

B-16 地球温暖化抑制のためのCH₄、N₂Oの対策技術開発と評価に関する研究

(8) 家畜及び家畜糞尿処理におけるCH₄、N₂O排出量推定に関する研究

研究代表者 農林水産省畜産試験場 栄養部 反すう家畜代謝研究室 寺田文典

農林水産省 畜産試験場

栄養部 反すう家畜代謝研究室 寺田文典・永西 修・田鎖直澄

飼養環境部 廃棄物資源化研究室 田中康男・長田 隆・鈴木一好・和木美代子

平成11年度合計予算額 3,904千円

(平成11年度予算額 3,904千円)

[要旨]

我が国およびアジアからのメタン(CH₄)および亜酸化窒素(N₂O)発生量推定手法の改善を図るため、低質飼料主体の飼養条件下における家畜からのCH₄放出量の測定データを収集するとともに、家畜排泄物取り扱いの過程において発生するCH₄、N₂Oの発生原単位について検討した。

(1) 家畜由来CH₄の発生量推定精度の改善にむけての基礎的データを収集するために、ヤギおよび水牛によるCH₄発生量の測定実験を実施した。その結果、① 稲ワラを主体とした低質飼料を摂取しているヤギからのCH₄発生量は乾物摂取量当たり30.4±7.5 L、可消化有機物当たり53.2±9.3 Lであり、良質乾草を主体とした場合に比べて幾分増加する傾向にあることが示された。また、アンモニア処理によってCH₄発生量は増加したが、尿素処理の場合には増加しなかった。解繊などの物理的処理による効果も認められなかった。② 水牛からのCH₄発生量は、乾物摂取量当たり18.8 L、総エネルギー摂取量に対する割合は4.2%であった。

(2) 糞尿処理過程からのCH₄、N₂O発生量の原単位の検討においては以下の結果が得られた。① 豚糞堆肥化過程において発生するCH₄およびN₂O揮散総量は通気量との間で相関が高く、特に、通気量が20 L (L m⁻³min⁻¹ 以下Lと略す)程度の場合に比べ、60 Lの場合ではCH₄とN₂Oの揮散量は1/5～1/20 と低く抑えられていた。また、N₂Oの発生は堆肥化混合物中に含有される硝酸・亜硝酸態窒素の総量との間に高い相関が見られた。② 適切な通気条件下では、1 m³の糞尿堆積物の処理過程から発生するCH₄の発生量は5～15g、N₂Oは1～4g程度と算定された。

[キーワード]

反芻家畜、豚、糞尿処理、メタン、亜酸化窒素

1. 序

地球温暖化を防止するためには個々の温室効果ガス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。そのため、気候変動枠組み条約締結国は、毎年、自国からの温室効果ガスの排出量(インベントリ)を報告することが義務づけられており、また、開発途上国への研究協力も求められている。温室効果ガス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(CH₄)ガス、亜酸化窒素(N₂O)ガス他の6種類であり、そのうち、CH₄の排出に対しては反芻

家畜が大きく関わっているとされ、その発生量は全地球からのCH₄発生量の約16%、人間活動に由来するCH₄発生量の約1/4を占めると言われている¹⁾。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に努める必要がある。

2. 研究目的

我が国の家畜からのCH₄排出量の推定精度の改善を図るとともに、アジア地域における家畜由来CH₄排出量の推定方法について検討する。我が国の家畜からのCH₄排出量の推定方式は家畜の乾物摂取量に基づくものであり、我が国の飼養環境下においては高い適合性を示す²⁾ものの、飼養環境や飼料構造が大きく異なるアジアにおいては何らかの補正を施す必要があるものと考えられる。また、アジアにおいて多く飼養される水牛や瘤牛 (Bos Indicus) はCH₄排出源としてもその存在が大きいにも関わらず、CH₄排出量に関する基礎的な知見はほとんど得られていない。

そこで、より精度の高いアジアにおけるインベントリ作成のために、まず、アジアで多く利用されている低質な粗飼料を多給した場合の反芻家畜からのCH₄排出量を測定するとともに、CH₄発生量に関する知見がきわめて少ない水牛に関するデータを収集する。

