

連携記事

環境ストレスにおける植物の鉄欠乏を改善する 2価鉄イオン供給材

Ferrous Ion Fertilizer to Improve Fe Deficiency in Plants Caused by Environmental Stress

愛知製鋼(株) 未来創生開発部
次世代あぐり開発グループ
グループ長

鈴木基史
Motofumi Suzuki

愛知製鋼(株) スマート事業統括部
鉄力あぐり事業チーム
チーム長

菊地弘泰
Hiroyasu Kikuchi

愛知製鋼(株) スマート事業統括部
鉄力あぐり事業チーム
主任

松山倫也
Tomoya Matsuyama

1 はじめに

愛知製鋼株式会社は2003年から植物への鉄供給材である「鉄力あぐり®・鉄力あくあ®」を販売している(図1)。鉄力あぐりは固体、鉄力あくあは液体の植物活性材で、どちらも「2価鉄イオン」を植物に効率的に吸収させることができる農業資材である。鉄は土壌中には数%存在し、弱酸性土壌が占める日本においては、土壌中の鉄が幾分か溶けるため、外部から撒かなくても不足することはないとされてきたが、環境ストレスを受けると鉄の吸収機構が働くなり鉄欠乏が生じることが近年分かってきた。本記事では、日本における潜在的な鉄欠乏とそれに対する鉄力®シリーズの貢献について紹介したい。鉄の役割と吸収機構についてはもう一つの連携記事にて詳細を記載しているので、そちらも参照されたい。

2 鉄力あぐり・鉄力あくあについて

2.1 開発経緯

愛知製鋼株式会社は1990年代の終わり頃から、社内の副産物から有価物を取り出す研究を行っていた。亜鉛を取り出す過程で偶然に出てきた酸化第一鉄(FeO)の粉末を何か役立たせることができなかと試行錯誤し、有機物と一緒に植物に撒いてみたところ植物の生育が良くなったという現象を見出した。当時はまだ認識していなかったが、FeOから溶けてくる鉄分は2価の鉄イオンで、これが植物に吸収されやすい形態であった¹⁾。これを粒状化して土壌に撒きやすくしたものが「鉄力あぐり」、液体化して水やりと一緒に撒けるようにしたものが「鉄力あくあ」である。

2003年の発売当初は農業界のパイプがなく手探りで市場開拓を行った。農家や大学で実証試験を行いながら、鉄鋼問屋を通じて取扱業者を探す活動であった。家庭園芸分野ではホームセンターに立って商品紹介を行っていたが、なかなか思うようには売れなかった。しかし、そのような取り組みの甲斐もあってか、2009年頃から農業資材を取り扱う種苗メーカーから興味を持ってもらうことができ、地域の種苗店から販売ができるようになった。

2.2 普及に向けた取り組み

しかし弱酸性土壌が大半を占める日本においては、鉄は一般的な肥料のカテゴリーではなく、鉄を積極的に使いたいというユーザーは少なかった。肥料であれば植物の成長に合わせて、毎年投入する必要があるが、元々土壌にある鉄分が弱酸性土壌では幾分か溶けるため、追加する必要はないという考えがほとんどであった。鉄は確かに土壌に存在するが、そ



図1 鉄力シリーズの集合写真
鉄力あぐり(固形)・鉄力あくあ(液体)として、それぞれ農業用と家庭園芸用の商品がある(Online version in color.)
提供元: 愛知製鋼(株)

の形態は酸化鉄・水酸化鉄・リン酸鉄などの「不溶態」の3価の鉄であり、吸収することが難しい鉄である²⁾。商流の方と農家を一軒ずつ回りながら、「鉄力あぐり・鉄力あくあは2価鉄なので吸収しやすい鉄分です」と説明しながら全国を回って効果を実感してもらった。葉の色が薄い場合は一般的には窒素栄養が足りないとされるが、成長点の葉の色のみが薄い場合は鉄欠乏である可能性が高い。葉の色が薄くなっているにもかかわらず鉄欠乏であることが認識されていないことも多く、現場を回りながら鉄力あぐり・鉄力あくあの使用を推奨させていただいた。

