

# 学園内で発生する生ごみと廃棄紙のメタン発酵\*

高島 正信<sup>\*1</sup>

## Methane Fermentation of Food and Paper Wasted from Fukui Campus

Masanobu TAKASHIMA<sup>\*1</sup><sup>\*1</sup> Department of Architecture and Environmental Engineering

Methane fermentation of the biomass wastes, food and paper wasted from Fukui Campus of Kanai Gakuen, was investigated in this study. The methane fermentation reactor was operated at 50 days hydraulic residence time and a mesophilic temperature of 35°C. The feed was food waste for the first 49 days, and then was mixed with paper waste which was increased from 2.5 to 20 g wet/day gradually. The reactor was unstable during the start-up period, but was recovered after about 20th days. The volatile solids (VS) destruction obtained varied from about 70% for food waste only to about 86% for food waste mixed with paper waste of 20 g/d. The biogas production was between 0.64 and 0.91 L/gVS fed. The performance agreed with the estimates from stoichiometric relationships. The results indicated that methane fermentation technology is suitable for treating those wastes and producing energy.

**Key Words** : Fukui Campus, Methane Fermentation, Waste Food, Waste Paper

### 1. 緒 言

近年、地球温暖化をはじめとする地球規模の環境問題がクローズアップされ、地球環境にやさしい科学技術の開発の重要性が強く認識されるようになった。そのなかで本研究室では、バイオマス廃棄物からバイオガスを生成するメタン発酵技術に注目してきた。「バイオマス廃棄物」とは、バイオマス（生物資源）のうち生活や産業活動によって生じる副産物や廃棄物のことで、家畜排せつ物、食品廃棄物、下水汚泥、黒液、廃棄紙、建設発生木材・林地残材、農作物非食用部などがある。メタン発酵により生成する「バイオガス」は、メタンガスを多く含む再生可能で二酸化炭素排出量を増やさないバイオ燃料であり、燃料電池、自動車の燃料などに利用できる。また、下水処理場で発生する下水汚泥をバイオガス化したときの例として、福井市ではバイオガス発電、金沢市や長岡市では都市ガスの燃料としての使用がある。

私たちの日常生活から排出される都市ごみについて、その内訳を集計したものを Table 1 に示す。厨芥類、紙類、木・竹・草類などメタン発酵の原料になりうるバイオマス廃棄物が7割程度（湿重量基準）も占めていることがわかる。学園キャンパス内に目を移すと、多量に廃棄されていると思われるバイオマス廃棄物として、学園レストランなどから発生する生ごみ（食品廃棄物）、教職員・学生が排出する廃棄紙、木々から落ちる枯葉などがあり、循環型社会の形成を目指して可能な限り有効利用することが望まれる。筆者は、これら

Table 1 Composition of wastes derived from town life<sup>(1)</sup>.

Type	Wet weight	Volume
Kitchen waste	38.33	7.69
Paper	29.42	38.02
Textile	2.40	2.00
Plastic	18.16	45.94
Plant	3.05	1.18
Others	8.64	5.17
Total	100.00	100.00

\* 原稿受付 2015 年 2 月 27 日

<sup>\*1</sup> 建築生活環境学科

E-mail: takasima@fukui-ut.ac.jp

のうち枯葉については下水汚泥などと混ぜて有機肥料化の試みを、廃棄紙については基本的なメタン発酵特性を既に報告している<sup>(2)(3)</sup>。

以上のような背景から、今回は学園内で発生するバイオマス廃棄物のメタン発酵によるエネルギー回収について取り上げ、次のような目的で実験的検討を行った。

- 1) 生ごみについてはこれまでメタン発酵実験の経験がないため、低負荷での安定性を確認する。
- 2) 生ごみに廃棄紙を混入した混合メタン発酵を実施し、廃棄紙の量を増やしていったときの影響を観察する。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。メタン発酵槽は容積 9.0L の完全混合型を用いた。その温度はサーモスタット (E5CSV, オムロン) とリボンヒーター (SBH15, 坂口電熱) の組合せによって約 35°C, 攪拌は攪拌モーター (ZZ-2320, EYELA) によって約 80rpm に制御した。発生したバイオガスは、ガス成分分析用サンプルコックと乾式脱硫カラムを経てガスメーター (WS-1A, シナガワ) で計量した。

生ごみ/廃棄紙の投入は、濃度が高く実験用小型ポンプでは困難であったため、メタン発酵槽横側に付けた内径約 3cm のパイプを通じて 1 日に 1 回マニュアルで行った。生ごみの投入量は全実験期間中 0.18L/日と一定にすることによって、水理学的滞留時間 (Hydraulic residence time; HRT) を比較的長めの 50 日に設定した。廃棄紙は、実験開始 50 日目より生ごみに混合して投入した。なお、種汚泥には下水処理場から採取した嫌気性消化汚泥を用いた。

