【論　　文】

1日1回給餌操作での豚糞の無動力撹拌低温メタン発酵特性

阿　部　　眞*・日　高　　平**・津　野　　洋**

【要　旨】 本研究では，小型発酵槽で豚糞を処理し，エネルギー源であるメタンガスを生産するために，26℃以下の条件での無加温低温メタン発酵の開発をガス圧の差による撹拌を実現する無動力撹拌方式のリアクターを用いて試みた。ミニブタの豚糞を基質として，1日1回給餌方式で連続実験を行った。安定なメタン発酵の状態である時には，pH は7程度に維持された。有機物負荷率 0.1～0.2 kgCODcr/（m^3・d）程度および26℃の条件下で，COD ベースのメタン転換率 60% 程度，VS あたりのメタンガス発生量 0.3～0.4 L/gVS 程度が得られた。10℃でのガス発生量は，25℃でのガス発生量の約 40% となった。これらの結果より，メタン発酵が安定して実現でき，実験期間中過度の固形性成分の蓄積もなく，無動力撹拌低温により運転エネルギー削減が可能であることが示された。

キーワード：低温メタン発酵，豚糞処理，1日1回給餌操作，無動力撹拌

1. は　じ　め　に

戦後の日本では，終戦直後の食糧難から高度成長を経て飽食の時代へ変化した。肉類の摂取エネルギーに占める割合は，1960 年の 1.6% から，2000 年には，9.4% と約6倍に増加し，それに伴い，1999 年での家畜糞尿は 9,220 万 ton に達した[1,2]。近年，「循環型社会形成推進基本法」，「家畜排せつ物法」，「改正肥料取締法」，および「持続型農業促進法」が制定され，家畜排せつ物を適正に管理するとともに，肥料としての成分表示を明確にして有効利用を促進し，持続性の高い農業生産方式の普及・定着をはかるための道筋を定めるなど，循環型社会構築を目指した取り組みが各方面から進められている[3]。温室効果ガスの削減約束を示した京都議定書が 2005 年に発効されたが，日本においては温室効果ガスの削減は未だ十分ではない。畜産廃棄物由来の亜酸化窒素やメタンといった温室効果ガスの排出量削減も求められている[4]。有機性廃棄物の再資源化の技術には原料化，飼料化，コンポスト化，エネルギー化等がある[5]。わが国においては，本格的な家畜糞尿バイオガス化施設が 1998 年に京都府八木町に建設された後に，社会的に注目されるようになった。課題として，家畜ふん尿の発酵残渣である消化液を散布可能な農地の確保があげられる。逆に，少ない輸送エネルギーで散布可能な農地面積に合わせて発酵槽のサイズを選定すると，処理量に対して設備費および運転費が高くなる点が課題となる[6]。中温では，牛ふん尿処理でのたんぱく質，炭水化物，脂質の影響の報告[7]，乳牛ふん尿での，外来植種の有無の影響の報告[8]，等様々な報告がされている。畜産ふん尿処理のメタン発酵装置は，IEA（International Energy Agency）分類で湿式メタン発酵に属する。湿式メタン発酵装置には，完全混合型，固定床型，膜分離型，自己造粒型等がある。完全混合型（またはそれに近い）発酵槽の技術方式には，ガス撹拌，機械撹拌，複合撹拌，無動力撹拌，ポンプ循環等がある[9]。

このような認識に基づき，本研究では，小型発酵槽の設備費，運転費を最適化するために，豚糞を処理対象として1日1回給餌操作での，無動力撹拌で無加温の嫌気性消化の適用性を検討することを目的とした。冬季には温室等を利用し，かつ，地中に設置することを前提に，無加温での液温変化を 10～26℃と仮定し，この低温条件下で，有機物負荷率を変化させて連続実験を行った。これらの運転において豚糞からバイオガスおよびメタン

原稿受付 2009. 5. 29　　原稿受理 2010. 3. 7
* ㈱村田製作所 次世代技術研究所
** 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻
連絡先：〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-228
京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻　日高　平
E-mail : hidaka@water.env.kyoto-u.ac.jp

