

B-2. メタン・亜酸化窒素の放出源及び放出量の解明に関する研究

(4) 家畜等畜産からの放出量の解明に関する研究

② 草地における温室効果微量ガス放出量の解明に関する研究

研究代表者

農林水産省草地試験場

山本 克巳

農林水産省 草地試験場

環境部 土壤肥料第一研究室 渋谷 岳

木村 武（現 農業研究センター）

山本 克巳

野中 邦彦

平成2～6年度合計予算額 15,199 千円

（平成6年度予算額 3,372 千円）

【要旨】

電子捕獲検出器付ガスクロマトグラフ(ECD-GC)にプレカット及びバックフラッシュを組み込み、無施肥草地の微小な N<sub>2</sub>Oフラックスが高精度で簡便に測定ができるよう分析機器の改良を行った。そこで、草地における CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oフラックスを測定した結果、年間を通じ、草地や林地ではCH<sub>4</sub>吸収活性が観測された。林地では草地の約4.5倍の吸収活性が認められ、草地、林地土壌はCH<sub>4</sub>のシンクとして機能していることが明らかとなった。草地においては植生によるCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oフラックスの差異はなかった。また窒素施肥、ふん尿還元により N<sub>2</sub>O放出量が増加し、さらにふん尿還元直後には CH<sub>4</sub>放出が観察され、ふん尿はCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O両方の発生源であることが示された。施肥窒素量当たりのN<sub>2</sub>O放出率は0.2～1%であった。施肥草地(年25kg-N/10a、5回分施)では、190.1mg-N/m<sup>2</sup>/yrのN<sub>2</sub>Oが放出されており、その量は無施肥草地の約4倍量に相当していた。

液状きゅう肥からの CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O発生を制御するために、牛液状きゅう肥の施用位置、施用量別による CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oフラックス測定を行った。土中施用区のCH<sub>4</sub>放出量は、表面施用区に比べて約1/3～1/4に抑制されることが観察されたが、N<sub>2</sub>O放出量は約2～3倍増加した。そこで硝化抑制剤(チオ尿素)を全窒素量の0.5%相当量を添加すると、土中施用区ではCH<sub>4</sub>放出量を抑制したまま N<sub>2</sub>O放出量を抑制することができた。

これまでの CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O放出率等の実測値と放牧牛成長モデルによるふん尿及びふん尿中窒素排泄量の推定値に基づき、我が国及び世界の草地における CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの放出量及び吸収量を試算した。

【キーワード】 草地、亜酸化窒素、メタン、温室効果微量ガス、家畜ふん尿

1. 序

大気中におけるメタン(CH<sub>4</sub>)及び亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)等の温室効果微量ガスの濃度上昇に関してはいくつかの発生源が指摘されている。N<sub>2</sub>Oの場合は土壌、肥料、地上部バイオマスの燃焼等が、また CH<sub>4</sub>の場合は水田や反すう家畜が発生源として挙げられているが、発生量の把握は必ずしも

充分ではない。そのため、農業生態系から放出されるこれらのガス発生の具体的データが早急に必要とされている。

わが国の農地における $\text{CH}_4$ 及び $\text{N}_2\text{O}$ のフラックスについては、水田や畑地での測定例があるものの、草地からの放出実態に関する継続的な測定は行われていない。草地では施肥窒素やふん尿処理物が施用されるだけでなく、リター等新鮮有機物の連続的な還元、放牧草地における排泄ふん尿の集中還元に加えて、不耕起管理に伴う土壌の圧密化・還元化がある。これらは $\text{CH}_4$ 及び $\text{N}_2\text{O}$ フラックスに影響を与えていると推定される。このため、草地における $\text{CH}_4$ 及び $\text{N}_2\text{O}$ 放出実態とその変動要因を解明する必要がある。

日本及び世界の草地からの $\text{CH}_4$ 及び $\text{N}_2\text{O}$ 放出量の見積もりを最終目標に据えて、本研究では(1)草地における $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ ガスフラックスの測定及び変動要因の解明、(2)家畜ふん尿還元に伴う $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ フラックスの変動解明を行った。これらに基づき、(3)日本及び世界の草地からの $\text{CH}_4$ 及び $\text{N}_2\text{O}$ 放出量の見積もりを試算した。

## 2. 研究方法

### (1) ガスフラックスの測定方法

#### ① ガスサンプリングの方法

ガスサンプリング方法としてはクローズドチャンバー法を採用した。基本的には以下に示すような手順で行った。

測定地点には予め $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 、深さ $5\text{cm}$ の無底鉄枠を深さ $3\text{cm}$ まで打ち込んで各々3反復の試験区を設定した。ガスフラックスの測定は試験区の処理から1週間間隔で行った。ただし、家畜ふん尿施用後や施肥後は $\text{N}_2\text{O}$ の放出ピークを過ぎるまで毎日測定した。ガス採取は毎回午前9時前後に行い、チャンバー( $0.09\text{m}^2$ 、高さ $20\text{cm}$ )を設置して、0、15、30分経過後にチャンバー内空気をテドラバッグに $500\text{ml}$ ずつ採取した(図1)。

土壌水分(深さ $5\text{cm}$ )はテンシオメーターにより測定し、地温は深さ $2\text{cm}$ 、 $5\text{cm}$ 、 $10\text{cm}$ において測定した。

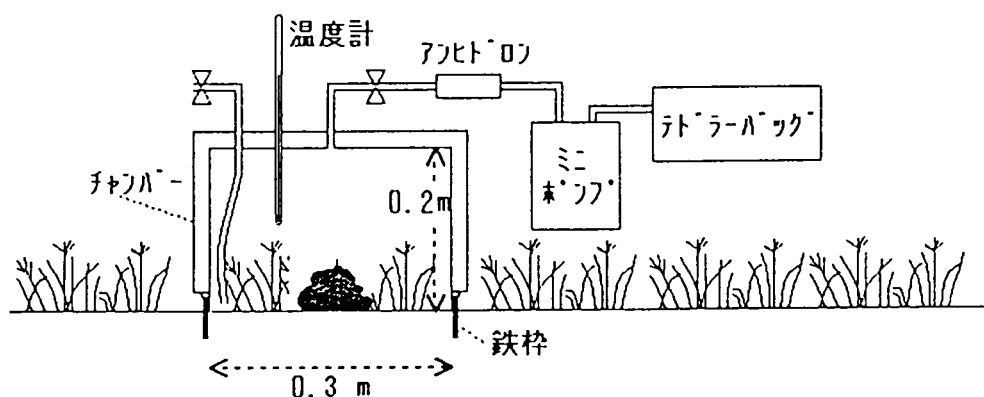


図1 ガス採取の概要

#### ② $\text{CH}_4$ 及び $\text{N}_2\text{O}$ の分析方法

$\text{CH}_4$ 濃度は採取空気の $5\text{ml}$ を水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフ(FID-GC)により分析し、 $1\text{ppmv}$ 及び $3\text{ppmv}$ の濃度検定済み標準ガス(日本酸素製)を用いて定量した。 $\text{N}_2\text{O}$ は採取空気の

