

家畜改良センター 技術マニュアル 7

堆肥化処理の理論と実践Ⅱ

独立行政法人 家畜改良センター

はじめに

平成10年に家畜改良センター技術マニュアルの第一弾として「堆肥化処理の理論と実践」が発行された。その後、「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が施行されたことにより、家畜排せつ物の堆肥処理の重要性が脚光を浴びてきたところである。

一方、初版の「堆肥化処理の理論と実践」の作成後、4年と間がないこと、初版の内容について好評を博していることから、今回のマニュアル作成には大いに躊躇したところである。

しかしながら、前述のように「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が施行されたことにより、状況変化が多少見られたことから本稿を起こしたものであるが、基本的には初版本の延長線上にあるということを御了知願いたい。

そういう意味でも、「堆肥化とは、堆肥の山を何とかしようというのではなく、堆肥の山の中に生きている微生物を何とかしようという技術である」ということは、本稿でも同様であり「堆肥は生きている」ということは、全くマニュアルのⅠと同様であるということを御認識願えれば幸いである。

目 次

堆肥化処理の理論と実践Ⅱ

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の概要	5
堆肥化技術に関する主な用語	7
家畜ふん尿の排せつ量	9
堆肥化の目的	10
堆肥化の条件	13
堆肥化における有機物の化学的変化	15
堆肥化における微生物の役割	17
堆肥化を促進する方法	19
切り返し作業方法	20
腐熟度判定法	23
家畜ふん堆肥の利用	26
牛ふんの性状	32
堆肥発酵処理施設における牛ふん堆肥調整技術	33
ある農協における堆肥発酵処理施設の導入計画例	36

(参考) 家畜排せつ物の適正化及び利用の促進に関する法律

堆肥化処理の理論と実践

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の概要

1. 家畜排せつ物の管理の適正化のための措置

管理基準の遵守

(1) 農林水産大臣による家畜排せつ物の処理・保管施設の構造基準等を内容とする管理基準の策定

1) 管理基準

ア 施設の構造に関する基準

- ・ふんの処理・保管施設は、床をコンクリートその他の不浸透性材料で築造し、適当な覆いおよび側壁を有するものとする
- ・尿やスラリーの処理・保管施設は、コンクリートその他の不浸透性材料で築造した構造の貯留槽とする

イ 家畜排せつ物の管理の方法に関する基準

- ・家畜排せつ物は、施設に置いて管理すること
- ・施設に破損があるときは、遅滞なく修繕を行うこと
- ・送風装置等を設置している場合には、その維持管理を適切に行うこと等

(2) 畜産業を営む者による管理基準に即した家畜排せつ物の管理

(3) 都道府県知事による必要な指導・助言、勧告・命令の実施

2) 小規模畜産農家については、管理基準は適用しない

- ・牛10頭未満
- ・豚100頭未満
- ・鶏2000羽未満
- ・馬10頭未満

3) 指導・助言、勧告・命令の流れ

- ・まず、自発的な管理の適正化を促すために指導・助言を行い、
- ・なお、管理基準に違反している者に対して、勧告を行い、更に強く自発的な管理基準の遵守を促し、
- ・それでも、管理基準に従わない者に対して命令を行うことが出来る。

