

(45) 生ごみの高濃度消化における中温と高温処理の比較

Comparison Between Mesophilic and Thermophilic High Solids Anaerobic Digestion in Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Waste

○李玉友*、佐々木宏*、鳥居久倫*、奥野芳男*、関廣二*、上垣内郁夫*

Yu-You Li*, Hiroshi Sasaki*, Hisatomo Torii*, Yoshio Okuno*, Koji Seki*, Ikuo Kamigochi*

ABSTRACT: Influences of the hydraulic retention time (HRT) and the organic loading rate on mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) were investigated by using a semi-continuous flow completely-mixed reactor. The experiments were conducted at a constant influent total solid (TS) of 10% by changing the HRT from 5 days to 30 days under mesophilic (35 °C) and thermophilic (55 °C) conditions, respectively. Both the mesophilic and the thermophilic digestion reactors were successfully operated even at a short HRT of 5 days corresponding to a volumetric loading rate of 31.8 g-COD_{Cr}/L·day by adding mineral nutrient to the feed. The results indicate that there was no significant difference between mesophilic and thermophilic digestion in terms of VS reduction, COD_{Cr} removal and methane production at the HRTs of longer than 15 days, and the comparative merits of thermophilic digestion was found only at the HRT shorter than 15 days. The water quality of the supernatant of the thermophilic digestion was worse than that of the mesophilic digestion at the all conditions. Based on the comparison between mesophilic and thermophilic digestion at various HRTs, it is concluded that the HRT of thermophilic digestion could be reduced to 7.5 days, but the mesophilic digestion should be operated at the HRT of 15 days or longer for maintaining a high degradation efficiency of 75%.

KEYWORDS: anaerobic digestion, mesophilic, thermophilic, organic fraction of municipal solid waste, high solid, methanogenesis, loading rate, hydraulic retention time, volatile fatty acid, biogas

1. はじめに

近年、生ごみの循環型処理システムの要素技術として嫌気性消化によるエネルギー回収とコンポスト生産が注目されている。嫌気性消化を適用する場合、生ごみの VS 減量化率は 70～80%で、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^{1,2)}。ここ 2—3 年間、国内では WAASA メビウスシステム³⁾、REM システム⁴⁾、リネッサシステム⁵⁾などの幾つかの技術が提案され、それぞれパイロットプラント実験も実施されてきている。また、世界的な状況としては 20 以上のプロセスが報告されている。建設実績については国内で少なくとも 5 基以上のプラント建設契約があり、全世界では 70 基以上の実績があると報告されている。

これまでに研究・報告された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分類すると、中温メタン発酵と高温メタン発酵がそれぞれ採

*アタカ工業株式会社・開発本部・技術研究所 (Technical Research Institute, ATAKA Constr. & Engrg. Co. Ltd) ; Tel: 06-551-5901, Fax: 06-553-6035.

用されている^{1,7)}。なおメタン発酵槽の滞留時間はプロセスによって違うが、基本的に10～15日以上となっている¹⁾。このように、生ごみメタン発酵において投入濃度、発酵温度、滞留時間及び負荷などが重要な操作因子であるが、それぞれの影響については必ずしも明確にされていない。一方、生ごみの質は分別収集などの廃棄物行政による影響の他に、食文化にも影響され、国や地域によって大きく異なる。そのため、高効率メタン発酵システムを確立するためには、それぞれの国と地方のごみ質に合った操作条件を検討しなければならない。

このような認識に基づき、筆者らはこれまで日本型生ごみの嫌気性消化に及ぼす投入 TS 濃度の影響を検討し、高温発酵にとって適切な投入 TS 濃度は10%程度であることを報告してきた⁷⁾。本研究では生ごみの高濃度嫌気性消化における温度と滞留時間等の影響を把握することを目的として、投入 TS 濃度を10%に固定して滞留時間を5日から30日まで変化させて中温と高温条件で高濃度嫌気性消化の連続実験を行った。特に中温と高温嫌気性消化における有機物分解率、VFA（揮発性脂肪酸）等の運転管理因子、メタンガス生成量及び消化後遠心上澄水の水質を比較し、それぞれの条件における滞留時間の短縮と負荷向上の可能性を検討した。

