

#### IV. 高温発酵試験

##### 1. 目的

高温発酵は発酵温度を55℃前後で行うもので、37℃前後で行う中温発酵に比べると、以下の長所を持つと言われている。

- ① 発酵原料単位量当たりエネルギー取得量が多い
- ② したがって、同量のふん尿処理では中温発酵より施設規模を小さくできる。
- ③ 施設規模が同じであれば、処理できるふん尿量が増える

しかし、温度変動に弱いため制御は難しいとも言われており、国内での普及は進んでいない。このような高温発酵の特徴を検証するために、室内実験と別海施設での実証試験を行った。

##### 2. 試験 1 室内実験

###### 1) 目的と方法

以下の3点の事項を確認するために室内実験を行った。

- ① 中温から高温へ温度を上昇させる過程での発酵への影響
- ② 高温発酵の温度変化に対する感受性
- ③ 高温発酵の中温発酵に対する優位性

特に、①の実験は既に中温発酵で稼働しているメタン発酵を高温に移行させることを念頭においたもので、別海施設での実証試験に応用することを目的としていた。

実験装置は写真-29で示した副資材実験と同じ装置を用いた。スラリーやガスの分析に関しても副資材実験と同様である。処理区は、以下の3試験区を設けた。実験経過を表16に示した。

###### ① 中温標準区

発酵槽内温度を37℃で保持した、中温発酵。

平均滞留日数30日に相当する200mlのふん尿スラリーを毎日投入した。

###### ② 高温保温区

発酵槽内温度を37℃の中温発酵で起動させ、その後段階的に55℃の高温発酵に移行させた。平均滞留日数20日に相当する300mlのふん尿スラリーを毎日投入した。槽の外側を建築用断熱材で保温した。

###### ③ 高温非保温区

槽内条件は②と同様である。槽の外側を断熱材で被覆せず、むき出しのまま使用した。

表16 実験概要

年 月 日	経過日数	槽内温度		実 験 内 容
		(中温)	(高温)	
2004.5.27		37℃	37℃	中温発酵で訓養を開始
2004.6.9		37℃	37℃	発酵液全量を混合、等量で3基のファーマンタに再配分
		37℃	37℃	
	0日目	37℃	37℃	実験開始(経過日数:0日)
2004.6.17	8日目	37℃	37→45℃	高温処理区の温度上昇開始
2004.6.21	12日目	37℃	45→47℃	〃
2004.6.30	21日目	37℃	47→49℃	〃
2004.7.2	23日目	37℃	49→51℃	〃
2004.7.4	25日目	37℃	51→53℃	〃
2004.7.6	27日目	37℃	53→55℃	以後、定温状態を保った
2004.7.29	50日目	37℃	55℃	実験終了

###### 2) 実験結果

###### (1) 中温から高温へ温度を上昇させる過程での発酵への影響

図27に1日当たりのバイオガス発生量の推移を、図28に発生したバイオガスにメタン濃度を乗じて求めた、1日当たりメタンガス発生量の推移を示した。

実験開始11日目頃(高温処理で43℃を超えた頃から)中温発酵と高温発酵で差が生じ始めた。中温発酵はガス発生量が定量化し、安定状態となった。一方、高温処理は槽内温度が45℃から47℃へ昇温した時点で両ガスとも発生量が減少し始め、中温発酵に対比すると、

高温保温区で0.5～0.6、高温非保温区で0.1～0.15まで低下した（19日目）。その後、昇温を続けたが、それに伴い、両ガス発生量とも上昇に転じ、53℃まで昇温した時点で中温発酵のおよそ2倍のガス発生量を示した（24日目）。しかし、メタン濃度は中温発酵より低いため、メタンガス発生量は約1.6～1.7倍で、2倍には至らなかった。53℃から55℃に昇温した時点（25日目）で両ガス発生量とも再び急激に減少し始め、中温発酵に比べて、最大でも0.22～0.35まで低下した（28日目）。その後、槽内温度55℃で定温状態を保った3週間で、両ガス発生量とも緩やかに増加したが、50日目で終了するまで高温発酵では中温発酵のガス発生量を越えることはなかった。