鉄は法律上は普通肥料ではないが、肥料に混ぜる「効果発現促進材」として酸化第一鉄(FeO)を利用することができる。肥料登録をした鉄力シリーズ(鉄力あくあF14³⁾、鉄力トレプラス⁴⁾)を種苗メーカーや農薬肥料メーカーとともに共同開発し、全国の農家に使用していただけるようになった。

3 鉄力のメカニズム

3.1 鉄力の効果が発揮できる時

鉄力あぐり・鉄力あくあは、元々鉄欠乏が起こりやすい土壌で使うことを奨励していた。植物の栄養素として、リン酸は毎年投入するものだが、リン酸は鉄と強く結合するので、鉄欠乏を引き起こす原因の一つとなる。また、カルシウム栄養の投入のために石灰も畑にまくことが多いが、石灰投与は土壌のpHを上げ、鉄の不溶態化を引き起こす。水酸化鉄[Fe(OH)₃]の溶解度積の考えでは、pHが1上がると水に溶ける濃度は1000分の1にもなる。

このような土壌条件とは別に、現場での声を聞くと、鉄力の効果が出やすい時として、「梅雨時」、「秋口～冬場」、「中山間地」、「春先の寒の戻り」といった環境条件が関わっていることが分かってきた。これらの環境では土壌条件が良くても鉄欠乏症状が発生していた。このことから低温・低日照などの気候条件では鉄吸収能力が悪化していると考えられたため、次に示すような仮説を立てて実験を行った。

3.2 環境ストレスによる鉄の吸収能低下

植物は2価鉄を吸収するが、土壌中の鉄は酸素がある畑状態では難溶性の3価鉄である。この鉄を吸収するために、ほとんどの植物は、①根から有機酸を分泌して3価鉄を溶かし出し、②根表面の鉄還元酵素で2価鉄に還元し、③2価鉄イオン(Fe²⁺)の形で根の細胞内に取り込む、という3つのステップで鉄を取り入れている。全てのステップで植物がエネルギーを使っているが、この中で②の酵素の働きは温度や日照に関わっていると考えて、環境ストレスを制御できる人工気象器を用いてチンゲンサイを育てて温度・照度の違いによ

る根の鉄還元活性を調査した。

すると、予想通り低日照・低温処理により根の鉄還元活性は低下した(図2(a))。このことは、土壌中に3価鉄が溶けていたとしても、2価鉄に還元することができずに植物が吸収しにくくなっていることを示している。環境ストレスによる鉄欠乏は植物の鉄還元活性の低下が原因で起こっていると考えられる。

施設園芸や植物工場では土を使わない養液栽培を行うことがあるが、この時の鉄源はFe(Ⅲ)-EDTAのような合成キレート鉄を用いている。合成キレート鉄の鉄は3価であり、養液中には安定的に溶けているが、そのまま吸収することができず、植物自身の力で2価鉄に還元しなければならない。植物が元気な時は鉄欠乏はあまり見られないが、低温・低日照になると養液栽培でも鉄欠乏が見られる。

3.3 鉄力の二刀流の効果

鉄力あぐり・鉄力あくあは2価鉄を配合することが特徴のため、上記の根の鉄還元酵素の活性が弱まった時でも2価鉄イオンをダイレクトに植物に供給することができる、環境ストレスに効果的な資材である。さらに、鉄力の特徴は、2価鉄を配合するだけでなく、根の鉄還元酵素の活性を上昇させる

