

乾式メタン発酵と飼料イネによる資源循環型養豚排水処理

東京農工大学大学院

細見 正明・豊田 剛己・利谷 翔平

1. はじめに

平成25年7月、水質汚濁防止法の省令の一部改正に基づき、これまでの硝酸性窒素等に関する養豚排水の暫定排水基準が900 mg/Lから700 mg/Lに強化された。しかしながら、一律排水基準は100 mg/Lであるので、今後さらに暫定排水基準の強化が実施されるものと考えられる。

さらに、閉鎖性海域においては、国で定める窒素及びりんの一様排水基準（窒素：120mg/L（日間平均 60mg/L））については、これを達成することが著しく困難と認められる業種に対して5年を期限とした暫定排水基準が設定されてきた。

平成25年10月～平成30年9月の5年間は、畜産業（豚房を有するものに限る）については、暫定排水基準として、許容限度170 mg/L（日間平均140 mg/L）に強化された（平成25年9月）。この際、必要な処理施設の整備並びに適正な運転・維持管理の徹底を通じて、早期に一般排水基準達成を目指すこととされた。

また湖沼水質保全に関して、条例により国の規制よりも厳しく排水基準が設定されている。例えば、茨城県霞ヶ浦水質保全条例では、排水量が50 m³/日をこえる場合、畜産農業の窒素に関する排水基準は15 mg/Lとされている。

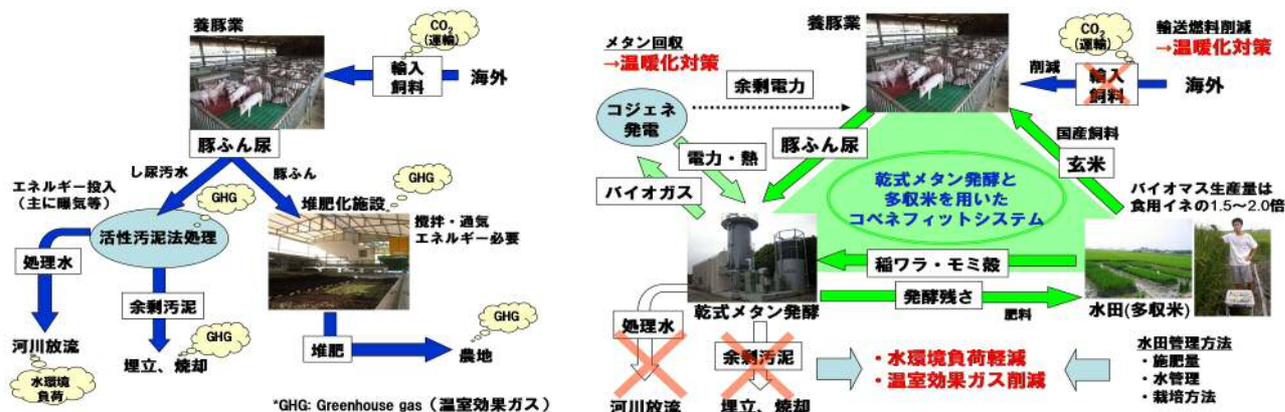


図1 従来型の養豚システム（左図）及び乾式メタン発酵と多収米を用いた資源循環型養豚システム（右図）

これまで養豚業では、飼料の供給も含めた豚の飼育とふん尿処理とを切り離し、養豚排水の活性汚泥法をはじめとした排水処理技術と豚ふんのコンポスト化によるリサイクルで対応してきた。排水規制の強化とともに処理コストや温室効果ガスの排出量が増大することになる(図1左)。また、輸入飼料の高騰をはじめ、口蹄疫などの問題もあり、養豚業の置かれている状況は大変厳しい状況にある。

そこで、養豚業全体とそれを取り巻く環境(飼料の供給体制も含めて)を考慮することで、低コスト型の排水処理、エネルギー回収及び温室効果ガス削減を同時に満たす資源循環型養豚排水処理に着目する(図1右)。

