

# 都市ごみを対象としたメタン発酵システムの開発（その2） Development of methane fermentation system for municipal solid waste (Part 2)

伊藤 忠彦\* 石渡 寛之\*\*  
Tadahiko Ito Hiroyuki Ishiwata

## 要 約

近年、低炭素化社会ならびに循環型社会の形成に寄与する技術の一つとしてメタン発酵技術が再注目されている。本開発はバイオマス資源の中で利用促進の余地がある都市ごみ（生ごみおよび紙ごみ等）に着目し、これらの混合物から乾式メタン発酵方式によるバイオガス発生に関する基礎的なバッチ試験を試みた<sup>1)</sup>。その結果、生ごみと紙ごみの混合発酵は各々の単発酵よりも多くのバイオガスが得られることを確認した。本報告はバッチ試験で得られた知見を基に、87日間の連続発酵試験を行い、メタンガスの発生挙動および安定運転の支障となる発酵阻害要因等について検討したものである。

## 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 生ごみ系メタンガス化施設
- § 3. メタン発酵に影響する要因
- § 4. 連続発酵試験
- § 5. まとめ

### § 1. はじめに

近年、低炭素化社会ならびに循環型社会の形成に寄与する技術の一つとして、バイオマスの利活用技術が注目されている。我が国では、平成21年6月にバイオマス活用推進基本法が公布され、平成24年9月には、関係府省庁から合同でバイオマス事業化戦略<sup>2)</sup>（以下、本戦略）が発表された。本戦略では、多種多様なバイオマス利用技術の課題および実用化の見通し等を評価したロードマップが整理され、その中で都市ごみに関連するものとしては、食品廃棄物を原料としたメタン発酵（湿式・乾式）技術がリストアップされている。これは、我が国における代表的なバイオマス（食品廃棄物系、木質系、下水汚泥、紙類、家畜排泄物）の中で、食品廃棄物が再利用されず廃棄処分される割合が一番高い<sup>3)</sup>ことに由来する。また、本戦略の中で示された食品廃棄物系のバイオガス製造事業化のモデル例では、一定の事業採算性を考慮し、施設あたりの処理量が少なくとも30t/日以上の規模が好ましいことが示されている。

\* 技術研究所

\*\* 技術研究所地域環境グループ

### § 2. 生ごみ系メタンガス化施設

#### 2-1 国内施設の現状

図-1に我が国における食品廃棄物系を対象としたメタンガス化施設の導入実績件数を示す。2015年4月現在で、生ごみ・食品廃棄物等を受け入れている施設は全国で45施設である<sup>4)</sup>。その45施設の平均処理量は約36t/日であり、概ね前述の事業化モデル例と一致している。しかしながら、処理量100t/日以上の大規模なものが4件ある一方で、処理量25t/日未満の施設が26件あり、施設数としては比較的小型のものが一番多く普及しているのが実態ともいえる。

図-2に地域別の導入件数を示す。導入地域は全国にわたるが、北海道・東北地方が多く、中国・四国地方が少ないことがわかる。

また、図-3に処理方式で比較した結果を示す。処理方式は、ほとんどが湿式中温方式であり、近年になっ

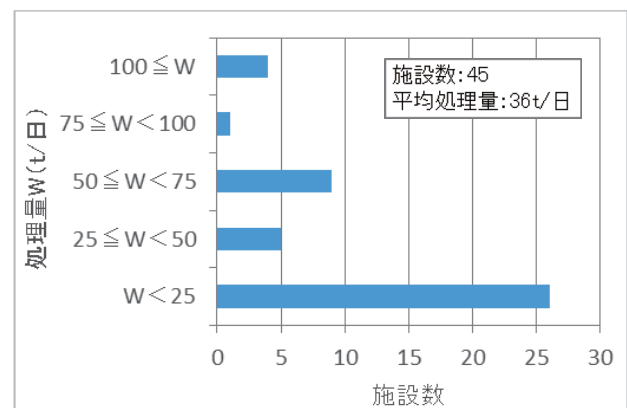


図-1 全国の食品廃棄物系メタンガス化施設

(処理量別：参考文献<sup>4)</sup>より作成)

