

第3章 牛起源の温室効果ガス発生低減技術の評価と適応手法の開発

1. 放牧飼養における温室効果ガス発生量の評価およびLCA手法による環境影響評価

ア 研究目的

放牧飼養は放牧地で牛を飼養し、給与する飼料の調製作業や家畜排泄物処理作業等が少なくなることから環境負荷の少ない飼養方法と考えられる。しかし、温室効果ガス発生量の変動が少ない牛生体と比べ、放牧地からの発生は不均一であり、基礎的な発生量データの不足が指摘されている。そこで、本課題では放牧地からのガス発生量の測定に特化し、実測点数を増やすとともに、飼料構成により異なるふんの性状やふん尿の排泄場所がガス発生に及ぼす影響を明らかにし、温室効果ガス発生量推定の精度向上に資する知見を蓄積する。また、舎飼飼養主体の酪農生産体系と放牧飼養を導入した生産体系から発生する温室効果ガスについての評価をライフサイクルアセスメント(LCA)により行い、放牧飼養導入の有利性を明らかにする。

イ 研究方法

1) 放牧地から発生する温室効果ガスの測定

①放牧地

北海道農業研究センター(北海道札幌市羊ヶ丘)の黒ボク土(褐色火山性土)に造成されたケンタッキーブルーグラス主体放牧地において試験を行った。

②温室効果ガスの分析とガスフラックスの計算

一酸化二窒素(N_2O)とメタン(CH_4)はガスクロマトグラフ、二酸化炭素(CO_2)は赤外線吸収方式の測定器で定量を行い、フラックスは直線回帰法により計算した(八木一行, 1997)。

③放牧地に排泄された牛ふん尿に由来する温室効果ガス発生量の測定

ガス発生量の測定は、塩化ビニル製チャンバー(30×30×30cmH)を用いたクローズドチャンバー法で行った。放牧地の一部を電牧線で区切ってチャンバー用の架台を設置し、処理区には放牧草のみ給与されている黒毛和種定置放牧繁殖牛(繁殖牛)と濃厚飼料を併給されているホルスタイン種昼夜放牧搾

乳牛(搾乳牛)より採取した新鮮ふん500gまたはそれぞれの尿として人工尿(0.8%尿素-N水溶液)600mlと1200mlを投入した(4反復、対照は無処理の放牧地)。投入時、ふんは架台内で直径20cmに成形し、人工尿はペットボトルを利用して注ぎ込んだ。ガス測定は、処理後6日間は毎日、20日目までは2~3日間隔、以後は随時、 N_2O と CH_4 発生量が対照区並になるまで継続した。処理区と対照区の差をふん尿からのガス発生量として積算し、投入したふん尿中の全窒素(T-N)および全炭素(T-C)に対する N_2O と CH_4 の排出係数($N_2O-N/T-N\%$ 、 $CH_4/T-C\%$)を求めた。試験はふんと尿それぞれについて春季(6月中旬~)、夏季(7月下旬~)、秋季(9月下旬~)の3回実施した(ふん:2008夏~2009春、尿:2009夏~2010春)。また、札幌市羊ヶ丘(年平均気温7.1°C)より温暖な栃木県那須塩原市千本松(12.0°C、畜産草地研究所那須研究拠点)で得られた既存値(那須値)との比較を行った。

④放牧地の水槽付近に自然発生した裸地からの温室効果ガス発生量の測定

ガス測定はステンレス製円筒型チャンバー(φ32~36×30cmH)を用いたクローズドチャンバー法で行った。測定日ごとに水槽から50cm、150cm、250cmのほぼ同じ位置にチャンバーを打ち込み、2009.8.2~2010.10.23(積雪期除く)に随時ガス測定を行った。ふんが確認できる場合はチャンバー内に入らないように測定位置の調整を行った。

⑤放牧地土壌中の有機物分解(土壌呼吸)に由来する二酸化炭素発生量の測定

放牧草由来の CO_2 発生を除くため、放牧地の草地部分1m×1m区画、2箇所の植物相をはぎ取り、植物体と土壌を分離後、土壌をもとの区画に戻し、成人男子の踏圧で踏み固め、試験区とした(2010.5.14)。塩化ビニル製チャンバー用の架台を1区画に3個設置し、生えてきた植物体を随時抜き取り、裸地状態を維持しながら、ガス測定を行った。

2) 放牧導入酪農経営と舎飼経営の温室効果ガス排出量のLCA分析

①分析対象としたモデル経営

畑地型酪農地帯での典型的な中規模酪農経営（経産牛頭数 60 頭、個体乳量 8500kg/頭）を対象に、経営規模、飼養頭数、乳量を維持しながら集約放牧体系を導入した場合のモデル経営を用い、経営規模、給餌内容等を設定した。比較は放牧体系 2 種（とうもろこしサイレージ（CS）通年給与と制限給与）と舎飼体系で行った。各モデルの給餌内容、飼料作物栽培面積は、藤田・相原（2008）のモデルを用い、利益が最大となる条件で設定した。自給粗飼料は、放牧草（イネ科主幹）、牧草サイレージ（イネ科主幹）、とうもろこしサイレージとし、濃厚飼料は、原料構成の複雑な配合飼料を排し、とうもろこし、麦類、大豆とした。

②自給飼料生産からの温暖化負荷の概算

自給飼料生産圃場での総 CO₂ 排出量は、圃場作業、運搬作業、農薬及び化成肥料の使用量から求めた。作業体系および作業に伴う燃料消費量は、北海道農業生産技術体系第 3 版（北海道農政部，2005）を用いて算出した。圃場作業として飼料用とうもろこし圃場では耕起、整地、播種、施肥、農薬散布、中耕、収穫作業等を含む。牧草生産圃場では、追肥、刈取り、転草・集草、梱包、密封、運搬等の作業を含む。肥料および農薬の消費に伴う温暖化負荷量は、産業連関表による環境負荷原単位データブック（南齋ら，2004）を用いて、購入者価格ベースの排出原単位から求めた。

③購入飼料からの温暖化負荷の概算

購入飼料部分については、飼料設計に使用したとうもろこし、ムギ類、大豆について、アメリカでの生産～北海道東部地域への供給を想定し、釧路港を経由しての供給地までの運搬を含めて、GHG 排出量データベース（小林・袖山，2006）より算出した。

④乳牛消化管からの温暖化負荷の概算

乳牛消化管での消化に伴う CH₄ の発生による温暖化負荷量は、日本国温室効果ガスインベントリとして採用されている、乾物摂取量から算定する方法（柴田ら，1993）を用いて算出した。

⑤ふん尿処理からの温暖化負荷の概算

搾乳牛、乾乳牛、育成牛から排出される排泄物総量および排出窒素量は、築城・原田（1997）による推定式から算出した。排泄物中の有機物含有率は、日本国インベントリで採用されている値（畜産技術

協会，2002）による値を用いた。非放牧（舎飼）体系経営モデルおよび放牧体系経営モデルの冬期の畜舎内飼養期間のふん尿処理は、地域の中規模経営で多いふん尿分離、ふん堆積発酵処理、尿貯留方式での処理とした。ふん堆積、尿貯留処理からの CH₄ および N₂O の排出係数は、日本国インベントリで採用されている係数（畜産技術協会，2002）を用いた。放牧飼養経営モデルにおいて、畜舎内と放牧地で処理されるふん尿の量の按分は、乳牛が畜舎および放牧地に滞在している時間を基準として行った。これは、第 3 章 2 表 3 - 15 で述べられているように、乳牛のふん尿排出量が、環境にかかわらずほぼ滞在時間に比例していることによる。放牧期間および時間は、北海道東部地域での放牧酪農家の実態から設定した。畜舎内で排出されたふん尿は、上記非放牧（舎飼）体系での処理方法と同様とした。放牧地での処理の排出係数は、本試験で求められた通年値を用いて算出した（表 3 - 1 および表 3 - 2）。

