

第4章 有機質資材の微細および水溶性画分の性状

前章で示されたように、有機質資材はさまざまな大きさの粒子から構成されている。こうした構成物のうち、微細および水溶性の部分は、土壤に施用された場合、雨水や灌漑水によって容易に浸出されて移動し、土壤粒子に吸着されたり微生物によって分解・変質をこうむる部分であると推定される。このため、有機質資材の微細画分と水溶性画分の性状を明らかにすることは、土壤に施用された有機質資材の挙動を理解する上での一つの手がかりになると考えられる。

したがって、本章では有機質資材の微細および水溶性の部分の性状を明らかにすることを目的として、第1節では4種類の有機質資材を粗大、微細および水溶性の各画分にわけ、それらの微細形態、元素組成および土壤中における窒素無機化特性から特徴づけた。また、第2節では同じ画分について、有機態窒素組成、単糖組成および細菌細胞壁に特異的に存在する成分であるムラミン酸(3-O-carboxyethyl-D-glucoseamine)³³⁾の分析によって特徴づけるとともに易分解性窒素の給源形態について検討した。

第1節 有機質資材の微細および水溶性画分の微細形態、元素組成と窒素無機化

耕地に施用された有機質資材の挙動を解明する上で重要な役割を演じていると考えられる微細および水溶性の画分の性状を明らかにするため、本節では4種類の有機質資材を供試して、それらを水中での沈降と遠心分離によって粗大、微細および水溶性の各画分にわけ、電子顕微鏡による微細形態の観察と元素組成の分析を行うとともに、インキュベーション実験によって土壤中での窒素の無機化を調べた。

1. 供試試料

牛ふん厩肥、都市ごみコンポスト、牛ふん・おがくずコンポスト、豚ふん・おがくずコンポストの4種類の有機質資材を供試した。供試資材の一般理化学性を第18表に示す。

牛ふん厩肥は、第2章および第3章で用いたと同じく、名古屋大学農学部附属農場において、連続堆肥化法⁴⁹⁾によって製造されたものを供試した。

都市ごみコンポストと豚ふん・おがくずコンポストは、前章第3節で用いたと同じものであるが、30週間堆積後に採取した試料を供試した。

第18表 供試試料の一般理化学性

試料	pH*	EC** (mS/cm)	灰分*** (%)	T-C**** (%)	T-N**** (%)	C/N
牛ふん厩肥	9.32	7.48	40.4	29.4	2.53	11.6
都市ごみコンポスト	7.55	4.11	48.1	27.1	2.22	12.2
牛ふん・おがくずコンポスト	8.01	2.10	15.3	45.4	2.17	20.9
豚ふん・おがくずコンポスト	7.26	2.43	19.7	42.4	2.46	17.2

*乾物：水 = 1 : 5. **乾物：水 = 1 : 10. ***乾物当り.

牛ふん・おがくずコンポストは、(株)鈴木工業(静岡県清水市)で迅速堆肥化された後、名古屋大学農学部構内において、底部に多数の小孔をあけた120 l容ポリバールに詰め、前章第2節で述べた方法により屋外で38週間堆積した。試料は容器中の内容物を充分混合した後、その一定量を採取した。

なお、各試料は採取後、分画を行うまで4℃で保存した。

2. 実験方法

1) 分画

100 gの湿潤試料を2 l容広口ビンにとり、1.5 lの蒸留水を加えた後、ゴム栓をして30分間振とうした。振とう終了後、ただちに4℃の低温室内に16時間静置し、サイホンによって上層液を除き、沈降物をF1とした。上層液は、硫酸(1:1)でpHを6.5に調節した後、10,000×gで10分間遠心分離した。この沈澱をF2とし、上澄液はロータリー・エバポレーターを用いて40℃で減圧濃縮し、約250 mlとした。濃縮液は100,000×gで1時間遠心分離して沈澱をF3とし、上澄液は蒸留水に対して透析してF4とした。各画分は、凍結乾燥して重量を測定した後、デシケーター中で保存した。

2) 電子顕微鏡観察

F2、F3およびF4の各画分を蒸留水に懸濁させ、その一滴をコロジオン膜を張った銅グリッド上に積載し、過剰の懸濁液をろ紙で吸い取った後、風乾した。風乾後、2%リン・タングステン酸水溶液(pH 6.5)でネガティブ染色し、透過型電子顕微鏡(日立HU-12A型)によって観察した。未染色の風乾試料についても電子顕微鏡観察を行った。

3) 元素分析

各画分の炭素、窒素、水素および灰分は、有機微量分析の常法によって測定した。酸素

含有量は、全有機物量から炭素、水素および窒素の各含有量を差し引いて求めた。

4) インキュベーション実験

各画分の有機態窒素の無機化を調べるため、Suzuki and Kumada⁶⁵⁾の方法によってインキュベーション実験を行った。インキュベーションに用いた土壌は、名古屋大学農学部附属農場から採取し、風乾細土 (pH、7.3; 全炭素量、1.34%; 全窒素量、0.10%) として供試した。100ml容ビーカーに用意した土壌5gと酸洗浄した30~60メッシュの石英砂30gの混合物に、5mgN相当量の画分試料を添加して十分に混合した後、7mlの蒸留水を加え、アルミホイルでふたをして30℃で4週間静置した。対照として、土壌と石英砂のみの混合物も同様にインキュベートした。なお、週に1度、蒸発した水を蒸留水で補給した。

インキュベーション終了後、ビーカーの内容物を10%塩化カリウム水溶液100mlによって250ml容ポリびんに移した。ポリびんを密栓して1時間振とうした後、ろ過し、ろ液中の無機態窒素をBremner法⁶⁾によって定量した。なお、すべての処理は2連で行い、インキュベーション前の各画分の無機態窒素量も、上記と同様の方法で測定した。有機態窒素量は、全窒素量から無機態窒素量を差し引いて求めた。

3. 結果および考察

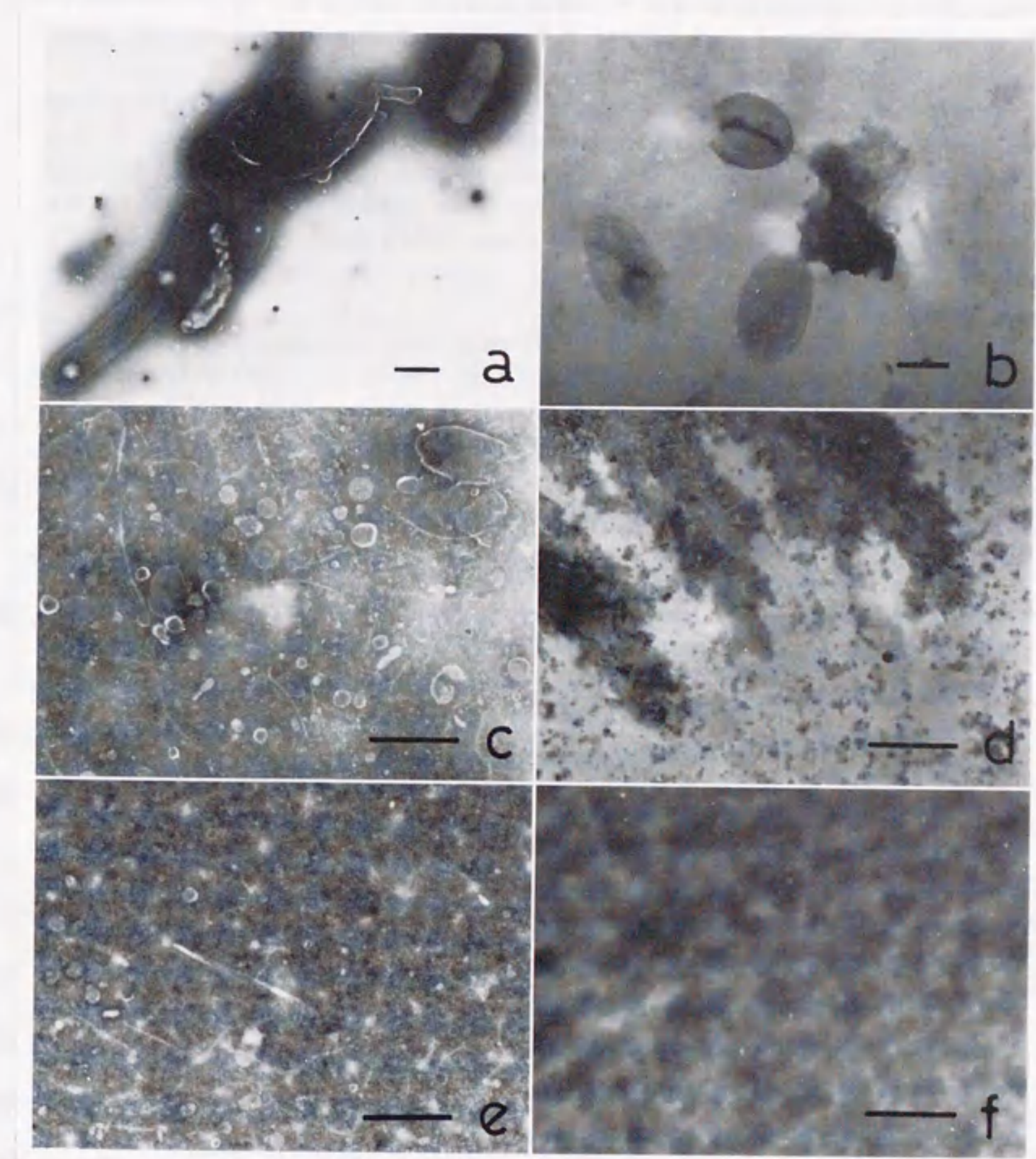
1) 画分量の分布と回収率

各画分の乾物量の分布と回収率を第19表に示す。

供試資材の画分の大部分は粗大画分 (F 1) に分布していた。一方、微細および水溶性画分には数%しか分布していなかった。回収率は最低でも94.5%であり、分画操作による損失はわずかであった。

第19表 画分の乾物量の分布と回収率

画 分	牛 畜 肥	都 市 糞 肥	牛 畜 糞 肥	豚 糞 糞 肥
F 1	83.5	90.0	94.4	93.4
F 2	5.7	5.5	3.2	3.1
F 3	2.0	0.5	1.2	0.9
F 4	3.3	0.2	1.5	1.6
回収率 (%)	94.5	96.2	100.3	99.0



第11図 牛ふん厩肥から分画したF2, F3およびF4画分の電子顕微鏡写真
 a, F2 (染色試料): b, F2 (未染色試料): c, F3 (染色試料):
 d, F3 (未染色試料): e, F4 (染色試料): f, F4 (未染色試料).
 図中の棒線の長さはいずれも $0.5\mu\text{m}$.

2) 微細および水溶性画分の微細形態

牛ふん厩肥から分離した微細および水溶性画分の電子顕微鏡写真を第11図に示す。

電子顕微鏡観察の結果、F 2画分には細菌細胞とともに細菌細胞壁もしくは細菌細胞膜と推定される物質が存在した(第11図a)。Suzukiら⁶²⁾は、稲わら堆肥の粒径画分の光学顕微鏡観察の際、F 2画分に相当する画分で細菌細胞の存在を確認している。しかし、電子顕微鏡観察によれば、細菌細胞よりもむしろ細菌細胞壁もしくは細胞膜とみられる物質が多く認められた。さらに、リン・タングステン酸による染色をしないで観察した場合には、無定形物質の存在も確認された(第11図b)。染色して電子顕微鏡観察した場合には、この無定形物質は染色剤であるリン・タングステン酸とは識別困難になると考えられる。このように、F 2画分には細菌細胞およびその細胞壁または細胞膜だけでなく、無定形の物質も共存していた。

F 3画分では、リン・タングステン酸で染色して電子顕微鏡観察した場合、主として膜状物質およびフィラメント状物質の存在が確認された(第11図c)。これらの物質は細菌菌体に由来するものであり、膜状物質は小胞化した細菌細胞膜であり、フィラメント状物質は細菌のべん毛もしくは線毛であると推定される。染色せずに観察した場合には、無定形物質のみがコロジオン膜上に広がっており(第11図d)、この画分でも無定形物質が細菌細胞の断片と共存していた。

F 4画分を未染色で電子顕微鏡観察した場合には、コロジオン膜のほぼ全面が無定形の物質で覆われていた(第11図f)が、リン・タングステン酸で染色した場合には、F 3画分と同様、膜状物質とフィラメント状物質の存在が認められた(第11図e)。このことは、F 4画分が無定形物質を主とするものの、100,000×gの遠心分離によっても沈降しない微細な菌体断片が混入していることを示す。

なお、第11図には牛ふん厩肥から分離した画分の電子顕微鏡写真のみを示したが、他の有機質資材試料から分離した画分についての電子顕微鏡観察からも同じ結論が得られた。

3) 画分の元素組成

各画分の灰分量と元素組成を第20表に示す。

F 1～F 3の各画分の灰分量は、おがくずを含まない牛ふん厩肥と都市ごみコンポストで高く、おがくずを含む牛ふん・おがくずコンポストと豚ふん・おがくずコンポストで低かった。しかし、F 4画分の灰分量には、おがくずを含むか否かによる差は認められなかった。

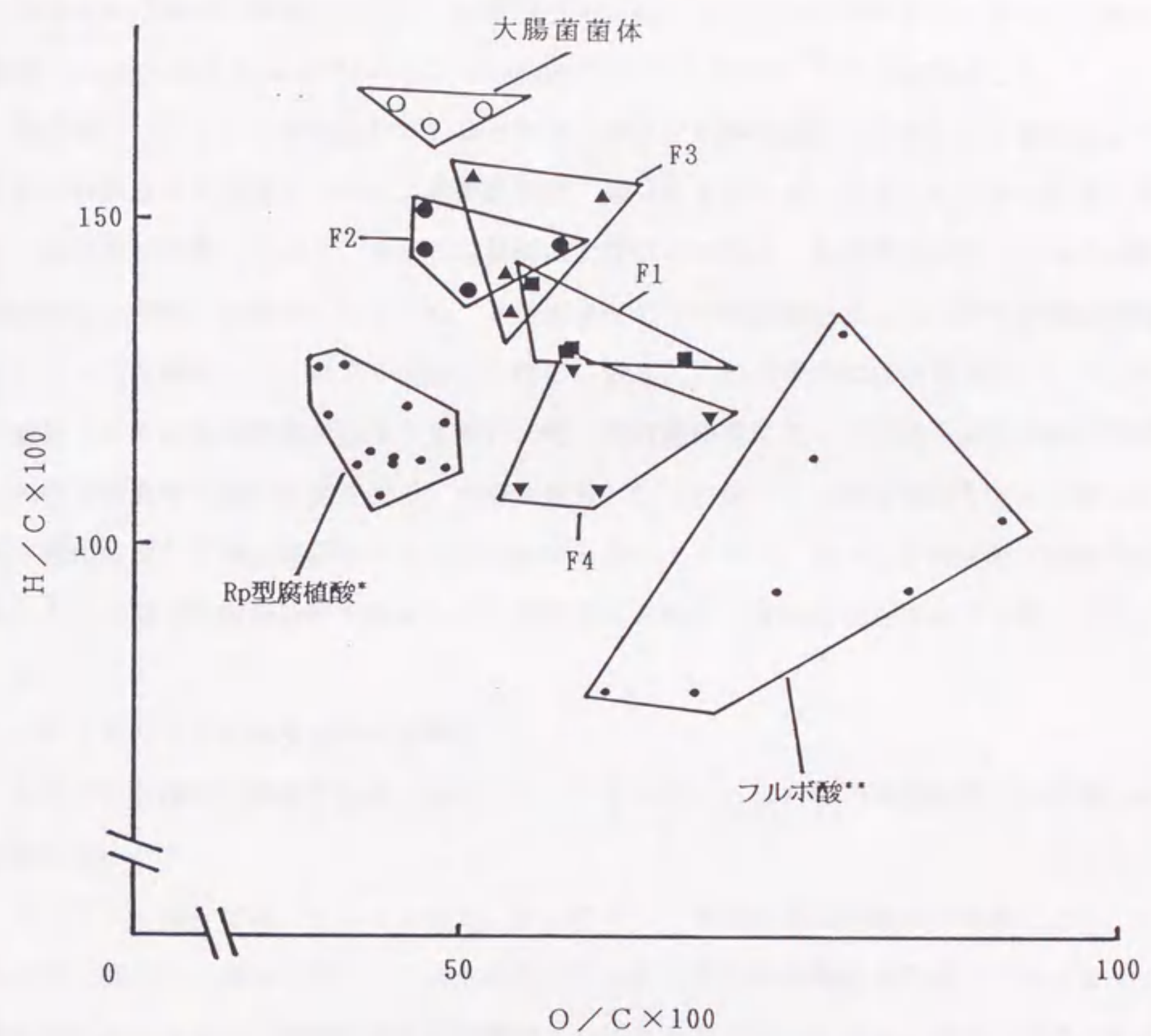
第20表 画分の灰分量と元素組成

試	料	画分	灰分* (%)	C** (%)	H** (%)	N** (%)	O** (%)	C/N
牛 厩	ふ ん 肥	F 1	41.9	51.7	6.18	3.55	38.6	14.6
		F 2	28.2	52.9	6.71	7.13	28.9	7.4
		F 3	42.1	51.8	6.79	6.51	33.3	5.9
		F 4	18.2	49.0	5.26	5.60	34.9	8.7
都 市 ご み コ ン ポ ス ト		F 1	49.3	51.1	5.58	3.85	39.4	13.3
		F 2	34.9	48.8	5.99	7.60	37.5	6.4
		F 3	40.0	47.6	6.13	7.88	38.3	6.0
		F 4	13.1	45.8	4.61	7.46	42.1	6.1
牛 ふ ん ・ お が く ず コ ン ポ ス ト		F 1	14.8	51.8	5.65	2.45	40.0	21.1
		F 2	12.9	53.0	6.19	5.36	35.5	9.9
		F 3	27.9	52.6	5.99	4.12	37.4	12.8
		F 4	17.4	51.5	4.72	2.3	41.5	22.1
豚 ふ ん ・ お が く ず コ ン ポ ス ト		F 1	12.2	48.8	5.28	2.61	43.3	18.7
		F 2	18.3	53.0	6.46	7.17	33.3	7.4
		F 3	35.0	51.6	6.15	5.58	36.6	9.2
		F 4	11.3	52.9	4.87	3.70	38.6	14.3

*乾物当り、**有機物当り。

灰分を除いた有機物当りの炭素含有率は、いずれの資材の画分においてもほぼ一定（約50%）であったが、窒素含有率は、F 1画分に比べてF 2～F 4の各画分で相対的に高く、都市ごみコンポスト以外ではF 2>F 3>F 4≥F 1の順であった。都市ごみコンポストでは、F 2～F 4の各画分ともほぼ同じ値であった。このように、窒素は、前章で得られた結果と同様に、粗大画分に比べて微細および水溶性の画分に相対的に多く存在した。

C/N比は、おがくずを含まない牛ふん厩肥と都市ごみコンポストに比べて、おがくずを含有する牛ふん・おがくずコンポストと豚ふん・おがくずコンポストで全般的に高かった。牛ふん厩肥と都市ごみコンポストでは、F 2～F 4の各画分のC/N比はほぼ一定であった（牛ふん厩肥：5.9～8.7、都市ごみコンポスト：6.0～6.4）が、牛ふん・おがくずコンポストと豚ふん・おがくずコンポストでは、F 2、F 3、F 4の順に高くなった。したがって、前節において豚ふん・おがくずコンポストの微細画分のC/N比が腐熟の進行とともに上昇したことを考え併せれば、おがくずを含む資材の微細画分と水溶性画分には、おがくずに由来するC/N比の高い物質が集積するものと考えられる。



第12図 画分のH/CとO/C(原子数比)の関係

*Suzuki and Kumada⁶³⁾のデータから計算.

**Kononova⁴⁸⁾のデータから計算.

さらに、各画分の炭素、水素および酸素の組成を検討するため、H/CとO/Cの関係を第12図に示した。前項で述べたように、微細画分と水溶性画分には電子顕微鏡観察によって細菌細胞およびその断片が認められた。また、これら画分には腐植物質が含まれ、その腐植酸部分は腐植化度の低いRp型腐植酸からなる^{26, 64)}。そこで、図には有機質資材試料から得られた各画分の値だけでなく、細菌細胞画分、Rp型腐植酸およびフルボ酸の値もプロットした。細菌細胞画分は、純粋培養した大腸菌菌体からつぎのように調製した。すなわち、純粋培養した大腸菌菌体を集菌して充分水洗し、蒸留水に懸濁させて超音波処理して菌体を破碎した後、有機質資材試料の分画と同様、遠心分離によって3画分を得た。

これら画分の凍結乾燥物について、元素組成を分析した。R p型腐植酸およびフルボ酸の値は、Suzuki and Kumada⁶³⁾およびKononova⁴⁸⁾のデータから、それぞれ計算した。

粗大画分(F 1)、微細画分(F 2とF 3)および水溶性画分(F 4)は、第12図上でそれぞれ異なった位置を占めた。細菌菌体は、画分によるちがいはほとんどみられず、図上でほぼ同じ位置を占めた。R p型腐植酸およびフルボ酸は、有機質資材画分および細菌菌体画分の領域とは重複しなかった。F 2およびF 3の微細画分は、いずれも細菌菌体画分とR p型腐植酸もしくはフルボ酸との間に位置し、これら画分には細菌菌体もしくはその断片とともに腐植物質が共存しており、電子顕微鏡観察によって認められた無定形物質の大部分が腐植物質と推定される。水溶性画分(F 4)は、R p型腐植酸とフルボ酸のほぼ中間に位置して微生物菌体の占める位置から遠いことから、主として無定形の腐植物質からなり、電子顕微鏡観察で認められた細菌菌体の断片は量的にはわずかであると推定される。

4) 土壌中での有機態窒素の無機化

各画分の有機態窒素量と土壌と混和してインキュベートした際の有機態窒素の無機化率を第21表に示す。

粗大なF 1画分では、インキュベーションによって有機態窒素の数%が無機化されたにすぎず、豚ふん・おがくずコンポストのF 1画分については無機化率がマイナスとなり、画分中および土壌中の無機態窒素が有機化されたことがうかがわれる。他方、F 2~F 4の微細画分と水溶性画分では、F 1画分と比べて無機化率は相対的に高かった。とくに牛ふん厩肥のF 2~F 4の各画分では、有機態窒素の約20%が無機化された。微細画分での高い無機化率は、これらの画分中に細菌細胞やそれらの断片が含まれていることによると推測される。しかし、電子顕微鏡観察と元素分析の結果から、F 4画分は無定形物質を主として、膜上およびフィラメント状の細菌細胞断片と認められる物質はわずかしか含まれていないと推定されている。このため、水溶性のF 4画分の場合には、易分解性有機態窒素の供給源を、細菌菌体の断片以外に求めねばならない。おそらくは、無定形の菌体外代謝産物がこの画分の易分解性窒素の供給源となっているものと思われるが、この点についてはさらに検討が必要である。

広瀬²⁴⁾は各種の未分解の植物遺体の土壌中における無機化過程について詳細に調べ、窒素無機化率とC/N比との間に高い相関関係があることを認めた。そこで、各画分の窒素無機化率とC/N比との関係を第13図にプロットした。しかしながら、有機質資材の画分

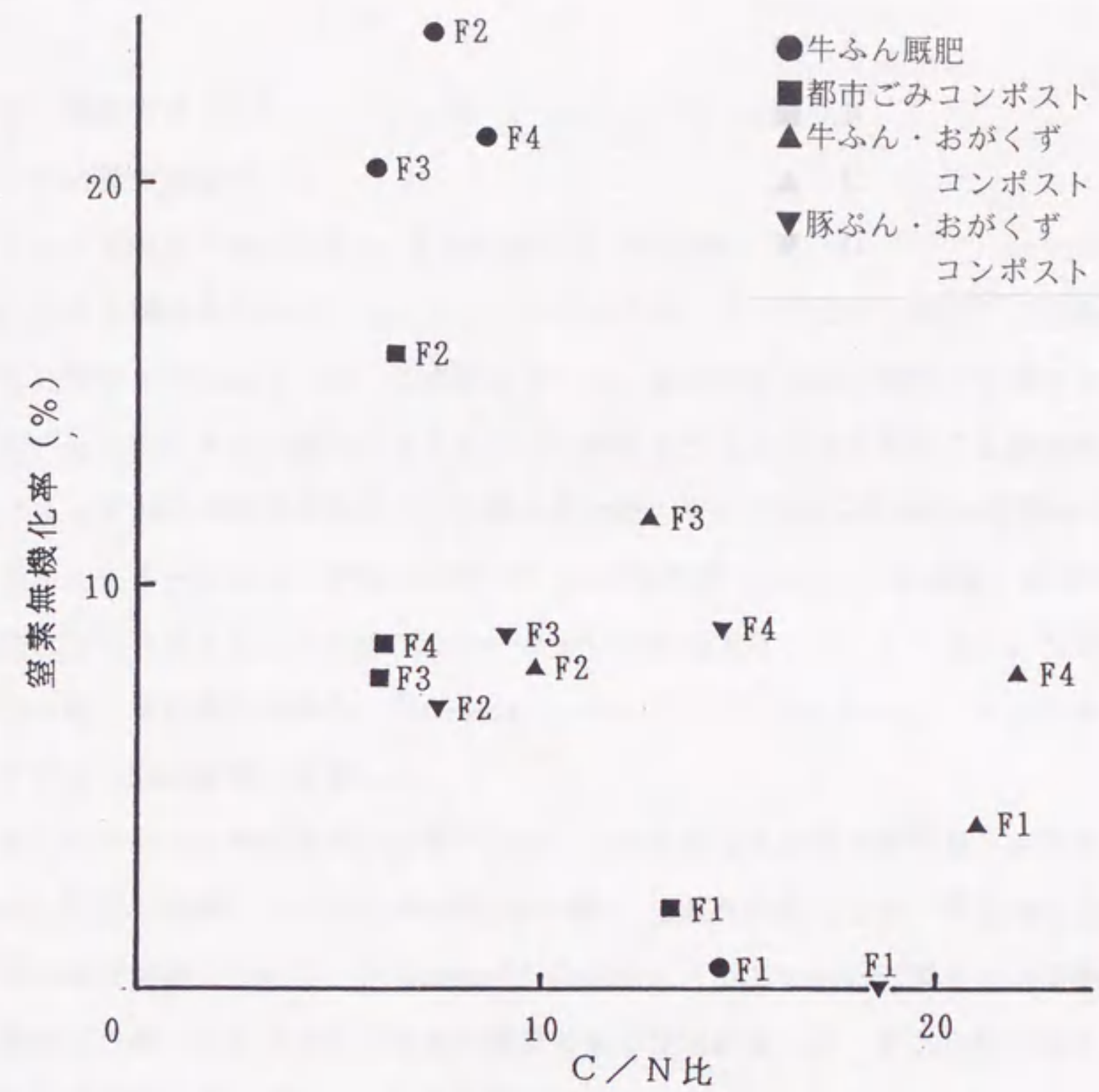
第21表 画分の有機態窒素量とインキュベーションに伴う有機態窒素の無機化率

試料	画分	有機態窒素*	窒素無機化率**
牛ふん厩肥	F 1	19.8	0.5
	F 2	49.9	23.7
	F 3	34.8	20.4
	F 4	45.8	21.1
都市ゴミ コンポスト	F 1	19.3	2.0
	F 2	49.1	15.7
	F 3	39.5	7.6
	F 4	63.3	8.6
牛ふん・おがくず コンポスト	F 1	20.6	4.1
	F 2	46.1	8.0
	F 3	28.7	11.6
	F 4	18.0	7.7
豚ふん・おがくず コンポスト	F 1	22.3	-13.0
	F 2	58.2	7.0
	F 3	35.0	8.7
	F 4	30.8	8.9

*mgN/100g 乾物. **窒素無機化率=窒素無機化量/有機態窒素×100 (%) .