ガスの生成能力を把握し，有機物負荷率，温度，pH 等の運転因子がメタン発酵に及ぼす影響を検討した。

2. 実　験　方　法

本研究では処理対象としてブタの糞を想定し，京都大学農学研究科で，表 1 に示す成分の餌により飼育しているミニブタの糞を用いた。この糞の成分分析結果は，表 2 に示すとおりである。まず 5 倍に希釈しミキサーで微粉砕したものを，さらに所定の倍率に希釈して基質とした。14 倍に希釈した場合の組成は，TS 3.3%, VS 2.5%, および CODcr 24 g/L であった。反応器の操作開始時には京都府南丹市八木バイオエコロジーセンタープラントの中温発酵槽より採取した消化液を種汚泥として用いた。

本研究において用いた実験装置の概要を図 1 および 2 に示す。本装置のガス圧の差による撹拌サイクルを以下に示す。

第 1 ステップ：図 2a) に示すようにリアクター内のバイオガス圧は，大気圧と同じであり，入力用パイプ，出力用パイプとリアクター内の水面差はない。

第 2 ステップ：リアクター内のバイオガス圧が上昇し，図 2b) に示すように，入力用パイプ，出力用パイプ内の水面とリアクター内の水面に差が生じる。

第 3 ステップ：上限圧力を差圧計で感知しバルブを開放しバイオガスをガスパックに回収することで，図 2a) の状態に戻る。この際発生する水流によりリアクター内は撹拌される。

上記手順により，発生するバイオガスで無動力で撹拌

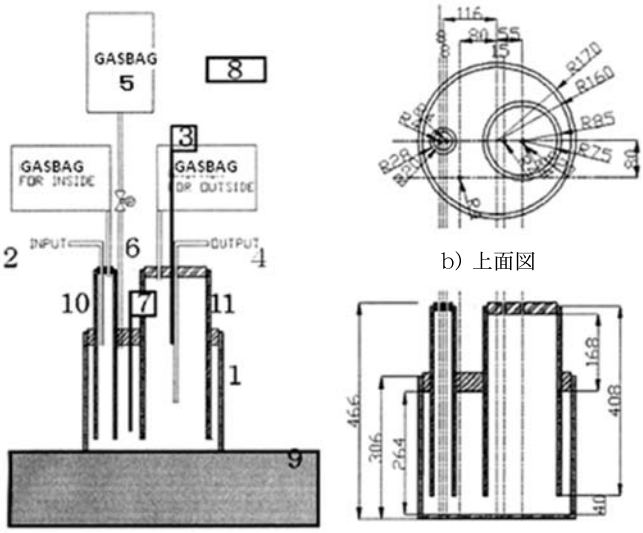
表 1　ブタの餌（くみあい配合飼料種豚プラス）

粗たん白質	15.0%　以上
粗　脂　肪	2.0%　以上
粗　繊　維	10.0%　以下
粗　灰　分	10.0%　以下
カルシウム	0.80%　以上
り　　ん	0.60%　以上
可消化養分総量	74%　以上

表 2　糞の成分分析

成分	含量[a)]
炭 水 化 物（加水分解-HPLC 法）	68.3 mg/g
炭 水 化 物（フェノール硫酸法）	33.4 mg/g
たんぱく質（加水分解-アミノ酸分析法）	142 mg/g
たんぱく質（Lowry 法）	31.4 mg/g
脂　　質	63.1 mg/g
無 機 成 分	231 mg/g
非多糖類の繊維状成分	320 mg/g

