研究論文

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—

呉 亜鵬*・小林 拓朗**・徐 開欽**・李 玉友*

要 旨

サイフォンを利用した無動力攪拌機構の導入がメタン発酵処理特性に及ぼす影響を評価するため、(1)サイフォン式攪拌、(2)完全混合、(3)無攪拌の各装置を用いた比較実験を行った。3種類の装置を並列して食堂残飯を処理する中温メタン発酵の連続実験を行い、処理性能と槽内の反応状況の分布を比較し、以下に示す特徴的な差異を発見した。サイフォン式攪拌装置は最大 $18 \text{ kg/m}^3/\text{d}$ まで達する高いCOD容積負荷の下で良好な運転を継続できたのに対して、無攪拌装置は $10 \text{ kg/m}^3/\text{d}$ の負荷の下で酸性化した。また、同一の負荷条件の下においてサイフォン式攪拌装置は完全混合装置と同等で、無攪拌装置よりも10%高いメタン収率が得られた。サイフォン攪拌装置の内部は無攪拌装置と比較して揮発性脂肪酸やVSが均一に分布しており、投入原料が槽全体によく分散されていることを示唆していた。このような特徴が無攪拌装置において起きる沈殿や酸性化の抑止に寄与していたと考えられた。

キーワード：サイフォン式攪拌、メタン発酵、酸性化、沈殿

1. はじめに

近年、アジア地域を中心として家畜ふん尿や生ごみ等を処理する個別家庭用の小規模メタン発酵施設が広く使用されている。とくに多くの施設が中国に集中し、現在では中国の国内に4,000万基程度存在する¹⁾。これらの施設は一般的には無攪拌の押し出し流れ方式で、容積は約10 m³、電力を必要としない簡素な低コストのシステムである²⁾。日本国内にも同様の施設が存在している。しかしながら、それらの施設は低効率であり、基本的に100日以上長いHRTを要する。

連続的な攪拌機構を持たないことは、家庭用施設と先進国を中心として普及している工業的な施設との根本的な違いである。攪拌は基本的な操作の一つであり、メタン発酵において攪拌が果たす役割は、(1)投入原料を分散して基質と微生物との接触効率を高める、(2)スカム形成の抑制、(3)大規模施設の場合の温度均一化等

がある。よく攪拌が行われない装置は、Completely stirred tank reactor(CSTR)と比較して処理効率が低下するという実験結果がいくつか報告されている^{3,4)}。こうしたことから、上述の家庭用メタン発酵施設は、攪拌不十分による問題がしばしば生じる。例えば生ごみのように、投入量が不安定な原料を処理する場合に、一時的な有機物負荷の増大に対応できず、有機酸の蓄積・ガス生成の不調が発生することをこれまでの調査で確認している。一般的に、押出流れ式装置の内部は投入原料の分散が不十分なため、局所的に高負荷になって酸性化しやすい。それを回避するために、アルカリ剤添加が必要になる場合もある。別の問題の例としては、槽内への固形物の沈殿・蓄積が挙げられる。原料には一定割合で無機物や難生物分解性の成分が含まれているため、それらは沈殿すると、槽内に蓄積することになる。このことは装置の有効容積の減少や、目詰まりの問題を引き起こす。事実、中国の家庭用施

