



Title	寒冷地酪農用メタンガス生産施設の設計に関する研究
Author(s)	梅津, 一孝
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	乙第4295号
Issue Date	1993-03-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.11501/3071607">https://doi.org/10.11501/3071607</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/49887">https://hdl.handle.net/2115/49887</a>
Type	doctoral thesis
File Information	000000265489.pdf



寒冷地酪農用メタンガス生産施設の  
設計に関する研究

梅 津 一 孝

①

# 寒冷地酪農用メタンガス生産施設の

## 設計に関する研究

第1章 序論	1
第2章 研究の目的	10
第3章 研究の範囲	15
第4章 研究の意義	20
第5章 研究の進捗	25
第6章 研究の結論	30
第7章 参考文献	35
第8章 謝辞	40
第9章 索引	45
第10章 図表目録	50
第11章 参考文献	55
第12章 謝辞	60
第13章 索引	65
第14章 図表目録	70
第15章 参考文献	75
第16章 謝辞	80
第17章 索引	85
第18章 図表目録	90
第19章 参考文献	95
第20章 謝辞	100
第21章 索引	105
第22章 図表目録	110
第23章 参考文献	115
第24章 謝辞	120
第25章 索引	125
第26章 図表目録	130
第27章 参考文献	135
第28章 謝辞	140
第29章 索引	145
第30章 図表目録	150
第31章 参考文献	155
第32章 謝辞	160
第33章 索引	165
第34章 図表目録	170
第35章 参考文献	175
第36章 謝辞	180
第37章 索引	185
第38章 図表目録	190
第39章 参考文献	195
第40章 謝辞	200
第41章 索引	205
第42章 図表目録	210
第43章 参考文献	215
第44章 謝辞	220
第45章 索引	225
第46章 図表目録	230
第47章 参考文献	235
第48章 謝辞	240
第49章 索引	245
第50章 図表目録	250
第51章 参考文献	255
第52章 謝辞	260
第53章 索引	265
第54章 図表目録	270
第55章 参考文献	275
第56章 謝辞	280
第57章 索引	285
第58章 図表目録	290
第59章 参考文献	295
第60章 謝辞	300
第61章 索引	305
第62章 図表目録	310
第63章 参考文献	315
第64章 謝辞	320
第65章 索引	325
第66章 図表目録	330
第67章 参考文献	335
第68章 謝辞	340
第69章 索引	345
第70章 図表目録	350
第71章 参考文献	355
第72章 謝辞	360
第73章 索引	365
第74章 図表目録	370
第75章 参考文献	375
第76章 謝辞	380
第77章 索引	385
第78章 図表目録	390
第79章 参考文献	395
第80章 謝辞	400
第81章 索引	405
第82章 図表目録	410
第83章 参考文献	415
第84章 謝辞	420
第85章 索引	425
第86章 図表目録	430
第87章 参考文献	435
第88章 謝辞	440
第89章 索引	445
第90章 図表目録	450
第91章 参考文献	455
第92章 謝辞	460
第93章 索引	465
第94章 図表目録	470
第95章 参考文献	475
第96章 謝辞	480
第97章 索引	485
第98章 図表目録	490
第99章 参考文献	495
第100章 謝辞	500

梅津一孝

寒冷地酪農用メタンガス生産施設の設計に関する研究

目次

第1章 緒論	1
第1節 序文	1
第2節 研究動向の概要	2
第3節 メタン発酵の原理	4
第4節 研究目的と本論文の構成	8
第2章 1槽式発酵法によるメタンガス生産	
第1節 本章の目的	10
第2節 乳牛糞尿からのメタンガス生産	11
1.1 実験装置	12
1.2 測定項目および測定方法	17
1.3 実験の手順と方法	20
1.4 解析の方法	22
2. 結果と考察	26
2.1 発酵温度とメタンガス生成量	26
2.2 固形分濃度とメタンガス生成量	35
2.3 有機物負荷、平均滞留時間とメタンガス生成量	42
第3節 乳牛糞尿の流動特性と消化液の肥料成分	47
1. 実験装置と方法	48
1.1 粘度の測定	48
1.2 実験の手順と方法	49

2. 結果と考察	50
2.1 固形分濃度と流動特性	50
2.2 原料温度と粘度	54
2.3 消化液の粘度	55
2.4 消化液の肥料成分	57
第4節 本章のまとめ	60
第3章 2相式発酵法によるメタンガス生産	
第1節 本章の目的	64
第2節 酸発酵槽に関する実験	65
1. 実験装置と方法	66
1.1 実験装置	66
1.2 実験方法	66
2. 結果と考察	67
2.1 攪拌と酸生成速度	67
2.2 原料温度と揮発性総有機酸生成量	70
第3節 従来型と2相式の比較	72
1. 実験装置と方法	72
1.1 実験装置	72
1.2 実験方法	72
2. 結果と考察	74
2.1 原料温度とガス生成量	74
2.2 有機物負荷と有機物分解率	76
第4節 本章のまとめ	79

第4章 小型プラントによる実験	81
第1節 本章の目的	81
第2節 実験プラントの概要	82
1. プラントの構成	83
2. 原料投入	84
3. 発酵槽	85
4. ガスの調製と貯蔵	91
第3節 運転特性	92
1. 発酵槽の運転経過	92
2. 測定と分析	92
3. 有機物負荷とメタンガス生成量	94
3.1 実験の方法	94
3.2 結果と考察	94
4. 投入方法とガス生成パターン	103
4.1 実験の方法	103
4.2 結果と考察	104
5. 実験プラントの熱収支	113
5.1 熱収支の解析方法	113
5.2 結果と考察	115
第4節 原料の性状とガス生成	122
1. 解析の方法	123
2. 結果と考察	125
2.1 有機物濃度	125
2.2 揮発性有機酸組成	127
2.3 pH	132

2.4 窒素	.....	133
第5節 本章のまとめ	.....	137
第5章 実用規模メタンガス生産施設の設計と熱収支の試算		
第1節 本章の目的	.....	142
第2節 実用規模メタンガス生産施設の設計	.....	143
1. 設計諸元と実用プラントの設計	.....	143
2. 最適運転	.....	158
第3節 実用プラントの熱収支の試算	.....	160
第4節 本章のまとめ	.....	166
第6章 総括	.....	171
記号一覧表	.....	182
参考文献	.....	186

## 第 1 章 緒 論

### 第 1 節 序 文

家畜糞尿は、かつては土づくりには欠くことのできない貴重な有機質肥料であった。しかし、近年、多頭飼養、専門化が進み圃場との結び付きが薄れ、その処理と利用が重要な課題となっている。

北海道の酪農についても乳牛飼養戸数は1960年をピークに年々減少しているのに対して、飼養頭数は増加を続けている。これを成畜の飼養規模別戸数で見ると、50頭以下の中・小規模階層では減少し、50頭以上の大規模階層が増加している。また、乳牛飼養頭数は84万7,400頭で、全国の4割以上を占め、1戸当り飼養頭数は平均56.5頭で府県の1.7倍と経営の大規模・多頭化が進んでいる（北海道農政部，1990）。北海道酪農は府県に比べ飼料自給率が高く、経営内での糞尿の圃場還元は比較的容易であった。しかし、近年、1戸当り飼養頭数が100頭を越える酪農家が現れ、排出される糞尿はミルクキング・パークの排水とともに膨大な量となり、その取り扱いが問題となっている。また近年は、自然環境、地域環境の保全の立場から生態系に基づいた家畜糞尿処理の重要性が再確認され、その処理方法としてメタン発酵に対する関心が高まっている。メタン発酵は、本来なら自然の循環系に戻される有機系廃棄物を微生物の働きを借りてエネルギーの回収と環境汚染を軽減する廃棄物処理の両面を行う有望な技術である。

メタン発酵の処理対象物には炭水化物、脂肪、タンパク質などの栄養源が必要であり、処理対象物となる有機物は太陽エネルギーを蓄積して生産された天然物(Biomass)である。処理対象物に糖類、ア

ルコール類、低級脂肪酸、アミノ酸などが多いと容易に発酵が進行し、澱粉、タンパク質、脂肪、繊維などは一旦加水分解されて低分子物質になりメタンガス化する。また、微生物の生育、増殖を伴うために炭水化物、脂肪、タンパク質などの栄養源の他に窒素、磷、カルシウムなどが必要である。窒素や磷の他に種々の無機塩類も必要であるが、家畜糞尿にはこれらが適切に含まれ特に調製する必要はなく、家畜糞尿はその性状から見てメタン発酵に適したバイオマス資源である。

将来、酪農が生態系に基づいた持続性のある産業として発展してゆくために、糞尿処理はメタン発酵技術やコンポストイングなどの技術と組み合わせた、トータルクローズドシステムとして確立される必要がある。さらにメタン発酵技術は、家畜糞尿のエネルギー利用分野においても重要な位置を占める可能性がある。

## 第2節 研究動向の概要

家畜糞尿をメタン発酵させメタンガスを得る技術は、インド、中国などで古くから行われ、日本でも1960年代に生活改善普及事業として本州の農家に普及した経過がある。しかし、プロパンなどの安価な化石エネルギーが普及することにより徐々に姿を消し、一部の篤農家を使用するのみとなった。その後1973年頃からの石油危機が契機になって世界的にエネルギー問題がクローズアップされメタン発酵は代替エネルギーとして再評価され、わが国においても畜産試験場や大学で様々な研究が行われ多くのデータの蓄積がある。Haga (1979)はこれらの成果をまとめ日本でのメタンガス生産の将来予測を行っている。

この時期、アメリカでも大学や試験場で様々なメタンプロジェクトが行われ（Jewell, 1978など）、アリゾナ州やカリフォルニア州など温暖な地域では比較的簡易な方法で実用化が試されている。また、普及機関でも将来の普及奨励技術として酪農者向け出版物での啓蒙を行っている（University of California, 1982; Northeast regional agricultural engineering service, 1984）。また、企業レベルではスミス・ハーベスト社とコーネル大学が共同で実用化に向けたランニングテストを行っている（Vetterら, 1990）。カナダでもメタン発酵の研究は盛んでオンタリオ州では7箇所の農場で発酵槽が稼働している（松田, 1988）。

還元圃場の少ないヨーロッパでもメタン発酵に関する関心が高く、イギリスの農業工学研究所での大型実験プラントによるランニングテスト（Oliverら, 1986）やデンマーク（Zubr, 1991）での取り組み、さらにガスコイン社など企業レベルでの実用化の動きがある。

わが国でも近年、環境保全の立場から家畜糞尿処理の重要性が再確認され、いくつかの嫌気糞尿処理プラントが誕生している（前川ら, 1990など）。しかし、これも温暖地に限られており、北海道のような厳寒地で使用できる実用的な施設はなく、寒冷地型のメタン発酵施設の開発が待たれている。

また、これらの研究開発の他に開発途上国への技術援助の一貫としてケニヤでの普及活動など（Dayら, 1990）、持続性のあるソフトエネルギーとして多方面からの取り組みが行われている。

## 2節 メタン発酵の原理

### 1. メタン発酵の原理

家畜の糞尿は、水、肥料成分、エネルギーの3種類の資源を含有している。メタン発酵は微生物が糞尿に含まれる有機物を栄養源として代謝するプロセスを利用し、エネルギーを抽出する方法のひとつである。

家畜糞尿に含まれた有機物が分解されメタンガスに変換される経過の概要を図1.1に示す。メタン発酵はメタン菌により有機物が分解されメタンガスを発生する反応と、水素と炭酸ガスからメタンガスを生成する反応とに分けられる。高級な有機物から低級な有機物への分解は、相Iの加水分解過程と酸発酵過程より構成され、通性嫌気性菌群により酢酸、プロピオン酸、アルコール、水素ガス及び炭酸ガスなどの中間生成物となる。プロピオン酸、酪酸は一旦酢酸に分解されたのち炭酸ガスを経てメタンに還元される。次に相IIにおいて、絶対嫌気性群と言われるメタン菌群によって、これら中間生成物はメタン、炭酸ガス、およびアンモニアに分解される。

相Iで関与する通性嫌気性菌群は、酸素の存在または不足状態でも生存可能であり、加水分解過程では炭水化物分解菌、繊維分解菌、タンパク質分解菌に分類される。また、酸発酵過程では、酸生成菌によって高級脂肪酸は低級脂肪酸に分解される。さらにメタン発酵過程ではこれら低級脂肪酸からメタンガスを生成する。絶対嫌気性菌群であるメタン菌群は好気性条件では活動できないため極めて高い嫌気性条件が要求される。従って実際のメタン発酵槽は空気の混入しない密閉した容器が必要となる。また、メタン菌は非常に基質

特異性の高い菌で、現在3目6科16属44種に分類され、おもに特定の低級脂肪酸を分解する。通常有機物の腐敗に関与する菌は数百種に及ぶといわれており、家畜糞尿は雑多な有機物を含んでいるためその系は非常に複雑であると推測される。

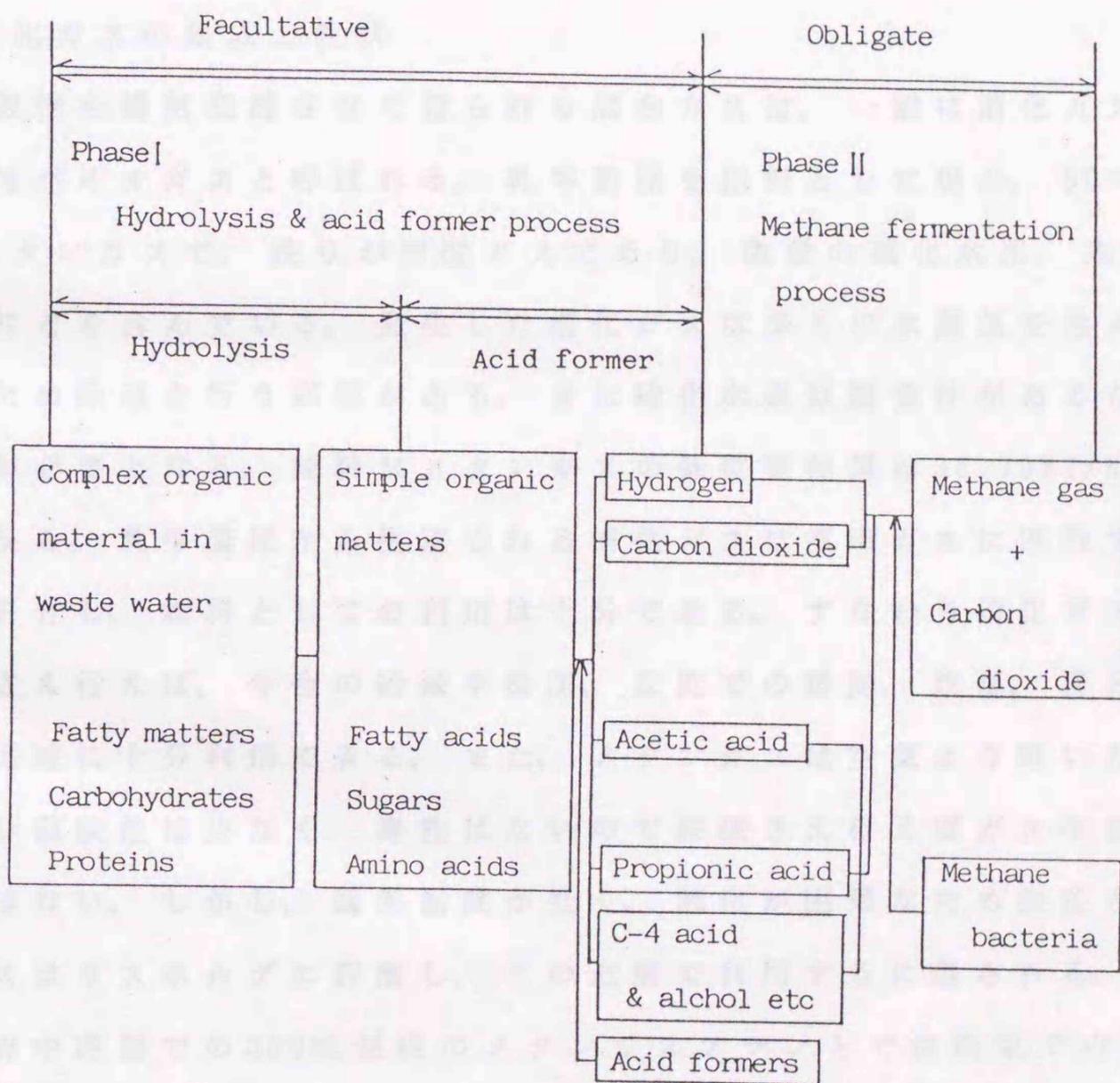


Fig. 1.1 The principles of methane fermentation  
 図 1.1 メタン発酵の原理

メタン発酵の適温領域には中温領域(35~45℃)と高温領域(55~65℃)があり、家畜糞尿の場合原料の加温、保温の熱量を考えると中温領域が適当であり、35℃を設定温度とした実験例、運転例が多い。発酵液温の急変はメタン発酵を阻害するため発酵槽温度を一定に保つ温度コントロールが極めて重要である。

## 2. 消化ガスの組成と性状

有機物を嫌気発酵させて得られる混合ガスは、一般に消化ガスあるいはバイオガスと呼ばれる。乳牛糞尿を原料とした場合、50~70%がメタンガスで、残りが炭酸ガスであり、微量の硫化水素、水素、窒素などを含んでいる。発生した消化ガスは多くの水蒸気を含んでいるため除湿を行う必要がある。また硫化水素は腐食性があるため脱硫が必要となる。純粋なメタンガスの低位発熱量は $35.79\text{MJ}/\text{Nm}^3$ であるから、乳牛糞尿から生産される消化ガスは都市ガスに匹敵する熱量を有し、燃料としての利用は十分である。すなわち消化ガスは脱硫さえ行えば、牛舎の給湯や暖房、家庭での暖房、炊事、風呂などの用途に十分利用できる。また、メタンガスは空気より軽いため、放散し危険性は少なく、毒性はないので脱硫さえ行えばガス中毒の心配はない。しかし、臨界温度が低く、液化が困難なため生産されたガスはガスホルダに貯溜し、その近隣で利用するに限られる。アメリカ中西部での300頭規模のメタンガスプラントでは農家での利用の他に近郊の家屋に配管し地域で利用している。また、東部では天然ガスに混ぜて利用している例がある。

### 3. エネルギーとしての可能性

一般に1日当りの乳牛糞尿の量はミルクキング・パーラの排水も含め1頭当り約60kgと言われ、有機物含量を10%とすると有機物量は6kgとなり、有機物1kg当りのメタンガス生成量を200ℓとすると、乳牛1頭当りの糞尿からのメタンガス回収量は1,200ℓとなり回収可能な熱量は42.9MJ/1頭/日となる(Hashimotoら, 1979)。原料の加温、保温に要する熱量を発生したメタンガスの50%で賄うと試算すると1頭1日当り約21.5MJの熱量が利用可能となる。

家畜糞尿からのエネルギー回収の方法としてメタン発酵の他にコンポストからの熱回収がある。ベルギーのVerougstraeteは、固形コンポストからの熱回収とメタン発酵によるエネルギー回収を数箇所のプラントで比較し、両者ともほぼ同様の熱が回収されるとしている(松田, 1992)。酪農にこれらの方法を導入する場合、畜舎からの廃棄物を固液分離し、固形分をコンポスト化し、液分をメタン発酵に用いる方法が有利であると考えられる。

### 4. メタン発酵の利点と問題点

メタン発酵の利点として、エネルギー価値の高いメタンガスが得られる他に、有機物の一部が分解され流動性が良くなり、悪臭が軽減されることがあげられる。堆肥ではかなりの窒素が流出放散するのに対してメタン発酵では、アンモニアは炭酸アンモニウム形で保持されリン酸、カリについても失われることはない。また、ギシギシなどの雑草種子の処理効果があり、40℃以上の発酵温度ではほぼ100%のギシギシの種子の発芽力が消滅している(梅津ら, 1992)。問題点として、北海道のような寒冷地でメタン発酵を成功させるた

めには十分な断熱と加温を行うための設備が必要でかなりの費用を要し、さらに毎日の原料投入や温度管理などの保守管理が必要となることがあげられる。

### 3節 研究の目的と本論文の構成

農場規模での大型メタンガス生産施設はまだ研究段階にあり、一般に実用化されていない。特に寒冷地における乳牛糞尿を原料としたメタンガス生産施設は冬期間の運転維持が困難なため北海道での周年運転の実績はない。

本研究は室内実験とベンチサイズの発酵槽による実験、さらに小型プラントによるランニングテストを行い、寒冷地型酪農用メタンガス生産施設の設計指針を得ることを目的とした。本論文は6章より構成され、第1章は緒論、第2章では1槽式発酵法を用い発酵温度、固形分濃度、滞留日数とメタンガス生成量の関係、さらに乳牛糞尿の流動特性と消化液の肥料成分などメタン発酵原料としての乳牛糞尿の特徴を述べる。第3章では2相式発酵法の効果、特に低温原料の投入の影響について1槽式発酵法との比較を行い、寒冷地酪農への適応性の検討を行う。第4章では開発試作した小型プラントを牛舎脇に設置し、無希釈糞尿を用い高負荷運転を行った場合の供試プラントの運転特性について述べる。第5章ではこれらの結果をまとめ実用規模の寒冷地型酪農用メタンガス生産施設の設計諸元を提示し、第6章ではそれらを総括した。

## 謝 辞

本研究の取りまとめにあたり、終始懇切なる御指導と論文の御校閲を賜った北海道大学農学部農産物加工工学講座 伊藤和彦教授、論文の御校閲を賜った農用車両システム工学講座 寺尾日出男教授、農業物理学講座 堀口郁夫教授、農産物加工工学講座 松田従三助教授に対して衷心より感謝の意を表す。研究着手当初より、終始御指導を賜った帯広畜産大学草地畜産機械学講座 高畑英彦教授、御協力を頂いた干場秀雄助教授に謹んで感謝の意を表す。また、実験の遂行にあたり多大な御協力を頂いた日本甜菜製糖株式会社総合研究所 増田昭芳所長、川本常美課長に深謝する。さらに、実験期間中、帯広畜産大学畜産機械学研究室に在籍した大学院生、4年目学生諸兄には多くの協力を得た。記して感謝の意を表す。

## 第2章 1 槽式発酵法による

### メタンガス生産

#### 第1節 本章の目的

家畜糞尿からのメタンガス生産に関する研究の多くは、ほとんどの飼料を購入している養豚や養鶏など還元圃場のない家畜の糞尿を対象としたもので、牛糞尿については肉牛の糞尿に関するものが多く乳牛の糞尿を対象とした研究は少ない。

Hill(1984)が行った乳牛糞尿、肉牛糞尿、豚糞尿、鶏糞のメタン原料としての比較では、有機物投入当りのメタン生成量では豚糞尿、鶏糞尿が多く、次に、肉牛糞尿、そして乳牛糞尿の順となり、有機物分解率では鶏糞、豚糞が50%台、続いて肉牛糞尿が40%台で乳牛糞尿は20%台と低い。すなわち、乳牛は他の家畜に比べ粗飼料を多給するため糞中の繊維分が多く有機物分解率が低い。さらに有機物投入当りのメタン生成量が少ないことが、前述の還元圃場の問題と併せて研究を遅らせ原因となった。しかし、近年多頭飼育化が進み、乳牛糞尿の処理は環境汚染防止のため最重要課題となり、その処理技術の確立が急がれている。

本章はメタン発酵原料としての乳牛糞尿の特徴を明かにするために回分式試験と連続投入試験を行った結果について述べる。第2節では、メタン発酵装置の設計の基礎となる発酵温度、投入原料固形分濃度、平均滞留時間とメタンガス生成量の関係について、1槽式発酵槽における最適固形分濃度と最適平均滞留時間を明かにすることを目的とした。第3節では各固形分濃度における乳牛糞尿の流動特性、温度と粘度の関係、液移送のためのポンプの選定の基礎となる原料

糞尿の粘性指数、粘性係数を求めることを目的とした。また、メタン発酵後の消化液の肥料成分の分析を行い、土壌還元指標を示した。さらに第4節では本章のまとめを行った。

## 第2節 乳牛糞尿からのメタンガス生産

家畜糞尿からのメタンガス生産に関する研究が本格的に始まったのは、中東戦争を契機に世界的エネルギー危機が勃発した1970年代初頭である。当初は下水処理あるいは工業廃液処理技術を踏襲した形で始まり、それを豚糞尿、鶏糞に応用したものが多いため原料の固形分濃度を6~7%に調整するために2~3倍の希釈を必要とした。希釈は単にスラリーの体積すなわち発酵槽の容積を増やすばかりでなく、加温に要する熱量も増やすことになり、近年原料の希釈割合を下げる試みがなされるようになった。

発酵槽に投入する有機物量を示す単位として有機物負荷量があり、投入有機物kg/発酵槽有効容積 $\text{m}^3$ /日、あるいは投入有機物g/発酵槽有効容積 $\text{g}$ /日で表される。また、投入した糞尿が発酵槽中に滞留する日数を水理学的平均滞留日数（または平均滞留時間）と呼び、発酵槽容積を1日当りの投入量で除した値で、平均滞留時間が10日であれば1日の投入量の10倍の発酵槽容積が必要となる。

寒冷地での効率のよいメタンガス生産施設は、メタン発酵槽を小型化し、外壁面からの放熱を少なくし、さらに発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量を最大にする操作方法の確立が必要となる。そのためには有機物負荷を上げると同時に平均滞留時間を短縮する必要がある。この概念はMorrisら(1977)によって実験的に示されている。その実験式を以下に示す。

$$\nu_v = 0.5(S_0 - S) / R_T \quad (2.1)$$

$\nu_v$ : 発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量 [ℓ / ℓ / day]

$S_0$ : 投入原料有機物量 [g / ℓ]

$S$ : 排出消化液有機物量 [g / ℓ]

$R_T$ : メタン発酵槽の平均滞留時間 [day]

すなわち、発酵槽有効容積当りのメタン生成量は投入原料有機物量と分解率に比例し、メタン発酵槽内の平均滞留時間に反比例する。しかし、有機物負荷の上限は、発酵槽内原料中の揮発性有機酸の蓄積あるいは菌体の流失 (Wash out) の量に規制され平均滞留時間の短縮は有機物分解率の低下を招く。そのため平均滞留時間を確保し、有機物負荷を上げるには投入原料の有機物濃度を上げる必要がある。

本節では高濃度原料を用いた場合の発酵温度、固形分濃度、有機物負荷、平均滞留時間とメタンガス生成量の関係を明かにし、投入原料濃度の上限を求めることを目的とした。

## 1. 実験装置と方法

### 1.1 実験装置

発酵温度ならびに固形分濃度とメタンガス生成量の関係を明かにするための回分式試験、および平均滞留時間、有機物負荷とメタンガス生成量の関係を明かにするための連続投入試験を行った。以下それぞれの試験に用いた実験用発酵槽について述べる。

#### 1) 回分式発酵槽

容積 2ℓ の培養用フラスコを改良した有効容積 1ℓ の嫌気発酵槽 20



Photo 2.1 Batch digesters  
写真 2.1 回分式発酵槽

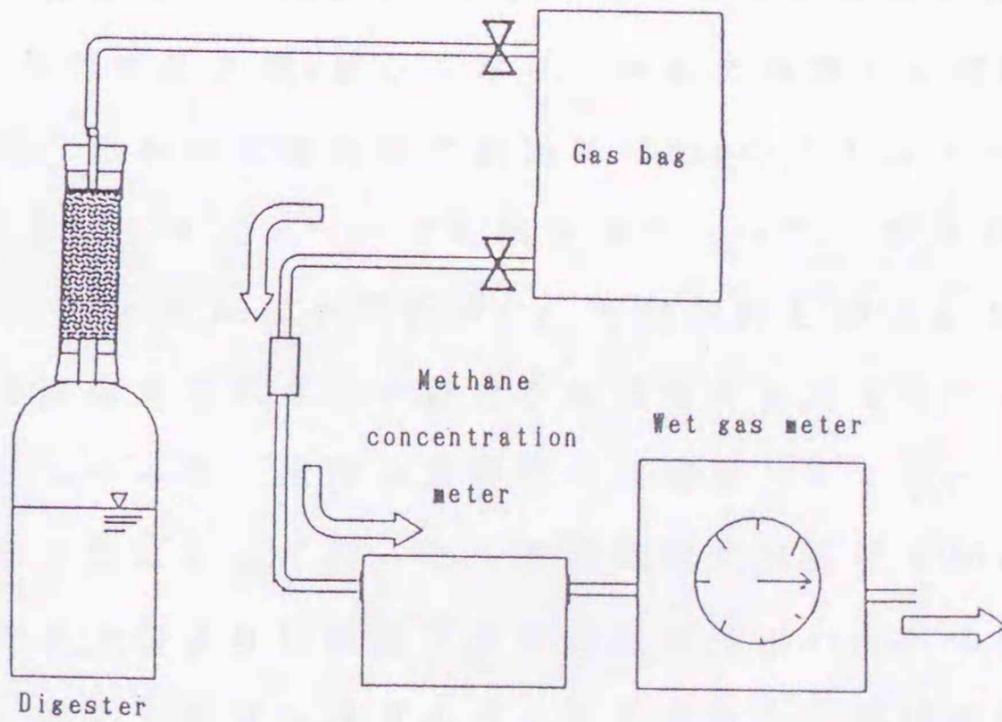


Fig. 2.1 Schematic of the batch digester  
図 2.1 回分式発酵槽の概略図

基を用い、これをサーモメータによって水温を一定に保った恒温水槽内に設置し、嫌気発酵槽として用いた。

実験装置の全景を写真2.1に示す。また、発酵槽の構造を図2.1に示す。各発酵槽の出口の部分に発生したガスの脱硫を目的とした水酸化第二鉄のペレットを充填した脱硫装置を設けた。発生したガスは脱硫装置を通りガスバックに捕集した後、発酵槽側のコックを閉じ、除湿剤、ポータブルガス濃度計、湿式ガスメータを接続し、24時間毎にガス体積とメタン濃度を測定した。恒温水槽内温度は打点記録温度計で記録した。

## 2) 連日投入発酵槽

実験装置の全景を写真2.2に示す。実験装置の構造を図2.2に示す。恒温水槽内の発酵槽を写真2.3に示す。使用した実験装置は大型恒温水槽2基と、小型恒温水槽4基からなり、内部に設置した発酵槽は合計28基である。恒温水槽は鉄製で側面に100mmのグラスウールを、上蓋は100mmのスタイロフォームで断熱処理を行った。嫌気発酵槽は内径150mmの塩化ビニールパイプを用い、有効体積を17.7ℓとした。なお、本発酵槽は生成消化ガスの硫化水素濃度を測定するために脱硫装置は設置しなかった。攪拌は発酵槽内に設置したブレードを付けた攪拌棒の上下動によって行った。攪拌機構の模式図を図2.3に示す。投入は原料を投入口より自然流下させ排出は排出バルブの開閉によって行った。発生したガスはガスバックに捕集し、毎日定時にガス体積とメタン濃度を測定した。



Photo 2.2 Experimental apparatus  
写真 2.2 実験装置

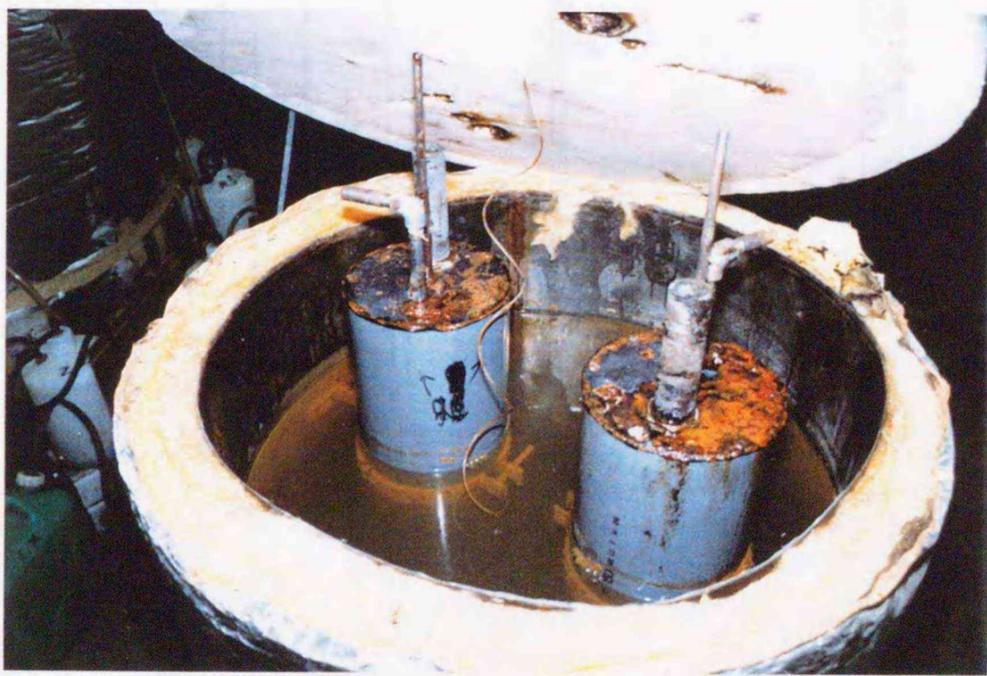


Photo 2.3 Experimental digesters in the hot water bath  
写真 2.3 恒温槽内に設置した発酵槽

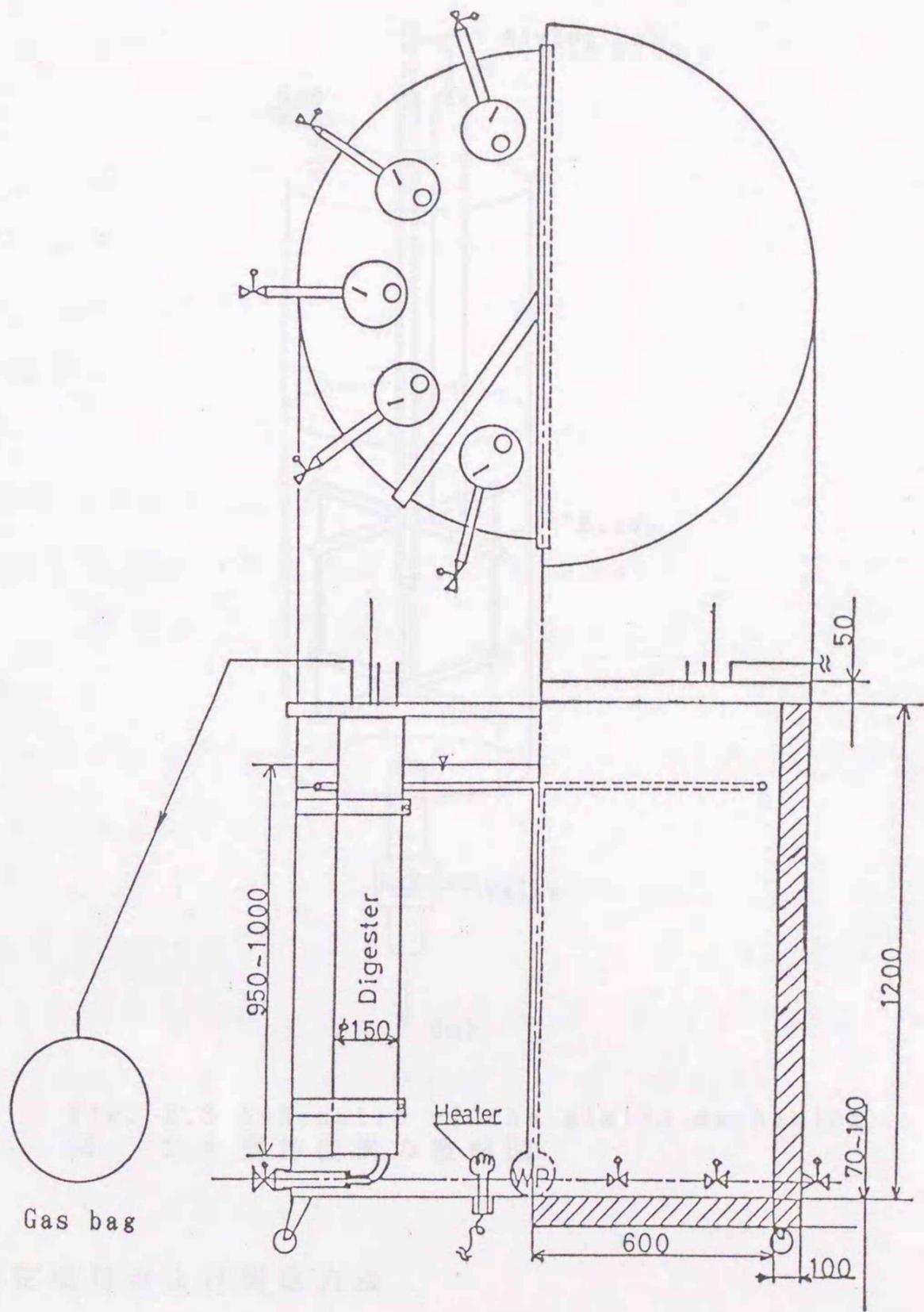


Fig. 2.2 Schematic of the experimental digester  
 図 2.2 実験用発酵槽の概略図

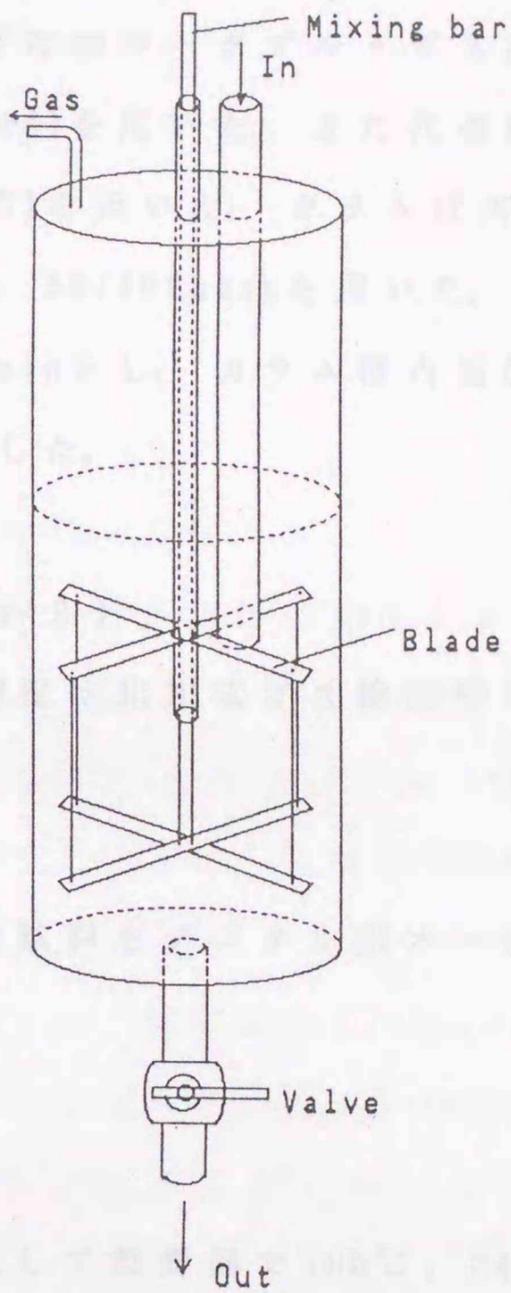


Fig. 2.3 Schematic of the mixing mechanism  
 図 2.3 攪拌機構の概略図

## 1.2 測定項目および測定方法

### 1) 消化ガス生成量 (ℓ または $m^3$ )

ガス生成量の測定は湿式ガスメータを用いた。ガス温度を測定し、標準状態に換算した。

## 2) メタン濃度 (%)

メタン濃度の測定にはポータブル・ガス濃度計 (Model GC-701, Toka Seiki CO., Ltd) を用いた。また代表的サンプルはガスクロマトグラフ島津 (GC-4C) を用いた。カラムは内径 3mm, 長さ 2m, カラム充填剤はシリカゲル 80/100mesh を用いた。キャリアーガスには He を用い、流量は 28 mL/min とし、カラム槽内温度を 80°C、熱伝導型検出器の温度を 120°C とした。

## 3) 硫化水素濃度 (mg/l)

硫化水素濃度の測定は北川式ガス検知管を用いた。

## 4) pH

サンプリングした試料をデジタル pH メータ (SHIBATA 672) を用いて測定した。

## 5) 固形分濃度 (%)

試料の質量を秤量して乾燥器で 105°C, 24 時間で乾燥させた後、常温まで冷却、秤量し、固形分濃度を次式で求めた。

$$T_s (\%) = D/W \times 100 \quad (2.2)$$

$T_s$ : 固形分濃度 [%]

$D$ : 試料質量 [g]

$W$ : 乾物質量 [g]

## 6) 有機物濃度 (% または g/l)

乾物質量測定後の試料を灰化炉で 550°C, 4 時間で灰化した後、常

温まで冷却、秤量し、次式で揮発性有機物濃度を求めた。

$$V_s(\%) = (D - A) / W \times 100 \quad (2.3)$$

$$S_a(\text{g}/\text{g}) = (D - A) / W \times 1000$$

$V_s$ : 有機物濃度[%]

$S_a$ : 投入原料有機物量[g/g]

A: 灰化後質量[g]

#### 7) 揮発性有機酸濃度 (mg/g)

投入原料と消化液の各有機酸の濃度は高速液体クロマトグラフ有機分析システム(HPLC, 島津LC-10AD)を用いた。カラムはShim-pack SGR-102H、移動相は5mMのp-トルエンスルホン酸水溶液、液量は0.8mL/min、温度は45℃とした。緩衝液は5mMのp-トルエンスルホン酸、20mMのBis-Trisと100μMのエチレンジアミン四酢酸の混合液を用い、液量は0.8mL/min、温度は48℃とした。

前処理は、糞尿3gに10%タングステン酸6mLと2/3N硫酸6mLを加え、5分間ホモジナイズした後、10,000rpm、20分間で遠心分離し、上澄み液をHPLCに注入し、分析を行った。

#### 8) 有機物分解率 (%)

投入原料液中の無機物は発酵によって消化されていないものとし、次式で求めた。

$$D_R(\%) = \{1 - (A_1 \times V_2) / (V_1 \times A_2)\} / 100 \quad (2.4)$$

$D_R$ : 有機物分解率[%]

$V_1$ : 供給原料液中の有機物濃度[%]

$V_2$ : 採取原料液中の有機物濃度[%]

A<sub>1</sub>: 投入原料液中の無機物濃度 [%]

A<sub>2</sub>: 採取原料液中の無機物濃度 [%]

### 1.3 実験の手順と方法

実験は4種類行った。以下実験の目的および実験方法について述べる。

#### 1) 実験 I 最適発酵温度に関する回分式実験

原料中に含まれるメタン菌を馴養し、乳牛糞尿を対象とする効率的な発酵温度を見いだすことを目的とし、有効体積2ℓの発酵槽を用い回分式実験を行った。発酵温度は35, 37.5, 40, 42.5, 45℃の5段階とし、乳牛糞尿中に含まれるメタン菌をそれぞれの発酵温度で馴養した。原料は日本甜菜製糖株式会社清川農場のスタンション牛舎糞尿溝の無希釈スラリーを採取し、実験に用いた。発酵槽に1,000gの糞尿を投入し、ガス生成が減少した時点で500gの内容物を取り出し、新鮮な糞尿500gを投入した。この作業は発酵状態の安定が確認されるまで繰り返し、35, 37.5℃では7回、40, 42.5, 45℃では8回、180日間の馴養を行った。

馴養を行った後、20日間の回分式試験を行った。発酵槽内は新鮮な糞尿800gに馴養を行った種汚泥200gを加え、消化ガス生成量とメタン濃度を測定した。

#### 2) 実験 II 最適固形分濃度に関する回分式実験

固形分濃度と消化ガス生成量の関係を明かにし、投入原料濃度の上限を求めることを目的とし回分式実験を行った。原料は日本甜菜

製糖株式会社清川農場のスタンション牛舎糞尿溝の無希釈スラリーを採取し、よく混合し実験に供した。乳牛スラリーの固形分濃度を10.8, 9.2, 7.3, 5.1, 2.8%の5段階に調整し、原料スラリー600gに種汚泥100gを加え発酵槽に投入した。滞留時間は50日間とした。発酵温度は実験Iの結果から42.5℃とし、消化ガス生成量を測定した。原料投入直後、発酵槽内を嫌気状態に保つため二酸化炭素による置換を行った。種汚泥は実験Iの発酵温度42.5℃の消化液を用いた。

### 3) 実験III 糞、尿、希釈水の割合に関する回分式実験

実験IIの結果をもとに、同様の固形分濃度における糞、尿、希釈水の割合と消化ガス生成量の関係について回分式試験を行った。糞はパドック内の新鮮なものを、尿はスタンション繋留牛から採取した。糞を400gに固定し、尿の添加量を0gから400gに変え、さらに希釈水の量を変え、100gの種汚泥を添加し、ガス生成量に及ぼす尿の影響を見た。発酵温度は42.5℃とし、種汚泥は実験Iの発酵温度42.5℃の消化液を用いた。原料投入直後、発酵槽内を嫌気状態に保つため二酸化炭素による置換を行った。表2.1に各発酵槽の内容物を示す。

表 2.1 実験IIIの各発酵槽の内容物  
Table 2.1 Experimental design of feces and urine ratio

Digester No	Feces (g)	Urine (g)	Ratio		Water (g)	Seed (g)	Total (g)
			U/F (%)				
1	400	0	0		200	100	700
2	400	50	12.5		150	100	700
3	400	100	25		100	100	700
4	400	150	37.5		50	100	700
5	400	200	50		0	100	700
6	400	300	75		0	100	800

#### 4) 実験Ⅳ 最適固形分濃度に関する連日投入試験

1槽式発酵槽のメタンガス生成量が最大となる固形分濃度の上限を求めることを目的とし、連日投入試験を行った。供試材料は帯広畜産大学附属農場のロータリ・ミルクパーラの待機場のコンクリート床面より、スコップで採取した新鮮な牛糞尿をよくかきまぜ、4℃に冷蔵保存し、実験に供した。投入は1日1回定時に行った。有機物濃度を106.4, 85.1, 70.9g/lに調整した原料を用いた。発酵温度は35℃とした。消化ガス生成量、メタン濃度、硫化水素濃度を測定した。実験は60日間行った。

#### 1.4 解析の方法

メタン発酵槽の設計、運転操作に必要な発酵温度、固形分濃度、有機物投入量、滞留日数の関係、さらにシステムの安定性、消化液の状態などメタン発酵プロセスの解析を行うためにいくつかの反応モデルが提唱されている。メタン発酵の反応モデルは当初、混合培養系における反応は純粋培養系のそれに近似しているものとして、菌の増殖モデルであるMonod式が用いられた(O'Rourke, 1968など)。

Monod式を基礎としたモデル(Hillら, 1977; Morris 1976; Andrewsら, 1971)は、家畜の種類、温度帯など15以上のパラメータを必要とした。その後、Pfeffer(1974)は下水処理における有機物分解率の予測にはMonod式は適当でないことを報告し、Gradyら(1972)も、Monod式は投入原料の濃度と排出消化液の関係が予測できない点を指摘している。そこでChenら(1978)はContoisの反応モデルを援用して家畜糞尿を対象としたメタン発酵反応モデルを提唱した。これはChen & Hashimotoモデルとして現在も広く用いられている。この

モデルの利点はパラメーターが少なく、測定しやすい項目であり、精度の高い点にある。また、モデルの適応性については、肉牛糞尿を対象とした Hashimoto(1981)の報告、豚糞尿を対象とした Hashimoto(1983)、Chenら(1984)の報告がある。また、このモデルを使った発酵槽の設計に関する Hill(1982)の報告があるが、乳牛糞尿を対象とした適応性についての報告はない。

本章では実験結果を Chen & Hashimotoモデルに適応し、乳牛糞尿のメタン発酵原料としての特性、他の家畜糞尿との比較、さらにモデルの適応性について考察を行った。

以下 Chen & Hashimotoモデルについて述べる。

完全混合槽で消化液の返送を行わない場合、菌体の変化と基質の濃度は次のふたつの式で表される (Chenら, 1978)。

$$\frac{dM}{dt} = \mu M - \frac{M}{R_T} \quad (2.5)$$

$$\frac{dS}{dt} = -F + \frac{S_0 - S}{R_T} \quad (2.6)$$

M: 菌体量 [g/ℓ]

μ: 比増殖速度 [day<sup>-1</sup>]

F: 基質利用率 [g/ℓ/day]

S: 排出基質濃度 [g/ℓ]

S<sub>0</sub>: 流入基質濃度 [g/ℓ]

R<sub>T</sub>: 平均滞留時間 [day]

t: 時間

ここで q を比基質利用率、Y を増殖定数とすると比増殖速度 μ と基質利用率 F の関係は次式で表される。

$$\mu = Yq = (Y/M)F \quad (2.7)$$

さらに(2.5)、(2.6)、(2.7)式から次の式が得られる。

$$\mu = 1/RT \quad (2.8)$$

$$F = (S_0 - S)/R_T \quad (2.9)$$

$$M = Y(S_0 - S) \quad (2.10)$$

比増殖速度  $\mu$  は平均滞留時間  $R_T$  の逆数であり、基質利用率  $F$  は(2.9)式より求めることができる。また、測定が困難である菌体量  $M$  は(2.5)式に代わり(2.10)式から計算することができる。

そこで、比増殖速度  $\mu$  を菌体量  $M$  と排出基質濃度  $S$  の関係で表した Contois(1959)のモデルを示す。

$$\mu = \mu_m S / (B M + S) \quad (2.11)$$

$\mu_m$ : 最大比増殖速度 [ $\text{day}^{-1}$ ]

$B$ : 動力学変数 [無次元]

上式は(2.10)式を用いて次式に書き換えることができる。

$$\mu / \mu_m = S / BY(S_0 - S) + S \quad (2.12)$$

さらに増殖定数と動力学変数の積を  $K$  とおいて ( $BY = K$ )、 $K$  を無次元の動力学変数とすると次式が導かれる。

$$\frac{\mu}{\mu_m} = \frac{(S/S_0)}{K + (1-K)S/S_0} \quad (2.13)$$

$K$  値は、発酵阻害の程度を表す変数として用いることができる。さらに、(2.8)式と(2.13)式から平均滞留時間  $R_T$  は次のように表すことができる。

$$R_T = 1 / \mu_m + (K / \mu_m)(S_0 - S) / S \quad (2.14)$$

すなわち、最大比増殖速度  $\mu_m$  と  $K$  値は平均滞留時間  $R_T$  と  $(S_0 - S) / S$  の関係から求めることができる。すなわち、 $R_T$  と  $(S_0 - S) / S$  をプロッ

トするとこれらは直線関係にあり切辺は $1/\mu_m$ 、傾きが $K/\mu_m$ となる。また(2.8)式と(2.13)式より次式が得られる。

$$\frac{S}{S_0} = \frac{K}{R_T/R_{Tm} - 1 + K} \quad (2.15)$$

(2.15)式は流入濃度と排出濃度は比例関係にあることを示している。流入基質濃度は一般に有機物濃度で表わすことができ、有機物分解率とメタン生成量とは強い相関関係にあるため、有機物投入当りのメタン生成量を $\beta$  ( $\text{g CH}_4/\text{g}$  投入  $V_s$ )、平均滞留時間を無限大とした場合の有機物投入当りのメタン生成量を $\beta_0$  ( $\text{g CH}_4/\text{g}$  投入  $V_s$   $R_T \rightarrow \infty$ )とすると(2.15)式は次式となる。

$$\frac{\beta_0 - \beta}{\beta_0} = \frac{K}{R_T/R_{Tm} - 1 + K} \quad (2.16)$$

または、

$$\beta = \beta_0 \left[ 1 - \frac{K}{R_T/R_{Tm} - 1 + K} \right] \quad (2.17)$$

さらに(2.17)式は

$$R_T = R_{Tm} + R_{Tm} K \left[ \beta / (\beta_0 - \beta) \right] \quad (2.18)$$

と表すことができ、 $\mu_m$ と $K$ 値を求めることができる。すなわち $R_T$ と $\beta / (\beta_0 - \beta)$ をプロットするとこれらは直線関係にあり、切辺は $R_{Tm}$ 、傾きが $R_{Tm} K$ となる。また、最少平均滞留時間 $R_{Tm}$ は最大比増殖速度 $\mu_m$ の逆数として表すことができる。

$$R_{Tm} = 1/\mu_m \quad (2.19)$$

さらに発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量 $\rho_v$ は有機物投入当りのメタン生成量 $\beta$ に有機物負荷 $S_0/R_T$ を乗じた値と等しく、(2.17)式と(2.19)式より

$$\nu_v = \frac{\beta S_0}{R_T} = \frac{\beta_0 S_0}{R_T} \left[ 1 - \frac{K}{\mu_m - 1 + K} \right] \quad (2.20)$$

となる。すなわち、 $\beta_0$ 値は投入原料の $\text{CH}_4$ 生産ポテンシャル、 $\mu_m$ 値は菌体の増殖速度、 $K$ 値は発酵阻害の程度を表し、(2.20)式は既知の $\beta_0$ 値と $\mu_m$ 値を用いて、投入有機物濃度と平均滞留時間から発酵槽有効容積当りのメタン生成量が予測できる。

## 2. 結果と考察

### 2.1 発酵温度とメタンガス生成量

メタン発酵の適温領域には、中温領域(30~45℃)と高温領域(50~65℃)があり、発酵温度はメタンガス生成量に重要な影響を及ぼす(Lappら, 1978)。Converseら(1977)は乳牛糞尿を用い敷料を含む場合と含まない場合について様々な平均滞留時間における中温領域と高温領域の比較を行っている。また、Rorickら(1980)は固液分離を行った乳牛糞尿を用い、発酵温度40℃と60℃の比較を行っている。また、Hill(1983)は肉牛、豚、乳牛、鶏の糞尿について既知のデータを用い中温領域と高温領域の比較を行っている。高温発酵は中温発酵よりも消化ガス生成量、有機物分解量ともに高く、発酵槽は小型化するため高い温度で排出される廃液の処理には有効である。しかし、発酵槽温度の維持に多くの熱量を必要とすることや、発酵が不安定であるという欠点がある(Varelら, 1980)。家畜糞尿の場合投入原料の加温、保温に多くの熱量を必要とするため中温領域が適当であり、35℃を設定温度とした運転例や実験例が多い。さらに乳牛糞尿を対象とした場合、35℃以外では40℃での運転例が多い。Hillら

(1983)はコンピュータシミュレーションを行い40℃を乳牛糞尿の適温と報告している。Painら(1984, 1988)とOliverら(1986)は125m<sup>3</sup>の発酵槽を用い25と40℃の比較を行っている。また、固液分離を行った乳牛糞尿を用い、Hawkesら(1984)は35℃以下について回分式試験を行っている。さらに岩淵ら(1988)は連日投入を行い20, 30, 35, 40, 48℃で比較を行い発酵温度40℃の有利性を示している。また、スミス・ハーベスター社が試作した300頭規模のモデルプラントでは40℃を目標温度とし33.8~40.5℃で運転されている。しかし、一般に乳牛糞尿を原料とした温度特性に関する実験例は少ない。

#### 2.1.1 馴養

発酵槽内で酸生成菌ならびにメタン発酵菌が共生(symbiosis)し、発酵が順調に進行するよう連日投入を開始する前に集中培養を行うことを馴養あるいは種培養と呼ぶ。豚糞尿あるいは鶏糞の場合、糞尿の嫌気性貯留槽の汚泥、もしくは嫌気性消化処理を行っているし尿処理場の汚泥などを種とする。乳牛糞尿などルーメンをもつ動物の場合その糞尿中に含まれるメタン菌を培養する方法が一般的である。馴養に関する報告はLappら(1975)、山田(1980)、前川(1982)があるが、いずれも豚糞尿を原料とし種を嫌気発酵槽の汚泥から求めたもので、乳牛糞尿を種に発酵温度別で馴養した報告はない。

馴養中の消化ガス生成量の累積値の経日変化を図2.4に示す。各温度とも安定したガス生成を示したが、ガス生成速度に差が認められた。すなわち、ガス生成量が減少し第1回目の投入までの日数は発酵温度が高くなるに従い短くなる傾向が認められた。35, 37.5℃では、58日、40℃では、51日目、42.5℃では、46日目、45℃では、40日目

