

クエン酸輸送体 FRDL1 の欠損がもたらすイネの鉄過剰ストレス耐性

イネ地上部への鉄蓄積の抑制により、アフリカや東南アジアで発生する鉄過剰ストレスへの耐性が上昇することが知られているが、関連するメカニズムは明らかになっていない。水稻根の導管で主に発現するクエン酸輸送体 FRDL1 の欠損により、鉄過剰条件において根から地上部への鉄の輸送が制限され、葉身における鉄の蓄積と褐変症状の形成が抑えられる。根における FRDL1 の働きを制御することで、鉄過剰ストレス耐性が向上したイネの育種素材開発が期待される。

キーワード：イネ、鉄過剰ストレス、クエン酸、褐変症状

背景・ねらい

鉄は植物の必須元素であるがその過剰な供給は植物の生育に悪影響を及ぼす。アフリカや東南アジアの水田では、鉄過剰ストレスが幅広く発生しており、地域の水稲収量の阻害要因となっている。これまでに、鉄過剰ストレス圃場において耐性を発揮する系統の中に、地上部への鉄蓄積を抑制するものが知られている。しかし、鉄過剰ストレス条件で地上部への鉄蓄積の抑制に関わる遺伝子や分子メカニズムは明らかになっていない。

本研究では、根で吸収された鉄が主にクエン酸によりキレート*されて地上部に移行することに着目し、クエン酸輸送体の機能が欠損した系統の評価を行う。また、クエン酸輸送体の欠損が鉄過剰ストレス耐性を変化させる生理的メカニズムを明らかにするとともに、鉄過剰ストレス耐性の向上を目指した育種への応用可能性を検討する。

*キレート：金属イオンと結合することで、金属イオンを安定化させたり輸送しやすい形態に変化させたりすること。

成果の内容・特徴

1. 根の導管で主に発現するクエン酸輸送体 FRDL1 が欠損した系統（以下、*frdl1* 変異体）では、過剰な二価鉄（300 mg Fe L⁻¹に相当する FeSO₄）を与えた条件で、葉の褐変症状の形成の程度の指標である褐変症状スコアが野生型と比べて有意に低下する。一方、根の表皮細胞で発現し、根圏へのクエン酸の放出に関わる輸送体 FRDL4 の変異体では野生型と同程度の葉の褐変症状を形成する（図 1）。
2. *frdl1* 変異体では、過剰な二価鉄（300 mg Fe L⁻¹に相当する FeSO₄）を与えた場合に、野生型と比べて根の鉄濃度には変化がないのに対し、葉の鉄濃度が

43%減少する。一方、同量の鉄をキレート鉄（三価鉄-EDTA）として与えた場合にはこのような系統間差はみられない（図 2）。

3. 鉄過剰ストレス耐性の低い感受性品種 Ciherang と、日本晴背景の *frdl1* 変異体の交雑後代（F₂ 世代）を過剰な二価鉄（300 mg Fe L⁻¹に相当する FeSO₄）を鉄源とする水耕溶液で 8 日間栽培し、葉の褐変症状と葉身の鉄濃度を比較すると、機能型の FRDL1 をもつ個体群と比べて、変異型の FRDL1 をもつ個体群の葉身の鉄濃度が有意に低下し、褐変症状の形成が抑えられる（図 3）。
4. これらのことから、FRDL1 の欠損は、根導管のクエン酸存在量を低下させ、根から地上部への鉄輸送を制限することで、鉄過剰ストレス耐性を向上させるメカニズムが示唆される（図 4）。

成果の活用面・留意点

1. 根における FRDL1 の機能を制御することで、イネの鉄過剰ストレス耐性を改善できる可能性がある。
2. FRDL1 は穂への鉄の転流にも関わるため、同機能の制御が籾の稔実にも影響を及ぼす可能性がある。そのため、根特異的に *FRDL1* の発現の調節に関わる因子を特定し、それを活用した育種を進めていくことが重要である。

その他

予算区分：交付金プロ [B5 アフリカ稲作システム]
研究実施期間：2022～2025 年度
研究担当者：植田佳明（生産環境・畜産領域）
発表論文等：Ueda (2025) *Plant Biol.* <https://doi.org/10.1111/plb.70107>

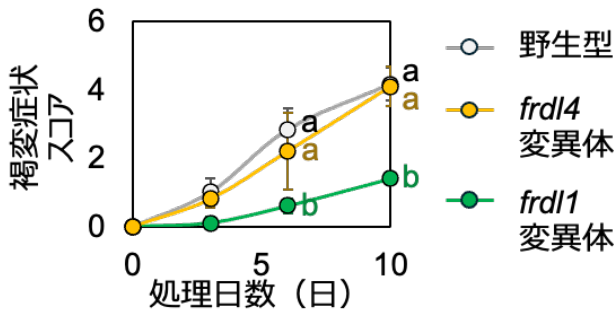


図1 異なる遺伝子型における、鉄過剰ストレスに伴う葉の褐変症状の形成

過剰な二価鉄 (FeSO_4) を鉄源とする鉄過剰条件の水耕溶液を処理し、褐変症状の形成の程度を数値化した。高い値ほど褐変症状の程度が高いことを示す。異なるアルファベットは $p < 0.05$ 水準で系統間差が有意であることを示す。

