

## 乾式メタン発酵を用いた組成の異なる都市ごみの処理(1)

誌名	農業機械學會誌
ISSN	02852543
著者	中久保, 亮 小島, 陽一郎 岩淵, 和則 門間, 崇広 松田, 従三 近江谷, 和彦
巻/号	75巻1号
掲載ページ	p. 45-51
発行年月	2013年1月

## 乾式メタン発酵を用いた組成の異なる都市ごみの処理 (第1報)\*

— 中温乾式メタン発酵特性 —

中久保亮\*<sup>1</sup>・小島陽一郎\*<sup>2†</sup>・岩渕和則\*<sup>3</sup>・門間崇広\*<sup>4</sup>・松田従三\*<sup>5</sup>・近江谷和彦\*<sup>6</sup>

## 要 旨

生ごみおよび紙ごみの湿重量割合を Run A (60%, 40%), Run B (68%, 32%), Run C (82%, 18%) に設定し, 容量 2L の発酵槽を用いて 37°C 中温乾式メタン発酵試験を行った。投入 VS あたりメタンガス収率は易分解性有機物を多く含有する生ごみの投入割合が高い Run C で 0.26 L/gVS, Run A および Run B で 0.24 L/gVS であった。平均メタンガス濃度はいずれの実験区においても 57% であった。急激な発酵阻害が発生することのない限界投入有機物負荷は, いずれの実験区においても 5 gVS/(kg 汚泥・day) であった。発酵阻害発生後, 投入有機物負荷の低減により Run B (C/N 比 39) では再度メタンガス収率が回復したことから, 紙ごみにより C/N 比を調整することで発酵阻害に対する強度を高め, より安定して発酵を行うことが可能だと考えられる。

[キーワード] 生ごみ, 紙ごみ, 嫌気性発酵, 中温メタン発酵, 乾式メタン発酵

## Dry Methane Fermentation of Municipal Waste with Various Composition (Part 1)\*

— Characteristics of Mesophilic Fermentation —

Ryoh NAKAKUBO\*<sup>1</sup>, Yoichiro KOJIMA\*<sup>2†</sup>, Kazunori IWABUCHI\*<sup>3</sup>, Takahiro MONMA\*<sup>4</sup>,  
Juzo MATSUDA\*<sup>5</sup>, Kazuhiko OHMIYA\*<sup>6</sup>

## Abstract

Characteristics of dry methane fermentation were studied with various composition ratio of kitchen wastes and paper wastes on a wet basis, Run A (60%, 40%), Run B (68%, 32%) and Run C (82%, 18%), using digesters with an effective volume of 2 liters maintained at a mesophilic temperature of 37°C. Methane gas yields of Run A, Run B and Run C were 0.24 L/gVS, 0.24 L/gVS and 0.26 L/gVS, respectively. In Run C, in which the loading rate of kitchen waste was the highest among the three runs, methane gas yield was higher than that in Run A or B since kitchen waste is an easily degradable organic waste. The maximum loading rate of kitchen waste and paper waste, which does not cause acute inhibition of methanogenesis, was 5 gVS/(kg<sub>sludge</sub>·day) regardless of their composition ratio.

[Keywords] kitchen waste, paper waste, anaerobic digestion, mesophilic fermentation, dry methane fermentation

\* 2009年9月 農業環境工学関連学会 2009年合同大会 (東京大学) にて講演

\*1 会員, (独)農研機構・畜産草地研究所 (〒305-0901 つくば市池の台2)  
National Institute of Livestock and Grassland Science, 2 Ikenodai, Tsukuba, 305-0901\*2 会員, (独)農研機構・畜産草地研究所 (〒329-2793 那須塩原市千本松 768 TEL 0287-37-7814)  
National Institute of Livestock and Grassland Science, 796 Senbonmatsu, Nasushiobara, 329-2747, Japan, +81-287-37-7814

\*3 会員, 宇都宮大学農学部農業環境工学科 (〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350)

Environmental engineering, Utsunomiya University, Mine-machi, Utsunomiya, 321-8505, Japan 現在: 北海道大学大学院農学研究院

\*4 株式会社コガネイ (〒101-0032 東京都千代田区岩本町 3-8-16)

Koganei, INC., Iwamoto-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0032, Japan

\*5 会員, ホクレン農業総合研究所 (〒060-0906 札幌市東区北 6 条東 7 丁目)

Hokuren Agricultural Research Institute, Higashi-ku, Sapporo, 060-0906, Japan

\*6 会員, 北海道大学大学院農学院生物資源生産学専攻 (〒060-8589 札幌市北区北 9 条西 9 丁目 TEL 011-706-4172)

Graduated school of agriculture, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo, 060-8589, Japan

