

不良土壌での穀物生産を可能にする次世代肥料の開発に成功

研究成果のポイント

- ・ 全世界の陸地の約3割を占めるアルカリ性不良土壌（沙漠土壌）で農作物を正常に生育させる肥料の開発に成功した。
- ・ イネ科植物が根から分泌する天然の鉄キレート剤「ムギネ酸」を基に開発した、環境に優しい次世代の肥料である。
- ・ 世界的な食糧難の解決“SDGsの「2.飢餓をゼロに」”につながる成果である。

全世界の陸地の約3分の1は農耕に適さないとされるアルカリ性不良土壌（沙漠土壌）で占められています。アルカリ性不良土壌では鉄分が水に溶けない不溶態鉄として存在するため、植物は根から鉄分を吸収できず発育不良を起こします。このため、アルカリ性不良土壌での農耕を可能にするためには、土壌中の不溶態鉄を溶かす農業用鉄キレート剤の開発が必要でした。今回、徳島大学の難波康祐教授らと愛知製鋼株式会社の研究グループは、石川県立大学生物資源工学研究所の小林高範教授ら、東京大学大学院農学生命科学研究科の中西啓仁准教授ら、北海道大学大学院理学研究院の谷野圭持教授ら、公益財団法人サントリー生命科学財団の村田佳子特任研究員らとの共同研究によって、イネ科植物が根から分泌する天然の鉄キレート剤「ムギネ酸」の化学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。本研究グループは、細胞活性試験、アルカリ性不良土壌でのイネの栽培試験、パイロット圃場試験などを通じて、PDMAがアルカリ性不良土壌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を実証しました。PDMAは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ています。

この研究成果は、3月10日付で英国の科学誌「ネイチャー・コミュニケーションズ」電子版に掲載されます。

（報道概要）

【背景】

全世界の陸地の約7割は農耕に適さない不良土壌とされており、そのうちの半分はアルカリ性の不良土壌とされています。アルカリ性不良土壌では、鉄分が水に溶けない水酸化鉄(III)（参照：用語解説）として存在しているため、植物は根から鉄イオンを吸収することが出来ず鉄欠乏症を引き起こします。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、アルカリ性不良土壌で水酸化鉄を溶かす農業用の鉄キレート剤（参照：用語解説）の開発がこれまで精力的に行われてきました。しかしながら、既存の人工鉄キレート剤では十分な効果は得られず、また土壌に残留するため環境への負荷が懸念されていました。一方、イネ科植物は鉄イオンを効率よく吸収するために、根からムギネ酸（参照：用語解説）と呼ばれる天然の鉄キレー



国立大学法人
徳島大学

AICHI STEEL

つくり、未来を。
つくり、素材で。



石川県立大学
Ishikawa Prefectural University



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY

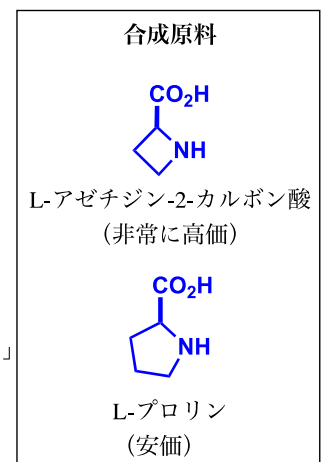
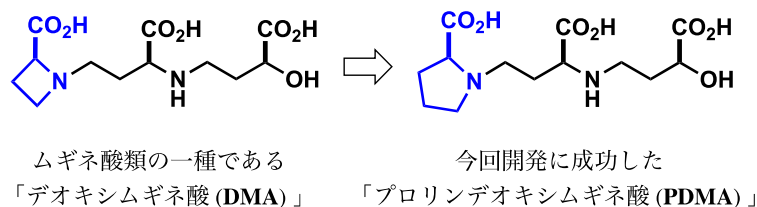


SUNTORY FOUNDATION FOR LIFE SCIENCES
BIOORGANIC RESEARCH INSTITUTE

ト剤を分泌することが知られています。しかしながら、ムギネ酸の発見から40年以上が経過したにも関わらず、ムギネ酸類を農業用鉄キレート剤（肥料）として利用する試みはほとんど行われてきませんでした。これは、ムギネ酸やその誘導体が天然から極微量にしか得られないため非常に高価であり、また土壤中で微生物によって容易に分解されることから、ムギネ酸を肥料として利用することは実質不可能と考えられてきたためでした。

【研究手法】

本研究グループは有機合成化学の技術を用いて、ムギネ酸の類縁天然物である「デオキシムギネ酸 (DMA)」の効率的な化学合成法を開発し、化学合成による供給を達成しました。これにより DMA をイネの培地に添加することが可能となり、アルカリ性不良土壌のイネが DMA の投与によって鉄欠乏症を回復することを世界に先駆けて実証しました。しかしながら、DMA を肥料として実用化するためには、DMA の土壌での安定性が低いこと、化学合成に多大なコストを要することが大きな障壁となりました。DMA の低い安定性および高い合成コストの要因は、DMA の4員環部分の歪みが非常に大きいこと、化学合成の原料に用いる L-アゼチジン-2-カルボン酸（下図参照）が非常に高価であることでした。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、その性能を評価しました。その結果、L-プロリン（下図参照）に変更した安価な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効果を示すことを見出しました。



