

持続的な作物生産に向けて

植物が必要とする栄養素を輸送の過程で感知する
トランスセプターを世界で初めて発見！

大阪府立大学（学長：辰巳砂 昌弘）大学院 生命環境科学研究科 高野 順平教授、吉成 晃研究員（現名古屋大学）、博士後期課程1年 細川 卓也さんらの研究グループは、植物の無機栄養素の1つであるホウ素（ホウ酸）を輸送する輸送体（トランスポーター、注1）の一つが、輸送の過程で栄養素の量を感知し、輸送体自体の蓄積量を制御するトランスセプター（トランスポーター兼レセプター）であることを明らかにしました。植物における輸送が感知を伴うタイプのトランスセプターは世界で初めての発見です。

本研究成果は、植物の持つシンプルで巧みな栄養素獲得の調節機構を発見したもので、不良土壌における作物生産や肥料投入量の削減につながると期待されます。

なお、本研究は国際誌「The Plant Cell」のオンライン速報版に12月3日に掲載されました。

<研究概要>

植物は根を使って土壌から無機栄養素（ミネラル）を吸収し、それらを各器官へ輸送して利用します。無機栄養素の1つであるホウ素（ホウ酸）は、細胞壁の構造と機能に重要な栄養素ですが、摂り過ぎると毒になります。ホウ素は雨の多い地域では土壌から流亡しやすく、乾燥地では土壌に蓄積しやすい性質を持っています。ホウ素の欠乏や過剰は作物の収穫量や品質に影響を与えるため、それらを回避する仕組みを知ることが非常に重要です。

今回、私たちは、モデル植物であるシロイヌナズナ（注2）を用いて実験を行い、ホウ素（ホウ酸）の輸送体BOR1がホウ酸輸送の過程で植物内のホウ酸の量を感知しながら、自身の分解を調節する、輸送体（トランスポーター）と受容体（レセプター）の機能を併せ持つ「トランスセプター」の一種であることを明らかにしました。本研究成果は、植物の持つシンプルで巧みな栄養素獲得の調節機構を発見したもので、不良土壌での作物生産や肥料投入量の削減につながると期待されます。

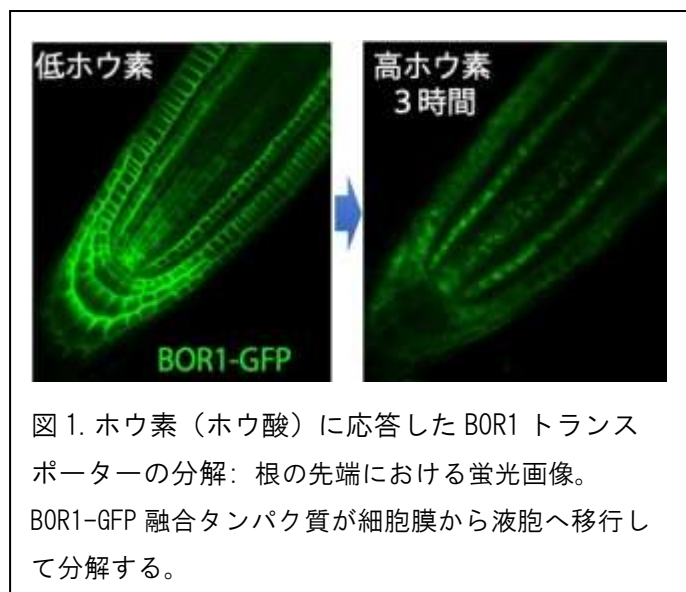


図1. ホウ素（ホウ酸）に応答したBOR1 トランスポーターの分解：根の先端における蛍光画像。BOR1-GFP 融合タンパク質が細胞膜から液胞へ移行して分解する。

<発表雑誌>

本研究成果は2020年12月3日に、国際誌「The Plant Cell」のオンライン速報版に掲載されました。

<雑誌名>

The Plant Cell

<論文タイトル>

Transport-coupled ubiquitination of the borate transporter BOR1 for its boron-dependent degradation

