

# 豚舎汚水のメタン発酵処理技術および低コスト普及型メタン発酵プラントの開発

誌名	畜産の研究 = Animal-husbandry
ISSN	00093874
著者名	亀岡,俊則 入江,直樹 森,忠明 陽奥,農司
発行元	養賢堂
巻/号	60巻4号
掲載ページ	p. 442-446
発行年月	2006年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# 豚舎汚水のメタン発酵処理技術および 低コスト普及型メタン発酵プラントの開発

亀岡 俊則\*・入江 直樹\*\*・森 忠明\*\*\*・陽奥 晨司\*\*\*\*

## はじめに

家畜ふん尿の資源化処理に向けて近年急速にメタン発酵処理法が注目されてきた。このメタン発酵法は古くから中国やインドで数多く普及され、最近ではヨーロッパの国々でも多くの実施例が見られる。とくにEU諸国では地球温暖化防止の京都議定書に基づくCO<sub>2</sub>削減目標から、再生可能エネルギーを2010年には12%に高める目標が立てられており、この再生可能エネルギーのうち約11%は家畜ふん尿を原料としたバイオガスエネルギーによる代替が見込まれている。

そうした中で、とくに近年ドイツでは共同および個別のメタン発酵処理施設の建設ラッシュともいえるほどに年間ほぼ800ヶ所にもものぼる新たな設備が設けられ、欧州全体では2,000ヶ所以上のメタン発酵施設が稼動しているといわれている。また、ほとんどが個別処理と思われるが中国では700万施設、インドで100万施設ともいわれるメタン発酵施設によりバイオガスエネルギーが供給されているようである。

一方わが国では、家畜ふん尿を主体とした実証および実用規模で稼動しているメタン発酵施設は僅か50数件程度であるが、ごく最近ふん尿混合処理の一選択肢としてメタン発酵処理の採択に向けた検討が進められるケースが増えつつある。

こうした状況のもと、家畜ふん尿を主原料としたメタン発酵処理は、処理施設の建設コストが高く、とくに養豚など消化液の液肥利用ができない場合の浄化処理については、脱窒の問題とともに、凝集剤を多量に使用する等、処理コストに大きな問

題を抱えるなど、メタン発酵処理の低コスト化技術の確立が急がれている。

この解決策として筆者らは、メタン発酵槽内の消化汚泥の高濃度化によるガス発生量の効率化と、カキ殻等を接触材とした低コストな消化液の浄化処理技術を確立し、この処理システムを豚4,000頭規模の養豚場で実証を行い、所期の処理効率と低コスト化を達成することができた。本処理システムの研究および実証研究は(財)畜産環境整備機構による開発で、同機構の助成により現地実証を行ったものである。メタン発酵法は、ふん尿混合汚水や生ごみ等を主原料とする資源循環型処理法として重要な選択肢であり、今後の普及が期待されることから、以下にその技術内容等について報告する。

## 1. 豚舎汚水の基本的な処理技術

### 1) 豚ふん尿の汚濁負荷量と汚水の性状

豚ふん尿の汚濁負荷量の標準的な数値は「家畜ふん尿処理・利用の手引き」に示されているが、飼料や飼育ステージで排泄量や汚濁濃度は異なってくる。表1は実態調査の結果とともに、ある養豚場のふん尿汚濁負荷量に近似した数値を示した。ここで、肥育豚のふん尿は、繁殖一貫経営の全飼

表1 豚ふん尿の汚濁負荷量

	排泄量 kg/日	BOD		SS		窒素		リン	
		mg/L	g/日	mg/L	g/日	mg/L	g/日	mg/L	g/日
肥育豚:ふん :尿 計	2.1	65,000	137	220,000	462	9,000	18.9	7,000	15
	3.0	5,000	15	4,500	13.5	4,000	12.0	400	1.2
	5.1	29,800	152	93,200	475.5	6,060	30.9	3,180	16.2
繁殖豚:ふん :尿 計	3.3	65,000	215	220,000	726	10,000	33	7,000	23
	7.0	5,000	35	4,500	32	5,000	35	400	3
	10.3	24,300	250	73,600	758	6,600	68	2,500	26

\* NPO法人 バイオガスシステム研究会, 前(財)畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所 (Toshinori Kameoka)

