

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00661

研究課題名(和文) 下水汚泥と都市ごみ有機成分(OFMSW)の一括バイオガス化技術の開発と評価

研究課題名(英文) Development and evaluation of anaerobic codigestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)

研究代表者

小松 俊哉 (Komatsu, Toshiya)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10234874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：都市ごみの機械処理により選別して得られた有機成分(OFMSW)を基質に用い、下水汚泥に対してOFMSWを重量比で5%、10%、15%追加投入した系列で混合消化の連続運転を実施し、同時運転の下水汚泥単独系と消化特性を比較した。全系列において安定した消化が行われ、OFMSWの投入量が5%、10%の運転では、OFMSWの投入VS(有機物)当たりの正味のガス発生量(以下、SBP)はそれぞれ657NL/kg-VS、635NL/kg-VSと算出され、高い分解性を示すことを実証した。投入量15%ではSBPIは532NL/kg-VSに低下したが、汚泥単独系に対するガス発生量の増加率は最も高かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バイオマスのエネルギー利用の必要性が高まっている現在、下水処理場の消化槽に下水汚泥とともに未利用バイオマス投入し、バイオガス量を増産させる混合嫌気性消化技術の更なる適用拡大が期待されている。本研究では、その殆どが焼却処理されている都市ごみ有機成分(OFMSW)に着目し、実際の下水汚泥とOFMSWを用いた混合消化のパイロットスケール連続実験を行い、消化特性を明らかにした。OFMSWは平均的な下水汚泥よりもバイオガス化活性や固形物分解率が高かったことなどにより、混合消化のバイオマスとしての有用性が示された。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the anaerobic co-digestion of a mechanically sorted organic fraction of municipal solid waste (MS-OFMSW) with sewage sludge. Continuous experiments were conducted using 500L pilot-scale digesters by addition of MS-OFMSW (5%, 10% and 15% v/v in the feed) with sewage sludge. A digester fed sewage sludge alone was operated as the control. As the results, a stable and satisfactory operation was achieved under all conditions. The specific biogas production (SBP) of the MS-OFMSW in 5% and 10% addition were estimated 657NL/kg-VS and 635NL/kg-VS, respectively. In the 15% addition, the estimated SBP dropped to 532NL/kg-VS. However, the increment of biogas production compared to the control was the highest under this condition.

研究分野：土木環境システム

キーワード：バイオマス利活用 混合消化 下水汚泥 都市ごみ OFMSW

1. 研究開始当初の背景

今後の低炭素社会を支えるエネルギー回収拠点として、一般廃棄物(都市ごみ)中の有機成分(organic fraction of municipal solid waste, OFMSW)や下廃水を集約処理する環境インフラである廃棄物焼却施設や下水処理場が重要な役割を担っている。下水道分野においては下水処理場内の汚泥消化槽に地域で発生するバイオマスを追加投入して消化ガス(バイオガス)量を増大させる混合嫌気性消化技術の実用化が国内でも進展している。本法は既設設備の利用により事業イニシャルコストを抑えられ、処理場の水処理・汚泥処理設備を利用できるため消化液返流水の性状変化等にも対応可能である。

現在、混合するバイオマスは、食品系廃棄物や生ごみ(厨芥類)、浄化槽汚泥、し尿が殆どを占めている。一方、多くの自治体では収集システムに可燃ごみ区分が採用され、それらの殆どが焼却処理される。一般家庭からの可燃ごみを調査結果によれば、湿重で生ごみとともに、各種の紙類が大量に排出されている。可燃ごみとして排出される家庭系紙類は、水分や異物が付着し、紙類のみを選別回収しリサイクルすることは困難である。一方で紙類は有機分に富むため、嫌気性消化(メタン発酵)の基質として期待できる。そこで、本研究では混合消化の基質として生ごみと紙類を含有する OFMSW に着目した。

2. 研究の目的

(1) 各種紙類、及び紙類を含む OFMSW を基質として回分式嫌気性消化実験を実施し、それらのバイオガス化ポテンシャルを明らかにする。

(2) 下水汚泥に紙類を含む OFMSW を混合した中温消化の連続実験を実施し、汚泥単独系を対照系として定常状態での消化データから OFMSW の投与負荷の影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 回分式嫌気性消化実験は、さまざまなバイオマスを基質として用い、全量 720mL のバイアル瓶に種汚泥として下水処理場の中温消化汚泥 150mL と所定量の基質を投入し、蒸留水を加えて全量を 300mL、混合液基準の投入濃度を 4.0g-TS/L とした(ブランク系として蒸留水のみのも系も設定)。その後、気相部を窒素パージした後に密栓し、36℃ 恒温槽内で保存し、20~30 日間定期的に pH、ガス量およびガス組成を測定した。

