

## ゼオライト下水汚泥コンポストの特徴

田村明長\*

## Properties of Zeolite Sewage Sludge Compost

Akinaga TAMURA

## I 緒言

ゼオライトは沸石といわれる結晶性のアルミノケイ酸塩の総称で、その立体網目状構造から、水分やガス成分の吸着及び陽イオン交換作用があることが知られている。このため、農業をはじめ様々な分野で用途が開発され、1990年におけるわが国の利用量は約13万5,000トンに達している<sup>20)</sup>。

島根県は日本でも有数の天然ゼオライトの産地であり<sup>23)</sup>、下水汚泥をコンポスト化する際の水分調整剤としてこのゼオライトを使用すれば、後藤ら<sup>10)</sup>が指摘しているように、発酵後の製品は、肥料成分としてのアンモニア態窒素を多く含むコンポストとなることが考えられる。このように、ゼオライトの用途開発と、高品質な下水汚泥コンポストの開発という二つの目的をもって、島根県では1987年より、ゼオライト下水汚泥コンポスト（以下、ゼオライトコンポスト）の製造を開始した<sup>12)</sup>。

ゼオライトを添加したコンポストについては、後藤ら<sup>10)</sup>のおからと鶏糞を用いた報告があるのみで、下水汚泥についての報告はみられない。このため、農業利用に当たっては新たな施用基準を策定する必要がある。1988年から1991年まで、このゼオライトコンポストの特性と、野菜に対する窒素質肥料の代替効果について試験を行ったのでその結果を報告する。

本研究の実施にあたり、元当場環境保全科長山根忠昭博士には研究の端緒を与えられ、終始激励、指導をいただいた。また、島根県土木部下水道課、宍道湖東

部浄化センターの関係各位には、資材の提供をはじめ数々の便宜、援助をいただいた。更に、当場環境保全科長沢田眞之輔氏には本研究をとりまとめる上で有益な助言、指導をいただいた。各種調査には環境保全科研究員各位のご協力を得た。これらの方々に深く感謝の意を表する。

## II 試験方法

## 1. コンポストの化学成分組成

供試試料は島根県東部浄化センターにおいて、約60日間嫌気性消化した汚泥に高分子凝集剤を添加後脱水し、更に、ゼオライトを約20%（乾重量比）添加混合して、約20日間発酵させて製造したもので<sup>12)</sup>、製品は粉状で取り扱いやすい形になっている。添加されているゼオライトの種類は仁摩町産のモルデナイト（粒径：0.25~0.5mm）である。化学成分組成については、1988年から1991年までの試験に供試した計7点について測定し、その方法は下水汚泥分析方法<sup>6)</sup>に従った。

## 2. 発芽及び初期生育への影響

試験は直径11.5cm、深さ10cm、容量500mlのポリエチレン製のポットで行った。第1表に示した沖積土壌をあらかじめ炭カルでpHを6.5に調整し、風乾土500gに対し、添加率0~4%の範囲で、ゼオライトコンポストを添加した。これはha当たり0~40Mg施用に相当する。最大容水量の60%になるように水を加え、2日間ガラス室に置いたあと、1988年3月11日にコマツナ（品種：晩生小松菜）を1ポット当たり25粒播種した。播種5、10日後の発芽率及び21日後の葉重と、跡地土

\*環境保全科

第1表 供試土壌の理化学性

土壌の種類	土性	pH (H <sub>2</sub> O)	交換酸度 (Y <sub>1</sub> )	T-C (g kg <sup>-1</sup> )	T-N (g kg <sup>-1</sup> )	CEC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	容積重 (g L <sup>-1</sup> )	最大容水量 (g kg <sup>-1</sup> )
沖積土	CL	5.8	1.9	11.3	0.95	14.7	1,114	666

壤のpH, EC, アンモニア態窒素, 硝酸態窒素を測定した。なお, いずれの区も窒素, リン酸, カリウムを成分量でポット当たり25mgずつ, ゼオライトコンポストと同時に施用し, 3連制で試験を実施した。また, 試験期間中は最大容水量の60%を保つよう, ほぼ毎日かん水を行った。

3. 窒素の無機化量

試験はゼオライトコンポストと, 比較資材として尿汚泥(高分子凝集剤使用汚泥)について行った。ゼオライトコンポストと尿汚泥の窒素含量は第2表に示した。この土壌をあらかじめ炭カルでpHを6.5に調整して, 50g乾土相当量を200mlのビーカーに充てんし, これに, 粉碎したゼオライトコンポストと尿汚泥を窒素成分量で25mg相当量添加した。

第2表 ゼオライトコンポストと尿汚泥の窒素含量 (風乾物当たり)

供試資材	含水率 (%)	T-N (g kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> -N (mg kg <sup>-1</sup> )
ゼオライトコンポスト	13.6	41	13,300	44
尿汚泥	11.9	42	3,600	22

第3表 無機化試験供試土壌の理化学性

土壌の種類	土性	pH (H <sub>2</sub> O)	T-C (g kg <sup>-1</sup> )	T-N (g kg <sup>-1</sup> )	CEC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )
黒ボク土 (未耕土)	CL	5.2	70.5	3.4	23.2

次に, 土壌の水分を最大容水量の60%に調整して, ポリエチレンフィルム(J I S, 0.02mm)で覆い, 20°C, 25°C, 30°Cの恒温室内で無添加土壌とともに0~200日間培養し, 生成した無機態窒素を測定した。この間, 蒸発した水分は2週間毎に補給した。無機態窒素の分析は, 培養土壌を150g L<sup>-1</sup>塩化カリウム溶液で浸出したのち, BREMNER法に準じて行った<sup>3)</sup>。同時に培養した

