

畜産排泄物のメタン発酵処理特性

新鮮牛フンを用いた実験例

帆秋利洋・友沢 孝

Keywords: methane fermentation, microorganism, anaerobic digestion, manure waste, organic waste, bio-gas

メタン発酵, 微生物, 嫌気性消化, 家畜排泄物, 有機性廃棄物, バイオガス

1. はじめに

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排泄物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によって資源循環活用を図るものである。

これに伴い、北海道開発局は、「積雪寒冷地における環境・資源循環プロジェクト」の計画を発表した。本計画は、牛1,000頭と200頭規模の排泄物処理実証施設を2ヶ所に建造し、各種データを取得することで、処理システムの適合性や処理性能評価を行い、北海道仕様の畜産廃棄物のリサイクル方法について、その管理基準の確立を目指すものである。

本報では、家畜排泄物のメタン発酵に関するノウハウや施設の運転管理技術等、独自の基礎技術の取得を目的として、乳牛飼育酪農家より採取した牛ふんを用いたメタン発酵の処理特性について検討した結果の概要を報告する。また、このメタン発酵という有機性廃棄物をエネルギー資源に変換する技術を将来的に普及拡大させるための課題についても触れる。

2. 有機性廃棄物の抱える問題

2.1 循環型社会への移行に関する社会的背景

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ならびに資源の保全を考慮した万国共通の課題として認識されている。その背景として、現在、国内においては最終処分場の受入許容量に対する残余年数が逼迫している¹⁾点、ごみ焼却場から発生する地球温暖化の一要因である二酸化炭素やダイオキシンの抑制に世論の関心が集中している点、畜産廃棄物の野積み

堆積等の放置による地下水汚染が深刻化している点などが挙げられる。ちなみに、現状の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²⁾。

2.2 社会動向

これらの実態に呼応するように、平成12年5月に「循環型社会基本法」が成立し、その流れの中で「食品循環資源再利用促進法」が来年度にも制定される見通しである。畜産排泄物(家畜ふん尿)に関しては、上述のように「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。これらの社会動向で示されるように、行政サイドからの指導が強化されてきている。

2.3 循環型処分法

循環型処分法とは、従来ごみとして焼却処分に委ねてきた有機性廃棄物を物質変換することで別の用途としての利用を図る、すなわち「資源の再利用」を意味する。具体的方法としては、コンポスト化や炭化、固形燃料をはじめ、さまざまな方法が開発・実用化されている。畜産排泄物を含めた有機性廃棄物の処分に関しては、環境保全に立脚した適正なる処分を行いつつ、これらの廃棄物を有価資源という視点から見つめ直すことで新たな社会基盤を整備する姿勢が今後の日本に要求される。ここで、メタン発酵は、有機性廃棄物を微生物の働きにより、分解・減容化しつつ、最終的にメタンガスという有価エネルギーに変換する理想的な循環型処分法と云える。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、

- ①メタンガスという有価資源が回収できる
- ②嫌気性(酸素の存在しない環境)条件で反応するシステム

であるためエアレーション動力を不要とした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、

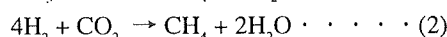
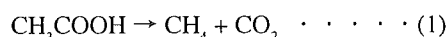
③嫌気性微生物の増殖速度が遅いため処理時間に長期間要することから処理施設が大規模になる

④施設周辺で不快臭が発生し易い

等の欠点もある。

2.4 メタン発酵の原理⁹⁾

有機物は、大別してタンパク質、脂質、および炭水化物に分類できる。これらの高分子成分は、加水分解微生物群によって構成単位のアミノ酸、グリセリンと脂肪酸、およびグルコースにまで、それぞれ低分子化される。その後、各種脂肪酸を経由して酢酸と水素まで微生物反応が進行する。そこで最終的に、酢酸は(1)式に示した反応で酢酸資化性メタン菌により、また、水素は(2)式に示した反応で水素資化性メタン菌により、それぞれメタン(CH₄)と二酸化炭素(CO₂)、および水(H₂O)へと変換される。



