

シンポジウム

カドミウム汚染圃場の整備と土地改良

館 川 洋*

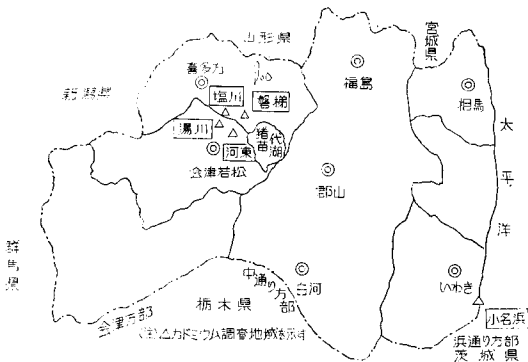
Improvement of Field Polluted with Cadmium

Hiroshi TATEKAWA

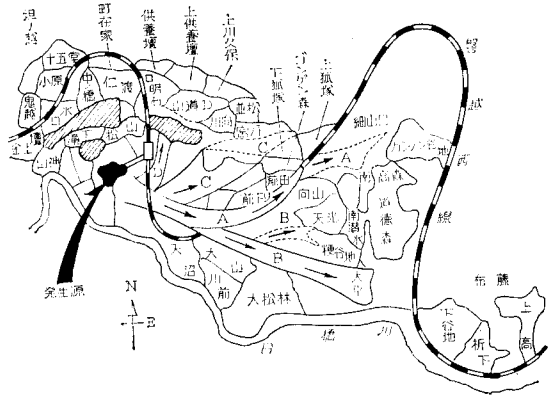
Fukushima Agricultural Experiment Station

1. 福島県におけるカドミウム汚染

県内の汚染型をみると大気型がいわき市小名浜地域と磐梯東部地域、水型は日橋川流域に大別されるが、大気と水との複合型汚染地が磐梯西部地域にみられる。(図一参照)



図一 福島県のCd汚染地域



図二 磐梯対策地域の風向

いる地域である。このCd汚染は工場から漏出するばい煙と同製錬所排水を含む用水とに由来していて、ばい煙は日橋川に沿って谷間を東西に吹く風に運ばれるため、風道に沿って汚染され、東西約6km、南北に1~2kmの幅で汚染されている。この地区の土壤汚染対策地は製錬所の東側の地域であり、工場のばい煙と亜硫酸ガスによ

磐梯地域は、磐越西線にそった山間地で、南~北西に延びる日橋川沿いの谷地で、大正5年以来操業を続けている日曹金属株式会社津製錬所のばい煙に由来し、Zn, Cu, Cd等の製錬を行なっている。工場周辺における大気汚染による被害は古く、農作物や樹木に現れる徴候は亜硫酸ガスの煙害であって、重金属による被害については調査されていなかった。昭和45年7月に昭和44年産農家保有米にCdを含むことが発見されて以来、現在はCd環境汚染要観察地域に指定されて

表一 水田土壌中の層別別重金属含量

地区	汚染型	層位	Cd		Cu		Zn		Pb	
			ppm/乾土	比	ppm/乾土	比	ppm/乾土	比	ppm/乾土	比
いわき市 小名浜	大気型	1	1.5	1	31.8	1	104.1	1	12.4	1
		2	1.5	1	22.9	0.7	86.6	0.8	10.1	0.8
		3	1.3	0.9	14.8	0.5	74.0	0.7	7.0	0.6
磐 梯	大気型	1	15.2	1	62.8	1	958.3	1	371.0	1
		2	9.6	0.6	42.0	0.7	800.7	0.8	201.7	0.5
		3	4.6	0.3	25.4	0.4	568.2	0.6	54.9	0.1
	複合型	1	34.3	1	120.9	1	2114.1	1	711.3	1
		2	14.1	0.4	70.5	0.6	1868.7	0.9	306.2	0.4
		3	6.1	0.2	40.6	0.3	1449.9	0.7	117.3	0.2
日橋川	水型	1	7.5	1	34	1	444	1	20	1
		2	4.4	0.6	26	0.8	313	0.7	14	0.7
		3	2.8	0.4	20	0.6	154	0.3	9	0.5