ウ 結果及び考察

1) 放牧地から発生する温室効果ガス量の評価

①放牧地に排泄された牛ふん尿に由来する温室効果ガス発生量

ふん由来の N₂O 発生は夏季で 2～3 週間継続し、繁殖牛と搾乳牛はほぼ同じ発生パターンを示した（図 3 - 1A1）。また、CH₄ 発生は夏季で 1 週間程度継続し、繁殖牛ふんからの発生量の方が大きかった（図 3 - 1A2）（秋山ら，2009）。

人工尿由来の N₂O 発生は夏季で 2 ヶ月程度継続し、面積当たりの発生量は尿の処理量の多い搾乳牛の方が大きかった（図 3 - 1B）。また、標準偏差の大きさからもわかるように試験区による発生量の変動が大きく（図 3 - 1B）、土壌条件がガス発生量に及ぼす影響の大きいことが示唆された。尿処理区からの CH₄ 発生は見られず、対照区と同様の変化を示した（秋山ら，2010）。

ふんからのガス排出係数は、表 3 - 1 のように N₂O、CH₄ ともおおむね夏季 > 春季 > 秋季の変化を示し、通年（3 季の平均値）の N₂O 排出係数は繁殖牛 0.08、搾乳牛 0.10 とも那須値 0.06 とほぼ同等で、CH₄ 排出係数は繁殖牛 0.17、搾乳牛 0.08 とも那須値 0.27 に比べて小さかった。また、CH₄ 排出係数

表3 - 1 牛ふんからの N₂O と CH₄ の排出係数^{*1}

| 排出係数 | 測定期間 平均気温* ² 平均土壌水分* ³ | 春季 | 夏季 | 秋季 | 通年 | |
|---|--|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|
| | | 09/6/16~7/27 17.4°C 29% | 08/7/30~8/21 20.5°C 26% | 08/9/30~10/20 12.4°C 26% | 3季の 平均値 | 現行値* ⁴ |
| N ₂ O (N ₂ O-N/T-N%) | 繁殖牛 | 0.05±0.03 | 0.19±0.05 | 0.00±0.00 | 0.08 | 0.06 |
| | 搾乳牛 | 0.14±0.09 | 0.16±0.05 | 0.01±0.01 | 0.10 | — |
| CH ₄ (CH ₄ /T-C%) | 繁殖牛 | 0.20±0.03 | 0.18±0.03 | 0.12±0.06 | 0.17 ^a | 0.27 |
| | 搾乳牛 | 0.05±0.02 | 0.12±0.05 | 0.06±0.03 | 0.08 ^b | — |

*1 各季の値は4試験区の平均値と標準偏差。異符号間に有意差あり (p<0.01)

*2 試験開始後20日間の平均値。春季、夏季、秋季の平年値(1981-2000)は、それぞれ16.1、20.9、11.1

*3 試験開始後20日間、4試験区の平均値。TDR方式水分計での測定値。

*4 現在、日本において放牧地からのガス発生量の算出に用いられている畜産草地研(那須)で得られた値(渋谷ら, 1994)

表3 - 2 牛人工尿からの N₂O と CH₄ の排出係数^{*1}

| 排出係数 | 測定期間 平均気温* ² 平均土壌水分* ³ | 春季 | 夏季 | 秋季 | 通年 | |
|---|--|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------|-------------------|
| | | 10/6/15~8/19 20.3°C 28% | 09/7/29~9/24 20.9°C 35% | 09/9/29~11/18 12.2°C 44% | 3季の 平均値 | 現行値* ⁴ |
| N ₂ O (N ₂ O-N/T-N%) | 繁殖牛 | 0.15±0.12 | 0.55±0.26 | 0.19±0.11 | 0.30 | 0.37 |
| | 搾乳牛 | 0.22±0.21 | 0.54±0.25 | 0.29±0.25 | 0.35 | — |
| CH ₄ (CH ₄ /T-C%) | 繁殖牛 | — | — | — | — | — |
| | 搾乳牛 | — | — | — | — | — |

*1 各季の値は4試験区の平均値と標準偏差。"- "は放出なし、またはデータなし。

*2, *3, *4 は表1と同じ。

は繁殖牛の方が搾乳牛に比べて有意に大きく (t 検定、P<0.01) (秋山ら, 2011a)、牛体からの CH₄ 発生と同様に飼料構成の違いが影響しているものと考えられた (日本飼養標準 (乳牛), 2006)。

牛人工尿からの N₂O 排出係数は、表3-2のように夏季>秋季>春季の変化を示し、繁殖牛の通年の N₂O 排出係数 0.30 は那須値 0.37 に比べてやや小さく、搾乳牛 0.35 はほぼ同じであった。平均気温が高い春季の値が秋季より小さい原因としては牧草の生育 (草丈伸長: 春季 0.9cm/日、秋季 0.1cm/日、試験開始後20日間の平均値) に伴う窒素吸収や土壌水分等の影響が考えられた (秋山ら, 2010)。

② 水槽付近に自然発生した裸地からの温室効果ガス発生量

牧区内に設置された水槽近傍は牛の訪問頻度が高いため踏圧等により裸地化している場合が多く、泥濘化等土壌条件の変化が起りやすくなっている。このため、温室効果ガス発生に関しても草地部分

とは異なると考えられる。本研究では定置放牧条件下で自然発生した水槽付近の裸地部分から発生する N₂O と CH₄ を経時的に測定し、草地部分との差異について検討を行った。ガス発生量の測定位置は水槽際 50cm、牛の臀部前後 150cm と少し離れた 250cm としたが、ガス発生量は概ね 150cm > 50cm > 250cm となり、水槽からの距離で差が見られた (図3-2)。

N₂O 発生量は土壌表面が凍結した 2009.12.13 と土壌表面に水が浮くほどの泥濘状態になった 2010.7.31 を除き、すべての測定点において図3-1で対照区とした草地部分 (0.01 ~ 0.02mg-N/m²/hr 程度) より 10 倍以上大きい値を示し、人工尿処理区のピーク発生量に比べてもかなり大きかった。また、その変動幅は 0.00 ~ 87.7mg-N/m²/hr と大きく、土壌や気象条件が発生量に大きい影響を及ぼすことが示唆された。CH₄ 発生量はわずかで草地部分と同様に負となる時期もあったが、N₂O の発生が抑

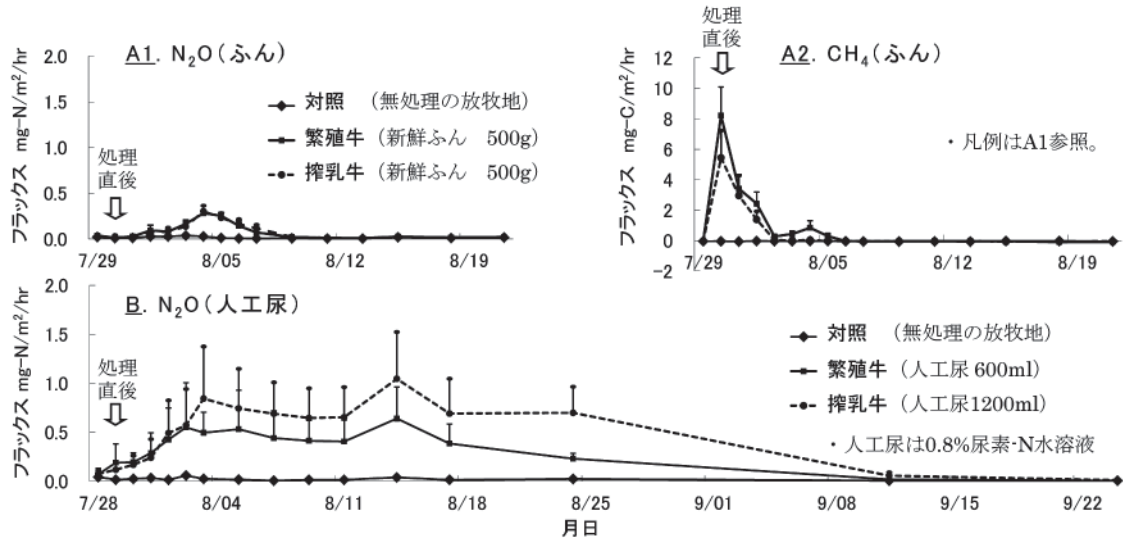


図3 - 1 放牧地に排泄された牛ふんおよび人工尿からの N_2O と CH_4 の発生パターン (夏季)