2. 目的

豚ふん尿の処理・利用法としてメタン発酵法が注目されている。メタン発酵には、従来から下水汚泥などの消化に使用されてきた湿式メタン法(含水率 $>90\%$)と乾式メタン法(含水率 $<85\%$)とがある。湿式メタン法は、これまでにエネルギー回収法として広く用いられているが、含水率が高い状態で発酵を行うため、高濃度の有機物や窒素・リン等を含む消化液が大量に発生し、その処理に多くのエネルギーを消費するという問題点があった。

一方、乾式メタン発酵法は含水率が低いことから、消化液処理が不要であり、発酵残さは肥料として利用できる可能性を秘めており、優れた利点をもつと期待される。しかし、乾式メタン発酵法では

有機物濃度が高いため、アンモニアによるメタン発酵阻害が起こりやすい点や高温発酵のための加温方法、汚泥の供給方法や完全混合のための攪拌方法、最適な負荷量、長期安定運転管理など様々な研究課題は残されている。

さらに、メタン発酵プロセスから発酵残さを肥料として利用した作物生産プロセスまでシステム全体の効率や環境負荷を考慮して最適なメタン発酵条件を見出す研究はまだ行われていない。さらに、多収米イネは食用のイネよりも高い窒素吸収性、耐倒伏性、高バイオマス生産力を有するという特徴があるが、過度の発酵残さの多収米水田への施用は、倒伏リスクの他に温室効果ガスの発生や地下への浸透により地下水汚染を引き起こすことも懸念される。

本研究では休耕田で多収米を栽培し、収穫したモミを豚の配合飼料とし、未利用バイオマスである稲ワラ・モミ殻を炭素源と希釈材として、豚ふん尿と混合し、高温乾式メタン発酵特性を詳細に解析し、豚ふん尿の処理を図る。高温乾式メタン発酵プロセスからメタンガスを回収して、エネルギー利用(ガスコジェネ発電による売電)を行う。

さらに、発酵残さを肥料として多収米を栽培する際には、水田の水管理によりメタン及び亜酸化窒素の放出量を削減することによって、豚ふん尿と稲ワラ・モミ殻の乾式メタン発酵処理、飼料自給率の向上、エネルギー回収を同時に満たす環境低負荷型かつ資源循環型養豚システムを構築する。

3. 乾式メタン発酵プロセスの設計及び運転管理の検討

(1) 豚ふん尿と稲わらのメタン発酵

豚ふん尿と稲ワラの高温乾式メタン発酵効率を評価するために、異なる混合比(C/N比=9(豚ふん尿のみ)、20、30及び45(稲ワラのみ))で基質を添加した際のメタン発酵ポテンシャルを、自動メタン生成ポテンシャルテストシステムを用いて検討した。

C/N比が8(豚ふん尿のみ)、20、30及び45(稲ワラのみ)の原料をそれぞれ回分で高温乾式メタン発酵し、Gompertzの式より算出したメタン発酵特性を図2に示す。稲ワラ(C/N比=45)は豚ふん尿

(C/N比=9)よりも遅延期が短く、最大メタン生成速度が大きかった(図2(a)及び(b))。つまり、稲ワラは豚ふん尿よりも分解速度が速いということが示唆された。また、図2(c)より稲ワラは豚ふん尿よりメタン生成ポテンシャルが大きかった。豚ふん尿に稲ワラを混合した系(C/N=20及び30)においては、稲ワラの添加量が多いほど、つまりC/N比が高いほど分解速度が速く、メタン生成ポテンシャルが大きかった。以上より、豚ふん尿に多くの稲ワラを投入することで、分解速度、さらにはメタン生成量も上昇し、高効率に豚ふん尿を処理することが可能であるということが明らかとなった。

