

乳牛ふん尿を原料とした中温湿式嫌気性発酵に関する室内実験(第1報)

—ふん尿スラリー中の敷料の有無および濃度(希釈倍率)がメタン発酵に与える影響—

Laboratory Experiment on Medium-Temperature and Wet Anaerobic Fermentation of Cattle Waste (1st Report)

Impact of presence or absence of bedding materials in waste slurry and the concentration (dilution magnification) of slurry on methane fermentation

石田 哲也*

Tetsuya ISHIDA

乳牛ふん尿スラリーに含まれる敷料(固形分)の含有量とメタン発酵の特徴を探索するため、ジャーファーマンタを用いた各種の室内実験を実施し、第1報として以下に示す2種のメタン発酵実験結果を報告する。いずれも原料の追加投入を行わないバッチ処理である。

- ①敷料の有無と希釈の影響：小麦裁断藁を敷料とするフリーストール牛舎から排出された乳牛スラリーを原料として、無処理、敷料除去、2倍希釈、敷料除去かつ2倍希釈の4つの処理でメタン発酵を行った。原料スラリーのTs濃度が12%程度と高い場合は、敷料の有無がバイオガス発生量に及ぼす影響は少なく、6%程度と低い場合は敷料を除去したほうが多量のバイオガスが発生し、良好な発酵となった。
- ②希釈の影響：フリーストール牛舎から排出された乳牛スラリーをTs濃度で、11.5、10.0、7.5、3.5%の4段階に希釈し実験した。ガス発生量、メタン濃度はTs=10.0が最も高く、ついで11.5、7.5、3.5%の順番であり、最適なTs濃度は10.0%と考えられた。

《キーワード：メタン発酵；敷料；希釈；硫化水素》

A variety of laboratory experiments were performed using jar fermenters in order to survey the relationship between efficiency of methane fermentation and volume of bedding. This first report aims to shed light on results of two types of methane fermentation experiments as follows. Both types adopted batch processing, whereby no additional raw materials are fed :

- ① Effect of presence or absence of bedding and dilution : Four kinds of methane fermentation treatment were performed, using dairy cattle slurry discharged from free stall barns, which use cut wheat straw as bedding, as the raw material : non-treatment ; removal of bedding ; double dilution ; and removal of bedding combined with double dilution. When the Ts concentration of raw material slurry was high at approximately 12%, presence or absence of bedding exerted little effect on the amount of biogas generated. On the other hand, when the said concentration was low at approximately 6 %, large amounts of biogas were generated by removing bedding, resulting in favorable fermentation.
- ② Effect of dilution : The dairy cattle slurry discharged from free stall barns was diluted in terms of Ts concentration in the following four steps to perform experiments : 11.5, 10.0, 7.5 and 3.5%. The amount of gas generated and methane concentration were the highest when Ts equaled 10.0, followed by 11.5, 7.5 and 3.5%, indicating that the optimum Ts concentration was 10.0%,

《Keywords : methane fermentation, bedding, dilution, hydrogen sulfide》

1. はじめに

太陽発電、風力発電、バイオガスなどの再生可能エネルギーは現世の太陽エネルギーに由来することから、石油等化石燃料に起因する地球温暖化などの環境問題やエネルギー問題を追い風として再認識されている。家畜排泄物や都市ゴミ（食品残渣）などの各種有機物を原料とした嫌気性発酵（以下、メタン発酵と呼ぶ）は、これらの有する潜在エネルギーをバイオガスという再生可能エネルギーに変換できる。しかし、積雪寒冷な北海道で家畜排泄物を主原料とした実用規模のメタン発酵施設は近々5カ年で10カ所を越える数になったが、まだまだ少なく、稼働年数も短いため、実績は不十分である。そこで、農業開発部では平成12年度、別海町と湧別町に建設した資源循環試験施設で実用規模での試験研究を実施している。

並行して、メタン発酵の基礎データの取得や発酵に与える影響が大きいと考えられる副原料投入の予備実験として、微生物培養装置を利用した室内実験を行っている。

本報告は、平成13年度に実施した以下の実験のうち、①と②を第1報として取り纏めたものである。③④の結果は第2報として報告する予定である。

- ①敷料の有無と2倍希釈がメタン発酵に与える影響
- ②4段階の希釈がメタン発酵に与える影響
- ③廃乳を副原料とした予備実験
- ④廃乳を副原料とした実用規模実験

2. 敷料の有無と2倍希釈がメタン発酵に与える影響

(1). 実験目的

北海道酪農での乳牛飼養形態は乾草や小麦藁といった長い繊維質の敷料を多用したスタンションストール方式が主流となっている。したがって、乳牛糞尿と敷料が混合した固形糞尿がメタン発酵の元々の原料となるが、長い繊維質の敷料はメタン発酵施設の配管閉塞の原因となることから、資源循環試験施設では固液分離機で除去し、液分をメタン発酵の原料とし、固形分は堆肥化して農地に還元する手法をとっている。この固液分離作業は労力・コストの面からメタン発酵システムの隘路となっており、改善が必要である。

改善の可否と態様を判断するためには、敷料がメタン発酵に与える影響を評価する必要がある。敷料が悪影響を有するものであれば、配管閉塞とは関わりなく除去は必須であると判断しなければならないし、良い

