



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 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	亀尾, 辰砂
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/2115/95340
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	KAMEO_Shinsa_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨/Dissertation Abstract

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)

現在の人間社会は様々なバイオマスの活用に支えられており、現存するバイオマスの85%は酸素発生型光合成生物が担っていると推定されている。緑藻と陸上植物を含む系統群である緑色植物はその分類群の1つであり、地球上の様々な環境に適応し光合成を行っている。緑色植物の祖先は青色や緑色の弱い光が優占する海洋に適応していたと考えられており、海洋から淡水へ、さらに淡水から陸上へと生息域を拡大する過程では、強光適応機構の獲得が必要であったと考えられている。

光合成の中心的な役割を担うのは、光化学系 I および II (PSI および PSII) と呼ばれる色素タンパク質複合体であり、反応中心複合体と集光アンテナ複合体から構成されている。緑色植物の集光アンテナ複合体は Light Harvesting Complex (LHC) と呼ばれており、その LHC アンテナの量的および質的な制御は光環境適応において重要である。とりわけ陸上植物における強光ストレスに対する LHC アンテナの制御機構については詳細な研究が行われてきた。しかし、LHC アンテナの構造やその制御機構が緑藻から陸上植物への進化に伴いどのように進化してきたのかについては不明である。その理由は、緑色植物の進化の初期に分岐した緑藻類の光化学系に関する知見が限られているためである。

一方、近年のシークエンス技術の発展により緑藻のゲノム情報の公開も進められてきた。そこで本研究では、緑色植物の初期に分岐した緑藻類の LHC 配列を含む LHC タンパク質群の系統樹を作成し、緑色植物の進化に伴う LHC アンテナ複合体の変遷を解析することとした。具体的には、プラシノデルマ藻類に属する *Prasinoderma coloniale*、3 種のプラシノ藻類 (*Pyramimonas parkeae*、*Nephroselmis astigmatica*、*Ostreococcus tauri*)、および、3 種のストレプト藻類 (*Chlorokybus atmophyticus*、*Klebsormidium nitens*、*Zygnema circumcarinatum*) に加えて、陸上植物やコア緑藻類の LHC 配列を用いた。その際、プラシノ藻類の *P. parkeae* と *N. astigmatica* についてはゲノム情報が公開されていなかったため、ロングリードシークエンサーを用いた isoform sequencing (IsoSeq) とショートリードシークエンサーを用いた de novo assembly 法を利用して LHC アンテナタンパク質の配列を推定し、系統解析に用いた。

その結果、陸上植物の PSII の LHC アンテナタンパク質に特徴的な LHCB3 と LHCB6 は、陸上植物への進化以前にストレプト藻類において既に獲得されていたことが判明した。この結果から、ストレプト藻類の少なくとも一部は、既に陸上植物型の PSII の LHC アンテナ構造を有

していたと考えられる。

一方、PSI の LHC アンテナタンパク質については、緑藻の進化初期に分岐したプラシノデルマ藻類の *P. coloniale*、および2種のプラシノ藻類 (*P. parkeae* および *N. astigmatica*) の PSI が、2層の LHCI ベルトと側面に結合する LHCI のヘテロダイマーを利用していることが明らかになった。この結果は、これが緑藻の祖先型 PSI の LHC アンテナ複合体の構成であることを強く示唆している。なお、プラシノ藻類の *O. tauri* の LHCI ベルトは 1 層のみであるが、これは共通祖先から進化する過程で2層目の LHCI ベルトを喪失したためと推測される。また、1 層目の LHCI ベルトの中央に結合する LHCA タンパク質には多様性が認められ、その進化的な変遷についても明らかにすることができた。

本研究で推定した祖先緑藻の PSI については、先行研究での報告がない。そこで、その祖先緑藻と同じ構成の LHC アンテナを持つと推定された *P. parkeae* と *N. astigmatica* の PSI を n-dodecyl α -D-maltoside で可溶化し、Clear-Native (CN) -PAGE で分離することにより、シロイヌナズナの PSI と分子量を比較した。その際には、両親媒性ポリマー amphipol A8-35 を用いた CN-PAGE による新たな分離方法を開発し、これを利用した。この方法を用いることによって、従来の CN-PAGE と比べて光化学系からの LHC アンテナの解離を効果的に防ぐことができた。

その結果、*P. parkeae* と *N. astigmatica* の PSI はシロイヌナズナの PSI よりも分子量が顕著に大きいことが明らかになった。これは2層目の LHCI ベルトを持つことを示唆する結果である。さらに PSI バンドの LC-MS/MS 解析の結果から、両種の PSI が2層の LHCI ベルトと側面に LHCI のヘテロダイマーを持つことが示唆された。これらの結果は、本研究での系統解析の結果が生化学的にも支持されたことを示している。

本研究の結果を踏まえると、緑藻の PSI は弱光環境の海洋においては多くの LHC アンテナを結合し高い集光能力を備えていたが、淡水や陸上といった強光環境に進出する過程で2層目の LHCI ベルトや側面の LHCI のヘテロダイマーを失い、集光アンテナサイズを小さくすることで適応したことが示唆された。また、陸上植物の PSI の LHC アンテナ複合体には長波長を吸収する red forms とよばれるクロロフィルが存在し、陸上環境への適応に寄与していると考えられているが、その形成に重要な PSI の LHC アンテナの構成は既にストレプト藻類から見られることも明らかになった。PSII の結果と併せて考えると、一部のストレプト藻類は PSI および PSII の両方において陸上植物型の LHC アンテナ複合体を兼ね備えていたと予想され、このことが陸上植物への進化に寄与したのではないかと考えられた。