

- (35) 1日1回給餌操作での高濃度高温メタン発酵の生ごみ処理
への適用性と操作因子に関する研究

Study on applicability and operation factor of thermophilic
methane fermentation to garbage treatment in high concentration
under once-a-day feeding condition

洪鋒*、津野洋*、日高平*、千智勲*

Feng HONG*, Hiroshi TSUNO*, Taira HIDAKA*, Jihoon CHEON*

ABSTRACT; The applicability and operation factors of thermophilic methane fermentation for garbage treatment in high concentration under once-a-day feeding condition were investigated by using a semi-continuous flow completely-mixed reactor. The experiment were conducted by changing the HRT from 158 to 9 days and the CODcr volumetric loading rate from 1.75 to 25.6 Kg/(m³ · d) under the conditions of a temperature of 55°C and a constant feeding TS of 15%. Some reactors were operated with returning solids materials for keeping the microorganism in the reactor at high concentration. The methane fermentation system could respond successfully, when CODcr volumetric loading rate were increased up to 25.6 Kg/(m³ · d) under the condition of returning solids materials. It is suggested that the appropriate CODcr volumetric loading rate would be 20 KgCODcr/(m³ · d), corresponding to the HRT of 11 days, for the reactor with returning solids materials, and 6-10 KgCODcr/(m³ · d) for the reactor without returning solids materials. More than 80% of garbage was transformed to methane gas as calculated on COD base. The stable ammonia concentrations under the conditions of each organic loading rate decreased from 2680 to 1500mgN/L with increasing CODcr volumetric loading rate. Methane fermentation activity was obtained to be 2.2g COD·CH₄/(gVSS · d).

KEYWORDS; High-solids methane fermentation, thermophilic, once-a-day feeding, returning solids materials, methane gas production rate.

1. 緒論

資源の有効利用は健全な物質循環と持続可能な発展の社会にとって、重要な基調である。家庭や食品産業・農業から排出される有機性廃棄物は処理されるべき廃棄物であるが、これよりエネルギーを生産し、資源の有効利用を行うことが「循環型経済社会の構築」では求められる。有機性廃棄物の資源化技術はいくつかあるが、現在利用可能な技術はコンポスト化、高効率メタン発酵、油温減圧脱水、炭化、焼却・溶融・ガス化溶融等である¹⁾。嫌気性消化を適用する場合は、生ごみのVS減量化率は70~80%であり、1トンの生ごみから100~140m³のバイオガスを生産できるだけでなく、消化汚泥の肥料価値が高いと報告されている^{2,3)}。嫌気性プロセスにより得られるバイオガスはメタンガス約60%と炭酸ガス約40%の混合物であり、発熱量として

* 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻(Dept. of Urban and Environ. Eng., Graduate School of Eng., Kyoto Univ.), CREST of JST

は約 5000-6000Kcal/kg となる⁴⁾。

生ごみのメタン発酵システムをメタン発酵槽への投入濃度で分類すると、乾式(投入 TS 濃度 25%以上)、湿式(投入 TS 濃度 10%以下)及び半乾式(投入 TS 濃度 10-20%)に分けることができ、またメタン発酵の温度では、中温メタン発酵と高温メタン発酵がそれぞれ採用されている⁵⁾。実際の嫌気性発酵処理装置で必要とされる熱や電気に費やされるバイオガス量は、投入される原料 1 トン当たり 30~50m³ 程度であり、この値は汚泥であろうと生ごみであろうとさほど変わらない⁴⁾。したがって、乾式及び半乾式の生ごみメタン発酵プロセスでは、発酵槽の加温及び装置運転電力が賄えるだけではなく、系外へ余剰エネルギーを多く出せる。一方、高温メタン発酵は有機物の分解、ガス化率が速く、高い有機物負荷率、短い滞留時間などのメリットを持つため、高濃度・高負荷の生ごみのメタン発酵が期待されており、その応用実績は近年増えてきた⁵⁾。

日本においては 1980 年代に都市ごみのメタン発酵に関するパイロットプラント実験⁶⁾を実施しており、関連する研究も数件報告されている⁷⁾。これらの研究においては、リアクターへの投入 TS 濃度は 8%以下と低く設定されたため運転にかかるより多くのエネルギーは得られていない。一方、李ら⁸⁾は、日本型生ごみの高温メタン発酵では最適 TS 濃度が 10%程度であると報告している。佐々木ら⁹⁾は、微量元素(Fe、Co、Ni)をリアクターに定期的に添加し、1 日数回リアクターに TS 濃度 10%の基質を投入する連続実験を行った。その結果、最大有機物負荷率として 31.8 KgCODcr/(m³・d)を達成できたが、分解率と安定運転の確保の観点から水理学的滞留時間 HRT(Hydraulic Retention Time) 7.5 日、有機物負荷率 20 KgCODcr/(m³・d)程度が妥当であると報告した。しかし、これまで、1 日 1 回の投入方式で TS 濃度が 10%以上の生ごみの高温半乾式嫌気性消化は殆ど検討されていない。一方、生ごみの高温・高負荷のメタン発酵においては有機酸が蓄積しやすく、アンモニア性窒素による影響を受けやすいことから、システムの安定性が相対的に低い。これに対しては汚泥の返送によるリアクター内の微生物濃度、特にメタン生成菌濃度を高く維持することにより、システムの安定性を改善できると考えられる。