5mlを電子捕獲型検出器付きガスクロマトグラフ(ECD-GC)により分析し、2ppmvの濃度検定済み標準ガス(日本酸素製)をガス分割器を用いて超高純度N<sub>2</sub>ガスにより、0~1000ppbvに希釈して作成した検量線に基づき算出した。

土壌水分(深さ5cm)はテンシオメーターにより測定し、地温は深さ2cm, 5cm, 10cmにおいて測定した。

## (2) 測定地の概況

### ①採草地

圃場におけるガスフラックスの測定は、栃木県西那須野町に位置する草地試験場内の施肥管理の異なる草地で行った。草地は造成後5年目(平成4年現在)のオーチャードグラス草地で、年間5回刈りとし、施肥草地ではN-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>Oを各々5kg/10aずつを3月下旬、5月上旬、6月中旬、7月下旬、9月上旬に施用した。土壌は表土に火山灰を含む褐色低地土である。

### ②放牧地

放牧地におけるガスフラックスの測定は、草地試験場内の藤荷田山放牧地H4区(面積: 2ha)において行った。放牧地は黒ボク土で、1973年(昭和48)に不耕起造成を行い、平成4年度で19年目の草地である。主要な草種はオーチャードグラス、トールフェスク、レッドトップ、ペレニアルライグラス、ケンタッキーブルーグラス、シロクロバである。放牧サイクルはH4区と他の3つの放牧区との組み合わせで3週間毎に1週間、8頭の牛が滞在するというものである。また年間2回の化学肥料、N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>Oを各々2.7kg/10aを5月中旬、8月中旬に施用している。

### ③林地

林地でのガスフラックスの測定は、草地試験場内の採草地に隣接する林地で行った。優占樹種はアカマツである。土壌は表土に火山灰を含む褐色低地土である。

## (3) 日本及び世界の草地からのCH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>O放出量の見積もり

日本及び世界の草地からのCH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>O放出量の見積もりは、本研究のこれまでの草地における実測値や、関東北部におけるデータを入力した放牧牛成長モデルによる排泄尿中窒素量及び排泄ふん量の出力値と実際の放牧牛のふん成分の実測値から排出係数を決定し、それに活動量として農林水産省畜産局資料及びFAO統計から、草地面積及び家畜頭数の統計値を使用して算出した。

使用した放牧牛成長モデルは、草地試験場生態部生態システム研作成のモデルである。このモデルに同試験場放牧利用部放牧管理研究室の平均的公共牧場における消化率等のデータ(未発表)と草地試験場の平年気象データを入力して得られた出力値を使用した。モデルについての詳細は、築城幹典ら、放牧草地における牛の成長のモデル化、草地試験場研究報告、第43号、p1-11、(1990.3)を参照されたい。

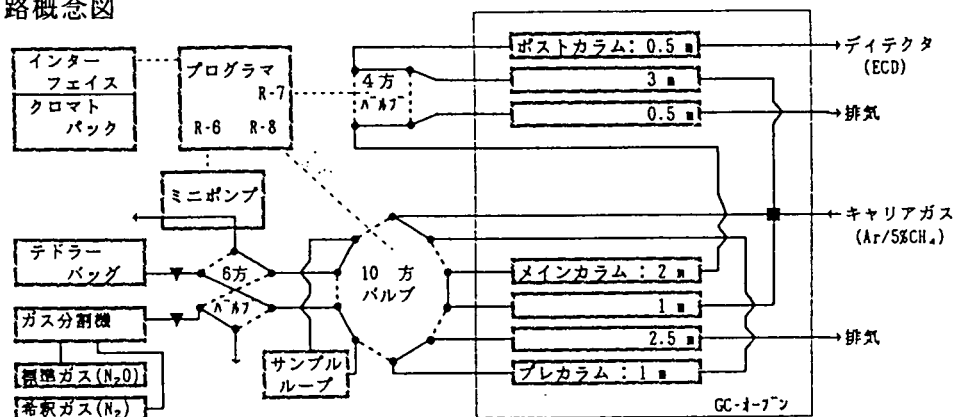
また畜体より排出されるあい気(げっぷ)はこの見積もりには含まれていない。この点に関しては別課題であるB-2-(4)-①家畜からのメタンの放出量の解明に関する研究(農林水産省 畜産試験場 栄養第1研究室 担当)の報告を参照されたい。

### 3. 実験結果及び考察

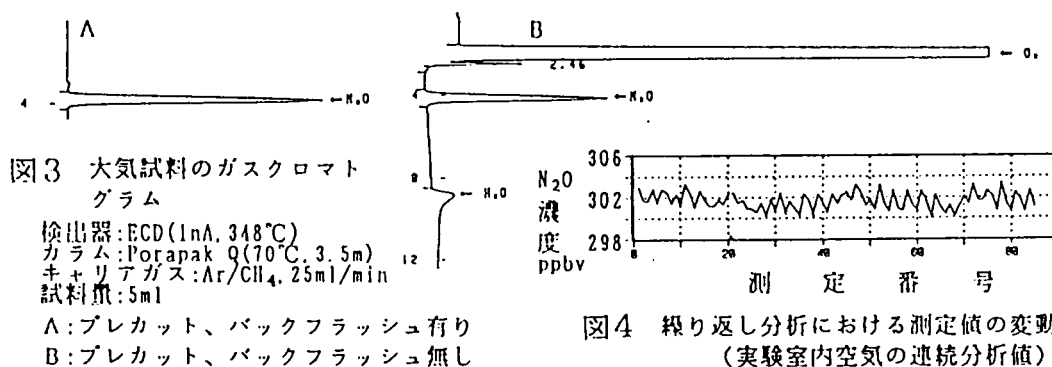
#### (1) 大気レベル濃度 $N_2O$ の分析法の改良

GC分析においてECD-GCの安定性を向上させて  $N_2O$ の高精度・簡易分析を行うためには酸素、水等に由来するピークを検出器に導入しないことが有効である。

図2 GC流路概念図



そこで、図2のシステムに従い、酸素と水を各々プレカット及びバックフラッシュにより除去し、 $N_2O$ のみを検出器に導入する流路を設定し、1試料当たり5分の分析時間で安定したクロマトグラムが得られた(図3)。また、実験室内空気の $N_2O$ 濃度を一定とみなして、連続分析(85回、約7時間)を行った結果、大気中の濃度約300ppbvに対して測定値の変動幅は $\pm 2$  ppbv未満であった(図4)。さらに、約10回に1度標準ガスを測定して補正すれば測定誤差は $\pm 1$  ppbvであり、本研究で用いたチャンバーの高さ(20cm)及び設定時間(30分間)でのフラックス測定精度は $0.5 \mu g N_2O-N/m^2/h$ と算出された。したがって本法は無施肥草地の微小な $N_2O$ フラックスの測定に有効であると判断された。なお $CH_4$ ではFID-GCで充分定量が可能であった。