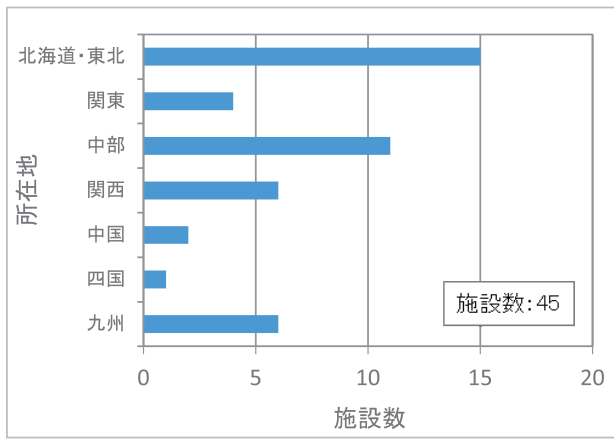


図-2 全国の食品廃棄物系メタンガス化施設  
(所在地別：参考文献<sup>4)</sup>より作成)

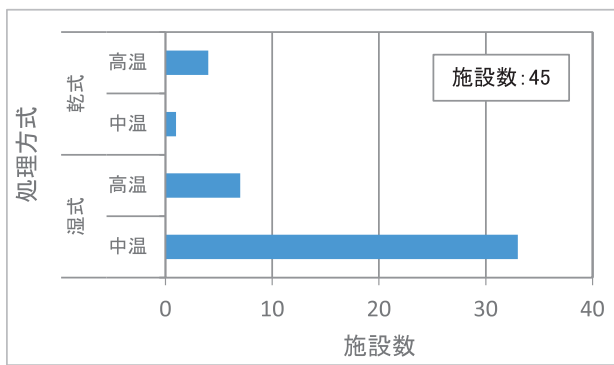


図-3 全国の食品廃棄物系メタンガス化施設  
(処理方式別：参考文献<sup>4)</sup>より作成)

て乾式高温方式の施設が導入されるようになった。

表-1に主なメタン発酵方式の違いをまとめる。ここでは、実施例が多い湿式中温と乾式高温について比較した<sup>5)</sup>。どちらにも長所と短所があり、どちらのメタン発酵方式が最適であるかは、導入地域の特徴、発酵処理物（以下、原料）の種類や組成、発酵残渣の利用の有無等によって異なり、一概に結論付けることはできない。逆に、地域の特徴に見合った処理方式をフレキシブルに選択できる点がメタン発酵技術によるバイオガス化の最大のメリットであるように思われる。

## 2-2 乾式メタン発酵

食品廃棄物を対象としたメタン発酵は、前述のように湿式中温方式（以下、湿式）のプラントが多く稼動しており、本方式は技術的には成熟領域に達している。現状の課題としては、処理量を大型化した場合のコストアップ（原料調達の大域化、発酵残渣の増大）対策等が考えられる。

一方、乾式高温方式（以下、乾式）のプラントは近年その採用例が増えてきたものであり、乾式は湿式よりも都市ごみの処理に優れる点が評価されている。例えば、乾式は紙や草木類などの固形物の処理が可能であることから、一般家庭や商店などから排出される燃えるごみ

表-1 主なメタン発酵方式の違い

|            | 湿式方式   | 乾式方式  |
|------------|--|---|
| 固形物濃度      | ～10%   | 15%～40%   |
| 発酵温度       | 中温(約35℃)   | 高温(約55℃)  |
| 有機物負荷      | 小さい  | 大きい   |
| 発酵期間       | 20～25日程度   | 10～15日程度  |
| 必要エネルギー    | 少ない  | 多い  |
| アンモニア濃度の上限 | ～4,000ppm  | ～3,000ppm   |
| 長所         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・省電力でメンテナンスコストが低い</li> <li>・原料の変動に強い</li> <li>・アンモニア阻害に対する安定性が高い</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・有機物負荷が高いのでガス発生量が多い</li> <li>・排水量が少ない</li> <li>・紙類や草木類なども発酵可能</li> </ul> |
| 短所         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・排水量が多い</li> <li>・発酵日数が長い</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・駆動部が多く消費電力が大きい</li> <li>・発酵残渣が多い</li> </ul>                             |

（生ごみ+紙ごみ）の処理が期待できる。また、乾式は投入できる固形物濃度が湿式よりも高く処理速度が速い（発酵日数が短い）ため、発酵槽の小型化が期待できる等があげられる。兵庫県の南但クリーンセンター<sup>6)</sup>では、ごみ焼却施設と併設する形で乾式メタン発酵施設が整備され、都市ごみからバイオガスを回収、ガスエンジン発電機にて売電を始めている。

