

下水汚泥の農業利用について、(第2報)
オガクズ入り汚泥堆肥の作物生育に対する効果と重金属の動向について

宗林 正・古山 賢治・田中 康隆

北川 芳雄・水田 昌宏

Utilization of Sewage Sludge in the Field of Agriculture. II.
Effects of sludge mixture composted with sawdust on several
crop growth and on heavy metal movement.

Tadashi SORIN, Kenji KOYAMA, Yasutaka TANAKA,
Yoshio KITAGAWA and Masahiro MIZUTA

緒 言

実験材料および方法

県浄化センターでは、下水汚泥の処理方法として熱処理加圧脱水法を採用しており、その処理中に汚泥中易分解性画分の流亡とタンパク質等高分子化合物の凝固変成が起こることが確認されている²⁾。この熱処理加圧脱水汚泥の農業用資材としての適否を判定することが要求され、著者らは前報において、土壤中での窒素の無機化、重金属の付加及び作物生育に対する施用効果等についてその特性を明らかにした^{7,8)}。その結果、熱処理汚泥そのものの窒素無機化率は低いものの、堆肥化、発酵処理により無機化率は高まり、その作物生育に対する効果は明りょうであった。しかしながら、堆肥化処理に極めて手数のかかること、製品から汚泥臭が消えないこと、粒形が不揃いなこと、含有する重金属の挙動が明確でないこと等の点から熱処理汚泥単独での農業利用は困難と判断された。そこで、県浄化センターでは農業用資材として使用可能な状態にするため「オガクズ入り汚泥堆肥」が作製された。昭和55年9月よりは同汚泥堆肥の施用による作物生育促進効果、重金属元素の挙動を中心に検討中である。これまでに若干の知見が得られたのでここに報告する。

実験は、奈良県農業試験場内圃場に縦100cm×横200cm×深さ80cmの木枠を設置し、深さ70cmに真砂土を充填して実施した。供試土壌の理化学性は、第1表のとおりである。供試した汚泥堆肥は熱処理汚泥、生汚泥(消化遠心脱水汚泥):膨軟化オガクズ=(2:1:4w/w)の割合で混合され、更に酸度調整のために石灰を0.24の割合で添加した後、立型移動式2段発酵槽で2週間一次発酵し、つづいて2~3ヶ月間野積みし二次発酵されている。第2表に供試汚泥の分析値を示す。

第2表 オガクズ入り汚泥堆肥の分析値

分析項目	分析値	分析項目	分析値
PH	6.02	Cd ppm	3.05
EC(1:5)ml/cm	22.96	Pb	96.8
T-N %	1.13	Cr	125
T-C %	30.1	Cu	495
C/N %	26.6	Zn	1310
P ₂ O ₅ %	4.58	Ni	64.3
K ₂ O %	0.33	As	2.75
Fe %	3.04		
Mn %	0.10		

第1表 供試土壌の理化学性

土 性	PH (1:5)		Y ₁	置換性塩基(mg/100g D. S.)			有効態リン酸 mg	T-C mg	T-N mg	CEC me
	H ₂ O	KCL		CaO	MgO	K ₂ O				
LS	6.08	4.03	0.13	54.5	6.8	4.1	0.4	40	4	4.2

処理は、無施用，1 t単用（第1作目のみ施用），1 t連用（年間2作施用），3 t単用，3 t連用，5 t単用，5 t連用，10 t単用の合計8処理とし、いずれも汚泥は地表下10cmまでの土壤に混和した。

供試作物として、ハウレンソウ，コカブ，小麦，イチゴ，シュンギク，タマネギ，大根を栽培した。施肥は奈良県主要作物施肥基準に従い，全区同一施肥とした。供試作物の耕種概要を第3表に示す。

第3表 供試作物の耕種概要

作付順	作物名	品 種	播種（定植）月日	収 穫 月 日
1	ハウレンソウ	アトラス	5 5. 9. 14	5 5. 10. 28
2	小カブ	もち花コカブ	5 5. 11. 14	5 6. 3. 24
3	小麦	オマセ	5 6. 4. 7	5 6. 7. 6
4	イチゴ	宝交早生	5 6. 10. 20	5 7. 5. - 6
5	シュンギク	大葉新菊	5 7. 9. 20	5 7. 11. 25
6	タマネギ	泉州黄	5 7. 12. 5	5 8. 6. 10
7	ダイコン	耐病総太り	5 8. 9. 22	5 9. 1. 12

土壤は0~15cm, 15~30cm, 30~45cmの3層に分け、栽培終了後採取した。土壤、作物体とも分析は環境実態調査における土壤、水及び作物体分析法¹⁰⁾によった。可溶性重金属は0.1 N 塩酸浸出法により行なった。