2. 実験材料及び方法

2.1 生ごみの調製

最近の幾つかの詳細調査に基づき本実験に用いた人工生ごみの組成を表1のように選定した⁷⁾。前処理としては高速ブレンダーで粒径3mm以下に微破碎してスラリー状にし、水道水を加えて所定のTS濃度に調整した。また基質中の微量栄養塩(鉄、ニッケル及びコバルト)を補足するため、基質中の濃度としてFeCl₂: 100 mg/l, NiCl₂: 10 mg/l, CoCl₂: 10 mg/l となるようそれぞれ塩化物で添加した。

表1 実験に用いた生ごみの組成

本研究に用いた生ごみの組成			文献調査のデータ	
大分類 (湿重%)	組成	湿重含有率 (%)	家庭系	事業系
果物類 (30%)	リンゴ	10	平均31% (15-45%)	4.4-29.7%
	グレープフルーツ (皮)	5		
	オレンジ (皮)	5		
	バナナ (皮)	10		
野菜類 (36%)	キャベツ	12	平均36% (15-55%)	12.4-49.2%
	ジャガイモ	12		
	ニンジン	12		
肉・魚介・卵類 (14%)	挽肉	5	平均14% (5-35%)	5.8-25.8%
	魚 (骨付き)	5		
	卵	4		
残飯類 (20%)	米飯	10	平均19% (10-30%)	2.6-28%
	パン	5		
	うどん	2.5		
	中華麺	2.5		

2.2 実験装置

実験装置の概略は図1に示す。投入物は4℃の攪拌槽で貯蔵し、ローラーポンプ（古江サイエンス、型式 RP-LV2）で定量投入した。投入ポンプはタイマーコントローラで制御し、1日4～12回（滞留時間によって変わる）、一回当たりの投入時間を1分間に設定した。嫌気性消化槽全容量は8Lで液体反応有効容積は5Lであり、攪拌はガス循環ポンプ（Iwaki Air Pump、APN085LV-1）により行っている。また処理

液はガス循環ポンプの吸引力で気液分離槽に吸引され、そこで気液分離を通して廃液は消化混合液タンクに流出している。ガスは容量式ガスメーターで計量した。なおメタン発酵槽と気液分離槽の温度は温水ジャケットで中温消化の場合は 35℃、高温消化の場合は 55℃にそれぞれ維持した。

2.3 実験条件と操作方法

実験内容と実験条件は表 2 にまとめた通り、中温と高温でそれぞれ五つの Run があり、計 10 種類の実験条件を設定した。中温と高温用の 2 基の反応槽を用いて、投入 TS 濃度を 10% に固定して滞留時間を 30 日から 5 日まで段階的に短縮させて実験を行った。対応している COD_C 容積負荷は 5.07～31.8 kg/m³・d の範囲で変化した。また投入 TS 濃度が 10% 以上の条件で VFA 蓄積の防止とメタン発酵の促進のために表 2 の通り微量栄養塩として鉄、ニッケル及びコバルトを微量栄養塩として添加した。なお反応槽運転の安定性を確保するため、負荷に応じて投入回数を増やして 1 回当たりの投入容量を反応槽有効容量の 2% 以下とした。種汚泥は下水汚泥の中温と高温嫌気性消化槽からそれぞれ採集した。スタートアップの初期には生ごみを添加して負荷を段階的に上げて運転し、種汚泥の馴致を図った。各実験条件で HRT の 3 倍以上の運転期間を設けて、pH、ガス生成量、反応槽の VFA 濃度、TS 濃度等の指標から判断して定常状態に達したことを確認した上で、3 回以上詳細分析を実施してその平均値を各条件での代表値とした。

