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

大羽 美 香*

李 玉 友*

野 池 達 也*

Characteristics of Hydrogen and Methane Fermentation of Potato Processing Waste by Two-Phase Circulating Process without Dilution Water

Mika OHBA*, Yu-You LI* and Tatsuya NOIKE*

* Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, 06 Aoba, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

Abstract

A new type of two-phase process for producing hydrogen and methane from food waste was investigated using potato processing waste in this study. In this process a mixing tank, a thermophilic acidogenic reactor(55°C) and a mesophilic methanogenic reactor(36°C) were used in series. The methane-fermentation-mixed liquor was returned to the mixing tank for the dilution of influent food waste. A continuous experiment was conducted by changing the whole process hydraulic retention time (HRT) stepwise from 56 days to 30 days, then 20 days and 15 days. The process was successfully performed for over 290 days until the HRT was reduced to 15 days. A stable and high hydrogen production yield of 1.67 mol H₂·mol⁻¹ degraded hexose with a VFA concentration of 10000 to 25000 mgHAc·l⁻¹ was obtained in the thermophilic acidogenic reactor, while a high efficiency of methane fermentation was achieved in the mesophilic methanogenic reactor. As a result, the high VS removal (92%) and total COD_{Cr} removal (85-90%) were achieved by the new process at HRTs of 20 to 56 days. The suggested new process was not only possible for the dilution-free treatment of potato processing waste, but also useful for continuous hydrogen fermentation at a high rate.

Key words: two-phase process, potato waste, hydrogen fermentation, methane fermentation

1. はじめに

近年、循環型社会の構築が推進されている中、廃棄物の発生抑制、減量化、リサイクル処理が注目されている。食品廃棄物に関しては、年間発生量が約2000万tであり、その処理処分は、約91%が焼却・埋立て処分され、肥料や飼料等として再利用されている割合は9%しかない。その再利用の内訳は肥料化(3%)、飼料化(5%)およびその他(1%)となっている。その中、食品リサイクル法およびバイオマス・ニッポン総合戦略等の推進により、食品廃棄物を含むバイオマスの有効利用が持続可能な環境保全技術として求められている¹⁾。水分含有量が多い、嵩張る等の扱いづらいという特性を持つ食品廃棄物の減量化・再資源化のためにメタン発酵による生物分解とエネルギー回収が有用な技術として注目されている^{2,3)}。

食品廃棄物などの高濃度有機性廃棄物をメタン発酵プロセスで処理する場合、酸生成細菌とメタン生成細菌のそれぞれの最適生育条件が異なり、VFAの蓄積、高濃度アンモニアによるメタン生成阻害など多くの問題が残されている。このような問題に対して、二相循環式メタン発酵プロセスは、二相に分離することにより最適な嫌気性分解が

可能となる。酸発酵槽とメタン発酵槽の二相に分離したシステムは様々な研究がなされており^{4)~7)}、酸生成相の代謝特性に関する研究も行われている^{8)~10)}。また、酸生成相の制御条件によっては水素が生成する現象も観察される¹¹⁾。水素は、次世代のクリーンエネルギーとして有望視されているので、バイオマスからの高効率な水素生産を目指した水素発酵の研究も進められてきている¹²⁾。水素発酵に関して、これまで、グルコース、セルロースおよびデンプンなどの単一基質を用いた研究、単一の純粋培養細菌を用いた研究といった基礎的な研究^{13)~16)}が多く報告されてきた。また、実用化に向けて単一基質と混合微生物系(マイクロフロー)を組み合わせた研究^{17,18)}、さらには実排水・実廃棄物を用いた報告もある^{19)~22)}。しかし、水素は嫌気性代謝の中間代謝産物だけでなく、その生成にも多くの競合経路があるため、水素を安定的に生成する実用的プロセスはまだ確立されていない。