土壤三相分布については供試土壤、汚泥ともに粒形が不揃なため、5 mmのフルイを全通した試料について実験室内で配合、供試した。

用で固相率、液相率とも約5%減少し、それ以上の施用では施用量の増加に伴い固相率は減少、液相率は増加する傾向を示した。

(3) 土壤中の全炭素及び全窒素含量

土壤中の全炭素含量は汚泥の施用量にほぼ比例して付加されたが、第1図に示すように単用区では施用3年後の分解耗率は10a 当り5 t以下の施用では約60%に達している。また連用区では第2図に示すように施用量に比例して急速に進むが、春夏季施用の第3、及び7作では停滞化傾向が認められた。

第6表に栽培跡地土壤中の全窒素含量を示した。単用区では第1作終了時に乾土100 g 当り6~20mgの付加が認められたが付加量そのものは著しく少なかった。一方、連用区では第3作目までは施用による付加量の差は小さいが、第6、7作目では施用量に対応して増加し、5 t連用では第6作、3 t連用では第7作目に乾土100 g 当り100 mg（農試内水田土壤の平均含量）を越えた。

第3図及び第4図に土壤のC/N比の堆移を示した。単用区では初作後30~40%に達したが、第3作終了時には10a 当り3 t施用区で約10%，5 t施用区で約17%，10 t施用区では約27%にまで急速に低下し、第6作以降では、10 t施用区においても約15%にまで低下した。一方、連用区では施用量に応じてほぼ一定の比率に保たれる傾向がみられ、10a 当り5 t施用では32%前後、3 t施用では26%前後、1 t施用では16%前後で安定して堆移した。

実験結果

1. 作物収量と土壤の理化学性に及ぼす影響

(1) 収 量

第4表に収量調査の結果を示した。毎作連用では無施用に対して明らかに優ったが、単用区では第2、3作目で無施用より低かった。収量の低下はその後回復した。増収効果は、ハウレンソウ、シュンギク、タマネギで特に高かった。

(2) 物 理 性

第5表に三相分布の変化を示した。汚泥堆肥の1 t施

第5表 汚泥堆肥の施用と土壤三相分布の関係

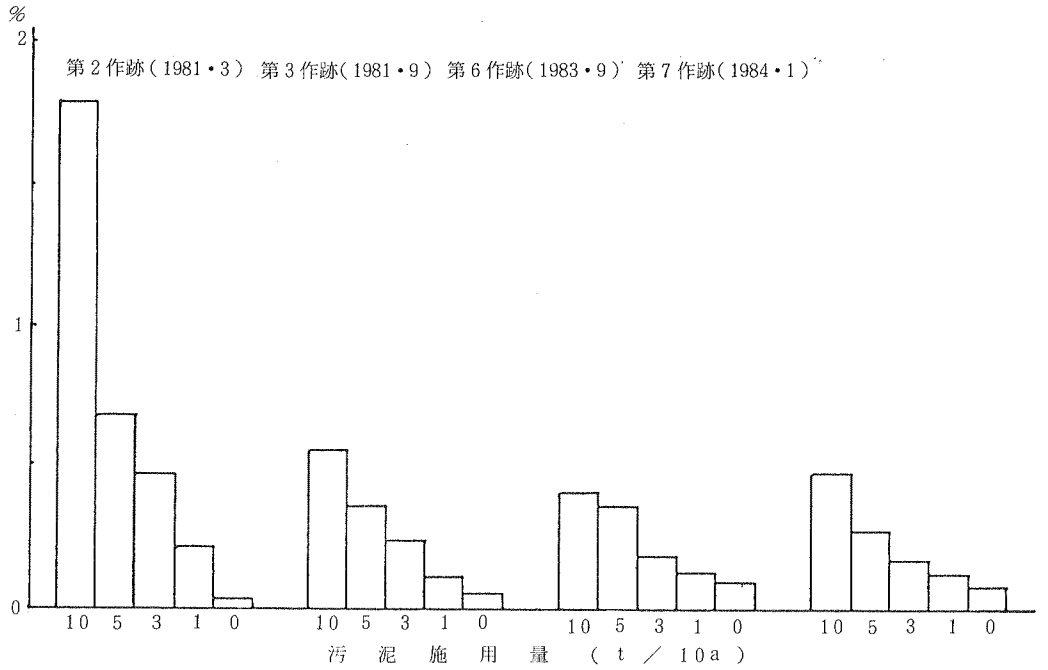
施用量	気 相	液 相	固 相
0 t/10a	2 6.5%	3 3.0%	4 0.5%
1 t	3 6.7	2 7.7	3 5.7
3 t	3 4.0	2 8.7	3 1.3
5 t	3 3.5	2 9.2	3 2.3
10 t	3 3.0	3 2.3	2 9.7
20 t	3 1.0	4 1.2	2 7.4

