

# 都市ごみを対象としたメタン発酵システムの開発

## Development of methane fermentation system for municipal solid waste

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バイオマス技術が注目されている。バイオマス資源の中で利用促進の余地がある食品残渣やオフィス等から排出されるシュレッダー紙や剪定枝等の都市ごみに着目し、これらの混合物からのエネルギー回収を目的に、乾式メタン発酵による基礎的なラボ実験を実施した。その結果、食品廃棄物（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が確認できた。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. メタン発酵の概要
- § 3. 開発目標
- § 4. ラボ実験の結果および考察
- § 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技術が注目されている。バイオマス資源には、木質系・草本系・家畜排せつ物・下水汚泥・資源作物・食品廃棄物などがあり、各々独自の交換技術により、様々なエネルギー（バイオガス、エタノール、熱・電気）および製品（肥飼料、化成品、樹脂）に変換される。バイオマスのメリットとしては、カーボンニュートラルと呼ばれる特性により、地球温暖化対策に有効であること、地域の未利用資源の有効活用を図ることにより、地域活性化が期待できること等が考えられる。一方、バイオマスは資源が薄く広く存在するため収集運搬コストが高いこと、食料供給や既存用途との競合の可能性がある等の課題も認識されている。

図-1に我が国における代表的なバイオマスの未利用率<sup>1)</sup>を示す。未利用率は食品廃棄物と木質系が50%を上回っており、これらは更なる利用促進の余地があると考えられる。食品廃棄物の利用促進にあたっては、下水処理場やごみ焼却施設といった静脈施設をバイオマス利用拠点として活用推進する動きが活発化している。下

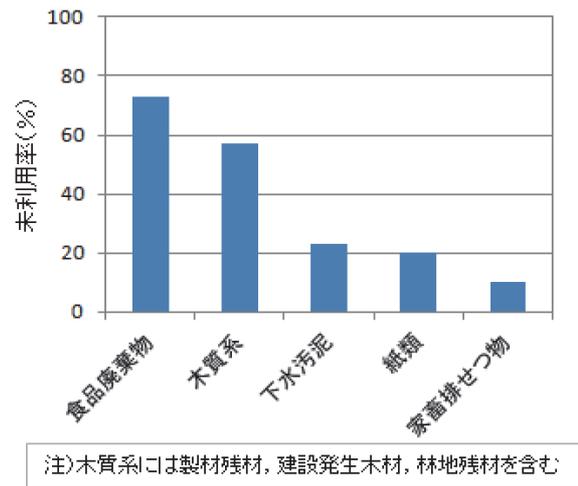


図-1 代表的なバイオマスの未利用率

水処理施設では、単位重量あたりのエネルギー量が少ないものの、通年で安定した量を確保できる下水汚泥とカロリーが高い食品廃棄物を混合してメタン発酵させる技術が開発されている<sup>2)</sup>。また、ごみ焼却施設と乾式メタン発酵システムとの組合せにより、熱回収とバイオガスを得るメタンコンバインド方式が最新システムとして注目を集めている<sup>3)</sup>。コンバインド方式は発酵残渣が簡単に焼却処分でき、かつ、発酵残渣が焼却施設のエネルギー源にもなる点が有利と考えられている。

本報告は、利用促進の余地がある食品廃棄物やオフィス等から排出されるシュレッダー紙や剪定枝等の都市ごみに着目し、これらの混合物からバイオガスを得るためのラボ実験結果をまとめたものである。なお、本報告は北海道大学との共同研究で実施した結果の一部である。

\* 技術研究所

\*\* 技術研究所地域環境グループ

§2. メタン発酵の概要

2-1 メタン発酵の原理

メタン発酵法は、酸素のない条件下で微生物が有機物最終的にメタンと二酸化炭素にまで分解する自然現象を利用した有機排水処理・エネルギー回収技術である。

図-2にメタン発酵のプロセス図を示す。メタン発酵のプロセスは基本的に以下の4段階に分けられる。

①加水分解：

通性嫌気性菌および偏性嫌気性菌の作用により、炭化水素、繊維質、たんぱく質、脂質（脂肪）などの高分子有機物が、それぞれ単糖類、ペプチド、アミノ酸、グリセリン、脂肪酸などに加水分解され、低分子化される。

