

(3) 水素・メタン二段発酵法による生ごみと紙ごみのバイオガス化特性

片岡 直明^{1*}・菖蒲 昌平²・宮 晶子³・米山 豊¹・渡辺 昭⁴・鈴木 隆幸⁵

¹現 在原環境エンジニアリング株式会社 水・環境開発室 (〒251-8502神奈川県藤沢市本藤沢4-2-1)
前 株式会社荏原製作所 環境事業カンパニー 水・環境開発室 (同上)

²現 在原エンジニアリングサービス株式会社 薬品技術部 (〒299-0267千葉県袖ヶ浦市中袖35)
前 株式会社荏原製作所 技術・研究開発管理室 (〒251-8502神奈川県藤沢市本藤沢4-2-1)

³株式会社荏原製作所 技術・研究開発管理室 (〒251-8502神奈川県藤沢市本藤沢4-2-1)

⁴株式会社荏原製作所 環境事業カンパニー 環境開発室 (〒108-8480東京都港区港南1-6-27)

⁵現 独立行政法人科学技術振興機構 (〒100-0011東京都千代田区内幸町2-2-2)
前 株式会社荏原製作所 環境事業カンパニー 水・環境開発室 (〒108-8480東京都港区港南1-6-27)

* E-mail: kataoka.naoaki@ebara.com

水素・メタン二段発酵によるバイオガス化特性について、模擬生ごみ+トイレットペーパー (VS 51,900mg/L) を用いて高温発酵での室内実験を行った。その結果、メタン発酵液の一部を可溶化・水素発酵槽に返送する方式で、可溶化・水素発酵ではバイオガス発生率0.06L/gVS、水素ガス含有率25-63%、メタン発酵ではメタンガス転換率74% (COD_C基準) が得られた。次に、パイロット規模の水素・メタン二段発酵実験プラントで、食堂残飯+シュレッダー紙 (VS 91,900mg/L) の可溶化・水素発酵の検証実験を行った。原水投入量50L/日、汚泥返送量100L/日、HRT2.1日、55℃の可溶化・水素発酵運転で、pH5.8、バイオガス発生率0.16L/gVS、水素ガス含有率46%、VSS分解率52%が得られた。

Key Words : hydrogen fermentation, methane fermentation, solubilization, two-phase digestion, biogas

1. はじめに

バイオマスは、エネルギー利用過程においてCO₂の発生量を増加させないため、温室効果ガス発生量削減に貢献するエネルギー資源として期待されている。近年、廃棄物系バイオマスを対象とした資源循環型プロセスとして嫌気発酵技術によるエネルギー回収が注目されており¹⁾、生ごみ、食品加工残渣、家畜糞尿、汚泥系を対象とした嫌気性消化の実施設が国内でも多く稼動し始めてきている^{2,3)}。

固形性廃棄物の嫌気性消化反応は、可溶化、酸発酵、メタン発酵工程に分類されるが、可溶化・酸発酵特性に関しては未だ十分な知見が揃っていない状況にない。現状では、可溶化・酸発酵に関して、酸発酵での代謝産物の特性、基質濃度の影響、生成有機酸の蓄積やpHの影響、水素ガスの発生などの研究報告がされている⁴⁻⁶⁾。この可溶化・酸発酵を活用したバイオガス化プロセスは、前

段に酸発酵槽を設けて固形物の可溶化と酸発酵を促進させ、その発酵液を後段でメタン発酵するという二段発酵方式となる。この発酵方式では、固形性廃棄物の嫌気性処理での安定化、高速化が可能であることが報告されている^{9,10)}。

著者らは、固形性廃棄物からのバイオガス回収と高速安定処理を目指して、前段に可溶化・水素発酵槽、後段にメタン発酵槽からなる水素・メタン二段発酵技術を提案し、その処理特性について検討している^{11,12)}。この嫌気性プロセスは、固形物の可溶化並びに水素発酵をメタン発酵の前処理技術として導入し、嫌気性発酵で水素ガスとメタンガスを回収するバイオガス化方法である。

本研究では、生ごみと紙ごみの混合廃棄物からの水素・メタン二段発酵によるバイオガス回収について、室内実験装置とパイロットプラントでの連続実験結果を報告する。今回特に、可溶化・水素発酵プロセスでの処理性能や発酵特性に関して知見が得られたので報告する。

2. 実験装置と実験方法

本研究の水素・メタン二段発酵実験では、室内のラボ実験装置とパイロット規模の実験プラントを用いて連続実験を行った。

(1) 室内実験

a) 実験装置と実験方法

二段発酵の連続実験フローを図-1に示す。実験装置は、前段の可溶化・水素発酵槽、後段のメタン発酵槽で構成され、両発酵槽共に完全混合型である。可溶化・水素発酵装置は総容積5L、有効容積3.0Lに設定したジャーファーメンター（東京理化学器械製MBF-500ME）を用いた。メタン発酵装置は総容積35L、有効容積24L、円筒型の塩化ビニル製発酵装置を用いた。