無添加土壌のそれも測定し, この値を差し引いて無機態窒素生成量とした。無機化量は, 培養期間中の無機態窒素生成量から, 培養開始時の無機態窒素量を差し引いた量とした。また, 無機化率は次式より求めた。

$$\text{無機化率} = \frac{\text{無機化量}}{\text{N添加量} - \text{培養開始時の無機態窒素量}} \times 100$$

4. 窒素とリン酸の利用効率

試験は直径30cm, 深さ50cmの塩化ビニル製の大型ポットを用い3連制で行った。ポットの底10cmに川砂を, その上15cmの厚さに沖積土壌の下層土を詰め, 更に, その上15cmに第1表に示した沖積土壌を, あらかじめ炭カルでpH6.5に調整して充てんした。

第4表に試験区と施肥量を示した。この表層15cmの土壌に, ゼオライトコンポスト及び肥料(窒素は硫酸, リン酸は過リン酸石灰, カリウムは硫酸加里)を施用した。1990年4月5日にハウレンソウ(品種: 晩抽パルク)を播種し, 4月28日にポット当たり20本となるよう間引きを行って, 5月17日に収穫した。収穫物は通風乾燥後, 粉碎したものについて, 窒素はケルダール法, リン酸は硝酸, 過塩素酸で分解したのち, パナドモリブデン酸法により測定した。利用率は次式より算出した。

$$\text{利用率} = \frac{\text{吸収量} - \text{無窒素区の吸収量 (無リン酸区)}}{\text{施用窒素 (リン酸) 量}} \times 100$$

第4表 利用率試験の試験区と施肥量

試験区	施肥量 (g/ポット)		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
対照	2.5	2.6	2.5
無窒素	0	2.6	2.5
無リン酸	2.5	0	2.5
コンポスト標準量	(2.5)	(2.6)	2.5(0.3)
〃 1.5倍量	(3.8)	(3.9)	2.5(0.4)
〃 2倍量	(5.0)	(5.3)	2.5(0.5)

注) ( ) 内は, コンポストに含まれる成分量

5. 窒素質肥料代替効果

試験圃場は場内の水田転換畑(細粒灰色低地土・灰色系, 鴨島統)で, 試験規模は1区面積12m<sup>2</sup>の3連制で行った。試験圃場の理化学性を第5表に, 試験区の構成は第6表に示した。コンポスト標準区の施肥量は, 島根県の汚泥肥料施用基準に基づき, 基肥窒素成分量の1/3を汚泥窒素で代替させ, かつ含有窒素の1/3を有効とみなして決定した。また, 利用率試験の結果からは含有窒素の1/2が有効と考えられるので, 標準区と同様に基肥窒素を1/3代替し, 肥効率を1/2とした区(コンポスト少量区)と, 全量代替し, 肥効率

を1/2とした区(コンポスト倍量区)を設けた。これらの区の化学肥料と, ゼオライトコンポストの基肥窒素投下成分量比は, 第6表に示したとおりであり, 双方を合わせた窒素成分量は, 対照区1に対し, コンポスト標準区5/3, 少量区4/3, 倍量区6/3となる。また, ゼオライトコンポストの施肥量は, コンポスト少量区が標準区の2/3, 倍量区が標準区の2倍となる。

1989年から1991年まで5作物について試験を実施し, その試験作物と施肥量を第7表に示した。ゼオライトコンポストの施肥量を基肥窒素量に合わせた

第5表 代替試験圃場の理化学性

土性	pH (H <sub>2</sub> O)	T-C T-N (g kg <sup>-1</sup> )		CEC (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )	交換性陽イオン (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )			可給態* リン酸 (mg kg <sup>-1</sup> )	重 金 属 (mg kg <sup>-1</sup> )		
		Ca	Mg		K	Zn	Cu		Cd		
SCL	6.2	15.3	1.42	19.6	12.2	5.7	0.9	190	78	19	0.20

\* Truog法

第6表 代替試験区の構成

試験区	処 理 内 容	基肥窒素投下成分量比	
		化学肥料	コンポスト
対 照	化学肥料単用 (化成肥料, 重焼リン, 硫加)	1	0
コンポスト標準	基肥窒素1/3代替, 肥効率1/3	2/3	3/3
〃 少量	〃 〃, 〃 1/2	2/3	2/3
〃 倍量	〃 全量代替, 〃 〃	0	2

第7表 代替試験作物と施肥設計

試験年次	試験作物 (品種)	標 準 区 コンポスト施肥量 (Mg ha <sup>-1</sup> )	対 照 区 基 肥			追 肥	
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	K <sub>2</sub> O
1989	チンゲンサイ	2.5	1.0	1.0	1.0	0	0
1989~1990	ダイコン (耐病総太り)	3.0	1.2	1.5	1.2	0.5	0.5
1990	スイートコーン (カクテル82)	3.8	1.5	3.8	1.4	0.75	0.75
1990	ブロッコリー (ハイッ)	5.0	2.0	2.0	2.0	0.5	0.5
1991	サトイモ (石川早生丸)	2.3	0.8	2.0	0.8	0.8	0.8

注) サトイモの追肥は2回に同量ずつ分施

第8表 ゼオライトコンポストの成分組成 (現物当たり)

	含水量 (%)	pH	T-C		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Zn	Cu	Cd	Hg	As
			(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )									
平均値	25.3	7.9	204	39	37	4.3	15	7.6	799	154	1.33	1.00	7.7
標準偏差	2.1	0.3	22	3	5	0.4	2	1.4	109	22	0.21	0.17	1.0

注) ゼオライトコンポストのnは7

め、コンポスト少量区で不足するリン酸分は重焼リンで補った。カリウムはゼオライトコンポスト中の含量が少ないので、対照区と同量を硫酸加里で施用した。作物体の無機成分は通風乾燥後、常法<sup>24)</sup>に従って測定した。

