水耕栽培でのキレート鉄施用によるトウガラシの生理障害の発現

矢澤 進*・佐藤隆徳**・並木隆和

京都府立大学農学部 606 京都市左京区下鴨

Injury in Pepper (*Capsicum annuum* L.) Induced with Chelated Iron in Solution Culture

Susumu Yazawa, Takanori Sato and Takakazu Namiki

Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural University, Sakyo-ku, Kyoto 606

Summary

A physiological disorder was observed on pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings soon after they were transplanted from soil to solution culture. The nutrient solution contained 8 mM $\text{NO}_3\text{-N}$, 0.7 mM $\text{NH}_4\text{-N}$, 2 mM Ca, 1 mM Mg, 6.5×10^{-5} M Fe, 5×10^{-5} M B, 9×10^{-6} M Mn, 7×10^{-6} M Zn, 2×10^{-7} M Cu, 8×10^{-8} M Mo.

1. The disorder is characterized by small brownish spots on leaves. In severe cases, leaf abscission and death of the plant may occur. Foliar symptoms on excised shoots were attributed to NaFeEDTA at concentrations above 1.6×10^{-5} M in the nutrient solution.

2. Severe symptoms developed if pepper seedlings were stressed for water while growing on soil and then transferred to nutrient culture solution. The severity of the symptoms reduced if the seedlings were initially transferred from soil to water culture for 2 weeks before being re-transferred to a nutrient solution containing as much as 20.8×10^{-4} M NaFeEDTA. No visible symptoms appeared if the roots of the soil-grown pepper plants were immersed in water for 2 to 4 days before being transferred to a solution containing 1.3×10^{-4} M NaFeEDTA.

3. Among several iron-chelates tested, FeEDDHA was the only one which did not cause the disorder to pepper plants even though the concentration was raised to 5.2×10^{-4} M. No NaFeEDTA was detected in leaves after the plants were cultured on NaFeEDTA solution. However, a large amount of unaltered FeEDDHA was detected in leaves of plants grown on this iron-chelate.

緒 言

著者らは、土耕で育苗したトウガラシの苗の根を水洗し、れき耕用圃試処方第一例培養液（以下、圃試培養液と省略）50%の多量要素と100%の微量元素を含む培養液に定植し水耕栽培したところ2～3日後に葉に褐変斑点が発生し一部障害の著しい個体は落葉枯死することを認めた。水耕栽培で一般に使用されている培養液でこのような生理障害が発生することについては、これまで報告されていない。

本実験では、圃試培養液に含まれるエチレンジアミ

ン4酢酸ナトリウム鉄 (NaFeEDTA) がこの生理障害をひき起こすことが確かめられたので、その結果について報告する。

キレート鉄である NaFeEDTA の水耕栽培の培養液への利用は、1951年 Jacobson (2) が提唱して以来のことである。それ以前は、水耕栽培の鉄源として硫酸第2鉄 (FeSO_4) などの無機物が用いられており、培養液の pH が上昇すると鉄が沈でんするという問題があった。しかし NaFeEDTA を用いることにより、培養液の pH の上昇による鉄の不溶化の問題は解決した。

わが国では、1957年に山崎らが水耕栽培の培養液の鉄源として NaFeEDTA をはじめて使用した。その後、1963年に堀らは培養液の pH が7になっても、NaFeEDTA は不溶化しないことを確かめ、NaFeEDTA

1988年7月13日 受理

* 現在：京都大学農学部 606 京都市左京区北白川。

**現在：農林水産省野菜・茶業試験場 514-23 三重県安芸郡安濃町。

を水耕培養液の鉄源として実用化を進めた(12). Wallace(9)は、彼の著書の中で多くのキレート剤の植物に対する反応について言及しているが、キレート鉄による生理障害の発生についてはほとんど述べていない。しかし、1964年に van Driel(1)は10 ppmの鉄を含むFeEDTA溶液でトマトの生育障害がみられることを報告した。その後はFeEDTAによる生育障害については、ほとんど問題にされることはなかった。