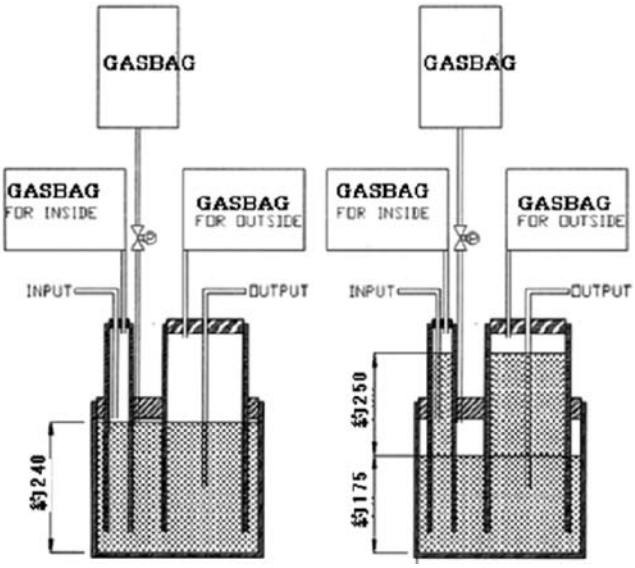
a）すべて乾燥重量に対する値，なお試料中の乾燥物量は 50.6%



a）配置図　　b）上面図　　c）断面図

1.リアクター　2.基質導入口　3.温度計　4.採取口
5.ガスバック　6.電磁バルブ　7.差圧計　8.制御器
9.恒温槽　10.入力パイプ　11.出力パイプ

図 1　実験装置



a)差圧 0kPa　　b)差圧 2.5kPa

図2　ガス圧による撹拌状況

する。発生したメタンガス，二酸化炭素等は連結したガスパックで捕集できる。リアクターは，恒温水槽に静置され温度を制御できるようにした。

給餌処理操作は基質である豚糞の所定量を注射器でリアクターに1日1回注入し，同時に同量の発酵液を注射器で吸い出す方式で行った。本研究では，リアクターとして，液有効容積18Lのものを1系列，およびほぼ相似形の1Lのもの（内半径58.5 mm内高110 mm）を3系列用意し，それぞれ，実験Iと実験IIに用いた。実験Iでは，約1年半の無動力撹拌でpH調整なしの連続実験における温度条件の検討を行い，実験IIでは有機物負荷率の検討を行った。それぞれの運転条件は表3に示すとおりである。

実験Iでは，撹拌により高水位（パイプ外水位面約240 mm，約240 mm以下部分18L，パイプ内240 mm以上部分0L）と低水位（パイプ外水位面約175 mm，約175 mm以下部分13.3L，パイプ内約175 mm以上部分4.7L）を繰り返した。吸い出した発酵液中の固形分はまったくリアクターに戻さなかったが，吸い出し位置（高さ約130 mm）は，容器中央部であるため，沈澱した固形分は吸い出されない状態であった。

実験Iaでは，投入基質TS濃度を3.3%まで上げ，かつ，投入量は100 mL，吸い出し量は50 mLとして，液量を約6Lから18Lまで増加させて実験した。18Lに達した点で，実験Iaは終了し，実験Ibに移行した。実験Ibでは，投入基質TS濃度3.3%，投入量100 mL，吸い出し量100 mLに固定して，運転温度を26℃から10℃まで下げながら運転した。実験IIでは，投入TS濃度を1%から，容器1, 2, 3でそれぞれ，1%, 3.1%, 7%まで増加させながら運転し，有機物負荷率の差を比較した。汚泥は，実験Ibでは250～350日の間，毎日吸い出した消化液を50 mLずつ冷蔵保存した合計約5Lの消化液を混合したものを用いた。

実験で用いた基質について，炭水化物，たんぱく質，脂質，無機成分，および非多糖類の繊維状成分について分析を㈱東レリサーチセンターに依頼して行った。炭水

表3　運転条件

	容器	運転経過日数（日）	基質TS（%）	有機物負荷率 kgCODcr/(m³・d)	HRT（d）	温度 ℃	汚泥	有効容積（L）
実験Ia		0～240	0.3～3.3	0.034～0.43	90～180	23 ± 2	入手汚泥	18
実験Ib		241～556	3.3	0.13	180	26～10	実験Ia継続	18
実験II	1	0～78	1	0.13	50	26	実験Ib 250～350日に採取	1
	2	0～78	1～3.1	0.13～0.43	50	26	実験Ib 250～350日に採取	1
	3	0～78	1～7	0.13～0.99	50	26	実験Ib 250～350日に採取	1

化物の分析は，加水分解-HPLC 法とフェノール硫酸法で行った。たんぱく質の分析は，加水分解-アミノ酸分析法[10]および Lowry 法[11]で行った。脂質，無機成分，非多糖類の繊維状成分の分析は，それぞれ Bligh-Dyer 法[12]，灰分法[13]，72% 硫酸不溶成分重量[14]にて行った。

実験 I においては，吸い出した混合液について，pH, TS, VS, CODcr，有機酸，NH_4-N 等の水質項目の分析，ならびに発生ガスの生成量および組成の分析を行った。実験 II においては，pH，および発生ガスの生成量の分析のみを行った。分析方法は実験 I, II 共通で，pH, TS, VS および VFAs の分析は下水道試験方法[15]に準拠して行った。CODcr はアメリカの Standard Methods[16]により測定した。NH_4-N 濃度は Autoanalyzer3（BRAN+LUEBBE 社）で測定した。また発生ガスの生成量および組成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。硫化水素についても，検知管式気体測定器（㈱ガステック，4 M）を用いて測定した。COD 換算のガス変換率は，毎日の，発生したメタンガスの COD 当量と，投入した基質の CODcr との比とした。

