

水稻の鉄栄養に関する研究(第4報)

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	但野, 利秋
巻/号	41巻12号
掲載ページ	p. 498-501
発行年月	1970年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



水稻の鉄栄養に関する研究 (第4報)

水稻の無機栄養状態が鉄過剰吸収におよぼす影響

但野 利秋*

1. 緒言

土壤溶液中の鉄濃度は湛水による土壤の還元にもなつて高濃度になり、数百 ppm に達することも稀ではない¹⁾。そして、培地中鉄濃度の上昇が水稻の生育障害の一つである Bronzing の原因と考えられている²⁾。

しかし、湛水条件下における土壤溶液中鉄濃度の上昇が水稻に生育障害をもたらさない例も認められている^{3,4)}。したがって土壤溶液中の鉄濃度と鉄過剰による水稻生育の阻害とは必ずしも対応しない。

著者はこれまでに培地中の鉄が高濃度の場合には水稻根が鉄を排除する機能を持ち⁵⁾、加里欠乏の場合にはこの機能が低下して鉄の過剰吸収をもたらすことを認めるとともに、このような加里欠乏に起因する鉄過剰症の実例を示した⁶⁾。これらの知見から、鉄過剰症は単に培地の鉄濃度の上昇によるだけではなく、他の無機要素の欠乏によって助長される可能性が大きいと考えられる。そして、このことが培地中鉄濃度と鉄過剰による水稻生育の阻害とが必ずしも対応しない主要な原因であると予想される。

上記の理由から、高鉄濃度培養液からの水稻による鉄吸収に対して各種要素に関する栄養状態がどのような影響を与えるか明らかにすることを目的として行なった実験の結果を今回は報告する。

2. 実験方法および結果

実験 I 水稻の鉄吸収におよぼす各要素欠乏の影響

水稻品種「ユウカラ」の苗を 4l ポットに移植し、完全区と要素濃度を低くして各要素の欠乏が軽度におこるようにした 5ppm N 区、1ppm P 区、2ppm K 区、2ppm Ca 区、2ppm Mg 区および Mn 欠除区の全部で 7 区を設けた。なお、これらの各要素濃度を低くした区を、それぞれ N 欠区、P 欠区、K 欠区、Ca 欠区、Mg 欠区および Mn 欠区と呼ぶこととする。完全区の各要素濃度は、 $N(NH_4NO_3)$ 、 $K(K_2SO_4)$ 、 $Ca(CaCl_2)$ 、 $Mg(MgSO_4)$ はそれぞれ 40ppm、 $P(Na_2HPO_4)$ は 10ppm、 $Mn(MnSO_4)$ は 0.1ppm、 $Fe(FeSO_4)$ は 0.1ppm であり、各要素欠乏区では当該要素以外は完全区のそれに準じた。培養液は脱塩水を用いて調製し、これを毎週交換して、そのつ

ど硫酸を用いて pH を 5.0 に調節した。各区とも 4 ポットずつ設置し、移植後 23 日目にそのうちの 2 ポットに 100ppm になるように $Fe(FeSO_4)$ を加えて 100ppm Fe 区とした。他の 2 ポットはそのまま同じ処理をつづけた。なお、本実験では上記鉄処理を加えて長期間生育させる区を設けたので、溶存酸素による液中 Fe^{2+} 酸化をできるだけ防ぐために pH を 5.0 に調節した。

移植後 23 日目の Fe 処理開始時には、完全区を除き各区ともそれぞれの要素に特有な欠乏症状を軽度を示していた。また、100ppm Fe 区では Fe 処理後約 1 週間目よりそれぞれ特有の鉄過剰症状を呈し始めた。その症状は概略次の通りである。