1981年に著者ら(13, 14)が、キレート鉄による生理障害を報告後、いくつかのキレート金属による生理障害が発表された(5, 10, 11)。

材料および方法

トウガラシの供試品種は‘ししとう’(*Capsicum annuum* L.)とし、3号ポリポットあるいは網目状ポリバット(32×44×46 cm)で栽培して本葉が6～9枚展開した幼苗を実験に用いた。

断根茎ざし法の場合には、網目状ポリバットで栽培した幼苗の地ぎわ部で茎を切断したものを、根つき法の場合には、ポリポットあるいはポリバットで栽培した幼苗の根部を水洗したものを供試した。後述するように、根つき法では同じ処理液でも育苗条件の違いなどにより生理障害の発生程度が異なるため、特別な場合を除き育苗条件の違いが生理障害の発生に影響を及ぼさない断根茎ざし法を用いた。実験処理溶液を満たした1/5000 aのワグネルポットに3個体、あるいは5 literポリ容器に6個体を処理液に浮かせた発ぼうスチロールを支持体として実験を行った。特に断わらない限り、pHの著しい変動がないため処理液のpH調整は行わなかった。薬剤の溶解には水道水を用いた。通気は小型エアー・ポンプで連続的に行った。

NaFeEDTAの生理障害は高温条件で発生しやすいため、実験-1, 2, 3は1980～1981年の夏季に、実験-4は1985年の夏季にそれぞれガラス室内で行った。

茎葉内の鉄濃度の測定は、断根茎ざし法で溶液処理を行った後、熱風乾燥粉末試料を湿式分解後、原子吸

光法により行った。分析値は3～4個体の平均値で示されている。溶液処理後、茎の表面に付着した鉄を取り除くため、1 N HCl溶液で洗浄した。また、茎の切り口に沈着した鉄を取り除くため、溶液処理後、茎の切り口を再び数mm切り落とした。

葉内のNaFeEDTAおよびエチレンジアミンジヒドロキシフェニル酢酸鉄(FeEDDHA)の濃度の測定は以下のようにして行った。断根茎ざし法で溶液処理を行った後、熱風乾燥粉末試料を12時間水で振とう抽出した。この操作で葉内のNaFeEDTAおよびFeEDDHAはほぼ完全に抽出される。抽出後、NaFeEDTAの濃度はHill-Contingham・Lloyd-Jones(3)の方法により調整した試料を原子吸光法で、FeEDDHAの濃度はJeffreys・Wallace(4)の方法に準じ、480 nmでの吸光度を二波長分光光度計で測定し求めた。

結果および考察

実験1. 土耕育苗した幼苗の園試培養液への移植直後に発生する生理障害

第1図は、土耕育苗したトウガラシの苗を園試培養液の多量要素50%、微量要素100%の培養液に移植後

第1図. トウガラシの土耕苗を園試培養液の多量要素50%、微量要素100%の培養液に移植後2日目に発生した生理障害。

第1表. 園試培養液の組成。

多量要素	mg · liter ⁻¹	微量要素	mg · liter ⁻¹
Ca(NO ₃) ₂ · 4 H ₂ O	475	NaFeEDTA	25.0 ^a
KNO ₃	405	H ₃ BO ₃	3.0
MgSO ₄ · 7 H ₂ O	250	MnSO ₄ · 4 H ₂ O	2.0
NH ₄ H ₂ PO ₄	78	ZnSO ₄ · 7 H ₂ O	0.22
		CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.05
		Na ₂ MoO ₄	0.02

^a 6.5×10⁻⁵M.

後に発生した生理障害の様子である。定植後2～3日目に葉に褐変斑点が生じ、一部障害のひどい個体では落葉し、枯死した。障害の著しい葉は、水分が減少し手でもみほぐすと簡単に粉末となる。

一般に用いられている培養液でこのような障害が発生することはこれまでに報告がないため、図試培養液に含まれるどの成分が障害発生に関与しているのかを確かめるために次のような実験を行った。

図試培養液の組成（第1表）を多量要素のみと微量要素のみの2区に分け、断根茎ざし法でそれぞれの区における障害の発生について調査した。その結果、第2図に示すように微量要素のみの区に激しい障害が認められた。