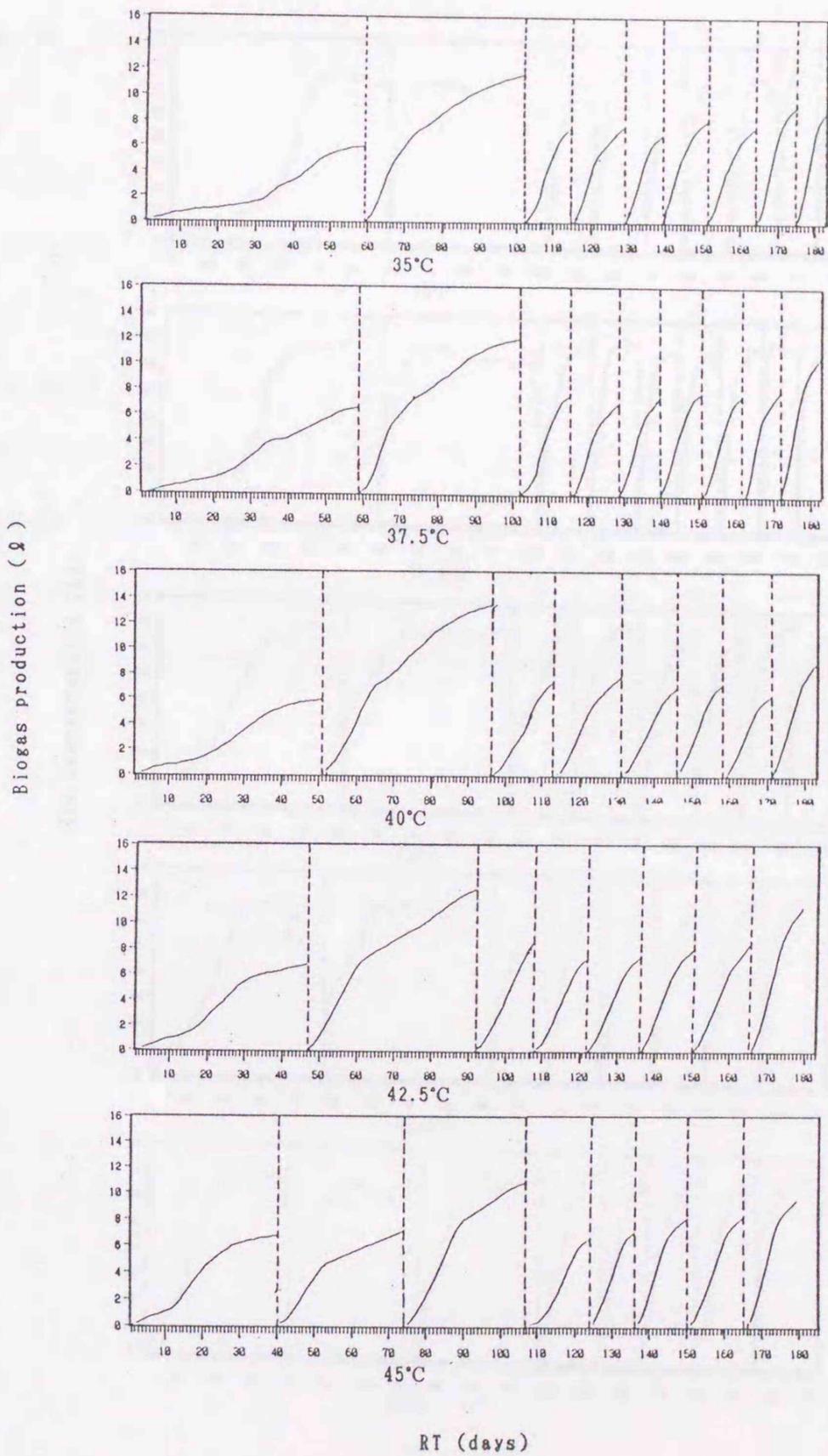


Fig. 2.4 Biogas production during incubation  
(accumulative gas volume)

Arrows indicate the time of feeding

図 2.4 馴養中の消化ガス量の累積変化

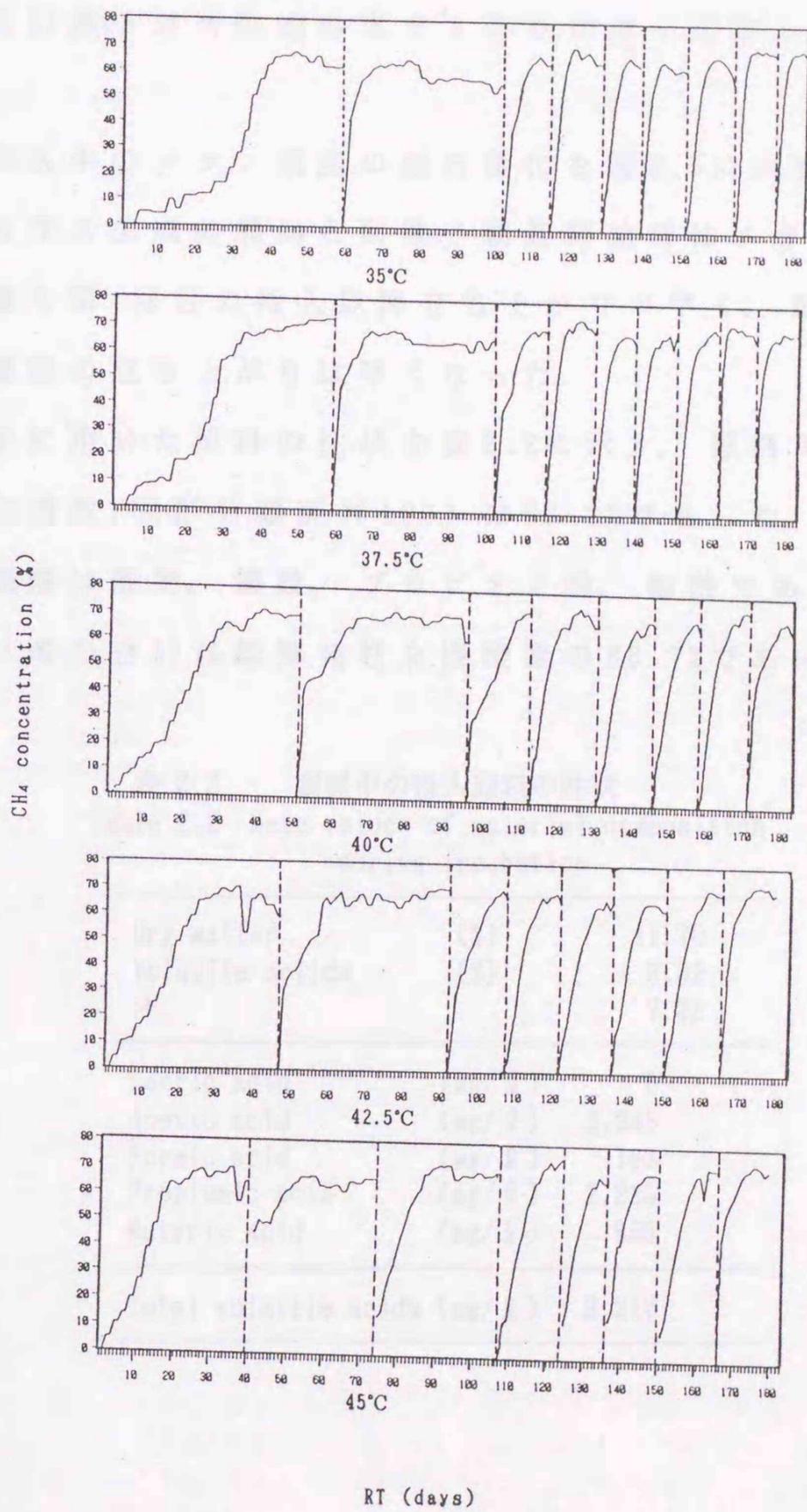


Fig. 2.5 Methane content during incubation  
 Arrows indicate the time of feeding  
 2.5 馴養中のメタン濃度の変化

であった。35, 37.5, 40, 42.5℃では2回目投入以降、45℃では、3回目投入以降、ガス生成の立ち上がりは早く安定したガス生成を示した。

消化ガス中のメタン濃度の経日変化を図2.5に示す。メタン濃度についてもガス生成の傾向と同様、馴養開始時はメタン濃度の立ち上がりが遅く第1回目の投入以降立ち上がりが早く、馴養が進むに従い、メタン濃度の立ち上がりは早くなった。

馴養中に用いた原料の性状を表2.2に示す。原料の有機物の割合（有機物濃度/固形分濃度×100）は82.2%であった。原料中の主な揮発性有機酸は酢酸、蟻酸、プロピオン酸、酪酸であった。酢酸とプロピオン酸の合計は総揮発性有機酸量の88.7%であった。

表 2.2 馴養中の投入原料の性状  
Table 2.2 Mean values of material composition during incubation

Dry matter	(%)	11.70
Volatile solids	(%)	9.62
pH		7.32
Lactic acid	(mg/g)	0
Acetic acid	(mg/g)	5,949
Formic acid	(mg/g)	188
Propionic acid	(mg/g)	2,225
Butyric acid	(mg/g)	855
Total volatile acids	(mg/g)	9,217

### 2.1.2 発酵温度とメタンガス生成量

180日間の馴養を行い、各発酵温度ともにガス生成の安定を確認した後、発酵槽内容物を新鮮な糞尿800gと馴養を行った種汚泥200gとし、20日間の回分式試験を行った。表2.3に投入原料の組成を示す。原料の有機物含の割合は80.6%であった。各温度の消化液の組成を表2.4に示す。

表 2.3 投入原料の性状  
Table 2.3 Composition of cow slurry

Total solids	(%)	10.32
Volatile solids	(%)	8.28
pH		7.46
Lactic acid	(mg/l)	0
Acetic acid	(mg/l)	3,188
Formic acid	(mg/l)	0
Propionic acid	(mg/l)	1,514
Butyric acid	(mg/l)	744
Total volatile acids	(mg/l)	5,446

表 2.4 種汚泥の性状  
Table 2.4 Composition of seed sludge

Operating temperature		35°C	37.5°C	40°C	42.5°C	45°C
Total solids	(%)	8.84	8.87	8.64	8.58	8.63
Volatile solids	(%)	6.76	6.79	6.61	6.53	6.59
pH		7.93	7.83	8.04	8.27	8.12
Lactic acid	(mg/l)	0	0	0	0	0
Acetic acid	(mg/l)	203	159	476	201	294
Formic acid	(mg/l)	0	0	0	0	0
Propionic acid	(mg/l)	0	0	1,609	704	843
Butyric acid	(mg/l)	0	0	0	0	0
Total volatile acids	(mg/l)	203	159	2,085	905	1,137

40℃以上でプロピオン酸の蓄積は認められたが、プロピオン酸の蓄積のもっとも多かった40℃でも総揮発性有機酸量は2,085mg/lと低い値であり、各発酵温度とも発酵は順調に進行したものと考えられる。

消化ガス生成量の経日変化を図2.6に示す。各温度とも2~3日目にガス生成のピークをむかえ徐々に減少した。図2.7に消化ガス中のメタン濃度の経日変化を示す。3~4日目にメタン濃度は60%に達し、その値を維持した。

各発酵温度での5日毎の累積消化ガス生成量の比較を図2.8に示す。いずれも42.5℃の消化ガス生成量が最大となり、42.5℃の消化ガス生成量は35℃の場合に比較して発酵日数10日目では40%、15日目では34%、20日目では14%と、それぞれ消化ガス生成量が多くガス生成速度に差が認められた。実験終了時の消化液の組成を表2.5に示す。各温度とも少量の酢酸の他はすべて消化され、発酵は順調に進行した。

これらの結果は前述の岩淵ら(1986)の結果や、下水処理におけるPfeffer(1974)の結果と一致した。同時に肉牛糞尿を用いたChen(1980)らの最大増殖速度 $\mu_m$ とメタン生成速度は発酵温度に比例するが、総メタン生成量に影響を及ぼさないとする結果と一致し、乳牛糞尿についてもこれらの関係は発酵温度35~45℃で適応できることが明らかとなった。

一般に施設設計のための基礎実験やプラント実験では、発酵温度を35℃とした運転例が多いが、乳牛糞尿の場合、発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量が最大となるのは42.5℃付近であることが明らかとなった。

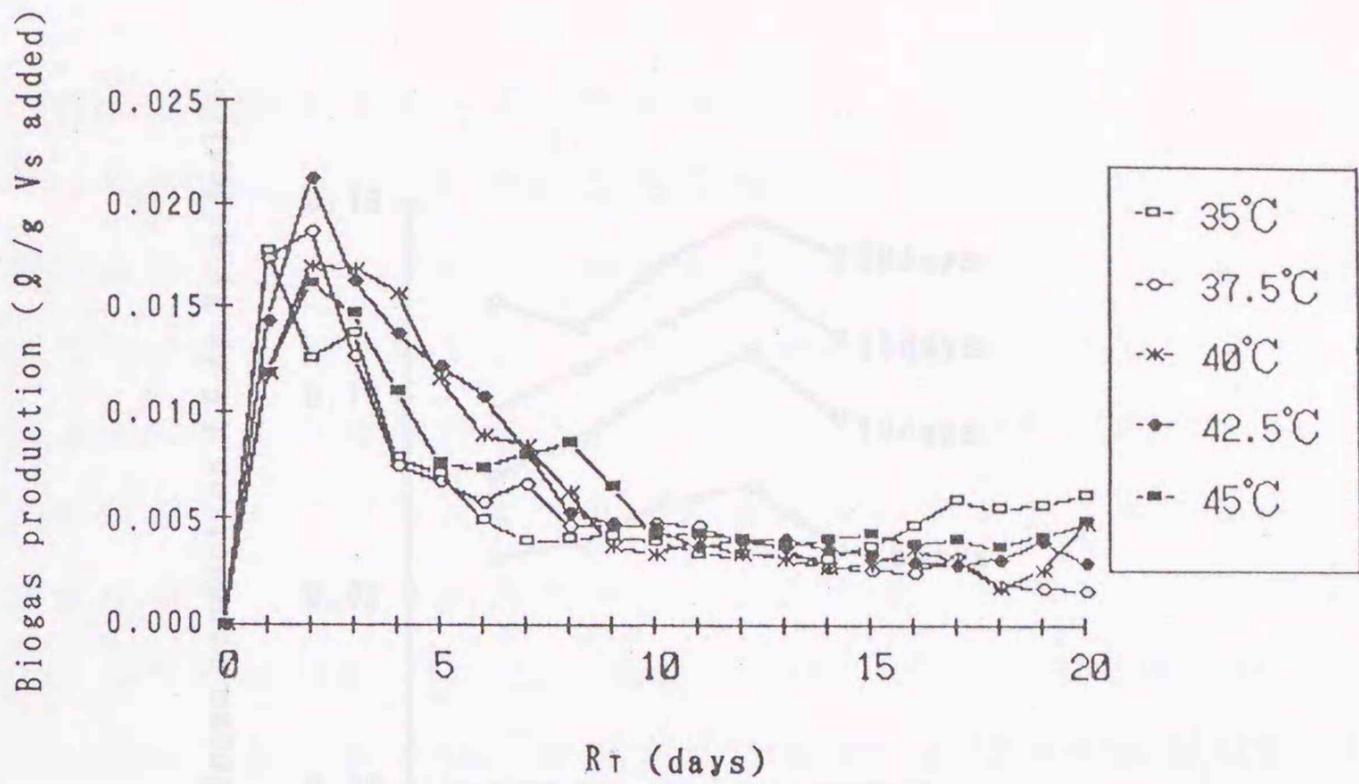


Fig. 2.6 Biogas production (20 days batch operation)  
 図 2.6 消化ガス生成量の経日変化

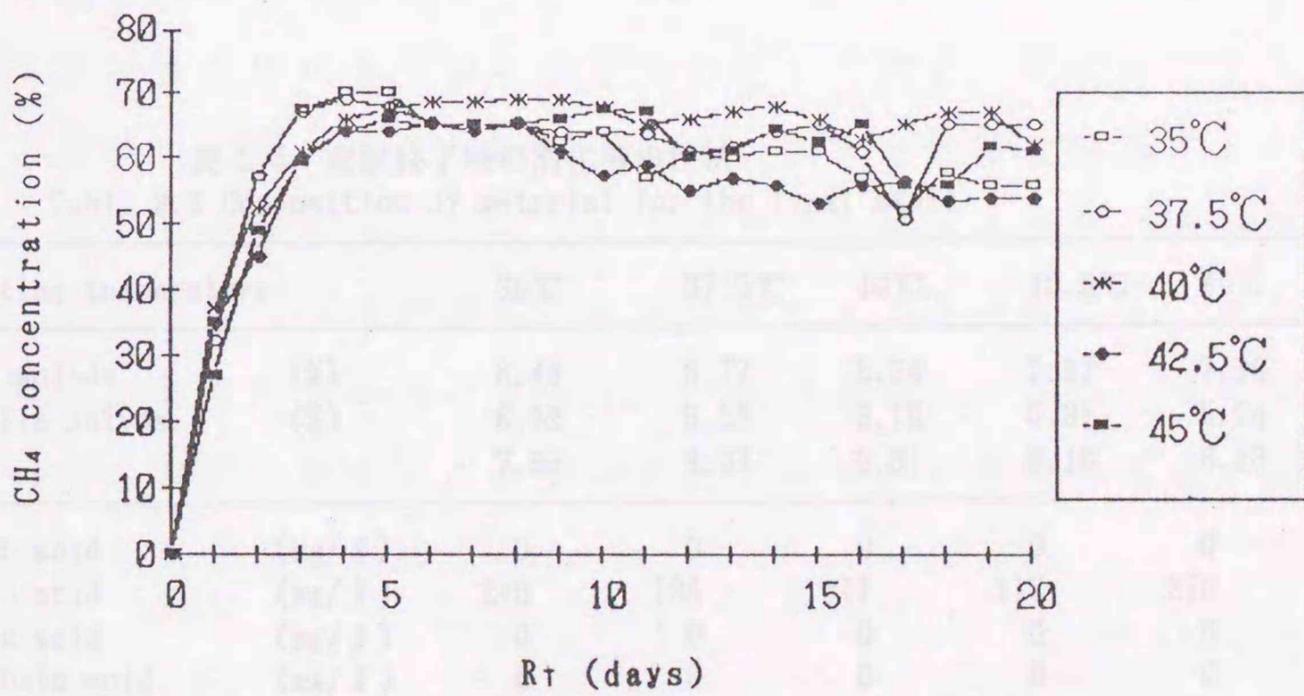


Fig. 2.7 Methane content (20 days batch operation)  
 図 2.7 メタン濃度の経日変化

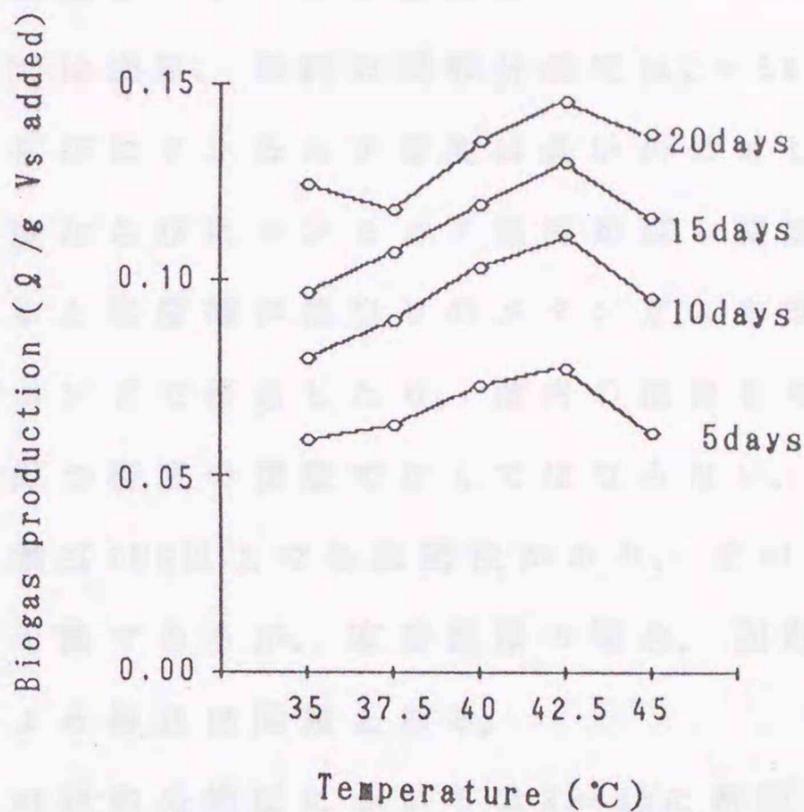


Fig. 2.8 Effect of digester temperature on biogas production  
 図 2.8 発酵温度と消化ガス生成量

表 2.5 実験終了時の消化液の性状  
 Table 2.5 Composition of material for the final state

Operating temperature		35°C	37.5°C	40°C	42.5°C	45°C
Total solids	(%)	8.48	8.77	8.24	7.97	7.98
Volatile solids	(%)	6.32	6.58	6.15	5.91	5.94
pH		7.98	8.07	8.31	8.16	8.23
Lactic acid	(mg/l)	0	0	0	0	0
Acetic acid	(mg/l)	219	138	117	117	270
Formic acid	(mg/l)	0	0	0	0	0
Propionic acid	(mg/l)	0	0	0	0	0
Butyric acid	(mg/l)	0	0	0	0	0
Total volatile acids	(mg/l)	219	138	117	117	270

## 2.2 固形分濃度とメタンガス生成量

下水処理では通常、原料の固形分濃度は2～5%で処理され、原料固形分濃度ならびにアンモニア濃度は低いのに対して、家畜糞尿は原料固形分濃度ならびにアンモニア濃度が高い特徴がある。固形分濃度が高くなると発酵槽容積当りのメタンガス生成量は増加するが、投入原料をポンプで移送したり、槽内の攪拌を考えると、投入原料は流動性を保つ程度の濃度でなくてはならない。アルコール蒸留廃液は固形分濃度10%以上でも流動性があり、そのままでも高能率なメタン発酵が可能であるが、家畜糞尿の場合、固形分濃度が10%以上ではポンプによる移送は困難となる。

発酵槽内の固形分濃度については3～4%に希釈したスラリー、ストール上の糞を用いた高濃度原料(Wong, 1975)、Chen, T.H.(1988)らの固形糞による実験、固液分離後の搾汁液など、さまざまな実験例、施設の運転例がある。

一般に敷料を用いる牛舎ではわらがポンプによる液の移送や発酵槽内の攪拌の支障となるためどうしても固液分離機で分離するかカッターポンプやグラインダーポンプなどで裁断するなどの前処理が必要となる。固形分濃度の低い希釈されたスラリーの場合、液の移送や発酵槽の攪拌が容易であるが、一般の農場での運転を考える場合、特別な希釈は希釈水の確保や希釈水や原料を発酵温度まで加温する熱量も増すなど問題が多い。

### 2.2.1 固形分濃度と消化ガス生成量の関係

回分式発酵での固形分濃度と消化ガス生成量の関係を図2.9に示す。原料当りの消化ガス生成量は固形分濃度が増すに従い上昇し、9%原料が最も高いガス生成を示した。回分発酵の場合、消化ガス生成は発酵初期の20日間に集中し、その後、わずかながらガス生成は継続し、50日間でほぼガス生成は終了することが明かとなった。

固形分濃度と投入有機物当りのメタンガス生成量( $\beta$ )の関係を図2.10に示す。 $\beta$ 値は原料固形分濃度3~9%では0.25~0.27 g/gとほぼ同様の値を示したのに対し、11%原料では0.19とやや低い値となり、豚糞尿などと同様、固形分濃度の上昇は投入有機物当りのメタンガス生成量を減少させることが明かとなった。豚糞尿の場合固形分濃度の最適上限は5%程度(Hashimoto, 1984)であるのに対して乳牛糞尿のそれは高いことが明かとなった。すなわち、乳牛糞尿は豚糞尿より高濃度原料の投入が可能であり、回分発酵では有機物投入当りのガス生成量が最大となる固形分濃度は9~10%であった。

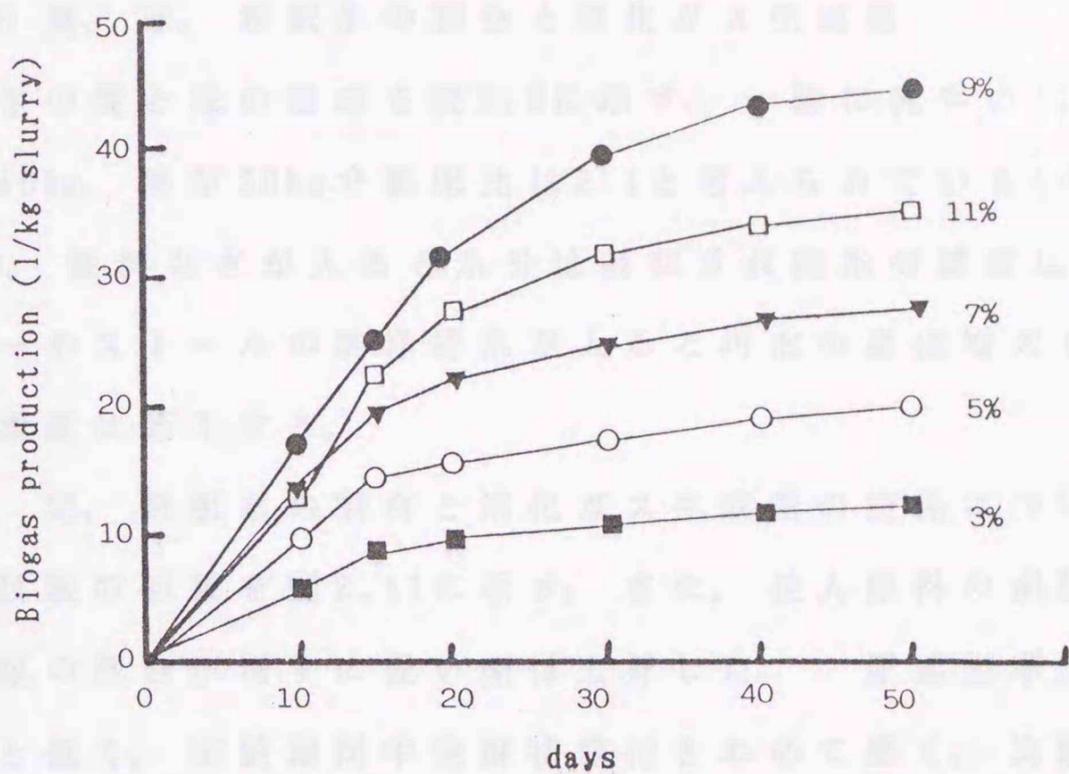


Fig. 2.9 Biogas production from batch digesters at various Ts%

図 2.9 各固形分濃度の消化ガス生成量の累積値

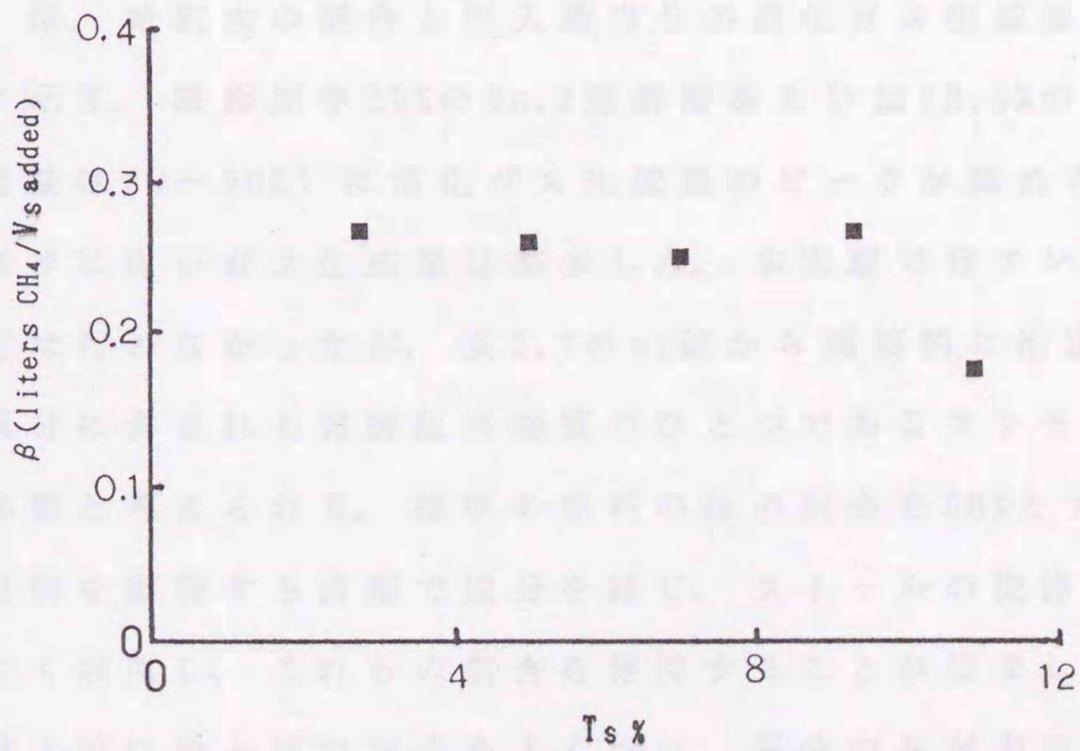


Fig. 2.10 Effect of Total solids(Ts) concentration on methane production( $\beta$ )

図 2.10 固形分濃度(Ts)とメタン生成量( $\beta$ )の関係

### 2.2.2 糞、尿、希釈水の割合と消化ガス生成量

乳牛の糞と尿の組成を表2.6に示す。一般に乳牛の1日の排泄量は糞が40kg、尿が20kgで糞尿比は2:1と考えられている(中央畜産会, 1978)。敷料などが入ると水分は吸収され固形分濃度は高くなり、パーラーやストールの洗浄排水が入ると汚水の量は増大し汚水中の固形分濃度は低下する。

糞、尿、希釈水の割合と消化ガス生成量の関係についての回分式発酵試験の結果を図2.11に示す。また、投入原料のpH値を表2.7に示す。尿の割合が増すに従いpHは上昇した。尿添加率0%の場合pHは6.92と低く、実験期間中発酵状態はきわめて悪く、実験終了時のpHは5.38を示し、有機酸の蓄積が発酵を阻害したものと考える。尿添加率が増すに従い消化ガス生成量のピークは後半にずれ込み鈍化する傾向が認められた。

糞、尿、希釈水の割合と投入糞当りの消化ガス生成量の関係を図2.12に示す。尿添加率25%のNo.3発酵槽あるいは12.5%のNo.2発酵槽(糞含量は80~90%)に消化ガス生成量のピークが認められ、尿添加率が増すに従いガス生成量は減少した。本実験ではアンモニア濃度の測定は行わなかったが、表2.7のpH値から間接的に推定するとこれは尿成分に含まれる発酵阻害物質のひとつであるアンモニウムイオンの影響と考えられる。標準の原料の尿の割合を50%とすると理想的には原料を調製する段階で尿分を減じ、ストールの洗浄排水などを効率よく活用し、これらの割合を維持することが望ましい。また、原料投入前に糞と尿の混合をよく行い、尿分のみが多量に投入されないようにする必要がある。

表 2.6 乳牛糞尿の組成  
Table 2.6 Composition of feces and urine

		Feces	Urine
Total solids	(%)	14.04	4.94
Volatile solids	(%)	11.46	2.32
pH		6.70	8.30
T-N(%)		0.423	0.680
NH <sub>3</sub> -N	(%)	0.015	0.004
NH <sub>3</sub> -N/T-N		0.04	0.01
Lactic acid	(mg/l)	0	37
Acetic acid	(mg/l)	2,153	253
Formic acid	(mg/l)	0	0
Propionic acid	(mg/l)	694	101
Butyric acid	(mg/l)	426	0
Total volatile acids	(mg/l)	3,273	391

表 2.7 pH値の変化  
Table 2.7 pH value of initial  
and final state  
Experiment of feces and urine ratio

Digester		
No	Initial	Final
1	6.92	5.38
2	7.24	7.81
3	7.49	7.92
4	7.56	7.98
5	7.62	8.13
6	7.70	8.23

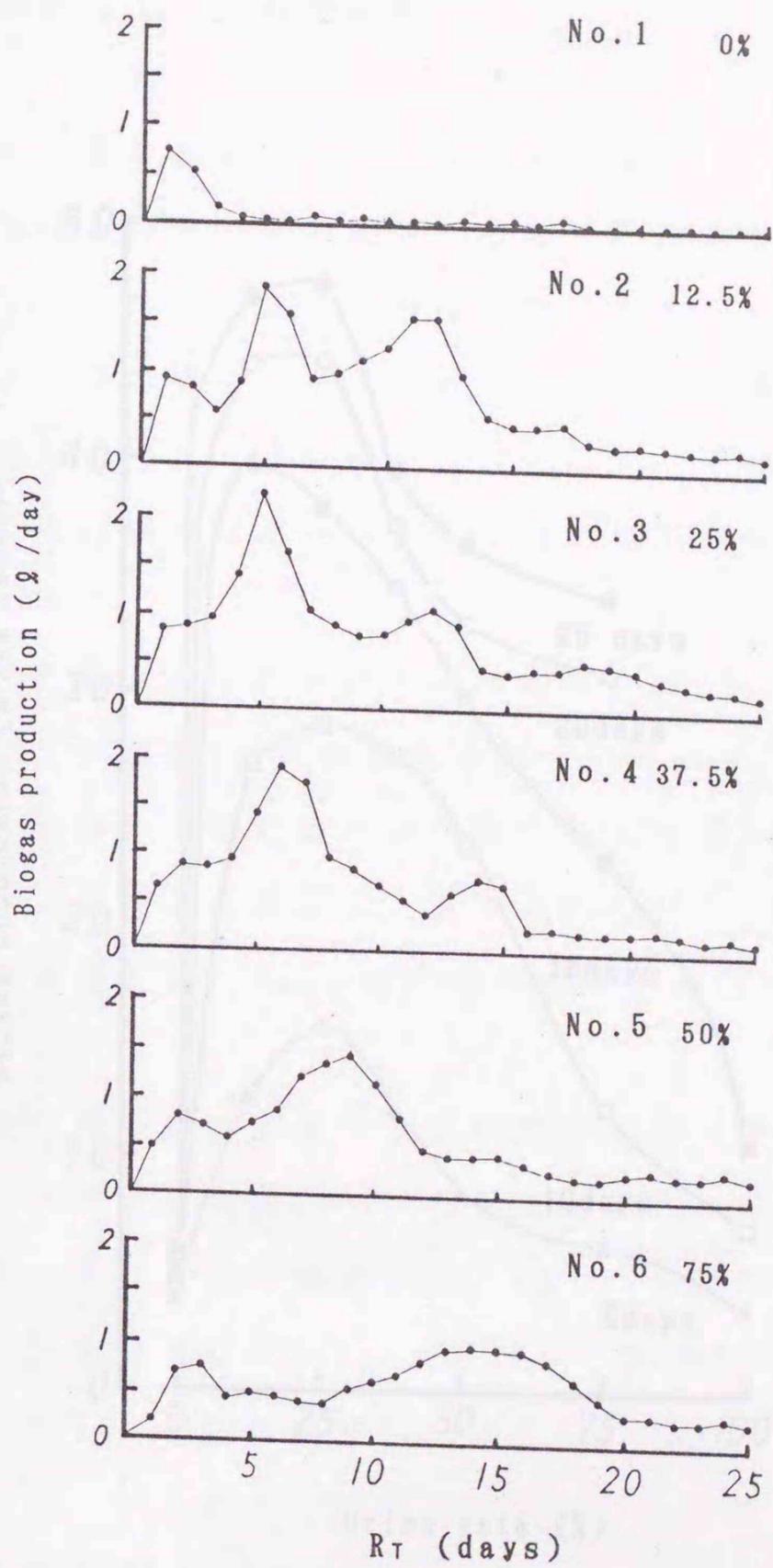


Fig. 2.11 Biogas production at various urine rate  
 図 2.11 各尿添加率における消化ガス生成量の経日変化

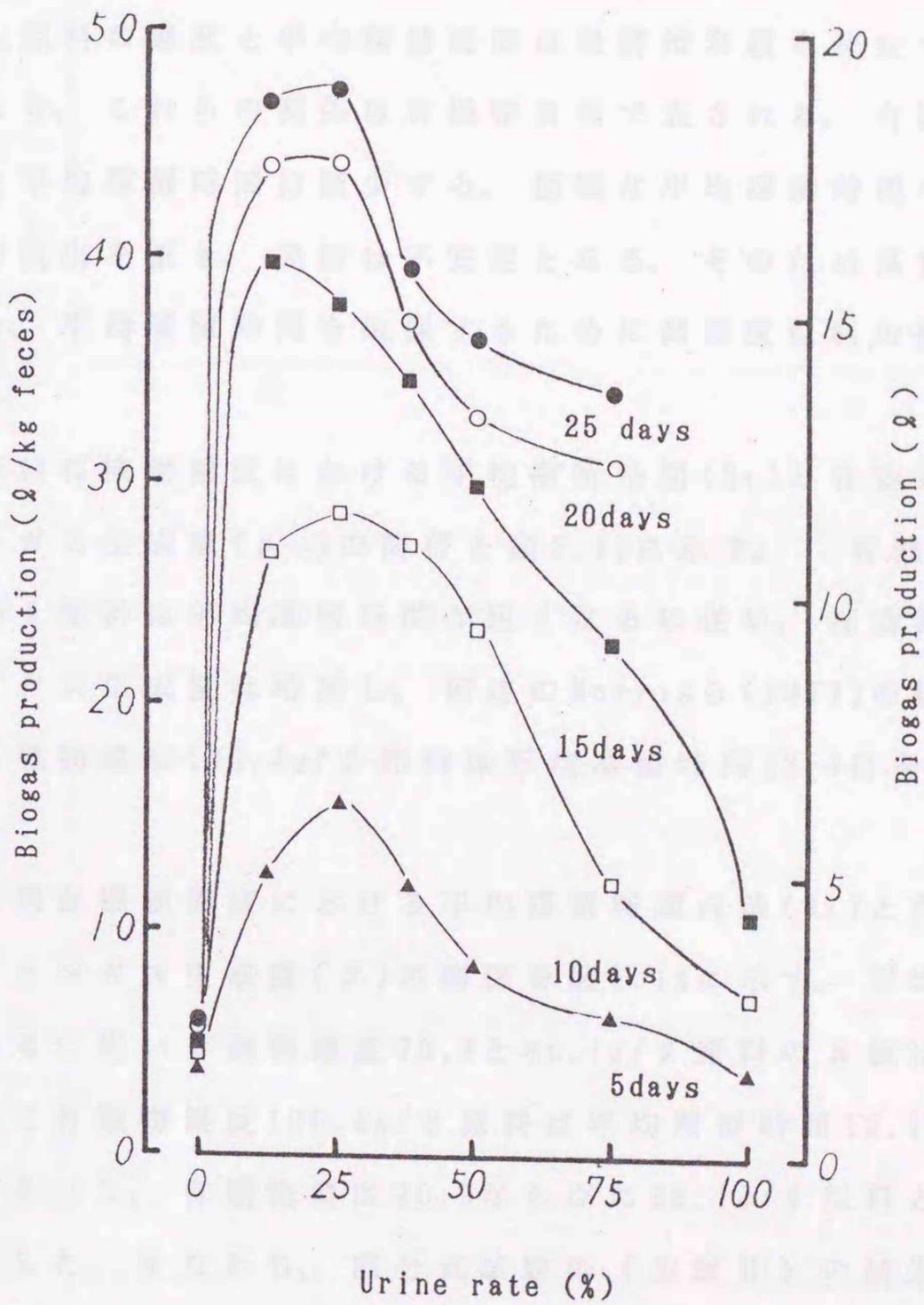


Fig. 2.12 Effect of urine rate on biogas production  
 図 2.12 尿添加率と消化ガス生成量

## 2.3 有機物負荷、平均滞留時間とメタンガス生成量

### 2.3.1 平均滞留時間とメタンガス生成量

投入原料の濃度と平均滞留時間は発酵槽容積を決定する重要な項目であり、これらの関係は有機物負荷で表される。有機物負荷を上げると平均滞留時間は減少する。極端な平均滞留時間の短縮はメタン菌の流出を招き、発酵は不安定となる。そのため高負荷運転を行う場合、平均滞留時間を確保するために高濃度原料の投入が必要となる。

各原料有機物濃度における平均滞留時間( $R_T$ )と有効発酵槽当りのメタンガス生成量( $\rho_u$ )の関係を図2.13に示す。有機物濃度70.9と85.1g/ℓ原料は平均滞留時間が短くなるに従い、有効発酵槽当りのメタンガス生成量は増加し、前述のMorrisら(1977)の結果と一致した。有機物濃度106.4g/ℓ原料は平均滞留時間13.1日をピークに減少した。

各原料有機物濃度における平均滞留時間日数( $R_T$ )と有機物投入当りのメタンガス生成量( $\beta$ )の関係を図2.14に示す。平均滞留時間が長くなるに従い有機物濃度70.9と85.1g/ℓ原料の $\beta$ 値は増加したのに対して有機物濃度106.4g/ℓ原料は平均滞留時間13.1日以降ほぼ同様の値を示し、有機物濃度70.9ならびに85.1g/ℓ原料と異なった傾向を示した。すなわち、回分式試験の(実験Ⅱ)の結果同様最適原料固形分濃度は10%付近に存在することが明かとなった。

各原料有機物濃度における平均滞留時間( $R_T$ )と有機物分解率の関係を図2.15に示す。有機物分解率は平均滞留時間( $R_T$ )が増すに従い、やや上昇する傾向が認められた。

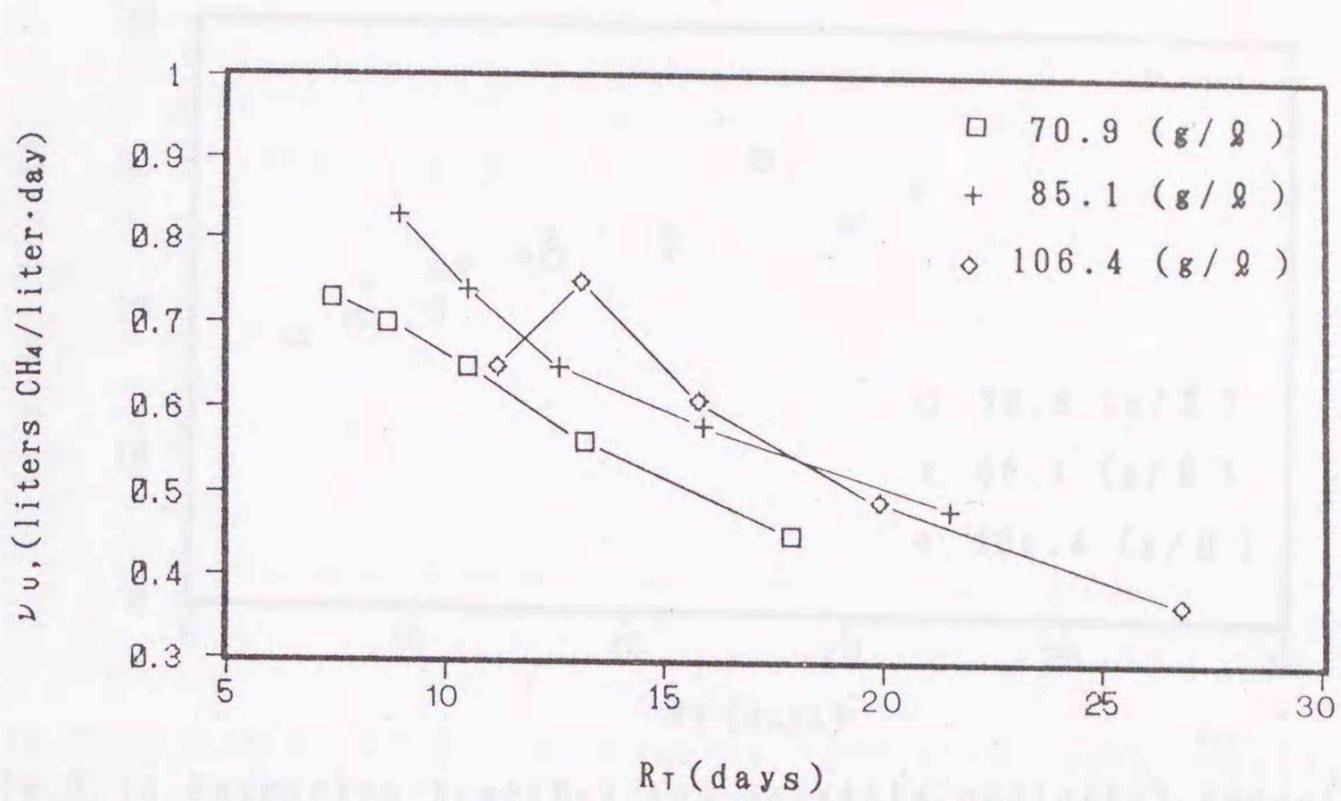


Fig. 2.13  $\nu_v$  as a function of Retention time ( $R_T$ ) at different Volatile solids ( $V_s$ ) concentration  
 図 2.13 平均滞留時間 ( $R_T$ ) と発酵槽当りのメタンガス生成量 ( $\nu_v$ )

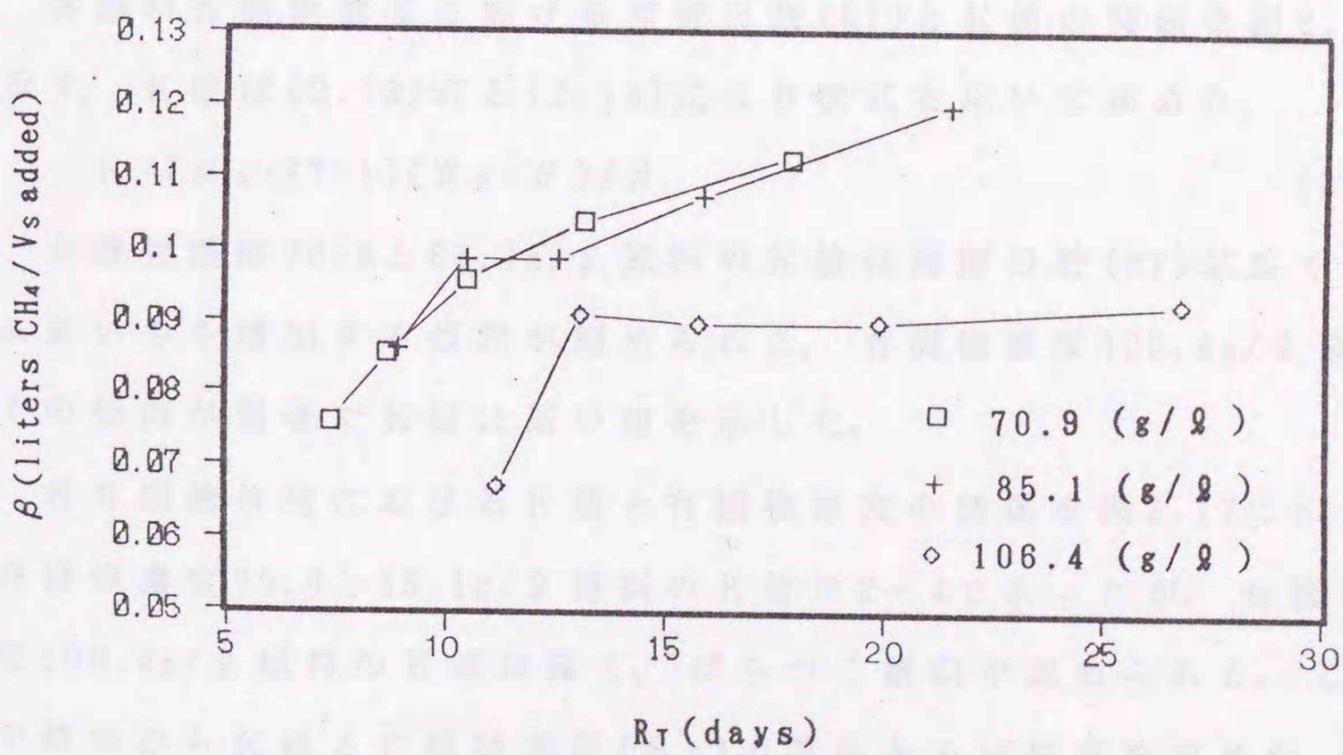


Fig. 2.14  $\beta$  as a function of Retention time ( $R_T$ ) at different Volatile solids ( $V_s$ ) concentration  
 図 2.14 平均滞留時間 ( $R_T$ ) と有機物投入当りのメタンガス生成量 ( $\beta$ )

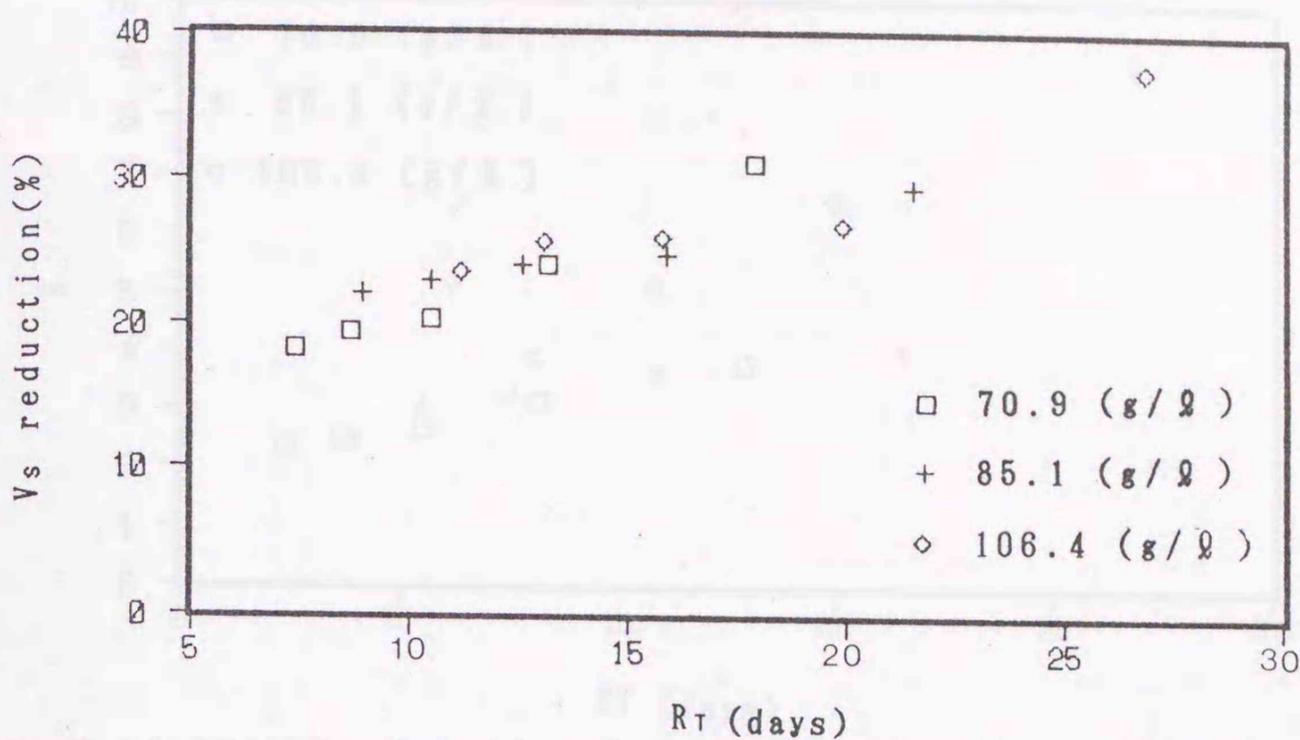


Fig. 2.15 Retention time( $R_T$ ) and Volatile solid( $V_s$ ) reduction  
 図 2.15 平均滞留時間日数( $R_T$ )と有機物分解率の関係

### 2.3.2 K 値の算出とモデルの適応性

各原料有機物濃度における滞留日数(RT)とK値の関係を図2.16に示す。K値は(2.18)式と(2.19)式より次式を用いて求めた。

$$K = (\mu_n \cdot RT - 1)(\beta_0 - \beta) / \beta \quad (2.21)$$

有機物濃度70.9と85.1g/l原料のK値は滞留日数(RT)が長くなるに従いやや増加する傾向が認められた。有機物濃度106.4g/l原料はその傾向が顕著でK値は高い値を示した。

各有機物負荷におけるK値と有機物濃度の関係を図2.17に示す。有機物濃度70.9と85.1g/l原料のK値は2~4であったが、有機物濃度106.4g/l原料のK値は高く、ばらつく傾向が認められた。これらの結果からK値と有機物濃度( $S_0$ )の関係から回帰式を求めた。

$$K = 0.614 \exp 0.021 \cdot S_0 \quad (2.22)$$

$$r = 0.798$$

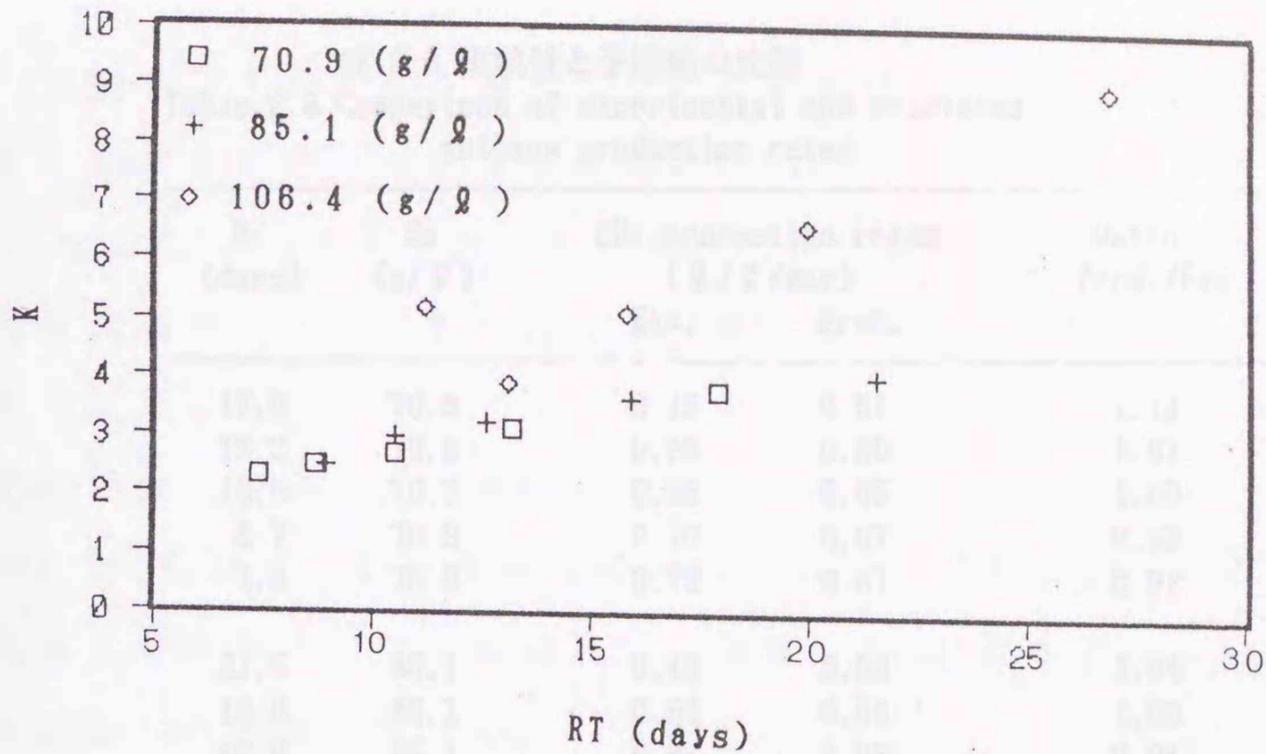


Fig. 2.16 Effect of influent Volatile solids concentration and Retention time ( $R_T$ ) on Kinetic parameter ( $K$ )

図 2.16 各有機物濃度での平均滞留時間 ( $R_T$ ) と  $K$  値の関係

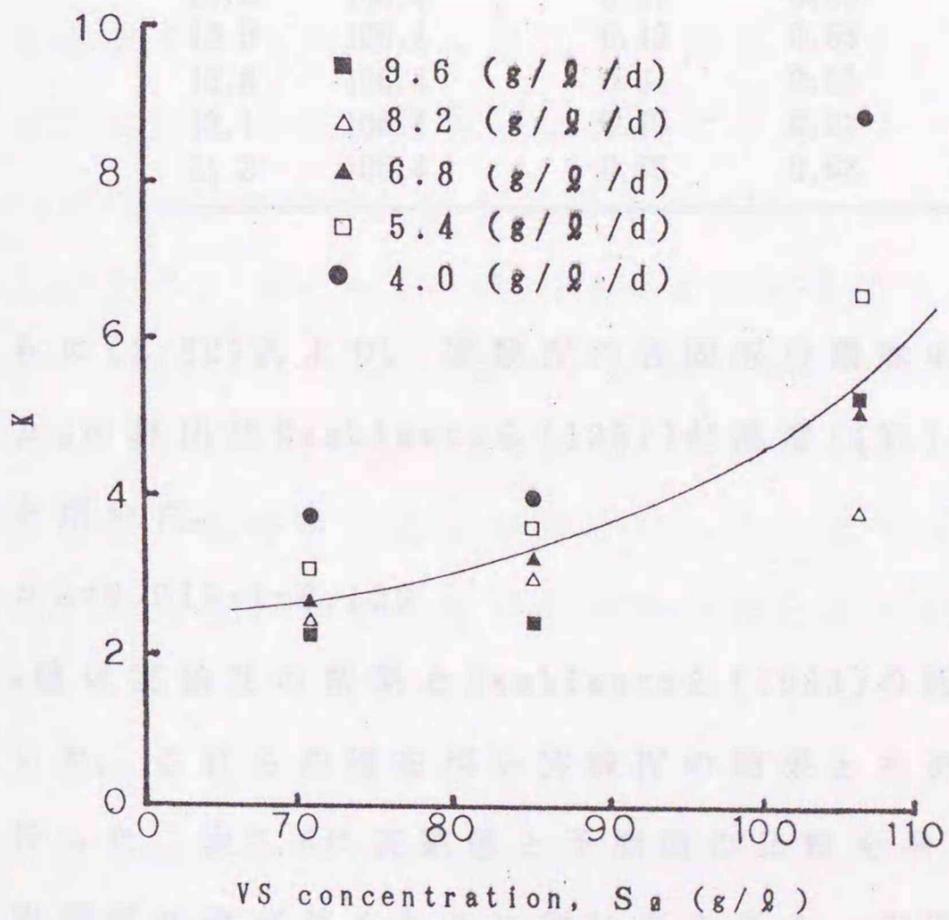


Fig. 2.17 Effect of  $V_s$  concentration on kinetic parameter ( $K$ ) at various loading rate

