

# 砂漠を緑地化する鉄可溶化肥料



研究ノート

難波 康祐\*

Iron-Solubilizing Fertilizer for Desert Greening

Key Words: Mugineic acids, Iron-chelator, Alkaline soils

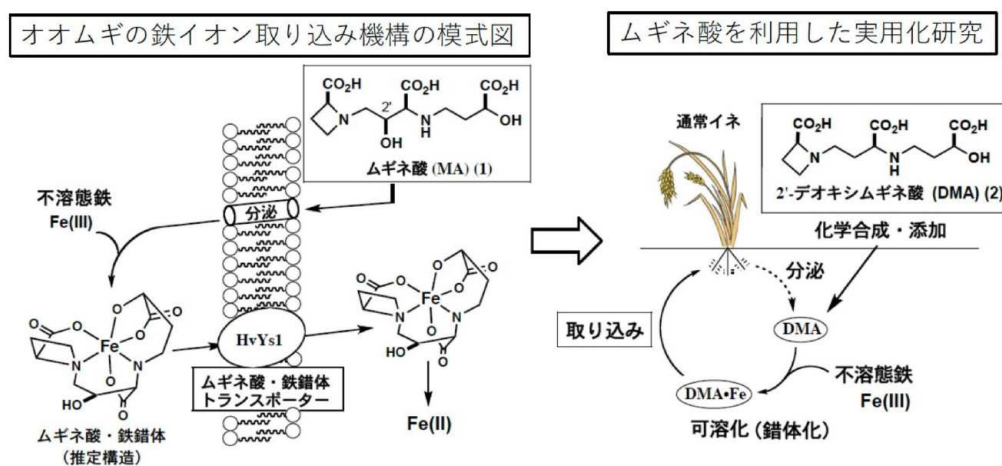


図1. オオムギの鉄イオン取り込み戦略の概要とムギネ酸を利用した実用化研究

## はじめに

近年、世界人口は急速な増加の一途を辿っている。2050年に世界人口は100億人に達することが予測されており、近い将来には食糧生産が人口増加に追いつかず、人類は深刻な食糧危機に直面することが懸念されている。国連食糧農業機関 (FAO) は、食料危機を回避するためには食糧生産量を現在の1.5倍以上に引き上げる必要があると警告しているが、森林伐採による農地拡大は地球温暖化の促進という更なる問題を引き起こす。そこで我々は、これらの問題を解決する手段として、現在農耕に使われていない不良土壌の活用に着目した。農耕に適さないと

される不良土壌は全世界の陸地のおよそ7割を占めており、そのうちの約半分 (全体の1/3) がアルカリ性の不良土壌 (砂漠土壌) とされている<sup>1)</sup>。したがって、このアルカリ性不良土壌での農業が可能となれば、森林伐採を伴わない環境に調和した農地拡大が可能になると期待された。

## イネ科植物の鉄取り込み戦略を利用する

アルカリ性不良土壌では鉄分が水に不溶な3価の水酸化鉄となるため、植物は根から鉄分を吸収できず正常に生育できない。そこで鉄分を溶かす人工キレート剤を圃場に散布するキレート農法が精力的に研究されてきたが<sup>2)</sup>、アルカリ性不良土壌で効果の高い鉄キレート剤は未だ見つかっていない。また、既存の人工鉄キレート剤は土壌に残留するため環境への負荷も懸念されている<sup>3)</sup>。一方、我々はイネ科植物の鉄取り込み機構に着目し、天然の鉄キレート剤を利用することを計画した。イネ科植物のオオムギはムギネ酸 (MA) (1) と呼ばれる天然の鉄キレート剤を根から分泌することで土壌中の鉄イオンを可



\* Kosuke NAMBA

1972年8月生まれ  
 大阪市立大学 大学院理学研究科 物質分子系専攻 博士後期課程 (2001年)  
 現在、大阪大学 大学院理学研究科 化学専攻 生体分子化学研究室 教授  
 博士 (有機合成化学)  
 TEL : 06-6850-5774  
 E-mail: namba@chem.sci.osaka-u.ac.jp

溶化し、鉄イオンをムギネ酸類・鉄錯体としてトランスポーターを介して吸収している(図1左)<sup>4)</sup>。また、イネやトウモロコシなどの穀物類もムギネ酸の一種である2'-デオキシムギネ酸(DMA)(2)を分泌することが知られている<sup>5)</sup>。しかしながら、イネやトウモロコシなどの穀物類はDMAの分泌量が十分ではないため、アルカリ性不良土壌では正常に生育することができなかつた<sup>6)</sup>。

