

有機廃棄物のリサイクル及びバイオマス利用

(独)農研機構

畜産草地研究所 研究管理監 (畜産環境研究分野)

羽賀清典

はじめに

農業は、色々な有機性廃棄物を肥料や飼料などの用途で数多く受け入れ、有機物資源としてリサイクルしてきた。有機性廃棄物のなかには、いつのまにか有機物資源となっているものが多い。例えば、油かすや魚かすなどは重要な有機質肥料となっているし、フスマや綿実かすなどが欠くべからざる飼料原料となっていることからみても、廃棄物と有機物資源の区別はなかなか難しい。新農業基本法(食料・農業・農村基本法)を受けて、農業関係の環境三法案(「持続性の高い農業生産方式の導入の促進に関する法律」「家畜排泄物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」「肥料取締法の一部を改正する法律」)が平成 11 年に成立した。また、バイオマス・ニッポン総合戦略の展開も廃棄物バイオマスの利用に大きな影響を与えている。ここでは、有機性廃棄物の処理利用の概況と、その中でも多量の廃棄物バイオマスと思われる家畜ふん尿の処理・利用について述べる。

1. 有機物資源としての農畜産廃棄物

食品産業、林産、農産、畜産など農業に係る主な有機性廃棄物について、主に「有機性廃棄物資源化大事典」¹⁾から引用し、年間発生量、処理利用状況、成分などを表 1 に整理した。以下に各廃棄物の特性と賦存量について概観し、その中における畜産廃棄物の位置付けをもう一度考えてみたい。

(1) 食品産業廃棄物(食品循環資源)

食品産業廃棄物のうち資源利用できるものは食品循環資源と呼ばれ、主に飼料に利用されており、その割合はビールかすなどでは 95% に上る。焼酎かすは廃棄割合が 50% と多く、スラリー状態であるからメタン発酵によるエネルギー利用の可能性はある。コーヒーかすはすでに工場内で燃料としてエネルギー利用されている。澱粉かすの一部はクエン酸発酵の原料にも利用されているが、一部は廃棄されている。

高水分で排出され、腐敗しやすい廃棄物であるビールかす、オカラ、焼酎かすなどの処理が問題となっており、飼料化の推進が重要だが、堆肥化の果たす役割も大きくなっている。これらは単独でも堆肥化されるが、他の廃棄物(下水汚泥、家畜ふん、廃オガなど)と混合して堆肥化(融合コンポスト化)されることも多い。

表 1 農業関係の生物分解性有機廃棄物の推定発生量と性質

種類		水分	年間発生推定量	処理・利用状況	T-C	T-N	C/N	
食 品 産 業	ビールかす	80%	700,000 ~ 1,050,000t/年	牛の飼料 95%	40.70%	2.90%	14	
	焼酎かす	94%	336,121kL/年	海洋投棄 50%、 肥料 19%、 飼料 19%	40.00% 26.90%	3.80% 3.31%	10.5 8.1	
	ウイスキーかす	76.40%	379,712t/年 ²⁾	飼料 83.5%				
	清酒かす		160,165t/年 ²⁾	食用 100% ²⁾				
	オカラ	80%	744,600t/年	飼料 70% ³⁾ 、 肥料 16%、 食品 4%	50% ⁴⁾	4 ~ 5% 4)	10 ~ 12 ⁴⁾	
	果 汁	ミカン果汁	86% ²⁾	22,500 ~ 153,300t/ 年	飼料 86.8% ²⁾			
		缶詰	84%	31,900 ~ 71,600t/年	飼料 50.6% ²⁾			
		リンゴ果汁	79.70%	43,800 ~ 85,500t/年	飼料 64.1% ²⁾			
	残 渣	果汁		4,700 ~ 7,800t/年				
		缶詰		7,800 ~ 12,800t/年 4,800t/年 ²⁾	廃棄 100% ²⁾			
	コーヒーかす	65%	600,000t/年	工場内燃料 約 10 万 t/年廃棄物	55.20%	2.17%	25.4	
	茶 か す	緑茶かす		9,000t/年		51.00%	5.02%	10.2
		紅茶かす	70%	14,000t/年	堆肥原料	50.00%	4.54%	11
		麦茶かす		4,500t/年				
		その他		9,000t/年				
	醤油かす	26.5% ²⁾	85,877t/年 ²⁾	飼料 64.1% ²⁾				
	コーンスターチ副産物	11 ~ 53% 2)	784,740t/年 ²⁾	飼料 100% ²⁾				
	ハレシヨ澱粉かす	92% ²⁾	776,790t/年 ²⁾	飼料 70% ²⁾ 、 廃棄 30% ²⁾				
カンシヨ澱粉かす	92% ²⁾	258,341t/年 ²⁾	飼料 70% ²⁾ 、 クエン酸発酵原料 30% ²⁾					
食品・小計			5,550,000t/年					

	種類	水分	年間発生推定量	処理・利用状況	T-C	T-N	C/N
林産	製紙スラッジ	74～79%		焼却 93%	22.3～ 32.70%	0.16～ 0.68%	39～ 120
	パーク		6,577,000m ³ /年 ⁵⁾ (比重 0.7として 460万 t/年) パーク堆肥として 906,458t/年	製材工場のもの ⁵⁾ 焼却 52%、 燃料 30%、 堆肥 7%、 畜舎敷料 4%、 オガライト用 2%	針葉樹: 51.70%	0.30%	172
				広葉樹: 50.00%	0.37%	133	
	オガクズ	製材時 40%	13,000,000m ³ /年 (比重 0.2として 260万 t/年) 4,146,000m ³ /年 ⁵⁾	畜産用 62% キノコ用 13% オガライト用 10% 工業用 8%	50%	0.05～ 0.10%	500～ 1,000
	廃オガ (キノコ栽培後の 培地の廃棄物)	47.6～ 53.00%	1,440,000m ³ /年 (500,000t/年)		48.5～ 51.00%	1.07～ 1.20%	43～ 47
林産・小計			7,700,000t/年				
農産	ビートパルプ	82% ²⁾	1,208,758t/年 ²⁾	飼料 100% ²⁾			
	バガス	50%	418,500t/年	工場内燃料 89%、 堆肥 8%、 飼料 1%	45～ 46%	0.25～ 0.31%	約 163
	モミガラ	11.70%	3,000,000t/年 2,366,408t/年 ⁵⁾	焼却 24.6% ⁵⁾ 、 畜舎敷料 20.9% ⁵⁾ 、 堆肥 20.1% ⁵⁾ 、 暗渠資材 12.2% ⁵⁾ 、 マルチ 6.31% ⁵⁾ 、 燐炭 4.61% ⁵⁾	32.80%	0.45%	72.9
	イナワラ	10% ²⁾	11,000,000t/年	鋤込 61%、 堆肥 11%、 粗飼料 11%、 畜舎敷料 6.5%、 焼却 4.9%、 マルチ 4.5%、 ワラ工芸 1.6%	40.80%	0.62%	66

種類		水分	年間発生推定量	処理・利用状況	T-C	T-N	C/N
農 産	ムギワラ		728,000t/年	焼却 37.7%、 鋤込 33.5%、 堆肥交換 29%	44.30%	0.36%	123
	農産・小計		15,720,000t/年				
畜 産	牛ふん	80%	30,369,000t/年 ⁶⁾	堆肥 94.8% 乾燥 5%	41.40%	1.80%	23
	豚ふん	75%	8,397,000t/年 ⁶⁾	堆肥 50% 乾燥 16%	41.50%	3.90%	11
	鶏ふん	78%	15,390,000t/年 ⁶⁾	乾燥 64% 堆肥 12%	42.20%	4.60%	9
	羽毛		167,586t/年 ²⁾	飼料 100% ²⁾			
	血液		25,228t/年 ²⁾	飼料 74.4% ²⁾ あとは廃棄			
	不可食内臓等		596,463t/年 ²⁾	飼料 97.6% ²⁾			
畜産・小計			54,940,000t/年				
合計			83,910,000t/年				

注：文献1)を基本とし、文献2～6)で補足して著者がとりまとめたものである。したがって、表内の引用が示していないものは文献1)による。

(2) 林産廃棄物

製紙スラッジやバークは焼却される割合が高く、燃料としての利用が考えられるが、水分が74%以上と高いことが問題であろう。バークやオガクズは主に畜舎の敷料に利用されて、最終的には堆肥となっている。しかし、バークの52%が焼却されており、焼却熱を利用したエネルギー利用への転換も考えられる。キノコ栽培後の培地(オガクズと米ヌカなどが原料)は廃オガと呼ばれ、生のオガクズよりは水分がやや高いものの堆肥の原料となっている。近年増大しつつある廃棄物であり、新たな有効利用方法を考える必要も出てこよう。

(3) 農産廃棄物

ビートパルプは100%飼料利用されている。バガスは約90%が工場内で燃料としてエネルギー利用されており、一部は家畜ふん尿といっしょに堆肥化されている。昔から堆肥の原料として伝統的に利用されてきたモミガラやイナワラだが、最近ではイナワラのように鋤き込まれたり、モミガラやムギワラのように焼却処理されることも多い現状である。焼却処分しているものは燃料利用を考える必要がある。