(4) 管理基準の適用については、必要な経過期間（最大で5年間）を設定

2. 家畜排せつ物の利用の促進のための措置

(1) 基本方針の策定

農林水産大臣による家畜排せつ物の利用の促進に関する基本方針の策定

(2) 都道府県計画の作成

都道府県による地域の実情に即応した施設整備の目標等を内容とした計画の作成

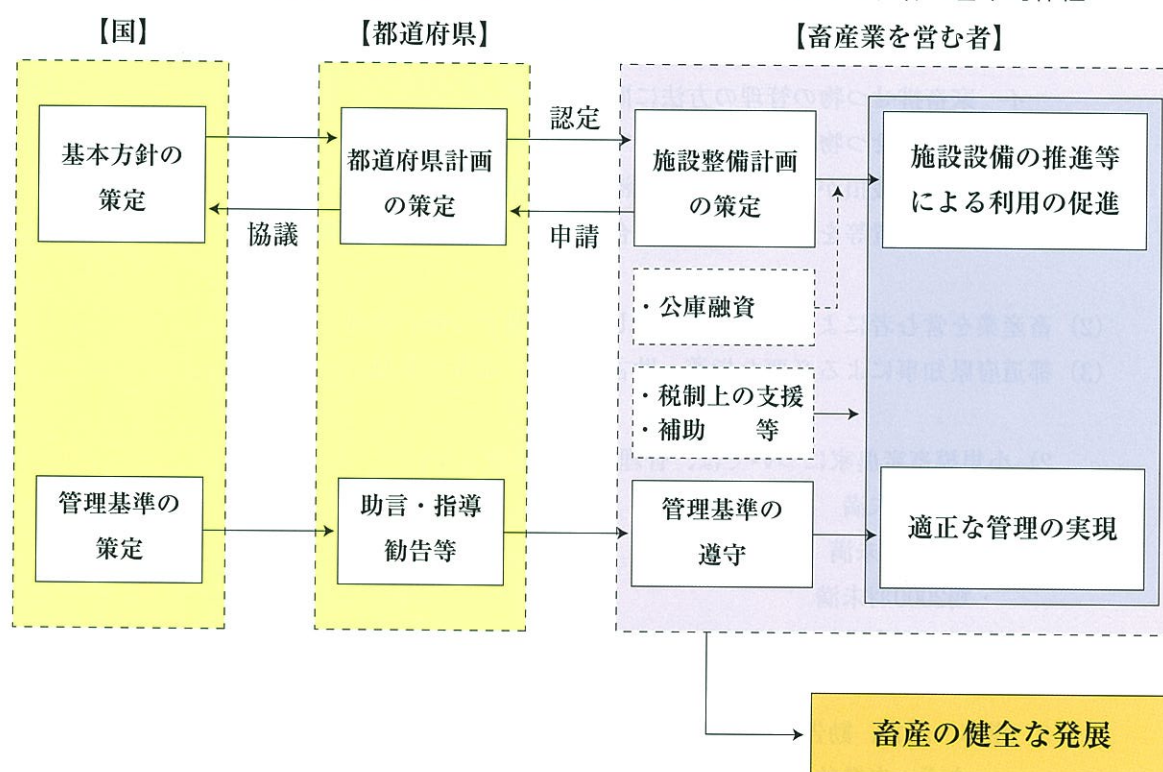
(3) 金融上の支援措置

ア. 畜産業を営む者が作成する施設整備計画の認定（都道府県知事）

イ. アの認定を受けた者に対する農林漁業金融公庫の融資

（施設の取得等に必要な資金のほか、施設・機械の貸借料の全額一括支払い等に必要な資金を融資）

家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律の基本的枠組み



参考：家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律について「畜産環境整備機構」

堆肥化技術に関する主な用語

堆肥化に関しては、様々な専門用語が用いられている。しかし、一部の用語は、それらの持つ意味がかなりあいまいであり、その受け取り方も人によって様々である。

そこで、ここではこれらの用語について、次に示すような定義づけを行った。

【堆 肥】

厳密には、家畜ふん尿などの動物性資材を発酵処理したものを「厩肥」、稲わらなどの植物性資材を発酵処理したものを「堆肥」という。しかし、実際には動物性資材と植物性資材を混合して処理する場合が多く、「厩肥」と「堆肥」の区分は難しい。

ここでは、原料資材が何であろうと発酵処理したものは全て「堆肥」とする。

【堆肥化】

「堆肥化」とは地力の維持・増強を目的として有機質資材を農業利用する場合に、あらかじめ好気性微生物の作用によりある到達目標まで分解させることである。

なお、この場合の到達目標とは、有機質資材を土壤に施用しても作物に生育障害を起こさないで地力を維持し、作物の生産性を高めるような成分組成を持つようにすることとする。

【腐熟度】

堆肥化の目標に到達するまでの様々な腐熟の程度を「腐熟度」という用語で表すこととする。

【完 熟】

堆肥化の到達目標とは、極めて長期間の処理を行って有機物の大部分が分解され、ほとんど不活性に近い状態にすることではなく、上記のように、作物に生育障害を起こさないで地力を維持し、作物の生産性を高めるような成分組成を持つようにすることまでである。従って、ここでいう「完熟」とは、この堆肥化の到達目標に達した時点を意味することとする。

【好氣的・嫌氣的】

酸素の存在・不在による状態を意味する。「好氣的」とは、酸素が存在する状態であり、「嫌氣的」とは酸素が存在しない状態である。

また、「好気性微生物」とは酸素が存在する状態で働く微生物であり、「嫌気性微生物」とは酸素が存在しない状態で働く微生物である。

【微生物】

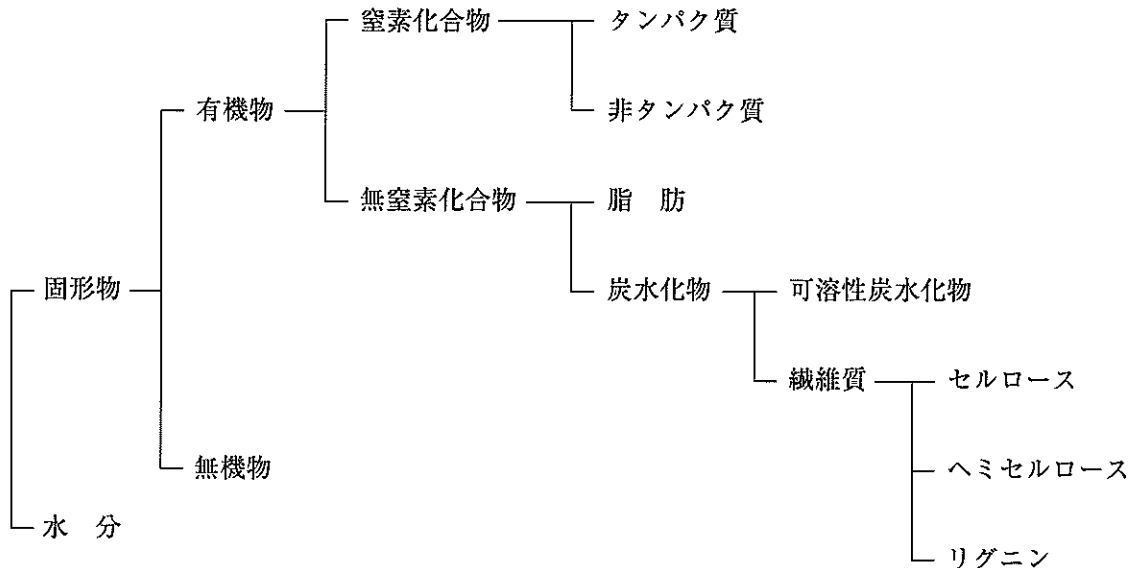
ウイルス、マイコプラズマ、細菌、放線菌、糸状菌などの微小な生物を総称して「微生物」という。

