

2026 年 8 月 28 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

植物の成長ホルモン「ブラシノステロイド」が糖新生を 促進する新たなメカニズムを解明 —酵素の立体構造変化を介した精緻な代謝調節—

【発表のポイント】

- 植物の成長を促進するホルモン、ブラシノステロイド（BR）^{（注 1）} が、「糖新生」^{（注 2）} を活性化する新たな仕組みを解明しました。
- BR シグナルの抑制因子である BIN2 キナーゼ^{（注 3）} が、糖新生の鍵酵素 PCK1^{（注 4）} の特定部位をリン酸化し、酵素の立体構造を 6 量体から 12 量体へ変化させることで、その働きを強く阻害することを発見しました。
- この制御機構は、発芽直後の実生定着における糖新生だけでなく、トウモロコシやソルガムなど C4 植物^{（注 5）} の特殊な光合成においても重要な役割を果たしており、将来的な作物のバイオマス生産向上に向けた新たな標的として期待されます。

【概要】

植物の糖供給は、葉で行われる光合成（二酸化炭素の固定）だけでなく、有機酸やアミノ酸、脂質などを糖に変換する「糖新生」という過程にも大きく依存しています。特に発芽直後の葉が未発達な時期には、この糖新生が不可欠です。また、C4 植物は、糖新生で中心的な役割を果たす PCK1 酵素を応用した特殊な光合成回路を持ち、効率的な糖生産を行っています。

東北大学大学院生命科学研究科の別所-上原奏子助教とカーネギー研究所の Zhiyong Wang 教授らの国際共同研究チームは、植物の成長を促進するホルモン、ブラシノステロイドに着目しました。研究の結果、ブラシノステロイド存在下では PCK1 が脱リン酸化され、活性を維持することで、植物の成長に必要な糖の供給を制御していることを発見しました。緻密なエネルギー制御の分子機構が明らかになったことで、将来的により早く、より大きく育つ作物の開発につながる可能性があります。本研究成果は 2026 年 8 月 28 日に国際誌 Nature Plants に掲載されます。

【詳細な説明】

研究の背景

糖は植物の成長における必須のエネルギー源であり、細胞壁生合成の主要な基質でもあります。植物体内では、光合成による炭素固定によって糖が作られることに加え、オキサロ酢酸からホスホエノールピルビン酸への変換を触媒する PCK 酵素などを介して、有機酸、アミノ酸、脂質を糖に変換する「糖新生」の経路が存在します。特に発芽時の実生は、光合成器官が未発達であるため、種子に蓄積された脂質から糖新生によって作られる糖に強く依存して成長します。また、トウモロコシやソルガムなどの C4 植物では、この PCK 酵素が特殊な光合成（C4 光合成^(注6)）において二酸化炭素を細胞内に濃縮するための鍵酵素として活用されています。植物の細胞伸長やバイオマスの蓄積を強力に促進するホルモンとして「ブラシノステロイド（BR）」が知られていますが、BR がどのように植物体内の一次代謝をコントロールし、成長に見合った糖の供給を実現しているのか、その分子レベルの機構は解明されていませんでした。

今回の取り組み

本研究では、モデル植物のシロイヌナズナやトウモロコシ、ソルガムを用いて、BR シグナルが一次代謝の中心酵素である PCK1 の活性をどのように制御しているのかを詳細に解析しました。

まず、BR 生合成阻害剤の処理や BIN2 キナーゼが常時活性化する変異体では PCK1 の酵素活性が著しく低下し成長が阻害されましたが、BR の投与により PCK1 の活性が回復しました（図 1）。生化学的な解析から、BR シグナル伝達下流に存在する BIN2 が PCK1 の特定の部位（Ser-62 と Thr-66）を直接リン酸化し、通常は 6 量体として高い活性を持つ PCK1 を 12 量体へと四次構造^(注7)を変化させることで、その働きを強く不活性化するというダイナミックなメカニズムが明らかになりました。