本研究では、投入 TS 濃度が 10%以上の生ごみを基質として 1 日 1 回給餌操作での半乾式高温嫌気性消化を確立することを試みた。生ごみの半乾式嫌気性消化の適用性及びプロセスにおける有機物負荷率などの影響を把握することを目的とし、投入 TS 濃度を 15%に固定して HRT を短くすることにより、有機物負荷率を 1.75 から 25.6KgCODcr/(m³・d)まで変化させて高温(55℃)条件下で 1 日 1 回給餌方式で連続実験を行った。実際のプラントの操作においては、管理性、人件費などの点で 15%という高い濃度の生ごみを 1 日 1 回給餌する操作は、大きなメリットがあり、その操作因子の確立は意義が大きい。メタン発酵槽中の微生物濃度を高く維持するために、一部のリアクターでは汚泥返送方式で運転した。この運転中においてバイオガス発生速度、有機酸(VFAs)、pH、NH₄⁺-N 等の運転管理因子を把握し、汚泥返送及び有機物負荷率が処理特性に及ぼす影響を検討することともに、最適有機物負荷率についても検討した。

2. 実験材料及び方法

2.1 種汚泥と人工生ごみ

本研究では、京都市での生ごみバイオガス化実用化試験プラントの消化槽より採取した消化汚泥を種汚泥として用いた。また人工生ごみを用いて実験を行ったが、それは実際の生ごみの組成成分¹⁰⁾を参考にして、表 1 に示されるように多くの種類の食品を所定の重量構成比で混合し、高速ミキサで微粉碎して、スラリー状にしたもの

表1 実験に用いた生ごみの細組成(湿重%)

野菜類	50	残飯類	20
キャベツ	10	ご飯	10
ジャガイモ	10	パン	2.5
大根	10	麺類	7.5
白菜	10	肉、魚、卵	10
ニンジン	10	挽肉	5
果物	20	魚	2.5
リンゴ	2.5	卵	2.5
オレンジ(皮)	7.5		
バナナ(皮)	10		

である。作った生ごみのTS濃度は19%であるが、実験においてはリアクターに投入する基質濃度を15%に調整したものを用いた。この実験基質の成分分析結果は、表2に示すとおりである。

2.2 実験装置及び実験条件

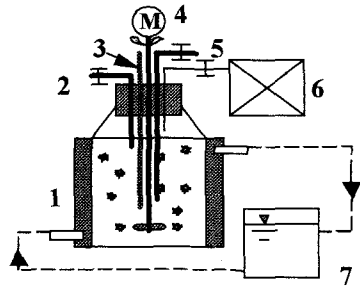
本研究において用いた実験装置の概要を図1に示す。リアクターは、機械攪拌装置を有する完全混合型微生物反応装置である。発生したメタンガス、炭酸ガスなどは連結したガスバックで捕集した。またリアクターは温水保温ジャケット付きで、リアクター内の混合液を55℃の温度に保つようにジャケット内の温水を循環恒温水槽にて保温できるようにした。

基質の投入は1日1回の給餌方式であり、基質である生ごみの所定量を注射器でリアクターに1日1回注入し、同時に同量の混合液を注射器で1日1回吸い出す方式で行った。本研究においては、リアクターを4系列(リアクター1, 2, 3, 4)用意し、実験を行った。それぞれの操作条件は表3に示すとおりである。リアクター2, 3においては、吸い出した混合液中の汚泥はリアクターに返送すること無しに無返送の完全混合式反応槽として運転した。このため水理学的滞留時間は固形物滞留時間 SRT(Solids Retention Time)に等しいことになる。リアクター1, 4においては、リアクターの微生物の濃度を高く維持するために、吸い出した混合液を遠心分離し、固形性物質(汚泥)をリアクターに返送した。

これらの連続実験において、吸い出した混合液について、pH、TS、VS、SS、VSS、CODcr(全及び溶解性)、VFAs、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等の水質項目の分析を行った。pH、TS、VS、SS及びVSSの分析は下水試験方法¹¹⁾に準じて行った。CODcrはStandard Methodes¹²⁾により測定した。VFAsはHPLC-高速液体クロマトグラフ(島津製作所、LC-VP有機酸分析システム)により定量