† Corresponding author: yokojima@affrc.go.jp

## I はじめに

日常の生活に伴って排出される生活系ごみは一般廃棄物の64%と、その大部分を占めている(環境省, 2005年実績)。また、東京などの都市から排出される、生活系ごみを含む都市ごみの70%以上は紙ごみや生ごみといった有機性廃棄物である(日本エネルギー学会, 2003)。このように日常生活からは大量のごみが排出されており、その一部は再資源化されている。再資源化される有機性廃棄物の大部分は紙ごみ由来のものであり、製紙原料化、炭化、廃棄物固形燃料(伊藤, 2004)、建設・農業資材、家畜用敷料等への利用などが挙げられる(白井, 2000)。一方、一般家庭から排出される生ごみは全食品廃棄物の約50%を占めているが、再資源化率はわずか2%程度である(環境省, 2008)。一般家庭から排出される生ごみの再資源化が進まない背景として、分別の難しさ、熱回収等を目的とした焼却利用においては、高水分に起因した燃焼温度低下によるダイオキシン発生問題などがあげられる(森北ら, 2002)。近年、生ごみの再資源化率の向上のために、生ごみ分別回収への取り組みも検討されているが(田原ら, 2004)、生ごみの再資源化量は未だ少ないままである。生ごみの再資源化としては、飼料化、堆肥化、メタン発酵などが挙げられる(田中ら, 2002)。しかし、飼料化は原料となる生ごみの品質に対する要求が高く(川島, 2007)、また、堆肥化は適正に処理を行えば有用な肥料となるものの(伊達, 1999)、発酵中に悪臭が発生する場合があります(中川ら, 2001)、再資源化のネックとなっている。このようなことを背景として、メタン発酵による生ごみ処理が近年注目を集めている。生ごみは水分が高いため、いわゆる湿式メタン発酵法による処理が一般的であるが(佐々木ら, 1999; 藤田ら, 2006)、都市ごみには生ごみの他に紙ごみも混入しているために、これらの混合物では水分が低く、湿式メタン発酵法による処理が困難な場合もある。

そこで本研究では、乾式メタン発酵法による生ごみおよび紙ごみの処理に着目した。乾式メタン発酵法とは、発酵槽内汚泥 TS 濃度 15~40% 程度で発酵を行うもので(黒島ら, 2001)、水分含有率の低い固形有機性廃棄物の処理に有効である。しかし、乾式メタン発酵に関しては研究事例があるものの(Xiao et al., 2009; 坪田ら, 2008)、紙ごみの混入している都市ごみの乾式メタン発酵処理についての研究は少ない。また、都市ごみにおける生ごみと紙ごみの排出比率は地域(織田原ら, 1980)や住居形態(三重県, 2005)により大きく異なる。このような背景から、都市ごみの乾式メタン発酵処理を想定し、生ごみと紙ごみの投入割合が乾式メタン発酵に及ぼす影響を明らかにすることを目的として本研究を行った。本報では中温乾式メタン発酵について、第2報では高温乾式メタン発酵について、生ごみと紙ごみの投入割合が発酵に及ぼす影響を明らかにした。

## II 材料及び方法

## 1. 実験装置

発酵槽として容量 2L のセパラブルフラスコを使用し、バイオガス発生量測定のためにシリコンチューブで湿式ガスメータ(シナガワ製, W-NK-1)と接続した。保温には恒温槽(サンヨー製, MIR1253)を用い、発酵温度を 37°C に設定して実験を行った。

## 2. 供試材料

表1に供試材料の性状を示す。種汚泥として、乳牛ふん尿を発酵原料とする酪農学園大学中温バイオガスプラントから採取した消化液に、有機物負荷 1~2 gVS/kg 汚泥/day でドッグフードおよび古紙を投入し、1ヶ月間馴養させた発酵汚泥を使用した。

投入原料として、疑似生ごみおよび紙ごみを使用した。表2に本研究で用いた疑似生ごみの組成を示す。社団法人日本下水道協会(2004)の報告をもとに作成した疑似生ごみを使用した。紙ごみとして、シュレッダーで裁断した廃コピー紙および電話帳を裁断して作成された脱水改善剤(株式会社ジャパנקクリエイティブ製)を湿質量比 1:1 で混合したものを使用した。

## 3. 実験条件

生ごみと紙ごみの投入割合が中温乾式メタン発酵に及ぼす影響を解明するため、表3に示す実験条件を設定した。生ごみおよび紙ごみの総量に占める紙ごみの湿重量割合は、100万都市においては50%前後(総務省統計局, 2007; 日本エネルギー学会, 2003)、郊外の住宅エリアで35%、農村エリアで30%、旧来からの住宅エリアで16%(三重県, 2005)と、地域特性や都市規模により大きく異なる。このことを考慮し、生ごみおよび紙ごみの湿重量割合を Run A (生ごみ 60%, 紙ごみ 40%), Run B (68%, 32%), Run C (82%, 18%) として、発酵槽温度 37°C

表1 供試材料性状

Table 1 Properties of substrates and inoculum

	pH	NH <sub>4</sub> -N (mg/kg)	TK-N (mg/kg)	VFA (mg/kg)	TS (%w.b.)	VS (%w.b.)
種汚泥	8.73	2050	4240	3700	13.4	10.2
生ごみ	5.75	-	7580	200	23.4	22.2
紙ごみ	-	-	350	-	93.6	87.3

