

## 土壌汚染に関する研究

### 第2報 水稻のカドミウム吸収抑制対策について

橋本俊一・中野政行・鶴野慶吉

#### I 諸言

近年、鉱工業の発展はめざましく、重金属等の利用も著しいが重金属の中には植物に対し著しい害作用を及ぼすものがあり、銅、亜鉛、ヒ素などは古くから植物の生育に害作用を与えることでいわゆる鉱害と呼ばれるものとして報告されている<sup>1,4)</sup>

カドミウムは富山県神通川流域の“イタイイタイ病”の原因物質であることが明らかとなつて以来<sup>7)</sup>、食品中の濃度が問題となり、農業面においても作物の生育障害の面からではなく、生産された可食部の中の濃度が重要な問題となつた。

このような背景から農用地の土壌汚染防止法が制定され、カドミウムについては食品衛生法の定めるところにより、1 ppm以上の玄米が生産されると認められる地域については対策地域とし、種々の対策を講じ、このような玄米の生産を防止することが急務となつた。

栃木県においても1970年に小山市及び野木町の一部地域が1 ppm以上の玄米を生産するカドミウム汚染地域であることが明らかとなった。筆者らはこれらの地域において水稻のカドミウム吸収抑制対策についてほ場試験、ポット試験等により検討したので報告する。

#### II カドミウム汚染地の概況

汚染地域は小山市と野木町の接する地域で、工場廃水による水質汚染によりカドミウムが水田に流入したものである。本地域は地下水位が

高く、たん水透水性が小さく、汚染を受けた年数も比較的短かつたため作土の汚染が大部分で作土下の汚染は少ない。水質型汚染であるため一筆のは場での汚染は水口が高く、水じりへ向うに従い直線的に低下している。また、汚染源に近い水田で汚染が著しく、遠ざかるに従い低くなる傾向である。

#### III 試験方法

##### 1. 石灰・リン酸施用試験

##### 1) ほ場試験

カドミウム(以下Cd)汚染程度の高い水田(以下A試験地)で石灰及びリン酸の多施用、低い水田(以下B試験地)ではリン酸多施用について検討した。

石灰区はpH 8.0目標で消石灰 100kg/a、リン酸区はリン酸吸収係数の20%飽和量をようリンと過リン酸石灰、3:1の比率で施用した。石灰・リン酸区は両者を併用した。試験地土壌は火山灰を母材とする地下水位の高い谷津田で、主な化学性と0.1N塩酸可溶のCd含量は第1表のとおりである。試験区は放射状配列とし1区面積は0.24aとした。

供試品種は日本晴で移植は5月下旬に行った。施肥量はNを0.9kg/a、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を0.7kg/a、K<sub>2</sub>Oを0.9kg/aとし硫酸、ようリン、塩化カリにより施用した。

##### 2) ポット試験

供試土壌はA試験地(Cd高含量)及びB試験

■ 本報告の一部は土壤肥料学会関東支部大会(1972年10月12日)において発表した。

第1表 ほ場試験作土の土壤条件

試験地	化 学 性							Cd含量ppm	
	pH		置 換 性 塩 基 mg/100g			CEC	リン酸	水口	水じり
	H <sub>2</sub> O	KCl	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	me	吸収係数		
A	6.4	5.5	326	48	9	23.1	2318	43.0	12.7
B	6.2	5.3	326	55	9	24.6	2400	2.85	2.58

第2表 客土の理化学性

粒 径 組 成 %					土性	pH		C %	CEC me	リン酸 吸収 係数	Cd ppm
粗砂	細砂	砂合計	シルト	粘土		H <sub>2</sub> O	KCl				
46.4	34.5	80.9	17.9	1.2	SL	5.9	5.2	2.4	17.0	2380	0.25