#### (2) 草地における $CH_4$ 、 $N_2O$ ガスフラックスの測定

##### ① 草地の植生とガスフラックス

植生の異なる地点におけるガスフラックスの測定結果を図5に示した。 $CH_4$ については草地及び林地で吸収現象が認められた。草地での $CH_4$ の平均吸収量は $11 \mu g CH_4-C/m^2/hr$ で、草種(豚科、マ科牧草)の違い、植生及び施肥の有無による有意差はなかった。林地では草地の約6倍の

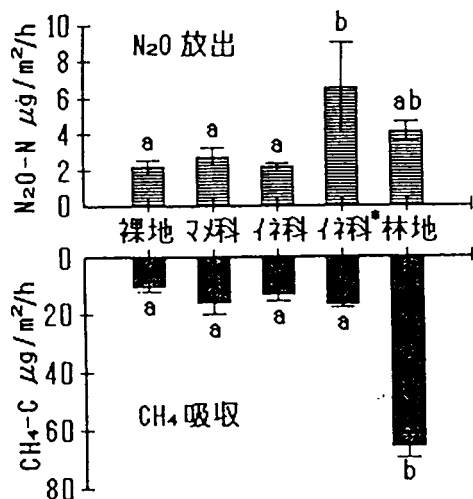


図5 植生の異なる地点におけるガスフラックス  
測定期間：91年5月1日～10月1日  
\*:施肥草地(他は無施肥)  
異なる記号間で有意差あり(P<0.01)

吸収が認められ、草地及び林地の土壌は大気のCH<sub>4</sub>のシンクとして機能していることが示された。一方 N<sub>2</sub>Oフラックスは全期間を通じて放出活性を示し、草地及び林地とも平均放出量は 5 µg N<sub>2</sub>O-N/m<sup>2</sup>/hrであった。N<sub>2</sub>O放出は施肥により増加したが、草種間に有意差は認められなかった。

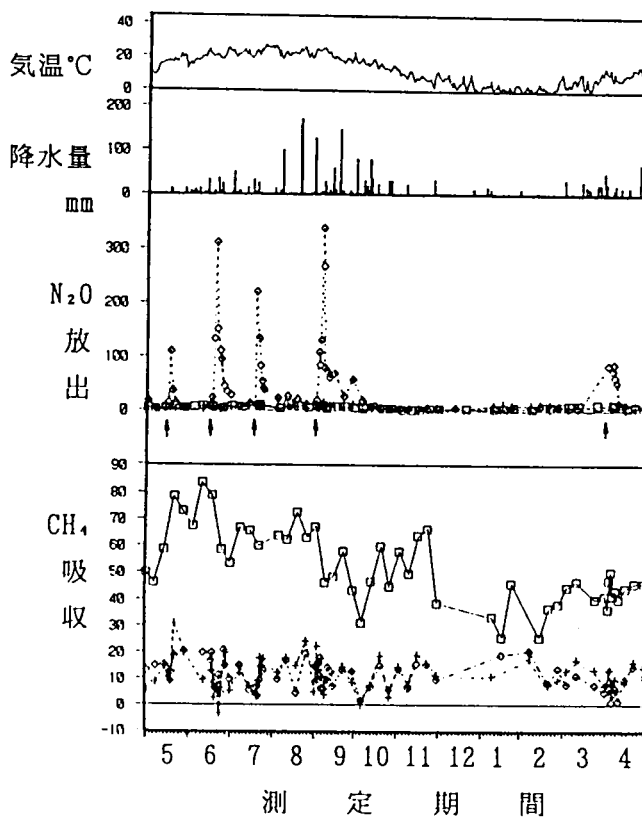
②採草地におけるフラックス

表1：年間のガスフラックスの積算

	CH <sub>4</sub> 吸収*	N <sub>2</sub> O放出*
無施肥草地	106.8	47.4
施肥草地**	100.0	190.1
林地(7カマ7優占)	449.5	45.9

\*:CH<sub>4</sub>-CまたはN<sub>2</sub>O-N mg/m<sup>2</sup>/yr  
\*\*:年間25kg-N/10a施肥、5回分施  
測定期間：1991年5月1日～1992年5月5日

図6：草地と林地におけるガスフラックス  
□：林地 +：無施肥草地 ◇：施肥草地  
\*:CH<sub>4</sub>-CまたはN<sub>2</sub>O-N ug/m<sup>2</sup>/hr  
測定期間：1991年5月1日～1992年5月5日  
↑：施肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O=5-5-5g/m<sup>2</sup>)



草地及び林地における年間のガスフラックスの測定結果を図6に示した。また年間のガスフラックスの見積もりは表1の通りである。

測定期間を通じて CH<sub>4</sub>については草地及び林地で吸収現象が認められた。また施肥の有無によるCH<sub>4</sub>の吸収に関して有意差はなかった。林地での年間 CH<sub>4</sub>吸収量は449.5mg CH<sub>4</sub>-C/m<sup>2</sup>/yrで草地の約4倍量の吸収量であった。

一方 N<sub>2</sub>Oフラックスは測定全期間を通じて草地、林地とも放出活性を示していた。草地では刈り取り後に施肥を行うが、窒素施肥3～7日後に放出ピークが認められた。採草地からの N<sub>2</sub>O放出は窒素施用に大きく依存しており、施肥草地(年間25kg-N/1a施肥、5回分施)からのN<sub>2</sub>O放出量は無施肥草地に比べ年間約4倍量を示した。また各時期の施肥窒素からのN<sub>2</sub>O放出率は0.2～1.0%の範囲であり、年間施肥窒素量の0.57%がN<sub>2</sub>Oとして放出されたと見積もられた。年間のN<sub>2</sub>O放出量は施肥草地では190.1mg N<sub>2</sub>O-N/m<sup>2</sup>/yrであったのに対し、林地と無施肥草地ではそれぞれ45.9mg N<sub>2</sub>O-N/m<sup>2</sup>/yr、47.4mg N<sub>2</sub>O-N/m<sup>2</sup>/yrで大差がなかったことから、施肥が大きな影響を及ぼしていることが示された。

### ③放牧地におけるフラックス

放牧地におけるガスフラックスの測定結果を表2に示した。測定地点は同じ放牧地内の放牧草地と「水のみ場」の2地点に設定した。

放牧草地における N<sub>2</sub>O放出フラックスは、無施肥草地と比べてみるとかなり大きい。これらは放牧牛が排泄するふん尿の影響であると推定される。また放牧草地は無施肥草地と同等の CH<sub>4</sub>吸収能を持っていた。