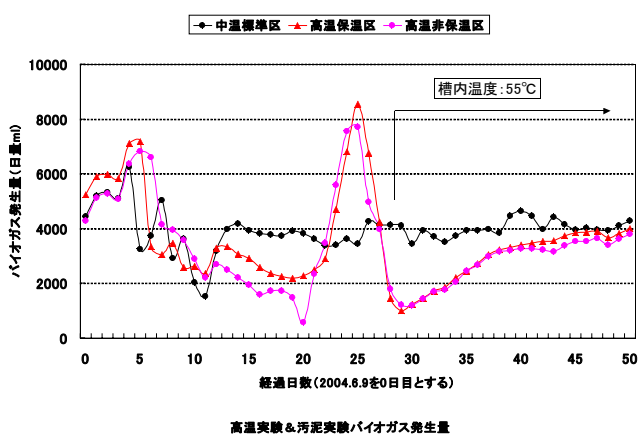


図27 バイオガス発生量

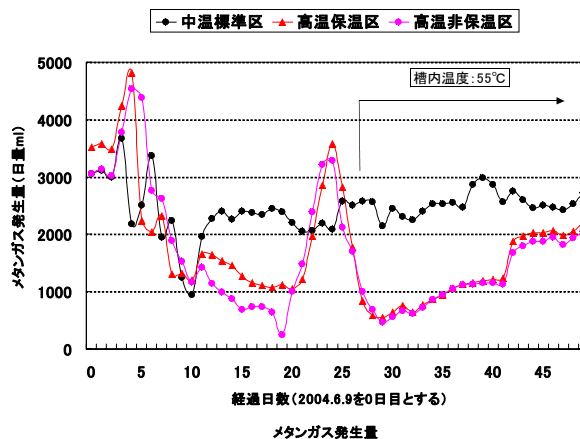


図28 メタンガス発生量

(2) 高温発酵の温度変化に対する感受性

図27、及び図28で示したように、槽内温度が変化すると両ガス発生量が増減したことから、メタン発酵は45℃以上の槽内の温度変化に大きく影響されると考えられる。

図29に高温保温区、高温非保温区それぞれの発酵液の温度変化を示した。温度調節器で設定された温度に対し、保温区の温度変動は極めて小さく、断熱材による保温効果が認められた。また、非保温区に関しても、温度変動は0.2℃程度と小さかった。しかし、加温温水を供給する温度調節器の温度設定にあたっては、高温保温区では設定温度より1℃前後高温に設定すれば良好に発酵温度を維持できていたのに対し、高温非保温区は約5℃高く設定しないと安定して目標温度を保持出来なかった。小さな実験装置で室内であったことから、大きな温度変動は生じず、温度編感化に対する感受性自体は明確にはなかったが、高温保温区では断熱材によって温度調節器の設定温度を低くすることができ、加温に必要な熱エネルギーは大きく低減できた。