第3表 供試土壌の理化学性

土 壌	粒 径 組 成 %					土性	pH		C %	CEC me	リン酸 吸収 係数	Cd ppm
	粗砂	細砂	砂合計	シルト	粘土		H <sub>2</sub> O	KCl				
腐植質火山灰土壌	19.0	43.8	62.8	33.6	3.6	L	6.2	5.2	9.5	39.2	2700	0.20
鉍質火山灰土壌	46.4	34.5	80.9	17.9	1.2	SL	5.9	5.2	2.4	17.0	2380	0.13
沖積強粘質土壌	15.6	24.4	40.0	30.5	29.5	LiC	5.7	5.2	4.6	17.0	1308	0.42
沖積壤質土壌	11.4	53.6	65.0	24.8	10.2	SL	6.0	4.6	2.2	9.4	880	0.13

地 (Cd低含量) の作土を供試し、処理として石灰区は pH 8.0 目標 (消石灰 100g/ポット)、リン酸区はリン酸吸収係数の20%飽和量 (ようりん90g/ポット)、石灰・リン酸区は両者の併用とした。ポットの規模は 1/2000a、二連制とした。品種は日本晴で移植は6月4日に行った。水管理は最高分けつ期以降節水栽培とした。土壌中の 0.1N 塩酸可溶 Cd は A 試験地 22.2 ppm B 試験地 2.3 ppm である。

## 2. 水管理試験

農試場内の火山灰水田の作土を現地汚染水田の作土と入れ替え 0.9×1.5m のわく試験を行った。水管理の方法は幼穂形成期以降落水 (以下早期落水 A)、出穂期以降落水 (以下早期落水 B)、出穂後20日以降落水 (以下標準)、常

時たん水とした。品種は日本晴で移植は6月4日である。施肥量は N を 0.9kg/a、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を 1.5kg/a、K<sub>2</sub>O を 0.9kg/a とし基肥と穂肥に分けて施用した。供試土壌の 0.1N 塩酸可溶の Cd 含量は 20.7 ppm であった。

## 3. 排土客土試験

### 1) ほ場試験

A 試験地及び B 試験地において試験処理として排土客土の深さを 15cm、20cm、25cm とし土壤改良としてリン酸吸収係数の 5% 飽和量をようりん で施用した。比較として 15cm 排土客土区には土壤改良を行わない処理区も設けた。客土材の理化学性は第2表に示した。供試品種は日本晴で移植は5月下旬に行った。施肥量は a 当たり N 0.7kg、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2.0kg、K<sub>2</sub>O 0.7kg とし排土

第4表 リン酸施用とCd含量 (ppm)

処 理	A 試験地						B 試験地					
	玄 米			茎 葉			玄 米			茎 葉		
	1971	1972	1973	1971	1972	1973	1971	1972	1973	1971	1972	1973
無処理	0.97	0.80	2.25	6.32	5.00	10.0	0.28	1.25	3.15	1.60	8.80	6.40
リン酸	0.90	0.90	2.45	4.19	5.20	8.80	0.10	0.20	0.70	0.50	0.80	1.40

客土区はさらにN0.2 kgの追肥を行った。かんがい水は用水路の底質等による汚染の拡散を防止するため、水源を井戸に求めた。

2) ポット試験

供試土壌は4種の土壌を用い、その理化学性は第3表に示した。処理内容は1ppm、3ppmの含量となるように現地汚染土壌を添加し、さらに比較としてCd(N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>で3ppm区を設置した。添加土壌の0.1N塩酸可溶Cd含量は26.5ppmであった。使用ポットは内径15cm、高さ65cmで2連制とした。供試品種は日本晴でポット当たり1株植とし6月5日に移植した。施肥量はポット当たりNを1.0g、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を3.0g、K<sub>2</sub>Oを0.7g施用した。水管理は最高分けつ期以降は落水状態とし1日おきに約20mmかん水した。

4. 分析法

玄米及び茎葉のCdの分析法<sup>8)</sup>は硝酸、過塩素酸による湿式分解液についてジエチルジチオカルバミン酸ナトリウム-メチルイソブチルケトン抽出後、原子吸光度法で測定した。