(4) 畜産廃棄物

畜産廃棄物の中でも、家畜ふんは年間発生量(約 5,400 万t)がもっとも多く、堆肥化されている割合も高く全体の約 65%を占める(図1)。他の廃棄物と量的に比較しても突出しており、家畜ふん尿はわが国における代表的な堆肥原料となっている。また、羽毛、血液、不可食内臓等の副生物は、飼料などに有効利用されている割合が高い。

(5) その他の有機性廃棄物

表1に載せなかった農業以外の有機性廃棄物として、発生量が多いと考えられるものに下水汚泥がある。脱水・焼却などの処理後に最終処分されるものは、乾物重で 223 万tであり、リ

表 2 生物系廃棄物の発生量及び成分含有量(総括表)⁸⁾

生物系廃棄物	発生量 千 t/年	乾物換算 千 t/年	成分含有量(%)			発生量(千 t/年)			
			窒素	リン酸	カリ	窒素	リン酸	カリ	
農業系	イナワラ	10,940	-	0.60	0.20	1.00	65.7	21.9	109.4
	ムギワラ	780	-	0.40	0.20	1.00	3.10	1.60	7.80
	モミガラ	2,320	-	0.60	0.20	0.50	13.9	4.60	11.6
	小計	14,040	-	-	-	-	82.7	28.1	128.8
畜産系	家畜ふん尿	94,300	-	-	-	-	749	274	519
	畜産物残渣	1,670	-	5.01	7.13	3.72	83.8	119.3	62.2
林業系	樹皮(パーク)	950	-	0.53	0.08	0.28	5	0.7	2.7
	オガクズ	500	-	0.15	0.03	0.14	0.8	0.2	0.7
	木クズ	4,020	-	0.15	0.03	0.14	6	1.2	5.6
	小計	5,470	-	-	-	-	11.8	2.1	9
食品産業動	植物性残渣	2,480	690	1.41	0.53	0.57	9.8	3.7	4
	汚泥	15,040	750	7.01	4.02	0.77	52.7	30.2	5.8
	計	17,520	-	-	-	-	62.5	33.9	9.8
建設業	建設発生木材	6,320	-	0.15	0.03	0.14	9.5	1.9	8.8
生ゴミ(家庭・事業系)		20,280	5,680	1.41	0.53	0.57	80.1	30.1	32.4
草木類	木竹類	2,470	-	0.76	0.19	0.37	18.7	4.7	9.1
汚泥類	下水汚泥	85,500	1,710	5.18	5.37	0.37	88.6	91.8	6.3
	し尿	19,950	-	0.60	0.10	0.30	119.7	20	59.9
	浄化槽汚泥	13,590	270	5.18	5.37	0.37	14.1	14.6	1
	農業集落排水汚泥	320	6	5.18	5.37	0.37	0.3	0.3	0
	小計	119,360	-	-	-	-	222.7	126.7	67.2
合計		281,430	-	-	-	-	1,320.8	620.8	846.3

サイクル率は約 70%に及んでいる⁷⁾。コンポスト化されるものは 23 万t、乾燥等 6 万tであり、緑農地利用はここ 10 数年来大きな変化はない。

表 2 は、生物系廃棄物リサイクル研究会が平成 11 年の 2 月にまとめた生物系廃棄物の発生量及び成分含有量の総括表である⁸⁾。表 1 に載っていない廃棄物として、食品産業汚泥、建設業、生ゴミ、草木、汚泥類が示されている。汚泥類が最も多いが、それを除くと畜産の占める割合が高い(図 2)。表 3 と図 3 はバイオマス・ニッポン総合戦略の中で整理された対象バイオマス量である。未利用バイオマスとして、食品廃棄物や木質が位置づけられている。

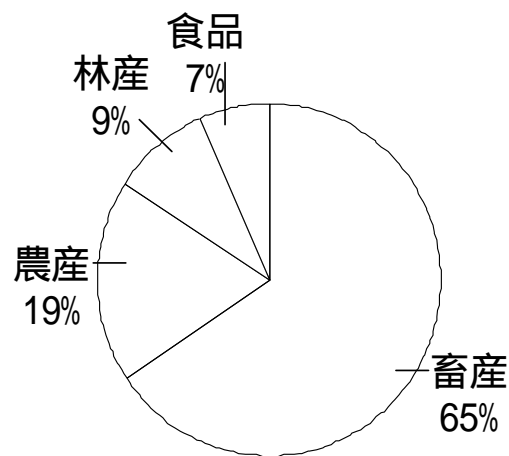


図 1 農業関係の生物分解性有機廃棄物の発生割合(表 1 から作成)

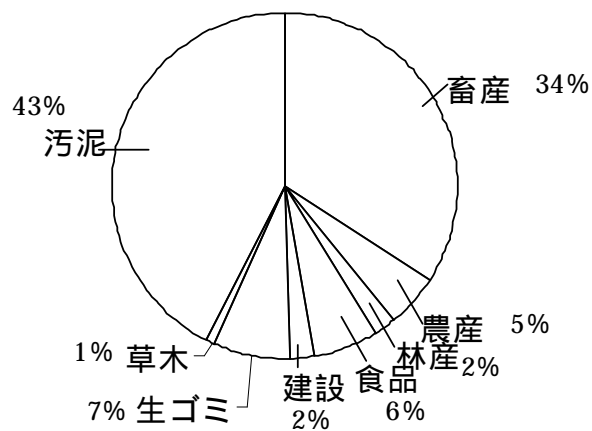


図 2 生物系廃棄物の発生割合(表 2 から作成)

表 3 バイオマス利活用の現状 (2005 年バイオマスニッポンのホームページから)

対象バイオマス	年間発生量	利活用の状況
家畜排泄物	約 9,100 万トン	堆肥等利用、約 80%
食品廃棄物	約 2,200 万トン	肥飼料利用 10% 未満、 残り 90% が焼却・埋却処理
廃棄紙	約 1,400 万トン	古紙として回収されず、 その大半が焼却
黒液 (乾燥重量)	約 1,400 万トン	ほとんどがエネルギー利用、 (主に直接燃焼)
下水汚泥 (濃縮汚泥ベース)	約 7,600 万トン	建設資材・堆肥利用 約 60% 埋め立て 約 40%
製材工場等残材	約 610 万トン	エネルギー・堆肥利用 約 90%
林地残材	約 390 万トン	ほとんど未利用
建設発生木材	約 480 万トン	製紙原料、ボード原料、家畜飼料等への 利用 約 40%
農作物非食用部 (イナワラ、モミガラ等)	約 1,300 万トン	堆肥、飼料、畜舎敷料への利用 約 30%

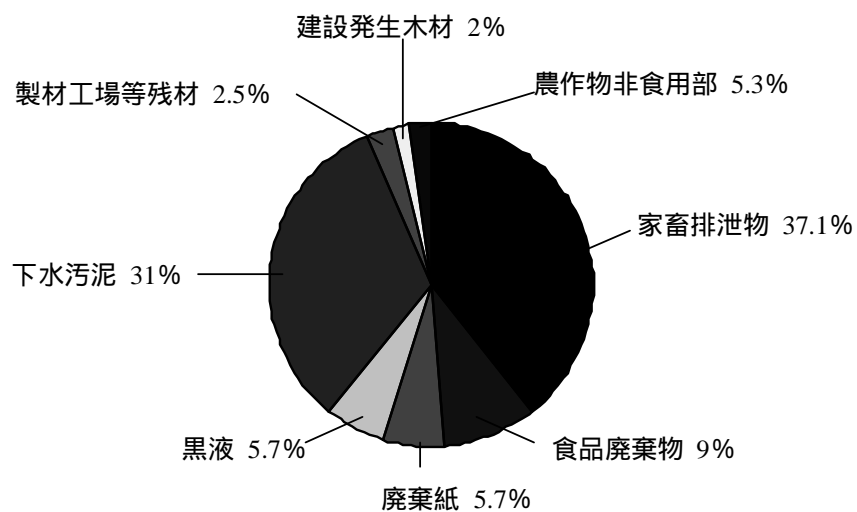


図 3 バイオマス利活用の現状 (表 3 から作成)

2. 堆肥化の仕組みと条件

堆肥化の主役は好気性条件で働く微生物である。堆肥化を順調に進行させるためには、好気性条件を確保し、微生物を活発に活動させる条件を整備する必要がある。その条件として、栄養分、空気(酸素)、水分、微生物、温度、時間の6つがあげられる(図4)

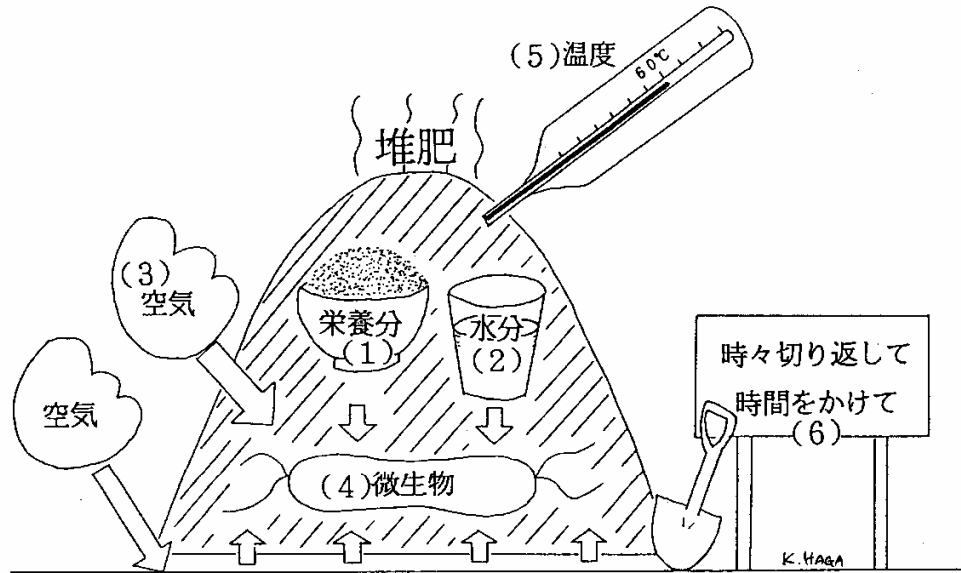


図4 堆肥化の基本6条件

(1) 栄養分

栄養分は、微生物が分解し易い有機物である(図5)。この易分解性有機物(分解しやすい有機物)は、污水处理で言えば生物化学的酸素要求量(BOD)に相当するものである。家畜の生ふんなど、堆肥の原材料の中には、易分解性有機物が多く含まれ、栄養分は十分である。

