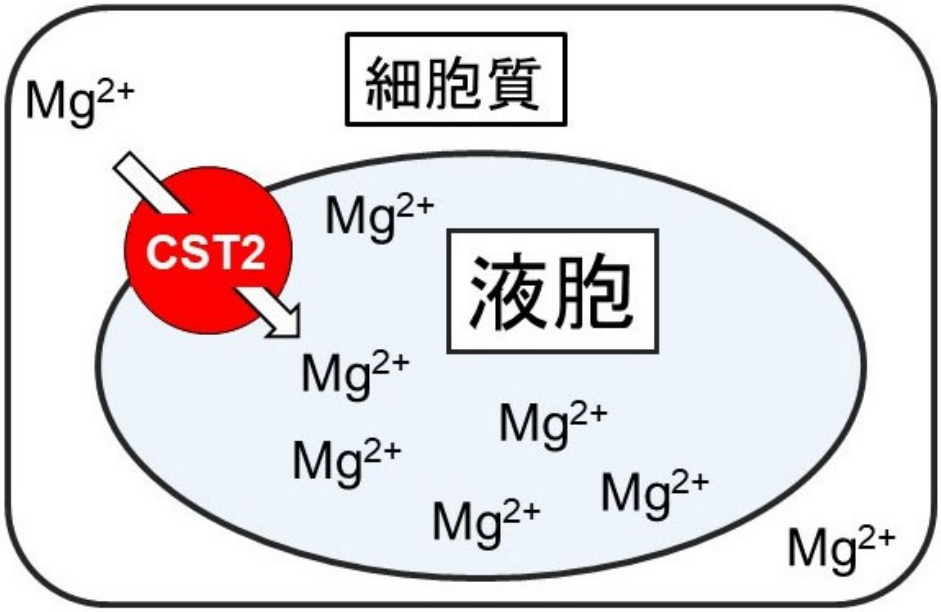


植物が細胞内にマグネシウムを貯蔵するしくみを解明
～植物の新しいマグネシウム輸送体の発見～

【本研究のポイント】

・マグネシウムは、植物の生命維持に必要な必須栄養素の一つだが、根から吸収されたマグネシウムが植物細胞でどのように分配されているのか、よく分かっていなかった。

・植物が細胞内にマグネシウムを貯蔵するために重要となる、マグネシウム輸送体[注1)]タンパク質である「CST2」を新たに発見した。

・CST2 は、細胞内の液胞[注2)]と呼ばれる巨大な細胞内小器官にマグネシウムを輸送して貯蔵する働きを持ち、この貯蔵システムが気孔[注3)]開口に重要であることが明らかになった。

・マグネシウム含量を高めた高栄養価の農作物の開発など、将来的な農業分野への応用が期待できる。

【研究概要】

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院理学研究科の井上 晋一郎 講師、名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所の木下 俊則 教授らの研究グループは、九州大学の後藤 栄治 准教授、中部大学の鈴木 孝征 教授、名古屋大学大学院理学研究科の嘉村 巧 教授、岡山大学資源植物科学研究所の馬 建鋒 教授らとの共同研究で、植物が細胞内にマグネシウムを貯蔵するために重要となるマグネシウム輸送体タンパク質「CST2」を新たに発見しました。

マグネシウムは植物の生命維持に必要な必須栄養素の一つですが、根から吸収されたマグネシウムが植物細胞でどのように分配されているのか、よく分かっていませんでした。今回発見された CST2 は植物体のあらゆる細胞に発現し、細胞内の液胞と呼ばれる巨大な細胞内小器官にマグネシウムを輸送して貯蔵する働きを持っていました。この輸送体が欠損した植物は細胞質のマグネシウム濃度が適切に維持されず、正常に生育できませんでした。更に、植物はこのマグネシウム貯蔵システムを利用して気孔を開口させることも発見しました。

これらの結果は、植物のマグネシウム利用を理解する上で重要な知見を提供します。また、CST2 は植物のマグネシウム含量を左右するため、将来的にはこの輸送体を用いた農業への応用も期待されます。

