

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(2)

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5号
掲載ページ	p. 621-626
発行年月	2006年5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 (2)

亀岡 俊則*・入江 直樹**・森 忠明***・陽奥 晨司****

2. 低コストメタン発酵処理システムの実証

1) 処理システムの目的

豚ふん尿混合汚水のメタン発酵法は、資源回収型処理としてきわめて有望であり大規模養豚場ではすでにふん尿混合方式の効率的処理として実施例がある。しかし、養豚経営のメタン発酵は消化液の液肥利用がほとんどの場合困難であり、消化液の浄化処理を行う場合は4,000頭程度の中規模以下においては処理施設の建設費が多くを占め、全体の処理コストがこれまでの「ふん尿分離方式の活性汚泥処理」に対し高額となる。ところが、近年メタン発酵処理は農家の現場においても強い関心が寄せられ、普及への期待感が強まっている。

そこで、筆者らはメタン発酵の効率化と消化液の低コスト浄化処理を4,000頭規模の養豚農家の現場で実証を行い(大洋興産株式会社)、処理性能および経済効果の高い安定処理技術を平成17年3月に確立することができた。この効率的かつ低コストメタン発酵処理システムを資源循環型処理法の一選択肢として普及が適えれば、環境保全と安定的畜産経営に寄与できることが期待できるので以下にその概要を報告する。

本処理システムの特長と開発された処理技術は以下のとおりである。

① 処理システム

本実証プラントは、豚舎より排出されたスラリー状の豚ふん尿混合汚水を搾汁脱水機で粗大物を除去した後、搾汁液をメタン発酵槽へ投入し、有機物を分解して消化ガスを発生して、ガス発電を行い、発電した電気は処理施設の消費電力として使用し、余剰が発生すると養豚場内で自家消費する。さらに回収した排熱は温水に変換して前処理設備で豚ふん尿搾汁液の加温に利用する。ま

* 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)

た、メタン発酵設備から排出される消化液は、浄化処理設備にて硝化・脱窒の浄化処理を行い河川放流する。

この処理システムでとくに効率化と低コスト化は以下の②と③の特徴がある。

② メタン発酵槽汚泥の高濃度化技術

メタン発酵槽内液の攪拌は間欠攪拌方式とし、上澄み消化液を引き出すことができる発酵槽の構造と運転法により、消化汚泥濃度を高め、有機物分解の効率化と高負荷運転を可能にするとともに、消化液中の汚泥を分離することなく浄化処理に供する技術の開発を行う。この手法により、発酵槽内の消化汚泥濃度を4%程度まで高め、有機物容積負荷量の高負荷運転(目標約3.0kg/m³)を可能とする。

③ 消化液のカラム浄化処理技術(接触酸化法)

メタン発酵槽から流出した上澄み消化液を汚泥分離することなく、低コスト化のカラム(接触酸化法)浄化処理により放流可能な水質まで処理する技術開発を行うとともに、余剰汚泥管理(曝気槽汚泥濃度管理)など運転管理の簡易化を図る。ばっ気槽内の充填材としては安価なカキ殻、コークスを接触ろ材として用いる生物膜方式としコストダウンを計るとともに、廃食油を用いた低コスト脱窒処理を実現する。

2) メタン発酵処理システムの構築

全体の処理設備は図2のフローシートおよび写真1に示すとおりである。豚舎汚水は、ふん尿混合の状態で原水受入槽に流入し、定量的処理によりスクリーブプレス型脱水機で搾汁処理を行う。分離された搾汁液は、搾汁液槽で加温し、メタン発酵槽へ投入する。

メタン発酵法は、有効容積520m³の発酵槽によって約20日間の消化日数を確保し、約35℃の中温発酵法により行う。発生した消化ガスは、酸化鉄製剤を封入した乾式脱硫塔を設置して脱硫処理

