家畜排泄物の処理と有効利用

原田靖生*

農芸化学の開祖とでもいうべきドイツの大化学者リービヒは、同時代の日本の農業が「グアノ、骨粉、チリ硝石の輸入なしに」成り立っていることに驚いたという。これが水田と下肥の利用というふたつの理由であったことをどこまで理解したであろうか。今や、その日本で家畜排泄物は環境汚染の原因となる廃棄物と見なされているが、見方を変えれば、多くの有用成分とエネルギーを含んだ資源である。これを有効に利用することは、資源に乏しい我が国の農業が進むべき方向であり、環境保全の面からもきわめて重要である。

家畜排泄物の発生量

我が国で1年間に発生する家畜排泄物の総量は、ふんが約 5,800 万トン、尿が約 1,700 万トン、合計では実に 7,500 万トンにのぼると推定される(表 1)。これは、家庭厨芥(850 万トン)、下水汚泥(350 万トン)、食品工場廃棄物(92 万トン)など^(2,3)と比較してもはるかに多い量である。また、表 1 に示した数値は、総飼養頭羽数と 1 日 1 頭当たりの排泄量から試算したものであって、排泄物のみの量を示している。しかし、現実には畜舎の敷料として用いられるオガクズ、モミガラ、稲ワラなど、さらに飼料の食いこぼし、あるいは畜舎の洗浄水などがこれに加わり、その試算は困難であるが、畜舎からの排出物全体として見れば莫大な量になる。このように、家畜排泄物は我が国で発生する有機性廃棄物の中では最大のものと言えよう。

家畜排泄物の処理・利用の方向

我が国の畜産は昭和 40 年代から 50 年代前半にかけて急成長をとげたが、それに伴って環境汚染問題の発生件数が急増し、畜産公害とまで言われるようになった。当時は、埋め立て、焼却などの利用を目的としない処理対策も多くとられていたが、今日では省資源・省エネルギーの観点から、有効利用を目的とした処理が中心に進められている。家畜排泄物は有機質肥料あるいは土壌改

表 1 家畜排泄物量の試算(昭和 59 年)⁽⁴⁾

畜 種	飼養頭羽数	ふん量(千 t)	尿量(千 t)	計(千 t)
鶏	330 百万羽	13,653	—	13,653
豚	1,042 万頭	7,800	8,594	16,394
乳用牛	211	20,949	4,480	25,429
肉用牛	257	15,696	3,507	19,203
計		58,098	16,581	74,679

(羽賀・原田 試算)

良資材として利用できるし、またエネルギーを回収して利用することもできる。畜産が原因となって発生する環境汚染を防止するためには、このような家畜排泄物の利用を積極的に推進することが重要である。

畜舎から排出される家畜排泄物の形状は、畜種、飼養形態、および排泄物の分離・搬出方式によってさまざまであり、明確に区分することはできないが、ここでは便宜的に固形状、泥状、液状に区分し、現在実施されている、あるいは研究がなされている処理・利用方式を整理して示した(図 1)。

ふんや敷料などの固形物は、とくに処理しないでそのまま農地に施用することもあるが、取り扱い性や安全性の点から乾燥処理やコンポスト化が広く行なわれている。ブロイラーの場合には、鶏ふんを燃焼させて鶏舎の床をあたためる装置(鶏ふんボイラー)が普及しており、エネルギーとして有効に利用されている。また、コンポスト化の過程で発生する発酵熱を回収する方式や、熱分解によって可燃性ガスを回収する方式も一部では行なわれている。さらに、我が国では一般的でないが、外国では飼料としても利用されている。

Treatment and Utilization of Animal Wastes

* Yasuo HARADA, 農林水産省農業環境技術研究所

図 1 家畜排泄物の処理・利用方式

ふんと尿が分離されず混合物として排出される場合には、泥状（スラリー）として取り扱う。ふん尿混合物を貯留したままにしておくとも臭気が強くなり、これをそのまま農地に施用すると悪臭問題が発生しやすい。そこで、曝気を行ない、好気性微生物の働きによって易分解性有機物を分解してやれば、悪臭は減少し粘性も低下して取り扱いやすくなる。この処理は好氣的スラリー処理ともいうが、目的や手段がコンポスト化と類似している。ここでは液状コンポスト化と呼ぶことにする。液状コンポスト化では、発酵槽を地下に設けたり、断熱材で被って熱を逃がさないようにすれば、発酵熱や水中ポンプのモーターから発生する熱で液温が上昇するため、その熱を回収して利用している例もある。また、嫌氣的処理としてはメタン発酵が行なわれている。

