

冬季の常緑針葉樹の光合成調節に関わるタンパク質を発見

～針葉樹の生態系の理解や林業への応用の可能性～

ポイント

- ・冬季の常緑針葉樹が光化学系の集光タンパク質で光エネルギーを熱として放散していることを発見。
- ・ELIP とよばれるタンパク質が冬季の葉緑体に大量に蓄積していることを発見。
- ・ELIP を介したエネルギー変換が活性酸素の生成を抑制し、葉の緑色を維持するという仮説を提唱。

概要

北海道大学低温科学研究所のヨウ・シゴウ氏、高林厚史助教、田中亮一教授、神戸大学大学院理学研究科の秋本誠志教授、基礎生物学研究所環境光生物学研究部門の横野牧生准教授、森林総合研究所の北尾光俊主任研究員らの研究グループは、冬季の常緑針葉樹では ELIP とよばれる葉緑体タンパク質が大量に蓄積し、光エネルギーを熱として放散する過程に関わることを明らかにしました。

冬季の寒冷圏の常緑樹は吸収した光のエネルギーの大半を熱として放散しており、実質的に光合成を行っていないことは知られていましたが、その仕組みは明らかではありませんでした。研究グループは常緑針葉樹の一種であるイチイを研究材料とし、ピコ秒単位（注：ピコ秒は1秒の1兆分の1の時間）での蛍光の測定、一年を通しての遺伝子の発現、光合成タンパク質及び光合成色素の量の測定、タンパク質の構造予測などの解析を複合的に組み合わせることによって、ELIP がこの仕組みにおいて重要であることを示しました。これらの結果をもとに、冬季の寒冷圏の常緑樹は、集光タンパク質が吸収した ELIP を介して光エネルギーを熱に変換し、放散することで、活性酸素の生成を抑制し、葉緑体のタンパク質を保護することで葉の緑色を維持する、という新たな仮説を提唱しました。この仮説は 2006 年にアメリカで提唱された仮説をさらに発展させたものです。

なお、本研究成果は、2024 年 11 月 22 日（金）公開の Journal of Experimental Botany 誌に掲載されました。



冬季の寒冷圏の常緑樹は、吸収した光エネルギーを光合成反応には使わずに熱として逃がしている

【背景】

北海道などの寒冷圏では常緑針葉樹林がよく見られ、0度を下回るような気温でも葉の緑色を維持しています。しかし、これまでに知られている植物の光合成の仕組みにおいては、低温下での葉の緑色の維持は非常に難しいと考えられてきました。低温下での光合成は細胞傷害を引き起こす活性酸素の発生を伴うと考えられているからです。一方、寒冷圏の常緑針葉樹は、低温下において光化学系の集光タンパク質の葉緑素（クロロフィル）が吸収した光エネルギーを熱に変換して放散し、冬季の光合成の活性を抑制することで、活性酸素の発生を防ぐ仕組みを持つのではないかと考えられてきましたが、その仕組みはこれまで不明でした。

この仕組みについては、先行研究によって、数多くの仮説が提唱されてきました。中でも有力なのは、光合成を担うタンパク質複合体の一つである光化学系2において、中心部分に位置するタンパク質が分解されることによって、光合成の活性が抑えられるという「光障害仮説」です。さらに、光化学系2から光化学系1へと直接エネルギーを移動させ、光化学系1でそのエネルギーを熱に変えてしまうという「スピルオーバー仮説」なども提唱されていました。さらに、2006年に Zarter らは ELIP とよばれる葉緑体タンパク質が関与するという仮説を提唱しましたが (C. Ryan Zarter et al., *New Phytologist* 172: 272-282 (2006))、定量的・複合的な証拠がなかったために、2006年以降は言及されることは稀でした。

【研究手法】

研究グループは、常緑樹の一種であるイチイを材料に、数年間にわたって、光合成活性の測定、遺伝子発現解析、タンパク質及び光合成色素の変動解析などの定量的な解析を多角的に行いました。また、時間相関単一光子計数法という手法を用いて、ピコ秒（注：ピコ秒は1秒の1兆分の1の時間単位）という非常に短い時間でクロロフィルから出る蛍光を分析し、光化学系内部でのエネルギーの移動を解析しました。さらに、上述の ELIP の構造予測を行った結果、このタンパク質が光化学系のタンパク質と類似した構造を持ち、光合成色素を結合すると考えられました。

【研究成果】

時間相関単一光子計数法の結果から、冬季のイチイにおいては、スピルオーバー仮説にあてはまるような現象（光化学系2から光化学系1へのエネルギーの移動）は観察されませんでした。そのため、イチイにおいては、スピルオーバー仮説はあてはまらないと考えられます。また、タンパク質の定量的な解析結果において、光化学系2の中心部分に位置するタンパク質の減少も観察されませんでした。そのため、従来、主要な仮説であった光障害仮説もあてはまらないと考えられます。

一方、年間を通して、RNA の発現解析を行ったところ、冬のイチイの葉の mRNA の 20% を ELIP の mRNA が占めていることが明らかになりました。さらに、冬には ELIP タンパク質の量が急激に増加し、葉緑体に大量に蓄積していることも明らかになりました。また、ELIP の構造予測の結果は、このタンパク質が光化学系のタンパク質と類似した構造を持ち、光合成色素を結合していることを示しました。これらの結果を総合すると、冬のイチイでは ELIP の蓄積量が急増し、それに伴って光化学系2の集光タンパク質からの熱放散が高まることが示唆されました（図1）。

