

第5章 実用規模メタンガス生産施設

の熱収支の試算

第1節 本章の目的

北海道のような寒冷地でメタン発酵を行う場合、発酵槽の温度維持の所要熱量が問題となる。Hillら(1981)は、CEDの特徴をCFDに比べ発酵状態の安定性は高いが、発酵槽の表面積が大きいため放熱量も大きいとしている。連続式CFDプラントの熱収支に関する報告では、Singhら(1977)、梅津(1993)などの報告があるが、CEDプラントに関する報告はない。

前章で、CFD+CEDシステムはCFD、CEDシステムに比べバイオガス生成量が多いことを明らかとしたが、本章では、実用規模の処理システムを想定して熱収支について検討を試みた。すなわち、乳牛200頭規模のバイオガスプラントモデルを想定し、CFD、CED、CFD+CEDの3方式についてそれぞれの熱収支を試算し、比較考察を試み、熱収支的に有利な処理システムを見出すことを目的とした。

第2節 モデルプラントの熱収支の試算

1. モデルプラントの規模

想定したモデルプラントは乳牛 200 頭規模である。乳牛 1 日一頭当たりの排泄量を 50kg, 雑用排水を 10kg, 計 60kg とした。一日当たりの処理量は 12t となる。

CFD は発酵槽容積を水理学的平均滞留日数 $HRT=10$ 日, 容積 147.8m^3 (有効容積 120m^3) 高さ 6.0m, 半径 2.8m の円柱形とした。発酵槽の上, 側, 底面の表面積はそれぞれ 24.6, 105.6, 24.6m^2 , 合計 154.8m^2 である。

CED は貯留日数 $RT=150$ 日, 容積 $2,035.8\text{m}^3$ (有効容積 $1,800\text{m}^3$) 高さ 4.5m, 半径 12.0m の円柱形とした。発酵槽の上, 側, 底面の表面積はそれぞれ 452.4, 339.3, 452.4m^2 , 合計 $1,244.1\text{m}^2$ である。CED および CFD いずれも板厚 6mm の鉄製, 使用する断熱材は 200mm とした。なお, 発酵槽はいずれも地上型とした。

2. 発生メタンガスの発熱量の試算

乳牛 200 頭規模のメタンガス生成量と発熱量を表 5-1 に示す。予想発熱量の計算にはメタンガスの低位発熱量 $25.08\text{MJ}/\text{m}^3$ を用いた。CFD の発熱量は $3,693\text{MJ}/\text{d}$ であった。投入有機物当たりのメタンガス生成量が一番高かった発酵温度, すなわち CED 34.5°C , CFD $42.5^\circ\text{C}+\text{CED}$ 29.5°C の発熱量は CED: $5,404\text{MJ}/\text{d}$, CFD+CED: $6,993\text{MJ}/\text{d}$ であった。

表 5-1 乳牛 200 頭規模メタンガスプラントの
メタンガス生成量と発熱量

	発酵温度 (°C)	プラント 投入有機物当たりの		有効容積当たりの		発熱量 (MJ)
		有効容積 (m ³)	メタンガス生成量 (m ³ CH ₄ /kg VSA)	メタンガス生成量 (m ³ /day)	メタンガス生成量 (m ³ CH ₄ /m ³)	
CFD	42.5	120	0.1611	147.3	1.2272	3,693
CED	20	1,800	0.1862	171.4	0.0952	4,298
	34.5	1,800	0.2341	215.5	0.1197	5,404
	42.5	1,800	0.2008	184.8	0.1027	4,635
CFD+CED	20	1,920	0.2617	240.9	0.1255	6,041
	29.5	1,920	0.3030	278.8	0.1452	6,993
	42.5	1,920	0.2498	229.9	0.1197	5,766

メタンガスの低位発熱量: 25.08MJ

投入原料重量: 12,000kg 有機物濃度: 7.67% 投入有機物量: 920.4kg/day

3. 発酵槽からの放熱量

3.1 放熱量の解析方法

一般に n 種の材料が層状になっている場合の単位面積当たりの放熱量 q_n (W/m²) は (5-1) 式で示される。

$$q_n = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n}} \quad (5-1)$$

θ_1, θ_2 : 両面の温度 (°C)

d_1, \dots, d_n : 各層の厚さ (m)

$\lambda_1, \dots, \lambda_n$: 各層の熱伝導率 (W/m·°C)

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{n=1}^n \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (5-2)$$

α_1 : 内壁面の熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

α_2 : 外壁面の熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

U (5-2 式) は総括伝熱係数 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) であり, (5-1) 式は (5-3) 式に書き換えることができる。

$$q_n = UA(\theta_a - \theta_b) \quad (5-3)$$

発酵槽表面積 $A (m^2)$ の放熱量 $q_R (W)$ は (5-4) で示される。

$$q_R = UA(\theta_a - \theta_b) \quad (5-4)$$

更に, 発酵槽表面積 $A (m^2)$ の 1 日当たりの放熱量 $q_R (J/d)$ は (5-5) で示される。

$$q_R = 86,400 UA(\theta_a - \theta_b) \quad (5-5)$$

3.2 総括伝熱係数

モデルプラントの算出基礎（熱伝導率，使用材料の厚さ）を

- ① 鋼材の熱伝導率 (λ_1) : $45 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$
(農業施設ハンドブック, 1990)
- ② 鋼材の厚さ (d_1) : 0.006 m
- ③ 吹付発砲ウレタンフォームの熱伝導率 (λ_2) :
 $0.028 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ (農業施設ハンドブック, 1990)
- ④ 吹付発砲ウレタンフォームの厚さ (d_2) : 0.2 m
- ⑤ 単位長さ当たりの内壁面の熱伝導率 (λ_3)
: $8.4 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ (畜舎の設計, 1972)
- ⑥ 単位長さ当たりの外壁面 (風速 3 m) の熱伝導率 (λ_4)
: $30.7 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ (畜舎の設計, 1972)