表2 基質の成分分析結果

指標	Total	Soluble
TS(g/L)	148.8	-
VTS(g/L)	141.3	-
SS(g/L)	95.0	-
VSS(g/L)	93.3	-
CODcr(g/L)	230	81.7
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	-	56.6
T-N(mg/L)	3170	820
pH	4.76	
炭水化物(gGlucose/L)	86.1	46.4
蛋白質(gAlbumin/L)	19.4	5.03
脂質(g/L)	14.8	



1.リアクター 2.基質投入口 3.温度計 4.機械攪拌装置 5.サンプリング口 6.ガスバック 7.循環恒温水槽

図1 実験装置

表3 各リアクターの操作条件

	リアクター1	リアクター2	リアクター3	リアクター4
HRT(d)	9~33.8	19.7~142	43.9~158	35.1~105
有機物負荷率 KgCODcr/(m ³ ・d)	6.83~25.6	2.06~11.7	1.75~5.26	2.19~6.57
生ごみの投入量 (g/d)	100~380	40~230	150~460	190~570
有効容積(L)	3.42	4.5	20	20
汚泥の返送	有り	無し	無し	有り
SRT(日)	36~57	19.7~142	43.9~158	140~210
温度(℃)	55			
基質のTS濃度 (%)	15			

した。この際、Shim-pack SCR-102H カラム(島津製作所)を用い、移動相は 5mM p-トルエンスルホン酸とし、カラムの温度を 43℃とした。NH₄⁺-N 濃度は Autoanalyzer 3 (BRAN+LUEBBE 社)で測定した。また発生ガスの生成量及び組成についての分析を行ったが、これらの分析では赤外線式ガス濃度測定装置-CGT-7000(島津製作所)を用いた。

リアクターの中での反応特性を把握するために、1 日 1 回の給餌後から次日の給餌までの 1 日間、一定時間経過毎にリアクター内の混合液について、上記と同様の各水質項目について分析を行った(以下回分式実験と記す)。

