

令和 7 年 11 月 7 日

国立大学法人静岡大学
国立大学法人岡山大学
国立大学法人北海道大学

緑色系統二次共生藻ユーグレナにおける非典型的な光化学系 I 超複合体の立体構造を解明

【研究のポイント】

- ユーグレナ由来の光化学系 I-集光性色素タンパク質複合体 (PSI-LHCI) の立体構造を 2.82Å の分解能で決定しました。
- PSI は通常 10 種類以上のサブユニットで構成されますが、本研究対象ではわずか 8 サブユニットで構成される「縮約型」PSI が観察されました。
- LHCI は計 13 個が不規則に配置されており、典型的な緑藻・植物型の「LHCI ベルト」を欠き、代わりにジアジノキサンチンという紅色系統特有のカロテノイドを結合していました。
- 系統解析の結果、PSI コアサブユニットの一部 (PsaD) がシアノバクテリア由来であることが判明し、ユーグレナ PSI-LHCI が「モザイク的進化」により成立したことが明らかになりました。

【研究概要】

静岡大学農学部の長尾遼准教授は、岡山大学の加藤公児准教授（特任）、沈建仁教授、北海道大学の髙林厚史助教らと共に、緑色系統二次共生藻ユーグレナ^(注1) 由来 PSI-LHCI^(注2) の構造をクライオ電子顕微鏡単粒子解析^(注3) により決定しました。分解能は 2.82Å に達し、これまで未解明だった緑色系統二次共生藻の PSI-LHCI の分子配置を初めて明らかにしました。

解析の結果、PSI コアは 8 種類のサブユニットから構成され、13 個の LHCI サブユニットが非対称的に配置していることが判明しました。これは、緑藻や植物に特徴的な「整列した LHCI ベルト」を欠き、むしろ紅色系統二次共生藻類の配置様式に近い特徴を示します。また、LHCI に結合する色素として、従来、緑藻系統藻類では見られないジアジノキサンチンが検出されました。さらに、系統解析により PSI コアの PsaD サブユニットがシアノバクテリア由来であることが明らかになり、本複合体が緑藻・紅藻・シアノバクテリア由来の分子要素を組み合わせ形成された「モザイク的進化」の産物であることが示されました。なお、本研究成果は、2025 年 10 月 31 日に、国際雑誌「Science Advances」に掲載されました。

研究者コメント

静岡大学農学部

准教授・長尾遼（ながおりょう）

ユーグレナの PSI-LHCI は、緑藻とも紅藻とも異なる独自の進化的特徴を持ちます。本研究により、光合成超複合体が“モザイク的”に構築され得ることが明らかとなり、光合成システムの進化的柔軟性を示す好例となりました。

【研究背景】

酸素発生型光合成^(注4)は、太陽光を利用して水と二酸化炭素から有機物を合成し、副産物として酸素を発生する生命にとって根源的な代謝過程です。この反応を担う光化学系 I (PSI) および光化学系 II (PSII) は、クロロフィルやカロテノイドを結合した膜タンパク質複合体であり、光エネルギーを効率的に捕集・変換するために進化の過程で多様な構造を獲得してきました。

光合成生物は大きく「緑色系統」と「紅色系統」に分かれ、それぞれ独自の光捕集系を形成しています。緑藻や陸上植物では、PSI に結合する集光性色素タンパク質 (LHCI) が整然と並び「LHCI ベルト」を形成するのに対し、紅色系統の二次共生藻類では異なる配置様式を示すことが知られています。

ユーグレナは二次共生によって緑藻由来の葉緑体を獲得した独特な生物であり、そのゲノムは緑藻だけでなく、紅色系統二次共生藻やシアノバクテリアに由来する遺伝子をも含む「モザイク構造」を有しています。しかし、ユーグレナ PSI-LHCI がどのような分子構築を持ち、進化的にどのような位置づけにあるのかは、これまで不明でした。

今回、クライオ電子顕微鏡によってユーグレナ PSI-LHCI の原子レベルの構造を解明することで、緑藻系統とも紅藻系統とも異なる「非典型的な光捕集様式」が明らかとなり、光合成システムがどのように柔軟に進化してきたのかを理解する重要な手がかりが得られました。