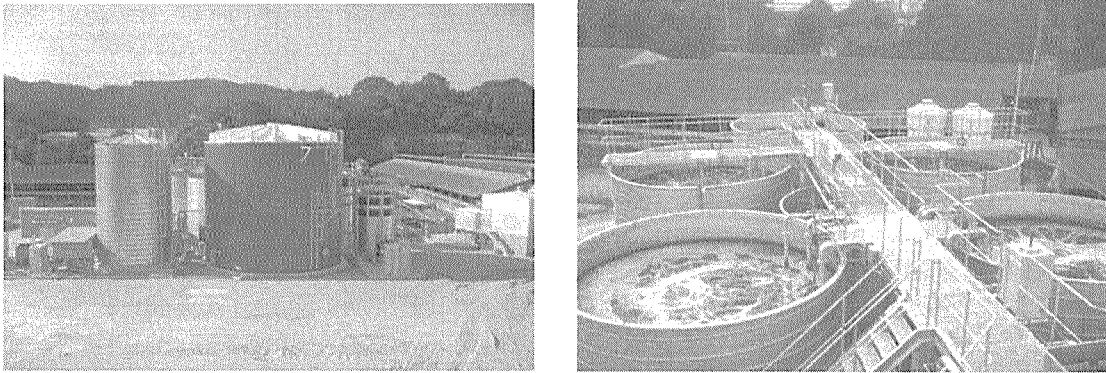


写真1 実証プラント写真
(左:メタン発酵槽, 右:浄化処理設備)

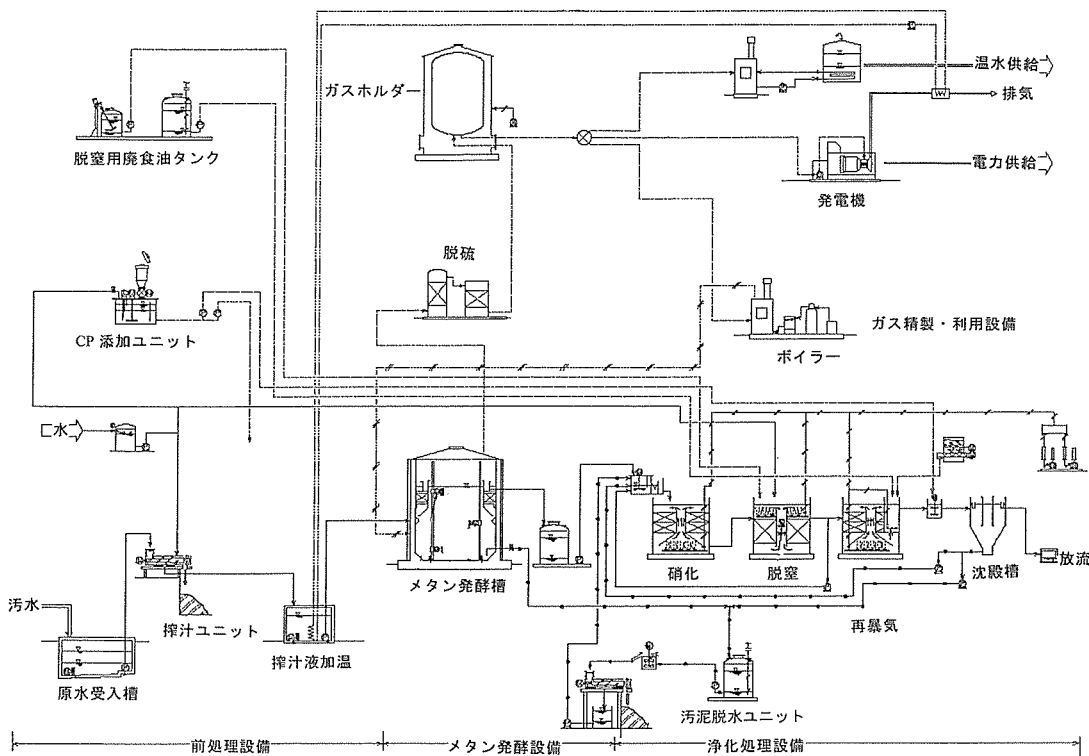


図2 実証プラントプロセスフロー

を行い、ガスホルダーに一次貯留し、マイクロガスタービンにより発電を行い、農場内の系統連係により供給利用する。メタン発酵槽の加温は、蒸気ボイラーで直接吹き込み方式としている。熱利用面では、発電設備からは温水として廃熱回収を行い、一方、余剰ガスは温水ボイラーによって温水に変換し、いずれも搾汁液槽の加温熱源に用いているが、さらに余剰が発生すると豚舎の子豚暖