<著者>

吉成 晃（前 生命環境科学研究科 研究員、現在 名古屋大学 研究員）、細川 卓也（生命環境科学研究科 博士後期課程1年）、Marcel Pascal Beier（前 生命環境科学研究科 研究員、現在 東京大学 研究員）、大島 啓嗣（生命環境科学研究科 博士前期課程2年）、荻野 由香（北海道大学 修了生）、堀 千明（北海道大学 助教）、高須賀 太一（北海道大学 准教授）、深尾 陽一郎（立命館大学 教授）、藤原 徹（東京大学 教授）、高野 順平（生命環境科学研究科 教授）

<https://academic.oup.com/plcell/advance-article/doi/10.1093/plcell/koa020/6017826>

<SDGs 達成への貢献>

大阪府立大学は研究・教育活動を通じて SDGs17 の目標への貢献および地球全体の持続可能な発展に貢献しています。

本研究は SDGs17 の目標のうち、「2：飢餓をゼロに」「15：陸の豊かさを守ろう」等に貢献しています。



<研究助成資金等>

本研究の一部は、科学研究費助成事業（科研費）新学術領域研究 生命金属科学（高野順平 19H05763）、若手研究 A（高野順平 26712007）、若手研究（吉成晃 19K1614）、基盤研究 S（代表 藤原徹 26712007）、日本学術振興会特別研究員制度（吉成晃 252799）からの支援を受けて行われました。

<研究内容>

植物は根を使って土壌から無機栄養素（ミネラル）を吸収し、それを各器官の必要に応じて輸送し利用します。高等植物の必須無機栄養素の一つであり肥料成分でもあるホウ素は、細胞壁の構造と機能に重要な栄養素です。ホウ素はホウ酸 $B(OH)_3$ の形で水に溶けますが、日本など雨の多い地帯では、ホウ素が雨水とともに流亡しやすく、作物のホウ素欠乏

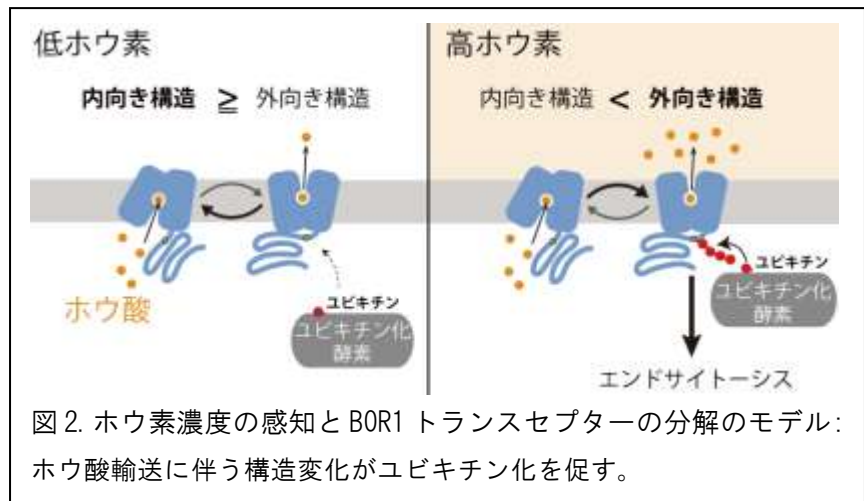


図2. ホウ素濃度の感知と BOR1 トランスセプター の分解のモデル：ホウ酸輸送に伴う構造変化がユビキチン化を促す。

が問題になっています。一方、世界の乾燥地では、地表にホウ素が蓄積し過剰害が問題になっています。ホウ素の欠乏や過剰は作物の収穫量だけでなく品質にも影響を及ぼすため、作物生産にとっても大きな問題となっています。そこで、植物が持つホウ素の欠乏と過剰を回避する仕組みを知ることは重要です。

これまでの私たちの研究から、シロイヌナズナのホウ酸輸送体（トランスポーター）BOR1 は、根の周りのホウ酸が少ないときに、根の細胞の細胞膜に蓄積しホウ酸を根の中心や地上部へ輸送する重要な働きをしていることや、ホウ酸が多いときに、ユビキチン化（注3）という化学修飾を介して起こるエンドサイトーシス（注4）により液胞へ送られ分解されることが明らかになっています（図1）。BOR1 の分解には、ホウ素を必要以上に輸送して過剰害が起こることを予防する意義があります。

