家畜・家禽の排泄物のメタン醗酵

羽 賀 清 典

農林水産省畜産試験場,
茨城県筑波農林研究団地 305

Methane Fermentation of Livestock and Poultry Wastes

Kiyonori HAGA

Laboratory of Animal Waste Management, National
Institute of Animal Industry, Tsukuba
Norindanchi P. O. Box 5, Ibaraki 305

畜産業から排出される家畜・家禽の排泄物は、それを取巻く状況が不整備なこともあって、悪臭や水質汚濁などの環境汚染問題を引起してきた¹⁾。そして、この畜産公害の解決に向けて多くの研究なり技術開発が行われてきた²⁾。しかし、そのように厄介視されてきた排泄物も、また見方を変えれば貴重な生物資源（バイオマス）であり、肥料化、燃料化、飼料化など様々な分野での有効利用が可能である。中でもメタン醗酵法は、比較的手軽な方法で排泄物から燃料ガスを生産できることで知られ、最近のエネルギー事情も手伝って益々重要性が増してきている。約4年毎に開催される家畜排泄物処理利用の国際シンポジウムは、1980年に第4回大会を迎えたが、そのテーマは「家畜排泄物：再生可能な資源」(Livestock Waste: A Renewable Resource)であった³⁾。その報告書に掲載された119件の発表の中でメタン醗酵に関するものは18件に及び、飼料化の21件に次ぐものであった。本稿では、家畜・家禽排泄物のメタン醗酵研究についての文献を整理し、その現状について概観したいと思う。

1. メタン醗酵の原理とそれに関与する細菌群

従来からメタン醗酵は酸生成過程とガス生成過程の2段階反応から成立つと言われてきた⁴⁾。しかし、最近になって細菌学的及び生化学的研究が進むに従い、メタン

ガスはより複雑な醗酵過程を経て生成することが明らかになりつつある。ZEIKUS⁵⁾によれば、メタン醗酵に関与する細菌群はその代謝過程から次の4群に分けられる；I. hydrolytic bacteria（多糖類、蛋白質、脂質などの高分子物質を分解する）、II. hydrogen producing acetogenic bacteria（脂肪酸などIの分解物を分解し、酢酸や水素を産生する）、III. homoacetogenic bacteria（ H_2/CO_2 、ギ酸、Iの分解生成物から酢酸を産生する）、IV. methanogenic bacteria（ H_2/CO_2 、酢酸などからメタンガスを産生する）。そしてそれら細菌群が図1に示すような共生状態を形成しながら、段階的にメタンガスを産生している。

まずIに関与する細菌群は、雑多な通性・偏性嫌気性菌が主と思われるが、HOBSONとSHAW⁶⁾の研究によれば、下水消化汚泥を種菌に使用した豚排泄物中温メタン醗酵槽（有機物負荷 $0.48 \text{ kgVS}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ ）には、 $6.4 \times 10^5/\text{ml}$ の嫌気性細菌が存在し、そのうちの79%が *Streptococcus* であり、その他に *Clostridium butyricum*、*Lactobacillus* などが検出された。また、それらの基質分解性からセルロース分解菌 $4 \times 10^4 \sim 4 \times 10^5/\text{ml}$ 、ヘミセルロース分解菌 $4 \times 10^4/\text{ml}$ 、蛋白質分解菌 $4 \times 10^3 \sim 4 \times 10^5/\text{ml}$ を計数した。IANNOTTIら⁷⁾は消化脱離液を含む新しい培地 Medium 174 を考案し、豚排泄物中温メタン醗酵槽中には嫌気性細菌 $7.33 \times 10^9/\text{ml}$ が存在し、そのうちの0.05%に当る 3.72×10^6 だけが aerotolerant bacteria である

Fig. 1. The Four Bacterial Groups Involved in Methane Fermentation.⁵⁾

と述べている。FISCHER らの研究でも豚排泄物中温メタン醗酵槽中の全細菌数は $2.37 \times 10^9/\text{ml}$ (醗酵槽 420 l, 有機物負荷 $4 \text{ kgVS}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$)⁸⁾, $5.6 \times 10^7/\text{ml}$ (140 m^3 , $1.3 \text{ kgVS}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$)⁹⁾ であった。そして、これらの計数値が HOBSON のデータよりも数 100 倍高いのは、有機物負荷の相異によるものと考察している⁸⁾。CONVERSE ら¹⁰⁾ は牛排泄物のメタン醗酵槽中の有機栄養細菌は、中温醗酵の場合 $10^9 \sim 10^{12}/\text{ml}$, 高温醗酵の場合 $10^9 \sim 10^{11}/\text{ml}$ と報告している。

II, III の細菌群について、MACKIE と BRYANT¹¹⁾ の研究によれば、牛排泄物のメタン醗酵における酢酸、酪酸の消長とそれに関与する細菌群を計数した結果、プロピオン酸の 13~16%, 酪酸の 7~9% が II の細菌群の作用で酢酸を経てメタンへ変換された。また III の細菌群の作用で、中温醗酵の場合 1.4~1.7%, 高温醗酵の場合 3.5~5.3% の酢酸が H_2/CO_2 から合成されることを見出した。

IV のメタン細菌がメタンガス生産の主役となるが、Bergey Manual の 8th edition では¹²⁾, 大きく *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanococcus* の 3 genus に分類され、その中には、*Methanobacterium soehngenii*, *M. formicicum*, *M. strain MOH*, *M. thermoautotrophicum*, *M. ruminantium*, *M. mobile*, *Methanosarcina methanica*, *M. barkeri*, *Methanococcus*

mazei, *M. vannielii* の 10 株が記されている。最近、BALCH ら¹³⁾ は 16S リボソーム RNA の性状を基本にし、他に細胞壁の構造と組成、脂質組成、DNA の GC 含量、メタン生成の基質、代謝経路などを加味して新しい分類体系を提出している。それによれば、上記の *M. ruminantium* と *M. arbophilicum* は新たに *Methanobrevibacter* の genus に入れ、*M. mobile* は *Methanomicrobium* の genus に入れ、その他 *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanogenium*, *Methanospirillum*, *Methanosarcina* を合わせて 7 つの genus に分類している。そして、その中には 18 種類のメタン細菌を挙げている。

豚排泄物中温メタン醗酵槽から、HOBSON と SHAW⁶⁾ は $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6/\text{ml}$ のメタン細菌を検出し、それを *M. formicicum* と同定し、その性質を調べている¹⁴⁾。また、IANNOTTI ら⁷⁾ は $7.8 \times 10^8/\text{ml}$, FISCHER ら⁸⁾ は $2.3 \times 10^7/\text{ml}$ のメタン細菌を計数している。CONVERSE ら¹⁰⁾ は牛排泄物の中温メタン醗酵槽中に $10^8 \sim 10^9/\text{ml}$, 高温醗酵槽中に $10^9 \sim 10^{11}/\text{ml}$ のメタン細菌を計数し、高温メタン細菌を *M. thermoautotrophicum* としている。MACKIE と BRYANT¹¹⁾ は中温で $3.7 \times 10^8/\text{ml}$, 高温で $10.4 \times 10^8/\text{ml}$ のメタン細菌を見出している。このように、家畜排泄物のメタン醗酵槽から単離同定されたメタン細菌は 2 種しか

ないが、その数は豚、牛ともに中温で $10^8/\text{ml}$ 前後、高温で $10^9/\text{ml}$ 前後と考えられる。

メタンガス生成の生化学的機構については、葉酸¹⁵⁾、メチルコバラミン¹⁶⁾、 $\text{Co-M}^{17,18)}$ 、 F_{420} ¹⁹⁾ など色々な物質の関与が挙げられているが、まだ不明の点が多い。例えば、ほとんどの種類のメタン細菌の基質は H_2/CO_2 のみであり、一部ギ酸も利用するものがあり、また *Methanosaarcina* はメタノール、モノメチルアミン、酢酸も利用することができる¹³⁾。ところが、トレーサーなどを用いた実験によればメタンの C の 70% は酢酸の C-2 由来であり、 CO_2 由来のものは 30% 程度である⁵⁾。牛排泄物のメタン醗酵について行った MACKIE と BRYANT¹¹⁾ の研究でも、発生したメタンは中温醗酵の場合 72~75%、高温醗酵の場合 75~86% が酢酸由来であり、その最大値は排泄物投入後 2 時間後に観察された。また、MOUNTFORT と ASHER²⁰⁾ の研究では、投入後 4~7 時間後はメタンの 90% が酢酸由来であり、時間の経過とともに CO_2 由来のものが増加し、24 時間後には 27.5% が CO_2 由来となった。

化学熱力学的にみても、 H_2/CO_2 からのメタン生成反応による自由エネルギーの変化は；

と大きいのに対し、酢酸の場合には；

であり、かろうじて 1 mol の ATP 生成 ($\Delta G^0 = -30.6 \text{ kJ}$) が可能な量にしかならず、これではメタン細菌の成長を支えるには乏しい量と言えよう²¹⁾。以上のように、この分野もまだ研究の余地を十分に残しているものと考えられる。

2. 家畜・家禽の排泄物のメタン醗酵

排泄物は畜種及び飼養形態により、その物性、化学成分などが著しく異なる。そこで、各畜種に分け、そのメタン醗酵について述べる。まず、畜産公害という面からも、最も研究例の多い豚から始めることにする。

2-1. 豚排泄物のメタン醗酵

豚排泄物の主なメタン醗酵研究結果を要約すると表 1 のようになる。中温醗酵 (30~40°C) において、約 2~3 kgVS (有機物)/ m^3 (槽)・日の有機物負荷量 (organic loading) で、滞留日数 (detention time) が 10~30 日という条件で、有機物 (VS) 1 kg 当り 300~500 l のメタンガス (メタン含量約 60%) が発生する。これを豚 1 頭当りに換算すると 150~250 l/頭・日 程度になる。この他