尿にふんの一部が分散し、それに畜舎洗浄水などが加わった液状物を畜舎汚水あるいは尿汚水と呼んでいる。畜舎汚水は、農地に施用する試みが一部ではなされているが、まだ一般的ではなく、利用が困難な部分である。しかし、そのまま放流したのでは水質汚染の原因となるので、何らかの手段を用いて処理しなければならない。従来より一般的に用いられているのは活性汚泥法や生物膜

法などの汚水処理技術であるが、クロレラ・光合成細菌などを用いた処理や土壌を用いた処理も試みられている。また、ビニールハウスの中で乾燥したり、発酵中のコンポストに散布し発酵熱を利用して蒸発させる処理もかなり普及している。

このように、家畜排泄物の処理・利用については、まずできるだけ有効に利用し、その上で利用が困難な部分は環境汚染を生じないように処理する、という方向で進められている。ここでは、畜産における主要な処理・利用技術として、コンポスト化（農業利用）、メタン発酵（エ

ネルギー利用）、および活性汚泥法（水質汚濁防止技術）について述べる。

コンポスト化

コンポスト化とは、有機質資材を人為的に制御された条件下で生物的に処理し、農地への施用に適した性状にすることであり、堆肥化と同義語と考えてよい。コンポスト化の目的は、まず第一に、家畜ふんを作業者にとって取り扱いやすく、衛生面でも安全なものにすることである。家畜ふんはそのままでは悪臭が強く、汚物感があり、搬送・貯蔵・施用などの作業性の面から見てきわめて取り扱いにくいものであるが、コンポスト化処理によって悪臭は減少し、取り扱いやすくなる。また、家畜ふんには病原菌、寄生虫の卵、雑草の種子などが含まれることがあるが、コンポスト化の過程で発酵熱が発生して温度が 70～80℃ 程度まで上がれば、これらを死滅させることが可能である。第二の目的は、家畜ふんを作物にとって安全なものにすることである。家畜ふんには易分解性有機物が多く含まれており、これを多量に施用すると土壤中で急激に分解して土壌を還元状態にしたり、無機態窒素濃度が過度に高まったりして土壌環境が悪化し、作物が生育障害を起こす危険

表 2 コンポスト化過程における微生物相の変化⁽⁴⁾

	最初の 温 度	中温 段階 (40℃以下)	高温 段階 (40～70℃)	中温 段階 (40℃以下)
細 菌				
(中温性)		10 ⁸	10 ⁶	10 ¹¹
(好熱性)		10 ⁴	10 ⁹	10 ⁷
放線菌				
(好熱性)		10 ⁴	10 ⁸	10 ⁵
糸状菌				
(中温性)		10 ⁶	0	10 ⁵
(好熱性)		10 ⁸	10 ⁷	10 ⁶

(コンポスト現物 1g 当たりの菌数)

性がある。また、家畜ふんや敷料中にはフェノール性酸などの生育阻害物質が含まれることがある。したがって、施用する以前にコンポスト化を行なって十分発酵させ、易分解性有機物や生育阻害物質を分解しておくことが重要である。

家畜ふんのコンポスト化にとって最も重要な条件は、通気と水分調整である。コンポスト化は主として好気性微生物の働きによって行なうものである。これを促進させるには酸素が必要であり、切返しや強制通気を行なって空気を十分供給することが重要である。また、生ふんの水分は80%前後とかなり高いので、発酵に適する水分(60～70%程度)にまで下げることも必要である。そのためには、家畜ふんをビニールハウスなどで予備乾燥するか、あるいは吸湿性の高い資材を生ふんと混合して水分調整を行なう方式が用いられている。このような副資材としてはオガクズやモミガラなどが一般的であるが、これらの資材が次第に入手困難になってきたことから、最近では乾燥ふんやコンポスト製品を生ふんと混合する方式も多く用いられるようになった。さらに、パーライト、ゼオライト、トバモライトなどの無機質資材を用いる方式も試みられている。