実際、リン酸化されないようにアミノ酸を置換した変異体（AA 変異体）を持つ植物は、暗所や土壌深くに播種した過酷な条件下でも高い出芽率と生存率を示しました。逆に、常にリン酸化状態を模した変異体（DE 変異体）では、土壌からの出芽が著しく阻害されました（図 2）。これは、BR を介した PCK1 の脱リン酸化および活性化が、種子内の脂質から糖を作り出す糖新生を促し、発芽後の生存に不可欠であることを示しています。

さらに、この BIN2 による PCK1 のリン酸化制御は、単子葉の C4 植物（トウモロコシ、ソルガム）でも保存されていました。両種の葉に BR を投与すると PCK1 が脱リン酸化され、活性が維持されることを見出しました。トウモロコシの葉では、BR 量は夜間に少なく、日中に高いことから、C4 植物において PCK1 は夜間にリン酸化されて不活性化し、日中には脱リン酸化されて活性化することで、C4 光合成の効率を最適化していることが示唆されました。

今後の展開

本研究により、成長ホルモンである BR が、単なる成長シグナルにとどまらず、代謝酵素の立体構造を変化させて糖の供給をコントロールしていることが明らかになりました（図 3）。今回発見された「BR-BIN2-PCK1 経路」は、シロイヌナズナのような C3 植物における糖新生だけでなく、C4 植物の光合成能力や作物のバイオマス生産を飛躍的に向上させるための新たな農業技術や遺伝子改変のターゲットとして大いに期待されます。

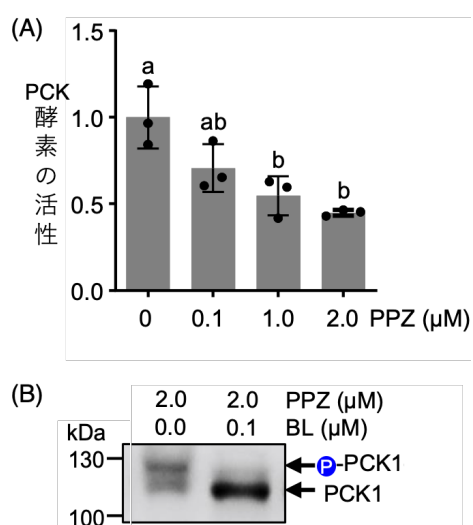


図 1. ブラシノステロイドにより PCK 酵素活性が変化する。(A) ブラシノステロイド生合成阻害剤 PPZ を投与すると濃度依存的に PCK 酵素の活性が低下する。(B) PPZ を与えるとリン酸化された PCK1 (P-PCK1) が増えるが、活性型ブラシノステロイド BL を与えると脱リン酸化される。

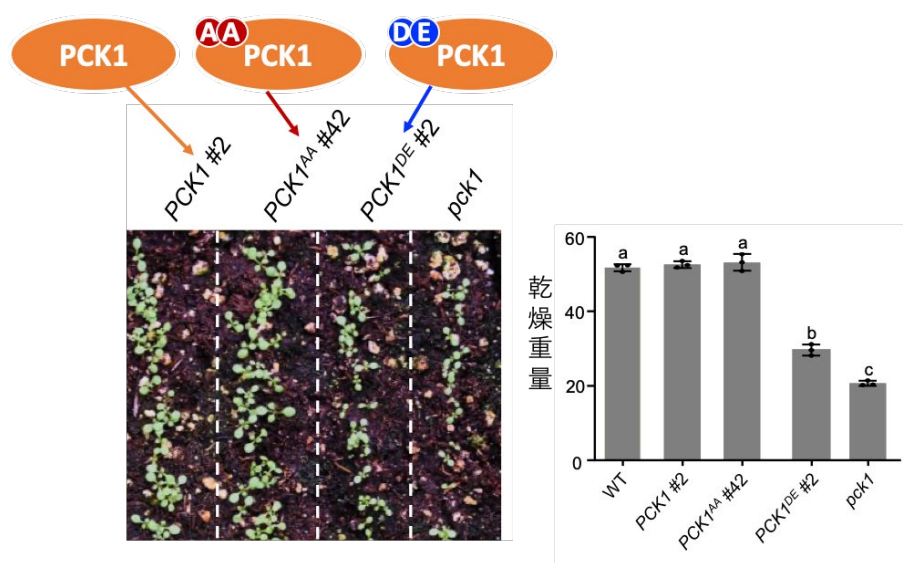


図 2. アミノ酸置換型 PCK1 形質転換体における表現型。左から野生型 PCK1、リン酸化サイトをアラニンに置換した PCK1 (AA 変異体)、リン酸化サイトをアスパラギン酸(D)とグルタミン酸(E)に置換して恒常的にリン酸化しているものと同質にした PCK1 (DE 変異体)、PCK1 を欠損した変異体 (*pck1*)。WT や AA 変異体に比べて DE 変異体や *pck1* では乾燥重量が著しく低い。

