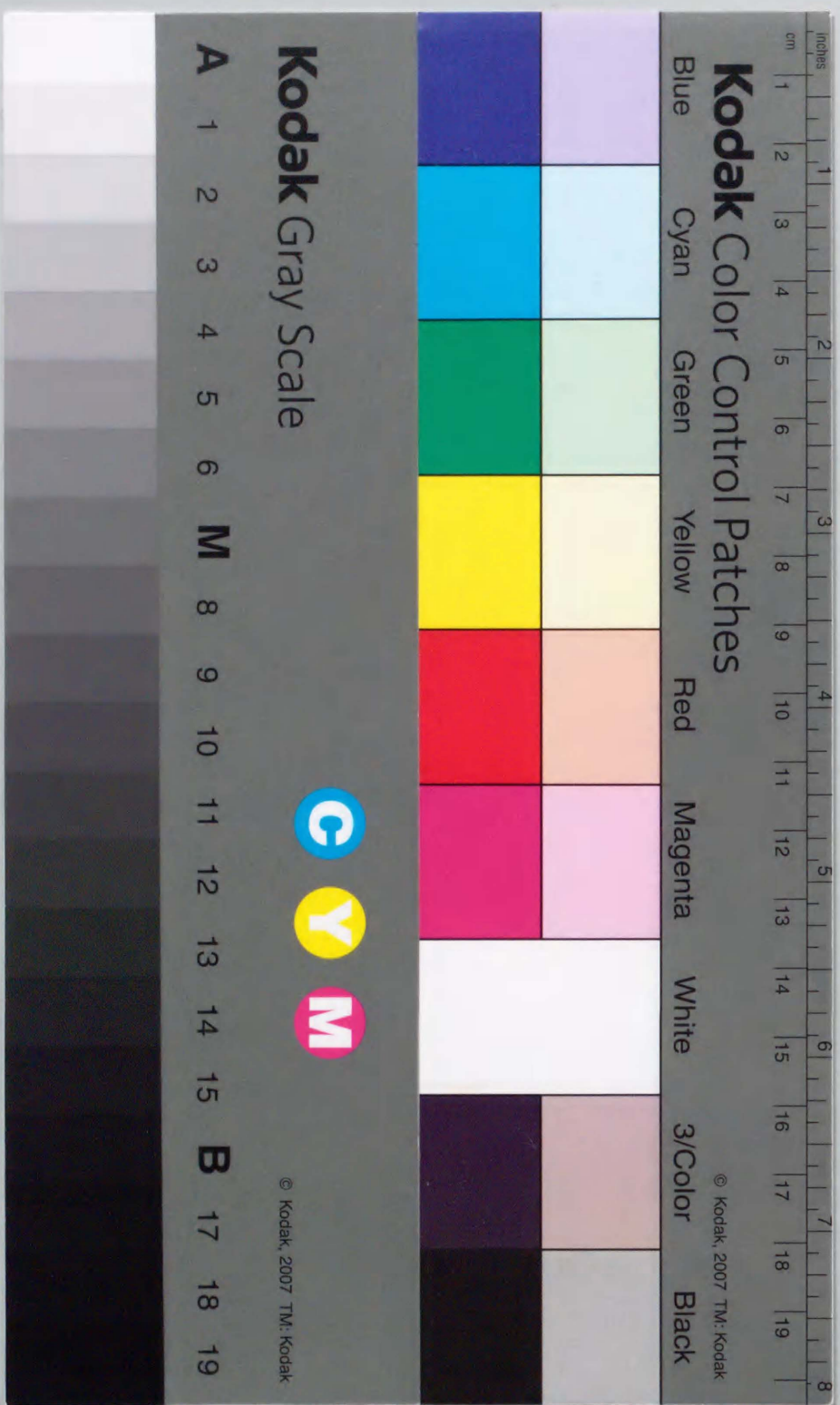


家畜ふんのコンポスト化における腐熟プロセス

2000

羽賀清典



家畜ふんのコンポスト化における腐熟プロセス

筑波大学大学院

農学研究科

農林工学専攻

羽賀清典

目 次

第1章 研究背景及び研究目的	1
1—1 はじめに	1
1—2 既往の研究	2
1—3 研究目的	7
第2章 牛ふんのコンポスト化における腐熟プロセス	9
2—1 研究の目的	9
2—2 材料及び方法	9
2—3 結果及び考察	23
2—3—1 コンポスト化における品温の変化	23
2—3—2 全炭素、全窒素、有機物の変化	25
2—3—3 有機成分の変化	28
2—3—4 生物化学的酸素消費量（BOD）の変化	32
2—3—5 水溶性成分の変化	34
2—3—6 コマツナ種子の発芽試験	47
2—3—7 陽イオン交換容量（CEC）の変化	50
2—3—8 近赤外分析	52
2—4 まとめ	55
第3章 牛ふん—モミガラ混合物及び牛ふん—粉碎モミガラ 混合物のコンポスト化における腐熟プロセス	56
3—1 研究の目的	56

3—2 材料及び方法	.....56
3—3 結果及び考察	.....61
3—3—1 コンポスト化における品温の変化	.....61
3—3—2 有機物の変化	.....63
3—3—4 生物化学的酸素消費量 (BOD) の変化 と硝酸態窒素 (NO ₃ -N) の出現	.....65
3—3—5 揮発性脂肪酸 (VFA) と フェノールカルボン酸の変化	.....68
3—4 まとめ	.....73
第4章 鶏ふんのコンポスト化における腐熟プロセス	.....74
4—1 研究の目的	.....74
4—2 材料及び方法	.....74
4—3 結果及び考察	.....79
4—3—1 コンポスト化における品温の変化	.....79
4—3—2 全炭素、全窒素、有機物の変化	.....79
4—3—3 有機成分の変化	.....82
4—3—4 生物化学的酸素消費量 (BOD) の変化	.....85
4—3—5 水溶性成分の変化	.....87
4—3—6 コマツナ種子の発芽試験	.....94
4—3—7 陽イオン交換容量 (CEC) の変化	.....94
4—4 まとめ	.....98
第5章 コンポスト化操作からみた腐熟プロセスの比較	.....99
5—1 機械攪拌区と堆積区の腐熟プロセスの比較	.....99

5—2 BODの低減、温度の低下、硝酸態窒素の出現	.....103
5—3 嫌気性部分における悪臭物質や有害物質の蓄積	.....106
5—4 牛ふんと鶏ふんの腐熟プロセスの比較	.....108
第6章 腐熟プロセスからみた腐熟度の評価	.....110
6—1 腐熟の目的と腐熟プロセス	.....110
6—1—1 腐熟の目的	.....110
6—1—2 取扱性の改善と腐熟プロセス	.....110
6—1—3 土壌・作物への有効性・安全性と 腐熟プロセス	.....112
6—2 腐熟の目的と腐熟度	.....115
6—2—1 取扱性の改善と腐熟度	.....116
6—2—2 土壌・作物への有効性・安全性と腐熟度	.....116
6—3 腐熟プロセスによる腐熟度の評価	.....116
要 約	.....118
謝 辞	.....120
文 献	.....121

第1章 研究背景及び研究目的

1-1 はじめに

家畜ふん尿は畜産業の産業廃棄物であるが、廃棄物と資源の両面性を持っている（押田ら，1998）。家畜ふん尿が原因の水質汚濁や悪臭問題など、年間2,500件を越す深刻な環境汚染問題が引き起こされているが（農林水産省，1998）、もう一方では家畜ふん尿は肥料資源（羽賀，1993）やエネルギー資源（前川，1996，1997）として注目されている。

家畜ふん尿などの有機資源リサイクルシステムの確立は、資源循環型社会の21世紀へ向けて、農業のキーテクノロジーのひとつに位置付けられている（羽賀，1999a）。しかし、廃棄物の資源化方法が不適切だと、資源化過程で環境汚染問題が発生したり、他の資源の浪費につながるだけでなく、新たな廃棄物を産むこともある。廃棄物を適切に処理し、環境汚染なく有効利用するために、コンポスト化（堆肥化）など、微生物の処理能力に期待するところは大きい（西尾・大畑，1998）。

農業に関係する廃棄物の多くは、生物由来の有機性廃棄物である。農業は本来的には、物質循環を基本とした環境保全型の産業であり、有機性廃棄物は作物生産用の有機資源としてリサイクルされる。ただし、生（ナマ）の廃棄物は腐敗しやすく、悪臭が強く、汚物感があり、衛生的にも好ましくない。そこで、生の廃棄物を有機資源に変換する処理技術が必要となる。古来から、コンポスト化は重要な廃棄物資源化技術である。現代において、廃棄物の発生量はより膨大かつ集約的となり、環境に優しい社会が志向される中で、コンポスト化技術の今日的意義は益々重要となり（木村・中崎，1999）、とくにコンポスト化技術の高度化と、良品質のコンポスト生産が切望されるようになった。

コンポストの肥料としての評価は、ひとつには肥料成分が基準となるが、ふたつめには有機質としての評価のために腐熟の意味が大きく、コンポストの適正な利用に際しては、腐熟の指標となる腐熟度を知ることが重要である

(Mathur *et al.*, 1993)。家畜ふんは重要なコンポスト資源となっているが(羽賀, 1997)、有機物としての腐熟度が不明確なため(原田, 1990)、品質の点で流通利用が阻害されているケースが多い。

家畜ふんのコンポスト化過程は、微生物の代謝によって発生する熱や代謝産物の変化によって複雑に推移し、腐熟プロセスは畜種や副資材の種類ならびにコンポスト化条件によって多様である。従って、腐熟度の基礎となる腐熟プロセスと腐熟度との関係を明らかにし、腐熟度の信頼性を高める必要がある。

本研究では、比較的大きな実験規模で、牛ふん及び鶏ふんのコンポスト化を副資材の種類や有無を含めて検討し、微生物による複雑な分解が行われるコンポスト化過程を、品温、全炭素、全窒素、有機物、ベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン、生物化学的酸素消費量(BOD)、水溶性の全有機炭素、全窒素、硝酸態窒素、揮発性脂肪酸、フェノールカルボン酸、さらには陽イオン交換容量やコマツナ種子の発芽率の変化などから明らかにし、腐熟プロセスと腐熟度の関係を評価した。

1-2 既往の研究

コンポストの腐熟については「腐熟とは、当該有機物を土壤に施用した場合、作物の生育に対してまったく障害性がなく、その施用により微生物にエネルギーを与えて活動を活発にさせること等により直接、間接的に地力維持と結び付き、かつ土壤環境、人間環境の悪変を招かない程度に有機物をあらかじめ腐朽させることである。そしてこの到達目標に合致したときが腐熟の終了時

(完熟)であり、この目標に到達するまでのさまざまな腐熟の程度を腐熟度という言葉であらわす。」という定義が広く知られているところである(井ノ子ら, 1982)。完熟とは、きわめて長時間のコンポスト化処理を行って有機物の大部分が分解され、ほとんど生物学的に不活性に近い状態になったものではなく、上記の定義において述べたように、コンポストがまだ十分なエネルギーを維持しながら、作物に生育障害を起こすことがなくなった時点を完熟と呼ぶべきであろう。

コンポスト生産者である畜産農家がコンポストの利用者である場合には、コンポストの品質や腐熟の見極めは、比較的簡単である。しかし、農業の専門化が進んで畜産農家と耕種農家が分離し、あるいはコンポストセンターなどが設置されて、コンポストの利用者がその製造過程に直接タッチなくなると、利用する側において腐熟の判定は困難な状況となっている。

家畜ふんは水分が多く、そのまま良質なコンポスト化を製造することは難しい。そこで、通気性の改善、水分調整、成分調整などの必要性から、様々な副資材(表1-1)を家畜ふんに混合してコンポスト化が行われている。良質コンポストの生産にとって副資材は重要な役割を果たしている。その場合、副資材の種類によって、当然、コンポストの腐熟プロセスは異なるし、とりわけ、副資材の種類あるいは混合比について不明なコンポストでは、利用者が外観のみからその腐熟度を判定することはきわめて困難である。このように、家畜ふんコンポストを製造する側においても、またそれを利用する側においても腐熟の判定は重要な問題である(原田, 1983)。

コンポストの腐熟度の判定法には、表1-2にまとめたように数多くの提案があり(原田, 1993)、各種コンポストに対する適用性も検討されている

(Bernal, M., *et al.* 1998)。しかし、表1-2に示された多くの方法は、手間がかかるもの、特殊な機器や専門的な技術を要するもの、特定な試料にしか適用

表 1 - 1 敷料および副資材の種類 (福光, 1996)

		水分%	仮比重	m ³ /ト	吸水比	pH	多孔性	単価円/kg
植 物 系	オガクズ	25~35	0.2~0.25	4~5	3.5~4.5	6~6.5	非常に多い	15~25
	木工くず	5~10	0.2~0.4	2~5	4~5		非常に多い	7~10
	モミガラ	5~15	0.2~0.3	3~5	1~2		少ない	
	粉碎モミガラ	10~15	0.4~0.5	2~2.5	4~5		非常に多い	
	バーク	40~55	0.7~0.9	1~1.5	1	7<	少ない	
	イナワラ	5~10	0.2	5~6	4~5		多い	80<
	ムギワラ	5~10	0.1	10	2~4		少ない	
	トビ粉	7~15	0.6	1.5	4~		非常に少ない	5<
	食品粕類	75~85	0.8	1~1.5	(2~3)	6~7	非常に少ない	4~9
	新聞紙 (古紙)	10			4~5		非常に少ない	5~10
鉱 物 系	ゼオライト	10~20	1.5	0.6	~2		非常に少ない	30<
	パーライト	5>	0.2	3~5	0.5		非常に少ない	100<
	バーミキュライト	5>	0.1	8~10	3~4		多い	100<
	ALC-P	8~15	0.5~0.6	1.5~2	2~3	8~9	多い	20

注) オガクズは、スギ、カラマツ、ハンノキ、ブナ、ラワンの総平均。

バークはスギ。

食品粕類は、コーヒー粕、茶粕、ビール粕など。

吸水比の測定法：ナイロンストッキングに資材を入れ、水に24時間浸漬後、

4時間以上（水滴の落下が認められなくなるまで）経過してから重量を測定。

表 1 - 2 腐熟の指標及び腐熟度判定法 (原田, 1993)

A. 微生物活動からの判定

- | | |
|-----------------|----------------|
| 1) 堆積温度 | Golueke (1972) |
| 2) BOD | 羽賀・原田 (1984) |
| 3) 酵素活性 | Goddenら (1986) |
| 4) ガス発生量 (ポリ袋法) | 吉野 (1979) |

B. 生物を用いた方法

- | | |
|-------------|------------------------|
| 1) 発芽試験 | 藤原ら (1980), 長田ら (1985) |
| 2) 幼植物試験 | 高橋 (1976), 河田 (1981) |
| 3) ミミズ試験 | 吉野 (1979) |
| 4) 花粉管生長テスト | 若沢ら (1986) |

C. 物理性からの判定

- | | |
|------------|------------|
| 1) 物体色 | 菅原ら (1979) |
| 2) 微細形態の観察 | 藤原ら (1980) |
| 3) 篩別残渣重量 | 日向 (1981) |

D. 化学性からの判定

- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| 1) C/N | Poincelot (1975), Golueke (1981) |
| 2) 水抽出物の C/N | Chanyasak・久保田 (1981) |
| 3) 還元糖割合 | 井ノ子・原田 (1979) |
| 4) アンモニア 不検出 | Spohn (1978), 森・木村 (1984) |
| 5) 硝酸イオン 検出 | 原田 (1983), Finstein (1985) |
| 6) COD | Lossin (1971) |
| 7) pH | Jannら (1960) |
| 8) EC | 日向 (1981) |
| 9) 揮発性成分 | 羽賀ら (1978) |
| 10) 遊離アミノ酸 | 原ら (1991) |
| 11) 水抽出物のゲルクロマトグラフィー | 吉田・久保田 (1979) |
| 12) CEC | 原田・井ノ子 (1980) |

E. 腐植物質による判定

- | | |
|------------------|-------------------------------|
| 1) 円形濾紙クロマトグラフィー | Hertelendy (1974), 井ノ子 (1979) |
| 2) 腐植物質含量 | Morel (1982), 渡辺・栗原 (1982) |
| 3) 沈殿部割合 | 菅原・井ノ子 (1981) |

F. 総合的判定

- | | |
|-------------|-------------------------|
| 1) 評点法 | 川辺・高野 (1979), 原田 (1983) |
| 2) 判別スコア値 | 下水汚泥資源利用協議会 (1985) |
| 3) 近赤外分光分析法 | 中谷・原田 (1994) |

できないものなど様々である。そのため、現場で簡単かつ迅速に、しかもどのような試料にも確実に適用できる方法は少ないのが現状である。したがって、コンポストの腐熟度合を実際に判定しなければならない現場では、色、臭気、水分、堆積中の最高温度、堆積期間、繰り返し回数、コマツナ発芽試験などの多様なデータを点数化し（原田，1983）、その点数の合計で総合的に評価する方法（表1-2の中のF. 総合判定 1)評点法）などが使われている。

家畜ふんコンポストの腐熟度を明らかにするためには、その基礎となる家畜ふんの腐熟プロセスを明らかにする必要がある、いくつかの研究例がみられる。しかし、家畜ふんにオガクズやモミガラなどの副資材を混合してコンポスト化することが多く、腐熟プロセスを追及するために成分分析を行っても、副資材が混合したままの成分組成の変化を解析する研究となっている例が多い。例えば、牛ふんとオガクズの混合物を9カ月間にわたって堆積コンポスト化した過程で、ヘミセルロースとセルロースはかなり分解されたが、リグニンはほとんど分解されなかった（渡辺ら，1981）。豚ふん-オガクズ混合物のコンポスト化においては、ヘミセルロースやセルロースなどの炭水化物の分解が腐熟と密接に関連していた（加藤ら，1986）。鶏ふん-オガクズ混合物を1カ月に1度繰り返しながらか月堆積コンポスト化すると、ヘミセルロースは減少するがセルロースは変化せず、さらに2カ月間推移するとセルロースが急激に分解した（藤原ら，1980）というような研究がある。これらの研究では、副資材の混合率にもよるが、副資材として利用したオガクズ中のヘミセルロース、セルロース、リグニンの分解を追跡することになってしまう。

以上のように、オガクズなど副資材を混合したコンポスト化の研究では、家畜ふんと副資材の両方の成分が混合して分析されるため、家畜ふんのみの成分変化を明らかにすることはできない。従って、家畜ふんのみの腐熟プロセスを解明する研究手法が必要とされている。

1-3 研究の目的

コンポスト利用上重要な指標となっている腐熟度を明らかにするためには、その基礎となるコンポスト化における腐熟プロセスを明らかにし、その知見に基づいて腐熟度を評価する必要がある。そこで、本研究では、家畜ふんのコンポスト化における腐熟プロセスを明らかにすることを目的とし、とくにコンポスト化原料中の副資材の影響を除き、家畜ふんのみの変化を調べるために、生物学的には分解されないパーライトを牛ふんと鶏ふんに混合してコンポスト化を行った。ここでは、牛ふんを鶏ふんの分解性の相違も明らかにできる。

コンポスト化方式については、方式の違いが腐熟プロセスに与える影響を検討する目的から、機械攪拌区と堆積区の2つの方式でコンポスト化を行った。機械攪拌と通気によって、コンポスト化に適した好気的条件が維持された場合、それが腐熟プロセスに及ぼす影響が明らかにされる。

さらに、もっとも一般的な副資材であるオガクズに家畜ふんを混合したものについても、同様に2つの方式でコンポスト化を行い、パーライト混合物と比較検討した。また、堆積区のコンポスト化については、通気性の異なる副資材による相違を調べる目的から、モミガラ及びその粉碎物を利用して牛ふんのコンポスト化を行った。モミガラは、表面が硬いケイ酸質で被われているため（石丸，1993）、吸水性が低く分解が遅い。そこで、吸水性を向上させ、分解性を高めるねらいで、粉碎して用いることがある。しかし、粉碎モミガラはもとのモミガラに比べて、仮比重が約2倍となるので、通気性が減少し、コンポスト化プロセスに影響を及ぼす。

コンポスト化における各種成分変化を分析することを主な手法とし、腐熟プロセスを調べた。まず、コンポスト化反応における温度の変化を測定するとともに、もっとも一般的成分である全炭素、全窒素、有機物（強熱減量）の経時

変化を分析した。さらに、その有機物の内容をより詳しく調べる目的から、ベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン+不溶性窒素化合物の経時変化を調べた。また、微生物によって分解されやすい有機物の消長を調べる目的から、BOD（生物化学的酸素消費量）の経時変化や酸素吸収速度の変化を調べた。

コンポスト反応にはふん中の水溶性成分が寄与している。コンポスト化反応を進行させている微生物は、水溶性成分を主に分解・代謝しているものと考えられるからである。そこで熱水抽出液中の全有機炭素（TOC）、全窒素（T-N）、アンモニウム態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、有機態窒素（Org-N）の経時変化を調べた。また、植物などに害作用の知られている揮発性脂肪酸（VFA）、フェノールカルボン酸を分析するとともに、それと関連性の高いコマツナ種子の発芽率試験を行った。

コンポスト化の進行に伴って、コンポスト粒子表面が酸化され、カルボキシル基が増加し、CEC（陽イオン交換容量）に変化が起きるものと考え、CECの経時変化を調べた。

非破壊、簡便、迅速な多成分分析法として多く利用されている近赤外分析法について、先に得られた腐熟プロセスに関する多項目のデータとの相関を求め、近赤外分析法のコンポスト品質評価法の可能性を検討した。

以上、コンポスト化方法の相違、副資材の性質、ふんの種類からみた腐熟プロセスの特徴を、各種成分変化に関する多くのデータから明らかにし、腐熟度との関係の評価する目的で本研究を行った。

第2章 牛ふんのコンポスト化における腐熟プロセス

2-1 研究の目的

比較的大きな実験規模で牛ふんのコンポスト化を行い、コンポスト化過程における品温、コンポストの全炭素、全窒素、有機物、ベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン、生物化学的酸素消費量、ならびに水溶性の全有機炭素、全窒素、硝酸態窒素、揮発性脂肪酸、フェノールカルボン酸、さらには陽イオン交換容量やコマツナ種子の発芽率の変化などから、コンポストの腐熟プロセスを明らかにする。

コンポスト化方式については、機械攪拌区と堆積区の2つ方式を用い、両方式の腐熟プロセスの相違を比較検討する。牛ふんに混合する副資材については、一般的な副資材のオガクズ区他に、生物分解性のないパーライト区を設けることによって牛ふんのみの分解を追跡する。

2-2 材料及び方法

2-2-1 コンポスト化方法

搾乳牛ふん（水分85.7%、有機物80.6%DM、全炭素40.7%DM、全窒素2.40%DM）にパーライト（水分3.7%）またはオガクズ（水分30.0%、有機物99.3%乾物）を表2-1に示すような組成で混合した。その約 1m^3 の混合物について、2通りの方法でコンポスト化実験を行い、コンポスト化方式が腐熟プロセスに与える影響を調べた（図2-1）。ひとつは強制通気を行う機械攪拌コンポスト化（以後、機械攪拌区と呼ぶ）、もうひとつは強制通気を行わない堆積コンポスト化（以後、堆積区と呼ぶ）である。

表 2 - 1 牛ふんと副資材の混合割合

Test run	Cattle waste(A)	Bulking agent (B)	B/A	Moisture
CPM (Cattle waste+Perlite+Mechanical)	480kg	Perlite 130kg	0.27	67.56%
CPP (Cattle waste+Perlite+Piling)	243kg	Perlite 67kg	0.27	67.56%
CSM (Cattle waste+Sawdust+Mechanical)	480kg	Sawdust 120kg	0.25	75.53%
CSP (Cattle waste+Sawdust+Piling)	348kg	Sawdust 87kg	0.25	75.53%

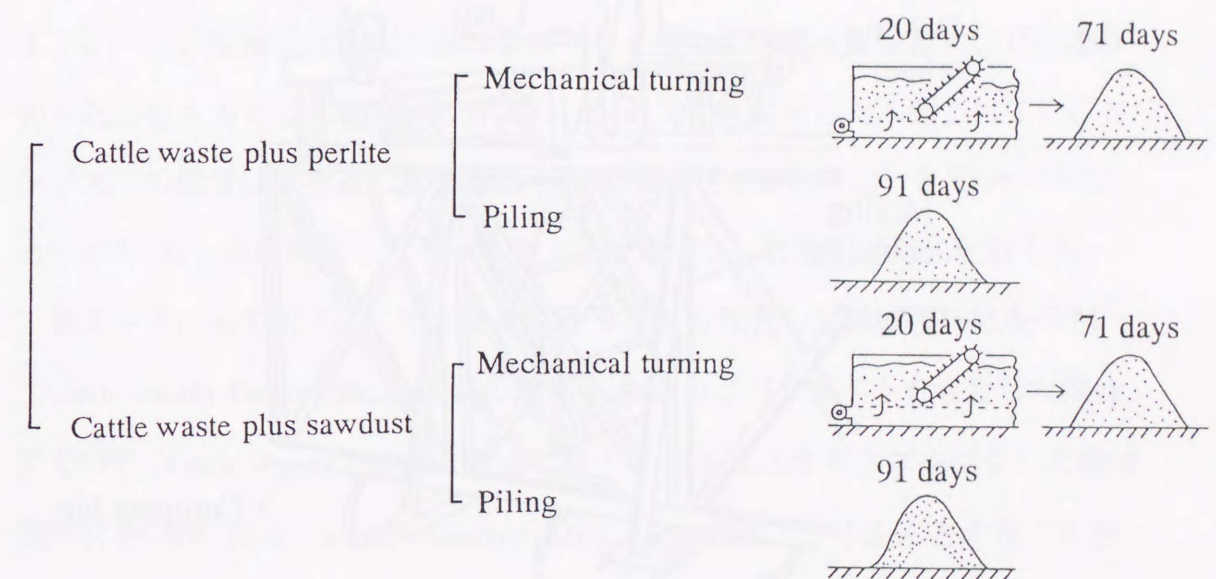


図 2 - 1 牛ふんのコンポスト化方式

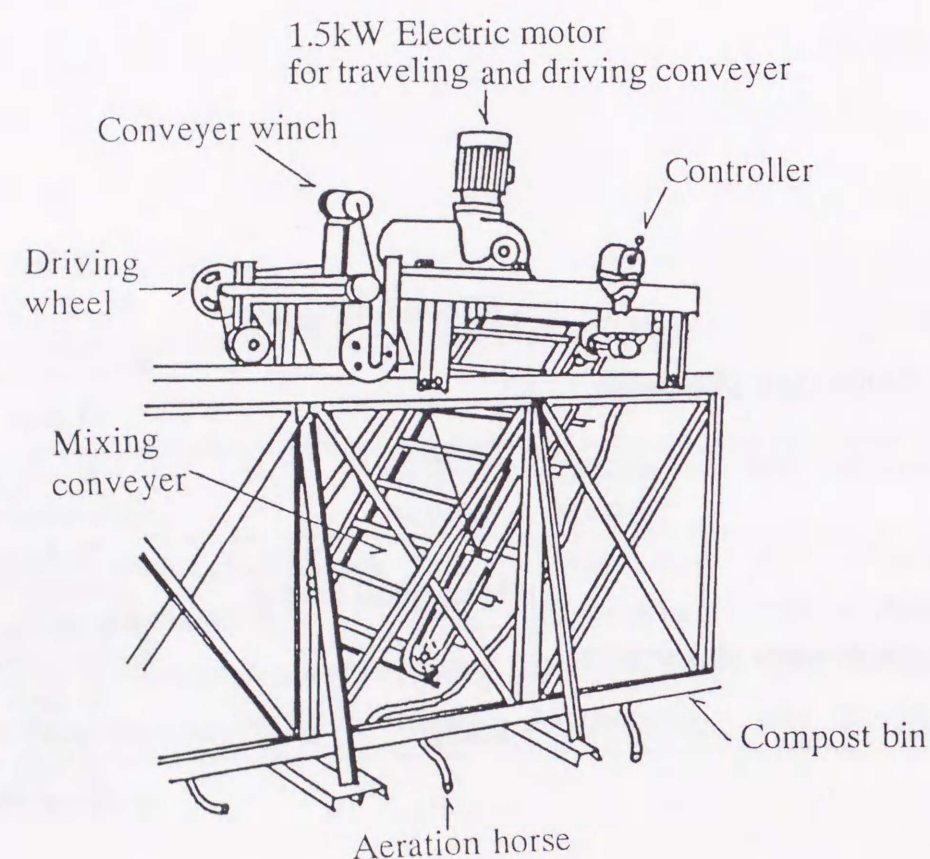


図 2-2 攪拌装置

オガクズを混合した牛ふんでは、コンポスト化過程でオガクズも分解するため、牛ふんのみの分解を把握することができない。そこで、生物分解性のないパーライトを牛ふんに混合して、牛ふんのみの分解を追跡することにした。

機械攪拌区では、図 2-2 に示すような攪拌機（コンポスト約 1m^3 用のスクープ攪拌式コンポスト化実験装置、駆動モーター 1.5kW ）を使用し、下部から強制通気（ $60\text{L}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$ ）をしながら、最初の 20 日間には 1 回/日の機械攪拌を行った。それ以降の 71 日間では、コンクリート床上に円錐状に堆積し、人力で 1 回/週の切り返しをしながら、合計 91 日間のコンポスト化を行った（図 2-1）。一方、堆積区は最初からコンクリート床上に円錐状に堆積し、1 回/週の切り返しを人力でしながら、91 日間のコンポスト化を行った（図 2-1）。コンポストの温度は、堆積した山の頂上から 20cm （上部と呼ぶ）と 50cm （下部と呼ぶ）の 2ヶ所に挿入したサーミスターで測定し、打点記録計に記録した。

表 2-1 に示すように、牛ふんとパーライトを混合した機械攪拌区を CPM（Cattle waste+ Perlite+Mechanical の略）、牛ふんとパーライトを混合した堆積区を CPP（Cattle waste+ Perlite+Piling の略）、牛ふんとオガクズを混合した機械攪拌区を CSM（Cattle waste+ Sawdust+Mechanical の略）、牛ふんとオガクズを混合した堆積区を CSP（Cattle waste+ Sawdust+Piling の略）と呼ぶ。

2-2-2 分析試料の調製

コンポストの切り返し時点で、機械攪拌装置（機械攪拌区）またはスコップ（堆積区）を用いてよく混合した後、数カ所からサンプルを採取し、さらにそれをよく混合したものから分析用サンプルを採取した。また、堆積区においては、コンポストの層位によってサンプルの性質が異なることから、切り返し時点で混合する前に、層位別の分析用サンプルも採取した。

採取したサンプルの一部はビニール袋に密閉して冷蔵庫（約5℃）に保管し、なるべく速やかに分析に供した（以下これを新鮮試料と呼ぶ）。また一部は60℃で通風乾燥し、ウィレー粉砕機（1mm）で粉砕した後、振動式粉砕機（平工 T-100）で微粉砕（0.1mm以下）して、以下の分析に供した（以下ではこれを微粉砕試料と呼ぶ）。

2-2-3 分析方法

水分及び有機物 新鮮試料を蒸発皿またはルツボに秤取し、105℃で4時間乾燥後の減量を水分とし、それを600℃で4時間強熱した後の減量を有機物（強熱減量）とした。

全炭素（T-C）と全窒素（T-N） 微粉砕試料数十mgから数百mgを精秤し、自動分析計（柳本CNコーダーMT-500）によって全炭素（T-C）と全窒素（T-N）を測定した。

有機成分 コンポスト化方式と副資材の種類の違いにより有機物の残存率に違いがみられたことから、有機物の内容をより詳しく調べるため、微粉砕試料1～2gを用い、図2-3に示す分析法（Harada *et al.*, 1981, Inoko *et al.*, 1979, Stevenson, 1965）によって有機成分を分析した。この方法によって、コンポスト中の有機成分をベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン+不溶性窒素化合物に分画することができる。

微粉砕試料1～2gを三角フラスコに秤取し、100mLのベンゼン・エタノール等量混合液を加え、リービッヒ冷却管を接続し、円形ホットプレート上で4時間煮沸抽出する。抽出濾液を冷却後、ガラス濾過器で濾過し、濾液をソックスレーフラスコに移し、溶媒を蒸発させたあとの残量をベンゼン・エタノール抽出物質とする。

ベンゼン・エタノール抽出後のガラス濾過器上の残渣を三角フラスコに移

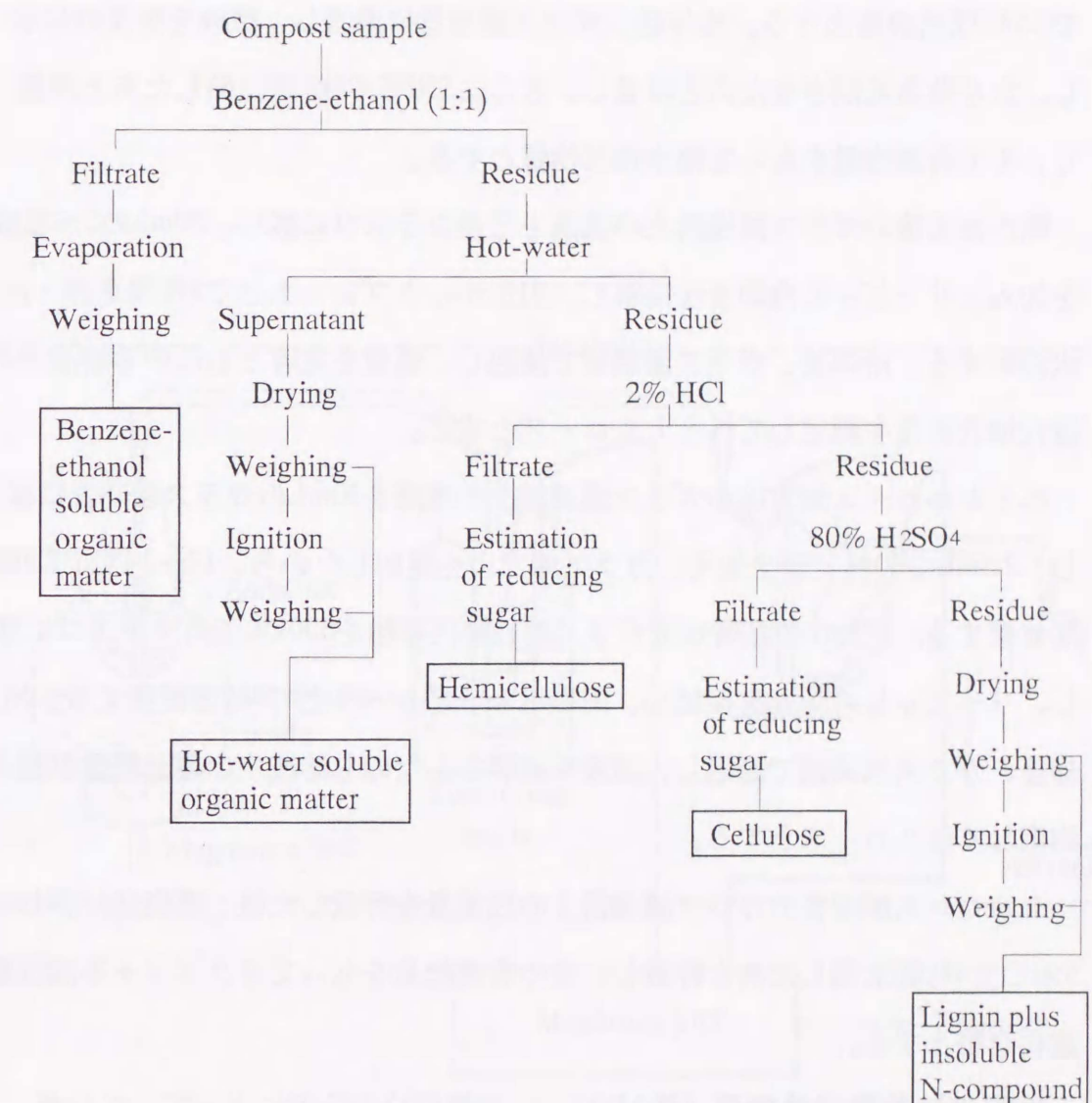


図2-3 有機成分（ベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン+不溶性窒素化合物）の分析方法の概要

し、50mLの水を加えて、リービッヒ冷却管を接続し、円形ホットプレート上で2.5時間煮沸抽出する。冷却後、ガラス濾過器で濾過し、濾液を蒸発皿に移し、水を蒸発乾固させたあと秤量し、さらに550℃で4時間加熱したあと秤量し、その有機物量をもって熱水抽出物質とする。

熱水抽出後のガラス濾過器上の残渣を三角フラスコに移し、50mLの2%塩酸を加え、リービッヒ冷却管を接続し、円形ホットプレート上で5時間煮沸・加水分解する。冷却後、ガラス濾過器で濾過し、濾液を定容としたのち溶液中の還元糖含有量を測定してヘミセルロースとする。

ヘミセルロース測定後のガラス濾過器上の残渣を50mLのガラス遠心管に移し、2.5mLの80%硫酸を加え、ガラス棒でよく混和したのち、12~14℃で2.5時間放置する。175mLの蒸留水でガラス遠心管内容物を500mL三角フラスコに移し、リービッヒ冷却管を接続し、円形ホットプレート上で5時間煮沸する。冷却後、ガラス濾過器で濾過し、濾液を定容としたのち溶液中の還元糖含有量を測定してセルロースとする。

セルロース測定後のガラス濾過器上の残渣量を秤量した後、蒸発皿に移し550℃で4時間加熱したあと秤量し、その有機物量をもってリグニン+不溶性窒素化合物とする。

生物化学的酸素消費量 (BOD) 有機成分の分析によって、ベンゼン・エタノール抽出物質のようにコンポスト化初期に急激に減少する成分がみられ、微生物によって分解されやすい有機物 (易分解性有機物) の存在が示唆された。そこで、微生物によって分解されやすい代表的な物質である生物化学的酸素消費量 (BOD) の変化を調べた。BODの測定方法はクーロメーター法 (図2-4) によった (下水汚泥資源利用協議会, 1983)。乾物相当で約3gの新鮮試料を300mLフラン瓶に秤取し、水分量が300mLになるように蒸留水を添加し、20℃の恒温室内でこの懸濁試料を攪拌・培養しながら酸素吸収量を自動

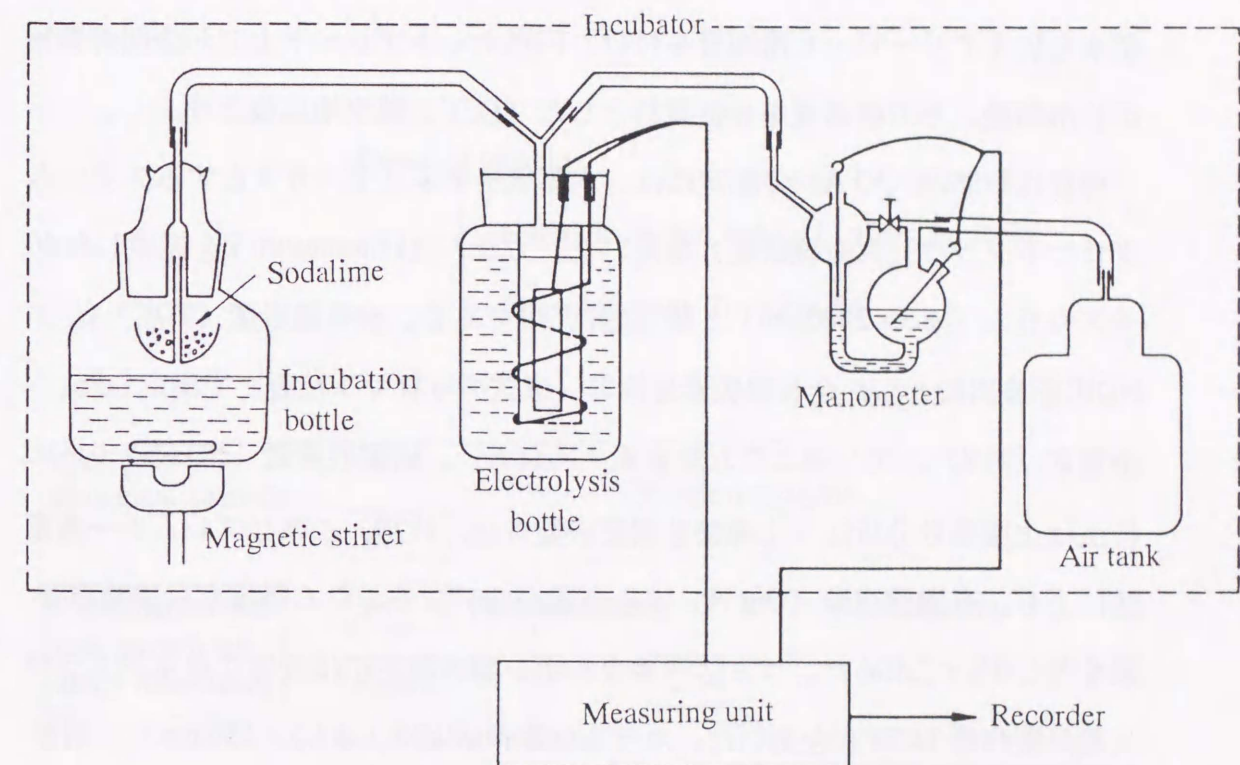


図2-4 BOD測定装置 (クーロメーター)
(下水汚泥資源利用協議会, 1983)