このように、近年実績を伸ばしている乾式メタン発酵であるが、対象となる原料が多様であるがため、原料の種類やそれら混合物の組成によっては、メタン発酵の挙動が大幅に異なることが予想される。本報告は、都市ごみからのエネルギー回収を目的とした「生ごみ+紙ごみ」の乾式メタン発酵方式による87日間連続の発酵運転を試行した結果をまとめたものである。

## §3. メタン発酵に影響する要因

### 3-1 メタン菌

一般に、生ごみには発酵に必要なメタン菌が含まれておらず、発酵槽内のメタン菌がいったん阻害を受けて失活すると、発酵プロセスの再立上げが必要となるため、発酵阻害を生じさせない高度な運転管理が必要である。

図-1に示した全国の食品廃棄物系メタンガス化施設のうち、生ごみ単独で運転している施設はわずか7施設であり、他の施設は下水汚泥、し尿・浄化槽汚泥、家畜糞尿などとの混合処理をしている。これは、下水汚泥や糞尿等には元々メタン菌やメタン菌が必要とする微量必須元素などが豊富に含まれており、比較的容易に発酵を進めることができるためである。写真-1にメタン菌（補酵素 F420 の蛍光顕微鏡画像）を示す。

### 3-2 発酵阻害

メタン発酵における発酵阻害を引き起こすと考えられている物質および要因について以下に述べる。

#### ①アンモニア：

アンモニアは投入原料の有機態窒素の分解によって発生し、メタン菌増殖の際の菌体形成に用いられるが、何

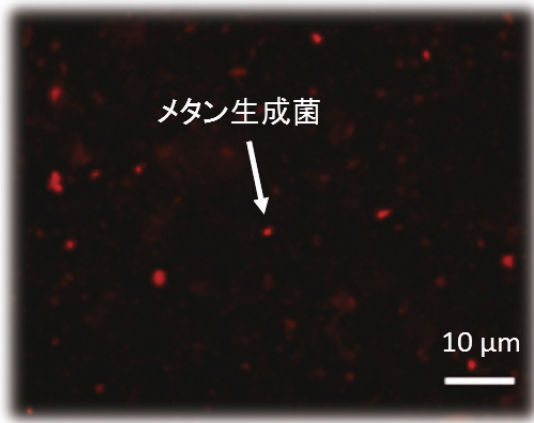


写真-1 メタン発酵消化液の観察画像

らかの影響でアンモニア濃度が必要以上に上昇すると発酵阻害を引き起こす（表-1参照）。イオン状態で存在するもの（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>）と、遊離した状態で存在するもの（NH<sub>3</sub>：フリーアンモニア）があり、フリーアンモニアの方がメタン菌に与える毒性が強い<sup>7)</sup>。

②揮発性脂肪酸（VFA）：

VFAとは炭素鎖が6つ以下の脂肪酸を指し、酢酸やプロキオン酸、ギ酸などを含む。メタン発酵過程における中間成生物であり、炭水化物の分解によって生成される。有機物負荷量が過多となるとVFAの蓄積が発生し、VFAが3,000 mg/L程度以上<sup>1)</sup>で発酵阻害を引き起こす。

③ pH：

pHは発酵槽内のアンモニア濃度（塩基性）とVFA濃度（酸性）のバランスに影響される。メタン発酵に最適なpHは7.5前後とされている。pHの上昇はアンモニアイオン濃度が高くなる要因となる。

④ C/N比：

C/N比とは、物質中の炭素Cと窒素Nの質量比のことであり、メタン発酵に用いる投入原料のそれは、一般に20～40程度とされている。C/N比が高いと炭素過多となりVFAによるpH低下を招きやすい。C/N比が低いと窒素過多となり、アンモニアによるpH上昇が生じてフリーアンモニアが発生しやすくなる。

§4. 連続発酵試験

4-1 実験方法

連続発酵試験の実験条件を表-2に、生ごみと紙ごみの材料諸元を表-3に示す。実験は、セパラブルフラスコ（容量2L）に馴養した種汚泥1kgを投入し発酵槽とした。発酵温度は52℃とし、連続原料投入による高温メタン発酵を合計で87日間行った。