### III 試験結果

#### 1. コンポストの化学成分組成

第8表に供試したゼオライトコンポストの化学成分組成を示した。pHは変動が少なく平均7.9であった。全窒素とリン酸は40g kg<sup>-1</sup>前後ではほぼ同程度の含量であったが、リン酸は窒素と比較してやや変動幅が大きかった。カリウム、カルシウム、マグネシウムの含量はそれぞれ、4.3、15、7.6g kg<sup>-1</sup>で窒素、リン酸と比較して少なかった。全炭素は204g kg<sup>-1</sup>であるので、C/N比は5.3となった。一方、重金属の亜鉛、銅、カドミウム、水銀、ヒ素の含量はそれぞれ、799、154、1.33、1.00、7.7mg kg<sup>-1</sup>で、いずれもほぼ同程度の変動幅であった。

第9表にゼオライトコンポストの無機態窒素含量を示した。150g L<sup>-1</sup>塩化カリウム溶液により浸出された無機態窒素量は12g kg<sup>-1</sup>で、水により浸出された量の2倍となった。この無機態窒素はほとんどアンモニア

第9表 ゼオライトコンポストの無機態窒素 (現物当たり)

	水浸出		KCL浸出	
	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N
	(g kg <sup>-1</sup> )			
平均値	6.1	0.11	12.0	0.14
標準偏差	0.9	0.05	1.3	0.08

注) 水浸出; pH7.0, KCL浸出; 150g L<sup>-1</sup>KCL  
ゼオライトコンポストのnは7

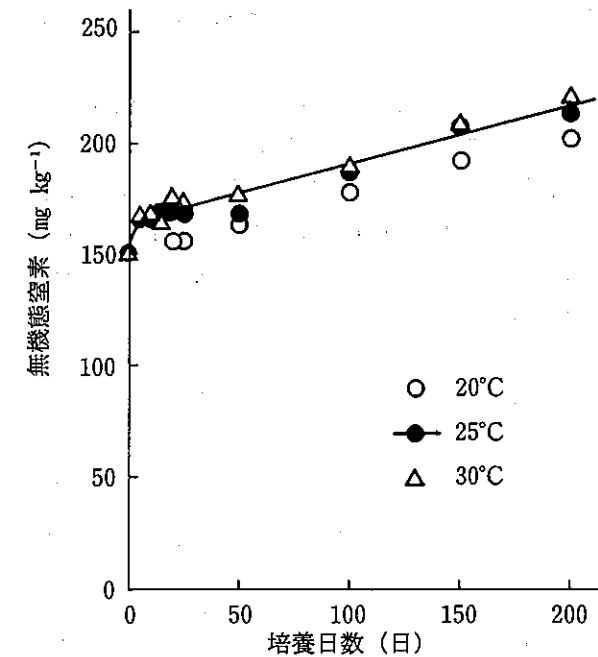
態で硝酸態はごくわずかであり、全窒素に対する無機態窒素の割合は約30%となった。

#### 2. 発芽及び初期生育への影響

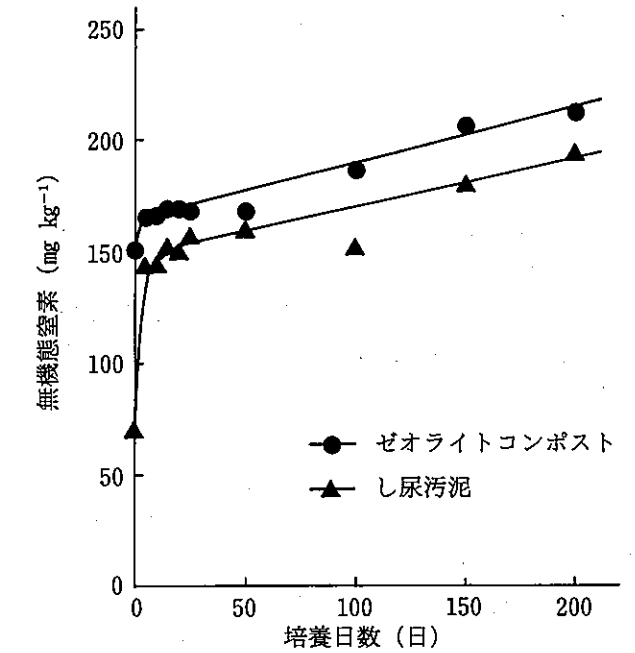
第10表にコマツナの発芽及び初期生育に対するゼオライトコンポスト添加の影響について、その結果を示した。ゼオライトコンポスト添加区の発芽率は、5日後57~77%、10日後76~88%で、添加率4%までは添加量が増加しても無添加区と差がなかった。しかし、葉重は添加率1%までは無添加区より勝ったものの、1.5%以上添加した区は生育が抑制され、4%添加区は無添加区のみならず40%の重量にとどまった。跡地土壌のpH、EC、アンモニア態窒素、硝酸態窒素濃度は、いずれもゼオライトコンポストの添加率に応じて高くな