次に、図試培養液の微量要素の中の1成分のみを欠如した試験液を作成し、断根茎ざし法で障害の発生について検討した。その結果、水のみ対照区とNaFeEDTA欠如区で障害の発生が認められなかった（第3図）。

以上の結果から、図試培養液で発生する生理障害の原因は、培養液に含まれるNaFeEDTAであることが明らかとなった。

NaFeEDTAは、天然には存在しない合成化合物で価格が他のキレート鉄に比べて安価なことから鉄源の肥料として用いられるようになった。水耕栽培にNaFeEDTAを利用するさいに、NaFeEDTAの作物に対する毒性について十分な検討がなされず、キレート

鉄が用いられる以前に FeSO_4 などの無機鉄塩を鉄源として用いていた培養液の鉄濃度（約3 ppm）に換算した濃度でNaFeEDTAが水耕栽培に用いられたようである。

実験2. NaFeEDTAによる生理障害

NaFeEDTA、キレート剤エチレンジアミン4酢酸ナトリウム（ Na_2EDTA ）および FeSO_4 を用いて第2表に示す濃度における‘ししとう’での生理障害を断根茎ざし法で調査した。その結果、NaFeEDTA $1.6 \times 10^{-5}\text{M}$ 以上の処理区および FeSO_4 $6.5 \times 10^{-5}\text{M} + \text{Na}_2\text{EDTA}$ $6.5 \times 10^{-5}\text{M}$ 処理区で激しい障害が発生した。Na $_2$ EDTA $1.3 \times 10^{-4}\text{M}$ 処理区にも軽度な障害が発生

第2図. 図試培養液の微量要素のみの処理区に発生した生理障害（断根茎ざし法、処理後2日目）。1. 微量要素のみの区、2. 多量要素のみの区。

第3図. 図試培養液の微量要素が生理障害の発生に及ぼす影響（断根茎ざし法、処理後2日目）。1. ホウ素欠如区、2. NaFeEDTA欠如区、3. モリブデン欠如区、4. 銅欠如区、5. マンガン欠如区、6. 亜鉛欠如区、7. 完全培養液区、8. 水のみ区。

した。FeSO₄処理区では障害の発生は認められなかった。なお、FeSO₄とNa₂EDTAが溶液中に共存するとキレート鉄が生成する(8)。

一般に使用されている培養液と同じ濃度 $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$ のNaFeEDTAでこのような生理障害が発生することは、これまでほとんど指摘されたことがなかった。しかし夏季に砂で育苗して、水耕栽培に移されたトマトやナスあるいは水耕で育苗したトマト、ナスを水耕栽培に移すさい、根を傷めるところで述べたトウガラシと同じようなNaFeEDTAによる生理障害が発生することがある。多くの場合、その症状が軽度なため見過ごされているか、立枯れ症などによる病害と混同されていたのではないと思われる。

これまでに、著者らが夏季に実際栽培でトマト、ナス、トウガラシなどでNaFeEDTAによる生理障害の発生を観察した例としては、かん水量の少ない土耕苗を水耕栽培に移した場合、水耕育苗した苗を水耕栽培に移すさいに多くの根を切った場合、栽培中に培養液がなくなり根が乾燥(根は枯死していない)して、そこに培養液が急に与えられた場合、培養液の更新のさいに根の活性が著しく低下している場合、ならびにトマトなどのえき芽を利用して水耕栽培でさし木繁殖する場合などである。

実験 3. NaFeEDTA による 生 理 障 害 の 軽 減

先述したように、NaFeEDTAの生理障害は土耕苗を

水耕栽培に移した直後に多発する。

3号黒色ポリポットで土耕育苗した本葉6枚展開期の‘ししとう’を用いて、NaFeEDTA溶液に移す前のかん水量の違いが、NaFeEDTAの生理障害の発生に及ぼす影響について検討した。NaFeEDTA溶液への移植はすべて根つき法で行った。