影響をもたらすものであれば、配管閉塞に対処しつつ、敷料の利用を積極的に進める必要があるからである。そこで、粗大な敷料の存在がメタン発酵に及ぼす影響を明らかにする。

(2). 実験方法

1) 原材料

原料スラリー：鹿追町のフリーストール牛舎で採取した乳牛スラリーで、敷料は平均長10cmに裁断された小麦桿が用いられている。毎日、成牛145頭と子牛10頭に0.3tの敷料が給与され、平均9.5tのふん尿と伴に排出されている（酪農家への聞き取り結果）。したがって、敷料の混入割合は3%と計算された。

Ts(乾物率)=12.7%、灰分率=1.30%であった。

種スラリー：別海資源循環試験施設で採取した原料スラリーを室内実験でメタン発酵させた液。

Ts=6.0% 灰分=1.2%であった。

2) 処理：以下の4処理

- ①無処理：原料5.45 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$ +種スラリー0.55 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$
Ts=12.0%
- ②2倍希釈：原料2.725 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$ +種スラリー0.275 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$ +
純水3 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$ Ts=6.0%
- ③敷料除去：敷料除去原料5.45 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$ +種スラリー0.55 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$
Ts=12.0%
- ④敷料除去2倍希釈：敷料除去原料2.725 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$ +種スラリー0.275 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$ +純水3 $\frac{\text{kg}}{\text{L}}$
Ts=6.0%

以下、各処理を①無処理、②2倍希釈、③敷料除去、④複合処理と略称する。

なお、敷料除去は、以下の手順で行った。

ア) ナイロンネット袋を用いて、手絞りで固液分離

イ) 分離固分から目視で麦桿のみを除去

ウ) 麦桿を除去した固分を分離液分に戻す

平成13年12月19日に実験装置にセットアップし、加温を開始した。翌20日を経過日数1日目とした。

3) 実験装置と試料分析

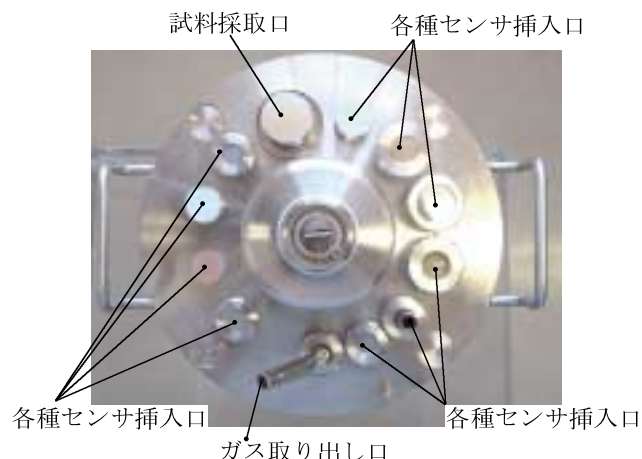
写真-1に実験装置1組の全景を示した。微生物培養装置は、家畜排泄物のように夾雑物・有機物が多く、粘性の高い基質を想定して製作されたものではないことから、定量ポンプを用いた連続処理には利用できず、バッチ処理で実施した。また、pHセンサーは汚れの付着による測定精度の劣化が短時間で生じるためpHの連続自動計測はできなかった。

スラリーの性状変化は、実験開始後10日間は1回／日で連続、その後は2回／週の頻度で試料を採取し、pH、Ts、Vs（灼熱損失）、VFA（揮発性脂肪酸含量：メタンの前駆物質のひとつ）を分析して把握した。スラリー採取はフランジ（写真－2）に設置されている試料採取口（通常はシリコンゴム栓で密栓している）からポリエチレン管を挿入し、100cc シリンジで吸引してポリエチレン管ごと引き抜き、ビーカーに吐出する方法で行った。1回の操作で約30ml 採取でき、分析に必要な約80ml を得られるまで、数回に渡って吸引・引抜きを行った。この方法では細片化した敷料は採取できるが、長い繊維状のものは採取されず、敷料のような粗大有機物はTsとして計測されない。

また、この操作時には試料採取口は大気に開放され発酵槽上部空間に空気の流入があった。

ガス分析は連日（平日）、スラリー採取前に培養槽の上部空間に滞留しているガスを試料採取口を密栓しているゴム栓をガスタイトシリンジで突き通して吸引採取し、ガスクロマトグラフでメタン、硫化水素濃度を測定した。ガス発生量は湿式ガスメーターによる自動計測で記録した。

実験装置はメタン菌群の活性を阻害する光を遮断するため、採光窓のない部屋に設置しており、蛍光灯の点灯は作業上必要な最低限に抑えた。温度調節器により培養槽内部の温度は常時37℃に保たれ、攪拌強度は肉眼でスラリーの流動が確認できる最低限の速度に調節した。

