

イネ科植物の根から分泌されるムギネ酸の合成類縁体による環境に優しい次世代肥料の開発

Nature Communications に掲載

(令和3年3月10日)

イネ科植物が根から分泌するムギネ酸の構造決定から始まり、ムギネ酸が土壌中の3価鉄と錯体を形成して、ムギネ酸鉄錯体として根のトランスポーターから吸収する機構を当研究所で、長年研究してきました。今回、徳島大学難波康祐教授は、愛知製鋼株式会社、石川県立大学、東京大学、北海道大学、および当研究所村田佳子特任研究員らとの共同研究により、ムギネ酸の構造を改良した環境調和型の鉄キレート剤プロリンデオキシムギネ酸 (PDMA) を開発しました。この研究成果は、3月10日にネイチャー・コミュニケーションズ電子版に掲載されました。

【発表論文】

“Development of a mugineic acid family phytosiderophore analog as an iron fertilizer”

Nature Communications 2021, in press.

Open access DOI: <https://doi.org/10.1074/jbc.RA120.015861>

鈴木基史 (愛知製鋼株式会社), 占部敦美 (徳島大学), 佐々木彩花 (徳島大学), 津川陵 (徳島大学), 西尾智 (徳島大学), 向山はるか (徳島大学), 村田佳子 (サントリー生命科学財団), 増田寛志 (石川県立大学), May Sann Aung (石川県立大学), 米良茜 (愛知製鋼株式会社), 竹内政樹 (徳島大学), 福島圭穰 (徳島大学), 金木美知佳 (北海道大学), 小林香織 (北海道大学), 千葉優一 (東京大学), Binod Babu Shrestha (徳島大学), 中西啓仁 (東京大学), 渡辺健宏 (サントリー生命科学財団), 中山淳 (徳島大学), 藤野裕道 (徳島大学), 小林高範 (石川県立大学), 谷野圭持 (北海道大学), 西澤直子 (石川県立大学、東京大学), 難波康祐* (責任著者) (徳島大学)

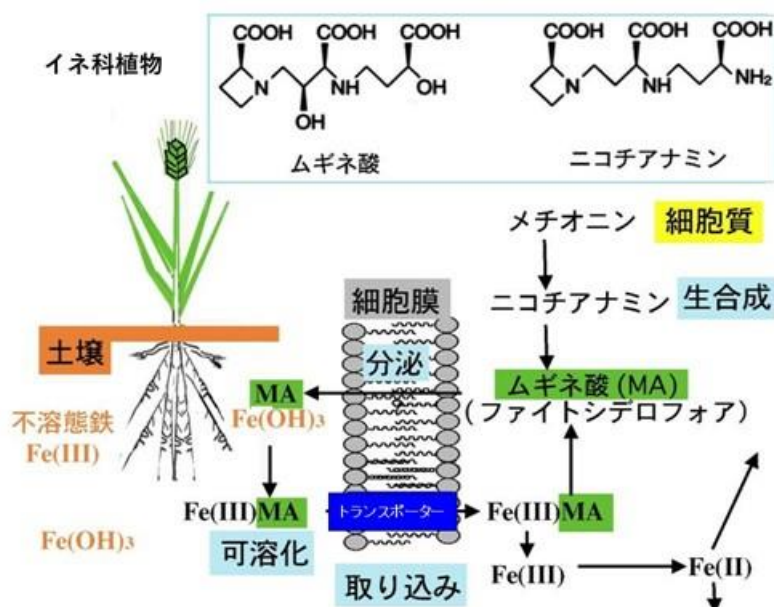


図1 イネ科植物の鉄キレート化合物ムギネ酸類による鉄取り込み機構

イネ科の中でも最もアルカリ土壌に耐性である、オオムギの鉄取り込み機構の模式図。オオムギではムギネ酸を鉄キレート物質、ファイトシデロフォアとして利用した。すなわち、鉄欠乏条件下でメチオニンから合成されたニコチアナミンを前駆体としてムギネ酸を活発に生合成し、土壌に分泌し、ムギネ酸が土壌の不動態鉄と錯体を形成して可溶化し、根から直接ムギネ酸鉄錯体としてトランスポーターを介して取り込まれた。

【研究の背景】

植物にとって鉄は必須元素ですが、世界の不良土壌の約半分はアルカリ土壌で、鉄が水に不溶態の3価鉄として存在するため、根から鉄を吸収することができません。アルカリ性不良土壌での農耕が可能となれば大幅な食料増産が期待できることから、3価鉄を溶かす農業用の鉄キレート剤の開発がこれまで精力的に行われてきました。イネ科植物は鉄分を効率よく吸収するために、根からムギネ酸と呼ばれる天然の鉄キレート剤を分泌することが知られています。当研究所では、40年前のムギネ酸構造決定に端を発し、メチオニンを出発原料とする生合成経路の解明、ムギネ酸 (MA; 大麦由来) とデオキシムギネ酸 (DMA; イネ由来) 合成法の開発、多数のムギネ酸類の構造決定など、研究が引き継がれてきました。東京大学によるムギネ酸生合成酵素遺伝子解明および遺伝子組み換えイネの作成など、日本のムギネ酸研究は世界でも群を抜いていました。当時、研究所で難波康祐博士の one pot 合成法の開発、村田佳子研究員のオオムギの根における吸収トランスポーターの同定 (図1) を基盤に、さらに安価で安定な誘導体により、今回のアルカリ圃場でも効果を確認できたことで、実用化への一歩を踏み出すことができました

