

(4) 生ごみの高温メタン発酵に及ぼす投入濃度の影響

Effect of the Influent TS Concentration on High Solid Thermophilic Methane Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste

O 李玉友*、佐々木宏*、奥野芳男*、関廣二*、上垣内郁夫*

Yu-You Li, Hiroshi Sasaki, Yoshio Okuno, Koji Seki, Yikuo Kamigochi

ABSTRACT: Effect of the influent total solid (TS) concentration on thermophilic methane fermentation of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) was investigated by using a semi-continuous flow completely-mixed reactor. The experiment was conducted at a temperature of 55 °C and a constant retention time of 15 days by changing the influent TS level from 5% to 12%. The stoichiometric formula of the methane fermentation of OFMSW was identified as: $C_{17}H_{29}O_{10}N + 6.5H_2O \rightarrow 9.25CH_4 + 6.75CO_2 + NH_4^+ + HCO_3^-$. The micro-nutrient was necessary for maintaining the reactor to be stable at the high influent TS level of 10% or more, otherwise methane fermentation tend to fail due to the accumulation of volatile fatty acid. By adding mineral nutrient to the feed, the reactor was successfully operated at the influent TS up to 12%, and no remarkable decrease in treatment performance was identified. The relationships between influent TS level and various operation parameter were determined quantitatively based on the experimental results.

KEYWORDS: Anaerobic digestion, thermophilic, organic fraction of municipal solid waste, high solid, methanogenesis, volatile fatty acid, trace metal, ammonia, stoichiometry, energy yield.

1. はじめに

1994 年度全国のごみ総排出量は 5,020 万トンに達し、1 人 1 日当たりのごみ総排出量は 1,106 g であった¹⁾。最近、埋立地の不足、焼却工場の建設の立地難やダイオキシン発生が大きな社会問題となり、ごみの減量化、資源化処理が強く求められている。生ごみは含水率が高く、腐敗しやすいので、最も取り扱い難く、処理が難しいと言われている。最近の調査によれば、一般的な世帯の生ごみ発生量は 200-340g/(人・日)で、平均で 250g/(人・日)程度である²⁻⁶⁾。また事業系ごみ中の生ごみ含有率は業種により 15~70%の範囲で変化し、特に食品加工型小売業、飲食店、給食センターから出されたごみの 5 割以上が生ごみである³⁻⁴⁾。

生ごみの処理については一般廃棄物として焼却などの処理法が利用されてきている。しかし、生ごみには水分を 75-85%程度含み^{3, 5)}、単独では自然でできないばかりでなく、他のごみと混合して燃焼する場合でも焼却炉内の温度上昇を妨げ、ダイオキシンの発生を引き起こす可能性がある。近年、リサイクル社会の構築が推進されている中で大きくクローズアップされてきた循環型処理技術として、メタン発酵によるエネルギー回収とコンポスト化による有機肥料生産が注目されている⁷⁻⁸⁾。特に、メタン発酵による生ごみの減量化、エネルギー回収、衛生化効果(病原菌を死滅させる)、発酵物肥料価値の向上が高く評価され、国内外で実用化されつつある⁷⁻¹²⁾。

* アタカ工業株式会社・技術研究所 (Technical Research Institute, ATAKA Constr. & Engrg. Co. Ltd)

Tel: 06-551-5901, Fax: 06-553-6035.

ごみのメタン発酵に関する研究開発の歴史的経緯は表 1 にまとめた通り、最古の報告は 1930 年代に遡るが、本格的基礎的研究の始まりは、1960 年代後半カリフォルニア大学で Golueke が指導した 5 年間の研究及びその後イリノイ大学 Pfeffer 教授が行ったごみのメタン発酵によるエネルギー回収可能性に関する実験的研究と言われている¹³⁻¹⁸⁾。その後、米国エネルギー省は 1978 年から 1985 年まで RefCoM (Refuse Conversion to Methane) と称する実証研究を Waste Management, Inc 社に委託し、フロリダ固形廃棄物減量センターでパイロットプラント実験を行った¹⁴⁻¹⁷⁾。また、GRI (Gas Research Institute) では Ghosh 及び Klass らによる一連の研究があり、SOLCON プロセスのパイロットプラントも行われた¹⁶⁻¹⁷⁾。日本においては 1980 年代に通産省のスターダスト研究プロジェクト¹⁹⁾の中で都市ごみのメタン発酵に関するパイロットプラントを実施しており、関連する研究も数件報告されている²²⁻²⁴⁾。しかし、これらの研究においてメタン発酵槽への投入 TS 濃度は 8% 以下と低く設定されたため、エネルギー回収や排水処理の観点での経済性の問題に分別技術体制の未熟も加えて埋め立てや焼却等の従来技術と競合できなく、結果的には日米での実用化は更なる技術開発を待つしかなかった。