②酸生成：

次に加水分解された低分子有機物が酸を作る菌により、アルコールや酪酸、プロピオン酸などの揮発性脂肪酸（以下、VFAという）のほか、二酸化炭素、硫化水素、アンモニアへと分解される。

③酢酸形成：

酢酸菌により、酪酸やプロピオン酸を始めとする炭素数3以上の脂肪酸から、酢酸（CH<sub>3</sub>COOH）、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）と水素（H<sub>2</sub>）に分解される。

④メタン生成：

メタン生成菌により、酢酸や水素から、メタン（CH<sub>4</sub>）、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、水（H<sub>2</sub>O）が発生する。

一般に、メタン発酵におけるメタン生成量は、投入した有機物負荷量によって決まる。有機物負荷量が多ければ、それだけメタンへ返還される材料が多いのでガス量は増える。しかし、VFAの一種であるプロピオン酸の分解工程はメタン発酵プロセスの律速要因になりやすく、有機物負荷量を増やすと中間生成物であるVFAが蓄積する。過大なVFAの蓄積はpH低下の原因となり、メタン発酵の阻害要因になる。そのため、ガス量を増やす

には適正な有機物負荷量を把握することが重要である。

2-2 メタン発酵方式の違い

一般に、メタン発酵は発酵槽へ投入する固形物濃度の違いにより湿式方式と乾式方式に、発酵温度の違いにより中温方式と高温方式に分けられる。表-1に各々の違いを示す<sup>4)</sup>。

(1) 湿式方式

有機物の固形分濃度を10%前後に調整した後、メタン発酵槽へ投入する。食物残渣（以下、生ごみという）を対象とする場合は希釈水が必要となる。発酵槽は酸生成とメタン生成を1槽で行う場合が多いが、可溶性や酸発酵の促進のため、前後に可溶化槽を設ける例もある。

(2) 乾式方式

メタン発酵槽へ投入する有機物の固形物濃度が15~40%程度のものを対象としている。湿式方式に比べ、水処理設備が小さくて済む。また、湿式方式では処理しにくい木質系や紙ごみ類も投入することができる。

(3) 中温発酵

35℃付近で活性するメタン生成菌により発酵を行う方法である。一般に、中温発酵は高温発酵に比べ、投入物の負荷変動やアンモニア阻害に強い。しかし、その一方で有機物の分解速度が遅いので、メタン発酵槽の容量は大きくなる。

(4) 高温発酵

55℃付近で活性するメタン生成菌により発酵を行う方法である。高温発酵は中温発酵に比べ、有機物の分解速度が速いため、メタン発酵槽の容量を小さくできるが、投入物の負荷変動やアンモニア阻害に弱い。

表-1 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、高温     | 高温        |
|            | 中温発酵      | 高温発酵      |
| 発酵温度       | 約35℃      | 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 |

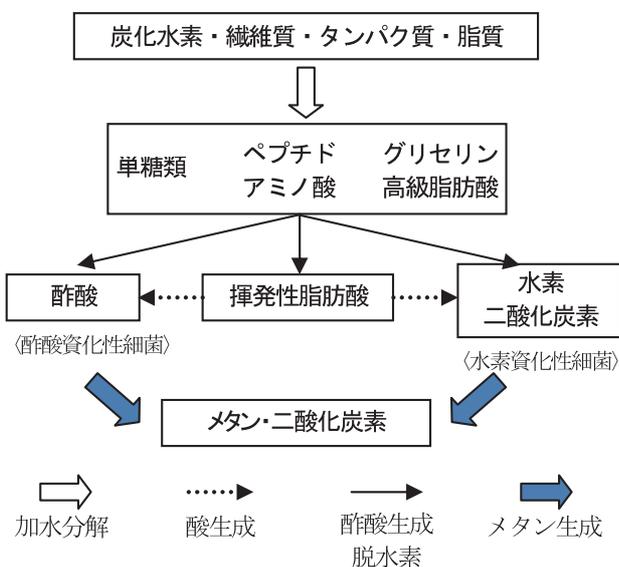


図-2 メタン発酵のプロセス図

2-3 乾式メタン発酵システムについて

乾式メタン発酵システムの代表的な方式を図-3に示す。いずれも欧州で開発された方式であり、日本での実績は従来の湿式メタン発酵システムに比べて少ない。

(1) ドランコ方式

ドランコ式は連続式押し流れの高温発酵に区別される発酵方式であり、発酵槽が縦型である。収集したバイオマス原料を破砕機で数十mm程度に裁断し、ポンプにて原料と発酵残渣の混合攪拌を行いつつ発酵槽へ混合資材を投入する。固形物濃度は15~35%程度であり、

