

マイクロフィルム用資料

土木研究所資料

下水汚泥と剪定枝葉を混合した堆肥の
製造方法に関する検討

平成12年3月

建設省土木研究所
環境部緑化生態研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

下水汚泥と剪定枝葉を混合した堆肥の 製造方法に関する検討

緑化生態研究室 室長 藤原 宣夫
主任研究員 石坂 健彦
技 官 石曾根敦子
前 主任研究員 森崎 耕一*
前 研 究 員 飯塚 康夫**

要 旨

地球環境保全が叫ばれるなか、リサイクルの気運が高まっており、従来、廃棄処分されていた下水汚泥や、剪定枝葉についても、リサイクルの必要性が問われている。しかしながら堆肥化を行う場合、下水汚泥では、臭気や粘性などの取り扱い性の悪さが問題とされ、剪定枝葉では、C/N比が高く、堆肥化しづらいことがあげられている。このように両者とも、堆肥化に関して問題を有しているのが現状であるが、下水汚泥と剪定枝葉を混合して堆肥化することにより、下水汚泥の取り扱いづらさの問題を剪定枝葉が改善する一方で、剪定枝葉が有する高C/N比の問題を下水汚泥が改善することにより、相互に補填しあうものと考えられた。このため、建設省土木研究所では、平成2年度から平成9年度の間、数回にわたって各種の汚泥と各種の剪定枝葉を用いた堆肥を試作して、その成分や性状を分析するとともに、施用試験を行い、樹木に対する施用効果や土壌成分の変化を調査検討してきた。その結果、堆肥の製造方法として、仕込みの段階において下水汚泥と剪定枝葉の混合割合を、C/N比20および含水率60%になるように調整し、発酵中は、通気、切り返しを行うとともに、含水率が60%になるように水分添加を行うことにより、良好な堆肥が製造できることが判明した。また、この製造方法は、消化脱水汚泥、乾燥汚泥、コンポスト化汚泥などの汚泥の種類、常緑樹や落葉樹などの枝葉の種類に関係なく堆肥製造方法として適用できることがわかった。

キーワード：リサイクル、下水汚泥、剪定枝葉、堆肥化

* 現 日本道路公団 東京第二建設局

** 現 日本道路公団 東京建設局

目 次

序 章	1
1. 検討の背景と本書のねらい	1
2. 本書の構成	1
第1章 各種の植物発生材と消化脱水汚泥を用いた堆肥製造試験（試験1）	2
1. 試験1の目的	2
2. 使用材料	2
2.1 剪定枝葉	
2.2 下水汚泥	
2.3 副資材	
3. 試験方法	7
3.1 試験区設定	
3.2 堆肥化の方法	
3.3 評価方法	
4. 試験結果	12
4.1 堆肥の物理性状	
4.2 化学成分	
4.3 生育障害の有無	
4.4 樹木への施用効果	
5. 考察	19
5.1 材料適性の評価	
5.2 仕込み方法の評価	
5.3 試作堆肥の総合比較	
6. まとめ	21
6.1 結果の総括	
6.2 課題	
第2章 各種の下水汚泥と落葉樹枝葉を用いた堆肥製造試験（試験2）	22
1. 試験2の目的	22
2. 使用材料	22
2.1 下水汚泥	
2.2 剪定枝葉	
3. 試験方法	24
3.1 試験区設定	
3.2 堆肥化の方法	
3.3 評価方法	
4. 試験結果	28

4.1	堆肥の物理性状	
4.2	化学成分	
4.3	生育障害の有無	
4.4	樹木への施用効果	
5.	考察	33
5.1	材料適性の評価（分解状況・物理性状からの評価）	
5.2	仕込み方法・管理方法の評価	
5.3	試作堆肥の総合比較	
6.	まとめ	36
第3章	各種汚泥枝葉堆肥の製造方法に関する検討	37
1.	原料素材に関する検討	37
1.1	下水汚泥	
1.2	枝葉粉碎物	
2.	素材の混合割合と仕込み時含水率	43
2.1	製造試験結果の再整理	
2.2	一般的な混合割合の検討	
2.3	仕込み作業における留意事項	
3.	発酵管理	48
3.1	通気と切り返し	
3.2	発酵温度	
4.	その他の留意項目	50
4.1	容積の減少（減容）	
4.2	水分変化	
4.3	pH の変化	
4.4	臭気	
第4章	汚泥枝葉堆肥の製造マニュアル（案）	53
1.	マニュアルの目的と適応範囲	53
1.1	マニュアルの目的	
1.2	マニュアルの適応範囲	
2.	堆肥化材料	55
2.1	下水汚泥	
2.2	剪定枝葉	
3.	仕込み	59
3.1	材料の混合割合	
3.2	材料の混合方法	
3.3	堆積	
4.	発酵	63
4.1	一次発酵と二次発酵	

4.2	切り返しと水分調整	
4.3	発酵期間中の品質管理	
5.	製品の品質管理と保存	68
	文献	72
資料 1	試験 1 の堆肥施用樹木の樹高・根元径測定結果	73
資料 2	試験 1 の堆肥施用樹木の根系スケッチ	74
資料 3	土壌分析結果の分級基準（日本造園学会土壌分科会試案）	78
資料 4	試験 2 の堆肥施用樹木の樹高・根元径測定結果	79

序 章

1. 検討の背景と本書のねらい

下水汚泥を堆肥化して利用することは、比較的古くから行われてきたが、臭気や粘性などにより取り扱いづらいことや、肥料成分のアンバランスなどの問題が指摘され、改善策が求められてきた。

一方、道路や公園の植栽管理から発生する剪定枝葉についても、有効利用策として堆肥化が試みられているが、C/N 比が高いなどの木質固有の成分特性により、堆肥化は必ずしも容易ではない。

このように両者とも、堆肥化に関して問題を有しているのが現状であるが、下水汚泥と剪定枝葉を混合して堆肥化することにより、下水汚泥の取り扱いづらさの問題を剪定枝葉が改善し、一方で、剪定枝葉が有する高 C/N 比の問題を下水汚泥が改善し、相互に補填しあうものと考えられた。

このため、建設省土木研究所では、平成 2 年度から平成 9 年度の間、数回にわたって各種の汚泥と各種の剪定枝葉を用いた堆肥を試作して、その成分や性状を分析するとともに、施用試験を行い、樹木に対する施用効果や土壌成分の変化を調査検討してきた。

その結果、堆肥の製造方法として、仕込みの段階において下水汚泥と剪定枝葉の混合割合を、C/N 比 20 および含水率 60% になるように調整し、発酵中は、通気、切り返しを行うとともに、含水率が 60% になるように水分添加を行うことにより、良好な堆肥が製造できることが判明した。また、この製造方法は、消化脱水汚泥、乾燥汚泥、コンポスト化汚泥などの汚泥の種類、常緑樹や落葉樹などの枝葉の種類に関係なく堆肥製造方法として適用できることがわかった。

本書は、このような結論を得る根拠となった堆肥製造試験の結果とともに、汚泥と枝葉の混合堆肥（以下、「汚泥枝葉堆肥」という。）の製造方法の取りまとめを行い、汚泥枝葉堆肥の製造方法の普及を図り、今後の下水汚泥と剪定枝葉の有効利用の推進に寄与することをねらいとした。

2. 本書の構成

第 1 章では、4 種の剪定枝葉と消化脱水汚泥を用いて、両者の混合割合や副資材を変えた堆肥製造試験（試験 1）を行った。そして、得られた試作堆肥について、性状や施用効果について評価し、その結果から、剪定枝葉に含まれる植物体の部位や、常緑樹・落葉樹の違いが堆肥の製造に与える影響とその要因について考察を加えた。

第 2 章では、試験 1 の結果を踏まえ、4 種の汚泥と落葉樹枝葉を用いた堆肥製造試験（試験 2）を行い、得られた堆肥について、1 章と同様の評価、考察を行った。

第 3 章では、1 章、2 章での汚泥枝葉堆肥の試作時に得られた情報を総合的に解析し、望ましい堆肥製造方法を検討した。そして、第 4 章において、その結果を「汚泥枝葉堆肥の製造マニュアル（案）」としてとりまとめた。

(試 験 1)

- 2 -

なお、試験1は2か年に分けて行っており、剪定枝葉の①と②は平成2年、③と④は平成3年に発生したものである。

(2) 物理性

4種の枝葉材料の物理性分析結果を表1-1に示す。

表1-1 剪定枝葉チップの物理性分析結果

材料記号		Dtld	Dtof	Dlof	Elof
分析項目					
含水率		8.0%	47.8%	52.6%	49.7%
粒径別乾物重量比	9.52mm以上	43.6%	29.3%	11.2%	8.8%
	9.52～4.76mm	29.7%	37.5%	17.4%	19.7%
	4.76～2.0mm	12.2%	14.7%	20.9%	32.6%
	2.0～0.84mm	11.0%	14.9%	25.3%	24.0%
	0.84～0.42mm	0.0%	0.0%	14.6%	9.7%
	0.42～0.21mm	3.5%	3.6%	8.0%	5.2%
	0.21mm以下	0.0%	0.0%	2.5%	0.0%

a. 含水率

含水率は、落葉樹、常緑樹ともに生の剪定枝葉は50%前後の含水率を示す。乾燥前処理を行った落葉樹剪定枝葉（Dtld）では8%となった。

b. 粒径組成

チップの粒径は、粉砕機的能力により異なるものとなり、幹のような固い部位では、一般に粒径は大きくなってしまふ。ここで用いた材料にも、幹を含むものと、含まないものに粒径組成に差が現れており、幹を含むDtldとDtofでは、4.76mm以上の合計%が70%前後であるのに対し、幹を含まないDlofとElofでは30%弱となっている（図1-1(a)～(d)）。

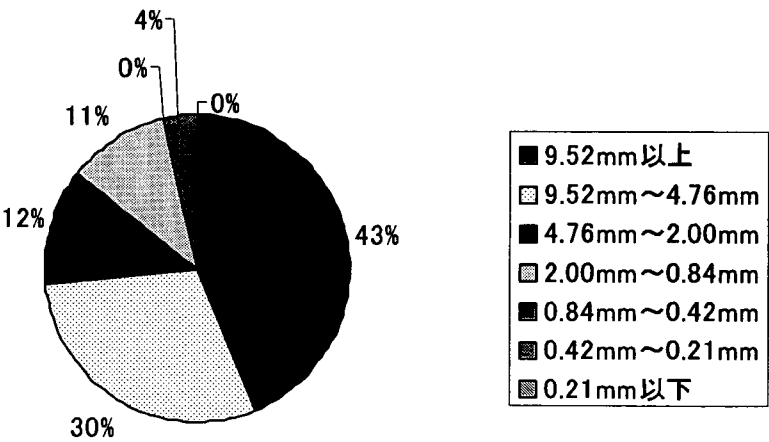


図1-1(a) Dtldの粒径組成

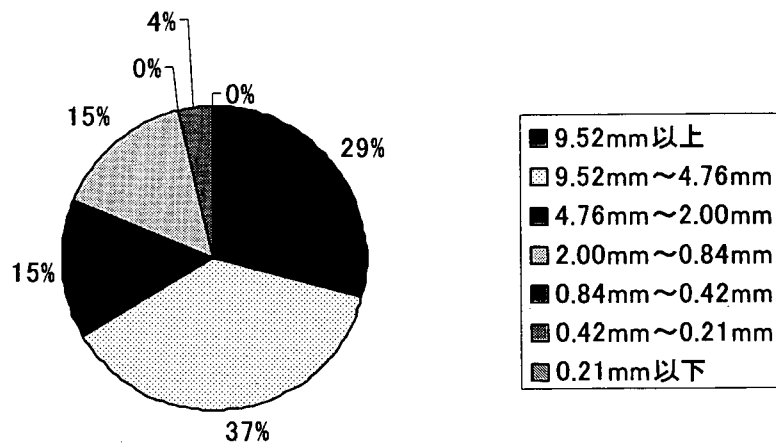


図1-1(b) Dtofの粒径組成

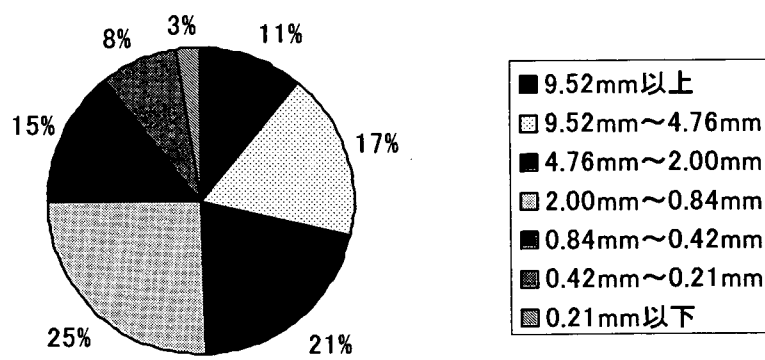


図1-1(c) Dlofの粒径組成

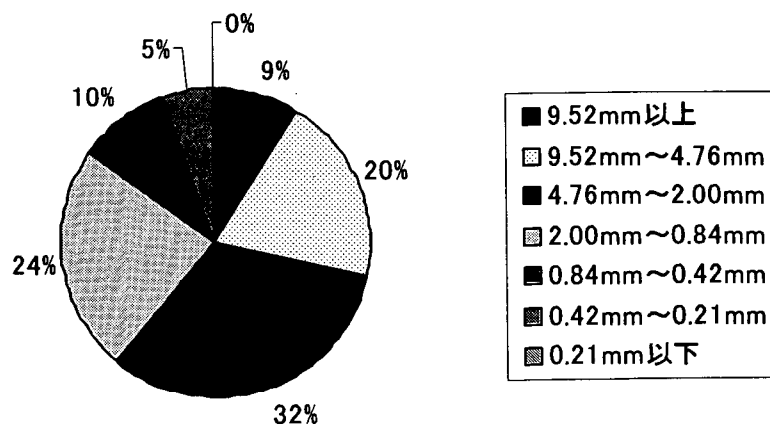


図1-1(d) Elofの粒径組成

(3) 化学性

4種の枝葉材料の化学性分析結果を表1-2に示す。

落葉樹と常緑樹の相違は特になく、部位による相違が認められた。幹を含む Dtld、Dtof は、枝葉のみの Dlof、Elof に比べ T-N が小さく、その結果、C/N 比も大きなものとなっている。また、この傾向は幹のみの Dtof において大きい。

表1-2 剪定枝葉チップの化学性分析結果

分析項目 \ 材料記号	Dtld	Dtof	Dlof	Elof
pH(H ₂ O)	5.7	5.9	6.6	6.3
EC (μS/cm)	470.0	620.0	1053.0	940.0
T-C (%)	45.1	43.3	45.1	46.1
T-N (%)	0.8	0.4	1.5	1.3
C/N比	57.1	100.8	30.0	34.7
T-P205 (%asP2O5)	0.1	0.1	0.3	0.2
T-K (%)	0.2	0.3	0.9	0.8
T-Ca (%)	0.4	0.3	1.1	0.9
T-Mg (%)	0.1	0.1	0.2	0.2
CEC (me/100g)	24.9	—	34.0	30.4

2.2 下水汚泥

下水汚泥は、霞ヶ浦湖北流域浄化センターで発生した、高分子凝集剤処理による消化脱水汚泥を用いた。試験1は2か年に分けて行っているため、使用した汚泥の発生時期は平成2年と3年である。Dtld と Dtof については平成2年発生 of 汚泥、Dlof と Elof については平成3年発生 of 汚泥を用いている。

汚泥の含水率、肥料成分に係る化学性の分析結果を表1-3に示す。また、汚染への配慮が必要な重金属類についての分析結果を表1-4に示す。

表1-3 消化脱水汚泥の物理・化学性分析結果

発生時期		平成2年	平成3年
分析項目			
含水率 (%)		82.50	81.90
化学性	pH(H ₂ O)	7.10	8.00
	EC (μS/cm)	2090.00	2670.00
	T-C (%)	29.80	27.80
	T-N (%)	4.79	4.26
	C/N比	6.20	6.50
	NH ₄ -N (mg-N/100g)	514.00	77.00
	NO ₃ -N (mg-N/101g)	13.80	ND
	T-P205 (%asP2O5)	8.14	2.73
	T-K (ppm)	2640.00	2800.00
	T-Ca (ppm)	11800.00	200.00
	T-Mg (ppm)	4760.00	4200.00
	CEC (me/100g)	54.70	72.10

表1-4 消化脱水汚泥の重金属類分析結果

分析項目		発生時期	
		平成2年	平成3年
重金属類	T-Pb (ppm)	42.80	1.10
	T-Cr (ppm)	18.40	25.70
	T-Cd (ppm)	4.08	3.10
	T-As (ppm)	11.70	8.00
	T-Cu (ppm)	32.00	260.10
	T-Fe (ppm)	16100.00	394.00
	T-Ni (ppm)	34.10	71.80
	T-Zn (ppm)	1520.00	17.00
	T-Hg (ppm)	0.22	0.34

2.3 副資材

試験1では、試験条件として含水率の差を作るため、生の剪定枝葉の堆肥化については、その一部において、副資材としてヤシガラ炭を用いた。

下水汚泥の堆肥化に際しては、含水率や粘性の改善を図るため、副資材の混入が一般に行われており、ヤシガラ炭などの粉炭も用いられることが多い。粉炭類は含水率の調整のほか、脱臭、ミネラル類の供給、微生物類の活性化に効果があるといわれるが、その効用は必ずしも明らかではない。ここでのヤシガラ炭の使用は、あくまでも含水率低下を目的としている。

表1-5に使用したヤシガラ炭の含水率と粒径組成、ミネラル類に係る化学性の分析結果を示す。

表1-5 ヤシガラ炭の分析結果

副資材材料			ヤシガラ炭
分析項目			
物理特性	含水率		9.6%
	粒径別乾物重量比	4.76mm以上	52.6%
		2.0～0.84mm	42.7%
		0.84～0.42mm	4.5%
		0.42mm以下	0.2%
化学特性	pH(H2O)		9.9
	EC	(μ S/cm)	445.0
	CEC	(me/100g)	6.4

3. 試験方法

3.1 試験区設定

剪定枝葉と下水汚泥の混合割合を、容積比にして1:1とした試験区を、4種の剪定枝葉すべてに設定し、その試験区記号を、それぞれDtld-1、Dtof-1、Dlof-1、Elof-1とした。

さらに、枝葉の乾燥前処理を行ったDtldについては、汚泥を倍量混合した試験区Dtld-2を設定した。また、Dlof-1、Elof-1については、さらにヤシガラ炭を枝葉に対し容積比で0.5混入した試験区を設定し、Dlof-c、Elof-cとした。

以上7個の試験区の条件を整理し、表1-6に示す。

表1-6 試験1の試験区設定一覧

試験区 記号	使用材料			材料混合割合 (容積比)
	剪定枝葉	下水汚泥	副資材	枝葉:汚泥:副資材
Dtld-1	Dtld	消化脱水汚泥 (平成2年発生)	なし	1:1:0
Dtld-2	(落葉樹/幹・枝葉/乾燥前処理)			1:2:0
Dtof-1	Dtof(落葉樹/幹のみ)			1:1:0
Dlof-1	Dlof(落葉樹/枝葉のみ)	消化脱水汚泥 (平成3年発生)	なし	1:1:0
Dlof-c			ヤシガラ炭	1:1:0.5
Elof-1	Elof(常緑樹/枝葉のみ)		なし	1:1:0
Elof-c			ヤシガラ炭	1:1:0.5

3.2 堆肥化の方法

(1) 発酵槽

堆肥の製造は、試験区1個につき、図1-2に示す箱型発酵槽1個を用いて行った。

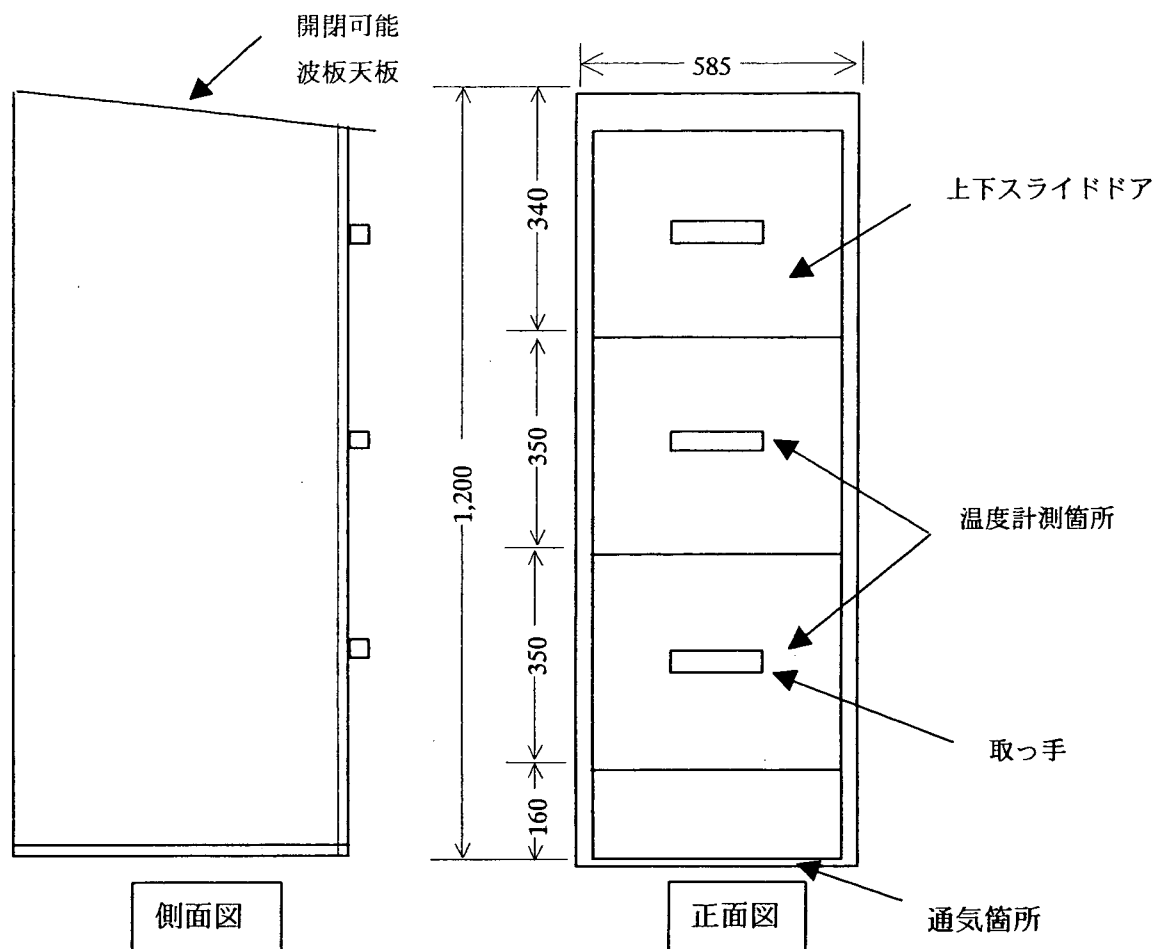
発酵槽の容積は0.25m³、木製であるが、内部は、保温性を保つため断熱材を張っている。発酵槽の前部は上下にスライドする3枚のドアとなっており、堆肥の切り返し時などに、堆肥の出し入れが容易な構造となっている。また、最下部には通気口を設けた。

(2) 仕込みと発酵管理

a. 仕込み

材料を人力によりスコップで混合・攪拌し、各材料を均一化するとともに、材料内への空気の混入を図った。

混合した材料は、発酵槽中に自然堆積状態で高さ1mになるように挿入した。



内容量=500×500×1,000 mm (250 リットル)

図 1-2 発酵槽

b. 通気

発酵期間中、発酵槽最下部より（図 1-2 参照）、小型の電動ポンプを用いて、6 リットル/分の通気を行った。

c. 温度管理と切り返し

発酵期間中、図 1-2 に示す発酵槽の下部と中部において温度計測を行い、発酵温度が低下した場合に切り返しを行った。

切り返しは、発酵槽から材料を取り出し、人力によりスコップで攪拌した後、発酵槽中に自然堆積状態で戻した。

d. 発酵期間

枝葉材料 Dtld、Dtof を用いた平成 2 年の堆肥製造については仕込みより 42 日、Dlof、Elof を用いた 3 年の製造では 40 日で、発酵槽から取り出し、評価に供した。

3.3 評価方法

製造した堆肥の品質について、堆肥の物理性状、堆肥の化学成分、生育障害の有無、樹木への施用効果、の4項目について評価を行った。各評価方法について以下に述べる。

(1) 堆肥の物理性状

物理性状では、含水率、粒径組成、臭気、分解状況について評価した。

臭気については、人間の嗅覚により、汚泥臭の有無、カビ臭の有無とその他に感知した全ての臭気について記録した。分解状況については、目視と触感により判断した。

(2) 堆肥の化学成分

肥効成分と関連項目、および有害物質となる重金属類を分析項目とした。分析項目の一覧を表1-7に示す。

分析結果は、肥料に係わる既存の各種の基準と比較することにより評価するものとし、比較対象基準は、以下の2基準とした。

a. 肥料取締法

汚泥枝葉堆肥は、肥料取締法では、汚泥発酵肥料に該当し、重金属等有害物質についての基準が設定されている（表1-8）。

b. 有機質肥料等推奨基準

平成6年に全国農業協同組合中央会が作成した「有機質肥料等推奨基準」において、「下水汚泥堆肥」など8種の堆肥等について基準が設けられている（表1-8）。

表1-7 堆肥の化学成分分析項目

	分析項目
化学特性	PH(H ₂ O)
	EC(電気伝導度)
	全リン酸
	全窒素
	全炭素
	C/N比
	強熱減量
	全リン酸
	全カリウム
	アンモニア態窒素
	硝酸態窒素
	CEC(陽イオン変換容量)
重金属類	ヒ素
	カドミウム
	水銀
	銅
	亜鉛

表1-8 評価に用いた堆肥に係わる公的基準

	肥料取締法*	有機質肥料等推奨基準(推奨基準)**					備考
		パーク堆肥	下水汚泥堆肥	し尿汚泥堆肥	食品工業汚泥堆肥	家畜ふん堆肥	
有機物		70%以上	35%以上	35%以上	40%以上	60%以上	表示を要する項目
前炭素(T-C)		要測定	要測定	要測定	要測定	要測定	
窒素全量(T-N)		1%以上	1.5%以上	2%以上	2.5%以上	1%以上	
C/N比		40以下	20以下	20以下	10以下	30以下	
無機態窒素		25mg以上	—	—	—	—	
りん酸(P2O5)全量		—	2%以上	2%以上	2%以上	1%以上	
加里(k2O)全量		—	—	—	—	1%以上	
アルカリ分		—	25%以下	25%以下	25%以下	—	表示不要項目
水分		60%以下	50%以下	50%以下	50%以下	70%以下	
pH		—	8.5以下	8.5以下	8.5以下	—	
EC		3mS以下	—	—	—	5mS以下	
CEC		70meq以上	—	—	—	—	
銅(Cu)		600ppm(300)以下 ()内以上の場合は施用上の注意を併記					
亜鉛(Zn)		1,800(900)ppm以下 ()内以上の場合は施用上の注意を併記					
幼植物試験		こまつなによる幼植物試験で異常が認められないこと					
砒素(As)	乾物1kgあたり50mg以下						
カドミウム(Cd)	乾物1kgあたり5mg以下						
水銀(Hg)	乾物1kgあたり2mg以下						

