The Society for Bioscience and Bioengineering, Japan

乾式メタン発酵による有機性廃棄物からのメタン回収

藪　宏典[1*]・坂井智加子[1]・藤原　朋子[1]・中島田　豊[2]・西尾　尚道[2]

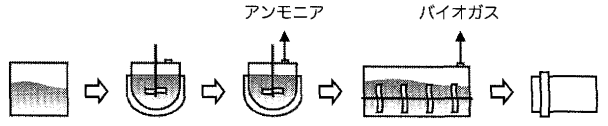
メタン発酵とは嫌気状態で有機物が加水分解されて低級脂肪酸（VFA）となり，さらに水素および酢酸に分解され，最終的にメタンおよび二酸化炭素に変換される過程である．従来，メタン発酵は汚泥の減容化や高濃度廃液の処理を目的に導入されていたが，カーボンニュートラルな資源であるバイオマスのエネルギー変換方法として現在注目されている．バイオマス・ニッポン総合戦略[1]では廃棄物系バイオマスとして家畜ふん尿，食品廃棄物，下水汚泥などがあげられており，これら含水率の高いウエット系バイオマスはメタン発酵によるエネルギー回収が可能である．

メタン発酵にはさまざまな方式があるが，含水率の点で湿式と乾式に大きく分類できる[2]．国内では湿式メタン発酵（固形物濃度2%程度）が排水処理の現場で広く普及している．しかし，上記のバイオマスの多くが固形物であり湿式のメタン発酵を行うためには水で希釈をする必要がある．一方，乾式メタン発酵（固形物濃度20%以上）はバイオマスをそのままメタン発酵することが可能であり，さらに発酵残渣の排出量も少なくすることができる．しかし乾式メタン発酵で大きな問題となるのはアンモニア態窒素によるメタン発酵阻害である．乾式では湿式に比べると水分が少ないため，有機物の分解により生成したアンモニアは希釈されずアンモニア阻害を受けやすい．そのため脱水汚泥や食品廃棄物などの窒素を多く含む有機性廃棄物単独での処理は難しいとされており，乾式メタン発酵の普及が進まない原因の一つである．

著者らはその問題を解決すべく新規の乾式メタン発酵プロセスを考案し[3]，バイオマスである脱水汚泥および食品廃棄物をそれぞれ単独で乾式メタン発酵を行ったので紹介する．

脱水汚泥の乾式メタン発酵

プロセス　広島県産業科学技術研究所で実施された産学官共同研究プロジェクトである「有機性排水・余剰汚泥の高効率嫌気処理システムの開発」において，図1に示す新規の乾式メタン発酵プロセスが提案された．このプロセスは脱水汚泥からのアンモニア生成を短期間で行った後に，脱アンモニア処理を行い，その汚泥を使用することにより乾式メタン発酵で問題となるアンモニア阻害を回避し，持続的なメタン発酵を可能にするものである．



プロセス	アンモニア生成	脱アンモニア	乾式メタン発酵	乾燥
温度（℃）	37～55	100	55	>100
SRT（日）	1～2	0.5～1	15～20	0.5～1