ウイルス、マイコプラズマ、細菌、放線菌、糸状菌の順に構造が複雑になるとともに形状も大きくなる。

なお、堆肥化で重要な役割を担っているのは、好氣的条件で繁殖する細菌、放線菌及び糸状菌である。

【有機物・無機物】

固形成分のうち、炭素と化合しているものを「有機物」、炭素と化合していないものを「無機物」という。また、有機物は窒素と化合しているか否かで窒素化合物と非窒素化合物に分類され、さらにタンパク質、炭水化物等に分類される。



【C/N比】

堆肥化は微生物の働きによって行うものであり、微生物が活動するためのエネルギー源となる成分（炭素；C）や微生物が増殖するために菌体を構成する成分（窒素；N）が必要である。

微生物の栄養源となる資材中の炭素と窒素の割合を「C/N比」という。「C/N比」は微生物による窒素の有機化の大きな要因であり、一般に微生物はC：N＝20：1の割合で体内に取り込み利用するといわれている。従って、微生物が利用できる資材中の成分のC/N比が20以上であれば（窒素に比べて炭素が多い場合）成分中の窒素は全て微生物の菌体に取り込まれ、さらに足りない窒素を外部に求めることとなる。一方、微生物が利用できる資材中の成分のC/N比が20以下であれば（炭素に比べて窒素が多い場合）成分中の窒素のうち一部は微生物の菌体に取り込まれるが、取り込みきれない窒素が無機態窒素として発生する。

なお、主な原料資材のC/N比の目安は、次のとおりである。（ただし、資材中には微生物が利用しやすい易分解性部分と利用しづらい難分解性部分があるので注意を要する。）

牛 糞	=	15～30
豚 糞	=	10～15
鶏 糞	=	10以下
稲 わ ら	=	50～70
麦 稈	=	70～100
籾 殻	=	60～72
オガクズ	=	200～1500

家畜ふん尿の排せつ量

堆肥化を計画的に行う場合、あらかじめ

- ①どの程度の量の原料資材（家畜ふん尿、敷料、副資材等）が発生するのか。
- ②堆肥化の過程でどの程度の減耗（水分の蒸散、有機物の分解等）が見込めるのか。
- ③どの時期にどの程度の堆肥の利用（圃場還元、戻し堆肥等）が見込めるのか。

を十分に考えておく必要がある。

特に、施設整備や機械導入をしようとする場合、この点を十分に検討しておかなければ設備不足や過剰投資を招く恐れがあるので注意する必要がある。

一般に家畜のふん尿の発生量については、その把握が困難なことから、下表のような数値が推定の算出根拠として用いられている。しかし、最近では家畜の大型化や飼料効率の向上などから必ずしもこの数値が当てはまるわけではない。あくまでも参考程度に止めておいた方がよいと思われる。

表1 家畜のふん尿排せつ量 （単位：kg）

畜 種	体 重	ふん（日・頭羽）			尿 （日・頭羽）	合 計 （日・頭羽）	合 計 （日・頭羽）
		乾物量	水 分	生 重			
乳用牛	搾乳牛 ¹⁾	700kg	7.5 kg	86%	54 kg	17 kg	71 kg
	搾乳牛 ²⁾	700kg	6.8 kg	86%	50 kg	15 kg	65 kg
	搾乳牛 ³⁾	600～700kg	5.7 kg	84%	36 kg	14 kg	50 kg
	乾乳牛	550～650kg	4.2 kg	80%	21 kg	6 kg	27 kg
	育成牛	40～500kg	3.6 kg	78%	16 kg	7 kg	23 kg
肉用牛	2歳未満	200～400kg	3.6 kg	78%	16 kg	7 kg	23 kg
	2歳以上	400～700kg	4.0 kg	78%	18 kg	7 kg	25 kg
	乳用種	250～700kg	3.6 kg	78%	16 kg	7 kg	23 kg
豚	子豚	3～30kg	0.15kg	72%	0.5 kg	1.0 kg	1.5 kg
	豚育豚	30～110kg	0.53kg	72%	1.9 kg	3.8 kg	5.7 kg
	繁殖豚	150～300kg	0.83kg	72%	3.0 kg	7.0 kg	10.0 kg
採卵鶏	雛	—	13 g	70%	43 g	—	43 g
	成鶏 ⁴⁾	—	30 g	70%	100 g	—	100 g
	成鶏 ⁵⁾	—	30 g	60%	75 g	—	75 g
肉 鶏	ブロイラー	—	26 g	70%	87 g	—	87 g
	ブロイラー ⁶⁾	—	26 g	40%	43 g	—	43 g

- 注) 1) 生乳生産量が年間10,000kg以上の場合
 2) 生乳生産量が年間10,000kg程度の場合
 3) 生乳生産量が年間7,600kg程度の場合
 4) 低床式鶏舎のふんの場合
 5) 高床式鶏舎のふんの場合
 6) 床暖房式のウィンドレス鶏舎のふんの場合