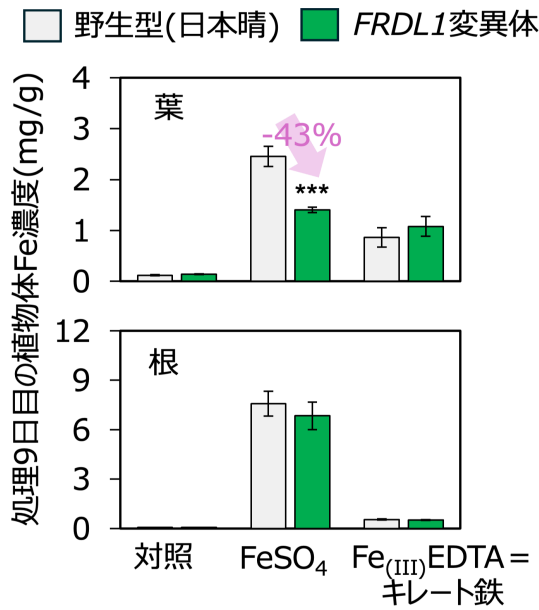


図2 異なる鉄条件における組織中の鉄濃度

対照区、対照区に加えて過剰な鉄を硫酸鉄 (FeSO_4) の形で含む FeSO_4 区、また、対照区に加えて過剰な鉄を三価鉄-EDTA の形で含む Fe -EDTA 区での処理の後、葉身（上）と根（下）における鉄濃度を測定した。アスタリスク(***)は、 $p < 0.001$ 水準で FeSO_4 区における鉄濃度が野生型と *frdl1* 変異体で有意に異なることを示す。

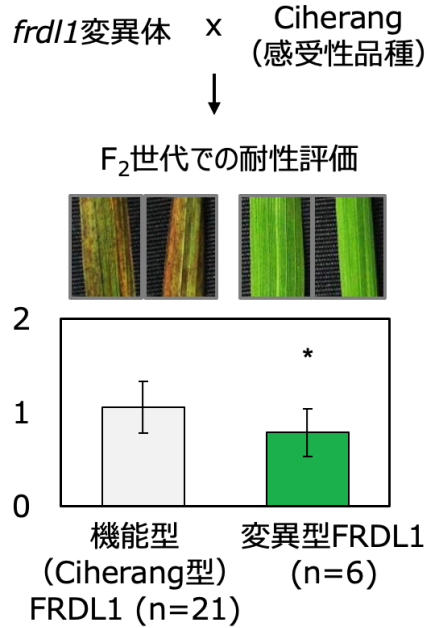


図3 FRDL1の変異が感受性品種 Ciherang との交配集団において及ぼす影響

frdl1 変異体と Ciherang の交配に由来する F₂ 集団の葉の褐変症状と葉身の鉄濃度を評価した。写真は、各遺伝子型の代表的な個体の葉の褐変症状の様子を示す。アスタリスク(*)は、 $p < 0.05$ 水準で鉄濃度が、機能型の FRDL1 をもつグループと変異型 FRDL1 をもつグループの間で有意に異なることを示す。

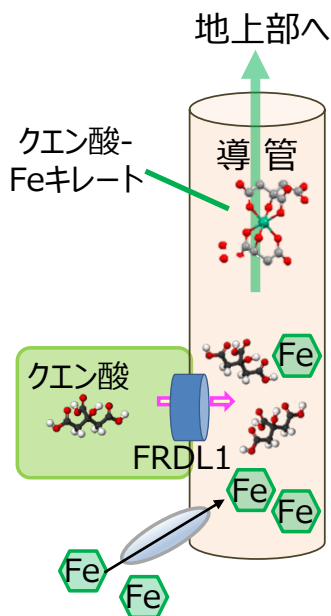


図4 FRDL1 の欠損が鉄過剰ストレス耐性に及ぼす影響の想定メカニズム

FRDL1によりクエン酸が細胞内から根の導管に放出される。導管液には植物が吸収した鉄が含まれており、それをクエン酸がキレートすることで効率的に地上部へ送られる。FRDL1の欠損により、導管のクエン酸濃度が低下し、キレートされる鉄の割合が低下することにより、鉄の地上部への輸送が減少する。キレート鉄を供給した場合には、導管中のクエン酸がなくても地上部へ鉄が輸送されるため、*frdl1* 変異体の効果は見られない。

図は Ueda (2025) © The Author 2025 より CC BY 4.0 に基づき転載/改変して作成 © Author(s) 2025 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>