* 上記の基準のほかに、「金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令」の基準が適用されるがここでは省略した。また、平成11年の法改正により、ニッケル、クロム、鉛が追加されたが、ここでは判定を行っていない。

** ここでは、たい肥のみを記載し、3種の肥料については省略した。

(3) 生育障害の有無

汚泥枝葉堆肥施用による生育障害の有無の確認は、堆肥の熱水抽出液による発芽試験^{注)}に準じて行った。試験手順は以下のとおりである。

① 熱水抽出

乾燥粉碎した堆肥 5g に、60℃の熱水 100ml を加え、密閉容器内で攪拌しつつ 60℃を 3 時間保持し、冷却後ガーゼ 2 枚で濾過した。

② 発芽床と播種

①の液 10ml を、ろ紙 2 枚を敷いたシャーレに注ぎ、その上からコマツナの種子 10～20 粒を播種し、シャーレに蓋をして室温に保持した。また、対照として蒸留水 10ml を注いだものに同様に播種した。

③ 計測

4～6 日後に、発芽数と地上部成長、根系成長を観察した。

注) 藤原俊六郎(1985): シャーレを使った堆肥の簡易腐熟度検定法、土肥誌、56 巻 3 号、251-252

(4) 樹木への施用効果

製造した堆肥を用いて緑化樹木への施用試験を行い、その肥培効果を確認した。

試験は、土木研究所構内（茨城県つくば市）に、関東ローム土を厚さ 50cm に盛り土した圃場を造成して行った。

製造した各堆肥について、幅 1 m 長さ 5 m の試験区を設け、地下 30cm の範囲で、堆肥を土壌に混入し、樹高約 50cm のマテバシイ 5 本を植栽した。試験樹木の植栽配置を図 1-3 に示す。

堆肥の施用量は、N 量にして 50g/m² とした。また、対象区として化成肥料の施用区を設けた。各堆肥、化成肥料の施用量については、「4. 試験結果」において詳述する。

試験は、平成 5 年 4 月から平成 7 年 12 月までの 2 年 8 か月間継続し、その間、地上部成長の計測を 4 回、地下部成長の計測と土壌分析を各 1 回行った。計測方法の詳細については、「4. 試験結果」において述べる。

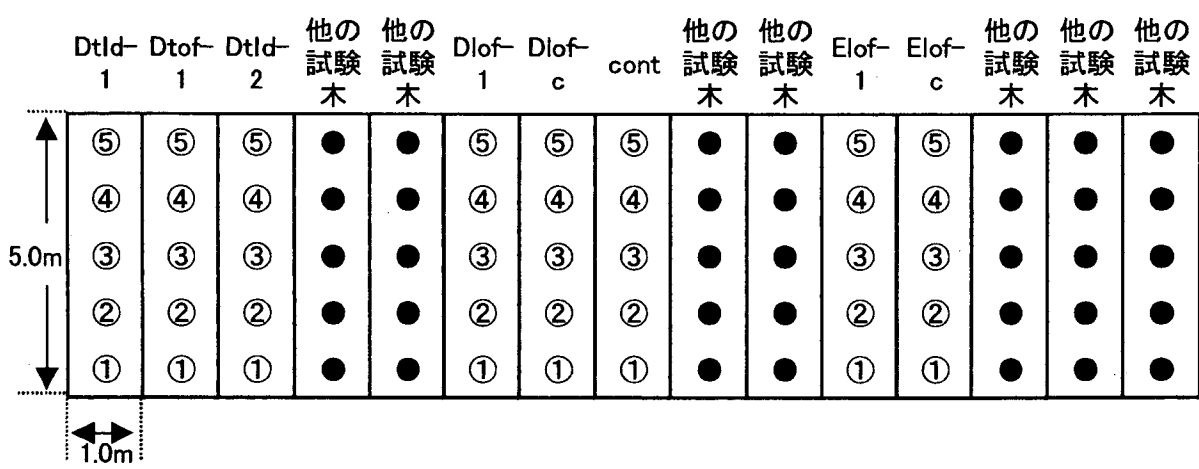


図1-3 樹木への施用試験での植栽配置

4. 試験結果

4.1 堆肥の物理性状

(1) 分解状況

試作した堆肥の臭気、汚泥と剪定枝葉の分解状況、触感について、人間の鼻・目・手により3段階で評価し、それらの結果から、さらに総合的な分解状況を評価したものを表1-9に示す。

評価はあくまでも相対的なものであるが、比較的良好な分解状況を示した Dtld-1、Dlof-c、Elof-c のグループ、分解状況の悪い Dtld-2、Dtof-1 のグループ、中間の状況である Dlof-1、Elof-1 のグループに大別された。

表1-9 堆肥の物理性状判定結果

試験区記号 (堆肥記号)	臭気		分解状況				触感		総合 評価
			汚泥		剪定枝葉				
Dtld-1	弱汚泥臭	△	塊なし	○	分解が進行している	○	べたつきなし パラパラする	○	○
Dtld-2	汚泥臭 弱キノコ臭	×	塊多数あり	×	ほとんど分解していない	×	べたつく	×	×
Dtof-1	弱汚泥臭 キノコ臭	△	塊多数あり	×	ほとんど分解していない	×	べたつく	×	×
Dlof-1	汚泥臭 弱樹木臭	×	塊多数あり	×	分解がやや進行している	△	ややべたつく	△	△
Dlof-c	ほとんど無臭	○	塊少々あり	△	分解が進行している	○	べたつきなし パラパラする	○	○
Elof-1	弱汚泥臭 弱キノコ臭	△	塊多数あり	×	分解がやや進行している	△	べたつきなし	△	△
Elof-c	弱汚泥臭 弱キノコ臭	△	塊少々あり	△	分解が進行している	○	べたつきなし パラパラする	○	○

(2) 含水率

各材料の含水率から計算により求めた仕込み時の含水率と、分析により得られた試作堆肥の含水率を表1-10示す。

仕込み時の含水率は、乾燥前処理を行った Dtld-1、副資材を混入した Dlof-c、Elof-c が他に比べ低く、この傾向は製造終了時においても同様である。

含水率の低さは、上述の分解状況の触感評価に連動しており、この3つの堆肥は、べたつきのない、パラパラした状態を示している。

なお、含水率については、化学性と合わせ、既存の公的基準との比較評価を、後に行う。

表1-10 試作堆肥の含水率

試験区記号 (堆肥記号)	仕込み時の 含水率(%)	製造終了 時の含水 率(%)
Dtld-1	66.6	58.7
Dtld-2	73.7	63.6
Dtof-1	73.1	60.1
Dlof-1	73.7	72.3
Dlof-c	60.5	54.3
Elof-1	73.4	69.8
Elof-c	60.1	49.6

(3) 粒径組成

試作堆肥の粒径組成分析の結果を、粒径 10mm を境として整理したものを表 1-11 に示す。10mm を境とすることにより、未分解の汚泥の固まりが概ね把握できる。

粒径 10mm 以上の重量比は、Dtld-2、Dtof-1、Dlof-1、Elof-1 の 4 つの堆肥で大きくなっており、上述の汚泥の分解状況に連動している。

表1-11 試作堆肥の粒径組成

試験区記号 (堆肥記号)	粒径別重量比(%)	
	10mm未満	10mm以上
Dtld-1	72.7	27.3
Dtld-2	36.5	63.5
Dtof-1	42.0	58.0
Dlof-1	41.8	58.2
Dlof-c	83.2	16.8
Elof-1	47.5	52.5
Elof-c	78.4	21.6

4.2 化学成分

(1) 重金属類

重金属含有量の分析は、Dlof-1、Dlof-c、Elof-1、Elof-c の 4 つの試作堆肥について行った。分析結果を肥料取締法と推奨基準の基準値と合わせて表 1-12 に示す。

試作堆肥の重金属類は、いずれも材料とした下水汚泥に由来すると考えられる。堆肥の重金属類の含有量はいずれも基準値を下回るものではあるが、堆肥製造には、材料とする下水汚泥の重金属含有量に留意が必要とされる。

表1-12 試作堆肥の重金属類分析結果と基準値との比較

分析項目	試作堆肥の分析結果(ppm)				基準値*
	Dlof-1	Dlof-c	Elof-1	Elof-c	
銅	83	114	165	102	600ppm以下
亜鉛	13	6	7	11	1,800ppm以下
ヒ素	ND	2	2	2	50ppm以下
カドミウム	2	1	1	0	5ppm以下
水銀	0	0	0	0	2ppm以下

*ヒ素・カドミウム・水銀は肥料取締法、銅・亜鉛は推奨基準の基準値

(2) 肥効成分

試作堆肥の肥効成分の分析結果を推奨基準の基準値と合わせて表 1-13 に示す。

汚泥枝葉堆肥は、下水汚泥と木材の混合堆肥であるため、比較する基準を、パーク堆肥と下水汚泥堆肥とし、両者の基準が異なる場合は、より厳しい方を比較基準とした。

一部未分析の基準項目があるため、すべての項目についての評価はできないが、分析項目の範囲においては、C/N 比、水分、CEC において、一部の試作堆肥で基準が満たされなかった。

基準を満たさなかった試作堆肥は、C/N 比と CEC については副資材を混入した Dlof-c と Elof-c であった。ただし C/N 比について炭を混入したためであり、堆肥としての熟成の

低さを示すものではなく、問題とはされない。水分については、Elof-c 以外は、すべて基準を満たさなかったが、Dlof-c が基準に近い値を示した。

このように、ここで得られた試作堆肥は水分過多という問題を有していると言える。それに対し、副資材としてのヤシガラ炭の混入は水分の低下に効果を示したが、一方では、CEC において問題を残した。

表1-13 試作堆肥の肥効成分分析結果と基準値との比較

	試作堆肥の分析結果							推奨基準	
	Dtld-1	Dtld-2	Dtof-1	Dlof-1	Dlof-c	Elof-1	Elof-c	バーク堆肥	下水汚泥堆肥
有機物	—	—	—	—	—	—	—	70%以上	35%以上
全炭素(T-C)	30.0	27.8	27.9	26.9	56.9	28.1	51.9	要測定	要測定
窒素全量(T-N)	2.9	3.2	2.5	2.9	2.1	2.9	2.3	1%以上	1.5%以上
C/N比	10.2	8.8	11.3	9.1	27.4	9.7	23.0	40以下	20以下
無機態窒素	346.0	416.7	331.3	94.7	92.4	81.4	102.2	25mg以上	—
りん酸(P2O5)全量	2.7	2.7	2.7	2.7	2.0	2.4	1.4	—	2%以上
加里(k20)全量**	0.4	0.4	0.4	0.7	0.8	0.6	0.8	—	—
アルカリ分	—	—	—	—	—	—	—	—	25%以下
水分	64.9	64.3	63.5	72.3	54.3	69.8	49.6	60%以下	50%以下
pH	5.1	5.8	6.1	7.0	7.4	6.8	6.9	—	8.5以下
EC	1.8	1.5	1.3	1.4	1.1	1.4	1.2	3mS以下	—
CEC	82.1	81.2	75.3	71.7	44.0	77.7	53.7	70meq以上	—

*推奨基準では「バーク堆肥」、「下水汚泥堆肥」に加里(k20)全量の基準設定はなく、「家畜ふん堆肥」にのみ1%以上の基準がある。

網掛けは、基準を満たさなかった項目である。

4.3 生育障害の有無

仕込みから2週間後と製造試験終了時の堆肥の熱水抽出液による発芽試験の結果を、発芽率で示したものが表1-14である。

試作堆肥のうち試験終了時において Dtld-2 と Dtof-1 の発芽率が低く、この2つについては2週間後の発芽率についても低い発芽率となっている。この原因については、Dtld-2 と同じ材料を用いた Dtld-1 が試験終了時において良好な発芽率を示していることから、材料の含有成分に起因するとは考えづらく、Dtld-2 と Dtof-1 に共通する点は、前項の分解状況で触れた分解状況の悪さであるため、この点が原因ではないかと類推される。

表1-14 試作堆肥の発芽試験結果(発芽率)

試験区記号 (堆肥記号)	発芽率(%)	
	2週間後	試験終了時
Dtld-1	90	100
Dtld-2	50	66
Dtof-1	0	80
Dlof-1	100	100
Dlof-c	70	100
Elof-1	100	100
Elof-c	100	100

4.4 樹木への施用効果

(1) 施用量

施用試験は、平成5年4月に開始しており、施用した試作堆肥は、Dtld-1、Dtld-2、Dtof-1については2年間、Dlof-1、Dlof-c、Elof-1、Elof-cについては1年間の保存を経たものである。保存期間中に熟成が進み、成分に変化が生じている可能性があるため、改めて成分分析を行い、施用量を決定した。分析結果を表1-15に示す。

同表より、試験終了時の分析において基準を満たさなかったC/N比、CEC、水分について、その傾向がそのまま残されていることが分かる。また加えて、Dtld-1のEC値が基準外の値を示した。

表1-15 施用試験開始時の試作堆肥の肥効成分分析結果と基準値との比較

	試作堆肥の分析結果							推奨基準	
	Dtld-1	Dtld-2	Dtof-1	Dlof-1	Dlof-c	Elof-1	Elof-c	バーク堆肥	下水汚泥堆肥
有機物	—	—	—	—	—	—	—	70%以上	35%以上
全炭素(T-C)	26.8	37.1	35.8	37.2	60.8	36.9	60.0	要測定	要測定
窒素全量(T-N)	3.3	3.1	3.2	2.6	1.5	2.6	1.6	1%以上	1.5%以上
C/N比	8.2	11.6	11.9	14.2	41.6	14.5	36.8	40以下	20以下
無機態窒素	—	—	—	—	—	—	—	25mg以上	—
りん酸(P2O5)全量	6.4	7.2	6.5	5.6	2.4	5.3	2.7	—	2%以上
加里(K2O)全量*	0.8	0.7	0.9	1.2	1.4	1.1	1.2	—	—
アルカリ分	—	—	—	—	—	—	—	—	25%以下
水分	54.4	69.2	62.9	66.7	48.4	74.5	56.1	60%以下	50%以下
pH	4.9	5.4	5.7	6.3	6.2	6.4	6.3	—	8.5以下
EC	3.8	2.2	2.2	1.7	2.0	1.4	2.1	3mS以下	—
CEC	87.0	82.0	80.0	73.0	60.0	71.0	62.0	70meq以上	—

*推奨基準では「バーク堆肥」、「下水汚泥堆肥」に加里(K2O)全量の基準設定はなく、「家畜ふん堆肥」にのみ1%以上の基準がある。

網掛けは、基準を満たさなかった項目である。

試作堆肥の施用量は、表1-15の分析結果を基にN量にして50g/m²とし、不足ぎみのカリ分を補うため、珪酸カリウムを、N:P:K=1:1:1となるように投入した。各堆肥試験区および対照区の施用条件を表1-16に示す。

表1-16 施用試験の施用条件

試験区記号	堆肥施用量(kg/m ²)	珪酸カリウム添加量(g/堆肥kg)
Dtld-1	3.3	56.5
Dtld-2	5.0	38.5
Dtof-1	4.3	41.1
Dlof-1	5.7	24.0
Dlof-c	6.6	1.8
Elof-1	7.7	18.0
Elof-c	7.0	9.0
cont(対照区)	化成肥料(N:P:K=6:4:3)をN量にして10g/m ² 施用	

(2) 計測項目と方法

地上部調査、地下部調査と土壌調査の3つの調査を実施した。各調査の実施時期を表1-17に示す。また各調査での計測項目と方法を以下に記す。

表1-17 調査時期

調査年	経過年月	地上部調査	地下部調査	土壌調査
平成5年 4月	—	○		
平成5年12月	8か月	○		○
平成6年12月	1年 8か月	○		
平成7年 7月	2年10か月		○	
平成7年12月	2年 8か月	○		

a. 地上部調査

樹高、根元径（地上高 3cm）の計測と樹勢の評価を行った。

樹勢の評価方法は、科学技術庁資源調査会^{注)}の方法に準じ、表 1-18 の基準によって行った。

表1-18 樹勢評価基準

	評価基準			
	1	2	3	4
樹勢	旺盛な生育状況を示し、被害が全く見られない	幾分被害の影響を受けているが、あまり目立たない	異常が明らかに認められる	生育状況が劣悪で回復の見込みがない

b. 地下部調査

各試験区から平均的な生育状態を示す樹木 1 本を選定し、根系の発達状態の観察とスケッチを行った。

c. 土壌調査

水分および肥効成分に係わる化学成分の分析を行った。

(3) 結果

a. 地上部

① 樹勢

樹勢の評価結果を試験区毎に平均したものを図 1-4 に示す。

樹勢の値は、すべての試験区で 1～3 の範囲にあり、全体に生育状態が良いとは言えないが、極端な異常は認められなかった。最終的な 2 年 8 か月後の評価では、相対的に対照区と D1d-1 で樹勢が劣り、他の区では 1～2 の間の比較的良好な樹勢を示し

注) 科学技術庁資源調査会（1972 年）：高密度地域における資源利用と環境保全の調和に関する勧告

た。なお、Dtld-1 については、植栽位置が試験区の端部であるため、風等の影響を受けた可能性が大きい（図 1-3 参照）。

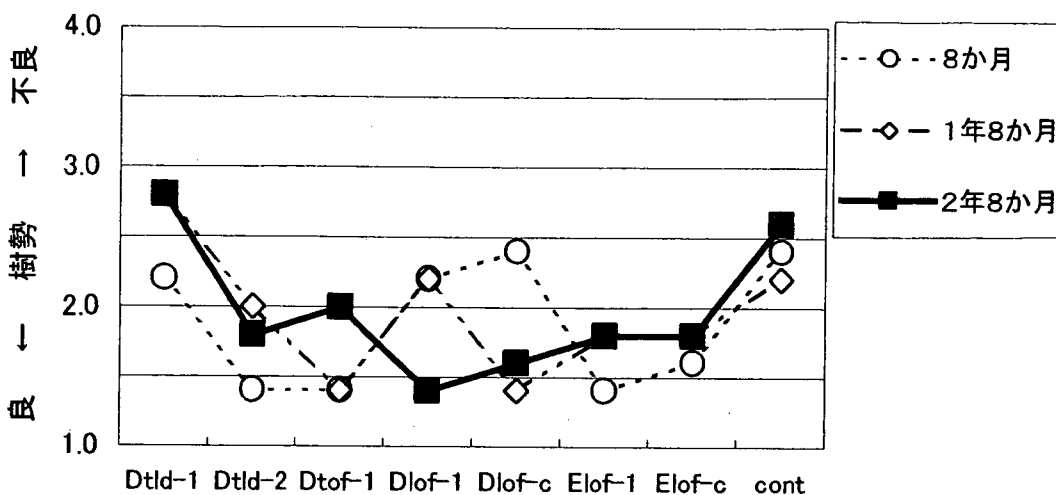


図1-4 樹勢評価結果(平均)

② 樹高・根元径

樹高、根元径の計測結果を試験区毎に平均したものを、それぞれ図 1-5、図 1-6 に示す。樹高、根元径ともに、1 年 8 か月以降に成長の差が見られ始め、最終的には、対照区と Dtld-1 が他の区に比べ成長が劣り、樹勢と同様な傾向を示した。

なお、全測定結果は巻末資料 1 に記載した。

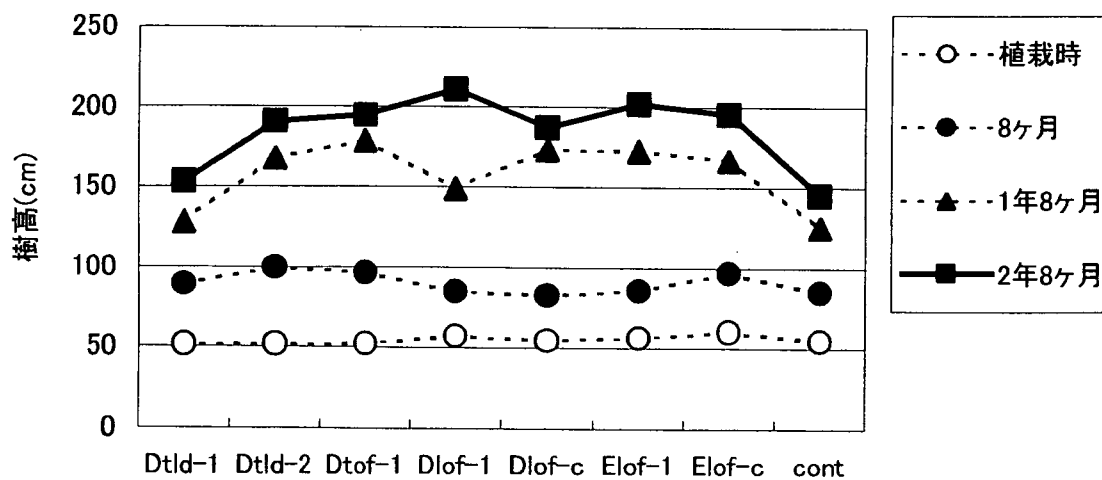


図1-5 樹高測定結果

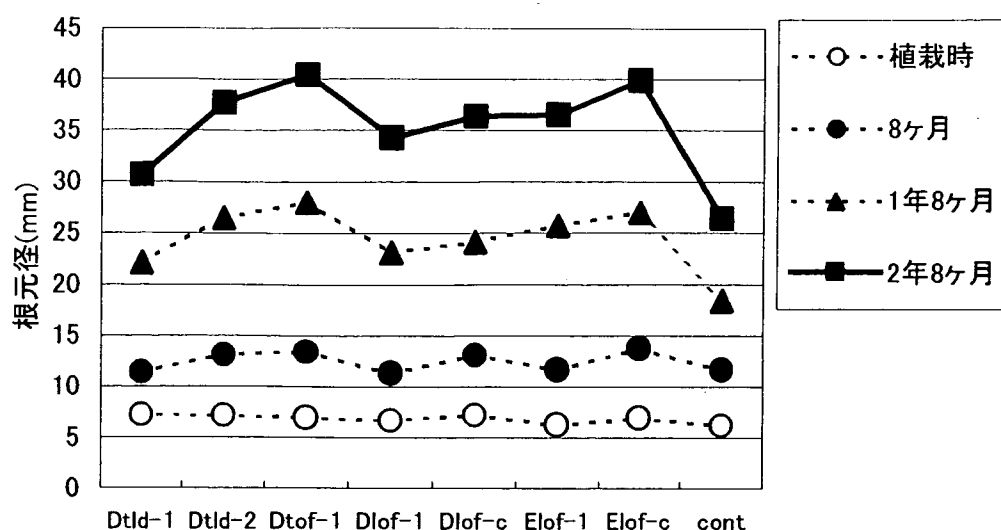


図1-6 根元径測定結果

b. 地下部

根系の成長には、各試験区において差は認められず、また病害も見られなかった。なお、根系のスケッチを巻末資料2に記載した。

c. 土壌

土壌分析の結果を表1-19に示す。

分析値には各試験区間に際だった差異は認められなかった。日本造園学会土壌分科会の土壌分析結果の分級基準^{注)}と比較すると、すべての試験区において土壌は、優ないし良に分級された(分級基準については巻末資料3参照のこと)。

表1-19 土壌分析結果(植栽8か月後)

	試作堆肥の分析結果							
	Dtld-1	Dtld-2	Dtof-1	Dlof-1	Dlof-c	Elof-1	Elof-c	cont
含水率(%)	46.5	45.9	45.8	44.9	46.1	44.3	46.0	45.3
比重	0.82	0.87	0.90	0.78	0.84	0.84	0.87	0.88
pH(H2O)	5.85	5.70	5.85	6.05	5.95	6.10	5.95	5.40
EC(μS)	26.0	41.2	31.2	20.9	21.7	26.5	27.4	50.2
全炭素(%)	0.34	0.67	0.63	0.63	0.57	0.70	0.70	0.54
全窒素(%)	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.12	0.11	0.09
全りん酸(%)	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.12	0.11	0.09
全カリ(%)	0.79	0.75	0.74	0.76	0.73	0.71	0.66	0.68
全カルシウム(%)	0.23	0.24	0.22	0.25	0.22	0.23	0.22	0.21
CEC(me/100g)	18.6	18.3	19.1	18.6	18.9	19.0	18.9	18.1
NH4-N(mg/100g)	2.0	1.2	1.2	1.8	1.7	1.8	2.0	1.6
NO3-N(mg/100g)	3.8	4.7	2.6	1.5	1.9	1.3	1.3	4.5

注) 日本造園学会土壌分科会(1984年): 緑化事業における植栽基盤整備マニュアル(分化会試案)、造園雑誌、48-2、pp.133-146

5. 考察

5.1 材料適性の評価

(1) 落葉樹・常緑樹の比較

落葉樹チップの Dlof と常緑樹チップの Elof では、堆肥仕込み前の材料としての物理性・化学性の分析結果に大きな違いは認められない。試作堆肥 Dlof-1 と Elof-1 の分解状況、肥効成分、施用効果においても、両者には大きな違いはなく、落葉樹、常緑樹による堆肥化の難易、堆肥の性状に差はないと判断される。

(2) 植物体部位の比較

幹を含むチップは、枝葉のみのチップと比較し、粒径組成において粒径が大きい傾向にある。また、枝葉の N 量は幹に比べ大きいため、T-N は、枝葉のみのチップ、幹と枝葉のチップ、幹のみのチップの順で大きく、逆に C/N 比は、この順で小さい。

幹のみの堆肥 Dtof-1 と枝葉のみの堆肥 Dlof-1 について、仕込み 40 日後の分解状況を比較すると、Dtof-1 では未分解のチップが多く残り、幹については発酵・堆肥化に長期間を要すると判断される。

今回の試験では、N 量の大きい下水汚泥を比較的多量に混合しているため、C/N 比の差が分解状況の差の原因とは考え難く、分解状況の差の直接的要因は、チップの粒径組成の差と思われる。ただし、チップの粒径組成は、粉砕機（チップパー）の能力により左右されるため、幹についても、より能力の大きな粉砕機を用いて、細かく粉砕することにより、部位の差は解消されるものと考えられる。

5.2 仕込み方法の評価

(1) 乾燥前処理の効果

仕込み前に乾燥処理を行った Dtld-1 の分解状況について、幹を含み似かよった粒径組成を有する無乾燥処理の Dtof-1 と比較すると、Dtld-1 の方が、分解状況が良い。Dtld-1 は幹を含まない無乾燥処理の Dlof-1、Elof-1 と比較しても良い分解状況を示している。

乾燥前処理を行った Dtld-1 の仕込み時含水率は、無乾燥処理区が 73~74%程度の値を示しているのに対し、66.6%と 7%程度低いものとなっており、この差が分解状況の差となって現れたと考えられる。

(2) 副資材（ヤシガラ炭）の効果

ヤシガラ炭を混入した Dlof-c と Elof-c は、混入なしの Dlof-1、Elof-1 に比べ良好な分解状況を示し、試験区全体でみても、乾燥前処理の Dtld-1 とともに最も良い分解状況のグループを形成している。これらに共通する点は、仕込み時の含水率が低いことであり、ヤシガラ炭の混入は含水率を下げ、分解を促進したと考えられる。しかし、試作堆肥の化学性分析からは、CEC が基準以下の小さい値を示した。