では、植物遺体で認められたような高い相関関係はみられなかった。とくに、おがくずを含有する牛ふん・おがくずコンポストのF 4画分では、C/N比が高い(22.1)にもかかわらず、窒素無機化率は高かった(8.9%)。このことは、F 4画分に含まれる易分解性有機物が、おがくず由来するC/N比の高い難分解性物質とは無関係に無機化されることを示唆する。

これまで述べてきたように、微細画分には多くの細菌菌体やその断片が含まれていたが、水溶性画分には細菌菌体の断片はわずかしき含まれていなかった。また、微細画分および水溶性画分のいずれも、土壤中で容易に無機化された。これらの結果から、有機質資材が土壤に施用された場合、微細および水溶性画分が易分解性有機態窒素の給源となる可能性が示唆される。Marumotoら^{47, 48)}は、微生物細胞、とくにその細胞壁物質が易分解性有機物の給源となりうることを報告しており、このことは、上記の可能性を支持するものである。



第13図 画分のC/N比と窒素無機化率との関係

第2節 有機質資材の微細および水溶性画分の有機態窒素組成、単糖組成とムラミン酸
 前節では、有機質資材の微細画分と水溶性画分の性状を電子顕微鏡観察、元素分析およびインキュベーション実験によって調べたが、本節では、有機成分組成の面から検討を加えるため、同じ画分について、有機態窒素組成、単糖組成および細菌細胞壁のペプチドグリカンに特異的に存在する成分であるムラミン酸の分析を行った。

1. 供試試料

前節と同じく、4種類の有機質資材試料（牛ふん厩肥、都市ごみコンポスト、牛ふん・おがくずコンポスト、豚ふん・おがくずコンポスト）から分離した4画分（F1、4℃、一夜沈降；F2、10,000×g沈降；F3、100,000×g沈降；F4、F3上澄）の凍結乾

乾燥試料を供試した。

2. 実験方法

1) 有機態窒素の分析

1 mgN相当量の画分試料を、真空封管中で6 M塩酸によって110°Cで24時間加水分解した後、加水分解液をろ別し、ロータリー・エバポレーターによって減圧下で塩酸を除き、蒸留水に溶解して25 mlとした。この液について、加水分解された窒素の全量をセミマイクロ・ケルダール法によって測定するとともに、酸化マグネシウムを加えて水蒸気蒸留⁵⁾することによって加水分解液中のNH₄-N量を求めた。また、加水分解液の一定量をロータリー・エバポレーターによって乾固した後、0.1 M炭酸水素ナトリウム水溶液1 mlを加え、粒状水酸化ナトリウムを入れた減圧デシケーター中で乾固することによりNH₄-Nを除いた。残留物を再び蒸留水に溶解し、Yemm and Cocking^{7,8)}の方法によって、ロイシンを標準物質としてアミノ酸態窒素を定量した。

さらに、アミノ糖態窒素の定量のため、1 mgN相当量の画分試料を5 mlの4 M塩酸によって、前記と同様に110°Cで14時間加水分解し、塩酸を除去した後、蒸留水で定容とした。この加水分解液について、Stevenson^{5,9)}の方法によってDowex-50陽イオン交換樹脂(H⁺型)で処理した後、グルコサミンを標準物質として比色定量した。なお、加水分解により生ずるアミノ糖態窒素の損失は、とくに補正しなかった。

2) 中性糖の分析

50~400 mgの画分試料を100 ml容丸底フラスコにとり、12 M硫酸3 mlを加えて室温で16時間放置した後、蒸留水69 mlを加えて希釈し、沸騰水浴中で5時間加水分解した。加水分解終了後、ただちに水酸化バリウム粉末を加えてpH 6.5まで中和し、生成した硫酸バリウムの沈殿を遠心分離によって除き、沈澱を蒸留水で数回洗浄した。上澄液と洗浄液を一括し、ロータリー・エバポレーターによって濃縮して100 ml定容とした。この一定量をとり、水素化ホウ素ナトリウムで糖アルコールに還元した後、Imanariら^{2,7)}の方法によってトリフルオロアセチル化し、Myo-イノシトールを内部標準としたガスクロマトグラフィーによって個々の中性糖を定量した。ガスクロマトグラフィーは、FID検出器を備えた日立製作所製163型ガスクロマトグラフ装置に2% DC QF-1 (担体: Gaschrom P, 100~120メッシュ)を充填した内径3 mm、長さ2 mのガラスカラムを接続し、窒素ガスをキャリアーガスとして毎分50 mlの速度で流し、カラム温度を90°Cから120°Cまで毎分2°Cの割合で昇温して行っ

た。

3) ムラミン酸の定量

50~200mgの画分試料を、真空封管中で6 M塩酸によって100℃で4.5時間加水分解した後、加水分解液をろ別し、ロータリー・エバポレーターによって減圧下で塩酸を除いた。加水分解液は、Millar and Casida⁵⁾の方法にしたがってDowex-50陽イオン交換樹脂(H⁺型)で処理し、Casagrande and Park⁸⁾の方法でトリメチルシリル化した後、Myo-イノシトールを内部標準としたガスクロマトグラフィーによって定量した。ガスクロマトグラフィーは、前項と同じ装置に10% OV-11(担体: Supelcoport, 100~120メッシュ)を充填した内径3 mm、長さ2 mのガラスカラムを接続し、窒素ガスをキャリアーガスとして毎分50 mlの速度で流し、カラム温度を200℃から240℃まで毎分4℃の割合で昇温して行った。なお、加水分解により生ずるムラミン酸の損失は、とくに補正しなかった。

3. 結果および考察

1) 画分の有機態窒素組成

各画分の有機態窒素組成を、第22表に示す。

6 M塩酸、24時間加熱の条件で加水分解された窒素は、画分の有機態窒素量の46~89%と幅があったが、とくに豚ふん・おがくずコンポストの画分で低かった。加水分解された窒素のうちでは、粗大画分(F1)および微細画分(F2とF3)においてはアミノ酸態窒素の割合がもっとも高く、水溶性画分(F4)においてはNH₄-Nの割合がもっとも高かったが、アミノ糖態窒素の割合はいずれの画分でももっとも低かった。こうした傾向は、広瀬・熊田²⁵⁾およびSuzukiら⁶²⁾の結果と類似している。

加水分解性のアミノ酸態窒素の割合は、F2とF3の微細画分で高い傾向にあり、水溶性のF4画分でもっとも低くなった。前節で行った電子顕微鏡観察によれば、F2とF3の両画分にはF4画分と比べて多量の細菌菌体もしくは菌体断片が含まれていた。したがって、微細および水溶性画分においては、アミノ酸態窒素の割合は、菌体タンパク質の多少を反映し、F2とF3の微細画分で高く、水溶性のF4画分で低かったものと推定される。

加水分解性のアミノ糖態窒素の割合は、牛ふん厩肥、都市ごみコンポストと牛ふん・おがくずコンポストではF4画分でもっとも高く、豚ふん・おがくずコンポストではF2画分でもっとも高かったが、牛ふん厩肥以外では画分間の差は小さかった。牛ふん厩肥では、

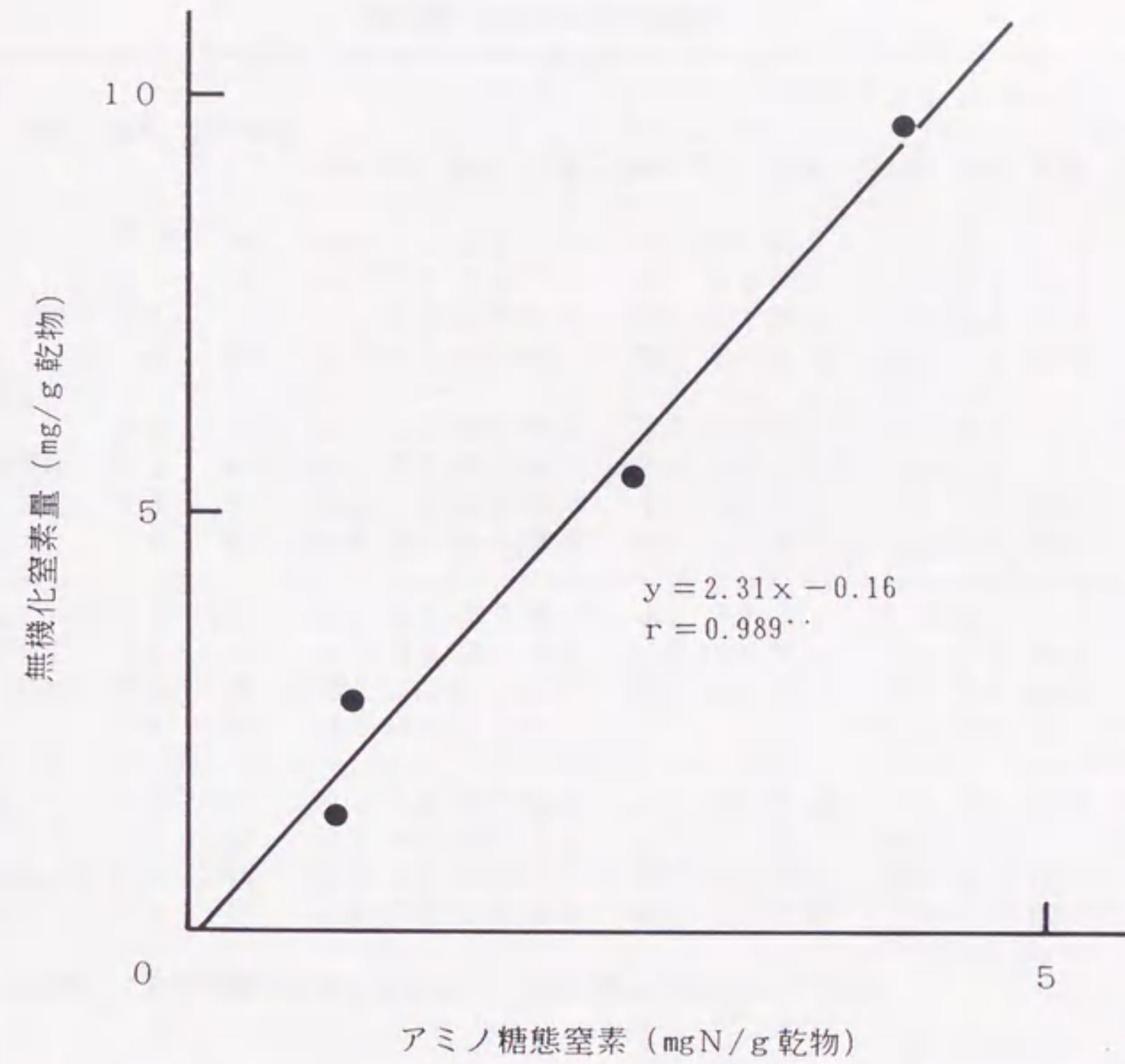
第22表 画分の有機態窒素組成

試料	画分	有機態窒素*	加水分解性窒素**			
			総量	アンモニア態	アミノ酸態	アミノ糖態
牛 厩 肥	F 1	19.8	85.8	20.3	41.1	4.6
	F 2	49.9	80.3	17.3	47.0	4.6
	F 3	34.8	88.8	21.3	42.9	4.6
	F 4	45.8	73.5	30.4	22.6	9.1
都 市 糞 肥	F 1	19.3	74.1	17.6	34.7	2.1
	F 2	49.1	82.0	15.3	43.8	3.3
	F 3	39.5	86.3	28.6	43.0	3.3
	F 4	63.3	81.3	45.3	19.1	4.1
牛ふん・おがくず コンポスト	F 1	20.6	83.0	18.9	54.9	4.4
	F 2	46.1	79.4	14.5	46.4	4.8
	F 3	28.7	81.5	16.3	50.4	4.3
	F 4	18.0	69.9	31.7	30.6	4.9
豚ふん・おがくず コンポスト	F 1	22.3	46.2	12.6	22.9	2.2
	F 2	58.2	77.0	13.7	44.2	3.1
	F 3	35.0	59.7	20.0	27.4	2.6
	F 4	30.8	53.9	19.8	19.5	2.6

*mgN/g乾物, **有機態窒素に対する%.

F 4画分のアミノ糖態窒素の割合が他の画分と比べてかなり高いことが特徴的であった。Suzukiら⁶²⁾はアミノ糖態窒素が微生物細胞壁に由来すると推定しているが、アミノ糖態窒素の割合がF 4画分で高い傾向があるにもかかわらず、細菌細胞壁に由来する物質は主にF 2画分に存在することが前節の結果から明らかである。こうした理由から、アミノ糖態窒素量が微生物細胞壁物質量の指標とはなりえないと考えられる。

さらに、微細および水溶性画分の易分解性窒素の給源を特定するため、前節で行ったインキュベート実験によって得られた窒素無機化量の値と各形態の有機態窒素量との間の相関を検討したところ、F 4画分の加水分解性アミノ糖態窒素量と窒素無機化量の間のみ有意な相関関係が認められた(第14図)。ただし、前述したように、F 4画分に含まれるアミノ糖態窒素は微生物細胞壁に由来するとは考えられない。微生物細胞壁以外のアミノ糖態窒素の給源としては、細菌が分泌する菌体外多糖が知られている⁵⁶⁾ことから、有機質資材の水溶性画分においては、菌体外代謝産物が易分解性窒素の給源となっていると推察される。



第14図 F 4 画分の加水分解性アミノ糖態窒素量と窒素無機化量との関係

2) 画分の中性糖組成

各画分を硫酸によって加水分解した場合に遊離した中性糖の組成を、第23表に示す。加水分解された全中性糖量は、いずれの有機質資材試料でも粗大なF 1画分でもっとも多かった。どの画分においても、組成的にはヘキソースの割合がもっとも多く、牛ふん・おがくずコンポストのF 4画分以外では、ヘキソースのうちでもグルコースがもっとも多かったが、牛ふん・おがくずコンポストのF 4画分では、グルコースよりもマンノースの割合が高かった。画分が小さくなるほど、グルコースの割合は低下したが、ガラクトースとマンノースの割合は高まった。また、ペントースの割合はヘキソースよりもかなり小さく、ペントースのうちでもアラビノースの割合は画分が小さくなるほど高まった。一方、キシロースの割合は、牛ふん厩肥のF 1画分で高く、牛ふん・おがくずコンポストのF 1画分で低かったことを除けば、画分間の差はそれほど大きくなかった。さらに、メチルペ

第23表 画分の中性糖組成

試料	画分	全中性糖*	ヘキソース**				ペントース**			メチルペントース**			G+M/A+X***
			Glu.	Gal.	Man.	含量	Ara.	Xyl.	含量	Rham.	Fuc.	含量	
牛ふん 厩肥	F 1	99	64.9	4.0	3.5	72.4	6.1	19.6	25.7	1.4	0.4	1.8	0.29
	F 2	58	51.9	12.3	7.4	71.6	9.1	8.4	17.5	8.5	2.4	10.9	1.12
	F 3	23	33.3	17.2	12.0	62.5	12.8	7.4	20.2	11.9	5.4	17.3	1.45
	F 4	64	32.5	21.8	13.4	67.7	5.3	6.1	11.4	12.7	8.1	20.8	3.09
都市ごみ コンポスト	F 1	121	66.5	7.7	15.0	89.2	3.7	6.0	9.7	0.8	0.3	1.1	2.34
	F 2	44	63.5	7.7	12.0	83.2	7.1	5.4	12.5	2.4	1.9	4.3	1.58
	F 3	53	53.4	7.8	15.2	76.4	7.4	5.7	13.1	7.0	3.5	10.5	1.76
	F 4	68	43.0	9.1	18.7	70.8	9.2	4.5	13.7	7.8	7.8	15.6	2.03
牛ふん・ おがくず コンポスト	F 1	221	67.2	8.6	13.0	88.8	3.2	5.9	9.1	1.7	0.5	2.2	2.37
	F 2	97	46.4	8.8	10.4	65.6	11.6	12.9	24.5	7.2	2.8	10.0	0.78
	F 3	55	26.2	13.1	14.4	53.7	13.1	12.6	25.7	12.2	8.4	20.6	1.07
	F 4	25	14.6	18.3	24.8	57.7	14.9	11.2	26.1	10.6	5.8	16.4	1.65
豚ふん・ おがくず コンポスト	F 1	347	73.2	2.6	10.1	85.9	2.9	8.5	11.4	1.8	0.9	2.7	1.11
	F 2	67	58.7	8.2	10.0	76.9	6.9	9.0	15.9	5.2	2.1	7.3	1.14
	F 3	45	45.3	12.1	13.0	70.4	10.7	8.2	18.9	7.1	3.6	10.7	1.33
	F 4	27	27.5	17.1	21.4	66.0	12.9	8.7	21.6	7.6	4.8	12.4	1.78

*mg/g乾物. **全中性糖に対するモル%. ***Gal.+Man.とAra.+Xyl.の比.

ントースの割合は、いずれの有機質資材試料でもF 1画分ではきわめて少なく、画分が小さくなるにしたがって著しく増大した。メチルペントースのうちでは、フコースよりもラムノースが多く含まれたが、どちらの割合も画分が小さくなるほど増大する傾向にあった。

Cheshire¹⁰⁾によれば、土壌中のペントースは植物遺体に由来しするのに対し、ガラクトース、マンノースおよびメチルペントースは微生物に由来し、グルコースは植物遺体、微生物双方に由来するとされる。こうした土壌中における中性糖の起源のちがいに基づいて、Oades^{5,4)}は、アラビノースとキシロースに対するガラクトースとマンノースの比(G+M/A+X比)によって土壌中の多糖類の起源を説明できるとした。すなわち、この比が0.5以下の場合には植物起源であり、2.0以上の場合には微生物起源であると推定した。牛ふん厩肥と豚ふん・おがくずコンポストでは、G+M/A+X比は画分が小さくなるにしたがって著しく増加した。都市ごみコンポストと牛ふん・おがくずコンポストでも、F 2~F 4の各画分では同様な傾向が認められたが、F 1画分では2.0以上の値を示した。このように都市ごみコンポストと牛ふん・おがくずコンポストのF 1画分でG+M/A+X比が低い原因は、ヘキソースよりもむしろペントースの割合が小さいことであるが、これにはコ

第24表 画分の有機態炭素組成

試料	画分	T-C*	アミノ酸態C**	アミノ糖態C**	中性糖態C**	回収率***
牛ふん肥	F 1	30.1	8.4	1.5	13.0	22.9
	F 2	38.1	19.1	3.1	6.1	28.3
	F 3	29.9	15.4	2.7	3.2	21.3
	F 4	41.0	7.6	5.2	6.3	19.1
都市ごみコンポスト	F 1	25.9	8.0	0.8	18.7	27.5
	F 2	31.7	20.8	2.4	5.5	28.7
	F 3	28.5	17.6	2.3	7.6	27.5
	F 4	39.8	8.7	3.4	6.7	18.8
牛ふん・おがくずコンポスト	F 1	44.3	7.9	1.0	19.9	28.8
	F 2	46.1	14.4	2.5	8.6	25.5
	F 3	37.8	11.4	1.6	5.9	18.9
	F 4	42.6	4.1	1.1	2.4	7.6
豚ふん・おがくずコンポスト	F 1	46.0	3.7	0.6	32.6	36.9
	F 2	43.4	18.4	2.1	6.2	26.7
	F 3	33.5	8.9	1.4	5.5	15.8
	F 4	46.8	4.0	0.9	2.4	7.3

*乾物当りの%, **T-Cに対する%, ***アミノ酸態C、アミノ糖態Cと中性糖態Cの含量.

ンポストの製造に用いた原料の中性糖組成が影響していると考えられる。したがって、有機質資材から得た粒径画分中の多糖類の起源の推定にG+M/A+X比を用いることは難しいと判断される。

しかしながら、ガラクトース、マンノースおよびメチルペントースの微生物起源と推定される中性糖の割合は画分が小さくなるほど高まることから、有機質資材の微細および水溶性画分に含まれる多糖類が微生物起源であることが示唆される。

3) 画分の有機態炭素組成

各画分に含まれる全炭素量に占めるアミノ酸態、アミノ糖態および中性糖態の各形態の炭素の割合を第24表に示す。

3つの形態の炭素のうちでは、粗大なF 1画分では中性糖態炭素の割合がもっとも高かったが、F 2~F 4の微細画分と水溶性画分ではアミノ酸態炭素の割合がもっとも高かった。このように、有機質資材の粗大画分は炭水化物の割合が多いことが特徴的であるのに対して、微細および水溶性の画分はタンパク様物質の割合が高いことが特徴的である。

また、アミノ酸態、アミノ糖態と中性糖態の炭素が全炭素に占める割合は、最大でも36.9

%であり、牛ふん・オガクズコンポストと豚ふん・おがくずコンポストのF4画分では7~8%に過ぎなかった。したがって、いずれの画分でもアミノ酸、アミノ糖および中性糖以外の形態の炭素が大部分を占める。熊田ら⁴⁴⁾が稲わら堆肥の有機物組成をWaksman法で分析した結果によれば、有機質資材中には炭水化物、タンパク質とともに脂質やリグニンもかなり含まれる。さらに、前節で行った電子顕微鏡観察でも、微細画分と水溶性画分にはかなりの量の無定形物質が認められ、これらの多くは元素分析の結果から腐植物質と推定されたことから、有機質資材の微細および水溶性画分を構成する有機成分の組成を解析するためには、炭水化物とタンパク質だけでなく、脂質、リグニンおよび腐植物質にも考慮を払う必要がある。

4) 画分のムラミン酸

各画分のムラミン酸含量を第25表に示す。

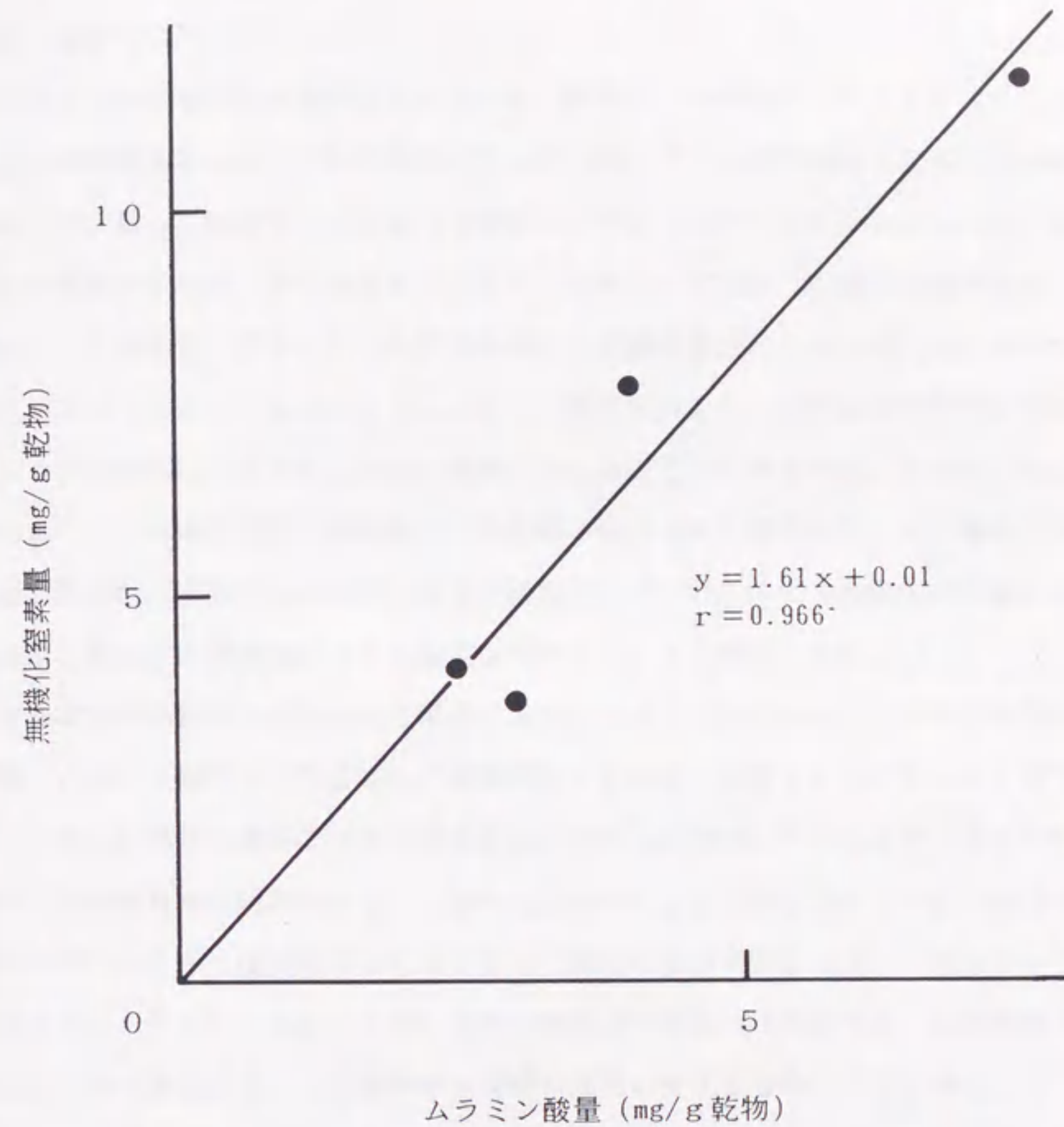
ムラミン酸含量は、いずれの有機質資材試料においてもF2画分でもっとも多く、それ以外の画分には少量しか存在しなかった。グルコサミンの乳酸エーテルであるムラミン酸は、細菌細胞壁を構成するペプチドグリカンに特異的に存在する³³⁾ことから、画分中に存在する細菌細胞壁物質の指標となる。したがって、ムラミン酸がF2画分に多いことはこの画分に細菌細胞壁物質が多く存在することを示すものであり、前節において細菌細胞と細胞壁物質がこの画分に多く存在することが電子顕微鏡観察によって認められていることと一致する。また、F3画分においても多くの膜状物質の存在が電子顕微鏡観察によって確認されているが、この画分のムラミン酸含量はかなり少ないため、膜状物質は細菌細胞壁の断片というよりはむしろ前節で指摘したように、細菌細胞膜の断片と判断される。

細菌細胞壁の主要な構成物であるペプチドグリカンは、N-アセチルグルコサミンとN-アセチルムラミン酸が交互に β -1,4結合をして糖鎖を形成しており、ムラミン酸の乳酸部分のカルボキシル基には数個のアミノ酸からなるペプチド鎖が結合している⁵⁶⁾。さらに、

第25表 画分のムラミン酸含量*

画 分	牛 ふ ん 厩 肥	都 市 ご み コンポスト	牛ふん・おがくず コンポスト	豚ふん・おがくず コンポスト
F 1	1.66	0.36	0.54	0.27
F 2	7.48	4.00	2.96	2.44
F 3	1.25	0.89	0.58	0.40
F 4	0.70	n.d.**	0.33	0.23

*mg/g乾物. **測定せず.