実験は発酵期間の87日間をⅠ期、Ⅱ期、Ⅲ期に分け、それぞれ条件を変えて行った。生ごみは図-4に示す模

表-2 実験条件一覧

| 期間(day)                       | Ⅰ期    | Ⅱ期    | Ⅲ期    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|
|                               | 1～20  | 21～46 | 47～87 |
| 有機物負荷量<br>(gVS/kg-sludge/day) | 1.2～4 |       | 2     |
| 攪拌方式                          | 手動    |       | 攪拌機   |
| 生ごみ:紙ごみ<br>混合比(湿重量比)          | 2:1   | 1:1.5 | 1:1.3 |
| 投入原料窒素濃度<br>(mg-N/L)          | 6085  | 825   | 994   |
| 投入原料TS<br>(%w.b.)             | 33    | 15    |       |
| 加水(g/gVS)                     | —     | 5.6   | 6.7   |
| 牛ふん投入量<br>(g/gVS)             | 1.3   | —     | —     |
| C/N比                          | 36    | 102   | 90    |

表-3 材料諸元

|     | TS<br>(%w.b.) | VS<br>(%w.b.) | 炭素<br>(%d.b.) | 窒素<br>(%d.b.) |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 生ごみ | 19.7          | 17.5          | 30            | 3             |
| 紙ごみ | 94.9          | 82.0          | 44            | 0             |



| 組成品目  | g/kg |
|-------|------|
| キャベツ  | 250  |
| ジャガイモ | 150  |
| リンゴ   | 150  |
| ニンジン  | 200  |
| サンマ   | 120  |
| 豚肉    | 30   |
| 白飯    | 50   |
| 茶殻    | 50   |
| 計     | 1000 |

図-4 原料（生ごみ+紙ごみ）および模擬生ごみ組成表



写真-2 模擬生ごみ

擬生ごみを使用し、紙ごみは廃コピー用紙を用いた。攪拌は1日1回1分間とした。

実験期間中の有機物負荷量は1.2～4とし、ガス発生状況を観察しながら適宜投入量を調整した。Ⅰ期からⅡ期では、投入原料に含まれる窒素濃度（mg-N/L）を生ごみ・紙ごみの混合比を変えることで減少させ、発酵槽



写真-3 実験状況 (Ⅲ期)

内のアンモニア発生を抑えることを試みた。Ⅲ期では、より実際のプラントに近づけた条件とするため、有機物負荷量を一定に保ち、攪拌方法を手動から攪拌機に切り替え、保温方法を恒温槽からシリコンラバーヒータに変更した。写真-3にⅢ期の実験状況を示す。

#### 4-2 実験結果および考察

##### (1) メタンガス発生量の推移

メタンガス発生量と有機物負荷量の推移を図-5に示す。有機物負荷量は、ほぼ一定で推移しているのに対し、メタンガス発生量はⅠ期からⅢ期で大きく変化した。各期における有機物負荷量あたりのメタンガス生産率 (L/gVS) は、Ⅰ期が0.07、Ⅱ期が0.14、Ⅲ期が0.37となり、Ⅲ期はバッチ試験<sup>1)</sup>での最大値0.15を大きく上回った。これは、バッチ試験ではメタン菌の活性が十分でなかったのに対し、今回のⅢ期はメタン菌の活性が高く、効率の良い発酵（消化）が行えたためと考えられる。

図-6にメタンガス濃度の推移を示す。Ⅰ期の前半ではメタンガス濃度は40%以下の低い値を示したが、発酵が安定するにつれてⅠ期後半からⅡ期では50%前後の値を推移し、Ⅲ期では60%以上の範囲を示した。一般的なバイオガスのメタン濃度は50～75%程度であるので、Ⅱ期以降は順調な連続発酵が達成できたと考えられる。

##### (2) アンモニア分析

メタン菌は窒素を必須元素としており、アンモニアはその窒素源としてメタン発酵にとっては必要不可欠であるが、生ごみをメタン発酵するには、投入窒素濃度が高い影響でアンモニア過多となり発酵阻害が発生しやすい。さらに、槽内のpHが高いと電離平衡の関係からフリーアンモニアの割合が大きくなり、より強い発酵阻害を引き起こすことが考えられる。