また、家畜排泄物は、その取り扱いの過程から発生する微量ガス (アンモニア、CH₄、N₂O等) が広域の環境に負荷となる事が懸念されており、その実態解明が緊急課題となっている³⁾が、国内外の研究事例のなかにも発生原単位として試算に使用可能なデータは僅かである。家畜1頭あたりから排出される環境負荷ガス発生原単位が簡便に算定され、畜産系からの環境負荷ガス放出総量を正確に推定できるよう、家畜排泄物の取り扱いの各過程から発生する環境負荷ガスの発生原単位を検討する必要がある。

このために、小型の処理装置を用い、糞尿の主要な処理技術であり、発生が大きいと推定される堆肥化処理からの発生について検討する。

3. 研究方法

(1) 家畜由来CH₄発生量推定精度の改善

① 日本在来種ヤギのべ60頭を供試し、馴致期1週間、予備期1週間、本試験期1週間とするガス代謝試験を維持給与レベルにおいて、当場の中家畜用呼吸試験装置 (写真右) を用いて実施した。給与飼料は、稲ワラを主体としたもので、稲ワラに対する物理的あるいは化学的処理の効果についても予備的な検討を行った。個々の実験における供試頭数と給与飼料の概略について表1に示した。

また、維持レベルにおいて良質乾草を主体とした飼料を在来ヤギのべ26頭に給与し、そのCH₄発生量を測定、稲ワラ主体の場合の値と比較検討した。給与飼料は、粗飼料としてアルファルファヘイキューブ、生育ステージの異なるイタリアンライグラス乾草ウエハーを用い、トウモロコシ、大豆粕よりなる配合飼料を0~60%の範囲で併給した。

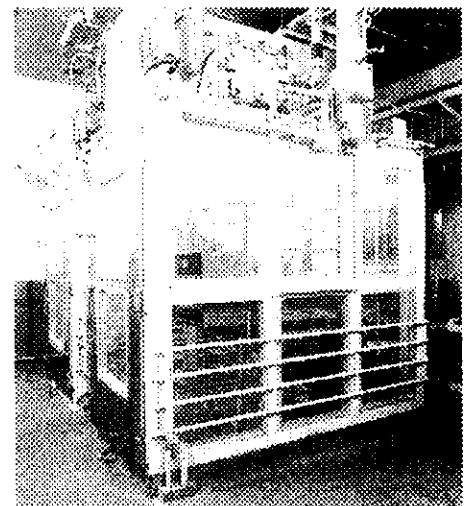


表1 各実験の処理と供試頭数, 飼料構成

実験No.	供試頭数	給与飼料の内容
1. 稲ワラの品種・系統 間差	どんとこい	4 稲ワラ + 大豆粕
	コシヒカリ	4
	アキチカラ	4
	北陸147	4
2. 尿素添加	対照区	3 稲ワラ85% + 配合飼料16%
	添加区	3 " + 配合飼料 15% + 尿素 1%
3. 穀類の添加	無添加	4 稲ワラ80%+大豆粕20%
	大麦	4 稲ワラ40%+大豆粕10%+大麦50%
	玄米	4 " + " + 玄米50%
	トウモロコシ	4 " + " + トウモロコシ50%
4. 解繊処理	処理区	4 解繊処理:
	対照区	4 稲ワラ+大豆粕
5. アンモニア処理	処理区	4 アンモニア処理(3%):
	対照区	4 稲ワラ70%+大豆粕30%
6. 尿素処理	処理区	4 尿素処理:
	対照区	4 稲ワラ60%+大豆粕40%

② 水牛のべ16頭を供試してマスク法によりCH₄発生量を測定した。具体的には、給餌後3時間間隔で12分間の呼気ガスの採取とガス流量の計測を行い、赤外線式メタンガス分析装置によってCH₄濃度を測定した。実験に用いた給与飼料と供試頭数を表2に示した。

表2 各試験区の供試頭数, 飼料の概要について

試験区	供試頭数	給与飼料構成(%)		粗蛋白質 含量(%)	乾物摂取量 g/kg ^{0.75}
		ルジ-グラス	大豆粕		
1	4	100	0	2.6	49
2	4	92.1	7.9	6.1	65
3	4	84.3	15.7	9.7	79
4	4	76.4	23.6	13.3	78

