

メタン発酵施設実証試験 (II)

白石 誠・高取健治・水木 剛・小林 宙・疇地勅和*

Research on the Methane Fermentation System (II)

Makoto SHIRAIISHI, Kenji TAKATORI, Takeshi MIZUKI, Hiroshi KOBAYASHI and Tokikazu AZECHI

要 約

メタン発酵処理施設において平成 17 年度から 21 年度まで実証試験を実施した。

- 1 試験期間中の平均バイオガス発生量は、投入有機物量 (VS) 1 kg 当たり 534m³、年間 15,504m³、メタン濃度は 63.6 %、発電量は 12,173kwh、一般家庭約 3.2 戸分の電力を生産したが、さらに発電量を高めるためには VS 量の増加が必要である。
- 2 メタン発酵槽内において T-P が、597ppm から 348ppm へ低下した。これは発酵槽内での汚泥への取り込みや、pH 上昇により結晶化が起こったと考えられた。
- 3 消化液の膜分離活性汚泥処理では、BOD の除去率は高かったが、COD、T-N、T-P が残存し、より効率的な脱窒方法や脱リン方法等の検討が必要である。

キーワード：バイオマス、メタン発酵、生ゴミ、豚ふん尿、発電

緒 言

近年、地球温暖化の防止、循環型社会の構築等を図るためバイオマスを活用する取り組みが全国的に展開されている。

このような状況の中、平成 14 年 12 月に閣議決定された「バイオマスニッポン総合戦略の達成状況」を踏まえ、平成 22 年 12 月にはバイオマス利用推進基本法 (平成 21 年法律第 52 号) により、バイオマス活用推進基本計画が策定された。本計画においても、家畜ふん尿は有益なバイオマスに位置づけられており、従来の肥料利用に加えてエネルギー利用の推進を目指すとされている。

エネルギー利用を前提としたメタン発酵処理は、人畜ふん尿や調理クズなどを原料に古くから研究が行われている。そして、大正時代以降広島県、岡山県を中心に瀬戸内地方で多く考案されたメタンガス発生装置により一般の注目を集めるようになった¹⁾。特に昭和 48 年の石油危機以降日本でもエネルギー源の一つとして精力的に研究が行われ²⁾、現在のバイオマス利活用によるメタン発酵処理の基礎が築かれている。そして近年は、地球温暖化の防止、循環型社会の推進のためメタン発酵処理施設が各地域に設置されはじめている³⁾。

当研究所においても、平成 16 年度に家畜排せつ物や地域の生ゴミを有効活用するため、これらを用いたメタン発酵処理施設と発酵残さである消化液の浄化処理施設を組み合わせた実証展示施設

(以下メタン発酵施設)を整備した。

そこで、家畜ふん尿のメタン発酵処理技術の普及をはかり、温暖化防止、資源循環型社会への貢献を目指すため、前報⁴⁾に引き続き当該施設の実証試験を行い、データの蓄積を図った。

材料及び方法

1 メタン発酵施設の概要

メタン発酵施設 (図 1) への原料の計画投入量は 1 日当り 3 t (3.0t/d) で、内訳は、約 350 頭分の豚ふん尿 2.7t/d と事業所から排出される生ゴミ 0.3t/d である。

豚ふんは、豚舎内でスクレーパーによりふん尿分離を行い、ふんはトップカーまたはバケットローダーにより、尿は貯留槽からポンプ移送により受入混合槽に投入した。ここで破砕機により破砕された生ゴミと混合・攪拌した後、コンテナ型のメタン発酵槽 (有効容積 50m³) 2 槽に投入した。メタン発酵方式は湿式、中温発酵で、発酵期間は 30 日となっている。

また、バイオガスに含まれる硫化水素は、発酵槽下部から 15 ~ 30 分に 1 回瞬間的に空気を供給する生物脱硫と脱硫材 (酸化鉄) を組み合わせ除去し、ガスホルダーに充填される。ガスホルダー内のガスはガスエンジン方式のコージェネ装置 (出力 9.8kw) により発電に供してメタン発酵施設と併設の浄化処理施設に利用し

た。廃熱については温水の形で利用し、メタン発酵槽の保温に活用した。

メタン発酵後の発酵残さ（以下消化液）については、高分子凝集剤を添加後、スクリープレス式の脱水機により固形分（脱水ケーキ）と液分（ろ液）に分け、脱水ケーキは開放直線型のロータリー式堆肥舎で堆肥化処理を行った。一方、ろ液については活性汚泥処理と専用の中

