

モデル実験による透水期間中の水田下層土の酸化還元電位 および水稻養分の動態

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	松浦, 勝美 福永, 明憲 坂上, 行雄
巻/号	48巻2号
掲載ページ	p. 25-34
発行年月	1977年2月

モデル実験による透水期間中の水田下層土の酸化還元電位および水稻養分の動態*

松浦勝美**・福永明憲**・坂上行雄**

前報⁹⁾において、筆者らは硬質塩化ビニール製の筒を用い、水稻生育と無機養分吸収に及ぼす下層土の役割について報告した。

それによれば、水稻の養分とくにケイ酸、マンガン、鉄などは水田下層土からも吸収されていた。このことはこれらの成分が下層土で有効な状態であったことを意味する。マンガン、鉄は還元状態で有効量を増加し、ケイ酸も類似の性格をもっている。

こういったことからみて、筆者らは湛水後の水田下層土における酸化還元状態、作土あるいは下層土からの養分の動きについて調べたので、その結果を報告する。

実験 I モデル実験による水田作土あるいは下層土から溶出する化学成分

1. 実験方法

1) 実験装置

内径 20 cm の硬質塩化ビニール製の筒を 2 種、12 個を準備した。短筒には、山口農試水田作土を 18 cm 詰め(以下、作土区という)、長筒には灰褐色水田下層土(G. Br)、または黄褐色山土(Y. Br)を 60 cm 詰めた上に、山口農試水田作土 18 cm を詰めた(以下、下層土区という)。水稻移植後に、減水深を 0 cm/日と 4 cm/日に分け、4 cm/日区からは、いずれの筒でも下端から水深 4 cm 分に相当する水量を 4~5 時間かけて 86 日間毎日抜きとった。

なお、供試土壌の理化学的性質や実験装置は前報⁹⁾に述べたとおりである。

2) Eh の測定

Eh 測定のための白金電極は東亜電波製 HP 105 を用い、作土では稲の株間中央を選び、土壌面より深さ 8 cm に挿入した。下層土では上部から深さ 10 cm と 50 cm の位置にそれぞれ直径 2 cm の穴を筒の横にあげ、ゴム栓を付して電極を深さ 8 cm に挿入して固定した。測定は携帯用東亜電波製 RM-1 型を用い、1~2 日おきに 14~15 時に行った。

* 本報告の一部は昭和 49 年 7 月、日本土壤肥料学会関西支部講演会において発表した。

** 山口県農業試験場(山口市大字大内御堀)

昭和 50 年 7 月 18 日受理

日本土壤肥料学雑誌 第 43 巻 第 2 号 p. 25~34 (1977)

3) 浸透水の分析

浸透水中の溶質の分析は 1 日おきに行い、鉄、マンガン、カルシウムおよびカリウムは原子吸光法、リン酸およびケイ酸はモリブデン比色法、全窒素は硫酸分解後セミマイクロケルダール法によった。COD は過マンガン酸カリウム消費量で表わした。

全溶出量を計算するにあたって、分析しない日は前後の平均値をとり算出した。

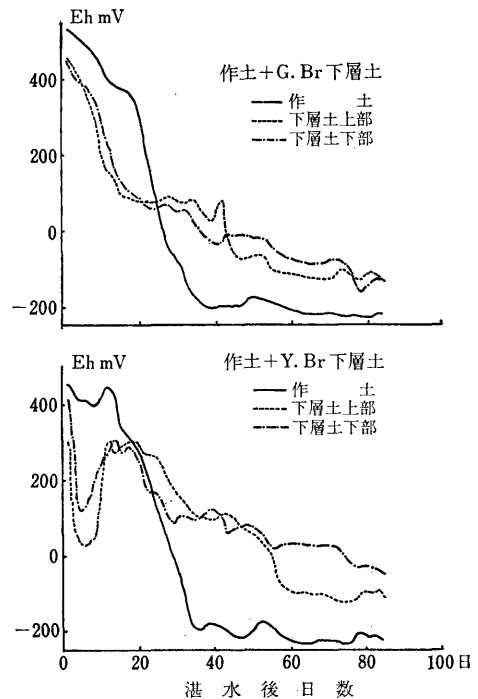
2. 実験結果

実験の結果は第 1~10 図に示した。

1) 土壌中の Eh 経時変化

減水深 0 cm/日区(第 1 図): 作土の Eh は、いずれの処理区も湛水後すぐに低下し、ほぼ 36 日目に最低値 -200 mV 付近に達し、その後は後期までほぼ一定の状態がつづいた。つぎに、下層土の種類と位置の違いによる Eh の経時変化をみるとつぎのとおりである。

G. Br 下層土区の場合、下層土上部で湛水後翌日の 450

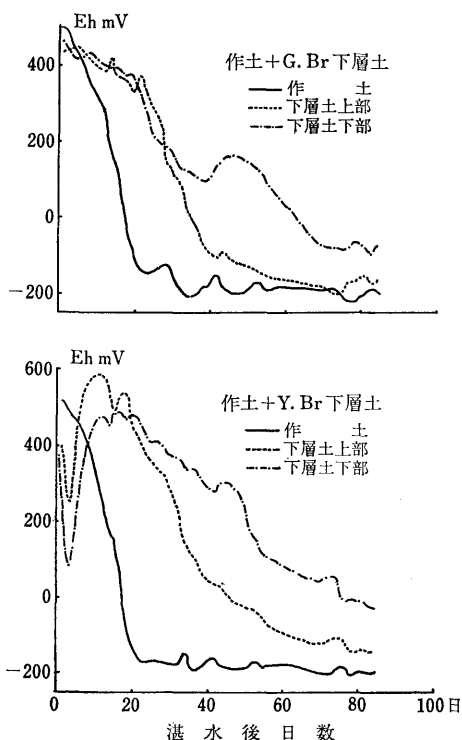


第 1 図 0 cm/日区における Eh の変化

mV から 40 日目で 20 mV, 60 日目で -120 mV, 80 日目で -130 mV まで低下した。一方, 下層土下部では湛水後 40 日目で 70 mV, 60 日目で -50 mV, 80 日目で -130 mV に達した。

Y. Br 下層土区の場合, 下層土上部で湛水後翌日の 400 mV から 5 日目に 30 mV までいったん低下したが, その後上昇し 12 日目に 300 mV に達した。その後少しずつ低下し, 40 日目で 100 mV, 60 日目で 0 mV, 80 日目で -100 mV に達した。一方, 下層土下部では湛水後 5 日目に 100 mV までいったん低下したが, 15 日目に 300 mV まで上昇した。その後湛水 40 日目で 80 mV, 60 日目で 15 mV, 80 日目で -50 mV まで低下した。