とするとモデルプラントの総括伝熱係数は $0.14 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ である。ウレタンフォーム 0.10 mm を用いた Fischer ら (1983) の報告は $0.26 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ であった。発酵槽全体を 0.20 mm の吹付発泡ウレタンフォームで断熱した効果と考えられる。

3.3 放熱量

(5-3)式を用いて算出した発酵槽壁単位面積当たりの1日の放熱量と温度差の関係を図5-1に示す。温度差(x)と放熱量(y)の関係は次に示す一次式(5-6)で表される。

$$y = 0.0121x \quad (5-6)$$

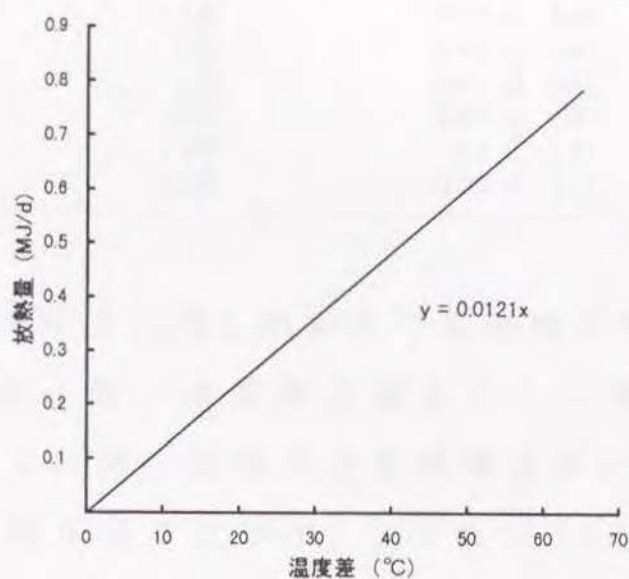


図 5-1 単位面積当たりの放熱量と温度差の関係

北海道帯広市は国内で厳寒地として知られているが、過去10年間(1987~1996)の月別平均気温を表5-2に示す。月別平均気温は1月の $-7.45 \pm 2.18^{\circ}\text{C}$ が最も低い。すなわち過去10年間の平均気温の最低は約 -10°C と仮定できるので、これを外気温として試算を試みた。

表 5-2 帯広市の過去 10 年間の
月別平均気温 (1986~1995)

	平均±標準偏差
1月	-7.45 ± 2.18
2月	-5.89 ± 1.80
3月	-0.83 ± 1.22
4月	5.57 ± 0.60
5月	11.27 ± 1.02
6月	14.52 ± 1.56
7月	17.72 ± 1.48
8月	19.85 ± 1.41
9月	16.07 ± 0.80
10月	9.87 ± 0.97
11月	3.2 ± 1.21
12月	-3.03 ± 1.31

CFD 及び CED の上, 側, 底面及び発酵槽全体の放熱量は, (5-4)式に上, 側, 底面表面積を代入し算出した。CFD 及び CED の上, 側, 底面及び発酵槽全体の放熱量と温度差の関係を図 5-2, 3 に示す。CFD 及び CED それぞれの温度差 (x) と放熱量 (y) は比例関係にあり CFD の側面では (5-7)式, 上, 底面では (5-8)式, CED の側面では (5-9)式, 上, 底面では (5-10)式で示される。

$$y = 1.2773x \quad (5-7)$$

$$y = 0.2976x \quad (5-8)$$

$$y = 5.4674x \quad (5-9)$$

$$y = 4.1042x \quad (5-10)$$

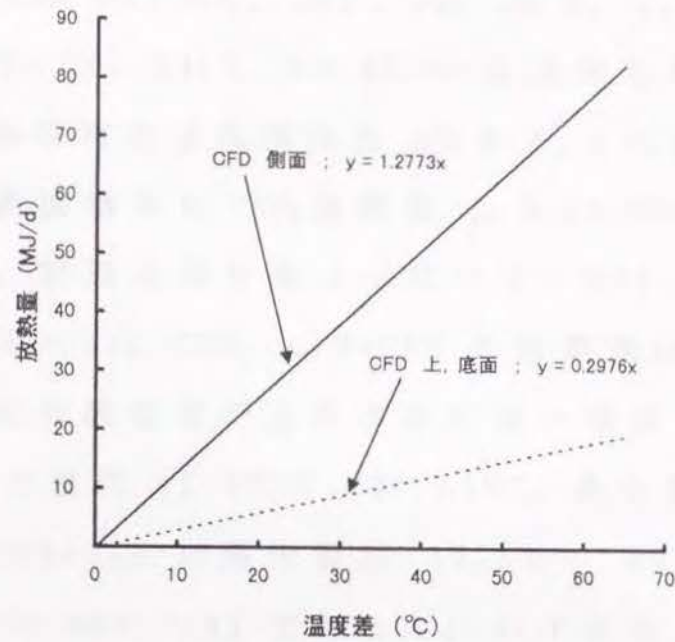


図 5-2 上, 側, 底面の放熱量と温度差の関係 (CFD)