空糸膜（膜孔径 0.45 μ m、実透過流速 0.29m³/m²/d）による吸引処理を組み合わせた膜分離活性汚泥法（図2）を用い、浄化処理を行った。また、窒素の除去にはメタノール添加と循環脱窒法を組み合わせる処理を用い、リンの除去は生物学的脱リン法を取り入れて処理を行った。

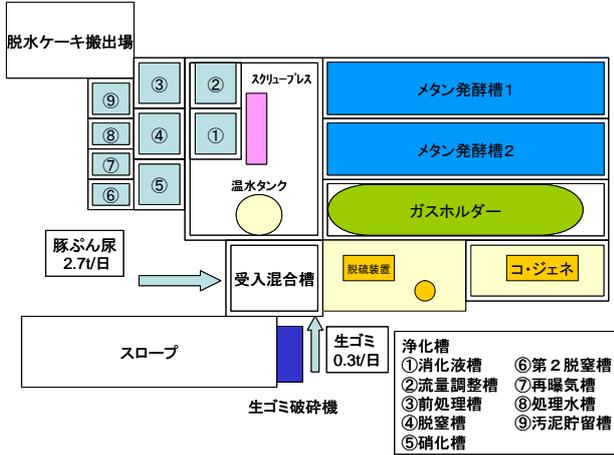


図1 施設の概要

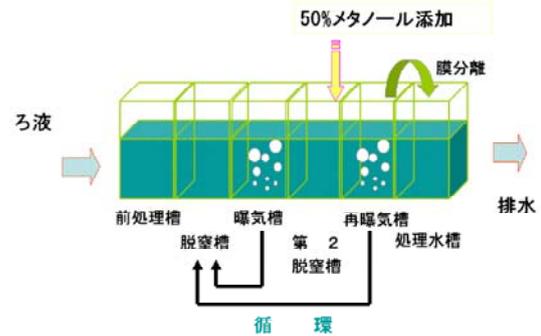


図2 浄化処理施設（膜分離活性汚泥法）

2 調査項目

表1に調査項目を示した。

メタン発酵槽への原料投入量は電磁式積算体積計で測定した。

投入物成分のうち、水分及び全固形分（TS）は蒸発残留物の測定により、また、有機物量（VS）は強熱減量により求めた。pHについてはガラス電極法、BODはウインクラア

ジ化ナトリウム変法、CODは過マンガン酸カリウム 100℃加熱法、SSはガラス繊維濾過法、全窒素（T-N）及び全リン（T-P）は同時分解法、KjNはケルダール分解法、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nはブレンナー法を用いた。濁度及び着色度については、排水着色度計・色汚染度計（日本電色工業株式会社製）により測定した。

表1 調査項目

項目	内容	容
エネルギー回収調査		
原料投入量	豚ふん尿、生ゴミ等	
原料・消化液	水分、TS、VS、pH、BOD、COD、SS、KjN、T-P	
バイオガス発生量	投入原料当り、投入VS当り	
バイオガス	メタン、二酸化炭素、酸素、硫化水素	
浄化処理能力調査		
水質調査	TS、VS、pH、BOD、COD、SS、T-P、T-N、NH ₄ -N、NO ₂ -N、NO ₃ -N、濁度、着色度	

バイオガスはガス流量計を用い、メタン、二酸化炭素及び酸素濃度は Gas-Photometer (Fresenius Umwelttechnik 社製)、硫化水素は北川式ガス検知管（光明理化製）をそれぞれ用いて測定した。