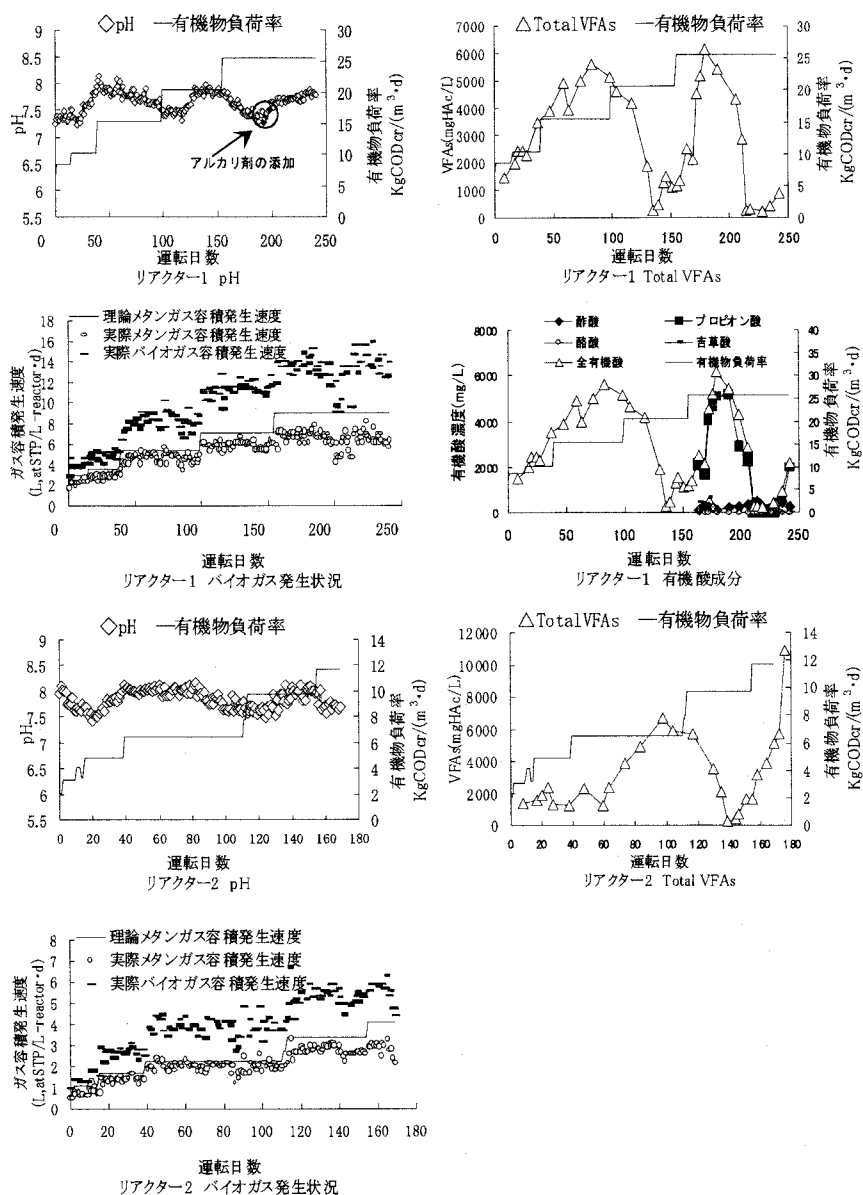


図2 リアクターの処理特性

3. 実験結果

3.1 連続実験でのメタン発酵特性

4 つのリアクターでの処理特性を、有機物負荷率の設定が高いリアクター1 及び2について例として図 2 に示す。表 4 に各リアクターにおいて長期にわたり安定した処理が行えた有機物負荷率条件下での定常状態下の分析結果と有機物負荷率条件をまとめて示す。リアクター1 においては、混合液からの引き抜き汚泥を遠心分離でリアクターに返送して運転し、241 日間にわたり運転し、有機物負荷率を 6.83 から 25.6 Kg CODcr

/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$)まで段階的に上昇させた。有機物負荷率を $15.4 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ に上昇させると、リアクター内の pH は 8 から 7.5 以下に低下したが、これは VFAs 濃度が 4000 mgHAc/L 以上に蓄積したためと考えられる。その後、リアクター内の VFAs がメタンに転化され、 1000 mgHAc/L になると、pH は 7.9 に回復した。有機物負荷率を 20.4 から $25.6 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ に増加させると VFAs が急激に 6000 mgHAc/L までに上昇してシステム内の

表4 各リアクターの定常状態における分析結果

項目		リアクター1	リアクター2	リアクター3	リアクター4
負荷条件	HRT(d)	11.3	23.6	43.9	35.1
	SRT(d)	57	23.6	43.9	140
	有機物負荷率 ($\text{KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$)	20.4	9.74	5.26	6.57
水質データ	pH	7.85	7.95	8.05	8.00
	アルカリ度 (mgCaCO_3/L)	12000	10500	10000	9700
	NH_4^+-N (mgN/L)	1710	1820	2290	2150
	VFAs (mgHAc/L)	1370	1620	1710	1540
	固形性CODcr(g/L)	39.2	23.8	21.8	35.1
	溶解性CODcr(g/L)	18.4	14.0	11.9	11.5
	T-CODcr(g/L)	57.6	37.8	33.7	46.6
ガス生成状況	ガス単位容積生成速度($\text{L, at STP}/(\text{L}-\text{リアクター} \cdot \text{d})$)	11.3	5.20	2.79	3.48
	CH_4 (%)	52.8	53.0	53.5	54.1
	CO_2 (%)	45.9	46.9	46.2	45.2
	メタンガス収率 (L/gTS生ごみ)	0.447	0.435	0.435	0.440

pH が 7.8 から 7.3 に低下し、バイオガスとメタンガスの生成速度も 30%ほど低下した。その時、負荷を維持しながらアルカリ剤の添加を行うことより pH を 7.5 以上に回復させるとガス生成速度も正常な状態に戻った。この負荷条件下で 30 日間以上にわたり安定して操作できた。ガスの発生状況については、バイオガスとメタンガスの単位容積当たりの発生速度は負荷の増加とともに段階的に上昇したが、理論メタンガス単位容積発生速度と比較して、メタンガスへの転化率が高負荷条件下で低くなり、有機物負荷率が $25.6 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ の時、CODcr をベースとする生ごみからメタンガスへの転化率が 80%以上から 76.0%に落ちた。VFAs 濃度は運転の途中で変動し、成分を調べると酢酸の濃度は 1000 mg/L 以下に維持されたが、プロピオン酸が蓄積しやすく、これが Total-VFAs の蓄積した原因であった。酢酸は直接メタン生成菌によって分解されるが、プロピオン酸は酢酸と水素ガスに分解されてからメタンガスになる。水素ガスの蓄積はプロピオン酸の分解に影響を及ぼし、VFAs の蓄積を引き起こす。このため、メタン発酵の不安定化では水素と二酸化炭素からメタンを生成する独立栄養性メタン生成菌が影響を受けやすいことが示されている。

