

島根県のマンガン過剰水田に発生する水稻の黄化症状 (第1報) 症状と発生要因

野 田 滋*

Growth Inhibition with Yellowing of Rice Plant on the Manganese
Excessive Paddy Fields in Shimane Prefecture, Japan.

(No 1) Symptom and Occurrence Factors

Shigeru Noda*

I 緒 言

島根県では、圃場整備後数年の新しい水田で、水稻の葉が生育初期に黄化して生育不良になる現象が、各地で少なからず認められるようになった。なかでも、金城町の水田では発生面積が大きく問題となっている。この葉の黄化を伴う生育不良（以下、黄化症と記す）は、石見銀山下流域で古くから‘しおまち’と呼ばれる生育不良現象と非常に類似した特徴を有する。また、石見銀山には菱マンガン鉱（赤坂，1998）、金城町周辺ではマンガン鉱石の一種クリプトメレン（今岡，1998）と、ともにマンガン鉱床に富み、農林水産省の事業で行った概況調査（1972～’79）や土壌環境基礎調査（1992～’96）の結果から、周辺の水田土壌はマンガン濃度が高く、障害にマンガンの関与が示唆された。このような現地で発生した水稻のマンガン過剰症に関する報告は少なく、福井県で数例報告（寺島，1973；勝見，1986）されているにすぎない。

本研究では島根県金城町の水田に発生する水稻の黄化症について、生育障害の特徴と発生要因を明らかにしたので報告する。

II 材料及び方法

1. 障害状況調査

1992年から’94年に、金城町の水田で移植1か月頃の水稲の黄化状況と移植2か月頃までの生育状況を調査した。

移植1か月頃の水稲（品種；コシヒカリ）で、葉の黄化が鮮明で生育障害が激しく見られる圃場を5か所選定した。このうち2圃場では、同じ圃場内で障害程度の異なる株を20～30株採取し、生育量と葉身中のクロロフィル含量の測定を行い、黄化が水稻生育に及ぼす影響を調べた。クロロフィルの測定は高木（1966）の方法に準じて行った。

また、4圃場から、同じ圃場内で黄化し生育の悪い株約20株と比較的健全な株を約10株ずつ採取し、それぞれ葉身と葉鞘に分け、葉位別にマンガン、鉄、窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムの測定を行い、黄化個体の体内無機成分の特徴を調べた。

さらに3圃場で、黄化し障害の激しい株を20数株ずつ採取して、黄化した葉身を黄化部と緑色部に剪刀で切り分け、上記無機成分の測定を行い、黄化部位の無機成分の特徴を調べた。

次に、金城町全域の水田土壌について、マンガン、銅、ヒ素、亜鉛、鉛の測定を行い、県内

の一般水田と比較した。また、黄化症状が顕著に見られるようになった移植後1か月頃の分けつ期に、全域の中から10地点の調査地点を設定し、症状発現の有無を確認するとともに、作土と水稻を採取し、作土の易還元性マンガン濃度と水稻の乾物重、稲体のマンガン及び鉄濃度の測定を行い、土壌のマンガンを障害の関連を検討した。障害の見られない圃場では1株とその直下の作土を、障害の見られる圃場では障害株と直下の作土と隣接4株を採取した。水稻品種は‘コシヒカリ’が多く、一部‘近畿33号’も作付けされていた。障害程度の判定は、圃場全体の平均的な生育量と比較し、生育量が少ないものから順に「大」「中」「小」の3段階に区分し、ほとんど黄化が見られず外観的に健全な株は「小」とした(図3)。

2. 障害再現試験

障害発生田の周辺の小山の露頭を示した(図1)。熱水変性した花崗岩等の割れ目や表面に黒色のクリプトメレーンの沈着が見られる。

1994年に、この小山の中腹部で表土を0~30cm採取した。採取した土壌の易還元性マンガン濃度は4,083ppmであった。一方、黄化症状が常時発生する水田で作土を採取した。易還元性マンガン濃度は737ppmであった。