参考：堆肥化施設設計マニュアル「中央畜産会」

堆肥化の目的

堆肥化には多くの目的があるが、それらは次の三つに大別できる。

1. 作業者にとって取り扱いやすいものにする

堆肥化の第一の目的は、水分低下及び臭気成分の分解により、家畜ふんを作業者にとって取り扱いやすいものにするることである。

家畜ふんは悪臭が強く、粘性が高く汚物感があり、作業者にとって極めて取り扱いがたいものであるが、堆肥化すれば悪臭や汚物感がなくなり、取り扱いやすい性状になる。

2. 衛生面で安全なものにするとともに雑草の種子等を死滅させる

堆肥化の第二の目的は、発酵温度により衛生面で安全なものにするとともに雑草の種子等を死滅させることである。

家畜ふんには病原菌、寄生虫の卵、雑草の種子などが含まれることがあるが、適正な堆肥処理を行えば発酵熱によって温度が上昇し、これらを死滅させることができる。

表2は、病原菌や寄生虫が死滅する温度と時間を示している。いずれも堆肥化による発酵温度（約70℃）で短期間に死滅させることができる。

また、表3は堆肥化中の牛ふん堆肥に雑草種子を埋設し、一定期間後の発芽率を調べた結果である。50℃未満の場合では大部分の種子が生き残ってしまうが、60℃で2日間埋設すれば全て死滅させることができる。

表2 病原菌及び寄生虫の死滅温度

種 類	温度(℃)	時間(分)
チ フ ス 菌	55～60	30
サルモネラ菌	56	60
	60	15
ヨ ー ネ 菌	60	30～60
	65	5
赤 痢 菌	55	60
ブドウ球菌	50	10
連鎖球菌	54	10
結 核 菌	66	15～20
ジフテリア菌	55	45
ブルセラ菌	61	3
条 虫	55～60	5
回 虫	60	15～20

表3 堆肥埋設後の雑草種子の発芽率(%)

	50℃未満	60℃ 2日間
メ ヒ シ バ	96	0
ノ ビ エ	72	0
カヤツリグサ	56	0
シ ロ ザ	26	0
オオイヌタデ	8	0
スベリヒユ	85	0
イヌビユ	68	0
エノキグサ	7	0
クワクサ	26	0

参考1.有機性汚泥の緑農地利用「日本土壌肥料学会」

2.農業技術大系畜産編8（環境対策）「農山漁村文化協会」

3. 作物にとって安全なものにする

堆肥化の第三の目的は、あらかじめ易分解性物質を分解・安定化させるとともに生育阻害物質を分解して作物にとって安全なものにすることである。

未熟な堆肥を施用した場合に生じる障害の現れ方は、堆肥の原料となる有機質資材の種類によって大きく異なる。一般に家畜ふんから堆肥を製造する場合、混合する副資材の有無及び種類によって、①家畜ふんだけで製造する堆肥、②家畜ふんに稲わら、麦稈、牧草等の繊維質作物資材を混合して製造する堆肥、③家畜ふんにオガクズや樹皮（パーク）等の木質資材を混合して製造する堆肥の三つに大別することができる。

従って、家畜ふんを製造する場合、①家畜ふん、②繊維質作物資材、③木質資材を原料資材の代表として考えればよい。

これらの原料資材から製造された堆肥を未熟なまま土壤に施用した場合の障害の現れ方及び堆肥化の目的は、次のように整理できる。

(1) 家畜ふん

家畜ふんは一般的に窒素含有量が高く（C/N比が低く）、極めて分解されやすい資材である。これを堆肥化せずに施用すると、家畜ふん中に多量に含まれる各種の易分解性有機物が急激に分解し、有機態窒素の分解が激しく起こり、土壤中が無機態窒素の濃度が高くなる。特にアンモニウム態窒素の濃度が高くなると作物が生育阻害を起こすことが知られている。

また、土壤中で活発な微生物活動が起こって易分解性有機物が急激に分解される際に、酸素が急速かつ大量に消費され、土壤中は還元状態になる。このような状態では、嫌気性微生物による有機物の分解が生じる結果、有機酸などの有害物質が生成され、作物の発芽を阻害したり生育を抑制することが知られている。

したがって、家畜ふんそのものの堆肥化の目的は、施用した後に土壤中で急激な有機物の分解が生じないように、家畜ふん中の易分解性有機物をあらかじめ分解しておくことである。

(2) 繊維質作物資材

稲わら、麦稈、牧草等の繊維質作物資材は、一般に炭素含有量が高く（C/N比が高く）、しかも微生物に利用されやすい形態の炭水化物の含量が高い。このような資材を未熟のまま施用すると、微生物は土壤中でこれらの炭水化物をエネルギー源として利用しながら増殖し、その菌体成分を合成するために、無機化されて出てくる窒素を体内に取り込む。この場合、土壤中に十分な無機態窒素があれば問題はないが、菌体合成に必要な量以上の無機態窒素が存在していなかったならば、微生物は作物が必要とする無機態窒素まで奪ってしまう。この結果、作物は窒素を吸収することができなくなり窒素欠乏症を起こしてしまう。このような現象を窒素飢餓という。