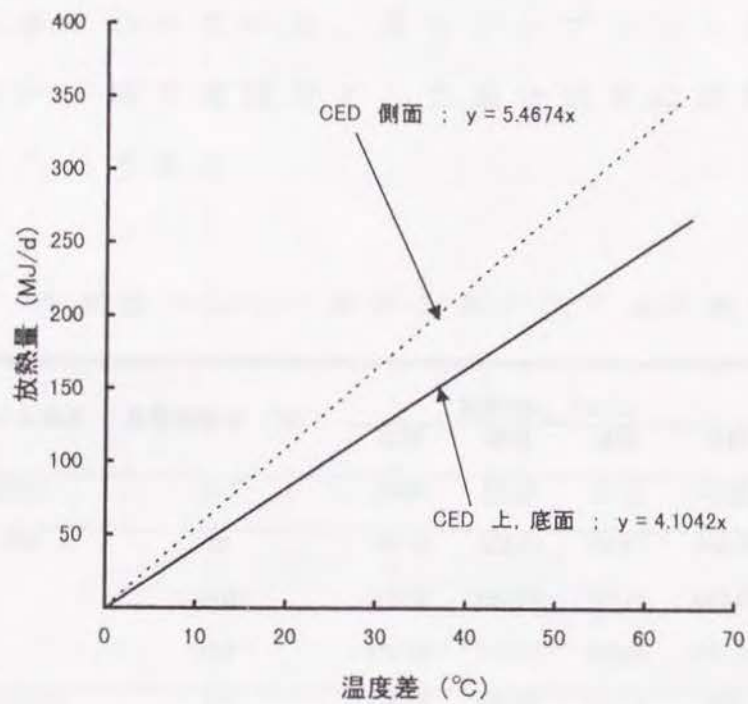


図 5-3 上, 側, 底面の放熱量と温度差の関係 (CED)

発酵温度 CFD : 42.5℃, CED : 20, 29.5, 42.5℃の3段階, CFD+CED : 20, 34.5, 42.5℃の3段階を θ_1 , 外気温度 -10℃, 発酵槽底面接触温度 5℃を θ_2 とし, 各システムの発酵槽表面積当たりの放熱量 q_R を(5-5)式に代入して算出した。計算結果を表5-3に示す。CFDの放熱量は93.84MJであった。CED, CFD+CEDの放熱量は図5-1~3に示すように発酵温度が上昇するに従い増加した。生糞尿CEDの最大値は42.5℃で707.54MJ, 最小値は20℃の369.16MJ, CFD+CEDの最大値は42.5℃で801.38MJ, 最小値は20℃の463.00MJであった。いずれも, 発酵温度が高く, すなわち槽内外の温度差が大きいほど放熱量が多く, CFD+CEDはCEDよりCFDの放熱量が付加されるので放熱量は多くなっている。本モデルプラントは地上型を想定したが, 地下埋設型とした場合は更に放熱量の減少が見込めると考える。

表 5-3 外気温 -10℃における各システムの放熱量

システム形式	発酵槽温度 (°C)	放熱量 q_R (MJ/d)			
		上面	側面	底面	合計
CFD	42.5	15.62	67.06	11.16	93.84
CED	20	164.02	123.13	82.01	369.16
	34.5	243.3	182.64	161.29	587.23
	42.5	287.04	215.47	205.03	707.54
CFD+CED	20 *	179.64	190.19	93.17	463
	29.5 *	231.58	229.17	145.11	605.86
	42.5 *	302.66	282.53	216.19	801.38

*はCEDの発酵温度を示す。

4. 原料加温熱量

CFD 及び CED への原料投入は一日一回とし、その加温熱量 q_m (MJ/d) は (5-12) 式を用いて算出した (表 5-4)。条件は投入原料重量 V_m 12,000kg, 糞尿の比熱 c 4.187KJ/kg \cdot °C (Chan, 1978), 糞尿の温度 θ_2 5°C (高畑ら, 1990), 発酵温度 θ_1 CFD: 42.5°C, CED: 20, 29.5, 42.5°C とした。また, 熱利用効率を 85% とした。

$$q_m = 0.001V_m c (\theta_2 - \theta_1) / 0.85 \quad (5-11)$$

V_m : 投入原料重量 (kg) c : 糞尿の比熱 (KJ/kg \cdot °C)

表 5-4 投入原料の加温熱量

発酵温度 (°C)	原料加温熱量	
	CFD (MJ/d)	CED (MJ/d)
20.0	—	887
34.5	—	1,744
42.5	2,217	2,217

5. 脱離液による加温

CFD より CED への脱離液を投入することによる加温熱量は原料加温と同様に (5-11) 式を用い算出した。表 5-5 に計算結果を示す。

表5-5 脱離液による加温熱量

発酵温度 (°C)		脱離液による加温熱量 (MJ/d)
(CFD)	(CED)	
42.5	→ 20.0	1,330
42.5	→ 34.5	768
42.5	→ 42.5	0

5. 余剰熱量

発熱量と放熱量の差を表 5-6 に示す。余剰熱量はメタン生成量に比例する傾向がある。しかし、CFD 42.5℃、メタン生成量の最も多い生糞尿 CED 34.5℃及び CFD+CED 29.5℃の余剰熱量はそれぞれ 1,715MJ/d, 3,335MJ/d, 5,156MJ/d であり、CFD+CED が最も高かった。すなわち、生糞尿を対象とする CED は CFD の約 2 倍の余剰熱量が得られ、メタン生成量のみで考えれば、貯留式メタン発酵の方が有利である。しかし、CFD42.5℃は雑草種子を 100% 駆除する効果があり、乳牛糞尿のメタン発酵処理システムに CFD は不可欠である。また、CFD+CED は CED に比べ余剰エネルギーが多く得られ、熱収支的にも有利である。

CFD+CED 20℃は、生糞尿 CED34.5℃の 1.5 倍 (CFD の 2.8 倍) となり、CFD 42.5℃と CED 20℃の組合せでも十分な余剰熱量を得られることが明らかとなった。また、最も余剰熱量の多い CFD+CED 29.5℃ と CFD+CED 20℃の差は 332MJ/d で 7%である。すなわち CFD+CED の処理システムにおいて、CED が 20℃まで降下しても余剰熱量の減少幅は小さいと考えられる。