採取した土壌は未風乾のまま2mmで篩別し、500mlビーカーに山土表土を650g、水田作土を500g充填した。山土充填区には、有機物としてセルロース粉末(アビセル)2%添加区と無添加区を設けた。また、水田作土充填区では同じく0.3%を添加した。各区には、深さ5cmにEh電極と土壌溶液採取用のポリエチレンフィルター管(鈴木(1983)、ポリエチレン微粉末の焼結成型、外径8mm、内径2mm、特注品)を埋設した。施肥量は窒素、リン酸、加里としてそれぞれ0.05g、0.12g、0.05gを、塩安、過石、塩加で施用した。水稻品種は‘日本晴’を用い、稚苗2本植えて、湛水条件で50~60日間栽培し、2連制で行った。栽培期間中、定期的にEhの測定と土壌溶液の採取を行い、土壌溶液は採取後直ちに塩酸で0.1規定とし、マンガン及び鉄の測定に供した。

3. 高濃度のマンガン及び鉄が水稻根の呼吸能に及ぼす影響

1996年に稚苗移植30日後の茎数10~15本の水稻(日本晴)を根を切らないように採取し、十分洗浄して試料とした。マンガンは塩化マンガンを、0、30、50、100、200ppm、鉄は硫酸第一鉄を用い、0、10、50、100、200ppmになるようそれぞれ溶液濃度を調製した。溶液pHは鉄100ppmが4.7、200ppmが4.3とpH5.0を下回ったが、酸度の矯正は行わなかった。調製したマンガンあるいは鉄溶液は300ml容三角フラスコに入れ、窒素ガスを2時間通気することにより、溶存酸素を除去し、採取した水稻を3株づつ移植した。24時間放置後、すばやく根を分離し、軽く濾紙で拭き取り、10gをO₂アップテスター(大洋科学工業社製)にかけて1時間当たりの呼吸量を測定した。培養条件は25℃とし、培養液は脱塩水を用いた。

III 結 果

1. 障害状況調査

水稻葉の黄化を伴う生育障害(黄化症)は、移植後1か月頃の分けつ期をピークに発生し、障害が軽度の場合、次第に緑色に回復する傾向を認めた。また、障害の程度は年度によって異なった。なお、障害程度は同一圃場でも大きくばらつき、排水の悪い所で大きい傾向が認められた(図2、図3)。障害株は不完全葉である下位第1葉の黄化と第2葉の先端部の黄化から始まり、障害程度によって3葉、4葉に及び、生育が不良になった。また、障害が激しい場合、黄化は全葉に及び、生育は極端に劣った。黄化葉は褐色の斑点を生ずる場合が多く、葉の先端に針状の枯れ上がりが認められた(図4)。

水稻生育と黄化の関係をみるために、乾物重とクロロフィル含量の相関を図5に示した。黄化の指標とした葉身中のクロロフィル含量は、生育の指標となる乾物重と高い正の相関があり、黄化程度が大きいほど生育量は小さい傾向が認められた。

同一圃場内の黄化株と外観的に障害が見られない株について、部位別に無機成分を比較して表1に示した。調査は4圃場で行ったが、同じ



図1 金城町青原付近にみられる露頭
マンガン鉱石の一種であるクリプトメレーン
(黒っぽい部分) が観察される



図2 水稻の生育障害状況
田植え後30日頃の状況



図3 同一水田における障害状況
障害程度：左から，大，中，小



図4 水稻葉の黄化状況
田植え後50日頃の障害徴候

表1 黄化発現盛期における障害程度と部位別無機成分濃度

障害程度	水稻 部位	乾物重 (g/株)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
大	第2葉		7,833	1,860	1.93	0.180	0.82	0.17	0.10
	第3葉		3,291	522	2.08	0.200	1.05	0.17	0.03
	第4葉		1,684	309	1.98	0.211	1.23	0.15	0.02
	第5葉		1,090	246	1.93	0.223	1.53	0.14	0.01
	全葉身		3,631	763	1.99	0.202	1.12	0.16	0.04
	桿・葉鞘		5,198	8,587	1.36	—	1.26	—	—
	全体	0.45	4,536	5,284	1.63	—	1.21	—	—
小	第2葉		1,516	218	4.66	0.410	1.75	0.15	0.03
	第3葉		978	178	4.94	0.422	1.95	0.14	0.02
	第4葉		683	124	4.86	0.424	2.11	0.14	0.02
	第5葉		544	117	4.59	0.485	2.51	0.16	0.03
	全葉身		899	155	4.78	0.432	2.07	0.14	0.02
	桿・葉鞘		2,545	1,543	2.47	—	3.54	—	—
	全体	7.35	1,712	841	3.64	—	2.79	—	—

