



PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ、文部科学記者会
大阪科学・大学記者クラブ
科学記者会 御中

令和 7 年 8 月 28 日
岡 山 大 学

光合成の足場「チラコイド膜」の再構築に新知見 ～原始シアノバクテリアが持つチラコイド膜を作れる能力を証明～

◆発表のポイント

- ・光合成の光エネルギーの転換反応は「チラコイド膜^[1]」で起こります。今回、チラコイド膜を作るために必須である「VIPP1」と呼ばれるタンパク質に着目しました。
- ・VIPP1 タンパク質が持つ特徴的なアミノ酸配列（Vc）は、極限環境に生息する古細菌などの祖先タンパク質 PspA にも出現しており、この Vc 配列により、チラコイド膜だけでなく膜へのストレス耐性を生命の進化において獲得した可能性が示唆されました。
- ・VIPP1 と Vc は「チラコイド膜を持たない」原始シアノバクテリア^[2]にも存在し、植物の葉緑体^[3]に導入するとチラコイド膜を作れる作用をすることが分かりました。
- ・今回の知見により、VIPP1 を用いてチラコイド膜を強化し、植物の環境耐性や光合成効率を高める技術への貢献が期待されます。

光合成は、植物が太陽光を利用して二酸化炭素を有機物に変換し、その過程で酸素を放出する生命現象であり、地球の大気組成や生態系の維持に欠かせない役割を果たしています。この反応の場となるチラコイド膜は、光合成装置が集積する細胞内の膜構造であり、光エネルギーを効率的に変換するために極めて重要です。その形成や維持には専用のタンパク質である VIPP1 が関与していますが、進化的起源は十分に解明されていませんでした。

岡山大学学術研究院先鋭研究領域（資源植物科学研究所）の坂本亘教授らは、原始的なシアノバクテリアである「グレオバクター（*Gloeobacter violaceus*）」が、チラコイド膜がないにもかかわらず VIPP1 タンパク質を持っていることに着目しました。グレオバクターの VIPP1 は、高等植物においてもチラコイド膜の形成を可能にすることが分かりましたが、このチラコイド膜形成能には、末端に付加された「Vc」と呼ばれる領域が不可欠であることが明らかになりました。また、Vc は VIPP1 に特徴的な配列と考えられていましたが、詳細な解析から、乾燥や高温といった極限環境に生息する古細菌などの祖先型のタンパク質にも付加されていること分かり、光合成に限らない膜保護機構として、進化的に獲得されてきたことが示されました。これらの成果は、光合成膜の進化において、膜の維持と保護が先行して確立された可能性を示唆しており、将来的には、チラコイド膜の強化による植物の環境耐性や光合成効率の向上を目指した応用が期待されます。

この研究成果は 8 月 18 日、米国の国際科学誌「プラントフィジオロジー（*Plant Physiology*）」の Research Report として掲載されました。



PRESS RELEASE

■発表内容

<現状>

光合成は、光エネルギーを利用して大気中の二酸化炭素(CO₂)を有機物へと変換し、その過程で酸素(O₂)を発生させる生命現象であり、現在の地球の酸素大気と炭素循環を支える基盤となっています。この反応の場となる「チラコイド膜」は、光合成における光エネルギー変換を担うタンパク質複合体が集積する、細胞内で最も重要な膜構造の一つです。地球の歴史において、光合成によって酸素を発生する生物(酸素発生型光合成生物)は、約27億年前に出現したと考えられています。この酸素発生型光合成の起源となったのがシアノバクテリア(Cyanobacteria)であり、彼らの登場によって地球の酸素濃度は大きく上昇し、生物多様性や大気環境の進化に決定的な影響を与えました。

このシアノバクテリアには現在、チラコイド膜を持ち、高度に分化した「クラウン・シアノバクテリア(crown cyanobacteria)」と呼ばれる多数の系統が存在しますが、例外的にチラコイド膜を持たず、原始的な形質を保つ「グレオバクテリア(Gloeobacteria)」という系統も存在します。グレオバクテリアはクラウン・シアノバクテリアと約25~27億年前に分岐したと考えられ、原始的な酸素発生型光合成の「生きた化石」とも言える存在です。グレオバクテリアはチラコイド膜を持たず、細胞膜(プラズマ膜)の一部で光合成を行うという特異な形質を持っています。この特徴から、「チラコイド膜がどのようにして進化したのか」を探るモデル生物として注目されています。

