

重金属による土壤汚染に関する研究

(第1報) 客土等が水稻のカドミウム吸収軽減に及ぼす影響

児玉行博*・戸田勉一**・米野泰滋**・戸波多美子**

石川裕一**・広瀬和久**

Studies on the Soil Pollution Caused by Heavy Metals

(Part I) Effect of soil covering up polluted surface soil on the cadmium uptake reduction of rice plant

UKIHIRO KODAMA, KOICHI TODA, TAIGI YONENO, TAMIKO TONAMI,
HIROKAZU ISHIKAWA and KAZUHISA HIROSE.

緒言

近年、産業活動の著しい進展に伴い、大気汚染、水質汚濁等による環境汚染が各地で発生し、全国的な社会問題になるとともに、これら大気、水質の汚染、汚濁等を媒体とした農用地の土壤汚染も、各地で顕在化しつつあり、問題となっている。

本県の西北端、員弁郡藤原町に所在するセメント工場周辺の農用地で、カドミウムを主体とした重金属等による汚染が明らかになった。^{1,10,11)}又、桑名市内に散在するホーロー、エナメル工場から排出された廃水中に含まれるカドミウムにより、農業用水路、農用地が汚染されていることが明らかになった。¹⁰⁾

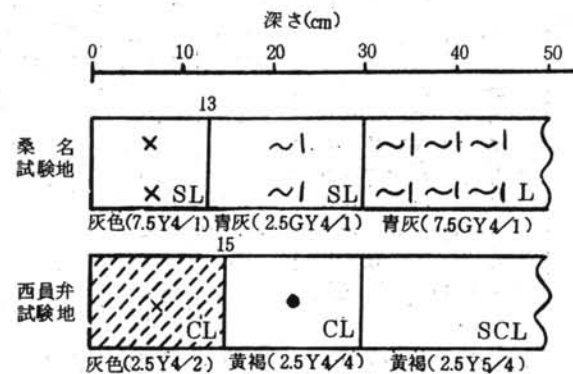
カドミウムは、特定有害物質に指定され、玄米について政令により基準が制定されており、したがって、この種の汚染農用地に対する汚染防止対策、あるいは、吸収軽減対策の確立が急務である。吸収軽減対策の方法には、排土客土、上乘せ客土、及び非汚染土との混合希釈などの土木的な抜本対策、土壤改良資材、土壤の還元化による難溶性化合物の生成促進等による応急対策がある。

本試験は、これら汚染農用地における抜本的な吸収軽減対策の方法を確立するため、床締め客土を中心に、客土、反転耕等の土木的方法について試験を行ない若干の知見を得たので報告する。

試験方法

本試験は、昭和49年から昭和51年の3年間、桑名市和泉「以下、桑名試験地」と、員弁郡北勢町麓村「以下、

西員弁試験地」の昭和48年度産米から高濃度のカドミウムを検出した水田において実施した。土壤型は、桑名試験地が強グライ土壤砂土還元型(五主統)、西員弁試験地は黄褐色土壤強粘土マンガン型(山田野統)であり、土壤断面形態は第1図のとおりである。試験地土壤の化学性を第1表に示したが、両試験地とも表層がカドミウムで汚染されている。土性は、桑名試験地では、1,2層がSL, 3層がLである。西員弁試験地では、1,2層がCL, 3層がSCLである。



第1図 土壤断面柱状図

* 伊賀農業改良普及所

** 環境部

第1表 試験地土壌の化学性

(風乾土中)

試験地	層位	pH		CEC (me)	Ex-Base(me)		塩基飽和度 (%)	磷酸吸収 係数	0.1N-HCl可溶(ppm)			I N-酢安 可溶Pb(ppm)
		H ₂ O	Kcl		CaO	MgO			Cd	Cu	Zn	
桑名	1. (0~13)	6.8	6.4	5.9	5.21	1.29	110.0	240	1.00	7.8	11.0	5.0
	2. (13~30)	6.8	6.3	6.9	5.42	1.07	94.1	270	0.24	4.7	3.8	2.4
	3. (30~)	6.3	5.0	8.6	4.38	0.98	62.3	330	0.30	8.9	5.3	9.4
西員弁	1. (0~15)	6.2	5.2	16.8	9.45	0.69	60.4	590	2.07	8.5	31.8	31.7
	2. (15~30)	7.0	6.7	13.5	9.38	0.51	73.3	520	0.10	2.4	1.3	1.7
	3. (30~)	7.1	6.6	12.3	8.93	0.46	76.3	510	0.15	2.3	1.5	2.0

(注) 1974年1月採土

第2表 試験区の内容

試験地	試験区名	客土の処理	土壤改良資材施用等の処理	水管理	床締めの有無程度
桑名	1. 慣行区	-	-	幼穂形成期以降は湛水せず3日に1回走り水程度のかん水	-
	2. 客土区	客土15cm	客土についてpH6.5とするに必要な珪カル、燐吸の5%相当燐、T-N5mg(初年度)又は3mg(2年度)に相当する鶏糞施用	桑名試験地と同じ	客土下を20mmまで圧密
	3. 床締め+客土10cm区	床締め用土10cm+客土10cm			床締め用土を同様に圧密
	4. 床締め+客土15cm区	床締め用土10cm+客土15cm			同上
西員弁	1. 慣行区	-			-
	2. 反転耕区	表層土30cmを反転耕	表層土、客土についてpH6.5とするに必要な珪カル、以下桑名試験地と同じ	桑名試験地と同じ	表層下15-30cm層を20mmに圧密
	3. 床締め+客土15cm区	床締め用土10cm+客土15cm			床締め用土を同様に圧密
	4. 床締め+客土20cm区	床締め用土10cm+客土20cm			同上

試験区及びその内容は第2表のとおりで、桑名試験地は、客土、床締め+上乗せ客土10cm、床締め+上乗せ客土15cmについて、西員弁試験地では、反転耕、床締め+上乗せ客土15cm及び床締め+上乗せ客土20cmについて試験を実施した。床締め層は山中式硬度計で20mmまで圧密

した。客土、上乗せ客土については、pHを6.5に、燐酸を燐酸吸収係数の5%相当に、全窒素を5mg又は3mgになるように土壤改良資材によって改良した。客土、土壤改良資材の投入量は第3表に示した。

第3表 客土量および土壤改良資材投入量

(a当り)

