

光を熱に変える：海の珪藻が光合成を調節するしくみの解明

—新規光捕集タンパク質による過剰な光エネルギーの消去機構—

概要

海洋の植物プランクトンである珪藻は、地球規模の炭素固定に大きく貢献しています。海洋では光環境が絶えず変化するため、珪藻は弱い光を効率よく利用すると同時に、強すぎる光から自身を守る必要があります。この過剰な光エネルギーを熱として逃がす仕組みは非光化学的消光（Non-Photochemical Quenching、略してNPQ）と呼ばれますが、NPQを担う光防御装置がどのように形成されるのかは十分にわかっていませんでした。京都大学大学院農学研究科のXING JIAN（邢健）博士課程学生、同じく伊福健太郎教授、および北海道大学低温科学研究所の熊沢穰研究員（現大阪大学大学院理学研究科の助教）らの研究グループは、海洋性珪藻 *Chaetoceros gracilis* において、光捕集タンパク質 Lhcf2 が NPQ に必須であることを明らかにしました。Lhcf2 を欠損させると、NPQ の中心因子である Lhcx1 タンパク質が安定に蓄積できなくなり、強光下で過剰な光エネルギーを熱として逃がす機能がほぼ失われました。一方、NPQ に必要な pH 勾配形成やキサントフィルサイクルは正常に働いていたことから、Lhcf2 は Lhcx1 を含む光防御装置を安定に形成するための構造的な足場として機能することが示されました。本成果は、珪藻の光防御装置が複数の光捕集タンパク質の協調により形成されることを示すものであり、海洋光合成を支える強光適応機構の解明に大きく貢献することが期待されます。本成果は、2026年6月30日に国際学術誌「*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*」に掲載されました。DOI：10.1073/pnas.2601782123.