水素生成には有機酸生成が伴うことから、水素発酵の後段にメタン発酵を設置することで、有機酸をメタンに変換することは廃棄物処理やエネルギー回収のいずれの観点からも有益である。酸発酵槽を水素発酵槽としてとらえた

* 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06

水素・メタン二相式プロセスの研究は最近になって始まったばかりである^{23,24)}。また、高濃度の有機性廃棄物を湿式発酵で行う際、濃度調整のため水による希釈を必要とするが、メタン発酵廃液の一部を循環させることにより新たに水道水を添加するといった希釈を必要としない、無希釈運転が可能であるという報告がある^{25)~27)}。

本研究では、高温酸発酵槽と中温メタン発酵槽からなる二相循環式高濃度水素・メタン発酵システムを提案し、食品加工廃棄物（ジャガイモ）を処理対象とした連続実験を行い、異なるHRT条件での水素発酵特性およびメタン発酵特性を明らかにした。

2. 方法

2.1 実験材料

反応槽はFig. 1に示すとおり、二相循環式水素メタン発酵システムを採用した。基質はフードプロセッサーで微破碎し、ペースト化したジャガイモ（Po）を用いた。ジャガイモペーストの性状はTable 1に示す。混合タンク（MT）ではジャガイモペーストとメタン発酵廃液を重量比で1:1の割合により混合した。この混合物を高温酸発酵槽（TAR；有効容量3 l）に投入し、可溶化、水素生成および酸発酵を行った。次に高温酸発酵液を中温メタン発酵槽（MMR；有効容積1.2 l）に投入し、メタン発酵を行った。温度はウォータージャケットにより混合槽を4℃、高温酸発酵槽を55℃、および中温メタン発酵槽を36℃にそれぞれ維持した。各反応槽の攪拌は混合槽および高温酸発酵槽ではモーターに攪拌翼を付けた機械攪拌方式とし、中温メタン発酵槽は生成したバイオガスをガス循環ポンプ（Iwaki Air Pump, APN-085型）により循環させるガス攪拌方式とした。生成したバイオガスはガスメーターにより計測した。各発酵槽への基質の投入および中温メタン発酵廃液の貯留槽への排出はHRTに応じて1日に4~24回、タイマー制御をしたローラーポンプ（古江サイエンス、型式RP-LV2）で行った。

実験条件はTable 2に示す。プロセス全体のHRTを56日（RUN1）、30日（RUN2）、20日（RUN3）および15日（RUN4）と段階的に変化させて（高温酸発酵槽のHRTで5.6~1.5日、中温メタン発酵槽のHRTで22.4~6日）それぞれ、47日間、92日間、126日間および9日間（酸敗のため、長く運転できなかった）の連続運転を行った。酸発酵を高温で行うことにより、固形物の加水分解の向上および病原性微生物の不活性化を図った。またメタン発酵を中温で行うことにより、安定したメタン発酵を可能とし、アンモニア阻害の低減を考慮した。本研究においては、水道水による希釈およびpH制御のための薬注を行わなかった。さらに、生ごみなどの高濃度有機性廃棄物では栄養塩（Fe、Co、Ni等）の不足が考えられ栄養塩の添加が必要であるという報告^{28,29)}があるが、本研究においてはそれらの添加も行わずに、メタン発酵の連続運転を行った。高温酸発酵槽の種汚泥は生ごみと尿汚泥の混合物を処理した高温メタン発酵槽より採取したものをを用いた。中温メタン発酵槽の種汚泥は、生ごみの中温高濃度メタン発酵槽より採取したものをを用いた。

2.2 実験方法

pH、TS、VS、SS、VSSおよびアルカリ度の測定は下水道試験法に従って行った。COD_{Cr}は米国のStandard Methodsにより測定した。有機酸（VFA、NVFA）濃度およびNH₄-N

Table 1 Characteristics of the potato used in this study

pH	5.73
TS (g·l ⁻¹)	174
VS (g·l ⁻¹)	164
T-carbohydrates (g·l ⁻¹)	157
T-proteins (g·l ⁻¹)	16.8
T-COD _{Cr} (g·l ⁻¹)	181

