

2026年7月1日

文部科学記者会、科学記者会、報道機関 各位

国立大学法人静岡大学
国立大学法人岡山大学

光化学系 II の表在性タンパク質を再構成した構造から酸素発生活性低下の一因を解明

【研究のポイント】

- 光合成で水を分解し、酸素を発生させる巨大タンパク質複合体「光化学系 II (PSII)」について、外側に結合する 3 種類のタンパク質をいったん取り外し、再び結合させた状態の立体構造を 2.0 Å の高分解能で決定しました。
- 再結合させた 3 種類の表在性タンパク質 (PsbO、PsbV、PsbU) は、PSII 本体の正しい位置に戻っていることが分かりました。
- 一方で、酸素発生反応に関与する重炭酸イオンの向きや水分子の配置にわずかな変化が見つかりました。
- 特に、酸素発生反応に関わる水の通り道と考えられている「O1 チャネル」で、水分子の並び方や水素結合ネットワークが乱れていました。
- 本研究により、表在性タンパク質が正しい位置に戻っていても、内部の水分子や小さな分子の配置が完全には元に戻らないことで、光合成の酸素発生活性が低下する可能性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、岡山大学学術研究院先鋭研究領域 (異分野基礎化学研究所) の中島芳樹助教と沈建仁教授らと共に、好熱性シアノバクテリア *Thermosynechococcus vulcanus* 由来の光化学系 II (PSII) ^(注1) に対して、3 種類の表在性タンパク質 PsbO、PsbV、PsbU ^(注2) をいったん取り外し、再び結合させた PSII の分子構造を X 線結晶構造解析 ^(注3) により決定しました。

解析の結果、再結合させた PsbO、PsbV、PsbU はいずれも PSII 本体の正しい位置に結合していることが分かりました。一方で、酸素発生反応に関わる金属クラスター周辺の全体構造は大きく保たれていたものの、重炭酸イオンの向きや周囲の水分子との相互作用に変化が見られました。さらに、酸素発生反応に必要な水の通り道と考えられている O1 チャネルでは、水分子の配置や水素結合ネットワークに乱れが確認されました。これらの結果から、表在性タンパク質が正しい位置に戻っていても、PSII 内部の水分子や小さな分子の配置が完全には元に戻らず、それが酸素発生活性の低下につながる可能性が示されました。なお、本研究成果は 2026 年 6 月 25 日に国際雑誌「ACS Catalysis」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)

PSII は、水を分解して酸素を発生させる、地球上の生命にとって極めて重要なタンパク質複合体です。本研究では、表在性タンパク質が正しい位置に戻っていても、内部の水分子や重炭酸イオンの配置にわずかな乱れが残ることを構造的に示しました。

【研究背景】

酸素発生型光合成^(注4)は、植物、藻類、シアノバクテリアが太陽光を利用して水を分解し、酸素を発生する生命にとって根源的な代謝過程です。この反応の中心を担う PSII は、クロロフィルやカロテノイド、金属クラスターなどを含む巨大な膜タンパク質複合体であり、水を分解して電子とプロトンを取り出すことで、地球上の酸素環境を支えています。

PSII の酸素発生反応は、マンガン、カルシウム、酸素からなる Mn_4CaO_5 クラスターで進行します。この金属クラスターの周囲には、水分子やアミノ酸残基が精密に配置されており、さらに PSII の外側には PsbO、PsbV、PsbU などの表在性タンパク質が結合して、酸素発生反応に適した構造環境を維持しています。

これまで、PSII から表在性タンパク質をいったん取り外し、再び結合させる再構成実験が行われてきました。再構成により酸素発生活性は大きく回復しますが、天然型 PSII と比べると完全には戻らず、その理由は十分に分かっていませんでした。原因として、表在性タンパク質が元の位置に正しく戻っていない可能性、あるいは正しく戻っていても酸素発生中心やその周辺の分子環境に微細な変化が残る可能性が考えられてきました。

今回、X 線結晶構造解析によって、PsbO、PsbV、PsbU を再結合させた PSII の高分解能構造を決定することで、これらの表在性タンパク質が PSII 本体の正しい位置に戻っていることが明らかになりました。一方で、重炭酸イオンの向きや周囲の水分子との相互作用、さらに O1 チャネルにおける水分子の配置と水素結合ネットワークに局所的な乱れが見つかりました。これにより、PSII の酸素発生活性が完全には回復しない背景には、タンパク質全体の大きな構造変化ではなく、内部の水分子や小さな分子の精密な配置の乱れが関係している可能性が示されました。