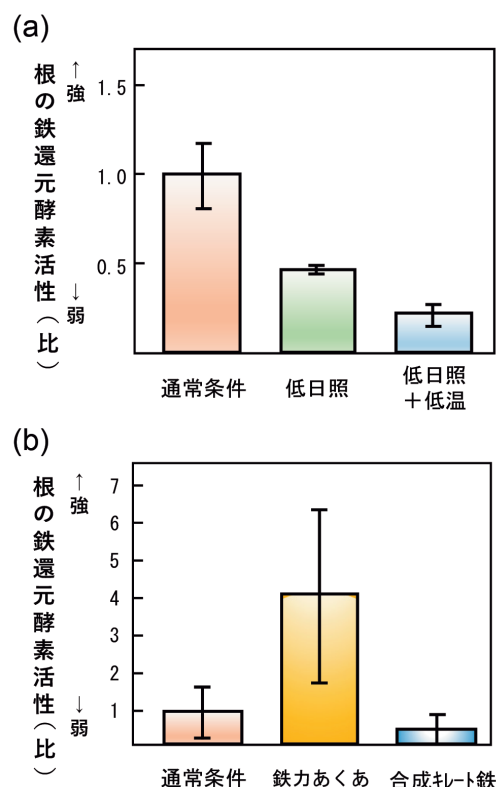


図2 植物(チンゲンサイ)の根の鉄還元酵素の活性
(a) 低日照で植物を育てると還元酵素活性が下がる。低温にするとさらに下がる。(b) 鉄力あくあを投与すると根の還元活性が上がる。一般的な合成キレート鉄材の投与では還元活性は増加しない(Online version in color.) 提供元: 愛知製鋼(株)

働きも持っている (図2 (b))。これは一般的な鉄キレート材には見られない現象である。

鉄力は「2価鉄供給材」として販売しているが、これは「植物が吸収できる2価鉄そのものを供給する」とことと「植物が2価鉄にする還元力を補強する」という、いわば「二刀流」の働きによって環境ストレスなどで鉄吸収能が悪化した植物に鉄を供給している (図3)。植物が持っている鉄吸収機構に適合した資材であることが特徴的である。

4 鉄力の効果事例

鉄力の効果事例として、一番目に見えやすいのは「葉色の回復」である (図4)。鉄は葉緑素 (クロロフィル) の合成に必要であるため、鉄欠乏は新葉の黄白化となって現れる。鉄力の散布は黄白化の防止あるいは回復となって効果が現れる。鉄はエネルギー生産や窒素栄養の代謝などにも関わっており、欠乏症が目に見えなくても「潜在的な」鉄欠乏となっていることも多い。トマトやキュウリ、イチゴなど実を付けながら成長を続ける作物は「成り疲れ」と呼ばれる成長障害が起こる。トマトが実をたくさんつけた場合、生長点の葉は白くなっていることもあり、成り疲れによる鉄欠乏が起こっている。一般的には葉の鉄含量は100ppmほどとされているが、鉄欠乏が生じた葉の金属含量を調べてみると、黄白化した葉の鉄含量は61ppmであった。同じ畑で健全に見える葉の鉄含量も測ってみたところ66ppmで、ほとんど大差がなく、十分な鉄含量とは言えなかった。

約5ヶ月のトマトの生育期間中、鉄力あくあを10日ごとに

1回散布をしてみたところ、成り疲れ時期 (花は咲くが実が付きにくい時期) に、慣行区よりも実の数が多くついた。最終的には果実数で2割ほどの増収であった (図5)。根から与えた場合も、葉から与えた場合も同じような傾向が見られたことから、成り疲れの原因の一つは鉄欠乏であったことが示唆された。イチゴ、キュウリにおいても、鉄力の継続散布により、収穫量の総量が増加したという実例も得られた。

養液栽培では、養液の再利用のために循環させる際に紫外線殺菌を行うことがある。合成キレート鉄は紫外線を吸収し

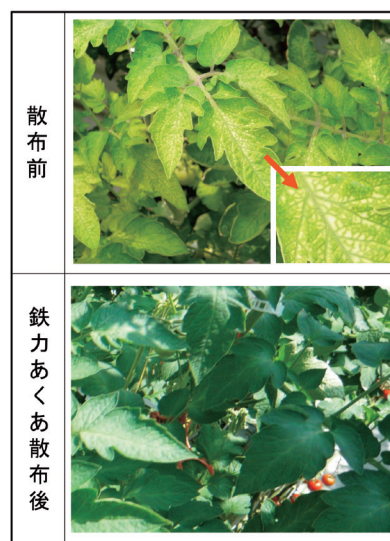


図4 鉄力の効果事例 (葉色の回復)
鉄分が不足すると、葉緑素が作れず葉が黄白色化する。特に新しい葉の葉脈の間の色が抜けることが特徴である。鉄力あくあを散布すると新しい葉が緑になる (Online version in color.)
提供元：愛知製鋼 (株)