IV 結果及び考察

1. 石灰・リン酸施用試験

1) ほ場試験

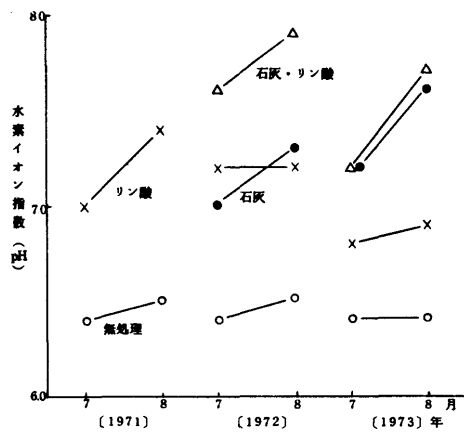
消石灰、ようりんなどの多施用により水稻は初期より生育良好で若干過繁茂となったが、倒伏もなくほぼ正常な生育を示した。リン酸施用による収穫期の玄米および茎葉のCd含量は第4表に示したように、A試験地ではCd吸収抑制効果はほとんどみられなかった。一方、B試験地

では年次による変動はあるが3ヵ年も効果が見られるしくみられ、A試験地とB試験地では異なる結果を示した。さらにA試験地に接した水田で別途行った石灰及びリン酸施用試験の結果を第5表に示したが、1972年には石灰及びリン酸によるCd吸収抑制効果が認められたが、1973年にはほとんどみられなかった。

消石灰、ようりんなどの多施用によるたん水期間中のpHは第1図に示すとおり、0.5~1.0

第5表 石灰・リン酸施用とCd含量 (ppm)

処 理	玄 米		茎 葉	
	1972	1973	1972	1973
無 処 理	0.85	1.00	4.20	3.60
石 灰	0.75	1.50	4.30	6.00
リ ン 酸	0.75	1.40	5.20	4.80
石灰・リン酸	0.55	1.15	2.80	4.00



第1図 石灰・リン酸施用と土壌のpH

上昇し、石灰・リン酸区のpHは7.5以上を示したが、石灰区は目標の8.0までは上昇しなかった。リン酸区のpH上昇は年次の経過とともに低下し、1973年には6.8前後となりこの傾向はA・B両試験地とも同様であった。pHの上昇によるCdの難溶化について亀井<sup>9)</sup>らは単独溶液での水酸化物沈でんpHよりも土壤中では低いpHで難溶化しはじめるとしており、本試験では石灰、リン酸の施用によってpHはほぼ7.0以上を示したことから水酸化物沈でんの生成は十分予想されるが水稻のCd吸収抑制とは結びつかなかった。

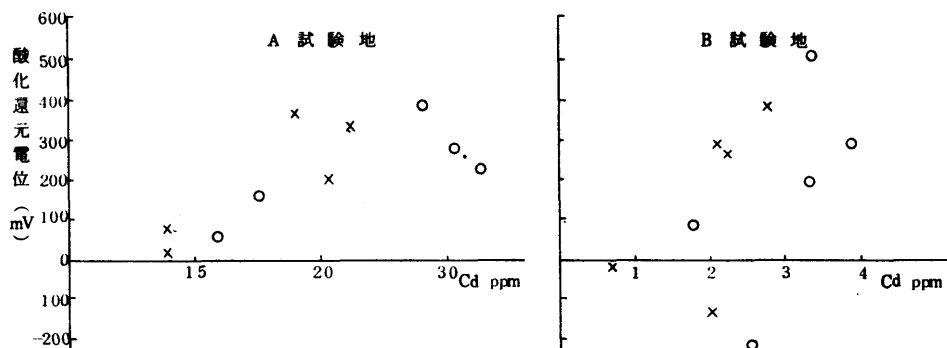
酸化還元電位(以下Eh)は第6表に示す通り、リン酸区の還元が促進されおおむね低く経過したが、両試験地とも落水によってかなり酸化状態を示し、還元が促進された期間はほぼ7月中旬までであった。7月、8月に測定した0.1N塩酸可溶のCd溶出量とEhの関係を第2図に示したが、Ehの低下により土壤中のCdが難溶化することがみられた。リン酸区と無処理

