

## 10. バイオマス利用による乾式メタン発酵技術の確立

奈良県畜産技術センター 生産環境グループ

○金原稔子・朝倉康夫

### 要約

バイオマスを利用した乾式メタン発酵技術の確立にむけて、原料となるバイオマスの処理方法および施設の運転方法の検討を行った。家畜排泄物に副資材として剪定枝を混合したバイオマスを利用して、バッチ式乾式メタン発酵施設でバイオガスの発生に成功した。しかし、同時に様々な問題が発生し、施設の構造の改善、バイオガスの発生効率や発酵期間を改善するため、さらなる技術の検討・改善が必要である。

### 緒言

バイオマスとは、化石資源を除いた生物由来の有機性資源であり、一方、食品残渣をはじめとする有機性廃棄物の発生量は、近年、増加傾向にある。その多くは焼却処理されており、温室効果ガスの二酸化炭素発生量の増加や地球温暖化に関わり、その有機性廃棄物をバイオマスとして再利用・再資源化することが求められている。また、メタン発酵技術は污水处理技術として古くから利用されているが、現在、バイオマスからエネルギーを生産する技術として注目されている。すでに普及している湿式メタン発酵技術は、施設が大型で、発酵過程で発生する消化液の処理問題など欠点があり、その欠点を改善するために、乾式メタン発酵技術が研究されている。

そこで、本研究は乾式メタン発酵技術の確立をめざし、当センターに建設されたバッチ式乾式メタン発酵施設で、家畜排泄物に副資材として剪定枝を混合したバイオマスを乾式メタン発酵処理し、バイオガスを発生させる処理方法および施設の運転方法の検討を行った。

### 材料と方法

#### 1. 乾式メタン発酵施設



図1 乾式メタン発酵槽

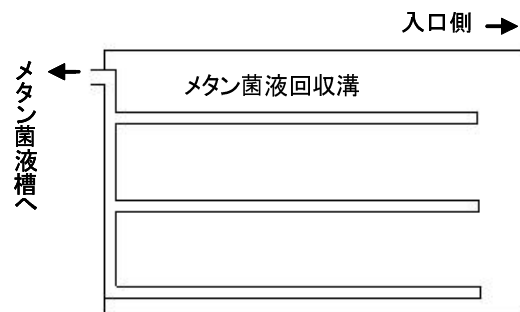


図2 発酵槽床

当センターの乾式メタン発酵施設は、ガレージ式の発酵槽4槽(図1)、メタン菌液槽、コントロール室(機器制御室、ガスバック室)、ボイラー、発電機、脱硫装置、脱臭槽で構成されている。発酵槽の構造は、天井からメタン菌液が散布され、床に

は散布されたメタン菌液を回収する回収溝があり（図2）、扉を閉めると密閉状態にすることができる。発酵方式は、原料の水分含量が60～80%の乾式で、発酵温度は38～40℃の中温発酵方式を用いている。発酵により発生したバイオガス中のメタンガス濃度が設定濃度（本試験では40%）以下の間は定期的に排気され、設定濃度を超過するとガスバックにバイオガスが貯留する。メタンガス濃度が40%を超過するとメタンガスボイラー、50%を超過すると発電機を稼働させることができる。