なお、調査期間は平成 17 年 8 月 1 日から平

成 22 年 3 月 31 日とした。

結果及び考察

1 原料投入量

月ごとの原料投入量の推移を図3に示した。

原料投入量は稼働直後を除き月あたり 50 ～ 100 t で推移している。平成 21 年度以降、豚ふんが減少しているが、これは飼養頭数が 380

頭から 211 頭へ減少したことによる。

なお、その他の有機資源は廃棄卵、廃糖蜜、シュレッダーダスト、廃棄乳などである。

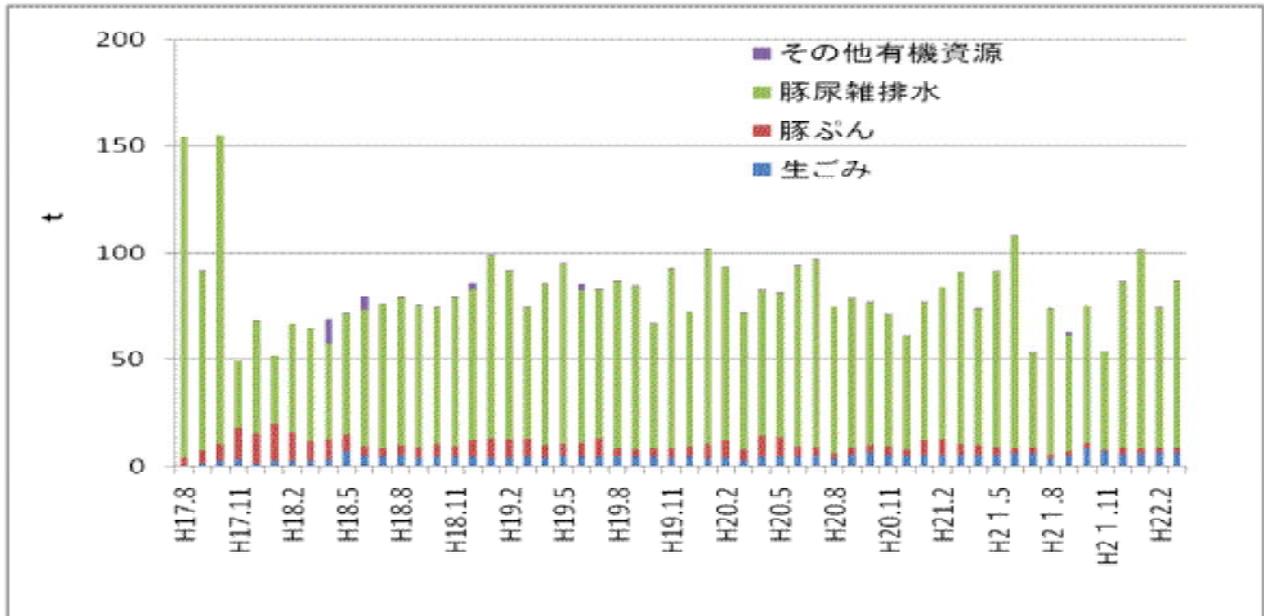


図3 投入量の推移

年 度	投 入 量	うち生ゴミ
H17	700.1	17.4
H18	954.2	55.7
H19	1,018.7	50.1
H20	969.7	60.5
H21	940.3	72.1

年 度	VS負荷量
H17	1.92
H18	0.92
H19	0.43
H20	0.45
H21	0.62

年度ごとの投入量を表2に示したが、平成19年度をピークに投入量は減少した。また、生ゴミ投入量については平成20年度から微増しているが、これは、平成20年8月から平成22年3月まで学校給食残さの利活用を図る試験を行ったためである。

2 原料と消化液の組成

投入VS負荷量を表3に、また原料と消化液の組成を表4に示した。

投入VS負荷量は平成17年度1.92kgVS/m³/d、と最も高く、以降は1 kgVS/m³/d以下で漸次減少している。これは、飼養頭数が減少したためである。

中温発酵法での、投入VS負荷量は2～3 kgVS/m³/d⁵⁾とされており、羽賀はいくつかの文

献から家畜ふん尿の場合2～4 kgVS/m³/dが適当としている⁶⁾。これらの負荷量に比べ本施設ではかなり低い負荷での運転となった。投入VS負荷量は平成17年度以降漸次減少しており、これは、飼養頭数減少が影響している。VS/T Sは畜産廃棄物では0.67～0.84、食品廃棄物は0.83～0.99といわれている⁷⁾が、本試験においては0.75と畜産廃棄物の平均的な値となっている。VSに対する窒素の比率は、平均で11.7:1であり、最も効率がよいとされる10～20:1の範囲⁵⁾にあった。また、リンはVS量の1/100程度が必要⁵⁾とされるが、本原料は1/50程度であった。羽賀は家畜ふん尿は成分的に上記諸点を満たしている⁶⁾としているが、本原料も生ゴミが加えられているが成分的には満たしていた。

投入原料のBOD濃度は平均23,724ppmであり、BOD/VSは0.75となり有機物中に易分解性有機物の占める割合が多く、生物分解性は

高いと考えられた。また、消化液中BOD濃度は 2,800ppm となり、メタン発酵により約 88% が除去されている。亀岡ら⁸⁾の約 1,000 頭規模の施設において豚舎汚水に残飯などを添加した試験では除去率 93.5%、また、豚ふんのみを利用した浅田ら⁹⁾の除去率は 61%、伊藤ら¹⁰⁾は 59.2%、林ら¹¹⁾は 57.1%であり、本結果では、分解されやすい生ゴミを活用している亀岡らの除去率に近い値であった。これは同じBODでも生ゴミが加えられることにより効率的なメタン発酵が可能となると考えられた。