区との差異は明らかな傾向がなく、リン酸多施用による直接的な難溶化よりは還元促進による難溶化の影響が大きいものと考えられる。

玄米のCd吸収抑制効果はA試験地に接する水田で行った石灰およびリン酸施用試験では資材施用初年目(1972年)には若干効果がみられたが2年目(1973年)には全くみられなかった。一方、A・B試験地で行ったリン酸多施用の効果はA試験地では前述の結果と同様に資材施用初年目(1971年)は若干効果がみられたが、1972年以後は全くみられなかったのに対し、B試験地では3カ年とも著しい効果を示した。白鳥<sup>10)</sup>らによれば石灰、リン酸などの資材施用による効果は土壌をたん水するとpHが6.7付近に収れん<sup>9)</sup>するため、たん水期間中のpHを人為的に制御することが困難であることから期待できないとしている。B試験地はA試験地にくらべ地下水位が高く落水後でもやや還元的に経過すること、及び土壤中のCd濃度が著しく異なることなどの条件が吸収抑制効果の差異に関

第6表 リン酸施用とEhの推移 (mV)

処 理	1971			1972			1973		
	7.16	7.29	8.20	7.17	8.3	9.5	7.17	8.7	8.22
A 無 処 理	-56	400	648	149	325	570	60	230	387
試地 リ ン 酸	-10	158	454	72	277	530	25	200	365
B 無 処 理	-51	218	251	72	293	250	155	190	515
試地 リ ン 酸	-30	-8	16	-12	276	240	-47	280	395



第2図 Ehと0.1N HCl可溶Cd

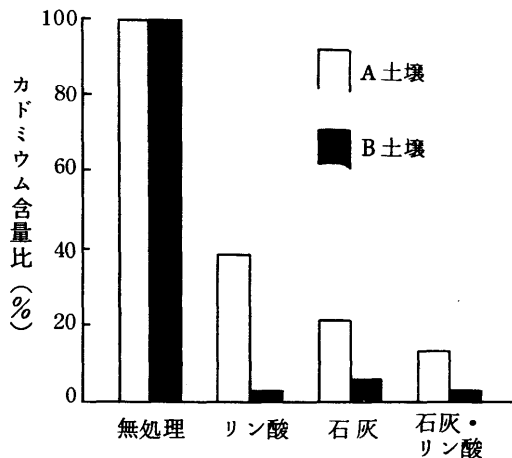
連があるものと考えられる。

## 2) ポット試験

A試験地とB試験地ではリン酸多施用の効果が異なっていたので水管理などの条件を同一にして石灰及びリン酸多施用の効果を検討した。水管理は最高分けつ期までたん水状態とし7月13日にポットのせんを抜きとり、その後1日おきに約20mm程度のかん水を行い落水状態に保った。水稻の生育は最高分けつ期以後落水しても順調な生育を示し、処理間での差異は少なかった。

玄米中のCd含量はリン酸、石灰の施用によって低下し、第3図に示すようにA試験地作土(以下A土壌)ではリン酸、石灰、石灰・リン酸の順となり、無処理区を100とするとそれぞれ38%、21%、13%であった。一方、B試験地作土(以下B土壌)では各処理とも著しく低い含量を示し、無処理区を100とすると10%以下であった。茎葉、籾がらのCd含量は第7表に示すとうり玄米と同様にリン酸、石灰の施用によって低下した。跡地土壌のCdは無処理区のA土壌が18.0 ppm、B土壌が1.70 ppmで第8表に示したように処理により含量の低下がみられるが、0.1N塩酸浸出時のpHの差異が大きく影響しているものと考えられる。

このようにA土壌に比較し、B土壌でリン酸



第3図 石灰・リン酸施用と玄米中Cd含量比

施用によるCd吸収抑制効果が著るしく大きいことはほ場試験の結果とほぼ同様な傾向を示し、石灰、リン酸多施用による効果はCd含量の低い土壌の場合高いと言える。ほ場試験との比較では明らかにポット試験の抑制効果が大きい。このことはほ場、ポット試験とも土壌pHの差は少ないがポット試験は早期落水しCd吸収の多い出穂期前後には比較的均一な酸化状態を呈したが、ほ場では地下水位が高く酸化部と還元部が不均一に分布したことなどが影響したものと考えられる。