表2：放牧地のCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oフラックス

	CH <sub>4</sub> 吸収*			N <sub>2</sub> O放出*		
	放牧草地	水のみ場	無施肥草地	放牧草地	水のみ場	無施肥草地
平均値	12.16	-3.97	8.62	25.74	36.95	6.28
最小値	5.34	-1.50	3.71	29.41	14.10	4.04
最大値	18.27	-8.30	14.23	43.46	53.15	8.28

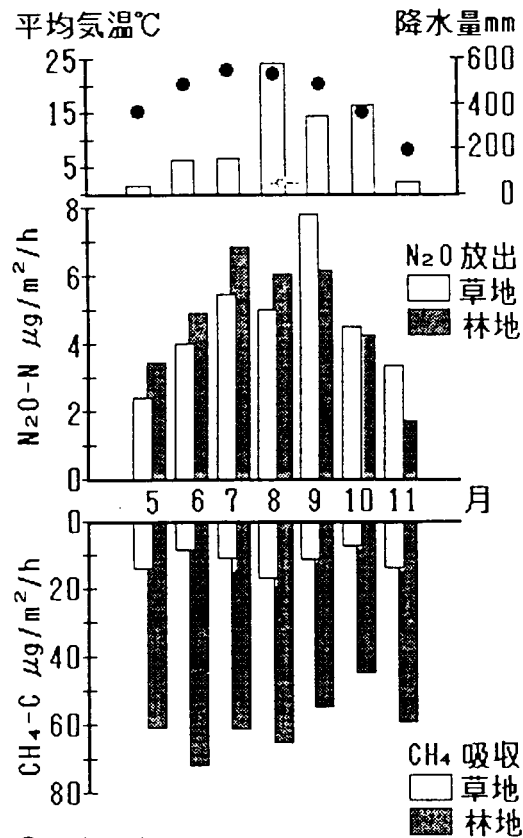
\*:CH<sub>4</sub>-CまたはN<sub>2</sub>O-N ug/m<sup>2</sup>/hr

測定期間:1992年9月21日～25日(水のみ場は22～25日、無施肥草地は91年9月期)

「水のみ場」ではCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oともに放出のフラックスが観測された。「水のみ場」には、集合した牛から排泄されるふん尿が集積しやすく、またこぼれた水により、この地点の土壌は泥濘状態となっていることが多い。これらのことから「水のみ場」においては多くの CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oが発生していると考えられた。しかしながら、予想していた数値よりは放出量が少なかった。この原因として、直接的なふん尿の影響を避けるようにサンプリング枠を設置したことや「水のみ場」の状況は、日々刻々と変化するためでもある、と考えられた。現場の状況変化が著しいという点では放牧草地も同様であり、このため、放牧草地や「水のみ場」からの正確なガスフラックスの把握は非常に困難である。こうした理由から、放牧地からの放出の見積もりは既存のモデル(物質循環を考えた放牧牛成長モデル)により検討することとした。

(3) 草地におけるCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oガスフラックスの変動要因

①季節変動



無施肥草地及び林地のガスフラックスを、平均気温、降水量とともに月別平均値で図7に示した。5月から11月までの測定期間中に、CH<sub>4</sub>吸収については特徴的な季節変動は認められないが、N<sub>2</sub>O放出では7月から9月、すなわち夏から秋にかけて放出量が増加する傾向が草地、林地ともに認められた。この時期は降水量も多く、また気温も上がり、それにつれて放出量も変動していることがわかる。この傾向はN<sub>2</sub>O放出が降雨後に増大することや土壌温度の上昇とともに放出量が多くなるという既往の報告と矛盾するものではなかった。

図7 無施肥草地と林地におけるガスフラックスの月別平均値

②温度、水分

草地試験場内の無施肥草地（オーチャードグラス優占地点）から、直径11cmの円筒形ステンレス枠を用いて地表からの深さ7cmに打ち抜いた後、水分調整（pF-水分曲線による）した「打ち抜き草地」を温度制御したインキュベーター内にいれ、クローズドチャンバー法（0.0095m<sup>3</sup>、高さ0.1m、4反復）で15分間の濃度変化を追跡した。

温度と水分を制御した環境でのガスフラックスの測定結果を図8に示した。

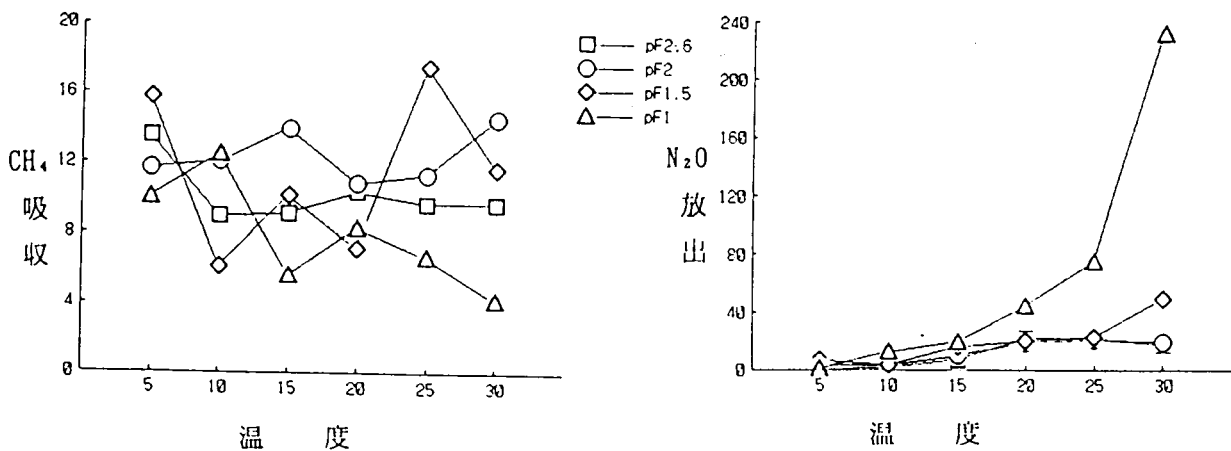


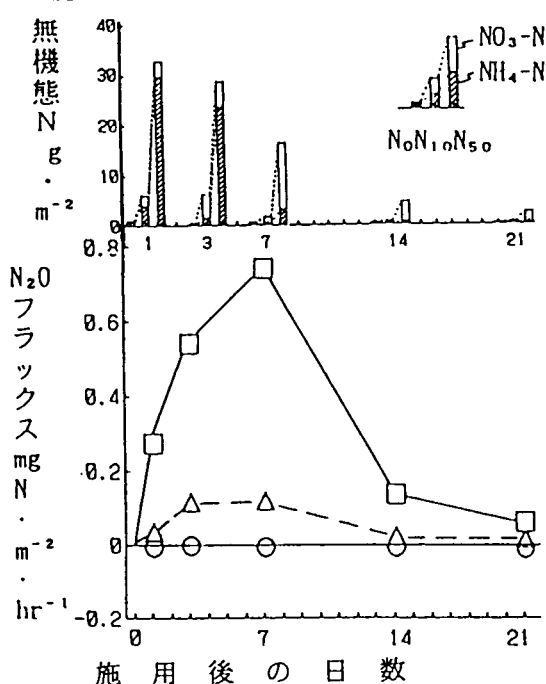
図8: 温度と水分を制御したときのCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oフラックス