本研究成果は、2022 年 7 月 29 日付イギリス学術雑誌「New Phytologist」電子版に掲載されました。

【研究背景と内容】

マグネシウムは植物にとって必須の金属栄養素で、生体内の様々な物質の構成要素として機能します。また、多くの酵素の活性化にも関与し、生命活動に必要な代謝を支えています。ところが、根から吸収したマグネシウムがどのように植物体の隅々まで運ばれ、どのような植物応答に利用されているのか、ほとんど理解されていませんでした。

私たちは元々マグネシウムの研究を行っていたわけでなく、気孔開口のメカニズムを研究する過程で偶然マグネシウムにたどり着きました。気孔は植物体表にたくさんある穴で、太陽光に応答して開口し、光合成[注4)]のための二酸化炭素の取り込みを促進します。これまで、光を受けた気孔孔辺細胞がカリウムと水を取り込み膨張することで気孔開口が誘導されると考えられているのですが、これだけでは開口メカニズムを完全には説明できていません。そこで私たちは、気孔開口メカニズムをさらに理解することを目指し、シロイヌナズナを用いて気孔が開口できない突然変異株[注5)]のスクリーニングを進め、*closed stomata2* (*cst2*)と名付けた新たな変異株を単離しました（図1）。

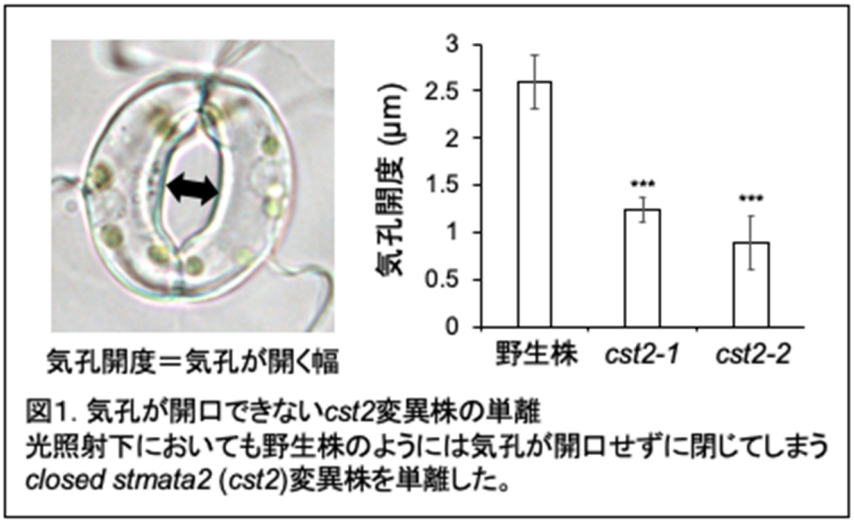


図1. 気孔が開口できない*cst2*変異株の単離
光照射下においても野生株のようには気孔が開口せずに閉じてしまう *closed stmata2* (*cst2*)変異株を単離した。

cst2 変異株を詳しく調べることにより、その表現型が意外なことに、生育条件のマグネシウム濃度に依存することが明らかになりました。*cst2* 変異株は、通常生育濃度以上のマグネシウム条件下で激的な生育阻害を示し、土に植えても矮小になり、正常に生育できませんでした（図 2A）。そのような条件下で、*cst2* 変異株の地上部ではマグネシウム含量が低下していることも判明しました（図 2B）。これらのことから、変異株は高濃度のマグネシウムに影響を受けやすく、マグネシウムホメオスタシス[注6)]が破綻していると考えられました。