NaFeEDTA溶液に移植前5日間ほとんどかん水を行わない少量かん水区では、NaFeEDTA $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$ 処理で、処理後2日目に障害が発生し、障害指数は33であった。 $1.3 \times 10^{-4} \text{M}$ 処理では、処理後3日目に障害指数100となり激しい障害が認められた。移植前5日間1日に1回かん水を行った中庸かん水区でも、NaFeEDTA $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$ 処理で、少量かん水区と同程度の障害が発生した。しかし、 $1.3 \times 10^{-4} \text{M}$ 処理では処理後5日目に至っても障害指数は56で、少量かん水区の場合よりも低い値であった。移植前5日間湛水状態(ポットの底より約3cmの高さまで湛水)とした湛水区では、NaFeEDTA $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$ 、 1.3×10^{-4} 処理区とも処理後2日目に葉にごくわずかな褐変斑点がみられる程度の軽い障害であった。障害程度は、両区とも処理後5日目に至っても2日目の障害程度と同じであり、進行することはなかった(第3表)。

以上の結果から、水分不足の状態で土耕育苗した苗ほど水耕栽培に移すとNaFeEDTAによる生理障害が発生しやすいことが明らかとなった。これは、植物体

第2表. NaFeEDTA, Na₂EDTAおよびFeSO₄がトウガラシの生理障害の発生に及ぼす影響(断根基ざし法, 処理後2日目)。

処 理 区		障害指数 ^a
NaFeEDTA	$6.5 \times 10^{-6} \text{M}$	0
	$1.6 \times 10^{-5} \text{M}$	67
	$3.3 \times 10^{-5} \text{M}$	89
	$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	100
Na ₂ EDTA	$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	0
	$1.3 \times 10^{-4} \text{M}$	33
Na ₂ EDTA $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$ + FeSO ₄ $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$		100
FeSO ₄ ^b	$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	0
	$1.3 \times 10^{-4} \text{M}$	0

$$^a \text{障害指数} = \frac{\sum(\text{障害度数} \times \text{個体数})}{3 \times \text{全個体数}} \times 100.$$

障害度数は、障害のないものを「0」とし、障害の発生の軽微なものから、ひどいものへ順に「1」、「2」、「3」とした。葉に褐変斑点を少量発生した場合を障害度数「1」とし、全葉数のほぼ半分以上が落葉した場合を障害度数「3」とした。

^b pH 5.0 に調整。

が急激に水を吸収して多量の NaFeEDTA が生体内にとりこまれたために生理障害が発生したのではないかと考えられる。

次に‘ししとう’の本葉 6 枚展開期の土耕育苗した苗を水耕栽培に移植後、5 日間水のみで培養した。その後 9 日間圃試培養液の 50% 培養液で栽培後、第 4 表に示すような濃度の NaFeEDTA 溶液に移して障害の発生程度を調査した。その結果、NaFeEDTA $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$ (圃試培養液における標準濃度)、 $2.6 \times 10^{-4} \text{M}$ 処理区で

は、障害の発生は認められなかった。しかし、 $10.4 \times 10^{-4} \text{M}$ 処理区では処理後 2 日目に葉に少量の褐変斑点を生ずる軽度な障害が発生した。NaFeEDTA の処理濃度を $20.8 \times 10^{-4} \text{M}$ に高めると、処理 5 日目に障害指数は 50 となりやや激しい障害の発生が認められた(第 4 表)。

以上の結果から、土耕苗を 5 日間水で、その後 9 日間培養液で栽培した後では、NaFeEDTA の処理濃度を圃試培養液の標準濃度の 16 倍 ($10.4 \times 10^{-4} \text{M}$) に高

第 3 表. かん水量を異にしたポット育苗のトウガラシを NaFeEDTA 溶液に移した後の生理障害発生程度の違い(根つき法)。

処 理 区	NaFeEDTA 濃度	障 害 指 数 ²			
		処理後日数 1 日目	2 日目	3 日目	5 日目
少量かん水区 ¹	$1.6 \times 10^{-5} \text{M}$	0	0	0	0
	$3.3 \times 10^{-5} \text{M}$	0	0	0	11
	$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	0	33	33	33
	$1.3 \times 10^{-4} \text{M}$	0	67	100	100
中庸かん水区 ²	$1.6 \times 10^{-5} \text{M}$	0	0	0	0
	$3.3 \times 10^{-5} \text{M}$	0	0	0	0
	$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	0	33	33	33
	$1.3 \times 10^{-4} \text{M}$	0	44	44	56
湛水区 ³	$1.6 \times 10^{-5} \text{M}$	0	0	0	0
	$3.3 \times 10^{-5} \text{M}$	0	0	0	0
	$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	0	11	11	11
	$1.3 \times 10^{-4} \text{M}$	0	11	11	11

