

## NEWS RELEASE

## 温泉に棲息する光合成細菌の 生き残り戦略

温泉に棲む光合成細菌の光捕集構造の可視化により  
 高めの温度でも効率的な太陽光利用ができる仕組み明らかに

- 光合成の際に酸素を発生しない「光合成細菌」の一種であるアロクロマチウム・テピダム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
- 温泉に棲息するアロクロマチウム・テピダムは、温泉中の Ca イオンを使って室温より高い温度でも高効率な光捕集メカニズムができる点の特徴
- 選択的に Ca イオンが結合するアミノ酸配列パターンを発見することができたため、Ca イオンによる温度安定性を高めた光合成細菌や新奇タンパク質の設計利用に貢献
- バイオテクノロジーで利用されている光合成細菌の品種改良のヒントになると期待

### 【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、茨城大学の太友征宇教授、神戸大学の木村行宏准教授、日本電子㈱らのグループは、ニュージーランドの温泉に棲息する紅色硫黄細菌<sup>\*1</sup>の一種 *Allochromatium tepidum* (アロクロマチウム・テピダム) の「膜タンパク質コア光捕集反応中心複合体<sup>\*2</sup>の立体構造」をクライオ電子顕微鏡<sup>\*3</sup>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。これまで立体構造が報告されているCaイオン結合型LH1-RCは、16ペアあるLH1すべてにCaイオンが結合しており、Caイオンが結合しないLH1-RCとの比較だけでは、双方が進化的に離れていることもあり、選択的にCaイオンを結合できる仕組みや特徴的なアミノ酸配列などは謎にまつまわれていました。

今回のコア光捕集複合体(LH1)は、複数のアイソフォーム<sup>\*4</sup>と呼ばれる異なる遺伝子由来のタンパク質を含んで形成する珍しい例です。このおかげで、アロクロマチウム・テピダムのLH1-RCでは、Caイオン選択的な結合は計6箇所でのみ起こり、特定のアイソフォームにだけ存在するアミノ酸配列部分で起きていることが明らかになり、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。このような複数のアイソフォームを含むLH1-RCの立体構造の決定は従来使用されていたX線結晶構造解析<sup>\*5</sup>では難しく、クライオ電子顕微鏡を用いる方法で2020年に私たちがNature communications誌へ立体構造を最初に発表して以来、3つ目の報告例となります。

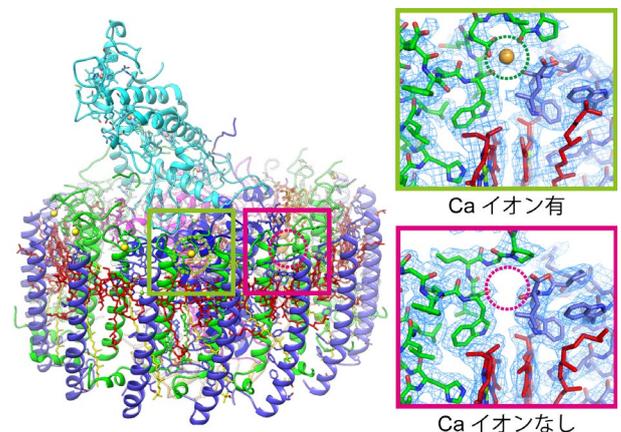


図1. コア光捕集反応中心複合体(左)とCaイオン有無の様子(右) 左図の四角形で囲んだ領域を拡大した部分がCaイオン有(緑)/無し(マゼンタ)の状態です。LH1の構成単位である2個のタンパク質ペア(緑、青の棒モデル)にCaイオン(金色球)が結合する例とそうでない例を示しています。Caイオンはあたかも釘のようにタンパク質同士を繋ぎとめ安定化させている様子がわかります。

私たちが発見した Ca イオン結合に必須だと考えているアミノ酸配列の特徴は、Ca イオンの結合性が実験的に確認されていない光合成細菌の LH1-RC にもみられることから、予想以上に広い菌種で採用されている可能性があることがわかりました。また、Ca イオンの結合により、アロクロマチウム・テピダムの LH1-RC の熱安定性が向上していることが立体構造の面からも理解することができました。本研究により、Ca イオンを活用した高効率な太陽光エネルギー利用への貢献が期待されます。

