

B-51 CH₄、N₂Oのインベントリーの精緻化と開発中核技術の内外への普及に関する研究

(7) 家畜及び家畜糞尿処理過程に由来するCH₄、N₂O排出量推定の精緻化と開発中核技術の内外への普及に関する研究

独立行政法人農業技術研究機構 畜産草地研究所

家畜生理栄養部 反すう家畜代謝研究室 栗原光規・寺田文典・田鎖直澄

永西 修・竹中洋一

畜産環境部 資源化研究室

長田 隆・田中康男・鈴木一好・和木美代子

平成12～14年度合計予算額 14,612千円

(うち、平成14年度予算額 4,813千円)

[要旨]

家畜由来メタン(CH₄)排出量の簡易測定法として六フッ化イオウ(SF₆)法を利用可能とするとともに、水牛からのメタン発生量を実測しインドネシア国の水牛からのメタン排出量の推定精度の精緻化を検討した。さらに、家畜排泄物の処理(汚水処理、堆肥化)過程から排出される温室効果ガス(GHG)の測定精度の精緻化と排出量削減技術について検討した。その結果、①チャンバー法によるCH₄の測定値(X)とSF₆法による値(Y)の間には、 $Y=1.08X$ $r=0.93$ との関係が認められ、SF₆法によりCH₄発生量を推定できることが示された。②水牛からのメタン発生に関する係数(EF)は10-12%と推定され、飼料構成により大きく異なることが示唆された。③低質粗飼料(稲ワラ)を給与している水牛からのメタン発生量として34.2 g/kgDMIを用いて、インドネシアの水牛からのメタン排出量を推定すると166 Gg/yearであり、インドネシアからのメタン排出量の約3.5%と試算された。④汚水処理過程から発生するCH₄は投入汚水中の全有機体炭素の0.2~0.05%と極めて低かった。⑤N₂Oの放出は、20℃で従来法では処理窒素の約5%と高かったが、間欠曝気法では温度条件によらず投入汚水中の総窒素の0.04%に抑制され、間欠曝気法が温室効果ガス抑制に効果があることが確認された。⑥豚の肥育全期間中(8週間、20kg~80kgの増体期間)に畜舎内で発生するCH₄およびN₂O量を汚水浄化と堆肥化処理を基本として糞尿処理を行うケースで算定すると、それぞれ270~438 gCH₄/頭および16.5~49.7 gN₂O-N/頭となった。⑦発生抑制には、N₂Oについては間欠曝気法の適用、CH₄については堆肥化を好气的条件で行うことが有効と考えられた。⑧堆肥化過程から発生するN₂Oは、現場で広く採用されている堆積型(投入窒素の3.9~5.9%を放出)と比べて強制通気型(投入窒素の約0.5%)では大きく低減し、堆積規模や日照などの要因により発生係数が大きく変動することも確認された。⑨CH₄の発生も堆肥型(投入有機物の0.24~0.28%)と比べて強制通気型(通気量大で0.001%)で大きく低減すると考えられた。

[キーワード] 反芻家畜、豚、排泄物処理、メタン、亜酸化窒素

1. はじめに

地球温暖化を防止するためには個々の温室効果ガス(GHG)の発生量を正確に把握し、的確な対策

を講じることが重要である。気候変動枠組み条約においてGHGとして対策を講じる対照となっているものは、炭酸ガス、メタンガス(CH₄)、亜酸化窒素ガス(N₂O)他の6種類であり、そのうち、CH₄の排出に対しては反芻家畜が大きな位置を占め、その量は全地球からのCH₄発生量の約16%、人間活動に由来する発生量の約1/4に当たることはよく知られている。また、家畜の糞尿処理過程で発生するCH₄およびN₂Oの量も無視できないものとされている。このため、畜産分野においてもその発生量の推定精度の向上と抑制技術の改善ならびに開発された中核技術の普及に努める必要がある。

2. 研究目的

アジア地域における家畜由来メタン排出量の簡易測定方法を開発し、それによりアジアで多く飼養される、瘤牛、水牛の測定データを収集、より正確な排出量の推定を行うとともに、家畜排泄物の取り扱いの全過程から発生する環境負荷ガスの発生原単位を定め、わが国の糞尿処理に由来するCH₄、N₂Oの排出量推定の精密化を図る。さらに、温度特性等の気候区分を考慮してアジア地域からの排出量を推定する。また、国情を考慮した適正な排出抑制技術の普及の最適化の解析、検討もあわせて行う。

3. 研究方法

(1) 家畜由来メタン排出量推定のための簡易測定法の開発

放牧牛などでも利用可能な六フッ化イオウ(SF₆)をインデックスガスとするメタン発生量測定手法の確立を目的として以下の検討を行った。

① SF₆放出量安定性検定

SF₆を封入したカプセル(写真1)を牛に投与し、第一胃(ルーメン)からのSF₆の放出速度の安定性についてフィステル装着牛を用いて検討した。

② 育成牛を用いたSF₆法の検定

育成牛のべ10頭を用いて、イタリアンライグラスウエハ、アルファルファヘイキューブ、配合飼料よりなる飼料を、維持(M)、1.5×M、2.0×Mの3水準で給与して呼吸試験を実施、同時にSF₆法によるガス採取を行い、その精度について比較、検討した。

③ SF₆法の改良と山羊・羊を用いた検定

測定精度向上を目指して、②で用いたSF₆測定法を改良した後に、山羊のべ12頭、羊のべ4頭を用いて、山羊には稲ワラまたは稲ワラ焼酎粕サイレージと配合飼料よりなる飼料を維持量(M)給与後に絶食し、羊にはアルファルファヘイキューブをおおよそ飽食、M量および0.5×M量で給与して呼吸試験を実施、同時にSF₆法によるガス採取を行い、その測定精度向上を図った。

