



PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 7 年 11 月 14 日

岡 山 大 学

イネの節で鉄を細胞外に排出する新奇輸送体を発見！ 鉄の過不足を解消し、環境変動に強い作物に期待

◆発表のポイント

- ・イネのタンパク質 IET1 は、これまでほとんど見つかっていなかった、細胞内から細胞外に二価鉄イオンを排出する輸送体です。
- ・IET1 は主に節の分散維管束の導管の周辺の細胞に発現します。IET1 は、この導管に節内で維管束間輸送された鉄を再度積み込むことで、新しい葉や穂への鉄の分配に重要な働きをします。

岡山大学学術研究院先鋭研究領域（資源植物科学研究所）の馬建鋒教授らの研究グループ、学術研究院教育研究マネジメント領域（自然生命科学研究支援センター：ゲノム・プロテオーム解析部門）の宮地孝明研究教授らの研究グループは、中国科学院南京土壤研究所の車景研究員らの研究グループと共同で、イネの節で発現し、二価鉄イオンを細胞の外に排出する輸送体タンパク質 IET1 (Iron Efflux Transporter 1) を発見し、植物体内での鉄の分配に不可欠な新たなメカニズムを解明しました。これらの研究成果は 11 月 12 日、英国の総合学術誌「*Nature Communications*」に掲載されました。

鉄は植物にも動物にも生きていくために欠かせない微量必須元素です。鉄は土壤中に広く分布していますが、環境条件（土壌の pH や酸化還元状態など）によって水に溶ける量が極端に変化するため、植物は土壌から鉄を獲得し、体内で過不足なく分配するためのさまざまな仕組みを発達させています。IET1 はイネの節で維管束間輸送された鉄を、新葉や穂へと続く分散維管束の導管に再度積み込む役割を担っていることが分かりました。このような研究を通じてイネや他の植物の環境適応能力をより良く理解し、持続可能な農業生産に貢献することが期待されます。

◆研究者からのひとこと

この研究は車景博士が岡山大学資源植物科学研究所の植物ストレス学グループに所属していた頃に始めたもので、車博士が南京土壤研究所に転出した後も、本学で引き続き前例のない輸送体の機能や役割を解明するために 5 年以上の時間がかかりました。右の写真は今年 7 月、ポルトガルのポルトで開催された国際植物栄養学会議にて撮影したものです。



車景研究員と馬建鋒教授



PRESS RELEASE

■発表内容

<現状>

鉄(Fe)は植物にも動物にも生きていくために欠かせない必須元素¹⁾で、酸化還元反応を担うさまざまな酵素タンパク質が鉄を必要とします。植物の場合は特に、葉緑素を合成する酵素に鉄が必要なため、鉄が不足した植物では葉緑素が減少して葉が黄化し、光合成能力が低下します。一方で過剰な鉄の蓄積は酸化ストレスなどによる生育障害を引き起こします。鉄は土壌中に酸素(O)、ケイ素(Si)、アルミニウム(Al)に次いで四番目に多く、普遍的に存在する元素ですが、酸性土壌や水田のように空気から遮断された還元状態の土壌では鉄が水に溶けやすくなり、植物に過剰に供給されるのに対して、アルカリ土壌や好気的な畑土壌では鉄はほとんど水に溶けず、そのままでは植物が利用できなくなります。そのため植物は土壌から鉄を獲得し、各器官や組織に過不足なく分配して、体内の鉄の濃度を一定の範囲に保つ、さまざまな仕組みを発達させています。

これまでの研究から、イネ科植物では、節²⁾の維管束³⁾を著しく発達させ、節内の維管束間輸送によってさまざまな種類の栄養素の分配を集約的にコントロールしていることが次第に明らかになってきましたが、鉄については節の維管束間輸送過程の一部分しか解明されていませんでした。