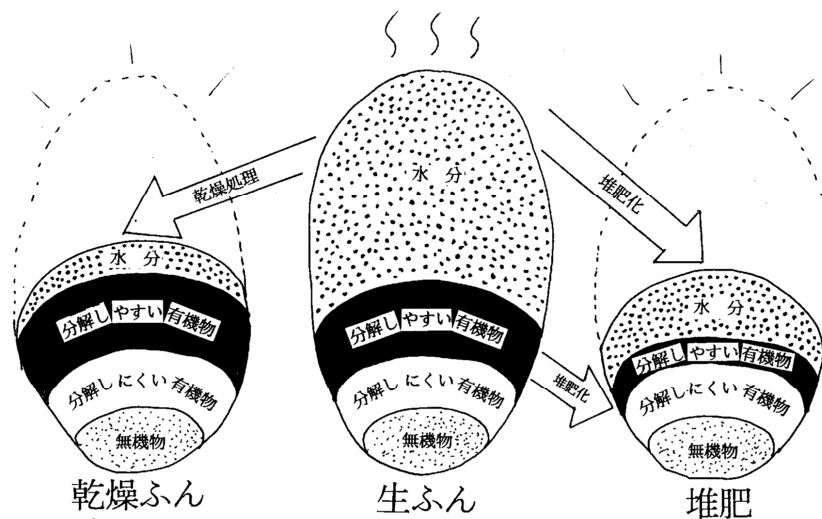


図5 生ふん、乾燥ふん、堆肥はどう違う？

栄養バランスとしての C/N は家畜ふんでは 8～20 の範囲にあり、窒素の比率が高い。したがって、堆肥化過程で有機物の分解に伴って、多量のアンモニアが発生することになる。また、林産廃棄物や農産廃棄物のように C/N の高い原材料では、堆肥化のためには窒素を添加する必要がある。

(2) 水分

堆肥の原材料は水分が多すぎることがしばしばである。例えば、生ふんの水分は約 80% と高いため、空気が内部まで浸透せずに嫌気性となる。通気性が発現して堆肥化が進行するには、55～70% くらいの水分に調整する必要がある。水分調整方法には、ハウスを利用した予備乾燥や副資材(オガクズ、イナワラ、戻し堆肥など)を混合する方法が一般的に行われている。通気性の発現する水分は、畜種や副資材の種類によって異なる(図 6)⁹⁾。

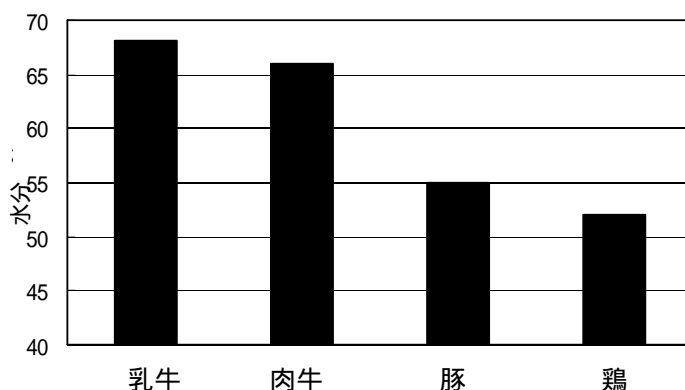


図 6 畜種別、通気性発現時のふんの水分⁹⁾

(3) 空気

通気性の目安として空隙率(気相率)が 30% 以上必要といわれている。容積重では 0.5 kg/L がその目安となる。強制通気方式の適正通気量は材料の水分や通気性によっても違うが、50～300 L/m³・分の範囲である。また、堆肥の内部に空気路ができ、全体に空気が行き渡らなくなるので、適宜切返しまたは攪拌を行うほうが良い。

小型堆肥化実験装置を用いて、通気量と堆肥の温度の関係を調べた(図 7)¹⁰⁾。通気量が少ないと温度が上がりやすく(図 7 の▲ 10 L/m³ 分)、適切な通気量(× 30 L/m³ 分と 50 L/m³ 分)では順当な温度上昇がみられるが、通気量が多すぎると(100 L/m³ 分)、堆肥が冷却され、かえって温度が下がることがわかる。また、通気を止めると、急激な温度下降がみられる。このように、順調な堆肥化を進行させるためには、各々の材料に合わせて適正な通気が必要である。

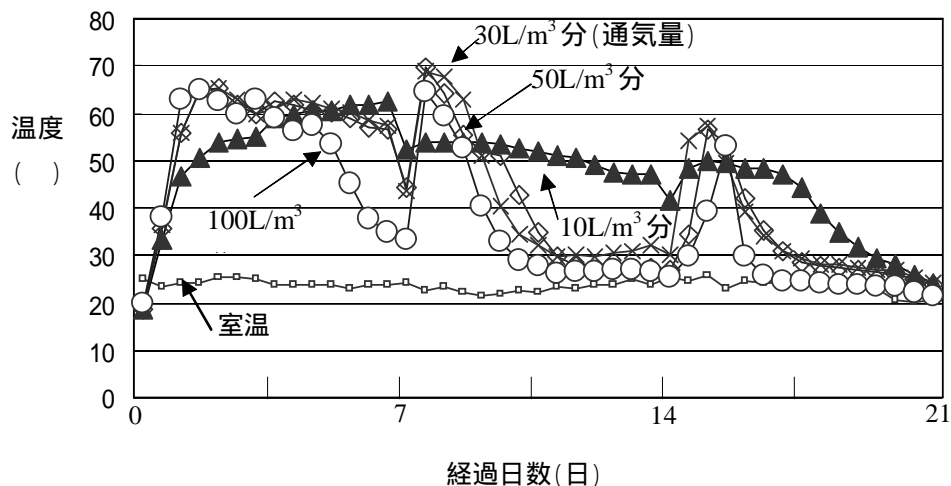


図 7 堆肥化過程における通気量と温度との関係¹⁰⁾
 (原材料: 余剰菌体 + オガクズ + モミガラなど; 7日目と14日目に切返し)

(4) 微生物

家畜ふんにはもともと微生物が $10^8 \sim 10^9$ 個/g 程度存在し、その微生物が堆肥化を進行させる。生ふんの中の微生物の数は堆肥化に十分な数であり、外部から微生物を添加する効果はあまり期待できない。むしろ、生ふんにもともと存在する微生物が好氣的に活動しやすい環境条件を整備する技術が重要である。微生物の数が元々少ない食品循環資源のようなものでは、戻し堆肥などによって、微生物の補充をする必要があるであろう。

(5) 温度

以上のように、栄養分、水分、空気、微生物の条件が揃うと堆肥化が進行し、微生物が有機物を分解する過程で熱が発生し、堆肥の温度が上昇し、ときには $70 \sim 80$ にも達する。高温

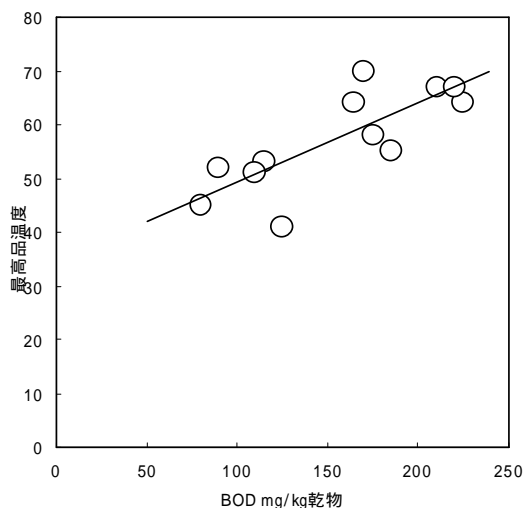


図 8 堆肥原料の BOD と最高品温の関係¹¹⁾

になることは、易分解性有機物(BOD)を微生物が盛んに分解している結果であり、堆肥化が順調に進んでいる証拠でもある。図8は堆肥原料のBODと、堆肥の最高品温の関係を示したものである。両者に正の相関がみられ、BODが多いほど最高品温が高いことがわかる¹¹⁾。

高温になる効果には3つある。1つは微生物の活性が高まる効果、2つは水分の蒸発が促進される効果、3つは病原菌や寄生虫さらには雑草の種子を死滅させる効果である。病原菌や寄生虫(表4)、雑草の種子(表5)を死滅させるためには、55で4~5日間、60で2~3日が必要である。また、堆肥の表面と中心部では温度が異なることから、堆肥全体が高温を体験するように、適宜切返しを行う必要がある。

