

モデルシアノバクテリアにおける光合成アンテナ制御の仕組みを解明 － “不完全な制御” の発見とその生理的な意義 －

【ポイント】

光合成生物として初めて全ゲノムが解読されたモデルシアノバクテリア *Synechocystis* sp. PCC 6803 において、光合成アンテナタンパク質複合体（フィコビリソーム）の光の色に応答した調節機構を明らかにしました。*Synechocystis* sp. PCC 6803 は、分子生物学研究において最も広く利用されているシアノバクテリアであり、今回の成果は、光合成の分子メカニズムの理解やより高効率な物質生産の実現など、基礎および応用研究の進展に貢献することが期待されます。

【概要】

シアノバクテリア *Synechocystis* sp. PCC 6803 は初めて全ゲノムが解読された光合成生物であり、分子生物学研究において最も広く利用されています（図 1）。全ゲノム情報から、*Synechocystis* sp. PCC 6803 が光合成アンテナ複合体であるフィコビリソームを光の波長（光色）によって調節する可能性が示唆されていましたが、その実態は明らかではありませんでした。豊橋技術科学大学応用化学・生命工学専攻博士前期課程の久布白睦実氏（当時）、河合繁特任助教、浴俊彦教授、広瀬侑准教授らの研究グループは、*Synechocystis* sp. PCC 6803 が青色から赤色光までの幅広い波長の光の下で、ロッド状フィコビリソームの合成を活性化（ON）することを明らかにしました。一方で、近紫外光や遠赤色光領域ではその合成量が低下しましたが、他のシアノバクテリアとは異なり、完全に合成を停止（OFF）することはありませんでした。研究グループは、*Synechocystis* sp. PCC 6803 は赤色光を優先的に利用する性質を持つために、ロッド状フィコビリソームの合成を厳密に制御する能力を失ったのではないかという新しい環境適応の仮説を提唱しました。*Synechocystis* sp. PCC 6803 は、基礎から応用まで幅広い研究に利用されているモデル生物であり、今回の発見は光合成の調節メカニズムの理解を深めるとともに、合成の ON/OFF の切り替え性能の改良や、光合成を利用した高効率な物質生産の実現に貢献することが期待されます。

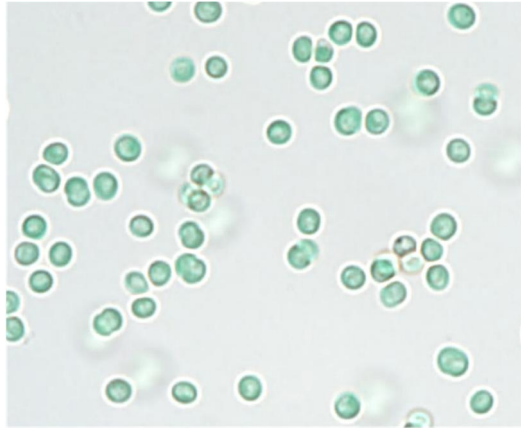


図 1，シアノバクテリア *Synechocystis* sp. PCC 6803 の顕微鏡写真

【詳細】

シアノバクテリアは酸素発生型の光合成を行う原核生物であり、地球上の多様な環境に適応して生息し、物質循環や生態系に大きな影響を与えることが知られています。シアノバクテリアは多様な環境条件下で光合成を行うために、光合成アンテナタンパク質複合体であるフィコビリソームを巧みに利用して光を集めています。フィコビリソームの形状には、半円状やロッド状など、多様な形態が存在することが知られています。特に、光の波長（光色）に応じてフィコビリソームの構造や機能を調節する現象は「光色順化（Chromatic Acclimation; CA）」と呼ばれ、これまでに CA1 から CA7 までの 7 タイプの存在が知られています。CA1 タイプの光色順化では、ロッド状フィコビリソームの形成に必要な鍵タンパク質である CpcL が緑色光下で特異的に合成され、それ以外の光条件下では抑制されることが、先行研究で明らかとなっていました。シアノバクテリア *Synechocystis* sp. PCC 6803 は初めて全ゲノムが解読された光合成生物であり、分子生物学研究において最も広く使われているモデルシアノバクテリアです。全ゲノム解析の結果、*Synechocystis* sp. PCC 6803 は CpcL とその合成を光色によって調節する制御系遺伝子を持つことが示唆されていましたが、その制御機構の実態はこれまで不明でした。