## 2. 水管理試験

水稻は順調な生育を示したが、収穫期の穂数は早期落水Aと常時たん水が減少し、収量は標準>常時たん水≒早期落水B>早期落水Aの順で早期落水により減収した。

Cdの吸収は落水処理により増加し、玄米中の含量は早期落水Aで標準の3倍程度となり、各部位の含量は茎>葉しょう>籾がら>葉身>玄米の順であった(第9表)。地上部の吸収量の推移を第4図に示した。早期落水Aは幼穂形成期から収穫期まで継続して増加しているが、落水処理直後の7月30日~8月26日の吸収量が急激に増加している。同様に早期落水B、標準についても落水処理直後に吸収量の増加がみられた。菅野<sup>5)</sup>らによれば水稻のCd吸収は出穂期後に最も良く吸収され、能率よく穂部へ移行す

第7表 石灰・リン酸施用とCd含量(ppm)

処 理			茎葉	玄米	籾がら
A 土 壌	無	処 理	12.8	1.30	4.00
	石	灰	3.68	0.27	—
	リ	ン 酸	5.13	0.50	1.03
	石	灰・リン酸	2.18	0.17	0.43
B 土 壌	無	処 理	6.25	0.94	1.44
	石	灰	0.88	0.06	0.10
	リ	ン 酸	0.88	0.03	0.28
	石	灰・リン酸	0.60	0.06	0.05

第8表 跡地土壤のCd含量とpH

処 理	A 土 壤			B 土 壤		
	pH	Cd ppm	浸出液の pH	pH	Cd ppm	浸出液の pH
無 処 理	6.3	18.0	2.8	6.3	1.70	2.7
石 灰	7.2	15.1	3.1	7.2	1.60	3.1
リ ン 酸	6.9	16.0	3.1	6.8	1.60	2.8
石灰・リン酸	7.6	8.8	4.0	7.6	1.05	3.8

るとしている。また勝見<sup>6)</sup>らは本試験と同様の落水処理を行い幼穂形成期以後の落水が水稻のCd含量を最も上昇させ、土壤の酸化状態が吸収増大の主要因としているが、本試験でも第5図のとうり、落水処理によってEhは顕著に上昇した。

以上のように落水処理がCdの吸収を増大させたことは土壤が酸化状態となりCdが可給態に変化するものと考えられる。伊藤<sup>2)</sup>らは土壤中Cdのたん水での難溶性化合物の形態は硫化物である可能性を認め、水稻のCd吸収のたん水処理による減少と、土壤中の硫化Cdの生成による難溶化とを結びつけることができるとしており、本試験の結果もこのような土壤中でのCdの難溶化による影響が大きいと推定される。

### 3. 排土客土試験

#### 1) ほ場試験

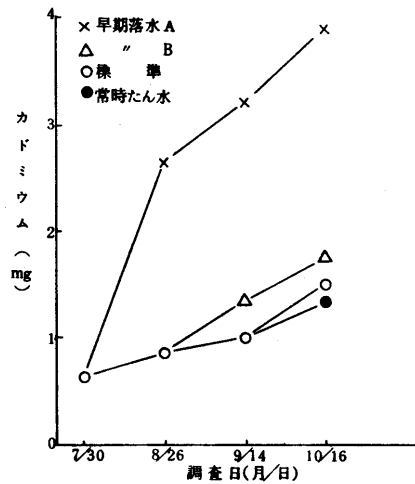
排土客土試験を2年間実施したが水稻の生育は各処理とも順調で無処理区に劣らぬ生育を示し、収量もほぼ変らなかつた。