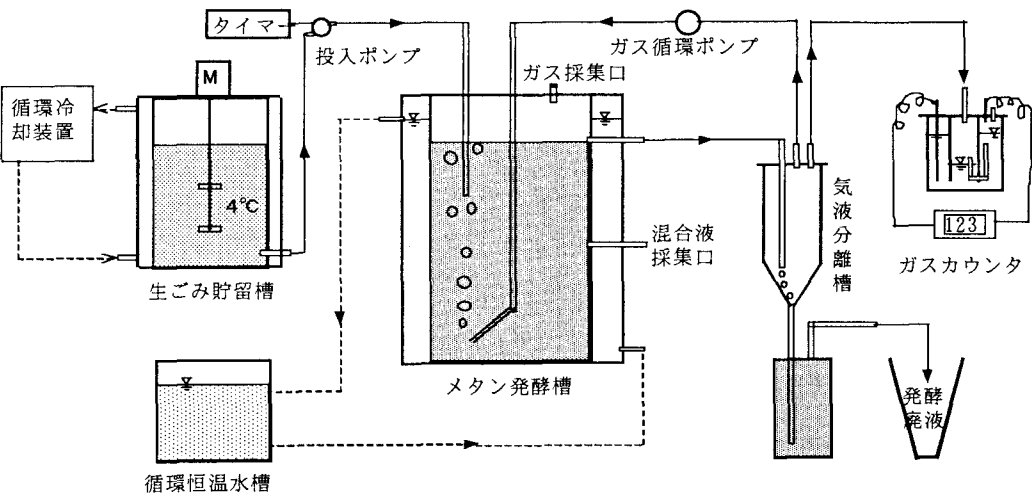


図 1 本研究に用いたガス攪拌型連続実験装置の概略

表 2 実験条件のまとめ

Run 番号	HRT (日)	投入回数 (回/日)	TS 容積負荷 (kg-TS/m ³ ・d)	VS 容積負荷 (kg-VS/m ³ ・d)	COD _C 容積負荷 (kg-COD _C /m ³ ・d)
1	30	2	3.25	2.95	5.07
2	15	4	6.51	5.91	10.1
3	10	6	9.74	8.83	14.3
4	7.5	8	14.4	12.5	20.3
5	5	12	19.8	17.6	31.8
温度条件	中温消化： 35±1℃				
	高温消化： 55±1℃				
栄養塩投入	基質タンクに投入：FeCl ₂ : 100 mg/l, NiCl ₂ : 10 mg/l, CoCl ₂ : 10 mg/l				

2.4 分析方法

pH、アルカリ度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TS、VS、SS、VSS の分析は下水試験方法に準拠して行った。COD_c は米国の Standard Methods (1995) により測定した。炭水化物はアンスロン-硫酸法、タンパク質は Lowry 法、脂質は Bligh-Dyer 法によりそれぞれ分析を行った²⁹⁾。遠心上澄水の成分は 3000 rpm で遠心分離した上澄水について分析したものである。VFA は FID ガスクロマトグラフ (HP-6890 型) 法により定量した。HP-INNOWAX Polyethylene Glycol キャピラリカラムを用いて、キャリアーガスはヘリウム (圧力 1.0 kg/cm²) を用いた。カラムオープンの設定温度は 50°C~170°C の範囲で段階的昇温操作を行った。検出器の温度は 280°C であった。ガス生成量は容量式カウンターで計量したデータを 0°C、1 気圧の乾燥ガス量に換算している。ガス組成 (N_2 , CH_4 , CO_2) の分析には TCD-ガスクロマトグラフ (HITACHI-163 型) を用いた。カラム条件として Unibeads C を充填した内径 3mm×長さ 3 m のステンレスカラムを用い、ヘリウム (圧力 5 kg/cm²) をキャリアーガスとして用いた。カラム温度と検出器温度はいずれも 140°C であった。