IFEADI と BROWN³⁹⁾ は 108~374 l/頭・日、MORRIS ら⁴⁰⁾ は 161 l/頭・日、羽賀⁴¹⁾ は 150~200 l/頭・日、GOLUEKE⁴²⁾ は 178 l/頭・日、MEYNELL⁴³⁾ は 240 l/頭・日、カナダの Biomass Energy Institute⁴⁴⁾ は 157 l/頭・日という値を提出しており、ほぼ 200 l 前後の発生量が平均値である。

JEWELL と LOEHR⁴⁵⁾ のとりまとめによると、有機物負荷 $3 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ 以上になると有機物の分解率が低下する。また、VAN VELSEN³⁰⁾ の実験では、 $5.4 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ でも醗酵が可能だが、悪臭防除を考慮に入れると $3.6 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ が適当であるとしている。投入固形物濃度 (TS) については、SUMMERS と BOUSFIELD³⁷⁾ の研究によれば、醗酵槽容積当り及び kgTS 当りのガス発生量からして、6% ぐらいが適切であるとしている。そして、ふんと尿の混合物である TS 10% 程度のものでもメタン醗酵は可能であるが、ポンプ搬送などの機械的面や、後述のアンモニア態窒素濃度の点からも、上記 TS 濃度が適当であると述べている。

中温メタン醗酵による有機物 (VS) の分解率は、JEWELL と LOEHR⁴⁵⁾ のとりまとめによると約 50% となっているが、TAIGANIDES ら²²⁾ は 60~70%、GRAMMS ら²³⁾ は 49~61%、HOBSON と SHAW²⁶⁾ は 18~41%、大野ら²⁷⁾ は 47%、VAN VELSEN³⁰⁾ は 32~49%、羽賀³⁴⁾ は 41%、FISCHER ら⁸⁾ は 63%、藤田³⁶⁾ は 35% という数字を出しており、ほぼ 30~50% が平均的な数字と思われる。また前述のガス発生量から逆算しても同じ値になる。そして、分解される有機物の分画については、HOBSON と SHAW²⁶⁾ の研究では、粗脂肪の 64%、Neutral detergent fiber の 40%、Acid detergent fiber の 20% が分解され、リグニンは全く分解されなかった。VAN VELSEN ら⁴⁶⁾ は、ヘミセルロースの 43%、セルロースの 39% が、SUMMERS と BOUSFIELD³⁷⁾ は脂肪の 53%、セルロースの 41%、ヘミセルロースの 48% が分解されたというデータを提出している。

醗酵温度とガス発生量について、VAN VELSEN ら⁴⁶⁾ は、TS 6%、TS 負荷 $4 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ 、滞留日数 15 日という条件で実験を行ったところ、15°C から 25°C まではガス発生量が急激に上昇したが、25°C 以上では 40°C まで緩やかなカーブでガス発生量が増加した。この結果から、VAN VELSEN らは 27~30°C が経済的温度としている。SUMMERS と BOUSFIELD³⁷⁾ の実験では、滞留日数 10 日の場合、35°C のガス発生量が 300 l/kg TS であるのに対し、25°C で 260 l、30°C で 300 l、40°C で 360 l、44°C で 420 l であった。このことから SUMMERS と BOUSFIELD は 30~35°C を最適温度としている。黒田と油川³⁸⁾ は 20~37°C の範囲でのメタンガス発生速度が有機物負荷の 1 乗、消化汚

Table 1. Methane Fermentation of Swine Wastes

Vol. of fermenter (l)	Temp. (°C)	Organic loading (kgVS/m ² ·day)	TS of influent (%)	Detention time (days)	Gas production (l/kgVS)	CH ₄ content (%)	Remarks	Reference
19	35	3.2	3.6	10	484-639	59		TAIGANIDES <i>et al.</i> (1963) ²²⁾
4	32.5	$\left\{ \begin{array}{l} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.8 \\ 3.8 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2.3 \\ 3.5 \\ 4.6 \\ 7.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 10 \\ 15 \\ 10 \\ 15 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 258 \\ 405 \\ 405 \\ 424 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 61 \\ 60 \\ 58 \\ 59 \end{array} \right.$		GRAMMS <i>et al.</i> (1971) ²³⁾
	37-39	4.65	9.5		306-400	71-82		KAMATA and UCHIDA (1972) ²⁴⁾
	53-54	$\left\{ \begin{array}{l} 4.65 \\ 6.975 \end{array} \right.$	9.5		$\left\{ \begin{array}{l} 346 \\ 277 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 79 \\ 87 \end{array} \right.$		
	36	$\left\{ \begin{array}{l} 2.25 \\ 3.6 \\ 1.51 \\ 1.81 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 4.4 \\ 3.0 \end{array} \right.$		$\left\{ \begin{array}{l} 440 \\ 439 \\ 355 \\ 356 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 65.3 \\ 64.3 \\ 69.0 \\ 70.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{feces} \\ \text{feces and urine} \end{array} \right.$	KAMATA and UCHIDA (1972) ²⁵⁾
		$\left\{ \begin{array}{l} 0.65 \\ 0.81 \\ 0.98 \end{array} \right.$	1.8		$\left\{ \begin{array}{l} 529 \\ 493 \\ 501 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 69.0 \\ 56.5 \\ 56.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{feces and urine} \\ 0.5 \text{ mm sieving} \end{array} \right.$	
	53	$\left\{ \begin{array}{l} 2.70 \\ 3.15 \end{array} \right.$	4.4		$\left\{ \begin{array}{l} 477 \\ 477 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 65.0 \\ 65.0 \end{array} \right.$	feces	
		$\left\{ \begin{array}{l} 1.21 \\ 1.51 \end{array} \right.$	3.0		$\left\{ \begin{array}{l} 390 \\ 375 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 73.0 \\ 70.0 \end{array} \right.$	feces and urine	
15	35	$\left\{ \begin{array}{l} 0.96 \\ 1.6 \\ 2.24 \\ 2.88 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2.08 \\ 2.6 \\ 3.64 \\ 4.66 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 19 \\ 14 \\ 14 \\ 14 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 243 \\ 283 \\ 295 \\ 236 \end{array} \right.$	60	not seeded	HOBSON and SHAW (1973) ²⁶⁾
		$\left\{ \begin{array}{l} 3.2 \\ 0.96 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5.18 \\ 2.08 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 14 \\ 19 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 246 \\ 299 \end{array} \right.$			
		$\left\{ \begin{array}{l} 1.6 \\ 2.24 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2.6 \\ 3.64 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 14 \\ 14 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 279 \\ 327 \end{array} \right.$	60	seeded by sewage sludge	
		$\left\{ \begin{array}{l} 2.88 \\ 3.2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 4.66 \\ 5.18 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 14 \\ 14 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 306 \\ 292 \end{array} \right.$			
4	35	$\left\{ \begin{array}{l} 0.5 \\ 1.0 \\ 2.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5 \\ 5 \\ 10.35 \end{array} \right.$	30	$\left\{ \begin{array}{l} 178 \\ 163 \\ 205 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 57.58 \\ 63.16 \\ 68.80 \end{array} \right.$	swine is fed formula feed	OHNO <i>et al.</i> (1974) ²⁷⁾
		$\left\{ \begin{array}{l} 0.5 \\ 1.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5 \\ 5 \end{array} \right.$	30	$\left\{ \begin{array}{l} 460 \\ 438 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 65.03 \\ 77.56 \end{array} \right.$	swine is fed leftover-	
		1.3	5.64		381	74.00	food feed	
100	35		4-5	10	397	65-70	loaded every 5 min.	BOUSFIELD <i>et al.</i> (1974) ²⁸⁾
200 (filter surface 8.1 m ²)	35			27.2	0.24-2.77 l/l fermenter		two-phase anaerobic filter method	SMITH <i>et al.</i> (1977) ²⁹⁾

Table 1. (Continued)

Vol. of fermenter (l)	Temp. (°C)	Organic loading (kgVS/m ³ ·day)	TS of influent (%)	Detention time (days)	Gas production (l/kgVS)	CH ₄ content (%)	Remarks	Reference				
1.5	30	{ 2.4 3.6 }	5	{ 15 10 }	271 198	84.9 82.8	}	VAN VELSEN (1977) ³⁰⁾				
6	30	{ 2.7 2.7 }	7.5	{ 20 20 }	332 300	73.8 75.6						
5		{ 3.4 4.3 }		{ 16 12.5 }	274 240	83.4 83.0						
2		{ 5.4 4.1 }		{ 10 20 }	241 273	77.1 74.7						
2		{ 5.4 8.1 }		{ 15 15 }	213 65	74.4 67.6						
6		{ 1.4 2.7 }		{ 40 20 }	300 315	73.9 75.2						
5	30	{ 3.6 4.5 }	7.5	{ 15 12 }	286 262	76.4 76.3						
240	32	{ 4.81 (2.92-11.68) 2.4 (1.46-5.82) }	4.72	{ 6 12 }	455 588	65.0 64.5			}	STEVENS and SCHULTE (1977) ³¹⁾		
2500	25	{ 1.45 (0.88-3.5) 0.96 (0.58-2.33) }	4.72	{ 20 30 }	524 677	68.0 66.0						
		{ 0.61 (0.56-0.68) }	5.59	55	623	63.9						
		{ 0.90 (0.83-1.00) }	5.59	40	511	63.8						
	22.5	{ 1.80 (1.66-1.92) }	5.48	20	289	63.0						
		{ 1.20 (1.10-1.32) }	5.59	30	433	64.5						
		100	35	{ 0.452 0.566 0.679 0.906 1.132 1.698 }	1.45	{ 25 20 16.7 12.5 10 6.67 }	608 654 741 552 433 286	66.0 64.8 64.0 63.8 63.0 61.0			}	HUANG <i>et al.</i> (1978) ³²⁾
				{ 0.640 0.915 1.210 1.851 2.062 }	{ 1.78 2.54 3.22 4.30 5.33 }	{ 20 20 20 20 20 }	{ 477 546 544 378 218 }	{ 65.4 64.2 62.5 61.9 61.1 }				
2	35			2.24	15	690 mlCH ₄ /org. carbon	C/N=19 (adjusted by urea and glucose)	SIEVERS and BRUNE (1978) ³³⁾				

