



PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ、文部科学記者会、
科学記者会
御中

令和8年1月29日
岡山大学

**植物がストレス条件でも光合成を維持する新たな仕組みを解明
— 熱ショックタンパク質 HSP70 と膜リモデリング分子 VIPP1 が連携 —**

◆発表のポイント

- ・光合成の光エネルギー変換反応は、葉緑体内的チラコイド膜という特殊な膜構造の上で行われます。
- ・本研究は、チラコイド膜の形成・修復を担う VIPP1 が、熱ショックタンパク質 HSP70 ファミリーに属する cpHsc70-1 と相互作用することを明らかにしました。
- ・この相互作用は、高温などのストレス下でチラコイド膜を動的に再編成し、光合成を維持するために必須であり、植物の環境適応性を高める新たな分子基盤を示しています。

植物の光合成は、葉緑体内に存在する「チラコイド膜^[1]」と呼ばれる膜構造の上で行われています。チラコイド膜には光合成に必要なタンパク質複合体が集中的に配置されており、その構造が光合成效率を左右します。

しかし、異なる日照や温度などの環境ストレス下では、光合成のタンパク質だけでなく、このチラコイド膜自身も損傷を受けたり、再構成されたりする必要があります。植物がストレスに耐えるためには、損傷したタンパク質を保護する仕組みと、膜構造を修復する仕組みの両方が必要です。

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、チラコイド膜の形成・修復などの恒常性を担う膜リモデリングタンパク質 VIPP1 が、熱ショックタンパク質^[2]HSP70 ファミリーに属する cpHsc70-1 と相互作用することを明らかにしました。cpHsc70-1 は「シャペロン^[3]」と呼ばれるタンパク質機能の制御により VIPP1 集合体の解体と再編成を制御し、チラコイド膜を動的に維持しています。

この連携機構により、高温ストレス下でもチラコイド膜の構造が保たれ、光合成機能が維持されることが示されました。本研究は、植物が環境変動に適応するための光合成制御の新たな分子基盤を示すものです。

この研究成果は、2026年1月にアメリカの国際学術誌『PNAS Nexus』に発表されました。

◆研究者からのひとこと

光合成を支えるチラコイド膜は、環境条件に応じて常に作り替えられています。本研究は、葉緑体の熱ショックタンパク質が単にタンパク質を守るだけでなく、光合成の足場となる膜構造の維持にも関与していることを示しました。タンパク質と膜という異なる階層の制御が結びつくことで、植物が高温ストレスに適応していることが分かり、生命システムの巧妙さを改めて実感しています。



坂本教授

PRESS RELEASE

■発表内容

<現状>

光合成は、太陽光エネルギーを利用して二酸化炭素から有機物を合成し、地球上の生態系と人類社会を根底から支える生命現象です。この光合成の光エネルギー変換反応は、植物細胞内の葉緑体に存在する「チラコイド膜^[1]」と呼ばれる膜構造の上で行われます(右図、参考文献を参照)。チラコイド膜には、光化学系I・II、電子伝達複合体、ATP合成酵素など、光合成に必須な巨大タンパク質複合体が高密度に配置されており、その立体構造と配置が光合成效率を大きく左右します。

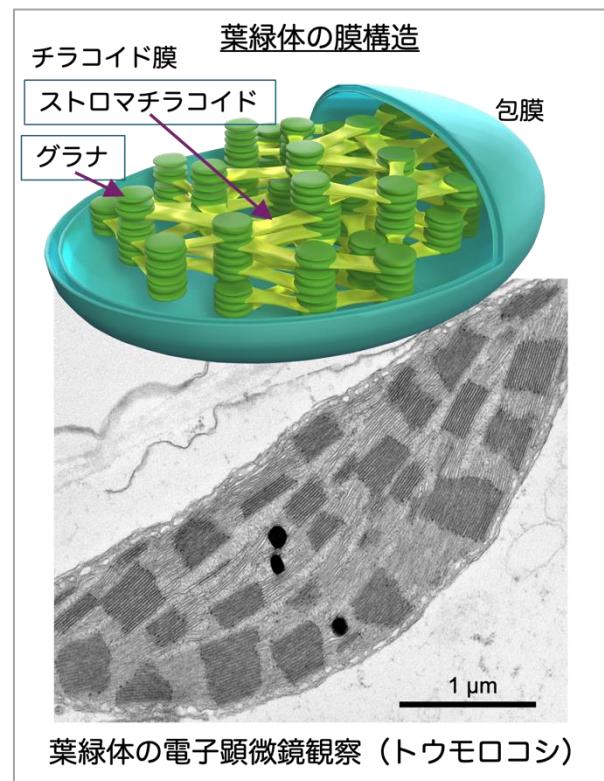
一方で、光合成に必要な光エネルギーや高温環境は、葉緑体内のタンパク質や膜構造にとって大きな負荷となります。特に高温ストレス下では、タンパク質の立体構造が不安定になるだけでなく、光合成装置の足場となるチラコイド膜そのものが損傷や変形を受けることが知られています。そのため、光合成を安定して維持するためには、個々のタンパク質の品質管理に加え、チラコイド膜を形成・修復・再編成する仕組みが不可欠です。

