



2つの光スイッチによる「ハイブリッド型」の 光合成調節を行うシアノバクテリアを発見

【概要】

光合成を行う原核生物であるシアノバクテリアは、周囲の光の色を感知して集光タンパク質複合体であるフィコビリソームの構造や吸収波長を調節します。この能力は光色順化と呼ばれ、赤色光によって活性化する光スイッチタンパク質、若しくは、緑色光によって活性化する光スイッチタンパク質によって制御されることが知られています。豊橋技術科大学応用化学・生命工学系の広瀬侑准教授らの研究グループは、ゲノム情報を手掛かりに2つの光スイッチを併せ持つユニークなシアノバクテリアを発見しました。このシアノバクテリアの緑色光及び赤色光への細胞の応答を詳細に調査し、さらに、フィコビリソームを単離して構成成分の変化を確認しました。これらの結果から、このシアノバクテリアが2つの光スイッチを用いてフィコビリソームの構成成分を制御する「ハイブリッド型」の光色順化を行うことが初めて明らかとなりました。今後は、これらの光スイッチの構造やシグナル伝達経路の解明を進めると共に、光照射による生体活動の光操作への応用も期待できます。

【詳細】

シアノバクテリアとは、酸素発生型の光合成を行う原核生物であり、植物の葉緑体の起源となった生物として知られています。シアノバクテリアは、海洋、湖沼、陸上、極域、温泉、砂漠など、地球上のあらゆる環境に進出し、物質循環や生態系に大きな影響を与えています。シアノバクテリアはこれらの多様な環境下で生存するために、光条件に応じて光合成機能を柔軟に調節する能力を進化させてきました。中でも、光の色を感知する仕組みや、光エネルギーを集める仕組みについては、他の生物種には見られない優れた能力を持つことが、近年の研究によって明らかとなりつつあります。これらのシアノバクテリアの優れた光スイッチを利用して生体活動を光操作する研究や、バイオマス生産の効率を高めるための研究なども進められています。

シアノバクテリアは光合成に必要な光エネルギーを集めるために、「フィコビリソーム」と呼ばれる集光タンパク質複合体を持ちます。また、シアノバクテリアの一部は、周囲の光の色を感知してフィコビリソームの形状と吸収波長を調節する能力を持ちます。この能力は「光色順化」と呼ばれ、様々な波長の光に応答するタイプの存在が明らかとなっています。その中でも、緑色光と赤色光に応答するタイプの光色順化は、100年以上も前に存在が報告されるなど、光合成の環境応答の代表的な例として知られています。近年の研究により、この光色順化が、光スイッチとして機能する光受容タンパク質である RcaE 若しくは CcaS によって制御されることが明らかとなっています。これらの光スイッチは、シアノバクテリオクロムと呼ばれる光受容体の一種であり、ピリン発色団を結合して緑色光と赤色光を感知します。これまでの研究で、RcaE は赤色光に応答し、CcaS は緑色光に応答して、制御下にあるフィコビリソーム遺伝子群の転写を誘導することが知られています（図1）。RcaE 若しくは CcaS の「どちらか」を用いて光色順化を行うシアノバクテリアは知られていましたが、2つの光受容体を「併せ持つ」シアノバクテリアはこれまで報告例がありませんでした（図1）。