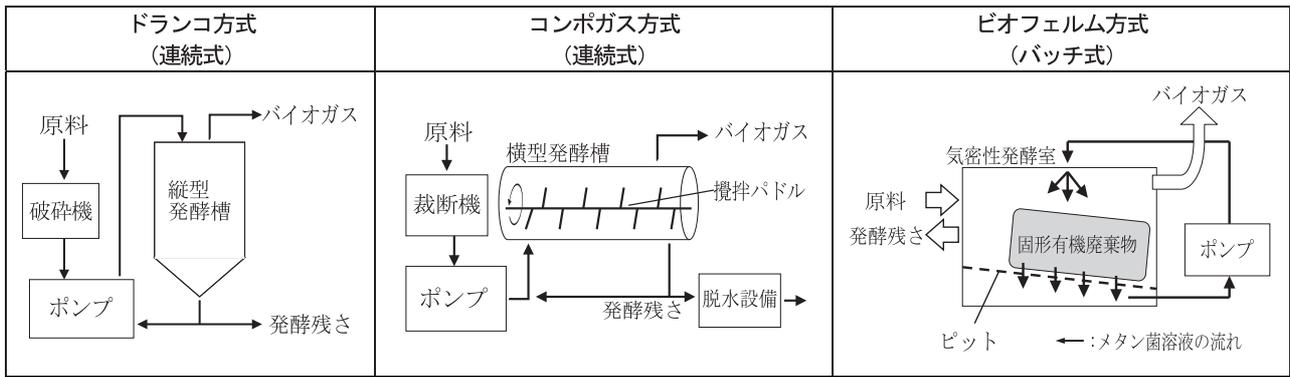


図-3 乾式メタン発酵システムについて

混合資材の固形物濃度を高く保つことで、発酵槽内の固液分離を抑制できるため攪拌装置は必要ないとされる。

(2) コンポガス方式

コンポガス式はドランコ方式と同様、連続式押し出し流れの高温発酵に区別される発酵方式であり、発酵槽が横型である。発酵槽内にはバイオガスを上方へ逃がすための攪拌パドルが設けられている。攪拌パドルは0.5～1回/分程度でゆっくり回転する。固形物濃度は20%程度であり、ドランコ式よりも低いとされる。最新の実施例として、兵庫県の南但クリーンセンターがある。

(3) ビオフィェルム方式

ビオフィェルム式は回分式の高温発酵に区別される。気密性発酵室の上部からメタン菌溶液を噴霧し、バイオマス原料に湿潤させる。メタン菌溶液はポンプで循環利用される。バイオガスの発生が終了したら、発酵室のドアを開け、バイオマス原料を入れ替える。原料の裁断は必要なく、固形物濃度は40～60%が可能とされる。

§3. 開発目標

本開発では、都市ごみからのエネルギー回収を対象とすることから、投入可能な固形物濃度は高い方が好ましい。また、建築施設等での適用を考えると、臭気等の関係から密閉系の連続処理システムが望ましい。したがって、本開発ではドランコ式をモデルとした乾式メタン発酵槽の開発を目的とする。

開発目標とする処理規模としては、受入れ量 500 kg/day のシステムを想定する。これは、約 1,000 人が排出する 1 日の可燃ごみに相当する。また、東京都の調査<sup>5)</sup>によると、500 kg/day は食料品専門スーパー（延床面積 3,000 m<sup>2</sup>）約 3 店舗分、駅ビル 1 棟分（延床面積 24,000 m<sup>2</sup> テナントビル）等の可燃ごみ排出量に相当する。

発生したバイオガスは、ガスホルダーを省略した都市ガスとの混焼制御等<sup>6)</sup>により、自ら熱利用することを想定する。なお、発酵残渣は炭化による再利用が考えられるが、乾式メタン発酵残渣の炭化物は発熱量が低く燃料としては不適との報告<sup>7)</sup>があること、および処理規模が小さいこと等から、現時点では、発酵残渣は焼却施