三重大学、茨城大学、神戸大学、日本電子(株)、沖縄科学技術大学院大学、神奈川大学、海洋機構 JAMSTEC、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4月20日、学術誌「Journal of Biological Chemistry」に掲載されました。

## 【背景】

光合成細菌は、光合成時に植物やシアノバクテリアのように酸素を発生しないものの、非常に高い効率で太陽の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、菌の種類ごとに利用する光の波長が異なるなど、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、温泉に棲息する光合成細菌アロクロマチウム・テピダムの光捕集反応中心複合体は、すべてのコア光捕集複合体(LH1)に Ca イオンが結合するわけではないことまではわかっていたのですが、その結合様式などは全くの謎にまつまわれていました。

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硫黄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。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は、バイオテクノロジーの応用分野などからも期待が寄せられています。

## 【研究内容】

アロクロマチウム・テピダムのコア光捕集反応中心複合体(LH1-RC)は、他の種とは異なり、Ca イオンの結合が局在するものの高い温度でも光のエネルギー変換を高効率で行えることが知られていました。Ca イオンを除くと高い温度での安定性が減ることも分かっていたのですが、Ca イオンがどうやって温度安定性を高めているのか、Ca イオンがなぜ一部の LH1 にしか結合しない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)。

一昨年私たちが解明した複数のアイソフォームを含む LH1-RC では、全ての LH1 に Ca イオンが結合していましたが、アロクロマチウム・テピダムの LH1-RC ではアイソフォームの特徴により、Ca イオンが結合するかどうかが決まっていることがわかりました。そのおかげで Ca イオンが結合できるアミノ酸配列の特徴を発見することができ、LH1-RC に Ca イオンが結合する可能性をもつ光合成細菌の仲間を予想することもできました。

また、Ca イオンの結合が熱安定性へ貢献している仕組みも明らかになりましたので、バイオテクノロジー分野で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により生育する光合成細菌ですが、植物が利用できない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。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熱安定性向上も期待できるため、太陽光エネルギーの人工的な利用のさらなる発展に貢献できると考えられます。

**【用語解説】**

- \*1) 紅色硫黄細菌: 光合成細菌の仲間で、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、水ではなく硫化水素などの無機物を使いますので、酸素を発生することはありません。
- \*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、キノン類\*6を介して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: 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) アイソフォーム: 同じ遺伝子ファミリーに由来した類似性の高いタンパク質メンバー。基本的には類似した機能をもつことが多いが、今回のようにCaイオン結合の有無のように一部機能が異なることもある。
- \*5) X線結晶構造解析: 生体の高分子構造を立体的に解析できる最も一般的に使用される手法。必ず対象となる生体高分子の三次元結晶を作る必要がある。今回のようなアイソフォームが混在するような状態は、三次元結晶を作るのが難しいことが予想されます。
- \*6) キノン: 光合成の電子伝達体として生体内で利用されています。反応中心で電子を受け取ると細胞質側のH<sup>+</sup>と結合し、LH1-RCから離れていきます。

**【論文情報】**

掲載誌: Journal of Biological Chemistry

掲載日: 2022/4/20

(<https://doi.org/10.1016/j.jbc.2022.101967>)

論文タイトル: Ca<sup>2+</sup>-binding motif underlies the unusual properties of certain photosynthetic bacterial core light-harvesting complexes

著者: Kazutoshi Tani, Kazumi Kobayashi, Naoki Hosogi, Xuan-Cheng Ji, Sakiko Nagashima, Kenji V. P. Nagashima, Airi Izumida, Kazuhito Inoue, Yusuke Tsukatani, Ryo Kanno, Malgorzata Hall, Long-Jiang Yu, Isamu Ishikawa, Yoshihiro Okura, Michael T Madigan, Akira Mizoguchi, Bruno M Humbel, Yukihiko Kimura, 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、科研費(JP20H05101, 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: sei.otomo.sci@vc.ibaraki.ac.jp

神戸大学大学院農学研究科 木村 行宏 准教授

E-mail: ykimura@people.kobe-u.ac.jp