表2 疑似生ごみの組成

Table 2 Composition of artificial household waste

材料	割合 (%w.b.)
キャベツ	25
ニンジン	20
ジャガイモ	15
リンゴ	15
サンマ	12
米飯	5
茶がら	5
豚肉	3

表 3 実験条件  
Table 3 Experimental conditions

	質量割合 (%)		有機物割合 (%)		CN 比	紙ごみ比
	生ごみ	紙ごみ	生ごみ	紙ごみ		
Run A	60	40	28	72	49	0.66
Run B	68	32	36	64	39	0.46
Run C	82	18	54	46	26	0.22

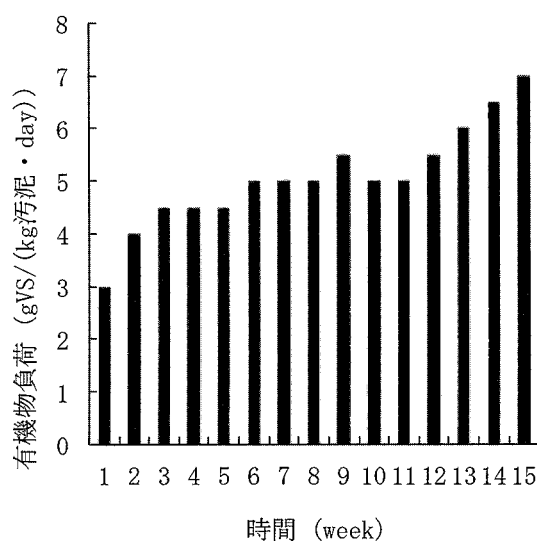


図 1 有機物負荷  
Fig. 1 Organic loading rate

の中温乾式メタン発酵を行った。生ごみの投入量を1とした際の紙ごみの比率を紙ごみ比として表中に示した。

図1に投入有機物負荷を示す。Xiaoら(2008, 2009)の乾式メタン発酵試験を参考に、投入有機物負荷3 gVS/(kg汚泥・day)から実験を開始し、発酵阻害によりバイオガスがほぼ発生しなくなるまで有機物負荷を上昇させた。なお、9週目に発酵阻害が発生したため、10週目および11週目の投入有機物負荷を低く設定し、発酵阻害の緩和を試みた。

表4に投入有機物負荷の上昇に伴うHRT(水理学的滞留日数)の推移を示す。いずれの実験区においても有機物負荷の上昇に伴う原料投入量の増加により、HRTは漸減した。

実規模バイオガスプラントでは、一定の発酵原料が常に確保できない場合も多く、発酵槽への原料投入量やその組成の日変化が大きなプラントも少なくない。このようなバイオガスプラントでは、HRTの1~2倍程度の比較的長期間に渡って緩やかに進行する発酵阻害だけでなく、発酵原料の一時的投入過剰によって発生する急激な発酵阻害に対しても警戒が必要である。また、急激な発酵阻害は対応が困難であるため、投入有機物負荷に上限を設ける等の予防策が重要となるが、一時的投入過剰によって発生する急激な発酵阻害に対する知見はほとんどない。そこで本研究では、一時的投入過剰を想定して投

表 4 投入有機物負荷の上昇に伴う HRT の推移  
Table 4 Transition of hydraulic retention time with increase of organic loading rate

有機物負荷 (gVS/kg 汚泥/day)	HRT (days)		
	Run A	Run B	Run C
3.0	161	143	114
4.0	121	107	85
4.5	108	95	76
5.0	97	86	69
5.5	88	78	62
6.0	81	72	57
6.5	75	66	53
7.0	69	62	49

入有機物負荷をHRTより短い間隔で上昇させ、生ごみと紙ごみの投入割合が急激な発酵阻害の発生に及ぼす影響を検討した。

以下に示すXiaoら(2008, 2009)の乾式メタン発酵試験と同様の手法を用いて実験を行った。発酵原料投入は、1日おきに週3回行った。発酵槽内の汚泥を全量取り出し、性状が均一になるまで攪拌した後に、測定サンプルを採取した。その後、攪拌した汚泥のうち1.5kgを負荷に応じた質量の発酵原料とともに攪拌し、再度発酵槽に投入した。乾式メタン発酵は剪定枝や古紙等、空気を内包する固形発酵原料を対象としており、原料攪拌時の酸素混入を前提とした処理プロセスである。本研究では、汚泥取り出し・原料投入作業を室内で行ったことにより、原料投入後の発酵槽内は一時的な好気的条件下となったが、Xiaoら(2008, 2009)の乾式メタン発酵試験と同様に、これに起因する発酵阻害は発生しなかった。なお、TS濃度の高い乾式メタン発酵汚泥は湿式と比較して一般に菌体濃度が高いことが知られており、乾式メタン発酵が湿式メタン発酵と比較して好気条件による阻害を受けにくい一因と考えられる。

