

道内における農畜産加工汚泥の成分組成と窒素無機化特性

中村 隆一** 平井 義孝***

北海道内の農畜産物加工工場から排出される汚泥は、都市下水汚泥に比較して炭素及び窒素の含有率が高く、重金属の含有率が低かった。化学組成は未消化汚泥であるため、工場毎に特徴が認められ、窒素含有率は、食肉加工工場汚泥・醸造工場汚泥>製糖工場汚泥>乳製品製造工場汚泥>スイートコーン加工工場汚泥>馬鈴薯加工工場汚泥の順であった。びん培養法による7週目の各汚泥の窒素無機化率とC/N比の間に負の相関関係が認められた。窒素無機化推移より、Ⅰ型：初期の無機化が急激で、後半に低下するが全体の無機化率が高い、Ⅱ型：全期間を通してほぼ一定の割合で無機化は進むが、全体ではⅠ型より低い、Ⅲ型：初期に窒素有機化が見られ、全体の無機化率が最も低い、の3つの型に分けられた。また、培養初期における窒素の無機化率から、汚泥の窒素無機化パターンに基づく分類指標を示した。

I 緒 言

近年、北海道では環境調和型農業確立のための研究が推進され、その一環として減化学肥料有機栽培技術の確立を目標として、地力の向上策、土壤に施用される有機物の評価方法が検討されている。有機物には肥料効果、土壤の物理性及び生物性を改善する効果が期待されているが、有機物の不適切な施用により農産物の品質低下を招く場合も認められている。このため、有機物に含有されている肥料成分の有効化及び作物による利用率を予測する研究が行われ、有機物の種類と土壤及び地温などの環境要因との関係が整理されつつある。

道内で耕地に施用されている有機質資材の大半は堆厩肥及び稲わらなどの圃場副産物であり、その多くは酪農、水田地帯に遍在しており、畑・園芸地帯では有機物資源の確保が困難な例が多い。一方、耕地で利用されている、有機物を含有する特殊肥料は、その流通量が年々増加している。これら特殊肥料の大半は、都市下水汚泥を始めとする汚泥類であり、この中には道内約1,000カ所の農畜産加工工場で発生する汚泥も含まれる。農畜産加工汚泥は、1988年時点約11万tに及び、そのうち約4万tが

耕地に施用されている²⁾。特殊肥料として利用されている汚泥のうち、都市下水汚泥については、その肥効について、また含有されている重金属類や凝集剤に関して数多くの研究があり⁷⁾、北海道では都市下水汚泥の施用基準が策定されてきた⁴⁾。しかし、農畜産加工汚泥については、肥料成分、特に作物生育と関連の深い窒素の無機化率などが体系的に整理されておらず、効率的に汚泥を活用する上で障害となっている。

そこで、道内の農畜産加工汚泥を収集し、その化学組成と含有されている窒素の無機化特性を検討したので、以下に報告する。

II 試験方法

1. 供試試料とその産出工程

道内の農畜産加工工場21件から合計33点の汚泥を採取した。この内訳は、食肉加工工場5件5点、乳製品製造工場2件2点、醸造工場2件2点（みそ製造工場、ウイスキー工場）、スイートコーン加工工場2件4点、馬鈴薯加工工場2件4点、製糖工場7件15点、製菓工場1件1点であった。比較対照材料として、汚泥は堆肥化され耕地に施用されている例が多いことを考慮し、家庭生ごみと籾殻を混合して堆肥化した都市ごみコンポスト6点と、道内で比較的大量に農地などへの還元が行われている都市下水汚泥14点の化学組成を調査した。

2. 試料の調整及び分析方法

供試汚泥の収集は、1980年から1982年に実施し、工場内の污水处理施設の脱水機、汚泥ホッパー部から数点に

1995年8月17日受理

*本報の一部は、1984、1985、1986年度日本土壤肥料学会北海道支部大会で発表した。

**北海道立中央農業試験場、(現北海道立道南農業試験場、041-12 亀田郡大野町)

***同上(現帯広市)

分けて2 kg程度採取し、均一に混合後、70℃で2 昼夜通風乾燥し、ボールミルで粉碎後、2 mmのふるいを通して供試試料とした。

化学組成は肥料分析法（1982年度版・農水省農蚕園芸局編）に従い、水分・pH、EC、全窒素、無機態窒素、全炭素、リン酸、カルシウム、マグネシウム、カリウム、重金属成分（亜鉛、銅、ヒ素、カドミウム、水銀、ニッケル、鉛）の各含有率を測定した。有機態窒素の分画定量は、三木らの方法¹⁾により行った。すなわち、乾燥粉末試料に6 N塩酸を加え24時間加熱後ろ過し、残渣をケルダール分解して酸不溶性窒素を定量した。次に、ろ液を1N-可性ソーダ条件で蒸留して酸可溶性抽出性窒素を測定した後、蒸留残留液をろ過し、残渣をケルダール分解して、酸可溶性ヒューミン態窒素を測定した。ろ液はpH2.5クエン酸緩衝液とニンヒドリンを加え、加熱後pH11.2クエン酸緩衝液で蒸留して酸可溶性アミノ酸態窒素を定量し、蒸留残渣をケルダール分解して酸可溶性未同定窒素とした。汚泥の炭水化物成分は土壤保全対策資料56号に基づき分画定量した。すなわち、熱エタノール・ベンゼンで4時間脂肪を抽出した後、残渣を熱水で2.5時間抽出して熱水抽出性有機物を得た。次いで2%塩酸で5時間加水分解して、抽出液中の糖をソモジー法で定量してヘミセルロースを定量し、残渣を80%硫酸で5時間加熱後ろ過して、ろ液の糖をソモジー法で定量してセルロース画分を求め、残渣をリグニンとした。

3. 汚泥に含有されている炭素の分解率及び窒素の無機化率の測定

試料に含有されている炭素の分解率と窒素の無機化率をびん培養法で測定した。供試土壌として風乾後2 mmのふるいを通した沖積土を使用した（表1）。各種試料を乾土当り2% w/wの割合で土壌と混合し、土壌水分は最大含水量の60%とし、土壌pHが6.5となるように炭酸カルシウムを添加した後、26℃で7週間培養した。試料無添加区を対照として設け同様に培養した。この培養条件における積算温度は、道内畑地帯における5～7月の平均的積算気温にほぼ相当する。