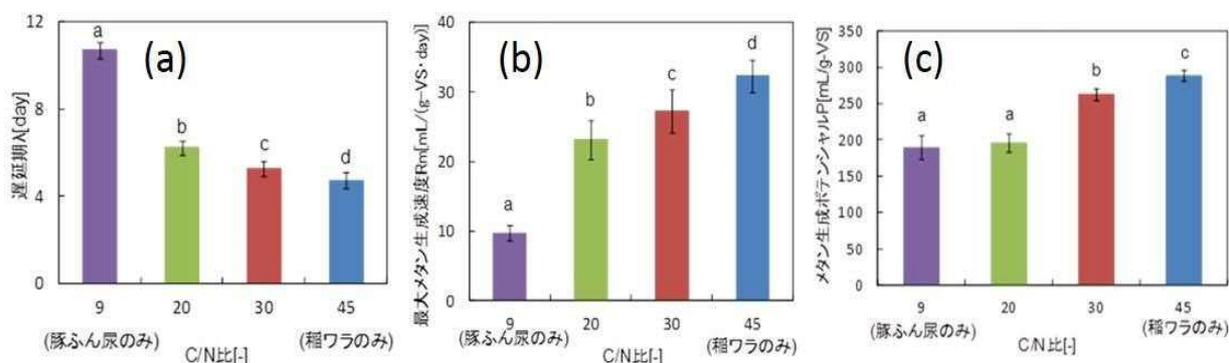


図2 異なるC/N比における(a)遅延期、(b)最大メタン生成速度及び(c)メタン生成ポテンシャル

(2) 長期培養試験

連続運転の可能性を評価するために、ラボスケールリアクター(500 mL)を用いて異なるC/N比(7.4(豚ふん尿のみ)、10、20、30及び125(稲ワラのみ))を評価した。さらに、その成果をもとに、20 Lスケールのリアクターを構築し、500日余りの長期培養試験を実施し、最適な運転管理方法を検討した。

図3に20 Lリアクターを用いた連続培養におけるバイオガス生成量の推移を示す。C/N比を高くすることで(豚ふん尿に対する稲ワラの混合割合を高くすることで)、バイオガス生成が持続した。C/N比=8では、リアクター内のアンモニア濃度がメタン発酵の阻害濃度(3000 mg-N/kg現物重)を超えていたことから、豚ふん尿と稲ワラの混合により発酵阻害を抑制で

きることが考えられた。さらに、C/N比が高いほど汚泥滞留時間(SRT)を短縮でき(基質の負荷を上昇できる)、C/N比20で

は、SRT=30日、C/N比30では、SRT=20日が最適運転条件であることが分かった。

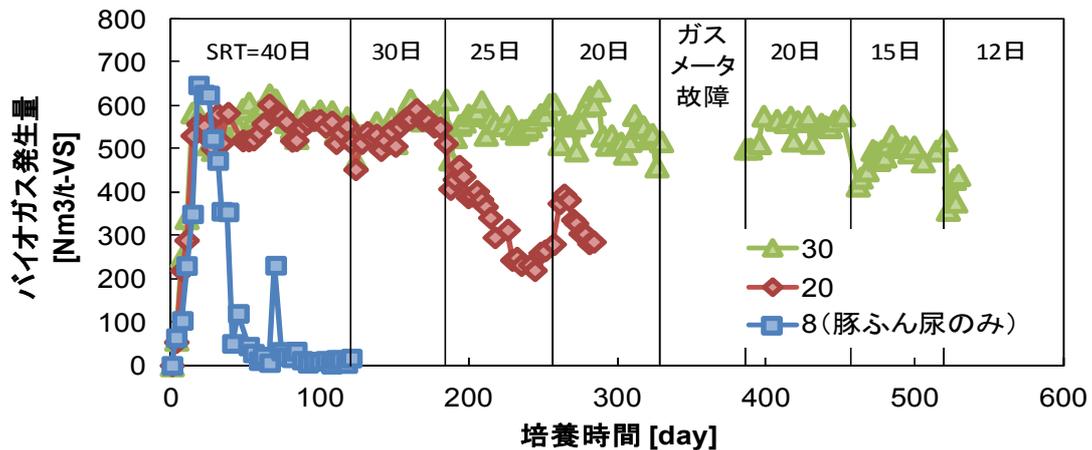


図3 20 Lリアクターにおけるバイオガス発生量の推移

4. 温室効果ガス抑制型の発酵残さの施肥方法及び水田管理方法の確立

(1) ポット栽培試験

発酵残さを水田に施肥した際の環境負荷(温室効果ガス及び窒素溶脱)に関する知見は全くない。従って、室内実験において、発酵残さ施肥量(0、150、300及び450 kg-N/ha)及び異なる水管理(常時湛水及び間断灌漑)により多収米飼料イネをポット栽培し、地下への浸透量及びメタンや亜酸化窒素の放出速度を評価した。