コンポスト化は、単一の微生物によって行なわれるわけではなく、自然に存在する多種類の微生物が関与し、優先微生物相が交代しながら一連の過程を経て進行する(図2)。まず中温性の細菌・糸状菌によって、糖、澱粉、蛋白質などが分解される。その際に、微生物が発生する発酵熱によって堆積物中の温度が上昇し、40℃以上になると好熱性の細菌・糸状菌・放線菌などが優勢になっ

図 2 牛ふんのコンポスト化過程における各成分の変化⁽⁵⁾

てヘミセルロースやセルロースが分解される。こうして、各成分の内とくに分解されやすい部分が分解されて成分的に安定化してくれば温度も低下し、再び中温性の細菌・糸状菌などが優勢になる。この段階では、悪臭が消えていわゆる堆肥臭となり、コンポスト化はほぼ終了する。しかし、実際には、堆積物の中は必ずしも均質ではなく、これらの分解過程が複雑にからみ合って進行するので、堆積物全体として見ると各々の成分は同時並行的に分解されているように見える。

牛ふんのコンポスト化過程における各成分の変化を図2に示す。このコンポスト化試験は、搾乳牛のふんにパーライトを混合して水分を60～70%に調整し、自動攪拌機を備えた発酵装置を用いて強制通気を行ないながら実施したものである。また、これらの図では、パーライトの部分は計算によって消去してあり、牛ふんのみの成分の変化を示している。コンポスト化の進行に伴って有機物が分解され、灰分が相対的に増加する。全炭素は減少し、全窒素は相対的に増加し、その結果C/N比は低下する。また、有機成分の変化については、次のようである。すなわち、ペンゼ

表 3 腐熟の指標および腐熟度判定法⁽⁶⁾

A. 微生物活動からの判定	f) 有機物含量 (灼熱減量)
a) 堆積物の温度変化	g) 易分解性有機物の簡易定量
b) 自己発熱容量	h) 澱粉試験
c) 酸素消費量	i) 堆肥化過程での pH の変化
d) BOD 曲線	j) 嫌氣的発酵による pH の変化
e) 炭酸ガス発生量	k) ジフェニルアミンによる硝酸態窒素の検出
f) ポリ袋によるガス発生量の簡易検定	l) 円形濾紙クロマトグラフィーによる判定
g) 酸化還元電位	m) 水抽出物のゲルクロマトグラフィーによる判定
h) 窒素の有機化・無機化試験	D. 腐植化学的手法による判定
B. 生物を用いる判定	a) 腐植可溶率
a) 菌接種後の子実体形成数	b) 沈澱部割合
b) ミミズによる判定	c) 相対色度
c) 幼植物試験	d) 2%アンモニア水可溶有機物割合
d) 発芽試験	e) 5%水酸化ナトリウム溶液抽出物量
e) 花粉管生長テスト	E. 物理的および物理化学的特性からの判定
C. 成分組成からの判定	a) 粒径分布
a) 堆肥の C/N 比	b) 光学的特性 (色)
b) 水抽出物の C/N 比	c) 陽イオン交換容量 (CEC)
c) 水不溶物の C/N 比	
d) 全窒素含量	
e) 還元糖割合 (全炭素に占めるセルロースおよびヘミセルロース態炭素の割合)	

ン・エタノール可溶性有機物は一度減少してから再び増加している。微生物によって分解される過程と再合成される過程の両方が存在するためと思われる。また、ヘミセルロースとセルロースは分解されて減少し、リグニンや不溶性窒素化合物は難分解性であるために濃縮され相対的に増加する。これらの変化は4～5週間でほぼ安定化するが、その期間は畜種によって異なり、鶏ふんではより分解されやすく2～3週間で安定化する⁽⁵⁾。