減水深 4 cm/日区 (第 2 図): 作土の Eh は, いずれの処理区も湛水後しだいに低下し, ほぼ 22 日目に -200 mV 付近に達し, その後はわずかな変動を示したが, 後期まではほぼ一定の状態がつづいた。つぎに, 下層土の種類と位置の違いによる Eh の経時変化をみるとつぎのとおりである。



第 2 図 4 cm/日区における Eh の変化

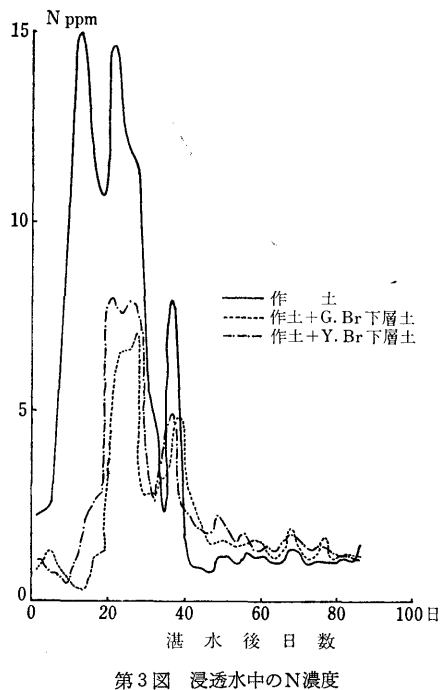
G. Br 下層土区の場合, 下層土上部で湛水後翌日の 440 mV から 40 日目に -75 mV, 60 日目を以降は -160 mV の値がつづいた。一方, 下層土下部では湛水後 40 日目に 100 mV, 60 日目で 30 mV, 80 日目で -100 mV 付

近に達した。

Y. Br 下層土区の場合, 下層土上部で湛水後翌日の 400 mV から 5 日目に 240 mV までいったん低下したが, その後上昇し 15 日目に 400 mV に達した。その後少しずつ低下し 40 日目で 50 mV, 60 日目で -100 mV, 80 日目に -150 mV に達した。一方, 下層土下部では湛水後 5 日目に 70 mV までいったん低下したが, 15 日目に 400 mV まで上昇した。その後湛水 40 日目に 300 mV, 60 日目に 80 mV, 80 日目で -30 mV まで低下した。

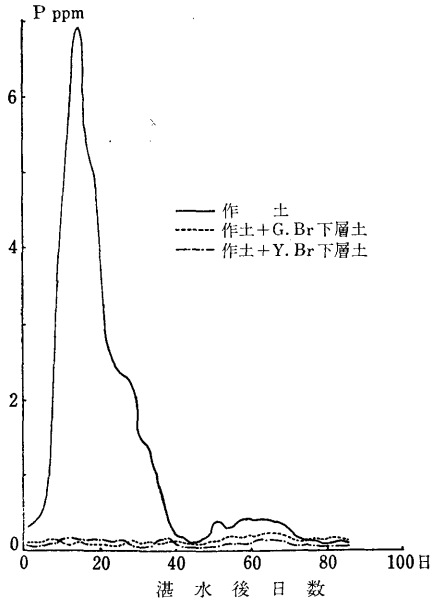
2) 無機成分の溶出

窒素 (第 3 図): 作土区は湛水後 12 日目に最大値を示したのち急激に低下し, 追肥直後の 37 日目に再び小さな山がみられたが, その後は低下した。これに対し, 下層土区はいずれも採水後 27 日目に最大値を示し, いったん低下し, 再び 37 日目に小さな山がみられた。そして, 湛水後 30 日目までは, Y. Br 下層土区の方が G. Br 下層土区に比べわずかに高い濃度で推移したが, その後は小さな差であった。

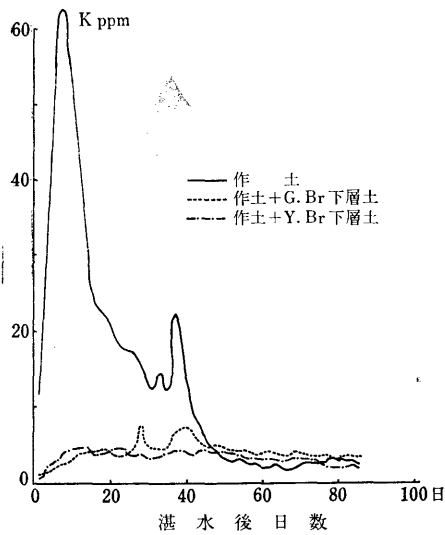


第 3 図 浸透水中の N 濃度

リン酸 (第 4 図): 作土区は湛水初期から増加しはじめ, 15 日目に最大の山を示し, その後急激に減少したが, 45 日目を以降はわずかに上昇した。これに対し, G. Br 下層土区および Y. Br 下層土区では全期間を通じ, きわめて少量ずつ溶出し, 下層土の種類による差はほとんどみられなかった。



第4図 浸透水中のP濃度

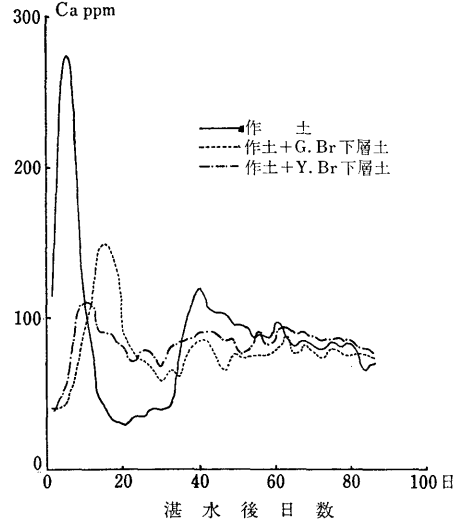


第5図 浸透水中のK濃度

カリウム(第5図)：作土区では、湛水後7日目に最大値を示したのち急激に低下し、追肥直後の37日目に再び小さな山がみられた。これに対し、Y.Br下層土区およびG.Br下層土区では、湛水初期から後期まで少しずつ溶出し、濃度の差も小さかった。

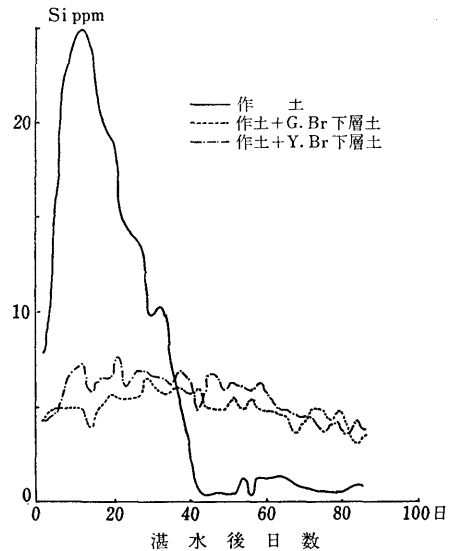
カルシウム(第6図)：作土区は湛水初期から急激に増加し、ほぼ5日目に最大の山を示した。その後は急激に低下したが、20日目から再び増加し始め40日目に第二の山を示し、その後は少しずつ低下した。これに比べ、