試験地	試験区名	客土 (t)	珪カル (kg)			燐 (kg)			鶏糞 (kg)		
			初年度	2年度	3年度	初年度	2年度	3年度	初年度	2年度	3年度
桑名	慣行区	-	-	-	-	1.2	1.2	1.2	-	-	-
	客土区	15	7.8	-	-	12	28.2	1.2	2.5	9	-
	床締め+客土10cm区	10	51.5	-	-	8.5	19.2	23.3	16.5	6	-
	床締め+客土15cm区	15	7.8	-	-	12	28.2	34.2	2.5	9	-
西員弁	慣行区	-	-	-	-	1.2	1.2	1.2	-	-	-
	反転耕区	-	-	-	-	21	9.1	8.3	2.5	9	-
	床締め+客土15cm区	15	7.8	3.87	-	12	28.2	38.8	2.5	9	-
	床締め+客土20cm区	20	104.5	3.87	-	15.5	28.2	38.8	33.5	9	-

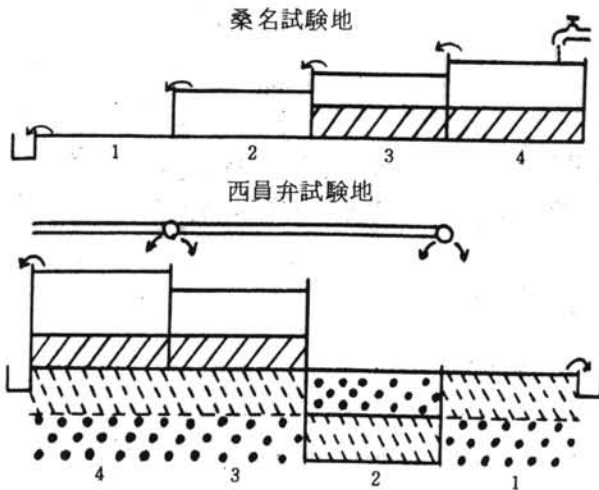
試験の規模は、1区20m²、2連制で、供試した水稻品種は、桑名試験地がトドロキワセ、西員弁試験地は初年度がうこん錦、2,3年度は晴々を用いた。

第4表 栽培概要

(月、日)

項目	桑名試験地			西員弁試験地		
	初年度	2年度	3年度	初年度	2年度	3年度
施肥、植代かき	4.25	4.22	4.22	6.14	6.2	6.2
移植	4.26	4.23	4.23	6.15	6.3	6.3
追肥	7.8	7.3	6.30	8.9	8.14	8.14
出穂期	7.19	7.22	7.22	8.28	9.4	9.4
収穫期	8.26	8.20	8.20	10.15	10.9	10.9

栽培概要については、第4表のとおりで、除草剤や病害虫の防除は慣行に従った。施肥は元肥に燐加安42号(14-14-14)を4kg/a、追肥は穂肥にNK化成2号(16-0-16)を用い、スターチテスト法を目安として追肥量を決定した。栽植密度は、桑名試験地が、23cm×28cm、西員弁試験地は、24cm×24cmで1株3~4本植えとした。水管理は、幼穂形成期以降節水し、間断かん水を行なった。



第2図 試験地の構成図

第2図に試験区の構成を示した。各区の隔壁は、周囲をポリエチレン樹脂の波板で囲い、側面からの水漏れ防止にビニールシートを隔壁に沿わせた。かんがい水は、桑名試験地では水道水を使用し、その蛇口を床締め+客土15cm区に設置し、順次低い区へかけ流した。西員弁試験地は、青川から取水した農業用水を用水路から塩化ビニール管で分水してかん水した。

第5表 客土の化学性

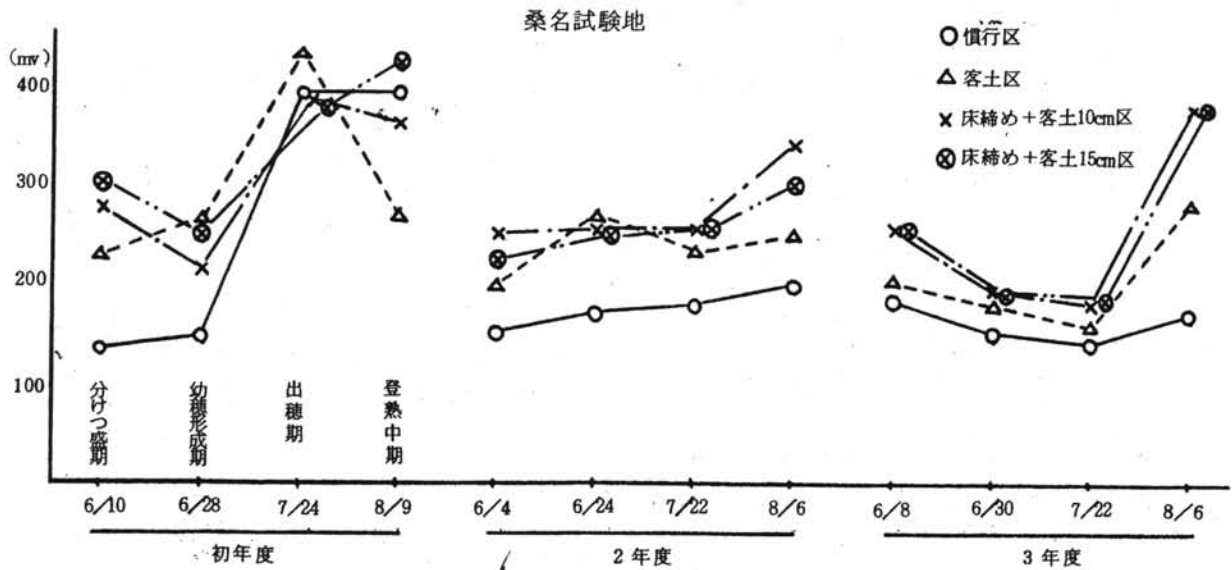
pH	T-N	T-C	Incub	C.E.C	Ex-Base(me)		Truo ϕ	磷酸吸	0.1 N-Hcl 可溶(ppm)			I N-酢
					CaO	MgO			Cd	Cu	Zn	
H ₂ O	(%)	(%)	NH ₄ -H (mg)	(me)			P ₂ O ₅ (mg)	収係数				Pb (ppm)
4.6	0.06	0.43	1.8	13.4	0.89	0.25	0.8	9.20	0.08	0.8	0.9	6.7