(2) 糞尿処理過程からのCH₄, N₂O発生量の原単位の検討

①堆肥化処理からのCH₄, N₂O発生

新鮮な家畜排泄物を採取し、固形分を堆肥化試験に供した。堆肥化においては、新鮮家畜糞の堆肥化が終了(分解性有機物の指標であるBODが一定値に収束)するまでの全堆肥化期間を単位期間とした。発生するガスの総量を押さえるため、密閉に近い小型試験装置を試作して連続的に発生するガス濃度を測定した。試験場内の肥育豚の新鮮糞尿を供試材料として用いた(表3)。堆肥化試験においては豚舎より採取した糞に適当量の副資材を混合し、水分およびかさ密度の調整を行った後、堆肥化試験に供した。

表3 堆肥化資材の性状 (平均と標準偏差)

項目	単位	豚糞 (n =14)	完熟豚糞 (n = 7)	段ボール裁断片 (n =2)
固形分	%	29.3±2.0	65.0±1.2	92.7
有機物	%	25.0±1.4	46.7±5.4	87.2
全窒素	% D.M.	3.5±0.5	3.72±0.02	0.17
NH ₄ -N	% D.M.	0.43±0.05	0.17±0.13	not detected
NO _x -N	% D.M.	not detected	0.17±0.06	not detected
pH (2N HCl)	-	7.06±0.05	7.58±0.18	6.05

堆肥化試験装置：図1に示す小型堆肥化装置を用いて堆肥化試験を行った。本装置は羽賀ら⁴⁾が用いた装置と基本的に同様であるが、より実規模での堆肥化反応を再現できるように反応槽容積を大きくし、断熱を向上させたものである。

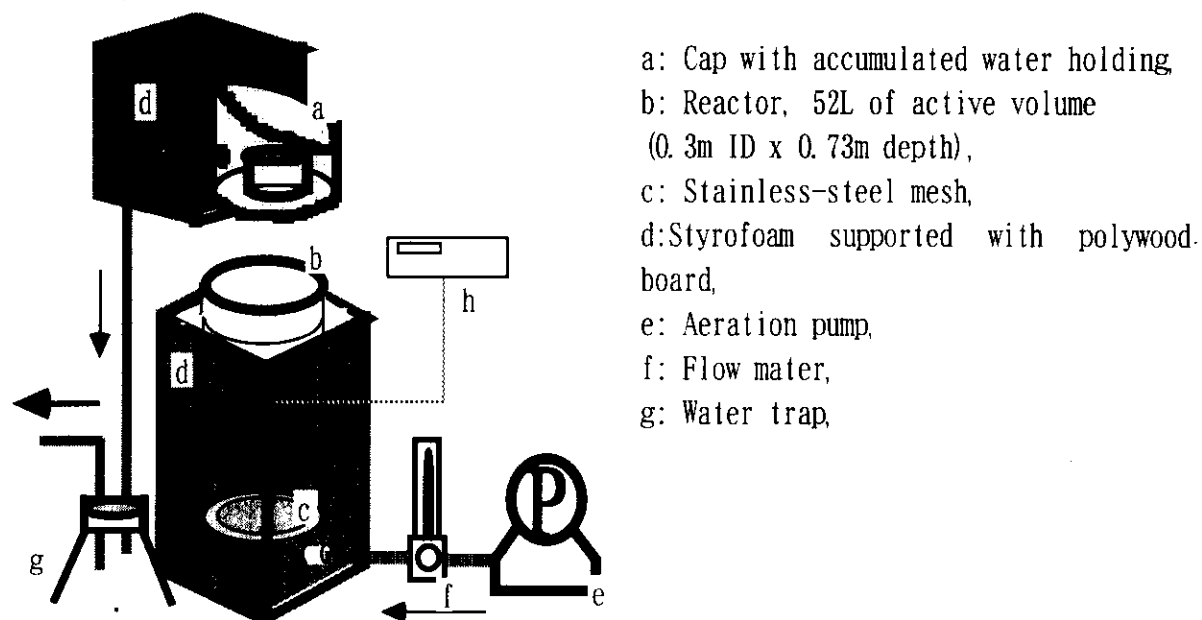


図1 小型堆肥化試験装置

②汚水浄化処理からのCH₄, N₂O発生量の原単位の検討

汚水処理試験においては豚舎において同じ豚から別々に採取した糞と尿を適当な比率で混合、0.5mmのふるいで粗大固形物を濾過した後の汚水について検討した。ここで用いられた汚水は、羽賀ら⁵⁾が行った、農家の豚舎排水実態調査における平均的な豚舎汚水と同様の性状であった(表4)。試験は、通常の畜産農家で行われている回分式活性汚泥処理の条件に準じて行われた。BOD容積負荷 0.5 kg m⁻³ day⁻¹ とし、HRTを3日(水理学的滞留時間：処理槽の1/3を毎日処理水として引き抜き、新たな汚水を投入する)に定め、水温10℃の条件で行った。