表4 人体病原菌及び寄生虫の死滅温度¹²⁾

種類	温度()	時間(分)
腸チフス菌	55 ~ 60	30
赤痢菌	55	60
ブドウ球菌	50	10
大腸菌	55	60
	60	15 ~ 20
回虫(卵)	60	15 ~ 20
クリプトスポリジウム*	45	6時間

*クリプトスポリジウムは、動物衛生研究所のデータから

表5 混入した雑草種子の生存率に及ぼす温度と加温時間の影響¹³⁾

温度() 加温時間	無処理	55					60			
		24	48	72	96	120	3	6	24	30
生存率(%)										
ワルナスビ	99	72	7	0	-	-	67	9	0	-
アメリカイヌホオズキ	97	79	0	-	-	-	84	6	0	-
イチビ	93	23	12	9	2	0	39	23	7	0
ヨウシュヤマゴボウ	94	0	-	-	-	-	57	3	0	-
ハリビユ	94	2	0	-	-	-	24	1	0	-
ホソアオゲイトウ	97	38	0	-	-	-	74	0	-	-
オオイヌタデ	83	0	-	-	-	-	0	-	-	-
オオクサビユ	96	0	-	-	-	-	46	0	-	-
イヌビエ	76	6	6	6	-	-	6	6	-	-
メシバ	67	0	-	-	-	-	10	0	-	-

(6) 時間

堆肥の温度が気温よりも高い場合は、微生物が有機物を分解している証拠であるから、まだ堆肥化は終了していない。切返し操作をしても、温度が上がらなくなるまでは、少なくとも時間がかかる。一応の目安としては、家畜ふんだけの場合は2か月、イナワラ、モミガラなどの作物残渣を混合した場合は3か月、オガクズ、バークなどの木質資材を混合した場合は6か月の時間をかけて堆肥化を行う必要がある⁹⁾。

3. 堆肥化施設

良質な堆肥生産のために堆肥化施設が重要な役割を果たす。施設の型式は図9に示すように、大きく堆積方式(通気装置の有るものと無いもの)と攪拌方式の2つに分類され、攪拌方式はさらに密閉型(縦型または横型攪拌装置付)、開放型(ロータリーやスクープなどの攪拌装置付)に分類される⁹⁾。どの畜種でも堆積方式はよく利用されるが、牛ふんでは堆積型と開放型が一般的に多く、豚ふんや鶏ふんでは、開放型や密閉縦型が多い。

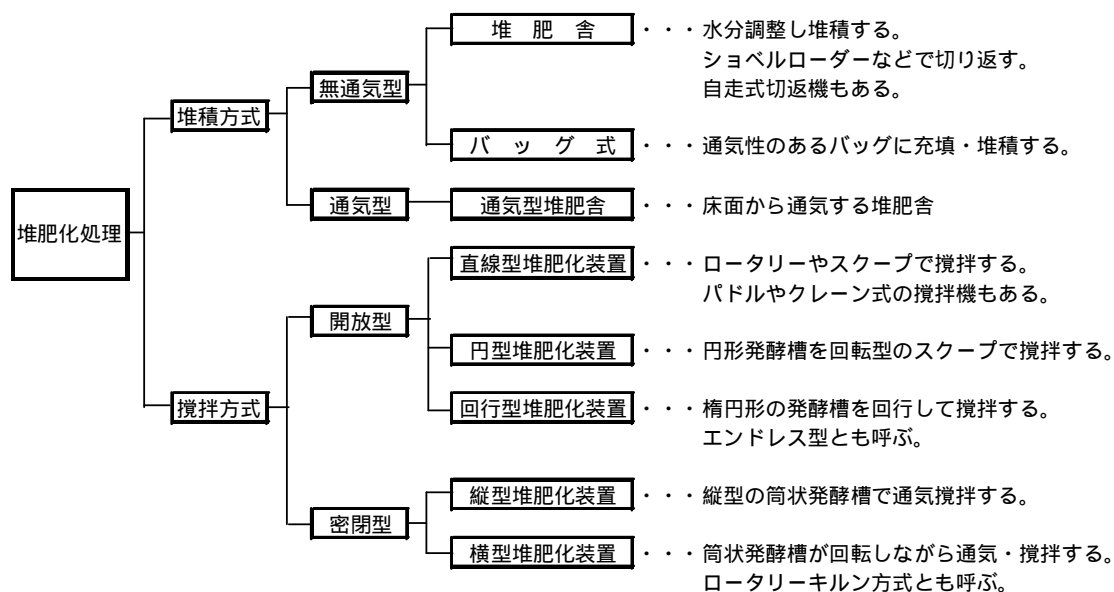


図9 堆肥化装置の分類⁹⁾

全国2,326施設の生産方法をみると、図10に示すように堆肥舎で堆積・切り返しが50.9%、ロータリー式攪拌が23.3%となっており、簡易で低コストな施設が志向されている¹⁴⁾。さらに、家畜ふん用堆肥化装置の建築経費は、表6に示すように、農林水産省が公表した堆肥舎等建築コストガイドライン(平成19年2月改正)にその目安が示されている¹⁵⁾。一般的堆肥舎の経費は、200m²未満で24,000円/m²、200m²以上で22,000円/m²と示されている。

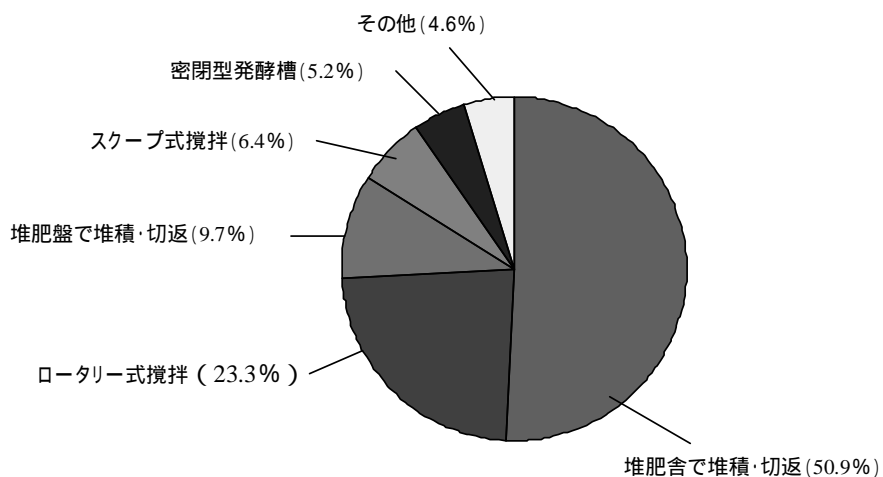


図 10 堆肥化の主な生産方法¹⁴⁾

表 6 堆肥舎等建築コストガイドライン（平成 19 年 2 月改正）¹⁵⁾

(1) 共同利用施設（単位：千円 / m²・m³）

区分		単位当たりの施設整備額	
		一般地域	特別地域
堆肥舎 (発酵舎含む)	500m ² 未満	34	38
	500m ² 以上	31	35
屋根掛け	500m ² 未満	21	24
	500m ² 以上	18	21
尿貯留施設	1,000m ³ 未満	30	30
	1,000m ³ 以上	25	25
スラリータンク	2,000m ³ 未満	20	20
	2,000m ³ 以上	17	17

(2) その他（単位：千円 / m²・m³）

区分		単位当たりの施設整備額	
		一般地域	特別地域
堆肥舎 (発酵舎含む)	200m ² 未満	24	26
	200m ² 以上	22	24
屋根掛け	200m ² 未満	19	20
	200m ² 以上	18	19
尿貯留施設	400m ³ 未満	24	24
	400m ³ 以上	19	19
スラリータンク	700m ³ 未満	15	15
	700m ³ 以上	14	14

4. 堆肥の利用促進

(1) 耕種農家のニーズ

堆肥を利用する耕種農家のニーズを探ってみたい。図 11 は、特別栽培米生産農家が家畜ふん堆肥を使用し始める条件をアンケートした結果である¹⁶⁾。高品質堆肥を望むものが26%あり、散布しやすい乾燥品の9%、重金属や病原菌のない安全性の2%を加えると品質に関することで37%に上る。次に低コストを望むものが20%ある。さらに、散布請負10%、少労力9%、散布機械8%、入手可能5%、輸送2%など運搬・散布関連が34%になる。総じて、堆肥をこれから使おうと考えている熱心な農家の考えは、高品質、低コスト、運搬・散布の3つに集約される。