第10表 コマツナの発芽及び初期生育に対するゼオライトコンポスト添加の影響

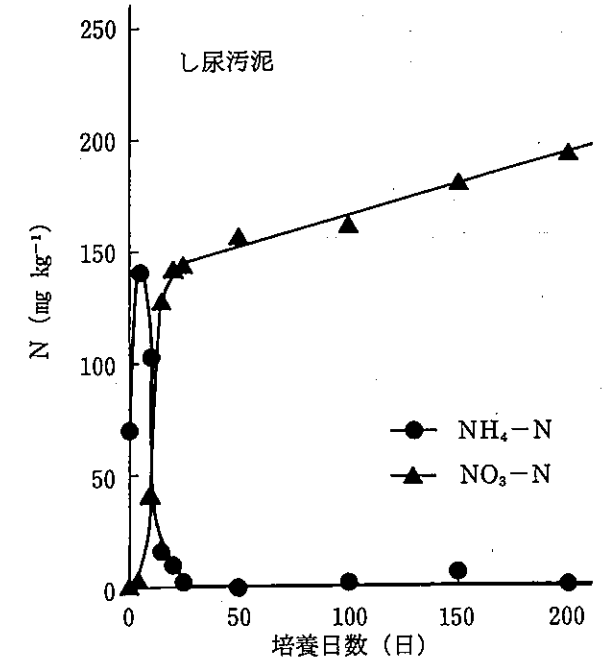
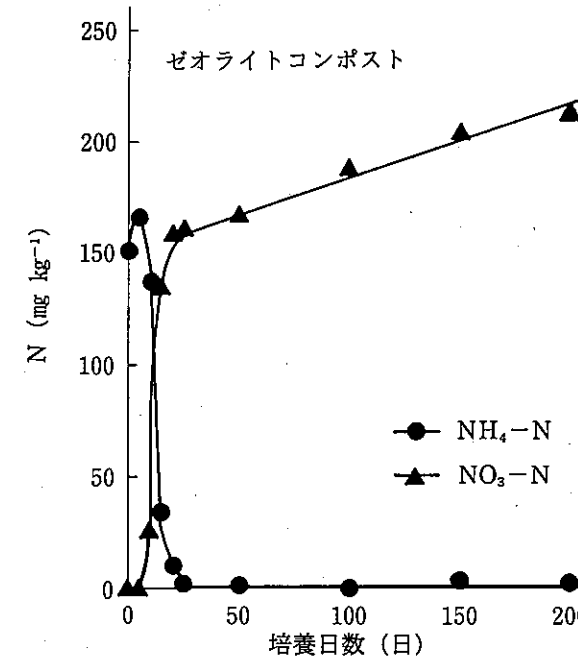
添加率 (%)	発芽率 (%)		葉重		跡地土壌			
	5日後 (%)	10日後 (%)	21日後 (g/ポット)	指数	pH (H <sub>2</sub> O)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> -N (mg kg <sup>-1</sup> )
0	68	89	6.34	100	5.8	0.13	11	0
0.25	57	85	7.08	112	5.8	0.15	27	3
0.5	69	81	6.97	110	5.8	0.17	55	3
1.0	69	76	6.85	108	5.9	0.21	122	7
1.5	72	84	5.26	83	6.1	0.27	180	7
2.0	77	88	5.61	88	6.1	0.31	235	11
4.0	69	84	2.59	41	6.5	0.50	487	15



第1図 培養温度がゼオライトコンポストの無機態窒素生成量に及ぼす影響



第2図 ゼオライトコンポストとし尿汚泥の無機態窒素生成量の推移 (25°C)



第3図 ゼオライトコンポストとし尿汚泥の硝酸化成の推移 (25°C)

り、特に、アンモニア態窒素は、1、1.5、2、4%添加でそれぞれ、122、180、235、487mg kg<sup>-1</sup>と濃度の高まりが顕著であった。

#### 3. 窒素の無機化量

第1図にゼオライトコンポストの培養温度と無機態窒素生成量の関係を示した。培養温度の違いによる生成量の差は少なく、培養終了時(200日後)における乾

土1kg当たりの無機態窒素量は、20°Cで202mg、25°Cで212mg、30°Cで221mgであった。

第2図には25°Cにおける、ゼオライトコンポストとし尿汚泥の無機態窒素生成量の推移を示した。ゼオライトコンポストの無機態窒素の生成は、培養期間を通じて比較的緩やかであった。一方、し尿汚泥は培養初期において急激に無機態窒素が生成し、培養により生

成した無機態窒素量はし尿汚泥の方が多かった。しかし、培養開始時における無機態窒素量は、ゼオライトコンポストがし尿汚泥より2倍以上多く、このため、培養期間中の無機態窒素生成量は、ゼオライトコンポストの方が常に多かった。

第3図にはゼオライトコンポストとし尿汚泥の25°Cにおける硝酸化成の推移を示した。ゼオライトコンポスト、し尿汚泥とも、10~15日にかけて急激に硝酸化成が進行した。このため、アンモニア態窒素は20日以降ほとんどみられなくなった。

第11表には同じく25°Cにおけるゼオライトコンポストとし尿汚泥の有機態窒素の無機化率を示した。培養開始時の無機態窒素量は、ゼオライトコンポスト151mg kg<sup>-1</sup>、し尿汚泥70mg kg<sup>-1</sup>で、全窒素に対する割合はそれぞれ30、14%であった。有機態窒素の無機化率はゼオライトコンポストの場合、50日までは5%、100日、200日後でそれぞれ10、18%となった。一方、し尿汚泥は15日後で19%と急激に無機化が進行したが、その後はあまり進まず、100日後21%、200日後29%となった。培養終了時におけるゼオライトコンポストの無機化率は、し尿汚泥のほぼ2/3であった。

第11表 ゼオライトコンポストとし尿汚泥の有機態窒素無機化率 (25°C)

培養 日数 (日)	ゼオライトコンポスト		し尿汚泥	
	無機化量 (mg kg <sup>-1</sup> )	無機化率 (%)	無機化量 (mg kg <sup>-1</sup> )	無機率 (%)
0	(151)	(30)	(70)	(14)
15	17	5	82	19
25	18	5	87	20
50	18	5	90	21
100	36	10	92	21
150	56	16	111	26
200	64	18	125	29