Table 1. (Continued)

Vol. of fermenter (l)	Temp. (°C)	Organic loading (kgVS/m ³ ·day)	TS of influent (%)	Detention time (days)	Gas production (l/kgVS)	CH ₄ content (%)	Remarks	Reference
150	35	3.2	7.7	20	350-400	62.2		HAGA <i>et al.</i> (1979) ⁸⁴⁾
420	35	4	7.3	15	575	59		FISCHER <i>et al.</i> (1979) ⁸⁾
140(m ³)		1.3	1-5 (VS)		0.9 m ³ /m ³ fermenter	55-60		FISCHER <i>et al.</i> (1979) ⁹⁾
20	35	$\left\{ \begin{array}{c} 5 \\ 2.5 \\ 1.65 \\ 1.25 \end{array} \right\}$	6.25	$\left\{ \begin{array}{c} 10 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{c} 457 \\ 502 \\ 525 \\ 540 \end{array} \right\}$			} PARK <i>et al.</i> (1979) ³⁵⁾
30	39	2.68	6	16	264	62.9		
32	55	$\left\{ \begin{array}{c} 1.34 \\ 2.68 \\ 5.36 \end{array} \right\}$	6	$\left\{ \begin{array}{c} 32 \\ 16 \\ 8 \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{c} 328 \\ 252 \\ 274 \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{c} 62.7 \\ 62.3 \\ 66.3 \end{array} \right\}$		
		$\left\{ \begin{array}{c} 10.71 \end{array} \right\}$		$\left\{ \begin{array}{c} 4 \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{c} 220 \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{c} 64.9 \end{array} \right\}$		
		100		35	4.2	6	10	430
28	37	0.6-1.8	1.1-3.13	7	410	68		KURODA and YUKAWA (1980) ³⁸⁾

泥濃度の0.3乗に比例し、温度の上昇につれて増加することを示した。FEILDEN⁴⁷⁾は投入 TS 濃度が 3.5% 以下ならば 25~30°C、3.5% 以上ならば 40~44°C が net gas production のための適温であるとしている。また、本多⁴⁸⁾が豚排泄物の搾汁液について行った実験では、37°C のときのガス発生量を 100 とした場合、31°C で 97.6、25°C で 90.4 であり、25°C 以下では急激にガス発生量が低下した。そして、醗酵槽加温用のガス使用量との関係から、28°C が最も経済的な温度としている。高温醗酵 (50~55°C) については、鎌田と内田²⁶⁾、藤田³⁶⁾などの研究があるが、必ずしも中温醗酵よりも良好なガス発生量を得られていない。以上の結果から、豚排泄物のメタン醗酵は 30°C 前後が適当と考えられるが、22.5°C という低温でも、STEVENS と SCHULTE³¹⁾が示すように滞留日数を長くすることによって投入有機物当たり十分なガス発生量を得ることができる。また、SUMMERS と BOUSFIELD⁸⁷⁾や御園⁴⁹⁾が指摘するように、5°C 以下の急激な温度低下はガス発生量を減少させる。

投入物の C/N については SIEVERS と BRUNE³⁹⁾の研究がある。尿素とグルコースを添加して豚排泄物の C/N を変化させ、そのときのガス発生量を調べた結果、C/N = 15.5~19 のときに最もガス発生量が多かった。豚排泄物自体の C/N は約 10 であるから、炭素源を添加して

C/N を上昇させることは、ガス発生量の増加させ、かつアンモニア態窒素による醗酵阻害を防止する意味でも有効であると SIEVERS らは考察している。FUJITA ら⁵⁰⁾も炭素源としてのコーンストーバの添加効果を研究した結果、コーンストーバの炭素分の 50% がガスに転換され、消化汚泥の蛋白質含量が増加することを示している。また、給与飼料の組成が排泄物のメタン醗酵に与える影響については、FISCHER ら⁵¹⁾の研究がある。その結果によると、corn のみ、corn-milo の場合には醗酵は順調だが、corn-wheat にするとガス発生量が低下し、スカム生成によるパイプの閉塞などの障害が起きた。

C/N の低いときにはアンモニア態窒素による醗酵阻害、C/N が高いときには揮発性脂肪酸による阻害が考えられる。それらの阻害濃度について、VAN VELSEN⁵²⁾はアンモニア態窒素濃度が 605~3,075 mg/l の範囲でも馴化されて十分なガス発生量があることを示している。黒田ら⁵³⁾は酢酸濃度が 10,000 mg/l でも炭酸アンモニウムで中和して pH を 7~8 に保てば正常な醗酵が行われることを示した。しかし、この阻害濃度を単なる濃度で判定することは難しく、イオンの形態の相異や、他のイオンとの相互・拮抗作用など多くの因子が複雑な機構を形成しているようである⁵⁴⁾。KROECKER ら⁵⁵⁾の知見によると、醗酵阻害は遊離アンモニア及び非イオン態揮発性

有機酸によるものが大きく、特に後者が30~60 mg/lでも阻害が見られた。HILLとNORDSTEDT⁵⁹⁾は非イオン態揮発性有機酸及びアンモニアが細菌類の成長速度に与える影響や、炭素・窒素化合物のマスバランスなどを因子としてメタン醗酵のシミュレーションを行い、負荷量の高い場合の有機酸やアンモニウムイオンの蓄積、pH、ガス量の低下などを示した。また、HOBSONとSHAW¹⁴⁾は豚排泄物メタン醗酵槽から単離した*M. formicicum*について、アンモニウム塩3,000~4,000 mg/l、プロピオン酸塩1,000~5,000 mg/lで顕著な阻害があることを示した。このことは、醗酵が十分に進行しないときに蓄積する有機酸がプロピオン酸であること^{57,58)}と関連して興味ある結果である。その他の阻害物としては、飼料中に添加された銅^{59,60)}、抗生物質⁵¹⁾、さらには畜舎消毒薬⁶¹⁾の混入がある。特に、FISCHERら⁵¹⁾の知見では、飼料中に添加されたlincomycinで顕著な醗酵阻害が起きた。

攪拌の効用については、他の廃棄物のメタン醗酵ではいくつかの物理的・生化学的效果が指摘されているが⁶²⁾、筆者らの実験では激しい攪拌によってむしろ醗酵が阻害され、ガス発生量が減少し、有機酸が蓄積する結果を得ている⁶³⁾。また厨芥試料を用いた市川と金井の研究でも同様な結果が得られている⁶⁴⁾。したがって、経済的な面も含めて、メタン醗酵における攪拌は槽内温度を均一に保つことや、スカム層の発生を防止することが主目的になる。古くから使用されている小野の装置でもスカム層を粉碎する目的の攪拌棒が設置されているだけである⁶⁵⁾。

メタン醗酵は密閉槽で行われることや、豚排泄物中の悪臭物質がメタン、二酸化炭素などに分解されることから、悪臭防除法としてもメタン醗酵は重要である。WELSHら⁶⁶⁾は、臭気の快・不快度を基本にした11段階(0~10)の官能テスト法によってその評価をしているが、投入物で6.5であったものが、処理物では4.6に減少し、25℃のメタン醗酵のものより35℃の方が悪臭が少ないという結果を得ている。田中ら⁶⁷⁾は中温醗酵の投入物と処理物の臭気濃度、臭気強度、不快度、またインドール、スカトール、p-クレゾール、アンモニア、トリメチルアミン、硫化水素、メチルメルカプタン、ジメチルサルファイド、ジメチルジサルファイド、酢酸、プロピオン酸、酪酸などの濃度を測定し、悪臭防除に対する有効性を示した。VAN VELSEN³⁰⁾もほぼ田中らと同じ悪臭物質を調べた結果、滞留日数の長い程悪臭物質の除去率が高く、投入物濃度が低い程インドール、スカトールの除去率が高いこと、揮発性有機酸は芳香族化合物よりも

速やかに分解されることを示した。そして、投入TS濃度7.5%、滞留日数15日のときに満足な悪臭除去ができるとしている。また、発生したメタンガス中に含まれる硫化水素の除去については、乾式脱硫剤^{68,69)}、石灰水⁶⁰⁾、微生物を利用する方法^{70,71)}などが試みられている。

以上のように、豚排泄物のメタン醗酵について述べてきたが、メタン醗酵処理後の液状きゅう肥を施用する土地を持たない場合が多く、これが普及のネックのひとつになっている。また、発生したメタンガスの用途としては、農家の日常生活用、子豚の哺育箱の熱源、発電して豚舎のファンの運転などが考えられる。

2-2. 牛排泄物のメタン醗酵

牛排泄物のメタン醗酵の主な研究結果を要約すると表2のようになる。表中、特にことわっていないものは乳牛の排泄物の研究である。1971年までの研究では中温醗酵のガス発生量は投入VS1kg当り100lほどであったが、最近の研究では200~350lが平均的な値と考えられる。これは研究手法の進歩とともに、飼料の質の変化も関係していると思われる。高温醗酵の場合もほぼ同様な値であり、投入VS当りのガス発生量において高温醗酵の方が特に優れているということはない。ただし、高温醗酵の方が短い滞留日数で高濃度のものを処理でき、その結果として醗酵槽容積当りのガス発生量は多いようである。ガス発生量を牛1頭当りに換算すると700~1,200 l/頭・日となる。MORRISら⁴⁰⁾は乳牛が1.16 m³/頭・日、肉牛が1.12 m³/頭・日、IFEADIとBROWN³⁹⁾は乳牛が1.19~1.7 m³/頭・日、肉牛が0.85~1.02 m³/頭・日、カナダのBiomass Energy Institute⁴⁴⁾は乳牛1.48 m³/頭・日、肉牛1.2 m³/頭・日という値を提出しており、乳牛・肉牛ともほぼ1 m³/頭・日ぐらいの値が平均値と思われる。