## 2. 試験期間と原料

表1 試験期間と原料

|                         |      | 予備試験                             | 試験1                        | 試験2                         | 試験3                         | 試験4                         | 試験5                        |
|-------------------------|------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 試験期間                    |      | H17.10.18<br>～H18.3.8<br>(141日間) | H18.3.8<br>～5.17<br>(70日間) | H18.5.18<br>～7.31<br>(74日間) | H18.5.25<br>～7.10<br>(46日間) | H19.4.26<br>～7.31<br>(96日間) | H19.8.16<br>～9.4<br>(19日間) |
| 原料<br>(m <sup>3</sup> ) | 豚糞   | 2.8                              |                            |                             |                             |                             |                            |
|                         | 牛糞   |                                  | 6.65                       | 7.48                        |                             | 3.88                        | 3.88                       |
|                         | 鶏糞   |                                  | 7.44                       | 4.00                        | 4.00                        | 3.61                        | 3.61                       |
|                         | 剪定枝  | 1.3                              | 11.48                      | 10.74                       | 10.74                       | 10.5                        | 10.5                       |
|                         | 種菌*  |                                  | 4.73(予)                    | 6.65(試1)                    | 6.65(試1)                    |                             | 3.88(試4)                   |
|                         | 活性汚泥 | 100L                             |                            |                             |                             | 135L                        |                            |
| 原料の高さ(cm)               |      |                                  |                            | 90                          | 100                         | 95                          | 115                        |
| 敷料<br>(cm)              | もみがら | —                                | —                          | 10                          | 10                          | 15                          | 15                         |
|                         | 剪定枝  | —                                | —                          | 20                          | 20                          | 20                          | 20                         |
| メタン菌液散布量<br>(L/日)       |      | 192                              | 192                        | 192                         | 192                         | 192                         | 342                        |

\*発酵終了後の残渣

## 3. 調査項目

### ①原料の詰め込み方法とメタン菌液散布条件

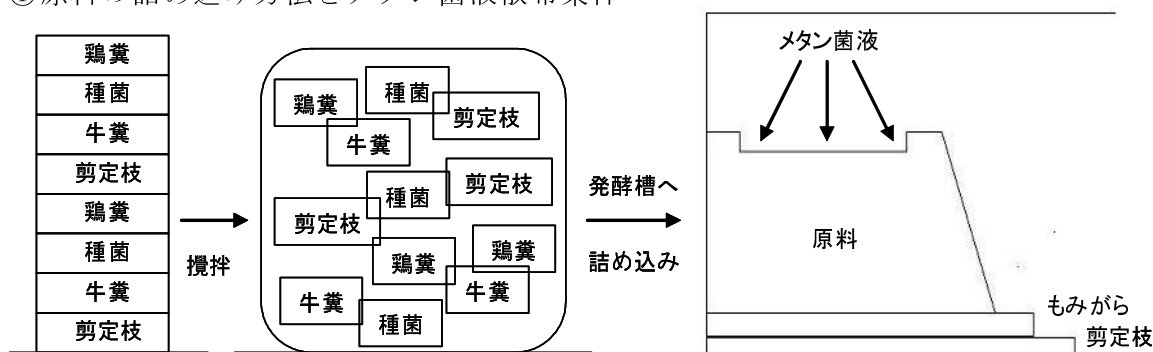


図3 原料の詰め込み方法

原料の詰め込みは、各原料をサンドイッチ状に積み、油圧ショベルで攪拌および活性汚泥を散布し、攪拌できた原料をショベルローダーや油圧ショベルで発酵槽に積み上げる（図3）。原料を詰め込む際、床に敷料（剪定枝、もみがら）の必要性お

よび発酵中のメタン菌液散布量を検討（表 1）。

②発酵槽内のメタンガス、硫化水素、二酸化炭素、酸素濃度の変化

③原料および発酵残渣中の水分、灰分、有機物含量

水分：加熱減量法（試料 2 ～ 5 g 135℃ 2 時間）

灰分：強熱灰化法（乾物試料 2 ～ 5 g 600℃ 2 時間 もしくは 550℃ 4 時間）

水分および灰分を上記方法で分析し、有機物含量を算出。

④バイオガス発生量

## 結果

### 1. メタン菌液の循環状況

表2 メタン菌液循環状況

|               | 予備<br>試験 | 試験<br>1 | 試験<br>2 | 試験<br>3 | 試験<br>4 | 試験<br>5 |
|---------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| メタン菌液<br>循環状況 | —        | ×       | ○       | ○       | ○       | ×       |