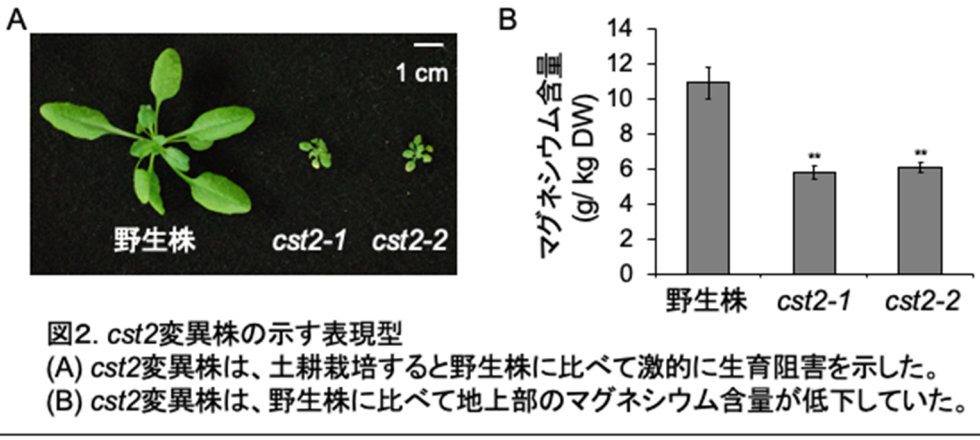
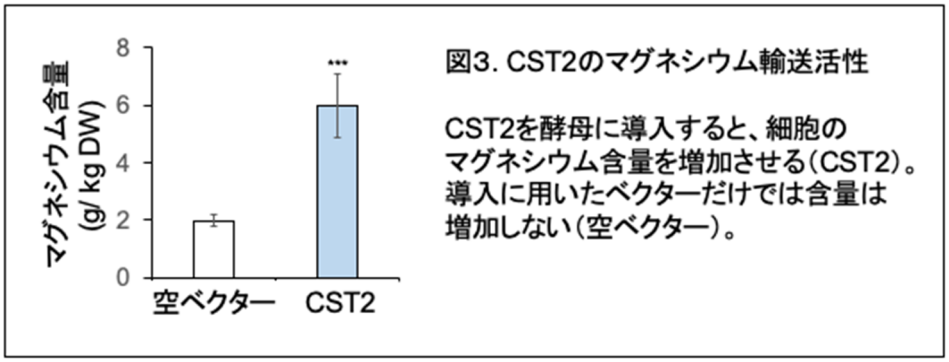
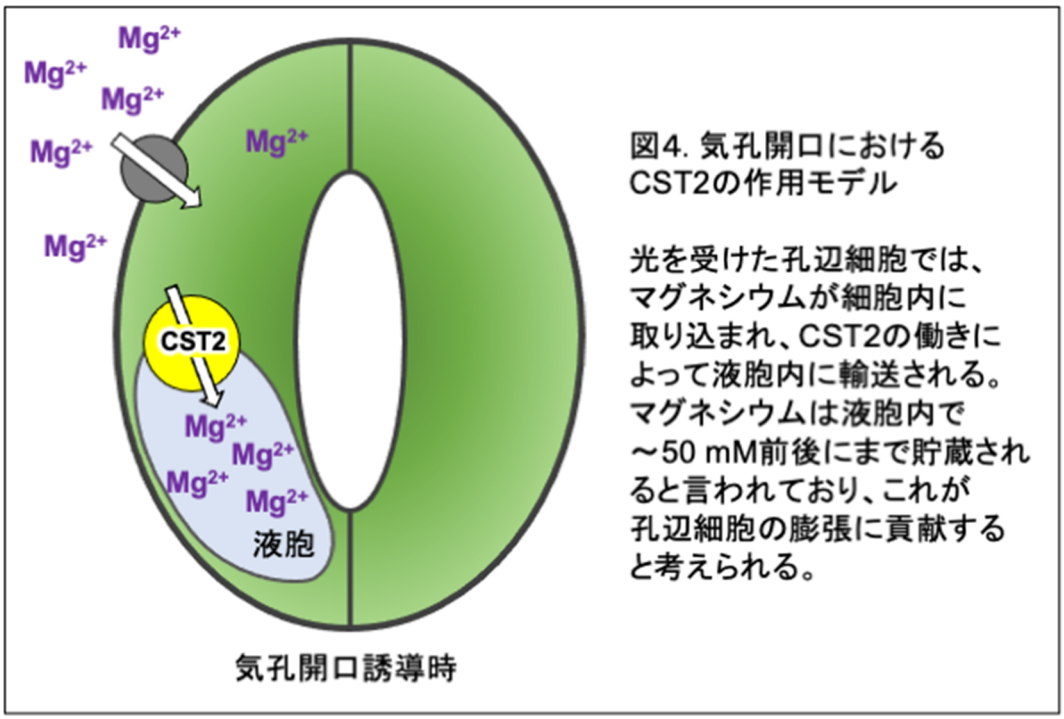


図2. *cst2*変異株の示す表現型
(A) *cst2*変異株は、土耕栽培すると野生株に比べて激的に生育阻害を示した。
(B) *cst2*変異株は、野生株に比べて地上部のマグネシウム含量が低下していた。

