

植物の低温耐性を支える新たなメカニズムを発見

—葉緑体の活性酸素ダメージの軽減機構—

概要

気候変動が進む中、作物の温度耐性を支えるメカニズムの解明が求められています。低温ストレスは、キュウリなどの夏作物の光合成を阻害して生育を低下させますが、その詳細なメカニズムは不明でした。京都大学大学院農学研究科 伊福健太郎 教授、竹内航 同博士後期課程学生、播本慎太郎 同修士課程学生、神戸大学大学院農学研究科 三宅親弘 教授らの研究グループは、葉緑体にある「NDH 複合体」の分解がキュウリの低温ストレス障害のトリガーであることを明らかにしました。低温に弱いキュウリ品種では、低温ストレス時に NDH が分解され、光合成の阻害と葉の白化が起きました。一方、低温に強いキュウリ品種では NDH は低温でも安定で、葉緑体は活性酸素から安全に守られました。これまで環境ストレス時の NDH の機能は明らかになっていませんでしたが、低温ストレス時に活性酸素を抑制し、葉緑体を健康に保つという重要な生理学的役割がはじめて明らかとなりました。

本成果は、2025 年 9 月 18 日に国際学術誌「New Phytologist」に掲載されました。

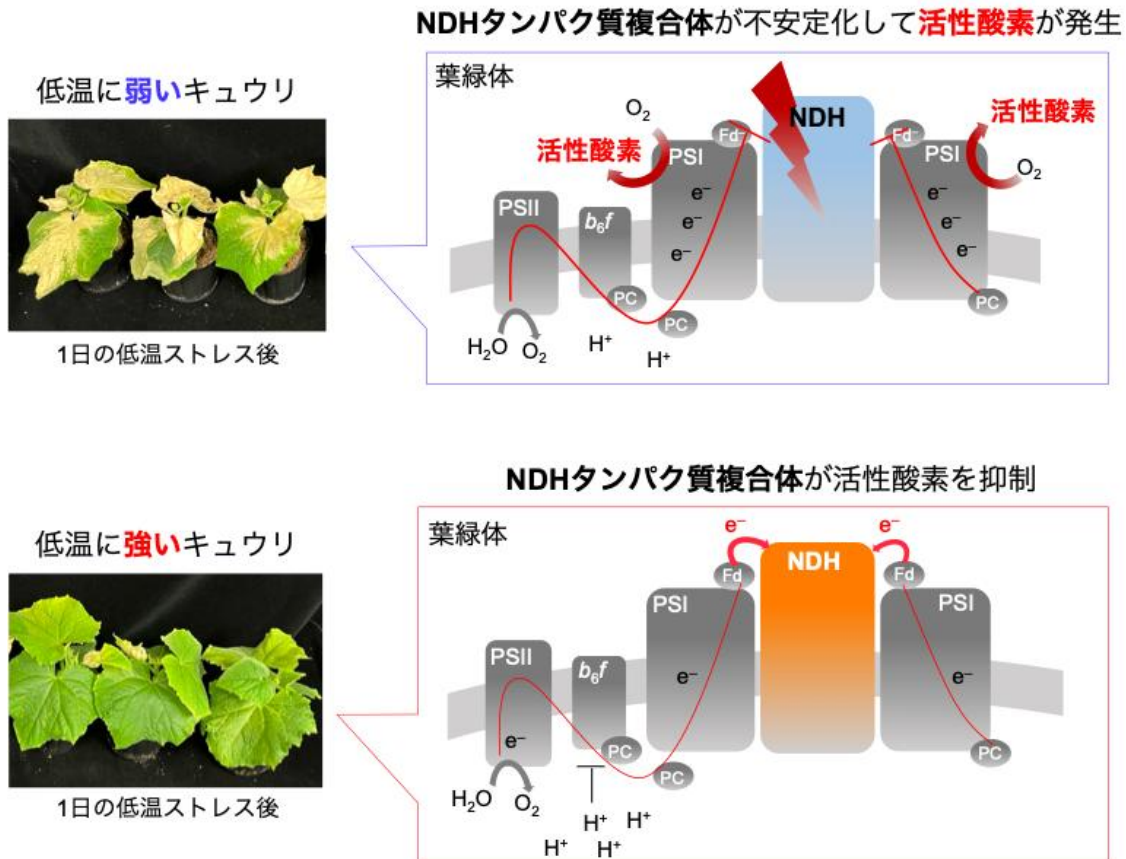


図 1 研究成果の概要図

低温に弱いキュウリ品種は、低温ストレス時に葉緑体 NDH タンパク質複合体が分解・不安定化して活性酸素が発生する（上）。低温に強いキュウリ品種では、NDH は正常に機能する（下）。

