

北海道草地研究会シンポジウム

「家畜糞尿利用の新しい技術と今後の方向性」

バイオガスプラントによる家畜糞尿の有効利用

梅 津 一 孝

The effective utilization of animal manure from biogas plants

Kazutaka UMETSU

1. はじめに

家畜糞尿は、かつては貴重な有機物肥料として農耕地で用いられてきたが、近年、多頭飼養に伴い農耕地との結び付きが薄れ、農業と環境の間に矛盾が生じるようになってきた。この理由として、家畜糞尿の取扱の困難さから利用というより、むしろ処理処分という扱いに変わってきたこと、多頭飼養化と購入飼料の増加に伴い農地が受け入れられる以上の糞尿が排出されるようになったためと考えられる。さらに糞尿処理・管理は直接には利益を生み出さないため、絶対に不可欠であるにもかかわらず合理化ならびに施設の整備が最も遅れてしまった部門であると言える。

最近では家畜糞尿由来と言われる下痢や腹痛を引き起こす原虫クリプトスポリジウムが話題となり、糞尿が水道水源の河川に流れ込み、原虫が含まれる水道水が家庭に配水される危険性が指摘されている。この他にも家畜糞尿に由来する病原性微生物による疾病発生の可能性がおおいにあることと考えられ、これらの対策が急がれている¹⁾。

このような状況のなかで環境汚染防止に向けた堆肥盤・尿溜の整備が急務であることは明らかであり、さらに状況に応じて様々な糞尿処理・管理の方策が必要になると考えられる。ここで紹介するバイオガスプラントによるメタン発酵処理もそのひとつである。メタン発酵処理システムはデンマーク、ドイツ、スウェーデンなどヨーロッパ諸国では一般的な処理技術となっているが、我が国では畜産部門への普及は非常に少ない。しかし今後、糞尿処理とエネルギー取得の両方が可能なこの方法が選択肢のひとつとして確立される可能性は極めて大きいと考えられる。

2. 諸外国における家畜糞尿対策

世界の先進農業国では、これまでの生産性追求のみの農業から、生態系に合った環境保全型の農業への方向転換が始まっている。なかでも、農地への窒素負荷量の多いヨーロッパ諸国は、一般に水道源を地下水に依存する割合が多く、耕地率がわが国の2倍にも達し、地下水汚染源として農地の比重は高い。また、降水量が少なく、平坦な地形のため、家畜糞尿や化学肥料の散布は地下水の硝酸塩濃度に大きく影響する。ヨーロッパの飲料水基準では硝酸塩濃度は50mg/lが上限であるが、イギリス、フランス、ドイツでは、すでにこれを超えている地域が相当数確認されている。

ヨーロッパ諸国の糞尿対策は各国とも糞尿貯蔵施設の設置義務と糞尿散布量と散布時期の制限が基本となっており、オランダでは、農家の過剰糞尿（リン酸量が125kg/ha/年以上のもの）に対して課徴金を徴収する。糞尿生産量がリン酸換算で125kg/ha年以上の農場の新設や拡大を禁止する。など、ヨーロッパ諸国の環境保全型農業への取り組みは、環境の保全とともに、農産物の生産過剰を抑えようという政策も同時に働いている。

このようにヨーロッパ諸国では各種の施策が実行、あるいは実行予定である。なかでもオランダではきびしい施策を立案している。家畜糞尿対策は施用基準量の他に、排泄量削減（飼料の改善）、草食家畜の飼料密度制限、アンモニア低揮散型の土壤還元、密閉型糞尿貯溜槽を備えた畜舎への切り替えなどの施策である。また、これらに加え、基準にあった土壤還元ができない糞尿はコンポストに加工して輸出し、国土の富栄養化を軽減することすら打ち出している。そのために必要な補助金は支出するが、環境対策強化のために農業が行えなくなった農業者には、むしろ離農を奨励しそのための保証金も設けて