(2) 下水汚泥と OFMSW の混合消化における OFMSW 投入量の影響を明らかにすることを目的として、混合液容量 500L のパイロットスケールの消化槽を標準活性汚泥法採用の下水処理場に設置し、約 37 日の中温消化の連続実験を行った。写真 1 に消化槽の外観を示す。



写真 1 パイロットスケール消化槽

用いた OFMSW は、実際の都市ごみから粒度選別機および破碎選別機を用いた機械的選別方法により、破碎選別機において 15mm スクリーンを通したもので¹⁾、以下、発酵適物と表す。発酵適物の主要構成物が生ごみと紙類であることは確認されている。

実証実験は 2 期間行い、連続実験は 3 系列運転し、1 系列を対照系の汚泥単独系として 1 日当たり実下水処理場の混合濃縮汚泥 20kg(初沈汚泥と余剰汚泥の容量比 3:2)を、他の 2 系列は混合系として、同量の混合濃縮汚泥に加えて発酵適物(平均 TS 23.6%、平均 VS 18.3%)を 1 日当たり 1.0kg(混合系、下水汚泥に対する重量比 5%)、2.0kg(混合系、重量比 10%)投入し、投入量と同量の消化汚泥を各系列から引き抜いた。連続実験は 2 系列運転し、1 系列を汚泥単独系、他の 1 系列を混合系とした。運転方式は実験と同様であり、混合系は発酵適物(平均 TS 22.0%、平均 VS 17.4%)を 1 日当たり 3.0kg(混合系、重量比 15%)投入した。種汚泥には同処理場の中温消化汚泥を用いた。

基質の投入・混合液の引抜きは土曜以外の週 6 回行った。実験は 11 週間、実験は 9 週間運転を継続した。それぞれの運転条件を表 1、表 2 に示す。これらの値は、後述する消化特性をまとめた 6 週目以降のデータの平均値である。混合系は発酵適物の追加投入により汚泥単独系に比べて滞留日数(HRT)は短くなり、VS 負荷は高くなる。

表 1 連続実験の運転条件

項目	単位	汚泥単独系	混合系	混合系
投入TS濃度	%	3.76 ± 0.53	4.70	5.56
投入VS濃度	%	2.73 ± 0.45	3.48	4.15
HRT	日	29.2	27.8	26.5
VS負荷	kg-VS/m ³ ・日	0.94	1.25	1.56
TS混合比	-	-	1:0.31	1:0.63

表 2 連続実験の運転条件

項目	単位	汚泥単独系	混合系
投入TS濃度	%	3.97 ± 0.23	6.32
投入VS濃度	%	3.00 ± 0.24	4.89
HRT	日	29.2	25.4
VS負荷	kg-VS/m ³ ・日	1.03	1.93
TS混合比	-	-	1:0.83

主な測定項目は、発生ガス量、組成と消化汚泥の pH、濃縮下水汚泥、発酵適物および消化汚泥の TS と VS、消化汚泥の上澄み成分として溶解性 COD とアンモニア性窒素である。プロセス評価は、汚泥単独系と比較した発酵適物混合の影響を中心に行った。

4. 研究成果

(1) 回分実験は、最初に紙類に焦点を当てて実施した。紙類の種類として、一般的な可燃ごみ区分として収集される都市ごみ中の紙類を調査して種類を選定した。代表的な実験では、10mm 程度に裁断したティッシュ、新聞紙、オフィス系雑紙、段ボールを基質とし、比較として下水汚泥と実際の家庭系生ごみも試験した。回分実験の結果、種汚泥の自己分解分を差し引いて算出した投入 VS (有機物) あたりの正味のガス発生量は、試験終了時 (20 日目) において生ごみ及び下水汚泥の 754, 513 (mL/g-VS) に対して、それぞれ 703, 429, 756, 580 (mL/g-VS) となった。したがって、易分解性の生ごみほどは高くないが、マテリアルリサイクルが困難なティッシュやオフィス系雑紙は生ごみに匹敵するガス化ポテンシャルを有していた。

続いて収集・破碎時期の異なる発酵適物を基質として回分実験を実施した。15mm スクリーン通過物 (外観: 写真 2) では回分実験の 20 日目における正味のメタンガス発生量は、平均 377 (mL/g-VS) (363, 341, 371, 434 の平均) であった。メタン比率は約 60% であり、正味のガス発生量としては平均約 629 (mL/g-VS) となる。また、25mm スクリーン通過物を用いた実験を 1 回行ったが、正味のメタンガス発生量は 252 (mL/g-VS) と低かった。発酵に不適なビニール片やプラスチックなどの存在がみられ、影響したと考えられる。一方、下水汚泥 (別サンプル) の正味のメタンガス発生量は 323 (mL/g-VS) であったことから、15 mm スクリーン通過発酵適物のメタン生成活性は時期によらず下水汚泥よりも高く、混合消化による効率的バイオガス増産が期待できる。