第15図 F 2 画分のムラミン酸量と窒素無機化量との関係

細菌細胞壁にはペプチドグリカン以外にも、タイコ酸やリポタンパク質など、かなりの窒素を含む化合物が存在する。このように、細菌細胞壁には相当量の有機態窒素が含まれる。甲斐ら³⁵⁾はD-アミノ酸の土壤中での分布とその動態に基づいて、土壤中における易分解性有機態窒素の給源として、こうした細菌細胞壁の役割が大きいと推定している。そこで、各有機質資材試料のF 2画分のムラミン酸含量と前節で行った4週間のインキュベーションによって無機化した窒素量との関係を検討したところ、両者の間には5%水準で有意な相関関係が認められ(第15図)、F 2画分においては細菌細胞壁物質が無機化窒素の主要な給源となっていることを示唆した。

5) 総括

前節で行った電子顕微鏡観察と元素分析の結果は、微細画分(F2とF3)にはかなりの量の細菌菌体およびその断片が存在するのに対して、水溶性画分(F4)には細菌菌体の断片は少量しか存在せず、大部分は無定形の物質であることを示した。一方、本節で行った有機態窒素組成と中性糖組成の分析から得られた知見は、前節の結論を支持すると同時に、水溶性画分で認められた無定形物質には腐植物質だけでなく微生物の菌体外代謝産物も含まれることを示した。また、ムラミン酸の分析から、細菌細胞壁物質が微細画分のうちでも相対的に大きなF2画分に集積していることが示唆された。さらに、前節で示されたように、有機質資材の微細および水溶性の画分は粗大画分と比べて土壤中で容易に無機化されるが、画分中の易分解性窒素の給源としては、このような微生物菌体とその断片ならびに菌体外代謝産物が大きな役割を果たしていると考えられる。

有機質資材が耕地に施用された場合、微細および水溶性の部分は土壤中で容易に移動・拡散した後、土壌粒子に吸着されて微生物による分解・変質をこうむるものと推定されるが、こうした過程を通じて土壌の窒素肥沃度の向上に関与していくものと考えられる。同時に、有機質資材の粗大部分も、土壤中で微生物による分解を受けて一部は急速に無機化されるが、その多くは微細化されるとともに微生物菌体に取り込まれ、代謝されるものと推定される。こうして新たに生成した微生物菌体や菌体外代謝産物も、有機質資材にもともと含まれる微細部分や水溶性部分と同様な振舞いをするものと予想される。

第3節 要 約

土壤中での有機質資材の挙動を解明するうえで重要な役割を担っていると考えられる微細画分と水溶性画分の性状を解明するため、材料および腐熟度の異なる4種類の有機質資材を、水中での沈降と遠心分離によって、粗大(F1、4℃、一夜沈降)、微細(F2、10,000×g沈降; F3、100,000×g沈降)および水溶性(F4、F3上澄)の各画分に分画した。得られた画分について、第1節では微細形態、元素組成および土壤中での無機化特性から特徴づけるとともに、第2節では有機態窒素組成、単糖組成およびムラミン酸の分析から特徴づけた。

透過型電子顕微鏡観察によれば、F2画分には細菌細胞とともに細菌細胞壁もしくは細胞質膜、および無定形物質が存在し、F3およびF4の両画分には細菌細胞に由来すると思われる膜状ならびにフィラメント状の物質と無定形物質が存在した。

元素分析の結果、窒素はF2～F4の微細および水溶性の画分に濃縮されており、F2～F4のC/N比は、おがくずを含まない牛ふん厩肥と都市ごみコンポストで低く、おがくずを含む牛ふん・おがくずコンポストと豚ふん・おがくずコンポストでは微細な画分ほど高かった。H/C-O/C図上で、F2およびF3の微細画分は細菌細胞画分とRp型腐植酸もしくはフルボ酸との間に位置し、水溶性のF4画分はRp型腐植酸とフルボ酸のほぼ中間に位置した。

各画分を土壌と混和してインキュベートした場合、F2～F4の微細画分と水溶性画分の窒素無機化率は粗大なF1画分よりも高く、有機質資材の微細画分と水溶性画分は粗大画分よりも土壌中で無機化されやすかった。

有機態窒素組成の分析によれば、いずれの画分においてももっとも多く含まれるのは加水分解性のアミノ酸態窒素もしくはNH₄-Nであり、F1～F3の各画分ではアミノ酸態窒素の割合がもっとも多かったのに対して、F4画分ではNH₄-Nの割合がもっとも多いことが特徴的であった。一方、加水分解性のアミノ糖態窒素はいずれの画分でももっとも少なかったが、F4画分においては、アミノ糖態窒素量と窒素無機化量との間に有意な相関が認められた。

加水分解によって遊離した中性糖量は、F2～F3の各画分と比べてF1画分で多かった。いずれの画分においても、ヘキソースがもっとも卓越しており、ヘキソースのうちでもグルコースがもっとも多くを占める傾向にあった。画分が小さくなるにつれて、グルコースの割合は減少したのに対して、微生物起源と推定されるマンノース、ガラクトースおよびメチルペントースの割合が増加した。

各画分のアミノ酸、アミノ糖および中性糖の3種類の主要な形態の炭素が全炭素量に占める割合を計算したところ、7～37%を占めるに過ぎなかった。

細菌細胞壁に特異的に存在する成分であるムラミン酸は、F2画分にもっとも多く含まれると同時に、この画分のムラミン酸含量と窒素無機化量の間には有意な相関が認められた。

以上のことから、微細画分(F2とF3)は細菌菌体およびその断片を多く含み、無定形の腐植物質と共存しているのに対して、水溶性画分(F4)には微生物菌体はわずかしか含まれず、無定形の腐植物質と微生物代謝産物を主としていると推定された。また、微細および水溶性の画分は土壌中で無機化されやすいが、これら画分の易分解性窒素の給源は画分に含まれる微生物菌体および菌体外代謝産物と考えられた。

第5章 物理的分画法による堆厩肥連用土壌 の有機物の存在状態の解析

毎年耕地に加えられる有機質資材は、土壌中で分解をこうむるが、その一部は土壌中に残存・集積し、しだいに土壌の性質を改変するとともに養分の供給能を増大させていくと推定される。しかしながら、連用された有機質資材がどのような過程を経て安定化され、土壌中に集積していくのかについての解析的研究はほとんど見当たらない。有機質資材が土壌に施用された場合、微細画分や水溶性画分は雨水などによって浸出されて土壌中に拡散するとともに、その一部は粘土鉱物と結合して土壌中に集積し、土壌の窒素供給力を増大させていくと推定される。また、土壌中に残留する粗大部分も微細化、水溶化され、同様の経過をたどると予想される。こうしたことから、前章では有機質資材の微細および水溶性画分の性状を、粗大画分との比較のもとに詳細に検討した。

本章では、堆厩肥の連用によって土壌中に集積した有機物の存在状態を物理的分画法を適用して解析することにより、畑土壌に施用された有機質資材の挙動の一端を明らかにすることを試みた。まず第1節では、有機質資材の微細部分と水溶性部分が吸着・保持されて集積する主要な場と考えられる粘土画分を赤黄色土畑地で行われている厩肥連用圃場から採取した土壌から分離し、炭素、窒素の含有率とC/N比の経時的变化を追跡した。ついで第2節では、同じ土壌に施用された厩肥由来の有機物の集積状況と集積有機物の性状を解明するため、土壌を粒径別に画分し、各画分の炭素、窒素の分布と画分中の有機態窒素の無機化について調べた。第3節では、第2節までに用いた土壌以外に、黒ボク土畑地で行われている堆厩肥連用土壌から採取した土壌について、粒径画分中の有機物量と各画分の有機態窒素の無機化を調べ、赤黄色土試料と比較検討した。また、土壌中の易分解性窒素の給源として微生物細胞壁が大きな役割を果たしている³⁵⁾ことから、有機質資材の連用に伴って集積する易分解性有機物の実体解明のための一つの試みとして、前章と同様に、細菌細胞壁のペプチドグリカンに特異的に存在する成分であるムラミン酸を分析した。さらに、第4節では、有機質資材の連用に伴って土壌中に集積する有機物の存在状態をより詳細に解析するため、厩肥を連用した黒ボク土畑地から採取した土壌について、粒径分画を行うと同時に水中篩別法によって大きさの異なる耐水性団粒(団粒サイズ画分)を分離し、得られた粒径画分および団粒サイズ画分の有機物含量ならびに炭素と窒素の無機化を調べた。

第1節 厩肥連用に伴う粘土画分中の有機物の経時的变化

本節では、厩肥連用に伴う畑土壌の粘土画分の性状の変化を検討するため、赤黄色土畑地で行われている厩肥連用試験圃場において、4年間にわたって12作栽培した跡地から採取した土壌より粘土画分を分離し、それらの全炭素含有率、全窒素含有率とC/N比の経時的变化を追跡した。

1. 供試土壌

名古屋大学農学部附属農場の厩肥連用試験圃場から採取した土壌を供試した。

この圃場試験は1975年9月より開始され、有機物含量の少ない赤黄色土畑地において、春作にバレイショ、夏作に青刈トウモロコシ、秋作に飼料カブの輪作が行われ、10a当たり0、2、5、10tの牛ふん厩肥が春作前と秋作前の年2回、施用されてきた。圃場試験の概要は、吉田・佳山⁸³⁾および吉田ら⁷⁹⁾によって詳しく報告されている。粘土画分の採取は、厩肥を0t、5t、10t施用した区から、試験開始前より12作跡地まで、作物収穫後に採取した土壌を風乾細土として供試した。なお、試験区の名称は、年間の厩肥施用量に基づいて、それぞれ0t区、10t区、20t区とする。また、供試土壌の採取時期を第26表に示す。

2. 実験方法

風乾細土40gを2l容広口びんにとり、蒸留水1lと1M塩化ナトリウム水溶液20mlを

第26表 供試土壌の採取時期

採 取 時 期	採 取 年 . 月 . 日
連用試験開始前	1975 . 8 . 25
1作(飼料カブ)跡地	1975 . 12 . 22
2作(バレイショ)跡地	1976 . 6 . 30
3作(青刈トウモロコシ)跡地	1976 . 9 . 8
4作(飼料カブ)跡地	1976 . 1 . 17
5作(バレイショ)跡地	1977 . 6 . 20
6作(青刈トウモロコシ)跡地	1977 . 9 . 5
7作(飼料カブ)跡地	1978 . 1 . 13
8作(バレイショ)跡地	1978 . 6 . 19
9作(青刈トウモロコシ)跡地	1978 . 9 . 4
10作(飼料カブ)跡地	1979 . 1 . 16
11作(バレイショ)跡地	1979 . 6 . 25
12作(青刈トウモロコシ)跡地	1979 . 9 . 5

加え、ゴム栓をして1時間振とう後、びんの内容物を1000、500、105および25 μ mの篩を順次通過させて粗粒部分を除いた。それぞれの篩上の残渣は蒸留水で洗浄し、洗浄液は通過液と併せてつぎの篩を通過させた。25 μ mの篩の通過液と洗浄液は再び広口びんに戻し、蒸留水を加えて全体を2 lとした後、沈底法によって粘土画分を採取した。粘土画分の採取は4 $^{\circ}$ Cの低温室内で行い、水温と室温が平衡状態となった後、広口びんを1分間振とうして静置した。所定時間経過後、サイホンで2 μ m以下の画分を集め、この操作を上層液がほぼ透明になるまで繰り返した。集めた懸濁液中の粘土画分は10,000 \times gの連続遠心によって分離し、凍結乾燥した。乾燥後の粘土画分中の全炭素含有率と全窒素含有率は、C-Nコーダーによって測定した。

3. 結果および考察

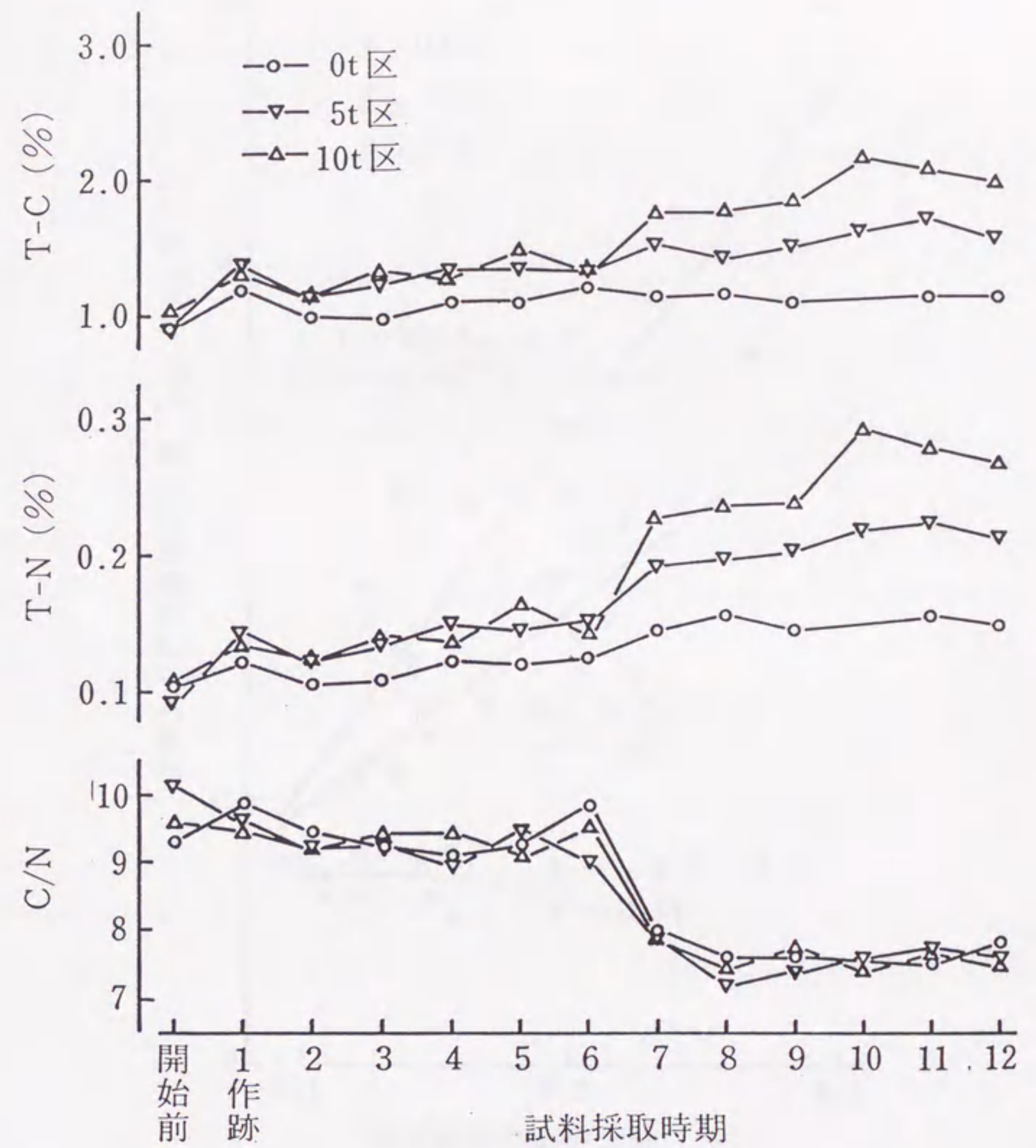
分画操作によって得られた粘土画分の量は各区ともほぼ一定であり、試験開始前より12作跡地までの平均値は、乾土 100 g 当たり、0 t 区12.9 g、10 t 区10.9 g、20 t 区10.5 gであった。また、0 t 区と10 t 区および0 t 区と20 t 区との間にはそれぞれ有意差が認められたが、10 t 区と20 t 区との間には有意差が認められなかった。これは、試験開始前の土壌でも、粘土画分の量は0 t 区13.6 g > 10 t 区12.4 g > 20 t 区11.7 gであったことから、厩肥施用の影響というよりもむしろ試験区間のばらつきのためと推定される。

粘土画分の全炭素含有率、全窒素含有率とC/N比の経時的变化を第16図に示す。

0 t 区の全炭素含有率は、1作跡地で若干増加し、その後もわずかながら増減がみられたが、12作跡地までの全期間を通じて増加する傾向は認められなかった。これに対して、厩肥を施用した10 t 区および20 t 区では、1作跡地以降、全炭素含有率は常に0 t 区より高く、いずれも経時的な増加が認められた。ただし、6作跡地までは10 t 区と20 t 区の値はほぼ等しかったが、7作跡地以降になって、20 t 区における増加が10 t 区を大きく上回った。

全窒素含有率はいずれの区でも増加の傾向にあり、1作跡地以降、0 t 区よりも10 t 区と20 t 区で常に高く、7作跡地以降では全炭素含有率と同様に10 t 区よりも20 t 区で大きな増加を示した。これらの増加の程度は全炭素含有率の場合よりも大きく、とくに7作跡地以降における増加が著しかった。

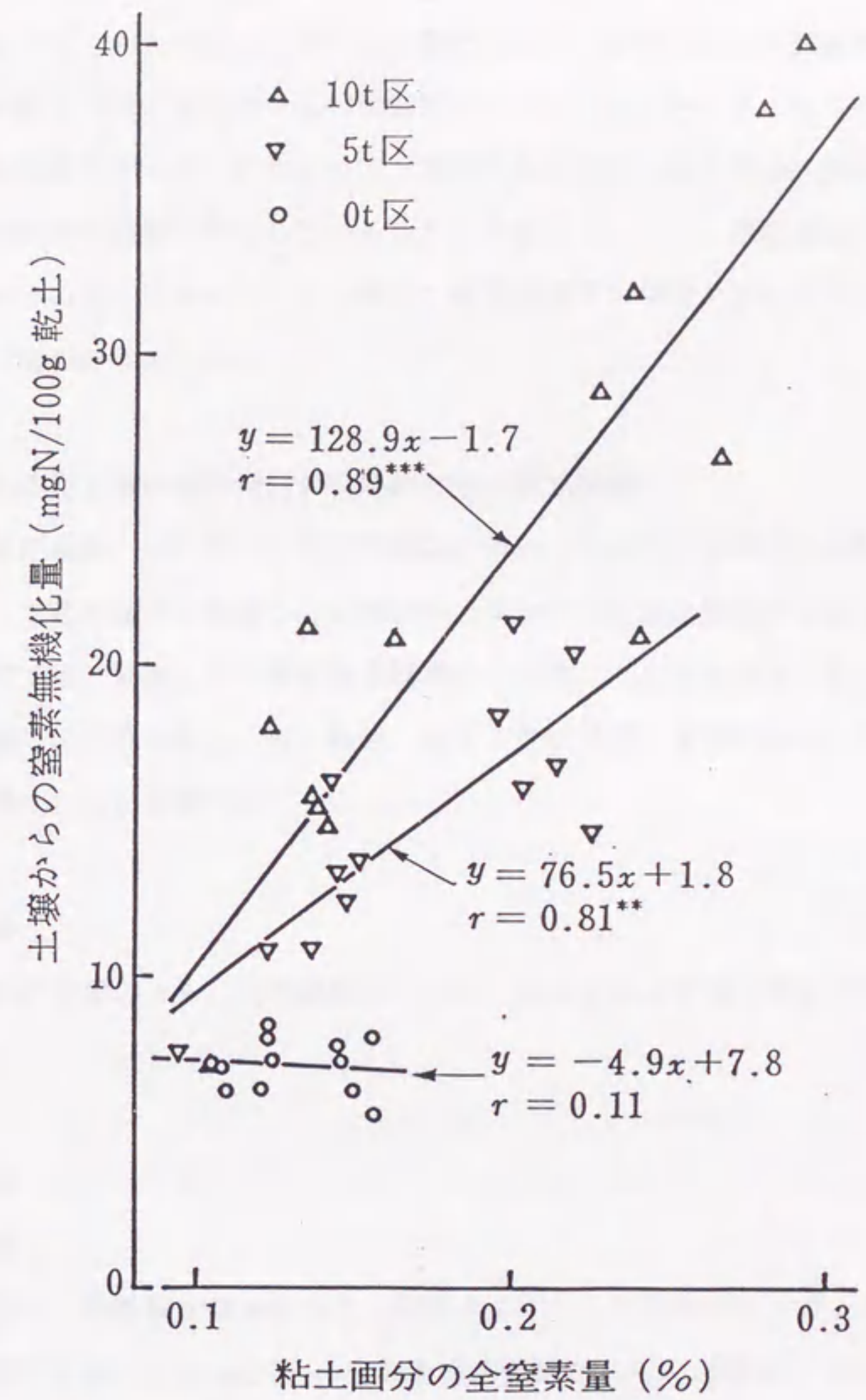
C/N比は上記の全炭素含有率と全窒素含有率の変化を反映し、6作跡地までは各区とも9~10であったのに対して、7作跡地以降では低下して7~8となった。



第16図 粘土画分の全炭素量、全窒素量とC/N比の経時的变化

このように、厩肥の連用に伴って粘土画分の有機物はしだいに増加することが判明した。また、厩肥無施用で化学肥料だけの耕作でも、全窒素含有率はわずかに増加する傾向を示した。さらにC/N比の推移から、いずれの区でも粘土画分の有機物は量的に増えるだけでなく、質的にも変化している可能性が示された。

吉田ら⁸⁰⁾は、本研究で用いたと同じ土壌(未分画)について30℃で保温静置した場合の



第17図 粘土画分の全窒素量と未分画土壌の窒素無機化量との関係

*数値は吉田ら⁸⁰⁾による。

窒素無機化量を測定し、厩肥施用区では7作以降窒素無機化量が増大したのに対して、厩肥無施用区では増加しなかったことを報告している。そこで、本実験で得られた粘土画分の全窒素含有率と吉田らの測定した未分画土壌の窒素無機化量（ビーカー法、20週間インキュベーション）との関係を検討するため、両者の関係を第17図に示した。

図に示したように、10 t区および20 t区の厩肥施用区では粘土画分の全窒素含有率と土壌の窒素無機化量との間には有意な正の相関関係が認められたが、0 t区ではこうした有意な関係は認められなかった。したがって、厩肥施用区では、粘土画分へ集積した有機物が土壌からの窒素の無機化に寄与していることを示唆する。一方、厩肥無施用の0 t区では、化学肥料だけの連用によっても粘土画分へ有機態窒素が集積するものの窒素無機化への寄与は小さいものと考えられる。

第2節 厩肥連用土壌の粒径画分の有機物とその窒素無機化

前節では、厩肥連用土壌の粘土画分の有機物についてその性状の経時的変化を追跡し、厩肥連用によって粘土画分へ集積した有機物が土壌からの窒素の無機化に寄与していると推定した。本節では、前節と同じ厩肥連用圃場から採取した土壌を粗砂、細砂、シルトおよび粘土の各画分に粒径分画し、粒子組成、画分の全炭素量と全窒素量および画分中の有機態窒素の無機化について調べた。

1. 供試土壌

前節で供試した土壌のうち、11作跡地の0 t区、10 t区および20 t区から採取した土壌を用いた。

2. 実験方法

1) 分 画

2 l容広口びんに風乾細土80 gをとり、蒸留水1 lと1 M塩化ナトリウム水溶液40 mlを加えて1時間振とう後、210 μ mと25 μ mの篩を順次通過させた。通過液について、前節と同様に、4℃の低温室で沈底法によって2 μ m以下の画分を集めた。このうち、210 μ m以上を粗砂画分、210~25 μ mの画分を細砂画分、25~2 μ mの画分をシルト画分、2 μ m以下の画分を粘土画分とした。粗砂と細砂の両画分は50℃で通風乾燥し、シルトと粘土の両画分は凍結乾燥した。

これらの画分の一部について、粗砂と細砂の両画分は振とうミルで、シルトと粘土の両画分は乳鉢と乳棒で粉碎し、C-Nコーダーによって全炭素含有率と全窒素含有率とを測定した。

2) インキュベーション実験

各土壌の粘土画分と20t区土壌の全画分について、以下の方法でインキュベーション実験を行なった。すなわち、250ml容広口ポリびん中に、粗砂画分については8g、細砂画分については4g、シルト画分については5g、粘土画分については2gの画分試料をとり、粗砂、細砂とシルトの3画分には乳鉢で粉碎したカオリナイト2gを加え、さらにすべてのポリびんに塩酸で洗浄した30~40メッシュの石英砂を全体が20gとなるように加えて、十分に混合した。これらに、蒸留水2mlとイノキュラムとして、0t区土壌(11作跡地)5gに蒸留水250mlを加えて振とう、静置した上澄液1mlずつを添加した。ポリびんはアルミホイルでふたをして、30℃で0、2、4および8週間インキュベートした。無機態窒素の定量は各試料に10%塩化カリウム水溶液100mlを加えて1時間振とう後ろ過し、ろ液中の $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ ($\text{NO}_2\text{-N}$ を含む)をBremner法⁶⁾で定量した。

なお、インキュベーション中に減少した水分は1週間ごとに補充した。また、インキュベーションはそれぞれ2連で行い、結果は平均値で表わした。

3. 結果および考察

厩肥連用土壌の物理分画画分の乾物重の分布、全炭素含有率、炭素の分布、全窒素含有率、窒素の分布とC/N比を第27表に示す。

乾物重の分布は3区ともほぼ同様な傾向を示し、粗砂画分が40%前後ともっとも多く、ついでシルト画分が30%程度、細砂画分が15~18%、粘土画分が10~13%を占めた。また、粘土画分の量は前節同様、0t区>10t区>20t区であった。

全炭素含有率は、各区とも細砂画分でもっとも高く、厩肥の施用量が増加するにつれて細砂と粗砂の両画分で著しく増加した。シルト画分と粘土画分では、いずれの区でもシルト画分より粘土画分の全炭素含有率が高く、両画分とも厩肥施用量の増加とともに全炭素含有率は増加したが、粗砂画分や細砂画分ほど著しくはなかった。また、0t区では粗砂と細砂の両画分に未分画土壌の全炭素量の50%程度が分布したが、厩肥施用量の増加とともに両画分への分布率は増加し、10t区で70%、20t区で80%程度となり、厩肥施用量の増加に伴って土壌の粗粒な画分に有機物が集積することを示した。各区の有機物は、0t区では植物根や植物破片が主であったのに対して、10t区および20t区ではほとんどが黒色の厩肥塊であった。なお、炭素の回収率は97~102%と良好であった。

第27表 土壤粒径画分の乾物重、炭素、窒素およびC/N比

試験区	画分	乾物重の分布 (%)	T-C** (%)	炭素の分布* (%)	T-N** (%)	窒素の分布* (%)	C/N
0 t区	未分画	100.0	0.73	100.0	0.072	100.0	10.1
	粗砂	41.6	0.35	19.9	0.019	11.0	18.4
	細砂	14.6	1.40	28.0	0.087	17.6	16.1
	シルト	28.1	0.88	33.9	0.066	25.8	13.3
	粘土	13.2	1.14	15.0	0.158	29.0	7.2
	回収率(%)	97.5	—	96.8	—	83.4	—
10 t区	未分画	100.0	2.12	100.0	0.200	100.0	10.6
	粗砂	39.6	1.87	34.9	0.150	29.7	12.5
	細砂	18.2	4.11	35.3	0.337	30.7	12.2
	シルト	29.6	1.38	19.3	0.128	18.9	10.8
	粘土	11.1	1.75	9.2	0.241	13.4	7.3
	回収率(%)	98.5	—	98.7	—	92.7	—
20 t区	未分画	100.0	3.43	100.0	0.305	100.0	11.2
	粗砂	43.5	4.09	51.9	0.335	47.8	12.2
	細砂	18.1	5.87	31.0	0.535	31.7	11.0
	シルト	26.0	1.76	13.3	0.163	13.9	10.8
	粘土	9.9	2.04	5.9	0.289	9.4	7.1
	回収率(%)	97.5	—	102.1	—	102.8	—

*乾土当り、**画分(乾物)当り。

全窒素含有率も全炭素含有率の場合とほぼ同じ傾向を示し、厩肥施用量の増加に伴う粗粒画分での増加が顕著であった。窒素の分布からみた場合にも、粗粒画分への分布率は厩肥施用によって増大したが、炭素の分布率よりは小さく、粘土画分においては炭素よりも窒素の分布率が大きかった。窒素の回収率は、10 t区と20 t区では良好であったが、0 t区ではやや低かった。

C/N比は、各区とも粒径が細くなるにつれて低下したが、画分ごとにみた場合には、厩肥施用量によって異なった様相を呈した。すなわち、粗砂と細砂の粗粒画分のC/N比は、0 t区では16~18であったが、厩肥の施用によって低下し、10 t区および20 t区では11~13程度となった。これは、前述のように、粗砂や細砂の粗粒画分に厩肥塊が集積していることによると推定される。シルト画分においてもC/N比は0 t区よりも10 t区と20 t区で低かったが、粘土画分のC/N比は厩肥施用の有無にかかわらず、各区とも7.1~7.3とほぼ等しかった。

0 t区と10 t区の粘土画分および20 t区の全画分をインキュベートした場合の無機態窒素量と窒素無機化量を第28表に示す。

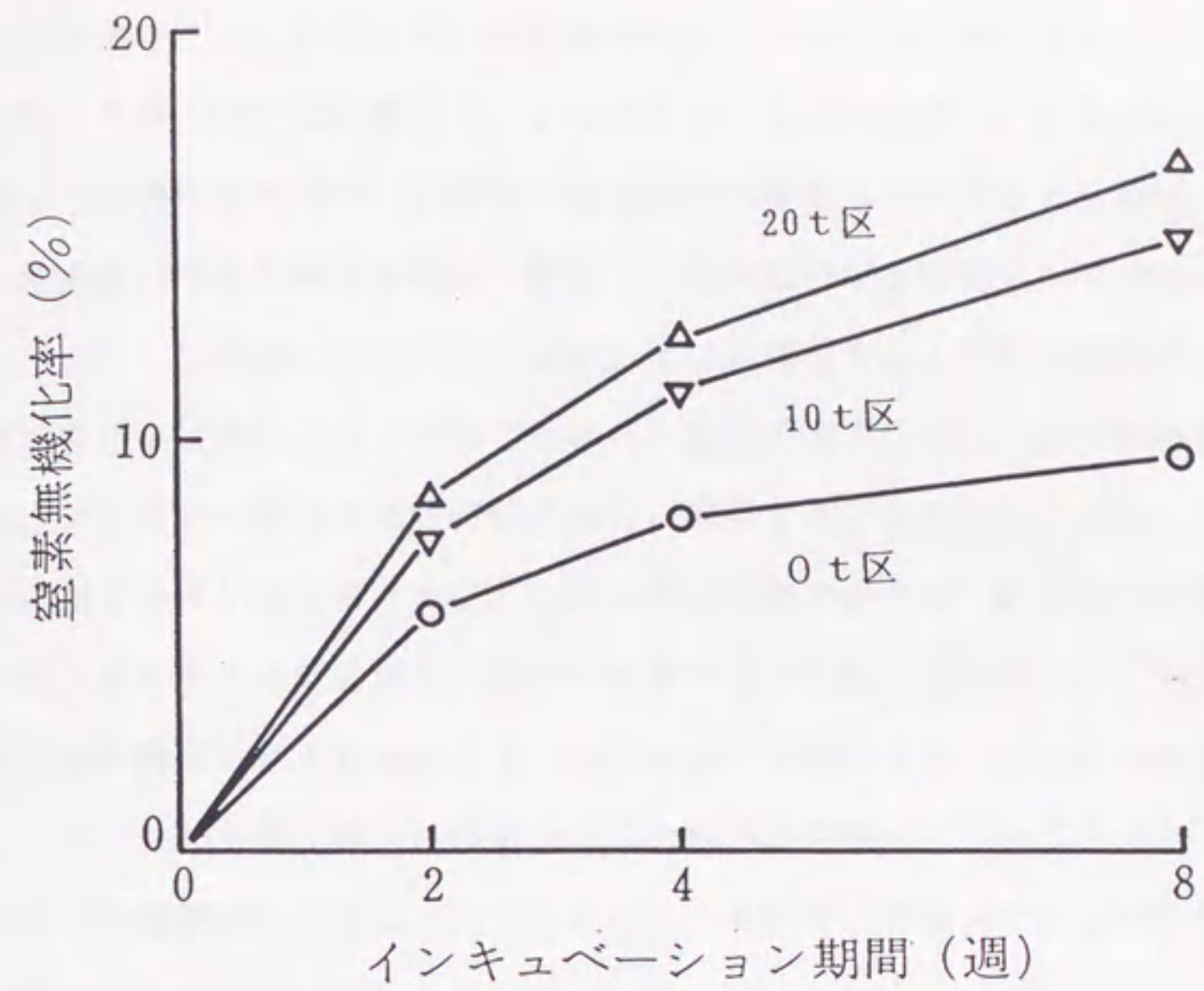
第28表 土壤粒径画分のインキュベーション期間中の無機態窒素量*の変化

試験区	画分	項目	インキュベーション期間(週)			
			0	2	4	8
0 t区	粘土	NH ₄ -N	3.4	4.0	2.7	1.2
		NO ₃ -N**	1.3	9.5	14.4	18.2
		計	4.7	13.5	17.1	19.4
		無機化量	-	8.8	12.4	14.7
10 t区	粘土	NH ₄ -N	4.1	2.3	3.2	1.4
		NO ₃ -N**	1.5	20.6	28.6	39.3
		計	5.6	22.9	31.8	40.7
		無機化量	-	17.3	26.2	35.1
	粗砂	NH ₄ -N	2.4	1.3	1.1	0.9
		NO ₃ -N**	0.4	8.3	12.7	16.7
		計	2.8	9.6	13.8	17.6
		無機化量	-	6.8	11.0	14.8
	細砂	NH ₄ -N	3.5	1.5	1.8	1.4
		NO ₃ -N**	1.5	11.4	15.1	23.4
		計	5.0	12.9	16.9	24.8
		無機化量	-	7.9	11.9	19.8
20 t区	シルト	NH ₄ -N	1.7	4.0	1.0	1.1
		NO ₃ -N**	0.2	4.9	11.1	14.8
		計	1.9	8.9	12.1	15.9
		無機化量	-	7.0	10.2	14.0
	粘土	NH ₄ -N	3.3	2.7	2.0	1.5
		NO ₃ -N**	0.0	25.6	37.3	50.0
		計	3.3	28.3	39.3	51.5
		無機化量	-	25.0	36.0	48.2

*mgN/100 g画分. **NO₂-Nを含む.