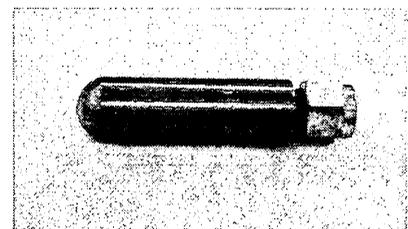


写真1 SF₆投与カプセル



写真2 実験風景

(2) 水牛からのメタン排出係数(EF)とその抑制の可能性

家畜由来CH₄発生量推定において、不確実性がもっとも大きいと思われる水牛のCH₄排出係数(EF)を、インドネシアにおける水牛飼養農家調査および現地におけるマスク法による水牛からのメタン発生量調査によって検討した。

① 水牛からのCH₄発生量調査

育成子水牛8頭を導入し、飼育環境と飼料に十分に馴致した後、3日間にわたって採食量を調査し、その後、3時間間隔で24時間にわたってマスク法により、CH₄発生量を調査した(写真2)。試験区は生稲ワラのみを給与した無添加区と1日あたり糖蜜150g、尿素40gを給与した添加区の2区を設定した。生稲ワラは飽食とした。

② 水牛飼養農家調査

西部ジャワの4地域における水牛農家11戸における水牛の飼養状況について、平成14年2月に聞き取り調査を行った。

(3) インドネシアの水牛からのメタン排出量

インドネシアにおける水牛の給与飼料は、主に稲ワラ等の低質粗飼料であることから、水牛に稲ワラを給与して測定した今回のメタン発生量と、以下の仮定からインドネシアの水牛からの年間メタン排出量を試算した。①インドネシアの水牛頭数を2859千頭(BPS, 1999)とし、その70%は稲ワラを給与され、30%は野草を給与されている、②水牛は体重500kgの成牛、300kgの育成水牛、100kgの若水牛が1/3ずつとした、③成牛と育成水牛の稲ワラ摂取量は体重の2.5%とし、若水牛は野草を給与されていると仮定した。これらの仮定から、水牛に給与される稲ワラ量を年間490万トンと試算して解析に使用した。

(4) 家畜糞尿処理に由来する温室効果ガス排出量の推定精度の改善

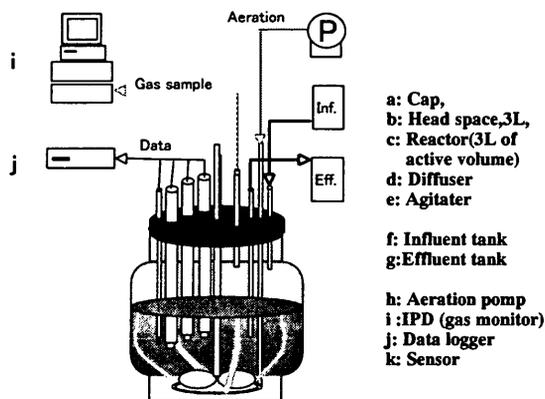


図1 汚水試験装置の構成

家畜糞尿起源の温室効果ガスの総量とその発生源を推定するため、汚水浄化処理からの発生について小型試験装置で検討した。これに、以前のプロジェクトで算出した堆肥化、畜舎における発生係数と合わせることで、肥育豚1頭あたりの温室効果ガス発生量を推定・算出した。

投入汚水として、豚の糞に尿を混ぜた汚水を作成したのち、0.5mmのふるいで粗大固形物を除去したものを(BOD 1500mg・L⁻¹、T-N 207mg・L⁻¹)を試験に供し、回分式活性汚泥装置(有効容積3L)2基により浄化試験を行った

(TJM-5W改造品、図1)。容積負荷0.5kg m⁻³・day⁻¹に対する処理水の除去効果が安定した後に連続曝気条件における処理試験を約4週間行った。この後、曝気方式を1時間間隔で曝気と停止を繰り返す間欠曝気法(IAP, Intermittent Aeration Process)に切り替えて再び処理効果が安定するまで4週間培養した後、間欠曝気方式の処理試験を約4週間継続した。

この結果を、以前のプロジェクトで算出した堆肥化、畜舎における発生係数(Osada et.al 1998,

Osada et.al 2000) と合わせることで、肥育豚 1 頭あたりの温室効果ガス発生量を推定・算出した。

(5) 堆積型堆肥化過程からのGHG測定法の開発と発生変動要因の解析

容積約13m³ (直径3m×高さ2.2m) のチャンバーを試作し、耐水性コンクリート床に設置した。チャンバー内空気は、チャンバー裾部分と床面との隙間(3cm程度)から外気が導入される(図2)。

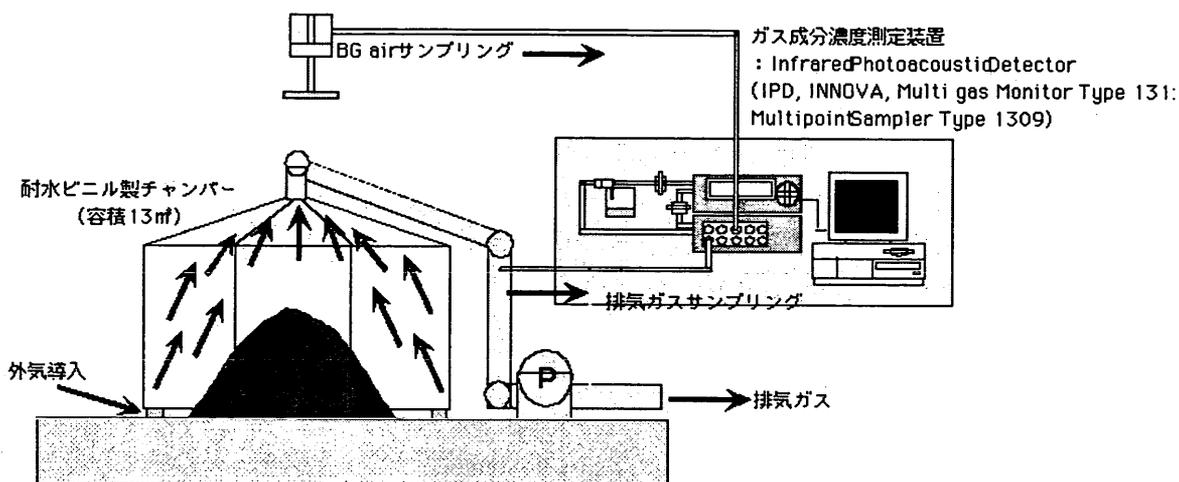


図2 温室効果ガスの測定システム

本試験で対象とするN₂OおよびCH₄の測定は、Infrared Photoacoustic Detector (IPD, INNOVA, Multi-gas Monitor Type 1312, Multipoint Sampler Type 1309) を用いて連続測定した。

