

水稻栽培における各種堆肥の化学肥料代替効果と 土壌及び浸透水への影響

篠田 正彦・森 孝夫・安西 徹郎

キーワード：水稻、豚ふん堆肥、汚泥堆肥、生ごみ堆肥、代替効果

I 緒 言

各種有機質資材の農業利用は、窒素や炭素など資源リサイクルの重要な要素として注目され、実際の農業現場、特に畑作において広く行われている。最近では、家畜ふんなど農業由来の資材のみならず、各種の汚泥や食品残渣などの利用も進められている。しかし、水稻栽培においては、稲わらや米ぬかなどの副生産物以外の有機質資材の利用は少なく、特に千葉県では、湿田及び半湿田が87.2% (八槇ら、2000) を占めており、未熟な有機質資材の施用は水稻に還元害を発生させる可能性があるため、ほとんど行われていない (安西ら、2004)。また、家畜ふん堆肥や汚泥堆肥などが含有する高濃度の重金属や各種資材の硝酸性窒素濃度によっては、土壌や地下水などの環境汚染が懸念される。

そこで、千葉県を代表する3種類の水田土壌を充填したライシメーターを用い、豚ふん堆肥、汚泥堆肥及び生ごみ堆肥を化学肥料の基肥窒素代替資材として施用し、水稻の生育及び収量に対する影響並びに土壌及び浸透水に及ぼす影響について明らかにしたので報告する。

本試験を実施するにあたり、千葉県農業総合研究センター生産環境部土壌環境研究室の諸氏には試験の遂行に当たり多大な御協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

II 材料及び方法

1. 試験期間及び試験区の設定

試験は1998年～2003年に実施した。試験に用いたライシメーターは、千葉県農業総合研究センター内に1984年に設置された面積4 m² (2 m×2 m)、深さ1.2mの有底のコンクリート製であり、県内の主要水田土壌である海成沖積砂土、河成沖積壤土、第三系粘土 (以下それぞれ砂土、

壤土、粘土と記す) の3種類の土壌が充填されている。なお、本試験に入る前に、それまでの試験の影響を除くため、1997年12月に各土壌ごとに作土部 (深さ約15cm) を搬出し、自然乾燥させた。これを翌年3月に破砕混合し、均一になるように再度搬入した。

1998年に、各土壌ごとに豚ふん堆肥区、汚泥堆肥区、生ごみ堆肥区及び対照区 (化学肥料単用区) の4処理区を設置した。

2. 供試堆肥の性状

(1) 豚ふん堆肥

東庄町にある堆肥生産利用組合の縦型コンポスト製造機で作られた堆肥である。豚ふんに通気と加温処理を施し、発酵槽で2週間処理したものであり、臭気はほとんど無く、袋詰めされて取り扱い易い特徴を持っている。

(2) 汚泥堆肥

多古町にある汚泥発酵肥料生産業者の堆肥である。食品・し尿・下水等の汚泥を通気しながら混合し、堆肥舎で切り返しを行いながら6週間堆積させたものである。本堆肥も臭気はほとんど無く、袋詰めされている。

(3) 生ごみ堆肥

千葉県庁地階にある堆肥製造機で、千葉県総務部管財課の管理で作られた堆肥である。県庁の食堂から出る生ごみを主原料として、発酵槽で攪拌、加温、発酵処理を1週間ほど加えて製造されたものである。袋詰めされていて、水分は少ないが油分が多くべとつく。なお、2000年は本堆肥と稲わらを重量比5:1で約4か月間混合堆積させて製造した2次発酵処理物 (以下、生ごみ2次処理堆肥) を施用した。

施用した堆肥の成分及び重金属の全投入量は第1表のとおりである。

3. 耕種概要

水稻品種は「コシヒカリ」を供試し、3月30日～4月3日に播種、4月17日～24日に代かき及び施肥を行い、4月22日～25日に3本の稚苗を1株とし、m²当たり25株

第1表 堆肥の成分(現物中)と堆肥由来重金属の全投入量

供試堆肥	水分 (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Cd (ppm)	投入年数 (年)	全投入量 (mg/m ²)		
											Cu	Zn	Cd
豚ふん堆肥	29.3	3.0	8.1	2.8	6.8	2.35	290	889	0.72	5	660~858	2020~2633	1.6~2.1
汚泥堆肥	52.1	1.6	3.7	0.3	2.0	0.39	95	866	0.74	5	655~839	6117~7885	5.2~6.6
生ごみ堆肥	7.3	3.2	0.7	0.8	1.3	0.17	7	21	0.04	2	10~13	27~37	0.05~0.06
生ごみ2次処理堆肥	57.2	1.9	0.6	0.9	1.2	0.14	9	28	0.09	1	9~12	29~37	0.09~0.12

注1) 各成分値は、豚ふん堆肥及び汚泥堆肥は5か年、生ごみ堆肥は2か年の平均値。生ごみ2次処理堆肥は2000年の値。

2) 全投入量は、各成分ごとに最小値は河成沖積壤土、最大値は海成沖積砂土への投入量。

の栽植密度で手植えた。水管理は常時湛水を基本とし、6月中旬～7月初旬に地下水位を地表面下5cmにする中干しを行った。雑草及び病害虫防除は慣行に従った。また、刈り取り後の稲わらはすべての試験区から搬出した。

4. 供試堆肥及び化学肥料の施用

豚ふん堆肥は堆肥中全窒素量の30%、汚泥堆肥及び生ごみ堆肥は同じく20%が無機化すると推定し、その推定無機化窒素量が対照区の基肥窒素量と同等になる量を施用した。なお、1999年は汚泥堆肥の窒素無機化量を24%と推定したが、水稻生育が不良だったため2000年～2002年は17%として施用量を増やした。生ごみ堆肥は1999年まで施用し、2000年は上述の生ごみ2次処理堆肥を施用し、2001年～2003年は堆肥を施用しなかった。各堆肥施用にともなうリン酸及び加里施用量の対照区との不足分は、それぞれ過磷酸石灰及び塩化加里を施用して補った。各堆肥の施用は、1998年は移植1週間前としたが、初期生育の抑制がみられたため、翌1999年は移植1か月前とした。2000年～2002年は移植1～3週間前とした。また、2003年は各堆肥は施用せず、対照区と同様の施肥を行い、堆肥の5年連用後の残効をみた。

