

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

(2) 反芻家畜におけるメタン及び亜酸化窒素放出とその変動要因の解明に関する研究

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・栗原光規（現農林水産技術会議事務局）

西田武弘（現草地試験場）・永西 修

平成7-9年度合計予算額 16,232千円

（平成9年度予算額 5,333千円）

[要旨]

温室効果ガスであるメタン及び亜酸化窒素ガスの低減を図るために、それらの反芻家畜からの発生量の推定精度の改善を図るとともに、その変動要因について検討した。その結果、メタン放出とその変動要因に関して次のような知見が得られた。① 牛からのメタン発生量の変動は乳量あるいは増体量との関連が非常に大きく、生産性の向上を図ることによって生産物当たりのメタン発生量を大きく削減できることを明らかにした。さらに、乳牛及び肥育牛からの生産物当たりのメタン発生量の推定式を作成した。また、肥育牛については濃厚飼料を多給した場合にメタン発生量が著しく減少することを明らかにした。② 反芻家畜からのメタン発生量は給与飼料構成によって影響を受け、粗蛋白質摂取量の増加により減少、炭水化物摂取量の増加とともに増加する。また、炭水化物摂取量の増加にともなうメタン発生量の増加は粗繊維の割合が大きい方が大きかった。③ 適温環境下に比べて高温環境下ではメタン発生量は増加する。とくに維持レベルでは高温環境下での発生量は適温域よりも10%程度増加する。

亜酸化窒素の放出については、① 通常の飼養環境下においてはルーメン内からほとんど発生しないものと判断された。また、畜舎内の糞尿からの放出量もごく僅かであることが確認された。したがって、家畜からの亜酸化窒素放出はその大部分が糞尿中の窒素からその堆肥あるいは液肥化の過程において発生するものと考えられた。② 糞尿中の窒素排泄量そのものの削減を図るために乳牛及び肥育牛からの排泄量に及ぼす諸要因について検討したところ、生産性の改善、窒素給与量の抑制が有効であることが明らかになった。

[キーワード]

反芻家畜、メタン、亜酸化窒素、窒素排泄量、推定式

1. 序

反芻家畜からの温室効果ガスであるメタンの放出量は、全地球からのメタン発生量の約16%であり、人間活動に由来するメタン発生量の約1/4を占めるに至っている。また、家畜から排泄される窒素量は現在の化学肥料生産量を上回り、これらの糞尿に由来する窒素は硝化・脱窒作用を受け、その一部は温室効果ガスであり、かつオゾン層を破壊する原因物質である亜酸化窒素に転換

されている。したがって、反芻家畜におけるメタン及び亜酸化窒素の放出量を把握し、その変動要因を明らかにすることが、地球温暖化抑制を目指した技術開発のために必要である。

そこで、本研究では、反芻家畜からのメタン及び亜酸化窒素放出量の推定精度の向上を図るとともに、それらの放出に及ぼす飼料構成等の影響を検討し、微量温室効果ガス低減技術の開発に資することとした。

2. 研究目的

わが国の家畜からのメタン発生量のうち37%が泌乳牛、33%が肥育牛に由来するものと推定されている¹⁾。そこで、実験1-1, 2においては両者からのメタン発生量の推定の精密化を図るとともに、生産性との関連において発生量の低減対策について検討した。さらに、実験1-3では給与飼料条件の影響について、実験1-4では環境条件の影響について検討した。

家畜に由来する糞尿からの亜酸化窒素放出は、人為起源の亜酸化窒素放出の一要因となっているが、その低減化を図るためには、① 家畜からの窒素排泄量の低減化を図る、② 糞尿からの亜酸化窒素放出率の低減化を図る、の2方策が考えられる。本課題では主に①の方策による亜酸化窒素放出の低減策を泌乳牛および肥育牛において検討した(実験2-3, 4; 泌乳牛及び肥育牛からの窒素排泄量の推定とその低減化)。また、実験2-1においては反芻動物のルーメンからの亜酸化窒素の放出の有無について検討し、実験2-2においては畜産における代表的な糞尿処理方式である堆肥化あるいは液肥化に至る前の畜舎内における糞尿からの亜酸化窒素の放出率について検討した。