2012年11月9日受付、2013年2月12日受理

* 東北大学大学院環境科学研究科 Ya-Peng WU, Yu-You LI

** (独) 国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター Takuro KOBAYASHI, Kai-Qin XU

設のマニュアルでは年一回の槽内の洗浄が推奨されている⁵⁾。これは、運転を停止して中の汚泥を全部取り出す必要があるため、メンテナンスとしては負担が大きい。

電力を消費せず、低コストであるという現行の技術の長所を損なうことなく、そのような問題を解決することが望ましい。本研究では、解決手段のひとつとして無動力の攪拌機構の活用に着目した。Kobayashiらは、密閉チャンバーとU字管を取り付けたメタン発酵槽を開発し、チャンバー内で生成し蓄積するバイオガスのサイフォン現象による移動を利用した無動力の攪拌を行いながら、模擬生ごみを処理する連続運転を達成することができた⁷⁾。このサイフォン攪拌の仕組みによって、前述した攪拌不十分ゆえに生じる問題を解決できるかどうか、本研究の焦点である。この研究では、実際の廃棄物を原料として、サイフォン攪拌の装置、同じ形状の無攪拌の装置、CSTR装置の3つを並列して連続実験を行った。これまでの研究では不明であったサイフォン攪拌式装置と無攪拌装置の処理特性の違いを明らかにし、サイフォン攪拌機構の小規模施設への導入は効果が期待できるかどうかを評価することを意図している。許容可能な有機物負荷の水準、槽内部における有機物や揮発性脂肪酸(VFA)の分布特性、スカム形成能に特に注目して解析、比較を行った。

2. 実験方法

2.1 連続運転装置

基質は、国立環境研究所の食堂残飯に重量比で1.4倍の水道水を添加し、カッターポンプで破碎したものを用いた。メタン生成菌に必須の微量栄養塩を補充するため、基質1 Lあたりに100 mgの FeCl_2 、それぞれ10 mgの NiCl_2 と CoCl_2 を添加した。基質は4℃の完全混合フィードタンクに貯留され、タイマー制御のポンプ(RP-LVS, Furue Science)によって各反応装置へ

毎日規定量が投入された。基質の平均COD濃度は $104.8 \pm 18.6 \text{ g/L}$ でTSおよびVSの平均濃度はそれぞれ $100.3 \pm 10.4 \text{ g/L}$ 、 $95.1 \pm 10.0 \text{ g/L}$ であった。R1は円筒状のモーター付インペラ攪拌方式CSTRである(有効容積5 L)。モーターの回転数は300 rpmである。図1に示すようにR2は箱型のサイフォン攪拌装置(有効容積10 L)、R3はR2と同型でU字管を持たない無攪拌装置である。槽の有効容積は10 Lで、有効水深は26.5 cmである。ただしR2の水深は槽内に蓄積されるガス量によって、有効水深は26.5~35.0 cmの間で絶えず変化する。R2の攪拌原理は別の論文で詳しく述べられている⁷⁾。概略は以下の通りである。図1のR2の装置左側の仕切り内部は気相部が密閉されガスが蓄積する構造である。また仕切りにはU字管が埋め込まれており、液およびガスが仕切りの反対側へ出入りできるようになっている。左側の仕切り内部ではバイオガスの発生によって液面が徐々に下降し、ガスが一定量蓄積してU字管下部まで達したときに、蓄積されたガスはサイフォン現象により一気に反対側へ移動する。それと同時にガス蓄積により押し出されていた液体は引き戻される。このときに生じる液体の流動によって攪拌が行われる。このリアクターは、液体の十分な流動が期待できる湿式発酵用の装置として位置づけられる。また、R2とR3の内部に分布する汚泥の性状を把握するため、各リアクターは図1に示した通り合計9箇所のサンプリングポートが取り付けられている。R1~R3の温度は温水循環で35℃に保持した。各発酵槽の種汚泥は、宮城県の仙塩浄化センター消化槽汚泥を使用した。