一方、ヨーロッパでは EC 委員会(CEC)は 1978 年、環境とエネルギー問題の両立を目指すべく代替エネルギー源の開発に関する研究開発を支援することを決定し、1979-1983 年の 5 年間に於いてメタン発酵を中心とした計 21 個の研究プロジェクトを進行させた¹⁵⁻¹⁶⁾。以来、西ヨーロッパを中心に、有機廃棄物のメタン発酵に関する積極的な技術開発が行われ、Dranco (ベルギー)、Valorga (フランス)、BTA (ドイツ)、Biocel (オランダ)、WAASA (フィンランド)、BIMA (オーストリア)、COMPOGAS(スイス)等の代表的プロセス(計 20 個以上もある)の実用化に成功している。

表 1 先進諸国における生ごみメタン発酵の研究開発の経緯⁹⁻²⁸⁾

年代	アメリカ合衆国	日本	ヨーロッパ
初期的研究	・ごみのメタン発酵に関する最古の報告は 1936 年 barbit らの研究に遡る。 ・ 1955 年洞沢勇が尿に厨芥を混合すると、メタンガス発酵量が大幅増加したことを報告 ・ Golueke らの研究報告 ・ 1969 年アメリカ厚生省廃棄物管理局によるごみメタン発酵の研究委託		
1970	・ Pfeffer らの研究 (1974) ・ Refcom プロジェクト 7 年間実証研究(1978-1985) ・ Jewell らの研究 (乾式)	・ スターダスト'80 研究計画 (1975-1982) ・ 東京都清掃局の実験研究 (1979)	・ 1978 年 CEC が都市や産業廃棄物のリサイクル処理研究開発プログラムを発足 (1979-1983)
1980	・ GRI による基礎研究と SOLCON プロセス (Ghosh と Klass の研究)	・ 石田らの研究(1984)	・ DRANCO プロセス実証 ・ VALORGA プロセスがフランスで実用化 (世界初) ・ Ceccchi らの基礎的研究
1990	・ NREL レポート ・ Kayhanian らの研究 ・ Chynoweth らの研究	・ 東郷らの研究 (1996,1997) ・ 佐々木ら(1997) ・ WAASA プロセス実証試験 ・ REM システム実証プラント	・ ドイツ、デンマーク、オランダ等西と北ヨーロッパで多くのプロセスが実用化
実用現状	実証プラント運転	・ 1997 年度で 3 件建設契約 ・ 1998 年度数件計画	・ 1995 年現在で 40 基以上の実績

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 20% 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¹⁵⁻¹⁷⁾、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用されている。都市ごみの生ごみ分を用いた幾つかの研究によれば、高温発酵は中温発酵に比較して、有機物の分解率が高く、メタンガス生成量も多い^{13, 24-26)}。しかし、投入 TS 濃度の影響については、これまでの研究は低濃度 (TS 数%程度) または乾式発酵で行われたものが多く、幅広い TS 濃度範囲での詳細検討はなく、不明な点が多く残されている。

本研究では生ごみの高濃度メタン発酵における投入 TS 濃度の影響を把握することを目的として、投入 TS 濃度を 5%から 12%まで変化させて高温メタン発酵の連続実験を行った。生ごみメタン発酵における理論式、有機物分解率、メタンガス生成量、物質収支について解析した。

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 2 のように選定した。前処理としては高速ブレンダーで粒径 3 mm 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。

表 2 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 ³⁻⁵⁾	
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℃の搅拌槽で貯蔵し、ローラーポンプで 1 日数回定量投入した。投入ポンプはタイマーコントローラで制御した。メタン発酵槽全容量は 8 L で液体反応有効容積は 5 L であり、搅拌はガス循環ポンプにより行っている。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 55℃に維持した。

2.3 実験条件と操作方法

実験内容と実験条件は表 3 にまとめた通り、全部で五つの Run があり、滞留時間を 15 日に設定して投入 TS 濃度を 5%から 12%まで変化させた。COD_{Cr} 容積負荷は 4.9~13.5 g/(L・d)の範囲で変化した。また投入 TS 濃度が 10%以上の条件では VFA の大量蓄積で反応槽の定常運転が不可能であったので、表 3 のように微量栄養塩を添加した。

種汚泥は下水汚泥の高温嫌気性消化槽から採集した。スタートアップの初期には TS5%の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。

