

# 光合成細菌の“生きた化石”をカナダの湖から発見

～地球上における光合成進化の謎を解く鍵となる細菌～

## ポイント

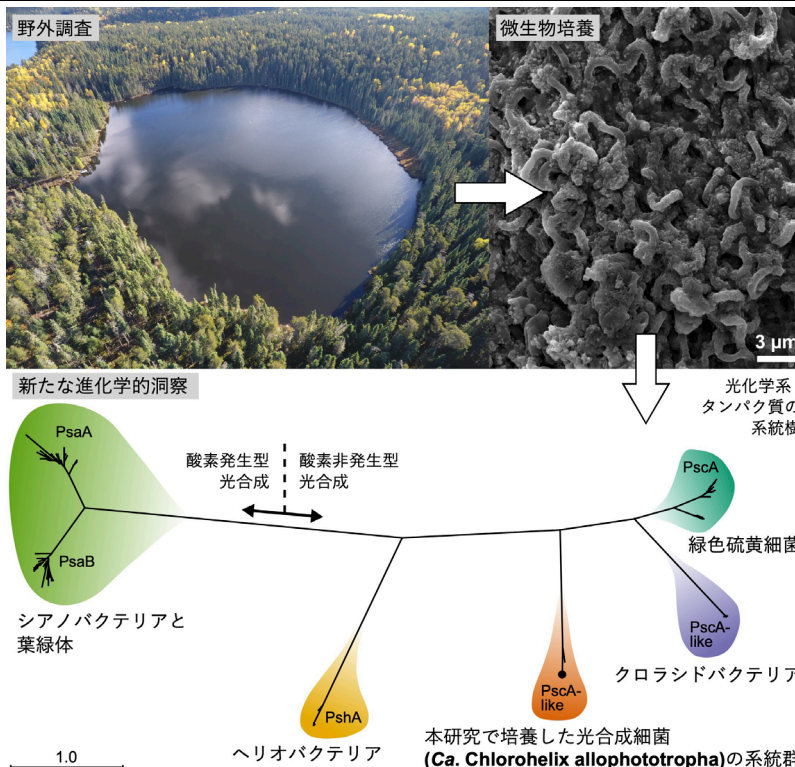
- ・北カナダの湖からユニークな酸素非発生型光合成<sup>\*1</sup>細菌の培養に成功。
- ・新しい光合成細菌が光合成進化のミッシングリンクであることをゲノム解析によって解明。
- ・この発見によって光合成進化の研究に新たな展開が生まれることが期待。

## 概要

北海道大学低温科学研究所のジャクソン・ツジ研究員（研究当時）（研究開始当時：カナダ・ウォータールー大学、現：国立研究開発法人海洋研究開発機構）、渡邊友浩助教、福井 学教授とウォータールー大学のジョシュ・ニューフェルド教授らの研究グループは、光合成進化のミッシングリンクに相当する新奇性の高い細菌を発見しました。この細菌は酸素を発生させない光合成<sup>\*2</sup>を行い、光のエネルギーを利用するためにユニークな光化学系を使っていることが判明しました。この発見は、太古の地球において光合成がどのように進化したのかを解明する鍵になると期待されます。

カナダの人里離れた楕状地湖の水中に生息する本細菌を培養するためには、本細菌が人工培地に適応するための長い時間が必要でした。このため培養初期は実験に「失敗」したと思われましたが、注意深い観察を通じて、研究グループは新しい光合成細菌の分離・培養、同定に成功し、ゲノムや光化学系に関する詳細な研究を実現しました。この発見は光合成の進化に関わる長年の難問に新たな視点を与えることから、ある意味で、光合成細菌の「生きた化石」と捉えることができます。

本研究成果は、2024年3月14日（木）公開のNature誌に掲載されました。



新たな酸素非発生型光合成細菌が発見されたカナダの湖の全景、走査型電子顕微鏡像（クロロヘリックス アロフォトリファ）、及び推定される光合成の初期進化の描像。

Copyright: the authors. Photo (top left) is courtesy of the IISD-Experimental Lakes Area Inc.

## 【背景】

地球上の生命を支える最も重要な生物学的プロセスの一つは、光を利用して二酸化炭素から有機物を合成する光合成です。光合成は数十億年前から地球上で活発に行われており、地球上を現代の「緑のオアシス」に変貌させました。現代の植物や藻類は光エネルギーを集めるアンテナ複合体と、光エネルギーを化学エネルギーに変換する光化学系を使って光合成を行います。植物や藻類の光合成は、光化学系Ⅰと光化学系Ⅱと呼ばれる2種類の光化学系が一緒に使われます。2種類の光化学系は酸素分子(O<sub>2</sub>)を生じない光合成(酸素非発生型光合成)を行う太古の細菌の光化学系から進化したと考えられています。