房の熱源に用いることとしている。

メタン発酵槽から流出した上澄み消化液は、貯留槽に移流し、定量的に硝化カラム槽 ($98\text{m}^3 \times 4$ 槽)、次いで脱窒カラム槽 ($98\text{m}^3 \times 2$ 槽)に移流し、硝化脱窒の浄化処理を行い、さらに水質の安定化を図るため再ばっ気槽 ($98\text{m}^3 \times 1$ 槽)で最終処理を行うシステムである。

メタン発酵槽の濃縮汚泥およびばっ気槽からの

余剰汚泥は汚泥濃縮槽を経てスクリーンプレス型脱水機により固液分離する。搾汁処理した分離ふんと分離汚泥は既設の堆肥舎で堆肥化処理を行う。

3) メタン発酵処理によるエネルギー生産効率

(1) 豚舎汚水および搾汁液の性状

豚舎から排出したふん尿混合汚水およびスクリーンプレスを通した搾汁液の性状を表5に示す。排出汚水量は日量ほぼ20~26m³で、その性状はTS(固形物)7.2%、BODは48,000mg/Lと非常に高濃度である。この汚水を搾汁すると、TSは4.4%に低下し、その除去率は約39%である。BODおよび窒素の濃度変化はほとんどなく、分解し易い有機物が大半を占めているが、T-Nが5,200mg/Lと高濃度であり、後のメタン発酵微生物への影響が懸念される性状である。また、搾汁

表5 豚ふん尿混合汚水および搾汁液の性状

分析項目	豚舎排出汚水	搾汁液
TS (%)	7.2	4.4
VTS (%/TS)	81.9	73.8
BOD (mg/L)	48,000	45,000
T-N (mg/L)	5,500	5,200
NH ₄ -N (mg/L)	2,900	2,800

表6 豚ふん尿搾汁液と豆腐粕の性状

	豆腐粕	搾汁液
投入量 (m ³ /日)	1.8	26.0
TS (%)	17.0	5.2
VTS (%/TS)	96.3	78
T-N (mg/L)	6,500	4,500

した分離ふんは平均で含水率69%、強熱減量94%、比重0.94であり、主に配合飼料由来の未消化物や豚毛が見うけられた。

(2) メタン発酵のガス発生効率

メタン発酵の効率化のためには、まずメタン発酵槽内の消化汚泥の高濃度化が重要な要因となる。本実証プラントでは、発酵槽液の攪拌方法を間欠運転とし、汚泥を重力沈降させた後、汚水を投入して消化液の上澄液を越流させることにより、発酵槽内の汚泥濃度を高濃度化する。したがって、攪拌・沈殿等の運転条件により高濃度化が大きく影響される。よって発酵槽内汚泥、消化液のSS濃度を測定し、適切な運転条件の検討の結果、攪拌時間を7時間、沈殿時間を4.5時間の回分方式とし、1日2回投入の方法により、発酵槽内汚泥のSS濃度を3.8%まで高められ、かつ越流する消化液のSS濃度を0.8%以下に抑えることができた。なお、発酵槽液の汚泥濃度をSS4%以上高めると発泡現象が大きくなるので留意する必要があった。

次に、メタン発酵の通常運転と、高負荷運転の結果を表7に示す。通常運転の有機物(VS)負荷量は平均1.6kg/m³・日(832kgVS)とやや低負荷条件であった。また、高負荷運転では、豚ふん尿搾汁液に豆腐粕を混合して行った(表6)。この時の搾汁液のメタン発酵槽VS負荷量が約2.0kg/m³・日で、豆腐粕のVS負荷は約0.6kg/m³・日、この合計のVS負荷量は2.6kg/m³・日(1,350kgVS)であり、ほぼ目標値の負荷条件になっている。