収穫期の玄米中Cd含量を第10表に示したが、

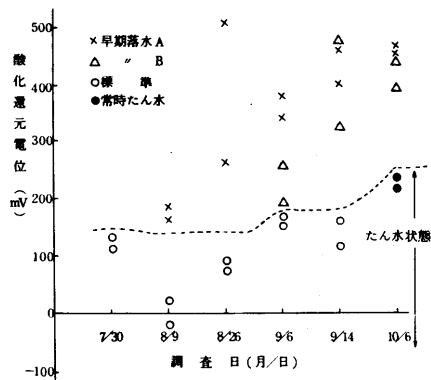
第9表 水管理とCd含量(ppm)

処 理	玄米	梗から			
		葉 身	葉 しょう	葉 しょう	葉 しょう
早期落水A	0.53	1.46	1.13	2.67	7.01
早期落水B	0.25	1.38	0.71	1.23	1.59
標 準	0.17	1.07	0.82	0.96	1.19
常時たん水	0.16	1.02	0.74	1.11	0.93

排土客土による吸収抑制はA・B両試験地とも著るしなかつた。両試験地の土壤中Cd含量の垂直分布は第11表に示したとうりで、B試験地では16cm以下はほとんど汚染されていないが、A試験地では23cmまで汚染されていることからA試験地の排土客土15cm, 20cmでは下層からのCd吸収が予想されたが、2カ年とも排土客土の深さと玄米中Cd含量の関係はなく、本試験の結果では玄米のCd含量に対する15cm以下の下層土の



第4図 水管理によるCd吸収量



第5図 水管理によるEhの推移

Cdは寄与率が小さいものと推定される。

試験地はかんがい水源を新たに井戸に求めて実施したが試験跡地の土壤中Cd含量は第12表のとうりでB試験地は底質等の拡散による再汚染はほとんどなかったが、A試験地は1974年7月5日の雷雨によつて増冠水し用水路の底質が流入し水口部で約5mmの汚染土がたい積し、その汚染土のCd含量は21.5 ppmであった。従つて本汚染地域のように汚染程度の高い場合には十分な配慮が必要となる。

本試験開始前の1971年～1973年の3カ年間排土客土、客土処理などの試験を行ったが底質などから再汚染が進行し、排土客土区でも1973年には玄米中のCdが1 ppmを超えてしまったが、客土材に沖積砂質土壌を用いたため客土材の性質にも問題があったものと考えられたのでポット試験で客土の性質とCd吸収の難易について検討した。

2) ポット試験

玄米中のCd含量は1 ppm添加では沖積強粘質土壌が最も低く、他はほぼ同程度であった。

3 ppm添加では沖積強粘質土壌が最も低く、次いで腐植質火山灰土壌、沖積壤質土壌、鉍質火山灰土壌の順であり、硝酸Cd 3 ppm添加も同様の傾向であった(第6図)。土壤のpH、Ehは第13表に示したように差異は少なく、Cd吸収への影響は少なかったものと考えられる。ポット試験の条件下では土壤中のCd含量のほかにポット当たりの絶対量も影響すると考えられ

第10表 排土客土と玄米中Cd含量(ppm)

処 理	A 試験地		B 試験地	
	1974	1975	1974	1975
無 処 理	0.88	1.28	0.38	0.45
排 土 客 土 15	0.28	0.31	0.07	0.06
排土客土15+リン酸	0.26	0.35	0.04	0.10
排土客土20+リン酸	0.26	0.37	0.08	0.10
排土客土20+リン酸	0.24	0.29	0.10	0.14

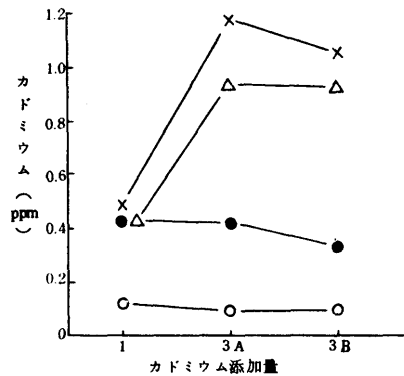
るが、本試験の絶対量の比率は沖積壤質土壌を100とすると沖積強粘質土壌が99、鉍質火山灰土壌が62、腐植質火山灰土壌が44であり、玄米のCd含量に直接影響を及ぼしたとは考えられず、客土材の理化学性の差異によるものと考えられ