原料の5年間平均VS量は 3.17%、固形物中に有機物の占める割合を示すVS/TSは 0.80であった。VSは平均 3.17%であったが消化液で 1.04%、約 67%が分解されており、乳牛ふんの分解率 42.6 ~ 49.0%、豚ふんの分解率 47.4 ~ 52.0%に比べ¹²⁾比較的高い分解率を示した。また、TSも含め固形物はメタン発酵により低

下している。

一方、窒素についてはメタン発酵後もほとんど変化がないが、アンモニア態窒素(NH₄-N)は増加している。高濃度のアンモニアは、VFAが蓄積しガス生成速度が低下するため、中温発酵での安全範囲は 4,000ppm 以下といわれている¹³⁾。本施設では 1,383ppm であり、アンモニア障害が起きる濃度までには至っていない。

また、原料のNH₄-N 935ppm に比べ消化液は増加しているため、BODに対する窒素の割合が高くなりBOD : N : Pの比率が 100:81:12 となっていた。この比率は、豚ふん尿に残飯等の生ゴミを加えてメタン発酵を行った亀岡らの消化液の比率 100:91:23⁸⁾よりは若干低いものの、浄化処理にはきわめて不向きな性状であった。

表4 原料と消化液の組成

		%, ppm								
		TS	VS	VS/TS	pH	BOD	COD	Kjn-N	NH ₄ -N	T-P
H17	原料	8.26	6.72	0.81	5.95	41,906	16,885	4,608	1,335	1,149
	消化液	3.12	2.21	-	7.76	1,966	8,401	3,812	2,107	758
H18	原料	4.54	3.51	0.77	6.14	29,750	12,241	2,698	1,331	804
	消化液	1.42	0.97	-	8.33	5,125	5,646	2,303	1,812	456
H19	原料	1.96	1.53	0.78	6.37	16,401	6,794	1,954	798	401
	消化液	0.86	0.57	-	8.39	2,405	3,461	1,607	1,010	199
H20	原料	2.10	1.68	0.80	5.99	15,183	8,383	1,579	721	414
	消化液	0.88	0.58	-	7.84	2,046	2,643	1,377	1,013	175
H21	原料	2.83	2.42	0.86	5.26	15,378	9,717	1,870	489	218
	消化液	1.24	0.87	-	7.79	2,460	3,291	1,776	922	152
平均	原料	3.93	3.17	0.80	5.94	23,724	10,804	2,710	935	597
	消化液	1.51	1.04	-	8.02	2,800	4,689	2,275	1,383	348
除去率		61.6	67.2	-	-	87.7	56.6	16.1	-	41.7

さらに、メタン発酵では、密閉系のためN、P、Kなどの肥料成分は保持され変化しない^{6, 9, 14)}とされているが、T-Pについては、597ppm から 348ppm へ低下した。これは、メタン発酵槽内での汚泥への取り込みや、pH上昇により結晶化が起こったのではないかと考えられた。リンの減少については、林ら¹¹⁾、木庭ら¹⁵⁾脇本ら¹⁶⁾も認めており、林ら⁹⁾は難溶解性の結晶を析出したためとしている。

写真に平成 21 年 6 月 ~ 10 月の発酵槽改修時にメタン発酵槽内部側壁で見つかったMAP 状物質を示したが、これが配管系に起これば重大なスケールトラブルが懸念される。



写真 発酵槽内部の結晶化物

3 バイオガス発生量及び発電量

バイオガスの発生量を表 5、6、図 4 に示し

た。ガス発生量や発電量については、メタン発酵槽の運転が安定してきた平成 17 年 10 月以降のデータを取りまとめた。

月当たりのバイオガス発生量は、平成 17 年度 ~ 18 年度は 1,500 ~ 2,000m³ で推移したが、

平成 19 年度以降減少し、メタン発酵槽改修後再び 1,500³まで発生量は増加した。

年度別にみると平成 18 年度をピークに減少し、平成 20 年度及び 21 年度にはピーク時の約 6 割程度に落ち込んだ。これは飼養頭数の減少もあるが、平成 20 年度の水封装置の腐食によるガス漏出及びその修繕、平成 21 年度の内部腐食によるメタン発酵槽改修により減少したことが大きい。

