担体設置型サイフォン式無動力攪拌 メタン発酵リアクターによる希釈生ごみの処理

松井 鐘慶^{1),*}

押部 洋^{2,3)}
李 玉友^{1,3)}

戚 偉康¹⁾

Methane Fermentation of Diluted Food Waste by Self-Agitated Anaerobic Baffled Reactor with Fixed Carrier

Kanechika MATSUI^{1),*}, Hiroshi OSHIBE^{2,3)}, Wei-Kang QI¹⁾ and Yu-You LI^{1,3)}

¹⁾ Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 6-6-06 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

²⁾ Tokyo Gas Co., Ltd. 1-7-7 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0064, Japan

³⁾ Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-06 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

Abstract

The operation performance of an improved self-agitated anaerobic baffled reactor with a fixed carrier was investigated by a continuous experiment of treating simulated food waste adjusted to a 5% total solid (TS) concentration. The objective of this study was to enhance methane fermentation and effluent water quality at 35 °C. The effect of chemical oxygen demand measured by potassium dichromate (COD_{Cr}) loading rate on the treatment performance was evaluated by shortening the HRT from 50 days to 10 days. As a result, the improved reactor was stably operated until the COD_{Cr} loading rate increased to 9.56 kg m⁻³ d⁻¹. In addition, the improved reactor showed better organic removal efficiency and conversion ratio from the substrate than these the CSTR and self-agitated anaerobic baffled reactor without a fixed carrier.

Keywords: Methane fermentation; Self-agitated reactor; Diluted food waste; Biogas production; Energy recovery

1. はじめに

バイオマス・ニッポン総合戦略¹⁾や食品リサイクル法²⁾の推進により、生ごみの有効利用への関心が高まっている。生ごみの資源化技術として近年メタン発酵によるリサイクル処理が注目されている。メタン発酵技術は、嫌気性細菌の働きにより有機物の減量化およびエネルギー回収という2つのメリットを有する。日本の生ごみのうち、家庭や事業系生ごみはほとんどが焼却処分されている³⁾。これら発生した生ごみをオンサイトでエネルギー利用及び減量化する方法として、分散型メタン発酵システムがある。分散型メタン発酵システムは、1日あたり数t以上の生ごみが発生する食品製造業を中心に導入が進んでいる⁴⁾。一方で、事業系の生ごみについては実証試験^{5,6)}レベルであり、導入事例⁷⁾は少ない。この要因の1つとして生ごみが少ない場合は、システムから回収可能なエネルギーが少なく非効率であるため⁸⁾であり、食品残渣の有効利用の促進に向けてメタン

発酵システムの高効率化が求められている。

当研究グループは、メタン発酵システムの消費動力低減による高効率化を目的として、仕切板とU字管を利用したサイフォン原理による、外部動力を要さない攪拌機構を有する無動力攪拌リアクターの研究に取り組んでいる^{9~11)}。無動力攪拌リアクターは、TS10%の模擬生ごみ⁹⁾及び食堂残飯¹⁰⁾を用いて、発酵温度35℃の中温条件下において、完全混合型リアクター(Continuous Stirred Tank Reactor: CSTR)と同等の処理性能を有することが示された。

本研究では、近年、普及拡大しているディスポーザー¹²⁾を使用して生ごみが破碎希釈された後、発酵槽に供給されることを想定している。具体的には、集合住宅や商業施設におけるディスポーザー排水処理システムへの導入を見込んでいる。ディスポーザーで生ごみを破碎処理する場合、基質が多量の水で希釈され、汚泥の流出やサイフォン式攪拌の回数が減少することが懸念される。そこで当研究グループでは、無動力攪拌リアクターに汚

1) 東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-6

2) 東京ガス株式会社 〒230-0064 横浜市鶴見区末広町 1-7-7

3) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-6

* 連絡先: k.matsui0218@gmail.com

泥流出抑制のための担体を充填した新規リアクターを設計し、希釈模擬生ごみを用いた長期間処理試験を行い、本リアクターの処理性能の検討を行った。押部ら¹³⁾は、高温条件下において試験を行い、本リアクターで COD_{Cr} 容積負荷 $12 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ まで安定的に発酵できることを示した。