【研究成果】

天然のアミノ酸である L-プロリンは安価に入手できるため、PDMA の合成コストは DMA の 1/1,000~1/10,000 まで削減可能となり、最大の課題であった原料コストの問題が解決できました。また、細胞試験によって PDMA はイネのみならず、トウモロコシやオオムギなど全てのイネ科植物にも有効であることが示されました。さらに、天然のムギネ酸類は1日で土壤中の微生物に分解されますが、PDMA は約1ヶ月かけて分解されるため、長期的に効果を維持しました。既存の鉄キレート剤は微生物に分解されず土壌に残留するため環境への負荷が懸念されていますが、PDMA は1ヶ月で分解されるため、環境に優しい肥料としての使用が可能で、PDMA の大量供給が可能となったことから、アルカリ性不良土壌のパイロット圃場を作製し、イネの屋外栽培

試験も実施されました。その結果、PDMA が既存の鉄キレート剤よりも約 10 倍程度の優れた鉄欠乏回復効果を示すこと、また PDMA の添加によりコメの収穫が可能であることが示されました。すなわち、実際のアルカリ性不良土壌でコメが収穫できたこととなります。

図：アルカリ土壌畑におけるイネへの鉄供給効果（撒いてから 4 週間後）



鉄剤なし



PDMA使用

【今後への期待】

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ています。このため、食糧生産が人口増加に追いつけず、近い将来に深刻な食糧難が訪れることが確実視されています。森林伐採による農地拡大は地球温暖化を促進させるため、食糧増産への新たなアプローチが求められていました。本研究は、これまで農地には不適とされていた土地を活用するものであり、深刻な環境破壊を引き起こす可能性は極めて低いと考えられます。世界の土地の約3割を占めるアルカリ性不良土壌で農作物を育てることが実現できれば、世界の食糧増産に絶大な効果をもたらすことは明らかです。実用化には未だ解決すべき課題がありますが、今回のPDMAの開発を基に、世界の土壌に応じた投与条件の精査や工業スケールでの製造法の検討を進め、世界の食糧の安定確保に貢献していきます。

研究論文名 : Development of a mugineic acid family phytosiderophore analog as an iron fertilizer (鉄肥料となるムギネ酸誘導体の開発)

著者: 氏名(所属) 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 B. 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)

公表雑誌 : *Nature Communications* (ネイチャー・コミュニケーションズ)

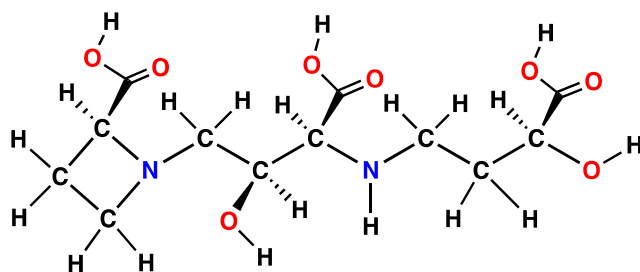
公表日 : 日本時間(現地時間) 2021 年 3 月 10 日(水)午後 7 時 (英国時間 2021 年 3 月 10 日)

【用語解説】

水酸化鉄・・・鉄の水酸化物の名称であり、鉄の酸化数により水酸化鉄(II)と水酸化鉄(III)が存在する。アルカリ性不良土壤中の水酸化鉄は水酸化鉄(III)である。水酸化鉄(III)は慣用的な名称であり、実際の構造は酸化水酸化鉄(III)(FeO(OH))である。いわゆる赤錆であり、アルカリ性条件下で極めて水に溶けにくい。

鉄キレート剤・・・「キレート」はギリシャ語で「蟹のはさみ」の意。鉄イオンを取り囲んでアルカリ土壌中でも安定に存在させる物質。

ムギネ酸・・・・・・・・植物が分泌する天然の鉄キレート物質。1976年に岩手大学の高城成一博士が「ムギの根から分泌する酸」として発見し、1978年にその化学構造式が竹本常松博士らによって決定され、この名が付けられた。



ムギネ酸の化学構造式

【研究内容に関する問い合わせ先】

(徳島大学)

部局名 大学院医歯薬学研究部

責任者 教授・難波康祐

電話番号 088-633-7293

メールアドレス namba@tokushima-u.ac.jp

(愛知製鋼株式会社)

部局名 広報室

電話番号 052-603-9216

<https://www.aichi-steel.co.jp/index.html>

【その他各機関の問い合わせ先】

(石川県立大学)

部局名 生物資源工学研究所

責任者 教授・小林高範

電話番号 076-227-7505

メールアドレス abkoba@ishikawa-pu.ac.jp

(東京大学)

部局名 大学院農学生命科学研究科

責任者 准教授・中西啓仁

電話番号

メールアドレス

(北海道大学)