対照区は基肥として、尿素系高度化成肥料をm²当たり窒素4.0g(ただし、1998年の砂土では窒素1.0gを塩安で増施、1999年の砂土では窒素2.0g、粘土では1.0gそれぞれ硫安で増施、2000年～2003年は砂土及び粘土で窒素1.0gを硫安で増施)、リン酸11.0g、加里6.0gを移植2日前の代かき時に施用した。穂肥は、出穂の約2週間前に各試験区ともm²当たり窒素及び加里それぞれ2.0gをNK化成で施用(2000年～2003年の砂土のみ出穂3週間前に窒素0.4gを硫安で増施)した。

5. 水稻、土壌及び浸透水の調査

水稻の生育調査は周辺部を除いた24株で行い、収量及び収量構成要素の調査は同じく周辺部を除いた36株の中で行った。

堆肥の施用にともなう土壌の酸化還元電位(以下Ehと記す)の変化をみるために、1998年の移植後18日に、壤

土の各試験区において白金電極を深さ7.5cmに4本ずつ設置し、約1か月間測定した。

土壌は、1998年の試験開始前(移植2週間前)と各年の水稻作栽培後の9月～10月に作土部(深さ0～15cm)から採取し、分析に供した。

土壌浸透水は、ライシメーター最下部からの立ち上げ管よりオーバーフローした浸透水を70ℓのポリ容器に蓄え、大量の降雨後満杯となった容器から1998年は3回、1999年～2000年は各10回採水した。これを直径0.45μmのメンブランフィルターで濾過後、陰イオンはイオンクロマトグラフ法、重金属は原子吸光法で測定した。採水後にポリ容器は空にした。

なお、各年次の土壌の化学性、土壌中及び玄米中の重金属は、常法(農林水産省農蚕園芸局農産課、1979)によって分析した。

III 結 果

1. 水稻の生育、収量及び収量構成要素

各試験区の最高分けつ期～幼穂形成期にあたる移植後60日～68日の草丈と茎数、成熟期の稈長と穂数、登熟歩合、m²当たり粒数及び精玄米重を試験前期(1998年～1999年の2年間の平均値、以下前期と記す)、試験後期(2000年～2002年の3年間の平均値、生ごみ堆肥区は生ごみ2次処理堆肥を施用した2000年の数値、以下後期と記す)、平均(1998年～2002年の5年間の平均)及び2003年(堆肥無施用)について、対照区については実数を、堆肥施用区については各期間・各土壌ごとの対照区の数値を100としたときの指数で第2表に示した。

(1) 豚ふん堆肥区

豚ふん堆肥区の草丈及び茎数は、前期では草丈は対照区と同程度であり、茎数は粘土を除いて対照区より劣った。後期では草丈は対照区と同等以上となり、茎数は砂土で多く、壤土及び粘土でやや少なかった。

稈長は、前期では砂土で対照区に比べて短かったが、後期では対照区と同程度となった。

穂数は、前期では砂土で対照区に比べて少なく、後期で

第2表 堆肥連用栽培における水稻の生育、収量及び収量構成要素（前期、後期、平均及び2003年）

試験区	土 壤	草 丈(対照区:cm)				茎 数(対照区:本/m ²)				稈 長(対照区:cm)				穂 数(対照区:本/m ²)			
		前期	後期	平均	2003年	前期	後期	平均	2003年	前期	後期	平均	2003年	前期	後期	平均	2003年
対照区	海成沖積砂土	62.2	54.2	57.4	60.7	500	516	509	415	82.1	79.6	80.6	76.0	335	325	329	291
	河成沖積壤土	69.8	63.5	66.0	68.9	469	554	520	414	91.3	92.8	92.2	77.9	386	395	392	286
	第三系粘土	65.5	62.4	63.6	63.4	465	581	535	428	80.9	82.6	81.9	77.7	356	375	367	286
豚ぶん堆肥区	海成沖積砂土	100	111	106	(103)	83	109	99	(100)	92	102	98	(102)	85	114	103	(100)
	河成沖積壤土	102	102	102	(105)	93	94	94	(114)	101	103	102	(114)	98	105	102	(125)
	第三系粘土	98	101	100	(106)	103	93	96	(121)	102	103	103	(106)	101	99	100	(111)
汚泥堆肥区	海成沖積砂土	88	99	94	(103)	62	82	74	(110)	89	100	95	(102)	78	96	89	(103)
	河成沖積壤土	94	95	95	(104)	81	81	81	(131)	96	99	98	(112)	87	93	90	(114)
	第三系粘土	91	94	93	(112)	74	81	78	(117)	95	100	98	(112)	83	97	92	(114)
生ごみ堆肥区	海成沖積砂土	97	{64.6;117}		(106)	74	{557;120}		(91)	101	{87.3;110}		(103)	89	{438;130}		(97)
	河成沖積壤土	98	{68.9;105}		(106)	80	{596;105}		(115)	106	{102.9;109}		(118)	90	{457;102}		(122)
	第三系粘土	86	{66.1;102}		(112)	75	{596;101}		(105)	105	{96.3;111}		(104)	86	{464;106}		(102)

試験区	土 壤	登熟歩合(対照区:%)				m ² 当たり初数(対照区:千粒)				精玄米重(対照区:g/m ²)			
		前期	後期	平均	2003年	前期	後期	平均	2003年	前期	後期	平均	2003年
対照区	海成沖積砂土	89.2	79.3	84.3	87.8	24.2	22.8	23.5	17.2	412	404	407	364
	河成沖積壤土	84.0	67.3	75.6	88.0	28.2	34.5	31.3	22.3	569	524	542	443
	第三系粘土	87.4	82.2	84.8	88.7	24.5	24.4	24.4	18.5	454	404	424	294
豚ぶん堆肥区	海成沖積砂土	94	96	95	(102)	76	104	90	(121)	98	133	118	(114)
	河成沖積壤土	100	86	94	(96)	112	99	105	(152)	93	99	96	(127)
	第三系粘土	100	99	100	(102)	109	119	114	(130)	108	111	110	(148)
汚泥堆肥区	海成沖積砂土	98	98	98	(101)	74	90	82	(119)	87	110	101	(109)
	河成沖積壤土	89	110	98	(93)	102	86	93	(124)	91	100	96	(135)
	第三系粘土	103	100	101	(103)	87	101	94	(131)	93	112	103	(137)
生ごみ堆肥区	海成沖積砂土	89	{77.5;99}		(103)	105	{35.5;162}		(117)	113	{597;138}		(102)
	河成沖積壤土	92	{49.6;75}		(97)	95	{40.9;104}		(147)	80	{505;81}		(116)
	第三系粘土	95	{51.6;70}		(101)	91	{39.4;128}		(120)	93	{531;103}		(143)

