

カルシウムが少ない環境に最適化した紅色硫黄細菌の光合成機構を解明

紅色硫黄細菌が行う光合成では、光エネルギーを化学エネルギーに変換します。このとき、通常とは異なり、カルシウムが少ない環境でも光合成する種があります。クライオ電子顕微鏡により光を集めるタンパク質の構造を調べ、カルシウムが少なくても光合成ができるメカニズムを明らかにしました。

光合成細菌が行う光合成は、酸素を発生せず、硫化水素を使って太陽光エネルギーを化学エネルギー（電子）に変換します。この役割は、タンパク質複合体であるコア光捕集反応中心複合体（LH1-RC）が担っています。中でも紅色硫黄細菌の多くは、温泉・海中といったカルシウムが豊富な環境に棲息しており、LH1-RC の立体構造では、光捕集に特化したアンテナタンパク質である LH1 にカルシウムが結合しています。しかし、カルシウム含量の少ない軟水や欠乏状態の水中でも増殖できる常温菌のモデル種アロクロマチウム・ビノサムについては、これまで、光合成にカルシウムは関与していないと考えられており、そのメカニズムは謎につつまれていました。

そこで、クライオ電子顕微鏡を用いて、本種由来の LH1-RC をアミノ酸が可視化できるレベルで観察したところ、LH1 サブユニットのうち特定の 6 か所にのみ、カルシウムが結合していました。近縁種の好熱菌サーモクロマチウム・テピダムでは、全ての LH1 サブユニット 16 か所にカルシウムが結合しており、アミノ酸配列のパターンに応じてカルシウムが結合できるかどうかが決まっていることが分かりました。このことから、本種は進化の過程で軟水中の微量カルシウムを結合して光合成を行うようなメカニズムを採用し、熱安定性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へ分解しつつ、淡水中でも光合成を行える種の、高効率な太陽光エネルギー利用への貢献や環境保全への活用が期待されます。

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（電子）へ変換できるように進化してきました。どの光合成細菌も、植物で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)}のほとんどは、熱安定性のために生育上カルシウムが必要で、温泉や海といったミネラル豊富な水中に棲息しますが、ごく一部の種ではカルシウム含量の少ない軟水にも棲息しています。このような種では、光を電子に変換するタンパク質複合体であるコア光捕集反応中心複合体（LH1-RC）^{注2)}が、独特の進化をしています。その立体構造とカルシウムイオンの関係性は不明な部分が多く、カルシウムが要求されない生育環境で、高効率かつ安定的な光合成を行える仕組みは謎に包まれていました。

研究内容と成果

今回、常温菌 *Allochromatium vinosum*（アロクロマチウム・ビノサム）の LH1-RC をクライオ電子顕微鏡^{注3)}により可視化したところ、今までに報告されているような、生育時にカルシウムが必要な種が持つ LH1-RC の立体構造と異なり、一部にのみカルシウムイオンが結合できることが分かりました（図1）。この結合位置は、カルシウムイオン濃度が異なる（0mM と 20mM）タンパク質精製に影響されないことから、カルシウムイオンは生育時に取り込まれたものと考えられ、かつ結合位置も一定していました。類縁種で温泉に棲息する好熱菌のサーモクロマチウム・テピダムでは、16 個ある LH1 サブユニット^{注4)}のすべてにカルシウムイオンが結合しているのに対し、本種では6個のみが結合していました（図2）。これらのことから、カルシウムイオン結合位置付近のアミノ酸配列には複数のパターンがあり、それに応じてカルシウムイオンが結合できるかどうかが決まっていることを明らかにしました。

また、サーモクロマチウム・テピダムでは LH1 サブユニットを構成する α 鎖のカルシウムイオン結合位置からカルボキシル末端の領域が明瞭に観察できましたが、本種のカルボキシル末端は熱揺らぎのためランダムな位置にあり、平均的な立体構造を観察することができませんでした（図3）。このことは、常温では本種の LH1 サブユニットにカルシウムイオンが結合していても、カルボキシル末端側は影響を受けにくいことを示唆しており、これまでの結果をうまく説明することができました。一方で、高温ではカルシウムイオンが存在しないとタンパク質の安定性が損なわれることも、実験によって分かりました。

本研究により、淡水に棲息するタイプの紅色硫黄細菌の光捕集複合体について、カルシウムイオンが結合している様子を観察でき、保存されたアミノ酸配列のパターンを見つけることができました。紅色硫黄細菌は、これらの特徴をうまく取り入れることで、ミネラルの少ない軟水でも効率的に生き残れるように進化してきたことが示唆されました。

今後の展開

本研究で行った、常温菌である紅色硫黄細菌と好熱菌の LH1-RC の比較結果から、紅色硫黄細菌の高温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・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にまで広く活用できると期待されます。