連続実験は、メタン発酵液の一部を可溶化・水素発酵槽に返送するX系列（汚泥返送比0.35）、返送を行わずに一過式で処理するY系列の2系列で行った。連続運転は全てジャケット式温水加温方式で高温（55-56℃）で行った。原水投入および汚泥返送はチューブポンプを用い、1日2-7回タイマ自動投入で行った。表-1に実験装置の運転条件を示す。

なお、汚泥返送比は下記計算式にしたがった。

$$\text{汚泥返送比} = \frac{\text{メタン発酵液返送量 (L/d)}}{\text{原水投入量 (L/d)} + \text{メタン発酵液返送量 (L/d)}}$$

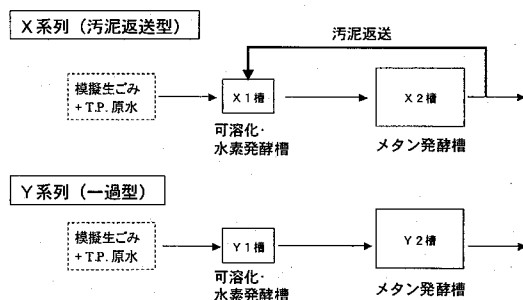


図-1 模擬生ごみ+T.P.の二段発酵実験装置のフロー

b) 模擬生ごみ+トイレトペーパー原水の調整

実験材料は、模擬生ごみ（ニンジン・キャベツ35%、バナナ・リンゴ・グレープフルーツの皮20%、鶏肉10%、魚10%、米飯10%、卵5%、惣菜5%、漬物5%（いずれも湿重量比率）¹³⁾と丸富製紙（株）製トイレトペーパー（以下、T.P.と省略）を用いた。模擬生ごみ：水道水=1:4.5（重量比）で調整後、ブレンダー（ワーリング社LBC-10型）で破碎したスラリー1Lに、乾燥処理したT.P.を25.8g（セルロース当量18.8g）混合してブレンダーで再破碎した。原水性状を表-2の(1)に示す。作成された原水はVSS/VS比0.88、全糖量/VS比0.90であり、固形物比率および糖質系比率の高い原料である。原水の成分構成は、炭水化物77%、タンパク質17%、脂質7%、灰分4%であった。

c) 種汚泥と馴致方法

模擬生ごみ+T.P.原水で高温メタン発酵した汚泥を可溶化・水素発酵の種汚泥とし、原水投入と汚泥返送を行いながら可溶化・水素発酵汚泥を馴致し、二段発酵連続実験を行った。

(2) パイロットプラント実験

a) 実験装置と実験方法

水素・メタン二段発酵実験プラントのフローシートを図-2に示す。本プラントは、前処理工程、可溶化・水素

表-2 原水性状

	(1) 模擬生ごみ+T.P.原水	(2) 食堂残飯+シュレッダー紙原水
TS (mg/L)	54,300	97,600
VS (mg/L)	51,900	91,900
SS (mg/L)	46,600	64,500
VSS (mg/L)	45,500	62,400
COD _{Cr} (mg/L)	75,500	128,000
全糖量 (mg/L)*	46,700	39,600
ケルダール窒素 (mg/L)	1,510	2,520
全脂質 (mg/L)	4,000	23,000
有機酸 (mg/L)	3,810	15,400
pH	4.2	4.0

*グルコース基準

表-1 室内実験装置の運転方法

	可溶化・水素発酵槽				メタン発酵槽		
	原水投入量	汚泥返送量	HRT	VS負荷	発酵液投入量	HRT	VS負荷
	(L/日)	(L/日)	(日)	(gVS/L・日)	(L/日)	(日)	(gVS/L・日)
X系	0.65-1.05	0.35-0.55	1.9-3.0*	12.6-20.3	1.0-1.6	15-24	1.4-2.2
Y系	1.0-1.4	0	2.1-3.0	17.3-24.2	1.0-1.4	17-24	1.6-2.2