図1．新規乾式メタン発酵プロセス

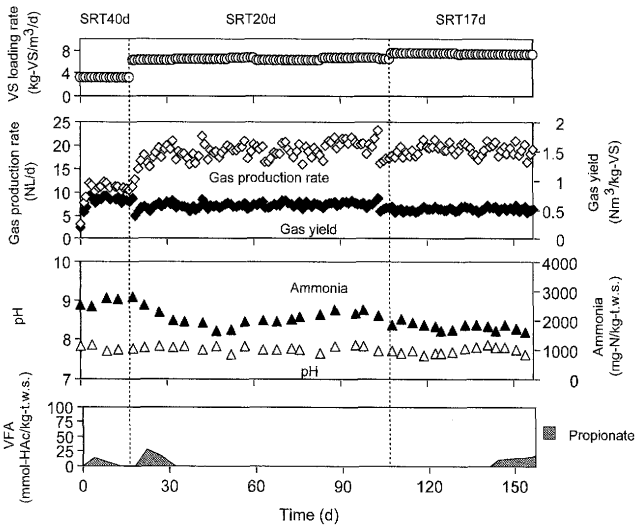


図2．脱アンモニア汚泥を基質とした半連続乾式メタン発酵ラボリアクター運転結果

半連続乾式メタン発酵　提案した乾式メタン発酵プロセスの有効性を確認するために完全混合型のラボリアクターを作製して半連続乾式メタン発酵実験を行った．種汚泥として下水処理場の高温嫌気消化脱水汚泥を用い，設定SRT（sludge retention time）に応じてアンモニア生成後に脱アンモニア処理した汚泥を基質として毎日投入し，55°Cで長期間運転を行った．その結果を図2に示す．

SRT40日で基質の投入を開始しVS（volatile solid）負荷を上げていった．バイオガス中に占めるメタンの割合

*著者紹介　[1]広島県立総合技術研究所食品工業技術センター（副主任研究員）　E-mail: h-yabu89393@pref.hiroshima.lg.jp
[2]広島大学大学院先端物質科学研究科分子生命機能科学専攻

NII-Electronic Library Service

The Society for Bioscience and Bioengineering, Japan

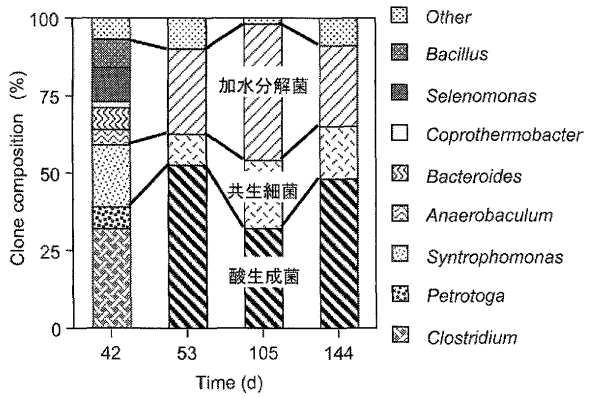


図3. 脱アンモニア汚泥を基質とした半連続乾式メタン発酵における真正細菌のクローン解析

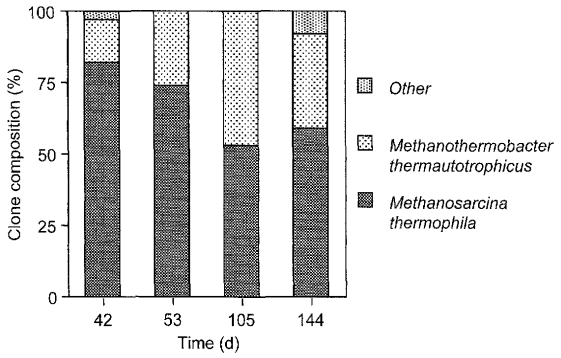


図4. 脱アンモニア汚泥を基質とした半連続乾式メタン発酵における古細菌のクローン解析

は63%，二酸化炭素の割合は35%でありVS負荷に関係なく運転期間中ほぼ一定であった．またpHは無調整であり運転期間中はpH8付近で安定して推移した．有機酸はVS負荷を変えると一時的にプロピオン酸が蓄積したが，その後資化されて不検出となった．

投入したVSに対するガス収率は，運転期間中平均で0.56Nm^3/kg-VSであったガス収率は負荷を上げるとわずかに低下したが，これはSRTが短くなることによりVS成分の可溶化が十分に行われないまま排出されるためではないかと考えられる．

アンモニア態窒素濃度は運転期間中3000mg-N/kg-total wet solid（t.w.s.）以下で推移した．脱アンモニアしていない脱水汚泥の反復回分乾式メタン発酵では，培養直後からアンモニア態窒素濃度が3000mg-N/kg-t.w.s.まで上昇し，回分を続けると6000mg-N/kg-t.w.s.以上まで蓄積した[3]．しかし，新規の乾式メタン発酵プロセスでは，アンモニア態窒素濃度の急激な上昇はみられず脱アンモニアの効果が示された．脱アンモニア処理によってアンモニア蓄積によるメタン生成への阻害は最小限に抑えられていると考えている．