注1) 数値は、対照区は実数、堆肥施用区は各期間、各土壌ごとの対照区の数値を100としたときの指数で示した。
 2) 前期は1998-1999年の2年間、後期は2000-2002年の3年間、平均は1998-2002年の5年間の数値の平均値。ただし、登熟歩合とm²当たり初数については、2001年のデータなしのため、後期は2年間、平均は4年間の平均値で示した。
 3) 生ごみ堆肥区()内は、生ごみ2次処理堆肥を施用した2000年の[実数;指数]。4) ()内は堆肥無施用。
 5) 草丈・茎数の調査日は、前期が平均で移植後68日、後期が移植後60日、平均が移植後63日、2003年は移植後67日。

は対照区に比べて同等以上となった。

登熟歩合は、前期では砂土で、後期では砂土及び壤土で対照区に比べて低かった。

m²当たり初数は、前期では砂土で対照区に比べて少なかったが、後期では対照区と同等以上となった。

精玄米重（以下収量）は、前期の壤土を除いて対照区に比べて同等以上であり、特に後期の砂土及び粘土では増収した。

2003年は、水稻生育は対照区に比べて同等以上となり、登熟歩合は壤土で対照区より低かったものの、m²当たり初数は対照区より多くなり、各土壌とも増収した。

(2) 汚泥堆肥区

汚泥堆肥区の草丈及び茎数は、前期では対照区より劣った。後期では依然として対照区に比べて草丈が短く、茎数が少なかったが、前期と同等以上に生育は良好となった。

稈長は、前期では対照区に比べて短かったが、後期では対照区と同程度となった。

穂数は、前期では対照区に比べて少なかった。後期では前期と同様対照区に比べて少なかったが、その程度は小さくなった。

登熟歩合は、壤土で対照区に比べて前期では低く後期

では高くなったが、概ね対照区と同程度であった。

m²当たり初数は、前期では壤土を除いて対照区より少なくなり、後期では粘土を除いて対照区より少なくなった。

収量は、前期では対照区に比べて減収したが、後期では対照区に比べて同等以上となり、砂土及び粘土では増収した。

2003年は、豚ぶん堆肥区と同様に、水稻生育は対照区に比べて同等以上となり、各土壌とも増収した。

(3) 生ごみ堆肥区

生ごみ堆肥区の草丈及び茎数は、前期では汚泥堆肥区と同様に対照区より短く少なかった。特に茎数は各土壌とも対照区の80%以下であった。試験初年の1998年に堆肥の分解にともなう土壌の還元化による初期生育の抑制がみられたため、翌1999年は移植1か月前に堆肥を施用したが、同様に還元害の症状を呈し、枯死寸前の株もみられた。生ごみ2次処理堆肥の施用では、初期生育の抑制はみられず、対照区に比べて草丈、茎数ともに優った。

稈長は、前期では対照区と同程度以上であった。生ごみ2次処理堆肥の施用では、対照区より9~11%伸長し、特に壤土で著しく倒伏した。

穂数は、前期では対照区に比べて少なかった。生ごみ

2次処理堆肥の施用では、対照区の2~30%多くなった。

登熟歩合は、前期では対照区に比べて低くなった。生ごみ2次処理堆肥の施用では、壤土及び粘土で約50%となり、対照区に比べて25~30%低くなった。

m²当たり粒数は、前期では対照区に比べて砂土で多く、壤土及び粘土で少なかった。生ごみ2次処理堆肥の施用では対照区に比べて多くなり、特に壤土では40,000粒を超えた。

収量は、前期では対照区に比べて砂土では増収、壤土及び粘土では減収した。生ごみ2次処理堆肥の施用では、対照区に比べて砂土及び粘土では増収、壤土では減収した。

2003年は、水稻生育は砂土の基数を除いて対照区に比べて同等以上となり、登熟歩合は対照区と同程度であったが、m²当たり粒数は対照区より多くなり、収量も対照区に比べて同等以上となった。

2. 施用堆肥別の収量推移

各施用堆肥ごとの収量（精玄米重）の推移を、各作・各土壌ごとにそれぞれの対照区の収量を100とした収量指数で表し、第1図~第3図に示した。

豚ぶん堆肥区では、各土壌とも収量は施用初年から対照区と同等であり、砂土及び粘土では3年目から増収した（第1図）。

汚泥堆肥区では、各土壌とも収量は施用2年目までは同等以下であるが、粘土で3年目から、砂土で4年目から増収する傾向にあった（第2図）。

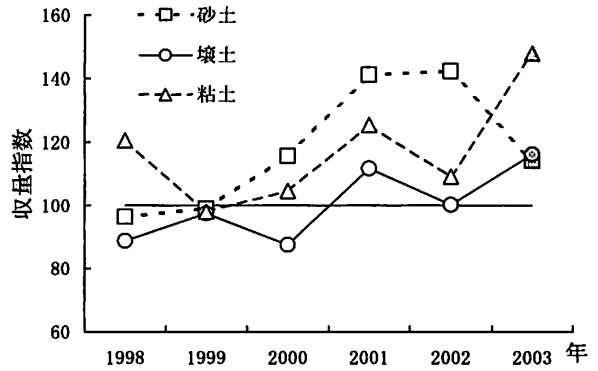
生ごみ堆肥区では、収量は2年目までは不安定であった。生ごみ2次処理堆肥を施用した3年目も同傾向にあった（第3図）。

3. 土壌の化学性的変化

1998年の壤土における土壌Ehの変化を第3表に示した。土壌Ehは各試験区とも継続的に低下した。堆肥施用区の土壌Ehは対照区と比べて低下の程度が大きく、還元的な状態となった。堆肥区間では、生ごみ堆肥区>豚ぶん堆肥区>汚泥堆肥区の順に低下程度が大きく、特に生ごみ堆肥区では移植後19日（5月11日）には既に-200mV以下となり、田面にはメタンと推定される気泡が発生した。