いる²⁾。

一方アメリカでは1988年から低投入持続型農業 (LISA) を開始している³⁾。これは農地の砂漠化を防止する目的で、1. 輪作の積極的導入 2. 生物的防除の積極的導入 3. 家畜糞尿と緑肥の積極的導入 4. 適切な機械耕運の実践が柱となっている。糞尿問題は日本に比べはるかに小さく、全家畜糞尿窒素の全農地還元負荷は、19kgN/ha、草食家畜糞尿窒素の永年草地への還元負荷量も29kgN/haに過ぎない。しかし、東部や五大湖付近では河川や湖の水質汚濁が問題化し、いくつかの州では長期貯蔵施設設置の義務化の条例が可決されている⁴⁾。

3. 北海道における家畜糞尿処理管理の現状と問題点

家畜糞尿は人間のし尿に比べBOD (生物学的酸素要求量) やSS (浮遊物質) の濃度が高く、乳牛一頭でBODが人間の47人分、SSで125人分にも相当する。すなわち、浄化処理をして河川に放流出来るようにするにはきわめてコストがかかる。適切な処理を行って圃場に散布する方法が合理的であり、化学肥料との代替価値も大きく、地力保全には欠くことができない。

北海道における乳牛の飼養形態は、ここ数年、1戸当たりの飼養頭数の増加に伴い、つなぎ方式からフリーストール方式へ移行する農家が急増している。糞尿処理の形態は敷料の種類、量によって堆肥処理の場合、尿は尿溜に牛舎から排出された糞尿は堆肥盤に堆積され、堆肥化された後に圃場に散布される。スラリー処理の場合はスラリーストア、ラグーンなどに貯留される。しかし飼養頭数が増加してもこれらの施設規模はそのままである場合が多く、さらに、飼料給与の変化に伴う糞の軟化、敷料量の減少によって堆肥が流動化し積み上げが困難になったり、降雨の流入によって貯留量が減少している。そのため、あふれた未熟堆肥を畑脇に堆積したり、堆肥盤からあふれた糞尿が降雨時に流出するなどの問題が表面化している。また、堆肥舎や屋根掛け堆肥盤が少ないため、降雨の混入による流亡、水分上昇、発酵不良などの問題がある。つなぎ飼いで敷料を容易に多量に入手できるならば、堆肥化処理を図るのがもっとも経済的であると考えられる。しかし、多くの場合敷料の不足により、バーククリーナから排出された糞尿は水分過多であり、空疎率が低い古紙の敷料としての利用が考えられている。また、固液分離機による搾汁が行われているが、敷料の混入量、性状、分離液の貯留、処理方法、寒地での利用条件など検討すべき課題は多い⁵⁾。また、固形堆肥化の他にスラリーあるいは固液分離液の曝気によ

る液状堆肥化が行われているが好気発酵を促進させるためには強度の曝気を連続的に行う必要があり、膨大なエネルギーを必要とする。近年ヨーロッパでは、アンモニア揮散を防止するために曝気を禁止している国もある。

このように、現場における糞尿処理・管理は飼養頭数の増加に伴う貯留容量不足、敷量、使用量の減少と糞尿の流動化、降雨の混入による水分上昇、貯留量の減少、処理エネルギーの増大、アンモニア揮散など多くの問題がある。

4. バイオガスプラントによる家畜糞尿処理

有機性の廃棄物をメタン発酵させ排水を浄化する技術は、下水処理をはじめ多くの産業排水に応用され、水処理技術として広く用いられている。また、家畜糞尿をメタン発酵させバイオガスを回収する方法は中国やインドで古くから行われている技術であり、わが国においても戦後、生活改善事業として導入を試みた時期がある。しかし、プロパンガスなどの普及により姿を消した経緯がある。1970年代、中東戦争による原油価格の高騰により、自然エネルギーへの関心が高まり、大学や試験研究機関で様々な研究が行われ、バイオガス利用についても多くの研究の蓄積がある。また、近年は、環境保全の立場から、関心が高まり諸外国では家畜糞尿処理の主要な方法として位置づけられている。このような今日、バイオガスは古くて新しいバイオテクノロジーとして脚光を浴びており、家畜糞尿をメタン発酵させ液状堆肥化とバイオガス回収を行う方法は北ヨーロッパを中心に、主にデンマークでは共同利用型の施設として、ドイツでは戸別型の施設として普及している。