リアクター2 では、汚泥を返送させない条件下で運転し、有機物負荷率を $11.7 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ まで増加させた。リアクター内の pH は、システムの安定な時は 7.9~8.1 の間に維持されたが、有機物負荷率が $6.49 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ の運転の条件下で VFAs が 4000 mgHAc/L 以上に蓄積し、7.5 以下に低下した。その後、実験の進行とともに、VFAs が 2000 mgHAc/L 以下に低下すると、pH も 7.8 以上に回復した。バイオガスとメタンガスの単位容積発生速度は、有機物負荷率の増加とともに増加したが、負荷率が $11.7 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ で VFAs が急激に蓄積した時期には一時的に低下した。リアクター2 では汚泥の返送をしない条件で運転したた

め、リアクター1と比べて微生物濃度が低く、負荷率が10KgCODcr/(m³・d)以上の時では、メタン生成菌が酸生成段階で生成したVFAsを速やかに分解できず、リアクター内のVFAsが蓄積してシステムの運転に影響を及ぼしたものと考えられる。

リアクター3においては汚泥の返送をしない条件で450日間以上運転し、負荷率を5.3KgCODcr/(m³・d)まで順次上昇させたが、リアクター内のpHは滞留時間の影響を受けず7.7～8.2の高い数値で維持されていた。

また、リアクター4においては汚泥を返送させて400日間以上運転し、負荷率を6.57KgCODcr/(m³・d)まで上昇させた。有機物負荷率を低く運転しているためリアクター内のpHは7.7～8.2の高い数値で維持され、バイオガスとメタンガスの単位容積発生速度は負荷率の増加とともに増加した。

3.2 回分式実験の処理特性

1日1回の給餌形式で連続実験を行っており、各給餌間の1日の間でのリアクター内のメタン発酵特性を把握するためにリアクター1において実験開始日より145日目まで有機物負荷率が20.4 KgCODcr/(m³・d)で運転していた条件下で24時間の間のバイオガス生成状況、pH、VFAs、累積有機酸生成量等を測定した。その結果を図3に示す。なお、VFAsの中では酢酸、プロピオン酸しか検出されなかった。

生ごみの分解過程における累積有機酸生成量を式(1)に基づきCODcrベースで算出した。

$$A = C_{VFAs} + M/Y_M \quad (1)$$

ここで、Aは累積有機酸生成量(gVFAs-CODcr/L)、C_{VFA}sは揮発性有機酸のCODcr濃度(gVFAs-CODcr/L)、Mは累積メタンガス生成量(gCH₄-CODcr/L)、Y_MはVFAsからメタンへの転化係数である。上式のY_Mは花木¹³⁾の実験結果0.96を用い、メタン生成量からCODcrへの換算係数は2.857(gCODcr/LCH₄, atSTP)の値を用いた。

図3によると、バイオガス及びメタンガスの単位容積発生速度はそれぞれ11.3L_{atSTP}/(L-リアクター・d)及び5.79L_{atSTP}/(L-リアクター・d)、生ごみからメタンガスへの回収率はCODcrをベースとして81%であった。揮発性有機酸発酵過程はVFAsの経時変化と累積有機酸生成量の経時変化により次の3段階に分けられる。I段階(0～3時間)では

累積有機酸の生成速度が最も速く、プロピオン酸の濃度は2倍程度になったのに対して酢酸の濃度は3500mgHAc/Lと6倍程度となった。これは酸生成速度がメタン生成速度に卓越してVFAsが蓄積したためと考えられる。II段階(3～13.5時間)では累積有機酸は増大するが、VFAsの濃度が低下し、酢酸濃度がほぼ基質の投入直後の濃度にまで低下したが、プロピオン酸の低下は殆ど生じなかった。III段階(13.5～24時間)では、累積有機酸の生成速度が遅くなり、酢酸の濃度低下が遅くなり、

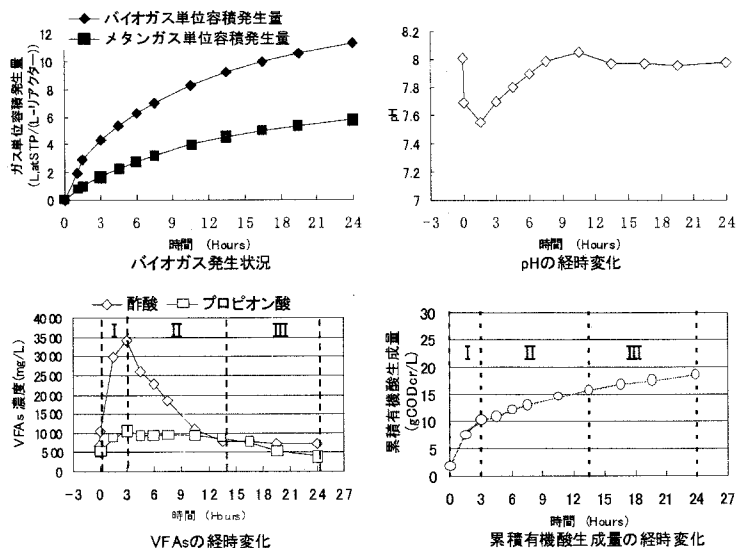


図3 回分式実験における処理特性

プロピオン酸の分解が始まり、給餌直前の濃度に戻った。プロピオン酸の蓄積防止のためにはこれは重要で、24 時間のサイクルは非常に重要である。回分式実験 24 時間の消化で生成されたメタンガスのうち、約 80% が最初の 13.5 時間で生成された。この結果により、最初の 13.5 時間で分解された有機物が易分解性有機物と考えられる。