なお、有機物の分解によって発生したCH₄とCO₂を総称してバイオガスと称している。

2.5 自然界におけるメタンの発生起源

身近な場所としては、ドブや沼地、ならびに水田から、上記原理に基づいてCH₄が発生している。その他、地核内の油田と共にガス田が挙げられる。また、深海底のメタンハイドレートの存在や、熱水鉱床からのメタンガ

スの噴出現象が知られている。これら高温高圧環境下においてもメタン生成菌の存在が確認されている⁹⁾。すなわち、CH₄は嫌気性環境下において微生物群による一連の嫌気性反応の最終生産物である。

3. 国内における牛ふんの実態

3.1 牛ふん発生量

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⁹⁾。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%を占める。

3.2 牛ふんの組成

表-1に、北海道の4ヶ所の酪農家より入手した牛ふんの組成について分析した結果を示す。各酪農家の飼育状況によって牛ふんの性状は異なり、とくに、尿の混入状況によって含水率や粘度、全窒素濃度等が変動する。また、メタン発酵によって分解し難い敷きわら等の混入率も飼育状況によって異なるため、原料の実態調査を事前に詳細に行うことが施設設計の情報として重要である。

なお、牛ふん中には未消化飼料(コーン)や敷きわらの混入が確認された。粘性が非常に高く、臭いに関しては、アンモニア臭や硫黄系化合物臭は感じられず、稲わらが腐敗した様な臭気があった。

4. 牛ふんのメタン発酵処理特性

表-1 牛ふんの成分組成
Chemical characteristics of cow manure

項 目	方 法	酪農家A	酪農家B*	酪農家C*	酪農家D*	平均値
pH	下水試験法	7.6	5.8	6.3	6.2	6.5
含水率 (%)	下水試験法	87.3	89.6	86.8	87.5	87.8
全固形分量; TS (%)	下水試験法	12.7	10.4	13.2	12.5	12.2
有機性固形分量; VS (%)	下水試験法	10.8	9.2	11.8	10.5	10.6
ワラ混入量 (TS%)	篩い分け-重量法 (425 μm mesh)	16.1	33.3	31.4	32.1	28.2
CODcr (g-COD/g-DW)	下水試験法	1.5	2.3	1.5	1.5	1.7
BOD ₅ (g-BOD/g-DW)	下水試験法	0.7	0.6	0.2	0.4	0.5
全炭素量; TC (%)	CNコーダー法	43.6	43.8	44.4	42.7	43.6
全窒素量; TN (%)	CNコーダー法	1.9	1.5	1.5	1.8	1.7
全硫黄量; TS (mg-S/g-DW)	下水試験法	2.4	1.5	0.5	0.7	1.3
蛋白質含有量 (g-COD/g-DW)	ローリー法	0.7	0.8	0.5	0.5	0.6
炭水化物含有量 (g-COD/g-DW)	フェノール・カボ*ハイト*レート法	0.6	0.3	0.4	0.4	0.4
脂質含有量 (g-COD/g-DW)	抽出後COD分析	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.0

N.D.; 検出されず

*; 酪農家B~Dの試料は4°Cで2ヶ月間保存後に分析

4.1 メタン生成活性

N市下水処理場の嫌気性消化汚泥を種菌として、牛ふんのメタン発酵特性について125ml容のバイヤル試験により評価した。新鮮牛ふんは、北海道の酪農家より入手したものを使用した。図-1に35°Cの条件下におけるメタンの発生状況を示す。牛ふんを原料とした場合、0.05 (g-CODcr/g-VSS/day)の初期活性値が得られた。10日目付近で活性値の変曲点が見られ、二段階の発酵過程を経ていることが分かる。本傾向に関して、初期の高い勾配は有機酸等の易分解性成分の、後期の緩やかな勾配は固形分等の難分解性成分の活性を示しているものと推察する。なお、消化汚泥のみの場合でも自己消化により若干のメタン発生が確認された。

