

## 【1-1404】簡易型乾式メタン発酵による養豚排水処理と発酵残渣の有効利用 (H26~H28)

細見 正明 (東京農工大学)

### 1. 研究開発目的

申請者らは、固形分が 15~30%と多く粘土状で発酵が進行し、排水が発生しない乾式メタン発酵に着目し、環境省環境研究総合推進費「養豚排水処理と多収(飼料)米生産の環境低負荷型コベネフィットシステムの構築 (H23-H25)」において、豚ふん尿を飼料米の稲ワラ・モミ殻と混合して高温乾式メタン発酵処理実験を実施した。豚ふん尿と稲ワラとの混合比を調整することでアンモニア阻害を防ぎ、バイオガスが安定的に生成することを示した。しかし、乾式メタン発酵は粘土状で発酵するため、基質(豚ふん尿と稲ワラ)と嫌気性微生物からなる汚泥の混合攪拌が困難である。同推進費での 20 L 発酵槽では人手により定期的に攪拌を行ってきた。商業用の実規模乾式メタン発酵では機械攪拌のための特殊で高価なポンプや攪拌装置が必要となり、小規模養豚農家にとって導入は困難である。従って、基質と汚泥の接触を低コストかつ簡易にする乾式メタン発酵の開発が必要である。

一方、霞ヶ浦周辺地域では豚のし尿処理が特に問題となっている。豚し尿と稲ワラとの混合については、両者を機械的に攪拌するのではなく、稲ワラを含む汚泥中にし尿などの液相(浸出液)を循環させる手法で基質と汚泥との接触を図ることを提案する。この場合、液相の循環ポンプで対応できるので、低コストかつ簡易な維持管理が可能となる。また、物質循環の観点から乾式メタン発酵より発生する発酵残渣の有効利用が重要である。同推進費において発酵残渣を散布した水田区は化学肥料水田区に比べ、メタンが多量に発生した。しかし、野菜に施用したポット試験では土壌病害の抑制の可能性や残渣施用前の水田の落水がメタンを抑制する可能性が示された。従って、水田以外への残渣の利用方法も含め、発酵残渣の多様な有効利用を検討する必要がある。

以上のように、簡易型乾式メタン発酵法の開発及び発酵残渣の有効利用法の検討を本研究の目的とする。

### 2. 研究の進捗状況

#### サブテーマ1 簡易型乾式メタン発酵の開発

これまで、簡易型乾式メタン発酵の開発に向けて、ラボスケールの実験を中心にを行い、様々な運転条件(原料と種汚泥の仕込み方法、液循環方式、循環期間、原料・種汚泥比)を検討した。原料と種汚泥の仕込み方法では、混合(基質と種汚泥が均一になるよう、完全に混合)、散布(種汚泥と豚尿を混合したスラリーを反応槽内の稲わらに散布)及び積層(種汚泥と稲わらを交互に4層にセットの三種類を評価した。液循環方式では、浸透方式(豚尿を定期的に反応槽の汚泥に浸透)及び浸漬方式(豚尿で反応槽の汚泥を定期的に浸漬)の比較を行った。その結果、仕込み方法に関わらず浸漬方式においてより高いメタン発存量(浸漬系: 124~152 mL/g-VS、浸透系: 60~90 mL/g-VS)が得られた。また、浸漬方式において、異なる仕込み方法におけるメタン生成特性の違いを解析したところ、メタン生成の立ち上がり、メタン生成速度及び最大メタン生成量の観点から、散布方式が有用であることが分かった。

さらに、浸漬期間(循環期間)がメタン生成量に及ぼす影響を調査したところ、1時間から24時間までは増加する傾向にあるのに対し、浸漬期間が24時間以降はメタン生成量が低下する傾向が見られた。従って、浸漬期間は24時間が有効であることが分かった。

現在、20 L(汚泥容積 10 L)にスケールアップしたリアクターを作製し、浸漬方式の回分式乾式メタン発酵を実施している。培養開始からリアクター内のメタン濃度の増加が確認されており、メタン発酵が進行していることが示唆された。引き続き培養を行っていく。

極力少ない種汚泥で稲わらの発酵を行うために、最適な基質/種汚泥比(基質及び種汚泥中の有機物含有量の比、F/I 比)の検討を F/I 比 2~7 で評価した結果、メタン生成量は、F/I 比の増加とともに減少する傾向が見られた。今後は、高 F/I 比における発酵阻害を緩和する手法を検討する。

さらに、現実のメタン発酵過程において起こりうる環境変化(温度及び C/N 比変化)がどのようにメタン生成

過程に影響するかを調べるために、メタン生成の各段階(加水分解、酸生成及びメタン発酵)における代表的な微生物の遺伝子発現解析を実施した。その結果、メタン生成の最終ステップに当たる *mcrB* 遺伝子の発現が C/N 比変化により阻害されていることが明らかとなった。

## サブテーマ 2 発酵残渣の有効利用法の確立

### 発酵残渣を用いたハス栽培における環境負荷の把握

本研究のモデル地域でもある茨城県の主要作物である、レンコン栽培への発酵残渣の適用可能性(収量及び環境負荷)を評価した。世界的に見て、ハスを人工的に栽培(つまり食用として栽培)した際の窒素挙動や温室効果ガスの放出量を定量した例はほとんどないため、温室に設置したタンクで化学肥料によりハスを栽培し、窒素挙動や温室効果ガス放出挙動を調査した。その結果、土壌中の間隙水に含まれるアンモニア態窒素濃度は、肥料施肥後は上昇するが、およそ 2 週間以内にゼロになる傾向が見られた。さらに、収穫したハスの葉、地下茎及びレンコンに含まれる窒素量を定量したところ、無施肥で栽培した系に比べ、肥料を施肥することでレンコン部の窒素含量が施肥窒素量と同じだけ増加した。このことから、施肥窒素はハスの特にレンコン部の生長に利用されることが明らかとなった。実際のレンコン栽培において、レンコン部は系外に収穫物として持ち出され、葉及び地下茎は水田に残すことから、投入した窒素はハス田に蓄積されず、地下水汚染などの要因になりにくいと考えられる。以上のことから、ハスへの発酵残渣施肥は養豚も含めた健全な窒素循環の構築に有効な手法であることが期待される。今回の計測は有底のタンクで実施したため、実際には地下浸透などの窒素挙動も含めた調査が必要となる。