このように、コンポスト化の過程で易分解性有機物が分解されて成分的に安定化することを腐熟と呼び、コンポスト化の程度を示す尺度として腐熟度という用語が用いられている。コンポストの腐熟を示す指標および腐熟度判定法については数多くの提案がなされており、それらを分類・整理してみると表3のようになる。しかし、これらの方法の中には、試料を調製する手間の必要なもの、分析に長い時間や高度な技術を必要とするもの、あるいは特殊な原料資材にしか適用できないものも含まれており、家畜ふんコンポストに対する適用性、確実さ、および簡易判定法としての観点に立って見れば、現在簡単に使用できる方法は少な

いようである。コンポストを製造する場においても、また使用する場においても腐熟度の判定は重要であり、さらに確実で簡便な判定法の開発が望まれている。

メタン発酵

泥状の家畜ふん尿混合物を嫌氣的条件下におき、微生物の働きによってメタンガスを発生させる。メタン発酵は古くから行なわれてきた技術であり、比較的簡易な施設で可燃性のガスを得ることのできる有効な方法である。メタンガスの発熱量は約 6,000 kcal/m³ であり、都市ガスの代替燃料となることはも

ろん、エンジンや発電など広範囲のエネルギー源として利用できる。

家畜排泄物はさまざまな有機物を含んでいるが、概念的には図3に示すような酸発酵とメタン発酵の2段階の過程を経てメタンガスに変換される。メタン発酵を進行させるための条件としては、まず第一に嫌氣的条件をつくる必要がある。メタン細菌は偏性嫌気性細菌で、きわめて高い嫌氣的条件下でのみ活動する菌である。次に重要なのは温度である。メタン発酵の適温領域には 30～40℃ の中温領域と 50～54℃ の高温領域があり、これらの温度領域をはずれるとガスの生成量は低下する。高温発酵のほうが効率は高いが、我が国の気候では維持管理の点から中温発酵のほうが適している。また、冬季にはガス発生量が極端に低下するため、発酵槽を加温することが必要である。発生したメタンガスを用いて加温する方式が一般的であるが、太陽熱をヒートパイプで発酵槽内に導いて加温する方式も検討されている⁽⁸⁾。

メタンガスの発生量は、畜種によってかなりの相違がある。すなわち、投入有機物 1 kg 当たり

図3 家畜排泄物のメタン発酵⁽⁷⁾

のガス発生量は、牛ふんで 200～350 l、豚ふんでは 300～500 l、鶏ふんでは最も高く 300～600 l 程度である⁽⁹⁾。メタンガスには単体のメタンが約 60% 含まれており、残りの 40% は炭酸ガスである。また、その他微量の硫化水素などが含まれている。硫化水素は毒性が強く腐蝕性のガスであるので、使用に際しては除去（脱硫）しなければならない。脱硫には、酸化鉄やキノンなどを用いて化学的に酸化する方法が一般的に用いられているが、光合成細菌（*Chromatium*）による生物学的脱硫法についても検討されている⁽⁸⁾。

畜産農家においてメタン発酵を行なう場合、最も問題となるのは廃液の処理である。メタン発酵によって投入原料中の有機物はある程度分解され、臭気も低くなっているが、これを河川などに放流しようとすれば、さらに活性汚泥法などの処理を行なうことが必要である。しかし、このように二段階の処理を行なうとすればコストが高くなるため、畜産農家においてはあまり現実的ではない。メタン発酵によって炭素は減少するが、窒素・リン・カリウムなどの肥料成分は廃液中に大部分残存しているので、無理に処理するのではなく、むしろ液肥として有効に利用すべきであろう。しかし、そのためには農地が確保できなければならない。酪農のような草地・飼料畑を有する経営形態では廃液の施用が可能のためメタン発酵を導入できるが、農地を持たない畜産経営においてはメタン発酵は有利な処理・利用方式とは言い難い。

もう一つの問題点は、上に述べたように、温度

が低くなるとガス発生量が低下することである。つまり、エネルギーを最も必要とする冬季に十分なガスが得られないということも、我が国でのメタン発酵の普及にとって大きな問題となっている。