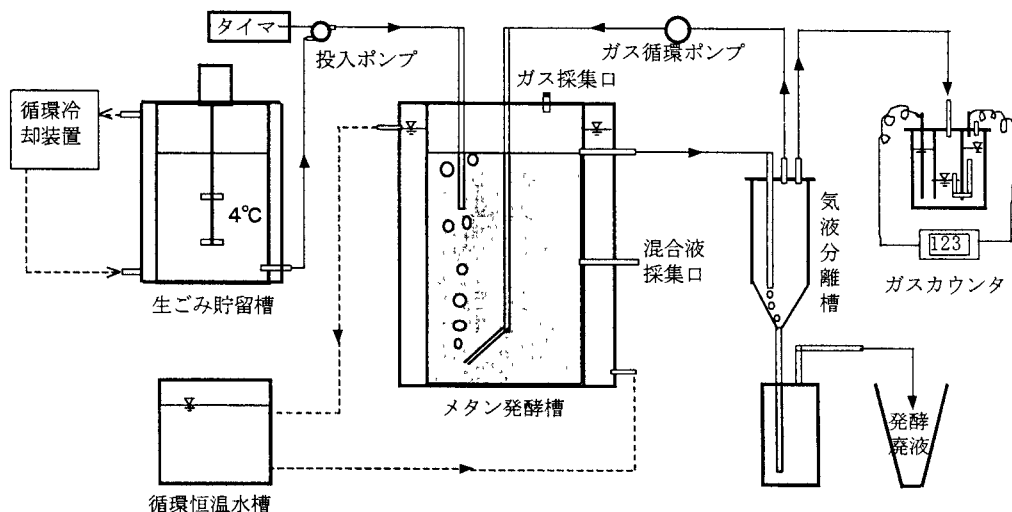


図1 本研究に用いたガス攪拌型連続実験装置の概略

表3 実験条件のまとめ

	項目	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5
操作条件	投入 TS 濃度 (%)	5.0	7.5	10.0	10.0	12.0
	滞留時間 (日)	15	15	15	15	15
	栄養塩添加	なし	なし	濃度 1 *	濃度 2 **	濃度 1 *
投入生ごみの水質分析 平均値	pH (-)	4.12	4.37	4.36	4.29	4.36
	TS (g/L)	50.8	76.3	97.6	96	118.2
	VS (g/L)	47.7	71.6	88.6	87	105.1
	VS/TS (%)	93.9	93.8	90.9	90.6	88.9
	COD _c (g/L)	72.7	11.29	152	148	182
	COD _c /TS	1.43	1.46	1.56	1.54	1.54
	T-N (mg/L)	1,880	2,190	3,120	3,350	4,650

*濃度 1 = FeCl₂: 100mg/L, NiCl₂: 10mg/L, CoCl₂: 10mg/L, **濃度 2 = 濃度 1 の 5 倍

2.4 分析方法

pH、アルカリ度、NH₄-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ー硫酸法、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⁾。脱離液の成分は 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) 用いた。カラムオープンの設定温度は 50℃～170℃の範囲で段階的昇温操作を行った。検出器の温度は 280℃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℃、1 気圧の乾燥ガス量に換算している。ガス組成 (N₂, CH₄, CO₂) 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 3m 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℃であった。

3. 実験結果

3.1 投入 TS 濃度、VFA の蓄積及び微量栄養塩添加の必要性

表4に各 Run の定常状態における主な分析結果及び有機酸の蓄積状況をまとめている。投入 TS 濃度 5% (Run1) の条件で VFA がほとんど蓄積しなかったが、TS 濃度 7.5%(Run2)では 5,000 mg-COD_C/L となり、また TS 濃度 10%の条件では短期間に 10,000 mg/L 以上まで蓄積し、pH も徐々に低下して酸敗になった²⁸⁾。そこで基質の投入を一旦止め、重炭酸ナトリウムと水酸化ナトリウムで pH を 7.2 に上げて回復実験を継続すると同時に、微量栄養塩添加効果の検討に関する回分実験も実施した。無添加のコントロール系に比較して Fe, Ni, Co の添加によるメタン生成の促進効果が認められ、しかも複合添加の方がより効果的であった。この回分実験の結果に基づき、Run3 では微量栄養塩を添加して実験した結果、メタン発酵は回復したものの、VFA が依然として 5,000 mg-COD_C/L 程度残留していた。この傾向は長く運転しても変らなかった³⁰⁾。そこで Run4 では微量栄養塩の添加濃度を 5 倍上げて実験を行った。その結果、VFA 濃度を数百 mg/L 程度まで低下させることができた。これらの結果は生ごみの高温・高濃度メタンにおいて微量栄養塩類のコントロールが重要であることを示唆している。

投入 TS 濃度 12%の Run5 では添加した栄養塩濃度が Run4 と同じであったにもかかわらず、VFA の大量蓄積が見られた。しかし反応槽の pH は 7.7 に安定しており、メタン生成には特に問題がなかった。生ごみの高濃度メタン発酵において VFA 蓄積の問題はしばしば報告されており、栄養塩不足または阻害因子の存在が原因であると考えられるが、この当たりについては更なる研究が必要である。