培養期間中は、炭酸ガス（CO₂）発生量、無機態窒素量を1週間毎に定量し、以下の方法で炭素分解率及び窒

表1 供試土壌の化学性

pH	CEC	Ex-Base(mg100g ⁻¹)			トルオーグP ₂ O ₅	腐植
(H ₂ O)	(me100g ⁻¹)	CaO	MgO	K ₂ O	(mg100g ⁻¹)	(gkg ⁻¹)
5.32	18.6	193	25	28	24.3	46.6

素無機化率を算出した。

窒素無機化率の測定は食肉加工工場汚泥3点、製糖工場汚泥2点、スイートコーン加工工場汚泥2点、馬鈴薯加工工場汚泥2点、製菓工場汚泥、乳製品製造工場汚泥及び都市ごみコンポスト各1点の計12点で行い、炭素分解率の測定は、窒素無機化率の測定を行った試料のうち、食肉加工工場汚泥、製糖工場汚泥、スイートコーン加工工場汚泥、馬鈴薯加工工場汚泥及び都市ごみコンポスト各1点の計5点で行った。

4. 作物栽培試験

農畜産加工汚泥が作物生育に及ぼす影響を知るために、1981年から1982年に、ガラス室内でエンバク「モイワ」を供試して栽培試験を実施した。供試試料は食肉加工工場汚泥、スイートコーン加工工場汚泥、馬鈴薯加工工場汚泥及び都市ごみコンポストの4点であった。1/5000 aワグネルポットを用いて、培養試験と同じ沖積土を炭酸カルシウムでpH6.0に調整した後、ポット当たり3 kg詰め、乾燥粉碎した汚泥などをポット当たり全窒素で500mgとなるように施用し、5月中旬に播種し60日間栽培した。地上部乾物重と窒素吸収量を20日毎に測定した。対照区として無窒素区及び硫酸アンモニウムを窒素でポット当たり250mg施肥した硫酸区を設けた。過リン酸石灰はP₂O₅で1 g、硫酸カリはK₂Oで0.5 gを各ポットに共通施肥した。エンバクによる窒素の利用率は、汚泥施用区と無窒素区の地上部窒素吸収量の差から算出した。

Ⅲ 試験結果

1. 農畜産加工汚泥の処理工程の特徴

農畜産加工汚泥の一般的な産出工程を図1に示した。農畜産加工汚泥は、加工工場内より排出する污水（原料洗浄水、床洗浄水、器具洗浄水、冷却水など）を処理する際に発生する。污水处理場に流入する污水は、工場内の排水に限られており、食肉加工工場では、血液などの

$$C \text{ 分解率}(\%) = \frac{(\text{試料混合区のCO}_2\text{発生量}) - (\text{対照区のCO}_2\text{発生量})}{\text{土壌に混合した試料中の全C量}} \times 0.27 \times 100$$

$$N \text{ 無機化率}(\%) = \frac{(\text{試料混合区の土壌無機態N量}) - (\text{対照区の土壌無機態N量})}{\text{土壌に混合した試料中の有機態N量}} \times 100$$

*CO₂をCに変換する係数

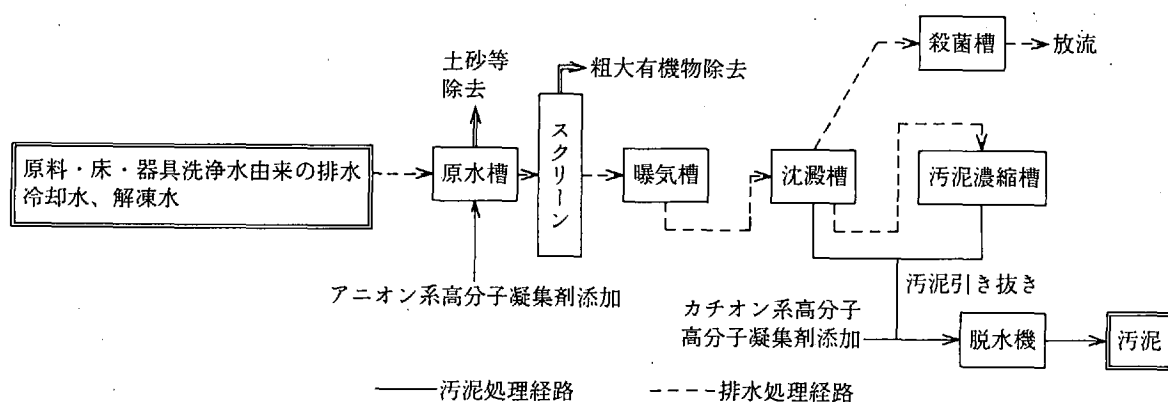


図1 農畜産加工汚泥の産出工程

水溶性の物質及びスクリーンを通過する小さい加工原料くず、畜肉を解体する際に使用する洗浄水の他、胃腸内容物も排水に流入していた。

対象とした農畜産加工工場の製品は、食肉加工工場が豚肉を主原料としたソーセージなど、乳製品製造工場が生乳を用いた加工乳、醸造工場が大豆を原料にしたみそ並びに麦を原料にしたウイスキー、製糖工場がてんさいを原料とした砂糖、製菓工場が小麦、砂糖、卵などを用いた生菓子、スイートコーン加工工場がスイートコーンの缶詰やスープ原料、馬鈴薯加工工場が馬鈴薯を原料としたフライドポテトやでんぷんであった。

排水は原水槽から曝気槽を経て、沈殿槽及び汚泥濃縮槽に送られ、ここで生じた沈殿物に凝集剤を加え機械脱水されて汚泥となる。

農畜産加工汚泥の特徴は、①消化槽を経ていない分解率の低い未消化汚泥であり、②高分子系凝集剤を添加し、機械脱水した含水率約80%の脱水ケーキであり、③都市下水汚泥と異なり汚泥が産出される時期が工場操業期間