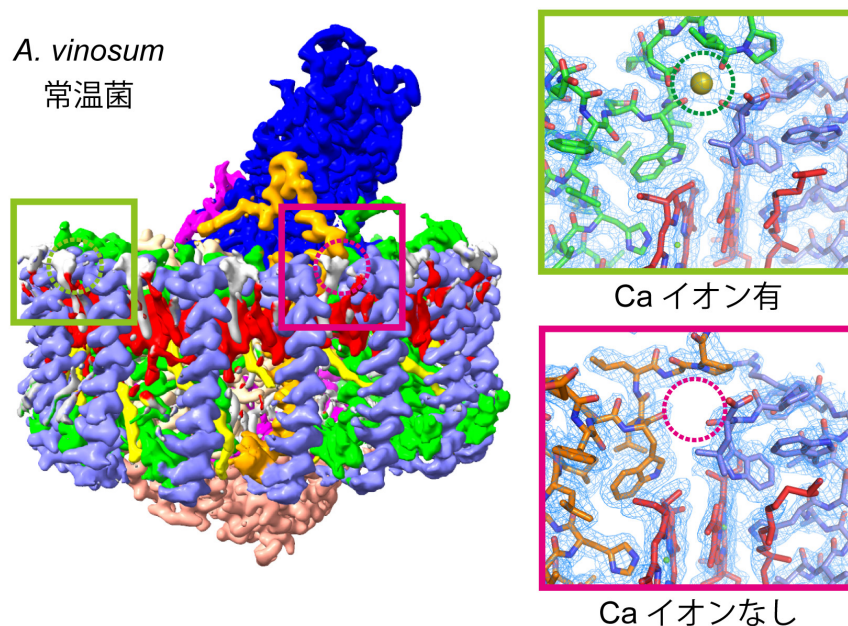


図1 クライオ電子顕微鏡により可視化されたアロクロマチウム・ビノサム (*A. vinosum*) のコア光捕集反応中心複合体 (LH1-RC) の立体構造。

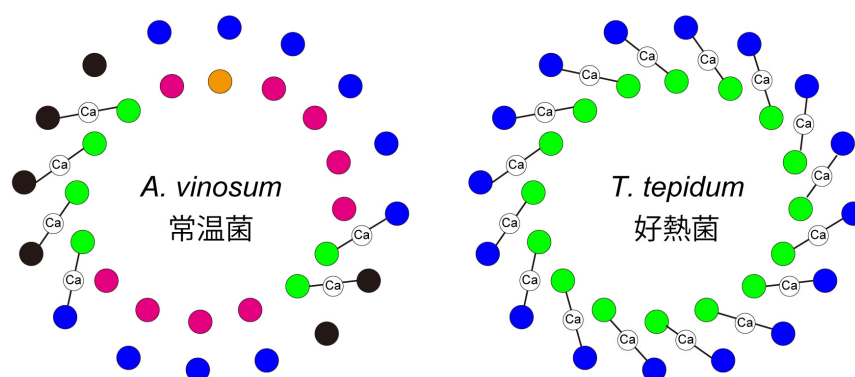


図2 LH1 α 鎖、 β 鎖のアイソフォーム^{注5)} 配置とカルシウム結合位置
常温菌のアロクロマチウム・ビノサム (*A. vinosum*) と、近縁種である好熱菌のサーモクロマチウム・テピダム (*T. tepidum*) 由来の LH1 サブユニット (α : 緑、橙、マゼンタ、 β : 青、黒) の比較。

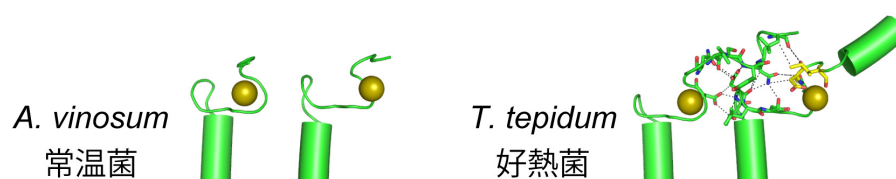


図3 LH1 α 鎖のカルボキシル末端側構造
カルシウムイオン (黄球) が結合した LH1 α 鎖 (緑)。熱安定性が低いものほどカルボキシル末端側が熱揺らぎのため可視化できない。

用語解説

注1) 紅色硫黄細菌

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、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。カルシウムイオンは、熱安定性に関連しているものの、硫黄代謝に直接の関連性はないため、長らく常温菌の *A. vinosum* は光合成にカルシウムイオンが不要だと考えられてきた。

注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、キノン分子により電子を伝達するタンパク質複合体。

注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。本研究では、筑波大学生存ダイナミクスセンターの CRYO-ARM300II と、沖縄科学技術大学院大学の Titan Krios G1 を使用した。

注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 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る。これらは、14~17 ペアで、隙間なくリング状に並ぶことが多い。このリング状構造では、内側に α 鎖が、外側に β 鎖が配列される。

注5) 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している類似のタンパク質。互いに同じ機能である場合もあるが、全く異なることもある。LH1 サブユニットでは、 α 鎖と β 鎖のそれぞれが複数のアイソフォームで構成されることがある。*T. tepidum* は、 α 鎖と β 鎖ともに1種類ずつで、アイソフォームはないが、*A. vinosum* は、 α 鎖3種類と β 鎖2種類のアイソフォームが存在する。

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, and JP20H02856) 等の助成を受けて実施されました。

掲載論文

【題 名】 High-Resolution Structure and Biochemical Properties of the LH1-RC Photocomplex from the Model Purple Sulfur Bacterium, *Allochromatium vinosum*.

(紅色硫黄細菌のモデル種アロクロマチウム・ビノサム由来光捕集反応中心複合体の高分解能構造と生化学的特性)

【著者名】 Kazutoshi Tani, Ryo Kanno, Ayaka Harada, Yuki Kobayashi, Akane Minamino, Shinji Takenaka, Natsuki Nakamura, Xuan-Cheng Ji, Endang R. Purba, Malgorzata Hall, Long-Jiang Yu, Michael T. Madigan, Akira Mizoguchi, Kenji Iwasaki, Bruno M. Humbel, Yukihiro Kimura & Zheng-Yu Wang-Otomo

【掲載誌】 *Communications Biology*

【掲載日】 2024 年 2 月 12 日

【DOI】 10.1038/s42003-024-05863-w

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