



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 7 月 31 日
岡 山 大 学

オオムギのアルミニウム耐性を担うクエン酸輸送体の構造的基盤を解明

◆発表のポイント

- ・オオムギの根からクエン酸を分泌し、酸性土壌でのアルミニウム毒性を緩和するクエン酸輸送体 AACT1 タンパク質について、これまで不明だった立体構造を解明しました。
- ・この構造解析により、クエン酸を輸送する仕組みも明らかになりました。
- ・本成果は、AACT1 タンパク質の働きを応用すれば、安定して収穫できる作物の開発に役立つことが期待されます。

岡山大学学術研究院先鋭研究領域（異分野基礎科学研究所）の菅倫寛教授の研究グループは、同領域（資源植物科学研究所）の馬建鋒教授、三谷奈見季准教授、同領域（異分野基礎科学研究所）の篠田渉教授、浦野諒助教（特任）らと共同で、オオムギ由来のクエン酸輸送体 AACT1 タンパク質の立体構造を明らかにしました。この立体構造の解析から、AACT1 がクエン酸を放出する仕組みの構造的基盤が解明されました。

本研究成果は、日本時間 8 月 5 日（火）午前 4 時（米国東部標準時：4 日午後 3 時）、米国の科学アカデミー発行の機関誌「*Proceedings of the National Academy of Sciences*」に掲載されます。

酸性土壌では、アルミニウムが溶け出し、植物は生育不良に陥ります。しかし一部の植物は、この環境ストレスを緩和するように進化し、根からクエン酸を分泌する機能を獲得しています。オオムギは、イネや小麦と比べて酸性土壌での生育が難しい作物とされていますが、一部の品種では、AACT1 を介して根からクエン酸を分泌することで酸性ストレスを緩和しています。

本研究により、クエン酸を輸送するこの AACT1 の巧妙な働きが明らかになりました。植物のアルミニウム耐性を担うタンパク質の立体構造を深く理解し、その機能を精密に制御できれば、酸性土壌でも健全に生育可能な作物の開発につながることを期待されます。

このクエン酸輸送体 AACT1 は、馬教授のグループによって発見されたものであり、その構造研究は岡山大学大学院命自然科学研究科に在籍していたベトナム出身の留学生、チャン・グエン・タオ大学院生が、5 年の歳月をかけた研究の末に成し遂げた成果です。この輸送体タンパク質のグループは、すでにいくつかの構造が明らかにされていましたが、クエン酸のように負電荷をもつ物質を輸送するタイプの立体構造は、長らく未解明のままでした。

本研究は、彼女の粘り強い努力と、共同研究者の多大な支援のもとで実現された成果です。



菅教授



PRESS RELEASE

■発表内容

<現状>

土壌の酸性化は、世界中の作物生産に深刻な影響を及ぼす広範な問題です。耕作可能な土地のおよそ 30～40%が酸性土壌であり、その主な原因として、降雨、肥料施用、有機物の分解、農作物の収穫などが挙げられます。特に日本は多雨な気候のため、土壌中のカルシウムやマグネシウムなどの塩基が雨水により流出しやすく、酸性化が進行しやすい傾向があります。酸性土壌ではアルミニウムがイオン化し、植物の根に吸着してその成長を阻害します。

一方で、酸性土壌に適応し、その環境ストレスを緩和するように進化した植物も存在します。オオムギはイネや小麦と比べて酸性土壌での生育が難しいとされていますが、一部の品種では、根からクエン酸を分泌することでアルミニウムの毒性を軽減し、生育を可能にしています。オオムギは古くから世界各地で栽培されてきた作物であり、ビールや味噌の原料として私たちの生活に欠かせません。

これまで馬教授のグループは、特定のオオムギ品種がアルミニウムイオンを感知すると、これを無毒化するためにクエン酸を根から放出し、クエン酸がアルミニウムと結合することで、生育阻害を回避することを明らかにしてきました。また、このクエン酸の放出には、AACT1 (Al-Activated Citrate Transporter 1) と呼ばれるアルミニウム活性型クエン酸輸送体タンパク質が関与することも、同グループによって発見されています。しかし、これまで AACT1 タンパク質の立体構造は明らかにされておらず、クエン酸放出の分子メカニズムは不明でした。