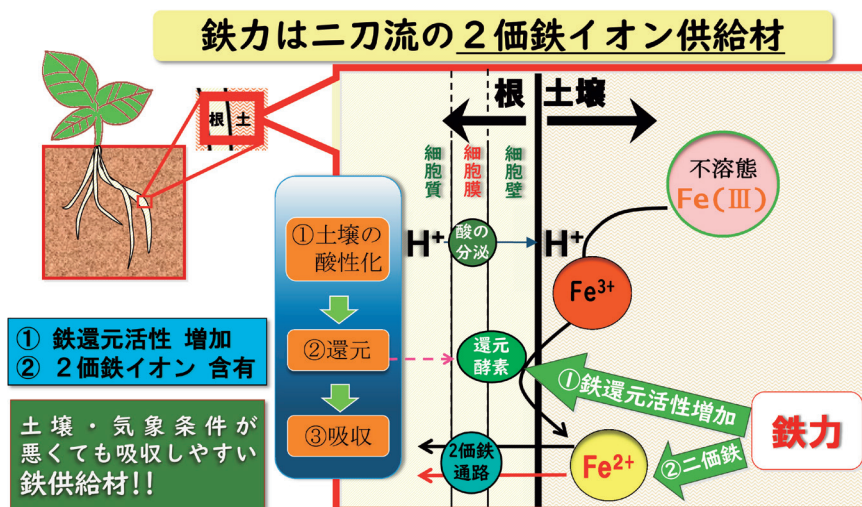


図3 鉄力の効果メカニズム
植物は根の鉄還元酵素で土壌中の3価鉄を2価鉄に還元しながら、2価鉄を専用の通路 (トランスポーター) で吸収する。鉄力の成分は鉄還元酵素の活性を増加させ、2価鉄そのものも配合しているため、2つの効果で鉄を吸収しやすくしている。特に環境ストレスで酵素の力が弱まっているときに効果を発揮する (Online version in color.)
提供元：愛知製鋼 (株)