* 福島農試

時期 区	分け期	幼穂形成期	出穂期	出穂後20日	成熟期	玄米Cd比
1	┌-----┐ (0.743) ───────────┘					100
2	┌-----┐ (3.013) ───────────┘					406
3	┌-----┐ (1.685) ───────────┘					227
4	┌-----┐ (2.771) ───────────┘					373
5	┌-----┐ (2.205) ───────────┘					297
6	┌-----┐ (0.807) ───────────┘					109
7	┌-----┐ (2.204) ───────────┘					297
8	┌-----┐ (4.080) ───────────┘					550
9	┌-----┐ (4.197) ───────────┘					566

図-3 落水時期が玄米のCd吸収に及ぼす影響

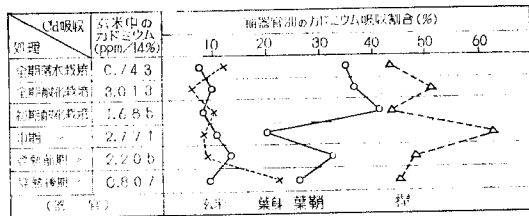


図-4 落水時期と稲器官別Cd吸収割合(%)

る大気型の汚染をこらむっている。

製錬所は、その東側に広がる起伏にとむ日橋川に沿う傾斜地を汚染している。降下cd量は風道に沿うて近く、吹きたまる地形の所に多い傾向がみられる。ばい煙には、亜硫酸ガス、Cdなどが含まれているので公害防止施設の整備をすすめている。対策地域内の風道は図-2のように4つに大別される。

水田土壌中の重金属汚染程度は表-1に示めた。地域別には磐梯<日橋川>いわき市小名浜であり、磐梯地域の複合型が最も高い値をしめている。土壌中のCd含量は作土で高く下層への移行が少なく、Cu、Pbも同じ傾向にあるが、Znは他の元素と異なり、下層への移行がみられる。

2. 水稻のCd吸収特性

(1) 水管理とCd吸収 水稻が土壌中Cdの吸収を左右する要因として還元があげられている。還元状態の調整に落水処理を行ない稲のCd吸収状況をみると図-3に示した。玄米中の含量は生育中期(幼穂形成期~出穂期)>登熟前期(出穂期~出穂後20日)>生育初期(幼穂形成期まで)>登熟後期(出穂20日以降)の順に吸収され、稲体器官別にCdの吸収割合をみると、土壌Cdの好吸収条件を与えると特異的な吸収濃縮が行なわれていることがわかる。図-4に示した。

生育初期の落水処理では葉鞘部に中期処理は程に、登熟前期処理は玄米に、登熟後期では葉身に多く吸収され

ている。従って、幼穂形成期から登熟前期の中干し~間断かん水による土壌の酸化栽培は土壌 Cdの玄米への濃縮を有利にするので、水管理に特に注意を要することになる。しかしこれは良質米生産のための根の健全化と登熟良化方策とは逆の水管理であり生産性向上の面からは好ましくない方策である。

(2) 降下Cdによる玄米汚染 大気型汚染地における降下Cdによる玄米汚染の程度を明らかにすることは、土壌改良後の再汚染防止の面からも重要であり、玄米汚染経路を判定する指標にもなる。

表-2 純降下Cdに由来する玄米のCd汚染割合(1973)