写真 2 発酵適物の外観

(2) 実験 での消化ガス発生量の推移を 1 週間単位で図 1 に示す。実験 は最初の 1 週間は全ての消化槽で下水汚泥のみを投入した。この 1 週間は 3 槽とも発生量がほぼ同量であり、再現性が高いことが確認された。発酵適物の投入を開始した 2 週目から、混合系 ①、混合系 ② ともに、汚泥単独系と比べて増大が確認され、4 週目頃から汚泥単独系との差がほぼ一定になり、それが運転終了時まで継続した。混合系 ① は混合系 ② よりも安定して発生量が高いことも確認された。なお、全系列において、特に後半は週毎に発生量が大きく上下している。本処理場は合流式を採用しており、濃縮初沈汚泥の濃度が大きく変動する特徴を有するため、投入した下水汚泥濃度の変動が主な要因と考えられる。

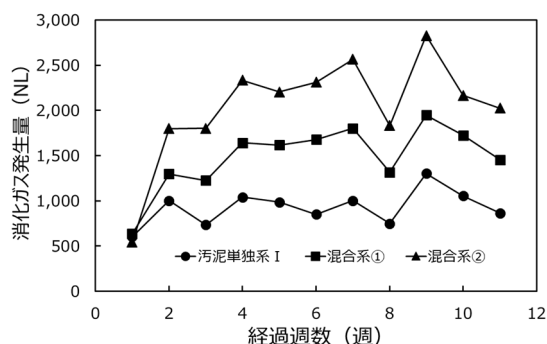


図 1 連続実験 でのガス発生量の推移

本運転では 6 週目以降の 6 週間を評価期間とし、その平均値を消化特性として評価した。表 3 に実験 の消化特性 (平均値および標準偏差) を示す。汚泥単独系の投入 VS 当たりのガス発生量については 315 NL/kg-VS と低い値であった。一般に下水汚泥の中温消化

表 3 連続実験 の消化特性

項目	単位	汚泥単独系	混合系	混合系	
pH	-	7.59 ± 0.07	7.57 ± 0.07	7.55 ± 0.08	
TS・VS	TS	%	2.13 ± 0.18	2.59 ± 0.12	2.82 ± 0.25
	VS	%	1.22 ± 0.13	1.54 ± 0.08	1.67 ± 0.16
分解率	TS	%	43.3	44.9	49.3
	VS	%	55.2	55.8	59.7
溶解性COD	g/L	0.43 ± 0.03	0.51 ± 0.04	0.59 ± 0.07	
アンモニア性窒素	gN/L	0.64 ± 0.09	0.57 ± 0.04	0.57 ± 0.09	
ガス発生量	NL/日	172 ± 54	292 ± 67	405 ± 93	
メタン含有率	%	59.7 ± 1.9	59.3 ± 2.0	59.1 ± 2.6	
投入VS当たりのガス発生量	NL/kg-VS	315	401	443	
投入VS当たりの正味のガス発生量	NL/kg-VS	-	657	635	

では 500 ~ 600NL/kg-VS 程度²⁾であるので、本研究を実施した処理場の下水汚泥は分解性が低いと言える。実消化槽での発生率も低いことが確認されており、下水汚泥の性状が影響したと考えられる。

全系列において pH は約 7.6 であり、溶解性 COD、アンモニア性窒素の値も汚泥単独系と同程度であったため、発酵は安定して行われたと考えられる。汚泥単独系に対して混合系のガス発生量は 1.70 ~ 2.31 倍になり、発酵適物の混合によって大きく増加した。TS および VS の分解率も混合系は汚泥単独系よりも高かった。混合系において、下水汚泥に起因するガス発生量、メタン

ガス発生量が汚泥単独系における発生量と等しいと仮定して発酵適物による正味の値を算出した。その結果、投入 VS 当たりの正味のガス発生量、メタンガス発生量ともに下水汚泥（汚泥単独系）の約 2 倍の値であった。

(3) 実験 は、運転開始時から発酵適物を投入した。初期 1 週目は 1 日 1.0kg、2 週目は 1 日 2.0kg、3 週目から所定量の 1 日 3.0kg に段階的に上昇させている。消化ガス発生量の推移を 1 週間単位で図 2 に示す。実験 において 4 週目頃から汚泥単独系との差がほぼ一定になり、それが運転終了時まで継続した。本運転では 6 週目以降の 4 週間を評価期間とし、その平均値から評価した。表 4 に実験 の消化特性（平均値および標準偏差）を示す。汚泥単独系の投入 VS 当たりのガス発生量は実験 を若干下回ったが同程度であった。実験 においても両系列で発酵は安定して行われたと考えられ、汚泥単独系に対する混合系のガス発生量は実験 を上回る 2.57 倍に増加した。