2.2 分析方法

ガス生成速度の測定には、湿式ガスメータ(シナガワ製W-NK)を用いた。ガス組成(CH_4 , N_2 , CO_2)は、

図1 実験装置の概要図

TCD ガスクロマトグラフ（島津製 GC-8A）を使って測定した。それに使用したカラムは ShinCarbon ST (50/80 mesh, 島津 GLC) を充填した長さ 2 m, 内径 3 mm のステンレスカラムである。VFA は, FID ガスクロマトグラフ（島津製 GC-14B）を用いて測定した。測定値は C2 から C5 の VFA を酢酸換算でまとめて標記した。カラムには長さ 30 m 内径 0.53 mm の Stabilwax-DA キャピラリーカラム（Resteck 製）を用いた。pH は TOA-DKK のイオンメータ IM55G を用いて測定した。TS, VS, アルカリ度は下水試験方法に従って測定した。脂質は Bligh-Dey 法によって測定した。COD の測定は HACH の COD_{Cr} 試薬 HR を使用して、マニュアルに従い測定した。COD 減量化率は、(基質の COD 濃度 - 流出液の COD 濃度) / (基質の COD 濃度) × 100 と定義した。COD 回収率は、(1 日あたりの流出汚泥の COD 量 (g/d) + メタン生成速度の COD 等量 (g/d)) / (1 日あたりの投入基質の COD 量 (g/d)) × 100, メタン化率は (メタン生成速度の COD 等量 (g/d)) / (1 日あたりの投入基質の COD 量 (g/d)) とそれぞれ定義した。また、槽内汚泥のスカムの形成しやすさを評価するため、Halalshah ら⁸⁾の方法に基づいてスカム形成ポテンシャルの測定を行った。決められた手順に従って、500 mL 容量のメスシリンダーに TS1.6 g を含む汚泥を入れ 300 mL まで蒸留水でメスアップした後、発泡剤 (Steradent) を投入し、発泡が終了したのを確認した後、形成されたスカム層の厚さを測定した。スカム形成ポテンシャルは、上の実験においてメスシリンダー内の汚泥液面の上に形成されたスカム層の表面と汚泥液面との垂直距離と定義した。この実験に使用した汚泥は、R1 の場合は槽側面のサンプリングポートからの採取汚泥、R2 と R3 の場合は槽側面の 9 つのサンプリングポートから等量ずつ採取した汚泥を混合したものである。また、槽内部の各位置における汚泥性状を知るために、それぞれの HRT の期間に 2 ~ 3 回、P1 から P9 まですべてのポートから汚泥を採取し、分析を行った。

3. 結果と考察

3.1 各反応槽の運転経過

図 2 は R1 ~ R3 の HRT, COD 容積負荷および槽容積あたりのガス生成速度の経日変化を示している。最初は HRT60 日からスタートしたが、グラフには HRT30 日の期間からのデータを記載している。HRT

は 30 日, 15 日, 10 日, 7.5 日の順に次第に短縮しながら運転を行った。COD 容積負荷は、それぞれの期間 2.9 ~ 3.8 kg/m³/d (HRT30 日), 6.9 ~ 8.7 kg/m³/d (HRT15 日), 8.9 ~ 12.6 kg/m³/d (HRT10 日), 11.9 ~ 18.2 kg/m³/d (HRT7.5 日) の範囲で推移した。

ガス生成速度の挙動は、HRT10 日の期間以降に系列間で変化が生じた。R1 では HRT30 日から HRT10 日まで、負荷に応じてガス生成速度も増加しながら、各条件で一定水準のガス生成速度が保持された。しかし HRT7.5 日の条件において、24 日目以降にガス生成速度が突如減少した。このとき槽内の pH は最低 5.1 まで低下した。R2 では HRT30 日から HRT7.5 日まで、負荷とガス生成速度が同時に増加しながら、各条件で一定水準の安定したガス生成速度が得られた。R2 は全実験期間中に顕著なガス生成の減少は起こらなかった。R3 では、HRT30 日と 15 日の期間には安定したガス生成が継続されたが、HRT10 日に切り替えてからすぐにガス生成速度が減少する傾向を見せた。槽内の pH は、ガス生成速度の減少に伴い、最低で 3.4 まで低下した。

以上のように、R2 が最も高負荷まで連続運転の継続が可能であり、R3 は明白に最も低負荷で運転の継続が困難となった。この結果は、サイフォン式攪拌の導入によって、許容可能な負荷の水準が明らかに拡大されたことを実証している。