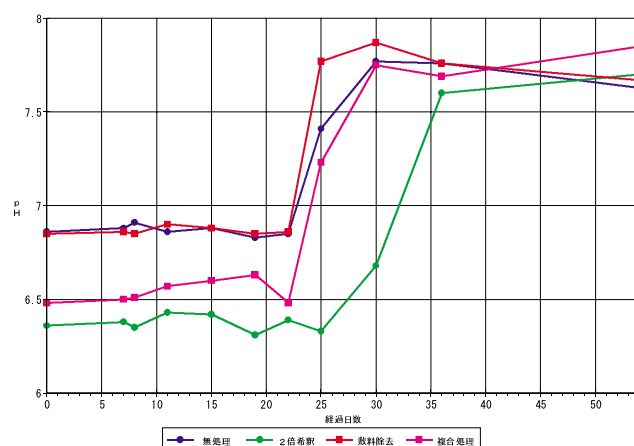


写真－2 フランジ上面写真

（3）実験結果

① pH の変化（図－1）

2倍希釈を除く3処理は、23日目以降で急速にpHが上昇し、7.8前後で安定するという近似した経過をたどった。2倍希釈ではpH上昇が約7日遅れたが、



図－1 pHの経時変化



写真－1 実験装置全景

最終的には他の処理と同じ値に収束した。

一般的な滞留日数である30日までに限定すると、2倍希釈によりpHの上昇が遅延するが、敷料を除去すると遅延現象は抑制される（複合処理の結果）といえる。

② Ts の変化（図-2）

最終的に、無処理でのTsは試験開始時の30%減であったのに対し他の3処理では半減した。無処理は敷料を多量に含んでおり、日数の経過に伴って長い繊維質や粗大物が分解し、Tsの測定対象となり、Tsの減少率が抑制されたことも考えられる。

2倍希釈には敷料が含まれるが、敷料を含まない複合処理と大差がなかった。これは希釈により敷料量も半減しており、Tsの測定対象となる細片化の量が少ないためと考えられる。また、いずれの処理でも7日目までの短期間に1%ほどの変動が発生しているがその理由は不明である。

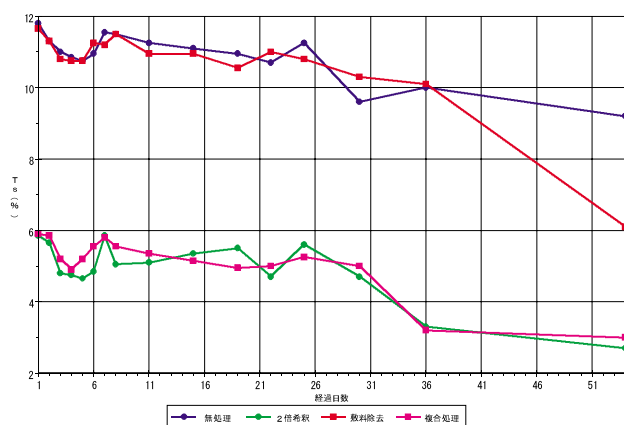


図-2 Tsの経時変化

③ VFA の変化（図-3）

いずれの処理も20日目まで増加傾向で、その後減少に転じるという経過を示した。35日以降では濃度の濃い処理では再び増加傾向を示したが、薄い処理は減少傾向が継続するという違いがあった。また、敷料を含

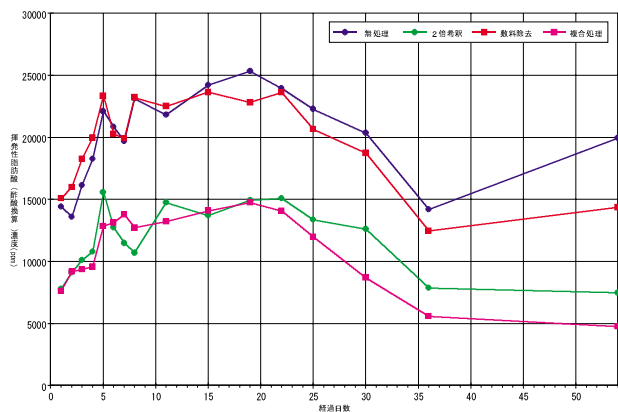


図-3 VFAの経時変化

む処理物のほうが若干高い値を持続していた。このことはTsの変化と同様に敷料の分解に由来する現象と考えられる。また、VFAが減少に転じた頃にpHが上昇に転じており、VFA濃度の変動がpHに影響していると考えられた。

④ アンモニア態窒素の経時変化

スラリー中のアンモニア態窒素を水蒸気蒸留・滴定法で経過日数1、30、54日目で分析した。結果を図-4に示す。スラリー中の窒素化合物の無機化が進みアンモニア態窒素含量は微増する傾向にあることを既存施設の調査で確認しており¹⁾、本実験でも、30日経過時点では同様の状況が確認できた。高濃度のVFAやアンモニアはメタン発酵を抑制するが、希釈されていない処理でVFA、アンモニア濃度が高い。したがって、これらの物質の原料となる有機物が多く存在する無処理と敷料除去でメタン発生量が減少しているのはこれらの阻害物質の影響の可能性がある。なお、敷料除去の処理のみ、54日後では原料時点より減少していたが、今後の検討課題である。