中に限られることの3点であった。

都市ごみコンポストは、家庭で発生した生ごみや農産物の廃棄物に糠殻、パーク、鶏糞などを混合した後、金属類などの夾雑物を除去し、約10日間通気発酵させた後、切り返しをしながら2週間程後熟させたものであった。

2. 農畜産加工汚泥の化学組成

(1) 無機成分

農畜産加工汚泥の無機成分含有率を工場種別に整理し、これらと比較するため都市ごみコンポスト及び都市下水汚泥の無機成分含有率とを表2に示した。

農畜産加工汚泥の無機成分含有率には工場種毎に特徴が認められた。すなわち、他の工場種に比較して、食肉加工工場汚泥は窒素、銅含有率が高く、乳製品製造工場汚泥はリン酸含有率が2～4倍と高く、醸造工場汚泥、特にウイスキー製造工場では銅含有率が高かった。馬鈴薯加工工場汚泥はC/N比が高い傾向にあり、製糖工場汚泥はカリウム、カルシウム及びナトリウム含有率が高かった。

表2 農畜産加工汚泥の無機成分含有率（乾物あたり）と都市下水汚泥および都市ごみコンポストとの比較

供試試料	水分 (gkg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	(gkg ⁻¹)		C/N	(gkg ⁻¹)						(mgkg ⁻¹)							
			T-C	T-N		T-P ₂ O ₅	T-K ₂ O	T-CaO	T-MgO	T-Na ₂ O	T-Fe	T-Zn	T-Cu	T-Cd	T-Ni	T-Pb	T-Hg	T-As	T-Mn
食肉加工工場汚泥	880	6.27	476	68.9	6.6	26.1	2.42	20.90	3.06	1.48	5.00	845	253	1.18	14.9	11.0	0.06	1.75	174
乳製品製造工場	860	6.98	271	54.7	5.0	93.1	2.80	19.80	7.55	2.25	17.25	707	121	0.16	33.5	36.8	0.13	1.69	1357
スイートコーン加工工場汚泥	810	5.27	409	49.4	9.0	23.7	2.83	5.83	2.03	1.23	3.63	348	50	0.94	15.5	7.5	0.04	1.50	234
馬鈴薯加工工場汚泥	814	4.21	447	36.2	12.1	18.8	3.32	5.64	2.28	1.72	4.94	164	32	0.84	7.5	7.5	0.05	1.47	95
製糖工場汚泥	818	7.02	303	57.6	5.4	21.0	9.55	59.50	3.11	6.98	9.00	209	42	0.76	17.7	9.8	0.37	3.92	303
製菓工場汚泥	818	6.28	417	56.9	7.3	33.8	3.40	4.90	1.70	1.90	3.10	692	74	0.90	23.9	15.3	0.08	8.18	39
醸造工場汚泥	880	6.57	377	68.9	5.4	39.7	9.50	8.35	7.15	1.15	25.90	353	722	0.38	32.9	22.4	0.11	5.75	1290
農畜産加工汚泥 (n=33)	$\bar{X}$	6.32	362	55.8	7.1	27.5	6.31	33.50	3.35	4.03	8.64	375	121	0.80	17.8	12.0	0.20	3.11	341
	推定幅	30 ± 0.40	± 30	± 5.58	± 1.1	± 7.01	± 1.52	± 17.79	± 0.81	± 1.50	± 2.89	± 132	± 84	± 0.25	± 4.6	± 2.9	± 0.07	± 1.05	± 198
	C.V	8	19	24	61	46	76	72	160	72	106	98	102	203	90	76	71	99	170
都市下水汚泥 (n=14)	$\bar{X}$	6.96	7.54	287	35.3	9.1	35.3	3.10	70.31	7.05	25.90	999	162	3.11	26.6	78.2	1.12	8.25	953
	推定幅	60 ± 0.63	± 45	± 6.45	± 1.9	± 5.85	± 0.84	± 32.17	± 2.00	± 1.03	± 54.6	± 180	± 39	± 1.73	± 8.8	± 56.4	± 0.31	± 3.20	± 250
	C.V	25	14	32	40	34	30	49	82	36	71	97	31	42	96	57	125	47	64
都市ごみコンポスト (n=6)	$\bar{X}$	3.97	7.79	332	20.9	16.1	20.1	12.15	51.05	3.57	14.03	131	44	1.16	6.0	12.0	0.17	2.07	488

注) 推定幅はt-推定（信頼度95%）により算出した。

農畜産加工汚泥群の無機成分含有率は、都市ごみコンポスト群に比較して窒素含有率が高く、カルシウム、カリウム、ナトリウム含有率及びC/N比が明らかに低かった。また、都市下水汚泥群に比較して、炭素、窒素含有率が高く、重金属含有率では鉛、水銀、が1/5以下、カドミウム、ヒ素、亜鉛及びマンガンが1/4~1/2であり、ニッケル、銅はやや低い程度であった(表2)。

(2) 炭水化物成分

農畜産加工汚泥を概括すると、炭水化物形態のうち、粗脂肪、熱水抽出性有機物及びヘミセルロースの割合は高く、リグニン、セルロースが低かった。粗脂肪は工場毎の変動が大きく、工場種別の特徴は明らかではなかった。熱水抽出性有機物の含有率は、製糖工場で他の工場の汚泥に比較して高い傾向であった(表3)。ヘミセルロースの含有率は、馬鈴薯加工工場で他の工場に比較して明らかに高かった。セルロースの含有率は、調査した炭水化物成分の中で最も低い含有率で、工場種別の特徴は認められなかった。リグニンの含有率は、食肉加工工場で他の供試汚泥に比較して高い傾向であった。

農畜産加工汚泥は、都市ごみコンポストに比較して、

リグニン及びセルロース含有率が低く、熱水抽出性有機物及びヘミセルロース含有率が高い傾向であり、都市下水汚泥に比較して、熱水抽出性有機物及びヘミセルロース含有率が著しく高い傾向であった。