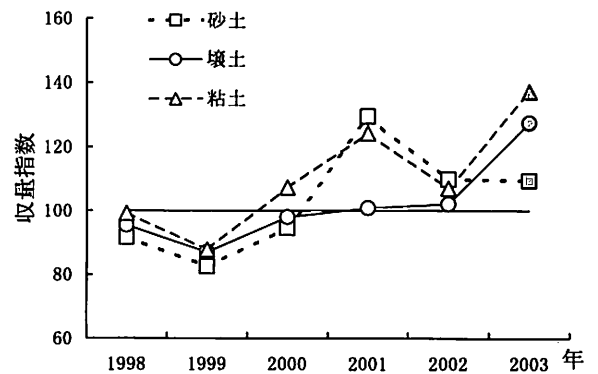
試験開始前、1999年及び2002年の栽培後土壌の全炭素、可給態窒素及び可給態リン酸含量について第4表に示した。

全炭素含量は、1999年の壤土における汚泥堆肥区を除いて堆肥施用区が対照区に比べてやや高くなった。可給態窒素含量は、各年とも堆肥施用区が対照区に比べてや



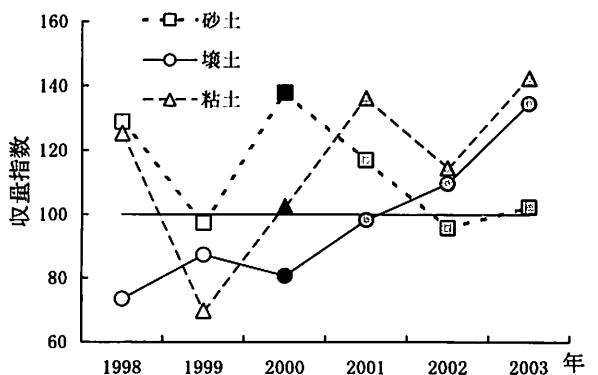
第1図 豚ぶん堆肥区の収量推移

注1) 各作・各土壌ごとに対照区の収量（精玄米重）を100としたときの指数。
2) 薄塗りは有機質資材無施用。



第2図 汚泥堆肥区の収量推移

注1) 各作・各土壌ごとに対照区の収量（精玄米重）を100としたときの指数。
2) 薄塗りは有機質資材無施用。



第3図 生ごみ堆肥区の収量推移

注1) 各作・各土壌ごとに対照区の収量（精玄米重）を100としたときの指数。
2) 黒塗りは生ごみ2次処理堆肥を施用。薄塗りは有機質資材無施用。

第3表 河成沖積壤土における酸化還元電位 (Eh) の変化 (1998年)

試験区	Eh (mV)					
	5/11	5/13	5/15	5/20	5/22	6/1
対照区	266	233	228	209	185	50
豚ぶん堆肥区	106	50	22	-23	-44	-93
汚泥堆肥区	217	166	156	212	89	-9
生ごみ堆肥区	-228	-218	-141	-135	-244	-249

注) 深さ7.5cm、各試験区とも3~4地点の平均値。同時に地温を測定し補正した。

第4表 試験開始前と栽培後土壌の化学性（開始前、1999年、2002年）

試験区	土 壤	全炭素 (%)			可給態窒素 (mg/100g)			可給態リン酸 (mg/100g)		
		開始前	1999年	2002年	開始前	1999年	2002年	開始前	1999年	2002年
対照区	海成沖積砂土	0.49	0.37	0.31	3.6	1.8	2.9	2.9	1.8	5.1
	河成沖積壤土	1.98	1.83	1.62	16.6	11.8	9.4	1.7	1.7	6.7
	第三系粘土	0.98	1.14	1.00	6.9	7.4	5.4	0.9	1.5	5.7
豚ふん堆肥区	海成沖積砂土	0.50	0.49	0.35	4.0	5.3	2.9	2.8	4.1	10.9
	河成沖積壤土	2.20	1.90	1.89	16.9	13.3	11.4	6.0	4.7	15.2
	第三系粘土	0.99	1.35	1.25	8.9	10.7	7.2	1.1	7.7	17.9
汚泥堆肥区	海成沖積砂土	0.43	0.46	0.42	5.4	7.3	4.9	3.1	3.0	7.6
	河成沖積壤土	2.12	1.57	1.96	18.0	13.5	9.4	1.6	3.7	11.5
	第三系粘土	1.00	1.42	1.78	8.9	9.8	9.9	1.1	5.5	13.8
生ごみ堆肥区	海成沖積砂土	0.54	0.66	(0.37)	3.2	4.8	(3.2)	2.9	0.7	(3.9)
	河成沖積壤土	2.21	1.89	(1.76)	18.5	20.5	(12.3)	6.0	2.3	(7.0)
	第三系粘土	1.13	1.51	(1.21)	13.2	15.5	(8.4)	1.1	3.5	(4.5)

注) 作土部(0-15cm)。可給態窒素は30℃4週間静置培養時の無機態窒素生成量。表中の()内は有機質資材無施用。

第5表 試験開始前と栽培後土壌の重金属含量（開始前、2002年）

試験区	土 壤	可溶性Cu (ppm)		全Cu (ppm)		全Zn (ppm)		全Cd (ppm)	
		開始前	2002年	開始前	2002年	開始前	2002年	開始前	2002年
対照区	海成沖積砂土	0.70	0.97	5.6	5.9	50.8	57.2	0.09	0.10
	河成沖積壤土	5.78	5.93	41.4	40.0	93.1	83.8	0.26	0.17
	第三系粘土	2.53	3.88	52.9	53.3	110.6	112.1	0.13	0.16
豚ふん堆肥区	海成沖積砂土	0.67	2.31	5.6	8.9	53.3	65.2	0.09	0.09
	河成沖積壤土	5.33	7.26	40.2	46.4	89.0	103.7	0.23	0.25
	第三系粘土	3.48	6.03	52.2	60.0	119.6	133.9	0.13	0.16
汚泥堆肥区	海成沖積砂土	0.77	1.46	5.4	7.7	44.8	77.2	0.09	0.09
	河成沖積壤土	6.93	6.46	42.9	44.6	83.9	128.6	0.25	0.23
	第三系粘土	3.49	4.94	52.9	59.4	109.3	186.1	0.12	0.18
生ごみ堆肥区	海成沖積砂土	0.74	(0.91)	5.9	(5.2)	56.2	(46.4)	0.08	(0.09)
	河成沖積壤土	5.81	(6.15)	40.6	(40.0)	82.0	(84.7)	0.21	(0.17)
	第三系粘土	3.44	(4.45)	52.6	(53.6)	113.9	(114.3)	0.17	(0.17)