今回は乳牛糞尿のみの処理を想定したが、デンマークの集中処理型プラントのように施設規模を拡大し、豚糞尿、水産廃棄物、厨芥などを原料に混合し、C/N を調整すれば更に余剰量は増加すると考えられる。

以上のように厳寒期を想定した試算結果より、CFD+CED システムは厳寒期においても余剰熱量が十分であり、周

年運転が可能なシステムであると考える。余剰メタンガスは牛舎，家屋で用いる熱源又は電源として利用可能である。

表 5-5 余剰熱量

システム形式	発酵槽温度 (°C)	産出メタンガスの 発熱量 (MJ/d)	発酵槽からの 放熱量 (MJ/d)	原料加温熱量 (MJ/d)	脱離液による 加温熱量 (MJ/d)	余剰熱量 (MJ/d)
CFD	42.5	3,693	94	1,884	—	1,715
CED	20	4,298	369	754	—	3,175
	34.5	5,404	587	1,482	—	3,335
	42.5	4,635	708	1,884	—	2,043
CFD+CED	20	6,041	463	1,884	1,130	4,824
	29.5	6,993	606	1,884	653	5,156
	42.5	5,766	801	1,884	—	3,081

第3節 本章のまとめ

飼養頭数 200 頭規模の糞尿処理施設を想定し、乳牛生糞尿を用いた貯留式メタン発酵（CED システム）と連続式メタン発酵と貯留式メタン発酵を組み合わせた複合処理システム（CFD+CED システム）、更にそれぞれの熱収支を検討した。熱収支の算出は、外気温度 -10°C 、発酵槽底面接触温度 5°C 、生糞尿原料温度 5°C 、発酵槽温度、CFD 42.5°C 、CED $20\sim 42.5^{\circ}\text{C}$ とし、メタンガス発熱量から発酵槽壁放熱量及び投入原料の加温熱量より余剰熱量を求めた。結果を要約すると以下の通りである。

- 1) 余剰熱量は CED 34.5°C $3,335\text{MJ/d}$ 、CFD+CED 29.5°C が $5,156\text{MJ/d}$ で CFD+CED が最も高く、CFD+CED が有利である
- 2) CFD+CED 20°C の余剰熱量は、生糞尿 CED 34.5°C の 1.45 倍、CFD の 3.01 倍となり CFD 42.5°C と CED 20°C の組合せでも十分な余剰熱量を得ることが明らかとなった。
- 3) CFD+CED 29.5°C と CFD+CED 20°C の差は 332MJ/d で 7% である。すなわち CFD+CED は CED 温度が 20°C まで低下しても余剰熱量の低下幅は小さく、発酵温度が熱収支に及ぼす影響が比較的小さいことが明らかとなった。

第6章 総括

家畜糞尿の内、乳牛糞尿は、繊維質が多いため連続式メタン発酵ではメタンガス生成量が少なく、かつ有機物分解率が低いため、経済的に、また熱収支的にメタン発酵処理は不利とされてきた。その解決策として発酵期間の延長があり、大型貯留槽を有効利用する貯留式メタン発酵の導入が考えられる。本研究は、発酵槽の小型化を目的とする連続式高率メタン発酵の発酵特性と糞尿中の雑草種子駆除を目的とする発酵条件を明らかにし、更に貯留式メタン発酵の有機物分解率とメタンガス生成量の温度依存性を明らかにし、熱収支的に最も有利なメタン発酵処理システムを構築する基礎資料を得ることを目的とする。

本研究の成果を総括すれば以下の通りである。

1. 連続式メタン発酵による乳牛糞尿処理

連続式高率メタン発酵槽(CFD)150日間の連続試験結果に基づくCFDの発酵特性及びメタン発酵の副次的効果として雑草種子の駆除効果について検討した。結果を要約すると以下の通りである。

連続式メタン発酵の運転結果：

発酵温度 42.5℃，水理学的平均滞留日数 10日，投入原料の固形分濃度 9%，有機物負荷 6～8 g/L/day の発

酵条件で乳牛糞尿の高率発酵を行った結果、メタン濃度 52.17%、投入有機物当たりメタン生成量 0.16L/g/day、分解有機物当たりメタン生成量 0.50L/g/day が得られた。有機物分解率は 31.81% で低いが、一般の数値よりメタン生成量が多く、装置の小型化と易分解性有機物のメタン発酵処理が短期間で可能であり、メタン発酵処理システムの前段処理法として有効であると考えられる。

メタン発酵処理の雑草拡散防止効果：

連続式メタン発酵処理を行った雑草種子は、発酵温度 42.5℃、水理学的平均滞留日数 10 日の運転条件で完全に死滅することが明らかとなった。

2. 中温連続式メタン発酵脱離液の冷温域への適応性

乳牛糞尿スラリー及び中温連続式発酵槽より排出された脱離液を原料とした嫌気回分発酵試験を行い、中温で馴養した種汚泥の冷温域への適応性および中温から冷温域にかけてメタンガス生成量及びメタン生成率の発酵温度依存性をモデル式： $B=B_0(1-\exp(-Kt))$ を用い検討した。結果を要約すると以下の通りである。