<研究成果の内容>

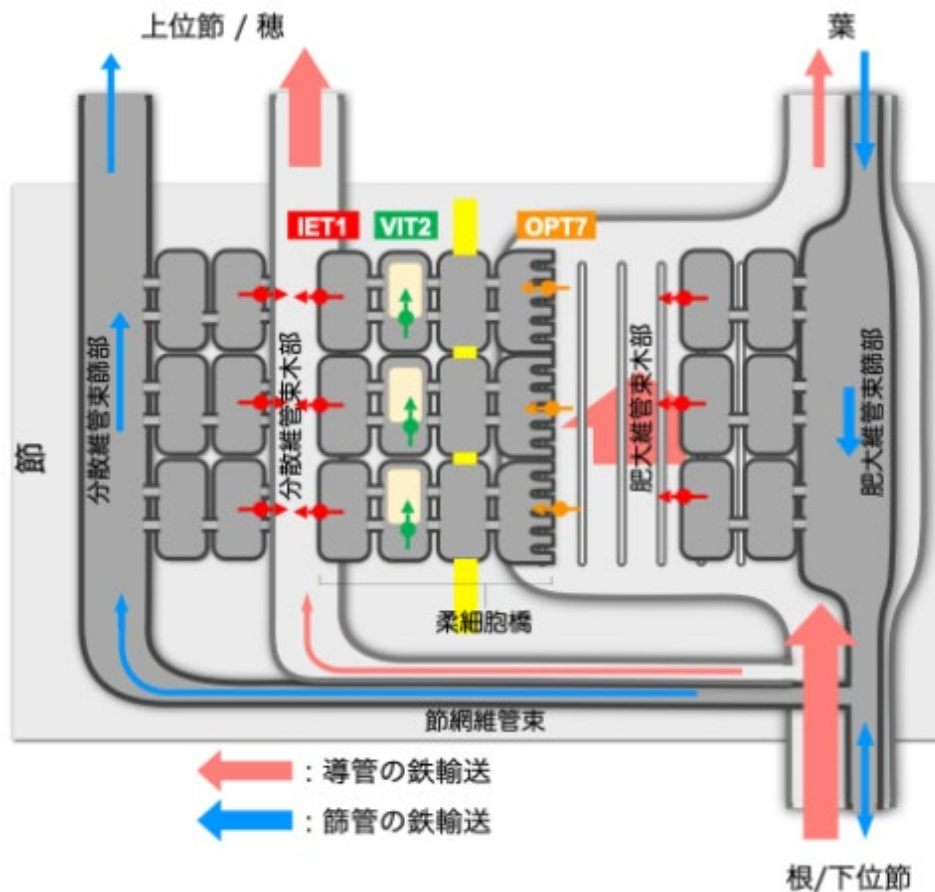
私たちは、イネの節で働く新奇鉄輸送体⁴⁾タンパク質 IET1 (Iron Efflux Transporter 1)を発見しました。

IET1 は VIT (Vacuolar Iron Transporter: 液胞の鉄輸送体) ファミリーに類似性があるため、これまで液胞膜に局在する輸送体と考えられてきましたが、詳しい解析は行われていませんでした。今回、私たちが IET1 と緑色蛍光タンパク質(GFP)の融合遺伝子を、イネの葉から調整したプロトプラスト⁵⁾やタマネギの表皮細胞に一過的に発現させたところ、予想に反して液胞膜ではなく、細胞膜に局在することが分かりました。また、プロテオリポソーム⁶⁾を用いて IET1 の輸送能力を調べたところ、膜の内外の水素イオン(H^+ /プロトン)濃度勾配に依存して二価鉄イオン(Fe^{2+})を排出する輸送活性を持つことが明らかになりました。すなわち IET1 は細胞内外のプロトン濃度勾配を利用して、プロトンを細胞内に取り込む代わりに二価鉄イオンを細胞外に排出する輸送体タンパク質であることが分かりました。これまでに、植物の細胞に鉄を取り込む方向の輸送体は多くの種類が知られていますが、細胞から鉄を排出する輸送体は限られた植物種のわずかな例しか知られておらず、IET1 はそれら既報の鉄排出輸送体とは類似性がありません。これまで液胞膜の鉄輸送体と考えられていた VIT 輸送体ファミリーに実際には細胞膜に局在する排出輸送体が含まれていたこととなります。これまでの研究から、栄養素の効率的な吸収や分配には、取り込み輸送体と排出輸送体が協調して働く必要があることが分かっていました。IET1 は植物の鉄輸送を理解するうえで、これまで見つかっていなかった重要なピースです。

IET1 遺伝子は主にイネの節で発現し、なかでも分散維管束と呼ばれる、より上位の節や穂へと続く維管束の木部(導管の周辺)の細胞に多く発現していました(図参照)。導管は管状の死細胞が連なった構造であるため導管の内部は細胞外の空間(アポプラスト⁷⁾)です。したがって導管周辺の細胞から IET1 によって排出された鉄は導管に積み込まれ、導管を流れる蒸散流と共に長距離輸送されると考えられます(図参照)。実際に今回の研究で、IET1 遺伝子を破壊した変異イネでは上位葉(新葉)や穂の鉄濃度が減少し、代わりに下位葉(古葉)と節の鉄濃度が増加しました。変異イネの節では維管束間の柔組織により