試験 1 および試験 5 でメタン菌液は循環不良となり、発酵槽内に貯留。試験終了時の開扉の際、発酵槽外にメタン菌液が溢れ出た（表 2）。

### 2. 発生ガス濃度の推移

表3 発生ガス状況

|                   |        | 予備<br>試験 | 試験1         | 試験2       | 試験3       | 試験4 | 試験5      |
|-------------------|--------|----------|-------------|-----------|-----------|-----|----------|
| メタン<br>ガス<br>濃度   | 40%到達日 | ×        | 33          | 18        | 26        | 55* | 18       |
|                   | 50%到達日 | ×        | 45          | 26        | 35        | 65* | 試験<br>中止 |
| メタン最高濃度(%)        |        | 22.4     | 71          | 56.3      | 55.5      | 60* | 試験<br>中止 |
| 硫化水素<br>最高濃度(ppm) |        | 14.0     | 2200<br>超   | 2200<br>超 | 2200<br>超 | 不明  | 1623     |
| ガスボイラー運転          |        | ×        | ○           | ○         | ×         | ×   | ×        |
| 発電機運転             |        | ×        | ○           | ○         | ×         | ×   | ×        |
| ガス発生量(m³/日)       |        | —        | 2.5～<br>3.5 | 1.8～3.9   |           | —   | 8.6**    |

試験2、3、5はガス漏れにより試験中止

\*ガス分析センサー劣化、交換により測定中断期間があるため参考値

\*\*測定直後に、機器トラブルおよびガス漏れ発生により試験中止となったため参考値

豚糞を主原料に行った予備試験では、バイオガスの発生が不十分であった。試験 1 ～ 5 において、バイオガス中のメタンガス濃度が 40%に達するには、最短で 18 日、最長で 55 日（参考値）を要した。試験 1 および試験 2 で、メタンガスボイラーおよび発電機の手動運転に成功した（表 3）。発酵槽内のガス濃度は、発酵開始後

数日で酸素濃度が0%となり、その後、嫌気状態を維持した。メタンガス濃度が上昇中に、硫化水素および二酸化炭素の濃度が最高に達し、メタンガス濃度の上昇に伴い硫化水素濃度は低下し、二酸化炭素は30%前後を推移した。メタンガス濃度は、試験1のように試験終了まで上昇する場合と、試験2のように最高濃度に達し維持する場合がみられた(図4、5)。発酵温度は、発酵開始温度は試験によって異なるが、発酵中は40℃前後を推移した(図6)。

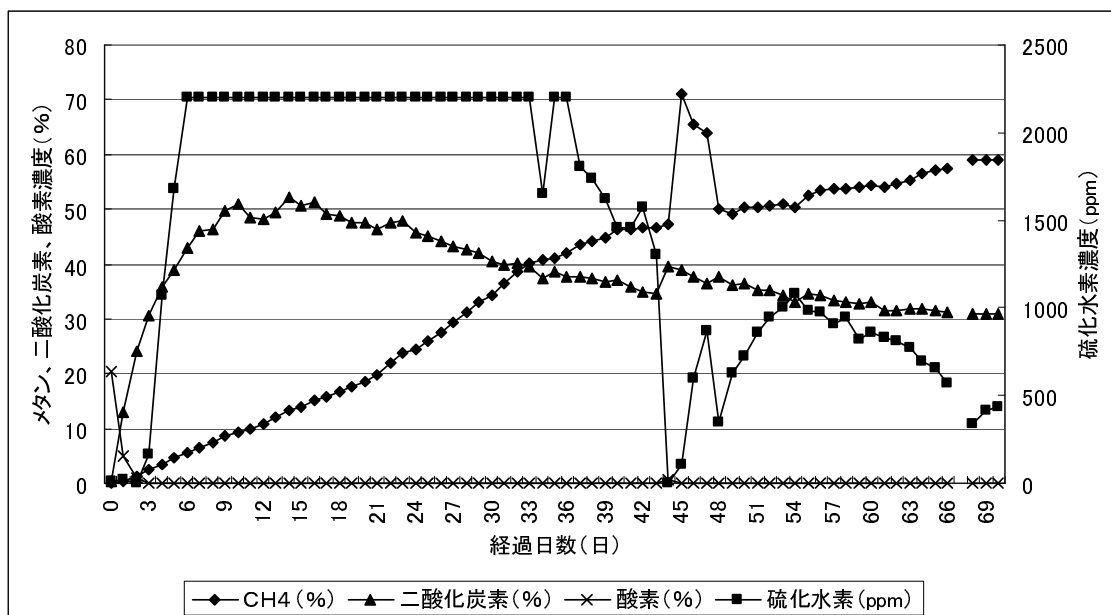


図4 発生ガス濃度 (試験1)