* 数値は4試験区の平均値。縦棒は標準偏差。
* A1とA2は同一ふんからの発生を示したものの。

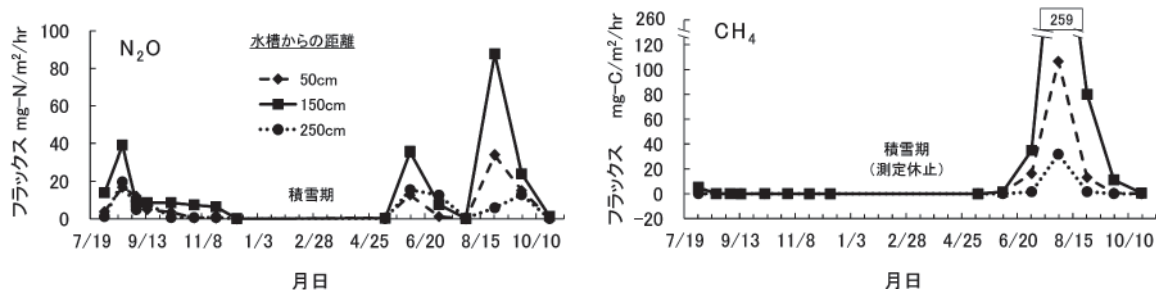


図3 - 2 水槽近傍の裸地から発生する N_2O と CH_4 フラックスの経時変化

* 測定期間は2009.8.2 ~ 2010.10.23

制された泥濘状態になると激増 (最大 $258.9 \text{ mg-C/m}^2/\text{hr}$) し、泥濘化した裸地からの総温室効果ガス発生量は高く維持された (秋山ら, 2011b)。

③放牧地からの土壌呼吸に由来する二酸化炭素発生量
土壌呼吸に由来する CO_2 も放牧地から発生する温室効果ガスの要因であるが、放牧草が存在する状態でのガス測定では植物呼吸に由来する CO_2 と土壌呼吸に由来する CO_2 の区別が困難である。このため本研究では人為的に植物相を除いた裸地を作成し、そこから発生する CO_2 を測定することにより土壌呼吸量の推定を試みた。その結果、 CO_2 発生量の測定値と 10cm 深地温 ($T_{10\text{cm}}$, 単位はK) は裸地化処理による土壌の攪乱後50日程度でアレニウスの式に近似するようになり (図3-3)、それ以後 (2010.7.11 ~ 11.14) の試験区 (6測定点) の測定で得られた結果から土壌呼吸に由来する CO_2 発

生量の推定式 $k=1.89E+13 \times \exp(-7710/T)$ を得ることができた (秋山ら, 2011b)。

2) 放牧導入酪農経営と舎飼経営の温室効果ガス排出量のLCA分析による比較

①飼料生産部分の温暖化負荷量

経営モデルの前提に基づいた飼料給与量は、表3-3の通りとなった。飼料自給率は、放牧 (CS 通年給与) 76.1%、放牧 (CS 制限給与) 71.8%、非放牧舎飼 62.6%であった。飼料給与量を満たすために必要な飼料作物栽培面積の試算結果を、表3-4に示した。放牧地の面積を確保する必要性から、放牧 (CS 通年) 体系で8.2ha、放牧 (CS 制限) 体系で6.8ha、それぞれ非放牧舎飼体系よりも広い面積が必要であった。

作目別の単位面積あたりの CO_2 排出量を、図3

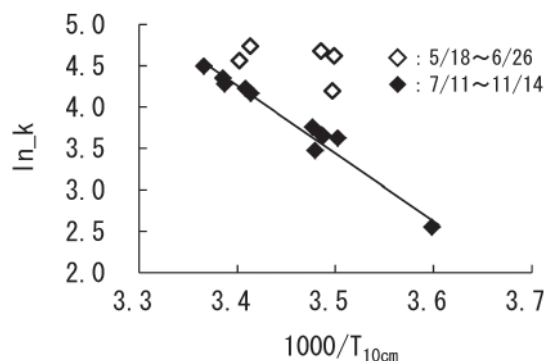


図3 - 3 CO₂フラックスと地温のアレニウスプロット

* k は区画 1(3 測定点)の CO₂ フラックスの平均値。
* T_{10cm} は 10cm 深地温 (単位 K)。

表3 - 3 モデルの前提に基づいた飼料給与量 (経産牛、kg/頭/年)

| | 飼養体系 | | |
|---------------|------|------|------|
| | 放牧体系 | | 非放牧 |
| | CS通年 | CS制限 | 舎飼 |
| 放牧草 | 2472 | 2472 | 0 |
| 牧草サイレージ | 1186 | 1147 | 3023 |
| とうもろこしサイレージ | 1720 | 1459 | 1530 |
| 大豆 | 84 | 84 | 361 |
| とうもろこし | 788 | 803 | 918 |
| ムギ類 | 514 | 808 | 962 |
| 飼料自給率(TDN換算%) | 76.1 | 71.8 | 62.6 |

ー 4 に示した。飼料用とうもろこしは、肥料、農薬および燃料の使用量が他の作目より多く、単位面積あたりの排出量が最も大きくなった。放牧地は、収穫調製作業が不要であることから、燃料消費量が少なく、作目中では最も排出量が小さくなった。経営モデル全体での飼料生産に伴う温暖化負荷量は、総面積は少ないが、単位面積あたりの排出量の多いサイレージ用とうもろこしの栽培面積が多い非放牧(舎飼)体系で最も多くなった(図3-5)。放牧(CS通年)体系は、約3%、放牧(CS制限)体系は約9%

表3 - 4 モデルの飼料給与量から求めた飼料作物栽培面積 (ha)

| | 飼養体系 | | |
|--------------|------|------|------|
| | 放牧体系 | | 非放牧 |
| | CS通年 | CS制限 | 舎飼 |
| 放牧専用 | 15 | 15 | 0 |
| 兼用地(1番採草) | 4.4 | 4.4 | 0 |
| 兼用地(1, 2番採草) | 10.4 | 10.4 | 0 |
| 採草専用 | 11.1 | 11.1 | 29.8 |
| とうもろこし | 7.8 | 6.4 | 10.7 |
| 放牧地合計 | 29.8 | 29.8 | 0 |
| 飼料生産畑合計 | 48.7 | 47.3 | 40.5 |

少なかった。

②購入飼料の使用に伴う温暖化負荷量

輸入飼料の TDN 1 トンあたりの温暖化負荷量を図3-6に示した。飼料給与量(表3-3)から算出した経営体系別の購入飼料使用に伴う温暖化負荷量は、非放牧舎飼体系で最も高く、放牧導入(CS通年)体系で37%、放牧導入(CS制限)体系で26%、それぞれ非放牧舎飼体系より低かった(図3-7)。

③乳牛の消化管からの CH₄ 排出に伴う温暖化負荷量

乾物摂取量から算出した搾乳牛(泌乳前期、中期、後期)、乾乳牛、および育成牛の消化管からの CH₄ 排出量を表3-5に示した。モデルの前提条件の飼養頭数を乗じて算出した経営全体の CH₄ 排出量および温暖化負荷量は、表3-6の通りとなった。各経営体系とも、乾物摂取量、飼養頭数を同等の条件としていることから、CH₄ 排出量および温暖化負荷量は同量である。

④ふん尿処理に伴う温暖化負荷量

搾乳牛、乾乳牛、育成牛から排出される総排泄物量、排出窒素量および排出有機物量を表3-7に示した。非放牧(舎飼)体系では、全量を施設で処理することになるため、CH₄ および N₂O の排出量