我々はDMAを肥料として投与してやれば、それらの低分泌能を補うことができ、アルカリ性不良土壌での穀物栽培が可能になると考えた(図1右)。この計画を立案した当時、ムギネ酸が発見されてから既に30年以上が経過していたが、ムギネ酸類を肥料とする試みは全く検討されていなかった。これは、ムギネ酸が極めて入手困難であり、DMAも1mgあたり46万円と非常に高価であったため、肥料としての利用は現実的ではなかつたためである。そこで我々はDMAの添加に効果があるかを調査するために、まずはDMAの効率的な合成法の確立に取り組み、無保護のアミノ酸を順次加えていく実用的なone-pot合成法を開発した<sup>7)</sup>。

### DMAの肥料としての効果検証

DMAの安定供給が可能となったことから、イネの培地への添加実験を行った(図2)。イネの栽培試験は共同研究者の鈴木基史博士に実際のアルカリ性不良土壌を用いて行っていただいた。通常のイネをアルカリ性不良土壌で生育させるとイネは殆ど生育しなかつたが(図2左)、合成したDMA・Fe錯体をアルカリ性不良土壌の培地に加えたところ、実際のアルカリ性土壌でもイネが正常に生育することがわかつた(図2中央)。また、アルカリ性土壌の農業用キレートとして実際に使用されているEDDHA-Fe錯体の投与も生育を促進することが確認された(図2右)。

### 次世代肥料PDMAの開発

DMAに砂漠肥料としての効果があることが明らかになったが、DMAを肥料として実用化するためには解決しなければならない大きな壁があった。すなわち、1)原料のL-アゼチジン-2-カルボン酸(四角のアミノ酸)が7万円/gと非常に高価であること、2)DMAは土壌中で微生物により容易に分解

### 貝化石土壌 (pH 9)

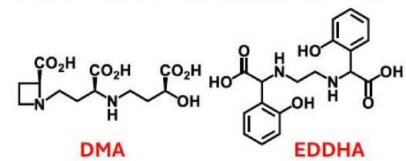
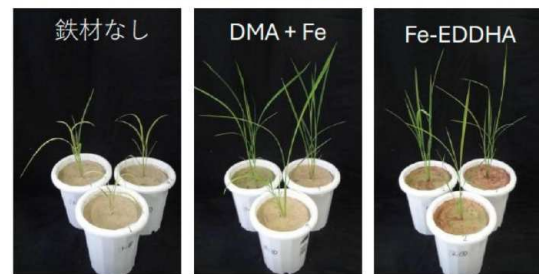


図2. アルカリ性不良土壌(貝化石土壌)での2'-デオキシムギネ酸(DMA)の添加効果。鉄剤投与後(移植後14日目)の植物の様子。EDDHA: 実用化されている人工の農業用鉄キレート剤

され、わずか1日で消失してしまうことである(図3a)。土壌中での不安定性および高価な原料コストはL-アゼチジン-2-カルボン酸に由来するものであったことから、L-アゼチジン-2-カルボン酸を安価なアミノ酸に代替することにした。先に開発したDMAの合成法に従って、L-アゼチジン-2-カルボン酸の代わりに様々な安価なアミノ酸を導入したDMA類似体を合成し、それらの成長促進効果を調べた。その結果、DMAの4員環の部分を変更に誘導した誘導体プロリンデオキシムギネ酸(PDMA)が天然のDMAよりも優れた成長促進活性を示すことを発見した(図3a)。これは、4員環の歪みが5員環になることによって解消され、土壌での安定性が向上したことが要因と考えられる。鉄欠乏の指標となるSPAD値(葉の緑色を示す値: 30を超えると正常とされている)を観測すると<sup>8)</sup>、DMAを投与後5日までは順調にSPAD値が向上しているが、その後は減少し鉄欠乏となっている(図3b)。これは、土壌でDMAが早期に分解したことを示唆している。一方、PDMAは一度の投与でSPAD値が上昇を続けており、土壌中で安定であることが示された(図3b)。また、EDDHA等の既存の鉄キレート剤は土壌に残留を続けることに対し、PDMAは一ヶ月以上かけてCO<sub>2</sub>にまで分解されるため、適度な安定性を有しつつも環境に負荷を与えない理想的な鉄キレート肥料であることも明らかと

