

# 生ごみの高温メタン発酵処理システム

## Thermophilic Methane Fermentation System for Garbage

東 郷 芳 孝  
多田羅 昌 浩  
後 藤 雅 史

### 要 約

複合建物から排出される生ごみを処理するシステムとしてメタクレス (METAKLES) を M 店舗及び V 店舗の二カ所に設置した。1997 年後半のプラント完成以来、これまで約 1.5 年間の連続運転におけるデータを解析し、本システムの性能を評価した。

本システムは、高圧分別/微粉碎機からなる前処理プロセス、高温メタン発酵プロセス、並びに膜分離式活性汚泥二次処理プロセスから構成される総合生ごみ処理設備であり、最大計画処理量は M 店舗向けシステムの場合 1,500 kg/d である。これまでの運転データによると、本システムは投入有機物のメタン転換率約 80%、投入固形物の可溶化率約 85%、投入油脂分除去率 95%以上を継続的に達成している。生ごみにはメタン菌の活性維持に必要な微量栄養素が不足する場合もあるが、これは微量の金属塩を定期的に添加することにより回避することができる。また、魚脂、牛脂、豚脂などに含まれる高度脂肪酸も、メタン菌に対する阻害的な効果が知られているが、n-ヘキサン抽出物濃度として 16,000mg/L 程度までの油分濃度ではまったく問題はなかった。生ごみ日処理量が平均 1,000kg/d の場合、平均 66%のメタンガスを含有するバイオガスが日量約 200m<sup>3</sup>発生するが、このバイオガスに含まれる熱エネルギーは、おおよそ灯油 100L に相当する。M 店舗、V 店舗の設置例では、発生したバイオガスは温水ボイラの燃料として再利用し、一部の温水はバイオリアクタの加温に利用するが、大半は店舗のゴミ処理施設においてコンテナ等の洗浄水として有効利用に供している。

### 目 次

- I. はじめに
- II. システム構成
- III. 排出生ごみの性状
- IV. システムの立ち上げ
- V. 連続運転
- VI. まとめ

#### I. はじめに

近年各地で建設が進んでいるショッピングモールなどの複合建物から排出される廃棄物は、施設の規模が大きくなるに連れその排出量も増大し、処理・処分が大きな問題となっている。特に、建物内の食料品売り場やファストフード店、レストラン等から排出される賞味期限切れ商品を含む食品残渣、調理屑、厨芥等のいわゆる生ごみの処理・処分は、回収率が 70~80%に達しているスチール/アルミ缶や、30~50%程度は回収されている段ボールや発泡スチロールのようにリサイクル経路が確立している訳ではなく、ごく一部が肥料原料等として回収されているだけであり、大半は施設外に搬出され、焼却などの処分がなされている<sup>1)</sup>。

一方、廃棄物処理委託費用は高額であり、また今後も上昇すると予想されることから、施設内で発生した生ごみを現場で減容・減量す

るための乾燥処理設備や有機肥料の回収を目的とするコンポスト設備の導入例もある。しかし、これまでのところ、必ずしも期待どおりの稼動状況であるとは言えない場合も多い。

我々は、高温メタン発酵システムが、多量の固形分を含む生ごみ等の有機性廃棄物の処理に適していること、また、有機性廃棄物からのエネルギー回収が可能であり環境調和性に優れていることに着目し、メタン発酵に適した前処理プロセスの開発、高温メタン菌に適した微生物担体の開発などを実施してきた。今回、本高温メタン発酵システムを実際の店舗に設置したので、主に M 店舗向けシステムについてその運転実績を以下に報告する。

#### II. システムの構成

本システムは、搬入された生ごみから生物処理に適さないプラスチックや金属等の異物を除去し、さらに固形有機分を微粉碎する前処理プロセス、有機物の大半を嫌氣的にメタンガスに変換するメタン発酵プロセス、並びにメタンガスを含むバイオガスをボイラ燃料として利用するバイオガス利用プロセスから構成されている。また、メタン発酵プロセスから排出される発酵液には高濃度の有機物が残留しており、これを浄化するために二次処理プロセスを設けている (Fig. 1)。以下に各プロセスについて述べる。

