

メタン発酵技術の概要と その応用展望

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 助教授 李 玉 友

1. はじめに

メタン発酵は、酸素のない嫌気的条件においてメタン発酵微生物の代謝作用により有機物を CH_4 と CO_2 まで分解する生物化学的反応であり、自然界の炭素循環において重要な役割を果たしている。また、メタン発酵技術とは、メタン発酵の原理を利用して、有機性廃水や廃棄物などの廃棄物系バイオマスを生物学的に分解し、その生産物である CH_4 をエネルギー資源として回収利用するものであり、バイオガス (Biogas) 技術とも呼ばれている。一方、廃水・廃棄物処理の分野において同様な原理を用いた処理技術は嫌気性消化 (Anaerobic Digestion) または嫌気性処理 (Anaerobic Treatment) として知られ、すでに 100 年間以上応用してきた歴史がある¹⁾。

近年、地球温暖化防止、循環型社会の形成、新エネルギーの開発、バイオマス利活用等の様々な観点から、メタン発酵技術の重要性・有用性が認識され、メタン発酵に関する新しい技術の開発とバイオガス応用が世界的に注目を集めている。しかし、どのような技術も応用ケースによっては向き不向きがあるので、バイオガス技術もその例外ではない。メタン発酵技術の基本的原理を理解しないでバイオガス技術を利用すると、いろいろ不具合が生じ、場合によつ

ては無益なものになる。従って、メタン発酵技術の利活用を適切に推進するためには、その生物化学的原理およびシステム構成を正しく理解する必要がある。

本稿では、メタン発酵を用いた廃棄物の減量化、無害化、エネルギー資源化の技術動向を概説するため、まずメタン発酵技術の歴史と再注目される社会的背景をまとめた。それから、メタン発酵の原理と操作条件を最新の研究成果に基づき概説した。最後に各種廃棄物系バイオマス処理・利用におけるメタン発酵技術の応用状況と課題を紹介している。

2. メタン発酵技術が再注目される社会的・技術的背景

2.1 メタン発酵技術応用の歴史

メタン発酵は古くて新しい技術と言われている。その原因是「メタン発酵」というキーワード自体は従来からよく使われてきたからである。メタン発酵技術の応用を振り返ると、技術の中身を問わなければ、国内では過去に 2 回のメタン発酵応用ブームがあった。

まず、昭和 30 年代に第一回のブームがあった。当時のし尿処理施設はほとんど嫌気性消化方式を採用していた。また農家の生活改良普及事業の一環として家畜ふん尿からのバイオガス

生産利用が活発に行われた。農家はメタン発酵槽を設置して、炊事等の生活用燃料にバイオガスを利用し、消化液は肥料として利用していた。しかし、このブームは持続しなかった。し尿処理施設の場合、水質規制の強化により酸化方式や標準脱窒素方式がより合理的になり、嫌気性消化を用いたし尿処理施設は次第に建設されなくなった。農家の場合、プロパンガスの普及および作業効率や利便性の追求により、バイオガス利用のメリットが減り、メタン発酵は自然に採用されなくなった。

第二回のブームは、昭和48年と昭和54年の二度のオイルショックによる影響が大きかった。石油のほとんど100%を輸入に頼っている日本にとって、エネルギー問題は深刻だったため、代替エネルギーの生産技術としてメタン発酵によるエネルギー生産が再浮上した。当時、科学技術庁と建設省は下水汚泥の嫌気性消化で発生する消化ガス発電技術の確立を真剣に取り組み、ガスエンジンによるコージェネレーション発電技術を確立し、北九州市や横浜市などで実用化された。また、農林水産省が昭和56年度に行った調査では全国の農村地域では34件のメタン発酵装置が運転されていた²⁾。なお、ごみのメタン発酵に関する研究も行われるようになった。しかし、その後エネルギー問題が緩和されるに伴い、メタン発酵装置は次第に減少した。下水汚泥処理やごみ処理の分野では徹底的減量化・安定化を追求するため焼却が普及していた。

2.2 メタン発酵が再注目される背景³⁾

1990年代に入り、地球環境問題が大きくクローズアップされるに伴い、20世紀の大量生産、大量消費、大量廃棄の社会を脱皮し、持続可能な発展が求められるようになった。21世紀は循環型社会の構築が志向されている。加えて、過去1世紀にわたるメタン発酵やその周辺技術の開発により、近代的なバイオガス技術が生ま

れ、近年ヨーロッパで実用化されてきている。このような社会情勢の変化と技術の発展により、ここ数年、メタン発酵技術の利活用は再び注目されている。以下、メタン発酵技術の応用を支えてきた社会的背景を箇条書きにてまとめる。

(1) 1990年代、排水処理における環境配慮

工場排水処理における省エネルギー、汚泥削減のためUASB、EGSBをはじめとする嫌気性処理が多く導入されている。

(2) 1998年「汚泥再生処理センター」事業の推進

1998年度より旧厚生省の推進で始まった「汚泥再生処理センター事業」は「し尿、浄化槽汚泥及び生ごみ等の有機性廃棄物を併せて処理することにより、メタン発酵のうえメタンガスとしてエネルギー回収する設備、又は堆肥化等により有効利用できる原料若しくは製品を製造する設備の設置」を要求したため、新しい超高速メタン発酵技術の開発と応用が促進された。

(3) 1999年「家畜排泄物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」の制定

家畜排泄物の適正処理が本法によって義務付けられた。メタン発酵法は単なる肥料化だけでなく、バイオガスとしてエネルギーを回収できるので、資源回収型処理方法として注目されている。

(4) 2000年食品リサイクル法成立。

年間100トン以上の食品廃棄物を排出する食品関連事業者は、飼料化、肥料化、油化、メタン化のいずれかの技術を用いてリサイクルを行うことが本法によって義務付けられ、メタン発酵法は有望な技術と期待されている。

(5) 2001年ごみ処理施設性能指針に「ごみメタン施設」が追加

紙、プラスチック類のリサイクル推進に伴い、水分の多い生ごみは焼却処理のマイナス要因となり、別途リサイクル処理が望まし

表-1 代表的廃棄物系バイオマスの発生量およびそのエネルギー生産能力

廃棄物系バイオマス	年間発生量 (万トン/年)	メタン生成能力 (億 m ³ /年)	原油換算 (万 kL/年)
下水汚泥（濃縮汚泥ベース）	7,600	6.23	62
食品廃棄物	2,200	17.0	169
家畜排せつ物	9,100	16.0	159
合 計	18,900	39.23	390

い。そこで、厨芥を分別してメタン発酵によりメタンを回収する技術が推奨された。

(6) 2002「バイオマス・ニッポン総合戦略」閣議決定

2002.12に閣議決定された「バイオマス・ニッポン総合戦略」では2010年において下水汚泥を含む廃棄物系バイオマスのうち炭素量換算で80%以上をエネルギー又は製品として利活用するように努めること、そのための効率的なエネルギー変換技術の開発・実用化や生成CH₄貯蔵・利用技術の開発推進等が盛り込まれている。

(7) 2003.4「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法(略称:RPS法)」が成立

電気事業者はその事業電力量の一定割合を、風力、太陽光、バイオマスなどの新エネルギーとすることが本法によって義務付けられた。バイオガス発電にとって追い風となっている。

(8) 2003.8「バイオソリッド利活用基本計画(下水汚泥処理総合計画)策定マニュアル」では汚泥のエネルギー利用の項目が追加されている。更に国土交通省では生ごみ等バイオマスを下水処理施設で共同処理し、発生したCH₄等のエネルギーの場内活用を図る「バイオマス利活用事業」を創設した。

(9) 廃棄バイオマスのエネルギー活用により、化石燃料由来の温室効果ガス排出量の抑制等、環境面の効果も期待されている。「京都議

定書」(1997.2)では、日本における2010年の温室効果ガス排出量を1990年度比6%削減の目標が定められ、これに向けて「地球温暖化対策推進大綱」(2002.3)の中で、新エネルギー対策(排出削減見込み量約3,400万t-CO₂)としてバイオマス発電(33万kW)及びバイオマス熱利用(67万kL)の導入が位置付けられている。