SMITHら⁸⁶⁾は中温醗酵の標準的条件として、乳牛で有機物負荷6 kg/m³・日、滞留日数15日、肉牛では各々4.5 kg/m³・日、10日を示しており、そのときVSの40%が分解されるとしている。MORRISら⁸⁷⁾は中温醗酵(32.5℃)の滞留日数、投入TS濃度、有機物負荷などの条件について検討を行った。その結果、VSの分解率やガス生成量からして滞留日数は10日以上とる必要があり、醗酵処理物中に残存するVS量は、投入VS量に正比例し滞留日数には反比例することを数式的に示した。また投入TS濃度は6~8%ぐらいが適当であり、ポンプ搬送や攪拌などの機械的見地からみても10%が上限であろうと述べている。しかしHILLS⁸⁰⁾はオーガ方式の攪拌装置を備えた70lの醗酵槽を用い、TS20.3%の乳

Table 2. Methane Fermentation of Cattle Wastes

Vol. of fermenter (l)	Temp. (°C)	Organic loading (kgVS/m ³ ·day)	TS of influent (%)	Detention time (days)	Gas production (l/kgVS)	CH ₄ content (%)	Remarks	Reference
3.41	<div> <div>23</div> <div>35</div> <div>23</div> <div>35</div> </div>	<div> <div>2.1</div> <div>2.1</div> <div>3.2</div> <div>3.4</div> </div>	10.08	<div> <div>25.7</div> <div>26.3</div> <div>26.3</div> <div>25.3</div> </div>	<div> <div>76.4</div> <div>154.7</div> <div>103.8</div> <div>144.5</div> </div>	<div> <div>52</div> <div>65</div> <div>59</div> <div>59</div> </div>		HART (1963) ⁷²⁾
10	35	<div> <div>1.6</div> <div>2.88</div> </div>	<div> <div>2.39</div> <div>3.97</div> <div>7.22</div> <div>4.34</div> </div>	<div> <div>12</div> <div>20</div> <div>20</div> <div>12</div> </div>	<div> <div>54.4</div> <div>48.7</div> <div>35.5</div> <div>65.0</div> </div>	<div> <div>77</div> <div>79</div> <div>77</div> <div>74</div> </div>		DALRYMPLE and PROCTOR (1967) ⁷³⁾
4	32.5	<div> <div>1.92</div> <div>3.84</div> </div>	<div> <div>2.48</div> <div>3.72</div> <div>4.95</div> <div>7.43</div> </div>	<div> <div>10</div> <div>15</div> <div>10</div> <div>15</div> </div>	<div> <div>63.4</div> <div>80.3</div> <div>72.2</div> <div>97.7</div> </div>	<div> <div>65.8</div> <div>64.9</div> <div>65.2</div> <div>61.3</div> </div>	dairy bull wastes	GRAMMS <i>et al.</i> (1971) ²⁸⁾
710	<div> <div>35</div> <div>60</div> </div>	<div> <div>4.26</div> <div>4.31</div> <div>6.12</div> <div>6.22</div> <div>4.23</div> <div>4.28</div> <div>9.90</div> <div>10.51</div> </div>	<div> <div>14.7</div> <div>14.8</div> <div>15.1</div> <div>15.5</div> <div>14.6</div> <div>14.7</div> <div>15.4</div> <div>15.8</div> </div>	<div> <div>15</div> <div>15</div> <div>10.4</div> <div>10.4</div> <div>15</div> <div>15</div> <div>6.2</div> <div>6.2</div> </div>	<div> <div>365</div> <div>373</div> <div>243</div> <div>266</div> <div>268</div> <div>246</div> <div>209</div> <div>249</div> </div>	<div> <div>53.1</div> <div>52.8</div> <div>53.3</div> <div>50.6</div> <div>49.2</div> <div>50.2</div> <div>50.6</div> <div>54.5</div> </div>	feces feces, urine and bedding feces, urine and bedding feces and urine feces feces, urine and bedding feces, urine and bedding feces and urine	CONVERSE <i>et al.</i> (1977) ¹⁰⁾
3	60	<div> <div>27.3</div> <div>16.7</div> <div>12.9</div> <div>9.7</div> </div>	<div> <div>8.2(VS)</div> <div>10.0(VS)</div> <div>11.6(VS)</div> <div>11.6(VS)</div> </div>	<div> <div>3</div> <div>6</div> <div>9</div> <div>12</div> </div>	<div> <div>160(CH₄)</div> <div>180(CH₄)</div> <div>200(CH₄)</div> <div>220(CH₄)</div> </div>		dairy-beef steer wastes	VAREL <i>et al.</i> (1977) ⁷⁴⁾
1	37.5	<div> <div>8.97</div> <div>6.72</div> <div>4.48</div> <div>3.36</div> <div>2.72</div> <div>2.24</div> </div>	7.6	<div> <div>7.5</div> <div>10</div> <div>15</div> <div>20</div> <div>25</div> <div>30</div> </div>	<div> <div>222</div> <div>241.2</div> <div>253.6</div> <div>295.7</div> <div>267.8</div> <div>261.0</div> </div>	<div> <div>64</div> <div>64</div> <div>65</div> <div>65</div> <div>69</div> <div>69</div> </div>		PATELUNAS and REGAN (1977) ⁷⁵⁾
150	35	<div> <div>3(TS)</div> <div>4(TS)</div> </div>	6	<div> <div>10</div> <div>20</div> </div>	<div> <div>195(TS)</div> <div>215(TS)</div> </div>	55-60		BOUSFIELD <i>et al.</i> (1979) ⁷⁶⁾
15000	ca. 25	0.95	8.5	75	240	60-70	a KVIC plant in India	RAJABAPAIAH <i>et al.</i> (1979) ⁷⁷⁾
20	35	<div> <div>5.2</div> <div>2.5</div> <div>1.65</div> <div>1.25</div> </div>	6.25	<div> <div>10</div> <div>20</div> <div>30</div> <div>40</div> </div>	<div> <div>259</div> <div>350</div> <div>393</div> <div>435</div> </div>			PARK <i>et al.</i> (1979) ³⁵⁾
	55	16		5	300	50	beef cattle wastes	HASHIMOTO <i>et al.</i> (1979) ^{78,79)}

Table 2. (Continued)

Vol. of fermenter (l)	Temp. (°C)	Organic loading (kgVS/m ² ·day)	TS of influent (%)	Detention time (days)	Gas production (l/kgVS)	CH ₄ content (%)	Remarks	Reference		
70	35	11.6	20.3	15.1	180	51.3		HILLS (1980) ⁸⁰⁾		
110	35	4.4	8.56	20	186	58.6	solar heating	HILLS and STEPHENS (1980) ⁸¹⁾		
3	40	4.06	4.06	10	164(CH ₄)	feces and urine	RORICK <i>et al.</i> (1980) ⁸²⁾			
		8.12		5	122(CH ₄)					
		4.06		10	222(CH ₄)	liquid separated				
		8.12		5	140(CH ₄)					
	60	6.77		6	166(CH ₄)	feces and urine				
		13.53		3	170(CH ₄)					
		6.77		6	179(CH ₄)	liquid separated				
		13.53		3	150(CH ₄)					
3	22	6	8	12	44	—	HAYES <i>et al.</i> (1980) ⁸³⁾			
		2.4		30	155	—				
		7		10	185	42				
		6		12	184	52				
	35	6	8	12	231	52		recycle		
		6		12	231	52				
		3.2		30	625	62		loading once/day		
		3.5		28	371	58		once/week		
	5000	35	6	10-12	16	267		60	once/week	
			7		16	286		59	once/4 days	
			7		15	337		55	plug flow	
			3.5		30	364		57		
38400	25, 35	7.6	12.9	15	281	55	completely mixing			
		3.6		30	310	58				
160	25	2.93	8	20	235	64.3	liquid separated	YAKUSHIDO <i>et al.</i> (1981) ⁸⁴⁾		
		1.95		30	261	64.2				
		1.46		40	249	63.5				
		5.02		20	155	58.8				
		3.34	12.8	30	181	59.2	feces and urine			
		2.51		40	161	59.3				
		0.7		5.2	60	300			—	bacterial support media method
		1.5		5.2	30	480			—	
2.3	4.8	20	480	60						
3.0	5.9	15	420	64						
3.8	35	0.7	5.2	60	310	—	conventional method	JONES <i>et al.</i> (1981) ⁸⁵⁾		
		1.5		5.2	30	360			—	
		2.3		4.8	20	430			60	
		3.0		5.9	15	270			69	

牛排泄物を稀釈せずにメタン醗酵した。バッチ式ではあるが、WONG-CHONG⁸⁸⁾ は dry anaerobic digestion という高濃度な方法を試みている。また、ふんと尿の混合物

については薬師堂ら⁸⁴⁾の研究などがある。以上の結果から、排泄物を稀釈せずに、前記のような機械的面を解決することによってメタン醗酵が可能である。そして長野

県畜試にみられるような自然流下式牛舎への適用も可能である⁶⁸⁾。また、そのような機械的問題を解決する意味も含めて、固液分離機を使って粗大固形物を除去し、その搾汁液をメタン醗酵に供する研究が、RORICK ら⁸²⁾や薬師堂ら⁸⁴⁾によって行われている。これらはいずれも分離前に比べて、より多いガス発生量があり、豚における同様な方法の本多⁴⁶⁾の研究とともにその発展が期待される。