(3) 有機態窒素成分

農畜産加工汚泥の有機態窒素成分を概括すると、酸可溶性窒素(6N塩酸に可溶性窒素)が全窒素の9割程度を占め、この酸可溶性窒素の内訳は、アミノ酸態窒素の割合が最も高く、ついで未同定窒素、留出性窒素で、ヒューミン態窒素の割合が極めて低かった(表4)。

アミノ酸態窒素の含有率は、乳製品製造工場、食肉加工工場など主な加工原料が動物質である工場の汚泥で高い傾向であった。未同定窒素の含有率は、製糖工場、製菓工場で他の工場の汚泥に比較して高かった。留出性窒素、ヒューミン態窒素及び酸不溶性窒素の含有率には工場種別の明らかな特徴は認められなかった。

農畜産加工汚泥は、都市ごみコンポストに比較して化学的に安定な酸不溶性窒素の割合が低く、都市下水汚泥の有機態窒素成分に比較して、酸可溶性未同定窒素及び酸可溶性アミノ酸態窒素の含有率が高かった。

表3 農畜産加工汚泥の有機物成分

供 試 試 料	粗脂肪	熱水抽出性有機物	ヘミセルロース	セルロース	リグニン	試料点数
	(乾物gkg ⁻¹)					
食肉加工工場汚泥	72.3	62.3	62.7	10.0	72.7	3
乳製品製造工場汚泥	36.5	85.5	30.5	4.5	22.5	1
スイートコーン加工工場汚泥	60.5	59.0	49.5	4.5	40.0	2
馬鈴薯加工工場汚泥	91.0	37.5	255.5	8.0	6.0	2
製糖工場汚泥	60.0	49.0	43.0	1.0	15.0	2
製菓工場汚泥	47.0	79.0	142.0	4.0	48.0	1
都市下水汚泥	—	35.3	—	13.9	150.6	5
都市ごみコンポスト	28.0	35.0	15.0	37.0	484.0	1

注) 都市下水汚泥のセルロース含有率は、ヘミセルロース+セルロースの値。

表4 農畜産加工汚泥のN区分

供 試 試 料	無機態 N	有機態 N (乾物gkg ⁻¹)						試料 点数
		酸可溶性 N					酸不溶性 N	
		留出性 N	アミノ酸態 N	未同定 N	ヒューミン態 N	合計		
食肉加工工場汚泥	5.9	9.8	13.7	28.0	1.6	53.1	7.9	3
乳製品製造工場汚泥	0.9	5.1	9.3	39.8	0.5	54.7	1.4	1
スイートコーン加工工場汚泥	1.3	5.7	20.2	20.2	1.2	47.3	4.5	2
馬鈴薯加工工場汚泥	0.5	2.9	8.3	13.5	0.5	25.2	2.7	2
製糖工場汚泥	1.8	7.1	19.0	20.5	1.2	47.8	7.1	2
製菓工場汚泥	3.2	10.2	16.7	22.0	0.7	49.6	3.3	1
都市下水汚泥	0.2	5.4	7.7	8.8	1.4	23.3	6.7	5
都市ごみコンポスト	0.9	2.2	2.8	6.1	0.9	12.0	10.7	1

3. 汚泥の炭素分解率及び窒素無機化特性

びん培養法による供試試料の炭素分解率の経時変化を図2に示した。各汚泥とも土壌に混合直後から炭素の急激な分解が認められ、培養6週目における炭素の分解率は20～50%であった。特に、馬鈴薯加工工場汚泥の炭素分解率が最も高く、ついで製糖工場汚泥≧スイートコーン加工工場汚泥>食肉加工工場汚泥の順に高かった。都市ごみコンポストでは全期間を通じて農畜産加工汚泥に比較して炭素分解率が著しく低く、6週後においても5%程度であった。

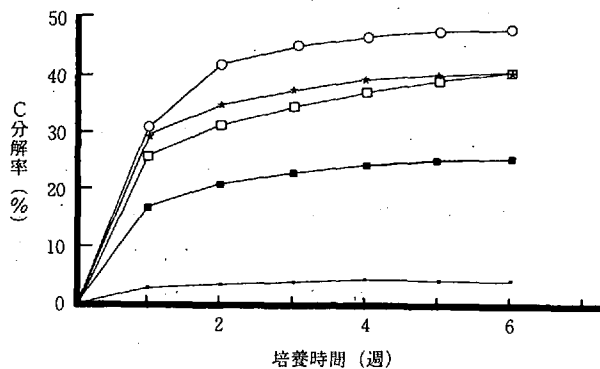


図2 農畜産加工汚泥のC分解率の推移

注) ■ 食肉加工工場汚泥 □ スイートコーン加工工場汚泥
★ 製糖工場汚泥 ○ 馬鈴薯加工工場汚泥
△ 製菓工場汚泥 ▲ 乳製品製造工場汚泥
● 都市ごみコンポスト

供試試料に含有されている窒素の無機化率の経時変化を、工場種別に平均し、図3に示した。試料に含有されている窒素の無機化は試料間で相違が認められた。すなわち、培養7週目における試料の窒素無機化率は、乳製品製造工場汚泥、製糖工場汚泥で50%以上と高く、スイートコーン加工工場汚泥、食肉加工工場汚泥、製菓工場汚泥で20～30%、馬鈴薯加工工場汚泥、都市ごみコンポストで10%以下と低かった。

これらの結果から、農畜産加工汚泥の窒素無機化率の傾向について3つの型に分けられると考えられた。すな

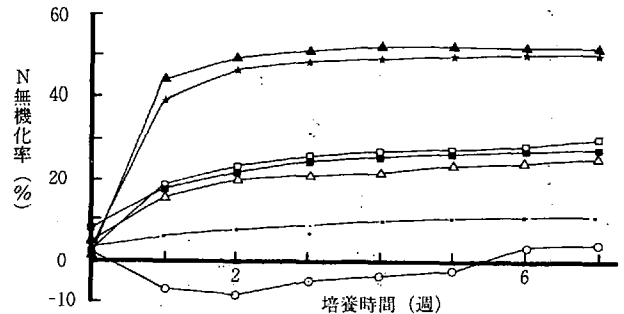


図3 農畜産加工汚泥のN無機化率の推移

注) ■ 食肉加工工場汚泥 □ スイートコーン加工工場汚泥
★ 製糖工場汚泥 ○ 馬鈴薯加工工場汚泥
△ 製菓工場汚泥 ▲ 乳製品製造工場汚泥
● 都市ごみコンポスト