キーワード：生ごみ、高温メタン発酵、エネルギー回収、複合建物、バイオガス

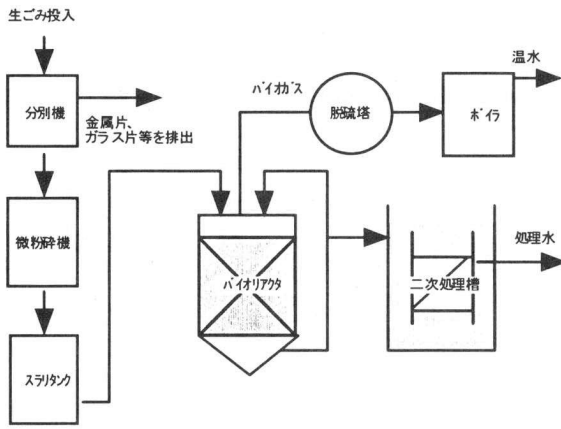


Fig. 1 メタクレス システムフロー  
(Flow diagram of Metakles)

1. 前処理プロセス

本プロセスでは、高圧圧縮で微生物によるメタン化が可能な有機物をペースト化すると同時に、有機物以外の異物を分別除去する。実機では40トンプレス（圧縮圧20~25Mpa）による圧縮分別設備を採用しており、投入生ごみに対して重量比で約2~8%が異物として分別される。なお、圧縮分別装置はスプーン程度の金属片は切断する能力を有しており、金属物混入によるトラブルはほぼ皆無である。高圧圧縮により分別された有機物はすでにペースト状になっているが、有機物濃度及び粘度調整のためこれに同量~倍量程度の希釈水を加え、破砕機によってさらに粒度の細かい生ごみスラリーとしてスラリタンクに貯留する。生ごみスラリーの平均的な粒度分布をTable 1, Fig. 2に示す。

Table 1 生ごみスラリーの粒度分布  
(Size Distribution of Particles in Garbage Slurry)

Particle diameter [μm]			
median	80% dia.	20% dia.	
30.34	69.35	10.46	

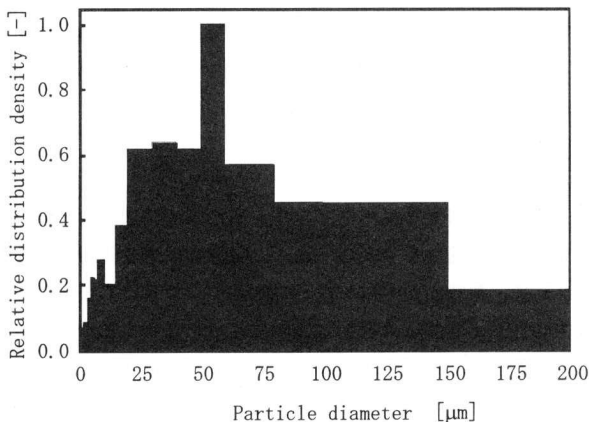


Fig. 2 生ごみスラリーの粒度分布例  
(Example of Particle Size Distribution in Garbage Slurry)

Table 1に明らかなように、微粉砕機により細粒化された生ごみスラリーの平均粒径は30ミクロン程度であり、このように細粒化することが、固形分の可溶化に大きく貢献しているものと考えられる。

2. バイオリアクタプロセス

高濃度の有機物を含む生ごみスラリーはバイオリアクタに投入され、リアクタ内の嫌気性微生物群により、固形分の可溶化、低分子化、有機酸生成過程を経て、メタンガス、二酸化炭素を主成分とするバイオガスに変換される。本プロセスでは、これらの微生物反応効率を最大限に維持するため55℃での高温嫌気発酵法を採用し、さらにリアクタ内の微生物密度を高くするためにガラス繊維不織布を用いた独自の微生物担体を充填している。