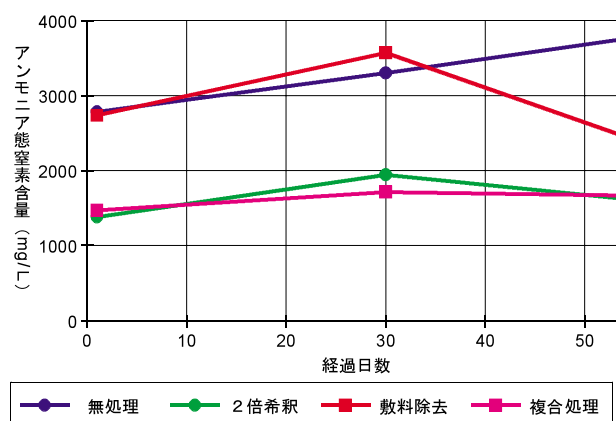


図-4 アンモニア態窒素の経時変化

⑤ バイオガス発生量

バイオガス累積発生量を図-5に示した。

ガス発生量は敷料除去>無処理=複合処理>2倍希

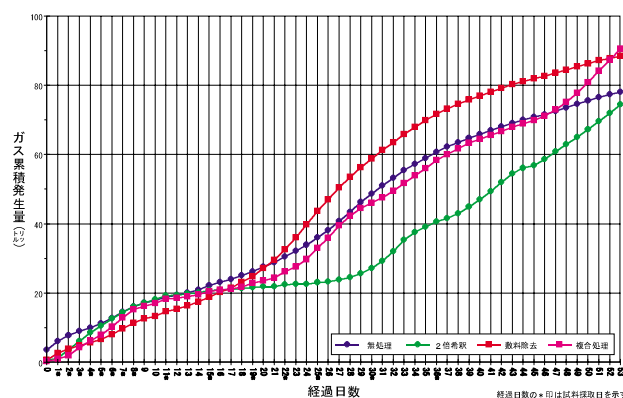


図-5 累積バイオガス発生量

積の順で多かった。増加に転じた屈曲点が2倍希釈では28日後と他の3処理より7日程遅れていた。このことはpHの変化と共通していた。

⑥メタン濃度

図-6にメタン濃度の経時変化を示した。
乳牛ふん尿を原料とした場合、メタン濃度は約60%が一般的な値である。2倍希釈を除く3処理では29日目に概ね一般値に達した。2倍希釈では4日ほどの遅延があったが、ピーク濃度は他の処理より高かった。37日目に全処理でメタン濃度が低下しているのは、スラリー採取による影響である。

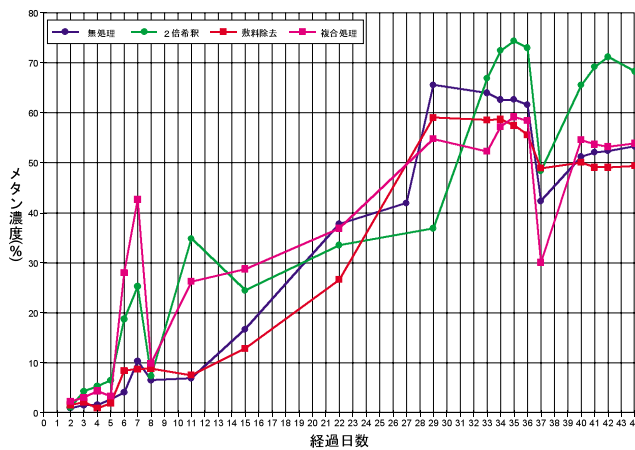


図-6 メタン濃度の経時変化

⑦メタン発生量

日ガス発生量とメタン濃度の積を日メタン発生量として図-7に、累積量を図-8に示した。濃度の高い処理ではほとんど近似した経過で、29日目をピークとして日発生量は低下した。濃度の低い処理では何回かのピークがあり、40日を経過してからでもそのピークが出現するという特徴があった。このことは累積発生量にも反映し、45日後には希釈した処理のほうが累積メタン発生量は多くなった。また、敷料の有無により

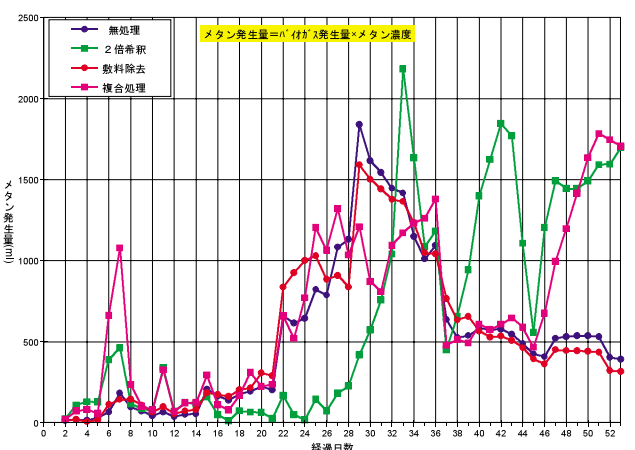


図-7 日メタン発生量の経時変化

全く異なる変化を示した。2倍希釈では他の3処理より最大ピークが遅延するという特徴はpHやメタン濃度の変化と共通していた。

⑧有機物単位量当りメタン発生量

スラリーのVsを有機物含量と見なして、有機物単位量当たりのメタン発生量を計算し、表-1に示した。

一般的には、乳牛スラリーを用いた中温メタン発酵では、30日間の発酵期間で、1m³の原料から15~30m³のバイオガスが得られるとされている。原料の有機物含量を8%、バイオガスのメタン濃度を60%とすると、日平均の有機物単位量当りメタン発生量は3.8~7.5m³/tと計算される。本実験ではスラリー抜き取りにより液量が減少しているが、実験開始時の液量6%とVs(無処理と敷き除去は9%、2倍希釈と複合処理は4.5%)と、30日間および54日間でのメタン累積発生量で計算した結果を表-2に示した。いずれの処理も一般値より小さな値であった。その理由としてスラリー中の有機物の分解程度の影響が考えられる。今後、分解性有機物の指標であるCODやBODの分析による検証が必要である。