3. 実験結果

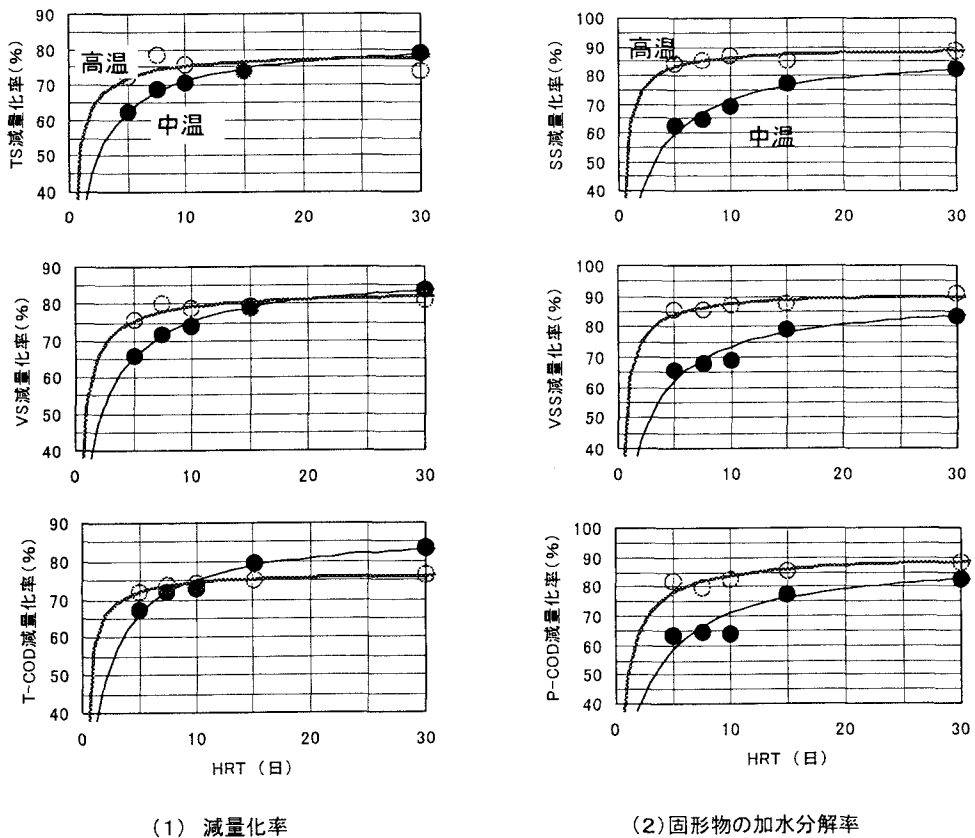


図2 生ごみの減量化と固形物の加水分解率に及ぼす滞留時間と温度の影響
(ここで丸は実測値、線は動力学解析⁸⁻⁹⁾に基づく予測値をそれぞれ示している。
また白丸と太い線は高温消化を、黒丸と細い線は中温消化を表している。)

3.1 有機物の分解と減量化に及ぼす温度と滞留時間の影響

図2に生ごみの減量化と固形物の加水分解率に及ぼす滞留時間と温度の影響を示す。ここで丸は実測値、線は動力学解析^{8,9)}に基づく予測値をそれぞれ示している。図2(1)の三つのグラフで示す通り、全体としてTS、VS及びT-COD_{Cr}の減量化率はいずれも滞留時間と温度に影響されるが、温度の影響はHRTにより異なる。HRTが15日以上十分長い場合には、中温と高温消化における各指標の減量化率はほぼ同じぐらになり、TS減量化率、VS減量化率及びCOD_{Cr}分解率はそれぞれ74%以上、78%以上、73%以上であった。しかし、HRTが15日以下の短い条件では、中温条件における減量化率は滞留時間の短縮に伴い急速に減少しているのに対して、高温消化の場合、HRTが5日まで短縮しても減量化率には大きな低下は見られず、いずれの指標で比較しても高温消化による有機物分解率は中温のそれより明らかに高くなる。即ち、高温消化の優位性は10日以下の短いHRTで顕著になる。特に、高温消化の優位性は固形物の加水分解効果においてより顕著である。図2(2)に示す通り、同じHRTにおけるSS、VSS及び固形物COD_{Cr}の分解率(加水分解率)はいずれも高温の値は中温より高い。HRT10日以下の条件ではその差は15%以上広がっている。

3.2 運転管理因子の変化

図3に中温消化と高温消化におけるpH、アルカリ度、VFA及びNH₄⁺-N濃度の変化を示している。中温消化のpHは7.3~7.5の範囲にあるのに対して、高温消化のpHは7.5~7.8の範囲にあり、すべての滞留時間において高温消化のpHは中温のそれより0.2ぐらいい高くなっている。またアルカリ度も高温の方が中温より高かった。NH₄⁺-N濃度については中温消化は950~1450 mg/Lの範囲にあるのに対して高温消化では1650~1940 mg/Lとなっている。なお、VFA濃度については中温消化ですべてのHRT条件において180 mg/L以下と低かったのに対して、高温消化では2000~4760 mg/Lの濃度で蓄積している。高温消化