メタン発酵処理の結果、通常運転では日量約

表7 メタン発酵処理の成績

投入物	通常負荷運転		高負荷運転	
	豚ふん尿搾汁液	豚ふん尿搾汁液	豚ふん尿搾汁液	おから
投入量	22 m ³ /日	26.0 m ³ /日	26.0 m ³ /日	1.8t/日
VS負荷 (kg-VS/m ³ /日)	1.6	2.0	2.0	0.6
CODCr負荷 (kg-CODCr/m ³ /日)	2.7	4.4	4.4	
バイオガス発生量 (m ³ /日)	534	921	921	
投入VS当たりのバイオガス発生量 (m ³ /VS-kg)	0.64	0.68	0.68	
発酵槽内有機酸濃度 (mg/L)	酢酸	180	170	
	プロピオン酸	<1	<1	

534m³ (2.9MKcal) の消化ガスが発生し、その有機物当たりのガス発生量は約0.64m³/VS - kgであり、これまでの豚ふん尿搾汁液の0.53m³/VS - kgの文献値に対して約20%の効率化された成績である。高負荷運転では、921m³/日 (5.1Mkcal) のガス発生量が認められ、ガス化率は0.68m³/VS - kgと一段と高い効果が得られた。これは、豆腐粕を混合し栄養バランスが改善されるなどのことから微生物活性が高まったものと推察される。

効率的なメタン発酵の裏付けとなる発酵槽内有機酸濃度は、通常運転の場合、投入1時間後は酢酸濃度が500mg/L程度であったが、次の投入までには200mg/Lまで減少していた。なお、他の有機酸濃度(プロピオン酸, 酪酸, 吉相酸)は検出限界以下(1mg/L以下)であった。また、高負荷運転では、通常運転の有機酸濃度とほぼ同程度であったことから、高負荷運転においても有機酸の蓄積はなく良好にメタン発酵が行われていることが証明された。

消化ガスの組成は、メタン濃度は66~72%で、その平均68%と一般的なメタン濃度(約65%)に對しやや高い成績であり、発酵槽液の高濃度化が何らかの関与があったものと推察される。

表8 浄化処理分析結果

分析項目	消化液	硝化カラム	放流水
pH (-)	-	-	7.0
BOD (mg/L)	3,700~15,000	670	11
CODMn (mg/L)	5,500~9,700	-	170
T-P (mg/L)	310~1,190	-	8
T-N (mg/L)	3,440~6,500	540	59
NH ₄ -N (mg/L)	1,700~4,130	32	2
NO ₂ -N (mg/L)	-	47	8
NO ₃ -N (mg/L)	-	62	31
SS (mg/L)	8,500	-	17
色度 (度)	-	-	270

4) 消化液の効率的な浄化処理成績

表8に消化液および浄化過程の各処理水の水質分析結果を示す。浄化処理設備の運転条件は、BOD容積負荷は平均0.4kg/m³・日、窒素負荷は平均0.25kg/m³・日であった。なお、硝化カラムのBOD除去率は平均75%、窒素除去率は平均66%であり、硝化カラムにおいてすでに脱窒が進行していることが確認された。写真2は硝化カラムに充填したカキ殻の写真である。カキ殻表面に汚泥が堆積しており、また生物膜の表面は茶褐色であった。さらに、生物膜の内部は黒い汚泥が堆積しており、硝化カラムに充填したカキ殻によって好気・嫌気状態が存在したためであると考えられる。放流水質はBOD11mg/L, T-N59mg/L, 大腸菌群数100個/ml以下であり、良好な水質であった。

また、年間を通じて各カラムのMLSS濃度は、4,000mg/L~6,000mg/Lであり、返送汚泥による汚泥濃度管理は必要なく、余剰汚泥の引抜きのみによる運転管理であった。これは、各カラム内の充填材(カキ殻, コークス)の効果により、十分な汚泥濃度が維持されていたためであると考えられる。