品種	稲の生育ステージ			常時灌水栽培区		酸化栽培区*	
	幼穂形成期	出穂期	成熟期	Cd濃度	降下Cdに由来比	Cd濃度	降下Cdに由来比
1	██████████	██████████	██████████	0.206	0.142	0.335	0.280
2	██████████	██████████	██████████	0.119	0.055	0.150	0.095
3	██████████	██████████	██████████	0.105	0.041	0.140	0.085
4	██████████	██████████	██████████	0.164	0.100	0.234	0.188
5	██████████	██████████	██████████	0.135	0.071	0.148	0.093
6	██████████	██████████	██████████	0.064	—	0.055	—

注 ████████ 汚染地にロケット

* 葉面吸収と一部表層根吸収を含む。

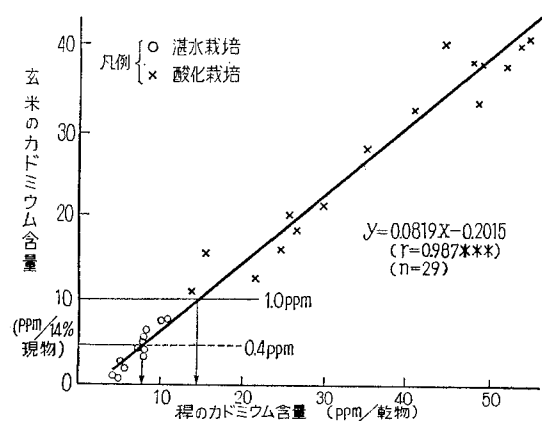
表-2に降下Cdによる葉面吸収時期が玄米汚染にどのように影響しているかを明らかにするために、ポット栽培した水稻を、生育ステージ別に非汚染地、汚染地間の交換を行なって、その反応を調べた。

純降下Cdによる水稻の葉面吸収では、葉身に多く集積し、ついで葉鞘に多く、茎、玄米、根の順に減少している。この分布の様子は経根的に吸収させた場合と異なっている。葉面吸収でも茎根吸収でもCdは吸収部位に多く、そこから遠く移動していくにつれて減少するようなパターンである。表-2に示したように、降下Cdによる玄米汚染は、全期間汚染地に栽培した場合、常時灌水栽培で0.142ppm、中干し~間断かんがい栽培(葉面及び表層根からのCd吸収を伴うものと考えられる)で0.280ppmを示した。水稻の生育時期別にCdの玄米汚染度をみると、登熟期間の汚染が約70%、それ以前が約30%となり、登熟期間の降下量を減少させることが対策として、必要になる。このことから水稻の生育時期別に純降下量を測定しておけば、大気型汚染による玄米汚染の程度を予測することが可能となることが明らかになった。

(3) 経根吸収による玄米Cd汚染の簡易予測

Cd汚染土壌から水稻が経根的にCdを吸収する場合は、稲体の各器官別Cd含量をみると、根>葉鞘>葉身>玄米の順に減少し、濃度勾配がみられる。そこで玄米Cd含

量と稈（葉鞘を含む）Cdの含量との相関が高いことを利用してCd汚染米の簡易予測の可能性を検討した。結果を図一5に示した。出穂後20日の稈中Cd含量と玄米中Cd含量とは高い相関関係が認められ、稈のCd含量が15ppmを越えなければ玄米のCd含量は1ppmに達しない。又稈のCd含量が7.5ppm以下では、玄米のCd含量は0.4ppmを越えないことが分かった。予測に使える出穂後20日の時期よりも少し早い時期についても現在現地適用性を検討しているが、出穂期でも予測できる可能性は明らかになったが、この場合の相関係数はやや劣るようである。玄米中のCd含量を早期に予測できれば、高Cd汚染米が生産



図一5 出穂後20日の稈と玄米のCd含量との関係

される可能性の水田に対して水管理などによるCd吸収抑制対策を指導し、高Cd汚染米の生産量を減少させるとなど有利な点が多い。だからといって、抜本的な改良対策を講ずる必要のあることは論をまたない。