豊橋技術科学大学応用化学・生命工学専攻博士前期課程の久布白睦実氏（当時）、河合繁特任助教、浴俊彦教授、広瀬侑准教授らの研究グループは、*Synechocystis* sp. PCC 6803 におけるロッド状フィコビリソームの光波長依存的な制御の実態を明らかにしました。研究グループは、*Synechocystis* sp. PCC 6803 を紫外から遠赤色光までの幅広い波長の光条件下で培養し、*cpcL* 遺伝子がどのような光条件下で発現するのかを、RNA-Seq 解析によって調べました。その結果、*cpcL* は緑色光に加え、青色から赤色までの幅広い波長範囲において発現することが明らかとなりました（図 2）。転写が最も高かった波長（580 nm）と、最も低かった波長（720 nm）とで、*cpcL* 遺伝子量に約 15.4 倍の差が認められました。一方、他のシアノバクテリア種における光色順化では、光条件により 1000 倍以上の発現差が報告されており、それと比べると *Synechocystis* sp. PCC 6803 における *cpcL* の発現制御の切り替えは厳密ではないことが示唆されました。

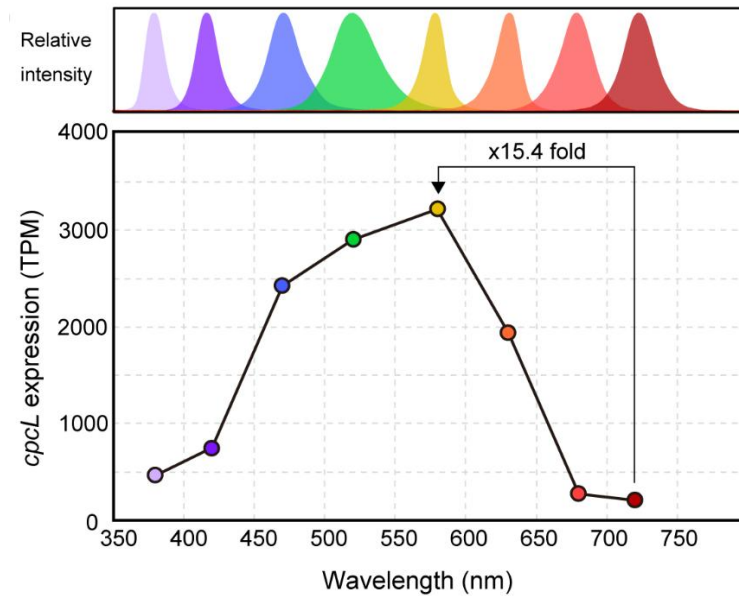


図2，様々な波長の光条件（上）で培養した際の *cpcL* 発現量の比較（下）

一般に、遺伝子の転写量と、それから作られるタンパク質の量との間には乖離があることが知られています。そこで研究グループは、ロッド状フィコビリソームがタンパク質レベルでどの程度合成されているのかを調べました。本研究では、フィコビリソームの精製法に改良を加えることで、*Synechocystis* sp. PCC 6803 が有する半円状フィコビリソームとロッド状フィコビリソームの両方を安定して分離・精製することに成功しました。この手法を用いて、緑色光・赤色光・遠赤色光の3つの条件下で細胞を培養し、それぞれの細胞からフィコビリソームを精製しました。その結果、いずれの光条件においてもロッド状フィコビリソームと半円状フィコビリソームの両方が合成されていることが確認されました（図3左）。さらに、SDS-PAGE および LC-MS/MS による詳細な解析により、精製されたロッド状フィコビリソームに CpcL タンパク質が含まれていることも明らかとなりました。また、低温蛍光スペクトルを用いて、半円状フィコビリソームに対するロッド状フィコビリソームの相対量を評価したところ、緑色光条件下でロッド状フィコビリソームの量が約 2.5 倍に増加していることが確認されました（図3右）。