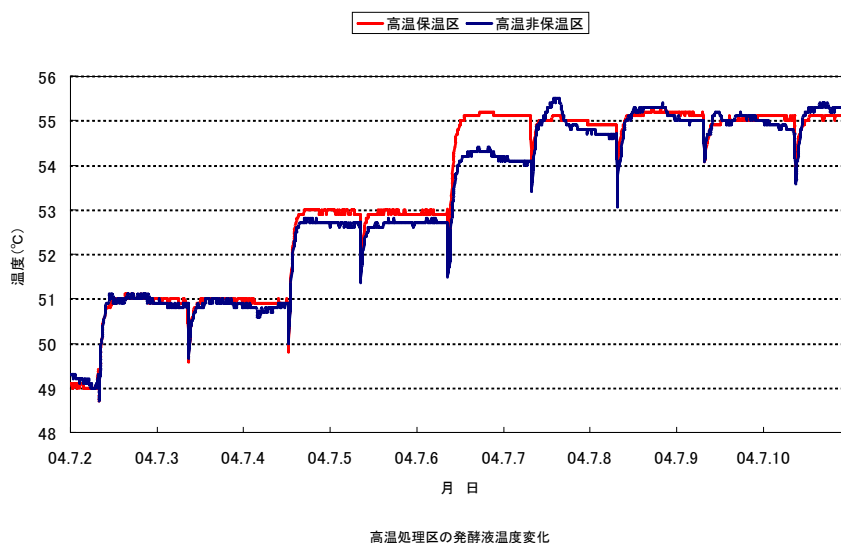


図29 高温処理区の発酵液の温度変化

### (3) 高温発酵の中温発酵に対する優位性

図30にスラリー中に含まれる有機物率の変化を示した。5回の測定の内、3.5~4.5%の間で有機物率が推移しているが、中温発酵と高温発酵を比較しても両者の間で大きな差はなかった。図31に投入したスラリー中に含まれる有機物量当たりのメタンガス発生量を経過日数毎に示した。7日目（中温状態）、21日目（昇温状態）、28日目以降（高温定温状態）いずれの場合にも高温発酵より中温発酵の方がガス発生効率が良好であった。

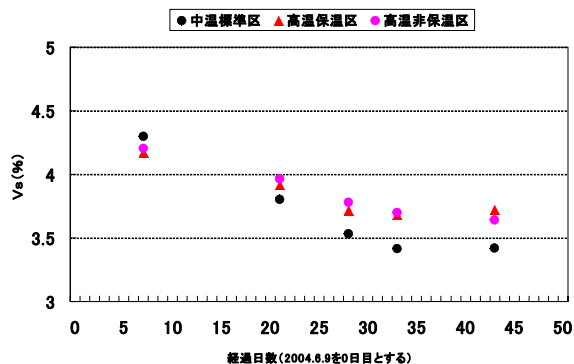


図30 スラリー中の有機物含有率の推移

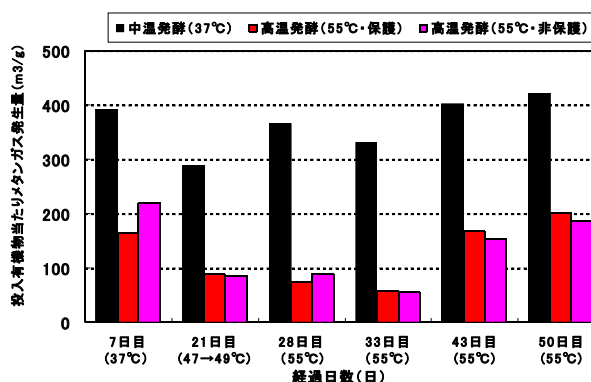


図31 投入有機物当たりのメタンガス発生量の推移

### (4) 考察

今回の室内実験では、中温発酵に比べ、高温発酵のバイオガス、メタンガスいずれの発生量も少なく、また、45℃以上のメタン発酵は温度変化に対して敏感で、ガス発生量が大きく変動した。加温エネルギー量が多いことも考慮すると、高温発酵の中温発酵に対する明らかな優位性は認められなかった。なお、43℃までが中温発酵の上限、高温発酵は53℃程度が適正と示唆された。

## 3. 試験 2 別海施設での実証試験

### 1) 目的と方法

室内実験では高温発酵に関する良好なデータは得られなかったが、発酵が全く停止するという事態には至らなかったことと、帯広畜産大学や足寄町で実規模プラントでの稼働が相次いでいることから、別海施設での実験を実施した。

平成17年1月10日に、メタン発酵槽の温度制御パラメータを55℃に変更した。また、殺菌プロセス制御パラメータも変更して殺菌タンクでの貯留をせずただちに消化液貯留タンクへ排出されるようにした。

高温発酵の水理的な平均滞留日数は15~20日と言われている。発酵槽の容量は一定であるため、毎回投入する発酵原料の量を中温発酵時の1.5~2倍に増量することとなるが、その分だけ消化液の発生量も多くなる。実験を開始した時期に、消化液貯留タンクの空容量を急速に圧迫することはプラント全体の制御上、得策ではないため、毎日の発酵原料の投入量は中温発酵と同じとした。3月10日に温度制御パラメータをはじめとする制御システムの設定を中温発酵に戻し、自然に中温発酵に戻した。