発生量の算定は、導入外気(吸気)と排気の各種ガス濃度を5分毎にガスモニターで測定し、その差異と換気量(排気量)との積で揮散物質の発生量を算出した。

また、豚糞を用いて堆積規模と日射に関する各ガスの発生変動を、本装置を使って検討した。

4. 結果・考察

(1) 家畜由来メタン排出量推定のための簡易測定法の開発

① SF₆放出量安定性検定

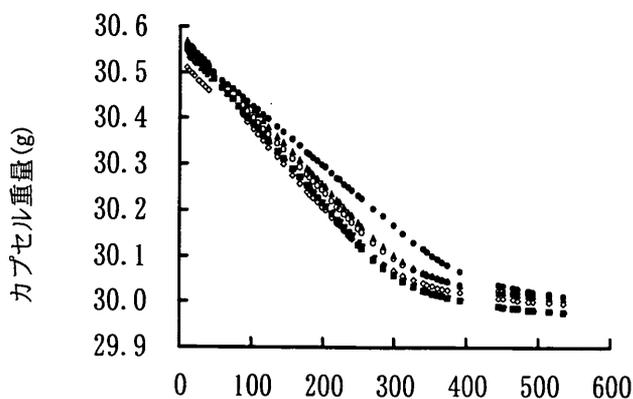


図3 SF₆のカプセルからの放出率の推移(39℃恒温槽内)

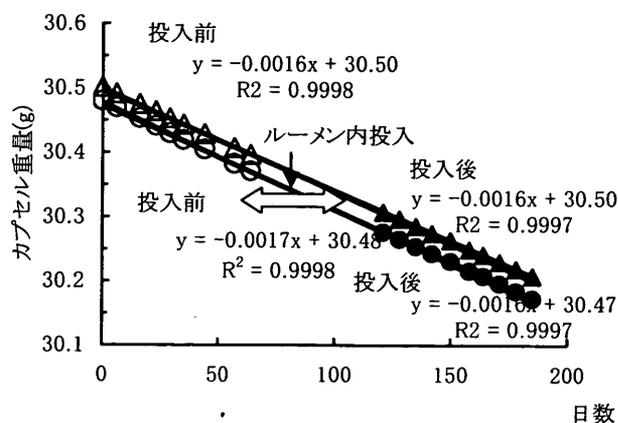


図4 ルーメン投与前後のカプセルからのSF₆の放出率の推移

SF6をカプセルに約0.5～0.7g封入し、ルーメン内温度とほぼ同じに設定（39℃）した恒温槽内に収容し、その重量変化を求めた（図3）。その結果、カプセルからのSF6放出率は約0.001～0.002 g/日の範囲で約280日間カプセル毎に一定であった。放出率が0.002g/日以上では、放出開始200日以降で放出率の低下が認められた。

次に、予め39℃恒温槽内でカプセルの重量変化を測定し、そのカプセルを家畜のルーメン内に一定期間放置した後に取り出し、再度、39℃恒温槽内でカプセルの重量変化を測定し、カプセルからのSF6の放出率がルーメン内への投与前後で変動するかどうか比較した。その結果、図4に示した通り、カプセルからのSF6放出率が投与前後で変化しないことが確認できた。

② 育成牛を用いたSF6法の検定

呼吸試験法による育成牛からのメタン発生量測定値(X)とSF6法による測定値(Y)の間には、 $Y=73.9+0.42X$ $r=0.61$ との関係が認められ、SF6法ではメタン発生量を過小に評価する傾向が見られた。

③ SF6法の改良と山羊・羊を用いた検定

SF6法によるメタン発生量測定値が呼吸試験法と合わない原因として考えられる①サンプル採取速度の安定性、②ガス採集容器の容量とガス採集時間について再検討した結果、当研究室で再調整したガス採取用流量調節装置を用いれば、ガス採集容器の内圧が-100 kPaから-50 kPaになる半日間は単位時間当たりのサンプル採取量が安定していることが確認された。

次に、改良したSF6測定装置を用いて、山羊および羊からのメタン発生量を測定し、呼吸試験法と比較した結果を図5に示した。

呼吸試験法による山羊・羊からのメタン発生量測定値(X)とSF6法による測定値(Y)の間には、 $Y=1.08X$ $r=0.93$ との関係が認められた。この結果より、反芻家畜からのメタン発生量をSF6法により、呼吸試験法と同様に測定できることが明らかとなった。しかし、①呼吸試験法と比べて測定値の変動が大きい、②家畜からのメタン発生量が多い場合には精度が落ちる傾向にある等の問題がある。したがって、SF6法により家畜からのメタン発生量を測定する場合には、①家畜頭数を増やす、②1頭当たりの測定回数を増やすなどの工夫により測定精度の維持に心がけることが重要である。

④ SF6を用いた反芻家畜からのメタン発生量測定手順

①～③の結果を基に、SF6を定量的に放出するカプセルを反芻家畜のルーメン内に投与し、呼気中に含まれるSF6とメタンの濃度を測定することによって、メタン発生量を推定する手順を次の通り取り纏めた（図6）。