バイオリアクタ内の発酵液は、リアクタ下部から上部に常時返送されており、内部の攪拌を行っている。循環率は空塔速度で約0.5(1/h)である。また投入生ごみスラリーの設計滞留時間は、ガラス繊維不織布担体充填容積基準で約8日である。

3. バイオガス利用プロセス

バイオリアクタで発生したバイオガス中にはメタンガス、二酸化炭素の他、1,000mg/Lを越える濃度の硫化水素を含んでおり、そのまま再利用することはできない。そこで、本システムでは固形脱硫剤による脱硫処理設備を設け、バイオガスから硫化水素を除去している。なお、本システムでは、発生バイオガスは温水ボイラ燃料として再利用している。

本プロセスには固形脱硫剤を約250kg用いているが、平均的な運転状況における脱硫剤交換頻度は約半年である。

4. 二次処理プロセス

バイオリアクタでは、後述するように投入された有機物の大半を効率よくメタンガスに変換できるが、投入スラリー中の有機物濃度が非常に高くその一部が残留すること、また、バイオリアクタ内で増殖した微生物の一部が流出することなどから、バイオリアクタ発酵廃液中にはまだかなりの濃度の有機物や固形分が含まれている。これらをさらに下水道に排出できる水質にまで浄化するために、好気性の活性汚泥二次処理プロセスを採用している。本プロセスは浸漬膜固液分離による高濃度活性汚泥法によって、発酵廃液中に多量に含まれる有機態/アンモニア態窒素の硝化、脱窒も可能としている。

III. 排出生ごみの性状

今回報告する生ごみ高温メタン発酵装置を納入した複合建物から排出される生ごみは、主に、

- a. 野菜、鮮魚、精肉などの販売店から排出される不要部分などの調理屑及び期限切れ商品
- b. 施設内のファストフード店及びレストランから排出される調理屑及び残飯
- c. 小売店舗から排出される賞味期限切れ商品及び調理済みパック食品

等である。これらの生ごみの組成比は、対象店舗の構成によって、また季節によって変動する<sup>2)</sup>。また、データとしては現れにくい、いわゆる生ごみには、金属や陶器、ガラス、プラスチック、ビニールなどの異物もある割合で必ず混入しており、排出源或いは処理設

備において分別作業を必要とする場合も多い。Table 2は他の同様の複合建物施設（V店舗）から実際に排出される生ごみの組成を種類別に分類したものであるが、この店舗の場合、特に魚系の生ごみの排出比が突出して大きく、後述するとおり、投入生ごみの調整が必要であった。なお、Table 2には排出生ごみの5日間の平均組成を示しているが、実施設における生ごみ組成の日毎の変動幅は非常に大きい。

Table 2 搬入生ごみの組成例  
(Example of Garbage Composition as Delivered)

種類	厨芥・残飯等*	野菜屑等	動物性生ごみ**
構成比 [%]	49.9	8.6	41.5

注 \* 豆腐、オカラ等も含む  
\*\* 魚類、肉類、動物性油脂等

#### IV. システムの立ち上げ

本システムの立ち上げは、焼酎廃液高温メタン発酵液（推定メタン菌初期濃度約 5,000 mg/L）を種汚泥として実施した。バイオリアクタに水道水を充填し所定温度まで昇温した後、リアクタ底部より窒素ガスを吹き込むことにより系内の酸素を充分に脱気してから植種率約 10% (容量) で種汚泥を供給した。