1. 背景

地球温暖化により、夏野菜は秋や春に栽培されることが増え、低温ストレスにさらされる機会が増えています。また、冬季のハウス栽培では低温障害を防ぐために多くのエネルギーが費やされています。そのため、植物の低温ストレス障害の軽減や、低温耐性機構の解明が重要です。植物は葉緑体で光エネルギーを使って CO₂ を固定します。しかし低温では、CO₂ 固定反応が滞ることで、光エネルギーが余剰な状態となります。この余剰な光エネルギーから活性酸素種 (ROS) (注 1) が発生し、光阻害 (注 2) と生育不良が生じます。特にキュウリなど一部の夏作物では、低温ストレス時に光化学系 I (以下 PSI) が光阻害を受け、生育阻害が起こります。しかしながら、低温での PSI 光阻害の発生機序やその抑制機構には未解明な部分が多く残されていました。

2. 研究手法・成果

本研究チームは 2022 年に、低温に強い、すなわち低温での PSI 光阻害に強いキュウリ品種と、弱いキュウリ品種が存在することを発見しました。今回、この 2 品種の比較解析を行うことで、低温ストレス障害の原因解明を目指しました。4 °C で光を照射しながら低温ストレスを与えたところ、低温に弱い品種では、PSI の反応中心クロロフィル P700 (注 3) と鉄硫黄クラスター (注 4) が過剰に還元的となり、ROS による PSI 光阻害が生じました (図 2)。一方、低温に強い品種では、PSI は酸化的に保たれており、PSI の活性低下はわずかでした。

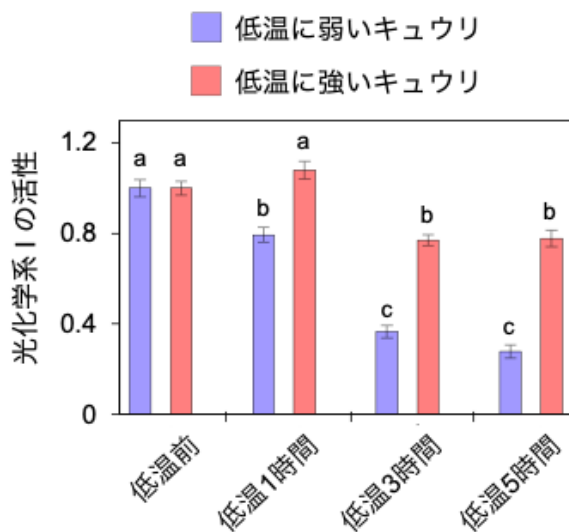


図 2 低温ストレスによる葉緑体ダメージの進行
低温に弱いキュウリ品種と強いキュウリ品種で低温時の PSI 光阻害の進行を比較した。横軸にそれぞれの品種の低温処理時間を示し、縦軸に光酸化可能な PSI 反応中心クロロフィル P700 の総量を示す。

この低温 PSI 光阻害の品種間差の要因を調べたところ、低温に強いキュウリ品種では、PSI の下流から電子を受け取るタンパク質である葉緑体 NADH dehydrogenase-like complex (NDH) (注 5) の活性が高いことがわかりました (図 3 左)。この品種では、NDH が低温ストレス時の余剰な電子を受け取り、PSI を ROS ダメージから守っていることが明らかとなりました。対照的に、低温に弱いキュウリ品種では NDH が低温で一部分解・不安定化しており、NDH の正常な機能が失われていました (図 3 左)。また、シロイヌナズナの NDH 欠損変異体を用いて、NDH による PSI 光阻害の抑制能力を検証したところ、NDH 欠損変異体は、低 CO₂ 条件において PSI が非常に還元的となり、PSI 光阻害が生じました (図 3 右)。これらのことから、NDH が環境ストレス時に余剰な電子を適切に受け取ることで、葉緑体を ROS 障害から守っていることが明らかとなりました。

