

PRESS RELEASE

令和 7 年 10 月 20 日

植物の葉緑体で“逆変換”酵素を発見 ～ 光合成やストレス応答の理解・応用に新たな道 ～

1 ポイント

- ・植物の葉緑体内で NAD(P)(H)量の調節に関与する“逆変換”酵素(CCR4C)を初めて同定
- ・CCR4C は NADP(H)を脱リン酸化して NAD(H)に変換する NADP ホスファターゼとして機能
- ・光合成やストレス応答に関わる NAD(P)(H)代謝の新しい調節機構を解明

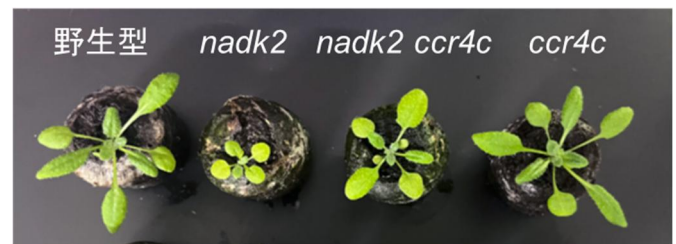
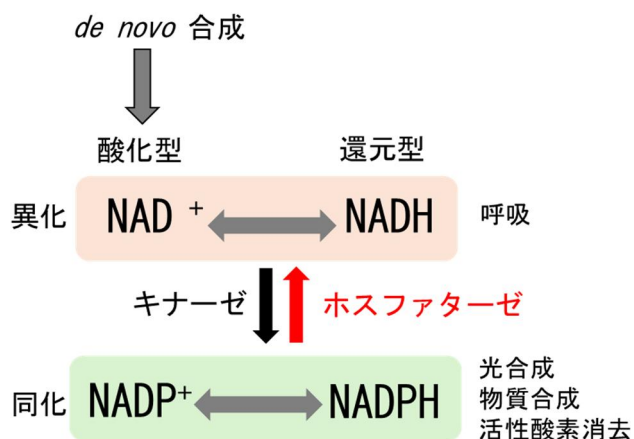


図1: 電子伝達物質であるNAD(P)(H)はすべての生物が持つ基本的な物質です。植物の光合成では NAD キナーゼが NADP⁺を葉緑体で供給していることが知られていましたが、夜間等に NADP⁺を脱リン酸化して量を減らす“逆変換”のメカニズムは不明でした。本研究では葉緑体に存在する CCR4C がホスファターゼ(脱リン酸化酵素)であることを世界に先駆けて明らかにしました。

図2: シロイヌナズナの *nadk2* 変異体は光合成がうまく行えず成育が遅延します。しかし、さらに CCR4C が機能なくなると (*nadk2 ccr4c*)、生育は回復しました。これは、CCR4C のもつ NADP の脱リン酸化活性が無くなったことで、光合成に必要な NADP⁺量が確保できるようになったためだと考えられます。

2 概要

NAD(P)(H)は、光合成や酸化ストレス応答など、植物の生命活動に欠かせない「電子のやり取り」に関わる重要な補酵素です。これまで NAD(H)をリン酸化して NADP(H)を作る酵素 (NAD キナーゼ) は知られていましたが、NADP(H)を脱リン酸化して NAD(H)に戻す酵素については、その正体が長年不明でした。

埼玉大学を中心とする研究チームは、モデル植物シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) において、CCR4C というタンパク質が葉緑体内で NADP(H)を脱リン酸化する酵素 (NADP ホスファターゼ) であることを明らかにしました。この発見は、植物が光合成やストレス応答をどのように調節しているのかを理解するうえで、大きな前進となる成果です。

本研究は埼玉大学大学院理工学研究科の川合真紀教授の研究グループと宇都宮大学バイオサイ

PRESS RELEASE

エンス教育研究センターの児玉豊教授、電力中央研究所サステナブルシステム研究本部の橋田慎之介上席研究員、山形大学学術研究院(農学部主担当)の宮城敦子准教授らとの共同研究で実施され、2025年10月15日(米国東部時間)に米国科学アカデミー紀要(PNAS)にオンラインで掲載されました。

3 研究の背景

植物は、光合成によって光エネルギーを利用し大気中の二酸化炭素を有機物に変換することで成長します。この過程で重要な役割を果たすのが、NAD(P)(H) と呼ばれる補酵素です。NAD⁺と NADH は主に呼吸に関与し、NADP⁺と NADPH は光合成や脂質合成、さらには活性酸素からの生体防御に用いられます。葉緑体に局在する NAD キナーゼ(NADK2)は、光合成電子伝達系に NADP⁺を供給する酵素です。光エネルギーで励起された電子は NADP⁺に受け渡され、NADPH が生成されます。葉緑体内の NAD(P)(H)量は光環境やその他の条件に応じて変動し、厳密に調整されていることが示されています。しかし、NAD(P)(H)の量を減らす仕組みは長らく不明でした(図1)。