測定した。5日間の酸素吸収量 (mgO₂/gDM) をもってBODとした。

水溶性成分 コンポスト化反応を進行させている微生物にとって、易分解性有機物としてのBODの重要性が示されたが、腐熟プロセスとの関係においてその他の水溶性窒素・炭素化合物も重要である。そこで、図2-5に示すとおりコンポスト試料の熱水抽出液について水溶性成分の分析を行った。水溶性成分の抽出法は、微粉碎試料数gを300mL三角フラスコに秤取し、20倍量の蒸留水を加えてリービッヒ冷却管を付け、円形ホットプレート上で30分間沸騰抽出し冷却後、その濾過液を分析試料とした（以下、熱水抽出液と呼ぶ）。

揮発性脂肪酸 (VFA) の測定には、水蒸気をキャリアーガスとするスチームクロマトグラフ (大倉理研製) を用いた。カラムはChromosorb Pを充填したガラスカラム (φ3×2000mm)、検出器はFIDである。全有機炭素 (TOC) はNDIRを検出器とした全有機炭素分析計 (東芝ベックマン社製) で測定した。全窒素 (T-N)、アンモニウム態窒素 (NH₄-N)、硝酸態窒素 (NO₃-N) の分析法は土壌養分分析法 (土壌養分測定法委員会, 1970) に準じブレムナー蒸留法により、有機態窒素 (Org-N) は全窒素からアンモニウム態窒素と硝酸態窒素を差し引いて求めた。フェノールカルボン酸の測定には液体クロマトグラフ (島津製作所 LC2F) を用いた。カラムはZorbaxODS (φ4.5×150mm)、溶離液は水-酢酸-ブタノール混合液 (混合比は350:1:10)、流速は1mL/min、検出器はUV検出器 (270nm) である。p-ヒドロキシ安息香酸、バニリン酸、p-クマル酸、フェルラ酸、安息香酸のクロマトグラム上の保持時間は各々5.57、6.29、12.00、13.46、24.87分であり (図2-6)、各物質ピーク面積をもとに標準検量線を作成した。この検量線を用い、熱水抽出液のクロマトグラム上の該当ピーク面積から、サンプルのフェノールカルボン酸含有量を算出した。

コマツナ種子の発芽試験 先の試験において、熱水抽出液中にフェノールカルボン酸などの植物生育阻害物質が検出されたことから、コンポスト抽出

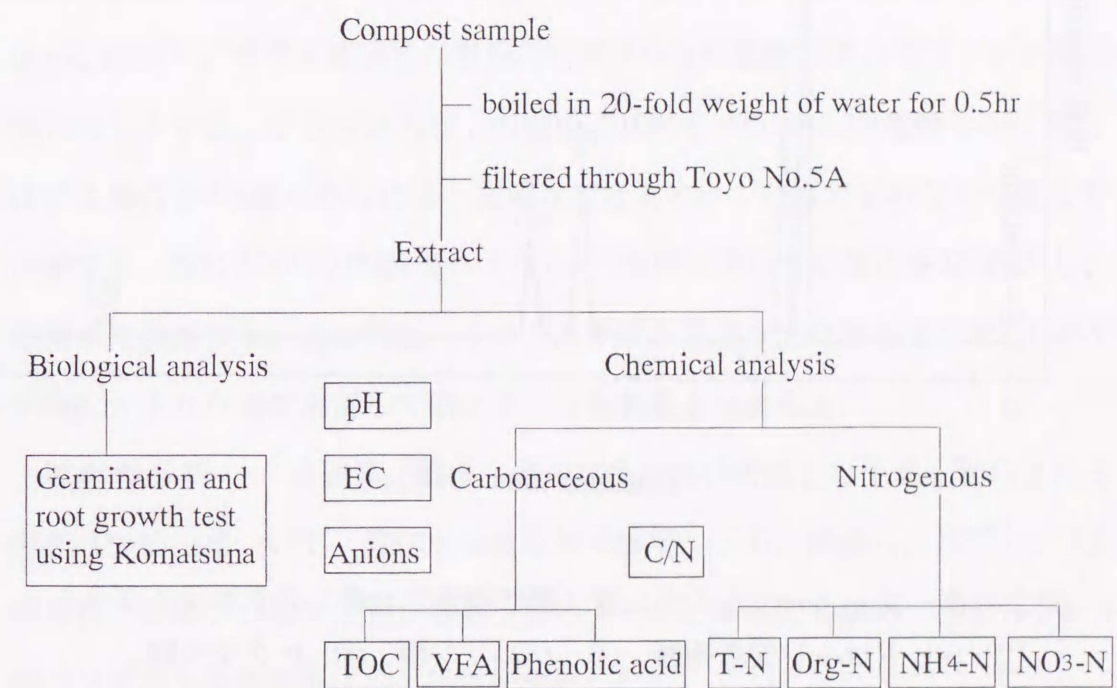


図2-5 水溶性成分の抽出法と分析項目

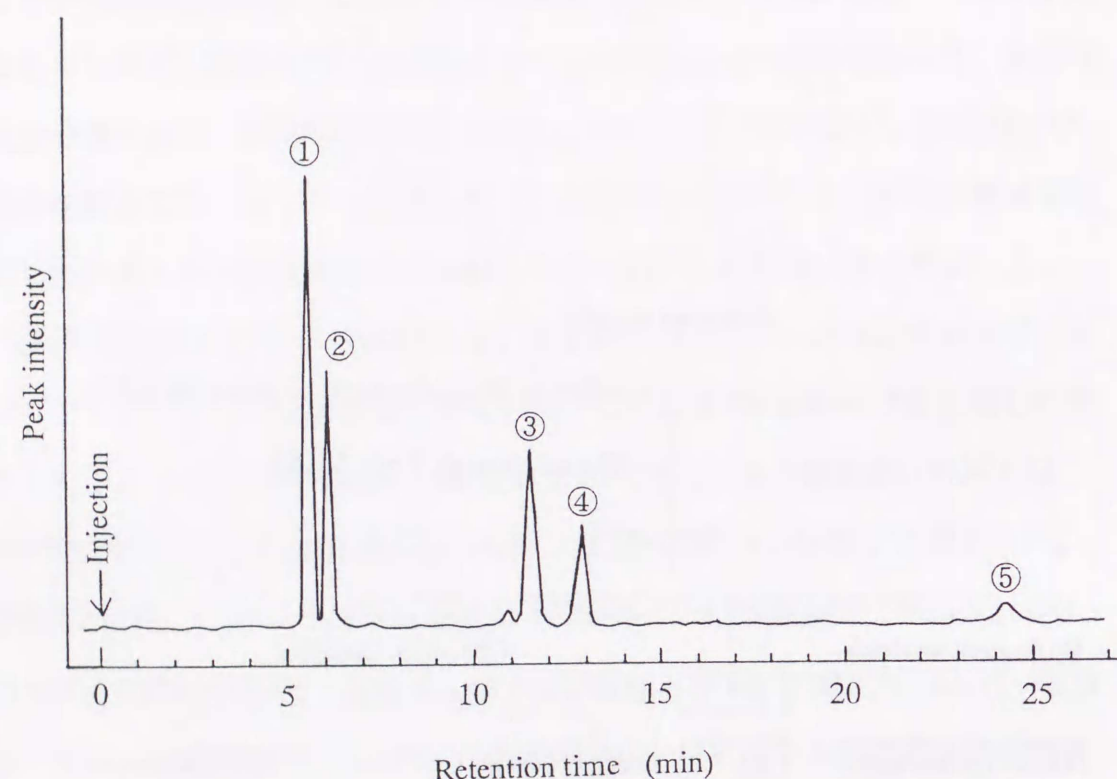


図 2-6 フェノールカルボン酸（標準物質混合液）のクロマトグラム
 ①：p-ヒドロキシ安息香酸、②：バニリン酸、③：p-クマル酸、
 ④：フェルラ酸、⑤：安息香酸

液を用いてコマツナ種子の発芽試験を行った。発芽試験方法は、10mLの熱水抽出液をガーゼを敷いたシャーレに注ぎ、50粒のコマツナの種子を播種し、20℃の温度条件で27時間後に発芽した数を計った。そして蒸留水を用いた発芽試験結果を100%とし、それに対する割合を発芽率で示した。

陽イオン交換容量（CEC） CEC（陽イオン交換容量）は肥料成分を保持する能力に関係し、コンポストの腐熟にともなって増加することが知られている（Harada and Inoko, 1980）。そこで、コンポスト化の進行に伴うCECの経時変化を調べた。CECの測定法は図 2-7 に示すとおりである（Harada and Inoko, 1980）。ガラス濾過器に微粉碎試料200mg程度を秤取してウィット濾過器にセットする。ガラス濾過器上の微粉碎試料を25mLの0.2N塩酸で20分間洗浄する操作を2回繰り返した後、蒸留水で塩素イオンが検出されなくなるまで洗浄する。次に25mLの1N酢酸バリウムで1時間で洗浄する操作を2回繰り返し、蒸留水で洗浄する。この酢酸バリウム洗浄液と蒸留水洗浄液を合わせ、0.05N水酸化ナトリウムで滴定して陽イオン交換容量を求める。

近赤外分析 非破壊、簡便、迅速な多成分分析法として多く利用される近赤外分析法について（農林水産省草地試験場, 1987, 浅井ら, 1993）、先に得られた腐熟プロセスに関する多項目のデータとの相関を求め、近赤外分析法のコンポスト品質評価法の可能性を検討した。

近赤外分析にはネオテック6250を用いた。微粉碎試料を専用セルに充填し、波長1100～2500nmの範囲で2nm間隔で近赤外拡散反射率を測定した。得られた原スペクトルから装置に附属のソフトウェアにより二次微分スペクトルを求め、各項目について重回帰式による検量線を作成した。全炭素、全窒素、粗灰分については、全試料62点から、無作為に40点を抽出し、検量線作成用試料とし、残りの22点を検量線検証用試料とした。その他の項目については試料48点中の30点を検量線作成用試料とし、残りの18点を検量線検証用試料とした。

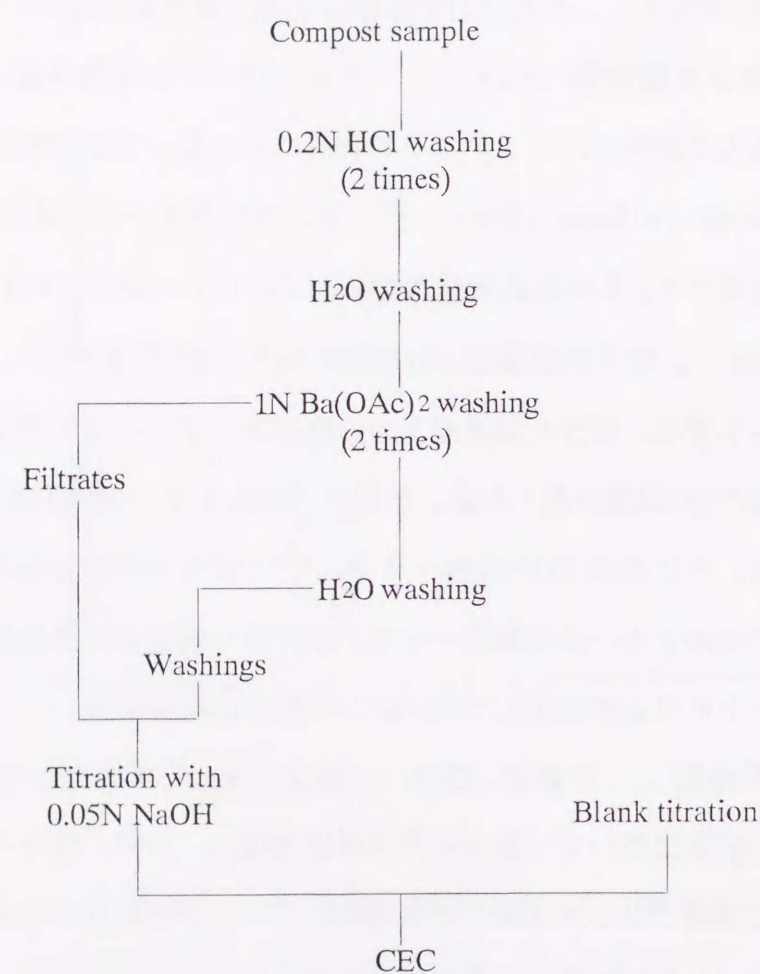


図 2-7 陽イオン交換容量 (CEC) の測定方法 (Harada and Inoko, 1980)

2-3 結果及び考察

2-3-1 コンポスト化における品温の変化

図 2-8 に示すように、機械攪拌区 (CPM と CSM) の上部では、24 時間以内に 55 から 70℃ に上昇し、1 回/日の攪拌によって温度の上下を繰り返しながら高温に達することができた。下部はやや温度が低かったが、これは強制通気によって冷却されたものと考えられる。コンポスト化開始 2~3 週間で温度の上昇が鈍くなり、4 週間くらいでほぼ周囲の温度と近くなった。さらに、11 週から最終の 13 週に達すると、コンポストからの発熱はみられず、周囲の温度と同じになった。

堆積区 (CPP と CSP) は、最高温度に達するのに 2~3 日を要した。パーライト混合区 (CPP) が 70℃ に達したのに対し、オガクズ混合区 (CSP) は 60℃ くらいまでしか上昇しなかった。このように、機械攪拌区のほうが堆積区よりも温度上昇が早く、最高温度も高かった。コンポスト化を進行させるための基本的な条件として適正な通気による好気性条件の実現は重要である (木村, 1999a)。機械攪拌区において強制通気と 1 回/日の切り返しを行ったことが、コンポスト化に適した好気性条件を作り、早い温度上昇と高温を達成させたことは明らかである。

一方、副資材別に比較すると、パーライト混合区の方がオガクズ混合区よりも温度上昇が早く、最高温度も高かった。これは、パーライトのほうがオガクズよりも、容積重が若干低く (中央畜産会, 1987, 福光, 1996)、コンポストの通気性の改善度が幾分高いものと考えられる。パーライト混合区においても、一般的なオガクズ混合区と比較して優るとも劣らない順調なコンポスト化が進行している。したがって、このようなパーライト混合区における各種成分の変化を調べることによって、家畜ふんのコンポスト化過程における腐熟プロ

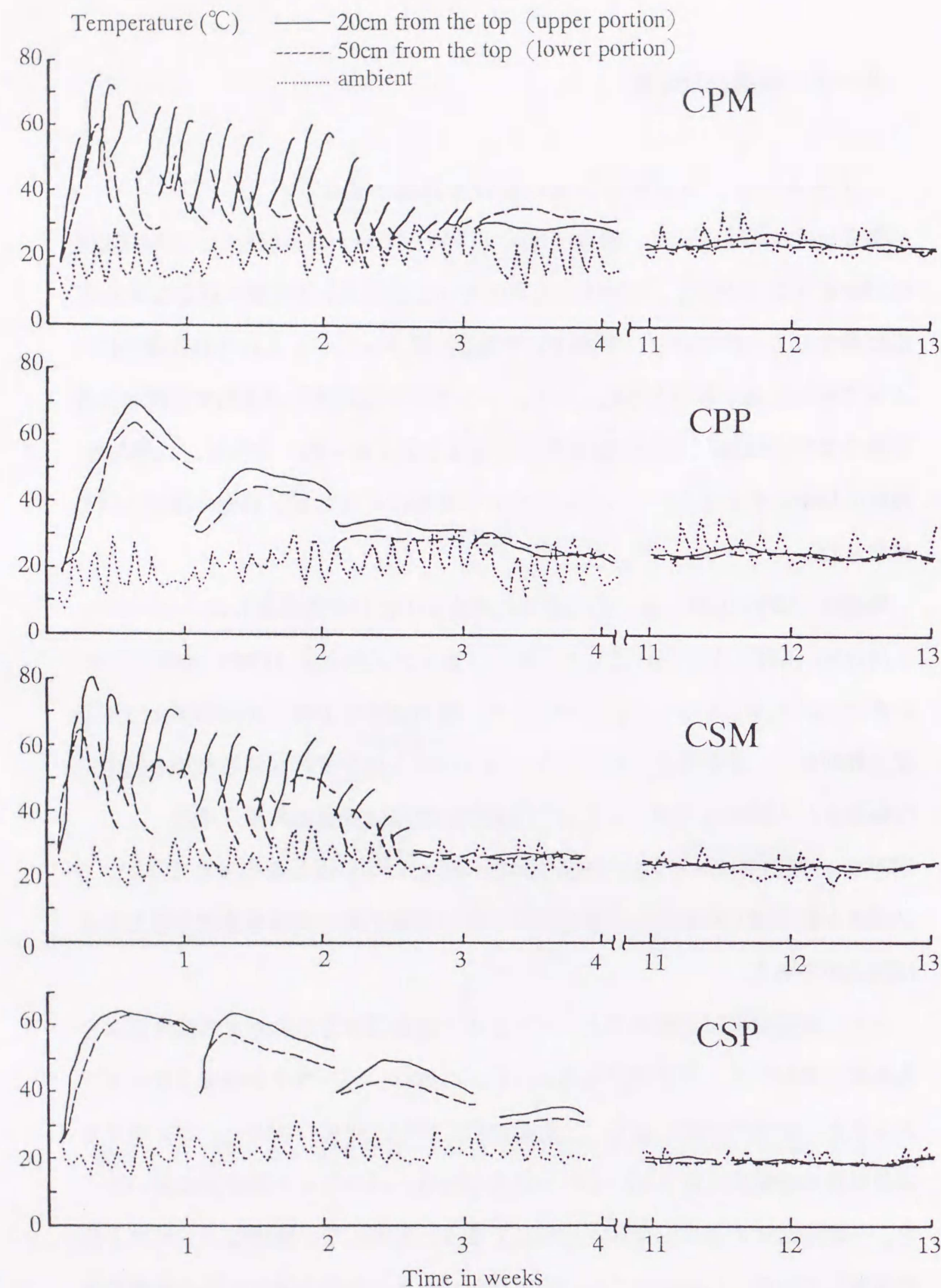


図 2-8 牛ふんのコンポスト化過程における温度の変化

セスを研究する上で、副資材の影響を除き家畜ふんのみの変化を知ることができる。

2-3-2 全炭素、全窒素、有機物の変化

図 2-9 に機械攪拌区のコンポスト化過程における灰分、全炭素 (T-C)、全窒素 (T-N)、C/N 比の変化を示す。コンポスト化が開始されると、T-C と C/N 比は減少し、灰分と T-N は増加し、約 5 週間でどの成分もほぼ一定となった。有機物の分解に伴って、見掛け上、灰分は増加しているが、実際にはほとんど増減がないはずである。

そこで、灰分は一定とし、コンポスト開始時点の有機物量を 100 として、分解されないで残っている有機物の割合である残存率 (Residual rate) を計算し、図 2-10 に示した。パーライト混合区の場合、機械攪拌区 (CPM) でも、堆積区 (CPP) でもほとんど同じ動きを示した。有機物の分解はやはり約 5 週間で終り、最終的に約 50% の有機物が分解されたことが分かる。

それに対し、オガクズ混合区では、機械攪拌区 (CSM) と堆積区 (CSP) で有機物の分解に差がみられた。堆積区では残存率が終始高い状態で推移し、機械攪拌区に比べ有機物の分解が進んでいないことが明らかになった。機械攪拌と強制通気がコンポスト化を進行させる効果があり、堆積区よりも有機物の分解が進んだものと考えられる。さらに、パーライトとオガクズを比較すると、パーライト混合区の方が分解が進行する傾向がみられた。これは、前述のコンポストの温度の変化と密接に関連している。すなわち、堆積区よりも温度上昇が早く、最高温度も高かった機械攪拌区のほうが、有機物の分解がより進む結果となった。

図 2-10 に示した 4 種類の分解曲線は、つぎのような $y=Ae^{kx}+B$ の式で表すことができた。

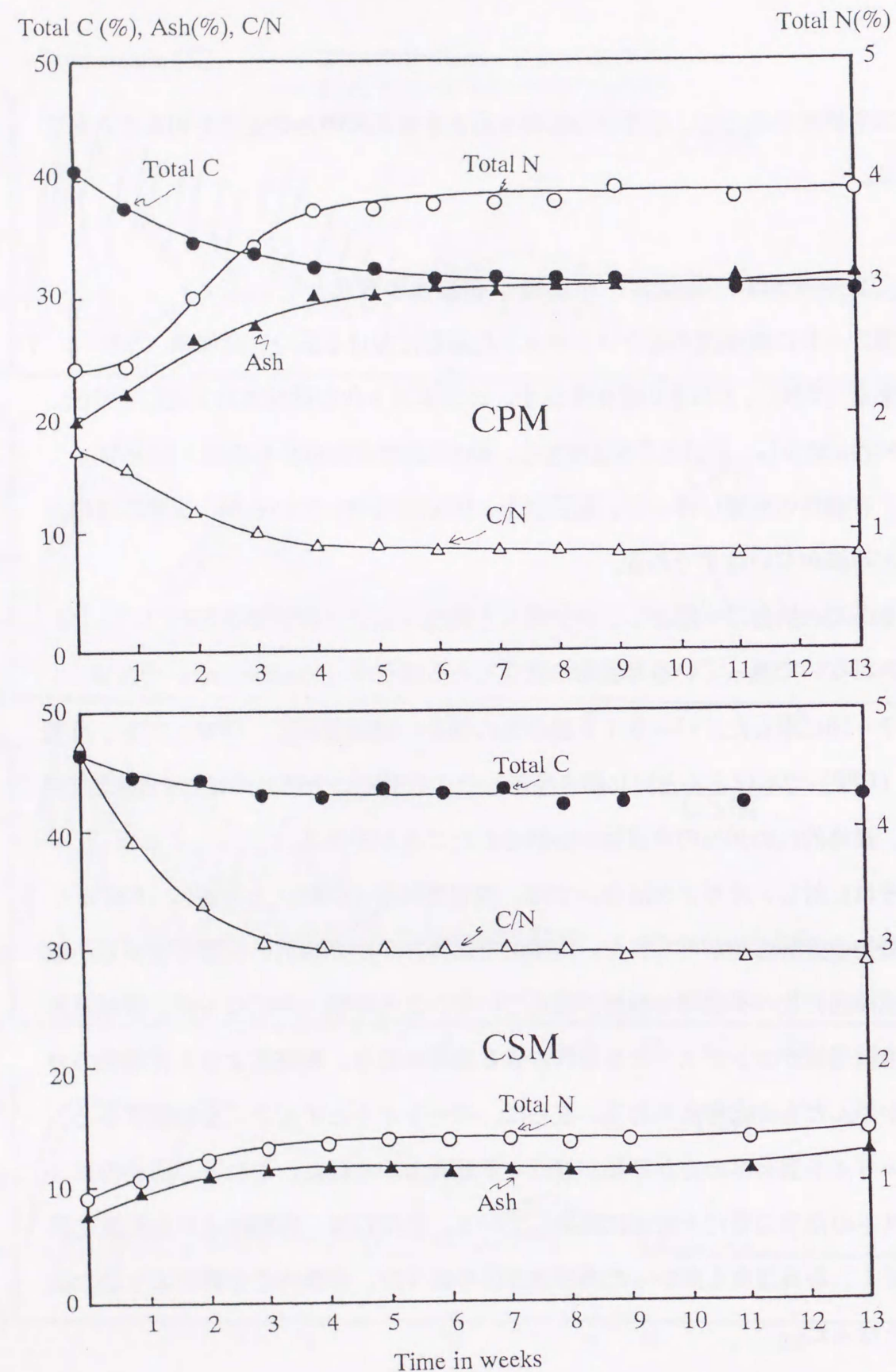


図 2-9 機械攪拌区 (CPMとCSM) の牛ふんコンポスト化過程における灰分、全炭素、全窒素、C/N比の変化

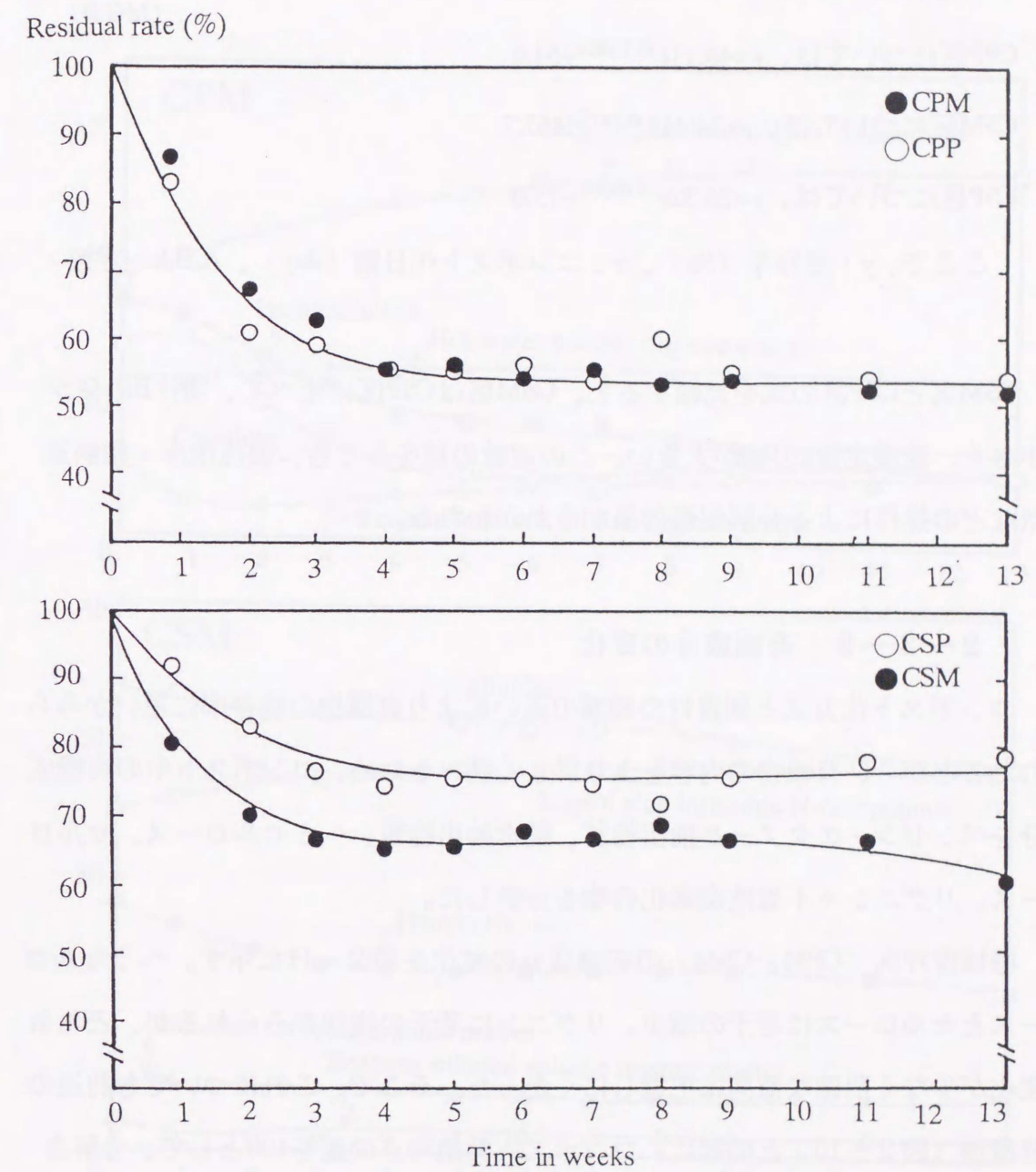


図 2-10 牛ふんコンポスト化過程における有機物の残存率の変化

CPM区については、 $y=49.02e^{-0.0775x}+52.3$

CPP区については、 $y=46.71e^{-0.1040x}+54.8$

CSM区については、 $y=34.41e^{-0.1472x}+65.7$

CSP区については、 $y=26.32e^{-0.0936x}+75.0$

ここで、 y : 残存率(%)、 x : コンポスト化日数(day)、 A, B, k : 定数

CSM区とCSP区の式を比較すると、CSM区はCSP区に比べて、切片 B の値が小さく、速度定数 k の値が大きい。この定数の値をみても、機械撹拌・強制通気などの操作による分解促進効果がうかがわれる。

2-3-3 有機成分の変化

コンポスト化方式と副資材の種類の違いにより有機物の残存率に違いがみられたことから、有機物の内容をより詳しく調べるため、コンポスト中の有機成分をベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン+不溶性窒素化合物を分析した。

機械撹拌区(CPMとCSM)の有機成分の変化を図2-11に示す。ヘミセルロースとセルロースに若干の減少、リグニンに若干の増加がみられるが、どれも変化が少なく明確な傾向は把握しにくかった。そこで、これについても前述の有機物(図2-10)と同様に、コンポスト開始時点の量を100として、分解されないで残っている割合である残存率で表すことにした(図2-12)。

図2-12において、どの有機成分も最初から減少しているが、特に最初の2~3週間でベンゼン・エタノール抽出物質が急激に減少していた。ベンゼン・エタノール抽出物質は、微生物に分解されやすい物質で、コンポスト化初期に急激に分解される物質と考えられる。また、CPM区においてベンゼン・エタノール

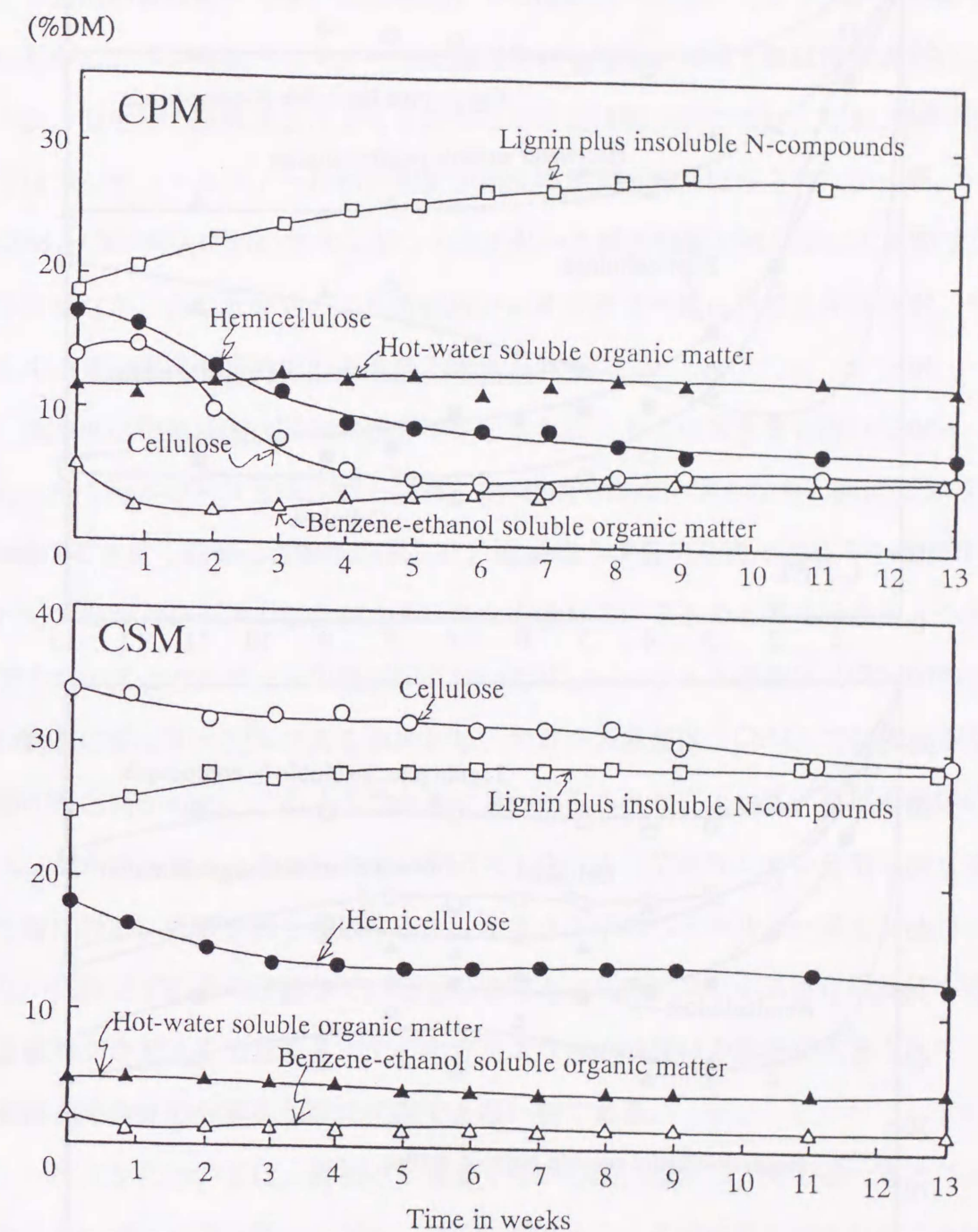


図2-11 機械撹拌区(CPMとCSM)の牛ふんコンポスト化過程における有機成分含有量の変化

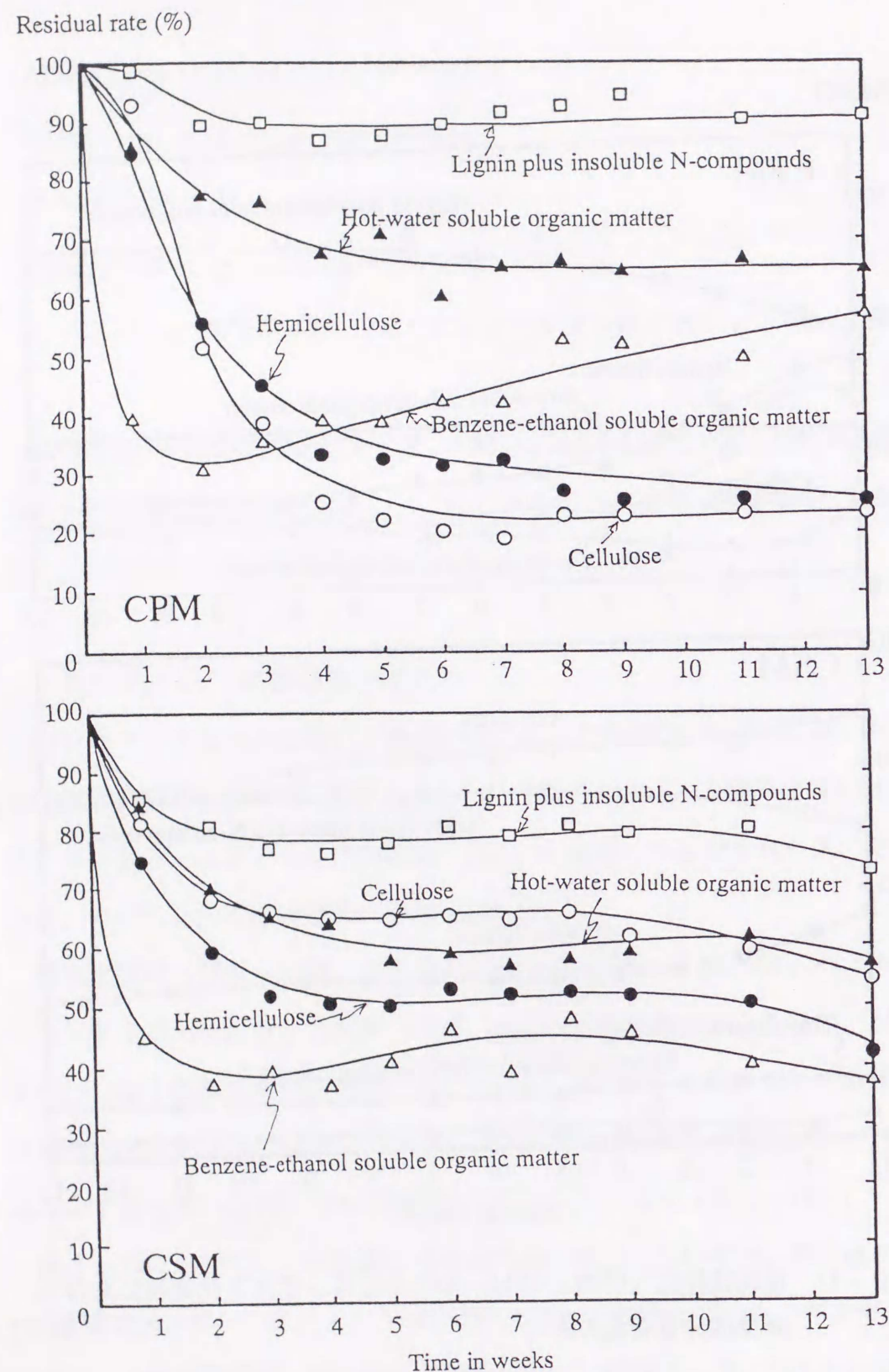


図 2-12 機械攪拌区 (CPMとCSM) の牛ふんコンポスト化過程における有機成分残存率の変化

ール抽出物質は後半でまた再度増加する傾向が見られた。コンポスト化の後半において、ベンゼン・エタノールに抽出される物質が生成または再合成されたのか、微生物の菌体成分によるものなのか理由は明らかでない。なお、CSM区ではベンゼン・エタノール抽出物質が再度増加する傾向はみられなかった。CPMとCSM両区においてベンゼン・エタノール抽出物質の残存率に大きな差がみられなかったことから、この有機成分はオガクズ中にはあまり存在せず、牛ふん由来が大半を占めているものと考えられる。

熱水抽出物質は60~70%の残存率を示したが、とくに大きな特徴はなかった。ヘミセルロースとセルロースは、約5週間でほぼ一定となり、前述の有機物やT-Cと良く近似した動きを示した。有機物や炭素化合物に占めるヘミセルロースとセルロースの割合が大きいことを示しているものと考えられる。ヘミセルロースとセルロースの残存率については、パーライト添加区 (CPM) の方が顕著に低く20~30%であるのに対し、オガクズ添加区 (CSM) では残存率が約60%と高かった。このような大きな違いがみられたことから、牛ふん自体のヘミセルロースとセルロースはコンポスト化によって80%くらい分解してしまうのに対し、オガクズを添加すると、オガクズ中のヘミセルロースとセルロースが分解せずに多く残存しているものと考えられる。コンポスト化過程における腐熟プロセスを追及する上で、オガクズなどの副資材の影響が大きく出て、家畜ふん自体の分解を明確に把握できない例である。

リグニンについては、最初の3週間くらいの間に減少し、その後一定となった。コンポスト化初期にリグニンの分解が起きている可能性が示されたことは興味深い。パーライト添加区 (CPM) のリグニンの残存率が90%であるのに対し、オガクズ添加区 (CSM) では80%であった。図2-12からみて、オガクズ添加区のほうがリグニン含有量が高いことから、オガクズ中に多く含まれるリグニンが多く分解することによって、みかけ上オガクズ添加区の分解率が高く