投入 V S 負荷量は 0.85kg/m³/d、滞留日数 37 日と中温発酵で用いられる一般的な負荷量 2 ~ 3 kg/m³/d⁵⁾、滞留日数 20 ~ 35 日¹⁷⁾ に比べ滞留日数は適正範囲より若干長い程度だが負荷量はかなり低い値となった。

投入 V S 1 kg 当たりのガス発生量は平均 534L で、豚ふん尿のガス発生量の目安とされる V S 1 kg 当たり 300 ~ 500L¹⁷⁾ に比べるとやや高い値であったが、これは、V S 1 kg 当たり 300 ~ 800L¹⁷⁾ 程度発生する生ゴミが混合されているためと考えられる。本試験と同様に残飯等を加えた亀岡ら⁸⁾の有機物負荷量 0.95kg/m³/d での発生量 670L に比べると低い値であった。今後、有機物負荷量を増加させればガス発生量も増加すると考えられる。

メタンガスの発生量については、投入 V S 1 kg 当たり 340L であった。また、分解された V S 1 kg 当たり 506L であった。これは豚のメタ

ン発酵に用いられる基礎数値である 660 ~ 730L-メタンガス/kg 分解 V S¹²⁾ より低い値であった。ただし、稼働初期の平成 17 年度を除く平成 18 ~ 21 年度の平均では、分解された V S 1 kg 当たり 698L であり、基礎数値とほぼ同程度であった。

発電量については図 5 に示した。平成 17 年度 ~ 18 年度は 1,000 ~ 1,500kwh で推移したが、平成 19 年度以降ガス発生量の低下に伴い減少した。これは前述したように、ガス配管系にトラブルが発生したためである。その後平成 21 年 6 月 ~ 10 月にかけてのメタン発酵槽改修後再び増加傾向になった。年度別にみると平成 18 年度をピークに減少し、平成 20 年度以降はガス発生量と連動して低下している。この電力を一般家庭に提供した場合、一般家庭の使用電力量を 3,600kwh/年(300kwh/月)として試算すると 3.2 戸分の電力を生産したこととなる。また、温室効果ガス削減の観点から見ると、一般家庭の電力からの二酸化炭素排出量を 2,139kgCO₂/年¹⁸⁾とした場合、3.2 戸分の年間 6,845kg の CO₂ 排出を削減したこととなった。

以上の結果から、ガス発生量、発電量を高めるためには V S 量の増加が必要であり、その結果として二酸化炭素排出量の削減が図れると考えられた。

表 5 ガス発生量と発電量

	バイオガス発生量		メタンガス発生量 m ³	発 電 量 kwh
	m ³	m ³		
H17	12,271	7,709	8,076	
H18	21,724	14,034	17,344	
H19	15,107	9,734	12,654	
H20	13,844	8,729	11,485	
H21	14,573	9,193	11,306	
平均	15,504	9,880	12,173	

表 6 投入量当たりのガス発生量

	バイオガス発生量			メタンガス発生量		
	投入原料当 (L/L)	投入 VS 当 (L/kg-VS)	メタン濃度 (%)	投入原料当 (L-CH ₄ /L)	投入 VS 当 (L-CH ₄ /kg-VS)	分解 VS 当
H17	17.5	261	62.8	11.0	164	244
H18	22.8	649	64.6	14.7	419	580
H19	14.8	968	64.4	9.5	623	993
H20	14.3	844	63.1	9.0	533	847
H21	15.5	639	63.1	9.8	403	630
平均	16.9	534	63.6	10.7	340	506