\*: CH<sub>4</sub>-CまたはN<sub>2</sub>O-N μg/m<sup>2</sup>/hr

N<sub>2</sub>O放出フラックスは温度の上昇とともに増大していくことが観測されたが、土壤水分については、土壤中に自由水を含むレベルであるpF1の状態では顕著なN<sub>2</sub>O放出フラックスの増大が認められた。このことはこれまでの研究報告や上述した季節変動の項で観察されたことと一致している。一方、CH<sub>4</sub>吸収フラックスでは温度及び土壤水分の影響がはっきりと認められなかったが、pF1の状態ではCH<sub>4</sub>吸収フラックスが小さくなることが観測された。これは土壤の粗孔隙が自由水により埋められてしまって小さくなったことが原因と考えられた。このことから草地土壤によるCH<sub>4</sub>吸収には自由水の影響を受け易い土壤の粗孔隙と何らかの関係があるのではないかと推察された。

### ③化学肥料及び家畜ふん尿の施用

#### ア. 施肥によるN<sub>2</sub>O放出



尿素溶液を施用した場合におけるガスフラックスの測定結果を図9に示した。窒素施用量の増大とともにN<sub>2</sub>O放出が増大し、経時的には土壤中での硝酸化成が進行した施用後3～7日後に最大値を示した。このことから、主として硝酸化成作用でN<sub>2</sub>Oが生成したと推察された。尿素施用後21日間におけるN<sub>2</sub>O総放出量は、施用窒素の0.32～0.35%であった。

また前述したデータと考えあわせると、草地におけるN<sub>2</sub>O放出は窒素施肥に大きく依存していることが明らかである。

図9 尿素施用後のN<sub>2</sub>Oの発生と土壤中(0～20cm)の無機態窒素量  
 施用量(N g/m<sup>2</sup>): ○(0) △(10) □(50)

#### イ. 家畜ふん尿からのCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの発生

草地へ家畜ふん尿還元に伴うCH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>Oのガスフラックスを測定した。

生ふんは草地試験場内放牧地より排泄直後のものを採取し、現物500gを直径約20cmのふん塊として施用した。また液状きゅう肥(スラリー)は曝気処理後のもの300gを試験区内に全面均一施用した。生ふん及びスラリー施用後15日間のガスフラックスを図10に示した。CH<sub>4</sub>の放出は家畜ふん尿の施用初期に多く、以後経時的に減少した。生ふん施用直後のピーク時には、土壤による吸収フラックスに比較して100倍以上の放出量が認められた。またスラリーは嫌気発酵過程で多量のCH<sub>4</sub>を生成するが、放牧地での排泄ふんの分解は好气的であるため、CH<sub>4</sub>生成は少ないと推定されている。しかし、本研究の結果ではスラリーからのCH<sub>4</sub>放出は生ふんほど多くはないが顕著に認められた。一方N<sub>2</sub>Oについても施用数日～10日後に放出ピークが認められ、家畜ふん尿は草



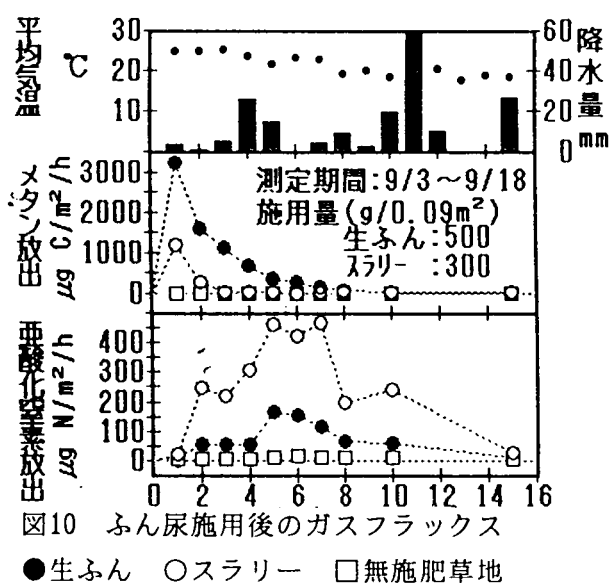


図10 ぶん尿施用後のガスフラックス

●生ふん ○スラリー □無施肥草地

地におけるCH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>Oの主要な放出源であることが示された。また放牧牛のふんからのCH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>Oの発生割合を表3に示した。

表3 放牧牛のふんからのCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの発生割合

	CH <sub>4</sub> 放出率*	N <sub>2</sub> O放出率*
平均値	0.16	0.03
最小値	0.09	0.01
最大値	0.30	0.11

\*: CH<sub>4</sub>-C/T-C%, N<sub>2</sub>O-N/T-N%

測定期間: 94年4月~10月

#### (4) 家畜ふん尿からのCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの放出抑制

牛液状きゅう肥の施用位置別によるガスフラックスの測定を、草地試験場内のロータリー耕起した圃場において行った。硝化抑制剤(チオ尿素)は施用した液状きゅう肥の全窒素量の0.5重量%相当量を添加して、施用位置(表面施用、土中施用:深さ約15cm)別の試験区を設定した。

牛液状きゅう肥の施用量・施用位置別による測定結果を表4、硝化抑制剤添加・施用位置別によるガスフラックスの測定結果を表5、土壌中の硝酸態及びアンモニア態窒素濃度を図11に示した。

表4 牛液状きゅう肥施用法別のN<sub>2</sub>O及びCH<sub>4</sub>の放出割合

施用位置	施用量 t/10a	施用窒素量 g-N/m <sup>2</sup>	N <sub>2</sub> O放出量 mg-N/m <sup>2</sup>	N <sub>2</sub> O放出割合 (%)*	施用炭素量 g-C/m <sup>2</sup>	CH <sub>4</sub> 放出量 mg-C/m <sup>2</sup>	CH <sub>4</sub> 放出割合 (%)*
表面施用	2	11	39	0.35	96	103	0.11
	6	33	85	0.26	289	177	0.06
	12	66	155	0.23	578	291	0.05
土中施用	2	11	67	0.61	96	30	0.03
	6	33	222	0.67	289	44	0.02
	12	66	425	0.64	578	93	0.02