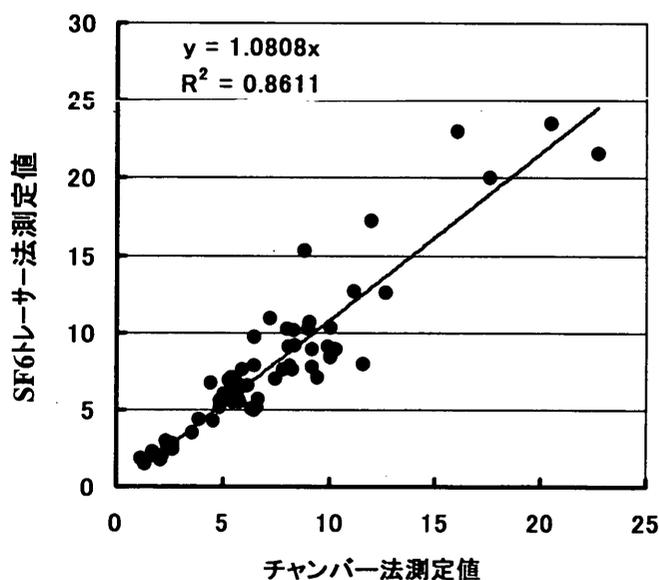


図5 チャンパー法とSF6法により同時測定した山羊・羊からのメタン発生量の比較

ア. SF6放出カプセル準備

放出カプセルは反芻家畜に吐き出されることがないよう、真鍮製のものをを用いる。製造に当たっては、カプセルを液体窒素中においてよく冷却し、そこに60ccのシリンジ2本分のSF6ガスを注入し、素早くテフロンシート、焼結フィルターで封をする。

SF6の放出速度は、39℃の恒温機内にカプセルを収容し、4～6週間程度重量変化を測定して算出する。

測定に当たっては、約1週間前に家畜に投与し、ルーメン内のガス濃度の均一化を心がける。

イ. 呼気ガス採取用流量調節装置

採取流量は、採取容器に接続する採取用配管中に設置する極微小な径のステンレス製チューブの長さによって制御する。半日用としては、SUS 1/16" × 0.1mm径のチューブ約50cmを用いると良い。流量調節装置の概略は写真3の通りである。

ウ. ガス採集容器

塩ビ製で直管状のものや家畜に背負わせるために曲がりをつけたものなど、いろいろなものがあるが、基本は気密が確実に保持できるものであればよい。

測定開始前に真空ポンプで、内圧を約-100 kPaまで下げておく。ガスの採取は、採取速度の定常性が保証される-50 kPaまでにとどめることが重要である。

エ. 圧力測定装置

ガスを採取した採集容器は密封して研究室に持ち帰り、内圧を測定する。その後、窒素ガスを注入し、+20 kPa程度まで加圧し（ガス分析計へのサンプル注入のため）、再度圧力を測定する。

オ. ガス分析装置

メタン濃度測定にはFIDガスクロマトグラフを、SF6濃度測定にはECDガスクロマトグラフを用いて行う。

カ. メタン発生量の計算

メタン発生量の計算は次式を用いて行う。

$$\text{CH}_4(\text{g/hr}) = \text{CH}_4(\mu\text{g/m}^3) \times [\text{SF}_6\text{放出速度}(\text{g/hr})/\text{SF}_6(\mu\text{g/m}^3)]$$

なお、測定時にはバックグラウンドのメタンおよびSF6濃度についても同時に測定し、補正する。

(2) 水牛からのメタン排出係数(EF)とその抑制の可能性

① メタン発生量調査

糖蜜と尿素の添加により、生稲ワラの採食量が平均0.5kg増加した。しかし、CH₄発生量には大きな変化がなく、乾物摂取量あたりの発生量として見ると、20%の低減となった（表1）。



図6 SF6トレーサー法の概念図

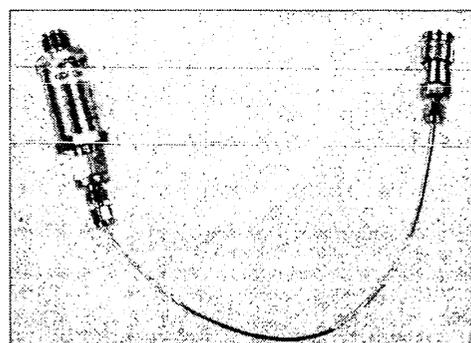


写真3 流量調節装置

粗飼料の品質が一般的に低い東南アジアを対象としたCH₄発生量抑制技術として、糖蜜・尿素のサプリメントが有効であると思われた。

メタン変換率(MCR)は、無添加区が12%、添加区が10%であり、これらの値はIPCCガイドラインの7.5%に比較してやや高く、また、給与飼料により大きく変動して

いること、一方、IPCCガイドラインよりも低い4%程度という値も報告されていることなどから、今後とも、欧米とは家畜の品種や飼養形態の異なる東南アジア等熱帯地域における実測データの収集が必要であると考えられる。

② 水牛飼養農家調査

農家の水牛飼養目的は労役に供することを意図したものと、資産あるいは食肉としての売却を目的としたものに2分された。

ア. 労役に供することを前提とした場合

標準的な飼養頭数は3頭（成畜2頭と子畜1頭）で、労役には1.5～3歳頃から成畜2頭がペアとして、6歳頃まで供用される。給与飼料は稲ワラと野草（放牧）であり、サプリメントや濃厚飼料はほとんど給与されていない。労役に供される期間は年間60～160日間で1日3～5時間程度である。成熟時体重は300～400kgと推定される。離乳時期は4～5ヶ月齢から1.5歳齢である。

イ. 売却を前提とした場合：

大規模な経営も存在するものと思われるが、今回の調査農家は2～5頭の規模であり、将来の希望飼養頭数も飼料資源や労力の問題から5～6頭程度とのことであった。給与飼料はアのグループと同じであり、濃厚飼料の導入による育成速度の改善等は図られていない。ただし、飼養期間は長く、12～15歳まで繁殖に供用するようで、体重は400～600kgに達すると推定された。離乳は6ヶ月齢から1歳齢である。

(3) インドネシアの水牛からのメタン排出量

水牛のEFについては、主に労役に供されるスワンプ型水牛と乳生産に供されるリバー型水牛の категорияに分けることが行われているが、スワンプ型についてはさらに労役用と肥育用に区分する必要がある。また、IPCCのデフォルト値の設定条件に比べて、今回の調査成績は給与飼料の品質が悪く、MCRが高かったことなどから、労役に供されるものについてのEFはデフォルト値よりもやや高い値になるものの、労役に供されない肥育用のものについてはむしろ低い値を示すものと考えられた。