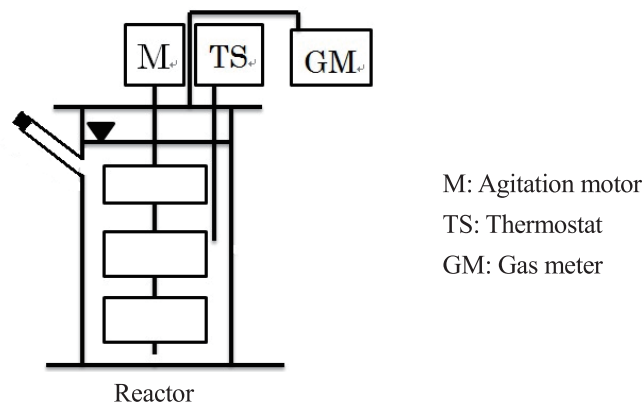


Fig. 1 Experimental set-up.

### 2.2 生ごみおよび廃棄紙

生ごみは、本学学園レストランから調理くずと残飯を提供してもらい、ブレンダー (CB15, Waring 社) で数分間粉碎したものである。これを冷蔵庫に保管して使用した。

廃棄紙は、元々は廃棄された PPC 用紙で、コピー機で印刷済みのものである。これをシュレッダーで粉碎してから使用した。

### 2.3 分析方法

週 1 回の頻度で、生ごみ、メタン発酵汚泥と発生バイオガスについて pH, 全固形物 (TS), 揮発性固形物 (VS), 浮遊物質 (SS), 揮発性浮遊物質 (VSS), 化学的酸素要求量 ( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ),  $\text{CH}_4$  および  $\text{CO}_2$  濃度などを測定した。それらの方法は下水試験法<sup>(4)</sup>と Standard methods<sup>(5)</sup>に主に従った。

$\text{COD}_{\text{Cr}}$  は Closed reflux colorimetric 法 (Standard methods 5220 D) で測定し、これには吸光光度計 (DR4000U, Hach 社) を用いた。バイオガス中の  $\text{CH}_4$  および  $\text{CO}_2$  は TCD 検出器付きガスクロマトグラフ (GC-9A, 島津製作所) で定量した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 生ごみおよび廃棄紙の性状

学園レストランから採取した生ごみの質量、特徴などを Table 2 に示す。この場合の生ごみは、調理くずと残飯が混合されたものであり、前者は新鮮であるが、後者は少々腐敗が進んでいる。調理の種類や曜日によって、生ごみの発生量と性状は大きく変化した。生ごみの発生量については、金曜～土曜の週末に客数と仕込み量が減るのに比例して減少し、月曜～木曜で多くなるようである。メタン発酵の非適合物質として、野菜を束ねていたビニールテープなどが混入しているのが散見された。

廃棄紙は、平均して水分 3.1%，有機分（VS）90.8%であった。紙は主にセルロースからできているが、有機物が 100%ではなく、10%近くの無機物も含まれていることがわかる。

Table 2 Characteristics of food waste from Gakuen restaurant.

No.	Date	Weight (wet kg)	Distinction
1	Oct. 3 (Fr)	3	Mainly vegetables. Japanese leeks etc.
2	Oct. 31 (Fr)	2.5	Mainly vegetables. Chinese cabbage, lettuce, potato, carrot etc.
3	Nov. 14 (Fr)	1	Mainly vegetables. No leftovers.
4	Nov. 27 (Th)	14	Mainly leftovers. Banana peel, rice, noodle, Chinese cabbage, hackberry etc.

#### 3.2 生ごみおよび廃棄紙のメタン発酵

Fig. 2 に VS 濃度、VS 分解率、バイオガス発生量と pH の経日変化を、Table 3 にそれらの平均値を実験条件ごとに示す。開始直後の約 2 週間は下水汚泥を処理していた種汚泥は生ごみに馴致しておらず、pH が一時的に約 6 まで低下して不安定であった。しかし、20 日目ごろから回復して pH やバイオガス発生量は上昇し、それ以降はほぼ安定な運転が可能であった。40 日目付近でバイオガス発生量が一時的に低下したのは、生ごみの中に残飯が含まれていなかった時期である。野菜を中心とした調理くずよりも炭水化物の多い残飯の方が有機物濃度が高くなり、メタンも生成しやすい原料であると考えられている。バイオガス中のメタンガス含有率は 52～66% の範囲で検出され（平均 55%）、生ごみの性状変化や廃棄紙の混合を反映して変動が大きかった。50 日目より、2.5g/日（湿重量、以下同様）の廃棄紙の投入を開始した。紙の槽内蓄積など運転に支障が見られなかったことから、廃棄紙の混合量をその 2 週間後に 5g/日、その後 3 週間ごとに 10g/日、20g/日と増加させていった。