メタン発酵は、一般的に高温条件の方が中温条件よりも高い分解率を示すことが知られている¹⁴⁾が、加温に要する熱量低減の観点では、中温条件の方が望ましい。基質が多量の水で希釈されるディスポーザー排水処理システムにおいては、なるべく消費エネルギーを小さくすることが事業採算性の面で重要なポイントであり、本リアクターが中温条件下で処理できる基質濃度の下限を把握する必要がある。また、押部ら¹³⁾の検討では、リアクター内に設置した担体の発酵効率向上への効果を、汚泥の滞留時間と水理学的滞留時間との差によって評価しているが、同じ発酵温度における担体無しの無動力攪拌リアクターの結果との比較を行っていないため、実際に発酵の効率が向上したかどうかについては検討されていない。そこで本研究では、模擬生ごみを原料として中温条件下で、 COD_{Cr} 容積負荷 $9.56 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ までの連続実験を行った。得られた結果は、同負荷条件における CSTR と、バイオガスの生成速度、有機物除去率及び処理水質を比較し評価を行った。また、中温条件下で担体無しの無動力攪拌リアクターを用いた既往研究⁹⁾と流出水の有機物濃度および基質のメタン転換率を比較することにより担体設置の効果を検証した。さらに、連続試験中、リアクター内に未分解性残渣の浮遊が確認され、それらがサイフォン式攪拌を阻害する機構が明らかとなった。未分解性食品残渣が発生する原因について、既往研究との比較による考察を行った。

2. 方法

2.1 実験装置および運転条件

連続運転装置の概略図を Fig. 1 に示す。基質は水道水で TS 5% に希釈した模擬生ごみ¹⁴⁾をミキサーによって微細化したものを使用した。Table 1 に無動力攪拌リアクターに対して投入した各 HRT における基質の平均性

状を示す。尚、基質の破碎に用いたミキサーの変更により、破碎粒径が細くなり、大粒径の基質を除外する工程にて除外される固形物が減少し、投入原料としての基質が増加した。これにより、HRT10 日の基質の COD 濃度が他の HRT での濃度に比べて高くなっているため、当期間における比較検討は行わないものとする。基質は 10 L の機械攪拌式タンクにおいて 4°C で保持し、タイマー制御式のポンプによって 2 時間に 1 回ごと無動力攪拌リアクターおよび CSTR へ間欠投入した。無動力攪拌リアクターと CSTR の有効容量はそれぞれ 10 L および 5 L である。無動力攪拌リアクターと CSTR の運転は別々の期間に同じ HRT 条件で行った。植種汚泥は、M 浄化センターに設置された下水汚泥の中温嫌気性消化槽から採取した消化汚泥を使用した。リアクターの温度は、ウォータージャケットに温水を循環することで 35°C に制御した。HRT は 100 日, 50 日, 30 日, 15 日, 10 日と段階的に短縮して運転を行った。各 HRT において、HRT の日数経過後、バイオガス生成速度およびバイオガス組成の標準偏差が 10% 以内の期間（以下、評価期間）を定常状態として、各測定項目の平均値を算出し、評価を行った。

無動力攪拌リアクターの内部は 4 つのチャンバー (Fig. 1 の左から C 1, C 2, C 3, C 4) に分けられている。リアクターの高さは 40 cm, 横幅 40 cm, 奥行きは 10 cm である。各チャンバーの横幅は等しく 10 cm となっている。各チャンバーには汚泥サンプリング用のポートが、Fig. 1 に示すように合計 4 箇所取り付けられている。基質投入は Fig. 1 に示す C 1 と C 2 の間から行った。汚泥流出は、リアクター内に有効容量以上の汚泥が蓄積されたとき Fig. 1 に示す C 4 上部の流出口から自然流下によって行われる。使用した担体は住友ベークライト社の流動床用微生物固定化担体で、ポリプロピレン樹脂性、直径 20 mm, 長さ 20 mm の円柱管状、真比重 0.98 g cm^{-3} 、および比表面積 $350 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ である。充填箇所は Fig. 1 に示す通り、C 4 の下段で、充填容積は約 0.8 L である。

攪拌の動作原理⁹⁾を Fig. 2 に示す。気相部が密封された第 1 チャンバーにて発生するバイオガスによって汚泥の液面が押し下げられる (Fig. 2B)。液面が U 字管の底部まで達したとき、第 1 チャンバー気相部に貯留された