表4 各条件の定常状態における主な分析結果及び有機酸の蓄積状況

項目		Run1	Run2	Run3	Run4	Run5
負荷条件	COD _C 容積負荷 (g/L/d)	4.9	7.6	10.1	10.0	13.5
	COD _C -SS 負荷 (g/g-SS/d)	0.92	1.09	1.11	1.11	1.12
代表的 水質データ	反応槽内 pH (-)	7.5	7.1	7.7	8.0	7.7
	アルカリ度 (mg/L)	3,420	2,880	8,430	10,300	9,630
	TS (g/L)	12.5	20.6	25.4	29.5	31.2
	VS (g/L)	9.31	15.9	18.7	21.5	23.3
	SS (g/L)	5.28	7.0	9.12	9.01	12.1
	VSS (g/L)	4.28	5.72	7.22	6.98	10.4
	T-COD _C (g/L)	16.0	28.3	37.8	41.8	65.6
	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	876	1,060	1,760	2,180	2,910
VFA 濃度及び 組成	酢酸 (mg/L)	370	1,920	1,650	465	4,830
	プロピオン酸 (mg/L)	19	1,080	1,730	198	6,740
	Iso-酪酸 (mg/L)	17	183	126	33	1,000
	n-酪酸 (mg/L)	22	102	47	検出されず	520
	Iso-吉草酸 (mg/L)	11	252	135	検出されず	1,710
	n-吉草酸 (mg/L)	3	12	30	検出されず	190
	VFA as 酢酸 (mg/L)	421	3,140	3,260	648	12,500
	VFA as ThOD (mg/L)	524	4,730	5,020	855	22,000
ガス生成 状況	ガス生成速度 (L/L/d)	2.59	3.48	3.98	4.58	5.58
	CH ₄ (%)	58.4	56.4	57.5	59.7	57.5
	CO ₂ (%)	40.9	43.0	42.0	39.6	42.4
	H ₂ S (PPM)	-	-	400	60-350	1,100

3.2 有機物の分解・減量化

図2に各実験条件の定常状態における TS, VS 減量化率(a)、SS, VSS の可溶化率 (b)、COD_C 除去率 (d)

及び反応槽内の TS 濃度 (c) を示している。TS と VS の減量化率はそれぞれ 70-75% (平均 74%) 及び 78-81% (平均 79%) の範囲にあり、投入 TS 濃度による影響は見られなかった。SS と VSS の可溶化率については栄養塩を添加せず酸敗気味の Run2 (TS7.5%) を除いてそれぞれ 83-85%、86-88% に達している。COD_{Cr} の除去率は投入 TS 濃度よりも VFA の蓄積に強く影響され、栄養塩添加などで VFA の蓄積を無くした場合、COD_{Cr} 除去率は 75-78% 程度に達したが、有機酸が大量に蓄積した場合には 70% 以下に低下してしまった。

反応槽における TS 濃度は図 2(c) に示したように、投入 TS 濃度に左右され、(1) 式のような直線的相関関係が得られている。投入 TS 濃度が 12% の条件においても反応槽における TS 濃度は 3% 程度であった。また (1) 式を用いて予測すると、投入 TS 濃度を 15% 及び 20% と高く設定しても反応槽における TS 濃度は 4.0% 及び 5.4% しかなく、十分攪拌可能な濃度範囲である。即ち、生ごみの高温メタン発酵において有機酸の蓄積さえ防止できれば、投入 TS 濃度は高く設定できる。

$$\text{反応槽内の TS 濃度 (\%)} = 0.271 \times \text{投入 TS 濃度 (\%)} \quad (1)$$

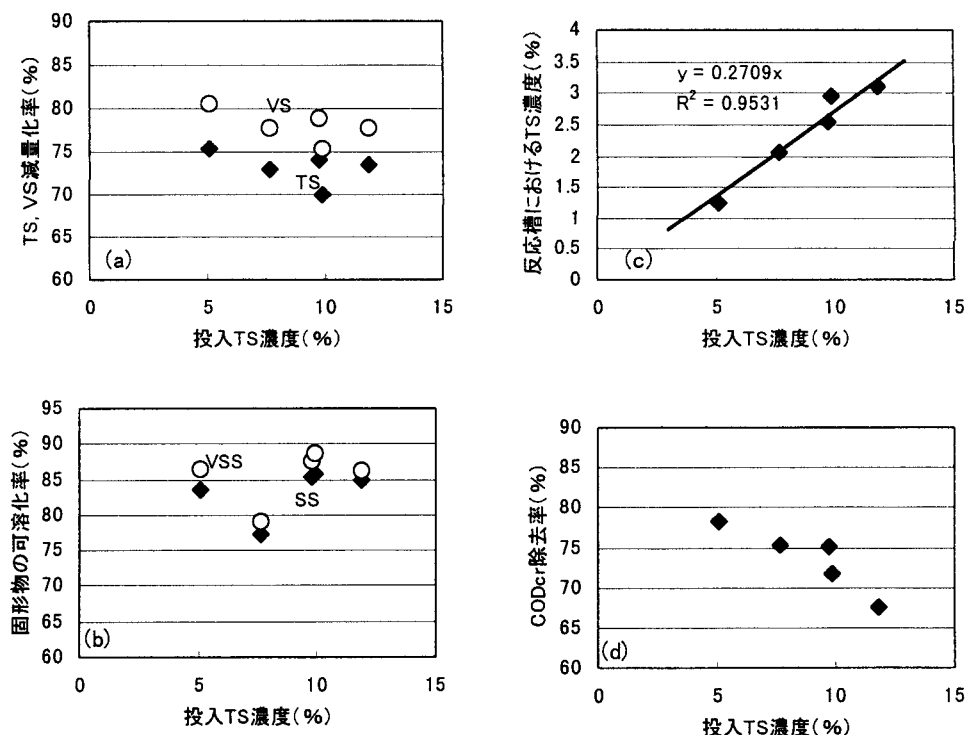
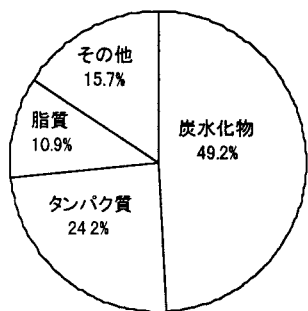