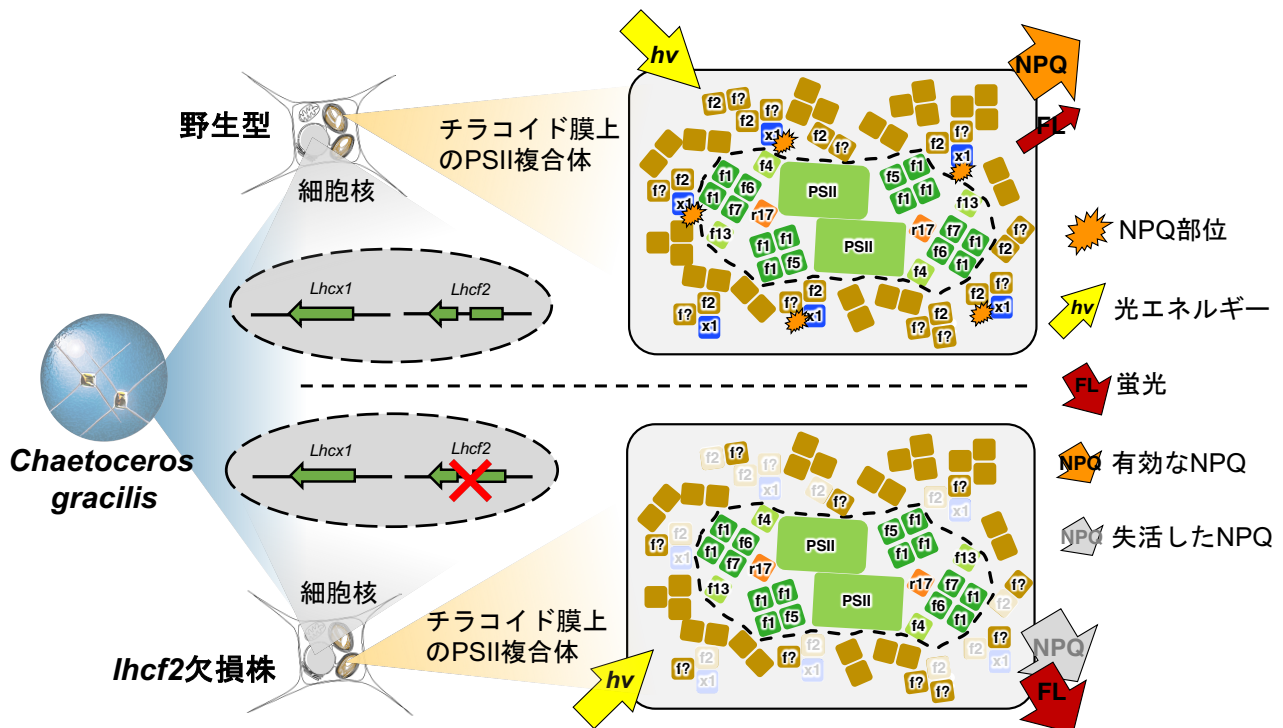


図 1. 研究成果の概要図

海洋性珪藻（*Chaetoceros gracilis*）の野生株（WT）において、Lhcf2 は光合成装置（PSII）周辺で Lhcx1 と過剰な光を熱に変換する NPQ 装置を形成する（上図）。Lhcf2 を欠損する *lhcf2* 変異株では、Lhcx1 は安定に蓄積できず、有効な NPQ 装置が形成されない（下図）。（図は Xing Jian が MS PowerPoint にて作成）

1. 背景

光合成生物は、太陽光エネルギーを利用して二酸化炭素を有機物へと変換し、地球上の生命活動を支えています。海洋では、珪藻を含む植物プランクトンが大きな割合の炭素固定を担っており、海洋生態系や地球規模の物質循環において重要な役割を果たしています。一方で、光は光合成に必須であると同時に、過剰になると細胞にとって危険なストレス要因にもなります。強光条件では、吸収された光エネルギーが二酸化炭素固定などで使い切れず、余剰な励起エネルギーから活性酸素種（ROS）^(注1)が発生し、光合成装置や細胞に損傷を与えます。光合成生物はこれを防ぐため、過剰な光エネルギーを熱として散逸させる非光化学的消光（NPQ）^(注2)を発達させてきました。珪藻では、Lhcx1 と呼ばれる光捕集タンパク質が NPQ に重要であることが知られています。しかし、Lhcx1 がどのように光捕集アンテナ内に配置され、機能的な光防御装置を形成するのかは明らかではありませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究チームは、海洋性珪藻 *Chaetoceros gracilis* を用いて、光捕集タンパク質（LHC タンパク質）の機能解析を進めてきました。その中で、Lhcf2 はこれまでのクライオ電子顕微鏡構造解析では主要な光化学系複合体中に見出されておらず、光合成装置（光化学系 II）の周辺領域に存在すると考えられました。CRISPR/Cas9 法^(注3)を用いたゲノム編集により *Lhcf2* 遺伝子に変異を導入し（図 2 左上）、欠損株（*lhcf2*）を作製したところ、変異株は野生型よりも淡い褐色を示しました（図 2 右上）。そこで葉緑体チラコイド膜タンパク質を CN-PAGE^(注4)で分離し（図 2 左下）、免疫ブロット解析を行いました（図 2 右下）。その結果、野生型では NPQ 因子 Lhcx1 を含む LHC 三量体（LHC trimer）が検出されました。一方、*lhcf2* 株では LHC 三量体と Lhcx1 タンパク質が著しく減少していました。*lhcf2* 株における *Lhcx1* 遺伝子の配列と mRNA 転写量に異常はなかったため、Lhcx1 タンパク質の安定な蓄積に必要であることが示唆されました。