\*\* 株式会社タクマ (Naoki Irie)

\*\*\* 株式会社モリプラント (Tadaaki Mori)

\*\*\*\* 大洋興産株式会社 (Shinji Yooku)

養頭数から肥育豚1頭分として平均して求めた数値である。

浄化処理を行う污水処理施設の設計にはBOD量が最も重要な汚濁指標になる。メタン発酵法では、有機物負荷量で設定するため、ふん尿中の水分を除いた固形物(TS)量を求め、固形物の中から無機物を差し引いた有機物(VS)量から設定条件を決めることになる。メタン発酵法は、有機物負荷量 $2.5\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ とかなりの高負荷条件であり、投入污水濃度もTS10%くらいまでの非常に高濃度でも対応できることが特長である。いずれにしても、処理施設の設計に当たっては養豚の飼養形態や給与飼料などの実態調査により排出するふん尿量(汚水量)および性状等から汚濁負荷量を設定することが重要である。

また、豚舎污水でも、メタン発酵処理においてはメタン発酵槽内で窒素(アンモニア)過剰による発酵阻害が生じることがあり、投入污水のBOD/N比のチェックも必要である。表2に示すように、通常豚舎污水のBOD/N比はふん尿混合でほぼ4.8で、ふん尿分離になるとほぼ2.2に低下するので、この条件からもメタン発酵法はふん尿混合方式が適している。

豚舎污水のTSに対するVS比は、通常約0.75であるが、豚舎や污水ピットの構造、流入污水の滞留日数などの条件で有機物比が異なってくるので、設計上はガス発生量に影響するため留意する必要がある。豚舎から排出する污水濃度においても豚尿の洗浄水量で大きく異なるので、飼養管理

表2 豚舎洗浄水量の違いによる汚水量と汚濁濃度(1頭当たり)

	①糞尿混合 無洗浄	②糞尿分 離洗浄	③糞尿混合 洗浄
汚水量 L/日	7	12	17
BOD g/日 mg/L	155 22100	59 4900	155 9120
T-N g/日 mg/L	32.4 4600	26.9 2240	32.4 1910
BOD/N比	4.8	2.2	4.8
TS g/日 mg/L	550 78600	164 13700	550 32400
VS g/日 mg/L	413 58900	123 10300	413 24300

①糞尿+こぼれ水+消毒洗浄水, ②糞30%+尿100%+こぼれ水+消毒洗浄水+5Lの洗浄水, ③糞尿+こぼれ水+消毒洗浄水+10Lの洗浄水

条件により浄化処理法かメタン発酵法かの選択が重要であり、洗浄水量が少なく、有機物等の汚濁濃度の高い水質性状がメタン発酵法には適している。

## 2) 豚ふん尿の基本的な処理体系

家畜ふん尿処理の中で最も基本的な処理法の方向性は、畜舎から排出する原料の水分で大きく決まり、そのうえで、堆肥や液肥として農地への利用がどの程度可能か、また処理水を公共用水域へ放流できるか、水質規制の関係、などによって処理方法および処理システムが決まってくる。これら処理方法の選択肢については(財)畜産環境整備機構から発行している「家畜ふん尿処理施設・機械選定ガイドブック」に詳述されている。

ふん尿污水の処理方法は、基本的には污水の汚濁濃度や排出汚水量、処理水を最終的にどのように扱うか、処理コストとの関係、などによって決定されるものであり、その大きな分かれ目はふんと尿を分離しているか、混合状態かで大きく異なってくる。