*原水投入量と汚泥返送量の総量のHRT

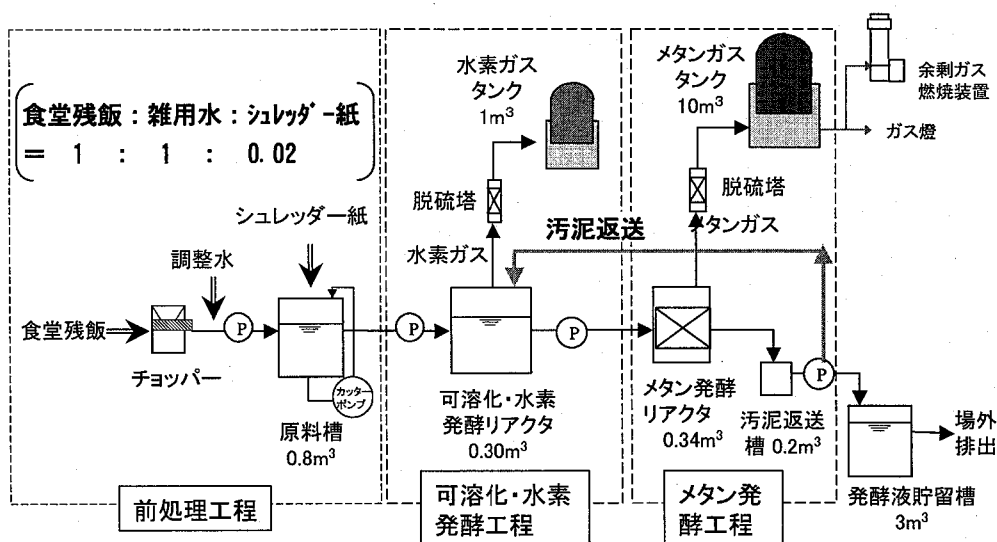


図-2 食堂残飯+紙ごみの水素・メタン二段発酵処理システムのフローシート
(産総研の食堂残飯とシュレッダー紙 50-70kg/d)

表-3 プラント実験装置の可溶化・水素発酵槽の運転条件

	原水投入量 (L/d)	污泥返送量 (L/d)	污泥返送比	アルカリ注入量 (%, to原料VS)	HRT(d)※	VS負荷 (kg/m ³ ・d)
Run A	50	100	0.67	0	2.1	20.2
Run B	45	60	0.57	2.7	2.9	15.3
Run C	70	90	0.56	7.5	1.9	27.9

※原水投入量と污泥返送量の総量のHRT

発酵工程、メタン発酵工程から構成される。プラント実験では、産総研の食堂残飯と紙ごみを定期的に収集して実験原料とした。前処理工程では、産総研の食堂残飯とシュレッダー紙をチョッパーとカッターポンプで粉碎・均質化する。可溶化・水素発酵工程では、完全混合型高温発酵装置を用い(55℃、総容積1.0m³、水位可変式)、固形性有機物を可溶化・水素発酵すると共に水素ガスを回収する。メタン発酵工程では、固定床式高温メタン発酵装置(有効容積340L)を用いてメタンガスを回収する。

本プラントの可溶化・水素発酵プロセスでは、メタン発酵工程から流出液の一部を可溶化・水素発酵槽に返送することを特徴とする。污泥返送によってアルカリ補給ができるため発酵槽へのアルカリ剤投入が不要であり、高温系での可溶化・水素発酵運転を容易にできる。

可溶化・水素発酵装置は55℃、攪拌速度40-70rpm、槽内水位0.30m³で運転した。表-3に可溶化・水素発酵槽の運転条件を示す。本実験では、原料投入量、メタン発酵液返送量、アルカリ液(25%NaOH)注入量を変えながらRun A～Run Cの運転を行った。Run Aではアルカリ液を注入せずにメタン発酵液返送のみで運転した(污泥返送

比0.67)。Run BとRun Cでは污泥返送とアルカリ注入を併用して運転した(污泥返送比0.56-0.57)。また、可溶化・水素発酵液pHをRun AとRun CではpH5.8、Run BではpH5.0付近で運転した。なお、パイロットプラント実験では原料濃度が室内実験よりもVS基準で約1.8倍高濃度になったことを考慮し、室内実験での污泥返送比0.35に対して、パイロット実験では返送比0.67とした。

b) 食堂残飯+シュレッダー紙原水の調整

実験原料として、(独)産業技術総合研究所のつくば中央事業所および西事業所から排出される食堂残飯およびシュレッダー紙を週2～5回定期的に収集した。廃棄物収集車で食堂残飯を実験プラント場まで運搬し、40L角型トレイに移し替えて計量後、冷蔵庫で保管した。1回あたりの搬入量は50～300kg(風袋込み、搬入容器の風袋および残飯中の発酵不適物の割合は搬入量全体の10～20%)。収集した食堂残飯は、分別作業台上で開袋後、ビニール袋、金属破片、プラスチック類、ゴム類、卵の殻、貝殻等の発酵不適物を取り除いた。分別後の食堂残飯について、コンパクトチョッパー(増幸産業株MKBC-42型)で粗破碎後、食堂残飯：雑用水=1：1(重量比)に

濃度調整したスラリーにシュレッダー紙を1% (重量比) 投入し、カッターポンプ (小松ゼノア (株) KD80MS型) で微破碎した。カッターポンプの運転は、1日に2時間の間欠自動運転で行った。

原水性状を表-2の(2)に示す。実験プラント運転で調整された食堂残飯+紙ごみ原水はVSS/VS比0.72であり、固形物比率の高い原料である。原水の成分構成は、炭水化物43%、タンパク質17%、脂質25%、灰分6%であった。

c) 種汚泥と馴致方法

可溶化・水素発酵の種汚泥は、模擬生ごみ+T.P. 原水で高温メタン発酵した汚泥を用いた。可溶化・水素発酵汚泥の馴致は、食堂残飯+シュレッダー紙原水の投入と共に、食堂残飯+シュレッダー紙原水を固定床式高温メタン発酵処理した発酵液の一部を汚泥返送タンク貯留して汚泥返送ポンプで可溶化・水素発酵槽に返送しながら行なった。