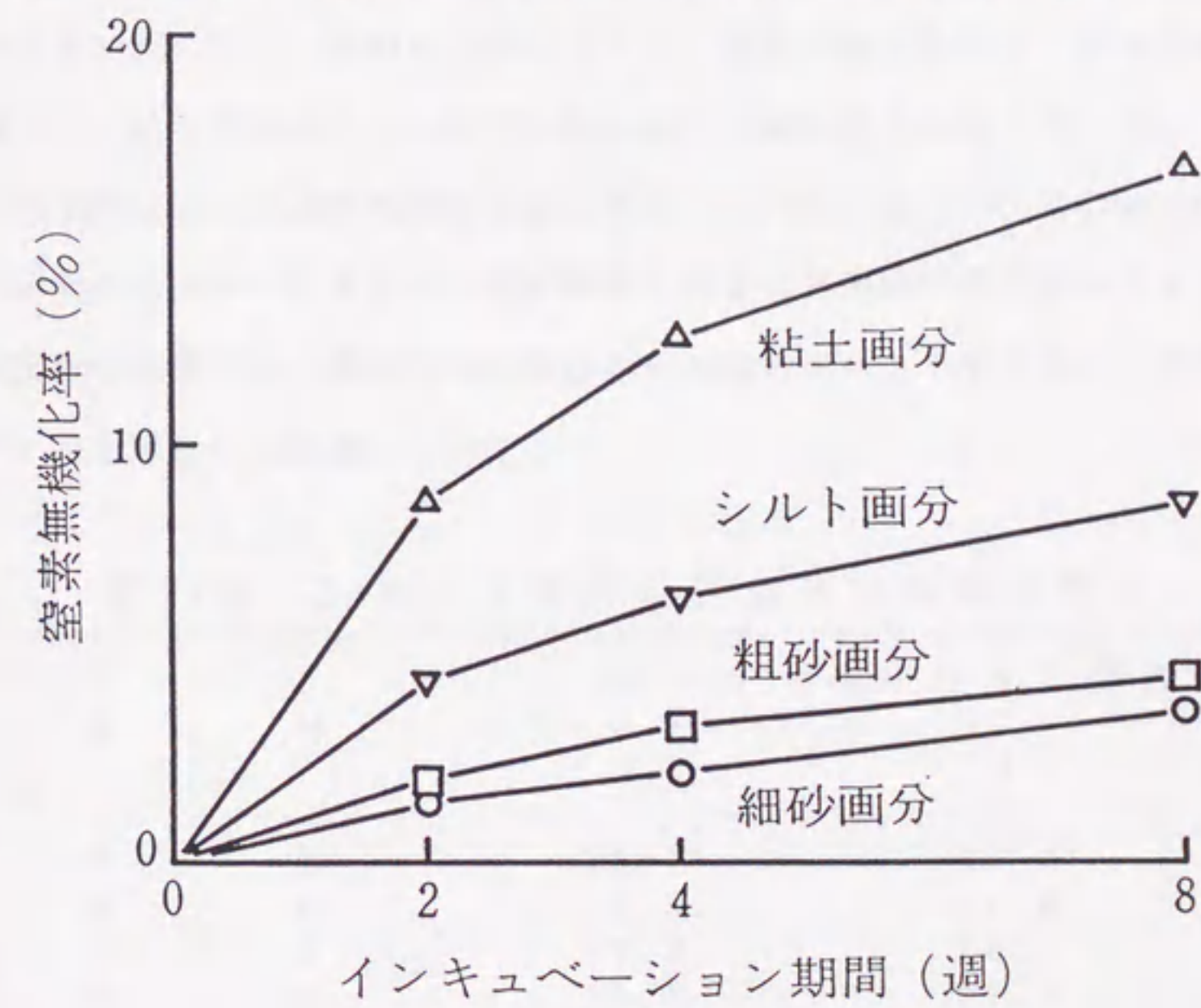
粘土画分では、いずれの区でもインキュベーション期間の経過とともに無機態窒素量は増加し、そのほとんどをNO₃-Nが占めたことから、窒素の無機化は順調に進行し、無機化した窒素の硝酸化成も順調に進行したことが明らかである。窒素の無機化量は、インキュベーションの全期間を通じて、0 t区<10 t区<20 t区の順であり、8週後には粘土画分100 g当たり、0 t区では15mg、10 t区では35mg、20 t区では48mgであった。

さらに、それぞれの粘土画分の窒素無機化率の推移を第18図に示す。窒素無機化率も、インキュベーションの全期間を通じて0 t区<10 t区<20 t区の順であり、厩肥施用量が



第18図 粘土画分の窒素無機化率*の推移

*窒素無機化率 = 窒素無機化量 / (全窒素量 - 0週目の無機態窒素量) × 100 (%)



第19図 20 t区土壌の粒径画分の窒素無機化率*の推移

*窒素無機化率 = 窒素無機化量 / (全窒素量 - 0週目の無機態窒素量) × 100 (%)

多くなるほど高くなったが、厩肥無施用区と施用区との差は大きく、10t区と20t区との差は小さかった。この事実は、3区のC/N比がほぼ等しいにもかかわらず、厩肥連用に伴って無機化されやすい有機物が粘土画分に集積していることを示唆する。

粘土画分へ易分解性有機物が集積する機構は必ずしも明らかではないが、前章で述べたように、この圃場に施用された厩肥とほぼ同様な牛ふん厩肥の微細および水溶性画分の窒素無機化率は非常に高かったことから、厩肥の施用に伴って、その微細部分や水溶性部分に由来する易分解性有機物が粘土画分に集積することが示唆される。ただし、窒素無機化率の測定条件が異なるために、その比較は困難であるが、粘土画分の窒素無機化率は前章で調べた牛ふん厩肥の場合に比べてかなり低かった。おそらくは、粘土画分に存在する易分解性有機物は粘土と結合することによって安定化されているものと推察される。

つぎに、20t区土壌の粒径画分からの窒素の無機化についてみると、第28表に示したように、8週間のインキュベーションによっていずれの画分でも窒素の無機化が認められ、硝酸化成も順調に進行した。

各画分からの窒素無機化量は、粘土画分>細砂画分>粗砂画分>シルト画分の順であった。しかし、画分の全窒素含有率がそれぞれ異なるため、窒素無機化率を計算し、その推移を第19図に示す。図からわかるように、窒素無機化率はインキュベーションの全期間を通じて、粘土画分>シルト画分>粗砂画分>細砂画分の順であった。

土壌粒径画分の窒素無機化に関しては、Chichester^{11,12)}やCameron and Posner⁷⁾などの研究があるが、いずれも粒径が細くなるほど無機化率が增大することを指摘している。本実験の結果でも、無機化率は粗砂画分が細砂画分よりやや高かったが、概して粒径が細かいほど無機化率は高いといえよう。

第29表 20t区土壌の粒径画分の窒素無機化への寄与率*

画 分	インキュベーション期間 (週)		
	2	4	8
粗 砂	34.1	36.4	34.9
細 砂	16.5	16.4	19.4
シ ル ト	21.0	20.2	19.8
粘 土	28.5	27.1	25.9

*窒素無機化への寄与率 = (画分の窒素無機化量 × 乾物重の分布) / ((画分の窒素無機化量 × 乾物重の合計)の総計) × 100(%)

さらに、20 t区土壌の窒素無機化に対する各画分の寄与率を第29表に示す。この寄与率は、各画分の窒素無機化量の割合を意味する。窒素無機化への寄与は粗砂画分でもっとも大きかったが、これは画分量と全窒素含有率が多いためである。ついで粘土画分で大きく、この画分は量的には10%程度を占めるにすぎないが、窒素無機化への寄与ははるかに大きいことが認められた。細砂およびシルトの両画分も、20%程度の寄与率であった。また、インキュベーション期間の経過に伴って、粗砂と細砂の両画分の寄与が増大したのに対して、シルトと粘土の両画分の寄与は減少した。このように、粘土画分は量的には少ないにもかかわらず、窒素の無機化への寄与は大きかったが、他の画分も、窒素無機化率は低いが無機化への寄与は大きく、さらに、時間の経過とともに粗砂や細砂の寄与が増大するので、窒素の無機化における粗粒な画分の役割は無視できない。これは、粗粒な画分に集積された厩肥塊も、時を経るにしたがって分解されて微細化し、無機化が進行していくためと推定される。

第3節 堆厩肥連用土壌の粒径画分中の有機物とその窒素無機化 — 赤黄色土と黒ボク土の比較 —

前節では、厩肥を連用した赤黄色土を粒径分画して得られた画分の有機物量と窒素の無機化について検討を行ったが、赤黄色土は有機物に乏しい土壌であり、この土壌について得られた結果が他の土壌にも適用可能か否かについては、さらに検討を必要とする。そこで本節では、赤黄色土とは性質が大きく異なる黒ボク土で行われてきた堆厩肥の連用試験圃場から採取した土壌を粒径によってわけ、粒径画分中の有機物量と各画分をインキュベートした場合の窒素の無機化を調べ、赤黄色土試料と比較検討した。さらに、有機質資材の連用に伴って集積する易分解性有機物の実体解明のための一つの試みとして、細菌細胞壁のペプチドグリカンに特異的に存在する成分であるムラミン酸を分析した。

1. 供試土壌

赤黄色土試料は、前節と同じく、名古屋大学農学部付属農場（東郷）で行われてきた厩肥連用試験圃場⁸³⁾から採取した。この連用試験は既述のように1975年に開始されているが、土壌試料は厩肥を年間0、10、20t/10a施用した区から、24作栽培後の1983年9月に採取した。黒ボク土試料は、東北農業試験場（厩川）⁶¹⁾および青森県農業試験場藤坂支場（藤坂）⁷⁶⁾で行われてきた厩肥および堆肥の連用試験圃場から、それぞれ採取した。厩川

では1973年に、藤坂では1940年に試験が開始され、厨川については厩肥を年間0、8、16、32t/10a施用した区から、藤坂については稲わら堆肥を年間0、1.1、3.4t/10a施用した区から、いずれも1983年5月に採取した。供試したすべての区は、厩肥もしくは堆肥のほかに化学肥料も施用されている。土壌は、いずれも堆厩肥の施用後、1作栽培した跡地の作土層(約0~15cm)から採取し、風乾細土として以下の実験に供した。なお、東郷土壌については各区とも4反復で行われてきているため、各反復から採取した等量の風乾細土を混合して供試土壌とした。

2. 実験方法

1) 粒径分画

100gの風乾細土試料を1lの1M塩化ナトリウム水溶液に懸濁させて1時間振とうしたのち一夜静置し、210 μ mの篩を通過させた。篩上の残渣は蒸留水で十分洗浄して粗砂画分(2000~210 μ m)とし、通過液と洗浄液はろ過した後、硝酸銀による塩素の反応がなくなるまで蒸留水で洗浄し、Na飽和土壌とした。これを再び1.5lの蒸留水に懸濁させ、東郷土壌は1時間、厨川と藤坂の両土壌は30時間、それぞれ振とうして分散させた。分散液は4 $^{\circ}$ Cの低温室に移し、2 μ m以下の部分を沈降法で採取した(粘土1画分)。黒ボク土の粘土画分はこの方法だけでは完全に分散しないため、加藤・藤沢の報告³⁷⁾を参照して、40gの陽イオン交換樹脂IR-120B(Na⁺型、>210 μ m)を加えて40時間振とう後、再び2 μ m以下の部分を採取した(粘土2画分)。さらに、沈降法で20 μ m以下の部分を採取してシルト画分(20~2 μ m)とし、残渣を細砂画分(210~20 μ m)とした。細砂中の陽イオン交換樹脂は、210 μ mの篩を再通過させて除いた。すべての画分は、凍結乾燥して以下の実験に供した。

2) 炭素と窒素の分析

画分中の全炭素量と全窒素量は、Allison法³⁾とセミマイクロケルダール法によってそれぞれ測定した。

3) インキュベーション実験

未分画土壌20g中の量に相当する画分試料を250ml容ポリびんにとり、40~80メッシュの石英砂を加えて全体を20gとし、蒸留水6mlおよび培養液とイノキュラム⁴⁷⁾各1mlを加えて、30 $^{\circ}$ Cで4週間インキュベートした。インキュベーション前後の無機態窒素量は、Bremner法⁶⁾で定量した。なお、インキュベーションは全画分について2連制で行った。

4) ムラミン酸の定量

有機物含量に応じて0.1~3gの画分試料をとり、真空封管中で6M塩酸によって100°Cで4.5時間加水分解した後、加水分解液をろ別し、ロータリー・エバポレーターによって減圧下で塩酸を除いた。加水分解液は、第4章、第2節で行ったと同様に、Dowex-50陽イオン交換樹脂(H⁺型)で処理し、トリメチルシリル化して、ガスクロマトグラフィーにより定量した。ガスクロマトグラフィーの条件は、第4章、第2節に記載した条件と同じである。なお、加水分解により生ずるムラミン酸の損失は、とくに補正しなかった。

3. 結果および考察

1) 堆厩肥の連用に伴う土壌粒径画分への有機物の集積

各土壌から分離した粒径画分の乾物重と回収率を第30表に示す。

画分量は、東郷土壌と藤坂土壌では粗砂画分がもっとも多く、厨川土壌ではシルト画分がもっとも多かったが、いずれの土壌でも粘土画分がもっとも少なかった。また、画分の回収率は96~100%であり、分画操作による損失はごくわずかであった。藤坂土壌では、堆肥の連用に伴う画分量の規則的な変化は認められなかったが、厨川土壌と東郷土壌では、厩肥の施用量が増加するにつれて粗砂画分の割合が大きくなるとともに粘土画分の割合が小さくなる傾向がみられた。黒ボク土については、粘土画分を分散特性のちがいに基づいて2画分にわけたが、厨川土壌では厩肥施用量が増すにつれて難分散性の粘土2画分の割合が減少した。

各土壌の粒径画分中の全炭素量、全窒素量とC/N比を第31表に示す。

未分画土壌の全炭素および全窒素の含有率は、いずれの土壌においても堆厩肥の連用に

第30表 画分の乾物重*と回収率

画 分	東郷			厨川				藤坂		
	0 t	10 t	20 t	0 t	8 t	16 t	32 t	0 t	1.1 t	3.4 t
粗 砂	37.8	40.4	43.4	16.9	18.4	22.1	21.0	41.5	43.5	40.8
細 砂	21.2	20.9	20.9	26.5	25.1	26.9	28.2	25.3	25.7	25.9
シルト	24.1	23.4	23.0	38.9	37.8	35.7	35.5	23.5	23.2	23.3
粘土1	16.9	13.7	10.1	4.8	8.2	7.2	8.1	3.1	3.3	3.5
粘土2	-	-	-	9.5	7.3	4.9	4.7	4.2	3.9	4.6
回収率(%)	100.0	98.4	97.4	96.6	96.8	96.8	97.5	97.6	99.6	98.1

*g/100g未分画土壌.

第31表 画分の全炭素含有率、全窒素含有率とC/N比

項目	画分	東郷			厨川				藤坂		
		0t	10t	20t	0t	8t	16t	32t	0t	1.1t	3.4t
T-C* (%)	未分画	1.13	2.21	3.42	9.6	10.2	10.0	13.6	6.0	6.2	6.5
	粗砂	0.61	1.86	3.29	2.8	5.0	5.2	13.1	0.9	1.6	1.8
	細砂	1.56	3.26	4.87	4.1	4.6	6.2	8.8	2.2	2.5	2.2
	シルト	1.35	1.92	2.99	13.5	13.8	13.9	16.1	13.6	13.0	13.6
	粘土1	1.25	1.91	2.14	17.5	18.1	18.0	19.6	19.1	18.6	19.1
	粘土2	-	-	-	15.4	17.8	16.6	19.6	19.6	20.4	20.8
T-N* (%)	未分画	0.116	0.216	0.346	0.67	0.70	0.73	0.94	0.38	0.39	0.45
	粗砂	0.040	0.113	0.270	0.23	0.25	0.32	0.88	0.10	0.12	0.15
	細砂	0.151	0.282	0.427	0.22	0.26	0.38	0.52	0.12	0.12	0.12
	シルト	0.149	0.215	0.321	0.87	0.88	0.92	1.05	0.77	0.78	0.83
	粘土1	0.137	0.230	0.285	1.35	1.43	1.42	1.70	1.34	1.45	1.46
	粘土2	-	-	-	1.26	1.36	1.32	1.53	1.33	1.42	1.47
C/N比	未分画	9.7	10.2	9.9	14.4	14.6	13.8	14.4	15.8	16.1	14.6
	粗砂	15.3	16.5	12.2	12.4	20.2	15.9	14.8	8.9	13.3	12.1
	細砂	10.3	11.6	11.4	18.7	17.7	16.2	17.0	18.8	20.3	18.6
	シルト	9.1	8.9	9.3	15.5	15.6	15.1	15.3	17.6	16.7	16.4
	粘土1	9.1	8.3	7.5	13.0	12.7	12.7	11.5	14.3	12.8	13.1
	粘土2	-	-	-	12.2	13.1	12.6	12.8	14.7	14.4	14.1

*乾物当たり。

よって増加し、藤坂土壌と比べて連用期間が短いが多量の厩肥が施用されている東郷および厨川の両土壌での増加が著しかった。C/N比も厨川および藤坂の両土壌より東郷土壌で低かったが、いずれの土壌でも堆厩肥の連用に伴う変化は小さかった。なお、東郷土壌は、前節で用いた土壌の採取時から4年間経過後に採取しているが、この間の全炭素と全窒素の含有率の増加は、厩肥無施用区ではかなり大きかったのに対して、厩肥施用区ではわずかであった。厩肥無施用区での有機物の増加の一因として、吉田ら⁸⁾は隣接する斜面上部の区画からの土壌の流入が起こった可能性を指摘しているが、本研究でも同様なことが推察された。

赤黄色土の東郷土壌では、全炭素含有率と全窒素含有率は、いずれも厩肥施用量が増すにつれて、全画分で増加した。とくに粗砂画分での増加が著しく、20t区では0t区の5倍以上であった。黒ボク土の厨川土壌と藤坂土壌では、全炭素含有率、全窒素含有率ともにシルト画分と粘土画分で著しく高かった。厨川土壌も東郷土壌と同様に、厩肥の連用に伴って全炭素含有率と全窒素含有率のいずれも全画分で増加する傾向にあり、とくに粗砂

第32表 画分間への炭素と窒素の分布

項 目 画 分	東郷			厨川				藤坂			
	0 t	10 t	20 t	0 t	8 t	16 t	32 t	0 t	1.1 t	3.4 t	
炭素の分布率* (%)	粗 砂	20.4	34.0	41.8	5.0	9.0	11.4	20.2	6.3	11.0	11.0
	細 砂	27.0	30.8	29.8	11.2	11.3	16.6	18.3	9.1	10.4	8.7
	シルト	28.8	20.3	20.1	54.9	51.1	49.6	42.0	53.3	48.5	48.5
	粘 土***	18.7	11.8	6.3	24.1	27.3	21.1	19.5	23.6	22.7	24.9
	回収率(%)	94.9	96.9	98.0	95.2	98.7	99.0	99.0	92.3	92.6	93.1
窒素の分布率** (%)	粗 砂	13.0	21.1	33.9	5.8	6.5	9.8	19.7	11.2	16.3	10.9
	細 砂	27.6	27.3	25.8	8.6	9.3	14.1	15.6	7.8	8.2	6.8
	シルト	31.0	32.3	21.3	50.9	47.7	45.2	39.5	47.9	46.8	43.3
	粘 土***	20.0	14.6	8.3	27.7	31.0	23.0	22.2	25.7	26.7	26.5
	回収率(%)	91.6	95.3	89.3	93.0	94.5	92.1	97.0	92.6	98.0	87.5

*炭素の分布率 = (画分の全炭素含有率 × 画分の乾物重) / ((画分の全炭素含有率 × 画分の乾物重) の総計) × 100. **窒素の分布率 = (画分の全窒素含有率 × 画分の乾物重) / ((画分の全窒素含有率 × 画分の乾物重) の総計) × 100. ***粘土1画分と粘土2画分の合量.

画分での増加が著しかった。藤坂土壌では、堆肥の連用によって、全炭素、全窒素いずれの含有率も粗砂画分と粘土2画分で増加し、シルト画分と粘土1画分では全窒素含有率のみが増加した。画分のC/N比は、東郷土壌では画分の粒径が細くなるにしたがって低下したが、厨川土壌および藤坂土壌では細砂画分でもっとも高く、粘土画分でもっとも低くなる傾向にあった。

堆肥の連用に伴う有機物の集積は、画分の量が異なるため、全炭素と全窒素の含有率のみからでは議論できない。そこで、炭素および窒素の画分間への分布率を計算し、第32表に示す。

東郷土壌における画分間への炭素の分布は、厩肥の施用量が増加するにつれて粗砂画分でもっとも増加し、ついで細砂画分で増加した。逆に、粘土画分で減少がもっとも大きく、シルト画分でも減少した。このことは、全炭素含有率が全画分で増加したにもかかわらず、有機物の相対的な増加は粗砂 > 細砂 > シルト > 粘土の順であることを示し、前節の結果と一致する。窒素についても、同様な傾向がみられた。

厨川土壌においても、厩肥の施用量が多くなるにしたがって、炭素と窒素の分布率は粗砂画分でもっとも増加し、ついで細砂画分での増加が大きかったが、粘土画分よりもシルト画分での減少が大きかった。したがって、この土壌での有機物の相対的な増加は、粗砂 > 細砂 > 粘土 > シルトの順である。

藤坂土壌でも、堆肥施用量の増加に伴って粗砂画分への炭素と窒素の分布率がわずかではあるが増加した。しかし、粘土と細砂の両画分ではほとんど変化せず、シルト画分でのみ減少が認められた。この土壌の場合には、粗砂>粘土=細砂>シルトの順に有機物の相対的増加が起こったと考えられる。

このように、赤黄色土、黒ボク土、いずれの場合でも、堆肥の連用によって有機物は全画分に集積するが、相対的には砂サイズの画分、とくに粗砂画分に多く集積することが示された。これは、東郷や厨川のように有機質資材の施用量が多い場合に顕著であった。一方、粘土およびシルトの微粒な画分にも有機物は集積するものの、粗砂や細砂の粗粒な画分と比べれば相対的に少なく、ことに黒ボク土ではシルト画分への有機物の集積が少ないことが特徴的であった。第3章の結果によれば、有機質資材の粒径画分の大部分が砂画分に相当する大きさであった。さらに、一旦風乾された堆肥は分散されにくいことが知られる⁶⁵⁾。したがって、土壌に施用された堆肥は、まず粗大な塊状の状態です砂サイズの画分に集積するとともに、しだいに分解もしくは微細化されていくと推定される。

Christensen¹⁴⁾は、厩肥を長期間連用した土壌について粒径画分間への有機物の分配を検討し、粘土およびシルトサイズの画分に有機物が集積するとした。これに対して、本研究の結果は、堆肥の連用によって粗砂画分に有機物が集積するという点で大きく異なる。これには、土壌の分散方法のちがいが関わっていると推察される。すなわち、彼は超音波処理によって土壌を分散しているが、こうした方法では土壌粒子は完全分散するものの、厩肥に由来する有機物も破碎されて微細化していることが予想される。この点については、さらに実験的に検討を加える必要がある。

2) 土壌粒径画分の窒素無機化能

各土壌の粒径画分からの窒素の無機化量を第33表に示す。

30℃で4週間インキュベートした際の窒素の無機化量を堆肥無施用区についてみた場合、いずれの土壌でも窒素無機化量は粒径が細くなるにつれて多くなる傾向にあった。

東郷土壌では、厩肥施用量が増えるにしたがって窒素無機化量は全画分で著しく増大した。なお、前節の結果では、20t区土壌の粗砂、細砂、シルトおよび粘土の各画分の4週間インキュベート後の窒素無機化量はそれぞれ11.0、11.9、10.2、36.0mg/100g乾物であり、これらの値と比べて、本節で得られた結果は粗砂、細砂、シルトの各画分で多く、粘土画分では少なかった。また、0t区土壌と10t区土壌の粘土画分の窒素無機化量も、前節の結果(それぞれ12.4と26.2mg/100g乾土)と比べて少なかった。このように粘土画分

第33表 画分の窒素無機化量、窒素無機化率と画分当りの窒素無機化量

項 目	画 分	東郷			厨川				藤坂		
		0 t	10 t	20 t	0 t	8 t	16 t	32 t	0 t	1.1t	3.4t
窒素無機化量 (mgN/100g乾物)	粗 砂	2.2	8.8	17.2	1.1	4.1	6.2	17.0	1.5	3.0	2.8
	細 砂	3.4	7.8	14.3	1.5	2.3	3.9	6.3	0.2	1.1	1.5
	シルト	5.4	8.9	15.3	3.0	1.2	2.7	3.7	2.6	3.8	3.3
	粘土1	9.4	13.2	22.8	18.2	21.3	30.5	42.8	15.3	17.9	24.7
	粘土2	-	-	-	17.9	17.7	19.1	38.5	3.0	16.0	18.3
窒素無機化率* (%)	粗 砂	5.6	7.8	6.4	0.5	1.7	1.9	1.9	1.4	2.5	1.9
	細 砂	2.3	2.8	3.4	0.7	0.9	1.0	1.2	0.1	0.9	1.2
	シルト	3.6	4.2	4.8	0.4	0.1	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4
	粘土1	5.5	6.1	8.1	1.4	1.5	2.2	2.5	1.1	1.2	1.7
	粘土2	-	-	-	1.4	1.3	1.5	2.5	0.2	1.1	1.3
画分当りの 窒素無機化量** (mgN/100g乾土)	粗 砂	0.83	3.56	7.46	0.19	0.75	1.37	3.57	0.62	1.31	1.14
	細 砂	0.72	1.63	2.99	0.40	0.58	1.05	1.78	0.05	0.28	0.39
	シルト	1.30	2.09	3.52	1.17	0.45	0.96	1.31	0.61	0.88	0.77
	粘土***	1.59	1.81	2.30	2.57	3.04	3.14	5.28	0.60	1.21	1.70

*窒素無機化率=窒素無機化量/有機態窒素量×100. **画分当りの窒素無機化量=窒素無機化量×画分の乾物重/100. ***粘土1画分と粘土2画分の合量.