種汚泥投入直後の約 5 日間は主にスキムミルク溶液のみで嫌気汚泥の増殖を図ったが、その後はスキムミルク溶液に加えて少量の生ごみスラリーも断続的に投入し、微生物の濃度増大並びに馴致を同時に行った。植種後約 30 日を経て微生物活性が十分に高くなったことを発酵液水質及びバイオガス分析データによって確認した後、スキムミルクの投入を停止し、生ごみスラリーのみの間欠投入に切り替えた。この時の有機物負荷は約 1.5~2 kg-CODcr/m<sup>3</sup>/d である。その後はスラリー投入量を漸次増加し有機物負荷を所定負荷率である 15 kg-CODcr/m<sup>3</sup>/d 以上にまで増大させたが、システムが安定状態に至るまでは適宜 NaOH 溶液を投入することによって発酵液 pH を常に 7 以上に維持した。本システムの立ち上げ期における運転状況を Fig. 3 及び Fig. 4 に示す。

バイオリアクタが安定状態に至るまでに発生した主な問題は、投入生ごみ質に由来する微量栄養素（金属塩類）不足によるメタン生成菌の活性阻害であった<sup>3)</sup>。すなわち、生ごみスラリーのみの高負荷運転の場合、嫌気性菌群のメタン菌にとって特に必須である極微量の金属塩類が不足しがちであり、低分子量有機酸の蓄積、バイオガス発生量の低迷等が観察された。

対処法としてこれらの微量栄養素を人為的に添加することが有効であり、M店舗の場合では月に1~2度の頻度で塩化ニッケル、塩化コバルト、酸化モリブデンの三種類の金属塩を少量添加することでメタン菌の活性低下を防ぐことが可能であることが分かった。Fig. 3中の▼印は、立ち上げ期におけるこれらの金属塩の添加時期を示すが、有機酸の速やかな消費が促進されていることが明らかである。なお、金属塩添加時のリアクタ内初期濃度は、それぞれの金属イオン濃度として約 0.2~0.4mg/L であり、非常に低い平均濃度で十分な効果が現れている。

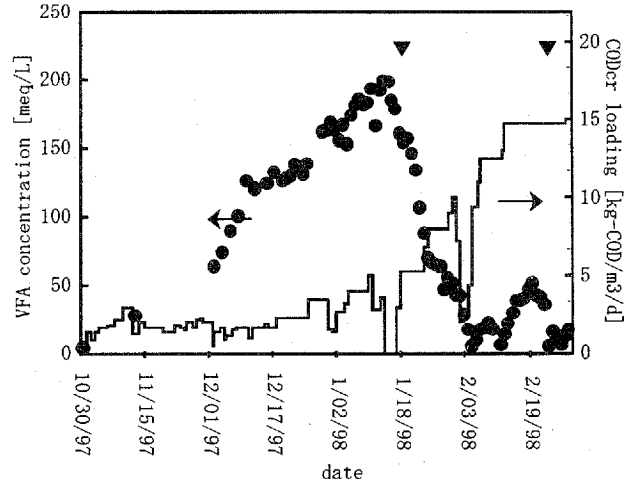


Fig. 3 有機酸濃度及び有機物負荷の経時変化  
(立ち上げ時)

(Time-course of VFA Concentration and COD loading at Start-Up)

▼ : 金属塩類添加 (Metal Salts added)

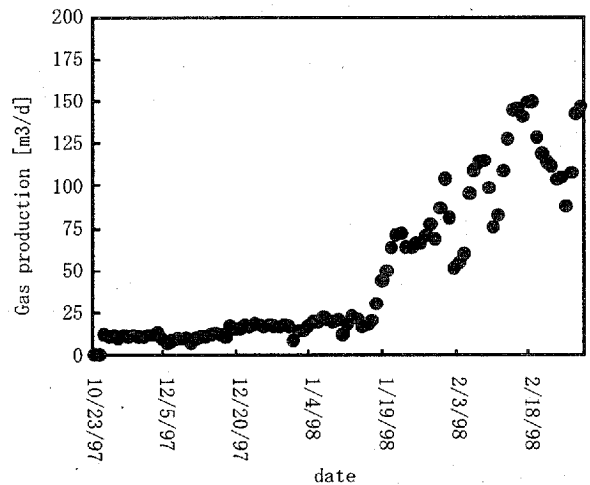


Fig. 4 バイオガス発生量の経時変化 (立ち上げ時)  
(Time-course of Biogas Production at Start-Up)

