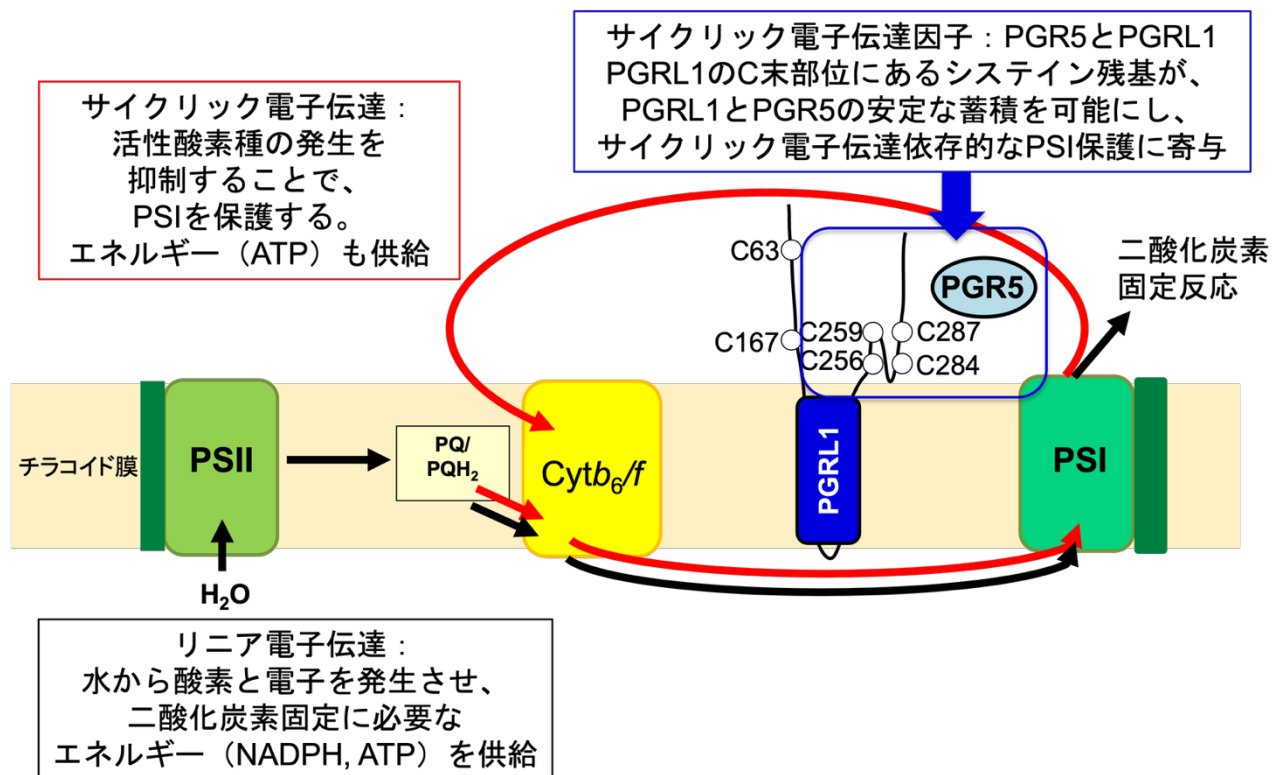


**光合成環境順化に必要なサイクリック電子伝達を司る
タンパク質の安定化に寄与!
PGRL1 タンパク質におけるシステイン残基の重要性**

ポイント

- ・植物が強い光から身を守るしくみ「サイクリック電子伝達」は、光合成装置(光化学系I)の保護に重要です。
- ・本研究では、このしくみに関わるタンパク質 PGRL1 の一部(C末端部位のシステイン残基)が、PGRL1 自身やパートナーである PGR5 を安定に保つために不可欠であることを明らかにしました。
- ・この部位が損なわれると、PGRL1 が存在していても PGR5 が蓄積せず、その結果、光化学系Iの光に対する耐性が低下します。
- ・本成果は、植物が光ストレスから身を守る分子メカニズムの理解を前進させるものです。

**2 概要**

埼玉大学大学院理工学研究科 高橋拓子助教をはじめとする研究グループは、光合成サイクリック電子伝達に関与する PGRL1 タンパク質の C 末端部位システイン残基が、PGRL1 タンパク質の安定化や結合パートナーである PGR5 タンパク質の蓄積に必要であることを、緑藻クラミドモナスを用いた研究により明らかにしました(図 1)。

