

農業用鉄キレート剤のフィールド実験より

写真提供：愛知製鋼(株)

食料危機を救う鉄の力

鉄は、ほぼ全ての生物に欠かせない金属元素である。しかし、アルカリ性土壌の場合は鉄分が水に溶けていないため、植物は根から鉄をうまく吸収することができない。そこで開発されたのが、土壌中の不溶態鉄を溶かす農業用鉄キレート剤だ。世界の食料問題を解決する手段の一つとして今後の展開が期待されている。

土壌中の鉄分の吸収を助ける「ムギネ酸」

植物は鉄が不足すると光合成が抑制されて葉が黄白化し、深刻な場合は枯れてしまう。鉄は光合成に必要な酵素の働きを助け、植物が成長するためのエネルギーを作り出す重要な役割を果たしている。

通常、植物は土壌中の水に溶けている鉄分を根から取り込むが、アルカリ性不良土壌においては鉄分が不溶態鉄として存在するため吸収することができない。亜鉛やマンガンなど、他のミネラルと比較して鉄が圧倒的に水溶性に乏しい性質を持っていることも、植物が土の中の鉄分を吸収しにくくしている原因となっている。このようなアルカリ性土壌は全世界の陸地のおよそ3割を占めており、農耕に適さない不良土壌も多く存在する(図1)。

しかし、イネ科の植物であるオオムギは「ムギネ酸」と呼ばれる天然の鉄キレート剤(鉄イオンを取り囲んでアルカリ性不良土壌でも安定して存在させる物質)を多く分泌するため、アルカリ性土壌でも鉄分を効率良く吸収できる。それに比べて、同じイネ科でもムギネ酸の分泌が十分でないコメやトウモロコシはうまく育つことができない(図2)。

植物生理学の教科書に必ず載っているムギネ酸は、1970年代に東北大学農学研究所の高城成一博士(後に

岩手大学教授)によって発見された。これによって、イネ科植物は自ら分泌するムギネ酸を介して鉄を吸収する全く新しい機構を持つことが明らかになった。そして東京大学農学部の森敏・西澤直子両教授はムギネ酸を遺伝子レベルで研究し、ムギネ酸を作る酵素や鉄の吸収に関わるトランスポーター(輸送体)の存在を明らかにした。

高価な鉄キレート剤を農業用に使用するために

研究により働きが明らかとなったムギネ酸は天然から極微量しか得ることができず、その類縁体でも価格は1mgあたり約10万円と非常に高価であった。土壌中の微生物によって容易に分解されてしまうことから、農業用の鉄キレート剤(肥料)として利用するのは不可能とされていた。

そこで、合成化学を専門とする徳島大学大学院医歯薬学部の難波康祐教授は、ムギネ酸鉄錯体を人工的に作り、サプリメントのように植物に与えればアルカリ性不良土壌でも育つのではないかと考え、できるだけ低コストでムギネ酸を作る合成法の開発に取り組んだ。そこには食料増産に貢献できるのではないかという思いがあった。

難波教授が最初に開発したのは、ムギネ酸に似た天然物(デオキシムギネ酸→以下DMA)の効率的な化学合成

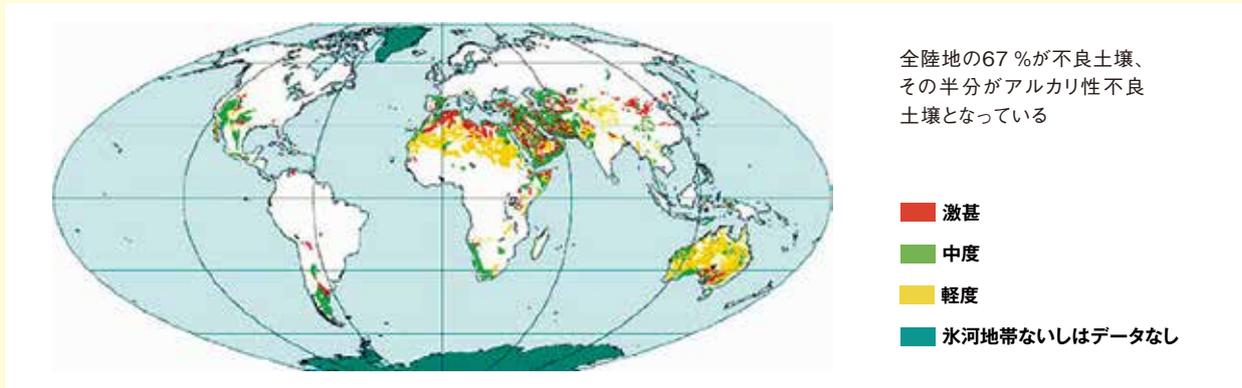


図1 石灰質アルカリ性土壌の分布

FAO(国連農業食糧機関)のホームページより

法である。実際に合成したDMAを用いてコメの水耕栽培実験を行ったところ、pH 5.8の酸性培地では鉄イオンが無いと発育不全となり、鉄イオンを与えるとよく育った。一方、pH 8のアルカリ性培地では、鉄イオンだけではうまく育たないが、そこにDMAを加えると非常によく育った(図3)。この結果は、DMA・鉄錯体を外部から加えることによってイネがアルカリ性条件下においても鉄イオンを吸収できることを示している。