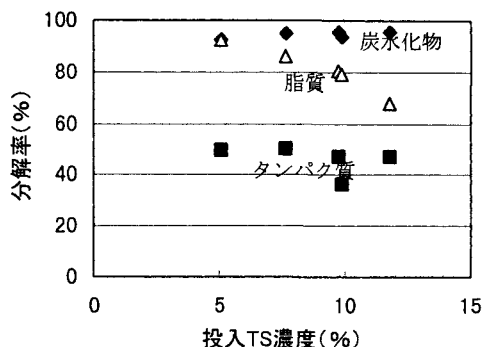
図2 減量化率、可溶化率、COD_{Cr}除去率及び反応槽内 TS 濃度に及ぼす投入 TS 濃度の影響

3.3 炭水化物、蛋白質、脂質の各成分の分解

図3に本研究に用いた生ごみの平均的化学組成 (a) 及びメタン発酵における各成分の分解率 (b) に及ぼす投入 TS 濃度の影響を示す。用いた生ごみの平均的化学組成として炭水化物は5割程度、タンパク質は4分の1程度、脂質は1割程度であった。メタン発酵における各成分の分解率については炭水化物と脂質がそれぞれ 92-96% 及び 68-92% と高かったのに対して、タンパク質は 37-50% と低かった。下水汚泥の 10 日



(a) 本研究に用いた生ごみの化学組成



(b) 各成分の分解率

図3 生ごみの炭水化物、タンパク質及び脂質の分解率

高温嫌気性消化における炭水化物、タンパク質及び脂肪の分解率はそれぞれ 68%、62%及び 48%である³¹⁾ 結果に比較して、生ごみに含まれる炭水化物と脂肪は分解しやすいと言える。またタンパク質の分解率が低かった原因としては、ここでいう分解率は見かけ上のものであって、細菌増殖による影響を考慮していないからである。一般的に炭水化物と脂肪の分解に伴い、嫌気性細菌が増殖し（細菌のタンパク質含有率は 50～60%²⁹⁾、菌体タンパク質が増える。その結果、見かけ上の蛋白質分解率が低下する。なお投入 TS12%の条件における脂質分解率の著しい低下については、主に VFA 蓄積による影響と考えられる。

3.4 ガス生成量

メタン発酵槽におけるエネルギー生産を評価する上で、ガス発生倍率は簡単で分かりやすい指標である。図4にガス発生倍率に及ぼす投入 TS 濃度の影響を示す。ここでいうガス発生倍率は投入物容量に対するガス生成量の容積比である。ガス発生倍率は基本的に投入 TS 濃度の増加に伴い、直線的に高くなっている。図4に示したように、ガス発生倍率 $= 7.0 \times \text{TS 濃度} (\%)$ という相関関係の良い回帰直線が得られている。またガス組成は表4にまとめた通り、メタン含有率が 56.4%～59.7% (平均 58%)、二酸化炭素は 39.6%～43%の範囲にあった。なお硫化水素の濃度は 60～1,100ppm の範囲にあり、栄養塩として鉄塩を多く添加した条件 (Run4) では硫化水素の濃度が低下していた。

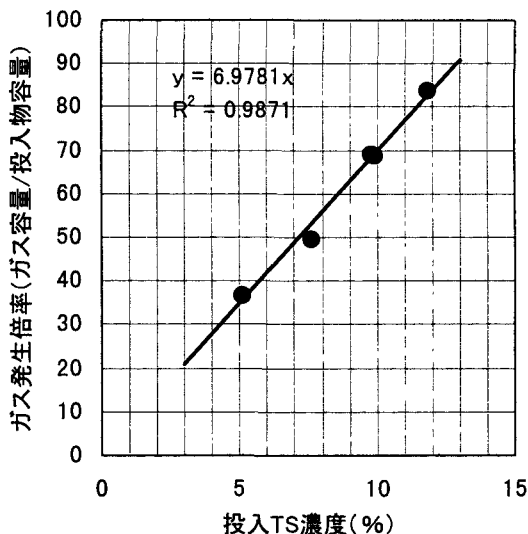


図4 ガス生成量に及ぼす投入濃度の影響

3.5 アルカリ度及び $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度に及ぼす投入 TS 濃度の影響

反応槽におけるアルカリ度及び $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度に及ぼす投入 TS 濃度の影響を把握するために、各条件における分析結果の平均値について図 5 のように相関関係を解析してみた。図 5 に示した通り、アルカリ度と $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度はいずれも投入濃度の増加につれて高くなっている。投入 TS 濃度は 12% の条件では $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が 2,900 mg/L と高くなっていた。このような条件では $\text{NH}_4^+\text{-N}$ による阻害が心配される。実際、同条件では VFA の大量蓄積が見られた。しかし、最近の系統的研究^{32,39)}によれば、馴致なしのメタン発酵汚泥では 2,000-2,500 mg/L の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ で阻害が見られるものの、よく馴致した汚泥では $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が 3,500 mg/L 程度高くても顕著な阻害影響は見られないと報告されている。従って、本研究の Run5 条件での VFA 蓄積は $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 阻害によるものなのか、それとも栄養塩不足が原因なのかについては結論を出せない。この点については今後の検討課題としたい。