(3) 分析方法

TS (Total solids), VS (Volatile solids), SS (Suspended solids), VSS (Volatile suspended solids), BOD, ケルダール窒素, pHの分析は下水試験方法 (1997年版) に準じた。COD_{Cr}分析は米国のStandard Methods 18th Edition (1992年) に準じた。揮発性脂肪酸は高速液体クロマトグラフで分析した (イーアールシーERC-8710, 示差屈折検出器 (RI), 分離カラムShodex RSPak KC-811, カラム温度60℃, 移動相0.1%リン酸)。全糖量はフェノール・硫酸法 (検量線はグルコースで作成) で分析した。脂質はヘキサン/イソプロパノール (5:3) の混合溶媒で抽出し、抽出液を80℃で乾燥後、抽出物質濃度を総脂質算出した。セルロース性物質はエタノール・ベンゼン抽出法で分析した¹⁰。

発生ガス組成はガスクロマトグラフGC-323 (ジーエルサイエンス, 熱伝導度検出器 (TCD)) で分析した。水素ガス/炭酸ガス分析は、分離カラムUnibeads C 60/80, カラム温度45℃, キャリアガスはアルゴンガスで分析し、メタンガス/炭酸ガス分析は分離カラムActive carbon 30/60, カラム温度95℃, キャリヤーガスはヘリウムガスで分析した。

3. 実験結果および考察

(1) 室内実験装置による水素・メタン二段発酵試験

a) 可溶化・水素発酵特性

可溶化・水素発酵槽X1およびY1の連続運転時のガス発生量とpH変化を図-3に示す。メタン発酵液返送型の

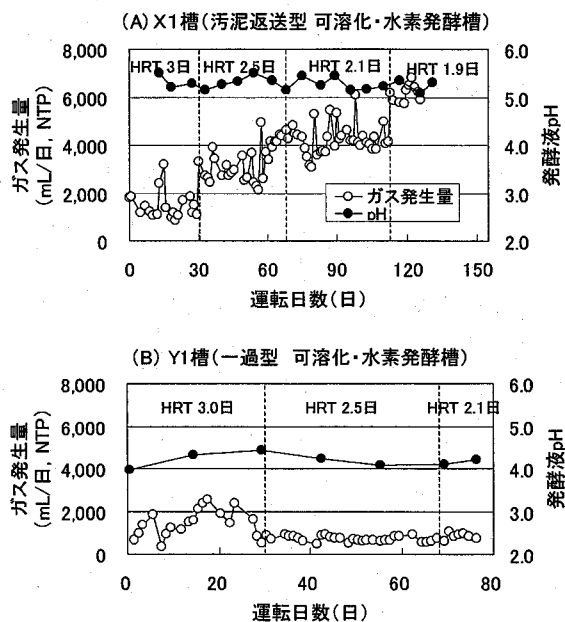


図-3 可溶化・水素発酵槽 X1 と Y1 のガス発生量と pH の経時変化

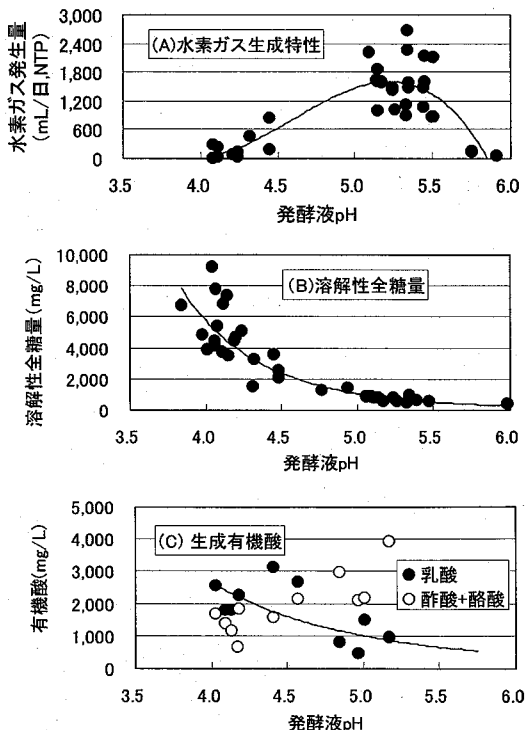


図-4 可溶化・水素発酵槽 X1 と Y1 の発酵特性

X1ではバイオガス生成が認められたのに対して、一過型Y1でのガス発生量は僅かであった。発生ガス組成は、X1では H_2 25~63%、 CO_2 35~72%、 CH_4 0~3.5%、Y1では H_2 2~45%、 CO_2 46~95%、 CH_4 0~2.8%であった。

X1とY1のデータをまとめて、pH、有機酸生成、溶解性全糖量について解析した結果を図-4に示す。X1ではpH5以上の場合に水素生成反応が進行し、それよりも低いpH条件下では水素ガス生成が低下する傾向にあり、水素生成反応にはpH条件が影響すると考えられた(図-4(A))。水素生成が進行したpH5付近では原水中の溶解性全糖量は80%以上が消費されて酢酸と酪酸が生成されたのに対し、pH4付近では溶解性全糖量が残存するとともに、乳酸が蓄積していた(図-4(B)、(C))。一方、Y1では常に乳酸が蓄積した状態であり、pH4~4.5であったことから、Y1では水素生成はほとんど起きなかったと考えられた。可溶性反応に関しては、VSS基準でX1では20%、Y1では5%だった。模擬生ごみ+T.P.原水は、T.P.濃度が2.5%と高く、生ごみ類の濃度が低かったために、X1でのVSS可溶化率は20%と低かったものと思われる。