Fig. 1 装置の概略図

Table 1 無動力攪拌リアクターの実験に用いた希釈生ごみの性状（測定回数：各3回）

HRT (d)	30	15	10
pH	3.99±0.14	3.94±0.08	3.80±0.03
TS (g L ⁻¹)	50.6±4.57	46.9±2.50	49.8±5.40
VS (g L ⁻¹)	47.6±3.33	44.9±2.62	44.6±0.66
SS (g L ⁻¹)	39.8±6.80	37.1±5.51	37.4±0.10
VSS (g L ⁻¹)	36.4±1.58	36.1±5.26	36.6±0.08
T-COD _{Cr} (g L ⁻¹)	75.5±18.3	62.3±9.17	99.8±3.35
S-COD _{Cr} (g L ⁻¹)	28.4±7.39	31.8±3.14	36.9±4.15
Total VFA (mg L ⁻¹)	1030±1183	855±552	285±52.2
NH ₄ ⁺ -N (mg L ⁻¹)	284±12.9	282±13.6	259±23.0
T-N (mg L ⁻¹)	2120±652	1790±165	2180±229
T-P (mg L ⁻¹)	186±26.2	260±18.5	308±19.6
BOD (mg L ⁻¹)	62000±18000	55000±11000	ND

ND : No Data

Fig. 2 無動力攪拌の原理

バイオガスはU字管を通して隣のチャンバーへ一気に移動する (**Fig. 2C**)。発酵液は第1チャンバーへ向かって引き戻され、第1チャンバー液面は上昇し、第2～4チャンバー液面は下降する。このときに生じる液流動によって槽内の攪拌が行われる (**Fig. 2D**)。

2.2 分析方法

バイオガス生成量は湿式ガスメータ (Shinagawa, W-NK) を用いて測定し、標準状態の量に換算した。ガス組成の分析には TCD ガスクロマトグラフ (Shimadzu, GC-8A) を使用した。カラムには Porapak Q (Shimadzu GLC) を充填したステンレスカラムを使用し、カラムおよび検出器の温度はそれぞれ 100 °C、70 °C とした。アルカリ度、NH₄⁺-N、S-COD_{Cr}、Volatile fatty acid (VFA) の測定に使用する上清は、3,000 rpm、20 分の遠心分離と 0.45 μm 孔径のフィルターろ過を経て準備した。アルカリ度、TS、VS、SS、VSS の測定は下水試験方法¹⁵⁾ に従っ

て行った。COD_{Cr} の測定は APHA Standard Method¹⁶⁾ に従った。アンモニア態窒素はキャピラリー電気泳動方法 (Administrator) により測定した。T-N は紫外線吸光度法により、試料をアルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウムで、約 120 °C 30 分間加熱して窒素化合物を硝酸イオンに変え、波長 220 nm の吸光度を測定して定量した¹⁷⁾。T-P は、高圧蒸気滅菌器を用いて、試料を加圧下でペルオキシ二硫酸カリウムによる分解を行い、生成したリン酸態リンをモリブデン青 (アスコルビン酸還元) 吸光度法により測定した¹⁷⁾。BOD は、希釈した試料の 5 日間培養前後の溶存酸素を滴定により測定し、消費された酸素を求めた¹⁷⁾。pH 測定には TOA DKK 製のガラス電極 pH メータ (HM-30V) を使用した。VFA の測定には、FID ガスクロマトグラフ (Agilent 6890) を使用した。カラムは 30 m のキャピラリーカラム (Agilent, DB-WAXetr) を用いた。カラムは 125 °C で 5 分、125

℃から180℃まで15分、180℃で12分の段階的昇温操作を行った。検出器の温度は280℃とした。尚、全てのサンプルは3回ずつ測定を行い、それらの平均を最終値として用いた。

3. 結果および考察

3.1 連続運転データの推移

無動力攪拌リアクターはそれぞれHRT 50日では55日間、HRT 30日では96日間、HRT 15日では58日間、HRT 10日では36日間、段階的にHRTを短縮しながら運転を行った。一方CSTRはそれぞれHRT 50日では56日、HRT 30日では83日、HRT 15日では26日間運転を行った。