² 第 2 表を参照。

¹ 移植 5 日前からかん水をほとんど行わず。

² 1 日に 1 回かん水。

³ 移植 5 日前から湛水 (鉢底より約 3 cm の高さまで湛水, 3 号ポリポット使用)。

第 4 表. 水耕トウガラシ²における NaFeEDTA の処理濃度の違いと生理障害の発生(根つき法)。

NaFeEDTA 濃度	障 害 指 数 ¹			
	処理後日数 1 日目	2 日目	3 日目	5 日目
$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	0	0	0	0
$2.6 \times 10^{-4} \text{M}$	0	0	0	0
$5.2 \times 10^{-4} \text{M}$	0	11	11	11
$10.4 \times 10^{-4} \text{M}$	22	28	28	28
$20.8 \times 10^{-4} \text{M}$	22	28	39	50

² 土耕から水耕栽培に移した後 5 日間水で、その後 9 日間 50% 圃試培養液で栽培後処理を行う。

¹ 第 2 表参照。

第5表. 土耕ポット育苗のトウガラシの水耕移植直後の水による培養期間とNaFeEDTA溶液濃度の違いが生理障害の発生に及ぼす影響(根つき法).

水による培養期間	NaFeEDTA濃度	障 害 指 数 ²			
		処理後日数 1日目	2日目	3日目	5日目
0日間	$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	0	22	27	27
	$1.3 \times 10^{-4} \text{M}$	33	67	72	83
2日間	$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	0	0	0	0
	$1.3 \times 10^{-4} \text{M}$	0	0	0	0
4日間	$6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	0	0	0	0
	$1.3 \times 10^{-4} \text{M}$	0	0	0	0

² 第2表参照.

第6表. 種々のキレート剤と FeSO_4 の組合せ処理がトウガラシの生理障害の発生に及ぼす影響(断根基ざし法, 処理後3日目).

处 理 区	障害指数 ²
EDTA	1.3×10 ⁻⁴ M + FeSO ₄ 1.3×10 ⁻⁴ M 100
EDTA-OH	1.3×10 ⁻⁴ M + FeSO ₄ 1.3×10 ⁻⁴ M 100
GEDTA	1.3×10 ⁻⁴ M + FeSO ₄ 1.3×10 ⁻⁴ M 100
CyDTA	1.3×10 ⁻⁴ M + FeSO ₄ 1.3×10 ⁻⁴ M 100
DTA	1.3×10 ⁻⁴ M + FeSO ₄ 1.3×10 ⁻⁴ M 100
EDDHA	1.3×10 ⁻⁴ M + FeSO ₄ 1.3×10 ⁻⁴ M 0
FeEDDHA	1.3×10 ⁻⁴ M 0

² 第2表を参照.

めても, 生理障害の発生は軽微であることが明らかとなった.

次に, 土耕育苗した苗を水耕栽培に移すさいに, 水で順化する期間とNaFeEDTAによる生理障害の発生との関連について検討した. 土耕育苗した‘ししとう’を水のみで0, 2, 4日間培養後, NaFeEDTA $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$ および $1.3 \times 10^{-4} \text{M}$ 溶液に移植した. その結果, 第5表に示すように2ないし4日間水のみで培養後, NaFeEDTAのいずれの濃度の溶液に苗を移しても障害の発生は認められなかった.

土耕苗を水耕栽培に移すさいのNaFeEDTAの生理障害の回避手段の一つとして, 2~4日間水のみあるいはNaFeEDTAを含まない培養液で苗を順化後, 完全培養液で栽培する方法が考えられる. この方法は, 特にNaFeEDTAによる生理障害が出やすい高温期の水耕栽培での移植のさいに有効であろう.