次に、廃食油とメタノールを用いた窒素除去の成績を表9に示す。その結果、廃食油では、廃食油のBOD換算を1.5kg/Lとすると、消化液の全窒素量に対して投入BOD量(消化液BOD量と廃食油添加BOD量の合計)が約1.9倍以上のときに、良好な脱窒効果が得られた。このとき、廃食油は投入消化液量に対して1,400mg/L程度の添加量であり、未分解油も確認されなかった。また、メタノール(99%換算)では約1.8倍の炭素源が必要であったことから、廃食油はメタノールとほぼ同程度であり、低コストで脱窒の有機炭素源

表9 廃食油による脱窒試験結果(単位: mg/L)

分析項目	メタノール				廃食油			
	消化液	硝化カラム	脱窒カラム	再曝気カラム	消化液	硝化カラム	脱窒カラム	再曝気カラム
BOD	6,500	-	-	-	4,900	-	-	-
T-N※	4,600	550	425	390	3,900	430	420	355
NH ₄ -N	2,800	27	24	6	2,600	37	40	16
NO ₃ -N	-	74	7	34	-	19	0.77	8
NO ₂ -N	-	40	4	6	-	7	3	0.3

※ T-N濃度はMLSSを含んだ分析結果を示す

として十分利用できることが証明された。

その後、廃食油を消化液量に対して2,400mg/L程度添加した場合、良好な脱窒効果を示したものの、再曝気カラムで未分解油が確認された。また、廃食油使用時に未分解油の流出が懸念されたが、放流水中のn-ヘキサン濃度は、常に検出限界(5mg/L)以下であり問題はなかった。これは、凝集沈澱により未分解油は余剰汚泥側へ移行したためであると推察された。

また、消化液の浄化処理では高濃度処理になるため、浄化処理水はかなり強い色度を呈する。本実証では、ポリ鉄(ポリ硫酸鉄)のみを0.28%添加した場合CODMn除去率が約42%、色度除去率は約49%であった。ポリ鉄に0.15%の鶏ふん活性炭を併用した場合はCODMn除去率が約55%、色度除去率は約63%であった。ポリ鉄の除去効果は色度除去の他にリン除去の効果が高い。また、鶏糞活性炭は賦活化率によって除去効果に影響することから、色度除去に適した鶏糞活性炭の選定が大事である。

5) 低コスト処理システムの実現

メタン発酵処理の普及のためには、処理性能と同時に処理コストが、一般的なふん尿分離方式での活性汚泥処理法とほぼ同程度であることが要求



写真2 硝化槽に充填したカキ殻

表10 薬剤平均使用量

薬剤名	使用量	備考
ポリ鉄	84kg/日	
脱水助剤	3kg/日	カチオン系
消泡剤	1.0kg/日	アルコール系
炭素源	20kg/日	廃食油
脱硫剤	7kg/日	

される。本実証プラントで約2年間の運転条件の中で要した処理経費をそれぞれリストアップし、出荷豚当たりの処理経費を求め経済性の評価を行った。

(1) 薬品使用量

表10に平成16年4月から平成17年3月までの平均薬品使用量を示す。なお、汚泥への脱水助剤添加率は約1.0%/SSであった。

(2) 電力使用量

図3に代表的な時季での電力収支を示す。定常運転時における平成16年4月から平成17年3月までのプラント消費電力の平均値は約800kWh/日、発電量は約620kWh/日であった。

(3) バイオガス収支

図4に代表的な時季でのバイオガス利用収支を示す。マイクロガスタービン発電機は吸気温度によって影響されるため、季節によって若干のガス利用量に差が見られた。また、冬季においては発酵槽の加温に使用する蒸気ボイラー稼働率が高くなり、ガスの利用量が増加した。なお、平成16年4月から平成17年3月までの余剰ガス発生量の年間平均値は約50m³/日であった。

(4) 処理コスト

上記のランニングコストの試算結果をもとに、機械設備を1.5億円とした場合の設備償却費を含め、トータルコストを算出した結果を表11に示す。その結果、本実証においては出荷豚1頭当たりのトータルコストが1,263円/頭となったが、高負荷運転では1,055円/頭となり、ふん尿分離式の尿汚水の活性汚泥処理法とほぼ同額であり、ふん尿混合で低コストメタン発酵システムを実現することができた。