注) 試料採取時期；移植約1か月後，調査株数：大；20株，小；10株，品種；コシヒカリ

傾向であったので、ここでは1圃場の結果を記載した。黄化株はマンガンや鉄濃度が高く、三要素成分が低い特徴が認められた。黄化症状の発現部位である葉身で比較すると、マンガン濃度は下位の第2葉で高く、特に黄化株で鉄濃度ともに顕著な増加が認められた。これらの成分は上位葉ほど低かったが、全般的に黄化株の方が高かった。逆に、窒素、リン及びカリウム濃度は低い傾向が認められた。一方、カルシウムやマグネシウムについては一定の傾向を認めなかった。

黄化株の葉身を黄化部位と緑色部位に分け、無機成分濃度を比較して表2に示した。黄化部位は3圃場ともにマンガン及び鉄濃度が顕著に高かった。また、窒素、リン及びカリウム濃度は、黄化部で低い傾向が認められた。

金城町に分布する水田作土について、重金属濃度を県内の一般水田と比較して表3に示した。障害の発生する水田ではいずれの平均値も2～10倍の濃度を示し、このうち易還元性マンガン濃度は約4倍であった。また、障害の程度と土壌の易還元性マンガン濃度、稲体マンガン及び鉄濃度の関係を圃場別に表4に示した。土壌の

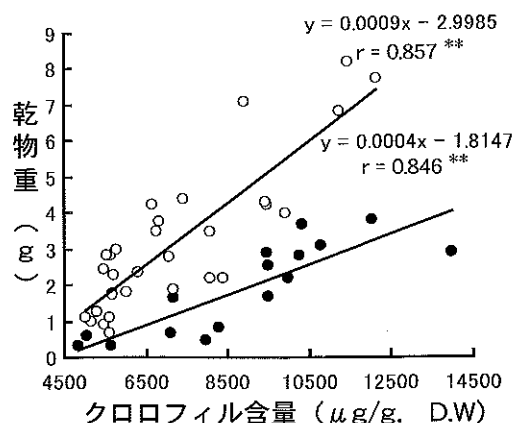


図5 黄化発現時における水稻乾物重と葉のクロロフィル含量の関係

**）5%水準で有意，調査圃場数；(○，●) 2圃場，品種；コシヒカリ，調査時期；移植後約1か月

易還元性マンガン濃度は高くても障害が見られない圃場もあり、圃場別に比較すると、障害と明確な関連は認められなかったが、同じ圃場内では障害が発現した部分で高い傾向を認めた。一方、葉身のマンガン濃度は土壌の易還元性マンガン濃度の高い圃場では高かったが、障害との関連は土壌の易還元性マンガンと同様に明確でなかった。他方、葉身中铁濃度は障害程度が大きい圃場ほど高い傾向を認めた。

表2 黄化した葉身における黄化部と緑色部の無機成分濃度

圃場番号	地上部乾物重 (g/株)	測定部位	Mn (ppm)	Fe (ppm)	N (%)	P (%)	K (%)
1	0.66	黄化部	5,930	2,760	1.90	0.220	1.40
		緑色部	1,230	350	2.01	0.290	1.80
2	0.28	黄化部	4,680	873	1.69	0.110	1.27
		緑色部	1,150	390	2.11	0.130	1.50
3	0.41	黄化部	4,680	2,420	2.72	0.250	1.11
		緑色部	1,150	420	2.53	0.300	1.50

注) 試料採取時期；移植約1ヶ月後，調査株数：20～23，品種；コシヒカリ

表3 障害発生田と無発生田の重金属濃度

(単位:ppm)

対象水田	事項	易還元性Mn	As	Cu	Zn	Pb
金城町 (障害発生)	濃度範囲	125～1,250	0.7～6.8	4.0～59.0	2.5～302	25.0～280
	平均値	564	3.0	21.2	57.6	94.6
	標準偏差	274	2.1	13.8	74.1	85.6
	調査点数	34	8	31	31	8
一般水田	濃度範囲	8～477	0.2～6.2	0.6～31.8	2.8～82.4	0～265
	平均値	130	1.5	6.0	9.9	7.5
	標準偏差	93	1.2	4.8	7.9	21.9
	調査点数	164	54	187	187	147