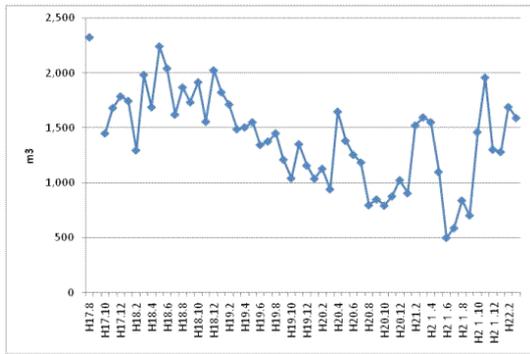


図4 月別ガス発生量

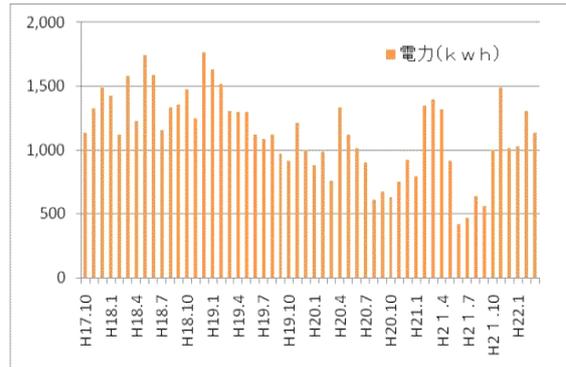


図5 月別発電量

4 バイオガスの組成

メタン発酵により発生するバイオガスは、メタン、二酸化炭素が大部分を占め、その他窒素、水素、硫化水素、酸素等が含まれる^{19, 20)}。本試験では、図6に示すとおり、メタン濃度は62.8%～64.6%、二酸化炭素濃度は33.1～35.8%、その他1.2～2.4%であった。メタン濃度と二酸化炭素の標準的な濃度である55～65%、35～45%¹²⁾に比べ、メタンはほぼ同程度、二酸化炭素は若干低めであった。

腐食成分である硫化水素濃度を表7に、生物脱硫による硫化水素の推移を図7に示した。4年間の最大値は1,400ppmであったが、平均濃度は100ppm以下であり、メタン発酵槽から発生する標準的といわれると数百～数千ppm¹²⁾に比べると低い結果となった。これはメタン発酵槽内で生物脱硫を利用しているためと考えられた。

なお、生物脱硫は、近年ヨーロッパで広まっている技術で、発酵槽外において気液接触等による方法や発酵槽内のヘッドスペース部分に空気を注入する方法により、硫化水素を硫黄に酸化し溶液中に吸収させる技術である²¹⁾。

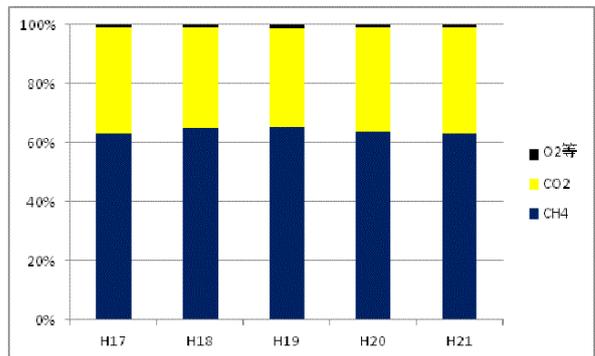


図6 バイオガス組成

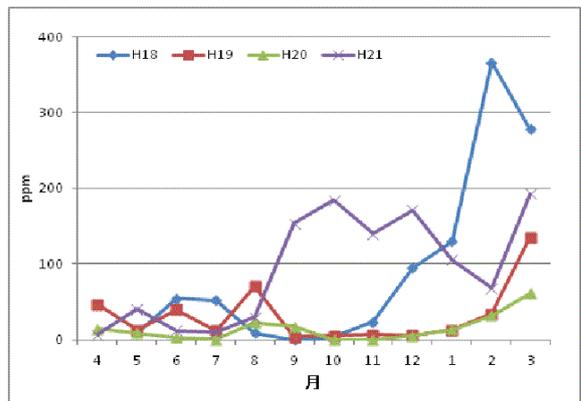


図7 生物脱硫による硫化水素の推移

	H18	H19	H20	H21
平均値	92.8	32.0	14.9	92.6
最大値	1,200.0	680.0	600.0	1,400.0
標準偏差	121.8	38.5	17.6	73.1

本施設では、メタン発酵槽内に圧縮空気を瞬間的に注入し、生物脱硫と内部攪拌を同時に行っている。しかしながら、生物脱硫のみでは十分に硫化水素を除去することはできないため、酸化鉄を利用した乾式脱硫を併用している。

化鉄を通過する時点で硫化水素はほとんど検出されず、生物脱硫と乾式脱硫を組み合わせることにより硫化水素の確実な除去と酸化鉄の交換費用が低減し、ランニングコストを抑えることができると考えられた。

5 浄化処理効果

BODは、消化液を高分子凝集剤を利用して固液分離を行うことによりかなり低減する。消化液のBOD平均値は表4に示したように2,800ppmであったが、ろ液(表8)では平均682.5ppmとなりかなり減少した。さらに、浄化処理を行うことにより処理水では除去率は98.7%と高く十分な処理結果が得られた。一方、CODは処理水に247.3ppm残存し、除去率も65.6%と低い結果であった。これは前報同様着色²²⁾とNO_x-N中のNO₂-Nの蓄積²³⁾によると考えられた。