また、繊維質作物資材にはフェノール性酸が含まれており、土壤中にすき込まれた場合に作物の生育を阻害する可能性がある。

従って、繊維質作物資材の堆肥化の目的は、窒素飢餓を起こさないように無機態窒素が十分に供給できる状況（窒素が多い家畜ふんと混合した状況）であらかじめ易分解性の炭水化物を分解しておくこと及びフェノール性酸などの生育阻害物質を分解しておくことである。

(3)木質資材

オガクズや樹皮（バーク）のような木質資材には、作物の生育を阻害する物質が含まれていることが報告されている。このような阻害作用は、木質資材中に含まれるフェノール性酸、タンニン、精油等によって生じると考えられている。

従って、木質資材の堆肥化の目的は、木質資材中に含まれる生育阻害物質をあらかじめ分解しておくことである。

木質資材のC/N比は極めて高い。また、木質資材にはかなりの量のセルロースが含まれているが、その大部分はリグニンと強固に結合し、あるいは一部は結晶化しているため微生物に分解され難くなっている。家畜ふんのような窒素源を加えた場合、木質資材の分解が促進されることもあるが、繊維質作物資材のように顕著な分解促進効果は見られない。

従って、木質資材の場合、たとえC/N比が高くても窒素飢餓を起こす危険性はほとんどないと考えられる。

ただし、木質部は樹皮に比べて、また広葉樹は針葉樹に比べて多少分解しやすいことが示されており、これら比較的分解しやすい木質資材を未熟なまま施用した場合には、窒素飢餓が起こる可能性もあるので注意が必要である。

以上のように、原料資材の成分的特徴から、これらを施用した時に起こりうる障害の原因と堆肥化の目的について述べてきたが、管理の仕方によっては原料資材の種類にかかわらず堆肥化の過程で作物に対する生育阻害物質が生じることがある。原料資材を堆肥舎などに堆積する場合、切り返しなどの管理が不適切であると堆積物の内部が嫌気的狀態になり、原料資材中に当初含まれていた量よりもはるかに多量の揮発性脂肪酸が生成される。

このような嫌気的部分は、そのまま堆積していただだけでは時間をかけても解消できず阻害性も強いままであるが、適切な管理を行って好氣的にし堆肥化を促進させれば、揮発性脂肪酸やフェノール性酸は比較的すみやかに分解される。従って、この場合の堆肥化の目的は生成された生育阻害物質を分解することである。しかし、最初から適切な管理を行って生育阻害物質を生成させないことが何よりも重要である。



写真1

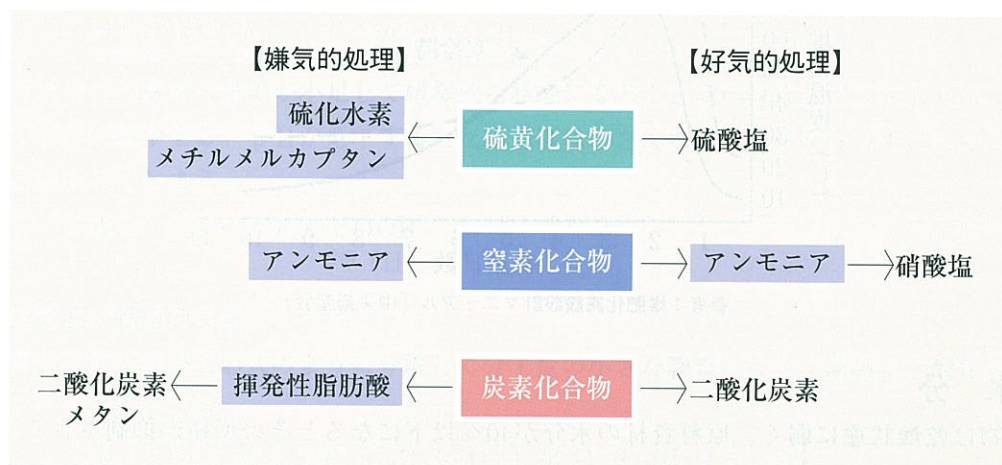
良質の堆肥は、汚物感がまったくなく、作業員、見学者に不快感を与えない。

堆肥化の条件

前述のとおり、堆肥化处理とは、好気性微生物の活動によって家畜ふんなどの堆肥原料をあらかじめ分解することにより、取り扱いを容易にし、高温発酵によって病原菌や雑草の種子などを死滅させ、作物への生育阻害作用を除去または軽減することである。

従って、堆肥化の条件は好気性微生物の増殖に適した条件を整えることであり、その条件の主なものは、①栄養源、②温度、③水分、④酸素（空気）の供給である。なお、①～③は嫌気性微生物にも共通する条件であり、④の酸素の供給がない場合には嫌気性発酵に移行し、悪臭の発生、生育阻害物質の発生などの問題が生じるので注意する必要がある。

図1 家畜ふんの好氣的・嫌氣的処理



注： は悪臭を放つ物質であり、その他は無臭の物質である。

参考：マニュアル「酪農ジャーナル臨時増刊号」

1. 栄養源

家畜ふん中には未吸収の栄養物が含まれており、体内である程度消化されているので分解が容易で微生物の栄養源として最適である。

排せつされた家畜ふんは水分と乾物から、また乾物は有機物と無機物から成り立っており、この有機物の中には易分解性有機物と難分解性有機物とがある。

堆肥化は微生物の働きによって行うものであり、微生物が活動するためのエネルギー源となる成分（炭素；C）や微生物が増殖するために菌体を構成する成分（窒素；N）が必要である。