2.3 メタン発酵技術に対する新たな評価

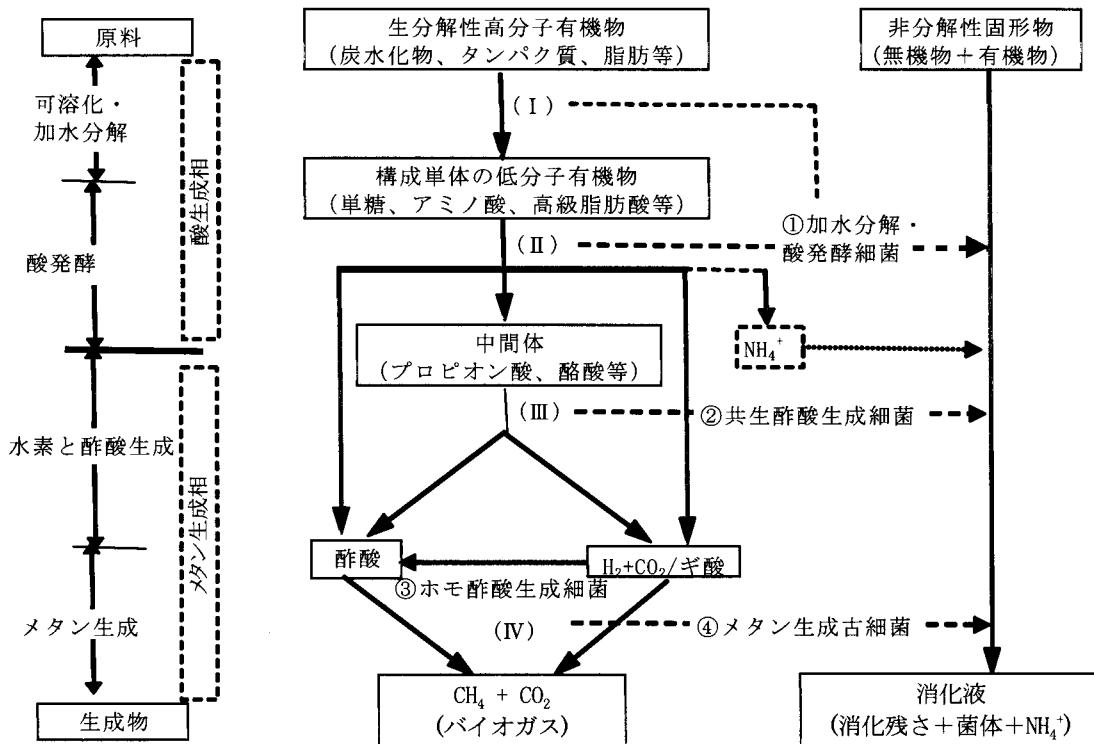
メタン発酵の最大の特徴はエネルギーを回収できることにある。この特徴を活用すれば、表-1に試算したように、廃棄物系バイオマスの3大カテゴリである下水汚泥(年間7,600万トン)、食品廃棄物(年間約2,200万トン)、家畜排せつ物(年間約9,100万トン)から、最大年間390万kLの原油に相当するエネルギーを生産できる。従って、メタン発酵はバイオエネルギー生産の最有力技術として位置づけられる。

また廃棄物処理システムのライフサイクルアセスメント(LCA)の研究によれば、メタン発酵による生ごみの処理は環境負荷が低く、地球環境にやさしいと報告されている。さらに排水または汚泥処理の分野ではメタン発酵による汚泥発生の抑制、または発生汚泥の減量化、エネルギー化も重要視されている。

3. メタン発酵の原理と化学量論

3.1 メタン発酵における物質変換の概要

メタン発酵における生分解性有機物の分解過程

図-1 バイオマスのメタン発酵における物質変換の概要⁴⁾

は図-1に示す通り、大きく分けて(I) 固形または高分子有機物から溶解性有機性単体(糖、アミノ酸及び高級脂肪酸)を生成する可溶化・加水分解(Hydrolysis)、(II) 加水分解生成物である溶解性単体から有機酸(蟻酸、酢酸、プロピオン酸、酪酸など)、アルコール類などを生成する酸生成(Acidogenesis)、(III) プロピオン酸や酪酸などのC3以上の揮発性脂肪酸から酢酸と水素を生成する酢酸生成(Aacetogenesis)、(IV) 水素や酢酸などからメタンと二酸化炭素を生成するメタン生成(Methanogenesis)、という四つの段階からなる。排水・廃棄物処理の分野では、(I)と(II)の二つの段階を併せて酸生成相(Acidogenic phase)、(III)と(IV)の二段階を併せてメタン生成相(Methanogenic phase)と呼ぶことが一般的である。

メタン発酵の結果、バイオマスに含まれる生分解性高分子有機物CODの約80~90%がバイオガスに転換され、残りの10~20%程度が増殖菌体となって非分解性固形物とともに消化液

となる。またメタン発酵において、タンパク質に含まれている窒素はアミノ酸の分解に伴いNH₄⁺の形態で液相に放出する。有機物に含まれているリンはまずリン酸根(PO₄³⁻)になり、そして鉄、マグネシウムなど金属イオンと反応して難溶性の沈殿物となることが多い。なおメタン発酵条件において病原性微生物の死滅効果も大きい。

メタン発酵で生成したバイオガスの成分は、一般的にメタン(CH₄)が60%(±5%)、二酸化炭素(CO₂)が40%(±5%)程度で安定している。そのうちメタンが燃料成分であり、その含有量が高いほど発熱量も高くなる。一般的にバイオガスの発熱量は1m³あたり5,000~6,000kcalで、都市ガスの5A~6Aの規格に近く、燃料資源としての価値は十分認められる。

3.2 メタン発酵微生物の概要

メタン発酵に関与している微生物は極めて複雑であり、表-2にまとめるように、数グループ

に分けられる⁴⁾。図-1に示すように、メタン発酵の最終段階ではメタン生成古細菌によりメタンと二酸化炭素が生成する。通常のメタン発酵では、メタンの70%程度は酢酸から生成し、残りの30%は二酸化炭素が水素により還元されて生成すると考えられている。従って、酢酸を利用するメタン生成菌は重要である。図-2にメタン発酵槽でよく観察される酢酸資化性メタン生成菌の糸状 *Methanosaeta* 属と連球状 *Methanosarcina* 属の電子顕微鏡写真を示す。

糸状の *Methanosaeta* と連球状の *Methanosarcina* はいずれも酢酸を基質とするので、基質をめぐって競合関係にある。一般的に酢酸濃度が低い場合、*Methanosaeta* が有利であるのに対し、酢酸濃度が高い場合には *Methanosarcina* は優勢となる。また、高温条件下では *Methanosarcina* はよく観察される。安定的メタン発酵を実現するには、反応槽内に *Methanosaeta* または *Methanosarcina* の酢酸利用性メタン生成細菌を十分維持する必要がある。

表-2 メタン発酵槽における微生物の菌叢構造

細菌グループ	細菌数(個/mL)	代表的属など
I. 酸生成細菌 総菌数 タンパク質分解菌 セルロース分解菌	$10^8 \sim 10^9$	ほとんど未知 グラム陰性桿菌が多い <i>Eubacterium</i> <i>Clostridium</i> 等
	10^7	
	10^5	
II. 水素生成性酢酸生成細菌	10^6	グラム陰性桿菌が多い <i>Syntrophobacter</i> <i>Syntrophomonas</i>
III. ホモ酢酸生成細菌	$10^5 \sim 10^6$	<i>Acetobacterium</i> <i>Clostridium</i>
IV. メタン生成古細菌	$10^6 \sim 10^8$	<i>Methanobacterium</i> <i>Methanospirillum</i> <i>Methanococcus</i> <i>Methanosarcina</i> <i>Methanosaeta(Methanotherix)</i>
V. 硫酸塩還元細菌	10^4	<i>Desulfovibrio</i> <i>Desulfotomaculum</i>