その結果、常時湛水系では栽培期間中のメタン排出量は発酵残さ負荷量の増加に伴い増加する傾向が見られた。一方、間断灌漑系の増加の割合は同じ負荷量の常時湛水系よりも小さく、300及び450 kg-N/haの実験系において、間断灌漑を行うことによって常時湛水系より59%と80%

の温室効果ガスが削減できた。ポット底部における溶脱無機態窒素濃度は、発酵残さを施肥したポットの法が対照系(発酵残さなし)よりも高かった。一方で、間断灌漑系における浸透水中の窒素濃度は常時湛水系よりも低かった。これらの結果は、間断灌漑により発酵残さを施肥した多収米飼料イネ栽培における環境負荷を抑制できることを示唆している。

(2) 農家の水田による実証試験

さらに、間断灌漑による環境負荷抑制効果を実証するために、茨城県行方市の実際の農家の水田にて、発酵残さによる多収米飼料イネを栽培した。化学肥料100 kg-N/haを施肥し、水管理として常時湛水を行ったものをC系(対照)とした。これに対し、発酵残さ300 kg-N/haを施肥し、常時湛水を行ったものを(MC系)、発酵残さ300 kg-N/haを施肥し、間断灌漑を行っ

たもの(MI系)を設定し、温室効果ガス排出及び窒素溶脱量を計測した。

メタン排出量は、C系で110 kg C/ha、MC系で464 kg C/ha、MI系で300 kg C/haとなった。対照のC系に対し、MC系では4.2倍、MI系では2.7倍のメタンが排出され、発酵残さ施肥は慣行の栽培手法よりも温室効果ガスが高くなることがわかった(図4)。一方、栽培期間中、亜酸化窒素の排出は観察されなかった。

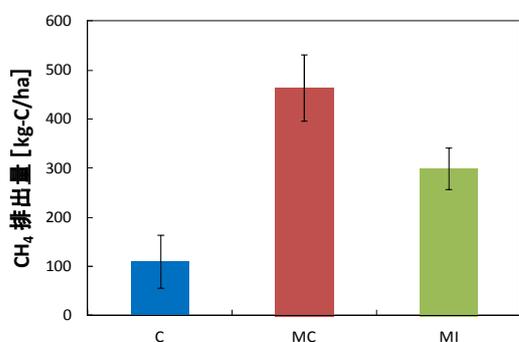


図4 栽培期間中における積算メタン(CH₄)排出量(茨城県行方市)
 C: 対照(常時湛水+化学肥料)
 MC: 常時湛水+発酵残さ
 MI: 間断灌漑+発酵残さ

(3) 窒素収支と収穫量

水田土壌間隙水中の窒素濃度は、慣行系より高窒素負荷の発酵残さ系の方が低く、乾式メタン発酵残さによる多収米飼料イネ栽培における地下水への窒素負荷は、慣行の栽培方法(化学肥料及び常時湛水)よりも小さいことが示唆された(図5)。しかし、窒素収支を評価した結果、MI系におけるイネによる窒素吸収はMC系よりも低く、間断灌漑により硝化脱窒が促進され、イネに吸収可能な窒素が不足

したと考えられた。

今回は、乾式メタン発酵残さは、実際の保存方法や散布方式を考慮して、乾燥することとした。しかし、乾燥過程に悪臭の発生と同時にアンモニアが揮発してしまった。その結果、発酵残さ300 kg-N/haで散布したが、実際にはそのほとんどが有機体窒素でイネに吸収利用される利用可能な窒素は少なかったと推定された。実際に収穫されたイネ(タカナリ)のバイオマスは、C系で1.6 kg/m²、MC系で1.1 kg/m²、MI系で0.8 kg/m²と、当研究室がこれまで畜産排水の液肥(埼玉県熊谷市妻沼有機センターから提供)を散布して得られたタカナリの収穫量2~2.5 kg/m²に比べ、小さいバイオマスとなった。