4. 考察

4.1. 定常状態での $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度

生ごみのような有機性廃棄物の高濃度メタン発酵においてはタンパク質の分解に伴いアンモニアが大量に蓄積して、メタン発酵に阻害影響を及ぼすケースがしばしば報告される。洪ら¹⁴⁾は TS 濃度が 19% の生ごみを基質とした高温メタン発酵実験においてアンモニア性窒素濃度が 2000mgN/L を超えると、VFAs が 5000mgHAc/L 以上に蓄積し、生ごみ添加量当たりのメタンガス発生速度が急激に低下することを報告しており、李ら¹⁵⁾は有機性廃棄物の高温高濃度メタン発酵におけるアンモニアの阻害が次の三つの濃度範囲に分けられると報告している。すなわち、安全濃度範囲：2000-2500mgN/L 以下、部分阻害濃度範囲：2500～4000mgN/L、運転不可能濃度：4000mgN/L 以上と報告している。しかし、1 日 1 回給餌形式での連続処理操作において、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の変化経過及び有機物負荷率が $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の蓄積に及ぼす影響はまだ明らかにされていない。本研究での 4 つのリアクターにおいて、各有機物負荷率での定常状態と見られる期間の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度と有機物負荷率との関係を図 4 にまとめて示す。図によると、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は有機物負荷率の増加とともに減少し、有機物負荷率が 6.57KgCODcr/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$) 以下の時には、リアクター内の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は 2000mgN/L 以上であり、生ごみのタンパク質からアンモニア性窒素への転化率が一番高い時で 82.3% であった。このように、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度が 2000mgN/L 以上であっても、有機物負荷率を低くすれば操作への影響が少ないことが分かる。高負荷率の場合は 1800mgN/L 以下であり、リアクター 1 において負荷率が 25.6KgCODcr/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$) (HRT9 日) であった時には、1500mgN/L になり、蛋白質からアンモニア性窒素への転化率が 45% 程度となった。

4.2 有機物負荷率のメタンガス生成に及ぼす影響

メタン発酵におけるメタンガス容積生成速度と有機物 (CODcr) 負荷率の関係を図 5 に示す。有機物負荷率が高いほどメタン容積生成速度は高くなることが示されている。メタン容積生成速度と有機物負荷率との相関係数は 0.998 であり、負荷率の相違に関わらず、高い相関が認められた。また生ごみ 1KgCODcr 当たり 280L のメタンガス(乾燥生ごみ 1Kg 当たり 435L のメタンガス)が生成されることもわかる。メタンガス生成活性と有機物負荷率の関係を図 6 に示す。メタンガス生成活性は有機物負荷率が高いほど高くなる傾向であるが 6.49 KgCODcr/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$) の有機物負荷率でほぼ一定の 2.2gCOD- CH_4 /(gVSS $\cdot \text{d}$) 程度となった。また、リアクター 1 では、有機物負荷率が 20.4 KgCODcr/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$) であった条件下で一番高く 2.54 gCOD- CH_4 /(gVSS $\cdot \text{d}$) で