牛液状きゅう肥成分(T-C:4.82%, T-N:0.55%, NH<sub>4</sub>-N:0.30%)

\*: 施用後34日間の放出量が施用成分量に占める割合(CH<sub>4</sub>は放出時のフラックスより積算)

CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oは土中施用区、表面施用区とも放出されることを観測した。また液状きゅう肥施用量が増加することにより、放出量も大きくなったが、施用量にかかわらず、施用した炭素及び窒素に対するCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの放出割合は大差がなかった。

表面施用区でのCH<sub>4</sub>放出量は施用炭素の0.05~0.11%であったが、土中施用区でのCH<sub>4</sub>放出量は0.02~0.03%と表面施用の場合よりも約1/3~1/4程度に減少することが示された。

一方、表面施用区での  $N_2O$  放出量は施用窒素の 0.23~0.35%であったが、土中施用区での  $N_2O$  放出量は 0.61~0.67%と表面施用の場合よりも約2~3倍に放出量が増加することが示された。

土中施用による  $CH_4$  放出量の減少の原因としては、液状きゅう肥の土中への封じ込めによる効果と、土壌との接触面積の増大による  $CH_4$  吸収効果が大きく働いたためと考えられた。一方  $N_2O$  放出量の増加の原因としてはアンモニア揮散が土中施用のために抑制された結果、施用窒素の土中蓄積量が増加したためと考えられた。

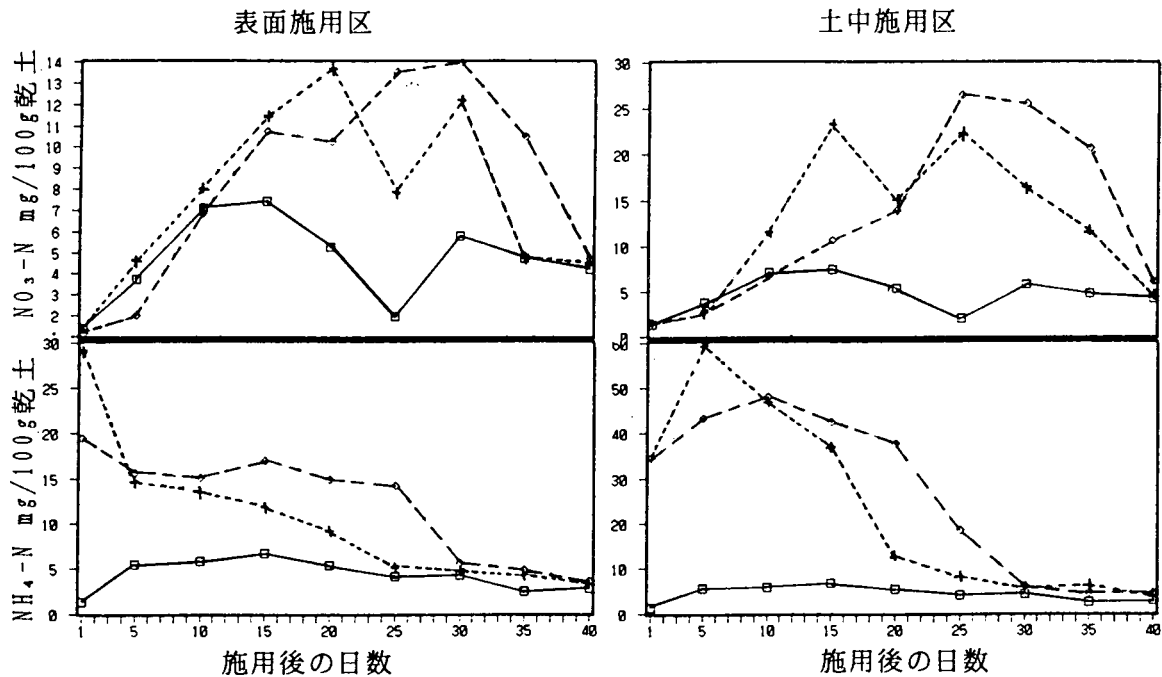


図11 牛液状きゅう肥施用後の土中 $NH_4-N$ ,  $NO_3-N$ 量の変化 測定期間：6月6日~7月15日

□:対照区 +:無添加区 ◇:硝化抑制剤添加区

表5 硝化抑制剤を添加した牛液状きゅう肥施用法別の $N_2O$ 及び $CH_4$ の放出割合

施用位置		$N_2O$ 放出量	$N_2O$ 放出割合*	$CH_4$ 放出量	$CH_4$ 放出割合*
		$N_2O-N$ mg/m <sup>2</sup>	$N_2O-N$ /全N量%	$CH_4-C$ mg/m <sup>2</sup>	$CH_4-C$ /全C量%
表面施用	無添加区	36	0.12	480	0.21
	添加区	21	0.07	456	0.20
土中施用	無添加区	171	0.56	162	0.07
	添加区	62	0.20	143	0.06

牛液状きゅう肥成分(T-C:3.78%, T-N:0.51%,  $NH_4-N$ :0.28%)、施用量：6t/10a

\*:施用後35日間の放出量が施用分量に占める割合で無施用区の値により補正をしている

測定期間：94年6月6日~7月10日

硝化抑制剤添加による  $CH_4$  放出割合への影響は認められなかったが、 $N_2O$  放出量は無添加の場合に比べて土中施用では36%に、表面施用では58%に減少した。土壌中の硝酸態窒素量が $6^{\circ}C$ に達するのが、表面施用の無添加区では20日目、添加区では30日目、土中施用の無添加区では15日目、

添加区では25日目であり、いずれの施用区でも無添加区の方が速かった。また土壌中のアンモニア態窒素量は表面施用では5日目以降、土中施用では15日目以降において添加区が無添加区の量を上回るようになった。以上のことから、N<sub>2</sub>O放出量が減少した原因は、硝化抑制剤によりアンモニア態窒素が多量に残存し、硝化由来のN<sub>2</sub>O発生量が減少したためと考えられた。

以上のように硝化抑制剤を添加し、さらに土中施用を行うことで、液状きゅう肥からのCH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>O放出量の抑制が可能である。しかしながら、表面施用した場合の硝化抑制剤無添加区よりはいまだにN<sub>2</sub>O発生割合は多いため、今後、他のN<sub>2</sub>O放出抑制技術の検討が必要である。

#### (5) 日本及び世界の草地からのCH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>O放出量の見積もり

これまで得られた実測値及び放牧牛からのモデル出力値を使ったCH<sub>4</sub>及びN<sub>2</sub>O排出係数を表6、表7に示す。また放牧牛の尿からのN<sub>2</sub>O排出係数は放牧牛の尿と同程度の窒素濃度に調製した尿素水溶液(0.8重量%N)を使用して実測して算出した。