生ごみの有機物分解率は、一般に 80%前後である<sup>(6)</sup>。今回の生ごみのみの場合に VS 分解率が約 70%とやや低かったのは立ち上がり時期の不安定さが影響していた可能性がある。その後、廃棄紙の混入量を増やすにつれて VS 分解率は上昇し、最終的に約 86%に達した。しかし、廃棄紙 20g/日では pH がわずかに低下しており、やや過負荷だった可能性がある。いずれにしても生ごみおよび紙（主成分はセルロース）は、一旦馴致するとメタン発酵にとって格好の原料であると考えられる。事実、廃棄紙については、本研究室における以前の研究<sup>(3)</sup>でほぼ 100% 分解されるという実験結果が得られている。

Table 4 には、報告されている生ごみ組成と紙の有機分がすべてセルロースと仮定したとき、メタン発酵反応の化学量論をまとめてある。セルロースからのメタン生成を示す(2)式に従うと、紙 1gVS からメタン約 0.4L、二酸化炭素約 0.4L、合計して約 0.8L のガスが発生すると推定されるので、今回の廃棄紙投入量では 100%分解されると各投入量において約 1.9, 3.8, 7.5, 15.1L/日の寄与があると計算される。

Fig. 3 には、メタン発生量について、実測値と Table 4 の化学量論式に基づく理論的推定値と一緒にプロットしてある。図より、実測値と理論値は比較的良好に一致しており、メタン発酵反応は化学量論式にほぼ従って進行していると考えられる。上記したように今回採取した生ごみは性状変化がよく見受けられたが、数種類混合されることによって組成がある程度均一化されると推定される。また、廃棄紙の混入量を高めた結果、最終的な流入濃度は TS で 20%を超過し乾式メタン発酵（20～30%）に近づいていたが、生ごみと廃棄紙の分解性がよいため湿式メタン発酵（発酵槽内約 10%以下）に留まり、まだ流入濃度の悪影響が現れなかったと考えられる。

学園内で発生する生ごみと廃棄紙のメタン発酵

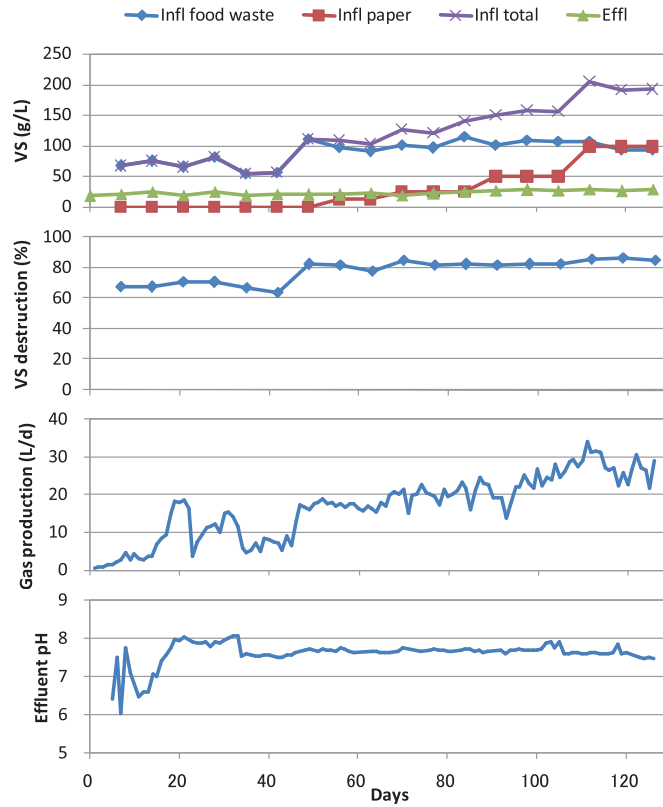


Fig. 2 Time course of the methane fermentation experiment.

Table 3 Averaged experimental results.

	Food waste	Food waste + Paper 2.5g/d	Food waste + Paper 5g/d	Food waste + Paper 10g/d	Food waste + Paper 20g/d
Duration (d)	0~49	50~63	64~84	85~105	106~126
Influent food waste VS (g/L)	72.6	93.4	104.2	105.5	97.9
Influent paper VS (g/L)	0.0	12.2	24.4	48.9	97.8
Influent total VS (g/L)	72.6	105.6	128.6	154.4	195.7
Effluent VS (g/L)	20.5	21.2	22.1	27.3	28.1
Gas production (L/d)	8.4	17.3	19.7	21.9	27.7
CH <sub>4</sub> concentration (%)	54.1	55.8	53.6	55.7	55.2
pH	7.53	7.69	7.69	7.73	7.60
VS destruction (%)	69.9	79.9	82.9	82.3	85.7
Gas production per VS (L/gVS)	0.640	0.909	0.853	0.788	0.787
CH <sub>4</sub> production per VS (L/gVS)	0.346	0.507	0.457	0.439	0.434

Table 4 Theoretical stoichiometry for the methane fermentation from food waste and paper.