(3) 下水汚泥混入量の影響

剪定枝葉と下水汚泥を1:2の割合に設定したDtld-2は、1:1のDtld-1に比べ、分解状況が悪く、試験区全体でも、最も分解の悪いグループとなった。今回の試験では、混入条件が2段階のみであるため、適正な混入割合についての考察を行うのは難しいが、少なくとも、1:2では、汚泥が多すぎ、剪定枝葉に期待した堆肥性状の改善効果が得られなかった。

5.3 試作堆肥の総合比較

試作堆肥に対して行った、物理性、化学性、生育障害、施用効果の4項目の評価について、3段階の相対的な区分を行い整理したものが表1-20である。

3段階の評価のうち×で示したものは、明らかに問題があると判断したものである。堆肥の物理性が良好であったDtld-1、Dlof-c、Elof-cは、すべて仕込み時の含水率が他に比べて低いものである(図1-7参照)。

表1-20 堆肥性状の総合評価

試験区記号 (堆肥記号)	物理性	化学性	生育障害 の有無(発 芽試験)	樹木への 施用効果
Dtld-1	○	○	○	△
Dtld-2	×	○	×	○
Dtof-1	×	○	×	○
Dlof-1	△	○	○	○
Dlof-c	○	△	○	○
Elof-1	△	○	○	○
Elof-c	○	△	○	○

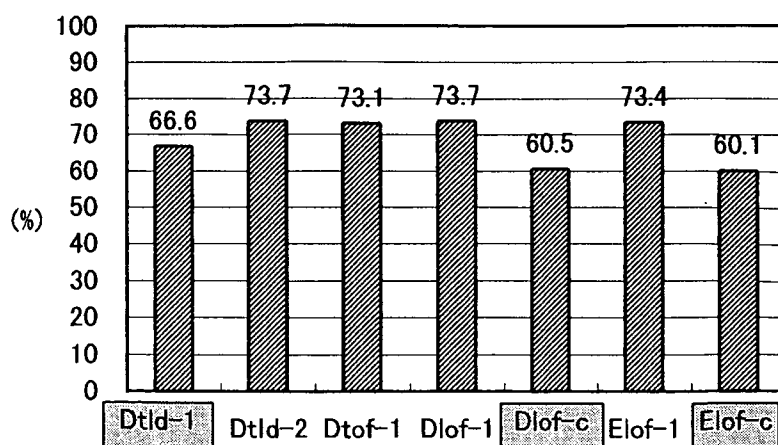


図1-7 仕込み時含水率

6. まとめ

6.1 結果の総括

約 40 日間の堆肥製造試験の結果、分解状況については、枝葉材料の落葉樹・常緑樹の別による差は認められず、植物体部位の別、乾燥前処理の有無、副資材（ヤシガラ炭）混入の有無、下水汚泥との混合割合の別、による差が認められた。

植物体部位の別については、幹の分解状況が枝葉に比べ悪かった。しかし、その原因はチップの粒径が大きいためと考えられ、チップ製作時の留意により問題は解消されと考えられた。

剪定枝葉の乾燥とヤシガラ炭混入の処理は、いずれも分解を促進させた。その効果は含水率を低下させることによるものと考えられ、これらの処理を行わない仕込み材料の含水率が 73~74% であるのに対し、処理したものは、60~67% 程度であった。

剪定枝葉と下水汚泥の混合割合（容積比）は、1:1 のものに比べ 1:2 のものでは、分解が悪かった。

試験により得られた試作堆肥は、分解状況の良好なものでは、べたつきのないパラパラとした状態に達し、汚泥臭は無いが、弱いものとなり、剪定枝葉の混入による性状の改善が認められた。しかし、いずれの試作堆肥も、水分が多く性状の改善余地を残した。

熱水抽出液による発芽試験では、特に分解の悪かったもののみに発芽率の低下が認められた。しかし、樹木への施用試験では、すべての試作堆肥で施用効果が確認された。

6.2 課題

仕込み時の含水率を 60% 程度に下げることが、分解促進上有効であることが、今回の試験により確認された。しかし、完成した堆肥の水分を少なくすることが課題とされ、解決には、仕込み時の水分調整についてさらなる検討が必要と考えられる。

今回の試験で用いた材料の含水率は、生の剪定枝葉で 50% 前後であるのに対し、消化脱水汚泥では 80% 余を示す。試験で主として設定した 1:1 の混合割合は、結果的に大きめな含水率をもたらしたと言える。

汚泥の量を減らすことにより、含水率を小さくすることは可能ではあるが、同時に N 量や C/N 比を変化させることとなるため、分解への影響を確認することが必要である。また、下水汚泥は、処理形態により含水率に大きな差があるため、含水率のみの調整では、適正な混合割合を得られないことが想定される。N 量など他の観点からの適正混合割合の検討も課題とされる。

第2章 各種の下水汚泥と落葉樹枝葉を用いた堆肥製造試験

(試 験 2)

1 章では、4 種類の枝葉材料と 1 種類の汚泥（消化脱水汚泥）を用いた汚泥枝葉堆肥の試作を行い、堆肥の性状や施用効果について確認し、剪定枝葉材料適性の評価、仕込み方法の評価、試作堆肥の総合比較を行った。

一方、下水汚泥については、下水汚泥の処理形態の違いによって、性状の異なる汚泥が発生しており、汚泥の種類によって、堆肥の製造方法や、得られる堆肥の性状は異なることが予想される。そこで、2 章では、堆肥化に適した汚泥材料の選定、あるいは汚泥材料に応じた堆肥化方法検討の基礎資料を得るため、4 種類の汚泥材料と 1 種類の枝葉（落葉樹枝葉）を用いた汚泥枝葉堆肥の試作を行い、堆肥の性状や施用効果について確認した。

1. 試験 2 の目的

試験 2 では、処理形態の異なる各種の下水汚泥が有する材料特性の違いが、堆肥化へ及ぼす影響の確認と、得られる堆肥の性状を評価することを目的とした。

材料特性の違いは、その物理性については含水率の把握と臭気・粒径などの外観、化学性については、肥料成分の含有量、重金属の含有量の比較により把握することとした。また、堆肥の性状については、物理性・化学性の分析評価に加え、施用試験により生育障害の有無と肥培効果の評価を行うこととした。

2. 使用材料

2.1 下水汚泥

(1) 汚泥処理の違い

試験材料とする下水汚泥は、汚泥処理過程が異なる以下の 4 種類の下水汚泥を選定した。また、汚泥材料には、以降の記述を簡略化するため、記号を付した。なお、使用した汚泥はいずれも平成 7 年発生のものである。

①消化脱水汚泥：dh (dehydrate digested-sludge)

霞ヶ浦湖北流域浄化センターで発生した高分子凝集剤を用いた消化脱水汚泥。

②コンポスト一次発酵品：ch (compost half-matured)

霞ヶ浦湖北流域浄化センターで発生した消化脱水汚泥を、一次発酵させたもの。

ここで、一次発酵とは、消化脱水汚泥を 600℃で加熱乾燥させたあと、40℃に低下するまでの約 10 日間の発熱発酵をいう。

③コンポスト完熟品：cc (compost complete-matured)

霞ヶ浦湖北流域浄化センターで発生した消化脱水汚泥を、発酵させたもの。

上記の一次発酵品をさらに、二次発酵させたものであり、合計 40 日間の発酵期間を経過したものである。

④乾燥汚泥：dry (dry digested-sludge)

横浜市下水道局南部下水処理場で生産され「ハマユーキ」という名称で販売されているもの。ハマユーキは、高分子凝集剤を用いた消化脱水汚泥を加熱、乾燥したものである。

(2) 物理性

a. 含水率

4種類の汚泥材料の物理性分析結果を表 2-1 に示す。

表2-1 汚泥材料の含水率

dh	ch	cc	dry
80.5%	25.9%	12.90%	9.80%

b. 臭気・外観

4種類の汚泥材料の臭気と外観を表 2-2 に示す。

表2-2 汚泥材料の臭気・外観

材料記号 評価項目	dh	ch	cc	dry
臭気	汚泥臭	汚泥臭はあるが、dhより改善		
外観	粘性	粒状		

(3) 化学性

4種類の汚泥材料の化学性分析結果を表 2-3 に示す。

表2-3 汚泥材料の化学性分析結果

分析項目	材料記号	dh	ch	cc	dry
化学性	pH(H ₂ O)	8	8	7.6	7.9
	EC (μ S/cm)	1794	2790	2440	1391
	T-C (%)	30.77	30.79	31.24	25.05
	T-N (%)	4.92	4.96	4.9	3.22
	C/N比	6.3	6.2	6.4	7.8

2.2 剪定枝葉

(1) 樹種・部位

試験材料とする剪定枝葉は、実際の剪定作業から発生したプラタナスとシダレヤナギの枝と葉を用いた。樹種、部位の区分は行わず、チップ化したものを混合し仕込みに用いた。

(2) 物理性

枝葉材料の物理性分析結果を表 2-4 に示す。

表2-4 剪定枝葉チップの物理性分析結果

含水率		22.70%
粒径別乾物重量比	4.76mm以上	24.60%
	4.76～2.0mm	24.80%
	2.0mm～0.84mm	37.00%
	0.84mm以下	13.60%

(3) 化学性

枝葉材料の化学性分析結果を表 2-5 に示す。

表2-5 剪定枝葉チップの化学性分析結果

T-C(%)	T-N(%)	C/N比
44.4	1.0	42.7

3. 試験方法

3.1 試験区設定

剪定枝葉と下水汚泥の混合割合は、仕込み時において含水率 60%かつ、C/N 比 20 になるようにした。

また、dh については、汚泥材料自体の含水率が高かったため、仕込み時の含水率 60%になることを優先した結果、C/N 比 15 になった。

以上、4 個の試験区の条件を整理し、表 2-6 に示す。

表2-6 試験2の試験区設定一覧

試験区記号	使用材料		混合根拠	材料混合割合 (容積比) 汚泥:枝葉
	剪定枝葉	下水汚泥		
dh	(落葉樹/枝葉のみ)	消化脱水汚泥	含水率60% C/N比15	1:3
ch		コンポスト一次発酵品	含水率60% C/N比20	1:14
cc		コンポスト完熟品		1:22
dry		乾燥汚泥		1:9

3.2 堆肥化の方法

(1) 発酵槽

堆肥の製造は、試験区 1 個につき、図 2-1 に示す発酵槽 1 個を用いて行った。

発酵槽の構造は、試験 1 と同様であるが、容積を 0.5m^3 とし大型化したものである。

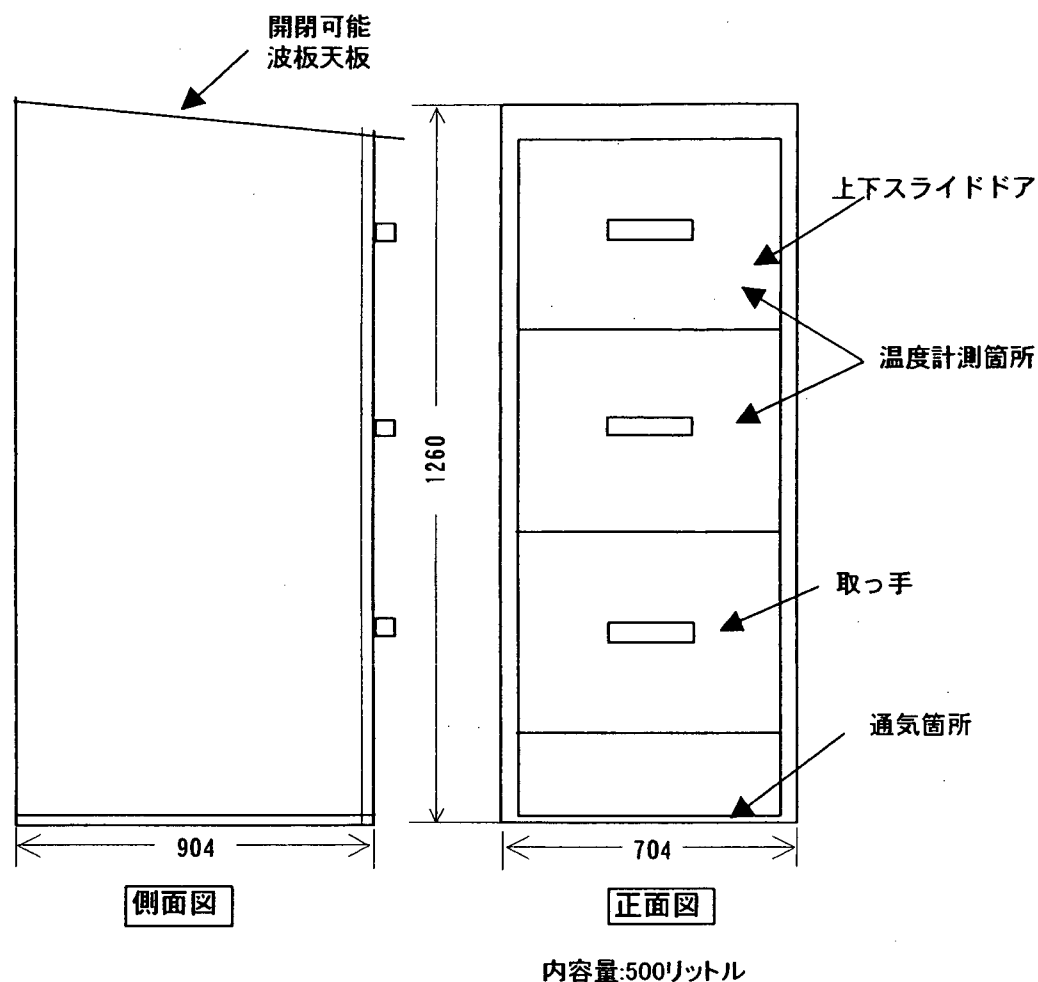


図2-1 大型発酵槽

(2) 仕込みと発酵管理

a. 仕込み

試験 1 と同様である (p.7, “3.2, (2), a.” 参照)。

b. 通気

試験 1 と同様である (p.8, “3.2, (2), b.” 参照)。

c. 温度管理と切り返し

発酵期間中、図 2-1 に示す発酵槽の上部と中部において温度計測を行った。その他は、試験 1 と同様である (p.8, “3.2, (2), c.” 参照)。

d. 発酵期間

試験 2 のすべての堆肥について、仕込みより 97 日で発酵槽から取り出し、評価に供した。

3.3 評価方法

製造した堆肥の品質について、試験1と同様に堆肥の物理性状、堆肥の化学成分、生育障害の有無、樹木への施用効果、の4項目について評価を行った。

各項目の評価方法について以下に述べる。

(1) 堆肥の物理性状

試験1と同様に、含水率、粒径組成、臭気、分解状況について評価した。

臭気については、人間の嗅覚により、汚泥臭の有無、カビ臭の有無とその他に感知した全ての臭気について記録した。分解状況については、目視と触感により判断した。

(2) 堆肥の化学成分

試験1と同様に、肥効成分と関連項目、および有害物質となる重金属類を分析項目とした。分析項目の一覧を表2-7に示す。

(3) 生育障害の有無

汚泥枝葉堆肥施用による生育障害の有無の確認は、コマツナによる幼植物試験を行った。

試験手順は、以下のとおりである。

① 試験区の設定

堆肥の土壌(赤玉土)への混合割合を変え、15%混合区、30%混合区、対照区(無混合)を設置した。

② 播種と設定条件

各試験区ごとに、コマツナを20粒播種し、適度な水分状態と気温(20℃～25℃)を保ちながら2週間栽培を行った。

③ 計測

播種2週間後に、発芽率、草丈の計測と、生育状況、障害の有無の観察を行った。

表2-7 堆肥の化学成分分析項目

	分析項目
化学特性	PH(H ₂ O)
	EC(電気伝導度)
	全リン酸
	全窒素
	全炭素
	C/N比
	強熱減量
	全リン酸
	全カリウム
	硝酸態窒素
重金属類	CEC(陽イオン交換容量)
	ヒ素
	カドミウム
	水銀
	銅
	亜鉛

(4) 樹木への施用効果

製造した堆肥を用いて緑化樹木への施用試験を行い、その肥培効果を確認した。

試験は、土木研究所構内(茨城県つくば市)に、関東ローム土を厚さ50cmに盛り土した圃場を造成し、製造した各堆肥について、幅1.5m、長さ7.5mの試験区を設け、樹高約1mのマテバシイを5本植栽した。試験樹木の植栽配置を図2-2に示す。堆肥の施用量は、容積比にして20%とし、地下15cmの範囲で、堆肥を土壌に混入した。また、対照区としてパーク堆肥の施用区(容積比にして20%の施用)を設けた。

試験は、平成8年5月～平成11年2月までの2年10ヶ月間継続し、その間、地上部計測を4回、土壌分析を3回行った。計測方法の詳細については、「4. 試験結果」において述べる。

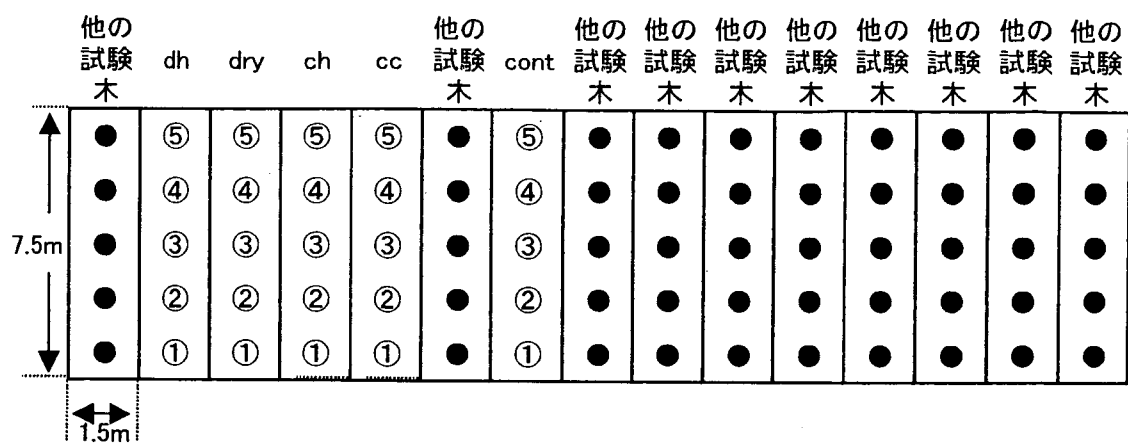


図2-2 樹木への施用試験での植栽配置

4. 試験結果

4.1 堆肥の物理性状

(1) 分解状況

試作した堆肥の臭気、汚泥と剪定枝葉の分解状況、触感について、試験 1 に準じ、3 段階で評価したものを表 2-8 に示す。“× (明らかに不良)”とされるものはなく、すべての堆肥で比較的良好な分解状況を示した。

表2-8 堆肥の物理性状判定結果

試験区記号 (堆肥記号)	臭気		分解状況				触感		総合評価
			下水汚泥		剪定枝葉				
dh	弱カビ臭	△	塊少々あり	△	分解が進行している	○	べたつきなし	○	○
ch		△	塊なし	○		○		○	○
cc		△		○		○		○	○
dry	弱カビ臭 弱アンモニア臭	△		○		○		○	○

(2) 含水率

製造終了時の各堆肥の含水率を表 2-9 に示す。この含水率については、化学性と合わせ、既存の公的基準との比較評価を後に行う。

なお、仕込み時の含水率は、各材料の含水率から計算により、60%に設定したが、試験期間の初期では、ch、cc、dry の 3 試験区では、含水率は低い値となった。試験期間中の含水率の推移を図 2-3 に示す。

表2-9 製造終了時の堆肥含水率(%)

dh	ch	cc	dry
69	69	66.2	61.9

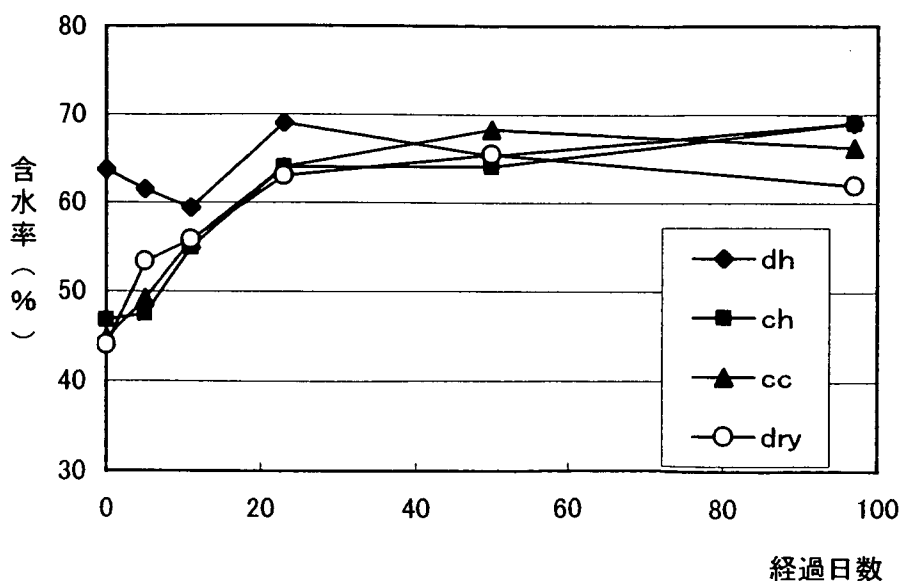


図2-3 含水率の推移

(3) 粒径組成

試作堆肥の粒径組成成分分析の結果を、粒径 10mm を境として整理したものを表 2-10 に示す。

ch、cc、dry では、粒径 10mm 以上の重量比は 2%以下となり、細かく分解されていることが示されている。しかし、dh では粒径 10mm 以上の重量比が約 11%あり、この大半が汚泥塊であることが観察された。

表2-10 試作堆肥の粒径組成(重量%)

	dh	ch	cc	dry
10mm以上	10.90%	1.10%	1.90%	2.00%
10mm未満	89.10%	98.90%	98.10%	98.00%

4.2 化学成分

(1) 重金属類

重金属含有量の分析結果を、試験 1 と同様に肥料取締法と推奨基準の基準値と合わせて表 2-11 に示す。

堆肥の重金属類の含有量はいずれも基準値を下回るものではあるが、堆肥製造時には、材料とする下水汚泥の重金属類含有量に留意が必要とされる。

表2-11 試作堆肥の重金属類分析結果と基準値との比較

分析項目	試作堆肥の分析結果(ppm)				基準値*
	dh	ch	cc	dry	
銅	144	123	158	139	600ppm以下
亜鉛	910	1160	1030	435	1,800ppm以下
ヒ素	3.25	3.67	2.52	1.49	50ppm以下
カドミウム	1.2	0.7	0.6	1.1	5ppm以下
水銀	0.52	0.58	0.33	0.48	2ppm以下

* 銅、亜鉛は肥料取締法、ヒ素、カドミウム、水銀は推奨基準の基準値。

(2) 肥効成分

試作堆肥の肥効成分の分析結果を推奨基準の基準値と合わせて表 2-12 に示す。

肥効成分については、試作堆肥 dry での、リン酸全量においてのみ基準が満たされなかった。また、水分においては、すべての堆肥で基準が満たされなかった。

表2-12 試作堆肥の肥効成分分析結果と基準値との比較

分析項目	試作堆肥の分析結果				推奨基準	
	dh	ch	cc	dry	バーク堆肥	下水汚泥堆肥
有機物	—	—	—	—	70%以上	35%以上
全炭素	35.5	39.2	40.7	33.8	要測定	要測定
全窒素	3.25	2.85	2.83	2.41	1%以上	1.5%以上
C/N比	10.9	13.8	14.4	14	40以下	20以下
無機態窒素	—	—	—	—	25mg以上	—
リン酸全量	2.86	2.84	2.7	1.79	—	2%以上
カリ全量*	1.22	1.45	1.25	1.01	—	—
アルカリ分	—	—	—	—	—	25%以下
水分	69	69	66.2	61.9	60%以下	50%以下
ph	6.3	6.7	6.5	7.4	—	8.5以下
EC	2.68	2	1.7	2.18	3ms以下	—
CEC	92	88.6	89.6	78.3	70meq以上	—

* 推奨基準では、バーク堆肥、下水おでい堆肥に加里(K₂O)全量の基準設定はなく、家畜ふん堆肥にのみ1%以上の基準がある。

4.3 生育障害の有無

幼植物試験の結果を、発芽率、草丈、生育状況について整理したものが表 2-13 である。

試作堆肥の平均発芽率は、70%~82%の範囲にあり、cc の 30%施用区以外では対照区の平均発芽率を上まわった。ただし、cc の 30%施用区についても、平均発芽率は 70%であり、対照区との差はわずか 2%である。

草丈については、すべての試験区において 6cm 前後を示しており、差は見られなかった。

生育状況を見てみると、dh15%施用区で立ち枯れ病が発生していたが、対照区においても立枯病が観察され、堆肥に起因するものとは考えられなかった。

以上のことから、試作堆肥施用による生育障害はないと判断された。

表2-13 試作堆肥の幼植物試験結果

試験区記号		発芽率	平均発芽率	草丈	生育状況
対照区	①	80%	72%	5~6cm	1本立枯病、その他生育やや不良
	②	65%		5~6cm	生育普通
dh	15%①	90%	82%	5~6cm	6本立枯病、その他生育普通
	15%②	75%		5cm	7本立枯病、その他生育普通
	30%①	90%	75%	6~7cm	生育良好
	30%②	60%		6~7cm	生育良好
ch	15%①	75%	80%	6~7cm	1本枯損、その他生育良好
	15%②	85%		6~7cm	生育良好
	30%①	70%	75%	6~7cm	生育極めて良好
	30%②	80%		6~7cm	生育極めて良好
cc	15%①	90%	85%	5~6cm	1本枯損、その他生育普通
	15%②	80%		6~7cm	生育良好
	30%①	70%	70%	6cm	葉がやや黄色
	30%②	70%		4~6cm	葉がやや黄色
dry	15%①	75%	77%	6cm	生育良好
	15%②	80%		6~7cm	生育良好
	30%①	80%	82%	5~6cm	生育良好
	30%②	85%		6~7cm	生育良好

4.4 樹木への施用効果

(1) 施用量

試作堆肥の施用量は、一般的に土壌改良材の混合量とされる 20%（容積比）を目安とした。1 試験区の施用容積は 0.3375m^3 ($=1.5 \times 7.5 \times 0.5 \times 0.2$) であるので、1 試験区あたり 300 リットルの施用とした。この施用量での N 量を算出したものを表 2-14 に示す。

表2-14 樹木施用試験での堆肥施用量とN量

試験区記号	堆肥施用量 (1試験区あたり)	全窒素量 (1試験区あたり)
dh	300L	128g/m^2
ch	300L	101g/m^2
cc	300L	104g/m^2
dry	300L	112g/m^2
対照区*	300L	77g/m^2

*対照区は、パーク堆肥を施用した。

(2) 計測項目と方法

地上部調査、土壌調査の2つの調査を実施した。各調査の実施時期を表2-14に示す。

また各調査での計測項目と方法を以下に記す。

表2-15 調査時期

調査年月	経過年数	地上部調査	土壌調査
平成8年5月	—	○	○
平成8年12月	7ヶ月	○	○
平成9年12月	1年7ヶ月	○	○
平成11年2月	2年10ヶ月	○*	—