CST2 は、液胞膜に局在する機能未知の輸送体らしきタンパク質であり、植物体の至る所で発現していました。また、植物と同様に液胞を持つ酵母に CST2 を導入するとマグネシウム含量を増加させることから、CST2 タンパク質そのものがマグネシウムを蓄積させる輸送体であることが示唆されました（図 3）。これらのことから、CST2 は植物細胞の液胞内にマグネシウムを輸送し、貯蔵する輸送体タンパク質であることが分かりました。



これまでは気孔開口には孔辺細胞にカリウムが蓄積することが重要だと分かっていましたが、本研究により CST2 を介して孔辺細胞の液胞にマグネシウムが蓄積することも気孔開口に重要であることを明らかにしました(図 4)。



【成果の意義】

本研究では、液胞内へのマグネシウムの輸送が植物細胞のマグネシウムホメオスタシス維持の中核を担うことを明らかにし、これを司る新たなマグネシウム輸送体として CST2 を発見しました。また、CST2 を介したマグネシウムの液胞への貯蔵が気孔開口に重要であることを明らかにしました。これらの成果は、植物が土壌から吸収したマグネシウム栄養をどのように運んで利用しているのか、植物の基本的な営みを理解する上で重要な知見を提供します。また、気孔開口を誘導する新たな細胞内過程を明らかにしたことを意味し、開口メカニズムの理解を進める上で、大きな進歩となります。

また、CST2 は植物体のマグネシウム含量を左右するため、本研究成果は将来的にマグネシウムを高蓄積する高栄養価作物の作出といった農業への応用も期待されます。

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業、市村清新技術財団植物研究助成、公益財団法人豊秋奨学会、岡山大学資源植物科学研究所における共同利用・共同研究拠点事業の支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注 1）輸送体：

細胞膜や細胞内小器官の膜のような、生体膜を貫通して存在するタンパク質であり、イオンを、生体膜を横切って移動させる働きを持つ。

注 2）液胞：

成熟した植物細胞では、その体積の大部分（～90%）を占めることがある大きな細胞内小器官。さまざまな物質の貯蔵や、それによる細胞質のイオン環境の調節に重要な働きを持つ。

注 3）気孔：

植物体表に無数にある穴。各々の気孔は一対の孔辺細胞に囲まれて形成され、孔辺細胞の膨張と収縮で穴の開口と閉鎖が調節される（図 5）。

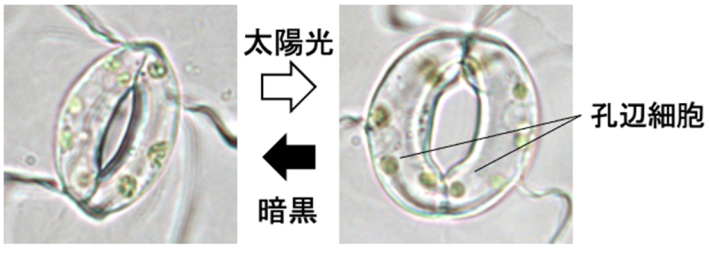


図5. 植物体表にある気孔
一対の孔辺細胞に囲まれて形成される穴。

注 4）光合成：

陸上植物では細胞内の葉緑体で行われる化学反応。太陽の光エネルギーを利用して大気中の二酸化炭素から有機物と酸素を生み出す反応。

注 5）突然変異株、または変異株：

突然変異とは、生物やウイルスがもつ遺伝物質（DNA と RNA）に質的及び量的な変化が生じること。変異株は、その変化をもつ系統。

注 6）ホメオスタシス：

生物において、その内部環境を一定に維持しようとする傾向のこと。

【論文情報】

雑誌名：New Phytologist

論文タイトル：A tonoplast-localized magnesium transporter is crucial for stomatal opening in Arabidopsis under high Mg^{2+} condition

著者：Shin-ichiro Inoue（本学教員、責任著者）, Maki Hayashi（本学元研究員）, Sheng Huang, Kengo Yokosho, Eiji Gotoh, Shuka Ikematsu（本学元研究員）, Masaki Okumura（本学元研究員）, Takamasa Suzuki, Takumi Kamura（本学教員）, Toshinori Kinoshita（本学教員、責任著者）, Jian Feng Ma

DOI: 10.1111/nph.18410

URL:https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.18410