嫌気性細菌による水素発酵時の微生物代謝に関して、グルコース代謝では代謝産物として酢酸や酪酸を生成する場合には水素生成を伴う(式(1a)および(1b))。一方、乳酸が生成される場合は、ピルビン酸を経由して乳酸が生成され、余剰電子が生じないことから水素発生はないとされている(式(1c))¹⁰⁾。

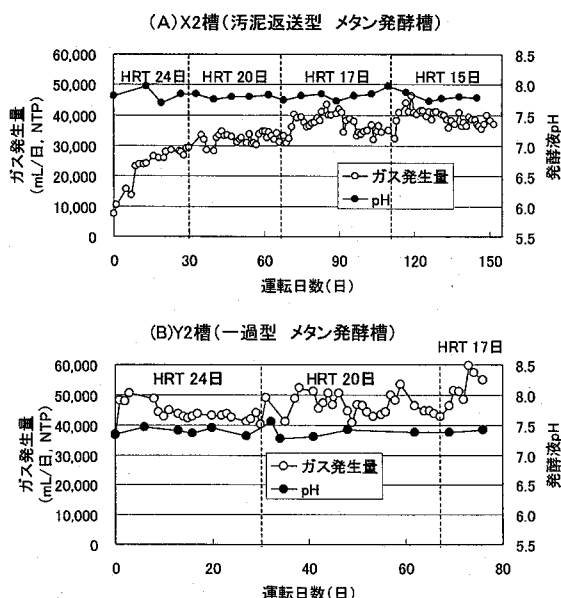
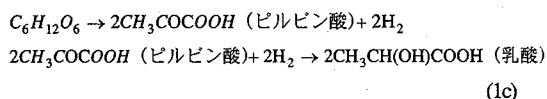
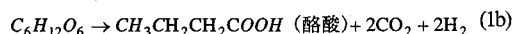


図-5 メタン発酵槽 X2 と Y2 のガス発生量と pH の経時変化

本実験での原水中有機酸の平均濃度は酢酸565mg/L、 n -酪酸73mg/L、乳酸1,720mg/Lであったのに対して、X1で水素生成が認められた場合の発酵液には酢酸1,070~1,210mg/L、 n -酪酸940~3,160mg/Lが生成されたことから、主に n -酪酸生成系の水素発酵が進行したものと推察された。また、X1発酵液中の乳酸は460~1,490mg/Lであったことから、X1では乳酸発酵は進行していないと考えられた。

以上の可溶性・水素発酵実験結果より、水素・メタン二段発酵プロセスにおいては、メタン発酵液の一部を可溶性・水素発酵槽に返送しながら運転する方法が効果的であることがわかった。

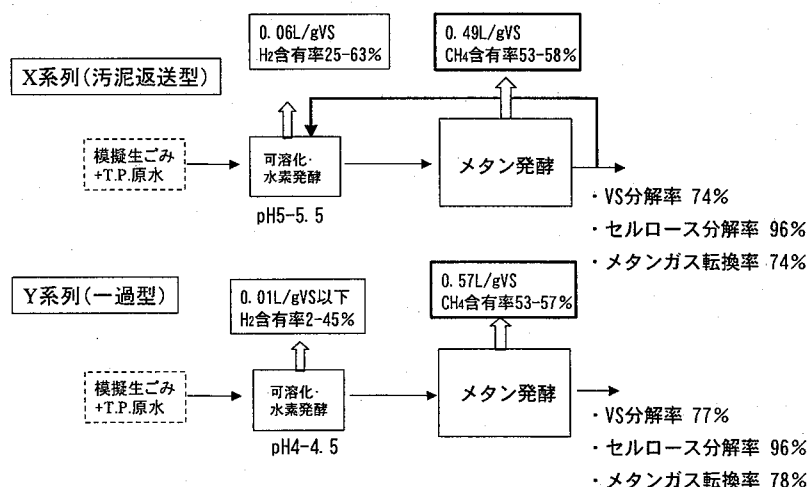


図-6 室内実験装置による二段発酵結果のまとめ

b) メタン発酵特性

メタン発酵槽X2およびY2の連続運転時のガス発生量とpH変化を図-5に示す。X2、Y2発酵槽ともに安定した高温メタン発酵連続運転が可能であった。Y2の高温メタン発酵（HRT20日、セルロース負荷1.2g/L・日）では、全糖量分解率93%、VS分解率77%、COD_{cr}分解率76%、エタノール・ベンゼン抽出法によるセルロース性物質分解率96%であった。

c) 二段発酵の物質収支

室内実験で得られた水素・メタン二段発酵の連続運転データのまとめを図-6に示す。X系列とY系列について、処理が安定した連続運転期間でのCOD_{cr}物質収支解析を行った結果、X系列のメタン発酵槽では有機物の74%がメタンガスに転換され、Y系列では78%がメタンガスに転換された。また、VS分解率はX系列で74%、Y系列で77%、セルロース分解率は両系列とも96%であり、汚泥返送式の二段発酵と一過式メタン発酵とはほぼ同等の有機物分解性能であった。