Fig.1 Schematic diagram of the two-phase circulating methane fermentation process

Table 2 Experimental conditions of this study

		RUN1	RUN2	RUN3	RUN4
Total	HRT	56days	30days	20days	15days
	COD _{Cr} loading rate	3.4 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹	7.2 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹	10.9 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹	12.4 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹
TAR	HRT	5.6days	3days	2days	1.5days
	COD _{Cr} loading rate	16.8 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹	35 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹	54.7 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹	62.0 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹
	temperature	55℃			
MMR	HRT	22.4days	12days	8days	6days
	COD _{Cr} loading rate	4.0 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹	8.1 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹	11.5 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹	14.6 g·L ⁻¹ ·d ⁻¹
	temperature	36℃			

TAR=Thermophilic acidogenic reactor

MMR=Mesophilic methanogenic reactor

濃度はキャピラリー電気泳動装置（Photol, CAPI-3200, キャピラリーカラム（ID75 μm×805mm）、25℃、220nm インダイレクトUV検出器）を用いて測定した。炭水化物はフェノール硫酸法、タンパク質はローリー法によりそれぞれ分析を行った。ガス生成量は湿式ガスメーターにより計量した。水素ガスの割合はTCD-ガスクロマトグラフ ShimadzuGC-8A（2.0mステンレスカラム、UnibedC充填、試料注入部温度100℃、カラム温度70℃、検出器温度100℃、窒素キャリアガス50ml·min⁻¹）により測定した。また、メタンと二酸化炭素は別のTCD-ガスクロマトグラフ

Fig.2 Time course of pH, biogas production rate, gas composition, VFA and Lactate in thermophilic acidogenic reactor

ShimadzuGC-8A (2.0mステンレスカラム, PorapakT充填, 試料注入部温度140℃, カラム温度70℃, 検出器温度100℃, ヘリウムキャリアガス30ml·min⁻¹) により測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 高温酸発酵槽の運転特性

3.1.1 ガス生成量および発酵代謝産物

高温酸発酵槽のpH, バイオガス生成速度, ガス組成, VFA濃度および乳酸濃度の経日変化をFig.2に示す。高温酸発酵槽のpHは実験開始時では8.0付近であったが、スター

トアップに伴い徐々に低下し, 各RUNの定常運転期間中はpH5.0~5.5で安定した。RUN1, RUN2, およびRUN3のバイオガス生成速度はそれぞれ, 2.3 l·l⁻¹·d⁻¹, 3.9 l·l⁻¹·d⁻¹, および8.0 l·l⁻¹·d⁻¹であり, HRTの短縮に伴いバイオガス生成速度は増加した。しかし, RUN 4 では後続のメタン発酵槽が過負荷となったため, その循環液の影響を受け, 酸発酵槽でのバイオガス生成も変調した。ガス組成は, スタートアップ時には種汚泥の影響により, メタンガスが生成されていたが, 次第に検出されなくなり, 代わって水素ガスの生成がみられた。その水素ガス組成は運転期間を通して

45%前後で安定していた。特にRUN3では120日間の長期運転において安定した水素生成が示され、除去ヘキソースあたりの水素収率は $1.67\text{mol H}_2 \cdot \text{mol}^{-1} \text{hexose}$ (COD等量の水素は $4.87\text{gCOD} \cdot \text{l}^{-1}$)であった。本研究の高温酸発酵槽の滞留時間 (HRT) は 5.6~1.5日の範囲にあった。これは従来研究されてきた水素発酵に適したHRT (6~12h程度)と比較してかなり長い。長いHRT条件では水素資化性メタン生成細菌および硫酸還元細菌の増殖により生成された水素は殆ど消費されてしまうという報告^{30,31)}がある。しかし、本研究において、HRTが長かったにも関わらず、メタンガスは検出されず、硫化水素も微量であった (0.5ppm以下)。本システムが廃液循環型であり、酸発酵槽が高温 (55°C) で運転したこと、pHが5.0~5.5の範囲に制御できたことからメタン生成細菌の増殖が抑制されたと考えられる。また、基質であるジャガイモ中に硫酸塩が殆ど含まれていないことから硫酸還元菌の増殖も起こらず、硫化水素の生成もなかった。従って、本実験系では酸生成槽において、水素資化性メタン生成細菌と硫酸還元細菌の影響が無かったと考えられる。結果として連続運転で安定した水素生成が可能であった。