完全区：下位葉暗色化、ついで下位葉より葉脈間に軽微な褐色斑点の発現。

N 欠区：N 欠乏による葉色の黄化はおこるが、0.1ppm Fe 処理 N 欠区に比較すると緑色が濃い。

P 欠区：下位葉暗色化、ついで下位葉および中位葉に褐色斑点の発現。

K 欠区：葉色下位葉より暗色化し全葉におよぶ。ついで下位葉先端部より褐色斑点生じ、さらに中・上位葉にも発現。症状が進むと下位葉より枯死。

Ca 欠区：下位葉および中位葉に鮮明な暗褐色斑点が生じ、症状が進むと各斑点が連なって条斑になる。下位葉より枯死。

Mg 欠区：下位葉暗色化、ついで下位葉より葉脈間に不鮮明な褐色斑点が多数発生。

Mn 欠区：Mn 欠乏特有の条斑が葉脈間に発生するが、その上に鉄過剰によって下位葉、中位葉の葉脈間に褐色斑点が生じる。

鉄処理後 12 日目に水稻を収穫し、前報⁶⁾と同様に上位葉、下位葉、稈、根の 4 部位において乾燥、重量測定後分析に供した。100ppm Fe 区における各区の生育量を 0.1ppm Fe 区のそれと比較すると、地上部では K 欠区が最も劣り、Mn 欠区がそれにつぎ、他の区では完全区の場合とほとんど差がない (第 1 表)。根部では 0.1ppm Fe 区に比較して Ca 欠区でやや高く、Mn 欠区でやや低いが、他の区では完全区と大差なかった。

同時期における 100ppm Fe 処理による地上部鉄含有率の上昇は K 欠区でもっとも著しく、Mg 欠区、Mn 欠区および Ca 欠区でそれにつぎ、P 欠区でやや高く、N 欠

* 北大農学部 (札幌市北 9 条西 9 丁目)
昭和 45 年 4 月 16 日受理
日本土壤肥科学雑誌 第 41 卷 第 12 号, p. 498~501 (1970)

区では完全区に比してほとんど増加しなかった（第2表）。根部ではP欠区とMn欠区の鉄含有率が明らかに低く、他の区は完全区よりやや低い値であった。

この実験結果から地上部および根部の鉄含有量を算出し、全吸収量に対する地上部移行割合を算出した（第2表）。この割合は0.1 ppm Fe区では高く、100 ppm Fe区では低かった。また、0.1 ppm Fe区ではN欠区、K欠区、Mg欠区で完全区に比べてやや小

さく、Mn欠区で大きくなった。それに対し、100 ppm Fe区では完全区に比してN欠区で小さく、K欠区、Ca欠区でやや大きく、Mg欠区、Mn欠区でもっとも大きかった。

第1表 鉄処理濃度を異にする各要素欠乏水稻の生育（100 ppm 鉄処理開始後12日目、乾物重 g/個体）

処 理	地 上 部			根 部		
	0.1ppm Fe	100ppm Fe	指数*	0.1ppm Fe	100ppm Fe	指数*
完 全	3.03	2.76	91	0.77	0.81	105
N : 5 ppm	0.88	0.77	88	0.37	0.37	100
P : 1 ppm	1.92	1.65	90	0.67	0.72	107
K : 2 ppm	2.08	1.38	66	0.51	0.50	98
Ca : 2 ppm	2.32	2.12	91	0.46	0.54	117
Mg : 2 ppm	2.63	2.30	87	0.67	0.66	99
Mn : 0	2.00	1.62	81	0.52	0.49	94

* Fe 100 ppm 処理の Fe 0.1 ppm 処理に対する指数

第2表 各要素欠乏水稻による鉄吸収（鉄処理後12日目）

処 理	Fe 含有率 (ppm)			Fe 吸収量 (mg/個体)			地 上 部 移 行 割 合 (地上部計) ×100
	上位葉	下位葉	稈	根	地上部	根 部	
0.1 ppm Fe							
完 全	249	395	225	865	0.80	0.67	1.47
N : 5 ppm	242	508	235	940	0.27	0.35	0.62
P : 1 ppm	222	530	190	655	0.48	0.44	0.92
K : 2 ppm	207	378	200	1,080	0.51	0.55	1.06
Ca : 2 ppm	212	418	193	1,135	0.55	0.53	1.08
Mg : 2 ppm	269	448	213	1,285	0.71	0.79	1.50
Mn : 0	209	468	180	700	0.52	0.36	0.88
100 ppm Fe				×10 ³			
完 全	423	732	390	48	1.29	35.8	37.1
N : 5 ppm	398	830	495	44	0.42	16.2	16.6
P : 1 ppm	458	864	407	34	0.82	21.4	22.2
K : 2 ppm	617	983	808	47	1.10	23.4	24.5
Ca : 2 ppm	544	910	413	43	1.10	23.0	24.1
Mg : 2 ppm	602	998	480	37	1.40	24.2	25.6
Mn : 0	601	826	570	39	1.03	18.1	19.1