図 2.17  $K$  値と有機物濃度の関係

表 2.8 実験値と予測値の比較  
 Table 2.8 Comparison of experimental and predicted  
 methane production rates

R <sub>T</sub> (days)	S <sub>a</sub> (g/ℓ)	CH <sub>4</sub> production rates (ℓ/ℓ/day)		Ratio Pred./Exp.
		Exp.	Pred.	
17.9	70.9	0.45	0.51	1.14
13.2	70.9	0.56	0.60	1.07
10.5	70.9	0.65	0.65	1.00
8.7	70.9	0.70	0.67	0.96
7.4	70.9	0.73	0.67	0.92
21.5	85.1	0.48	0.50	1.04
15.9	85.1	0.58	0.58	1.00
12.6	85.1	0.67	0.63	0.94
10.5	85.1	0.74	0.66	0.89
8.9	85.1	0.80	0.67	0.81
26.8	106.4	0.37	0.46	1.23
19.9	106.4	0.49	0.53	1.09
15.8	106.4	0.61	0.58	0.95
13.1	106.4	0.75	0.61	0.81
11.2	106.4	0.65	0.62	0.95

さらに(2.22)式より、実験Ⅳの各固形分濃度のK値を求めた。なお、 $\mu_m$ の算出はHashimotoら(1981)が温度 $t(^{\circ}\text{C})$ の関数として求めた次式を用いた。

$$\mu_m = 0.013 \cdot t - 0.129 \quad (2.23)$$

$\beta_a$ 値は実験Ⅱの結果とHashimotoら(1983)の報告から、 $\beta_a = 0.2$ を用いた。これらの値を用い実験Ⅳの結果とモデルの予測値との比較を行った。表2.8に実験値と予測値の比較を示す。モデルの予測値は平均滞留時間が長くなるに従いやや高く、平均滞留時間が短くなるに従いやや低くなる傾向が認められたが、全体として非常に高い精度でメタン生成量が予測できることが明かとなった。

有機物濃度  $85.1\text{g}/\text{g}$  原料では有機物負荷を  $11.5\text{kg}/\text{m}^3/\text{d}$ まで上げることができ、その平均滞留時間は8.9日で、メタンガス生成量は最高の  $0.80\text{g}/\text{g}/\text{d}$ であった。K値は平均滞留時間が増すに従い増加した。実験期間中、菌体の流出による発酵不良は認められなかった。これらの結果は前述のコンピュータ・シミュレーションを用い中温での乳牛糞尿を原料とした場合の最適運転を発酵温度  $40^\circ\text{C}$ 、平均滞留時間8日、発酵槽内の有機物濃度  $82.5\text{g}/\text{g}$ とした Hill(1983)の報告をほぼ裏付ける値となり、最適固形分濃度は10%前後と回分式発酵試験とほぼ同様の結果となった。

## 2節 乳牛糞尿の流動特性と消化液の肥料成分

家畜の糞尿処理施設を設計する場合、スラリーのポンプによる移送や攪拌のために、原料の流動特性を明かにする必要がある。Schneiber(1958)は液状の糞尿は非ニュートン流動を示すことを明かにしている。さらに Sobel(1965)は家畜糞尿の流動性を semisolid, semiliquid, liquidの3種類に分類することを提唱している。また、Chen & Hashimoto (1976, 1981, 1983, 1986)は回転粘度計を用い肉牛糞尿の流動特性の解析を行っている。乳牛糞尿については Kumarら(1972)の報告があるが嫌気発酵後の消化液の粘性に関する報告はない。

本節では乳牛糞尿の流動特性について固形分濃度および原料温度と粘性の関係を明かにし、見かけ粘度を固形分濃度と原料温度の関数で表し、予測するモデル式を作製した。さらに連続式メタン発酵を行った後の消化液の粘度についても述べる。また、圃場還元の指標となる消化液の肥料成分について分析を行い、肥料としての利用

値について述べる。

## 1. 実験装置と方法

### 1.1 粘度の測定

粘度計はB型粘度計(東京計器B8L形)を用いた。サンプルカップは500mlビーカー(内径85φ)を使用した。サンプルカップは恒温水槽に設置し、サンプル温度を一定に保った。

B型回転粘度計は二重円筒式回転粘度計と呼ばれレオロジー特性値、すなわちせん断応力 $\tau$ 、せん断速度 $\gamma$ は次式で表される。

$$\begin{aligned}\tau &= M / 2\pi R_b h \\ &= 6.74\theta / 2\pi R_b h\end{aligned}\tag{2.24}$$

$$= k_1 \cdot \theta\tag{2.25}$$

$$\begin{aligned}\gamma &= 2\omega / 1 - (R_b/R_o)^2 \\ &= (2 \cdot 2\pi N / 60) / 1 - (R_b/R_o)^2\end{aligned}\tag{2.26}$$

$$= k_2 \cdot N\tag{2.27}$$

M: ローターに作用する粘性トルク[dyn·cm]

$R_b$ : ローター半径[cm]

h: ローター高さ[cm]

$\theta$ : 粘度計の指示値

$k_1$ : せん断応力常数

$\omega$ : ローター回転角速度[rad/s]

$R_o$ : 外筒半径[cm]

N: ローター回転数[rpm]

$k_2$ : せん断速度常数

単純円筒形である#4ローターは(2.24)式と(2.26)式を用いてせん断応力常数とせん断速度常数を算出した。その他の円板形ローター(#1, #2, #3)についてはせん断応力の計算値と粘度計校正用標準液を用いて得たデータから逆算して求めたせん断速度の実用的近似値を用いた。それらの値を表2.9に示す。

さらに使用したローターのせん断応力常数( $k_1$ )とせん断速度常数( $k_2$ )をそれぞれ(2.25)式と(2.27)式に代入してせん断応力 $\tau$  (Pa)とせん断速度 $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ )を求めた。

表 2.9 ローターのせん断応力常数とせん断速度常数  
Table 2.9 Shear stress constant and shear rate constant

Rotor #	#1	#2	#3	#3
shear stress constant	0.168	0.854	2.98	12.9
shear rate constant	0.280	0.285	0.248	0.215

## 1.2 実験の手順と方法

### 1) 実験 V 乳牛糞尿スラリーの粘度の測定

乳牛糞尿スラリーの固形分濃度、スラリー温度と粘度の関係を明かとすることを目的としてB型回転粘度計を用い、せん断応力とせん断速度を測定した。供試材料は帯広畜産大学附属農場のロータリ・ミルキングパーラの待機場のコンクリート床面より、スコップで採取した新鮮な牛糞尿をよくかきませ、4℃に冷蔵保存し、実験に供した。固形分濃度を蒸留水を用い 11, 9, 5, 3%に、更に原料温度を恒温恒湿器のなかで5, 20, 35, 42.5℃に調整し、それぞれのサンプルについて測定を行った。

## 2) 実験 VI 投入原料と消化液の粘度の測定

連日投入の場合の投入原料の粘性の変化について実験 IV の投入原料と消化液の代表的サンプルのせん断応力とせん断速度を測定した。測定は室温で行った。

## 3) 実験 VII 投入原料と排出消化液の肥料成分の分析

高濃度原料を用い連日投入を行った場合の投入原料と排出消化液について実験 IV の投入原料と消化液の代表的サンプルを用い肥料成分の含有量を測定した。肥料成分の分析は日本甜菜製糖株式会社総合研究所に依頼した。

## 2. 結果と考察

### 2.1 固形分濃度と流動特性

一般に家畜の糞尿の流動曲線は次式で表される。

$$\tau = C \gamma^n \quad (2.28)$$

$\tau$  : せん断応力 [Pa]

$\gamma$  : せん断速度 [ $\text{sec}^{-1}$ ]

$n$  : 粘性指数 [無次元]

$C$  : 粘性係数 [ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-n}$ ]

(2.28)式で求められる粘性指数と粘性係数はポンプの選定の際の重要な数値となる。流動曲線の形式から  $n=1$  の場合ニュートン流体、 $1 > n > 0$  の場合非ニュートン擬塑性流体 (pseudoplastic)、 $n > 1$  の場合非ニュートンダイラタント流体 (dilatant) に分類される。

非ニュートン擬塑性流体の粘度はせん断速度によって変化するた

めせん断応力をせん断速度で除した見かけ粘度 ( $\eta_a$ ) で表される。

$$\eta_a = \tau / \dot{\gamma} \quad (2.29)$$

$\eta_a$ : 見かけ粘度 (Pa·s)

$\tau$ : せん断応力 (Pa)

$\dot{\gamma}$ : せん断速度 (sec<sup>-1</sup>)

さらに (2.29) 式に (2.28) 式を代入し、見かけ粘度は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \eta_a &= C \dot{\gamma}^n / \dot{\gamma} \\ &= C \dot{\gamma}^{(n-1)} \end{aligned} \quad (2.30)$$

各固形分濃度におけるせん断速度とせん断応力の関係を図 2.18 に示す。

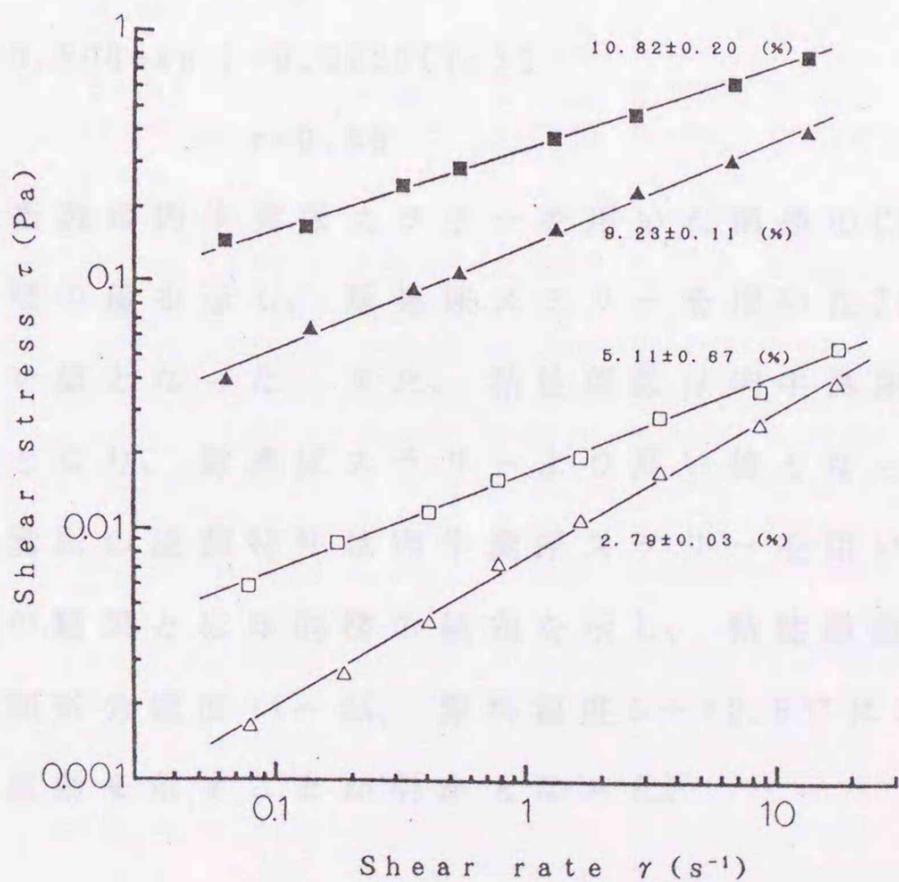


Fig. 2.18 Shear stress and shear rate at various Ts %  
 図 2.18 各固形分濃度におけるせん断速度とせん断応力の関係

せん断応力とせん断速度は両対数で直線関係にあり、せん断応力はせん断速度の上昇に従い増加し、固形分濃度が低下するに従い減少する傾向が認められた。

表2.10に実験Vで求めた各固形分濃度、温度におけるせん断速度 $\dot{\gamma}$ 、せん断応力 $\tau$ 、見かけ粘度 $\eta_a$ の一覧を示す。

さらに各固形分濃度における粘性指数と粘性係数を(2.29)式から求め表2.11に示す。乳牛糞尿はせん断速度0.0645~17.1の範囲で(2.29)式に回帰し、これらの結果は前述の乳牛糞尿を用いた Kumarら(1972)の報告と高濃度(5%以上)ではほぼ同様の値であった。

また、粘性指数は固形分濃度が増すに従い減少する傾向が認められた。これらの結果から、固形分濃度( $T_s$ , %)  $2.79 \leq T_s \leq 10.82$ の範囲で、粘性指数 $n$ は次式で表すことができる。

$$n = 0.508 \exp [-0.0520(T_s)] \quad (2.31)$$

$$r = 0.83$$

粘性指数は肉牛糞尿スラリーを用いた前述のChen(1986)の結果とほぼ同様の値を示し、豚糞尿スラリーを用いたZhang(1990)らの結果より低い値となった。また、粘性係数は肉牛糞尿スラリーよりやや低い値となり、豚糞尿スラリーより高い値となった。以上の結果より乳牛糞尿の流動特性は肉牛糞尿スラリーを用いた前述のChen(1986)の結果とほぼ同様の傾向を示し、粘性指数は $n < 1$ であることから、固形分濃度11~3%、原料温度5~42.5℃において非ニュートン擬塑性流動を示すことが明かとなった。

表 2.10 測定値の一覧

Table 2.10 Measurement and calculation results at different temperature with different solids content

Ts (%)	Temp (°C)	rpm	0.3	0.6	1.5	3	6	12	30	60	
10.82±0.20	5	$\gamma$ (s <sup>-1</sup> )	0.0645	0.1290	0.3225	0.6450	1.2900	2.5800	6.4500	12.9000	
		$\tau$ (Pa)	0.3676	0.3805	0.4708	0.4966	0.5418	0.5547	0.7869	0.9546	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	5.7000	2.9500	1.4600	0.7700	0.4200	0.2150	0.1220	0.0763	
	20	$\tau$ (Pa)	0.1548	0.1677	0.2580	0.3289	0.3805	0.4773	0.6256	0.7933	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	2.4000	1.3000	0.8000	0.5100	0.2950	0.1850	0.0970	0.0615	
	35	$\tau$ (Pa)	0.1096	0.1548	0.2064	0.2838	0.3612	0.4386	0.5934	0.6966	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	1.7000	1.2000	0.6400	0.4400	0.2800	0.1700	0.0920	0.0540	
	42.5	$\tau$ (Pa)	0.1290	0.1032	0.1806	0.2451	0.2580	0.3483	0.4747	0.5998	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	2.0000	0.8000	0.5600	0.3800	0.2000	0.1350	0.0736	0.0465	
	9.23±0.11	5	$\gamma$ (s <sup>-1</sup> )	0.0645	0.1290	0.3225	0.6450	1.2900	2.5800	6.4500	12.9000
			$\tau$ (Pa)	0.1290	0.1483	0.1870	0.1999	0.2386	0.2580	0.3483	0.4192
			$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	2.0000	1.1500	0.5800	0.3100	0.1850	0.1000	0.0540	0.0325
20		$\tau$ (Pa)	0.0387	0.0645	0.0903	0.1161	0.1677	0.2257	0.2902	0.3805	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.6000	0.5000	0.2800	0.1800	0.1300	0.0875	0.0450	0.0295	
35		$\tau$ (Pa)	0.0387	0.0774	0.0838	0.1354	0.1677	0.2128	0.2580	0.3483	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.6000	0.6000	0.2600	0.2100	0.1300	0.0825	0.0400	0.0270	
42.5		$\tau$ (Pa)	0.0516	0.0645	0.0774	0.1032	0.1419	0.1677	0.2322	0.2902	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.8000	0.5000	0.2400	0.1600	0.1100	0.0650	0.0367	0.0225	
5.11±0.67		5	$\gamma$ (s <sup>-1</sup> )	0.0855	0.1710	0.4275	0.8550	1.7100	3.4200	8.5500	17.1000
			$\tau$ (Pa)	0.0111	0.0153	0.0362	0.0217	0.0256	0.0362	0.0405	0.0593
			$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.1298	0.0898	0.0849	0.0254	0.0149	0.0106	0.0047	0.0034
	20	$\tau$ (Pa)	0.0059	0.0093	0.0119	0.0179	0.0192	0.0311	0.0341	0.0572	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.0699	0.0549	0.0279	0.0209	0.0112	0.0091	0.0039	0.0033	
	35	$\tau$ (Pa)	0.0064	0.0085	0.0222	0.0128	0.0149	0.0222	0.0251	0.0375	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.0749	0.0499	0.0519	0.0149	0.0087	0.0064	0.0029	0.0021	
	42.5	$\tau$ (Pa)	0.0055	0.0085	0.0213	0.0140	0.0145	0.0213	0.0256	0.0375	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.0649	0.0499	0.0499	0.0164	0.0084	0.0062	0.0029	0.0021	
	2.79±0.03	5	$\gamma$ (s <sup>-1</sup> )	0.0855	0.1710	0.4275	0.8550	1.7100	3.4200	8.5500	17.1000
			$\tau$ (Pa)	0.0025	0.0038	0.0170	0.0093	0.0136	0.0170	0.0315	0.0435
			$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.0299	0.0224	0.0399	0.0109	0.0079	0.0049	0.0036	0.0025
20		$\tau$ (Pa)	0.0017	0.0025	0.0042	0.0089	0.0119	0.0175	0.0260	0.0367	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.0199	0.0149	0.0099	0.0104	0.0069	0.0051	0.0030	0.0021	
35		$\tau$ (Pa)	0.0025	0.0042	0.0123	0.0064	0.0085	0.0123	0.0153	0.0247	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.0299	0.0249	0.0289	0.0074	0.0049	0.0036	0.0017	0.0014	
42.5		$\tau$ (Pa)	0.0017	0.0034	0.0106	0.0042	0.0055	0.0106	0.0140	0.0222	
		$\eta_a$ (Pa <sub>o</sub> ·s)	0.0199	0.0199	0.0249	0.0049	0.0032	0.0031	0.0016	0.0012	

表 2.11 各固形分濃度、温度における粘性係数と粘性指数  
 Table 2.11 Rheological properties of dairy manure slurries

TS (%)	Temp. (°C)	n (dimensionless)	C (Pa·s <sup>-n</sup> )	Correlation coefficient
10.82±0.20	5	0.173	0.548	0.97
	20	0.315	0.355	0.99
	35	0.348	0.306	0.99
	42.5	0.321	0.257	0.98
9.23±0.11	5	0.215	0.229	0.99
	20	0.450	0.155	0.98
	35	0.383	0.140	0.98
	42.5	0.322	0.124	0.98
5.11±0.67	5	0.295	0.024	0.99
	20	0.396	0.017	0.99
	35	0.316	0.014	0.99
	42.5	0.331	0.014	0.99
2.79±0.03	5	0.532	0.020	0.99
	20	0.572	0.008	0.99
	35	0.378	0.007	0.98
	42.5	0.499	0.005	0.97

## 2.2 原料温度と粘度

粘性流体の粘度は温度の関数で表され、一般に温度が1°C上昇すると粘度は5~10%減少する。粘度と温度の関係はAndrade(1930)の式で表される。

$$C = C' \exp[E/R \cdot T] \quad (2.32)$$

C: 粘性係数 [Pa·s<sup>-n</sup>]

T: サンプルの絶対温度 [273° + t(°C)]

C': 粘性常数 (T → ∞ の粘性係数)

E: 活性化エネルギー [J/mol]

R: 気体常数 [=8.3143 J/mol]

実験 V の測定値を(2.32)式に回帰させ C' と E/R の値を求めた。表

2.12に各固形分濃度におけるC'とE/Rの値、さらにそれらの相関係数を示す。E/Rの値の平均値は1,441で標準偏差は137であった。これらの結果から乳牛糞尿スラリーのAndrade(1930)の式の活性化エネルギーは12.0kJ/molとなり、肉牛糞尿を用いた前述のChen(1983)の13.8kJ/molよりやや低い値となった。さらにC'と固形分濃度Ts(%)の関係を求めたところ次式を得た。

$$C' = 4.599 \times 10^{-6} (T_s)^{2.464} \quad (2.33)$$

$$r = 0.98$$

そこで粘性係数Cは(2.32)と(2.33)式から次式で表すことができる。

$$C = 4.599 \times 10^{-6} (T_s)^{2.464} \exp [1441/T] \quad (2.34)$$

さらに、見かけ粘度は(2.30)式に(2.34)式を代入して次式で表すことができる。

$$\eta_a = 4.599 \times 10^{-6} (T_s)^{2.464} \exp [1441/T] \gamma^{(n-1)} \quad (2.35)$$

すなわち、(2.35)式は乳牛糞尿スラリーの見かけ粘度を固形分濃度と原料温度から予測するモデル式となる。

表 2.12 各固形分濃度、温度におけるC'とE/R値  
Table 2.12 Rheological C' and E/R for Dairy Manure Slurry

TS (%)	C'	E/R	Correlation coefficient
10.82±0.20	1.288	1,671	0.98
9.23±0.11	1.613	1,364	0.97
5.11±0.67	0.203	1,314	0.98
2.79±0.03	0.063	1,415	0.88

### 2.3 消化液の粘度

一般に家畜糞尿の粘度は有機物濃度に比例し、その分解と共に減

少する。この関係については曝気処理を行った場合の研究報告が多く、鶏糞を用いたChenら(1976)の報告、乳牛糞尿を用いた高畑ら(1985)の研究報告などがあるが、メタン発酵処理後の消化液の粘度に関する報告は少ない。

実験で求めた連日投入の場合の原料と消化液のせん断速度と、見かけの粘度の関係を図2.19に示す。発酵後の消化液の見かけ粘度は有機物濃度の低下に従い減少した。図2.20に有機物負荷と見かけ粘度の関係を示す。有機物負荷が高くなるに従い平均滞留時間は減少し、有機物分解率はやや低下する傾向が認められたが(図2.15)、見かけ粘度に差は認められなかった。

以上の結果よりメタン発酵後の消化液の粘度は、有機物濃度の低下と共に減少することが明かとなった。

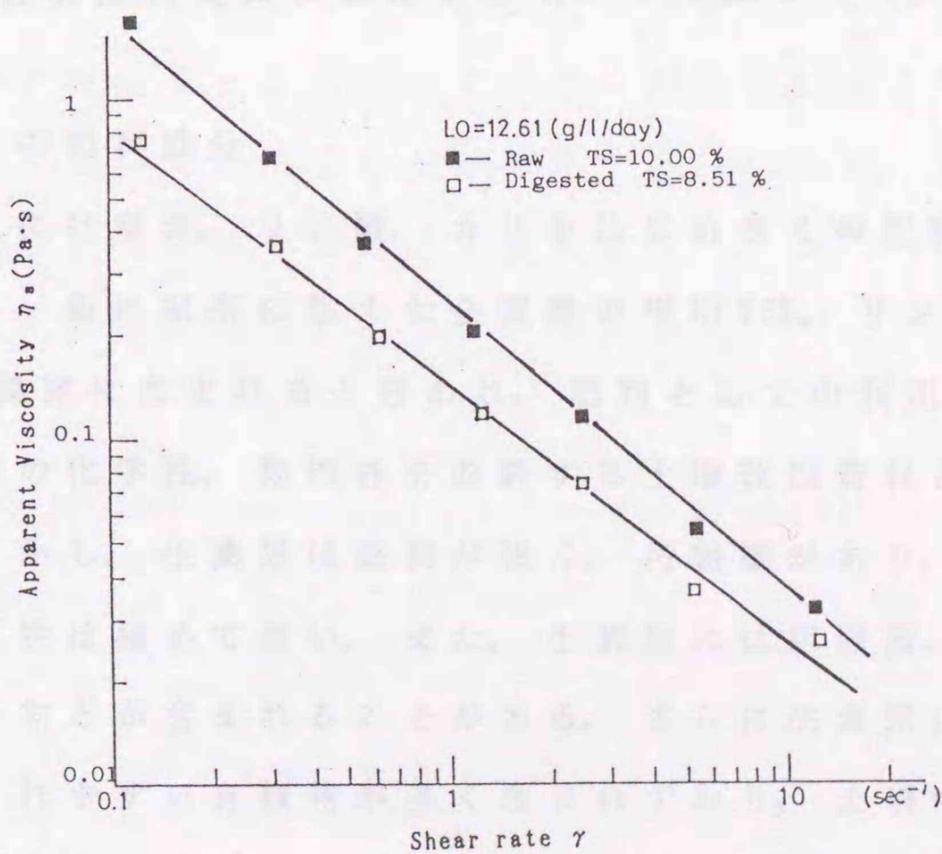


Fig. 2.19 Apparent viscosity and shear rate of raw and digested Slurry

図 2.19 投入原料と消化液の見かけ粘度とせん断速度の関係

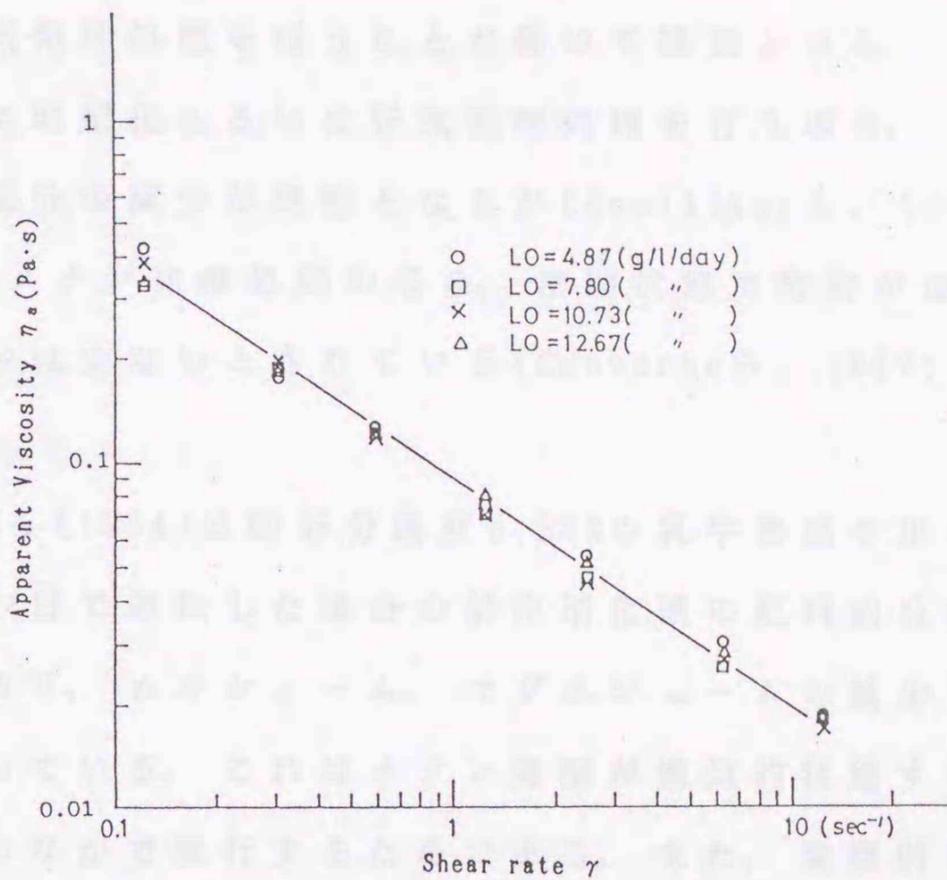


Fig.2.20 Apparent viscosity and shear rate of digested slurry at various loading rate

図 2.20 各有機物負荷におけると見かけ粘度とせん断速度の関係

#### 2.4 消化液の肥料成分

家畜糞尿には窒素、リン酸、カリをはじめ多くの肥料成分が含まれており、一般に家畜に与えた全窒素の平均75%、リン酸の75%、カリの85%が糞尿に含まれると言われ、肥料としての利用価値は高い。また、土壌の化学性、物理性を改善する土壌改良資材としての効果も高い。しかし、生糞尿は悪臭が強く、汚物感があり、搬送、貯蔵、施用の作業性は極めて悪い。また、生糞尿には病原菌、寄生虫の卵、雑草の種子などが含まれることがある。さらに生糞尿は微生物によって分解されやすい有機物が多く含まれており、土壌中で急激に分解して土壌を還元状態にし、作物が生育障害を起こす危険性がある。したがって糞尿を施用するには、乾燥・堆肥化あるいは好気発酵処

理、嫌気発酵処理を行うことが極めて重要となる。

一般に堆肥化あるいは好気発酵処理を行う場合、窒素分の流亡など肥料成分の減少が問題となるが(Koellikerら, 1973; Muckら, 1983)、メタン発酵処理の場合、密閉状態で発酵が進行するためそれらの減少は少ないとされている(Converseら, 1977; Hashimotoら, 1980)。

Fieldら(1984)は固形分濃度5.23%の乳牛糞尿を用い滞留日数を16日と24日で運転した場合の排出消化液の肥料成分について窒素、リン酸、カリ、カルシウム、マグネシウムの減少は認められないと報告している。これはメタン発酵が嫌気的狀態すなわち密閉された容器のなかで進行するためである。また、発酵前の糞尿中の窒素の多くは作物で利用されない有機態窒素で存在するが、メタン発酵過程で微生物の働きにより有機態窒素は無機化するため、アンモニア態の窒素に変化すると報告している。実験Ⅳの投入原料と消化液の代表サンプルの肥料成分の分析値を表2.13に示す。カリを除き肥料成分の発酵による減少は認められなかった。また、リン酸の含有量の増加は実験誤差に起因するものと考ええる。

表 2.13 投入原料と消化液の肥料成分  
Table 2.13 Fertilizer nutrients of the influent and effluent

Material	Ts (%)	Vs (%)	T-N (mg/l)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/l)	K <sub>2</sub> (mg/l)	Na <sub>2</sub> O (mg/l)	CaO (mg/l)	MgO (mg/l)
Influent	9.62	8.02	3,380	1,680	5,360	690	1,390	630
Effluent	8.54	6.94	3,120	2,270	3,330	660	1,600	710

以上の結果より高濃度高負荷運転の場合、有機物分解率は低く、肥料成分の含量に差がないことが明かとなった。また、施用に当たって窒素は圃場での流亡の危険性があるので化学肥料を併用する必要がある。またカリが多いので施用量は5t/10a程度を限界とし、施用畑の土壌診断値に合わせ土壌の透水性などに留意し施用量を決定する必要がある(橋元, 1977)。

#### 第4節 本章のまとめ

本章は、メタン発酵装置の設計の基礎となる発酵温度、投入原料固形分濃度、平均滞留時間とメタンガス生成量の関係について、1槽式の従来型発酵槽における最適固形分濃度と最適平均滞留時間を明らかにした。また、各固形分濃度における乳牛糞尿の流動特性、温度と粘度の関係、液移送のためのポンプの選定の基礎となる原料糞尿の粘性指数、粘性係数を求めた。また、メタン発酵後の消化液の肥料成分の分析を行った。これらの結果をまとめ下記に示す。

##### 1. 馴養

ガス生成がほぼ終了し第1回目の投入までの日数は発酵温度が高くなるに従い短くなる傾向が認められた。35、37.5℃では、58日、40℃では、51日目、42.5℃では、46日目、45℃では、40日目であった。35、37.5、40、42.5℃では2回目投入以降、45℃では、3回目投入以降ガス生成の立ち上がりは早く安定したガス生成を示した。

##### 2. 発酵温度とメタン生成量

発酵温度35～45℃で20日間の回分式試験を行った結果、各温度とも2～3日目にガス生成のピークをむかえ徐々に減少した。メタン濃度は3～4日目に60%に達し、その値を維持した。各発酵温度での5日毎の累積消化ガス生成量の比較では、いずれも42.5℃のガス生成が最大となり、35℃の場合と比較して発酵日数10日目では40%、15日目では34%、20日目では14%と、それぞれガス生成量が多かった。メタン生成速度は発酵温度による差が認められた。乳牛糞尿の場合、メタンガス生成量が最大となるのは42.5℃付近であった。

### 3. 固形分濃度と消化ガス生成量の関係

回分式発酵の場合、投入原料当りの消化ガス生成量は固形分濃度が増すに従い上昇し、9%原料が最も高いガス生成を示した。消化ガス生成は発酵初期の20日間に集中し、その後、わずかながらガス生成は継続し、50日間でほぼ終了することが明かとなった。

有機物当りのメタンガス生成量( $\beta$ )は原料固形分濃度3~9%では0.25~0.27  $\ell/g$ とほぼ同様の値を示したのに対し、11%原料では0.19とやや低い値となり、豚糞尿などと同様、固形分濃度の上昇はメタンガス生成量( $\beta$ )を減少させることが明かとなった。すなわち、乳牛糞尿は豚糞尿より高濃度原料の投入が可能であり、回分発酵では発酵槽当りのガス生成量が最大となる固形分濃度は9~10%であった。

糞、尿、希釈水の割合とガス生成量の関係についての回分式発酵試験の結果では尿添加率25%あるいは12.5% (糞含量では80~90%) にガス生成量のピークが認められ、尿添加率が増すに従いガス生成量は減少した。

### 4. 有機物負荷、平均滞留時間とメタンガス生成量

有機物濃度70.9と85.1  $g/\ell$  原料の発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量は、平均滞留時間が短くなるに従い増加し、有機物濃度106.4  $g/\ell$  原料は平均滞留時間13.1日をピークに減少した。また、有機物濃度70.9と85.1  $g/\ell$  原料の有機物投入当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が長くなるに従い増加したのに対して、有機物濃度106.4  $g/\ell$  原料は、平均滞留時間13.1日以降ほぼ同様の値を示し、有機物濃度70.9、85.1  $g/\ell$  原料と異なった傾向を示し、回分式試験の

結果同様、最適原料固形分濃度は9~10%付近に存在することが明らかとなった。有機物分解率は平均滞留時間が増すに従いやや上昇する傾向が認められた。

#### 5. K値の算出とモデルの適応性

有機物濃度( $S_a$ )とK値は次の回帰式で表され、 $\beta_a=0.2$ を用いた

$$K=0.614 \exp 0.021 \cdot S_a$$

$$r=0.80$$

場合、Chen & Hashimotoモデルの予測値は平均滞留時間が長くなるに従いやや高く、平均滞留時間が短くなるに従いやや低くなる傾向が認められたが、全体として非常に高い精度でメタンガス生成量が予測できることが明らかとなった。

#### 6. 乳牛糞尿の流動特性

乳牛糞尿のせん断応力は、固形分濃度の上昇に従い増加する傾向が認められた。粘性指数は固形分濃度が増すに従い減少する傾向が認められた。また、乳牛糞尿は粘性指数は $n<1$ であることから固形分濃度3~11%、原料温度5~42.5℃において非ニュートン擬塑性流動を示すことが明らかとなった。また、Andrade(1930)の式の活性化エネルギーは12.0kJ/molとなり、見かけ粘度( $\eta_a$ )を固形分濃度( $T_s$ )と原料温度( $T$ )から予測するモデル式を作製した。

$$\eta_a=4.599 \times 10^{-6} (T_s)^{2.464} \exp [1441/T] \gamma^{(n-1)}$$

また、連日投入の場合の発酵後の消化液の見かけ粘度は有機物濃度の低下に従い減少した。

## 7. 消化液の肥料成分

高濃度高負荷運転の場合、有機物分解率は低く、肥料成分の含量に差がないことが明かとなった。

以上の結果より、乳牛糞尿はメタン発酵原料に適しており、その消化液は有機質肥料として利用価値が高いことが明かとなった。

## 第3章 2相式発酵法による

### メタンガス生産

#### 第1節 本章の目的

2相式発酵法は相分離ともよばれ下水処理技術として開発された技術である。従来のメタン発酵は通性嫌気性菌群と絶対嫌気性菌群を共生(symbiosis)させた状態で発酵させる1槽式発酵法が用いられてきた。しかし、前述のようにこれらの微生物群は互いに環境要因に対する最適条件さらに栄養要求、増殖速度が異なるため、共生による発酵法では有機物負荷を大きくすることに限界があった。そこで、それぞれの細菌群の最適な生育条件を整え、発酵過程を2相に分離する2相式発酵法が考案された(Pohlandら, 1971)。これは発酵槽における菌体の槽保持時間を調節する方法を用い、発酵槽内を基質が通過する平均滞留時間を調節することによって、相分離を行うものである(Ghoshら, 1975)。Ghoshら(1974)によれば、通性嫌気性菌群と絶対嫌気性菌群の最大比増殖速度 $\mu_m$ は、それぞれ1.25, 0.414で絶対嫌気性菌群の生育は、2~10日間かかるのに対して通性嫌気性菌群の生育速度は絶対嫌気性菌群の約1/10と言われている。すなわち、発酵槽をこれらの最適条件を保つために可溶化を行う酸発酵槽とメタン発酵を行うメタン発酵槽のふたつの槽に分離して直列に配置し、通性嫌気性菌と絶対嫌気性菌をそれぞれの発酵槽内で優先種として保ち発酵させる方法である。

家畜糞尿処理にこの方法を応用した例として、前川ら(1984)は豚糞尿を対象として第1酸発酵槽300ℓ、と50ℓのpH調整を行う第2酸発酵槽とメタン発酵槽1,000ℓの2相式メタン発酵槽を用い、連日発酵

試験を行っている。さらに前川ら(1987)はMonod型菌体増殖速度式による2相式メタン発酵モデルを提唱している。また、Loら(1985, 1986, 1986a)は4ℓの発酵槽を用い固液分離を行った乳牛糞尿の搾汁液を対象とし、中温層と高温層における2相式と従来型の比較を行っているが、寒冷地で問題となる低温原料の投入に対する効果など実用化に向け解明すべき点は多い。

本章は乳牛糞尿を対象とした2相式発酵法の効果、特に低温原料の投入の影響についてベンチサイズの発酵槽を用い従来型との比較を行い、寒冷地酪農への適応性について検討を行った。第2節では酸発酵槽について行った回分式試験と、連日投入試験の結果について述べる。回分式試験では最適平均滞留時間ならびに攪拌と酸生成速度の関係を明かにすることを目的とした。また、連日投入試験では原料温度と揮発性有機酸量の関係を明らかにすることを目的とした。第3節では従来型と2相式発酵法における投入原料温度とメタンガス生成量の比較を行った。また、第4節では本章のまとめを行った。

## 第2節 酸発酵槽に関する実験

酸発酵槽では原料の可溶化と酸生成が主な目的となる。本節では連日投入を行う場合の最適平均滞留時間と攪拌強度の関係を明かにするために回分式試験を行った結果について述べる。さらに回分式試験の結果に基づき平均滞留時間を2日、投入原料を発酵槽温度の35℃と冬期間の投入を想定し5℃に冷却したものを用い連日投入試験を行い、原料温度と酸生成量の関係について実験的に考察を行った結果について述べる。

## 1. 実験装置と方法

### 1.1 実験装置

実験装置は第2章で示した連日投入発酵槽を用いた。

### 1.2 実験方法

酸発酵槽の最適滞留日数、攪拌強度と酸生成の関係を明らかにするために回分式試験と連日投入試験を行った。投入原料は帯広畜産大学附属農場のロータリ・ミルクングパーラの待機場のコンクリート床面より、スコップで採取した新鮮な牛糞尿をよくかき混ぜ、4℃で冷蔵保存し、実験に供した。なお、酸発酵槽への種汚泥の植種、さらに馴養は行わなかった。

#### 1) 回分式試験

無希釈乳牛糞尿 ( $V_s\%$  10.6,  $A_s\%$  1.86) を投入し攪拌強度を(A)無攪拌、(B)6時間毎3回、(C)2時間毎10回とした3本の発酵槽について消化ガス生成量、メタン濃度を測定した。攪拌は攪拌棒の上下動を1回とした。また、発酵槽内の原料pH、揮発性有機酸量については排出バルブから毎日サンプリングを行い分析に供した。

#### 2) 連日投入試験

回分式試験の結果より平均滞留時間を2日、攪拌強度を6時間毎3回に設定し、連日投入試験を行った。投入原料を発酵槽温度の35℃に加温し投入を行った酸発酵槽(AC1)と、冬期間の投入を想定し5℃に冷却し投入を行った酸発酵槽(AC2)の2本である。実験は40日間行っ

た。投入作業は毎日定時に行った。消化ガス生成量、メタン濃度は毎日測定を行った。pH、固形分濃度、有機物濃度、揮発性有機酸量は4日に1度サンプリングを行い分析に供した。

## 2. 結果と考察

### 2.1 攪拌と酸生成速度

酸発酵槽においても攪拌は基質と菌体を十分に接触させ、さらに消化ガスを液中から放出し、槽内温度を均一に保ち生成したスカムを粉砕する効果を果たすものと考えられる。

消化ガス生成量の経日変化を図3.1に示す。攪拌を行った発酵槽(BとC)は1日目、攪拌を行わなかった発酵槽(A)は2日目に消化ガス生成量が最大となり、その後急激に減少した。消化ガス中のメタン濃度の経日変化を図3.2に示す。メタン濃度は2日目以降やや上昇したが、20%以下と低い値を示した。

一般に、pH値と揮発性有機酸量は酸発酵槽の状態を示す重要な指標であり、pH値の下降と揮発性有機酸量の上昇が特徴である。pH値の経日変化を図3.3に示す。各攪拌強度共pH値は3日目が最低となり、攪拌強度が増すに従いpH値の下降が早いことが明かとなった。さらに総揮発性有機酸量の経日変化を図3.4に示す。総揮発性有機酸量はpH値とほぼ同様の傾向を示し、2~3日目が最大となった。また、攪拌強度の比較では無攪拌(A)は有機酸の増加が遅く、4日目には減少した。2日目では(B)が(C)よりも高く攪拌の効果には限界があることが明かとなった。

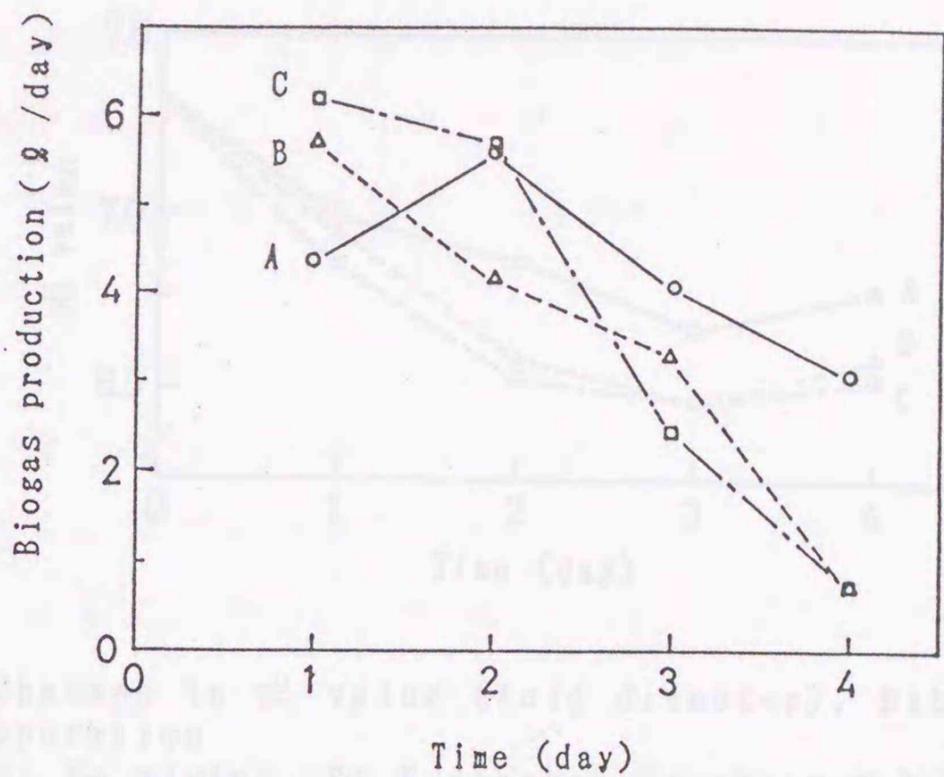


Fig.3.1 Changes in biogas production from the acid digester, Batch-fed operation (Working volume 17.7ℓ)  
 A: No mixing, B: 3 strokes in every 6 hours,  
 C: 10 strokes in every 2 hours

図 3.1 酸発酵槽からの消化ガス生成量の経日変化 (回分式発酵)

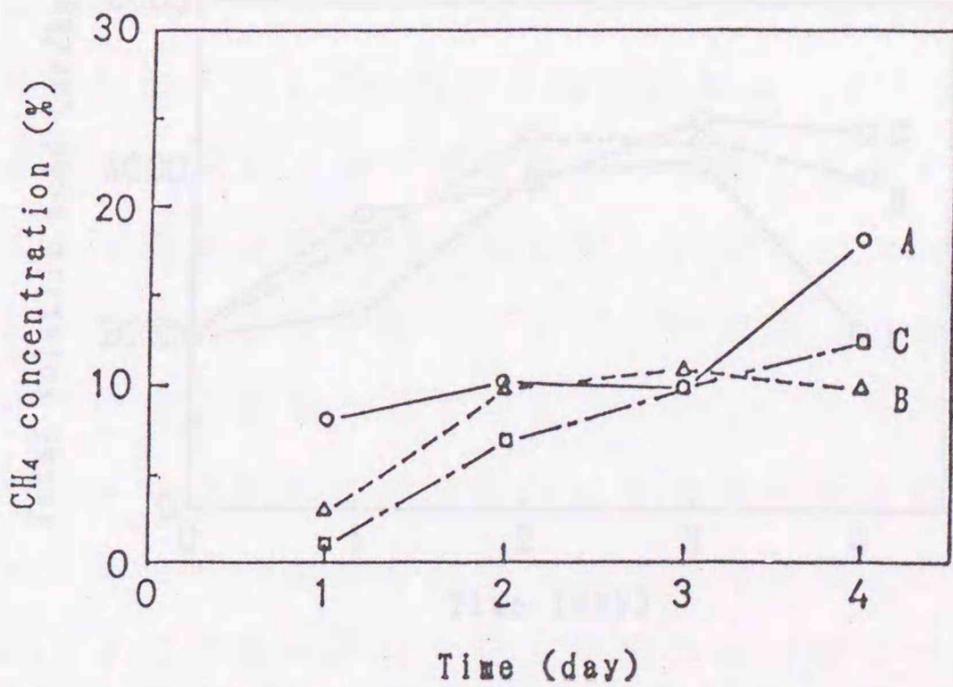


Fig.3.2 Changes in CH<sub>4</sub> concentration (Acid digester), Batch-fed operation, A: No mixing,  
 B: 3 strokes in every 6 hours,  
 C: 10 strokes in every 2 hours

図 3.2 酸発酵槽からの消化ガスのメタン濃度の経日変化 (回分式発酵)

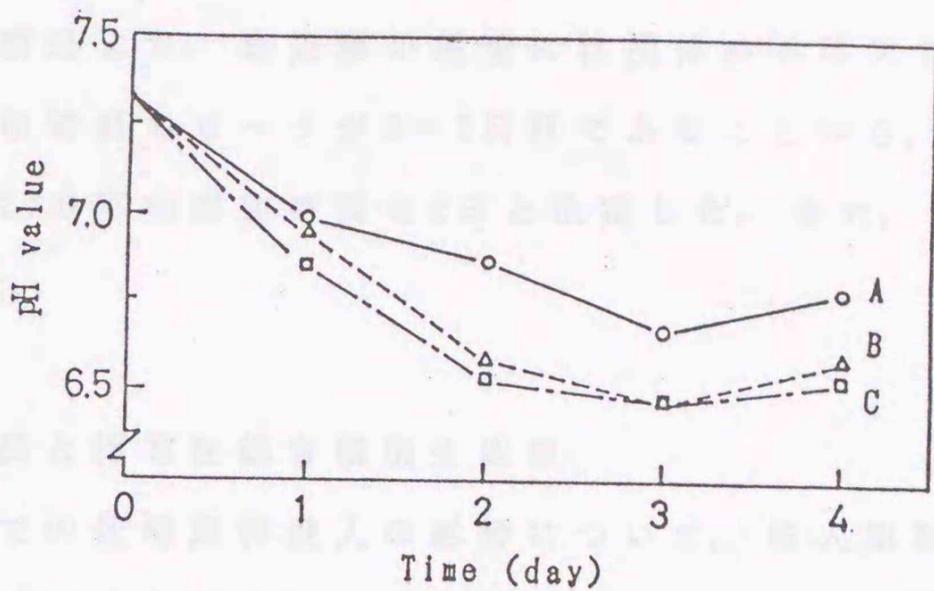


Fig. 3.3 Changes in pH value (Acid digester), Batch-fed operation

A: No mixing, B: 3 strokes in every 6 hours,  
C: 10 strokes in every 2 hours

図 3.3 酸発酵槽のpHの経日変化

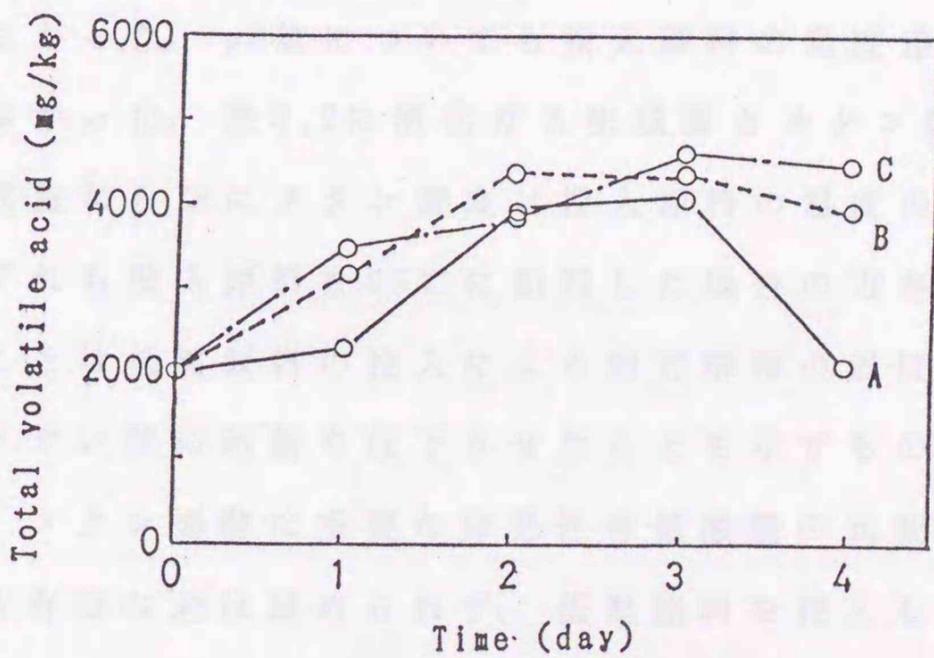


Fig. 3.4 Changes in Total volatile acids (Acid digester), Batch-fed operation, A: No mixing,

B: 3 strokes in every 6 hours,  
C: 10 strokes in every 2 hours

図 3.4 酸発酵槽の揮発性総有機酸量の経日変化

これらの結果より、酸発酵の促進には攪拌が不可欠であり、総揮発性有機酸の消長のピークが2~3日目であることから、連日投入試験(AC1, AC2)の平均滞留時間を2日と決定した。また、攪拌は6時間毎3回とした。

## 2.2 原料温度と揮発性総有機酸生成量

酸発酵槽での低温原料投入の影響について、投入原料を発酵槽温度の35℃に加温した場合と、冬期間の投入を想定して5℃に冷却した場合の比較を行った。

酸発酵槽のAC1は35℃に加温した投入原料を、AC2は5℃に冷却した原料を投入した。4日毎の投入原料ならびに各発酵槽の排出消化液の性状を表3.1に示す。なお、A4~D4は後述する2相式メタン発酵槽である。ふたつの酸発酵槽の排出消化液の揮発性有機酸量に違いは認められなかった。pH値についても投入原料の温度差による影響は認められなかった。表3.2に消化ガス生成量とメタン濃度を示す。消化ガス生成量ならびにメタン濃度は投入原料の温度の影響を大きく受け、いずれも投入原料を35℃に加温した場合の方が高い値を示した。このことは低温原料の投入による酸発酵槽の温度低下は酸生成菌およびメタン菌の活動を低下させたことを示すものと考えられる。

しかし、メタン発酵に重要な揮発性有機酸量の比較では投入原料温度による有意な差は認められず、低温原料を投入した場合でも2日間の滞留で十分に原料を昇温させ、酸発酵を促進させることが明かとなった。これらの結果より酸発酵槽は酸生成槽と同時に寒冷地型のメタン発酵槽の原料前処理槽としても有用であることが明かとなった。

表 3.1 投入原料と消化液の性状  
Table 3.1 Composition of influent and effluent

	Influent	Effluent					
		AC1	AC2	A4	B4	C4	D4
Vs (%)	8.02	7.81	7.74	6.70	6.63	6.94	6.99
Ts (%)	9.62	9.42	9.36	8.31	8.25	8.54	8.61
pH	7.70	6.69	6.63	7.32	7.30	7.27	7.24
T-N (%)	0.338	0.279	0.312	0.264		0.286	
AA (mg/l)	3,108	4,660	4,651	348	336	441	522
PA (mg/l)	371	1,508	1,216	0	0	0	0
BA (mg/l)	162	436	405	0	0	0	0
FA (mg/l)	632	289	601	365	251	251	301
TVA (mg/l)	4,273	6,893	6,873	713	587	692	823

Vs, Volatile solids; Ts, Total solids; T-N, Kjeldahal nitrogen;  
AA, Acetic acid; PA, Propionic acid; BA, Butyric acid; FA, Formamide  
acid; TVA, Total volatile acids

表 3.2 酸発酵槽の消化ガス生成量とメタン濃度  
Table 3.2 Performance of acid phase digesters  
R<sub>T</sub> 2 days, digester temperature 35°C

	AC1 (35°C Material)		AC2 (5°C Material)	
	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.
Biogas production rate (l/l/d)	0.62	0.14	0.49	0.10
Methane production rate (l/l/d)	0.16	0.06	0.08	0.02
Methane content (%)	24.7	7.1	16.2	3.3

### 第3節 従来型と2相式の比較

前述の前川ら(1984)は豚糞尿を対象とした2相式メタン発酵について従来値との比較を行っている。有機物投入当りの消化ガス量は、従来型より20~30%高く、有機物負荷を5g/ℓ/d以上にしても有機物投入当りの消化ガス量を維持し、酸発酵槽とメタン発酵槽の平均滞留時間比を1:2.85としたときのメタン濃度を、それぞれ29.0~58.0%, 62.5~67.0%と報告している。また、相分離を行った場合、固形分濃度8%の中温発酵で7日間でも、発酵は安定すると前川ら(1980)は確認している。また、固液分離を行った乳牛糞尿の搾汁液を対象とした前述のLoら(1986)は、中温層での2相式と従来型の比較を行い、消化ガス量に差はなく、2相式の方は消化ガス中のメタン濃度が高くなると報告している。これらの知見を基に、本節では従来型と2相式発酵法の比較を行い、投入原料温度とメタンガス生成量の関係について述べる。

#### 1. 実験装置と方法

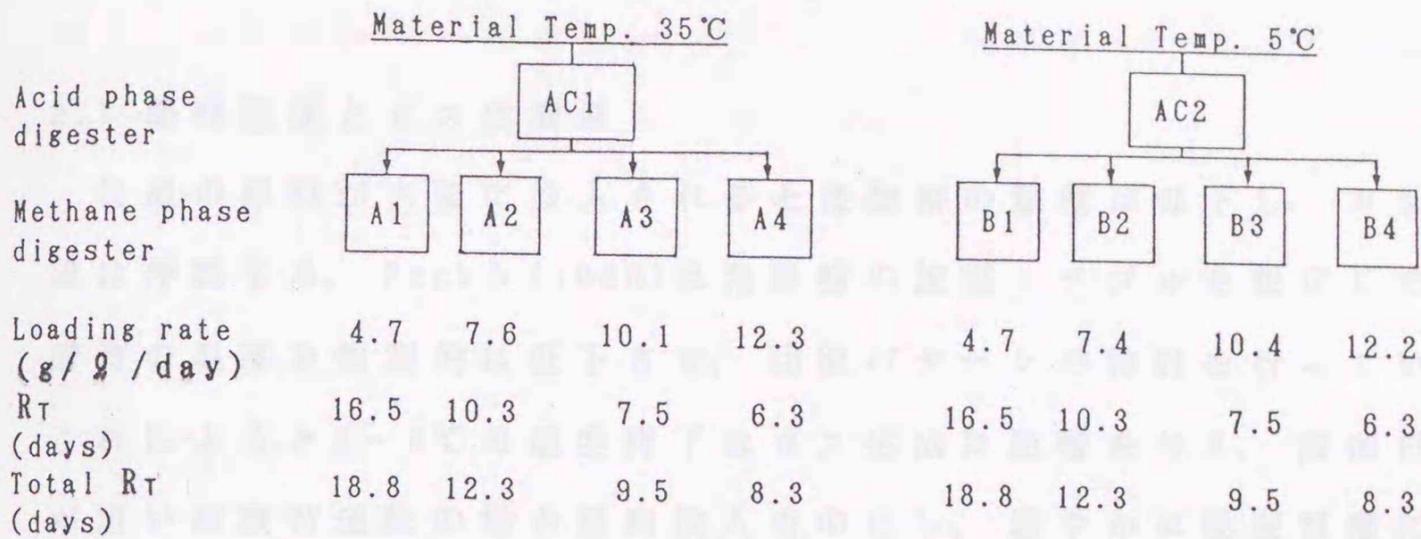
##### 1.1 実験装置と供試材料

前述の酸発酵試験で用いたものと同様である。

##### 1.2 実験方法

従来型連日投入における投入原料の温度差の影響及び酸発酵槽(AC1, AC2)より排出される原料をメタン発酵槽に投入する2相式発酵法の是非について検討を行った。図3.5に実験の手順を示す。酸発酵槽AC1, AC2の排出消化液はメタン発酵槽A1~A4とB1~B4へ投入され、

