

# 光合成微生物“シアノバクテリア”の新たな光エネルギー利用機構 —シアノロドプシンの発見—

長谷川 万純

地球表層圏変動研究センター | 大学院生

西村 陽介

地球表層圏変動研究センター | 特任研究員

吉澤 晋

地球表層圏変動研究センター | 准教授

近年の遺伝子解析技術の進歩により様々な微生物のゲノム(注1)が解読されるにつれ、一部のシアノバクテリアから、光合成とは全く異なる光利用機構である“微生物型ロドプシン”遺伝子が見つかり、これまで光合成のみであると考えられてきたシアノバクテリアの光利用が、ロドプシンによって分担されている可能性が示唆されました。本研究では、大規模な比較ゲノム解析を行い、ロドプシン遺伝子がシアノバクテリア系統内に広く分布すること、シアノバクテリアに特有の未知ロドプシングループ(シアノロドプシンと命名)が存在することを明らかにしました。本研究成果は、シアノバクテリアの新規な光エネルギー利用機構の発見にとどまらず、生物の光利用の常識に新たな概念を提供すると考えられます。

## 1 研究背景

太陽光に由来するエネルギーは、地球上のほとんど全ての生物の生命活動を支えています。特に水圏環境では、シアノバクテリアや植物プランクトンなどの微生物が行う光合成によって、太陽光エネルギーが生物の利用可能なエネルギーに変換され、生態系に取り込まれる経路が重要です。一方で、光合成とは全く異なる機構で光エネルギーを利用する微生物型ロドプシン(以下ロドプシン)と呼ばれる光受容体が存在します。ロドプシンはこれまでに、海洋・淡水・土壌・塩湖など様々な環境に生息する微生物から見つかっており、その機能タイプも多様であることが知られています。環境中に最も多く存在する「光駆動型プロトンポンプ」タイプのロドプシンは、太陽光を受け取ると、細胞内から細胞外へプロトン(水素イオン)を輸送します。微生物は、ロドプシンのイオン輸送によって細胞膜(注2)内外に生じたプロトン濃度勾配を使って“生命共通のエネルギー通貨”である「ATP(注3)」を合成することで、太陽光を利用可能な化学エネルギーに変換します。光駆動型プロトンポンプロドプシンが、細菌、古細菌、原生動物などの幅広い微生物系統群に分布することから、ロドプシンによる光エネルギー利用は微生物の生存に有利に働いていると考えられています。では、光合成を行う微生物もロドプシンを持つのでしょうか?近年のゲノム解析から、一部のシアノバクテリアがロドプシン遺伝子を持つことは知られていましたが、光合成とは異なる光エネルギー利用機構であるロドプシンが、どのくらいシアノバクテリア系統内に普遍的に存在するのか?どのタイプの機能を持つのか?また生息環境に応じた偏りがあるのか?などは全く分かっていませんでした。

## 2 研究内容

本研究では、154のシアノバクテリアゲノムを対象に比較ゲノム解

析を行い、ロドプシン遺伝子がシアノバクテリア系統内に広く分布すること、ロドプシンを持つシアノバクテリアの殆どが淡水・陸水性であることを見出しました。また、シアノバクテリアは多様なグループのロドプシンを持ち、その中にシアノバクテリアのみが持つロドプシンで構成される未知グループが存在することを見出し、シアノロドプシン(CyR)と命名しました(図1, 2)。

次に、CyR遺伝子を人工的に合成し、大腸菌を宿主として異種発現させることで機能解析を行った結果、CyRは光駆動型プロトンポンプとして働くことが明らかになりました。さらに、CyRタンパク質の特徴を調べるために、淡水に生息する*Calothrix* sp. NIES-2098由来のCyR(N2098R)に関して、詳細な分光解析を行いました。その結果、N2098Rは緑色光(吸収極大:約550 nm)を用いて、幅広いpHの範囲内で効率よくプロトンを輸送できることが明らかになりました。これらの結果から、CyRはクロロフィルが吸収しない緑色の光を利用すること、海洋環境に比べてpHをはじめとする環境条件が短時間で大きく変化する淡水環境に適応的な性質を持つことが分