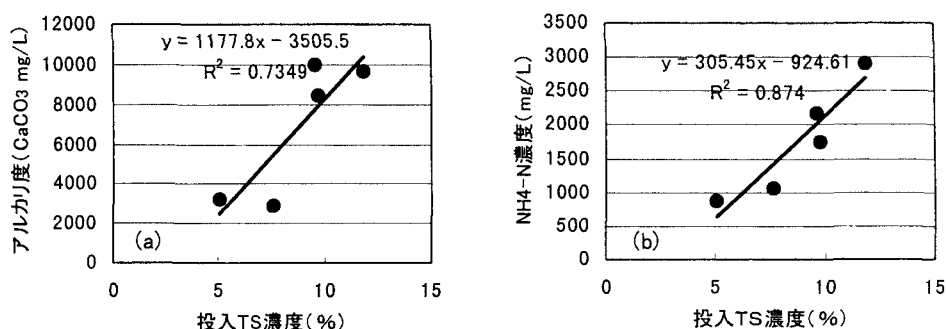
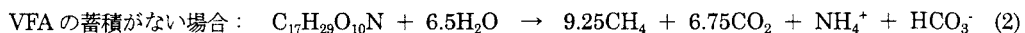


図 5 反応槽におけるアルカリ度及び $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度に及ぼす投入 TS 濃度の影響

4. 考察

4.1 生ごみメタン発酵の疑似理論式

本研究に用いた生ごみの元素組成は炭素 47.8%、水素 6.7%、酸素 38.0%、窒素 3.3%であった。この結果に基づき、生ごみの有機物の疑似分子式は $\text{C}_{17}\text{H}_{29}\text{O}_{10}\text{N}$ と計算される。なお、メタン発酵で生成した NH_4^+ は HCO_3^- と釣り合っている⁹⁾として生ごみメタン発酵の化学量論式を計算すると、(2)式になる。



この量論式によれば、理論的ガス生成量は $(9.25 + 6.75) \times 22.4 / 407 = 0.88 \text{ L/gVS}$ 、メタン含有率は $9.25 / (9.25 + 6.75) = 57.8\%$ なので、分解 VS 量当たりのメタン収率は 0.51 L/gVS となる。実験では投入 VS 当たりのガス生成量は $0.8\text{--}1.0 \text{ L/g-VS}$ 程度で、メタン含有率は 58% 程度なので、(2)式に基づく計算結果とよく一致している。

4.2 COD 物質収支

固形物のメタン発酵における有機物の分解過程は固形物の可溶化、溶解物の低分子化、酸生成、メタン生成の4段階に分けられ、また反応槽における物質の存在状態が固形物、溶存物、ガスの3種類に分類できる。そこで、各条件での物質分解の全体状況を把握するため、投入 COD_c 量を 100%として、反応槽から出る物質を固形物、溶存物及びガスの3大類に分け、溶存物についてはさらに可溶化生成物（炭水化物、タンパク質及び脂肪）、VFA 及びその他に細分してそれぞれの COD 換算収率を計算し²⁹⁾、COD ベースの物質収

支を表5にまとめた。表より明らかなように、 COD_c と理論 COD で計算して物質収支がほぼ取れており、投入 COD_c の約 70-80 がメタンガスになっている。

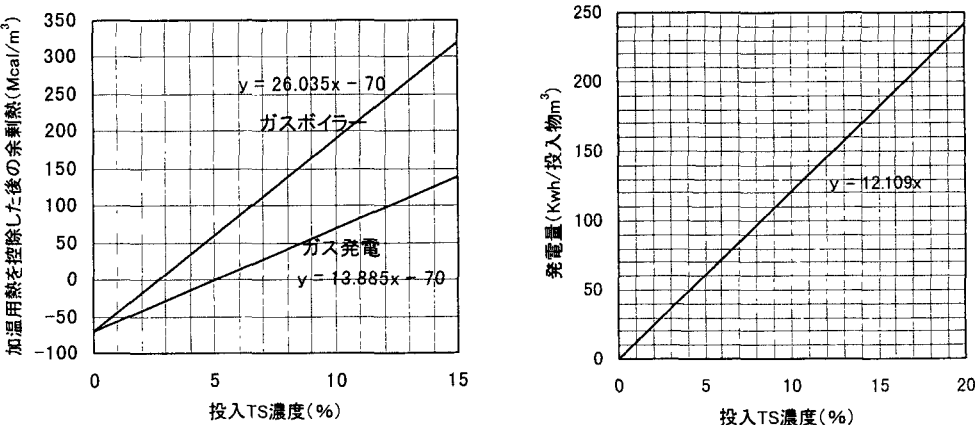
表5 各条件における COD 物質収支（投入物の COD_c を 100%として流出物の収率を計算した）