次に, 種々のキレート剤(いずれも濃度 $1.3 \times 10^{-4} \text{M}$) と FeSO_4 (濃度 $1.3 \times 10^{-4} \text{M}$) の組合せ処理が‘ししとう’のキレート鉄障害の発生に及ぼす影響について, 断

根基ざし法で調査した. 先述したように, キレート剤と鉄塩が共存する水溶液中では, キレート鉄が生成する.

エチレンジアミン4酢酸(EDTA), ヒドロキシエチルエチレンジアミン3酢酸(EDTA-OH), グリコールエーテルジアミン4酢酸(GEDTA), シクロヘキサレンジアミン4酢酸(CyDTA) およびジエチレントリアミン5酢酸(DTPA) は FeSO_4 との組合せ処理で, 処理後3日目にすべての個体の障害指数は100となった. しかしエチレンジアミンジヒドロキシフェニル酢酸(EDDHA) は, FeSO_4 との組合せ処理で障害の発生が認められなかった. また, FeEDDHAでは処理濃度を $5.2 \times 10^{-4} \text{M}$ に高めても, 葉はFeEDDHAを吸収して赤色を帯びるが, 障害の発生はみられなかった(第6表).

EDDHAと FeSO_4 の組合せ処理やFeEDDHAで生理障害が発生しなかった原因は, EDDHAの鉄との安定度定数が, 他のキレート剤の値よりも大きいことによるものと思われる. 鉄との安定度定数が高いEDDHA

第7表. NaFeEDTA, FeEDDHAおよびFeSO₄の処理濃度の違いとトウガラシの茎葉内鉄濃度(断根茎ざし法, 処理2日間).

処 理 区	葉内鉄濃度 (乾物当たり, ppm)	茎内鉄濃度 (乾物当たり, ppm)	処理後2日目の 障害指数 ²
NaFeEDTA	6.5×10 ⁻⁶ M	116	66
	1.3×10 ⁻⁵ M	122	60
	3.3×10 ⁻⁵ M	132	66
	1.3×10 ⁻⁴ M	334	159
FeEDDHA	6.5×10 ⁻⁵ M	144	76
	1.3×10 ⁻⁴ M	204	86
	2.6×10 ⁻⁴ M	313	92
	5.2×10 ⁻⁴ M	568	132
FeSO ₄ ^y	1.3×10 ⁻⁴ M	106	139
	1.3×10 ⁻³ M	156	777
水のみ		96	73

² 第2表を参照.^y pH5.0に調整.

では、鉄との安定度定数が低い他のキレート剤に比べて生体内の遊離鉄濃度が低いために生理障害が発生しないのではないかと考えられる。供試したキレート剤の鉄との安定度定数は以下のとおりである。EDTA, 14 LogK_{ML}; EDTA-OH, 12; GEDTA, 12; CyDTA, 16; DTPA, 17; EDDHA, 34 (Dojin 15th, 同仁化学研究所 1981 年より引用)。

FeEDDHA は、アメリカ合衆国をはじめとする国々では鉄源肥料として用いられている。しかし、FeEDDHA は、水に対する溶解度が NaFeEDTA に比べて低く、水溶液が赤色となる欠点がある。さらに、どの種類の作物でも FeEDDHA を鉄源として利用できるかどうかの問題が残されている。

実験4. キレート鉄処理による茎葉内鉄濃度と生理障害

‘ししとう’を用いて NaFeEDTA, FeEDDHA および FeSO₄の処理濃度の違いが茎葉内鉄濃度と生理障害の発生に及ぼす影響について断根茎ざし法で検討した。

第7表の結果から、障害の発生する NaFeEDTA 処理区での葉内鉄濃度は、障害指数が大きくなるにつれ上昇した。障害の激しい 1.3×10⁻⁴M 処理区では鉄濃度は 334 ppm であった。しかし、FeEDDHA 5.2×10⁻⁴M 処理区では葉内鉄濃度は 568 ppm と著しく高い値であったが、障害の発生は認められなかった。このような結果から、葉内鉄濃度の上昇がかならずしも