本実験では、生ごみと紙ごみの投入割合が発酵にあたる影響を明らかにするために、紙ごみ投入割合の異なる3実験区を設定したが、表1に示すように紙ごみは水分含有率が低いため、紙ごみ投入割合の違いは汚泥水分含有率にも影響を与えることになる。汚泥水分含有率の差異は発酵性能に影響を及ぼすため、下記に示すように投入原料に希釈水を加えることにより、各発酵槽の汚泥水分含有率を調節した。希釈水量は式1により求めた。

$$M_w = BOM - \left( M_T - \frac{M_D}{TS} BOM \right) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $M_w$ ；添加水量 (g)、 $BOM$ ；投入原料中の生分解可能有機物量 (g)、 $M_T$ ；投入原料の総質量 (g)、 $M_D$ ；投入原料中の固形物質量 (g)、 $TS$ ；投入物全体の設定固形物濃度 (%) である。Xiao (2007) の報告に基づき、擬似生ごみ、コピー紙および古紙の全有機物中のBOM率をそれぞれ80%、83%、36%とし、生分解可能な有機物であるBOMが全て分解された後の残留固形物

濃度が 15% (水分含有率 85%) となるように希釈水量を設定した。その結果、投入原料の含水率は Run A で 68.3%、Run B で 66.9%、Run C で 65.1% となった。

4. 測定項目及び方法

測定項目は、固形分濃度 (Total Solid ; TS), 揮発性固形物濃度 (Volatile Solid ; VS), pH, 全窒素濃度 (TK-N), アンモニア態窒素濃度 (TA-N), 有機酸濃度 (Volatile Fatty Acid ; VFA), ガス発生量, メタンガス濃度とした。すべての測定項目を週 3 回測定した。

TS は炉乾法 (105℃, 24 時間) により測定した。VS は強熱減量法 (550℃, 6 時間) により測定した。pH は、ガラス電極法により測定した。TA-N は酸化マグネシウム 1g を添加した後、水蒸気蒸留法にて測定した。TK-N は、ケルダール分解法を用い水蒸気蒸留法にて測定した。ガス発生量は湿式ガスメータ (シナガワ, W-NK-1) により測定した。メタンガス濃度はガスクロマトグラフ (島津製作所 GC-17A) を用いて測定した。以下にガスクロマトグラフの運転条件を示す。

- (1) 検出器 : TCD
- (2) キャリアガス : ヘリウムガス
- (3) カラム槽温度 : 80℃ 検出器温度 : 120℃
- (4) メタン・二酸化炭素分析用カラム : 信和化工 Porapak Q (試料ガス量 0.5mL)
- (5) 硫化水素分析用カラム : 信和化工 Sunpak-S (試料ガス量 2.0mL)

III 結果と考察

1. メタンガス収率

図 2 にメタンガス収率および投入有機物負荷の経時変化を、図 3 に pH の経時変化を示す。実験開始から 5 週目にかけて、メタンガス収率はわずかに増加した。これ

は、ドッグフードおよび古紙により馴養されていた種汚泥が、本実験の発酵基質である生ごみおよび紙ごみの分解に順応したためだと考えられる。投入有機物負荷 5 gVS/ (kg 汚泥・day) で運転された 7 週目に、いずれの実験区においてもメタンガス収率の低下が見られた。しかし、pH の低下はなく、また、7 週目と同負荷で運転された 8 週目のメタンガス収率は安定していたことから、正常にメタン発酵が行われていたと考えられる。この期間におけるメタンガス収率は Run C で 0.26 L/gVS, Run A および Run B で 0.24 L/gVS となった。Hong ら (2007) は、生ごみおよび紙ごみの高温 (55℃) 乾式メタン発酵におけるメタンガス収率を 0.25 L/gTS と報告している。本実験においても、この報告とほぼ同程度のメタンガス収率 (Run A, Run B, RunC それぞれ 0.26 L/gTS, 0.26 L/gTS, 0.28 L/gTS) が得られており、いずれの実験区においても安定してメタン発酵が行われていたと考えられる。

本実験は高温発酵と比較して有機物分解速度が遅い中温発酵により行われた。そのため、易分解性有機物を多く含有する生ごみの投入割合が実験区中最も高かった Run C では、Run A および Run B と比較してメタンガス収率が高くなった (表 3 参照)。また、実験開始から 8 週目までの平均メタンガス濃度はいずれの実験区においても 57% と、生ごみおよび紙ごみの投入割合の影響はみられなかった。

2. 限界投入有機物負荷

投入有機物負荷を 5.5 gVS/ (kg 汚泥・day) に引き上げた実験 9 週目には、全ての実験区においてメタンガス収率の低下がみられ、Run A, Run B, Run C のメタンガス収率はそれぞれ 0.16 L/gVS, 0.22 L/gVS, 0.14 L/gVS となった (図 2 参照)。このメタンガス収率の低下は、発

