

43. 家畜ふん尿の資源リサイクルシステム

RECYCLE SYSTEM OF RESOURCES WHICH APPLIED COW EXCRETA

帆秋利洋*・友沢孝*・小嶋令一**・大原孝彦**・程野豊**・福井清正**・岡本隆***・石田哲也***

Toshihiro HOAKI, Takashi TOMOZAWA, Reiichi OJIMA, Takahiko Ohara

Yutaka Hodono, Kiyomasa FUKUI, Takashi OKAMOTO, Tetsuya ISHIDA

ABSTRACT; Development for recycle technology of the organic refuses is a subject to prevent environmental pollution and to secure natural resources. In a case of Japan, most of natural resources are imported from foreign countries. Therefore organic refuses are increasing and accumulating in any place of Japan. This is caused by effect of global warming. We developed a recycle system of resources that is consisted from methane fermentation and composting. This recycling system was built in Hokkaido. Hokkaido is a famous place for dairy farming and approx. one million number of milk cows is keeping. In this system, cow excreta is converted to electric energy and manure by microorganisms.

In this report, we describe (1) summary of our recycle system which was built in Bekkai-cho, (2) results of fundamental study of seed microorganisms for startup of methane fermentation, (3) operational condition of methane fermentation, (4) effect of temperature on disinfection of pathogens, and (5) importance of recycle system and subject of methane fermentation.

KEYWORD; methane fermentation, compost, recycle, resource, cow excreta

1. はじめに

循環型社会の構築およびそのための技術開発は、21 世紀に不可欠な環境保全ならびに資源確保の課題である。国内における有機性廃棄物の発生量に関しては、食品廃棄物が 1,940 万 ton/年、家畜ふん尿が 9,400 万 ton/年、さらには、下水余剰汚泥が 11,800 万 ton/年という莫大な量の統計的数値が公表されている¹⁾。

地球温暖化の要因のひとつとして、水田ならびに家畜ふん尿の野積み堆積物由来のメタンガス放出が問題となっている。また、家畜ふん尿の野積み堆積等の放置による地下水汚染も深刻化している。これらの現状を踏まえて、平成 11 年 11 月に家畜排泄物の適正管理と利用促進に向けた「家畜排泄物の管理の適正化および利用の促進に関する法律」が施行された。これは、従来、野積み堆積等により放置されてきた家畜ふん尿による環境汚染を防止すると共に、その排泄物をメタン発酵やコンポスト化することにより、メタンガス発電や畑作への堆肥利用といった資源循環活用の促進を図ることが狙いである。

北海道には、乳牛 88 万 2 千頭(畜産農家 10,600 件)、肉牛 41 万 5 千頭(畜産農家 3,760 件)、合計約 130 万頭もの牛が畜産牛として飼育されている²⁾。ちなみに、成牛 1 頭の排泄するふん尿量は、50kg/頭・日であるので、北海道全域で毎日 6 万 5 千 ton もの牛排泄物が発生していることになる。これは、国内の全畜産排泄物の 25%に相当する。この実態を踏まえて、(独)北海道開発土木研究所は、「積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト」に着手した。これは、別海町と湧別町をモデル地域として、それぞれ牛 1,000 頭、