設等での焼却処分が適していると考えられる。

§4. ラボ実験の結果および考察

4-1 バッチ試験による最適有機物負荷量の検討

(1) 実験方法

バッチ試験は、試薬ビンに基質（生ごみ+紙ごみ）と 300 g の消化液を入れ、52℃の恒温槽内でメタン発酵を行った。写真-1、2 に実験状況と基質を示す。生ごみは表-2 に示す模擬生ごみをミキサーで粉碎し、紙ごみは未使用のコピー用紙をシュレッダーで細断した。ここに、基質の C/N 比は既往の研究<sup>8)</sup> から最適と考えられる C/N 比 39 に調整しており、この時の生ごみと紙ごみの量は質量比で概ね 1:1 になっている。

基質の投入量は、消化液の単位質量あたりの有機物負



写真-1 バッチ試験状況



写真-2 基質

表-2 模擬生ごみ

| 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 |

荷量として、0, 2, 4, 8, 16, 32 gVS/kg-sludgeとした。ここに、VS (volatile solids : % w.b.) は、全固形物分中の有機性物質の量を表す。

なお、消化液は北海道別海町の高温バイオガスプラントから採取したものを、バッチ試験で用いる基質を用いて2週間以上52℃で馴養した。これは、メタン菌を活性化させ、実験初期から分解を効率よく進めるためである。馴養は20 L密閉容器内で行い、基質を2 gVS/kg-sludge/dayで投入、1日1回以上の撹拌を行った。

発酵実験はビンを恒温槽に入れて静置し、ガスが出なくなるまで(通常、1週間程度)反応させた。実験中は1日1回程度ビンを振って撹拌を行い、捕集用ガスバックが満杯になったら適宜交換した。実験はそれぞれの負荷量で2反復を行った。

(2) 実験結果および考察

図-4に有機物負荷量とガス発生量の関係を示す。

0 gVS/kg-sludgeでの発生量は、馴養消化液中の未分解有機物が分解されたものである。本実験では、16 gVS/kg-sludgeでの発生量が総ガスおよびメタンガスともに最も多い結果となった。なお、32 gVS/kg-sludgeでは、ガスは全く発生しなかった。

図-5に実験終了時のVFA濃度を示す。

VFA濃度は、有機物負荷量の増加に伴い増加した。VFA濃度が3,000 ppmを越えると発酵阻害を生じる可能性があり、本実験では16 gVS/kg-sludgeから危険域に入っていた。また、本実験では16 gVS/kg-sludgeのガス発生量が最大であったが、これは消化液のpHが8程度とアルカリ度が高かったため、VFA蓄積によるpH低下の影響を受けにくかったと考えられる。

図-6に実験終了時のアンモニア態窒素濃度を示す。

今回の実験では、有機物負荷量を増やしても先にVFA蓄積の影響で発酵が停止するため、アンモニア態窒素は2,000 ppm程度しか発生しないことがわかった。そのため、C/N比39では発酵阻害物質として最も大きい要因は、VFA蓄積であったと考えられる。

図-7に実験終了時のpHを示す。ただし、0 gVS/kg-sludgeは消化液の初期値である。32 gVS/kg-sludge以外のpHは、初期値のそれよりも上がっている。これは発生したアンモニア態窒素によるものと考えられる。

図-8に2 gVS/kg-sludgeと16 gVS/kg-sludgeのマスバランスを示す。

投入基質の重量に対するガス発生量の割合は、どちらも環境省が定める高効率バイオガス発生目標値<sup>4)</sup>である150 m<sup>3</sup>/tを上回ることがわかった。また、有機物負荷が低い時は、発生ガス中のメタンの比率が高い傾向が見られた。これは、低負荷では水素資化性細菌が酢酸資化細菌よりも優勢であり、二酸化炭素と水素からメタンを作る働きが多いためと考えられる。