*地上部調査の樹勢に関しては、平成11年2月の調査は行っていない。

a. 地上部調査

樹高、根元径（地上高3cm）の計測と樹勢の評価を行った。

樹勢の評価方法は、試験1と同様に科学技術庁資源調査会の方法に準じ、表1-18（p.16 記載）の基準によって行った。

b. 土壌調査

試験1と同様に土壌の水分および肥効成分に係わる化学成分の分析を行った。

(3) 結果

a. 地上部

① 樹勢

植栽1年7ヶ月後の樹勢の評価結果を試験区毎に平均したものを図2-4に示す。

樹勢の値は、すべての試験区で1～2の範囲にあり、比較的良好な樹勢を示した。

1年7ヶ月後の評価では、相対的に試験区のなかで樹勢が劣る試験区は、ccと対照区であった。

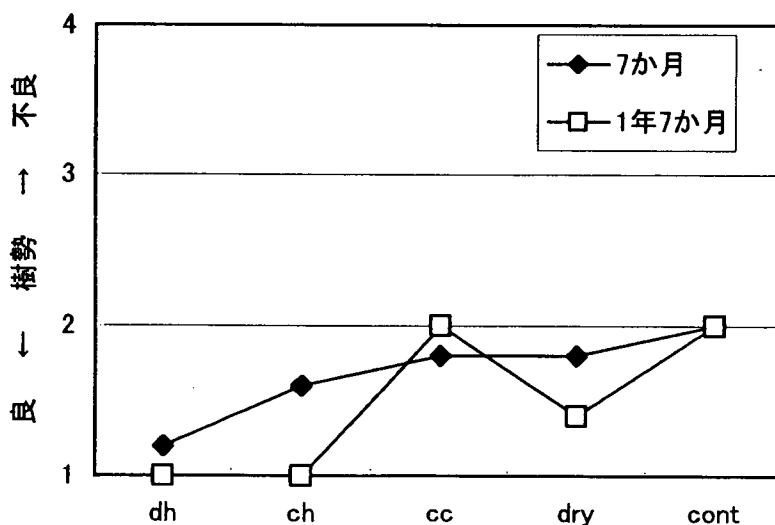


図2-4 樹勢評価結果(平均)

② 樹高

樹高の計測結果を試験区毎に平均したものを図2-5に示す。

樹高では、植栽より1年7ヶ月目以降に成長の差が見られ始め、最終的には、ccと対照区が他の区に比べて成長が劣り、樹勢と同様な傾向を示した。なお、全測定結果は巻末資料4に記載した。

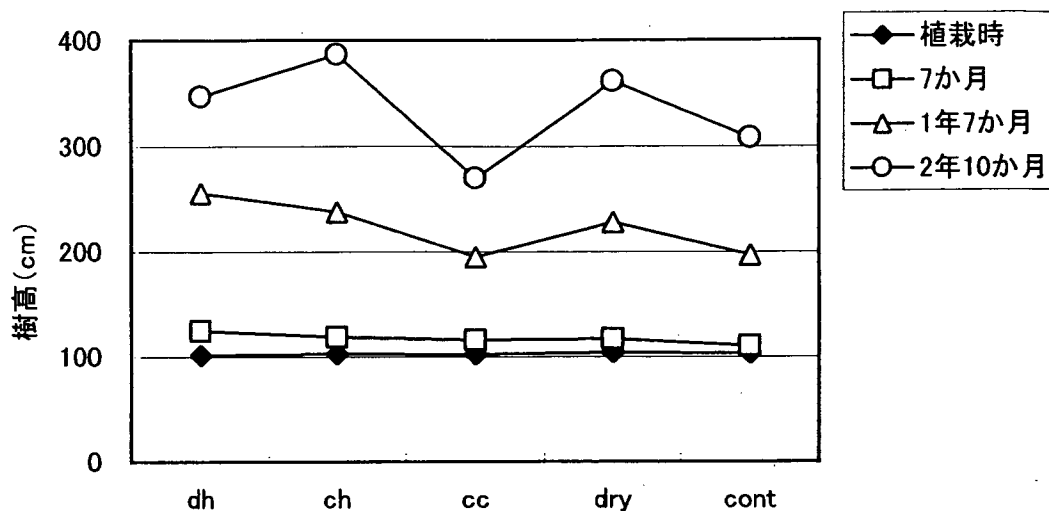


図2-5 樹高測定結果

③ 根元径

根元径の計測結果を試験区毎に平均したものを、図2-6に示す。

根元径でも、植栽より1年7ヶ月目以降に成長の差が見られ始め、最終的には、ccと対照区が他の試験区に比べ成長が劣り、樹勢・樹高と同様な傾向を示した。なお、全測定結果は巻末資料4に記載した。

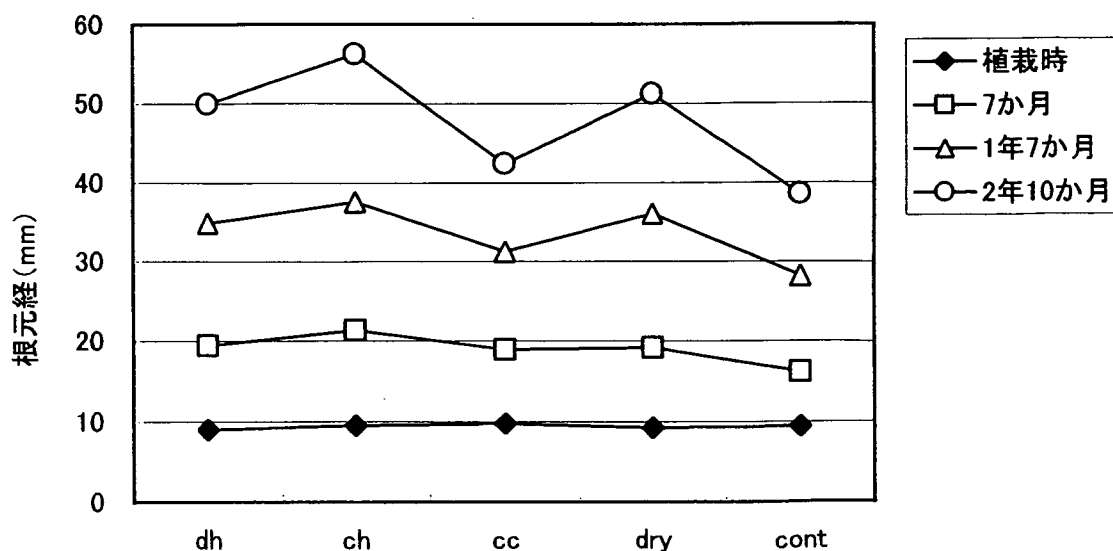


図2-6 根元径測定結果

b. 土壌

土壌分析の結果を表 2-16 に示す。

分析値には各試験区間に際だった差異は認められなかった。試験 1 と同様に日本造園学会土壌分科会の土壌分析結果の分級基準と比較すると、すべての試験区において土壌は、優ないし良に分級された（分級基準については巻末資料 3 参照のこと）。

表2-16 土壌分析結果

試験区	pH(H ₂ O)			EC μ S/cm			T-C %			T-N %			C/N比		
	植栽時	7ヶ月目	2年目	植栽時	7ヶ月目	2年目	植栽時	7ヶ月目	2年目	植栽時	7ヶ月目	2年目	植栽時	7ヶ月目	2年目
dh	6.2	5.9	6.1	80.4	134.6	112.0	4.56	3.10	2.82	0.38	0.35	0.31	12.0	8.9	9.1
dry	6.9	6.6	7.2	146.6	74.0	171.2	2.89	1.95	3.82	0.26	0.20	0.39	11.1	9.8	9.8
ch	6.3	6.4	6.1	317.0	95.4	159.3	4.70	2.90	3.61	0.43	0.27	0.37	10.9	10.8	9.8
cc	6.4	6.4	6.0	196.6	115.6	152.9	3.28	3.94	5.25	0.29	0.38	0.49	11.3	10.3	10.7
cont	6.9	6.9	6.9	203.0	99.5	68.2	3.83	6.36	3.15	0.20	0.33	0.20	19.2	19.4	15.8

試験区	NH ₄ -N mg/100g			NO ₃ -N mg/100g			可給態リン酸 mgP ₂ O ₅ /100g			交換性Ca meq/100g			交換性K meq/100g			CEC meq/100g		
	植栽時	7ヶ月目	2年目	植栽時	7ヶ月目	2年目	植栽時	7ヶ月目	2年目	植栽時	7ヶ月目	2年目	植栽時	7ヶ月目	2年目	植栽時	7ヶ月目	2年目
dh	0.6	0.9	0.9	2.8	1.2	5.5	4.3	51.9	-	5.8	7.3	-	0.6	1.4	-	12.5	20	-
dry	0.7	0.2	1.3	6.9	0.8	6.9	18.9	23.3	-	26.1	9.9	-	2.0	1.4	-	21.7	18	-
ch	1.7	0.2	1.2	4.0	1.1	9.3	28.1	37.6	-	16.1	6.8	-	2.0	1.1	-	28.8	19	-
cc	1.0	1.0	1.3	3.4	1.8	13.4	20.0	70.6	-	11.6	10.4	-	2.0	1.7	-	21.1	27	-
cont	1.0	0.7	1.1	0.1>	0.1	3.8	3.2	63.8	-	23.6	16.8	-	1.9	1.6	-	27.7	31	-

5. 考察

5.1 材料適性の評価（分解状況・物理性状からの評価）

試験 2 では、消化脱水汚泥（dh）、コンポスト一次発酵品（ch）、コンポスト完熟品（cc）、乾燥汚泥（dry）の 4 種類を用いて、汚泥枝葉堆肥の試作を行った。

97 日間の発酵を経た堆肥の分解状況は、いずれの下水汚泥を用いた堆肥についても、比較的良好な分解状況を示したが、消化脱水汚泥（dh）を用いたものでは、未分解の汚泥塊が残っていた。

消化脱水汚泥（dh）に見られた、このような問題は、発酵期間をより長くすること、あるいは、仕込み時に汚泥塊を十分に粉砕し、枝葉と混合することにより改善されるものと

思われる。しかし、消化脱水汚泥 (dh) は、試験に用いた他の下水汚泥に比べ、含水率が高く、粘性が強いため (表 2-1、表 2-2 参照)、仕込みや切り返しなどの作業性から見なれば、堆肥化材料としては、不利と言える。

なお、試作堆肥はいずれも、含水率がいずれも推奨基準越える高い値となった。しかし、基準を越える範囲は比較的小さく、べたつきのないパラパラとした性状を示しているため、堆肥としての使用に実質的に障害が生じるものとはされなかった。高含水率の原因は、材料の性質の問題ではなく、発酵管理に起因するものと考えられる。詳細は後述する。

5.2 仕込み・管理方法の評価

ここで試験条件とした含水率 60%、C/N 比 20 の設定により、97 日間で良好な分解状況が確認された。ただし、得られた堆肥は、使用した材料に関わらず高い含水率を有したもののとなった。高含水率の原因としては、発酵期間中の水分調整のための加水量と時期に、不適切な点があったのではないかと類推される。

試験期間中、発酵管理として、高温発酵期間において、温度が低下した際に切り返しを行い、同時に水分状態の観察から、必要と判断した場合、適宜加水を行っている。図 2-7 は各堆肥製造試験区の温度変化と切り返し・加水作業の状況を示したものである。

いずれの試験区も、50 日程度で高温発酵が終了したと考えられるが、ch、cc、dry については 50 日目に加水を行っており、高含水率が維持される一因となったのではないかとと思われる。しかし、より大きな問題は、堆肥中の水分量の判定は、人の感覚に頼っていることであり、厳密な水分管理には、簡便かつ迅速な水分測定手法が必要とされる。

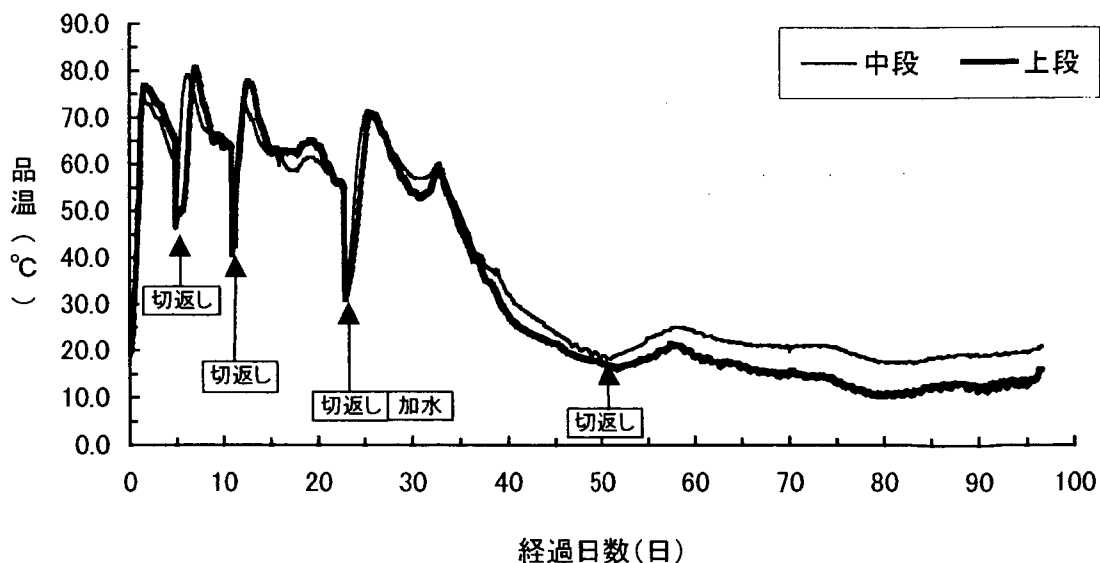


図 2-7.a 発酵中の温度変化と切り返し・加水 (dh)

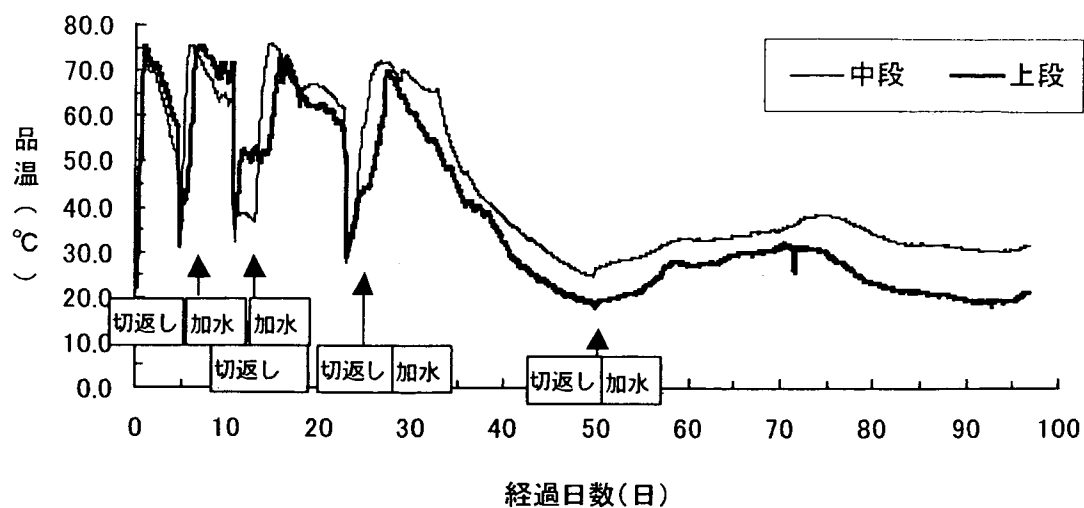


図 2-7.b 発酵中の温度変化と切り返し・加水(ch)

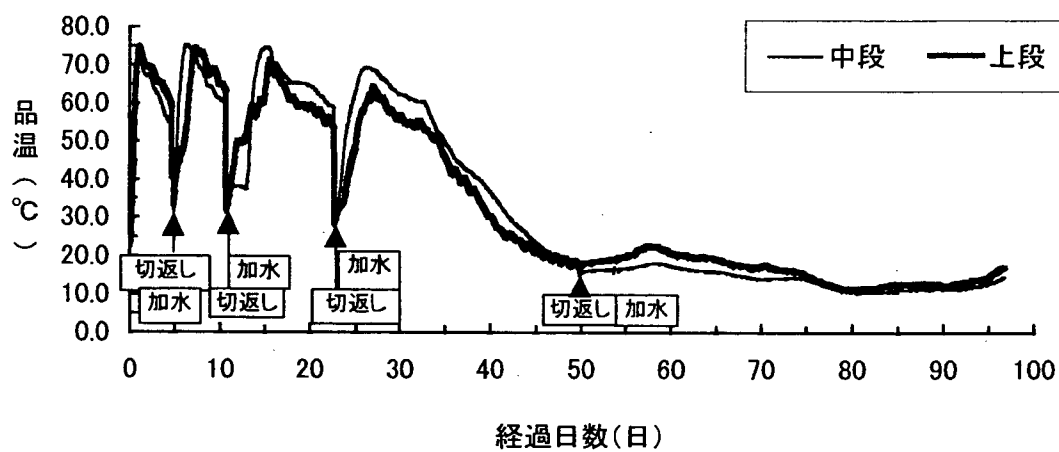


図 2-7.c 発酵中の温度変化と切り返し・加水(cc)

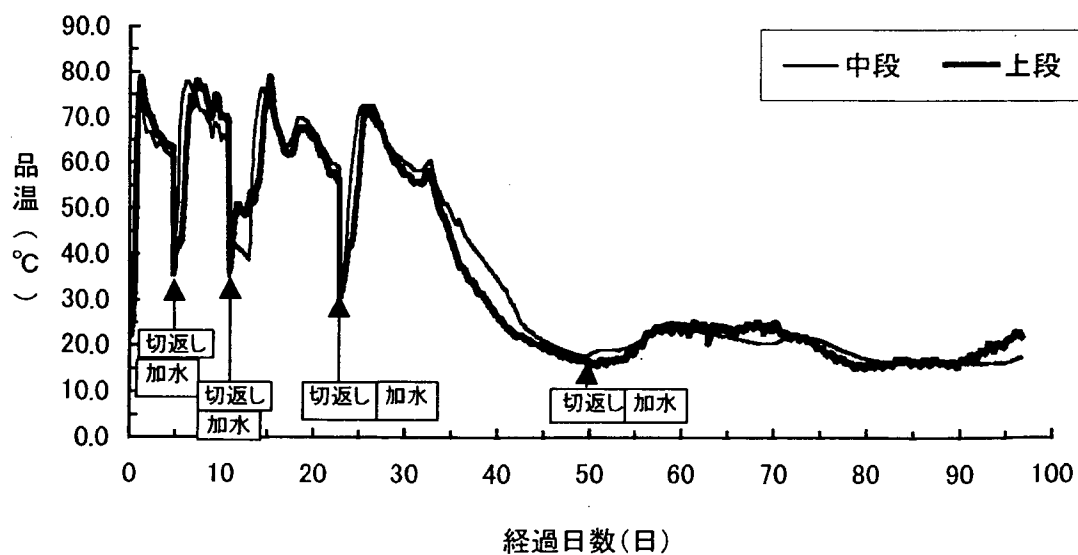


図 2-7.d 発酵中の温度変化と切り返し・加水(dry)

5.3 試作堆肥の総合比較

試作堆肥の物理性、化学性、生育障害、施用効果の4項目の評価について、試験1になり3段階の相対的な区分を行い整理したものが表2-17である。ただし、試験2では、明らかに不良とされる評価項目はなかったので、△と○の2段階の評価となっている。

表中△評価となったのは、汚泥塊が残存した消化脱水汚泥(dh)の物理性と、コンポスト完熟品(cc)の樹木への施用効果のみであり、堆肥としてその性状に大きな違いは認められない。含水率が高めという結果を得たが、実用上の問題はなく、比較的良好な堆肥が得られたといえる。

表2-17 堆肥性状の総合評価

堆肥記号	物理性	化学性	生育障害の有無	樹木への施用効果
dh	△*	○	○	○
ch	○	○	○	○
cc	○	○	○	△**
dry	○	○	○	○

*汚泥塊が残存した。

**他の堆肥に比べ劣ったがバーク堆肥(対照区)と同程度の効果が認められる。

6. まとめ

消化脱水汚泥、乾燥汚泥、コンポスト汚泥一次発酵品、コンポスト汚泥完熟品の4種の下水汚泥と、落葉樹枝葉との混合堆肥製造において、仕込み時の混合条件を含水率60%、C/N比20とした場合、約100日間の発酵期間により、概ね良好な堆肥が得られた。

汚泥の違いによる堆肥の性状に大きな違いはなかったが、消化脱水汚泥については、未分解の汚泥塊が残存し、粘性による混合・粉碎に対する作業性の悪さが影響したものと考えられた。

また、実用上の問題とされるほどではないが、いずれの堆肥も含水率が高めであった。改善には、発酵期間中の水分の確認と加水時期について、さらに検討が必要と思われる。

幼植物試験からは、いずれの堆肥にも生育障害が認められなかった。

また、樹木に対する施用効果は、コンポスト完熟品を用いた堆肥が他に比べ劣ったが、対照区としたバーク堆肥と同程度の効果があると考えられた。

第3章 各種汚泥枝葉堆肥の製造方法に関する検討

試験 1、2 から得られた堆肥製造に関する知見は、限られた材料、条件下のものである。本章では、試験 1、2 の結果に、既往の研究による知見を合わせ、より広い範囲で適用可能な汚泥枝葉堆肥の製造方法について検討を行った。

1. 原料素材に関する検討

1.1 下水汚泥

(1) 製造試験で使用した下水汚泥とその特性の概要

試験 1、2 では、以下の 4 種の下水汚泥を使用した。

- ①消化脱水汚泥（高分子系消化脱水汚泥）
- ②乾燥汚泥（高分子系消化脱水汚泥の乾燥品）
- ③高分子系消化脱水汚泥のコンポスト化物（一次発酵品）
- ④高分子系消化脱水汚泥のコンポスト化物（完熟品）

また、これらの汚泥の成分等の特性は表 3-1 のようであった。

表3-1 製造試験に使用した下水汚泥の物理・化学性分析結果

発生時期		消化脱水 汚泥 (平成2年)	消化脱水 汚泥 (平成3年)	消化脱水 汚泥 (平成7年)	乾燥汚泥	コンポスト 一次 発酵品	コンポスト 完熟品
分析項目							
含水率	(%)	82.50	81.90	80.50	9.80	25.90	12.90
pH(H ₂ O)		7.10	8.00	8	7.9	8	7.6
EC	(μ S/cm)	2090.00	2670.00	1794.00	1391.00	2790.00	2440.00
T-C	(%)	29.80	27.80	30.77	25.05	30.79	31.24
T-N	(%)	4.79	4.26	4.92	3.22	4.96	4.9
C/N比		6.20	6.50	6.30	7.80	6.20	6.40
NH ₄ -N	(mg-N/100g)	514.00	77.00				
NO ₃ -N	(mg-N/101g)	13.80	ND				
T-P205	(%asP2O5)	8.14	2.73				
T-K	(ppm)	2640.00	2800.00				
T-Ca	(ppm)	11800.00	200.00				
T-Mg	(ppm)	4760.00	4200.00				
CEC	(me/100g)	54.70	72.10				
T-Pb	(ppm)	42.80	1.10				
T-Cr	(ppm)	18.40	25.70				
T-Cd	(ppm)	4.08	3.10				
T-As	(ppm)	11.70	8.00				
T-Cu	(ppm)	32.00	260.10				
T-Fe	(ppm)	16100.00	394.00				
T-Ni	(ppm)	34.10	71.80				
T-Zn	(ppm)	1520.00	17.00				
T-Hg	(ppm)	0.22	0.34				

これらの下水汚泥が同種の汚泥において、平均的なものであると解釈されれば製造試験での知見を広く展開できるが、特殊なものであればその点についての考慮が必要となる。そこで、試験 1、2 で使用した汚泥類の成分等の特性を、緑農地利用されている汚泥類に関する既存の統計資料と比較することとした。

比較に用いた資料は、建設省土木研究所汚泥研究室が、全国自治体のデータをアンケート集計した結果である^{注)}。同資料より緑農地で利用される下水汚泥製品の肥効成分含有量の全国平均値を引用し表 3-2 に示す。なお、以下では同表の値を「全国統計」もしくは「全国平均」と呼ぶ。

表3-2 緑農地利用汚泥製品の特性(土木研究所資料第3289号)

		N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	含水率 (%)	pH	C/N比	アルカリ分 (%)	有機物 (%)
脱水汚泥	有効回答件数	71	41	40	33	30	21	48	29
	平均値	4.72	5.30	0.33	78.00	7.99	6.92	7.18	65.40
	最大値	8.30	13.70	1.20	87.00	12.40	13.90	331.60	97.60
	最小値	1.04	0.83	0.02	60.60	5.28	1.00	0.15	38.30
	標準偏差	1.94	3.44	0.24	6.29	2.00	2.68	8.70	15.50
	中央値	4.70	4.10	4.10	79.10	7.73	6.30	3.16	62.20
乾燥汚泥	有効回答件数	47	30	30	39	31	23	27	30
	平均値	4.01	3.62	0.29	16.80	7.11	6.53	7.10	53.30
	最大値	6.97	9.94	0.65	50.30	11.20	9.46	25.20	82.80
	最小値	1.80	1.32	0.03	3.20	5.40	2.70	0.23	26.70
	標準偏差	1.47	1.67	0.15	10.50	1.41	1.45	7.54	14.10
	中央値	3.98	3.17	0.23	14.10	6.80	6.40	3.20	53.70
コンポスト 化汚泥	有効回答件数	94	69	67	73	72	59	66	70
	平均値	2.41	3.35	0.31	30.00	7.28	9.43	11.90	45.80
	最大値	9.91	13.00	1.26	59.70	8.50	20.50	38.50	83.20
	最小値	0.72	0.96	0.07	0.56	5.10	3.20	0.74	16.30
	標準偏差	1.34	2.25	0.23	10.90	0.64	3.44	10.30	16.90
	中央値	2.25	2.81	0.23	28.10	7.48	8.95	8.40	43.30

a. 消化脱水汚泥

製造試験で使用した消化脱水汚泥は、いずれも霞ヶ浦湖北流域浄化センター発生の高分子系消化脱水汚泥である。前掲の表 3-1 と表 3-2 から比較可能な項目を整理し、表 3-3 に再掲する。

表3-3 製造試験に使用した消化脱水汚泥と全国平均との比較

	pH	N (%)	C/N比	含水率 (%)
平成2年使用品	7.10	4.79	6.20	82.50
平成3年使用品	8.00	4.26	6.50	81.90
平成7年使用品	8.00	4.92	6.30	80.50
全国平均(±標準偏差)	7.99±2.0	4.72±1.94	6.92±2.68	78.0±6.29

注) 建設省土木研究所下水道部汚泥研究室：全国下水汚泥緑農地利用製品調査報告書、土木研究所資料第3289号、1993

製造試験に用いた脱水汚泥は高分子系の凝集剤による処理を行ったものであるのに対し、全国平均には、石灰系による処理を行ったものも含まれているが、それでも、製造試験使用品の、N（全窒素）や C/N 比は全国平均に近い。