第11表 Cd含量の垂直分布(ppm)

A 試験地			B 試験地		
深さcm	水口	水じり	深さcm	水口	水じり
0～13	43.0	12.7	0～16	2.85	2.58
13～23	6.65	6.30	16～26	0.20	0.24
23～33	0.38	0.48	26～36	—	—
33～43	—	0.25	36～46	—	—

第12表 排土客土後の土壤中Cd含量(ppm)

処 理	A 試験地		B 試験地	
	1974	1975	1974	1975
無 処 理	28.3	32.5	2.50	3.00
排 土 客 土 15	0.65	1.10	0.20	0.35
排土客土15+リン酸	0.53	1.05	0.38	0.20
排土客土20+リン酸	0.48	0.90	0.22	0.50
排土客土25+リン酸	0.55	0.70	0.25	0.40



第6図 客土材の違いと玄米中Cd含量

注. 1, 3 A …汚染土壌添加 △…沖積壤質土壌  
3 B …Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>添加 ●…腐植質火山灰土壌  
× …鉍質火山灰土壌 ○…沖積強粘質土壌

第13表 pH及びEh

土 壤	7.11(最高げつ期)		8.29(出穂期)	
	pH	Eh mV	pH	Eh mV
鉍質火山灰土壤	6.4	155	6.8	166
沖積壤質土壤	6.8	170	6.5	170
腐植質火山灰土壤	6.3	50	6.3	163
沖積強粘質土壤	6.8	40	6.6	140

る。すなわち、客土材として沖積土壤では粘土含量の多い土壤、火山灰土壤では腐植含量の多い土壤で水稻のCd吸収は低く抑えられると考えられる。

### V 摘 要

Cdにより汚染された水田における水稻のCd吸収抑制対策として、石灰およびリン酸の多施用、水管理、排土客土については場試験、ポット試験、わく試験を行いその効果を検討した結果。

1. Cd高含量土壤における石灰、リン酸の効果は明らかでなかったが、低含量土壤におけるリン酸の吸収抑制効果は顕著であった。
2. 水管理とCd吸収との関係が著しく、落水処理をすることによりCdの吸収は急激に増加し、幼穂形成期から出穂期の影響が最も大きく、玄米のCd含量も多くなった。一方、全期間たん水栽培すると玄米のCd含量は低下した。
3. 排土客土処理により玄米のCd含量は著るしく少なくなり、排土客土の深さは少なくとも15cmは必要である。客土材は沖積土壤では粘土含量の多い土壤、火山灰土壤では腐植含量

の多い土壤が適当であることが示唆された。

### 引 用 文 献

1. 細田克己(1942)鉍害土壤改良に関する研究(第5報). 土肥誌16:459-466.
2. 伊藤秀文・飯村康二(1975)土壤の酸化還元状態の変化と水稻のカドミウム吸収応答. 土肥誌46:82-88.
3. 亀井茂他(1972)重金属の土壤蓄積性について. 土肥要旨集18:130.
4. 金井徹(1971)銅鉍害の歴史とその対策. 土壤肥料の研究第2集:15-24.
5. 菅野忠教他(1974)重金属土壤汚染による農作物被害の解析に関する研究(第6報). 土肥要旨集20:131.
6. 勝見太他(1972)水管理が水稻のカドミウム吸収におよぼす影響. 土肥要旨集18:125.
7. 小林純(1971)カドミウムをめぐる生物地球化学. 土壤肥料の研究第2集:5-14.
8. 農林水産技術会議事務局(1971)土壤および作物体中の重金属の分析法.
9. Ponnampetuma, F. N. et al(1966) Influence of Redox Potential Pressure of Carbon Dioxide on pH Value and the Suspension Effect of Flooded Soils. Soil Science 101:421-431.
10. 白鳥孝治他(1973)カドミウム汚染水田に対する水稻栽培技術的改良対策の問題点. 千葉農試報告13:83-93.