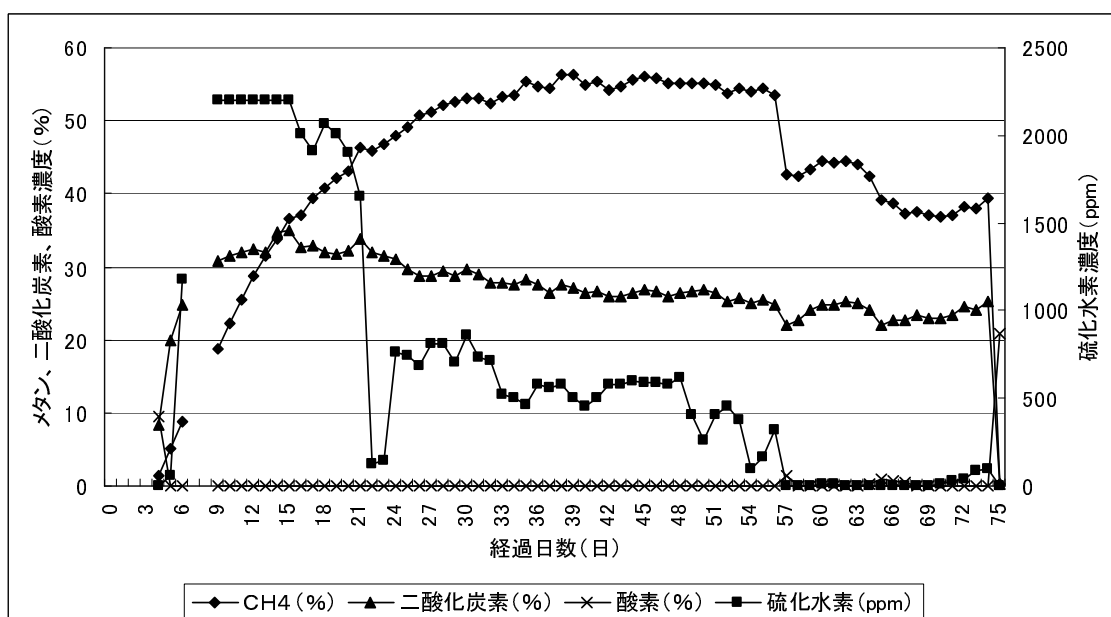


図5 発生ガス濃度 (試験2)