注1) 作土部(0-15cm)。可溶性Cuは0.1N塩酸可溶Cu。全重金属は三混酸分解後の塩酸可溶重金属。

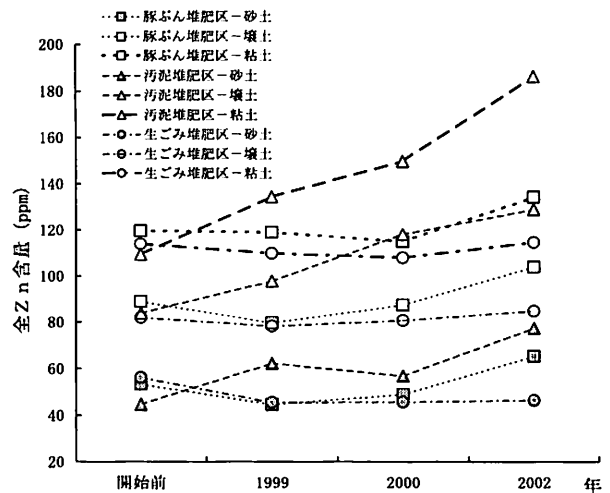
2) 表中の()内は有機質資材無施用。

や高くなった。可給態リン酸含量は、豚ふん堆肥区及び汚泥堆肥区で対照区に比べて高くなった。データには示さなかったが、pH、EC（電気伝導度）、CEC（陽イオン交換容量）には、堆肥の種類の違いや連用による影響は明瞭には認められなかった。

試験開始前と堆肥連用最終年である2002年の栽培後土壌の可溶性Cu、全Cu、全Zn及び全Cd含量について第5表に示した。

可溶性Cu含量は、豚ふん堆肥区及び砂土と粘土の汚泥堆肥区で増加した。全Cu含量は、豚ふん堆肥区及び汚泥堆肥区で蓄積が認められた。全Zn含量は、豚ふん堆肥区及び汚泥堆肥区で蓄積が明瞭に認められた。全Cd含量は、堆肥の連用による増加は認められなかった。

堆肥施用区における全Zn含量の推移を第4図に示した。各土壌とも、生ごみ堆肥区ではほとんど変化がみられないが、豚ふん堆肥区では緩やかな上昇、汚泥堆肥区では砂土を除いて著しい上昇が認められた。



第4図 堆肥施用区における全Zn含量の推移

注) 生ゴミ堆肥区は2000年は生ごみ2次処理堆肥を施用、2002年は無施用。

4. 玄米中のCd濃度

堆肥連用によってCdの投入量が多い、豚ふん堆肥区及び汚泥堆肥区における玄米中のCd濃度を第6表に示した。

豚ふん堆肥区では0.01~0.28ppm、汚泥堆肥区では0.04~0.36ppmであり、土壌の違いや連用による影響は明らかではなく、年次による変動のほうが大きかった。

IV 考 察

第6表 玄米中のCd濃度 (1999-2002年)

試験区	土 壤	玄米中 C d (ppm)			
		1999年	2000年	2001年	2002年
豚ふん堆肥区	海成沖積砂土	0.07	0.28	0.01	0.06
	河成沖積壤土	0.12	0.25	0.00	0.12
	第三系粘土	0.05	0.13	0.10	0.07
汚泥堆肥区	海成沖積砂土	0.11	0.29	0.10	0.15
	河成沖積壤土	0.04	0.32	0.07	0.36
	第三系粘土	0.13	0.18	0.04	0.25

注) 三混酸分解後、塩酸可溶MIBK抽出。

5. 土壌浸透水の化学性

1998年~2000年に採水した土壌浸透水の硝酸イオン濃度とZn濃度について、各年とも高い濃度が検出された日を中心に第7表に示した。

硝酸イオンは、有機質資材施用前の1998年4月13日の粘土の生ごみ堆肥区で28ppmと高かった。1999年には、有機質資材施用から約1か月後の4月20日に、壤土の豚ふん堆肥区及び汚泥堆肥区で約50ppmと高かったが、施肥前の対照区でも同程度の硝酸イオン濃度であった。同年10月や翌2000年の1月、11月など水稻の非栽培期間であっても、壤土の豚ふん堆肥区及び生ごみ堆肥区では40ppm以上の高い硝酸イオンが検出された。

その他の陰イオンでは、塩素イオンと硫酸イオンが恒常的に検出された (データ略)。

土壌浸透水中のZn濃度は極めて微量であり、施用堆肥や土壌の違い及び連用による影響はみられなかった。同時に測定したCu、Cd、Pb濃度もほとんどが検出限界以下であった (データ略)。

1. 施用堆肥の基肥代替効果

豚ふん堆肥の窒素無機化率を30%と推定し、基肥として5年間連用したところ、2年目までは初期生育に若干の抑制がみられたが、概ね化学肥料栽培と比べて同等の生育を示し、90%程度以上の収量が確保され、3年目からは増収傾向を示した。また、豚ふん堆肥の施用時期は移植1か月前~1週間前までと幅があったが、これによる初期生育に対する影響は小さく、3年日以降はみられなかった。西川 (1999) は、移植4日目の豚ふん堆肥400kg/10a (全窒素3%)の基肥施用は、水稻の活着を遅らせるが、移植14日前施用では問題なく、これに穂肥として有機質粒状肥料を出穂15日前に窒素成分で3kg/10a施用すると、化学肥料栽培並みの収量や玄米外観品質が得られると報告している。この時の基肥としての豚ふん堆肥の無機化率は、化学肥料栽培が基肥窒素3kg/10a施用であるため、25%と推定される。また、鹿児島農試 (1999) では、水稻栽培における豚ふん堆肥の化学肥料に対する窒素肥効率は、連用2年目から30%前後で安定するとの報告がある。本試験の結果もこれらの報告とほぼ一致していた。