活性汚泥法

前述のように、家畜排泄物はできるだけ利用すべきであるが、すべてを有効利用することは困難である。とくに畜舎汚水の利用については困難な点が多いが、たとえ利用に結びつかずとも環境汚染を発生させないよう適切に処理することが必要である。農林水産省畜産局の調査⁽¹⁰⁾によると、畜産が原因となって発生する環境汚染問題の総発件数は昭和 60 年度で 4,591 件あり、そのうち水質汚濁関連問題の発件数は 1,856 件で全体の 40.4% にも達している。また、湖沼法の制定や水質汚濁防止法の改定により、排水基準はますます厳しくなっており、畜舎汚水の効果的な処理技術の開発が求められている。

畜舎汚水の処理に最も一般的に用いられてきた方法は活性汚泥法である。活性汚泥法は好氣的処理であり、微生物の働きによって汚水中の有機性汚濁物質を分解する方法である。この方法では、好氣的条件を保つために曝気を行ない、一定時間後に曝気を停止あるいは沈澱槽に導いて静置すれば微生物がフロックを作って沈降し、透明な処理水が分離できる仕組みになっている（図 4）。

活性汚泥法は昭和 40 年代から 50 年代前半にかけて広く普及し、全国の畜産農家、とくに養

図 4 活性汚泥法の仕組み (羽賀)

豚農家に多くの施設が設置されたが、現在では運転をとり止める農家が多くなっている。その主な理由は、維持管理が難しいことや経費（曝気のための電気料など）がかかることであるが、排水の水質基準が厳しくなったことも大きな理由の一つになっている。すなわち、BOD、COD、SS などの水質基準に対して各地で厳しい上乘せ基準が設定されたこと、また閉鎖系水域での富栄養化を防止する目的で窒素とリンの濃度も規制の対象に加えられたことなどである。

従来の活性汚泥法は窒素除去能力が低いが、運転管理の仕方を工夫することによってその能力を高めることができる。すなわち、まず処理槽を好気的条件下に保ち、アンモニア酸化菌および亜硝酸酸化菌の働きによって汚水中の NH_4^+ を NO_2^- 、さらに NO_3^- にまで酸化し、次に嫌気的条件下にすれば、脱窒菌の働きによって NO_2^- あるいは NO_3^- が N_2 （一部は N_2O ）となって系外に放出される。したがって、基本的には活性汚泥処理の過程で好気的条件下と嫌気的条件下を作ればよい。しかし、脱窒菌は従属栄養細菌であって NO_2^- や NO_3^- を還元するためにはエネルギー源を必要とするので、嫌気的条件下においた時に有機態炭素が存在していなければならない。ところが、好気的条件下で大部分の有機物が分解されるので、嫌気的条件下にする時に有機態炭素を加えてやる必要がある。下水処理場などでは、有機態炭素源としてメタノールなどの添加が行なわれているが、畜産農家においてはコストの点で実施困難で

あろう。

最近、メタノールを添加しないで脱窒を起こさせる方式が、工業技術院微生物工業技術研究所において開発された。これは、制限曝気式回分活性汚泥法（制限曝気法）と呼ばれる方式で、汚水を投入している間（約 8 時間）は曝気を行わず嫌気的条件下を保ち、投入汚水中の有機態炭素を利用して脱窒を起こさせる方式である。この方式は産業廃水の処理を目的として開発されたものであり、窒素除去能力が高いだけでなく、バルキング（フロックの形成不良により汚泥の沈降性が悪化すること）も防止でき、運転管理が簡易な方法として報告されている⁽¹¹⁾。また、この方式ではリンの除去も可能である。活性汚泥は嫌気的条件下でリンを放出し、好気的条件下でリンをとり込む性質がある。この場合、リンは大部分ポリリン酸の形で汚泥中にとり込まれる。そこで、活性汚泥を一定時間嫌気的条件下におき、再び好気的条件下にすることによって汚泥中にリンを過剰にとり込ませ、このリンを高濃度に含む汚泥を余剰汚泥として引き抜くことで、リンの除去が行なわれる。制限曝気方式のように、嫌気過程と好気過程を組み合わせた方式で運転していくと、汚泥のリンをとり込む能力が高くなることが報告されている⁽¹¹⁾。