表4 試験に供試した汚水の性状と各試験区の汚水処理効果（処理期間中の平均水質，mg/L）

項目	投入汚水	間欠曝気区 （1時間毎）	連続曝気区
		処理水	処理水
BOD	1670	25.4	109.9
Total N	303	71.5	128.9
NH ₄ -N	163	65.7	48.9
NO _x -N	ND	5.8	78.6

汚水処理試験装置：図2に示す回分式活性汚泥装置を用いて汚水処理試験を行った。試験槽は恒温水槽内に設置され、温度条件を制御できる。また、排気（曝気槽内を通過し、放出される気体）が採取できるように金属製のふたを設置した。

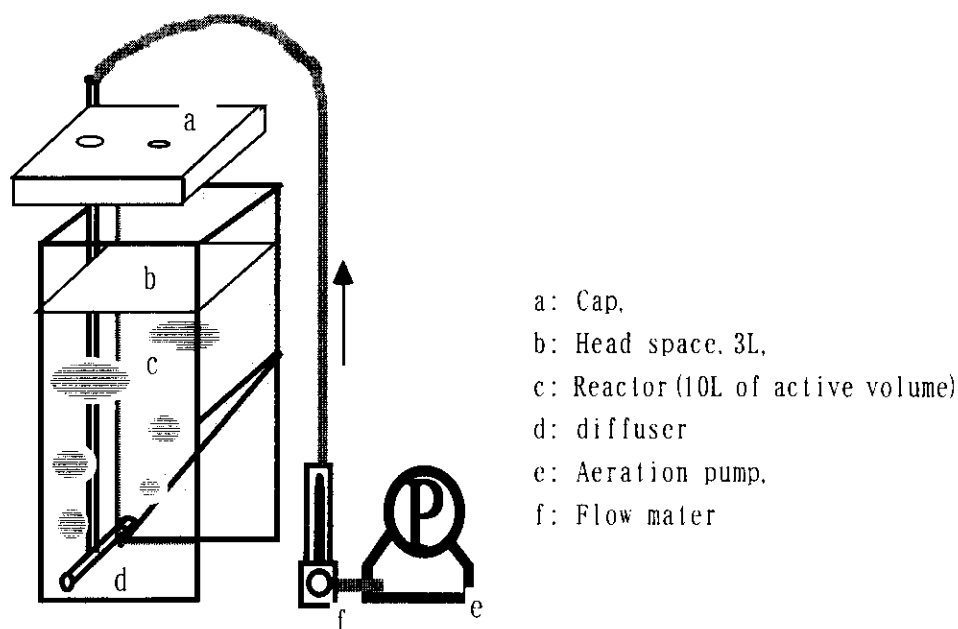


図2 汚水処理試験装置

4. 実験結果と考察

(1) 家畜由来CH₄発生量推定精度の改善

① 稲ワラを主体とする低質飼料給与時のCH₄発生量の推定

1) 品種・系統間差

実験No. 1で供試した稲ワラの稈長はコシヒカリが87cmで最も長く、次いで北陸147号の69cm、アキチカラ68cm、どんとこい63cmであり、a当たりの乾物収量は順に、140kg、137kg、96kg、119kgであった。消化率は北陸147号が最も高く、次いでどんとこい、アキチカラ、コシヒカリの順であった。CH₄/GE、CH₄/DDMIは消化率と同様の傾向はあったものの、CH₄/DOMIではほとんど品種間差が認められなかった。

2) 給与飼料構成の影響

・尿素的添加 (CP水準の影響) 飼料中への尿素的添加によりCP水準を高めた場合、栄養価が明らかに高まったが、CH₄/GE、CH₄/DMIに差はみられなかった。

・穀類の添加効果 穀類の添加により給与飼料全体の栄養価が改善され、CH₄/GEは増加するが、CH₄/DMIに差はみられなかった。

3) 物理的処理

物理的処理は工程が簡便であり、稲ワラの栄養価の改善効果が得られれば実用的な方法となる可能性がある。そこで、解繊による稲ワラの栄養価とCH₄発生量に及ぼす影響について検討したが、解繊による栄養価の向上は期待できず、CH₄発生量にも差はみられなかった。