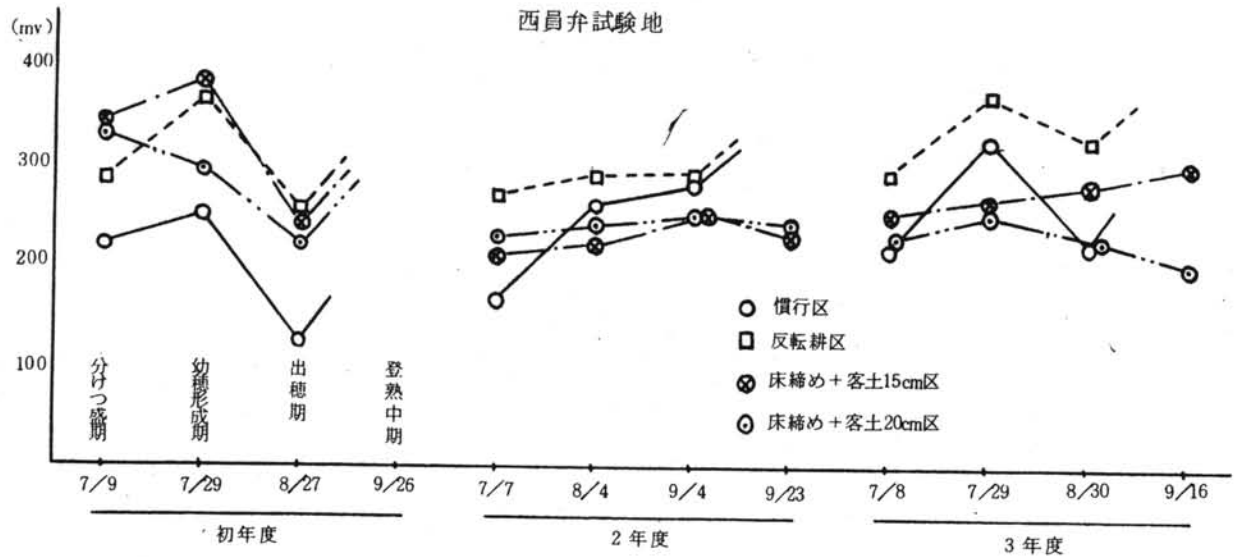
試験に用いた客土の化学性は、第5表のとおりで、重金属含量は少ないが極めて養分に乏しく、強酸性土壌である。土性は粘土含量が多いHCである。

1. 酸化還元電位の変化

試験期間中の水管理による酸化還元電位の変化は、第3図に示すとおりである。

試験結果



第3図 生育期間中のEh₆の変化

桑名試験地では、幼穂形成期までの湛水栽培の期間は各区3年間とも150 mV～300 mVの範囲で推移した。幼穂形成期以降の節水によるEh₆の変化は、初年度、出穂期に各区で400 mVに達し、客土区を除くそれぞれの区は登熟中期まであまり変化がなかった。2年度は、湛水期間に比べ若干上昇の傾向がみられたが、初年度に比べていずれも低く、登熟中期の床締め+客土両区で300 mV程であった。3年度は、各区とも分けつ盛期から出穂期まで徐々に低下したが、登熟中期には上昇して床締め+客土両区は400 mV程になった。床締め+客土両区のEh₆は、3年間とも高く推移し、慣行区が最も低く経過した。

西員弁試験地は、初年度初期の水管理が十分でなかったため、反転耕区、床締め+客土両区では出穂期まで3

00 mV～400 mVの範囲で経過した。しかし、出穂期に一旦200 mV～250 mVに低下した。登熟中期は田面が乾き測定できなかった。2年度は、床締め+客土両区が節水栽培に関係なく200 mV～250 mVの間で経過した。慣行区、反転耕区は徐々に上昇し、幼穂形成期以降、床締め+客土両区より高く推移した。3年度は、2年目同様、床締め+客土両区は横ばい状態で300 mV以下で経過した。中でも床締め+客土20 cm区は幼穂形成期以降徐々に低下した。反転耕区、慣行区は、相対的に床締め+客土両区より高く、反転耕区については常に300 mV以上で推移した。登熟中期は、田面が乾いて測定できなかった。

2. 水稻の生育収量

各処理区の水稲の生育状況は第6表のとおりである。

第6表 生育調査結果(2年度)

試験地	試験区名	調査時期		幼形期		登熟中期					
		項目	草丈	茎数	草丈	茎数	稈長	穂長	穂数		
桑名	慣行区	cm	32.9	本	17.4	cm	77.6	cm	17.2	本	25.7
	客土区	cm	29.3	本	13.1	cm	58.4	cm	29.1	本	26.9
	床締め+客土10cm区	cm	30.1	本	19.5	cm	56.7	cm	32.1	本	29.0
	床締め+客土15cm区	cm	28.7	本	13.9	cm	56.4	cm	27.9	本	26.3
西員弁	慣行区	cm	44.1	本	28.7	cm	76.2	cm	23.0	本	20.9
	反転耕区	cm	44.9	本	27.5	cm	77.0	cm	22.4	本	19.9
	床締め+客土15cm区	cm	43.4	本	30.9	cm	75.4	cm	28.1	本	27.5
	床締め+客土20cm区	cm	42.1	本	32.3	cm	75.8	cm	29.7	本	27.9

桑名試験地において、草丈は、幼穂形成期まで慣行区が最も優れていたが、登熟中期の稈長については、各客土処理区の方が長かった。茎数は、床締め+客土10cm区が生育全期間を通じて最も多かったが、客土区、床締め+客土15cm区は初期生育が慣行区に比較して劣り、幼穂形成期までやや少なかった。しかし、登熟中期には多く、有効茎歩合が高かった。穂長は、慣行区が最も長く、

穂数の最も多かった床締め+客土10cm区が最も短かった。

西員弁試験地において、草丈は、床締め+客土両区が慣行区に比較して幼穂形成期まで短く劣ったが、登熟中期にはほとんど同じであった。反転耕区は慣行区とほぼ同じであった。茎数は、床締め+客土両区が初期から慣行区に比較して多く、常に優れており、有効茎数も十分

あった。反転耕区は、慣行区と同程度であった。穂長に 差がなかった。
 ついては、慣行区が最も短かった他は、各処理区とも 収量については第7表に示したとおりである。

第7表 収量調査結果 (kg/a)