注) 一般水田：県内全域調査結果，易還元性Mn；1992～96年土壌環境基礎調査，その他；1972～79年重金属類概況調査による土壌中濃度

As；1規定塩酸可溶，Cu，Zn；0.1規定塩酸可溶，Pb；1規定酢酸アンモニウム可溶

表4 圃場別の障害程度と土壤及び水稻葉身中のマンガン、鉄濃度

圃場番号	地区名	障害程度	土壤中濃度 易還元性Mn (ppm)	水稻乾物重 (g/株)	葉身中濃度	
					Mn (ppm)	Fe (ppm)
1	七条	無	200	4.4	450	300
2	大元	無	275	9.6	700	300
3	久佐	無	125	4.9	550	400
4	下米原	無	375	6.9	1,400	300
5	青原	無	575	6.0	1,950	250
6	青原	大	350	0.5	938	703
		小	250	2.2	700	310
7	伊木	大	625	0.5	1,506	1,205
		小	600	6.7	1,200	300
8	吉留	大	125	1.1	800	1,120
		小	75	4.6	500	440
9	上米原	大	400	0.4	3,626	2,153
10	元谷	大	350	0.9	1,500	1,150

注) 試料採取時期：移植約1ヶ月後，葉身全葉分析，調査株数：番号1～5，6～8の小；1株，その他；5株
障害程度：大，中，小，無（圃場内で障害なし），品種：1～7，10；コシヒカリ，8，9；近畿33号

2. 障害再現試験

ピーカーに充填した現地水田作土における酸化還元電位（Eh）と土壤溶液中のマンガン及び鉄の溶出パターンを図6に示した。土壤Ehの低下に伴い，先にマンガンが溶出し，次いで鉄の溶出が認められた。マンガンは15日，鉄は30日をピークに濃度が漸減した。水稻は生育が悪く，下位葉の先端部に針状の枯れと黄化が見られた（図7）。

一方，山地土壤にセルロースを添加しない場合の酸化還元電位とマンガン，鉄の溶出パターンを図8に示した。土壤Ehは有機物がないために，湛水条件でも電位の低下が緩慢であり，-200mVにまで低下したのは，試験終了に近い50日目であった。したがって，土壤溶液中では鉄の溶出がほとんどみられず，マンガン濃度のみが上昇した。水稻は生育不良となったが，葉の黄化は見られず，葉身の先端から針状に枯死した（図9）。

山地土壤にセルロースを添加した場合の酸化還元電位とマンガン，鉄の溶出パターンを図10に示した。供試土壤は未耕地土のため有機物量が少なく，電位の低下は無添加区と同様に緩慢であったが，開始後30日には-200mV近くまで低下した。土壤溶液中のマンガンは直線的に増加し，鉄も開始30日頃から溶出し始めた。水稻葉は黄化し，褐色の斑点が認められ（図11），現地の障害程度の大きい水田で作付け後50日頃

見られる症状（図4）と類似した。

3. 培地中のマンガン及び鉄濃度が水稻根の呼吸能に及ぼす影響

マンガン，鉄濃度の違いが水稻根の呼吸能に及ぼす影響を表5に示した。マンガン濃度は30ppmで一昼夜処理することによって，根の呼吸能が半減した。鉄濃度は10ppmでは無処理区よりやや呼吸能が高かったが，50ppm以上で顕著に低下した。