<研究成果の内容>

岡山大学学術研究院先鋭研究領域の坂本教授の研究グループは、光合成を行う細胞内の「葉緑体」を研究しています。今回注目したVIPP1というタンパク質は、葉緑体の膜に巨大な集合体となって存在し、膜の融合や変形(リモデリング)を通してチラコイド膜の維持に必須であることを明らかにしています。VIPP1により、強い光や高温などの環境変動に応答した耐性を植物が持つことも分かってきました。VIPP1とチラコイド膜形成の関連性に関して、今回の研究ではグレオバクター(*Gloeobacter violaceus*)のVIPP1に注目しました。グレオバクターにはチラコイド膜が存在しないものの、VIPP1に類似したタンパク質(GviVIPP1)を持っています。そこで、坂本教授らは中国の内蒙古大学のグループと共同でGviVIPP1の機能を詳しく調べることにしました。

GviVIPP1は、細菌由来の祖先型タンパク質であるPspAと構造的に類似していますが、カルボキシル末端(C末端)側に付加されたVIPP1に特異的なペプチド配列(Vc)を持っています。光合成生物のVIPP1は全てVcを持つので、GviVIPP1は、他のVIPP1に近いはたらき、すなわち、チラコイド膜を形成する能力を持つことが予想されました。一方で、今回PspAについて詳しい解析を行った結果、PspAタンパク質の中でも、乾燥や高温といった極限環境に生息する古細菌(Archaea)や一部のバクテリアのPspAにはVcが存在することが分かり、PspAからVIPP1への進化は、チラコイド膜形成のみならず、多様な環境ストレスから膜を保護する機能を果たすための獲得形質であることが示唆されました。

以上の結果に基づくと、チラコイド膜を持たないグレオバクターに由来するGviVIPP1も、潜在的にチラコイド膜を作る能力を持っている可能性が考えられました。そのため、VIPP1を欠損しているために光合成膜(チラコイド)を形成できず致死となるシロイヌナズナ*vipp1*変異体にGviVIPP1

PRESS RELEASE

を導入した実験を試みました（図1）。その結果、葉緑体内でチラコイド膜が再構築され、正常な光合成と成長が回復することを確認しました。これは、グレオバクターがチラコイド膜を持たないにもかかわらず、膜形成に必要な分子装置を保持していたことを示す強力な証拠です。加えて、GviVIPP1のC末端領域「Vc」を除去した変異体（GviVIPP1 Δ C）では、膜形成が不完全となり、植物の生育も回復しませんでした。このことから、当初予想した通り、Vcがチラコイド膜の形成に不可欠な機能を担っていることが明らかになりました。

さらに、GviVIPP1を細胞内で可視化させるために緑色蛍光タンパク質（GFP）^[4]を融合させた蛍光観察実験では、Vcを欠くGviVIPP1ではVIPP1が巨大なオリゴマー（多量体）を形成しやすくなり、動的な粒子の形成や再編成が著しく減少することも分かりました（図2）。これは、VcがVIPP1の自己集合を「抑制的に制御」することで、膜構造のリモデリングを柔軟かつ迅速に行うための調整役となっている可能性を強く示しています。つまり、Vcはストレス環境下（強光、高温など）で損傷した膜の修復や再構築を担う「ダイナミックな膜リモデリング活性」を引き出す鍵因子であり、単なる構造的な末端ではなく、機能的にも進化的にも重要な役割を果たしていることが実証されました。