メタン発酵は、嫌気発酵とも呼ばれ空気の入らない密閉された発酵槽で進行する有機物の分解反応であり、メタン菌群に属する微生物に有機物が分解されメタンガスを生成する反応と、水素と炭酸ガスからメタンガスを生成するふたつの反応の総称である。後者は無機物よりメタンガスを生成する反応で、前者のメタン菌群がメタン発酵の主役をなしている。家畜糞尿のような複雑な有機物 (脂肪類、炭水化物、タンパク質など) から構造が単純な有機物 (高級脂肪酸、アミノ酸、糖類など) への分解は、加水分解過程と呼ばれ、さらにこれらが、酢酸、プロピオン酸、アルコール、水素などに分解される過程を酸発酵過程と呼び通性嫌気性菌が関与している。これらの生成物、主に酢酸などの低級脂肪酸がメタン菌群により、メタンガス、炭酸ガスおよびアンモニアに分解される過程をメタン発酵と呼ぶ。メタン菌は絶対嫌気性菌群に属し、酸化還元電位で $-150\sim-140\text{mV}$ の嫌氣的な環

境でのみ活動が可能である⁶⁾。

発生するガスはバイオガスと呼ばれ、メタンが約60%、二酸化炭素が約40%、その他、微量の硫化水素、窒素の混合気体である。メタン発酵によるメタン発酵菌からの発熱はごく僅かであるため、発生したメタンガスなどにより、発酵槽内を最適温度に加熱する必要がある。メタン発酵は一般に中温発酵と高温発酵とに適温が分かれ、その最適温度は範囲は、それぞれ30~50℃、50~60℃の範囲にある。また、中温と高温の有機物処理能力は、1:2.5の比率で、高温の方が中温の2倍以上の有機物処理能力を有する。現行のメタン発酵槽は下水やし尿処理も含めると95%以上が中温発酵法を採用しており信頼性は極めて高い。その理由として加熱熱量と発酵槽からの熱放射が高温に比べ少なく済むこと、また温度の変動に対する緩衝性が高いことなどがあげられる。さらに毒物や阻害物質に対する耐性も強いことが知られている⁷⁾。しかし、近年、欧州で普及している家畜糞尿を対象としたメタン発酵槽は55℃を中心とした高温域で運転されているものが多い。その背景には、断熱技術、熱交換技術の進歩、さらに発酵槽の温度制御技術の飛躍的進歩などがあげられる。また、消化液の有機物肥料としての圃場還元の際に衛生面の配慮から、殺菌効果の高い高温域での処理に対する評価が高まっている。家畜糞尿を対象としたメタン発酵処理施設の場合、戸別型では中温、大型共同施設では高温による運転が一般的になっている。

メタン発酵を阻害する要因として、発酵温度の激変、許容範囲を超える高負荷投入、さらにこれによる滞留日数の不足、pH異常などがあげられる。また、発酵阻害を引き起こす阻害物質には、ナトリウム、アンモニウム、カリウムなどの塩類、陰イオン物質、銅、クロム、ニッケル、水銀などの重金属、フェノール、トルエンなどの芳香族化合物、洗剤、抗生物質などがある。家畜糞尿のメタン発酵では、アンモニウムイオンの阻害が問題となり、一般に3000ppmを超えると阻害が生じると言われている。また、高濃度の消毒剤や搾乳機械の洗剤、さらに、抗生物質の大量の混入などにも注意を要する⁸⁾。

メタン1 m³当たりの低位熱量は約8500kcalであるのでメタン濃度が60%であれば、バイオガス1 m³当たりの熱量は約5100kcalとなり、発酵によって得られるバイオガスは都市ガス以上の熱量であることが分かる。一般に、バイオガスプラントでは年平均で1日乳牛1頭当たり正味1 m³以上のバイオガスを生産することが可能である⁹⁾。ヨーロッパのバイオガスプラントでは、ガスを直接販売したりバイオガスによる発電を行い売電による農