PRESS RELEASE

多くの鉄の蓄積が観察されました。また変異イネでは草丈や分けつ数、千粒重が減少し、一株あたりの種子の収量が大幅に減少しました。このことは、IET1 による鉄の分配制御がイネの正常な生育に欠かせないことを示しています。



これまでに明らかになったイネ節における鉄の分配の仕組みをまとめると次のようになります(図参照)。

①根が吸収した鉄は導管を通して地上部に運ばれ、節の肥大維管束(節内で著しく発達し、その節に付随する葉へと続く維管束)の木部に到達します。②肥大維管束木部に発現する、鉄の取り込み輸送体の1種である OPT7 によって、導管内の鉄が積み下ろされ、隣接する柔細胞内に取り込まれます。③余剰な鉄は節の維管束間の柔細胞で、液胞膜の鉄輸送体 VIT2 によって液胞に運ばれ貯蔵されます。④分散維管束の木部柔細胞まで到達した鉄は、IET1 によって細胞外に排出されることで分散維管束の導管に積み込まれます。⑤分散維管束は上位の節や穂へと続くため、これらの輸送体によって節内で維管束間輸送された鉄は、新葉や穂へと優先的に分配されます。

<社会的な意義>

土壌中の鉄は環境条件によって植物への供給量が大きく変化するため、IET1 などによる鉄の分配の仕組みを理解することで、環境変化に強いイネなどの作物の作出につながることを期待されます。また鉄は人にとっても不足しがちな栄養素であるため、植物の鉄の分配の仕組みを応用し、可食部の鉄を増やすことで、鉄欠乏の改善も期待できます。



PRESS RELEASE

■論文情報

論文名 : A node-localized efflux transporter for loading iron to developing tissues in rice.

邦題名「成長組織への鉄の分配に働くイネ節の鉄排出輸送体」

掲載誌 : *Nature Communications*

著者 : Jing Che, Sheng Huang, Yuting Qu, Yuma Yoshioka, Chiyuri Tomita, Takaaki

Miyaji, Zhenyang Liu, Renfang Shen, Naoki Yamaji, and Jian Feng Ma

DOI : 10.1038/s41467-025-64863-4

URL : https://www.nature.com/articles/s41467-025-64863-4?utm_source=rct_congratemail&utm_medium=email&utm_campaign=oa_20251111&utm_content=10.1038/s41467-025-64863-4

■研究資金

本研究は、主に独立行政法人日本学術振興会(JSPS)「科学研究費助成事業」(基盤 S・21H05034 研究代表:馬建鋒)の支援を受けて実施しました。

■補足・用語説明

1) 必須元素

生きていくために必ず必要とする元素。陸上植物の場合は 17 元素(水素、ホウ素、炭素、窒素、酸素、マグネシウム、リン、硫黄、塩素、カリウム、カルシウム、マンガン、鉄、ニッケル、銅、亜鉛、モリブデン)が知られている。

2) 節

葉と茎が接する部分。イネ科植物の節は非常に維管束が発達しており、さまざまな輸送体タンパク質を介した維管束間輸送によって栄養素の分配先を集約的にコントロールしている。

3) 維管束

木部と篩部を束ねた植物の通導組織

4) 輸送体

生体膜を横切って基質を輸送するタンパク質。細胞質に基質を取り込む方向の輸送体を取り込み輸送体(Influx transporter)、細胞質から基質を排出する方向の輸送体を排出輸送体(Efflux transporter)と呼ぶ。

5) プロトプラスト

原形質体。酵素処理などによって細胞壁を取り除いた植物細胞。薬剤や電気的な処理によって一時



PRESS RELEASE

的に外部の遺伝子を取り込ませることができるため、一時的な遺伝子発現実験に用いる。

6) プロテオリポソーム

細菌や培養細胞に作らせた膜タンパク質を精製し、小胞状の人工膜脂質に埋め込んだもの。膜の内外の微小環境を自由にコントロールできるため、輸送体タンパク質の活性評価などに用いる。

7) アポプラスト

植物の細胞膜外の空間。細胞壁、細胞間隙、導管から成り、原則として水や溶質を透過する。

<お問い合わせ>

岡山大学資源植物科学研究所

教授 馬 建鋒

(電話番号) 086-434-1209



岡山大学は持続可能な開発目標(SDGs)を支援しています。