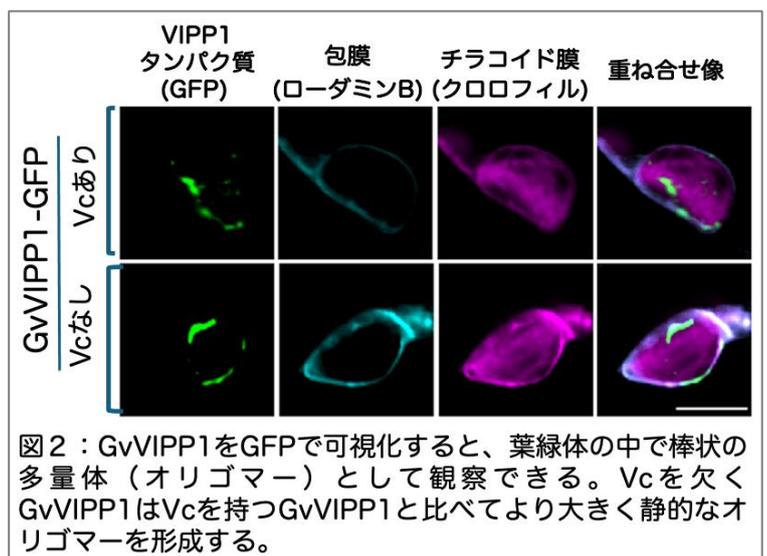
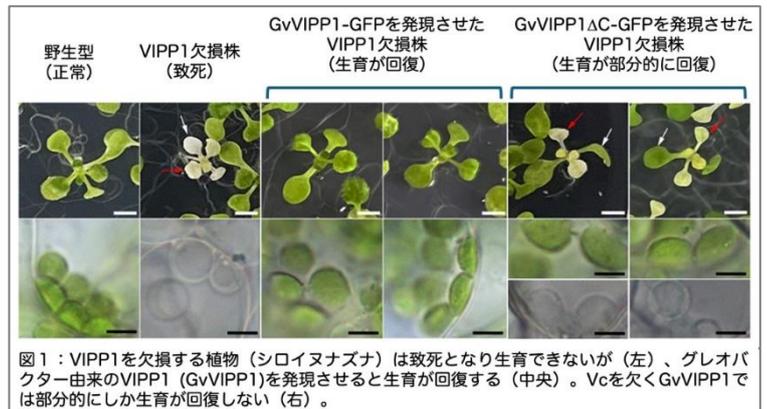
<社会的な意義>

本研究は、光合成膜の形成・保護に関わるタンパク質の進化的起源を明らかにしただけでなく、膜構造体の柔軟な制御に関わる分子機構の普遍性を示すものです。グレオバクターという生きた「進化の証人」を用いることで、生命がどのようにして複雑な細胞構造を獲得し、環境ストレスに適応してきたのかを理解する大きな手がかりとなります。

今後、光合成機能の強化やストレス耐性をもつ作物の開発、さらには合成生物学による人工的な膜システムの構築にも応用されることが期待されます。

■論文情報

論文名：VESICLE-INDUCING PROTEIN IN PLASTIDS 1 from thylakoid-less *Gloeobacter*





PRESS RELEASE

promotes thylakoid formation in Arabidopsis

掲載紙： *Plant Physiology*, 2025年 8月 18日（アメリカ東部時間）

著者： Lijuan Ma, Baozhu Dong, Meiyun Sun, Riqin Hao, Xinxia Wang, Haoyang Yu, Chenxu Han, Alex Muhire, Sarah Wanjiru Gachie, Di Li, Wataru Sakamoto*, Lingang Zhang*
(*責任著者)

DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiaf359>

■研究資金

本研究は、科学研究費（学術変革領域研究(A)および基盤研究 B）の研究助成により行われました。

■補足・用語説明

- [1] チラコイド膜：酸素を発生する光合成生物に見られる、特徴ある構造をした袋状の膜構造（図を参照）。この膜の中に葉緑素があって光を吸収し、光合成の光エネルギー転換反応が起こる。
- [2] シアノバクテリア：光合成をする細菌（バクテリア）で藍色細菌、ラン藻とも呼ばれる。30億年以上前に現れて、酸素を発生する光合成の起源とされている。約 15 億年前に植物の祖先に取り込まれて葉緑体となり、陸上生物が反映して現在の地球環境が作られた。
- [3] 葉緑体：藻類や陸上植物などで光合成の反応が起こる細胞内器官。顕微鏡でも緑の器官として観察される。進化の過程でシアノバクテリアの細胞内共生により生じ、特徴あるチラコイド膜の構造を持っている。
- [4] 緑色蛍光タンパク質（GFP）：オワンクラゲ由来のタンパク質で、青色の光を吸収して緑色の蛍光を放出する。GFP を他のタンパク質とつなげて細胞で発現させるとそのタンパク質の挙動を顕微鏡で可視化することができる。GFP の発見で下村脩博士らが 2008 年にノーベル化学賞を受賞した。

<お問い合わせ>

岡山大学 学術研究院先鋭研究領域（資源植物科学研究所） 光環境適応研究グループ
教授 坂本 亘
（電話番号）086-434-1206
（HP）www.rib.okayama-u.ac.jp/index-j.html



岡山大学は持続可能な開発目標 (SDGs) を支援しています。