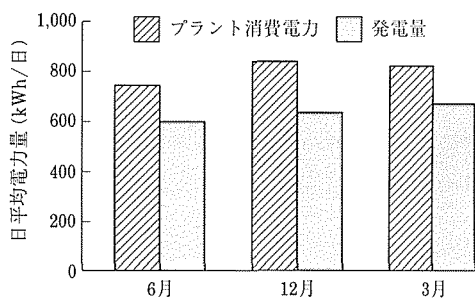


図3 代表的な時季での電力収支

表11 トータルコスト試算結果(単位:円/頭)

	通常運転	高負荷運転	備考
出荷豚1頭当たりのランニングコスト	647	566	
出荷豚1頭当たりの設備償却費	616	489	機械設備1.5億円,補助率50%,定額・15年償却,残存価格10%
出荷豚1頭当たりのトータルコスト	1,263	1,055	

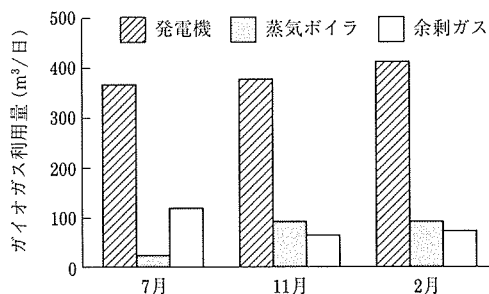


図4 代表的な時季のバイオガス利用収支

6) 普及型システムとその展望

豚舎汚水の排出形態は、ふん尿混合か、ふん尿分離方式であるが、ふん尿分離式であっても分離ふんの水分は尿の混合により泥状の場合が多く、しかも尿の混合によりアンモニア等の悪臭発生が極めて強い。飼養管理の省力化や豚舎臭気の発生抑制のためにもふん尿は混合状態で排出し、密閉系の処理工程により処理することが望まれる。ところがふん尿混合になると、水分は88~92%程度の非常に高濃度なスラリー状の汚水として排出するため、堆肥化では水分調整に大きな負担がかかり、また活性汚泥法などの汚水浄化方式では高濃度で多量のBOD物質を除去するための処理施設と経費が必要になる。

メタン発酵法は、このような高濃度汚水を処理できる特長があり、かつ資源循環型エネルギー回収ができ、カーボンニュートラルとして環境保全に貢献できる大きな利点があり、これからの家畜ふん尿処理の大きな選択肢として期待できる。

引用文献

- 1) 亀岡俊則, メタン発酵消化液の低コスト処理技術の開発, (財)畜産環境整備機構:畜産環境技術研究所年報, 第5号, p40-49, 2002
- 2) 財団法人畜産環境整備機構:畜産環境保全に関する技術開発成果発表会, p10, 2002
- 3) 和田浩幹, 中西英夫, 入江直樹, 豚ふん尿汚水メタン発酵処理実証プラントの試験報告, タクマ技報, VOL.12, NO.2, 2005
- 4) 財団法人畜産環境整備機構, 家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き, 平成13年8月.
- 5) 財団法人畜産環境整備機構, 家畜ふん尿処理・利用の手引き, 平成10年5月.
- 6) 亀岡俊則, 崎元道男, 因野要一, 家畜ふんに食品廃棄物を混合したメタン発酵について, 日畜会報, 57(3), 1986.
- 7) 亀岡俊則, 因野要一, 崎元道男, メタン発酵システムによる豚舎汚水の処理, 日畜会報, 59(8), 1988.
- 8) 亀岡俊則, 因野要一, 崎元道男, 豚舎排水のメタン発酵消化液の浄化処理, 水処理技術, 27, 1986.
- 9) 北海道バイオガス研究会, バイオガスシステムによる家畜ふん尿の有効活用, 酪農学園大学エクステンションセンター, 酪農ジャーナル臨時増刊号, 2002.