家収入がある。このようにメタン発酵は高カロリーの可燃ガスが得られるばかりでなく、発酵後の液の肥料価値の向上、すなわち、糞尿中の雑草種子¹⁰⁾、有害細菌が死滅した悪臭の少ない肥効の高い液肥に変換することが可能であり¹¹⁾、さらに好気発酵のようにアンモニア、二酸化炭素などのガス揮散がないという利点がある。

5. デンマークにおける共同バイオガスプラントの取り組み

デンマークでは1980年代前半に窒素、リン酸、有機物など農畜産業に起因する環境汚染が大きな問題として取り上げられ、デンマーク政府はNPO(窒素、リン酸、有機物)計画(1985年)、水環境計画(1987年)、農業の持続的発展のための行動計画(1991年)を策定した。これらのうち畜産に関する計画の主要方針は次の通りである。1. 農地に見合う家畜頭数の上限設定(1haあたり乳牛2.3頭) 2. 糞尿の窒素利用最低基準の設定 3. 作物輪作、施肥計画書の作成義務 4. 糞尿を最低6ヶ月貯留できる施設の設置

その結果、施肥技術の改善、輪作、作付け面積の調整などにより糞尿中の窒素利用高率は、1993/94実績で40%にまで向上している。また、畜産農家の90%は最低6ヶ月分、60%は最低9ヶ月分の糞尿貯蔵能力を持つに至り、これがバイオプラント建設の重要な動機づけとなった。現在、デンマークでは、20基の共同バイオガスプラントが稼働しており、生産されたガスはすべて発電と地域暖房に使われている。写真1にデンマークの比較的新しい共同バイオガスプラントであるBlaabjergバイオガスプラントの外観を写真2に発電施設を示す。デンマークでは発電はほぼ100%が火力発電であり、北海から出る天然ガスを燃料とする施設が多い。また、地域暖房が発達しており、エネルギー危機以来、発電所から出る余熱はほとんど地域暖房に利用されている。発電の熱効率は約40%であるが、地域暖房への余熱利用により熱効率

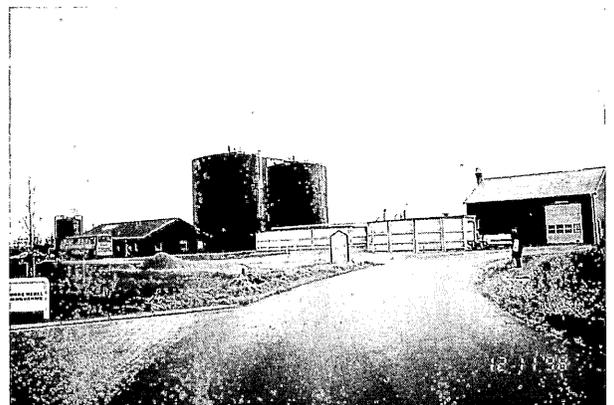


写真1 デンマークの共同バイオガスプラントの外観

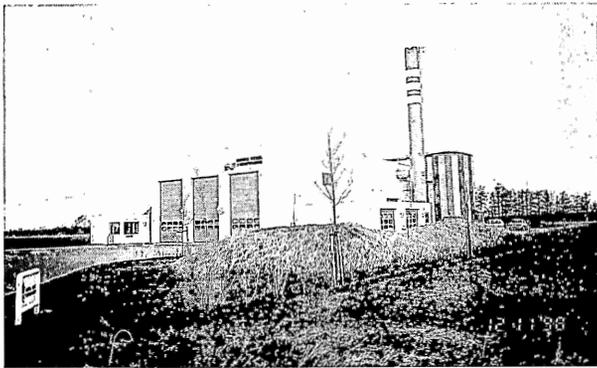


写真2 バイオガスプラントの発電施設
(写真提供 北王コンサルタント)



写真4 ホースアプリーケーターによる発酵後の液肥の
草地への施用

を90%まであげることが出来る。共同バイオガスプラントにおいても発電と余熱利用が普及の前提条件となっている。デンマークでは再利用エネルギーには税金が掛からないため、現在、1 m³のバイオガスの価格は約1.7クローネ（1クローネ約16円）となっている。