Fig. 3 Aに無動力攪拌型リアクターのバイオガス生成速度とメタン濃度の推移を示す。Fig. 3 Bに流出液のpHとアルカリ度、Fig. 3 Cには流出液のVFA濃度のそれぞれの推移を示している。各HRTにおけるバイオガス生成速度の平均は、 $0.86 \text{ L L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (HRT 50日)、 $1.10 \text{ L L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (HRT 30日)、 $2.00 \text{ L L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (HRT 15日)、 $2.74 \text{ L L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (HRT 10日)となり、HRT短縮に伴い段階的に増大しながら推移した。

流出液のpHは、HRT 15日および10日で下降が確認されたが、運転期間を通じて平均約7.2~8.7の範囲であり、メタン発酵に適した水準であった。流出液のアルカリ度 (pH 4.8) は、運転期間中3,600~5,950 mg L^{-1} as CaCO_3 の範囲で分布した。流出液のVFA濃

度は全てのHRT条件の定常状態期間、常に1,000 mg L^{-1} as acetate 以下でほとんど検出されなかった。図示はしていないが、流出液の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は評価期間中600~1,500 mg L^{-1} の範囲であり、一般的に中温メタン発酵で障害が生じると考えられる水準 (3,000 mg L^{-1})¹⁹⁾より低かった。以上述べてきた指標は各HRTにおいて標準偏差が平均値の10%以内で安定しており、VFAはほとんど未検出かつpHは適正範囲であった。COD_{Cr}容積負荷1.71~9.56 $\text{kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ の条件において、有機酸等による発酵阻害は生じなかったと判断できる。

3.2 スカムの生成

無動力攪拌リアクターの連続実験において、連続実験の106日目以降 (HRT 30日)、C1の液面にスカム性未分解残渣 (以下スカム) の浮遊が確認された。スカムは日数を経るごとに増加し、最終的には縦方向10 cm程度の厚さとなり、リアクター内壁面に付着し、C1の液面が下降しても固形物が残留し、U字管内が閉塞することで攪拌が妨げられた。また、液の流動性が低下したことにより、攪拌後に液が所定の高さ (U字管開口部) まで戻らず、攪拌の混合効果が弱まり、バイオガスの生成量が減少した。以上の理由により、スカムの発生が攪拌回数の減少を招いた。そこで、153日目 (HRT 30日) にスカムの除外を行った。除外後もC2およびC3の液面には2~3 cmほどのスカムが浮遊していた。また、242日目 (HRT 10日) より、流出口部 (C4上部) の液面において厚さが約5 cmのスカムの浮遊が確認された。流

Fig. 3 連続処理実験における各評価項目の経日変化

出口部がスカムによって閉塞した場合、オーバーフローシステムの妨げとなるため、242日目（HRT 10日）に除外を行った。153日目にC1から除外したスカムの分析を行ったところ、TS濃度は 27.0 g L^{-1} 、脂質は 3.20 g L^{-1} であり、スカムより下部に存在する汚泥のそれと比較してどちらも2～3倍高濃度であった。

以下にスカムの発生に関する考察を記す。スカムの発生は脂質の分解不良に依る油脂の蓄積が直接的な原因である²⁰⁾。脂質の分解不良が生じる要因としては、高脂質濃度の原料の使用²⁰⁾や攪拌不足^{19, 20)}、低汚泥濃度²¹⁾であることが挙げられる。無動力攪拌リアクターに関する既往研究と本研究について、スカム発生の有無と基質条件および発酵槽内汚泥濃度に関する情報をTable 2にまとめた。Kobayashiら⁹⁾がTS10%の模擬生ごみを基質として容量43Lの無動力攪拌リアクターについて評価を行った研究（以下、文献9）では、発酵槽内でスカムは形成されなかった。また、呉ら¹⁰⁾の研究（以下、文献10）では、スカムが発生した原因は基質の脂質濃度が高く、高脂質負荷となって引き起こされたと考察されている。本研究で用いた基質の脂質濃度はスカムが発生しなかった文献9のそれよりも低いため、高脂質負荷は原因ではないと考えられる。一方、油脂は微生物や酵素による生物分解を受けにくいいため、分解を促進するためにはできるだけ油脂を分散しながら微生物や酵素との接触性を良くすることが重要ということが報告されている¹⁹⁾。Table 2に記載した通り、本研究およびスカムの発生しなかった文献9のHRT 30日における攪拌回数はそれぞれ 4.6 ± 0.9 、 5.4 ± 0.8 回 d^{-1} で、有意水準5%の統計学的帰無仮説検定の結果、統計学的な有意差なしと判断された。したがって、本研究において、攪拌回数の減少はスカム発生の原因である可能性は低いと考えられる。また、汚泥の高濃度化は基質の分解効率向上に寄与する²¹⁾ことが報告されている。Table 2中段にHRT 30日および15日それぞれの定常状態における発酵槽内の汚泥濃度を示す。汚泥サンプルは無動力攪拌直後にFig. 1に示すPort2より採取した。既往研究における発酵槽内汚泥濃度は、同じ部位から採取したサンプルについてのグラフデータより推算した値を引用した。Table 2からも分かる通り、本研究の無動力攪拌リアクターのHRT 30日およびスカムの発生が見られなかったHRT 15日における汚泥濃度はそれぞれ 4.12 、 16.5 g L^{-1} であった。汚泥濃度の上昇は