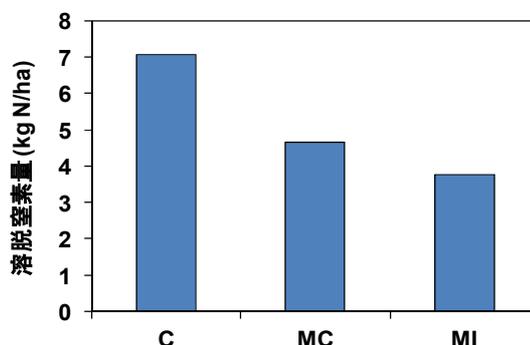


図5 栽培期間中の溶脱窒素量(茨城県行方市)
 C: 対照(常時湛水+化学肥料)
 MC: 常時湛水+発酵残さ
 MI: 間断灌漑+発酵残さ

5. 発酵残さを用いた多収米の生産評価

多収米飼料イネ生産における乾式メタン発酵残さの肥料効果を明らかにするために、ポット試験及びライシメータ試験

を通して化学肥料や堆肥、湿式メタン発酵消化液による多収米飼料イネ栽培成績及び環境負荷(温室効果ガス、窒素溶脱及び土壌及びイネへの重金属の蓄積)の比較を行った。

(1) ポット試験

ポット試験では、化学肥料(高度化成、窒素:りん酸:カリ=14:14:14)、堆肥及び湿式のメタン発酵消化液及びをそれぞれ30 gN/m²施肥し、高温乾式メタン発酵残さを15、30及び45 gN/m²施肥した。ライシメータ試験では、化学肥料、堆肥、湿式メタン発酵消化液及び高温乾式メタン発酵残さをそれぞれ30 gN/m²施肥し、3年間の連用試験を実施した。

ポット試験では、乾式メタン発酵残さを施用したポットにおいて初期生育が若干抑制された。したがって、乾式残さは植物に対する生育抑制効果を有することが確認された。しかし、移植後1ヶ月以降は生育抑制はみられなくなり、むしろ残さ添加量が多いポットほど、イネの生育は良好になった。最終的な乾物生産量はポット試験での収穫時の乾物収量は、化学肥料に比べ乾式15区は劣ったが、乾式30区、乾式45区と残さ施用量が多くなるほど収量が高まったことから、乾式残さの肥料効果を確認することができた。

(2) ライシメータ試験

ライシメータ試験でもタカナリは良好な生育を示し、乾式30区は化学肥料をはじめとするその他の肥料と同程度の乾物生産量を示した(図6)。化学肥料と湿式消化液は基肥と追肥2回の合計3回の施肥を行ったのに対し、乾式発酵残さ区では基肥の1回しか施肥していない。それに

も関わらず同程度の肥料効果を示したことは、乾式発酵残さに含まれる有機態窒素が栽培期間中徐々に無機化され、イネに対する追肥として機能したと考えられた。

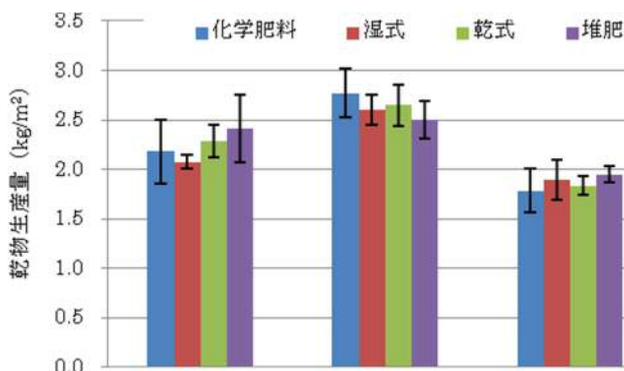


図6 3年間のライシメータ試験における多収米(タカナリ)の乾物生産量(ただし、2013年の堆肥区は乾式残さ+スラグ区)