堆肥化处理では主にこの易分解性有機物が微生物により分解され、この過程で熱エネルギーが発生する。

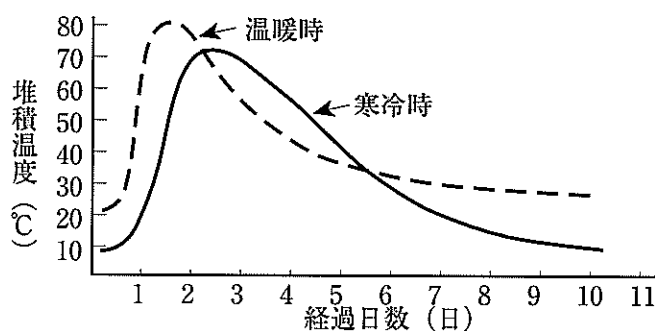
2. 温 度

堆肥化においては、易分解性有機物が好氣的微生物によって分解される際に熱エネルギーが発生する。その結果、発酵熱が蓄積し、管理が適切であれば堆積物の温度は70～80℃程度まで上昇する。この発酵熱は引き続き好氣性微生物の活発な活動を促すことにも役立っている。

微生物の活動は外気温の影響を受けやすく寒冷期には低下する。しかし、極端な低温でなければ、堆肥化初期の発酵温度の立ち上がりは多少遅れるものの、速効性の栄養源となる副資材の投入や放熱を少なくするための繰り返し頻度の見直しなどにより十分堆肥化は可能である。

ただし、極度の低温のために発酵温度の立ち上がりが全く不可能な場合は、温風を通気して微生物が活動を始めるまで加温することなども必要である。

図2 環境温度が異なる場合の堆積温度の経過



参考：堆肥化施設設計マニュアル「中央畜産会」

3. 水 分

微生物は乾燥状態に弱く、原料資材の水分が40%以下になるとその増殖が抑制される。一方、高水分状態では増殖が盛んになるが、酸素の供給が十分であれば堆肥化に好ましい好氣性微生物が活動し、酸素の供給が不十分であれば嫌氣性微生物が活動する。

一般に堆肥化する場合、原料資材の水分は60～65%程度が適当といわれている。これは、正確には、好氣的微生物が必要とする水分と酸素を供給できる空隙が原料資材中に適度に存在している場合、水分が60～65%程度となっているということである。従って、高水分の原料資材を搾って水分を60～65%程度にするだけでは酸素を供給する空隙がないため、好氣性微生物の活動は期待できない。また、水分調整のため副資材を混合して水分を60～65%程度にしても、副資材の粒子が小さい場合には酸素を供給する空隙を埋めてしまうことがあるので注意が必要である。

このように、水分は重要な要素ではあるが、水分含有率だけを指標にすることは危険である。

4. 酸素の供給

堆肥化は好氣性微生物の働きを活用する技術であることから、酸素の供給が不可欠である。従って、原料資材の通気性を確保し、繰り返しなどによって十分な酸素を供給することが必要である。

酸素を供給できない状態で原料資材を長期間放置しておくと、嫌氣性微生物が増殖し、徐々に家畜ふん中の有機物が分解され、堆肥化処理時の熱源が減少する。また、このような条件下では、嫌氣性微生物の働きによって生育阻害物質が生産され、臭気もひどくなる。

堆肥化における有機物の化学的变化

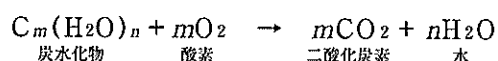
1. 堆肥化における化学反応

堆肥資材中の堆肥化可能な有機物は、炭水化物、脂肪及び蛋白質である。これらの有機物は、堆肥化の過程において好機条件の下で微生物により分解されたり、生物体に合成される。

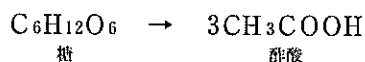
このような有機物が分解・合成する化学反応は、簡略化すると次のようになる。

(1) 炭水化物の分解

炭水化物は $C_m(H_2O)_n$ の形で表され、次の反応式のように酸素と反応して最終的には二酸化炭素と水とに分解される。この反応は、燃焼と同じであるが、堆肥化の場合は、生物が有する酵素が触媒として働いて低温で反応が進む。

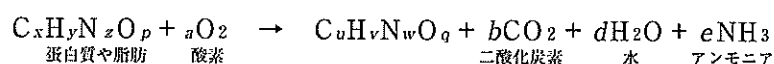


堆肥資材中への酸素の供給が不足して嫌機的な状態になると、次の反応式に示すように、有機酸が生じて pH が低下する。pH が低下すると反応速度は小さくなり、pH が 5 以下になると反応はほとんど停止してしまう。



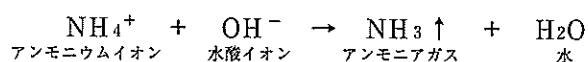
(2) 蛋白質及び脂肪の分解

蛋白質や脂肪は次の反応式のように分解して分子量の小さな物質になり、同時に二酸化炭素、水及びアンモニアを生じる。



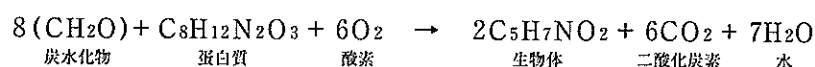
ここで生じたアンモニア NH_3 は水に溶けて水酸化アンモニウム NH_4OH になり、堆肥資材の pH を高める働きをする。このような反応により堆肥資材が弱アルカリ性になれば、堆肥化の速度が早まることとなる。