Fig.2に示すように高温酸発酵槽のT-VFA濃度は $10,000 \sim 25,000\text{mgHAc} \cdot \text{l}^{-1}$ であり、多少のばらつきはみられたが、酸発酵が行われた。酸発酵の特徴として、プロピオン酸は低濃度であって主要代謝産物は酢酸、酪酸およびカプロン酸であってプロピオン酸は低濃度であった。

乳酸の濃度は数百~ $10,000\text{mgHAc} \cdot \text{l}^{-1}$ と大きな変動があった。また、酢酸や酪酸を主とするVFA濃度が増加すると乳酸は低下し、逆にVFA濃度が低下すると乳酸は増加するといった傾向にあった。水素ガス生成が安定していたRUN3では乳酸濃度が比較的に低く、 $2000\text{mgHAc} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であった。乳酸生成は、メタン発酵においては必ずしも阻害要因ではないが、有機性廃棄物の水素発酵においては阻害要因になり得るという報告³²⁾がある。これは、水素生成細菌と乳酸菌との間に基質競争が生じること、および乳酸菌が生成するバクテリオシンにより水素生成細菌の生育を阻害すること等が考えられる。高島ら³³⁾は乳酸菌の水素発酵阻害におけるpH依存性を検討している。乳酸菌による水素発酵阻害は低pH下ほど顕著であり、pH4.5では水素生成がみられない結果を得たが、pHを高くすることにより、乳酸菌による水素発酵阻害を抑制できることを明らかにしている。河野ら²¹⁾が行った混合培養系の研究によると、pH4.0~5.5の低い範囲では乳酸が多く生成し、水素ガス生成量が減少したと報告した。また、TS濃度が高い場合にpHをあげるにより乳酸生成を抑えるという知見も示した。このように、TS濃度が高い場合の低pH下において水素生成が低下する報告があるが、本研究の高温酸発酵槽では、RUN3(高温酸発酵槽のHRT2日)においてpH5.2程度の低pHであっても乳酸濃度が低濃度に抑えられ、高濃度有機性廃棄物からの連続的な水素生成が可能であった。

3.1.2 高温酸発酵槽における加水分解率、酸生成率およびガス転換率

高温酸発酵槽における反応状況を把握するために、加水分解率、酸生成率および水素ガス転換率を沈ら⁹⁾と李ら³⁴⁾の方法に従いCODベースで算出した。それぞれの転換率は流入全CODに対する溶解性COD、有機酸COD、および水素ガスCODとした。その計算結果はFig.3に示す。ここで

Fig.3 Effect of HRT on the COD conversion ratio of hydrolysis, acidogenesis and hydrogen in thermophilic acidogenic reactor

のHRTは高温酸発酵槽でのHRTを示した。HRT2日~HRT5.6日における加水分解率は40%程度であり、酸生成率は15%~18%であった。最も水素生成が安定していたHRT2日での水素ガス転換率は5.3%であった。また、水素生成が低下したHRT1.5日における酸生成率はHRT2日~HRT5.6日と比較して高い値 (26.4%) を示した。その原因は後続のメタン発酵槽は過負荷により有機酸が蓄積傾向となり、その循環液中の有機酸濃度も上昇したことによる影響である。