【研究の成果】

本研究により、ユーグレナ由来 PSI-LHCI の立体構造が世界で初めて解明されました。その主な成果は以下の通りです。

1. 縮約型 PSI コアの発見

通常緑藻や植物では 10 種類以上のサブユニットで構成される PSI が、ユーグレナではわずか 8 種類のサブユニット (PsaA、PsaB、PsaC、PsaD、PsaE、PsaF、PsaJ、PsaM) で構築されていることが判明しました。これは「最小限の機能的 PSI」と考えられる新しい形態です (図 1)。

2. 非典型的な LHCI 配置

ユーグレナの PSI には 13 個の LHCI が不規則に結合しており、緑藻や植物に見られる「整然とした LHCI ベルト」が存在しませんでした。この特徴はむしろ紅色系統二次共生藻類の構造に類似しており、進化的に独自の再編成が起きたことを示しています (図 1)。

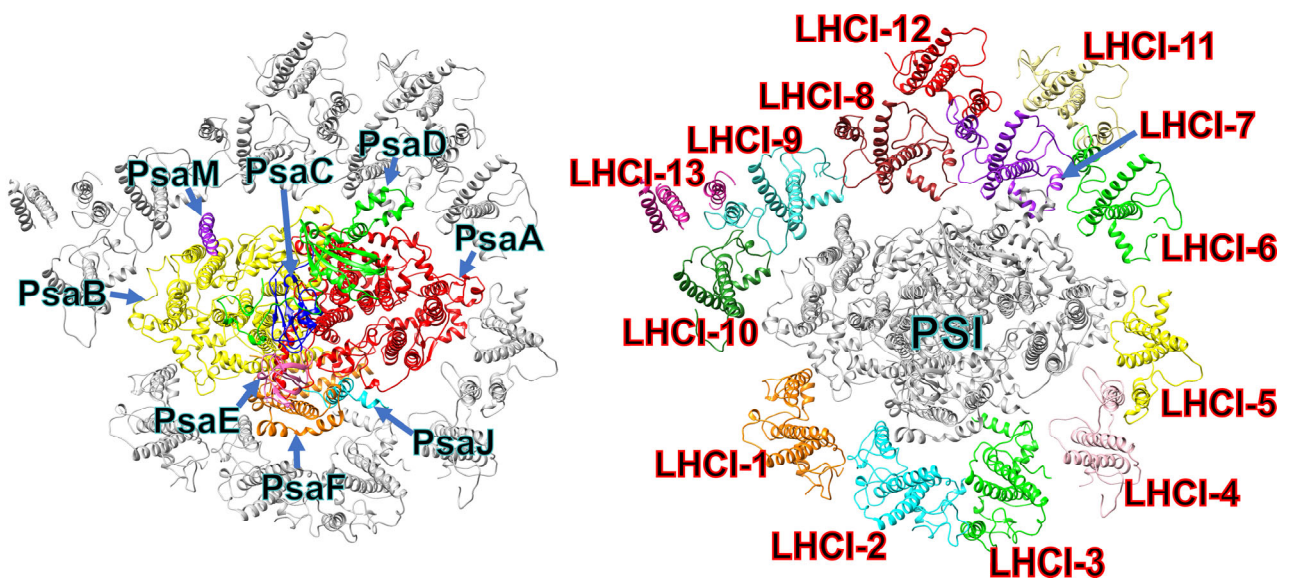


図 1. ユーグレナ PSI-LHCI の立体構造

左図は PSI の各サブユニットを、右図は LHCI の各サブユニットをそれぞれラベルした。

3. 紅色系カロテノイド「ジアジノキサンチン」の結合

緑色系統では一般的にルテインやネオキサンチンが結合しますが、ユーグレナでは紅色系統二次共生藻類に特徴的なジアジノキサンチンが結合していることが分かりました。これは光捕集および光保護機構の多様化を示す新たな知見です。