4) 化学的処理

・アンモニア処理 低質飼料の栄養価改善効果が実証されているアンモニア処理は、今回の実験においても栄養価については大きな改善効果が示されており、CH₄発生量も増加するものの、CH₄/DMIではわずかに増加する程度にすぎなかった。

・尿素的処理 栄養価の改善効果はアンモニア処理ほど大きくはないものの、CH₄発生量は抑制され、CH₄/DMIも有意ではないが、低下している。尿素的処理は特殊な機械装備を必要とせず、コストも安いことからアジアにおけるCH₄発生抑制技術としては最も有望であると考えられるが、尿中窒素排泄量の増加が懸念される。

表3 低質飼料給与時のメタン発生量

実験No.		GE消化率	CH ₄ /GE	CH ₄ /DMI	CH ₄ /DOMI
1. 稲ワラの品種間差	どんとこい	63.0±1.3	7.04±1.20	29.7±5.1	53.2±7.9
	コシヒカリ	61.0±1.0	6.82±0.28	29.0±1.2	52.9±2.4
	アキチカラ	61.2±2.1	6.77±0.60	28.7±2.6	52.7±3.5
	北陸147号	65.3±2.5	7.70±0.77	31.9±3.2	55.7±3.6
2. 尿素的添加	対照区	54.0±1.6	7.19±0.27	29.5±1.1	62.1±1.4
	添加区	56.6±2.4	7.38±0.33	30.2±1.4	60.3±2.5
3. 穀類の添加	無添加	58.2±0.3	5.99±0.60	27.6±2.8	58.8±6.2
	大麦	71.3±2.4	7.78±1.26	37.2±6.0	56.6±7.9
	玄米	73.5±2.3	8.93±0.98	42.6±4.6	62.2±5.4
	トウモロコシ	76.0±1.2	7.48±1.35	38.8±4.4	55.2±6.9
4. 解繊処理	対照区	56.0±1.8	4.79±0.15	20.5±0.7	41.7±0.1
	処理区	56.7±1.7	5.29±0.59	22.5±2.5	45.3±4.7
5. アンモニア処理	対照区	62.5±2.2	7.61±0.43	33.1±1.9	57.6±2.3
	処理区	70.4±0.6	9.15±0.14	40.4±0.6	62.2±0.9
6. 尿素的処理	対照区	60.8±1.4	4.62±0.55	21.1±3.3	38.3±6.6
	処理区	63.0±2.1	4.32±0.33	18.7±1.4	31.6±3.3

以上、稲ワラを主体とした飼料を給与した6回の実験におけるCH₄の発生量の平均値は乾物摂取量当たり30.4±7.5 L、可消化有機物当たり53.2±9.3 Lであり、良質乾草を主体とした26例の平均値に比べて幾分増加する傾向にあった。また、両者のエネルギー消化率に対するCH₄/GEの値の

変化を比較すると、エネルギー消化率が低い場合は大きな違いがないものの、消化率の上昇に伴い、有意ではないが差が大きくなる傾向にあった（図3）。

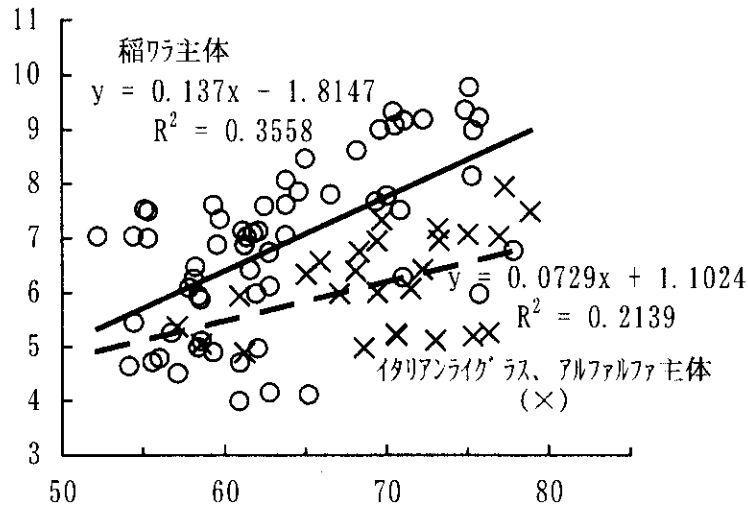


図3 稲ワラまたは寒地型牧草主体飼料給与時のエネルギー消化率とメタン変換効率(MCR)