### 2) 実験結果

約2ヶ月間の高温発酵実験期間中の推移を稼働履歴と共に図32に示した。

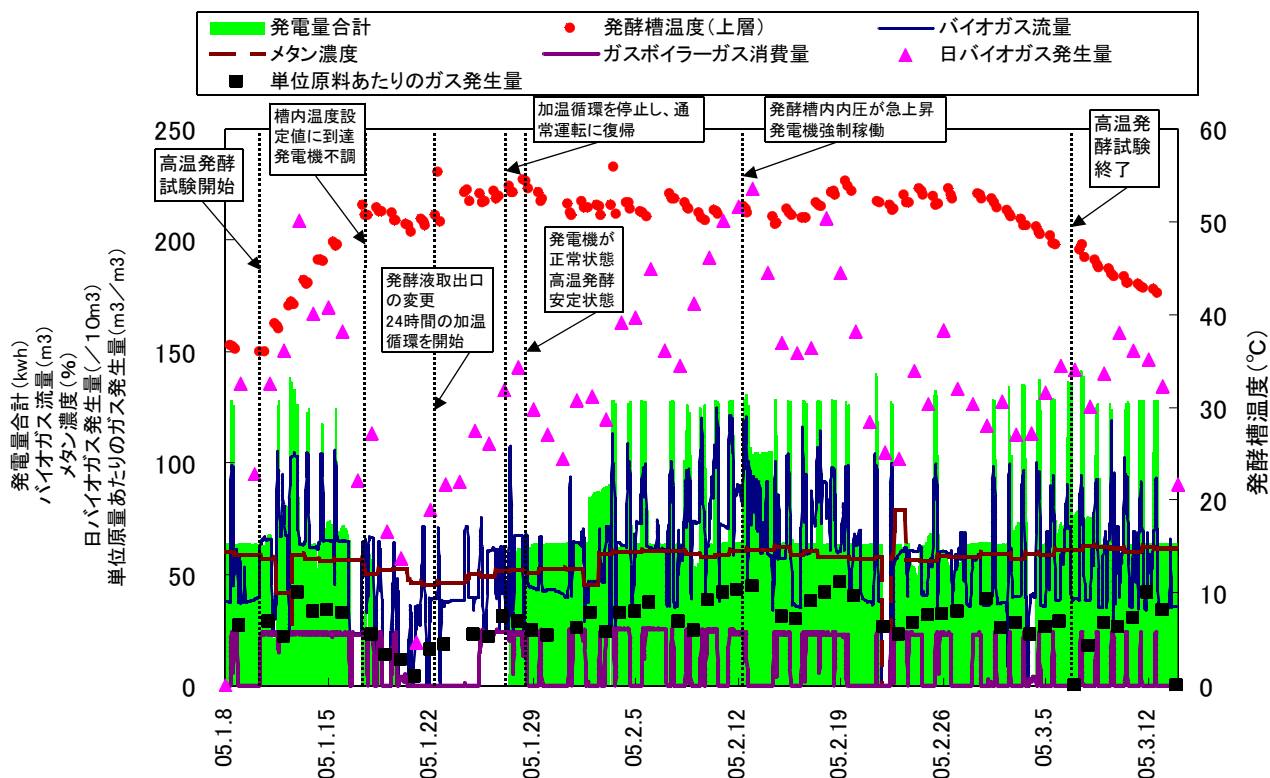


図32 高温発酵試験に関するバイオガス発生量などの推移

高温発酵試験期間中の発酵槽の温度およびバイオガス発生量の推移から、[温度上昇期][移行期][高温発酵期]の3期に区分して、比較対照として[中温発酵期]を加えた4期で諸元を整理した(表-17)。

温度上昇期はメタン発酵自体に強い劣化は生じておらず、中温発酵を上回るガス発生であったが、1500m<sup>3</sup>の発酵液の温度を上昇させるためには熱量が不足であり、重油に依存した。高温に達した後、約10日間(=移行期)はバイオガスの発生量もメタン濃度も低下してしまい、電力も熱もほとんど自給できず、外部エネルギーに依存してしまった。

ガス発生とメタン濃度が回復して、高温発酵としての安定期(=高温発酵期)に入った以降は中温発酵期より電力自給率が高まった。加えて、殺菌行程も不要であるため熱消費においても中温発酵より低い値であった。