なったものと考えられる。

なおデータは示さないが、すべての有機成分について堆積区の変化は機械攪拌区に比べ小さいものであった。

2-3-4 生物化学的酸素消費量 (BOD) の変化

有機成分の分析によって、ベンゼン・エタノール抽出物質のようにコンポスト化初期に急激に減少する成分がみられ、微生物によって分解されやすい有機物 (易分解性有機物) の存在が示唆された。そこで、微生物によって分解されやすい代表的な物質である生物化学的酸素消費量 (BOD) の変化を調べた。

牛ふんパーライト混合区 (CPP と CPM) のコンポスト化過程における BOD の変化を T-C と比較して図 2-13 に示す。BOD はコンポスト化開始直後から急激に低下し、15~20 日くらいではほぼ一定となった。T-C が一定となるのは 40~50 日であるから、それに比較して BOD の減少がコンポスト化初期に起きたことがわかる。このことは、BOD がふん中の易分解性有機物の指標であることを裏付けており、コンポスト化初期にコンポスト中の微生物によって易分解性有機物の分解が急激に起こっていることが考えられる。また、前述のベンゼン・エタノール抽出物質と BOD はかなり近似した有機物であることが推察できる。ただし、CPM 区におけるベンゼン・エタノール抽出物質については、コンポスト化後期に再度増加する傾向がみられたが、BOD については再度増加する傾向はみられなかった。このことから、ベンゼン・エタノール抽出物質と BOD 物質は、易分解性有機物という点では近似しているが、他の点では異なる物質と考えられる。恐らく、コンポスト化後期に増殖した糸状菌などの微生物の菌体脂質などがベンゼン・エタノールに抽出され、ベンゼン・エタノール抽出物質が増加したようにみえたものと考察しているが、確かなことは不明である。

牛ふんパーライト混合区のコンポスト化過程における各試料について、BOD

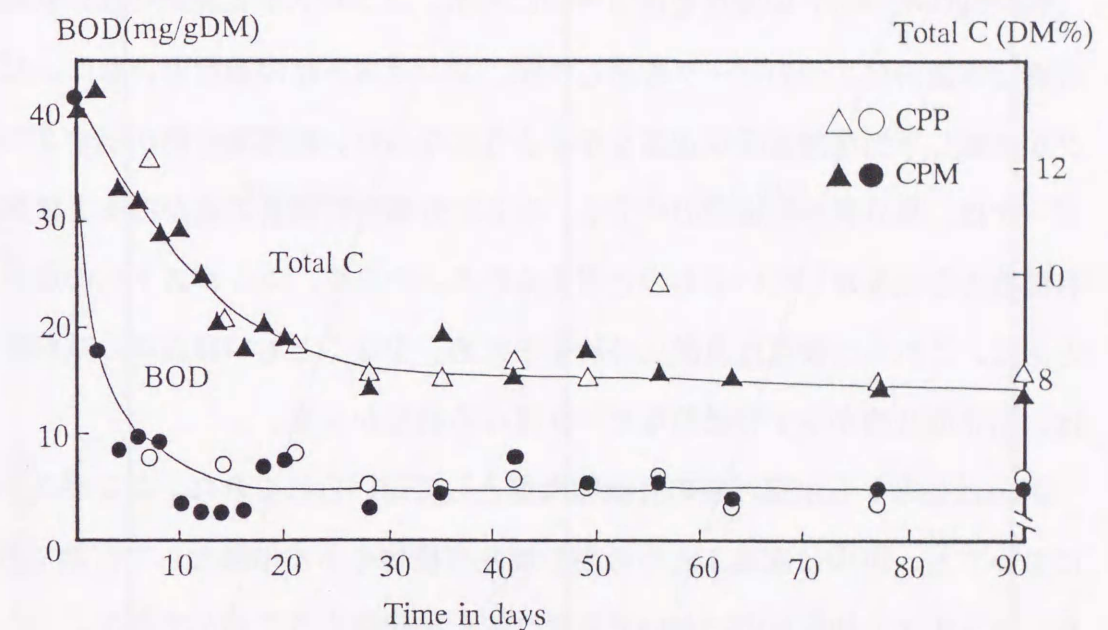


図 2-13 牛ふんパーライト混合区 (CPM と CPP) の BOD と T-C の変化

測定時に記録された酸素吸収曲線の変化を図2-14に示す。コンポスト化開始時点の初発混合物の吸収曲線の勾配は急であり、とくに培養初期にその勾配は急であり、培養後半ではややゆるやかな曲線型の酸素吸収を示した。コンポストの進行とともに、勾配が緩く直線型の酸素吸収になっていった。そこで、各コンポスト試料の酸素の吸収速度をより明らかにするため、酸素吸収速度 ($\text{mgO}_2/\text{gDM} \cdot \text{day}$) の変化を図2-15に示す。コンポスト化開始時点の初発混合物は特徴的な2つのピークを示したが、コンポスト化の進行とともに、ピークが消滅し平坦な酸素吸収速度を示すようになった。初発混合物が示す2つのピークは、易分解性有機物の中でも、さらに分解性に難易の差がある2種類の有機物の存在を示しているものと考えられる。そして、コンポスト化の進行とともに、これらの物質は急激に分解するため、少なくとも14日以降の試料では、初発混合物が示す特徴的なピークはみられなかった。

BODは従来から水質汚濁の有機物指標として用いられてきた。コンポスト化においても、BODは家畜ふん中の易分解性有機物を示す指標として有効であり、コンポスト初期反応において急激な変化を観察することができた。

2-3-5 水溶性成分の変化

コンポスト化反応はコンポスト表面に存在する微生物によって進行しているが、微生物は水溶液中の化学成分を変化させている。したがって、コンポスト中の水溶性成分の変化を調べることは、コンポスト化反応を知る上で重要である。

VFAの変化 パーライト混合区 (CPMとCPP) のVFAの変化を図2-16に示す。パーライト混合区では、機械攪拌区も堆積区もほとんど同じ変化を示した。CPMとCPPの両方とも、コンポスト化開始時点の水溶性VFAとして酢酸、プロピオン酸、安息香酸、イソ酪酸、n-酪酸が含まれており、ほとんどが

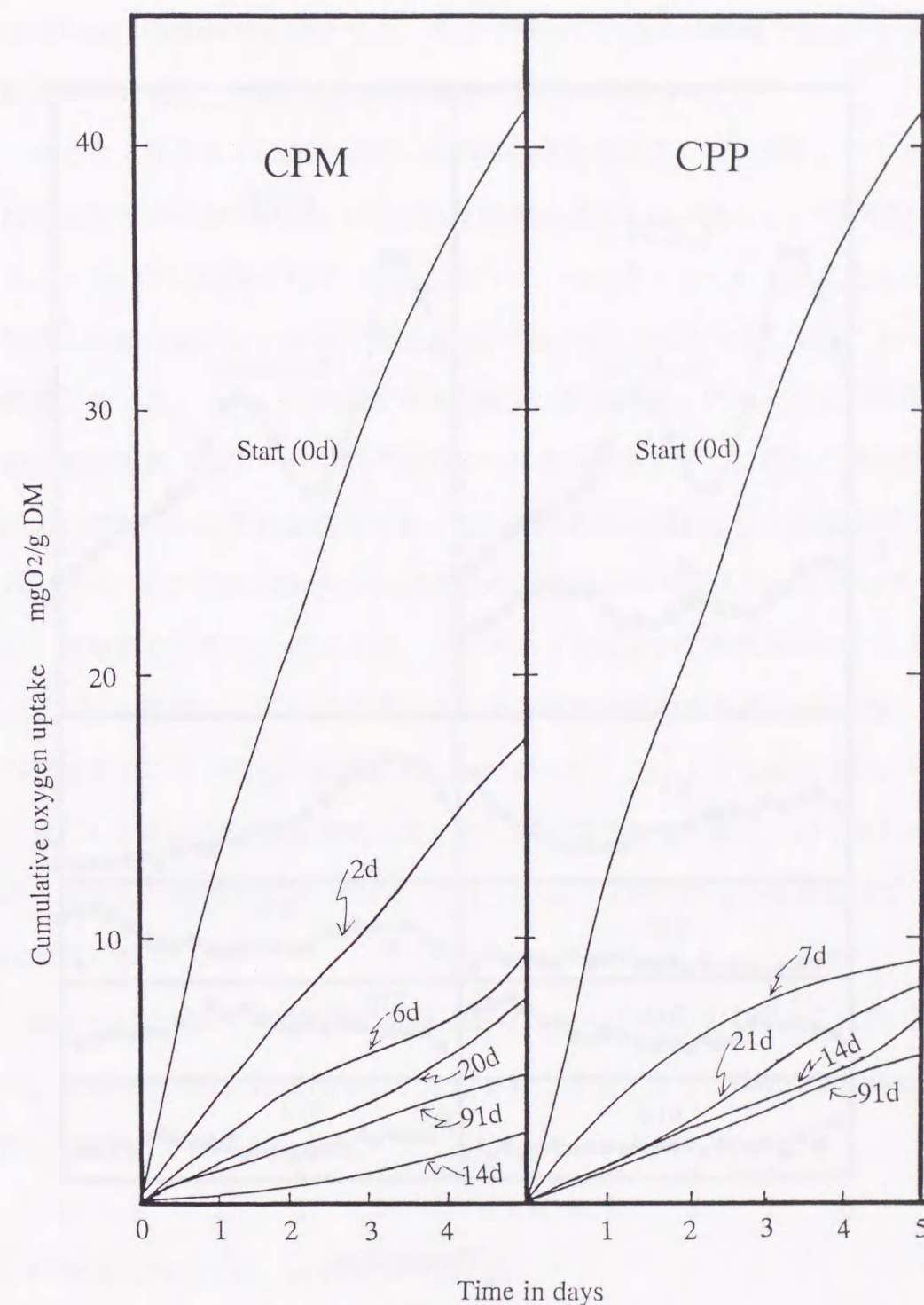


図2-14 牛ふん-パーライト混合区 (CPMとCPP) のコンポスト化過程における各試料の酸素吸収曲線の形状の変化

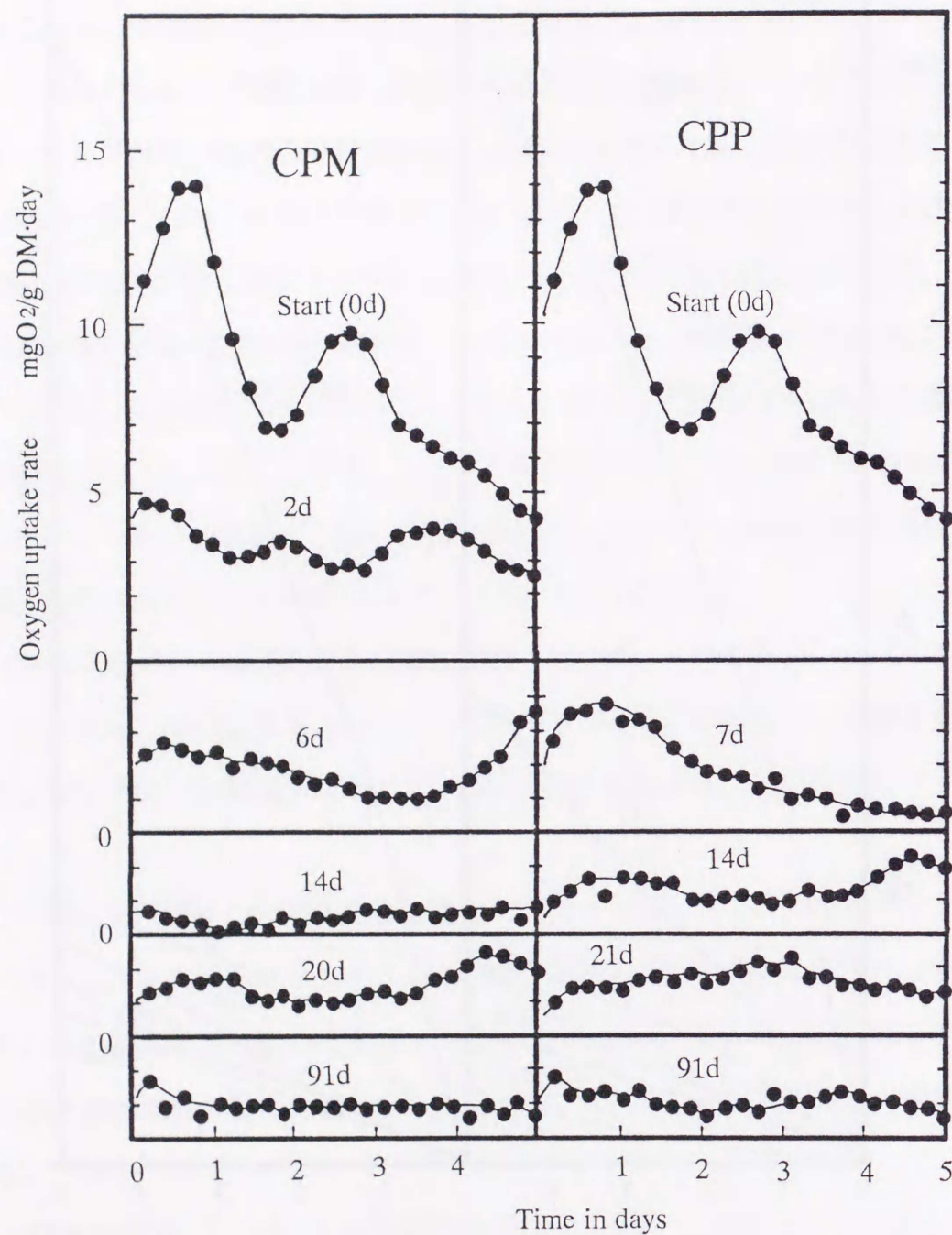


図 2-15 牛ふん-パーライト混合区 (CPMとCPP) のコンポスト化過程における各試料の酸素吸収速度の変化

酢酸であった。コンポスト化の進行にともなってVFAは急激に減少し、40日でほぼ10mg/100gDMで一定となり、そこで残っているのは酢酸であった。減少曲線はBODに近似し、易分解性有機物との関連が示唆される。

オガクズ混合区 (CSMとCSP) のVFAの変化を図 2-17に示す。コンポスト化開始時点の水溶性VFAとしてやはり酢酸がほとんどであった。CSM区はパーライト混合区 (CPMとCPP) と同じように、コンポスト化の進行にともなってVFAは急激に減少し、40日でほぼ10mg/100gDMで一定となり、残っているのは酢酸であった。一方、CSP区はVFAの減少が緩慢であった。とくに、一週間目の堆積物下部 (図 2-17中CSPのbottom of the pileを示す) に現れた嫌気性部分においてはVFAの蓄積が顕著であった。この嫌気性部分には、酢酸が827mg/100gDM、プロピオン酸が137mg/100gDM含まれ、BODの3,213mg/100gDMと高く、酸味臭がした。このように、コンポスト化において嫌気性部分ができる、VFAが蓄積し、BODに代表される易分解性有機物含有量が高くなり、腐熟が遅延することが明らかになった。したがって、このような嫌気性部分を発現させないためには、強制通気と切り返しが有効であり、事実、同じ原料をコンポスト化した機械攪拌区 (CSM) ではそのような嫌気性部分は発現せず、VFAは順調に減少した。

図 2-16と 2-17の4種類の分解曲線は、 $y=Ae^{kx}+B$ の式で表すことができた。CPM区とCPP区はほぼ等しい定数をもつ曲線となり、CSPにおける速度定数kの値がとくに小さかった。

$$\text{CPM区については、} y=220e^{-0.208x}+12.03$$

$$\text{CPP区については、} y=221e^{-0.1776x}+15.00$$

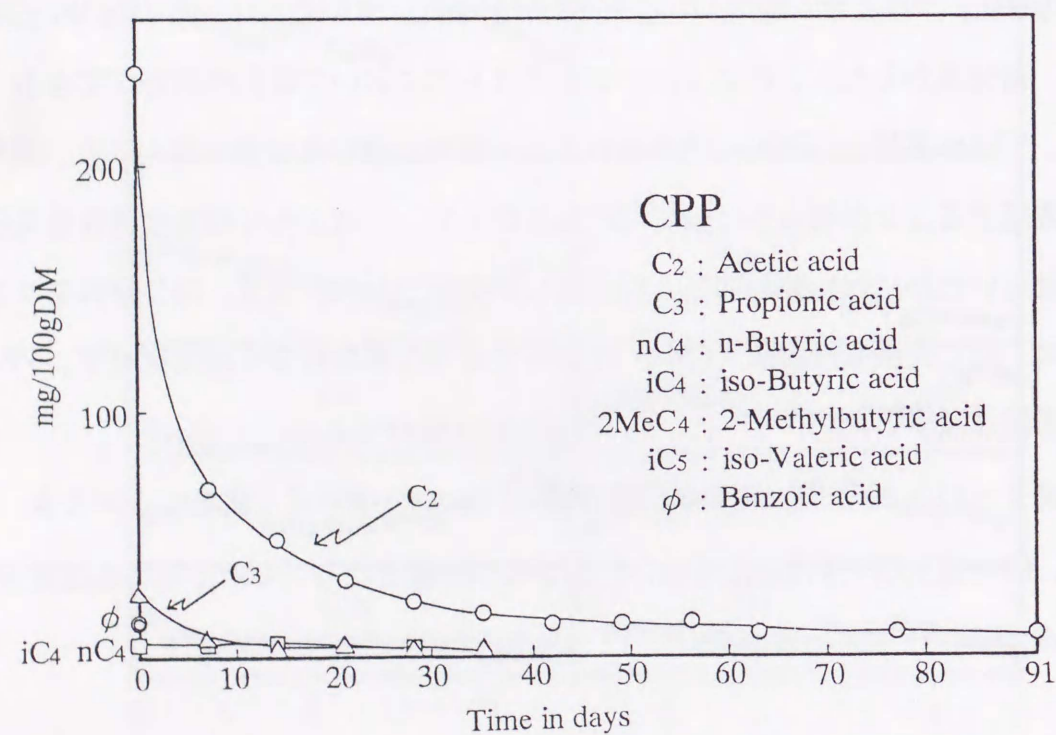
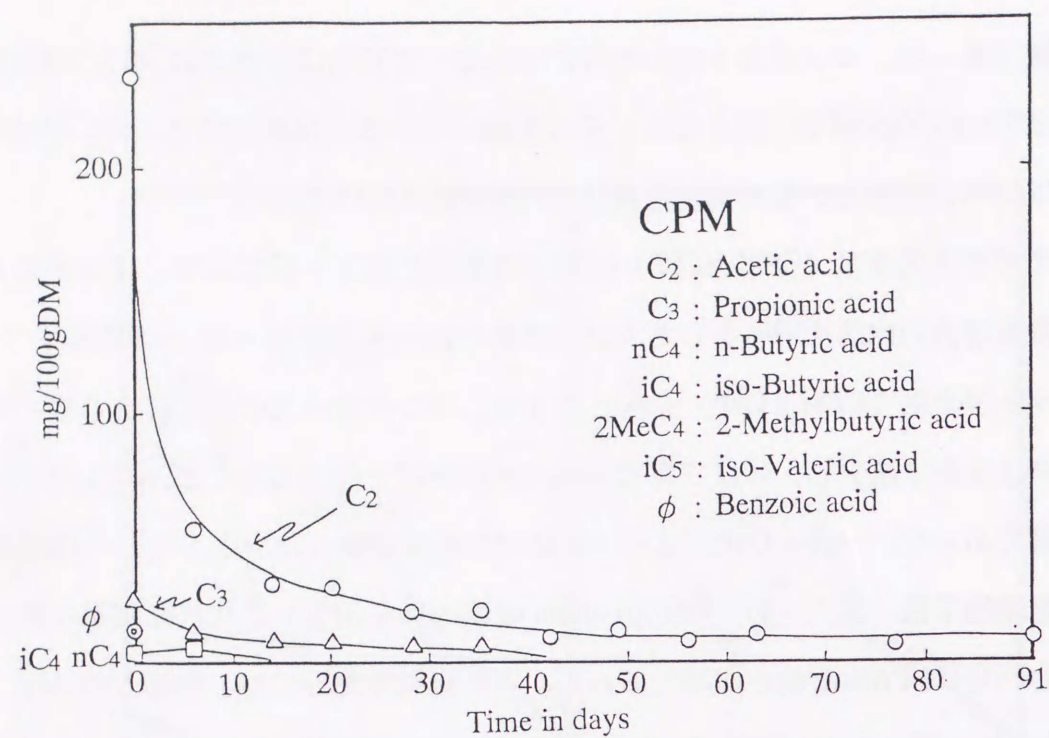


図 2-16 牛ふん-パーライト混合区 (CPMとCPP) のVFAの変化

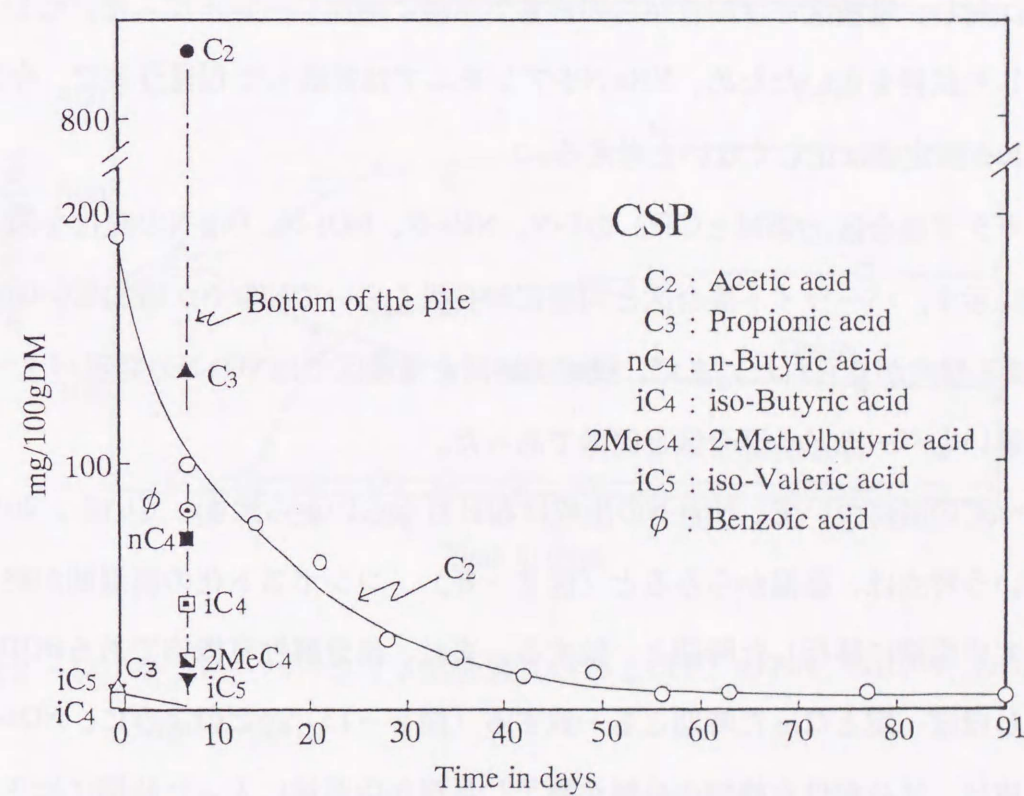
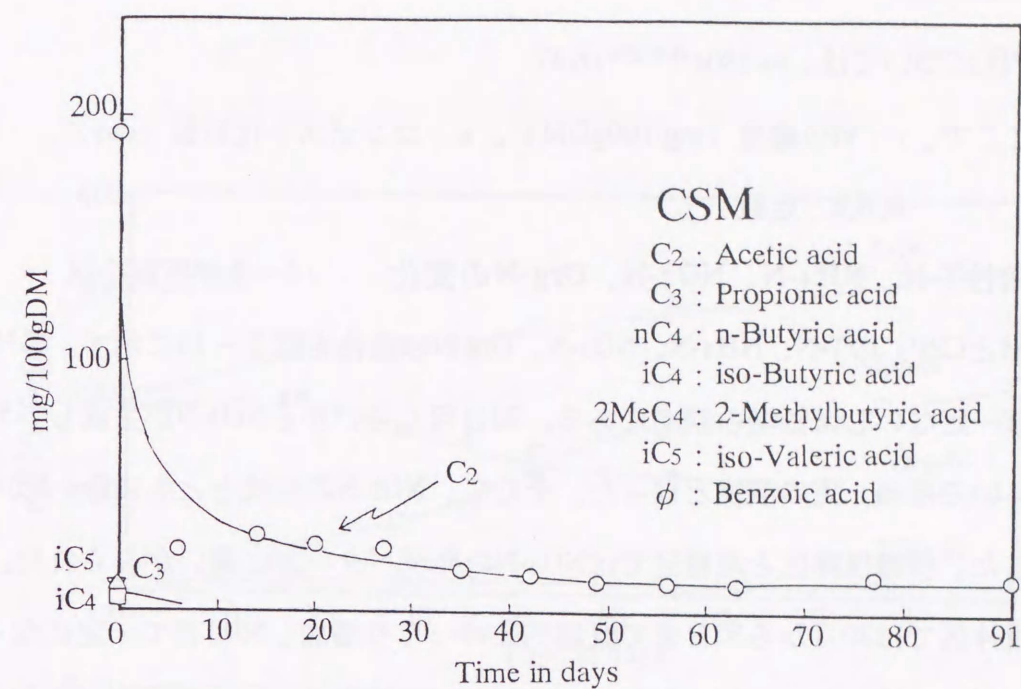


図 2-17 牛ふん-オガクズ混合区 (CSMとCSP) のVFAの変化

CSM区については、 $y=170e^{-0.208x}+12.69$

CSP区については、 $y=180e^{-0.0725x}+6.47$

ここで、 y : VFA濃度 (mg/100gDM)、 x : コンポスト化日数 (day)、

A,B,k : 定数

水溶性T-N、NH₄-N、NO₃-N、Org-Nの変化 パーライト混合区

(CPMとCPP) のT-N、NH₄-N、NO₃-N、Org-Nの変化を図2-18に示す。T-Nはほぼ一定ないしは微増の傾向にある。20日目くらいからNO₃-Nが生成し、50日目くらいではほぼ一定の濃度となった。そして、NO₃-Nの生成とともにOrg-Nが減少した。機械攪拌区と堆積区ではNO₃-Nの発現パターンに違いがみられた。機械攪拌区では20日から50日まで直線的にゆっくり増加し50日目で一定になったのに対し、堆積区では20日から40日まで急激に増加し一定となった。なお、乾燥した試料を用いたため、NH₄-Nやアンモニアは揮散してしまうので、今回のNH₄-N測定値は正しくないと考える。

オガクズ混合区 (CSMとCSP) のT-N、NH₄-N、NO₃-N、Org-Nの変化を図2-19に示す。パーライト混合区と同様に20日目くらいでNO₃-Nが増加し、Org-Nが減る傾向が見られた。また、機械攪拌区と堆積区ではNO₃-Nの発現パターンに違いもパーライト混合区と同様であった。

すべての区について、NO₃-Nの生成は20日目くらいから始まっている。20日目という時点は、品温からみると(図2-8)、コンポスト化の高温期が終わって中温期に移行した時期と一致する。また、易分解性有機物であるBODが減少しほぼ一定となった時期とも一致する(図2-13)。このように、NO₃-Nの生成は、易分解性有機物の分解が終了し品温が中温域に入った時期に始まることが明らかになった。言い換えれば、硝化菌の活動しやすい環境条件になった時点からNO₃-Nの生成が始まっている。

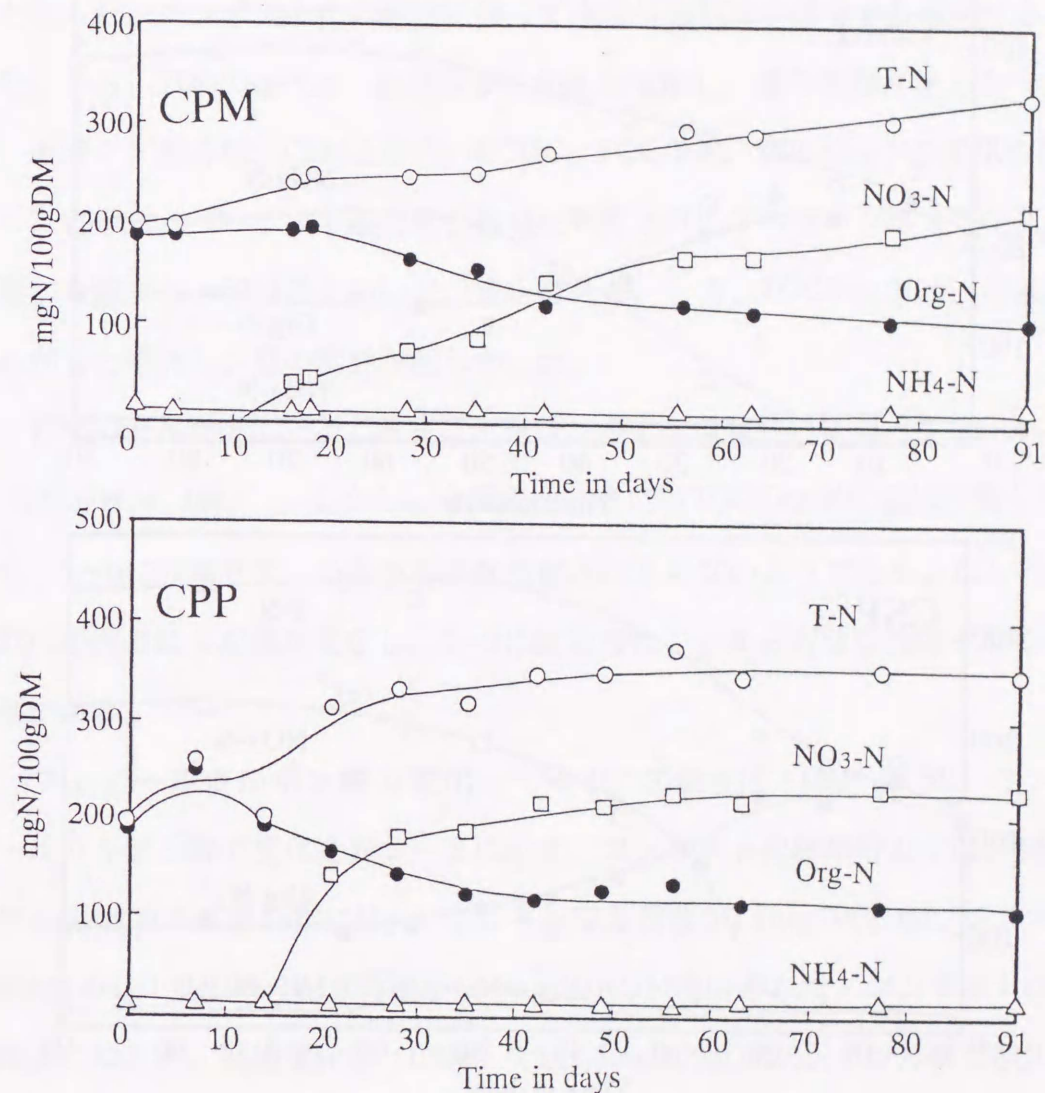


図2-18 牛ふん-パーライト混合区 (CPMとCPP) のT-N、NH₄-N、NO₃-N、Org-Nの変化

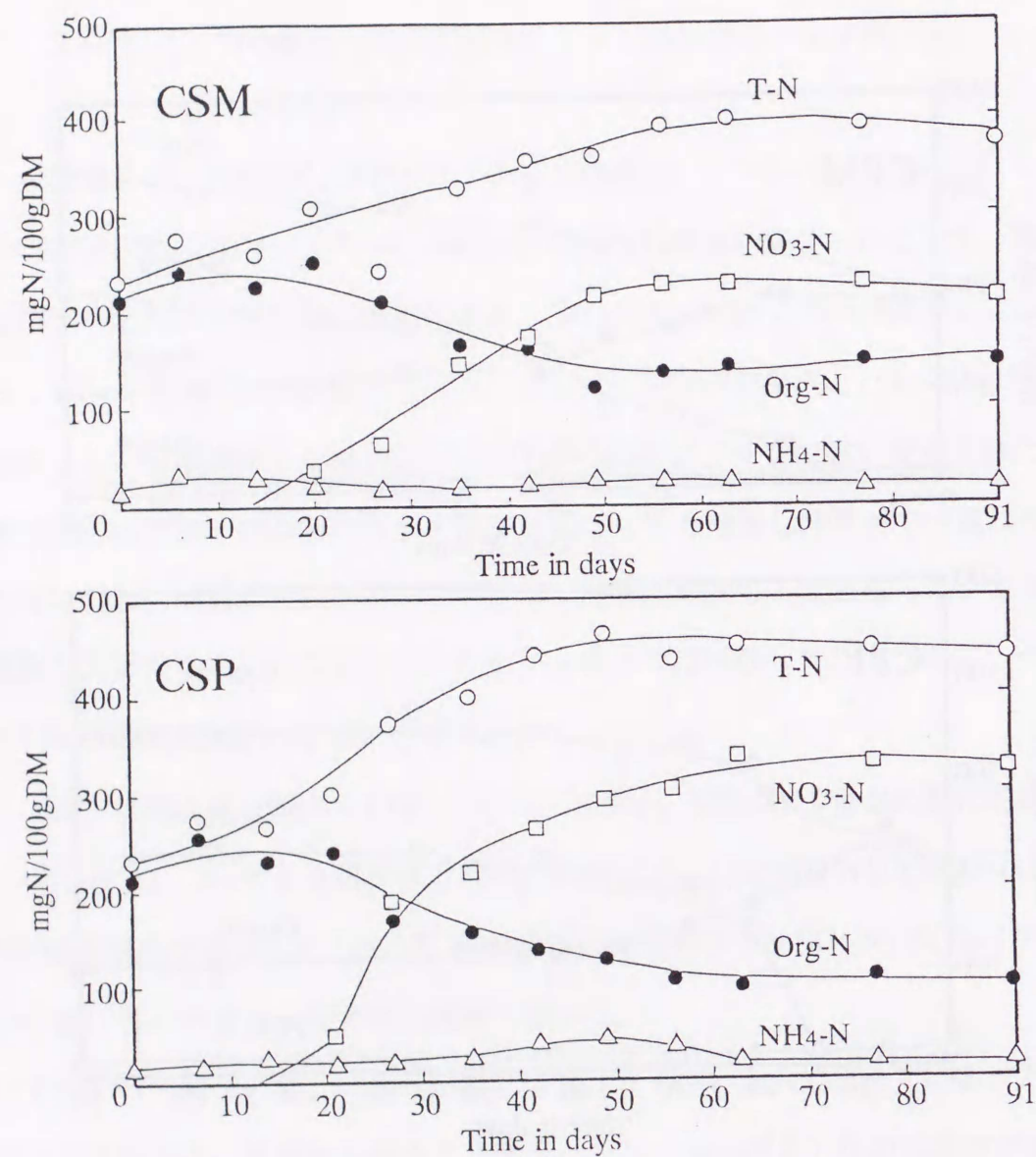


図 2-19 牛ふん-オガクズ混合区 (CSMとCSP) のT-N、NH₄-N、NO₃-N、Org-Nの変化

水溶性TOC、TOC/T-N、TOC/Org-Nの変化 パーライト混合区

(CPMとCPP)の水溶性のTOC、TOC/T-N、TOC/Org-Nの変化を図2-20に示す。TOCとTOC/T-Nはコンポスト化開始時期から減少し、50日目くらいで一定となった。コンポスト化の進行に伴って水溶性のTOCが減少する傾向がみられた。一方、TOC/Org-Nは一旦減少するがまた増加し、値の変動が激しかった。

オガクズ混合区 (CSMとCSP)のTOC、TOC/T-N、TOC/Org-Nの変化を図2-21に示す。パーライト混合区と同様にTOCとTOC/T-Nはコンポスト化開始時期から減少し、50日目くらいで一定となった。一方、TOC/Org-Nは一旦減少するがまた増加し、値の変動が激しかった。

TOC/Org-Nの値が5~6であることをコンポストの腐熟の指標とする説がある (Hirai *et al.*, 1983)。しかし、今回のデータではTOC/Org-Nの値は変動が激しく、5~6に収束せず、あまり有効な指標とは言えないようである。むしろ、TOC/T-Nのほうが値が安定し、2~3に収束したことから有望な指標となる可能性がある。

フェノールカルボン酸の変化 オガクズ混合区 (CSMとCSP)のフェノールカルボン酸の変化を表2-2に示す。コンポスト化開始時点では、初発の牛ふん-オガクズ混合物にはp-ヒドロキシ安息香酸が2.1mg/100gDM、p-クマル酸が4.4mg/100gDM、安息香酸が13.6mg/100gDM検出された。コンポスト化1週間後になると、機械攪拌区 (CSM)では1.5mg/100gDMのp-クマル酸が検出されたのみであるし、堆積区 (CSP)の表面の好気部分のフェノールカルボン酸はほとんど痕跡程度になっていた。

一方、堆積区の堆積物下部に現れた嫌気性部分においてはフェノールカルボン酸の蓄積が顕著であり、p-ヒドロキシ安息香酸が13.8mg/100gDM、p-クマル酸が3.4mg/100gDM、安息香酸が97.5mg/100gDM検出され、総量で開始時の約6