2. 含有重金属の動向

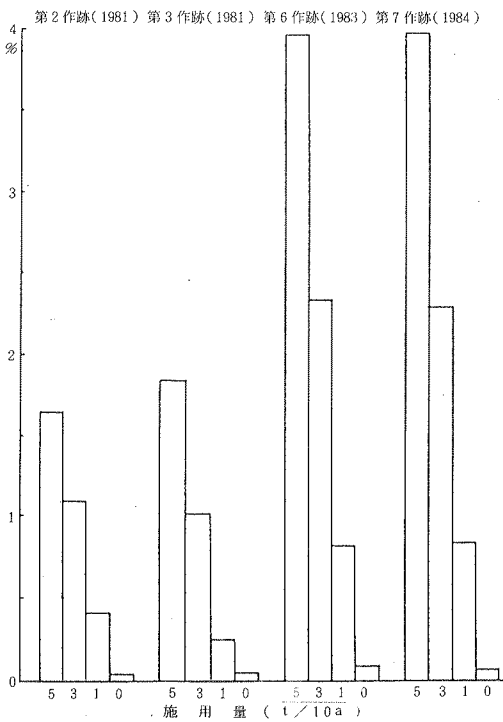
(1) 土壤中における重金属の動向

第4表 作物収量

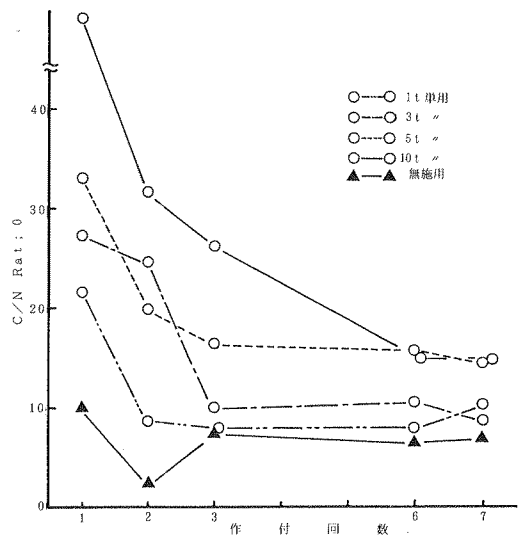
作付順	作物名	処 理	収 量	収量指数
1	ホウレンソウ	無 施 用	450 (g/m ²)	100
		1 t 単用	821	182
		3 t 単用	1068	237
		5 t 単用	1190	264
		10 t 単用	1106	246
2	コカブ	無 施 用	141.3 (g/10株)	100
		1 t 単用	126.8	90
		3 t 単用	87.7	62
		5 t 単用	138.8	98
		10 t 単用	146.5	104
		1 t 連用	174.0	123
		3 t 連用	97.3	69
3	小 麦 (春播)	無 施 用	360 (g/m ²)	100
		1 t 単用	352	98
		3 t 単用	375	104
		5 t 単用	330	92
		10 t 単用	338	94
4	イチゴ (露地)	無 施 用	2.663 (g/10株)	100
		1 t 単用	3.214	121
		3 t 単用	3.592	135
		5 t 単用	2.745	103
		10 t 単用	2.780	104
5	シュンギク	無 施 用	1.05 (kg/100株)	100
		1 t 単用	1.36	130
		3 t 単用	1.76	168
		5 t 単用	2.20	210
		10 t 単用	2.90	276
6	タマネギ	無 施 用	1.50 (kg/10株)	100
		1 t 単用	1.28	85
		3 t 単用	1.92	128
		5 t 単用	1.96	131
		10 t 単用	2.96	197
7	ダイコン	無 施 用	3.89 (kg/10株)	100
		1 t 単用	2.91	75
		3 t 単用	4.18	107
		5 t 単用	4.25	109
		10 t 単用	4.09	105
		1 t 連用	4.91	126
		3 t 連用	5.40	139
		5 t 連用	6.00	154