わち、①培養1週目までに急激な窒素の無機化が起こり、以後の窒素無機化率が低い型（製糖工場汚泥、乳製品製造工場汚泥）、②培養期間後半まで比較的高い窒素の無機化が維持される型（製菓工場汚泥、食肉加工工場汚泥及びスイートコーン工場汚泥）、③培養期間初期に窒素の有機化が生じる型（馬鈴薯加工工場汚泥）であった。

4. 作物栽培試験

汚泥施用区の窒素の利用率は、播種後60日目で、食肉加工工場汚泥が22%、スイートコーン加工工場汚泥が20%、馬鈴薯加工工場汚泥が17%であった（表5）。一方、硫安区の窒素利用率は、播種後20日目で16%、40日目で急激に増加し70%、60日目で79%に達した。窒素の利用率の推移は汚泥により異なり、馬鈴薯加工工場汚泥区では、生育初期に葉が黄化し、草丈、乾物重、地上部窒素吸収量も無窒素区に比較して明らかに低くなるなどの窒素欠乏症状が認められた（図4）。その後、生育及び窒素吸収量ともかなり回復したが、60日目における地上部の乾物重・窒素吸収量とも他の汚泥区より低かった。食肉加工工場汚泥、スイートコーン加工工場汚泥区では、生育初期に窒素欠乏症状は認められなかったが、生育量、窒素吸収量とも硫安区より低く、窒素利用率の増加が播

表5 エンバク栽培試験結果

供 試 試 料	乾物重(g/ポット)			地上部N吸収量(mg/ポット)			試料Nの利用率(%)		
	20日目	40日目	60日目	20日目	40日目	60日目	20日目	40日目	60日目
無窒素	0.9	5.3	12.7	40	60	72	—	—	—
硫安	1.3	13.9	31.0	80	236	270	16.0	70.4	79.2
食肉加工工場汚泥	0.9	8.3	20.5	48	145	183	1.6	17.0	22.1
スイートコーン加工工場汚泥	0.8	7.0	19.8	37	134	171	-0.1	14.8	19.8
馬鈴薯加工工場汚泥	0.5	5.1	14.0	20	98	154	-4.0	7.5	16.5
都市ごみコンポスト	0.9	4.7	16.7	39	85	108	0.0	5.0	7.2

注) 日目：播種後の栽培日数

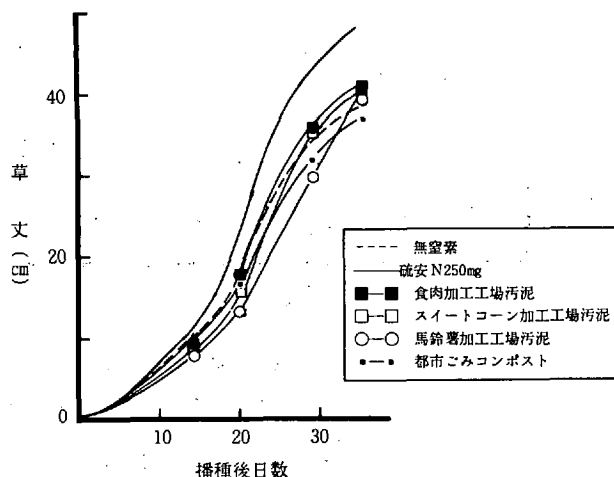


図4 エンバクの草丈の推移

種後40日目以後、鈍化した。各汚泥施用区とも播種後14日の草丈が無窒素区に比較しても低く、生育の抑制が認められた。

都市ごみコンポスト区では、60日目の試料の窒素利用率は7%で汚泥施用区に比較して低かった。しかし、播種後14日目の草丈は汚泥施用区に比較して大きく初期の生育抑制の程度は小さく、また、C/N比が14と窒素飢餓症状を発生させた馬鈴薯加工工場汚泥と同程度であったが、エンバクに同症状が認められなかった。

IV 考 察

1. 農畜産加工汚泥の化学組成の特徴

農畜産加工汚泥を耕地で安全かつ効率的に使用する上で、その化学性を把握することは重要である。

汚泥の化学組成に影響を及ぼす要因については、データ集積数の多い都市下水汚泥を中心に整理され、排水処理施設に流入する排水の発生源、すなわち汚水集水地域の人口、流入する工場排水の量及び工場の種類、流域の自然環境のほか、処理場での汚泥産出工程で用いられる凝集剤の種類、消化槽の有無などにより変動することが知られている⁸⁾。

農畜産加工工場の場合、①排水処理過程で使用する凝集剤は高分子系凝集剤であり、②発生する汚泥は未消化汚泥であることが特徴であるが、③工場の種類毎に加工原料が異なり、工場内の排水処理施設に流入する排水が加工原料の洗浄や加工行程で使用された排水に限られていた。このため、汚泥の化学成分には工場種毎に一定の特徴が認められた。

農畜産加工汚泥の化学性に影響を及ぼす要因について、加工原料の影響、工場の立地環境などの面から考察を行った。

(1) 原料の影響：

乳製品製造工場汚泥は、他の農畜産加工汚泥に比較してリン酸含有率の高いことが認められ、その原因として、牛乳に含まれているカゼイン（リンタンパク）及びリン酸カルシウムなどの影響が考えられる。一方、カルシウムを製造工程で使用する製糖工場の汚泥はカルシウム含有率が他の汚泥に比較して高い。