4. 窒素とリン酸の利用効率

第12表にハウレンソウの収量、窒素、リン酸の吸収量および利用率を示した。窒素成分を対照区と同量施用したコンポスト標準量区は、対照区の60%の収量となり、1.5倍量区はほぼ同等、2倍量区は約20%増収した。窒素の吸収量は標準量区が対照区の40%、2倍量区がほぼ同程度となった。一方窒素の利用率は、対照とした硫酸の40%に対し標準量区17%、1.5倍量区

19%、2倍量区21%で、硫酸の40~50%の利用効率となった。

リン酸の吸収量は、標準量区が対照区の75%で、窒素と比較して吸収された割合は高かった。また、リン酸の利用率は、対照とした過リン酸石灰の9.3%に対し、標準量区7.1%、1.5倍量区7.2%、2倍量区6.7%で、過リン酸石灰の70~80%の利用効率となり窒素のそれより高かった。

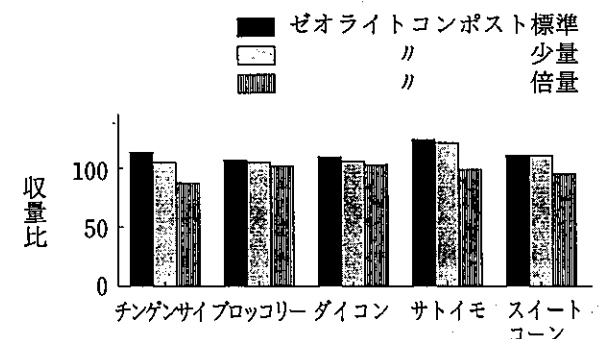
第12表 ハウレンソウの収量と窒素、リン酸の吸収量及び利用率

試験区	葉重 (g/ポット)	N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
		吸収量 (mg/ポット)	利用率 (%)	吸収量 (mg/ポット)	利用率 (%)
対 照	222.2	1,013	40	252	9.3
無 窒 素	7.8	16	-	25	0.6
無リン酸	24.2	108	4	11	-
コンポスト 標準量	132.7	441	17	192	7.1
コンポスト 1.5倍量	210.1	731	19	291	7.2
コンポスト 2倍量	259.8	1,068	21	366	6.7

5. 窒素質肥料代替効果

第4図にゼオライトコンポストの、各作物に対する窒素質肥料代替効果を収量比で示した。コンポスト標準区、少量区は、試験した5作物いずれも対照区と同等以上の収量が得られたが両区の差はほとんどなかった。一方、倍量区はダイコン、スイートコーン、ブロッコリー、サトイモではほぼ対照区と同等の収量となったが、チンゲンサイは及ばなかった。

第13表に作物体中の無機成分含有率を示した。窒素、



第4図 ゼオライトコンポストの作物に対する窒素質肥料代替効果 (化学肥料区を100とする)

第13表 作物体無機成分含有率

試験作物	試験区	(g kg <sup>-1</sup> )			(mg kg <sup>-1</sup> )			
		N	P	K	Zn	Cu	Cd	Hg
チンゲンサイ	対 照	46	12	92	67	6.1	0.78	0.03
	コンポスト標準	50	12	86	66	6.1	0.73	-
	// 少量	52	13	91	83	6.7	0.74	-
	// 倍量	45	13	86	71	6.0	0.48	0.03
ダイコン	対 照	21	4.1	44	29	2.9	0.15	0.01
	コンポスト標準	21	4.0	43	27	2.7	0.14	-
	// 少量	20	4.0	42	27	3.0	0.14	-
	// 倍量	19	4.5	43	26	3.4	0.13	0.01
スイートコーン	対 照	24	5.2	18	50	4.5	0.13	0.03
	コンポスト標準	24	5.0	18	54	4.4	0.15	-
	// 少量	24	5.0	17	53	4.2	0.07	-
	// 倍量	24	5.3	18	52	4.6	0.10	0.03
ブロッコリー	対 照	53	8.1	42	49	6.2	0.12	0.01
	コンポスト標準	57	8.5	43	50	6.0	0.13	-
	// 少量	56	8.3	44	48	4.4	0.10	-
	// 倍量	52	8.2	43	46	3.9	0.09	0.01
サトイモ	対 照	17	3.5	43	22	4.3	0.30	0.03
	コンポスト標準	19	3.5	45	26	4.9	0.28	-
	// 少量	18	3.4	44	24	5.0	0.26	-
	// 倍量	19	3.5	44	28	4.7	0.25	0.03

リン、カリウムはいずれも処理による差がなかった。また、ゼオライトコンポストを施用した区の亜鉛、銅、カドミウムは対照区と比較して高いものもあるが、逆に低い場合もあり、コンポスト施用量と作物体含量との間に一定の傾向は認められなかった。また、水銀濃度は対照区と変わらなかった。

IV 考 察

下水処理により発生する汚泥の農業利用をすすめるためには、作物に対する安全性を高め、製品の貯蔵、輸送、取り扱いを容易にする必要があり、コンポスト化はこれらの要件を満たす有力な手段である。1991年の建設省下水道部の調査でも、この年発生した汚泥は27%に相当する577km<sup>3</sup>が有効利用されており、その大部分がコンポスト化された製品であるとされている<sup>15)</sup>。汚泥のコンポスト化には、通気性の確保と水分調整のため副資材として、モミガラ、おがくず、パーク等がよく用いられているが<sup>13)</sup>、ゼオライトを添加し