堆肥資材の pH があまり高くなりすぎると堆肥化の速度が低下することが知られているが、堆肥中では次の反応式に示すように、水に溶けていたアンモニウムイオン NH_4^+ は気体のアンモニア NH_3 になって気散するので、堆肥資材の pH が 10 以上になることはほとんどない。



(3) 生物体の合成

生物は有機物を取り込んで自分の体を合成して増殖する。このとき好気性生物は次の式のように酸素を取り込み、二酸化炭素と水とを合成する。生物体を構成する蛋白質を合成するには、炭素のほかに窒素、リン及び微量元素を必要とするが、この反応式では生物体を $C_5H_7NO_2$ と簡単に表し、リンや微量元素については省略している。

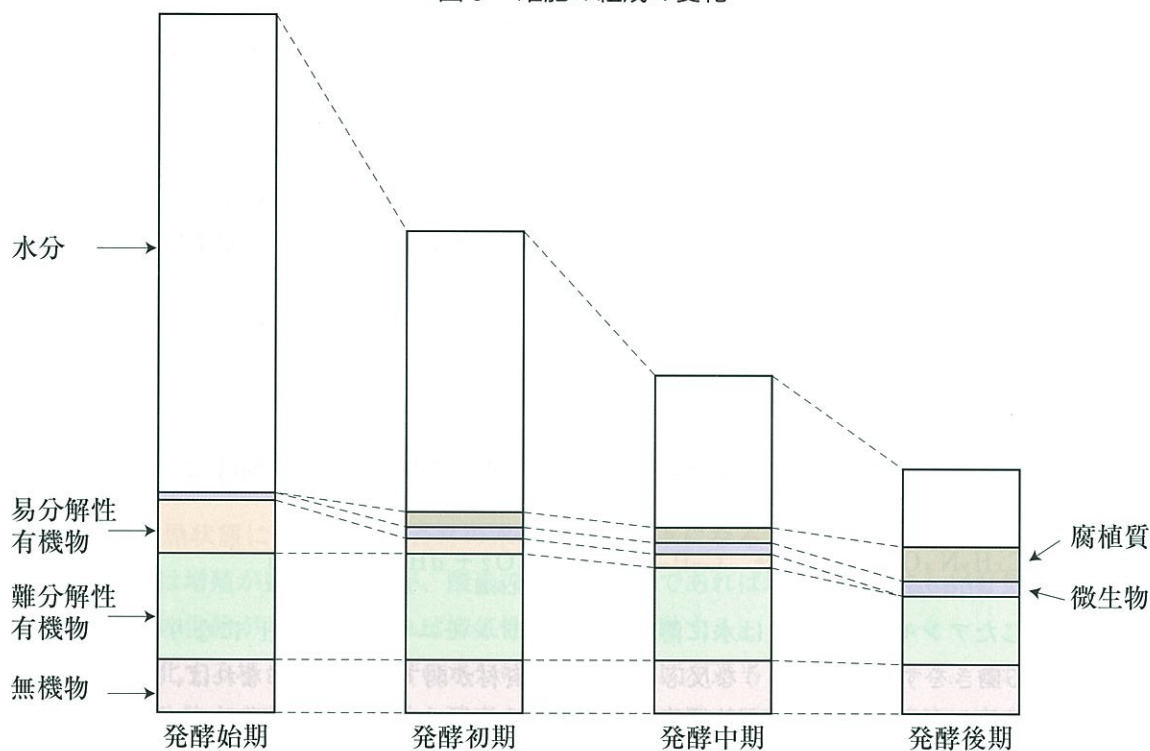


2. 堆肥化における組成変化

前述のように、堆肥化の過程において生分解可能な有機物は分解され、その一方で生物体の合成が行われる。

この場合、堆肥化の到達目標とは、「Ⅳ. 堆肥化の目的」で説明したように、長期間の処理を行って有機物の大部分を分解し、ほとんど不活性に近い状態にすることではなく、作物に生育障害を起こさないで地力を維持し、作物の生産性を高めるような成分組成を持つようにすることまでである。従って、堆肥化の過程で分解されるのは主に易分解性の有機物のみであり、その組成変化を図示すると図3のようになる。

図3 堆肥の組成の変化



参考：堆肥化処理の理論と実践「家畜改良センター 技術マニュアル1」

発酵初期： 比較的分解しやすい有機物が好気性微生物の働きにより急激に分解される。また、この際に発生した発酵熱により水分が蒸散する。

発酵中期： 比較的分解しやすい有機物が好気性微生物の働きによりほぼ全て分解される。また、この際に発生した発酵熱により水分がさらに蒸散する。
この時期が、概ね「完熟」に相当する。

発酵後期： 比較的分解しづらい有機物が好気性微生物の働きにより分解される。難分解性有機物の分解速度は易分解性有機物の分解速度に比べかなり緩慢である。また、この際に発生した発酵熱により水分がさらに蒸散する。一方、動植物遺体に由来する腐植質が増加する。
この時期は、切り返し後にストック場所で堆積されている状態に相当する。