汚泥堆肥は、窒素無機化率を豚ふん堆肥より低い20~24%と推定して施用したところ、1、2年目は初期生育が化学肥料栽培と比べて劣り、穂数減となり10%程度減収した。そこで、推定無機化率を17%に下げて施肥量を増加したところ、3年目からは生育も回復傾向となり、収量も化学肥料栽培と同等以上となった。ただし、この場合の全窒素含有率が1.6%の汚泥堆肥では、砂土での施肥量は1.5t/10aを超えることになり、後述するように多量のZnが施用されることとなる。

第7表 土壌浸透水中の硝酸イオン及びZn濃度 (1998-2000年)

試験区	土 壤	硝酸イオン (ppm)									Z n (ppm)										
		1998年			1999年			2000年			1998年			1999年			2000年				
		4/13	6/17	3/23	4/20	5/13	10/29	1/21	4/21	5/19	11/13	4/13	6/17	3/23	4/20	5/13	10/29	1/21	4/21	5/19	11/13
対照区	海成沖積砂土	10.8	33.3	22.0	33.4	23.6	-	-	-	3.3	-	<0.03	<0.03	0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
	河成沖積壤土	16.2	-	-	48.3	22.4	9.1	17.6	5.9	4.0	16.9	<0.03	<0.03	0.04	<0.03	0	<0.03	<0.03	0.17	0.04	<0.03
	第三系粘土	3.8	-	-	5.4	5.1	1.6	0.4	-	-	8.7	0	0	<0.03	<0.03	0.12	0.03	<0.03	<0.03	0.03	<0.03
豚ふん堆肥区	海成沖積砂土	-	-	-	-	-	-	4.1	-	-	<0.03	<0.03	0	<0.03	0.08	0.06	<0.03	0.03	0.13	<0.03	
	河成沖積壤土	8.4	-	8.4	53.2	48.0	44.6	76.2	10.5	11.8	37.6	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.03	0.03	<0.03	<0.03	0.03	<0.03
	第三系粘土	1.7	-	-	6.2	12.1	5.3	0.5	-	-	11.6	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.12	0.05	0.06	<0.03	0.04	0.04
汚泥堆肥区	海成沖積砂土	-	-	5.2	25.3	29.5	1.2	-	-	-	4.0	<0.03	<0.03	0	<0.03	0.14	0.05	0.05	<0.03	0.14	<0.03
	河成沖積壤土	-	-	-	49.4	37.7	9.0	10.3	4.1	19.8	20.3	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
	第三系粘土	3.5	-	-	20.1	12.7	4.8	0.6	9.0	21.4	4.2	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.06	<0.03	0.05	0.04	0.12	0.03
生ごみ堆肥区	海成沖積砂土	17.6	5.2	5.2	40.9	24.6	-	-	3.4	3.7	<0.03	<0.03	0	<0.03	0.25	<0.03	<0.03	<0.03	0.07	<0.03	
	河成沖積壤土	-	-	10.4	36.6	17.1	43.1	43.4	11.4	38.2	46.9	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.07	<0.03	<0.03	<0.03	0.05	<0.03
	第三系粘土	27.7	-	-	7.5	0.3	10.2	1.5	4.0	3.3	16.3	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.05	0.04	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03

注) 1998年は3回、1999年・2000年は各10回採水した中で高い濃度が検出された日を中心にして示した。「-」は検出限界以下。

生ごみ堆肥は、推定無機化率20%として2年間施用したが、移植1週間前の施用では、急激な分解により土壌が還元状態となり、水稲の生育抑制をもたらした。そのため、施用時期を移植1か月前としたが、それでも水稲苗に還元害を及ぼし、砂土を除いて減収した。この原因は、生ごみの約1週間の高速堆肥化処理では有機物の分解発酵が不十分で、生ごみ処理物はまだ未熟な状態にあると考えられた。そこで、稲わらと混合して堆積発酵処理を行い、生ごみ2次処理堆肥を製造した。本堆肥を施用した3年目は、初期生育の抑制はなく、化学肥料栽培を上回る生育となった。その結果、成熟期には m^2 当たりの穂数及び籾数が過剰となり、特に壤土では倒伏して減収した(第2表)。これは、窒素の無機化率が予想した20%よりも高かったためと考えられる。

なお、本試験での対照区の生育量は、特に砂土及び粘土で一般圃場より少ない傾向であった。これは、稲わらの全量搬出が一因と考えられるが、ここでの堆肥の基肥代替効果を一般圃場に利用する場合には、この点に留意して、生育診断等を行って生育過剰にならないような施用量に止める必要がある。

2. 施用堆肥の土壌別効果

堆肥の連用が水稲の収量に及ぼす効果を土壌別にみると、砂土>粘土>壤土の順に大きかった(第1図、第2図)。これは、土壌中の全炭素及び可給態窒素含量の少ない順と一致する(第4表)。つまり、堆肥の施用効果は、元来肥沃度の高い壤土より、肥沃度の低い砂土や粘土で大きかった。このことは、施用有機物の分解は全炭素含量の少ない土壌で早いこと(安西・松本、1979)によるものと考えられ、土壌別の稲わら連用効果に関する報告(篠田ら、2001)と一致する。

3. 施用堆肥の土壌及び玄米への影響

各堆肥を3~5年連用したところ、土壌の有機成分(特に炭素)はわずかながら蓄積が認められた。堆肥を施用せずに残効調査とした、生ごみ堆肥区の4年目以降及び豚ふん堆肥区と汚泥堆肥区の6年目は、それらの蓄積の効果が増収につながったと考えられる。ただし、刈り取り後の稲わらはすべての試験区から搬出しており、対照区では徐々にではあるが全炭素及び可給態窒素含量が減少した。

水田土壌に投入された重金属の中で、Cuは作土への蓄積は認められたが、投入量は $150mg/m^2$ /年程度で(第1表)、多いものでも壤土の豚ふん堆肥区の $7.3ppm$ であり、土壌汚染防止法の基準(可溶性Cu： $125ppm$)と比べてはるかに低く、すぐに問題になるものではなかった。ま