T-Nについては、除去率72.7%で処理水中に374.6ppm残存していた。これは、BOD/N比が0.5と窒素濃度が極端に高いため、メタノール添加と循環脱窒法による窒素除去効果が十分に発揮されなかったためと考えられた。対策としてメタノール添加量の増加が考えられるが、これでは直接コストの増加につながるため、処理水の循環をBOD濃度が高い消化液槽へ返送することが効果的ではないかと考えられた。

また、窒素の低減及び硝化の促進が図れればCODも低下すると考えられる。

着色度については、平均585.4と高いが脇本ら²⁴⁾の研究から井上²⁵⁾らが開発した黒ボク土を活用した植物濾床を組み合わせれば低コストで脱色が可能と考えられ、CODの低減にもつながると考えられる。

リンについても、除去率43.3%で32ppmが残存しており、生物学的脱リン法では十分な除去ができなかった。生物学的処理において微生物に対し最も最適とされるBOD:N:Pは100:5:1とされているが、当施設のろ液は100:200:8とバランスが悪かったことが影響している。

また、メタン発酵槽内にMAP状物質が認められたことは前述したが、浄化処理過程の配管系においてもMAP状物質が付着するトラブルが認められた。これらを回避するためには、結晶化法等新たなリン除去回収技術の検討が必要である。

表8 ろ液と浄化処理水の組成

		%, ppm									
		pH	BOD	COD	S	S	T-N	NH ₄ -N	NO _x -N	T-P	濁度
H17	ろ液	8.51	652.6	1,113.0	662.2	2,171.4	1,433.0	2.7	72.0	-	-
	処理水	7.03	8.9	482.1	7.8	422.9	60.5	66.9	61.1	-	-
H18	ろ液	8.55	1,102.3	821.3	310.3	1,823.1	1,314.4	10.2	73.8	-	-
	処理水	6.94	16.2	370.2	10.8	371.6	62.5	160.0	37.2	-	-
H19	ろ液	8.52	620.4	461.0	144.4	1,140.3	887.9	26.6	41.1	-	-
	処理水	5.92	9.7	128.3	1.4	463.9	127.2	237.9	25.3	0.66	595.2
H20	ろ液	8.16	341.9	501.1	259.1	869.9	707.0	31.5	33.3	-	-
	処理水	6.45	6.7	124.5	3.9	300.5	85.3	163.0	21.8	1.20	674.1
H21	ろ液	8.17	695.4	697.3	337.0	822.3	628.5	9.0	61.4	-	-
	処理水	6.57	3.2	131.3	1.7	314.1	154.7	223.5	14.1	0.58	486.8
平均	ろ液	8.38	682.5	718.8	342.6	1,370.8	994.2	16.0	56.3	-	-
	処理水	6.58	8.9	247.3	5.1	374.6	98.0	170.3	31.9	0.81	585.4
	除去率	-	98.7	65.6	98.5	72.7	90.1	-	43.3	-	-

6 日常運転経費

平成18年度のデータから、日常の運転にかかる費用を算出し図8に示した。平成18年度の購入電気費は年間32万円、消化液の浄化処理に係る凝集剤及びメタノール代が23万円、メタン発酵槽の発酵温度維持のための灯油代8万円、生ゴミ破碎時の水道代3万円の66万円であり、出荷豚1頭あたりの経費としては1,144円程度であった。