3. 研究方法

実験1 反芻家畜からのメタン放出量の推定精度の向上と変動要因の解明

1-1 メタン発生量に及ぼす乳生産性の影響

ホルスタイン種泌乳牛を用いて行った115回の呼吸試験結果を用いて、4%脂肪補正乳(FCM)量とメタン発生量との関係を検討した。給与飼料は粗飼料と濃厚飼料とし、飼料に馴致後、開放型呼吸試験装置に収容し、メタン発生量を測定した²⁾。なお、以下の動物実験におけるメタン発生量の測定方法は全て実験1-1と同様である。

1-2 肥育牛からのメタン発生量の推定と増体速度との関係

ホルスタイン種去勢牛39頭、黒毛和種去勢牛23頭を供試して、メタン発生量を測定した。供試牛の体重はホルスタイン種が337~745kg、黒毛和種が397~619kgであった。給与飼料は粗飼料が稲ワラ、イタリアンライグラス乾草ウエハー、蒸煮木材等であり、その給与割合はいずれも3割以下、飼料給与量はTDN量で維持から維持の2倍量とした。なお、給与飼料中の可消化養分総量(TDN)含量は乾物中61~83%、粗蛋白質(CP)含量は乾物中11~19%であった。

1-3 飼料中の栄養素構成とメタン発生量との関係

ホルスタイン種乳牛、黒毛和種、ゴリデール種成去勢羊及び日本在来種去勢雄山羊を用いて行った250回の呼吸試験結果を用いて、給与飼料中の養分構成がメタン発生量に及ぼす影響を検討した。

1-4 乳牛からのメタン発生量に及ぼす環境温度の影響

ホルスタイン種乾乳牛及び泌乳牛を用いて行った40回の呼吸試験結果を用いて、メタン発生量

と乾物摂取量との関係に及ぼす環境温度（18℃と30～32℃）の影響を検討した。供試牛には粗飼料及びトウモロコシ，大豆粕を主原料とする濃厚飼料を給与した。環境条件は乾乳牛では18及び32℃，泌乳牛では18℃及び30℃で，いずれも相対湿度60%とした。

実験2 反芻家畜からの亜酸化窒素放出と変動要因の解明

2-1 ルーメン内における亜酸化窒素生成

乾乳牛及び泌乳牛を各4頭用いて，ルーメン内からガスを直接採取し，飼料摂取前後における亜酸化窒素生成について検討した。乾乳牛では，粗飼料と濃厚飼料の給与割合の異なる飼料を給与して，また，泌乳牛ではルーメン内消化特性の異なるデンプン源と蛋白質源とを組み合わせさせた飼料を用いてルーメン内性状を変化させた。

2-2 牛舎内における糞尿からの亜酸化窒素放出量の検討

畜舎内に糞尿が24時間放置されると仮定して，その間の亜酸化窒素放出量を糞尿混合物（糞10:尿1）を用いて小型チャンバー（フロート式，容量約10リットル）によるモデル実験によって検討した。また，乾乳牛を収容した呼吸試験チャンバー内の亜酸化窒素放出量についても経時的にサンプリングを行い，測定した。

2-3 泌乳牛からの窒素排泄量の推定と低減化対策

環境温度18℃または20℃の代謝実験室内で行われたホルスタイン種泌乳牛による窒素出納試験成績95例を用いて，4%乳脂補正乳(FCM)1kgあたりの糞尿中への窒素排泄量(N/FCM, g/kg)の推定式を作成し，糞尿中への窒素排泄量に及ぼす諸要因について検討した。

2-4 肥育牛から窒素排泄量の推定と低減化

ホルスタイン種および黒毛和種去勢牛62頭を供試して窒素出納試験を実施した。給与飼料条件については実験1-2に示した。データを解析するにあたって品種と肥育ステージ（肥育前，後期）を処理因子として検討した。