#### V. 連続運転

V店舗に設置した生ごみ処理システムでは、立ち上げ期に生ごみスラリーのみによる連続運転を開始した当初、高濃度の高度不飽和脂肪酸によると考えられるメタン生成菌への阻害が発生したが、M店舗のシステムではこの問題は顕著にはならなかった。これは、M店舗のシステム運転管理者による徹底した生ごみ分別/投入指導及び管理に負うところも大きい。排出される生ごみ質がV店舗のものとはかなり違っていることにもよるとも思われる。なお、M店舗におけるバイオリアクタ投入スラリー中の平均油分濃度は約 16,000mg/L (n-ヘキサン抽出物濃度) であるが、メタン発酵処理に問題は生じていない。なお、搬入生ごみに牛脂等が多量に混入されていた時期があり、この時にはスラリタンクの異常発泡事故が頻発したが、十分に増殖した

微生物への阻害作用は見られなかった。廃油脂の不適切な廃棄については排出源が特定され、運転管理者によって適正排出するよう指導が行われた結果、現在では異常発泡問題は再発していない。

Table 3 に生ごみ平均投入量、Table 4 にバイオリアクタ投入スラリの平均性状を示す。なお、同一店舗においても生ごみの投入量は、処理する生ごみの種類によっても大きく変化する。例えば、最近の M 店舗では見掛け比重の低いパック商品（調理済食品、惣菜など）の処理が増えてきているため、重量ベースでの日処理量は減少する傾向にある。パック商品を全く投入していなかった 1998 年 6 月から 8 月の 3 ヶ月間の M 店舗における平均日処理量は 984kg/d に達していたが、バイオリアクタの運転状態も安定していた。

Table 3 生ごみ平均投入量  
(Average Amount of Garbage Treated)

	投入量(kg)
全平均*	712
1998年平均	804
1998年6月～8月平均	984

注) プラント完成後、全稼動日の平均値

Table 4 投入スラリの性状  
(Characteristics of Garbage Slurry) [mg/L]

	SS	VSS	T-COD	S-COD	K-N	Amm-N
全平均*	60,674	59,864	177,032	65,709	4,279	270
1998年平均	60,189	59,400	180,945	67,930	4,344	308
年平均**	61,533	60,583	180,598	68,117	4,380	255

注) \* 全平均は1997年末から1999年6月までの平均値、  
\*\* 年平均は1998年6月から1999年5月までの平均値

Fig. 5 に 1997 年 10 月から 1999 年 5 月までの期間における生ごみ投入量の経時変化を、Fig. 6 に同期間のバイオガス発生量の経時変化をそれぞれ示す。これらの図に明らかなように、バイオガス発生量は投入生ごみ量の変化に良く追従しており、バイオリアクタが有機物負荷の変動に十分対応していることが分かる。

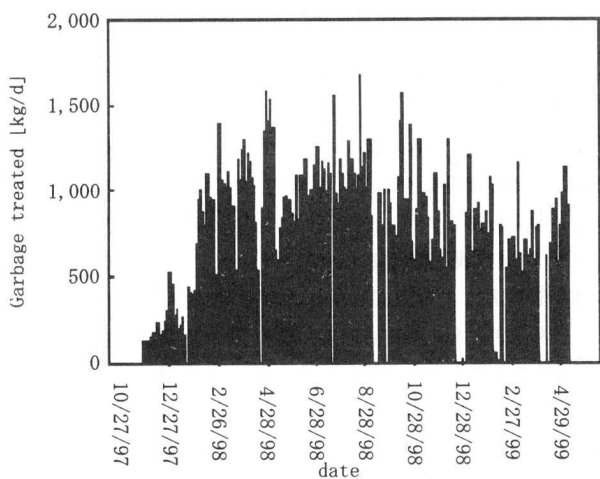


Fig. 5 生ごみ投入量の経時変化  
(Time-course of Amount of Garbage treated)