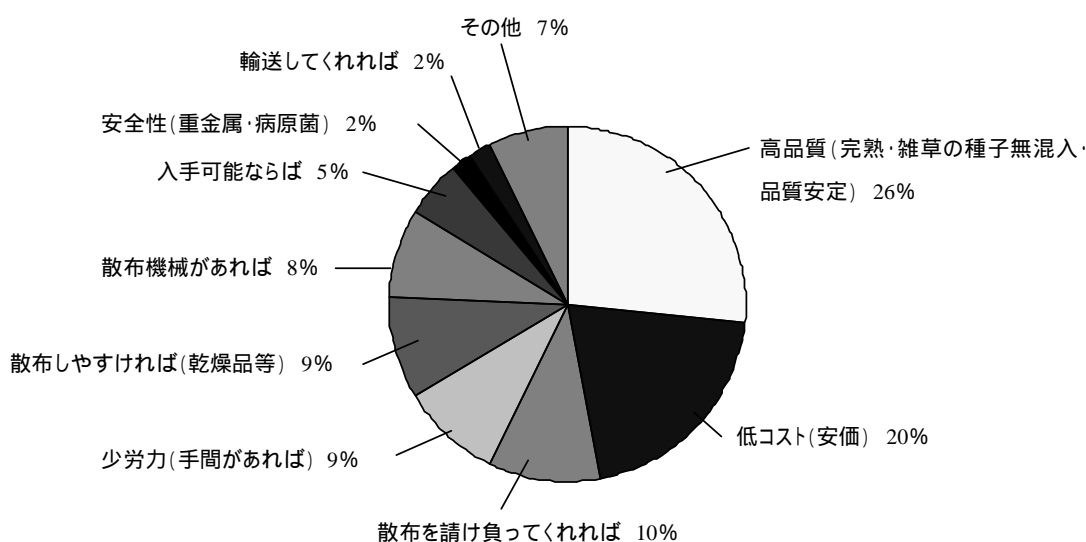


図 11 特別栽培米生産農家が家畜ふん堆肥を使用し始める条件¹⁶⁾

図 12 は熱心に堆肥を利用している耕種農家が、利用上抱えている問題点である¹⁷⁾。種子混入24%、成分変動6%、生育障害18%、硝酸態窒素8%を合わせて品質に関するものが56%に上る。低コストについての回答はない。ただし、同アンケートの別の設問で、もっとも多い購入価格はトン当たり2,000~4,000円であり、上限は8,000円という回答を得ている。農林水産省の市場価格調査でも、表7に示すように、バラ積みの堆肥ではおおむね2,000~4,000円/tの範囲にあり、平均価格は2,630円/tである¹⁸⁾。散布については12%である。さらに、臭気16%、環境汚染2%、周囲からの苦情2%、ハエの発生4%など、環境問題が24%に上る。現在、堆肥を使っている農家の問題点は、高品質、臭気など環境問題、散布の3つに集約される。

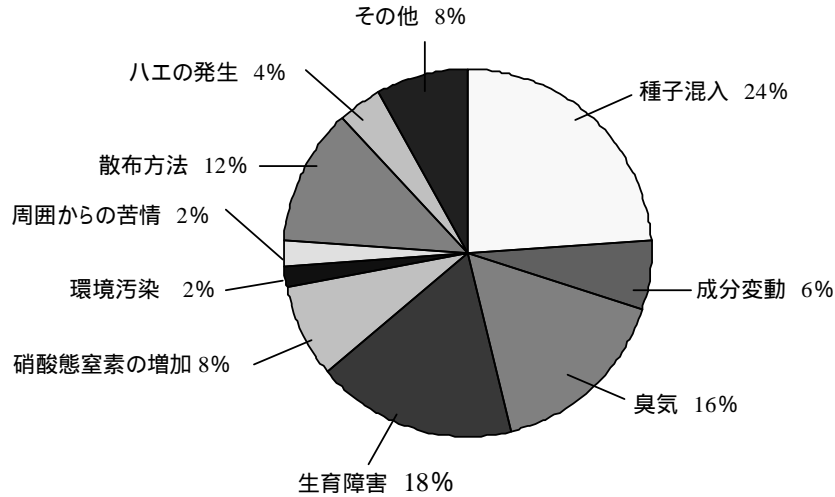


図 12 家畜ふん堆肥を利用している耕種農家の利用上の問題点¹⁷⁾

表 7 個人へ販売された家畜排せつ物堆肥の価格別割合¹⁸⁾

出荷形態	出荷別割合	平均価格	価格別割合 %				
			2,000 円未満	2,000 ~ 4,000	4,000 ~ 6,000	6,000 ~ 8,000	8,000 円以上
バラ*	%	円/t					
	86.2	2,630	41.0	38.9	15.2	2.6	2.3
袋詰め**	%	円/10 kg	100 円 未満	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 500	500 円 以上
	13.8	164	22.1	43.5	25.3	8.1	1.0

* : 堆肥をそのままトラックなどに積んだ出荷形態。500 kg 程度の大きな袋に入れ、トラックに積載する場合も含む。

** : 堆肥を袋詰めした出荷形態。通常、10、15、20 kg の袋を使う。

以上から、耕種のニーズは高品質（肥料成分、有害成分など）、低コスト、運搬・散布、環境問題（臭気など）の4つに要約される。また、ハンドリング改善技術としては成型化（ペレット化）が役立つ¹⁹⁾。そして、堆肥流通の促進には、堆肥の品質管理を徹底して品質向上を図ることによって 良質堆肥を生産すること、 堆肥流通を促進する堆肥センター協議会などと連携を密接にすること、 主体的な販売活動を行うことが必要である²⁰⁾。

(2) 肥料成分

表 8 畜種別の堆肥分析値²¹⁾

畜種	試料数	集計方法	水分 %	灰分 %	pH	EC	NH ₄ ⁺ -N mg/kg	全窒素 %	全炭素 %	C/N	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	銅 mg/kg	亜鉛 mg/kg
乳用牛	319	平均	52.3	28.7	8.6	2.4	349	2.2	36.6	17.6	1.8	2.8	4.4	1.5	50	168
		最大	82.9	73.8	9.7	7.7	4971	5.6	46.3	40.8	13.3	7.7	18.8	6.6	906	893
		最小	15.7	10.1	7.0	0.2	5	0.9	17.2	7.0	0.5	0.2	0.7	0.3	5	43
		SD	14.0	11.4	0.6	1.2	469	0.7	6.4	5.2	1.1	1.2	2.2	0.8	72	93
肉用牛	303	平均	52.2	23.3	8.2	2.6	646	2.2	39.3	19.0	2.5	2.7	3.0	1.3	31	149
		最大	76.6	57.7	9.5	6.2	6155	4.1	45.6	39.3	6.7	7.1	33.9	3.8	313	575
		最小	10.5	11.2	5.3	0.3	7	0.9	19.3	9.6	0.5	0.4	0.5	0.1	3	35
		SD	13.0	8.3	0.8	1.2	672	0.6	4.6	5.4	1.2	1.0	2.8	0.6	27	76
豚	144	平均	36.7	30.0	8.3	3.6	1509	3.5	36.5	11.4	5.6	2.7	8.2	2.4	226	606
		最大	72.0	74.2	12.7	7.6	8354	7.2	45.6	26.6	22.7	6.6	49.3	5.5	654	1956
		最小	16.6	10.4	5.5	0.7	14	1.4	20.2	6.0	1.6	0.3	1.8	0.7	45	191
		SD	13.1	9.9	1.1	1.3	1308	1.1	4.7	3.8	2.8	1.1	6.5	1.0	112	332
採卵鶏	129	平均	22.9	50.3	8.9	4.9	1429	2.9	26.2	9.5	6.2	3.6	25.8	2.2	58	435
		最大	58.7	74.5	10.1	14.6	5623	6.2	39.2	21.5	20.9	5.8	53.4	5.1	108	843
		最小	6.4	25.8	7.4	1.1	26	1.4	16.8	4.9	1.7	1.2	1.6	0.3	11	172
		SD	10.2	10.4	0.5	1.5	1098	0.9	4.9	2.8	2.5	1.0	10.3	0.8	17	138
ブイラ	27	平均	33.0	27.5	7.9	5.0	2969	3.8	37.4	10.6	4.2	3.6	8.9	1.9	68	351
		最大	60.1	58.4	9.7	7.6	8339	5.6	43.7	20.1	9.2	7.6	28.0	2.9	114	658
		最小	15.4	15.6	5.8	0.6	11	2.1	21.6	7.3	1.0	1.1	4.2	0.7	31	126
		SD	12.8	11.0	1.1	2.0	2505	1.1	5.6	3.5	1.8	1.4	6.3	0.5	21	138
複数畜種	580	平均	45.6	27.6	8.5	3.1	768	2.5	37.6	16.4	3.2	2.9	6.0	1.5	68	255
		最大	78.8	62.6	9.8	8.0	4814	8.1	53.1	44.3	13.4	7.5	28.3	5.7	414	1213
		最小	5.4	4.7	5.2	0.2	4	0.9	17.4	3.9	0.1	0.2	0.5	0.1	5	19
		SD	14.4	9.2	0.6	1.4	763	0.9	4.8	5.7	1.9	1.1	4.5	0.8	58	165
全体	1502	平均	45.3	29.1	8.5	3.1	826	2.5	36.6	16.0	3.3	2.9	7.0	1.6	71	266
		最大	82.9	74.5	12.7	14.6	8354	8.1	53.1	44.3	22.7	7.7	53.4	6.6	906	1956
		最小	5.4	4.7	5.2	0.2	4	0.9	16.8	3.9	0.1	0.2	0.5	0.1	3	19
		SD	16.0	11.9	0.7	1.5	989	0.9	6.1	5.9	2.2	1.1	7.7	0.8	81	211

SD: 標準偏差

肥料成分濃度に関しては、最近5年間の全国の多数の分析データがあるので、畜種別に整理したものを表8に示す²¹⁾。有機物含量は牛に多く、採卵鶏は灰分が著しく高い。窒素やリンは豚や鶏で高く、牛が低い。重金属に関しては、豚の銅と亜鉛、鶏の亜鉛は高い傾向にある。