メタンガス生成量予測モデルの有効性：

モデル式は、投入有機物当たりの累積メタンガス生成量及びメタン生成率の予測モデルとして有効であることが明らかとなった。

種汚泥の冷温域への適応性：

中温で馴養した種汚泥を用いた回分発酵の場合，発酵温度 20℃を境に冷温域のメタン生成量が著しく減少し，冷温域の環境にはほとんど順応しないことが明らかとなった。

発酵温度と可燃性バイオガス：

可燃性バイオガスは 15℃でも採取が可能であるがメタン生成量，メタン濃度，有機物分解率共に低く，メタン発酵の安定的な進行のためには，発酵温度 20℃以上が必要である。

3. 貯留式メタン発酵の温度依存性

(1) 乳牛糞尿を対象とした貯留式メタン発酵

乳牛糞尿を対象とし，5，10，15，20，35，42.5℃の発酵温度条件で貯留式嫌気発酵（生糞尿 CED）試験を行い以下の項目が明らかとなった。

発酵温度とメタン濃度：

乳牛生糞尿を用いた貯留試験では中温域（20～42.5℃）におけるメタン濃度に有意差はない。また，15℃でも可燃性メタンガスが採取できるが，効率的なメタンガス生成には 20℃以上の発酵温度が必要である。

発酵温度とメタンガス生成量：

投入有機物当たりのメタン生成量は 35℃において 0.23L/g であり，CFD 42.5℃の 1.43 倍である。ただし雑草種子の完全駆除は期待できない。

発酵温度と有機物分解率：

冷温域（5, 10℃）での貯留嫌気式発酵は，中温連続式発酵と同等の高い有機物分解率を得る。また乳牛糞尿の有機物分解率は発酵温度の影響を受けやすい。

発酵温度と BOD 除去率：

5, 10℃では BOD 除去率が著しく低下するが 20℃以上では約 80% の除去率を得る。

(2) 脱離液を対象とした貯留式メタン発酵

連続式嫌気発酵槽 (CFD) より排出された脱離液の貯留式嫌気発酵 (CED) 試験を行い，以下の項目が明らかになった。

発酵温度とガス生成量及びメタン濃度：

20℃以上でガス生成量，メタン濃度共に立ち上がり早く，良好な発酵状態が安定的に持続する。また，平均メタン濃度は 15℃以上で全て 40% 以上となり，温度依存性は低かった。また，生糞尿，脱離液の原料種別はメタン濃度に殆ど影響しないことも明らかになった。

発酵温度と有機物分解率：

有機物分解率は発酵温度に比例し 42.5℃で 47%となる。

発酵温度と BOD 除去率：

BOD 除去率は発酵温度 42.5℃で 67%に達する。

(3) 各システムの比較

脱離液 CED を CFD の補助施設とした CFD+CED システムと生糞尿原料 CED システムをメタンガス生成量主体に発酵温度 20, 35, 42.5℃で比較考察を試みた。結果を要約すると以下の通りである。

メタンガス生成量：

投入有機物当たりのメタンガス生成量の最大値は、CED は 34.5℃ (0.23 L CH₄/g VSA) , CFD+CED は 30.4℃ (0.30 L CH₄/g VSA) と推定される。

有機物分解率と BOD 除去率：

CED, CFD+CED それぞれの有機物分解率, BOD 除去率は発酵温度が上昇するに従い高くなる傾向を示した。また, CFD と比較すると, CED, CFD+CED の有機物分解率は CED 34.5℃ 62.92%, CFD+CED 29.5℃ 59.86%, BOD 除去率は CED 34.5℃ 82.19%, CFD+CED 29.5℃ 84.19% で明ら

かに高く、長期間の貯留発酵処理の優位性が認められた。

4. 実用規模メタンガス生産施設の熱収支の試算

乳牛 200 頭規模のバイオガスプラントモデルを想定し、乳牛生糞尿を用いた貯留式メタン発酵 (CED システム) と連続式メタン発酵と貯留式メタン発酵を組み合わせたシステム (CFD+CED システム) それぞれの熱収支を検討した。熱収支の算出は、外気温度 -10°C 、発酵槽底面接触温度 5°C 、生糞尿原料温度 5°C 、発酵槽温度、CFD 42.5°C 、CED $20\sim 42.5^{\circ}\text{C}$ とし、メタンガス発熱量から発酵槽壁放熱量及び投入原料の加温熱量より余剰熱量を求めた。結果を要約すると以下の通りである。

余剰熱量：

余剰熱量は CFD 42.5°C $1,715\text{ MJ/d}$ に対し、CED 34.5°C が $3,335\text{ MJ/d}$ 、CFD+CED 29.5°C が $5,156\text{ MJ/d}$ で CFD+CED が最も高く、CFD+CED が有利である

CFD+CED の運転温度条件：

CFD+CED 20°C の余剰熱量は、生糞尿 CED 34.5°C の 1.45 倍、CFD の 3.01 倍となり CFD 42.5°C と CED 20°C の組合せでも十分な余剰熱量を得ることが明らかとなった。また、CFD+CED 29.5°C と CFD+CED 20°C の差は 332 MJ/d で 7% である。すなわち CFD+CED は CED 温度が 20°C まで低下しても余剰熱量の低下幅は小さく、発酵温度が熱収支

に及ぼす影響が比較的小さいことが明らかとなった。

5. 結論

本研究の結果、乳牛糞尿のメタン発酵処理は発酵温度に大きく影響を受けることが明らかとなった。連続式高率メタン発酵の適温は 42.5℃とされ、その条件で雑草種子の完全駆除が可能になることが明らかとなった。その脱離液を更に貯留式メタン発酵する場合は、約 30℃が最適で 20℃まで温度が低下しても熱収支的に大きな影響は無いことが明らかとなった。乳牛糞尿を直接貯留式メタン発酵に投入する場合の最適発酵温度は約 35℃で連続式高率発酵のメタン発酵より 44%増となるが糞尿中の雑草種子の完全駆除は望めない。

連続式と貯留式の複合処理システムはメタン濃度、メタンガス生成量、有機物分解率のいずれも高く、発酵状態も安定している。特に、有機物分解率は長期間の貯留発酵により難分解性有機物も分解し、55%以上となり、更に熱収支的に余剰熱量が連続式高率発酵の約 3 倍に達することが明らかとなった。連続式メタン発酵処理施設で大型脱離液貯留槽は必要施設であり、これを貯留式メタン発酵槽として活用するための基礎資料が得られたと考える。

参考文献

Allen, J.B. and Lowery, B. (1976): Methane gas production from dairy, poultry and swine anaerobic lagoons. Presented at the 1976 Southeast ASAE Meeting, Mobile, AL, 30.