堆肥化における微生物の役割

堆肥は、目に見えない細菌、放線菌、糸状菌や小動物など微小な生物の活発な活動によってつくられる。堆肥づくりのための微生物は、大部分が好気性の微生物であり、種類の異なる数多くの微生物が一定の法則をもって、現れては消えてゆく。堆肥化は、微生物的には3つの段階に分けて考えることができる。それは、堆積初期の糖分解期、発熱期のセルロース分解期、堆肥の温度が下がった頃起こるリグニン分解である。

1. 糖分解期

原料資材中のタンパク質、アミノ酸、糖質などの易分解性物質が分解される時期である。この時期は、好気的な分解であり、発育の速い糸状菌や細菌が主となって活動する。この過程で微生物の盛んな呼吸による熱が発生し、堆積物の温度は上昇する。

2. セルロース分解期

次の段階はセルロース分解期である。セルロース分解が堆肥化の主たる役割であるが、セルロースはリグニンやヘミセルロースで保護されるような状態になっているため、これらを除去する必要がある。なかでもヘミセルロースは、セルロースとリグニンの結合組織的役割をもっているため、これを効率よく分解する必要がある。

このセルロース分解期は発熱期であり、堆肥の温度は60～80℃になっている。このため一般の菌は活動できず、ごく限られた種類の高温菌が働く。

高温性好気性の放線菌（テルモアクチノミセスなど）が働いてヘミセルロースを分解し、セルロースをむき出しにする。このとき、酸素を盛んに吸収して自分のまわりに酸素不足の環境をつくる。そこに嫌気性のセルロース分解菌（クロストリジウム）が働く。堆肥化は全体としては好気的条件下で進行するが、このように部分的には嫌気性菌も役割を担っている。

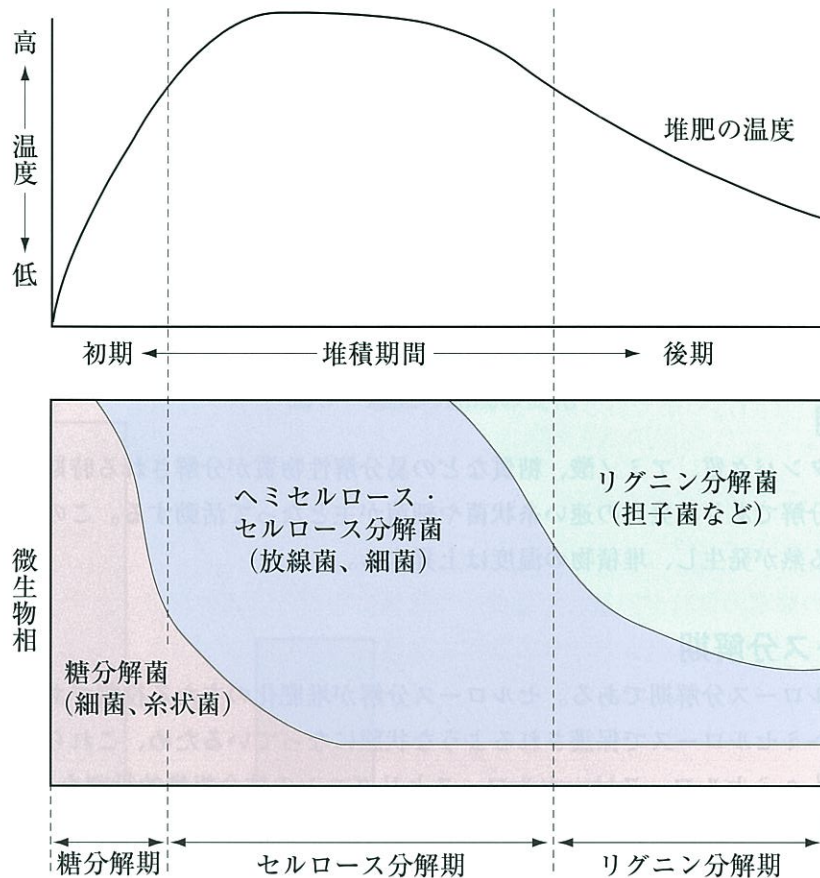
ヘミセルロースやセルロースの分解がピークを超えると、堆肥の温度はゆっくりと下がってくる。このころからリグニン分解が始まり、次の段階へ入る。

3. リグニン分解期

これは堆肥の骨格が分解する時期であり、堆肥は黒褐色の壊れやすい性状となる。リグニン分解は、主として糸状菌の仕事であるが、この時期はセルロースなどの中間分解物も多く、堆肥の温度も低下しているため、他の微生物も非常に多くなる。多くの微生物が現われると、それを食べる小動物が現われ、さらにトビムシやミミズも見られるようになる。このように多くの微生物がこの時期に現われては死ぬ。さらに微生物同志の食いあいもある。こうして微生物の遺体が蓄積され、この微生物の遺体がやがて堆肥の窒素成分の大部分を占めるようになる。

以上のように、易分解性物質→ヘミセルロース・セルロース→リグニンの順序で分解され、それに携わる微生物もそれぞれに適合したものに変化している。すなわち、堆肥は単一種の微生物によってでなく、多くの種類の微生物によってつくられているのである。

図6 堆肥化過程における微生物相の変化



参考：堆肥化施設基本設計作成の手引「全農 施設・資材部」



写真2 放線菌の層

堆肥が良好に発酵していると、酸素が豊富な表層部に白い放線菌の層を見ることができる。