現代の地球にみられる酸素非発生型光合成細菌は、光化学系Ⅰあるいは光化学系Ⅱのどちらか一つによって光合成を行うため(図1)、太古の光合成細菌も同様に1種類の光化学系を使っていたと考えられています。太古の光合成細菌は初期地球における光合成の主役でしたが、光合成装置の種類やその進化は未だに研究者を悩ませている難問です。

本研究以前、少なくとも八つの現存する光合成細菌のグループが発見されていましたが、その多くが使っている光化学系やアンテナ複合体の組み合わせは、単純な進化仮説で説明できるものではありませんでした。例えば、クロロフレキサス門<sup>3</sup>の細菌は光化学系Ⅱとクロロソームと呼ばれるアンテナ複合体を使って光合成をすることが知られていましたが、クロロソームを使うその他の細菌は全て光化学系Ⅰを使って光合成を行っています。そのためクロロソームの起源は未知でした。こうした問題も含めて、地球の光合成の初期進化を解明するためには新たな手がかりが必要な状況です。

## 【研究手法】

研究グループは、「*Candidatus Chlorohelix allophototropha*」と名付けた細菌を、カナダ北部の湖から培養しました。研究開始当初、光合成ができる珍しい細菌の培養を目指して、採水した湖水に光を照射して培養を行いました。しかし、数週間経ってもはっきりとした結果は得られませんでした。実験終了寸前で、当時大学院生だったジャクソン・ツジ氏(研究開始当時:ウォータールー大学のジョシュ・ニューフェルド教授の研究グループ)が、微生物増殖を示した1本の培養瓶に注目しました。その後の共同研究によって、その培養瓶中に含まれている主要な光合成細菌の分離培養に成功しました。そして、微生物ゲノム解析、顕微鏡法、及び分光学的手法によってその詳細な特徴を明らかにしました。

## 【研究成果】

本研究で分離培養に成功した「*Candidatus Chlorohelix allophototropha*」はクロロフレキサス門に属しており、クロロソームなどの光合成に必要な装置を持っていました。これは他のクロロフレキサス門の光合成細菌と共通します。ところが、クロロフレキサス門の既知の全ての光合成細菌は光化学系Ⅱを使っているのに対して、この新しい細菌は光化学系Ⅰを使っていることが判明しました。この光化学系Ⅰは今までに知られていなかった系統群を代表するものであるため、本細菌は既知の全ての光合成生物と一線を画する存在だと言えます(p1図)。つまり、この細菌は、生命の進化系統樹において既知の光合成グループの中間に位置する「光合成進化におけるミッシングリンク」であり、太古の地球における光合成進化過程のパズルを解くピースとなるものです。

それでは、光化学系Ⅰと光化学系Ⅱの両方を含むことが判明したクロロフレキサス門において、いかにしてクロロソームが獲得されたのでしょうか?さらなる詳細なゲノム解析によって、本細菌が光合成進化において今まで前例のなかった進化イベントを経たことが判明しました。すなわち、クロロフレキサス門の細菌は光化学系の反応中心を柔軟に変化させながら進化したつつ、クロロソームの様な集光装置をそのまま維持して進化したと考えられます。

この新発見によって、研究グループはクロロフレキサス門における光合成進化仮説の矛盾を解消し、この進化を説明する二つの新しいモデルを提案しました。

### 【今後への期待】

19世紀に翼竜アーケオプテリクス（始祖鳥）の化石が発見されたことは、鳥が古代の恐竜から進化した可能性を示す上で重要な役割を果たしました。同様に、光合成細菌「*Candidatus Chlorohelix allophototropha*」の発見が、地球上での光合成の進化についての考え方を大きく変えると期待しています。

ある意味で、この新種の酸素非発生型光合成細菌を生き化石と捉えることができます。そして、特筆すべき点として、本細菌が地球における光合成のからくりや進化の謎を解く鍵となる生物であり、分離培養ができたことで生体分子の生化学的アプローチが可能となるため、酸素非発生型から酸素発生型光合成<sup>\*4</sup>への進化過程、さらには太古地球の環境と生命の共進化について包括的に理解できることが期待されます。

### 論文情報

論文名	Anoxygenic phototroph of the <i>Chloroflexota</i> uses a Type I reaction center (クロロフレキサス門の酸素非発生型光合成細菌は光化学系Iを使う)
著者名	Tsuji JM <sup>1</sup> 研究当時、 <sup>2</sup> 研究当時、 <sup>3</sup> 、Shaw NA <sup>1</sup> 、Nagashima S <sup>4</sup> 、Venkiteswaran JJ <sup>1,5</sup> 、Schiff SL <sup>1</sup> 、Watanabe T <sup>2</sup> 、Fukui M <sup>2</sup> 、Hanada S <sup>4</sup> 、Tank M <sup>4,6</sup> 、Neufeld JD <sup>1</sup> ( <sup>1</sup> ウォータールー大学、 <sup>2</sup> 北海道大学低温科学研究所、 <sup>3</sup> 国立研究開発法人海洋研究開発機構、 <sup>4</sup> 東京都立大学、 <sup>5</sup> ウィルフリッド・ローリエ大学、 <sup>6</sup> ライプニッツ研究所 DSMZ)
雑誌名	Nature
DOI	10.1038/s41586-024-07180-y
公表日	2024年3月14日(木)