総じて、今回実施した高温発酵はガス発生とエネルギー収支において中温発酵より良好な値であった。一方、温度上昇期や高温発酵が安定するまでの期間は、外部エネルギーに大きく依存することから、移行期間をできるだけ短くする工夫が必要と考えられた。

高温発酵から中温発酵への移行では、ガス発生低下などの明確なトラブルは発生しなかった。

表-17 高温発酵試験に関する期別対比表

項目	中温発酵期 (2004.12.9~1.9)	温度上昇期 (2005.1.10~1.17)	移行期 (2005.1.18~1.28)	高温発酵期 (2005.1.29~3.10)
バイオガス発生量(m <sup>3</sup> /日)	1,190.9	1,495.6	935.9	1,506.5
メタンガス濃度(%)	58.3	54.0	49.2	58.5
スラリー投入量(m <sup>3</sup> /日)	42.8	45.8	44.8	41.1
単位原料当たりガス発生量(m <sup>3</sup> /t/日)	27.8	32.7	20.9	36.7
電力自給率(%) <sup>*1</sup>	107.5	97.9	47.2	145.7
重油消費量(L/日)	144	334	340	130
発酵槽熱消費量(MJ/日)	5,395	17,880	13,282	6,612
殺菌槽熱消費量(MJ/日)	5,417	2,321	0	0

\*1 電力自給率は売電を除く消費電力量の合計と発電量の比率

### 高温発酵試験での温度管理上の施設的な課題

発酵槽に挿入してある温度計が正しい温度情報を発信していないことが明らかとなった。Ⅲ－２－４)で詳述するが、本章でも簡単に触れる。

メタン発酵槽は縦置円筒型で、側面の上部と下部の2カ所にPt抵抗体の温度計が挿入されており、2カ所の平均温度で循環加温の要否を自動制御している。循環加温は発酵槽と加温用熱交換機の間でスラリーを循環させ、熱交換機を導通している温水との間接接触でスラリーの温度を上げる方式で、発酵槽からの取り出し口は、上部と下部に切り替えることができる構造となっている。通常は上部から取り出し、加温後は下部から導入させる。

移行期において、下部温度計の値がなかなか上昇しなかった。しかし、設定温度を高くすると、上部温度が55℃を超えてしまうこととなり、下部に滞留していると思われる冷たいスラリーを直接加温するために、加温循環の取り出し口を発酵槽上部から下部に切り替えた。その結果、下部取り出し配管で閉塞が発生した。

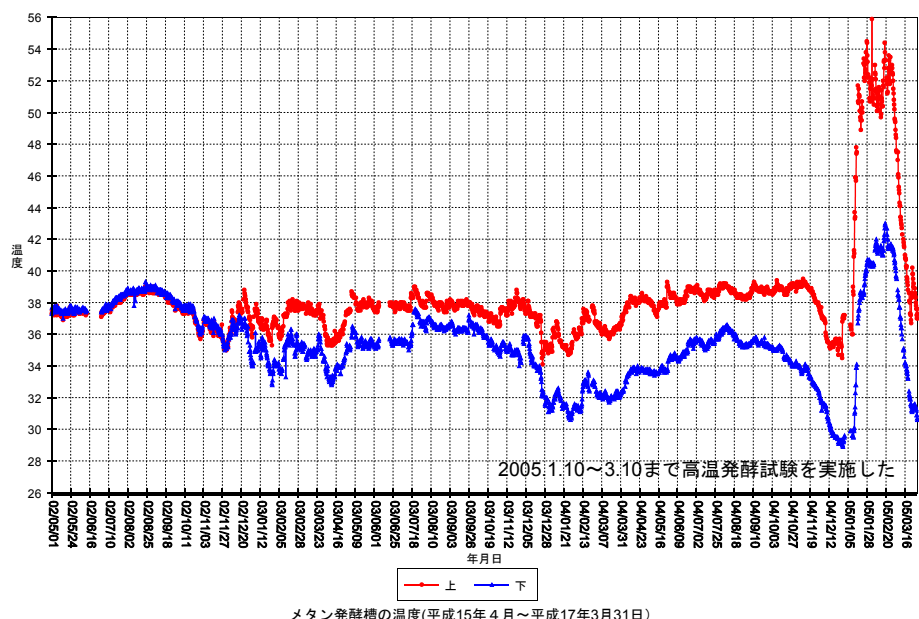
実際に下部の液温が上昇していないのか、液温は上昇しているが温度計が感知できていないのか（温度計の故障 もしくは 測定環境の悪化）、原因を特定できなかった。そこで、上部と下部の温度計の値を遡って確認したところ、図33のようであった。すなわち、施設稼働直後は、上部温度計と下部温度計はほとんど同じ値を示していたが、年数の経過とともに較差が生じ、下部温度計の値が低下していることが認められた。