有機性廃棄物の水素・メタン二段発酵プロセスでは、メタン発酵液の一部を可溶化・水素発酵槽に返送しながら運転することで可溶化・水素発酵槽でのpH保持と嫌気発酵促進が可能となり、前段で水素ガス回収、後段でメタンガス回収を安定に行えることがわかった。

(2) パイロットプラント実験による可溶化・水素発酵の検証

パイロット実験では原料濃度が室内実験よりもVS基準で約1.8倍高濃度であったことから、室内実験での汚泥返送比0.35を根拠に、汚泥返送比0.67でのメタン発酵液返送のみによる可溶化・水素発酵性能を調べた（Run A）。次に、可溶化・水素発酵液pH5.0付近での可溶化・水素発酵性能を調べ（汚泥返送+アルカリ注入併用で制御、Run B）、その後、汚泥返送とアルカリ注入を併用した高負荷運転時の処理性能を調べた（pH5.8、Run C）。

a) バイオガス生成とpH変化

図-7にRun A～Run Cの連続運転時のガス発生率、ガス組成、槽内pH変化を示す。Run Aの運転ではpH5.7-6.1、ガス発生率0.1-0.18L/gVS、Run BではpH4.9-5.5、ガス発生率0.12-0.26L/gVS、Run CではpH5.5-5.9、ガス発生率0.18-0.29L/gVSであった。バイオガス組成は水素ガス濃度40-54%、メタンガス濃度は0.1%以下だった。

可溶化・水素発酵運転時の水素生成特性、有機物分解特性を表4に示す。Run AとRun Cを比較すると、Run Cでは水素生成率は高かったがVSS分解率と生成有機酸比率は低かった。全糖分解率については92%以上でほぼ同等だった。一方、Run Bでは水素生成率、有機物分解率共にRun A、Run Cよりも低く、可溶化・水素発酵反応が

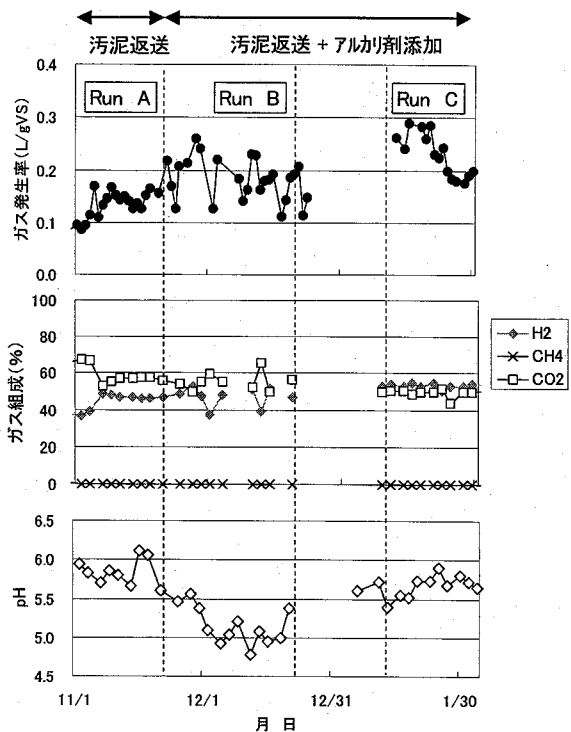


図-7 実験プラントの可溶化・水素発酵運転結果 (RunA, RunB, RunC)

表-4 実験プラントの可溶化・水素発酵性能の比較

	Run A 汚泥返送	Run B 汚泥返送+アルカリ注入	Run C 汚泥返送+アルカリ注入
pH	5.8	5.0	5.8
バイオガス発生率 (L/gVS)	0.16	0.20	0.26
水素ガス比率 (%)	46	48	53
全糖分解率 (%)	94	70	92
VSS分解率 (%)	53	37	33
有機酸比率 (総有機酸/VS)	0.33	0.17	0.24

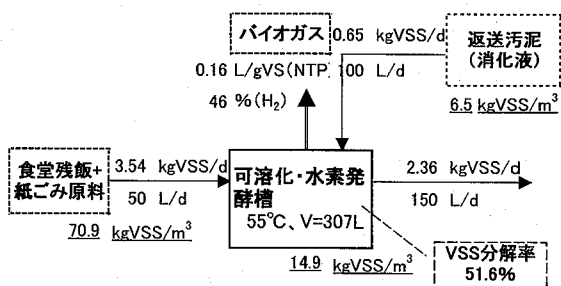
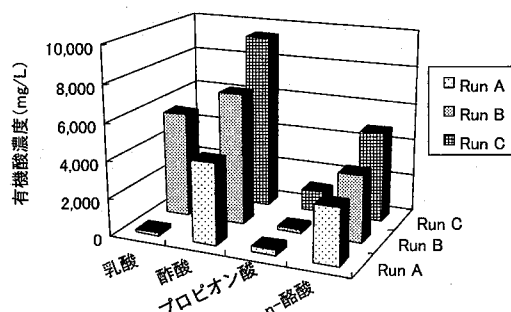