【研究の内容】

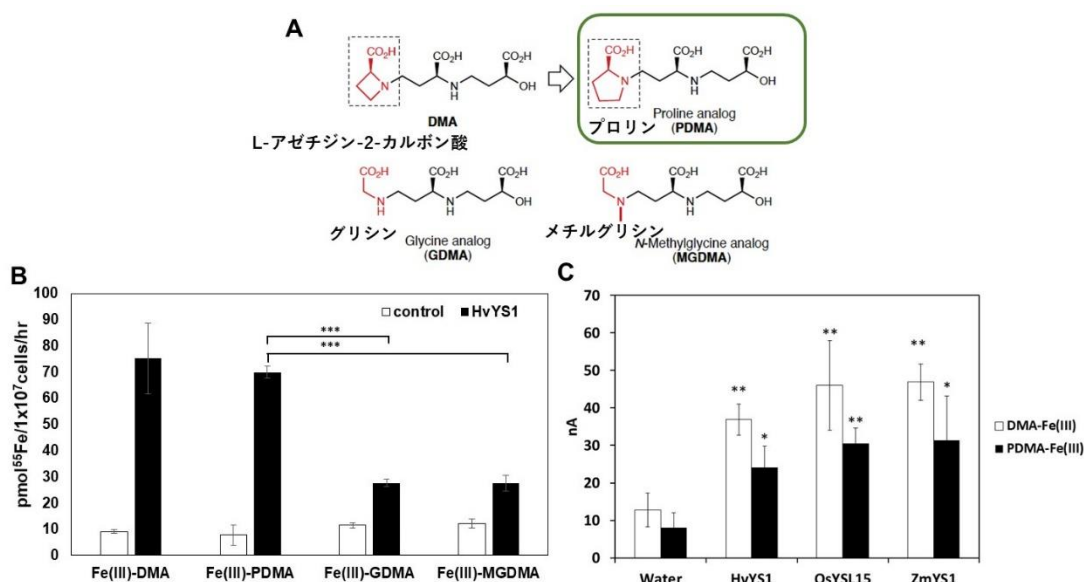


図2 合成DMAアナログの輸送活性

(A) 合成DMAアナログの構造。(B) オオムギDMA鉄錯体トランスポーターHvYS1を発現させたSf9昆虫細胞(1×10⁷cells)での輸送活性を測定した。⁵⁵Fe(III)-DMAと同様に⁵⁵Fe(III)-プロリンデオキシムギネ酸(PDMA)輸送活性が検出された。グリシン、メチルグリシン体はわずか活性だった。n = 4, *** P < 0.001。(C) HvYS1(オオムギ)、OsYSL15(イネ)またはZmYS1(トウモロコシ)のcRNA、または水(ネガティブコントロール)をインジェクションしてアフリカツメガエル卵母細胞にトランスポーターを発現させた。PDMAのFe(III)の電気生理輸送活性を測定し、この3種類の穀物のトランスポーターでPDMA鉄錯体輸送活性を検出した。n = 4, ** P < 0.005, * P < 0.05 (Nat. Commun. Fig. 3 改変)。

ムギネ酸の類縁天然物である「デオキシムギネ酸 (DMA)」の効率的な合成によってDMAを土壌に添加することが可能となり、アルカリ性土壌において、イネの鉄欠乏症を回復させることを世界に先駆けて実証しました。

しかし、DMAの4員環部分の不安定性、さらにこの4員環の原料となるL-アゼチジン-2-カルボン酸 (図2A) が非常に高価であることが、DMAを肥料として実用化するため

の大きな障壁になっていました。そこで、L-アゼチジン-2-カルボン酸を安定かつ安価なアミノ酸に代替した類縁体を種々合成し、オオムギのムギネ酸鉄錯体トランスポーターHvYS1を発現させた昆虫細胞を用いて、それらの3価鉄キレート体の細胞内への輸送活性を評価しました。その結果、L-プロリンに変更したプロリンデオキシムギネ酸(PDMA)がDMAと同程度の鉄錯体輸送活性があることが分かりました(図2B)。このPDMAの輸送活性の強さはオオムギのHvYS1のみならず、イネ(OsYSL15)、トウモロコシ(ZmYS1)の鉄錯体トランスポーターでも同様であることを証明しました(図2C)。

PDMAの合成コストはDMAの1/1000-1/10000まで削減され、原料コストの問題が解決できました。さらに、天然のムギネ酸類は1日で土壤中の微生物によって分解されますが、PDMAの分解には約1ヶ月を要するため、効果が長期的に維持されました。既存の鉄キレート剤は分解されず、土壤に長期にわたって残留するため環境への負荷が懸念されますが、PDMAは分解されるため、環境に優しい肥料と言えます。次に、アルカリ性のパイロット圃場において、PDMAの効果を検証したところ、明らかに生長が改善されていることが分かりました(図3)。定量的な実験により、PDMAが既存の鉄キレート剤よりも約10倍程度の優れた鉄供給効果を示しました。



PDMA添加

添加なし

図3. アルカリ土壤畑におけるPDMA(30 μ M)のイネ生長効果(散布4週間後)

[愛知製鋼株式会社提供]

【今後の展望】

世界の人口増加は著しく、2050年には100億人に達することが予想され、近い将来に深刻な食料難が訪れることが危惧されています。また、森林伐採による農地拡大は地球温暖化の促進や天候による災害の誘発など、環境破壊につながる恐れがあるため、食料増産への新たなアプローチが求められています。本研究は、環境にやさしいアプローチで、これまで農地には不適とされていたアルカリ土壤を活用するものです。PDMAがアルカリ性不良土壤でも農作物を正常に生育させる画期的な肥料であることが実証されたことにより、世界の食料問題を解決する手段の一つとして、今後の実用展開が期待されます。