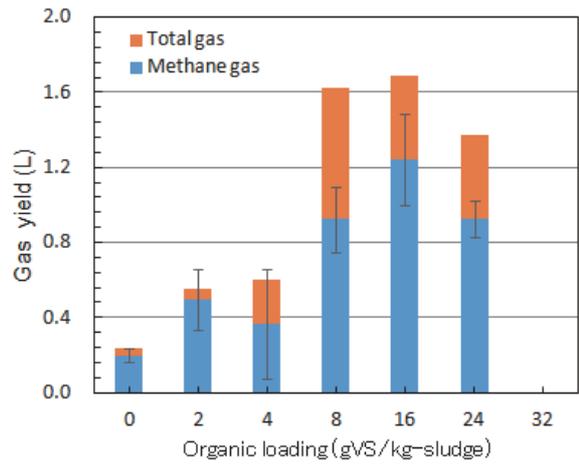


図-4 有機物負荷量とガス発生量の関係

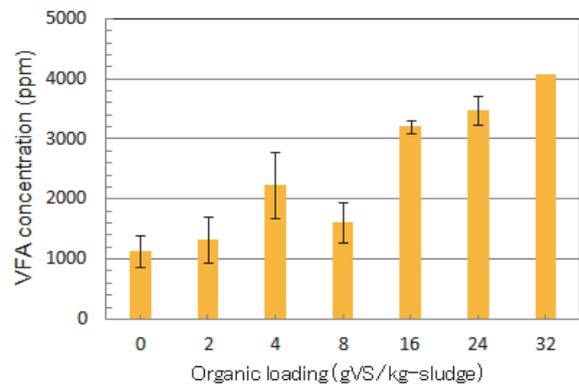


図-5 VFA濃度

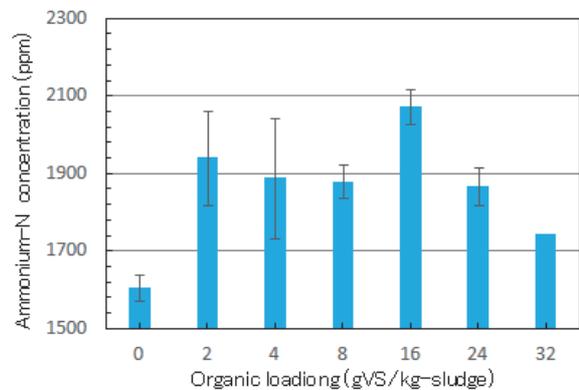


図-6 アンモニア態窒素濃度

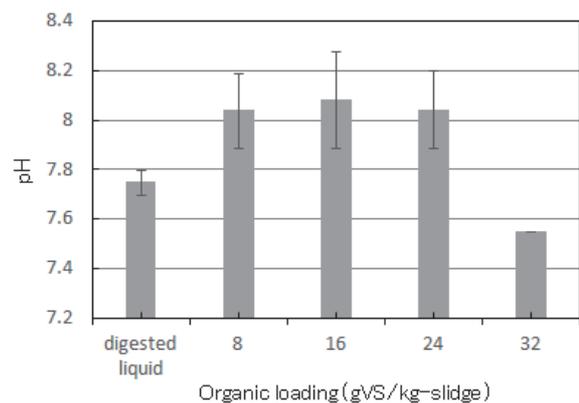


図-7 実験終了時の消化液 pH

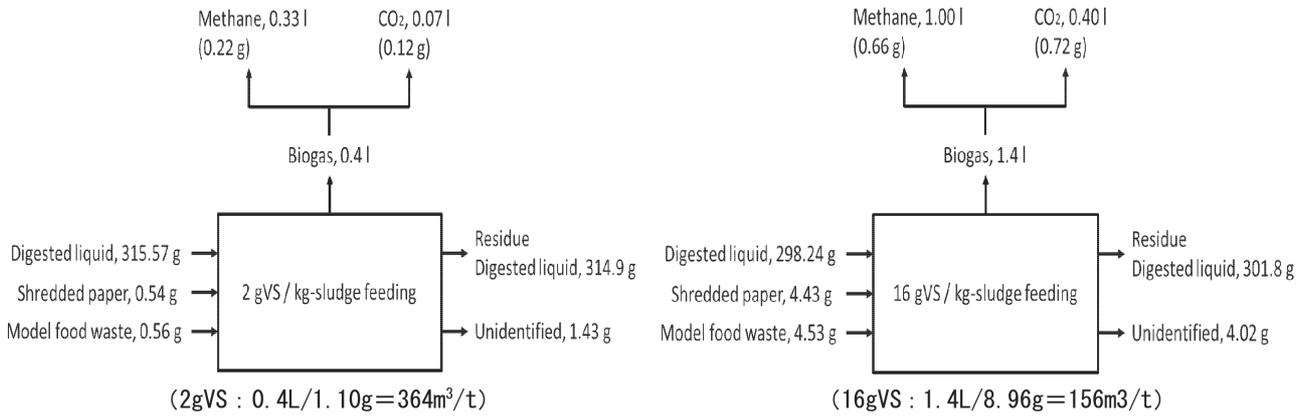


図-8 マスバランス

4-2 副資材の種類によるガス発生量の検討

(1) 実験方法

一般に、生ごみのみの単発酵はC/N比が低いためアンモニア態窒素の蓄積が生じやすく、発酵阻害となりやすい。紙ごみの混入はC/N比を調整でき、より高い有機物負荷をかけられるようになるので、反応槽容積あたりのバイオガス量を増やすことが可能となる。しかし、大量の紙ごみの安定供給は困難な場合も考えられるので、

表-3 実験ケース

| 実験区の名称          | 有機物負荷量 |       |
|-----------------|--------|-------|
|                 | 2 gVS  | 8 gVS |
| 牧草区 (生ごみ+牧草)    | —      | ①     |
| 木質区 (生ごみ+木質チップ) | —      | ②     |
| 紙ごみ区 (生ごみ+紙ごみ)  | —      | ③     |
| 生ごみのみ区 (生ごみ)    | ④      | ⑤     |
| 紙ごみのみ区 (紙ごみ)    | ⑥      | ⑦     |