H₂/CO₂、酢酸、グルコース、および牛ふんを原料(基質)とした際のメタン生成活性の比較を図-2に示す。本活性値は、図-1の初期勾配より自己消化分を差し引いた数値で評価した。なお、本実験では、比較基質を用いることから、通常メタン菌の培養に使用する微量栄養素⁶⁾を添加している点が図-1の実験とは異なっている。牛ふんのメタン生成活性値は、酢酸単一基質と同等の0.1 (g-CODcr/g-VSS/day)であった。一方、グルコース基質と比較すると牛ふんは低い活性値を示した。この理由として、牛ふんには固形性の高分子有機物の含有量が高いことに併せて、敷きわら等の難分解性の物質が含まれており、それらの分解が律速になっているためと考えられる。ちなみに、メタンのCOD当量は、2.857 (g-CODcr/l-CH₄)であるから、本実験での牛ふん原料のメタン生成活性値は、0.035(l-CH₄/g-VSS/day)に相当する。なお、本実験で得られたメタン生成活性値について、他の有機性固形原料を用いて得られた結果との比較を表-2に示す。中温メタン発酵法で、焼酎廃液に含まれる残渣を原料とした場合と比較しても同等以上の活性値を示していることが分かる。このことから、今回得られた活性値は妥当であると判断できる。

4.2 生分解特性

牛ふんの生分解率について、メタン転換率として物質収支を求めた結果を図-3に示す。35°Cと55°Cそれぞれの

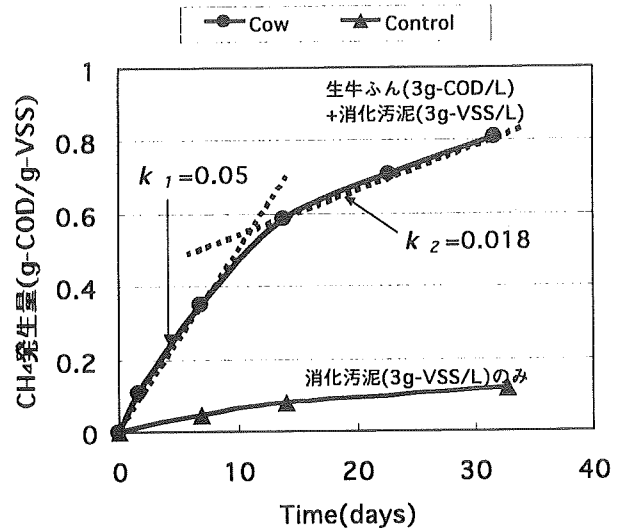


図-1 牛ふんを原料とした際のメタン発酵特性
Methane production rate of cow manure as a feed substrate

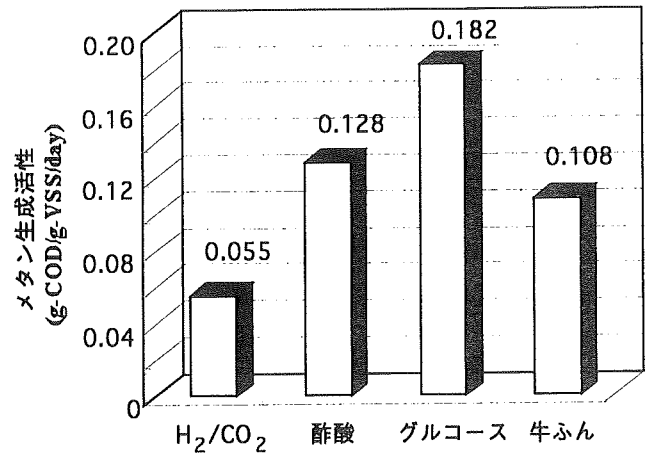


図-2 嫌気性消化汚泥を種菌とした際の基質別メタン生成活性
Methane production activities using anaerobic digestion sludge as a seed microorganisms

温度下で馴養した種菌を用いたが、いずれも32日間における生分解率(メタン転換率)は約60%であった。なお、牛ふんの未消化分40%のうち、約10%は溶解性成分であった。本結果より、供試種菌の構成菌相は牛ふんに対して高い適合性を示したものと推察する。これは、牛ふんの主成分が、嫌気性消化槽の原料である余剰汚泥の主成分と類似していることを示唆している。すなわち、牛ふん

表-2 原料によるメタン生成活性の比較
Comparison of methane production activity in the various orsubstrates organic wastes