菌叢解析　乾式メタン発酵における菌叢解析を行った．その結果を図3，図4に示す．クローン解析の結果，真正細菌においてはメタン発酵に必要な加水分解菌，酸生成菌，共生細菌がバランスよく安定的に存在していることが分かった．また古細菌においても酢酸資化性メタン生成菌の*Methanosarcina*と水素資化性メタン生成菌の*Methanothermobacter*が安定して存在しており，菌叢解析の面からも新規乾式メタン発酵プロセスの安定的な処理が裏づけられた．

窒素収支　SRT20日における安定期（69～82日目）の窒素収支を図5に示す．脱水汚泥中には全窒素の10%がアンモニア態として存在し，アンモニア生成過程で全窒素の49%がアンモニアに変換されたため，汚泥中の全窒素に対するアンモニア態窒素の比率は合計で59%となった．脱アンモニア過程で全窒素の57%がアンモニアとして系外に回収され，アンモニア態窒素の回収率は97%であった．メタン発酵過程においてはVSの分解と共にアンモニア態窒素も増加し，脱アンモニア汚泥では全窒素の2%であったアンモニア態窒素が16%まで増加した．よって一連の乾式メタン発酵プロセスにおいて全窒素に対するアンモニア態窒素の比率は73%となった．本実験で使用した脱水汚泥の全窒素は約14,000mg-N/kg-t.w.s.であり，そのまま無希釈で乾式メタン発酵を行うと約10,000mg-N/kg-t.w.s.のアンモニア濃度となることが推測される．このことは本プロセスにおけるアンモニア生成および脱アンモニアの有効性を裏づけるものと考えられる．

