



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	An integrated study on the molecular mechanisms for sustained photosynthetic thermal dissipation in overwintering yew leaves [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	叶, 子豪
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第16224号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95342
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	YE_Zihao_review.pdf, 審査の要旨



学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士 (環境科学)

氏 名 叶 子豪

審査委員 主査 教授 田中 亮一
副査 教授 山口 良文
副査 助教 伊藤 寿

学 位 論 文 題 名

An integrated study on the molecular mechanisms for sustained photosynthetic thermal dissipation in overwintering yew leaves

(越冬中のイチイの葉における光合成の熱放散の分子メカニズムに関する統合的研究)

光合成は光の吸収、アンテナ内部での励起エネルギー伝達、電子伝達、NADPHの生成など多数の反応からなる複雑な代謝反応である。寒冷圏の植物において、気温が低い時期に、光の吸収とNADPHの生成・消費のバランスが崩れ、酸素分子が電子を受け取ることによって、細胞内で活性酸素が発生し、細胞が障害を受ける危険性が高まることが知られている。そこで、寒冷圏の常緑樹は、冬季には、吸収した光エネルギーの大半を熱として放散することで、電子伝達を抑制し、活性酸素の過剰な発生を防いでいる。このような現象は光合成における持続的熱放散として知られているが、その分子メカニズムは明らかになっていない。先行研究においては、光化学系IIの反応中心複合体のサブユニットD1を分解する光阻害や光化学系IIから直接的に光化学系Iを通して熱放散するスピルオーバーなどのメカニズムが提唱されており、また、ゼアキサンチンなどのカロテノイドやチラコイド膜タンパク質である **Early light induced protein (ELIP)** などの関与も示唆されてきた。しかし、常緑植物の研究にはいくつかの技術的な限界があり、これまでは、遺伝子発現と持続的熱放散の関連を調べた研究はなく、また、スピルオーバーの研究も春先のトウヒを用いた研究が一例あるだけあり、さらに光阻害に関してもサンプリングの回数が少なく、定量性の検証もされていないという問題があった。

この学位論文では、北大キャンパス内のニホンイチイを材料とし、光合成に関する各種の測定や光合成色素の測定、光合成タンパク質の量の比較、RNA-Seq、時間分解クロロフィル蛍光測定などの多角的な解析を組み合わせ、持続的熱放散の分子メカニズムの解明に迫った研究内容を報告している。

申請者はまず持続的な熱放散誘導のタイミングをより正確に把握するために、光条件下での実際の光合成効率を表す $Y(II)$ と最大光合成効率を表す F_v/F_m をフィールドで測定した。これらのパラメーターの数値は秋の間に徐々に減少し、冬季間は低いままであった。これは熱散逸メカニズムの活性化を示している。月次または季節ごとに $Y(II)$ を測定した以前の研究とは対照的に、この研究では週次測定が前例のない時間分解能を提供し、 $Y(II)$ の動的な変化を捉え、温度との明確な線形関係を明らかにした。

同様に複数年に渡る光合成色素の測定によって、クロロフィルaとbは年間を通じて比較的

安定した蓄積パターンを示すこと、ゼアキサンチンやルテインなどのカロテノイドは冬に大幅に蓄積し、Y(II)の減少と強い線形相関を示すことなどが明らかにされた。また、D1タンパク質などの主要な光化学系IIサブユニットや周辺アンテナサブユニット (LHCII) は、年間を通して比較的安定していた。他の常緑樹種で冬に光化学系II量が大幅に減少することを報告した以前の研究とは異なり、イチイではそのような減少は観察されず、光化学系IIタンパク質の減少の影響を受けずに持続的な熱散逸を研究するための理想的なモデルとなっていることが示された。

RNA-Seq解析では、第一に、日陰と日向の葉の間で光強度に大きな違いがあるにもかかわらず、それらのトランスクリプトーム発現パターンは驚くほど類似していることが示された。第二に、チラコイド膜タンパク質の一種ELIPのmRNAは冬季に顕著な誘導発現パターンを示し、この次期の総トランスクリプトームの20%を占めた。また、ELIPタンパク質レベルは主要なLHCIIとほぼ同等であった。先行研究とは異なり、ほぼ1ヶ月毎に冬季の時系列でトランスクリプトームと光合成タンパク質の蓄積を解析した本研究はELIPタンパク質とmRNA発現の季節的動態と持続的な熱放散との相関を明らかにした。さらにチラコイド膜の光化学系複合体をショ糖密度勾配遠心によって分画し、2種のカロテノイドがELIP分画に主に局在していることを示した。

また、この研究では時間分解クロロフィル蛍光測定により、30ピコ秒程度で光化学系IIの周辺アンテナにおいて冬季に特有な強い熱放散が起きていることが示された。これらの発見に基づいて、ELIPがクロロフィルとゼアキサンチンを結合し、冬の間光化学系IIの周辺アンテナにおいて、熱放散を促進するという仮説が提案された。この研究は、持続的熱放散メカニズムの理解を進め、冬季の常緑樹の光ストレスからの保護に関する新たな知見と仮説を提供しており、北方圏の常緑樹の生態系の理解への基盤的な知識を深めると期待される。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。