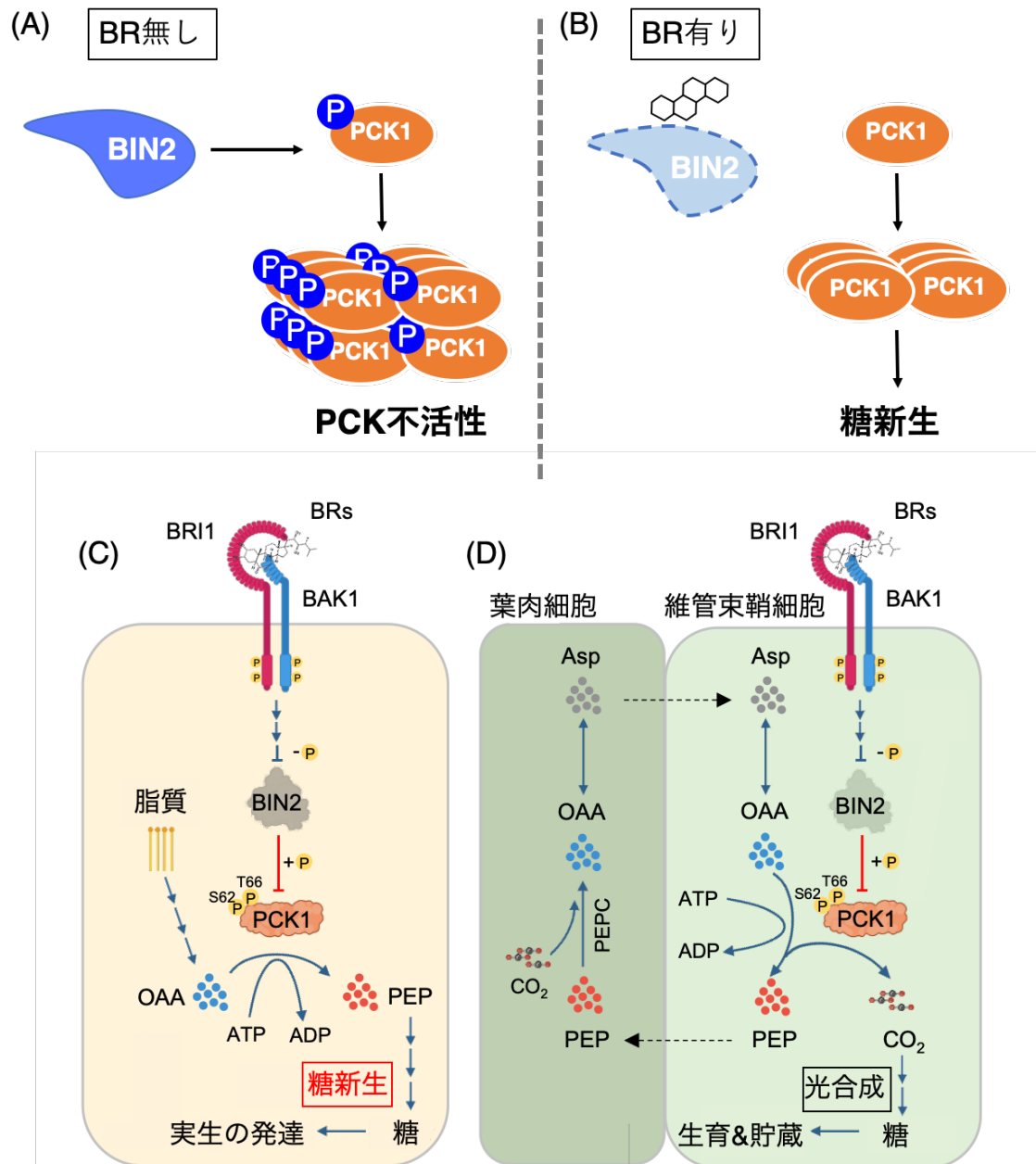


図 3. BR-BIN2-PCK1 調節モジュールの役割の概要。(A) BR の無い状態では BIN2 が PCK1 をリン酸化して 12 量体化し、不活性となる。(B) BR のある状態では BIN2 が分解されて、PCK は 6 量体で活性を示し、糖新生が促進される。

(C) シロイヌナズナでは、実生発芽時における脂質から糖への変換を促進。(D) C4 植物では CO₂ は、葉肉細胞において PEP カルボキシラーゼ (PEPC) によってオキサロ酢酸 (OAA) として固定される。OAA はその後アスパラギン酸 (Asp) に変換され、維管束鞘細胞へ輸送される。そこで OAA は PCK によって脱炭酸され、光合成のための CO₂ が放出される。OAA 由来のホスホエノールピルビン酸 (PEP) は次のサイクルのために葉肉細胞へ戻る。

【謝辞】

本研究の一部は日本学術振興会 海外特別研究員 奨励費 (研究課題番号: JP201860452) の助成を受けて実施されました。

【用語説明】

- 注1. ブラシノステロイド (BR): 植物の細胞伸長、分裂、分化など、成長全般を強力に促進する植物ステロイドホルモンの一種。
- 注2. 糖新生: 糖質以外の物質 (脂質やアミノ酸など) からグルコースなどの糖を合成する代謝経路。
- 注3. BIN2 (BRASSINOSTEROID-INSENSITIVE 2): GSK3 (グリコーゲン合成酵素キナーゼ3) に似た構造を持つキナーゼ (リン酸化酵素) で、BR シグナル伝達経路において負の制御因子として働く。
- 注4. ホスホエノールピルビン酸カルボキシキナーゼ (PCK1): オキサロ酢酸をホスホエノールピルビン酸に変換する酵素。種子発芽時の脂質から糖への変換する糖新生や、C4 植物の光合成において二酸化炭素を放出する重要な役割を担う。
- 注5. C4 植物: 効率のよい C4 光合成を行う植物の総称。一般的な植物 (C3 植物) に比べ、二酸化炭素を細胞内に濃縮する仕組みを持つため、乾燥や高温、強光下といった過酷な環境でも水分を節約しながら旺盛に生育できる。