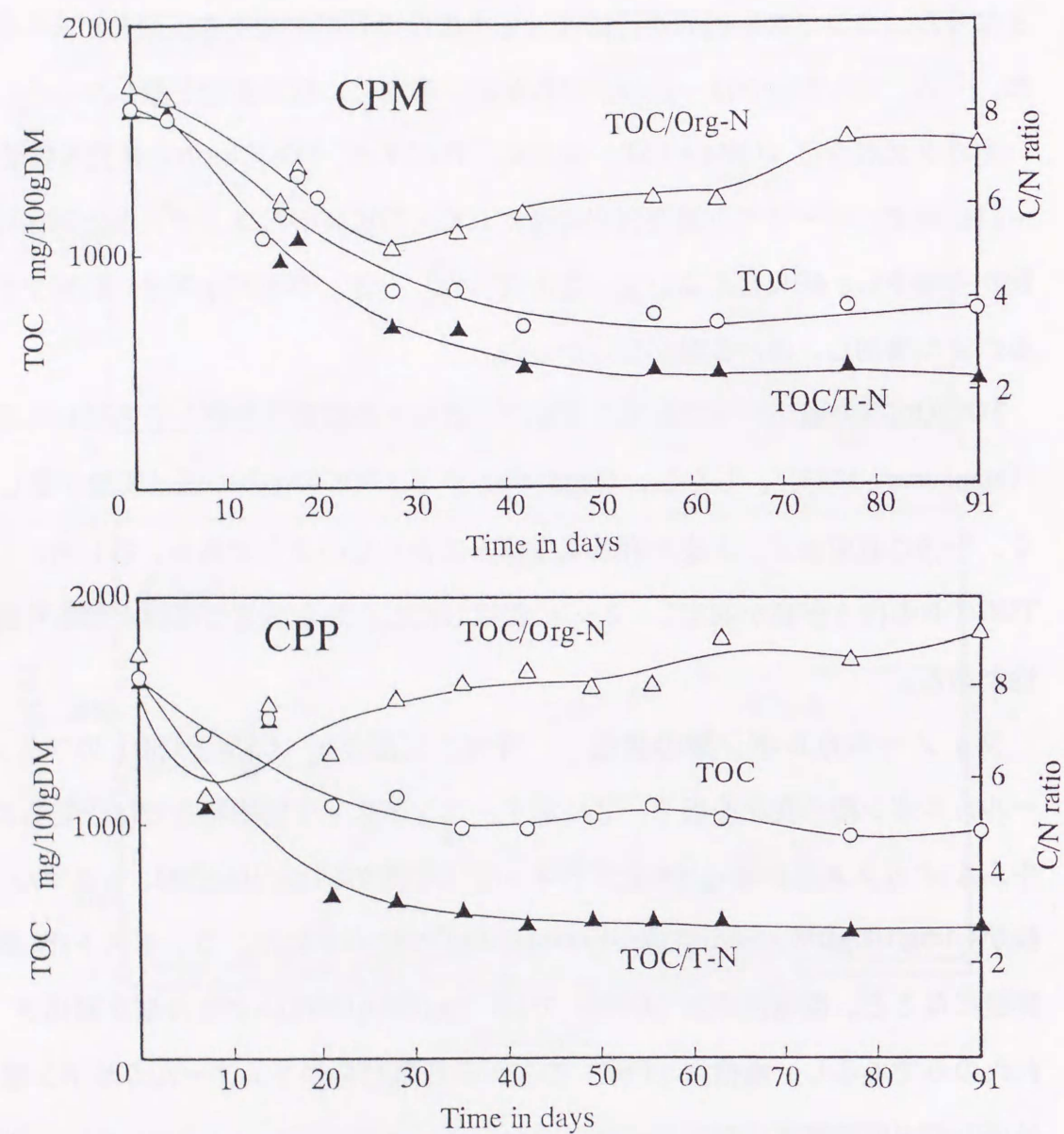


図 2-20 牛ふん-パーライト混合区 (CPMとCPP) のTOC、TOC/T-N、TOC/Org-Nの変化

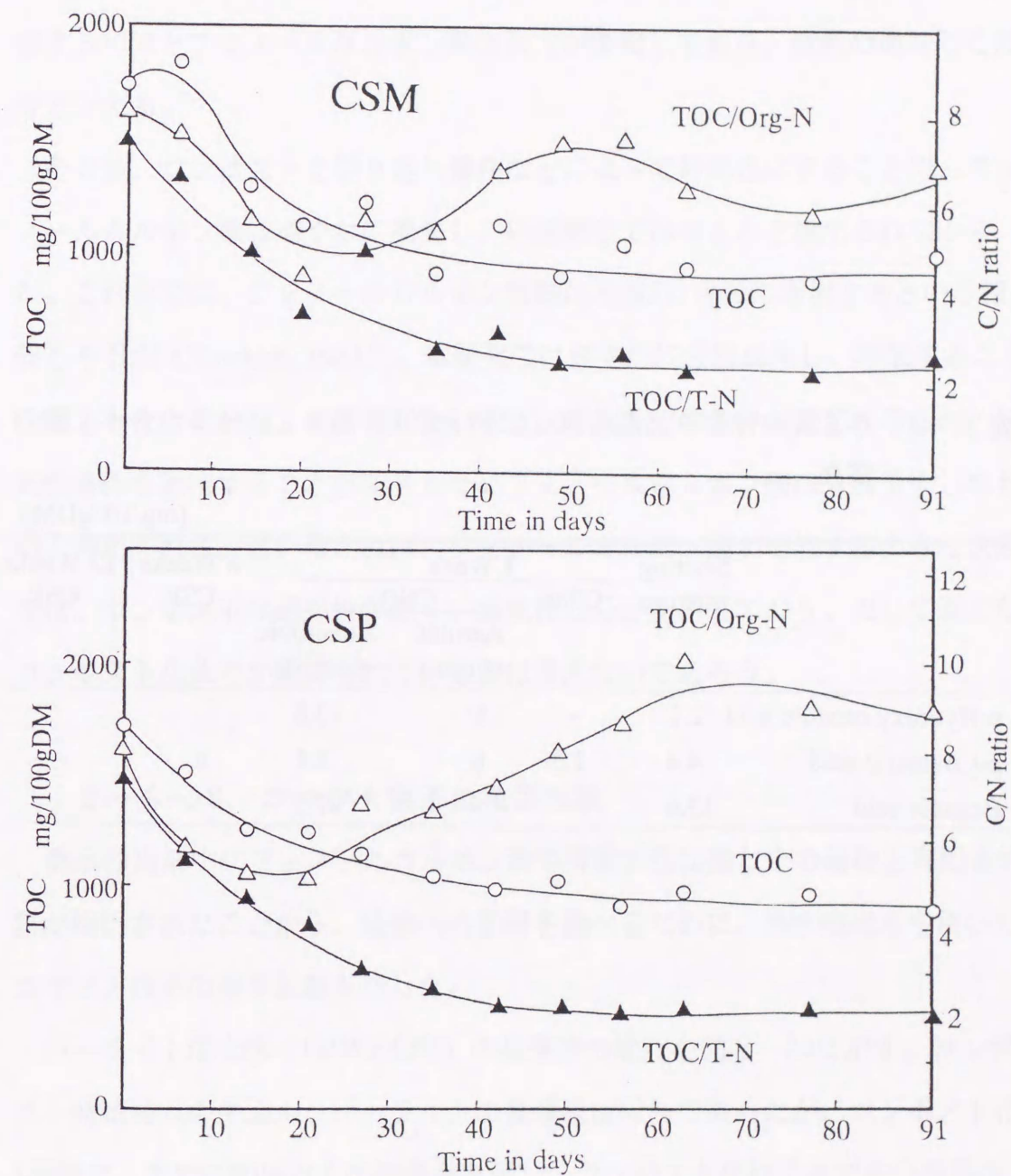


図 2-21 牛ふん-オガクズ混合区 (CSMとCSP) のTOC、TOC/T-N、TOC/Org-Nの変化

表 2-2 牛ふん-オガクズ混合区 (CSMとCSP) のフェノールカルボン酸の
変化

(mg/100gDM)						
	Starting mixture	CSM	1 Week		8 Weeks CSP	13 Weeks CSP
			CSP			
			Aerobic portion	Anaerobic portion		
p-Hydroxy benzoic acid	2.1	-	tr	13.8	-	-
p-Coumaric acid	4.4	1.5	tr	3.4	tr	-
Benzoic acid	13.6	-	-	97.5	-	-

倍量に増加していた。この嫌気部分は、VFAが蓄積し (図 2-17のCSPの bottom of the pile)、酸味臭のした部分である。嫌気部分には、植物の生長を阻害するVFAとフェノールカルボン酸の両方が蓄積しており、腐熟の遅延した部分といえる。

その後、コンポストを切り返し操作などによって好気性にすることで、フェノールカルボン酸は速やかに消失し、13週間目ではほとんど検出されなかった。これまでに、フェノールカルボン酸類は堆積3カ月後に増加するという報告もあるが (Tsuchida, 1984)、本研究では速やかに分解消失し、増加することはない。それは、本研究においてコンポスト化の条件が適正に守られ、好気性条件を維持することができたためフェノールカルボン酸は分解消失したものと考えられる。言い換えれば、フェノールカルボン酸が増加するような状態では、コンポストの通気性が悪く、嫌気性部分が発生しており、決して適正なコンポスト化条件が維持されているとは言えないであろう。

2-3-6 コマツナ種子の発芽試験

熱水抽出液中にフェノールカルボン酸や揮発性脂肪酸などの植物生育阻害物質が検出されたことから、植物への影響を調べるために、熱水抽出液を用いてコマツナ種子の発芽試験を行った。

パーライト混合区 (CPMとCPP) の発芽率の変化を図 2-22に示す。コンポスト開始時点の牛ふん-パーライトの発芽率は52%であったが、コンポスト化1週間で、すでに80%以上の発芽率を示し、コンポスト化終了までその発芽率を維持した。機械攪拌区と堆積区では幾分機械攪拌区のほうが、発芽率が良いようにもみえるが、有意な差はみられなかった。

オガクズ混合区 (CSMとCSP) の発芽率の変化を図 2-22に示す。コンポスト開始時点の牛ふん-パーライトの発芽率は40%であったが、機械攪拌区

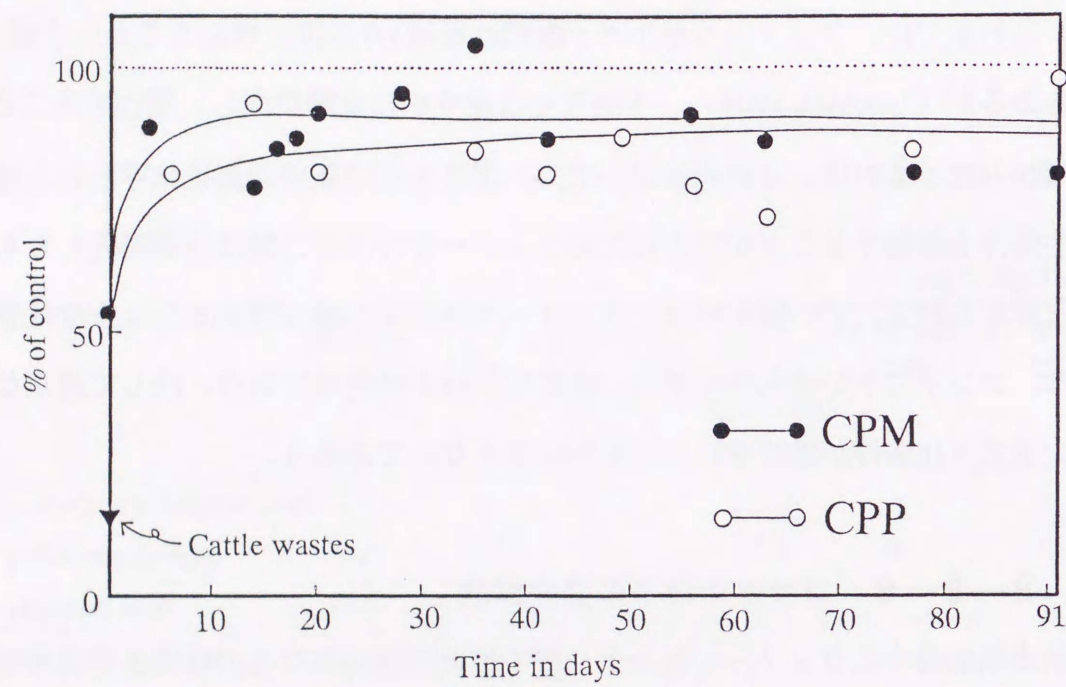


図 2-22 牛ふん-パーライト混合区 (CPMとCPP) のコマツナ種子発芽率の変化

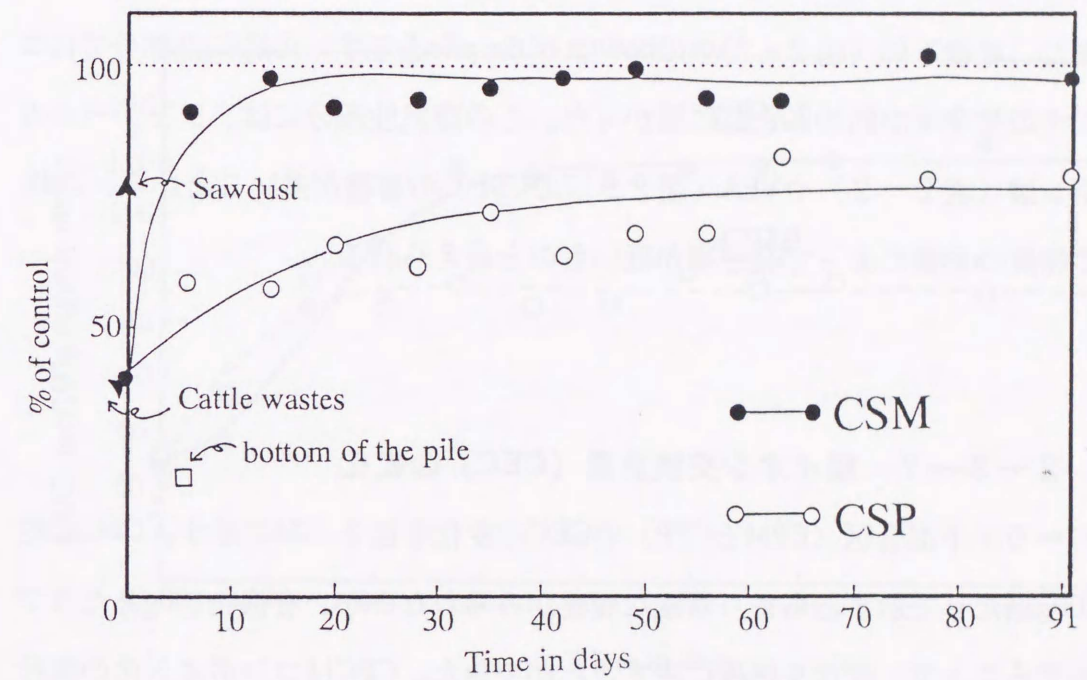


図 2-23 牛ふん-オガクズ混合区 (CSMとCSP) のコマツナ種子発芽率の変化

(CSM)ではコンポスト化1週間で、すでに80%以上の発芽率を示し、コンポスト化終了まで90%以上の発芽率を維持した。一方、堆積区(CSP)では発芽率の回復が大きく遅れ、50日目でも75%程度であった。このように、機械攪拌区と堆積区の処理方式によって発芽率の変化に大きな差がみられ、コンポスト化条件の悪かった堆積区ではコンポスト化の後期になっても、機械攪拌区の発芽率に到達することができなかった。

また、堆積下部(図2-23中のbottom of the pileを示す)の嫌気性部分ではコマツナの発芽率が約20%と特に悪かった。この嫌気性部分には、フェノールカルボン酸(表2-2)やVFA(図2-17のCSP)の蓄積が多いことから、これらの物質の影響によって発芽率が低いものと考えられる。

2-3-7 陽イオン交換容量(CEC)の変化

パーライト混合区(CPMとCPP)のCECの変化を図2-24に示す。CECは乾物100g当たりで示すとあまり明確な変化がみられないが、有機物100gあたりで表示することで、変化を明確に表すことができた。CECはコンポスト化の進行とともに増加し、30日目位で一定値115meq/100g有機物となった。都市ゴミでは60meq/100g有機物以上の場合が腐熟の指標となっているから(Harada and Inoko, 1980)、それよりも高い値となった。この値は、コンポストの原料となる有機物の性質によっても異なるものと考えられる。

堆積区では機械攪拌区よりも低い値で一定となった。CECが増加する理由は、コンポスト反応である酸化反応によって、有機物の表面のカルボキシル基等が増加するためと考えられている。堆積区では機械攪拌区に比較してコンポストが十分に進行しないために、酸化が進まず、CECが低いレベルで一定になったと考えられる。ここでも、強制通気と攪拌によってコンポストの腐熟が

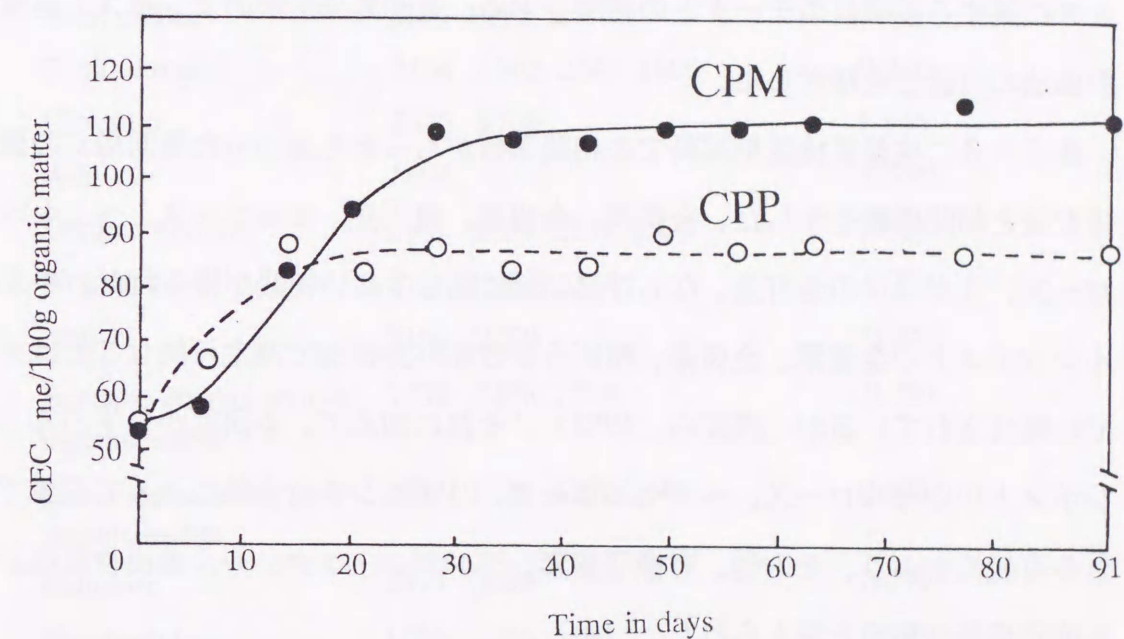


図2-24 牛ふん-パーライト混合区(CPMとCPP)のCECの変化

より進んだことが明らかになった。

2-3-8 近赤外分析

ここまで、牛ふんのコンポスト化における腐熟プロセスに関する多項目の測定データを集めることができた。そこで、近年、非破壊、簡便、迅速な多成分分析法として多く利用される近赤外分析法について、先に得られた腐熟プロセスに関する多項目のデータとの相関を求め、近赤外分析法のコンポスト品質評価法の可能性を検討した。

表2-3に検量線検証用試料での相関係数がもっとも高かった重回帰式の使用波長と相関係数を示した。全炭素、全窒素、粗灰分、セルロース、ヘミセルロース、リグニンの含有量、ならびにCECに関して高い相関が得られた。牛ふんコンポストの全窒素、全炭素、粗灰分が近赤外分析法で測定可能なことはすでに報告されているが（浅井ら、1993）、それに加えて、本研究から牛ふんコンポスト中のセルロース、ヘミセルロース、リグニンを近赤外によって定量できる可能性があり、その他、有機態窒素、ベンゼン・エタノール抽出物質なども推定可能な項目と考えられた。

その中で、コマツナの発芽に及ぼす牛ふんコンポスト試料の影響の近赤外分析法による推定結果を図2-25に示す。検量線作成時の重相関係数は0.933、検証用試料についての相関係数は0.865であった。化学分析法ではなく、発芽率のような生物検定方法に近赤外分析法の可能性が示唆されたことは興味深い。

使用波長1236、1692、1710、1418nmで最大の相関係数が0.865となったことは、高精度な推定は難しいが、実用上は生物検定の代用の可能性がある。波長1236nmは熱水抽出物に同一の波長がみられることから、熱水で抽出される何等の化学物質が、コマツナの発芽と関連している可能性がある。また、波長1710nmは、油脂の吸収波長1720nmに近く、ベンゼン・エタノール抽出物質に

表2-3 牛ふんコンポストの品質関連項目の検量線重回帰式の使用波長と検証用試料における相関係数

Item	Wave length (nm)	coefficient of correlation
Total carbon	2346 1894	0.999
Total nitrogen	2164 1662 2248 1900	0.980
C/N ratio	2322 1758	0.956
Ash	1894	0.999
Organic nitrogen	1662 1758 2354 1908	0.938
NH ₄ -N	2166 2288 2364	0.771
NO ₃ -N	2158 2320	0.890
Benzene-ethanol soluble organic matter	1738 2248 2318	0.896
Hot-water soluble organic matter	1660 1236 2362 2386	0.895
Cellulose	2074 2446	0.999
Hemicellulose	1954 2320 1564	0.995
Lignin	2446 1680	0.997
CEC	2158 1764 1248	0.990
Germination test with Komatsuna	1236 1692 1710 1418	0.865

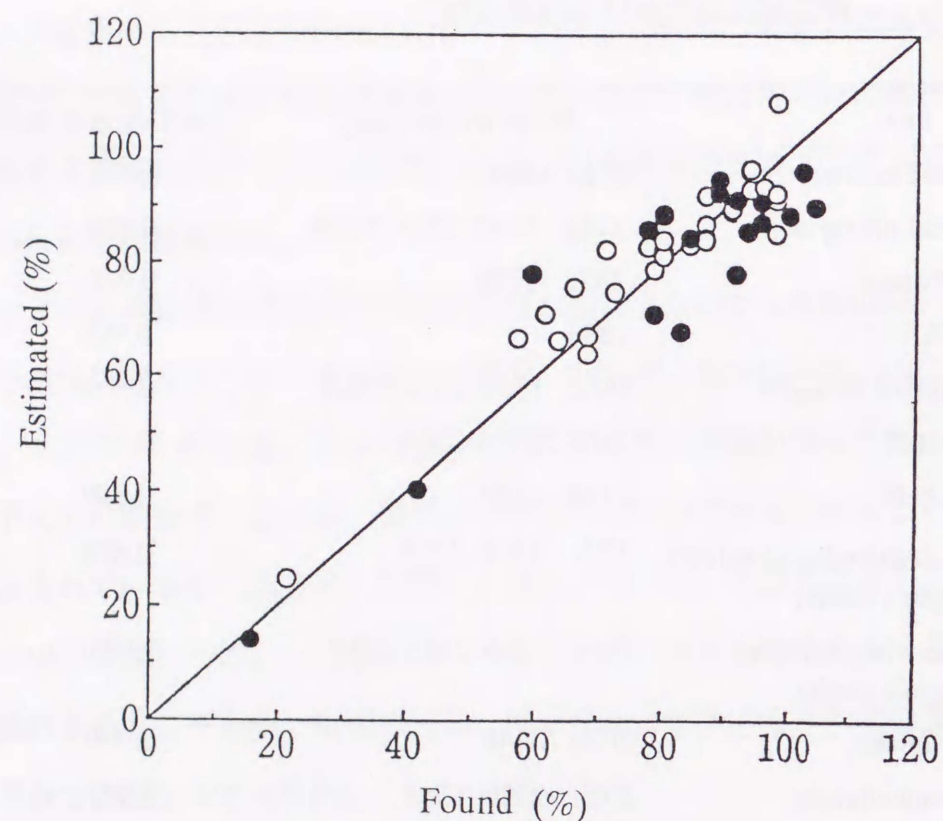


図 2-25 コマツナの発芽に及ぼす牛ふんコンポスト試料の影響の
近赤外分析法による推定

(●: 検証用試料、○: 検量線作成用試料)

ある波長1738nmにも近いことから、ベンゼン・エタノール抽出物質は油脂系化学物質の関与が示唆される。このように、コマツナの発芽試験のような生物検定結果が、いくつかの化学物質の相互作用によって成り立つものと考え、単一の化学物質よりも、総合的な判定法としての価値は高いものと言えよう。

2-4 まとめ

牛ふんに混合する副資材として、生化学的反応に不活性な無機物のパーライトを用いてコンポスト化を行い、牛ふんそれ自身の腐熟特性を調べることができた。コンポスト化過程において、ほとんどの成分について、機械攪拌区のほうが堆積区よりも分解が速く、しかも分解率も高かった。機械攪拌区は強制通気と攪拌によって、コンポスト化の適正条件が達成され、堆積区に比べて分解が進んだものと考えられる。

生物化学的酸素要求量 (BOD) は易分解性有機物の指標として有効であり、ベンゼン・エタノール抽出物質や揮発性脂肪酸と同様に、コンポスト化初期に急激に分解し、コンポストの品温を上昇させ、2週間くらいして品温が高温域から中温域へ下降するところで一定となった。一方、セルロースやヘミセルロースの分解が一定になるのは5週間を要した。また、BODが一定となった時点で硝酸態窒素が出現することから、牛ふんコンポスト化の第1次過程が終了したことを知る指標として硝酸態窒素は重要である。

堆積式コンポスト化では、1週間目の切返し時に、コンポスト断面の底部に嫌気性部分が見いだされた。嫌気性部分は、酸素供給が不十分なために、揮発性脂肪酸 (VFA) とフェノールカルボン酸が初発原料の数倍量蓄積しており、好気性部分に比較して腐熟の進行が遅延し、コマツナの発芽率も低かった。腐熟の促進には、このような嫌気性部分を作らないことが重要である。

第3章 牛ふん－モミガラ混合物及び牛ふん－粉碎モミガラ混合物の コンポスト化における腐熟プロセス

3－1 研究の目的

副資材として利用されているモミガラは、表面が硬いケイ酸質で被われているため（石丸，1993）、吸水性が低く分解が遅い。そこで、吸水性を向上させ、分解性を高めるねらいで、粉碎して用いることがある。しかし、粉碎モミガラはもとのモミガラに比べて、仮比重が約2倍となり、空隙が著しく減少する性質を持っている（福光，1996）。第2章において、牛ふん－オガクズ混合・堆積物の下部の通気性の悪い層位に出現した嫌気性部分は、有機物の分解が遅れ、さらにVFAやフェノールカルボン酸が蓄積することが明らかになった（図2－17、表2－2）。そこで、モミガラと粉碎モミガラを牛ふんに混合し、粉碎モミガラ混合区に嫌気性部分を人為的に出現させて、両区の腐熟過程の変化を比較検討する。

3－2 材料及び方法

3－2－1 コンポスト化方法

牛ふん（水分85.8%、有機物84.7%DM、全窒素2.76%DM）、モミガラ（水分11.2%、有機物79.6%DM、全窒素0.244%DM）、粉碎モミガラ（水分9.9%、有機物80.1%DM、全窒素0.375%DM）の混合割合とコンポスト化方式は表3－1に示す6とおりである。

牛ふんと未粉碎モミガラについては、堆積し1週間に1回切り返しを行う区CRL（Cattle waste + Rice hull + Lower moistureの略）（水分71.4%）、同様に1

表3－1 牛ふんとモミガラの混合割合とコンポスト化方式

Test run	Cattle waste	Bulking agent	Moisture
CRL (Cattle waste+Rice hull+Lower moisture) with turning once a week	250kg	60kg	71.4%
CRH (Cattle waste+Rice hull+Higher moisture) with turning once a week	250kg	47.5kg	73.8%
CRHn (Cattle waste+Rice hull+Higher moisture) without turning through 6 weeks	250kg	47.5kg	73.8%
CCRL (Cattle waste+Crashed rice hull+Lower moisture) with turning once a week	250kg	60kg	70.6%
CCRH(Cattle waste+Crashed rice hull+Higher moisture) with turning once a week	250kg	47.5kg	73.8%
CCRHn(Cattle waste+Crashed rice hull+Higher moisture) without turning through 6 weeks	250kg	47.5kg	73.8%

週間に1回切り返しを行い水分がやや多め（水分73.8%）の区CRH（Cattle waste + Rice hull + Higher moistureの略）、6週間切り返しを行わない区CRHn（Cattle waste + Rice hull + Higher moisture + no turningの略）の3種類とした。

牛ふんと粉碎モミガラを混合した区についても、堆積して1週間に1回切り返しを行う区CCRL（Cattle waste + Crashed Rice hull + Lower moistureの略）（水分70.4%）、同様に1週間に1回切り返しを行い水分がやや多め（水分73.8%）の区CCRH（Cattle waste + Crashed Rice hull + Higher moistureの略）、6週間切り返しを行わない区CCRHn（Cattle waste + Rice hull + Higher moisture + no turningの略）で3種類の合計6種類とした。このように、未粉碎・粉碎モミガラを用い、空隙が異なる牛ふん-モミガラ混合物を調製し、さらに水分の高低と切り返しの有無の影響も検討できるように、6種類の区を設けてコンポスト化における成分変化を調べた。

混合物はコンクリート床上に円錐状に堆積し、スコップを用いて人力で1週間に1回切り返しを行い、切り返さない区は6週間にわたってそのまま静置してのコンポスト化を行った。コンポストの温度は、堆積した山の頂上から20cm（上部と呼ぶ）と50cm（下部と呼ぶ）の2ヶ所に挿入したサーミスターで測定し、打点記録計に記録した。

3-2-2 分析試料の調製

コンポストの切り返し時点で、スコップを用いてよく混合した後、数カ所からサンプルを採取し、さらにそれをよく混合したものから分析用サンプルを採取した。また、堆積初期においては、堆積物の層位によってサンプルの性質が異なることから、切り返し時点で混合する前に、層位別の分析用サンプルも採

取した。

採取したサンプルは、一部はビニール袋に密閉して冷蔵庫（約5℃）に保管し、なるべく速やかに分析に供した（以下これを新鮮試料と呼ぶ）。また一部は60℃で通風乾燥し、ウィレー粉碎機（1mm）で粉碎した後、振動式粉碎機（平工 T-100）で微粉碎（0.1mm以下）して分析に供した（以下ではこれを微粉碎試料と呼ぶ）。なお、CRHnとCCRHnの両区は、6週間の実験期間中は切り返しをしなかったため、初発と実験終了時の2回だけのサンプル採取となった。

3-2-3 分析方法

水分及び有機物 新鮮試料を蒸発皿またはルツボに秤取し、105℃で4時間乾燥後の減量を水分とし、それを600℃で4時間強熱した後の減量を有機物（強熱減量）とした。

生物化学的酸素消費量（BOD） BODの測定方法はクーロメーター法（図2-4）によった（下水汚泥資源利用協議会，1983）。乾物相当で約3gの新鮮試料を300mLフラン瓶に秤取し、水分量が300mLになるように蒸留水を添加し、20℃の恒温室内でこの懸濁試料を攪拌・培養しながら酸素吸収量を自動測定した。5日間の酸素吸収量（mgO₂/gDM）をもってBODとした。

水溶性成分 新鮮試料約5gを50mL遠心管に秤取し、2NKCl溶液を50mL加え、密栓して30分間振とう抽出した。振とう抽出後、3,000rpmで20分間遠心分離し、上澄液を濾紙（Toyo No.5A）で濾過して、抽出液とした。この抽出液について揮発性脂肪酸（VFA）と全窒素（T-N）、アンモニウム態窒素（NH₄-N）、硝酸態窒素（NO₃-N）有機態窒素（Org-N）を測定した。

揮発性脂肪酸（VFA）の測定には、水蒸気をキャリアーガスとするスチームクロマトグラフ（大倉理研製）を用いた。カラムはChromosorb Pを充填したガ

ラスカラム ($\phi 3 \times 2000\text{mm}$)、検出器はFIDである。全窒素 (T-N)、アンモニウム態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の分析法は土壌養分分析法 (土壌養分測定法委員会, 1970) に準じブレムナー蒸留法により、有機態窒素 (Org-N) は全窒素からアンモニウム態窒素と硝酸態窒素を差し引いて求めた。

フェノールカルボン酸の測定には、図 2-5 に示すとおり微粉碎試料の熱水抽出液を用いた。抽出法は、微粉碎試料数gを300mL三角フラスコに秤取し、20倍量の蒸留水を加えてリービッヒ冷却管を付け、円形ホットプレート上で30分間沸騰抽出し冷却後、その濾過液を熱水抽出液とした。分析には液体クロマトグラフ (島津製作所 LC2F) を用いた。カラムはShimpack ODS ($\phi 6.0 \times 150\text{mm}$)、溶離液は水-酢酸-ブタノール混合液 (混合比は97.95 : 2 : 0.05 v/v)、流速は4mL/min、検出器はUV検出器 (270nm) である。p-ヒドロキシ安息香酸、バニリン酸、コーヒー酸、p-クマル酸、フェルラ酸、安息香酸のクロマトグラム上の保持時間は各々2.948、3.297、3.783、6.742、7.708、11.967分であり、各物質ピーク面積をもとに標準検量線を作成した。この検量線を用い、熱水抽出液のクロマトグラム上の該当ピーク面積から、サンプルのフェノールカルボン酸含有量を算出した。

3-3 結果及び考察

3-3-1 コンポスト化における品温の変化

図 3-1 に示すように、未粉碎モミガラを混合した区 (CRL、CRH、CRHn) は、粉碎モミガラを混合した区 (CCRL、CCRH、CCRHn) に比較して温度上昇が早く、最初の1週間で70℃以上に上昇した。1週間目の切り返しごとに、温度の上昇と下降を繰返し、時間の経過とともに、順調に温度が低下していき、5週間目ではほぼ一定となっている。このパターンは、第2章の牛ふん-オガクズ混合区 (図 2-8) によく似ていた。

一方、粉碎モミガラを混合した区 (CCRL、CCRH、CCRHn) は温度上昇が緩慢であり、とくに水分が多めのCCRHとCCRHn区では、最初の1週間では50℃近辺に停滞した。上部と下部との温度差も約10℃と大きく、上部と下部において空隙に大きな差ができ、とくに下部の空隙が大きく減少しているものと考えられる。粉碎による仮比重の増加と堆積物の圧密の二つの原因で下部の空隙が減少したのであろう。コンポスト反応を促進させるためには、通気性との関係で十分な空隙を確保する必要がある (木村, 1999b)。この点からは、モミガラの粉碎は逆効果であった。モミガラを粉碎すると、未粉碎に比べて空隙が著しく減少し、同じ水分のコンポストでも通気性が劣ることから、温度上昇が緩慢になるものと考えられる。

このようにモミガラという同じ原料であっても、未粉碎モミガラと粉碎モミガラでは、コンポスト化における品温の変化には大きな違いが現れた。モミガラの表面は硬いケイ酸質で覆われており (石丸, 1993)、微生物による分解反応を防いでいる。モミガラを粉碎することによってケイ酸質に損傷を与え、微生物の分解性が向上するものと考えがちだが、コンポスト化に関しては逆効果であった。コンポスト化における品温上昇のためには、未粉碎モミガラの通気

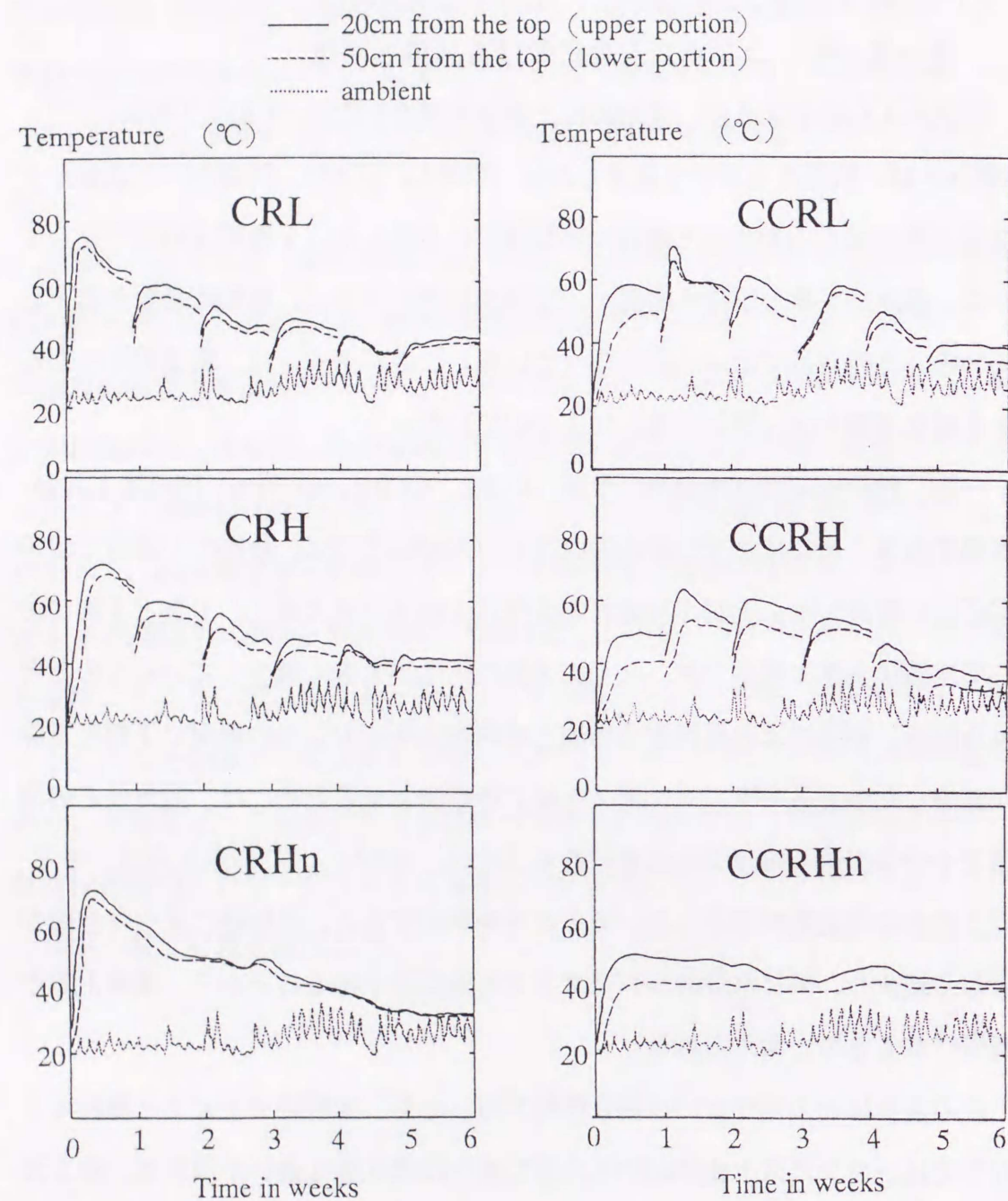


図3-1 牛ふん-モミガラ混合物のコンポスト化過程における温度の変化

性を利用し、好気性条件を実現できることの方がより重要であった。

3-3-2 有機物の変化

有機物の残存率の変化を図3-2に示す。有機物の分解はどの区でもほとんど同じ動きを示し、約5週間でほぼ一定となり、最終的に約40%の有機物が分解されたことが分かる。第2章の牛ふん-パーライト混合物や牛ふん-オガクズ混合物の場合でも、約5週間で有機物の残存率が一定となったことと概ね一致した(図2-10)。しかし、牛ふん-オガクズ混合物の堆積式コンポスト化での分解率が約25%であったことに比較すると、分解率は高い。木質であるオガクズと、植物質のモミガラとの有機物分解性の違いも推察できるが、モミガラはオガクズに比較して、通気性が良いことも留意しなければならない点である。

未粉碎モミガラ混合区(CRL、CRH区)では堆積物の上部と下部で、ほとんど分解に差がないのに、粉碎モミガラ混合区では、上部と下部で分解に大きな差が現れた。とくに、CCRL区の1週間目と、CCRH区の1、2週間目で顕著であり、1週間目のCCRL区とCCRH区の下部(図3-2中のBottom of the pile)ではほとんど、有機物の分解がなかったことがわかる。

また、粉碎モミガラ混合の切り返しを行わない区(CCRHn区)では、6週間後でも堆積物下部の有機物分解率は10数%しかなかった。以上から、コンポスト化における有機物の分解にとって、通気性の確保と切り返し操作が非常に重要なことがわかる。したがって、副資材を利用しての水分調整や、コンポスト化装置を利用した強制通気と切り返し作業がコンポスト化を促進するために重要な役割を果たしているのである。

そして、コンポスト化によって有機物が分解しているかどうかは、温度上昇とその変化(図3-1)にはっきりと反映されていた。温度が低く停滞した

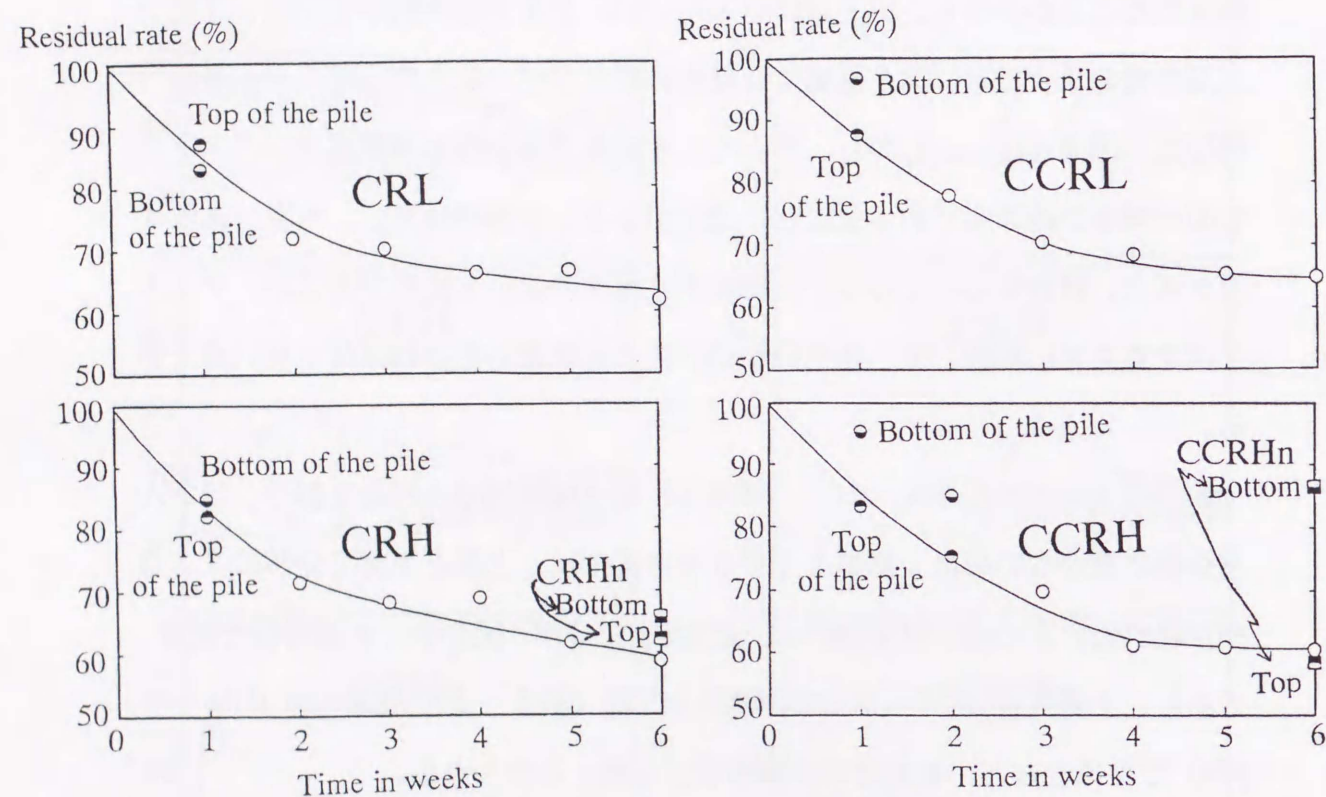


図3-2 牛ふん-モミガラ混合物のコンポスト化過程における有機物の残存率の変化

り、上部と下部で大きな温度差があることは、有機物の分解が不十分であったり、上部と下部で分解に差があったりすることの反映である。

3-3-4 生物化学的酸素消費量 (BOD) の変化と

硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) の出現

BODの変化 CRL、CRH、CCRL区では、BODはコンポスト化開始直後から急激に低下し、2週間ではほぼ一定となった(図3-3と図3-4)。BODの減少がコンポスト化初期に起きたことがわかる。ここでも、第2章と同様に、BODがふん中の易分解性有機物の指標であることを裏付けており、コンポスト化初期にコンポスト中の微生物によって易分解性有機物の分解が急激に起こっていることが考えられる。