高温醗酵については、乳牛排泄物で CONVERSE ら、ディリービーフで VAREL ら、肉牛排泄物で HASHIMOTO らの研究がある。CONVERSE ら¹⁰⁾の実験では、高温醗酵は中温醗酵に比べあまり良い成績を示していないが、VAREL ら⁷⁴⁾は滞留日数3日、投入 VS 濃度 8.2%でも良好なメタン醗酵が行われ、そのガス発生量は1日当りで槽の4.5倍にもなると報告している。また、HASHIMOTO ら⁷⁹⁾は肉牛排泄物の高温メタン醗酵によってエネルギー生産を行うと同時に、菌体蛋白を回収し飼料化を図ることを目的として研究を行っている。彼らの提示している醗酵条件は醗酵温度 55°C、滞留日数5日、有機物負荷 16 kg VS/m³・日である。

醗酵温度について、VAREL ら⁸⁹⁾は肉牛排泄物について、30~65°C まで5°C間隔で実験を行い、滞留日数が6日以上ならば 40~60°C で槽当りのガス発生量に大差のないことを示した。HASHIMOTO ら⁹⁰⁾のバッチ式醗酵槽を用いた実験でも、30~60°Cの間で ultimate methane yield (lCH₄/g VS) に差がなかった。PARK ら³⁵⁾は 35°C で滞留日数30日の場合醗酵槽当りのガス発生量が 0.66 l/l・日であったものが、30°C で30日の場合 0.58 l/l・日、25°C で35日の場合 0.48 l/l・日、20°C で45日の場合 0.42 l/l・日、15°C で60日の場合 0.24 l/l・日と減少する結果を得ている。また FEILDEN⁴⁷⁾は投入 TS 濃度が 7.5% 以下ならば 25~30°C、7.5% 以上ならば 40~44°C が net gas production のための適温であるとしている。

投入物の C/N については、乳牛排泄物の篩別濾液についての HILLS⁹¹⁾の研究がある。HILLS は全有機炭素からリグニン態炭素を差引いたものを available carbon (C) と定義し、その C/N をグルコースまたはセルロースの添加によって 8~51.7 の範囲で変化させ、中温メタン醗酵を行った。その結果、C/N の上昇にともなって発生ガス中のメタン含量は減少するが、C/N=25 のときに VS 当りのメタン発生量が最大となった。もとの濾液の C/N は 8 であることから、ここでも炭素源添加の効果が示唆された。

そこで、HILLS⁹²⁾は先の高濃度メタン醗酵槽に大麦の

ワラを添加し C/N=30 で実験を行ったところ、12.5 kg/m³・日の高負荷でも、槽容積の 2.46 倍のガスが発生し、25 日の滞留日数でヘミセルロースの 26.7%、セルロースの 28.4%、リグニンの 6.3%が分解されたという結果を得た。そして非リグニン態炭素のメタンへの変換効率を測定すると、ワラ添加の効果が大きいことを示した。さらに HILLS と ROBERTS⁹³⁾はイナワラとモミガラの添加効果についても同様な実験を行い、C/N が 25~32 で最大の効果を得ている。ROBBINS ら⁹⁴⁾もセルロース添加の効果を示し、また脱リグニン処理したワラが未処理のものより 2 倍の効果のあることを明らかにした。LAURA と IDNANI⁹⁵⁾は種々の農産廃棄物や蔗糖、尿素、セルロースなどを添加した結果、セルロース添加はガス発生量を増加させたがメタン含量を低下させた。また尿やカゼインなどの含窒素化合物でもガス発生量が増加したと述べている。JAIN ら⁹⁶⁾の研究では、羊の排泄物を添加すると牛排泄物のセルロース分解率とガス発生量が 5~10% 上昇する。

飼料中に添加された抗生物質はメタン醗酵に悪影響を及ぼす。VAREL と HASHIMOTO⁹⁷⁾の研究によれば、monensin 添加飼料を与えた肉牛の排泄物を醗酵槽に投入したところ、9 日間でメタンガス発生が全く停止し、pH の低下と有機酸の蓄積が観察された。chlortetracycline の場合は 20% だけガス発生量が低下しただけであった。また、バッチ式の醗酵槽でも、monensin によってメタンガスの発生開始が 40 日余り遅れたが、その後は無添加区と同様のガス発生を示した⁹⁸⁾。そして、このような抗生物質による醗酵阻害ならびに馴化機構については、ルーメン代謝の既往の研究成果に照らして考察が加えられている^{98,99,100)}。

最後に、メタン醗酵槽の形式として特徴あるものを挙げると、HAYES ら⁸³⁾の簡易な plug flow 方式、HILLS と STEPHENS⁸¹⁾のソーラ加熱方式、固定床式の一つである JONES ら⁸⁵⁾の fiber wall reactor (FWR) 方式、さらにはセミ・バッチ方式と言える HILLS ら¹⁰¹⁾の continuously expanding digester (CED) 方式などがある。

以上のように牛排泄物のメタン醗酵について述べてきたが、牛の場合、醗酵処理物は自分の飼料畑に液状きゅう肥の形で有効に施用できることが多く、豚のようにその処理に困るようなことは少ない。むしろ、排泄物中に混入しやすい牧草やイナワラなどの粗大固形物が醗酵槽の機械的トラブルの原因となるような別の問題がある。発生したガスは、酪農の場合には作業用の温水やミルカー用発電など畜産用エネルギーとしての需要も多く、有効利用を図る可能性も大きい。

2-3. 鶏排泄物のメタン醗酵

鶏排泄物のメタン醗酵の主な研究結果を要約すると表3のようになる。中温醗酵で投入 VS 1 kg 当り 300～600 l のメタンガスが発生する。前の2畜種に比べて研究例も少なく、データのバラツキも大きい。1羽当り

のガス発生量にすれば、6.75～13.5 l/羽・日である。

MORRIS ら⁴⁰⁾ は 13.8 l/羽・日, GOLUEKE⁴²⁾ は 11.3 l/羽・日, MEYNELL⁴³⁾ は 14 l/羽・日, カナダの Biomass Energy Institute⁴⁴⁾ は 12.4 l/羽・日という値を提出していることからして、10 l ぐらいが平均的な値と思われる。

Table 3. Methane Fermentation of Poultry Wastes

Vol. of fermenter (l)	Temp. (°C)	Organic loading (kgVS/ m ³ ·day)	TS of influent (%)	Detention time (days)	Gas production (l/kgVS)	CH ₄ content (%)	Remarks	Reference
3.41	{ 23.3 35 23.3 35	{ 2.75 2.77 4.46 4.88	14.96	{ 25.2 26.1 25.0 22.5	{ 102.4 263.9 66.4 212.3	{ 32 48 22 49		HART (1963) ⁷²⁾
4	32.5	{ 1.92 3.84	{ 2.37 3.56 4.75 7.11	{ 10 15 10 15	{ 305.9 361.1 311.4 281.9	{ 58.0 57.8 52.9 52.5		GRAMMS <i>et al.</i> (1971) ²³⁾
0.64-0.87				23	750	13-45		DUGAN <i>et al.</i> (1972) ¹⁰²⁾
35	51		8		560	69		SAVERY and CRUZAN (1972) ¹⁰³⁾
2070	35		7	133-161 (CH ₄)/(TS)		59.2-52.8		HASSAN <i>et al.</i> (1975) ¹⁰⁴⁾
3	29	2	10	10	634	65-75	litter with 30% wood shavings	HAWKES <i>et al.</i> (1976) ¹⁰⁵⁾
840	35	1.168	11	19	924	70		
150	35	{ 4 (TS) 3 (TS)	6	{ 15 20	{ 362/ (TS) 380/ (TS)	70		BOUSFIELD <i>et al.</i> (1979) ⁷⁶⁾
20	35	{ 5.2 2.5 1.65 1.25	6.25	{ 10 20 30 40	{ 506 578 585 600			PARK <i>et al.</i> (1979) ⁸⁵⁾
5	35	2.2	10	35	403-415	53	litter with wood shavings and sawdust	HAWKES and YOUNG (1980) ¹⁰⁶⁾
96.65(m ³)	35	1.95	11.4	36-46	440	62		CONVERSE <i>et al.</i> (1981) ¹⁰⁷⁾
2830	35	{ 1.60 2.21 3.18 2.71 3.12 3.05 3.77 4.38 2.72 3.81 4.61		70	{ 360 380 310	54		MORRISON <i>et al.</i> (1981) ¹⁰⁸⁾
				25	{ 460 410			
				15	{ 610 590 530			
				10	{ 510 630 680			

鶏の排泄物は他の畜種に比べて固形物に近い形で排出される。したがって、メタン醱酵に際しては水で稀釈し、適当な TS 濃度にする必要がある。HASSAN ら¹⁰⁴⁾ は TS 濃度 1.9~19.7% の範囲でガス発生量を検討したところ、4.6~7.6% が効率が良いとしている。HOBSON ら¹⁰⁹⁾ は投入物の TS が 13% にもなるとアンモニア態窒素が 6,000 mg/l、揮発性脂肪酸が 18,000 mg/l になって醱酵に悪影響を及ぼすとし、TS が 4~6% で実験を行っている。

醱酵温度について、PARK ら³⁵⁾ は 35°C で滞留日数 20 日の場合醱酵槽当りのガス発生量が 1.45 l/l・日であったものが、30°C で 24 日の場合 1.80 l/l・日、25°C で 30 日の場合 1.38 l/l・日、20°C で 35 日の場合 0.72 l/l・日、15°C で 50 日の場合 0.48 l/l・日となり、25°C 以下では急激に減少する結果を得ている。HASSAN ら¹⁰⁴⁾ の研究では、25°C と 50°C におけるガス発生量は 35°C の約半分であった。ADDERLEY ら¹¹⁰⁾ によれば、酸生成期は TS 2.5% で 25°C が適温だが、メタン生成期では TS 2.5% で 35°C が適温であり、両者を組み合わせることでメタン醱酵が改善されるとしている。