Two-phase system



Conventional system

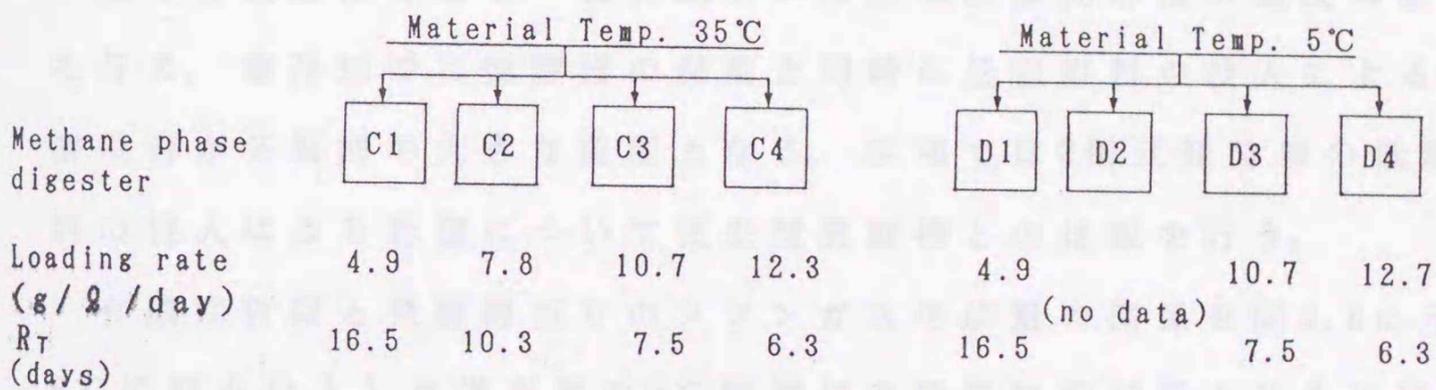


Fig. 3.5 Experimental design  
 図 3.5 実験の手順

2相式による相分離の状態をつくった。従来型のC1~C4は35°Cの原料をD1~D4は5°C原料を投入し、従来型における投入原料の温度差の影響を求めた。実験は40日間行った。投入作業は毎日定時に行った。消化ガス生成量、メタン濃度は毎日測定を行った。pH、固形分濃度、有機物濃度、揮発性有機酸量は4日に1度サンプリングを行い分析に供した。投入原料は帯広畜産大学付属農場ロータリ・ミルクングパーラの待機場のコンクリート床面より、スコップで採取した新鮮な牛糞尿をよくかき混ぜ、4°Cで冷蔵保存し、実験に供した。

## 2 結果と考察

### 2.1 原料温度とガス生成量

低温の原料が大量に投入されると発酵槽の温度は低下し、ガス生成は停滞する。Peckら(1986)は発酵槽の加温トラブルを想定して発酵槽の温度を強制的に低下させ、回復パターンの検討を行っている。これによると3~6℃の温度降下はガス生成に影響を与え、滞留日数が短い高負荷運転の場合原料投入を中止し、速やかに設定温度に昇温する必要があると報告している。

従来型発酵槽の場合、投入原料の温度は直接発酵槽の温度に影響を与え、寒冷地では発酵槽の保温と同時に低温原料の投入による発酵阻害が冬期間の大きな問題となる。本項では2相式発酵槽の低温原料の投入による影響について従来型発酵槽との比較を行う。

有機物負荷と発酵槽当りのメタンガス生成量の関係を図3.6に示す。5℃原料を投入した従来型のD発酵槽は有機物負荷が高くなるに従い、すなわち投入量が増すに従い、その影響が現れた。低温原料の投入による発酵槽内の温度低下は、生成ガス量に大きな影響を与えることが明かとなった。このことは従来式メタン発酵槽においては、低温原料の大量投入が発酵を阻害することを示している。2相式のA発酵槽、B発酵槽は高いガス生成を示し、原料温度の差による影響は認められなかった。また、従来型のC発酵槽(35℃原料)より、高負荷投入が可能であることが明かとなった。

メタン発酵槽の消化ガス生成量とメタン濃度を表3.3に示す。2相式のA発酵槽、B発酵槽、従来式(35℃原料)のC発酵槽の比較では生成ガス量に差は認められなかったが、メタン濃度で有意な差が認めら

れた ( $P < 0.01$ )。すなわち、2相式発酵法の場合、従来型より発生した消化ガス中のメタン濃度がやや高くなる傾向が認められた。これらの結果は前述のLoら(1986)の結果と一致した。

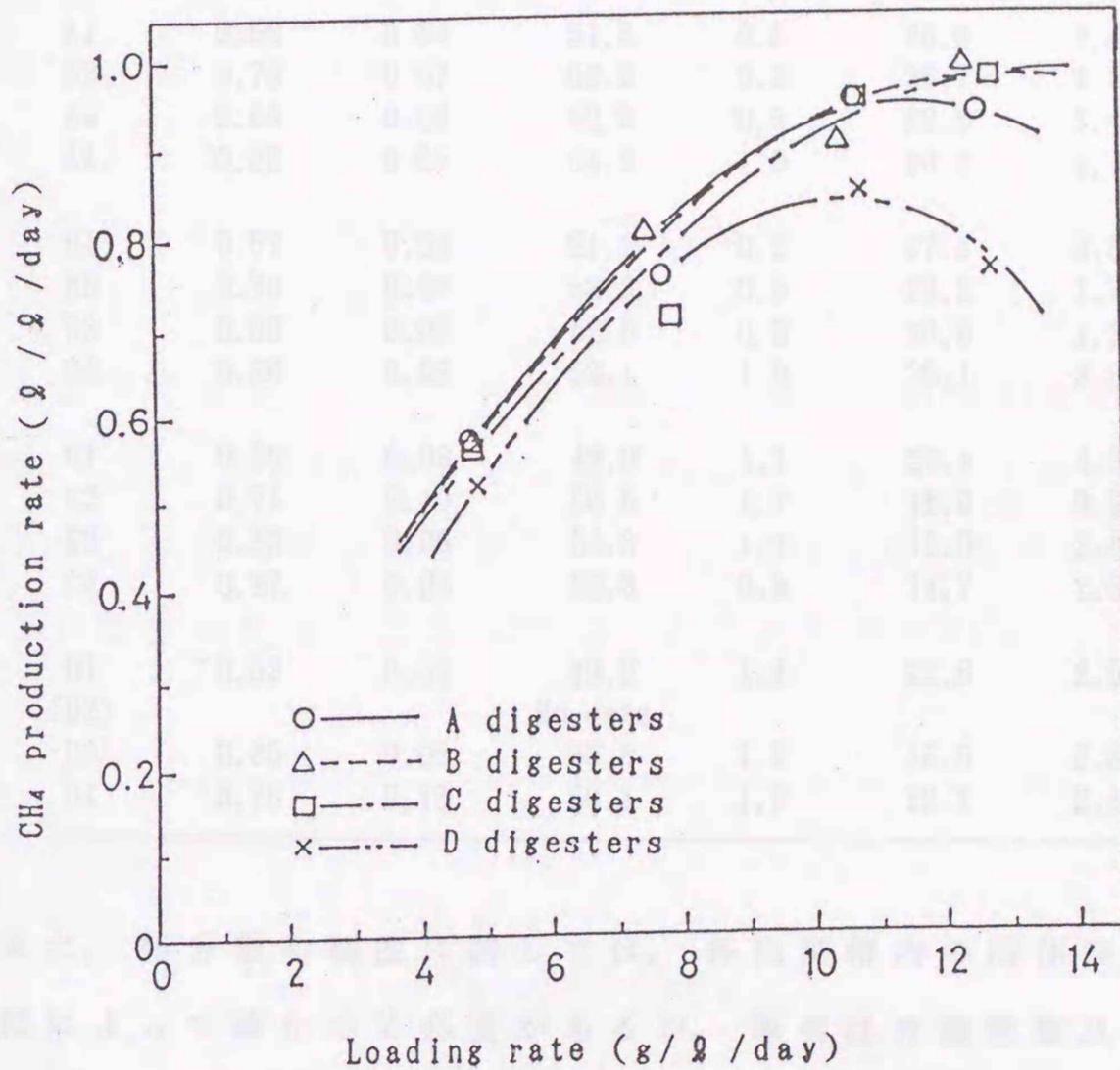


Fig. 3.6 Loading rate and CH<sub>4</sub> production rate  
 図 3.6 有機物負荷とメタン生成量の関係

従来型メタン発酵槽の場合、投入原料の温度はメタン発酵槽の温度に直接影響を与え、D発酵槽のガス生成量は投入原料が増加するに従い減少した。2相式メタン発酵槽の場合、酸発酵槽は酸生成とともに加温も同時に行う。そのためメタン発酵槽の温度変化が極めて小さく、低温原料を投入する寒冷地の場合、2相式発酵法は有利であることが明かとなった。

表 3.3 メタン発酵槽のメタンガス生成量と有機物分解率  
Table 3.3 Performance of methane phase digesters

Digester No	Methane production rate (g/g/d)		Methane content (%)		Volatile solids reduction (%)	
	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.	Ave.	S.D.
A1	0.56	0.64	51.5	0.5	26.6	2.4
A2	0.79	0.07	52.6	0.5	25.7	4.1
A3	0.88	0.08	52.9	0.5	22.5	3.4
A4	0.92	0.05	54.0	1.0	20.2	2.7
B1	0.57	0.03	51.2	0.5	27.4	0.8
B2	0.79	0.06	53.3	0.5	23.2	1.7
B3	0.80	0.06	52.8	0.9	20.6	1.2
B4	0.96	0.06	53.1	1.0	20.1	3.3
C1	0.56	0.03	49.9	1.1	23.4	4.8
C2	0.71	0.10	50.5	1.7	18.8	3.9
C3	0.95	0.06	51.3	1.1	18.0	2.8
C4	0.97	0.08	52.3	0.9	14.7	2.6
D1	0.52	0.03	49.2	1.4	22.6	2.5
(D2)			No data			
D3	0.85	0.05	50.8	1.2	16.9	2.6
D4	0.76	0.18	50.1	1.8	13.7	2.8

また、相分離の程度に関しては、各発酵槽内の菌体濃度と菌相を  
 検鏡によって確かめる必要があるが、筆者は有機酸量及びpH値より  
 間接的に推定することにした。表3.1に示したとおり、酸発酵槽内の  
 揮発性有機酸は増加し、メタン発酵槽内で分解されていることが明  
 確に現れた。また、これを裏付けるものとしてpH値は酸発酵槽で低  
 下し、メタン発酵槽で上昇した。このように酸発酵槽とメタン発酵  
 槽の相違及び特徴が現れたものと考えらる。

## 2.2 有機物負荷と有機物分解率

2相式発酵法は従来型に比べ高負荷が可能であり、短い平均滞留時

間での運転が行われる。一般に有機物分解率は平均滞留時間に比例し、有機物負荷と反比例の関係にあり、平均滞留時間の減少は直接有機物分解率を低下させる。2相式発酵法の場合、酸発酵槽で可溶化が促進されるため有機物分解率の低下は少ないと考えられている。本項では2相式発酵法の有機物負荷と有機物分解率について従来型との比較を行った。

有機物負荷と有機物分解率の関係を図3.7に示す。有機物負荷が上昇すると有機物分解率は低下した。すなわち、原料投入量を増やすと平均滞留時間は減少し排出消化液の有機物分解率は減少した。従来型のC発酵槽とD発酵槽は有機物負荷が $10\text{g}/\ell/\text{d}$ を越えると有機物分解率は急激に低下したのに対して、2相式発酵法のA発酵槽とB発酵槽の有機物分解率の減少は少ないことが明かとなった。

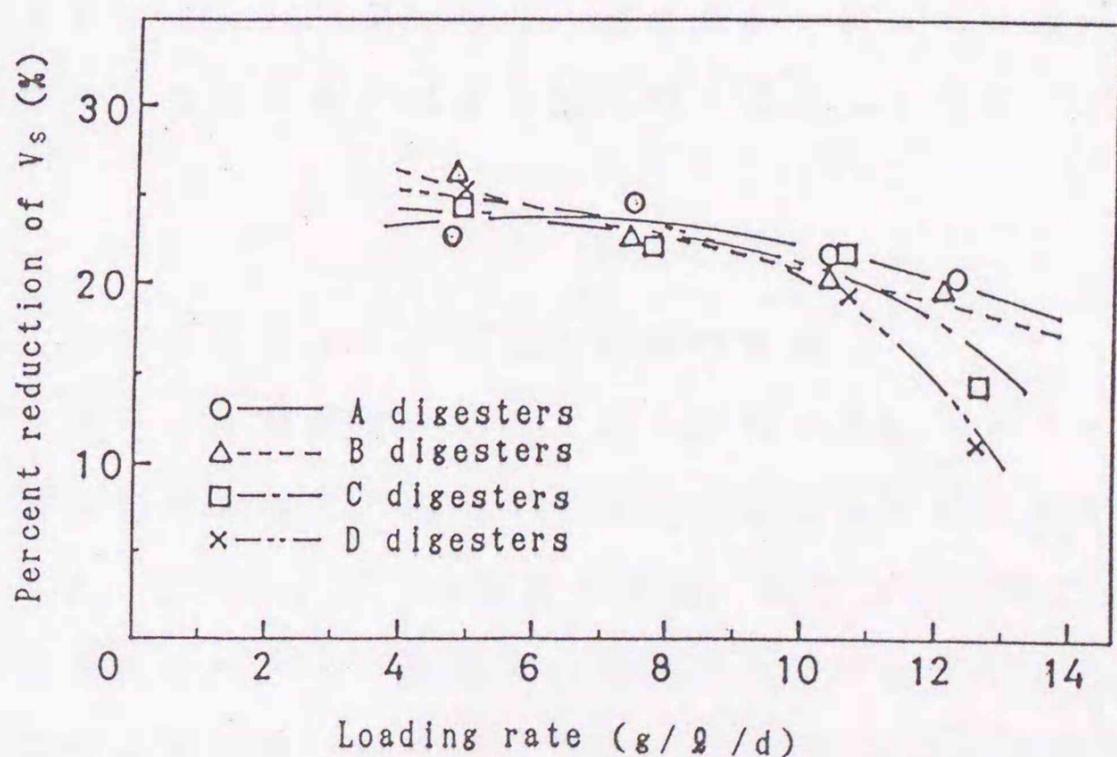


Fig.3.7 Loading rate and percent reduction of volatile solids

図 3.7 有機物負荷と有機物分解率の関係

2相式発酵法の場合原料は酸発酵槽で可溶化が促進されるため高負荷においても有機物分解率を維持したものと考えられる。これらの結果より、2相式発酵法は従来型に比べ高負荷に対しても有機物分解率を維持し、酸発酵槽は可溶化の効果があることが明かとなった。

### 1. 原料の可溶化促進効果

2相式発酵法の場合原料は酸発酵槽で可溶化が促進されるため高負荷においても有機物分解率を維持したものと考えられる。これらの結果より、2相式発酵法は従来型に比べ高負荷に対しても有機物分解率を維持し、酸発酵槽は可溶化の効果があることが明かとなった。

### 2. 投入原料量と有機物分解率

2相式発酵法の場合原料は酸発酵槽で可溶化が促進されるため高負荷においても有機物分解率を維持したものと考えられる。これらの結果より、2相式発酵法は従来型に比べ高負荷に対しても有機物分解率を維持し、酸発酵槽は可溶化の効果があることが明かとなった。

### 3. 投入原料量とメタン生成量の関係

2相式発酵法の場合原料は酸発酵槽で可溶化が促進されるため高負荷においても有機物分解率を維持したものと考えられる。これらの結果より、2相式発酵法は従来型に比べ高負荷に対しても有機物分解率を維持し、酸発酵槽は可溶化の効果があることが明かとなった。

#### 第4節 本章のまとめ

本章は乳牛糞尿を対象とした2相式発酵法の効果、特に低温原料の投入の影響についてベンチサイズの発酵槽を用い従来型との比較を行い、寒冷地酪農への適応性について検討を行った。

##### 1. 攪拌と酸生成速度の関係

回分式試験で得られた最適攪拌条件は、攪拌回数3回/日であった。また、pH値の下降と揮発性有機酸量の上昇は、おおむね2~3日間で完了することから、酸発酵槽の平均滞留時間を2日間とした。

##### 2. 投入原料温度と揮発性有機酸生成量

2日間滞留による酸発酵連日投入試験では、35℃に加温した原料と5℃に冷却したものとは、pH値ならびに揮発性有機酸量の有意な差は見られなかった。すなわち、低温原料を投入した場合でも2日間の滞留で十分に原料を昇温させ酸発酵を促進させることが明かとなった。

##### 3. 投入原料温度とメタンガス生成量の関係

従来型メタン発酵槽の場合、投入原料の温度はメタン発酵槽の温度に直接影響を与え、消化ガス生成量は投入原料が増加するに従い減少した。2相式メタン発酵槽の場合、酸発酵槽は酸生成とともに加温も同時に行いメタン発酵槽の温度変化が極めて小さく、低温原料を投入する寒冷地の酪農場の場合、2相式発酵法は有利であることが明かとなった。

#### 4. 有機物負荷と有機物分解率

従来型発酵槽は有機物負荷が $10\text{g}/\text{Q}/\text{d}$ を越えると有機物分解率は急激に低下したのに対し2相式発酵法は高い有機物分解率を維持した。

#### 5. 相分離

各発酵槽内の有機酸量およびpH値より相分離の状態を間接的に推定すると、酸発酵槽内の揮発性有機酸は増加し、メタン発酵槽内で分解されpH値は酸発酵槽で低下し、メタン発酵槽で上昇した。このように酸発酵槽とメタン発酵槽の相違および特徴が現れたものと考えられる。

以上の結果より、2相式発酵法の場合酸発酵槽は酸生成と共に原料の加温も同時に行いメタン発酵槽の温度変化は極めて少なく低温原料の投入による影響を緩和し、寒冷地での発酵方式として有用であることが明かとなった。

## 第4章 小型プラントによる実験

### 第1節 本章の目的

家畜糞尿からのバイオガス生産は熱帯地域においては伝統的技術のひとつであるが、北海道のような寒冷地での乳牛糞尿を原料とした現場規模の実施例はない。それは、冬期間、プラントの維持が困難であったことに起因している。

近年、農業試験場や大学などで実用化試験が試みられ、一部で実用化も進んでいる。香川県畜産試験場では1槽式発酵槽(3m<sup>3</sup>)を用い豚糞尿を原料として発生した消化ガスでエンジンの運転試験を行っている。また、高知県畜産試験場では既設の豚糞尿貯溜槽(41.3m<sup>3</sup>)を密閉し、メタン発酵槽として改造し、生産された消化ガスを用い、育すう器の保温や夏期の牧草の乾燥に利用する実験を行っている。さらに広島県畜産試験場では生産した消化ガスを用い豚舎の冷暖房を行い、経済性の検討を行っている。また、筑波大学では豚糞尿を用い2槽式発酵槽による相分離の実験を行っている。大阪府では養豚農家を対象とした畜産公害対策として、メタン発酵による処理と消化液の利用技術についてトータルシステムとしての研究を行っている。しかし、これらの多くは豚糞尿を対象としたもので、しかも、これらの施設は比較的温暖な地域に限られており、滝川農試の豚糞による1m<sup>3</sup>発酵槽の実験がある他は北海道のような厳寒地で使用できる実用的な施設はまだ存在しない。

本章では酪農家向け寒冷地型メタンガス施設の開発を目的として小型実験プラントを開発試作し、これを野外に設置し、実用化に向けたランニングテストを行った結果について述べる。第2節では開発

試作した横型実験用嫌気発酵槽(4m<sup>3</sup>)と付帯施設について、第3節では無希釈糞尿を用い高負荷運転を行った場合の供試実験プラントの運転特性について述べる。また、第4節では原料の性状とガス生成の関係について述べる。さらに第5節では本章のまとめを行う。

## 第2節 実験プラントの概要

本施設は日本甜菜製糖株式会社清川実験農場に設置した。牛舎は対頭式スタンション牛舎でカウマット方式である。糞尿は自然流下式で糞尿溝からスラリーピットを経てスラリーストアに貯溜される。

家畜糞尿を対象としたメタン発酵施設の開発のための実験槽は10ℓ以下の実験室規模、1m<sup>3</sup>以下のベンチサイズ、さらに実用規模に大別されるが、本実験においては乳牛約6~8頭分の糞尿が処理できる4m<sup>3</sup>とした。実験プラントの基本設計を以下に述べる。

本実験プラントは消化液の保有熱を十分に回収し、投入原料の昇温、可溶化を促進させ、さらに有機物負荷を上げ余剰ガス量を高め寒冷地での乳牛糞尿からのメタン生産が可能な施設とすることを目的とした。具体的には第2章の結果より、希釈水不要の方式とし、高濃度原料による、高負荷運転を行い消化槽の小型化を図った。そのために発酵温度は42.5℃とした。第3章の結果より発酵方式は2相式とし、酸発酵槽は排出消化液の排熱を利用し、原料の加温と酸発酵の促進を目指して熱交換型とした。また、メタン発酵槽の形状はプラグ・フロー方式の横型発酵槽を採用し温水ジャケットで発酵槽内部を仕切り液温変動、メタン菌の流出を低減させる方式とした。さらに寒冷地型のプラントとするために発酵槽の断熱を強化した。また、現場での実用施設を想定し、できるだけ構造の単純化と運転の

自動化を図った。

### 1. プラントの構成

実験装置は野外に設置した。実験装置の外観を写真4.1に示す。また、実験施設のフローチャートを図4.1に示す。実験装置は計量槽、メタン発酵槽、熱交換槽、消化液タンク、ガスホルダ、温水タンクから成り、原料は自然流下式糞尿溝の乳牛スラリーを発酵槽からの排出消化液の余熱を利用した熱交換槽で加温した後、メタン発酵槽に投入した。

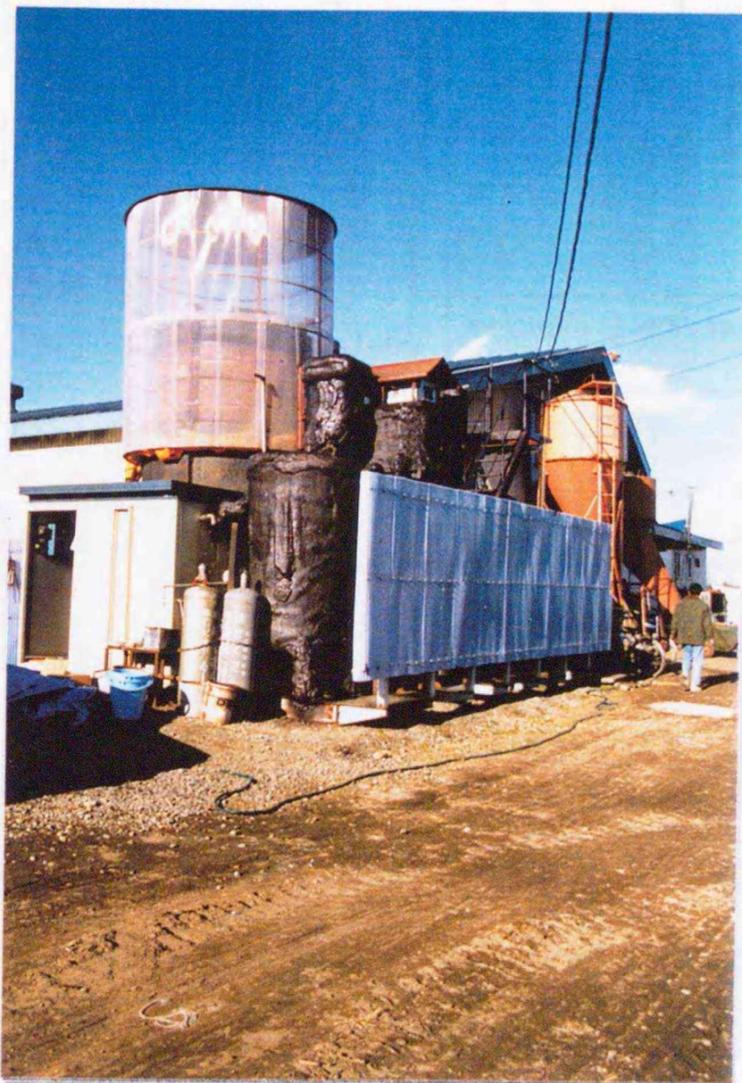


Photo 4.1 Experimental plant  
写真 4.1 実験プラント

発生したバイオガスは脱硫装置を通し、硫化水素を除去したものをガスホルダに補集し、発酵槽加温のためのボイラー用燃料および牛舎の給湯用熱源に用いた。発酵槽は温水ジャケットによる加温を行った。

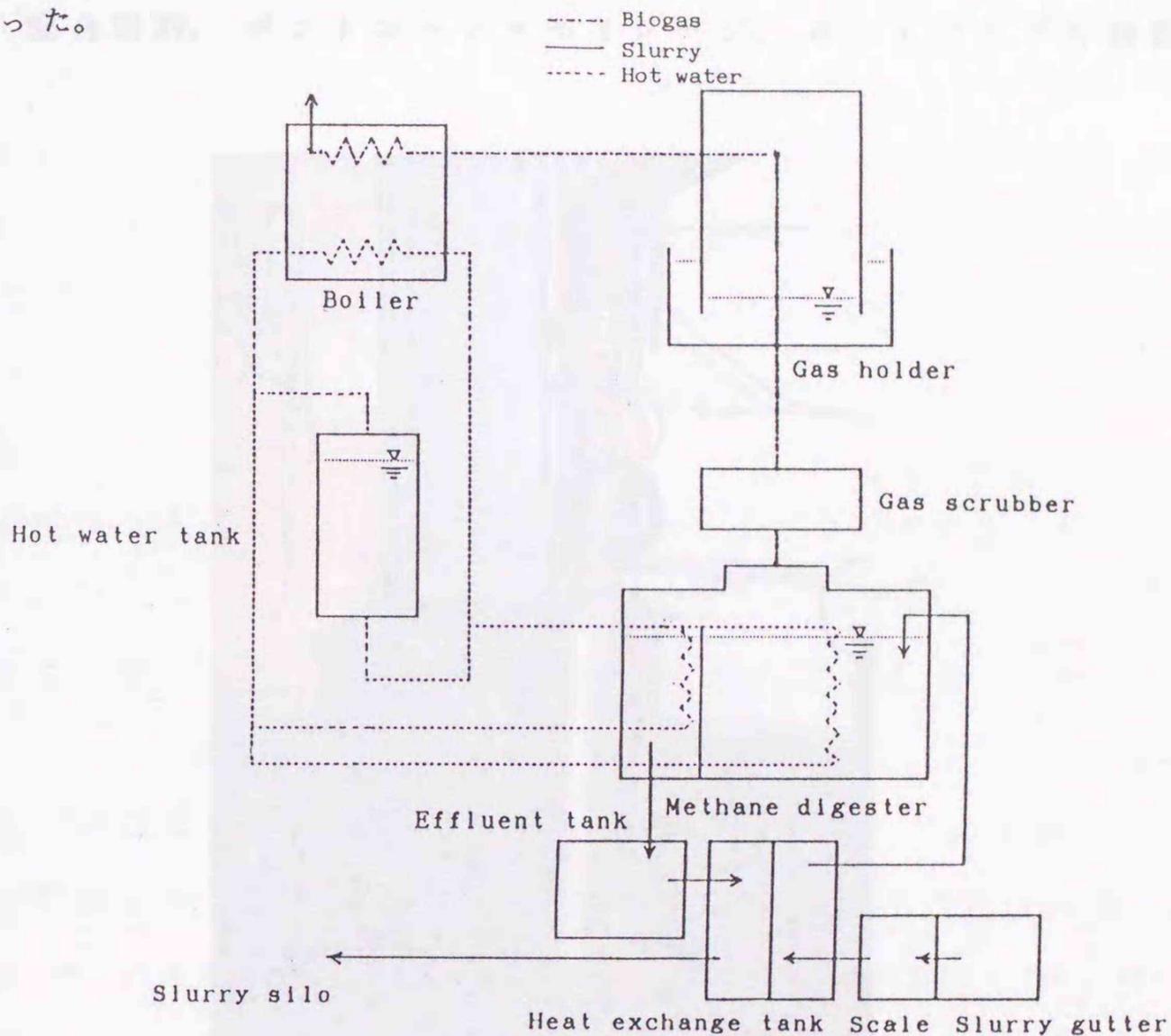


Fig. 4.1 Flow sheet of the experimental plant

図 4.1 実験プラントのフローシート

原料のスラリーは、糞尿溝のなかでスクリュミキサー（極東水中ミキサー 1,500 rpm 1.5kW）によって攪拌した後、水中ポンプによって毎日定時（1日1回投入の場合は正午12時）に計量後熱交換槽に自動投入した。糞尿溝と計量槽を写真4.2に示す。原料の定量供給のために3位置動作リレー付きポンプとゲート付き計量槽を設置した。スラリーの移送に用いた水中ポンプ（エバラ水中ボルテックスポン

プ 0.75kW) は、糞尿溝から計量槽、計量槽から熱交換槽、メタン発酵槽から熱交換槽の計4台である。実験期間中、牛舎内の清掃に用いた雑排水以外、特別な希釈は行わなかった。実験期間中、牛には乾草、配合飼料、デントコーン・サイレージ、ビートパルプを給餌した。

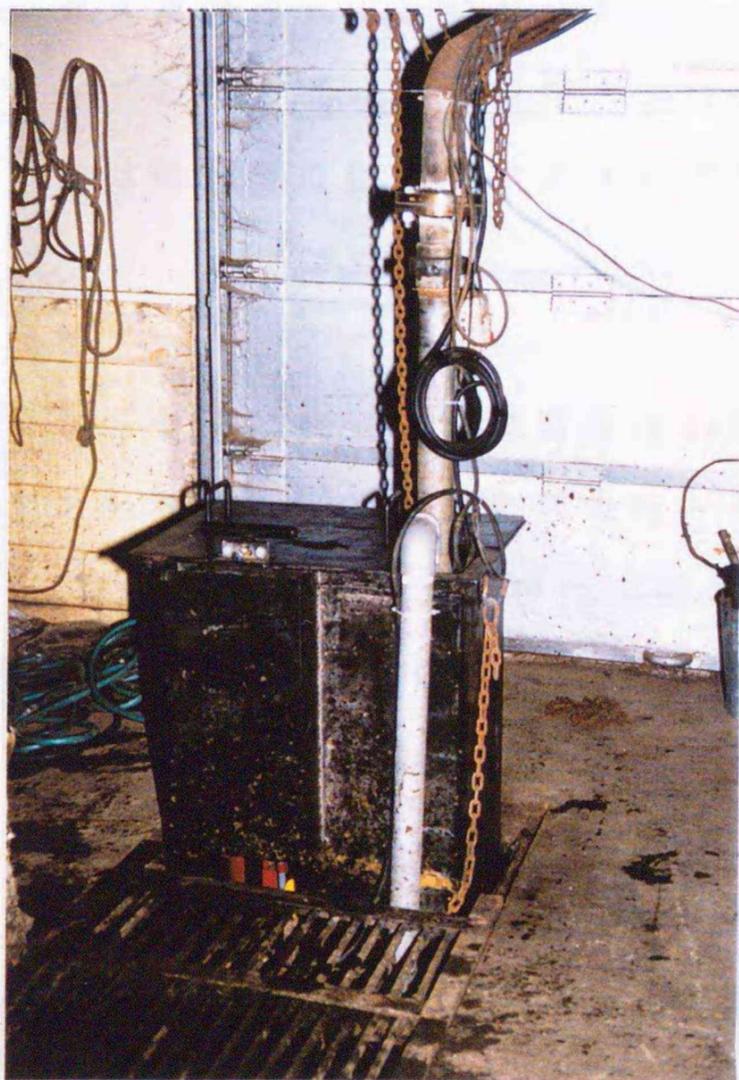


Photo 4.2 Slurry gutter and scale container  
写真 4.2 糞尿溝と計量槽

### 3. 発酵槽

発酵槽はその構造から完全混合懸濁式と隔壁で発酵槽内を仕切るバブル式がある。さらに菌の固定を目的とした固定床式、流動床式、膜複合式などがあるが、構造が複雑となる欠点がある。また、液の移送方式からプラグ・フロー方式、強制排出方式などに分類さ

れる。本実験に用いたメタン発酵槽はプラグ・フロー方式で内部を温水ジャケットによって仕切り、原料投入時の温度ショックを緩和する構造とした。発酵槽が温水ジャケットによって仕切られる構造的特徴から、供試メタン発酵槽の名称をコンパートメントタイプ横型実験用嫌気発酵槽とした。また、攪拌方式にはポンプ循環方式、機械攪拌方式、ガス攪拌方式が一般的であり、比較的大規模な発酵槽においてはポンプ循環方式、ガス攪拌方式などが用いられるが、本実験槽においては横軸型の機械攪拌方式を採用した。

### 3.1 メタン発酵槽

本実験に用いた発酵槽は鉄製で有効容積は $4\text{m}^3$ である。表面に $150\text{mm}$ のポリウレタン発泡材による断熱処理を行った。断熱前のメタン発酵槽を写真4.3に示す。メタン発酵槽は内部を温水ジャケットによって5室に仕切った。作製中の発酵槽内部を写真4.4に示す。攪拌は高粘性原料に対し、攪拌所用動力が最小限となるように攪拌羽根による機械攪拌を採用した。写真4.5に製作中の攪拌羽根を示す。軸の回転によって攪拌羽根が槽内を攪拌し、沈澱したスラッジを掻き上げ同時に発酵槽内部の原料の移動、スカムの破碎を行う。

### 3.2 発酵槽の加温

発酵槽の加温は温水循環加温方式を採用し、メタン発酵槽内に設置した温水ジャケットに温水を循環させた。発酵槽の液温調節は温水循環ポンプ（渦巻ポンプ 50W）とマイコン制御方式の電磁弁を温度調節計に接続し、第1,2温水ジャケットと第3,4,5温水ジャケットの2系統の温水を制御した。また、断熱前の温水タンクを写真4.6に

示す。写真4.7にボイラーと温水循環ポンプを示す。ボイラーは市販の都市ガス用ボイラー（瞬間湯沸器 ノーリツ CQ-1,000WF BA）を用いた。写真4.8に制御盤と配電盤を示す。



Photo 4.3 Methane digester before insulation  
写真 4.3 断熱前のメタン発酵槽

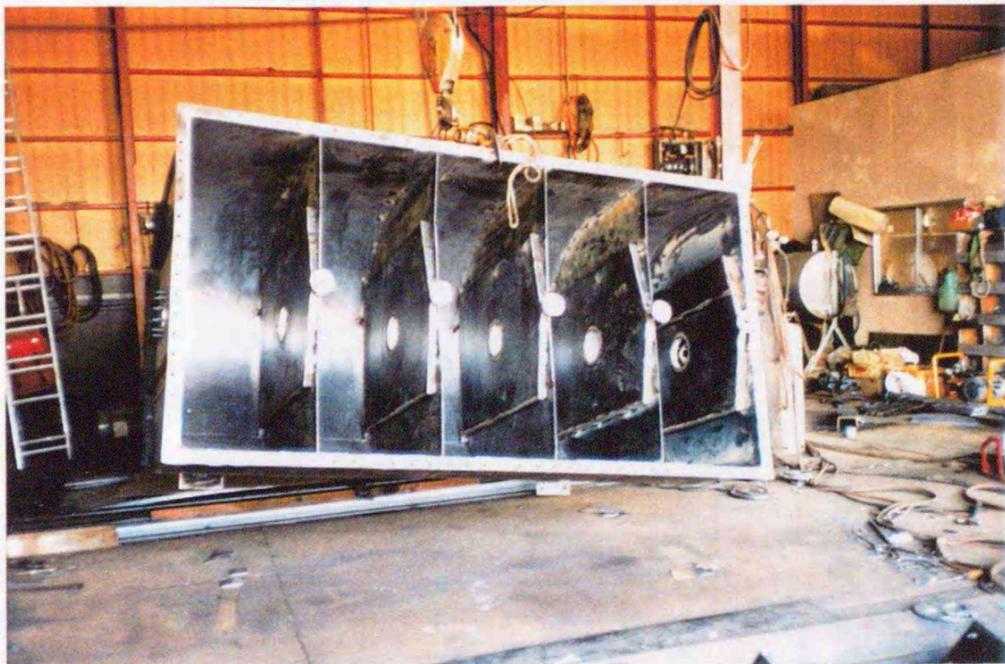


Photo 4.4 Inside of the digester under construction  
写真 4.4 製作中の発酵槽内部



Photo 4.5 Mixing blade under construction  
写真 4.5 製作中の攪拌羽根



Photo 4.6 Hot water tank before insulation  
写真 4.6 断熱前の温水タンク



Photo 4.7 Boiler and water pump  
写真 4.7 ボイラーと温水循環ポンプ

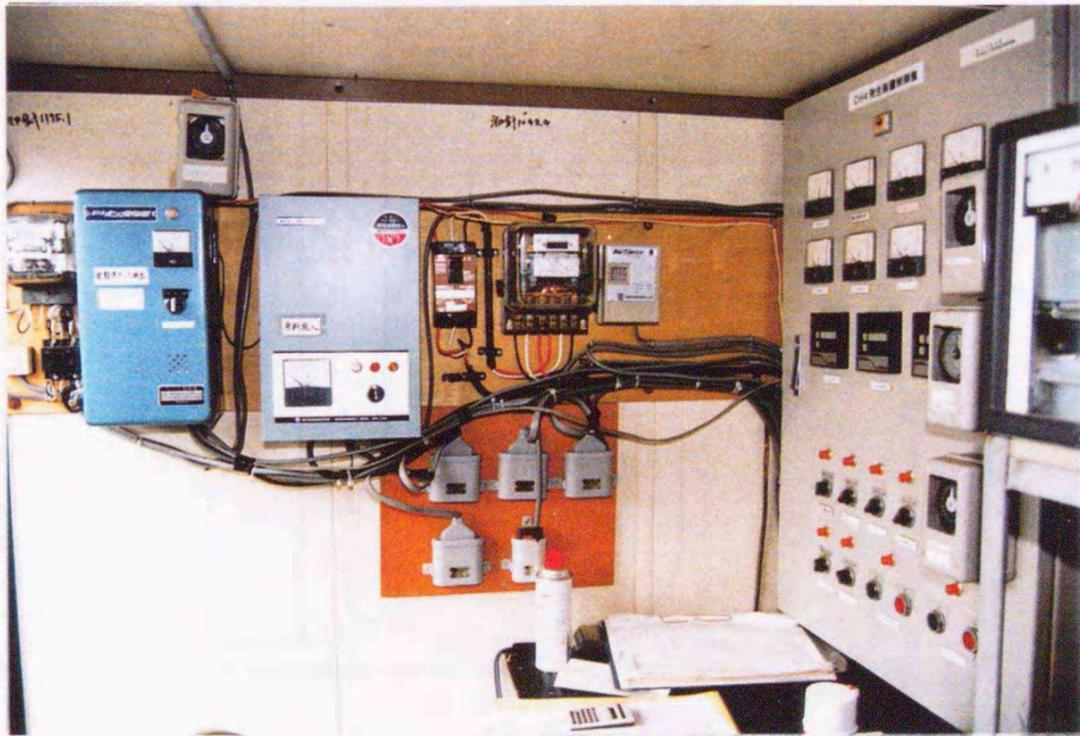


Photo 4.8 Control board  
写真 4.8 制御盤と配電盤

### 3.2 熱交換槽

本実験装置ではメタン発酵の前段に酸発酵槽を設ける2相式発酵法を採用した。酸発酵槽では原料を長時間かけて緩慢に昇温させ可溶化を促進するもので、昇温熱源として消化液の保有熱を利用し、熱交換を行う方式であるため本発酵槽の名称を熱交換槽とした。通常用いられる多管型、プレート型、二重円筒型等の熱交換器は管壁やプレート壁にスラッジが付着あるいは堆積し、熱伝達を妨げ、さらに夾雑物が流動を阻害し使用に適さないため構造が簡単な箱型の隔膜熱交換方式を採用した。熱交換槽の概略図を図4.2に示す。本発酵槽は一つの槽内を隔壁で仕切ることにより原料室と消化液室が交互配列となり隔壁を通して熱の授受を行うものであり、原料加温有効容積は $1.2\text{m}^3$ 、消化液有効容積は $1.6\text{m}^3$ 、伝熱面積は $7.7\text{m}^2$ である。

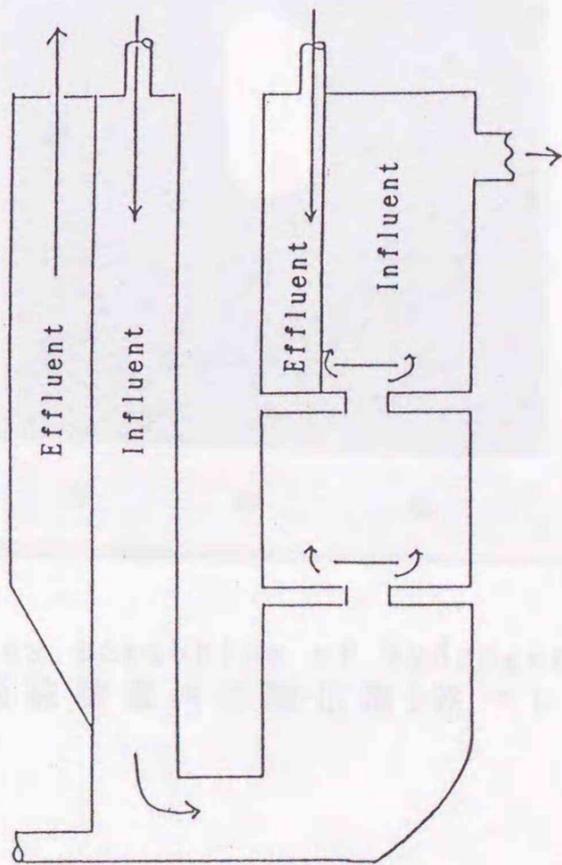


Fig. 4.2 Schematic of the heat exchange tank  
図 4.2 熱交換槽の概略図

#### 4. ガスの調製と貯蔵

消化ガスは除湿、脱硫の後、ガスホルダに貯留し、発酵槽加温に使用し、余剰ガスは牛舎の給湯に用いた。発生ガス中に含まれる硫化水素は、配管、ガスホルダ、ボイラーを腐食させ、人体にも有害であり、燃焼により生成する亜硫酸ガスも有害であるため予め脱硫を行う必要がある。脱硫は乾式脱硫法を採用した。脱硫剤は酸化第2鉄のペレットを用いた。写真4.9に脱硫装置内の酸化第2鉄ペレットを示す。ガスホルダは湿式円筒浮蓋式を採用し、冬期間の凍結を考慮し、水封には不凍液を使用した。ガスホルダの有効容積は $9.5\text{m}^3$ である。



Photo 4.9 Gas scrubbing of hydrogen sulfide  
写真 4.9 脱硫装置内の酸化第2鉄ペレット

### 第3節 運転特性

従来のメタン発酵槽は前述のように原料の希釈を行い低負荷投入による運転が一般的でプラント実験での高濃度原料による高負荷運転に関する運転報告はない。本節では高濃度原料を用いた場合の有機物負荷とガス生成量、高負荷時の運転特性、投入方法とガス生成パターン、実験プラントの熱収支など供試施設の運転特性について述べる。

#### 1. 発酵槽の運転経過

発酵槽は1984年10月より、1988年12月までの4年2ヶ月間に渡り運転を行った。発酵槽の馴養は種汚泥を使用せず、乳牛のルーメンに由来するメタン菌を用い、原料投入後回分発酵を続けメタン濃度の上昇を待った。馴養期間中、メタン発酵槽の加温の熱源にはプロパンガスを用いた。原料投入後10日目のガス発生量は1日当たり約 $3\text{m}^3$ で、メタン濃度は43%であった。さらに、35日目のガス発生量は1日当たり約 $9\text{m}^3$ で、メタン濃度は58%となり、プロパンガスによる加温を停止し発生したメタンガスによる加温に切り替え、自給ガスによる運転を開始した。

当初は1槽式による運転を行い、1984、85年の2回の越冬試験を通し、凍結対策等の改造、断熱の強化を行い、ランニングテストの後、1986年3月より熱交換槽を設置し、本格運転を開始した。

#### 2. 測定と分析

##### 2.1 糞尿スラリー

サンプルは週に1度、糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽（入口、中央、出口）の5ヶ所から採取し、固形分濃度、有機物濃度、揮発性有機酸量、総窒素、アンモニア態窒素、pHを測定した。総窒素、アンモニア態窒素の分析は日甜総合研究所で行った。サンプリングは原料投入の直前に行った。

## 2.2 消化ガス

消化ガス生成量は30分毎にモニターした。また、消化ガス量はガスホルダ内とメタン発酵槽内のガス圧と温度の測定値から0℃、1気圧に換算して示した。ガス圧の測定に用いた水柱計を写真4.7に示す。メタンガス濃度はポータブル・ガスマーター（東科精機製作所GC-701）を用い、1日1度原料投入前測定した。硫化水素濃度は北川式ガス検知管を用い、週に1度原料投入前に測定した。

## 2.3 温度

スラリー温度は、糞尿溝、熱交換槽とメタン発酵槽（入口、中央、出口）にそれぞれT型熱電対を挿入し測定し、打点式記録計に記録した。外気温は実験装置の脇に設置した百葉箱に熱電対を設置し、日平均外気温は2時間毎の測定値の算術平均値を用いた。

## 3. 有機物負荷とメタンガス生成量

一般に発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量は有機物負荷に比例し、その上限は菌体の流出(Wash out)の量に規制される。高濃度原料による高負荷運転を行う場合原料スラリーの移送や攪拌が問題となる。本項は、高濃度原料による最適有機物負荷を求め高負荷メ

タンガス生産システムを確立することを目的とした。

### 3.1 実験の方法

高濃度原料を用いた場合の有機物負荷と、消化ガス生成量の関係について明らかにすることを目的に有機物負荷を3.19から11.0g/ℓ/d、平均滞留時間を7から20日の範囲で運転を行った。実験期間は1986年3月22日から1988年9月21日で、有機物負荷とガス生成量の関係は一括投入法による実験データを用いて示した。また、最高負荷運転を行った1986年3月18日から5月9日の50日間の運転状態と原料の発酵状態を示した。

### 3.2 結果と考察

#### 3.2.1 有機物負荷とメタンガス生成

実験期間中の有機物負荷( $L_R$ )と発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量( $\nu_v$ )の関係を図4.3に示す。有機物負荷と発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量は比例関係にあり、有機物負荷3.19から11.0g/ℓ/d、平均滞留時間7から20日の範囲で強い正の相関を示し( $P < 0.001$ )、次式が得られた。

$$\nu_v = 0.115 \cdot L_R + 0.228 \quad (4.1)$$

$$r = 0.79$$

さらに平均滞留時間( $R_T$ )と発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量( $\nu_v$ )の関係を図4.4に示す。投入量が減少し平均滞留時間が長くなるに従い発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量は減少し、原料固形分が7.5~10.5%の場合平均滞留時間と発酵槽有効容積当りのメ

タンガス生成量は負の相関を示した( $P < 0.001$ )。図4.5に平均滞留日数( $R_T$ )と有機物投入当りのメタンガス生成量( $\beta$ )の関係を示す。有機物投入当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が長くなるに従い増加し、平均滞留時間と有機物投入当りのメタンガス生成量( $\beta$ )は正の相関を示した( $P < 0.001$ )。以上の結果は、第2章で述べた実験Ⅳのベンチサイズ発酵槽による連日投入試験とほぼ同様の傾向を示した。

また、滞留日数を無限大とした場合の回分発酵(実験では50日以上)で得られる投入有機物当りのメタンガス生成量である $\beta_0$ 値は、発酵原料としてのポテンシャルを表し、実際の回分発酵試験あるいは連日投入試験の滞留日数の逆数と $\beta$ の関係から計算で求める。

そこで実験期間中の $\beta_0$ 値を計算から求めた。これらの関係を図4.6に示す。これらの関係から次の回帰式が得られた( $P < 0.001$ )。

$$\beta = -0.452/R_T + 0.194 \quad (4.2)$$

$$r = 0.45$$

滞留日数の無限大、すなわち、滞留日数の逆数が0となるY軸との交点は0.194であった。算出した $\beta_0$ 値は第2章で述べた実験Ⅱの結果よりやや低い値となったが、 $\beta_0$ 値を0.2としたHashimotoら(1981)や0.19とした宮川ら(1992)の実験値とほぼ同様の値となった。

以上の結果より、供試施設のメタンガス生成量は有機物負荷3.19から11.0g/ℓ/d、平均滞留時間7から20日の範囲で有機物負荷に比例し、有機物負荷8g/ℓ/d以上の高負荷運転が可能であることが明らかとなった。

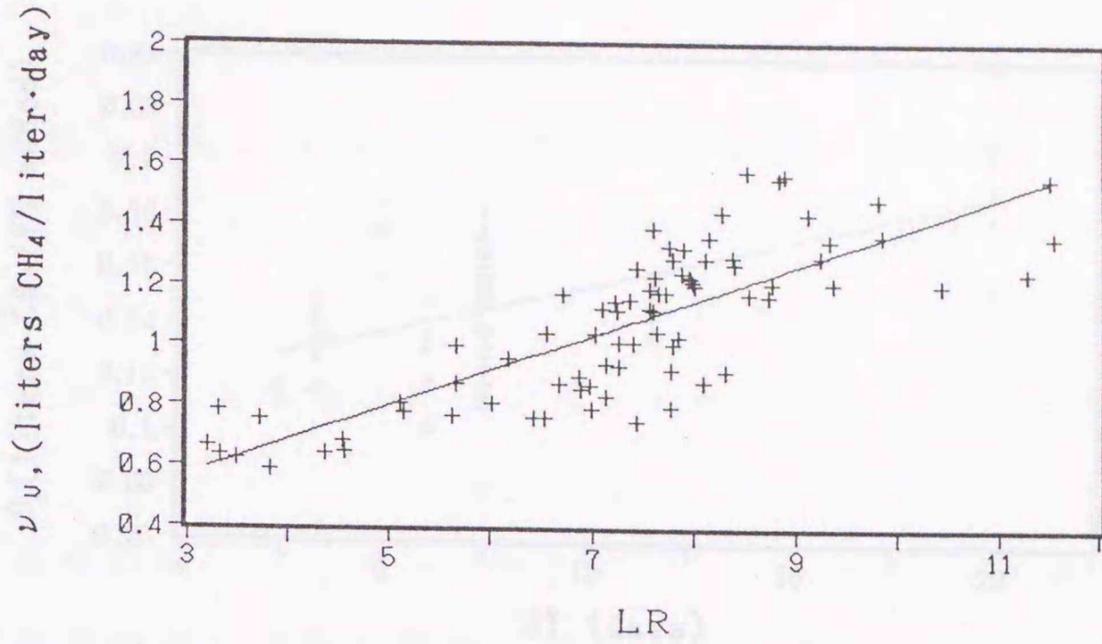


Fig. 4.3 Effect of loading rate(LR) on methane production rate( $\nu_v$ )

図 4.3 有機物負荷(LR)と発酵槽有効容積当りメタンガス生成量( $\nu_v$ )の関係

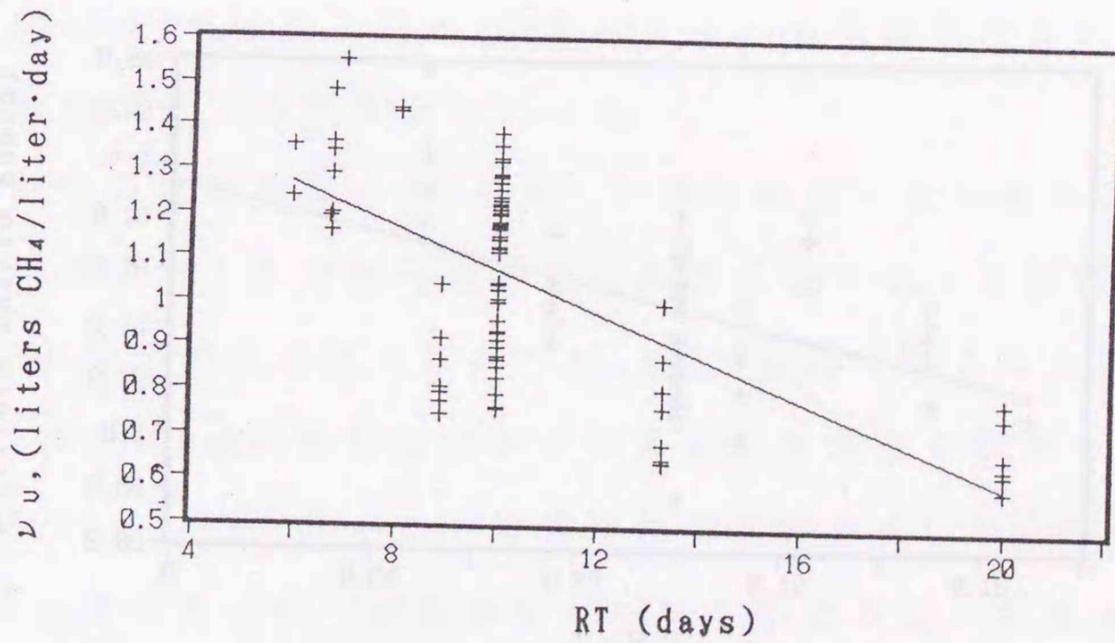


Fig. 4.4 Effect of retention time(RT) and methane production rate( $\nu_v$ )

図 4.4 滞留日数(RT)と発酵槽有効容積当りメタンガス生成量( $\nu_v$ )の関係

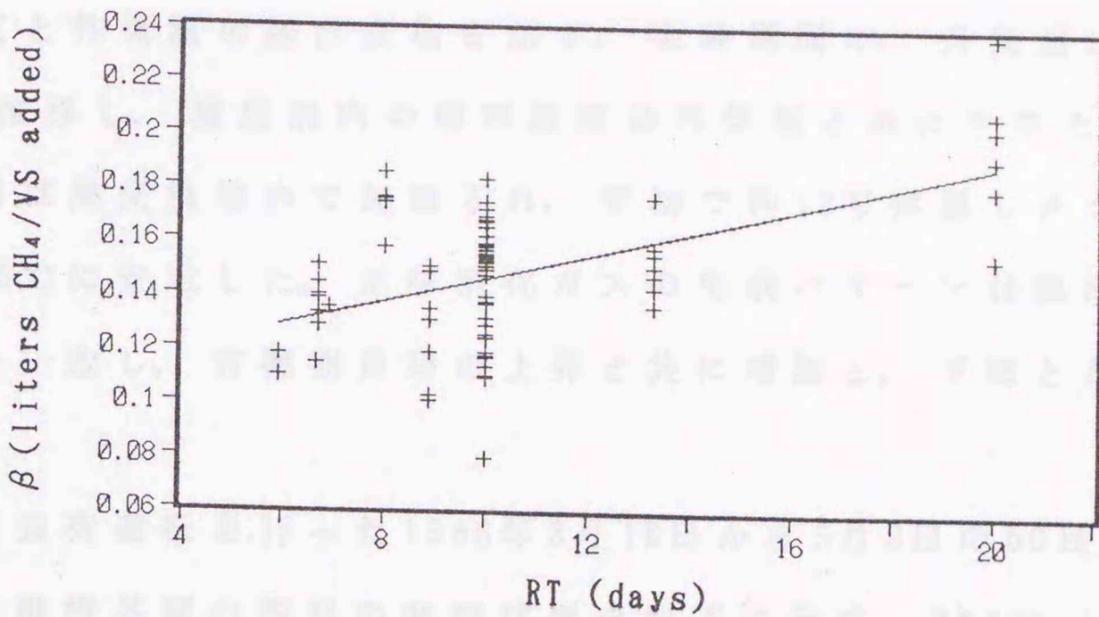


Fig. 4.5 Effect of retention time(RT) and methane production ( $\beta$ )

図 4.5 滞留日数(RT)と有機物投入当りメタンガス生成量( $\beta$ )の関係

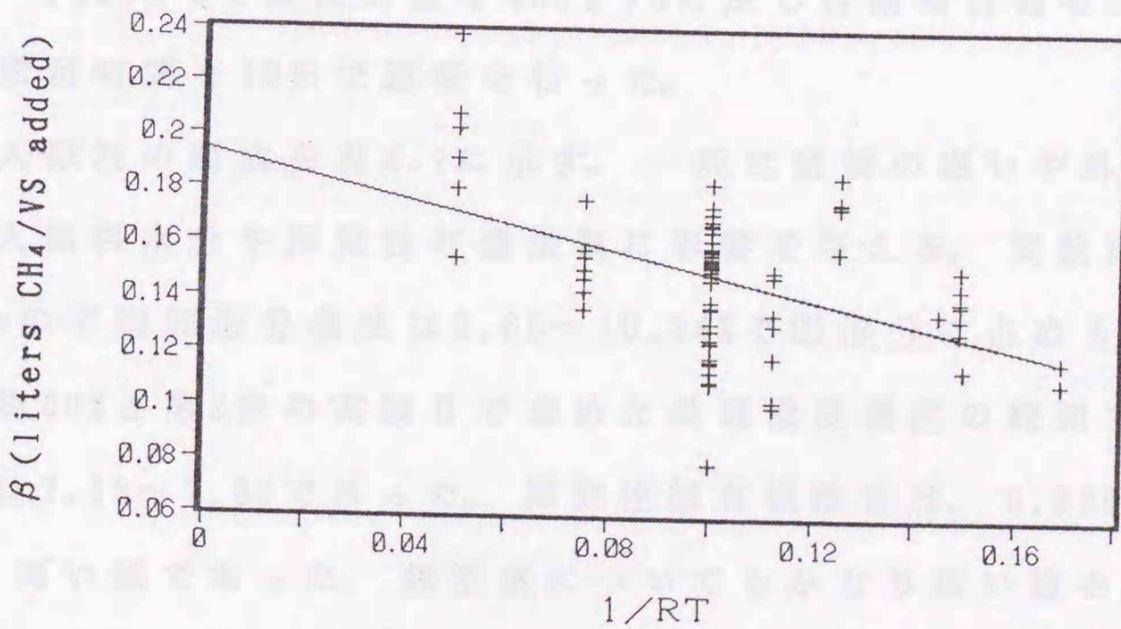


Fig. 4.6 Plot of  $1/RT$  and methane production( $\beta$ )