単位	原料	高温 (55°C)		中温 (35°C)	
		牛糞	牛糞	薩摩芋焼酎残渣	大麦焼酎残渣
メタン生成活性 (kg-CODcr/kg-VSS/day)		0.332	0.108	0.076	0.063
メタン生成活性 (m ³ -CH ₄ /kg-VSS/day)		0.116	0.038	0.027	0.022

表-3 実験前後における低級脂肪酸の分析結果
Changing of volatile fatty acids concentration before and after the fermentation

供試種菌	実験条件 (mg/L)	初期CODcr*	残留CODcr*	全VFA (mgCOD/L)		酢酸		プロピオン酸		i-酪酸		n-酪酸		i-吉草酸		n-吉草酸	
		(mgCOD/L)	(mgCOD/L)	0日	32日	0日	32日	0日	32日	0日	32日	0日	32日	0日	32日	0日	32日
下水消化汚泥 35°C	牛ふん3000、種菌3000	2264	488	243.6	36.9	155.3	36.9	51.1	N.D.	6.1	N.D.	17.6	N.D.	13.5	N.D.	N.D.	N.D.
	牛ふん3000、種菌6000	2264	745	231.5	4.6	81.0	3.2	75.9	1.4	16.8	N.D.	17.1	N.D.	40.7	N.D.	N.D.	N.D.
	牛ふん無、種菌3000	490	280	69.7	2.1	26.6	2.1	18	N.D.	6.3	N.D.	1.5	N.D.	17.3	N.D.	N.D.	N.D.
	牛ふん無、種菌6000	828	384	89.5	4.3	6.2	4.3	34	N.D.	13.2	N.D.	2.6	N.D.	33.5	N.D.	N.D.	N.D.

*溶解性CODcr値
N.D.; 検出されず

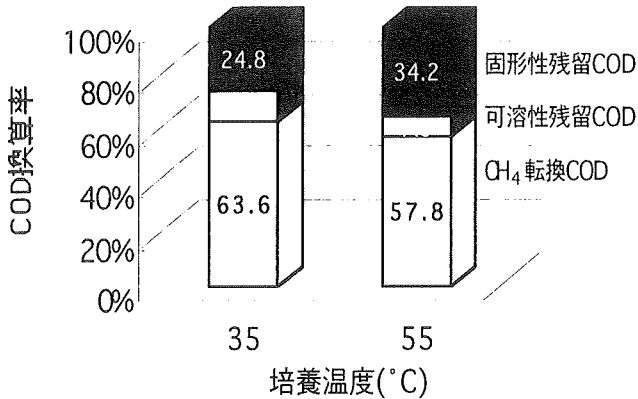
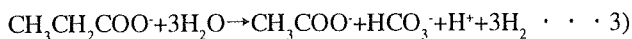


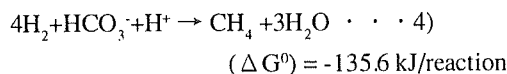
図-3 メタン発酵の物質収支(CODバランス)
CODcr balance of methane fermentation

原料で実際にシステムの運転を開始する際、種菌として下水消化汚泥を使用することで、スタートアップが容易になるものと推察する。

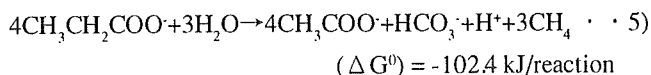
表-3に実験前後における残留低級脂肪酸の分析値を示す。原料中には、プロピオン酸(C3)、酪酸(C4)、吉草酸(C5)が検出されており、若干の酸発酵が進行していることが分かる。これに対して、32日後の発酵液中にはこれらの低級脂肪酸が検出されていない。このことは、メタン発酵が良好に進行したことを表している。低級脂肪酸の代謝に関しては、次式の反応が解明されている⁷⁾。プロピオン酸の代謝を例にとると、



標準自由エネルギー変化(ΔG^0) = +76.1 kJ/reaction
で表せる。3)式の反応における標準自由エネルギー変化は正であるため、外部からエネルギーを供給しない限り反応は進まない。しかし、これに右項の生成物である水素(H_2)を消費する反応4)式