これらの結果は、2006年に Zarter らが発表した仮説を、定量的なデータによって裏付けるだけでなく、彼らの仮説をさらに発展させる内容となっています。本研究では、冬季のイチイの光合成に関する新たな仮説を提唱しています。その仮説は、光化学系2の集光タンパク質が集めた光エネルギーは、蓄積した ELIP によって熱として放散され、それにより光合成に伴う活性酸素の生成が抑制され葉緑体のタンパク質が保護されることで、葉の緑色が維持されるというものです。

【今後への期待】

常緑針葉樹が冬季に葉緑素によって吸収した光エネルギーを熱として逃がし、緑色を保つ能力は、常緑樹が春先に効率よく光合成をするために非常に重要です。また、冬季に樹木の芽生えが生き延びるためにも重要と考えられ、このような性質を持つ樹種ほど、寒い地域によく適応すると考えられます。このような仕組みが明らかになることで、常緑樹の樹種による熱放散能力の違いに関する理解が進み、常緑樹の寒冷地適応能力を光合成の観点から理解することが可能になります。このような知見を生態学や林業に取り入れることで、森林の保全や種の保存に役立つと期待されます。

【謝辞】

本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業・学術変革領域(A)「光合成ユビキティ」(JP23H04960 及び JP23H02262)、基盤研究(B)(JP20H03017)及び寿原記念財団の支援によって実施しました。また、タンパク質配列解析は北海道大学オープンファシリティセンターにご支援いただきました。

論文情報

論文名	Revisiting the early light-induced protein hypothesis in the sustained thermal dissipation mechanism in yew leaves. (イチイの葉における持続的熱放散メカニズムの early light-induced protein 仮説を再考する)
著者名	ヨウ・シゴウ ¹ 、澤田未菜 ¹ 、岩佐万希子 ¹ 、森山 亮 ¹ 、デイ・デバヤン ¹ 、古谷実佑 ² 、北尾光俊 ³ 、原登志彦 ¹ 、田中 歩 ¹ 、岸本純子 ¹ 、横野牧生 ^{4,5} 、秋本誠志 ² 、高林厚史 ¹ 、田中亮一 ¹ (¹ 北海道大学低温科学研究所、 ² 神戸大学大学院理学研究科、 ³ 森林総合研究所、 ⁴ 基礎生物学研究所、 ⁵ 総合研究大学院大学)
雑誌名	Journal of Experimental Botany (植物学の専門誌)
DOI	10.1093/jxb/erae412
公表日	2024年11月22日(金)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院低温科学研究所 教授 田中亮一 (たなかりょういち)

T E L 011-706-5493 F A X 011-706-5493 メール rtanaka@lowtem.hokudai.ac.jp

U R L <https://www.plantadapt.jp>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

神戸大学総務部広報課 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

T E L 078-803-6678 F A X 078-803-5088 メール ppr-kouhoushitsu@office.kobe-u.ac.jp

【参考図】

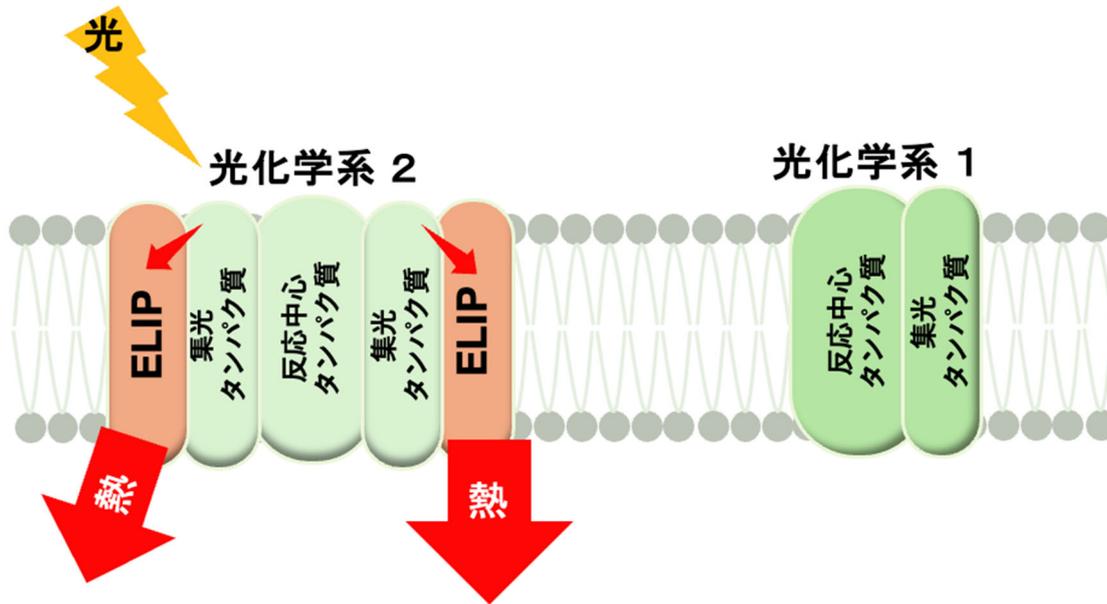


図 1. 葉緑体内の光化学系 2 では、ELIP タンパク質を介して、吸収したエネルギーを熱に変換していると考えられる。