て下水汚泥をコンポスト化した報告はみられない。ゼオライトは高い陽イオン交換容量を有しており、地力増進法では主要効果を保肥力の改善に置いた土壌改良資材に指定されている<sup>16)</sup>。また、その立体構造からアンモニウムイオン、カリウムイオンを特異的に吸着する性質を有しており<sup>7,8)</sup>、この性質を利用して排水中のアンモニア態窒素の除去も数多く試みられている<sup>14,18,19,25)</sup>。後藤ら<sup>9)</sup>は鶏糞あるいは豚糞にゼオライトを混合すると、分解に伴って生成したアンモニアはゼオライトに吸着されるので、ゼオライトの混和量が多いほどアンモニアガスの揮散が抑制されること、更に、この吸着されたアンモニア態窒素は、塩化カリウム溶液で交換浸出されるが、水ではほとんど浸出されないことを報告している。

本報告のゼオライトコンポストの化学成分組成をみると、全窒素含量が約40g kg<sup>-1</sup>(乾物当たり50g kg<sup>-1</sup>)と比較的高く、無機態窒素はそのうちの30%を占め、その大部分はアンモニア態で硝酸態はごくわずかである。これは、下水汚泥のコンポスト化の際に発生した

アンモニアが添加されたゼオライトに吸着され、その揮散が抑制されたことを示している。更に、この無機態窒素のうち、塩化カリウム溶液で浸出される量が、水で浸出される量の2倍であったことから、無機態窒素の1/2は水では浸出されない形で、ゼオライトに吸着されていることを示しており、前述の後藤らの報告と一致している。このように無機態窒素を多量に含むことは、速効性肥料的な性格を持つことであり、ゼオライトコンポストが一般の堆肥とは大きく異なる点である。

ゼオライトコンポストは前述したように無機態窒素、特にアンモニア態窒素含量が高く、多量施用すると発芽障害などの心配があるため、コマツナを用い幼植物試験を行った。添加率と発芽率、葉重との関係を見ると、土壌に4%添加しても発芽障害は認められなかったが、1.5% (ha当たり15Mg相当)以上添加すると、初期生育の抑制が顕著であり、アンモニア態窒素の過剰障害と考えられた。この結果から、その適度な施用は作物の生育に有効である反面、堆肥のように多量施用すると窒素の過剰害や、未利用窒素による環境の二次汚染が懸念される。したがって、1回当りの施用量は、その作物の基肥窒素量の範囲内にとどめた方がよいと判断される。

下水汚泥の緑農地への施用効果については、土木学会<sup>4)</sup>が多くの試験例をとりまとめており、要約するとその主たる効果は、汚泥に含まれる窒素の肥料的効果によるものと考えられている。したがって、汚泥の窒素含量とその無機化率を把握することが、各作物に対する施用量を決定する目安となる。新井<sup>1)</sup>によれば、下水汚泥(脱水汚泥)は嫌気性消化の有無、凝集剤の種類や添加量により窒素含量が異なり、乾物当たり10~60g kg<sup>-1</sup>(平均37g kg<sup>-1</sup>)の窒素を含む。しかし、下水汚泥コンポストのそれは、コンポスト化の過程でアンモニアの揮散や脱窒が起きるため、10~40g kg<sup>-1</sup>(平均20g kg<sup>-1</sup>)と低くなっている。また、コンポスト化していない下水汚泥の無機化率はこれまでの報告をみると培養4~8週間後で30%前後であり、このことから、これらの下水汚泥に含まれる窒素のほぼ30%が有効化すると考えられている<sup>5,11,21)</sup>。一方、コンポスト化した例の報告は少ないが、山田<sup>26)</sup>は脱水汚泥と発酵処理汚泥の肥効解析を行い、下水汚泥コンポストの無機化率は培養8週間後で5%と低いものの、10%程度の無機態窒素を含むので、窒素の肥効は総合して15%程度であるとしている。

ゼオライトコンポストの有機態窒素の無機化率についてみると、25°Cで培養したとき50日までが5%、100日で10%と低く、この値は山田の報告<sup>26)</sup>と変わらないが、し尿汚泥のそれはゼオライトコンポストに比較して高い。これは、し尿汚泥は易分解性有機物が多いのに対し、ゼオライトコンポストはコンポスト化の過程でこれらが分解し、比較的分解しにくい窒素化合物の割合が高くなる<sup>1)</sup>ことによると考えられる。このことは、第2図の無機態窒素生成量からも推測される。これらの結果から、作物に利用可能な窒素は、汚泥に含まれる無機態窒素と栽培期間中に無機化する窒素の含量と考えれば、ゼオライトコンポストのそれは全窒素の40%前後となり、し尿汚泥よりも多くなる。

次に、含有される窒素とリン酸の肥効利用率の面から検討するため、ゼオライトコンポストの窒素施用量を対照区と同量から2倍量まで変えて、ホウレンソウで試験した。収量は1.5倍量区が対照区とほぼ同等で、利用率は施用量による差は少なく、窒素が硫酸の約50%、リン酸が過リン酸石灰の約75%であった。後藤ら<sup>10)</sup>は、おからと鶏糞を用いてゼオライトコンポストを製造し、その肥効をソルゴーで検討して、リン酸の利用率は対照とした過リン酸石灰の75%、窒素のそれは対照とした硫酸を上回ったことを報告している。リン酸については本報と同様の結果であったが、窒素については結果が異なった。これは後藤らの場合、ゼオライトの添加量が多く、しかも下水汚泥と比較して、おからや鶏糞は分解しやすい資材であるため、生成したアンモニアがほとんどゼオライトに吸着され、その結果作物に利用される窒素が多くなったことによるものと考えられる。また、BARTZら<sup>2)</sup>はスーダングラスの収量に対して、アンモニウムイオン飽和吸着ゼオライト(クリノプロチロライト)の施用効果は、硫酸と同等であることを認め、特に、窒素の利用率は、天然肥沃度の低い土壌では硫酸より高く、その肥効が播種後242日まで持続したことを報告している。これらのことから、ゼオライトコンポストに含まれる窒素、リン酸とも、他の下水汚泥やそのコンポストより肥効が高いことが推測される。