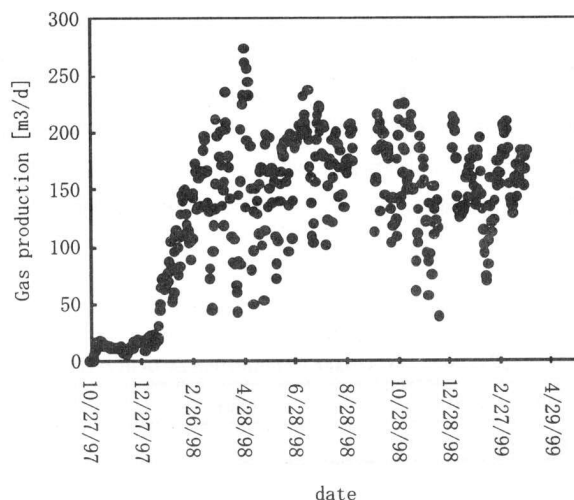


Fig. 6 バイオガス発生量の経時変化  
(Time-course fo Biogas Produced)

Fig. 7, 8 及び 9 に、バイオリアクタ発酵液の有機酸 (VFA) 濃度、有機酸濃度/アルカリ度比 (VFA/t-Alk 比)、バイオガス中の CO<sub>2</sub> 濃度の経時変化を示す。これらの図からも、計画値を超える有機物負荷率で運転されている本システムにおいて安定した投入有機物のメタン化が維持されていることが分かる。特に、Fig. 8 に示す VFA/t-Alk 比はメタン発酵プロセスの状態を示す指標とされているが、本プロセスにおいても系が安定した時期以降は、VFA/t-Alk 比は 1 点を除いて常に安定状態を示す 1 を下回った値で推移している。なお、1998 年 5 月と 1999 年 5 月に VFA/t-Alk 比が上昇しているが、この時以上に述べた金属塩類の添加によって速やかに正常な状態に復帰した。また、バイオガス中の CO<sub>2</sub> 濃度は平均約 34% であることからバイオガス中のメタン濃度は平均約 66%、したがってバイオガスの発熱量は約 26MJ/m<sup>3</sup> である。1998 年 3 月以降を例にとると、生ごみ 100kg あたり 21.9m<sup>3</sup> のバイオガスが発生しており、その回収熱エネルギーは灯油換算で約 10L (生ごみ 100kg あたり) に相当する。

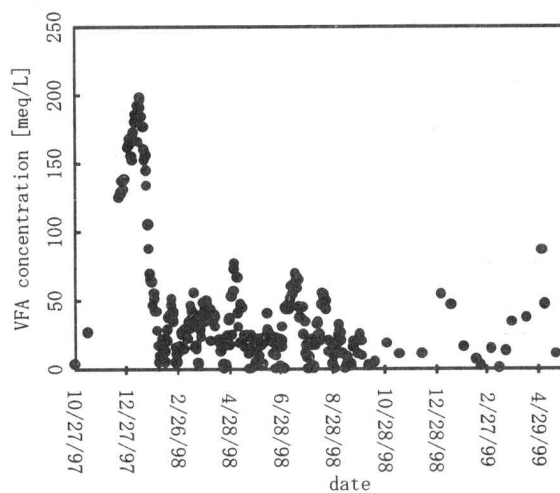


Fig. 7 有機酸濃度の経時変化  
(Time-course of VFA Concentration)