3.2 各実験系系列の運転性能のまとめと比較

3.2.1 運転の安定性

各 HRT 条件において、運転日数が HRT と同じ時間だけ経過した後を詳細データ取得期間と定めて、その期間のそれぞれの系列のデータの平均値を表 1 にまとめた。R1 と R3 の、途中で運転を停止した条件のデータはこの表から除いた。全ての系列で流出液の pH は中性の適正な水準であった。VFA 濃度は、R2 と R3 において HRT30 日と 15 日の期間には、R1 よりも低い水準であった。ただし R2 は、HRT10 日と 7.5 日にはそれ以前より明らかに高い水準の VFA 濃度を示した。しかし全ての系列で流出液の VFA 濃度は酢酸換算で約 300 mg/L 以下であった。従来生ごみの中温メタン発酵では、数百から 1,000 mg/L を超える VFA が残留する例がよく報告されている^{9, 10)}。それらと比較すると本研究で得られた VFA 濃度は低い水準であって、深刻な蓄積が進行した状態ではなかった。pH と VFA の観点からは、表 1 に示した期間はそれぞれ安定した

図2 各装置のガス生成速度とCOD容積負荷の経日変化

表1 各実験系の安定状態における平均運転性能

実験系列	R1			R2				R3	
HRT (d)	30	15	10	30	15	10	7.5	30	15
平均 COD 容積負荷 (kg/m ³ /d)	3.5±0.3	6.4±0.3	10.8±0.9	3.3±0.3	7.4±1.0	10.4±0.9	14.8±2.2	3.3±0.3	7.4±1.0
pH	7.3±0.1	7.4±0.1	7.2±0.1	7.9±0.2	7.8±0.2	7.4±0.2	7.4±0.1	7.9±0.1	7.9±0.2
流出液中 VFA (mg/L as acetate)	203±204	109±111	43.7±62.5	22.4±30.3	13.2±35.1	100±108	326±319	21.9±30.4	11.3±19.4
流出液中 COD _{Cr} (g/L)	20.1±1.6	18.3±1.6	33.5±5.2	7.1±1.1	20.4±7.4	21.2±7.7	26.0±4.2	10.9±2.6	22.3±7.9
COD _{Cr} 減量化率 (%)	83.1±2.7	80.2±4.0	67.1±3.4	93.2±1.4	82.6±5.4	82.1±6.2	73.9±6.0	89.8±2.4	81.3±8.3
バイオガス生成速度 (L/L-reactor/d)	1.8±0.2	2.9±0.4	4.6±0.4	1.8±0.2	3.4±0.3	4.2±0.4	6.2±0.9	1.6±0.2	2.8±0.5
CH ₄ (%)	61.1±2.7	60.3±3.0	60.4±1.7	59.9±4.3	59.6±3.3	58.2±4.9	57.6±4.0	56.8±2.5	57.0±5.4
CO ₂ (%)	37.4±2.5	38.3±2.6	38.9±1.6	39.0±4.4	39.0±3.7	40.7±4.9	40.7±4.2	41.8±2.9	41.6±5.6
スカム形成ポテンシャル (cm)	6.2	7.0	7.5	6.3	7.3	7.7	8.5	6.7	7.7

運転が達成されていたといえる。

上述のように、攪拌と処理効率との間にポジティブな関係が存在することが従来報告されている^{3, 4)}が、一方で攪拌と流出液の VFA 濃度との間にはネガティブな関係のあることが報告されている¹¹⁻¹⁴⁾。C3以上の VFA の分解は、水素資化性メタン生成古細菌と共生脂肪酸分解細菌の共生系において進行する。

McMahon らは、連続的な攪拌を行った系よりも、1日の動作時間2分の断続的攪拌を行った系の方が、共生脂肪酸分解細菌が安定して高水準で保持されていたことを示した¹²⁾。また Hoffmann らは、攪拌速度を変化させた実験において、速度の上昇に応じて汚泥フロックが微細化することを確認している¹⁴⁾。これら2つの結果は、攪拌によって、上述の VFA 分解にとって必要な微生物の共生系が物理的に破壊され、共生反応が阻害される可能性を示している。このような理由から、R1よりも攪拌の少ない R2, R3において低い VFA 濃度が得られたと考えられる。