G.Br下層土区は湛水後14日目に最大の山、Y.Br下層土区では10日目に最大の山を示し、その後はいったん低下した。いずれの区も30日目を以降はほぼ一定の量ずつ溶出したが、Y.Br下層土区の方がG.Br下層土区よりもわずかに高かった。



第6図 浸透水中のCa濃度

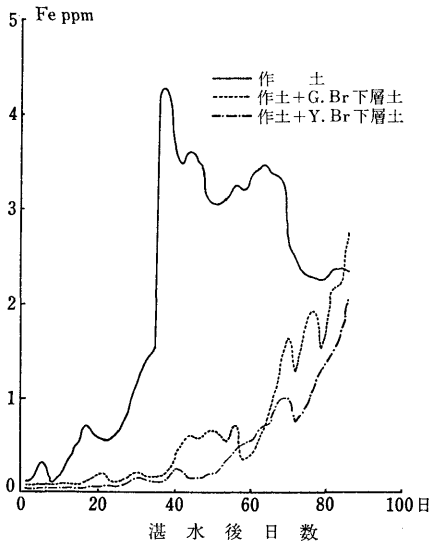
ケイ酸(第7図)：作土区では湛水後12日目に最大値を示し、その後は急激に低下して42日目を以降は少量ずつ溶出した。これに対し、G.Br下層土区およびY.Br下層土区では、湛水初期から少しずつ溶出したが、湛水後40日目を以降はわずかに低下するようであった。溶出濃度は、Y.Br下層土区の方がG.Br下層土区よりもわ



第7図 浸透水中のSi濃度

ずかに高かった。

鉄 (第 8 図) : 作土区では湛水後 37 日目に最大値を示し、その後はしだいに低下した。下層土区ではいずれも湛水初期に少しずつ溶出し、40 日目以後しだいに増加した。しかし、Y. Br 下層土区は G. Br 下層土区に比べ、いくぶん低い濃度で溶出した。



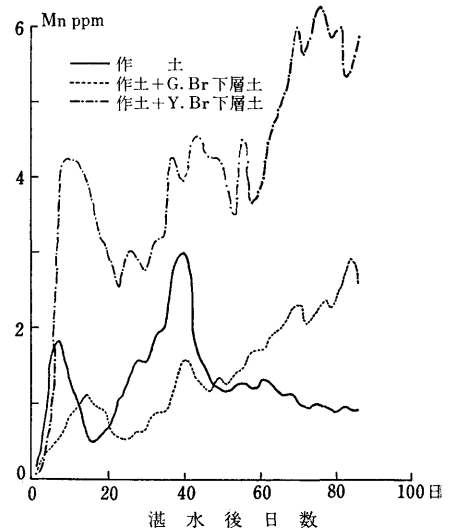
第 8 図 浸透水中の Fe 濃度

マンガン (第 9 図) : 作土区では 7 日目にひとつの山を示し、その後いったん低下したが、再び上昇し始め、湛水後 40 日目に最大の山を示したのちしだいに低下した。G. Br 下層土区では 14 日目に小さな山を示し、いったん低下し湛水後 25 日目から後期まで少しずつ増加した。これに比べ、Y. Br 下層土区では湛水後 10 日目にひとつの山を示し、いったん低下したが、23 日目で降から再び増加し始め、後期にかけて著しく溶出濃度が高くなった。

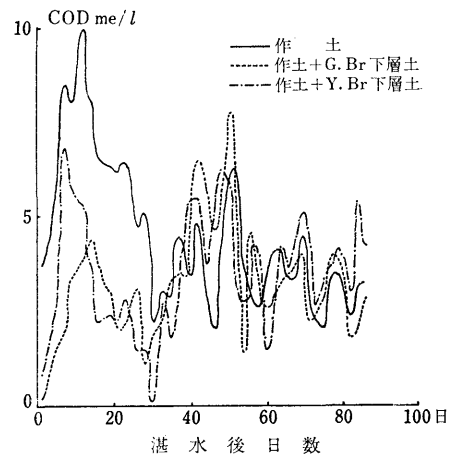
過マンガン酸カリウム消費量 (第 10 図) : 作土区では湛水後 12 日目に最大値を示し、その後低下し 30 日目で降から後期まで増減を繰返し、少しずつ低下していった。G. Br 下層土区では 14 日目に第一の山、その後低下し 30 日目から再び増加し、51 日目に最大の山を示し、その後は増減を繰返しつつ低下していった。これに比べ、Y. Br 下層土区では湛水後 7 日目に最大の山を示し、G. Br 下層土区よりも濃度が高かったが、30 日目以降は濃度の差も小さく、同様な傾向で推移した。

3. 考 察

硬質ビニール管によるモデル水田の実験で、下層土の Eh は湛水後しだいに低下し、全期間を通じて Y. Br 下層土区が G. Br 下層土区に比べ高い値で推移した。また



第 9 図 浸透水中の Mn 濃度



第 10 図 浸透水中の KMnO_4 消費量

減水深 0 cm/日のとき、下層土の Eh は全体として 4 cm/日のときより、いくらか低いようであるが上部と下部の差が小さかった。しかし減水深 4 cm/日区では、いずれの下層土区でも上部は下部に比べ低い値 (100~200 mV) で推移していた。すなわち湛水期間中における水田下層土では、透水に伴って下降する作土の還元浸出物の影響を受け、還元化が起ったものと思われる。モデル水田の実験で示されたこのような Eh の推移が、そのまま実際の水田で起るならば、乾田においても水田下層土では湛水後 (ほぼ 40 日目)、還元状態が発達することになる。

水田土壌に関するこれまでの研究によれば、乾田の水田下層土では湛水期間中、酸化状態であると理解されている^{11,16)}。前報⁹⁾で述べたように、モデル実験の下層

土は物理的状态で作土の連続体である。還元状態発達後の作土の水溶性物質は実際の水田より速い速度で、しかも土層全体に均一に浸透していくとみてよい。下層土における還元状態の発達は実際の水田の場合より速く、かつ土層全体に均一にみられるであろう。実際の水田下層土では構造の発達程度、緻密度に違いがあって、作土からの浸透水は孔隙にそって流れ、このため土層全体としてはかなり不均一な酸化還元状態がみられるものと思われる¹⁴⁾。