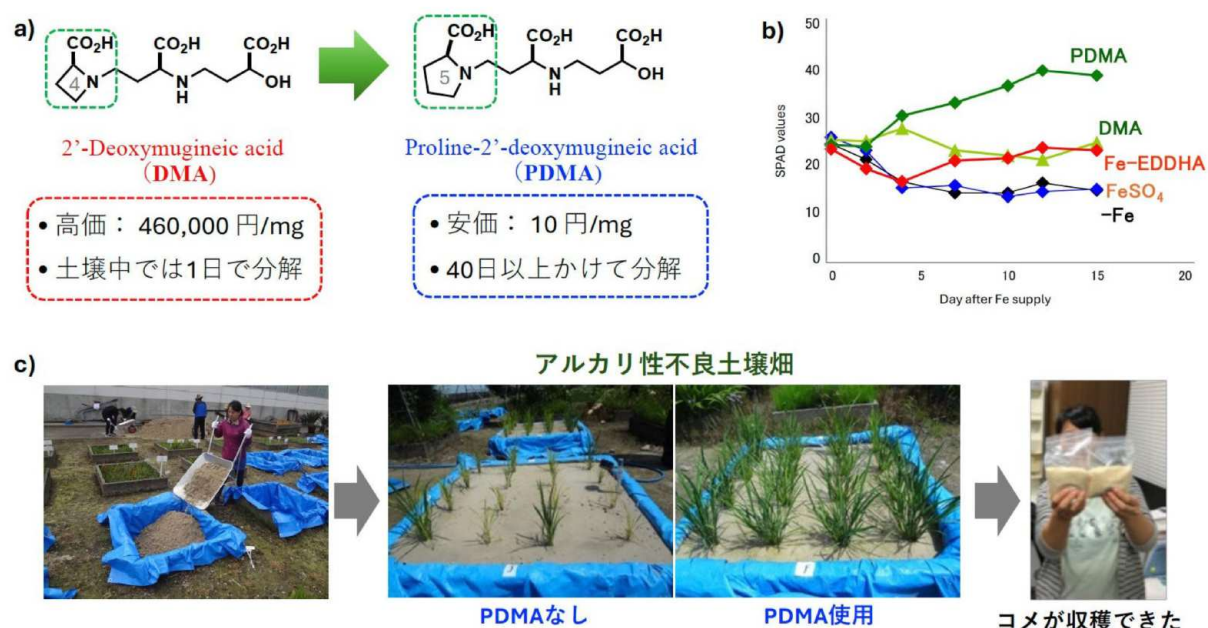


図3. PDMA の開発. a) PDMA の構造と DMA との比較. b) 鉄キレート剤投与後の SPAD 値の変化. c) アルカリ性不良土壌畑でのイネの屋外栽培試験の様子

なった。さらに、原料となるアミノ酸を 5 員環に変更したことで、原料のコストは 1/1000 以下に削減できた。原料コストと土壌中での安定性の問題を解決できたことから、PDMA を実験室で 100 g 以上合成し、実際に砂漠の土を使ったフィールド試験を行った。なお、圃場の作成および検証は愛知製鋼株式会社の協力のもと石川県立大学で実施された。富山県で採取した貝化石土壌（砂漠土壌）を用いて圃場を作成し（写真：一般の土と混ざらないようにコンクリートブロックで囲っている）、イネの圃場に PDMA を投与した。その結果、PDMA を投与しなかった圃場ではイネは生育できなかったが、PDMA を投与した圃場では砂漠土壌でも正常に生育し、実際にコメを収穫することができた。すなわち、PDMA が砂漠での農業を可能にする次世代肥料であることが実証された<sup>9)</sup>。

### 実用化に向けて

上記の成果を 2021 年に論文発表したところ大きな反響を得たが<sup>9)</sup>、その時点での PDMA の合成コストはおよそ 10～100 円/mg であった。すなわち、10 万円/mg の DMA のコストを 1/1000～10000 まで削減できたことになる。これは大幅なコスト削減であったが、10 円/mg のコストは kg スケール

にすると 1000 万円/kg である。PDMA による砂漠の緑地化を実現するためには、更なる大幅な合成コスト削減が必要不可欠であった。我々は合成経路を一から見直し検討を重ねた結果、市販の出発原料からわずか 2 工程で PDMA を与える画期的な合成経路を新たに確立し、また市販の合成原料の安価供給も確立できた。本合成経路は煩雑な反応条件やカラム精製を必要としないため大量合成にも適用可能である。現在、この新規合成経路を基に PDMA のプロセス検討を進め、最近 kg スケールでの合成を達成したところである。また海外での圃場試験も現在進行中であり、本場の砂漠土壌でも PDMA による効果が確認されたという報告が届き始めている。