NaFeEDTA による障害発生の原因ではないことが明らかとなり、障害の発生には生体内の鉄の化学形態が問題であると考えられる。なお、茎内鉄濃度は NaFeEDTA あるいは FeEDDHA の処理濃度を高めても、葉内鉄濃度ほどの上昇は認められなかった。吸収された NaFeEDTA あるいは FeEDDHA は、茎にほとんど蓄積することなく葉に移行するものと思われる。FeSO₄処理区では、処理濃度を 1.3×10⁻³M に高めても障害の発生は認められず、葉内鉄濃度も 1.3×10⁻⁴M 処理区に比べて著しい差異はみられなかった。しかし、茎内の鉄濃度は 1.3×10⁻³M 処理区で著しく高く、FeSO₄濃度が高くなると茎に鉄が蓄積し、葉に移行する鉄はわずかなでることが認められた。

先述したように、NaFeEDTA は FeEDDHA より安定度定数が低いため、生体内に吸収された NaFeEDTA は FeEDDHA に比べて鉄を遊離しやすいものと考えられるので、断根茎ざし法で NaFeEDTA および FeEDDHA の生体内の存在量について検討した。第8表に水に可溶性の鉄の中に占める NaFeEDTA あるいは FeEDDHA 含量の割合を示した。NaFeEDTA 処理では、いずれの濃度区においても上位葉および下位葉とも NaFeEDTA は認められなかった。しかし、FeEDDHA 処理では 1.3×10⁻⁴M 処理区の上位葉で水抽出分画中の総鉄含量の 58.5%、5.4×10⁻⁴M 処理区の上位葉で 77.5%の割合で FeEDDHA で占められていた。上位葉

第8表. NaFeEDTAおよびFeEDDHA処理によるトウガラシ葉内の水可溶性鉄中のNaFeEDTAあるいはFeEDDHA含有率(断根茎ざし法, 処理2日間).

処 理 区	部 位	含有率 (%) ^z
NaFeEDTA $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$	上位葉 ^y	0.0
	下位葉 ^x	0.0
	上位葉	0.0
	下位葉	0.0
FeEDDHA $1.3 \times 10^{-4} \text{M}$	上位葉	58.5 (38 ppm) ^w
	下位葉	47.6 (49 ppm)
	上位葉	77.5 (241 ppm)
	下位葉	60.6 (189 ppm)

^z $\frac{\text{水抽出分画中のNaFeEDTAあるいはFeEDDHA含量}}{\text{水抽出分画中の総鉄含量}} \times 100.$

^y 展開直後の葉から下位へ3葉.

^x 上位葉より下位の葉すべて.

^w カッコ内は乾物当たりのFeEDDHA含量.

は下位様に比べて, FeEDDHA の存在量の割合が高かった. 以上の結果から NaFeEDTA による生理障害の発生原因の一つに, 茎から吸収された NaFeEDTA がほとんどすべて分解され, 鉄を遊離することが考えられる. 一方, FeEDDHA 処理区では葉に分解されない FeEDDHA が多量に存在することから, 鉄の過剰障害が発生しないものと思われる. このようなことからキレート鉄による生理障害の発生の原因は, 過剰に吸収されたキレート鉄が生体内で遊離鉄を生成するためではないかと推察される.

作物の鉄過剰による生理障害の発生については, すでに田中・但野(7), 但野(6)により, 水稻を用いて詳細な検討がなされている. これらの報告によると根の鉄排除機能の低下が鉄過剰吸収の主な原因であるとされている. 本実験での土耕から水耕栽培への移植直後に認められる NaFeEDTA の生理障害の発生は, 田中・但野が指摘した根の鉄排除能の低下による NaFeEDTA の過剰吸収による可能性がある.

摘 要

トウガラシの品種‘ししとう’の土耕育苗した苗を, れき耕用圃試処方第一例培養液(圃試培養液と省略)50%の多量要素と100%の微量要素を含む培養液で水耕栽培すると, 移植直後に葉に褐変斑点が発生し, 一部障害の激しい個体は落葉, 枯死した. この生理障害は, 圃試培養液に $6.5 \times 10^{-5} \text{M}$ で含まれる NaFeEDTA によることが明らかとなった.