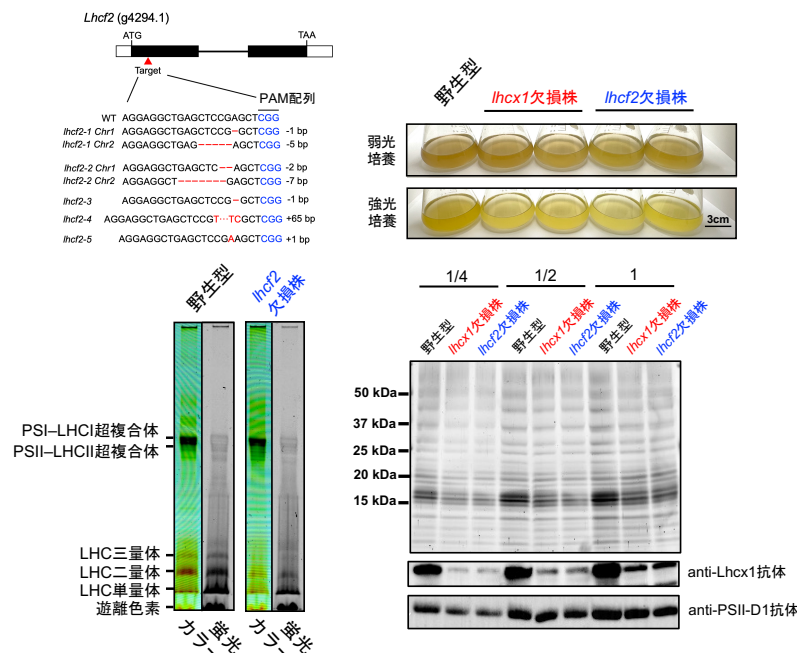


図 2. ゲノム編集による *Lhcf2* 欠損株 (*lhcf2*) の作出と光捕集タンパク質への影響

そこで *lhcf2* 株の NPQ を測定したところ、野生型では強光照射により NPQ がすばやく誘導されたのに対し、*lhcf2* 株では *Lhcx1* 欠損株 (*lhcx1*) と同様に NPQ がほぼ失われました (図 3)。一方、NPQ 誘導に必要なチラコイド膜を介した pH 勾配 (Δ pH) の形成^(注5) や、キサントフィルサイクル^(注6) は正常に働いていました。これらの結果から、*lhcf2* 株で NPQ が失われる原因は、pH 勾配や色素変換の異常ではなく、*Lhcx1* タンパク質が安定に蓄積できないことにありと結論づけました。

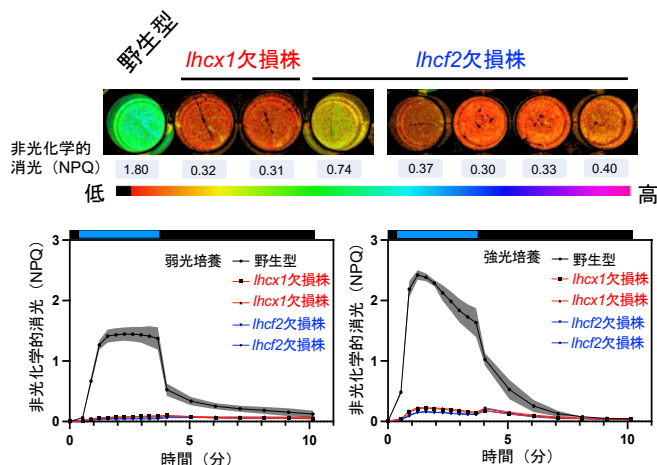


図 3. *Lhcf2* 欠損株における NPQ の変化

二次元電気泳動と免疫ブロット解析を組み合わせた解析の結果、野生株のチラコイド膜において、*Lhcf2* と *Lhcx1* はよく似た分布を示しました (図 4)。一方、*lhcx1* 株では *Lhcf2* の蓄積に影響はなかったことから、*Lhcx1* は *Lhcf2* に依存して安定化されるが、*Lhcf2* は *Lhcx1* がなくても存在できることがわかりました。以上の結果から、*Lhcf2* は *Lhcx1* を含む光防御装置の形成に必須な構造的パートナーであると考えられます。

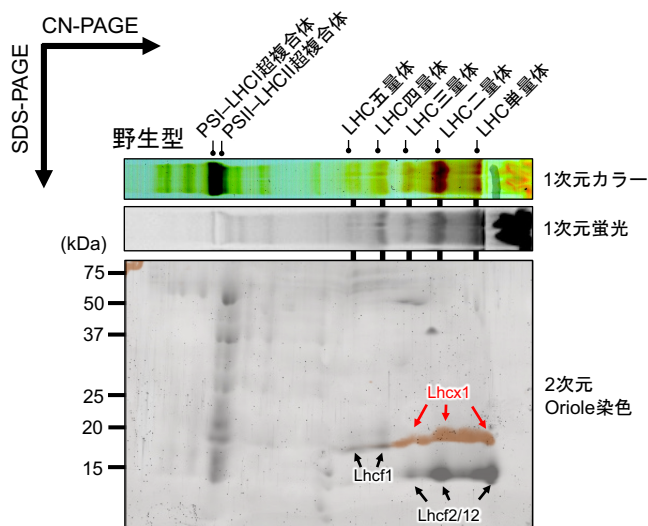


図 4. 二次元電気泳動と免疫ブロット解析による *Lhcf2* と *Lhcx1* の局在比較

3. 波及効果、今後の予定

過剰な光エネルギーから身を守る NPQ は光合成生物の環境適応において必須な役割を持ち、世界中で研究されてきました。これまで珪藻の NPQ 研究では、*Lhcx1* のような *Lhcx* 型タンパク質が注目されてきました。