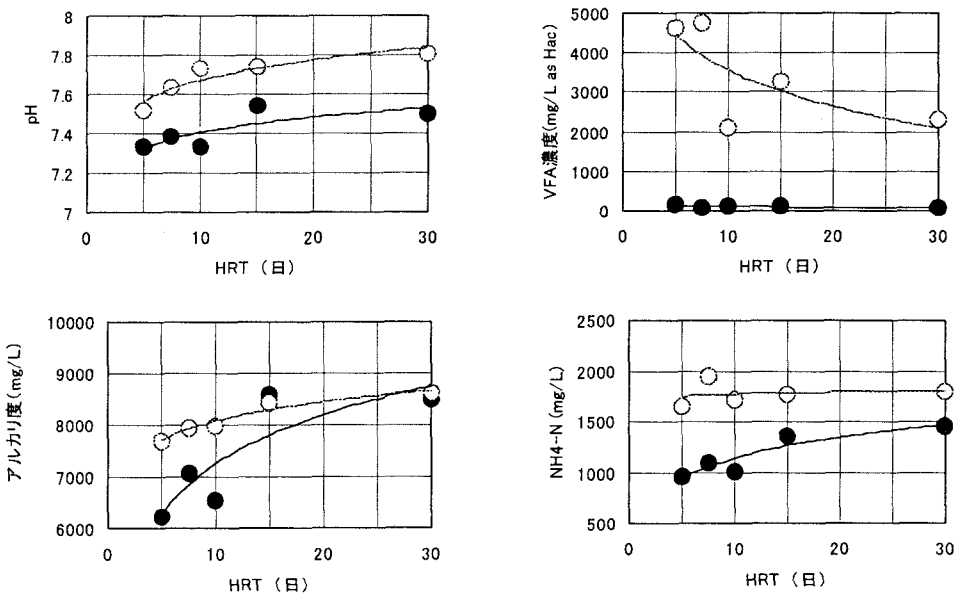


図3 中温消化と高温消化におけるpH、アルカリ度、VFA及びNH₄⁺-N濃度の変化 (○:高温、●:中温)

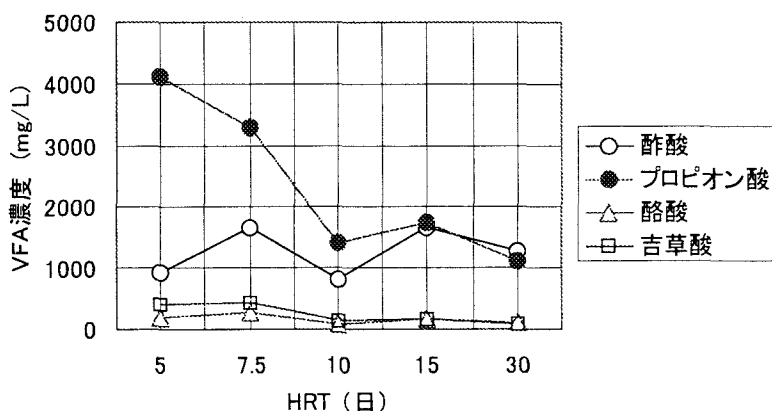


図4 高温消化における残存 VFA の組成

における残存 VFA の組成は図4に示す通り、主にプロピオン酸と酢酸であり、酪酸と吉草酸（いずれもイソ体とノルマルの合計）は僅かであった。しかしこの程度の VFA が残存したものの、それぞれの運転条件において長期間にわたり pH、アルカリ度及び VFA 濃度が安定しており、メタン発酵への阻害影響は見られなかった。

3.3 消化ガス及びメタンガス生成量に及ぼす滞留時間と温度の影響

図5にガス生成収率の比較として(a)投入 TS 当たりの消化ガス生成率、(b) 除去 VS 当たりの消化ガス生成率及び (c) 除去 COD_{Cr} 当たりのメタンガス生成率を示している。いずれのグラフにおいても中温消化と高温消化におけるガス生成率に差がないことが伺える。図5 (a) に示す通り、投入 TS1kg 当たりのガス生成量は 0.7 m³ 程度なので、生ごみの含水率を 80%と仮定して計算すると、1 トンの生ごみから 140 m³ の消化ガスを生成できるという結果になる。また除去 VS 当たりの消化ガス生成率は 0.9~1.0 m³/kg-VS 除