3. 水稻のCd吸収抑制方策

Cd汚染水田土壌の改良方策としては、表一3に示したが、汚染物質の除去（排土、用水調節、植物による吸収除去、洗浄除去など）汚染物質の陰べい、希釈（客土、転圧、汚染土埋没、反転、混層など）、汚染物質の不活性化、作物吸収抑制（土壌改良資材、水管理、品種選択、土地利用変更など）などが汚染水田土壌の改良方策（多田）考えられる。又対策工法からみると区画拡大を伴うものや、現況区画に復旧するものなどがあり、用排水路の分離、取水施設などに対する処置も汚染の形態などによっても異なってくるものと思われる。

(1) Cd汚染水田土壌の改良資材による水稻の吸収抑制効果 土壌改良資材としては、りん酸資材、アルカリ資材、有機物施用によるCd吸収抑制効果を異なる水管理条件下で検討したのが表一4である。

常時湛水栽培下ではよりりん酸の多施用、珪カル多施用による土壌酸度の矯正による効果が認められるが、中干し～間断かんがい栽培下では、生育、収量は向上するが玄米のCd吸収抑制には効果なかった。このように水稻の根の健全化をはかり品質のよい玄米生産に結びつくような水管理をすれば玄米中Cd含量は著しく高まり、土壌改良資材の施用効果を期待することはできない。

(2) 反転耕深によるCd吸収抑制効果 Cd汚染田を表層から25cmと40cmにそれぞれ反転耕深を行ない作土中のCd含量を希釈し低下させた場合のCd吸収抑制に対する効果を検討したのが表一5である。反転耕によって作土中のCd含量は反転耕深が深いほど減少するが、逆に透水性の増大、pHの低い下層土が作土層に混入、などによる土壌還元未発達、かえってCd吸収を促進する結果に

表一3 Cd汚染水田土壌の改良方策（多田）

原土・表土の扱い	下層土の扱い	転圧の有無	客土後の改良資材の有無
1. 排土・客土	1. 混層（転圧）	1. 客土・汚染土有	1. 表土有
2. 上のせ客土	2. 反転（転圧）	2. 客土無・汚染土有	心土有
a 基盤切盛後客土	3. 無処理（転圧）	3. 客土有・汚染土無	2. 表土有
b 攪拌・転圧後客土		4. 客土・汚染土無	心土無
c 混層・転圧後客土			3. 表土無
d 表土じめ後・客土			心土有
3. 表土はぎ（心土じめ無客土）			4. 表土無
4. 混層			心土無
5. 反転			
6. 表土心土入換			
7. 排土・無客土			

（注）2-d, 5, 6, 7 は事業例がない工法区画整理の有無の要因によっても分類される。

表-4 土壤改良資材によるCd吸収抑制効果

区 番 号	区名	Cd 濃度 (ppm/14% 現物)		Cu 濃度 (ppm/14% 現物)		Zn 濃度 (ppm/14% 現物)		Pb 濃度 (ppm/14% 現物)					
		澁水	酸化	酸化 澁水	澁水	酸化	澁水	酸化	澁水	酸化	澁水		
												澁水	酸化
1	無改良区	0.400	3.111	7.84	25.4	70	1.131	3.33	5	1.1	0.322	0.331	1.0
2	りん酸少量区	0.440	2.970	6.84	30.4	48	1.031	5.34	3	1.1	0.341	0.473	1.4
3	中量区	0.215	3.018	14.04	40.4	62	1.129	7.38	1	1.3	0.384	0.470	1.2
4	多量区	0.194	3.622	18.74	15.4	54	1.129	7.32	9	1.1	0.374	0.364	1.0
5	pH7 矯正区	0.152	4.022	26.54	01.4	39	1.131	7.35	2	1.1	0.439	0.330	0.8
6	pH8 "	0.217	3.672	16.92	99.4	43	1.525	7.34	4	1.3	0.487	0.578	1.2
7	稲わら少量区	0.213	3.602	16.93	44.3	89	1.129	2.31	3	1.1	0.404	0.379	0.9
8	多量区	0.665	3.259	4.93	32.4	22	1.330	2.33	9	1.1	0.352	0.408	1.2