4. 実験結果と考察

実験1 反芻家畜からのメタン放出量の推定精度の向上と変動要因の解明

実験1-1 メタン発生量に及ぼす乳生産性の影響

4%乳脂補正乳量(FCM, kg)とFCM当たりのメタン発生量(CH₄/FCM, g/kgFCM)との関係を図1に示した。

両者の間には以下に示した有意な回帰式が得られた。

$$\text{CH}_4/\text{FCM} = 8.19 + 300/\text{FCM}$$

また，この回帰式を用いて試算した，メタン発生量と乳生産性との関係を表1に示した。

メタン発生量はFCM量の増加につれて増加するが，FCM量当たりのメタン発生量は逆に減少することが明らかとなった。具体的には，乳牛のFCM量が20kgから30kgに増加するとメタン発生量は

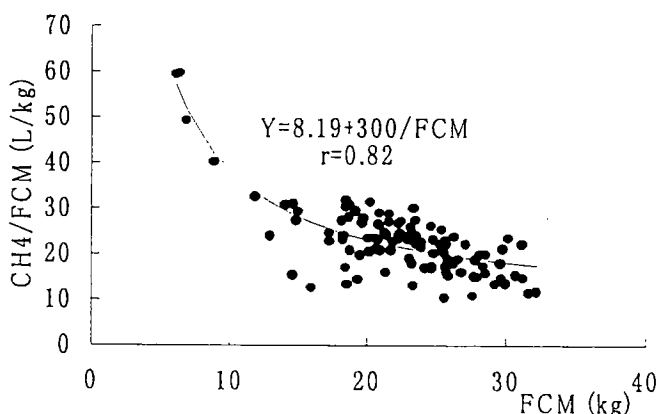


図1 4%乳脂補正乳量(FCM)とFCM当たりのメタン発生量(CH₄/FCM)の関係

1日当たりでは18%増加するが、FCM1kg当たりでは22%減少することになる。言い換えると、FCM乳量が1日20kgの牛群が生産する牛乳を1日30kgの牛群で生産することができればメタン発生量を大幅に低減できることが可能になる。また、この傾向は生産性が低い時ほど顕著であることから、開発途上国におけるメタン発生量の低減化対策として乳牛1頭あたりの生産性の改善が重要であることが明らかとなった。

表1 メタン発生量と乳生産性の関係

FCM量 (kg/日)	10	15	20	25	30
FCM量当たり (ℓ/kgFCM)	38(100)	28(74)	23(61)	20(53)	18(48)
1日当たり (ℓ/日)	382(100)	423(111)	464(121)	505(132)	546(143)

以上の結果から、日本及び世界における乳牛からのメタン発生量は乳牛個体の生産性を高めて飼養頭数を抑制することにより、生産量を一定程度高めながら低減できるものと判断された。また、上記の回帰式は日本における乳牛からのメタン発生量の将来予測を将来の牛乳需要の増加と乳牛の生産性の向上とを考慮して行う場合にも利用できると考えられた。

実験1-2 肥育牛からのメタン発生量の推定と増体速度との関係

乾物摂取量 (DMI, kg) とメタン発生量 (CH₄, ℓ) の関係について、①品種間の違い (ホルスタイン種と黒毛和種)、②粗飼料給与水準の違い (粗飼料給与割合が飼料乾物中20%以上と未満)、の2点について乾物摂取量を補助変数とする共分散分析法によって検討した。粗飼料20%以上の給与群においては品種間差は認められておらず、DMIとCH₄との間には有意な相関関係が認められた。しかし、20%未満の群ではDMIとCH₄の間には有意な相関関係は認められず、また、従来の乾物摂取量からの推定値に比べてかなり低い値を示すことが示された。さらに、粗飼料の給与量