(3) メタン発生量

ライシメータ試験における温室効果ガス排出の調査では、栽培期間中の累積メタン発生量は、年次変動があるものの、化学肥料に比べ堆肥、湿式消化液及び乾式発酵残さは高いメタン発生量となった。この結果は、茨城県行方市における実際の水田での結果(図4)と一致した。

(4) 硝酸性窒素、重金属

また、ライシメータ試験3年間のほとんどの栽培期間において、浸透水中の硝酸態窒素濃度は1 mg/L以下だった。従って、窒素が硝酸性窒素として溶脱するリスクはほとんどないといえる。銅及び亜鉛は、化学肥料に比べて発酵残さ施用により、それぞれ10倍及び4倍以上が添加された。しかし、収穫物に含まれる銅及び亜

鉛濃度に有意な差はなかった。土壌においては、両重金属ともに増加が認められたが、数十年の連用により土壌環境基準を超過することはないと考えられた。

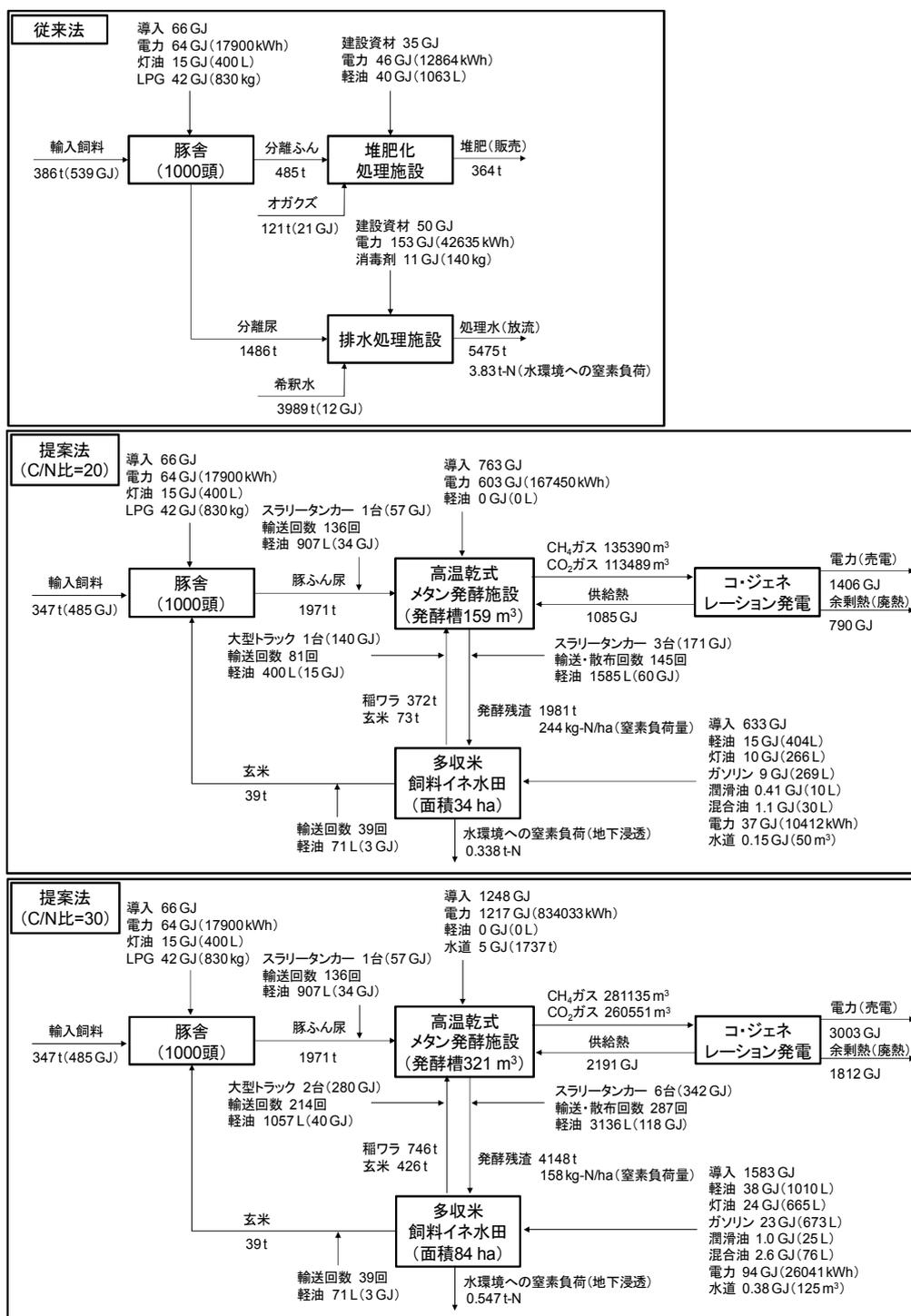


図7 従来法および提案法における物質・エネルギー収支 (養豚の規模1000頭、各ユニット間の距離10 km、1年間あたり)

6. システムの物質・エネルギー収支の解析

(1) 従来法及び提案法の物質・エネルギー収支の比較

原単位法を用いて、1000頭の養豚における従来システム（豚舎、分離ふんの堆肥化処理施設及び分離尿の排水処理施設）及び提案システム（豚舎、豚ふん尿の高温乾式メタン発酵施設及び多収米水田、補助金、FIT価格での売電）の導入及び運営における物質・エネルギー・コスト・温室効果ガスの収支解析を実施し、従来システムと提案する資源循環型豚ふん尿処理システムとを比較した。

図7に示すように、物質及びエネルギー

収支解析の結果、C/N比=20及び30の場合、多収米水田はそれぞれ34及び84 haの水田面積が必要になることがわかった。この結果、発酵残さを肥料として水田に施肥した際の窒素負荷量は、C/N比=20及び30でそれぞれ244及び158 kg-N/haとなる。

(2) 窒素負荷の比較