4. 遺伝的モザイク進化の証拠

PSI コアの一部である PsaD が緑藻ではなくシアノバクテリアに由来することが系統解析から明らかになりました。すなわち、ユーグレナの PSI-LHCI は、緑藻・紅色系統二次共生藻・シアノバクテリア由来の要素が組み合わさった「モザイク的な進化」の産物として成立しています。

これらの成果は、光合成システムが種を超えて柔軟に組み換えられ、環境に適応してきたことを示す重要な証拠となります。とくに、ユーグレナが緑色系統でありながら紅色系統的な特徴を併せ持つことは、光合成複合体の進化的多様性と柔軟性を理解する上で画期的な発見です。

【論文情報】

掲載誌名: Science Advances

論文タイトル: Structural insights into the divergent evolution of a photosystem I supercomplex in *Euglena gracilis*

著者: Koji Kato, Yoshiaki Nakajima, Runa Sakamoto, Minoru Kumazawa, Kentaro Ifuku, Takahiro Ishikawa, Jian-Ren Shen, Atsushi Takabayashi, Ryo Nagao

DOI: 10.1126/sciadv.aea6241

【用語説明】

注1：ユーグレナ (*Euglena gracilis*)

淡水に生息する単細胞生物で、「ミドリムシ」とも呼ばれます。葉緑体を持ち光合成を行うと同時に、鞭毛で運動もできるという植物と動物の両方の特徴を併せ持つ点が特徴です。葉緑体は緑藻を取り込む二次共生で獲得したもので、光合成の進化研究において重要なモデル生物とされています。

注2：光化学系 I (PSI) 集光性色素タンパク質 (LHCI) 超複合体 (PSI-LHCI)

PSI-LHCI は PSI と LHCI によって構成される巨大な膜タンパク質複合体です。PSI は光エネルギーを化学エネルギーへ変換する膜タンパク質複合体で、10 種類以上のサブユニットから構成されます。補欠因子として、鉄硫黄から構成される金属錯体、色素分子 (クロロフィルやカロテノイド) が PSI タンパク質に結合しています。クロロフィルとカロテノイドはそれぞれ特有の光エネルギー吸収帯を持ち、光捕集に重要な役割を担います。LHCI は、光エネルギーを捕捉し、光化学系へ効率的に伝達する役割を担うタンパク質群です。光合成の初期反応において、太陽光を利用可能な化学エネルギーに変換するための重要な要素であり、その多様性と進化は、光環境への適応や光合成効率の向上に寄与しています。

注3：クライオ電子顕微鏡単粒子解析

タンパク質などの生体分子を水溶液中の自然に近い状態で観察するための手法です。試料を液体エタンで急速凍結して薄い非晶質の氷に包埋し、液体窒素温度下で電子顕微鏡により観察します。得られた多数の単粒子像をコンピュータで重ね合わせることで、分子の立体構造を原子レベルで再構築する解析方法です。この「クライオ電子顕微鏡単粒子解析」は、2017 年にノーベル化学賞の対象となった技術でもあります。

注4：酸素発生型光合成

光合成には酸素発生型光合成と酸素非発生型光合成があります。酸素発生型光合成は、光化学系 I、シトクロム *b₆f*、光化学系 II、ATP 合成酵素と呼ばれるそれぞれの膜タンパク質複合体によって駆動され、光エネルギーを利用して水と二酸化炭素から有機物と酸素を合成します。酸素非発生型光合成生物が進化して酸素発生型光合成生物になったと考えられています。

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

静岡大学農学部

准教授・長尾遼（ながおりょう）

TEL : 054-238-4251

E-mail : nagao.ryo@shizuoka.ac.jp

WEB サイトや SNS のリンクのまとめ (QR コード) : <https://linktr.ee/ryonag>



(報道に関すること)

静岡大学 総務部広報・基金課

TEL : 054-238-5179 E-mail : koho_all@adb.shizuoka.ac.jp

岡山大学 総務部広報課

TEL : 086-251-7292 E-mail : www-adm@adm.okayama-u.ac.jp

北海道大学 社会共創部広報課

TEL : 011-706-2610 E-mail : jp-press@general.hokudai.ac.jp