私たちは今回、細胞においてホウ素の多少がどのように感知されるのかを明らかにするため、BOR1 の分解を制御する遺伝的な要因を探索しました。方法としては、BOR1-GFP（BOR1 と緑色蛍光タンパク質の融合タンパク質）を持つシロイヌナズナのゲノム DNA にランダムに変異を導入し、BOR1-GFP が分解されない株を蛍光顕微鏡によって探しました。その結果、別の遺伝子ではなく、BOR1 遺伝子の中の変異で分解を抑制するものが見つかりました。これらの変異は BOR1 の構造の中央部でホウ酸結合ポケット周辺のアミノ酸を置換していました。そこでホウ酸結合ポケット周辺のアミノ酸の機能をさらに調べたところ、ホウ酸輸送活性に重要なアミノ酸は、ユビキチン化と分解にも重要なことがわかりました。

これにより、ホウ酸輸送がホウ酸感知に直結することがわかりました。出芽酵母のアミノ酸の輸送体では、アミノ酸の活発な輸送に伴う構造の変化が、ユビキチン化を受けやすくすることが示されています。私たちの結果は、高等植物におけるホウ酸輸送体も同様の性質を持つことを強く支持しています（図2）。このように輸送体（トランスポーター）と受容体（レセプター）の機能を併せ持つものはトランスセプターと呼ばれます。BOR1 はトランスセプターとしてホウ酸を輸送しつつ感知し、BOR1 自体の蓄積量を制御するのです。このような仕組みはおそらく植物の多くの輸送体に備わっていると考えられます。

<社会的意義、今後の予定>

私たちはこれまでに、BOR1 の蓄積量を増やした遺伝子組み換えシロイヌナズナが、ホウ素が少ない時に良く育ち良く実ることを示しています。この組換え体では、環境中のホウ素が少ない時でも効率よくホウ素が輸送されるため、ホウ素欠乏に強い形質を示しますが、環境中のホウ素が多い場合でも、ホウ素が輸送され過ぎることによる過剰害は起こりません。これは、今回私たちが明らかにした、BOR1 がトランスセプターとして自体の蓄積量を制御できることによります。

この仕組みはシンプルなため、様々な作物において BOR1 の発現増強がホウ素の輸送効率を向上させることが期待されます。私たちは遺伝子組み換え技術、さらには BOR1 の品種間差を利用した育種により、作物におけるホウ素欠乏の回避とホウ素肥料の削減を実現したいと考えています。また、他の栄養素の輸送体についてもトランスセプターである可能性を検証し、応用に結び付けたいと考えています。

<用語解説>

注1) 輸送体

生体膜に埋め込まれる一群のタンパク質で、物質の生体膜透過を促進する働きを持つ。タンパク質の構造からチャネルやトランスポーターなどに分類される。トランスポーターは外向き構造と内向き構造を繰り返すことで物質を輸送する。

注2) シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*)

アブラナ科の植物でゲノムサイズが小さく、遺伝子組み換えが容易である等の性質を持つことから、研究によく使われる。植物で最初に全ゲノムが解読された生物である。

注3) ユビキチン化

タンパク質の化学修飾の一種であり、タンパク質を構成するアミノ酸であるリジンにユビキチンタンパク質が付加される。エンドサイトーシスやタンパク質分解の標識となるなど、様々なタンパク質の機能や細胞内の局在性の調節に働く。

注4) エンドサイトーシス

細胞が細胞膜成分や細胞外の物質を取り込むため、細胞膜の一部を陥入させて小胞を作り、細胞内へ送る過程のこと。輸送体などの膜タンパク質もエンドサイトーシスにより細胞内に取り込まれ、細胞膜に再配置（リサイクリング）されたり、液胞に送られて分解されたりする。

<参考 URL 等>

大阪府立大学 生命環境科学研究科 応用生命科学専攻 植物栽培生理学研究グループ Web サイト

<https://saibaiseirigaku.wixsite.com/crop-ecophysiology>