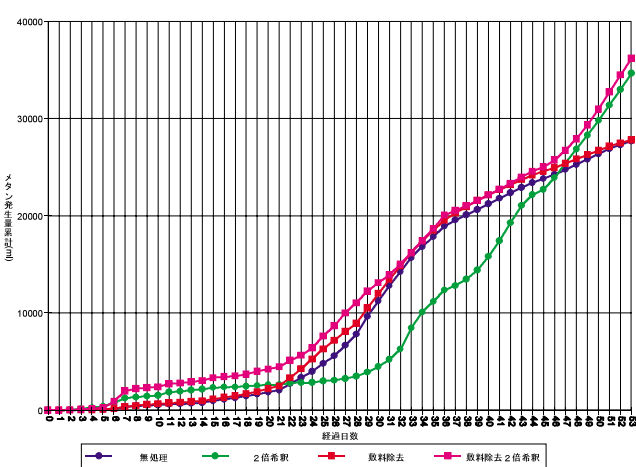


図-8 累積メタン発生量の経時変化

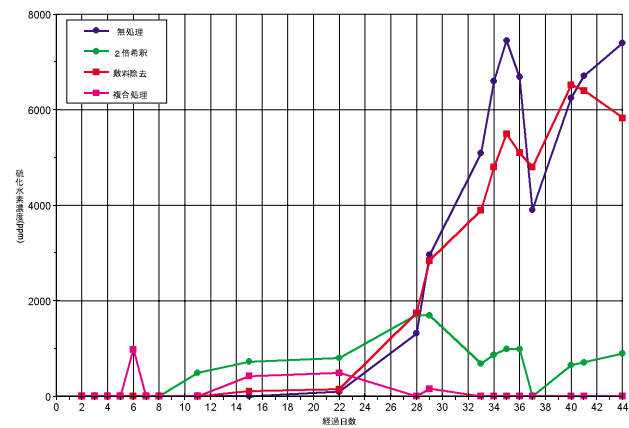
表-1 有機物単位量当りメタン発生量

処理区分	V s 量 (g)	30日間		54日間	
		発生メタン 総量 (ml)	日量 (ml/g /日)	発生メタン 総量 (ml)	日量 (ml/g /日)
無 処 理	540	11267	0.7	27693	0.95
2 倍 希 釈	270	4480	0.55	34677	2.38
敷 料 除 去	540	12017	0.74	27799	0.95
複 合 処 理	270	13112	1.62	36197	2.48

⑨硫化水素濃度(図-9)

TSの濃度による差異が最も明瞭に現れた。すなわ

ち、希釈処理を施した「2倍希釈」と「複合処理」は顕著なピークを示すことなく硫化水素濃度は低く推移し、Ts濃度の高い「無処理」と「敷料除去」では25日経過後に増加し35日後に1回目のピークを表した。敷料の有無で比較すると、敷料を含む方が高い濃度を示した。これらの現象は30日を経過してから顕著となっていることから、TsやVFAの変化と同様に、敷料の分解進行に伴うものと考えられる。



図－9 硫化水素濃度の経時変化

(4)まとめ

各処理の影響を無処理との差異に注目して項目ごとに整理した（表－2）。

- これらの事象は以下の2点に総括される。
- ① Ts12%程度の高濃度では敷料を除去してもバイオガス発生量やメタン濃度に大きな差はない。
 - ② Ts6%程度に希釈した場合は敷料を除去したほうがメタン発生量が多く、硫化水素濃度の低い発酵となる。

表－2 無処理との比較による各処理の評価

項 目	2倍希釈	敷料除去	複合処理
pH 上昇	10日以上遅れ	○	○
固形分減少	○	36日後急減	○
VFA の推移	○	○	○
メタン発生推移	ピークの遅れと分離	○	○
硫化水素濃度	やや抑	○	大きく抑制

○印は無処理との差がないことを示す

- 残された課題は以下の2点である。
- ①30日滞留を基本に考えた場合、メタン発生のピークが25日目頃と遅くに出現した理由として、実験開始後10日間は連日試料採取のために一時的な発酵槽開放をしており、これが発酵にストレスを与えた可能性がある。発酵槽を開放せずに試料採取が可能となるように改造し、これを用いた再実験で確認する予定である。
 - ②敷料の存在あるいはその分解進行がガス発生やメタン濃度をはじめ発酵状況に影響している。敷料の大きさがメタン発酵に及ぼす影響は敷料自体の分解進行の把握と伴に今後の課題である。

3．4段階の希釈がメタン発酵に与える影響

(1)．実験目的

メタン発酵原料のTsあるいはVs濃度はバイオガス発生に大きく影響するが、その範囲は下限値で6～8、上限値で12～15と変動がある²⁾。また、発酵液の流動性を加味した場合、適正な固形物濃度は6～8%以下である必要があると記されている文献もある³⁾。そこで、最適なTs濃度を確認するための基礎実験として行った。

(2)．実験方法

- 1) 原料、実験装置、試料採取と分析、ガス量計測等の実験諸元は、前述の「敷料の有無と2倍希釈がメタン発酵に与える影響」と同様である。
- 2) 処理：以下の4処理を設定した。