家畜糞尿と有機廃棄物の混合はガスの生産効率を上げることが明らかになっている。そのためデンマークのバイオガスプラントでは家畜糞尿の他にも様々な有機性の廃棄物、さらに家庭から出る生ゴミも発酵原料として用いられている。また、発酵後の廃棄物の圃場還元の安全性を保証するためにこれらの原料は発酵前に熱による殺菌処理が行われている。

多くのテクニカルトラブルは着実に解決されているが、その費用が深刻な問題となっているプラントもある。また、臭いも初期のプラントでは大きな問題であったが、新しいプラントではこれらの問題も解決され驚くほど臭いがしなかった。スラリーの輸送費は共同バイオガスプラント運営の重要なカギであり、コストの35~50%が輸送費である。写真3にスラリー輸送用のタンクローリーを示す。通常20トンのローリーが使われており、平均輸送距離は往復18~28kmである。写真4にホースアプリーケーターによる発酵後の液肥の草地への施用の様子を示す。このような散布時のアンモニアなどの揮散を極力少

なくするためにホースアプリーケーターやスラリードリル、スラリーインジェクターなどが用いられている。

以下、デンマークにおける共同バイオガスプラントの利点を要約する。 1. 発酵処理した糞尿は作物に吸収されやすく、窒素利用率が向上し、同時に無機窒素肥料Nの使用量が約70%減少した。 2. 牛糞尿（Kを多く含む）と豚糞尿（Pを多く含む）の混合により価値が向上する。 3. 家畜糞尿と有機廃棄物を効率的に圃場へ還元できる。 4. これらの結果、窒素などの水系への流出が軽減できる。 5. 発酵により病原菌、雑草種子が死滅し、農薬の使用量が軽減できる。 6. 地球温暖化、温室効果を低減出来る¹²⁾。

このように、デンマークでは15年間にわたる尽力と多額の投資により今日のシステムを構築し、さらに国内外への普及を図っている。バイオガス、風力などの自然エネルギー関連産業はデンマークの重要な輸出産業にもなっている。

6. ドイツにおける戸別型バイオガスプラントの取り組み

ドイツにおいても他のヨーロッパ諸国同様、年間ha当たりの家畜糞尿スラリーの施用上限、施用期間の限定、6ヶ月間の糞尿貯蔵容量の確保などが義務付けられている。現在、ドイツでは400基のバイオガスプラントが稼働しており、その半数は1994年以降に建設されたもので、それらの90%は1日の処理量が10 m³以下の戸別型小型プラントである。ドイツにおけるバイオガス利用の歴史は古く、最も古いプラントは1957年に建設されている。日本と同様、1950年代から1960年代の始めにかけて最初の普及がみられ、その後、原油価格の高騰によるオイルショックが起こった1973年から1984年の間に約70基のプラントが建設されている。写真5にドイツの戸別型発酵槽の代表的な形式であるダームスタッド型（水平円柱型）発酵槽を示す。現在、ドイツには約10社のバイオガスプ

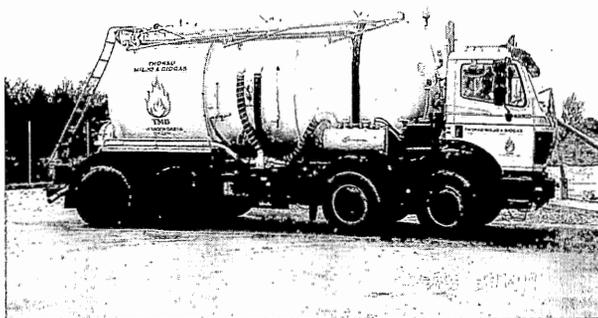


写真3 スラリー輸送用のタンクローリー

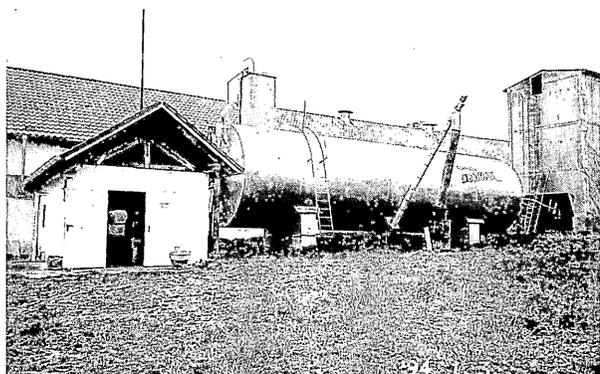


写真5 ドイツの戸別型発酵槽
(写真提供 コーンズエージャー)