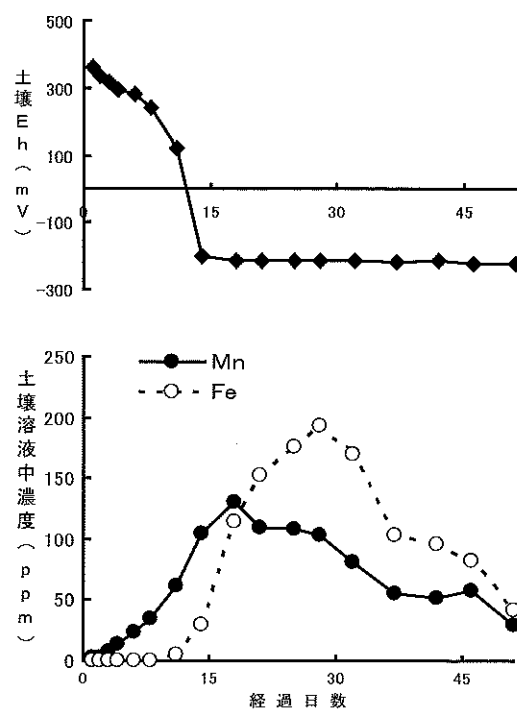


図6 現地水田土壤の酸化還元電位とマンガン，鉄の溶出パターン



図7 現地水田作土における移植後30日頃の水稻の障害状況



図9 山土のみ有機物無添加の場合の移植後50日頃の水稻の障害状況



図11 山土に有機物を添加した場合の移植後50日頃の水稻の障害状況

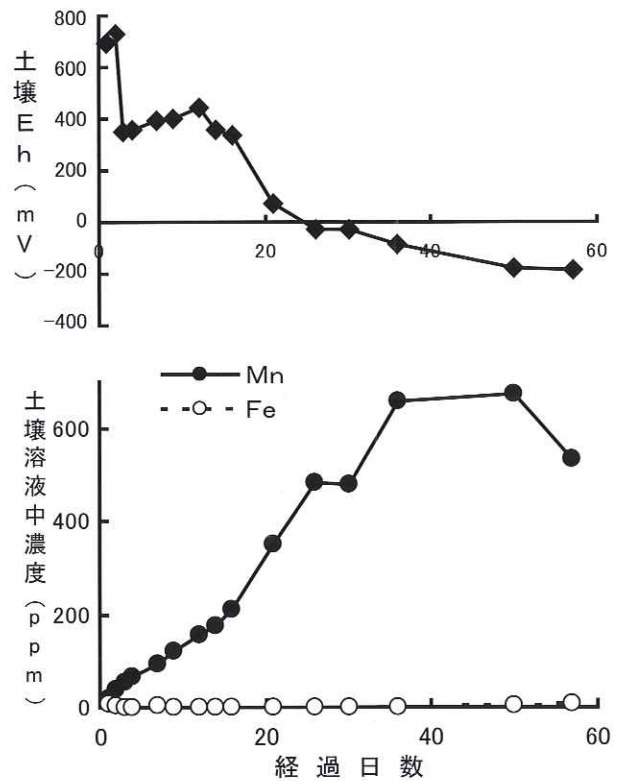


図8 山地土壌の酸化還元電位とマンガン、鉄の溶出パターン

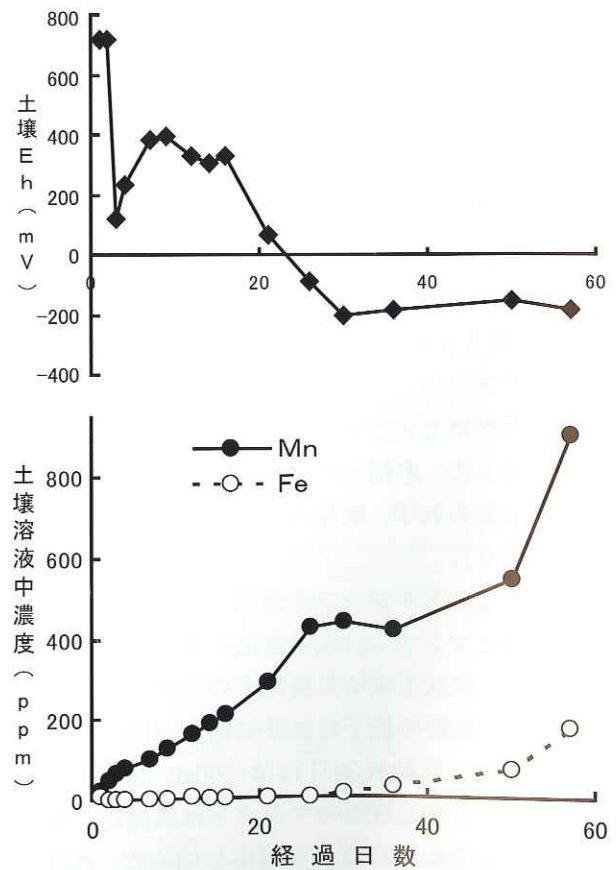


図10 セルロースを添加した山地土壌における酸化還元電位とマンガンおよび鉄の溶出パターン

表5 マンガン、鉄濃度の違いが水稻根の呼吸能に及ぼす影響

Mn, Fe濃度 (ppm)	呼吸能 (O ₂ ml/g/hr)	同左比 (%)
Mn 0	0.76	100
Mn 30	0.41	54
Mn 50	0.37	49
Mn 100	0.38	50
Mn 200	0.29	38
Fe 0	0.76	100
Fe 10	0.83	109
Fe 50	0.27	36
Fe 100	0.25	33
Fe 200	0.23	30

IV 考 察

マンガンによる水稻の過剰害に関する報告は数多くあるが、主として水耕及びポット試験によるものが多く、過剰害は生育後半にでやすいと言われているが、現地圃場で検討し、報告した例は少ない。茅野（1967）は水耕試験で、マンガンが水稻に吸収されやすく、多くは地上部に蓄積することから、過剰害は葉身へのマンガンの取り込み量が増加し、かつ出葉速度の低下する生殖生長期に大きいことを報告している。一方、寺島（1973）は福井県のマンガン過剰田で、水稻の初期生育が不良となり、特に分けつが抑制され、生育は遅延し、初期に長期間湛水すると黄化現象を生ずるとし、本報と類似した生育初期の過剰例を報告している。本地域で発生する葉の黄化は、移植後1か月頃の分けつ期に発生して、分けつが抑制され、生育の不良と直接関係が深いのが特徴的である。この黄化は次第に回復するが、生育の遅延を招いた。

障害田の作土を湛水培養すると、マンガンは培養開始後15日、鉄は30日をピークに溶出し、黄化症が発現し、その後両成分は次第に溶出しなくなった（図6）。現地の黄化症が湛水1か月をピークに発現し、その後回復する傾向とよく対応することから、黄化症に土壤中のマンガン、鉄の溶出が関与していると推察された。