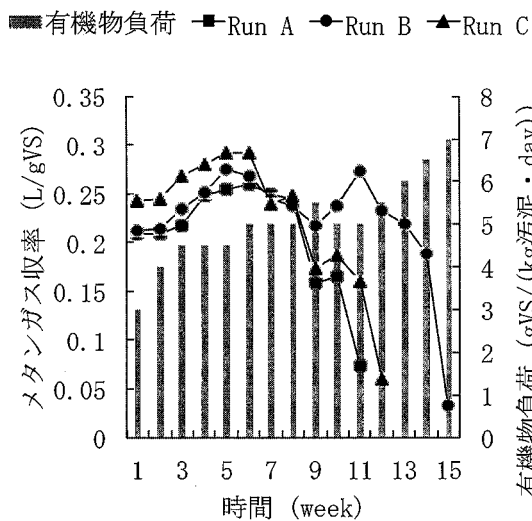


図 2 メタンガス収率および投入有機物負荷の経時変化  
Fig. 2 Methane gas yield and organic loading rate

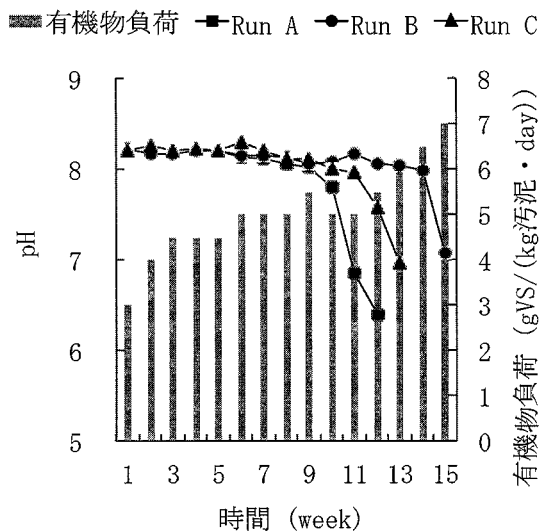


図 3 pH の経時変化  
Fig. 3 Transition of pH

酵阻害に起因すると考えられたため、実験 10 週目に投入有機物負荷を再度 5gVS/ (kg 汚泥・day) に引き下げた。しかし、Run A および Run C では発酵阻害が進行し、メタンガス収率はそれぞれ 0.07L/gVS (11 週目)、0.06L/gVS (12 週目) にまで低下し、発酵停止状態に陥った。一方、Run B では 11 週目にメタンガス収率が 0.27 gVS/kg にまで回復した。その後、投入有機物負荷を 12 週目に 5.5gVS/ (kg 汚泥・day) に再び上げた結果、ガス収率は再び低下した。その後、段階的に 7gVS/ (kg 汚泥・day) まで投入有機物負荷を引き上げた結果、Run B のメタンガス収率はさらに減少し、15 週目に発酵停止状態に陥った。

以上より、急激な発酵阻害が発生することのない限界投入有機物負荷は、いずれの実験区においても 8 週目の 5gVS/ (kg 汚泥・day) であると考えられる。また、上述した発酵阻害発生後のメタンガス収率の挙動から、Run B は、Run A および Run C と比較して発酵阻害に対する強度が高く、発酵阻害の進行が緩やかであったと考えられる。

なお、本研究では、実規模バイオガスプラントにおける発酵原料の一時的投入過剰を想定し、投入有機物負荷を HRT より短い間隔で上昇させた。従って、HRT の 1~2 倍といった長期間に渡って緩やかに進行する発酵阻害については、本研究で得られた限界有機物負荷以下においても発生する可能性が考えられる。本研究で得られた限界投入有機物負荷 5gVS/ (kg 汚泥・day) において、Run A、Run B、Run C それぞれ 60、63、66 日の HRT に対して 21 日間の正常なメタン発酵が確認された。

中久保ら (2008) は、水利学的滞留日数 30 日での 37°C 中温湿式メタン発酵実験において、牛ふん尿を基質として脂質、炭水化物、タンパク質を主成分とするバター、

パン粉、プロテイン栄養補助食品を牛ふん尿と共発酵した際の限界投入有機物負荷を、それぞれ 3.7gVS/ (L・day)、4.2gVS/ (L・day)、2.6gVS/ (L・day) と報告している。対して本研究では、家畜ふん尿を発酵基質として投入せず、生ごみ、紙ごみのみで乾式メタン発酵を行ったが、限界投入有機物負荷は中久保ら (2008) の報告を上回っており、湿式メタン発酵と比較して限界投入有機物負荷が高いとされる乾式メタン発酵の優位性が示される結果となった。