担体によって汚泥を流出させずに保持したことによるものであり、スカム発生の抑制に寄与している可能性がある。以上をまとめると、本実験のHRT 30日におけるスカム発生の原因は汚泥濃度が低いことによる影響である可能性が高く、これは希釈基質を用いていることに起因していると考えられる。

3.3 無動力攪拌リアクターの運転性能評価

(a) 異なるHRT条件での比較

Table 3に無動力攪拌リアクターとCSTRの各HRTにおける評価期間の測定項目の平均値を示す。除去率は各性状項目に対して $(1 - \text{流出量} \cdot \text{基質投入量}^{-1})$ と定義して計算した。また、メタン転換率は $(\text{生成バイオガス中のメタンのCOD}_{\text{Cr}} \text{換算値} \cdot \text{投入基質のCOD}_{\text{Cr}}^{-1})$ と定義して計算した。無動力攪拌リアクターの流出液の性状は、HRTの短縮に伴いpHが低下し、アルカリ度、遊離性アンモニアおよびT-Nの濃度が低下した。流出液のT-COD_{Cr}、BODおよびT-Pの濃度はHRTの短縮に伴い上昇した。無動力攪拌リアクターの基質COD_{Cr}のメタンへの転換率は、HRT 30日および15日ではそれぞれ0.87および0.88であったが、2.1で述べた通り、HRT 10日では基質COD_{Cr}濃度の上昇による容積負荷の急激な増加のため、0.47と他のHRTに比べ低かった。HRT 10日における無動力攪拌リアクターはCSTRに比べて高負荷である。一般に中温条件のメタン発酵は容積負荷 $10.1\text{ kg m}^{-3}\text{ d}^{-1}$ 程度で、基質の分解率が低減する¹⁴⁾。以上の理由より、無動力攪拌リアクターのHRT 10日におけるメタン転換率は他のHRTに比べて低かったと考えられる。

(b) CSTRとの性能比較

無動力攪拌リアクターとCSTRの運転性能を比較する。HRT 30日および15日では、流出液のVFA濃度はCSTRよりも無動力攪拌リアクターの方が低水準であった。遊離性アンモニアの値は無動力攪拌リアクターがそれぞれ $1,446\text{ mg L}^{-1}$ および $1,064\text{ mg L}^{-1}$ 、CSTRがそれぞれ 721 mg L^{-1} および 402 mg L^{-1} と無動力攪拌リアクターの方が高い値を示した。3.1でも述べた通り、これらの遊離性アンモニアの濃度は一般的なメタン発酵の値程度であった。BOD、T-N、T-Pの全性状項目について、無動力攪拌リアクターの方がCSTRよりも大幅に数値が低く、流出液の水質は無動力攪拌リアクターの方が明らかに良好であった。Fig. 4に無動力攪拌リアクターおよびCSTRのメタン転換率とCOD_{Cr}容積負荷の関係を示す。図中の