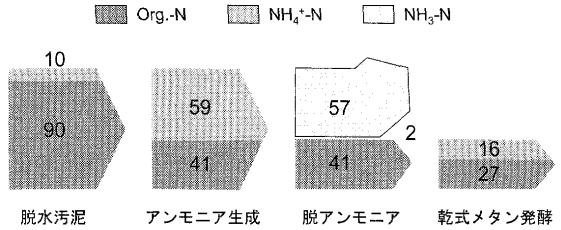


図5. 脱水汚泥を基質とした半連続乾式メタン発酵における窒素収支

食品廃棄物の乾式メタン発酵

半連続乾式メタン発酵　脱水汚泥と同様に，アンモニア生成後に脱アンモニア処理したモデル生ごみ[4]を基質として半連続乾式メタン発酵を行った．その結果を図6に示す．

バイオガスの組成は運転期間中ほぼ一定でメタンが60%，二酸化炭素が40%であった．リアクター内のpH

NII-Electronic Library Service

The Society for Bioscience and Bioengineering, Japan

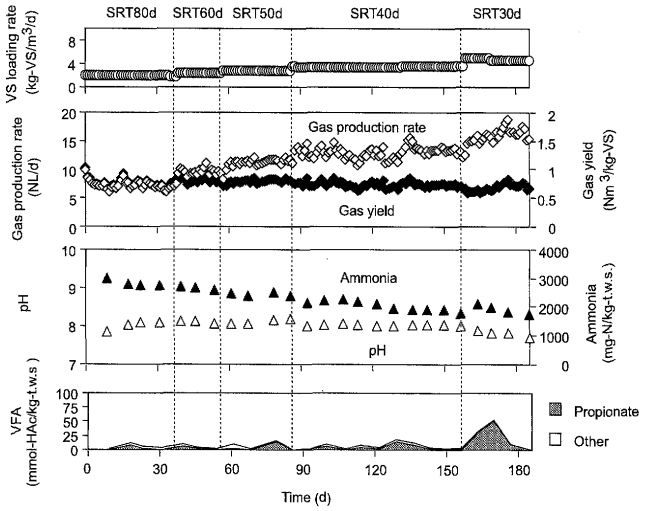


図6. 脱アンモニア生ごみを基質とした半連続乾式メタン発酵ラボリアクター運転結果

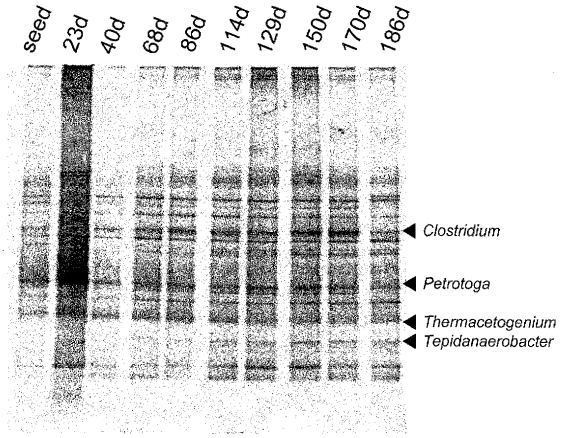


図7. 脱アンモニア生ごみを基質とした半連続乾式メタン発酵における真正細菌のDGGE解析

は無調整で運転をしたがpH8付近で安定して推移した．有機酸の蓄積はプロピオン酸が主であり，SRT30日に変更した際に一時的に50mmol-HAc/kg-t.w.s.まで蓄積したが，その後の運転で解消した．リアクター内のアンモニア態窒素濃度は運転と共に減少し，運転終了時には2000mg-N/kg-t.w.s.以下となった．

ガス収率は運転期間中平均で0.74Nm^3/kg-VSであったため，脱水汚泥と比べると生ごみを基質としたほうがバイオガスの回収には有利であると考えられる．

菌叢解析　乾式メタン発酵におけるDGGEおよびクローン解析の結果，真正細菌では運転開始期には*Petrotoga*が優占していたが，安定期にはセルロースを分解する*Clostridium*や共生細菌である*Tepidanaerobacter*, *Thermacetogenium*などが増加し菌の種類が多様化した（図7）．古細菌では運転と共に*Methanosarcina*の割合が増加した．

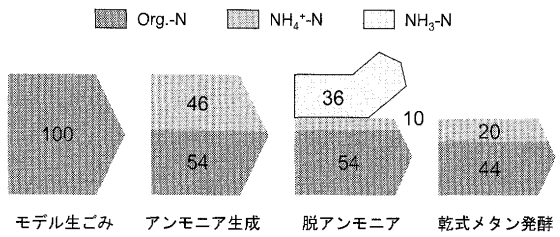


図8. モデル生ごみを基質とした半連続乾式メタン発酵における窒素収支

窒素収支　SRT40日における安定運転期（137～150日目）における窒素収支を図8に示した．本実験において基質中の全窒素のアンモニア態窒素への変換率は56％であった．使用したモデル生ごみの全窒素は約6300mg-N/kg-t.w.s.であり，無希釈で乾式メタン発酵を行うとアンモニア阻害が起きることが推測される．

おわりに

以上のように，従来は乾式メタン発酵では難しいとされていた窒素を多く含む有機性廃棄物からのメタン回収が，新規の乾式メタン発酵プロセスで可能であることが確かめられた．また，鶏糞を基質とした場合でも同様な処理が可能であることが確かめられている[5]．

エコ燃料利用推進会議の試算[6]では，国内で1年間に発生するウエット系バイオマスのメタン発酵により，原油換算で下水汚泥から40万kl，食品廃棄物から70万kl，家畜ふん尿から250万klに相当するエネルギーが得られると推測されている．これは京都議定書目標達成計画における2010年度のバイオマス熱利用導入見込みに相当する[7]．これらのバイオマスを有効に利用してエネルギー回収を行うことは地球温暖化が問題となっている現在，急務であると考える．

その一つの手段である乾式メタン発酵は，現状まだ多くの解決すべき点があるが，今後の更なる研究開発により実用化されることを期待したい．

文　献

1) http://www.maff.go.jp/j/biomass/index.html
2) Nichols, C. E.: *BioCycle*, **45**, 47 (2004).
3) Nakashimada, Y. *et al.*: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **79**, 1061 (2008).
4) Sasaki, H. *et al.*: *J. Jpn. Soc. Water Environ.*, **22**, 983 (1999).
5) 北村ら：日本生物工学会大会講演要旨集, p. 106 (2007).
6) http://www.env.go.jp/earth/ondanka/conf_ecofuel/rep1808/index.html
7) http://kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/index.html

NII-Electronic Library Service