断根茎ざしのトウガラシでは, NaFeEDTA による生理障害は $1.6 \times 10^{-5} \text{M}$ 以上の濃度で発生した.

水耕栽培へ移す前のトウガラシの土耕苗でかん水量が少ない場合に, 水耕に移した直後に NaFeEDTA による生理障害の発生が著しかった. 2週間水耕栽培したトウガラシでは, NaFeEDTA 濃度を $20.8 \times 10^{-4} \text{M}$ に高めても, 落葉, 枯死を伴うほどの障害の発生は認められなかった. 土耕苗を水のみで2~4日間培養すると NaFeEDTA $1.3 \times 10^{-4} \text{M}$ で生理障害は発生しなかった.

種々のキレート鉄の中で, FeEDDHA が生理障害を発生せず, その濃度を $5.2 \times 10^{-4} \text{M}$ に高めても, 断根茎ざしのトウガラシで障害の発生は認められなかった.

断根茎ざし法で NaFeEDTA を吸収させた場合, トウガラシの葉には NaFeEDTA は認められなかったが, FeEDDHA を吸収させた場合には葉に多量の FeEDDHA が認められた.

謝 辞 本実験の遂行にあたり, いろいろとご教示いただいた京都大学農学部高橋英一名誉教授および岡山大学農学部川崎利夫教授に慎んで感謝する. また, 鉄の分析方法などをご指導いただいた京都大学農学部西村和雄助手ならびに実験の遂行上, 終始ご助力いただいた京都府立大学農学部寺林敏講師および鉄の分析その他で助けていただいた山下悟氏に深く感謝する.

引 用 文 献

1. van Driel, W. 1964. The effect of iron ethylenediaminetetraacetic acid on the growth and metabolism of tomato plants in water culture. *Plant and Soil* 20 : 85-104.
2. Hewitt, E. J. 1966. Sand and water culture

- methods used in the study of plant nutrition. (2nd ed.). p.229-231. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Bucks, England.
3. Hill-Cottingham, D.G. and C.P. Lloyd-Jones. 1961. Analysis of iron chelates in plant extracts. *J. Sci. Food Agric.* 12 : 69-74.
 4. Jeffreys, R.A. and A. Wallace. 1968. Detection of iron ethylenediamine di (O-hydroxyphenylacetate) in plant tissue. *Agron. Jour.* 613-616.
 5. Samman, Y. and A. Wallace. 1983. Possible plant toxicity resulting from high level application of ZnEDTA. *Jour. Plant Nutr.* 6 : 491-500.
 6. 但野利秋. 1976. 水稻の鉄過剰障害対策に関する作物栄養学の研究. 北海道大農学部邦文紀要 10 : 22-67.
 7. 田中 明 但野利秋. 1969. 水稻の鉄栄養に関する研究. (第2報). 水稻根の鉄排除機能について. 土肥誌. 40 : 469-472.
 8. 上野景平編. 1977. EDTA-コンプレキサンの化学. p.105-110. 南江堂. 東京.
 9. Wallace, A. 1962. A decade of synthetic chelating agents in inorganic plant nutrition. Published by the author, Los Angeles, California.
 10. Wallace, A. 1983. Chelate toxicity with transplant solutions containing Zn, Mn and Fe chelates for tomato. *Jour. Plant Nutr.* 6 : 501-502.
 11. Wallace, G.A., A. Wallace and G.V. Alexander. 1983. Effect of different levels of ZnDTPA on bush beans in solution culture. *Jour. Plant Nutr.* 6 : 447-449.
 12. 山崎肯哉. 1981. 水耕栽培法に関する諸問題. (2). 農および園. 56 : 1391-1398.
 13. 矢澤 進・佐藤隆徳・並木隆和. 1981. キレート鉄による生育障害. (第1報). トウガラシにおけるNaFeEDTAの生育障害. 園学要旨. 昭56秋 : 242-243.
 14. 矢澤 進・佐藤隆徳・並木隆和. 1981. キレート鉄による生育障害. (第2報). キレート鉄の生育障害の回避について. 園学要旨. 昭56秋 : 244-245.