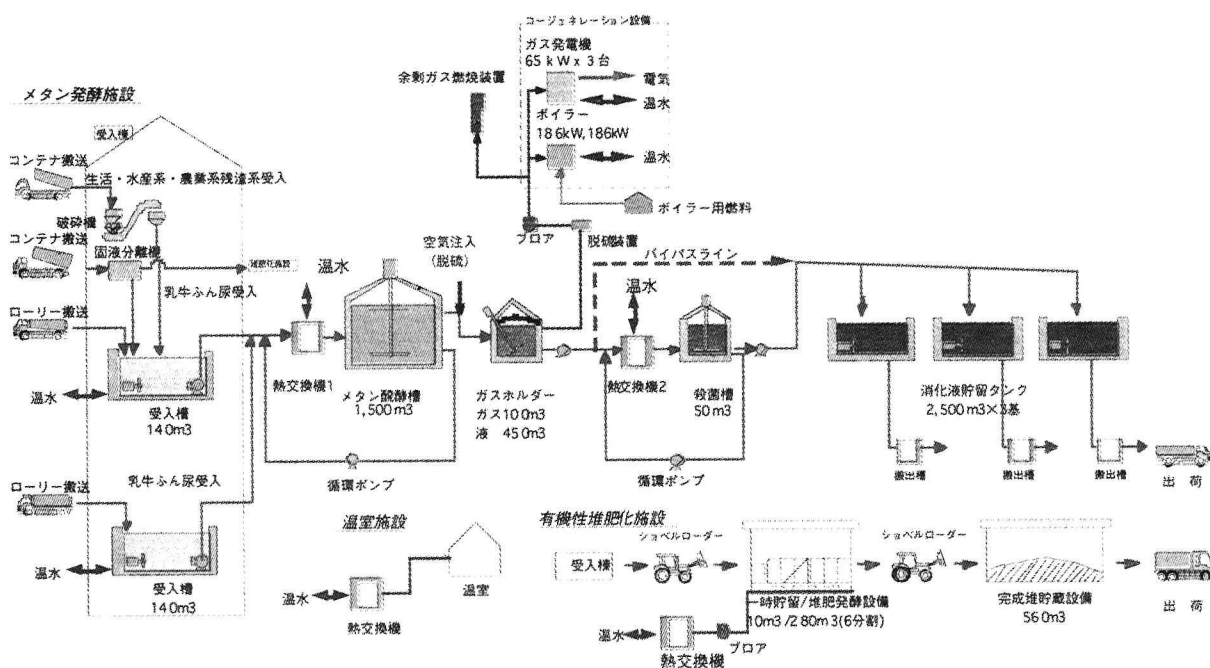
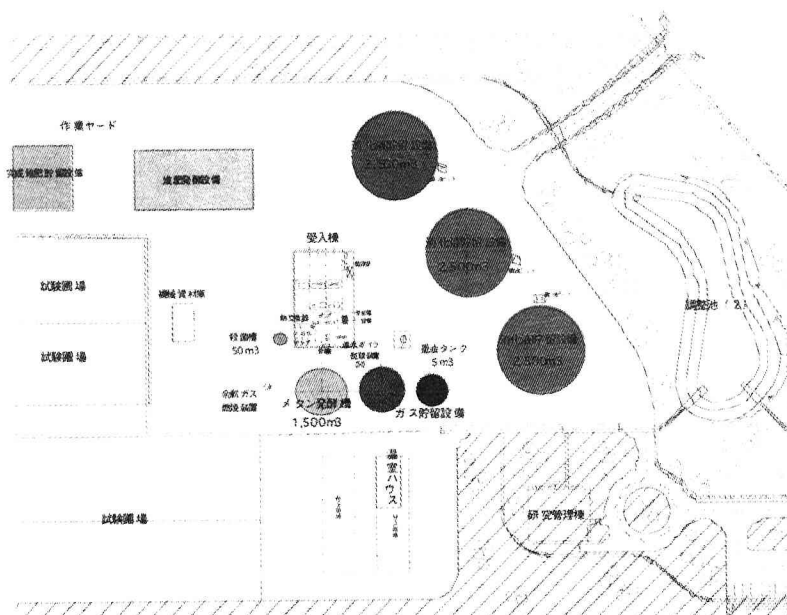
* 大成建設(株)技術センター土木技術研究所生物環境研究室 Bio-environment Engineering Section, Civil Engineering Research Institute, Technology Research Center of Taisei Corp., 344-1, Nase, Totsuka, Yokohama 245-0051, Japan

** 同上 エンジニアリング本部計画グループ

*** (独)北海道開発土木研究所農業開発部土壌保全研究室

200 頭規模の排泄物を主体とした資源循環施設を建造し、各種実験をつうじて得られたデータを解析することで、積雪寒冷地における家畜ふん尿の処理技術の確立、生成物（バイオガス、メタン消化液）の有効利用、総合的な経済性の検討結果に基づいた循環型酪農の推進を目指すものである。

2. 資源循環試験施設の概要



3. バイオガスパラントの稼働データ

3.1 植種源の検討

メタン発酵実プラントを稼働するに当たっては、スタートアップに時間を要することが課題である。その為、通常は近隣で稼働している下水処理場の嫌気性消化汚泥を入手して植種する対策が採られている。しかしながら、所定量の植種源の確保が困難であったり、地域特性上、植種源の輸送の問題を生じるケースがある。北海道では、畜舎ピットに溜まった牛フンを屋外の肥溜めに移してラグーン処理(自然発酵)している事例が多い。また、酪農家によっては、畜舎の衛生確保を目的に消石灰でアルカリ処理したものをラグーン処理している場合もある。これらが植種源として利用できれば入手の容易性と汎用性、輸送面で実用的と言える。そこで、牛フンのメタン発酵実プラントのスタートアップに使用する植種源の諸特性について検討した。