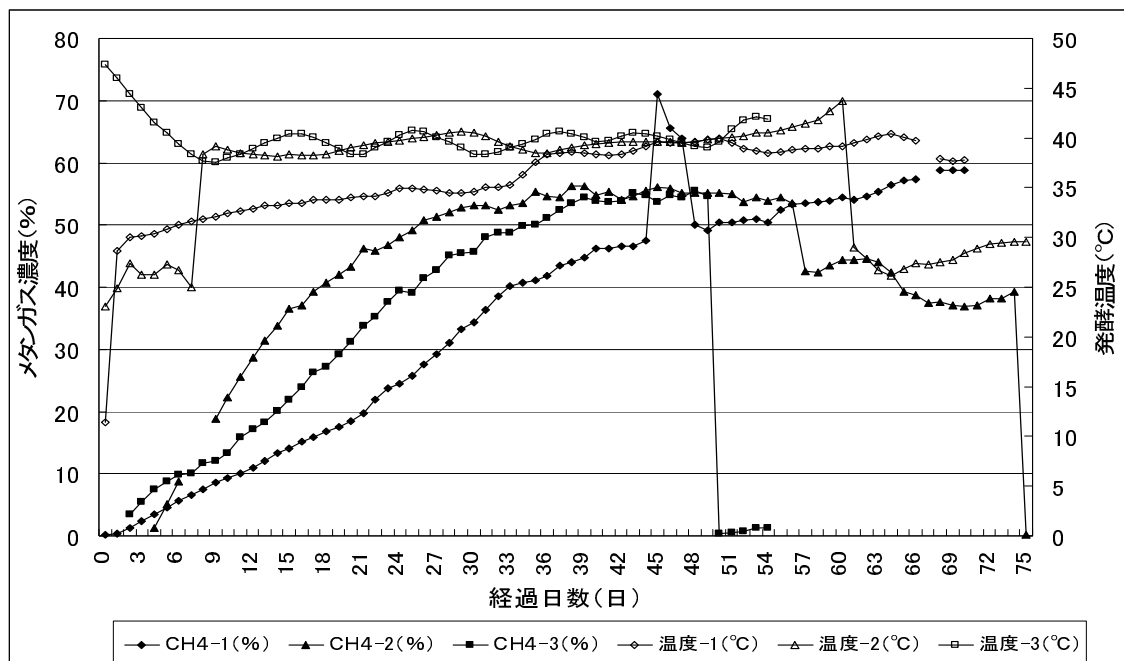


図6 メタンガス濃度と発酵温度（試験1～3）

### 3. 原料および発酵残渣中の水分、灰分、有機物含量

表4 原料および発酵残渣中の水分、灰分、有機物含量（試験5）

|      | 原料        |       |        | 発酵残渣      |       |        |
|------|-----------|-------|--------|-----------|-------|--------|
|      | 水分<br>(%) | 乾物中   |        | 水分<br>(%) | 乾物中   |        |
|      |           | 灰分(%) | 有機物(%) |           | 灰分(%) | 有機物(%) |
| 原料   | 70.5      | 18.3  | 81.7   | 65.2      | 33.5  | 66.5   |
| もみがら | 10.7      | 20.0  | 80.0   | 34.1      | 20.7  | 79.3   |
| 剪定枝  | 14.5      | 6.7   | 93.3   | 72.4      | 17.2  | 82.8   |

原料中の有機物含量は、81.7%から66.5%に減少した。また、敷料に使用した剪定枝の有機物含量も93.3%から82.8%に減少したが、もみがらはほとんど変化しなかった。

### 4. バイオガスの発生量

表5 メタン発酵法による有機物(VS)の分解率とメタンガス発生量および濃度

|                        | 牛糞  | 鶏糞  | 豚糞  | 生ゴミ |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|
| VS分解率(%)               | 30  | 30  | 50  | 80  |
| VSkg当メタンガス発生量(L/Vs・kg) | 485 | 200 | 695 | 500 |
| メタンガス濃度(%)             | 60  | 60  | 65  | 58  |

牛糞、豚糞：家畜排せつ物を中心とした発酵処理施設に関する手引き  
鶏糞、生ゴミ：日本車輛製造株式会社による実験値

表6 メタンガスの性状

|                  |                              |
|------------------|------------------------------|
| 特徴               | 無色、透明<br>無臭、無毒<br>可燃性<br>爆発性 |
| 比重<br>(空気=1)     | 0.554                        |
| 発熱量<br>(kcal/m³) | 8,600                        |

家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き

表7 バイオガス発生量(理論値)

|                          | 試験1       |         | 試験5     |         |
|--------------------------|-----------|---------|---------|---------|
|                          | 牛糞        | 鶏糞      | 牛糞      | 鶏糞      |
| 投入量(t)                   | 3.97      | 4.62    | 2.31    | 2.24    |
| VS量(kg)                  | 856       | 946     | 359     | 754     |
| 分解されるVS量(kg)             | 256.8     | 283.8   | 107.7   | 226.2   |
| 発生メタンガス(m <sup>3</sup> ) | 124.5     | 56.8    | 52.2    | 45.2    |
| 発生バイオガス(m <sup>3</sup> ) | 207.8     | 94.6    | 87.1    | 75.4    |
| バイオガス発熱量(kcal)           | 1,071,113 | 488,136 | 449,217 | 389,064 |

表8 バイオガス発生量(試験1)

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| メタンガス濃度<br>40%超期間            | 38日間    |
| ガス発生量<br>(m <sup>3</sup> /日) | 2.5~3.5 |
| 総ガス<br>発生量(m <sup>3</sup> )  | 114     |

