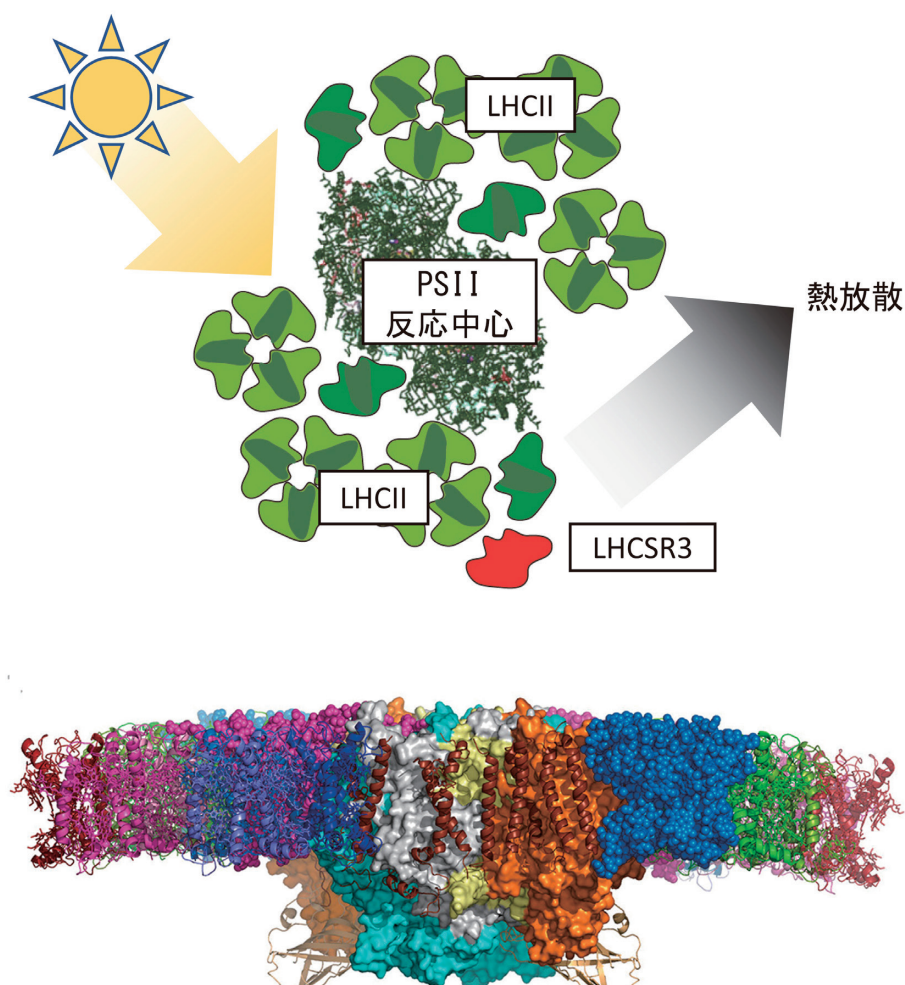


植物が巧みに光を集める仕組みを探る

植物は、環境の変化に自らを順化適応させることで生き残りをはかります。太陽光を集め、利用可能なエネルギーへの変換を行う光合成においても、さまざまなレベルの光環境適応が行われています。本部門では、単細胞緑藻クラミドモナスを中心としたモデル藻類を用いて、生化学、分子遺伝学、分光学、ライブイメージングなどを駆使し、光合成に必要な光が効率よく集められるしくみや、余分に吸収された光エネルギーを安全に消去するしくみの研究を行っています。



Staff

教授
皆川 純

准教授
横野 牧生

助教
Eunchul Kim

特任助教
小杉 真貴子

技術課技術職員
野田 千代

【上】 過剰に吸収された光エネルギーを安全に消去する NPQ 機構：クラミドモナスの光化学系Ⅱ（PSⅡ）に LHCSR3 が結合すると、集光アンテナ（LHCⅡ）に吸収された光エネルギーは PSⅡ 反応中心に移動する前に熱として放散される。このしくみは NPQ（non-photochemical quenching）と呼ばれ、高効率で光を集める光合成装置を強光環境で保護するために役立っている。

【下】 原子レベルで解明された PSⅡ-LHCⅡ 超複合体の構造：光化学系Ⅱは、電荷分離を起こす反応中心を光のアンテナである LHCⅡ が取り囲んだ構造を取っている。その全体構造がクライオ電顕技術により明らかになった（図はチラコイド膜水平方向からのもの）。

光合成装置の環境適応

植物や藻類は置かれた環境に応じて光合成装置を変化させ、常に最適化された光合成を行っている。その最も顕著な変化は、光を集める“アンテナ”である LHC (light-harvesting complex) に現れる。本研究部門では、特に LHC に注目し、その光環境適応メカニズムの分子レベルでの解明をめざしている。単細胞緑藻であるクラミドモナスを中心に、さまざまな微細藻類や植物を用い、その光合成装置の先進的な解析を生化学解析、物理解析、遺伝学解析などを組み合わせて行っている。

特に光合成にとって過剰分の光エネルギーを安全に消去する熱放散機構 NPQ (non-photochemical quenching) と2つの光化学系へのエネルギー分配機構である状態遷移に注目し、その分子機構の解明を進めている。