CCRH区におけるBODの分解は、他の区に比較すると、約一週間の遅れがあった。BODの分解の遅れが温度上昇の停滞を招いたことが推察される。さらに、粉碎モミガラ混合区では、上部と下部で分解に大きな差が現れた。とくに、CCRL区の1週間目と、CCRH区の1、2週間目で顕著であり、1週間目のCCRL区とCCRH区の下部(図3-4中の①)では、BODの分解がほとんどなかったことがわかる。また、切り返しを行わなかったCCRHn区の下部のBODは $250\text{mgO}_2/\text{gDM}$ と高く、堆積物下部では6週間経ってもまだ有機物の分解が不十分であった。これらの分解様式は有機物の場合(図3-2)とよく一致しており、コンポスト化初期の有機物分解におけるBODの占める位置の重要性が示唆される。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の変化 $\text{NO}_3\text{-N}$ の生成は4週間目くらいから始まっている(図3-3と図3-4)。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の出現順位は、概ね $\text{CRL} > \text{CRH} \geq \text{CCRL} > \text{CCRH}$ となっていた。4週間という時点は、コンポストの温度からみると、コ

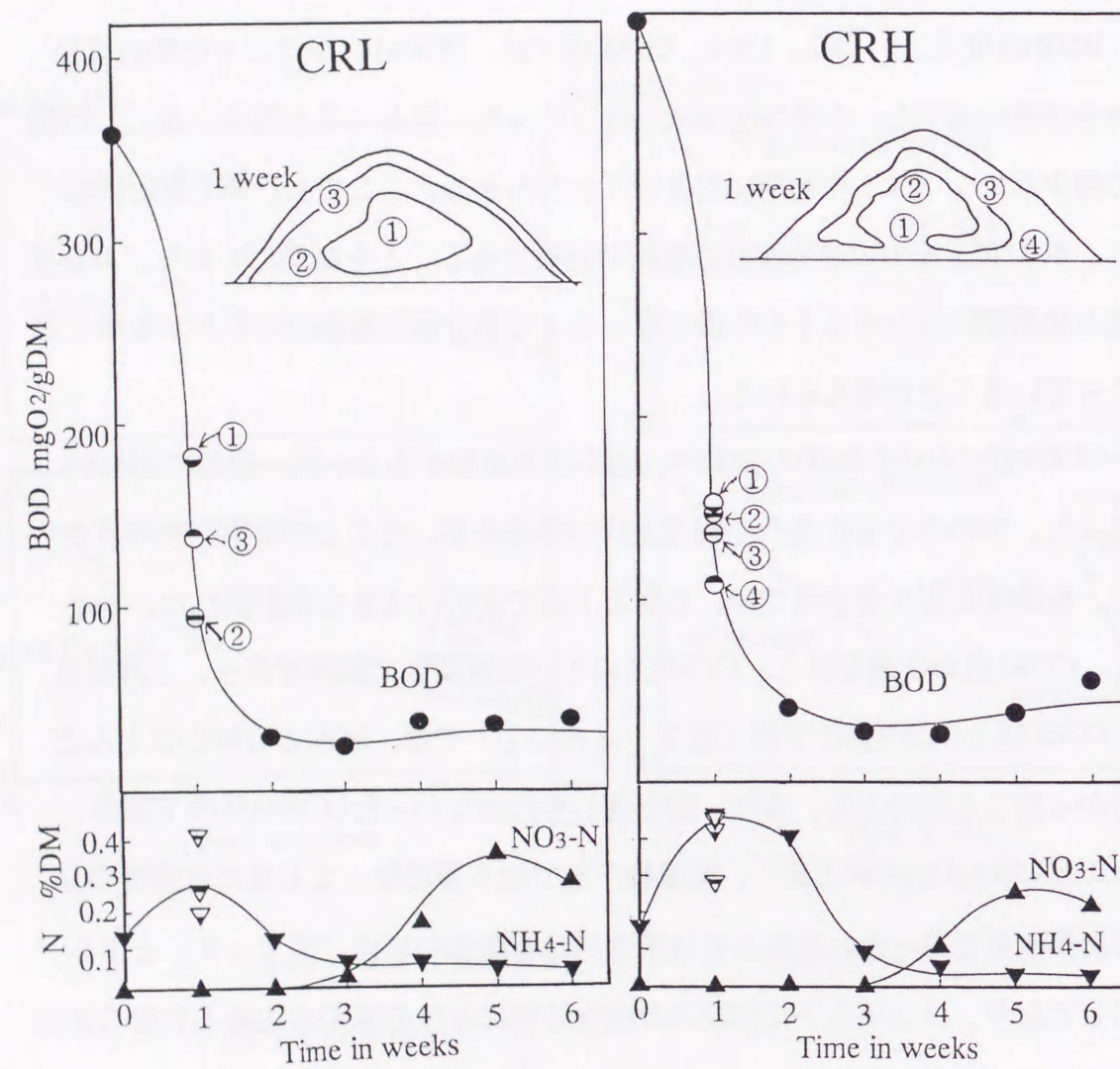


図3-3 牛ふん-未粉碎モミガラ混合物区 (CRLとCRH) のBODの変化とNO₃-Nの出現

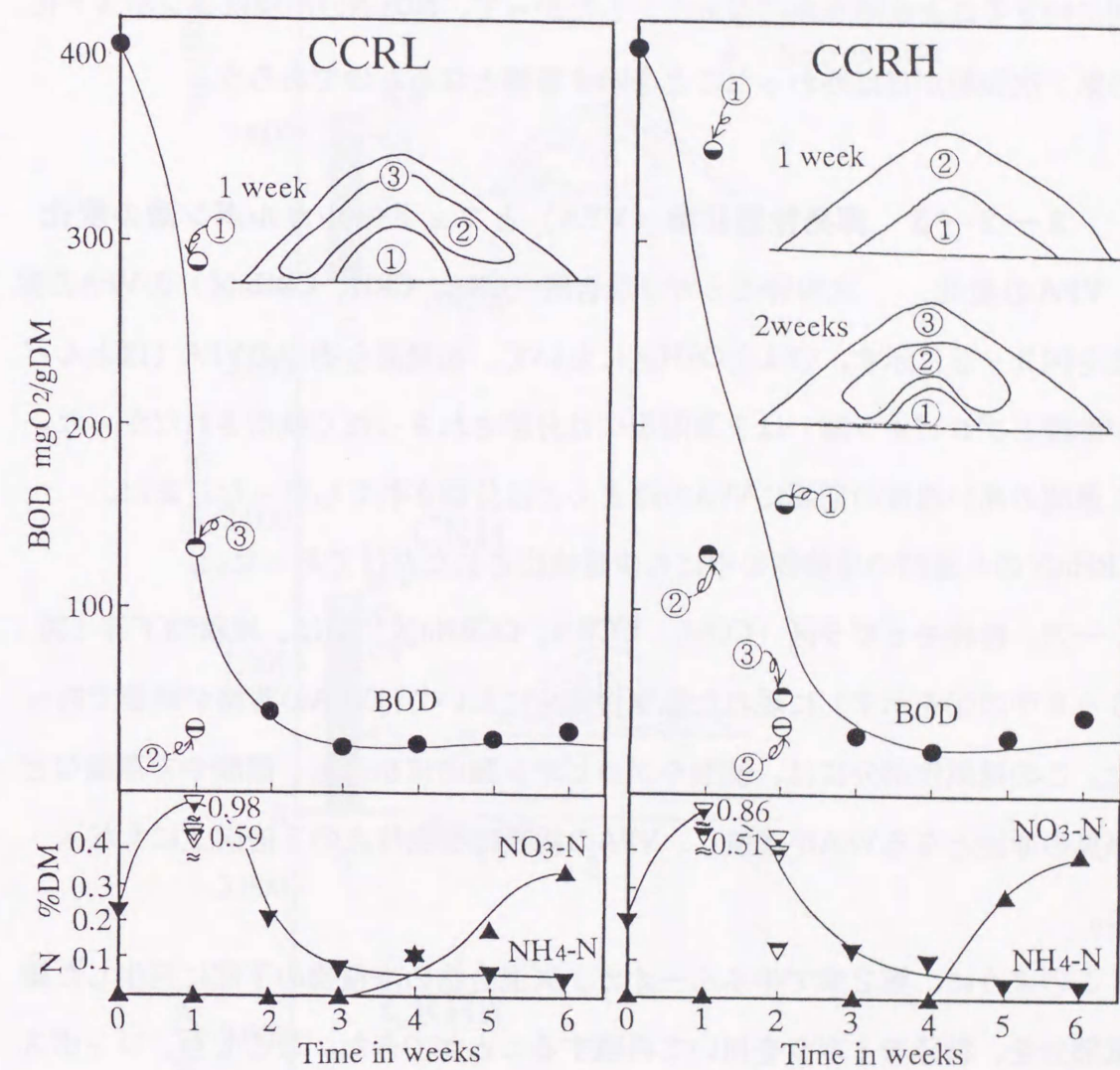


図3-4 牛ふん-粉碎モミガラ混合物区 (CCRLとCCRH) のBODの変化とNO₃-Nの出現

ンポスト化の高温期が終わって中温期に以降した時期と一致する。また、易分解性有機物であるBODが減少しほぼ一定となった時期とも一致する。このように、NO₃-Nの生成は、易分解性有機物の分解が終了し品温が中温域に入った時期に始まることが明らかになった。したがって、NO₃-Nの出現はコンポスト化の第1次発酵がほぼ終わったことを示す指標となるものであろう。

3-3-5 揮発性脂肪酸（VFA）とフェノールカルボン酸の変化

VFAの変化 未粉碎モミガラ混合区（CRL、CRH、CRHn区）のVFAの変化を図3-5に示す。CRLとCRH区において、初発混合物中のVFA（ほとんどが酢酸とプロピオン酸）は1週間後には分解されまったく検出されなかった。

1週間の高い温度の期間にVFAのほとんどは分解されてしまった。また、CRHn区の6週間の堆積物の中にも少量検出されただけであった。

一方、粉碎モミガラ区（CCRL、CCRH、CCRHn区）では、堆積物下部（図3-6中の①を示す）に現れた嫌気性部分においてはVFAの蓄積が顕著であった。この嫌気性部分には、酢酸やプロピオン酸のほかにも、酪酸や吉草酸など悪臭の原因となるVFAが蓄積し、VFAの総量は初発時点の2倍以上にもなった。

このように、第2章で牛ふん-オガクズ混合物の堆積物の下部に発生した嫌気部分を、粉碎モミガラを用いて再現することができた。ここでも、コンポスト化において嫌気性部分ができると、VFAが蓄積し、BODに代表される易分解性有機物含有量が高くなり、腐熟が遅延することが明らかになった。

フェノールカルボン酸の変化 未粉碎モミガラ混合区（CRL、CRH、CRHn区）のフェノールカルボン酸の変化を図3-7に示す。水分の少ないCRL区では1週間ではほぼ半減したが、水分の多いCRH区においては1週間ではあまり減量することがなかった。

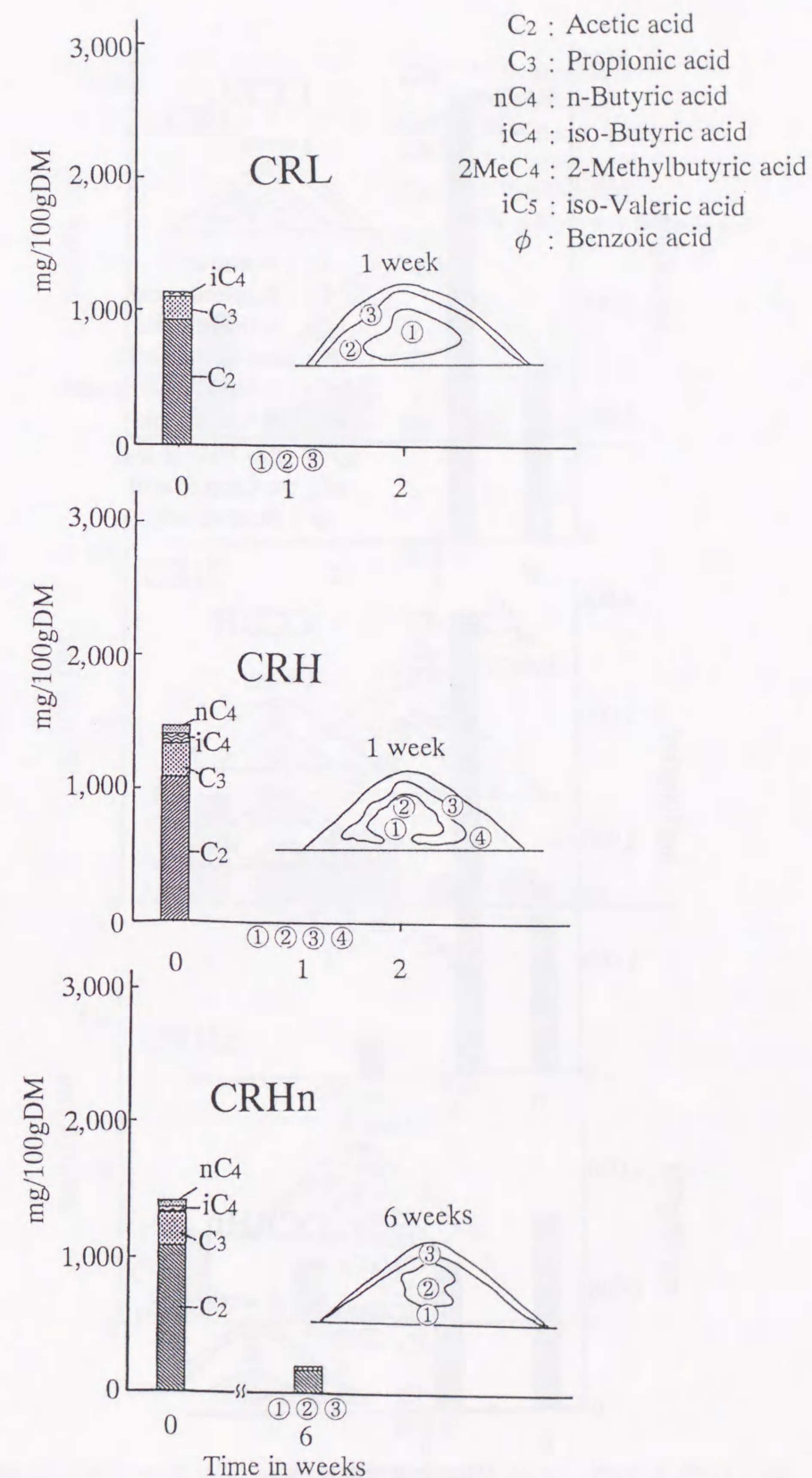


図3-5 牛ふん-未粉碎モミガラ混合区（CRLとCRH）のVFAの変化

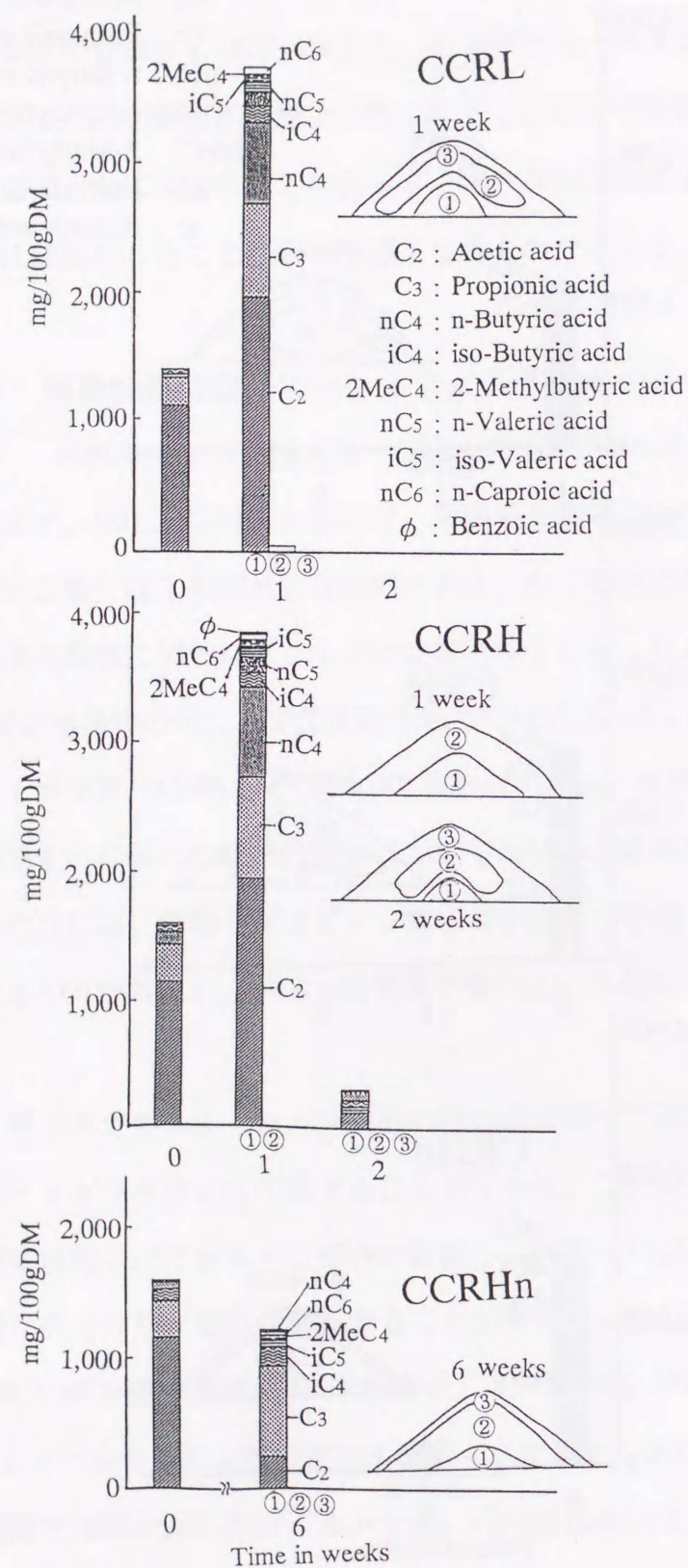


図 3-6 牛ふん-粉碎モミガラ混合物区 (CCRLとCCRH) のVFAの変化

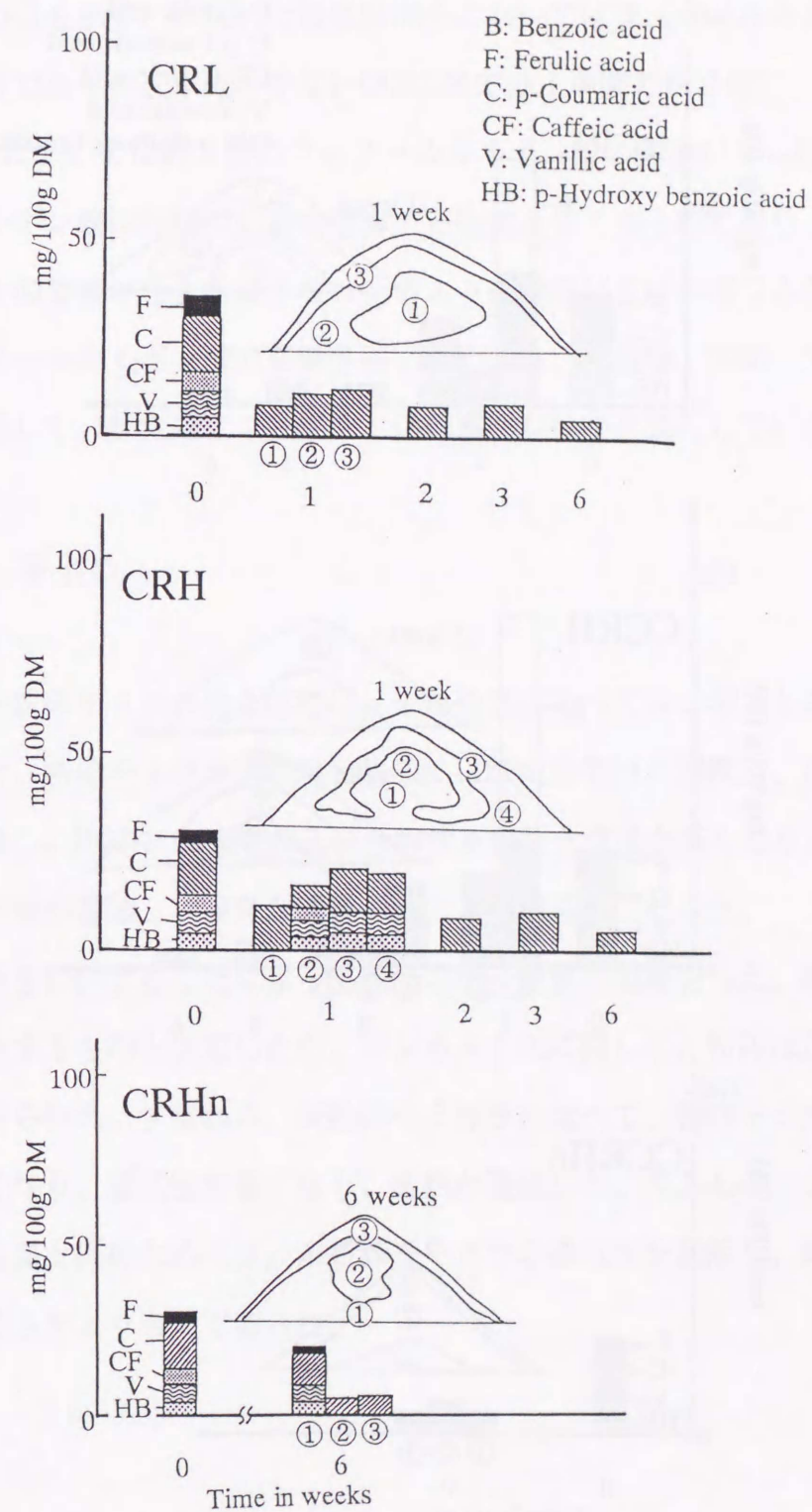


図 3-7 牛ふん-未粉碎モミガラ混合物区 (CRLとCRH) のフェノールカルボン酸の変化

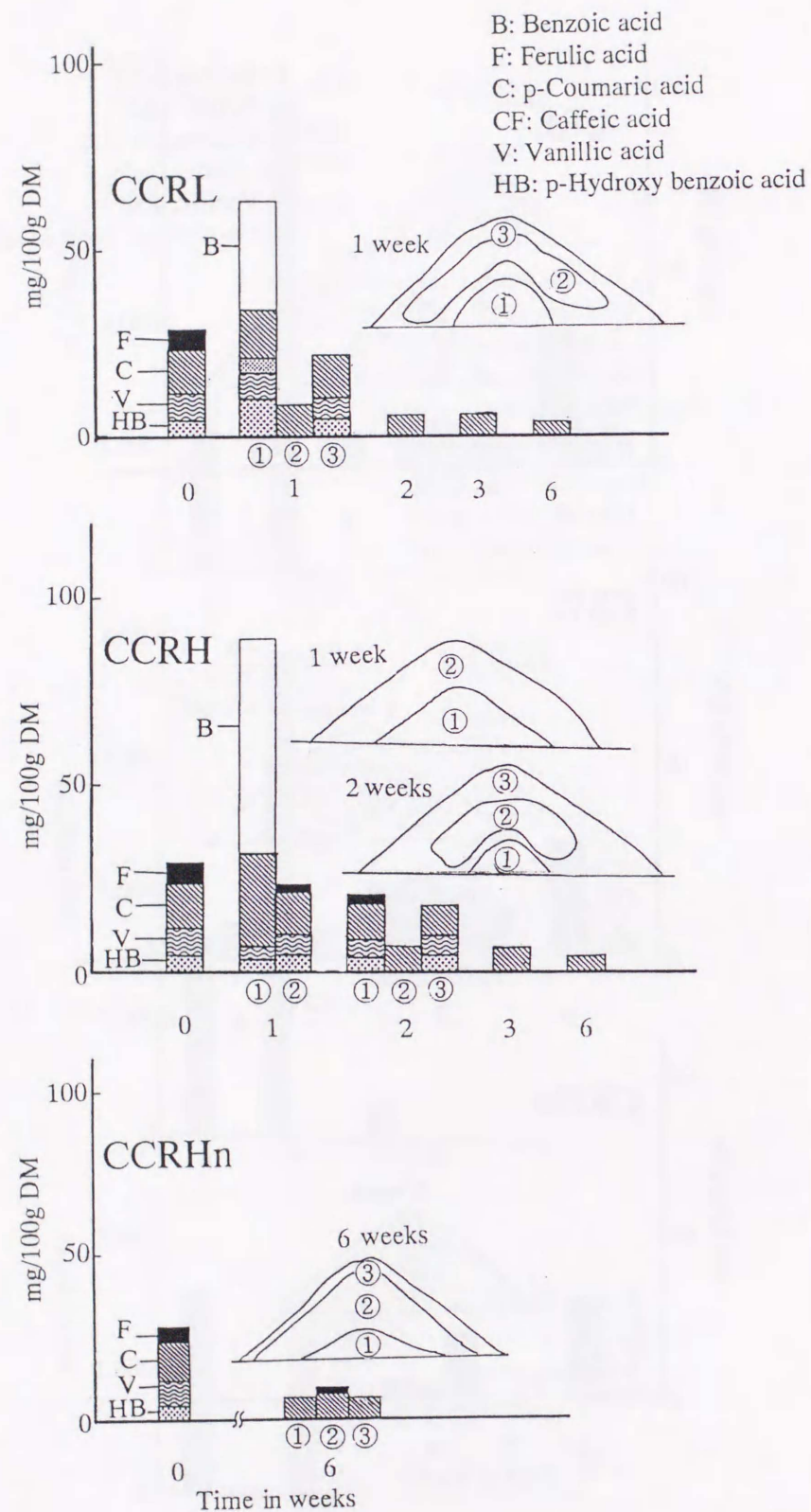


図 3-8 牛ふん-粉碎モミガラ混合物区 (CCRLとCCRH) のフェノールカルボン酸の変化

一方、粉碎モミガラ区 (CCRL、CCRH、CCRHn区) では、堆積物下部 (図 3-8 中の①を示す) に現れた嫌気性部分においてはフェノールカルボン酸の蓄積が顕著であった。水分の少ないCCRL区では1週間で約2倍に、水分の多いCCRH区においては約3倍のフェノールカルボン酸の蓄積がみられた。フェノールカルボン酸は作物の生育を阻害する物質として知られており (藤原ら, 1983)、その蓄積が起きるようなコンポスト化は避けなければならない。そして、フェノールカルボン酸の蓄積を防ぐためには、有機物、BOD、VFAなどの物質と共通して、好気的なコンポスト化が重要な役割を果たしている。

3-4 まとめ

牛ふん-粉碎モミガラ混合区では、未粉碎区に比べてコンポストの温度上昇が遅延した。粉碎モミガラ区の堆積物中には嫌気性部分が出現し、そこにはVFAが蓄積し、BODに代表される易分解性有機物含有量が高くなり、フェノールカルボン酸が蓄積し、腐熟が遅延することが明らかになった。

モミガラを粉碎することによって表面のケイ酸質に損傷を与え、微生物の分解性は向上するものと仮定したが、コンポスト化に関して、粉碎は逆効果となる結果が得られた。すなわち、未粉碎モミガラに比べて、粉碎モミガラは容積重が大きくなり、通気性が悪くなり、腐熟が遅延した。牛ふんのコンポスト化における品温上昇のためには、未粉碎モミガラの通気性を利用し、好気性条件を実現する方がより有効であった。

第4章 鶏ふんのコンポスト化における腐熟プロセス

4-1 研究の目的

比較的大きな実験規模で鶏ふんのコンポスト化を行い、コンポスト化過程における品温、全炭素、全窒素、有機物、ベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン、生物化学的酸素消費量、水溶性の全有機炭素、全窒素、硝酸態窒素、揮発性脂肪酸、さらには陽イオン交換容量やコマツナ種子の発芽率の変化などから、コンポストの腐熟プロセスを明らかにし、第2章の牛ふんとの畜種の違いについて比較検討を行う。

コンポスト化方式については、牛ふんの場合と同様に、機械攪拌区と堆積区の2つ方式を用い、両方式の腐熟プロセスの相違を比較検討する。鶏ふんに混合する副資材については、一般的な副資材のオガクズ区の他に、生物分解性のないパーライト区を設けることによって鶏ふんのみ分解を追跡する。

4-2 材料及び方法

4-2-1 コンポスト化方法

採卵鶏の鶏ふん（水分74.5%）にパーライト（水分3.7%）またはオガクズ（水分49.5%）を表4-1に示すような組成で混合した。その約1m³の混合物について、2通りの方法でコンポスト化実験を行い、コンポスト化方式が腐熟プロセスに与える影響を調べた（図4-1）。ひとつは強制通気を行う機械攪拌コンポスト化（以後、機械攪拌区と呼ぶ）、もうひとつは強制通気を行わない堆積コンポスト化（以後、堆積区と呼ぶ）である。

オガクズを混合した鶏ふんでは、コンポスト化過程でオガクズも分解するた

表4-1 鶏ふんと副資材の混合割合

Test run	Poultry waste(A)	Bulking agent (B)	B/A	Moisture
PPM (Poultry waste+Perlite+Mechanical)	510kg	Perlite 117.4kg	0.23	63.90%
PPP (Poultry waste+Perlite+Piling)	192kg	Perlite 48.5kg	0.25	63.90%
PSM (Poultry waste+Sawdust+Mechanical)	520kg	Sawdust 130kg	0.25	70.18%
PSP (Poultry waste+Sawdust+Piling)	288kg	Sawdust 72kg	0.25	70.18%

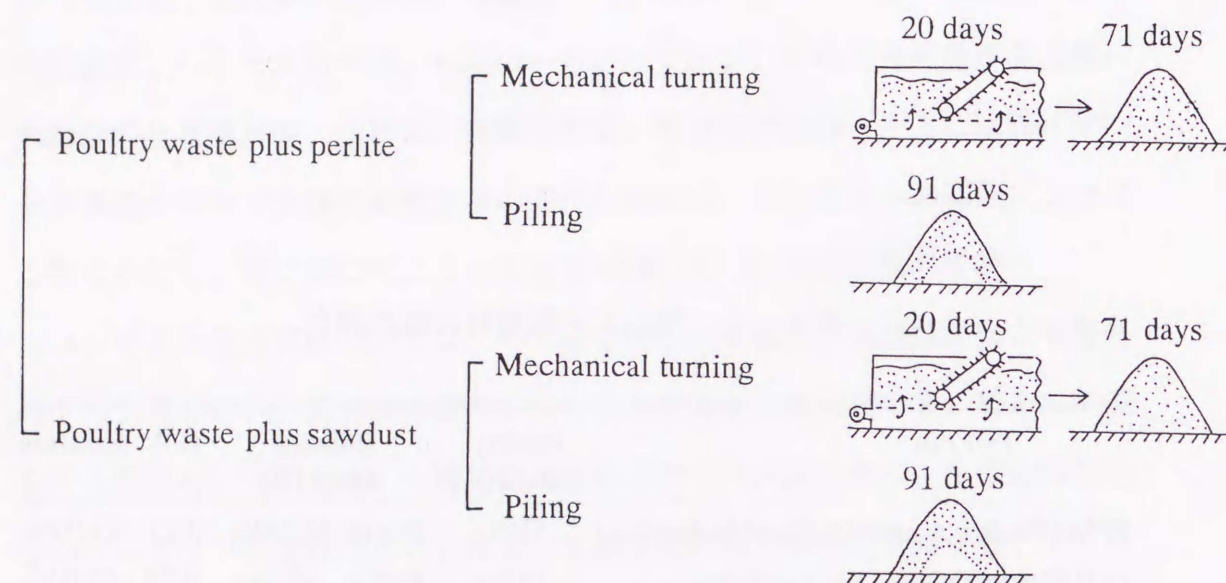


図 4-1 鶏ふんのコンポスト化方式

め、鶏ふんのみ分解を把握することができない。そこで、生物分解性のないパーライトを鶏ふんに混合して、鶏ふんのみ分解を追跡することにした。

機械攪拌区は牛ふんの場合と同様に、図 2-2 に示すような攪拌機（コンポスト約 1m³用のスクープ攪拌式コンポスト化実験装置、駆動モーター 1.5kW）を使用し、下部から強制通気（60L/m³・min）をしながら、最初の 20 日間は 1 回/日の機械攪拌を行った。それ以降 71 日間はコンクリート床上に円錐状に堆積し、人力で 1 回/週の切り返しをしながら、合計 91 日間のコンポスト化を行った（図 4-1）。一方、堆積区は最初からコンクリート床上に円錐状に堆積し、1 回/週の切り返しを人力でしながら、91 日間のコンポスト化を行った（図 4-1）。コンポストの温度は、堆積した山の頂上から 20cm の所に挿入したサーミスターで測定し、打点記録計に記録した。

表 4-1 に示すように、鶏ふんとパーライトを混合した機械攪拌区を PPM（Poultry waste+ Perlite+ Mechanical の略）、鶏ふんとパーライトを混合した堆積区を PPP（Poultry waste+ Perlite+ Piling の略）、鶏ふんとオガクズを混合した機械攪拌区を PSM（Poultry waste+ Sawdust+ Mechanical の略）、鶏ふんとオガクズを混合した堆積区を PSP（Poultry waste+ Sawdust+ Piling の略）と呼ぶ。

4-2-2 分析試料の調製

コンポストの切り返し時点で、機械攪拌装置（機械攪拌区）またはスコップ（堆積区）用いてよく混合した後、数カ所からサンプルを採取し、さらにそれをよく混合したものから分析用サンプルを採取した。また、堆積区においては、コンポストの層位によってサンプルの性質が異なることから、切り返し時点で混合する前に、層位別の分析用サンプルも採取した。

採取したサンプルの一部はビニール袋に密閉して冷蔵庫（約 5℃）に保管

し、なるべく速やかに分析に供した（以下これを新鮮試料と呼ぶ）。また一部は60℃で通風乾燥し、ウィレー粉砕機（1mm）で粉砕した後、振動式粉砕機（平工 T-100）（0.1mm以下）で微粉砕して分析に供した（以下ではこれを微粉砕試料と呼ぶ）。

4-2-3 分析方法

水分、有機物、全炭素（T-C）、全窒素（T-N）、有機成分（ベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン+不溶性窒素化合物）、生物化学的酸素消費量（BOD）、水溶性成分（揮発性脂肪酸（VFA）、全有機炭素（TOC）、全窒素（T-N）、アンモニウム態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）、有機態窒素（Org-N））、コマツナ種子の発芽試験、陽イオン交換容量（CEC）について、「第2章 2-2-3 分析方法」と同様の方法で分析した。

4-3 結果及び考察

4-3-1 コンポスト化における品温の変化

図4-2に示すように、機械攪拌区（PPMとPSM）の上部では、24時間以内に55から70℃に上昇し、1回/日の攪拌によって温度の上下を繰り返しながら高温に達することができた。下部はやや温度が低かったが、これは強制通気によって冷却されたものと考えられる。コンポスト化開始2~3週間で温度の上昇が鈍くなり、4週間くらいではほぼ周囲の温度と近くなった。

堆積区（PPPとPSP）は、最高温度に達するのに、3日を要した。パーライト混合区（PPP）もオガクズ混合区（PSP）も最高温度で60℃くらいまでしか上昇しなかった。このように、機械攪拌区のほうが堆積区よりも温度上昇が早く、最高温度も高かった。コンポスト化を進行させるための基本的な条件として適正な通気による好気性条件の実現は重要である（木村，1999a）。機械攪拌区において強制通気と1回/日の切り返しを行ったことが、コンポスト化に適した好気性条件を作り、早い温度上昇と高温を達成させたことは明らかである。

牛ふんの場合には、パーライト混合区の方がオガクズ混合区よりも温度上昇が早く、最高温度も高かったが（図2-8）、鶏ふんの場合には、それほど大きな差はみられなかった。今回の鶏ふんの試験では、オガクズ混合区の水分が牛の場合よりも低かったことに起因することが考えられる。

4-3-2 全炭素、全窒素、有機物の変化

図4-3に機械攪拌区のコンポスト化過程における灰分、全炭素（T-C）、全窒素（T-N）、C/N比の変化を示す。コンポスト化が開始されると、T-CとC/N比は減少し、灰分とT-Nは増加し、約3週間でどの成分もほぼ一定となった。有機物の分解に伴って、見掛け上、灰分は増加しているが、実際にはほと