<研究成果の内容>

オオムギ由来のクエン酸輸送体 AACT1 の立体構造を、X 線結晶構造解析という手法により 3.2 Å (1 Å = 1×10^{-10} m) の解像度で決定し、その構造的基盤を明らかにしました。解析の結果、AACT1 タンパク質はアルファベットの V 字型をした構造をもち、細胞の外側に大きく開いた状態をとっていました。輸送体の中央には大きくくぼみが形成されており、その内側には一方に正電荷、他方に負電荷が分布していました (図 1)。

クエン酸は負の電荷をもつため、この正電荷を帯びた領域に引き寄せられ、結合した後、細胞外へと輸送されると考えられました。加えて、くぼみの負に帯電した領域は、輸送体の動作に必要な正電荷をもつ水素イオンを引き付けている可能性も示されました。

この仮説を検証するため、クエン酸が結合すると考えられるアミノ酸を人為的に変異させたところ、その部位がクエン酸の効率的な輸送に不可欠であることが明らかになりました。さらに、理論化学計算によっても、その部位にクエン酸が結合することが裏付けられました。

細胞膜を介した物質の輸送は、生物学における基本的かつ重要な研究テーマです。本研究は、AACT1 の立体構造を初めて明らかにしただけでなく、クエン酸の輸送において、構造中の正電荷および負電荷を巧みに利用する仕組みを示した、初の報告となりました。

PRESS RELEASE

＜社会的な意義＞

土壌の酸性化は、作物生産において世界的な課題であり、主な原因はアルミニウムのイオン化による植物根への吸着と、それに伴う成長阻害です。

一方で、植物は進化の過程でアルミニウム耐性を獲得し、酸性土壌に適応してきました。AACT1タンパク質のように、アルミニウム耐性に関与するタンパク質の立体構造と機能の詳細を解明することは、酸性土壌でも健全に育つ作物の開発に直結する重要なステップです。