第3表 各処理区における当該要素含有率と完全区の要素吸収量（鉄処理後12日目）

		N	P	K	Ca	Mg	Mn	
当 該 要 素 含 有 率 (0.1 ppm Fe)	地 上 部	完 全 区	3.02	0.65	2.61	0.13	0.41	85
		当 該 要 素 欠 乏 区	2.24	0.14	0.41	0.052	0.17	25
	根 部	完 全 区	1.77	0.49	1.17	0.074	0.24	42
		当 該 要 素 欠 乏 区	1.18	0.13	0.38	0.045	0.075	15
完 全 区 の 要 素 吸 収 量 (mg/個体)	0.1 ppm Fe (a)	105	23	88	4.6	14.2	0.29	
	100 ppm Fe (b)	95	18	65	3.5	6.9	0.20	
	(b/a×100)	91	76	74	77	49	70	

サンプルング時における各要素欠乏区の当該要素含有率はどの区でも著しく低かった（第3表）。また、完全区の各要素吸収量は100 ppm Fe 処理によってMg吸収がとくに低下し、Mn, K, PおよびCaの吸収量も低下した。

実験II 鉄吸収におよぼす培養液中共存イオンの影響

300 ml 容三角フラスコに完全培養液あるいは各要素を欠除した培養液または50 ppm Mn 培養液を加えておき、窒素ガスを通気して培養液中の溶存酸素を完全に除去してから⁵⁹FeでラベルしたFeSO₄をFeとして300 ppmになるように加えた。なお、完全区の各要素濃度は実験Iと同じであり、N源としては(NH₄)₂SO₄を用いた。また、本実験は溶存酸素を完全に除去して短期間行なった実験であるので、実験開始時のpHは、実際の水田で普通に認められる6.0に酸素を除去したNaOHを用いて調節した。終了時のpHは3.5~4.0であった。培養

液は脱塩水を用いて調製し、実験は2反復でおこなった。上記のように調製したそれぞれの三角フラスコに前もって完全培養液で30日間生育させた水稻を1個体ずつ移し、ガラス室内に放置した。24時間後水稻を採取して地上部と根部にわけ、乾燥、秤量、細断後灰化し、吸収した⁵⁹Feをガスフロー・カウンターで測定し、その値から実験期間中に吸収した鉄の量を算出して⁵⁹Fe吸収量とした。なお、10 ppm Pの添加は培養液中に沈殿の生成をもたらした。

地上部⁵⁹Fe含有量はP欠除区で完全区より約20%増加したが、他の要素欠除区では完全区とほぼ同じであった（第4表）。また、根部では

第 4 表 鉄吸収におよぼす培養液中共存イオンの影響 (300 ppm Fe, 24 時間)

処 理	⁵⁹ Fe 吸 取 量			
	地 上 部		根 部	
	mg/個体	指 数	mg/個体	指 数
完 全	$\times 10^{-1}$ 2.56	100	7.4	100
-N	2.44	95	6.9	94
-P	3.14	123	4.6	62
-K	2.44	95	7.0	95
-Ca	2.41	94	6.8	92
-Mg	2.46	96	5.8	79
-Mn	2.45	96	5.9	81
Mn : 50 ppm	2.11	82	8.0	109

P 欠除区で非常に少なく, Mg 欠除区および Mn 欠除区でやや少なく, 他の区では完全区と大差なかった。Mn 50 ppm 区では根部で増加し, 地上部で減少した。

実験 III 水稻の水吸収にともなう培養液中鉄濃度の変化

脱塩水を用いて調製した無りん酸培養液を 300 ml 容三角フラスコに加え, 酸素を完全に除去した後 FeSO₄ を 1, 10, 50, 100 および 300 ppm Fe になるように加え, pH を 6.0 に調節してから各フラスコに水稻を一個体ずつ移植した。これを 20 時間ガラス室内に放置してから水稻を除去し, ただちに濃硫酸 10 ml を加えてよく攪拌し, 10 分間静置後フラスコ内の残存培養液量を測定した。また同時に鉄濃度の測定を行なった。鉄濃度の測定には Fe²⁺+Fe³⁺ は過マンガン酸カリで酸化後ロダンカリ法を, Fe³⁺ はロダンカリ法を用いた。鉄濃度の測定は実験開始前の培養液についても行なった。

培養液中 Fe³⁺ 濃度はこの実験条件下では全く増加しなかった。いっぽう, Fe²⁺ 濃度は培養液中鉄濃度が 1 および 10 ppm では低下し, 50 ppm 以上の濃度では上昇した (第 5 表)。