3. 実験結果および考察

3.1 処理特性

実験 Ia の処理特性を図 3 に示す。有機物負荷率は，40 日目まで徐々に増加させ，その後は一定の基質投入量に設定した。反応器内の汚泥量増加に伴い，容積あたりの負荷率としては徐々に減少しており，容積あたりのバイオガス発生量も減少している。初期の馴致に約 40 日かかり，その後 pH は 7 付近で安定した。発生バイオガスのメタン濃度はおおむね 60% 程度で安定していた。154～203 日の期間に 4 回硫化水素濃度を測定したところ，350～380 ppm 程度であった。吸い出し液の TS，および VS は，それぞれ 3 g/L 程度および 1 g/L 前後であり，長期的な変動傾向は見られず安定していた。

図 4 に，COD ベースのメタンガス転換率を示す。馴致後は，COD ベースのガス転換率で 60% 程度を安定して維持できた。投入基質の VS/CODcr 比は，1.1 gVS/g CODcr であり，本研究での VS あたりのメタンガス発生量は，0.3～0.4 L/gVS 程度となる。負荷率 0.6～1.8

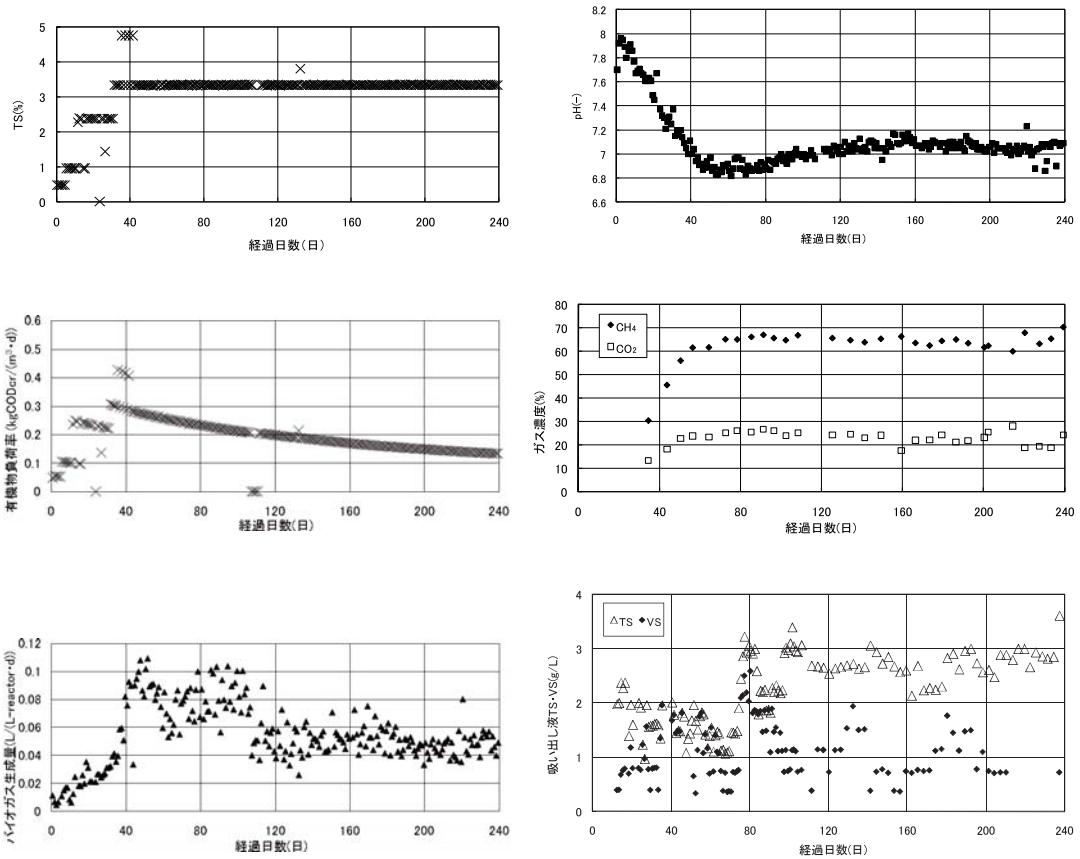


図 3　処理特性（実験 Ia）

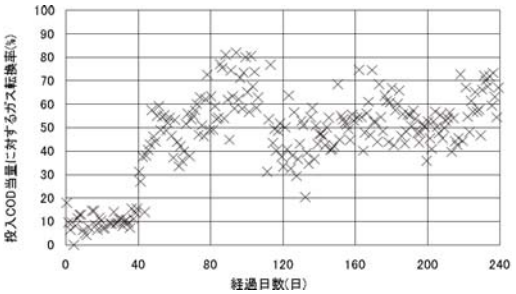


図4　CODベースのメタンガス転換率（実験Ia）

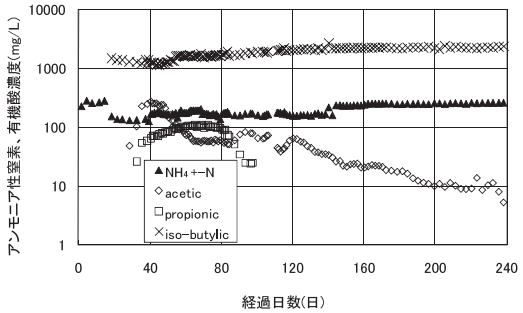


図5　NH_4-Nおよび有機酸濃度（実験Ia）

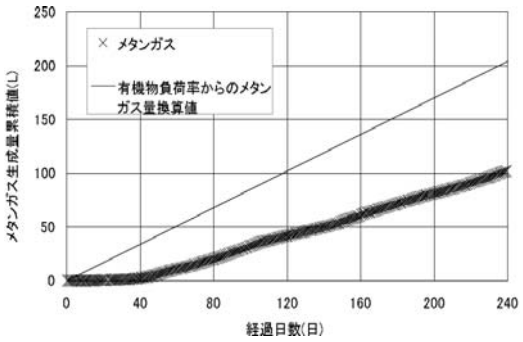


図6　CODベースの累積メタンガス転換率（実験Ia）