3.2 中温メタン発酵槽の特性

3.2.1 ガス生成量および発酵代謝産物

中温メタン発酵槽のpH、アルカリ度、バイオガス生成速度およびガス組成の経日変化をFig.4に示す。図から分かるように290日間の連続運転において、中温メタン発酵槽ではRUN1~RUN3でそれぞれ安定したバイオガス生成を示し、メタンガス組成は57%~58%で安定し、pHは7.4~7.8で安定していた。しかし、RUN4においては次第にガス生成量が減少し、pHが6.5にまで低下し酸敗状態となった。すなわち、本研究の実験条件においてRUN3までは安定運転ができたものの、RUN4では過負荷となったと考える。RUN4では定常データを取らなかったため、以下の考察では、RUN4のデータはあくまで参考として示す。

Table3にメタン発酵における主な有機酸濃度を示す。RUN1~RUN3の条件において主要なVFAは酢酸であった。しかし、プロピオン酸がRUN4においてRUN1~RUN3と比較すると蓄積傾向にあった。また、RUN4の乳酸濃度もRUN1~RUN3と比較すると増加傾向にあった。

Fig.5は中温メタン発酵槽でのCOD負荷に対するバイオガス生成量およびpHを示した。COD負荷が $11.5\text{g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ まではバイオガスは負荷の増大とともに増加する傾向にあった。しかし、負荷を $14.6\text{g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ に上げるとバイオガスおよびpHは低下し、定常状態を示すことなく負荷変更後9日でpH5.27まで低下し酸敗状態となった。これより、本プロセスで栄養塩等の添加なしでジャガイモ加工廃棄物を処理可能なCOD負荷は $11.5\text{g} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ であることがわかった。

Fig.6に投入COD当たりのガス生成量を示す。中温メタン発酵槽のHRT8日~HRT22.4日の値は $0.26 \sim 0.30\text{l} \cdot$

Fig.4 Time course of pH, alkalinity, biogas production rate and gas composition in mesophilic methanogenic reactor

g^{-1}COD で安定したメタンガス生成を示した。メタンのCOD換算について、1molのメタン (0℃, 1気圧, 22.4l) を酸化するために2molの酸素が必要となり、0.35l (22.4l/64g) のメタンは除去COD1gに相当する。この換算関係で評価すると、安定したメタン発酵が行われた条件 (HRT8日～HRT22.4日) でのメタン生成量はメタン発酵槽へ投入したCODの74%～86% (0.26/0.35～0.3/0.35) に相当することになる。

3.2.2 加水分解率、酸生成率およびガス転換率

複雑な有機性廃棄物を嫌気性処理によりメタンガスへ転換する過程は、加水分解段階、酸生成段階、酢酸・水素生成段階およびメタンの生成段階といった複雑な反応で構成されている³⁵⁾。各段階の反応状況を把握するために、加水分解率、酸生成率およびメタンガス転換率を沈ら⁸⁾と李ら³⁴⁾の方法に従いCODベースで算出した。それぞれの転換率は流入全CODに対する溶解性COD, 有機酸COD, およびメタンガスCODとした。その結果はFig.7に示すとおりである。ここでのHRTは中温メタン発酵槽でのHRTを示

Table3 Organic acid concentration in mesophilic methanogenic reactor at each experimental condition

Organic acid ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4
Acetate	821	109	1350	1520
Propionate	0	69.8	177	1160
Butyrate	185	30.1	166	602
Valerate	0	27.9	0	0
Caproate	0	0	7.2	0
Lactate	532	235	1000	2640

した。

HRT8日～HRT22.4日における加水分解率は、73%～80%であった。酸生成率は68%～78%, およびガス転換率は68%～78%であった。これらのことより、HRT8日～HRT22.4日において酸生成に転換されたもののほとんどがメタンガスに転換できたことが確認できた。二相循環プロセスによるジャガイモ加工廃棄物のメタン発酵はHRT8日までのHRT短縮において安定した処理の実現が可能であることを示した。

Fig.5 Effect of COD_{Cr} loading rate on the biogas production and pH in mesophilic methanogenic reactor