第 5 表 水稻の水吸収にともなう培養液中鉄濃度の変化

培養液中鉄濃度 (ppm Fe)	根 重 (g 生重/個体)	水 吸 取 量 (ml/個体)	培養液中鉄濃度の変化 (ppm)			
			Fe ³⁺		Fe ²⁺	
			実験前	実験後	実験前	実験後
1	7.4	57	0	0	1.0	0.7
10	7.3	57	0	0	10.0	9.5
50	9.3	72	0	0	50	53
100	9.0	66	0	0	99	109
300	9.2	47	0.5	0.3	298	318

実験 IV 各要素欠乏水稻による水吸収と培養液中鉄濃度の変化

実験 I と同様に, 0.1 ppm Fe で完全区および各要素低濃度区をつくって 50 日間生育させた水稻を実験に供した。まず, 300 ml 容三角フラスコにりん酸以外は各ポットと全く同じ組成の培養液を加え, 窒素ガスを通気して酸素を完全に除去した後, 鉄濃度が 100 ppm になるように FeSO₄ を加え, pH を 6.0 に調節して全量を 330 ml にした。りん酸はりん酸鉄の沈殿生成を防ぐために除去した。このようにして準備した各培養液より 2 ml ずつ溶液を採取して実験開始時の鉄濃度を測定し, その後ただちに各フラスコに鉄以外についてはそれと対応する培養液で生育させた水稻を移し, 2 反復でガラス室内に放置した。なお, 完全区的水稻は要素欠乏区に比べてはるかに大きかったので, フラスコに移すさい他の区の水吸収とあまり大きな差を生じさせないために, その 1/3 の分けつを取り除いて残りをフラスコに移した。30 時間後水稻を除去し, ただちにフラスコ内の残存培養液量を測定し, 実験 III と同様にして溶液を 2 ml 採取し, 実験終了時の鉄濃度測定に供した。この場合にも溶液中に沈では認められなかった。実験終了時の pH は 3.0~3.5 であった。

Fe³⁺ 濃度は実験開始時, 終了時ともに微量であったので第 6 表にしめした鉄濃度 (Fe²⁺+Fe³⁺) は Fe²⁺ 濃度とほとんど一致する。

水吸収量は植物体の大きさを反映していた。培養液中鉄濃度はどの区でも開始時に比べて終了時に上昇したが, その上昇は完全区でもっとも大きく, Mn 欠区, Mg 欠区でそれにつき, K 欠区でもっとも小さかった。N 欠区では水吸収量ももっとも小さかったにもかかわらず,

第 6 表 各要素欠乏水稻による水吸収, 培養液中鉄濃度の変化および鉄排除能 (100 ppm Fe, 30 時間)

処 理	供 試 水 吸 実験終 鉄濃度 鉄排除	水 吸 取 量 (g 乾重/個体)	取 量 (ml/個体)	了 時 の 鉄 濃 度 (ppm)	の 増 加 割 合 (1)	能 (2)
完 全	7.1	127	137	37	60	
N : 5 ppm	2.9	50	111	11	60	
P : 1 ppm	6.5	75	109	9	30	
K : 2 ppm	5.0	67	105	5	20	
Ca : 2 ppm	5.3	78	107	7	22	
Mg : 2 ppm	7.7	107	113	13	27	
Mn : 0	8.3	118	121	21	38	

(1) $\frac{a-b}{a} \times 100$, [a=実験開始時の鉄濃度 (ppm), b=実験終了時の鉄濃度 (ppm)]

(2) $\left\{ \left(\frac{b-a}{a} \right) \left(\frac{A-B}{B} \right) \right\} \times 100$, [A=実験開始時の水量 (ml), B=実験終了時の水量 (ml)]

鉄濃度の上昇は比較的大きかった。

この実験結果から鉄濃度の増加割合および残存量に対する吸収水量の割合を算出し、その比をとって水稻根の鉄排除能とした（第6表）。この値は水に溶けて水とともに根の表面に達する鉄が全部培養液系から除去されるならば0になり、全部培養液中に残存するならば100になるはずである。

完全区では明らかに鉄排除能をしめし、N欠区では完全区と差がないが他の要素欠区ではいずれも排除能が低下した。そして、その低下はK欠区でもっとも激しく、Ca欠区およびMg欠区でそれについだ。