湿式メタン発酵法により、すでに報告されているデータ(表5)およびメタンガスの発熱量(表6)から、理論的には、試験1で約302m<sup>3</sup>、試験5で約163m<sup>3</sup>であった。(表7)。実際には、試験1で、ガス発生量を平均3m<sup>3</sup>/日としたところ、発生したバイオガスは114m<sup>3</sup>であった(表8)

## 5. これまでの経緯

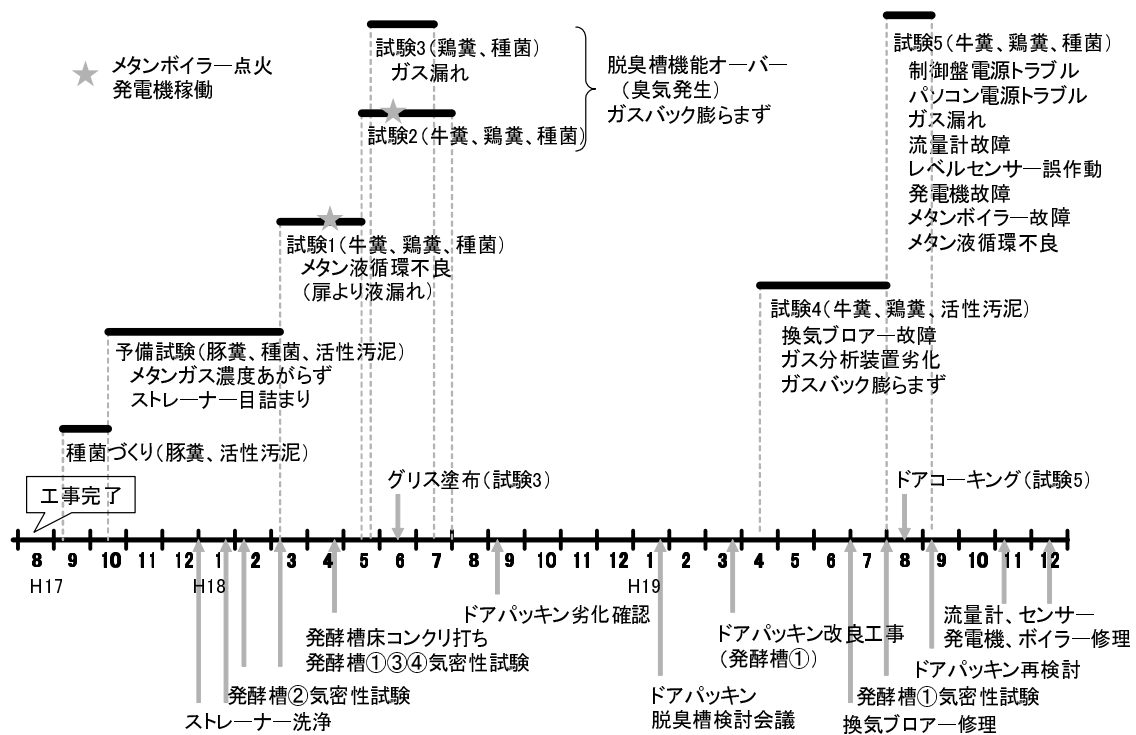


図7 これまでの経緯

平成 17 年 8 月に施設工事が完了し、種菌づくり、予備試験を行った後、試験 1～5 を実施した。当初、豚糞を主体とした原料の予定であったが、当センターの畜舎構造上、豚糞がほとんど発生しないため、主原料を牛糞と鶏糞に変更した。どの試験においても、発酵槽の気密性を主とする様々なトラブルにより、個々に対応したものもあるが、データの欠如や不備、中止せざるをえない試験もあった（図 7）。

## 考察

湿式メタン発酵技術の欠点を改善するため<sup>1)</sup>に、新たな技術である乾式メタン発酵技術の確立にむけて検討を行った。

乾式メタン発酵技術の最大の特徴である低水分でメタン発酵させるためには、発酵槽に散布するメタン菌液を循環させなければならない。当センターの施設では、敷料を利用しなければ原料で菌液回収溝が詰まり循環不良となり、敷料が不可欠であった。しかし、メタン菌液の散布量を増加させたところ、敷料を利用しても循環不良となり、メタン菌液の散布量ならびに敷料や施設構造の改善の検討が必要である。また、敷料として使用した剪定枝は分解されていたが、もみからはほとんど分解されておらず、残渣を堆肥化した際、この敷料が堆肥にどのような影響を与えるかといった点からも敷料の検討をしなければならない。

