



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	緑色植物の進化に伴う光化学系の変遷に関する研究 [全文の要約]
Author(s)	亀尾, 辰砂
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第16222号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95341
Type	doctoral thesis
File Information	KAMEO_Shinsa_summary.pdf



学 位 論 文 内 容 の 要 約/Dissertation Summary

博士 (環境科学)

氏 名/Applicant 亀尾 辰砂

学 位 論 文 題 名/Title of Dissertation

緑色植物の進化に伴う光化学系の変遷に関する研究 (Studies on the evolutionary changes of photosystems in green plants)

光合成は、光エネルギーを化学エネルギーに転換し、そのエネルギーを用いて糖などの生体物質を合成する反応である。緑色植物は、進化とともに海から淡水、そして陸上へと生息域を拡大し、現在では最も繁栄している酸素発生型光合成生物の一群である。このような緑色植物の進化や環境適応は、地球環境の観点からも重要な意義を持つ。

海洋、淡水、陸上では、それぞれの環境が大きく異なり、特に光環境の違いが顕著である。例えば、海洋では青色や緑色の弱い光が優占する一方、陸上では強い光にさらされる。このような異なる光環境に適応するため、緑色植物はそれぞれの生息地に適応した光合成の制御を持つようになったと考えられる。その環境適応を支える機構の一つとして、集光アンテナの多様性が挙げられる。近年のタンパク質構造解析により、特に光化学系I (PSI) の集光アンテナには種特異的な多様性が存在することが明らかになってきた。しかし、緑色植物の進化初期分岐系統群の光化学系に関する研究は限られており、進化初期における光化学系の変遷や、祖先型緑藻から陸上植物への進化の過程における変遷は十分に解明されていない。

本研究では、光化学系を分離する手法である Native 電気泳動法 (Clear-Native (CN)-PAGE) を改良し、機能や構造を維持したまま光化学系を分離する試みを行った。その結果、従来の CN-PAGE で使用されるデオキシコール酸ナトリウム (DOC) の代替として、両親媒性ポリマー Amphipol A8-35 を用いることで、光化学系II (PSII) からの集光アンテナ (LHCII) や酸素発生複合体 (OEC) の解離を抑制できることが明らかとなった。また、OECやATP合成酵素のストロマ側構成サブユニットの解離については、pHの調整のみでは抑制できず、Amphipol A8-35 の使用が重要であることが示唆された。

次に、緑色植物の進化過程における周辺集光アンテナ (light-harvesting complex: LHC) 遺伝子群の変遷を解析した。進化初期分岐系統群に属する緑藻のうち、ゲノム情報が公開されていない海洋性緑藻 *Pyramimonas parkeae* および *Nephroselmis astigmatica* を対象とし、RNA-seq 解析を実施して LHC 配列を取得した。さらに、既存の緑藻ゲノムデータを加え、LHC の系統解析を行った。その結果、Prasinodermophyta に属し現在入手できる緑色植物の中では最も早く分岐した緑藻 *Prasinoderma coloniale* や *P. parkeae*, *N. astigmatica* の PSI 集光アンテナは、共通の

LHC 組成を持つ可能性が示唆された。これは、緑藻の共通祖先が同様の LHC 組成を持っていたことを示唆するものである。

先行研究では、緑色植物の進化初期に 1 層型の PSI 集光アンテナが存在し、進化の過程で 2 層型へと変遷したとする仮説が提示されている。しかし、本研究で *P. coloniale* が 2 層型 PSI 集光アンテナを有することが示唆されたことから、緑色植物はその進化初期、少なくとも Prasinodermophyta 分岐前にはすでに 2 層型 PSI 集光アンテナを構成していた可能性が高いことが新たに明らかとなった。また、*P. coloniale*、*P. parkeae*、*N. astigmatica* の 2 層型 PSI 集光アンテナの 1 層目を構成する LHCI の組成が、これまで報告されている緑色植物の LHCI 組成とは異なる可能性も示唆された。これは、PSI 集光アンテナ複合体の 1 層目の LHCI 組成にも進化に伴う変遷があったことを示唆している。

また、*P. coloniale* と *N. astigmatica* からは PSII 集光アンテナ複合体の一部である major LHCI を構成する LHCI として LHCP と LHCBMs が両方検出された一方、*P. parkeae* からは LHCBMs のみが検出されることが明らかとなった。先行研究から、緑色植物の major LHCI を構成する LHCI として LHCP と LHCBMs の 2 つが報告されており、通常はこの 2 つのうちのどちらか一方を有している。両方とも有している緑色植物として、例外的に最も早く分岐した Streptophyta 緑藻である *Mesostigma viride* が報告されている。本研究において、進化初期系統群である *P. coloniale* や *N. astigmatica* において同様のことが確認されたことから、LHCP と LHCBMs を両方とも有することは、初期分岐系統群の特徴であることが考えられた。また、LHCP 型の major LHCI を構成することが報告されている緑藻は海洋の水深が比較的深い場所に生息する一方、LHCBMs 型の major LHCI を構成することが報告されている緑藻は淡水域や、陸上、海洋であっても潮間帯やタイドプールなど比較的浅い場所に生息する傾向が見られることから、初期分岐系統群の緑色植物が両方の LHCI を有する一方、進化していくとどちらか一方のみが見られるようになる傾向は光環境への適応の結果であることが考えられた。

さらに、*P. parkeae* の光化学系Iを CN-PAGE によって分離した結果、陸上植物よりも大きな周辺アンテナを持つことが確認された。この結果は、LHC 系統解析によって *P. parkeae* が 2 層型 PSI 集光アンテナを有することが示唆された結果を支持している。さらに、分離した PSI-LHCI 画分のタンパク質を LC-MS/MS 解析し、その組成を調査したところ、1 層目と 2 層目の LHCI に対応するタンパク質が検出された。これらの結果から、*P. parkeae* が祖先型の PSI 集光アンテナ複合体を構成することが強く示唆され、同様の PSI 集光アンテナを有すると推定された *P. coloniale* においても、2 層型 PSI 集光アンテナ複合体が構成されていた可能性が高いと考えられる。この結果は、PSI 集光アンテナの進化に伴う変遷の仮説をさらに支持するものである。

また、*P. coloniale* を含む海洋性の初期分岐緑藻や、Chlorophyta に属する緑藻においては、LHCA5-like が PSI 集光アンテナとして働く一方、陸上植物へと進化していく一群である Streptophyta においては、NADH dehydrogenase-like (NDH) 複合体と PSI との超複合体形成に用いられることが考えられた。これは、陸上植物の PSI 循環的電子伝達経路の制御の起源を考察する上で、重要な知見となる。

以上のように、本研究は、緑色植物の進化初期における PSI 集光アンテナの変遷に関する新たな知見を提供し、今後の緑色植物の光合成の進化に関する研究の基盤となるものである。