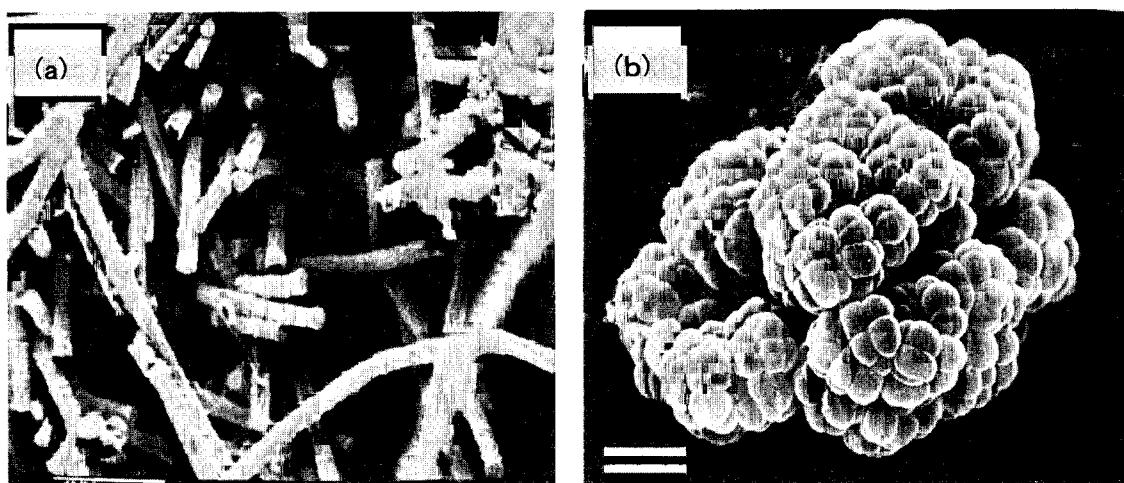
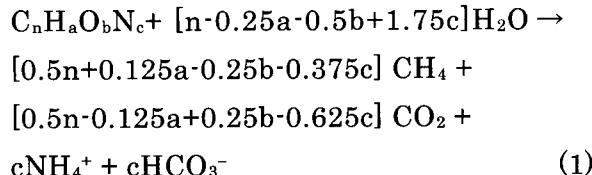


図-2 代表的メタン生成菌である糸状性の *Methanosaeta*
(a) 連球状の *Methanosarcina* (b) の電子顕微鏡写真

3.3 メタン発酵の化学量論

汚泥や生ごみなどのバイオマスに含まれる有機物は炭水化物、タンパク質、脂質および粗繊維に大別されるが、その主な元素構成は炭素(C)、水素(H)、酸素(O)および(N)である。メタン発酵における有機物の変換反応を次式のような化学量論式で簡潔に表現できる。



著者ら^{3,5-7)}はこの量論式はバイオガスの生成のみならず、NH₄⁺およびアルカリ度生成も概算できることに注目して生ごみ、汚泥など幾つかのケースに適用してみた結果、この式はほとんどの場合、メタン発酵反応をよく表現できることを確認した。ここで、文献に報告された擬似分子式を用いて代表的なメタン発酵を試算し、表-3にまとめた。

この計算より明らかなように、有機物1g当たりのメタン生成ポテンシャルは脂肪(0.998L) >タンパク質(0.527L) >炭水化物(0.415L)の順である。また、ガス組成に関しては、炭水化物の分解ではメタン含有率が50%であるのに

対して、他の3種類の物質はいずれも70%程度である。このようにメタン発酵の対象によってはバイオガス生成量およびメタン含有率は著しく異なる。

4. メタン発酵の環境条件と運転指標

4.1 攪拌と混合

メタン発酵が微生物反応であるので、基質と微生物の混合や反応生成物の物質移動を促進する攪拌は当然重要な影響因子となる。過去の経験より適切な攪拌はメタン発酵の効率を向上できることが知られている。特に汚泥などの固形物のメタン発酵処理において反応槽内の攪拌が必要不可欠である。

攪拌の方法は基本的に次の3種類がある。

- 1) 機械攪拌: インペラやドラフトチューブ攪拌機など
- 2) ガス循環: 発生したバイオガスを反応槽内に吹き込む。
- 3) 水理学的攪拌: 液循環または液面変動によって生じる攪拌

近年開発された高濃度メタン発酵では、これらの攪拌手段を組み合わせて使用するケースもある。

表-3 代表的有機物および廃棄物系バイオマスのメタン発酵に関する化学量論式とガス発生量の概算

	擬似分子式に基づくメタン発酵の化学量論式 (菌体増殖の影響を考慮していない)	ガス発生量の概算		
		L/g-VS	CH ₄ 率	L·CH ₄ /g-VS
炭水化物	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + nH ₂ O → 3nCH ₄ + 3nCO ₂	0.830	50%	0.415
タンパク質	C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄ + 14.5H ₂ O → 8.25CH ₄ + 3.75CO ₂ + 4NH ₄ ⁺ + 4HCO ₃ ⁻	0.764	69%	0.527
脂肪	C ₅₀ H ₉₀ O ₆ + 24.5H ₂ O → 34.75CH ₄ + 15.25CO ₂	1.425	70%	0.998
リグニン等	(-CH ₂ -) _n + 0.5nH ₂ O → 0.75nCH ₄ + 0.25nCO ₂	1.60	75%	1.200
食品生ごみ	C ₁₇ H ₂₉ O ₁₀ N + 6.5H ₂ O → 9.25CH ₄ + 6.75CO ₂ + NH ₄ ⁺ + HCO ₃ ⁻	0.88	58%	0.510
乳牛ふん尿	C ₂₂ H ₃₁ O ₁₁ N + 10.5H ₂ O → 11.75CH ₄ + 9.25CO ₂ + NH ₄ ⁺ + HCO ₃ ⁻	0.97	56%	0.543
都市ごみ	C ₄₆ H ₇₃ O ₃₁ N + 14H ₂ O → 24CH ₄ + 21CO ₂ + NH ₄ ⁺ + HCO ₃ ⁻	0.887	53%	0.470
混合紙	C ₄₆ H ₇₃ O ₃₁ N + 54.25H ₂ O → 134.375CH ₄ + 130.625CO ₂ + NH ₄ ⁺ + HCO ₃ ⁻	0.832	51%	0.424
下水汚泥	C ₁₀ H ₁₉ O ₃ N + 5.5H ₂ O → 6.25CH ₄ + 2.75CO ₂ + NH ₄ ⁺ + HCO ₃ ⁻	1.003	69%	0.690
余剰汚泥	C ₅ H ₇ O ₂ N + 4.0H ₂ O → 2.5CH ₄ + 1.5CO ₂ + NH ₄ ⁺ + HCO ₃ ⁻	0.793	63%	0.500
初沈汚泥	C ₂₂ H ₃₉ O ₁₀ N + 9H ₂ O → 13CH ₄ + 8CO ₂ + NH ₄ ⁺ + HCO ₃ ⁻	0.986	62%	0.611
し尿汚泥	C ₇ H ₁₂ O ₄ N + 9H ₂ O → 13CH ₄ + 8CO ₂ + NH ₄ ⁺ + HCO ₃ ⁻	0.772	60%	0.463