鶏排泄物は窒素濃度が高いので醱酵液中のアンモニア態窒素が問題となるが、CONVERSE ら¹⁰⁷⁾ の研究では平均 7,090 mg/l でも順調なメタン醱酵が行われている。筆者らの実験では 3,000 mg/l 程度でも醱酵阻害が出ており、この点に関しては、前記の豚の項で論じた KROECKER ら⁵⁵⁾ のような考え方を導入し、さらに考察を加える必要がある。

HILL と BARTH¹¹¹⁾ は有機物負荷量を 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 kg/m³・日、滞留日数を 15, 30, 45 日とし、各々を組合わせた 12 台の醱酵槽を使って、25°C のメタン醱酵の実験値とシミュレーションの結果を比較検討した。主なパラメータはガス中のメタン濃度、醱酵液の pH、アンモニウムイオン濃度、VS 分解率、揮発性有機酸濃度、アルカリ度などであるが、実験値とシミュレーションの結果は良く一致し、醱酵が失敗するような条件設定をこのシミュレーションで予知できることが示唆された。

排泄物を前処理し、生物分解性を高めた上でメタン醱酵に供しガス発生量を増加させようという試みもある。YANG と CHAN¹¹²⁾ は pH 1 の硫酸加水分解処理をした鶏排泄物と、未処理のもののメタン醱酵を行った。その結果、ガス発生量と分解性 COD との間にミカエリス・メンテン式が成立し、そのミカエリス定数は処理区の方が小さいことから、処理区の分解性及びガス発生量が高いと述べている。

鶏の排泄物の場合、前述のように固形状に近い形で排

出されるのが普通であり、現在の排泄物処理利用体系では、固形状のまま乾燥なり堆肥化なりの方法をとることが望ましい。メタン醱酵に供する場合には、排泄物に水を加えなければならず、後の処理をかえって困難にすることがあるので注意を要する。

3. エネルギー収支と経済性

メタン醱酵法は、メタンガスというエネルギーと、腐熟した液状きゅう肥とのふたつの生産物を作り出す。したがって、STAFFORD ら¹¹³⁾ が彼らの著者の中で指摘しているように、ふたつの生産物のどちらを主目的と考えるかでシステム全体が変わってくる。即ち、エネルギー生産を主目的とすれば、比較的濃度の高いものを投入し、滞留日数を短くし、たとえ未熟な液状きゅう肥が得られようとも、醱酵槽当りのガス発生量を最大にすべきであろう。一方、腐熟した液状きゅう肥を主目的とするならば、十分に醱酵を進行させるよう滞留日数を長くし、たとえ醱酵槽当りのガス発生量は低下しても、投入 VS 当りのガス発生量を最大にするようにすべきであろう。前までの項では、主に後者の立場から論議を進めてきたが、本項では前者の点を中心に述べてみたい。

メタンガスを生産するためには、醱酵槽の保温などのエネルギーを外部から投入してやる必要がある。したがって、実際にメタン醱酵法を採用する場合、メタンガス生産の net energy (ここでは、一般にガス発生総量から保温などに要するガス量を差引いた余剰ガス量を言う) の正負が重要な問題となる。

高温醱酵について、CONVERSE ら¹⁰⁾ は乳牛排泄物について net energy はマイナスになるとしているが、HASHIMOTO ら⁷⁹⁾ は肉牛排泄物についてガス生産量を高めることによって 50% の net energy が可能としている。一方、中温醱酵ではほとんどの研究例がプラスであると述べている。MILLS¹¹⁴⁾ は醱酵槽に 0.35 kW/m³ の生産性を認めており、PARK ら¹¹⁵⁾ は 137 m³ のメタン醱酵槽に牛、豚、鶏の 3 畜種混合排泄物を投入し、外気温 -9°C に下った冬期 (1~3 月) でも net energy が 62% あったとしている。SUMMERS と BOUSFIELD¹¹⁶⁾ は豚排泄物メタン醱酵について、発生ガスの 40% が槽の保温に必要であり、残りのガスを電気に変換してポンプ動力に使用としても、その 25% が余剰になると述べている。FISCHER ら⁹⁾ がサイロを改造した 140 m³ の豚排泄物のメタン醱酵槽でも、発生ガスの 53% が net energy であった。園田¹⁷⁾ が 10,000 頭規模の豚排泄物のメタン醱酵槽 (2,000 m³) で試算したところでは、冬 (5°C) で 52.3%、夏 (30°C) では 80.9% が余剰ガスになる。

乳牛については、CONVERSE ら¹⁰⁾は 66.7~72.0% の net energy を得ている。PATELUNAS と REGAN⁷⁵⁾は、60 頭規模のメタン醱酵槽では冬期 (-18°C) でも、8.96 kg VS/m³・日の負荷ならば 47.7%, 2.24 kg/m³・日ならば 25.8% が余剰ガスになると述べている。また、鶏については、CONVERSE ら¹⁰⁷⁾の 76.65 m³ のメタン醱酵槽で、発生ガスを保温、攪拌などのエネルギー源に使用しても 63% が net energy として残るとしている。さらに WILLIAMS ら^{118,119)}は 100 頭規模の酪農家、1,000 頭規模の肉牛フィードロットについて、エネルギー使用量を分析し、その一部をメタンガスで賄えるという結論を得ている。

このように、net energy ではプラスになるものの、メタン醱酵法は施設費などにかかりの経費がかかることから、経済性を考えると否定的結論が多い。まず、メタンガスの価格は、SMITH ら⁸⁶⁾や MORRIS ら⁴⁰⁾が指摘するように市販エネルギーの数倍の価格になる。そして、FELDMAN と BREESE¹²⁰⁾が酪農、WILLIS と CHRISTENSEN¹²¹⁾が企業養鶏、MIRANOWSKI ら¹²²⁾がアイオワの農家、FISCHER ら¹²³⁾が養豚について各々経済的分析を行っているが、いずれもエネルギー価格の急激な上昇がない限り、経済的には困難という結論に達している。

したがって、経済的に成立させるためには、ガスの生産量を飛躍的に上昇させるか、または施設費を大幅に安くするかの 2 つの方法が考えられる。前者の代表例には HASHIMOTO ら USDA のグループであろうし、後者は HAYES ら Cornell 大学のグループに代表されよう。HASHIMOTO と CHEN¹²⁴⁾の経済分析によれば、肉牛農家が自分で建設・運転するものであれば、1,000~2,000 頭規模、市販の完成品の醱酵槽を用いるならば 8,000 頭以上の規模のフィードロットで経済的に成立つとしている。また、HAYES ら⁸³⁾の簡易型 plug flow 式メタン醱酵槽では 25 頭規模の酪農家でも経済的に成り立つとしている。

おわりに

以上、家畜、家禽の排泄物のメタン醱酵研究について述べてきた。もともとメタン醱酵は自然界において沼気や消化管内反応（特にルーメン反応）などの形で、人類誕生以前から存在していたものであろう。そして、メタンガスを燃料利用する技術にも古い歴史がある¹²⁵⁾。わが国の農家における使用例や外国の例については筆者らがまとめた成書^{126,127)}に詳しい。また、最近、各県立畜産試験場を中心に実用化へ向けての活発な試験研究が行われており、確実に成果を蓄積しつつある。これらの成果

については、紙面の都合で省略してしまったが、詳しくは成書¹²⁷⁾や各畜試の報告など^{48,88,69,128-133)}を参照されたい。

メタン醱酵法はエネルギー危機を背景に注目を集めているが、元来それほどはなばなしくコスト的にプラス効果がある技術とは言えないようである。しかし、園田¹¹⁷⁾が指摘しているように、1 kg の BOD を除去するのに要する電気量は活性汚泥法の約 1/10 ですみ、その意味では極めて省エネの技術と言えよう。また言い方を変えれば、自然の摂理を巧みに利用している点で省エネ的とも言えよう。そして、将来的には、エネルギー生産、悪臭防除、肥料生産の三拍子兼ね備えた総合技術としての発展が期待される。

文 献

- 1) 渡辺昭三 (監修), 畜産公害対策全書 (昭和 56 年度版) 1-336. 鶏卵肉情報センター. 名古屋. 1981.
- 2) 農林水産省農林水産技術会議事務局 (編), 別梓研究「農林漁業における環境保全的技術に関する総合研究」試験成績書 第 6 集 家畜排泄物の処理利用技術の開発. 1-609. 東京. 1979.
- 3) Livestock Waste: A Renewable Resource, Proceedings of the 4th International Symposium on Livestock Wastes-1980. 1-430. ASAE. St. Joseph, MI. 1981.
- 4) ECKENFELDER, W. W., Jr, Industrial Water Pollution Control, McGraw-Hill, U. S. A., 1966, 市川邦介・前田嘉道 (訳), 産業廃水の処理. 220. 恒星社厚生閣. 東京. 1970.
- 5) ZEIKUS, J. G., in Anaerobic Digestion (STAFFORD, D. A., B. I. WHEATLEY and D. E. HUGHES, eds.), 61-90. Applied Science. London. 1980.
- 6) HOBSON, P. N. and B. G. SHAW, Water Res., 8: 507-516. 1974.
- 7) IANNOTTI, E. L., J. R. FISCHER and D. M. SIEVERS, Appl. Environ. Microbiol., 36: 555-566. 1978.
- 8) FISCHER, J. R., E. L. IANNOTTI, J. H. PORTER and A. GARCIA, Trans. ASAE, 22: 370-374. 1979.
- 9) FISCHER, J. R., N. F. MEADOR, D. M. SIEVERS and C. D. FULHAGE, Trans. ASAE, 22: 1129-1136. 1979.
- 10) CONVERSE, J. C., R. E. GRAVES and G. W. EVANS, Trans. ASAE, 20: 336-340. 1977.
- 11) MACKIE, R. I. and M. P. BRYANT, Appl. Environ. Microbiol., 41: 1363-1373. 1981.
- 12) BRYANT, M. P., in Bergey's Manual of Determinative Bacteriology. 8th ed. (BUCHANAN, R. E. and N. E. GIBBONS, eds.), 472-477. The Williams and Wilkins. Baltimore. 1974.
- 13) BALCH, W. E., G. E. FOX, L. J. MAGRUM, C. R. WOESE, and R. S. WOLFE, Microbiol. Rev., 43: 260-296. 1979.