Atkeson, F.W., Hulbert, H.W. and Warren, T.R. (1934): Effect of bovine digestion and manure storage on the viability of weed seed. *J. Am. Soc. Agronomy*, 26: 390-399.

Blake, D.R. and Rowland, F.S. (1988): Continuing worldwide increase in tropospheric methane, 1978 to 1987. *Science* (Washington, DC), 239: 1129-1131.

Chan, Y.R. and Hashimoto, A.G. (1978): Kinetics of methane fermentation. *Biotechnology and Bioengineering Symp*, No 8: 269-282.

Chandler, J.A., Hermes, S.K. and Smith, K.D. (1983): A low cost 75-kW covered lagoon biogas system. In *Energy from biomass and wastes VII*, Lake Buena Vista, FL, 23.

Cicerone, R.J. and Oremland, R.S. (1988): Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global biogeochem cycles*, 2: 299-327.

Contois, D.E. (1959): Kinetics of bacterial growth. *J. General microbiology*, 21: 40-46.

Converse, J.A., Graves, R.E. and Evens, G.W. (1977) : Anaerobic degradation of dairy manure under mesophilic and thermophilic temperatures, Transactions of the ASAE, 20(20) 336-340.

Cullimore, D.R., Maule, A. and Mansuy, N. (1985): Ambient temperature methanogenesis for pig manure waste lagoon thermal gradient incubator studies. Agric. Wastes, 12:147-157.

Danish Energy Agency (1995) : Progress report on the economy of centralized biogas plants, 5-7.

Day, D.L., Chen, T.H., Anderson, J.C. and Steinberg, M.P. (1990): Biogas plants for small farms in Kenya. Biomass. 21 83-99.

Evenari, M. (1949): Germination inhibitors. Bot. Rev, 15:153-194.

Fischer, J.R., Sievers, D.M. and Fulhage, C.D. (1983): Energy consumption from animal manure methane generation. Transactions of the ASAE, 223-227.

Harmon, G.W. and Keim, F.D. (1934): The percentage viability of weed seeds recovered in the feces of farm animals and their longevity when buried in manure. J. Am. Soc. Agronomy, 26:762-767.

Hashimoto,A.G.(1989):Effect of Inoculum/ Substrate ratio on methane yield and production rate from straw.Biological Wastes ,28:247-255.

Hills,D.J. (1980) : Methane gas production from dairy manure at high solids concentration. Transactions of the ASAE,23:122-126.

Hill,D.T., Young,D.T. and Nordstedt,R.A. (1981):Continuously expanding anaerobic digestion – A technology for the small animal producer. Transactions of the ASAE, 731-736.

Hill,D.T. (1983a) : Design parameters and operating characteristics of animal waste anaerobic digestion system, Dairy cattle. Agricultural Wastes ,5: 219-230.

Hill,D.T. (1983b): Energy consumption relationships for mesophilic and thermophilic digestion of animal manures. Transactions of the ASAE,26(3):841-848.

Hill,D.T.(1984) :Methane productivity of the major animal waste types. Transactions of the ASAE,530-524.

Hill,D.T., Cobb,S.A. and Bolte,J.P. (1987):Using volatile fatty acid relationships to predict anaerobic digester failure. Transactions of ASAE ,30: 496-501.

平方秋男(1992)：自然流下式牛舎より得られた混合スラリーによるメタン発酵について，低希釈・無加温・無攪拌によるガス発生状況．日本家畜管理学会誌，28 (1) 4-5.

本江昭夫(1986)：異なる生育地から採取したエゾノギシギシ(*Rumex obtusifolius L.*)の種子重と発芽について．帯広畜産大学学術報告 I, 15: 107-112.

藤田秀保，志賀一一（1997）：環境保全を考えた乳牛のふん尿処理と利用，酪農総合研究所,22.

岩淵和則・松田従三(1986)：牛糞の搾汁液によるメタンガス生成．農業施設学会大会講演要旨，49-50.

岩淵和則・松田従三(1988)：牛糞搾汁液によるメタンガス生成一回分操作による実験一．農業施設，9(1): 5-9.

Iwabuchi, K. and Matsuda, J. (1993) : Temperature effects on CH₄ gas production with dairy cattle manure. J. Society of agricultural structures, 23(3):111-116.

Jeyanayagam, S.S. and Collins, E.R., Jr. (1984): Weed seed survival in a daily manure anaerobic digester. Transactions of the ASAE, 27: 1518-1523.

環境・公害実務必携(1974)：農林漁業環境・公害問題研究会編，125-126.

古賀洋介(1988) : 古細菌. 東京大学出版会, 20.

黒須和代・前川孝昭・阿部 充(1997) : 低温馴養メタン菌を用いたプラグフロー型 2 相式メタン発酵装置のスタートアップと適正有機物負荷. 農業施設, 28(1): 3-11.

Lelieveld, B. and Crutzen, P.J. (1992): Indirect chemical effects of methane on climate warming. *Nature (London)*, 355:339-341.