表-5 反転耕深によるCd吸収抑制効果

区 番 号	項 目 区 分	収量(kg/a)		玄米中重金属含量				重金属吸収総量 (mg/m ²)			
		玄米重	ワラ重	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb
1	無処理区	33.33	47.76	0.109	2.43	29.79	0.488	2.45	2.39	76.6	11.20
2	土壤改良区	38.92	49.22	0.197	2.37	29.79	0.493	2.59	2.50	83.0	9.96
3	25cm反転耕深区	41.07	47.65	0.162	2.03	37.05	0.537	2.66	2.84	99.8	11.58
4	40cm "	34.44	43.61	0.223	2.26	35.82	0.460	2.19	2.91	65.5	10.17

表-6 客土深とCd吸収抑制効果

区名	項目 調査 地点	土壤中のCd濃度 (ppm)			玄米中の重金属濃度 (ppm/14%現物)				収量(kg/a)	
		新作土	旧作上	旧作上 下15cm	Cd	Cu	Zn	Pb	玄米重	ワラ重
客土25cm	A-1	0.21	36.77	19.80	0.080	3.44	23.26	0.625	58.3	85.0
	A-2	0.27	32.22	40.07	0.073	3.39	23.80	0.543	55.6	83.9
	A-3	0.20	34.75	35.91	0.097	3.89	23.85	0.543	66.7	110.5
	A-4	0.20	1.90	2.26	0.090	4.58	21.84	0.504	47.8	86.1
	X	0.22	26.41	24.51	0.085	3.83	23.19	0.554	57.1	91.4
客土30cm	B-1	0.20	21.52	31.58	0.073	4.40	23.51	0.592	46.1	6.67
	B-2	0.19	12.92	44.84	0.075	4.09	24.19	0.504	49.4	67.8
	B-3	0.21	5.70	1.67	0.083	4.08	21.40	0.460	30.0	55.0
	B-4	0.14	1.72	1.38	0.092	4.12	24.97	0.515	34.4	75.5
	X	0.19	10.47	19.87	0.081	4.17	23.52	0.518	40.0	66.3
客土40cm	C-1	0.19	25.00	40.88	0.070	4.02	23.55	0.515	60.5	82.2
	C-2	0.20	17.62	28.39	0.083	3.76	27.13	0.537	47.8	50.6
	C-3	0.21	39.30	1.36	0.080	4.19	23.21	0.482	55.0	68.9
	C-4	0.20	4.12	1.33	0.091	3.55	23.09	0.537	53.9	73.3
	X	0.20	21.51	17.99	0.081	3.88	24.25	0.618	54.3	68.8