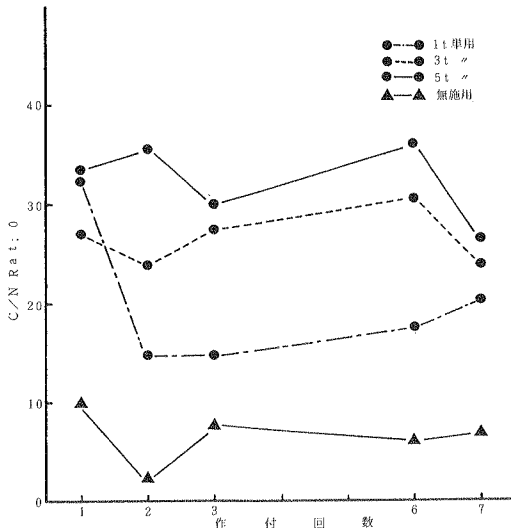
第1図 単用区栽培跡地土壤中の全炭素含量の変化



第2図 連用区栽培跡地土壤中の全炭素含量の変化



第3図 単用区栽培跡地土壤中のC/N比の変化



第4図 連用区栽培跡地土壤中のC/N比の変化

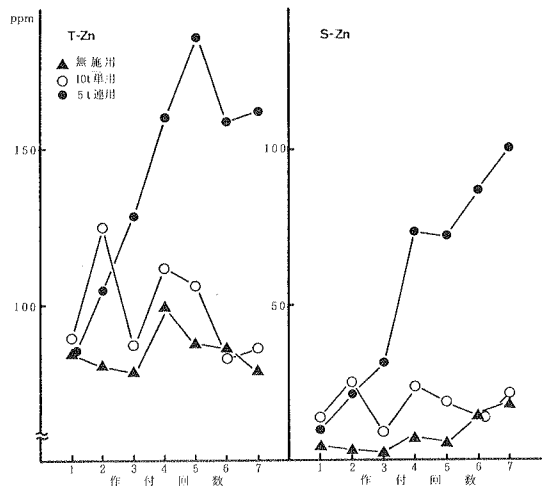
1) 0~15cm層位

第5~9図に各作物栽培跡地土壌の0~15cm層位中の重金属の濃度変化を示した。

単用区では、亜鉛は可溶性画分は無施用に対して付加されたが、バラツキが大きく一定の傾向を見いだせなかった。全亜鉛の無施用に対する付加は第5作目まで明らかであったが第6作以降判然としなかった。銅は可溶性

銅、全銅ともに第1作終了後、施用量に応じて増加したが第2作目以降7作経過後もその値は一定の範囲で推移した。ニッケルでは、可溶性ニッケルは漸増するものの全ニッケルは減少する傾向を示した。カドミウムは、可溶性カドミウムは第4作以降漸増し、全カドミウムは漸減している。鉛についてみると、全鉛はほぼ一定の値を示し、可溶性鉛は明確な傾向を示さなかった。

一方、連用区では施用量に応じて明らかに付加されていく。亜鉛及びニッケルでは可溶性画分は施用量に伴い

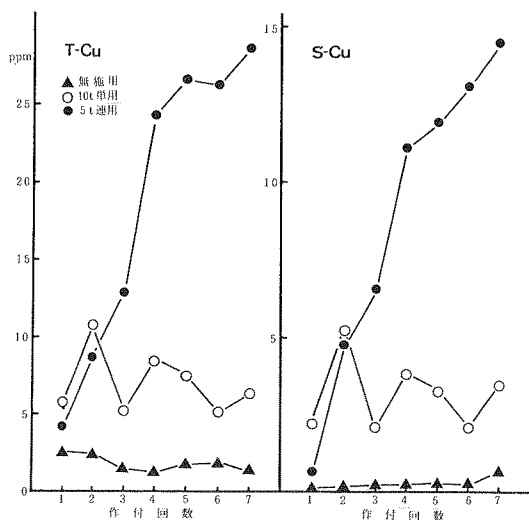


第5図 栽培跡地土壌表層中の亜鉛の濃度変化

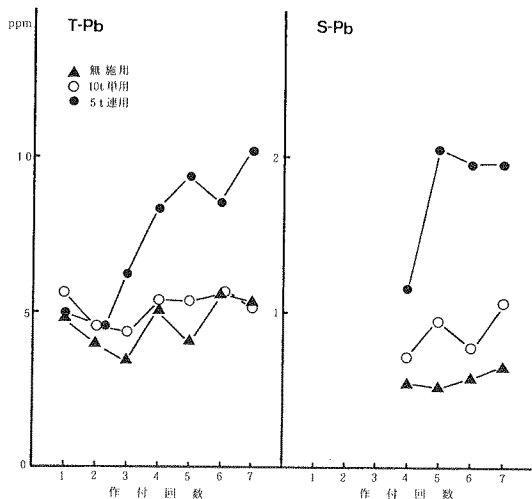
第9表 栽培跡地土壌中の全窒素含量の変化

(単位: mg/100g DS)

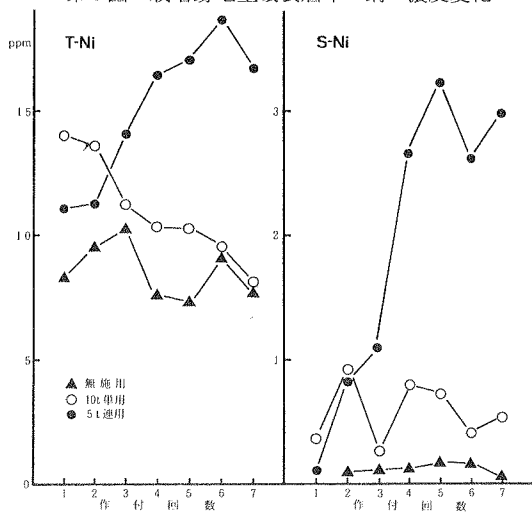
処 理	土壌層位	第1作	第2作	第3作	第6作	第7作
無 施 用	0~15 cm	4	13	7	15	11
	15~30	4	14	1	8	3
1 t 単 用	0~15	6	24	14	16	12
	15~30	4	5	2	10	5
3 t 単 用	0~15	10	19	24	17	21
	15~30	4	12	4	10	8
5 t 単 用	0~15	10	34	22	23	19
	15~30	4	8	3	5	12
10 t 単 用	0~15	24	60	21	26	33
	15~30	4	15	2	15	12
1 t 連 用	0~15	4	29	17	47	41
	15~30	4	18	4	10	11
3 t 連 用	0~15	10	45	37	77	101
	15~30	4	12	3	20	19
5 t 連 用	0~15	10	47	62	110	151
	15~30	4	4	4	40	49



