PRESS RELEASE

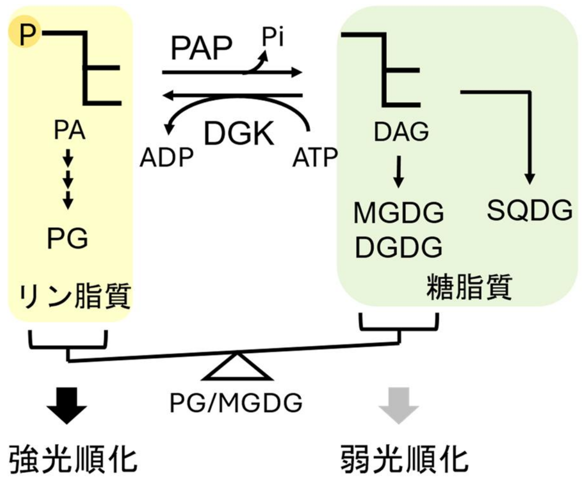
埼玉大学 理化学研究所

令和 7 年 8 月 26 日

光合成が強光ストレスに応答して膜脂質転換を行う機構を解明
－光合成生物の膜脂質改変技術の開発へ－

1 ポイント

- 強光ストレス下では、膜脂質の転換が起こり、リン脂質の一つであるホスファチジルグリセロール（PG）が増加する。
- 強光下の PG の増加に関わるジアシルグリセロールキナーゼ（DGK）を同定した。
- 本研究により、強光ストレス応答における膜脂質転換の機能解明が一歩前進した。



2 概要

光合成生物は、環境ストレスに応答することで、光合成活性を最適化している。光合成の場であるチラコイド膜においては、強光や低 CO_2 などの環境変化に応じて膜脂質組成が変化することで光合成活性が制御されていると考えられるが、その分子機構については不明である。本研究では、光合成微生物であるシアノバクテリアを用いて、糖脂質の前駆体であるジアシルグリセロール（DAG）をリン脂質の前駆体であるホスファチジン酸（PA）へ変換する DAG キナーゼ（DGK）の変異株を作出し、強光ストレス応答における膜脂質転換の役割について解明した。*dgkA* 変異株では、強光ストレス下における PG の増加が見られなかった。さらに、光化学系 II 二量体（PSII dimer）が蓄積することで、光合成の修復が阻害されていることが示唆された。これらの表現型は、細胞懸濁液に PG を添加することで解消されたことから、強光下における PG の増加が、PSII 複合体の単量体化および、修復を促進することが明らかとなった。

本研究は埼玉大学大学院理工学研究科生命科学部門 神保 晴彦助教と理化学研究所環境資源科学研究センター 中村 友輝 チームディレクター、東京大学大学院総合文化研究科 和田 元 名誉教授との共同研究で実施され、『The Plant Journal』に 8 月 20 日付けにオンラインにて掲載されました。

3 研究の背景

光合成生物は、常にさまざまな環境ストレスにさらされている。一見すると、どんな環境でも、青々と緑を保っていて、ただ耐えているように見える。しかし、実は環境変化に応答して、積極的に光合成系を最適化する（順化）ことで、環境ストレスに対処している。特に光環境は、数分から数ヶ月といった幅広いレンジの中で変化する環境要因であり、光合成生物には、変化する光強度に対応するための多くの機構が備わっている。光合成の電子伝達反応は、チラコイド膜で行われる。チラコイド膜脂質の主要な

リン脂質である、ホスファチジルグリセロール（PG）は、光合成活性の維持に重要であることがわかっている。最近、我々は、低 CO_2 濃度に応答したチラコイド膜の脂質転換によって PG 量が増加することで、光合成活性が最適化されていることを明らかにし、光合成の環境応答における膜脂質転換の役割について初めて明らかにした（Jimbo et al. 2021 *Plant J.*）。そこで、膜脂質転換を介した光合成の環境応答機構を解明するため、強光ストレス下における膜脂質転換とそれに関わる脂質代謝遺伝子の役割について解析を行なった。

４ 研究内容

シアノバクテリアの膜脂質合成経路においては、リン脂質の前駆体であるホスファチジン酸（PA）と糖脂質の前駆体であるジアシルグリセロール（DAG）が、DAG キナーゼ（DGK）と PA ホスファターゼ（PAP）によって相互に変換されることで、リン脂質と糖脂質の割合を調整していると考えられる（上図）。そこで、大腸菌のホモログ探索から、シアノバクテリア *Synechocystis* sp. PCC 6803（以下 *Synechocystis*）において DGK をコードすると考えられる遺伝子の探索を行い、遺伝子を耐性遺伝子の挿入によって破壊した株を作出した。遺伝子破壊株では、DAG から PA の変換が行われなかったことから、*Synechocystis* において、DGK をコードする遺伝子を同定することができた。野生株においては、強光下において、PG 量が約 1.7 倍程度に増加することが観察されたが、DGK 遺伝子を破壊した *dgkA* 株では、強光下における PG の増加が見られず、MGDG が 2 倍に増加した。また、*dgkA* 変異株は強光下で生育遅延を示した。そこで、強光下における光合成活性を解析したところ、*dgkA* 変異株では、水分解反応を担う光化学系 II（PSII）の修復が阻害されていた。また、*dgkA* 変異株では野生株に比べて、PSII 二量体が増加しており、PSII の修復過程における複合体の解体過程が阻害されている可能性が見出された。また、これらの表現型は、細胞懸濁液に PG を添加することによって、改善されたことから、*dgkA* 変異株では MGDG/PG 比の減少によって、PSII 修復阻害が引き起こされたと考えられる。

５ 今後の展開

今回の研究成果から、強光ストレスにおいて、DgkA 経路の強化による膜脂質転換によって PG 量が増加することが光合成活性の制御に重要であることが明らかになった。今後は、強光以外の環境ストレスに関わる膜脂質転換メカニズムを明らかにすることによって、強光だけでなく、さまざまな環境ストレスに対して耐性を持つ光合成系の構築に展開したい。

これまでに脂質代謝酵素の改変によって脂質量を改変できた例は少なく、本研究で着目した DAG と PA の変換は、唯一の改変ポイントであると期待される。これらのバランスを改変することによって、目的とする脂質の合成を促進し、それを基質とするホルモンやバイオ燃料の増産を目指すことも可能であると考えられる。

６ 論文情報

掲載誌	The Plant Journal
論文名	Cyanobacterial diacylglycerol kinase is involved in membrane lipid synthesis and contributes to high-light acclimation of photosystem II
著者名	Kensuke Takagi[1], Yuki Nakamura[2, 3], Haruhiko Jimbo[4,†,*] and Hajime Wada[1, †,*] [1]Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo [2]RIKEN Center for Sustainable Resource Science [3]Graduate School of Science, The University of Tokyo [4]Graduate School of Science and Engineering, Saitama University †責任著者
DOI	10.1111/tpj.70368
URL	https://doi.org/10.1111/tpj.70368

７　研究支援

本研究は、科学研究費助成事業（日本学術振興会、22K14795、20K06701）、Novonesis 研究助成金、生体医工学研究センター（2057）、および GteX プログラム日本（JPMJGX23B0）の支援を受けて実施されました。

８　用語解説

チラコイド膜:光合成の電子伝達が行われる脂質二重層。シアノバクテリアから植物まで、共通して、主要な 4 種類の膜脂質で構成されている。

光化学系 II:光合成において、水を分解して酸素を発生する反応を担うタンパク質超複合体。20 以上のタンパク質や、クロロフィルなどの色素、脂質、キノン、金属などが緻密に配置された高度な分子機械である。