部局名 大学院理学研究院

責任者 教授・谷野圭持

電話番号 011-706-2705

メールアドレス ktanino@sci.hokudai.ac.jp

(公益財団法人サントリー生命科学財団)

部局名 生物有機科学研究所

責任者 特任研究員・村田佳子

電話番号 0774-66-1950

メールアドレス murata@sunbor.or.jp

プレスリリース「不良土壌での農業を可能にする次世代肥料の開発に成功」

補足資料（石川県立大学）

石川県立大学 生物資源工学研究所の小林高範教授らの研究グループは、徳島大学の難波康祐教授ら、愛知製鋼株式会社の鈴木基史博士ら、東京大学大学院農学生命科学研究科の中西啓仁准教授ら、北海道大学大学院理学研究院の谷野圭持教授ら、公益財団法人サントリー生命科学財団の村田佳子特任研究員らとの共同研究によって、イネ科植物が根から分泌する天然の鉄キレート剤「ムギネ酸」の化学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）」の効果を証明しました。

プレスリリース全体の成果の概要

全世界の陸地の約3分の1はアルカリ性不良土壌で占められています。この土壌では鉄分が水に溶けにくい難溶態鉄として存在するため、植物は根から鉄分を吸収できず生育不良を起こします。このため、アルカリ性不良土壌での農業生産を可能にするためには、土壌中の難溶態鉄を溶かす農業用鉄キレート剤の開発が必要でした。上記6機関から成る研究グループは、イネ科植物が根から分泌する天然の鉄キレート剤「ムギネ酸」の化学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。本研究グループは、細胞活性試験、アルカリ性不良土壌でのイネの栽培試験、パイロット圃場試験などを通じて、PDMA がアルカリ性不良土壌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を実証しました。PDMA は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ています。この研究成果は、英国の科学誌「ネイチャー・コミュニケーションズ」電子版に掲載されます。

本学の成果の概要

小林高範教授、西澤直子特任教授（現・学長）、増田寛志特別研究員（現・秋田県立大学）、メイサンアウン特別研究員（現・秋田県立大学）らは、これらの研究のうち、

アルカリ性土壌水田でのパイロット圃場試験と、PDMA による土壌からの金属溶出効果およびイネへの金属蓄積効果の検定を行いました。

パイロット圃場試験では、富山県の貝化石土壌^(注1)を石川県立大学構内のコンクリートブロック内に運搬してアルカリ性土壌の水田を作製し、イネを屋外栽培しました。水田水に鉄肥料として PDMA を投与した区、既存の農業用鉄キレート材である鉄-EDDHA を投与した区および鉄肥料を投与しない区（対照区）で栽培を行い、生育を比較しました。投与の4週間後には、対照区のイネは鉄欠乏によって生育が著しく阻害されていたのに対して、PDMA 投与区のイネは鉄欠乏症状を示さず、健全に生育していました（図1）。また、PDMA が既存の鉄-EDDHA の1/10量の投与で同等の鉄欠乏回復効果を示すこと、PDMA の投与によりイネは収穫期まで順調に生育しコメの収穫が可能であることを明らかにしました。すなわち、実際のアルカリ性不良土壌でコメが収穫できたことになります。



対照区(鉄肥料無し)



PDMA投与区

図1. アルカリ土壌水田でのPDMAの投与効果(4週間後)

また、PDMA による土壌からの金属溶出試験では、PDMA をアルカリ性不良土壌に投与した時に、土壌から水溶液中に鉄・亜鉛を溶出させる効果があることを明らかにしました。

イネへの金属蓄積効果の検定では、鉄-PDMA または PDMA をアルカリ性不良土壌に投与してイネを育てた場合、葉中の鉄含量を増加させること、亜鉛-PDMA で与えた場合は、葉中の亜鉛含量を増加させることを明らかにしました。

以上の結果から、PDMA がアルカリ性不良土壌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を実証しました。

(注 1) 貝化石土壌：太古の魚介類に由来する化石（貝化石）を主成分とする土壌で、pH 9～10 のアルカリ性を示すため、植物は鉄欠乏になります。一方、酸性土壌に施用すると、土壌酸度の改良とともにミネラル補給の効果があるため、天然肥料として利用されています。（日本海肥料株式会社「ネオベスト」など）

(参考) 各研究機関の役割分担

徳島大学：PDMA および関連化合物の有機化学合成および中量合成法の確立、化学的性質の測定、細胞毒性評価、研究取りまとめなど

愛知製鋼株式会社：ポット栽培およびパイロット圃場試験での PDMA および関連化合物のイネへの効果の検定、分解活性の測定、データ解析など

石川県立大学：パイロット圃場試験での PDMA および関連化合物のイネへの効果の検定、PDMA による土壌からの金属溶出効果およびイネへの金属蓄積効果の検定など

東京大学：イネ体内での PDMA および関連化合物の検出、遺伝子発現調査など

北海道大学：PDMA および関連化合物の有機化学合成など

公益財団法人サントリー生命科学財団：PDMA および関連化合物の細胞への取り込み活性測定など