本実験では敷料の除去は行っていない。

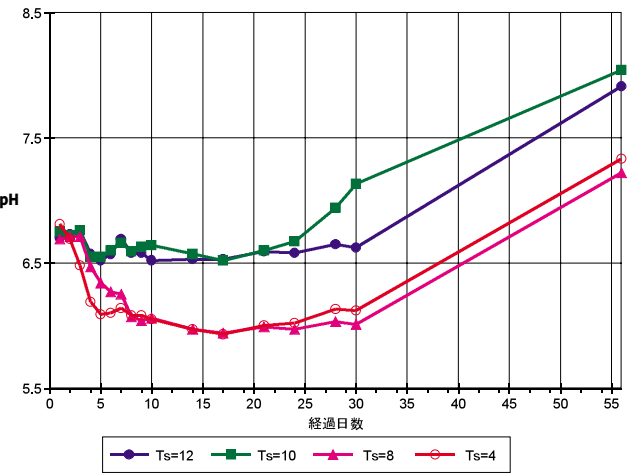
- ① Ts12：原料5.45ℓ＋種スラリー0.55ℓ
- ② Ts10：原料4.51ℓ＋種スラリー0.45ℓ＋純水1.04ℓ
- ③ Ts8：原料3.61ℓ＋種スラリー0.36ℓ＋純水2.03ℓ
- ④ Ts4：原料1.80ℓ＋種スラリー0.18ℓ＋純水4.02ℓ

平成14年2月11日に実験装置にセットアップし、加温を開始した。

(3)．実験結果

① pH の変化（図－10）

Ts12とTs10、Ts8とTs4がそれぞれ類似した推移を示した。特にメタン発酵の前段となる酸発酵期間でのpH低下に大きな差異があり、濃度の低い処理でpH低下が顕著であった。これは有機物が少ないことによる緩衝能力の差が影響したものと考えられる。Ts10の方がTs12よりpH上昇に転じる時期が早かった。



図－10 pH の経時変化

② Ts の変化 (図-11)

いずれの処理も、発酵30日で10%減程度と従来得られている知見(40~50%減)より大幅に小さな値であった。加温開始後、10日間の連日の試料採取による発酵槽の開放がメタン菌群にストレス(不完全な嫌気状態)を与えたことを考慮して40日後までの値の変化を見ても20%減程度であった。

4 処理の中では、Ts10の減少率が最も高かった。

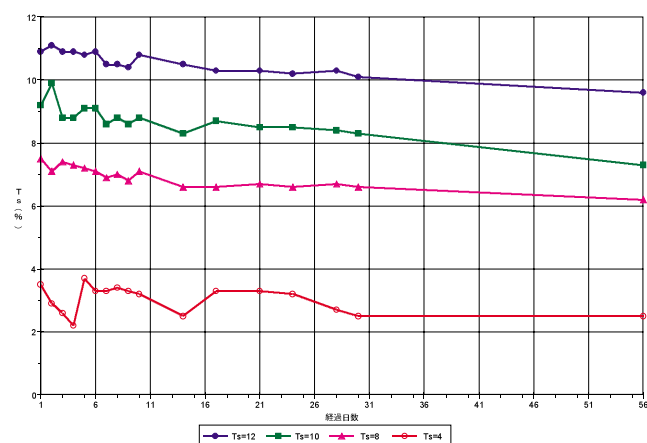


図-11 Ts の推移

③ VFA の変化 (図-12)

メタンの前駆物質の一つであり、VFA の減少はメタンガスの発生を意味している。濃度の高いものほど上昇から下降に転じる屈曲点が遅くなる傾向があるが、大きな差ではない。30日目以降での減少はTs10が最も大きく、後述のガス発生量の変化と一致していた。

既存施設(町村牧場)の計測では原料スラリーで10000ppm、発酵後で100ppm以下のオーダーであった¹⁾。これに比べると、本実験でのVFA濃度は非常に高かった。

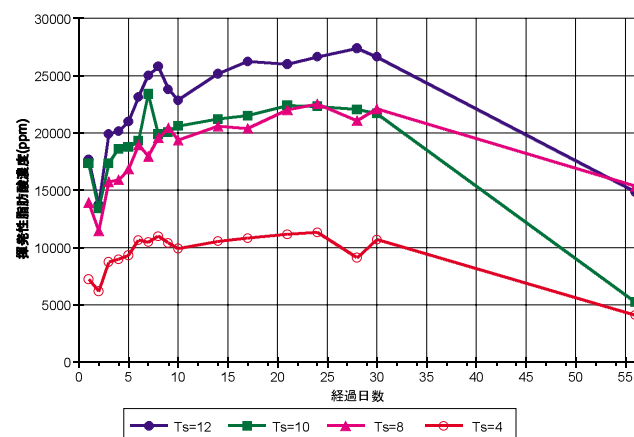


図-12 VFA の推移

④ バイオガス発生量

バイオガス発生量を図-13に日量で、図-14に累積量で示した。日発生量は数回のピークを持っており、濃度の高いものほど回数が少ない傾向にある。ピークが生じることの理由は有機物分解の進行状況が斉一ではないためと考えられる。このことはCODもしくはBODの分析により確認する必要がある。