② マスク法によって測定した水牛からのCH₄発生量を表4に示した。給与飼料中の粗蛋白質含量が増加するにしたがって乾物摂取量が増加しており、これに伴い、1日あたりのCH₄発生量も増加している。

乾物摂取量あたりのCH₄発生量についてみると、粗蛋白質含量が極端に少ない1区の値は他の区に比べて低いものの統計的に有意ではなく、低質粗飼料を主体とした飼料を摂取している水牛からの乾物摂取量あたりのCH₄発生量は平均で18.8L、その総エネルギー摂取量に対する割合(CH₄/GE)は4.2%であった。ヤギを用いた実験1では、CP水準の上昇により栄養価が改善、CH₄/GEも明らかに増加する傾向を示したが、水牛の場合は栄養価の改善は明らかであったものの、CH₄/GEの増加は実験1ほど顕著ではなかった。

これらの値は、昨年度の「B-51 温室効果ガスの人為的な排出源・吸収源に関する研究」において報告されている17Lとほぼ同様であり、従来、我が国で報告されているホルスタイン種牛、黒毛和種牛等による値や、Crutzenら⁶⁾の算定値よりも低いものであった。

表4 水牛からのメタン発生量

試験区	BW	GE消化率	CH ₄	CH ₄ /GE	CH ₄ /DMI
1	430	46.9 ^b	76 ^b	3.7	16.5
2	424	52.8 ^a	125 ^a	4.5	20.6
3	430	53.0 ^a	150 ^a	4.4	20.2
4	434	57.6 ^a	139 ^a	4.0	18.8

ただし、水牛によるCH₄発生量測定に際して、十分なトレーニングを行ったものの、マスク装着時にCH₄の放出を抑制する傾向がみられることから、これらの値は、若干、過小に評価している可

能性も考えられる。このため、水牛からのCH₄発生量の測定精度を高めるためには牛と水牛の暖気排出パターンの違いについて、もう少し検討する必要がある。

(2) 糞尿処理過程からのCH₄, N₂O発生量

①堆肥化過程におけるCH₄, N₂O発生量

1) 発生総量に及ぼす通気量の影響

堆肥化過程において発生するCH₄およびN₂O揮散総量と通気量の関係を図4, 5に示した。揮散総量は通気量と相関が高く、特に、通気量が20 L (L m⁻³min⁻¹ 以下Lと略す)程度の場合に比べ、60 Lの場合ではCH₄とN₂Oの揮散量は1/5~1/20 と低く抑えられていた。適切な通気条件下では、1 m³の糞尿堆積物の処理過程から発生するCH₄の発生量は5~15g, N₂Oは1~4g程度と算定される。嫌気的条件(部分的にせよ)が必要とされるCH₄とN₂Oの発生は、通気量を上げることによって抑制可能と考えられた。しかし、通気量を上げることによってNH₃の揮散総量が増大した。