今回の試験で、高濃度の硫化水素が原因と考えられるドアパッキンの劣化によるガス漏れが発生した。高濃度の硫化水素の発生要因として、鶏糞の混合が考えられる。また、高濃度のアンモニアがメタン発酵を阻害することが報告されており<sup>2)</sup>、発酵中のアンモニア濃度の測定は行っていないが、鶏糞はアンモニアの発生にも大きく関与するため乾式メタン発酵に不適とされていることから<sup>3) 4)</sup>、鶏糞の混合について検討が必要である。

発酵開始時点の温度は、気温の他、原料を準備する上で家畜糞尿を一時保管するため、すでに堆積発酵していることがあり、その発酵温度の影響を受けている。当センターのメタン菌は中温菌なので、発酵温度を 38～40℃に保つことが望ましいが、メタン発酵による発熱はほとんどないため、適温に保つために加熱することが一般的であり<sup>5)</sup>、気温の変化や発酵開始温度もメタン発酵に影響すると考えられる。今回の試験では季節や発酵開始温度が異なっており、メタン発酵にどのような影響を与えているか明らかにできていない。

バイオガスの発生状況は、一定の傾向がみられなかった。そして、当初の計画では発酵期間は 28 日であったが、実際には予想以上の日数を要し、バイオガスの発生量も理論値よりも実際の発生量は少なかった。これらの要因として原料の質や組成、気温、発酵開始温度、メタン菌液の散布方法・散布量・浸透性、メタン発酵の阻害因子<sup>6) 7)</sup>など、様々な要因が絡んでいると考えられる。また、試験 4 では、種菌を使用せず活性汚泥を利用しており、ガス分析センサーの劣化・交換のためデータ欠如により正確な日数は不明であるが、ガス濃度が 40%に達するまでに最長の約 55 日（参考値）要しており、活性汚泥よりも種菌を混合する方がメタンガス濃度は速やかに上昇した。これは、種菌中にメタン菌が含有されていることや、副資材として通気性や浸透性の向上効果があると考えられる。

バッチ式乾式メタン発酵技術の欠点として、発酵中に原料を攪拌できないこと<sup>1)</sup>、水分含量が低いため発酵阻害物質が阻害濃度に達しやすいことがある<sup>8)</sup>。当センターにおいても、発酵後の残渣処理の段階で、メタン菌液が原料に十分浸透していないことがわかっており、散布方法や散布量、副資材、そして十分浸透させ循環させる技術の検討が必要である。

乾式メタン発酵技術を確立するためには、バイオガスの発生効率を改善し、発酵期間を短縮する必要がある、試験を重ねていかなければならない。

#### 参考文献

- 1) 帆秋利洋ら：メタン発酵の研究開発の現状と課題 大成建設技術センター報第 38 号 24-1-24-4 (2005)
- 2) 前川孝昭：メタン発酵システムの開発 産学官による技術開発を推進 平成 16 年度バイオマス利活用への技術開発 14-15 (平成 16 年度)
- 3) 亀岡俊則：メタン発酵処理技術の現状と課題 畜産環境情報第 35 号 3-9 (2006)
- 4) 西尾尚道ら：資源循環型産業・社会構築に向けて－乾式アンモニア・メタン発酵の活用－ 生物工学会誌 85 巻 4 号 171-173 (2007)
- 5) 財団法人 畜産環境整備機構：家畜排せつ物を中心としたメタン発酵処理施設に関する手引き (平成 13 年 8 月)
- 6) 三津橋浩行ら：有機性廃棄物のメタン発酵処理特性 北海道立工業試験場報告 No.305 45-50 (2006)
- 7) 梅津一孝：メタン発酵を阻害する要因について 畜産経営技術 Q&A (1999)
- 8) 国立大学法人広島大学：有機性廃棄物の処理方法および処理システム (特開 2006-205017 平成 18 年 8 月 10 日公開)