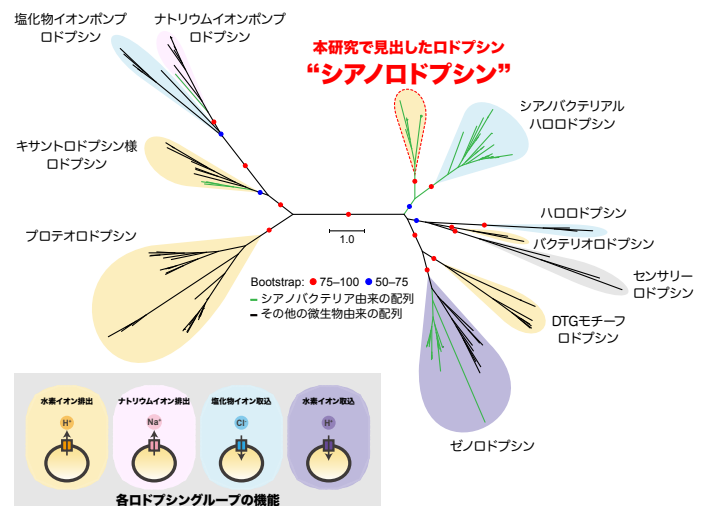


図1. 本研究でシアノバクテリアのゲノムから探索したロドプシンと、既に機能が報告されているロドプシンの分子系統樹。

# 光合成微生物 “シアバクテリア” の新たな光エネルギー利用機構 —シアノロドプシンの発見—

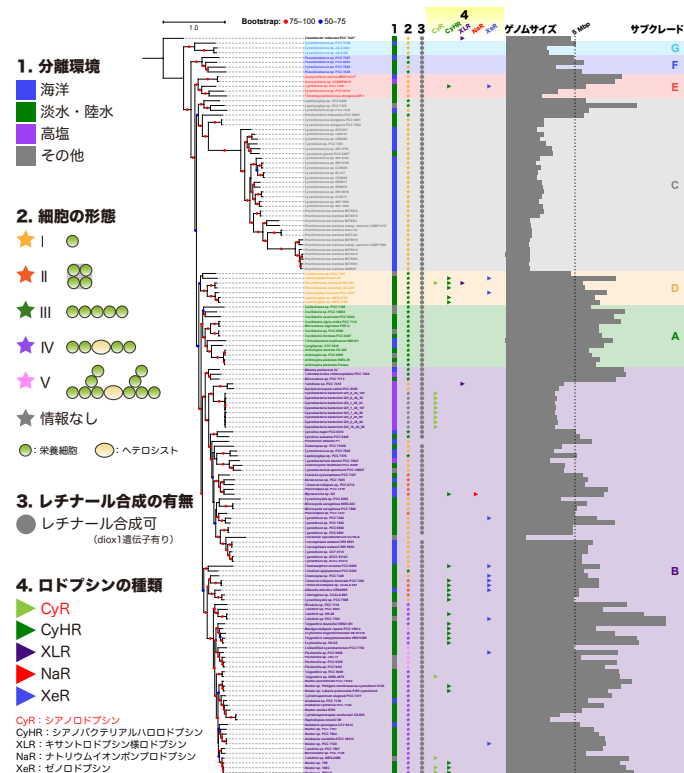


図2. 本研究で比較ゲノム解析を行った、シアバクテリアの進化系統樹と、分離環境、細胞の形態、レチナル合成の有無、レチナル合成の有無とその種類、ゲノムサイズの情報。

かりました。また、海洋性のシアバクテリアからロドプシンが全く見つからなかったことは、シアバクテリアの光利用戦略が、海洋と淡水で異なることを示します。

加えてX線結晶構造解析(注4)により、N2098Rタンパク質の結晶構造を決定しました。その結果、N2098Rは淡水性のシアバクテリアに適応した機能的特徴を持つにも関わらず、その構造は好塩古細菌が持つバクテリオロドプシンに非常によく似ていることが分かりました。これらの結果は、CyRがシアバクテリアの系統内でクロロフィルを用いる光合成系とともに進化し、大きな構造変化を伴