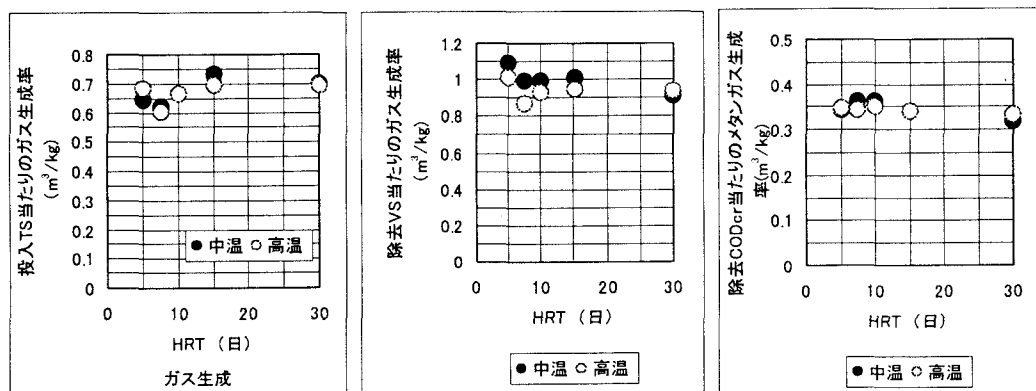


図5 ガス生成収率の比較

去量であり、前報⁷⁾で報告した生ごみの擬似分子式 $C_{17}H_{25}O_{10}N$ に基づいて計算した理論的ガス生成率: $0.88 \text{ m}^3/\text{kg-VS}$ とほぼ一致する。なお、メタンガスの COD 換算当量から計算すると、 $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ から理論的にはメタン 1 モル (22.4 L) は 64 g の酸素(ThOD)に相当するので、1kg の ThOD は全部メタンになるとしたら $22.4/64=0.35 \text{ m}^3$ のメタンになる。もし COD_{Cr} で ThOD を近似できるなら、1kg の COD_{Cr} を除去すると、 0.35 m^3 のメタンガスが生成される計算になる。図 5 (c) に示すように本研究の実測メタン生成率は除去 COD_{Cr} 1kg 当たり $0.32\sim0.36 \text{ m}^3$ となっている。この結果は従来の食品工場排水処理や下水汚泥処理¹²⁾と同様、生ごみの中温または高温嫌気性消化のいずれの条件においても除去 COD_{Cr} 1kg 当たりのメタンガス生成量は 0.35 m^3 という換算係数が十分信頼できるものと言える。

3.4 嫌気性消化後の遠心分離上澄水の水質比較

図 6 に中温と高温消化物の遠心上澄水の水質を COD_{Cr} 、BOD 及び COD_{Mn} の三つの有機物指標で比較している。これより明らかなように、すべての条件において高温消化の上澄水の COD_{Cr} 、BOD 及び COD_{Mn} は中温消化のそれより高かった。とくに HRT10 日以上では、高温の値は中温の 2 倍以上高かった。この結果を図 2 (b) と関連して比較すると、高温消化の加水分解率は確かに中温より高いが、その加水分解生成物は十分メタンへガス化できずに、かなりの部分は液中に残存することが伺える。この残存有機物の組成として VFA だけでなく、炭水化物、タンパク質及び脂質も高い濃度で検出されている。中温条件における炭水化物、タンパク質及び脂肪の濃度はそれぞれ $0.5\sim0.7 \text{ g/l}$ 、 $2.9\sim5.2 \text{ g/l}$ 及び $0.1\sim0.6 \text{ g/l}$ であったのに対して、高温条件ではそれぞれ $0.7\sim1.1 \text{ g/l}$ 、 $4.7\sim6.2 \text{ g/l}$ 及び $0.7\sim2.0 \text{ g/l}$ であった。