3.2.2 COD の分解とメタンガスへの変換

流出液中の COD 濃度は、HRT 短縮に伴って全体的に増大する傾向が確認された。COD 減量化率は、全ての系で HRT 短縮に応じて減少する傾向があった。R2とR3は、R1と比較して t 検定の下で 5% の水準で、有意に高い COD 減量化率を有していた。特に HRT10日の期間において大きな差が生じ、R1とR2の間で COD 減量化率の平均値の差は15%であった。バイオガス生成速度も各系列で HRT 短縮に伴った増加傾向が認められたが、COD 減量化率ほど系列間で大きな

違いは認められなかった。R2とR3の間では、R2の方がバイオガス生成速度はやや高い傾向があった。また、メタン濃度も平均57~61%であり、異なる系列間および異なる HRT 間でほとんど違いは認められなかった。即ち、メタン生成速度は HRT の短縮に応じて増大する傾向があり、同じ HRT の下では系列間で大きな違いがない。

図3は、COD 回収率を、系列ごとにまとめたものである。R1は全ての条件で COD 回収率の合計値がほぼ100%であった。つまり、COD 減量化率=メタン化率である。R2では、HRT30日と15日の間は COD 回収率の合計値がほとんど100%であったが、HRT10日と7.5日の下ではそれが90%前後に低下した。R3は HRT30日、15日の下でもそれが85%程度であった。一方、COD のメタン化率は R1と R2の間でほとんど違いは認められなかった。しかし R3は、R1, R2よりも10~20%低かった。上では、R2とR3はR1と比較して COD 減量化率が高い傾向があると述べたが、その原因は流入した COD の一部が槽内に蓄積されて排出されなかったことであると考えるのが適当である。

連続実験において攪拌なしの装置と CSTR の間でメタン収率を比較した例はこれまでにいくつか先行研究がある¹⁵⁻¹⁷⁾。メタン収率は、極端に激しい攪拌をすると、かえって減少する場合もあるが¹⁴⁾、攪拌をした方が増加する場合がほとんどである。報告されているその増加率は0~53%の範囲である¹⁵⁻¹⁷⁾。増加率にこのような違いが現れる要因は、Karim らの研究¹⁷⁾によると、原料の TS 濃度の違いである可能性が大きい

図3 各実験系における流入 COD に対する流出とメタン化 COD の割合

ようである。その研究では、原料の TS 濃度 50 g/L ではメタン収率の増加率が 4 % 以下、100 g/L ではそれが 10~26%、150 g/L では最大 53% のメタン収率の増加率が得られている。本研究の場合は、原料の TS 濃度は 100 g/L である。R2 の R3 に対するメタン収率の増加率も、上で示した TS 100 g/L のときの増加率の範囲 (10~26%) の中に含まれていた。サイフォン式攪拌の効果が原料の TS 濃度にどのように影響されるかは検討される必要がある。

以上のことから、サイフォン式攪拌を導入した装置は、攪拌無しの装置よりも 10% 以上高く、CSTR と同等のメタン化率を達成できることがわかった。ただ HRT 10 日以下まで短縮されたときには、CSTR よりも COD の回収率が低下する傾向が認められた。

3.2.3 スカムの形成

R2 は HRT 10 日以下、R3 は HRT 30 日および 15 日の下で COD の槽内への蓄積が生じることを述べた。実験期間中、R2 と R3 では槽内に 2~10 cm のスカム層が形成された。とりわけ、HRT 7.5 日の期間の R2 において、槽の液面に厚さが 10 cm まで達する浮遊スカムの形成が観察された。R2 の装置からスカムと判断された浮遊層を取り出して分析すると、COD 濃度は 88.2 g/L であって、スカムより下部に存在する汚泥のそれと比較して 2~3 倍以上高濃度であった。このことから、スカム層の形成は槽内への COD 蓄積の要因のひとつであると考えられる。このようなスカム層形成は、HRT の短縮に伴って明らかに促進された。表 1 には各 HRT 期間に 2 回ずつ測定したスカム形成ポテンシャルの値も示している。Halalsheh ら⁸⁾ が初沈汚泥を処理する CSTR の実験において示したのと同様に、HRT の短縮に従ってスカム形成ポテンシャルが増大する傾向が、本研究の場合にも存在した。特に、最も HRT が短い R2 の HRT 7.5 日において最大値である 8.5 cm を記録した。これは Halalsheh らの実験で記録された最大値と同水準であった。このような傾向は、HRT の短縮に従って、R2 の COD 回収率が低下したことと関係していると思われる。即ち、HRT 10 日および 7.5 日ではスカム形成が促進されたために、R2 槽内への COD の蓄積が起きたというわけである。