このことから、下部温度計は原因不明であるが正しい液温を感知できておらず、上部温度計の温度が発酵槽全体の液温であると判断した温度制御で実験を継続した。

具体的な温度制御は、以下の考え方で行った。

- ① 上部温度計の値が53℃を維持するようにする。
- ② 下部温度計の値は不正であるが、制御は上部と下部の平均温度で行われる。
- ③ 下部の温度は実際より約9℃低い値を示すと判断される。
- ④ 制御温度は48℃とし、液温の変化を見ながら微調整する。

下部温度計の指示値が不正であることの理由は、温度計自体の劣化・スラッジに埋没している・汚れが厚く被覆している等が考えられる。下部配管が閉塞したことから、スラッジの堆積は明らかであり、原因として強く疑われる。なお、温度計は発酵槽に直接挿入されているため交換するためには、発酵液を全て排出するなどの手順が必要となる。二重ソケット方式など、センサー類の異常に対する点検や交換が簡便に実施できる構造と設計が求められる。



## V. 総合考察

### 1 固形糞尿の取り扱い

北海道においても家畜糞尿を主原料とするバイオガスプラントの設置数は増加しているが、北海道酪農では堆肥盤に堆積される固形糞尿を排出する酪農家が過半を占めるため、共同利用型バイオガスプラントではスラリー状糞尿だけでなく、固形糞尿も受け入れる可能性がある。

固形糞尿をメタン発酵の原料とするには、メタン発酵施設と堆肥化施設の両方を整備し、固形糞尿は固液分離を行い、分離液分だけをメタン発酵の原料とし、分離固分は堆肥化することが運営上の負担は大きい、施設稼働面から現実的であった。

固形糞尿を直接、メタン発酵の受入槽に投入し、攪拌・混合後、メタン発酵槽に投入することは可能であるが、攪拌・混合に施設の増強、多大な労力と動力を必要とし、効率的かつ安全な処理法とはではなかった。

このことから、共同利用型バイオガスプラント施設の効率的な稼働のためには、原料をスラリー状糞尿に限定することが望ましい。

### 2 副資材のバイオガス発生効果

地域で発生する多くの有機性廃棄物は家畜糞尿とともに堆肥化される他に、ダイオキシンの発生が危惧される焼却処理、地下水汚染やメタンガス揮散の危惧のある埋め立て処理等をされていた。しかし、有害物質を含まない有機性廃棄物はバイオガスプラントの副資材として利用することにより、エネルギーを取出すことができるようになる。また、これらの副資材のガス発生効果や発酵上の投入限界が本成果で明らかになり、今後のバイオガスプラントの稼働上の指針となる。

### 3 バイオガス中の硫化水素の効率的除去

別海施設の生物脱硫装置(イオウ酸化細菌の棲息面積当たりのガス処理量:2.8m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/日、平均滞留時間:0.69時間)では当初、バイオガスの流入口と流出口が近接していたが、流出口を流入口に対向する位置に移動することにより、バイオガスの実質的な滞留時間が長くなり、生物脱硫効果が向上した。

一方、湧別の生物脱硫装置は別海施設にくらべ、イオウ酸化細菌の棲息面積当たりのガス処理量が約7倍、バイオガスの滞留時間は1/20以下である。このために生物脱硫の効果が低かったものと考えられる。このように、現在の生物脱硫装置は全てが十分に機能しているとは言いがたいが、担体式生物脱硫装置は安定した脱硫効果が認められた。