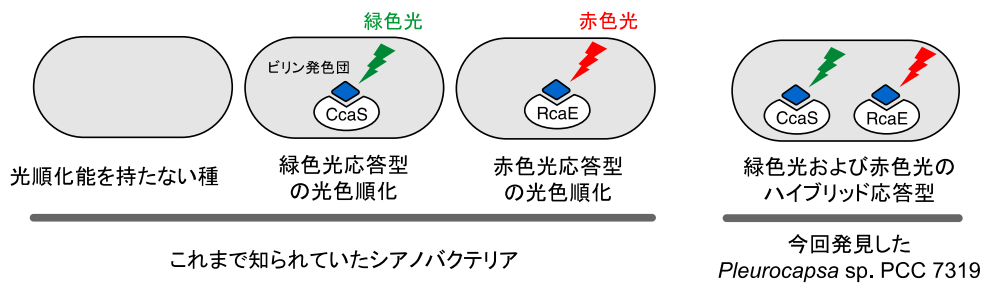


図 1, 今回発見した *Pleurocapsa* sp. PCC 7319 の光色順化

豊橋技術科学大学応用化学・生命工学専攻博士前期課程 2 年の大津卓人氏、浴俊彦教授、広瀬侑准教授らの研究グループは、データベースに蓄積されたシアノバクテリアのゲノム情報を探索し、シアノバクテリア (*Pleurocapsa* sp. PCC 7319) が RcaE と CcaS の両方の光スイッチを持つことを見いだしました (図 2 A)。フィコビリソーム遺伝子の詳細な組成解析を行い、PCC 7319 株が、半円状フィコビリソームとロッド状フィコビリソームという異なる形状のフィコビリソームを作るための遺伝子を有していること、また、フィコビリソームの主な色素タンパク質として、赤色光を吸収するフィコシアニンと、緑色光を吸収するフィコエリスリンを持つことを明らかにしました。次世代 DNA シークエンサーを用いた RNA-Seq 解析により、CcaS が緑色光下でロッド状フィコビリソームの遺伝子群を誘導し、RcaE が赤色光下でフィコシアニン遺伝子群の合成を誘導することを明らかにしました (次ページ図 3)。実際に、細胞からフィコビリソームを抽出して単離し (図 2 B)、吸収スペクトル及び低温蛍光スペクトル解析と LC-MS/MS 解析によって、転写レベルの応答がフィコビリソームの構成成分の調節に反映されていることを確認しました (図 2 C)。

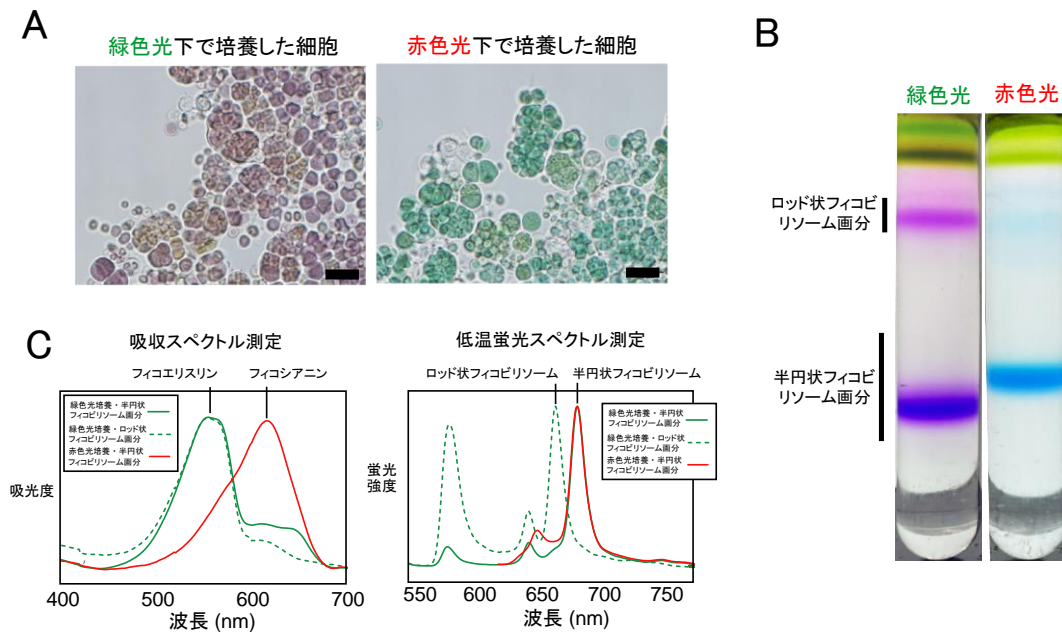


図 2, A, 光色順化させた *Pleurocapsa* sp. PCC 7319 の顕微鏡写真。B, それぞれの細胞から密度勾配遠心法によって精製したフィコビリソーム画分の写真。C, 単離したフィコビリソーム画分の吸収スペクトルと低温蛍光スペクトル解析。

これらの結果から、RcaE は緑色光及び赤色光下での光の吸収効率が最大となるように、フィコエリスリンとフィコシアニンの比率を調節していることがわかりました (図3)。一方で、CcaS は緑色光下でロッド状フィコビリソームを合成することで、緑色光条件下で不足する光化学系 I の励起バランスを補っていることがわかりました (図3)。つまり、PCC 7319 株はフィコビリソームの吸収波長と形状を2つの光スイッチを用いて制御する「ハイブリッド型」の光色順化を行っていることが初めて明らかとなりました。PCC 7319 株がこれらの2つの光スイッチをどのように獲得したのか、その詳細は明らかではありませんが、シアノバクテリア同士で遺伝子を交換する仕組み (遺伝子水平伝播) によってこのような能力を獲得した可能性が考えられました。また、今回、RcaE と CcaS 以外の第3の光スイッチが存在し、フィコエリスリン遺伝子群の発現を緑色光下で誘導する可能性が示唆されました (図3)。