図 4.6 滞留日数(RT)の逆数と有機物投入当りメタンガス生成量( $\beta$ )の関係

### 3.2.2 高負荷時の運転特性

図4.7に総消化ガス生成量、正味消化ガス生成量、メタン濃度、原料温度と外気温の経日変化を示す。実験期間中、外気温は $-5^{\circ}\text{C}$ から $9^{\circ}\text{C}$ で推移し、糞尿溝内の原料温度は外気温と共にやや上昇した。投入原料は熱交換槽内で加温され、平均で約 $12^{\circ}\text{C}$ 昇温しメタン発酵槽で $42.5^{\circ}\text{C}$ に安定した。正味消化ガスの生成パターンは総消化ガス生成量と一致し、有機物負荷の上昇と共に増加し、下降と共に減少した。

最高負荷運転を行った1986年3月18日から5月9日の50日間の運転状態と発酵槽各部の原料の発酵状態を以下に示す。Phase 1では原料投入量 $400\text{ l/d}$ 、有機物負荷は $7.7\text{ g/l/d}$ で平均滞留時間は10日であった。Phase 2では投入量を $570\text{ l/d}$ とし、有機物負荷を $11.0\text{ g/l/d}$ まで上げた。その時の平均滞留時間は7日であった。投入量を増加させた結果、ガス生成量は増加したが、4月2日をピークに減少し始めたため、Phase 3では投入量を $400\text{ l/d}$ に戻し有機物負荷を $8.0\text{ g/l/d}$ 、平均滞留時間を10日で運転を行った。

投入原料の組成を表4.1に示す。一般に給餌の違いや外気温の変化は投入原料水分や揮発性有機酸量に影響を与える。実験期間中、各Phaseの平均固形分濃度は $9.65\sim 10.34\%$ で固形分に占める有機物の割合は約80%と第2章の実験IIで求めた最適濃度濃度の範囲であった。pH値は $7.13\sim 7.35$ であった。揮発性総有機酸量は、 $5,898\sim 6,823\text{ mg/l}$ と高い値であった。総窒素についてもかなり高い値を示し、約50%がアンモニア態窒素であった。

消化液の組成を表4.2に示す。有機物負荷を上げることにより滞留日数が短縮され、有機物の分解率は低下した。

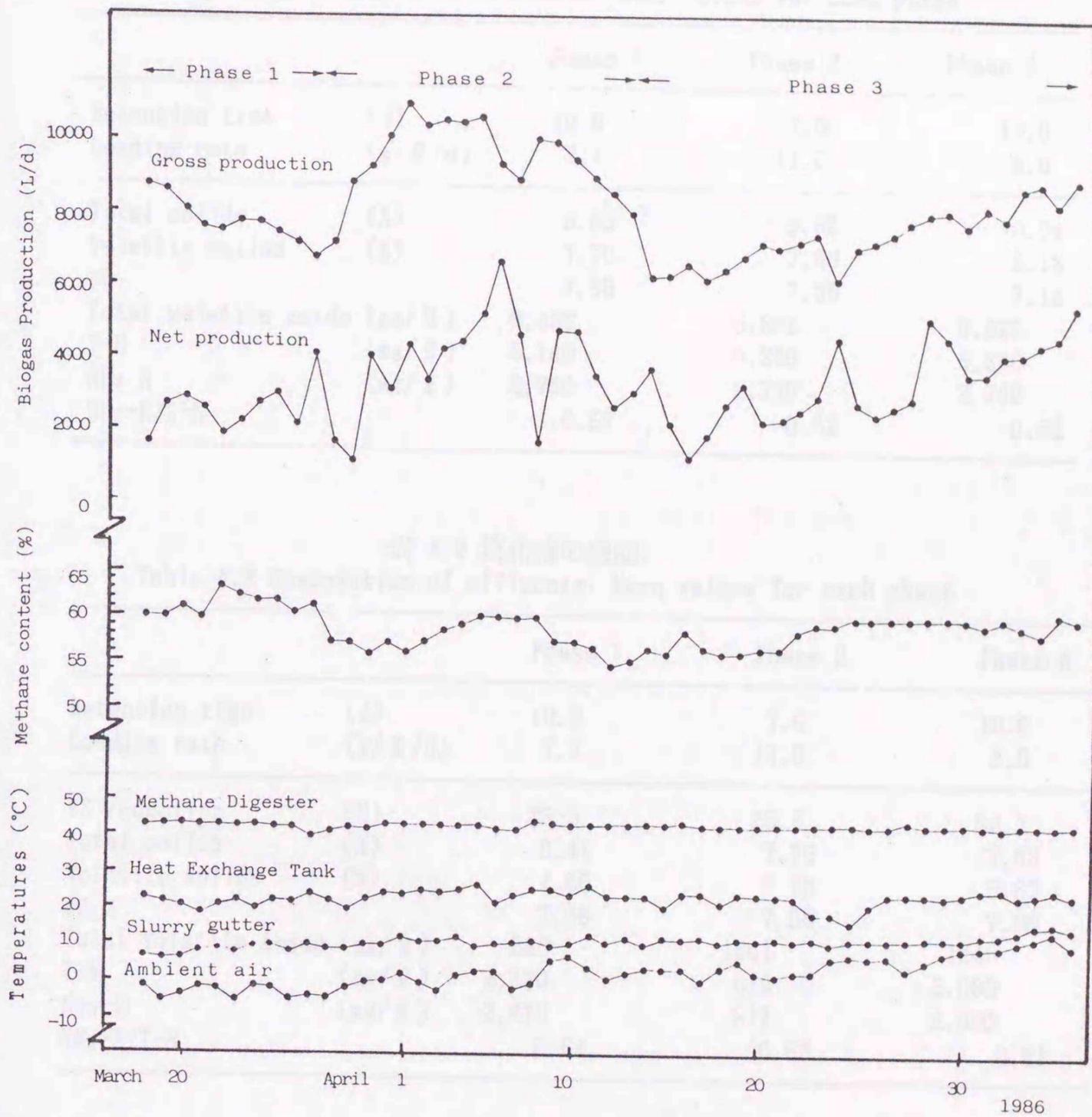


Fig. 4.7 Biogas production, methane content and temperatures  
 図 4.7 消化ガス生成量、正味消化ガス生成量、メタン濃度、原料温度と外気温の経日変化

pH値は、各Phase共に8付近で安定した。揮発性総有機酸量は有機物濃度の低下に従い減少した。消化液の総窒素は供給原料のそれよりやや減少したが、有機体の窒素は無機化し、アンモニア態の窒素

表 4.1 投入原料の組成

Table 4.1 Composition of influents: Mean Values for each phase

		Phase 1	Phase 2	Phase 3
Retention time	(d)	10.0	7.0	10.0
Loading rate	(g/ℓ/d)	7.7	11.0	8.0
Total solids	(%)	9.65	9.92	10.34
Volatile solids	(%)	7.70	7.80	8.13
pH		7.36	7.35	7.13
Total volatile acids	(mg/ℓ)	6,456	5,898	6,823
T-N	(mg/ℓ)	5,140	5,250	5,280
NH <sub>3</sub> -N	(mg/ℓ)	2,750	2,730	2,740
NH <sub>3</sub> -N/T-N		0.53	0.52	0.52

表 4.2 消化液の組成

Table 4.2 Composition of effluents: Mean values for each phase

		Phase 1	Phase 2	Phase 3
Retention time	(d)	10.0	7.0	10.0
Loading rate	(g/ℓ/d)	7.7	11.0	8.0
VS reduction	(%)	39.5	25.8	30.2
Total solids	(%)	6.41	7.76	7.63
Volatile solids	(%)	4.65	5.78	5.67
pH		7.98	7.95	7.96
Total Volatile Acids	(mg/ℓ)	535	1861	1240
T-N	(mg/ℓ)	4,530	512	5,030
NH <sub>3</sub> -N	(mg/ℓ)	2,870	317	3,090
NH <sub>3</sub> -N/T-N		0.64	0.62	0.61

は増加した。発酵槽各部の固形分濃度の変化を図4.8に揮発性有機酸量の変化を図4.9に示す。固形分については全分解量の約30%が熱交換槽のなかで分解し、残りがメタン発酵槽で分解した。Phase 1ではメタン発酵槽での固形分の分解率が高く、有機物負荷を上げたPhase 2では大幅に減少した。Phase 3では有機物負荷を元のレベル

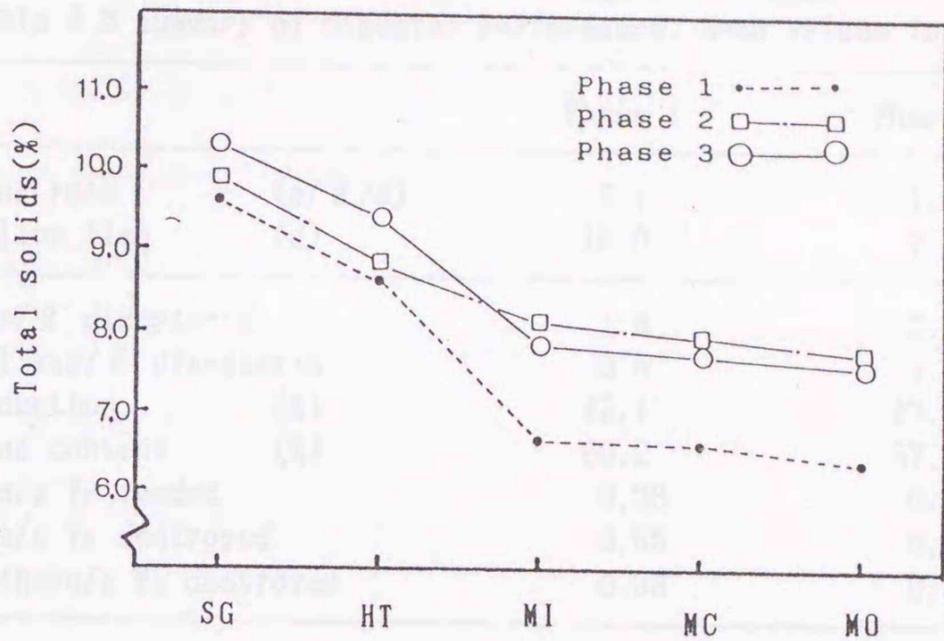


Fig. 4.8 Changes in Total solids(TS%) at slurry gutter(SG), heat exchange tank(HT), methane digester inlet(MI), center(MC) and outlet(MO)

図 4.8 固形分濃度の変化

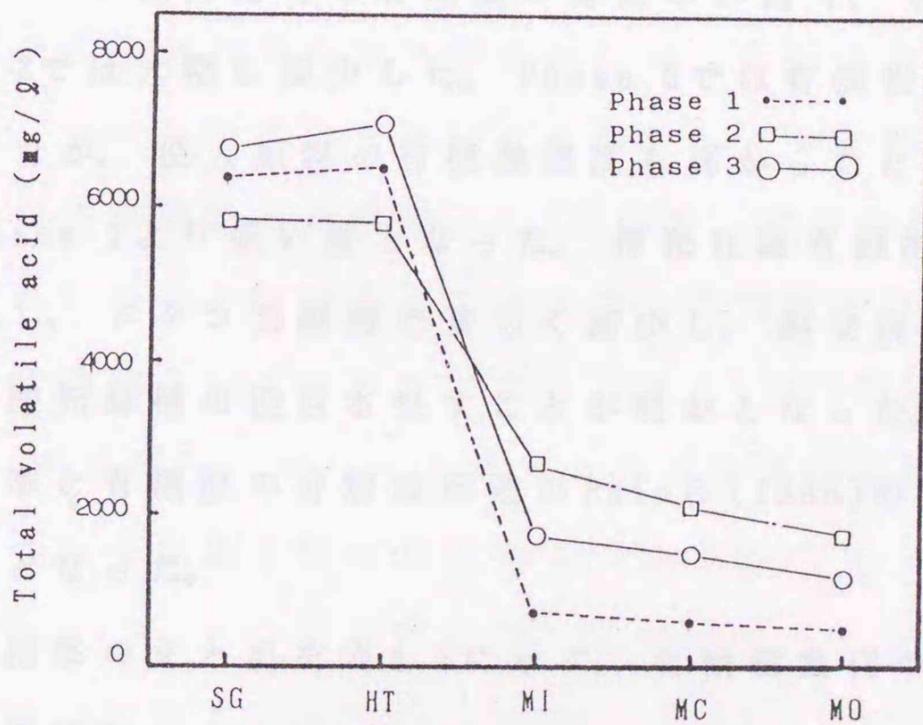


Fig. 4.9 Changes in Total volatile acids(TVA) at slurry gutter(SG), heat exchange tank(HT), methane digester inlet(MI), center(MC) and outlet(MO)

図 4.9 揮発性総有機酸量の変化

表 4.3 消化ガス生成量とメタン濃度

Table 4.3 Summary of digester performance: Mean values for each phase

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Loading rate (g/ℓ/d)	7.7	11.0	8.0
Retention time (d)	10.0	7.0	10.0
ℓ gas/ℓ digester·d	1.8	2.4	1.8
ℓ net gas/ℓ digester·d	0.5	1.0	1.0
Vs reduction (%)	42.1	27.7	33.3
Methane content (%)	60.2	57.9	58.6
ℓ gas/g Vs loaded	0.23	0.21	0.22
ℓ gas/g Vs destroyed	0.55	0.78	0.67
ℓ methane/g Vs destroyed	0.33	0.45	0.39

に下げたが、有機物分解率は低い値に留まった。また、揮発性有機酸量の変化についても同様の傾向が認められた。すなわち、Phase 1ではメタン発酵槽での有機酸の分解率が高く、有機物負荷を上げたPhase 2では大幅に減少した。Phase 3では有機物負荷を元のレベルに下げたが、投入原料の有機酸濃度も高かったため、有機酸の分解率はPhase 1より低い値となった。揮発性総有機酸量は熱交換槽でやや上昇し、メタン発酵槽で著しく減少し、熱交換槽が原料の加温と同時に酸発酵槽の役目も果たすことが明かとなった。この実験の有機物分解率と有機酸の分解は前述のPainら(1988)の実験値とほぼ同様の傾向となった。

実験結果のまとめを表4.3に示す。有機物負荷の上昇に伴い消化ガス生成量はPhase 2では増加したが、その後減少した。また、メタン濃度は高負荷運転によってやや減少する傾向が認められ、この傾向はHills(1980)の報告と一致した。有機物負荷を抑えるとPhase 3ではガス生成量が徐々に回復していることから、Phase 2での高負荷運

転による発酵槽内固形分濃度の上昇が除々に解消されたものと考えられる。

これらの結果より原料有機物濃度を9~10%に調整することによって、やや安定性に欠けるが有機物負荷を $11\text{g}/\ell/\text{d}$ 、平均滞留時間を7日とした高負荷運転が可能であることが明かとなった。さらにガス生成パターン、メタン濃度より、安定した高負荷運転を行うためには、有機物負荷を $8\text{g}/\ell/\text{d}$ 前後、平均滞留時間を10日とした運転が望ましいことが明かとなった。

#### 4. 投入方法とガス生成パターン

一般に高負荷運転を行う場合、低温原料の大量投入は発酵槽の温度低下を招き発酵が不安定になり、発生ガス量は低下する。これらの関係については前述のPeckら(1986)の実験室規模の報告があるが、農場規模の発酵槽での研究報告はない。供試発酵槽は前述のように温水ジャケットで槽内を仕切り温度ショックを緩和する構造としたが、さらに原料投入を分割し、1回の投入量を少なくすることによって温度ショックを軽減する方法について検討を行った。本項では、平均滞留時間を10日の条件下で一括投入(1日1回)と分割投入(1日4回)を行いガス発生パターンと槽内各部の原料の温度変化ならびに発酵状態について比較を行った結果について述べる。

##### 4.1 実験の方法

分割投入は1987年8月4日から9月17日、一括投入は1988年6月10日から7月21日のデータを用いた。分割投入(Run A)を開始する前は一括投入で有機物負荷は $7.44\text{g}/\ell/\text{d}$ 、平均滞留時間は10日であった。

分割投入の期間中、原料投入は1日4回、6時間毎(1:00, 7:00, 13:00, 19:00)に行った。1回の投入は100ℓ, 1日の合計を400ℓとした。この時の有機物負荷は7.68g/ℓ/dで平均滞留時間は10日であった。一括投入(Run B)を開始する前の有機物負荷は7.32g/ℓ/dで平均滞留時間は9.7日であった。一括投入期間中は1日1回(12:00)投入を行った。投入量は400ℓとした。この時の有機物負荷は7.51g/ℓ/dで平均滞留時間は10日であった。

## 4.2 結果と考察

### 4.2.1 発酵槽各部の消化液の組成

原料ならびに発酵槽各部の消化液の組成を表4.4と表4.5に示す。実験期間中、原料の組成は安定し、原料の平均固形分濃度は9.66%、有機物含量は固形分の約80%であった。Run Aの総揮発性有機酸量はRun Bよりやや高く、原料中の主な揮発性有機酸は酢酸、プロピオン酸、酪酸で、酢酸とプロピオン酸が総有機酸量の90%であった。総揮発性有機酸量は熱交換槽でやや増加し、メタン発酵槽で急激に減少した。

### 4.2.2 発酵槽内の温度変化

実験期間中の外気温、糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽中央の原料温度の経日変化を図4.10と図4.11に示す。糞尿溝原料温度は外気温の影響を受け、Run Aのほうがやや高かった。熱交換槽、メタン発酵槽中央の原料温度はほぼ同様の値を示した。

図4.12に分割投入(Run A)の場合のメタン発酵槽入口、中央、出口

表 4.4 投入原料と消化液の性状 (Run A, 分割投入)

Table 4.4 Composition of influent and effluent (Run A, Multiple feeding)

		Slurry gutter	Heat exchange tank	Methane digester		
				Inlet	Center	Outlet
V <sub>s</sub>	(%)	7.73	7.66	6.75	6.36	6.32
T <sub>s</sub>	(%)	9.71	9.70	8.72	8.37	8.31
pH		7.48	7.69	8.23	8.48	8.49
T-N	(%)	0.510	0.517	0.512	0.527	0.525
L <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	12	11	0	0	0
A <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	6,546	6,463	3,119	1,730	1,350
P <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	2,426	2,878	1,457	1,133	1,018
B <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	1,056	837	138	20	16
F <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	48	52	27	0	0
T <sub>UA</sub>	(mg/ℓ)	10,088	10,241	4,741	2,883	2,384

V<sub>s</sub>, Volatile solids; T<sub>s</sub>, Total solids; T-N, Kjeldahal nitrogen;  
 L<sub>A</sub>, Lactic acid; A<sub>A</sub>, Acetic acid; P<sub>A</sub>, Propionic acid; B<sub>A</sub>, Butyric acid;  
 F<sub>A</sub>, Formamide acid; T<sub>UA</sub>, Total volatile acids

表 4.5 投入原料と消化液の性状 (Run B, 一括投入)

Table 4.5 Composition of influent and effluent (Run B, One-time feeding)

		Slurry gutter	Heat exchange tank	Methane digester		
				Inlet	Center	Outlet
V <sub>s</sub>	(%)	7.57	7.63	6.40	6.29	6.19
T <sub>s</sub>	(%)	9.60	9.69	8.51	8.38	8.28
pH		7.51	7.51	8.41	8.47	8.49
T-N	(%)	0.516	0.522	0.540	0.538	0.544
L <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	70	0	12	6	0
A <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	5,624	6,044	2,210	1,655	1,634
P <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	2,020	2,261	1,153	930	945
B <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	755	719	15	0	0
F <sub>A</sub>	(mg/ℓ)	13	13	0	0	0
T <sub>UA</sub>	(mg/ℓ)	8,486	9,037	3,390	2,591	2,579

V<sub>s</sub>, Volatile solids; T<sub>s</sub>, Total solids; T-N, Kjeldahal nitrogen;  
 L<sub>A</sub>, Lactic acid; A<sub>A</sub>, Acetic acid; P<sub>A</sub>, Propionic acid; B<sub>A</sub>, Butyric acid;  
 F<sub>A</sub>, Formamide acid; T<sub>UA</sub>, Total volatile acids

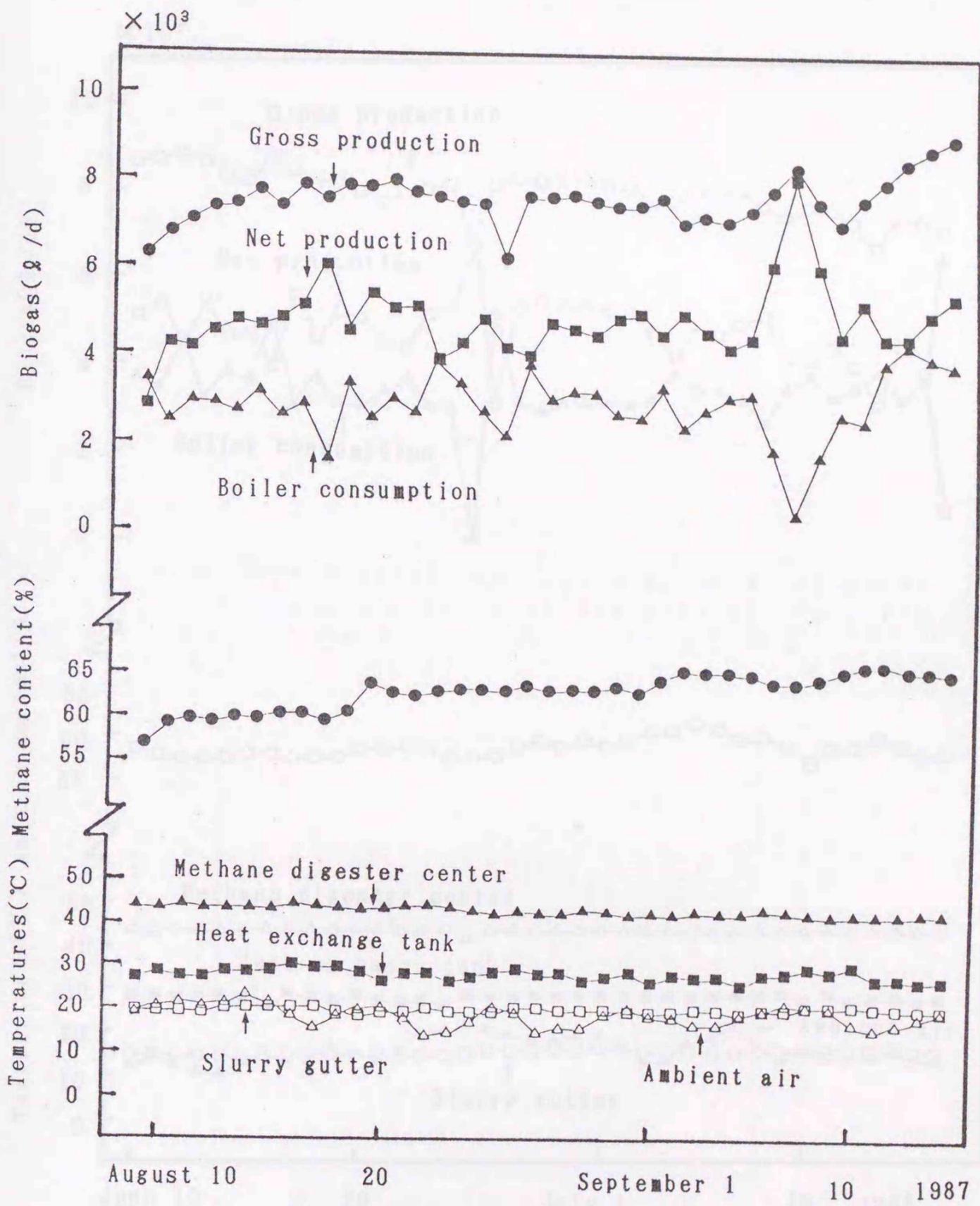


Fig. 4.10 Biogas production, methane content and temperatures (Multilpe feeding, Run A)  
 図 4.10 消化ガス生成量、正味消化ガス生成量、メタン濃度、原料温度と外気温の経日変化 (分割投入, Run A)

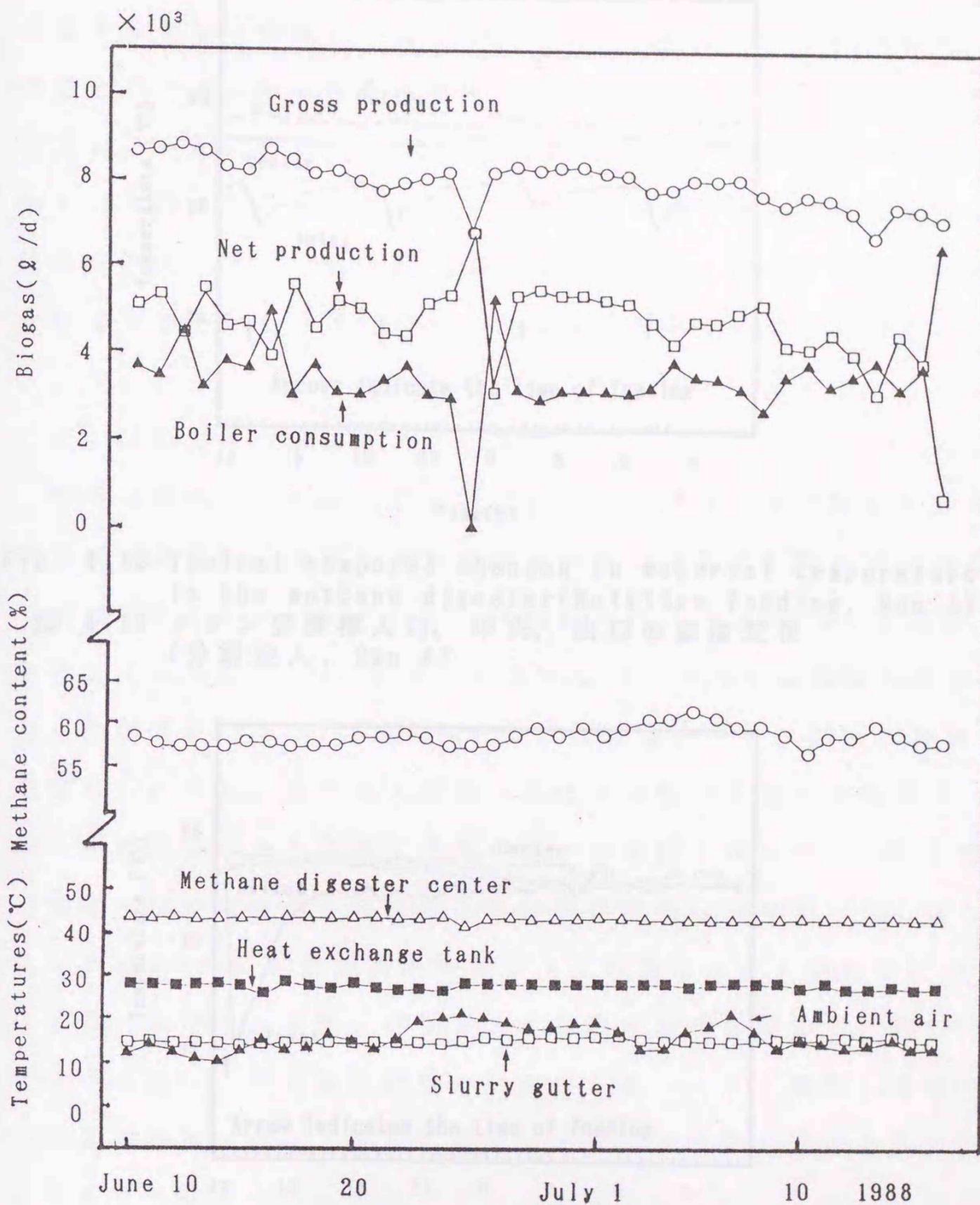


Fig. 4.11 Biogas production, methane content and temperatures (One-time feeding, Run B)  
 図 4.11 消化ガス生成量、正味消化ガス生成量、メタン濃度、原料温度と外気温の経日変化 (一括投入, Run B)

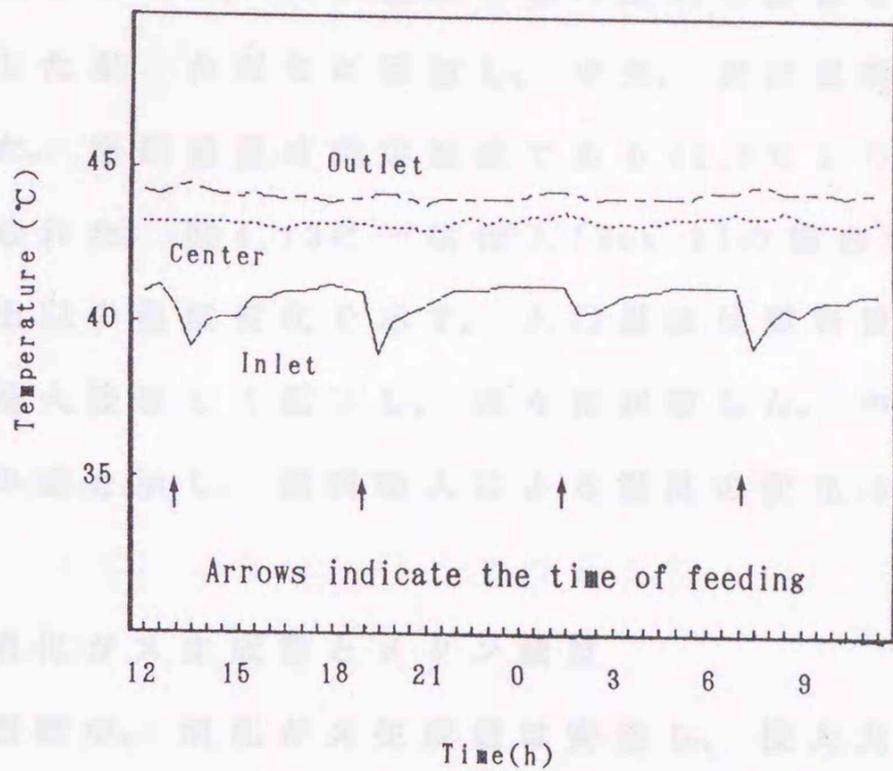


Fig. 4.12 Typical temporal changes in material temperature in the methane digester (Multilple feeding, Run A)

図 4.12 メタン発酵槽入口、中央、出口の温度変化 (分割投入, Run A)

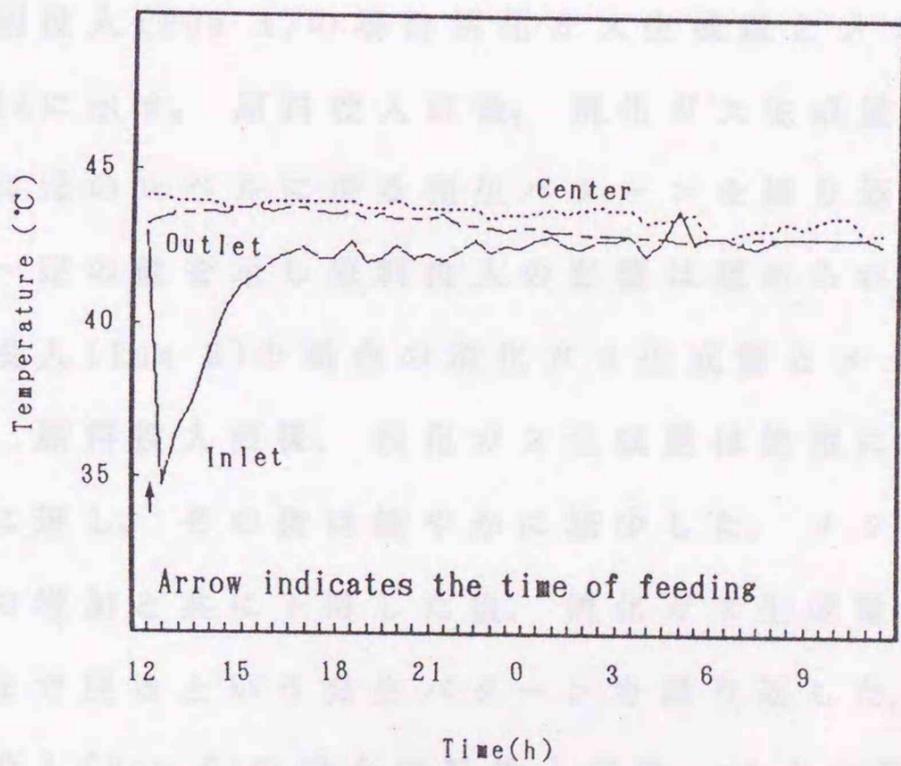


Fig. 4.13 Typical temporal changes in material temperature in the methane digester (One-time feeding, Run B)

図 4.13 メタン発酵槽入口、中央、出口の温度変化 (一括投入, Run B)

の温度変化を示す。入口温度は原料投入の影響を受け原料投入後やや低下したが、ただちに回復し、中央、出口温度の変化は認められなかった。出口温度は設定温度である42.5℃よりやや高くなる傾向が認められた。図4.13に一括投入(Run B)の場合のメタン発酵槽入口、中央、出口の温度変化を示す。入口温度は原料投入の影響を強く受け原料投入後著しく低下し、除々に回復した。中央、出口温度はほぼ同様の値を示し、原料投入による温度の変化は認められなかった。

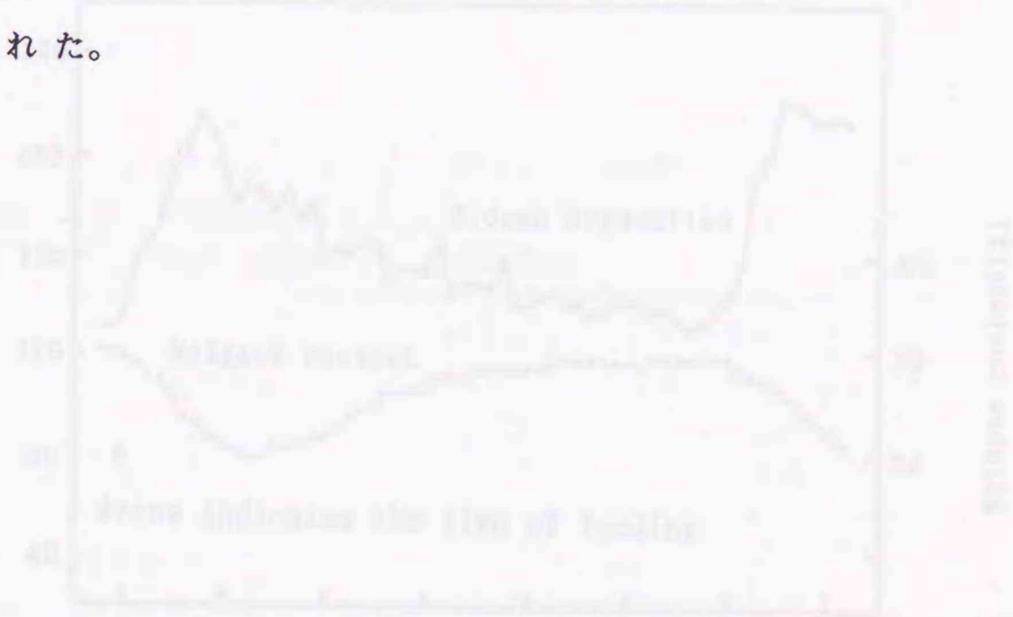
#### 4.2.3 消化ガス生成量とメタン濃度

実験期間中、消化ガス生成量は安定し、投入方法の違いによる生成消化ガス量に差は認められなかったが、発生ガス中のメタン濃度に差が認められた。すなわち、分割投入(Run A)の場合生成消化ガス中のメタン濃度は(Run B)よりわずかながら高くなる傾向が認められた。分割投入(Run A)の場合消化ガス生成量とメタン濃度の経時変化を図4.14に示す。原料投入直後、消化ガス生成量はやや増加するが、速やかに元のレベルに戻る発生パターンを繰り返した。メタン濃度はほぼ一定の値を示し原料投入の影響は認められなかった。図4.15に一括投入(Run B)の場合の消化ガス生成量とメタン濃度の経時変化を示す。原料投入直後、消化ガス生成量は急激に増加し、約2時間でピークに達し、その後は緩やかに減少した。メタン濃度は消化ガス発生量の増加と共に下降した後、消化ガス生成量の減少と共に元のレベルまで戻るといふ発生パターンを繰り返した。これらの結果より一括投入(Run B)の場合原料投入直後、メタン発酵槽の第1室は急激な温度低下と高負荷投入により酸発酵が優勢となり生成消化ガスに占める炭酸ガスの割合が増したのに対して、分割投入(Run A)の場

合、投入による液温やpH値、揮発性有機酸量などの変化 (loading shock) が比較的小さく、生成消化ガス中のメタン濃度は高く安定したものと考えられる。

分割投入 (Run A) の場合と一括投入 (Run B) の場合のボイラーでの消費ガス量の経時変化を図4.16に示す。一括投入 (Run B) の場合、原料投入直後、メタン発酵槽入口温度の急激な低下と共に昇温のため約6時間多量のガスが消費されたが、分割投入 (Run A) の場合、ボイラーでの消費ガス量はほぼ一定の値を示した。実験結果のまとめを表4.6に示す。

以上の結果より、投入方法の違いによる生成消化ガス量、有機物分解率に差は認められなかったが、生成消化ガス中のメタン濃度に差が認められた。すなわち、1日4回投入の場合消化ガス生成量、メタン濃度は安定し、1日平均のメタン濃度についてもやや高くなる傾向が認められた。



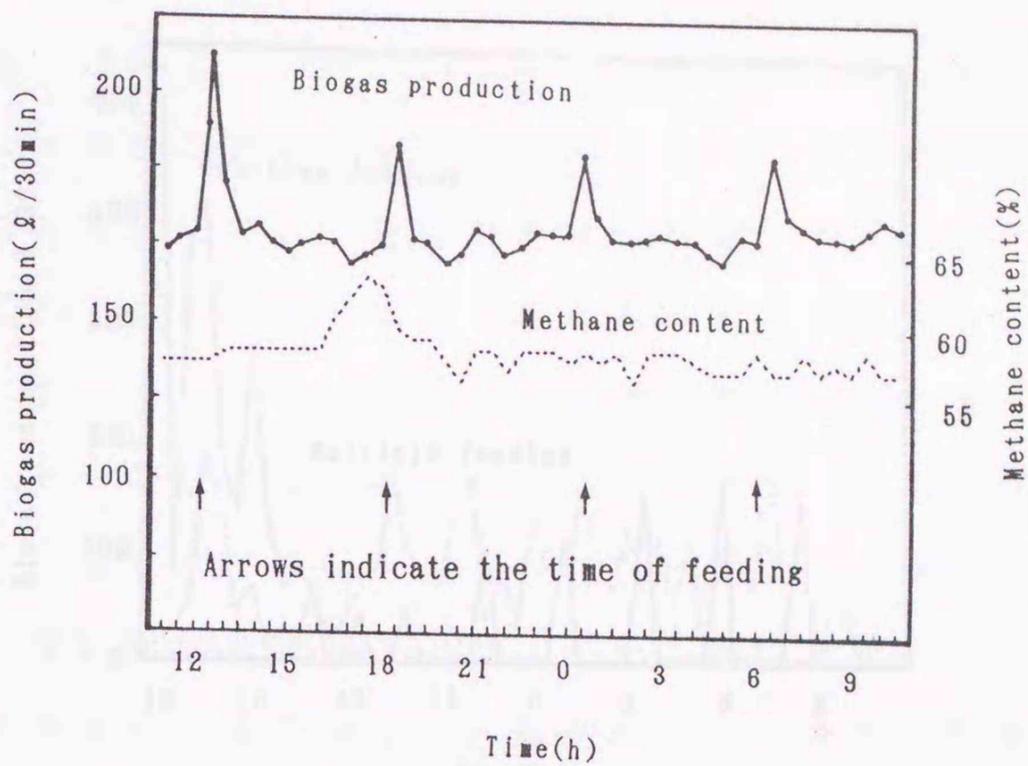


Fig. 4.14 Typical temporal changes in biogas production and methane content (Multiple feeding, Run A)

図 4.14 消化ガス生成量とメタン濃度の経時変化 (分割投入, Run A)

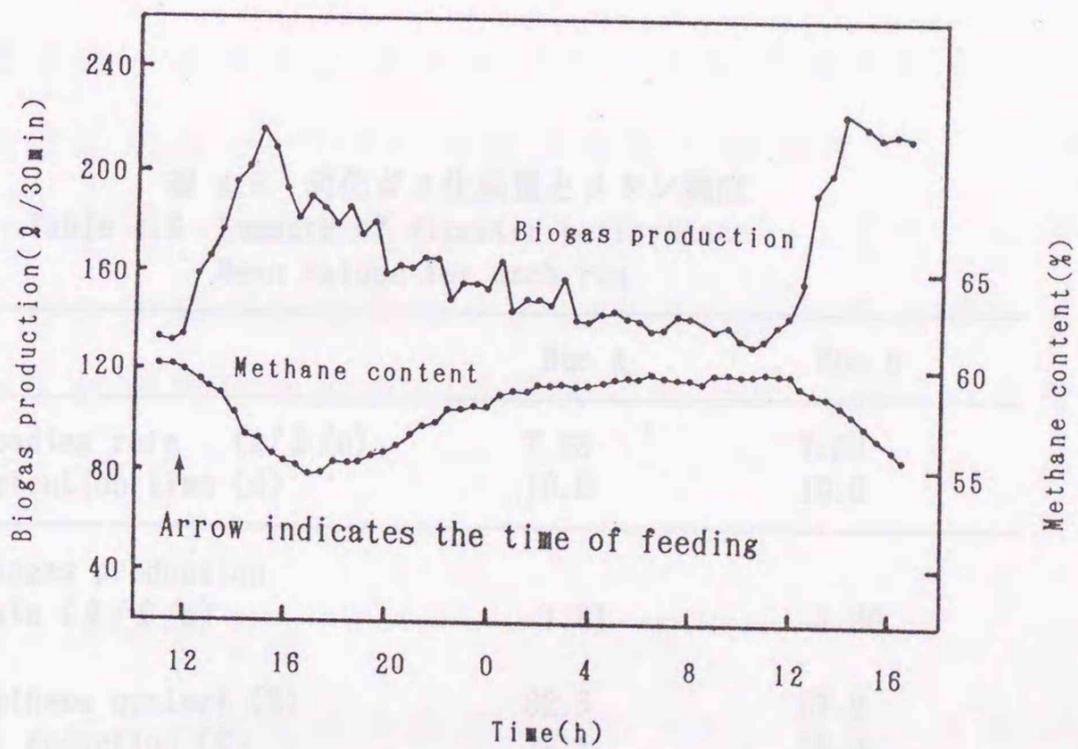


Fig. 4.15 Typical temporal changes in biogas production and methane content (One-time feeding, Run B)

図 4.15 消化ガス生成量とメタン濃度の経時変化 (一括投入, Run B)

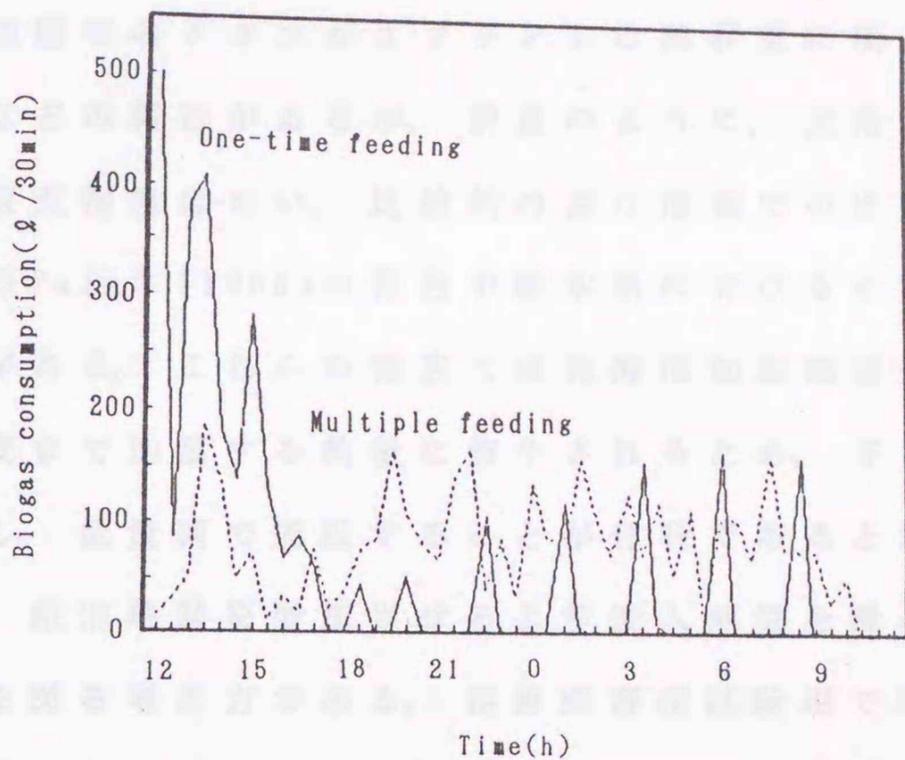


Fig. 4.16 Typical temporal changes in biogas consumption in the boiler

図 4.16 分割投入と一括投入の消化ガス消費量の経時変化

表 4.6 消化ガス生成量とメタン濃度

Table 4.6 Summary of digester performance

Mean values for each run

	Run A	Run B
Loading rate (g/ℓ/d)	7.68	7.63
Retention time (d)	10.0	10.0
Biogas production rate (ℓ/ℓ/d)	1.91	1.99
Methane content (%)	62.5	57.2
V <sub>s</sub> reduction (%)	18.2	18.2

Run A: Multiple feeding 100 ℓ × 4 times

Run B: One-time feeding 400 ℓ × 1 times

## 5. 実験プラントの熱収支

熱帯地域でのメタンガスプラントの熱収支に関しては、Sinhaら(1990)などの報告があるが、前述のように、北海道のような寒冷地での熱収支報告はない。比較的冷涼な地域での実験プラントとしては前述のPainら(1988)の報告や栃木県における小林ら(1988, 1989)の報告がある。これらの報告では発酵槽加温熱量の多くが原料を発酵槽温度まで加温する熱量に費やされるため、冬期間は発酵槽温度を低くし、低負荷で運転することが有利であると結論している。すなわち、産出熱量を増加させるより投入熱量を最小限にして熱収支の向上を図る考え方である。長野県畜産試験場では乳牛糞尿を原料とし、自然流下式スラリーピットをメタン発酵槽として無加温による低温メタン発酵を行っている(平方, 1992)。しかし、これらの方法は産出熱量が極端に低いため、寒冷地においては余剰熱量を得ることは難しい。本項は高濃度原料による高負荷運転を行った場合の冬期間の運転経過と1年間の熱収支解析の結果について、1988年度の運転データを用い月別熱収支について述べる。また、発酵槽の断熱に関する設計仕様を決定するために不可欠な、熱的特性値の基礎数値として供試発酵槽の総括伝熱係数を測定データの熱収支解析から求めた。

### 5.1 熱収支の解析方法

本プラントの熱収支は生成ガス量とメタン濃度、さらに発酵槽で用いた消費熱量から求めた。生成消化ガス中のメタンガスによる発熱量は低位発熱量 $35.79\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ( $8,550\text{kcal}/\text{Nm}^3$ )を採用し、メタン濃度vol(%)を乗じて求めた。また、原料加温熱量は発酵槽温度と熱交

換槽の温度差と原料投入量から求めた。発酵槽からの放熱量、すなわち、発酵槽の温度維持に用いた熱量は発酵槽の消費熱量から原料加温熱量を差し引いて求めた。余剰率は消費熱量を生成消化ガスの発熱量で除した値の百分率で示した。原料の投入、移送、攪拌、温水の循環、制御等に用いた電力量は電力計の数値から読み取り、電力量の熱量換算には、1kWh:10.26MJ(2,450kcal)熱効率35.1%を用いた(茅, 1981)。

#### 5.1.1 メタン発酵槽の総括伝熱係数(U)

メタン発酵槽壁における熱流束 $q$ (W/m<sup>2</sup>)は、平板壁の熱通過として扱うことができる。そこでメタン発酵槽壁における定常状態を考えると、槽内流体から発酵槽壁に伝わる熱流束 $q_1$ 、槽壁内部での熱伝導による熱流束 $q_2$ 、槽外壁から外気に伝わる熱流束 $q_3$ について次式が成立する(一色ら(1975)、杉山(1969)など)。

$$q_1 = \alpha_1 (t_{f1} - t_{w1}) \quad (4.3)$$

$$q_2 = \lambda (t_{w1} - t_{w2}) / x \quad (4.4)$$

$$q_3 = \alpha_2 (t_{w2} - t_{f2}) \quad (4.5)$$

ここで、 $\alpha$ :熱伝達率(W/(m<sup>2</sup>·°C))、 $t_f$ :流体の温度、 $t_w$ :壁温、 $\lambda$ :熱伝導率(W/(m<sup>2</sup>·°C))、 $x$ :壁の厚さ(m)、添字1, 2:槽の内壁または外壁とする。

定常状態では $q=q_1=q_2=q_3$ とおけるから、(4.3)~(4.5)式を整理すると次式となる。

$$q = (t_{f1} - t_{f2}) / (1/\alpha_1 + x/\lambda + 1/\alpha_2) \quad (4.6)$$

(4.6)式より総括伝熱係数Uは次式で与えられる。

$$U = 1 / (1/\alpha_1 + x/\lambda + 1/\alpha_2)$$

$$=q/(t_{r1}-t_{r2})$$

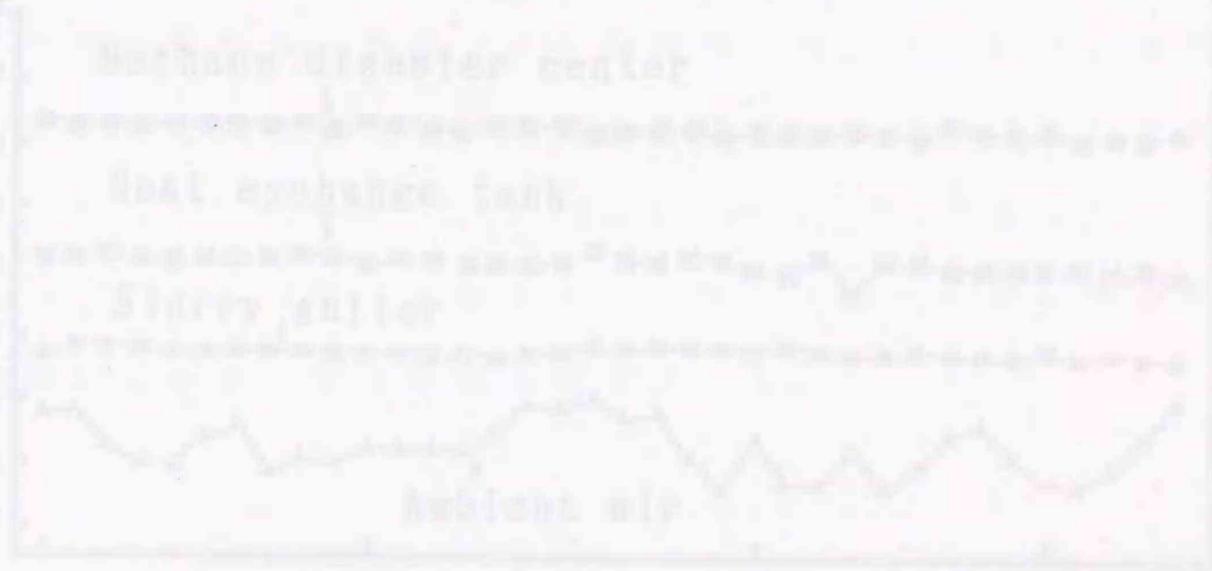
(4.7)

ここで、(4.7)式を発酵槽について当てはめると、 $q$ は発酵槽保温熱量、 $t_{r1}$ は発酵槽内温度、 $t_{r2}$ は外気温となる。

## 5.2 結果と考察

### 5.2.1 冬期間の運転経過

図4.17に冬期間の運転成績を示す。日平均外気温は、 $-0.1$ から $-13.9^{\circ}\text{C}$ 、糞尿溝のスラリー温度は約 $9^{\circ}\text{C}$ で推移し、熱交換槽で約 $20^{\circ}\text{C}$ に昇温された。生成消化ガス量はほぼ一定の値を示した。1月1日以降調温器の作動不良により消費ガス量に大きなバラツキが見られた。この間の消化ガス量の余剰率は約25%であった。ボイラーの熱効率は入湯口と出湯口の湯温と流量、さらにその時の単位時間当りの消化ガス消費量から算出し、その値は約80%であった。厳寒期においても凍結によるトラブルは認められなかった。



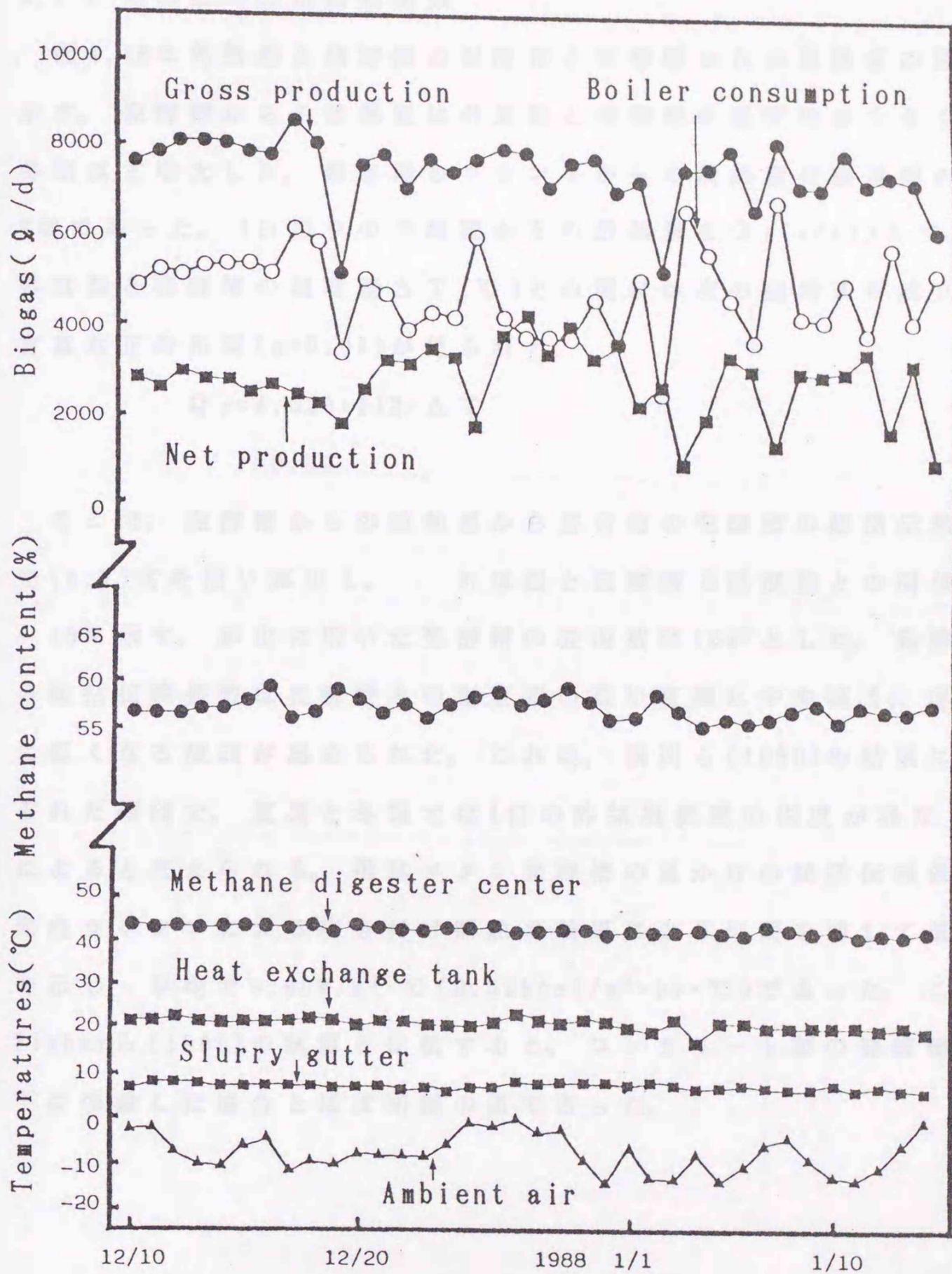


Fig. 4.17 Biogas production, methane content and temperatures (Winter)