湛水期間中の水田下層土の Eh に関連して、水田下層土でも小塊を破壊せず水に浸漬した場合、還元状態は発達し難いが、攪拌すれば還元化が促進されるという報告¹⁰⁾、実際の水田下層土の Eh を現地状態で測定した結果、「時として還元状態のものもあった」とする報告⁹⁾、あるいは実験室内で、きわめてモデル的水田下層土は還元された作土浸出物の洗脱をうけるとグライの色彩に漸次変化したとする報告¹²⁾、またガラス筒によるモデル水田の実験結果から、湛水期における実際の水田下層土の Eh をできうる限り現地状態のまま採取して測定した結果では、従来のものより低い値を示したとする報告¹³⁾などがある。

こうしてみれば、筆者らのモデル水田の下層土で湛水期間中、還元状態が発達していたとしても、そのこと自体不自然な現象ではなく、可能性として考えられることである。ただ、この結果から直ちに実際の水田下層土における湛水期間中の酸化還元状態を、直結して類推するには検討の余地があると思うが、実際の水田で乾田の下層土でも湛水期間中、部分的にしる還元状態が発達する可能性は十分に考えられよう。

さて湛水期間中、作土区および下層土区から系外に排出された化学物質の量を、採水を始めて 20 日目ごとに計算して全排出量に対する割合で示したのが第 1 表である。この表から鉄は水稲生育の後期に大部分が排出されていて、湛水後の土壌還元化の速度とも密接な関連性を示唆している。下層土区から排出した鉄の量は、作土区からのものより明らかに少ない。すなわち作土から溶出された Fe^{2+} は下層土で吸着と酸化が行われ、さらに下層土の Eh 低下に伴って Fe^{2+} に変化し溶出したものであろう。第 8 図でわかるように、作土区からの鉄の溶出量は 60 日目頃から漸次低下しているが、下層土区では 60 日目頃から増加し始めており、しかも下層土の Eh の推移(第 2 図)とよく対応している。こうした過程からみれば、作土から下層土に溶出された鉄の一部と下層土自体から溶出された鉄の一部が下層系外に排出されたものと思われる。

第 1 表 総溶出量を 100 とした時期別の溶出量指数 (%)

項 目	湛 水 後 日 数				総溶出量 (mg)	
	1~20	21~40	41~60	61~86		
N	作 土	44	41	6	9	410
	G. Br	9	52	19	20	188
	Y. Br	15	51	17	17	218
P	作 土	61	29	5	5	117
	G. Br	17	19	25	39	12
	Y. Br	20	23	24	33	10
K	作 土	60	27	7	6	1,211
	G. Br	17	29	27	27	358
	Y. Br	23	26	25	26	296
Si	作 土	62	33	2	3	627
	G. Br	20	28	25	27	426
	Y. Br	24	27	25	24	488
Ca	作 土	29	15	26	30	7,583
	G. Br	26	21	22	31	7,010
	Y. Br	22	22	24	32	7,270
Fe	作 土	3	18	37	42	179
	G. Br	4	6	19	71	59
	Y. Br	1	8	15	76	40
Mn	作 土	17	32	24	27	115
	G. Br	11	14	23	52	124
	Y. Br	16	18	23	43	358
COD	作 土	35	22	20	23	395
	G. Br	19	18	32	31	284
	Y. Br	23	15	29	33	310

マンガンの溶出は鉄に比べ様相を異にし、作土区から排出されるマンガンは、生育前期と後期ではほぼ同量である。下層土区では生育後期にはほぼ 75% が溶出し、その量も作土区に比べて明らかに多かった。とくに Y. Br 下層土区の場合、作土からの量より多かった。これらの現象は水田土壌において $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ の反応より $Mn^{4+} \rightarrow Mn^{2+}$ の反応は高い Eh で起り、鉄よりマンガンの方が移動し易いことを意味している。こうして本実験のモデル水田の下層土では、マンガンの溶出に必要な程度の還元状態が発達し、下層土区からのマンガンの溶出量の大小は下層土のマンガン含量の大小に左右されたものであろう。

作土区から溶出した Ca^{2+} の大部分は下層系外に排出されている。この場合、下層土の塩基飽和度、塩基置換容量の大小と関係がないようである。これに対して同じ陽イオンでも作土区から溶出した K^+ は、かなりの量が下層土にとどまっている。つまり湛水期間中の水田下層土を通過するときの Ca^{2+} と K^+ の行動は、著しく違っているようである。

畑土壌の場合、黒色火山灰土壌と鈳質酸性土壌を供試して塩基飽和度が高まるにつれて Ca^{2+} と K^+ の溶脱量は増大するけれども、その量はいずれの場合も K^+ が

Ca²⁺ よりまさっているとの報告がある³⁾。一方では還元状態土壤中で Fe²⁺ が Ca²⁺ と置換反応を起し、Ca²⁺ が土壤系外に溶出するという報告^{4,5)}がある。これらのことから、湛水状態の水田下層土における Ca²⁺ と K⁺ の行動については研究の余地が残されているように思う。

土壤還元に関連して、リン酸の行動が問題になる。作土から浸透したリン酸は、ほとんどが下層土にとどまっている。下層土として供試された2つの土壤の化学的性質⁹⁾からみて、作土からのリン酸は大部分が下層土で吸着されており、水稻による吸収量も作土区に比べ、むしろわずかながら減少していた⁹⁾。このようなことからみると、作土から下層土に溶脱したリン酸は、酸化還元の見達程度に応じたリン酸の形態変化よりも土壤に含まれる鉄、アルミニウム、石灰などとの結合による下層土での不溶化が大きいように思われる。

実験 II 土壤の Eh と無機成分溶出に及ぼす土壤浸出液、グルコース添加および温度の影響

実験 I で、筆者らは乾田の下層土でも湛水期間中、還元化が起る可能性を推察した。実験 II では、乾田の下層土で湛水期間中、還元化が起る程度とその原因物質に関して調べた結果について述べる。

1. 実験方法

実験 A 添加物質の違いによる影響

1) 供試土壤：供試土壤は前報⁹⁾に示した G. Br 下層土と Y. Br 下層土である。

2) 保温静置方法：処理は (1) 無処理、(2) Ca, NPK、(3) Ca, NPK+グルコース 0.2%、(4) Ca, NPK+土壤浸出液、(5) Ca, NPK+土壤浸出液(反復)区を設けた。

土壤浸出液は、山口農試作土湿潤土 1 kg にイタリアンライグラスの根を粉末にしたもの 7 g と純水 1.5 l を加え十分に攪拌し、30°C に2週間保温後濾過したものである。浸出液の無機成分は Ca 60 ppm, K 14 ppm, Fe 29 ppm, Mn 3 ppm であった。