Lo, K.V. and Liao, P.H. (1985): Two-phase anaerobic digestion of screened dairy manure. *Biomass*, 8 :81-90.

Lo, K.V. and Liao, P.H. (1986a): Mesophilic anaerobic digestion of screened dairy manure using two-phase process. *Energy in Agriculture*, 5 :81-88.

Lo, K.V. and Liao, P.H. (1986b): Thermophilic anaerobic digestion of screened dairy manure using two-phase process. *Energy in Agriculture*, 5 :249-255.

McInery, M.J. and Bryant, M.P. (1978): Syntrophic association of H₂-utilizing bacteria and H₂-producing alcohol and fatty acid-degrading bacteria in anaerobic degradation of organic matter. In: *Proceedings of the Symposia, anaerobiosis and anaerobic infection*. Gustav-Fisher, Verlag stuttgart, Germany.

メタンガス利用の新技术(1980) : 農林水産技術情報協会, 21.

Morris,G.R., Jewell,W.J. and Loehr,R.C.(1977): Anaerobic fermentation of animal wastes. Food, fertilizer and agricultural residues. Ann arbor science, 359-413.

Mullverstedt, R. (1963): Investigations on the germination of dormant weed seeds as Influenced by Oxygen partial pressure. Weed Res,3 :154-163.

農業環境技術研究所(1997):農村空間を科学する. 19.

農業施設ハンドブック(1990):693-694.

農林水産技術情報協会(1980) : メタンガス利用の新技术. 41-42

御国光信 (1971) :メタン発酵法, 水処理実験法. コロナ社,312-329.

Oliver,B. ,Pain,B.F. and Phillips,V.R.(1986): Mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry on a farm scale: Economic considerations. J. Agricultural engineering research,34 :229-243.

Pain,B.F., West,R., Oliver,B. and Hawkes,L.(1984): Mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry on a farm scale, first comparisons between digestion before and after solid separation. J. Agricultural engineering research,29 :249-256.

Patni,N., Jaction,H., Masse,D., Wolynetz,M. and Kinsman,R. (1995):
Greenhouse gas release from stored daily-cattle manure slurry, Proceedings
of the 7th international symposium on agricultural and food processing
wastes: 261-270.

Pearman,G.I., Etheridge,D.,de Silva,F. and Fraser,P.J.(1986):Evidence of
changing concentrations of atmospheric CO₂,N₂O and CH₄ from air bubbles
in Antarctic ice. Nature (London) ,320 :248-250

Pohland,F.G. and Ghosh,S. (1971): Anaerobic stabilization of organic wastes,
two-phase concept. Environmental Letter. 1 :255.

Rolick,M.B., Spahr,S.L. and Bryant,M.P. (1980) : Methane production from
cattle waste in laboratory reactors at 40 and 60 °C after solid-liquid
separation. J.Dairy Science,63:1953-1986.

Safley, L.M.Jr. and Westerman, P.W. (1988): Biogas production from
anaerobic lagoons, Biological Wastes, and 23, 181-193.

Safley, L.M.Jr., Casada,M.E., Woodbury,J.W. and Roos,K.F. (1992):Global
methane emissions from livestock and poultry manure. USEPA Rep,400/1-
91/048. USEPA, Washington, DC

志賀一一(1994) : 農耕地の有機物受け入れ容量と畜産廃棄物—環境保全型酪農

のために. 6-7.

清水矩宏 (1978): 牧草と雑草, 特に発芽・初期生育について. 日本雑草学会第6回雑草防除夏季研究テキスト. 23-68.

Shine, K.P., Derwent, R.G., Weubbles, D.J. and Morcrette, J.J. (1990): In J.T. Houghton et al. (ed.) *Climate change: The IPCC scientific assessment*. Cambridge Univ. Press, Cambridge :41-68.

施設農業への新エネルギー利用, 地熱・バイオマス・産業廃熱編 (1980) : フジテクノシステム.

Singh, R.K. and Schulte, D. (1977): *Computer simulation of energy recovery through anaerobic digestion of livestock manure*. University of Manitoba.

Stevens, M.A. and Schulte, D.D. (1977) : *Low temperature anaerobic digestion of swine manure* ASAE meeting. ASAE, St. Joseph, MI:19

Sutter, K. and Wellinger, A. (1985) : *Methane production from cow manure at low temperatures, experiential 41*, birkhauser verlag. CH-4010 Basel / Switzerland , 554

Takahata, H., Kawamoto, T. and Umetsu, K. (1989): *Biogas production from dairy cow slurry*. *J. Agric. Struc. Jpn.*, 20 :161-168.

高畑英彦・梅津一孝・川本常美(1991):寒冷地バイオガス生産システムの開発,
帯広畜産大学学術研究報告 I, 17:149-154.

Taylorson, R.B. (1979): Response of weed seeds to ethylene and related
hydrocarbons. *Weed Science*, 27:7-10.

畜産環境対策大辞典(1995):農山漁村文化協会:429-430.

畜産施設研究会 (1972): 畜舎の設計・第1集 牛舎の設計, 91.

Totterdell, S. and Roberts, E.H. (1979): Effects of low temperature on the loss
of innate dormancy and the development Induced dormancy in seeds of
Rumex Obtusifolius L. and *Rumex Crispus L.* *Plant, Cell and environment*
2: 131-137.

梅津一孝(1993); 寒冷地酪農用メタンガス生産施設に関する研究, 北海道大学
学位論文, 42-47, 61, 95-96.

Umetsu, K., Takahata, H. and Kawamoto, T. (1990): Effect of temperature on
mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry. *Research bulletin of*
Obihiro university I, 17:401-408.