Kobayashi ら⁷⁾ が模擬生ごみを原料として R2 と類似の装置で実験を行ったときには、スカムの形成は観察されず、R2 のような COD 回収率の低下は起こらなかった。本実験はその実験とは原料が異なっている。

模擬生ごみは生野菜や果物を中心として構成されており、脂質濃度は低かったが、本研究で使用した食堂残飯の脂質濃度は複数回の測定の結果、12~20 g/L を示し、模擬生ごみの脂質濃度の 2 倍程度高い水準であった。Halalsheh ら⁸⁾ はスカムの形成ポテンシャルは、同じ pH の下では汚泥中の脂質濃度との間に相関関係を持つと述べている。これに従うと、原料中の脂質濃度の違いが、本研究の装置と以前の研究の装置⁷⁾ の間にスカム形成能の差を生じさせたと考えられる。

3.3 槽内の汚泥性状のプロファイル

3.3.1 pH と VFA 濃度

R2 と R3 は槽内が均一ではないので、流出液の分析だけでは反応を十分に把握できない。内部の汚泥性状の分布を知るために、槽側面に取り付けられた合計 9 つのポートから、それぞれ汚泥を採取して分析した。pH と VFA 濃度の分布は図 4 に示す通りである。A と B は R2 のデータ、C と D は R3 のデータである。R3 の HRT 10 日のデータは別々の日に採取したサンプル 2 回、それ以外のデータは 3 回の測定の平均値である。この図から明らかなように、R2 と R3 には大きな違いがある。R2 では全ての HRT の下で全てのポートにおいて pH が 7 以上であった。図には掲載していないが、アルカリ度も全ての HRT、全てのポートで、3,400 mg/L as CaCO₃ 以上であった。よって、R2 の内部は安全な水準が保持されていたといえる。一方 R3 では、HRT 30 日の間は全てのポートで pH が 7 以上を記録したが、HRT 15 日の期間は流入口に近い P1 と P2 のポートにおいて pH が 4 まで低下していた。HRT 7.5 日になると、pH はさらに低下し、P9 以外全てのポートで 7 を下回る結果となった。pH は流入口に近いほど、低下する傾向があった。この時期には R3 はほぼ全体が酸性化し、メタン生成古細菌がほとんど活動できない環境になっていたといえる。

VFA の濃度分布には R2 と R3 の間で特徴的な違いがあった。R2 では VFA は全体的に低水準で濃度の偏りが小さいが、R3 ではそれは全体的に高水準で、流入口付近から流出方向にかけて濃度が減少していく傾向が存在した。R2 では、HRT の短縮に応じて流入口付近でやや濃度が上昇する傾向があるものの、HRT 7.5 日においても約 3,000 mg/L as acetate 以下であった。それに対して、R3 では、HRT 15 日の期間において、P1 の汚泥は 10,000 mg/L as acetate まで濃度が上昇した。HRT 10 日には、全てのポートで 6,000 mg/L as

図4 槽内汚泥のpHとVFAの分布

AとBはR2, CとDはR3のデータ。

acetate 以上の高い濃度で VFA の蓄積が観察された。R3で確認された pH や VFA の濃度分布は、押出流式装置の特徴的な分布である¹⁸⁾。R3では、HRT15日の期間に、流入口付近から酸性化が始まり、次第に全体へ拡大していき、最終的にほぼ全体においてメタン生成菌の生息が困難な環境が形成され、図2に示されたようにR3のメタン生成が停止したと推察される。

以上述べてきたように、R2はHRT30日～7.5日の範囲で槽内全体が望ましいpH、アルカリ度、VFAの水準が確保されており、流入口付近からの酸性化を回避して十分に安全に運転が行われていたことがわかった。