図-7に槽内の総アンモニア濃度およびフリーアンモ

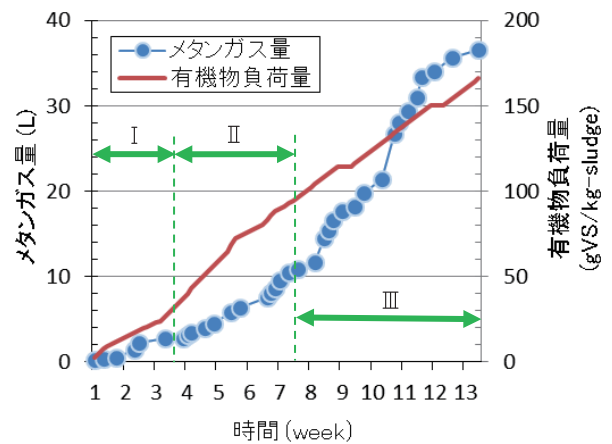


図-5 メタンガスと有機物負荷の積算値

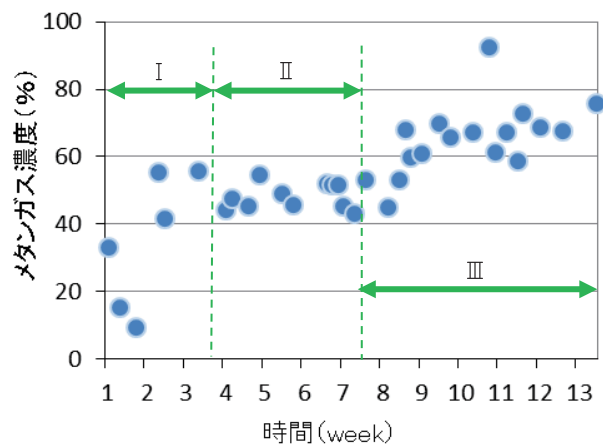


図-6 メタンガス濃度の推移

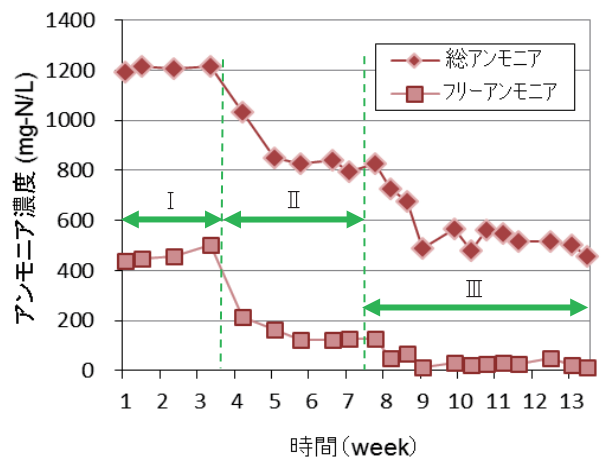


図-7 アンモニアの分析結果

ニア濃度の推移を示す。総アンモニア濃度はⅠ期～Ⅲ期にかけて1200～500 mg-N/L程度まで減少した。これは、投入原料のC/N比が高く生成されるアンモニア量が少なかったため、投入原料によってアンモニアが薄まったと考えられる。フリーアンモニア濃度に関しては、Ⅰ期において濃度の上昇が見られた。これは高いpHの影響であり、総アンモニア濃度がメタン発酵に問題ないレベルであっても、フリーアンモニア濃度が高いと発酵阻

害を発生していることを示していると考えられる。実際に図-5より、I期後半のフリーアンモニア濃度が500 mg-N/L程度に上昇した時、メタンガス量が落ち込んでいるのがわかる。

ただし、今回フリーアンモニア濃度は式(1)より算出した。

$$[\text{NH}_3] = \frac{[\text{T-NH}_3]}{\{1 + (\text{H}^+/\text{ka})\}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $[\text{NH}_3]$ ：フリーアンモニア濃度  
 $[\text{T-NH}_3]$ ：総アンモニア濃度  
 $\text{H}^+$ ：水素イオン濃度  
 $\text{ka}$ ：温度関数  
 (52℃では  $\text{ka} = 34.4 \times 10^{-10}$  一定)