Fig.6 Effect of HRT on the biogas production in mesophilic methanogenic reactor

3.3 システム全体の解析

3.3.1 物質収支

高濃度メタン発酵では、加水分解とバイオガスの生成による混合液の水分と重量の減量は無視できない^{25)~27)}。本研究では定常状態の水素・メタン発酵による混合液の減量分を把握した。HRT20日、HRT30日およびHRT56日の発酵液はもとの投入物のそれぞれ、86.5%、86.5%および87.8%であった。従って、プロセス全体の分解率計算は水処理系のように濃度差だけで求めるのではなく、重量変化と濃度変化を総合的に考慮した物質収支に基づき行う必要がある。本研究ではプロセスの分解率は次の(1)式に基づき行った。

$$E = \frac{S_i W_i + S_e W_e}{S_i W_i} \times 100 \quad (1)$$

ここで、E : 分解率 (%)

Fig.7 Effect of HRT on the conversion ratio of hydrolysis, acidogenesis and methanogenesis in mesophilic methanogenic reactor

Fig.8 Effect of process HRT on the total removal efficiencies of TS, VS and COD_{Cr} in the two phase system

Fig.9 Removal efficiency of carbohydrate and protein by the two-phase system

S_i : 流入有機物濃度 ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

W_i : 流入重量 (kg)

S_e : 流出有機物濃度 ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

W_e : 流出重量 (kg)

Fig.10 The NH₄-N concentration in thermophilic acidogenic reactor and mesophilic reactor at process HRT

3.3.2 有機物の分解率

Fig.8にプロセスHRT別のTS, VSおよびCODの分解率を示す。HRT20日～HRT56日におけるTS分解率,VS分解率,およびCOD分解率はそれぞれ, 89%～90%, 93%～94%および87%～91%で高い分解率が得られた。Fig.9に炭水化物とタンパク質の分解率を示す。炭水化物の分解率は99%と極めて高い値を示した。一方, タンパク質はHRT56日で30%, HRT30日で51%およびHRT20日で52%と分解率が低かった。その原因としては, Fig.9に示したタンパク質分解率は流入と流出だけを計算した見かけ上の分解率であり, 炭水化物の分解などに伴う菌体増殖によって増加するタンパク質の量を考慮しなかったからである。Table1に示したとおり, 基質であるジャガイモの有機物成分の殆どが炭水化物であり (87%), その炭水化物の99%は除去されていることから, 本プロセスにおける投入基質の分解率は極めて高いと言える。

3.3.3 NH₄-N濃度と無希釈運転の可能性

各HRT条件の高温酸発酵槽と中温メタン発酵槽におけるNH₄-N濃度をFig.10に示す。いずれの反応槽もNH₄-N濃度はHRTの短縮に伴い減少傾向にあった。安定したメタン発酵が行われたHRT20日～HRT56日の高温酸発酵槽および中温メタン発酵槽内のNH₄-N濃度は1040～1320mg・l⁻¹および1400～2120mg・l⁻¹であった。また, 中温メタン発酵槽においてアンモニアによる阻害はなかった。ジャガイモ加工廃棄物はC/N比が高く, 窒素含有量が少ないため, アンモニアによる阻害は起こらないという報告がある²²⁾が, 本研究も同様な結果が得られた。また, 本研究では, 無希釈, 添加物なしの条件で実験を行ったため, 窒素をはじめ, 栄養塩の不足が心配されていたが, 高温酸発酵槽と中温メタン発酵槽におけるNH₄-N濃度1000mg・l⁻¹以上であったので窒素源が不足することは無かった。なお, 280日の長期連続運転において, 安定した水素生成, メタン生成可能であったので, 本プロセスによるジャガイモの水素・メタン二相発酵は無希釈, 添加物無しの条件で長期間にわたり連続運転が可能であったことが示された。