200 ml 容ガラス製ビーカーに乾土 100 g に相当する未風乾土をとり、CaCO₃ 300 mg と粉末にした高度化成 120 mg (成分 12-18-14) を添加した。そして、純水またはあらかじめ還元状態においた土壤浸出液 100 ml を加え、十分にガラス棒で攪拌して気泡を除き、発泡スチロール板で蓋をした。それぞれの区は 30°C の定温器内に 80 日間静置した。

保温期間中に純水を1週間に1回 25 ml あて補給したが、土壤浸出液反復区のみ 0°C に貯蔵した土壤浸出液をそのつど取り出し、1週間に1回 25 ml あて補給した。

3) Eh の測定：Eh の測定は発泡スチロール板に穴をあけ、白金電極 2 本を土層の深さ 3 cm に固定し、1~2 日おきに東亜電波製携帯用 Eh メーターで測定した。

4) 分析方法：所定期間保温静置後、ガラス棒で十分攪拌し、直ちに 3,500 rpm 15 分間遠心分離を行い、透明な上澄液を分離し、塩酸酸性後、鉄、マンガン、カルシウムおよびカリウムを原子吸光法で定量した。

土壤中の2価鉄は湿潤のまま手速く秤量し、0.2% AlCl₃ (pH 4.0) 抽出後ジピリジル法で分析した。また別に土壤を秤量し、1 N CH₃COONH₄ (pH 7.0) 液を加え、1時間往復振とうし、その濾液についてマンガン、カルシウムおよびカリウムを原子吸光法で定量した。別に湿潤土の水分を測定し、分析数値は乾土 100 g 当りに換算した。

実験 B 土壤および処理温度の違いの影響

1) 供試土壤：供試土壤は佐賀農試水田、徳佐黒色火山灰水田および山口農試水田のそれぞれ下層土を用いた。その理化学的性質は第2表に示した。

第2表 供試土壤(下層土)の理化学的性質

項 目	供 試 土 壤			
	佐 賀	徳 佐	山 口	
pH (H ₂ O)	7.10	5.49	5.42	
T-C%	0.52	6.12	0.96	
T-N%	0.06	0.57	0.11	
CEC me	24.8	18.9	8.2	
置換性	Ca me	15.8	10.5	7.0
	Mg me	7.7	2.0	0.8
	K me	0.4	0.4	0.2
易還元性 Mn mg%	44.8	2.9	1.8	
遊離鉄 Fe %	1.06	0.66	0.44	
土 性	LiC	CL	SL	

2) 保温静置方法：100 ml 容ポリエチレン製瓶に、風乾細土 50 g を入れ、CaCO₃ 100 mg と粉末にした高度化成(成分 12-18-14) 60 mg を添加した。そして、純水またはあらかじめ還元状態においた土壤浸出液 70 ml を加え、ガラス棒で十分に攪拌して気泡を除き、密栓した。

それぞれの区は2つのグループに分け、5°C の冷蔵庫と 30°C の定温器内に静置した。保温静置の当日、30日、60日後に試料を分析した。

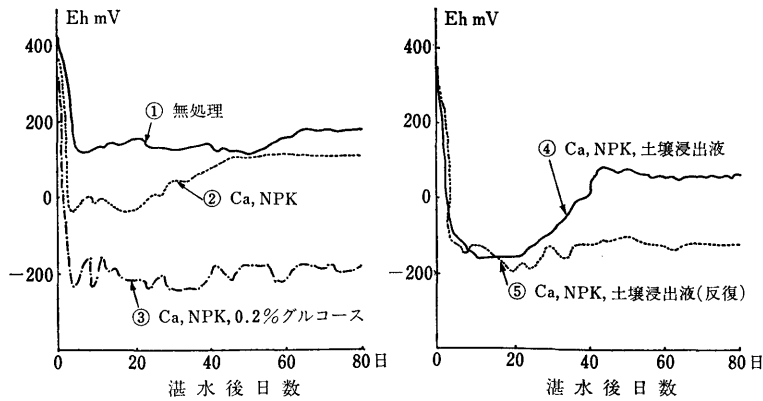
土壤の浸出液は実験 A と同じものを用いた。

3) 分析方法：分析および Eh の測定は実験 A と同一方法で実施した。

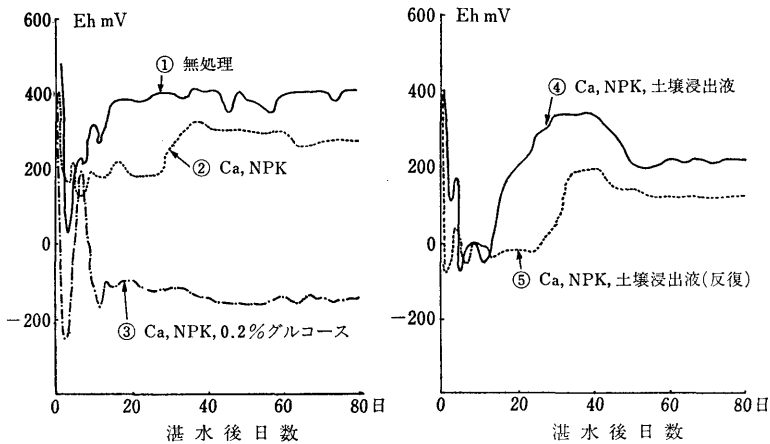
2. 実験結果

実験 A

1) Eh の経時変化：Eh の測定結果は第 11, 12 図に



第 11 図 Eh の変化 (G.Br 土)



第 12 図 Eh の変化 (Y.Br 土)

示した。

G.Br 下層土の場合、いずれの処理区も湛水当日 400 mV から 3 日目にはほぼ最低値を示した。無処理区は 150 mV まで低下し、平行状態がつづき 50 日目を降はわずかに上昇し 200 mV に達した。Ca, NPK 区は 0 mV 付近まで低下したが、20 日以後は少しずつ上昇し、後期は 100 mV に達した。0.2% グルコース区は湛水保温後 5 日目に -200 mV まで低下し、その後も平行状態がつづいた。土壌浸出液区は湛水後 20 日目に最低値 -150 mV に達し、その後は少しずつ上昇したが、40 日目を降は 50 mV 前後の値がつづいた。これに対し、土壌浸出液反復区は湛水後 -200 mV まで低下し、20 日以後はわずかに上昇し -120 mV の値が後期までつづいた。

Y.Br 下層土の場合、いずれの処理区も湛水当日 400 mV から 3 日目にいったん急激に低下し、5 日目には再び上昇した。その後、無処理区は 20 日降になると 400 mV の値がつづき、Ca, NPK 区も同様な傾向を示し 300 mV 前後の値が後期までつづいた。0.2% グルコース区