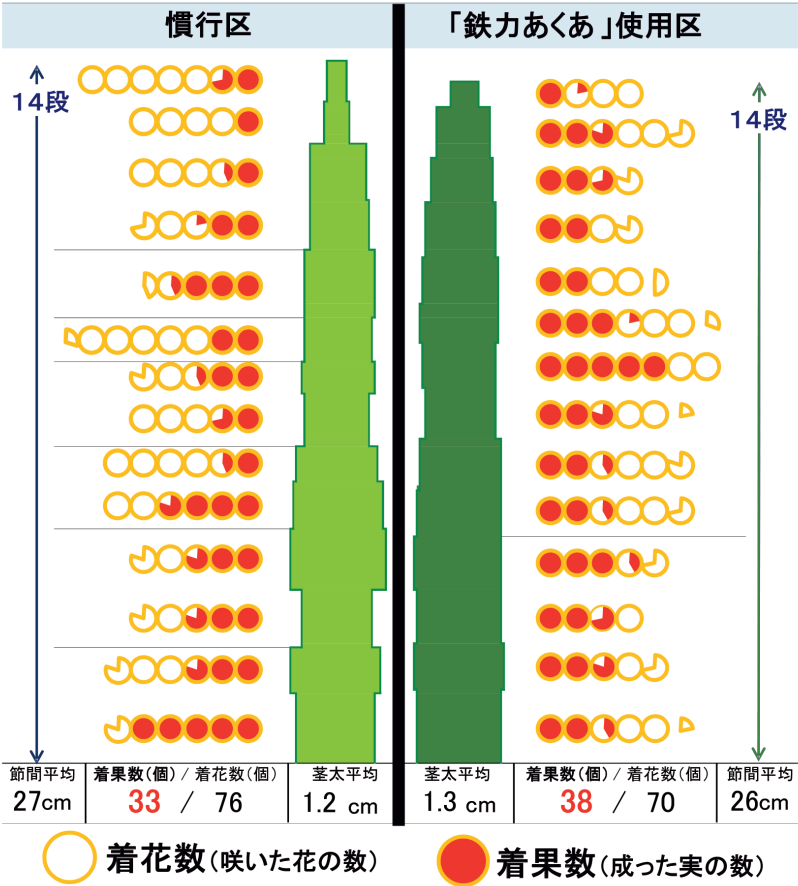


図5 鉄力の効果事例(成り疲れの軽減)
トマトの栽培に鉄力あくあF10を10日に1回の頻度で根に投与した。鉄力あくあを投与した区のほうが、中盤から後半にかけて安定して実がつき、総収量が増加した。茎も上のほうまでしっかりと太さとなった(Online version in color.) 提供元: 愛知製鋼(株)

やすい性質を持ち、紫外線照射により鉄が沈殿するため鉄欠乏を生じることがある。鉄力あくあは紫外線を透過しやすい性質を持っているため、このような紫外線殺菌を伴う施設園芸では、鉄供給材として使用されている。

5 鉄力の今後の展開

5.1 高い鉄分を含む農作物の生産

鉄はヒトや動物にとっても重要な栄養源である。世界では20億人が鉄欠乏ともされており⁵⁾、日本においても鉄欠乏による貧血症や潜在的に鉄欠乏となっている場合がある。そのため、鉄分を多く含む農作物が望まれる。一方で、鉄は与えすぎても過剰害となり生育が阻害されることがある。可食部中の鉄含量の増加を試みて、収穫直前に鉄力あくあを高濃度で与える試験をしたところ水耕栽培のコマツナでは約10倍まで鉄分を高めることができた(図6(a))。また、イネや小麦において穂が出る時期に鉄力あくあを散布したところ、可食部中の鉄含量を有意に高めることができた⁶⁾(図6(b))。農作物の付加価値やヒトの鉄栄養改善にも貢献していきたいと考えている。

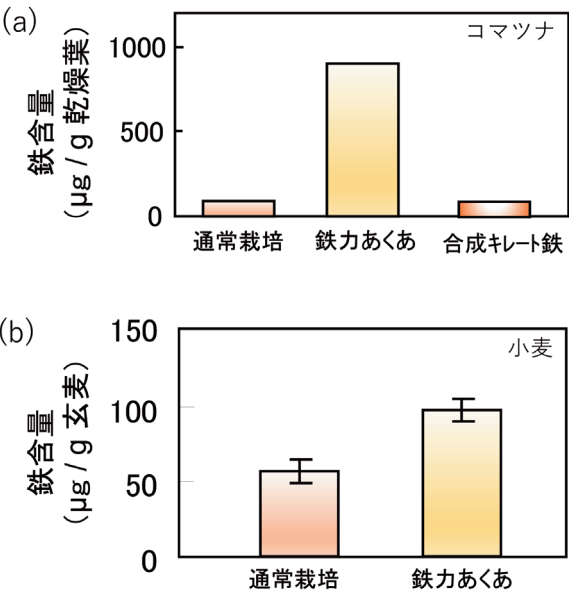


図6 鉄力あくあの投与による可食部の鉄含量増加
(a) 水耕養液への鉄投与によるコマツナの鉄含量の増加 (b) 小麦への鉄葉面散布による鉄含量の増加 (Online version in color.) 提供元: 愛知製鋼(株)

5.2 バイオスティミュラント資材として

近年、欧米を中心に「バイオスティミュラント」という資材が使われており、環境ストレスによって生育が阻害された植物を改善させる資材として着目されている。従来の農薬・肥料・土壌改良材とは異なる概念であり、各国でその定義や運用について議論されている。日本においても、「日本バイオスティミュラント協議会」や「生物刺激制御研究会」といった団体が発足し、産業界・学術界の両方から注目されている。日本では、まだ法律には載っていない用語であるが、2020年に農林水産省が打ち出した「みどりの食料システム戦略」でバイオスティミュラントを明記し、「植物のストレス耐性等を高める資材」と定義づけた。1982年にBoyerがScience誌で発表した内容によると、本来収穫できる作物の収穫量に対して、環境的な要因による減収は6割以上にも及ぶと報告されている⁷⁾。