うことなく淡水性シアバクテリアの細胞内環境に適応してきたことを示唆します。

## 3 社会的意義・今後の展望

本研究から、これまで光合成のみで光エネルギーを受け取っていると考えられていたシアバクテリアに、ロドプシン型の光エネルギー利用機構が広く分布することが明らかになりました。また、本研究で見出したCyRは、クロロフィルが吸収しない緑色の光を利用することから、CyRを持つシアバクテリアは光合成とロドプシンの両方を用いて効率よく光を利用している可能性を示唆しています(図3)。しかしながら、CyRがシアバクテリアの細胞内のどこに局在

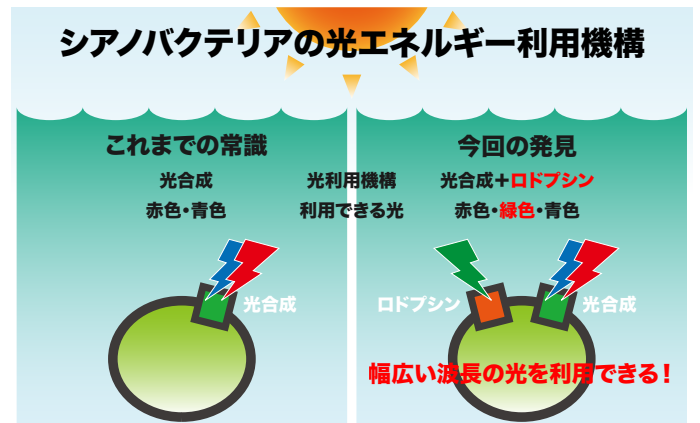


図3. 本研究で明らかになった、シアバクテリアの新たな光エネルギー利用機構の模式図。(左)これまで、シアバクテリアは光合成によって赤色と青色の光のみを利用すると考えられていた。(右)本研究での発見により、シアバクテリアはロドプシンによって緑色の光も利用できることがわかった。

し、どのタイミングで発現するのか、などの光合成との詳細な分担機構は未だ不明な点が多いのが現状です。今後、光合成系とロドプシン系の光エネルギー利用機構の使い分けの詳細を明らかにすることで、生物の光利用の歴史が「光合成の進化史」ではなく「光合成とロドプシンの共進化史」として刷新されることが期待されます。

## 発表雑誌

[Scientific Reports] 10:16752 (2020)  
A unique clade of light-driven proton-pumping rhodopsins evolved in the cyanobacterial lineage  
Masumi Hasegawa, Toshiaki Hosaka, Keiichi Kojima, Yosuke Nishimura, Yu Nakajima, Tomomi Kimura-Someya, Mikako Shirouzu, Yuki Sudo, Susumu Yoshizawa\*  
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73606-y>  
<https://www.nature.com/articles/s41598-020-73606-y>

## 用語解説

- 注1 **ゲノム** : 生物がもつ遺伝子の総体であり、物質的にはDNAから構成される。各生物種の基本的な形質を決定する。
- 注2 **細胞膜** : 細胞を包む膜。リン脂質二重層でできており、その中にタンパク質が埋め込まれている。
- 注3 **ATP** : アデニン三リン酸の略称。生命共通のエネルギー通貨と呼ばれる物質。ATPがアデニン二リン酸 (ADP) と無機リン酸 (Pi) に加水分解されるときに放出されるエネルギーを、生物は様々な化学反応に利用している。
- 注4 **X線結晶構造解析** : タンパク質などの生体高分子の立体構造を、X線を照射することで調べる手法。

## 研究内容についての 問い合わせ先

吉澤 晋 地球表層圏変動研究センター | 准教授

[yoshizawa@aori.u-tokyo.ac.jp](mailto:yoshizawa@aori.u-tokyo.ac.jp)