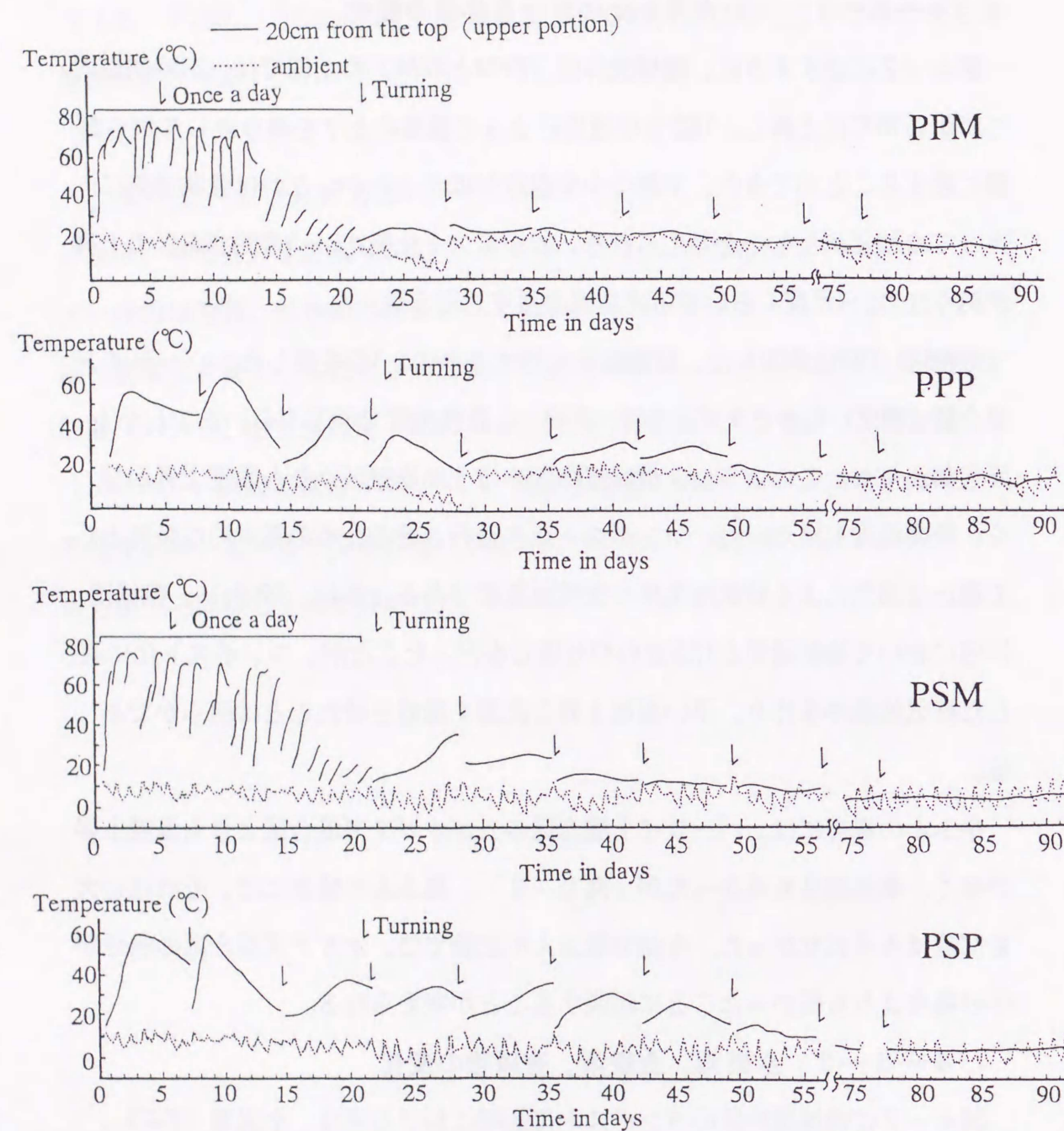


図4-2 鶏ふんのコンポスト化過程における温度の変化

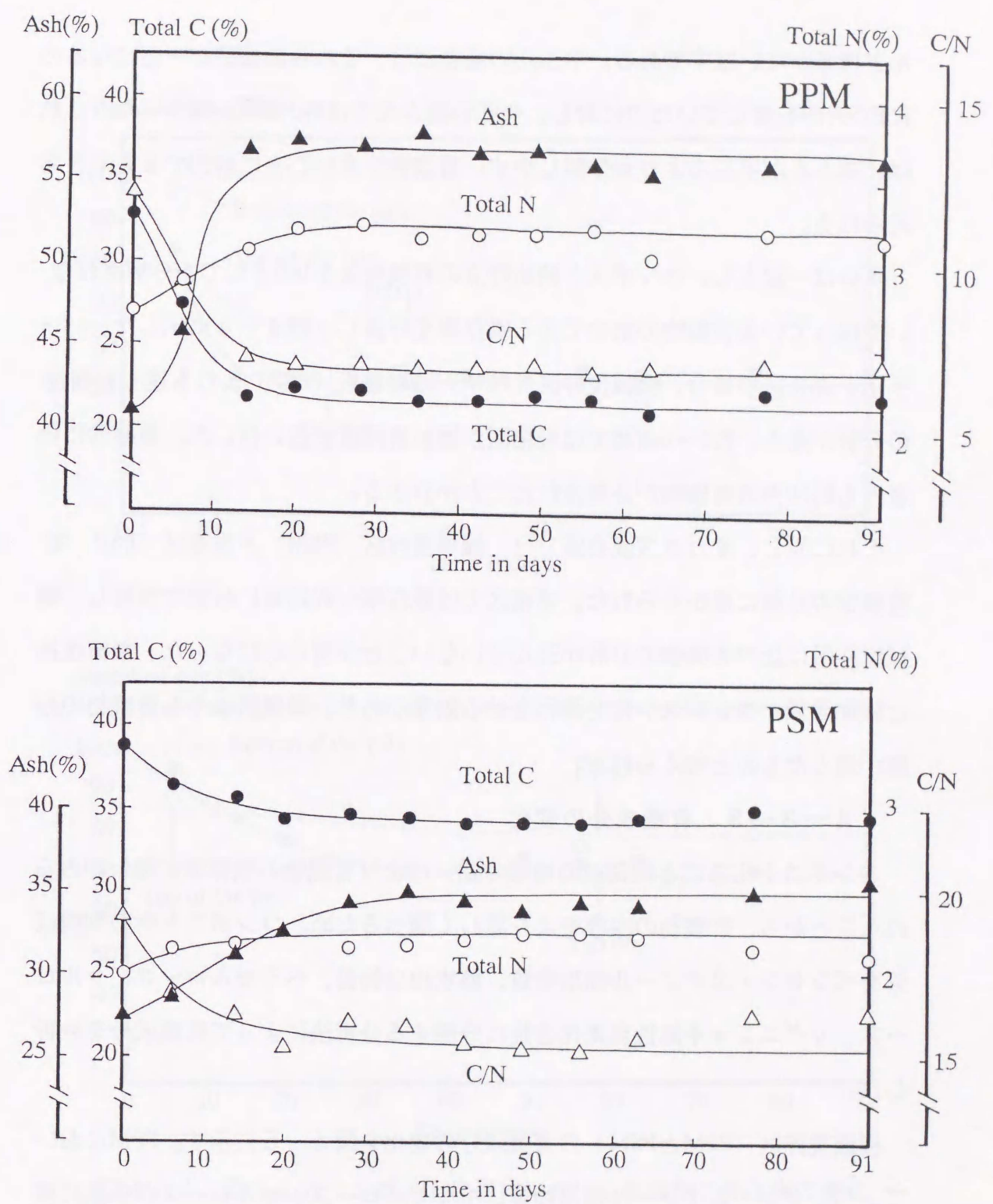


図4-3 機械攪拌区（PPMとPSM）の鶏ふんコンポスト化過程における灰分、全炭素、全窒素、C/N比の変化

んど増減がないはずである。牛ふんの場合には、これらの成分が一定になるのに約5週間を要していたのに対し、今回の鶏ふんでは約3週間と短かった。これは、鶏ふんが牛ふんよりも分解しやすい有機物が多いことに起因するものと考えられる。

灰分は一定とし、コンポスト開始時点の有機物量を100として、分解されないうちに残っている有機物の割合である残存率を計算し、図4-4に示した。パーライト混合区の場合、機械攪拌区（PPM）は堆積区（PPP）よりも速く有機物の分解が進み、約5～6週間では堆積区が機械攪拌区に追い付いた。最終的に両者とも約50%の有機物が分解されたことが分かる。

それに対し、オガクズ混合区では、機械攪拌区（PSM）と堆積区（PSP）で有機物の分解に差がみられた。堆積区では残存率が終始高い状態で推移し、機械攪拌区に比べ有機物の分解が進んでいないことが明らかになった。機械攪拌と強制通気がコンポスト化を進行させる効果があり、堆積区よりも有機物の分解が進んだものと考えられる。

4-3-3 有機成分の変化

コンポスト化方式と副資材の種類の違いにより有機物の残存率に違いがみられたことから、有機物の内容をより詳しく調べるため、コンポスト中の有機成分をベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン+不溶性窒素化合物に分画する分析法によって有機成分を分析した。

機械攪拌区（PPMとPSM）の有機成分の変化を図4-5に示す。PPMにおいて、ベンゼン・エタノール抽出物質、ヘミセルロース、セルロースが急激に減少、リグニンに若干の増加がみられた。PSMでは、オガクズの影響で変化が明確には現れてこなかった。パーライトを使用したことによって、ふん自体の分解が明確に現れたものと考えられる。

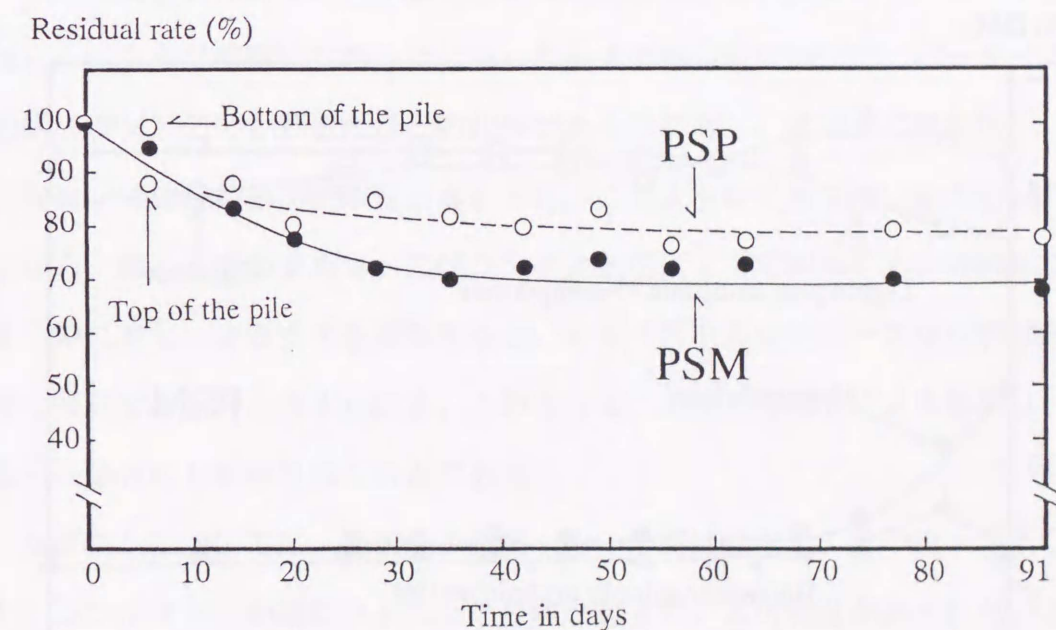
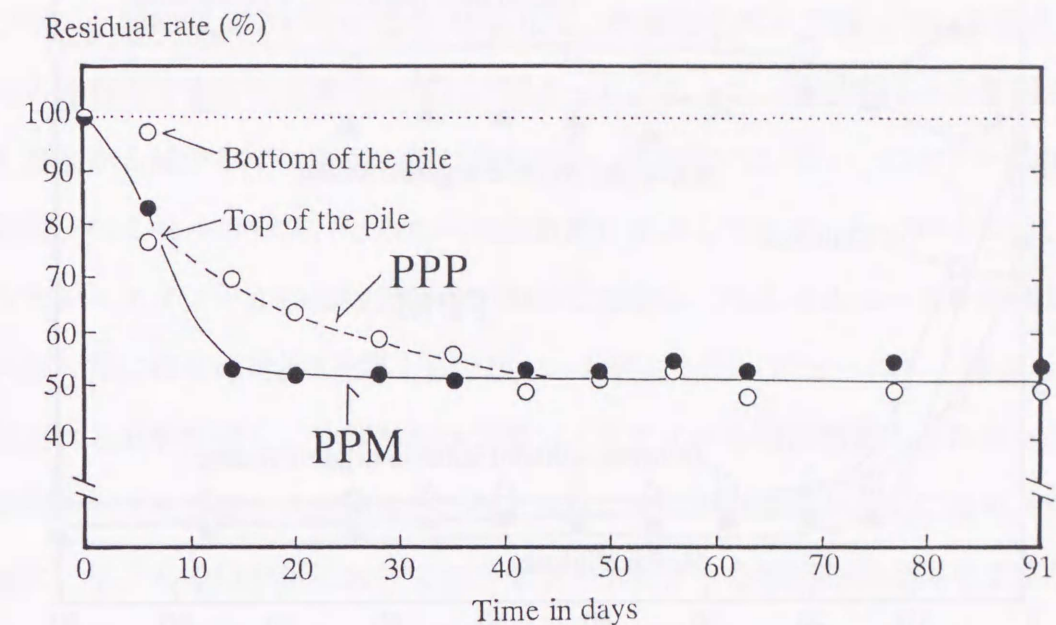


図4-4 鶏ふんのコンポスト化過程における有機物の残存率の変化

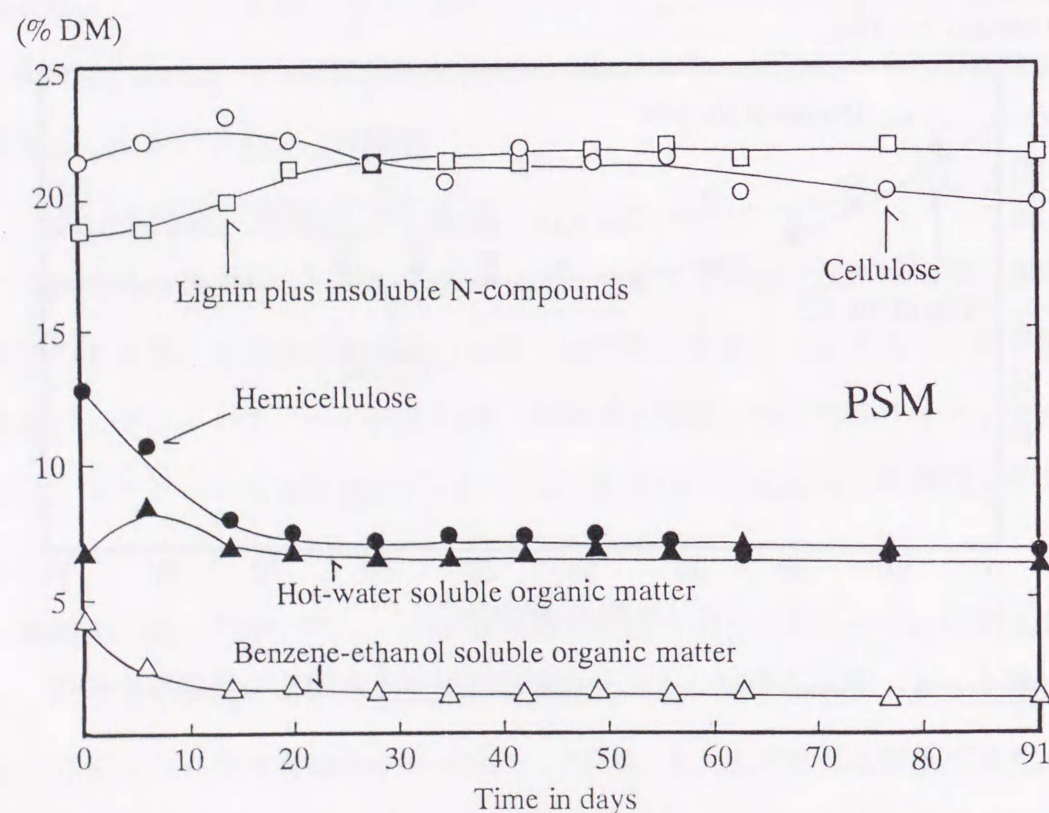
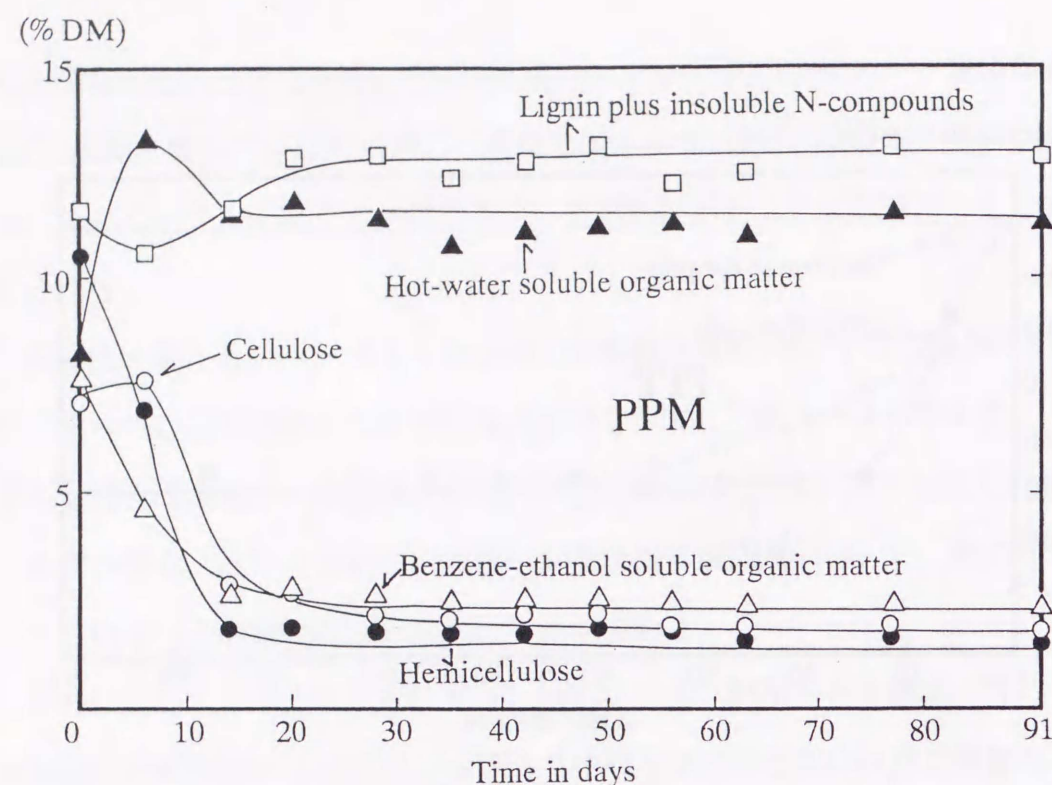


図4-5 機械攪拌区（PPMとPSM）の鶏ふんコンポスト化過程における有機成分含有量の変化

ふんに含まれる有機成分の分解率を明確にするため、図4-4と同様に、コンポスト開始時点の初発の量を100として、分解されないで残っている割合である残存率で表した（図4-6）。図4-6において、PPMではどの有機成分も最初から減少しているが、特に最初の2～3週間でベンゼン・エタノール抽出物質、ヘミセルロース、セルロースが急激に減少していた。牛の場合には、ベンゼン・エタノール抽出物質のみが初期に減少し、ヘミセルロース、セルロースが一定になるには約5週間くらいかかったのに対し（図2-12）、鶏ふんではどれも分解が速く、分解率もベンゼン・エタノール抽出物質とセルロースが80%、ヘミセルロースが90%と、ヘミセルロースの分解率がとくに高かった。また、牛ふんのCPM区においてベンゼン・エタノール抽出物質は後半でまた再度増加する傾向がみられたが、鶏ふんではその現象は観察されなかった。

熱水抽出物質はオガクズ添加区で80%の残存率を示したが、パーライト区ではとくに大きな特徴はなかった。セルロースの残存率について、パーライト添加区（PPM）の方が顕著に低く約20%であるのに対し、オガクズ添加区

（PSM）では残存率が約80%と高かった。このような大きな違いがみられたことから、鶏ふん中のセルロースはコンポスト化によって80%くらい分解してしまうのに対し、オガクズを添加すると、オガクズ中のセルロースが分解せずに多く残存するものと考えられる。このような、オガクズ添加による影響は、牛ふんの場合にも観察されたことである。

リグニンについては、最初の3週間くらいの間に減少し、その後一定となった。コンポスト化初期にリグニンの分解が起きている可能性が示されたことは興味深い。

4-3-4 生物化学的酸素消費量（BOD）の変化

有機成分の分析によって、ベンゼン・エタノール抽出物質のようにコンポスト化初期に急激に減少する成分がみられ、微生物によって分解されやすい有機

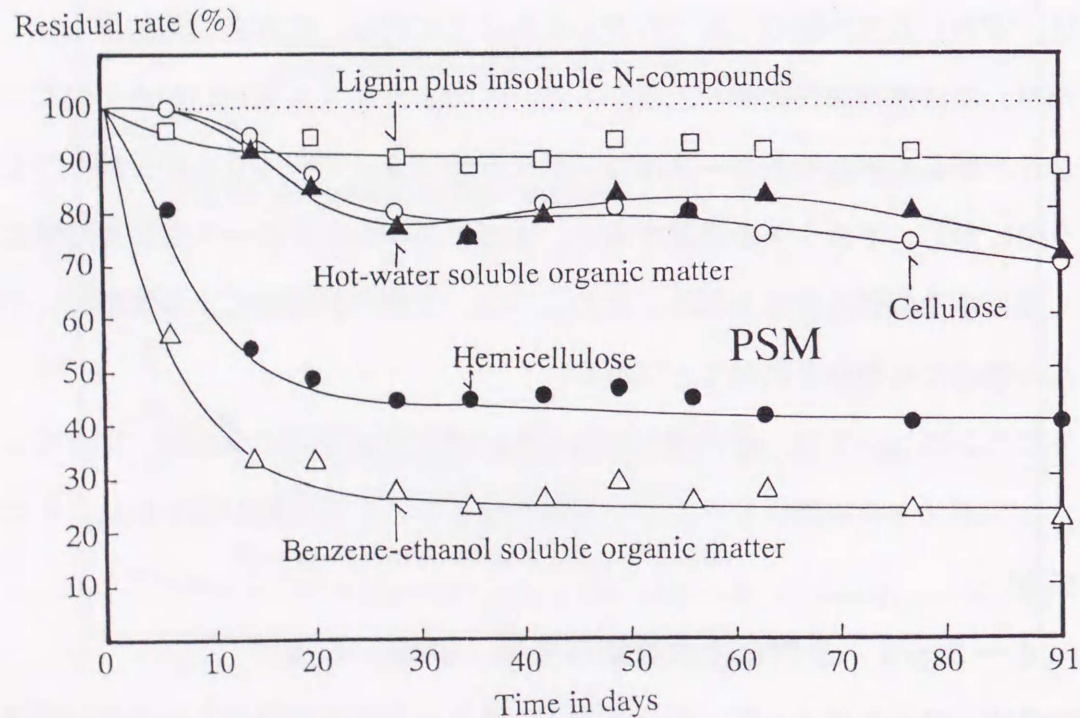
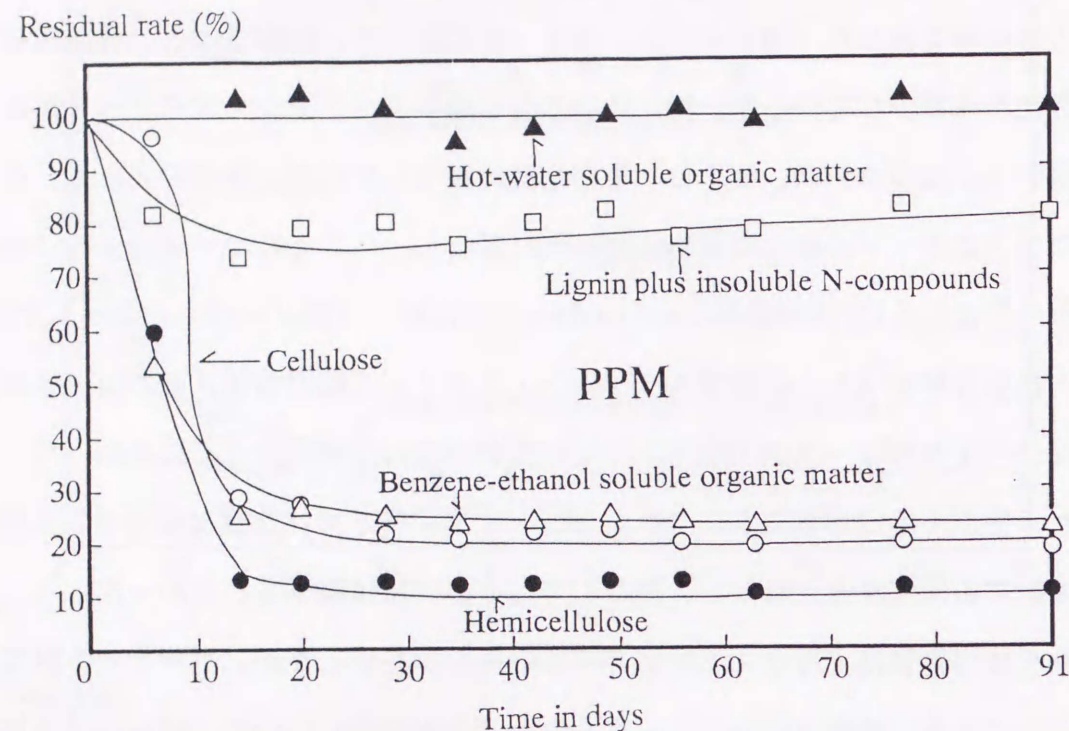


図4-6 機械攪拌区 (PPMとPSM) の鶏ふんコンポスト化過程における有機成分残存率の変化

物（易分解性有機物）の存在が示唆された。そこで、微生物によって分解されやすい代表的な物質である生物化学的酸素消費量（BOD）の変化を調べた。

鶏ふんパーライト混合区（PPPとPPM）のコンポスト化過程におけるBODの変化をT-Cと比較して図4-7に示す。BODはコンポスト化開始直後から急激に低下し、15～20日くらいではほぼ一定となった。T-Cが一定となるのも約20日であるから、BODとT-Cが一定となる時期がほぼ一致している。この点は難分解性有機物を多く含む牛ふんの場合と異なる点である。

鶏ふんパーライト混合区のコンポスト化過程における各試料について、BOD測定時に記録された酸素吸収曲線の変化を図4-8に示す。コンポスト化開始時点の初発混合物の吸収曲線の勾配は急であった。とくに培養初期にその勾配は急であり、培養後半ではややゆるやかな曲線型の酸素吸収を示した。コンポストの進行とともに、勾配が緩く直線型の酸素吸収になっていった。

そこで、各コンポスト試料の酸素の吸収速度をより明らかにするため、酸素吸収速度（ $\text{mgO}_2/\text{gDM} \cdot \text{day}$ ）の変化を図4-9に示す。コンポスト化開始時点の初発混合物は特徴的な2つのピークを示したが、コンポスト化の進行とともに、ピークが消滅し平坦な酸素吸収速度を示すようになった。初発混合物が示す2つのピークは、易分解性有機物の中でも、さらに分解性に難易の差がある2種類の有機物の存在を示しているものと考えられる。そして、コンポスト化の進行とともに、これらの物質は急激に分解するため、6日以降の試料では、初発混合物が示す大きいピークはみられない。

4-3-5 水溶性成分の変化

コンポスト化反応はコンポスト表面存在する微生物によって進行しているが、微生物は水溶液中の化学成分を変化させている。したがって、コンポスト中の水溶性成分の変化を調べることは、コンポスト化反応を知る上で重要であ

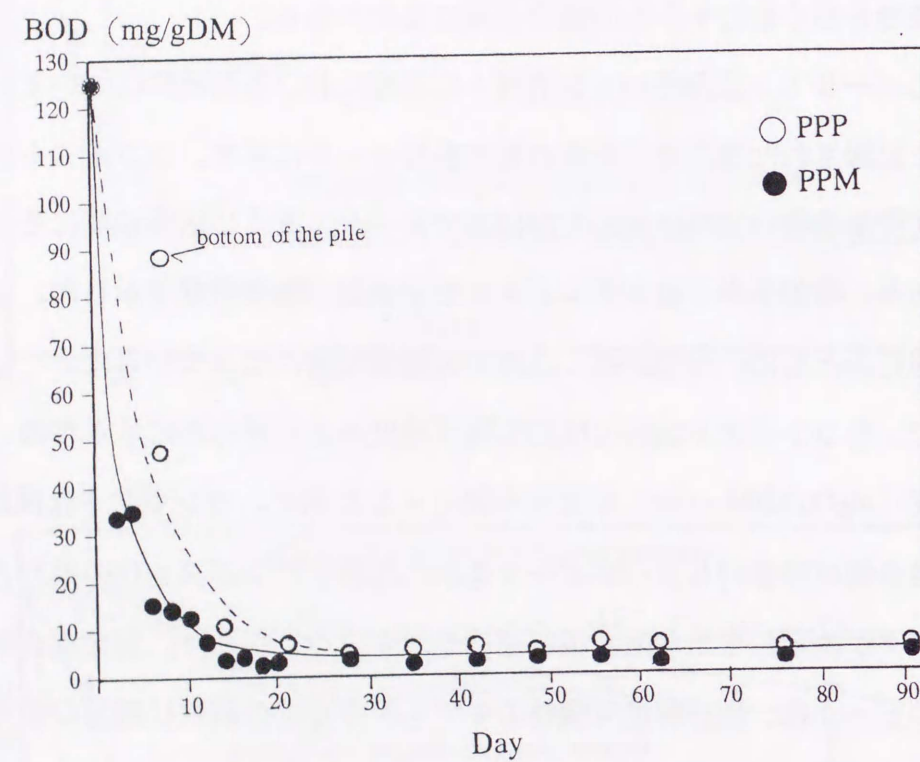


図 4-7 鶏ふん-パーライト混合区 (PPMとPPP) のBODの変化

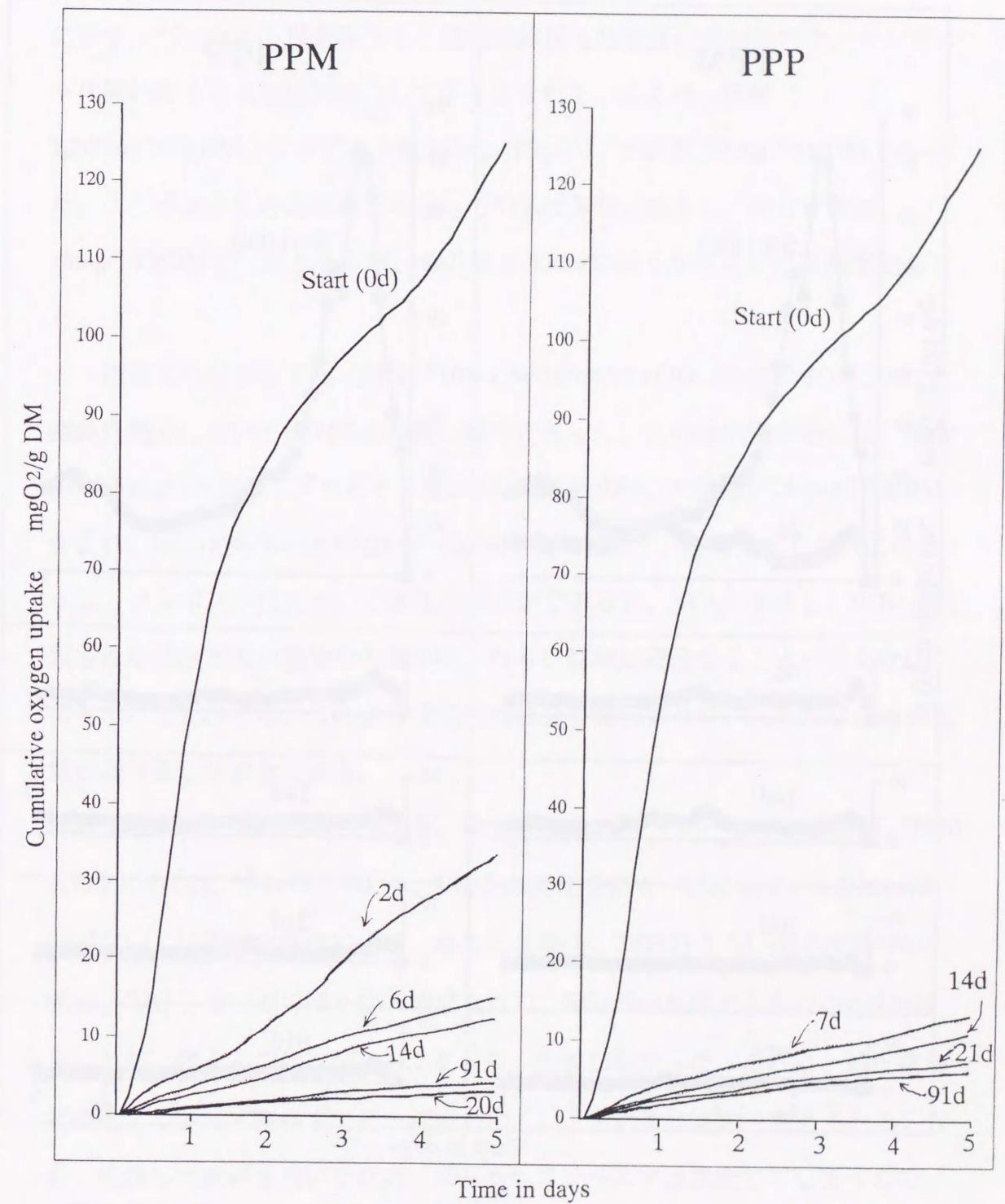


図 4-8 鶏ふん-パーライト混合区 (PPMとPPP) のコンポスト化過程における各試料の酸素吸収曲線の形状の変化

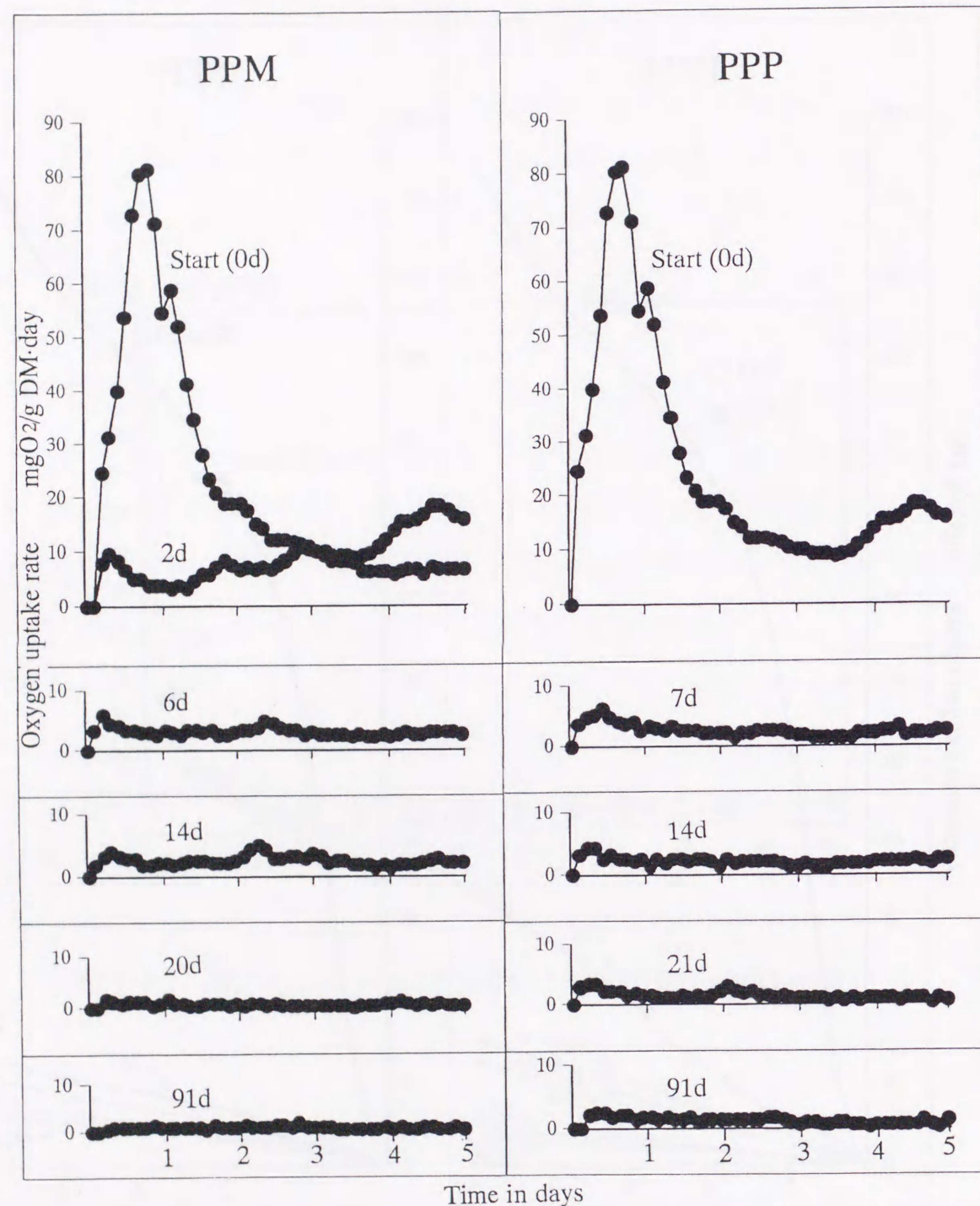


図4-9 鶏ふん-パーライト混合区 (PPMとPPP) のコンポスト化過程における各試料の酸素吸収速度の変化

る。

VFAの変化 パーライト混合区 (PPMとPPP) のVFAの変化を図4-10に示す。パーライト混合区でも、機械攪拌区も堆積区に差が現れた。コンポスト化開始時点の水溶性VFAとして多く含まれているのは、酢酸 1,200mg/100gDM、プロピオン酸507mg/100gDM、n-酪酸308mg/100gDMであった。コンポスト化の進行にともなうVFAは急激に減少し、20日でほぼ 10mg/100gDMで一定となるが、その濃度はPPPのほうが明らかに高濃度であった。

一週間目の堆積物下部 (図4-10中CSPのbottom of the pileを示す) に現れた嫌気性部分においてはVFAの蓄積が顕著であった。この嫌気性部分には、酢酸が1,500mg/100gDM、プロピオン酸が370mg/100gDM、n-酪酸が240mg/100gDM含まれ、BODの8,700mg/100gDM (図4-7) と高く、酸味臭がした。このように、コンポスト化において嫌気性部分ができると、VFAが蓄積し、BODに代表される易分解性有機物含有量が高くなり、腐熟が遅延することが明らかになった。したがって、このような嫌気性部分を発現させないためには、強制通気と切り返しが有効である。

水溶性T-N、NH₄-N、NO₃-N、Org-Nの変化 パーライト混合区 (PPMとPPP) のT-N、NH₄-N、NO₃-N、Org-Nの変化を図4-11に示す。T-Nはほぼ一定ないしは微増の傾向にある。牛ふんの場合、20日目くらいからNO₃-Nが生成し、50日目くらいでほぼ一定の濃度となり、NO₃-Nの生成とともにOrg-Nが減少したが、鶏ふんでは、NO₃-Nはまったく生成しなかった。これは、硝化菌が高濃度アンモニア条件下では、活動しにくいことによるものと考えられる。なお、乾燥した試料を用いたため、NH₄-Nやアンモニアは揮散してしまうので、今回のNH₄-N測定値は正しくないと考える。