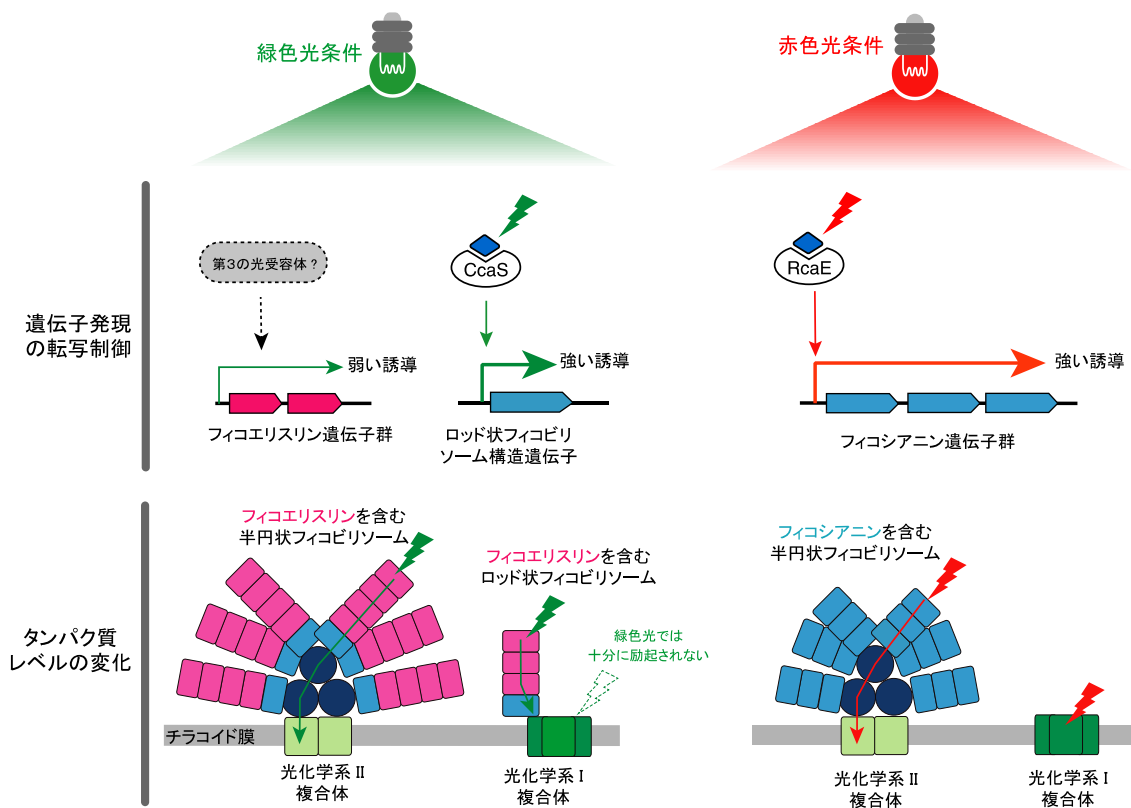


図3. 今回の研究によって示された *Pleurocapsa* sp. PCC 7319 の光色順化のモデル

【今後の展望】

今後は、今回の研究によって明らかにしたフィコビリソームの構造変化をクライオ電子顕微鏡等の手法を用いて分子レベルの分解能で解明することが必要です。また、緑色光下でフィコエリスリン遺伝子群の発現誘導に関わる第3の光スイッチの同定も重要です。シアノバクテリアは地球上の生物の中で最も優れた光応答能を持つ生物の1つであり、それを可能とする分子メカニズムを解明できれば、光合成の基本機能や環境応答を理解する基礎研究から、光照射によって生物機能を操作する応用研究まで、幅広い研究に波及効果を与えることが期待できます。

【論文情報】

論文タイトル：A hybrid type of chromatic acclimation regulated by the dual green/red photosensory systems in cyanobacteria

著者名：Takuto Otsu, Toshihiko Eki, Yuu Hirose

雑誌：Plant Physiology

DOI：<https://doi.org/10.1093/plphys/kiac284>

【謝辞】

本研究は、文部科学省科研費基盤研究（C）19K06707「補色順化におけるフィコビリソームの構造変化の多様性の解明（代表者：広瀬侑）」、公益財団法人日揮・実吉奨学会、一般財団法人イオン工学振興財団の研究助成による支援を受けて行われました。



本件に関する連絡先

広報担当：総務課企画・広報係 高柳・岡崎・高橋

TEL：0532-44-6506 FAX：0532-44-6509