産学連携によって、研究は大きく進展

DMAによりイネが育った成果については、「水耕栽培は培地に鉄イオンとDMAしか存在していないからであり、他のミネラルや微生物を多く含む実際の土壌では成果が出ないのではないか」という見解を持つ人が多かった。そこで、難

波教授の研究グループは実際の土壌でDMAの効果を試そうとした。しかし、鉄欠乏に陥った植物モデルを作れる共同研究者が見つからなかったため、海の砂を採取し、蒸留水で洗った砂の上でイネを栽培してみた。それでも鉄欠乏にはならなかった。

研究は一時停滞したが、東京大学・西澤直子教授(現石川県立大学学長)により愛知製鋼(株)を紹介してもらうことができた。同社は特殊鋼製造のノウハウを活かして農業用の鉄肥料を開発・販売しており(図4)、海外のアルカリ性不良土壌で植物を育てるための研究にも取り組み、鉄欠乏モデルの植物を生み出す技術を保有していた。難波教授は、「もし紹介されたのが肥料メーカーであったら、ムギネ酸鉄錯体の化学構造式を見ただけで実現は不可能だと判断されてしまっただろう。新規素材を模索している鉄鋼メーカーだからこそ粘り強く取り組み実現できた」と、振り返る。

安価で環境負荷のないキレート剤の開発

早速、鉄欠乏状態の植物を用いた実証実験を行うと、肥料として実用化されている鉄キレート剤(EDTA、EDDHA等)よりも高い効果を現すことが確認できた。しかし、肥料として実用化するためには、合成原料に1gあたり約6万4千円のコストがかかり、まだ高すぎた。そこで、合成原料となるアミノ酸をより安価なものに代替したところ、1gあたり9円の原料で10倍もの効果をもたらすプロリンデオキシムギネ酸(PDMA)を生み出すことに成功した(図5)。

天然のキレート剤は一日で土壌中の微生物に分解されてしまうが、PDMAは緩やかに分解するため、肥料としての効果が長続きする。毒性もなく、土壌に残留しないことから、



Horst Marschner 教授 撮影
森敏教授提供(NPO法人 植物鉄栄養研究会)

図2 鉄欠乏で全滅のトウモロコシ畑(アメリカ・ユタ州)

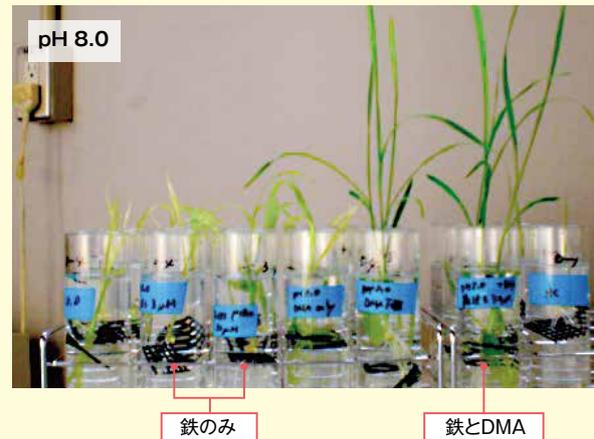
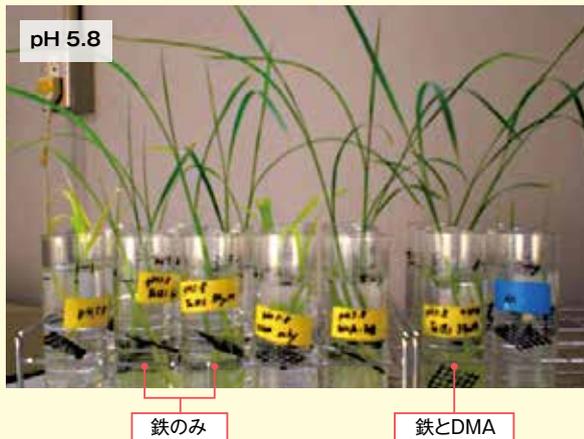