農畜産加工工場全体を通して、排水の処理工程中有機物を嫌気分解する消化工程が無い。このため、戸外の貯留槽で長期間汚泥を貯留する製糖工場汚泥を除き、生産される汚泥の分解程度は低く、消化汚泥が主体の都市下水汚泥に比較して同レベルの窒素含有率の汚泥では炭素含有率が明らかに高い傾向がみられた。また、汚泥の炭水化物及び有機態窒素成分には、各工場で使用される原料の有機成分の影響が現われやすく、工場毎に特徴が認められる。食肉加工工場や、大豆を加工する醸造工場など加工原料の蛋白質含量が高い工場の汚泥は、窒素含有率が高い。さらに、加工原料中の遊離のアミノ酸含量が高い醸造工場や、乳製品製造工場、あるいは製品の収率向上のためにアミノ酸を原料から除く工程がある製糖工場では、全窒素に占める酸可溶性アミノ酸態窒素の比率が高い。馬鈴薯加工工場でヘミセルロースが高い原因は、汚水に混入する剥皮工程で生じる馬鈴薯の表皮の屑の影響と考えられる。また、ポテトチップなどを製造する馬鈴薯加工工場や、ソーセージなどの肉加工品を製造する食肉加工工場では油が使用されており、汚泥の粗脂肪含有率が高かった。

(2) 重金属問題：

汚泥の耕地施用に際し問題となるのは、汚泥に含まれている重金属が土壌及び作物に及ぼす影響である。都市下水汚泥では重金属の混入要因について解析がすでに行われている⁸⁾。

この都市下水汚泥に比較して、農畜産加工汚泥は重金属含有率が明らかに低く、特に鉛、鉄含有率が低い。都市下水処理場には道路排水が多量に流入し、そこには土砂由来の鉄、自動車の燃料由来の鉛が含まれているのに対し、農畜産加工工場ではこれらの影響が無いと考えられる。しかし、一部の農畜産加工汚泥のニッケル含有率が都市下水汚泥なみに高い場合がみられ、工場の立地する地域の自然環境の影響と推定された。すなわち、日高管内に存在する乳製品製造工場、士別市周辺の製糖工場及び千歳市周辺の食肉加工工場で採取した汚泥のニッケル含有率が他の農畜産加工汚泥に比較して高い傾向であったが、これらの地域にはニッケル含量の高い蛇紋岩が分布しており⁹⁾、その影響が考えられる。

食肉加工工場及び乳製品製造工場汚泥など加工原料が動物質である加工工場の汚泥の銅、亜鉛含有率は、加工原料が植物質である工場の汚泥に比較して高い傾向であった。亜鉛については、食品中の亜鉛含有率が肉類で一般に高いことと一致する⁵⁾。また、食肉加工工場汚泥では銅含有率も高いが、豚などの飼養に際して整腸作用を目的に餌に混入される銅剤が胃腸内蔵物の洗浄の際に排水中に流入することが考えられる。なお、ウISKY工場で発生する汚泥の銅含有率が比較的高い値を示したが、これは工場で使用される銅製の蒸留釜などの影響と考えられる。

このように、農畜産加工汚泥は、都市下水汚泥に比較して重金属含有率が低く、炭素、窒素含有率が高い。したがって、都市下水汚泥に比較して良質な窒素質資源として耕地での有効利用が期待される。しかし、C/N比が高い場合、作物栽培に際して窒素飢餓の危険性がある。また、無機成分含有率には工場間で差がみられ、農畜産加工汚泥として一括することが困難であるので、利用に当たってはその特性に留意すべきである。

2. 汚泥窒素の無機化パターンの類型区分

汚泥の農地施用に際し、含まれている窒素の無機化の予測は、農産物の収量安定化と内部品質向上、効率的窒素施肥を行うために重要である。都市下水汚泥に関しては、窒素無機化率のデータが集積され、特に窒素含有率が高い高分子系消化汚泥では、窒素無機化率を基に施用基準が策定されている¹⁰⁾。

土壤に施用した各種汚泥の窒素無機化率は、汚泥のC/N比と負の相関関係にあることが明らかにされている¹¹⁾。農畜産加工汚泥についても、C/N比と窒素の無機化率との関係を見ると、高い相関関係 ($r = -0.81$) が認められた (図5)。さらに、C/N比が17以上の汚泥は、7週間の培養期間中に見かけ上窒素の放出が起らず、汚泥のC/N比に基づき窒素無機化率を予測できると考えられる (図5)。

有機質窒素質肥料として評価する場合、窒素の無機化

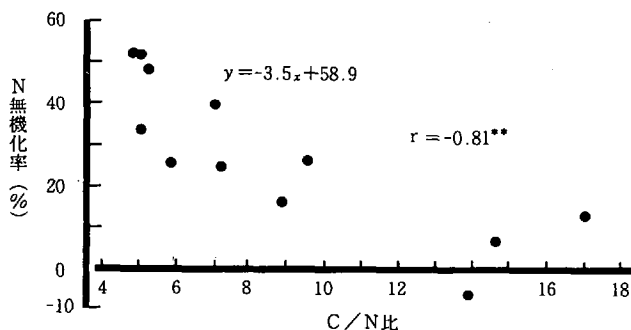


図5 農畜産加工汚泥のC/N比とN無機化率の関係

率の予測とともに、窒素無機化パターンを知ることも重要である。

今回実施した試料の培養試験の結果から、培養期間を初期 (培養1週目まで) と後期 (培養1週目から7週目まで) に分け、各時期で新たに無機化された有機態窒素の割合を求め、窒素無機化パターンを以下のように3つに類型区分した。

I型: 初期に有機態窒素の60%以上が急激に無機化され、以後の窒素無機化率が低い型である。製糖工場汚泥、乳製品製造工場汚泥が属し、培養7週間における全窒素の無機化率は50%程度と高い。

II型: 初期の窒素無機化率は有機態窒素の60%以下でI型に比較して低いが、以後の窒素の無機化率がI型に比較して高く推移し、培養全期間に亘り比較的高い窒素無機化率が持続する型である。食肉加工工場汚泥、スイートコーン加工工場汚泥、製菓工場汚泥が属する。培養期間中における全窒素の無機化率は24~30%で、I型に比較して明らかに低い。

III型: 培養初期に無機態窒素の有機化が認められ、培養後半に窒素の無機化が認められる型である。馬鈴薯加工工場汚泥が属し、培養期間中の全窒素の無機化率は10%程度と最も低い。

これら窒素無機化のパターンとC/N比の関係をみると、I型の場合、C/N比は6以下であり、II、III型となるに従ってC/N比は高まり、II型では7~10、III型では14以上となった。これらのことから、汚泥のC/N比を求めることによってその窒素無機化パターンもある程度推定することが可能と考えられる。