紙ごみに代わる副資材でC/N比39に調整した場合のバイオガス発生量を検討した。ここに、副資材は都市ごみにおける剪定枝等の適用性を踏まえ、牧草と木質チップを用いた。実験は前項と同様のバッチ試験で行い、実験ケースは、表-3に示す7種類とした。写真-3に投入基質を示す。

(2) 実験結果および考察

図-9に副資材の違いによるガス発生量の変化を示す。

紙ごみ区のCase③が最もガス発生量が多く、次いで牧草区のCase①、木質区のCase②という結果になった。生ごみのみ区2gVSのCase④は、正常に発酵が進行したが、8gVSのCase⑤では、ガスが全く発生しなかった。同様に、紙ごみのみ区2gVSのCase⑥は発酵が進行したが、8gVSのCase⑦では、ガスが発生しなかった。

Case④と⑥を比較すると、生ごみの方が紙ごみよりもガス発生に寄与する割合が高いことが示された。木質チップは、目視ではほとんど分解されていなかったが、Case②は、④と⑤に比べてガスが多く発生していることから、木質チップもガス発生に寄与することが確認された。牧草区のCase①では、総ガス発生量はCase③よりも劣るが、総ガス中に占めるメタンガスの割合が多い結果となった。また、牧草は目視で分解されている様子が見られた。



写真-3 投入基質

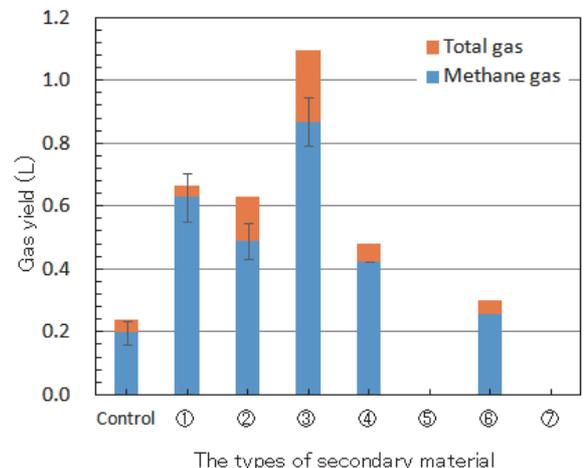


図-9 有機物負荷量とガス発生量の関係

図-10 に各 Case の実験終了時の VFA 濃度を示す。

本実験では、有機物負荷量 8 gVS 以下で行ったため、ほとんどの実験ケースで目立った VFA 蓄積は認められなかった。VFA 濃度は Case ⑦ が一番高くなったが、発酵阻害が生じる可能性のある 3,000 ppm には達していなかった。したがって、Case ⑤と⑦でガスが発生しなかったのは、VFA 蓄積である可能性は低いといえる。