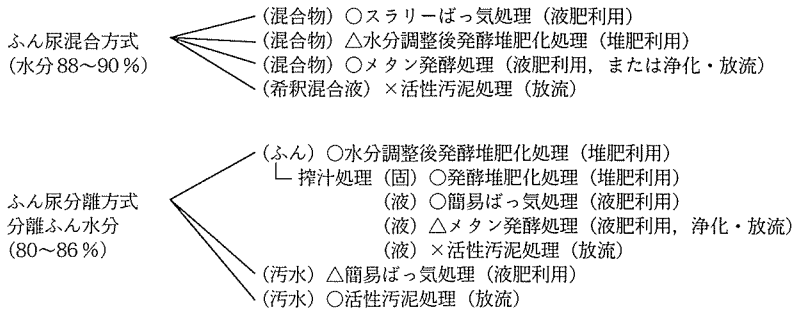
最初の選択肢は、液肥として農地還元が可能であればスラリーばっ気法や簡易ばっ気法、メタン発酵法がリストアップされる。農地還元が無理で、公共用水域に放流が可能であれば、活性汚泥法や生物膜法、またメタン発酵と浄化処理の組み合わせが選択肢となる。水質規制が厳しい段階では、土壌を利用した方法や膜分離活性汚泥法、脱窒処理等の高度処理法の組み合わせの処理システムにならざるを得ない。

近年では、資源循環型処理法が大きくクローズアップされている。処理法の中では、活性汚泥法などはエネルギー浪費型であるが、省エネルギー型としてはスラリーばっ気法などで液肥利用への方策を進め、そしてメタン発酵法ではエネルギー生産型であり、生産エネルギーで自らが処理できる、すなわちカーボンニュートラルの資源循環型処理法として注目されてきている。

## 3) メタン発酵法の処理技術

### (1) メタン発酵の目的

家畜ふん尿処理を行ううえでメタン発酵法を採用するためには、メタン発酵処理の目的を明確に位置づけたうえで、処理全体のシステムを構築する必要がある。メタン発酵法の目的は以下のよう



注：処理方法の選択肢として，○は適合性が高い，△はやや条件整備が必要，×は大幅な条件整備が必要。なお，各排出区分で記載していない処理方法は適合性が極めて低い。

図1 家畜ふん尿の基本的な処理方法

に整理できる。

### ① エネルギー生産を前提とした資源循環型処理体系の位置づけ

メタン発酵は、家畜ふん尿などの有機物をメタン細菌の分解によりガス状のエネルギーを生産することができる。消化ガスにはメタンガス ( $\text{CH}_4$ ) がほぼ65%含まれており ( $\text{CO}_2$  約35%)、この熱量は約5,500kcalであり、ガス状であることから利用し易いエネルギー源として貴重なものである。

### ② 家畜ふん尿等汚濁物質の減量化、安定化のための処理

汚水や廃棄物を衛生的かつ安定的に処理する代表的な方法として、活性汚泥法や発酵堆肥化処理法があげられる。メタン発酵も同様に、有機性汚濁物質を消化ガスに分解し、汚濁物質の安定化を図ることができる。とくに、有機性窒素の大部分はアンモニア態の窒素に分解されており、液肥として利用する場合は好都合である。しかし、消化液中には未だBODや窒素の多くが残留しているため、そのまま放流することはできなく、放流するためには活性汚泥法などで浄化処理する必要がある。

### ③ 家畜ふん尿由来の病原菌、寄生虫等の衛生対策、安全性

メタン菌は、病原菌を含むその周辺の微生物に対して強い抗菌力を有しており、コレラ菌等はメタン発酵槽で増殖することができない。ヨーロッパではと畜場等から排出された動物残渣について

はその衛生対策として、メタン発酵の前段階で90℃の加熱処理などが行われている。わが国では牛のヨーネ病防疫のため70℃、1時間の熱処理が行われている事例もある。こうしたことから、メタン発酵の加温に必要な熱量を前段階で高温処理として用い衛生対策もできるといったことがメタン発酵法の一つの特徴でもある。

### (2) メタン発酵処理に適するふん尿排出形態

ふん尿の排出形態は、畜舎構造によりふん尿分離方式と混合方式に分かれ、この両者の違いで汚濁負荷量は大きく異なり、後のふん尿処理体型も異なってくる。また、ふん尿の清掃で水洗いを行うか否かで汚水濃度も大きく異なり、それぞれに適したふん尿処理システムの選択が必要になってくる。メタン発酵法は低濃度汚水の処理は不向きであり、ふん尿混合の高濃度汚水を直接処理できることが特長で、大きな利点でもある。