図 4.17 消化ガス生成量、正味消化ガス生成量、メタン濃度、原料温度と外気温の経日変化(冬期間)

### 5.2.2 発酵槽の総括伝熱係数

図4.18に外気温と発酵槽の温度差と発酵槽からの放熱量の関係を示す。発酵槽からの放熱量は外気温と発酵槽の温度差が大きくなる冬期ほど増大した。厳冬期のプラントからの放熱量は盛夏期の約35%増であった。1日当りの発酵槽からの放熱量を $Q_f$ (kcal)とすると、外気温と発酵槽の温度差 $\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )との間には次の回帰式が成立し、有意な正の相関( $p < 0.01$ )が見られた。

$$Q_f = 4,028 + 112 \cdot \Delta T \quad (4.8)$$

$$r = 0.84$$

そこで、発酵槽からの放熱量から各月毎の発酵槽の総括伝熱係数を(4.7)式を用い算出し、外気温と発酵槽の温度差との関係を図4.19に示す。算出に用いた発酵槽の表面積は $18\text{m}^2$ とした。発酵槽の総括伝熱係数は発酵槽との温度差の低い夏期にやや高く、冬期間に低くなる傾向が認められた。これは、前川ら(1990)の結果にも見られた傾向で、夏期と冬期では1日の外気温変動の程度が異なることによると考えられる。供試メタン発酵槽の見かけの総括伝熱係数は発泡ウレタンによる吹き付け断熱の効果により年間を通して低い値を示し、平均で $0.60\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$  ( $0.52\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )であった。これは、Fisherら(1983)の試算と比較すると、コンクリート製の発酵槽を地下に埋設した場合とほぼ同様の値であった。

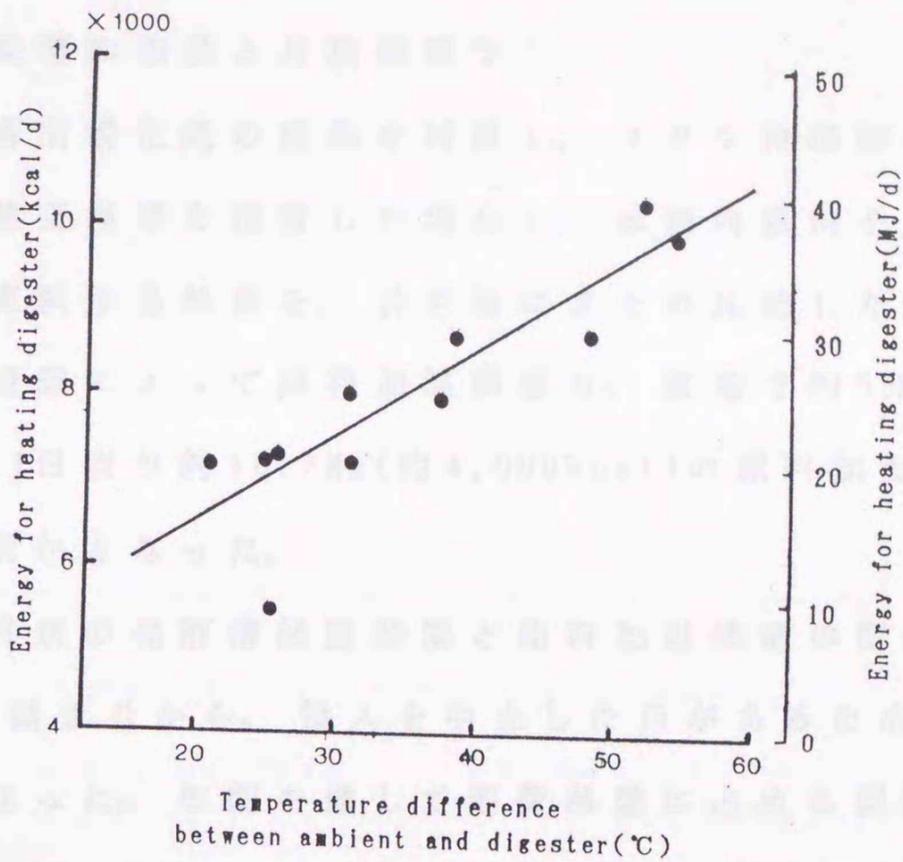


Fig. 4.18 Correlation between the temperature difference (ambient and digester) and the energy for heating digester ( $r=0.84$ ,  $p<0.01$ )

図 4.18 外気温と発酵槽の温度差と発酵槽からの放熱量の関係

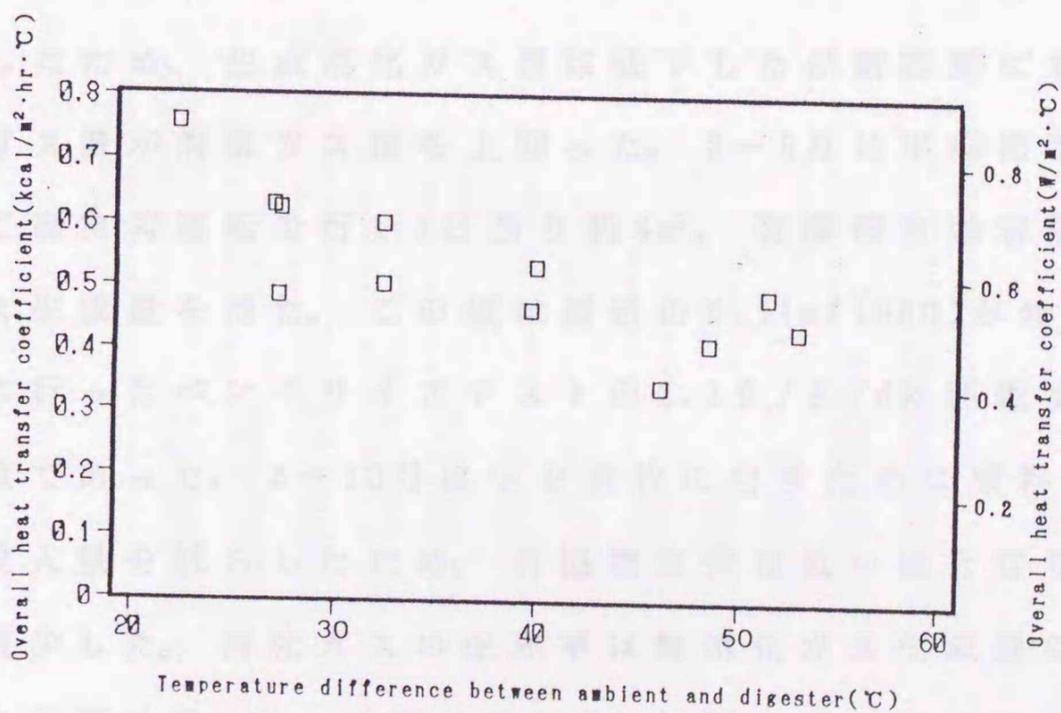


Fig. 4.19 Relation between the temperature difference (ambient and digester) and overall heat transfer coefficient of the digester

図 4.19 外気温と発酵槽の温度差と発酵槽の総括伝熱係数の関係

### 5.2.3 熱交換槽の効果と月別熱収支

図4.20に排出消化液の廃熱を利用し、メタン発酵槽への投入原料を加温する熱交換槽を設置した場合と、尿溝内原料を直接投入した場合の理論原料加温熱量を、各月毎にまとめ比較した結果を示す。熱交換槽の設置によって原料加温熱量は、夏期で約50%、冬期で約30%減少し、1日当り約16.7MJ(約4,000kcal)の原料加温熱量が節減されることが明らかとなった。

図4.21に月別の発酵槽保温熱量と原料加温熱量の関係を示す。1,2月は配管の詰まりから、投入を中止した日があるため原料加温熱量は低い値となった。年間を通して消費熱量に占める原料加温熱量は約44%と、従来のプラントに比べ低い値となり熱交換槽による原料加温の効果が明らかとなった。

1988年の運転条件と成績の一覧を表4.7に示す。1,2月は調温器の作動不良と配管の詰まりから、投入を中止したり有機物負荷を下げたりしたため、生成消化ガス量は低下したが厳寒期にもかかわらず、生成ガス量が消費ガス量を上回った。3~6月は平均滞留時間を10日として高負荷運転を行い1日当り約8m<sup>3</sup>、発酵槽有効容積の約2倍の消化ガス生成量を得た。この値は前述のHills(1980)が無希釈牛糞尿を原料に行ったベンチサイズテストの2.1ℓ/ℓ/dに匹敵する消化ガス発生量であった。8~10月は牛を放牧に出すために原料スラリーが不足し投入量を減らしたため、有機物負荷は低い値となり、生成ガス量は減少した。消化ガスの生産率は総消化ガス生成量の平均48.7%でその内冬期は約30%、夏期は約60%と年間を通してガス生産が可能であることが明らかとなった。

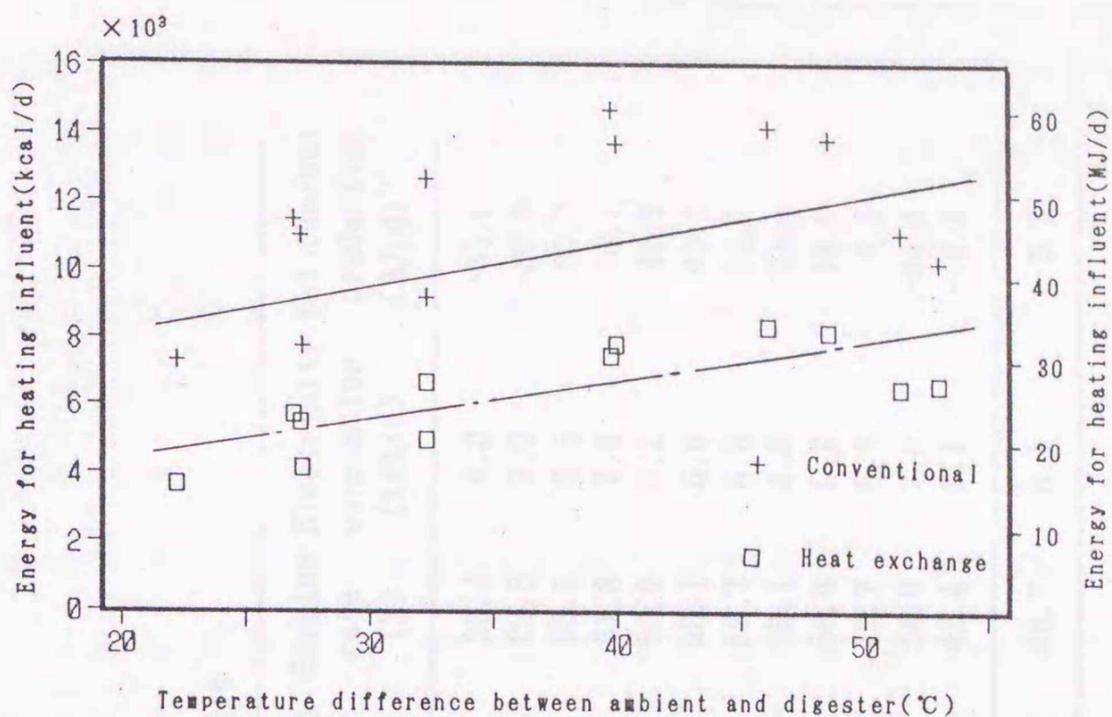


Fig. 4.20 Relation between the temperature difference (ambient and digester) and the energy for heating slurry

図 4.20 外気温と発酵槽の温度差と原料加温熱量の関係

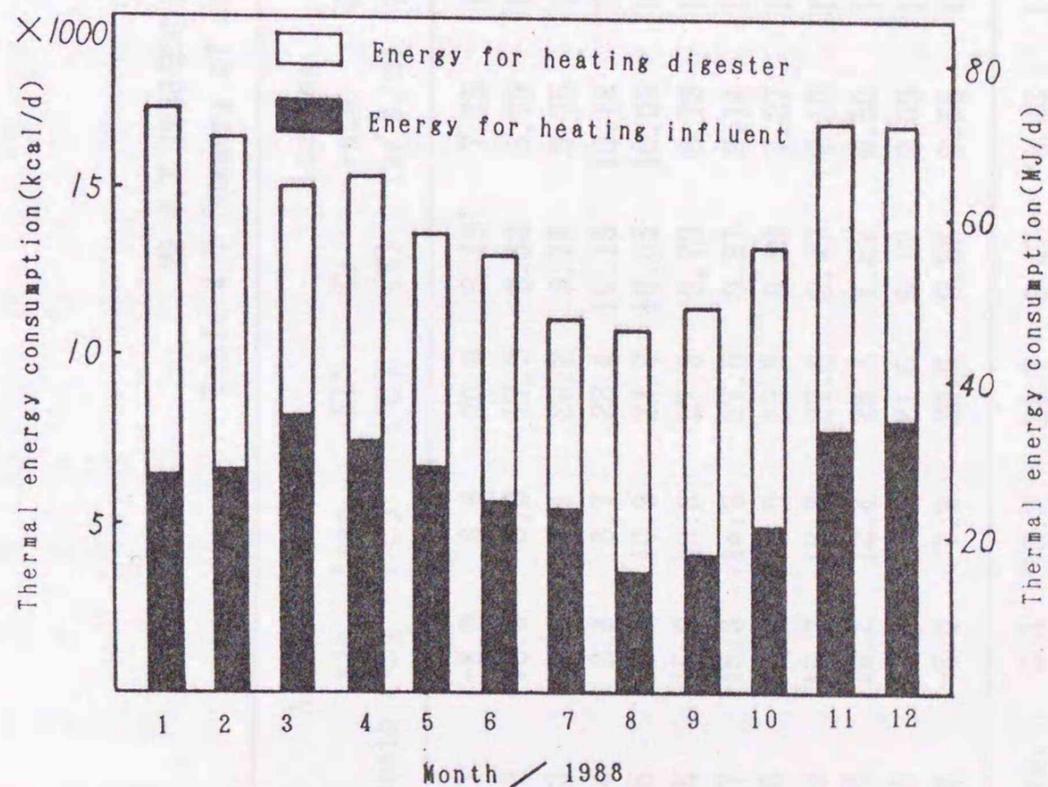


Fig. 4.21 Monthly energy for heating digester and feeding slurry

図 4.21 月別の原料加温熱量と発酵槽保温熱量の関係

表 4.7 1988年の運転条件と成績一覧  
Table 4.7 Summary of experimental data in 1988

Month	Ambient air temp. (°C)	Slurry temp. (°C)	HT* (°C)	Ts (%)	Loading rate (g/d)	R <sub>T</sub> (d)	Biogas production (g/day)	Methane cont. (%)	Surplus rate (%)	Electricity consumption (kWh/d)	Net thermal production (MJ/d)
1	-8.9	6.9	20.0	9.49	7.35	12.9	5,919	55.8	23.4	6.0	-33.6
2	-10.5	6.0	17.3	9.63	6.75	14.3	6,083	56.0	29.5	5.5	-20.5
3	-3.6	7.1	20.2	9.75	9.75	10.0	8,776	56.2	55.1	6.5	30.7
4	2.8	8.7	22.4	10.13	10.13	10.0	8,240	56.1	51.3	7.3	10.1
5	10.2	10.9	24.6	10.05	10.05	10.0	8,182	56.6	56.8	6.2	42.9
6	15.6	13.8	27.3	8.79	8.79	10.0	7,916	57.4	58.1	5.0	43.2
7	15.3	14.3	27.5	9.37	9.14	10.2	6,949	58.1	59.7	5.6	28.7
8	20.3	18.0	29.5	9.69	7.27	13.3	6,537	59.7	59.1	4.8	33.2
9	15.2	16.8	27.8	9.47	7.10	13.3	6,128	60.3	54.6	5.2	19.0
10	10.2	12.4	25.1	8.57	6.50	13.2	6,053	63.9	49.7	5.9	8.3
11	2.6	7.9	21.6	9.17	9.09	10.1	6,388	59.6	34.9	7.0	-24.4
12	-6.0	7.9	20.6	9.55	9.55	10.0	7,573	56.3	42.4	8.1	-18.4
Ave.	6.3	10.9	23.7	9.47	8.46	11.4	7,062	58.0	48.7	6.1	9.9

\* Heat exchange tank

原料の投入、移送、攪拌、温水の循環、制御等に用いた電力量は月によりややバラツキが見られたが、平均で6.1kWh/dであった。さらに実験プラントでの消費電力量を消費熱量に換算し、プラントから生ずる熱量を求めた。冬期間11~2月では産出熱量が負となったものの、年平均では1日当り9.9MJ(2,371kcal)の熱量が産出されることが明かとなった。

供試実験プラントは発酵槽を野外に設置したため、地下埋設型などと比べ放熱が多いこと、また、スラリーの移送にポンプを多数使っていることから、消費電力量が多い。実用プラントではこれらの点を改良することにより、スケールメリットが相当出るものと考えられる。また、生成消化ガスを用いて、発電を行う際、エンジンからの排熱を回収するコ・ジェネレーションシステムを採用することにより熱効率は向上すると考えられ(Zhangら, 1990)、実用規模にスケールアップした際、北海道のような寒冷地においてもメタンガス生産施設の周年運転が可能であると考えられる。

#### 第4節 原料の性状とガス生成

発酵槽の運転状態を表すパラメータとして生成消化ガス量とメタン濃度の他に、消化液の有機物濃度、pH値、揮発性有機酸量、窒素量などがある。生成消化ガス量とメタン濃度は発酵過程の結果として現れるのに対して、pH値、揮発性有機酸量は発酵状態のモニター、ガス生成を予測する手段として有効である。

乳牛糞尿のメタン発酵原料としての特性は第2章で述べたが、本節では供試施設の運転データならびに供給原料と消化液の有機物濃度、

pH、揮発性有機酸、窒素の分析値の解析結果からこれら供給原料の性状とガス生成の関係について述べる。

## 1. 解析の方法

供給原料および消化液の分析値は1986年3月22日から1988年9月21日の81組のデータを用いた。サンプルは1週間毎に糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽（入口、中央、出口）の5ヶ所から採取した。対応する生成消化ガス量とメタン濃度は、サンプリング前までの24時間の生成消化ガス量の累積値とサンプリング直前の生成消化ガスのメタン濃度を用いた。

### 1.1 有機物濃度

投入原料ならびに消化液の有機物濃度は発酵状態を把握する最も重要なパラメーターであり、発酵槽への原料投入量は有機物負荷で表される。そこで糞尿溝から採取した投入原料サンプルの固形分濃度( $T_s$ , %)と、有機物濃度( $V_s$ , %)の関係について回帰分析を行った。また、糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽（入口、中央、出口）の5ヶ所から採取したサンプルの有機物濃度について平均値、標準偏差、範囲を示し、供試プラントの有機物分解特性を求めた。

### 1.2 揮発性有機酸

生成されるメタンガスの多くは、揮発性有機酸を基質とするため、揮発性有機酸濃度とその組成は発酵状態に大きな影響を与える。そこで、メタン生成に最も重要な投入原料と排出消化液の揮発性総有機酸量( $T_{VA}$ )、プロピオン酸と酢酸の比率(P/A)、酢酸量( $A_A$ )を求め

た。さらに固形分濃度( $T_s$ , %)と揮発性総有機酸量( $T_{UA}$ , mg/l)の関係について回帰分析を行った。また、糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽(入口、中央、出口)の5ヶ所から採取したサンプルの揮発性総有機酸量について平均値、標準偏差、範囲を示し、供試プラントの有機酸分解特性を求めた。

さらに、他の揮発性有機酸についても解析を行い、総揮発性有機酸に占める酪酸の割合( $B_A/T_{UA}$ )と、有機物投入当りのメタンガス生成量( $\beta$ )の関係について示した。

### 1.3 pH値

メタン発酵においてpHは重要な条件のひとつである。第1段の低分子化は多様な細菌が関与しているため、それほどpHの影響を受けない。第2段のガス化は絶対嫌気性菌のみの活動となるため、pHは発酵の状態を表す重要な指標となる。そこで、糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽(入口、中央、出口)の5ヶ所から採取したサンプルのpH値について平均値、標準偏差、範囲を示し、揮発性総有機酸量との関係を求めた。

### 1.4 窒素

一般に密閉されたメタン発酵槽内で窒素は生成または分解されることはなく、有機態の窒素(Organic nitrogen)は無機化しアンモニア態に変化するが、総窒素(ケルダール窒素,  $T_{KN}$ )に影響を及ぼさない(Cobbら, 1990)。そこで、菌体の流出の程度を推定するために投入原料中の窒素量( $T_{KNin}$ , mg/l)と排出消化液の窒素量( $T_{KNout}$ , mg/l)の比率( $N_R$ )を次式で求めた。

$$N_R = T_{KNin} / T_{KNout} \quad (4.9)$$

また、投入原料の固形分濃度と総窒素量の関係について回帰分析を行った。さらに糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽（入口、中央、出口）の5ヶ所から採取したサンプルの投入原料中の総窒素に占めるアンモニア態窒素の割合について平均値と、標準偏差、範囲を求めた。

## 2. 結果と考察

### 2.1. 有機物濃度

糞尿溝から採取した投入原料の固形分濃度 ( $T_s$ , %) と有機物濃度 ( $V_s$ , %) の関係を図4.22に示す。固形分濃度と有機物濃度は固形分濃度7.32~10.75%の範囲で強い正の相関を示し ( $p < 0.001$ )、これらの関係から次の回帰式を求めた。

$$V_s = 0.806 \cdot T_s - 0.153 \quad (4.10)$$

$$r = 0.95$$

すなわち、試料を105℃、24時間で乾燥させた後の乾物質量から求める固形分濃度と灰化後の灰分質量は比例関係にあり、原料の有機物濃度は固形分濃度を求めることにより非常に高い精度で予測できることが明かとなった。

糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽（入口、中央、出口）の5ヶ所から採取したサンプルの有機物濃度を箱ひげ図 (Box and Whisker Chart) を用いて図4.23に示す。箱ひげ図はTukeyによって提案された図式で、平均値とともに、標準偏差、範囲を同時に表示する場合用いられる (脇本ら, 1984)。

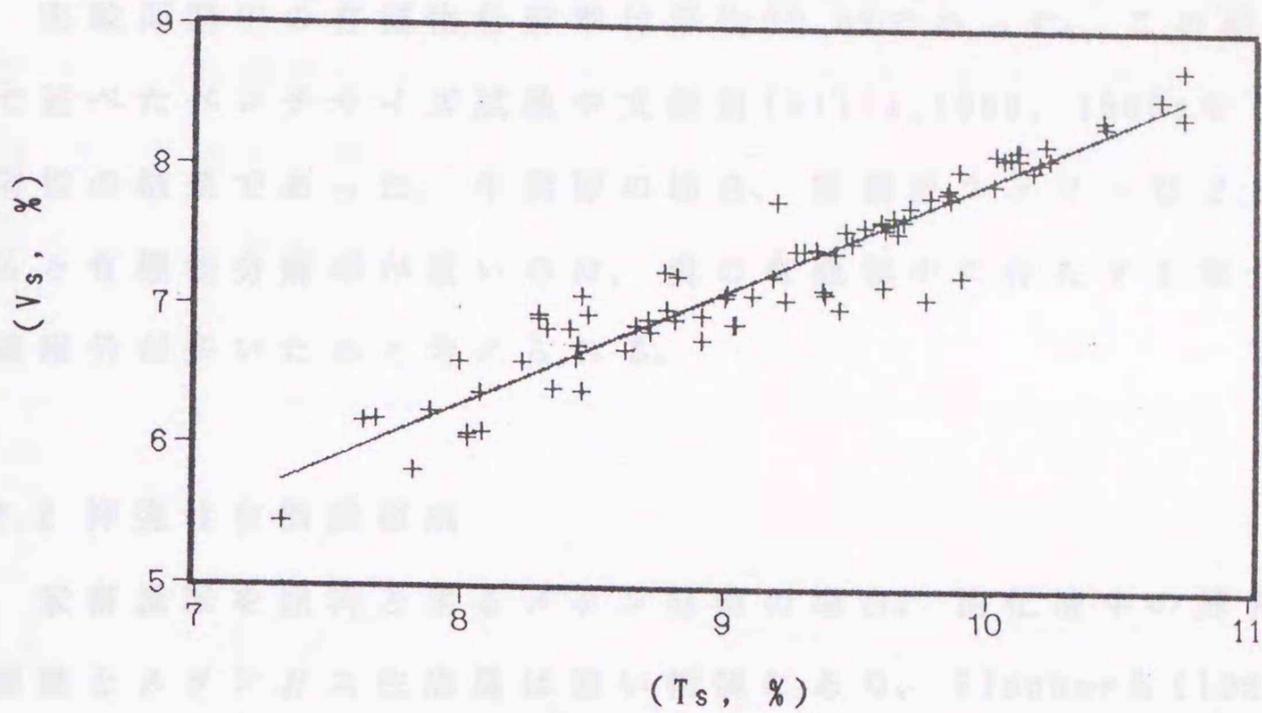


Fig. 4.22 Volatile solid concentration(Vs) and total solids concentration(Ts) for dairy manure slurry

図 4.22 投入原料の固形分濃度(Ts, %)と有機物濃度(Vs, %)の関係

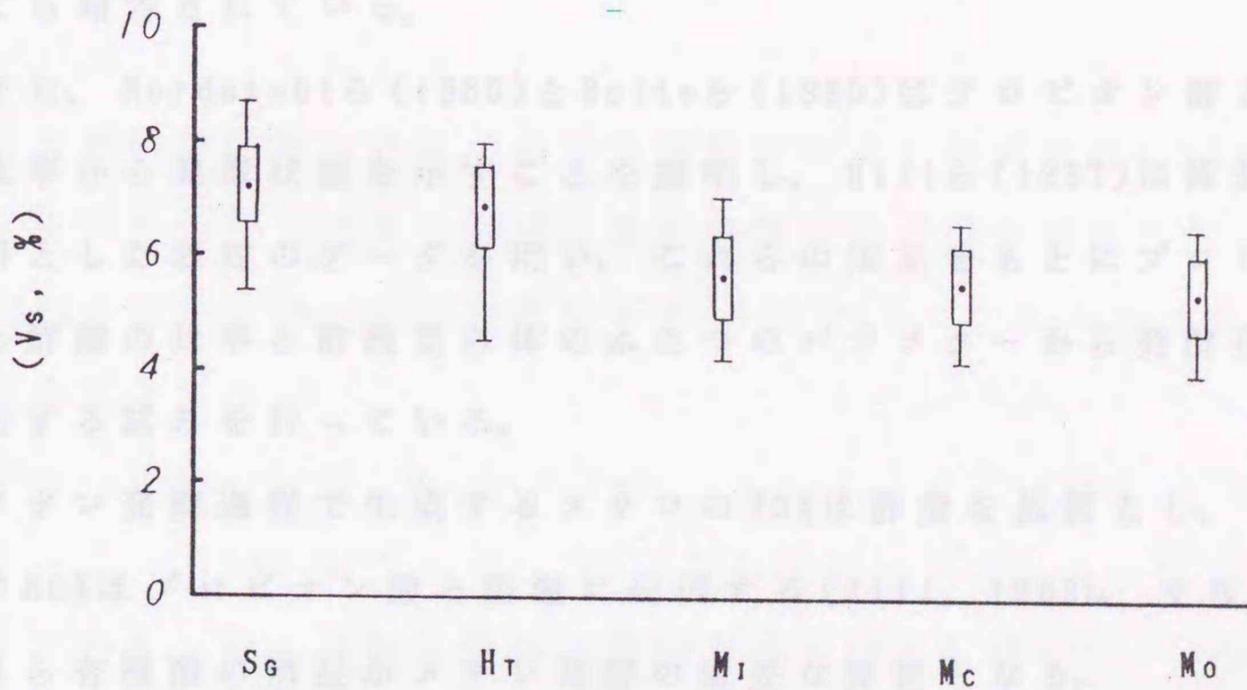


Fig. 4.23 Volatile solid concentration at slurry gutter(Sg), heat exchange tank(Hr), methane digester inlet(M1), center(Mc) and outlet(Mo)

図 4.23 発酵槽各部の原料有機物濃度

実験期間中の有機物分解率は平均22.8%であった。この値は第3章で述べたベンチサイズ試験や文献値(Hills, 1980, 1980aなど)とほぼ同様の結果であった。牛糞尿の場合、豚糞尿スラリーなどと比較すると有機物分解率が低いのは、糞の有機物中に存在する難分解性の繊維分が多いためと考えられる。

## 2.2 揮発性有機酸組成

家畜糞尿を原料とするメタン発酵の場合、消化液中の揮発性有機酸量とメタンガス生成量は強い相関にあり、Fischerら(1981)は豚糞尿を原料とした実験でプロピオン酸の増加は発酵を阻害すると報告している。また、Hashimotoら(1978)とVarelら(1977)は同様の傾向が肉牛糞尿にも見られると報告している。さらに、この傾向は下水汚泥(Kaspar, 1978)や食品加工廃棄物(Van den Bergら, 1977)についても報告されている。

また、Nordstebtら(1985)とBolteら(1985)はプロピオン酸と酢酸の比率から発酵状態を示すことを提唱し、Hillら(1987)は豚糞尿を原料とした既知のデータを用い、これらの知見をもとにプロピオン酸と酢酸の比率と酢酸量自体のふたつのパラメーターから発酵状態を推測する試みを行っている。

メタン発酵過程で生成するメタンの70%は酢酸を基質とし、この酢酸の60%はプロピオン酸と酪酸に起因する(Hill, 1982)。すなわち、これら有機酸の消長がメタン発酵の重要な要素となる。

メタン発酵槽内(入口、中央、出口)の揮発性総有機酸量(TVA)の経時変化を図4.24に示す。入口での揮発性総有機酸量は原料の投入によって上昇し、その影響は中央の揮発性総有機酸量にも多少現れ

たが、出口での投入による影響は認められなかった。すなわち、供試メタン発酵槽の入口、中央、出口の揮発性総有機酸量の経時変化は2節4で述べた温度変化と同様の傾向を示し、供試発酵槽の構造は投入による影響を緩和することが明かとなった。

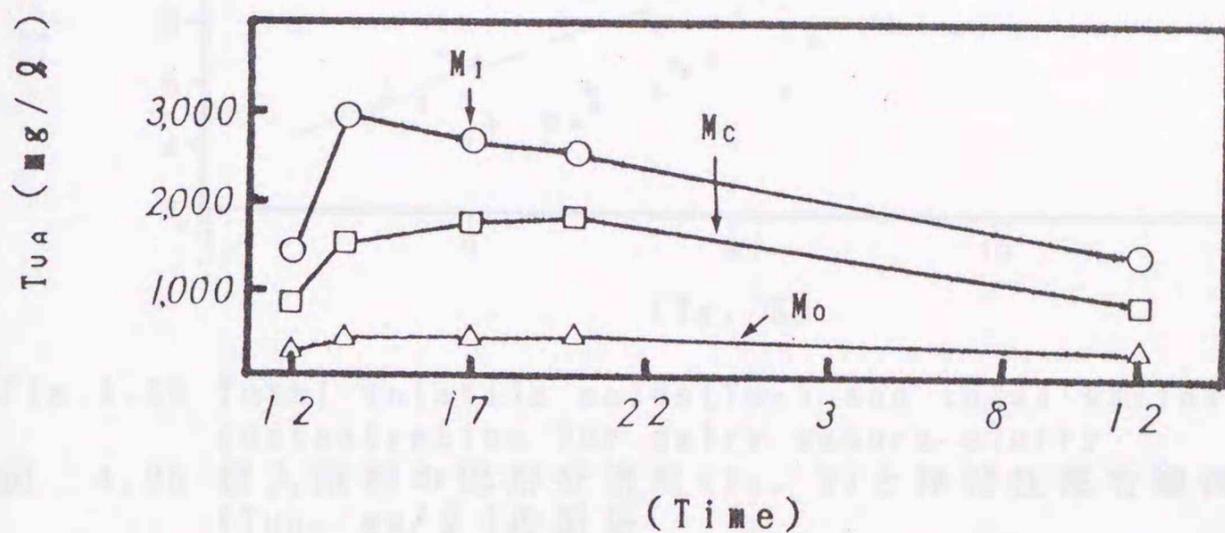


Fig 4.24 Changes in total volatile acids(TVA) at methane digester inlet(MI), center(MC) and outlet(MO)

図 4.24 メタン発酵槽各部の揮発性総有機酸量(TVA)の経時変化

投入原料の固形分濃度と揮発性総有機酸量の関係を図4.25に示す。投入原料の固形分濃度と揮発性総有機酸量は固形分濃度7.32~10.75%の範囲で強い正の相関にあり( $p < 0.001$ )、これらの関係から次の回帰式を求めた

$$TVA = 1,562 \cdot Ts - 7,257 \quad (4.11)$$

$$r = 0.66$$

すなわち、投入原料の固形分濃度が高くなるに従い、メタンの基質となる揮発性総有機酸量が増加することが明かとなった。

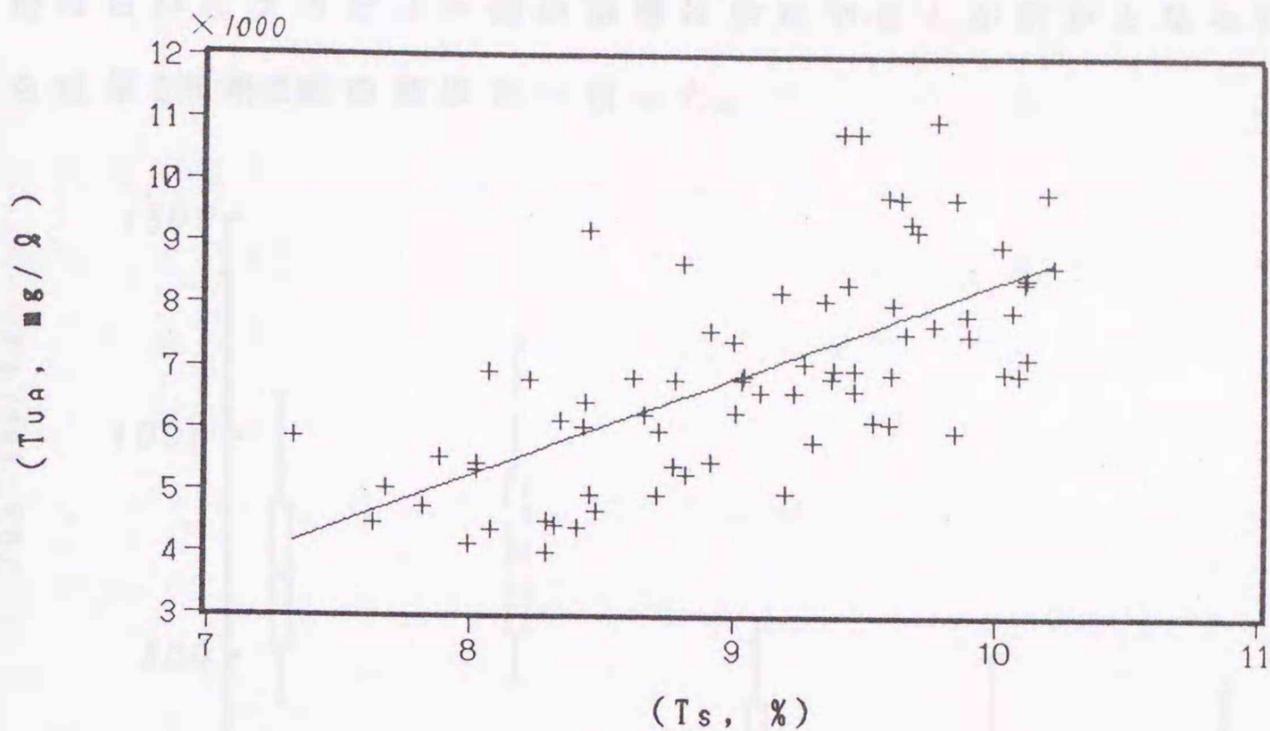


Fig 4.25 Total volatile acids(TVA) and total solids(Ts) concentration for dairy manure slurry

図 4.25 投入原料の固形分濃度(Ts, %)と揮発性総有機酸量(TVA, mg/g)の関係

図 4.26 に糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽から採取したサンプルの揮発性総有機酸量を箱ひげ図を用いて示す。総揮発性有機酸量は熱交換槽でやや増加し、メタン発酵槽で急激に減少した。これは熱交換槽が酸発酵槽としても機能し、メタン発酵槽との間で相分離が起こり、2相式による発酵が行われたものと考えられる。

表 4.8 に実験期間中の排出消化液の酢酸量ならびにプロピオン酸と酢酸の比率(P/A)を示す。メタン発酵後の排出消化液の揮発性総有機酸量は1,500mg/g以下が全体の80%で酢酸の蓄積は認められなかった。また、プロピオン酸と酢酸の比率(P/A)は0.4以下が全体の75%を占め、プロピオン酸の蓄積は認められなかった。これらの結果は前述の Hillら(1987)の豚糞尿を用いた解析結果より低い値となった。すなわち、乳牛糞尿の場合、高濃度原料による高負荷運転を行っても酢

酸ならびにプロピオン酸の蓄積は少ないことが明かとなった。これらは第2章第2節の結果と一致した。

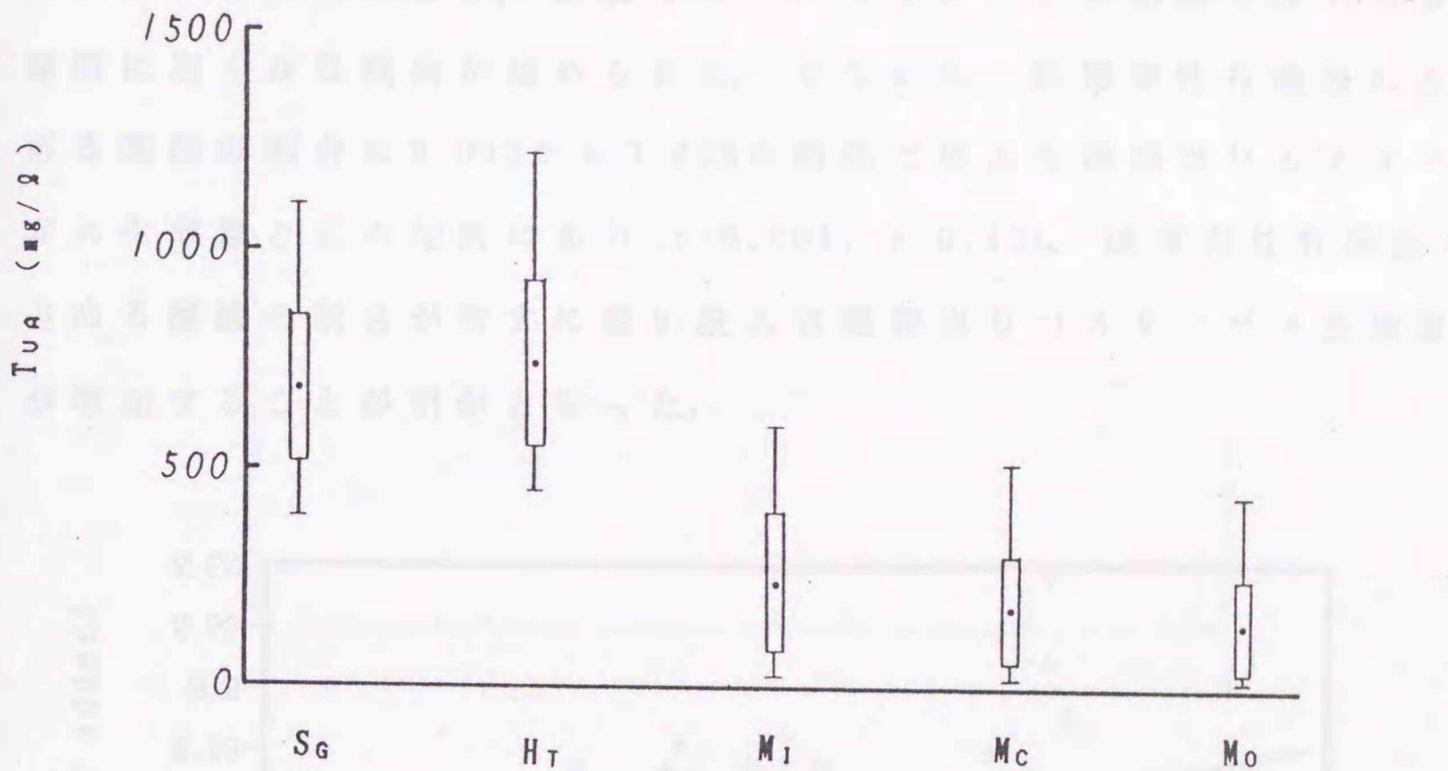


Fig 4.26 Total volatile acids concentration(TUA) at slurry gutter(SG), heat exchange tank(HT), methane digester inlet(MI), center(Mc) and outlet(Mo)

図 4.26 発酵槽各部の揮発性有機酸濃度(TUA)

表 4.8 揮発性有機酸量の度数分布

Table 4.8 Acetic acid level and Pro/Ace ratio in 81 data

Acetic acid concentration mg/l	#	%	P/A ratio	#	%
>500	26	32	>0.2	49	60
1000	45	55	0.4	61	75
1500	65	80	0.6	66	81
2000	73	90	0.8	72	88
2500	81	100	1 ≤	81	100

総揮発性有機酸に占める酪酸の割合と有機物投入当りのメタンガス生成量の関係を図4.27に示す。総揮発性有機酸に占める酪酸の割合は給餌の影響により、良質のコーンサイレージが給餌されている期間に高くなる傾向が認められた。すなわち、総揮発性有機酸に占める酪酸の割合は0.04%から0.22%の範囲で投入有機物当りのメタンガス生成量と正の相関にあり ( $p < 0.001$ ,  $r = 0.45$ )、総揮発性有機酸に占める酪酸の割合が増すに従い投入有機物当りのメタンガス生成量が増加することが明かとなった。

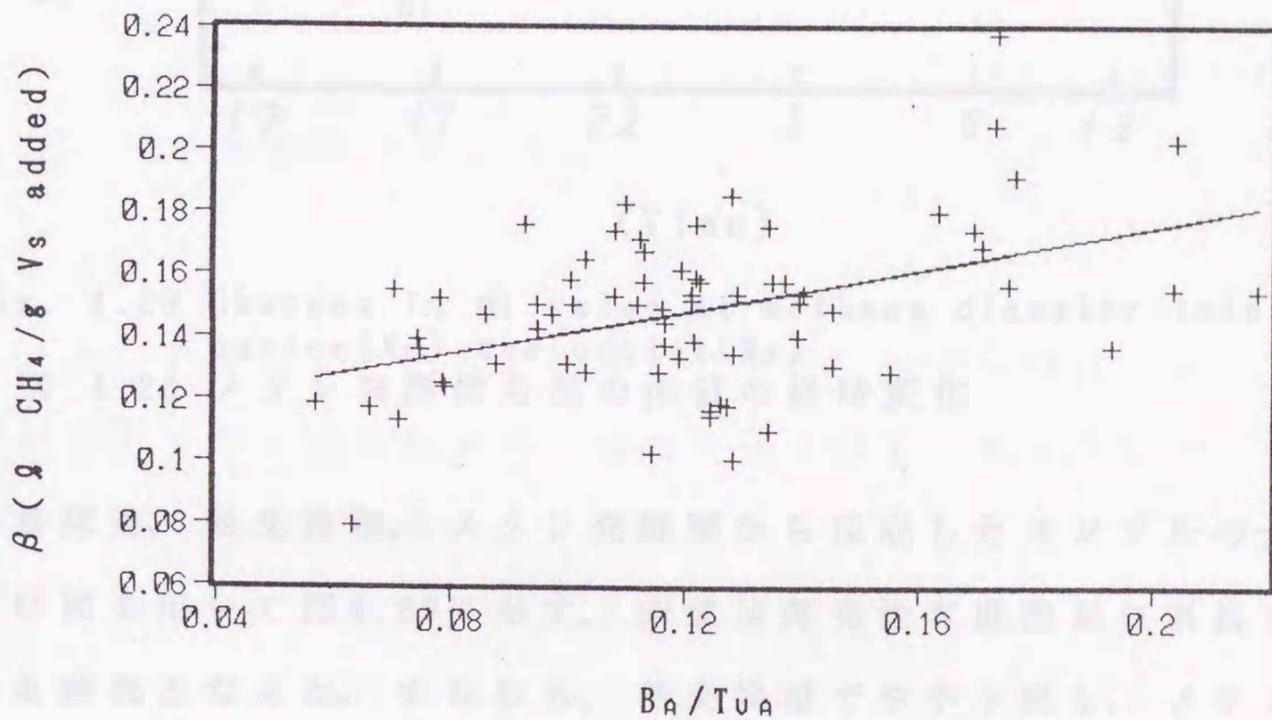


Fig. 4.27 Butyric to total volatile acids ratio ( $B_A/T_{VA}$ ) and  $\beta$  (g  $CH_4$ /g Vs added)

図 4.27 総揮発性有機酸に占める酪酸の割合 ( $B_A/T_{VA}$ ) と有機物投入当りのメタンガス生成量 ( $\beta$ ) の関係

### 2.3 pH 値

メタン発酵槽内の pH の経時変化を図 4.28 に示す。入口での pH 値は原料の投入によって下降し、その影響は遅れて中央の pH 値にも多少現れたが、出口での投入による影響は認められなかった。すなわち、pH 値は揮発性総有機酸量の経時変化を裏付ける結果となった。

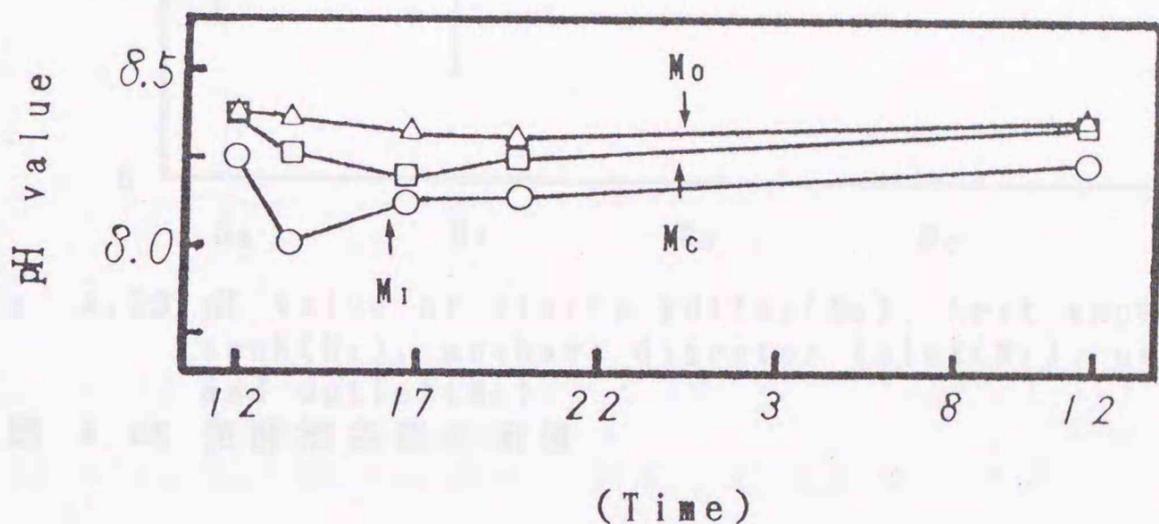


Fig. 4.28 Changes in pH value at methane digester inlet ( $M_i$ ), center ( $M_c$ ) and outlet ( $M_o$ )

図 4.28 メタン発酵槽各部の pH 値の経時変化

糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽から採取したサンプルの pH を箱ひげ図を用いて図 4.29 に示す。pH 値は揮発性有機酸量の消長を裏付ける結果となった。すなわち、熱交換槽でやや下降し、メタン発酵槽で上昇した。これは熱交換槽が酸発酵槽として機能し、pH 値は総有機酸量の増加とともに下降し、メタン発酵槽で有機酸の分解とともに上昇したものと考えられる。

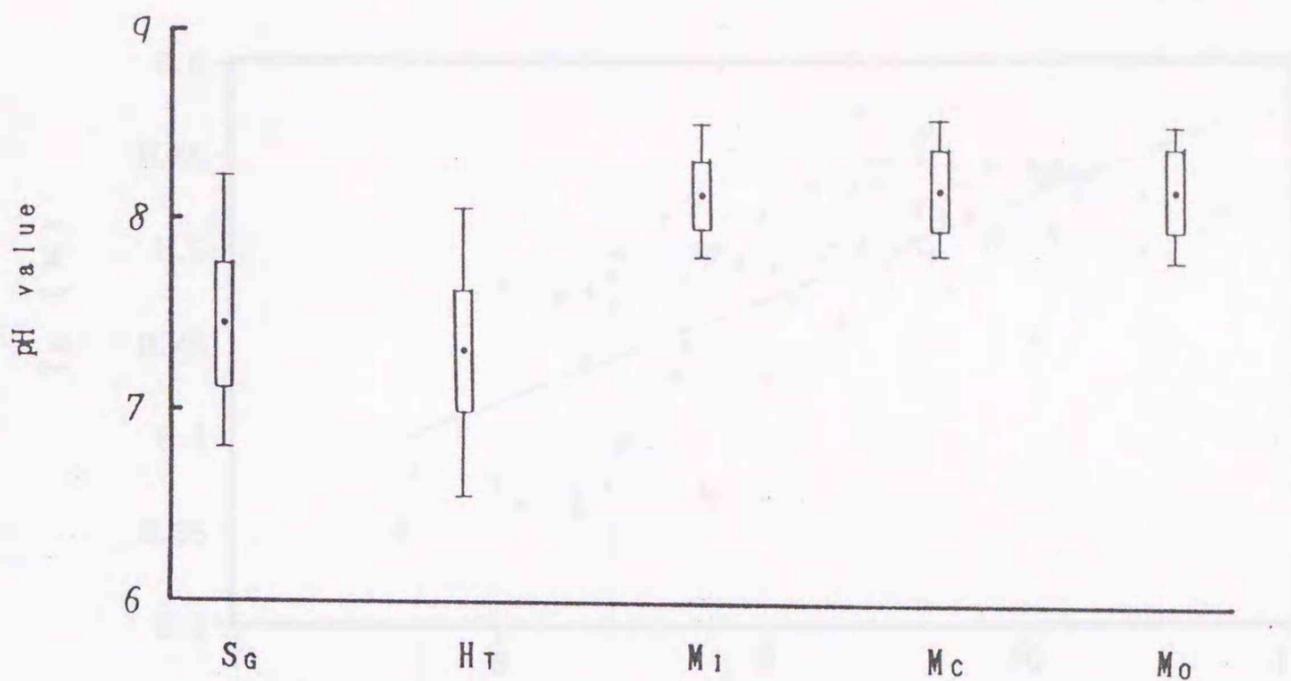


Fig. 4.29 pH value at slurry gutter(S<sub>G</sub>), heat exchange tank(H<sub>T</sub>), methane digester inlet(M<sub>I</sub>), center(M<sub>C</sub>) and outlet(M<sub>O</sub>)

図 4.29 発酵槽各部の pH 値

#### 2.4 窒素

メタン発酵槽でガス化が阻害されると、酸発酵槽で生成した有機酸が蓄積され、緩衝能が低い場合は pH の低下をもたらすが、陽イオンが大量にあると酢酸ソーダ、酢酸アンモンなどになり、pH の低下は起こらない。投入原料に窒素化合物が多いと pH の上昇が起こり、ガス化が阻害され低級脂肪酸が蓄積する。

投入原料の固形分濃度と総窒素量の関係を図 4.30 に示す。投入原料の固形分濃度と総窒素量は固形分濃度 7.32~10.75% の範囲で正の相関にあり ( $p < 0.001$ ,  $r = 0.71$ )、固形分濃度が上昇するに従い総窒素量は増加することが明かとなった。

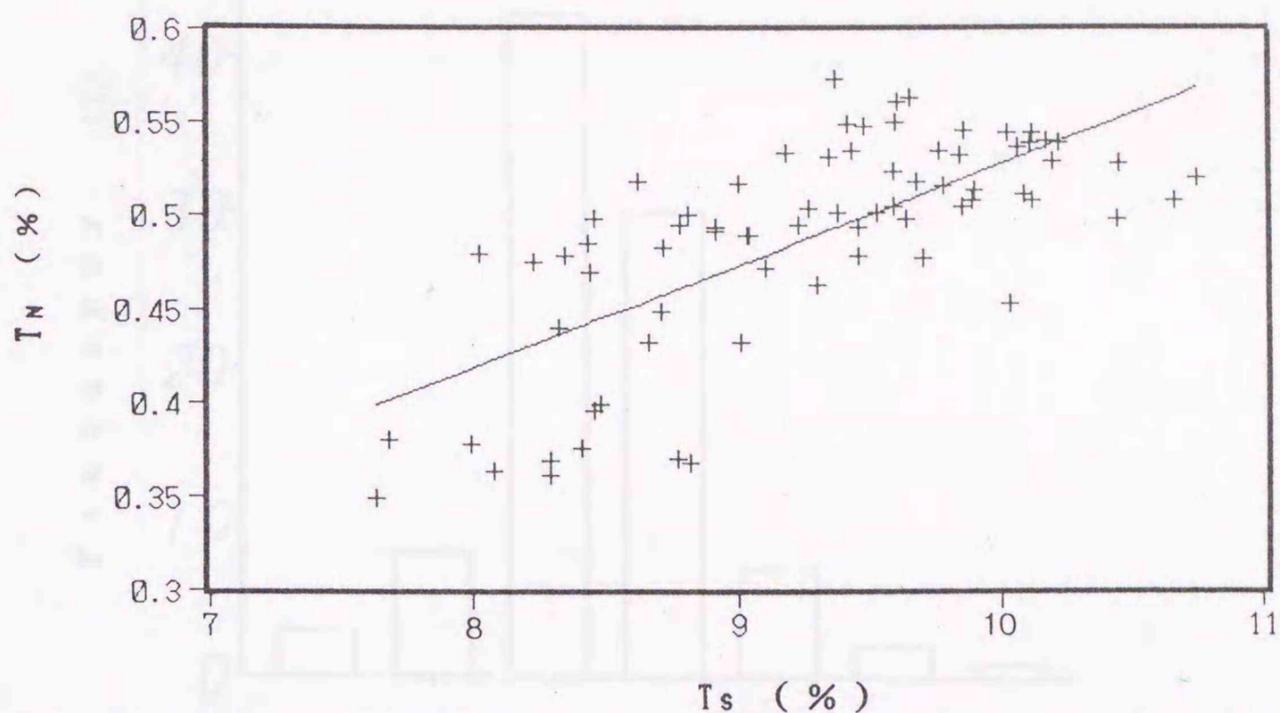


Fig. 4.30 Total nitrogen(T<sub>N</sub>) and total solids(T<sub>s</sub>) for dairy manure slurry

図 4.30 投入原料の固形分濃度と総窒素量の関係

図4.31に(4.9)式で求めた投入原料中の窒素量と排出消化液の窒素量の比率の度数分布を示す。N<sub>R</sub>値は0.9~1.1に集中し全体の74.1%を占め平均は0.99、標準偏差は0.10であった。

発酵槽は安定した状態で運転されている場合、Cobbら(1990)の考えを援用し、菌体の増殖量と死滅量が同じであるとする、安定した状態ではNR=1、NR<1では菌体量が減少し、NR>1では菌体量が増加していると考えた。すなわち、菌体量を窒素量から間接的に推定すると高濃度高負荷運転においても有機物負荷3.19から11.0g/ℓ/d、平均滞留時間7から20日の範囲で菌体の流出は発生しないことが明らかとなった。

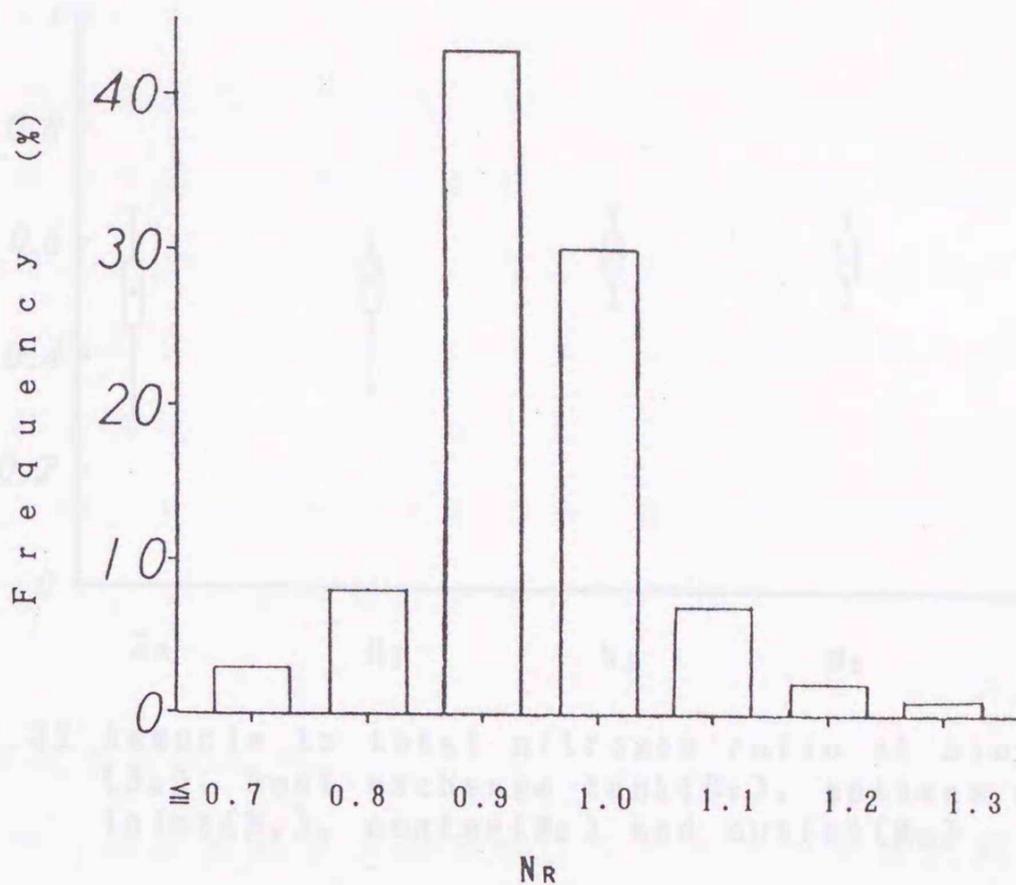


Fig 4.31  $N_R$  ratio

図 4.31 投入原料と排出消化液の窒素量の比率( $N_R$ )の度数分布

糞尿溝、熱交換槽、メタン発酵槽から採取したサンプルの投入原料中の総窒素に占めるアンモニア態窒素の割合を箱ひげ図を用いて図4.32に示す。糞尿溝ならびに熱交換槽では総窒素に占めるアンモニア態窒素の割合は広い範囲にあったが、メタン発酵槽ではやや上昇し、バラツキは認められなかった。すなわち、高濃度高負荷運転においても有機態の窒素は無機化しアンモニア態に変化することが明かとなった。