ただし、pH は、全国統計でも高分子系と石灰系では図 3-1 のように歴然とした差があり、使用品は高分子系の全国平均に近い。

したがって、製造試験に使用した消化脱水汚泥の主要成分は、高分子系の全国平均に近く、高分子系であることを前提とし、製造試験の知見を展開することが可能と考えられる。

なお、使用した消化脱水汚泥は嫌気性分解（消化）過程を経たものであるが、全国統計では消化過程の有無に関する区分がないので、消化過程の有無による差異についての検討はできなかった。

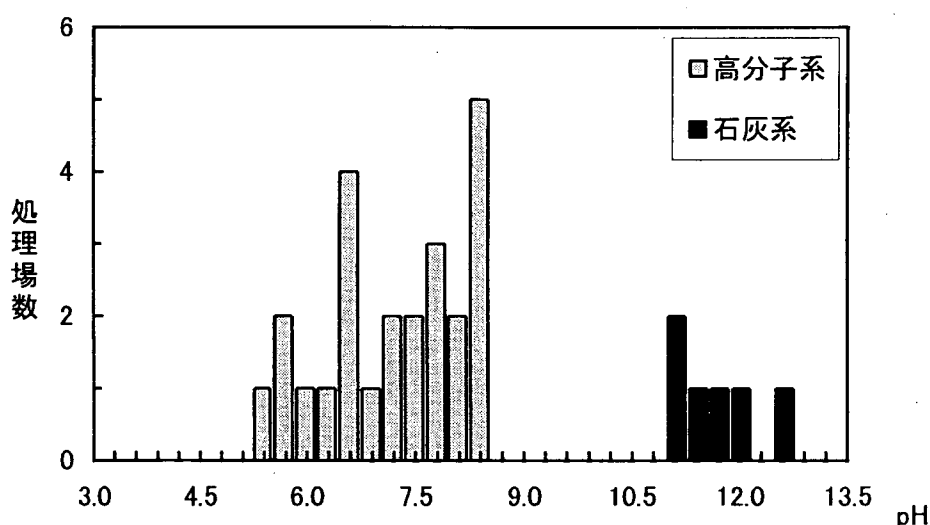


図3-1 脱水汚泥のpH例(土木研究所資料第3289号)

b. 乾燥汚泥

製造試験で用いた乾燥汚泥は、横浜市下水道局南部下水処理場で生産された「ハマユーキ」である。本品は、消化脱水汚泥を加熱・乾燥した特殊肥料であり、2～5mm 程度の粒状を呈し、含水率は約 10% である。なお、消化脱水汚泥より弱い、汚泥臭が残る。

また、本品は消化汚泥を高分子系凝集剤で沈降させた消化脱水汚泥の乾燥物であり、横浜市下水道局の資料では、その成分組成は、「リン酸 2～3%、カリ 0.1～0.3%、カルシウム 7～15%、マグネシウム 0.4～0.7%、有機物 35～40%」となっている。製造試験に用いた乾燥汚泥と全国平均の分析結果を整理し表 3-4 に示す。

表3-4 製造試験に使用した乾燥汚泥と全国平均との比較

	pH	N (%)	C/N比	含水率 (%)
製造試験使用品	7.90	3.22	7.80	9.80
全国平均(±標準偏差)	7.11±1.40	4.01±1.47	6.53±1.45	16.8±10.5

全国平均と比較すると、pH については若干高い値を示し、窒素 (N) と含水率では平均より低く、C/N 比はやや高い。しかし、いずれも標準偏差の範囲内であり、供試品は、概ね平均なものと考えられる。

c. コンポスト化汚泥 (一次発酵品・完熟品)

製造試験で使用したコンポスト化汚泥は、一次発酵品、完熟品ともに、霞ヶ浦湖北流域浄化センターで発生した高分子系消化脱水汚泥を、副資材を用いずにコンポスト化したものである。

一次発酵品は、消化脱水汚泥を 600℃ で加熱乾燥させた後、およそ 10 日間発熱発酵させた時点で採取したものである。含水率は 26%、粒状を呈する。汚泥臭は発酵期間を経ているだけにそれほど強くないが、残っている。

完熟品は、一次発酵品をさらに二次発酵させたもので、その期間はおよそ 40 日間である。一次発酵品と同様に粒状を呈し、含水率は一次発酵品よりも低く 13% となっている。見かけは乾燥汚泥に近い。汚泥臭は弱い、無くなっていない。

製造試験に用いたコンポスト製品と全国平均の分析結果を整理し表 3-5 に示す。

表3-5 製造試験に使用したコンポスト化汚泥と全国平均との比較

	pH	N (%)	C/N比	含水率 (%)
一次発酵品	8.00	4.96	6.21	25.9
完熟品	7.60	4.90	6.38	12.9
全国平均(±標準偏差)	7.28±0.64	4.41±1.34	9.48±3.44	30.0±10.9

製造試験に用いたコンポスト製品は、全国平均に比べ以下の特色を有する。

- ① pH が、原料汚泥が石灰系凝集剤使用ではないにも係わらず、平均よりやや高い。
- ② 窒素量は、平均を越えてかなり多い。コンポスト化汚泥としては特異と思われ、むしろ脱水汚泥の平均値 (4.72±1.94) に近い。
- ③ 含水率は平均より低く、特に完熟品は乾燥汚泥の平均値 (16.8±10.5) をも下回った値であり、コンポスト化汚泥としては特異と思われる。

以上のことから、供試品は、一般的なコンポスト化汚泥に比べ、窒素が多くて水分が少ないという点で特異なものと思われ、製造試験の結果の展開に際しては考慮が必要とされる。なお、これらの分析結果で見ると、未熟品と完熟品の間の差異は大きなものとは思われない。

製造試験から、枝葉粉砕物については、常緑樹、落葉樹の別に関わりなく、仕込み時の含水率と C/N 比を調整することにより、堆肥化が可能なが示されたが、一方では、枝葉粉砕物の部位（幹・枝・葉）の別や、粒径組成により、分解の程度に差が認められている。ここでは、部位、粒径組成のほか、枝葉粉砕物のいくつかの項目を取りあげ、その一般的な特性を整理するとともに、堆肥化に際しての留意事項について検討した。

試験 1、2 では、以下の 5 種の枝葉粉碎物を使用した。

- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| ①落葉 1: サクラ | : 幹・枝・葉: 乾燥: 試験 1 (記号 Dtdl) |
| ②落葉 2: ユリノキ・ケヤキ | : 幹: 生: 試験 1 (記号 Dtof) |
| ③落葉 3: サクラ | : 枝・葉: 生: 試験 1 (記号 Dlof) |
| ④落葉 4: プラタナス・シダレヤナギ | : 枝・葉: 生: 試験 2 (記号なし) |
| ⑤常緑 1: マテバシイ・クスノキ | : 枝・葉: 生: 試験 1 (記号 Elof) |

表3-6 製造試験に使用した枝葉粉碎物の特性

- 41 -

(2) 樹木の部位と堆肥化特性

枝葉粉碎物の、樹木の部位（葉・枝・幹・根の区分）別の分解・発酵のしやすさについては、一般的に、葉の方が木質となる他の部位に比べ分解・発酵しやすい。

分解・発酵のしやすさは、仕込み材料の C/N 比が、判断材料のひとつとされ、C/N 比が低いほうが、分解・発酵しやすい。

製造試験に用いた枝葉粉碎物は、葉が含まれる程度により、C/N 比に差が現れている。表 3-7 に各枝葉粉碎物の部位と C/N 比を整理した。同表より、枝・葉の粉碎物の C/N 比が 30～40 代を示しているのに対し、幹のみの粉碎物では約 100 と大きくなっている。また、幹と枝・葉の粉碎物は両者の中間的値を示している。

このような、部位による C/N 比の違いは、下水汚泥との混合割合の決定に際し配慮すべき事項の一つとなる。また、部位の別は次項で述べる粉碎粒度との関係も大きい。

表3-7 製造試験に用いた枝葉粉碎物の部位とC/N比

	落葉1	落葉2	落葉3	落葉4	常緑1
部位	幹・枝・葉	幹	枝・葉	枝・葉	枝・葉
C/N比	57.1	100.8	30.0	42.7	34.7

(3) 粉碎粒度

一般に枝葉粉碎物の粒度が細かいほど、分解・発酵は起こりやすいと考えられ、製造試験においても、その傾向が現れた。製造試験に用いた枝葉粉碎物の粒経組成を表 3-8 に再掲する。

また、4.76 mm を境にした分布割合を図 3-2 に示した。4.76 mm を境にした粉碎物の分布は、幹を含むものと含まないもので、明確な差となって現れている。

枝葉粉碎物の粒度は粉碎機械の能力により決定されるところが大きく、堅い幹では、粒径が大きくなる傾向にある。

大きな粒径は、分解・発酵に要する期間が長くなることを意味しており、また、未分解の枝葉が残る一因となるため、発酵管理、堆肥の品質管理に留意が必要となる。

表3-8 製造試験に用いた枝葉粉碎物の部位と粒径組成

		落葉1	落葉2	落葉3	落葉4	常緑1
部位		幹・枝・葉	幹	枝・葉	枝・葉	枝・葉
粒径別 乾物重 量比	9.52mm以上	43.6%	29.3%	11.2%	24.6%	8.8%
	9.52～4.76mm	29.7%	37.5%	17.4%		19.7%
	4.76～2.0mm	12.2%	14.7%	20.9%	24.8%	32.6%
	2.0～0.84mm	11.0%	14.9%	25.3%	37.0%	24.0%
	0.84～0.42mm	0.0%	0.0%	14.6%	13.6%	9.7%
	0.42～0.21mm	3.5%	3.6%	8.0%		5.2%
	0.21mm以下	0.0%	0.0%	2.5%		0.0%

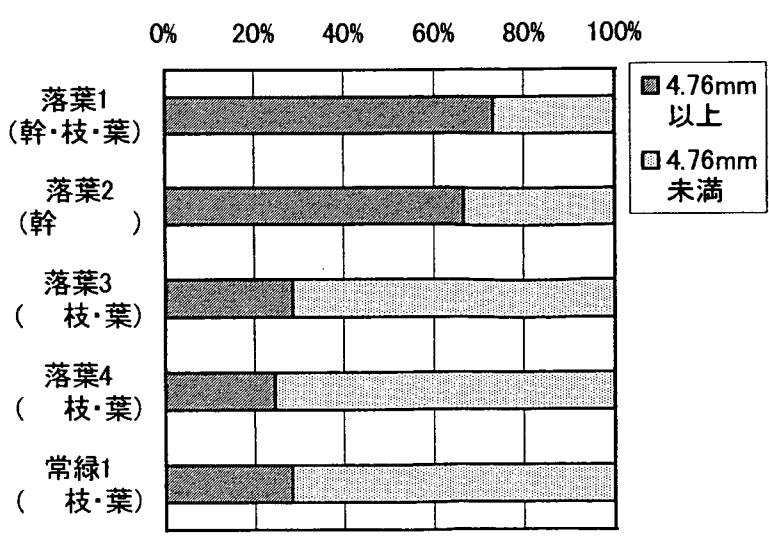


図3-2 4.76mmを境界とした枝葉粉碎物の粒径分布

(4) 含水率

枝葉粉碎物の含水率をあらかじめ把握しておくことが、仕込み時の水分調整のため必要となる。製造試験における枝葉粉碎物の仕込み時の含水率を表 3-9 に再掲する。

含水率は故意に乾燥させた落葉 1 を除くと、50%前後のもの（落葉 2、落葉 3、常緑 1）と 20%程度のもの（落葉 4）に分けられる。前者（50%前後のもの）は、生もしくはそれに近い幹や枝葉等を粉碎して、すぐに仕込みを行ったものである。一方、後者は、街路樹の剪定作業により発生してから、1~2 週間後に粉碎し、さらに 1 週間後に仕込みを行っている。

生材の含水率は、樹木の種類・部位の他、季節や立地によっても異なるが、35~65%の範囲とされ^{注)}、50%程度の値を有するものが多い。また、一般に葉は材よりも高い含水率を有する。

製造試験で用いた 50%前後のもの（落葉 2、落葉 3、常緑 1）は、概ね平均的な含水率を有する生材と考えられ、多くの場合、発生直後の剪定枝葉はこの程度の値を有するものと思われる。しかし、仕込みまでの時間経過は枝葉粉碎物を乾燥化するため、仕込み時の含水率の確認に留意が必要となる。

表3-9 製造試験に用いた枝葉粉碎物の部位と含水率

	落葉1	落葉2	落葉3	落葉4	常緑1
部位	幹・枝・葉	幹	枝・葉	枝・葉	枝・葉
含水率(%)	8.0	47.8	52.6	22.7	49.7

2 素材の混合割合と仕込み時含水率

ここでは、製造試験 1、2 の結果と、前項の「材料素材に関する検討」の結果を踏まえ、汚泥枝葉堆肥製造の際の、望ましい仕込みの方法について検討した。仕込み時の検討ポイントは、下水汚泥と枝葉粉碎物の混合割合であり、混合割合の主たる決定要素を、混合材料の C/N 比と含水率として整理した。

2.1 製造試験結果の再整理

製造試験での素材混合割合を表 3-10 に再掲する。

注) 三浦伊八郎、西田屹二：「木材化学」、丸善、1933

表3-10 製造試験の仕込み条件

	使用材料		材料混合割合 (汚泥:枝葉)	仕込み時の 含水率(%)	C/N比	備考 (試験区記号)
	剪定枝葉	下水汚泥				
試験1	落葉1*	消化脱水汚泥	1:1	66.6	15.9	Dtld-1
	落葉1*	消化脱水汚泥	1:0.5	73.7	11.6	Dtld-2
	落葉2	消化脱水汚泥	1:1	73.1	14.8	Dtof-1
	落葉3	消化脱水汚泥	1:1	73.7	—	Dlof-1
	落葉3	消化脱水汚泥	1:1**	60.5	—	Dlof-c
	常緑1	消化脱水汚泥	1:1	73.4	—	Elof-1
	常緑1	消化脱水汚泥	1:1**	60.1	—	Elof-c
試験2	落葉4	消化脱水汚泥	1:3	63.7	15.0	dh
	落葉4	コンポスト 一次発酵品	1:14	46.8	20.0	ch
	落葉4	コンポスト 完熟品	1:22	44.8	20.0	cc
	落葉4	乾燥汚泥	1:9	44.0	20.0	dry

*乾燥前処理

**副資材としてヤシガラ炭0.5を投入

(1) 試験1の結果からの示唆

試験1では、下水汚泥と枝葉粉碎物の基本混合割合を1:1として実施した。表3-10に示した含水率とC/N比は結果的に生じた値である。

試験1では発酵期間が約40日と短かったこともあり、試作堆肥の分解状況は、実用堆肥としては、不十分な面が見られ、特に仕込み時の含水率が高いもので分解状況が悪かった。その中で比較的良好な分解の進行が認められたものは、枝葉の乾燥前処理や副資材の投入により、仕込み時の含水率が60%代となったのものであり、仕込み時の含水率を低くすることが必要であることが示唆された。

(2) 試験2の結果からの示唆

試験2では、試験1の結果を踏まえ、発酵促進上問題のない範囲のC/N値において、仕込み時の含水率を60%とすることを意図した。また、副資材の投入や乾燥前処理を行わず混合割合と加水により調整を図った。

生の枝葉粉碎物は50%程度の含水率を有するため、80%程度の含水率を有する消化脱水汚泥との混合では、汚泥に対し3倍程度の枝葉を混合することにより目標とする含水率が達成される。そして、この場合C/N比についても、発酵促進上問題のない15程度の値となった。

一方、含水率の低い他の汚泥については、混合だけでは目標含水率が設定できないため、C/N比が20となる混合割合とし、不足する水分を加水することとした。しかし、分析により確認された実際の含水率は、45%程度と目標値より低い設定となった。

試作された堆肥の性状は、含水率がやや高めである点を除けば、堆肥として良好と判断されるものであり、C/N比が15~20程度であれば、仕込み時含水率が45~60%程度で堆肥製造上問題はないことが示唆された。

2.2 一般的な混合割合の検討

ここでは、試験から示唆された条件を、一般的な汚泥枝葉堆肥の製造条件へと展開するための検討について述べるが、消化脱水汚泥と、他の汚泥では性状が大きく異なるため、以下では分けて記述する。

(1) 消化脱水汚泥の混合比率

a. 含水率からの決定

一般的な高分子系消化脱水汚泥の含水率は約 80% であり、この値は堆肥化には過多とされる。そのため、脱水汚泥の堆肥化に際しては、水分の少ないモミガラなどの副資材を添加することにより含水率の低下がなされ、その場合の含水率は 50~60% 程度である^{注1)}。

副資材の混入は、含水率を下げるだけでなく、空隙をもたらしることにより、発酵に好条件を与える。剪定枝葉粉碎物のような粒度の粗い素材を混合した場合には、空隙が大きくなり、その点は有利に働くと考えられる。試験 1 からは、含水率 65% 程度を境とし、分解状況に差が現れており、また試験 2 では、やや高めと思われる 63.7% で良好な発酵が開始されている。

したがって、消化脱水汚泥と枝葉粉碎物の混合堆肥の混合比率を決定するためには、まず混合物の含水率が 60% 程度になるようにすることを基本的条件とする必要があると認識された。

b. 含水率を根拠に混合割合を決定した場合の C/N 比

消化脱水汚泥の含水率が 80% 前後に集中するのに対し、枝葉粉碎物の含水率は発生直後では 50% 程度であるが、次第に乾燥し、50~20% 程度の間で変化がある。

上述のように、混合物の含水率が 60% とすると、枝葉粉碎物の含水率にしたがって、混合割合は変化する。すなわち、含水率の大きい生に近い枝葉粉碎物では、枝葉粉碎物の混合量が相対的に増加する。そして、枝葉の C/N 比は汚泥に比べ大きいため、混合物の C/N 比も大きなものとなる。

植物発生材の堆肥化においては、C/N 比が極端に大きい場合は、発酵が困難となるため、N 量の大きい副資材を添加し、C/N 比を下げるが行われる。この場合の C/N 比の目安は、30~50 程度とされており^{注2)}、含水率を根拠とした消化脱水汚泥と枝葉粉碎物の混合に際しては、極端に C/N 比が高くないように注意が必要となる。

c. C/N 比変化の試算

消化脱水汚泥に、含水率や部位の異なる枝葉粉碎物を混合した場合の C/N 比の試算を行った。

試算では資材の条件として、含水率、N 量、C 量を仮定することとし、汚泥については、製造試験供試品の平均値を用いた。枝葉粉碎物については、含水率を、生のものと自然乾

注 1) コンポスト専門委員会：「下水汚泥コンポストの指標（その2）」、下水汚泥資源利用協議会、1985

注 2) (社) 道路緑化保全協会：「植物発生材堆肥化の手引き」、1998

燥を経たものの2種、部位を幹のみ、幹と枝葉、枝葉のみのものの3種とし、製造試験供試品の値もしくは平均値を用いた。資材の条件を表3-11に、試算の結果を表3-12に示す。

試算からは、混合物のC/N比は18~43となり、極端に大きな値を示すことはなかった。しかし、幹を含む生の枝葉粉碎物については、高めのC/N比を示しており、生に近い高水分の枝葉粉碎物を用いることは得策ではないといえる。

表3-11 試算に用いた資材の条件

			含水率%	全炭素%	全窒素%	C/N比	備考
消化脱水汚泥			82	29	4.7	6.2	消化脱水汚泥平成2年、3年、7年の平均値
枝葉粉碎物	自然乾燥	幹のみ	23	45	0.4	113	含水率:落葉4の値 全炭素:落葉1~4、常緑1の平均値 全窒素:落葉2の値
		幹と枝葉	23	45	0.8	56	含水率:落葉4の値 全炭素:落葉1~4、常緑1の平均値 全窒素:落葉1の値
		枝葉のみ	23	45	1.3	35	含水率:落葉4の値 全炭素:落葉1~4、常緑1の平均値 全窒素:落葉3,4、常緑1の平均値
	生	幹のみ	50	45	0.4	113	含水率:落葉2,3、常緑1の平均値 全炭素:落葉1~4、常緑1の平均値 全窒素:落葉2の値
		幹と枝葉	50	45	0.8	56	含水率:落葉2,3、常緑1の平均値 全炭素:落葉1~4、常緑1の平均値 全窒素:落葉1の値
		枝葉のみ	50	45	1.3	35	含水率:落葉2,3、常緑1の平均値 全炭素:落葉1~4、常緑1の平均値 全窒素:落葉3,4、常緑1の平均値

表3-12 試算結果

			汚泥1重量に対する粉碎物重量比	汚泥乾物重量	枝葉粉碎物乾物重量	混合物全炭素	混合物全窒素	混合物C/N比
枝葉粉碎物	自然乾燥	幹のみ	0.59	0.18	0.46	0.26	0.010	25
		幹と枝葉	0.59	0.18	0.46	0.26	0.012	21
		枝葉のみ	0.59	0.18	0.46	0.26	0.014	18
	生	幹のみ	2.2	0.18	1.10	0.55	0.013	43
		幹と枝葉	2.2	0.18	1.10	0.55	0.017	32
		枝葉のみ	2.2	0.18	1.10	0.55	0.023	24

(2) 乾燥汚泥とコンポスト化汚泥の混合比率

a. C/N 比からの決定

乾燥汚泥とコンポスト化汚泥の含水率は、15～30%程度と低く、枝葉との混合では、60%の含水率に達しないため、試験2では、C/N比を20になるように混合割合を設定し、不足する水分を付加した。

剪定枝葉のような、C/N比の高い素材については、発酵を進める上では、一般にC/N比を下げるのが重要とされる。しかし、最適なC/N比については、今のところ確たるものはない。製造試験においても、C/N比の設定は20のみであるので、他の設定について言及することは難しいが、発酵可能なC/N比にはかなりの幅があり、一般的にはC/N比が小さい方が発酵しやすいと考えられている。ちなみに、堆肥や自然界の落葉の腐植化過程において、炭素率は、最終的には10～11程度に安定することが知られている。

b. 含水率調整のための加水

試験2における含水率設定は60%を意図したが、実際には45%程度とかなり低めの設定となった。その後の水分調整により発酵期間の大部分は含水率60%程度で管理されたが、初期の発酵の立ち上がりは、45%程度の含水率においても、特に支障は認められず、仕込み時含水率は、比較的広い範囲が許容されると思われた。

2.3 仕込み作業における留意事項

(1) 資材混合

製造試験では、仕込や切り返し時の資材の混合はすべて人力作業で行った。すなわち、発酵槽近くに、土木シートやコンパネ等を敷いて攪拌場所とし、ここに材料を広げ、スコップやレーキ（ジョレン）で混合攪拌した。

このような条件下での作業は、混合時に汚泥を練ることによって塊としてしまうことがある。この問題は含水率の高い脱水汚泥に特有の問題であり、良好な発酵・分解には、このような状況をさけるための工夫が必要とされる。

(2) 水分調整

水分調整と言っても、現実的には水分増加（加水）のみが可能で、乾燥などによる水分減少は困難である。

特に脱水汚泥を仕込み段階で乾燥することは難しく、製造試験では、脱水汚泥をビニルハウス内に広げて乾燥する試みも行ったが、素材に空隙がないので、効果は小さかった。

これに対して枝葉粉碎物は通気性がよいので比較的乾燥させやすい。したがって、水分調整が必要とされる場合は、枝葉粉碎物を乾燥させることを意図したほうが良いといえる。ただし、枝葉粉碎物を乾燥するにも、それなりの面積や施設が必要である。

3. 発酵管理

3.1 通気と切り返し

(1) 通気

製造試験における通気は、試行錯誤の結果、最終的に極めて少量の空気を熱帯魚用の振動ポンプ（公称吐出量 6L/分）で発酵槽内に送る条件で行った。

堆肥化の通気条件については、小規模の実験を除き、通気条件が明記されることが少なく、測定方法等も特に一定していないので、既存知見が乏しい。畜糞などの堆肥化施設に関する「堆肥化施設設計マニュアル」^{注1)}では、 $0.05\text{m}^3/\text{分} \cdot \text{m}^3$ の通気量を示しており、本試験の規模にあてはめると 12.5～25L/分の通気となる。試験設定はこの値よりかなり小さなものであるが、規模が小さく通気抵抗が少ないためであろうか、この通気量で嫌気状態になるような問題は発生しなかった。

しかし、堆肥化施設の設計にあたって通気装置の能力設定は、問題となるところであり、下水汚泥と枝葉粉碎物の混合堆肥に関しても、基礎的な実験データが蓄積されることが好ましい。

具体的な項目としては、積み高さや水分の変化に伴う容積重と通気抵抗の変化などがあげられる。たとえば上記の「堆肥化施設設計マニュアル」には、鶏糞や牛糞に各種添加資材を加えた場合の、水分率と堆積高さに応じた通気抵抗が示されている。

(2) 切り返し

切り返しは、発酵に伴い不足してくる酸素を素材混合物中に供給すると同時に、素材の均質な混合や、物理的に破碎作用を目的として実施される。そのタイミングは、一般的に、前回の切り返し（あるいは仕込み）後、最高温度を経過し温度が下降した時点で切り返しを行う。

また、温度は水分が少なくなっても下降するので、必要に応じて加水を行う必要があり、製造試験では、切り返し時に水分状態を観察し適宜加水した。

3.2 発酵温度

堆肥は、微生物の活動により有機物を分解する作業であり、微生物は活動によって熱を発するため、一般に堆肥の温度は気温より高いものとなる。また、その温度は微生物活動の状況により大きく変化する。

この温度上昇により、病原菌や雑草種子の死滅が図れるので、下水汚泥コンポスト製造の指標としては、 65°C を 48 時間維持することが目標とされている^{注2)}。

また、素材混合物中の温度は「品温」とも呼ばれ、微生物の活動状況を反映するため、切り返し実施時期や一次発酵の終了などを判断するうえで重要な情報となる。

品温の変化を、試験 2 での消化脱水汚泥と乾燥汚泥を例として、図 3-3.a,b に再掲する。

注1) 中央畜産会：「堆肥化施設設計マニュアル」、1988

注2) コンポスト専門委員会：「下水汚泥コンポストの指標（その2）」、下水汚泥資源利用協議会、1985

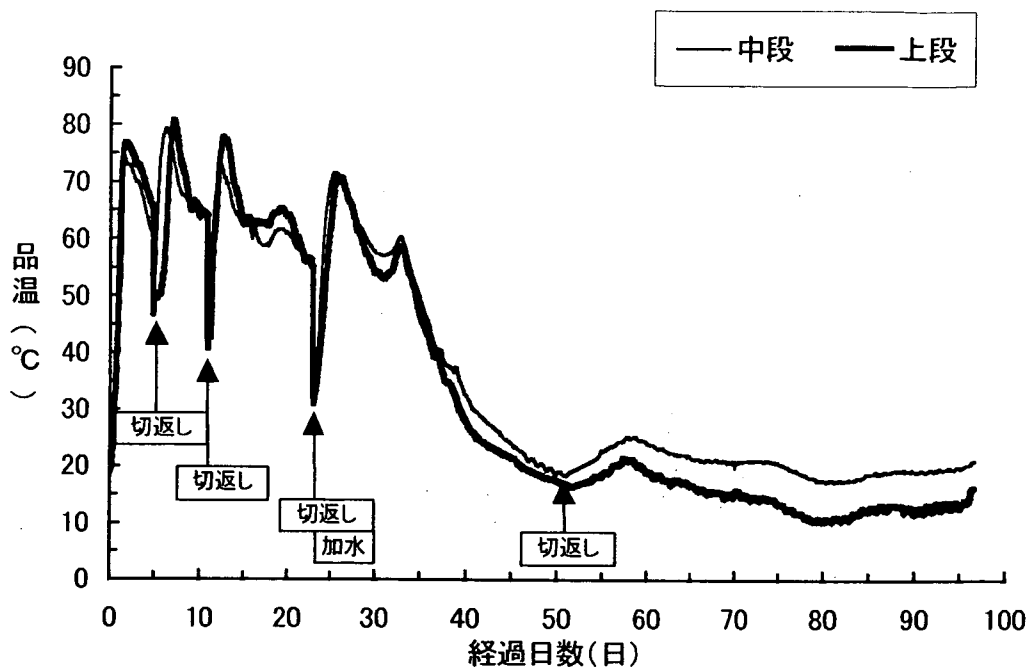


図3-3.a 品温変化(消化脱水汚泥)