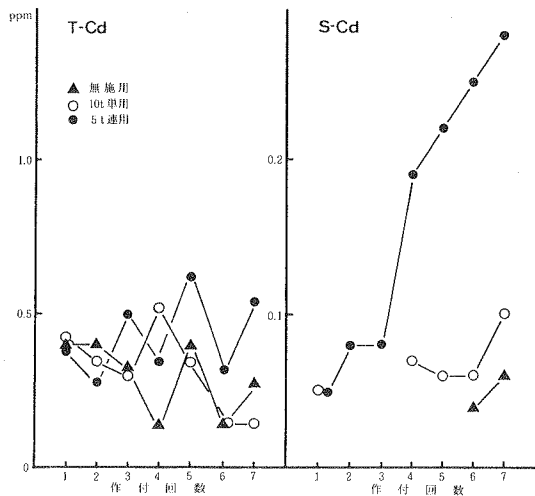
第6図 栽培跡地土壌表層中の銅の濃度変化



第9図 栽培跡地土壌表層中の鉛の濃度変化



第7図 栽培跡地土壌表層中のニッケルの濃度変化



第8図 栽培跡地土壌表層中のカドミウムの濃度変化

増加した。また、全量も増加しているが、その増加率は第5、7図にみられるように頭打ちの傾向を示している。一方、銅では可溶性銅、全銅とも施用量に従い増加した。カドミウム、鉛についてもいづれも増加する傾向を示している。

0～15cm層位における重金属の溶出率の変化を第10、11、12、13図に示した。

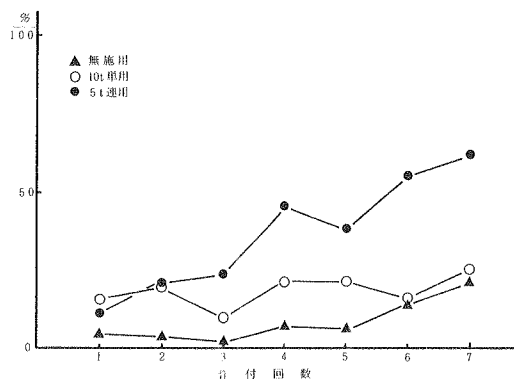
亜鉛、ニッケル、カドミウムでは溶出率は増加する傾向を示したが銅ではほぼ一定の範囲で推移した。

2) 15～30cm層位

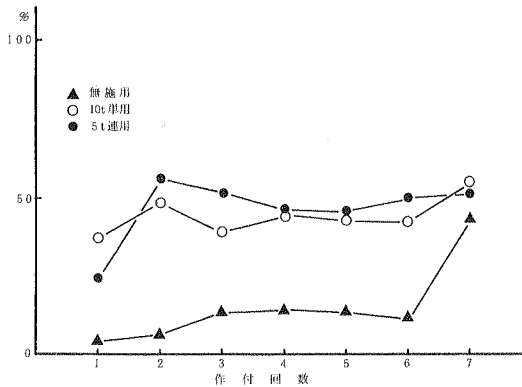
第1及び第7作終了後の15～30cm層位土壌中の含量を第14図に示した。亜鉛、銅、ニッケルでは付加は明らかであり、特に可溶性重金属の増加が著しかった。カドミウム、鉛では明かな傾向は認められなかった。