85日間に及ぶ実験期間内でのガス発生総量はTs10が最も多く、Ts12がこれに次いだ。原料スラリーのTsは高ければ良いというものではないことが示唆された。

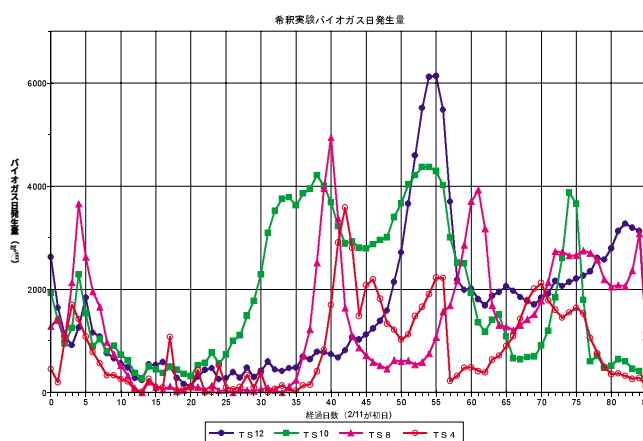


図-13 バイオガス日発生量の推移

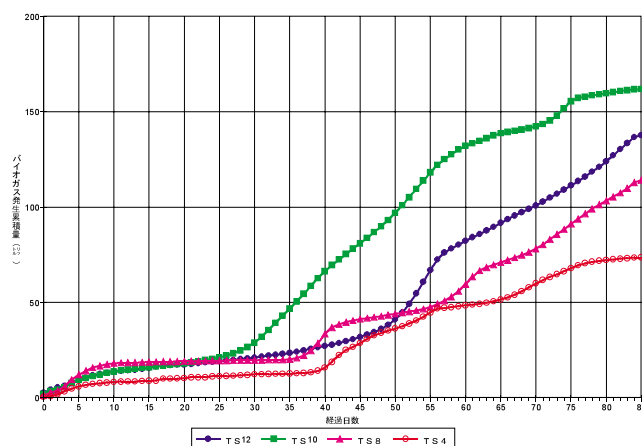


図-14 バイオガス累積発生量の推移

⑤ ガス成分濃度

図-15にメタン濃度、図-16に硫化水素濃度の変化を示した。メタン濃度が最も早く60%に達したのはTs10であり、Ts8、Ts4、Ts12の順であった。また、Ts4は他の処理とは全く異なる、著しい値の変動を示したが、その理由は不明である。