従来システムと提案システムにおける環境負荷を比較した。年間の水環境への窒素負荷は従来法の排水処理施設は3.8 t-N/年に対し、提案法の多収米水田はC/N比=20及び30の場合、それぞれ0.33及び0.54 t-N/年だった。

表1 養豚7000頭規模の収支結果

		収入	支出	養豚農家収益
コスト (万円/年)	従来法	21683	19835	1849
	提案法(C/N比=20)	54097	40646	2460
	提案法(C/N比=30)	98784	69119	2234
		排出量	削減量	正味の排出
温室効果ガス (t-CO ₂ eq/年)	従来法	2731	0	2731
	提案法(C/N比=20)	3731	3220	511
	提案法(C/N比=30)	6719	6392	326
		排出負荷量		
水環境負荷 (t-N/年)	従来法	26.8		
	提案法(C/N比=20)	2.4		
	提案法(C/N比=30)	3.8		

(3) 温室効果ガス排出量の比較

温室効果ガス排出は、従来法では豚ふん尿の処理過程における温室効果ガス排出が支配的だった。一方、提案法では水田の水管理を間断灌漑にすることで、正

味の温室効果ガス排出量を従来法に比べC/N比=20及び30の場合、73及び74%削減可能であることが示された。

(4) 経済性の比較

システムの経済性を評価した結果、

1000頭規模では養豚農家及び水田農家の両業者が最低限必要な所得を確保できないことがわかった。しかし、表1に示すように、養豚の規模を7000頭に拡大し、水田への補助金(飼料米生産などに対する水田活用の直接支払い交付金など)を活用し、各ユニット間(豚舎、乾式メタン発酵、多収米水田)の距離が10 kmとして、本研究が提案している温室効果ガス削減対策の水田管理方法である間断灌漑を行えば、環境負荷の面だけでなく、経済性の面でも従来法より有利になることがわかった。

以上より、提案する環境低負荷かつ資源循環型の豚ふん尿処理システム全体の物質・エネルギー収支の関係を明確化し、経済性及び環境負荷の両面からシステムが実現可能な条件を解明することができた。