た、Cdは投入量も極めてわずかであり、豚ふん堆肥区や汚泥堆肥区での土壌への蓄積も明らかでなく、玄米中のCd濃度も土壌汚染防止法の基準(玄米中Cd： $1.0ppm$)を下回った。

しかし、Znは前記の2元素とは異なった。豚ふん堆肥区及び汚泥堆肥区におけるZn投入量は、それぞれ $500mg/m^2$ /年及び $1500mg/m^2$ /年であり(第1表)、明らかに作土部への蓄積が認められた(第5表)。砂土、壤土及び粘土の仮比重をそれぞれ1.5、1.0及び1.0(千葉県農業試験場、1996)と仮定すると、作土部(0-15cm)の土量は m^2 当たり $225kg$ 、 $150kg$ 及び $150kg$ となり、投入されたZnが全て作土部に蓄積すると仮定すると、豚ふん堆肥区では砂土で $2.2ppm$ /年、壤土及び粘土で $3.3ppm$ /年、汚泥堆肥区では砂土で $6.7ppm$ /年、壤土及び粘土で $10.0ppm$ /年蓄積すると推定される。実際、5年間の豚ふん堆肥区及び汚泥堆肥区的全Zn含量の作土部での増加量は、それぞれ砂土で $11.9ppm$ 及び $32.4ppm$ 、壤土で $14.7ppm$ 及び $44.7ppm$ 、粘土で $14.3ppm$ 及び $76.8ppm$ であり、推定した蓄積量に近い。水田に汚泥肥料を連用すると、Zn、Cu、Cd等の重金属は作土層に蓄積し、特にZnで蓄積程度が高いという森岡ら(2002)の報告があるが、本試験の結果もこれと一致している。また、畑土壌でも同様な報告が真行寺ら(1986)によってなされている。土壌汚染の未然防止に係る環境庁の管理基準(土壌中全Zn濃度： $120ppm$ 、昭和59年)と比べると、汚泥堆肥区では粘土で2年目、壤土で4年目で管理基準を超えており、連用には施用量など十分な検討が必要である。

4. 施用堆肥の土壌浸透水への影響

土壌浸透水の硝酸イオン濃度は、堆肥施用後及び施肥・代かき後に高まると推測したが、この傾向は明らかでなく、堆肥施用前、施肥・代かき前及び冬季の非栽培期間でも $30\sim 70ppm$ の数値が検出された。これは、ライシメーターの構造から、降雨により下部から浸透水がオーバーフローするが、常に一定の水は下部に貯まっており、硝酸性窒素が年間を通じて溶出することによるためと考えられる。水質基準項目の硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素は $10mg/l$ 以下である。硝酸イオンとしては約 $44mg/l$ 以下となるが、測定値でこの値を大きく上回ったのは、2000年1月の壤土の豚ふん堆肥区($76ppm$)での1回のみであり、翌2000年度の最高値は $47ppm$ であった。硝酸性窒素は、水田の還元層を通過する際に脱窒作用を受けて浄化されることが明らかにされており(小川、2000)、本試験でも溶出した硝酸性窒素は脱窒作用で放出され、土壌浸透水での濃度は抑えられたと考えられる。

同様に、土壌浸透水のZn、Cu、Cd、Pb等の重金属濃度への堆肥連用からの影響は認められなかった。よって、地下水等への環境に対する影響は極めて小さいと考えられた。ただし、土壌浸透水の調査は堆肥施用開始3年間の結果であり、それ以上の連用に対する影響については、さらに検討を加える必要がある。

5. 各堆肥の効果的施用法

豚ふん堆肥は、全窒素含量の30%が化学肥料の基肥窒素量に相当する量を移植1週間～1か月前に施用すると、水稲は若干の初期生育の抑制を受けるが、概ね化学肥料栽培並みの生育と収量が得られ、3～5年の連用では増収傾向を示した。しかし、作土への重金属、特にZnの蓄積は顕著であり、環境庁の管理基準によって制限を受ける。千葉県ではこれを受けて、昭和63年に「下水・し尿汚泥の農用地施用に係る当面の留意事項について」として施用基準を作成している。これに照らし合わせて制限量を考えてみる。在原ら(1992)によれば、千葉県内水田土壌の全Zn含量は土性別に異なっており、粘質で平均60ppm、最大90ppm、壤質で平均60ppm、最大105ppm、砂質で平均30ppm、最大70ppmとされている。豚ふん堆肥の現物での全窒素含量を2%、全Zn含量を600ppm(千葉県農業化学検査所、1993)とすると、化学肥料の基肥窒素量3kg/10aの地域では、施用量は500kg/年、Zn投入量は300mg/年となり、前述の仮比重を用いると砂土では1.3ppm/年、壤土と粘土では2.0ppm/年蓄積すると計算できる。これらから安全性を見込んだ制限量は、現物で500kg/10a/年、連用5～10年が限度と考えられる。ただし、豚ふん堆肥中のZnは、主として飼料由来であるため、豚ふん飼料中のZn含量の低減化が図れば、より広範囲に利用できる資材となる。

汚泥堆肥は、全窒素含量の17%が化学肥料の基肥窒素量に相当する量を連用すると、化学肥料栽培並みの生育と収量が得られた。しかし、このためには、年1t以上の施用が必要となり全Zn濃度の管理基準をすぐに超えてしまう。「下水・し尿汚泥等の土壌別、地域別施用基準」(千葉県、1990)の付記③にあるように、汚泥肥料は水田では使用しないのが妥当と考えられる。

生ごみの堆肥化は、資源リサイクルとごみの減量化が求められている中で近年特に注目され、各家庭でのコンポスト化、市町村単位での収集堆肥化、食品・流通業界では堆肥化から農業現場での利用までの研究が行われている(生ごみリサイクル全国ネットワーク運営委員会、1999)。本試験で施用した生ごみ堆肥は、水分と臭気を除いてハンドリングを良好にした1次処理物であり、施用後は急激な還元障害を起こしたことから未熟有機物と