現在、茨城県土浦市のレンコン農家のハス田の一部に区画を設け、発酵残渣を用いた栽培試験を実施している。処理として、無施肥(コントロール)、化学肥料(慣行)、豚尿施肥及び発酵残渣の 4 処理を設定し、ハスの生育及び水質を調査している。基肥以降、表面水中のアンモニア態窒素濃度は化学肥料系が最も高く、発酵残渣では検出されないレベルだった。従って、発酵残渣施肥は表面流出による窒素負荷に影響しないことが示唆された。しかし、ハスの生育に関して、発酵残渣系は他の管理よりも遅れていることが分かった。土壌中のアンモニア態窒素濃度は他の管理よりも低くなっており、窒素不足が懸念された。今後追肥を実施し、生育及び水質調査を継続していく。

また、上記タンクのハスから発生するメタンガスを、クローズドチャンバー法により秋季から冬季(10月~12月)にかけて計測したところ、メタンフラックスは秋季から冬季にかけて低下し、気温との関係が示唆された。さらに、メタンフラックスの日周変動を把握するために 2 時間おきに、24 時間メタンフラックスを測定したところ、9 時、17 時及び 23 時にメタンフラックスのピークが観測された。この挙動は、既往の報告におけるハスの葉の中央部にある荷鼻から大気へのガス流量の時間変化と酷似していた。そこで、ハスの葉をビニールで覆い、内部のメタン濃度を計測したところ、時間とともに増加が確認された。従って、荷鼻におけるガス交換がメタン放出において重要と考えられた。

そこで、中国上海市農業科学院に設置したタンクにハスを栽培(無施肥系、化学肥料系、堆肥系及び豚尿系)し、ビニールチャンバー法による温室効果ガス測定を実施している。6 月に、2 時間ごと 24 時間連続サンプリングを実施したところ、堆肥系では 5~10 mg C/m<sup>2</sup>/h、その他の系では 0~5 mg C/m<sup>2</sup>/h の範囲でメタン放出量の変動が観測された。しかし、既往の報告やタンク実験で見られた明確な日周変動はなかった。ハスの生育が十分ではなかったことから、生育がより活発な夏季に再度調査を実施する予定である。

### 発酵残渣の飼料イネに対する施肥効果

発酵残渣の飼料イネに対する施肥効果を確認するために、化学肥料、湿式消化液、湿式消化液及び発酵残渣で飼料イネの栽培を実施した。発酵残渣を施肥した飼料イネ水田の収量は、化学肥料区とほぼ同程度であり、発酵残渣は化学肥料と同程度の肥料効果を有することが確認された。

### 発酵残渣の土壌病害虫に及ぼす影響

発酵残渣がサツマイモネコブセンチュウ、キタネグサレセンチュウ、レンコンネモグリセンチュウ及びトマト萎ちょう病に及ぼす影響を調べたところ、キタネグサレセンチュウ及びレンコンネモグリセンチュウ密度に対しては全く抑制効果が見られなかった。一方、サツマイモネコブセンチュウ及びトマト萎ちょう病に対しては、効果が認められた。いずれにおいても、窒素施用量が  $15\text{g/m}^2$  よりも  $30\text{g/m}^2$  においてより高い抑制効果があったことから、多量施用することでより病害の軽減につながる可能性が考えられた。

また、サツマイモネコブセンチュウ汚染土壌に各種肥料（化学肥料及び発酵残渣）を施肥した土壌の硝酸態窒素濃度は、化学肥料区に比べ発酵残渣区で低くなる傾向が見られた。これは、発酵残渣に含まれる有機物が土壌微生物バイオマスを増加させ、より多くの硝酸が菌体に取り込まれたためと考えられる。従って、発酵残渣の施用は硝酸態窒素の溶脱リスクを軽減できる可能性がある。

### 3. 環境政策への貢献（研究代表者による記述）

回分式高温乾式メタン発酵において、よりメタン生成効率が高くなる基質の仕込み方法及び液循環方法が明らかとなったことから、乾式メタン発酵を用いた低コストな養豚排水処理への適用が期待される。今後はスケールアップや水収支などを検討することで、養豚排水を系外に排出しない低コストな回分式乾式メタン発酵の構築が期待される。

発酵残渣にトマト萎ちょう病の発病軽減効果及びネコブセンチュウ密度低減効果が認められたことから、農薬使用の一部を代替できる可能性がある。また、発酵残渣の施用は土壌微生物バイオマスを増加させることで硝酸溶脱リスクを軽減できる。

### 4. 委員の指摘及び提言概要

霞ヶ浦周辺の養豚農家と水田農家が共同して運用する簡易な乾式メタン発酵技術を開発し、発酵残渣の有効利用を進める研究としては具体的技術の開発として、有意義な成果があがっている。環境影響の更なる評価、経済性の更なる評価を今後期待したい。

### 5. 評点

総合評点： A