図-11 に実験終了時のアンモニア態窒素濃度を示す。

実験前よりも、全ての実験ケースでアンモニア態窒素濃度は高くなっている。また、各々の実験ケースで濃度の差は少なかった。

図-12 に実験終了時の消化液の pH を示す。

pH の変化はアンモニア態窒素濃度の変化と同じ傾向であり、その値は概ね正常範囲内であった。

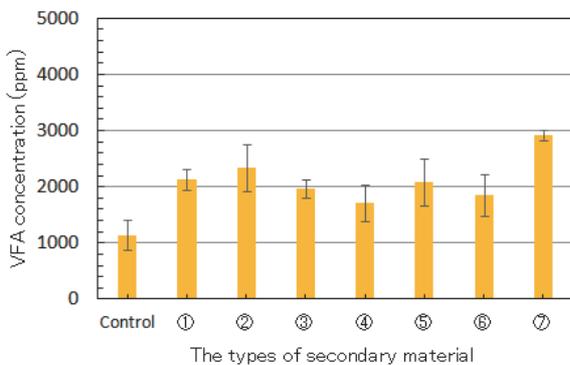


図-10 VFA 濃度

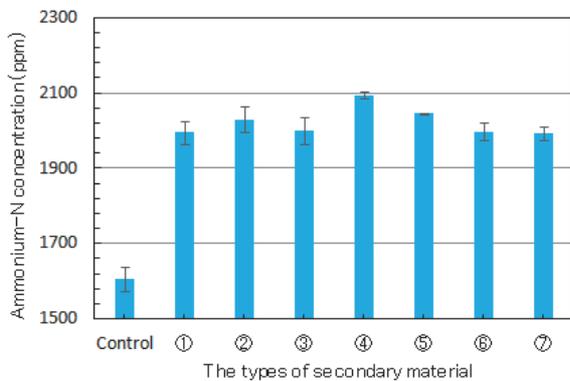


図-11 アンモニア態窒素濃度

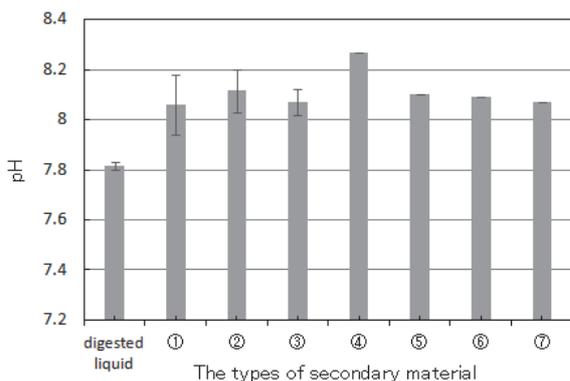


図-12 実験終了時の消化液 pH

以上のとおり、今回の実験の範囲内では、バイオガス発生量は、生ごみと紙ごみを混合発酵した方が、生ごみ単発酵よりも多く得られることが確認された。また、生ごみと混合する紙ごみを牧草または木質チップに代替した場合でも、生ごみ単発酵よりも多くのバイオガスが得られた。したがって、乾式メタン発酵方式では、生ごみや紙ごみの単発酵よりも複数種類の固形有機物を混合発酵させるのが効率的と考えられる。

§ 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着目した基礎的なラボ実験を実施した。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が確認できた。

今後は基質を連続投入した場合の発酵槽試験等を実施し、乾式メタン発酵システムにおける合理的な有機物負荷量の制御方法ならびにシステム設計に繋げていきたい。

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) 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、平成 24 年 2 月。
- 2) 下水汚泥と食品廃棄物混合処理の現状と課題について：日本下水道事業団、平成 25 年 5 月。
- 3) 廃棄物系バイオマス活用ロードマップ：環境省、廃棄物・リサイクル対策部、平成 25 年 6 月。
- 4) メタンガス化(生ごみメタン)施設整備マニュアル：環境省、廃棄物・リサイクル対策部、平成 20 年 1 月。
- 5) 藤原ら：バイオマス・都市ガス活用による再生可能エネルギー導入促進研究、東京都環境科学研究所年報、pp. 75-78, 2008。
- 6) 長谷川：乾式メタン発酵法活用による都市型バイオマスエネルギーの実用化に関する技術開発、全国環境研会誌、Vol.34, No.2, pp. 22-27, 2009。
- 7) 藤原ら：都市ごみを用いた乾式メタン発酵法実証実験、東京都環境科学研究所年報、pp. 44-48, 2011。
- 8) 伊藤ら：発酵液循環方式による都市ごみの無加水バイオガス化、第 70 回農業機械学会年次大会講演要旨、pp. 418-419, 2011 年 9 月。