は 20 日目 -100 mV 付近からゆるやかに低下し、40 日目以後 -150 mV の値がつづいた。土壌浸出液区は湛水後 10 日目に最低値 0 mV に達したが、その後上昇し 300 mV 付近まで達し、40 日目以後は少し低下して 200 mV 近くの値を示した。これに対し、土壌浸出液反復区は 40 日目を降から後期まで 100 mV の平行状態がつづいた。

2) 土壌水浸液および土壌中の無機成分：土壌水浸液中に含まれている鉄、マンガンと土壌中に含まれている二価鉄、マンガンの測定値を、また同様にカルシウムおよびカリウムについて第 3 表に示した。

鉄およびマンガン：土壌中の二価鉄の生成は、Eh の低下と平行し、いずれの土壌も 0.2% グルコース区が多かった。ついで、土壌浸出液反復区と湛水時土壌浸出液区の順であった。マンガンも鉄と同様な傾向を示したが、その生成量は G.Br 下層土に比べると Y.Br 下層土

の方が著しく多かった。

つぎに鉄、マンガンの土壌水浸液中の量と土壌置換性を比べると、水浸液中の鉄はいずれの土壌も土壌置換性量の 0.5~2%、マンガンは G.Br 下層土では 2~6% になるのに対し、Y.Br 下層土では土壌置換性量の 10~20% 位に達した。

そして、処理区のうち鉄、マンガンともに 0.2% グルコース、土壌浸出液添加区で水浸液中の割合が高くなった。

カルシウムおよびカリウム：カルシウムとカリウムについて、土壌水浸液中の量と土壌置換性の量を比較すると、水浸液中のカルシウムは無処理区の場合、土壌置換性量の 2~3% であったが、土壌浸出液添加区をみると G.Br 下層土では土壌置換性量の 10% になるのに対し、Y.Br 下層土ではほぼ 20% であった。水浸液のカリウムについては無処理区の場合、土壌置換性量の 5~7% であったが、その他はいずれの土壌も土壌置換性量の 10~12% であった。処理区のうちカルシウム、カリウ

第 3 表 80 日 incubate 後の Fe, Mn, Ca, K

区 名	Fe ²⁺ mg/100g 乾土		Mn mg/100g 乾土	
	H ₂ O 浸出	AlCl ₃ 浸出	H ₂ O 浸出	CH ₃ CO-OH ₄ 浸出
G. Br 土壤				
1 無処理	0.01	1.2	0.04	1.9
2 Ca, NPK	0.02	4.0	0.06	4.9
3 〃 0.2% グルコース	0.76	52.6	0.28	11.0
4 〃 土壤浸出液	0.02	12.8	0.14	4.7
5 〃 土壤浸出液反復	0.25	29.8	0.34	5.7
Y. Br 土壤				
1 無処理	0.01	0.6	0.21	3.0
2 Ca, NPK	0.01	0.6	1.27	4.1
3 〃 0.2% グルコース	0.59	59.4	2.66	19.0
4 〃 土壤浸出液	0.02	2.2	2.08	10.6
5 〃 土壤浸出液反復	0.22	29.2	2.66	15.5

区 名	Ca mg/100g 乾土		K mg/100g 乾土	
	H ₂ O 浸出	CH ₃ CO-OH ₄ 浸出	H ₂ O 浸出	CH ₃ CO-OH ₄ 浸出
G. Br 土壤				
1 無処理	4.2	172.7	0.4	6.0
2 Ca, NPK	29.8	275.6	2.0	16.9
3 〃 0.2% グルコース	22.8	275.6	1.6	15.3
4 〃 土壤浸出液	29.8	275.6	2.0	16.9
5 〃 土壤浸出液反復	29.8	277.8	2.6	22.2
Y. Br 土壤				
1 無処理	1.8	28.2	0.2	4.1
2 Ca, NPK	31.5	132.1	2.3	20.6
3 〃 0.2% グルコース	22.8	132.1	1.6	18.3
4 〃 土壤浸出液	29.8	132.1	2.2	20.6
5 〃 土壤浸出液反復	31.5	132.1	2.3	22.8

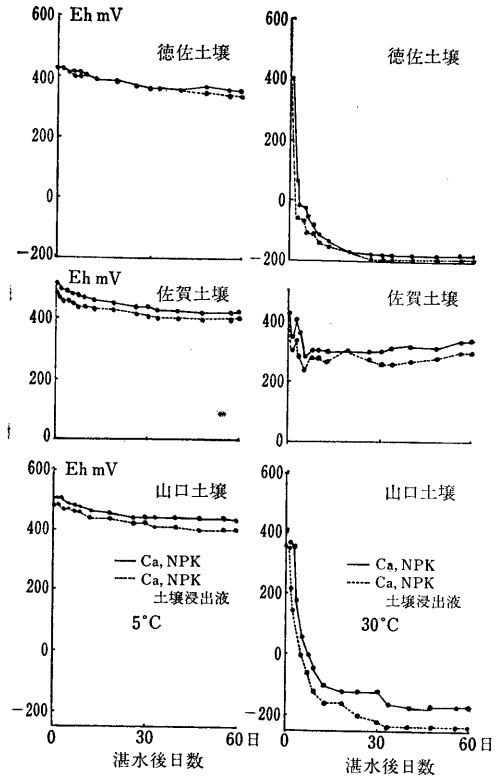
ムともに 0.2% グルコース区で、いずれの土壤も水浸液中の割合が小さい傾向がみられた。

実験 B

1) Eh の経時変化: Eh の測定結果は第 13 図に示した。

5°C に保温静置の場合、いずれの供試下層土も Eh の降下はわずかであった。すなわち山口、佐賀下層土は 400 mV 前後、徳佐下層土だけは 350 mV 付近まで下がったが、土壤浸出液添加による影響はいずれの下層土も差が小さかった。

30°C に保温静置の場合、徳佐、山口下層土はいずれも湛水後急激に低下し、保温 20 日後には -200 mV まで降下した。そして、土壤浸出液添加の影響は徳佐下層土では差がなく、山口下層土ではほぼ -50 mV 低く推移した。これに比べ、佐賀下層土は Eh の降下がゆるやかであり、湛水後 5 日目にわずかに低下したが、その後は 300 mV 前後の値を維持し、土壤浸出液を添加すると 50 mV



第 13 図 湛水後 Eh の変化

程度低く推移した。

2) 土壤水浸液および土壤中の無機成分: 土壤水浸液中に含まれている鉄、マンガンと土壤に含まれている二価鉄、マンガンの測定値を第 4 表に示した。また、同様にカルシウムおよびカリウムについて第 5 表に示した。
鉄およびマンガン: 5°C に保温静置の場合、いずれの下層土でもわずかながら二価鉄およびマンガンの生成が認められ、なかでも徳佐下層土が山口、佐賀下層土よりも多かった。