7. 今後の課題

伝染病や飼料の高騰のみならず、TPP交渉において養豚業は非常に困難な状況にあることはよく理解できる。しかしながら、そうした状況下でも硝酸性窒素等の排水基準や窒素の一律排水基準を遵守している畜産農家、さらにはより厳しい排水基準を課している茨城県霞ヶ浦保全条例の基準などを遵守している畜産農家がいることを思えば、公正な競争の観点からも基準の遵守は必要条件である。

本研究が提案するシステムは、物質収支、エネルギー収支、そしてコスト試算により、実現可能性が高いと考えられる。ただ、今回計算したデータの根拠や乾式

メタン発酵装置の運転費用やふん尿・稲ワラの運搬費等、さらに精査する必要がある。この点においては、関係各位のご協力をお願いする次第である。

最も重要な課題と考えているのは、本研究が提案するシステムは、広大な休耕地を有効利用するだけでなく、耕種農家にはそうした休耕地で多収米を栽培して、籾は豚の飼料として販売するほかに、稲ワラは回収して畜産農家に提供することを前提としている点である。この前提条件が成立するには耕畜連携のみならず、指導監督する立場にある農林部局の関係者の連携協力が求められる。

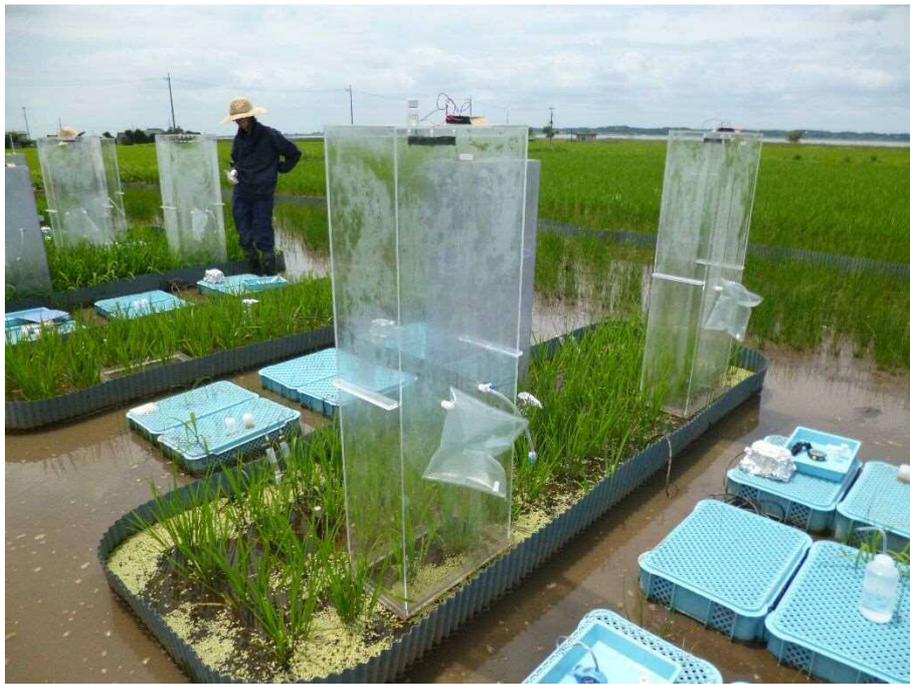
謝辞：本文は、環境省総合環境推進費 1B-1103 「養豚排水処理と多収(飼料)米生産の環境低負荷型コベネフィットシステムの構築」の支援を受けた研究成果をもとにまとめたものである。乾式メタン発酵の種汚泥として、穂高広域施設組合による穂高クリーンセンター(バイオマスエネルギー地域システム化実験事業)から提供いただいた。また、栗田工業株式会社より、乾式メタン発酵に関する資料を提供いただいた。ここに記して関係各位に感謝いたします。

参考文献

細見正明(2014)
1B-1103 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、
環境省環境研究総合推進費 最終報告書



参考：写真1 湿式メタン法および乾式メタン法の残さの様子
左：湿式メタン発酵の消化液、右：乾式メタン発酵の残さ（粘土状）



参考：写真2 発酵残さを施肥した多収米飼料イネ水田における温室効果ガス採取
（茨城県行方市）