### (3) メタン発酵処理の特性

メタン発酵は2段階の微生物分解により有機物が消化ガスに変成される。第一段階分解（酸発酵）は可溶性菌（通性嫌気性菌）により高分子の有機物が低級脂肪酸にまで分解され、次いで第二段階分解は低級脂肪酸等を基質としてメタン菌（偏性嫌気性菌）により、有機物はメタンを主成分とするガス状の消化ガスに分解される。この発酵過程で、微生物により分解され易い有機物とそうでない有機物により、ガスの発生量は大きく異なる。

家畜ふんの場合、とくに牛ふんの場合は第一

表3 メタン発酵に必要な条件

(1) 嫌気性条件での処理	・メタン細菌は偏性嫌気性細菌
(2) 温度	・中温発酵 (30~40℃) 高温発酵 (50~55℃)
(3) 種菌	・可溶化・ガス化の並行的進行, 投入有機物への馴化と種菌の集積培養
(4) 槽液の攪拌	・槽液の混合攪拌
(5) 投入有機物の性状	・易分解性有機物
(6) 有機物容積負荷量	・中温発酵法 (2~3kg/m <sup>3</sup> ・日) 高温発酵法 (4~6kg/m <sup>3</sup> ・日)
(7) 投入固形物濃度	・湿式メタン発酵法: 4~12%程度 乾式メタン発酵法: 20~40%程度 UASB法: SSで0.4%以下
(8) pH	・7.0~8.0の中性から弱アルカリ性域
(9) 発酵槽内固形物濃度	・2.0~8.0%程度以下 (湿式法)
(10) 消化日数	・15~30日程度

胃内ですでに微生物発酵が行われた残渣であり、有機物の中でも難分解性のリグニン等の有機物が多いため、可溶化菌による酸発酵の効率は低くなる。豚ふんの場合は、腸内細菌によって強い発酵をうけていないこともあり、微生物分解が可能な未消化物が比較的多く残されているため、牛ふんに対してガス発生量は多くなる。

同一家畜ふんにおいてもメタン発酵の前処理として搾汁処理したものと、全量を対象としたものでは分解効率が異なるため、処理条件に合わせた分解率の設定が必要がある。

食品残渣は、厨芥残飯はもともと人の食べ物であり、栄養バランスが良く微生物的にも非常に分解効率が高い素材である。この食品残渣を豚ふんと混合してメタン発酵を行うと、豚ふん単独では分解できなかつた有機物まで相乗的に発酵効率が高くなることが証明されており、むしろエネルギー生産型のメタン発酵として位置づけられる。

(4) メタン発酵の処理条件

メタン菌は偏性嫌気性菌であり、空気存在下では増殖できない。メタン発酵槽は完全密閉型の構造で、中温発酵法では約35℃、高温発酵法では約55℃の温度が保てるように加温し、発酵槽の保温ができる構造が必要である。

メタン発酵処理の最初の立ち上げ段階では、メタン菌の増殖スピードは極めて遅いため、必ずメタン発酵槽容量の半量以上には良好な種汚泥菌を加えて、徐々に汚水を投入しながら立ち上げることが大事である。この立ち上げに失敗すると、酸発酵が優先し、pHは酸性に移行するため、メタン菌の健全な活性化が失われることになる。消化

表4 搾汁処理した家畜ふん等の有機物当たりの分解率 (ガス化率) (中温発酵法)

	豚糞	鶏糞	牛糞	残飯	豚糞+残飯
分解率 L/g VS	0.53	0.52	0.27	0.84	0.78

日数も中温と高温の発酵で異なるが、メタン菌の増殖スピードが遅いため少なくとも3週間程度の消化日数を確保する必要がある (表3)。

(5) メタン発酵による有機物分解率

家畜ふんの有機物当たりの分解率は、前述の処理条件によって異なるが、家畜ふんを搾汁処理した場合の有機物分解率 (ガス化率) を表4に示す。ガス化率は蛋白、脂肪、炭水化物の組成により異なるが、理論的にはほぼ1gの分解有機物からほぼ1Lのガスが発生する。実際は分解速度が非常に遅い難分解性有機物等が含まれたり、組成によりメタン濃度が増えるため、原料の有機物性状によりガス化率は異なる。豚ふんではほぼ50%程度の有機物が消化ガスに変成される。牛ふんでは30%以下の分解率しかない。残飯は非常に分解率が高く80%以上が期待できる。このように、原料によってガス化率が異なっており、すなわち生産できるエネルギー量が異なるので、エネルギーの利用方法は各条件により十分な検証が必要である (表4)。