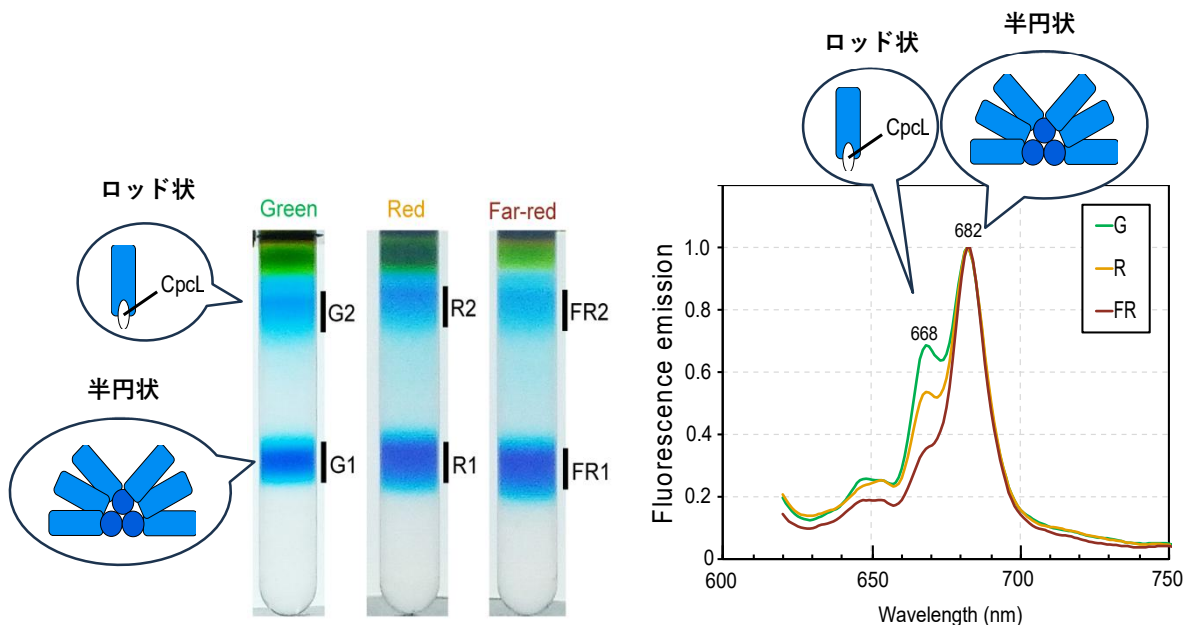


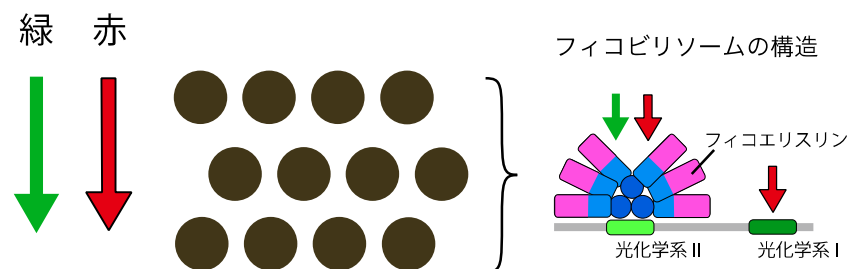
図3, ショ糖密度勾配遠心によるロッド状および半円状フィコビリソームの分離 (左) と、低温蛍光スペクトル解析によるフィコビリソームの量比解析 (右)

研究グループは、光色順化を行う他のシアノバクテリアの解析を通じて、光色によるフィコビリソーム合成の ON/OFF 制御が非常に厳密に行われていることをこれまでに明らかにしてきました。ところが、今回解析対象とした *Synechocystis* sp. PCC 6803 では、ロッド状フィコビリソームの光波長依存的な制御が存在することが示されましたが、その制御は他のシアノバクテリアと比較して厳密でないことが明らかとなりました。それでは、なぜシアノバクテリアの種間でこのような違いが生じるのでしょうか？