4. ま と め

新しく提案した二相循環式高濃度水素・メタン発酵プロセスを用いてジャガイモについて無希釈, 添加物ゼロの条件で連続実験を行い, 有機物の減量化, 水素生成およびメタン生成に関する実験データを総合的に解析した結果, 以下の結論が得られた。

1) 希釈水や添加物なしの条件において安定運転ができる本プロセスの最短HRTは20日であることがわかった。対応している高温酸生成槽および中温メタン発酵槽のHRTはそれぞれ2日と8日であった。

2) HRT20日とHRT30日の定常状態において, TS分解率,VS分解率, およびCOD_C分解率はそれぞれ87%程度, 92%程度および85%～90%であった。

3) プロセスHRT20日での高温酸発酵槽のバイオガス生成速度は, 約8.1・l⁻¹・d⁻¹であり, 水素の組成は45%と安定していた。また, 除去ヘキソースあたりの水素収率は1.67mol H₂・mol⁻¹ hexoseであった。中温メタン発酵槽のバイオガス生成速度は約5.3・l⁻¹・d⁻¹で, そのうちのメタンガスの組成は58%であった。水素生成とメタン生成はそれぞれ安定していた。

(原稿受付 2005年 3月 1日)

(原稿受理 2005年 9月 1日)

参 考 文 献

- 1) 閣議決定 (2002) バイオマス・ニッポン総合戦略, 29pp.
- 2) 李玉友 (2004) メタン回収技術の応用現状と展望, 水環境学会誌, 27(7), 622-626.
- 3) 澤山茂樹 (2005) 新しいメタン発酵技術の動向, バイオサイエンスとインダストリー, 63(1), 48-51.
- 4) Bhattacharya, S. K., Madura, R.L., Walling, D.A. and Breure, A. M. (1996) Volatile solids reduction in two-phase and conventional anaerobic sludge digestion, *Wat. Res.*, 30(5), 1041-1048.
- 5) Shin, H. S., Han, S. K., Song Y. C. and Lee C. Y. (2001) Performance of uasb reactor treating leachate from acidogenic fermenter in the two-phase anaerobic digestion of food waste, *Wat. Res.*, 35(14) 3441-3447.
- 6) von Sachs, J., Meyer, U., Rys, P. and Feitkenhauer, H. (2003) New approach to control the methanogenic reactor of a two-phase anaerobic digestion system, *Wat. Res.*, 37, 973-982.
- 7) 福岡三喜, 武貞健太郎, 安西晟 (1993) セルロース系廃棄物の2相式嫌気性処理によるメタン生成, 化学工学論文集, 19(5), 885-892.
- 8) 遠藤銀朗, 野池達也, 松本順一郎 (1982) 嫌気性消化の酸生成相におけるセルロースとグルコースの分解特性, 土木学会論文報告集, 325, 61-68.
- 9) 遠藤銀朗, 野池達也, 松本順一郎 (1983) 嫌気性消化の酸生成相に及ぼす温度とpHの影響, 土木学会論文報告集, 330, 49-57.
- 10) 神戸宏, 中村玄正, 松本順一郎 (1992) 嫌気性処理におけるグルコースの酸生成分解過程と細菌群に関する基礎的研究—温度の影響—, 下水道協会誌論文集, 29(339), 22-30.
- 11) Cohen, A., Zoetemeyer, R. J., Deursen, A. V. and Andel, J.G.V. (1979) Anaerobic digestion of glucose with separated acid production and methane formation, *Wat. Res.*, 13(7), 571-580.
- 12) Shin, H. S. and Youn J. H. (2005) Conversion of food waste into hydrogen by thermophilic acidogenesis, *Biodegradation*, 16, 33-44.
- 13) 田口文章, 長谷川勝重 (1994) シロアリから分離した水素生成菌