また、低質粗飼料（稲ワラ）を給与している水牛からのメタン発生量として34.2 g/kgDMIを用いて、インドネシアの水牛からのメタン排出量を推定すると166 Gg/yearであり、インドネシアからの全メタン排出量（4687 Gg/年）の約3.5%と試算された。この水牛からのメタン排出量

表1 育成子水牛からのメタン発生量

	無添加区	添加区	有意差
体重, kg	162	166	NS
乾物摂取量, kgDM/day	2.63	3.13	p<0.01
メタン発生量, L/day	124.7	118.6	NS
L/kgDMI	47.7	37.9	p<0.05
g/kgDMI	34.2	27.1	p<0.05
メタン変換率, % of GE	11.9	9.8	p<0.05

は、全家畜からのメタン排出量の約23%に相当した。この割合は、インドネシアにおいて水牛の割合が全家畜の16%であることからすると、相対的に高い値であった。

さらに、インドネシアにおいて水牛からのメタン発生量低減には低質飼料への糖蜜・尿素添加が有効（表1）と考えられた。

しかし、今回の成果は第一報であり、今後、東南アジア地域におけるインベントリーの精度向上のためには、各種反芻家畜に各種飼料資源を給与した時のメタン発生量について更なる研究の蓄積が不可欠と考えられる。そのために、当プロジェクトの中で確立したSF6トレーサー法は有効なツールと期待できるものと考えられた。

(4) 家畜糞尿処理に由来する温室効果ガス排出量の推定精度の改善

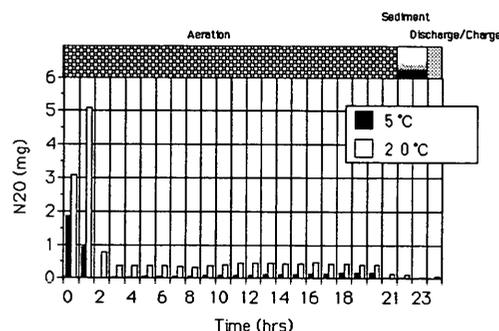
① 污水处理過程からのGHGの変動

ア. CH₄の発生量

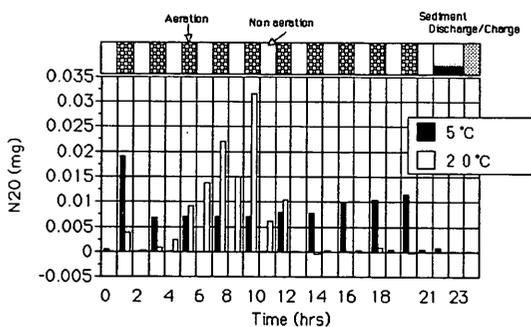
全ての試験区でのCH₄の顕著な発生は污水投入直後の2時間程度に限定される。発生総量としては連続曝気区の20℃条件で1.7mg、5℃条件で0.7mgであり、間欠曝気区では20℃条件で2.7mg、5℃条件で2.1mgであった。この発生量は投入汚水中の全有機炭素（Total Organic Carbon）の0.2-0.05%に止まる。十分な曝気処理が行われる活性汚泥処理では、酸化的条件下で強く活性が阻害されるメタン生成菌の生育は限定的で、したがって生成されるメタンもきわめて少ないものと思われる。

イ. N₂Oの発生量

N₂Oの放出は全ての試験区から確認された。20℃における従来の連続曝気条件では、試験期間中の1日の投入汚水中総窒素量（処理窒素）の約5%（17.0mg）がN₂Oとして放出されており、その発生は200mg・m⁻³を越える濃度値も観測された。N₂Oの発生は特に連続曝気区において污水投入後2時間の曝気時に顕著であった。水温が低い条件（5℃）では、硝化・脱窒活性が抑制され、窒素処理効率自体も悪いこともあり、N₂Oの発生総量は4.7mgと低いが、発生量の変動については20℃の場合と同様、初期の2時間が顕著であった（図7）。間欠曝気区では、試験期間中の1日のN₂O発生総量は0.07mg程度であり、投入汚水中に含有された総窒素の0.04%がN₂Oに変換したにすぎない。この排出量は従来法である連続曝気法と比較すると、1/50-1/100であった。間



N₂O emission during wastewater treatment under Non Limited Aeration Process (Ordinary)



N₂O emission during wastewater treatment under Intermittent Aeration Process

図7 污水处理におけるN₂O発生（時間あたり）
（NLAP, Ordinary：連続曝気区 [上] と
IAP：間欠曝気区 [下]）

欠曝気法による処理では硝酸の生成と脱窒がバランスよく進行することで、浄化効率が高いだけでなく、 N_2O 発生も抑制されていると考えられる。

ウ. $1 m^3$ の家畜尿汚水処理から発生するGHGの総量

$1 m^3$ の家畜尿汚水から発生する CH_4 と N_2O 発生を、GHGの総量としてGWPを積算して算出した(図8)。従来法である連続法では N_2O 発生が顕著であるのに対し、間欠法では、 N_2O の発生総量は温度条件によらず $0.1mgN_2O-N$ 程度であり、投入汚水中の総窒素の0.04%に抑制されていた。 CH_4 と合わせても温室効果ガス抑制に効果があることが確認された家畜尿汚水は窒素濃度が極端に高く脱窒に必要な電子供与体(有機物)が比較的不足することが発生要因のひとつと考えられる。(図8)。

(g CO₂ eq)

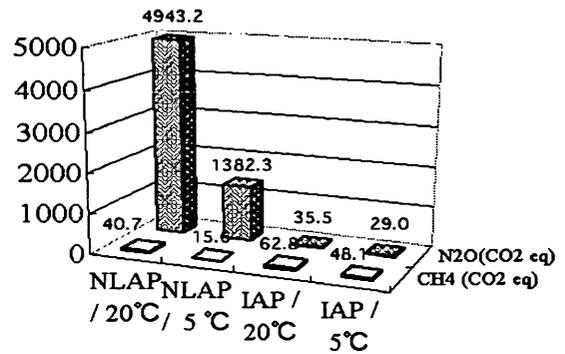


図8 $1 m^3$ の汚水 (950gの TOC(C) と207gの窒素(N)を含んでいる) の浄化処理から発生するメタンと亜酸化窒素 (NLAP: 従来法、IAP: 間欠曝気法)