図3 DMAを用いたイネの水耕栽培実験

写真提供：公益財団 サントリー生命科学財団 村田佳子博士

環境に負荷を与えることもない。しかも、鉄分と一緒に投与しなくても土壌中の鉄分が利用されてイネ科の植物に取り込まれるのは、他の鉄キレート剤にはない特長である。

不良土壌でもイネが育つことを証明

PDMAのフィールド実験は、石川県立大学の圃場内において日本で初めて行われた(図6)。土壌に使用したのは、富山県の貝化石鉱床から採掘した砂のような石灰質土壌である。日本ではカルシウム不足を補うために有用な資材として活用されているが、海外のアルカリ土壌を模して貝化石の土壌単独で鉄欠乏の評価試験を行った。1m四方に区切った貝化石土壌の水田に、5月中旬にイネの苗を移植したところ、1週間後には葉の緑色が薄くなる鉄欠乏症状が

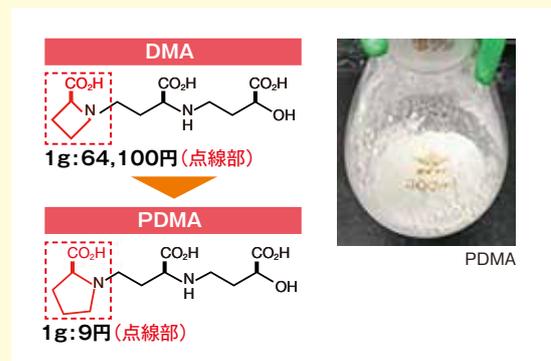
起こった。そこで同月末にPDMAやキレート剤を投与し、鉄欠乏の回復具合を評価した。実用化されているキレート剤は散布後に土の表面が黄や赤に染まったが、PDMAの散布は無色透明であった。1m四方に1.6gのPDMAを撒いただけで、わずか10日間で苗の成長が回復し、同じ濃度で投与したキレート剤との明らかな違いが見られた。

さらに10日後、キレート剤なしの苗は鉄欠乏となってほぼ枯れた状態になったが、PDMAを散布した苗はそのまま育ち、9月には豊かに実った米を収穫できるまでに成長した。これは、アルカリ性不良土壌においてもPDMAを添加することで米の収穫が可能になることを示している。こうした一連の開発経緯と評価の結果は、2021年3月10日付の英国科学誌「ネイチャー・コミュニケーションズ」電子版に掲載された。



写真提供：愛知製鋼(株)

図4 特殊鋼製造のノウハウを活かして開発された肥料



写真提供：徳島大学大学院医歯薬学研究所 難波 康祐教授

図5 安価なPDMAの開発



図6 石川県立大学の圃場内で行われたフィールド実験の様子

写真提供：愛知製鋼(株)

期待される世界の食料危機への貢献

これまでの実験により、コメ、コムギ、トウモロコシといったイネ科の植物だけでなく、野菜や果樹もPDMAによって成長できることがわかった。現在、アメリカ、欧州、アジアの各国にサンプルが配布され、それぞれの地域で試験が行われている。

その一方、難波教授はPDMAの合成にかかる工程数を一つでも省略することを目標にしている。加熱や冷却の処理を施せば、その分コストがかかるため、最終的には原料を混ぜるだけの工程を目指している。また、より安価な誘導体を見出すことにも力が入られている。将来的には、発展途上国でも容易に入手できる誘導体を開発する予定である。

近年、世界の人口は急激な増加の一途をたどっており、2050年頃には深刻な食料危機に直面することが懸念されている。世界の土地の約3割を占めるアルカリ性不良土壌で農業生産性を向上させることが実現すれば、世界の食料増産に大きな効果をもたらすことが期待できる。他方、「隠れた飢餓」と呼ばれる人間の微量栄養素欠乏も問題になっており、世界保健機関WHOによると20億人が鉄欠乏性貧血だとされている。その多くの地域は農業生産性が

低いことから、ムギネ酸の有効活用が期待され、PDMAを使って育てた作物に鉄分を含ませる取り組みも行っており(図7)、そのデータも今後明らかになるという。世界の食料危機や人々の栄養不足の問題に、日本の技術が貢献できる日もそう遠くはないだろう。

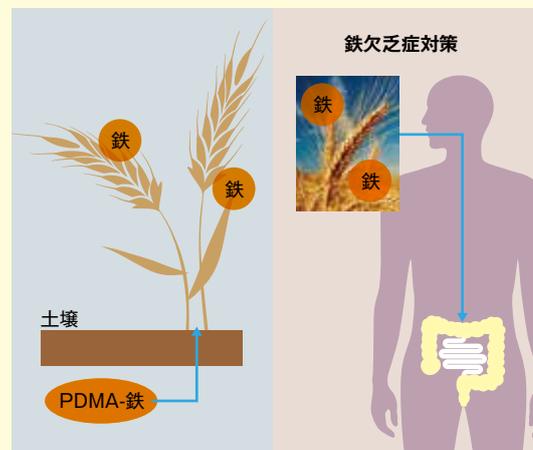


図7 アルカリ性不良土壌での農耕の実現

●取材協力：徳島大学大学院医歯薬学研究部 難波 康祐教授、愛知製鋼(株) ●文 藤井 美穂