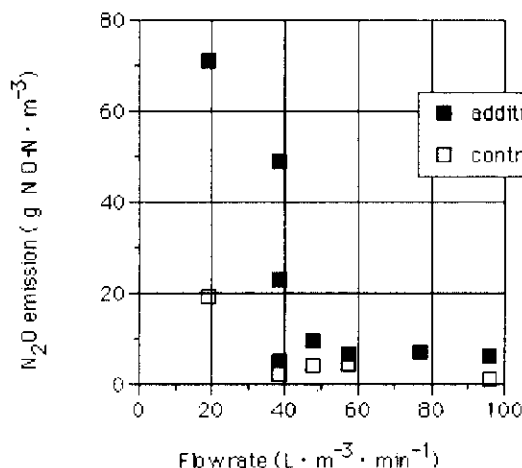


図4 堆肥化過程の通気量とメタン発生量の関係

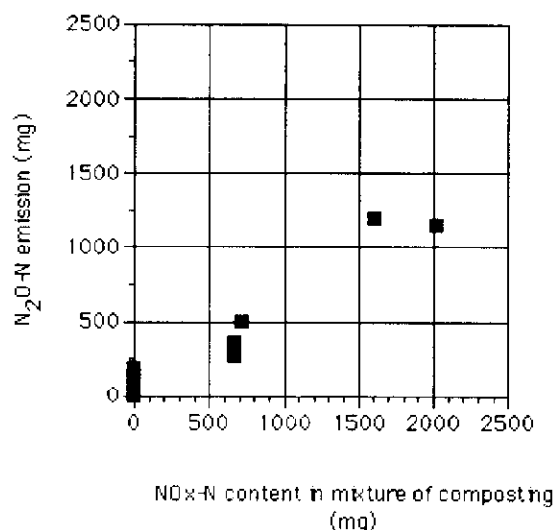


図5 堆肥化過程の通気量と亜酸化窒素発生量の関係

2) 堆肥化過程における各気体の消長

堆肥化過程において測定されたNH₃, CH₄およびN₂O揮散の一般的な消長を図6に示した。CH₄とN₂Oについては、堆肥化初期7~10日における発生が高い。堆肥化終了時までの各気体揮散総量の80-90%が堆肥化初期に揮散した。堆肥化初期の約10日間に極めて多量のNH₃揮散も見られる。この発生のピークは堆積後約24時間後で、切り返し後にも再度増大するが急速に減少した。

3) N₂Oの発生要因

N₂Oの発生は堆肥化混合物中に含有される硝酸・亜硝酸態窒素の総量と極めて高い相関が見られた(図7)。N₂Oの発生時期が堆肥化初期に高いことを考えあわせると、揮散の大部分が脱窒による可能性が高い。従来行われている戻し堆肥中の硝酸等がN₂Oの発生に関与していることが推測さ