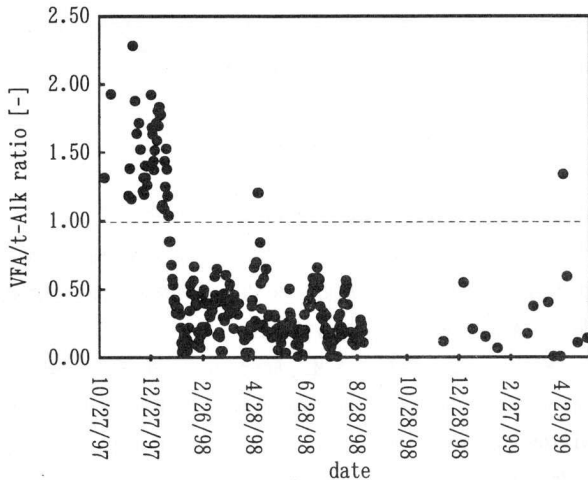


Fig. 8 有機酸濃度/全アルカリ度比の経時変化  
(Time-course of VFA/total Alkalinity Ratio)

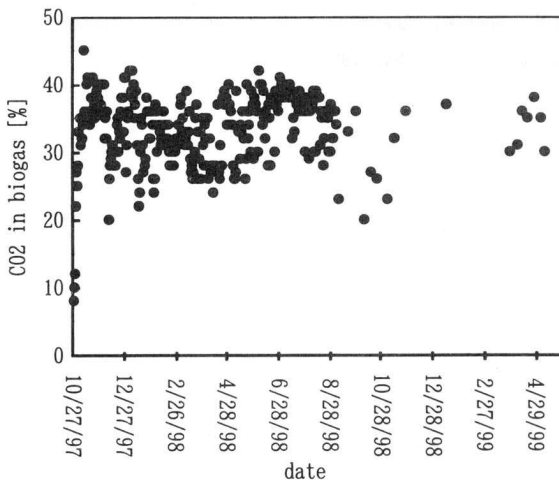


Fig. 9 バイオガス中CO2濃度の経時変化  
(Time-course of CO2 Concentration in Biogas)

Table 5 にシステムの運転状況を示す。表に明らかとなお、生ごみ処理量の多い本システムにおいても、投入有機物、固形分、油分のそれぞれ約 80%、約 85%、約 99%以上がそれぞれ分解されていることが分かる。なお、投入有機物の分解率は、バイオガスの発生量から推定した値である。また、投入固形分の可溶性・分解率はバイオリアクタ入口/出口の浮遊性固形物濃度分析結果によるが、バイオリアクタから排出される発酵液中には余剰のメタン菌等の嫌気性微生物が流出していると予想され、実際の投入固形分の可溶化率は 85% よりも更に高い値と考えられる。生ごみスラリ中の油分については、n-ヘキサン抽出物濃度で比較した。

なお、設計当初の計画ではバイオリアクタへの有機物負荷率を 15 kg-CODcr/m<sup>3</sup>/d と設定していたが、実際の生ごみスラリ中の有機物濃度が予想値よりもかなり高く、実有機物負荷率 18~20kg-CODcr/m<sup>3</sup>/d

で長期間の安定運転が可能となっている。この値は通常報告されているメタン発酵プロセスにおける有機物負荷率に比べかなり高い数値であり、本プロセスの効率の高さ、すなわち設備の小型化に優れていることを示している<sup>4,5)</sup>。

Table 5 バイオリアクタ平均性能  
(Average Performance of Bioreactor) [mg/L, %]

	生ごみスラリ			バイオリアクタ発酵液		
	CODcr	SS	n-hex	CODcr	SS	n-hex
濃度	180,598	60,583	16,000	37,600	7,600	100
残留率	-	-	-	20.8%	12.5%	0.6%