ラグーン汚泥を植種源として用いた場合、消化汚泥よりはその効果が劣るものの、40%の添加率でラグの短縮化が確認され、植種源としての有効性が認められた(図4)。ラグーン汚泥と2%消石灰添加ラグーン汚泥は、いずれもH₂/CO₂を基質とした際のメタン活性値が高く(図-3)、消化汚泥と比較しても約2倍(標準系)から5倍(消石灰添加系)の活性値を示した。従って、ラグーン汚泥を植種源として使用することは、メタン発酵の阻害要因である水素分圧に対して抑制効果があるものと推察する。

ラグーン汚泥と消石灰添加ラグーン汚泥の潜在微生物の存在比率についてFISH法で解析した(表-1)。FISH法はAmannの手法³⁾に準じ、真正細菌に特異的なEUB338プロンプ⁴⁾、および古細菌に特異的なARC915プロンプ⁴⁾をそれぞれ用いた。ここで、EUB338はメタン菌以外の細菌群集を、ARC915はメタン菌群集をそれぞれ検出するものと考えられる。本結果より、消石灰添加ラグーン汚泥は標準ラグーン汚泥に比較してメタン菌の潜在比率が1.5倍高いことが分かる。本結果は、図-4のメタン活性値の比較結果を支持しており、消石灰ラグーン汚泥中には水素資化性メタン菌が多く潜在しているものと推察する。従って、消石灰ラグーン汚泥は、植種源として有効であることが示唆された。

3.2 植種源の発酵槽への投入方法の検討

メタン発酵のスタートアップ時に、植種源をラグーンから採取したり新規のメタン発酵槽へ投入する際、植種源が空気と接触する機会が生じる。ところが、メタン菌をはじめとして発酵を司る微生物群集は偏性嫌気性菌であるため、これらの微生物群集が空気中の酸素と接触することで失活する可能性がある。そこで、メタン発酵植種源の酸素感受性について暴露試験を行い、空気存在下でのメタン菌群の死滅速度を解析して植種源の投入時の留意点を明確にすることを目的とした。

水素資化性メタン菌は、11日間空気に暴露されてもメタン生成活性の低下は生じないが、酢酸資化性メタン菌は空気暴露によって11日間で約40%メタン生成活性が低下していることが分かる(図-5)。本結果より、供試植種源の酢酸資化性メタン菌が酸素に対して影響を受けやすいものと推察できる。

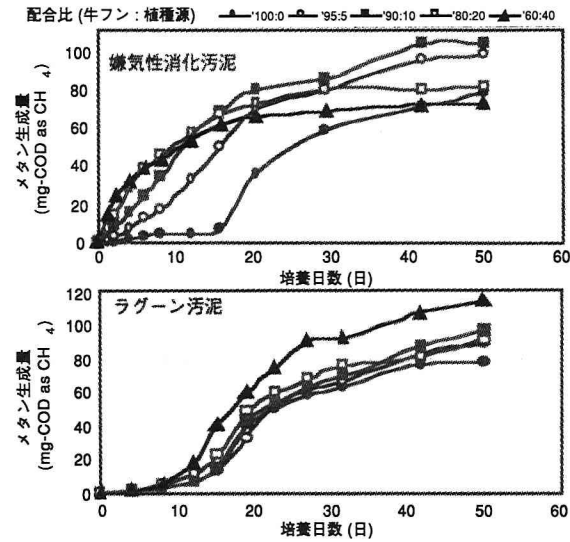


図-3 植種源添加率によるメタン生成速度比較

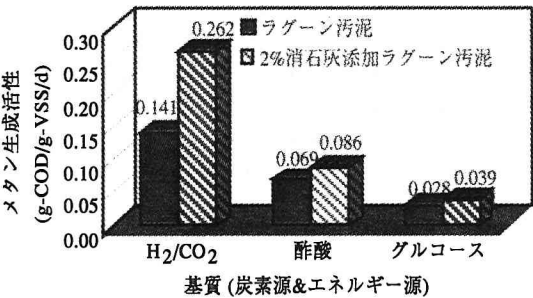


図-4 メタン生成活性の比較

表-1 バクテリアとアーキアの潜在比率

植種源	ラグーン	2%消石灰添加 ラグーン
DNA7 ⁺ ローブ ⁺		
EUB338	25.5	23.5
ARC915	9.6	14.6

図-6 に 5 ° C 条件下における AODC 法による全菌数の変化(a)と FISH 法で解析した全菌数に占めるメタン菌数の存在比率(b)の時系列変化を示す。本結果より、全菌数の減衰傾向を解析したところ、図中(a)に示した数式で表記できる。本式より、全菌数の死滅半減期を求めると約 15 日と見積もられる。すなわち、供試植種源の嫌気性微生物群集は空気と接触した環境下においても低温下では長期にわたって生存が可能であることが示唆された。