本研究は、Lhcx 型ではない光捕集タンパク質 Lhcf2 が、Lhcx1 の安定な蓄積と NPQ 装置の形成に必須であること発見しました。これは、珪藻の光防御装置が単一の特殊な因子だけでなく、異なる種類の光捕集タンパク質の協調によって形成されることを示す全く新しい知見です。陸上植物においても類似の機構は見つかっておらず、NPQ 研究にブレークスルーをもたらす可能性があります。また、珪藻は変動する海洋光環境に適応することで高い光合成生産性を維持しています。本成果は、海洋における炭素固定の分子基盤の理解に加え、将来的には高効率な光合成生物の設計や有用物質生産への応用にもつながる可能性があります。今後は、Lhcf2 と Lhcx1 の直接的な相互作用による光エネルギー散逸の仕組みを明らかにするとともに、この仕組みが他の珪藻にも保存されているかを明らかにする予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS KAKENHI (JP25KJ1660, JP23H02347, JP24H02081)、および公益財団法人発酵研究所の助成による支援を受けて実施されました。

<用語解説>

注 1：活性酸素種 (ROS)

酸素 (O_2) から発生する反応性の高い酸素分子で、葉緑体では余剰な電子やエネルギーが酸素に渡ることによって発生する。光合成装置から発生する主な活性酸素として、スーパーオキシドアニオン (O_2^-) や 1 重項酸素 ($^1O_2$) が挙げられる。

注 2：非光化学的消光 (NPQ)

光合成生物が過剰に吸収した光エネルギーを熱として散逸させる仕組み。強光ストレスから光合成装置を守る重要な防御機構である。

注 3：CRISPR/Cas9 法

特定の遺伝子配列を狙って切断し、遺伝子を破壊または改変するゲノム編集技術。本研究では *Lhcf2* 遺伝子の機能解析に用いた。

注 4：CN-PAGE

Clear native polyacrylamide gel electrophoresis の略。タンパク質複合体を比較的天然状態に近い形で分離する電気泳動法。

注 5：チラコイド膜を介した pH 勾配 (ΔpH)

光合成電子伝達に伴ってチラコイド膜の内側と外側の間に形成される pH の差。NPQ を誘導する重要なシグナルである。

注 6：キサントフィルサイクル

強光条件下、チラコイド膜内で特定のカロテノイド色素が相互変換される反応。珪藻ではジアジノキサンチンがジアトキサンチンへと変換され、NPQ に関与する。

<研究者のコメント>

珪藻は海洋の光合成を支える重要な生物ですが、その光防御装置がどのように形成されるのかは十分にわかっていませんでした。その一因として、光防御装置の形成に関わると考えられる周辺アンテナ領域は不安定で、現在のクライオ電子顕微鏡構造解析では捉えにくいことが挙げられます。本研究では、NPQ の中心因子である Lhcx1 だけでなく、別の光捕集タンパク質 Lhcf2 が Lhcx1 の安定な蓄積に不可欠であることを発見しました。全く予想外の結果で、結果を見たときは信じられず、何度も再解析を行って確認しました。この結果は、珪藻

の光防御装置が複数の光捕集タンパク質の協調によって形成されることを示しており、海洋光合成の環境適応戦略を理解するうえで重要な一歩であると考えています。（京都大学博士課程 2 年 XING JIAN（邢 健））

<論文タイトルと著者>

タイトル： Lhcf2 in the peripheral antenna is essential for non-photochemical quenching and Lhcx1 accumulation in the diatom *Chaetoceros gracilis*

（珪藻 *Chaetoceros gracilis* において周辺アンテナタンパク質 Lhcf2 は非光化学的消光と Lhcx1 蓄積に必須である）

著 者： Jian Xing, Minoru Kumazawa, and Kentaro Ifuku

掲 載 誌： *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS)

DOI：10.1073/pnas.2601782123