gVS/(L・d) 程度の中温豚糞嫌気性消化でのメタンガス発生量0.41 L/gVSが報告されている[17]。また各種農畜産廃棄物を対象に中温回分式実験でメタンガス発生量を比較した研究では，豚糞尿の場合0.24 L/gVS，豚糞の場合0.27 L/gVSの発生率が報告されている[18]。片岡ら[19]は，豚糞尿搾汁液を対象としたメタン発酵の最大負荷率4.8 kgCODcr/(m^3・d) での実証プラント実験において，夏季～秋季は無加温（25～29℃）で，冬季は35℃への加温で運転しており，いずれの期間もCODcr除去率は60%程度であったことを報告している。本研究では，低温のため負荷率は低いものの，メタン転換率としては中温と同程度が得られたといえる。

図5に，NH_4-Nおよび有機酸濃度の経時変化を示す。有機酸としては，イソ酪酸が蓄積し，プロピオン酸濃度（100日目以降は，検出されなかった），酢酸濃度は減少する傾向が見られ，特に過度の有機酸蓄積は見られなかった。NH_4-Nは250 mg/L程度で安定していた。pHやメタン生成も安定していたことから，処理は安定していたと考えられる。

図6に，累積の投入CODcr量のメタンガス換算値および累積メタンガス発生量を示す。40日目以降は投入有機物負荷に対して一定の割合でメタンガスに転換されていることが示されている。なお液量18 L，バイオガス生成量0.05 L/(L-reactor・d) の時，撹拌回数は約4日で1回に相当する。撹拌時の水流についての特性は，本反応器の規模では正確に把握しづらいものの，反応器内の約2割の混合液が移動することになり，目視では水流が生じていたことを確認している。吸い出し位置の関係で，反応器内のSRTはHRTより長くなり，固形物の一部は長期間反応器内に滞留することになる。ただし，徐々に分解は進み，吸い出し液の固形性成分濃度も安定していたことから，ある程度は反応器外へ固形物も排出され，最終的には平衡状態に達した固形物濃度になっていたと考えられる。これらの結果より，本研究で採用した撹拌方法でも，長期間メタン発酵が安定しており，過度の固形性成分の蓄積がなく，運転エネルギー削減が可能であることが確認できた。