れる。

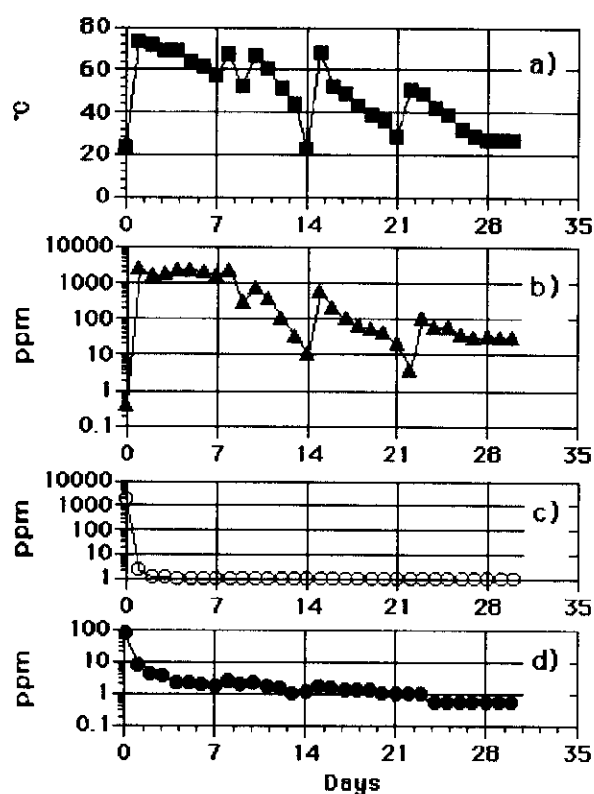


図6 堆肥化過程における品温変化 (a) と揮散物質 (b:NH₃, c:CH₄, d:N₂O) の消長

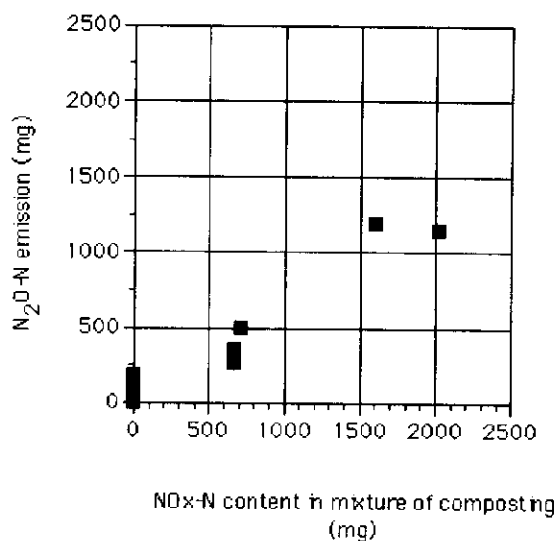


図7 亜酸化窒素の発生量 (Y軸) と堆肥化混合物中のNO_x-N含有量の関係

②汚水浄化からのCH₄, N₂O発生量

本年度は、汚水浄化装置を設置した施設の温度制御が不調であったため、十分な実験が組めなかった。限られたデータではあるが、全ての試験区からN₂Oの放出が確認された。特に従来の連続曝気条件では、処理窒素の約30%がN₂Oとして放出されており、その発生は1000ppmvを越える値も観測された。家畜尿汚水は窒素濃度が極端に高く、処理水は硝酸濃度が高くなる。この条件下では脱窒に必要な水素供与体(有機物)が比較的不足すること要因のひとつと考えられる。間欠曝気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、N₂O発生も抑制されていると考えられる。N₂Oの放出は、間欠曝気では従来法の1/50であった。

5. 本研究により得られた成果

我が国およびアジアからのCH₄およびN₂O発生量推定手法の改善を図るため、低質飼料主体の飼養条件下における家畜からのCH₄放出量の測定データを収集するとともに、家畜排泄物取り扱いの過程において発生するCH₄, N₂Oの発生原単位について検討し、以下の知見を得た。① 在来山羊を用いて測定した稲ワラを主体とした低質飼料給与時のCH₄発生量は乾物摂取量当たり30.5±7.9 L、可消化有機物当たり52.3±9.5 Lであり、良質乾草を主体とした場合に比べて幾分増加する傾向に

あった。② 水牛からのCH₄発生量は、乾物摂取量当たり18.8L、総エネルギー摂取量に対する割合は4.2%であった。③ 堆肥化過程において発生するCH₄およびN₂O揮散総量は通気量と相関が高く、また、N₂Oの発生は堆肥化混合物中に含有される硝酸・亜硝酸態窒素の総量との間で高い相関が見られた。④ 適切な通気条件下では、1 m³の糞尿堆積物の処理過程から発生するCH₄の発生量は5～15g、N₂Oは1～4g程度と算定された。

6. 参考文献

- 1) IPCC Climate Change 1995. Cambridge Univ. Press. 1996.
- 2) Shibata, M., F. Terada, M. Kurihara, T. Nishida, K. Iwasaki. Estimation of methane production in ruminants. Anim. Sci. Technol. (Jpn.), 64:790-796. 1993.
- 3) IPCC Climate Change 1994 -Radiative Forcing of Climate Change and Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, Cambridge Univ. Press. 1994.
- 4) 羽賀清典・川崎 晃・新井重光・斎藤貴之 微生物利用土壌改良資材による農業廃棄物の分解促進効果の判定-小型発酵槽によるイナワラ分解効果の検討, 第2回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 73～76. 1991.
- 5) Haga K., Osada T. and Harada Y. Characterization of Piggery Wastewater and the Control of Nitrogen and Phosphorus. Environmental Information Science 18, 57-60. 1989.
- 6) Crutzen, P. J., I. Aselmann and W. Seiler. Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous fauna, and humans. Tellus, 38B:271-284. 1986.

[研究発表の状況]

(1) 口頭発表

- ① M. Islam, H. Abe, M. Ishida, F. Terada Effects of different roughage based diets and intake levels on methane production in goats. 第97回日本畜産学会大会, 1999. 10.
- ② M. Islam, O. Enishi, A. Purnomoadi, K. Higuchi, N. Takusari and F. Terada Effects of Preservatives on Nutrient Contents and Digestibility of Italian Ryegrass Silages. 第97回日本畜産学会大会, 2000. 3.
- ③ 寺田文典・渡辺直人・G. McCrabb・A. Purnomoadi・野中最子・児島浩貴・樋口浩二・M. Islam・田鎖直澄・永西 修 育成牛のメタン発生量に及ぼす魚粉とフマル酸の添加効果, 第97回日本畜産学会大会, 2000. 3.

(2) 論文発表

- ① M. Islam, H. Abe, F. Terada, K. Iwasaki, R. Tano Effects of level of feed intake and inclusion of corn on rumen environment, nutrient digestibility, methane production, and energy and protein utilization by goats fed alfalfa pellets. AJAS, 13:948-956. 2000.
- ② T. Osada, K. Kuroda and M. Yonaga Nitrous oxide, Methane and ammonia emissions from composting process of swine waste. Jpn. Soc. Waste Management Experts, 2:51-56. 2000. 4.