生物はこのような環境ストレスに対応するため、熱ショックタンパク質(HSP: Heat Shock Protein)^[2]と呼ばれるタンパク質群を持っています。HSPは高温、乾燥、強光、酸化ストレスなどに応答して活性化され、損傷を受けたタンパク質を保護し、正しい構造に折りたたみ直す「シャペロン^[3]」として働きます。中でもHSP70ファミリーは、細菌から植物、動物まで広く保存されており、ストレスからの回復に中心的な役割を果たしています。

近年、チラコイド膜は単なる静的な構造ではなく、環境条件に応じて動的に再編成される状態として捉えられるようになり、この状態は「チラコイド膜の恒常性(ホメオスタシス)=チラコスタシス」と呼ばれています(参考文献)。しかし、タンパク質の品質管理とチラコイド膜の維持が、どのように分子レベルで結びついているのかは未解明の課題でした。

<研究成果の内容>

岡山大学学術研究院先鋭研究領域(資源植物科学研究所)の坂本亘教授らの研究グループは、チラコイド膜の形成および維持に必須な膜リモデリングタンパク質VIPP1(Vesicle Inducing Protein in Plastids 1)に着目しました。VIPP1は、チラコイド膜上で巨大な集合体(オリゴマー)を形成し、膜の融合や再構築を通じて、光合成反応の足場となる膜構造を整える実行因子です。VIPP1は、真核生物の細胞質で膜輸送に広く関与するESCRT-III^[4]と呼ばれる重要な膜リモデリング分子と構造的・機能的に類似したタンパク質であることから、膜の維持に関して生命に共通するシステムであると考えられています。

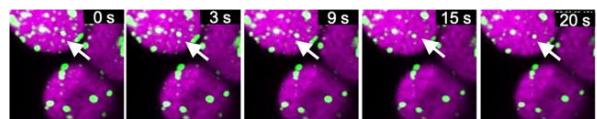


PRESS RELEASE

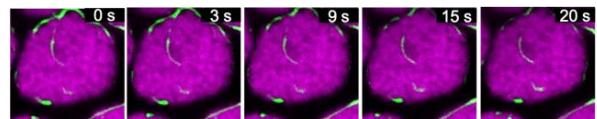
坂本教授らは、VIPP1を緑色蛍光タンパク質(GFP)と融合して発現させる実験系(右図)を用い、VIPP1と相互作用する他のタンパク質因子を探索した結果、葉緑体に局在するHSP70ファミリータンパク質cpHsc70-1を同定しました。cpHsc70-1は、一般的なHSP70と同様にシャペロン^[3]活性を持ち、タンパク質の分解ではなく、構造の維持や再生を補助する役割を担います。詳細な生化学的解析および遺伝学的解析により、cpHsc70-1はVIPP1のカルボキシ末端(C末端)領域に結合し、VIPP1が形成する集合体の脱会合を介した再編成(動態)を制御していることが明らかになりました(右図)。cpHsc70-1が欠損した植物では、VIPP1集合体が過度に安定化し、チラコイド膜の動的な再編成が阻害されるとともに、高温ストレス条件下での光合成機能の回復が著しく低下しました(下図)。

緑色蛍光タンパク質(GFP)によるVIPP1タンパク質の可視化
(タイムラプスイメージ) (クロロフィル蛍光)