* 1区画内の切盛土部も調査

なっている。玄米中のCd含量の3カ年間の変動をみると栽培年次によるふれが大きく持続効果が劣っている。

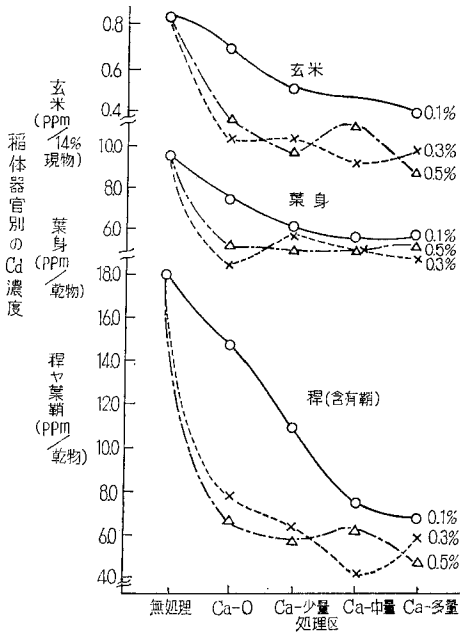
(3) Cd吸収抑制剤による吸収抑制効果 Cd汚染水田

土壤の改良方策の1つとして土壤中のCdを選択的に不活性化させる資材の開発利用が考えられる。使用したALM剤は日本曹達で開発した資材であり、黄褐色の水溶性の液体で比重1.15、pH約11、硫黄を含む有機物を主成分としている。検討した結果は図-16に示した。玄米中Cd含量は無処理区の0.832に対してALM剤0.3~0.5%（容量）処理区でいずれも0.4ppm以下となり顕著な抑制効果がみとめられた。又、ALM剤とCaCO₃剤を併用すればCd吸収抑制効果が更に高まる。これらの資材の開発には今後の研究に待つところが大きい。客土工事との併用とか、客土工事が地域的に場所的に困難な所とか、低Cd汚染地などでの活用が考えられる。

(4) Cd吸収抑制に対する客土量 Cd汚染土壌の抜本的な改良として客土量を検討した。結果は表-6に示した。

工事は段々の水田を15a区画に基盤整備し十分にブル転用し（山中式硬度計で約20mm以上を目標）して透水性を減少させ、客土（安山岩風化土、CL、pH5.7、CEC16.0me、P吸2130の非汚染土）を25cm、30cm、40cmの3段階で検討し10a当り珪酸石灰200kg、ようりん600kg施用し、水稲は一般栽培法に準じた。

その結果客土深は25cmで充分効果がみとめられ、基盤整備時に下層土のブル転用は、漏水、透水を抑制し土壤還元を促進し保持することが大切である。一作跡の根系



図一六 ALM剤によるCd吸収抑制効果

分布調査をみると、客土深より25cm以下の層には殆んど侵入していなかった。しかし、熟田化の進行と共に構造が発達し、下層土のCd汚染土部に根が侵入することが予想されるので、下層土のブル転圧程度は侵入する根量、土壤還元維持などの面から検討されるべきであり土壌の性格によっても異なる。この場合のように25cmの客土では下層土の土壤硬度(山中式硬度計のよみ)として24mm以上必要であることが明らかになり、現場含水時でのブルによる転圧回数が重要となる。

4. 汚染対策地域の土壌改良法

汚染地域は未整理の半湿田が多いので、土地改良を行なうに当たっては区画を15~20aとし乾田化して中型農業機械を導入して一般的管理、特に中干~間断かん水を行ないきれいな米を多収するようにする。そのため耕深は18~20cmでも下層汚染土が作土層に混入しないように計画した。

その対策事業の概要は次のようである。

- (1) 区画—1区画を15~20aとする。現在の汚染田を均平化しグラウンドを造る。
- (2) 転圧—均平面をブルで充分転圧し、漏水、透水を抑制する。下層土の還元化の促進
- (3) 畦畔、進入路の築立—非汚染土を用いて築立する
- (4) 客土—安山岩風化土を代掻後の厚さ25cmを保つように非汚染土を客入する。
- (5) 土壌改良資材の施用—よりんを用いてよりん酸

吸収係数の3%とするように600kg/10aを20cmに混入する。珪酸石灰は200kg/10a施し、よりん同様に20cm深さに混合する。

(6) 肥培、管理は水稲多収栽培法による。

(7) その他、道路、水路から汚染土の混入しないように考慮する。また用水不足を来たすことのないように確保するとともに用排水路を分離する。

以上のことが対策事業の概要であるが、これらの対策を実施するにあたって、次の点が問題になった。

造成された基盤は、区画整理時の切盛によって、コーン支持力、土壌硬度などに変化がみられ、特に盛土部ではホイルトラクターの進入に支障をきたすほど基盤が弱いので、土壌の性格と現場含水比を考えた転圧の方法を確立すべきである。水田への進入路、畦畔は客土を行なう前に客入土でおおい汚染土の客土への混入を防ぐこと。田区差のあるところでは暗渠排水を工事に含めて行なうことも考慮する必要がある。工事中降雨があると客土母材運搬のトラックがめり込み、客土を汚染する恐れがある。土壌改良後、年数の経過と共に土壌構造の発達、下層土の転圧と水稲根の侵入、などが客土後の耐用年数に影響を与えることになる。又仕上り精度の高い土壌改良工事が要求される点は通常の土地改良事業とおもむきを異にする。