本成果は、2026年3月24日(アメリカ東部時間)に、米国植物科学会の学術誌「Plant Physiology」に公開されました。

3 研究の背景

光合成は、光のエネルギーを使って水から酸素を生み出し、二酸化炭素から糖（炭水化物）を作るはたらきです。このとき、葉や緑藻の細胞中にある「葉緑体」という器官にある膜構造には、光化学系^{*1}I(PSI)と光化学系 II(PSII)という装置があり、光エネルギーを効率よく利用するために重要な役割を果たしています。一方で、光は強すぎると、活性酸素^{*2}と呼ばれる有害な物質が発生し、これらの装置が傷ついてしまいます。その結果、光合成の働きが低下する「光阻害」が起こります。このようなダメージを防ぐため、植物には光化学系を守るしくみがあります。PSII は、壊れてもすぐに作り直すことで機能を保つのに対し、PSI は電子の流れを調整することでダメージを避けています。この電子の流れの調整に重要なのが「サイクリック電子伝達」と呼ばれるしくみで、PSI から出た電子を再び PSI に戻すことで、光によるダメージを抑えています。このしくみには、PGR5 と PGRL1 というタンパク質が関わっており、PGRL1 は PGR5 を支える土台として働きます。PGRL1 が存在しないと PGR5 も存在できません。しかし、PGRL1 が PGR5 の働きをどのように支えているのかについては、まだよく分かっていませんでした。PGRL1 には、真核光合成生物間で保存される、アミノ酸のシステイン残基が 6 つあり、このシステインが PGR5 の機能並びにサイクリック電子伝達に依存した PSI の保護に関わるのではないかと思い、本研究を着想しました。

4 研究内容

サイクリック電子伝達に依存した PSI 保護機構における PGRL1 のシステイン残基の役割を明らかにするため、緑藻クラミドモナスを用いて解析を行いました。PGRL1 のシステイン残基(C63、C167、C256、C269、C284、C287)をセリン残基に置換した遺伝子を PGRL1 欠損株に導入し、システイン→セリン(CS)置換株を作製しました。

その結果、N 末端側のシステイン残基を置換した C63S/C167S 株では、PGRL1 欠損株で見られる PSI の光感受性が回復しました。一方、C 末端側の C284S/C287S 二重置換株および各一重置換株では、この表現型は回復しませんでした。また、同じく C 末端側の C256S/C269S 二重置換株および各一重置換株では、PGRL1 タンパク質が蓄積する株は得られませんでした。

さらに、C284 および C287 を置換した株では、強光条件下で PGRL1 タンパク質が分解されやすいことが明らかとなり、これらのシステイン残基が PGRL1 の構造維持に重要であることが示唆されました。加えて、これらの置換株では PGRL1 タンパク質は蓄積するものの、PGR5 タンパク質は検出されず、これらのシステイン残基、あるいはそれらが形成する構造が PGR5 の安定化に必要であることが示唆されました。

以上の結果から、PGRL1 の C 末端領域に存在するシステイン残基は、タンパク質構造の安定化および PGR5 との相互作用の維持を通じて、サイクリック電子伝達に依存した PSI の光保護に重要な役割を果たすことが明らかとなりました。

5 今後の展開

PGRL1 の C 末端領域に存在する 4 つのシステイン残基は、CXXC モチーフと呼ばれる、亜鉛や鉄などの金属を配位する際に見られる配列を形成することが知られています。さらに、AlphaFold3 によるタンパク質構造予測からも、これら 4 つのシステイン残基が亜鉛原子を配位する可能性が示唆されています。しかしながら、実際の配位金属の原子種は未同定であり、鉄あるいは鉄硫黄クラスターである可能性も残されています。

今後、この配位金属の原子種を同定することで、配位する金属が PGRL1 の構造維持に寄与するのか、あるいは電子伝達機能にも関与するのかが明らかになると期待されます。これにより、サイクリック電子伝達における PGRL1 および PGR5 の機能の詳細理解が進むと考えられます。そのため、今後は PGRL1 の立体構造の解明を目標として、さらなる解析を進めていきます。

6 論文情報

掲載誌	Plant Physiology
論文名	Importance of cysteine residues in the C-terminal region of PGRL1 for PSI photoprotection in <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>
著者名	Hiroko Takahashi, Yuki Okegawa, Atsuko Isu, Tetsuto Sato, Keisuke Yoshida, Ken-ichi Wakabayashi, Toru Hisabori, and Yoshitaka Nishiyama
DOI	10.1093/plphys/kiag164
URL	https://doi.org/10.1093/plphys/kiag164

7 研究支援

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科研費 (18K06275, 19H04716, 22K06275)、物質・デバイス領域共同研究拠点事業 (20196004, 20231203, 20241201, 20251232)、並びに岡山大学資源植物科学研究所における共同利用・共同研究拠点事業 (R603, R704) による支援を受けて行われました。

8 用語解説

*1 光化学系: 葉緑体にあるチラコイド膜と呼ばれる膜構造に存在する多くのタンパク質やクロロフィル色素などの分子から構成される複合体。この中にある特別なクロロフィル分子は、光エネルギーを得て電子を取り出し、次々と受け渡すことができる。光化学系 I (PSI) 由来の電子は、エネルギー物質 (NADPH) の生成に用いられる。光化学系 II (PSII) では、伝達された電子を補充するために、水を分解して電子を得る。このとき、副産物として酸素が生じる。

*2 活性酸素 (種): 酸素が電子を受け取ったり、光エネルギーによってエネルギーの高い状態になることで生じる、非常に反応性の高い酸素の一種。周囲のタンパク質や脂質、核酸などを酸化し、細胞にダメージを引き起こす。