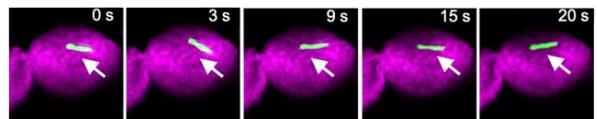
野生型VIPP1 (早い動き)



C末端のないVIPP1 (遅い動き)

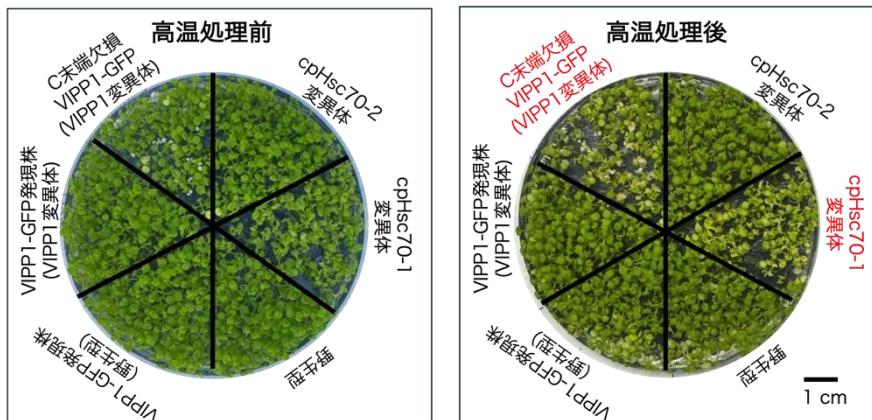


cpHsc70-1変異体における野生型VIPP1 (遅い動き)

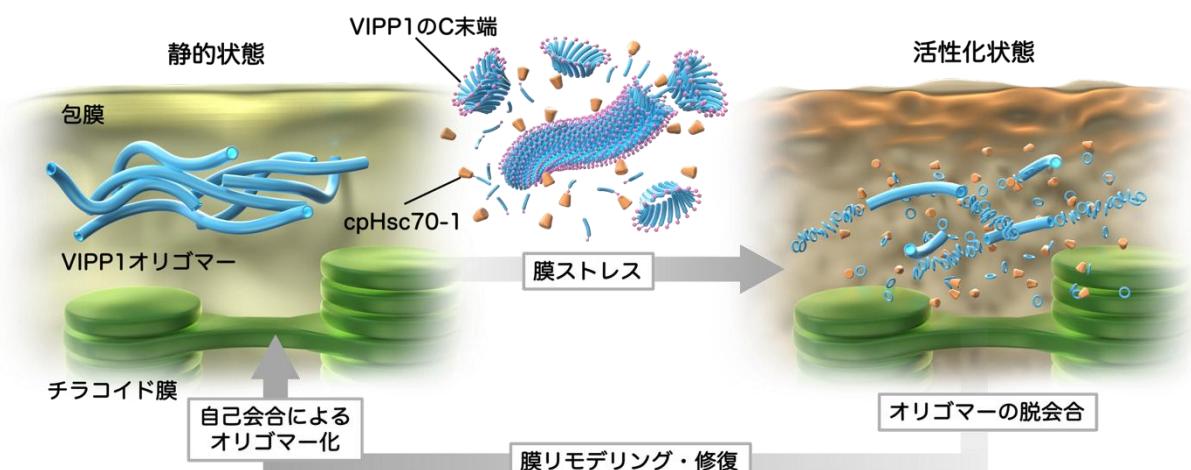


C末端とcpHsc70-1の相互作用を通じて
VIPP1オリゴマーの脱会合による動態が制御されている

C末端を欠くVIPP1あるいはcpHsc70-1の欠損は植物の高温適応性を弱めてしまう



これらの結果は、葉緑体において「タンパク質の品質管理を担うシャペロン機構」と「光合成の足場となる膜構造を維持する膜リモデリング機構」が密接に連携して働く」という、新しい光合成制御の概念を示しています(下図)。





PRESS RELEASE

＜社会的な意義＞

地球温暖化に伴い、作物が高温ストレスにさらされる機会は今後さらに増加すると予想されます。本研究は、植物が高温環境下でも光合成を維持するために、チラコイド膜の形成・修復機構が熱ショックタンパク質によって精密に制御されていることを明らかにしました。