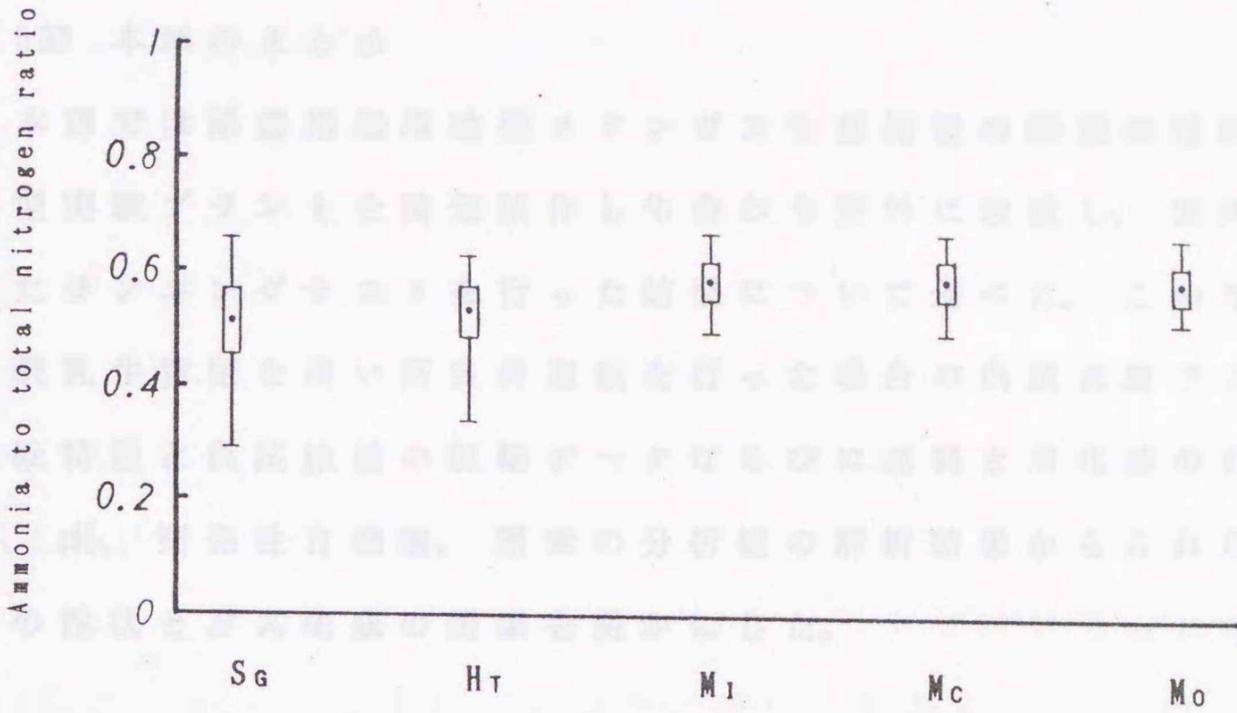


Fig 4.32 Ammonia to total nitrogen ratio at slurry gutter (Sg), heat exchange tank(H<sub>T</sub>), methane digester inlet(M<sub>1</sub>), center(M<sub>c</sub>) and outlet(M<sub>o</sub>)

## 第5節 本章のまとめ

本章では酪農用寒冷地型メタンガス生産施設の開発を目的として小型実験プラントを開発試作し牛舎わき野外に設置し、実用化に向けたランニングテストを行った結果について述べた。このなかで無希釈乳牛糞尿を用い高負荷運転を行った場合の供試実験プラントの運転特性と供試施設の運転データならびに原料と消化液の有機物濃度、pH、揮発性有機酸、窒素の分析値の解析結果からこれら投入原料の性状とガス生成の関係を明かにした。

### 1. 高負荷時の運転特性

有機物負荷と発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量は比例関係にあり、有機物負荷3.19から11.0g/ℓ/d、平均滞留時間7から20日の範囲で正の相関を示し(P<0.001)、次式が得られた。

$$V_v = 0.115 \cdot L_R + 0.228$$

$$r = 0.79$$

また、投入量が減少し平均滞留時間が長くなるに従い発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量は減少し、原料固形分が7.5~10.5%の場合平均滞留時間と発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量は負の相関を示した(P<0.001)。有機物投入当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が長くなるに従い増加し、平均滞留時間と有機物投入当りのメタンガス生成量は正の相関を示した(P<0.001)。

以上の結果より、供試施設のメタンガス生成量は有機物負荷3.19から11.0g/ℓ/d、平均滞留時間7から20日の範囲で有機物負荷に比例し、有機物負荷8g/ℓ/d以上の高負荷運転が可能であることが明らかとなった。

## 2. 投入方法とガス生成パターン

一括投入の場合、投入直後入口温度は著しく低下し回復に時間を要したが、分割投入の場合大きな温度変化がないことが明かとなった。投入方法の違いによる発生ガス量に差は認められなかったが、消化ガス中のメタン濃度に差が認められた。すなわち、分割投入の場合消化ガス中のメタン濃度はわずかながら高くなる傾向が認められた。

一括投入の場合原料投入直後、消化ガス生成量は急激に増加し、約2時間でピークに達し、その後は緩やかに減少した。メタン濃度は消化ガス生成量の増加と共に下降した後、消化ガス生成量の減少と共に元のレベルまで戻るといふ発生パターンを繰り返したのに対して分割投入の場合原料投入直後、消化ガス生成量はやや増加するが、速やかに元のレベルに戻る発生パターンを繰り返した。メタン濃度はほぼ一定の値を示し原料投入の影響は認められなかった。

## 3. 実験プラントの熱収支

発酵槽からの放熱量は外気温と発酵槽の温度差が大きくなる冬期ほど増大した。厳冬期のプラントからの放熱量は盛夏期の約35%増であった。1日当りの発酵槽からの放熱量を $Q_f$ (kcal)とすると、外気温と発酵槽の温度差 $\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )との間には次の回帰式が成立し、有意な正の相関( $p < 0.01$ )が見られた。

$$Q_f = 4,028 + 112 \cdot \Delta T$$

$$r = 0.84$$

供試メタン発酵槽の総括伝熱係数は発泡ウレタンによる吹き付け断熱の効果により年間を通して低い値を示し、平均で $0.60\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ で

あった。また、熱交換槽の設置によって原料加温熱量は夏期で約50%、冬期で約30%減少し、1日当り約16.7MJの原料加温熱量が節減されることが明かとなった。

年間を通して消費熱量に占める原料加温熱量は約44%と従来のプラントに比べ低い値となり熱交換槽による原料加温の効果が明らかとなった。消化ガスの正味生成量は総消化ガス生成量の平均48.7%でその内冬期は約30%、夏期は約60%と年間を通してガス生産が可能であることが明らかとなった。

原料の投入、移送、攪拌、温水の循環、制御等に用いた電力量は月によりややバラツキが見られたが、平均で6.1 kWh/dであった。

#### 4. 原料の性状とガス生成

固形分濃度と有機物濃度は固形分濃度7.32~10.75%の範囲で強い正の相関を示し( $p < 0.001$ )、これらの関係から次の回帰式を求めた。

$$V_s = 0.806 \cdot T_s - 0.153$$

$$r = 0.95$$

すなわち、原料の有機物濃度は固形分濃度を求めることにより非常に高い精度で予測できることが明かとなった。

投入原料の固形分濃度と揮発性総有機酸量は固形分濃度7.32~10.75%の範囲で強い正の相関にあり( $p < 0.001$ )、これらの関係から次の回帰式を求めた

$$T_{VA} = 1,562 \cdot T_S - 7,257$$

$$r = 0.66$$

すなわち投入原料の固形分濃度が高くなるに従い、メタンの基質となる揮発性総有機酸量が増加することが明かとなった。

総揮発性有機酸量は熱交換槽でやや増加し、メタン発酵槽で急激に減少した。これは熱交換槽が酸発酵槽としても機能したためでメタン発酵槽との相分離が起こり、2相式による発酵が行われたことが明かとなった。

排出消化液の揮発性総有機酸量は $1,500\text{mg}/\ell$ 以下が全体の80%で酢酸の蓄積は認められなかった。また、プロピオン酸と酢酸の比率(P/A)は0.4以下が全体の75%を占め、プロピオン酸の蓄積は認められなかった。すなわち、乳牛糞尿の場合、高濃度原料による高負荷運転を行っても酢酸ならびにプロピオン酸の蓄積は少ないことが明かとなった。

総揮発性有機酸に占める酪酸の割合は投入有機物当りのメタンガス生成量と正の相関にあり( $p < 0.001$ ,  $r = 0.45$ )、総揮発性有機酸に占める酪酸の割合が増すに従い投入有機物当りのメタンガス生成量が増加することが明かとなった。

原料の固形分濃度と総窒素量は固形分濃度7.32~10.75%の範囲で正の相関にあり( $p < 0.001$ ,  $r = 0.71$ )、固形分濃度が上昇するに従い総窒素量は増加することが明かとなった。

投入原料中の窒素量と排出消化液の窒素量の比率(NR)は0.9~1.1に集中し全体の74.1%を占め平均は0.99、標準偏差は0.10であった。すなわち、菌体量を窒素量から間接的に推定すると高濃度高負荷運転においても有機物負荷 $3.19$ から $11.0\text{g}/\ell/\text{d}$ 、平均滞留時間7から20日の範囲で菌体の流出は発生しないことが明かとなった。

以上の結果より、供試発酵槽ならびに熱交換槽は投入による影響を緩和する効果が明かとなった。また、供試プラントを実用規模に

スケールアップした際、寒冷地においてもガス生産を行う周年運転が可能であることが明かとなった。

### 1. 概要

従来、天然ガスの生産は、地質学的に有利な地域に限られていた。しかし、近年、天然ガスの生産技術の進歩により、寒冷地においても天然ガスの生産が可能となった。本論文では、寒冷地における天然ガスの生産技術の進歩について、その背景と現状を調査し、今後の展望を考察する。

天然ガスの生産には、地質学的な条件だけでなく、経済的な条件も重要である。寒冷地では、天然ガスの生産コストが高くなる傾向がある。しかし、近年、天然ガスの生産技術の進歩により、寒冷地における天然ガスの生産コストが低下している。本論文では、寒冷地における天然ガスの生産コストの低下要因を調査し、今後の展望を考察する。

寒冷地における天然ガスの生産には、地質学的な条件だけでなく、経済的な条件も重要である。寒冷地では、天然ガスの生産コストが高くなる傾向がある。しかし、近年、天然ガスの生産技術の進歩により、寒冷地における天然ガスの生産コストが低下している。本論文では、寒冷地における天然ガスの生産コストの低下要因を調査し、今後の展望を考察する。

## 第5章 実用規模メタンガス

### 生産施設の設計と熱収支の試算

#### 第1節 本章の目的

家畜糞尿を対象とした大型の発酵槽では、原料の液温が低いと投入原料が槽低部に停滞し槽内の液温が不均一になり、メタン菌との接触が不十分となるなど原料投入と液の移送、攪拌に関する技術的課題が多い。また、寒冷地では冬期、回収した消化ガスの熱量が原料の加温と発酵槽の温度維持に必要な熱量より多くなければならないため、原料加温の効率化や発酵槽の保温が重要となる。さらに酪農家に設置する施設は保守管理が容易で、装置構造が単純で安価である必要がある。

消化ガスの利用は燃焼利用が最も効率的であるが、大型発酵槽の場合、余剰ガスを発電など動力源として用いる場合エンジンの余熱の回収（コ・ジェネレーション）が不可欠となる。豚糞尿を原料としたコ・ジェネレーション方式のメタンガス生産施設についてはネブラスカ大学（Siebenmorgenら；1988a, b）やイリノイ大学の（Northら，1987）の研究報告があるが、乳牛糞尿を対象とした研究報告は少ない。

乳牛糞尿を対象とした例としてKoelschら（1982）はニューヨーク州の酪農家でメタンガスを用いた発電を行い、負荷特性、メタンガスと空気の混合比などについて報告している。また、Coppingerら（1978）は発電実験とエンジン排熱の回収を行っている。さらにWalkerら（1984）はニューヨーク州の250頭規模の経営でのコ・ジェネレーション方式のメタンガス生産施設について経営全体の熱収支に

ついて解析を行っている。

本章では、これらの研究成果と前章までの実験結果に基づき寒冷地酪農地域で使用可能な実用規模メタンガス生産施設の基本設計と設計諸元を示し、さらにプラントの熱収支の試算を行うことを目的とした。第2節では実用規模メタンガス生産施設の設計を行い、第3節では設計した実用プラントの熱収支の試算を行った。さらに第4節では本章のまとめを行った。

## 第2節 実用規模メタンガス生産施設の設計

Fischerら(1979)は豚糞尿を対象とした実用プラントの基本設計と運転操作の指針について報告しているが、一般に乳牛糞尿を原料とした発酵施設の設計に関する研究報告は少ない。本節では、第4章で述べた小型実験プラントの結果に基づきシステムの基本構成、設計の基礎となる糞尿排泄量を示し、原料混合槽、酸発酵槽、メタン発酵槽、ガスホルダの有効容積の算出基礎ならびに施工の留意点について述べ、ケース・スタディとして乳牛100頭規模の実用プラントの設計を行う。さらに実用プラントの最適運転制御、保守管理について述べる。

### 1. 設計諸元と実用プラントの設計

#### 1.1 乳牛の糞尿排泄量

家畜糞尿処理施設の設計に当たっては、基準となる糞尿排泄量の設定が不可欠である。しかし、乳牛糞尿の処理・利用を目的として、給与飼料別、体重別、飼養形態別など、詳細に測定した例は少ない。

本来、家畜の糞尿排泄量は、飼料、環境、家畜自体のコンディションなど、さまざまな条件により大きく変動する。一般的に、糞の排泄量は給与飼料の高品質化によって減少する傾向が見られ、糞量は飼料給与量に依存する場合が多く、給与量の多い産乳時は多くなり、乾乳時は減少する。また、粗飼料よりも濃厚飼料を多く与えたほうが糞量は多くなる傾向にある。尿量は夏期が多く変動が大きいものに対して冬期は少なく変動は小さい(代永, 1991)。表5.1に糞尿処理施設の規模選定に用いる糞尿排泄量を示す。

実際の施設の設計に際してはミルクング・パーラの排水なども考慮に入れ糞尿排泄量は多めに見積る必要がある。すなわち、乳牛1日1頭当りの排泄量を50kg、ミルクング・パーラの排水を10kgとし、乳牛1日1頭当りの処理量を60kgとするのが適当であると考えられる。また、排泄直後の糞尿の約90%は水分であるため発酵槽の容積の算定には投入原料の比重を1と考え乳牛1日1頭当りの処理量を60ℓとした。

表 5.1 乳用牛の1日当り糞尿排泄量(kg)(中央畜産会, 1987)  
Table 5.1 Daily manure production from dairy cattle(kg)

	Body size	Feces	Urine	Total
Milking cow	550~650	30	20	50
Heifer	40~550	10	7.5	17.5

## 1.2 実用プラントの基本構成

実用プラントは排出消化液の排熱を利用し、投入原料の加温と酸発酵を行う2相式発酵法とする。基本構成を図5.1に概略図を図5.2と図5.3に示す。糞尿はフリーストール牛舎の自然流下式糞尿溝から調整槽に流下する。原料調整槽で攪拌と混合を行い、地下配管を経て

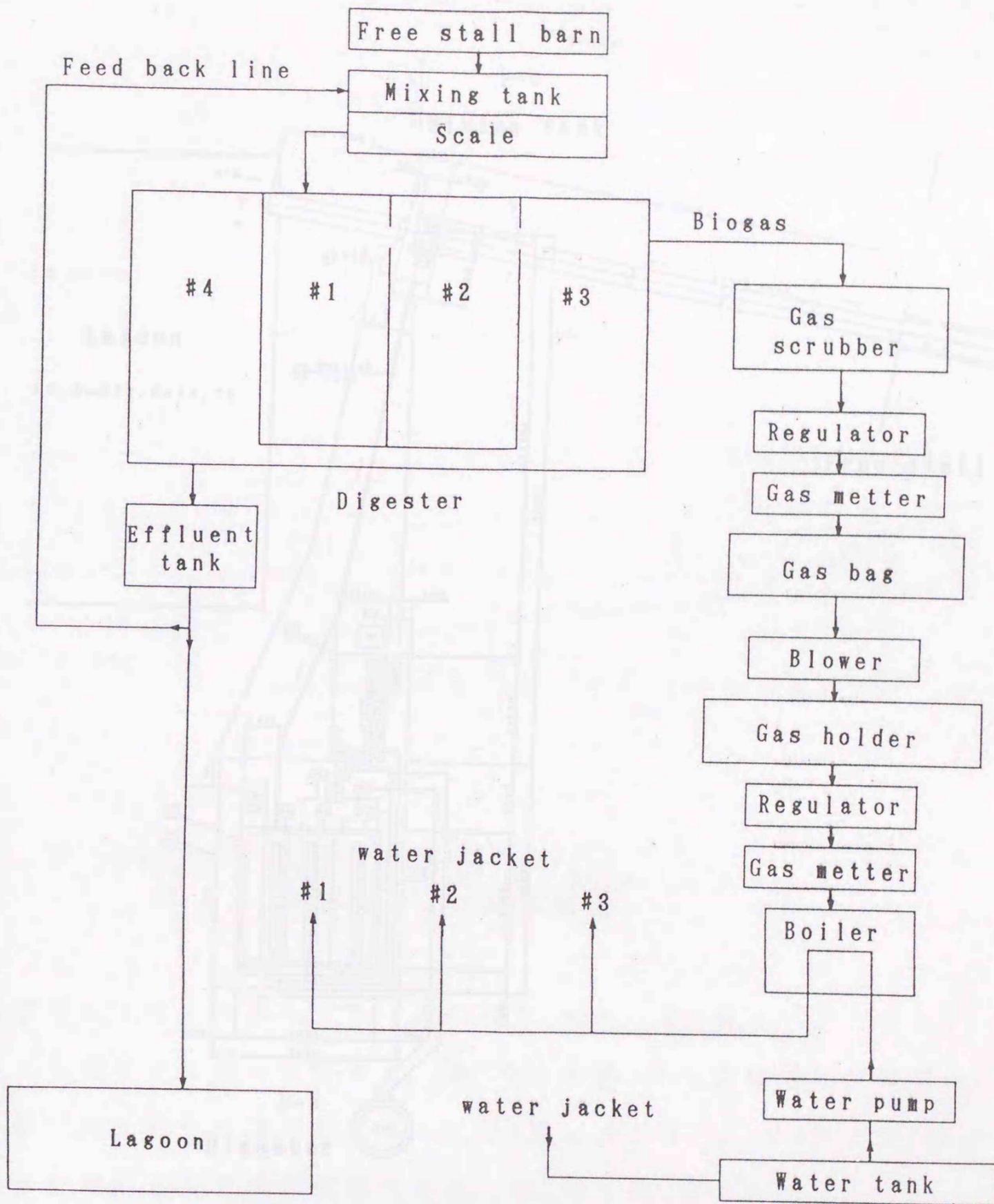


Fig.5.1 System flow of the farm scale plant  
 図 5.1 実用プラントの基本構成

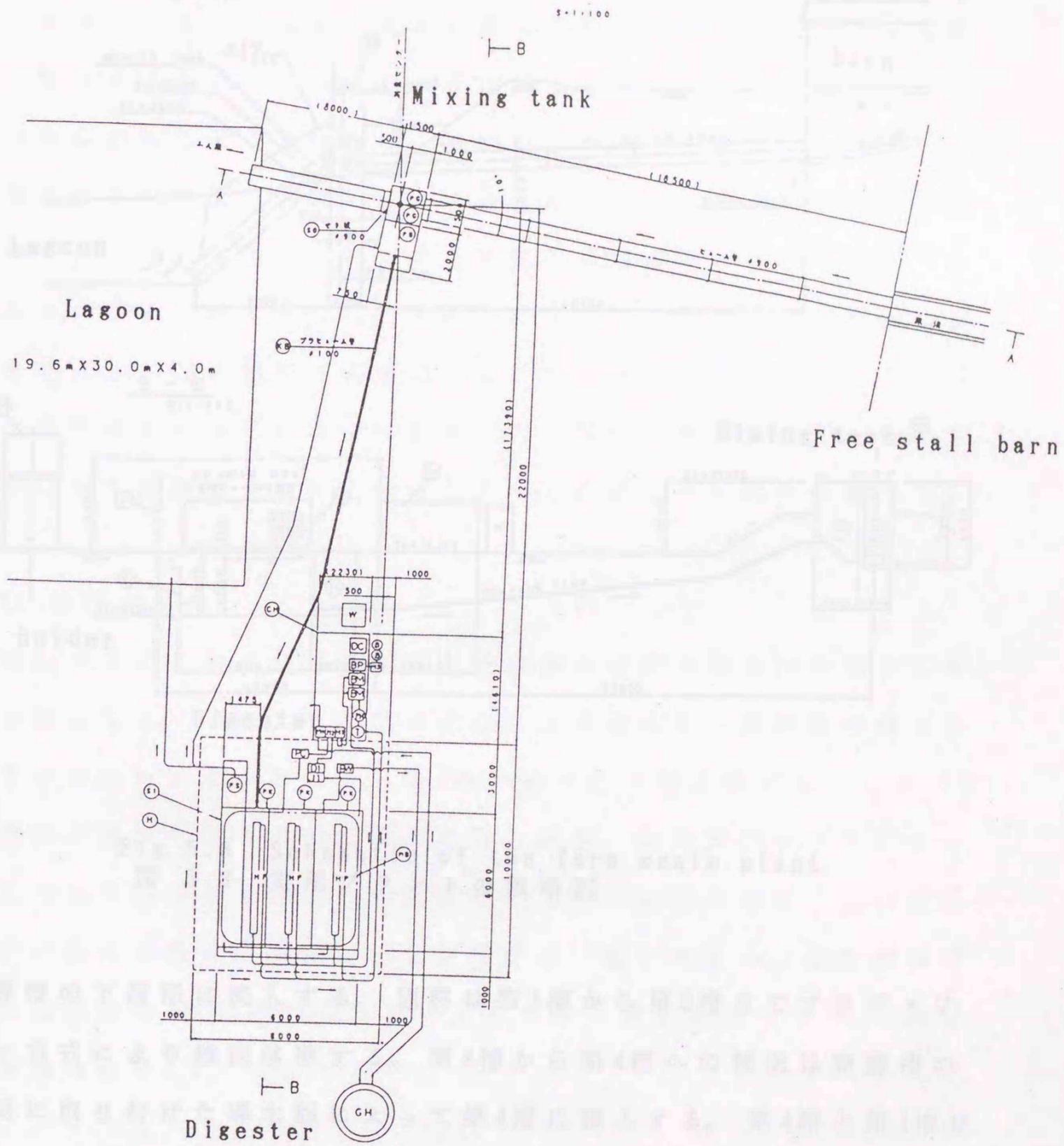


Fig 5.2 Schematic of the farm scale plant

図 5.2 実用プラントの概略図

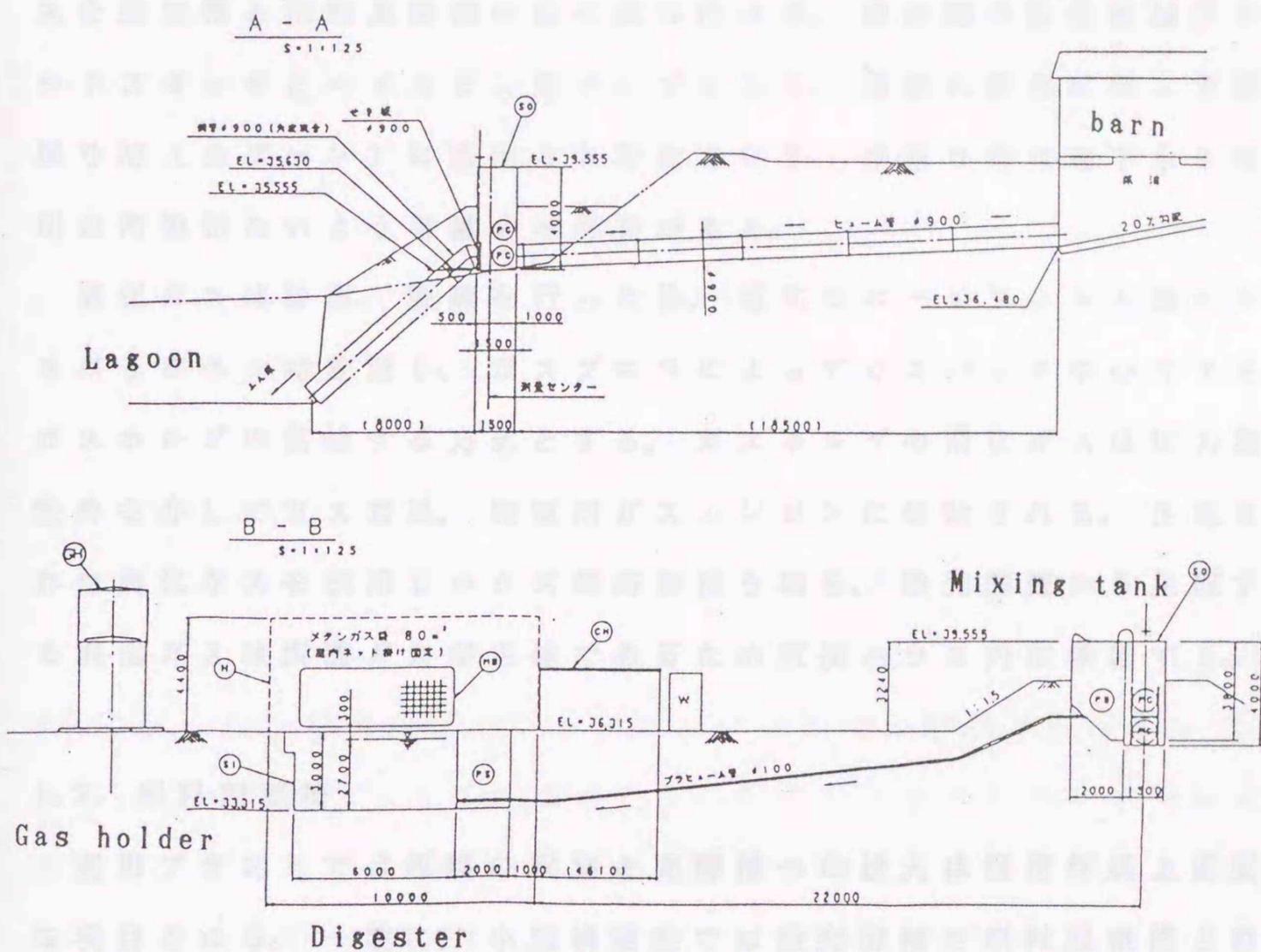


Fig 5.3 Schematic of the farm scale plant  
 図 5.3 実用プラントの概略図

発酵槽の下層部に流入する。原料は第1槽から第3槽までプラグ・フロー方式により越流移動する。第3槽から第4槽への移送は発酵槽の外側に取り付けた導水路によって第4槽に流入する。第4槽と第1槽は鉄板を境膜とした熱交換槽である。第1槽と第2槽の隔壁は厚さ50mmの断熱を行い、原料投入によるメタン発酵槽の温度低下を防ぐ。第4槽で熱交換が終わった消化液は排出槽に越流する。排出槽の消化液は活性の高いメタン菌を含むので、その一部を返送する返送ホー

スを排出槽と原料調整槽の間に取り付ける。排出槽の消化液はフロートスイッチとハイスピン型ポンプにより、液面の変化に伴って素堀り池（ラグーン）に排出され貯溜される。素堀り池は地下水や河川の汚染がないよう考慮する必要がある。

消化ガスは除湿、脱硫を行った後、塩化ビニールフィルム製のガスバックへ一時貯溜し、ガスブロワによってガスバック中のガスをガスホルダの供給する方式とする。ガスホルダの消化ガスは圧力調整弁を介してガス器具、発電用ガスエンジンに供給される。生産された消化ガスを利用しハウス栽培を行う場合、酸発酵槽から生成する消化ガスは炭酸ガスが主体であるため直接ハウス内に供給する。

### 1.3. 原料調整槽

実用プラントでは原料の収集と発酵槽への投入は管理作業上重要な項目となる。一般に、小規模施設では酸発酵槽を原料調整槽と併用させて用いる場合が多い。第4章で述べた小型実験プラントでは投入原料の混合を牛舎内の糞尿溝で行ったが、実用規模のプラントでは糞と尿の混合を目的とした調整槽の設置が必要となる。原料調整槽での攪拌は攪拌羽根による機械攪拌が一般的である。原料調整槽の有効容積は1回の原料処理量すなわち投入量が必要となり、調整槽有効容積  $V_m$  は、次式で表される。

$$V_m = V_r / n \quad (5.1)$$

$V_m$ : 原料調整槽有効容積 [ $m^3$ ]

$V_r$ : 1日の原料投入量 [ $m^3$ ]

$n$ : 投入回数

敷料を用いる牛舎では、糞がポンプによる液の移送や発酵槽内の

攪拌の支障となるため、固液分離機での分離が必要となる。原料調整槽で原料の加温を行う場合、原料の粘性が低下し、混合が容易になり、攪拌動力が減少する。この方法を採用したプラントとして豚糞尿を原料としたイリノイ大学のプラントがある(Zhangら, 1990)。

実用プラントでは原料の投入を1日1回とし(5.1)式より原料調整槽有効容積 $V_m$ を $6\text{m}^3$ とする。

#### 1.4. 酸発酵槽

酸発酵槽は可溶化槽とも呼ばれ原料を通性嫌気性菌(酸生成菌)の働きにより、投入有機物を低分子化させるために設置される。第4章で述べた小型実験プラントでは排出消化液の排熱を回収する熱交換槽として併用する方式を採用した。実用プラントにおいても排出消化液の排熱を回収し、投入原料の加温に用いる方法が望ましい。酸発酵槽の平均滞留時間を $RT_a$ とすると、酸発酵槽容積 $V_a$ は次式で示すことができる。

$$V_a = V_f \times RT_a \quad (5.2)$$

$V_a$ : 酸発酵槽容積 $[\text{m}^3]$

$V_f$ : 1日の原料投入量 $[\text{m}^3]$

$RT_a$ : 酸発酵槽の平均滞留時間 $[\text{day}]$

酸発酵槽を隔膜熱交換方式の熱交換槽として用いる場合、排出消化液側の容積を見積る必要がある。また、排出消化液側の容積は酸発酵槽容積 $V_a$ と同様あるいはそれ以上の容積とする。実用プラントでは酸発酵槽の平均滞留時間を第3章ならびに第4章の結果から2日間とし、酸発酵槽容積 $V_a$ は(5.2)式より $12\text{m}^3$ とする。

## 1.5. メタン発酵槽

### 1.5.1 発酵槽容積の算出

メタン発酵槽はメタンガス生産施設の中心となるもので、効率よくメタン発酵が進行するように槽内の流動、保温などを考慮して設計する必要がある。メタン発酵槽の素材は規模に応じて決められるが、家畜糞尿を対象とした実用規模の発酵槽ではコンクリート製、鋼板製が多く、 $30\text{m}^3$ 程度まではFRP製のタンクを用いた例がある。メタン発酵槽では発酵温度の維持が重要となるため断熱材による被覆や発酵槽を地下に埋設するなどの保温が必要となる。

メタン発酵槽を設計する場合、処理すべき廃棄物量に対して、どれだけの発酵槽容積が必要かが設計上も経済的にも重要な基礎数値となる。下水処理の場合、下水道協会の下水道施設設計指針では有機物の減少が発酵期間に比例しているという仮定で、次のように発酵槽の容積を算定している。

$$V = [(V_f + V_d) / 2] R_T \quad (5.3)$$

$V$  : 発酵槽有効容積 [ $\text{m}^3$ ]

$V_d$  : 1日の消化液排出量 [ $\text{m}^3$ ]

$R_T$  : メタン発酵槽の平均滞留時間 [day]

また、原料中の有機物濃度を  $S_0$  とすると有機物負荷 ( $L_R$ ) は

$$L_R = S_0 / R_T \quad (5.4)$$

と表すことができるのでメタン発酵槽容積は有機物負荷を用いて、次式から算出することができる。

$$V = V_f \cdot S_0 / L_R \quad (5.5)$$

また、家畜糞尿を原料とした高負荷運転の場合、 $V_f = V_d$  とすることができるので5.2式は次式に書き換えることができる。

$$V = V_f \cdot R_T \quad (5.6)$$

1日の原料投入量( $V_f$ )は表5.1の乳用牛1頭当りの糞尿排泄量と対象となる飼養頭数から求めることができるので、発酵槽有効容積は平均滞留時間を決定することにより、(5.6)式から算出することができる。

実用プラントの発酵槽はプラグフロー方式とし、未分解の固形分やメタン菌の流失を少なくするために隔壁を設け前段の槽から越流した糞尿を後段の下層部に流入させるバツフル方式を採用する。糞尿排泄量は1日当たり $6\text{m}^3$ とし、第1槽は酸発酵槽とし平均滞留時間2日分の $12\text{m}^3$ 、第2, 3槽はメタン発酵槽とし合計10日分各々 $30\text{m}^3$ 、第4槽は熱交換槽の消化液槽とし3日分の $18\text{m}^3$ 、合計 $90\text{m}^3$ の一体型発酵槽とする。最後段の第4槽と最前段の第1槽を隣接させ消化液と投入原料の熱交換を行い、原料の昇温と酸発酵を行う。発酵槽は発泡ウレタンを $100\text{mm}$ 厚で吹き付け地中に埋設する。

### 1.5.2 攪拌

発酵槽を無攪拌の状態では静置するとスラッジは沈降し、スカムと呼ばれる気泡を含んだ浮上物が水面に浮上する。そこで、発酵槽内を何らかの方法で攪拌する必要がある。メタン発酵槽の代表的な攪拌方式にはガス攪拌、機械攪拌、ポンプ循環がある。攪拌の目的は、スカムを十分に破碎し、槽内全体を混合することである。機械攪拌式は槽内全体が均一に攪拌され、スラッジの沈澱は少ない利点があるが所要動力が多い欠点がある。家畜糞尿を対象とした大型の施設の場合、メタン発酵槽はガス攪拌またはポンプ循環を用い、原料混合槽は機械攪拌を用いる場合が多い。

実用プラントでは酸発酵槽はスクリュウ型ミキサーによる機械攪拌、メタン発酵槽はポンプ循環による方式を採用する。

### 1.5.3 加温

家畜糞尿を対象とした場合の発酵槽の加温方法は温水ジャケット方式が多い。温水ジャケットは熱伝達の優れた素材が望ましい。発酵槽は一旦加温すると放熱しにくいので絶えず加温する必要はないが、制御する温度幅はできるだけ小さいことが望ましい。ボイラーはメタンガス用の他にスタートアップ時や緊急時用にプロパン用を設置する。

実用プラントでは発酵槽の加温は温水ジャケット方式とし、冬期の循環液の凍結を防ぐため不凍液を用いる。実用プラントの発酵槽の温度維持に使用する温水（不凍液）の循環経路と配管の模式図を図5.4に示す。発酵槽の温度制御は、第1～第3槽の各槽の温度センサーにより各槽に通ずる電磁弁を単独で開閉し、槽単独の温水循環回路が形成できるようにする。すなわち、各槽の温度センサーは、いずれかの発酵槽の液温が設定温度以下になると、その槽に通ずる温水配管の電磁弁を開き、同時に温水循環ポンプが作動する。ボイラーは先止め式ボイラーを用い温水の循環が始まると自動的に着火する。

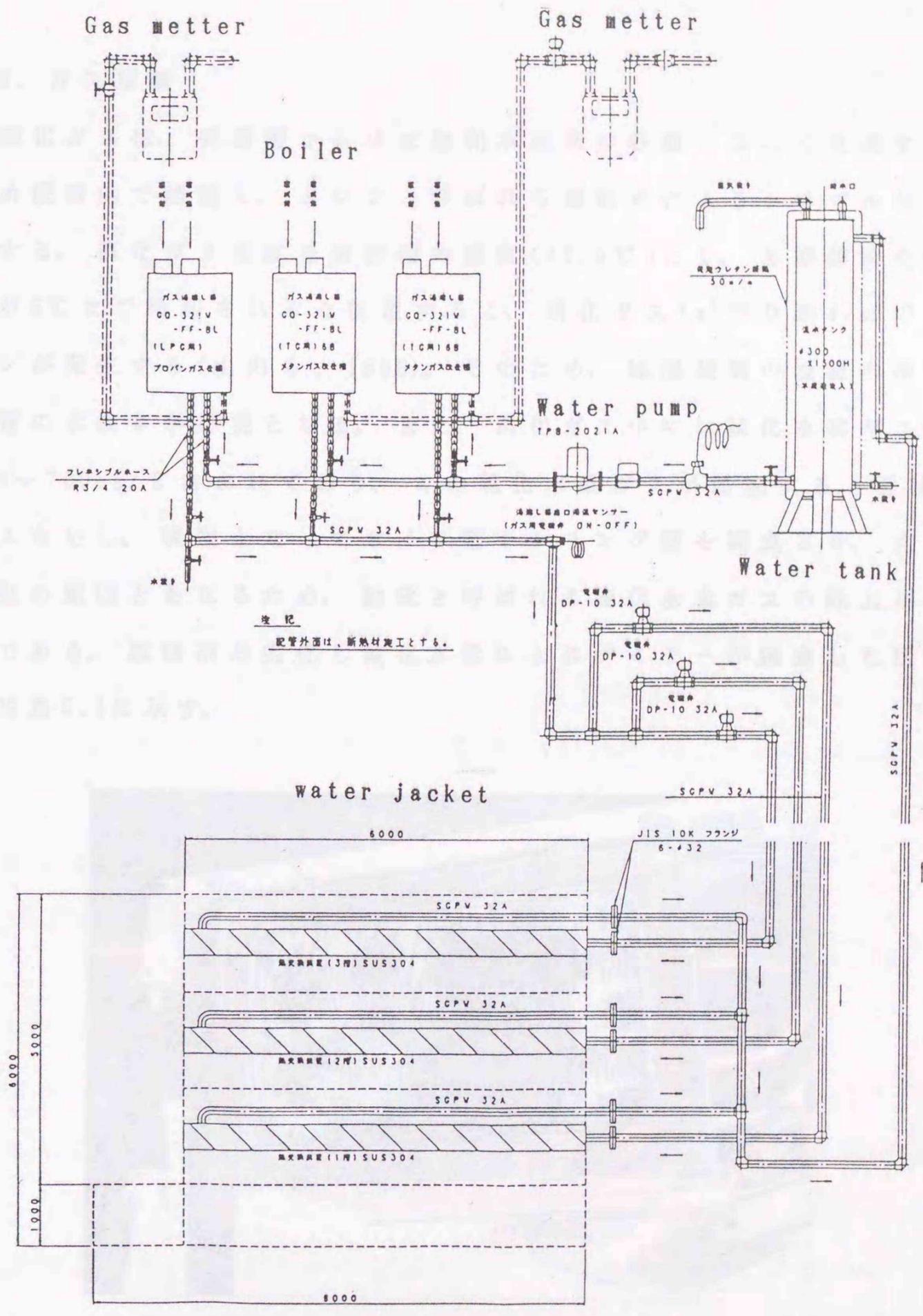


Fig 5.4 Schematic of the hot water circuit  
 図 5.4 温水の循環経路と配管の模式図

### 1.6. ガス精製

消化ガスは、発酵槽からほぼ飽和水蒸気の状態となって生成するため配管内で結露し、ドレンと呼ばれる凝結水によるトラブルが発生する。消化ガス温度を発酵槽内温度(42.5℃)とし、冬期間消化ガスが5℃まで冷却されると仮定すると、消化ガス1m<sup>3</sup>当り約47mℓのドレンが発生する(山内ら, 1980)。そのため、除湿装置の設置の他に配管の水抜きが必要となる。また、消化ガス中には硫化水素ガスが500~700mg/ℓ含まれており、この硫化水素ガスが燃焼すると亜硫酸ガスないし、硫酸となってボイラ壁やシリンダ壁を腐食させ、大気汚染の原因ともなるため、脱硫と呼ばれる硫化水素ガスの除去が必要である。脱硫剤が劣化し硫化水素によりボイラーが腐食した状態を写真5.1に示す。

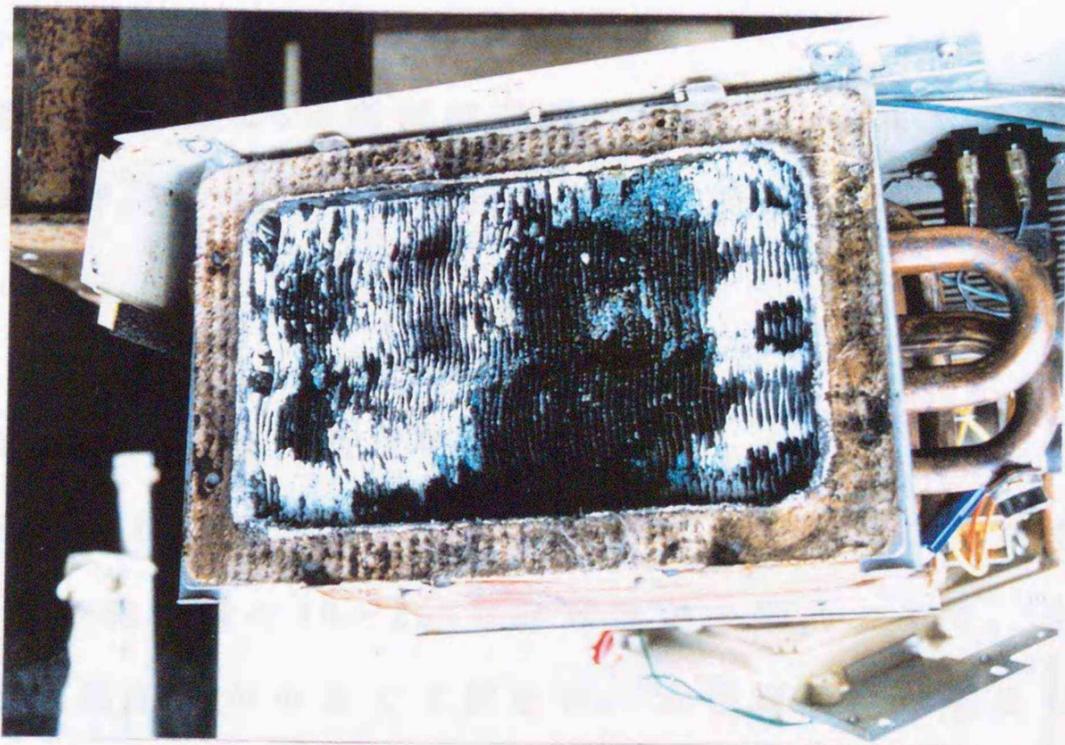
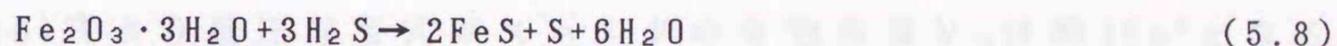
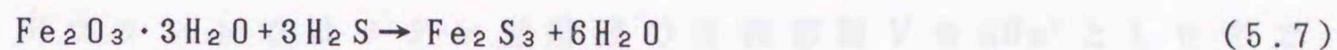


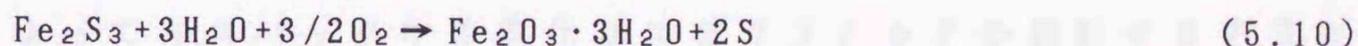
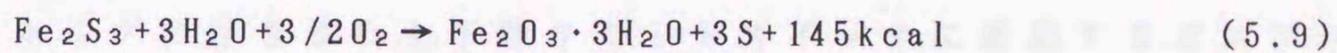
Photo 5.1 Corrosion in the boiler by hydrogen sulfide  
写真 5.1 硫化水素によるボイラーの腐食

脱硫法には湿式法と乾式法がある。筆者ら(1991)は乳牛糞尿からの消化ガスを用い除湿と炭酸ガス除去を兼ねた湿式法について実験を行っている。また、North(1990)は豚糞尿からの消化ガスについてアルカリ溶液を用いたガス精製を検討している。しかし、これら湿式法は大量の水を必要とするため、寒冷地での湿式脱硫装置は基礎研究の段階にある。

乾式法は水酸化鉄を含む脱硫剤に反応させる方法で、おもに水酸化第二鉄が用いられる。脱硫の化学反応式を示す。



(5.7)式が主反応であるが、副反応として(5.8)式の反応も生ずる。また、脱硫剤の再生反応は以下のとおりである。



再生で生じる硫黄Sは脱硫剤表面に蓄積し、硫化水素の吸収能力を低下させるが、2~5回の再生使用が可能である。

### 1.7. ガスの貯蔵

消化ガスの発生量と利用量は一般に等しくない。そのために発生ガスを貯蔵する必要がある。ガス発電をするような下水処理施設の場合、1日の発生量の40~20%の貯蔵量が一般的である。発酵槽との一体型は設置面積が小さくて済むが、大型施設には適さない。発酵槽とガス貯槽を別置する場合、球形圧力タンクと低圧浮蓋式がある。前述の山内ら(1980)はその経済的区分点は約6,000m<sup>3</sup>と報告している。球形圧力タンクを使用する場合、ガス圧縮に動力が必要となる。こ

これらの他に生成した消化ガスをビニールバッグに貯溜し、これを小型の低圧浮屋根式ガスホルダにプロアで送り込み燃焼機器で使用する方法がある(高畑ら, 1992)。

第4章で述べた小型プラントの結果から高負荷運転を行った場合の生成消化ガス量は発酵槽有効容積  $1\text{m}^3$  当り  $2.04\text{ m}^3/\text{d}$  となる。また、貯蔵量を1日の発生量の20%とすると低圧浮屋根式ガスホルダの有効容積  $V_G(\text{m}^3)$  は次式で表される。

$$V_G = (2.04 V) 0.2 \quad (5.16)$$

実用プラントではメタン発酵槽の有効容積  $V$  を  $60\text{m}^3$  としたので(5.16)式より低圧浮蓋式ガスホルダの有効容積  $V_G$  は約  $25\text{m}^3$  となる。ガス配管系統の模式図を図5.5に示す。消化ガスは除湿、脱硫を行った後、塩化ビニールフィルム製のガスバックに一時貯溜する。湿式ガスホルダの浮き蓋の上下動リミットスイッチに連動するガスプロワによってガスバック中の消化ガスをガスホルダの供給する方式とする。ガスホルダの消化ガスは圧力調整弁を介してガス機具、発電用ガスエンジンに供給される。

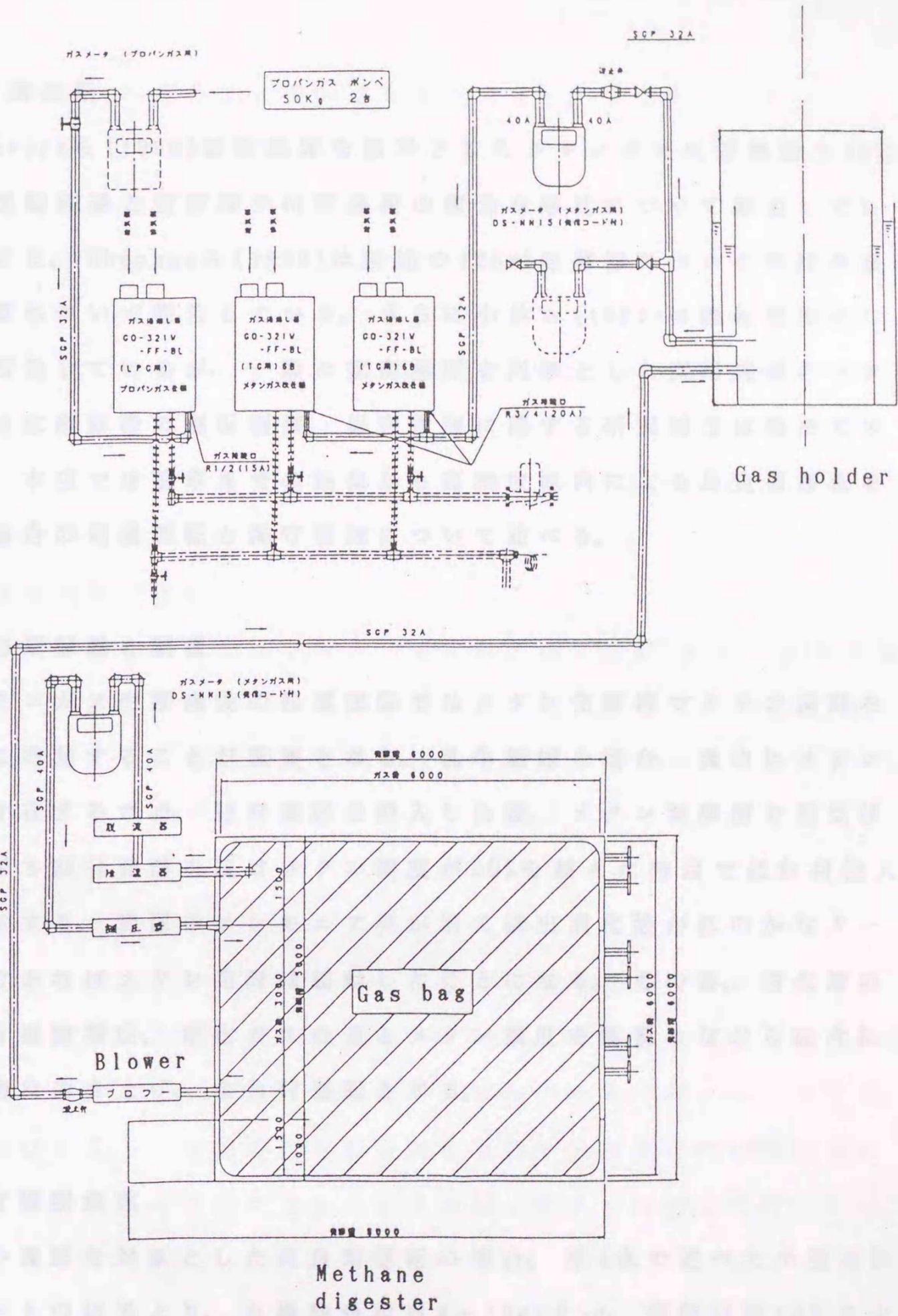


Fig 5.5 Schematic of the gas line  
 図 5.5 ガス配管系統の模式図

## 2. 最適運転

Sieversら(1990)は豚糞尿を原料としたメタンガス生産施設の10年間の運転経過と発酵槽や付帯施設の腐食や摩耗について報告している。また、Chapmanら(1990)は前述の125m<sup>3</sup>発酵槽について管理作業と経費について報告している。さらに小林ら(1988)は運転管理について報告しているが、一般に家畜糞尿を対象とした実用規模のメタンガス生産施設の運転制御、保守管理に関する研究報告は極めて少ない。本項では前章までの結果から高濃度原料による高負荷運転を行う場合の最適運転と保守管理について述べる。

### 2.1 初期起動と馴養

メタンガス生産施設の初期起動ではメタン発酵槽でメタン菌群を十分に培養することが重要となる。乳牛糞尿の場合、糞中にメタン菌が存在するため、原料糞尿を投入した後、メタン発酵槽を嫌気状態に保ち回分発酵を続けメタン濃度が50%を越えた時点で低負荷投入を開始する。糞尿のアンモニア臭が消え排出消化液がほのかなタール臭であればメタン発酵は起動したことになる。その後、消化液のpH、有機酸濃度、消化ガスの量とメタン濃度を監視しながら徐々に有機物負荷を上げ、全負荷運転とする。

### 2.1 有機物負荷

乳牛糞尿を対象とした高負荷運転の場合、第4章で述べた小型実験プラントの結果より、有機物負荷は9~10g/ℓ・d、滞留日数10日を全負荷運転とする。この有機物負荷を維持するために原料の有機物濃度と投入量は常に一定であることが望ましい。そのために定期的に

投入原料と排出消化液の有機物濃度を測定し、分解率を確認する。

## 2.2 発酵槽内温度

メタン発酵は温度変化に敏感なため、発酵槽内温度を一定に保つことが重要である。そのため温度指示計などが正常か常に確認する必要がある。発酵槽内温度は第2章の結果より乳牛糞尿を原料とする高負荷運転の場合40～42.5℃を設定温度とする。制御する温度幅はできるだけ小さくすることが望ましく、±2℃を目安とする。

## 2.3 脱硫装置の運転

定期的に脱硫剤の交換を行う。脱硫剤の再生は(5.9)式のとおり強い発熱反応があるので、脱硫剤の取り出し前に水で十分に湿らし、発熱反応により水蒸気が発生する場合は水をかけながら作業を行う。脱硫剤の温度上昇がなくなった時点で再生終了となる。

## 2.4 保守管理

投入有機物当りのメタンガス生成量は発酵槽維持管理の重要な指標となるため、消化ガス生成量とメタン率、さらに硫化水素濃度は定期的に測定する。また、脱硫剤の交換時の火災、酸欠中毒等の発生に注意する。計器類の異常の有無を確認する日常点検の他に発酵槽の腐食、機器の摩耗などを主体に運転を休止した定期点検を行う。

### 第3節 実用プラントの熱収支の試算

実用プラントの熱収支の試算についてはSinghら(1977)やChenら(1981)、さらにFischerら(1983)の研究報告があるが、150m<sup>3</sup>以上の発酵槽を対象としたものや、発酵槽有効容積当りの熱収支を比較したものが多く、本節では第1節で示した100頭規模の実用プラントの熱収支の試算を行い、寒冷地での実用化の可能性について検討を行う。

#### 1. 熱収支の試算方法

実用プラントの熱収支は次式を用いて求めた。

$$Q_N = Q_g - (Q_t + Q_E) \quad (5.16)$$

$Q_N$ : 正味産出熱量[J/d]

$Q_g$ : 産出熱量[J/d]

$Q_t$ : 発酵槽加温に必要な総熱量[J/d]

$Q_E$ : 直接投入熱量(電力使用機器)[J/d]

#### 2. 産出熱量の試算

有機物負荷を9~10g/ℓ・d、平均滞留時間を10日とした全負荷運転の場合の1日当りの産出熱量は第4章で述べた小型プラントの結果から生成消化ガスは発酵槽有効容積1m<sup>3</sup>当り2.04m<sup>3</sup>、メタン濃度56.5%となり産出メタンガス量は1.15m<sup>3</sup>となる。メタンガス1m<sup>3</sup>当りの発熱量を35.79MJ/Nm<sup>3</sup>とし、実用プラントのメタン発酵槽の発酵槽有効容積を60m<sup>3</sup>とすると、プラントの1日当りの産出熱量 $Q_g$ は2,470MJとなる。

### 3. 発酵槽加温に必要な総熱量

発酵槽加温に必要な熱量は次式で表すことができる。

$$Q_t = Q_r + Q_i - Q_f \quad (5.18)$$

$Q_t$ : 発酵槽加温に必要な総熱量[J/d]

$Q_f$ : 発酵槽からの放熱量[J/d]

$Q_i$ : 投入原料の加温熱量[J/d]

$Q_r$ : メタン発酵に伴う反応熱[J/d]

メタン発酵に伴う反応熱は無視することができるので、(5.18)式は次式で表すことができる。

$$Q_t = Q_r + Q_i \quad (5.19)$$

また、発酵槽からの放熱量は次式から求めることができる。

$$Q_f = U A \Delta T \quad (5.20)$$

$U$ : 総括伝熱係数[W/m<sup>2</sup>/°C]

$A$ : 放熱外壁面積[m<sup>2</sup>]

$\Delta T$ : 発酵槽温度と外気温の差[°C]

さらに、投入原料の加温熱量は次式から求めることができる。

$$Q_i = V_f C \Delta T_f (100 - R) / 100 \quad (5.21)$$

$\Delta T_f$ : 発酵槽温度と原料温度の差[°C]

$C$ : 投入原料の比熱[kJ/kg·°C]

$R$ : 排熱回収率[%]