の窒素無機化量が減少した理由として、本節では、分散処理の前に塩化ナトリウムで処理した土壌を蒸留水で洗浄する操作を加えたため、この間に粘土画分中の易分解性有機物の一部が流失した可能性が考えられる。

黒ボク土の厨川土壌では、窒素無機化量は厩肥施用量が増えるにしたがってシルト以外の全画分で増加し、とくに粗砂画分と粘土画分での増加が著しかった。また、藤坂土壌では、堆肥の連用によって粘土画分でのみ大きく増加していた。

窒素無機化率（第33表）は、黒ボク土の厨川土壌と藤坂土壌では赤黄色土の東郷土壌と比べて全般的に低い傾向にあったが、いずれの土壌でも粗砂画分と粘土画分で高い傾向にあった。赤黄色土の東郷土壌では、厩肥の連用によってすべての画分で無機化率が高まった。一方、黒ボク土の厨川土壌と藤坂土壌では、堆肥の施用量が増すにつれてシルト以外の画分で上昇し、とくに厨川土壌の粗砂画分で著しかった。

Christensen¹³⁾は、わらを鋤き込んだ土壌の粒径画分からの炭素の無機化を検討し、砂画分における炭素の無機化率をもっとも大きく、ついで粘土画分で大きいことを報告している。本研究では窒素の無機化のみを対象としたが、得られた結果は、この知見とよく一致する。

さらに、各土壌の粒径画分のうちどの画分が無機化窒素の供給に大きな役割を果たしているのかを調べるため、未分画土壌100gに相当する量の画分からの窒素の無機化量を計算した(第33表)。東郷土壌では、厩肥無施用の場合には粘土画分からの無機化量をもっとも多かったが、厩肥施用量が多くなるにつれて他の画分、とくに粗砂画分からの無機化量が多くなり、厩肥を連用した土壌では前節と同様に、粗砂画分が可給態窒素の供給に大きな役割を果たしていることを示している。他方、黒ボク土の堆厩肥無施用土壌では粘土画分からの無機化量をもっとも多く、堆厩肥の連用によって、粗砂画分および細砂画分からの無機化量も増加した。しかし、厨川、藤坂いずれの土壌でも粘土画分からの無機化量をもっとも多く、黒ボク土では可給態窒素の供給に粘土画分が大きな役割を果たしていることが認められる。なお、黒ボク土のシルト画分では、堆厩肥の施用量が増加しても画分当りの窒素無機化量はわずかしか増えず、この画分が無機化窒素の供給に果たす役割は小さい。また、窒素無機化率からわかるように、シルト画分へ集積した有機物はきわめて無機化されにくく、この画分の有機・無機複合体は生物的分解に対する抵抗性が非常に高いことをうかがわせる。

3) 土壌粒径画分中のムラミン酸

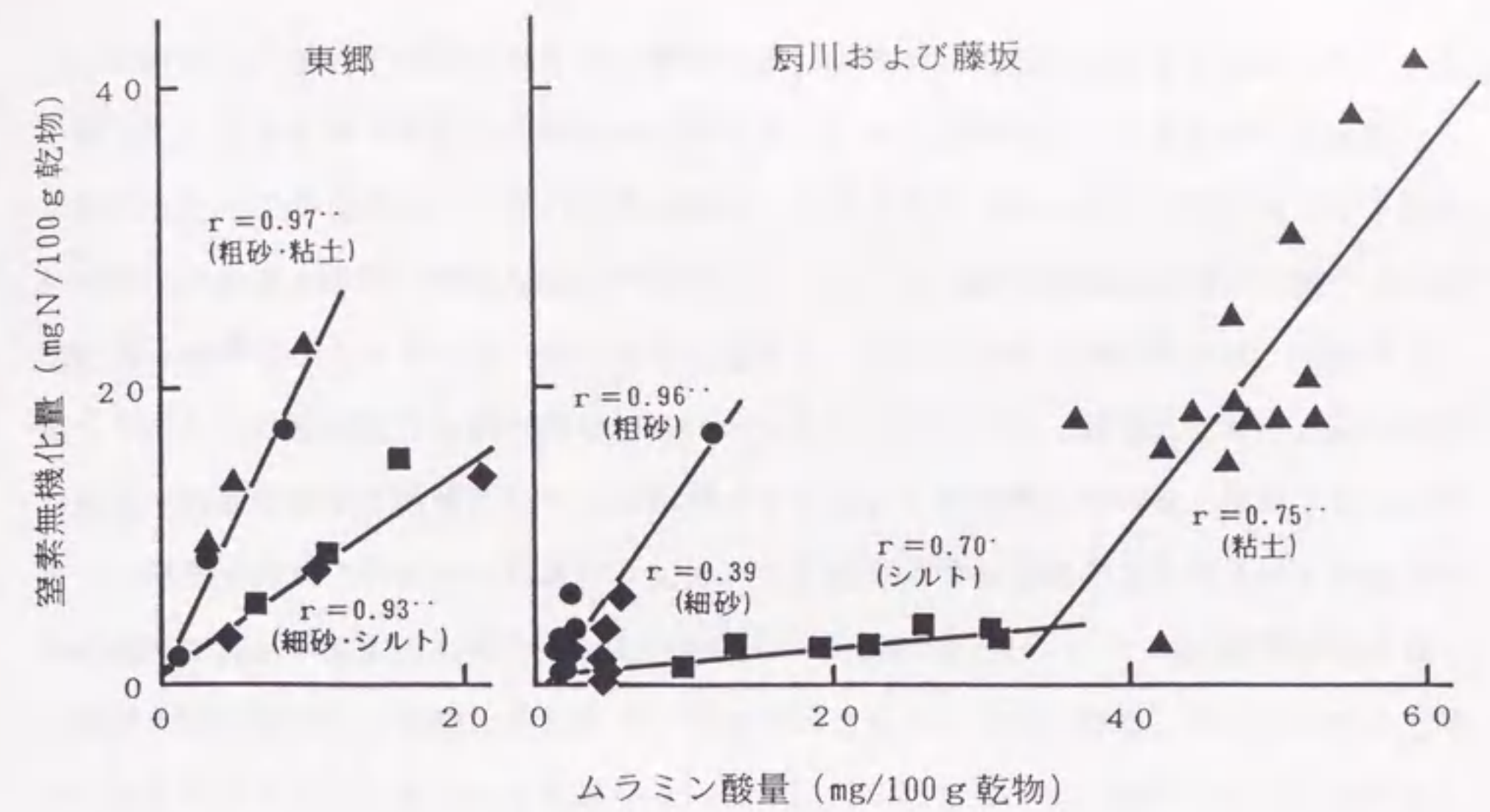
各土壌の粒径画分中のムラミン酸量を第34表に示す。

赤黄色土の東郷土壌では、ムラミン酸は細砂およびシルトの両画分に多く存在し、厩肥の連用によって全画分で著しく増加した。一方、黒ボク土の厨川と藤坂の両土壌では、ムラミン酸は粘土画分にもっとも多く存在し、ついでシルト画分に多く、粗砂と細砂の砂サイズの画分には少量しか存在しなかった。厨川土壌では、厩肥の連用によって全画分で増加する傾向を示したが、シルト画分における増加がとくに著しかった。藤坂土壌でも、ムラミン酸は堆肥の連用によってシルト画分で著しく増加していた。

第34表 画分のムラミン酸量*

画 分	東郷			厨川				藤坂		
	0 t	10 t	20 t	0 t	8 t	16 t	32 t	0 t	1.1 t	3.4 t
粗 砂	1.5	3.4	8.5	2.2	3.0	2.6	11.7	2.4	1.9	1.8
細 砂	4.9	10.7	22.1	2.6	2.6	4.9	5.8	4.9	5.0	4.6
シルト	6.9	11.4	16.3	13.3	14.8	22.5	30.5	19.0	26.4	31.1
粘土1	3.2	5.2	10.1	52.5	51.8	51.0	59.8	46.5	49.7	47.2
粘土2	-	-	-	44.3	36.0	47.1	55.0	42.2	42.2	48.3

*mg/100g乾物.



第20図 各画分中のムラミン酸量と窒素無機化量との関係

●、粗砂；◆、細砂；■、シルト；▲、粘土。

ムラミン酸は、Millar and Casida⁵¹⁾によって、土壤中での存在が最初に確認されている。彼らはムラミン酸を土壤中の細菌バイオマス量の指標とするべく分析を行ったが、Jenkinson and Ladd³³⁾はムラミン酸量から推定した細菌バイオマス量が過大に評価されていると指摘している。このことは、細菌菌体成分のうち細胞壁部分が相対的に分解されにくいことを示すものである。さらに、Marumotoら^{47, 48)}は、細菌および糸状菌のいずれにおいても、細胞壁物質が細胞質物質と比べて土壤中で分解されにくいことを明らかにしている。そこで、ムラミン酸を土壤中に存在する微生物菌体の細胞壁物質の指標とすれば、赤黄色土にもともと集積している細胞壁物質の量はあまり多くなく、厩肥連用に伴って全画分に集積していくと推定される。これに対して、黒ボク土では、もともと粘土画分とシルト画分にかかなりの量の細胞壁物質が集積しているが、堆厩肥の連用によってすべての画分で増加する傾向にあり、とりわけシルト画分における増加の著しいことが特徴的である。

さらに、各画分に存在する菌体細胞壁物質と無機化窒素の関係を検討するため、ムラミン酸量と窒素無機化量の関係を第20図に示した。両者の関係は赤黄色土と黒ボク土では異なり、画分によっても異なった。赤黄色土の東郷土壤では、粗砂画分と粘土画分、細砂画分とシルト画分、2つのグループにわけて検討した場合、それぞれについて1%水準で有意な相関関係がみられた。一方、黒ボク土の厨川と藤坂の両土壤についてそれぞれの画分

ごとに検討した場合、粗砂画分と粘土画分で1%水準で有意な相関関係が認められ、シルト画分でも5%水準で有意な相関関係が認められたが、細砂画分では有意な相関は認められなかった。このように、一部の画分を除いて、赤黄色土、黒ボク土ともにムラミン酸量と無機化窒素量との間に密接な関係が認められたことは、菌体細胞壁物質が土壤中の可給態窒素の給源の一つとなっていることを示唆する。また、回帰直線の傾きは、赤黄色土、黒ボク土ともに粗砂画分と粘土画分で大きかった。このことは、両画分における菌体細胞壁物質の無機化窒素の給源としての役割がより大きいことを表していると解釈できる。同様に、傾きが非常に小さかった黒ボク土のシルト画分には有機物の連用によって多量の菌体細胞壁物質が集積するものの、窒素の無機化の項で述べたように、これらは強固な有機・無機複合体を形成して無機化されにくくなっているものと予想される。なお、黒ボク土の粘土画分ではx切片の値がかなり高くなったが、このことは、粘土画分においてもシルト画分と同様に菌体細胞壁物質が強固な有機・無機複合体を形成して無機化されにくくなっている部分が存在することを示唆する。

金沢ら³⁶⁾は水田土壌の粘土画分中の微生物について検討し、粘土画分の細菌数は他画分と比べて著しく多く、この画分には微生物に由来する有機物が相対的に濃縮されていると推定している。また、Cameron and Posner⁷⁾は、粒径分画した土壌のインキュベーション実験から粘土画分の窒素無機化能が大きいことを示し、微生物菌体と微生物の代謝産物が粘土画分の易分解性窒素の給源となっていると推定している。これらの知見を考慮すれば、堆肥の施用に伴って粘土画分には微生物菌体由来の物質が集積するが、相対的に安定な細胞壁由来の物質が残留し、無機化窒素の給源となっていくものと推察される。一方、砂画分においても微生物の細胞壁物質が易分解性有機物の給源となっていると推定された。第4章で行った電子顕微鏡観察とムラミン酸の分析に基づけば、堆肥の微細画分には細菌細胞壁由来の物質が多く含まれることが示されており、また、前述のように一旦乾燥した堆肥塊は分散されにくいことから、砂画分中に存在する堆肥塊にはかなりの量の細胞壁物質が含まれていると推定される。したがって、砂画分中の細胞壁物質は、この画分に集積している堆肥塊に由来するものと考えられる。

第4節 堆肥連用土壌の粒径画分および団粒サイズ画分の有機物とその無機化

前節まで、土壌中における有機質資材の挙動を解析するための試みの一環として、堆肥連用土壌の粒径画分への有機物の集積状態と粒径画分の窒素無機化について検討を行っ

てきた。しかし、土壌は単なる粒子の寄せ集まりではなく、各種の大きさの土壌粒子が複雑に集合して高次の構造をとっている。したがって、有機質資材の施用に伴って集積する有機物の土壌中における存在状態を解析するためには、個々の粒子まで完全に分散させるのではなく、より緩やかな手段によって分散させて高次の集合体である団粒を得、それらに含まれる有機物の量およびその性状を詳しく調べる必要がある。そこで本節では、4年間にわたってもみがら混じりの牛ふん厩肥を連用した屋外の枠試験区から採取した土壌について、粒径分画を行うと同時に水中篩別法によって大きさの異なる耐水性団粒（団粒サイズ画分）を分離し、得られた粒径画分および団粒サイズ画分の有機物含量および炭素と窒素の無機化を調べ、厩肥の連用に伴って集積する有機物の土壌中における存在状態を解析することを試みた。

1. 供試土壌

1984年5月以来栽培試験を続けてきた弘前大学農学部構内の枠試験区⁴⁾のうち、無肥料区(-NPK)、厩肥5t/10a施用区(M5)、10t/10a施用区(M10)および20t/10a施用区(M20)から、4作栽培後の1987年9月12日に土壌を採取し、実験に供した。試験区の土壌は、岩木火山灰起源の黒ボク土である。また、施用した厩肥は新屋肉牛生産組合（青森県南津軽郡平賀町）から入手したもみがら混じりの牛ふん厩肥であり、毎年5月下旬に施用し、その後9月中旬まで作物を栽培した。栽培した作物は次の通りである：1984年度、トウガラシ；1985年度、ニンジン；1986年度、トウモロコシ；1987年度、トウモロコシ。土壌試料は、作土層（約0～15cm）より採取して風乾した後、粒径分画用には2mmの網目篩を、また、団粒サイズ画分の分離用には5mmの網目篩を、それぞれ通過させて以下の実験に供した。

2. 実験方法

1) 粒径画分の分離

前節と同じ方法を用いて、粗砂（0.2～2mm）、細砂（0.02～0.2mm）、シルト（0.002～0.02mm）、粘土1（<0.002mm、1M塩化ナトリウム処理により分散）および粘土2（<0.002mm、Na⁺型陽イオン交換樹脂処理により分散）の各画分にわけた。得られた画分は、凍結乾燥して、以下の実験に供した。

2) 団粒サイズ画分の分離

前記の風乾土壌を厚さ約10cmの石英砂層を通じて毛管飽和し、Yorder型土壌団粒分析器(大起理化 DIK-2000型)を用いて水中篩別することにより⁵²⁾、団粒サイズ画分を得た。団粒分析器は2mm、1mm、0.5mm、0.25mmおよび0.1mmの網目篩からなる4組の組篩を持ち、この最上部に乾土25g相当量の毛管飽和土壌を載せ、脱イオン水を満たした水槽中に10分間浸漬した後、30分間水槽内で振とうした。振とうは、毎分約30往復、振幅3.8cmの条件で、1つの土壌ごとに同時に4つのサブ・サンプルについて行い、これを3回繰り返した。振とう終了後、篩上の画分は40℃の通風乾燥機内で乾燥するとともに、0.1mmの篩を通過した画分は一定時間静置後、サイホンで上澄みを除いて回収し、同じく40℃の通風乾燥機内で乾燥した。1回の水中篩別に用いた4サブ・サンプルから得られた各サイズの団粒は、一まとめにして重量を測定した。画分の分布率はそれぞれ3回の反復ごとに計算し、試験区間の有意差の有無をダンカンの範囲検定²⁾によって検定した。

3) 全炭素量と全窒素量の分析

団粒サイズ画分および粒径画分中の全炭素量と全窒素量は、Allison法³⁾とセミマイクロゲルダール法によってそれぞれ定量した。団粒サイズ画分については、3反復の試料についてそれぞれ全炭素量と全窒素量を分析し、試験区間の有意差の有無をダンカンの範囲検定²⁾によって検定した。

4) 団粒サイズ画分の粒子組成の測定

3反復で分画したそれぞれのサイズの画分を等量混合して調製した試料10gを蒸発皿にとり、少量の蒸留水を加えてポリスマンで攪拌することにより団粒を破壊した後、その団粒サイズ画分の分画に用いた篩を用いて篩別した。篩上の残渣は、団粒を破壊しつつ蒸留水で十分に洗浄した後、105℃で乾燥して重量を測定し、一次粒子量とした。通過液と洗浄液は500ml容広口びんに移して液量を500mlとし、ピベット法によって粘土サイズの粒子(<0.002mm)とシルトサイズの粒子(0.002~0.02mm)の含有量を測定した。一次粒子以外の砂サイズの粒子の含有量(二次粒子量)は、供試した土壌の乾燥重から粘土サイズおよびシルトサイズの粒子の重量を差し引いて算出した。

5) 粒径画分のインキュベーション

前節と同じく、未分画土壌20gに相当する画分試料を100ml容ポリびんにとり、石英砂を加えて全体を20gとし、培養液とイノキュラム¹³⁾各1mlおよび蒸留水6mlを加えた。これを約900ml容の広口ガラスびんに入れ、ガスクロマトグラフ用注入口パッキンを取り付けた

第35表 粒径画分の分布率、全炭素含有率、全窒素含有率とC/N比

項 目	画 分	-NPK	M5	M10	M20
画分分布	粗 砂	16.8	17.4	18.0	21.2
	細 砂	28.5	27.2	29.6	30.1
	シ ル ト	36.2	36.9	35.3	33.0
	粘 土 1	10.4	10.2	8.9	8.5
	粘 土 2	7.0	7.5	8.0	6.8
	回収率(%)	98.9	99.2	99.8	99.6
T-C* (%)	未分画土壌	6.62	7.04	8.28	9.87
	粗 砂	1.70	2.95	6.62	9.74
	細 砂	3.23	3.86	4.76	6.91
	シ ル ト	9.50	9.15	10.11	11.46
	粘 土 1	11.22	10.62	10.89	11.17
	粘 土 2	11.87	11.75	12.91	14.71
T-N* (%)	未分画土壌	0.472	0.498	0.590	0.731
	粗 砂	0.091	0.141	0.323	0.509
	細 砂	0.188	0.218	0.280	0.453
	シ ル ト	0.668	0.631	0.713	0.863
	粘 土 1	1.004	0.937	1.015	1.187
	粘 土 2	0.950	0.945	1.052	1.069
C/N比	未分画土壌	14.0	14.1	14.0	13.5
	粗 砂	18.7	20.9	20.2	19.1
	細 砂	17.2	17.7	17.0	15.3
	シ ル ト	14.2	14.5	14.2	13.3
	粘 土 1	11.2	11.3	10.7	9.4
	粘 土 2	12.5	12.5	12.3	13.8

*乾物当り.

ゴム栓で密閉し、30℃で28日間インキュベートした。3、7、14、21および28日経過後に、ポリびんを動かすことによってガラスびん内の空気を充分攪拌した後、シリンジを用いて注入口パッキンからびん内の空気を一定量採取し、赤外線ガス分析装置（富士電機 ZRC型）に導入して二酸化炭素量を分析した。その後、びん内の空気を外気と完全に入れ替え、換気したびん内の二酸化炭素量を分析した。インキュベーション開始直後にも、同様に二酸化炭素量を分析した。このようにして測定した各期間前後の二酸化炭素量の差を累積し、インキュベーション期間中の炭素無機化量を求めた。また、インキュベーション終了後にBremner法⁶⁾によって無機態窒素量を分析するとともに、インキュベートしていない粒径画分中の無機態窒素量も同様に分析してインキュベーション中の窒素無機化量を求めた。なお、インキュベーションは全画分について2連制で行い、結果は平均値で表した。

6) 団粒サイズ画分のインキュベーション

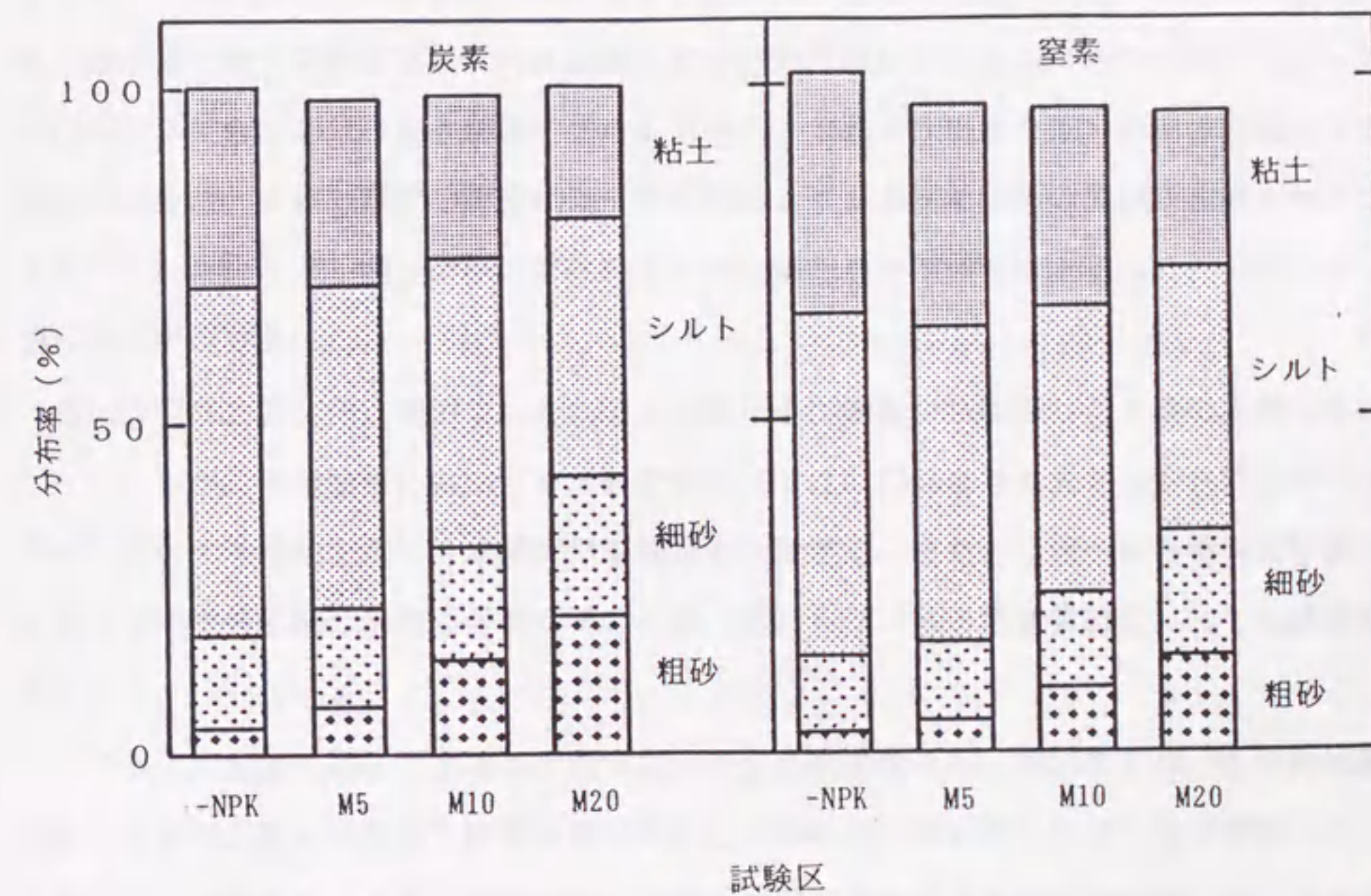
未分画土壌25gに相当する量の画分試料を100ml容ポリびんにとり、40~80メッシュの石英砂を加えて全体を25gとし、培養液とイノキュラム⁴⁷⁾各1mlを加え、さらに蒸留水で最大容水量の60%水分に調節した。これを、粒径画分の場合と全く同じ方法によって30℃で28日間インキュベートし、炭素および窒素の無機化量を測定した。なお、画分試料は3反復した試料を等量混合して用い、インキュベーションは全画分について2連制で行い、結果は平均値で表した。

3. 結果および考察

1) 厩肥連用土壌における有機物の存在状態

土壌粒径画分の分布率、全炭素量、全窒素量とC/N比を第35表に示す。

粒径分画した場合の画分分布は、いずれの土壌においてもシルト画分の割合がもっとも大きく、ついで細砂画分、粗砂画分、粘土画分の順であり、厩肥の施用量が多くなるにしたがって粗砂と細砂の両画分で増加した。画分の回収率は各土壌ともほぼ99%以上であり、分画に伴う損失はわずかであった。



第21図 粒径画分間の炭素と窒素の分布

未分画土壌の全炭素と全窒素の含有率は、-NPK区でもっとも少なく、厩肥施用量が増えるにつれて増加した。-NPK区における粒径画分の全炭素含有率と全窒素含有率は、いずれも粒径が小さくなるほど高くなった。厩肥の連用に伴って、全炭素含有率、全窒素含有率ともに、すべての画分で増加したが、とくに粗砂と細砂の両画分において著しかった。画分のC/N比は、粗砂画分でもっとも高く、粒径が小さくなるほど低下したが、いずれの画分でも試験区間の差はそれほど大きくはなかった。

各画分への有機物の集積状態は炭素と窒素の含有率のみからでは議論できないため、炭素と窒素の粒径画分間への分布率を計算して、第21図に示す。粘土1と粘土2の両画分は、粘土画分として一括して表した。炭素と窒素の分布率は、厩肥の連用に伴って、粗砂画分で大きく増加し、細砂画分でもやや増加する傾向を示したが、粘土画分とシルト画分では減少した。このように、厩肥連用に伴う有機物の相対的増加は粗砂画分でもっとも大きく、ついで細砂画分であり、これは前節の結果と一致する。

各土壌から得た団粒サイズ画分の分布率、全炭素量、全窒素量とC/N比を第36表に示す。

団粒サイズ画分の分布をみた場合、厩肥無施用の-NPK区では、 $>2\text{mm}$ の画分の割合がもっとも多く、画分サイズが小さくなるにしたがって分布率も減少した。また、-NPK区とM5区の画分の間には統計的に有意な差は認められなかったが、厩肥の連用に伴って、 0.25mm より大きな画分の割合が増加すると同時に、それより小さな画分の割合が減少する傾向がみられ、多量の厩肥の連用によって 0.25mm よりも大きな団粒の形成が促進されることが示された。なお、画分の回収率はいずれの土壌でもほぼ99%以上であり、分画に伴う損失はわずかであった。

吉田ら⁷⁹⁾は、赤黄色土畑地で行われてきた厩肥連用圃場から採取した土壌の団粒分析を行っているが、その結果においても、厩肥施用区では 0.25mm よりも大きな耐水性団粒がしだいに増加する傾向を示し、本研究での結果と一致する。また、土壌への各種有機質資材の添加が耐水性団粒の形成を促進することは、阿江ら¹⁾による培養実験によっても確認されている。

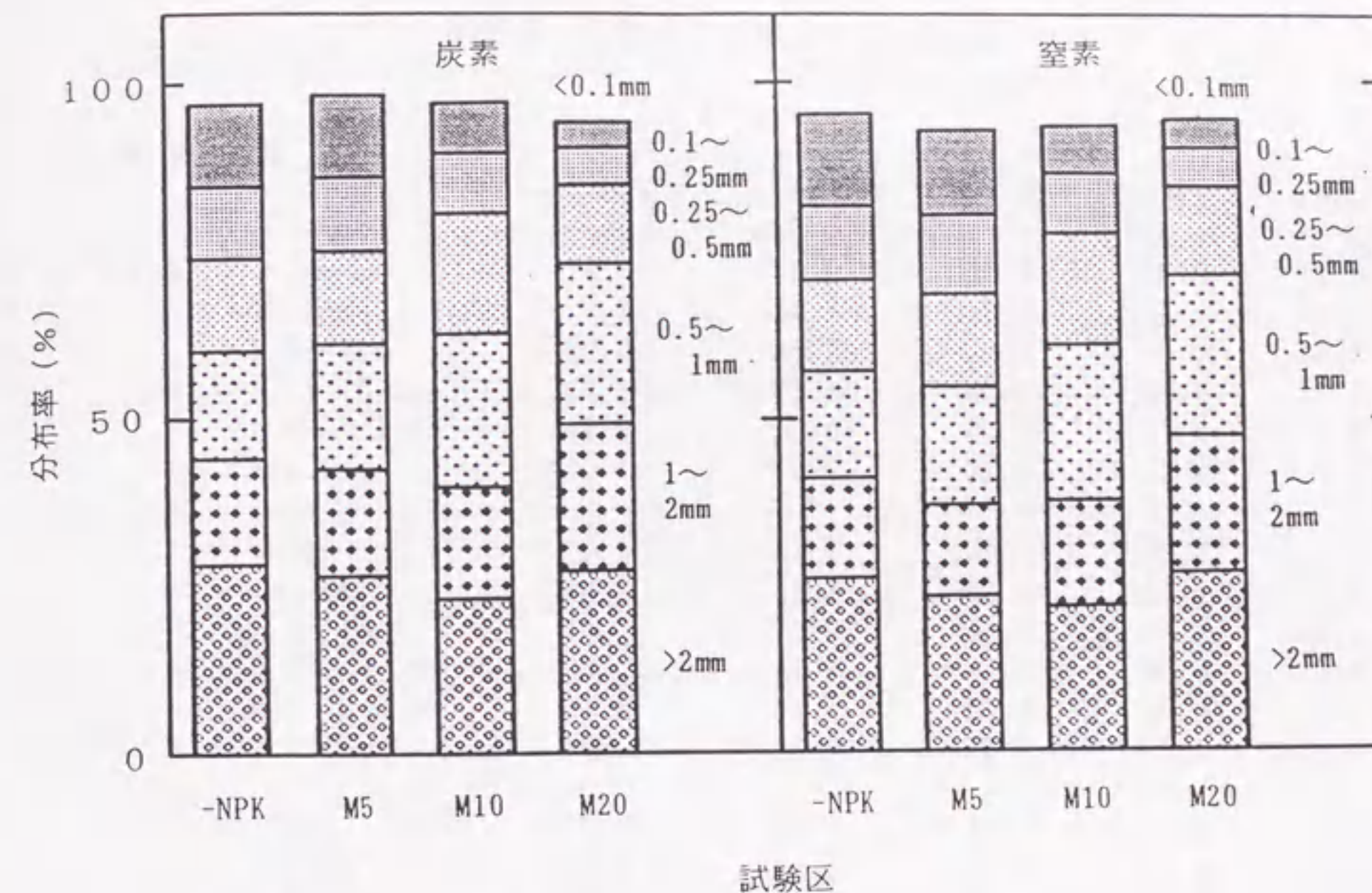
ところで、分画に用いた土壌の全炭素および全窒素の含有率(第36表)は、厩肥施用量が多くなるほど高まったが、粒径分画に用いた土壌の値(第35表)とは、やや異なった。これには、それぞれの土壌の調製に用いた篩の網目の大きさのちがいが影響しているものと推定される。