供試植種源の全菌数に占めるメタン菌の存在比率は約 30%である(b)。この比率は空気暴露時間とともに減少していく傾向が見られる。なお、この比率を加味して上述の数式より試算するとメタン菌の全減期は約 90 日であると推定された。従って、メタン菌自体は酸素に対する感受性が、他の微生物群集に対して強いことが示唆された。図-1 の結果と合わせて考察すると、この死滅し易いメタン菌は酢酸資化性メタン菌であることが想像できる。

3.3 連続運転処理性能

メタン発酵槽に投入した植種源(2%消石灰添加ラグーン汚泥)及び原料(牛ふん尿)の性状を表-2 に示す。植種源として投入し、メタン発酵槽を 37℃に昇温させた(運転 0 日目)のち、63 日目は原料の供給を行わずに馴養した。64～116 日目までは牛ふん尿 C を 50 t/day 投入した。147 日目まではふん尿 A+B+C 混合を 30～40t/day、148 日目からはふん尿 A+B 混合を 40t/day 投入した。発酵槽は、植種源投入後、DO=0、ORP=350mV の嫌気的な環境が維持された。pH は減少傾向にあったためアルカリ剤を投与したところ、運転 20 日目(COD 容積負荷 3.5 kg-COD/m³/day)より徐々にメタンが

発生し、運転 40 日目には急激に上昇した。40 日目以降の COD 容積負荷は原料の濃度が希薄なため約 1.5m³-COD/ m³/day 程度の容積負荷であり、メタン発生率は 0.26m³-CH₄/m³-sludge/day であった。S-COD 及び VFA は発酵槽内にほとんど蓄積しておらず、速やかにバイオガスへ転換し、そのメタン転換率は 50～100% であった(図-7)。立ち上げ期間は希薄な原料しか入手できず、またその供給量も少なかったため COD 容積負

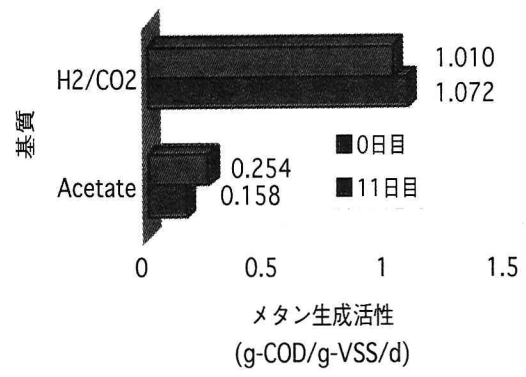


図-5 空気暴露下でのメタン生成活性の変化

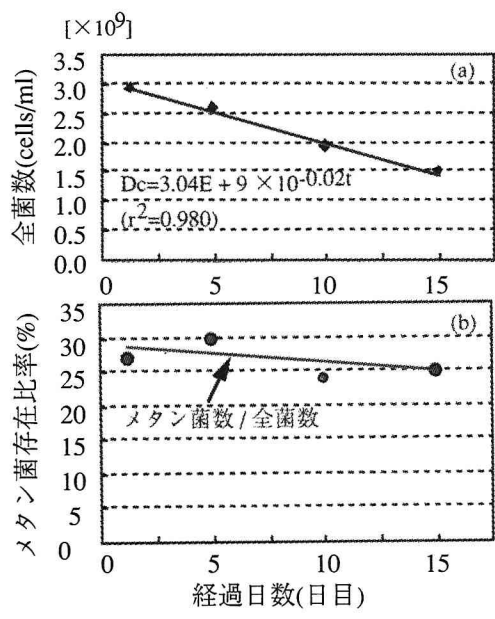


図-6 空気暴露によるメタン菌の減衰傾向

表-2 植種源と原料の化学的性状

項目	単位	植種源 (ラグーン汚泥)				原料(牛ふん尿)		
			A	B	C			
pH		6.9	7.6	7.3	7.3			
含水率	%	88.5	91.7	96.6	96.1			
TS	%(kg-DW/kg-WW)	11.5	8.3	3.4	3.9			
TVS	%(kg-TVS/kg-WW)	8.9	6.2	2.4	2.8			
TVS/TS	%	77.4	84.1	70.6	71.8			
T-CODcr	mg-COD/g-DW	1,650.0	2,210.0	1,800.0	1,350.0			
S-CODcr	mg-COD/L	44,000.0	26,000.0	18,150.0	13,200.0			
NH ₄ -N	mg-N/kg-DW	304.0	313.0	789.0	435.0			
T-VFA	mg/L	5,050.0	4,380.0	4,981.0	2,718.0			