投入 TS 濃度 (重量%)	固形物 (%)	上澄水中溶存物：S-COD (%)				メタンガス (%)	回収率 (%)
		3成分*	VFA	その他**	小計(分析値)		
5.0 (Run1)	11.0	6.0	0.7	4.0	10.7	83.7	106.0
7.5 (Run2)	7.3	10.2	4.2	3.2	17.5	70.2	95.1
10.0 (Run3)	8.7	8.1	3.3	4.7	16.2	74.3	99.1
10.0 (Run4)	10.2	8.2	0.6	8.8	17.6	79.1	106.9
12.0 (Run5)	9.3	8.2	10.9	4.1	23.2	68.1	100.6

*炭水化物、タンパク質、脂質の COD 換算量, **その他=S-COD－3成分－VFA として計算

4.3 エネルギー生産率に及ぼす投入 TS 濃度の影響

メタン発酵によるエネルギー生産を考える場合、反応槽加温用のエネルギーも含めて評価しなければならない。そこで、投入物の温度は 15℃、反応槽内の温度は 55℃、また熱放散による熱損失は 2℃/(日・m³)と仮定して、図4に示すガス発生データに基づき、ガスボイラーによる加熱及びガス発電を行う場合のエネルギー生産量を計算してみた。ここでは、下水汚泥処理の実績⁴⁰⁻⁴¹⁾に基づき、ガスボイラーを用いた加温のエネルギー効率率は 75%とし、またガス発電の電力生産効率と熱回収率はそれぞれ 30%と 40%と仮定している。図6(a)に加温用熱エネルギーを控除した後の余剰熱の生成量に及ぼす投入 TS 濃度の影響を示す。ガスボイラーで反応槽の加温を行う場合、投入 TS 濃度が 2.7%以上になれば、余剰熱エネルギーを生産できる。またガス発電を行い、回収した廃熱で反応槽の加温を行う場合には、投入 TS 濃度が 5.0%以上になれば、余剰エネルギーが得られる。即ち、エネルギー収支の観点から付加燃料なしで高温メタン発酵を成立させるためには、ガスボイラーによる加熱方式を取る場合、投入 TS 濃度は 2.7%以上が必要であり、またガス発電の回収廃熱で加温を賄うなら、投入 TS 濃度を 5.0%以上と設定する必要がある。



(a) ガスボイラー又はガス発電の廃熱を用いて反応槽を行う場合の余剰熱の生成 (b) ガス発電による電力生産量

図6 エネルギー生産率に及ぼす投入 TS 濃度の影響

5. 結論

生ごみのメタン発酵は基本的に $C_{17}H_{29}O_{10}N + 6.5H_2O \rightarrow 9.25CH_4 + 6.75CO_2 + NH_4^+ + HCO_3^-$ という量論式で表現できたが、高濃度で実施する場合、微量栄養塩の添加が必要であった。VFA の大量蓄積による酸敗を防止できた高温連続実験より次の結論が得られた。

- (1) TS 及び VS の平均的減量化率はそれぞれ 74% 及び 79% で、COD 除去率は 75% 程度であった。
- (2) 生ごみの各成分の見かけ上分解率として炭水化物が 92-96%、脂質が 68-92%、タンパク質が 50% 程度であった。いずれも下水汚泥の対応成分より高い分解率を示した。
- (3) 反応槽における TS 濃度、アルカリ度、 NH_4^+-N 濃度及びガス発生倍率はいずれも投入 TS 濃度の増加に伴い直線的に高くなっていた。
- (4) エネルギー収支の観点から高温メタン発酵を応用する条件として、ガス発電を行う場合と行わない場合の最低投入 TS 濃度はそれぞれ 2.7% 及び 5.0% である。実用的にエネルギー自立型・生産型高温メタン発酵を実現させるために、投入 TS 濃度をなるべく高く設定することが望ましい。本研究の結果は微量栄養塩を制御することで投入 TS10% 程度で安定的高温発酵を実現できることを示唆した。