図-8 実験プラントの可溶化・水素発酵運転 RunA における VSS 分解収支



	乳酸	酢酸	プロピオン酸	n-酪酸
Run A	171	4,360	329	3,000
Run B	5,660	7,000	195	3,540
Run C	474	9,390	1,150	4,830

単位: mg/L

図9 実験プラントの可溶化・水素発酵における生成有機酸

十分進行しなかったと言える。

b) 可溶化・水素発酵性能

汚泥返送法によるRun Aの可溶化・水素発酵性能を解析した結果、pH5.8、バイオガス発生率0.16L/gVS、水素ガス含有率46%、VSS分解率52%であった。汚泥返送+アルカリ注入併用法によるRun Bでは、pH5.0、バイオガス発生率0.20L/gVS、水素ガス含有率48%、VSS分解率37%、Run CではpH5.8、バイオガス発生率0.26L/gVS、水素ガス含有率53%、VSS分解率33%であった(表4、図-8)。これらの結果より、pH5.0-5.8の可溶化・水素発酵条件下では水素ガス生成を主体とするバイオガス化が進行することがわかった。一方、固形物の可溶化反応については、運転条件によってVSS分解性能が異なることがわかった。

c) 生成有機酸濃度の影響

可溶化・水素発酵運転Run CでVSS分解率と生成有機酸比率が低かった原因を考察した。図9に主な生成有機酸を示す。Run Cの酢酸濃度はRun Aの2倍以上だった。発酵槽内の総有機酸濃度も、Run Aは8,017mg/L、Run BとRun Cでは16,600mg/Lであり、汚泥返送+アルカリ液注入で運転した方が約2倍高い有機酸濃度となった。これは、アルカリ液注入の場合は生成有機酸の希釈率が低くなるため、有機酸が高濃度で蓄積して発酵阻害が生じたものと推察される。なお、返送汚泥性状は、Run Aでは、TS 15,000mg/L、VS 9,800mg/L、酢酸1,100mg/L、pH8.4、Run Bでは、TS 11,000mg/L、VS 10,900mg/L、酢酸3,270mg/L、pH8.1、Run CではTS 33,000mg/L、VS 25,800mg/L、酢酸3,400mg/L、pH7.8だった。

中温の嫌気性水素発酵では、遊離酸濃度200mg/L以上で水素発酵への強い影響が見られ、ガス発生ポテンシャルが低下することが報告されている⁷⁾。本実験のRun Aでは遊離酸濃度330mg/L、Run Cでは730mg/Lと推定されることから、Run Cにおいて遊離酸による発酵阻害が生じ

ていたものと推察される。すなわち、Run CでのVSS分解率低下と生成有機酸比率の低下の影響因子の1つとして、遊離酸による発酵阻害が大きく関係していると考えられた。

4. 結論

- (1) 模擬生ごみ+TP.原水の水素・メタン二段発酵室内実験では、メタン発酵液の一部を可溶化・水素発酵槽に返送する方式で、可溶化・水素発酵ではバイオガス発生率0.06L/gVS、メタン発酵ではバイオガス発生率0.49L/gVS、メタンガス転換率74% (COD_G基準) が得られた。
- (2) 食堂残飯とシュレッダー紙の可溶化・水素発酵パイロットプラント実験において、メタン発酵液の返送法、返送法+アルカリ液注入による併用法で性能特性を調べた。汚泥返送法のみによるRun Aの運転で、pH5.8、バイオガス発生率0.16L/gVS、水素ガス含有率46%、VSS分解率52%が得られた。
- (3) 汚泥返送+アルカリ液注入法によるRun Cの運転では、pH5.8、バイオガス発生率0.26L/gVS、VSS分解率33%で、VSS分解率がRun Aよりも低かった。この原因の1つとして、アルカリ液併用の場合は生成有機酸の希釈率が低くなり、遊離酸による発酵阻害が生じたものと推察された。
- (4) 汚泥返送方式による水素・メタン二段発酵法の運転では、前段の可溶化・水素発酵プロセスをpH5以上で保持することでバイオガスを回収でき、また、VSS分解促進には発酵槽内有機酸濃度が重要ポイントであることがわかった。二段発酵法における固形物の高負荷処理と回収バイオガスの効率的利用が普及に向けての検討課題である。

謝辞：本研究は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発/有機性廃棄物の高効率水素・メタン醗酵を中心とした二段醗酵技術研究開発」で実施したものである。プラント実験では、(独)産業技術総合研究所つくば西事業所の関係者各位、鹿島建設㈱、㈱西原環境テクノロジー、(財)バイオインダストリー協会の研究員、並びに㈱丸菱バイオエンジの運転員の皆様に多大な協力をいただきました。また、室内実験の水質・汚泥分析では川辺通子氏、加藤裕子氏に協力を得ました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Angelidaki I., Ellegaard L. and Ahring B.K.: Applications of the anaerobic digestion process, pp.1-33. In B.K.Ahring (ed.), Biomethanation II, Vol.82. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2003.