試験地	年度 試験区名	初年度		2年度		3年度		累年平均				
		項目	玄米重	わら重	玄米重	わら重	玄米重	わら重	玄米		わら	
									重量	指数	重量	指数
桑名	慣行区	57.6	58.5	50.2	48.0	45.8	49.1	51.2	100	51.9	100	
	客土区	59.7	74.7	53.0	54.2	48.6	54.6	53.8	105	61.2	117	
	床締め+客土10cm区	61.6	68.2	52.7	51.0	44.3	49.6	52.9	103	56.3	108	
	床締め+客土15cm区	64.0	74.4	55.1	56.7	37.7	47.1	52.3	101	59.4	114	
西員弁	慣行区	39.9	59.9	48.0	67.4	48.7	71.8	45.5	100	66.4	100	
	反転耕区	50.5	65.1	46.3	64.2	46.0	66.7	47.6	106	65.3	99	
	床締め+客土15cm区	44.8	59.2	57.2	73.0	45.6	69.9	49.2	108	67.4	101	
	床締め+客土20cm区	40.6	52.2	53.6	75.9	44.1	69.4	46.1	102	65.8	99	

桑名試験地の玄米重は、初年度及び2年度において、客土区、床締め+客土両区が慣行区と比較して多く、中でも床締め+客土15cm区は最も優れていた。3年度は、客土区が最も多く、床締め+客土両区は慣行区に比較して少なかった。わら重については、玄米重と同様な傾向を示した。3年間の累年平均結果では、玄米重は客土区及び床締め+客土10cm区が慣行区に対しやや増収となった。わら重については、処理各区とも慣行区よりかなり収量が高く、過繁茂の傾向を示した。

西員弁試験地の玄米重は、初年度、反転耕区、床締め+客土両区が慣行区に比較して優れていた。2年目は、床締め+客土両区が慣行区に比較して優れていたが、反転耕区は劣った。3年目は、慣行区が最も多く、次に反転耕区、床締め+客土15cm区、床締め+客土20cm区の順位で、いずれの処理区も劣った。わら重については、玄米重とほぼ同じ傾向であった。3年間の累年平均結果は、玄米重で、反転耕区、床締め+客土両区が8~2%の増収になった。わら重は各区とも差はなかった。

3. 床締め層のち密度の変化と根群分布

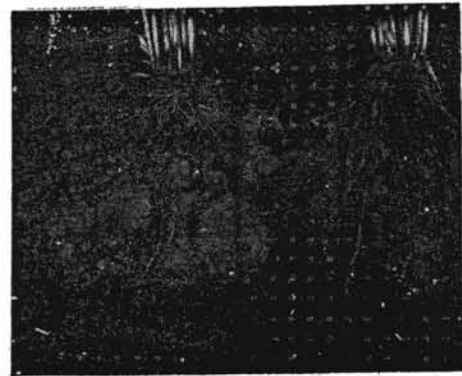
水稻根が汚染土層へ侵入するのを阻止する目的で、試験田の造成時に客土の下部10cmと反転耕の下層を山中式硬度計で20mmまで圧密した。床締め層のち密度の変化は第8表のとおりで、湛水時及び収穫時の土壌が湿潤な状態では、桑名試験地は17~18mm、西員弁試験地は18~19mmであった。収穫後乾いた状態での測定値は22mmであった。

第8表 床締め層のち密度変化 単位：mm

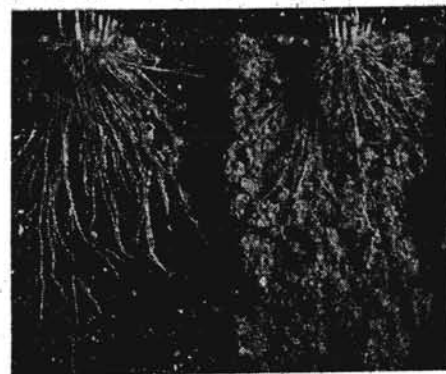
試験地	初年度			2年度	3年度	
	造成時	分けつ盛期	収穫期	収穫期	収穫期	収穫期10日
桑名	20	17	-	17~18	18	-
西員弁	20	18	19	18	19	22

収穫後、モノリス根群調査法により水稻根群の分布調査を行なった結果、桑名試験地の客土区、床締め+客土10cm区および西員弁試験地の反転耕区は、初年度から汚

染土層への水稻根の侵入が認められた。両試験地の床締め+客土15cm区と西員弁試験地の床締め+客土20cm区的水稻根は、2年度になって床締め層を貫き汚染土層への侵入が認められた。



第4図 水稻根の分布 (3年度床締め+客土15区)



第5図 水稻根の分布 (3年度床締め+客土20区)

根群調査時の観察調査によれば、床締め土層は、年々土層の構造化が進行していることが認められ、3年度の調査では、塊状構造が形成されていた。又、同時に行なった断面調査の結果、客土下の汚染土層の土色は、2.5GY 3/1の青暗色を呈し、還元状態であることが認められた。

4. 植物体中カドミウム濃度

1) 玄米中カドミウム濃度

客土、反転耕等の処理が玄米中カドミウム濃度に及ぼす影響は第9表のとおりである。

第9表 玄米中カドミウム濃度

試験地	試験区名	カドミウム濃度(μm)			累年平均指数
		初年度	2年度	3年度	
桑名	慣行区	0.36	0.06	0.18	100
	客土区	0.01	0.01	0.05	16
	床締め+客土10cm区	0.02	0.01	0.05	17
	床締め+客土15cm区	0.02	0.00	0.03	8
西員弁	慣行区	0.22	0.48	0.31	100
	反転耕区	0.06	0.06	0.11	25
	床締め+客土15cm区	0.03	0.02	0.07	14
	床締め+客土20cm区	0.03	0.01	0.04	10

桑名試験地では、初年度、慣行区が0.36μmで最も高く、床締め+客土両区が0.02μm、客土区が0.01μmであった。2年目は慣行区が0.06μmで低かったが、客土区、床締め+客土10cm区は0.01μmでさらに低く、床締め+客土15cm区はほとんど含まれていなかった。3年目は、慣行区が0.18μm、客土区、床締め+客土10cm区が0.05μm、床締め+客土15cm区が0.03μmであり、初年度、2年目に比較して各客土処理区の玄米中カドミウム濃度はやや高くなる傾向が認められた。3年間の累年平均指数については、慣行区(指数:100) > 床締め+客土10cm区(17) ≧ 客土区(16) > 床締め+客土15

cm区(8)の順位で、いずれも各客土処理区が慣行区より低く、順位は客土層の厚い区ほど低くなる傾向が認められた。

西員弁試験地についても初年度は、慣行区が0.22μmで最も高く、次に反転耕区で0.06μm、床締め+客土両区が最も低く0.03μmであった。2年目は、慣行区が0.48μmで高く、次に反転耕区の0.06μm、床締め+客土15cm区の0.02μmで、床締め+客土20cm区が最も低く0.01μmであった。3年目は、慣行区が0.31μm、反転耕区が0.11μm、床締め+客土15cm区が0.07μm、床締め+客土20cm区が最も低く0.04μmであったが、初年度、2年度に比較して各処理区のカドミウム濃度が若干高くなる傾向が認められた。3年間の累年平均指数については、慣行区(指数:100) > 反転耕区(25) > 床締め+客土15cm区(14) > 床締め+客土20cm区(10)の順位で、桑名試験地同様いずれも慣行区より低く、順位も客土層の厚いほど低かった。