私たちは、(1) NPQ は、光化学系 II 超複合体に結合した LHCSR タンパク質が重要であること、(2) LHCSR タンパク質の発現が青色光受容体や紫外線受容体に起因する細胞内シグナル伝達によって起きること、(3) ステート遷移においてリン酸化された LHCII 三量体が光化学系 I に結合する詳細などを明らかにしてきた。

最近クライオ電子顕微鏡を利用した光化学系II超複合体の構造解析を足がかりとして、原子レベルで、あるいは膜レベルで光合成装置の環境構造変化を追究している。

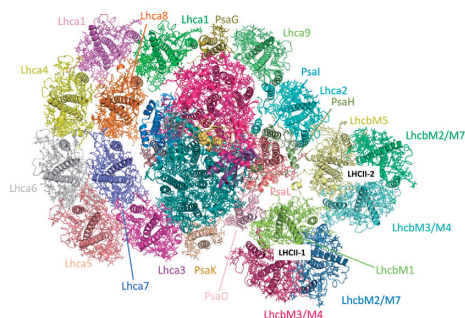


図 1. 光化学系 I 超複合体のステート 2 状態の立体構造
緑藻クラミドモナスを光化学系 II がより励起される状態（ステート 2）にして PSI 超複合体を精製し、クライオ電子顕微鏡画像取得およびコンピュータによる単粒子解析により立体構造を解明した（解像度 2.84Å）。超複合体は光化学系 I の片側（図の左側）に光化学系 I 固有の集光装置である Lhca の 4 量体が二層結合し、反対側に Lhca の 2 量体（Lhca2/9）と光化学系 II の集光装置である 3 量体 LHClI（LHClI-1/LHClI-2）が結合しており多くの微細構造が明らかとなった。特に、ステート 2 では、LhcbM1 と LhcbLM5 の N 末端 Thr 残基がリン酸化されることで 3 量体 LHClI が PSI に結合する構造であることが確定した。

参考文献:

1. Kubota, M., Kim, E., Ishii, A., and Minagawa, J. (2024). The blue-green light-dependent state transition in the marine phytoplankton *Ostreococcus tauri*. *New Phytol.* 244, 1837-1846.
2. Kosugi, M., Ohtani, S., Hara, K., Toyoda, A., Nishide, H., Ozawa, S.-I., Takahashi, Y., Kashino, Y., Kudoh, S., Koike, H., and Minagawa, J. (2024). Characterization of the far-red light absorbing light-harvesting chlorophyll a/b binding complex, a derivative of the distinctive Lhca gene family in green algae. *Front. Plant Sci.* 15, 1409116.
3. Ishii, A., Shan, J., Sheng, S., Kim, E., Watanabe, A., Yokono, M., Noda, C., Song, C., Murata, K., Liu, Z., and Minagawa, J. (2023). The photosystem I supercomplex from a primordial green alga *Ostreococcus tauri* harbors three light-harvesting complex trimers. *eLife* 12, e84488.
4. Pan, X., Tokutsu, R., Li, A., Takizawa, K., Song, C., Murata, K., Yamasaki, T., Liu, Z., Minagawa, J., Li, M. (2022). Structural basis of LhcbM5-mediated state transitions in green algae. *Nat Plants* 7, 1119-1131.
5. Kim, E., Watanabe, A., Duffy, C. D. P., Ruban, A. V., Minagawa, J. (2020). Multimeric and monomeric photosystem II supercomplexes represent structural adaptations to low- and high-light conditions. *J Biol Chem* 295, 14537-14545.
6. Sheng, X., Watanabe, A., Li, A., Kim, E., Song, C., Murata, K., Song, D., Minagawa, J., and Liu, Z. (2019). Structural insight into light harvesting for photosystem II in green algae. *Nat Plants* 5, 1320-1330.
7. Tokutsu, R., Fujimura-Kamada, K., Matsuo, T., Yamasaki, T., and Minagawa, J. (2019). The CONSTANS flowering complex controls the protective response of photosynthesis in the green alga *Chlamydomonas*. *Nat Commun* 10, 4099.
8. Aihara, Y., Fujimura-Kamada, K., Yamasaki, T., and Minagawa, J. (2019). Algal photoprotection is regulated by the E3 ligase CUL4-DDB1^{DET1}. *Nat Plants* 5, 34-40.
9. Kosuge, K., Tokutsu, R., Kim, E., Akimoto, S., Yokono, M., Ueno, Y., and Minagawa, J. (2018). LHCSR1-dependent fluorescence quenching is mediated by excitation energy transfer from LHClI to photosystem I in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Proc Natl Acad Sci USA* 115, 3722-3727.
10. Petroustos, D., Tokutsu, R., Maruyama, S., Flori, S., Greiner, A., Magneschi, L., Cusant, L., Kottke, T., Mittag, M., Hegemann, P., Finazzi, G., Minagawa, J. (2016). A blue light photoreceptor mediates the feedback regulation of photosynthesis. *Nature* 537, 563-566.
11. Tokutsu, R. and Minagawa, J. (2013). Energy-dissipative supercomplex of photosystem II associated with LHCSR3 in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Proc Natl Acad Sci USA* 110, 10016-10021.
12. Iwai, M., Takizawa, K., Tokutsu, R., Okamuro, A., Takahashi, Y., Minagawa, J. (2010). Isolation of the elusive supercomplex driving cyclic electron transfer in photosynthesis. *Nature* 464, 1210-1213.

教授
皆川 純

准教授
横野 牧生

助教
Eunchul Kim

特任助教
小杉 真貴子