表6 放牧牛排出係数算定に使った数値

放牧牛からの排出係数算定に使用したモデル出力値	排泄生ふん量 : 26kg/頭/day
	ふん中窒素量 : 83 g/頭/day
	尿中窒素量 : 75 g/頭/day
放牧牛生ふん中T-C量を算出するために使用した実測値	ふん中T-C% : 3.57~5.82%

表7 草地、林地及び家畜ふん尿に関係したCH<sub>4</sub>,N<sub>2</sub>Oの排出係数

	中央値 ( )は範囲	単位	
<b>N<sub>2</sub>O排出係数</b>			*1:無施肥草地における372日間の実測値から算出した。
草地* <sup>1</sup>	47.4(22.1~72.7)	N <sub>2</sub> O-Nmg/m <sup>2</sup> /yr	
窒素肥料	0.6 (0.2~1.0)	N <sub>2</sub> O-N%/N施用量	*2:春先や排出後乾燥した状態が続くとN <sub>2</sub> O放出は起きない場合もある。
放牧牛ふん* <sup>2</sup>	0.06(0.01~0.11)	N <sub>2</sub> O-N%/T-N	
尿	0.37(0.11~0.62)	N <sub>2</sub> O-N%/T-N	
スラリー	0.18(0.09~0.26)	N <sub>2</sub> O-N%/T-N	*3:この値は排泄されたふん尿由来のもので、実測値とモデル出力値から算出した。
放牧牛* <sup>3</sup>	0.32(0.09~0.55)	N <sub>2</sub> O-Ng/頭/day	
林地	45.9(22.7~69.1)	N <sub>2</sub> O-Nmg/m <sup>2</sup> /yr	
<b>CH<sub>4</sub>排出係数</b>			
草地* <sup>1</sup>	-106.8(-56.6~-157.0)	CH <sub>4</sub> -Cmg/m <sup>2</sup> /yr	
放牧牛ふん	0.20(0.09~0.30)	CH <sub>4</sub> -C%/T-C	
スラリー	0.14(0.06~0.21)	CH <sub>4</sub> -C%/T-C	
放牧牛* <sup>3</sup>	2.75(0.85~4.65)	CH <sub>4</sub> -Cg/頭/day	
林地	-449.5(-330.2~-568.8)	CH <sub>4</sub> -Cmg/m <sup>2</sup> /yr	

さらに日本及び世界の草地における活動量は、農林水産省畜産局資料及びFAO統計から表11のように仮定した。

表8 日本及び世界の草地に関連した活動量

日本：畜産局資料(昭和59年度、平成3年度)から

採草地面積： $344 \times 10^3$  ha

放牧地面積： $375 \times 10^3$  ha =  $305 \times 10^3$  ha +  $70 \times 10^3$  ha(野草地面積を含む)

放牧頭数： $220 \times 10^3$  頭(乳用牛 $126 \times 10^3$  頭、肉用牛 $94 \times 10^3$  頭)

採草地には窒素 $250 \text{ kg-N/ha/yr}$ 、放牧地には窒素 $54 \text{ kg-N/ha/yr}$ 施用したとする。

野草地は無施肥とし、放牧期間は4月下旬～10月(191日間)とする。

放牧頭数は公共牧場利用頭数とする。

世界：FAO YEARBOOK(1992)から

草地面積：総面積は $3,357,520 \times 10^3$  ha

先進国： $1,188,229 \times 10^3$  ha

発展途上国： $2,169,291 \times 10^3$  ha

草地に関係した家畜頭数

牛： $1,284,488 \times 10^3$  頭

野牛： $147,520 \times 10^3$  頭

羊： $1,138,363 \times 10^3$  頭

山羊： $574,181 \times 10^3$  頭

らくだ： $17,019 \times 10^3$  頭

先進国の草地には窒素 $54 \text{ kg-N/ha/yr}$ を施用し、発展途上国の草地は無施肥とする。

牛はすべて放牧牛とし、これには野牛を含めている。

らくだは牛と同じぐらいの体重的なので、牛と同じ排出係数とする。

羊や山羊は牛の約10分の1の体重的なので、排出係数は牛の10分の1とする。

以上から日本及び世界の草地からの $\text{CH}_4$ 及び $\text{N}_2\text{O}$ 放出量の試算を行うと表9のようになる。

これらの結果から、我が国の草地における年間の $\text{CH}_4$ 吸収量は $0.8 \text{ CH}_4\text{-C Gg/yr}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 放出量は $0.84 \text{ N}_2\text{O-N Gg/yr}$ となり、世界では年間の $\text{CH}_4$ 吸収量 $3,586 \text{ CH}_4\text{-C Gg/yr}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 放出量は $1,979 \text{ N}_2\text{O-N Gg/yr}$ と見積もられた。また家畜のふん尿からは世界で $1,626 \text{ CH}_4\text{-C Gg/yr}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 放出量は $189 \text{ N}_2\text{O-N Gg/yr}$ と見積もられた。

#### 4. 得られた成果

1)  $\text{N}_2\text{O}$ はECD-GC(電子捕獲検出器付ガスクロマトグラフ)へのプレット、バックフラッシュの組み込みにより1試料当たり5分の分析時間で安定したクロマトグラムが得られ、無施肥草地の微小フラックスが高精度( $\pm 2 \text{ ppbv}$ )で測定できた。

2) 年間を通じ、草地や林地は $\text{CH}_4$ 吸収活性が観測された。林地では草地の約4.5倍の吸収活性が認められ、草地、林地土壌は $\text{CH}_4$ のシンクとして機能していることが明らかとなった。また草地においては植生による $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ フラックスの差異はなかった。

3) 窒素施肥、ふん尿還元により $\text{N}_2\text{O}$ 放出量が増加し、さらにふん尿還元では $\text{CH}_4$ 放出が観察され、ふん尿は $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 両方の発生源であることが示された。

4) 施肥窒素量当たりの $\text{N}_2\text{O}$ 放出率は0.2～1%であった。施肥草地(年 $25 \text{ kg-N/10a}$ 、5回分施)では、 $190.1 \text{ mg-N/m}^2/\text{yr}$ の $\text{N}_2\text{O}$ が放出されており、その量は無施肥草地の約4倍量に相当していた。

5) 牛液状きゅう肥の施用位置、施用量別による $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ フラックス測定では、 $\text{CH}_4$ 放出量は土中施用区で、表面施用区からの $\text{CH}_4$ 放出量の約1/3～1/4程度に抑制されることが観察された。また $\text{N}_2\text{O}$ 放出量は土中施用区で表面施用区よりも約2～3倍程度増加した。そこで硝化抑制剤(材尿素)を全窒

素量の0.5%相当量を添加した場合のCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oフラックス測定の結果、土中施用区ではCH<sub>4</sub>放出量を抑制したままN<sub>2</sub>O放出量を抑制することができた。