Table 2 既往研究との性状比較

	文献9	文献10	本研究
基質	模擬生ごみ	食堂残飯	模擬生ごみ
基質のTS濃度 (%)	10	ND	5
基質の脂質濃度 (g L^{-1})	推定6～10	12～20	3.0～6.5 (スカム発生期間)
スカム生成の有無	なし	あり	あり
HRT30日での攪拌回数 (回 d^{-1})	5.4 ± 0.8	ND	4.6 ± 0.9
発酵槽内汚泥濃度の平均値			
-HRT30d (g-VSS L^{-1})	推定13.0	ND	4.12
-HRT15d (g-VSS L^{-1})	推定16.0	ND	16.5

ND: No Data 推定: 論文内グラフより推定

Table 3 無動力攪拌リアクターと CSTR の各 HRT 評価期間別の測定項目の平均値

	無動力攪拌リアクター			CSTR		
HRT (d)	30	15	10	30	15	10
COD _{Cr} 容積負荷 (kg m ⁻³ d ⁻¹)	2.07	3.74	9.56	2.66	4.83	6.59
流出水性状						
pH	8.20	7.93	7.38	7.38	6.87	6.75
アルカリ度 pH4.8 (g L ⁻¹ as acetate)	5581	4350	3900	4428	4024	3450
T-COD _{Cr} (g L ⁻¹)	1.84	5.21	16.6	14.2	16.1	20.0
VFA (mg L ⁻¹)	3.20	50.0	0	3.50	178	241
NH ₄ ⁺ -N (mg L ⁻¹)	1446	1064	713	721	402	333
BOD (mg L ⁻¹)	686	1080	2368	3150	5300	ND
T-N (mg L ⁻¹)	1856	1498	1163	1834	1678	2049
T-P (mg L ⁻¹)	192	167	228	249	207	255
COD _{Cr} 除去率 (%)	97.2	91.6	82.7	77.0	67.8	64.9
TS 除去率 (%)	92.1	90.6	77.0	81.8	70.6	66.7
VS 除去率 (%)	96.1	93.8	74.9	82.5	77.5	69.6
バイオガス生成速度 (L L ⁻¹ d ⁻¹)	1.10	2.00	2.79	1.26	2.55	3.00
投入 COD _{Cr} のメタン転換率 (COD-CH ₄ COD-substrate ⁻¹)	0.87	0.88	0.47	0.76	0.78	0.75
CH ₄ (%)	61.6	57.6	57.4	57.4	58.8	57.9
CO ₂ (%)	38.2	41.8	41.9	41.3	40.3	41.3
N ₂ (%)	0.28	0.65	1.10	1.11	0.47	0.40

ND : No Data

Fig. 4 COD_{Cr} 容積負荷とメタン転換率の関係

曲線は、CSTR を用いた際の有機物の分解率が文献 23 の一次反応式に従うとして、フィッティングした近似曲線である²³⁾。COD_{Cr} 容積負荷が 3.74 kg m⁻³ d⁻¹ のとき、無動力攪拌リアクターおよび CSTR のメタン転換率は、それぞれ 0.88 (実験値) および 0.76 (近似曲線) となった。以上述べた観点から、本研究の無動力攪拌リアクターは、COD_{Cr} 容積負荷 3.74 kg m⁻³ d⁻¹ 以下の条件で、攪拌動力ありの CSTR 以上の分解性能を示したといえることができる。

(c) 担体の設置効果の検証

本研究では、リアクター内に担体を設置し、処理水質の改善を図ることを目標とした。**Table 4** に担体を設置していない無動力攪拌リアクターを用いた実験を行っている文献 9 と、本研究の処理性能の比較を示した。文献 9 における基質の TS 濃度は 10% で、本研究よりも約 2 倍高濃度であるため、**Table 4** に示した各実験結果は同じ HRT 条件でも COD_{Cr} 容積負荷が異なる。

Table 4 無動力攪拌リアクターの担体の有無による性能比較

	本研究		文献 9	
担体設置の有無	有り		無し	
基質 TS 濃度 (%)	5.0		10	
HRT (d)	30	15	30	15
COD _{Cr} 容積負荷 (kg m ⁻³ d ⁻¹)	2.07	3.78	4.82	9.74
流出水 COD _{Cr} (g L ⁻¹)	1.84	5.21	20.9	30.0
VFA (mg L ⁻¹ -as acetate)	3.2	50	17	1.0
COD 除去率 (%)	97.2	91.6	85.5	79.4
TS 除去率 (%)	92.1	90.6	81.0	77.3
VS 除去率 (%)	96.1	93.8	86.4	81.9
投入 COD _{Cr} のメタン転換率	0.87	0.88	0.74	0.66