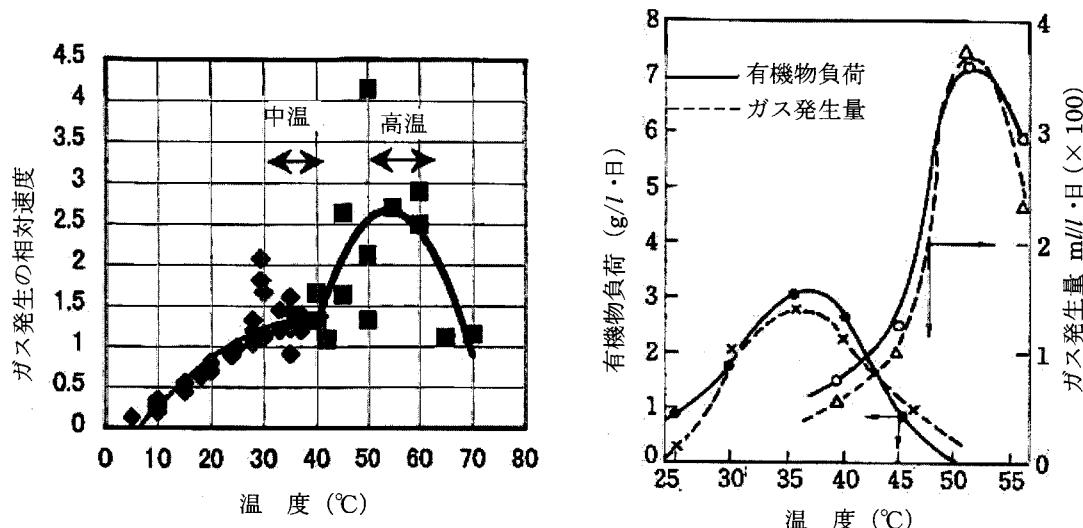


図-3 メタン発酵に及ぼす温度の影響（左図は汚泥処理のデータ、右図は廃水処理のデータ）

4.2 温度³⁾

メタン発酵はその操作温度域により無加温(<25°C)、中温発酵(30~40°C)および高温発酵(50~60°C)に分けられるが、実用的に中温の最適温度35°C前後または高温の最適温度55°C前後で行われる。一般的に高温発酵の反応速度は中温発酵の2倍以上と報告されており、経験的に高温発酵の容積負荷は中温の倍ぐらい向上できる。処理特性の観点から中温発酵と高温発酵を比較すると、高温発酵は加水分解率や病原性微生物の死滅率が高く、発酵速度が早く、高負荷を実現しやすい反面、有機酸が蓄積しやすいこともある。それに対して中温発酵は分解速度が遅いものの、安定性や脱離液の水質が比較的良い。

4.3 pH

メタン生成菌はほぼ中性付近のpH条件を好みので、メタン発酵の最適pHが6.8-7.6と言われている。良好に運転されているメタン発酵槽のpHはだいたい6.5~8.2の範囲にある。廃水の嫌気性処理においてpHが7.0の中性付近にあるが、汚泥や生ごみなどの固形廃棄物のメタン発酵においてはアンモニア性窒素濃度が比較的高いので、pHは一般的に7.0~8.0の範囲にある。

4.4 有機酸濃度

メタン発酵の中間生成物としてギ酸、酢酸、プロピオン酸、酪酸、乳酸などの有機酸が生成するが、メタン発酵が順調に進んでいる場合、生成した有機酸は速やかにメタン生成菌に利用されるので、有機酸の濃度が低く、しかも検出されるものはほとんど酢酸、プロピオン酸および酪酸の揮発性脂肪酸である。従って、これら3種類の揮発性脂肪酸の挙動(濃度と構成)を分析すれば、メタン発酵槽の運転状況を把握することができる。また、有機酸の蓄積はアルカリ度やpHと連動しているので、pHとアルカリ度の推移よりその動向を容易に推定することができる。

4.5 アンモニア

(1)式に示す通り、バイオマスのメタン発酵においてタンパク質の分解に伴い、NH₄⁺が生成する。このNH₄⁺がメタン生成細菌増殖の栄養成分になったり、重炭酸根(HCO₃⁻)と平衡してアルカリ度になったりするので、良好なメタン発酵にとって不可欠な成分である。しかし、NH₄⁺濃度が高すぎると、それに起因するメタン発酵の阻害(有機酸の蓄積とメタン生成速度の低下)が起こる。アンモニア毒性はさまざまな要因に影響されるので、文献に報告されている阻害濃

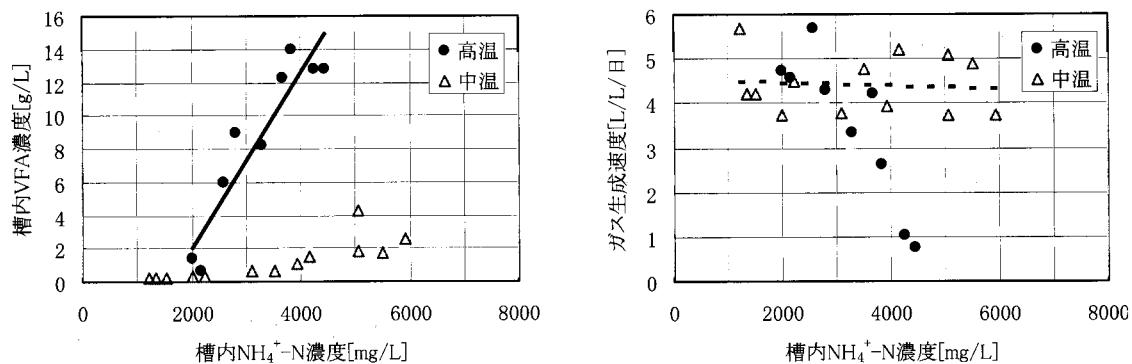


図-4 中温および高温メタン発酵におけるアンモニアの影響（VFA蓄積とガス生成速度の低下）

度には幅がある。また、汚泥の馴養によりアンモニア耐性が強くなることも知られている。メタン発酵槽における安全運転の目安として中温発酵で $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 濃度 4,500 ~ 5,000 mg/L 以下、高温条件で 2,500 mg/L 以下と見られる⁸⁾。投入バイオマスの TS 濃度 10% 程度なら、基本的にこの安全ラインが満たされる。

4.6 アルカリ度

アルカリ度は、酸を中和する溶液の容量を示す指標であり、メタン発酵プロセスの安定性に関わる。一般的にメタン発酵におけるアルカリ度は原液由来のものと代謝由来のものに分けられるが、生ごみや汚泥のメタン発酵においては原液にアルカリ度がほとんどないので、主に発酵代謝に由来する。代謝由来のアルカリ度は主にタンパク質の分解で放出する NH_4^+ に起因する。理論的に NH_4^+ は等モルの HCO_3^- と平衡して NH_4HCO_3 となるので、1g の $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ は 3.6 g のアルカリ度をもたらす。従って、メタン発酵槽におけるアルカリ度は投入物の TS 濃度とタンパク質含有率に比例して増大する。

4.7 ガス組成と硫化水素

メタン発酵により生成するバイオガスの主成分はメタンと二酸化炭素であり、表2に例示したように CH_4 と CO_2 の含有率はバイオマスの種類と性状に若干影響されるが、一般的にそれぞれ 60% ($\pm 5\%$) と 40% ($\pm 5\%$) で安定してい

る。 CH_4 含有率の傾向として、タンパク質と脂肪成分が多い場合に高めになるが、逆に炭水化物が多い場合には低めになる。また、メタン発酵槽の運転において CO_2 含有率の急上昇または CH_4 含有率の急低下はメタン発酵の阻害と連動する場合が多い。

メタン発酵において原料に含まれる硫黄成分が硫化水素 (H_2S) の生成をもたらす。硫化水素の発生は硫酸塩の還元とタンパク質の発酵に由来するので、原料中の硫酸塩濃度とタンパク質濃度に影響される。バイオガス中の硫化水素濃度は一般的に処理対象により数百 ppm から数千 ppm の範囲で変化する。硫化水素が多くなると、バイオガスの品質を低下させるだけでなく、メタン発酵に阻害を及ぼす場合もある。

4.8 滞留時間

滞留時間は、有機物の分解率と運転の安定度に影響を及ぼすだけでなく、投入負荷とも関連する重要な指標である。嫌気性反応槽の安定運転を維持するために、メタン生成菌の保持と過負荷の防止が重要である。単純に菌体維持の観点から考えると、メタン生成菌世代時間の 3 倍以上の滞留時間（安全係数 3）を確保しようとすると、中温では 6 日（世代時間 2 日 × 3 倍）以上、高温では 4 日（世代時間 1.3 日 × 3 倍）以上が必要という計算になる。また下水汚泥の分解には固形物の加水分解に時間がかかるので、高い分解率を得るのに、固形物滞留時間（SRT）を

ある程度長くする必要がある。実用技術として滞留時間を15日程度以上とすることが一般的である。下水汚泥の処理プロセスにおいて、メタン発酵の他に、脱水性、容量調整などの機能も重視されているので、実用的にはメタン発酵を行う嫌気性消化槽が30日の滞留時間で運転されているケースも少なくない。