3.2　メタン発酵に及ぼす温度の影響

実験Ibでの処理特性を図7に示す。設定温度を26℃から2℃ずつ10℃まで減少させた。pHは7付近で安定して運転ができ，系が破綻する状況には至らなかった。吸い出し液の濃度は，TS約3 g/LおよびVS約2 g/Lであった。実測の反応器温度とバイオガス生成量の関係を，各温度の設定期間での最後の5日間の平均値で図8に示す。温度の低下に伴い徐々にガス発生量は減少し，10℃でのガス発生量は，25℃でのガス発生量の約40%となった。一般的に，温度の低下に従いメタン発酵活性は低下し，26℃の場合35℃の約半分であるといわれている[20]ものの，20～25℃程度でもメタン発酵が可能であることが報告されている[21]。26℃以下の低温でも，処理効率は低下するものの，メタン発酵は可能であることが示された。

3.3　メタン発酵に及ぼす有機物負荷率の影響

実験IIでの処理特性を図9に示す。58日目以降に，各系列の有機物負荷率を異なる値に設定して運転を行っ

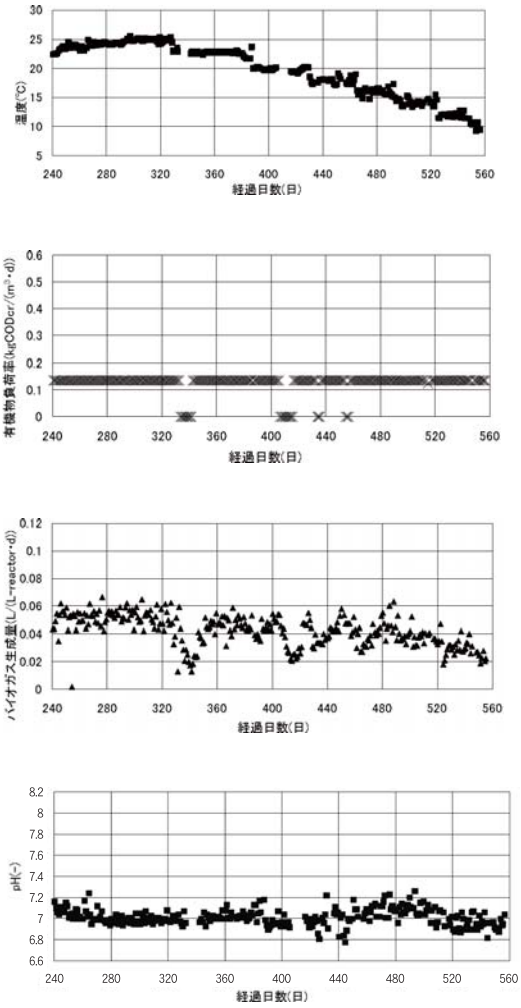
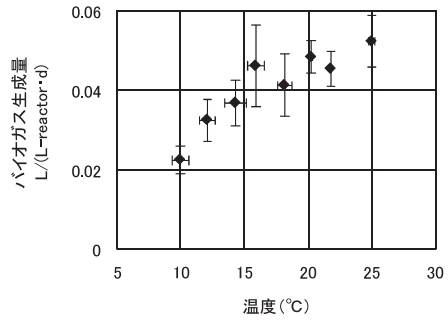


図７　処理特性（実験 Ib）



(5 日間の平均値±標準偏差)