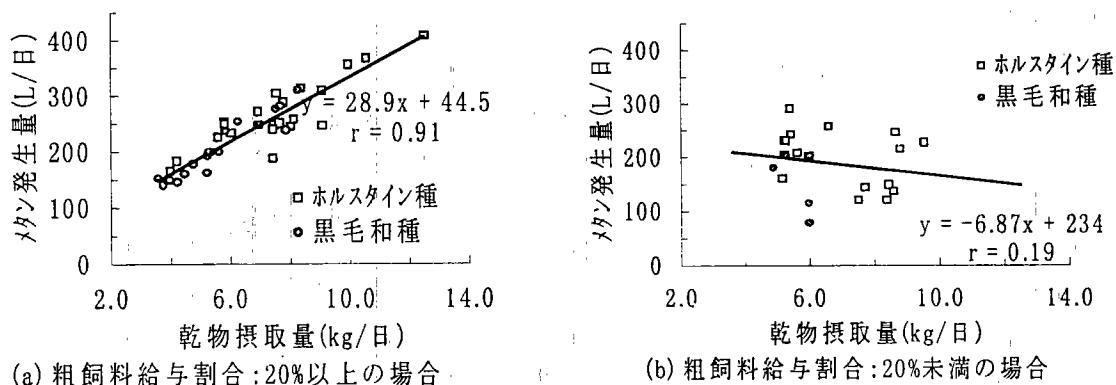


図2 肥育牛の乾物摂取量とメタン発生量との関係

が極めて少ない条件下では黒毛和種牛からの発生量がホルスタイン種牛よりも少ないことが明らかとなった。

次に、日増体量 (DG, kg) 当たりのメタン発生量 (CH₄/DG, ℓ/kg) につてDG 0.45kg以上のデータを用いて検討したところ、DGの増加とともにCH₄/DGが直線的に低下することが示されており、

より減少し、炭水化物摂取量、可消化炭水化物摂取量の増加にしたがって増加した。とくに乾物摂取量が10kg以上の場合は粗繊維摂取量あるいは可消化粗繊維摂取量当たりのメタン発生量がNFEあるいは可消化NFE摂取量当たりの値よりも著しく多かった。このことから、反芻家畜からのメタン発生量を効率的に抑制するためには、植物繊維を消化吸収しエネルギー源として利用している反芻家畜からの消化特性を維持しながら飼料中のCP、CF及びNFE給与量の最適なバランスを検討することが必要と考えられた。

実験1-4 乳牛からのメタン発生量に及ぼす環境温度の影響

乾乳牛と泌乳牛からのメタン発生量のデータをまとめて、乾物摂取量とメタン発生量との間で回帰分析を行った結果、環境温度18℃及び30～32℃において以下の有意な回帰式が得られた。

$$18^\circ\text{C} \quad : \quad \text{CH}_4 = 35.97 + 2.757 \cdot 10^{-2} \text{DMI} \quad r=0.917$$

$$30\sim 32^\circ\text{C} \quad : \quad \text{CH}_4 = 63.27 + 2.678 \cdot 10^{-2} \text{DMI} \quad r=0.782$$

この2式を用いてそれぞれの環境温度において乾物摂取量5、10、15、20kgにおけるメタン発生量を求めて表2に示した。乾物摂取量が同一の場合では、メタン発生量は高温時において増加し、乾物摂取量が乳牛の維持量前後である5～10kg程度では18℃に比べて約10%高まることが明らかとなった。また、反芻家畜からのメタン発生量は気候温暖化の要因として指摘されているが、

表2 18及び30～32℃における乾物摂取量(kg)とメタン発生量(ℓ)との関係

乾物摂取量	5	10	15	20	25
18℃	174	312	450	587	725
30～32℃	197(113)	331(106)	465(103)	599(102)	733(101)

本検討結果から気候温暖化による気温上昇が反芻家畜からのメタン発生量の増加要因となっていることも示唆された。

実験2 反芻家畜からの亜酸化窒素放出と変動要因の解明

実験2-1 ルーメン内における亜酸化窒素の生成

ルーメン内ガス中の亜酸化窒素濃度を表3に示した。乾乳牛及び泌乳牛において、採食前の亜酸化窒素濃度は畜舎内とほとんど同じであり、採食後3時間でわずかに増加傾向を示したにすぎなかった。また、亜酸化窒素濃度に及ぼす飼料構成の影響はないものと考えられた。

表3 ルーメン内ガスの亜酸化窒素濃度(ppbv)