4.9 微量金属の必要性

微量金属はあらゆる種類の微生物にとって必須である。メタン生成菌の増殖には数種類の微量金属を特に要求している。メタン生成菌の増殖活性に促進効果を及ぼす元素として鉄、銅、セレン、コバルト、マンガン、タングステン、ニッケル、モリブデン、ホウ素、亜鉛の9種類が報告されている。その中で、最も重要なのは鉄、ニッケル、コバルトの3種類である。微量金属が欠乏しているケースの特徴として、アンモニアやその他の阻害因子がないにもかかわらず、反応槽内に有機酸が蓄積し、有機物負荷をなかなか上げられず場合によっては酸敗にもなる。また、この現象は主にメタン発酵の投入物に依存するので、反応槽の初期運転で見られなくても、種汚泥に含まれているものが利用し尽

くされる2~3月後で顕著になることが多い。一般的に下水汚泥にはこれらの微量金属が豊富に含まれているので、あまり問題にならないが、生ごみおよび食品廃棄物のメタン発酵を行う場合にはこの点を留意する必要がある。

5. メタン発酵による廃棄物系バイオマスのエネルギー資源化の現況

様々な廃棄物系バイオマスはメタン回収の原料となることが可能である。その中で特に重要なものは下水汚泥、生ごみ、畜産排泄物、産業廃水などが挙げられる。以下対象物別に技術の現況と応用実績を説明する。

5.1 下水汚泥の嫌気性消化⁶⁾

5.1.1 下水汚泥処理における嫌気性消化の採用状況

下水道の分野では、伝統的に下水汚泥のメタン発酵を嫌気性消化と呼んでいる。図-5に1984年以降の下水汚泥発生量、嫌気性消化処理量及びメタン発酵効率の経年変化をまとめている。近年、小規模下水道の普及により下水汚泥発生量は確実に増えているものの、新規の小規模下水処理施設では

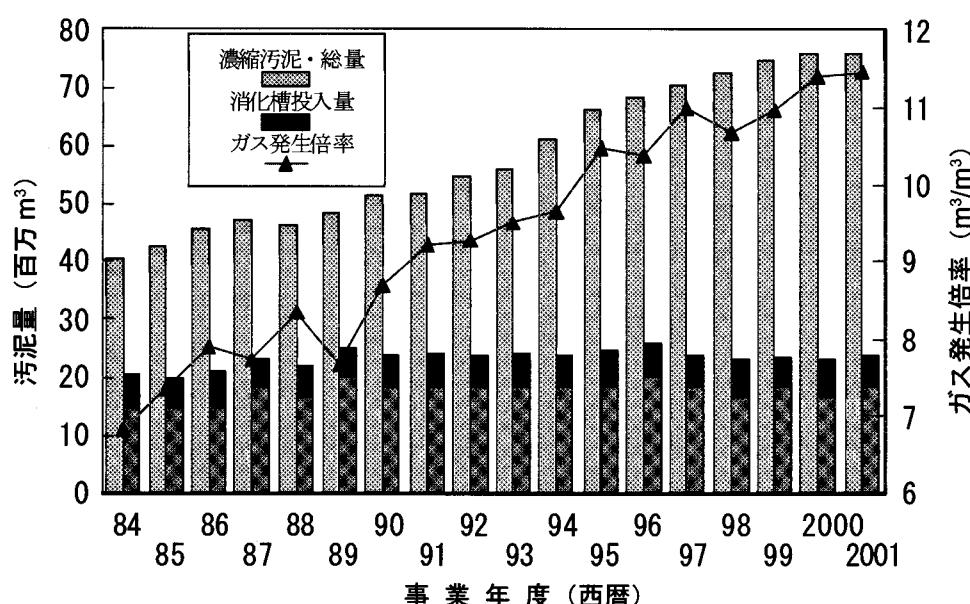


図-5 下水汚泥処理における嫌気性消化の採用状況とガス発生効率（倍率）の経年変化

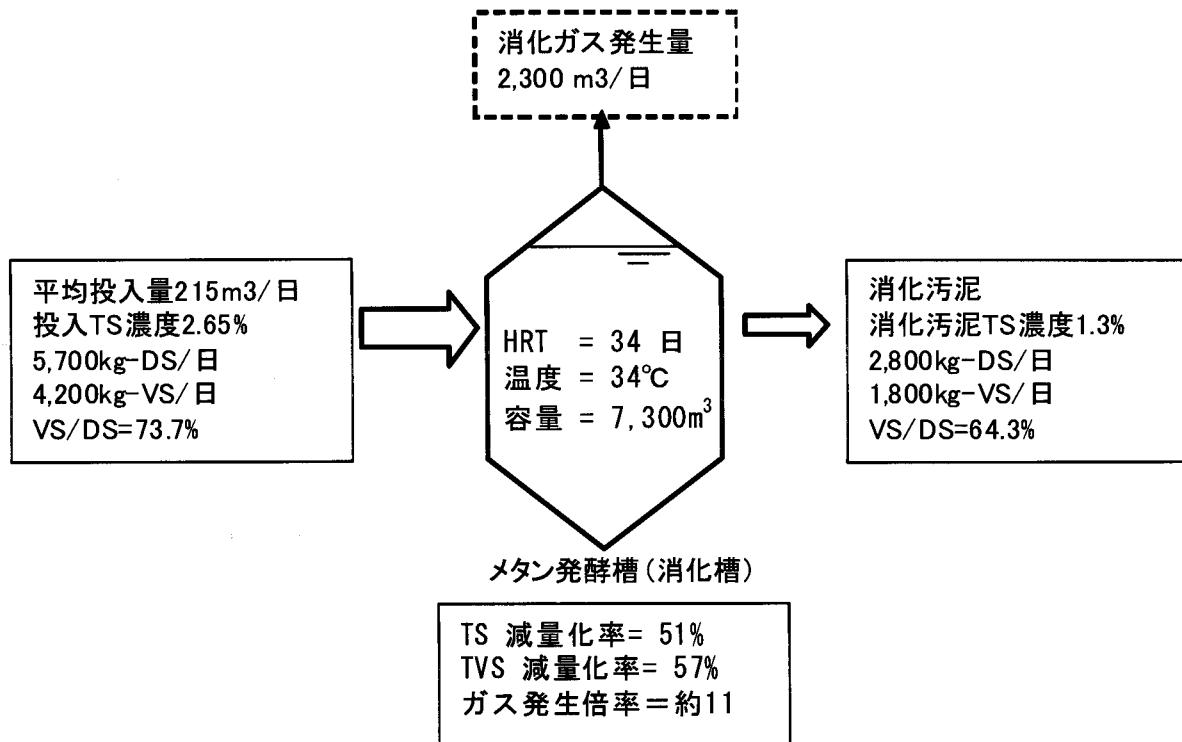


図-6 全国にある下水汚泥メタン発酵槽の平均的運転状況（平成12年度下水道統計に基づく）

ほとんど単独の汚泥処理システムを持たないため、嫌気性処理による汚泥処理量は横ばい状態が続いている。処理規模別に嫌気性処理の採用状況を検討すると、下水処理量 20,000 m³/日以下の場合、汚泥処理フローに嫌気性消化を込み入れた事例が少ない。特に下水処理量 10,000 m³/日以下になると、嫌気性消化がほとんど採用されていない。一方、メタン発酵の効率を示すガス発生倍率は年々高くなっている。これは、近年汚泥濃縮技術の進歩に伴い、嫌気性消化の前段に遠心濃縮器などの機械濃縮が採用されはじめたため、消化槽への汚泥投入濃度が高くなってきたことによる結果である。

5.1.2 下水汚泥嫌気性消化の性能調査

2001年度の下水道統計によれば、日本全国で発生した下水汚泥の約34.5% (DSベース) が嫌気性消化を組み込んだシステムによって処理され、「濃縮→嫌気性消化→脱水→コンポスト」と「濃縮→嫌気性消化→脱