### 展望

以上、アルカリ性不良土壌での農業を可能にする次世代肥料の開発について述べてきた。PDMA が広く世界に普及するようになれば、全世界の陸地の 1/3 を占めるアルカリ性不良土壌での農業が可能となり、SDGs 「2. 飢餓をゼロに」が達成できると期待している。PDMA がアルカリ性不良土壌での農業を可能にする革新的な技術であることは既の実証された。しかしながら、アルカリ性不良土壌は発展途上国や貧しい地域にも多い。今後は更に安価な誘

導体の開発にも取り組み、世界中の全ての人が容易に砂漠肥料を利用できるようにしていきたい。

また、今回は誌面の都合上、ムギネ酸の実用化に焦点を当てて紹介したが、植物がムギネ酸を利用するメカニズムの解明研究も精力的に進めており、この過程でムギネ酸のプロープ化<sup>10)</sup>、ムギネ酸・鉄錯体を取り込むトランスポーターの3次元構造の解明<sup>11)</sup>、プロープを安定に供給するためのムギネ酸効率的合成法の確立<sup>12)</sup>、機能解明のための蛍光分子開発<sup>13)</sup>などを行ってきた。これらの植物の鉄イオン取り込み機構の解明研究についても機会があれば紹介していきたい。

### 参考文献

- 1) a) A. Wallace, O. R. Lunt, *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, **1960**, *75*, 819; b) P. B. Vose, *J. Plant Nutr.*, **1982**, *5*, 233.
- 2) J. J. Lucena, *Synthetic Iron Chelates to Correct Iron Deficiency in Plants: Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms* Ch. 5 (Springer, 2006).
- 3) W. D. C. Schenkeveld, E. Hoff, A. M. Reichwein, E. J. M. Temminghoff, W. H. van Riemsdijk, *Geoderma*, **2012**, *173-174*, 282-288 (2012).
- 4) a) S. Takagi, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **1976**, *22*, 423; (b) T. Takemoto, K. Nomoto, S. Fushiya, R. Ouchi, G. Kusano, H. Hikino, S. Takagi, Y. Matsuura, M. Kakudo, *Proc. Jpn. Acad. Ser. B*, **1978**, *54*, 469.
- 5) K. Nomoto, H. Yoshioka, M. Arima, S. Fushiya, S. Takagi, T. Takemoto, *Chimia*, **1981**, *35*, 249.
- 6) S. Mori, in *Iron Nutrition and Interactions in Plants* (eds. Y. Chen & Y. Hadar) Ch. 3 (Kluwer Academic Publishers, 1991).
- 7) K. Namba, Y. Murata, M. Horikawa, T. Iwashita, S. Kusumoto, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2007**, *46*, 7060.
- 8) a) T. Maruyama, K. Higuchi, M. Yoshida, T. Tadano, *Soil. Sci. Plant. Nutr.* **2005**, *51*, 1035-1042. b) Y. Wakamiya, *JARQ*, **2016**, *50*, 329-334.
- 9) M. Suzuki, A. Urabe, S. Sasaki, R. Tsugawa, S. Nishio, H. Mukaiyama, Y. Murata, H. Masuda, M. S. Aung, A. Mera, M. Takeuchi, K. Fukushima, M. Kanaki, K. Kobayashi, Y. Chiba, B. B. Shrestha, H. Nakanishi, T. Watanabe, A. Nakayama, H. Fujino, T. Kobayashi, K. Tanino, N. K. Nishizawa, K. Namba, *Nat. Commun.*, **2021**, *12*, 1558.
- 10) K. Namba, K. Kobayashi, Y. Murata, H. Hirakawa, T. Yamagaki, T. Iwashita, M. Nishizawa, S. Kusumoto, K. Tanino, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2010**, *49*, 9956.
- 11) A. Yamagata, Y. Murata, K. Namba, T. Terada, S. Fukai, M. Shirouzu, *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 7180.
- 12) K. Kayano, T. Tsutsumi, Y. Murata, C. Ogasa, T. Watanabe, R. Sato, S. Karanjit, K. Namba, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2024**, e202401411.
- 13) K. Namba, A. Osawa, S. Ishizaka, N. Kitamura, K. Tanino. *J. Am. Chem. Soc.*, **2011**, *133*, 11466-11469.