表3 - 5 乳牛消化管からの CH₄ 発生量*

| | 乾物摂取量 kg/day | 日数 | CH ₄ 排出量 | CH ₄ 排出量 | CH ₄ 総量 |
|------|-----------------|-----|---------------------|---------------------|--------------------|
| | | | L/頭/day | kg/頭/day | kg/頭/期間 |
| 泌乳前期 | 22.3 | 101 | 514.3 | 0.367 | 37.1 |
| 泌乳中期 | 20.5 | 100 | 502.7 | 0.359 | 35.9 |
| 泌乳後期 | 18.8 | 105 | 486.7 | 0.348 | 36.5 |
| 乾乳期 | 8.3 | 59 | 278.9 | 0.199 | 11.8 |
| 育成牛 | 7.3 | 365 | 248.8 | 0.178 | 64.9 |

* 乾物摂取量 (DMI) から CH₄ (L/頭/日) = -17.766 + 42.793 × DMI - 0.849 × DMI² (柴田ら, 1993) により算出。

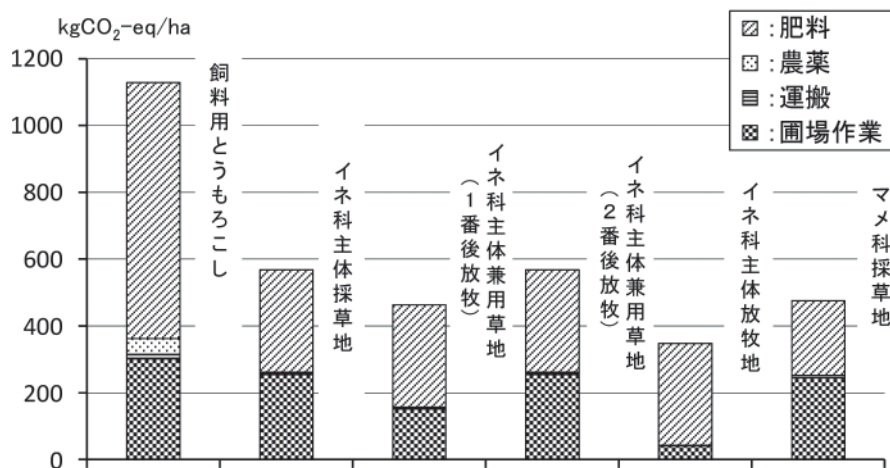


図3-4 自給飼料生産面積あたりのCO₂排出量

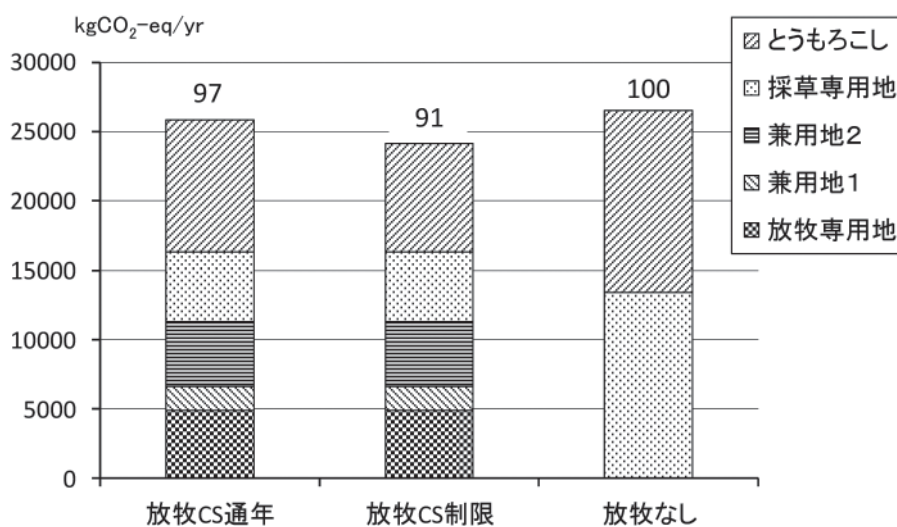


図3-5 自給飼料生産に伴う温暖化負荷

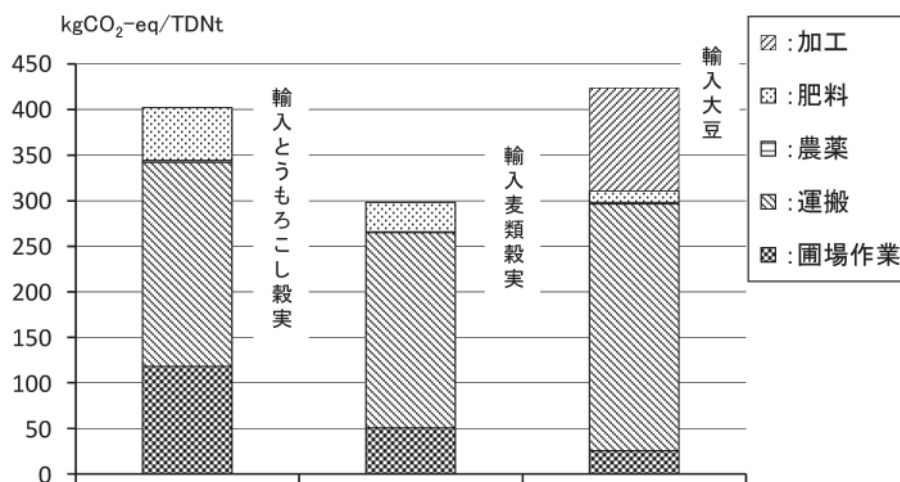


図3-6 輸入飼料のTDNtあたりの温暖化負荷

表3 - 6 乳牛消化管からのCH₄発生量
(年間、経営全体)

| | CH ₄ 排出量 | | 温暖化負荷 | |
|-----|---------------------|--|----------------------------|--|
| | kg/頭/年 | | kgCO ₂ -eq/経営/年 | |
| 経産牛 | 121.3 | | 167348.0 | |
| 育成牛 | 64.9 | | 89498.9 | |

表3 - 7 乳牛からの排泄物量、排出窒素量、
排出有機物量

| 年間の 排出量 | 排泄物量* | | 排出窒素量* | | 排出有機物量** | |
|------------|---------|--------|----------|------|----------|------|
| | kg/経営/年 | | kgN/経営/年 | | kg/経営/年 | |
| | ふん | 尿 | ふん | 尿 | ふん | 尿 |
| 搾乳牛 | 832700 | 245235 | 2796 | 2795 | 133232 | 1226 |
| 乾乳牛 | 106887 | 21953 | 139 | 208 | 17102 | 110 |
| 育成牛 | 172484 | 64561 | 822 | 706 | 27598 | 323 |
| 合計 | 1112072 | 331749 | 3757 | 3709 | 177931 | 1659 |

* 排泄物量、排出窒素量は「家畜の排泄物量推定プログラム」原単位(築城・原田,1997)から算出。

** 有機物含有率は日本国インベントリのデフォルト値を使用(畜産技術協会,2002)。

表3 - 8 舎飼経営(全量を施設で処理)
の年間合計発生量

| | CH ₄ 排出量g/経営/年 | | N ₂ O排出量g/経営/年 | |
|-----|---------------------------|-------|---------------------------|------|
| | ふん | 尿 | ふん | 尿 |
| 搾乳牛 | 5062816 | 47821 | 105465 | 4391 |
| 乾乳牛 | 649875 | 4281 | 5226 | 327 |
| 育成牛 | 1048705 | 12589 | 30999 | 1110 |

表3 - 9 放牧期のふん尿の按分の基準

| 期間(d) | 昼夜 放牧期* | 日中 放牧期* | 舎飼期 | 年間の 合計時間 | 年間の 比率 |
|---------|------------|------------|-----|-------------|-----------|
| | 期間(d) | 152 | 40 | 173 | — |
| 舎内時間(h) | 4 | 14 | 24 | 5320 | 0.61 |
| 放牧時間(h) | 20 | 10 | 0 | 3440 | 0.39 |

* 昼夜放牧:5月21日~20日、日中放牧期:5月1日~20日・10月21日~11月9日

表3 - 10 放牧飼養経営の処理方法別の
ふん尿の年間総量

| | 排泄物量kg/経営/年 | | | |
|-----|-------------|--------|--------|--------|
| | ふん | | 尿 | |
| | 施設処理 | 放牧地処理 | 施設処理 | 放牧地処理 |
| 搾乳牛 | 505704 | 326996 | 148933 | 96302 |
| 乾乳牛 | 64913 | 41974 | 13332 | 8621 |
| 育成牛 | 104751 | 67734 | 39208 | 25353 |
| 合計 | 675368 | 436704 | 201473 | 130276 |