30°C に保温静置の場合、土壤中の二価鉄の生成量は徳佐下層土が最も多かった。ついで山口下層土となり、佐賀下層土では生成量が少なかった。そして、いずれの下層土も保温日数が長くなるほど生成量は増加し、また土壤浸出液添加によって、わずかながら増加がみられた。

ついで、置換性マンガンの量は、二価鉄と同様な傾向を示し、徳佐下層土が最も多く、ついで山口、佐賀下層土の順となった。そして、土壤水浸液中の量と土壤中の量を比べてみると、いずれの下層土も鉄イオンよりもマンガンが大きかった。

カルシウムおよびカリウム: いずれの下層土も保温静置の温度や保温日数に関係なく、ほとんど差異はみられ

第4表 30日, 60日 incubate 後の下層土の Fe, Mn

区名	Fe ²⁺ mg/100 g 乾土		Mn mg/100 g 乾土			
	H ₂ O 浸出	AlCl ₃ 浸出	H ₂ O 浸出	CH ₃ CO-OH/NH ₄ 浸出		
徳佐土壤						
0日	1 Ca, NPK	0	0	0.006	0.28	
	2 〃 土壤浸出液	0	0	0.012	0.41	
30°C	30	3 Ca, NPK	0.11	40.4	0.060	2.13
		4 〃 土壤浸出液	0.13	43.8	0.160	2.38
	60	5 Ca, NPK	0.14	53.1	0.060	2.13
		6 〃 土壤浸出液	0.17	54.7	0.180	2.63
5°C	30	7 Ca, NPK	0.03	2.5	0.004	0.50
		8 〃 土壤浸出液	0.07	2.7	0.006	1.25
	60	9 Ca, NPK	0.04	2.4	0.006	0.63
		10 〃 土壤浸出液	0.08	3.3	0.018	1.00
佐賀土壤						
0日	1 Ca, NPK	0	0	0.006	0.23	
	2 〃 土壤浸出液	0	0	0.010	0.38	
30°C	30	3 Ca, NPK	0.09	5.2	0.040	0.54
		4 〃 土壤浸出液	0.10	7.2	0.060	0.65
	60	5 Ca, NPK	0.10	6.6	0.040	0.56
		6 〃 土壤浸出液	0.15	9.8	0.120	0.71
5°C	30	7 Ca, NPK	0.07	1.3	0.004	0.03
		8 〃 土壤浸出液	0.09	1.9	0.006	0.06
	60	9 Ca, NPK	0.07	1.2	0.004	0.03
		10 〃 土壤浸出液	0.09	2.1	0.006	0.04
山口土壤						
0日	1 Ca, NPK	0	0	0.010	0.13	
	2 〃 土壤浸出液	0	0	0.028	0.26	
30°C	30	3 Ca, NPK	0.12	10.0	0.020	0.54
		4 〃 土壤浸出液	0.20	18.0	0.080	0.76
	60	5 Ca, NPK	0.22	24.2	0.100	0.89
		6 〃 土壤浸出液	0.40	36.0	0.160	1.00
5°C	30	7 Ca, NPK	0.05	1.3	0.006	0.07
		8 〃 土壤浸出液	0.06	1.5	0.016	0.18
	60	9 Ca, NPK	0.05	1.5	0.012	0.12
		10 〃 土壤浸出液	0.07	2.9	0.020	0.27

なかった。そして、土壤浸出液の添加によってカルシウムは、いずれの下層土もわずかに高まり、またカリウムも同様な傾向を示した。

3. 考察

実験 I で用いた下層土を供試して、ビーカー内で最も低い Eh を示したのは 4 要素 + グルコース添加区であり、作土の還元浸出液の反復添加がこれについている(第11, 12図)。これは G.Br 下層土でも、Y.Br 下層土でも同一傾向であった。さらに Eh の値に応じて鉄、マンガンが可溶化している。下層土の Eh の低下は湛水 4 要素、グルコース添加、30°C 保温区において最低であり、5°C 保温区では小さかった。すなわち作土浸出物は微生物のエネルギー源としての性格も重要な側面であると思われる。

第5表 30日, 60日 incubate 後の下層土の Ca, K

区名	Ca mg/100 g 乾土		K mg/100 g 乾土			
	H ₂ O 浸出	CH ₃ CO-OH/NH ₄ 浸出	H ₂ O 浸出	CH ₃ CO-OH/NH ₄ 浸出		
徳佐土壤						
0日	1 Ca, NPK	20.5	206.8	4.0	17.6	
	2 〃 土壤浸出液	21.5	218.9	4.4	19.0	
30°C	30	3 Ca, NPK	18.0	209.8	4.0	17.4
		4 〃 土壤浸出液	19.5	212.8	4.3	19.2
	60	5 Ca, NPK	18.5	206.8	4.0	17.4
		6 〃 土壤浸出液	19.5	209.8	4.1	20.0
5°C	30	7 Ca, NPK	18.5	206.7	3.9	17.6
		8 〃 土壤浸出液	19.5	212.8	4.2	19.7
	60	9 Ca, NPK	19.0	206.8	4.2	17.2
		10 〃 土壤浸出液	20.0	214.9	4.2	20.0
佐賀土壤						
0日	1 Ca, NPK	28.1	350.0	1.7	16.9	
	2 〃 土壤浸出液	28.6	355.8	1.8	18.4	
30°C	30	3 Ca, NPK	24.1	348.1	1.7	16.9
		4 〃 土壤浸出液	26.1	363.0	1.8	18.4
	60	5 Ca, NPK	24.6	344.3	1.7	16.7
		6 〃 土壤浸出液	26.1	354.3	1.8	18.2
5°C	30	7 Ca, NPK	25.1	342.9	1.9	17.1
		8 〃 土壤浸出液	27.1	355.8	1.8	18.6
	60	9 Ca, NPK	24.6	344.3	1.8	17.1
		10 〃 土壤浸出液	26.1	354.3	1.8	19.0
山口土壤						
0日	1 Ca, NPK	35.1	160.7	4.9	12.6	
	2 〃 土壤浸出液	36.1	163.1	4.9	13.9	
30°C	30	3 Ca, NPK	29.6	167.9	4.5	12.7
		4 〃 土壤浸出液	31.6	170.3	4.8	14.4
	60	5 Ca, NPK	32.1	155.8	4.5	12.1
		6 〃 土壤浸出液	32.6	153.4	4.8	14.1
5°C	30	7 Ca, NPK	35.1	155.8	4.6	12.4
		8 〃 土壤浸出液	38.6	167.9	5.2	14.4
	60	9 Ca, NPK	35.1	158.2	4.6	12.4
		10 〃 土壤浸出液	37.6	165.5	4.9	14.2