②肥育豚1頭飼育あたりのふん尿由来温室効果ガス発生総量の算定

これまでの試験結果から、標準的な肥育豚1頭飼育あたりのふん尿由来温室効果ガス発生総量を算定した(図9)。汚水浄化と堆肥化処理を基本とするふん尿処理を行うケースで、肥育豚1頭の

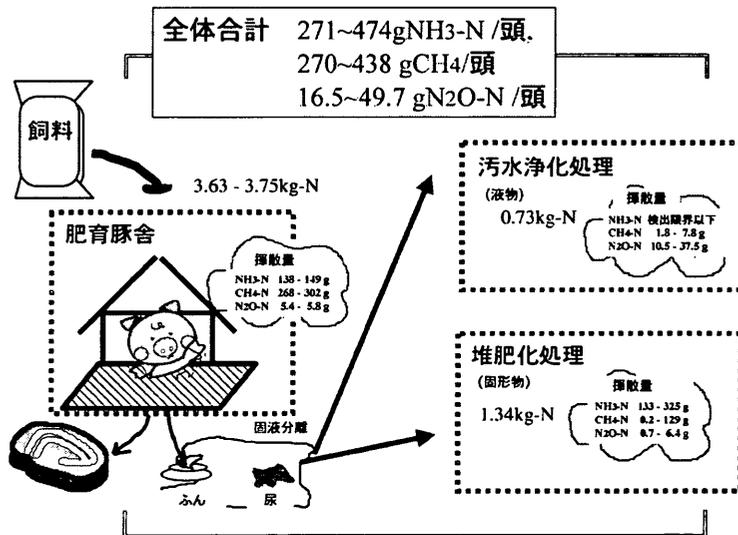


図9 1頭の肥育豚の飼養期間中に発生するアンモニア、メタンおよび亜酸化窒素(ふん尿分離型豚舎で、固形分は堆肥化し、液分については活性汚泥による浄化処理をした場合)。

飼養に伴う環境負荷ガス発生総量を算定した。肥育全期間中(8週間)の発生量を合計するとメタン

が270~438 gCH₄/頭 および 亜酸化窒素が16.5~49.7 gN₂O-N/頭と試算された。発生抑制には、N₂Oについては間欠曝気法の適用、CH₄については堆肥化を好氣的条件で行うことが有効と考えられた。

(5) 堆積型堆肥化過程からのGHG測定法の開発と発生変動要因の解析

①堆積型堆肥からの発生ガス測定手法の開発

チャンバー内で発生した揮散物質の定量評価が可能であることを確認するため、チャンバー内で対象ガスを一定流量 (CH₄ 0.35 g/5min.、N₂O 0.51 g/5min.) で放出させて各物質の測定を行った。5分毎の測定値から単位時間あたりの揮散量 (揮散量/5分) を算出して評価を行った。単位時間揮散量を積算して回収率 (%) を評価した。単位時間揮散量を積算した回収率 (%、対象ガスの総積算値/放出量 x 100) は、CH₄で平均96.6% (標準偏差4.03)、N₂Oで平均99.5%(標準偏差2.68)と野外試験装置の回収率としては良好な結果であった。また、この条件下、対象ガスの放出量と換気量 (測定時130m³/hour) から算出される単位時間当たりの発生量の理論値が測定値から得られていることを確認した。

②実規模の堆肥化試験における測定手法の制度の検証

実規模の堆肥化試験を行い、堆肥化過程で発生する揮散をとらえていることを確認するため、各測定対象ガスの一般的に用いられてきた測定手法との比較を行った (図10)。CH₄についてはFID-GC法で、亜酸化窒素についてはECD-GC法で、本手法の検証を行った。CH₄については15分毎に自動測定するガスクロマトグラフによる測定値との濃度比較を行った。両手法の測定値に大きな差異はなく、堆肥化に伴い変動するメタン濃度の変化を捉えていた。また、今回の堆肥化過程のように、CH₄濃度が数ppm程度の清浄空気より上昇する条件であれば、十分な精度の測定が可能であり、評価期間における両方式の揮散総量の差異は1%程度に止まる。

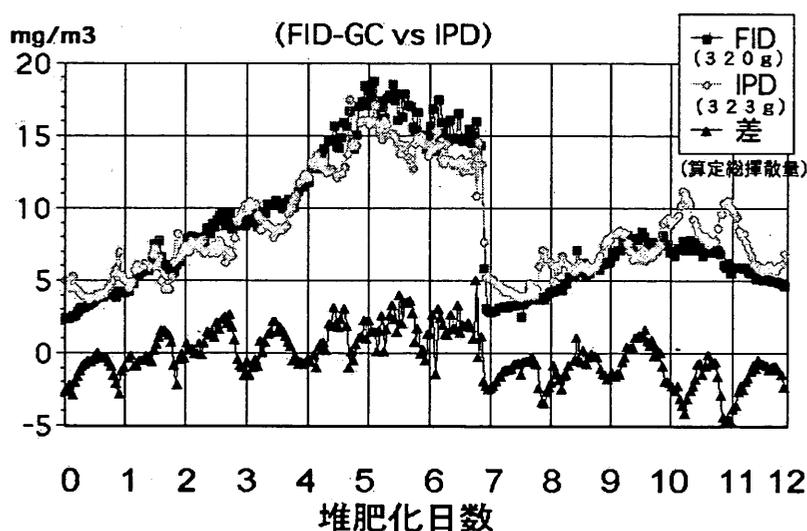


図10 両手法による堆肥化初期のメタン測定結果の比較

③堆積型堆肥化試験における各物質の揮散パターンとGHG発生総量

堆積型堆肥化試験における各物質の揮散パターンはCH₄が堆肥化初期で多くの揮散がみられ、N₂Oは堆肥化後期でピークを示した。堆積型堆肥化過程からの亜酸化窒素については、処理窒素ベ