酸素消費量(表9)とは、堆肥中に易分解性有機物がどのくらい残っているのかを知る指標であり、新しく導入された測定法である。従来からBODとして測定されていた易分解性有機物の量を把握する方法と同様である。豚と鶏の堆肥には、牛に比べて未分解の有機物が残存している可能性がある。

表9 畜種別の堆肥成分値(その2)²¹⁾

畜種	試料数	集計方法	C/N比	銅 mg/kg	亜鉛 mg/kg	発芽率 %	酸素消費量 μg/g/分
乳用牛	319	平均	17.6	50	168	97.0	1.7
		最大	40.8	906	893	100.0	8.0
		最小	7.0	5	43	70.3	0.0
		標準偏差	5.2	72	93	6.5	1.3
肉用牛	303	平均	19.0	31	149	96.4	1.5
		最大	39.3	313	575	100.0	8.0
		最小	9.6	3	35	70.0	0.0
		標準偏差	5.4	27	76	7.1	1.3
豚	144	平均	11.4	226	606	91.0	2.7
		最大	26.6	654	1956	100.0	16.0
		最小	6.0	45	191	4.4	0.0
		標準偏差	3.8	112	332	19.5	3.1
採卵鶏	129	平均	9.5	58	435	90.8	3.9
		最大	21.5	108	843	100.0	14.0
		最小	4.9	11	172	58.3	1.0
		標準偏差	2.8	17	138	17.6	3.3
ブロイラー	27	平均	10.6	68	351	67.5	6.2
		最大	20.1	114	658	100.0	22.0
		最小	7.3	31	126	0.0	0.0
		標準偏差	3.5	21	138	41.3	7.2
全体	1502	平均	16.0	71	266	94.2	2.2
		最大	44.3	906	1956	100.0	23.0
		最小	3.9	3	19	0.0	0.0
		標準偏差	5.9	81	211	14.5	2.6

また、1970年代からの従来の分析値と比較すると、最近の堆肥は以前の堆肥に比べて水分が低く、肥料成分濃度が高い傾向にある(表10)²²⁾。したがって、堆肥の特性や成分に応じて、施用方法を考慮する必要がある。

表10 オガクズ入り堆肥の成分組成について既存データとの比較²²⁾

	畜種	試料数	水分 %	全窒素 %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	CaO %	MgO %	全炭素 %	C/N 比
草地試験場 (1978)	牛	151	65.5	1.7	1.8	2.0	3.0	0.7	39.9	23.3
	豚	227	57.2	2.2	3.3	1.5	3.0	1.0	39.9	18.0
農蚕園芸局 (1982)	牛	292	65.4	1.7	1.6	1.7	1.9	0.8	38.5	24.6
	豚	173	55.7	2.1	3.4	1.8	3.4	1.1	36.5	19.3
農業研究センター (1996)	牛	130	57.8	1.9	2.3	2.6	2.7	1.1	37.0	21.0
	豚	44	43.8	2.5	5.4	2.6	5.1	1.6	30.7	14.2
畜産環境技術研究所 (2005)	牛	146	52.2	2.2	2.4	2.8	3.5	1.5	39.1	18.8
	豚	14	41.8	3.2	5.3	3.0	6.1	2.2	37.6	12.8

(3) 有害成分

堆積方式の堆肥化では、図13の1週間目の堆積物のように、中心下部に嫌気部分が出現し、そこには作物の生長にとって有害物質であるフェノール酸や、悪臭物質の低級脂肪酸が顕著に蓄積した²³⁾。このような嫌気性条件では有機物の分解率も低く、腐熟の進行も遅延する。したがって、堆肥化においては好気性条件を保つことで、有害物質や悪臭物質を分解し、腐熟を促進することが重要である。

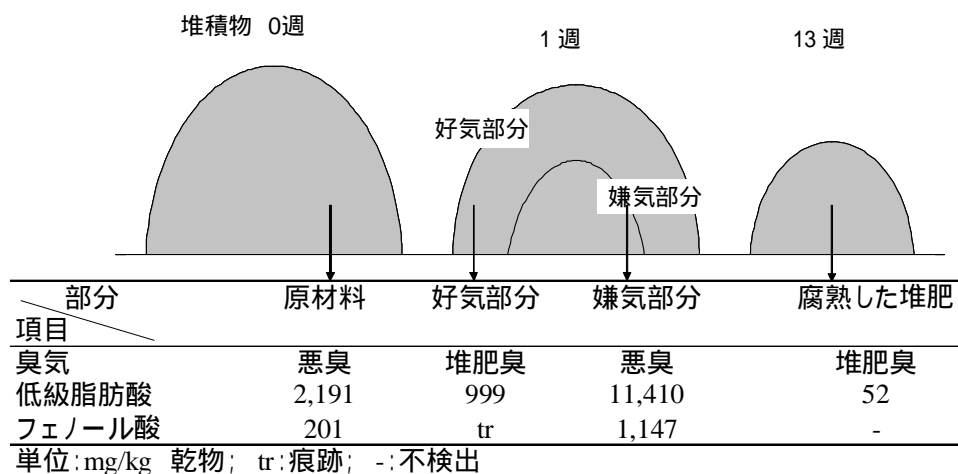


図13 堆肥化過程で発生した嫌気部分の成分²³⁾

家畜ふん尿中には、水銀、ヒ素、カドミウムといった肥料取締法に関連する重金属の含有量は極めて少ない。しかし、豚の飼料中には、成長促進などを謳って銅と亜鉛が添加されており、それらはふんの中に排泄される²⁴⁾。例えば、哺乳期子豚(体重 30 kg 以下)では、銅の栄養要求量が 5 ppm(5 mg/kg)にもかかわらず、飼料業界の自主規制上限値は 125 ppmと 25 倍量になっている(表 11)。そのため、銅含有量の多い豚ふん堆肥が散見される(表 9)²¹⁾。

表 11 豚用飼料への銅と亜鉛の自主規制上限添加量²⁴⁾

飼料の用途	上限添加量(ppm)	
	銅	亜鉛
哺乳期子豚育成用 (体重 30 kg 以下)	125	120
子豚育成用 (体重 30 ~ 70 kg)	45	55
肉豚肥育用 (体重 70 kg 以上)	10	50
種豚用 (体重 60 kg 以上)	10	50

注：これらの数値は添加の限量であって、元々飼料には原料由来の銅 3 ~ 5ppm、亜鉛 20 ~ 30ppm 程度が含まれる。

家畜に投与された動物医薬品が排泄され、堆肥中に残留し、作物に移行する可能性がある。比較的良好に使われているオキシテトラサイクリン、アンピシリン、スルファジメトキシンの3種類の薬

表 12 乳牛ふん堆肥化中の抗生物質濃度の変化²⁵⁾

抗生物質	対照区		投与区	
	切返・採取日	濃度	切返・採取日	濃度
オキシテ ラサイクリン	0日目	<0.1µg/g	0日目	12.64µg/g
	15	<0.1µg/g	15	2.72µg/g
	60	<0.1µg/g	60	1.17µg/g
	135	<0.1µg/g	135	1.12µg/g
アンピシリ ン	0日目	<0.03µg/g	0日目	<0.03µg/g
	30	<0.03µg/g	30	<0.03µg/g
	60	<0.03µg/g	60	<0.03µg/g
スルファジ メトキシン	0日目	<0.1µg/g	0日目	11.7µg/g
	30	<0.1µg/g	30	1.91µg/g
	60	<0.1µg/g	60	0.84µg/g
	150	<0.1µg/g	150	0.15µg/g

剤を牛に投与し、ふん尿と敷料混合物を堆肥化して、その堆肥で作物を栽培した。その結果、薬剤は堆肥化過程で 90 ~ 100% 分解し(表 12)、作物への移行は検出されなかった²⁵⁾。

(4) 臭気

1) アンモニアの排出を低減する微生物

悪臭発生防除を謳った各種添加資材(微生物資材等)が市販されているが、その効果には賛否両論あって確定したものとはなっていないのが現状である^{26,27)}。微生物学的な見地から試験研究を深める必要がある分野である。

最近、アンモニアを低減する微生物を堆肥からスクリーニングし、その効果を明らかにすることができた²⁸⁾。スクリーニングのコンセプトは、高温細菌、好気性、アンモニウム態窒素に高い耐性を持ち、アンモニアを同化する能力の高い微生物の4点である。分離された菌は、*Bacillus thermophaericus* と *B. pallidus* に近縁の高温性の新規な *Bacillus* 属細菌であり、TAT105 と命名した。堆肥化過程に TAT105 を添加したところ、排気中のアンモニアガス濃度を 20～40% 低減させることができた(図 14)。