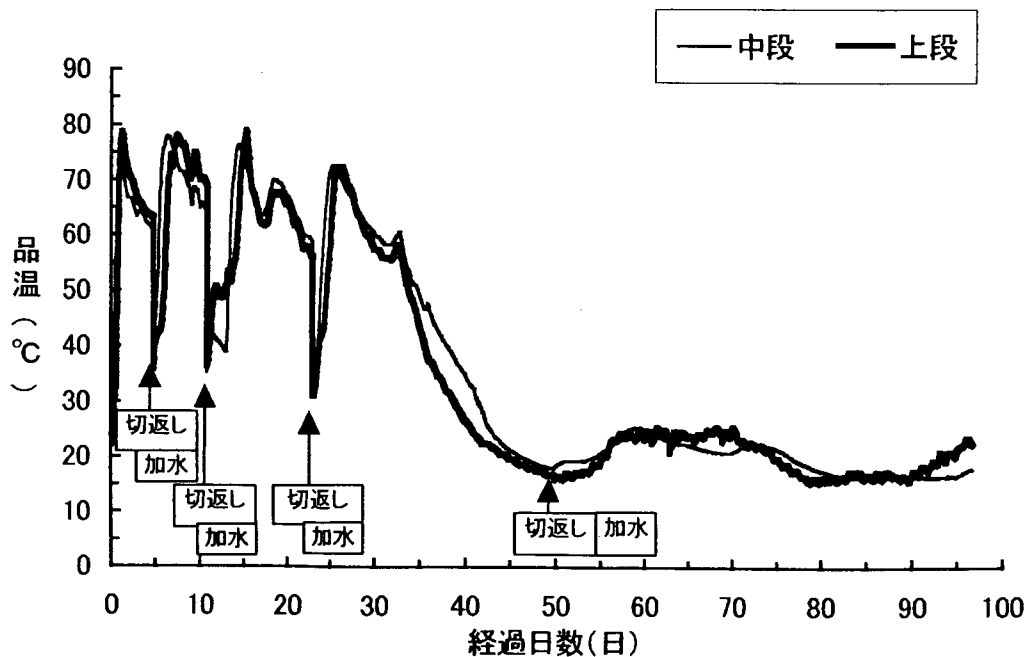


図3-3.b 品温変化(乾燥汚泥)

両図の品温変化は順調な発酵が進展した場合の例であり、下水汚泥材料が消化脱水汚泥と乾燥汚泥という条件の違いに加え、仕込み時の枝葉との混合割合、含水率、C/N 比が異なるものであるのに関わらず (p.44、表 3-10 参照)、両者の品温変化は極めて似かよったものとなっている。以下では順番に温度管理の留意事項を整理する。

(1) 仕込み直後の温度上昇

発酵が順調に開始された場合、品温は仕込み直後から、急速に上昇する。製造試験では、1日から1日半後に最高温度である80℃に達した。このような温度上昇が見られない場合は、C/N比が高すぎる、含水率が低すぎるか高すぎる、混合や通気が不十分など、仕込み条件に問題があることが考えられる。

(2) 温度低下と切り返し

最高温度を経た後、品温は次第に低下する。最高温度の値と高温の期間は、決まった値があるわけではなく、病原菌の死滅条件ある65℃以上の48時間継続が、必要条件となる。

品温の低下は、混合材料内の酸素が減少してきたことを意味しており、切り返しにより酸素を補給するとともに、材料をよく攪拌し、発酵ムラを防ぐ。また、合わせて必要な場合は加水する。

切り返しのタイミングは、最高温度から10℃程度、あるいは最高温度の9割程度に、品温が低下した時が目安とされる。切り返しにより品温は気温近くまで低下するが、堆積後、また急速に温度が上昇する。そして、また次第に温度が低下し、切り返しが必要となる。このような高温を伴う発酵が一次発酵と呼ばれるものである。

(3) 高温期間の終了と恒温状態の継続

切り返しを何回か繰り返すと、急速な温度上昇が生じない時期が来る。この時点が一般に一次発酵の終了とされる。

製造試験では、50日めの切り返し後の温度上昇はわずかであり、40～50日程度で一次発酵が概ね終了したものと判断される。

なお、50日めの切り返し時点での加水は、その後の高温が伴わなかったため、製品の高含水率を招く一因となったと思われる。

(4) 低温・恒温状態の維持

一次発酵の終了後は、ゆるやかな発酵が継続され、品温は室温なみの温度に恒常的に保たれる。この期間が二次発酵と呼ばれる、いわゆる熟成の期間である。二次発酵の終了は特に決められたものではなく、使用目的や保存・出荷形態に応じ、所要の品質が確保されたと製造者が判断した時点となる。

4. その他の留意項目

発酵期間中には、品温の他にも、混合材料には容積や水分などの変化が生じる。それらは、発酵状況を直接反映するものではないが、製品として品質管理上、把握しておくことが必要とされるものもある。以下では、そのような項目として、容積、水分、pH、臭気を取りあげ、変化の概要を述べる。

4.1 容積の減少（減容）

混合し堆積した素材は、分解・発酵、水分の減少、重力による沈下により減容する。この減容は仕込み量に対する製品量、いわゆる製造歩留まりを意味しており、生産や出荷の計画をたてる上では、重要な事項となる。

試験2における、消化脱水汚泥と乾燥汚泥の場合の容積変化を図3-4に示す。

消化脱水汚泥によるものでは、一次発酵の半ば（23日）で22.2%、一次発酵終了時（50日）で25.6%、試験終了時（97日）で27.0%減容している。同様に乾燥汚泥によるものでは、19.3%、21.4%、22.0%の減容となっている。

これらの試験では、汚泥に対する枝葉粉碎物の割合が、消化脱水汚泥で3倍、乾燥汚泥で9倍と大きいことから、減容は主に枝葉粉碎物の容積変化によるものと思われ、枝葉粉碎物を主たる材料とする堆肥製造では、2割程度の減容が生じるものと考えて良いだろう。

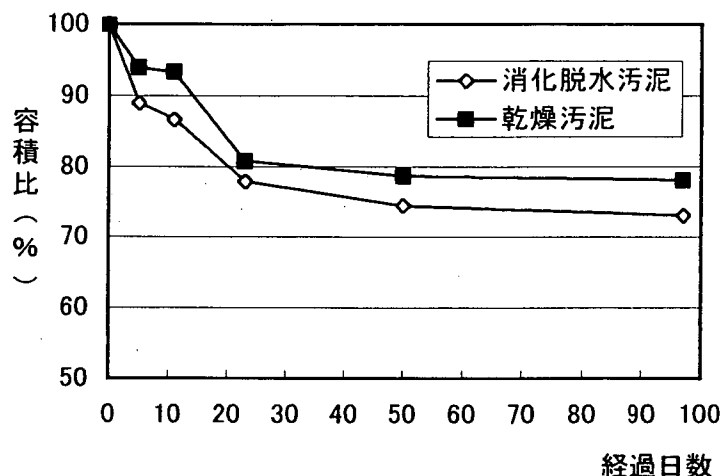


図3-4 試験2における容積変化

4.2 水分変化

堆肥の発酵には発熱が伴うので、水分は熱による蒸発の影響が大きいと類推される。また、発酵状況を勘案して適宜水分を補給するため、水分変化は加水要因も組み入れられたものとなる。

試験2における、消化脱水汚泥と乾燥汚泥の場合の含水率変化を図3-5に示す。

試験2では、仕込み時から含水率を60%に維持することを目的に水分管理を行っており、消化脱水汚泥については1回、乾燥汚泥については4回の加水を行っている。

どちらの堆肥も良好な発酵過程を経ているが、得られた堆肥の含水率は若干高めのものであった。

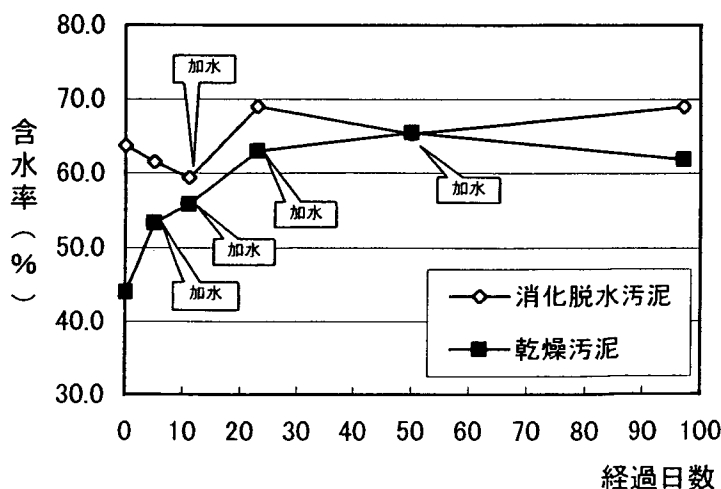


図3-5 試験2における含水率の推移

4.3 pH の変化

製造中の堆肥 pH は、主にタンパク質の分解に伴うアンモニアの発生で上昇（アルカリ性化）し、炭素源の分解に伴って発生する二酸化炭素起源の炭酸や、嫌気性発酵にともなう有機酸の発生などによって低下（酸性化）する。

一般に堆肥化の反応速度は pH8～9 で最大になると言われているが^{注)}、このために特別の pH 調整を行うことはあまりなされておらず、製造試験でも特に行っていない。

製造試験における pH 変化の例を図 3-6 に示した。製造試験では、一次発酵初期に発酵上は理想的と思われる pH8～9 の範囲にあり、次第に低下し、一次発酵の終わり頃には中性域に落ち着いている。

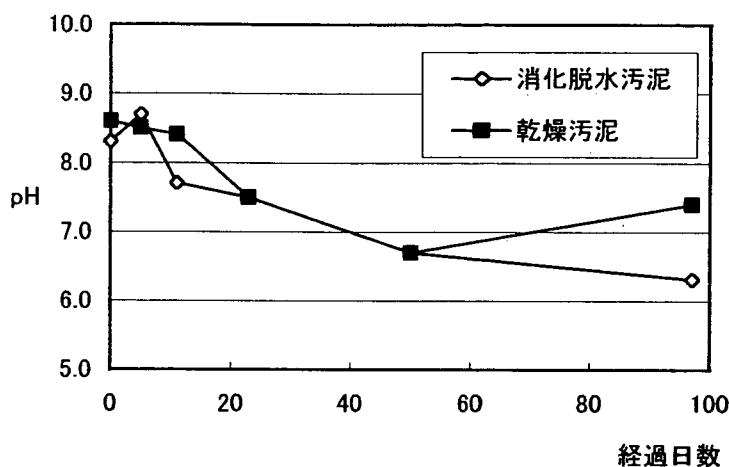


図3-6 試験2におけるpHの推移

4.4 臭気

素材に臭気に伴う下水汚泥の場合、臭気の変化は発酵状況の判断の目安となる。

試験 2 では、いずれの下水汚泥も仕込み時には汚泥臭があったが、一次発酵が終了したと思われる 50 日時点では、汚泥臭がなくなり、弱いカビ臭のみとなっていた。汚泥臭が消滅することを、一次発酵終了の判断材料のひとつとして利用することが可能と思われる。

注) 藤田賢二：「コンポスト化技術」、技報堂出版、1993

第4章 汚泥枝葉堆肥の製造マニュアル（案）

1. マニュアルの目的と適応範囲

1. 1 マニュアルの目的

本マニュアルは、下水汚泥と剪定枝葉を混合した汚泥枝葉堆肥の製造方法を示し、資源の有効利用促進に資することを目的とする。

地球環境保全が求められるなか、資源の有効利用・リサイクルに関する気運が高まっており、下水処理場から発生する下水汚泥や緑地管理から発生する剪定枝葉についても有効利用が求められている。

下水汚泥の有効利用リサイクル方法のひとつに堆肥化があげられるが、下水汚泥が有する臭気や粘性などによる取り扱いづらさや、肥料成分のアンバランスなどの問題が指摘され、改善策が求められてきた。

一方、道路や公園の植栽管理から発生する剪定枝葉についても、有効利用策として堆肥化が試みられているが、C/N比が高いなどの木質固有の成分特性から、堆肥化は必ずしも容易ではない。

このように両者とも、堆肥化に関して課題を有しているのが現状であるが、下水汚泥と剪定枝葉を混合して堆肥化することにより、下水汚泥の取り扱いづらさを剪定枝葉が改善し、一方で、剪定枝葉の分解しづらさを下水汚泥が改善し、相互に補填しあうことが認められる。

本マニュアルでは、下水汚泥と剪定枝葉を混合した堆肥を「汚泥枝葉堆肥」と呼び、その製造方法を示し、資源の有効利用推進に資することを目的とする。

1. 2 マニュアルの適応範囲

本マニュアルは、汚泥枝葉堆肥の製造工程のうち、仕込み、発酵の範囲について適応する。

汚泥枝葉堆肥の製造は、剪定枝葉と下水汚泥を調達し、混合したうえで発酵させ、植物への施用に適した堆肥にする作業であり、一般に以下の工程からなる（図4-1）。

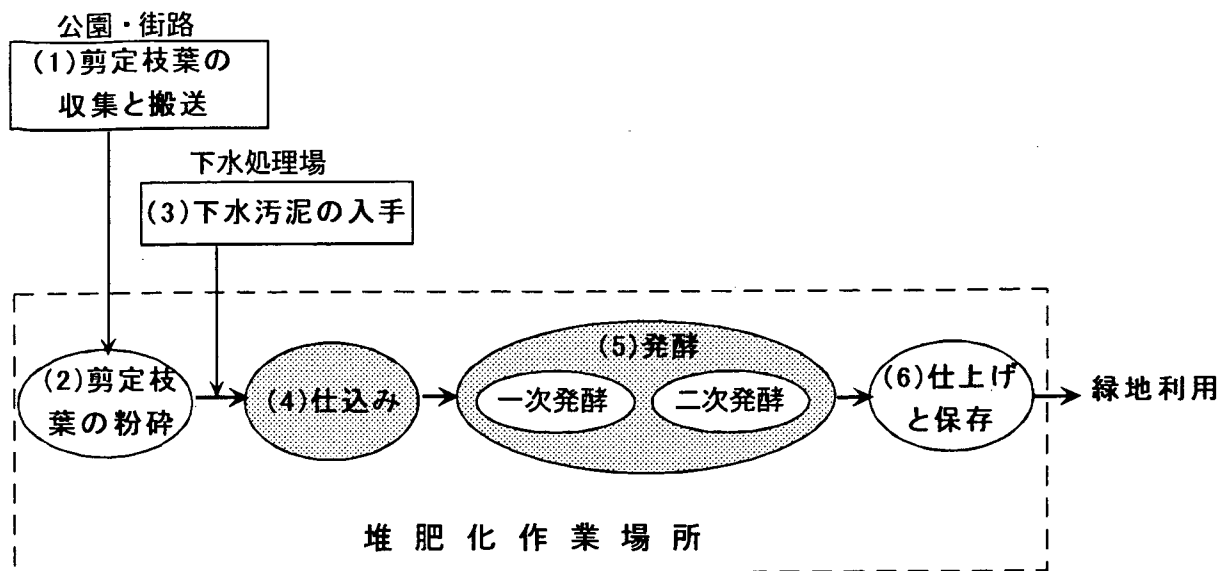


図4-1 汚泥枝葉堆肥の一般的製造工程

(1) 剪定枝葉の収集と搬送

公園や街路から発生する剪定枝葉を収集し、堆肥化作業場所へ搬送する。

(2) 剪定枝葉の粉碎

収集した剪定枝葉を粉碎する。粉碎することで剪定枝葉は分解しやすくなり、堆肥化期間を短縮できる。特に分解しづらい木質部を堆肥化する場合に不可欠である。

剪定枝葉の粉碎には、チップパーやシュレッダーなどと呼ばれる粉碎機械を使用する場合が多い。また、粉碎は、移動可能な粉碎機械を用いて剪定現場で行うこともあるが、騒音の問題、大量処理への対応から、堆肥化作業場所に搬送して行うのが一般的である。

(3) 下水汚泥の入手

下水汚泥は、下水処理場から直接入手する。コンポスト化汚泥や乾燥汚泥については、販売を行っている下水処理場もある。

下水処理場の連絡先は、「都市緑化における下水汚泥の施用指針」¹⁾に記載されているので、参考となる。

(4) 仕込み

粉碎した剪定枝葉と下水汚泥を混合し、水分などの調整を行い、発酵の準備を整える。

(5) 発酵

発酵には、急速に分解が進み高温が発生する一次発酵と、緩やかに分解が進み熟成される二次発酵がある。発酵中には、良好な発酵状態が保たれるように、切り返しや水分などの調整を行う必要があり、特に、一次発酵中には、頻繁にその必要が生じる。

(6) 仕上げと保存

完成と判断された堆肥は、その後、必要に応じて袋詰めなどを行い利用までの間の保存がなされる。

以上の汚泥枝葉堆肥の製造工程は、「下水汚泥の入手」を除けば、一般に行われている剪定枝葉の堆肥製造と工程手順は同様であり、各工程での作業内容も多くの点で共通する。両者の違いは、主として「仕込み」と「発酵」の工程での作業内容にあり、下水汚泥を材料とすることに起因し、特異的な調整と管理が要求される。

そこで、本マニュアルでは、特異的な作業が必要となる「仕込み」と「発酵」を適用の範囲とし、所要の解説を行う。なお、他の工程については、「植物発生材堆肥化の手引き」²⁾を参照されたい。

2 堆肥化材料

2. 1 下水汚泥

本マニュアルでは、次の3種の下水汚泥を対象とする。

- (1) 消化脱水汚泥
- (2) 乾燥汚泥
- (3) コンポスト化汚泥

下水処理後に残留・沈殿する固形物を下水汚泥という。この汚泥は、水分と有機物を多量に含むため、処分にあたり取り扱いが悪いため、減量や安定化の処理が施される。一般的な下水処理方法である標準活性汚泥法の工程と下水汚泥処理方法のバリエーションを図4-2に示す。

標準活性汚泥法では、下水処理場に導流された下水は、まずスクリーンを通過し、水中の大きなゴミなどが除去された後、沈砂池に送られ砂などが沈殿除去される。その後、下水は、最初沈殿池に送られ、細かい浮遊物を含む汚水と沈殿物に分けられる。この沈殿物は、初沈汚泥と呼ばれ、濃縮槽に運ばれる。一方、細かい浮遊物を含む汚水は、エアレーションタンクへ送られ、汚水中の有機物が微生物（活性汚泥）によって分解される。そして、次の最終沈殿池において静置され、処理水と沈殿物（活性汚泥）に分離される。ここで沈殿する活性汚泥は、一部が有機物を分解するためにエアレーションタンクに返送され、残りは余剰汚泥として濃縮槽に運ばれる。

```

graph TD
    A[流入下水] --> B[スクリーン]
    B --> C[沈砂池]
    C --> D[最初沈殿池]
    D -- 初沈汚泥 --> E[濃縮槽]
    D --> F[エアレーションタンク]
    F -- 返送汚泥 --> D
    F --> G[最終沈殿池]
    G -- 余剰汚泥 --> E
    G --> H[放流]
    E -- 濃縮汚泥 --> I[消化槽]
    E --> J[脱水機械]
    J --> K([脱水汚泥])
    K --> L([乾燥汚泥])
    I -- 消化汚泥 --> M[脱水機械]
    M --> N([消化脱水汚泥])
    N --> O([コンポスト化汚泥])
  
```

出典：建設省都市局、都市緑化における下水汚泥の施用指針、1995文献1)を修正

凝集剤には、高分子系凝集剤と石灰系凝集剤があり、凝集剤によって脱水汚泥の性質は異なる（表 4-1）。特に pH の違いは大きく、高分子凝集剤を用いた脱水汚泥が pH7 程度の中性であるのに対し、石灰系凝集剤を用いた脱水汚泥では、pH10 以上のアルカリ性を示し、このような pH の違いは、堆肥の製造に影響するものと考えられる。

性質	高分子系凝集剤を用いた 脱水汚泥	石灰系凝集剤を用いた 脱水汚泥
pH	7前後	10以上
水分	多い	少ない
カルシウム 鉄分含有量	少ない	多い

また、濃縮と脱水の間に消化処理を行う場合がある。消化処理は嫌気性消化が一般的であり、嫌気性菌の働きにより有機物を分解し減量・安定化させた後に脱水したものが消化脱水汚泥である。消化処理の有無もまた堆肥の製造に影響すると考えられる要素のひとつである。

しかしながら、凝集剤の種類、消化処理の有無が堆肥製造に与える影響については必ずしも明らかとされているわけではない。そのため、本マニュアルでは、脱水汚泥については、試験等により製造方法が確認された、高分子系凝集剤を用いた消化脱水汚泥を対象としている。

(2) 乾燥汚泥

乾燥汚泥は、消化脱水汚泥や脱水汚泥を、加熱もしくは天日により乾燥させたものである。乾燥汚泥についても、上記の消化脱水汚泥と同様、凝集剤の種類に起因する pH の違いが現れるが、その違いが堆肥製造に与える影響については明らかとされてはいない。

本マニュアルでは乾燥汚泥を対象とするにあたり、凝集剤の種類には言及していないが、ここでの記述内容は、高分子系凝集剤による消化脱水汚泥を、乾燥させたものを用いた堆肥製造試験に基づくものである。

(3) コンポスト化汚泥

コンポスト化汚泥は、消化脱水汚泥や脱水汚泥を、汚泥単独もしくはオガクズなどの副資材を添加して好気発酵させ、安定化したものである。ここでの記述内容は、高分子系凝集剤による消化脱水汚泥をコンポスト化させたものを用いた堆肥製造試験に基づくものである。

十分に熟成されたコンポスト化汚泥は、既にそれ自体、堆肥として完成されたものといえるが、本マニュアルでは、完熟のものに加え未熟なコンポスト化汚泥を対象とし、枝葉堆肥の発酵促進材的に用いる方法を述べる。

2. 2 剪定枝葉

本マニュアルでは、緑地や植栽の剪定などの管理から発生する枝葉・幹を対象とし、これらを剪定枝葉と呼ぶ。堆肥化に際しては剪定枝葉を粉碎し材料とする。

公園などの緑地や植栽樹木、街路樹の管理からは、定期的な剪定作業から発生する剪定枝葉のほか、枯損木や支柱の除去などの作業により、幹や根などを含む様々な植物性廃材が発生する。本マニュアルでは、主として剪定作業から発生する剪定枝葉を対象とし、これには、枝、葉に加え幹が含まれる。なお、根、支柱材等は対象としていない。

剪定枝葉をスムーズに堆肥化するためには、仕込みに際しあらかじめ粉碎しておくことが

不可欠であり、粉碎粒度など粉碎の程度が発酵のしやすさに大きく影響する。また、樹木の種類や剪定枝葉が植物のどの部位からなるのか、さらには剪定枝葉粉碎物の含水率なども発酵のしやすさに影響すると考えられる事項であり、これらについて把握しておく必要がある。

(1) 粉碎粒度

剪定枝葉の粉碎粒度は、樹木の部位や粉碎機械の能力により異なったものとなる。粉碎粒度が細かいほど、粉碎物が発酵を行う微生物と接触する面積が広くなるので、分解が早くなり堆肥化しやすいが、実際には粉碎機械能力や作業効率から、堆肥化材料としての粉碎物は、一般に最大粒径3cm程度が目安とされている。

本マニュアルでは、粉碎粒度について条件の設定は行っていないが、粉碎粒度が大きい場合、堆肥化に要する期間が長くなること、あるいは、完成堆肥内に未分解の枝葉が残る可能性が大きくなることに留意が必要である。

(2) 樹木の種類

樹木の種類と堆肥化の関係については、一般に広葉樹は堆肥化しやすく、針葉樹は堆肥化しづらいと言われている。また、一部の常緑広葉樹は落葉樹広葉樹に比べ、堆肥化しづらいことが知られているが、本マニュアルで以降に示す堆肥化方法においては、両者の違いに対し、特段の配慮は必要とされない。

(3) 部位

樹木の部位と堆肥化のしやすさについては、部位の固さの違いによるほか、部位のC/N比の違いによるものと考えられる。

一般にC/N比が低いと堆肥化しやすいと言われ、C/N比の低い枝葉部(50程度以下)は堆肥化しやすく、C/N比の高い(最高500～1000以上にまでなる場合がある)樹皮や幹部は堆肥化しづらいことが知られているが²⁾、本マニュアルで以降に示す堆肥化方法においては、枝葉部・幹部の粉碎物であれば、特段の配慮は必要とされない。

(4) 含水率

発酵の開始と維持には、仕込み材料の含水率を適度に保つ必要があり、水分が多すぎても、少なすぎても発酵の阻害となる。

樹木の含水率は、樹木の種類・部位・季節・立地などによっても異なるが、生木については一般に50%程度である場合が多い³⁾。剪定枝葉についても剪定・伐採直後は50%程度の含水率を示すが、仕込みまでの間、放置した場合は次第に乾燥する。

50%程度の含水率は、堆肥化に問題のない値であり、また乾燥した場合も、仕込みにおいて加水により調整が可能であるため、乾燥自体が堆肥化の障害となるものではないが、仕込み材料の適切な水分調整を行うためには、剪定枝葉の含水率の把握が重要となる。

3. 仕込み

3. 1 材料の混合割合

仕込み時の下水汚泥と剪定枝葉の混合割合は、混合後のC/N比が20、もしくは含水率が60%となるように決定することを基本とする。

(1) 消化脱水汚泥を用いる場合は、混合後の含水率が60%となることを優先し、C/N比については結果を確認する。

(2) 乾燥汚泥、コンポスト化汚泥を用いる場合は、混合後のC/N比が20となることを優先し、含水率が60%となるように加水する。

仕込み後の発酵の立ち上がりに大きく作用する要因が、C/N比と含水率である。植物発生材の堆肥化においては、発酵に適したC/N比と含水率には比較的幅があり、C/N比については小さい程発酵が促進されるが、50以下であれば発酵上問題はなく、含水率についても50～60%程度であれば問題がないことが知られている²⁾。

汚泥枝葉堆肥についても、発酵上は上記の条件の範囲で問題はないと考えられるが、下水汚泥の有する発酵促進効果を最大限活用し、その再利用の推進を図る観点から、本マニュアルでは、堆肥化作業性と堆肥品質が確保できる範囲において、下水汚泥をより多く混合できる値であるC/N比20、含水率60%を、混合割合決定の目安として採用した。

また、本マニュアルで対象とする3種の下水汚泥については、消化脱水と乾燥・コンポスト化汚泥では、含水率に大きな差があり、同一の混合割合決定方法では実体にそぐわないため、両者を分けて混合割合の決定方法を示している。

