


光合成における光誘導水分解反応機構及び光エネルギー利用機構の解明

	研究代表者	岡山大学・異分野基礎科学研究所・教授 沈 建仁 (しん けんじん)	研究者番号:60261161
	研究課題 情報	課題番号: 22H4916 キーワード: 光合成、水分解反応、光化学系II、光化学系I、構造解析	研究期間: 2022年度~2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

● 研究の全体像

地球上生物の生存を維持するのに不可欠なエネルギー (食物) と酸素 (好気性生物) は、植物や藻類が行う酸素発生型光合成によって、太陽の光エネルギーと水から変換されたものである (図1)。本研究は、酸素発生型光合成における光誘導水分解・酸素発生反応の機構、及び光エネルギーの吸収・変換を担う各種生物由来光化学系I (PSI)、光化学系II (PSII)と光捕集アンテナタンパク質複合体(LHC, FCP)超分子複合体の構造・機能を解明することを目的とする。得られた結果は、光合成における水分解反応機構や光エネルギーの高効率利用機構の解明だけでなく、光エネルギーの高効率人工利用や人工光合成系の開発にも道を開くものである。



図1 光合成とその産物による生命活動への効果 (イメージ図)

● 光合成水分解反応機構の解明

光合成における水分解反応は、光化学系II(PSII)と呼ばれる膜タンパク質複合体によって触媒されている。本研究の第1の目的は光合成における水分解・酸素発生反応機構の解明である。これまでの研究で、PSIIの水分解触媒であるMn₄CaO₅クラスターの構造を明らかにし(図2)、また、X線自由電子レーザー(XFEL)を利用したポンプ・プローブ時分割構造解析法により、水分解反応のS状態遷移のうち、S₂, S₃中間体の構造を明らかにした。本研究では、残るS₃→(S₄)→S₀遷移の触媒の構造変化をポンプ・プローブXFEL時分割結晶構造解析法、またはクライオ電子顕微鏡による構造解析法(cryo-EM)により解析し、産物である分子状態酸素の形成部位と反応機構を明らかにする。これらの構造変化からプロトンの排出経路、水の進入経路を推定し、得られた結果を各種アミノ酸変異体の構造・機能解析と組み合わせ、O-O結合の形成機構や基質である水の進入経路、プロトン・酸素の排出経路を明らかにする。

● 各種生物由来光化学系 - 光捕集アンテナ超分子複合体の構造解明

本研究の第2の目的は光合成における光エネルギーの高効率吸収・伝達の機構解明である。光合成における光エネルギーの捕集、反応中心への伝達は一連の光捕集タンパク質(light-harvesting antenna proteins, LHC, FCP)によって行われており、これらタンパク質の配列・結合する色素類は生物によって異なっている。これまですでに高等植物、珪藻(図3)等の生物からPSII-LHC(FCP)超分子複合体の構造がcryo-EM構造解析技術によって解析されているが、構造未知の生物由来のPS-LHC(FCP)超分子複合体

が多数残っている。本研究では、これら構造未知のPS-LHC(FCP)超複合体を単離精製し、cryo-EMによりその構造を解析し、それぞれの生物における光エネルギーの伝達経路や各種色素の役割、生物間での違いを明らかにするとともに、生物の進化において光環境の違いに応じて生じた色素・タンパク質の変化を明らかにする。

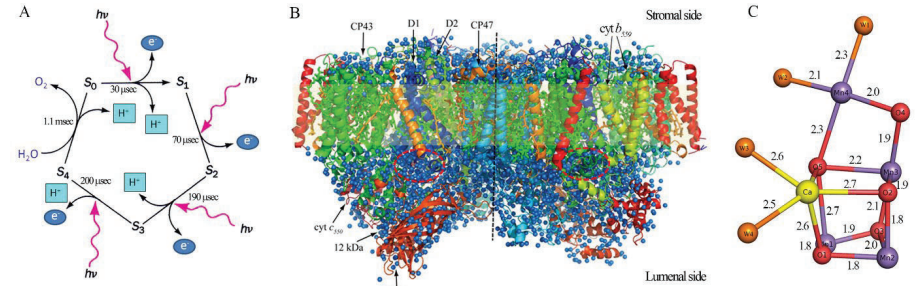


図2 光合成における水分解反応のS状態遷移モデル(A)、PSII二量体の1.9 Å分解能構造(B)、及び水分解触媒であるMn₄CaO₅クラスターの構造(C)。Bの薄黄色で覆われた領域は膜貫通領域、赤点線で囲まれた領域はMn₄CaO₅クラスターの結合部位である。

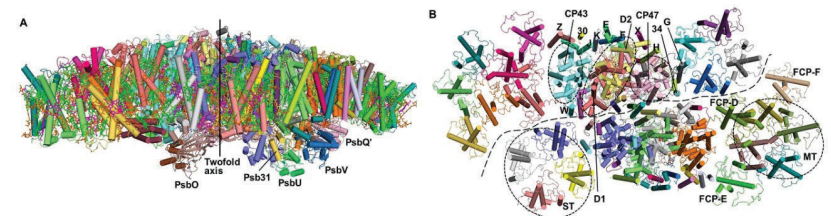


図3 珪藻PSII-FCPのクライオ電子顕微鏡構造。A、膜の側面から見た図。B、膜の上から見た断面図。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

● 光合成水分解反応機構の解明

光合成水分解反応の機構解明では、まず水分解反応のS状態遷移のうち、構造が不明のS₃→(S₄)→S₀遷移の構造変化を、ポンプ・プローブ時分割XFEL結晶構造解析法により、好熱性シアロバクテリア *Thermosynechococcus vulcanus*由来PSII結晶を用いて明らかにする。結晶中でS₃→(S₄)→S₀遷移が進まない、あるいは効率よく進行しない場合は、PSIIの溶液試料を用いて、室温で3閃光照射し、急速に液体窒素温度に冷却することでS₀状態をトラップし、cryo-EMで構造を解析する。そしてMn₄CaO₅クラスターと外側の溶液を繋ぐ複数の水素結合ネットワークについて、それぞれのアミノ酸残基の変異体を作成し、機能への影響を調べるとともに、結晶化・結晶構造解析、あるいはcryo-EMによる構造解析を行い、アミノ酸置換による構造への影響を明らかにする。これらの結果から、水分解反応におけるO-O結合の形成部位、基質酸素の由来、プロトン排出経路、水の進入経路を明らかにする。得られた結果は人工光合成における、光エネルギーを利用した水分解の人工触媒の合成にも重要な知見を提供することが期待される。

● 各種生物由来光化学系 - 光捕集アンテナ超分子複合体の構造解明

これまで構造が未解明のシャジクモ藻、渦鞭毛藻、褐藻、ユグレンアやクロレラ等由来PSII-LHCII, PSI-LHCI, さらにシアロバクテリアや植物由来Cyt c6-PSI-Fd, Fd-FNR-PSI等超分子複合体の構造を解析し、機能解析の結果と組み合わせそれぞれ超分子複合体におけるエネルギー移動、電子伝達機構を解明する。そして各種生物由来PSII-LHCII, PSI-LHCIの構造を比較し、進化過程において光環境の変化に伴い、光捕集アンテナタンパク質や結合色素がどのように変化してきたかを原子レベルで明らかにする。得られた結果は太陽光エネルギーを高効率に捕集・利用するための人工光エネルギー捕集装置や人工光合成システムの開発に役立つことが期待される。