が共役すると、トータルとして5)式となり、反応全体の標準自由エネルギー変化が負となるため、自然状態で反応が促進されることになる。



すなわち、メタン発酵においては、4)式を司る水素資化性メタン菌の役割が大きく影響を及ぼす。換言すれば、メタン発酵を良好に進行するためには、水素分圧を低く維持することが重要であり、プロセス管理においても、発酵槽内の水素分圧や低級脂肪酸の蓄積状況のモニタリングが重要と考えられる。

4.3 アンモニア濃度阻害

遊離アンモニア(NH_3)は、酢酸資化性メタン菌を失活させるため、3,000ppm以上では困難であるという報告がある⁸⁾。ただし、pH7.5以下では遊離アンモニアではなく、アンモニウムイオン(NH_4^+)として存在するため、とくに影響を受けないという報告もある⁹⁾。図-4に、pH7.0, 7.5, 8.0におけるアンモニア濃度のメタン生成に対する影響について調べた結果を示す。実験は、アンモニア濃度0mg/l, 500mg/l, 1000mg/l, 2000mg/l, 4000mg/lの5条件下でメタン生成活性を測定することにより、アンモニア濃度阻害の状況を把握した。その結果、アンモニア濃度が2000mg/l以上では著しくメタン生成活性が阻害された。また、pH8.0では、アンモニア濃度500mg/l以上においてメタン生成活性が抑制される事が明らかとなった。従って、プラント稼動時には、原料中のアンモニア濃度の監視を行

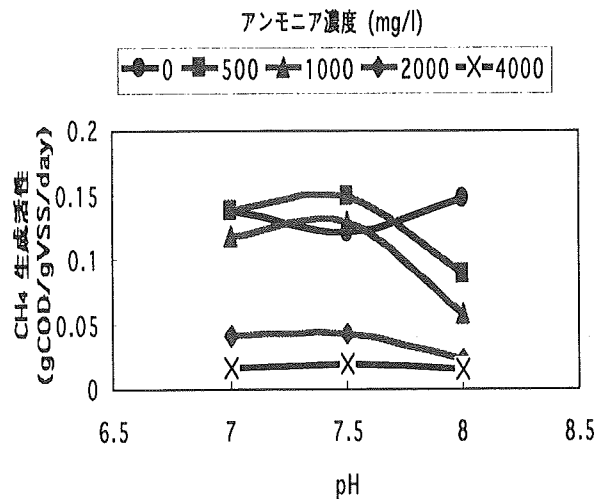


図-4 アンモニア濃度のメタン生成に対する影響
Effect of ammonium concentration on methane production activity

い、アンモニア濃度を低く保つことが必要である。

4.4 実プラントでのメタン発生量の予測

以上の結果より、牛フンを原料とした場合のメタン発酵は、適正負荷のもとで適切な運転管理を施せば良好に進行することが示唆された。そこで、北海道開発局が計画している1,000頭の牛フンを対象とした場合のメタン発生量を予測すると、表-1の実測値より原料の性状は、

$$0.127(\text{g-乾重/g-湿重}) \times 1.6(\text{g-CODcr/g-乾重}) \\ = 0.203(\text{g-CODcr/g-湿重})$$

と見積もれる。

メタン発酵(滞留時間30日)による原料の分解率を図-3の結果より60%とすると、

$$0.203(\text{g-CODcr/g-湿重}) \times 0.6 = 0.1218(\text{g-CODcr/g-湿重})$$

であり、1日の処理量が45.4 (ton-湿重/日)として、

$$121.8(\text{g-CODcr/kg-湿重}) \times 45,400(\text{kg-湿重/日}) \\ = 5,529,720(\text{g-CODcr/日})$$

がガス化されることとなる。

図-3の結果よりガス中のメタン含有量は68%、メタンのCOD当量は2.857 (kg-CODcr/m³-CH₄)であるから、メタンガス発生量は、

$$5,529.72(\text{kg-CODcr/日}) \times 0.68 \div 2.857(\text{kg-CODcr/m}^3\text{-CH}_4) \\ = 1,316(\text{m}^3\text{-CH}_4/\text{日})$$