- による廃棄物処理と水素産生, 用水と廃水, 36(3), 37-44.
- 14) Kataoka, N., Miya, A. and Kiriya, K. (1997) Studies on hydrogen production by continuous culture system of hydrogen-producing anaerobic bacteria, *Wat. Sci. Tech.*, 36(6-7), 41-47.
 - 15) Andel, J. G. van, Zouyberg, G. R., Crabbendam, P. M. and Breure, A. M. (1985) Glucose fermentation by *Clostridium butyricum* grown under a self generated gas atmosphere in chemostat culture, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 23, 21-26.
 - 16) 片岡直明, 宮晶子, 桐山光市 (1999) 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, 183, 38-45.
 - 17) 小木曾直行, 中村玄正, 松本順一郎 (1997) 嫌気性酸生成相におけるグルコースの分解と水素ガス生成に及ぼすHRTの影響, 工業用水, 466, 20-26.
 - 18) 沈建権, 李玉友, 野池達也 (1996) 嫌気性細菌による糖類排水の水素発酵特性の比較, 土木学会論文集, 552, 23-31.
 - 19) 水野修, 大原健史, 新谷真史, 野池達也 (1999) 水素発酵における有機性廃棄物の分解特性, 環境工学研究論文集, 36, 423-429.
 - 20) 水野修, 大原健史, 野池達也 (1997) 嫌気性細菌による食品加工廃棄物からの水素生成, 土木学会論文集, 573, 111-118.
 - 21) 河野孝志, 和田克士, 李玉友, 野池達也 (2004) 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, 27(7), 473-479.
 - 22) 大下信子, 松本寿美, 土肥哲哉, 竹本裕, 品田司 (2004) 食品系廃棄物の水素発酵条件に関する研究, 用水と廃水, 46(12), 1058-1064.
 - 23) 西尾尚道, 中島田豊 (2004) 各種廃水・廃棄物の水素・メタン発酵, 第7回水環境学会シンポジウム講演集, 163-164.
 - 24) Nishio, N. and Nakashimada, Y. (2004) "High rate production of hydrogen/methane from various substrates and wastes", *Adv Biochem Engin/Biotechnol.*, 90, 63-87.
 - 25) 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.
 - 26) 李玉友, 水野修, 船石圭介, 山下耕司 (2003) 生ごみの高速メタン発酵システム, エコインダストリー, 8(6), 5-19.
 - 27) 水野修, 李玉友, 奥野芳男, 関廣二, 一瀬正秋 (2004) 二相循環式メタン発酵プロセスによる食品加工廃棄物の無希釈処理, 環境工学研究論文集, 41, 321-331.
 - 28) 李玉友, 佐々木宏, 奥野芳男, 関廣二, 上垣内郁夫 (1998) 生ごみの高濃度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.
 - 29) 佐々木宏, 李玉友, 奥野芳男, 関廣二, 上垣内郁夫 (1999) 生ごみの高温・高濃度メタン発酵における滞留時間と負荷の検討, 水環境学会誌, 22(12), 983-989.
 - 30) 水野修, 李玉友, 野池達也 (1995) スクロースの酸発酵に及ぼす硫酸塩還元の影響, 水環境学会誌, 18(11), 894-900.
 - 31) Mizuno, O., Li, Y. Y. and Noike, T. (1998) The behavior of sulfate-reducing bacteria in acidogenic phase of anaerobic digestion, *Wat. Res.*, 32(5), 1626-1634.
 - 32) Noike, T., Takabatake, H., Mizuno, O. and Ohba, M. (2002) Inhibition of hydrogen fermentation of organic wastes by lactic acid bacteria, *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, 1367-1371.
 - 33) 高島寛生, 河野有吾, 丹野幸, 野池達也 (2002) 乳酸菌 *Lactobacillus paracasei* の嫌気的水素発酵阻害におけるpH依存性及び代謝産物の影響, 環境工学研究論文集, 39, 55-65.
 - 34) 李玉友, 野池達也 (1987) 嫌気性消化の酸生成相における余剰活性汚泥の分解特性, 水質汚濁研究, 10(12), 729-740.
 - 35) 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, pp.30-31, 技報堂出版, 東京.