荷は設計値の 1/2 以下であった。しかしながら、図-8 で明らかなように COD 容積負荷に対してのバイオガス発生率の関係は相関が見られる。従って、実質の CODcr 容積負荷 4.5kg-CODcr/m³/day 換算のガス発生率を試算すると実線で示した相関(0.25m³-Gas/kg-CODcr)より、1,700m³-Gas/day と見積もることが出来る。これは、設計量の 1,400m³-Gas/day を上回っており、本メタン発酵システムが、立ち上げ期間中に予定以上の性能を発揮したことを裏付けている。ちなみに、ガス中のメタン含有率は約 63%であるので、メタン発生量は、1,070m³-CH₄/day と見積もれる。

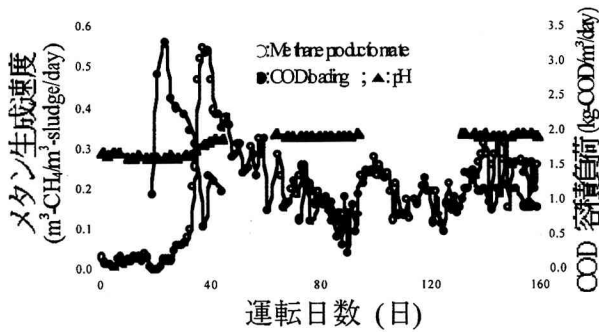


図-7 メタン生成量の時系列変化

3.4 発酵済み液の特性

メタン発酵法は、メタンの有効利用の他、消化液を液肥として利用できることから、畜産廃棄物の有効な処理方法の一つとして考えられている。メタン発酵後の消化液を土壌還元する場合、農作物の消費者の健康を考慮し、メタン発酵プロセスにおける病原菌の挙動を把握する必要がある。そこで、牛ふん尿のメタン発酵施設における病原性指標微生物の挙動を調査した。本プラントは、主に受入槽、中温メタン発酵槽、殺菌槽（70℃）からなる。そこで、各段階における大腸菌ファージ、総大腸菌群（TC）、ふん便性連鎖球菌(FS)、ふん便性大腸菌群（FC）の挙動を調査した。各処理段階における FC は、殺菌槽において全て検出限界以下まで除去された。現在、わが国では消化汚泥を土壌還元する際の明確な基準はないが、EPA では下水汚泥を農地に還元する際の微生物基準をふん便性大腸菌で 2x10⁶ 個/gTS 以下としている⁶⁾。本プラントでは殺菌槽を経ることにより EPA の基準値を十分満たしていることが判明した。