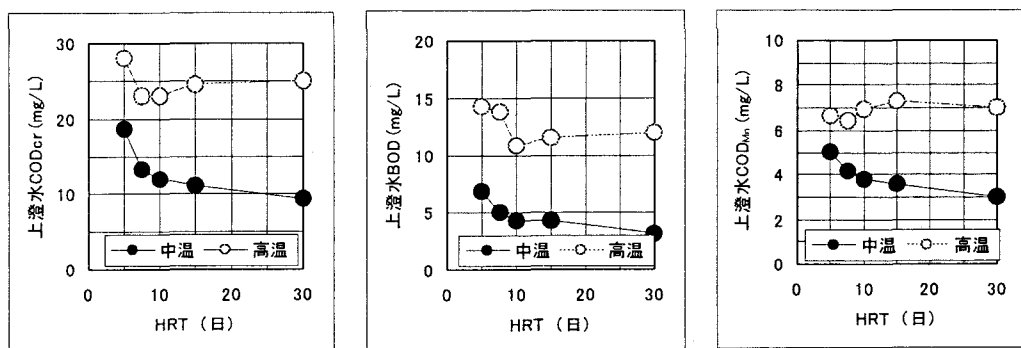


図 6 中温と高温消化物の遠心上澄水の水質比較

4. 考察

4.1 高温条件における VFA の残存

本研究の高温条件において VFA が酢酸換算として $2000\sim4760 \text{ mg/L}$ 残存しているが、その原因は単に過負荷によるものではないと考えられる。なぜならば、HRT を 30 日から 5 日まで短縮し、負荷を 5 倍ぐらい高くしても VFA 濃度は大きく変化してないこと、活性テストでもメタン生成活性が十分高いことを確認しているからである。本研究の高温消化における VFA の残存は恐らく微量栄養塩不足または NH_4^+-N 阻害のいずれかによるものと考えられる。ただ HRT15 日で行った栄養塩添加の実験によれば、栄養塩を多く

添加することで、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度 2000mg/L 程度の条件においても、VFA を十分低下させることができた経験¹¹⁾から、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 阻害よりも微量栄養塩不足の影響が大きかったと推定される。

4.2 中温消化と高温消化の比較評価

嫌気性消化における温度の影響は従来から注目されているテーマであり、下水汚泥や廃水処理の分野でよく研究されてきている^{8, 13)}。これまでの結論として（１）高温消化のメリットは有機物の分解、ガス化率が早く、高い有機物負荷、短い滞留時間での運転が可能であることと、（２）病原性微生物の死滅率が高く、消化汚泥がより衛生的であることの２点にあると報告されている。また欠点としては（１）廃棄物を加熱するのにより多くのエネルギーを消費し、エネルギー生産効率が低くなる、（２）消化の上澄水の水質が悪い、（３）安定性が悪く、運転が難しいケースもあるなどが指摘されている⁸⁾。一方、ごみの嫌気性消化に関しては欧米の幾つかの研究によれば高温消化を採用することで、有機物分解率とガス生成率を大幅に向上できるとされている¹⁴⁻¹⁶⁾。しかし、本研究の結果はむしろ下水汚泥の研究結果とよく似ており、HRT を十分長く取った場合には Pfeiffer (1974)¹⁴⁾、Marique et al (1989)¹⁵⁾、Cecchi et al (1991)¹⁶⁾が報告した高温有利説を支持できないものである。その原因はごみ質の違いによるものと考えられる。Pfeiffer (1974)、Marique et al (1989)、Cecchi et al (1991)の研究に用いたごみには厨芥だけでなく、紙とグリーンウェストも多く含まれているのに対して、日本でいう生ごみの中にこのような難分解性物質はほとんどない。また東京都都市清掃局の広畑ら¹⁷⁻¹⁸⁾が行った室内実験でも長い滞留時間で本研究と同じ結果を得ている。そこで、本研究の結果を従来の研究報告と比較しつつ、中温消化と高温消化の比較を滞留時間の長短に応じて表３のようにまとめた。結論として HRT が 15 日以上条件では有機物の減量化やガス生成において中温と高温消化はほぼ同等な結果になるが、HRT が 10 日以下の短い滞留時間では高温消化の優位性が顕著になる。

表３ 生ごみの高濃度消化における中温と高温の比較評価（○＝勝る、×＝劣る）

比較項目	HRT = 5-10 日		HRT が 15 日以上		備考
	中温	高温	中温	高温	
１．有機物の減量化	×	○	同等	同等	文献 18 と一致
２．ガス生成量	×	○	同等	同等	文献 18 と一致
３．加水分解率	×	○	×	○	本研究の結果
４．負荷能力	×	○	同等	同等	文献 15 と一致
５．運転の安定性			○	×	高温で VFA 残存
６．上澄水水質	○	×	○	×	本研究の結果
総合評価	高温消化が有利		同等		