* 舎内および放牧地での滞在時間で按分

は、表3-8の通りとなった。放牧導入体系では、総排泄物量(表3-7)を、牛舎内で排出され、施設で処理される量と、放牧地で排出・分解される量に按分する必要がある。北海道の標準的な放牧期間

表3 - 11 放牧経営で施設処理される排泄物から
の年間合計発生量

| | CH ₄ 排出量g/経営/年 | | N ₂ O排出量g/経営/年 | |
|-----|---------------------------|-------|---------------------------|------|
| | ふん | 尿 | ふん | 尿 |
| 搾乳牛 | 3074678 | 29042 | 64049 | 2667 |
| 乾乳牛 | 394673 | 2600 | 3174 | 199 |
| 育成牛 | 636885 | 7646 | 18826 | 674 |
| 合計 | 4106236 | 39287 | 86049 | 3540 |

表3 - 12 放牧地に排泄された排泄物から
の既存の排出係数

| | |
|--------------------|--------------------------------|
| CH ₄ | 3.67 (gCH ₄ /頭/日) |
| N ₂ O-N | 0.32 (gN ₂ O-N/頭/日) |

* 渋谷ら(1994)

表3 - 13 放牧地で排泄されるふん尿からの
CH₄、N₂Oの発生量

| | 既存の排出係数から算出 | | 試験データから算出 | |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | CH ₄ g/年 | N ₂ Og/年 | CH ₄ g/年 | N ₂ Og/年 |
| 搾乳牛 | 26375 | 3614 | 13320 | 6375 |
| 乾乳牛 | 5187 | 711 | 3753 | 530 |
| 育成牛 | 13887 | 1903 | 6055 | 1282 |
| 合計 | 45449 | 6227 | 23128 | 8187 |

から、按分の基準となる放牧期間および時間を表3-9のように設定し、排泄物量を按分した結果を表3-10に示した。按分したもののうち、施設で処理される排泄物から発生するCH₄およびN₂Oの量は表3-11に示す結果となった。放牧地で処理される排泄物からの発生量は、日本国インベントリで採用されている既存の係数(表3-12)と、本試験で観測された試験結果から求められた係数(表3-1および表3-2)を用いた2方法で算出し、比較した。既存の排出係数から算出した発生量と、本試験で新たに設定した係数で算出した発生量を表3-13に示した。発生量から温暖化負荷量を比較した結果、既存の係数での算出結果と比較して、CH₄で約49%少なく、N₂Oで約31%多くなり、総合した温暖化負荷量では、約2%の増加となった(図3-8)。

⑤経営形態別の温暖化負荷量の比較

上記①~④で算出された温暖化負荷量を、経営形態別に総合した結果を図3-9に示した。ふん尿処理部分からの負荷量の差異が大きく寄与し、放牧導入(CS通年給与)体系は、非放牧(舎飼)体系

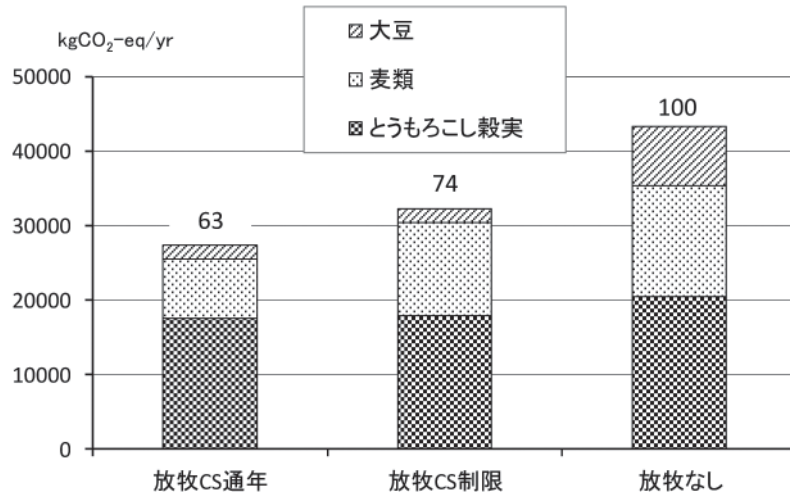


図3 - 7 経営形態別の購入飼料部分の温暖化負荷

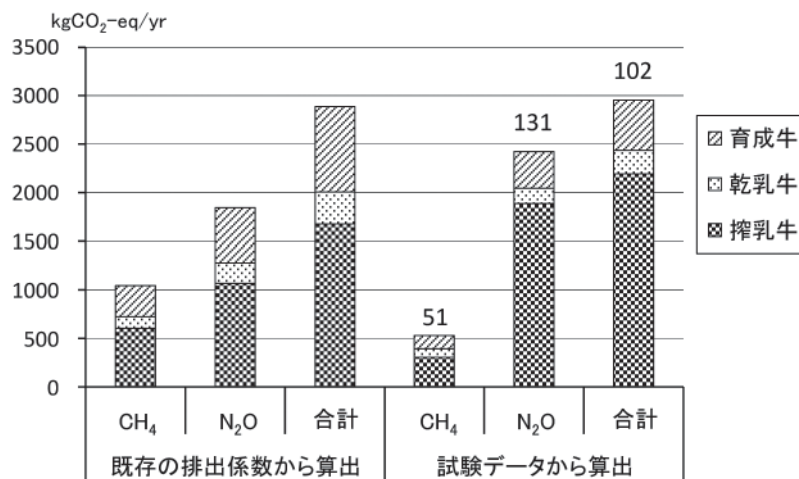


図3 - 8 放牧地で排泄されるふん尿からのCH₄、N₂Oによる温暖化負荷

に比較して17%、放牧導入（CS制限給与）体系は16%、それぞれ温暖化負荷量が少なかった。ふん尿処理以外の部分からの負荷量の差異は小さかった。放牧体系では、排泄物総量の約40%が放牧地に排出され、好気的な条件で迅速に分解できることにより、温暖化負荷量を削減できることが示された（松村ら、2010）。

エ 今後の課題

本研究では、寒地における繁殖牛と搾乳牛のふん尿からのN₂OとCH₄の排出係数、放牧地土壌の土壌呼吸量の推定式等が放牧地からの温室効果ガス発生量の推定精度向上に資する知見として得られた。しかし、まだまだ基礎的データの蓄積が少なく、他地域でも関連データが蓄積されていくことが望まれ

る。また、今回の酪農経営からの温暖化負荷量の試算は、北海道東部地域の中規模酪農家に放牧体系を導入した際の条件に限定される。異なる地域や経営規模、経営形態へ放牧を導入した際の変化を明らかにするには、さらにデータを蓄積することが求められる。

オ 要約

放牧地における温室効果ガス発生量の推定精度向上に資する知見を得るため、道央（札幌）の放牧地においてガス発生量の実測を行い、牛ふん尿由来の一酸化二窒素とメタンの排出係数は、北関東で得られた値に比べ同等か小さいこと、ふん由来のメタン排出係数は繁殖牛の方が搾乳牛に比べて有意に大きいことを明らかにした。また、放牧地に設置された