- 2) 米山豊, 竹野勝彦, 清水紀久夫, 内藤龍雄, 板垣文夫, 安原義光, 中田六雄: し尿汚泥と生ごみを対象としたメタン発酵実施施設の処理特性, 廃棄物学会論文誌, Vol. 15, No.3, pp. 155-164, 2004.
- 3) 築井良治, 片岡直明, 米山豊, 竹野勝彦: コーヒー, 茶の抽出残渣のメタン発酵技術 粉碎処理で固形物分解率を向上, 都市と廃棄物, Vol. 35, No.10, pp. 37-40, 2005.
- 4) 片岡直明, 宮晶子, 桐山光市: 微生物による水素生産システムに関する研究, エバラ時報, No.183, pp. 38-45, 1999.
- 5) 片岡直明, 鈴木隆幸, 鈴木芳郎, 石田健一, 山田紀夫, 本多勝男: 家畜糞尿のメタン発酵処理システムの実証試験, 環境工学論文集, Vol.36, pp. 443-453, 1999.
- 6) 河野孝志, 和田克士, 李玉友, 野池達也: 複合基質からの嫌気性水素発酵に及ぼす基質濃度と pH の影響, 水環境学会誌, Vol. 27, No.7, pp. 473-479, 2004.
- 7) 和田克二, 矢田健一, 李玉友, 野池達也: 嫌気性水素発酵に及ぼす有機酸濃度の影響, 第 42 回下水道研究発表会講演集, pp.187-189, 2005.
- 8) 片岡直明, ハオリンユン, 宮晶子, 石田健一, 山田紀夫, 鈴木隆幸: 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, No.212, pp. 3-9, 2006.
- 9) 李玉友, 水野修, 船石圭介, 山下耕治: 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, 環境工学論文集, Vol.40, pp. 321-331, 2003.
- 10) 大羽美香, 李玉友, 野池達也: 二相循環プロセスによるジャガイモ加工廃棄物の無希釈水素・メタン発酵の特性, 水環境学会誌, Vol. 28, No.10, pp. 629-636, 2005.
- 11) 片岡直明, 菖蒲昌平, 宮晶子, 石田健一, 鈴木隆幸: セルロース系廃棄物の水素・メタン二段発酵に関する研究, 第 15 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 518-520, 2004.
- 12) 片岡直明, 菖蒲昌平, 宮晶子: 有機性廃棄物の水素・メタン二段発酵技術の開発ー可溶化・水素発酵特性についてー, 第 42 回下水道研究発表会講演集, pp.196-189, 2005.
- 13) 片岡直明, チュウシュン HOW, 宮晶子, 鈴木隆幸: 生ごみの中温及び高温メタン発酵における生ごみ組成の影響と動力学的解析, エバラ時報, No.191, pp. 33-42, 2001.
- 14) 岩堀恵祐, 本多俊一, 佐野裕美, 宮田直幸: 生下水・汚泥からのセルロース定量に関する実験的検討, 下水道協会誌, Vol. 37, No.451, pp. 121-128, 2000.
- 15) 菱田泰治: 嫌気性消化と水素発酵, pp. 147-164. 日本農芸化学会編集, バイオマスー生物資源の高度利用ー, 朝倉書店, 1988.

(2006. 5.26 受付)

Biogasification of Garbage and Waste-paper by Hydrogen-methane Two-stage Fermentation System

Naoaki KATAOKA¹, Shohei AYAME², Akiko MIYA³, Yutaka YONEYAMA¹,
Akira WATANABE⁴ and Takayuki SUZUKI⁵

¹Water Environmental Technology Development Office, EBARA Environmental Engineering Corporation

²Chemical Sales Planning Office, Ebara Engineering Service Corporation

³Technologies, Research & Development Division, Ebara Corporation

⁴Environmental Technology Development Office, Ebara Corporation

⁵Japan Science and Technology Agency

Bench-scale continuous digestion experiments were conducted with a thermophilic hydrogen-methane fermentation system, composed of a solubilization/hydrogen fermentation reactor and a methane fermentation reactor, using simulated garbage + toilet-paper as raw material. For promoting digestion in the solubilization/hydrogen fermentation reactor, part of the methane fermentation slurry was returned to the solubilization/hydrogen reactor to facilitate pH maintenance and microorganism enrichment. The solubilization and hydrogen fermentation reactor exhibited a biogas production rate of 0.06L/gVS. The hydrogen gas content of the biogas was 25-63%. The methane fermentation reactor exhibited COD_{Cr} removal rate of 74%. A semi-pilot scale plant for treating food leftovers and waste paper by hydrogen-methane two-stage fermentation was tested. Pre-treated strong slurry (VS 91,900mg/L) was solubilized and digested under thermophilic hydrogen fermentation conditions of HRT of 2.1 d and recirculation ratio of 0.67. VSS removal rate at pH5.8 was found to be 52%, biogas production rate to be 0.16L/gVS.