2) 作物体可食部への吸収移行

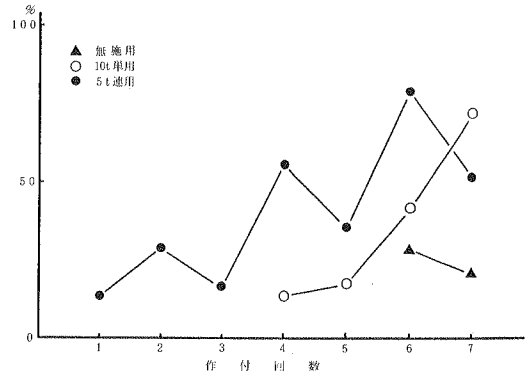
(2) 作物体可食部への吸収移行



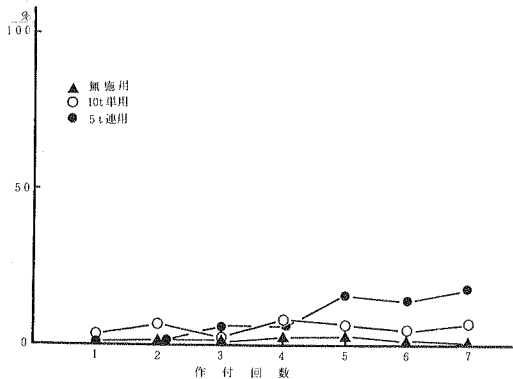
第10図 栽培跡地土壌表層中の亜鉛の溶出率の変化



第11図 栽培跡地土壌表層中の銅の溶出率の変化



第13図 栽培跡地土壌表層中のカドミウム溶出率の変化



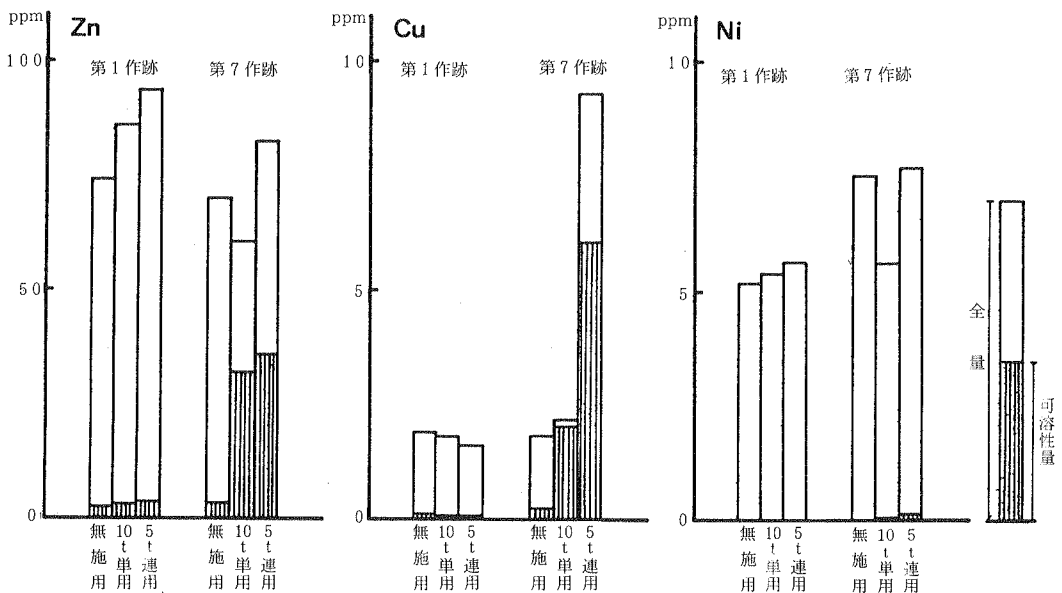
第12図 栽培跡地土壌表層中のニッケル溶出率の変化

第7表に作物体可食部の重金属含量を示した。可食部の重金属含有率は汚泥施肥量の増加に伴い、亜鉛、銅で増加する傾向を認めた。

作物別では、ホウレンソウ、シュンギクで全元素について高い吸収移行が認められた。

考 察

発酵処理済熱処理汚泥と同様、オガクズ入り汚泥堆肥の作物増収効果は明らかであったが、単用、連用区間また作物間で様相を異にした。連用区では施肥量に従い全



第14図 栽培跡地土壌表層中の亜鉛、銅、ニッケルの濃度変化

第7表 作物体可食部の含有重金属の濃度 (ppm 対乾物)

作付順	作物名	処 理	Cd	Zn	Ni	Cu	Pb
1	ホウレンソウ	無 施用	1.26	166.0	3.53	39.20	9.90
		1 t単用	1.38	156.5	3.03	8.18	6.97
		3 t単用	1.45	221.0	3.22	9.47	7.39
		5 t単用	1.52	314.0	4.09	10.60	7.50
		10 t単用	1.77	490.0	4.30	9.10	7.22
2	コカブ	無 施用	0.28	64.2	0.73	2.92	0.16
		1 t単用	0.32	54.1	0.74	6.75	0.22
		3 t単用	0.27	81.8	0.65	6.60	0.34
		5 t単用	0.06	132.9	0.65	10.39	0.04
		10 t単用	0.17	169.7	0.60	6.79	0.45
		1 t連用	0.17	47.5	0.68	6.12	0.13
		3 t連用	0.15	147.1	0.53	8.49	0.20
3	小 麦	無 施用	tr.	55.6	tr.	3.06	0.11
		1 t単用	tr.	83.8	tr.	6.06	0.06
		3 t単用	tr.	79.3	tr.	5.95	0.02
		5 t単用	tr.	80.3	tr.	6.12	0.02
		10 t単用	tr.	81.3	tr.	6.79	0.13
		1 t連用	tr.	87.4	tr.	6.48	0.04
		3 t連用	tr.	89.9	tr.	6.28	0.04
5	シュンギク	無 施用	0.41	98.5	0.83	4.56	0.20
		1 t単用	0.38	197.0	0.66	7.15	0.28
		3 t単用	0.36	75.8	0.73	9.01	0.43
		5 t単用	0.40	112.1	0.56	11.18	0.33
		10 t単用	0.59	222.2	0.76	17.30	0.22
		1 t連用	0.34	228.3	0.48	11.38	0.35
		3 t連用	0.65	311.1	0.06	8.89	0.21
6	タマネギ	無 施用	0.09	46.2	0.20	5.27	0.17
		1 t単用	0.06	66.8	0.07	5.95	0.10
		3 t単用	0.16	50.5	0.21	5.33	0.42
		5 t単用	0.15	49.0	0.29	5.78	0.13
		10 t単用	0.28	83.9	0.36	7.15	0.29
		1 t連用	0.20	68.5	0.32	5.29	0.09
		3 t連用	0.37	195.1	0.93	10.31	0.80
7	ダイコン	無 施用	0.10	35.9	0.07	1.71	0.18
		1 t単用	0.05	40.6	0.07	2.02	0.18
		3 t単用	0.06	32.1	0.07	1.52	0.33
		5 t単用	0.03	30.8	0.10	1.53	0.09
		10 t単用	tr.	30.3	0.07	1.30	0.20
		1 t連用	0.08	39.9	0.07	1.56	0.11
		3 t連用	0.08	34.8	0.14	1.54	0.51
		5 t連用	0.02	48.3	0.13	1.72	0.11

