protein-Uがキノンの出入口を形成していることを示しており、新たなキノンの流入出経路のモデルと、高効率化の可能性を提示するものとなっています。

【今後の展望】

酸素を発生しない光合成細菌による光合成は、進化的に原始的なものですが、非常に高い効率性を実現しています。既に、私たちの暮らしにとって有益な分子の生合成といった産業利用もなされています。本研究で可視化したメカニズムは、生物学でも利用されているロドバクター・スフェロイデスの効率向上の研究を進めるだけでなく、太陽光エネルギーの人工的利用のさらなる発展に貢献することが期待できます。

【用語解説】

*1) 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、キノンを介して電子を伝達する複合体膜タンパク質。

*2) クライオ電子顕微鏡: 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。

*3) PufX: 長らく構造未知であった1回膜貫通型膜タンパク質であり、これまでのノックアウト株の結果

から LH1-RC 二量体が見当たらず単量体になるだけでなく、光栄養成長できないことがわかっている。

*4) 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、イソプレンが直鎖状に結合した基本骨格にもつ。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る。

【論文情報】

掲載誌： Nature communications

掲載日： 2021/11/2 (On line 版)

(<https://doi.org/10.1038/s41467-021-26561-9>)

論文タイトル： A Previously Unrecognized Membrane Protein in the *Rhodobacter sphaeroides* LH1-RC Photocomplex

著者： Kazutoshi Tani, Kenji V. P. Nagashima, Ryo Kanno, Saki Kawamura, Riku Kikuchi, Malgorzata Hall, Long-Jiang Yu, Yukihiko Kimura, Michael T. Madigan, Akira Mizoguchi, Bruno M. Humbel, and 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 等の支援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