ラントメーカーがあるが、1985年以降の動きとして環境保護団体による非営利、農家と支援団体の施工によるプラントが増えている。これらのためのビルディングキットも販売されている。ドイツの戸別型プラントの特徴として、初期のプラントではガス利用は熱利用のみであったが、1985年以降のプラントではガスエンジンによる発電エンジンの廃熱による原料の加温、発酵槽の保温、コ・ジェネレーションシステムの採用がある。写真6にドイツの戸別型プラントのガスエンジンと発電装置を示す。戸別型バイオガスプラントはデンマーク同様、ドイツにおいても重要な輸出産業になっている。

さらに、従来の好気発酵による堆肥化では酸性雨の原

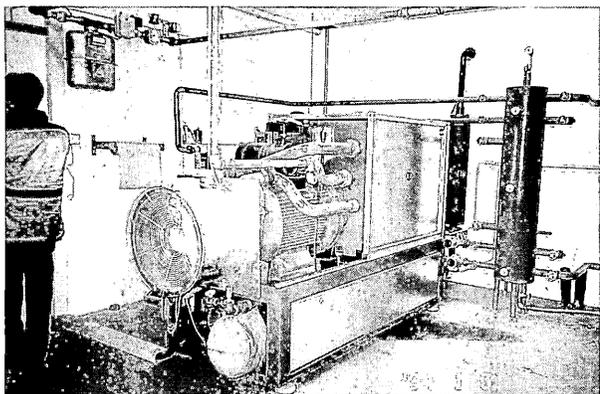


写真6 ドイツの戸別型プラントのガスエンジンと発電装置
(写真提供 コーンズエージャー)

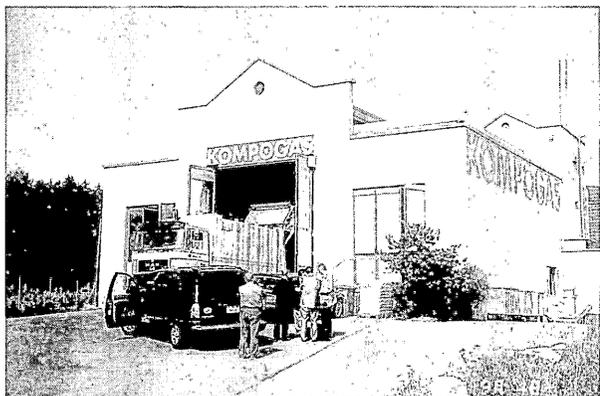


写真7 乾式メタン発酵施設

因となるアンモニアガスや地球温暖化ガスである二酸化炭素などが揮散することから、これにかわる固形堆肥化の方法として、メタン発酵による固形有機廃棄物の固形堆肥化技術が注目されている。一般に液状の廃液を対象としたメタン発酵を湿式メタン発酵と呼ぶのに対して、これらの方法は乾式メタン発酵と呼ばれている。写真7に厨芥、芝草など住宅地からの廃棄物を主な原料とした乾式メタン発酵施設を示す。写真8に生成したメタンガスを燃料とした廃棄物収集用のダンプトラックを写真9にメタンガスも利用できるハイブリットカーを示す。欧州の主要自動車メーカーではこのようなメタンガスを使用できる車両の生産を行っている。これらの車両はコストの面では採算は合わないが、自然エネルギー利用の啓蒙のために用いているとのことであった。

7. 北海道におけるバイオガス利用の展望

一般に搾乳牛の場合、1日1頭あたりの排泄量は糞で40kg、尿で20kg、合計60kgの糞尿が排泄される¹⁹⁾。さらにこれに麦幹などの敷料が加わる。これらをメタン発酵する場合、パーラー排水などをうまく利用して液状化したスラリーとして扱う必要がある。しかし、多くの場合、敷料を用いているため、固液分離が必要となる。200頭飼養の農家であれば、滞留日数を15日とすると発酵槽容