【研究の成果】

本研究により、表在性タンパク質 PsbO、PsbV、PsbU を再結合させた PSII の高分解能立体構造が明らかになりました。その主な成果は以下の通りです (図 1)。

1. 再構成 PSII の高分解能構造の決定
本研究では、好熱性シアノバクテリア *Thermosynechococcus vulcanus* 由来 PSII について、PsbO、PsbV、PsbU をいったん取り外し、再び結合させた状態の立体構造を 2.0 Å 分解能で決定しました。これにより、再構成後の PSII を原子レベルで比較できる基盤が得られました。
2. 表在性タンパク質が正しい位置に再結合することを確認
解析の結果、再結合させた PsbO、PsbV、PsbU はいずれも PSII 本体の本来の位置に結合していることが分かりました。また、PSII 全体の構造は天然型 PSII と非常によく似ており、表在性タンパク質の再結合によって PSII 全体が大きく崩れているわけではないことが示されました。
3. 酸素発生中心の全体構造は大きく保たれる一方、局所的な変化を検出
酸素発生反応の中心である Mn_4CaO_5 クラスターの全体構造は、再構成 PSII でもおおむね保たれていました。一方で、 Mn_2-O_2 結合距離にわずかな短縮が見られるなど、酸素発生中心の周辺には局所的な構造変化が確認されました。この変化は大きな構造崩壊ではなく、酸素発生中心の微細な環境変化として解釈されます。
4. 重炭酸イオン周辺の構造変化を発見
再構成 PSII では、電子の受け渡しに関わる重炭酸イオンの向きが変化していました。さらに、D1-Y246 や D1-E244 など周辺のアミノ酸、水分子との相互作用にも変化が見られました。これらの変化は、PSII 内部で電子が受け渡される環境に影響し、酸素発生活性の低下に関与する可能性があります。
5. O1 チャネルにおける水分子ネットワークの乱れを確認
酸素発生反応に必要な水の通り道の一つと考えられている O1 チャネルでは、天然型 PSII で観察される水分子の一部が、再構成 PSII では明瞭な位置として観察されにくくなっていました。また、D1-N298 周辺の水素結合ネットワークにも変化が確認されました。これは、再構成 PSII において水分子の配置や動きやすさが変化し、水の供給や反応場の安定性に影響している可能性を示しています。

6. CI-1 チャンネルおよび O4 チャンネルは大きく変化しないことを確認

一方で、PSII 内部の別の水・プロトン移動経路と考えられている CI-1 チャンネルおよび O4 チャンネルでは、天然型 PSII と再構成 PSII の間で大きな構造変化は見られませんでした。このことから、再構成による影響は PSII 全体に一様に生じているのではなく、重炭酸イオン周辺や O1 チャンネルに比較的限定された局所的な変化であることが示されました。

これらの成果は、表在性タンパク質が正しく再結合しても、PSII 内部の水分子や小さな分子の配置が完全には元に戻らないことを示しています。PSII の酸素発生活性が完全には回復しない背景には、タンパク質全体の大きな構造変化ではなく、重炭酸イオン周辺や O1 チャンネルにおける微細な分子配置の乱れが関係していると考えられます。これは、光合成による水分解反応が、水分子一つひとつを含む精密な分子ネットワークによって支えられていることを示す重要な成果です。