脱硫装置に関しては、酸化鉄脱硫装置単独よりも十分に機能を発揮する生物脱硫と酸化鉄脱硫を併用した脱硫装置で維持管理費が低廉であることが試算された。加えて、使用済み酸化鉄剤は現在、埋め立て処理されるため、イオウ資源の循環にならないが、生物脱硫ではイオウ資源の循環にも寄与することからも、今後の脱硫では生物脱硫装置を酸化鉄(化学的脱硫)脱硫装置とともに併設する事が望ましい。

### 4 高温発酵

別海施設での検証試験では、高温発酵としての安定期に入れば、メタン濃度は低下せず、ガス発生量は約1.3倍に増量し、殺菌エネルギーが不要になることからエネルギー収支も小さく、中温発酵に対する優位性が認められた。一方で、中温から高温への移行期間中は外部エネルギーへの依存が極めて高くなることが実証できた。

## VI. 要約

- 1) 長藁入り固形糞尿、固液分離後の固形糞尿及び裁断藁入り固形糞尿をメタン発酵の受入槽に投入しメタン発酵の原料とするには、受入槽での固形糞尿塊の破碎・分散に多大の時間・労力・機械力を要し、不十分な場合にはポンプ等の閉塞を招く(写真-11)ため、固形糞尿をメタン発酵の原料として直接利用することは実用的でない。
- 2) スラリー状糞尿、固液分離後の液分(スラリー)および尿溜め液を原料とし、原料投入や消化液の排出に支障がない構造のバイオガスプラントであれば、連続的な原料投入と所定温度での加温によりメタン発酵は順調に進行し、投入原料当たりのメタンガス発生量は $15\sim 18\text{m}^3$ であった(図-9)。廃牛乳や給食残滓を副資材として投入した場合に原料投入量当たりのメタンガス発生量は増加する傾向が認められた。
- 3) 重金属等の有害物質を含まない有機性廃棄物の副資材としてのメタンガス産出効果はその組成により異なり、廃牛乳や廃バターで多く(図-14)、汚泥等で小さかった。有機物当たりのメタンガス発生量は糞尿: $0.18\text{ m}^3/\text{g}$ 、廃牛乳: $0.82\text{ m}^3/\text{g}$ 、廃バター: $0.89\text{ m}^3/\text{g}$ であり、食品残滓などでメタンガス発生量が多くなる。バイオガスの発生量が大きく低下する投入限界量は廃バターで10%、パン粉で12%、蛋白質(プロテイン)で8%であり、N分の多い有機物で限界量が小さかった。
- 4) 生物脱硫(湿式ガスホルダー)と酸化鉄脱硫が直列に配置される別海施設では、脱硫後のバイオガス中の硫化水素濃度を数 $\text{mL}/\text{kL}$ 以下に維持できた。湿式ガスホルダー式生物脱硫装置での脱硫効果はガス流入口と近接していたガス流出口を対向位置に移動した後、空気注入率5~8%で脱硫効率の改善が認められた(図-19)が安定しなかった(図-23)。38℃保持の担体式生物脱硫試験装置では空気注入率5~8%で約85%の安定した生物脱硫率が得られた(表-14)。
- 5) 脱硫経費に関して、生物脱硫施設を併設し機能させる方が酸化鉄脱硫単独の場合よりも安価であると試算された(表-15)。前者の脱硫法ではイオウ資源の循環がなされる事もあり、生物脱硫を十分に機能させる事が望ましい。
- 6) 別海施設での高温発酵は水理的な平均滞留日数を中温発酵と同じで実証試験を実施した。その結果、高温発酵のエネルギー収支は中温発酵より優れていた(表-17)。

## VII. 残された問題とその対応

- 1) 副資材としては調査した物以外にも、敷き料として使用しているオガクズも含め、多くの有機性資源が考えられ、今後室内試験で調査する予定である。
- 2) 廃脱硫剤のイオウ資源としての再利用は残された課題である。
- 3) 抗生物質を含む廃棄牛乳を副資材として利用した消化液での抗生物質の残留状況とその影響の究明は残された課題である。