消化ガス中には、CH<sub>4</sub>がほぼ65%、CO<sub>2</sub>がほぼ35%含まれており、この熱量はほぼ5,500Kcal/Nm<sup>3</sup>である。また、硫化水素が500~4,000ppm程度含まれているため、燃焼機器の腐食防止のため酸化鉄製剤等を用いた脱硫処理が必要である。

(6) 消化液の液肥利用

メタン発酵消化液は、有機態の窒素がアンモニ

ア等の無機態窒素に変化していることから、堆肥の効用と異なり即効性肥料として有効であり、液肥として利用することが最も有効なシステムである。消化液の農地への利用は、年のうち2~3回程度の施用時期しかないため、ほぼ半年分の消化液貯留槽を設ける必要がある。また、消化液の発生量と施用可能な農地面積とのバランスが必要であり、過剰施用は窒素過多などで地下水汚染の原因にもなりかねないので十分留意する必要がある。とくに養豚経営では、農地の確保が困難な場合が多く、しかも施用に伴う臭気発生など周辺環境条件から液肥利用については非常に厳しい現状がある。

#### (7) 消化液の浄化処理

消化液の液肥利用が困難な場合は活性汚泥法などによる浄化処理が必要になってくる。メタン発酵消化液の性状は、C/N比が1~2程度と浄化に係る微生物処理のためには極めて窒素過剰の性状である。従来、し尿のメタン発酵処理では消化液を10~20倍に希釈し活性汚泥法によって処理さ

れていた。畜産の現場では、希釈処理には限界があり、効率的な浄化処理を確立しなければメタン発酵普及上で大きな隘路となってくる。

これまでの処理技術では、標準活性汚泥法や回転円板法、接触酸化法についての浄化性能は、標準活性汚泥法はBOD容積負荷量 $0.7\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ を超えると急速にBOD除去率が低下してくるが、回転円板法と接触酸化法の生物膜法については、BOD容積負荷量が $1.5\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ 以下の条件でもBOD容積負荷量とBOD除去率には直線の関係を示し、有効な処理法であることが分かっている。

また、凝集剤を用いた豚舎汚水の前処理技術を応用し、高分子凝集剤により消化液中の汚濁物質の大半を除去して浄化する方法が行われている。この方法では、ほとんど無希釈処理であり、BOD除去には問題ないが、着色度が強く、また脱窒槽等の併設が必要である。とくに、ランニングコストのほぼ2/3は高分子凝集剤に要する経費であり、消化液の低コスト処理技術の開発が重要課題となっている。

### ◀新刊紹介▶

## だれも教えてくれなかった、農場をうまくやる方法 ~コーチングであなたの農場が100倍魅力的になる~

著者：山本浩通(牛獣医師)  
体裁：B6変形判・156ページ  
定価：本体1,429円+税  
発行：(株)デーリィ・ジャパン社  
〒162-0806  
東京都新宿区榎町75番地  
TEL 03-3267-5201  
FAX 03-3235-1736  
www.dairyjapan.com

コーチングは、相手の“自主性”や“意欲”を育てていく技術として知られており、企業、グループ、組織、スポーツ選手など、さまざまな分野で使われています。しかし、農業の分野では、まだほとんど知られていません。

ところが実は、農業の分野、とくに農場の管理には、このコーチングをはじめファシリテーション(ミーティングの仕方)が非常に役立つものであ

ることを、筆者である山本浩通氏(熊本県・開業獣医師)は見出しました。そして、より多くの農業者、そこに携わる人たちや周辺産業の人たちに、そのことを知ってもらいたいとして本書をまとめました。

筆者は酪農・畜産の現場獣医師だけに、読者にとって、必ず「そうだ!そうだ!」と思う身近なことがたくさん書かれています。

本書を読んで、コーチング、ファシリテーションの技術をマスターすれば、農場内の家族関係、人間関係が良くなり、全員やる気が出て、楽しく儲ける農場となり、明るい将来が開けます。

主な内容は以下のとおり

- 第1章 コーチング
- 第2章 ファシリテーション
- 第3章 運営