図８　温度がガス発生量に及ぼす影響（実験 Ib）

ている。それに応じて，バイオガスの発生量も系列ごとに変化した。pH は実験開始時 7.8 程度であり，負荷を変化させた実験を行った時期には７程度で安定していた。

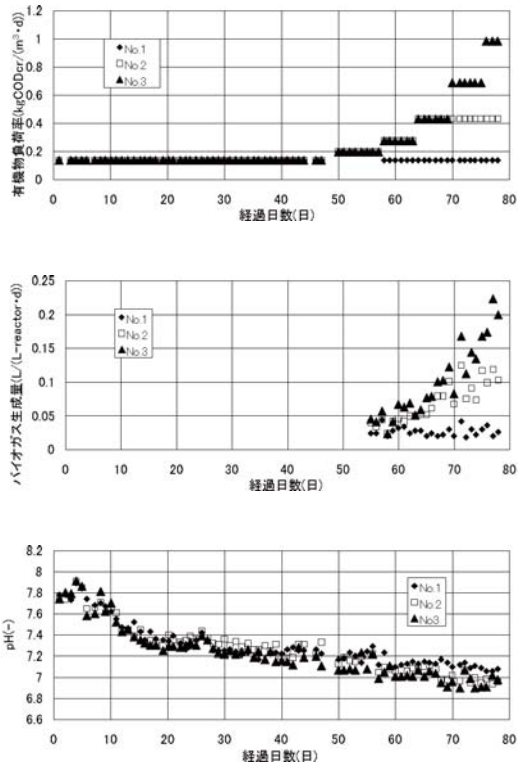


図９　処理特性（実験 II）

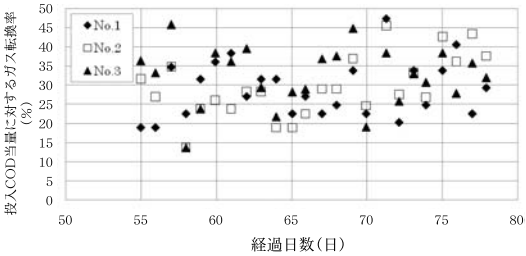


図 10　COD ベースのメタンガス転換率（実験 II）

試算した COD 換算のガス転換率を図 10 に示す。ここでは，バイオガス中のメタンガス濃度は，実験Ｉの 60 日以降の実測値から 60% として算出した。26℃の条件下で有機物負荷率を，約 1 kgCODcr/(m^3・d) まで増加させても，ガス転換率に大きな差は見られず，40% 程度でほぼ維持された。実験Ｉと同程度の処理成績が示され，再現性が確認できたといえる。メタン発酵が不安定になることもなく，一般的な中温メタン発酵に比べると低いものの，短期間であればこの程度の負荷率までは対応可能であり，特に小規模反応器の場合の急な負荷変動に対する緩衝能力の目安と考えられる。これらの結果より，26℃でも豚糞のメタン発酵が負荷率は低くなるも

のの可能であり，無加温での処理が実現可能であると考えられる。

4. 結　　論

本研究では豚糞を基質として，無動力撹拌で低温での嫌気性消化反応器を設計し，それにおける豚糞の分解特性を把握することを目的として，連続処理実験を行った。得られた主な結果を以下に示す。

1）豚糞の無動力撹拌での26℃程度の低温メタン発酵プロセスの各実験において，特に制御することなしに，pH7付近でメタン発酵が安定しており，過度の固形性成分の蓄積もなく，運転エネルギー削減が可能であることが確認できた。

2）リアクターから発生したバイオガス中のメタン濃度は，60%以上であった。CODベースで，リアクターに投入した豚糞の60%程度がメタンガスに変換され，VSあたりのメタンガス発生量は，0.3～0.4 L/gVS程度であった。

3）設定温度を26℃から，2℃ずつ，10℃まで減少させた実験において，10℃でのガス発生量は，25℃でのガス発生量の約40%となった。

4）温度26℃のメタン発酵実験で，基質濃度を増加させた運転を行い，1 kgCODcr/(m^3・d）まで負荷率を増加可能であることが示された。

ブタ4頭規模の農家を想定すると，糞発生量は2 kg/(頭・日）程度であり[22,23]，実験Ⅰでの負荷率程度で運転するために必要な反応器容積は10 m^3程度の規模である。本研究で提案した手法で温度や撹拌などの維持管理を簡略化することで，小規模農家での導入も容易になるものと考えられる。

［謝　辞］

本研究で用いた基質は，京都大学大学院農学研究科応用生物科学専攻生体機構学分野久米新一教授にご提供頂きました。また，植種材料は南丹市八木バイオエコロジーセンターにご提供頂きました。ここに記して感謝致します。