### 3. 発酵阻害

図 4、図 5、図 6 にそれぞれ VFA 濃度、全窒素濃度、アンモニア態窒素濃度を示す。

鉄 (Fe)、ニッケル (Ni)、コバルト (Co) はメタン発酵菌群増殖のための必須要素であり、これらをほとんど

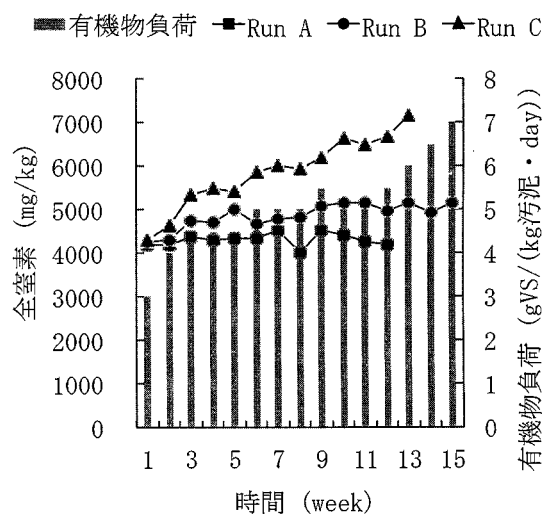


図 5 全窒素濃度の経時変化

Fig. 5 Transition of TK-N concentration

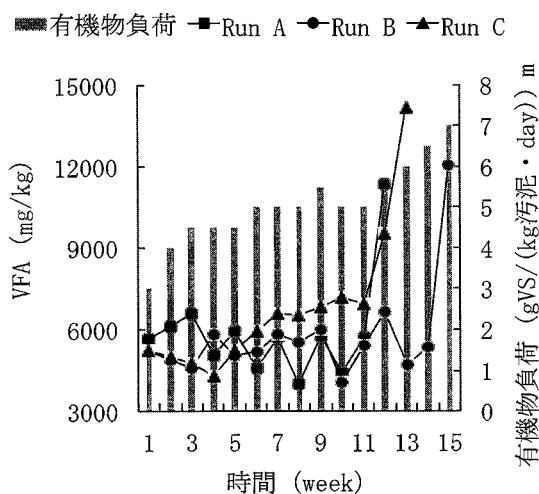


図 4 VFA 濃度の経時変化

Fig. 4 Transition of VFA concentration

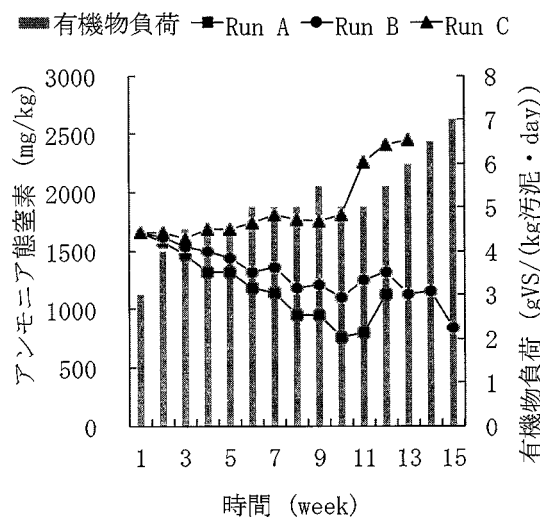


図 6 アンモニア態窒素濃度の経時変化

Fig. 6 Transition of NH<sub>4</sub>-N concentration

含有しない生ごみを基質とするメタン発酵では、Fe, Ni, Co の欠乏がメタン発酵阻害要因となることが知られている (Qiang et al., 2012)。下水汚泥を種汚泥とする中温乾式メタン発酵では、食品加工残さを投入して 2~3ヶ月後、HRT の約 2 倍の発酵期間が経過した後に、種汚泥に含有されていた Fe, Ni, Co がウォッシュアウトされたことによる発酵阻害が発生したと報告されている (Qiang et al., 2012)。しかし、本実験は発酵期間が短く、試験開始後 10 週目が 1HRT に相当しており、種汚泥中 Fe, Ni, Co のウォッシュアウトは発生しなかったと考えられる。また、本実験の種汚泥である牛ふん尿メタン発酵消化液の Ni 含有量を 0.19 mg/L とした場合 (中村ら, 2009)、本実験終了時の発酵汚泥中には 0.03 mg/L が含有されていたと推測される。この Ni 含有量は Qiang et al. (2012) の研究において発酵阻害が観測された  $5.0 \cdot 10^{-4}$  mg/L と比較して十分に大きい。従って、本実験では Ni 欠乏による発酵阻害は発生しなかったと考えられる。以上より、本実験では Fe, Ni, Co の欠乏による発酵阻害は考慮せず、以下の要因により発酵阻害が発生したと考察した。

Run C の VFA 濃度は、6 週目以降緩やかに増加し、メタンガス収率が低下した 9 週目に 6800 mg/kg となった。酸発酵菌群の比増殖速度 (Specific growth rate) はメタン生成菌群よりも速い (Angelidaki and Ahring, 1993; Angelidaki et al., 1999)。Run C では易分解性有機物を多く含有する生ごみの投入割合が高かったため、投入有機物負荷過剰に伴って酸発酵菌群による VFA 生成量が増加し、増殖速度が比較的遅いメタン生成菌群の分解能力を超える VFA が生成されたため、VFA が蓄積したと考えられる。

Run A の発酵阻害発生時の挙動は Run C とは異なるものであった。Run C では VFA が 6 週目以降緩やかに増加したのに対して、Run A では 12 週目に急激な VFA 蓄積が発生した。また、メタンガス収率および pH の低下は、VFA 蓄積に先行してそれぞれ 9 週目および 10 週目に発生した。