	採食前	採食3時間後	畜舎内
乾乳牛	299	308	315
泌乳牛	320	330	317

実験2-2 牛舎内における糞尿からの亜酸化窒素放出量の検討

① 新鮮糞尿混合物からの亜酸化窒素放出量の検討： 小型チャンバーを用いたモデル実験の結果、乾乳牛の糞尿から3mgN/日、泌乳牛からは13mgN/日の亜酸化窒素が放出されるものと推定された。この量は糞尿中の窒素量の、それぞれ、0.003%、0.007%に相当するので、糞尿中の窒素

からの亜酸化窒素の発生率を1%と仮定すると、畜舎内における亜酸化窒素の放出量は乳牛の糞尿からの亜酸化窒素放出量の0.5%に相当することになる。

② 乾乳牛を収容した呼吸試験チャンバー内とバックグラウンドの亜酸化窒素の濃度差に通過量を掛けて算出した1日あたりの亜酸化窒素放出量は8.9mgN/日であった。

①②の結果から、乳牛1日1頭あたりの畜舎内での亜酸化窒素の放出量（畜舎内の糞尿由来のものも含めて）を9mgNと仮定すると、年間の我が国での乳牛からの畜舎内での放出量は6,409kgとなり、我が国の乳牛の糞尿に由来する亜酸化窒素放出量⁴⁾の0.6%に相当することになり、極めてわずかな量であることが確認された。

実験2-3 泌乳牛からの窒素排泄量の推定と低減化対策

泌乳牛では摂取した窒素量にしめる糞中へ排泄される窒素の割合は39%、尿中へは24%、合計63%とほぼ摂取窒素の2/3が排泄されていた。

代謝体重あたりの摂取窒素に対する糞、尿、乳、蓄積窒素量の関係について図4に示した。摂取窒素の増加に伴って糞中窒素は直線的に増加するものの、その他は曲線的に増加しており、乳中窒素、蓄積窒素は上に凸であるのに対して尿中窒素は下に凸の関係を示した。つまり、摂取窒素の増加に伴って糞尿中への窒素排泄は曲線的に増加することになるが、生産性は大きくは改善

表4 新鮮牛糞尿混合物からの
亜酸化窒素放出量

	n	亜酸化窒素 mgN/day	排泄N量比 %
乾乳牛	3	2.8 (0-8.3)	0.003
泌乳牛	4	13.1 (6.1-31.9)	0.007

() ; 範囲 (最小-最高) .

されない。そこで、生産性を損なわずに窒素排泄量の低減方策を検討するためにはFCM量あたりの窒素排泄量(N/FCM)について検討することが有効であると考えられた。

N/FCMとFCM量、体重、乾物摂取量(DMI)、乾物消化率、粗蛋白質(CP)含量間の相関は、順に、-.533, -.101, -.208, -.176, .302であった。相関がもっとも高かったN/FCMとFCMの関係について図5に示した。FCMが増加するに従ってN/FCMは曲線的に低下しており、生産性の向上が窒素排泄量の相対的な低下に結びつくことが示さ

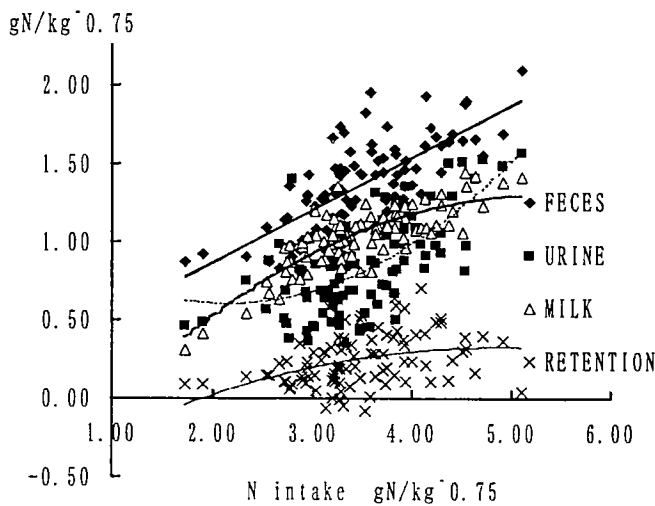


図4 代謝体重あたりの窒素摂取量と排泄量の関係

れた。

FCM量に次いでN/FCMとCP含量の相関が高い値を示した。そこで、解析に用いたデータのほぼ平均にあたるFCM量22~25kgの29点のデータを用いて窒素排泄量とCP含量の関係について検討した(図6)。CP含量の増加に伴って窒素蓄積量は増加するものの、乳中への移行量はほとんど増加していない。また、CP水準の上昇に伴って、尿中への窒素排泄量が直線的に増加している。すな