すなわち、牛フンの6割が分解された場合、1日当たり1,316m³のメタンガスが回収できることになる。

回収されたメタンについてエネルギー試算すると、20°Cでのメタン1モルの容積は、 $(p_1 \cdot v_1)/T_1 = (p_2 \cdot v_2)/T_2$ (ボイルシャルルの法則)より、

$$(273+20) \times 22.4(\text{L}) \div 273 = 24.04(\text{L-CH}_4/\text{mol-CH}_4)$$

メタンの定圧燃焼熱が212.798 kcal/mol-CH₄であるので、発生熱量は、

$$212.798(\text{kcal/mol-CH}_4) \div 24.04 \times 10^3(\text{m}^3\text{-CH}_4/\text{mol-CH}_4) \\ = 8,851.8(\text{kcal/m}^3\text{-CH}_4)$$

なお、メタンガス発生量から1日に生産されるエネルギー量を推定すると、

$$1,316(\text{m}^3/\text{日}) \times 8,852(\text{kcal/m}^3\text{-CH}_4) = 11,649,232(\text{kcal/日})$$

であり、1日当たり約12G kcalと推定される。

5. メタン発酵システムの普及化の課題

5.1 システム設計上の留意点

メタン発酵システムは、建造コストが高価になり易いため、個別対応での導入は難しい。そのため、諸外国においても集合処理システムとしての普及が一般的である¹⁰⁾。ここで、本技術の普及を図るためには、適用対象と用途に

応じて、システム自体のシンプル化による建造コストの低減を図る工夫が要求される。処理能力の安定を原則として、必要最小限の設備で最大限の処理能力を発揮するための施設設計が必要である。欧州では、非常にシンプルなシステムで安定した処理性能を維持している実機が数多く稼働している¹⁰⁾。メタン発酵のメカニズムを理解し、適正負荷の下で何を制御する必要があるのか、その詳細について再認識することで、日本に適した設計指針が具体化してくるものと思われる。

5.2 高速処理技術の開発

メタン発酵槽は、大規模になりがちである。その理由として、①メタン生成菌をはじめとした微生物の増殖速度が遅いこと、②複雑な原料を安定処理するための緩衝能力を付与する必要があること、が挙げられる。従来より発酵槽のコンパクト化を目指して、高密度の微生物を保持する様々なバイオリアクターが考案されてきた¹¹⁾が、固形性の有機性廃棄物に適した発酵槽は実用化に至っていない。将来的には、施設のコンパクト化と建造コストの低減化は避けて通れない課題であり、固形性の有機性廃棄物を対象とした高速メタン発酵槽の開発が要求される。その際、固形分の可溶化(加水分解過程)がキーテクノロジーとなる。

5.3 システム制御のための微生物DNA診断

メタン発酵では、未消化の固形分が発酵槽内で徐々に蓄積して、突然にシステムが機能しなくなる可能性がある。そこで、少なくとも長期間に亘ってシステムの安定性を観測する必要がある。その際、システムの適正負荷を見いだすと共に、必要に応じて滞留時間や原料希釈の操作による有機物負荷の低減運転が要求される。一方、固形分の蓄積状況を判断する上では、分解菌と原料固形分との区別を行うための分析・解析技術(例えばDNA診断など)の開発が要求される。さらに、メタン発酵の進行状況の診断を行うには、メタン発酵に関与する様々な微生物コンソーシアの解析技術が有効となる。すなわち、メタン発酵は種々雑多な微生物が連携し合って一連の複雑な反応が進行するが、原料組成の変動や負荷変動に伴って、どの段階でどのような微生物が影響を受けているか等の診断をDNA解析技術によって解明し、その対策手法を見いだすことが必要である。これは、将来的にシステム制御としても応用可能な技術となり得る。

5.4 副産物の適正利用

現状では、生産されたCH₄の約30%が施設の加温及び運転エネルギーとして利用されている¹²⁾。とくに、日本では欧州のように売電流通システムが普及していない為、余

剰エネルギーは利用されていない。一方、メタン発酵処理したものを液肥やコンポスト後に堆肥利用する際も、それらの流通システムに支障をきたすケースが多い。メタン発酵処理液には、高濃度の窒素やリン酸を含有しているため、用途に応じて何等かの後処理を施す必要もある。地域特性を考慮して、畑への液肥の輸送や融雪システムなど、資源循環利用を推進するには、得られた有価副産物を廃棄物とすることなく、適正に利活用するための運営方法まで含めた総合的な計画が必要である。