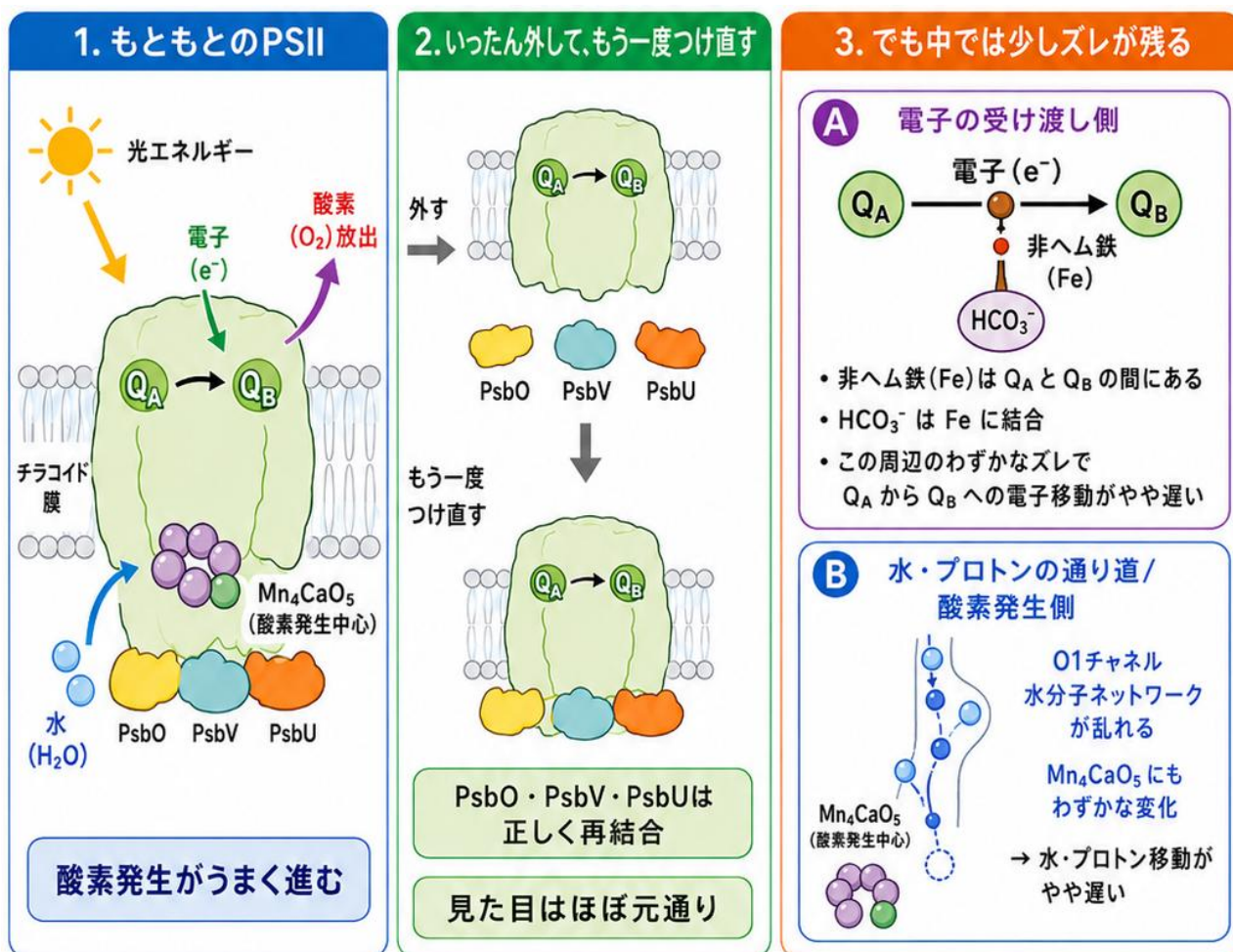


図 1. 本研究の概要

【論文情報】

掲載誌名: ACS Catalysis

論文タイトル: Structural basis for impaired oxygen evolution in extrinsic-protein-reconstituted photosystem II

著者: Yoshiki Nakajima, Koji Kato, Jian-Ren Shen, Ryo Nagao

DOI: <https://doi.org/10.1021/acscatal.6c03852>

【用語説明】

注1：光化学系 II (Photosystem II, PSII)

植物、藻類、シアノバクテリアが行う光合成で、水を分解して酸素を発生させるタンパク質複合体です。太陽光のエネルギーを使って水から電子を取り出し、その過程で酸素を生み出します。

注2：表在性タンパク質

PSIIの外側に結合し、酸素発生反応を安定に進めるために働くタンパク質です。本研究では、シアノバクテリア PSII に結合する PsbO、PsbV、PsbU の3種類を対象にしました。

注3：X線結晶構造解析

タンパク質などの分子を結晶化し、その結晶にX線を当てて得られる回折パターンから、分子を構成する原子の位置を調べる手法です。タンパク質の立体構造を原子レベルで明らかにできるため、どの分子がどこに結合しているか、水分子や金属クラスターがどのように配置されているかを詳しく解析できます。本研究では、この手法により再構成 PSII の構造を 2.0 Å 分解能で決定しました。

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

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

岡山大学 総務部広報課

TEL : 086-251-7292