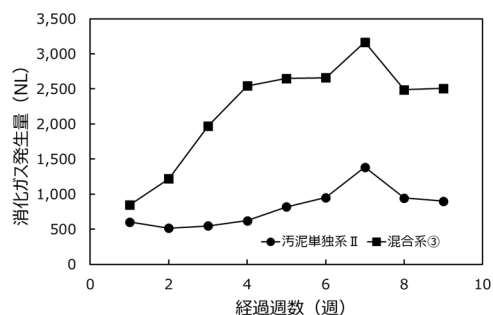


図 2 連続実験 でのガス発生量の推移

表 4 連続実験 の消化特性

(4) 実験 , 実験 の結果をまとめて発酵適物投入量の影響を評価する。投入 VS 当たりの正味のガス発生量は、下水汚泥に対して発酵適物 5% 投入で 657NL/kg-VS、10% 投入で 635NL/kg-VS、15% 投入で 532NL/kg-VS と、負荷の上昇によって低下した。これは一般的にみられる妥当な結果である。メタン含有率については混合系において僅かに低下したが、低下率は 1% 未満であり有意な差ではなかった。

項目	単位	汚泥単独系	混合系
pH	-	7.29 ± 0.09	7.35 ± 0.09
TS・VS	TS	1.98 ± 0.06	2.94 ± 0.15
	VS	1.19 ± 0.04	1.83 ± 0.11
分解率	TS	50.0	53.5
	VS	60.4	62.5
溶解性COD	g/L	0.25 ± 0.02	0.49 ± 0.07
アンモニア性窒素	gN/L	0.59 ± 0.07	0.56 ± 0.02
ガス発生量	NL/日	176 ± 52	454 ± 85
メタン含有率	%	58.3 ± 0.6	57.5 ± 0.6
投入VS当たりのガス発生量	NL/kg-VS	293	404
投入VS当たりの正味のガス発生量	NL/kg-VS	-	532

発酵適物の投入 VS 当たりの正味のガス発生量は、下水汚泥との混合消化における分別生ごみの設計値 (740NL/kg-VS)³⁾には及ばないが、それに近い値である。また、本発酵適物を単独基質として行ったメタン発酵では¹⁾、VS 負荷 2.64kg-VS/m³・日の運転において約 620NL/kg-VS であり (メタン発酵に必要な微量元素のニッケルとコバルトをそれぞれ 65mg/kg-TS 添加した運転条件)、今回の結果も同等である。TS・VS 分解率についても混合系ではすべて汚泥単独系の分解率を上回った。以上より、本研究で使用した発酵適物は連続運転においても分解性が優れていることが実証され、混合消化のバイオマスとして有用であることが示された。

< 引用文献 >

- 1) 姫野修司, 小松俊哉, 伊藤圭汰, 笹淵晃洋, 高橋倫広, 北田誠: MBT システムによる都市ごみからのメタン発酵適物の回収およびバイオガス化技術に関する研究, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.29, pp.227-239, 2018
- 2) 社団法人日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説 後編-2009 年版-, pp. 359, 2009
- 3) 財団法人下水道新技術推進機構: 下水処理場へのバイオマス (生ごみ等) 受け入れマニュアル, 2011

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 姫野 修司, 小松 俊哉, 笹渕 晃洋, 伊藤 圭汰, 北田 誠, 高橋 倫広	4. 巻 29
2. 論文標題 MBTシステムによる都市ごみからのメタン発酵適物の回収およびバイオガス化技術に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 廃棄物資源循環学会論文誌	6. 最初と最後の頁 227-239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3985/jjsmcwm.29.227	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小松 俊哉, 姫野 修司, 伊藤 圭汰, 高橋 倫広	4. 巻 56
2. 論文標題 都市ごみの機械的処理による発酵適物と下水汚泥の混合嫌気性消化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 下水道協会誌論文集	6. 最初と最後の頁 118-125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤圭汰, 岡野勝也, 小松俊哉, 姫野修司, 高橋倫広, 北田誠
2. 発表標題 MBTを適用した下水汚泥と可燃ごみの混合嫌気性消化(第2報)
3. 学会等名 第55回下水道研究発表会(2018年7月, 北九州市)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡野勝也, 伊藤圭汰, 小松俊哉, 姫野修司, 高橋倫広
2. 発表標題 可燃ごみの機械的処理による選別発酵適物のメタン発酵
3. 学会等名 第53回日本水環境学会年会(2019年3月, 甲府市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤圭汰, 小松俊哉, 姫野修司
2. 発表標題 下水汚泥と都市ごみ有機成分の混合消化連続実験
3. 学会等名 第52回日本水環境学会年会 (2018年3月, 札幌市)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	姫野 修司 (Himeno Shuji) (60334695)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	