Umetsu, K., Takahata, H. and Kawamoto, T. (1992): Biogas production from
cow slurry using a two-phase process. *The Journal of the Society*
Agricultural Structures, 23(2): 61-66.

Varel, V.H., Hashimoto, A.G. and Chen, Y.R. (1980): Effect of temperature and retention time on methane production from beef cattle waste. *Applied environmental microbiology*, August :217-222.

Vetter, R.L., Friederick D.J. and Huntington P. (1990): Full scale anaerobic digester and waste management system for a 300 cow dairy. *Proceedings of the 6th international symposium on agricultural and food proceeding wastes*, 236-249.

Williams, R.D. and Hoagland, R.E. (1982): The effects of naturally occurring phenolic compounds on seed germination. *Weed Sci*, 30: 206-212.

薬師堂謙一，高木清継，新井澄男 (1986)：未希釈牛ふん尿の低温メタン発酵。
昭和 61 年度農業施設学会大会講演要旨:45-46.

山品正志・足立一郎・濱崎隆文・北口敏弘・養嶋裕典(1995)：乳牛糞尿のメタン発酵処理について，第 41 回農業土木学会北海道支部研究発表会講演集，66-69.

Zeikus, J.G. and Winfrey, M.R. (1976) : Temperature limitation of methanogenesis in aquatic sediments. *Applied and Environmental Biology*, 31,1,Jan:99-107.

Zubr, J. (1991): *Biogas technology for protection of the environment*.

Proceedings of international symposium on agricultural mechanization
conference (China),269-275.

謝 辞

本研究の遂行及び論文の作成にあたり多大なる御指導、御助言及び本文の校閲を賜った、岩手大学大学院連合農学研究科地域資源工学連合講座 高畑英彦教授、三輪式教授、前川勝郎教授、干場秀雄助教授、生物資源工学連合講座 石橋憲一教授の諸先生に心より謝意を表す。また、帯広畜産大学畜産環境科学科 梅津一孝助手には論文の作成にあたり御助言、御指導を頂いた。また、株式会社ズコーシャ環境調査室同室長 伊藤俊之氏には試料の分析・分析結果の解析に御指導・助言を頂いた。また、帯広畜産大学畜産環境科学科草地畜産機械学講座の在学生諸氏には実験、データ整理に協力して頂いた。ここに記して謝意を表す。

記号一覧

A	発酵槽表面積(m ²)
AVG	平均
B	動力学変数
B	累積投入有機物当たりのメタンガス生成量 (L CH ₄ /g VSA)
Bo	累積投入有機物当たりの究極メタンガス生成量 (L CH ₄ /g VSA, t→∞)
BOD	生物学的酸素要求量(mg/L)
c	糞尿の比熱(KJ/kg·°C)
C/N	炭素(C)/窒素(N)
CED	貯留式発酵槽(Continuously Expanding Anaerobic Digester: CED)
CFD	連続式発酵槽(Continuously Flow Anaerobic Digester :CFD)
COD	化学的酸素要求量(mg/L)
d1	鋼材の厚さ(m)
d2	吹付発砲ウレタンフォームの厚さ(m)
F	基質利用率(g/L·day)
HRT	水理学的平均滞留日数(day)
HRTm	最少水理学的平均滞留日数(day)
K	増殖定数と動力学変数の積
K	メタン生成率(day ⁻¹)
K ₂ O	カリ(mg/L)
M	菌体量(g/L)
Mc	メタン濃度(%)
NH ₄ ⁺ -N	アンモニア性窒素(mg/L)
NO ₂ ⁻ -N	亜硝酸性窒素(mg/L)
NO ₃ ⁻ -N	硝酸性窒素(mg/L)
P ₂ O ₅	リン(mg/L)
q	比基質利用率
qm	原料加温熱量 (MJ/d)
qn	放熱量(W/m ²)
Qr	放熱量(W)
qR	発酵槽表面積A(m ²)の1日当たりの放熱量(J/d)
qR	各システムの発酵槽表面積当たりの放熱量(J/d)
S	排出基質濃度(g/L)
SD	標準偏差
So	流入基質濃度(g/L)
t	発酵温度(°C)
t	滞留日数(day)
T	実験期間(日)
T-N	総窒素(ケルダール窒素)(mg/L)
TS	固形分濃度(%)
TVA	揮発性総有機酸量(mg/L)
U	総括伝熱係数(W/m ² ·°C)
Vm	投入原料重量(kg)
VS	有機物濃度(%)
VSA	投入有機物(g)
VSD	分解有機物(g)
X	安定期間(日)
Y	増殖定数
α	日数(日)

$\alpha 1$	内壁面の熱伝達率($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
$\alpha 2$	外壁面の熱伝達率($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
β	投入有機物当たりのメタンガス生成量($L CH_4 / g$ 投入有機物)
βo	HRTを無限大とした場合の投入有機物当たりのメタンガス生成量 ($L CH_4 / g$ 投入有機物, $HRT \rightarrow \infty$)
$\theta 1, \theta 2$	両面の温度($^\circ C$)
$\lambda 1$	鋼材の熱伝導率($W/m \cdot ^\circ C$)
$\lambda 2$	吹付発砲ウレタンフォームの熱伝導率($W/m \cdot ^\circ C$)
$\lambda 3$	単位長さ当たりの内壁面の熱伝導率($W/m \cdot ^\circ C$)
$\lambda 4$	単位長さ当たりの外壁面(風速3m)の熱伝導率($W/m \cdot ^\circ C$)
μ	比増殖速度(day^{-1})
μm	最大比増殖速度(day^{-1})
νv	発酵槽有効容積当たりのメタンガス生成量(L/L)