流出水の COD_{Cr} は担体有りでは 1.84 g L⁻¹ (HRT 30 日), 5.21 g L⁻¹ (HRT 15 日) および担体無しでは 20.9 g L⁻¹ (HRT 30 日), 30.0 g L⁻¹ (HRT 15 日) であった。また, COD_{Cr}, TS, VS それぞれの除去率は担体無しでは全て 90%以上であった。これらの結果から, 容積負荷の違いを加味しても, 担体有りの無動力攪拌リアクターは担体を設置しない場合に比べて, 明らかな処理水質の改善が確認された。さらに, メタン転換率は担体有りでは 0.87 (HRT 30 日), 0.88 (HRT 15 日) および担体無しでは 0.74 (HRT 30 日), 0.66 (HRT 15 日) であり, いずれの HRT においても担体有りの条件の方が担体無しの条件よりも高いメタン転換率を示した。流出水の VFA 濃度は担体の有無による大きな差は見られなかった。以上より, 担体有りの無動力攪拌リアクターは, 担体無しに比べて流出水質の観点で高い処理性能を有することが確認され, 除去された有機物はリアクターに蓄積することなくバイオガスに転換されたと考えられる。これは担体の設置によって汚泥滞留時間 (SRT) が増加し, 汚泥と基質の接触時間が増加したこと, また担体のろ過効果に起因していると考えられる。この結果から, 担体の設置がメタン収率の向上に寄与することが直接的に示された。

4. まとめ

本研究では無動力攪拌メタン発酵リアクターに担体を設置し, 中温条件下で TS 濃度 5% の模擬生ごみを基質として連続処理実験を行った。その結果, 希釈生ごみに対して次の性能を有することが示された。

- ① 本リアクターを用いて COD_{Cr} 容積負荷約 1.71~3.74 kg m⁻³ d⁻¹ の範囲で安定的に発酵することが可能であった。また, 80~97% の有機物の減量化および 85% 以上のメタン転換率が確認された。
- ② 本リアクターは, 有機物除去率, 投入基質のメタン転換率, 流出液の水質の観点から, 機械攪拌式の CSTR を用いた同負荷の運転と比較して優れた処理性能を有することが確認された。
- ③ 運転期間中, 無動力攪拌リアクター内にスカム性未分解残渣の形成が確認された。スカム発生の原因は投入基質が低濃度であることにより, リアクター内の汚泥濃度が低いことが原因であることが示唆された。これにより, ディスポーザー排水処理システムに無動力攪拌リアクターの中温発酵を適用する場合,

リアクター内の汚泥濃度を高く保持するための仕組みが必要であることが考えられる。

- ④ 本リアクターは, 同負荷の担体を設置していない無動力攪拌リアクターと比較して, 良好な流出水性状を示し, 除去された有機物はリアクターに蓄積することなくバイオガスに転換されることが示唆された。
(原稿受付 2016 年 12 月 27 日)
(原稿受理 2018 年 8 月 26 日)