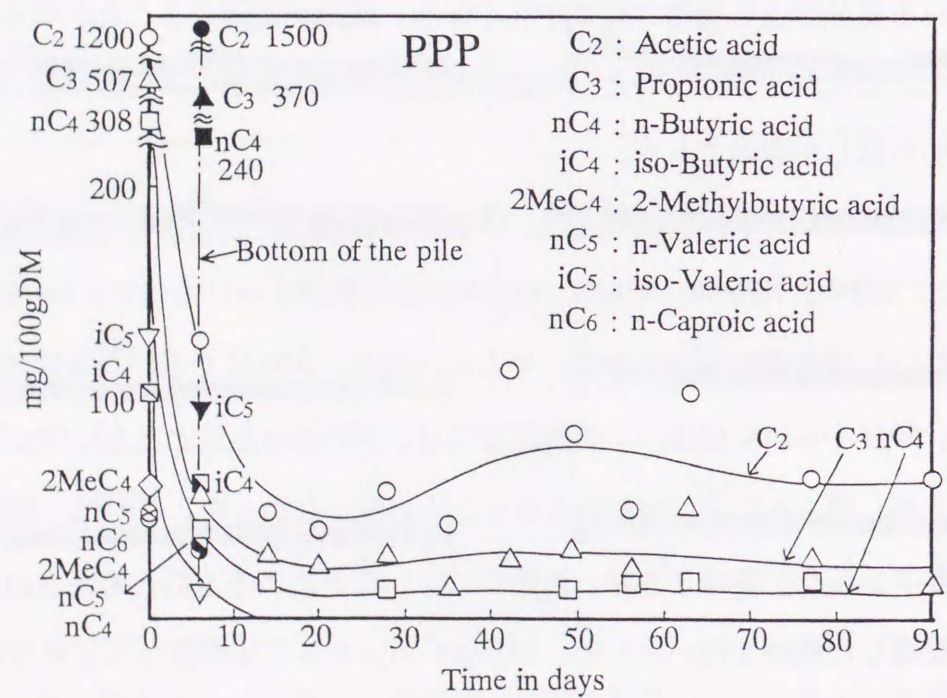
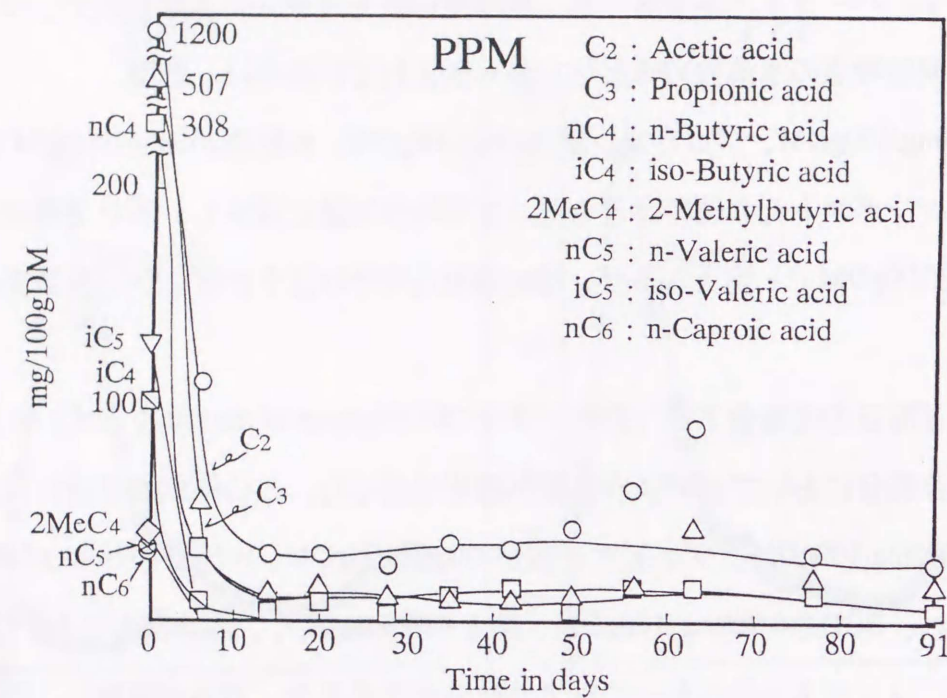


図4-10 鶏ふん-パーライト混合区 (PPMとPPP) のVFAの変化

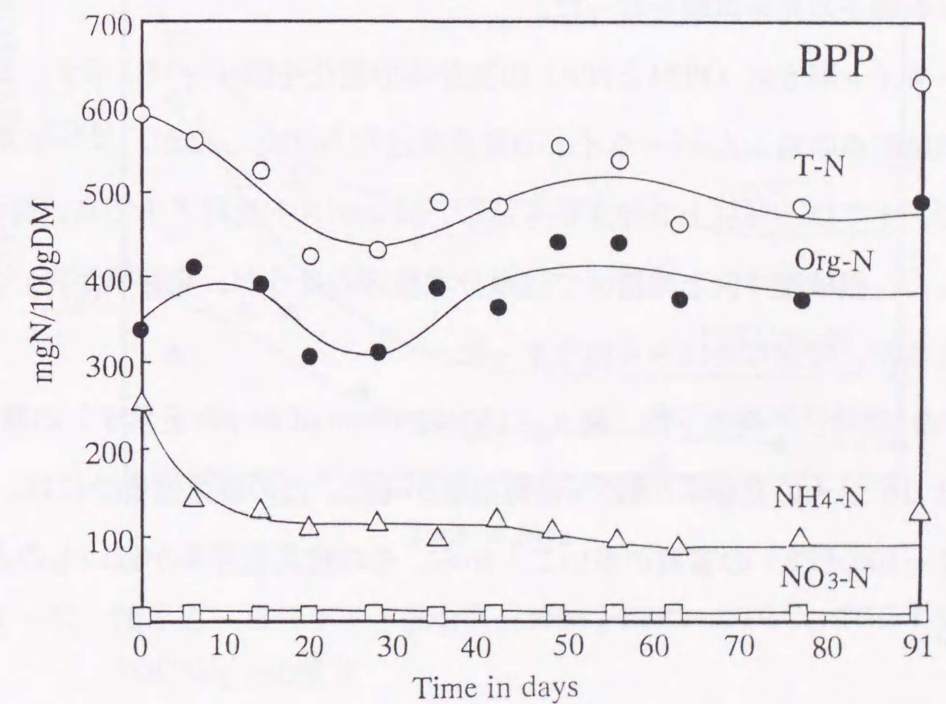
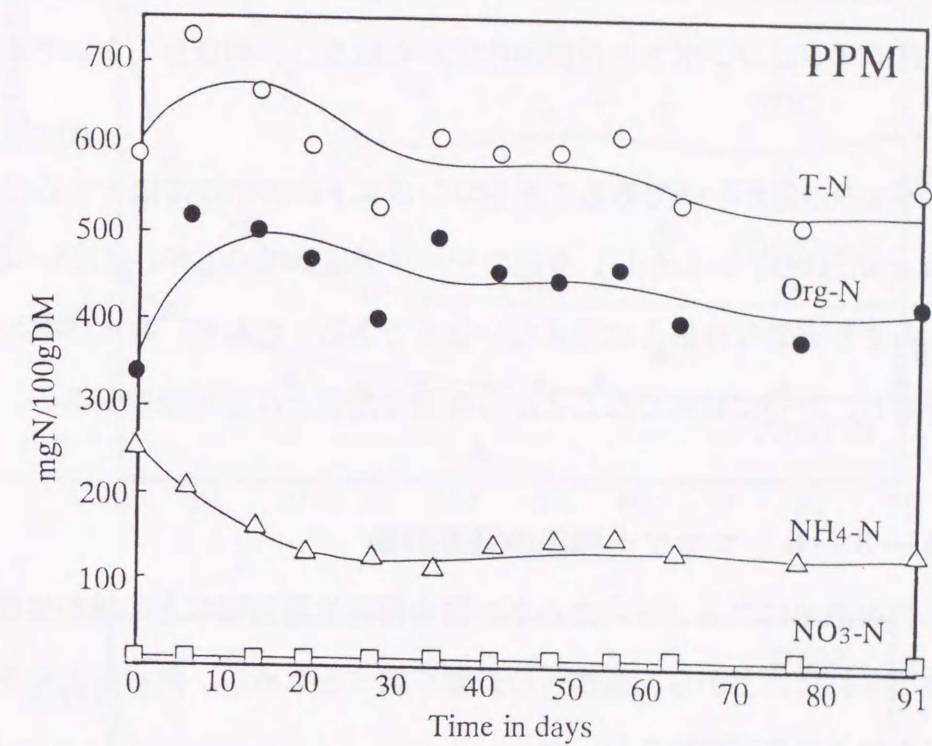


図4-11 鶏ふん-パーライト混合区 (PPMとPPP) のT-N、NH₄-N、NO₃-N、Org-Nの変化

水溶性TOC、TOC/T-N、TOC/Org-Nの変化 パーライト混合区（PPM

とPPP）の水溶性のTOC、TOC/T-N、TOC/Org-Nの変化を図4-12に示す。

TOCとTOC/T-Nはコンポスト化開始時期から減少し、40日目くらいで一定となった。

TOC/Org-Nの値が5～6であることをコンポストの腐熟の指標とする説がある（Hirai *et al.*, 1983）。しかし、今回のデータではTOC/Org-Nの値は5～6に収束せず、あまり有効な指標とは言えないようである。むしろ、TOC/T-Nのほうが値が安定し、2～3に収束したことから有望な指標となる可能性がある。

4-3-6 コマツナ種子の発芽試験

熱水抽出液中にフェノールカルボン酸や揮発性脂肪酸などの植物生育阻害物質が検出されたことから、植物への影響を調べるために、熱水抽出液を用いてコマツナ種子の発芽試験を行った。

パーライト混合区（PPMとPPP）の発芽率の変化を図4-13に示す。コンポスト開始時点の鶏ふん-パーライトの発芽率は7.1%であったが、コンポスト化1週間で、すでに70%以上の発芽率を示し、コンポスト化終了まで高い発芽率を維持した。機械攪拌区と堆積区では幾分堆積区のほうが、発芽率が良いようにも見えるが、有意な差はみられなかった。

PPPの1週間目の堆積下部（図4-13中のbottom of the pileを示す）の嫌気性部分ではコマツナの発芽率が約5%と特に悪かった。この嫌気性部分には、VFA（図4-10のPPP）の蓄積が多いことから、その結果発芽率が低いものと考えられる。

4-3-7 陽イオン交換容量（CEC）の変化

パーライト混合区（PPMとPPP）のCECの変化を図4-14に示す。CECは乾

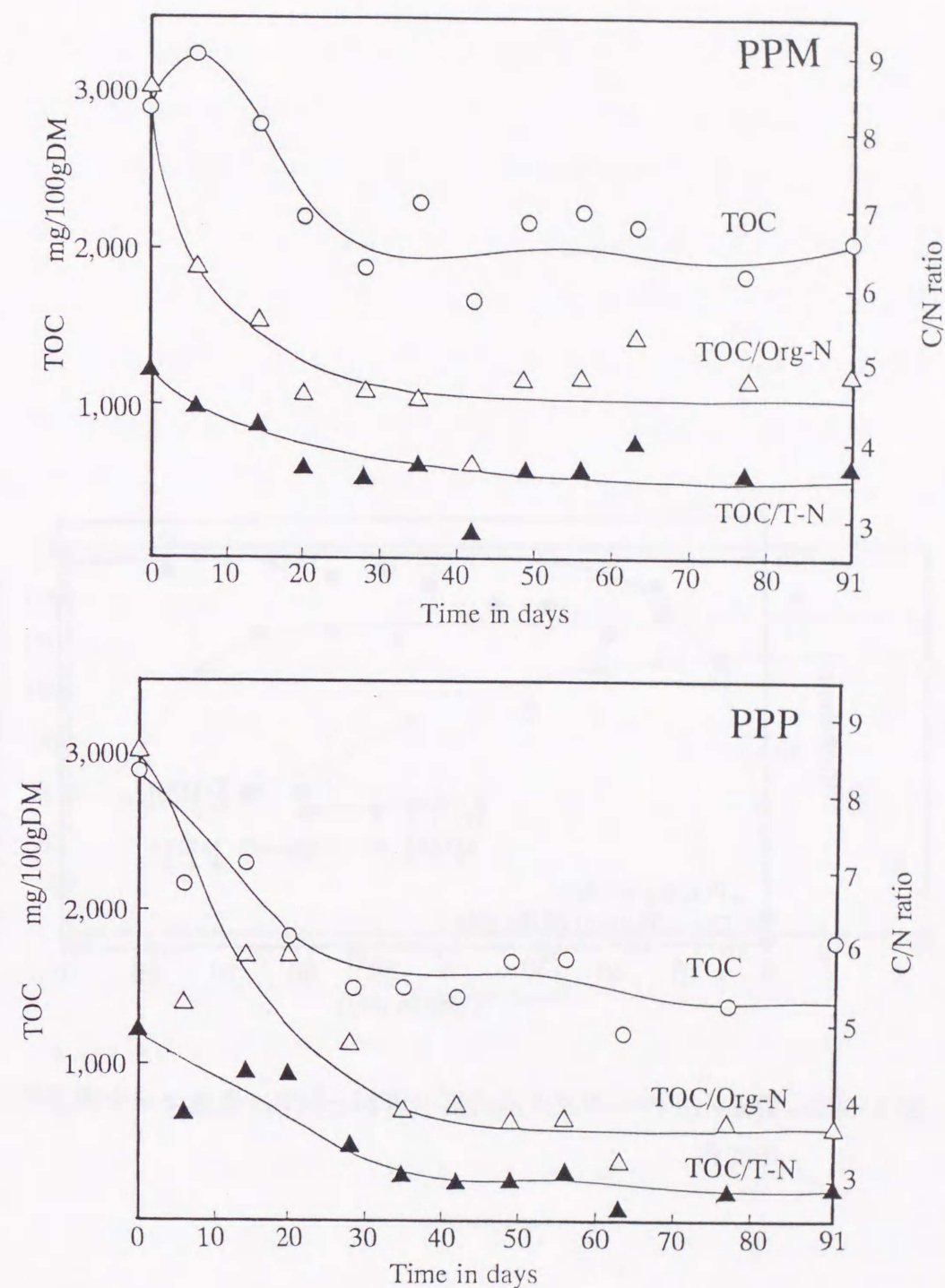


図4-12 鶏ふん-パーライト混合区（PPMとPPP）のTOC、TOC/T-N、TOC/Org-Nの変化

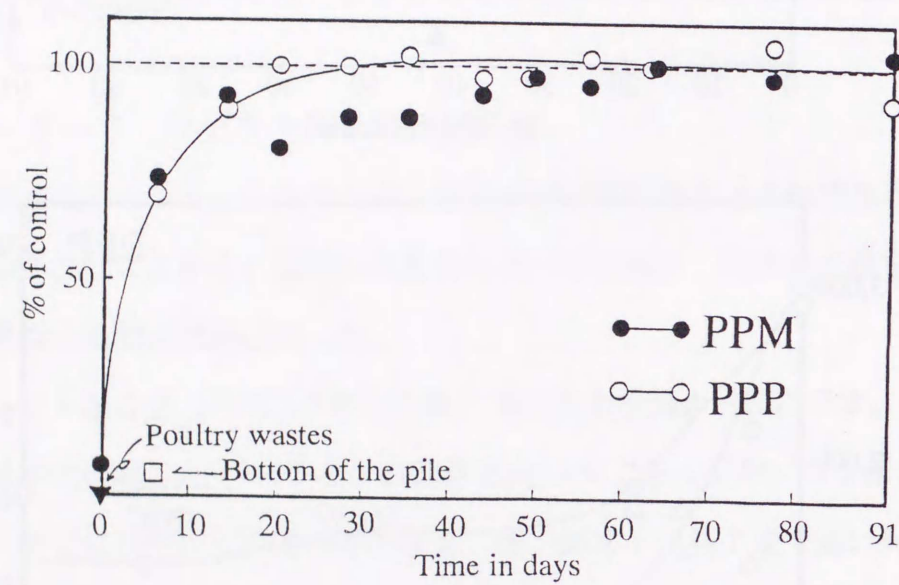


図 4-13 鶏ふん-パーライト混合区 (PPMとPPP) のコマツナ種子発芽率の変化

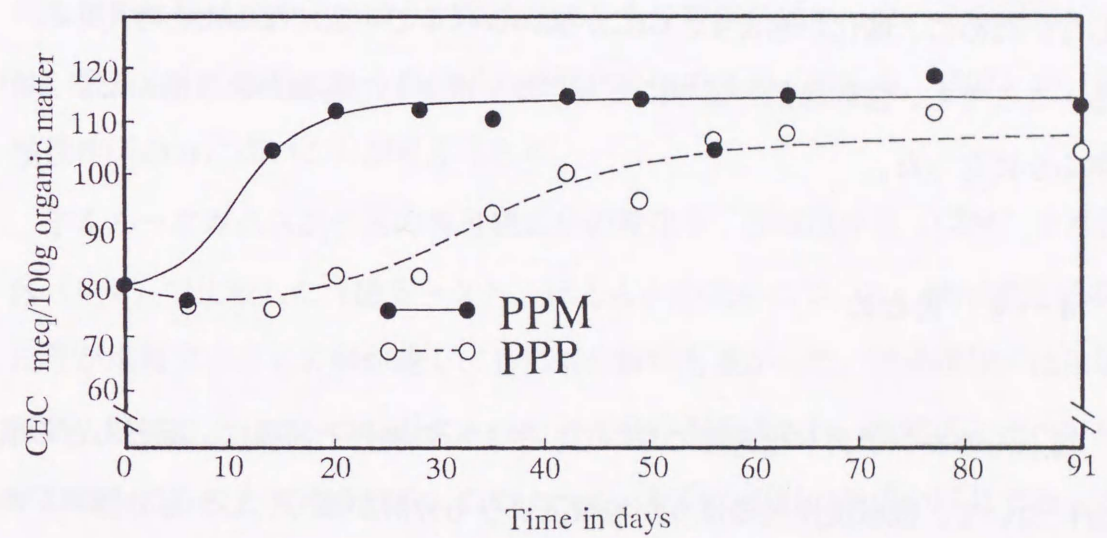


図 4-14 鶏ふん-パーライト混合区 (PPMとPPP) のCECの変化

物100g当たりで示すと余り明確な変化がみられないが、有機物100gあたりで表示することで、変化を明確に表すことができた。PPM区のCECはコンポスト化の進行とともに増加し、30日目位で一定値115mcq/100g有機物となった。都市ゴミでは60mcq/100g有機物以上の場合が腐熟の指標となっているから（Harada and Inoko, 1980）、それよりも高い値となった。

堆積区では機械攪拌区よりも低い値で一定となった。CECの増加はコンポスト反応である酸化反応によって、有機物の表面のカルボキシル基等が増加するためと考えられる。堆積区では機械攪拌区に比較してコンポストが十分に進行しないために、酸化が進まず、CECが低いレベルで一定になったと考えられる。ここでも、強制通気と攪拌によってコンポストの腐熟がより進んだことが明らかになった。

4-4 まとめ

鶏ふんのコンポスト化過程において、牛ふんの場合と同様に、ほとんどの成分について、機械攪拌区のほうが堆積区よりも分解が速く、しかも分解率が高かった。機械攪拌区は強制通気と攪拌によって、コンポスト化の適正条件が達成され、堆積区に比べて分解が進んだものと考えられる。

生物化学的酸素要求量（BOD）は易分解性有機物の指標として有効であり、コンポスト化初期に急激に分解する点は、牛ふんの場合と同様であった。しかし、セルロース・ヘミセルロースの分解が一定となる時期が、BODとほぼ一致しており、しかも分解率が牛ふんより高いことは、鶏ふんの分解しやすい特性を示している。このように、鶏ふんでは、第1次過程と第2次過程がほとんど一緒になる傾向がみられ、第1次過程が終了したことを知る指標として牛ふんの場合には有効であった硝酸態窒素は、鶏ふんでは検出されなかった。

第5章 コンポスト化操作からみた腐熟プロセスの比較

5-1 機械攪拌区と堆積区の腐熟プロセスの比較

牛ふん—パーライト混合区における各有機成分の残存率の変化を、機械攪拌区（CPM）と堆積区（CPP）で比較した（図5-1）。ベンゼン・エタノール抽出物質、ヘミセルロース、セルロースでは機械攪拌区の分解が速く分解率が70～75%に達したが、熱水抽出物質は両区で差がなく、リグニン+不溶性窒素化合物では機械攪拌区のほうが堆積区よりも分解率が低かった。この原因には、家畜ふんの腐熟に伴う高分子の窒素化合物の集積（岡田ら, 1997）が、機械攪拌区の方に高いことが考えられる。

牛ふん—オガズ混合区の各有機成分の変化を、機械攪拌区（CSM）と堆積区（CSP）で比較した（図5-2）。ほとんどの成分について、機械攪拌区のほうが堆積区よりも分解が速く、しかも分解率も高かった。機械攪拌区は強制通気と攪拌によって、コンポスト化の適正条件が達成され、堆積区に比べて分解が進んだものと考えられる。このように、初発の原料の組成が同じであっても、コンポスト化の条件が異なると、腐熟プロセスに大きな違いが現れた。さらに、機械攪拌区に比べて堆積区は単に時間的に腐熟プロセスが遅延しているだけではなく、最終的な到達点としての各種成分の分解率（残存率）到達点にも違いが現れた。したがって、強制通気や攪拌装置を装備したコンポスト化装置は、コンポストの腐熟にとって重要な役割を果たしていることが示唆される。

鶏ふん—パーライト混合区における各有機成分の変化を、機械攪拌区（PPM）と堆積区（PPP）で比較した（図5-3）。ヘミセルロースとセルロースにお

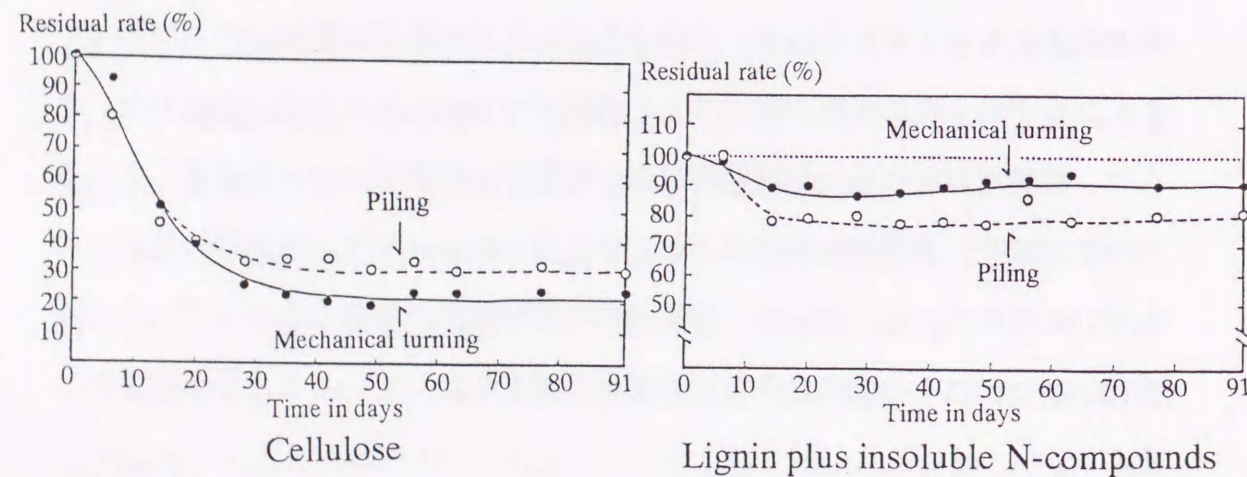
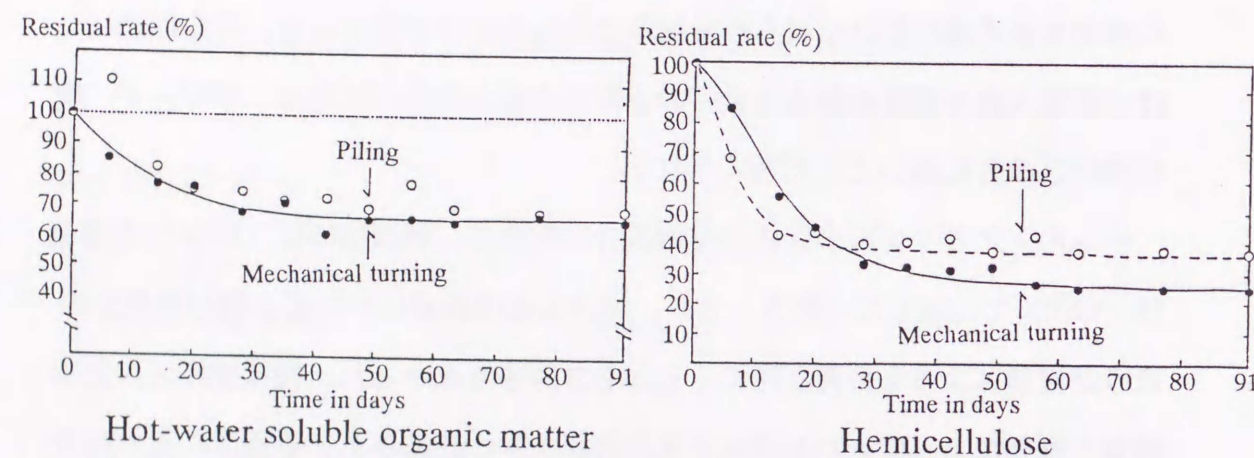
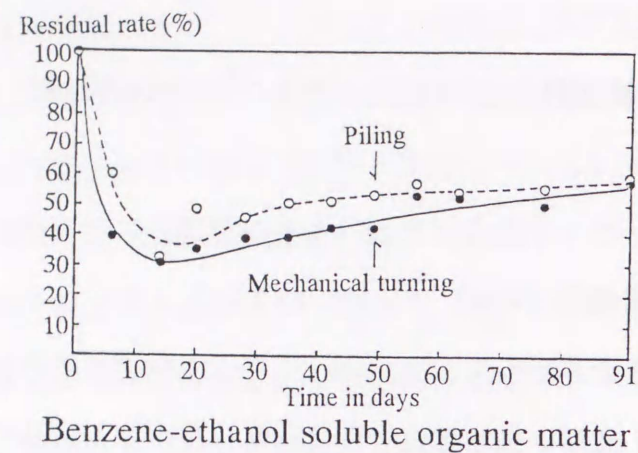


図5-1 牛ふん-パーライト混合区 (CPMとCPP) における有機成分の変化の比較

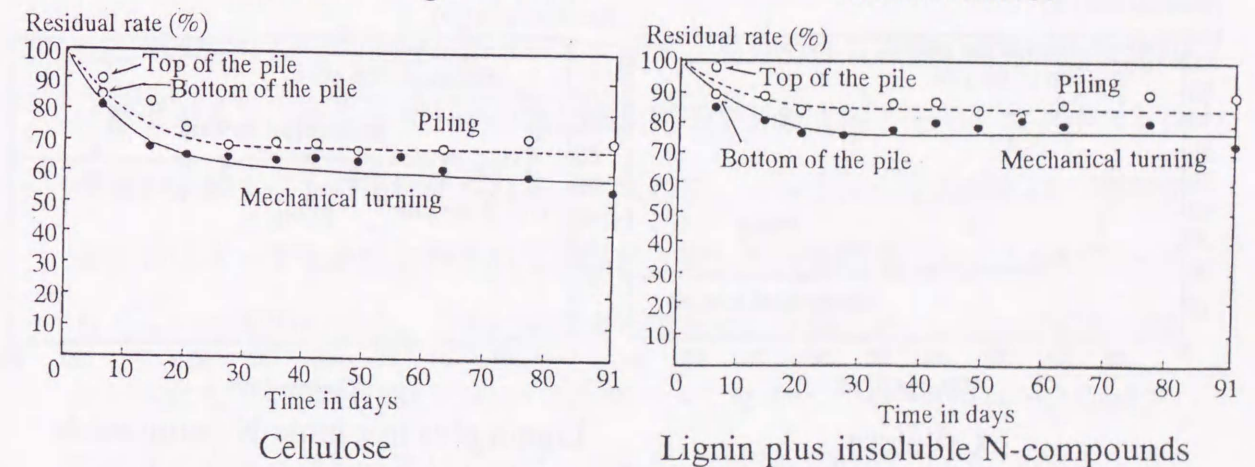
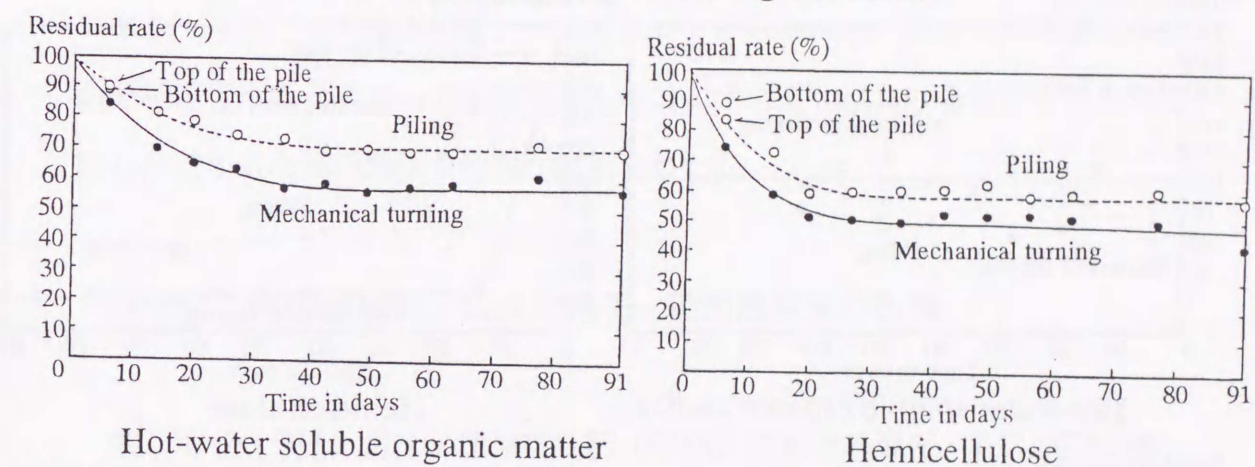
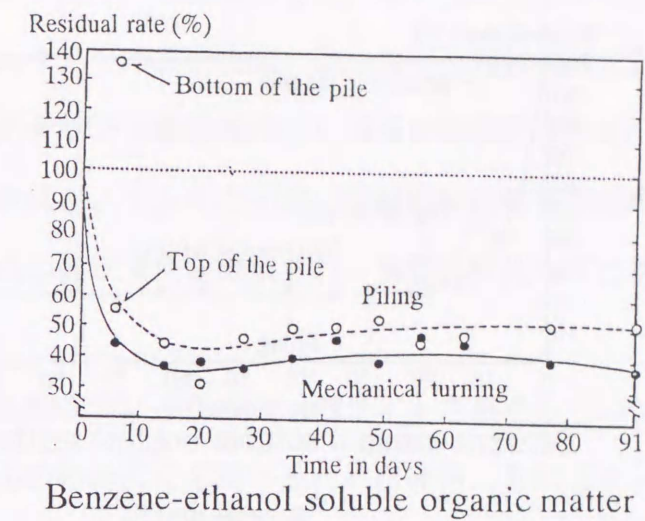


図5-2 牛ふん-オガクズ混合区 (CSMとCSP) における有機成分の変化の比較

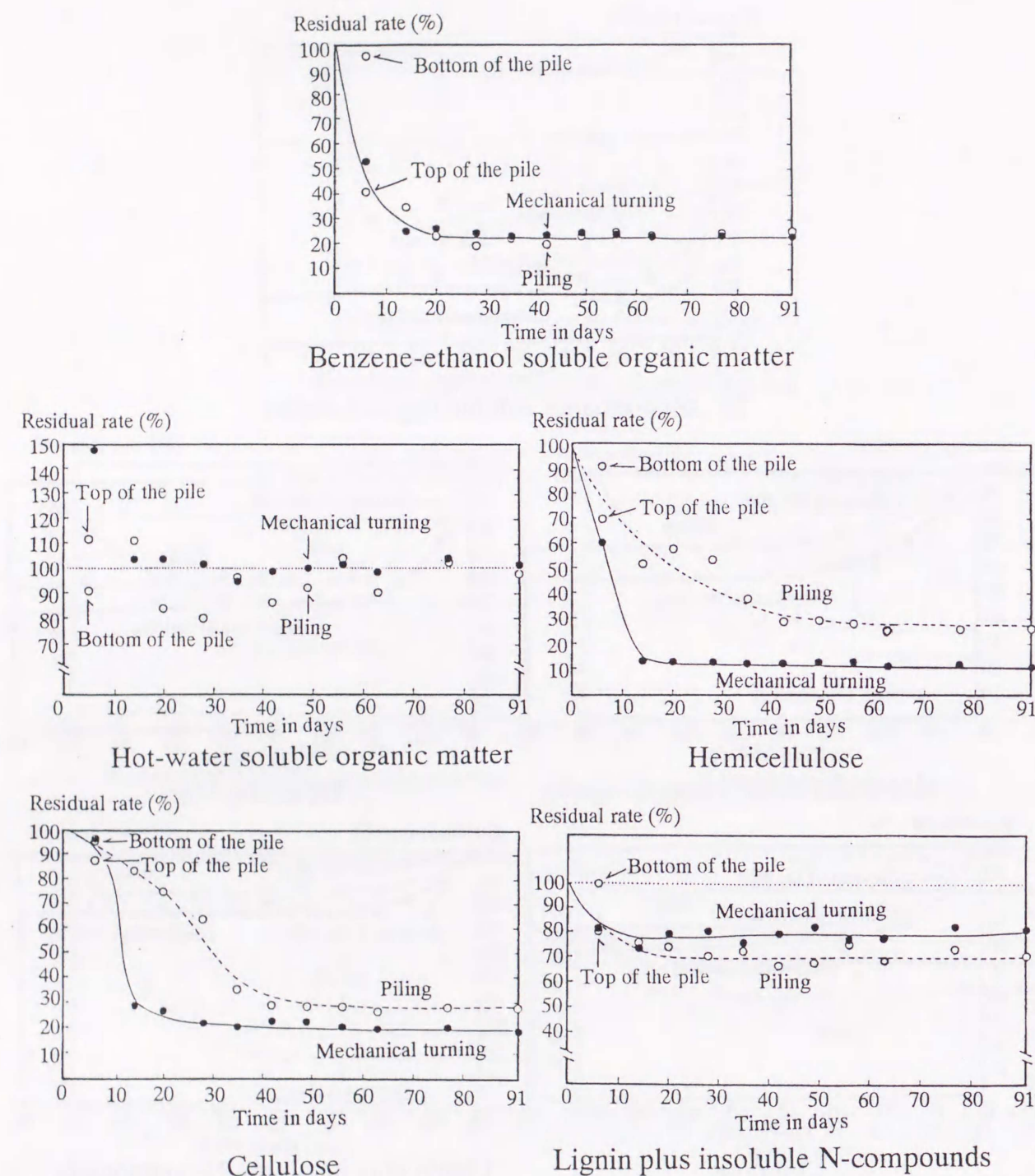


図 5-3 鶏ふん-パーライト混合区 (PPMとPPP) における有機成分の変化の比較

いて、機械攪拌区のほうが堆積区よりも分解が速く、しかも分解率も高かった。ベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質は両区で差がなく、リグニン+不溶性窒素化合物では機械攪拌区のほうが堆積区よりも分解率が低かった。鶏ふんの場合にも、牛ふんと同様に機械攪拌区は強制通気と攪拌によって、コンポスト化の適正条件が達成され、堆積区に比べて分解が進んだものと考えられる。

このように、生物学的に不活性なパーライトを混合してコンポスト化を行うことは、家畜ふんのみの変化を調べるために非常に有効であった。そして、ベンゼン・エタノール抽出物質、ヘミセルロース、セルロースなどの有機性成分の分析を行うことによって、家畜ふんのコンポスト化における腐熟プロセスを明らかにするための重要な情報が提供された。

5-2 BODの低減、温度の低下、硝酸態窒素の出現

牛ふんパーライト混合・機械攪拌区 (CPM) における温度、T-C、C/Nの変化とBODの変化との比較を図 5-4 に示す。易分解性有機物の指標としてBODは重要であり、コンポスト中の微生物がBODを分解することで、コンポストの温度が上昇するものと考えられる。すなわち、コンポスト化初期には、BODが微生物によって急激に分解されて品温が上昇して高温領域に達するが、15~20日くらいでBODの減少とともに品温も中温領域に下降した。一方、T-Cの分解が一定になるのは5週間目くらいであり、ヘミセルロースやセルロースの減少が止まるときとほぼ一致していた。さらに、CECも5週間くらいで一定となった。

このとき、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はBODが低下した15~20日目くらいから出現した (図 5-5)。すなわち、中温領域に温度が低下したことで硝化菌が活動しやすくなっ

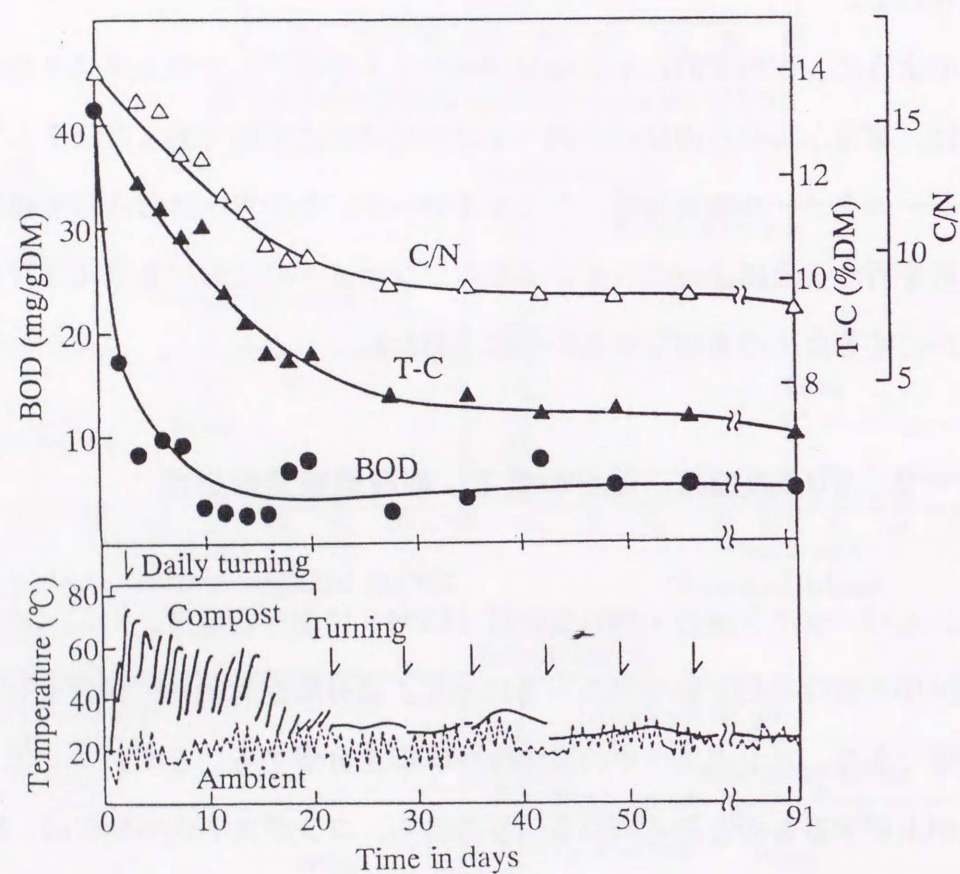


図5-4 牛ふん-パーライト混合・機械攪拌区(CPM)における温度、T-C、C/Nの変化とBODの変化との比較

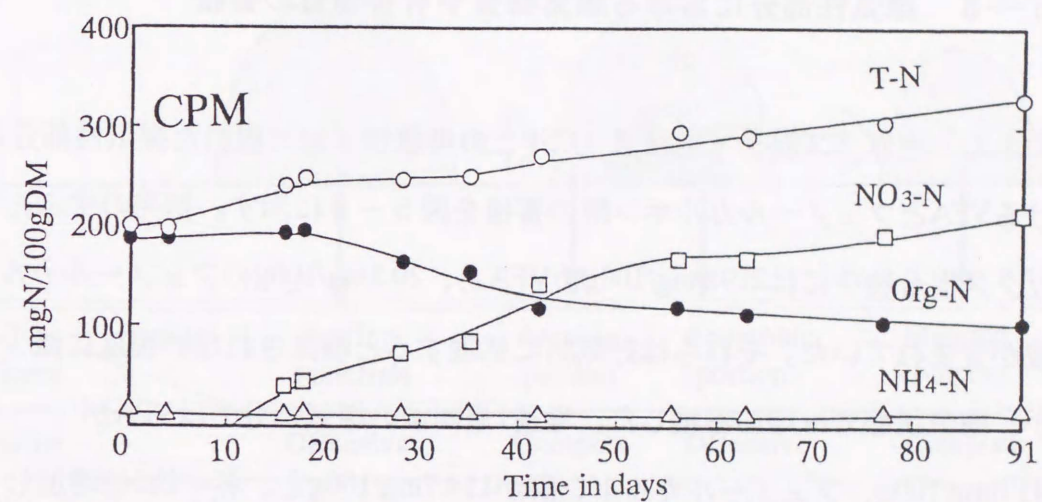


図5-5 牛ふん-パーライト混合・機械攪拌区(CPM)におけるNO₃-Nの出現

たことや、BODが少なくなったことと時をほぼ同じくしている。したがって、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の定性・定量は、コンポストの腐熟度合の判定に重要な役割を果たすものと考えられる。ただし、鶏ふんの場合には、コンポスト期間を通じて $\text{NO}_3\text{-N}$ は生成しておらず（図4-11）、 $\text{NO}_3\text{-N}$ による判定は牛ふんに限る可能性がある。鶏ふんコンポストでは、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度とpHが高いので、硝化菌の活動が阻害されているものと考えられる。