第36表 団粒サイズ画分の分布率、全炭素含有率、全窒素含有率とC/N比

項 目	画 分	-NPK	M5	M10	M20
画分分布 (%)	>2mm	27.7 ^{a b}	27.3 ^{a b}	24.5 ^a	31.2 ^b
	1~2mm	16.4 ^{a b}	15.3 ^a	16.7 ^b	20.7 ^c
	0.5~1mm	17.8 ^a	19.1 ^a	24.6 ^b	23.3 ^b
	0.25~0.5mm	15.0 ^a	15.8 ^{a b}	18.0 ^b	13.5 ^a
	0.1~0.25mm	10.5 ^c	11.0 ^c	8.8 ^b	6.0 ^a
	<0.1mm	11.3 ^c	10.6 ^c	6.8 ^b	4.9 ^a
	回収率 (%)	98.7	99.1	99.5	99.8
T-C* (%)	未分画土壌	6.23	6.67	7.77	10.29
	>2mm	6.33 ^a	6.44 ^a	7.26 ^b	8.91 ^c
	1~2mm	5.94 ^a	6.97 ^b	7.79 ^c	10.84 ^d
	0.5~1mm	5.61 ^a	6.46 ^b	7.18 ^c	10.46 ^d
	0.25~0.5mm	5.76 ^a	5.75 ^a	7.69 ^b	9.08 ^c
	0.1~0.25mm	6.37 ^a	6.74 ^a	7.88 ^b	9.23 ^c
	<0.1mm	6.75 ^a	7.87 ^b	8.41 ^b	8.41 ^b
T-N* (%)	未分画土壌	0.458	0.511	0.576	0.753
	>2mm	0.426 ^a	0.428 ^a	0.508 ^b	0.636 ^c
	1~2mm	0.409 ^a	0.454 ^b	0.530 ^c	0.743 ^d
	0.5~1mm	0.409 ^a	0.467 ^b	0.540 ^c	0.769 ^d
	0.25~0.5mm	0.416 ^a	0.452 ^a	0.528 ^b	0.736 ^c
	0.1~0.25mm	0.480 ^a	0.549 ^b	0.595 ^c	0.732 ^d
	<0.1mm	0.564 ^a	0.600 ^b	0.625 ^b	0.699 ^c
C/N比	未分画土壌	13.6	13.1	13.5	13.7
	>2mm	14.9 ^a	15.1 ^a	14.3 ^a	14.0 ^a
	1~2mm	14.5 ^a	15.4 ^a	14.7 ^a	14.6 ^a
	0.5~1mm	13.7 ^a	13.9 ^a	13.3 ^a	13.6 ^a
	0.25~0.5mm	13.8 ^b	12.7 ^a	14.6 ^b	12.4 ^a
	0.1~0.25mm	13.3 ^a	12.3 ^a	13.3 ^a	12.6 ^a
	<0.1mm	12.0 ^a	13.1 ^b	13.5 ^b	12.0 ^a

表中のアルファベットはダンカンの範囲検定による試験区間の有意差の有無を示し、同記号は5%水準で有意差がないことを表す。
*乾物当り。

団粒サイズ画分の全炭素含有率、全窒素含有率ともに、-NPKでは0.25mmより小さな画分と>2mmの画分で高く、厩肥の連用によってすべての団粒サイズ画分において増加する傾向を示した(第36表)。ただし、画分によっては、-NPK区とM5区との間に統計的な有意差が認められない場合もあった。団粒サイズ画分のうちでは、0.25~0.5mm、0.5~1mmおよび1~2mmの各画分における増加がとりわけ著しかった。C/N比は、どの土壌でも画分サイズが小さくなるにしたがって低下したが、厩肥連用に伴う変化は、いずれの画分においてもほとんど認められなかった。



第22図 団粒サイズ画分間の炭素と窒素の分布

団粒サイズ画分間の炭素と窒素の分布をみた場合には(第22図)、炭素、窒素いずれの分布率も、 $>2\text{mm}$ と $0.25\sim 0.5\text{mm}$ の画分では増減が明確ではなかったが、 $1\sim 2\text{mm}$ と $0.5\sim 1\text{mm}$ の画分で増加し、 $0.1\sim 0.25\text{mm}$ と $<0.1\text{mm}$ の画分で減少する傾向にあった。このように、有機物は各サイズの画分で増加するが、相対的な増加は $0.5\sim 2\text{mm}$ の部分で大きいことが認められた。

大西ら⁵⁵⁾は施設栽培条件下の厩肥連用土壌を団粒分析し、 $50\text{ t}/10\text{ a}$ 施用区では 0.5mm より小さな団粒の減少とこれより大きな団粒の増加がみられることを報告している。こうした粗大な団粒の増加の原因として、熊田・吉田⁴⁵⁾は粒径の大きな厩肥塊の残存によるところが大きいことを指摘している。

各団粒サイズ画分の粒子組成を第37表に示す。

いずれの土壌においても、 $<0.1\text{mm}$ 以外の画分では砂画分の割合がもっとも多く、ついでシルト、粘土の順であったのに対して、 $<0.1\text{mm}$ の画分では砂サイズの粒子よりもシルトサイズの粒子の割合が多かった。また、 $<0.1\text{mm}$ の画分を除けば、画分の大きさが小さくなるにしたがって粘土サイズとシルトサイズの粒子の割合が減少し、砂サイズの粒子の割合が増加する傾向にあった。本研究では分画に用いた篩目より大きな粒子を一次粒子と規定し

第37表 団粒サイズ画分の粒子組成

試験区	画分	砂 (%)			シルト (%)	粘土 (%)
		一次粒子*	二次粒子**	合量		
-NPK	>2mm	4.8	50.5	55.3	28.2	16.4
	1~2mm	8.3	34.7	43.0	38.7	18.3
	0.5~1mm	10.0	40.2	50.2	35.2	14.6
	0.25~0.5mm	27.4	23.3	50.7	38.2	11.2
	0.1~0.25mm	41.9	12.0	54.0	37.5	8.5
	<0.1mm	-	31.6	31.6	57.3	11.2
M5	>2mm	7.8	31.9	39.7	38.8	21.5
	1~2mm	10.9	31.1	42.0	40.1	17.9
	0.5~1mm	18.1	28.0	46.1	39.3	14.6
	0.25~0.5mm	30.1	16.9	47.0	36.6	16.4
	0.1~0.25mm	41.8	11.4	53.2	36.4	10.4
	<0.1mm	-	26.6	26.6	56.1	17.3
M10	>2mm	5.3	36.0	41.3	38.3	20.3
	1~2mm	12.4	33.6	46.0	35.9	18.1
	0.5~1mm	15.6	30.6	46.2	39.0	14.8
	0.25~0.5mm	31.9	24.5	56.4	32.3	11.2
	0.1~0.25mm	48.2	10.3	58.5	31.1	10.5
	<0.1mm	-	29.2	29.2	55.0	15.8
M20	>2mm	8.7	43.4	52.1	31.6	16.2
	1~2mm	16.3	38.2	54.5	33.1	12.4
	0.5~1mm	17.9	37.5	55.5	34.3	10.3
	0.25~0.5mm	34.1	26.9	61.0	30.6	8.4
	0.1~0.25mm	49.9	11.4	61.3	30.3	8.3
	<0.1mm	-	36.5	36.5	50.7	12.8

*分画に用いた篩目を通過しなかった部分。 **分画に用いた篩目を通過した部分。

たが、砂粒子のうちでも団粒を形成していないと考えられるこれら一次粒子の割合は、画分サイズが小さくなるほど増加するとともに、二次粒子の割合が減少した。また、<0.1mm以外の画分では、画分サイズが小さくなるにしたがって粘土サイズの粒子の割合が低下したことは、画分サイズが小さくなるほど二次粒子の割合が減少することを反映している。

さらに、>2mmと<0.1mmの画分を除けば、厩肥の施用量が多くなるほど、各団粒サイズ画分中の砂サイズの粒子の割合が増加する傾向が認められた。厩肥の連用に伴う有機物の集積は粗砂画分でもっとも大きく、ついで細砂画分で大きいという粒径分画の結果を考え併せれば、厩肥連用によって土壤中に集積した有機物は主に粗大な団粒を形成して存在するものと推定される。一方、厩肥施用量が増えるとともに、各画分に含まれる一次粒子の

割合も増加する傾向がみられた。このことは、厩肥の連用によって集積する有機物の一部が団粒を形成せずに存在していることを示唆する。実際、団粒サイズ画分を肉眼的に観察した場合、厩肥連用区では、もみがら片等の厩肥に由来すると推定される有機物が多数認められた。ただし、こうした粗粒有機物にも微細な土壌粒子が多少とも付着していた。

以上のことから、畑地に施用された厩肥は主として粗粒な状態で土壌中に集積し、こうした粗粒有機物の多くが粗大な団粒を形成して存在すると推定される。厩肥の連用によって形成される団粒は、主に0.25mmより大きなサイズであり、このサイズの画分量は全体のほぼ8割以上を占めた(第36表)。Tisdall and Oades^{6,9)}によれば、土壌団粒はmacroaggregates(>0.25mm)とmicroaggregates(<0.25mm)に大別され、macroaggregatesはmicroaggregatesが植物根や菌糸によって結合されて形成されるとしている。また、Oades^{5,4)}は、土壌管理によって影響されやすいのはmicroaggregatesよりもmacroaggregatesであり、一般に易分解性有機物の添加によってmacroaggregatesを増大することができるかと述べている。したがって、厩肥のような有機質資材の施用によって形成される団粒も、macroaggregatesに相当するものであり、有機物施用という土壌管理によって大きく影響を受ける部分であると結論される。

2) 厩肥連用土壌における易分解性有機物の分布様式

土壌粒径画分からの炭素および窒素の無機化量を第38表に示す。

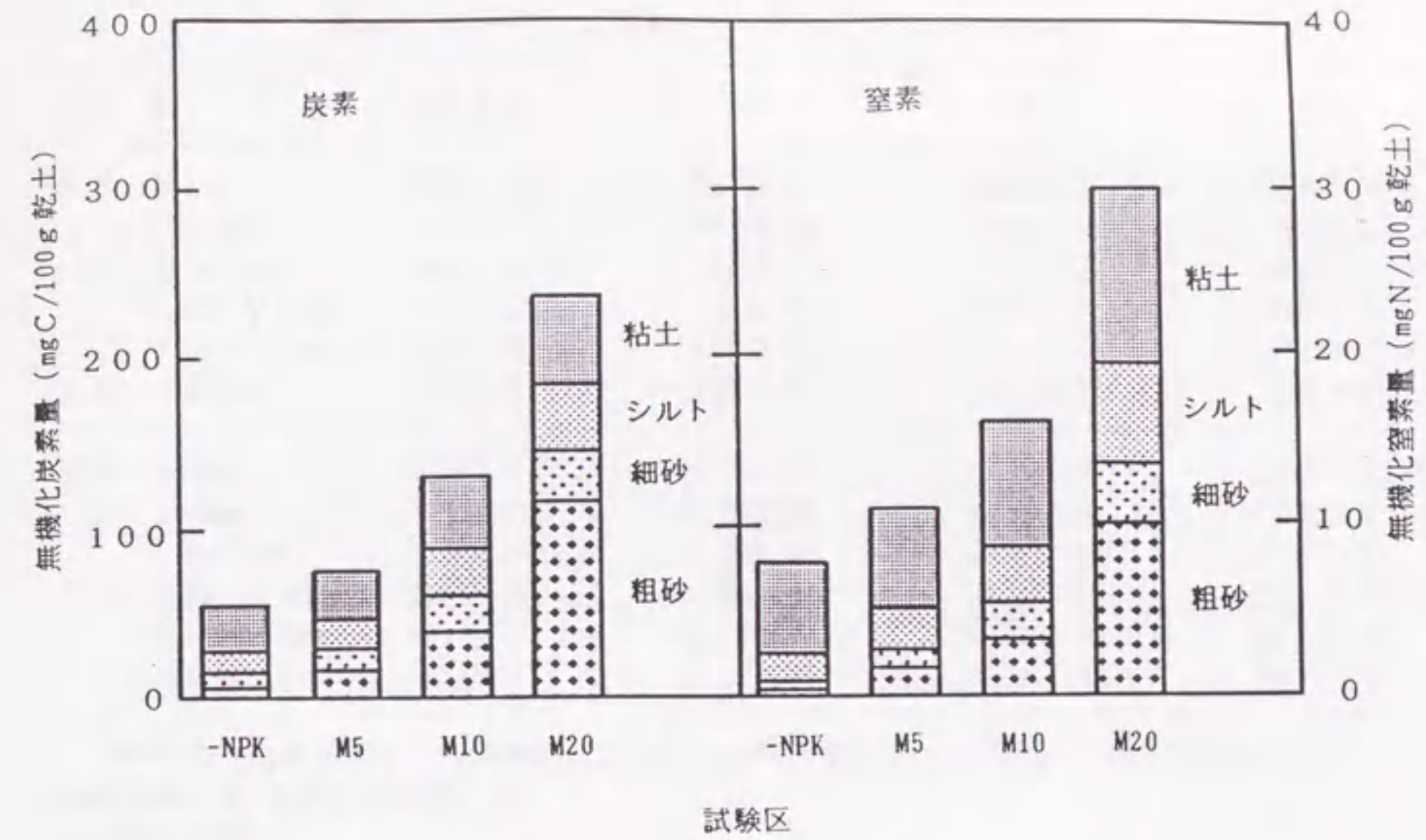
-NPK区における粒径画分からの炭素の無機化量は、粘土サイズの画分でもっとも大

第38表 粒径画分からの炭素と窒素の無機化量*

項目	画分	-NPK	M5	M10	M20
炭素	粗砂	43(2.5)	100(3.4)	218(3.3)	546(5.6)
	細砂	29(0.9)	47(1.2)	75(1.6)	102(1.5)
	シルト	36(0.4)	46(0.5)	77(0.8)	115(1.0)
	粘土1	162(1.4)	179(1.7)	276(2.5)	363(3.2)
	粘土2	149(1.2)	148(1.3)	232(1.8)	332(2.3)
窒素	粗砂	2.7(3.0)	9.5(6.7)	19.3(5.9)	48.4(9.5)
	細砂	1.9(1.0)	4.2(1.9)	7.0(2.5)	11.6(2.6)
	シルト	4.4(0.7)	6.6(1.1)	9.5(1.3)	18.0(2.1)
	粘土1	30.4(3.0)	38.6(4.1)	45.0(4.4)	67.9(5.7)
	粘土2	31.3(3.3)	25.5(2.7)	42.2(4.0)	67.9(6.4)

()内は無機化率を示す。炭素無機化率(%)=炭素無機化量/全炭素量×100; 窒素無機化率=窒素無機化量/有機態窒素量×100。

*mg/100g乾物。



第23図 未分画土壌100gに含まれる量に相当する粒径画分からの炭素と窒素の無機化量

きく、ついで粗砂、シルト、細砂の順であり、窒素についてもシルト>細砂であるものの、ほぼ同様な傾向にあった。無機化率は、炭素、窒素いずれについても粗砂画分でもっとも大きく、ついで粘土サイズの画分で大きく、シルト画分でもっとも小さかった。厩肥の連用に伴って、いずれの画分においても炭素と窒素の無機化量、無機化率ともに増加したが、とくに粗砂画分における増加が著しかった。このように、粘土画分がもっとも易分解性有機物に富むが、無機化率を計算した場合には、粗砂画分の有機物がもっとも無機化されやすいといえる。

こうした結果は、粒径画分の窒素の無機化を検討した前節の結果と同様である。また、Christensen¹³⁾は、わらを鋤き込んだ土壌の粒径画分からの炭素の無機化を検討し、砂画分における炭素の無機化率がもっとも大きく、ついで粘土画分で大きいことを報告しているが、本研究で得られた結果もこの知見とよく一致する。

さらに、炭素と窒素の無機化に対する各画分の寄与を検討するため、未分画土壌100gに含まれる量に相当する粒径画分からの炭素と窒素の無機化量を計算し、第23図に示す。なお、粘土1画分と粘土2画分は、粘土画分として一括して表した。これによれば、-NPK区では、炭素、窒素いずれの場合にも、粘土画分から無機化する量が多かったが、厩肥施用量が増すにつれて粗砂画分からの無機化が著しく増大し、M20区における炭素の

第39表 団粒サイズ画分からの炭素と窒素の無機化量*

項目	画分	-NPK	M5	M10	M20
炭素	>2mm	106 (1.7)	207 (3.2)	308 (4.2)	652 (7.3)
	1~2mm	95 (1.6)	207 (3.0)	294 (3.8)	812 (7.5)
	0.5~1mm	88 (1.6)	201 (3.1)	226 (3.2)	592 (5.7)
	0.25~0.5mm	93 (1.6)	145 (2.6)	190 (2.5)	373 (4.1)
	0.1~0.25mm	109 (1.7)	175 (2.6)	202 (2.6)	279 (3.0)
	<0.1mm	95 (1.4)	155 (2.0)	187 (2.2)	160 (1.9)
窒素	>2mm	9.9 (2.3)	10.0 (2.3)	15.2 (3.0)	15.7 (2.5)
	1~2mm	8.8 (2.2)	10.9 (2.4)	13.3 (2.5)	21.3 (2.9)
	0.5~1mm	7.8 (1.9)	11.5 (2.5)	14.3 (2.7)	25.6 (3.3)
	0.25~0.5mm	7.6 (1.8)	13.0 (2.9)	16.4 (3.1)	27.2 (3.7)
	0.1~0.25mm	8.1 (1.7)	14.2 (2.6)	15.9 (2.7)	23.0 (3.2)
	<0.1mm	8.3 (1.5)	13.6 (2.3)	15.0 (2.4)	20.9 (3.0)

()内は無機化率を示す。炭素無機化率(%) = 炭素無機化量/全炭素量×100；窒素無機化率 = 窒素無機化量/有機態窒素量×100。
*mg/100g乾物。

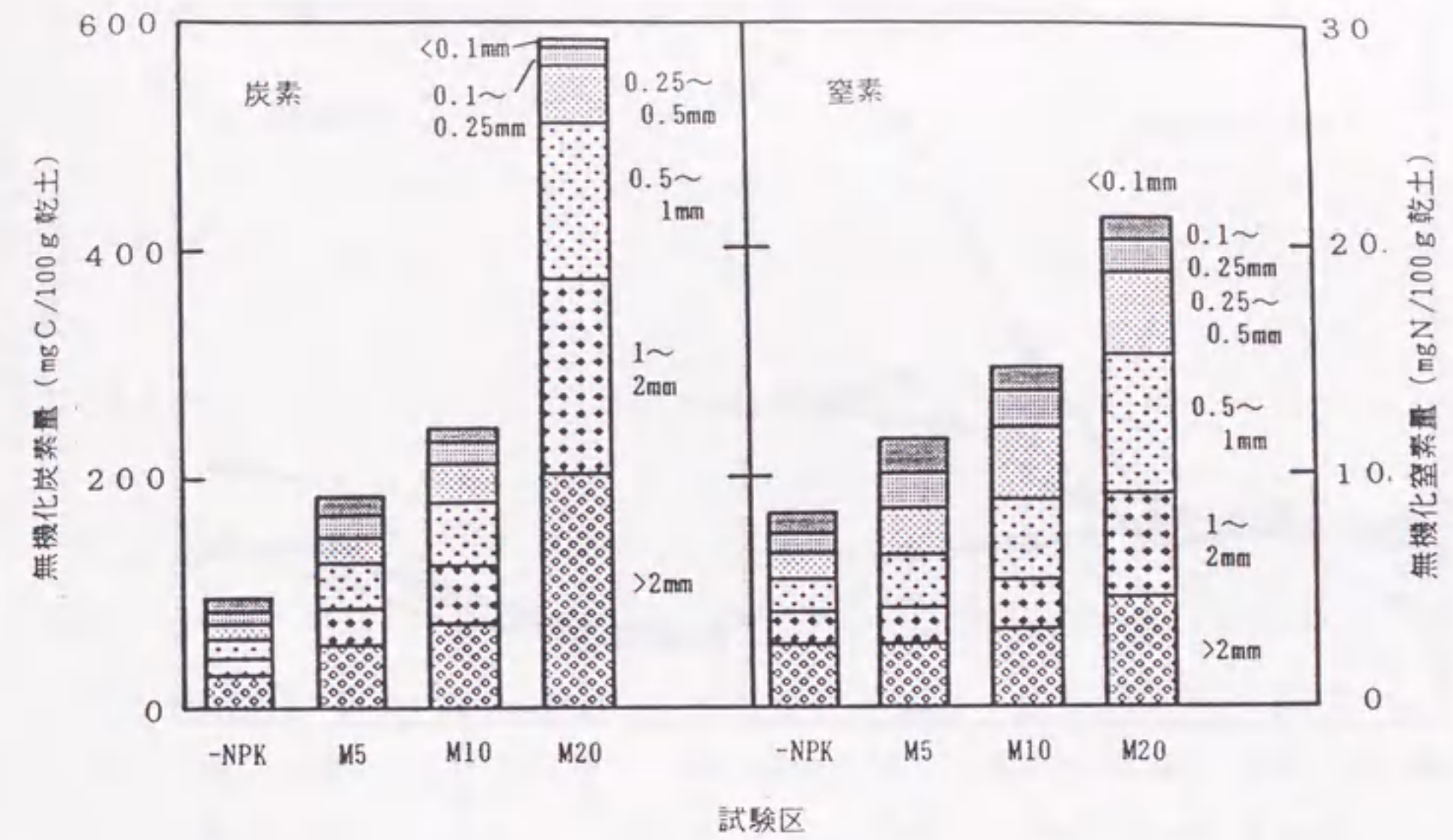
無機化に対する寄与は粗砂画分でもっとも大きくなった。しかし、窒素の場合には、前節で黒ボク土について得られた結果と同様、いずれの土壤でも無機化に対する寄与は粘土画分でもっとも大きく、無機化窒素の供給には粘土画分が大きな役割を果たしていた。

団粒サイズ画分からの炭素および窒素の無機化量を第39表に示す。

-NPK区では炭素と窒素、いずれの無機化量にも画分間でそれほど大きなちがいは認められなかったが、厩肥の施用量が多くなるにつれてすべての画分で増大した。ただし、炭素では画分サイズが大きくなるほど無機化量の増加が著しかったのに対して、窒素では0.1~1mmの画分において増加が著しかった。また、無機化率を計算した場合にも、炭素と窒素、いずれについても無機化量と類似した傾向がみられた。

粒径画分の場合と同様に、未分画土壤100gに含まれる量に相当する量の画分からの炭素と窒素の無機化量を計算した場合(第24図)には、無機化炭素量は厩肥の連用に伴って0.25mmより大きな画分で増加し、そのうちでも、0.5mmより大きな画分における増加が著しかった。また、無機化窒素量も厩肥の連用に伴って0.25mm以上の大きさの画分で増加を示し、とくに0.25~1mmの画分における増加が著しかった。

このように、厩肥連用に伴う易分解性有機物の集積もmacroaggregatesに相当する画分で著しいことが明らかであった。しかし、各団粒サイズ画分における無機化の様相は、炭素と窒素ではかなり異なった。そこで、粒径画分と団粒サイズ画分について無機化した炭

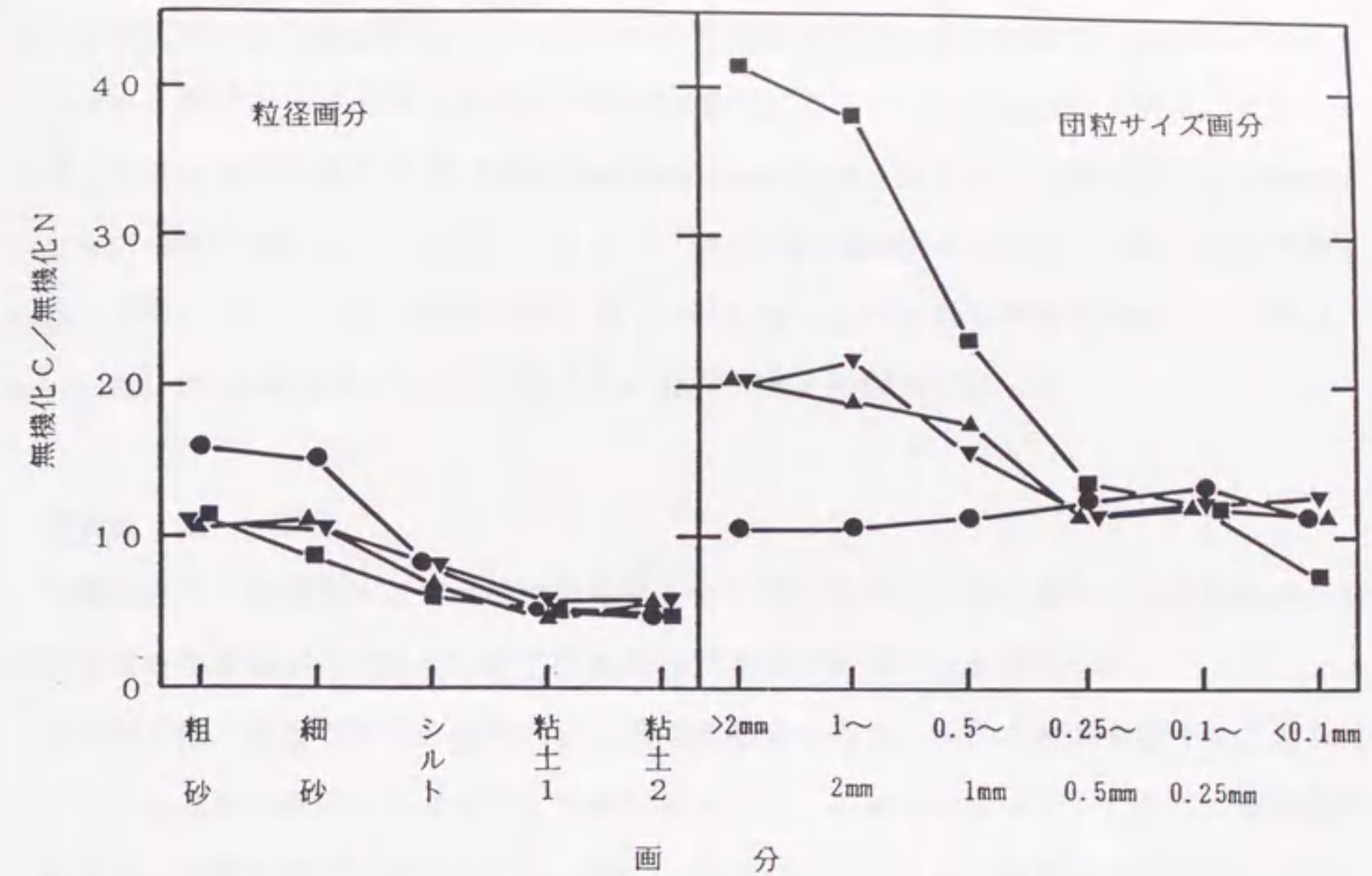


第24図 未分画土壌100gに含まれる量に相当する団粒サイズ画分からの炭素と窒素の無機化量

素と窒素の比を計算し、第25図に示す。

粒径画分についてみた場合、いずれの土壌でも、無機化した炭素と窒素の比は粒径が小さな画分ほど低下した。これは粒径画分のC/N比と同じ傾向であり、画分のC/N比が高いほど炭素の無機化が卓越することを示す。これに対して、団粒サイズ画分の場合には、-NPK区では画分によるちがいはほとんど認められなかったが、厩肥の連用によって0.5mmよりも大きな画分で著しく高まった。第3章で各種有機質資材から得た粒径画分を分析した結果によれば、有機質資材の粗粒画分のC/N比はかなり高く、粒径が小さくなるにしたがって低下した。このため、団粒サイズ画分の大きさが増大するにしたがって窒素よりも炭素の無機化が卓越するのは、団粒サイズが大きな画分ほどC/N比の高い粗粒有機物が集積していることを反映していると推定される。