研究グループは、このような制御の違いが生じた理由として、フィコビリソームが吸収する光の波長が関係している可能性があるという新たな仮説を提唱しました。光色順化を行う多くのシアノバクテリアは、フィコビリソームに含まれる集光タンパク質として、緑色光を吸収するフィコエリスリンと、赤色光を吸収するフィコシアニンを持ちます。このような種が増殖した細胞集団では、緑色と赤色の光が集団の外部と内部で均等に吸収されると考えられます(図4上)。一方、今回解析対象とした *Synechocystis* sp. PCC 6803 はフィコシアニンを持つもののフィコエリスリンを持ちません。そのため、細胞集団では、集団の外側で赤色光が優先的に吸収され、内部では緑色光の比率が相対的に高まると考えられます(図4下)。つまり、*Synechocystis* sp. PCC 6803 の細胞集団では、他のフィコリスリンとフィコシアニンの両方を持つ種と比べて、緑色光が優先する環境が集団の内部に常に作られることになります。

ロッド状フィコビリソームは緑色光の下で光化学系 I に結合し、半円状フィコビリソームが結合する光化学系 II との励起バランスを保つ役割を担っていると考えられています(図4下)。*Synechocystis* sp. PCC 6803 は、自らの細胞集団の内部の緑色が優先する環境において光化学系 I の励起を保つため、ロッド状フィコビリソームを常に作らなければならなかった、その結果として、長い進化の過程の中で、ロッド状フィコビリソームの合成を OFF にする厳密な制御機構を失っていった可能性が考えられました。

フィコエリスリンとフィコシアニンを持つ種



フィコシアニンのみを持つ種 (*Synechocystis* sp. PCC 6803)

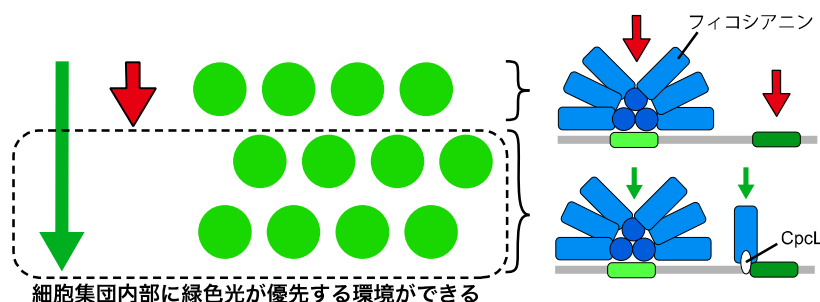


図4, フィコビリソームの吸収波長の違いが、細胞集団の光環境に与える影響

【今後の展望】

本研究により、シアノバクテリアのフィコビリソームの構造・機能の環境適応に関して、新たな仮説を提唱することができました。今後は、フィコシアニンのみを有する多様なシアノバクテリアの解析を通じて、この仮説の妥当性を検証していく必要があります。さらに、*Synechocystis* sp. PCC 6803 における光スイッチの ON/OFF 制御性能を改良することで、より高効率な物質生産の実現に向けた応用展開が期待されます。

【論文情報】

タイトル： Partial photoswitching of rod-shaped phycobilisome production in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803

著者名： Mutsumi Kubushiro, Takuto Otsu, Naomi Misawa, Masako Hamada, Toshihiko Eki, Shigeru Kawai, and Yuu Hirose

雑誌： Plant and Cell Physiology

掲載日： 2025 年 6 月 12 日（木）2:00（日本時間）

DOI： [10.1093/pcp/pcaf064](https://doi.org/10.1093/pcp/pcaf064)

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（課題番号 23H04962, 25K02239）による支援を受けて行われました。

【本件に関する連絡先】

■研究内容に関すること

豊橋技術科学大学大学院工学研究科 准教授 広瀬 侑（ひろせ ゆう）

E-mail： hirose@chem.tut.ac.jp

■報道に関すること

豊橋技術科学大学 広報担当：総務課広報係 高柳・太田

TEL：0532-44-6506 E-mail： kouho@office.tut.ac.jp