参考文献

- 1) 入江登志男：一般廃棄物行政の現状と課題，環境技術，Vol.27, No.1, pp 55-59, 1998。
- 2) 高橋俊和，三上佳秀，寺岡泰浩：横浜市ごみ質の推移について，都市清掃，Vol.51, No.223, pp.140-145, 1998。
- 3) 森田明博，木村洋：ちゅう房系の廃棄物，空気調和・衛生工学，Vol 64, No.2, 103-109, 1990。
- 4) 谷川昇，武本敏男，大木秀男，川崎照夫：生ごみの細組成，都市清掃，Vol.50, No.217, pp 116-11, 1997。
- 5) 大迫政浩，田中勝，光田恵：厨芥類の臭気防止と処理について，第 3 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.91-94, 1992。
- 6) 川本克也：機器を用いた家庭ごみ処理の現状と課題，第 15 回全国都市清掃研究発表会講演論文集，pp.50-52, 1994。
- 7) 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。
- 8) 松野正隆：資源化処理システムのための収集・運搬・処理技術，都市清掃，50, pp.574-582, 1997。
- 9) 李玉友：高濃度・高負荷メタン発酵エネルギー回収システム，ISS 産業科学システムズ主催『有機性廃棄物のメタン発酵エネルギー回収技術』講習会テキスト，pp.43-69, 1998
- 10) 久芳良則：BIMA システムと実証プラント運転状況，ISS 産業科学システムズ主催『有機性廃棄物のメタン発酵エネルギー回収技術』講習会テキスト，pp 70-93, 1998
- 11) Mata-Alvarez, J.: Biological household waste treatment in Europe: second Aalborg international conference Resources, Conservation and Recycling, Vol.17, pp 67-73, 1996
- 12) Riggall, D.: Anaerobic digestion for MSW and industrial wastewater, *Biocycle*, pp.78-82, November 1996.
- 13) Pfeffer, J. T.: Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol.16, pp.771-787, 1974.
- 14) Wise, D L., Kispert, R. G. and Langton, E.W.: A review of bioconversion systems for energy recovery from municipal solid waste, Part II: fuel gas production, *Resources and Conservation*, Vol.6, pp 117-136, 1981.
- 15) Haveau, H.: Anaerobic digestion in the EEC., *Anaerobic Digestion and Carbohydrate Hydrolysis of Waste*, pp182-194, 1984.
- 16) De Baere, L. and Verstrate W.. Anaerobic fermentation of semi-solid and solid substrates, *Anaerobic Digestion and Carbohydrate Hydrolysis of Waste*, pp195-208, 1984.
- 17) Gupta, B. and Shepherd P.: Data summary of municipal solid waste management alternatives, Volume X: Appendix H- Anaerobic digestion of MSW, NREL/TP-431-4988J, 1992.
- 18) Cecchi, F. and Traverso P. G.: State of the art of R & D in the anaerobic digestion process of municipal solid waste in Europe, *Biomass*, Vol.16, pp.259-284, 1988.

- 19) 大磯義和：スターダスト'80の現状，省エネルギー，Vol.32, No.11, 65-73, 1980。
- 20) 石田昌彦，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。
- 21) 洞沢勇：厨芥のし尿合併消化によるガス発生に関する研究1，水道協会誌，No.251, pp.30-36, 1955。
- 22) 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。
- 23) 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。
- 24) Cecchi, F., Pavan, P., Musacco, M., Mata-Alvarez, J. and Vallini, G.: Digesting the organic fraction of municipal solid waste: moving from mesophilic (37 °C) to thermophilic (55°C) conditions, *Waste Management & Research*, Vol.11, pp.403-414, 1993。
- 25) Cecchi, F., Pavan, P., Musacco, M., 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。
- 26) 東郷芳孝，横田長雄：高温メタン発酵による有機性廃棄物処理と燃料利用，クリーンエネルギー，'96.12, pp.45-49, 1996。
- 27) 東郷芳孝，多田羅昌浩，佐藤進，雨森司瑞利，田中俊樹：生ごみの高温メタン発酵による処理，第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.302-304, 1997。
- 28) 佐々木宏，李玉友，奥野芳男，関廣二，上垣内郁夫：生ごみの高濃度メタン発酵特性，第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.305-307, 1997。
- 29) 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。
- 30) 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。
- 31) 清原雄康，宮原高志，水野修，野池達也，李玉友：高温嫌気性消化法を用いた高濃度下水汚泥の処理特性，土木学会論文集，No.601/VII-8, pp.35-43, 1998。
- 32) Parkin, G. F., Speece, R. E., Yang, C.H.J. and Kocher, W. M.: Response of methane fermentation systems to industrial toxicants, *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol.55, pp.44-53, 1983。
- 33) Hashimoto, A.: Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes, *Agricultural Wastes*, Vol.17, pp.241-261, 1986。
- 34) Wiegant, W. M. and Zeeman, G.: The mechanism of ammonia inhibition in the thermophilic digestion of livestock wastes, *Agricultural Wastes*, Vol.16, pp.243-253, 1986。
- 35) Bhattacharya, S. K. and Parkin, G. F.: The effect of ammonia on methane fermentation processes. *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol.61, pp.55-59, 1989。
- 36) Angelidaki, I. and Ahring, B. K.: Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol.38, pp.560-564, 1993。
- 37) Borja, R., Sanchez, E. and Weiland P.: Influence of ammonia concentration on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors, *Process Biochemistry*, 31, pp.477-483, 1996。
- 38) Hansen, K. H., Angelidaki, I. and Ahring, B. K.: Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia, *Water Research*, Vol.32, pp.5-12, 1998。
- 39) Lay, J. J., Li, Y. Y. and Noike, T.: The influence of pH and ammonia concentration on the methane production in high-solids digestion processes, *Water Environmental Research*, Vol.70, pp.1075-1082, 1998。
- 40) 平岡正勝編著：汚泥処理・再資源化技術とシステム，(株)ティー・アイ・シー，pp.260-297, 1994。
- 41) 小出正實：東京都における下水汚泥消化ガス発電，燃料及燃焼，Vol.64, No.10, pp.9-15, 1997。