一方、炭素および窒素の無機化に対する粘土画分の寄与も粗砂画分に劣らず大きく、厩肥無施用区はもとより厩肥施用区においても、粘土画分は可給態窒素の供給に対してもっとも大きな役割を果たしていたが、こうした粘土画分の有機物から無機化する炭素と窒素の比はかなり小さかった。各団粒サイズ画分の粘土粒子の割合は、いずれの土壌においても、<0.1mmの画分を除いて、画分サイズが小さくなるにしたがって減少した(第37表)。



第25図 粒径画分および団粒サイズ画分から無機化した炭素と窒素の比

厩肥無施用の-NPK区の団粒サイズ画分から無機化した炭素と窒素の比が、 $<0.1\text{mm}$ の画分を除けば、画分サイズが小さくなるにしたがって高まる事実は、比が小さな粘土画分の割合が少なくなることを反映していると推察される。このため、 0.5mm 以上の大きさの団粒サイズ画分における無機化炭素と無機化窒素の比が厩肥の連用によって高まるのは、主に厩肥由来のC/N比の高い有機物の集積に基因していると考えられる。さらに、これらの画分においては、厩肥連用によって集積したC/N比の高い有機物の分解に伴って無機態窒素の有機化が起こり、実際の窒素無機化量よりも見かけの無機化量が少なくなっている可能性もある。

以上のように、厩肥連用土壌においては、易分解性有機物は粗砂および粘土の両画分に多く集積している。粗砂画分に集積している易分解性有機物は、主として厩肥由来の粗粒な有機物であり、前項で示されたように、これらの多くは 0.25mm より大きな団粒、すなわちmacroaggregatesを形成して存在していると推察される。畑地に施用された厩肥等の有機質資材はこうした状態のもとで活発な分解をこうむり、一部は急速に無機化されると考えられる。ただし、粗粒な有機物はC/N比が高く、窒素よりも炭素の無機化が卓越する。これに対して、有機質資材の施用によって粘土画分に集積する易分解性有機物は、第4章

および前節で得られた結果に基づけば、有機質資材中の微細および水溶性の画分に由来するとともに資材の分解過程で生成した微生物菌体およびその代謝産物に由来すると推定される。すでに述べたように、粘土粒子はmicroaggregatesを形成し、これが集合してmacroaggregatesを形成していると推定されるが、macroaggregatesにはC/N比の高い粗粒有機物も集積しているため、厩肥連用土壌におけるもっとも大きな可給態窒素の供給源は、macroaggregatesのうちでもとくに0.25~1mmの大きさの部分であった。

第5節 要 約

有機質資材の連用によって土壌中に集積した有機物の存在状態を明らかにするため、有機質資材連用圃場から採取した畑土壌を物理的分画法を適用して解析した。

第1節では、有機質資材の微細部分と水溶性部分が吸着・保持されて集積する主要な場と考えられる粘土画分の性状の変化を解明するため、赤黄色土上で行われてきた厩肥連用試験圃場（厩肥無施用区および0 t、10 t、20 t/10 aの牛ふん厩肥を毎年施用した区）において4年間（年3作栽培）にわたって採取した土壌から粘土画分を分離し、それらの全炭素含有率、全窒素含有率とC/N比の経時的变化を追跡した。

厩肥施用区（10 t区と20 t区）では、粘土画分の全炭素含有率と全窒素含有率は厩肥の連用に伴って経時的に増加し、粘土画分に有機物が集積することが示された。ただし、化学肥料だけを連用した厩肥0 t区でも、粘土画分の全窒素含有率はわずかながら増加した。粘土画分のC/N比は6作後までは各区とも9~10で推移したが、7作目以降、6~7に低下した。さらに、10 t区および20 t区の厩肥施用区では粘土画分の全窒素含有率と未分画土壌の窒素無機化量との間には有意な正の相関関係が認められ、厩肥連用によって粘土画分へ集積した有機物が未分画土壌の窒素無機化に寄与していることが示唆された。

第2節では、土壌に施用された厩肥由来の有機物の集積状況と集積有機物の性状を解明するため、11作栽培後に第1節と同じ厩肥連用圃場（厩肥無施用区および10 t、20 t/10 a区）から採取した土壌を粗砂、細砂、シルトおよび粘土に粒径分画して、各画分の乾物重、全炭素含有率、全窒素含有率、C/N比を調べるとともに、各土壌の粘土画分ならびに20 t区土壌の全画分について、インキュベーション実験によって窒素無機化量を測定した。

いずれの土壌においても、各画分の乾物重の割合は、粗砂>シルト>細砂>粘土の順であった。各画分の全炭素含有率と全窒素含有率は、厩肥の施用量が多いほど粗砂と細砂の粗粒画分で増加し、厩肥連用に伴って土壌の粗粒な画分に有機物が集積することが認めら

れた。C/N比は粒径が細くなるほど低下し、粘土画分のC/N比は各区ともほぼ同じ値であったが、シルト以上の画分では厩肥連用に伴ってC/N比の低下が認められた。

粘土画分の窒素無機化率は、厩肥施用量が多いほど高くなり、厩肥連用によって粘土画分に易分解性有機物が集積することを示した。また、20 t区土壤の粒径画分の無機化量と無機化率はいずれも粘土画分で最大となり、粘土画分の無機態窒素供給力がもっとも大きかった。しかし、各画分の窒素無機化への寄与率を計算した場合には、画分量と全窒素含量がもっとも多い粗砂画分で最大となり、窒素の無機化における粗粒画分の役割も無視できなかった。

第3節では、前節までと同じ厩肥連用試験圃場（東郷、0~20 t/10 aの厩肥を8年間連用）とともに、黒ボク土で行われてきた2カ所の堆厩肥連用試験圃場（厨川、0~32 t/10 aの厩肥を10年連用；藤坂、0~3.4 t/10 aの堆肥を43年連用）から採取した土壤を粒径によって分画し、画分中の全炭素量、全窒素量、インキュベートした場合の無機化窒素量およびムラミン酸量を測定した。

いずれの土壤でも、堆厩肥の連用によって全炭素と全窒素の含有率は全画分で増加したが、有機物量の相対的な増加は粗砂画分でもっとも大きく、とくに厩肥を多量に施用した東郷および厨川から採取した土壤で顕著であった。

インキュベーションによって無機化する窒素の量は、堆厩肥の連用によって全画分で増大したが、堆厩肥を連用した土壤の窒素無機化率は粗砂および粘土の両画分で高かった。また、土壤からの窒素無機化に対する各画分の寄与を検討したところ、赤黄色土では粗砂画分が、黒ボク土では粘土画分が無機化窒素の供給に大きな役割を果たしていることが認められた。

ムラミン酸量は、堆厩肥施用量が増えるにしたがって、東郷土壤と厨川土壤のすべての画分および藤坂土壤の粗砂と細砂以外の画分で増加した。さらに、黒ボク土の細砂画分以外のすべての画分について、ムラミン酸量と無機化窒素量との間に有意な相関関係が認められ、菌体細胞壁物質が堆厩肥を連用した土壤の無機化窒素の給源となっている可能性を示唆した。

第4節では、0~20 t/10 aの厩肥を4年間にわたって連用した黒ボク土畑地から採取した土壤を、粒径および団粒サイズに基づいて分画し、得られた画分の全炭素量と全窒素量を測定するとともに、インキュベーション実験によって炭素と窒素の無機化を検討した。

厩肥の連用に伴って、全炭素と全窒素の含有率は未分画土壤およびすべての粒径画分で

増加する傾向にあったが、有機物の相対的増加は粗砂画分でもっとも大きく、ついで細砂画分で大きかった。他方、厩肥の連用は、団粒サイズ画分のうちでも0.25mmより大きな部分の割合を増加させた。また、厩肥連用に伴う団粒サイズ画分の全炭素と全窒素の含有率の増加は全画分で認められたが、有機物の相対的増加は0.5~2mmの画分でもっとも著しかった。こうしたことから、厩肥の連用によって土壤中に集積する有機物は主に砂サイズの粗大な状態であり、厩肥由来の粗粒な有機物の多くが団粒を構成して存在していると推論された。しかし、各団粒サイズ画分の粒子組成から、砂サイズの粗粒有機物の一部には団粒を形成していないものもあることが示された。

粒径画分および団粒サイズ画分からの炭素と窒素の無機化量は、厩肥の施用量が増えるにしたがって、すべての画分で増加する傾向を示した。厩肥連用に伴う粒径画分への易分解性有機物の集積は、粗砂画分においてもっとも著しかったが、厩肥を20 t/10 a連用した場合でさえも、無機化窒素の供給には粘土画分がもっとも大きな役割を果たしていた。団粒サイズ画分への易分解性有機物の集積も、0.25mm以上の粗大な画分で著しく、そのうちでも、炭素の無機化には0.5mm以上の画分が大きな役割を果たしていたのに対して、窒素では0.25~1mmの画分の役割が大きかった。さらに、各画分から無機化した炭素と窒素の比を計算したところ、粒径画分、団粒サイズ画分いずれにおいても画分サイズが小さくなるほど低下した。こうしたことから、厩肥連用土壌における易分解性有機物の給源は、主として粗大な団粒を形成して集積している粗粒有機物と粘土画分に集積した有機物であると推定された。

第6章 総合考察

堆厩肥等の有機質資材は古くから自給肥料として耕地に施用されてきたが、現在では、大規模畜産農家から多量に排出される家畜ふん尿をはじめ、木質廃棄物や都市廃棄物など、多種多様な材料を利用した有機質資材が製造され、耕地に施用されている。しかしながら、こうした有機質資材の性状は、従来から用いられてきた堆厩肥とはかなり異なる場合も多い。

有機質資材の耕地への施用にあたっては、充分腐熟したものをを用いることが原則である。未熟な有機質資材を施用した場合には、資材に含まれる生育阻害物質による生育障害⁸²⁾、易分解性有機物の急激な分解に伴う障害⁵⁹⁾やC/N比の高い有機物の分解に伴う窒素飢餓⁷⁰⁾など、作物への悪影響が懸念される。このため、有機質資材の品質面でもっとも問題とされてきたのは腐熟度の評価であり、これまでかなりの数の腐熟度判定法が提案されている^{19, 31, 77)}。たとえば、井ノ子ら^{29, 30)}は円形紙クロマトグラフィーによる腐熟度判定法を提唱している。しかし、この方法は都市ゴミコンポストならびにおがくずを含まない鶏ふん厩肥と豚ふん厩肥には適用可能であるが、おがくずなどの木質物を含む資材や牛ふん厩肥には適用不可能とされる¹⁷⁾。このように、これまで提案されている腐熟度判定法は、適用できる資材の材料に限られており、材料の異なる有機質資材全般について統一的に腐熟度を評価する方法は見当たらない。こうした問題を解決するためには、材料の異なる各種の有機質資材の腐熟過程における物質変化を多面的に解析して共通する変化の法則性を見だし、それに基づいて腐熟度判定法を開発していくことが必要である。

また、耕地に施用された有機質資材の土壤肥沃度および作物生産性に及ぼす影響を明らかにすることは、各種資材の利用に当たっての重要な課題である。有機質資材の施用効果に関しては国内外で古くから研究がなされてきている²³⁾が、施用効果が発現する機構に関する研究はきわめて少ない。この点を解明するためには、土壤中における施用有機質資材の挙動について詳細に解析することが不可欠と考えられるが、このような研究としては和田⁷¹⁾や吉田ら⁸⁰⁾の研究があるにすぎない。

以上のことから、本研究では有機質資材の腐熟過程と土壤に施用された後の資材の物質変化を統一的に解析することを試みた。ここでは、前章までの研究結果から、有機質資材の腐熟過程と土壤中での挙動を整理するとともに、有機質資材の腐熟度の評価ならびに有機質資材の施用に伴って土壤中に集積する易分解性窒素の存在状態について考察する。

第1節 有機質資材の腐熟過程における物質変化とそれに基づいた腐熟度の評価

Suzuki and Kumada⁶⁶⁾は、稲わら・石灰窒素・くず大豆混合物を屋外で堆積し、経時的に採取した湿潤試料について、風乾もしくは一定温度で保温静置した場合の無機態窒素の変化を測定し、それから推定される窒素形態変化反応の種類とその程度、すなわち窒素形態変化能が腐熟に伴って推移することを示した。そこで、まず第2章では、材料および腐熟度の異なる各種有機質資材試料について、つぎの3種類の方法によって窒素形態変化能を推定し、窒素形態変化能と腐熟との関係について詳細な検討を行った。①土壤混和法：土壤と混和して30℃で保温静置し、無機態窒素量を経時的に測定する。②インキュベーション法：土壤と混和せずに30℃で4週間保温静置してその前後の無機態窒素量を測定する。③風乾法：室温で2日間風乾してその前後の無機態窒素量を測定する。

その結果、有機質資材の腐熟に伴う窒素形態変化能の推移のパターンは、有機質資材がおがくずのような木質物を含むか否かによって異なると推察され、つぎのように取りまとめられた。木質物を含まない資材の場合には、もっとも未熟な段階では激しいアンモニア化成とそれに伴うアンモニア揮散が主として起こり、つぎの段階ではアンモニア化成は弱まり、 $\text{NO}_2\text{-N}$ の集積や硝酸化成とともに脱窒も起こるが、最終的にはアンモニア化成と硝酸化成が卓越する段階に至る。木質物を含む資材の場合には、アンモニア化成とアンモニア揮散を主とするもっとも未熟な段階ならびに一時的な $\text{NO}_2\text{-N}$ の集積や硝酸化成、脱窒が起こる段階を経たのち、木質物の分解に伴う窒素の有機化が卓越するようになるが、最終的にはアンモニア化成と硝酸化成のみの段階へ到達する。

熊田⁴³⁾によれば、植物遺体の腐朽過程は、一般に還元的段階（第1段階）と酸化的段階（第2段階）、およびそれらの中間段階に大別できるとされる。有機質資材の腐熟過程も同様に分類できるとすれば、木質物を含むか否かによらず、アンモニア化成と硝酸化成のみの優占する最終段階が植物遺体の腐朽の第2段階に相当し、この段階を完熟と表現しうる。したがって、既述の窒素形態変化能推定法によってアンモニア化成と硝酸化成のみが認められれば、完熟と考えて差し支えない。一方、アンモニア化成とアンモニア揮散のみが認められれば未熟な第1段階にあると判定され、 $\text{NO}_2\text{-N}$ の集積、脱窒や窒素の有機化が認められれば中間段階にあり、中熟と判定されよう。ただし、実際に耕地に施用できるかどうかの判断は施用方法によって異なってくる。たとえば、資材の施用から定植まで間をおけば、完熟状態に達していない資材でも施用可能である。しかし、木質物を含む資材では、窒素の有機化が長期間続き、土壤中で一時的な窒素飢餓をひき起こす懸

念もある。このように、どの段階に達すれば施用可能かという判断は施用方法のちがいに
よって一概には規定できないが、窒素形態変化能の推定に基づいて腐熟度を判定し、その
資材が施用可能か否かの判断に役立てることができる。

窒素形態変化能の推定法として本研究で採用した方法は、前述のように、風乾法、イン
キュベーション法ならびに土壌混和法の3種である。これらのうち、土壌混和法は有機質
資材を土壌に混和して行なうため、圃場での条件にもっとも近いが、操作が煩雑である。
一方、風乾法とインキュベーション法はより簡単に行いうる。そこで、風乾法とインキュ
ベーション法を腐熟度判定法として用いるため、窒素形態変化能の推定条件を検討した。
すなわち、材料および腐熟度の異なる数種の試料を用い、25℃と50℃の2段階の温度条件
で風乾処理を行なうとともに、30℃で保温静置してそれぞれの処理に伴う無機態窒素量の
経時的变化を測定した。

25℃と50℃のいずれの温度条件でも、風乾処理によって推定された窒素形態変化反応は
ほとんど異ならず、主な窒素形態変化反応は処理後24時間以内に認められた。30℃での保
温静置によって推定された窒素形態変化反応は経時的に推移したが、試料に特徴的な反応
は2週間以内に発現した。したがって、風乾法については25℃で24時間、インキュベー
ション法については30℃で2週間、それぞれ処理することによって窒素形態変化能の推定が
可能と判断された。また、風乾とインキュベーションのいずれの処理においても硝酸アン
モニウム添加区を設けたことにより、推定された窒素形態変化反応の数は増加した。すな
わち、試料が $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の一方もしくは両方を少量しか含まない場合でも、添加
した無機態窒素の変化から窒素形態変化能を推定することが可能であった。このため、風
乾法、インキュベーション法、いずれの方法でも無機態窒素添加区を設けることが望まし
い。

風乾法では24時間の処理によって窒素形態変化能の推定が可能となったが、窒素の有機
化の反応の推定は短時間の処理では困難であったため、おがくず等の木質物を含む有機質
資材には適用できない可能性もある。したがって、木質物を含有する有機質資材の腐熟度
判定のためには、2週間程度を要するものの、インキュベーション法が適当であると考え
られる。なお、有機質資材の腐熟度の判定に、風乾法とインキュベーション法のいずれの
方法を採用するにしても、無機態窒素の定量が必須であるため、現段階では農業改良普及
所や農協など、ある程度の分析設備が備わった場所でなければ実施できない。有機質資材
の製造現場においても実施可能とするためには、無機態窒素の簡易な定量法の開発が必要

である。

ところで、土壌や有機質資材を篩別、水中での沈降や遠心分離などによって粒径別に分画する方法は、一般に物理(的)分画法⁷²⁾と呼ばれる。この方法は、有機質資材の腐熟過程の解析に役立つと考えられるが、有機質資材の腐熟過程の解析に物理的分画法を適用した研究例は少なく、有機質資材の腐熟過程の解明のためには、さらに多くの資材についてこの方法を適用して、解析を進めることが必要である。

そこで、材料および腐熟度の異なる有機質資材について篩別、水中での沈降および遠心分離によって粒径別に分画し、粒子組成および各画分の全炭素含有率、全窒素含有率とC/N比を調べた。供試したいずれの有機質資材でも、粒径500 μm 以上の粗大な画分の割合が多く、粒径が細くなるにしたがって画分の全窒素含有率は増加し、C/N比は低下した。おがくずを含有する資材では、おがくずを主とする粗大な画分のC/N比が高い傾向にあった。有機質資材の粒径画分の性状と窒素形態変化能とを比較した場合には、家畜ふんとおがくずのような木質物を混合して腐熟させた資材については、粗大画分のC/N比が25~30を境として、それ以上では窒素の有機化をひき起こし、それ以下ではアンモニア化成と硝酸化成が進行することが認められた。

さらに、腐熟に伴う窒素形態変化能の推移は木質物を含むか否かによって異なることが明らかにされたことから、木質物を含む資材と含まない資材とについて物理的分画法を適用して腐熟に伴う物質変化過程を比較するため、豚ふん・おがくずコンポストと下水汚泥コンポストを堆積し、経時的に採取した試料について粒径別に分画して検討を行った。その結果、腐熟の進行とともに粒子組成が微細化する傾向が2種のコンポストに共通に認められたが、画分のC/N比の推移は大きく異なっていた。豚ふん・おがくずコンポストでは、粗大な画分は主としておがくずからなるためC/N比がかなり高く、腐熟に伴って大きく低下した。これに対して、下水汚泥コンポストでは、画分のC/N比の変化はほとんど認められなかった。したがって、物理的分画法を適用して有機質資材の腐熟過程の解析を行った場合にも、おがくずのようなC/N比の高い木質物を含む資材と含まない資材とではその物質変化過程が異なっていると考えられた。また、窒素形態変化能と対比したところ、豚ふん・おがくずコンポストにおいては、腐熟によって粗大な画分のC/N比が低下するにつれて、有機化を引き起こさなくなることが認められた。

このように、有機質資材の腐熟過程における物質変化を窒素形態変化能の面から研究した結果から、窒素形態変化能の推定に基づいて有機質資材の腐熟度の判定が可能であるこ

とが示された。同時に、物理的分画法を適用して解析した結果から、家畜ふんとおがくずのような木質物を混合して腐熟させた資材については、全体のC/N比が低くとも、粗大な木質物のC/N比によって窒素の形態変化能が規定されているため、おがくずのような木質物を含む資材では腐熟度の判定にあたって、粗大画分のC/N比も腐熟度判定のための有用な資料となりうると考えられた。

第2節 土壤中での有機質資材の挙動と可給態窒素の供給

前節でも述べたように、有機質資材は粒径の異なる各種の粒子からなる。このような有機質資材の不均一性に着目した最初の研究者は和田⁷¹⁾であり、彼は実験室内で腐朽させた稲わらを粗大部分、微細部分および水溶性部分にわけてそれらの性状を検討し、粗大部分は腐朽植物遺体であり、微細部分には微生物体が多量に含まれ、水溶性部分は水溶性の腐植からなるらしいと推定した。これら3つの画分のうち、微細部分と水溶性部分は土壤中容易に移動する部分であり、土壤中での有機質資材の挙動の解析にあたっては、この部分の実体解明が重要な課題となる。

そこで、第4章において、材料の異なる4種の有機質資材の微細画分と水溶性画分の性状を電子顕微鏡観察、元素分析および有機成分組成の分析によって検討したところ、微細画分のうちでも10,000×gの遠心分離によって沈降する画分は主に細菌菌体と細胞壁物質からなり、これらに無定形物質が混在しているが、より微細な100,000×g沈降画分は細胞膜、べん毛や線毛などの細菌細胞の断片と無定形物質からなっていた。一方、100,000×gの遠心分離によっても沈降しない水溶性画分は無定型物質を主成分とし、ごく少量ながらべん毛や線毛などの細菌細胞の断片を含んでいた。また、電子顕微鏡観察で認められた無定形物質は、元素分析の結果から腐植物質と考えられたが、有機態窒素組成と中性糖組成の分析から水溶性画分にはかなりの菌体外代謝産物が含まれることが示された。したがって、有機質資材の微細画分と水溶性画分の性状は、前述の和田⁷¹⁾の検討結果と大筋では一致するが、微細画分には微生物菌体のみならず細胞壁、細胞膜、べん毛や線毛などの微生物菌体の断片が、また、水溶性画分には微生物代謝産物が集積していることが明らかになった。さらに、微細画分と水溶性画分の有機態窒素は粗大画分と比べて土壤中無機化されやすいことが、インキュベーション実験によって示されるとともに、無機化窒素の給源としては微生物菌体とその断片および微生物代謝産物が大きな役割を担っていると推察された。

このような性格を持った有機質資材の微細部分と水溶性部分は、耕地に施用された場合、雨水や灌漑水によって浸出されて土壤中に拡散し、その一部は土壤粒子と結合して土壤中に集積すると同時に微生物による分解・変質をこうむるものと推定される。他方、有機質資材の粗大部分は、前節で述べた腐熟過程における変化と同じ道筋をたどるとすれば、土壤中で無機化されると同時に微細化し、一部は微生物菌体に取り込まれて代謝され、微細部分や水溶性部分へ変化するであろう。

第5章では、畑地に施用された有機質資材が、実際に土壤中でどのような状態で存在しているかを解析するため、物理的分画法を適用して検討を行った。まず、赤黄色土畑地において4年間にわたって牛ふん厩肥を連用した試験圃場において、試験開始前と12作までの各作跡地より採取した土壤から粘土画分を採取し、全炭素含量と全窒素含量を測定した結果、いずれも厩肥の連用回数が増すにつれて増加し、厩肥の連用に伴って粘土画分に有機物が集積することを示した。厩肥の連用に伴って粘土画分に集積する有機物のすべてが厩肥の微細部分や水溶性部分に直接由来すると考えるのは短絡的すぎるが、かなりの部分は前述のような厩肥の分解過程で生成した微生物菌体やその代謝産物に由来したものと推定される。

さらに、施用された有機質資材の土壤中での分布状態を検討するため、同じ厩肥連用試験圃場の11作跡地土壤について、粗砂、細砂、シルトおよび粘土の4画分に分け、各画分の乾物重、全炭素含量と全窒素含量を測定することによって、土壤中での厩肥由来の有機物の分布状況を調べた。いずれの画分でも、厩肥の連用によって全炭素含有率と全窒素含有率は上昇したが、この上昇割合は粗粒な画分ほど高かった。このことは、施用された厩肥由来の有機物が粗粒な土壤画分に相対的に多く分布していることを表す。また、赤黄色土とはその性質が大きく異なる黒ボク土畑地で行われてきた堆厩肥連用試験圃場から採取した土壤について検討した結果も、赤黄色土と同様に、堆厩肥の連用に伴う有機物の相対的増加は粗砂画分でもっとも大きいことを示した。

このように、畑地に施用された有機質資材は主として粗粒な状態で土壤中に集積することが明らかになったが、厩肥を連用した黒ボク土における有機物の存在状態を粒径分画だけでなく団粒サイズに基づいて分画することによって検討したところ、粗粒有機物の多くが250 μm より大きな団粒を形成して存在することが判明した。Tiadall and Oades⁶⁹⁾は土壤団粒のうちでも250 μm より大きな粗大団粒 (macroaggregates) がより小さな微小団粒 (microaggregates) から成り立っているとしているが、土壤中に存在する有機質資材は、そ

れ自体が核になるとともにmicroaggregatesを接着する役割を果たし、macroaggregatesを形成しているものと考えられる。

有機質資材の施用は一般に土壌の窒素肥沃度を増大させ⁶⁷⁻⁸⁰⁾、このことは有機質資材の施用効果として重要視されている¹⁶⁾。そこで、有機質資材の連用に伴って集積する可給態窒素が土壌の粒径画分のいずれに由来するのかを検討するため、堆厩肥連用土壌の粒径画分からの窒素無機化をインキュベーション実験によって検討した。赤黄色土、黒ボク土を問わず、無機化窒素量は堆厩肥の連用によって全画分で増大したが、土壌からの窒素無機化に対する各画分の寄与を検討したところ、粗砂画分と粘土画分で大きいことが明らかになった。赤黄色土では、厩肥連用に伴う粘土画分の全窒素量の増加と土壌からの窒素無機化量の増加とは対応しており、窒素無機化に対する粘土画分の役割の大きいことが示されていたが、インキュベーション実験によれば、粘土画分よりも粗砂画分の寄与が大きいことが判明した。一方、黒ボク土についてインキュベーション実験によって粒径画分の窒素無機化への寄与を検討した場合には、粗砂画分よりも粘土画分が無機化窒素の供給に大きな役割を果たしていることが認められたが、これは粘土画分の割合が赤黄色土より高く、なおかつ粘土画分の全窒素量が多いためである。

黒ボク土については粒径画分からの炭素の無機化も検討したが、炭素の無機化も窒素の無機化と同様、粗砂と粘土の両画分で著しかった。しかし、炭素無機化への寄与は、窒素の場合とは逆に、粘土画分よりもむしろ粗砂画分で大きかった。これは、土壌の粒径画分のうちでも粒径が大きな画分ほどC/N比が高く、このため粗砂画分では窒素の無機化よりも炭素の無機化が卓越することに基因していた。このように、有機質資材を施用した土壌では、粗砂サイズの粗粒有機物上で活発な分解が行われていることが示された。したがって、こうした分解の過程で粗粒有機物は微細化されるとともに、その一部は無機化されて無機態窒素を放出するか、もしくは微生物菌体に取り込まれて代謝されるものと推定される。これに対して、有機質資材中の微細部分や水溶性の部分、さらには粗粒有機物の分解過程で生成した微生物菌体や代謝産物は粘土粒子に吸着・保持され、無機化窒素の供給源となるものと予想される。

これまでみてきたように、有機質資材の連用によって土壌中に集積する易分解性有機物は、粒径ごとにみた場合には粗砂と粘土の両画分に多く存在していたが、さらに黒ボク土について団粒サイズ画分からの炭素と窒素の無機化を検討したところ、いずれも250 μ m以上のmacroaggregatesに相当する画分で大きかった。このことは、有機質資材の施用に伴っ

て土壤中に集積する有機物の多くが粗粒な状態であり、そのほとんどがmacroaggregatesを形成しているという前述の知見と一致し、粗大な塊状もしくは粘土粒子に吸着された状態で存在する易分解性有機物は、いずれもmacroaggregatesを形成していることを示している。ただし、粘土粒子はmicroaggregatesを形成した状態で存在し、実際には、こうしたmicroaggregatesと粗粒有機物とが集合してmacroaggregatesを形成しているものと思われる。