2) 水稻体部位別カドミウム濃度

玄米中カドミウム濃度を除く、水稻体部位別カドミウム濃度は第10表のとおりである。

第10表 水稻体部位別カドミウム濃度

試験地	試験区名	もみから			茎葉			株			根			合計(玄米含む)		
		初年度	2年度	3年度	初年度	2年度	3年度	初年度	2年度	3年度	初年度	2年度	3年度	初年度	2年度	3年度
桑名	慣行区	0.05	0.09	0.09	0.57	0.14	0.52	1.13	0.36	1.39	3.78	3.11	3.13	5.89	4.00	5.31
	客土区	0.08	0.09	0.01	0.10	0.04	0.07	0.17	0.19	0.20	0.30	0.88	0.50	0.66	1.21	0.83
	床締め+客土10cm区	0.05	0.06	0.04	0.09	0.05	0.08	0.22	0.14	0.14	0.23	0.63	0.42	0.61	0.89	0.73
	床締め+客土15cm区	0.08	0.10	0.02	0.15	0.05	0.05	0.07	0.08	0.10	0.28	0.52	0.51	0.60	0.75	0.71
西員弁	慣行区	0.10	0.35	0.30	1.17	2.85	1.63	6.15	8.13	6.62	10.32	29.50	9.2	17.96	41.31	18.06
	反転耕区	0.08	0.18	0.05	0.38	0.23	0.48	0.32	0.67	1.07	1.70	3.00	2.9	2.54	4.14	4.61
	床締め+客土15cm区	0.10	0.17	0.07	0.19	0.11	0.33	0.09	0.24	0.65	0.44	0.60	0.7	0.85	1.14	1.82
	床締め+客土20cm区	0.08	0.18	0.06	0.20	0.07	0.16	0.08	0.17	0.32	0.43	0.52	0.5	0.82	0.95	1.08

桑名試験地の茎葉、株及び根のカドミウム濃度は、慣行区が最も高く、客土区、床締め+客土両区の区間差は、年度、部位ごとにはばらつき、一貫した傾向がみられなかった。もみからについては、3年間では処理による傾向が明らかでなかった。しかし、玄米を含めた各部位のカドミウム濃度の合計値は、3年間とも慣行区 > 客土区 > 床締め+客土10cm区 > 床締め+客土15cm区の順位で、客土の厚い区ほど低くなった。部位別カドミウム濃度については、慣行区が、根 > 株 > 茎葉 > 玄米 > もみからの順位であり、客土各區は、根 > 株 > 茎葉 > もみから > 玄米の順位であった。

西員弁試験地の各部位のカドミウム濃度は、もみからでは、慣行区が最も高く、反転耕区及び床締め+客土両区間には差がなかった。茎葉、株及び根については、3年とも慣行区 > 反転耕区 > 床締め+客土15cm区 > 床締め+客土20cm区の順位であった。又、玄米を含む各部位の

カドミウム濃度の合計値も、茎葉、株、根と同じ傾向で、床締め+客土区では客土の厚さを増すほど低くなった。部位別カドミウム濃度は、桑名試験地と同じ傾向を示し、慣行区と各処理区の玄米ともみからの順位が異なった。

5. 跡地土壌の化学性

1) 作土

3年目の水稻跡地土壌の作土の化学性は第11表のとおりである。

第11表 跡地土壌の分析(作土)

試験地	試験区名	pH		T-C (%)	T-N (%)	Inclub NH ₄ -H (mg)	CEC (me)	Ex-Base(me)		Truoog-P ₂ O ₅ (mg)	Soluble SiO ₂ (mg)	0.1N-Hcl Soluble (ppm)	
		H ₂ O	Kcl					CaO	MgO			Cd	Zn
桑名	慣行区	5.8	5.1	1.60	0.13	10.2	8.4	4.02	0.54	15.4	9.3	0.84	13.7
	客土区	7.1	6.3	0.75	0.08	5.3	14.2	9.72	1.79	14.8	35.2	0.37	6.2
	床締め+客土10cm区	6.6	5.8	0.51	0.07	2.9	14.1	7.85	1.49	10.8	25.1	0.33	3.1
	床締め+客土15cm区	6.8	6.2	0.53	0.07	3.4	14.5	9.16	1.58	14.0	30.6	0.31	3.9
西員弁	慣行区	6.2	5.4	1.96	0.18	12.0	15.0	7.70	0.53	27.9	20.8	0.59	33.3
	反転耕区	6.7	5.9	0.92	0.09	6.7	11.7	6.35	0.69	17.0	12.6	0.51	5.9
	床締め+客土15cm区	5.9	4.9	0.98	0.09	3.0	14.6	3.91	1.29	5.1	15.7	0.17	2.6
	床締め+客土20cm区	6.0	4.9	0.75	0.08	2.9	13.4	4.15	1.39	5.7	14.4	0.16	2.4

桑名、西員弁両試験地では、土壌改良資材の施用により、土壌pHが上昇し、塩基類、珪酸、有効態磷酸、窒素及び炭素が増加した。桑名試験地の各客土処理区は、慣行区と比較して、土壌pH、置換性塩基、珪酸含量が高くなった。有効態磷酸はほぼ同量であった。しかし、全窒素、全炭素量は少なく慣行区の約1/2であった。又、乾土効果は、慣行区が10.2mgあるのに対し、各客土処理区は2.9mg~5.3mgで約1/2~1/3程度であった。西員弁試験地の反転耕区、床締め+客土両区は、慣行区に比較して置換性苦土だけが高くなったが、全窒素、全炭素、乾土効果、有効態磷酸、置換性石灰のいずれも少なかった。特に床締め+客土両区の有効態磷酸、置換性石灰及び乾土効果が小さく、有効態磷酸については植物栄養の面からやや不足みであった。