考えられ、そのままでの施用は困難と判断された。同様な報告が東京都(東京都農業試験場、2001)や神奈川県(神奈川県農業総合研究所、2001)から出されており、東京都庁の生ごみ堆肥は家畜ふん堆肥やチップ化した剪定枝と混合して2次処理を施している。筆者らは、生ごみ堆肥の2次処理に水分資材が必要と考え、野菜残渣と混合して堆肥化を試みたが、発酵処理機の中でべとつくだけでよく混じらず、温風処理を加えたところ処理機内の壁面に焦げ付いてしまった。そこで稲わらと水を加えながら混合して堆積したところ、良好な2次発酵処理物が得られた。これらのことから、生ごみ堆肥の混合には、稲わらなど混合堆積した時にある程度の孔隙ができる資材を用いるのが適当と考えられる。施用効果では、水稲の初期生育抑制はみられず、窒素無機化率は20%以上と考えられた。生ごみ2次処理堆肥は重金属をほとんど含まず、環境に対して極めて安全な堆肥であるが、原料の生ごみは油分が多く含まれる(神奈川県農業総合研究所、2002)ため、施用法や施用限界量については、新たな検討が必要である。

V 摘 要

3種類の県内主要水田土壌を充填したライシメーターに3種類の堆肥(豚ふん堆肥、汚泥堆肥、生ごみ堆肥)を基肥窒素代替資材として連用して、水稲の生育収量、土壌及び浸透水への影響を明らかにした。

1. 豚ふん堆肥は、移植前1週間～1か月の施用によって、概ね化学肥料栽培並みの生育と収量をもたらす。連用では増収も期待でき、窒素無機化率は約30%と考えられる。ただし、Znの土壌蓄積がみられることから、連用は5～10年に止める必要がある。

2. 汚泥堆肥の施用は、化学肥料栽培並みの生育と収量をもたらすが、Znが土壌に蓄積し、数年の連用で土壌管理基準を超えることから、避けるべきと考えられる。

3. 生ごみ堆肥は、移植1か月前の施用でも移植苗に還元害を及ぼし、そのままでの施用は困難であった。施用の際は、稲わらとの混合堆積など2次発酵処理が必要である。

4. 施用堆肥の水稲収量への連用効果は、砂土>粘土>壤土の順に大きく、土壌肥沃度の低い順に高かった。

引 用 文 献

安西徹郎・松本直治(1979). 水田土壌における有機物の施用について 第2報 乾湿田処理土壌における堆肥の分解過程. 土肥要旨集, 25: 109.

- 安西徹郎・八槨 敦・篠田正彦・鈴木節子 (2004). 千葉県耕地土壌の実態と変化 (1) 土壌機能実態モニタリング調査を中心として. 土肥要旨集, 50: 132.
- 在原克之・八槨 敦・渡辺春朗 (1992). 千葉県の耕地土壌における全亜鉛含量の実態. 千葉農試研報, 33: 123-132.
- 千葉県 (1990). 農林公害ハンドブック (改訂版). 128. 千葉県農林部農業改良課.
- 千葉県農業化学検査所 (1993). 汚泥肥料及び堆肥中の肥料成分・重金属等の含有量. 9-14.
- 千葉県農業試験場 (1996). 平成7年度地力保全調査試験成績書 (その2). 37-38.
- 鹿児島県農業試験場 (1999). 水稲に対する家畜ふん堆肥の連用と窒素肥効. 九州沖縄農業研究センター. 平成11年度研究成果情報.
- 神奈川県農業総合研究所 (2001). 平成12年度試験研究成績書. 281-286.
- 神奈川県農業総合研究所 (2002). 平成13年度試験研究成績書. 165-174.
- 森岡幹夫・中川文彦・熊谷勝巳 (2002). 汚泥肥料長期連用水田における重金属の土壌蓄積. 山形県農業試験場. 平成14年度研究成果情報.
- 生ごみリサイクル全国ネットワーク運営委員会 (1999). 第4回生ごみリサイクル全国交流集会資料集. 1-180.
- 西川康之 (1999). 減農薬を組み入れた家畜ふんの利用技術. 環境にやさしい稲作・野菜・果樹新技術の開発と実証. 千葉県農業試験場. 21-22.
- 農林水産省農蚕園芸局農産課 (1979). 土壌環境基礎調査における土壌、水質及び作物体分析法. 1-178.
- 小川吉雄 (2000). 地下水の硝酸汚染と農法転換. 118-149. 農文協. 東京.
- 真行寺孝・日暮規夫・安藤光一・松本直治 (1986). 下水汚泥の多量施用が土壌および作物に及ぼす影響. 千葉農試研報. 27: 61-70.
- 篠田正彦・八槨 敦・安西徹郎 (2001). 非栽培期間の地下水位の差異が水稲の生育収量および土壌の化学性に及ぼす影響 第2報 非栽培期間の土壌別の適正地下水位. 千葉農試研報. 42: 31-41.
- 東京都農業試験場 (2001). 平成12年度技術成果レポート. 1-13.
- 八槨 敦・岡本勝男・川島博之・安西徹郎 (2000). ランドサットTMデータを用いた千葉県水田の乾湿区分. 土肥誌. 71: 27-34.

Effect of Various Compost Alternatives for Chemical Fertilizer on Wet Rice Culture and Effects on Soil and Percolation

Masahiko SHINODA, Yoshio MORI and Tetsuo ANZAI

key word:paddy rice, swine manure compost, sludge compost, garbage compost, alternative effect

Summary

We applied three kinds of composts (swine manure, sludge and garbage) instead of basal dressing to lysimeter filled with three representative paddy soils in Chiba Prefecture and obtained the effects on rice plant growth, yield, soils and percolation.

- 1 . When swine manure compost is applied a month to a week before transplanting, rice plant growth and yield are equivalent to those when chemical fertilizer is applied; repeated applications will produce even greater yields. However, Zn will accumulate in soils, so we need five to ten applications.
2. When sludge compost is applied, rice plant growth and yield are equivalent to those when chemical fertilizer is applied. However, Zn will accumulate in soils and surpass maintenance standards in some years, so sludge should not be applied.
- 3 . Garbage compost applied from a month before transplanting impaired rice plant growth with reduced soil and was difficult to apply without treatment. If garbage compost is to be applied, it will be necessary to ferment it after mixing with rice straw.
- 4 . The effects of successive application of various composts on the yield of paddy rice were, in order of reverse soil fertility, sand (marine alluvium) > clay (from the Tertiary) > loam (fluvial alluvium).