５．結論

微量栄養塩を添加することで中温と高温のいずれの条件においても生ごみの高濃度・高負荷嫌気性消化の安定運転を実現できた。本研究より次の結論が得られた。

- （１）中温と高温のいずれの条件においても、滞留時間 5 日の条件で安定運転を実現できた。 COD_{Cr} 容積負荷は最大 32.0 kg/m³/d に達し、対応している COD_{Cr} -VSS 負荷は中温と高温でそれぞれ 1.5 及び 3.8 kg/kg-VSS に達することができた。
- （２）中温と高温消化の性能比較は滞留時間に依存する。滞留時間が 15 日以上と十分長い場合、有機物の減量化と消化ガスの生成量における中温消化と高温消化の顕著な差がなく、TS 減量化率、VS 減量化率及び COD_{Cr} 分解率はそれぞれ 74%以上、78%以上、73%以上で、投入 TS 当たりの消化ガス生成率は 0.7 m³/kg-TS 程度である。一方、滞留時間が 10 日以下短くなると、高温消化による有機

物分解率は中温のそれより明らかに高くなる。

- (3) 高温消化の最大の利点は加水分解やメタン発酵の反応速度が速いことである。中温消化15日で達成するVS減量化率は高温ではわずか7.5日で達成できる。しかし、高温消化ではプロピオン酸と酢酸が残存しやすく、遠心上澄水はCOD_{Cr}、BODの各水質項目において中温のそれより高い。
- (4) 高温消化のメリットを十分生かすために、高温消化を採用するなら、投入TS10%程度の条件でHRTを7.5日程度に短縮して高負荷・高速処理を行うことができる。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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，Vol.50，pp.533-539，1997。
- 3) 岩尾充：メビウスシステムについて，環境技術，Vol.27，pp.845-852，1998。
- 4) 久芳良則：REMシステムについて，環境技術，Vol.27，pp.853-859，1998。
- 5) 坂上正美：リネッサシステムについて，環境技術，Vol.27，pp.860-866，1998。
- 6) Riggle, D.: Anaerobic digestion for MSW and industrial wastewater, *Biocycle*, pp.78-82, November 1996.
- 7) 李玉友、佐々木宏、奥野芳男、関廣二、上垣内郁夫：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，Vol.35，pp.29-39，1998。
- 8) 李玉友：汚泥・生ごみなどの有機廃棄物の高温メタン発酵，水環境学会誌，Vol.26，pp.644-649，1998。
- 9) 佐々木宏、李玉友、関廣二、上垣内郁夫：生ゴミの高温、高濃度メタン発酵における滞留時間と負荷の検討、水環境学会誌に投稿中、1999。
- 10) Mata-Alvarez, J.: Biological household waste treatment in Europe: second Aalborg international conference. Resources, Conservation and Recycling, Vol.17, pp.67-73, 1996.
- 11) 李玉友、佐々木宏、奥野芳男、関廣二、上垣内郁夫：生ごみの高濃度メタン発酵における微量栄養塩の必要性，第32回日本水環境学会年会講演論文集，pp.137，1998。
- 12) 李玉友、野池達也：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，Vol.10，pp.729-740，1987。
- 13) 松尾吉高、桐山光市（1981）下水汚泥の嫌気性消化—高温消化と中温消化の比較実験、第17回衛生工学研究討論会論文集、183-190。
- 14) Pfeffer, J. T.: Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol.16, pp.771-787, 1974.
- 15) Marique, Ph., Gilles, A., Edeline, F. and Joassin, L. (1989) Thermophilic semisolid anaerobic digestion of municipal refuses. *Biotech. Bioengr.*, 33, 536-541
- 16) Cecchi, F., Pavan, P., Musacco, Mata-Alvarez, J., Bassetti, A. and Cozzolino, C.: Anaerobic digestion of municipal solid waste: thermophilic vs. mesophilic performance at high solids, *Waste Management & Research*, Vol.9, pp.305-315, 1991.
- 17) 伊藤勝康、広畑和幸、占部武生、秋山薫、西沢千恵子：ちょう芥のメタン発酵について、東京都清掃研究所研究報告，pp.119-137，1979。
- 18) 広畑和幸、伊藤勝康、西沢千恵子、占部武生、秋山薫：ちょう芥のメタン発酵について（その2），東京都清掃研究所研究報告，pp.57-81，1980。