5.5 メタン発酵システムの普及の課題

メタンガスは、天然ガスを代表する炭化水素ガスであり、都市ガス(LNG)の成分でもある。これらの新しい用途として燃焼としてではなく、電気化学反応でエネルギーをつくり出す燃料電池が注目されており、そのシステム検証が望まれている。

石油をはじめとした天然炭化水素資源の枯渇が懸念されて久しいが、これらの天然地下資源への依存度は将来的に減少していくものと予想される。そこで、その減少分を有機性廃棄物のメタン発酵で生産されたメタンガスで代替利用する為の社会基盤づくりが要求される。現状では、一施設内で処分とエネルギー利用が完結する計画である。しかしながら、将来的には、都市部では生ゴミや下水汚泥を、農村部では酪農排泄物や農産廃棄物、海産廃棄物等を対象として、さまざまな場所にメタン発酵施設を建造することも考えられる。その際、現有の下水道を参考とした有機性廃棄物の施設までの収集システムの整備が必要であろう。また、そこから発生する余剰メタンガスを都市ガスのパイプラインと共有化し、地下でネットワーク状に配備させる等の広域施策が要求される。

6. まとめ

有機性廃棄物を従来の浄化や処分といった一元的概念から脱却して、エネルギー等の生産原料という新たな資源として見つめ直し、環境保全とエネルギー確保の双方に優位となる社会体系(循環型社会)の構築が21世紀に要求されている。そのためには、各要素技術のさらなる研究開発もさることながら、有機性廃棄物の収集システムや生産エネルギーの公共利活用システムをはじめとしたインフラ整備が必要であろう。さらに、酪農家の負担を極力少なくするための新しい補助金制度や売電制度をはじめとした法的整備の改善、といった社会的課題も残されている。21世紀はまさに、官民学が一体となって今後の国内における環境整備の在り方について見直す時代と言えよう。

参考文献

- 1) 永井達夫, 横田正和, 大谷孝: 事業系生ごみのコンポスト化・減容化, 空気調和・衛生工学, 第71巻第1号, pp.35-42, 1997.
- 2) 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.
- 3) Mosey, F.E.: Mathematical modelling of the anaerobic digestion process; regulatory mechanisms for the formation of short-chain volatile acids from glucose, Water Science Technology, Vol.15, pp.209-232, 1983.
- 4) Jones, W.J., Leigh, J.A., Mayer, F., Woese, C.R. and R.S. Wolfe: *Methanococcus jannaschii* sp. nov. An extremely thermophilic methanogen from a submarine hydrothermal vent, Archives Microbiology, Vol.136, pp.254-261, 1983.
- 5) 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
- 6) Balch, W.E., Fox, G.E., Magrum, L.J., Woese, C.R., and Wolfe, R.S.: Methanogens; Reevaluation of a unique biological group, Microbiological Review, Vol.43, pp.260-296, 1979.
- 7) Jurgen, H.T., Chartrain, M. and Zeikus, J.G.: Control of interspecies electron flow during anaerobic digestion; Role of floc formation in syntrophic methanogenesis, Applied and Environmental Microbiology, Vol.54, pp.10-19, 1988.
- 8) Zeeman, G., Wiegant, W.M., Koster-Treffers, M.E. and Lettinga, G.: The influence of the total ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure, Agricultural Wastes, Vol.14, pp.19-35, 1985.
- 9) McCarty, P.L.: Anaerobic waste treatment fundamentals III, Public Works Vol.95, pp.91-94, 1964.
- 10) 四蔵茂雄, 原田秀樹: 都市廃棄物の嫌気性消化, 廃棄物学会誌, Vol.10, pp.241-250, 1999.
- 11) van den Berg, L. and Kennedy, K.J.: Comparison of advanced anaerobic reactors, Third International Symposium on Anaerobic Digestion, pp.71-89, 1983.
- 12) 生物系廃棄物資源化・リサイクル技術, エヌ・ティー・エス発行, 2000.