わち、過剰量のCPの給与が尿中排泄量の増加につながることを示された。

以上のことから、独立変数として、FCM (対数変換したもの)、CP、DMIを用いて泌乳牛のFCM量あたりの窒素排泄量(N/FCM)を推定することとし、次式を得た。

$$N/FCM = -14.48 \times \ln(FCM) + 0.806 \times CP + 0.769 \times DMI + 31.4 \quad R^2 = 0.864, \text{RSD} = 0.92$$

この式におけるN/FCMに対するln(FCM)、CP、DMIの偏相関係数は、順に、-.917、.828、.930で

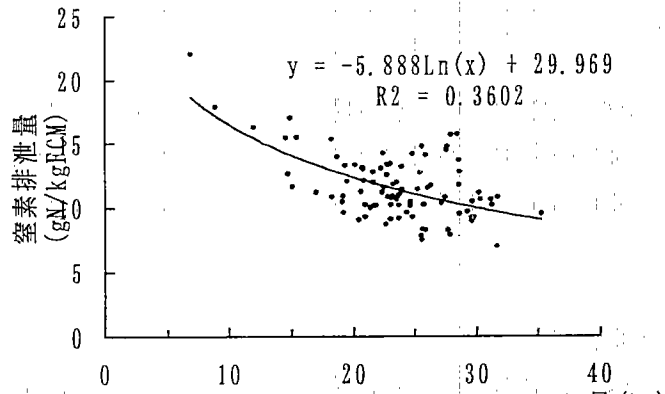


図5 FCM量あたりの窒素排泄量と FCM量 (kg) の関係

あった。また、この式で用いた独立変数はいずれも飼料設計上必須のものであることから、この式の活用により窒素排泄量の低減を意図した飼料設計が可能になるものと考えられた。

実験2-4 肥育牛からの窒素排泄量の推定と低減化

肥育牛の糞尿中への窒素排泄に及ぼす品種の影響

は認められなかったが、肥育前期と後期とでは明らかな違いが認められ、代謝体重当たりの糞中排泄量は肥育後期に低下し、逆に尿中排泄量は著しく低下した。糞中への窒素排泄量のおよそ半分は、ルーメンの微生物態蛋白質などに由来する代謝性の蛋白質(代謝性糞中窒素)であり、その部分の削減を測るためには給与飼料中のエネルギー濃度を高める、とくに脂肪を活用していくことを検討する必要がある。

さらに、これらの成績をもとに、1日当たりの糞尿、糞及び尿中への窒素排泄量(それぞれ、FUN, FN, UNと略、単位はg/日)の推定式を、体重(BW, kg)、乾物摂取量(DMI, kg/日)、粗蛋白質含量(CP, %DM)を説明変数として作成した。

$$FUN = 16.74 \times DMI + 8.54 \times CP + 0.108 \times BW - 154.3 \quad R^2 = 0.960$$

$$FN = 7.22 \times DMI + 2.05 \times CP - 0.585 \times TDN + 14.1 \quad R^2 = 0.862$$