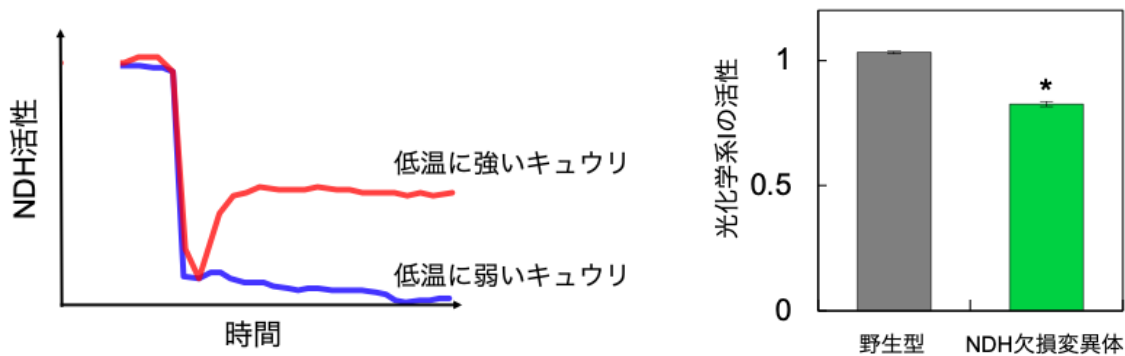


図3 (左) 低温ストレス後のキュウリのNDH活性。低温に強いキュウリ(赤線)では、低温に弱いキュウリ(青線)よりもNDH活性が高いことを示す。(右)NDH欠損変異体のPSI光阻害耐性。シロイヌナズナの野生型とNDH欠損変異体を低CO₂環境で光照射した後、光酸化可能なPSI反応中心クロロフィルP700の総量を測定した。

3. 波及効果、今後の予定

葉緑体NDHは、光化学系Iの循環的電子伝達(注6)に関わると考えられていますが、NDHが機能するタイミングや生理学的役割には未解明な部分が多く残されていました。本研究によって、NDHは低温ストレス時の光阻害の抑制に貢献する、という新たな役割が明らかとなり、植物の低温耐性メカニズムの新たな1ピースとして注目されることが期待されます。現在、キュウリやイネなど多様な作物におけるNDHの重要性を検証し、環境ストレスに強い農作物の選抜、育種指標として確立することを目指しています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JST CREST(JPMJCR1503, JPMJCR1702), JSPS(JP23KJ1357)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(O₂)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が酸素に渡ることによって発生する。光化学系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(O₂⁻)や1重項酸素(¹O₂)が挙げられる。

注2: 光阻害

光による光合成の機能低下を指す。特に光化学系Iの光阻害をPSI光阻害と呼ぶ。PSI光阻害は主に活性酸素種により引き起こされる。

注3: 反応中心クロロフィルP700

クロロフィルに吸収された光エネルギーは、最終的に光化学系の反応中心に存在する特殊なクロロフィルに伝達され電子伝達反応を駆動する。光化学系Iの反応中心に存在するクロロフィルaを特にP700と呼ぶ。

注4: PSIの鉄硫黄クラスター

光化学系Iの下流に位置する電子伝達に関わる4Fe-4Sを含む一連のタンパク質の総称。主にF_X、F_A、F_Bの3種類の鉄硫黄クラスターが存在する。F_Bの電子は、最終的に2Fe-2Sのフェレドキシンに伝達される。

注5: 葉緑体NADH dehydrogenase-like complex (NDH)

ミトコンドリアの呼吸鎖のNADH dehydrogenaseのサブユニットと相同性のある葉緑体タンパク質として名付けられた。被子植物の葉緑体では、PSIの近傍でフェレドキシンから電子を受け取る能力を持つと考えられて

いる。

注 6: 光化学系 I の循環的電子伝達

PSI の最終電子受容体の電子が NADP⁺の還元に使われず、光化学系電子伝達鎖内に再び戻る経路を指す。

<研究者のコメント>

低温ストレスによる葉緑体光化学系 I の障害は、約 30 年前に発見されて以降、日本が世界をリードしてきた研究分野の 1 つです。今回の研究では、これまでに蓄積された低温障害のメカニズムを裏付ける多くのエビデンスに加えて、NDH が低温障害を抑制するという重要かつ新規の役割を提案できたことを大変嬉しく思います。植物は多彩で高度な環境ストレス耐性メカニズムを備えており、今後もその神秘的な防御システムを解明することで、持続的な食料生産への貢献を目指したいと考えています。(京都大学博士課程 3 年 竹内 航)

<論文タイトルと著者>

タイトル： The protective role of chloroplast NADH dehydrogenase-like complex (NDH) against PSI photoinhibition under chilling stress

(葉緑体 NDH 複合体は低温ストレス時の PSI 光阻害の抑制に重要である)

著 者： Ko Takeuchi, Shintaro Harimoto, Yufen Che, Minoru Kumazawa, Hayato Satoh, Shu Maekawa, Chikahiro Miyake, and Kentaro Ifuku

掲 載 誌： New Phytologist

DOI：10.1111/nph.70573