注) 発酵液中の残留CODcr濃度は発生メタンガス量から推定

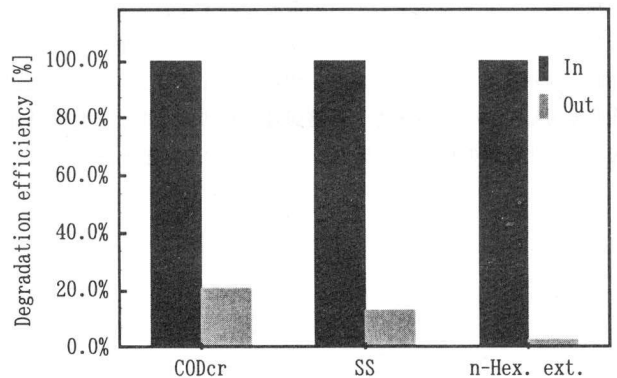


Fig. 10 バイオリアクタにおける分解率  
(Degradation Efficiencies at Bioreactor)

本システムの二次処理プロセスは、ばっ気槽内水温が上昇し始めた 1998 年 6 月頃から溶存酸素濃度が不足する傾向が明らかとなった。その結果、特に水温や溶存酸素濃度に影響を受けやすい脱窒プロセスの性能不足が生じ、処理水中のアンモニア濃度や有機物濃度が上昇した。その後、小型冷却装置を設置し、ばっ気槽水温を低下するための対策を講じている。

Table 6 に二次処理水の平均水質を示す。処理水の pH は、残留アンモニア態窒素濃度が高いため、数値が高くなっている。また、本二次処理プロセスでは平均 0.4μm の微細孔の精密ろ過膜(浸漬膜)による固液分離を行っているため本来 SS 分の流出は無い。しかし、処理水の殺菌を行っていないので、処理水槽内で新たに SS (微生物)が発生し処理水の SS が高くなっているものと思われる。

Table 6 平均二次処理水質  
(Average Qualities Secondary Effluent)

pH	BOD	COD(Mn)	SS	Amm-N
8.7	122	680	32	879

[pH以外は mg/L]

## VI. まとめ

過去約1年半の期間を通じて実施してきたメタクレスを中心とする高温メタン発酵生ごみ処理システムの試運転経験から、装置上並びに運転管理上の問題の多くを解決することができ、長期間の連続運転が可能なシステムとすることができた。

本システムは、15~20 kg-CODcr/m<sup>3</sup>/d 以上の高負荷運転において投入生ごみ中の有機物並びに固形分を効率良く分解し、エネルギー源として有効再利用可能なメタンガスを回収することのできる環境調和性並びに省スペースに優れたシステムである。

実施におけるこれまでの運転実績によれば、生ごみ 1,000kg/d の日処理量に対して平均 66%のメタンガスを含むバイオガス約 200m<sup>3</sup>/d を安定して回収することができるが、これは投入有機物の 80%程度がメタンに変換されていることを示している。また、投入生ごみスラリ中の浮遊性固形分の 85%以上が可溶化されていることも確認された。

今回報告した実システムでは回収したバイオガスをボイラ燃料として再利用しているが、バイオガスはこれ以外にも燃料電池による発電等に利用できるものであり、現在、実証プラントによる検証実験を検討している。今後も、最終処理水質の向上などの付加価値を加え、より効率の良いシステムへと発展させていきたい。

本研究は本店プロジェクト「環境調和型有機性廃棄物処理システムの開発」として実施したものである。また、開発に際して協力頂いた関西支店及び横浜支店の各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 環境庁;平成9年度 環境白書(総説), 1999.
- 2) 今井ら;給食設備を対象とした厨芥ゴミの発生量・成分調査とその生物学的処理に関する研究,第53回年次学術講演会講演概要集,土木学会(1998), pp.120-121.
- 3) A. Wilkie, M. Goto, F.M. Bordeaux and P.H. Smith; Enhancement of Anaerobic methanogenesis from Napiergrass by addition of micronutrients, Vol. 11, Biomass (1986), pp.135-146.
- 4) 清原ら;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 (1998), pp.35-43.
- 5) 多田羅, 東郷;焼酎粕の高温メタン発酵処理実証実験,鹿島技術研究所年報, Vol. 46 (1998), pp.203-208.
- 6) R.E. Speece; Anaerobic Biotechnology, Archae Press, Nashville, TN, USA, 1996.