3.3.2 VSとAsh濃度

冒頭で述べたように、固形物沈殿蓄積回避は攪拌の機能の一つである。その機能を評価するため、R2とR3の槽側面のポートから採取したサンプルのVSと

Ash濃度(TSからVSを差し引いたもの)を測定した結果が図5である。AはR2のHRT15日、BはR2のHRT7.5日、CはR3のHRT15日のそれぞれの期間に採取したサンプルの分析結果である。AとCを比較すると明らかなように、同時期においてR2では槽全体に渡ってほぼ均一な低い濃度でVSとAshが分布しているのに対し、R3では、R2と比較して明らかに高いVS、Ash濃度であり、かつポート箇所によって濃度にばらつきがあった。R3においては、一番高い位置にあるポートP5、P6の汚泥のVSが最も低いことと、流入口に近いP1～P4のポートでVS濃度が高いことが明確な傾向として存在している。前者の傾向は攪拌が行われないことによるVS成分の沈殿によって、P5やP6のような槽上部とP3やP7などの槽下部において、明らかな濃度差が生じたことによって引き

図5 槽内汚泥のVSとAshの分布

AとBはR2, CはR3のデータ。AはHRT15日, BはHRT7.5日, CはHRT15日の期間に採取した汚泥。

起こされたと考えられる。後者の傾向は、VFA等と同じく、R3が押出流れであるために生じたと思われる。つまり、流入口付近ではまだ有機物の分解が進行していないためにVS濃度が高く、流出方向に向かうに従って、VS成分がガス化されて除去されるため、低濃度になっていく。反対にR2のVS、Ash濃度が均一であるということは、沈殿が生じず、さらに槽の流入部から流出部にかけての前後の汚泥の混合もよくできていることを示唆していると言ってよい。Ashの成分は生物学的に除去されないため、沈殿が起きると、物理的に取り出さない限り、濃度が上昇していくことになる。図5のAと約130日経過後のデータであるBとを比較すると、AからBの間にAshの濃度は2倍程度まで増加している。AとCと比較からは、明らかにR3よりR2の方がAshの沈殿は抑制されているといえるが、R2でも長い運転期間に徐々に沈殿が進行しているのは確かである。この点では、サイフォン式攪拌は十分な混合ができているとはいえない。

しかしながら、サイフォン式攪拌は安定な運転を継続させるには十分に寄与していると判断できる。R3のようにVSつまり有機物の所在が偏っているときには、局所的に有機物負荷が高まり、酸性化が生じやすい。押出流れ式装置でアルカリ剤の添加が必要になる

場合があるのは、このような理由からである。R2では、R3とは異なり、投入されたVSが広く分散されるため、より酸性化を回避しやすい仕組みになっている。このことが、R3よりも許容負荷を大きく向上させることに寄与していると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 連続実験経過から、サイフォン攪拌式装置は無攪拌装置よりも明らかに高いCOD容積負荷まで安定した運転が可能であることが示された。
- 2) 同じ条件の下で、サイフォン攪拌式装置はCSTRと同等かつ無攪拌装置よりも10%以上高いCOD回収率が得られた。
- 3) 槽内の汚泥性状の分布を分析した結果、サイフォン攪拌装置の内部は無攪拌装置と比較してVFAやVSが均一に分布しており、投入原料が槽全体によく分散されていることを示唆していた。このような仕組みが高負荷での安定した運転に寄与していたと考えられた。