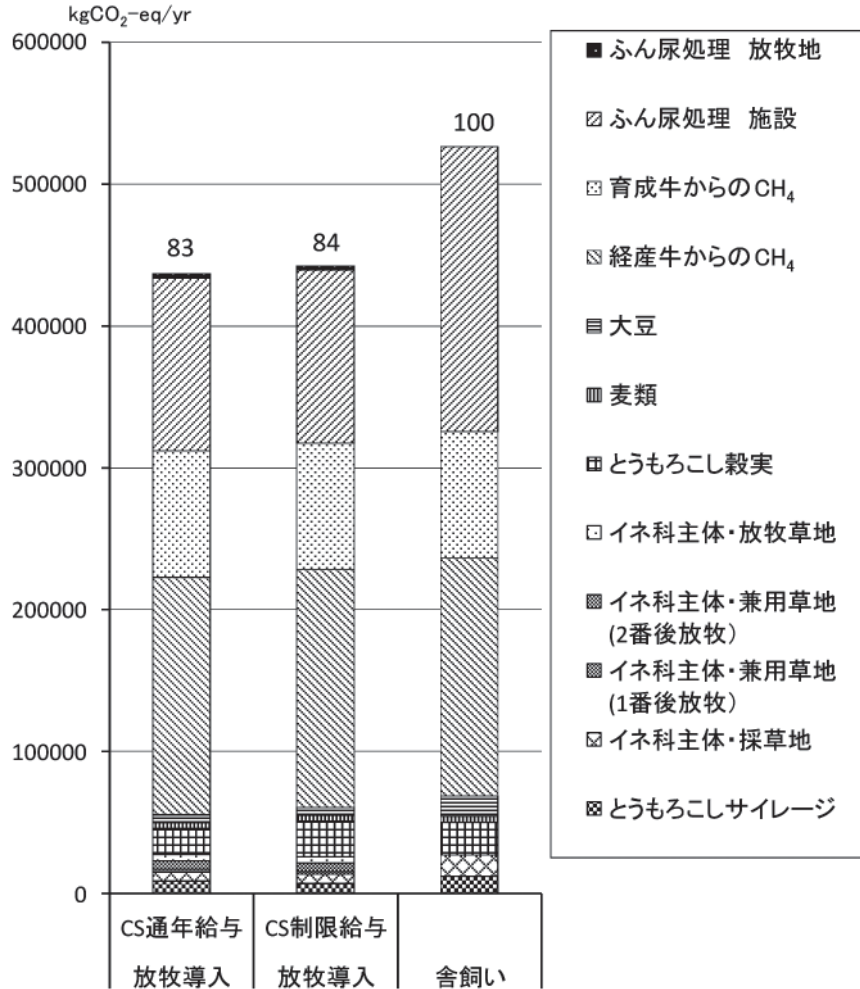


図3-9 経営形態別の温暖化負荷の比較

水槽近傍に自然発生する裸地からの N₂O 発生量は草地部分に比べて非常に大きく、本研究で行った尿投入試験時の発生量ピークと比べても数十倍に達する場合のあること、また、通常条件ではわずかな発生しか見られない CH₄ は泥濘化に伴い激増することを明らかにした。さらに、人為的に裸地化した土壌面を用いた試験により、放牧地からの土壌呼吸による CO₂ 発生量の推定式を作成した。また、寒地中規模酪農の放牧体系と舎飼体系の温室効果ガス排出量の LCA 分析により、舎飼経営へ放牧を導入した際の低減効果を部門別に見ると（乳牛消化管からの排出を除く）、飼料生産部分では放牧・CS 通年給与体系で 3%、CS 制限給与体系で 9% の低減、購入飼料部分では、CS 通年体系で 37%、制限体系で 26% の低減、ふん尿処理部分では 38% の低減（本試験での計測データでの再計算結果で精緻化）となり、各部分および乳牛消化管からの排出の合計で、

放牧・CS 通年で 17%、放牧・CS 制限で 16% の低減が可能であることが試算された。

カ 参考文献

秋山典昭, 八木隆徳, 須藤賢司, 小路敦, 渡辺也恭, 坂上清一, 松村哲夫, 永田修 (2009) : 放牧飼養における温室効果ガス発生量の評価 (1) 札幌の放牧地における牛ふん由来の CH₄ と N₂O の発生, 日草誌. 55 (別), 104

秋山典昭, 八木隆徳, 須藤賢司, 小路敦, 渡辺也恭, 坂上清一, 松村哲夫, 永田修 (2010) : 放牧飼養における温室効果ガス発生量の評価—札幌の放牧地における牛尿由来の CH₄ と N₂O の発生, 日草誌. 56 (別), 173

秋山典昭, 八木隆徳, 須藤賢司, 小路敦, 渡辺也恭, 坂上清一, 松村哲夫, 永田修 (2011.a) : 放牧飼養における温室効果ガス発生量の評価 (4) 札幌の放牧地における牛ふん尿由来の一酸化二窒素とメ

タンの発生, 日草誌. 57 (別), P33

秋山典昭, 八木隆徳, 須藤賢司, 小路敦, 渡辺也恭, 坂上清一, 松村哲夫, 永田修 (2011.b): 放牧飼養における温室効果ガス発生量の評価 (5) 放牧地の裸地部分からの二酸化炭素、一酸化二窒素、メタンの発生, 日草誌. 57 (別), P34

小林久, 袖山義人 (2006): 輸入飼料の供給地域別ライフサイクル・エネルギー消費量および GHG 排出量の推計, 環境情報科学. 35 (3), 45-53.

柴田正貴, 寺田文典, 栗原光規, 西田武弘, 岩崎和雄 (1993): 反芻家畜におけるメタン発生量の推定, 日畜会報. 64 (8), 790-796

渋谷岳, 木村武, 山本克巳, 野中邦彦 (1994): 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, 環境省地球環境研究総合推進費研究成果報告書, 99-113

畜産技術協会 (2002): 畜産における温室効果ガスの発生制御総集編, 畜産技術協会

築城幹典, 原田靖生 (1997): 家畜の排泄物量推定プログラム, システム農学. 13 (1), 17-23

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構編 (2006): メタン放出の低減, 日本飼養標準 (乳牛), 100-102, 中央畜産会, 東京

南齋規介, 森口祐一, 東野達 (2004): 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), 環境庁国立環境研究所地球環境研究センター, 200P.

藤田直聡, 相原克磨 (2008): 寒地中規模酪農における集約放牧技術の確立、II-1. 畑地型集約放牧技術の経営評価と地域への波及効果の解明, 北海道農研プロジェクト研究成果シリーズ No.4, 158-166

北海道農政部技術普及課 (2005): 北海道農業生産技術体系 (第3版), (社) 北海道農業改良普及協会, 430P

松村哲夫, 秋山典昭, 須藤賢司, 藤田直聡, 坂上清一, 渡邊也恭, 八木隆徳, 小路敦 (2011): 寒地中規模酪農への集約放牧体系導入による温室効果ガス排出量の削減効果, 北草研報. 45,74

八木一行 (1997): ガスの分析法とフラックスの計算法, 土壌環境分析法, 135-138, 博友社, 東京

(秋山典昭、松村哲夫)

2. 家畜行動の解析による温室効果ガス発生量算定の精緻化

ア 研究目的

放牧飼養では、家畜行動によってふん尿の局在化が生じる。これにより温室効果ガスの発生も圃場内で不均一となっている可能性があり、サンプリング方法によっては温室効果ガス発生量の評価に大きな誤差が生じることも考えられる。放牧圃場における温室効果ガス発生量をより正確に見積もるためには、家畜の放牧行動を解析し、排泄量の分布状況を明らかにする必要がある。さらに、それらを踏まえて草地全体のガス発生量を低減化させる放牧技術の開発も必要となる。以上のことから、本研究では以下の3つの取り組みを行った。1) 放牧地と牛舎等施設間を交互に往来する乳牛放牧システムにおける草地へのふん排出割合を評価する、2) 育成牛や繁殖牛を対象とした、長期間に渡って放牧地のみで飼養するシステムにおいて、ふんの排出時間を測定する技術を開発する、3) 放牧の一般的な形態である傾斜地放牧において、ふんからの温暖化ガス発生量を抑制する放牧技術を開発する。

イ 研究方法

1) 集約放牧条件下における乳牛の草地へのふん排出割合の評価

①昼夜放牧条件下における乳牛の草地、通路及び水・休息場へのふん排出割合の評価

北農研で飼養される泌乳牛から月齢と直近分娩日の近い3頭を選び供試牛とした(月齢26-27ヶ月、分娩日2008年3月1日-4月17日)。供試牛を用いて2008年7月13日から7月31日(夏試験)及び9月18日から10月2日(秋試験)にかけて、毎日輪換式の放牧試験が行われた。試験はペレニアルライグラスとシロクローバが優占する矩形型の放牧草地で行った。放牧区の面積は供試牛の維持・成長に必要な草量を考慮し、1日あたり(1牧区)の面積を930 m²(46.5 × 20 m)とし、供試草地を電気牧柵で区切ることにより計14牧区を作成した(図3-10、写真3-1、牧区名は牛舎に近い側から順に1、2、…14牧区とする)。ただし5牧区と14牧区については通路側に寒冷遮を屋根にした休