参 考 文 献

1） 伊藤正直，新田太郎監修：ビジュアル NIPPON 昭和の時代，第1版，小学館，pp. 45-46（2005）
2） ㈳日本エネルギー学会編：バイオマスハンドブック，第1版，オーム社，pp. 64-69（2002）
3） 古市 徹監修：バイオガスの技術とシステム，第1版，オーム社，pp. 29-35（2006）
4） 古市 徹監修：バイオガスの技術とシステム，第1版，オーム社，pp. 11-14（2006）
5） 洪 鋒，津野 洋，日高 平，千 智勲：1日1回給餌操作での生ごみの高温メタン発酵特性に関する研究，廃棄物学会論文誌，第15巻，第5号，pp. 381-388（2004）
6） 古市 徹監修：バイオガスの技術とシステム，第1版，オーム社，pp. 122-123（2006）
7） 中久保亮，石田哲也，松田從三，近江谷和彦：牛ふん尿のメタン発酵における食品廃棄物投入の効果，廃棄物学会論文誌，第19巻，第6号，pp. 392-399（2008）
8） 安田大介，小林拓朗，李 玉友，原田秀樹，岡庭良安：乳牛ふん尿の嫌気性自己分解によるメタン発酵スタートアップ方法およびその過程における微生物群集構造の変化，廃棄物学会論文誌，第19巻，第6号，pp. 373-381（2008）
9） ㈶新エネルギー財団編：バイオガス技術ハンドブック，オーム社，第1版，pp. 218-227, pp. 282-286（2008）
10） ㈳日本生化学会編：新生化学実験講座1，タンパク質分離・精製・性質，東京化学同人（1990）
11） O. H. Lowry, N. J. Rosebrough, A. L. Farr and R. J. Randall : Protein Measurement with the Folin Phenol Reagent, J. Biol. Chem., Vol. 193, No. 1, pp. 265-275（1951）
12） E. G. Bligh and W. J. Dyer : A Rapid Method of Total Lipid Extraction and Purification, Can. J. Physiol., Vol. 37, p. 911（1959）
13） JIS K0067・強熱残分又は灰分の試験法（第1法）（1992）
14） 日本木材学会編：木質科学実験マニュアル，文永堂出版（2000）
15） ㈳日本下水道協会：下水試験方法1984年版（1985）
16） APHA AWWA WEF：Standard Methods 19th Edition, USA（1995）
17） 黒田正和，油川 博：畜産廃棄物（豚糞）の連続中温メタン発酵におけるガス生成速度，下水道協会誌，第196巻，第17号，pp. 61-64（1980）
18） 加藤明徳，野池達也：各種農畜産廃棄物の嫌気性消化処理におけるメタンガス発生量，廃棄物学会論文誌，第10巻，第1号，pp. 1-8（1999）
19） 片岡直明，鈴木隆幸，鈴木芳郎，石田健一，山田紀夫，本多勝男：家畜糞尿のメタン発酵処理システムの実証試験，環境工学研究論文集，第36巻，pp. 443-453（1999）
20） G. Lettinga, S. Rebac and G. Zeeman : Challenge of Psychrophilic Anaerobic Wastewater Treatment, TRENDS in Biotechnology, Vol. 19, No. 9, pp. 363-370（2001）
21） 宝月章彦，東野宏昭，野中信一，前田嘉道：嫌気処理における発酵温度と処理性能に関する研究，水処理技術，第30巻，第1号，pp. 37-43（1989）
22） ㈳日本エネルギー学会：堆肥化施設，浄化槽などの規模算定に用いる排せつ量，バイオマスハンドブック，オーム社，p. 65（2002）
23） ㈶畜産環境整備機構：家畜ふん尿処理施設の設計・審査技術，p. 11（2004）

Low-temperature Methane Fermentation of Swine Excrement with Unpowered Mixing in Once-a-day Feeding Condition

Shin Abe*, Taira Hidaka** and Hiroshi Tsuno**

* Research Center for Next Generation Technology, Murata Manufacturing Co., Ltd.
** Department of Environmental Engineering, Kyoto University

† Correspondence should be addressed to Taira Hidaka :
Department of Environmental Engineering, Kyoto University
(C1-228 Kyotodaigakukatsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540 Japan)

Abstract

A small methane fermentation reactor was developed that mixes without power to treat swine excrement at 26℃ or less in a once-a-day feeding condition. Mixing was conducted by utilizing pressure generated by biogas. When operation was stable, pH was maintained at around 7. The COD-base methane conversion ratio was around 60%, and methane production was about 0.3-0.4 L/gVS under an organic loading ratio of 0.1-0.2 kg-CODcr/(m^3・d). Methane production at 10℃ was about 40% of that at 25℃. These results proved that this low-temperature reactor that mixes without power can reduce operation energy consumption and be operated stably without the accumulation of solids.

Keywords: low-temperature methane fermentation, swine excrement, once-a-day feeding, unpowered-mixing