3. 考 察

100 ppm Fe 処理後12日目における地上部各部位の鉄含有率の上昇はK欠乏水稻でもっとも著しく、Ca、MgおよびMn欠乏水稻でそれにつき、P欠乏水稻でもやや増加した（第2表）。いっぽう、高鉄濃度培養液においてりん酸が共存しない場合地上部鉄含有率は高まるが、他の要素については共存しなくてもほとんど影響がない（第4表）。この実験は完全培養液で生育した水稻を用いて短期間行なったものであるから、第2表にみられる要素低濃度処理による地上部鉄含有率の上昇はP欠区以外は培養液中における各種イオンと鉄イオンの直接的相互作用の結果とは考えられない。すなわち、水稻の栄養状態が劣悪になったことが鉄含有率上昇の原因と考えるべきであろう。P欠区については、地上部鉄含有率の上昇に対して培養液中P濃度が低いこと自体も関与していると考えられる。

培養液中鉄濃度が50 ppm以上になると水稻根は鉄排除能を示し（第5表）、水に溶けて水とともに根に達する Fe^{2+} のある部分は根の内部に入らないように排除され、水だけが吸収される結果培養液中鉄濃度は上昇する。これはさきりに論じた水稻根の鉄排除能に起因するものである。そして、この機能は水稻の無機栄養状態によって影響を受け、K栄養状態の劣悪化によって著しく低下し、Ca、Mg、P、Mnの栄養状態の劣悪化によっても低下する（第6表）。

また、培養液中の鉄濃度が高い場合根に止まる鉄の割合が増加し、地上部に対する移行割合は低下する（第2表）。この移行割合も水稻の無機栄養状態によって影響を受け、Mg欠およびMn欠によって増大し、K欠およびCa欠でもやや増大し、N欠ではやや低下する。

以上を総合すると、培養液中鉄濃度が高濃度になった場合に、健全な水稻ではまず根の鉄排除能によって水に溶存している鉄が根の中に侵入することを選択的に排除し、ついで根の中に吸収された鉄を地上部へ移動しにく

くすることによって地上部が鉄過剰症におちいることを防いでいると考えられる。

このような水稻根の性質は水稻の無機栄養状態によって影響を受け、鉄排除能はK欠乏によって著しく低下し、Ca、Mg、P、Mn欠乏によっても低下する。また、地上部に対する鉄移動性はMg欠乏およびMn欠乏によって増大し、K欠乏およびCa欠乏でもやや増大する。そして、この結果、高濃度鉄溶液からの鉄過剰吸収はK欠乏水稻でもっとも著しく、Ca、MgおよびMn欠乏水稻でそれにつぐ。また、P欠乏水稻の場合にはこの要因の他に培養中P濃度が低いこと自体も鉄吸収に影響をおよぼしていると考えられる。

さらに、培養液中鉄濃度の上昇はMg、Mn、K、PおよびCaの吸収を低下させ、これら要素の栄養状態の劣悪化をもたらし、鉄の過剰吸収をまねく原因になる可能性がある。

4. 要 約

培養液中N、P、K、Ca、MgおよびMn濃度を低濃度にして、これら無機要素の栄養状態を劣悪にした水稻による鉄の過剰吸収について検討し、次の結果を得た。

1. 培養液中2価鉄濃度が50 ppm以上になると、水とともに根に達する鉄を根に入らないように排除する機能は水稻根は持っている。この機能はK欠乏によって著しく低下し、Ca、Mg、P、Mn欠乏によっても低下し、N欠乏によつては影響を受けない。
2. 根から地上部への鉄の移動はMg欠乏、Mn欠乏によって増加し、K欠乏、Ca欠乏によつてもやや増加する。
3. 高鉄濃度培養液からの水稻による鉄吸収は培養液中りん酸（10 ppm）が共存することによって低下するが、他の要素の共存は用いた完全培養液の濃度範囲では影響を与えない。
4. 以上の結果、高濃度鉄溶液における鉄過剰症の発現は水稻の無機栄養状態によって影響を受け、K欠乏水稻でもっとも発現しやすく、Ca、MgおよびMn欠乏水稻でそれにつぐと考えられる。

謝辞 本研究を行なうにあたり御指導をいただいた北海道大学田中明教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) The International Rice Research Institute Annual Report (1964)
- 2) PONNAMPERUMA, F. N., BRADFIELD, D. and PEECH, M.: *Nature*, 175, 265 (1955)
- 3) 高城成一：東北大農研彙報, 10, 13 (1958)
- 4) DE, P. K. and MANDAL, L. N.: *Soil Sci.*, 84, 367 (1957)
- 5) 田中 明・但野利秋：土肥誌, 40, 469 (1969)
- 6) 但野利秋・田中 明：土肥誌, 41, 142 (1970)