この知見は、農業の持続可能性向上や食糧安全保障の強化に資するものであり、今後の品種改良や農地利用の最適化において大きな社会的意義を持つといえます。

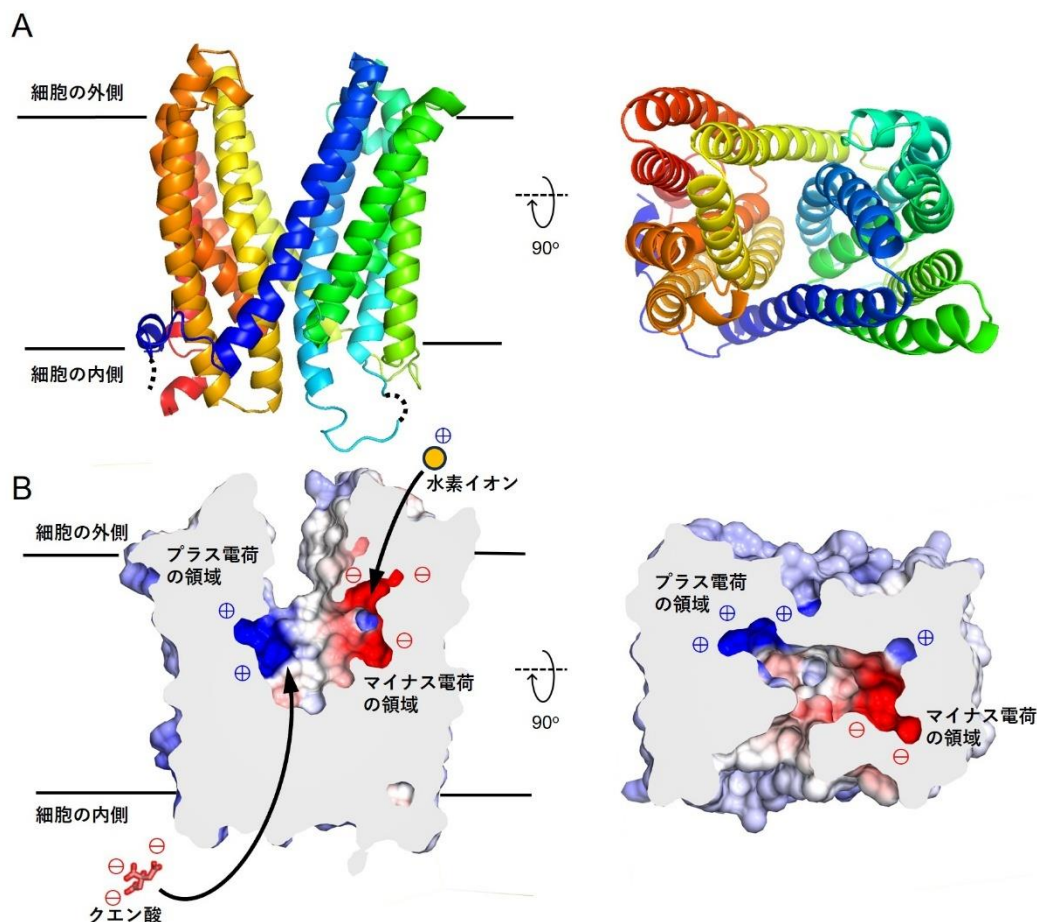


図 1. クエン酸輸送体タンパク質 AACT1 の立体構造とその中央部に見つかったくぼみ

(A) AACT1 タンパク質の立体構造を細胞膜に対して横側の向き（左）と細胞の外側の向き（右）から見たものをリボン図で表示させた。実際の大きさのおよそ 1000 万倍に拡大して表示している。(B) AACT1 の細胞表面の電荷の分布を(A)と同じ方向で表示させた。AACT1 タンパク質は細胞の外側に開いており、中央部には大きなくぼみがある。このくぼみにはプラスの電荷に帯電した領域とマイナスの領域に帯電した領域がある。マイナスの電荷を持つクエン酸は AACT1 タンパク質のプラスの電荷の領域に結合し、プラスの電荷を持つ水素イオンはマイナスの電荷の領域に結合する。



PRESS RELEASE

■論文情報

論文名: "Structural insights into a citrate transporter that mediates aluminum tolerance in barley"

「オオムギのアルミニウム耐性に関わるクエン酸輸送体の構造的知見」

掲載紙: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*

著者: Tran Nguyen Thao, Namiki Mitani-Ueno, Ryo Urano, Yasunori Saitoh, Peitong Wang, Naoki Yamaji, Jian-Ren Shen, Wataru Shinoda, Jian Feng Ma, and Michihiro Suga

DOI: 10.1073/pnas.2501933122

■研究資金

本研究は、日本学術振興会・科学研究費補助金「特別推進研究」（課題番号：JP16H06296）、「基盤研究 S」（課題番号：JP21H05034）、「基盤研究 B」（課題番号：JP23K27143）、JST・創発的研究支援事業 JPMJFR230W、日本学術振興会・論博事業等の支援を受けて実施しました。

■補足・用語説明

注意 1：酸性土壌

土壌中の水素イオン濃度を示す指標である pH において、7.0 より小さいものを酸性、7.0 を中性、7.0 より大きいものをアルカリ性と定義される。土壌の pH が 5.5 以下になると、土壌中のアルミニウムがイオン化して溶出し、土壌微生物の活動や作物の生育に悪影響を及ぼす。日本の土壌の多くは黒ボク土であり、アルミニウムを多量に含むことに加え、多雨な気候のためにカルシウムやマグネシウムといった塩基が雨水によって流亡しやすく、酸性化が進行しやすい特徴がある。このような背景から、酸性土壌は日本における農作物の生産を制限する重要な要因の一つとなっている。

注意 2：X 線結晶構造解析

原子と原子との結合距離は $1 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$) 程であり可視光 ($400\text{--}800 \times 10^{-9} \text{ m}$) よりもはるかに短いため、光学顕微鏡で拡大して観察することができない。このため、分子の形を詳細に観察するために、分子を結晶化して可視光よりも波長の短い X 線を照射することで立体構造を決定する X 線結晶構造解析という手法が用いられている。



PRESS RELEASE

<お問い合わせ>

岡山大学 学術研究院先鋭研究領域（異分野基礎科学研究所）
教授 菅 倫寛（すが みちひろ）
（電話番号）086-251-7877

岡山大学 学術研究院先鋭研究領域（資源植物科学研究所）
教授 馬 建鋒（ま けんぼう）
（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。