2) 作土のカドミウム濃度

3年間の跡地土壌のカドミウム濃度は第12表のとおりである。

第12表 跡地土壌のカドミウム

試験地	試験区名	0.1N-Hcl Soluble (ppm)		
		初年度	2年度	3年度
桑名	慣行区	0.77	0.90	0.84
	客土区	0.20	0.32	0.37
	床締め+客土10cm区	0.10	0.20	0.33
	床締め+客土15cm区	0.12	0.19	0.31
西員弁	慣行区	2.37	2.58	2.59
	反転耕区	0.34	0.40	0.51
	床締め+客土15cm区	0.08	0.12	0.17
	床締め+客土20cm区	0.07	0.09	0.16

桑名、西員弁両試験地の客土区、床締め+客土区、反転耕区のカドミウムは、いずれも慣行区より低く、客土の厚い方がさらに低い傾向がある。慣行区は、年によりサンプリング誤差による変動がみられるが、客土、反転耕等の各処理区は、年々増加する傾向が認められた。

3) 床締め客土層及び反転耕下層

水稻栽培跡の床締め客土層、及び反転耕下層の化学性について第13表に示した。

第13表 床締め客土層および反転耕下層土の化学性

試験地	試験区名	pH		CEC (me)	Ex-Base (me)		塩基飽和度(%)	Truoog-P ₂ O ₅ (mg)	0.1N-Hcl Soluble (ppm)		
		H ₂ O	Kcl		CaO	MgO			Cd	Cu	Zn
桑名	床締め+客土10cm区	6.0	5.1	12.9	4.82	1.38	4.1	1.5	0.19	1.4	1.9
	床締め+客土15cm区	5.8	4.7	12.4	5.22	1.24	5.21	1.6	0.17	1.3	1.3
西員弁	反転耕区	6.8	6.2	15.5	9.37	0.84	6.59	3.80	2.63	10.1	31.9
	床締め+客土15cm区	5.8	4.5	12.9	3.49	1.06	3.53	3.9	0.16	1.9	1.7
	床締め+客土20cm区	5.4	4.3	12.7	2.30	0.71	2.37	2.5	0.15	1.8	1.7

桑名、西員弁両試験地の床締め客土層は、第5表で示した客土の化学性に比べ、塩基置換容量を除く各項目とも数値が高くなった。特に、pH、置換性塩基の増加は顕著であった。重金属類については、もとの約2倍になっていた。上乘せ客土の厚さによる違いは、桑名試験地では認められなかったが、西員弁試験地で認められ、上乘せ客土量の少ない床締め+客土15cm区の方が、pH、置換性塩基、有効態磷酸がやや高くなった。重金属については差がなかった。

考察

カドミウムによる汚染田を対象に、異なる汚染地域内

のは場2ヶ所を選定し、床締め客土法を中心に2,3の土木的手法によるカドミウム吸収軽減対策の効果について検討し、抜本的な対策を講ずるための資料を得るため試験を行なった。なお、対策処理区については、土壌改良を行なうとともに、幼穂形成期以降節水による間断かん水を行なった。

1) 生育収量について

第6表に2年目の生育結果をとり上げたのは、初年目の全窒素改良目標値が高すぎ過繁茂であったことと、3年目は、2年目までの土壌改良効果をみるため窒素資材を控えたためである。客土、反転耕等および土壌改良、水管理が生育収量に及ぼす影響は、初期生育が慣行に比

較して遅れ、草丈が短かった。しかし、幼穂形成期以降は、主として土壤改良資材中の窒素の肥効によって回復し、生育後期には慣行の生育を上廻った。茎数についても肥効の発現が遅れたためか、秋優り型の生育傾向を示し有効茎数が多く確保された。収量については、初年目、2年目の玄米重は、各客土処理区、反転耕区で増収した。これは、土壤改良資材の施用効果による有効茎の確保、及び登熟歩合の向上によるものと考えられる。しかし、土壤改良資材の残効をみるため窒素資材を控えた3年目の玄米収量は、ほとんどの区で減収になった。このことは2年間の土壤改良では既存水田まで熟田化が進まず、3年以上の土壤改良が必要であることを意味する。細野ら⁹⁾は土地基盤整備田の切土部への三要素増施、熔燐、珪酸苦土石灰、堆肥による土壤改良を行ない玄米収量が経年的に増加することと、盛土と切土の土壤処理間の収量差が3年位で解消されるとし、上田ら³⁾は、4種の土壤について、基盤整備跡地の水稻生育および収量の経年変化を調べ、耕種肥培対策の導入によってほぼ3~4年で解消すると報告しているが、これは本試験のように全く地力に欠乏する山土を作土化した場合と、基盤整備跡地とは当初の地力に差があるためではなかろうか。

しかし、以上の結果から、客土および反転耕等を行なった場合でも適切な土壤改良、肥培管理、水管理を十分行なうことにより、慣行と同程度又はそれ以上の生育収量を得られることが明らかになった。

2) 植物体中カドミウム濃度と吸収軽減効果について

水稻体を玄米、もみがら、茎葉、株、根に分画しそれぞれのカドミウム濃度を測定した。

玄米、茎葉、株、根のカドミウム濃度は、両試験地の慣行区が最も高く、各処理間の順位は西員弁試験地では、反転耕区>床締め+客土15cm区>床締め+客土20cm区であった。桑名試験地は、年度、部位により若干ばらつきがあり、処理による一定の傾向は認められなかった。もみがらもほぼ同様な傾向にあった。水稻体が吸収した各部位のカドミウム濃度の合計値は、桑名試験地は、慣行区>客土区>床締め+客土10cm区>床締め+客土15cm区の順位で、西員弁試験地は、慣行区>反転耕区>床締め+客土15cm区>床締め+客土20cm区で、いずれも床締め+客土区の上乗せ客土量の厚さが増すほど低くなった。すなわち、反転耕、床締め+客土処理により水稻体が吸収するカドミウム量は軽減され、その効果は、床締め+客土処理、客土、反転耕の順に高く、客土量が増すほど顕著であった。渋谷⁵⁾は、46年度全国土壤汚染防止対策現地改善試験成績をとりまとめているが、それによると反転耕、排土客土の処理の土層が深くなるほど効果が

高いと報告している。又、館川ら⁷⁾は、客土の効果について客土20~30cmは65~68%減少、客土10cmは30%減少の吸収抑制効果が得られたとし、客土量の多いほど効果が高いと報告している。