- 注6. C4 光合成: C4 植物であるトウモロコシやソルガムなどが持つ、効率よく二酸化炭素を濃縮・固定する光合成システム。明反応 (光エネルギーの吸収) を行う細胞と、暗反応 (糖の合成) を行う細胞を分業させることで、光合成のロスを抑え、低濃度の二酸化炭素からでも効率よく糖を作り出すことができる。
- 注7. 四次構造: 複数のタンパク質分子 (サブユニット) が組み合わさってできる立体構造のこと。PCK1 は通常 6 つのサブユニットからなる 6 量体だが、リン酸化によって 12 量体になることで活性を失うことが示された。

【論文情報】

タイトル : Brassinosteroids promote sugar synthesis by inhibiting BIN2 phosphorylation of phosphoenolpyruvate carboxykinase

著者 : Hongliang Zhang#, Yalikunjiang Aizezi#, Kanako Bessho-Uehara, Ajeet Chaudhary, Cao Son Trinh, Shou-Ling Xu, Zhi-Yong Wang* (#共同筆頭著者、*責任著者)

*責任著者 : Carnegie Institution for Science, Zhi-Yong Wang

掲載誌 : Nature Plants

DOI : 10.1038/s41477-026-02379-5

URL : <https://www.nature.com/articles/s41477-026-02379-5>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学大学院生命科学研究科

助教 別所-上原奏子

TEL: 022-795-6693

Email: kanako.bessho.b3@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学大学院生命科学研究科広報室

高橋さやか

TEL: 022-217-6193

Email: lifsci-pr@grp.tohoku.ac.jp