鉄力は、低温・低日照のような環境ストレスで鉄欠乏がかかる際に、2価鉄の供給を促進することで生育が改善するバイオスティミュラント資材とも言える。近年多発する天候不順時に効果を発揮する資材として、農業生産への貢献をしていきたい。また、高温ストレスにおいても鉄力の施用で根の活着を改善するなどの効果も見られている。猛暑が続く今後の世界においても鉄の力で貢献できる用法を増やしていきたいと考えている。

5.3 カンキツグリーニング病と2価鉄

鉄力は鉄栄養の供給材であり農薬ではないが、2価鉄の施用は病気によって鉄欠乏となった植物の生育改善にもなりうる。カンキツグリーニング病は21世紀に入ってから世界中で猛威を振るっており、フロリダ州ではグレープフルーツの生産が10年間で6分の1にまで減ったという報告もあり⁸⁾、経済損失は1兆円規模と言われている。ミカンキジラミを媒介して樹木の師管に病害菌が棲みつぎ、直す手立てがないとされている。日本では沖縄と南西諸島の一部でみられるが、発見し次第伐採する政策がとられている。

カンキツグリーニング病に感染した樹の葉は鉄欠乏の症状に似ており、感染した葉は鉄含量が低下するという報告がある⁹⁾。私たちは2価鉄の散布が鉄栄養の改善に効果があるかどうかを広島大学との共同研究において閉鎖系温室で検証した。その結果、一般的な3価の合成キレート鉄では回復効果は見られなかったが、2価鉄溶液の葉面散布が感染樹の生育を改善させることを発見した¹⁰⁾。このことは、カンキツグリーニング病に感染した樹は何かしらの理由で植物体内で鉄を利用できなくなっているが、2価鉄として葉の細胞の中に直接鉄栄養を供給すれば生育できることを示唆している。

今後、資材の改良や評価試験を拡充することで、世界のカ

ンキツ生産の一助となりたいと考えている。

6 おわりに

想定外で生産した酸化第一鉄(FeO)を機に愛知製鋼㈱は農業分野に取り組んできた。農業現場を現地現物で廻る中で、恵まれた土壌の日本でも環境ストレスによって作物が鉄欠乏になることが分かってきた。植物の鉄の吸収機構に基づいた知見をもとに、「鉄力あぐり・鉄力あくあ」は使われている。今後も学術的な知見を得ながら、国内外の農業問題に鉄をキーワードに取り組んでいきたいと考えている。

謝辞

NPO法人植物鉄栄養研究会(WINEP) 森敏理事長には学術的なご助言を頂きました。広島大学の正岡淑邦先生にはカンキツグリーニング病への温室試験の実施とフィールド試験へのご助言を頂きました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森敏, 西澤直子: 植物の生長調節, 37 (2002), 110.
- 2) 森敏: Journal of Pesticide Science, 17 (1992), S207.
- 3) 鈴木基史, 松山倫也, 菊地弘泰: 愛知製鋼技報, 29 (2012) 48.
- 4) 松山倫也, 菊地弘泰, 南川勝大, 早稲田正浩, 鈴木基史: 愛知製鋼技報, 34 (2018), 32.
- 5) WHO, The World Health Report, 2002, Reducing Risks, Promoting Healthy Life. World Health Organization, (2002).
- 6) 鈴木基史, 松山倫也, 菊地弘泰: 愛知製鋼技報, 30 (2013), 47.
- 7) J.S.Boyer: Science., 218 (1982), 443.
- 8) United States Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service. Florida Citrus Statics 2017/2018, (2019).
- 9) Y.Masaoka, A.Pustika, S.Subandiyah, A.Okada, E.Hanundin, B.Purwanto, M.Okuda, M.Okada, A.Saito and P.Holford: Jpn. Agric. Res. Q., 45 (2011), 269.
- 10) H.Inoue, S.Yamashita-Muraki, K.Fujiwara, K.Honda, H.Ono, T.Nonaka, Y.Kato, T.Matsuyama, S.Sugano, M.Suzuki and Y.Masaoka: Int. J. Mol. Sci., 21 (2020), 4033.

(2022年6月14日受付)