室内実験及び利用率試験から、ゼオライトコンポストの窒素の肥効率は窒素質肥料の約50%と考えられるが、これが妥当であるかどうかを検討するため、いくつかの作物について代替試験を行った。下水汚泥や下水汚泥コンポストを、窒素質肥料代替の観点から試験した例は少なく、松本ら<sup>17)</sup>が下水汚泥について、窒素

の無機化率を30%とし、これの化学肥料代替施用が普通作物の生育収量に及ぼす影響を検討し、代替率1/3~3/3で収量が、いずれも対照区の化学肥料と同等かこれを上回ったことを報告しているにすぎない。

本報ではゼオライトコンポストの肥効率を窒素質肥料の1/3及び1/2に仮定した区を設定し、更に、肥効率を1/2とした場合、基肥窒素の代替率を1/3と全量にした処理区を設けて試験を行った。基肥窒素の1/3を代替した場合は、対照区と同等以上の収量が得られること、並びに、肥効率を1/2に仮定した区と、1/3に仮定した区との間には収量的に差がないことを認めた。また、基肥窒素を全量代替した場合でも栽培期間が2か月と短いチンゲンサイを除いて対照区とほぼ同等の収量が得られている。したがって、ゼオライトコンポストは窒素質肥料の1/2の肥効率であり、下水汚泥の1/3より高いことを認めた。ただし、栽培期間が2か月以内の短い作物では窒素の肥効が十分でないで、代替率を1/3と少なくし、残りは化学肥料を使用した方がよい。

なおリン酸については、含量が窒素と同程度であったため、代替試験では基肥リン酸の多い作物はリン酸肥料を補った。しかし、1991年に消化汚泥の処理方法が変更されて以来、汚泥中のリン酸含量が増加し、現在の製品は70~80g kg<sup>-1</sup>となっている。このリン酸の肥効は、ホウレンソウでの利用率試験の結果から、対照とした過リン酸石灰の3/4程度であり、今後はリン酸肥料を施用しなくても、収量低下はほとんどないと考えられる。

また、カリウムはゼオライトコンポストも他の下水汚泥コンポストと同様、含量が低いので、硫酸加里、塩化加里等の化学肥料で全量補う必要がある。

汚泥類の農用地利用にあたっては常に重金属の土壌蓄積が問題となる。ゼオライトコンポストの重金属含量はカドミウム、ヒ素、水銀それぞれ、現物で1.3, 8.0, 1.0mg kg<sup>-1</sup>(乾物当たり1.8, 10.0, 1.3mg kg<sup>-1</sup>)といずれも特殊肥料の基準である乾物当たりカドミウム、ヒ素、水銀それぞれ5, 50, 2mg kg<sup>-1</sup>以下に適合している。しかし、亜鉛も800mg kg<sup>-1</sup>(乾物当たり1,100mg kg<sup>-1</sup>)含んでおり、連用すれば当然亜鉛の土壌蓄積が考えられる。また、ゼオライトはイオン交換作用により各種の重金属イオンを吸着する性質があり<sup>22,27)</sup>、汚泥に含まれる重金属も、作物による吸収が抑制される可能性があるといわれているが、代替試験での重金属含量を見ると、ゼオライトコンポスト施用量と作物体含

量との間には一定の傾向がなく、実用的な施用量の範囲では吸収増や抑制は認められなかった。作物と土壌に対するこれらの影響については、試験を重ねたうえで改めて検討したい。

## V 摘 要

下水汚泥にゼオライトを添加してコンポスト化したゼオライトコンポストの特性と、窒素、リン酸の肥効を調査し、その施用法を検討した。

1. ゼオライトコンポストの窒素含量は40g kg<sup>-1</sup>(現物)で、そのうち30%が無機態窒素であった。無機態窒素はほとんどがアンモニア態で、硝酸態は少なかった。リン酸は窒素と同程度含まれており、重金属含量はいずれも特殊肥料の基準に適合していた。

2. ゼオライトコンポストの有機態窒素の無機化率は、25°C培養、50, 100, 200日後でそれぞれ、5, 10, 18%と低かった。しかし、無機態窒素量が多いため、ホウレンソウでは、窒素の利用率は対照とした硫酸の50%、リン酸のそれは対照とした過石の75%であった。このことから、ゼオライトコンポストの窒素の肥効率は窒素質肥料の1/2と考えられる。

3. ゼオライトコンポストは堆肥のように多量施用すると、アンモニア態窒素による過剰障害の恐れがあるので、1作当たりの施用量は作物の基肥窒素量の範囲内にとどめるべきである。

4. 基肥窒素をゼオライトコンポストで全量代替しても、栽培期間が2か月以上の長い作物では化学肥料とほぼ同等の収量が得られる。しかし、栽培期間がこれより短い作物では、窒素の肥効が十分でないで、代替率を1/3として化学肥料を併用するのがよい。

## 引用文献

- 1) 新井重光(1991): 下水汚泥、食品工場汚泥および同コンポストの特性(日本土壌肥料学会監修: 有機性汚泥の緑農地利用)。博友社, p.57-93.
- 2) BARTZ, J.K. and JONES, R.L. (1983): Availability of Nitrogen to Sudangrass from Ammonium-Saturated Clinoptilolite. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 259-262.
- 3) BREMNER, J.M. (1965): Inorganic Forms of Nitrogen (Method of Soil Analysis). American Society of Agronomy, p.1179-1237.