参考文献

- 1) 中国農業部：中国農業統計資料2010, 中国農業出版社,

- 2011.
- 2) 小林拓朗, 徐開欽, 李玉友; 中国農村地域における家庭用バイオガス施設の現況, 用水と廃水, **53**, (9), 707-717, 2011.
 - 3) Stafford, D. A. ; The effects of mixing and volatile fatty acid concentrations on anaerobic digester performance, *Biomass*, **2**, 43-55, 1982.
 - 4) Kalia, A. K., Singh, S. P. ; Effect of Mixing Digested Slurry on the Rate of Biogas Production from Dairy Manure in Batch Fermenter, *Energy Sources*, **23**, (8), 711-715, 2001.
 - 5) Ferguson, J. F., Eis, B. J., Benjamin, M. M. ; Neutralization in anaerobic treatment of an acidic waste, *Water Res.*, **18**, 573-580, 1984.
 - 6) 中国農業部 : 農村家用沼気発酵工艺規程, 中国農業部, 1988.
 - 7) Kobayashi, T., Li, Y.Y. ; Performance and characterization of a newly developed self-agitated anaerobic reactor with biological desulfurization, *Bioresour. Technol.*, **102**, 5580-5588, 2011.
 - 8) Halalshah, M. M., Koppes, J., den Elzen, J., Zeeman, G., Fayyad, M., Lettinga, G. ; Effect of SRT and temperature on biological conversions and the related scum-forming potential, *Water Res.*, **39**, 2475-2482, 2005.
 - 9) Cecchi, F., Traverso, P.G., Cescon, P. ; Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid wastes - digester performance, *Sci. Total Environ.*, **56**, 183-197, 1986.
 - 10) Zhang L., Jahng, D. ; Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements, *Waste Management*, **32**, 1509-1515, 2012.
 - 11) Stroot, P. G., McMahon, K. D., Mackie, R. I., Raskin, L. ; Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions-I. Digester performance, *Water Res.*, **35**, (7), 1804-1816, 2001.
 - 12) McMahon, K. D., Stroot, P. G., Mackie, R. I., Raskin, L. ; Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions-II. Microbial population dynamics, *Water Res.*, **35**, (7), 1817-1827, 2001.
 - 13) Padmasiri, S. I., Zhang, J., Fitch, M., Norddahl, B., Morgenroth, E., Raskin, L. ; Methanogenic population dynamics and performance of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating swine manure under high shear conditions, *Water Res.*, **41**, (1), 134-144, 2007.
 - 14) Hoffmann, R. A., Garcia, M. L., Veskivar, M., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., Angenent, L. T. ; Effect of shear on performance and microbial ecology of continuously stirred anaerobic digesters treating animal manure, *Biotechnol. Bioeng.*, **100**, (1), 38-48, 2008.
 - 15) Karim, K., Klasson, K. T., Hoffmann, R., Drescher, S. R., DePaoli, D. W., Al-Dahhan M. H. ; Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing, *Bioresour. Technol.*, **96**, 1607-1612, 2005.
 - 16) Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T., Al-Dahhan, M. H. ; Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing, *Bioresour. Technol.*, **96**, 1771-1781, 2005.
 - 17) Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T., Al-Dahhan, M. H. ; Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing, *Water Res.*, **39**, 3597-3606, 2005.
 - 18) Krishna, G. V., Kumar, P., Kumar, P. ; Treatment of low strength complex wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR), *Bioresour. Technol.*, **99**, 8193-8200, 2008.

Effects of Automatic Mixing by a Siphon on Anaerobic Digestion: Comparative Experiments Using Reactors with Different Mixing Modes

Ya-Peng WU*, Takuro KOBAYASHI**, Kai-Qin XU**, Yu-You LI*

* Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University,

** Center for Material Cycles and Waste Management Research, National Institute for Environmental Studies

ABSTRACT

A continuous experiment of mesophilic anaerobic digestion of kitchen waste was performed using three types of reactors: (1) an automatic mixing reactor with a siphon (siphon reactor), (2) a completely stirred reactor and (3) an unmixed reactor. Comparisons of performance and digestion characteristics inside the reactors show significant variations, described below. The siphon reactor performed well under a very high COD loading rate, while an increase in the COD loading rate to 10 kg/m³/d triggered a significant volatile fatty acid (VFA) accumulation in the plug flow reactor. Even under a similar COD loading rate, the methane yield of the siphon reactor was at least 10% higher than that of the unmixed reactor. VFA and Organic Solids were distributed uniformly inside the siphon reactor as compared to the unmixed reactor, potentially leading to reduced precipitations and acidification.

Key Words : Siphon mixer, Anaerobic digestion, Acidification, Precipitations