- 14) HOBSON, P. N. and B. G. SHAW, *Water. Res.*, **10**: 849-852. 1976.
- 15) WOOD, J. M., A. M. ALLAM, W. J. BRILL and R. S. WOLFE, *J. Biol. Chem.* **240**: 4564-4569. 1965.
- 16) BLAYLOCK, B. A. and T. C. STADTMAN, *Arch. Biochem. Biophys.*, **116**: 138-152. 1966.
- 17) TAYLOR, C. D., B. C. McBRIDE, R. S. WOLFE and M. P. BRYANT, *J. Bacteriol.*, **120**: 974-975. 1974.
- 18) TAYLOR, C. D. and R. S. WOLFE, *J. Biol. Chem.*, **249**: 4879-4885. 1974.
- 19) CHEESEMAN, P., A. T. WOOD and R. S. WOLFE, *J. Bacteriol.*, **112**: 527-531. 1972.
- 20) MOUNTFORT, D. O. and R. A. ASHER, *Appl. Environ. Microbiol.*, **35**: 648-654. 1978.
- 21) McINERNEY, M. J., M. P. BRYANT and D. A. STAFFORD, in *Anaerobic Digestion* (STAFFORD, D. A., B. I. WHEATLEY and D. E. HUGHES, eds.) 91-98. Applied Science. London. 1980.
- 22) TAIGANIDES, E. P., E. R. BAUMANN, H. P. JOHNSON and T. E. HAZEN, *J. Agric. Eng. Res.*, **8**: 327-333. 1963.
- 23) GRAMMS, L. C., L. B. POLKOWSKI and S. A. WITZEL, *Trans. ASAE*, **14**: 7-13. 1971.
- 24) 鎌田信一・内田和夫, 日本獣医畜産大学紀要, **21**: 79-83. 1972.
- 25) 鎌田信一・内田和夫, 日本獣医畜産大学紀要, **21**: 84-92. 1972.
- 26) HOBSON, P. N. and B. G. SHAW, *Water Res.*, **7**: 437-449. 1973.
- 27) 大野 茂・高橋一三・桜井敏郎・松本十郎, 用水と廃水, **16**: 263-269. 1974.
- 28) BOUSFIELD, S., P. N. HOBSON and R. SUMMERS, *J. Appl. Bacteriol.*, **37**: xi-xii. 1974.
- 29) SMITH, R. E., M. J. REED and J. T. KIKER, *Trans. ASAE*, **20**: 1123-1128. 1977.
- 30) VAN VELSEN, A. F. M., *Neth. J. Agric. Sci.*, **25**: 151-169. 1977.
- 31) STEVENS, M. A. and D. D. SCHULTE, paper presented at the 1977 Annual Meeting of North Central Region of ASAE, paper No. NCR 77-1013, ASAE. St. Joseph. MI. 1977.
- 32) HUANG, S. Y., K. T. WON, H. W. WANG and C. C. LIN, *Proceedings of the National Science Council (Taiwan)*, **2**: 407-415. 1978.
- 33) SIEVERS, D. M. and D. E. BRUNE, *Trans. ASAE*, **21**: 537-541. 1978.
- 34) HAGA, K., H. TANAKA and S. HIGAKI, *Agric. Wastes*, **1**: 45-55. 1979.
- 35) PARK, Y. D., N. J. PARK and J. H. LIM, *Res. Rep. ORD(Korean)*, **21** (H. and Agric. Eng.): 53-60. 1979.
- 36) 藤田正憲, 水処理技術, **21**: 313-332. 1980.
- 37) SUMMERS, R. and S. BOUSFIELD, *Agric. Wastes*, **2**: 61-78. 1980.
- 38) 黒田正和・油川 博, 下水道協会誌, **17** (196): 61-64. 1980.
- 39) IFEADI, C. N. and J. B. BROWN, JR., in *Energy, Agriculture and Waste Management* (Jewell, W. J. ed.) 373-396. Ann Arbor Science. MI. 1975.
- 40) MORRIS, G. R., W. J. JEWELL and G. L. CASLER, in *Energy, Agriculture and Waste Mangement* (JEWELL, W. J. ed.) 317-335. Ann Arbor Science. MI. 1975.
- 41) 羽賀清典, 畜産公害対策全書(昭和 56 年度版)(渡辺昭三監修), 70-91. 鶏卵肉情報センター, 名古屋. 1981.
- 42) GOLUEKE, C. G., *Biological Reclamation of Solid Wastes*. 145-188. Rodale Press. Emmaus. PA. 1977.
- 43) MEYNELL, P. J., *Methane: Planning a Digester*. 1-150. Shocken Books. New York. 1976.
- 44) Biomass Energy Institute, *Biogas Production from Animal Manure*, 1-20. Biomass Energy Institute. Winnipeg. Manitoba. 1978.
- 45) JEWELL, W. J. and R. C. LOEHR, in *Animal Wastes* (TAIGANIDES, E. P., ed.) 273-294. Applied Science. London. 1977.
- 46) VAN VELSEN, A. F. M., H. R. LETTINGA and D. DEN OTTELANDER, *Neth. J. Agric. Sci.*, **27**: 255-267. 1979.
- 47) FEILDEN, N. E. H., *Agric. Wastes*, **3**: 75-79. 1981.
- 48) 本多勝男, 畜産の研究, **35**: 1027-1030. 1981.
- 49) 御園光信, 水処理実験法(日本工業用水協会編) 312-329. コロナ社. 東京. 1971.
- 50) FUJITA, M., J. M. SCHARER and M. MOO-YOUNG, *Agric. Wastes*, **2**: 177-184. 1980.
- 51) FISCHER, J. R., E. L. IANNOTTI and D. M. SIEVERS, *Agric. Wastes*, **3**: 201-214. 1981.
- 52) VAN VELSEN, A. F. M., *Water Res.*, **13**: 995-999. 1979.
- 53) 黒田正和・武井 章・油川 博・杉山幸男, 化学工学論文集, **6**: 609-613. 1980.
- 54) KUGELMAN, I. J. and K. K. CHIN, in *Anaerobic Biological Treatment Process* (Advances in Chemistry Series 105). 55-90. American Chemical Society. Washington, D. C. 1971.
- 55) KROEKER, E. J., D. D. SCHULTE, A. B. SPARLING and H. M. LAPP, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **51**: 718-727. 1979.
- 56) HILL, D. T. and R. A. NORDSTEDT, *Agric. Wastes*, **2**: 135-156. 1980.
- 57) VAN VELSEN, A. F. M., *Neth. J. Agric. Sci.*, **27**: 142-152. 1979.
- 58) BRYANT, M. P., *J. Anim. Sci.*, **48**: 193-201. 1979.
- 59) TAIGANIDES, E. P., E. R. BAUMANN and T. E. HAZEN, *Compost Sci.*, **4** (2): 26-28. 1963.