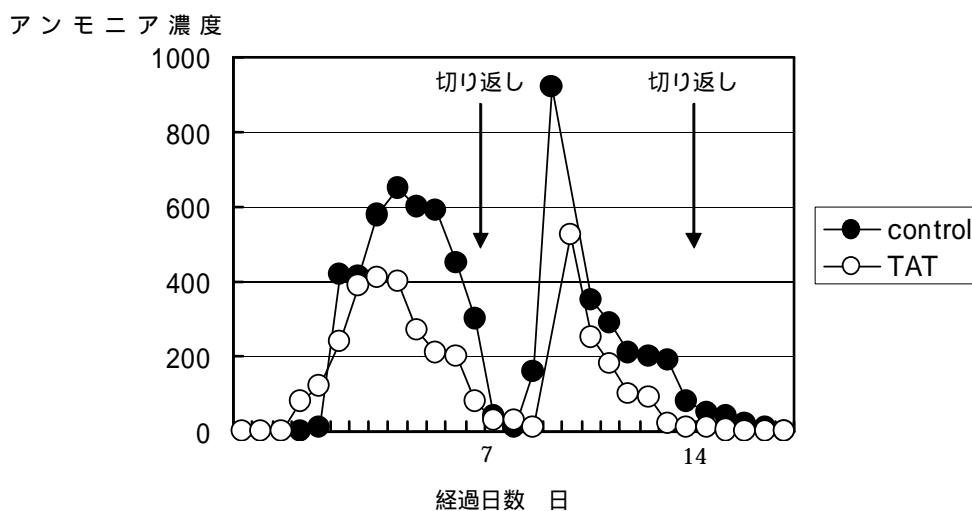


図 14 排気中のアンモニア濃度の推移²⁸⁾

2) 吸引式堆肥化でアンモニアを資源に

堆肥化の通気装置には、圧送式と吸引式があり、古くはアメリカ農務省の研究所とラトガース大学の論争がよく知られているが、現在では圧送式が圧倒的に多い。圧送式の問題点は、堆肥表面からのアンモニアの揮散が多いことである。そこで、通気を吸引式とし、アンモニアの揮散を最小限にしようとする実験が行われた(図 15)²⁹⁾。吸引式でも圧送式とほぼ同様の発酵が可能であり、堆肥の品質も同等であるが、吸引式の表面からのアンモニア揮散はごくわずか

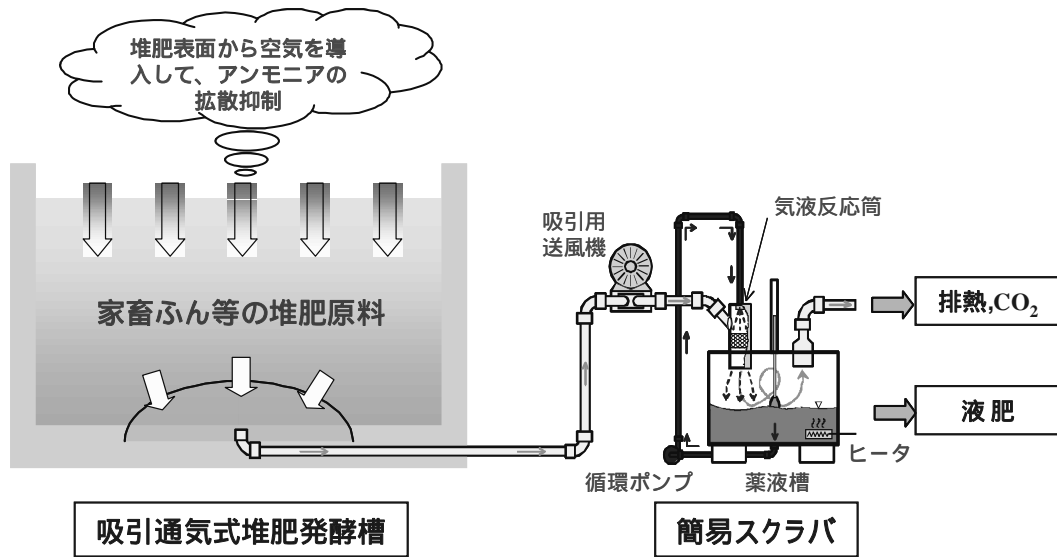


図 15 吸引通気式堆肥化システムと簡易スクラバ²⁹⁾

であった³⁰⁾。ただし、吸引ドレインの中には高濃度のアンモニアが溶け込んでいるので、それを回収することができる。さらに、このように肥料成分が明らかな副産物(アンモニア回収物など)を堆肥に添加することによって、肥料成分の安定した堆肥の調製が試みられている。

3) 完熟堆肥をアンモニアで窒素成分富化

いっぽう、圧送式の堆肥化装置において、発生したアンモニアを完熟堆肥に吸着させて脱臭するとともに、堆肥の窒素濃度を富化させることが行われている(図 16)³¹⁾。堆肥化初期の1

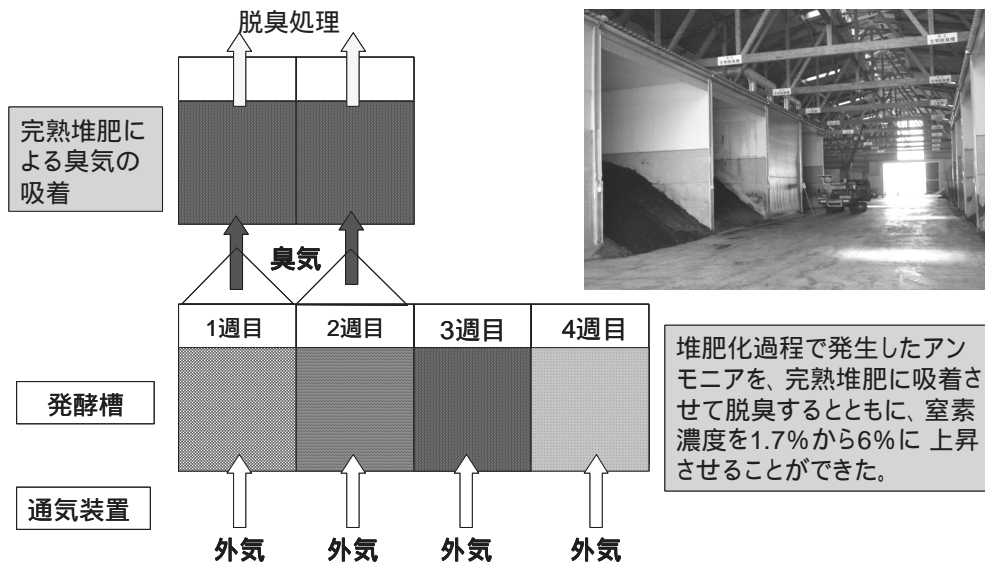


図 16 堆肥による脱臭システムと窒素成分の富化³¹⁾

～2週間はアンモニアの発生量が多く、悪臭対策が必要である。また、完熟した堆肥は堆肥化過程におけるアンモニアの損失があり、肥効性の高い堆肥を調製するためには窒素を富化させることが有効である。このプロセスによって完熟堆肥の窒素を1.7%から6%に上昇させることができた。

4) アンモニアを堆肥の中にリン酸塩で捉える

家畜ふん尿中のリン酸塩は、アルカリ性条件下でアンモニウムイオンとマグネシウムイオンと反応してリン酸マグネシウムアンモニウム(MAP)を形成する。このMAPは難溶性であり汚水から沈殿分離することができることから、豚舎汚水のリン除去の研究が進められている³²⁾。このMAP反応を堆肥化に応用し、堆肥化からのアンモニアの発生低減が研究されている。図17に示すように、豚ふんの堆肥化において、マグネシウム塩として苦汁を用いて堆肥中にMAPを生成させ、アンモニアの発生を低減することができた³³⁾。

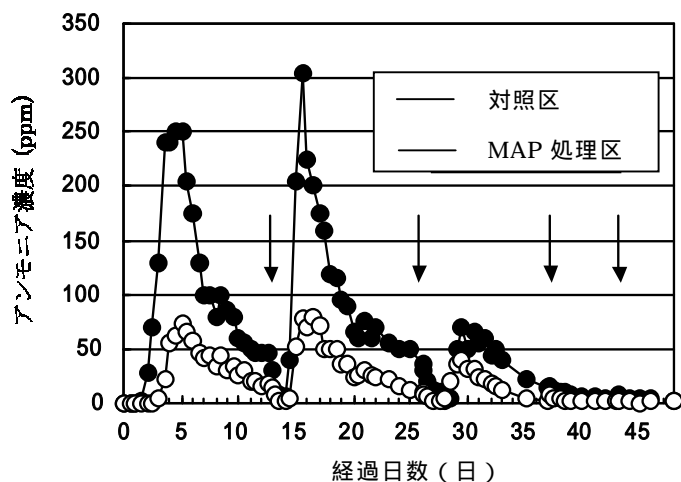


図17 MAP処理による堆肥によるアンモニア発生濃度の推移³³⁾

(図中の→矢印は切返し操作を示す。)

(5) 温室効果ガス

畜舎内に貯留した家畜ふん尿やその処理過程では、温室効果ガスの発生があり³⁴⁾、その発生パターンや量は処理条件によって異なる可能性がある³⁵⁾。例えば堆肥化過程では、アンモニアの酸化にともなって温室効果ガスの亜酸化窒素が発生する。亜酸化窒素は二酸化炭素の約300倍の温室効果を持つ環境負荷ガスであり、その低減は地球温暖化防止にとって重要な課題である。亜酸化窒素ガスの発生量は堆肥中の亜硝酸塩が多くなると、それだけ多くなる。そこで、亜硝酸塩を酸化分解する微生物(亜硝酸酸化細菌)を堆肥に添加して、亜酸化窒素ガスの発生量を80%も減少させることができた³⁶⁾。