4 研究内容

本研究では、モデル植物シロイヌナズナにおいて NADK2 が機能しない変異体(*nadk2*)の表現型を回復させる変異株をスクリーニングし、葉緑体に局在する新規酵素 CCR4C を同定しました。CCR4C は NADP⁺および NADPH をそれぞれ NAD⁺、NADH に変換する脱リン酸化酵素(NADP ホスファターゼ)として機能し、葉緑体内の NAD(P)(H)量を調節する役割を持つことが分かりました(図 2)。さらに、CCR4C 欠損株は活性酸素ストレスに対して耐性を示すとともに、*nadk2* 変異体の葉の色や成長の異常も回復させることがわかりました。これらの結果から、CCR4C は葉緑体内の NAD(P)(H)量を調節する新規因子であることが示されました。

5 今後の展開

植物細胞が葉緑体内で NAD(P)(H)量を制御する新たな仕組みを CCR4C が担うことを明らかにした今回の成果は、持続可能な農業やカーボンニュートラル社会の実現に向けた重要な基盤となります。今後は、CCR4C を介した NAD(P)(H)調節の分子メカニズムや活性酸素ストレス応答との関係を詳細に解析し、光合成効率やストレス耐性を高める作物改良へと応用を進めます。また、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 ALCA-Next(先端的カーボンニュートラル技術開発)「フィージビリティスタディ(FS)課題」(2025 年度採択)などを通じて、応用展開に向けた研究を加速して行きます。

PRESS RELEASE

6 論文情報

掲載誌	Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 米国科学アカデミー紀要
論文名	Identification of CCR4C as a chloroplast-localized NADP(H) phosphatase regulating NAD(P)(H) balance in Arabidopsis
著者名	Kazuki Akashi, Yutaka Kodama, Hiroaki Sakaguchi, Shin-Nosuke Hashida, Atsuko Miyagi, Toshiki Ishikawa, Masatoshi Yamaguchi, Maki Kawai-Yamada 明石一樹 ¹ 、児玉豊 ² 、坂口浩朗 ¹ 、橋田慎之介 ³ 、宮城敦子 ⁴ 、石川寿樹 ¹ 、山口雅利 ¹ 、川合真紀 ^{1*} ¹ 埼玉大学大学院理工学研究科、 ² 宇都宮大学バイオサイエンス教育研究センター、 ³ 電力中央研究所サステナブルシステム研究本部、 ⁴ 山形大学学術研究院 (農学部主担当) *責任著者: 埼玉大学大学院理工学研究科 教授 川合真紀
DOI	10.1073/pnas.2504605122
URL	https://doi.org/10.1073/pnas.2504605122

7 研究支援

本研究は、文部科学省の科学研究費補助金 (20H05905, 22H02298, 23K23564, 23H04187, 24H02065) の支援を受けて行われました。

8 用語解説

(1) NAD(P)(H)

細胞内で電子を運ぶ分子で、光合成や呼吸、脂質合成、活性酸素防御などさまざまな代謝反応に関わります。NAD⁺とNADHは主に呼吸、NADP⁺とNADPHは光合成やストレス応答に使われます。

(2) NAD キナーゼ (NADK2)

葉緑体に局在する酵素で、NAD⁺をリン酸化してNADP⁺を作ります。光合成電子伝達鎖に最終電子受容体NADP⁺を供給する働きがあります。

(3) CCR4C

本研究で新たに同定された葉緑体内の酵素で、NADP⁺やNADPHからリン酸を取り除きNAD⁺やNADHに変換する脱リン酸化酵素として機能することが明らかになりました。

(4) 葉緑体

植物細胞内で光合成が行われる細胞小器官で、太陽光を利用して二酸化炭素から糖を作り、エネルギーを生成します。

PRESS RELEASE

(5) 活性酸素ストレス

光合成や呼吸の過程で生じる酸素の活性化した形態によるストレスで、細胞や葉にダメージを与えます。

(6) 光合成電子伝達系

葉緑体のチラコイド膜上に存在します。光合成の中で電子を受け渡す化学反応の流れで、 NADP^+ が電子を受け取って NADPH を作ります。この過程が効率的に行われることで、植物は光エネルギーを化学エネルギーに変換できます。