(3) pHおよびVFA

図-8に発酵槽内のpHとVFAの推移を示す。今回の実験では、pHは総アンモニア濃度の推移と近い傾向を示し、総アンモニア量の減少とともに、pHの値も低下した。Ⅲ期のpHは平均7.26であった。pHは発酵液中で酸性を示すVFAと塩基性を示すアンモニアによる酸と塩基性バランスに影響を受けるため、投入基質窒素濃度の減少(表-2参照)による総アンモニア量の減少によってpHが低下したと考えられる。

VFA濃度はI期～Ⅲ期を通じて変動が大きかったものの、1500～2500 mg/Lの範囲内で推移し、発酵阻害が疑われる3000 mg/Lを超えることは無かった。Ⅲ期において、アンモニア濃度が十分に低くアンモニア阻害が発生しなかったにも関わらずVFA濃度が下がらなかったのは、メタン菌の要求量に対して不足しやすい微量必須元素(鉄、コバルト、ニッケル等)の不足が疑われる。

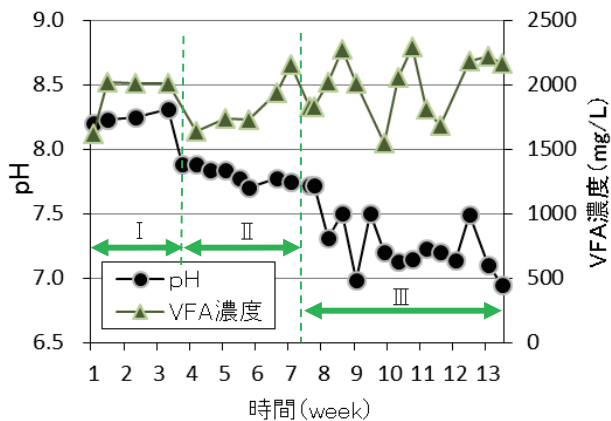


図-8 pHおよびVFAの推移

§5. まとめ

都市ごみからのエネルギー回収を目的に、乾式メタン発酵システムによる基礎的なラボ実験を実施した。その

結果、本実験の範囲内では、生ごみに紙ごみを湿質量比で1.3～1.5倍量加え、投入基質中の窒素濃度を希釈することで、高濃度生ごみの安定発酵を実現できた。

また、発酵を連続して行うことで発酵槽内のメタン菌活性が増加し、メタンガス生産率を増加させることが可能であった。今回の実験の範囲内では、最大のメタンガス生成率は0.37 (L/gVS)であり、これは既往の研究<sup>8)</sup>で見られた最大値0.3を上回り、原料組成の優位性が示されたと考えられる。

また、安定運転制御の観点では、フリーアンモニア濃度を少なくとも500 mg-N/L以下に抑制することで、高濃度生ごみの安定的な連続メタン発酵を実現できるとわかった。

今後は本実験で明らかとなった投入原料の組成を踏まえ、実際の食堂等から排出された食品残渣を用いて、処理規模を大きくした実験機(処理量5 kg/日)による連続メタン発酵実験を行う予定である。

謝辞。本研究を進めるにあたり、北海道大学大学院農学研究院清水直人准教授、同・大学院生の中嶋昂君には大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤忠彦, 石渡寛之: 都市ごみを対象としたメタン発酵システムの開発, 西松建設技報, VOL.38, 2015.6
- 2) バイオマス事業化戦略～技術とバイオマスの選択と集中による事業化の推進～: バイオマス活用推進会議, 2012.9
- 3) バイオマスをめぐる現状と課題: 農林水産省, バイオマス推進会議, 2012.2
- 4) 全国のメタンガス化施設リスト: 環境省, <http://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/data/facilitylist.pdf>, 2015.4
- 5) エネルギー回収型廃棄物処理施設整備マニュアル: 環境省, 大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課, 2016.3 (改訂)
- 6) 芹澤佳代: 南但クリーンセンター～都市ごみのメタン発酵と焼却処理による小規模発電施設～, 再生と利用, Vol.39, No.150, pp.85-89, 2016.1
- 7) 佐々木宏: 生ごみの高温・高濃度メタン発酵に及ぼす滞留時間と負荷の影響, 水資源学会誌, 第22巻第12号, pp.983-989, 1999.12
- 8) V.H.Varel: Effect of Temperature and Retention Time on Methane Production from Beef Cattle Waste, Applied and Environmental Microbiology, Vol.40, No.2, pp.217-222, American Society For Microbiology, 1980