Type	Reaction	Gas production (NL/gVS destroyed)	CH <sub>4</sub> production (NL/gVS destroyed)	CH <sub>4</sub> percent (%)
Food waste <sup>(6)</sup>	$C_{45}H_{73}O_{31}N + 14H_2O \rightarrow 24CH_4 + 21CO_2 + NH_4HCO_3$ (1)	0.887	0.470	53
Paper (Cellulose)	$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$ (2)	0.830	0.415	50

# 学園内で発生する生ごみと廃棄紙のメタン発酵

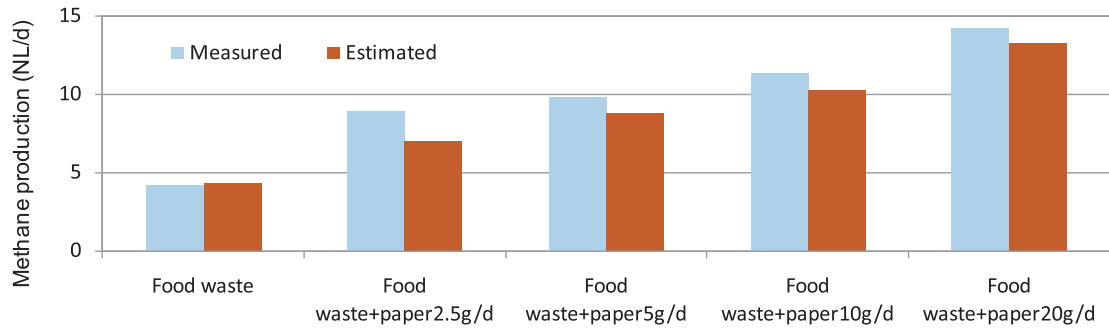


Fig. 3 Comparison of methane production between the measurement and theoretical estimate.

以上より、生ごみと廃棄紙の混合メタン発酵は学園内から出るバイオマス廃棄物のエネルギー回収に適した方法であることが示された。一方、上記したように、学園レストランの生ごみは性状の大きく異なることが明らかになったので、HRTを今回の50日から短縮する場合でも30日程度が限界であろうと予想される。

## 4. 結 言

本研究では学園内から排出されるバイオマス廃棄物として学園レストランから出た生ごみと PPC 用紙から成る廃棄紙を対象とし、メタン発酵実験を実施した。

- 1) 生ごみのメタン発酵では、実験開始直後はやや不安定だったものの、滞留時間 50 日という比較的低負荷だったこともあり、その後は安定した運転が可能であった。
- 2) 50 日目より廃棄紙も混入し、その量を増加させていったところ (2.5, 5, 10 および 20g/日湿重量)、VS 分解率とガス発生量は上昇し、最終的に VS 分解率約 86%、ガス発生量約 28L/日 (約 0.8L/gVS 投入) に達した。
- 3) 実験で得られたガス発生量は、化学量論から推定される理論値と比較的よく一致した。
- 4) これらの結果より、生ごみと廃棄紙の混合メタン発酵は学園内から出るバイオマス廃棄物のエネルギー回収法として適していると考えられた。

今後の課題として、短い滞留時間で有機物負荷を高めた条件や、廃棄紙の量をさらに増した条件などを調べる必要がある。また、最近再注目を浴びている水素発酵についても、これらのバイオマス廃棄物を用いて検討する価値があると思われる。

## 謝 辞

生ごみを快く提供してくださいました本学学園レストランの木村店長に感謝致します。

## 文 献

- (1) 日本環境衛生センター, 廃棄物基本データ集 2000 (2001).
- (2) 高島正信, “バイオマス廃棄物の堆肥化”, 福井工業大学研究紀要, No. 39 (2009), pp. 374-379.
- (3) 高島正信, “未利用植物系バイオマスのメタン発酵”, 福井工業大学研究紀要, No. 41 (2011), pp. 387-392.
- (4) (社) 日本下水道協会, 下水試験方法 (1997).
- (5) APHA, AWWA and WEF, Standard methods (2000).
- (6) 野池達也編著, メタン発酵 (2009), 技報堂出版.

(平成 27 年 3 月 31 日受理)