

31. 分子構造に基づく光合成集光性色素タンパク質の結合選択機構の解明

静岡大学農学部 准教授 長尾 遼

概要

本研究では、珪藻 *Thalassiosira pseudonana* に由来する光化学系 I (PSI) とフコキサンチン結合型集光性色素タンパク質 (FCP) の超分子複合体の立体構造解析を通じて、FCP が PSI の特定部位に選択的に結合する分子機構の解明を目的とした。クライオ電子顕微鏡単粒子解析により、PSI 単量体に 5 つの FCP サブユニットが結合した PSI-FCPI 複合体構造を決定し、各 FCP が有する非保存的なループ領域やアミノ酸残基が、PSI サブユニットとの特異的相互作用に関与することを明らかにした。さらに、既報の *Chaetoceros gracilis* 由来 PSI-FCPI 構造との比較により、結合部位の保存性と分子進化的背景を示した。本研究により、LHC 様 (FCP) タンパク質が多数存在するにもかかわらず、特定のサブユニットのみが PSI に結合する理由の一端が構造学的に示された。

背景および目的

光合成生物において、PSI は集光性色素タンパク質 (LHC) と結合することで、周囲の光環境に応じた効率的な光エネルギー獲得を実現している。PSI と LHC が形成する複合体 (PSI-LHCI) の立体構造や構成要素については、緑色植物や藻類を中心にこれまで数多くの研究が行われてきた。

珪藻は、海洋における主要な一次生産者の一つであり、独特な光環境に適応した光捕集システムを進化させてきた。珪藻の集光系は、フコキサンチンを結合する集光性色素タンパク質 (FCP) によって特徴づけられ、緑色植物の LHC とは色素組成やアミノ酸配列が大きく異なる。このような FCP が PSI に結合することで、珪藻特有の PSI-FCPI が形成され、青色から緑色域の光を効率よく利用できると考えられている。

これまでに報告されてきた PSI-LHCI あるいは PSI-FCPI の構造研究の多くは、「どのサブユニットが PSI に結合しているか」という構成要素の同定に主眼が置かれており、「なぜ多数存在する LHC 様 (FCP) タンパク質の中から、特定のサブユニットのみが PSI の決まった位置に結合するのか」という結合選択性の分子基盤については、十分な説明がなされてこなかった。特に珪藻においては、FCP の数的多様性と PSI への選択的結合との関係が未解明であり、光捕集系の分子集合原理を理解する上で、構造生物学的な知見が強く求められていた。

本研究では、このような背景のもと、モデル珪藻 *Thalassiosira pseudonana* を対象として PSI-FCPI の立体構造解析を行った。さらに、既に構造が解明されている *Chaetoceros gracilis* 由来 PSI-FCPI と比較することで、PSI に結合する FCP に共通する構造的特徴や、結合に関与するアミノ酸残基を抽出し、FCP の結合選択性を規定する構造的要因および分子進化的背景を明らかにすることを目的とした。

方法

T. pseudonana 由来の PSI-FCPI 複合体を単離した。得られた複合体について、クライオ電子顕微鏡単粒子解析を行い、高分解能の三次元電子密度マップを再構築した。これに基づき、PSI サブユニットおよび結合する FCP サブユニットの原子モデルを構築した。構造モデルを用いて、各 FCP サブユニットと PSI サブユニットとの界面

における相互作用を詳細に解析し、特に水素結合、疎水性相互作用、ループ構造の配置に着目した。さらに、FCPファミリー全体のアミノ酸配列情報および既存の系統解析結果と照合することで、PSI 結合 FCP に特有な非保存配列や構造的特徴を抽出した。

PSI により多くの FCP が結合した大型複合体の単離・解析を目指し、精製条件の最適化を試みた。得られた試料については、生化学的分析および分光学的評価を行い、構造解析に向けた基礎的検討を行った。

結果および考察

クライオ電子顕微鏡解析の結果、*T. pseudonana* 由来 PSI 単量体に 5 つの FCP サブユニットが結合した PSI-FCPI 複合体の立体構造を決定した。FCPI は、それぞれ FCPI-1 から FCPI-5 と命名され、それらを構成する遺伝子は RedCAP、Lhcr3、Lhcq10、Lhcf10、Lhcq8 であることを見出した（図 1）。特に、FCP 側に存在する非保存的なループ領域やアミノ酸残基が、PSI 表面の特定部位を認識していることが明らかとなった。これらの相互作用に関与するアミノ酸配列は、同一 FCP サブファミリー内の他のメンバーには保存されておらず、PSI に結合する FCP が選択的に進化してきたことを示唆している。一方で、PSI 側の結合部位は *C. gracilis* 由来 PSI-FCPI 構造と高い保存性を示しており、PSI が比較的保存された足場として機能し、FCP 側が構造的多様化を通じて結合能を獲得してきた可能性が考えられる。このような結合選択機構は、珪藻が多様な光環境に適応する過程で、既存の PSI 構造を維持しつつ、周辺アンテナタンパク質を柔軟に組み替える戦略を採用してきたことを示すものである。

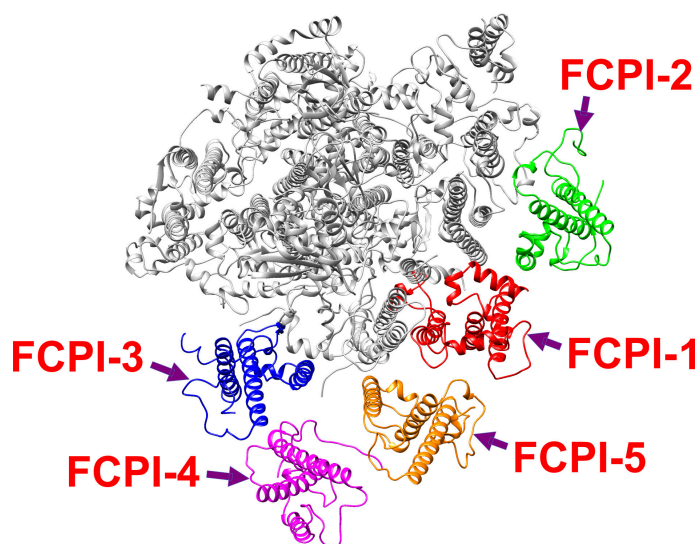


図 1. *T. pseudonana* PSI-FCPI 構造.

灰色は PSI サブユニット、他の色は FCP サブユニットである。

一方、より多くの FCP が結合した大型 PSI-FCPI 複合体についても精製および解析を試みたが、構造決定には至らなかった。同時期に海外研究グループから関連する先行研究が報告されたこともあり (Feng et al., 2024)、本研究期間内での構造解明は達成されなかった。しかし、本研究で得られた小型 PSI-FCPI 複合体の高分解能構造は、FCP 結合選択の分子原理を理解するうえで基盤となる成果であり、今後の大型複合体解析や機能解析に向けた重要な足がかりとなる。

(完)

発表論文

- 1) Kato, K., Nakajima, Y., Xing, J., et al. Structural basis for molecular assembly of fucoxanthin chlorophyll *a/c*-binding proteins in a diatom photosystem I supercomplex. *eLife* 13, RP99858 (2024).

引用文献

- 1) Feng, Y. et al. Structures of PSI-FCPI from *Thalassiosira pseudonana* grown under high light provide evidence for convergent evolution and light-adaptive strategies in diatom FCPIs. *Journal of Integrative Plant Biology* 67, 949-966 (2024).