- 4) 土木学会 (1970~1975): 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44~49年度). 土木学会, 1135pp.
- 5) 海老原武久・山田 要・松村 蔚 (1979): 汚泥の農用地への利用に関する研究 (第1報) 汚泥の理化学性と連用試験について. 群馬農試研報19; 49-58.
- 6) 下水汚泥資源利用協議会 (1983): 下水汚泥分析方法. 下水汚泥資源利用協議会, 94pp.
- 7) 後藤逸男・蜷木 翠 (1979): 天然ゼオライトの農業利用に関する基礎的研究 (第1報) 畑土壌における硝酸化成抑制と塩基流出防止効果について. 東京農大農学集報24 (2); 164-183.
- 8) 後藤逸男・蜷木 翠 (1980): 天然ゼオライトの農業利用に関する基礎的研究 (第3報) アンモニウム型天然ゼオライトのイオン選択係数の測定. 東京農大農学集報25 (2); 164-168.
- 9) 後藤逸男・蜷木 翠 (1980): 天然ゼオライトの農業利用に関する基礎的研究 (第4報) 天然ゼオライトのアンモニアガス揮散抑制効果. 東京農大農学集報25 (2); 169-179.
- 10) 後藤逸男・竹間 馨・玉木和之・蜷木 翠 (1984): 天然ゼオライトの農業利用に関する基礎的研究 (第5報) ゼオライトコンポストの性質と肥効. 東京農大農学集報28 (4); 383-392.
- 11) 平山 力・桜井鎮男・小林 登 (1987): 下水汚泥の農業利用に関する研究 (第1報) 下水汚泥の理化学性. 茨城農試研報27; 57-65.
- 12) 伊藤富夫・石破 智・飯島 宏・森 忠洋・野田修司・田村明長 (1993): ゼオライトコンポストー島根県の事例ー. 用水と排水35; 1015-1020.
- 13) 伊澤敏彦 (1983): 下水汚泥コンポスト化の方法(茅野充男編: 下水汚泥コンポスト入門). 下水汚泥資源利用協議会, p.41-64.
- 14) 河 紀成・鈴木基之 (1984): 天然ゼオライトを用いた排水中のアンモニウムイオンの除去. 水質汚濁研究 7: 448-460.
- 15) 建設省下水道部 (1993): 平成3年度下水汚泥有効利用状況調査報告. 再生と利用61; 53-78.
- 16) 久保田徹 (1985): ゼオライト (日本土壌肥料学会監修: 土壌・水質・農業資材の保全). 博友社, p.128-132.
- 17) 松本英一・平山 力 (1987): 下水汚泥の農業利用に関する研究 (第2報) 下水汚泥の畑施用が作物の生育収量に及ぼす影響. 茨城農試研報27; 67-80.
- 18) 三木康平・加藤明德・加藤宏夫 (1980): 天然ゼオライトによる排水中のアンモニアの除去(その1). 住友重機械技報82; 64-68.
- 19) 三箇清治・高橋 浩・吉岡 等 (1973): ゼオライトによる下水中のアンモニア性窒素の除去. 下水道協会誌105; 2-11.
- 20) 湊 秀雄・田村孝章 (1993): 天然物系吸着剤 (清水博監修: 吸着技術ハンドブック). エヌ・ティー・エス, p.4-36.
- 21) 元木征治 (1989): 高分子系下水汚泥の農業利用と簡易モニタリング法. 再生と利用46; 18-25.
- 22) 野田修司 (1980): 天然ゼオライトによる重金属含有排水の処理について. 島根県工技センター研報 17; 27-33.
- 23) 野田修司 (1986): 島根県産ゼオライトの工業利用に関する研究 (第1報) イオン交換処理による酸素製造能の改良. 島根県工技センター研報23; 1-9.
- 24) 作物分析法委員会 (1975): 栄養診断のための栽培植物分析測定法. 養賢堂, 545pp.
- 25) 佐藤敦久・八木美雄 (1974): ゼオライトによるアンモニア除去 (I). 水道協会雑誌477; 27-33.
- 26) 山田 裕 (1990): 神奈川県における下水汚泥の施用事例ー脱水汚泥と発酵処理汚泥の肥効解析ー. 再生と利用49; 27-32.
- 27) 吉田秀夫・倉田 陽・三箇清治 (1976): 各種ゼオライトによる汚水中の重金属イオンの除去. 水処理技術17; 219-226.

## Summary

This study was carried out to make clear the properties of zeolite sewage sludge compost (zeolite compost) and its optimum amount for crops.

1. Zeolite compost comprised 40g kg<sup>-1</sup> nitrogen. 30% of nitrogen proved to be inorganic form, which consists of a large amount of ammonium nitrogen and a little nitrate nitrogen. Phosphorus content was the same rate as much as nitrogen.

2. The mineralized rate of organic nitrogen of zeolite compost for 50, 100 and 200 days of incubations at 25°C was 5, 10 and 18% respectively. Zeolite compost contained a large amount of ammonium nitrogen. Therefore, in the spinach, the recovery of nitrogen and phosphorus from zeolite compost was 50% of ammonium sulfate and 75% of superphosphate, respectively. Zeolite compost was estimated to be a half of nitrogen fertilizers.

3. When a plenty amount of zeolite compost was applied, an excess damage caused by ammonium nitrogen may occur in any crops. Therefore, on nitrogen content, application amount of zeolite compost should be at most the basal dressing nitrogen for the crops.

4. When zeolite compost was substituted completely for basal dressing nitrogen in the crops grown up for more than two months, as much yield could be obtained as chemical fertilizer was applied. In the crops within two months, zeolite compost should be substituted for one third of the basal dressing nitrogen.