(1) 消化脱水汚泥の混合割合

一般に消化脱水汚泥は80%程度の含水率を有しており、べたつきがあって作業性が悪い。そのため、含水率の低い剪定枝葉を混合することにより全体としての含水率を60%程度に下げ、発酵に適したものとするとともに作業性の向上を図る。

なお、この場合C/N比を20に調整することは不可能である。結果的に得られるC/N比は、通常は発酵に支障のない範囲に収まるが、確認すべき事項となる。

以下に混合割合の計算例を示す。

(計算例)

含水率80%の消化脱水汚泥と、含水率50%の剪定枝葉を混合し、含水率が60%となる汚泥と枝葉の重量比を求める。

汚泥の重量を1、枝葉の重量 x とすると次の式が成り立つ。

$$(1 \times 0.8) + (x \times 0.5) = (1 + x) \times 0.6$$
$$x = 2$$

よって、消化脱水汚泥の重量1に対して、2倍の剪定枝葉を混合すれば、混合後の含水率は、60%となる。

なお、この場合のC/N比を、下記に示す一般的な消化脱水汚泥と剪定枝葉のC、Nの含有値を用いて計算すると次のようになる。

・消化脱水汚泥：C/N比7、T-C28%、T-N4%

・剪定枝葉：C/N比40、T-C40%、T-N1%

$$\{(1 \times 0.2 \times 0.28) + (2 \times 0.5 \times 0.4)\} / \{(1 \times 0.2 \times 0.04) + (2 \times 0.5 \times 0.01)\} = 25.3$$

C/N比25.3であり、発酵上問題のない値である。

(2) 乾燥汚泥およびコンポスト化汚泥の混合割合

乾燥汚泥とコンポスト化汚泥の含水率は、ばらつきが大きい、乾燥汚泥では概ね50%以下、コンポスト化汚泥では60%以下にあり、平均値はそれぞれ16.8%、30%である⁴⁾。

したがって、乾燥汚泥、コンポスト化汚泥を用いる場合は、水分は制約条件とはならず、C/N比20を基に混合割合を決定した後、不足する水分を補うため含水率60%を目安に加水する。

なお、乾燥汚泥とコンポスト化汚泥のC/N比は、乾燥汚泥では概ね10以下、コンポスト化汚泥では21以下にあり、平均値はそれぞれ6.53、9.43である⁴⁾。

以下に混合割合と加水量の計算例を示す。

(計算例)

次の条件の剪定枝葉、乾燥汚泥を用いて、C/N比20、含水率60%に混合する場合の剪定枝葉と乾燥汚泥の混合割合および加水量を求める。

①各材料の、T-N、T-C、C/N比、含水率

下水汚泥：T-N4%、T-C25%、C/N比6.25、含水率20%

剪定枝葉：T-N1%、T-C40%、C/N比40.0、含水率40%

②混合後のC/N比20になるよう乾燥重量での混合割合の計算

剪定枝葉の乾燥重量1kgに対する汚泥の乾燥重量を x kgとすると、C/N比20の場合、次の式が成り立つ。

$$\{(1 \times 0.4) + (x \times 0.25)\} / \{(1 \times 0.01) + (x \times 0.04)\} = 20$$
$$x = 0.36 \text{ kg}$$

よって、乾燥汚泥は乾物重量で0.36kgが必要である。

③各材料の水分を含んだ重量（生重）の計算

乾燥汚泥の生重・・・ $0.36 + 0.36 \times 0.2 = 0.432 \text{ kg}$

剪定枝葉の生重・・・ $1 + 1 \times 0.4 = 1.4 \text{ kg}$

④含水率60%とする加水量の計算

追加する水の重さを Y kgとすると次の式が成り立つ。

$$\{(0.36 \times 0.2) + (1 \times 0.4) + Y\} / (1.4 + 0.432) = 0.6$$
$$Y = 0.6272 \text{ kg}$$

以上の計算から、生重にして乾燥汚泥0.432kgと剪定枝葉1.4kgを混合し、水0.6272kgを加水する。

3. 2 材料の混合方法

材料の混合は、下水汚泥と剪定枝葉粉碎物を均等に混ぜ合わせるとともに、空気が材料の間にまんべんなく入るように行う。

材料の混合は、材料を均等にするとともに、材料内に空気を混入するという意味を有しており、こうすることにより細菌の活動が活発となり、むらなく発酵が促進される。

混合には、機械などを用いて行えるが、消化脱水汚泥を混合する場合は、練り返しすぎると塊状になり、発酵不良となる。汚泥の中に剪定枝葉を練り込まないように注意する必要がある。

3. 3 堆積

堆積においては、通気性、保温性、排水性の確保をし、発酵しやすい状態を保つ。

仕込み材料は堆積することにより、材料内の温度が保たれ、発酵が継続する環境が形成される。合わせて通気性、排水性を確保することにより発酵に適した環境が形成される。

野外で堆積を行う場合は、発酵温度を保てるよう一定規模の堆積が必要であり、また、良好な発酵状態を保つためには、風雨をしのぐ施設の設置が望ましい。

堆積の形状の詳細については、「植物発生材堆肥化の手引き」²⁾を参照されたい。

4. 発酵

4. 1 一次発酵と二次発酵

発酵は、混合した材料が微生物によって分解され、堆肥として熟成される過程である。発酵には、急速に分解が進み高温が発生する一次発酵と、緩やかに分解が進み熟成される二次発酵がある。発酵中には、良好な発酵状況が保たれるよう、切り返しや水分などの調整を行う必要があり、特に、一次発酵中には、頻繁にその必要が生じる。

(1) 一次発酵

仕込みを終え堆積された材料は、順調に発酵が開始された場合、堆積物内の温度（品温）は急速に上昇し80℃にも達する。この温度は次第に低下するが、切り返しを行い新たな空気を送り込むことにより再び高温となる（図4-3）。

このような（温度上昇－低下－切り返し・加水－温度上昇）が繰り返される期間を一次発酵といい、堆肥材料が急速に分解される期間である。一次発酵中は頻繁に切り返しを行い、新たな酸素を送り込むことにより好気性微生物の活動を維持することが必要となる。また、高温は水分の蒸発をもたため、加水により水分を補う必要が生じる。

一次発酵の終了は、切り返し後急速な温度上昇が見られなくなった時点とされ、切り返しを行っても温度上昇10℃に満たない時点が一次発酵終了の目安となる。

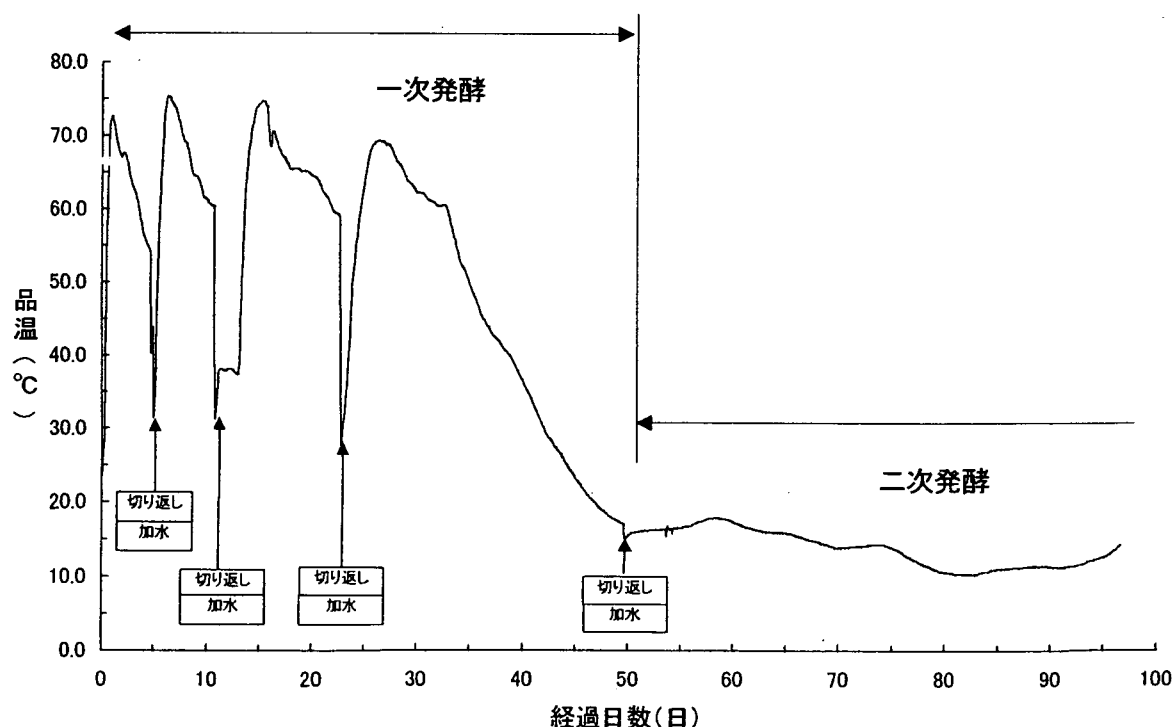


図4-3 品温変化の観測例

(2) 二次発酵

一般的に二次発酵は、一次発酵で分解できなかった物質や菌類の分解を行うもので、激しい発熱は伴わず、水分の蒸散も少ない。二次発酵は堆肥の熟成期間といえる。

二次発酵の終了は、品温が室温程度になり、木質の弾性、減容度合、色調などの変化状況から堆肥が完成したと判断した時点となる。ただし、堆肥の完成には決まった判断基準があるわけではなく、使用目的に応じ、堆肥の製造者が判断することとなる。

4. 2 切り返しと水分調整

切り返しとは、良好な発酵状態を保つための酸素補給と発酵ムラを補正する目的を兼ねて攪拌混合を行うことである。

切り返しは、最高温度を経過し10℃程度下がった時や、最高温度の9割程度に低下した時、発酵不良が確認できた時に行う。

また、切り返し時に、適宜、含水率60%に保つよう加水を行う。

(1) 切り返し

切り返しは、良好な発酵状態を維持するため、空気を混入し通気性を確保するとともに、堆肥を均一にするため攪拌混合を行うことである。切り返し方法は、前述の仕込み時の混合方法と同様である。

切り返しを行うタイミングは、品温が下降した時点であり、目安としては直前の切り返し後の最高温度から、10℃程度下がった時点、あるいは9割程度に下がった時点があげられる。また、腐敗臭の発生など、通気不足が原因と考えられる発酵不良が確認された場合も、切り返しが必要となる。

(2) 水分調整

品温は水分の不足が原因となり下降する場合があるので、必要に応じて加水を行う。その場合、加水の目安は含水率 60% に保つように行う。特に、一次発酵中は、高温による蒸発が激しいので、加水を行い、乾燥しないよう留意する。

なお、含水率の分析は時間を要するため、実際は外観や触感などで判断し実施する必要がある。触感による含水率の判断の目安を表 4-2 に示す。

表4-2 堆肥の水分調整の目安

区分	含水率(%)	現場における簡易判定法	対応
適量	50%～60%	・手にしっとりした感じがする ・わずかに水気を感じる ・手で握り締めると、団子状になる	
乾燥	40%～50%以下	・水気を感じない ・カサカサした感じ ・手で握り締めても塊にならず、サラサラしている	・含水率を計測し、不足する水分を補給する
過湿	70%～80%以下	・材料を強く握り締めた場合、その指の間から水がしたたり落ちる ・ベトベトした感じがする	・乾燥した材料を加える ・堆肥を敷き均し、水分を蒸発させる

出典：建設省都市局公園緑地課・河川局河川環境課・道路局道路環境課監修・社団法人道路緑化保全協会編著、植物発生材堆肥化の手引き、1998文献2)を引用

4. 3 発酵期間中の品質管理

発酵期間中は、発酵温度、減容度合、臭気、色調、水分、木質の弾性、生物の発生状況等を計測・観察して品質管理に努める。

発酵過程では発酵状況を、発酵温度、減容度合、臭気、色調、水分、木質の弾性、生物の発生状況の計測・観察により把握し、発酵が不良な場合は、切り返しや水分調整を行う。また、これらの計測・観察は、堆肥の熟成度合い・完成の判断手段ともなる。

(1) 発酵温度

発酵温度（品温）は、微生物の活動状況で大きく変化するため、その計測から微生物活動、堆肥化の進行状況を把握することができ、前述したように切り返しを行う目安になる。

また、発酵期間中の高温は、病原菌や雑草種子の死滅を図る役割も有している。65℃を48時間維持することが目標とされており、品温計測により目標が達成されているかの確認が必要である⁵⁾。

発酵温度の計測は、発酵期間中、1日に1回程度継続して行うとよい。計測位置は、外気の影響を受ける表面付近を避け、堆積物（堆肥）の内部とする。

(2) 減容度合

発酵の進展にともない、分解や水分減少により堆積物の容積は減量するため、減容度合を計測することによって、発酵進行状況や発酵期間の終了の目安とすることができる。汚泥枝葉堆肥の場合、良好に発酵が進展すれば、最終的には仕込み時に比べて20%程度減容する（図4-4）。

減容度合は、堆積物の高さを計測することによって把握されるので、切り返し前に実施すればよい。

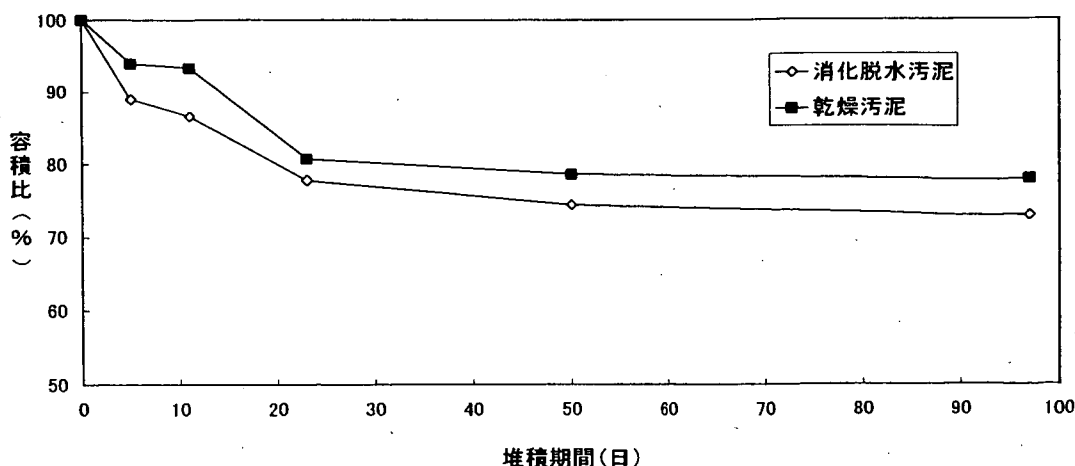


図4-4 減容の計測例

(3) 臭気

発酵が順調に進まず腐敗が起これと、アンモニア臭などの腐敗臭が発生する。発酵期間中は臭気に留意し、腐敗臭が確認された場合は、切り返しを行い、好気発酵を促すことが必要となる。

また、汚泥枝葉堆肥の製造においては、発酵が順調に進めば、次第に汚泥臭がなくなるため、発酵の進展状況を把握する方法のひとつとなる。

(4) 色調

堆肥は腐熟にともない黒褐色の度合いが増していくため、色調の観察は堆肥完成の判断材料となる。ただし、色調は、水分の状態や枝葉粉碎物の種類・粒度によって異なるため、あらかじめ、これらの関係を把握しておくことが必要となる。

(5) 水分

堆積物中の水分は、過剰の場合は嫌気発酵を招き腐敗しやすく、不足する場合は、微生物の活動が不活発となり発酵が行われない。堆肥の発酵に望ましい水分は含水率50～60%程度といわれており、本マニュアルでは仕込みから発酵期間中の含水率の管理目標値を60%としている。

「4.2 切り返しと水分調整」において既に述べたように、重量法（通常の水分計測法）により、含水率を正確に計測するとすれば、結果が出るまでに時間がかかるため、迅速な対応には、手触り等の感触により水分を把握することが必要である。

(6) 木質弾性

剪定枝葉は分解が進むにつれ、木質部が柔らかくなる。ここでは、枝葉粉碎物中の枝の断片などの手触りや、折れ抵抗を「木質弾性」と呼び、枝葉の分解状況の判断材料としてとりあげた。径5mm程度までの小枝であれば、簡単に確認できる方法である。発酵が未熟の段階では、折口の中が新鮮な木質色を示している。

(7) 生物の発生状況

二次発酵が十分に進んだ堆肥では、堆肥上にキノコが発生したり、ミミズの繁殖が見られる場合があり、堆肥完成の目安になる。

また、発酵不良の場合は、ハエやウジが発生するので、切り返しを行い、良好な発酵状態に改善する。

5 製品の品質管理と保存

製品の品質は、以下の基準等を満たすように努める。

- (1) 肥料取締法
- (2) 有機質肥料等推奨基準

汚泥枝葉堆肥の製造者は、利用者が安心して使えるように、堆肥の品質について、情報公開していくことが望ましく、特に、①重金属類の含有、②病原菌の存在、③臭気等に対して、不要な危惧を抱かせないことが肝要である。

現在、汚泥枝葉堆肥に関連する公的基準としては、肥料取締法と有機質肥料等推奨基準があり、肥料取締法では、有害成分の含有量について定められており、有機質肥料等推奨基準では、重金属の含有量、肥料成分の含有量について定められている。

(1) 肥料取締法

肥料取締法は、肥料の品質を保全し、その公正な取引を確保するため、肥料の規格、登録、検査等について定めたものである。肥料取締法では、肥料を、普通肥料と特殊肥料の2種に区分しており、普通肥料については、主成分の最小量・最大量や有害成分の最大量などを公定規格として定めている。業として普通肥料を生産する者は、これらの規格に適合したものを国または都道府県に登録を行い、肥料には保証票を添付することが義務づけられている。

業とは、肥料の生産、輸入又は販売を、反復継続する意志を持って行うことを意味するものであり、利益を得ることを目的することも要しない⁶⁾。例えば、地方公共団体が肥料を販売もしくは配布する場合も、業者として取締りを受けるのである。

汚泥枝葉堆肥は、法の肥料区分のうち、普通肥料の汚泥発酵肥料に該当し、汚泥枝葉堆肥を業として生産する場合は、肥料取締法が適用されることとなる（表4-3）。

表4-3 肥料取締法で示す肥料の区分と規格および表示内容

肥料の区分	肥料名	規格の内容	表示の内容	申請の方法
普通肥料	窒素質肥料	主成分の最小量 または最大量	保証票の添付義務 ①種類・名称 ②保証成分量 ③原料の種類	業として生産する場合 国または都道府県に 登録の義務
	りん酸質肥料			
	カリ質肥料			
	有機質肥料			
	複合肥料			
	石灰質肥料			
	けい酸質肥料			
	苦土肥料			
	マンガン肥料	有害成分の最大量		
	ほう素肥料			
	微量要素複合肥料			
	化成肥料			
	下水汚泥肥料	有害成分の最大量		
	汚泥発酵肥料			
	し尿汚泥肥料			
	工業汚泥肥料			
	混合汚泥肥料			
	焼成汚泥肥料			
	水産副産物発酵肥料			
	硫黄及びその化合物			
特殊肥料	魚かす	なし	表示基準なし	生産業者、輸入業者は 都道府県に届出の義務
	米ぬか			
	家畜ふん・たい肥		表示基準あり	

汚泥発酵肥料の公定規格と保証票に示す成分の含有量の表示内容を、表4-4に示す。植物に対する害に関する栽培試験とは、試験対象となる肥料を植物に施肥し、発芽調査、生育調査、異常症状を調査し、植物に対して障害の有無を確認する試験である。

汚泥枝葉堆肥を販売もしくは配布するためには、有害成分の公定規格を満足し、国に登録を行い、肥料の袋には、保証票を添付することが必要となる。

表4-4 肥料取締法における汚泥発酵肥料の規格および表示内容

有害成分 の最大量	物質名	表示	規格
	ヒ素(As)	%	0.005以下
	カドミウム(Cd)	%	0.0005以下
	水銀(Hg)	%	0.0002以下
	ニッケル	%	0.03以下
	クロム	%	0.05以下
	鉛	%	0.01以下
	アルキル水銀化合物	mg/L	不検出
	水銀又はその化合物	mg/L	0.005以下
	カドミウム又はその化合物	mg/L	0.3以下
	鉛又はその化合物	mg/L	0.3以下
	有機燐化合物	mg/L	1以下
	六価クロム化合物	mg/L	1.5以下
	ヒ素又はその化合物	mg/L	0.3以下
	シアン化合物	mg/L	1以下
	PCB	mg/L	0.003以下
	トリクロロエチレン	mg/L	0.3以下
	テトラクロロエチレン	mg/L	0.1以下
	ジクロロメタン	mg/L	0.2以下
	四塩化炭素	mg/L	0.02以下
	1,2-ジクロロエタン	mg/L	0.04以下
	1,1-ジクロロエチレン	mg/L	0.2以下
	シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L	0.4以下
	1,1,1-トリクロロエタン	mg/L	3以下
	1,1,2-トリクロロエタン	mg/L	0.06以下
	1,3-ジクロロプロペン	mg/L	0.02以下
	チウラム	mg/L	0.06以下
	シマジン	mg/L	0.03以下
	チオベンカルブ	mg/L	0.2以下
	ベンゼン	mg/L	0.1以下
セレン又はその化合物	mg/L	0.3以下	
表示が必要な 含有成分量	窒素全量	%	分析値を表示
	リン酸全量	%	分析値を表示
	カリ全量	%	分析値を表示
	銅全量		
	1kgあたり300mg以上含有する場合に限り、分析値を表示		
	亜鉛全量		
	1kgあたり900mg以上含有する場合に限り、分析値を表示		
	石灰全量		
1kgあたり150mg以上含有する場合に限り、分析値を表示			
植物に対する害に関する栽培試験の調査を受け、害が認められないもの			

(2) 有機質肥料等推奨基準

有機質肥料等推奨基準とは、有機質肥料の望ましい品質を確保し、安全で安心して使えることを目的とし品質基準を定め、これに適合するものを積極的に推奨することにより、利用の促進を図ろうとするものである。平成6年に全国農協中央会によって定められた。有機質肥料等推奨基準において対象とする肥料の種類を、表4-5に示す。

表4-5 有機質肥料等推奨基準において対象とする肥料の種類⁷⁾

肥料の種類	製法等の定義
パーク堆肥	樹皮を主原料とし、家きん・家畜ふん等を加えて堆積腐熟させたもの
下水汚泥肥料	下水をばっ気処理又は発酵処理して得られるもの及びその処理物
し尿汚泥肥料	し尿等をばっ気処理又は発酵処理して得られるもの及びその処理物
食品工業汚泥肥料	食品工業排水をばっ気処理又は発酵処理して得られるもの及びその処理物
下水汚泥堆肥	下水汚泥を主原料とし、堆積腐熟させたもの
し尿汚泥堆肥	し尿等を主原料とし、堆積腐熟させたもの
食品工業汚泥堆肥	食品工業汚泥を主原料とし、堆積腐熟させたもの
家畜ふん堆肥	牛ふん又は豚ふんを主原料とし、堆積腐熟させたもの

汚泥枝葉堆肥は下水汚泥堆肥に該当し、下水汚泥堆肥の基準は、表4-6に示すように、①肥料成分含有量、②重金属含有量、③幼植物試験について定められている。有機質肥料等推奨基準には、法的な規制力はないが、肥料としての汚泥枝葉堆肥の品質確保の観点からは、この基準を満たすことが望まれる。

表4-6 有機質肥料等推奨基準における下水汚泥堆肥の基準

	分析項目	分析方法	下水汚泥堆肥	備考
①肥料成分含有量	有機物	乾物あたり	35%以上	品質表示要
	窒素全量		1.5%以上	
	C/N比		20以下	
	りん酸全量		2%以上	
	アルカリ分		25%以下	
	水分	現物あたり	50%以下	品質表示不要
	pH		8.5以下	
②重金属含有量＊	銅	乾物1kgあたり	600(300)ppm以下	()以上の値の場合は施用上の注意を併記すること
	亜鉛		1800(900)ppm以下	
	③幼植物試験			
こまつなで異常が認められないこと				

* 肥料取締法と重複するヒ素、カドミウム、水銀、ニッケル、クロム、鉛の基準については、ここでは省略する

汚泥枝葉堆肥は、出荷までの間、その品質が保持されなければならない。完成した堆肥は、袋詰めやバラの形態で出荷までの間保存される。保存には、堆肥の腐敗を防ぐため、極端な高温の場所は避け、風通しの良い場所に保存することが必要であり、また、バラの形態で保存する場合、雨水によって堆肥中の養分が流失しないよう留意が必要である。

文 献

- 1) 建設省都市局：都市緑化における下水汚泥の施用指針、下水汚泥資源利用協議会、1995
- 2) 建設省都市局公園緑地課・河川局河川環境課・道路局道路環境課監修、社団法人道路緑化保全協会編著：植物発生材堆肥化の手引き、社団法人道路緑化保全協会、1998
- 3) 三浦伊八郎・西田屹：木材化学、丸善、1933
- 4) 建設省土木研究所下水道部汚泥研究室：全国下水汚泥緑農地利用製品調査報告書、建設省土木研究所、1993
- 5) コンポスト専門委員会：下水汚泥コンポスト指標その2、下水汚泥資源利用協議会、1985
- 6) 農林水産省農林法規研究委員会編：農林法規解説全集農政編・第四巻、大成出版、2000
- 7) 下水汚泥資源利用協議会：下水汚泥の農地・緑地利用マニュアル、下水汚泥資源利用協議会、1996

資料 1 試験 1 の堆肥施用樹木の樹高・根元径測定結果

① 植栽時

試験区名	樹高(cm)						根元径(mm)					
	①	②	③	④	⑤	平均	①	②	③	④	⑤	平均
Dtld-1	59	49	48	51	48	51	8.3	7.0	7.7	6.2	6.8	7.2
Dtld-2	52	49	50	53	53	51	7.2	7.4	7.6	7.0	6.3	7.1
Dtof-1	53	48	51	58	51	52	7.7	6.3	7.1	7.6	5.8	6.9
Dlof-1	66	72	50	50	47	57	7.0	6.3	7.2	6.4	6.6	6.7
Dlof-c	51	63	48	61	49	54	6.7	6.8	6.8	8.7	6.8	7.2
Elof-1	51	53	55	65	58	56	5.5	6.8	5.3	7.0	6.6	6.2
Elof-c	69	60	56	53	62	60	7.8	7.0	7.9	5.5	6.2	6.9
cont	58	53	64	47	51	55	6.7	4.9	6.9	5.4	6.9	6.2

② 8か月

試験区名	樹高(cm)						根元径(mm)					
	①	②	③	④	⑤	平均	①	②	③	④	⑤	平均
Dtld-1	94	90	102	100	58	89	12.0	11.5	12.0	12.5	9.0	11.4
Dtld-2	130	92	92	76	108	100	16.5	12.5	14.0	11.0	11.5	13.1
Dtof-1	77	82	96	125	102	96	11.0	15.0	12.5	16.0	12.5	13.4
Dlof-1	90	83	74	110	66	85	11.5	11.5	10.0	14.0	9.5	11.3
Dlof-c	62	85	87	74	105	83	10.5	14.5	13.0	16.5	11.0	13.1
Elof-1	65	62	112	87	103	86	12.5	8.0	12.0	12.5	13.0	11.6
Elof-c	113	102	97	82	89	97	13.0	18.0	14.5	9.0	14.0	13.7
cont	88	85	121	68	62	85	11.0	11.0	14.0	10.0	12.0	11.6