6)以上の結果、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O放出率等の実測値と放牧牛成長モデルによる推定値に基づき、我が国及び世界の草地におけるCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの放出量及び吸収量を試算した。

表9 我が国及び世界の草地におけるCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O放出量の試算例

日本

		排出係数		活動量		放出量
採草地	草地	N <sub>2</sub> O	47.4 × 10 <sup>4</sup>	N <sub>2</sub> O-Nmg/ha/yr	344 × 10 <sup>3</sup> ha	0.2 Gg/yr
		CH <sub>4</sub>	-106.8 × 10 <sup>4</sup>	CH <sub>4</sub> -Cmg/ha/yr	"	-0.4 Gg/yr
	窒素施肥	N <sub>2</sub> O	0.6/100 × 250	N <sub>2</sub> O-Nkg/ha/yr	"	0.5 Gg/yr
放牧地	草地	N <sub>2</sub> O	47.4 × 10 <sup>4</sup>	N <sub>2</sub> O-Nmg/ha/yr	375 × 10 <sup>3</sup> ha	0.2 Gg/yr
		CH <sub>4</sub>	-106.8 × 10 <sup>4</sup>	CH <sub>4</sub> -Cmg/ha/yr	"	-0.4 Gg/yr
	窒素施肥	N <sub>2</sub> O	0.6/100 × 54	N <sub>2</sub> O-Nkg/ha/yr	305 × 10 <sup>3</sup> ha	0.1 Gg/yr
放牧牛	ふん尿	N <sub>2</sub> O	0.32	N <sub>2</sub> O-Ng/頭/day	220 × 10 <sup>3</sup> 頭 × 191日	0.01Gg/yr
		CH <sub>4</sub>	2.75	CH <sub>4</sub> -Cg/頭/day	"	0.1 Gg/yr

世界

		排出係数		活動量		放出量
先進国	草地	N <sub>2</sub> O	47.4 × 10 <sup>4</sup>	N <sub>2</sub> O-Nmg/ha/yr	119 × 10 <sup>7</sup> ha	563Gg/yr
		CH <sub>4</sub>	-106.8 × 10 <sup>4</sup>	CH <sub>4</sub> -Cmg/ha/yr	"	-1269Gg/yr
	窒素施肥	N <sub>2</sub> O	0.6/100 × 54	N <sub>2</sub> O-Nkg/ha/yr	"	388Gg/yr
発展途上国	草地	N <sub>2</sub> O	47.4 × 10 <sup>4</sup>	N <sub>2</sub> O-Nmg/ha/yr	217 × 10 <sup>7</sup> ha	1028Gg/yr
		CH <sub>4</sub>	-106.8 × 10 <sup>4</sup>	CH <sub>4</sub> -Cmg/ha/yr	"	-2317Gg/yr
牛+野牛	ふん尿	N <sub>2</sub> O	0.32	N <sub>2</sub> O-Ng/頭/day	143 × 10 <sup>7</sup> 頭 × 365日	167Gg/yr
		CH <sub>4</sub>	2.75	CH <sub>4</sub> -Cg/頭/day	"	1437Gg/yr
羊	ふん尿	N <sub>2</sub> O	0.32/10	N <sub>2</sub> O-Ng/頭/day	114 × 10 <sup>7</sup> 頭 × 365日	13Gg/yr
		CH <sub>4</sub>	2.75/10	CH <sub>4</sub> -Cg/頭/day	"	114Gg/yr
山羊	ふん尿	N <sub>2</sub> O	0.32/10	N <sub>2</sub> O-Ng/頭/day	57 × 10 <sup>7</sup> 頭 × 365日	7Gg/yr
		CH <sub>4</sub>	2.75/10	CH <sub>4</sub> -Cg/頭/day	"	58Gg/yr
らくだ	ふん尿	N <sub>2</sub> O	0.32	N <sub>2</sub> O-Ng/頭/day	2 × 10 <sup>7</sup> 頭 × 365日	2Gg/yr
		CH <sub>4</sub>	2.75	CH <sub>4</sub> -Cg/頭/day	"	17Gg/yr

## 5. 研究発表の状況

1) 木村 武、山本克巳、渋谷 岳

草地におけるメタン・亜酸化窒素フラックスの測定

日本土壤肥料学会講演要旨集, 38, 179(1992)

- 2) 山本 克巳  
家畜ふん尿から発生する亜酸化窒素及びメタンとその実態  
畜産技術 444号 P9 (1992)
- 3) 木村 武、山本克巳、渋谷岳  
ECD-GCを利用した大気試料中亜酸化窒素の高精度・簡易分析  
草地飼料作研究成果最新情報 第7号 (1992)
- 4) 渋谷 岳、木村 武、山本克巳、野中邦彦  
採草地における温室効果微量ガスの発生実態  
草地飼料作研究成果最新情報 第8号 (1993)
- 5) K. Minami, J. Goudriaan, E. A. Lantinga, T. Kimura  
Significance of grassland in emission and absorption of greenhouse gases.  
Proc. 17th Int. Grassland Cong. 1231-1238 (1993)
- 6) 山本克巳  
草地における亜酸化窒素の発生及びその制御  
地球温暖化とわが国の畜産 第三集, 11-18, 畜産技術協会(1994)
- 7) 木村 武  
草地におけるメタンの発生・吸収およびその制御  
地球温暖化とわが国の畜産 第三集, 33-45, 畜産技術協会(1994)
- 8) 渋谷 岳, 木村 武, 山本克巳, 野中邦彦  
草地におけるメタン・亜酸化窒素の放出実態とその推定量  
日本土壤肥料学会講演要旨集, 40, 192(1994)
- 9) 渋谷 岳、木村 武、山本克巳、野中邦彦  
牛液状きゅう肥の土壌施用に伴う温室効果微量ガスの発生  
草地飼料作研究成果最新情報 第9号 (1994)
- 10) 山本克巳, 渋谷 岳  
草地における亜酸化窒素の発生及びその制御  
地球温暖化とわが国の畜産 第四集, 14-25, 畜産技術協会(1995)
- 11) 木村 武  
草地におけるメタンの発生・吸収およびその制御  
地球温暖化とわが国の畜産 第四集, 35-51, 畜産技術協会(1995)

- 12) 渋谷 岳, 木村 武, 山本克巳, 野中邦彦  
牛液状きゅう肥の土壌施用に伴う $\text{CH}_4 \cdot \text{N}_2\text{O}$ の発生とその制御  
日本土壌肥料学会講演要旨集, 41, 216(1995)
- 13) 木村 武  
土壌によるメタンの吸収  
日本土壌肥料学会講演要旨集, 41, 246(1995)
- 14) 渋谷 岳, 木村 武, 山本克巳, 野中邦彦  
草地における温室効果微量ガスの排出係数  
草地飼料作研究成果最新情報 第10号 (1995)