5-3 嫌気性部分における悪臭物質や有害物質の蓄積

牛ふん・オガクズ混合・堆積区（CSP）の堆積物下部に現れた嫌気性部分におけるVFAとフェノールカルボン酸の蓄積を図5-6に示す。初発の牛ふん・オガクズ混合物中には $219.1\text{mg}/100\text{g}$ のVFAと、 $20.1\text{mg}/100\text{g}$ のフェノールカルボン酸が含まれていた。それらは好氣的に処理すると検出されない程度に減少するが、嫌気状態では増加蓄積した。堆積1週間後の嫌気部分ではVFAが $1,141.0\text{mg}/100\text{g}$ 、フェノールカルボン酸が $114.7\text{mg}/100\text{g}$ と、各々約5倍増加した。さらに嫌気部分では臭気も酸味を帯びた悪臭に変化し、発芽試験の成績も21.3%と低かった。

作物の生育に悪影響を及ぼすVFAやフェノールカルボン酸などの物質は、嫌気性条件では増加するが、好気性条件では減少させられることが明らかになった。このような嫌気状態は、堆積式のコンポスト化では、ごく一般的にみられる現象であり、コンポストの腐熟というより、逆に品質の悪化を招いており、繰り返し作業時の強い悪臭の発生も、この嫌気部分からである。現場のコンポスト化施設においては、強制通気や定期的な攪拌によって、嫌気状態をいかになくすかに重点がおかれるべきであり、その科学的根拠のひとつが示された。

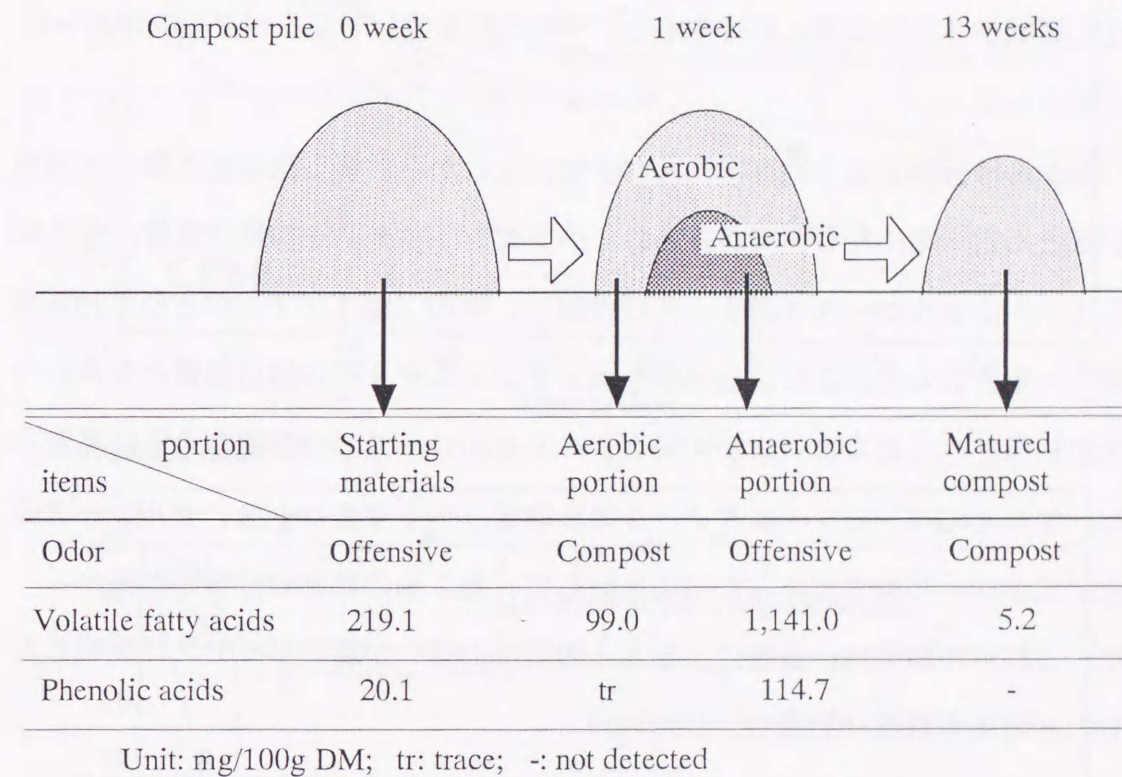


図5-6 牛ふん・オガクズ混合・堆積区（CSP）の堆積物下部に現れた嫌気性部分におけるVFAとフェノールカルボン酸の蓄積

5-4 牛ふんと鶏ふんの腐熟プロセスの比較

牛ふんのコンポスト化による腐熟プロセスは、有機物の分解の視点から、易分解性有機物（BODやベンゼン・エタノール抽出物質）が分解する第1次過程と、ヘミセルロースやセルロースなどの化合物が安定化する第2次過程に分類できた（図5-4と図5-7のCPM）。そして、第1次過程が終わって品温が高温領域から中温領域に移行すると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が生成してくるパターンがあった（図5-5）。

鶏ふんは分解しにくい有機物量が少ないことから、第1次過程と第2次過程がほとんど一緒になる傾向がみられ、ベンゼン・エタノール抽出物質、セルロース、ヘミセルロース（図5-7のPPM）、BOD（図4-7）のどれも約20日間で一定となった。また、分解率もベンゼン・エタノール抽出物質とセルロースが80%、ヘミセルロースが90%と、ヘミセルロースの分解率がとくに高かった。牛ふんのベンゼン・エタノール抽出物質、ヘミセルロース、セルロースの分解率が70~75%で留まったのに比較して、鶏ふんの場合の分解率は高かった。これらの結果は、畜種によるふんの組成の違いが腐熟プロセスに反映したものと考えられる（加藤ら、1983）。

鶏ふんは牛ふんに比べて、易分解性有機物の指標であるBODが2~3倍高く、土壤中で分解するときの二酸化炭素発生量の多いことが知られている（松崎、1979）。今回のコンポスト化でも初発BODが牛ふん-パーライト混合物で41.5mg/gDMに対して、鶏ふん-パーライト混合物では125.3mg/gDMと約3倍あり、前述のように、分解速度や分解率に影響を与えたものと考えられる。

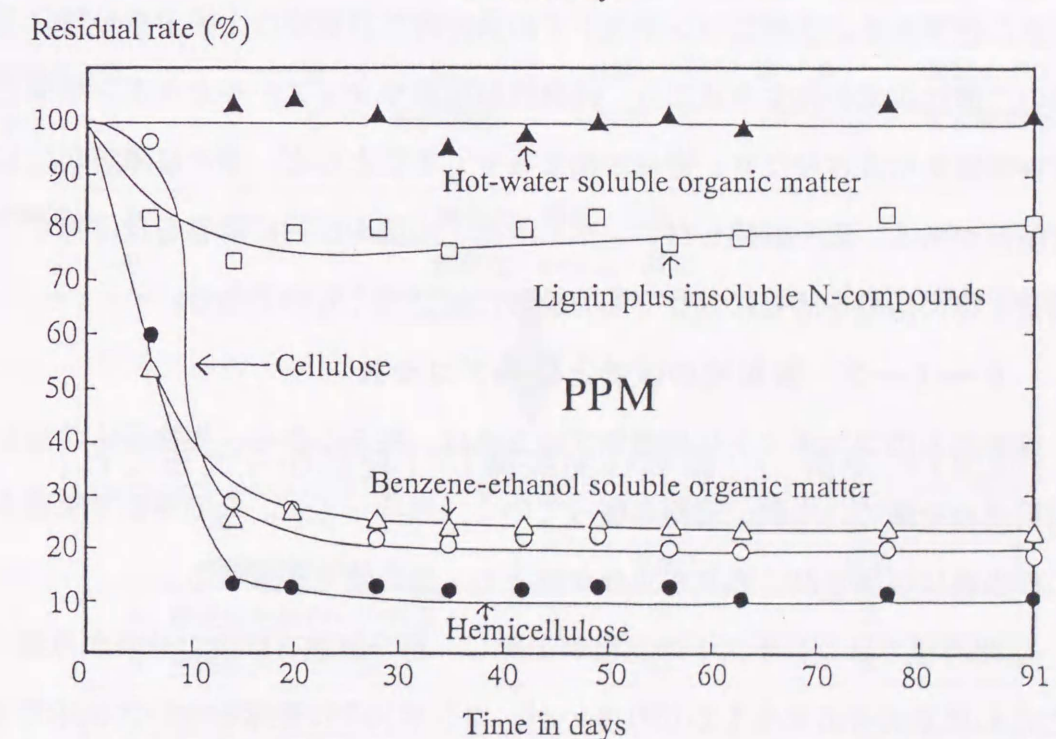
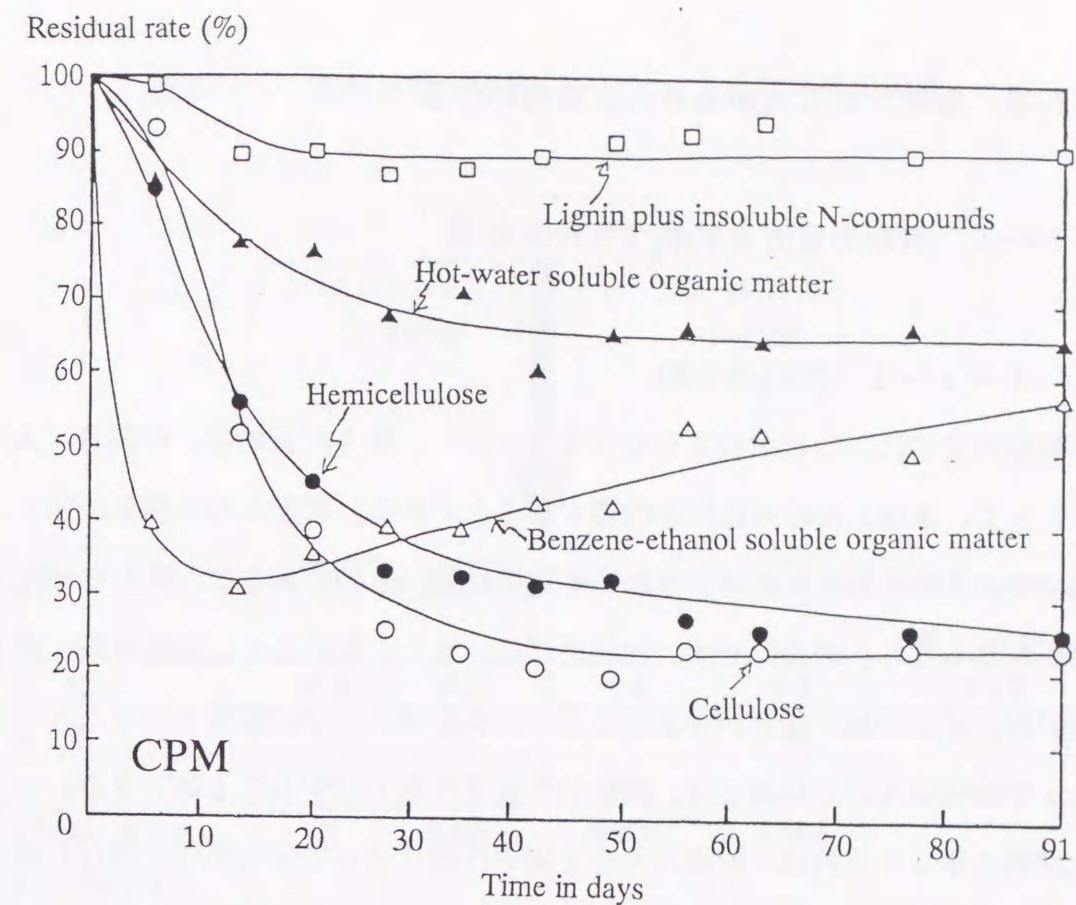


図5-7 牛ふん（CPM）と鶏ふん（PPM）のコンポスト化過程における有機成分の残存率の変化

第6章 腐熟プロセスからみた腐熟度の評価

6-1 腐熟の目的と腐熟プロセス

6-1-1 腐熟の目的

腐熟の目的は二つに大別できる（表6-1）。第1の目的は、作業員（人）にとって、家畜ふんの取扱性を改善することである。家畜ふんは悪臭が強く、粘性が高くて汚物感があり、きわめて取扱い難いものであるが、腐熟させれば悪臭がなくなり、取扱いやすい性状になる。また、家畜ふんには病原菌、寄生虫の卵、雑草の種子などが含まれることがあるが、十分に腐熟させることによって病原菌などを死滅させ、衛生的で安全なものにすることができる。

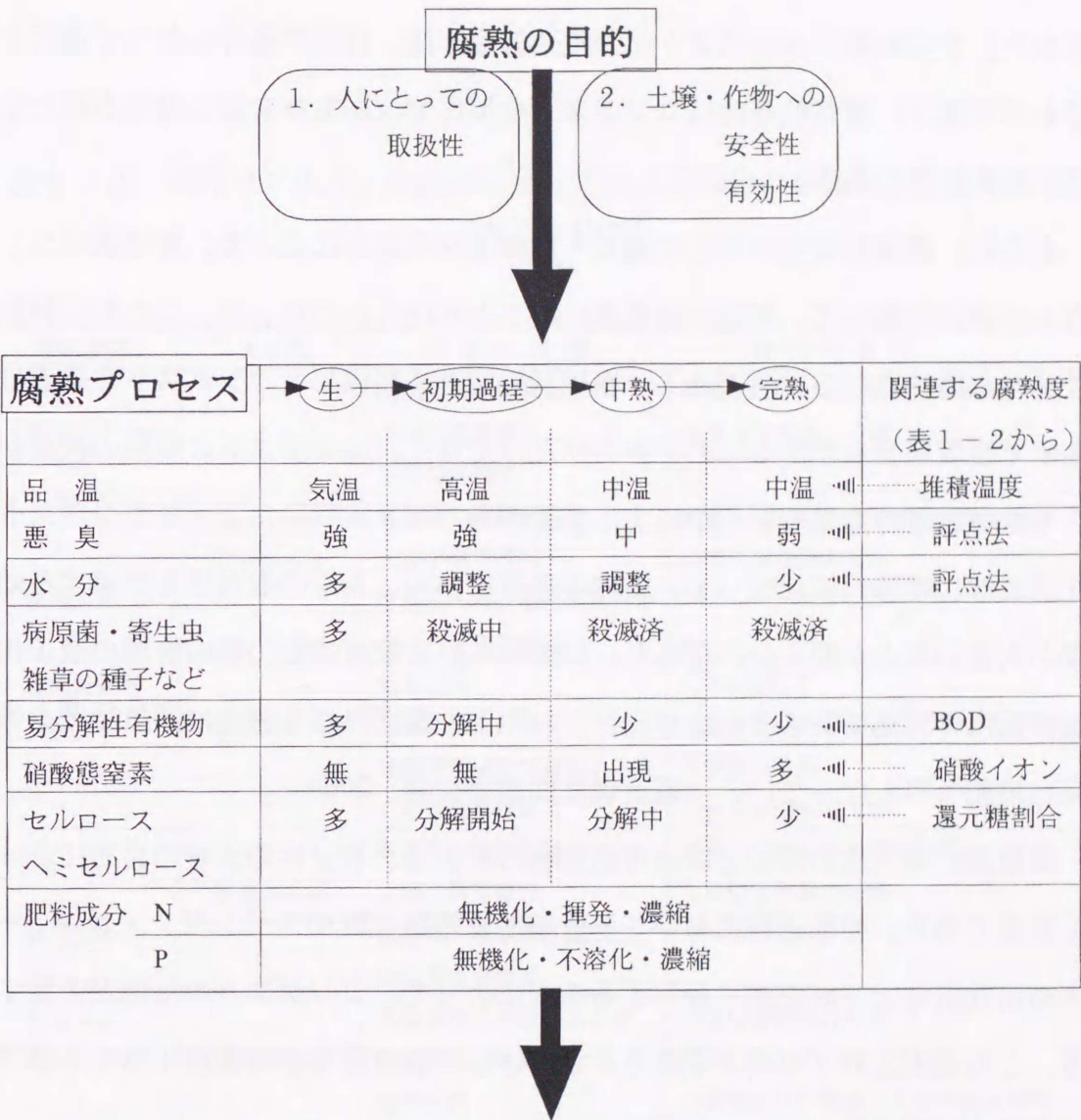
腐熟の第2の目的は、家畜ふんを土壌や作物にとって安全かつ有効なものにすることである。未熟なコンポスト中の易分解性有機物は土壌中で分解して多量の二酸化炭素を発生させたり、揮発性脂肪酸やフェノールカルボン酸などの有害物質を生成させたり、害虫が集まってくることなど、様々な障害が生じる危険性がある。よく腐熟したコンポストは、土壌や作物に障害を及ぼさず、土壌微生物の活動を活発にさせて地力維持に結びつくものである。

6-1-2 取扱性の改善と腐熟プロセス

家畜ふんのコンポスト化の腐熟プロセスは、生ふんから、生物反応の激しい初期過程を経て、中熟、完熟と移っていく（表6-1）。その過程で家畜ふんの取扱性は改善され、悪臭や水分が低下し、固形物も減量する。

初期過程ではコンポストの品温が上昇し、易分解性有機物の分解が急激に進むため悪臭成分の発生もかなり多いが、コンポストに酸素を十分に供給できる好気性条件を確保すれば、悪臭の発生を抑制することができる。しかし、一部の民間農法では、嫌気性処理の方が腐熟の進行が速く、悪臭の発生が少ないと

表6-1 腐熟目的と腐熟プロセスによる腐熟度の評価



コンポストの品質 = 腐熟度の評価 + 衛生 + 肥効

表1-2の 腐熟度判定法	腐熟の目的に対する重み付け	
	目的1	目的2
A. 微生物活動からの判定	中	大
B. 生物を用いた方法	小	大
C. 物理性からの判定	中	小
D. 化学性からの判定	中	大
E. 腐植物質による判定	小	大
F. 総合的判定	大	大

の旧来からの説がある。これに対し、今回の試験においては、コンポスト堆積物の嫌気性部分は悪臭が強く、腐熟を遅らせていることを明らかにすることができた。すなわち、コンポスト化の主要な反応は、好気性条件において進行するものであり、嫌気性条件はコンポスト化反応ではあまり有効な役目を果たしていないようである。

さらに、機械装置を利用して通気・攪拌を行うことによって、堆積式のコンポスト化に比較して、腐熟が促進されることが明らかになった。これも、好気性条件が維持される結果である。機械攪拌装置を装備したコンポスト化装置は高価で運転経費もかかるため、省力化だけでなく、コンポストの腐熟の側面からも機械装置の効果を明らかにする必要があった。本試験によってコンポスト化装置は、堆積式に比較して、腐熟の進行を早め、ふんの取扱性を改善する効果が大きいことが明らかになった。1999年11月に家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律が施行されたが、推奨される施設は通気装置を備えた堆肥舎等となっている（畜産環境問題研究会，2000）。

病原菌、寄生虫の卵などの有害微生物の除去も、取扱性の改善の目的にとって重要である。初期過程において易分解性有機物（BODやベンゼン・エタノール抽出物質など）が急激に分解することによって、コンポストの品温が上昇する。この温度上昇プロセスを経ることによって病原菌など有害微生物を死滅させることができる。

6-1-3 土壌・作物への有効性・安全性と腐熟プロセス

未熟なコンポストを施用した場合、作物に対する障害の現れ方は、有機質資材の種類によって次の三つに大別される（表6-2）（原田，1995）。第1は家畜ふんだけで製造するコンポスト、第2に家畜ふんにイナワラやムギワラなどの作物収穫残渣（繊維質資材）を混合して製造するコンポストである。そして第3は家畜ふんにオガクズやバークなどの木質資材を混合して製造するコン

表6-2 未熟コンポストの施用によって生じる障害の原因および腐熟の目的
（原田，1995）

原料資材	混合比	障 害 の 原 因	腐 熟 の 目 的
家畜ふんのみ		高濃度の無機態窒素 土壌の異常還元 生育阻害物質	家畜ふん中の易分解性有機物の分解 生育阻害物質の分解
家畜ふん + 繊維質資材	家畜ふん多	高濃度の無機態窒素 土壌の異常還元 家畜ふん及び繊維質資材中の生育阻害物質	家畜ふん中の易分解性有機物の分解 生育阻害物質の分解
	繊維質資材多	窒素飢餓 土壌の異常還元 繊維質資材及び家畜ふん中の生育阻害物質	C/N比の低下 繊維質資材及び家畜ふん中の易分解性有機物の分解 生育阻害物質の分解
家畜ふん + 木質資材	家畜ふん多	高濃度の無機態窒素 土壌の異常還元 家畜ふん及び木質資材中の生育阻害物質	家畜ふん中の易分解性有機物の分解 生育阻害物質の分解
	木質資材多	木質資材及び家畜ふん中の生育阻害物質 窒素飢餓 土壌の異常還元	生育阻害物質の分解 C/N比の低下 木質資材及び家畜ふん中の易分解性有機物の分解

ポストである。

家畜ふんは一般的に窒素含量が高く、したがって、C/N比が低く、きわめて分解されやすい資材である。これを生のまま、あるいはコンポスト化しても未熟なままで施用すれば、ふん中に多量に含まれる各種の易分解性有機物が急激に分解し、有機態窒素の無機化が激しく起こり、土壌中で無機態窒素の濃度が高くなる。とくにアンモニウム態窒素の濃度が高くなると作物が障害を起こすことが知られている。

また、土壌中で活発な微生物活動が起こって易分解性有機物が急激に分解される際に、酸素が急速かつ多量に消費され、土壌は還元状態になる。このような状態では、微生物による嫌気分解の結果、有機酸などの有害な代謝産物が生成され、発芽を阻害したり作物の生育を抑制することが知られている。したがって、家畜ふんのみでコンポストを製造する場合の腐熟の目的は、施用した後に急激な分解を生じないよう、家畜ふん中の易分解性有機物をあらかじめ分解しておくことであり、生育阻害物質も十分に分解する必要がある（表6-2）。腐熟プロセスとしては、初期過程における易分解性有機物の分解によって概ねその目的を達成できる。

作物収穫残渣は、一般的にC/N比が高くしかも比較的分解されやすいため、土壌に施用されれば窒素の有機化が起こる。ワラ類などの資材では、一般に微生物に利用されやすい形態の炭水化物の含量が高い。このような資材を施用すると、微生物は土壌中でこれらの炭水化物をエネルギー源として利用して増殖し、その菌体成分を合成するために、無機化されて出てくる窒素を体内に取り込む。これを窒素の有機化という。その場合、菌体合成に必要な量以上の無機態窒素が存在していなかったならば、作物は窒素を吸収することができなくて窒素欠乏症状を起こし、窒素飢餓といわれる現象が生ずる。したがって、この場合の腐熟の目的は、C/N比を低下させること、生育阻害物質を分解する

こと、および易分解性有機物を分解することである（表6-2）。腐熟プロセスとしては、初期過程において易分解性有機物が盛んに分解することによってこの目的は概ね達成できる。

木質物のC/N比は130~1,400というようにきわめて高い。また、木質物にはかなりの量セルロースが含まれているが、その部分はリグニンと強固に結合し、あるいは一部は結晶化しているため微生物に分解され難く、一般的に難分解性である。家畜ふんのような窒素源を加えた場合、木質物の分解は促進されることもあるが、イナワラやムギワラのように顕著な分解促進効果は見られず、木質物と家畜ふんの分解過程はそれぞれ別個に進行すると考えてよいだろう。木質物を含むコンポストでは、C/N比が20より高くても必ずしも窒素の有機化を生じない。さらに、腐熟させて木質物中の易分解性有機物をあらかじめ分解したものについては、たとえC/N比が高くても窒素飢餓を起こす危険性はほとんどないと考えられる。したがって、腐熟の目的はふん中の易分解性有機物と、木質物中の生育阻害物質を分解することであり、木質資材の混合比が高い場合にはC/N比の低下も必要となる（表6-2）。腐熟プロセスとしては、初期過程における易分解性有機物の分解、ならびに中熟過程におけるセルロースなどの分解が重要な役割を果たしている。

6-2 腐熟の目的と腐熟度

6-2-1 取扱性の改善と腐熟度

腐熟の第1の目的である取扱性の改善については、悪臭、水分、色などコンポストの外見に関連した腐熟の指標が重要である。したがって、表1-2の腐熟度判定法をみると、C. 物理性からの判定が関連がある（表6-1）。病原

菌、寄生虫の卵などを勘案すると、微生物に関連する衛生面も重要視される。そのためには、コンポスト過程において、病原菌や寄生虫を殺滅できる高い温度に達しているかどうかも重要な基準となる。さらに、悪臭、水分、色などコンポストの外見を総合的に判断する必要性から表1-2のF. 総合的判定の中の1) 評点法などが有効である。

6-2-2 土壌・作物への有効性・安全性と腐熟度

腐熟の第2の目的である土壌・作物への安全性・有効性については、易分解性有機物の分解、生育阻害物質の分解、C/N比の低下がある。したがって、表1-2の腐熟度判定法をみると、BODなどA. 微生物活動からの判定、C/N比などD. 化学性からの判定が関連がある。また、土壌への施用を考えると、E. 腐植物質による判定も関係がある。さらに、作物への影響を考えると、コマツナの発芽試験や花粉管生長試験（任ら、1997aと1997b）などのB. 生物を用いた方法が不可欠なものになる（表6-1）。また、個別の腐熟度判定法ではオールマイティーな判定法とはならない現状から、上記の個別判定法を総合的に組み合わせて判断する必要がある、表1-2のF. 総合的判定の中の1) 評点法などが有効である。

6-3 腐熟プロセスによる腐熟度の評価

腐熟の主な目的は易分解性有機物の分解と生育阻害物質の分解によって取扱性が良く、土壌・作物への安全性・有効性の高いコンポストを作ることである。今回のコンポスト化実験の腐熟プロセスからみると、易分解性有機物や生育阻害物質を分解するためには、好気性条件を整えたコンポスト化において、高温に達する初期過程、中温に戻った中熟過程といった腐熟プロセスを経ることが重要なことが明らかとなった（表6-1）。

好気性条件を整えて品温を上昇させるには、機械攪拌と強制通気が有効であった。しかし、品温の上昇に伴う悪臭や温暖化ガスのエミッションも多く（羽賀、1999b）、その環境影響をコンポストの生産プロセス全体にわたって評価するライフサイクルアセスメント（LCA）の手法（羽賀・和木、2000）を取り入れることも必要となろう。

温度のあまり上がらない嫌気性条件では、フェノールカルボン酸や揮発性脂肪酸などの物質が蓄積し、コマツナの発芽を阻害した。したがって、堆積温度の推移を記録することが、これら有害物質の分解のためには重要な指標であり、同時に高温は病原菌や寄生虫の殺滅にも効果を発揮する（表6-1）。

中温に戻った中熟過程では、牛ふんの場合には硝酸態窒素が生成し、腐熟プロセスが順調に進行している重要な指標となった。セルロースとヘミセルロースの分解については、牛ふんと鶏ふん、及び副資材の種類によってもパターンが異なり（藤原ら、1981）、腐熟度としては不確実である。

コンポストの肥効面からみると、窒素とリンのなどの多量要素の効果と微量要素を含む総合的な有機質肥料としての位置付けがある。窒素やリンはコンポスト化過程でまず無機化され、有機物の分解に伴って相対的に濃度が上昇することが多い。窒素はアンモニアガスとして揮散したり、不溶性窒素化合物として固定される。リンは不溶性の塩類を生成することが多く、例えば、リン酸アンモニウムマグネシウム（MAP）は緩効性肥料として有効である。

以上から、腐熟度の判定のためには、コンポストの堆積温度、BOD、硝酸態イオンなどの個別の指標とともに、悪臭・水分・手触り・色などを簡易に総合的に判定できる評点法なども有効である。また、土壌・作物への有効性・安全性を勘案するならば、コマツナ発芽試験や花粉管生長試験などの生物試験が不可欠である。そして、腐熟度に加えて、衛生面と肥効面などを考慮し、総合的にコンポストの品質を考える必要がある（表6-1）。

要 約

本研究では、比較的大きな実験規模で、牛ふん及び鶏ふんのコンポスト化を副資材の種類や有無を含めて検討し、微生物による複雑な分解が行われるコンポスト化過程を、品温、全炭素、全窒素、有機物、ベンゼン・エタノール抽出物質、熱水抽出物質、ヘミセルロース、セルロース、リグニン、生物化学的酸素消費量（BOD）、水溶性の全有機炭素、全窒素、硝酸態窒素、揮発性脂肪酸、フェノールカルボン酸、さらには陽イオン交換容量やコマツナ種子の発芽率の変化などから、腐熟プロセスと腐熟度の関係を評価した。得られた結果は、以下のとおりである。

1. コンポスト化方式については機械攪拌区と堆積区の2つの方式、家畜ふんは牛ふんと鶏ふんの2種類、混合する副資材についてはパーライトとオガクズの2種類を用いてコンポスト化を行った。副資材として、生化学的反応に不活性な無機物のパーライトを用いることによって、家畜ふんそれ自身の腐熟特性を調べることができた。

コンポスト化過程において、ほとんどの成分について、機械攪拌区のほうが堆積区よりも分解が速く、しかも分解率も高かった。機械攪拌区は強制通気と攪拌によって、コンポスト化の適正条件が達成され、堆積区に比べて分解が進んだものと考えられる。このような有機性成分の分析結果は、腐熟の度合を知る上で重要な情報を提供しており、近赤外分析法と組み合わせることで迅速・簡便なコンポスト品質評価法の可能性が考えられる。

2. 生物化学的酸素要求量（BOD）は易分解性有機物の指標として有効であり、ベンゼン・エタノール抽出物質や揮発性脂肪酸と同様に、コンポスト化初期に急激に分解し、コンポストの品温を上昇させ、2週間くらいして品温が高温域から中温域へ下降するところで一定となった。

牛ふんの場合、全炭素の分解が一定になるのに5週間くらいかかり、ヘミセルロースやセルロースの減少が止まるときとほぼ一致している。さらに、陽イオン交換容量（CEC）も5週間くらいで一定となった。したがって、牛ふんのコンポスト化による有機物の分解には、易分解性有機物を分解する第1次過程と、ヘミセルロースやセルロースなどの化合物が安定化する第2次過程に分類することができる。一方、鶏ふんでは第1次過程と第2次過程がほとんど一緒になる傾向がみられ、BOD、ベンゼン・エタノール抽出物質、セルロース、ヘミセルロース、CECのどれも約20日間で一定となった。

3. 堆積式コンポスト化では、1週間目の切返し時に、コンポスト断面の底部に嫌気性部分が見いだされた。嫌気性部分は、酸素供給が不十分なために、揮発性脂肪酸（VFA）とフェノールカルボン酸が初発原料の数倍量蓄積しており、好気性部分に比較して腐熟の進行が遅延し、コマツナの発芽率も低かった。モミガラと粉碎モミガラを用いて堆積式コンポスト化を行い、通気性の悪い粉碎モミガラによって嫌気性部分を再現することができた。悪臭を防ぎ、良品質のコンポストを生産するためには、コンポストを好気性条件に維持し、嫌気性部分の形成を回避することが重要であり、強制通気や攪拌装置と装備したコンポスト化装置の重要な役割が示唆された。

4. 以上の腐熟プロセスからみると、腐熟の主な目的は易分解性有機物の分解と生育阻害物質の分解によって、取扱性が良く、土壌・作物への安全性・有効性の高いコンポストを作ることである。腐熟度の判定のためには、コンポストの品温、硝酸態窒素、評点法など簡易な方法も有効であり、コマツナ発芽試験や花粉管生長試験などの生物試験を併用し、さらに衛生面と肥効面など総合的な判断が必要とされる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、筑波大学農林工学系 前川孝昭教授、筑波大学農林工学系 木村俊範教授、筑波大学農林工学系 安部征雄教授、筑波大学応用生物化学系 東 照雄教授、筑波大学応用生物化学系 田中秀夫教授に御指導と御助言を賜りましたことに深く感謝いたします。とくに、前川孝昭教授には、研究遂行、論文とりまとめなど研究全般にわたって物心両面から御指導を賜り、深く感謝申し上げます。

本研究の多くは、農林水産省農業研究センター土壌肥料部 原田靖生部長、農林水産省畜産試験場廃棄物資源化研究室 長田 隆主任研究官、元生物系特定産業技術研究推進機構 伊澤敏彦主任研究員、生物系特定産業技術研究推進機構 西村 洋研究員、農林水産省農業研究センター 中谷 誠室長の方々と共同で進められたものであり、以上の方々に、記して深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 浅井貴之・清水伸也・古賀照章・佐藤 満 (1993) 近赤外反射光分光分析法による牛糞きゅう肥の全窒素、全炭素、粗灰分の迅速測定, 日本土壌肥科学雑誌, **64**, 669-675.
- 2) Bernal, M. P., Paredes, C, Sanchez-Monedero, M. A. and Cegarra, J. (1998) Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes, *Bioresource Technol.*, **63**, 91-99.
- 3) 畜産環境問題研究会 編 (2000) 家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律の解説, 地球社, 東京, 167pp.
- 4) 中央畜産会 (2000) 副資材による物性の改善, 堆肥化施設設計マニュアル, 中央畜産会, 東京, p.5.
- 5) 土壌養分測定法委員会 (1970) 土壌養分分析法, 養賢堂, 東京, p.139-190
- 6) 藤原俊六郎・鎌田春海・井ノ子昭夫 (1980) おが屑混合鶏ふん堆積物の腐熟に伴うおが屑の分解 走査電子顕微鏡による微細形態変化の観察, 日本土壌肥科学雑誌, **51**, 203-209.
- 7) 藤原俊六郎・井ノ子昭夫・松崎敏英・鎌田春海 (1981) 家畜ふんの堆積に伴う有機成分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, 日本土壌肥科学雑誌, **52**, 311-316.
- 8) 藤原俊六郎・鎌田春海 (1983) おが屑混合鶏ふん堆肥の腐熟度が作物生育に及ぼす影響, 神奈川農総研報, **124**, 73-90.
- 9) 福光健二 (1996) 副資材・敷料, マニュアル・マネージメント (羽賀清典監修), デーリィマン社, 札幌, pp.50-51.
- 10) 下水汚泥資源利用協議会 (1983) 酸素消費量 クーロメーター法, 下水汚泥分析法, 下水汚泥資源利用協議会, 東京, pp.88-89.

- 11) 羽賀清典 (1993) 家畜ふん尿の農耕地利用, 用水と廃水, **35**, 919-929.
- 12) 羽賀清典 (1997) 畜産廃棄物, 有機廃棄物資源化大事典 (有機質資源化推進会議編), 農山漁村文化協会, 東京, pp.335-353.
- 13) 羽賀清典 (1999a) 農業関連有機性廃棄物のリサイクル, 都市清掃, **52**, 314-319.
- 14) 羽賀清典 (1999b) 畜産をめぐる環境問題と対策, 農林水産技術研究ジャーナル, **22**(5), 20-27.
- 15) 羽賀清典・和木美代子 (2000) 肥育牛のふん尿堆肥化におけるエミッションのLCA農業におけるライフサイクルアセスメント (農林水産省農業環境技術研究所編), 農林水産省農業環境技術研究所, つくば, pp.116-125.
- 16) Harada, Y. and Inoko, A. (1980) The measurement of the cation-exchange capacity of composts for the estimation of the degree of maturity, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **26**, 127-134.
- 17) Harada, Y., Inoko, A., Tadaki, M. and Izawa, T. (1981) Maturing process of city refuse compost during piling, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **27**, 357-364.
- 18) 原田靖生 (1983) 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.
- 19) 原田靖生 (1993) 腐熟の促進, 腐熟の判定, 再生と利用, **60**, 68-74.
- 20) 原田靖生 (1995) 家畜ふん堆肥の腐熟度, 畜産環境対策大事典 (農山漁村文化協会編), 農山漁村文化協会, 東京, pp.127-133.
- 21) Hirai, F. M., Chanyasak, V. and Kubota, H. (1983) A standard measurement for compost maturity, *BioCycle*, **24**(6), 54-56.
- 22) Inoko, A., Miyamatsu, K., Sugahara, K. and Harada, Y. (1979) On some organic constituents of city refuse composts produced in Japan, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **25**,

- 225-234.
- 23) 井ノ子昭夫・原田靖生・菅原和夫 (1982) 都市廃棄物コンポスト化製品の農業利用, 農技研報, **B33**, 165-213.
- 24) 石丸圀雄 (1993) 稲作副産物, 廃棄物処理・再資源化ハンドブック, 建設産業調査会, 東京, pp.317~323.
- 25) 加藤博美・早川岩男・井戸 豊・沢田守男・山川芳男 (1983) 家畜ふん尿コンポストに関する研究 (第9報) 畜種の異なるおがくず混合畜ふん堆肥の熟成過程, 愛知農総試研報, **15**, 429-438.
- 26) 加藤博美・早川岩男・井戸 豊・沢田守男・今井三郎 (1986) 家畜ふん尿コンポストに関する研究 (第11報) おがくず混合豚ふん堆肥の熟成に伴う有機的成分の変化 愛知農総試研報, **18**, 344-351.
- 27) 木村俊範・中崎清彦 監修 (1999) 生物系廃棄物コンポスト化技術, 東京, シーエムシー, 254pp.
- 28) 木村俊範 (1999a) コンポスト化の基本反応, 生物系廃棄物コンポスト化技術 (木村俊範・中崎清彦 監修), 東京, シーエムシー, pp.9-24.
- 29) 木村俊範 (1999b) 材料物性, 生物系廃棄物コンポスト化技術 (木村俊範・中崎清彦監修), 東京, シーエムシー, pp.47-54.
- 30) 前川孝昭 (1996) メタン発酵施設, マニユア・マネージメント (羽賀清典監修), デーリィマン社, 札幌, pp.89-91.
- 31) 前川孝昭 (1997) 概説バイオマスエネルギー, 手作りエネルギー大全 (家の光協会編), 家の光協会, 東京, pp.46-63.
- 32) Mathur, S. P., Owen, G., Dinel, H. and Schnitzer, M. (1993) Determination of compost biomaturity. I. Literature review, *Biol. Agric. Horticul.*, **10**, 65-85.
- 33) 松崎敏英 (1979) 家畜ふん尿の利用と処理, 農山漁村文化協会, 東京, 192pp.

- 34) 西尾道德・大畑貫一 監修 (1998) 農業環境を守る微生物利用技術, 家の光協会, 東京, 327pp.
- 35) 農林水産省畜産局畜産経営課監修 (1998) 環境保全, 平成10年畜産経営の動向, 中央畜産会, 東京, pp.203-242.
- 36) 農林水産省草地試験場 (1987) 近赤外反射光分光法 (NIRS) による飼料品質の分析 (草地試験場資料62-6), 101pp.
- 37) 岡田憲三・宮寄英二・神前 健・椎葉 究 (1997) 高速液体クロマトグラフィによる畜ふんのコンポスト熟度の評価, 日本土壤肥科学雑誌, **68**, 175-177.
- 38) 押田敏雄・柿市徳英・羽賀清典 編 (1998) 畜産環境保全論, 養賢堂, 東京, 233pp.
- 39) 任 順栄・院多本華夫・張 振亜・前川孝昭 (1997a) 花粉管生物判定法によるコンポスト腐熟度および品質効果に関する研究 (I) —花粉管培養における標準培地の組成および培養条件—, 農業施設, **28**, 143-148.
- 40) 任 順栄・院多本華夫・張 振亜・前川孝昭 (1997b) 花粉管生物判定法によるコンポスト腐熟度および品質効果に関する研究 (II) —花粉管の生長に及ぼすコンポスト水抽出液添加の影響—, 農業施設, **28**, 149-153.
- 41) Stevenson, F.J. (1965) Gross chemical fractionation of organic matter, In: *Method of Soil Analysis*, Part 2, Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy Inc. Publ., pp.1409-1421.
- 42) Tsuchida, H. (1984) Changes in phytotoxic components of sawdust barnyard manure during its rotting process, *Sci. Report Fac. Agric. Kobe Univ.*, **16**, 277-290.
- 43) 渡辺 実・板川英雄・矢崎仁也 (1981) おがくず牛ふん堆積物の腐熟過程, 日本土壤肥科学雑誌, **52**, 339-346.