硫化水素濃度のピークは、Ts濃度の薄いものほど早くに現れ、終息も早い傾向にあった。

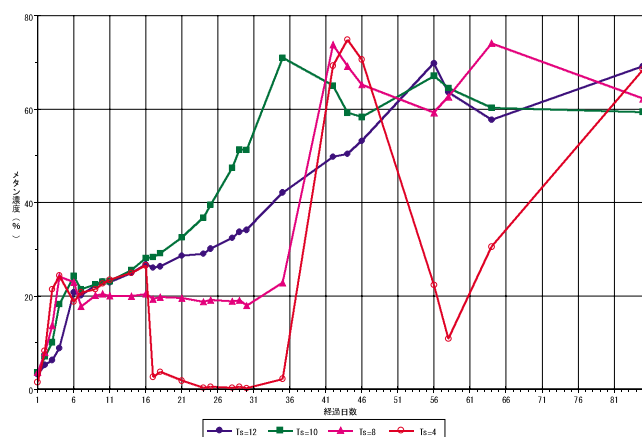


図-15 メタン濃度の推移

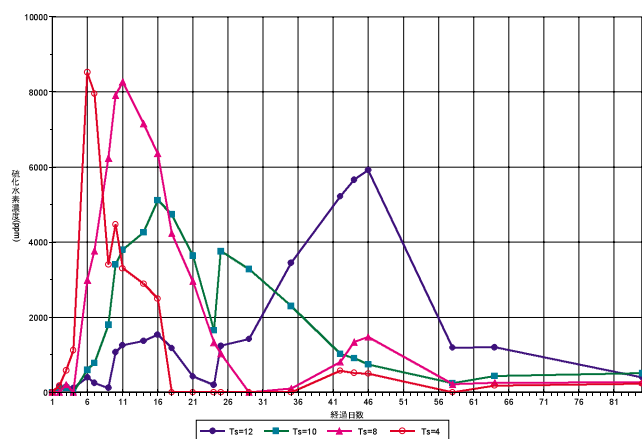


図-16 硫化水素濃度の推移

⑥メタン発生量

日メタン発生量を図-17に、累積量を図-18に示した。

Ts 濃度が低いものほどメタン発生ピークの回数が多い傾向にあった。メタン累積発生量はバイオガス発生量と同様の推移で Ts10 が最大であった。

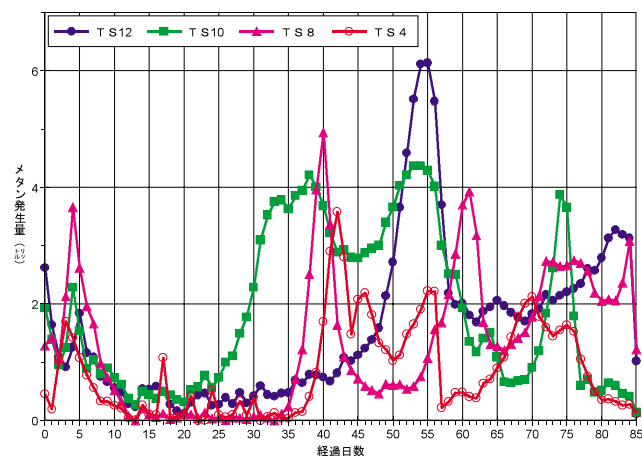


図-17 日メタン発生量の推移

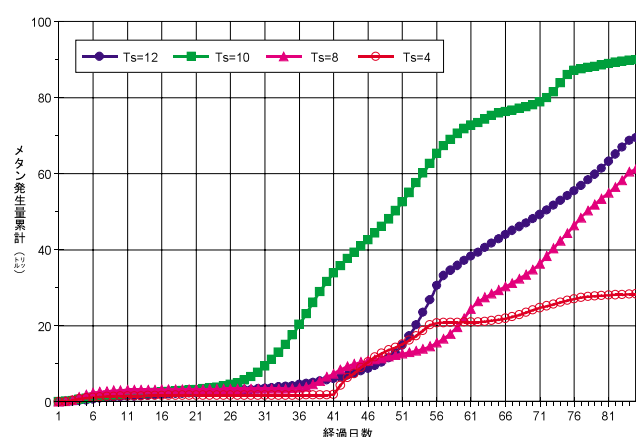


図-18 累積メタン発生量の推移

⑦同一原料処理でのガス発生量の比較 (図-19)

前項の「敷料の有無と2倍希釈」試験での無処理と本項の「4段階の希釈」試験での Ts12 は実験時期は異なるが、冷蔵庫に保管した同一の原料と種スラリーを同一の比率で混合し、実験に供したものである。累積ガス発生量自体は、約80Lの発生量に到達した経過日数が Ts12 で約5日遅れている程度であるが、経時変化の状況は大きく異なっている。すなわち、無処理は順調にガス発生が開始したが、Ts12 は起動に時間を要した。その理由は判然としないが、実験開始直後の連続10日間の試料採取による発酵槽開放によるストレスのかかり具合が異なっていたと推察された。

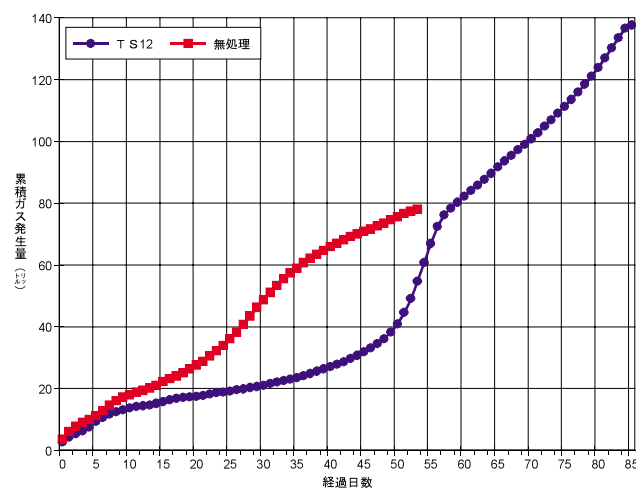


図-19 同一原料処理でのガス発生量の比較

(4)まとめ

- ①メタン発生量が最も多くなる原料スラリーの Ts 濃度は10%であることが示された。
- ②バイオガス発生の消長は必ずしも斉一な成長曲線を描くものではなく、数回のピークを繰り返していた。このことは原料スラリーに含まれている有機物の分解消長に影響されているものと考えられ、分解性有機物

の分析により確認する必要がある。

4. おわりに

「敷料の有無と2倍希釈」「4段階の希釈」が中温嫌気性発酵に及ぼす影響をバッチ処理による室内実験で確認した。

その結果、以下の知見が得られた。

- ① Ts12%程度の高濃度では敷料の有無は発酵状況（バイオガス発生量とメタン濃度）に大きな影響を与えない。
- ② Ts6%程度に希釈した場合は敷料を除去したほうがメタン発生量が多く、硫化水素濃度が抑制された、良好な発酵となる。
- ③ バイオガスの総発生量とメタン濃度を指標とした場合、発酵原料スラリーのTs濃度は10%が最適であり、それ以上でも以下でも10%より劣った。
- ④ 原料スラリーに含まれている有機物の分解性がガス発生消長の消長に大きく関与していることが示唆された。
- ⑤ 55～85日の長期間の実験ではTs10%以下で数度のガス発生量ピークが認められ、発酵の終点が明瞭でな

かった。これは、原料に含まれる粗大有機物の緩慢な分解発酵によるものと考えられる。

実用施設では毎日一定量の原料を送り込み、同量の消化液を排出するという連続運転を行う。本実験は原料の追加投入を行わないバッチ処理であるため、この実験結果を単純に実用施設に適用することはできないが、乳牛スラリー本来の発酵プロセス、敷料の影響は把握できた。

今後、敷料の影響も含めた連続処理による実験も行い、実用施設への適用を図っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 乳牛ふん尿のメタン発酵に伴う性状変化, 石田哲也、石渡輝夫、岡本隆, 北海道開発土木研究所月報 No.580
- 2) Heinz Schulz and Barbara Eder 共著, 浮田良則監訳, バイオガス実用技術, オーム社出版局, 2002
- 3) 北海道バイオガス研究会監修, バイオガスシステムによる家畜ふん尿の有効利用, 酪農ジャーナル臨時増刊号, 酪農学園大学エクステンションセンター, 2002



石田 哲也*

北海道開発土木研究所
農業開発部
土壌保全研究室
主任研究員