コメント

岩手大農学部 馬場 秀和

館川氏の発表された磐梯地区は煙害による大気型Cd汚染地であり、汚染源の製錬所は今日も操業している。今後の汚染をも考えた細密な調査研究に敬意を表したい。

Cd汚染は場の更生工法として化学的にCdを洗い流したり、不溶化したり、あるいは植生を用いて選択的に吸収させたりする方法の研究も行われているが、現在可能な方法として実施されているのは汚染土の上に非汚染土を上をせする客土方式である。

磐梯地区においても客土方式による対策工事が行われた。発表の終りに指適された問題点の中から

①は場整備により基盤を造成しその上に客土を行った場合の土壌構造の発達と耐用年数、

②水稲根の伸長と下層土の転圧の関係の2点について私達が茨城県七会村で行った工事例と関連させて述べてみたい。

当初、私達の役割は純農業土木的な「対策工事後の減水深を20mm/day以下におさえる」という点にあった。それがいろいろ勉強していくうちに「漏水防止のための破碎転圧工法によって造成された汚染土の耕盤層(約20

cmの均一な厚さをもつ)はCd対策工事として重要な役割をもつ」との考えに至った。それは汚染土の還元化とその持続性に関しきわめて有効であろうということである。

七会村の例では作村期間中における原土耕盤の $\alpha-\alpha'$ ジピリジル反応は中干期も含め全期間中Gの反応を示した。また、長期間の耕盤の耐久性については、8年前に破碎転圧工法により造成された岩手大学滝沢農場の水田の調査では、耕盤のコーン支持力は開田時と比べ変化がみられず、減水深の増大がみられないことからその永続性が保障されるものと考えられる。

水稻根の侵入は山中式硬度計の読み20以上の客入耕盤をも貫通し、硬度20~24の原土耕盤中にもみられた。この侵入根の活性は盛土部、切土部に明瞭な生育差(収穫時約1週間のずれ、収穫量において約3俵/反の盛土部における増収)を生ずる程のものであった。盛土部に於ては原土耕盤は旧表土でつくられておりチッソ分に富むものである。この層からの養分吸収が上述した程の生育の違いを生じさせた事実は明らかである。しかしこの個所から採取した玄米中のCd濃度は0.05ppmと低く、切土部の0.04ppmともほとんど変りない。又ある水田では盛土

部0.00ppm(検出されず)切土部0.02ppmとの結果も出ている。

これらの調査研究は茨城県農試と共同で行っているものであり、原土耕盤中のCdの不溶出をさらに明確にすべく、根中Cdの測定、耕盤中のCdの溶出量の測定などが行われており、その結果も上述のデータを裏づけるものであった。

七会村の更生工法としては客土厚25cm、うち10cmは客土耕盤(根の侵入防止を目的としたが、上述のようにその効果は少なかった)となっており、玄米Cd濃度は昨年の平均0.056ppm、今年は0.055ppmであり最高値もそれぞれ0.19ppm、0.15ppmと許容基準0.4ppm(準汚染米)を下まわるものであった。

秋田県雄物川流域や富山県神通川流域にみられるように、一地区の要対策汚染水田が1,000haを越す場合もあり、これらの地区については客土材の不足、客土運搬によって左右される工期の長期化などの問題が考えられる。このような現実的視点もふまえて客土厚の削減の可能性に関する研究も今後進められるべきであり、その点からも汚染土そのものをいかに処理するかについてさらに目がむけられねばならないと考える。