試験期間中、Run A の汚泥中全窒素濃度は 4000~4500 mg/kg と安定して推移したのに対して、アンモニア態窒素濃度は 1 週目の 1700 mg/kg から 8 週目の 1000 mg/kg まで大きく減少した。汚泥中全窒素濃度は安定していたことから、このアンモニア態窒素濃度の減少は投入原料と発酵汚泥との窒素含有量の差に起因するものではないと考えられる。また、この間のメタンガス収率は安定していたことから、有機物分解速度の低下によるアンモニア態窒素発生量の低下に起因するものでもないと考えられる。窒素はメタン発酵菌群の増殖に必要な不可欠であり、発酵に最適な C/N 比は 20~30 と報告されている (Xiao et al., 2008), (Hawkes, 1980)。Run A では、紙ごみの投入割合が高く、投入原料の C/N 比は 49 と最適 C/N 比より高かった。C/N 比の高い投入原料を分解

するためにメタン発酵菌群の増殖に汚泥中アンモニア態窒素が消費されたため、汚泥中アンモニア態窒素濃度は減少したと推察される。

Run A では、メタンガス収率が低下した 9 週目において、VFA 蓄積は発生していなかった。固形廃棄物および生ごみのメタン発酵では、加水分解反応が律速段階と報告されている (佐々木ら, 1999; 清原ら, 1998; Li et al., 1998)。発酵阻害発生の際、投入原料の C/N 比の高い Run A では、メタン生成菌群による VFA からのメタンガス生成プロセスだけでなく、VFA 生成以前の発酵プロセスにおいても、窒素を律速条件として反応速度が低下した。このために、発酵阻害発生時においても VFA 蓄積が発生しなかったと推察される。また、発酵阻害発生後の 12 週目に VFA の急激な蓄積がみられるが、これは酸発酵菌群より比増殖速度が遅く (Angelidaki and Ahring, 1993; Angelidaki et al., 1999)、発酵阻害の影響を受けやすいメタン発酵菌群による VFA からのメタン生成速度が大幅に低下したためと考えられる。同様に、11~12 週目にかけてのアンモニア態窒素濃度の増加は、メタン生成速度の低下に伴ってメタン発酵菌群の窒素消費量が低下したためと考えられる。

Run B では汚泥中全窒素濃度が 1 週目の 4300 mg/kg から 8 週目の 4800 mg/kg まで増加したのに対して、アンモニア態窒素濃度は Run A と同様に 1 週目の 1700 mg/kg から 8 週目の 1200 mg/kg まで大きく減少した。また、メタンガス収率が低下した 9 週目において、VFA の蓄積は発生しなかった。これらのことから、Run B においても Run A と同様に、C/N 比のアンバランスによる窒素不足がメタン発酵プロセス全体にわたって反応速度の低下を引き起こしたと考えられる。しかし、Run B の C/N 比は 39 と、Run A と比較して投入窒素量が多かったために、反応速度の低下は比較的緩やかであった。また、発酵阻害発生時に VFA が蓄積していなかったため、発酵汚泥の pH は低下しなかった。そのために、発酵阻害発生の際、発酵停止状態に陥ることなく、投入有機物負荷の低減によりメタンガス収率が回復したと考えられる。以上より、紙ごみの投入割合によって C/N 比を調整することにより、急激な発酵阻害に対する強度を高めて、より安定して発酵を行うことが可能だと考えられる。

#### IV ま と め

安定してメタン発酵が行われた期間におけるメタンガス収率は、Run A (生ごみ 28%, 紙ごみ 72%) および Run B (36%, 64%) で 0.24 L/gVS, Run C (54%, 46%) で 0.26 L/gVS となり、易分解性有機物である生ごみを多く含有する Run C のメタンガス収率が高かった。メタンガス濃度はいずれの実験区においても 57% と、生ごみおよび紙ごみの投入割合の影響はみられなかった。発酵原料の一時的投入過剰による急激な発酵阻害が発生

することのない限界投入有機物負荷は、生ごみおよび紙ごみの投入割合の影響を受けず、いずれの実験区においても5gVS/(kg汚泥・day)であった。

本研究で実験を行ったC/N比26, 39, 49の中では、C/N比39(生ごみ36%, 紙ごみ64%)において、発酵阻害に対する強度が最も高くなった。紙ごみ等でC/N比を調整することで窒素不足による反応速度低下やVFA蓄積によるpH低下を回避することにより、発酵阻害に対する強度を向上可能と考えられる。