- 60) HOBSON, P. N. and A. M. ROBERTSON, *Waste Treatment in Agriculture*. 50. Applied Science. London. 1977.
- 61) KAMATA, S., N. KAKIUCHI and K. UCHIDA, *Bull. Npn. Vet. Zoototechnol. College*, **28**: 8-12. 1979.
- 62) 田中正雄・園田頼和・清古義雄・平位正彦・小野英男, *発酵研報*, **21**: 169-180. 1962.
- 63) 羽賀清典・田中 博・中嶋吉郎, *日本畜産学会第72回大会講演要旨*. 64. 1981.
- 64) 市川茂樹・金井昌邦, *水処理技術*, **20**: 825-832. 1979.
- 65) 小野二良, *メタンガス利用の理論と実際*. 1-271. 文雅堂. 東京. 1963.
- 66) WELSH, F. W., D. D. SCHULTE, E. J. KROEGER and H. M. LAPP, *Can. Agric. Eng. Res.*, **19**: 122-126. 1977.
- 67) 田中 博・代永道裕・中嶋吉郎, 別枠研究「農林漁業における環境保全的技術に関する総合研究」試験成績書 第6集 家畜排泄物の処理利用技術の開発(農林水産省農林水産技術会議事務局編). 576-578. 1979.
- 68) 平方明男・久保田建御・北原友栄・荻原正義・田中章人・荻原宗弥・佐藤 満, *畜産技術*, **316**: 1-8. 1981.
- 69) 田盛俊昌, *養豚の友*, **146**: 6-15. 1981.
- 70) 田中 博・代永道裕・中嶋吉郎, 別枠研究「農林漁業における環境保全的技術に関する総合研究」試験成績書 第6集 家畜排泄物の処理利用技術の開発(農林水産省農林水産技術会議事務局編). 585-587. 1979.
- 71) ANGLO, P. G., H. TANAKA and K. HAGA, *Philipp. J. Biol.*, **7**: 247-258. 1978.
- 72) HART, S. A., *J. Water Pollut. Control Fed.*, **35**: 748-757. 1963.
- 73) DALRYMPLE, W. and D. E. PROCTOR, *Water Sewage Works*, **114**: 361-364. 1967.
- 74) VAREL, V. H., H. R. ISAACSON and M. P. BRYANT, *Appl. Environ. Microbiol.*, **33**: 298-307. 1977.
- 75) PATELUNAS, G. M. and R. W. REGAN, *J. Environ. Eng. Div. ASCE*, **103** (EE5): 851-861. 1977.
- 76) BOUSFIELD, S., P. N. HOBSON and R. SUMMERS, *Agric. Wastes*, **1**: 161-164. 1979.
- 77) RAJABAPAIAH, P., K. V. RAMANAYYA, S. R. MOHAN and A. K. N. REDDY, *Proc. Indian Acad. Sci.*, **C2** (pt. 3): 357-363. 1979.
- 78) HASHIMOTO, A. G., R. L. PRIOR and Y. R. CHEN, paper presented at the Great Plains Extension Seminar on Methane Production from Livestock Manure. 1-25. Liberal. KS. 1978.
- 79) HASHIMOTO, A. G., Y. R. CHEN and R. L. PRIOR, *J. Soil Water Conserv.*, **34**: 16-19. 1979.
- 80) HILLS, D. J., *Trans. ASAE*, **23**: 122-126. 1980.
- 81) HILLS, D. J. and J. R. STEPHENS, *Agric. Wastes*, **2**: 103-118. 1980.
- 82) RORICK, M. B., S. L. SPAHR and M. P. BRYANT, *J. Dairy Sci.*, **63**: 1953-1956. 1980.
- 83) HAYES, T. D., W. J. JEWELL, S. DELL'ORTO, K. J. FANFONI, A. P. LEUSCHNER and D. F. SHERMAN, in *Anaerobic Digestion* (STAFFORD, D. A., B. I. WHEATLEY and D. E. HUGHES, eds.). 255-288. Applied Science. London. 1980.
- 84) 葉師堂謙一・今泉七郎・新井澄男, *家畜の管理*, **17**: 31-32. 1981.
- 85) JONES, D. D., A. C. DALE, J. C. NYE and R. B. HARRINGTON, *Trans. ASAE*, **24**: 1282-1286, 1290. 1981.
- 86) SMITH, R. J., M. E. HEIN and T. H. GREINER, *J. Anim. Sci.*, **48**: 202-217. 1979.
- 87) MORRIS, G. R., W. J. JEWELL and R. C. LOEHR, in *Food, Fertilizer and Agricultural Residue*, (LOEHR, R. C., ed.). 395-413. Ann Arbor Science. MI. 1977.
- 88) WONG-CHONG, [G. M., in *Energy, Agriculture and Waste Management* (JEWELL, W. J., ed.). 361-372. Ann Arbor Science. MI. 1975.
- 89) VAREL, V. H., A. G. HASHIMOTO and Y. R. CHEN, *Appl. Environ. Microbiol.*, **40**: 217-222. 1980.
- 90) HASHIMOTO, A. G., V. H. VAREL and Y. R. CHEN, *Agric. Wastes*, **3**: 241-256. 1981.
- 91) HILLS, D. J., *Agric. Wastes*, **1**: 267-278. 1979.
- 92) HILLS, D. J., *Trans. ASAE*, **23**: 1500-1504. 1980.
- 93) HILLS, D. J. and D. W. ROBERTS, *Agric. Wastes*, **3**: 179-189. 1981.
- 94) ROBBINS, J. E., M. T. ARNOLD and S. L. LACHER, *Appl. Environ. Microbiol.*, **38**: 175-177. 1979.
- 95) LAURA, R. D. and M. A. IDNANI, *J. Sci. Food Agric.*, **22**: 164-167. 1971.
- 96) JAIN, M. K., R. SINGH and P. TAURO, *Agric. Wastes*, **3**: 65-73. 1981.
- 97) VAREL, V. H. and A. G. HASHIMOTO, *Appl. Environ. Microbiol.*, **41**: 29-34. 1981.
- 98) HUNGATE, R. E., D. W. FLECHER and I. A. DYER, *J. Anim. Sci.*, **14**: 997-1002. 1955.
- 99) SLYTER, L. L., *Appl. Environ. Microbiol.*, **37**: 283-288. 1979.
- 100) CHEN, M. and M. J. WOLIN, *Appl. Environ. Microbiol.*, **38**: 72-77. 1979.
- 101) HILL, D. T., D. T. YOUNG and R. A. NORDSTEDT, *Trans. ASAE*, **24**: 731-736. 1981.
- 102) DUGAN, G. L., C. G. GOLUEKE and W. J. OSWALD, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **44**: 432-440. 1972.
- 103) SAVERY, C. W. and D. C. CRUZAN, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **44**: 2349-2354. 1972.
- 104) HASSAN, H. M., D. A. BELYEA and A. E. HASSAN, in *Managing Livestock Wastes*, Proc. the 3rd International Meeting. 244-247. ASAE. St. Joseph, MI. 1975.

- 105) HAWKES, D., R. HORTON and D. A. STAFFORD, *Process Biochem.*, **11**: 32-36. 1976.
- 106) HAWKES, F. R. and B. V. YOUNG, *Agric. Wastes*, **2**: 119-133. 1980.
- 107) CONVERSE, J. C., G. W. EVANS, K. L. ROBINSON, W. GIBBONS and M. GIBBONS, in *Livestock Waste: A Renewable Resource*, Proc. the 4th International Symposium on Livestock Wastes. 122-125. ASAE. St. Joseph, MI. 1981.
- 108) MORRISON, S. R., P. VOHRA, W. L. SHUPE and D. J. HILLS, in *Livestock Waste: A Renewable Resource*, Proc. the 4th International Symposium on Livestock Wastes. 96-97, 100. ASAE. St. Joseph, MI. 1981.
- 109) HOBSON, P. N., S. BOUSFIELD, R. SUMMERS and P. J. MILLS, in *Anaerobic Digestion* (STAFFORD, D. A., B. I. WHEATLEY and D. E. HUGHES, eds.). 237-253. Applied Science. London. 1980.
- 110) ADDERLEY, A. E., I. E. SMITH and S. D. PROBERT, *Appl. Energy*, **2**: 163-173. 1976.
- 111) HILL, D. T. and C. L. BARTH, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **49**: 2129-2143. 1977.
- 112) YANG, P. Y. and K. K. CHAN, in *Food, Fertilizer and Agricultural Residues* (LOEHR, R. C., ed.). 423-435. Ann Arbor Science. MI. 1977.
- 113) STAFFORD, D. A., D. L. HAWKES and R. HORTON, *Methane Production from Waste Organic Matter*. 1-285. CRC Press. Boca Raton. FL. 1980.
- 114) MILLS, P. J., *Agric. Wastes*, **1**: 57-66. 1979.
- 115) PARK, Y. D., J. H. LIM and N. J. PARK, *Res. Rep. ORD (Korean)*, **21** (H. and Agric. Eng.): 61-68. 1979.
- 116) SUMMERS, R. and S. BOUSFIELD, *Process Biochem.*, **11**: 3-6. 1976.
- 117) 園田頼和, 廃水の生物処理 (高原義昌編). 167-215. 地球社, 東京. 1980.
- 118) WILLIAMS, D. W., T. R. McCARTY, W. W. GUNKEL, D. R. PRICE and W. J. JEWELL, in *Energy, Agriculture and Waste Management* (JEWELL, W. J., ed.). 29-48. Ann Arbor Science. MI. 1975.
- 119) WILLIAMS, D. W., T. R. McCARTY, G. R. MORRIS, W. W. GUNKEL and D. R. PRICE, *Trans. ASAE*, **19**: 1034-1044. 1976.
- 120) FELDMAN, S. L. and J. BREESE, *Resource Recov. Conserv.*, **3**: 261-273. 1978.
- 121) WILLIS, C. E. and R. L. CHRISTENSEN, in *Agriculture and Energy* (LOCKERETZ, W., ed.). 455-468. Academic Press. New York. 1977.
- 122) MIRANOWSKI, J. A., E. R. PIDGEON and D. V. PETERSON, in *Agriculture and Energy* (LOCKERETZ, W., ed.). 469-477. Academic Press. New York. 1977.
- 123) FISCHER, J. R., D. D. OSBURN, N. F. MEADOR and C. D. FULHAGE, *Trans. ASAE*, **24**: 1306-1310. 1981.
- 124) HASHIMOTO, A. G. and Y. R. CHEN, in *Livestock Waste: A Renewable Resource*, Proc. the 4th International Symposium on Livestock Wastes. 129-132. ASAE. St. Joseph. MI. 1981.
- 125) TIETJEN, C., in *Energy, Agriculture and Waste Management* (JEWELL, W. J. ed.). 247-259. Ann Arbor Science. MI. 1975.
- 126) 農村生活総合研究センター(編), *くらしとメタンガス*, 1-126. 農村生活総合研究センター. 東京. 1981.
- 127) 農林水産技術情報協会(編), *メタンガス利用の新技術*, 1-127. 農林水産技術情報協会. 東京. 1980.
- 128) 大野木利成, 昭和50年度山形県立畜産試験場試験研究報告, **19**: 87-97. 1976.
- 129) 築城文明・中林大治郎・姫野厚士, 昭和51年度大分県農業技術センター畜産部試験研究成績書, **18**: 57-65. 1976.
- 130) 貝塚隆義, *養鶏の友*, **225**: 6-13. 1980.
- 131) 郡山秀文・阿野俊男, 香川県畜産試験場研究報告, **18**: 35-44. 1980.
- 132) 北村元茂・川井顕正・下西 和, 高知県畜産試験場研究報告, **11**: 62-68. 1980.
- 133) 林希史雄・兵頭只義・石本功一, 愛媛県畜産試験場研究報告, **4**: 2-27. 1980.