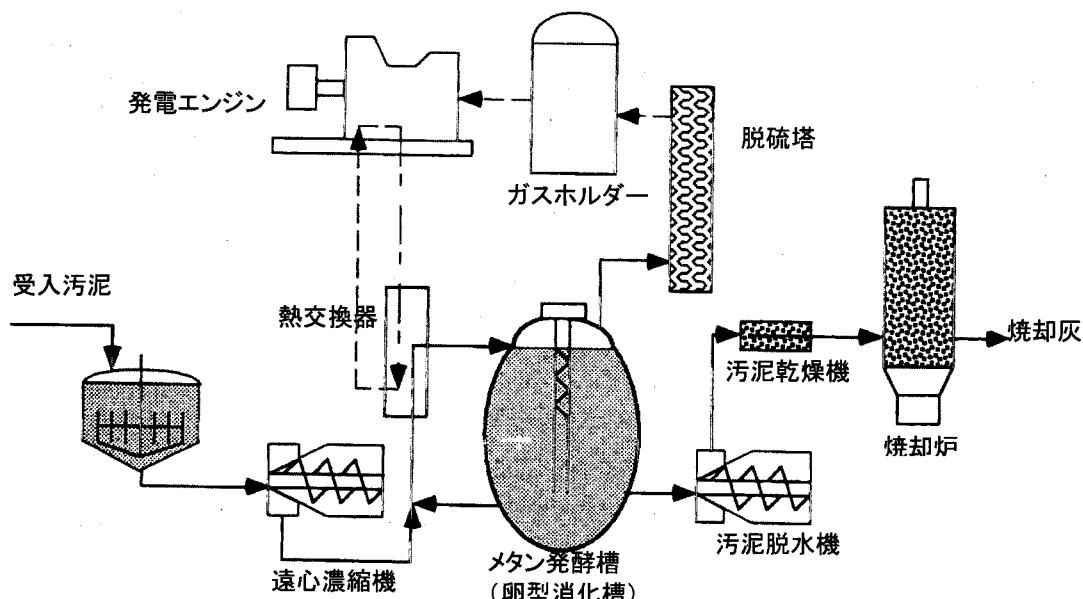
水→焼却」が代表的な処理フローとなっている。図-6に示すように、全国の305個所の処理場の平均規模としては、消化槽有効容量は7,600 m³であり、滞留時間は34日、消化温度は34°Cであった。投入汚泥のTS濃度は2.65%と比較的に低いため、消化ガス発生倍率は11倍程度に止まっている。嫌気性消化によるTS減量化率は平均51%で、VS減量化率は57%であった。消化ガスの組成としてはCH₄:60% (57-63%)、CO₂: 36% (32-40%)、H₂S:1164 ppm (696-2238 ppm)であった。

5.1.3 汚泥集約処理システムにおける高濃度消化の事例

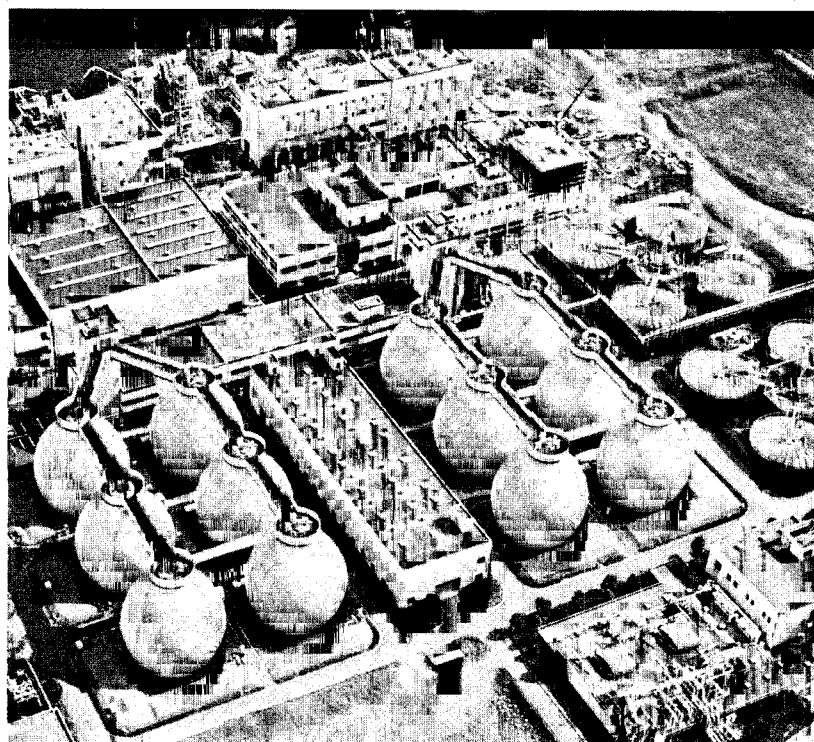
下水汚泥の効率的メタン発酵システムとして汚泥を集約処理する横浜市の事例がある。横浜市では11個の下水処理場で発生する下水汚泥を送泥管路により北部汚泥処理センターと南部汚泥処理センターに集約し、図-7のようなシステムフローで処理を行つ

ている。ここでは高濃度消化を行い、エネルギー回収を行っている。著者らが北部汚泥処理センターの運転状況について約2年間継続調査を行ったことがあるので、その概要を次の通り紹介する。

北部汚泥処理センターでは5つの下水処理場の汚泥を受け入れ、機械濃縮機でTS濃度5%程度に濃縮した後、図7(b)の写真に示した12個の卵型消化槽（容量 $6,800\text{m}^3 \times 12$ 基）で中温高濃度消化を行っている。メ



(a) 汚泥処理システムのフロー図



(b) 北部汚泥処理センターの写真（12個の卵型消化槽）

図-7 横浜市北部汚泥処理センターのシステムフローと処理場写真

表-4 生ごみ・食品廃棄物のバイオガス化施設のリストとガス利用の概要

設置場所	処理対象	規模	主なバイオガス利用方法	稼働年	備考
兵庫県明石市	ショッピングセンター内の生ごみ	1 t/d	ボイラー燃料	1997	
京都府京都市	ホテル等の事業所の生ごみ、剪定枝	3 t/d	ガス発電	1997	乾式発酵
神奈川県川崎市	ショッピングセンター内の生ごみ	1 t/d	ボイラー燃料	1997	
兵庫県神戸市	ホテル等の事業所の生ごみ	6 t/d	燃料電池	1998	
三重県津市	食品製造工場の食品廃棄物	2 t/d	ガス発電	1998	
北海道北見市	擬似生ごみ	7.5 t/d	-	1999	
神奈川県横須賀市	家庭からの生ごみ	2 t/d	自動車燃料	2002	
宮城県白石市	家庭からの生ごみ	3 t/d	ガス発電	2003	
千葉県千葉市	事業所からの食品廃棄物	30 t/d	ガス発電	2003	
富山県富山市	事業所からの食品廃棄物	24 t/d	ガス発電、売ガス	2003	
北海道滝川市	家庭・事業所からの生ごみ	55 t/d	ガス発電	2003	
北海道砂川市	家庭・事業所からの生ごみ	22 t/d	ガス発電	2003	
北海道深川市	家庭・事業所からの生ごみ	16 t/d	ガス発電	2003	
京都府園部町	食品廃棄物、生ごみ、剪定枝	50 t/d	ガス発電、自動車燃料	2004	乾式発酵
愛知県東海市	食品廃棄物（コーヒー粕、茶粕など）	19.6 t/d	ボイラー燃料、ガス発電	2004	
京都府木津町	生ごみ	1 t/d	-	2004	無希釈
東京都大田区	事業所からの生ごみ	100 t/d	ガス発電	2006	

タン発酵で生成した消化ガスを用いてコージェネレーション発電を行っていると同時に、消化ガスの一部分は汚泥焼却炉の燃料として活用している。

メタン発酵の前段に遠心濃縮を採用しているので、濃縮汚泥の濃度をよく管理でき、メタン発酵槽に投入する汚泥濃度を4.5～5.0%に制御できている。メタン発酵槽内のpHとアルカリ度がそれぞれ7.25(7.1～7.4)および4,800mg/L(4,400～5,400mg/L)となっており、年間を通して安定している。中温36°C、滞留時間30日の消化によりTS、VS、およびT-COD分解率はそれぞれ~44.2%、54.2%および60%であった。またバイオガスの生成倍率（投入汚泥1m³当たりの消化ガス生成量m³）は20～30の範囲にあり、図-6にまとめた全国平均値の約2倍以上であった。