③ 1年8か月

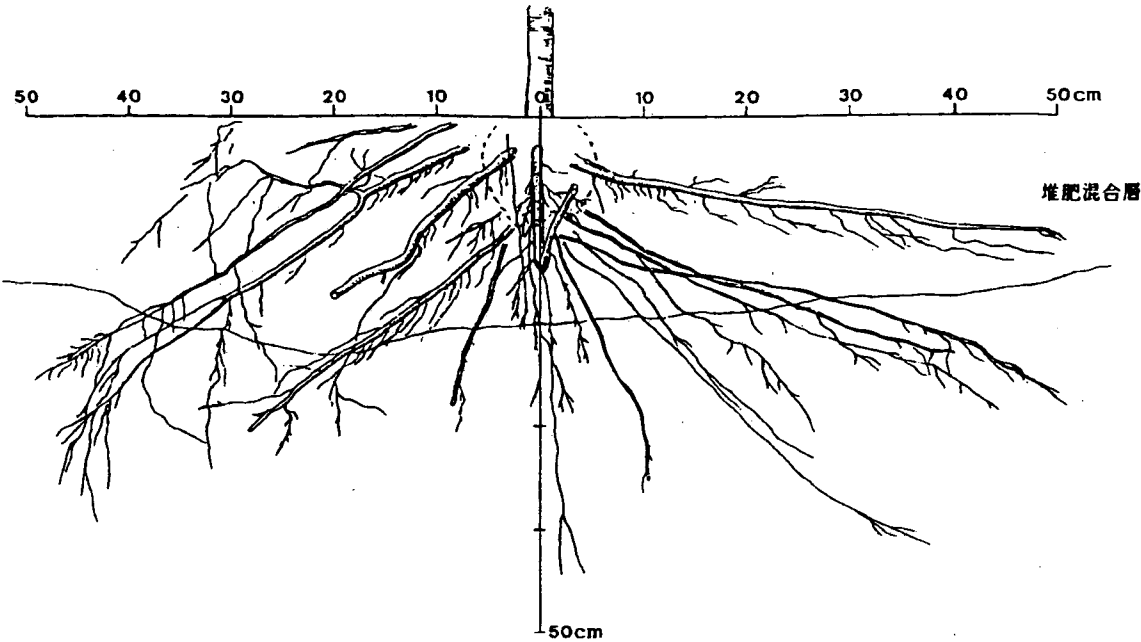
試験区名	樹高(cm)						根元径(mm)					
	①	②	③	④	⑤	平均	①	②	③	④	⑤	平均
Dtld-1	168	118	144	136	74	128	25.0	21.0	24.5	24.0	16.0	22.1
Dtld-2	188	167	202	125	155	167	36.5	24.0	29.5	23.0	19.5	26.5
Dtof-1	138	181	184	198	192	179	20.0	28.0	27.0	37.5	27.5	28.0
Dlof-1	155	138	118	184	148	149	25.0	23.5	17.5	30.0	19.5	23.1
Dlof-c	102	203	208	164	189	173	17.0	27.0	25.0	26.0	25.5	24.1
Elof-1	174	146	179	162	202	173	24.0	21.0	28.0	25.5	30.0	25.7
Elof-c	178	190	172	148	146	167	26.0	32.0	32.0	15.5	29.5	27.0
cont	113	109	181	102	120	125	16.5	19.0	27.0	13.5	16.0	18.4

④ 2年8か月

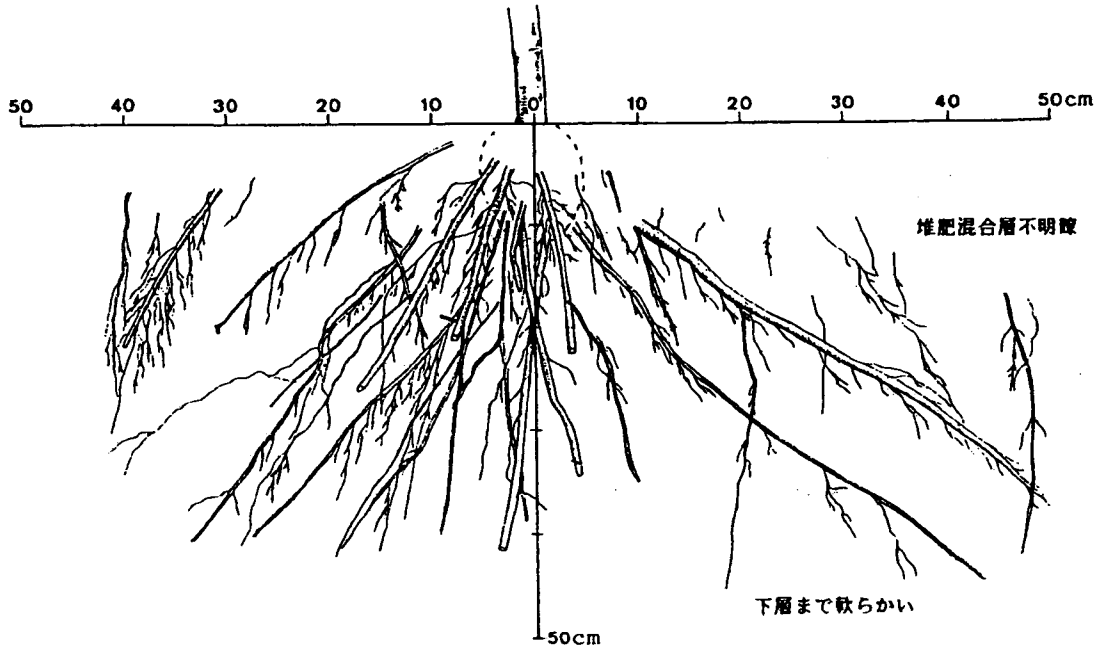
試験区名	樹高(cm)						根元径(mm)					
	①	②	③	④	⑤	平均	①	②	③	④	⑤	平均
Dtld-1	214	123	167	171	89	153	37.2	26.0	35.0	34.2	20.9	30.7
Dtld-2	214	196	198	184	161	191	50.0	32.3	45.1	31.5	29.6	37.7
Dtof-1	164	218	185	201	204	194	32.5	39.8	39.1	50.8	39.8	40.4
Dlof-1	209	227	177	255	186	211	33.4	34.4	25.0	47.5	30.7	34.2
Dlof-c	153	209	219	168	185	187	27.1	44.6	35.3	36.0	38.8	36.4
Elof-1	204	210	179	208	208	202	39.6	30.5	34.9	35.9	41.8	36.5
Elof-c	212	197	221	142	205	195	40.2	43.8	49.8	23.0	42.8	39.9
cont	147	141	187	114	135	145	21.7	26.6	40.1	20.0	23.5	26.4

資料 2 試験 1 の堆肥施用樹木の根系スケッチ

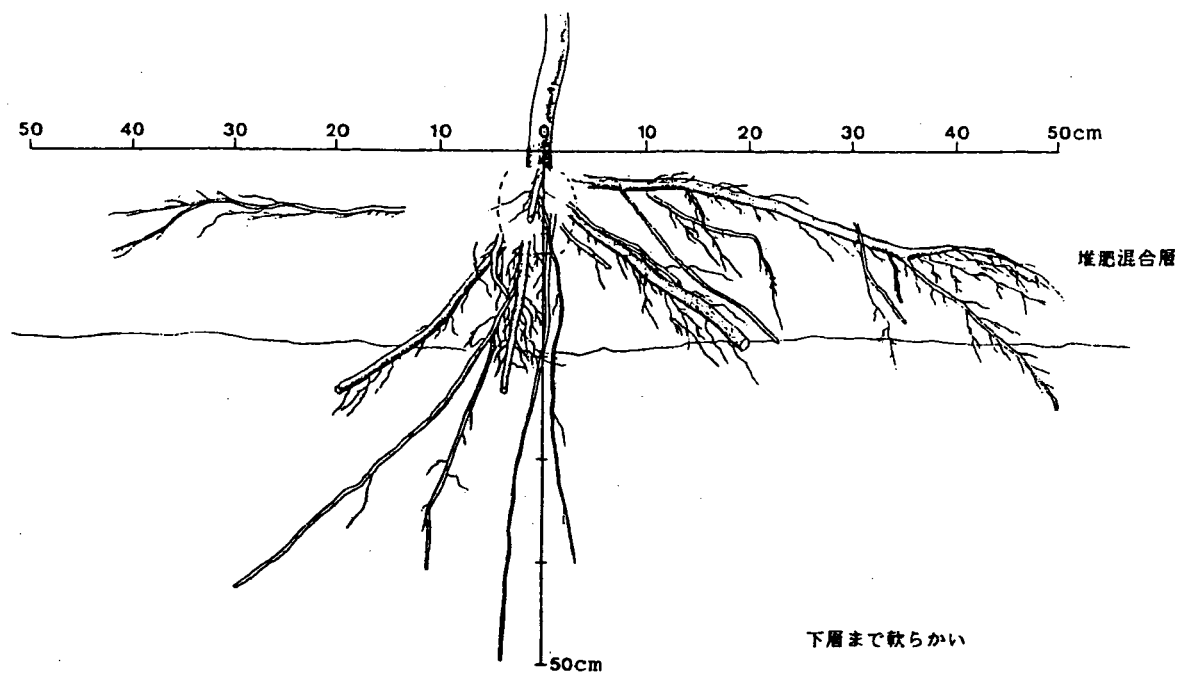
① Dtld-1



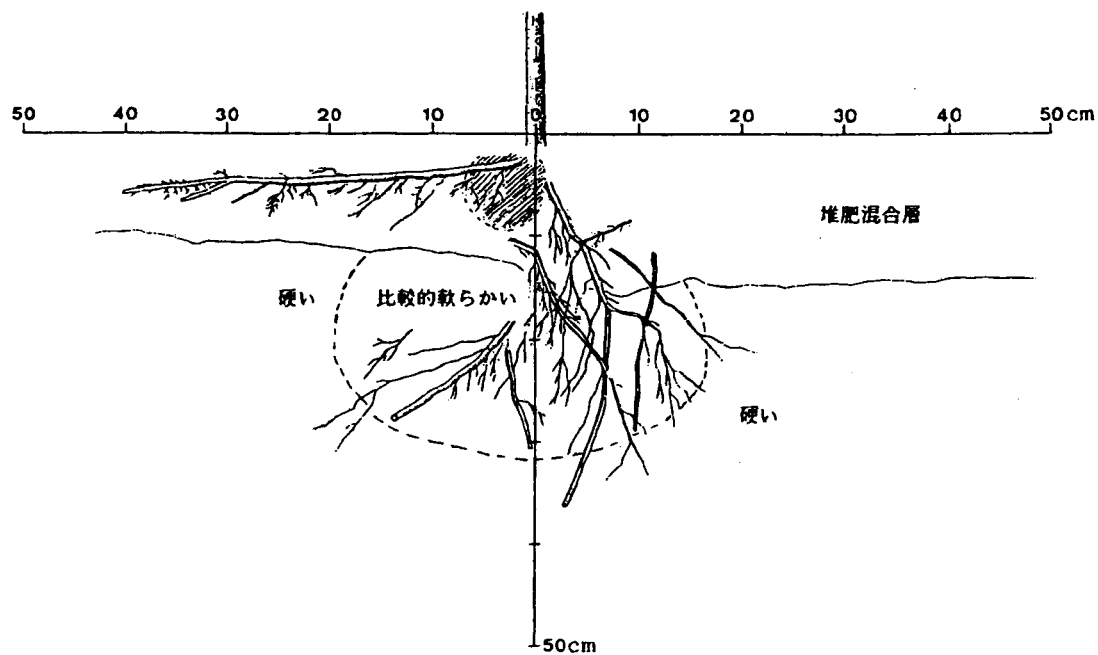
② Dtld-2



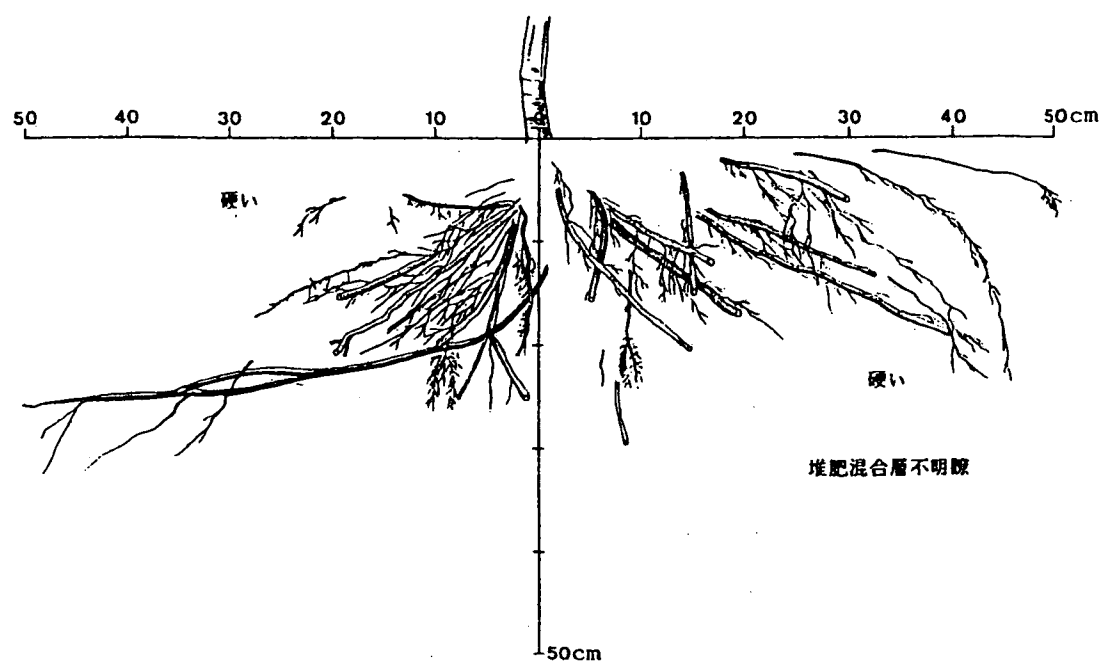
③ Dtof-1



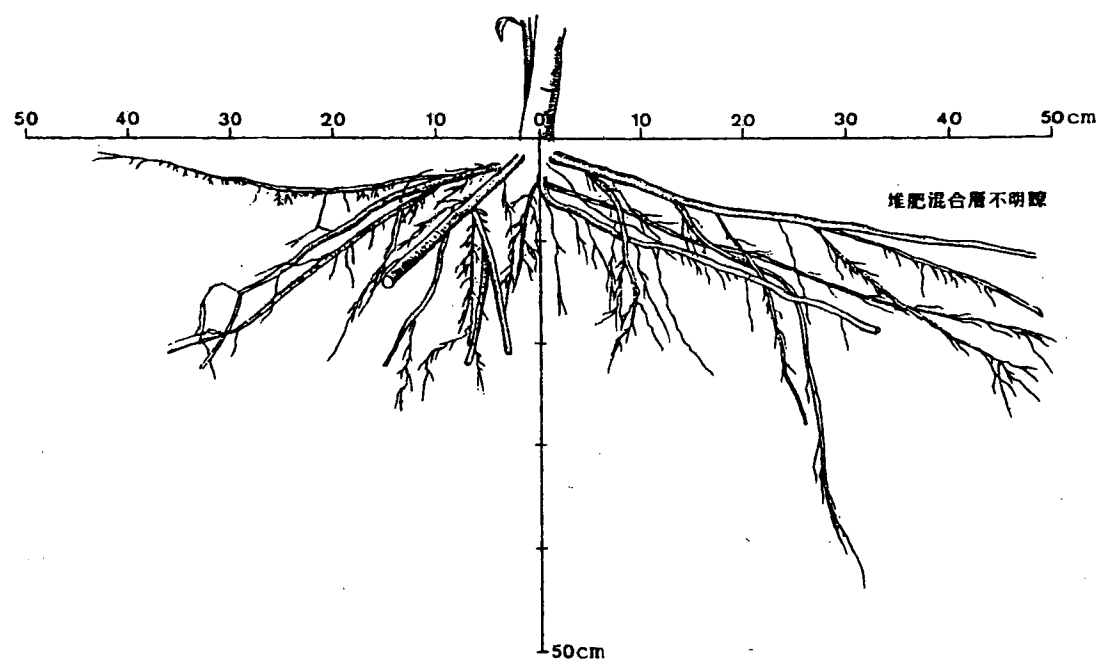
④ Dlof-1



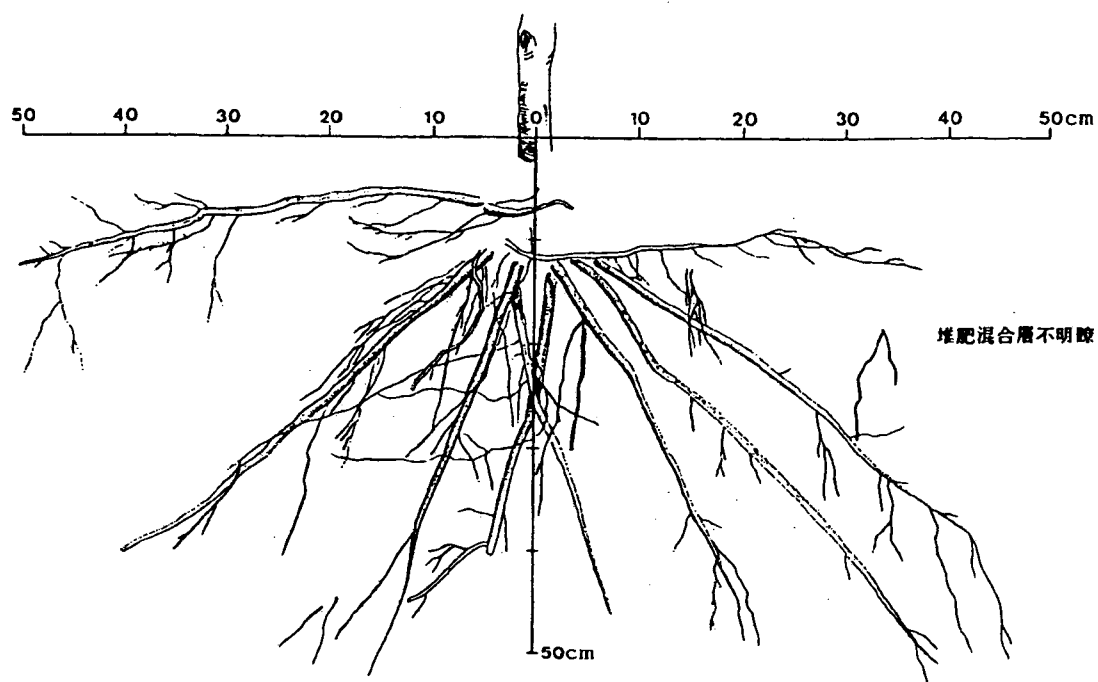
⑤ Dlof-c



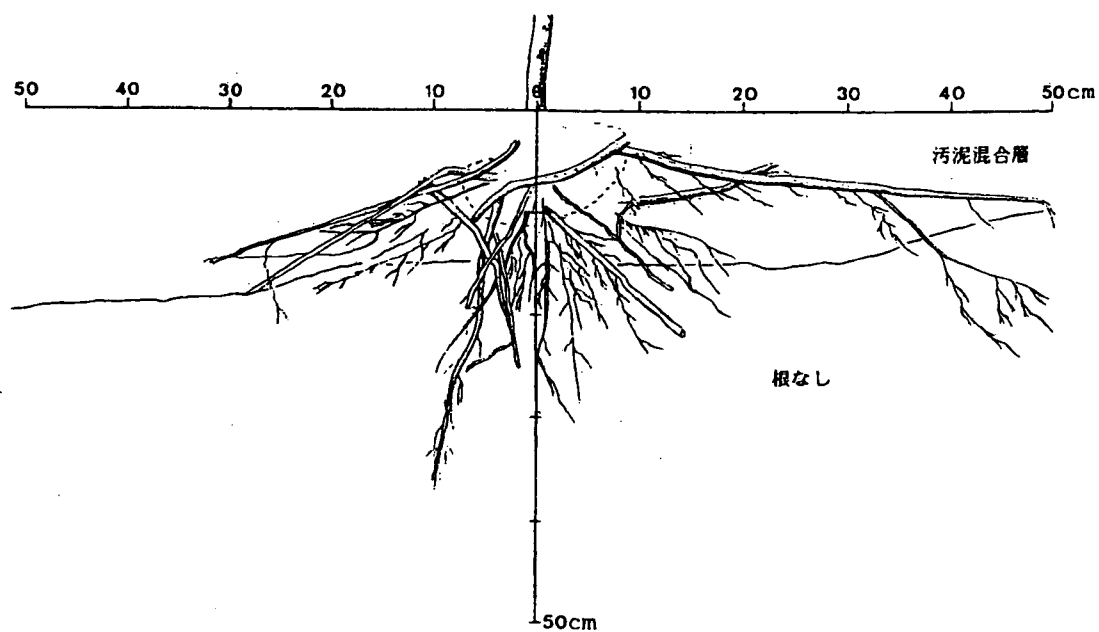
⑥ Elof-1



⑦ Elof-c



⑧ cont



資料3 土壌分析結果の分級基準（日本造園学会土壌分科会試案）

① 土壌評価結果（評価因子）の分級

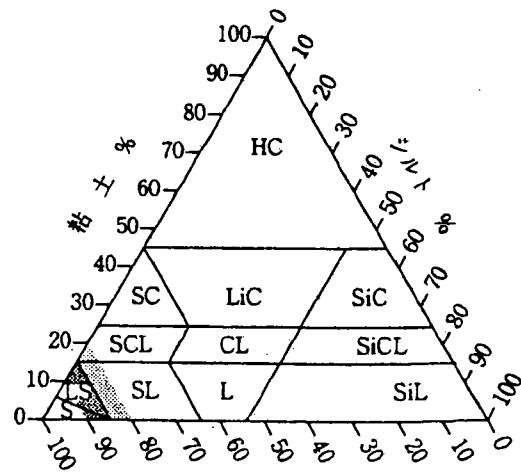
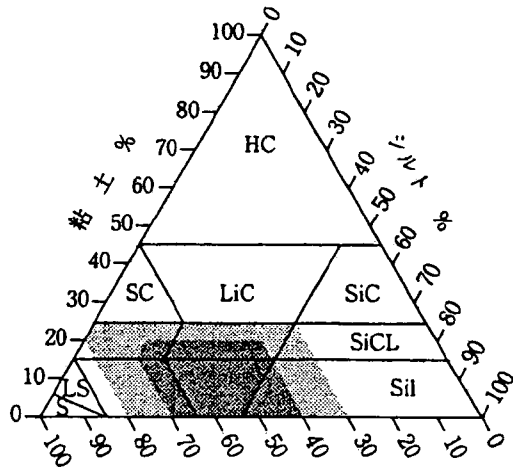
評価因子・分級		1 (優)	2 (良)	3 (不良)	4 (極不良)
粒 径 組 成				(三角座標に示す)	
透 水 係 数	cm/sec	10^{-3}	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} >$
有 効 水 分 *	l/m^3	$120 <$	$120 \sim 80$	$80 \sim 40$	$40 >$
固 相 率 **	%	$20 > (40 >)$	$20 \sim 30 (40 \sim 50)$	$30 \sim 40 (50 \sim 60)$	$40 > (60 <)$
礫 含 有 率	%		$20 \sim 40$	$40 \sim 60$	$60 <$
pH (H ₂ O)		$5.6 \sim 6.8$	$4.5 \sim 5.6$ $6.8 \sim 8.0$	$3.5 \sim 4.5$ $8.0 \sim 9.5$	$3.5 >$ $9.5 <$
全 窒 素	%	$0.12 <$	$0.12 \sim 0.06$	$0.06 >$	
有 効 リ ン 酸	mg/100g	$20 <$	$20 \sim 10$	$10 >$	
陽イオン交換容量(塩基置換容量)	me/100g	$20 <$	$20 \sim 6$	$6 >$	
置 換 性 石 灰	me/100g	$5.0 <$	$5.0 \sim 2.5$	$2.5 >$	
塩 素 イ オ ン	%	$0.05 >$	$0.05 \sim 0.20$	$0.20 <$	
電 気 伝 導 度	mS	$0.2 >$	$0.2 \sim 1.0$	$1.0 \sim 1.5$	$1.5 <$

* 有効水分を pF1.8~3.0 とした場合

** 鉱質土壌の場合は () に表示

② 基盤土壌と客土の品質基準のための土性分級図

(左：火山灰土壌、右：マサ土)



資料 4 試験 2 の堆肥施用樹木の樹高・根元径測定結果

①植栽時

試験区名	樹高(cm)						根元径(mm)					
	①	②	③	④	⑤	平均	①	②	③	④	⑤	平均
dh	99	104	102	100	100	101	8.4	9.0	9.9	8.1	9.1	8.9
dry	102	105	107	99	107	104	8.1	8.6	10.3	9.0	9.8	9.2
ch	106	107	100	101	98	102	10.5	9.1	8.9	9.2	9.7	9.5
cc	104	100	106	100	100	102	9.4	9.4	9.9	9.9	10.1	9.7
cont	101	105	102	104	103	103	8.8	9.6	9.6	8.4	10.3	9.3

②7か月

試験区名	樹高(cm)						根元径(mm)					
	①	②	③	④	⑤	平均	①	②	③	④	⑤	平均
dh	114	130	143	132	106	125	22.0	19.0	19.0	17.0	20.0	19.4
dry	108	114	114	122	127	117	18.9	20.0	19.0	18.0	20.0	19.2
ch	122	128	120	108	115	119	21.4	20.0	22.0	21.0	22.0	21.3
cc	116	111	116	115	119	115	20.5	16.0	20.0	17.0	21.0	18.9
cont	103	115	108	117	110	111	14.7	18.0	15.0	17.0	16.0	16.1

③1年7か月

試験区名	樹高(cm)						根元径(mm)					
	①	②	③	④	⑤	平均	①	②	③	④	⑤	平均
dh	210	199	270	301	299	256	31.0	33.0	35.0	36.0	39.0	34.8
dry	194	231	211	243	261	228	31.0	32.0	40.0	41.0	36.0	36.0
ch	194	264	243	221	267	238	35.0	37.0	44.0	36.0	36.0	37.6
cc	189	174	242	143	226	195	31.0	29.0	36.0	25.0	35.0	31.2
cont	203	227	170	171	213	197	26.0	30.0	27.0	28.0	30.0	28.2

④2年10か月

試験区名	樹高(cm)						根元径(mm)					
	①	②	③	④	⑤	平均	①	②	③	④	⑤	平均
dh	317	326	424	210	320	347	44.2	51.4	50.2	45.6	54.0	50.0
dry	324	403	395	362	320	361	42.1	45.2	54.5	57.1	57.3	51.2
ch	402	441	344	297	448	386	58.5	56.0	64.2	49.9	52.7	56.3
cc	273	244	370	191	208	270	44.0	39.5	52.0	33.9	48.9	42.4
cont	268	297	356	274	343	308	37.1	39.1	36.2	38.1	42.0	38.5