しかし、C/N比が高く、窒素無機化率が低いIII型と位置づけた馬鈴薯加工工場汚泥と都市ごみコンポストを比較すると、堆肥化されていない馬鈴薯加工工場の汚泥は、培養期間中に窒素の有機化が認められたのに対し、籾殻を混合して堆肥化した都市ごみコンポストでは窒素の有機化は認められず、窒素無機化パターンは明らかに異なった。つまり、C/N比のみでは単純に窒素無機化パターンを予測することができない現象がみられた。馬鈴薯加工工場汚泥と都市ごみコンポストの違いは、土壤中での炭素分解率にもみられ、馬鈴薯加工工場汚泥では培養初期から高かったのに対し、都市ごみコンポストでは培養全期間に亘り低く推移した。このことは、馬鈴薯加工工場汚泥では、ヘミセルロースやセルロースなどの易分解性の有機成分の含有率が高かったのに対し、都市ごみコンポストは、難分解性のリグニンの含有率が80%と高かったことと符合する。

有機態窒素組成は、馬鈴薯加工工場汚泥で酸可溶性窒

素の割合が高かったのに対し、都市ごみコンポストでは酸不溶性窒素の割合が高かった。

有機物施用に際して生ずる窒素の有機化現象には、含有されている易分解性有機成分と有機態及びアンモニア態窒素の比率の影響が大きいとされている³⁾。土壤中での有機物の分解速度は、ヘミセルロース及びセルロースなどがリグニンに比較して速く、一方、有機態窒素の分解速度は、酸可溶性窒素が酸不溶性窒素に比較して速い⁶⁾。都市下水汚泥やし尿汚泥を対象に有機態窒素の無機化を経時的に調査した報告では、酸可溶性アミノ酸態窒素及び酸可溶性非留出態窒素（アミノ酸態窒素＋ヒューミン態窒素）が主として無機化されるとの報告がある¹¹⁾。

C/N比が同程度の馬鈴薯加工工場汚泥と都市ごみコンポストの窒素無機化パターンが異なる原因を推察すると、両試料の有機成分、有機態窒素成分の差異が考えられた。

このように、同程度のC/N比でも窒素無機化パターンが異なることから、工場種別に有機成分組成及び有機態窒素組成に特徴が認められる農畜産加工汚泥の窒素無機化パターンを予測するに当たっては、C/N比のみに基づくより、有機成分と有機態窒素の構成比を考慮して分類することが、より適合性が高いと考えられる。そこで、供試試料の窒素無機化パターン、すなわち、培養初期（培養1週目まで）及び培養後半（培養2週目から7週目迄）において窒素無機化率と汚泥の有機成分と窒素形態の比率の関係を各々検討し、その相関係数を表6に示した。

培養1週目迄の試料に含有されている窒素の無機化率は、 $(\text{ヘミセルロース含有率} + \text{セルロース含有率}) / (\text{酸可溶性未同定窒素含有率} + \text{酸可溶性アミノ酸態窒素含有率})$

率) が最も高い負の相関関係 ($r = -0.71$) を示した。さらに両者の関係を図6に掲げた。窒素無機化パターン

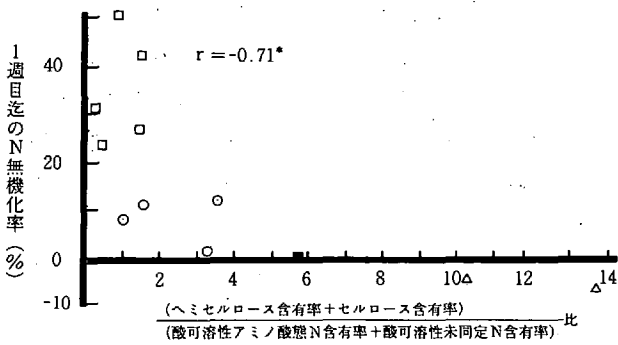


図6 農畜産加工汚泥の培養1週間のN無機化率と有機成分／窒素成分比との関係

注) □ I型 ○ II型 △ III型 ■ 都市ごみコンポスト
型別の $(\text{ヘミセルロース含有率} + \text{セルロース含有率}) / (\text{酸可溶性未同定窒素含有率} + \text{酸可溶性アミノ酸態窒素})$ の値は、I型で2以下、II型で1から4、III型で7以上であった。一方、培養1～7週目の試料に含有されている窒素の無機化率は、熱水抽出性有機物含有率／酸可溶性アミノ酸態窒素含有率との相関関係が高かった ($r = -0.60$) (表6、図7)。

ヘミセルロース及びセルロース並びに酸可溶性未同定窒素及び酸可溶性アミノ酸態窒素は分解速度が速い成分であり、これらの成分が培養初期の窒素の無機化率に影響を及ぼしたと考えられる。熱水抽出性有機物画分は低分子量の有機物が含まれる画分で、分解速度は速いと考えられるが、培養初期には分子量の大きいヘミセルロース、セルロースが分解される際に低分子量の有機物が供給され、培養後期にはヘミセルロース、セルロースが分

表6 農畜産加工汚泥の各種（有機成分／窒素成分）値と窒素無機化率との関係

		有 機 成 分			
		粗脂肪	熱水抽出性有機物	ヘミセルロース＋セルロース	リグニン
窒 素	1 週目までの N 無機化率				
	無機態 N＋酸可溶性留出性 N	－0.34	－0.01	－0.59*	－0.23
	酸可溶性アミノ酸態 N＋酸可溶性未同定 N	－0.51	－0.25	－0.71*	－0.24
	酸可溶性アミノ酸態 N	－0.40	－0.18	－0.66*	－0.28
	酸可溶性未同定 N	－0.31	－0.05	0.53	－0.29
	酸可溶性ヒューミン態 N＋酸不溶性 N	－0.02	0.33	－0.44	－0.22
成 分	1 から 7 週目までの N 無機化率				
	無機態 N＋酸可溶性留出性 N	0.55	0.32	0.61*	－0.50
	酸可溶性アミノ酸態 N＋酸可溶性未同定 N	0.45	－0.48	0.45	－0.51
	酸可溶性アミノ酸態 N	0.25	－0.60*	0.42	－0.51
	酸可溶性未同定 N	0.53	0.23	0.44	－0.46
	酸可溶性ヒューミン態 N＋酸不溶性 N	0.51	0.01	0.46	－0.56