ところで、土壤中における易分解性窒素の給源形態としては、微生物細胞壁が大きな役割を果たしていることが指摘されている³⁵⁾。そこで、堆肥連用土壌の粒径画分について細菌細胞壁物質の指標となるムラミン酸を分析した結果、粗砂画分と粘土画分のいずれにおいても細胞壁物質が無機化窒素の給源形態として重要であることが示唆された。既述のように、有機質資材の施用に伴って粘土画分には微生物菌体由来の物質が集積すると推定されるが、細胞壁部分は細胞質部分と比べて分解され難い^{47, 48)}ことから、細胞壁物質が相対的に多く残留し、無機化窒素の給源となっていくものと推察される。また、有機質資材中では、細菌細胞壁物質は主に10,000×gの遠心分離によって沈降する、微細画分でも相対的に大きな部分に存在することが示されているが、粗砂画分中の細胞壁物質は塊状で存在する有機質資材中に包含されている微細部分に由来するものと考えられる。

以上のように、有機質資材のうちでも土壤中で容易に移動できる部分と推定される微細および水溶性画分は微生物菌体、菌体断片もしくは代謝産物を多く含み、土壤中で無機化されやすい部分であることが示されるとともに、有機質資材の施用に伴って、有機物の多くは粗砂サイズの粗粒な土壌画分に集積し、その大部分は250μmより大きな粗大な団粒を形成していることが明らかにされた。さらに、有機質資材を施用した土壌における可給態窒素の供給源は主に塊状で存在する粗粒有機物と粘土粒子に吸着された微生物菌体由来の有機物であり、そのほとんどが粗大な団粒中に含まれていることが示された。

第7章 摘 要

近年、多様な材料を用いた各種の有機質資材が使用されるようになり、それら資材の腐熟度を判定する必要性が増してきているにもかかわらず、材料の異なる各種資材に一律に適用可能な方法は見当たらない。また一方では、有機物の施用試験が古くから行われてきているにもかかわらず、施用効果の発現機構に関する研究はほとんど行われていない。こうしたことから、有機質資材の腐熟過程と土壤中における挙動を解析することにより、有機質資材の腐熟度判定法の開発ならびに施用効果の発現機構の解明に資することを目的として以下の研究を行なった。

1. 有機質資材の窒素形態変化能

材料および腐熟度の異なる各種有機質資材について、土壌と混和してのインキュベーション（土壌混和法）、有機質資材のみのインキュベーション（インキュベーション法）、風乾（風乾法）の各処理によって窒素形態変化能を推定し、有機質資材の腐熟と窒素形態変化能との関係を検討した。なお、窒素形態変化能とは、前記の処理を行った際の無機態窒素量の変化から推定される窒素形態変化反応とその程度を意味する。

3種の方法によって推定された有機質資材の窒素形態変化能は、完全には一致しなかったが、腐熟の進行に伴う窒素形態変化能の遷移は、おがくずのような木質物を含むか否かによって、つぎのように取りまとめられた。

①木質物を含まない資材：もっとも未熟な段階ではアンモニア化成とアンモニア揮散を主とし、つぎの段階ではアンモニア化成は弱まり、 $\text{NO}_2\text{-N}$ の集積や硝酸化成、脱窒が起こるが、最終的にはアンモニア化成と硝酸化成のみの段階に至る。

②木質物を含む資材：アンモニア化成とアンモニア揮散を主とするもっとも未熟な段階と一時的な $\text{NO}_2\text{-N}$ の集積や硝酸化成、脱窒が起こる段階を経た後、木質物の分解に伴う無機態窒素の有機化が卓越するが、最終的にはアンモニア化成と硝酸化成のみの段階へ到達する。

さらに、窒素形態変化能の推定法のうち、土壌混和法は圃場条件にもっとも近いが、操作が煩雑であるため、風乾法とインキュベーション法によって窒素形態変化能を推定する場合の温度条件と期間および無機態窒素測定値のバラツキについて検討した。風乾処理を 25°C 、 50°C のいずれの温度条件で行っても、推定される窒素形態変化能はほとんど異なら

ず、主要な窒素形態変化反応は24時間以内に認められた。また、30℃でインキュベートした場合、主要な窒素形態変化反応は2週間以内に認められた。無機態窒素測定値の変動係数は、風乾もしくはインキュベートの各処理を行った後でも最大35%であった。こうしたことから、風乾法とインキュベーション法を行なう際の最適な条件はつぎのように設定された：風乾法、25℃で24時間；インキュベーション法、30℃で2週間。なお、いずれの方法でも無機態窒素の添加区を設け、2連制で行う。

2. 物理的に分画した有機質資材の性状

材料および腐熟度を異にする各種の有機質資材を粒径分画し、粒子組成、各画分の全炭素含有率と全窒素含有率を分析するとともに、2種類のコンポストを堆積し、経時的に採取した試料について粒径分画を行い、粒子組成および各画分の全炭素含有率と全窒素含有率の推移を追跡した。

同一の有機質資材の分画を4反復したところ、全炭素含有率、全窒素含有率やC/N比の測定値よりも、画分の乾物重のばらつきが大きかった。さらに、5種類の有機質資材を粒径別に分画した結果によれば、いずれの資材でも粒径 $>500\mu\text{m}$ の粗大な画分の割合が多く、粒径の微細化に伴って画分の全窒素含有率は増加し、C/N比は低下する傾向にあった。

2種のコンポストの粒子組成は、堆積に伴って微細化する傾向が認められた。おがくずを含むコンポストでは粗大な画分のC/N比が高く、堆積によって大きく低下したのに対して、下水汚泥を材料とするコンポストでは画分のC/Nの変化はほとんどみられなかった。また、いずれのコンポストでも、水溶性画分は多量の無機態窒素を含み、C/N比が低かったが、炭素量、窒素量およびC/N比は堆積しても規則的な変化は示さなかった。

これらの有機質資材の粒径分画についてC/N比と窒素形態変化能との関連を検討したところ、おがくずを含む資材では、粗大画分のC/N比が高い場合には無機態窒素の有機化をひき起こすが、腐熟に伴うC/N比の低下によって有機化を引き起こさなくなると推察された。

3. 有機質資材の微細および水溶性画分の性状

4種類の有機質資材を蒸留水に懸濁させて4画分（F1、4℃で16時間の静置により沈降；F2、10,000×gの遠心分離により沈降；F3、100,000×gの遠心分離により沈降；

F 4、F 3上澄)にわけ、得られた画分について、微細形態、元素組成、土壤中での窒素無機化特性、有機態窒素組成、単糖組成およびムラミン酸の分析から特徴づけた。

透過型電子顕微鏡観察によれば、F 2画分は細菌細胞、細菌細胞壁もしくは細胞質膜を、F 3画分は細菌細胞に由来すると思われる膜状およびフィラメント状の物質をそれぞれ主として無定形物質を含んでいるのに対して、F 4画分は無定形物質を主として膜状およびフィラメント状の物質を含んでいた。また、元素分析からは、電子顕微鏡で無定形と認められた物質は腐植物質と推定された。さらに、インキュベーション実験によって、土壤中での窒素無機化は粗大なF 1画分よりもF 2～F 3の微細および水溶性画分で速やかなことが判明した。

有機態窒素組成と中性糖組成の分析結果は、上記の結果を支持するとともに、F 4画分の無定形物質のうちにはかなりの菌体外代謝産物が存在することを示唆した。また、ムラミン酸を指標とした場合、細菌細胞壁物質はF 2画分に集積していた。画分の有機成分組成と窒素無機化量との関係を検討した結果、F 2画分では細胞壁物質が、F 4画分では菌体外代謝産物がそれぞれ易分解性窒素の給源として大きな役割を果たしているものと推定された。

4. 物理的分画法による堆肥連用土壌の有機物の存在状態の解析

堆肥連用試験地から採取した土壌を粒径分画もしくは団粒サイズに基づく分画を行い、各画分の分析とインキュベーション実験から有機物の存在状態を検討した。

牛ふん厩肥を4年間(年3作栽培)にわたって連用した赤黄色土畑地(厩肥無施用区および厩肥10、20 t/10 a施用区)において各作跡地から採取した土壌から粘土画分を分離し、全炭素含有率、全窒素含有率とC/N比の変化を追跡した。粘土画分の全炭素含有率と全窒素含有率は、厩肥の連用に伴って経時的に増加すると同時に、粘土画分のC/N比も7作跡地を境として低下した。さらに、厩肥施用区では、粘土画分の全窒素含有率と土壌からの窒素無機化量との間には有意な正の相関関係が認められた。

前記と同じ厩肥連用試験圃場の11作跡地土壌について、粗砂、細砂、シルトおよび粘土の4画分に分け、各画分の全炭素含量と全窒素含量を測定した結果、厩肥の連用に伴って土壌中に集積した有機物が粗粒な土壌画分に多く分布することが判明した。また、インキュベーション実験によって厩肥連用土壌の粒径画分からの窒素無機化を検討したところ、窒素の無機化は粗砂画分と粘土画分で著しかったが、窒素無機化への寄与は粘土画分より

も粗砂画分で大きかった。

前記の赤黄色土とともに黒ボク土畑地で行われてきた堆厩肥連用試験圃場から採取した土壌について粒径分画法によって検討した結果、黒ボク土でも赤黄色土と同様に、堆厩肥の連用に伴う有機物の相対的増加は粗砂画分でもっとも大きいことを示した。黒ボク土における窒素の無機化も粗砂と粘土の両画分で著しかったが、窒素無機化への寄与は、赤黄色土とは逆に、粗砂画分よりも粘土画分で大きかった。また、赤黄色土と黒ボク土の粒径画分のムラミン酸量を分析し、窒素無機化との関係を検討したところ、黒ボク土の細砂画分以外の画分でムラミン酸量と無機化窒素量との間に有意な相関関係が認められ、菌体細胞壁物質が堆厩肥を連用した土壌の無機化窒素の給源となっていると推定された。

厩肥を連用した黒ボク土における有機物の存在状態を粒径分画だけでなく、団粒サイズに基づいて分画することによって検討した結果、粗粒有機物の多くが $250\mu\text{m}$ より大きな団粒を形成して存在することが判明した。粒径画分と団粒サイズ画分について炭素と窒素の無機化を検討したところ、粒径画分からの炭素無機化も窒素無機化と同様、粗砂と粘土の両画分で著しかったが、炭素無機化への寄与は、窒素の場合とは逆に、粘土画分よりもむしろ粗砂画分で大きかった。また、団粒サイズ画分からの炭素と窒素の無機化を検討したところ、無機化する炭素と窒素のほとんどは $250\mu\text{m}$ 以上の粗大な画分に由来していた。

以上の結果を総合的に考察し、つぎのように結論した。

1) 有機質資材の腐熟とともに窒素形態変化能は推移し、木質物を含むか否かによらず、最終段階ではアンモニア化成と硝酸化成のみが認められた。この段階を完熟と表現すれば、風乾もしくはインキュベートした際の無機態窒素の変化から推定される窒素形態変化能に基づいて有機質資材の腐熟度判定が可能である。同時に、腐熟に伴って、有機質資材の粗大画分は微細化されるとともにそのC/N比も低下の傾向をたどったが、粗大画分のC/N比が高い場合には無機態窒素の有機化を引き起こすことから、粗大画分のC/N比も腐熟度の判定資料となりうる。

2) 有機質資材を構成する画分のうちでも土壌中で容易に移動し、分解・変質をこうむる部分であると考えられる微細画分と水溶性画分は、いずれも微生物菌体、菌体断片もしくは代謝産物を多く含み、土壌中で容易に無機化される。また、有機質資材の施用によって土壌中に集積する有機物の多くは、粗砂サイズの粗粒な状態であり、その大部分が $250\mu\text{m}$ より大きな粗大団粒を形成している。さらに、有機質資材を施用した土壌における可給態

Faint, illegible text covering the left page of the open book.

窒素の供給源は主に粗砂画分と粘土画分に集積した有機物であり、これらはいずれも粗大団粒を形成して存在している。

Faint, illegible text covering the right page of the open book, starting below the main paragraph.

謝 辞

本研究を行うにあたって、終始懇切なるご指導を賜った故熊田恭一先生に謹んで感謝の意を表します。また、本論文の取りまとめにあたって、ご校閲の労を賜った名古屋大学農学部名誉教授楯塚昭三博士ならびに同教授木村真人博士に心から感謝の意を表します。

本研究は、名古屋大学農学部土壌学教室および弘前大学農学部土壌学・肥科学教室において遂行したが、この間、多大なご援助をいただいた名古屋大学農学部附属農場教授吉田重方博士、同大学農学部土壌学教室吉田光二博士（現在、フィリピン稲研究所）、弘前大学農学部名誉教授花田 慧博士、同元教授音羽道三博士ならびに同助教授齊藤 寛博士に厚く感謝の意を表します。さらに、電子顕微鏡観察にあたってご協力をいただいた名古屋大学農学部名誉教授前田英三博士ならびに同大学農学部発酵化学教室山田寿美博士、実験にあたってご協力いただいた内藤三香（旧姓、柴田）、平井隆平、谷内 豊の諸氏、土壌試料の採取にあたってご協力いただいた東北農業試験場齋藤雅典博士（現在、草地試験場）、有機質資材試料採取と調製にあたってご協力いただいた名古屋大学農学部附属農場、愛知県農業総合試験場、青森県農業試験場藤坂支場、名古屋市下水道局、豊橋市資源化センター、㈱鈴木工業の関係者各位にお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 阿江教治・遅沢省子・久保田徹：フェノール性化合物の土壌団粒形成能、土肥誌、58、233～236(1987)
- 2) 秋元浩一：農学・生物学の統計分析大要、p.138～147、養賢堂(1984)
- 3) Allison, L.E.: Organic carbon: in Methods of Soil Analysis, Part 2, ed. C.A. Black et al., p.1346～1366, American Society of Agronomy, Inc., Publisher, Madison, WI(1965)
- 4) 青山正和・杉浦美保：きゅう肥施用に伴う土壌微生物バイオマス窒素量の推移、土肥誌、62、536～538(1991)
- 5) Bremner, J.M.: Organic forms of nitrogen: in Methods of Soil Analysis, Part 2, ed. C.A. Black et al., p.1148～1178, American Society of Agronomy, Inc., Publisher, Madison, WI(1965)
- 6) Bremner, J.M.: Inorganic forms of nitrogen: in Methods of Soil Analysis, Part 2, ed. C.A. Black et al., p.1195～1198, American Society of Agronomy, Inc., Publisher, Madison, WI(1965)
- 7) Cameron, R.S. and Posner, A.M.: Mineralizable organic nitrogen in soil fractionated according to particle size. J. Soil Sci., 30, 565～577(1979)
- 8) Casagrande, D.J. and Park, K.: Simple gas-liquid chromatographic technique for the analysis of muramic acid. J. Chromatogr., 135, 208～211(1977)
- 9) Chanyasak, V. and Kubota, H.: Carbon/organic nitrogen ratio in water extract as measure of composting degradation. J. Ferment. Technol., 59, 215～219(1981)
- 10) Cheshire, M.V.: Nature and Origin of Carbohydrates in Soils, p.145～154, Academic Press, London(1979)
- 11) Chichester, F.W.: Nitrogen in soil organo-mineral sedimentation fractions. Soil Sci., 107, 356～363(1969)
- 12) Chichester, F.W.: Transformations of fertilizer nitrogen in soil. II. Total and ^{15}N -labelled nitrogen of soil organo-mineral sedimentation fraction. Plant Soil, 33, 437～456(1970)

- 13) Christensen, B.T.: Decomposition of organic matter in particle size fractions from field soils with straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.*, 19, 429~435 (1987)
- 14) Christensen, B.T.: Effects of animal manure and mineral fertilizer on the total carbon and nitrogen contents of soil size fractions. *Biol. Fertil. Soils*, 5, 304~307 (1988)
- 15) Cooke, G.W.: Long-term fertilizer experiments in England. The significance of their results for agricultural science and for practical farming. *Annales Agronomique*, 27, 503~536 (1977)
- 16) Cooke, G.W.: The role of organic manures and organic matter in managing soils for higher crop yields; in *Proc. Intern. Seminar on Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture*, p.53~64. The Society of the Science of Soil and Manure, Japan (1977)
- 17) 藤原俊六朗・井ノ子昭夫・松崎敏英・鎌田春海: 家畜ふんの堆積に伴う有機成分組成の変化と円形濾紙クロマトグラフィーによる腐熟度検定、*土肥誌*, 53, 311~316 (1981)
- 18) 下水汚泥資源利用協議会編: 下水汚泥コンポストの指標、p.203~211、*下水汚泥資源利用協議会* (1980)
- 19) 原田靖生: 家畜ふん堆肥の腐熟度についての考え方、*畜産の研究*, 37, 1079~1086 (1983)
- 20) Harada, Y. and Inoko, A.: The measurement of the cation-exchange capacity of composts for the estimation of the degree of maturity. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 26, 127~134 (1980)
- 21) Harada, Y. and Inoko, A.: Relationship between cation-exchange capacity and degree of maturity of city refuse composts. *ibid.* 26, 353~362 (1980)
- 22) 橋本秀教: 有機物施用の理論と応用、p. 1~12、*農文協* (1977)
- 23) 橋本秀教: 有機物施用の理論と応用、p.47~204、*農文協* (1977)
- 24) 広瀬春朗: 各種植物遺体の有機態窒素の畑状態土壌における無機化について、同上、44, 157~163 (1973)
- 25) 広瀬春朗・熊田恭一: 植物遺体の腐朽化過程に関する化学的研究 (第2報)、*物理*

- 的に分画した稲わら堆肥の性状(その1)、土肥誌、43、21~24(1972)
- 26) 広瀬春朗・熊田恭一: 植物遺体の腐朽化過程に関する化学的研究(第3報)、物理的に分画した稲わら堆肥の性状(その2)、同上、43、115~118(1972)
- 27) Imanari T., Arakawa, Y. and Tamura, Z.: Gas chromatographic analysis of aldoses. Chem. Pharm. Bull. (Tokyo), 17, 1967~1969(1969)
- 28) 稲垣育雄: 野菜に対するおがくず混合家畜ふん堆肥の利用、家畜ふん尿のコンポスト化技術に関する現地検討会資料、p.56~62、農林水産省畜産試験場(1978)
- 29) 井ノ子昭夫: 円形濾紙クロマトグラフィーによる都市ごみコンポストの腐熟度の簡易検定法、土肥誌、50、127~132(1979)
- 30) 井ノ子昭夫・藤原俊六朗: 円形濾紙クロマトグラフィーによるおが屑、木屑混合家畜ふん堆積物の腐熟度検定の可能性、同上、50、518~522(1979)
- 31) 井ノ子昭夫: 有機物資材の品質とその検定法、農業および園芸、57、235~242(1981)
- 32) 井ノ子昭夫: 土壤改良資材の品質保全と施用法 1. 有機系資材: 鬼鞍 豊編、土壤・水質・農業資材の保全-法の制定とその技術対策-, p.87~116、博友社(1985)
- 33) Jenkinson, D.S. and Ladd, J.N.: Microbial biomass in soil, measurement and turnover: in Soil Biochemistry, Vol. 5, ed. E.A. Paul and J.N. Ladd, p.415~471, Merce! Dekker, New York(1981)
- 34) 甲斐秀昭: 土壤中における窒素の動態: 土壤微生物研究会編、土の微生物、p.352~372、博友社(1981)
- 35) 甲斐秀昭・河口定生・丸本卓也: D-アミノ酸の土壤中分布と窒素代謝における意義、土と微生物、18、27~41(1976)
- 36) 金沢晋二郎・和田秀徳・高井康雄: 水田土壤の粘土画分中の微生物体、土肥誌、43、194~198(1972)
- 37) 加藤秀正・藤沢 徹: 腐植粘土複合体の構造に関する研究(第1報)、複合体の分散特性について、同上、44、251~256(1973)
- 38) 加藤博美・早川岩夫・沢田守男・山川芳男: 家畜ふん尿のコンポストに関する研究(第8報)、補助材別豚ふん堆肥及び稲わら堆肥の土壤中での分解と窒素の挙動、愛知農総試研報、14、387~395(1982)
- 39) 木下忠孝・森下勇治・山川芳男・野田賢治・田中宏幸: 家畜ふん尿コンポストに関する研究(第1報)、家畜ふん尿の腐熟過程における窒素の動向、同上、E5、87~

93(1975)

- 40) Kononova, M.M.: Soil organic matter, its nature, its role in soil formation and in soil fertility, p.90, Pergamon Press, NY(1961)
- 41) 熊田恭一: 土壌中における有機物分解と腐植化過程: 人間生存と自然環境3, p. 116~129, 東京大学出版会, 東京(1975)
- 42) 熊田恭一: 有機質資材に関する土壌化学的諸問題、家畜ふん尿のコンポスト化技術に関する現地検討会資料, p. 5~14, 農林水産省畜産試験場(1978)
- 43) 熊田恭一: 土壌有機物の化学(第2版), 249~276, 学会出版センター, 東京(1981)
- 44) 熊田恭一・広瀬春朗・中野綱次郎・北洞信也: 植物遺体の腐朽過程に関する化学的研究(第1報)、数種の有機質および無機質資材を混合した稲わらの腐朽過程、土肥誌、43, 13~20(1972)
- 45) 熊田恭一・吉田光二: 畑地における厩肥の挙動、微生物の生態 12. 有機物負荷と環境浄化、微生物生態研究会編, p.21~40, 学会出版センター(1984)
- 46) Kumada, K., Yoshida K., Takei A. and Shimada N.: Some characteristics of various composts with special reference to nitrogen: in Proc. Intern. Seminar on Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture, p.677~682, The Society of the Science of Soil and Manure, Japan(1977)
- 47) Marumoto, T., Kai, H., Yoshida, T. and Harada, T.: Relation between an accumulation of soil organic matter becoming decomposable due to drying of soil and microbial cells. Soil Sci. Plant Nutr., 23, 1~8(1977)
- 48) Marumoto, T., Kai, H., Yoshida, T. and Harada, T.: Drying effect of mineralization of microbial cells and their cell walls in soil and contribution of microbial cell walls as a source of decomposable soil organic matter due to drying. *ibid.*, 23, 9~19(1977)
- 49) 松崎敏英: 実用規模における牛ふんの連続堆肥化処理試験、神奈川県農総研土壌肥料試験研究成績、7, 49~52(1975)
- 50) 松崎敏英: 家畜ふん尿の農作物への施用技術、畜産の研究、30, 205~210(1976)
- 51) Millar, W.N. and Casida, L.E.: Evidence for muramic acid in soil. Can. J. Microbiol., 16, 299~304(1970)

- 52) 美園 繁: 土壤の集合体の分析法、続作物試験法(復刻版)、戸刈義次ら編、p.407~429、農業技術協会(1979)
- 53) Nelson, D.W.: Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification; in Nitrogen in Agricultural Soils, F.J. Stevenson ed., p. 327~363, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI(1982)
- 54) Oades, J.M.: Soil organic matter and structural stability. Mechanism and implications for management. *Plant Soil*, **76**, 319~337(1984)
- 55) 大西成長・吉田光二・佳山良正: 施設栽培条件下における過剰厩肥連用が土壤の物理的環境要因に及ぼす影響、*生物環境調節*, **21**, 61~67(1983)
- 56) Parsons, J.W.: Chemistry and distribution of amino sugars in soils and soil organisms; in *Soil Biochemistry*, Vol. 5., ed. E.A. Paul and J.N. Ladd, p.415~471, Mercel Dekker, New York(1981)
- 57) 齊藤道雄: 本邦厩肥の研究、p.286、明文堂(1950)
- 58) 進藤晴夫・丸本卓哉・東 敏男: 稲わら堆肥の腐熟過程における各画分の元素組成と分布率の変化、*土肥誌*, **51**, 497~502(1980)
- 59) Stevenson, F.J.: Amino sugars; in *Methods of Soil Analysis*, Part 2, ed. C.A. Black et al., p.1195~1198, American Society of Agronomy, Inc., Publisher, Madison, WI(1965)
- 60) 菅原 健・道野鶴松: 基礎応用定量分析、p.162~163、朝倉書店(1962)
- 61) 杉原 進・石井和夫・近藤 熙: 畑地に対する牛ふん厩肥の連年多量施用、第1報 厩肥の多量施用が畑作物の生育収量および土壤に及ぼす影響、*東北農試研報*, **60**, 17~40(1979)
- 62) Suzuki, M., Harada, K. and Kumada, K.: Analysis of the rotting process of rice straw-calcium cyanamide mixture by physical fractionation. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **21**, 173~183(1975)
- 63) Suzuki, M. and Kumada, K.: Several properties of Rp type humic acids. *ibid.*, **18**, 53~64(1972)
- 64) Suzuki, M. and Kumada, K.: Analysis of rotting process of sawdust barnyard manure. *ibid.*, **22**, 361~372(1976)
- 65) Suzuki, M. and Kumada, K.: Mineralization of physically fractionated

- rotten plant residues under upland conditions. *ibid.*, 22, 373~385 (1976)
- 66) Suzuki, M. and Kumada, K.: Nitrogen transformation during the rotting process of rice straw compost. *ibid.*, 23, 163~173 (1977)
- 67) 高井康雄・角田公正・高遠 宏: 厩肥連用が火山灰畑地の土壌性質および作物生育に及ぼす影響、肥料科学、5、47~71 (1982)
- 68) 立川 涼: 土壌および液体試料中の有機物の迅速定量法ならびに糖類に関する二、三の定量法、土肥誌、37、373~385 (1976)
- 69) Tisdall, J.M. and Oades, J.M.: Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33, 141~163 (1982)
- 70) 徳橋 伸: オガクズ入家畜ふん堆肥窒素の肥効に関する研究、高知農技研報、10、5~16 (1978)
- 71) 和田秀徳: 堆肥の施用が土壌腐植の形態におよぼす影響 (土壌中における堆肥の行動)、土と微生物、2、47~53 (1961)
- 72) 和田秀徳: 土壌有機物の物理分画 - 土壌中の有機物の集積、分布および機能研究のために: 日本土壌肥料学会編、近代農業に於ける土壌肥料の研究、第3集、p.25~35、養賢堂 (1972)
- 73) 和田秀徳・金沢晋二郎: 土壌有機物の物理的分画法 (第1報)、土肥誌、41、273~280 (1970)
- 74) 和田秀徳・金沢晋二郎・高井康雄: 土壌有機物の物理的分画法 (第2報)、同上、41、395~400 (1970)
- 75) 和田秀徳・金沢晋二郎・高井康雄: 土壌有機物の物理的分画法 (第3報)、同上、42、109~117 (1971)
- 76) 和田純二・佐藤亮一・角田公正: 畑地における堆肥・石灰の併用効果について、青森農試研報、13、38~44 (1968)
- 77) 渡辺光昭: 都市ごみコンポストの腐熟度判定について、肥検回報、32、23~38 (1979)
- 78) Yemm, E.W. and Cocking, E.C.: The determination of amino-acids with ninhydrin. *Analyst*, 80, 209~213 (1955)
- 79) 吉田光二・石川明美・熊田恭一: 鈳質畑地における厩肥の施用効果、厩肥連用土壌および施用厩肥の性質、肥料科学、2、71~98 (1979)
- 80) 吉田光二・大口和良・熊田恭一: 鈳質畑地における厩肥の施用効果、厩肥連用によ

る窒素肥沃度の変化、同上、5、91~112(1982)

81) 吉田光二・村口博俊・鈴木浩典・熊田恭一：鉍質畑地における厩肥の施用効果、厩肥連用土壌の性質、同上、8、73~111(1985)

82) 吉田重方：オガクズ堆肥施与による作物の生育障害とその発生原因、農業および園芸、50、295~300(1975)

83) 吉田重方・佳山良正：鉍質畑地における厩肥の施用効果—特に畑作物の収量、品質におよぼす厩肥施用の影響について、肥料科学、2、35~65(1979)

報 文 目 録

1. 熊田恭一・青山正和：数種の堆厩肥の窒素形態変化能、土肥誌、53、135～141 (1982)
2. 青山正和・熊田恭一：コンポストの腐熟過程における窒素形態変化能の推移、土肥誌、53、142～148 (1982)
3. 青山正和・柴田三香・熊田恭一：物理分画した数種の堆厩肥の性状とコンポストの腐熟過程の解析、土肥誌、53、337～343 (1982)
4. 青山正和・熊田恭一：厩肥連用土壌の物理分画面分、とくに粘土画分の性状について、土肥誌、53、425～430 (1982)
5. Aoyama, M.: Properties of fine and water-soluble fractions of several composts, I. Micromorphology, elemental composition and nitrogen mineralization of fractions. Soil Sci. Plant Nutr., 31, 189～198 (1985)
6. 青山正和・吉田光二・平井隆平・熊田恭一：有機質資材の腐熟と窒素形態変化能との関係、土肥誌、59、353～362 (1988)
7. 青山正和・吉田光二・平井隆平・熊田恭一：有機質資材の窒素形態変化能推定条件の検討、土肥誌、59、363～369 (1988)
8. Aoyama, M.: Properties of fine and water-soluble fractions of several composts, II. Organic forms of nitrogen, neutral sugars and muramic acid in fractions. Soil Sci. Plant Nutr., 37, 629～637 (1991)
9. 青山正和：堆きゅう肥の連用に伴って土壌粒径画分に集積する有機物とその窒素無機化、土肥誌、63、161～168 (1992)
10. 青山正和・谷内 豊：きゅう肥連用土壌の粒径画分および団粒サイズ画分の有機物とその無機化、土肥誌、63、571～580 (1992)