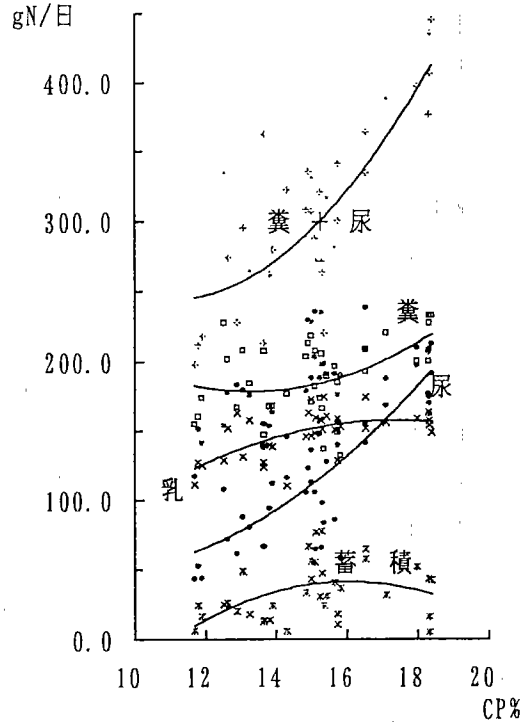


図6 給与飼料中のCP水準と糞尿中への窒素排泄

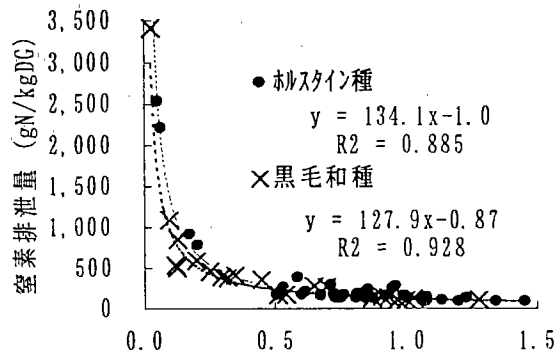


図7 増体量(DG)と増体量当たりのDG (kg/day) 窒素排泄量との関係

[研究発表の状況]

(1) 口頭発表

- ① 寺田文典・栗原光規・塩谷 繁 乳牛の窒素排泄量に及ぼす高温環境の影響 第92回日本畜産学会大会, 1997. 3.
- ② M Kurihara et al., Methane emission from lactating cows in Japan during past 30 years, 8th Int. Conference on Anaerobic Digestion, 1997. 6.
- ③ 寺田文典・栗原光規・永西 修・西田武弘・A. Purnomoadi・上田宏一郎・樋口浩二 肥育牛からのメタン発生量の推定, 第93回日本畜産学会大会, 1998. 3.
- ④ 寺田文典・阿部啓之・西田武弘・柴田正貴 肥育牛の窒素排泄量の推定, 第94回日本畜産学会大会, 1998. 3.

(2) 論文発表

- ① 栗原光規・柴田正貴・久米新一・相井孝允・西田武弘 乳牛からのメタン発生量に及ぼす給与飼料と高温の影響, ルーメン研究会報, 6(1):33-39, 1995.
- ② 栗原光規・久米新一・相井孝允・高橋繁男・柴田正貴・西田武弘 気候温暖化に対応した乳牛の飼養法—エネルギー代謝に基づく技術評価—, 九州農試報告, 29:21-107, 1995.
- ③ 寺田文典 乳牛からの窒素排泄量の低減について 畜産環境研究会フォーラム1996, 20-23, 1996.
- ④ 寺田文典・栗原光規・西田武弘・塩谷 繁 泌乳牛における窒素排泄量の推定, 日本畜産学会報, 68:163-168, 1997.
- ⑤ F Terada et al., Methane emission in ruminant production -Its significance in Asia, 19th MSAP, 60-66, 1997.
- ⑥ T Nishida, M Kurihara, A Purnomoadi, F Terada and M Shibata, Methane suppression by calcium soaps of stearic, oleic, and linoleic acids in cattle, Proc. 14th Symp. Energy Metabolism of farm animals, 379-382, 1997.
- ⑦ M Kurihara, M Shibata, T Nishida, A Purnomoadi and F Terada et, Methane production and its dietary manipulation in ruminants, Rumen Microbes and Digestive Physiology in Ruminants, 199-208, 1997.
- ⑧ 寺田文典・塩谷 繁 泌乳牛の窒素排泄量に及ぼす魚粉給与と環境温度の影響, 日本畜産学会報, 69, 1998 (印刷中).

(3) 雑誌等発表

- ① 栗原光規 繊維の消化とメタン(5)—乳牛からのメタン発生と飼料構成及び環境温度との関係—, 畜産の研究, 49(11):1213-1218, 1995.
- ② 寺田文典 給餌による排泄成分削減技術 西尾道德監修 環境保全と新しい畜産, 137-150, 1997.