おわりに

有機性廃棄物を堆肥化する目的は、第1に廃棄物の汚物感や悪臭をなくし、病原菌や寄生虫などを死滅させることによって、廃棄物を取り扱う者にとって良質で安全な有機質肥料資源に変換することである。第2には、土壌や作物にとって良質な有機質肥料の堆肥を生産することである。すなわち生の廃棄物中の有機物を十分に腐熟させ、有害物質や雑草の種子などが分解・死滅し、肥料成分をほどよく含む有機質肥料を製造し、堆肥の利用者に供給することである。そして、第3には、有機資源リサイクルによって資源循環型社会に貢献できることである。大量生産・大量消費・大量廃棄から転換し、資源循環型の持続的産業へと発展する時を迎え、堆肥化技術は重要な技術となっている。食品廃棄物(食品循環資源)の資源化について、最上位に食品(Food)としての再利用があり、食品利用がだめならば、次に飼料(Feed)利用があり、それがだめならば燃料(Fuel)利用、または肥料(Fertilizer)利用の4Fの図式が考えられる(図18)。この図式をみると、堆肥化が一番下位にあるように見えるが、堆肥化(肥料利用)や焼却(燃料利用)なしには、4Fが完結しないケースがほとんどである。堆肥化は資源循環を前提とした資源化システム全体を支えるために、欠かせない基盤となっている。

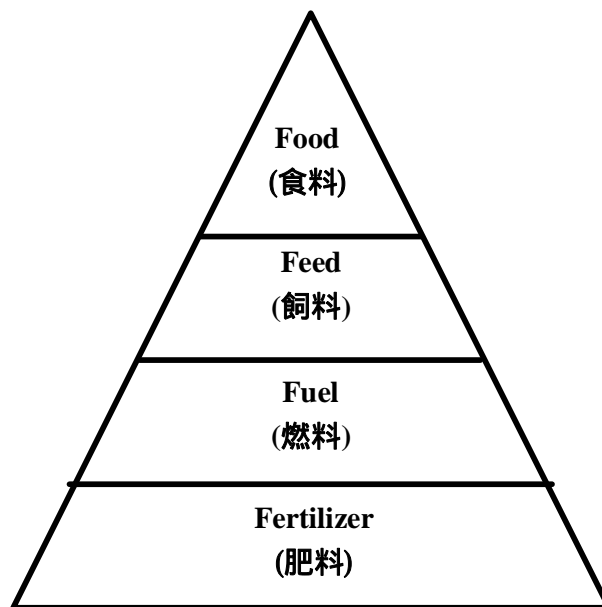


図 18 食品循環資源を資源化するときの 4F

6. 参考文献

- 1) 有機質資源化推進会議(1997)有機廃棄物資源化大事典. 農山漁村文化協会, 東京 p.189 ~ 348.
- 2) 中央畜産会(1988)昭和 62 年度未利用資源飼料化特別推進事業報告書. 中央畜産会, 東京 p.11 ~ 13.
- 3) 渡辺篤二(1994)大豆加工食品副産物(おから)の高度利用技術の開発. 農林水産研究ジャーナル, 17(8), 6 ~ 11
- 4) 藤原俊六郎・加藤哲郎(1990)ベランダ・庭先でコンパクト堆肥. 農山漁村文化協会, p.152 ~ 153.
- 5) 建設産業調査会(1993)廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック. 建設産業調査会, p.317 ~ 877.
- 6) 羽賀清典(1998)堆肥生産による家畜ふん尿の肥料資源化. 肥料, 80, 42 ~ 57.
- 7) 鈴木あや子(2008)下水道における資源・エネルギー循環の形成に向けた下水汚泥の有効利用について. 下水道協会誌, 45(544), 4 ~ 6.
- 8) 生物系廃棄物リサイクル研究会(1999)生物系廃棄物のリサイクルの現状と課題—循環型経済社会へのナビゲーターとして—, 85pp.
- 9) 中央畜産会(2000)堆肥化施設設計マニュアル. 246pp.
- 10) 羽賀清典(1999)小型堆肥化実験装置による堆肥化条件の検討. 圃場と土壌, 31(10・11), 30 ~ 34.
- 11) Hanajima, D., Kuroda, K., Fukumoto, Y. and Haga, K. (2006) Effect of addition of organic waste on reduction of *Escherichia coli* during cattle feces composting under high-moisture condition. *Bioresource Technol.*, 97, 1626 ~ 1630.
- 12) Golueke, C. G. (1972) Composting. Rodale Press, Inc., Emmause, PA, USA, 110pp.
- 13) Nishida, T., Kurosawa, S., Shibata, S. and Kitahara, N. (1999) Effect of duration of heat exposure on upland weed seed viability. *J. Weed Sci. Technol.*, 44, 59 ~ 66.
- 14) 農林水産省統計情報部(2000)家畜排せつ物等の堆肥化施設の設置・運営状況調査報告書. 農林統計協会, 東京, p.12.
- 15) 農林水産省 (2007) 畜産環境問題の現状と課題 (<http://www.maff.go.jp/chikukan/index.html>)
- 16) 猪俣敏郎(1998)堆肥施用の現状と今後の利用促進. 日本土壌協会, 東京, 12pp.
- 17) 志賀一一・藤田秀保・徳永隆一・吉原大二(2001)酪農における家畜ふん尿処理と地域利用. 酪農総合研究所, 札幌, 130pp.
- 18) 農林水産省統計情報部(2002)家畜飼養者による堆肥化利用への取組状況調査報告書. 農林統計協会, 東京, p.34 ~ 39.
- 19) 原 正之(1998)家畜ふん堆肥の成型技術と施肥技術の動向. 農業技術, 53, 468 ~ 472.
- 20) 樽本祐助(2004)堆肥流通促進のための方策. ふん尿処理ハンドブック(羽賀清典監修). チクサン出版社, 東京, p.116 ~ 123.
- 21) 古谷 修(2006)全国の堆肥センターで生産された家畜ふん堆肥の実態調査(1). 畜産の研究, 59, 1048 ~ 1054
- 22) 古谷 修(2006)全国の堆肥センターで生産された家畜ふん堆肥の実態調査(2). 畜産の研究, 59, 1181 ~ 1183
- 23) Haga, K., Osada, T., Harada, Y., Izawa, T. and Nishimura, Y. (1998) Constituents of the anaerobic portion

- occurring in the pile during composting of cattle wastes. *J.Soc.Agric.Struct., Jpn.*, **29**, 125 ~ 130.
- 24) 高田良二 (2002) 豚ふん堆肥中の銅・亜鉛含量はなぜ高いのか. 畜産環境情報, **17**, 7 ~ 11 .
 - 25) 山本誠二 (2003) 家畜より排泄された動物用医薬品などの堆肥中での消長と植物体への移行残留, 畜産技術, **578**, 5 ~ 8.
 - 26) 農林水産バイオリサイクル研究 畜産エコチーム 微生物サブチーム (2005) 畜産で利用される臭気対策資材の効果判定法, p.1 ~ 50.
 - 27) 黒田和孝 (2006) 養豚で利用される臭気対策資材, 日本養豚学会誌, **43**, 143 ~ 167
 - 28) Kuroda, K., Hanajima, D. Fukumoto, Y. Suzuki, K., Kawamoto, S. Shima, J. and Haga, K. (2004) Isolation of thermophilic ammonium-tolerant bacterium and its application to reduce ammonia emission during composting of animal wastes. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, **68**, 286 ~ 292.
 - 29) 阿部佳之・福重直輝・伊藤信雄・加茂幹男 (2003) 吸引通気式堆肥化処理技術の開発 (第1報) - 吸引通気式堆肥化の特徴 - . 農業施設, **33**, 255 ~ 261.
 - 30) 阿部佳之・福重直輝・伊藤信雄・加茂幹男 (2003) 吸引通気式堆肥化処理技術の開発 (第2報) - 吸引通気式堆肥化におけるアンモニア回収の可能性 - . 農業施設, **34**, 21 ~ 30.
 - 31) 田中章浩 (2006) 堆肥吸着による家畜ふん尿堆肥の悪臭防止と窒素回収技術. 畜産技術, **611**, 27 ~ 30.
 - 32) Suzuki, K., Tanaka, Y., Kuroda, K., Hanajima, D., Fukumoto, Y., Yasuda, T. and Waki, T. (2007) Removal and recovery of phosphorous from swine wastewater by demonstration crystallization reactor and struvite accumulation device. *Bioresource Technol.*, **98**, 1573 ~ 1578
 - 33) 黒田和孝・花島大・福本泰之・安田知子・鈴木一好・和木美代子・代永道裕 (2007) MAP 形成による家畜ふんの堆肥化からのアンモニア発生低減. 畜産草地研究成果情報 **No.6**
 - 34) 長田 隆 (2002) 豚のふん尿処理に伴う環境負荷ガスの発生. 畜産草地研究所研究報告, **2**, 15 ~ 62.
 - 35) 羽賀清典 (2002) 家畜排泄物からのメタン及び亜酸化窒素の発生と制御. 畜産における温室効果ガスの発生制御(総集編), 畜産技術協会, p. 84 ~ 110 .
 - 36) Fukumoto, Y., Suzuki, K., Osada, T., Kuroda, T., Hanajima, D., Yasuda, T. and Haga, K. (2006) Reduction of nitrous oxide emission from pig manure composting by addition of nitrite-oxidizing bacteria. *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 6787 ~ 6791.