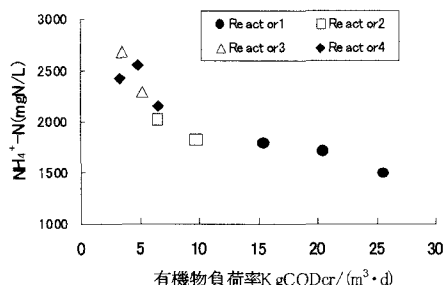


図4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と有機物負荷率の関係

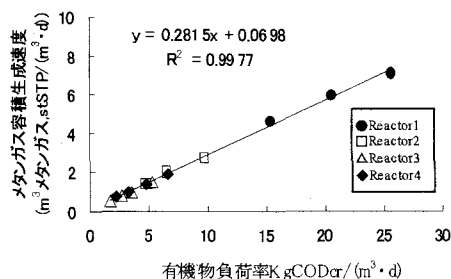


図5 メタンガス容積生成速度と有機物負荷率の関係

あり、メタン生成菌濃度を高い状態で維持できる UASB リアクターで得られた最大メタン生成活性¹⁶⁾の $5.0\text{--}7.0 \text{ gCOD-CH}_4/(\text{gVSS} \cdot \text{d})$ と比較して半分程度に相当しており、高温・高負荷メタン発酵ではメタン生成活性を高い状態で運転することが可能であることが示された。この実験を通して CODcr をベースとして生ごみからメタンガスへの回収率と有機物負荷率の関係を図 7 に示す。4つのリアクターでは、リアクター1 の負荷率 $25.6 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ である条件下の回収率を除外して回収率はいずれも 80%以上が得られた。汚泥の返送を行う条件下で運転したリアクター1 と 4 の回収率は返送を行っていないリアクター2 と 3 に比べて若干高い。これは高い SRT のためであると考えられる。

4.3 操作因子の検討

生ごみのような有機性廃棄物の高温メタン発酵では、中温発酵と比べて有機物の分解、メタンガス化速度が速く、高い有機物負荷率や短い滞留時間での運転が可能である。そして HRT が 10 日以下の短い滞留時間では、中温メタン発酵と比べて、高温消化の優位性が顕著になることに對して安定性が悪く、運転が難しいケースがあるなどが指摘されている⁵⁾。日本においては生ごみの中に紙や剪定枝などの廃棄物が殆ど含まれていないため、生物分解可能な易分解性物質が多いものと考えられる。これはリアクター1 において行った 24 時間の回分式実験により 80%の生ごみ CODcr が給餌後の最初の 13.5 時間でメタンガスに転化されることから明らかであり、高温・高負荷のメタン発酵技術は生ごみのような易分解性有機物の処理に適するものと考えられる。一方、微生物の濃度を高く維持して高温メタン発酵の安定性を改善するために、本研究で汚泥返送による効果の研究を試みた。

4 つリアクターの実験の結果により汚泥の返送を行わない条件下でのリアクター 2 において負荷率が $10 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ を超えると有機酸の蓄積及び pH の低下により、反応が不安定になったが、リアクター 1 では汚泥の返送により、負荷率が $25.6 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ まで運転できた。一方、リアクター内の微生物濃度を評価するために、VSS 濃度を図 8 にまとめて示す。汚泥を返送させて運転したリアクターでは無返送のものより 2 倍ぐらい高い 20 gVSS/L に達し、微生物濃度が高く維持できることが示されている。このため汚泥返送により $20 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 以上の高負荷率でもシステムの安定的な運転が可能となると考えられる。有機物負荷率に関して、TS 濃度が 15%の生ごみを基質とした実験(リアクター1)で有機物負荷率が $25.6 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ に達したが、滞留時間の短さや途中での VFAs の蓄積によりガスの発生への影響が生じ、メタンガスへの転換率が他の実験と比べて 76%と最も低くなった。一方、有機物負荷率が $20.4 \text{ KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ である時には、VFAs が 2000 mgHAc/L 以下と安定しており、メタンガスへの回収率が 83.3%であり、メタンガス生成活性も一番高くなった。以上より汚泥を返送する条件下での高温・高負荷メ

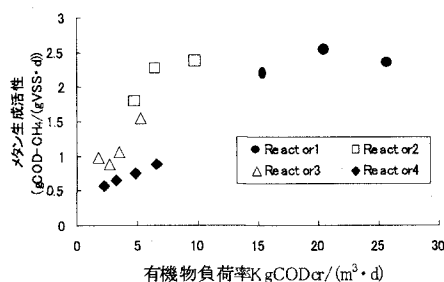


図6 メタン生成活性と有機物負荷率の関係

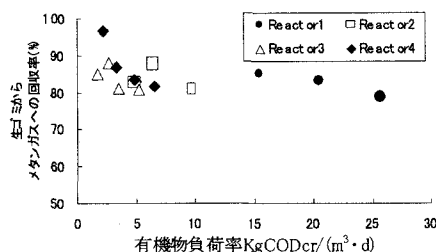


図7 メタンガスへの回収率と有機物負荷率の関係

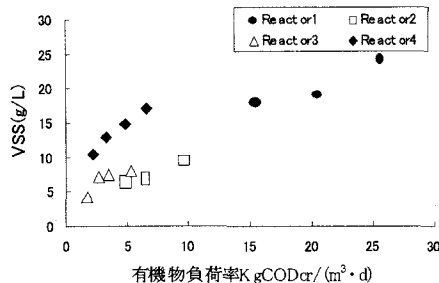


図8 VSSと有機物負荷率の関係

タン発酵ではシステムの安定性、メタンガスへの転換性などの観点から最適有機物負荷率は $20\text{KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (HRT=11 日) であると考えられる。また返送を行わない場合は $6\sim 10\text{KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ の負荷率が適切であると考えられる。またこれらの条件下であれば、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ も 2000mgN/L 以下とする。