光合成效率は、個々の酵素反応だけでなく、それらが配置される膜構造の健全性に強く依存しています。本研究で示された cpHsc70-1 と VIPP1 の連携機構は、光合成装置全体を支える基盤的な仕組みであり、高温ストレス下での植物生産性を理解する上で重要な知見です。

■論文情報

- ・ **論文名:** Chloroplast heat shock protein cpHsc70-1 interacts with thylakoid membrane remodeling protein VIPP1 C-terminal tail and controls VIPP1 oligomer assembly
- ・ **掲載誌:** *PNAS Nexus* 第5巻1号(2026年1月発行)
- ・ **著者:** Di Li, Sarah Wanjiru Gachie, Shin-ichiro Ozawa, Martin Scholz, Michael Hippler, Wataru Sakamoto
- ・ **DOI:** 10.1093/pnasnexus/pgaf393
- ・ **参考論文** Wataru Sakamoto, Thylakostasis: key factors in thylakoid membrane organization with emphasis on biogenesis and remodeling proteins in vascular plants. *Plant and Cell Physiology*, 66 (11): 1602-1618, DOI: 10.1093/pcp/pcaf098

■研究資金

本研究は、文部科学省科学研究費・学術変革領域研究(A)「光合成ユビキティ」計画研究および基盤研究(C)の支援を受けて実施されました。また、本研究の一部は、岡山大学 RECTOR プログラム(生命科学 RECTOR 国際光合成拠点)に基づき、ドイツ・ミュンスター大学との国際共同研究として実施された成果です。

■補足・用語説明

[1] **チラコイド膜:** 植物の葉緑体の中にある、光合成の反応が起こる“作業台”のような膜です。光を受け取り、エネルギーに変換するタンパク質が多数並んでいます。ミルフィーユ状に重なった「グラナ」と、連絡通路の「ストロマラメラ」から構成されます。高温や強光で傷つきやすく、その修復が植物の生存に重要です。今回の研究対象である VIPP1 は、この膜の形づくりと保護に関わる分子です。

[2] **熱ショックタンパク質:** 高温などのストレスがかかるときに細胞内で増える保護タンパク質です。熱で変形しそうな他のタンパク質を守り、正常な状態へ戻す働きがあります。HSP70 など、いくつかのファミリーに分かれて機能しています。動物・植物・微生物など、あらゆる生物が共通して持つ“ストレス耐性システム”です。今回の研究では、葉緑体にある HSP70 が光合成膜を守る鍵として働きました。

[3] **シャペロン:** タンパク質が正しい形に折りたたまれるよう“介添え”をする分子です。変性したタンパク質を修復、異常な凝集を防ぐ品質管理役もあります。

PRESS RELEASE

HSP70 や HSP90 など多くのシャペロンが細胞内で働いています。

通常時だけでなく、熱ストレスなどの厳しい環境下で特に重要です。

植物では光合成装置の維持にも関わり、チラコイド膜の保護にも貢献します。

[4] ESCRT-III (Endosomal Sorting Complex Required for Transport-III): ESCRT エンドソーム輸送など、細胞質の膜機能に普遍的に存在するタンパク質複合体で、I・II・III など複数のサブコンプレックスから構成されています。ESCRT-III はその中で「膜を絞って切り離す働き」を担う重要なユニットです。ESCRT-III は、細胞の膜を“切る・絞る・変形させる”ための分子装置の一部で、あらゆる生物が持つ基本的な膜リモーデリング機構です。細胞が不要になった膜を回収、仕分けしたタンパク質を小胞に閉じ込める際に働きます。ゴム輪をキュッと締めるように、膜をねじりながら収縮させる動きが特徴です。植物でも葉緑体や細胞膜で機能し、損傷した膜の修復や膜の形づくりに重要です。VIPP1 はこの ESCRT-III ファミリーと共に祖先をもつタンパク質群に属し、類似した膜補修の仕組みを利用しています。

[5] 緑色蛍光タンパク質 (GFP, Green Fluorescent Protein): 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します。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ます。

〈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
OKAYAMA UNIVERSITY

SUSTAINABLE
DEVELOPMENT
GOALS



岡山大学は持続可能な開発目標（SDGs）を支援しています。