写真3-1 乳牛放牧試験(2008年7月31日撮影)

息場(5 × 5 m)を設置したことにより面積は905 m²とした。供試牛は放牧期間中、毎日14の牧区の内1つに放牧され、14日間で全牧区を一巡した。水飲み場(フロート付きコンテナ)は牧区を移動する通路間(休息場横)に固定設置され、放牧中、牧区に近い方の水飲み場と休息場のみが利用できるように電牧線により通路が仕切られた。供試牛群は朝9:00AMと夜19:00PMの2回搾乳のため7:00AMと17:00PMに放牧地からフリーストール牛舎に移動させた。牛舎内で補助飼料(配合、グラスサイレージ、ビートパルプペレット、乾草(秋のみ))を給与後、牛舎に併設されたパーラー施設で搾乳を行った。搾乳後直ちに放牧地へ移動させ、日中は8時間、夜間は12時間、1日計約20時間の放牧を行った。朝の搾乳後に新たな牧区に移動させ、夜の搾乳後は朝と同じ牧区で放牧させた。

野外におけるふんの分布調査は、7月18日から7月31日にかけての14日間及び9月20日から10月1日にかけての12日間にそれぞれ行った。草地(905または930 m²)、移動通路(通路幅×長さ、2.5 × 90 m、225 m²)、水飲み場と休息場付近(50 m²)に排出されたふんの数を供試牛の朝の退牧後にそれぞれ数え上げた。

各場所に排出されたふん数はその場所の面積割合(草地:通路:水・休息場、18.5:4.5:1)に基づいて計算された期待値と異なるかどうかについて各期(夏と秋)で2項検定により評価された。場所ごとにふんの排出が期待される確率は、その面積比から草地、通路及び水・休息場でそれぞれ18.5/24、4.5/24及び1/24とした。また、夏と秋で野外へ排出され

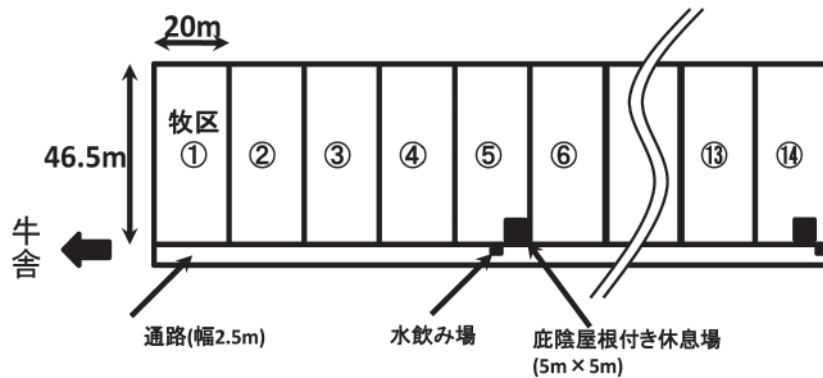


図 3 - 10 乳牛放牧草地模式図

るふん数が異なるかどうかについて、放牧された牧区ごとにペアとした対応のある t 検定を行い比較した。

②放牧方法の違いが乳牛の屋外と屋内に排出するふん数の割合に及ぼす影響

一般的な搾乳システムでは、牛は朝と夜の 1 日 2 回搾乳されるが、この 2 回の搾乳前後の放牧の利用の仕方により、乳牛放牧は主に昼夜放牧（朝と夜の搾乳後共に放牧）、日中放牧（朝搾乳後のみ放牧、夜搾乳後は屋内に滞在）及び夜間放牧（朝搾乳後は屋内、夜搾乳後に放牧）の 3 つに分けることができる。放牧地に排出されるふん尿からのガス発生量を精緻化するためには、屋内と屋外に排出されるふん尿の割合が放牧方法の違いによってどのように変化するかを把握することが必要である。本試験では放牧方法の違いが泌乳牛の屋外と屋内に排出するふん数の割合に及ぼす影響について調査を行った。

昼夜放牧条件下における乳牛のふん排出数について、屋内（畜舎、搾乳施設および放牧前の牛の待機場（コンクリートパドック））と屋外（放牧草地、休息・水飲み場および移動通路）の 2 つに分けて測定した。8 頭の泌乳牛（月齢 25 - 65 ヶ月、体重 484 - 692kg、分娩後 45 - 133 日）を選び供試牛とし、2009 年 9 月 11 日から 10 月 7 日の期間、毎日輪換式の放牧が行われた。供試牛は朝と夜の搾乳時 2 回約 2 時間ずつ屋内に滞在し、それ以外は屋外にいる。放牧は朝搾乳後新しい牧区で行い、夜搾乳後は朝に入れた牧区で行った。放牧地はメドウフェスク優占草地であり、牧区の面積は牛の体重 100kg あたり乾物草量で 5 kg になるよう毎日調整して区切られた。本試験では 1 日の牧区面積は平均で 220 m² で

あった。ふんの測定は屋外では朝の退牧後に実施し、屋内では朝と夜の放牧開始直前に行った。屋内では新鮮なふんのみを測定するため、ふんは測定後すぐに片付けられた。

日中放牧と夜間放牧における屋外及び屋内に排出されるふん数を調査するために 8 頭の泌乳牛（月齢 24 - 45 ヶ月、体重 490 - 656kg、分娩後 31 - 228 日）が供試され、この 8 頭を 4 頭ずつの 2 グループ（A と B）に分けた。A グループは 2010 年 5 月 27 日から 6 月 10 日にかけて朝搾乳後放牧し、夜搾乳後は屋内に滞在させる日中放牧（9.6 時間放牧）を行い、B グループは同期間、朝搾乳後は屋内に滞在させ夜搾乳後に放牧させる夜間放牧を行った。次に 6/11 から 6/24 の期間には処理を交代させ、A グループは夜間放牧（14.0 時間放牧）に、B グループは日中放牧に供した。日中放牧区、夜間放牧区ともに毎日輪換式の放牧を行い、両グループは毎日それぞれ別の牧区で放牧された。全期間通じて日中放牧については 11 回、夜間放牧については 10 回のふん数測定を行った。ふん数の測定は日中放牧区で朝搾乳後の放牧前に屋外でのふん数を測定し、放牧後に屋内のふん数を測定した。夜間放牧区では朝の退牧後に屋外のふん数を測定し、夜搾乳後に屋内のふん数を測定した。

各放牧処理における屋外と屋内のふん数の割合がその滞在時間に基づく割合（昼夜放牧、20.0h（屋外）：4.0h（屋内）；日中放牧、9.6h（屋外）：14.4h（屋内）；夜間放牧 14.0h（屋外）：10.0h（屋内））と異なっているかどうかを解析するために、2 項検定が実施された。

2) 加速度センサーを利用したふん排出時間の測定法の開発

① 去勢牛のふん排出時の尻尾の加速度値変化

黒毛和種繁殖牛と育成牛の定置放牧を行っている北農研内草地（35号圃場と37-2号圃場、約7.6ha）において2010年7月から9月にかけて試験を実施した。放牧条件下の去勢牛3頭（牛221、月齢36ヶ月、体重572kg; 牛225、27ヶ月、504kg; 牛227、27ヶ月、512kg; 月齢と体重は7月時点）の尾（肛門から下にむかって距離約20cm）に3軸加速度計（日立 Airsence、43×35×15mm、40g）を粘着性弾力包帯を用いて固定し、0.05秒ごとに加速度を測定した。加速度軸の向きは写真3-2のように、尻尾が下がっているとき（正常時）に牛体の前後方向の加速度を検出する軸をz軸、牛体の横方向を検出する軸をy軸そして上下方向を検出する軸をx軸とした。ふん排出のため尻尾が上がるとき、尻尾は尾根を原点として約90度回転するが、その際に尻尾に装着した加速度計のz軸とx軸もそれぞれ