5 結論

都市ごみを模擬した人工生ごみを対象に、1 日 1 回給餌方式での高温・高負荷メタン発酵の連続操作を行い、処理特性や操作因子について検討を試みた。得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) TS 濃度が 15% である人工生ごみを処理対象として、汚泥の返送を行う条件下で HRT9 日で有機物負荷率が $25.6\text{KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ で、高温メタン発酵を実現できた。しかし、メタン発酵効率は 76.1% に低下した。
- (2) 汚泥の返送のない条件下での有機物負荷率は $6\sim 10\text{KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ が適切であった。
- (3) 汚泥を返送させる条件でリアクター内の微生物濃度を高めると、処理を安定化させることができ、有機物負荷率として $20\text{KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ が適切であった。
- (4) これらの条件下では生ごみの蛋白質の分解率は 50% 程度で $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は 2000mgN/L 以下を保持することができた。
- (5) CODcr をベースとすると、各リアクターに投入した生ごみの 80% 程度がメタンガスに変換された。
- (6) 生ごみ 1KgCODcr 当たり 280L (乾燥生ごみ 1Kg 当たり 435L) のメタンガスが得られた。
- (7) メタン生成活性は、有機物負荷率 $6.49\text{KgCODcr}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 以上ではほぼ一定であり、 $2.2\text{gCOD}\cdot\text{CH}_4/(\text{gVSS} \cdot \text{d})$ の値となった。
- (8) メタン発酵においては生ごみ投入直後に酢酸が急激に増加したが、それは速やかにメタン発酵されて減少した。一方、プロピオン酸は 2 倍程度に増加し、その減少は酢酸の低下がほぼ終了する給餌後 13.5 時間経過時に生じ始めた。また、有機物の高負荷運転時にメタン発酵が不安定になる時には水素ガスやプロピオン酸が蓄積する傾向にあることから独立栄養性メタン生成菌が影響を受けやすいことが判明した。

参考文献

- 1) 井上雄三：し尿・汚泥・生ごみ等の地域総合リサイクル処理システムへの取り組み、第 37 回日本水環境学会セミナー講演資料集、pp.127-128.1999
- 2) 李玉友：生ごみ・有機性廃棄物の高濃度メタン発酵処理技術、技術情報センター主催「生ごみ・有機性廃棄物の最新処理・リサイクル技術」講習会テキスト、pp.43-69.1998
- 3) 武田信生：循環型社会における資源化処理技術体系、都市清掃、Vol50, pp.533-539.1997
- 4) 益田光信：KOMPOGAS システム(メタンガス化)、環境技術、Vol29, pp.669-670.2000
- 5) 李玉友、佐々木宏、鳥居久倫、奥野芳南、関廣二、上垣内郁夫：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、Vol36, pp.413-421.1999
- 6) 大磯義和：スターダスト 80 の現状、省エネルギー、Vol32, No.11, pp.65-73.1980
- 7) 石山昌彦、芳賀良一、下條哲男、石塚俊明：都市ごみのメタン発酵技術、日立評論、Vol.66, No.2, pp.67-72.1984
- 8) 李玉友、佐々木宏、奥野芳南、関廣二、上垣内郁夫：生ごみの高濃度消化に及ぼす投入濃度の影響、環境工学研究論文集、Vol35, pp.29-39.1998
- 9) 佐々木宏、李玉友、関廣二、上垣内郁夫：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、Vol22, No.12, pp.983-989.1999
- 10) 谷山昇、武本敏男、大木秀男、川崎照夫：生ごみの細組成、都市清掃、Vol50, No.217, pp.116-119.1997

- 11) 下水試験方法-1984年版 社団法人 日本下水道協会、東京.1985
- 12) Standard Methods 19th Editions、 APHA AWWA WEF, USA.1995
- 13) 花木啓祐：嫌気性消化における基質分解過程に関する研究、東京大学大学院博士学位論文、pp.68-69.1979
- 14) 洪鋒、日高平、津野洋：高温・高負荷メタン発酵技術、資源回収型の都市廃水・廃棄物処理システム技術に関する公開シンポジウム、pp.24-30.2002
- 15) 李玉友、佐々木宏、関廣二、上垣内郁夫：有機性廃棄物の高濃度メタン発酵におけるアンモニア阻害の解析、第34回日本水環境学会年会講演集、p.189.2000
- 16) 上村繁樹、原田秀樹：上向流嫌気性汚泥床(UASB)法による高温・高濃度排水処理に関する研究現況、用水と廃水、Vol37,pp.801-808.1995