注) *信頼度95%で有意を示す。

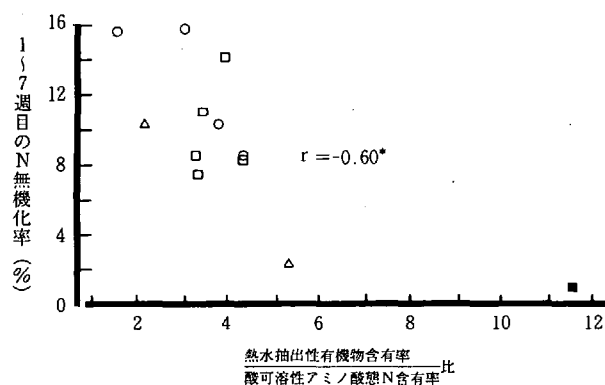


図7 農畜産加工汚泥の培養1～7週間のN無機化率と有機成分/窒素成分比との関係

注) □ I型 ○ II型 △ III型 ■ 都市ごみコンポスト

解されて低分子量の有機物の供給が減少し、その熱水抽出性有機物含有率の高低が培養後半における窒素の無機化率に影響を及ぼしたと推察される。しかし、これらの点についての結論をうるためには、土壌中における各有機物画分の経時変化の調査結果を待たなければならない。

以上のことを総括し、農畜産加工汚泥の窒素無機化特性と作物の窒素吸収及び生育におよぼす影響を、各窒素無機化パターン別に整理して表7に示した。

謝辞 本稿をとりまとめるにあたり、北海道立中央農業試験場、沢口正利環境化学部長、木村清農産化学部長には懇切なご校閲、ご助言をいただきました。北海道立道南農業試験場、島田実幸場長、森村克美研究部長及び坂本宣崇主任研究員にご校閲並びにご指導をいただきました。感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 土壌養分測定法委員会編. “土壌養分分析法”. 養賢堂. 1970.p.203
- 2) 大崎玄佐雄. “農産食品工場における廃棄物の発生と利用状況に関する実態調査”. 北海道立中央農試, 北海道環境科学技術センター. 1988.p.42
- 3) 樋口太重. “土壌中における施肥窒素の有機化と再無機化”. 農業技術研究所報告B. 第34号. 1983.p.65-66
- 4) 平井義孝. “第2回下水汚泥の緑農地利用に関する国際シンポジウム講演集”. 下水汚泥資源利用協議会. 1988.p.128-144.
- 5) 岩田久敬. “食品化学総論”. 養賢堂. 1984.p.130-133
- 6) 熊田恭一. “土壌有機物の化学”. 学会出版センター. 1973.p.198
- 7) 栗原 淳. “下水汚泥—リサイクルのために—”. 日本土壌肥料学会編. 1979.p.83-103
- 8) 栗原 淳. “有機性汚泥の緑農地利用”. 日本土壌肥料学会監修, 博友社. 1979.p.112-116
- 9) 水野直治. “蛇紋岩質土壌の化学的特性と農作物の生理障害に関する研究”. 北海道立農業試験場報告. 29,p.297-25. (1979).
- 10) 元木征治. “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,p.18-52. (1989).
- 11) 山田良三. “各種汚泥の土壌中における分解”. 愛知農総研報. 13,461-466. (1981).

表7 農畜産加工工場汚泥の窒素無機化パターンに基づく分類指標

類型	窒素無機化パターン	窒素無機化率(%)	(ハミセルロース+セルロース) 酸可溶性(未同定窒素+アミノ酸態窒素)	熱水抽出物 酸可溶性アミノ酸態窒素	C/N	作物の窒素吸収・生育	該当汚泥発生工場
I	培養初期のN無機化速度が大きく 以後のN無機化速度が小さい	50	2以下	4~6	4~6	初期より旺盛	製糖工場 乳製品製造工場
II	培養後半までN無機化速度が大きい	25	1~4	5以下	7~10	中期以後旺盛	スイートコーン加工工場 食肉加工工場, 製菓工場
III	培養初期無機態Nの有機化が生じ 培養後半にN無機化が認められる	5以下	10以上	3~6	14~17	初期にN飢餓が発生	馬鈴薯加工工場
(IV)	培養初期N無機化が若干認められるが 以後のN無機化がほとんど認められない	7	6	12以上	15	初期よりN区を やや上回る	都市ごみコンポスト

Chemical Composition and Nitrogen Mineralization Property of Sludge Produced from Agricultural and Livestock Products Processing Factories in Hokkaido

Ryuichi NAKAMURA*and Yoshitaka HIRAI

Summary

Chemical composition and nitrogen mineralization ratio of sludge produced from agricultural and livestock products processing factories in Hokkaido prefecture were examined. The results obtained were summarised as follows :

- 1) Concentration of carbone and nitrogen of the sludge was higher and that of heavy metals was lower than that of sewage sludge.
- 2) Most of the sludge was non-digested sludge. So the chemical composition were varied by each factory. For example, nitrogen concentration of sludge was as follows, meal processing factory, brewing factory > sugar mill > daily processing factory > agricultural products processing factory > town refuse compost.
- 3) The sludge was applied to soil at the rate of 2%w/w and incubated at 26°C for 7 weeks and that was grouped into 3 classes according to the nitrogen mineralization ratio.

Percentage of mineralization of nitrogen in the first week of incubation to the total nitrogen contents showed a negative correlation with the ratio of cellulose and hemi-cellulose concentration to acid soluble non-determined and amino acid nitrogen concentration.

On the other hand, percentage of mineralization of nitrogen after the first week to the total nitrogen contents showed a negative correlation with the ratio of hot water soluble organic matter concentration to acid soluble amino acid nitrogen concentration.

* Hokkaido prefectural Dounan agricultural experiment station