この年度のガスエンジン稼働率は約60%であったため、VS量の増加などにより、ガス発生量を増加させ100%ガスエンジンを稼働するこ

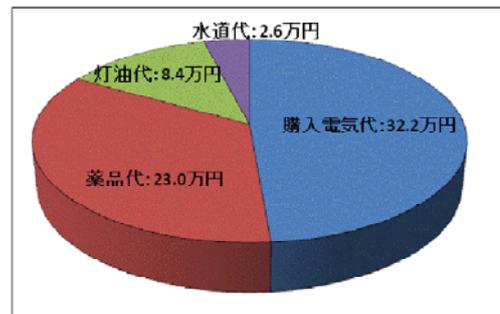


図8 日常運転経費

とができれば、灯油代、購入電気代が削減でき、44万円程度まで年間維持費を抑えることが可能と考えられ、この場合、出荷豚1頭あたりの

経費としては763円程度まで削減できると考えられた。

引用文献

- 1) 小野二良. 1963. メタンガス利用の基礎と実際. 23-67. 分雅堂書店. 東京
- 2) 松田従三, 北海道バイオガス研究会監修. 2002. バイオガスプラントによる家畜ふん尿の有効活用. 8-14. 酪農学園大学エクステンションセンター
- 3) バイオマスエネルギー導入ガイドブック検討委員会. 2010. バイオマスエネルギー導入ガイドブック第3版. 147-153. 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構. 東京
- 4) 白石 誠, 滝本英二, 高取健治, 小林 宙, 疇地勅和. 2008. メタン発酵施設実証試験. 岡山総畜セ研報 17, 103-106
- 5) 御園光信, 社団法人日本工業用水協会編. 1971. 水処理実験法. 312-348. コロナ社, 東京
- 6) 羽賀清典. 1976. 家畜ふん尿のエネルギー利用, 特にメタンガス生産利用法. 畜産の研究 30, 1, 222-226
- 7) 米山豊, 植田真司, 西本将明, 築井良治, 中村一之, 片岡直明. 2010. 有機性廃棄物のメタン発酵実設備への適用. エバラ時報 No228, 23-33
- 8) 亀岡俊則, 因野要一, 崎元道男. 1988. メタン発酵システムによる豚舎汚水の処理. 日畜会報, 50, (8). 675-681
- 9) 浅田研一, 徳満茂, 高椋久次郎, 山下滋貴. 1990. 大型メタン発酵処理装置を用いた豚舎汚水処理施設の実態調査. 福岡農総試, C-10. 51-54
- 10) 伊藤元, 河瀬信雄, 奥村千春, 臼井正直, 度会巖. 1983. 家畜ふん尿のメタン発酵による処理と利用(1). 岐阜県畜産試験場研究報告, 9. 58-63
- 11) 林希史雄, 兵頭只義, 石本功一. 1980. 高能力簡易メタンガス発生装置の開発に関する研究. 愛媛県畜産試験場研究報告, 4. 2-28
- 12) 家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理技術研究会. 2001. 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. 37-42. 財団法人畜産環境整備機構. 東京
- 13) 船石圭介, 山下耕司, 佐々木宏, 李玉友. 2002. 有機性廃棄物の高濃度メタン発酵に及ぼすアンモニアの影響. 第36回日本水環境学会年会講演集, 416
- 14) 渡部敢, 北海道バイオガス研究会監修. 2002. バイオガスプラントによる家畜ふん尿の有効活用. 48-53. 酪農学園大学エクステンションセンター
- 15) 木庭研二, 押川文夫, 村上忠勝. 1991. 豚ふん尿によるメタン発酵とその利用に関する研究. 熊本県農研セ研報, 2. 75-83
- 16) 脇本進行, 白石 誠, 滝本英二, 小林 宙, 北村直起. 2008. メタン発酵消化液の活性汚泥法によるBOD容積負荷量の検討. 岡山総畜セ研報 17, 51-55
- 17) 財団法人畜産環境整備機構編. 2004. 家畜ふん尿処理施設的设计・審査技術. 171-184. 財団法人畜産環境整備機構, 東京
- 18) 独立行政法人国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスウェブページ. 2010. 日本の温室効果ガス排出量データ(1990 ~ 2008年度) 確定値
- 19) 羽賀清典. 2002. 人に役立つ微生物のはなし. 175-205. 学会出版センター. 東京
- 20) 浮田良則監訳. 2002. バイオガス実用技術. 27-28. オーム社. 東京
- 21) 浅野孝幸, 北海道バイオガス研究会監修. 2002. バイオガスプラントによる家畜ふん尿の有効活用. 40-47. 酪農学園大学エクステンションセンター
- 22) 地人書館 (1992) 水のリサイクル (応用編) : 28-35
- 23) 菱川雅弘・上林峯治・井上重美. 1993. 低コスト汚水処理技術の確立(Ⅲ). 岡山総畜セ研報 4, 67-71
- 24) 脇本進行, 北村直起, 白石 誠, 滝本英二, 奥田宏健. 2004. 尿汚水活性汚泥処理垂のリン・窒素の低減及び脱色技術の検討. 岡山総畜セ研報 15, 76-83
- 25) 井上重美, 斉木孝. 1981. 畜舎汚水浄化のための土壌・植物濾床の施工及び管理方法. 岡山酪試研報 第18号, 149-163.