ースで3.9%（透明区）および5.9%（遮光区）であり、強制通気での最大発生（最低通気量条件）が0.5%足らずであったのに比して著しく高かった（図11）。CH₄については、堆積型では投入有機物（VS）ベース（gCH₄/gVS）で0.24～0.28%であったが、強制通気では通気量を高めると0.001%まで低下した（表2）。

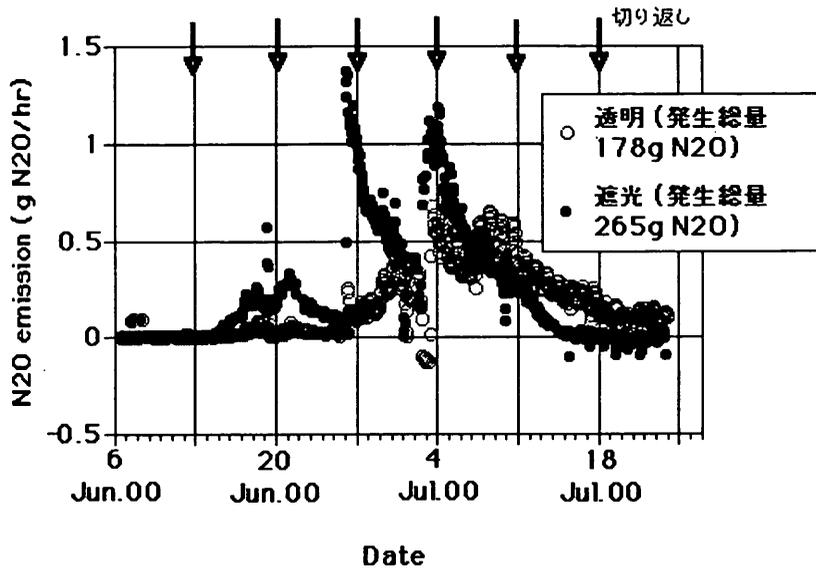


図11 日射条件の違う堆積堆肥化過程から発生する亜酸化窒素の変動

表2 各種の豚糞堆肥化過程から発生する温室効果ガスの発生係数

		CH ₄	N ₂ O-N	備考
		投入有機物(VS)に対する放出%	投入窒素(TN)に対する放出%	条件の詳細
強制通気堆肥化	通気量小	0.356	0.480	19.3L/m ³ /min、小型装置
	通気量大	0.001	0.050	76.9L/m ³ /min、小型装置
堆積型堆肥	堆積規模中	0.186	4.651	779kg堆積、チャンバ、透明
	堆積規模小	0.104	3.713	320kg堆積、チャンバ、透明
天日堆肥		0.240	3.900	330kg堆積、チャンバ、透明
遮光条件		0.280	5.900	330kg堆積、チャンバ、遮光

以上の結果から、堆積規模や手法によって環境負荷ガス発生は大きく変動することが明らかとなり、インベントリー精度向上に加えて発生抑制を目指し、変動の要因の検討を急ぐ必要があると考えられた。

5. 本研究により得られた成果

家畜由来メタン（CH₄）排出量の簡易測定法として注目される六フッ化イオウ（SF₆）法を世界的な基準測定法であるチャンバ法と比較しながら利用可能とするとともに、インドネシアにおいて水牛からのメタン発生量について検討し、同国の水牛からのメタン排出量について試算した。

その結果、①家畜由来CH₄測定のためのインデックスガスであるSF₆の家畜の胃内からの放出速

度の安定性が確認され、チャンパー法によるCH₄の測定値(X)とSF₆法による値(Y)との間には、 $Y=1.08X$ $r=0.93$ との関係が認められ、SF₆法みよりCH₄発生量を推定できることが示された。②水牛からのCH₄発生に関する係数(EF)は10~12%と推定され、飼料構成により大きく異なることが示唆された。③低質粗飼料(稲ワラ)を給与している水牛からのCH₄発生量として34.2 g/kgDMIを用いて、インドネシアの水牛からのCH₄排出量を推定すると166 Gg/yearであり、インドネシアからのCH₄排出量の約3.5%と試算された。

次に、家畜排泄物の処理(汚水処理、堆肥化)過程から排出される温室効果ガス(GHG)の測定精度の精緻化と排出量削減技術について検討した。

その結果、④汚水浄化処理過程から発生するCH₄の放出は極めて低く、発生量は投入汚水中の全有機体炭素の0.2~0.05%に止まる。亜酸化窒素の放出は全ての試験区から確認され、20℃で従来法では、処理窒素の約5%が亜酸化窒素(N₂O-N)として放出されており、その発生は200 mgm⁻³を越える値も観測された。⑤これまでの試験結果から、標準的な肥育豚1頭飼育あたりのふん尿由来温室効果ガス発生総量を算定した。汚水浄化と堆肥化処理を基本とするふん尿処理を行うケースで、肥育豚1頭の飼養に伴う環境負荷ガス発生総量を算定した。肥育全期間中(8週間)の発生量を合計するとCH₄が270~438 gCH₄/頭 および 亜酸化窒素が16.5~49.7 gN₂O-N/頭と試算された。発生抑制には、N₂Oについては間欠曝気法の適用、CH₄については堆肥化を好气的条件で行うことが有効と考えられた。⑥堆積型堆肥化過程からのN₂O排出量は、処理窒素ベースで3.9~5.9%であり、強制通気での最大発生(最低通気量条件)が0.5%足らずであったのに比して著しく高かった。CH₄排出量は投入有機物(VS)ベース(gCH₄/gVS)で、堆肥型では0.24~0.28%であり、強制通気型では通気量に影響され、通気量大で0.001%、通気量少で0.356%であった。堆積規模や手法によって環境負荷ガス発生は大きく変動することが明らかとなり、インベントリー精度向上に加えて発生抑制を目指し、変動の要因の検討を急ぐ必要性が明らかとなった。