5.2 生ごみのメタン発酵^{3,9)}

1990年代の後半から生ごみメタン発酵技術の実用化が始まった。著者の統計によれば、生ごみまたは食品廃棄物の単独メタン発酵施設の建

設状況は少なくとも計18件報告されている。これらの技術の特徴として高濃度（投入TS濃度10%以上）、高温発酵を採用している事例が多い。

一般的に生ごみの分解率は約80%（±10%は可能）で、バイオガス生成量は生ごみ1トン（湿重量）当たり100～160m³と報告されており、その減量化、エネルギー生産効果が大きい。しかし、バイオガス発生量は生ごみの含水率と有機物組成に大きく影響されるので、生ごみの性状を言及せず、生ごみ1トン（湿重量）当たりのガス生成量ばかり強調するのは妥当ではない。また、生ごみは基本的に固体廃棄物になっているので、多くの希釈水を使って処理すると、エネルギー回収効率が低下するだけでなく、排水処理の負荷も問題になる。従って、生ごみに対しては、なるべく希釈せずにメタン発酵を行うのが理想的である。こういう観点から、乾式メタン発酵は正に理想的であるが、実用的にはアンモニア阻害や機械的性能を注意深く確認する必要がある。特に生ごみの乾式高温発酵にはアンモニア阻害が制限因子となることを留意しなければならない。

筆者は生ごみに対して、希釈水を加えず、し

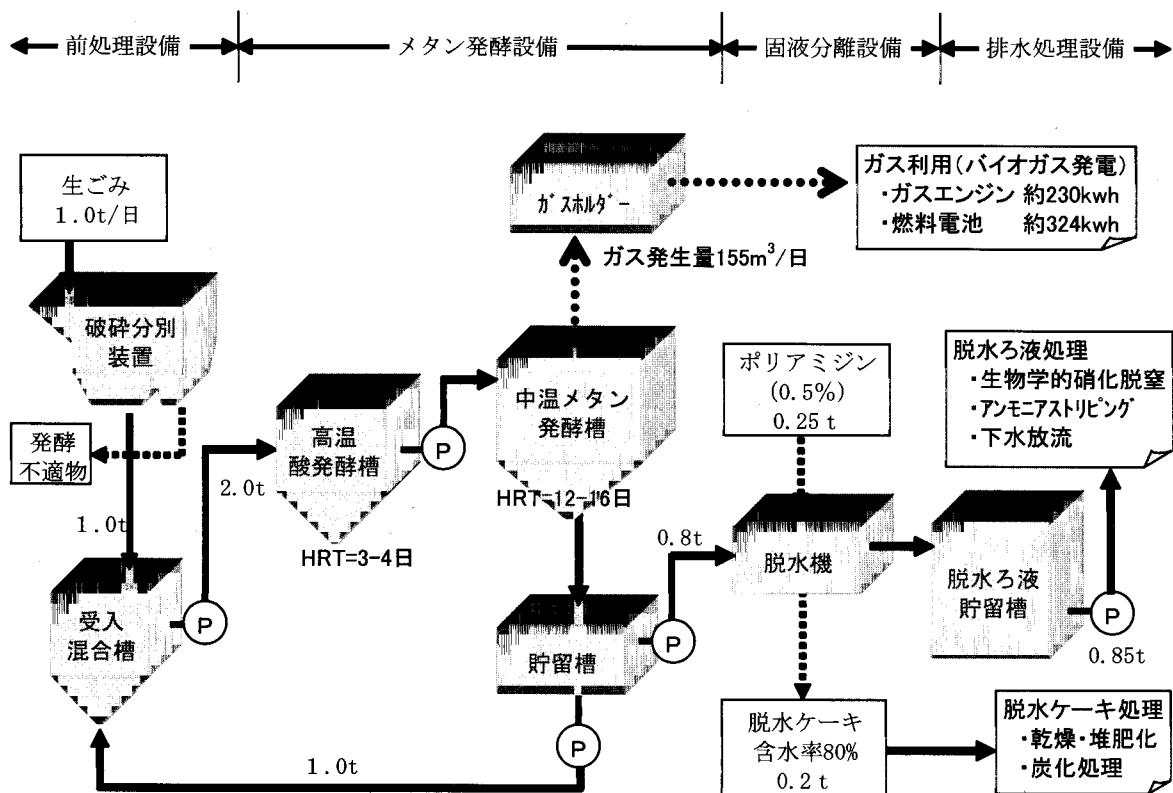


図-8 生ごみの無希釈二相循環方式高速メタン発酵プロセスのフロー及び標準的設計条件

かも反応系内は湿式発酵を採用することが最も良いと考え、生ごみの無希釈二相循環式高速メタン発酵プロセスを考案した⁹⁾。図-8に同プロセスのフローと標準設計条件を示す。本プロセスは平成16年度より京都府木津町で実証試験が行われており、これまで良好な処理結果を得ている。

生ごみのメタン発酵はコストや環境配慮の側面から評価して比較的推進しやすいと考えられる。ネックはごみ収集システムにあり、今後、ごみの収集・分別システムを含めた総合的検討が重要になる。

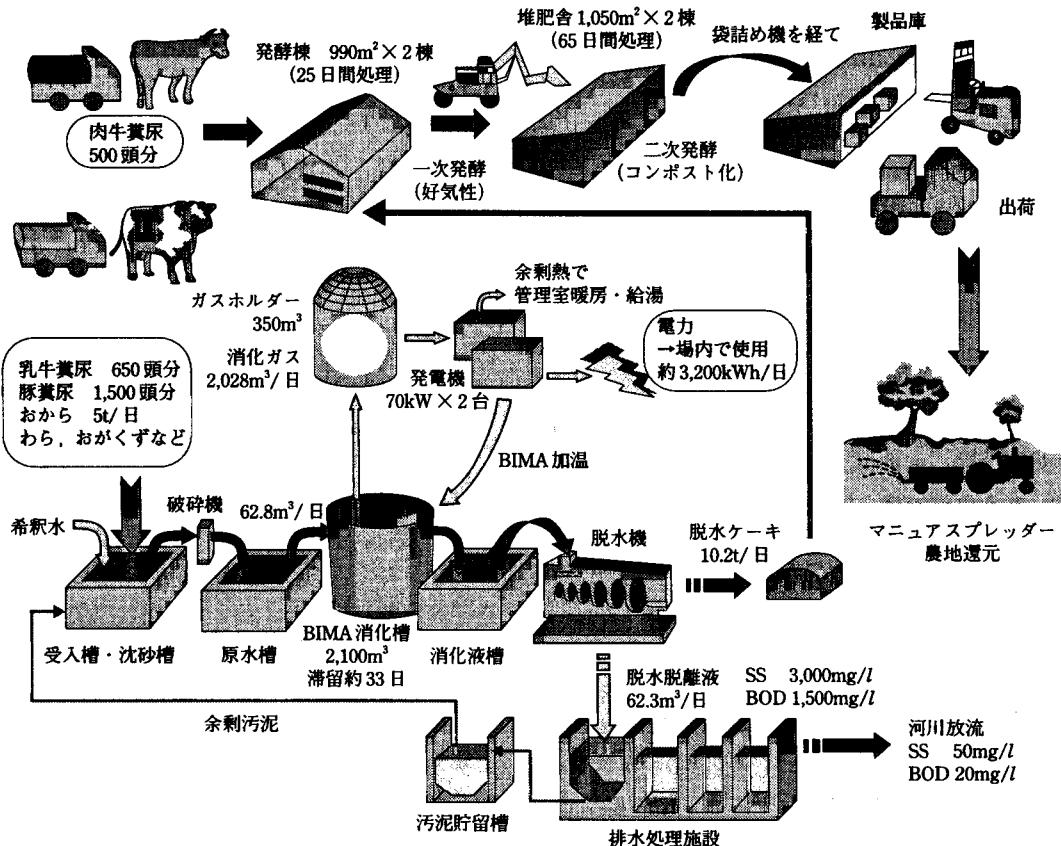
5.3 「汚泥再生処理センター」のメタン発酵技術⁹⁾

「汚泥再生処理センター」はし尿・浄化槽汚泥処理施設から発展してきた廃棄物の総合リサイクルシステムである。特徴としてし尿処理汚泥と生ごみの混合高濃度メタン発酵が採用されている。これまで建設されたメタン発酵施設は