品目でその効果は明らかであったが、単用区で、第2作目に収量が大きく無施用区を下まわった。また作物別では吸肥力の強いホウレンソウ、シュンギク、タマネギで特にその効果が高かった。

オガクズ入り汚泥堆肥の施用による増収効果の主たるものは、その構成からみて前報⁷⁾に示したように無機化

してくる多量の窒素によるものと思われ、単用区における第2、3作目の収量低下はC/N比の急激な低下からみて含有有機物の分解に伴う窒素の取り込みによるものと考えられる。また、それ以降の収量の回復はC/N比の低下、安定に伴う窒素供給の円滑化によるものと推察される。同様に、連用区においては全炭素及び全窒素の

付加効果が著しく、10a 当たり3~5 tの毎作施用で第6, 7作目は全炭素含量は2~4%, 全窒素は乾土100g 当り100~150mgにも達し、このことが施用効果の主たる要因と考えられる。また、供試した汚泥堆肥では発酵処理済熱処理汚泥に対比して土壤物理性の改善効果が顕著に認められた。北川ら⁶⁾は、オザクズ堆肥の連年施用土壤において、固相率の減少と液相率の増加を報告しており、本実験において確認された同様の現象は本汚泥堆肥中のオガクズによるものと考えられる。

作物の増収効果から見た汚泥堆肥の適正施用量は、供試土壤が真砂土ではあるものの、比較的吸肥力の旺盛なハウレンソウ、シュンギク、タマネギでは10a 当り3~5 t, また吸肥力の弱いイチゴでは1 t前後、その他の作物では3 t前後であり、毎作施用が必要とおもわれる。施用の中断は単用区第2作目に見られるように、その後2~3作は窒素飢餓による生育障害が起こるものと推察される。

土壤中重金属は施用量に従い可溶性重金属、全重金属ともに付加されている。しかしながら、その傾向は各元素間及び単用、連用区間で若干様相を異にしている。通常作土である0~15cm層位についてみると、可溶性重金属は単用、連用区とも各作付ごとに増加する傾向を示している。また全重金属は単用区では銅、鉛では増減なし、カドミウム、亜鉛、ニッケルでは増減なしからやや減少傾向を示すのに対し、連用区では各元素とも増加傾向を示している。しかしながら、第4作以降その増加率に頭打ちの傾向がみられる。また下層土への重金属付加もわずかではあるが存在し、その原因として耕種的影響の他に上層よりの移行が推察される。鎌田ら⁵⁾、山田ら^{13,14)}は汚泥中の重金属は種々の形態で存在すること、更に山田¹⁴⁾は汚泥施用土壤中には種々の重金属が、汚泥中とは異なる構成比で存在することを報告している。また、海老原ら³⁾は高分子凝集汚泥の施用で、亜鉛及びカドミウムの下方移動が激しく、銅では少ないことを報告している。これらのことは、汚泥の種類により含有重金属の形態の構成比は異なるものの、土壤中に施用されると形態変化が比較的容易に起こり、しかも重金属の種類によって移動に難易のあることを示唆している。本実験における表層土壤中の全重金属付加の頭打ち現象は、供試土壤の土性を勘案するとほぼ同一の現象と考えられる。なお、供試土壤はCEC 4.2の砂質土壤であり、汚泥の農用地等還元問題委員会報告書¹¹⁾のいうCEC 8以下の砂質土壤としてガイドラインの適用外に当たると共に、米国環境保全局(EPA)の言う私有地への汚泥金属施用量⁴⁾でも最低ランクに位置されている。