一方、マンガンのみが溶出する土壤条件で湛水培養すると、水稻は生育が不良となるものの、黄化症状は発現せず、水稻は葉身の先端部から針状に枯れ上がった。他方、これに有機物を添

加し、鉄も溶出する条件にすると、現地で見られる黄化症に類似した症状が認められた。このことから、黄化症状に鉄の関与が強く示唆された。

水稻の鉄過剰制御能について、但野（1976）は鉄排除能が主要機作であり、根の鉄排除能が生育初期に極めて小さいことから、水稻の鉄過剰抵抗性は生育初期に小さいこと、また、この排除能は根の生理活性と密接に関係しており、土壤溶液中に過剰な鉄あるいは硫化水素、有機酸など根に有害な物質が高濃度で存在すると低下すると報告している。高マンガンあるいは高鉄濃度培養条件下で24時間処理し、その後水稻の根の呼吸能を測定した結果、マンガンでは30ppm以上、鉄では50ppm以上で、呼吸能は大きく阻害され、根の生理活性の低下が認められた。黄化症水稻は体内のマンガン、鉄濃度が高く、逆に窒素、リン、カリウムの3要素成分が低い特徴があることから、障害水田では土壤Ehの低下に伴い過剰なマンガン濃度の上昇と、続いて起こる鉄濃度の上昇によって、根の生理活性が低下し、鉄排除能が阻害され、鉄過剰症になり、根の養分吸収が阻害され黄化徴候を呈していると推察される。

土壤のマンガン濃度と障害については、福井県では易還元性マンガン300ppmをマンガン過剰水田の判定基準としている。また、これ以上の濃度でも肉眼的に障害のでない水田もあることも報告されている（勝見，1986）。金城町で確認された黄化症発現圃場の易還元性マンガン濃度は全般的に高いものの、400ppmあるいは600ppm近くでも発現しない圃場や125ppmで発現した圃場もあり、易還元性マンガン濃度だけで黄化症の発生を予測することは困難と考えられた。

一方、これら圃場の葉身中の鉄濃度を比較すると、発現しなかった圃場では低く、逆に易還元性マンガン濃度が低くても発現した圃場では鉄濃度が高かった。但野（1976）は高鉄濃度培養液で水耕栽培すると、下位葉濃度が550ppm程度で軽微な鉄過剰症の発現を認めている。黄化症水稻はいずれもこれより明らかに高く、特に下位葉では顕著に高かった。このことから、黄化症状が鉄過剰と密接に関係していることが示唆された。