図-9 に各指標微生物の受け入れ牛ふん尿に対するメタン発酵槽出口および殺菌槽出口における死滅率を示す。結果から明らかなように、いずれも FC と

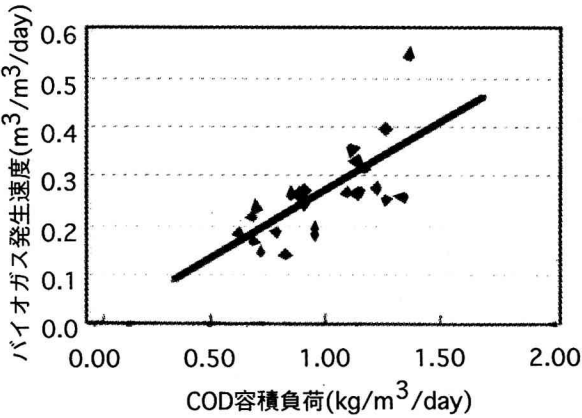


図-8 COD 容積負荷とバイオガス生成速度の関係

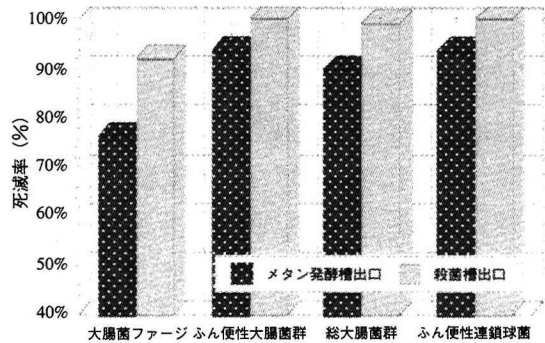


図-9 各指標微生物の死滅率

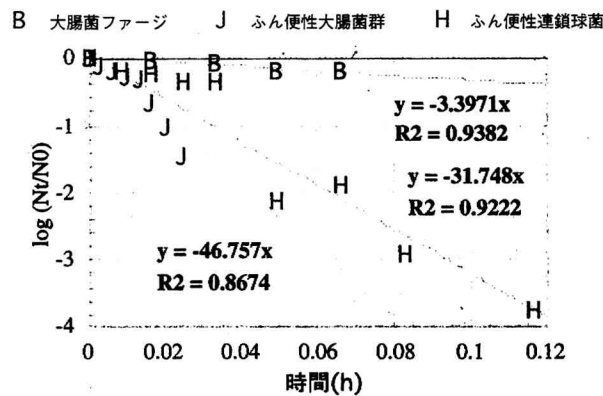


図-10 70℃ 条件下での各指標微生物の不活特性

FS が最も良く除去され、次いで TC、大腸菌ファージの順で除去された。図-10 に 70℃における殺菌試験の結果を示す。各温度とも大腸菌ファージが最も不活化しにくく、次いで FS、FC の順で不活化することが分かった。一般に指標微生物は実際の病原菌よりも耐性が強いことが望まれるが、消化液の土壌還元における病原性ウイルス指標については、今後検討する余地があると思われる。

4. エネルギー収支

本施設のバイオガス発生量を表-3 に、また施設内におけるエネルギー収支についてまとめたものを表-4 にそれぞれ示す。本施設では、1 日当たり 810 万 kcal のエネルギーを生産し、その約 30%が電力へ変換され、残りの 70%がボイラー熱としてそれぞれ再利用されている。なお、施設に必要な電力量は半分でまかなえるため、残りの半分が余剰電力として施設外利用が可能である。

表-3 バイオガス生成量

原料供給量：	50t/日
原料組成：	乳牛ふん尿(90%)、生活・水産・農業系残滓(10%)
バイオガス発生量：	約30Nm ³ /t
バイオガス組成：	メタン63%、二酸化炭素37%
バイオガス発熱量：	約5,400kcal/Nm ³
総熱量：	8,100,000kcal/日 (9,400kW/日)

表-4 施設内エネルギー収支

用 途	利 用 率
発 電 利 用	28%
・施設電力	14%
・余剰電力	14%
ボ イ ラ ー 利 用	72%
・メタン発酵槽加温	19%
・殺菌槽加温	25%
・堆肥化施設加温	6%
・廃ガス、放熱	22%

5. 今後の課題

なお、メタン発酵法は古くより下水処理場から発生する余剰汚泥の嫌気性消化法として採用されてきたように、永い歴史を有した技術である。本技術の特徴としては、メタンガスという有価資源が回収でき、嫌気性(酸素の存在しない環境)であるため省エネタイプの処分法である等の利点が挙げられる。一方、処理時間に長期間要することから処理施設が大規模になる点や施設周辺で不快臭が発生し易い等の欠点もある。そこで、高速発酵技術や脱臭技術の開発が要求される。また、現状のメタン発酵の対象となる原料には制約があるため、難分解性有機物も対象とした原料の種類の拡大を図るための技術開発が必要である。これらの課題が解決できれば、あらゆる有機性廃棄物からのバイオガス回収が可能となり、環境問題と共にエネルギー問題への解決策につながるであろう。

謝 辞

本研究を行うに当たり、長岡技術科学大学の原田秀樹教授、木更津高専の上村茂樹助教授には多大なるご指導と研究のご支援を戴いたことに感謝いたします。また、タックコンサルタント(株)の国井伸隆氏には実験のご支援を戴いたことに感謝いたします。

引用文献

1) 茅野充男他著：生物系廃棄物の資源化とリサイクル，農林水産業と環境保全，産業技術会議編集発行，pp.255-295, 2000,

2) 平成 10 年度版畜産統計，農林統計協会，農林水産省経済局統計情報部編集

3) Amann et al., (1995) *Microbiol. Rev.*, 59:143-169.

4) Amann et al., (1990) *Appl. Environ. Microbiol.* 56:1919-1925.

5) EPA：Environmental regulation and technology, Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (1999).