### お問い合わせ先

国立研究開発法人海洋研究開発機構 ヤングリサーチフェロー ジャクソン・ツジ

T E L 046-867-9691 F A X 046-867-9715 メール jackson.tsuji@jamstec.go.jp

U R L [https://www.jamstec.go.jp/sugar/e/members/personal/Jackson\\_M\\_Tsuji.htm](https://www.jamstec.go.jp/sugar/e/members/personal/Jackson_M_Tsuji.htm)

北海道大学低温科学研究所 助教 渡邊友浩

T E L 011-706-6878 F A X 011-706-6878 メール watanabe1986@lowtem.hokudai.ac.jp

北海道大学低温科学研究所 教授 福井 学

T E L 011-706-6877 F A X 011-706-6877 メール my-fukui@lowtem.hokudai.ac.jp

### 配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

国立研究開発法人海洋研究開発機構海洋科学技術戦略部報道室 (〒236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25)

T E L 045-778-5690 メール press@jamstec.go.jp

## 【参考図】

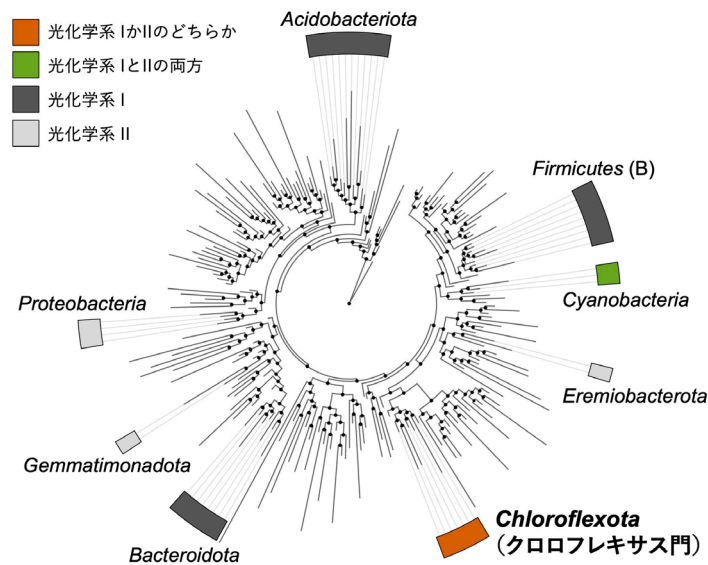


図 1. 細菌の系統樹と光化学系の分布。光合成能を有する細菌系統群には赤（光化学系 I か II のどちらか）、緑（光化学系 I と II の両方）、黒（光化学系 I のみ）、灰色（光化学系 II のみ）でそれぞれ示す。本研究で発見された新奇酸素非発生型光合成細菌はクロロフレキサス門に含まれ、光化学系 I のみを有するが、同門内の光合成細菌全ては光化学系 II を有する。Copyright: the authors.

## 【用語解説】

- \*1 酸素非発生型光合成 … 光化学反応において酸素を発生しない光合成であり、光合成の起源と考えられている。光化学反応として光化学系 I のみを用いる細菌（緑色硫黄細菌、ヘリオバクテリア、アシドバクテリアなど）と光化学系 II のみを用いる細菌（紅色硫黄細菌、紅色非硫黄細菌、エレミオバクテロータなど）に 2 大別される。進化的に古い系統群であるクロロフレキサス門には、光化学系 II のみを用いる「繊維状緑色非硫黄細菌」に代表される酸素非発生型光合成細菌しか知られていなかったが、本研究により光化学系 I を用いる光合成細菌が発見された。
- \*2 光合成 … 光エネルギーを化学エネルギーに変換して二酸化炭素を固定して有機物を生産する生物反応で、光化学反応と炭酸同化反応で構成されている。光化学反応には、光化学系 I と光化学系 II が知られている。
- \*3 門 … 細菌の分類階層の一つで、高次順にドメイン、門、綱、目、科、属、種。本研究で発見された *Candidatus Chlorohelix allophototropha* は、クロロフレキサス門に属し、クロロヘリックスと命名した新しい属でアロフォトリファと命名した新種の候補であることを示している。
- \*4 酸素発生型光合成 … 光化学反応において水の分解により酸素を発生する光合成。植物及び藻類（緑藻やシアノバクテリアなど）が代表生物であり、光化学系 II から光化学系 I へと連結して進行する。