水稻のカドミウム吸収移行に影響がある土壤条件には、水管理等による酸化還元電位の変化と土壤pHがある。上田ら⁴⁾は、カドミウムの吸収は、水管理に大きく左右され、玄米中のカドミウム濃度は、間断かんがい>早期落水>常時湛水の順であると報告している。又、柳沢¹⁴⁾は、水管理がカドミウムの吸収におよぼす影響についてポット試験と現地試験を実施し検討しているが、その結果によれば、ポット試験と現地試験では若干結果は異なっているが、幼穂形成期後の排水による影響が顕著であると、特に出穂期~乳熟期の落水が最もカドミウム吸収に影響があると報告している。本試験では、客土、反転耕等の吸収軽減効果を明らかにするため、幼穂形成期以降の節水栽培を実施した。土壤中のカドミウムは、酸化状態では大部分が交換性陽イオンとして、一部が磷酸塩、炭酸塩および水酸化物などの難溶性化合物として存在し、還元状態では硫化物の生成が土壤中の平衡状態を支配すると考えられている²⁾。飯村²⁾は、土壤の酸化還元電位とカドミウム溶出割合を測定した結果、Eh6が-150~200mVに低下すると溶出量は急激に低下するが、それまではあまり顕著な低下は認められないとしている。しかし、落水と玄米中カドミウム含量についてポット試験を実施し検討している中で、Eh6の推移を測定しているが、それによれば、200mVまで低下すれば玄米中カドミウム含量は減少している。皆川ら¹²⁾は、硫酸カドミウム添加土壤のEhの変化と溶出カドミウム量について添加直後とインキュベート10日目の溶出量を比較検討しているが、その中で250mV以上になると溶出量は増加し、それ以下で減少している。さらに200mV以下になると急減すると報告している。桑名、西員弁両試験地のEh6の推移は、各年度によって異なっているが、幼穂形成期以降の節水栽培によりほとんどの区で上昇する傾向が認められ、桑名試験地の2,3年目の慣行区、西員弁試験地の床締め+客土20cm区以外は、出穂期以降250mV以上の値が得られ、カドミウム吸収には好条件であった。

土壤溶液pHと土壤溶液中カドミウム溶出率との関係は、pHの上昇につれ水酸化物の生成、Ca等による共沈現象などにより溶出率が減少し、pH7~8では急激に低下することが報告されている⁵⁾。又、土壤pHとIN酢酸アンモン浸出カドミウム溶出量の関係は、pHの上昇によって溶出量が低下し、pH6~7から急激に溶出量が低下すると報告されている²⁾。両試験地の跡地土壤のpH(Kcl)

は、4.9～6.3であり、カドミウムを不溶化し吸収を著しく抑制する程度ではないと考えられる。

酸化還元電位の低下と、pHの上昇が汚染土からのカドミウム吸収に直接影響があるのは慣行区である。客土各区、反転耕区については、非汚染土に分布する水稻根量と、汚染土に侵入した根の分布量の比率、及び非汚染土で覆われた汚染土中カドミウムの溶解性の難易が問題である。収穫後の水稻根群分布調査では、床締め層とその下層の旧作土層への根の侵入の有無及び程度について調査した。初年度から汚染土層へ侵入が認められた区は、桑名試験地の客土区、床締め+客土10cm区及び西員弁試験地の反転耕区である。床締め+客土区の上乗せ客土が15cm以上の区では、2年目になって床締め層を貫き旧作土層に到達した。しかし、汚染土侵入根量は極めて少なかった。客土、反転耕等各区の旧作土層は、青暗色を呈し、還元状態にあり、カドミウムは、難溶性の硫化物を形成していると推察された。以上のことから、客土、反転耕等による水稻根の汚染土への侵入抑制効果に付加され、植物体のカドミウム吸収軽減効果に有効に働いたものと考えられる。

水稻体部位別カドミウム濃度は、慣行区が根>株>茎葉>玄米>もみがらの順位であるのに、各処理区は、根>株>茎葉>もみがら>玄米の順位になり、玄米ともみがらの順位が入れかわった。しかし、いずれも下位部に高く、上位部に行くほど低く移行が少ない。この傾向は、館川ら^{6,8)}が報告している根>葉鞘>稈>葉身>下位枯葉≒枝梗>玄米の順位とほぼ同じである。又、柳沢¹⁴⁾は、根に最も高くわら>枝梗>もみがら>玄米の順に濃度が低下すると報告している。

部位別吸収比率は、玄米と茎葉が約10倍、玄米と根が約100倍あるといわれているが¹⁵⁾、試験の結果は、玄米と茎葉の比率が、桑名試験地で1.4～10倍で平均4.4倍、西員弁試験地は4.0～7.7倍で平均5.9倍となり、試験地により若干異なるが、約5倍であった。又、玄米と根の比率は、桑名試験地が8.4～100倍、平均36倍であり、西員弁試験地が10～52倍で平均31倍であった。両試験地の平均は34倍でいずれも低かった。

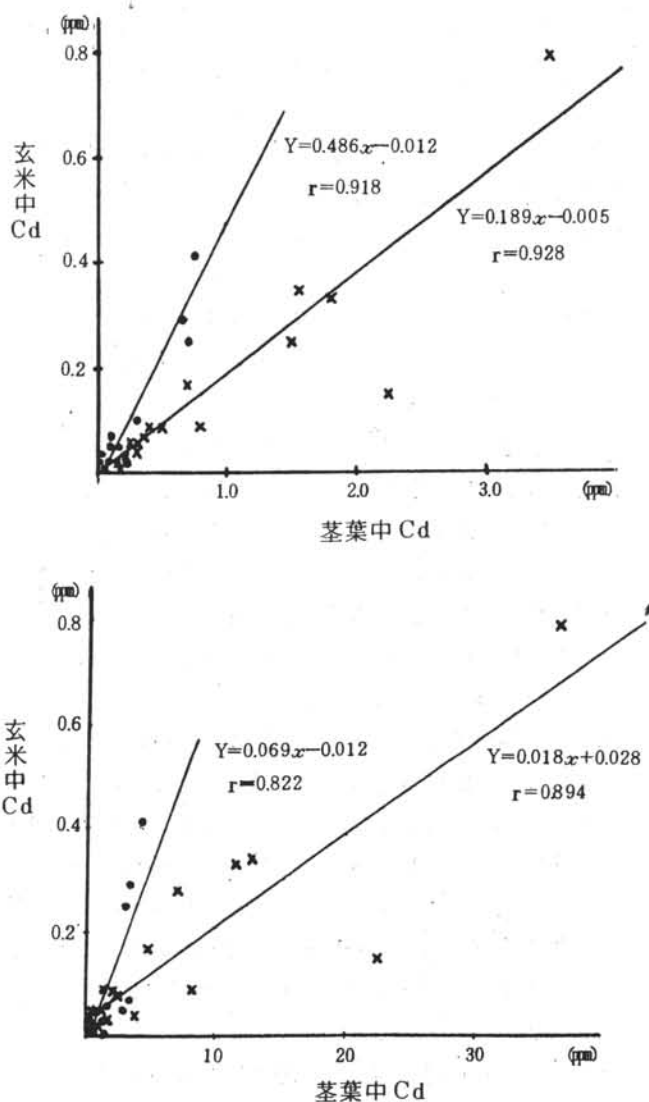
第14表は水稻部位別間のカドミウム濃度の相関関係をみたものである。もみがらを除く各部位の関係は、相関係数が0.8以上の高い正の相関関係が認められた。玄米と茎葉、玄米と根をさらに試験地別に相関係数を求めると、より高い相関係数が得られた。この関係は第6図のとおりで、回帰式の傾斜角度はいずれも桑名試験地が大きく、根及び茎葉から玄米への移行量が試験地によって異なることが認められた。この原因については、栽培期間の土壌条件の変化、気象条件の違いが複雑に関与して