参 考 文 献

- 1) 農林水産省, 2006. バイオマス・ニッポン総合戦略. URL. http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf (2018 年 7 月時点).
- 2) 農林水産省, 2007. 食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律の概要. URL. http://www.maff.go.jp/j/shokusan/recycle/syokuhin/s_about/pdf/data1.pdf (2018 年 7 月時点).
- 3) 環境省, 2006. 生ごみの分類と発生・処理状況. URL. https://www.env.go.jp/recycle/waste/conf_raw_g/01/mat03.pdf (2018 年 7 月時点).
- 4) NEDO, 2015. バイオマスエネルギー導入ハンドブック (第 4 版), pp.153-177. URL. <http://www.nedo.go.jp/content/100859993.pdf> (2018 年 7 月時点).
- 5) NEDO, 2010. 小規模バイオガスプラントと天然ガス併用型燃料電池発電システム導入に関する実証事業 (P02057). 平成 22 年成果報告書, NEDO, 神奈川.
- 6) NEDO, 2010. 複合商業施設における食品廃棄物を対象としたバイオガス化実証事業, 2010 年成果報告書, NEDO, 神奈川.
- 7) 加藤利崇, 塩田憲明, 竹林徹也, 2015. 厨芥と厨房排水処理汚泥を用いた日本初の建物内地下メタン発酵装置の運転状況と効果検証 (あべのハルカスにおける運転実績から). 第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿, B7-1.
- 8) 押部洋, 大坂典子, 西川向一, 李玉友, 2015. 事業系食品残渣を対象とした小規模分散型メタン発酵システムの効率性に関する研究. 土木学会論文集 G (環境) 71(7), III_1-III_10.
- 9) Kobayashi, T., Li, Y.Y., 2011. Performance and characterization of a newly developed self-agitated anaerobic reactor with biological desulfurization. Bioresource Technology 102, 5580-5588.
- 10) 呉亜鵬, 小林拓朗, 徐開欽, 李玉友, 2013. サイフォン式無動力攪拌のメタン発酵に及ぼす効果 - 異なる攪拌方式の比較実験 -. 環境技術別冊 42(5), 291-299.
- 11) Qi, W.-K., Li, W., He, S.-L., Li, Y.-Y., 2015. Simulation and configuration correlation analysis of the self-agitation anaerobic baffled reactor. Biochemical Engineering Journal 103, 85-92.
- 12) エクレス, 2018. ディスポーザーとは. URL. https://www.e-disposer.com/html/user_data/explain (2018 年 7 月時点).
- 13) 押部洋, 大坂典子, 李玉友, 2017. 高希釈生ごみを対象とした担体設置型サイフォン攪拌式リアクターの高温メタン発酵特性.

- 土木学会論文集 G (環境) 73(1), 11-19.
- 14) 李玉友, 佐々木宏, 鳥居久倫, 奥野芳男, 関廣二, 上垣内郁夫, 1999. 生ごみの高濃度消化における中温と高温処理の比較. 環境工学研究論文集 36, 413-421.
- 15) 日本下水道協会, 2010, 下水試験方法. URL: http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/pdf/s03.pdf (2018 年 7 月時点).
- 16) American Public Health Association, 1999, APHA Standard Method. URL: https://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_1000-3000.pdf (2018 年 7 月時点).
- 17) 日本工業標準調査会, 2013. 工場排水試験方法. URL: <http://kikakurui.com/k0/K0102-2013-01.html> (2018 年 7 月時点).
- 18) Speece, R.E., 1999. 産業廃水処理のための嫌気性バイオテクノロジー. 技報堂出版, 東京.
- 19) 片岡直明, 宮晶子, 石田健一, 山田紀夫, 鈴木隆幸, 2006. 油脂含有食品加工排水のメタン発酵促進技術の研究. エバラ時報 212, 3-9.
- 20) 褚春風, 李玉友, 宮原高志, 野池達也, 1997. 中温および高温メタン発酵に及ぼす高級脂肪酸の阻害効果の比較. 土木学会論文集 VII (559/VII-2), 31-38.
- 21) 李玉友, 水野修, 船石圭介, 山下耕司, 2003. 二相循環方式高濃度メタン発酵プロセスを用いた生ごみの高速メタン化処理. 環境工学研究論文集 40, 321-331.
- 22) 吉田耕治, 久保田洋, 矢島聡, 里見仁, 2008. デイスパーザー破砕生ごみの粒径組成とメタン発酵特性. 廃棄物学会研究発表会講演論文集 19, P2-B3-2.
- 23) 佐々木宏, 李玉友, 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.

[論文要旨]

メタン発酵システムの高効率化を目的として, サイフォン式の無動力攪拌機構を有するメタン発酵槽に担体を部分的に設置し, 運転性能を実験的に確認した。模擬生ごみの TS 濃度を約 5% に希釈した基質を対象に, 中温の条件下で HRT を 50 日から 10 日に段階的に短縮することで COD_{Cr} 容積負荷を段階的に増加して処理性能を評価した。その結果, COD_{Cr} 容積負荷 $9.56 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ まで安定運転が実現し, 本リアクターの処理性能が示された。また, CSTR および改良前の同リアクターの既往の試験結果との有機物除去率およびメタン転換率を比較したところ, 処理性能の改善が確認された。

キーワード: メタン発酵; 無動力攪拌リアクター; 希釈生ごみ; バイオガス生成; エネルギー回収