6. 引用文献

- ① BPS (Badan Pusat Statistik) Republic of Indonesia. Animal Husbandry Statistics.
(<http://www.bps.go.id/statbysector/agri/ternak/table3.shtml>)
- ② K.A. Johnson, M. Huyler, H. Westberg, B. Lamb, and P. Zimmerman: Environmental Sci. & Technol., 28, 359-362 (1994)
“Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF₆ tracer technique”
- ③ T. Osada, Hans Benny Rom and Preben Dahl.: Transaction of the ASAE., 41, 1109-1114 (1998).
“Continuous measurement of nitrous oxide and methane emission in pig units by Infrared Photoacoustic Detection”
- ④ H. Westberg, K.A. Johnson, M.W. Cossalman, and J.J. Michal: Washington State University Pullman, Washington, pp41 (1998)
“A SF₆ tracer technique: Methane measurement from ruminants”

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

<学術誌（査読あり）>

- ① T.Osada, K.Kuroda and M.Yonaga: The Japanese Society of Waste Management Experts, 2, 1, 51-56 (2000)
“Nitrous oxide, Methane and ammonia emissions from composting process of swine waste”
- ② T.Osada: Asian-Australasian Journal of Animal Science, 13, 698-701 (2000)
“The processing of livestock waste through the use of activated sludge. -Treatment with intermittent aeration process”
- ③ 長田 隆: 日本畜産学会報, 72, J167-J176 (2001)
「家畜排泄物からの環境負荷ガスの発生について」
- ④ M. Islam, O. Enishi, A. Purnomoadi, K. Higuchi, N. Takusari and F. Terada: Small Ruminant Research, 42, 49-60. (2001)
“Energy and protein utilization by goats fed Italian ryegrass silage treated with molasses, urea, cellulase and cellulase+lactic acid bacteria”
- ⑤ Osada, T. & Fukumoto, Y. : Water Science and technology, 44(9), 79-86 (2001)
“Development of new dynamic chamber system for measuring harmful gas emission from composting livestock waste”
- ⑥ 長田 隆 : 日本畜産学会誌, 71(8), 167-176 (2001)
「家畜排泄物からの環境負荷ガスの発生について（総説）」
- ⑦ 長田 隆 : 畜産草地研究所研究報告 2号, 15-62 (2002)
「豚のふん尿処理に伴う環境負荷ガスの発生」
- ⑧ Y. Fukumoto, T.Osada, D.Hanajima and K.Haga : Bioresource Technology, 89(2) 109-114 (2003)
“Patterns and quantities of NH₃, N₂O and CH₄ emissions during swine manure composting without forced aeration - effect of compost pile scale”

<学術誌（査読なし）>

なし

<書籍>

- ① F. Terada: Greenhouse Gases and Animal Agriculture (Edited by J.Takahashi and B.A.Young) ELSEVIER Science B.V., 21-27 (2002)
“Global warming and animal agriculture”
- ② M. Kurihara et al. : Greenhouse Gases and Animal Agriculture (Edited by J.Takahashi and B.A.Young) ELSEVIER Science B.V., 171-174 (2002)
“The prediction of methane conversion rate from dietary factors”
- ③ T. Osada and K.Haga: Greenhouse Gases and Animal Agriculture (Edited by J.Takahashi and

B.A.Young) ELSEVIER Science B.V., 271-274 (2002)

“Environmental load gas emissions from swine waste treatment”

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

- ① M. Islam, A Oshibe and F. Terada: The International Conference on Tropical Agriculture Technology for Better Health and Environment, Bangkok, Thailand (2000)
“Processing of Tropical Agro-Industrial Byproduct to Complete Feed - An Approach to Increase Livestock Productivity and Reduce Methane and Nitrogen Emitted from Ruminants”
- ② 長田 隆, 本田善文, 福本泰之, 白石 誠: 第11回廃棄物学会大会 (2000)
「バイアル瓶を採気容器としたガスサンプリングによる堆肥化処理における温暖化ガスの調査」
- ③ 寺田文典: 第98回日本畜産学会大会 (2001)
「反芻家畜におけるメタンガス産生の制御」
- ④ T. Osada, K.Haga: Proceedings of the 1st International Conference on Greenhouse Gases and Animal Agriculture, 407-410 (2001)
“Environmental load gas emissions from swine waste treatment”
- ⑤ T. Osada: Proceedings of International Workshop on Recent Technologies of Composting and Their Application 4.1 - 4.15 (2001)
“Gas Emission from Composting Animal Waste”
- ⑥ F Terada: Proceedings of Tsukuba Workshop - Development of New Monitoring Method for Methane Emission From Ruminants, 22-24 (2001)
“Methane Emission from Animals in Asia-Traits and Issues”
- ⑦ F Terada: Proceedings of the 1st International Conference on Greenhouse Gases and Animal Agriculture, 21-26 (2001)
“Global warming and animal agriculture in Japan”
- ⑧ 長田 隆, 福本泰之, 道宗直昭: 第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 365-367 (2002)
「家畜排泄物堆肥化過程からの環境負荷ガス発生に及ぼす日射の影響」
- ⑨ A. purnomoadi, E. Rianto and F. Terada: Proceedings of 3rd International Symposium on Tropical Animal Production (2002)
“Methane emission from buffalo fed rice straw in Indonesia”
- ⑩ 長田 隆, 酪農学園大学酪農学科特別講義 (平成14年5月28日) 講義資料 1-3 (2002)
「家畜ふん尿処理に伴う環境負荷ガスの発生」
- ⑪ 長田 隆, アグロバイオロジー先端セミナー (農林交流センター主催、平成14年7月) セミナー資料 1-8 (2002)
「堆肥化過程における温暖化ガスの発生モニタリングシステム」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

長田 隆：廃棄物学会奨励賞（平成13年度）

「家畜のふん尿に起因する環境負荷ガスのインベントリー作成に関する研究」

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

データの一部は「環境省温室効果ガス排出量算定に関する検討結果総括報告書（14年8月）」においてインベントリーデータとして採用された。