いるものと推察される。

第14表 水稻体部位間の相関係数

	玄米	もみがら	茎葉	株	根
玄米		0.629 ***	0.872 ***	0.808 ***	0.823 ***
もみがら			0.648 ***	0.705 ***	0.711 ***
茎葉				0.949 ***	0.959 ***
株					0.894 ***
根					

ただし、玄米-茎葉 桑名 0.918 ***、西員弁 0.928 ***
 玄米-根 " 0.822 ***、" 0.894 ***



第6図 玄米中Cdと茎葉・根のCdの関係

3) 客土層の変化

森ら¹³⁾は、作物根の伸長は山中式硬度計における指標目盛でほぼ20mm以上になると阻止されるとしている。水稻根の汚染土層への阻止を目的とした床締め層の密度は、造成時に20mmに圧密した。だが灌水時や収穫時の湿った状態では、18～19mmで床締め層を根が貫入した。床締め層は、休閑期における土層の乾湿の繰り返し等によ

って土壌構造の生成，発達が認められた。客土層のカドミウム濃度が年々増加の傾向にあり，3年後の床締め層は搬入前の約2倍に増え，上乗せ客土層は，桑名試験地で約4倍になっている。これは水稻の根，株が年々土壌に残存し，分解による付加と，踏査のため汚染土の人為的搬入が主な要因として考えられる。

摘 要

桑名市内に散在するホーロー，エナメル工場から排出される廃水が農業用水に混入することにより，この用水を利用している地域の水田土壌がカドミウムにより汚染していることが明らかになった¹⁰⁾。又，員弁郡藤原町に所在するセメント工場周辺の水田土壌がカドミウム等により汚染されていることが判明する^{1,10,11)}に及び，これら両地域では土壌の汚染を通じて人の健康を損うおそれのある農産物が生産される危惧が生じた。従って，両地域を対象に対策試験を実施した。汚染の除去の最も確実な方法は，汚染された土壌を非汚染土壌と入れ変えることであるが，排土の処分が困難であることから今回は床締め客土による方法を中心に，2,3の土木的方法によるカドミウム吸収軽減対策について検討した。

1. 客土及び反転耕等の土壌改良，肥培管理，水管理を徹底することにより，生育収量は，慣行と同程度，又は，それ以上に増加することが明らかになった。
2. 客土，反転耕，床締め客土等の工法により，玄米中カドミウム濃度は，天然賦存量程度に減少し，床締め+客土20cm区>床締め+客土15cm区>客土区>反転耕区の順に吸収軽減効果が高かった。
3. 水稻体の各部位（根，株，茎葉，もみがら，玄米）のカドミウム濃度は，慣行区が最も高くなり，各部位のカドミウム濃度合計値は，桑名試験地で，慣行区>客土区>床締め+客土10cm区>床締め+客土15cm区の順位となった。又，西員弁試験地では，慣行区>反転耕区>床締め+客土15cm区>床締め+客土20cm区の順位であり，いずれも床締め客土区の上乗せ客土の厚さが増すほど低くなった。
4. 床締め層の造成は，水稻根の旧作土への侵入を抑制する効果があるが，休閑期における土壌構造の発達によって経年的にその効果は徐々に低減するものと考えた。しかし，床締め土層下の旧作土は還元状態下にあるため，カドミウムの吸収は極めて小さいものと考えた。
5. 床締め層のち密度は，湿っている状態では20mmに達しなかった。又，3年間，湿っている状態ではほぼ一定であった。

この試験を実施するにあたり，桑名農業改良普及所，

桑名市市役所農林水産課，北勢町役場商工課の格別の協力，御援助を得た，ここに厚く謝意を表する。

引用文献

- 1) 板野義太郎，河田昌東，依田欣哉（1974）：科学，44，（8），487～497
- 2) 飯村康二（1973）：近代農業における土壌肥料の研究，第4集，日本土肥学会編，養賢堂46～52
- 3) 上田弘美；有田昌雄（1967）：基盤整備に伴う土壌環境条件の変化に関する研究（第11報），中国農業研究36，20～22
- 4) 上田弘美，田中彰，西尾一雄（1973）：水稻に対する公害に関する研究（第5報），鳥取県農業試験場研究報告第13号
- 5) 渋谷政夫（1973）：近代農業における土壌肥料の研究，第4集，日本土肥学会編，養賢堂53～64
- 6) 館川洋，立谷寿雄，横木信行（1972）：福島県における農作物および土壌の重金属汚染の実態（第1報），福島県農業試験場研究報告10，1～32
- 7) 館川洋，立谷寿雄，菅野忠教（1972）：日本土肥学会講演要旨集，第18集，11～20
- 8) 館川洋（1973）：近代農業における土壌肥料の研究，第4集，日本土肥学会編，養賢堂79～86
- 9) 細野博，北島昂（1967）：基盤整備直後における水田土壌の地力の変化と改良対策，農及園，42，（12），1786～1790
- 10) 三重県農技センター（1976）：土壌汚染防止対策調査関係成績書
- 11) 三重県（1974）：西員弁地域におけるカドミウム汚染調査結果について
- 12) 皆川勝，鎌田賢一：水田土壌中におけるカドミウムの挙動（第1報），北海道立農試集報27，65～76
- 13) 森哲郎，小川和夫（1967）：土壌の物理的要因と作物の生育に関する研究（第1報），東海近畿農業試験場研究報告16，77～104
- 14) 柳沢（1973）：水稻のCd吸収に及ぼす環境条件について，富山県農業試験場化学課
- 15) 東海近畿農試環境部土肥研究室（1972）昭和46年度土壌肥料ブロック会議討議資料（環境保全5）