農林水産省畜産試験場では、豚舎汚水中の窒素・リンの除去に関する研究を実施中であり、上記の制限曝気方式や間欠曝気方式（嫌気過程と好気過程を短時間で何回も繰り返す方式）が畜舎汚水中の窒素とリンの除去にもかなり効果があることを明らかにしている⁽¹²⁾。これらの方式は、窒素とリンの除去効率が高くなることに加え、施設の改造を必要としないので既設の施設をそのまま使えること、曝気時間が短くなるので電気料が節約できること、などの利点がある。

しかし、このような活性汚泥処理による窒素とリンの除去効果は、投入汚水の成分組成によって大きく変動する。つまり、BOD に対する窒素・リンの比率が低い場合には上記の方式によって窒素とリンがきわめて効率的に除去できるが、窒素・リンの比率が高くなると除去効果は低下する。畜舎汚水の BOD に対する窒素・リンの比率

は、生活雑廃水や他の産業廃水に比較すると概して高く、また畜舎の構造によってはこれらの比率がきわめて高い汚水が排出されることもある。今後、このような窒素とリンの高い汚水についても十分適用できるような、さらに効果的で経済的な処理方式を開発していかなければならない。

*

家畜排泄物の代表的な処理・利用技術として、コンポスト化、メタン発酵、および活性汚泥法について述べてきた。これらの技術は、いずれも自然に存在する微生物を活用し、これらの微生物が各々の目的に向ってその能力を最大限に発揮できるような環境を整えることによって処理を達成する技術である。

これに対して、特定の微生物を添加することによって処理能力をさらに向上させるという試みもなされている。たとえば、コンポスト化に関しては、有機物分解能力の高い菌を接種することによって処理日数を短縮し、合わせて悪臭の発生を抑制するということである。メタン発酵に関しては、低温においても効率的にメタンを生産する細菌を探索・培養する試みである。また、汚水処理に関しては、高濃度汚水に適用可能な微生物を用いて処理し、さらに菌体を回収して有効利用するということである。

一方では、有機物の分解促進・浄化能力の向上などを謳った数多くの微生物資材が販売されている。しかし、これらの資材に含まれる微生物の種類に関してはほとんど明らかにされておらず、それらの処理促進効果についても不明なものが多い。また、これらの資材を使用する場合、純粋培養ができないことも問題であろう。つまり、微生物資材の添加に先立って家畜排泄物を滅菌することは、農家においては現実的に無理である。したがって、接種した微生物が混合培養系の中で他の微生物に打ち勝って優先的に増殖し、その能力を発揮することはかなり困難なことであろうと思われる。

しかし、だからと言って、このような特定微生物の利用を否定するわけではない。今後、これら

の問題を科学的に解明し、微生物の利用技術をさらに発展させるように努力すべきであろう。また、最近急速に進歩してきた膜分離技術や微生物・酵素の固定化技術などを導入することも重要であろう。これらの新技術を応用し、さらに効果的な処理・利用システムが開発されるよう期待したい。

文 献

- 1) 原田靖生：有機質廃棄物のコンポストに関するシンポジウム講演集，9 (1985)。
- 2) 久保田宏，佐々木正幸：同上，45 (1985)。
- 3) 都留信也：同上，89 (1985)。
- 4) R. P. Poincelot : *Connecticut Agricultural Experiment Station, Bulletin*, 754, 5 (1975)。
- 5) 原田靖生，羽賀清典，長田 隆，伊澤敏彦，西村 洋：未発表。
- 6) 原田靖生：畜産の研究，37，1079 (1983)。
- 7) 羽賀清典：畜産公害対策全書，昭和56年度版，70(1981)。
- 8) 田中 博，羽賀清典，代永道裕，中嶋吉郎：未発表。
- 9) 羽賀清典：日本獣医師会雑誌，35，377 (1982)。
- 10) 農林水産省畜産局：畜産経営の動向，昭和 61 年，178 (1986)。
- 11) 太宰宙朗，風袋則夫，福岡誠一：下水道協会誌，22，60 (1985)。
- 12) 原田靖生，羽賀清典，長田 隆：未発表。