写真8 生成したメタンガスを燃料とした廃棄物収集用のダンプトラック



写真9 メタンガスも利用できるハイブリットカー

積は約180m³となる。また、発酵槽は中温で35～40℃、高温では55～60℃に保つ必要があり、冬期間、これらの発酵温度を保つためには断熱のしっかりした構造が要求される。また、発生したバイオガスを利用するために硫化水素と水分を取り除くプロセスが必要となる。これらの他に消化液を貯留するスラリータンク、散布のためのバキュームカー、スラリードリル、さらに、経済効率を高めるためにはガスエンジンによる発電装置が不可欠な付帯装置となる。バイオガス施設の普及を考える場合、これらの条件を満たした安い取り扱いが簡単な施設の開発が重要となる。ガスエンジンを備えたバイオガス施設の場合、発電による売電収入を見込むと維持経費をカバーし、さらに収入が見込める可能性がある。また、発酵後の液肥の肥料価値を考えると、バイオガスプラントの経済性は必ずしも否定的ではない。さらに、環境保全効果を考慮するとバイオガスプラントによる家畜糞尿処理は大きな可能性を包括していると言える。しかし、その一方でバイオガスプラントを北海道で普及させるためには施設の建設コストの低減、寒地仕様のプラントの開発、回収したバイオガスの有効利用、売電、発酵後の液肥の積極利用、さらにスラリーの運搬方法、圃場への散布など解決しなければならない問題は多い。

8. まとめ

糞尿の散布を積極的に行っている農家では、春先に化成リン酸を施用するだけで立派な牧草ができて肥料代が半分から1/3に減少したという話を聞く。やはり、糞尿は適切な量を適切な状態で圃場に還元することが不可欠であることが分かる。糞尿の問題は、畜産業にとって大変やっかいな問題であり、さらに自然環境に対しても大きな負荷を与える。バイオガスプラントの視察でデンマークを訪れた際、農家の方にこのようなことを言われた。「日本は工業技術の優れた国なので、バイオガスプラントは、すぐ作れるでしょう。でもこれをうまく農村に導入し使っていくには、社会全体の農業に対する理解が

なければ難しいよ。」複雑な気持ちで農場をあとにした。北海道の農業がバイオガス施設を導入することによって糞尿を良質肥料、自然エネルギーとして再資源化し、コスト、品質の両面で競争力のある足腰の強い産業として再生するきっかけとなればと考える。

参考文献

- 1) 松田従三(1997)：北海道酪農の方向と環境問題、農業機械学会北海道支部会第48回研究発表会講演要旨
- 2) 志賀一一、藤田秀保(1992)：環境汚染に取り組むE C酪農 酪農総合研究所
- 3) 干場信司(1992)：マニユア・コントロール デーリーマン社
- 4) R. E. Spring (1992)：Source control, Proceeding from the natinal milking center design conference, Northeast regional agricultural engineering service NARES-66.
- 5) 原 令幸(1995)：糞尿処理の現状と課題 北海道家畜管理研究会報 第31号
- 6) 前川孝昭(1982)：バイオマスエネルギー、朝倉書店
- 7) 高畑英彦(1996)：家畜糞尿のメタン発酵処理、酪農いま環境を考える、デーリージャパン社
- 8) 前川孝昭(1996)：メタン発酵処理技術、マニユア・マニュアル'96、酪農学園大学エクステンションセンター
- 9) 梅津一孝(1993)：メタンガスの利用、マニユア・コントロール、デーリーマン社
- 10) 木村義彰、梅津一孝、高畑英彦(1994)：メタン発酵処理がエゾノギシギシ種子の生存率に及ぼす影響、日本草地学会誌、40 (2)、165-170
- 11) 梅津一孝(1999)：乳牛糞尿スラリーにおける中温嫌気発酵消化液中の大腸菌群数、農業施設(投稿中)
- 12) 高井久光(1995)：共同バイオガスプラントによる家畜ふん尿の活用 酪農学園大学紀要20
- 13) 中央畜産会(1987)：堆肥化施設設計マニュアル