水田作土の還元浸出物の中には、下層土の鉄と反応して Fe²⁺ を生成する能力をもった化学物質が含まれている¹⁵⁾、このものにフェノール性のものが含まれていること¹⁰⁾も報告されている。こうしたことからみれば、水田作土の浸出物が下層に作用して還元状態を起させる反応には、化学的作用と微生物的作用とが共存しているように思われる。

また、水および酢酸アンモンによって浸出される Ca²⁺ と K⁺ の浸出量は、Eh の低下と関係がなかった。これまでに報告^{7,9)}してきたように、湛水期間にポット下端から溶出する Ca²⁺ は、マンガンの溶出とその型式において類似したような行動をとっていた。Ca²⁺ の溶出そのものは、この実験でわかるように還元と関係のないものであるが、前述のように還元土壤中 Fe²⁺ との交換反

応を起し、そのことが Ca^{2+} の行動をあたかも還元に関係するように観察された原因ではなからうか。

総合考察

実験 I は硬質塩化ビニール製の筒を用いたモデル水田によるものであり、実験 II はピーカーによるものである。これらの結果から乾田の下層土でも、湛水後しだいに還元化がおこる可能性が十分にあると推察される。下層土に還元化をもたらす原因物質は水田土壌の還元浸出物である。すなわち湛水後、下層土に還元化をもたらすのは、化学的作用と微生物的作用であると推察される。ただ、実在の水田下層土は物理的状态で不均一な層であるから、一般には水田土壌の還元浸出物は下層土全体に均一な接触ができない。こうして湛水後の下層土では、作土からの還元浸出物が浸透する道筋にあたる部分で還元化が起るものと推察される。

さて、還元状態の水田作土から浸出されたほとんどの化学物質の量は、下層土区から排出された量よりも大である。これは作土から浸出された化学物質が、下層土にとどまったことを意味する。ただ、マンガンだけは下層土を浸透していく過程で、かえってその量が増加した。還元状態で水に対する溶解性を増加しうる化学物質の中で、明らかに下層土自体からのものが土壌系外に排出されたのはマンガンである。このことは、水田土壌において $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ の反応に比べ、 $\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ の反応はかなり容易に起ること、また $\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ の反応に必要な程度の還元化が、湛水後の下層土で起っていたことを意味する。そして水田土壌の還元状態の判定には、Eh や Fe^{2+} 以外に Mn^{2+} の測定も重要であろうと思われる。

要約

水田土壌の作土または作土と下層土(厚さ 60 cm)を詰めた硬質ビニール製の筒に水稻を栽培し、作土、下層土の上部と下部の酸化還元電位、作土下端または下層土下端から排出される化学成分などを、湛水期間中(86日)測定し、つぎの結果を得た。

1) 酸化還元電位は作土で湛水後 20 日で -200 mV に達し、以後その値がつづいた。下層土上部では、湛水後 40 日で $0 \sim 100$ mV, 60 日で $-100 \sim -150$ mV に達し、下部では湛水後 40 日で、 $100 \sim 300$ mV, 60 日で $0 \sim 100$ mV, 80 日で $-110 \sim 0$ mV に達した。

2) 湛水期間中、作土から排出された成分の全量を基

準にして、下層土から排出された成分の全量を比べると、リン酸 $\equiv 9$, 鉄 $\equiv 28$, ケイ酸 $\equiv 70$, 窒素 $\equiv 50$, カルシウム $\equiv 94$ であったが、マンガンは灰褐色水田下層土区では 107, 黄褐色山土区では 310 であった。

3) 数種の水田下層土を供試して作土浸出物、4 要素を添加して、 5°C と 30°C でインキュベートしたところ、 30°C の区が 5°C の区に比べ、可溶性鉄、マンガンの量と Eh の低下が明らかに大きく、可溶性カルシウム、カリウムの含量にはほとんど差異がなかった。

文 献

- 1) 青峰重範：内ノ浦実験部落土壌調査成績書 I. 酸化還元電位、内ノ浦実験部落資料報告書、第 9 号 (1943)
- 2) BRINKMAN, R. : Ferrollysis, a Hydromorphic Soil Forming Process. *Geoderma*, 3, 199~206 (1969/1970)
- 3) 出井嘉光：黒石原火山灰土壌の置換性塩基に関する研究、九州農試彙報, 6, 242~249 (1960)
- 4) 川口桂三郎・川地 武：土壌の湛水下および乾燥過程におけるカチオン交換反応の意義、湛水土壌中のカチオン交換反応について(第 1 報), 土肥誌, 40, 89~95 (1969)
- 5) 川口桂三郎・川地 武：湛水土壌の乾燥による交換性カチオン組成の変化、湛水土壌中のカチオン交換反応について(第 2 報), 土肥誌, 40, 177~183 (1969)
- 6) 松尾英俊・加藤 敦：暖地水田土壌の酸化還元電位測定器について、九州農試彙報, 3, 347 (1956)
- 7) 松浦勝美・松原弘一郎・坂上行雄：水田土壌からの無機成分の溶出に及ぼす透水の影響、土肥誌, 43, 238~244 (1972)
- 8) 松浦勝美・福永明憲・坂上行雄：水田土壌からの無機成分の溶出に及ぼす植生の影響、土肥誌, 45, 361~367 (1974)
- 9) 松浦勝美・福永明憲・坂上行雄：水稻の生育と無機養分吸収に及ぼす下層土の役割に関するモデル実験、土肥誌, 48, 19~24 (1977)
- 10) 岡崎正規・和田秀徳・天正 清・高井康雄：土壌水溶性成分の役割(第 1 報)、水田土壌作土からの浸透水による水酸化第 2 鉄の溶解過程、土肥要旨集, 20, 19 (1974)
- 11) 塩入松三郎：土壌学研究, p. 134~135, 朝倉書店 (1952)
- 12) 和田秀徳・松本 聰・高井康雄：水田土壌作土の溶脱物質と心土との交互作用、水田土壌下層土の形態的特徴の発達過程について(第 1 報), 土肥誌, 41, 95~100 (1970)
- 13) 和田秀徳・松本 聰：夏期湛水(稲作)期間における水田土壌の調査、土肥誌, 43, 46~52 (1972)
- 14) WADA, H. : Micropedological Approach to the Study of Dynamics of Paddy Soils, 9, 1, 1975 (JARJA 9, 9 (1)), Tropical Agriculture Research Center
- 15) 和田秀徳・松本 聰：水田土壌下層土における鉄とマンガンの行動の比較(その 1)、水田土壌下層土の形態的特徴の発達過程について(第 4 報), 土肥誌, 43, 103~108 (1972)
- 16) 山崎欣多：水田土壌の生成論的分類に関する研究、富山農試特別報告第 1 号, 14~17, 23~25 (1960)