本実験において、銅、亜鉛の溶出率は増島ら⁹⁾の求め

た回歸式より大きい値を示したが、増島らの溶出の偏差のほぼ上限付近に該当した。

作物体可食部中の重金属は亜鉛、銅で明らかに増加しており、先の熱処理汚泥単独の場合⁸⁾と同様であった。

作物別ではハウレンソウ、シュンギクの葉菜類で他の作物に比して特に高かった。また初作のハウレンソウで大沢¹²⁾の報告した亜鉛の障害発現時の含有量を越えたが生育障害は認められなかった。このことは、重金属の吸収は低濃度では積極的であり、高濃度では受動的で生育障害が問題となる¹⁾ことから汚泥中の亜鉛等は比較的低濃度で持続的に供給されていることを推察させる。

以上のことから、オガクズ入り汚泥堆肥は、作物の生育促進及び土壤理化学性の改善等の効果が著しく、本実験では10a 当り3~5 tの毎作施用が適当と考えられた。しかしながら、3~5 tの毎作施用では亜鉛等の付加量が比較的大きいことが想定され、農耕地への実際施用に当っては、土壤条件による汚泥含有重金属の形態変化、その移動について検討を重ねる必要があると思われる。

摘 要

オガクズ入り汚泥堆肥の施用による作物生育への効果と重金属付加について検討した。

1. オガクズ入り汚泥堆肥の作物生育への効果は毎作施用で特に明りょうであった。その効果は含有する窒素及び粗大有機物によるところが大きいと考えられた。
2. 土壤中重金属は汚泥の連用に伴い亜鉛、銅、ニッケルで施用量に応じて明らかに付加された。カドミウム及び鉛についても余り明りょうではないが同様の傾向が認められた。また、下層土への移行が推察された。
3. 作物体可食部中の重金属は亜鉛、銅で汚泥堆肥の施用量に従い明らかに増加する傾向が認められた。作物別ではハウレンソウ、キクナの葉菜類でやや高い傾向がみられた。

謝 辞

本実験に際して、汚泥堆肥の提供、また貴重な御助言をいただいた県浄化センター水質試験室の毛利吉那室長を始めとする同試験室の諸氏に深く感謝の意を表します。また、本実験に際し、確別の御配慮をいただいた県農政課和田光男主幹並びに田和桐司係長を始めとする県園芸農産課肥料農薬係の諸氏に深く感謝いたします。

引用文献

1. 茅野充男 1982. 無機栄養. 田中明編. 「作物比較栄養生理」 P 77~112. 学会出版センター.
2. 土木学会 1972. 下水汚泥の処理. 処分および利用に関する研究報告書. 昭和46年度. P 145~260.
3. 海老原武久・松村蔚・山田要 1984. 汚泥施用土壌における重金属の動態. 群馬農業研究 A総合 1 : 41~44.
4. Environmental Protection Agency. (EPA). 1977. Municipal Sludge management. environmental factors. Technical Bulletin. Federal Register 42
5. 鎌田賢一・南松雄 1981. 下水汚泥中の重金属の形態. 土肥誌 52(5) : 385~391.
6. 北川芳雄・若山譲・田中康隆・水田昌宏 1985. 各種有機資材の連用における土壌理化学性の変化. (第1報). 奈良農試研報 17 : (投稿中)
7. 古山賢治・宗林正・水田昌宏・田中康隆 1982. 下水汚泥の農業汚泥の農業利用について(第1報)熱処理汚泥の窒素肥効. 奈良農試研報 13 : 58~65.
8. 奈良農試 1980. 下水処理汚泥の農業利用について中国農試編. 昭和55年度近畿中国地域秋季試験研究打合せ会議資料. (土壌肥料) P 21~35.
9. 農林水産技術会議 1976. 農用地土壌の特定有害物質による汚染の解析に関する研究. 研究成果 92
10. 農林水産省農蚕園芸局農産課 1979. 環境実態調査における土壌. 水質及び作物体分析法.
11. 汚泥の農用地等還元問題委員会 1983. 汚泥の農用地等への還元問題について. 再生と利用 6(23) : 63~74.
12. 大沢孝也 1971. そ菜の重金属過剰障害に関する研究(第1報). 水耕溶液中の亜鉛濃度がそ菜の生育に及ぼす影響. 園学誌 40(4) : 389~394.
13. 山田要・海老原武久 1983. 下水汚泥の農用地利用について. 再生と利用 6(23) : 18~23.
14. 山田要 1985. 下水汚泥の有効利用について. 連用土壌の重金属の動態から. 再生と利用 8(28) : 12~17.

Summary

A sludge mixture composted with sawdust was applied to several types of crops and effects on crop growth and heavy metal movement were studied.

The compost was very effective for crop yields when used by continuously. This effect was gotten from the nitrogen and crude organic matter that were included in the compost.

Heavy metals-zinc, copper and nickel were obviously increased in the soil due to the compost applications. Cadmium and lead were also increased but not so clearly. After the fourth cultivation, reducing of the additional rates were observed regarding the zinc and other metals. It seems some of the heavy metals were moving to the lower horizon.

Zinc and copper concentrations in the eatable portions of the crops were increased clearly due to the compost application, and the absorption rates were higher in spinach and garland chrysanthemum than in the other crops.