V 摘 要

1. 水稻葉の黄化を伴う生育障害（黄化症）は、移植後1か月頃の分けつ期をピークに発生し、分けつが抑制され、生育量は低下した。
2. 黄化症状は下位葉身の先端部から発現し、障害程度によっては上位に及んだ。また、黄化した葉身の先端に針状の枯れ込みが見られた。
3. 黄化症水稻は外観的健全水稻に比べ体内中のマンガンと鉄濃度が高く、逆に窒素、リン、カリウムの3要素濃度の低い特徴が認められた。
4. 金城町の水田作土は易還元性マンガン濃度が高い特徴が認められたが、障害と明確に関連づけられなかった。しかし、黄化症水稻は葉身中铁濃度が一様に高かった。
5. 現地の水田作土で湛水培養した結果、土壤溶液内にマンガンは15日、鉄は30日をピークに溶出して現地の発現時期とよく対応し、黄化症を再現することができた。
6. マンガン濃度の高い周辺の山土を用い、マンガンのみ溶出する条件で湛水培養すると、水稻は黄化せず、葉身の先端部が針状に枯れ込んだ。
7. 山土に有機物を添加し、マンガンに加え鉄も溶出する条件で湛水培養すると、水稻は黄化し、現地と類似した症状を再現することができた。
8. 二匁のマンガン及び鉄が高濃度含まれる培養条件下で1日処理すると、生育初期の水稻

根の呼吸能はマンガンが30ppm以上、鉄は50ppm以上で大きく阻害された。

9. 水稻の黄化症状は土壤中に生成する過剰なマンガンと続いて生成される鉄によって、根の鉄排除能が低下して起こる鉄過剰症であると推察された。

引 用 文 献

- 赤坂正秀 (1998) 2つのタイプの鉄床からできている石見銀山。島根の自然をたずねて（島根の自然編集委員会編著）。築地書館, 194-195.
- 茅野充男 (1967) 重金属元素の植物に対する害作用特に重金属誘導鉄クロロシスの発生機構に関する研究。茨大農学術報告15, 105-164.
- 今岡照喜 (1998) 金城町伊木のマンガン鉄床。島根の自然をたずねて（島根の自然編集委員会編著）。築地書館, 199-202.
- 勝見 太 (1986) マンガン過剰が水稻の生育収量に及ぼす影響。福井農試報23, 41-65.
- 鈴木大助 (1983) 土壤中の水および空気採取用フィルター管の開発。土肥誌54, 253-254.
- 但野利秋 (1976) 水稻の鉄過剰障害対策に関する作物栄養学的研究。北大農邦文紀要10巻第1号, 22-68.
- 高城成一 (1966) 水稻栽培における土壤湛水の意義に関する研究。東北大農18巻第1号, 1-158.
- 寺島利夫 (1973) マンガン過剰水田に関する研究。福井農試特報5, 1-86.

Summary

The causes and characterization of growth inhibition with yellowing of rice plant was investigated which had occurred on the manganese excessive paddy fields, in the Kanagi District, Shimane Prefecture, Japan.

The results obtained are summarized as follows:

1. This regional growth disorders of early-planted rice was severely and peculiarly inhibited, causing yellow stunting of lower leaves and no increase in stem number after approximately 30 days of transplanting.
2. The inorganic component in a leaf blade appearing yellow was characterized by high content of Mn, Fe and low content of N, P and K.
3. This regional paddy fields or wild land were characterized by high content of easily reducible manganese in soil.
4. The disorder with yellowing of lower leaves was able to reappear by cultivation experiment in small pots containing excess manganese soils on the spot paddy field or wild land supplied with organic matter and was characterized by high content of Mn, Fe in soil solution.
5. Under submerging condition which was produced only formation of Mn and no Fe in a weakly reduced environment, rice plants was severely injured by high content of Mn in soil solution, but yellowing of leaf was not appeared.

It is considered, based on these findings, that growth disorder with yellowing results from iron toxicity which Iron-Excluding Power is inhibited by metabolic activity of root inhibitors, such as high content of Mn in soil solution.