


|  |        |  |
|--|--------|--|
|  | 領域代表者  | 大阪大学・蛋白質研究所・教授<br>栗栖 源嗣（くりす げんじ）<br>研究者番号:90294131             |
|  | 研究領域情報 | 領域番号：23A305<br>研究期間：2023年度～2027年度<br>キーワード：光合成、植物科学、構造生物学、情報科学 |

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

光合成は植物科学分野における最重要課題のひとつであると共に、熱帯から極地まで多様な光環境で駆動される地球上でもっとも重要な化学反応である。光合成生物は強光や弱光だけでなく刻々と変化する光条件を克服して地球を覆っており、地球上のどこでも光合成が可能であるとしても過言ではない。そこで『光合成生物がどのように多様な光環境に適応してきたのか？』という光合成環境適応の原理を理解し検証できれば、学術的インパクトのみならず、それを地球温暖化や気候変動の問題解決に応用できるなど、社会的な波及効果も期待される。

最新の研究成果から、光合成生物は環境に適応する際にチラコイド膜上の基本分子装置そのものは変えず、特定のタンパク質やその組み合わせでできる「超分子」を多様化することで、個別の環境に適応した集光やその制御を進化させてきたと推察される。すなわち、光合成の環境適応においては様々なタイプの超分子装置の機能制御と構造形成を軸に環境適応を理解することが重要であると判り始めたのである。しかし、環境変化に応じてチラコイド膜上で動的に形成される「光合成超分子複合体の構造」と「光合成生物の生理学」を完全に結びつけることは未だ達成されていない。そこで、実績ある構造生物学と植物生理・生化学の研究者が、情報科学を媒体としてタグを組み、時空間的包括性を備えた情報を基盤にして超分子複合体が生理機能の発現を可能にする仕組みを明らかにする。

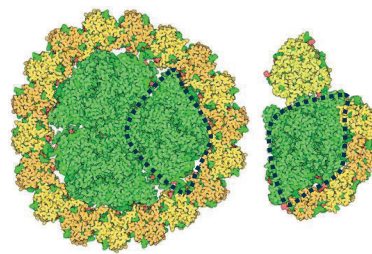


地球上のどこでも光合成ができる謎に迫る

図1 地球上に広がった光合成生物の環境適応の仕組みを解析するイメージ図

●きっかけとなった前身の科研費の成果と新しく生まれた課題

新学術領域研究『新光合成：光エネルギー変換システムの再最適化』（平成28年から令和3年3月まで）では、光合成プロセスが内包する“アクセル”と“ブレーキ”の仕組みをシステムとして捉え直し、それぞれの分子実体を実験で明らかにするとともに、それらのネットワークをシステムティックに検証する融合研究が多数遂行された。さらに、領域研究で様々な高解像度超分子複合体構造を解明することができたが、現状では構造・機能相関の理解が各論に留まっており、環境適応を反映している構造多様性の“原理”の理解には至っていない。例えば、図2に示す通り、シアノバクテリアの光化学系Iは3量体で存在し、弱い光環境ではリング状のアンテナを追加する。これに対して、緑色植物が単量体の光化学系Iを持ち全く異なるアンテナ系を環境適応に用いている原理は全く理解できていない。



3量体と単量体でなぜ違う？

図2 異なった超複合体形成様式を示すシアノバクテリア（左）とウモロコシ（右）の光化学系Iのクライオ電子顕微鏡構造図

●研究の手法

環境変化に対応する超分子複合体の制御系では、髪の毛の100万分の1（オングストローム）から1000分の1（サブμm）の空間スケールとピコ秒から分の時間幅ではたらくタンパク質超分子を中心に多様な調節機能が働いている。この多次元・多階層システムの理解に取り組むには、①クライオ電子顕微鏡構造解析と高速AFMや分子科学計算を含む先端的構造生物学による可視化技術（＝観る技術）、②非モデル生物にまで展開している信頼度の高い光合成解析技術（＝測る技術）、そして③比較的容易に決定可能となった豊富なゲノム情報を駆使した比較ゲノム解析とAlphaFold2に代表される詳細な予想構造を駆使した情報解析技術（＝繋ぐ技術）の融合にあると考えている（図3）。地球上のどこでもおこるユニバシティな光合成に切り込む我々の研究を『光合成ユニバシティ』研究と名付けて、“観て、測って、繋ぐ”融合研究により初めて到達できる新しい学理の構築を目指す。



図3 “観て、測って、繋ぐ”融合研究のイメージ図

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

●領域全体としての目標

光合成の環境適応機構を俯瞰して、シアノバクテリア・藻類・陸上植物が海水・淡水・陸上、そして熱帯から寒冷域まで生息域の拡大を果たした環境適応の原理を解明する。時空間的な広がりや繋ぎ、領域研究を多階層・多次元の研究として推進することで「地球上のどこでもおこる光合成」の不思議を解明する。それにより、将来的な光合成の人工設計への発展にも貢献する

「観る研究」では、分子進化の観点から非モデル種を含む種々の光化学系の集光色素最適化配置の原理を解明し、異なる光環境下における光化学系/LHC光アンテナ超複合体の構造ダイナミクスを解明する。分子科学計算や高速AFMを駆使し超複合体の構造ダイナミクスを分子的/構造的に明らかにして、主にナノ秒までの時間スケールでおこる光エネルギー変換効率の動的な制御機構と環境適応原理を分子レベルで解明する。

「測る研究」では、光合成超分子複合体の足場となるチラコイド膜の形成や緑色植物型光化学系Iおよび系II超複合体の高次構造と集光機能を解析し、その集光系構造の多様性とそれぞれの集光・エネルギー移動特性とを特徴づける。そのような構造機能特性に立脚した光合成生理が光合成生物の環境適応にどのように寄与したのか、藻類・陸上植物光合成の環境適応原理を解明する。レドックスを基盤とする光合成のスイッチングが果たす生理機能を、制御に必須であるタンパク質の構造変化および進化的変遷とを統合して明らかにする。

「繋ぐ研究」では、環境適応を支える分子装置をコントロールする「制御系」の進化を軸に、植物の集光超分子の構造多様化とそれに伴う遺伝子進化史を比較ゲノム的視座から明らかにし、光合成超分子の構造や機能を環境変化に応じて柔軟に組み変える仕組みを解析する。また、光合成超分子複合体や制御タンパク質の祖先型遺伝子配列および立体構造を情報学的に再現し、それらの情報と環境パラメータを機械学習により総合して超分子複合体の機能・構造解析と環境適応原理を繋ぐ役割を果たす研究を展開する。



図4 観て、測って、繋いで明らかにする新しい学理の構築を示すイメージ図