これらをまとめ(5.19)式に(5.20)式と(5.21)式を代入しボイラー効率を $\eta_b$ [%]とすると発酵槽加温に必要な熱量は次式で表すことができる

$$Q_t = (U A \Delta T + V_f C \Delta T_f (100 - R)) / \eta_b \quad (5.22)$$

そこで、実用プラントについて原料糞尿温度、外気温度、排熱回

収率は1988年の小型実験プラントの実測値を用い、メタン発酵槽の放熱外壁面積は $144\text{m}^2$ 、発酵槽の総括伝熱係数は第4章の結果から $0.60\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ 、発酵槽温度を $42.5^\circ\text{C}$ とし、ボイラー効率を80%、投入原料の比熱は $4.187\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ とし(Chen, 1981)、これらの数値を用い(5.22)式から $Q_t$ を求めた。これらの値を表5.2に示す。

#### 4. 直接投入熱量の試算

本実用プラントで用いる原料投入と移送、発酵槽の攪拌、温水の循環に用いるポンプ、ガスの吹き込みに用いるブローなど電力使用機器の電力量を求め、 $1\text{kWh}:10.26\text{MJ}$ として、その投入熱量の試算を行う。

##### 4.1 原料の投入と移送

家畜糞尿を対象としたメタンガス生産施設の場合、自然流下によるスラリーの移送の他にポンプの設置が必要となる。しかし、これらの仕様や使用方法はメタンガス生産施設や牛舎の構造によって様々な形態が考えられる。ポンプの所要動力は一般に次式で求めることができる。

$$P = Q H \rho / 6.12 \eta_p \quad (5.23)$$

P: 所要動力[kW]

Q: 流量 $[\text{m}^3/\text{min}]$

H: 揚程[m]

$\rho$ : 液の比重

$\eta_p$ : ポンプ効率

固形分濃度が増し粘性が高くなるに従いポンプ効率は低下する。

乳牛糞尿の無希釈糞尿を原料とした場合、流量を $1.5\text{m}^3/\text{min}$ 、揚程を $2\text{m}$ 、糞尿の比重を $0.95$ (Midwest plan service, 1975)、ポンプ効率を $30\%$ と見積ると約 $1.5\text{kW}$ のポンプが必要となる。

実用プラントでは、 $1\text{日}6\text{m}^3$ の原料投入と消化液の排出に約 $8$ 分間の運転が必要となり、これに必要な電力量は $1\text{日}0.2\text{kWh}$ となる。

#### 4.2 攪拌

原料調整槽では $3\text{kW}$ のスクリーミキサーを用い、攪拌時間を $1\text{日}6$ 時間( $25\%$ )とすると必要電力量は $1\text{日}18\text{kWh}$ となる。メタン発酵槽では第 $2$ 槽と第 $3$ 槽にポンプを設置し、消化液の循環による攪拌を行う。設置するポンプは投入、排出と同様 $1.5\text{kW}$ のポンプを用い、攪拌時間を $1\text{日}6$ 時間( $25\%$ )とすると必要電力量は $1\text{日}$

$$1.5(\text{kW}) \times 6(\text{h}) \times 2(\text{台}) = 18(\text{kWh})$$

となり、攪拌に要する電力量は合計 $36\text{kW}$ となる。

#### 4.3 温水の循環

実用プラントでは、発酵槽加温のための温水の循環に $0.4\text{kW}$ 循環ラインポンプを用い、作動時間を $1\text{日}8$ 時間とすると必要電力量は $3.2\text{kWh}$ となる。

#### 4.4 ガス精製

$1\text{日}$ 当りの消化ガス生成量は、 $5.16$ 式より $122.4\text{m}^3$ となり、 $0.75\text{kW}$ のガスブロワを用い、吸い込み風量 $0.4\text{m}^3/\text{min}$ の場合、作動時間は $1\text{日}5$ 時間となり、必要電力量は $1\text{日}3.75\text{kWh}$ となる。

以上の合計は43.2kWhとなる。これらの他にボイラや照明などの電力量を考慮し実用プラントの1日当りの必要電力量を45kWhに見積ると直接投入熱量は次のように410MJとなる。

$$45 \times 10.26 \approx 410 \text{ MJ}$$

### 5. 正味産出熱量の試算

1日当りの産出熱量は2,470MJ、1日当りの必要電力量である直接投入熱量は410MJとなり、発酵槽加温に必要な総熱量は(5.22)式から、正味産出熱量は(5.16)式から算出した。これらの結果を表5.2に示す。

表 5.2 実用プラントの熱収支試算  
Table 5.2 Calculation of thermal balance  
for a 100 cow dairy

Month	Ambient temp. (°C)	Slurry temp. (°C)	Heat recovery (%)	$Q_f$ (MJ/d)	$Q_i$ (MJ/d)	$Q_t$ (MJ/d)	$Q_N$ (MJ/d)
1	-8.9	6.9	40	372	537	1,136	874
2	-10.5	6.0	40	383	550	1,167	842
3	-3.6	7.1	42	334	516	1,057	948
4	2.8	8.7	48	287	442	911	1,098
5	10.2	10.9	47	234	421	818	1,191
6	15.6	13.8	49	195	368	703	1,306
7	15.3	14.3	49	188	361	687	1,322
8	20.3	18.0	52	161	296	571	1,439
9	15.2	16.9	60	198	258	565	1,445
10	10.2	12.4	54	234	348	727	1,283
11	2.6	7.9	33	289	582	1,089	921
12	-6.0	7.9	36	351	556	1,134	875
Ave.	6.3	10.9	46	269	436	880	1,129

$Q_f$ : Energy for heating digester; calculated using eqns (5.20)

$Q_i$ : Energy for heating material; calculated using eqns (5.21)

$Q_t$ : Total energy for heating; calculated using eqns (5.22)

$Q_N$ : Net thermal production; calculated using eqns (5.22) and (5.16)

予想される正味産出熱量は年間平均1日当たり1,129MJで産出熱量の46%となった。また、夏期は58%、冬期は34%であった。

以上の結果より、寒冷地においても投入熱量を必要としない周年運転の可能なメタンガス生産施設の稼働が可能であり、生産されるメタンガスは牛舎で用いるバルククーラやミルクの動力源として供給可能であると考えられる。

### 1.1 乳牛の飼育設備設計

実際の設備設計に関しては、乳牛の飼育設備の設計など、飼育設備の設計に当たっては、乳牛1頭1日当たりの飼料量を90kgとする。

### 1.2 電用プラントの基本設計

電用プラントは、電用プラントの設計を可能とし、投入電力の削減と、発電を行うための発電機とする。発電機の形式は、ブリティッシュ方式とし、発電機の回転数を、メタンガスの発生量を、発電機に供給するメタンガスの発生量を、発電機の下流部に投入するメタンガス方式を採用する。

### 1.3 設備の設計

設備の設計は、設備の設計を可能とする。

$$V_1 = V_2 / \eta$$

$V_1$ : 発電機に供給するメタンガスの発生量

$V_2$ : 発電機から供給されるメタンガスの発生量

$\eta$ : 発電機の効率

電用プラントでは、発電機の効率を、発電機に供給するメタンガスの発生量

#### 第4節 本章のまとめ

本章では、寒冷地酪農地域で使用可能な実用規模メタンガス生産施設の基本設計と設計諸元を求め、搾乳牛100頭規模の実用プラントを設計し、熱収支の試算を行った。

#### 1. 実用規模メタンガス生産施設の設計

##### 1.1 乳牛の糞尿排泄量

実際の施設の設計に際してはミルクキング・パーラの排水なども考慮に入れ、乳牛1日1頭当りの処理量を60ℓとする。

##### 1.2 実用プラントの基本設計

実用プラントは排出消化液の排熱を利用し、投入原料の加温と酸発酵を行う2相式発酵法とする。発酵槽の形式はプラグフロー方式とし、未分解の固形分やメタン菌の流失を少なくするために隔壁を設け前段の槽から越流した糞尿を後段の下層部に流入させるバッフル方式を採用する。

##### 1.3. 原料調整槽

原料調整槽の有効容積は次式で表される。

$$V_m = V_f / n$$

$V_m$ : 原料調整槽有効容積 [ $m^3$ ]

$V_f$ : 1日の原料投入量 [ $m^3$ ]

$n$ : 投入回数

実用プラントでは原料の投入を1日1回とし、原料調整槽有効容積

$V_m$ を $6\text{m}^3$ とする。

#### 1.4. 酸発酵槽

酸発酵槽は排出消化液の排熱を回収し投入原料の加温に用いる方法とする。酸発酵槽容積は次式で示すことができる。

$$V_a = V_f \times RT_a$$

$V_a$ : 酸発酵槽容積 [ $\text{m}^3$ ]

$RT_a$ : 酸発酵槽の平均滞留時間 [day]

実用プラントでは酸発酵槽の平均滞留時間を2日とし酸発酵槽容積を $12\text{m}^3$ とする。

#### 1.5. メタン発酵槽

実用プラントでは糞尿排泄量を1日当り $6\text{m}^3$ とし、第1槽を平均滞留時間2日分の $12\text{m}^3$ 、第2, 3槽は計10日分各々 $30\text{m}^3$ 、第4槽は3日分の $18\text{m}^3$ とし、合計 $90\text{m}^3$ の一体型発酵槽とする。最後段の第4槽と最前段の第1槽を隣接させ消化液と投入原料の熱交換を行い、原料の昇温と酸発酵を行う。発酵槽は発泡ウレタンを $100\text{mm}$ 厚で吹き付け地中に埋設する。また、酸発酵槽はスクリュウ型ミキサーによる機械攪拌、メタン発酵槽はポンプ攪拌を採用する。発酵槽の加温は温水ジャケット方式とする。

#### 1.6. ガスの貯蔵

高負荷運転を行った場合の生成消化ガス量を発酵槽有効容積 $1\text{m}^3$ 当り $2.04\text{m}^3/\text{d}$ 、また、貯蔵量を1日の発生量の20%とすると低圧浮蓋式ガスホルダの有効容積 $V_g$ は次式で表される。

$$V_G = (2.04 V) 0.2$$

実用プラントではメタン発酵槽の有効容積を $60\text{m}^3$ としたのでガスホルダの有効容積 $V_G$ は約 $25\text{m}^3$ とする。

## 2. 実用プラントの熱収支の試算

### 2.1. 産出熱量の試算

有機物負荷を $9\sim 10\text{kg}/\text{m}^3/\text{d}$ 、平均滞留時間を10日とした全負荷運転の場合のプラントの1日当りの産出熱量は $2,470\text{MJ}$ となる。

### 2.2. 発酵槽加温に必要な総熱量

発酵槽加温に必要な熱量は次式で表すことができる。

$$Q_t = (U A \Delta T + V_f C \Delta T_f (100 - R)) / \eta_b$$

U: 総括伝熱係数 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

A: 放熱外壁面積 [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta T$ : 発酵槽温度と外気温の差 [ $^\circ\text{C}$ ]

$\Delta T_f$ : 発酵槽温度と原料温度の差 [ $^\circ\text{C}$ ]

C: 投入原料の比熱 [ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ]

R: 排熱回収率 [%]

$\eta_b$ : ボイラー効率 [%]

発酵槽加温に必要な総熱量は年平均 $880\text{MJ}/\text{d}$ となる。

### 2.3 直接投入熱量の試算

#### 2.3.1 原料の投入と移送

乳牛糞尿の無希釈糞尿を原料とした場合、実用プラントでは、1日 $6\text{m}^3$ の原料投入と消化液の排出に約8分間の運転が必要となり、これ

に必要な電力量は1日当り0.2kWhとなる。

### 2.3.2 攪拌

原料調整槽では3kWのスクリュミキサーを用い、攪拌時間を1日当り6時間(25%)とすると必要電力量は1日当り18kWhとなる。メタン発酵槽では第2槽と第3槽にポンプを設置し、消化液の循環による攪拌を行う。設置するポンプは投入、排出と同様1.5kWのポンプを用い、攪拌時間を1日当り6時間(25%)とすると必要電力量は1日当り

$$1.5(\text{kW}) \times 6(\text{h}) \times 2(\text{台}) = 18(\text{kWh})$$

となり、攪拌に要する電力量は合計36kWhとなる。

### 2.3.3 温水の循環

実用プラントでは、発酵槽加温のため温水の循環に0.4kWの循環ラインポンプを用い、作動時間を1日当り8時間とすると必要電力量は3.2kWhとなる。

### 2.3.4 ガス精製

0.75kWのガスブロワーを用い、吸い込み風量 $0.4\text{m}^3/\text{min}$ の場合、作動時間は1日当り5時間となり、必要電力量は1日当り3.75kWhとなる。

以上の合計は43.2kWhとなる。これらの他にボイラーや照明などの電力量を考慮し実用プラントの1日当りの必要電力量を45kWhに見積ると直接投入熱量は次のように410MJとなる。

$$45 \times 10.26 \approx 410\text{MJ}$$

## 2.4. 正味産出熱量の試算

予想される正味産出熱量は年間平均1日当たり1,129MJで産出熱量の46%となり、夏期は58%、冬期は34%となる。

以上の結果より、寒冷地においても投入熱量を必要としない周年運転の可能なメタンガス生産施設の稼働が可能であり、生産されるメタンガスは牛舎で用いるミルクヤやバルククーラの動力源として供給可能であることが明かとなった。

## 第 6 章 総 括

近年、わが国の酪農は多頭飼養化が進み、1戸当り平均飼養頭数が100頭を越える酪農家が現れ、排出される糞尿はミルクキング・パーラの排水とともに膨大な量となり、その取り扱いが問題となっている。さらに、自然環境、地域環境の保全の立場から生態系に基づいた家畜糞尿処理の重要性が再確認され、その処理方法としてメタン発酵に対する関心が高まっている。

しかし、農場規模での大型メタンガス生産施設はまだ研究段階にあり、一般に実用化されていない。特に寒冷地におけるメタンガス生産施設は冬期間の運転維持が困難なため北海道での周年運転の実績はない。

本研究は室内実験とベンチサイズの発酵槽による実験、さらに小型プラントによるランニングテストを行い、寒冷地型酪農用メタンガス生産施設の設計指針を得ることを目的とした。

実験から得られた結果の要点と施設の設計指針の要約は次の通りである。

### 1. メタン発酵原料としての乳牛糞尿の特性

#### 1) 発酵温度とメタンガス生成量

発酵温度35～45℃で20日間の回分式試験を行った結果、42.5℃の消化ガス生成量が最大となり、35℃の場合と比較して発酵日数10日目では40%、15日では34%、20日目では14%と、それぞれ消化ガス生成量が少なかった。乳牛糞尿の場合、メタン生成量が最大となるのは

42.5℃付近であることが明かとなった。

## 2) 固形分濃度とメタンガス生成量の関係

回分式発酵の場合、原料当りのメタンガス生成量は、9%原料が最も高い値を示した。糞、尿、希釈水の割合とガス生成量の関係についての回分式発酵試験の結果では尿添加率25%あるいは12.5%（糞含量では80~90%）にメタンガス生成量のピークが認められ、尿添加率が増すに従いメタンガス生成量は減少した。

## 3) 有機物負荷、平均滞留時間とメタンガス生成量

有効発酵槽容積当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が短くなるに従い増加し、有機物投入当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が長くなるに従い増加した。回分式試験の結果と同様最適原料固形分濃度は9~10%付近に存在することが明かとなった。有機物分解率は平均滞留時間が増すにつれてやや上昇する傾向が認められた。

## 4) K値の算出とChen & Hashimotoモデルの適応性

有機物濃度とChen & HashimotoモデルのK値の関係を求めた。

$$K = 0.614 \exp 0.021 \cdot S_0$$

$$r = 0.80$$

モデルの予測値は平均滞留時間が長くなるに従いやや高く、平均滞留時間が短くなるに従いやや低くなる傾向が認められたが、全体として非常に高い精度でメタンガス生成量が予測できることが明かとなった。

## 5) 乳牛糞尿の流動特性

乳牛糞尿は固形分濃度11~3%、原料温度5~42.5℃において非ニュートン擬塑性流動を示すことが明かとなった。また、これらの結果から見かけ粘度を固形分濃度と原料温度、せん断速度から求めるモデル式を提示した。

$$\eta_a = 4.599 \times 10^{-6} (TS)^{2.464} \exp [1441/T] \dot{\gamma}^{(n-1)}$$

## 6) 消化液の肥料成分

高濃度高負荷運転の場合、有機物分解率は低く、肥料成分の含量に差がないことが明かとなった。また、有機態窒素はメタン発酵によってアンモニア態窒素に変化し、肥料価値が増すことが明かとなった。

以上の結果より、乳牛糞尿はメタン発酵原料に適しており、その消化液は有機質肥料として利用価値が高いことが明かとなった。

## 2. 2相式発酵法の効果

### 1) 酸生成速度

pH値の下降と揮発性有機酸量の上昇は、おおむね2日間で完了することから、酸発酵槽の平均滞留時間を2日間とした。

### 2) 投入原料温度と揮発性有機酸生成量

2日間滞留による酸発酵連日投入試験では、35℃に加温した原料と5℃に冷却したものとはpH値ならびに揮発性有機酸量では有意な差

は見られなかった。すなわち、低温原料を投入した場合でも2日間の滞留で十分に原料を昇温させ、酸発酵を促進させることが明かとなった。

### 3) 投入原料温度とメタンガス生成量の関係

1槽式メタン発酵槽の場合、投入原料の温度はメタン発酵槽の温度に直接影響を与え、消化ガス生成量は低温原料の投入が増加するに従い減少した。2相式メタン発酵槽の場合、酸発酵槽は酸生成とともに加温も同時に行いメタン発酵槽の温度変化が極めて小さいことが明かとなった。

### 4) 有機物負荷と有機物分解率

従来型発酵槽は有機物負荷は $10\text{g}/\ell/\text{day}$ を越えると分解率は急激に低下したのに対し2相式発酵法は高い有機物分解率を維持した。

### 5) 相分離

各発酵槽内の有機酸量およびpH値より間接的に推定すると、酸発酵槽内の揮発性有機酸は増加し、メタン発酵槽内で分解されpH値は酸発酵槽で低下し、メタン発酵槽で上昇した。このように酸発酵槽とメタン発酵槽の相違及び特徴が現れたものと考えられる。

以上の結果より、2相式メタン発酵法の場合、酸発酵槽は酸生成とともに原料加温も同時に行いメタン発酵槽の温度変化が極めて小さく、低温原料を投入する寒冷地の場合、2相式発酵法は有利であることが明かとなった。

### 3. 小型実験プラントによる実験

#### 1) 高負荷時の運転特性

有機物負荷と発酵槽当りのメタンガス生成量は比例関係にあり、有機物負荷3.19から11.0g/ℓ・d、平均滞留時間7から20日の範囲で強い正の相関を示し(P<0.001)、次式が得られた。

$$V_v = 0.115 \cdot L_R + 0.228$$

$$r = 0.79$$

また、投入量が減少し平均滞留時間が長くなるに従い発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量は減少し、原料固形分が7.5~10.5%の場合平均滞留時間と発酵槽当りのメタンガス生成量は負の相関を示した(P<0.001)。有機物投入当りのメタンガス生成量は平均滞留時間が長くなるに従い増加し、平均滞留時間と有機物投入当りのメタンガス生成量は正の相関を示した(P<0.001)。

以上の結果より、供試施設のメタンガス生成量は有機物負荷3.19から11.0g/ℓ/d、平均滞留時間7から20日の範囲で有機物負荷に比例し、有機物負荷8g/ℓ/d以上の高負荷運転が可能であることが明らかとなった。

#### 2) 投入方法とガス生成パターン

一括投入の場合、投入直後入口温度は著しく低下し回復に時間を要したが、分割投入の場合大きな温度変化がないことが明らかとなった。投入方法の違いによる生成消化ガス量に差は認められなかったが、生成消化ガス中のメタン濃度に差が認められた。すなわち、分割投入の場合、生成消化ガス中のメタン濃度はわずかながら上昇す

る傾向が認められた。

分割投入の場合原料投入直後、消化ガス生成量はやや増加するが、速やかに元のレベルに戻る発生パターンを繰り返した。メタン濃度はほぼ一定の値を示し原料投入の影響は認められなかった。一括投入の場合原料投入直後、消化ガス生成量は急激に増加し、約2時間でピークに達し、その後は緩やかに減少した。メタン濃度は消化ガス生成量の増加と共に下降した後、消化ガス生成量の減少と共に元のレベルまで戻るといふ発生パターンを繰り返した。

### 3) 実験プラントの熱収支

発酵槽保温熱量すなわち発酵槽からの放熱量は外気温と発酵槽の温度差が大きくなる冬期ほど増大した。厳冬期のプラントからの放熱量は盛夏期の約35%増であった。

供試メタン発酵槽の総括伝熱係数は発泡ウレタンによる吹き付け断熱の効果により年間を通して低い値を示し、平均で $0.60\text{W}/\text{m}^2/\text{C}$ であった。

また、熱交換槽の設置によって原料加温熱量は夏期で約50%冬期で約30%減少し、1日当たり約16.7MJの原料加温熱量が節減されることが明かとなった。

年間を通して消費熱量に占める原料加温熱量は約44%と従来のプラントに比べ低い値となり熱交換槽による原料加温の効果が明らかとなった。正味消化ガス生成量は生成ガス量の平均48.7%でその内冬期は約30%、夏期は約60%と年間を通してメタンガス生産が可能であることが明らかとなった。

原料の投入、移送、攪拌、温水の循環、制御等に用いた電力量は

月によりややバラツキが見られたが、平均で6.1kWh/dであった。

#### 4) 原料の性状とガス生成

固形分濃度と有機物濃度は固形分濃度7.32~10.75%の範囲で強い正の相関を示し( $p < 0.001$ )、これらの関係から次の回帰式を求めた。

$$V_s = 0.806 \cdot T_s - 0.153$$

$$r = 0.95$$

すなわち、原料の有機物濃度は固形分濃度を求めることにより非常に高い精度で予測できることが明かとなった。実験期間中の有機物分解率は平均22.8%であった。

投入原料の固形分濃度と揮発性総有機酸量は固形分濃度7.32~10.75%の範囲で強い正の相関にあり( $p < 0.001$ )、これらの関係から次の回帰式を求めた

$$T_{VFA} = 1,562 \cdot T_s - 7,257$$

$$r = 0.662$$

すなわち投入原料の固形分濃度が高くなるに従い、メタンの基質となる揮発性総有機酸量が増加することが明かとなった。

総揮発性有機酸量は熱交換槽でやや増加し、メタン発酵槽で急激に減少した。これは熱交換槽が酸発酵槽としても機能したためでメタン発酵槽との相分離が起こり、2相式による発酵が行われたことが明かとなった。

排出消化液の揮発性総有機酸量は1,500mg/kg以下が全体の80%で酢酸の蓄積は認められなかった。また、プロピオン酸と酢酸の比率は0.4以下が全体の75%を占め、プロピオン酸の蓄積は認められなかった。すなわち、乳牛糞尿の場合、高濃度原料による高負荷運転を行

っても酢酸ならびにプロピオン酸の蓄積は少ないことが明かとなった。

総揮発性有機酸に占める酪酸の割合は投入有機物当りのメタンガス生成量と正の相関にあり ( $p < 0.001$ ,  $r = 0.45$ )、総揮発性有機酸に占める酪酸の割合が増すに従い投入有機物当りのメタンガス生成量が増加することが明かとなった。

投入原料の固形分濃度と総窒素量は固形分濃度 7.32~10.75% の範囲で正の相関にあり ( $p < 0.001$ ,  $r = 0.71$ )、固形分濃度が上昇するに従い総窒素量は増加することが明かとなった。投入原料中の窒素量と排出消化液の窒素量の比率は 0.9~1.1 に集中し全体の 74.1% を占め平均は 0.99、標準偏差は 0.10 であった。すなわち、菌体濃度を窒素量から間接的に推定すると高濃度高負荷運転においても有機物負荷 3.19 から 11.0 g/ℓ/d、平均滞留時間 7 から 20 日の範囲で菌体の流出は発生しないことが明かとなった。

以上の結果より、供試発酵槽ならびに熱交換槽は投入による影響を緩和する効果が明かとなった。また、供試プラントを実用規模にスケールアップした際、寒冷地においてもメタンガス生産施設の周年運転が可能であることが明かとなった。

#### 4. 実用規模メタンガス生産施設の設計

##### 1) 乳牛の糞尿排泄量

実際の施設の設計に際してはミルク・パーラの排水なども考慮に入れ、乳牛 1 日 1 頭当りの処理量を 60 ℓ とする。

## 2) 実用プラントの基本設計

実用プラントは排出消化液の排熱を利用し、投入原料の加温と酸発酵を行う2相式発酵法とする。発酵槽の形式はプラグフロー方式とし、未分解の固形分やメタン菌の流失を少なくするために隔壁を設け前段の槽から越流した糞尿を後段の下層部に流入させるバッフル方式を採用する。

## 3) 原料調整槽

原料調整槽の有効容積は次式で表される。

$$V_m = V_r / n$$

$V_m$ : 原料調整槽有効容積 [ $m^3$ ]

$V_r$ : 1日の原料投入量 [ $m^3$ ]

$n$ : 投入回数

実用プラントでは原料の投入を1日1回とし、原料調整槽有効容積  $V_m$  を  $6m^3$  とする。

## 4) 酸発酵槽

酸発酵槽は排出消化液の排熱を回収し投入原料の加温に用いる方法とする。酸発酵槽容積は次式で示すことができる。

$$V_a = V_r \times RT_a$$

$V_a$ : 酸発酵槽容積 [ $m^3$ ]

$RT_a$ : 酸発酵槽の平均滞留時間 [day]

実用プラントでは酸発酵槽の平均滞留時間を2日とし酸発酵槽容積を  $12m^3$  とする。

## 5) メタン発酵槽

実用プラントでは、第1槽を平均滞留時間2日分の $12\text{m}^3$ 、第2, 3槽は計10日分各々 $30\text{m}^3$ 、第4槽は3日分の $18\text{m}^3$ とし、合計 $90\text{m}^3$ の一体型発酵槽とする。最後段の第4槽と最前段の第1槽を隣接させ消化液と投入原料の熱交換を行い、原料の昇温と酸発酵を行う。発酵槽は発泡ウレタンを $100\text{mm}$ 厚で吹き付け地中に埋設する。また、酸発酵槽はスクリュウ型ミキサーによる機械攪拌、メタン発酵槽はポンプ攪拌を採用する。発酵槽の加温は温水ジャケット方式とする。

## 6) ガスの貯蔵

高負荷運転を行った場合の生成消化ガス量を発酵槽有効容積 $1\text{m}^3$ 当たり $2.04\text{m}^3/\text{d}$ 、また、貯蔵量を1日の発生量の20%とすると低圧浮蓋式ガスホルダの有効容積 $V_G$ は次式で表される。

$$V_G = (2.04 V) 0.2$$

実用プラントではメタン発酵槽の有効容積を $60\text{m}^3$ としたのでガスホルダの有効容積 $V_G$ は約 $25\text{m}^3$ とする。

## 5. 実用プラントの熱収支の試算

### 1) 産出熱量の試算

有機物負荷を $9\sim 10\text{kg}/\text{m}^3/\text{d}$ 、平均滞留時間を10日とした全負荷運転の場合のプラントの1日当りの産出熱量は $2,470\text{MJ}$ となる。

### 2) 発酵槽加温に必要な総熱量

発酵槽加温に必要な熱量は次式で表すことができる。

$$Q_t = (U A \Delta T + V_f C \Delta T_f (100 - R)) / \eta_b$$

U : 総括伝熱係数 [W/m<sup>2</sup>・°C]

A : 放熱外壁面積 [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$  : 発酵槽温度と外気温の差 [°C]

$\Delta T_f$  : 発酵槽温度と原料温度の差 [°C]

C : 投入原料の比熱 [kJ/kg・°C]

R : 排熱回収率 [%]

$\eta_b$  : ボイラー効率 [%]

発酵槽加温に必要な総熱量は年平均880MJ/dとなる。

### 3) 直接投入熱量の試算

原料の投入と移送、攪拌、温水の循環等に必要な熱量は410MJとなる。

### 4) 正味産出熱量の試算

予想される正味産出熱量は年間平均1日当たり1,129MJで産出熱量の46%となり、夏期は58%、冬期は34%となる。

以上の結果より、寒冷地においてもメタンガス生産施設の周年運転が可能であり、生産されるメタンガスは牛舎で用いるミルクやバルククーラの動力源として供給可能であることが明かとなった。

記号一覧表

A:	試量の灰化後質量	[g]
A <sub>1</sub> :	投入原料液中の無機物濃度	[%]
A <sub>2</sub> :	採取原料液中の無機物濃度	[%]
A <sub>A</sub> :	酢酸量	[mg/ℓ]
A:	放熱外壁面積	[m <sup>2</sup> ]
B:	Contoisモデルの動力学変数	[無次元]
B <sub>A</sub> :	酪酸量	[mg/ℓ]
C:	粘性係数	[Pa·s <sup>-n</sup> ]
C':	粘性常数 (T → ∞ の粘性係数)	[Pa·s <sup>-n</sup> ]
C:	投入原料の比熱	[kJ/kg·°C]
D:	試料質量	[g]
D <sub>R</sub> :	有機物分解率	[%]
E:	活性化エネルギー	[J/mol]
F:	基質利用率	[g/ℓ/day]
F <sub>A</sub> :	蟻酸量	[mg/ℓ]
h:	ローター高さ	[cm]
H:	揚程	[m]
k <sub>1</sub> :	せん断応力常数	
k <sub>2</sub> :	せん断速度常数	
K:	Chen & Hashimotoモデルの動力学変数	[無次元]
L <sub>A</sub> :	乳酸量	[mg/ℓ]
L <sub>R</sub> :	有機物負荷	[g/ℓ/d]
M:	菌体量	[g/ℓ]

M:	ローターに作用する粘性トルク	[dyn·cm]
n:	原料投入回数	
n:	粘性指数	[無次元]
N:	ローター回転数	[rpm]
P <sub>a</sub> :	プロピオン酸量	[mg/l]
P:	ポンプ所要動力	[kW]
q:	メタン発酵槽における熱流束	[w/m <sup>2</sup> ]
Q:	流量	[m <sup>3</sup> /min]
Q:	1日の消化ガス生成量	[m <sup>3</sup> /d]
Q <sub>N</sub> :	正味産出熱量	[J/d]
Q <sub>g</sub> :	産出熱量	[J/d]
Q <sub>t</sub> :	発酵槽加温に必要な総熱量	[(J/d)]
Q <sub>E</sub> :	直接投入熱量 (電力使用機器)	[J/d]
Q <sub>t</sub> :	発酵槽加温に必要な総熱量	[J/d]
Q <sub>f</sub> :	発酵槽からの放熱量	[J/d]
Q <sub>i</sub> :	投入原料の加温熱量	[J/d]
Q <sub>r</sub> :	メタン発酵に伴う反応熱	[J/d]
R:	気体常数	[=8.3143 J/mol]
R <sub>b</sub> :	回転粘度計のローター半径	[cm]
R <sub>o</sub> :	回転粘度計の外筒半径	[cm]
R <sub>T</sub> :	メタン発酵槽の平均滞留日時間	[day]
R <sub>Ta</sub> :	酸発酵槽の平均滞留時間	[day]
R:	排熱回収率	[%]
S:	排出基質濃度	[g/l]
S <sub>0</sub> :	流入基質濃度	[g/l]

$S_0$	: 投入原料有機物量	[g/l]
$S$	: 排出原料有機物量	[g/l]
$t$	: 温度	[°C]
$t_f$	: 流体の温度	[°C]
$t_{f1}$	: 発酵槽内温度	[°C]
$t_{f2}$	: 外気温	[°C]
$t_w$	: 壁温	[°C]
$T$	: サンプルの絶対温度	[273° + t(°C)]
$T_{KNin}$	: 投入原料中の窒素量	[mg/l]
$T_{KNout}$	: 排出消化液の窒素量	[mg/l]
$T_s$	: 固形分濃度	[%]
$T_{UA}$	: 揮発性総有機酸量	[mg/l]
$U$	: 総括伝熱係数	[W/m <sup>2</sup> ·°C]
$V_1$	: 投入原料液中の有機物濃度	[%]
$V_2$	: 採取原料液中の有機物濃度	[%]
$V_s$	: 有機物濃度	[%]
$V$	: 発酵槽有効容積	[m <sup>3</sup> ]
$V_A$	: 酸発酵槽容積	[m <sup>3</sup> ]
$V_d$	: 1日の消化液排出量	[m <sup>3</sup> /d]
$V_f$	: 1日の原料投入量	[m <sup>3</sup> /d]
$V_G$	: ガスホルダの有効容積	[m <sup>3</sup> ]
$V_m$	: 原料調整槽有効容積	[m <sup>3</sup> ]
$W$	: 試量乾物質質量	[g]
$x$	: 壁の厚さ	[m]
$\alpha$	: 熱伝達率	[W/m <sup>2</sup> ·°C]

- $\beta$  : 有機物投入当りのメタンガス生成量 [  $\ell / g$  ]
- $\beta_{\infty}$  : 滞留日数を無限大とした場合の有機物投入当りの  
メタン生成量 [  $\ell / g$  ]
- $\eta_a$  : 見かけ粘度 [ Pa  $\cdot$  s ]
- $\eta_b$  : ボイラー効率 [ % ]
- $\theta$  : 粘度計の指示値
- $\lambda$  : 熱伝導率 [ W / m<sup>2</sup>  $\cdot$  °C ]
- $\mu$  : 比増殖速度 [ day<sup>-1</sup> ]
- $\mu_m$  : 最大比増殖速度 [ day<sup>-1</sup> ]
- $\nu_v$  : 発酵槽有効容積当りのメタンガス生成量 [  $\ell / \ell \cdot d$  ]
- $\omega$  : ローター回転角速度 [ rad / s ]
- $\tau$  : せん断応力 [ Pa ]
- $\gamma$  : せん断速度 [ sec<sup>-1</sup> ]
- $\rho$  : 液の比重 [ g /  $\ell$  ]

参考文献

— 第1章 —

1. Day, D.L., T.H. Chen, J.C. Anderson and M.P. Steinberg(1990): Bio-gas plants for small farms in kenya. Biomass. 21, 83-99
2. Haga, K., H. Tanaka and S. Higaki(1979): Methane production from animal wastes and its prospects in Japan. Agricultural Wastes. 1, 45-55
3. Hashimoto, A.G. and Y.R. Chen(1979): The overrall economics of anaerobic digestion. First international symposium on anaerobic digestion. Wales, England, 449-466
4. 北海道農政部(1990): 北海道農業の動向、170-174
5. Jewell, W.J.(1978): Anaerobic fermentation of agricultural residues. Cornell university methane project
6. 前川孝昭・新垣忠男(1990): 2相式流動床メタン発酵装置の性能及び経済評価、平成2年度農業施設学会大会講演要旨 29-30
7. 松田従三(1988): カナダ農業と畜産施設、農業施設 第19巻(1) 47-51
8. 松田従三(1992): コンポスの排熱回収に関するレビュー、農業機械学会北海道支部会第43回研究発表会講演要旨 73-74
9. Northeast regional agricultural engineering service(1984): On-farm biogas production. Cooperative extension NRAES-20
10. Oliver, B., B.F. Pain and V.R. Phillips(1986): Mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry on a farm scale: Economic considerations. Journal of agricultural engineering research 34, 229-243
11. 梅津一孝、高畑英彦(1992): メタン発酵処理が雑草種子の発芽力に及ぼす影響、平成4年度農業施設学会大会講演要旨 386-387
12. University of california(1982): Biogas fuel from manure some considerations for california agriculture. Cooperative extension energy publication, Leaflet 21292
13. Vetter, R.L., D.J. Friederick and Peter Huntington(1990): Full scale anaerobic digester and waste management system for a 300 cow dairy. Proceedings of the sixth international symposium on

agricultural and food processing wastes, 236-249

14. Zubr, J.(1991): Biogas technology for protection of the environment. Proceedings of international symposium on agricultural mechnization conference, China. 269-275

- 第2章 -

1. Andrade, E.N.(1930): The viscosity of liquids. Nature, Vol.125, No.3148 309-310
2. Andrews, J.F. and S.P. Graef(1971): Dynamic modeling and simulation of the anaerobic digestion process. Anaerobic biological treatment processes. Advances in chemistry series No. 105, American chemistry society.
3. Chen, T.H., D.L.day, J.T. Pfeffer, M.P. Bryant and Vanderholm, D.H.(1984): Kinetic parameters of thermophilic digestion of swine manure. Transactions of the ASAE. 1491-1498
4. Chen, T.H., D.L. Day and M.P. Steinberg(1988): Methane production from fresh versus dry dairy. Biological wastes. 24 297-306
5. Chen, Y.R. and A.G. Hashimoto(1976): Rheological properties of activated poultry wastes slurries. Transactions of the ASAE. 19(1) 128-133
6. Chen, Y.R. and A.G. Hashimoto(1976): Pipeline transport of livestock wastes slurries. Transactionss of the ASAE. 19(5) 898-906
7. Chen, Y.R. and A.G. Hashimoto(1978): Kinetics of methane fermentation. Biotechnology and bioengineering Symp. No.8. 269-282
8. Chen, Y.R., V.H. Varel and A.G. Hashimoto(1980): Effect of temperature on methane fermentation kinetics of beef cattle manure. Biotechnology and bioengineering. 10 325-339
9. Chen, Y.R.(1981): Impeller power requirement if mixing livestock manure slurries. Transactions of the ASAE. 24(1) 187-192
10. Chen, Y.R. and E.L. Shetler(1983): Temperature effect on the rheological properties of cattle manure slurry. J. Testing and evaluation. 11(6) 360-364
11. Chen, Y.R.(1986): Rheological properties of sieved beef cattle manure slurry. Agricultural wastes. 15 17-33

12. Contois, D.E.(1959): Kinetics of bacterial growth. J. General microbiology. 21 40-46
13. Converse, J.C., R.E. Graves and G.W. Evans(1977): Anaerobic degradation of dairy manure under mesophilic and thermophilic temperatures. Transactions of the ASAE. 20 (20) 336-340
14. Field, J.A., J.S. Caldwell, S. Jeyanayagam, R.B. Reneau, W. Kroontije and Collins, E.R.(1984): Fertilizer recovery from anaerobic digesters. Transactions of the ASAE. 1871-1881
15. Grady, C.P., L.F. Harlow and R.R. Riesing(1972): Effects of growth rate and influent substrate concentration on effluent quality for chemostats containing bacteria in pure and mixed culture. Biotechnology and bioengineering.
16. Hashimoto, A.G. and Y.R. Chen(1976): Rheology of livestock waste slurries. Transactions of the ASAE. 19(6) 930-934
17. Hashimoto, A.G., Y.R. Chen, V.H. Varel and R.L. Prior(1980): Anaerobic fermentation of agricultural residues. Utilization and recycling of agricultural wastes and residues. CRC Press, Boca Raton, FL. 135-196
18. Hashimoto, A.G., Y.R. Chen and V.H. Varel(1981): Theoretical aspects of methane production: state-of-the-art. In Livestock wastes a renewable resource. ASAE, St. Joseph, MI, 86-91
19. Hashimoto, A.G., V.H. Varel and Y.R. Chen(1981): Ultimate methane yield from beef cattle manure. Agricultural wastes. 3 241-256
20. Hashimoto, A.G.(1983): Thermophilic and mesophilic anaerobic fermentation of swine manure. Agricultural wastes. 6 175-191
21. Hashimoto, A.G.(1984): Methane from swine manure. Agricultural wastes. 9 299-308
22. 橋元秀教(1977): 有機物施用の理論と応用、農山漁村文化協会 188-1196
23. Hawkes, F.R., B.L. Rosser, D.L. Hawkes and M. Statham(1984): Mesophilic anaerobic digestion of cattle slurry after passage through a mechanical separator. Agricultural wastes. 10, 241-256
24. Hill, D.T. and C.L. Barth(1977): A dynamic model for simulation of animal waste digestion. Journal of water pollution control

- federation 49(10) 21-29
25. Hill, D.T.(1982): Optimum operational design criteria for anaerobic digestion of animal manure. Transactions of the ASAE. 1029-1032
  26. Hill, D.T.(1983): Energy consumption relationships for mesophilic and thermophilic digestion of animal manures. Transactions of the ASAE, 26(3) 841-848
  27. Hill, D.T.(1983): Design parameters and operating characteristics of animal waste anaerobic digestion system. Agricultural wastes. 5 219-230
  28. Hill, D.T.(1984): Methane productivity of the major animal waste types Transactions of the ASAE. 530-534
  29. 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
  30. Koelliker, J.K., and J.R. Miner(1973): Desorption of ammonia from anaerobic lagoons. Transactions of the ASAE. 16(1) 148-151
  31. Kumar, M., H.D. Bartlett and N.N. Mohsenin(1972): Flow properties of animal waste slurries. Transactions of the ASAE. 15 (2) 718-722
  32. Lapp, H.M., D.D. Schulte, E.J. Kroeker, A.B. Sparling and B.H. Topnik(1975): Start-up of pilot scale swine manure digesters for methane production. The proceedings of the 3rd international symposium on livestock wastes. 234-243
  33. Lapp, H.M., D.D. Schulte and M.A. Stevens(1978): Biogas production from animal manure. Biomass energy institute Inc., Manitoba
  34. 前川孝昭(1982): バイオマスエネルギー、山澤新吾編、朝倉書店 131-133
  35. Morris, G.R.(1976): Anaerobic fermentation of animal wastes, A kinetic and empirical design evaluation. Cornell university.
  36. Morris, G.R., W.J. Jewell and R.C. Loehr(1977): Anaerobic fermentation of animal wastes. Food, fertilizer and agricultural residues. Ann arbor science. 395-413
  37. Muck, R.E., and T.S. Steenhuis(1983): Nitrogen losses from manure storage. Agricultural wastes. 4 41-54

38. Oliver, B., B.F. Pain and V.R. Philips(1986): Mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry on a farm scale. J. agricultural engineering research. 34 229-243
39. O'Rourke, J.T.(1968): Kinetics of anaerobic waste treatment at reduced temperatures. Ph.D. dissertation, Stanford university.
40. Pain, B.F., R. West, B. Oliver and D.L. Hawkes(1984): Mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry on a farm scale. J. agricultural engineering research. 29 249-256
41. Pain, B.F., V.R. Philips and R. West(1988): Mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry on a farm scale. J. agricultural engineering research. 39 123-135
42. Pfeffer, J.T.(1974): Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse. Biotechnology and bioengineering. 16 771-787
43. Rorick, M.B., S.L. Spahr and M.P. Bryant(1980): Methane production from cattle waste in laboratory reactors at 40 and 60°C after solid-liquid separation. J. Dairy science, 63 1953-1986
44. Schneiber, E.C.(1985): Non free flowing materials, handling techniques for hay and manure. Agricultural engineering 39(9) 558-559
45. 中央畜産会(1987): 堆肥化施設設計マニュアル 78-80
46. Sobel, A.T.(1965): Some physical properties of animal manure associated with handling. ASAE paper No. NA65-11
47. 高畑英彦、美濃羊輔、村井信仁(1983): 家畜糞尿液肥化システムの実験、エバラ時報、126巻 53-63
48. Varel, V.H., A.G. Hashimoto and Y.R. Chen(1980): Effect of temperature and retention time on methane production from beef cattle waste. Applied and environmental microbiology, August 217-222
49. Wong, G.M.(1975): Dry anaerobic digestion. Energy, agriculture and waste management. Ann arbor science, Ann arbor, MI
50. 山田秀昭(1980): 集中家畜糞尿処理での実施例、廃棄物のメタン発酵、サイエンティスト社 103-104
51. Zhang, R.H. and D.L. Day(1990): Rheological properties of fresh

swine manure slurry. Proceedings of the sixth international symposium on agricultural and food processing wastes, 541-547

— 第3章 —

1. Ghosh, S. and F.G. Pohland(1971): Kinetics of substrate assimilation and product formation in Anaerobic digestion. J. water pollut. control fed. 46 748
2. Ghosh, S., J.R. Conrad and P.L. Klass(1975): Anaerobic acidogenesis of sewage sludge. J. water pollut. control fed. 47 30-45
3. Lo, K.V. and P.H. Liao(1985): Two-phase anaerobic digestion of screened dairy manure. Bionass, 8 81-90
4. Lo, K.V. and P.H. Liao(1986): Mesophilic anaerobic digestion of screened dairy manure using two-phase process. Energy in agriculture, 5 81-88
5. Lo, K.V. and P.H. Liao(1986a): Thermophilic anaerobic digestion of screened dairy manure using two-phase process. Energy in agriculture, 5 249-255
6. 前川孝昭(1980): 畜産廃棄物のクローズド処理システム、施設農業への新エネルギー利用、フジテクノシステム
7. 前川孝昭、山澤新吾(1984): 2相式メタン発酵装置の開発に関する研究(第1報)、豚糞尿を基質とする有機物負荷特性、農業施設、15(1) 7-21
8. 前川孝昭、吉田伸二、山澤新吾(1987): モーノ型菌体増殖速度式による2相式メタン発酵シミュレーションと発酵制御、農業施設学会大会講演要旨 9-10
9. Peck, M.W., J.M. Skilton, F.R. Hawkes and D.L. Hawkes(1986): Effects of temperature shock treatments on the stability of anaerobic digesters operated on separated cattle slurry. Wat. Res. 20 No.4 453-462
10. Pohland, F.G. and S. Ghosh(1971): Anaerobic stabilization of organic wastes, tow-phase concept. Environmental letter. 1 255

— 第4章 —

1. Bolte, J.P., D.T. Hill and T.H. Wood(1986): Anaerobic digestion of screened waste liquids in suspended particle-attached growth

- reactors. Transactions of the ASAE. 29 (2) 543-549
2. Cobb, S.A. and D.T. Hill(1990): Using nitrogen ratio as an indicator of biomass retention and steady-state in anaerobic fermentation. Transactions of the ASAE. 282-287
  3. Fischer, J.R., E.L. Iannotti and D.M. Sievers(1981): Anaerobic digestion of manure from swine fed on various diets. Agricultural wastes. 3 201-214
  4. Hashimoto, A.G., R.L. Prior and Y.R. Chen(1978): Methane and biomass production system for beef cattle manure. Great plains extension seminar on methnae production from livestock manure. Liberal, KS.
  5. Hashimotoら(1981): 第2章 18.に同じ
  6. Hill, D.T.(1982): A comprehensive dynamic model for animal waste methanogenesis. Transactions of the ASAE. 25 (5) 1374-1380
  7. Hills, D.J.(1980): Methane gas production from dairy manure at high solids concentration. Transactions of the ASAE. 23(1) 122-126
  8. Hills, D.J.(1980a): Biogas fro a high solids combination of dairy manure and barley straw. Transactions of the ASAE. 1500-1504
  9. Hill, D.T., S.A. Cobb and J.P. Bolte(1987): Using volatile fatty acid relationships to predict anaerobic digester failure. Transactions of the ASAE. 496-501
  10. 平方明男(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、日本家畜管理研究会誌 28 (1) 4-5
  11. 一色尚次、北山直方(1975): 伝熱工学、森北出版 7-41
  12. Kaspar, H.F. and K. Wuhrmann(1978): Kinetic parameters and relative tuenovers of some important catabolic reactions in digesting sludge. Applied and environmental microbiology 36 (1) 1-7
  13. 小林茂樹、大山銀四郎、石丸國雄(1988): 牛ふん尿嫌気発酵処理における管理作業と熱収支、農作業研究 23(3) 226-234
  14. 小林茂樹、石丸國雄(1989): 冷涼地における牛ふんメタン発酵処理実用化プラントの投入、産出および損失熱量の推定、日畜会報、60(11) 1000-1008

15. 前川孝昭、中野和弘、山澤新吾、鈴木貞之(1990): 熱収支解析にもとづく2相式メタン発酵槽内壁面の境膜熱伝達率の算出、農業施設 21 (1) 31-36
16. 宮川芳史、梅津一孝、高畑英彦(1992): 牛糞尿搾汁液を利用したメタン発酵に関する基礎実験、農業機械学会北海道支部会第43回研究発表会講演要旨 71-72
17. Nordstedt, R.A. and M.V. Thomas(1985): Start-up characteristics of anaerobic fixed bed reactor. Transactions of the ASAE. 28(4) 1242-1247
18. Painら(1988): 第2章 41.に同じ
19. Peckら(1986): 第3章 9.に同じ
20. Sinha, C.S. and T.C. Kandpal(1990): A framework for the financial evaluation of household biogas plants in india. Biomass, 23 39-53
21. 杉山幸男(1969): 化学工業工学(熱工学総論)、地球出版 375-434
22. 茅 陽一(1981): エネルギーアナリシス、電力新報社 21-26
23. Varel, V.H., H.R. Isaacson and M.P. Bryant(1977): Thermophilic methane production from cattle waste. Applied and environmental microbiology 33 (2) 298-307
24. Van den Berg, L.A. and C.P. Lentz(1977): Anaerobic digestion of pear waste, Laboratory equipment design and preliminary results. Canadian Inst. Food technology J. 4 (4) 159-165
25. 脇本和昌、垂水共之、田中豊: パソコン統計解析ハンドブック、共立出版株式会社 21
26. Zhang, R.H., J.R. North and D.L. Day(1990): Operation of a field scale anaerobic digester on a swine farm. Applied engineering in agriculture 6(6) 771-776

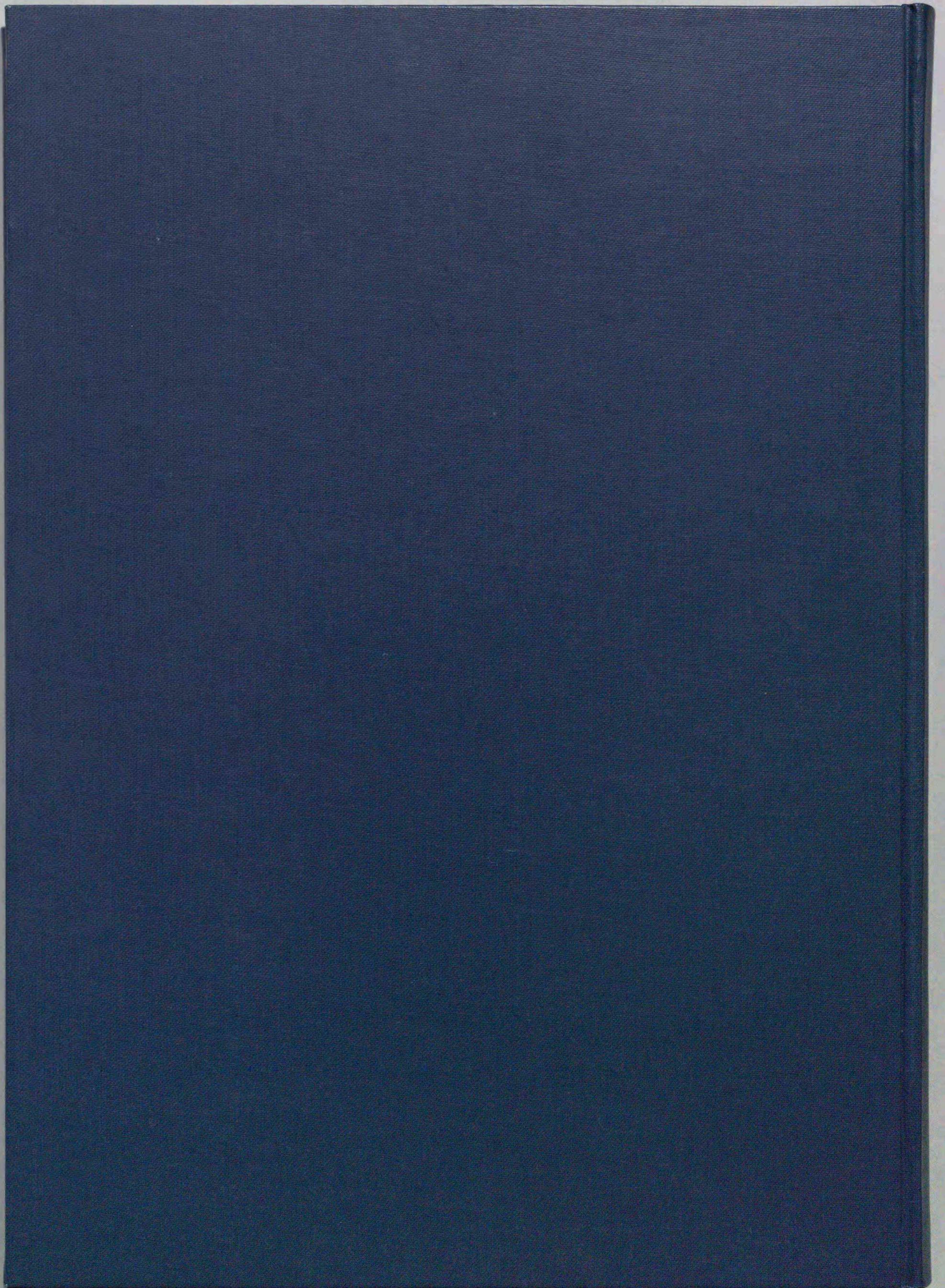
— 第5章 —

1. 中央畜産会(1987): 第2章 45.に同じ
2. Chapman, J.M., V.R. Phillips and B.F. Pain(1990): Mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry on a farm scale, maintenance requirements and reliability. J. agricultural engineering reseach 47 277-285

3. Chen, Y.R. and A.G. Hashimoto(1981): Energy requirements for anaerobic fermentation of livestock waste. Proceedings of the 4th Int. symposium on livestock wastes. ASAE 117-121
4. Coppinger, E., R.E. Hermanson, and D. Baylon(1978): Operation of a 390m<sup>3</sup> digester at the Washington state dairy farm. ASAE paper No. 78-4566
5. Fischer, J.R., N.F. Meador, C.D. Fulhage, and F.D. Harris(1979): Energy self-sufficient swine production system. ASAE paper No.79-4062.
6. Fischer, J.R., D.M. Sievers and C.D. Fulhage(1983): Energy consumption from farm animal manure methane generation. Transactions of the ASAE 223-232
7. 小林茂樹、武藤忠夫、石丸國雄(1988): 冷涼地における牛ふん尿嫌気発酵処理の実用化施設と運転管理、農作業研究 23(3) 218-225
8. Koelsch, R. and W. Jewell(1982): Co-generation of electricity and heat from biogas. ASAE paper No. 8-3621.
9. Midwest Plan Service(1975): Livestock waste facilities handbook. Iowa state university.
10. North, J.R., C.B. Fedler, T.H. Chen and D.L. Day(1987): The university of Illinois digester principles of operation. Seminar of 2nd technical section of the C.I.G.R. on latest developments in livestock housing. Reports 52-60
11. North, J.R.(1990): Feasibility of an integrated biogas scrubber for a swine manure digester. Ph.D Thesis, University Illinois.
12. Siebenmorgen, T.J., D.D. Schulte and J.L. Ballard(1988): Integration of a cogeneration system into a swine operation, I. Model development and system description. Transactions of the ASAE. 31(5) 1556-1565
13. Siebenmorgen, T.J. and D.D. Schulte(1988): Integration of a cogeneration system into a swine operation, II. Evaluation of cogenerator operation. Transactions of the ASAE. 31 (5) 1566-1573
14. Sievers, D.M., C.D. Fulhage and E.L. Iannotti(1990): Structural and equipment deterioration in an anaerobic digester. Proceedings of the sixth international symposium on agricultural and food

processing wastes. 84-87

15. Singh, R.K. and D. Schulte(1977): Computer simulation of energy recovery through anaerobic digestion of livestock manure. University of Manitoba.
16. 高畑英彦、梅津一孝(1992): 100頭規模酪農用バイオガス生産施設について、平成4年度農業施設学会大会講演要旨、 384-385
17. 梅津一孝、高畑英彦、山本智久(1991): 乳牛スラリー嫌気処理によるバイオガスからの炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)の分離、帯大研報 I . 17(3) 21-26
18. 代永道裕(1991): 牛糞尿の性状、マニユア・コントロール、デーリーマン社 85-91
19. 山内 徹(1980): バイオマスのメタン発酵に関するエンジニアリング、施設農業への新エネルギー利用、フジテクノシステム
20. Walker, L.P., D.C. Ludington, R.E. Muck, R.E. Friday, and M.G. Heisler(1984): The design and analysis of an energy integrated dairy system. Transactions of the ASAE. 27(1) 229-240
21. Zhangら(1990): 第4章 25.に同じ

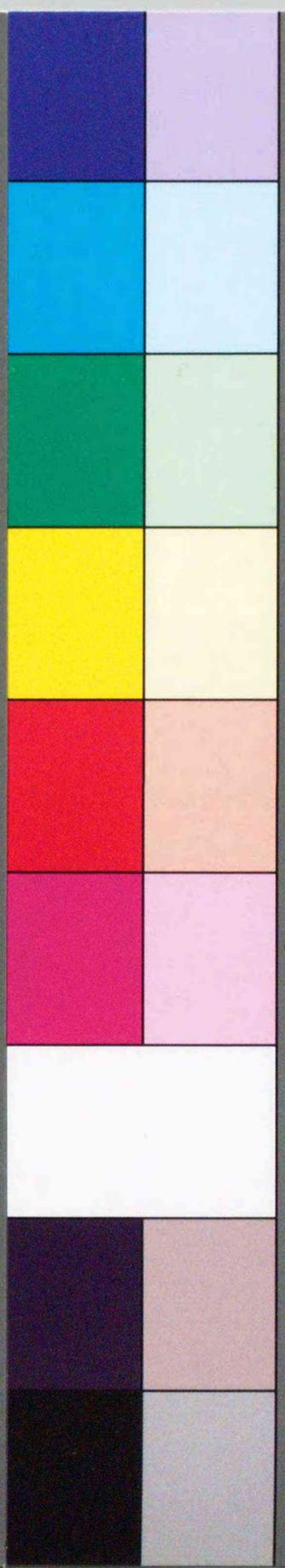


inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