## References

- Angelidaki I, Ahring B.K., 1993. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste : effect of ammonia, *Application Microbiological Biotechnology*, 38, 560-564.
- Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring B.K., 1999. A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas, *Biotechnology and Bioengineering*, 63, 363-372.
- 伊達 昇, 1999. 生ゴミリサイクルの実践と技術的課題. *農林水産技術研究ジャーナル*, 22 (11), 15-21.
- 藤田由季子, 杉村誠司, 川越保徳, 2006. 有機性廃棄物の高効率発酵に関する基礎的研究(その2). *クリモト技報*, 54, 24-33.
- Hawkes F. R., Younga B. V., 1980. Design and operation of laboratory-scale anaerobic digesters : Operating experience with poultry litter, *Agricultural Waste*, 2, 119-133.
- Hong F., 穴田健一, 入江直樹, 吉井隆裕, 2007. 高温乾式メタン発酵におけるバイオ基質の発酵特性評価. *タクマ技報*, 15 (2), 166-174.
- 伊藤浩己, 2004. 印刷用紙における環境対応. *日本印刷学会誌*, 41 (2), 84-88. Ito H., 2004.
- 日本エネルギー学会, 2003. *バイオマスハンドブック (第1版)*. オーム社, 東京, 73-78.
- 社団法人日本下水道協会, 2004. 下水道のためのデイスポーザ排水処理システム性能基準. 日本下水道協会, HP : <http://www.jsww.jp/wp/wp-content/uploads/2011/03/01.pdf>.
- 川島知之, 2007. 食品残さ飼料化の技術的課題. *畜産の研究*, 61, 129-133.
- 清原雄康, 宮原高志, 水野修, 野池達也, Li Y.Y., 1998. 高温嫌気性消化法を用いた高濃度下水汚泥の処理特性. *土木学会論文集*, 601 (7-8), 35-43.
- 黒島光昭, 堀井重希, 古賀哲雄, 石橋 保, 2001. 有機性廃棄物の乾式メタン発酵法. 特開番号 2001-347247.
- Li Y.Y., 佐々木宏, 奥野芳男, 関 廣二, 上垣内郁夫, 1998. 生ごみの高温メタン発酵に及ぼす投入濃度の影響. *環境工学研究論文集*, 35, 29-39.
- 三重県, 2005. 家庭系ごみ組成分析調査. 一般廃棄物実態調査報告書(平成17年3月), 93.
- 環境省, 2008. 食品廃棄物の発生及び処理状況. *環境統計集*, 3, 44.
- 森北浩通, 片山弘典, 新保秀人, 卜部豊之, 中川尚治, 懸樋和生, 2002. バイオ式生ごみ処理機の臭気分析法と脱臭法. *松下電工技報 Nov. 2002*, 33-38.
- 中川尚治, 大村浩之, 片山弘典, 森北浩通, 新保秀人, 卜部豊之, 2001. バイオ式生ごみ処理機の臭気の性状と脱臭技術. *臭気の研究*, 32 (4), 10-19.
- 中村真人, 袖山義人, 山岡 賢, 折立文字, 藤川智紀, 清水夏樹, 阿部邦夫, 相原秀基, 2009. メタン発酵プラントのトラブル記録と長期運転データの解析. *農工研技法*, 210, 11-36.
- 中久保亮, 石田哲也, 松田從三, 近江谷和彦, 2008. 牛ふん尿のメタン発酵における食品廃棄物投入の効果. *廃棄物学会論文誌*, 19 (6), 392-399.
- 緒田原蓉二, 石田昌彦, 1980. 都市ごみ処理技術の開発. *廃棄物のメタン発酵*. サイエティスト社, 東京, 156.
- Qiang H., Lang D., Li Y. Y., 2012. High-solid mesophilic fermentation of food waste with emphasis on Iron, Cobalt, and Nickel requirements, *Bioresource Technology*, 103, 21-27.
- 佐々木宏, Li Y.Y., 関 廣二, 上垣内郁夫, 1999. 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. *水環境学会誌*, 22 (12), 983-989.
- 白井俊一, 2000. 古紙再生の現状と今後について. *繊維学会誌*, 57 (6), 170-174.
- 総務省統計局, 2007. 経営組織別全事業所数及び男女別従業員数. <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001008300&cyccode=0>
- 田原聖隆, 稲葉 敦, 坂根 優, 小島紀徳, 2004. 都市ごみ処理における生ごみ分別処理の効果. *廃棄物学会論文誌*, 15 (4), 276-282.
- 田中信壽, 松藤敏彦, 2002. 都市ごみの適正処理と資源化技術. *資源と素材*, 118, 588-597.
- 坪田 潤, 黒木浩二, Hong F., Cheon J., 津野 洋, 2008. 乾式メタン発酵法への生物学的超高温可溶化技術の適用性の見当. *廃棄物学会論文誌*, 19 (4), 265-274.
- Xiao D., 2007. Study on characteristics of fermentation of waste biomass by dry-type methane fermentation method, Doctor Thesis of Hokkaido University.
- Xiao D., Matsuda J., Liu B., Ohmiya K., 2008. Mesophilic dry anaerobic co-digestion of municipal solid waste and swine manure. *J. JSAM*, 70 (2), 72-29.
- Xiao D., Matsuda J., Liu B., Ohmiya K., 2009. Characteristics of fermentation of biodegradable plastics mixed with household solid waste by thermophilic dry anaerobic co-digestion. *J. JSAM* 71 (3), 55-62.

(受付: 2011年6月6日・受理: 2012年11月13日・  
質問期限: 2013年3月31日)