計13件ある。採用されているメタン発酵技術の内訳はメビウスシステム10施設(高温メタン発酵)、REMシステム3施設(中温メタン発酵)となっている。メタン発酵より得られたバイオガスの利用方法は大きく熱利用と発電の二つの方々に分けられる。傾向として生ごみ量が多い(7.0t/d以上)プラントでは発電・コジェネを行っているが、生ごみが少ないケースでは、熱利用だけにとどまっている。

ここ2年間、汚泥再生処理センター事業ではメタン発酵の新規採用はほとんどない。その最大の理由は生ごみの回収は進まないことがあるのではないかと見られる。生ごみの搬入が少ない場合、エネルギーの回収効果が限定的なものになる。また、余剰汚泥や浄化槽汚泥の分解率向上は依然として技術開発の課題であると言えよう。

5.4 家畜排泄物のメタン発酵とエネルギー回収 家畜排泄物処理のためのメタン発酵施設（ま

図-9 八木バイオエコロジーセンターのシステムフロー図¹⁰⁾

たはバイオガスプラント)は1998年に京都府八木町バイオエコロジーセンターが建設された頃から急に注目を浴びるようになった。ヨーロッパのデンマーク、ドイツの先進的事例と技術も参考になり、ここ数年家畜排泄物を集約処理するセンター方式のメタン発酵施設が北海道や東北地方などで多く建設された。現在家畜廃棄物のメタン発酵処理施設は日本全国で30以上があると言われ、その多くは2000年以降稼働し始めている²⁻³⁾。

図-9に示すように、八木町バイオエコロジーセンターは受入・前処理施設、BIMA消化槽(メタン発酵槽)、スクリュープレス式脱水機、脱水ケーキ堆肥化施設、脱水脱離液処理施設からなる。当初計画では、乳牛650頭、豚1,500頭のふん尿とおから5t/dを処理することになっている。2000年と2001年の2年間の運転実績¹¹⁾によれば、1日の平均受入量は乳牛ふん尿35.9t、

豚ふん尿5.2t、おから3.3tでメタン発酵槽への投入TS濃度は6.8%であった。中温(35°C)、滞留時間33日のメタン発酵により、バイオガス生成量は投入物1m³当たり32.4m³であり、メタン含有率は52~60%であった。H₂S濃度は800~1,200ppmであった。生成したバイオガスはガスホルダーに一次貯留し、脱硫した後、ガスエンジンによる発電を行っている。また同施設の最新運転実績¹²⁾によれば、発電能力は3,913kWh/dに達し、施設内利用後の余剰電力は総発電量の7~27%を占め、また余剰熱も大量発生している。

6. バイオガスのエネルギー利用技術

様々な原料から回収したバイオガスは、基本的に以下の手段により再利用されている。

- (1) バイオガス発電：ガスエンジン発電（電気転換率約30%）が主流であるが、最近マイク

ロタービン発電（電気転換率約25%）や燃料電池発電（電気転換率30%以上）などの新しい技術も確立されている。

- (2) ボイラー燃料：バイオガスボイラーの燃料として熱効率80～85%が得られる。
- (3) 都市ガス原料化：長岡市¹³⁾のように、バイオガスを精製してH₂SとCO₂を除去して都市ガスとして利用することが可能である。
- (4) 自動車燃料：横須賀市¹⁴⁾の生ごみ実証プラントのように、バイオガスを精製して天然ガス自動車の燃料とすることができる。
- (5) バイオガスの貯蔵・改質技術：近年、バイオガスの吸着貯蔵技術¹⁵⁾や水素への改質技術が開発されつつあり、有効利用の選択肢がますます広がっている。

7. メタン発酵技術の課題

以上、メタン発酵技術の原理と応用を中心に説明したが、その正しい活用法を目指すために、技術的な弱点や課題についても最後にまとめておく。

(1) 分解率とエネルギー効率の問題

嫌気性消化による下水汚泥や家畜排泄物の減量化率は40～50%程度であり、分解率の向上によるさらなる減量化が求められている。近年、水熱処理やオゾン酸化などの分解促進技術の導入により、脱水汚泥ベースで汚

泥量を半減できる技術が開発されている。また投入TS濃度5～15%の高濃度消化を採用することにより、システム全体のエネルギー効率は大きく改善できる。

(2) 消化液処理の問題

固体廃棄物メタン発酵処理の最大の問題点は消化汚泥の処理である。特に家畜排泄物の処理ではコストの制限から複雑な汚泥処理システムを組めない。条件のあるところでは、液肥利用または乾式発酵により消化汚泥の処理工程を簡略化できるが、それ以外のケースでは、発酵残渣または消化汚泥の処理が課題となる。

(3) 反流水処理の問題

下水汚泥の嫌気性消化では脱水ろ液の返送による水処理への影響が懸念されている。特に高度処理が要求されている場合、窒素、リン、色度、難分解性CODの影響も考えなければならない。現在、効率的窒素除去、リン回収技術の開発が進められている。

(4) 消化ガス利用コストの問題

既存の汚泥消化施設においても消化ガスの有効利用を図らずただ燃やして捨てている処理施設がある。その原因是施設投資の負担があると言われている。このあたりはシステムの工夫と政策的投資の配慮も重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 益田信雄、佐野寛：メタン発酵の基礎と応用、燃料及燃焼、51(1)、pp.1-8(1984)
- 2) 羽賀清典：家畜ふん尿のメタン発酵の特徴と施設例、産業と環境、2005.1、pp.109-113 (2005)
- 3) 李玉友：メタン回収技術の応用現状と展望、水環境学会誌、27(10)、pp.622～626(2004)
- 4) 須藤隆一編著：水環境保全のための生物学、産業用水調査会、p.144 (2004)
- 5) 李玉友：汚泥・生ごみなどの有機廃棄物の高温メタン発酵、水環境学会誌、21(10)、pp.644～649(1998)
- 6) 李玉友、張岩、野池達也：メタン発酵を用いた下水汚泥の減量化・エネルギー回収システム、ECO INDUSTRY、9(9)、pp.5～19 (2004)
- 7) 櫻井国宣、李玉友、野池達也：高濃度牛ふん尿のメタン発酵特性、廃棄物学会論文誌、16(1)、pp.65～73 (2005)
- 8) Y.Y. Li, I.B. Ko, T. Noike, K. Funaishi and H. Sasaki: Comparison of ammonia inhibition between the mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of municipal solid wastes. The Proceedings of 10th World Congress on Anaerobic Digestion, Volume 1, pp.507-514 (2004)
- 9) 李玉友、水野修、船石圭介、山下耕司：生ごみの高速メタン発酵システム、ECO INDUSTRY、8(6)、pp.5～19 (2003)
- 10) 小川幸正：BIMA消化槽による複合廃棄物資源回収システム、畜産環境対策大事典第2版、p.547 (2004)
- 11) 小川幸正、藤田正憲、中川悦光：ふん尿・食品残渣のメタン発酵施設における運転データの解析、廃棄物学会論文誌、14(5)、pp.258～267 (2003)
- 12) 小川幸正：エネルギー自立型畜産・食品廃棄物処理への挑戦、環境技術、34(3)、pp.177～182 (2005)
- 13) 宇崎一将：長岡市における消化ガスの都市ガス原料化の取り組みについて、再生と利用、25(94)、pp.55～63 (2002)
- 14) 横須賀市環境部、住友重機械工業プラント・環境事業本部：生ごみのバイオガス化による自動車燃料の精製、資源環境対策、40(2)、pp.53～57 (2004)
- 15) 落修一、鈴木穣：消化ガス貯蔵施設の稼働実績調査報告書、土木研究所資料第3939号 (2004)