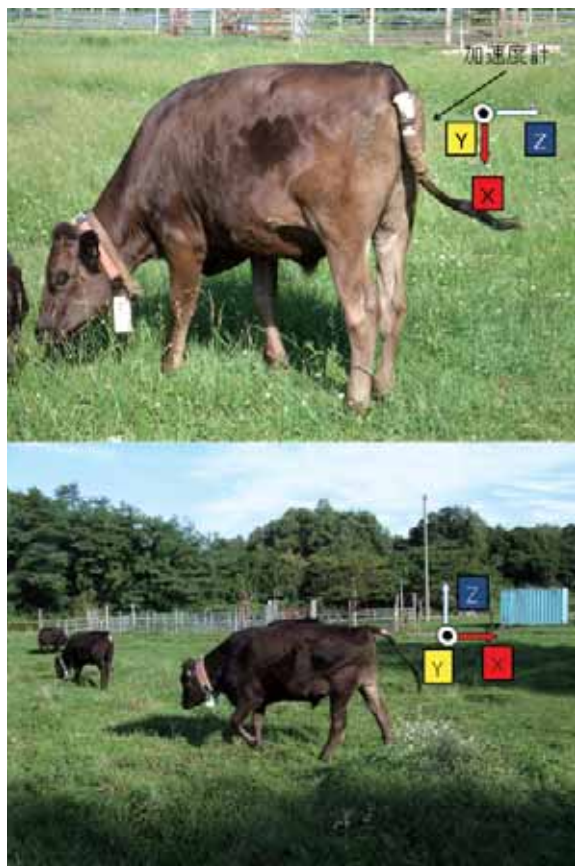


写真3-2 去勢牛の尻尾に装着した加速度計とその軸の向き

90度回転する。牛体の前後方向の加速度を検出していたz軸は、尻尾が地面と水平になったとき上下方向（地面と垂直の向き）の加速度を検出することになり、x軸はこのとき上下方向から水平方向に向きを変える。一方、y軸は尻尾の上下方向の運動時にはその軸の向きは変わらない。加速度の測定期間中、直接行動観察を全80時間（3頭込み）実施し、ふんの排出時間を記録した。

② GPSと加速度センサーを組み合わせた放牧牛のふん排出時間と場所の特定

①で供試された去勢牛のうち1頭（牛221、2008年10月調査時で月齢16ヶ月、体重374kg）に3軸加速度センサー（ペンダントGロガー、58×33×23mm、18g、Onset社）を①と同様に尻尾に、GPS（eTrex Venture、ガーミン社）を頭絡を用いて頭部に装着した。本試験で使用した加速度センサーとGPSの記憶容量を考慮して、測定間隔はそれぞれ1秒及び30秒とし、測定時間は17時間とした（2008年10月14日9:00から翌15日2:00AM）。得られたGPSデータをGISソフト（ArcView 9.3 ESRI社）を用いて可視化し、さらにふん排出時間については①の方法で（加速度値を可視化して上に凸、下に凸の放物線の存在を指標として）識別し、識別された時間と最も近いGPS測定時間に測位された場所をふん排出場所とした。

③ 加速度センサーによるふん排出時の自動的識別法の開発

自動的にふん排出時間を識別するために、ふん排出時にz軸で見られる「上に凸の放物線」を検出するアルゴリズムの開発を行った。①で得られたデータセットを用いて以下の解析を行った。z軸の加速度値データについて移動平均（n=60）を取る。次に移動平均値が0.5以上を記録しかつ、それが9秒間以上連続した時を抽出する。検出された時間と行動観察による排出時間を比較した。

3) 傾斜放牧地におけるふんからの温暖化ガスを抑制する放牧技術の提示—水飲み場設置位置が傾斜放牧地のふん分布に及ぼす影響—

北農研内の傾斜草地（斜度平均8.3°）3牧区（Ⅰ、Ⅱ、1.02ha（60×170m）；Ⅲ、0.85ha（50×170m）；長辺が傾斜方向）に、黒毛和種繁殖牛（約16頭）



写真3 - 3 傾斜草地における放牧試験(2010年5月17日撮影)I 牧区で放牧(黒毛和種成牛20頭)。水飲み場は斜面下に設置した。



写真3 - 4 乳牛放牧のための通路と水・休息場の裸地状態(2008年7月3日撮影)

とその仔牛を2008 - 2010年の3年間、5 - 6月にかけて4日間ずつ放牧した(3牧区×3年間、全9試験; 写真3 - 3に放牧試験の例、2010年牧区I)。水飲み場の位置は2008 - 2010年にそれぞれ斜面中部、上部、下部に設置した。放牧後草地を10×10mの格子状に区切りその排出ふん数を数え上げて測定した。また、2010年には成牛7頭の首にGPS及び加速度計(ライフコーダー、Suzuken)を装着し、1分ごとの位置と行動(採食、休息)を測定した。試験(全9試験)ごとに各枠(10×10m)でのふん数実測値と排出された全ふん数を枠数で除した期待値とを、 χ^2 適合度検定により比較した。さらに水飲み場位置ごとに、水飲み場所を含む枠の実測値と期待値との比較を、牧区を反復として(n=3)、

対応のあるt検定により行った。またふん数を従属変数、斜面位置、草量、草質(粗タンパク含量)、牛の滞在時間を独立変数の候補としてステップワイズ重回帰分析を統計解析ソフトSPSS(ver. 19、IBM Inc.)を用いて行い、ふん数に最も影響を与える要因を解析した。

ウ 結果及び考察

1) 集約放牧条件下における乳牛の草地へのふん排出割合の評価

① 昼夜放牧条件下における乳牛の屋外での場所ごとのふん排出

昼夜放牧された乳牛3頭が草地、通路及び水・休息場に排出したふん数とその場所の面積比から期待されるふん数との比較について表3 - 14に示す。夏と秋で、屋外で観察された1日あたりふん数はそれぞれ平均37.1と36.3であり、有意な差はなかった。また、草地、通路及び水・休息場の場所ごとのふん数は、夏ではそれぞれ32.3、0.4及び4.5、秋では34.3、1.4及び0.5であった。草地のふん数間には有意な差はなかったが、通路のふん数では秋が、水・休息場では夏が有意に多かった。

観察されたふん数と各場所の面積から期待されるふん数との差について季節ごとに比較された。夏では草地のふん数は期待値とほぼ変わらなかったが、通路では面積から期待されるふん数7.0に対して実際には0.4と有意に少なく、水・休息場では期待値1.5に対し4.5と有意に多かった。一方、秋では草地が期待値28.0に対して実際は34.3と有意に多く、逆に通路は期待値6.8に対し実際は1.4と有意に少なかった。水・休息場では有意な差は検出されなかった。

以上から、夏と秋で屋外に排出されるふん数に違いはなく平均して36.7/日(1頭あたりでは12.2/日)であること、夏では水・休息場にその面積に比して多くのふんが排出されること、及び通路に排出されるふん数は放牧期間を通じて少ないこと、が明らかとなった。

本試験区の通路ではその面積の一部が裸地であり、水・休息場では半分以上が裸地であった(写真3 - 4)。裸地に排出されたふんの窒素分は植物に吸収されにくく、それゆえ植生の上に排出された

表3 - 14 昼夜放牧された乳牛3頭が草地、通路および水・休息場に排出したふん数と面積比から期待されるふん数との比較

| | 日平均 気温(°C) | ふん数(日) | | | | 期待ふん数(日) | | |
|------|---------------|--------|--------|-----------|------|----------|-----|-----------|
| | | 草地 | 通路 | 水・ 休息場 | 計 | 草地 | 通路 | 水・ 休息場 |
| 夏 | 20.0 | 32.3 | 0.4** | 4.5* | 37.1 | 28.6 | 7.0 | 1.5 |
| 秋 | 13.8 | 34.3** | 1.4* | 0.5 | 36.3 | 28.0 | 6.8 | 1.5 |
| 有意差† | | NS | p<0.01 | p<0.01 | NS | | | |

「各場所に排出されたふん数はその場所の面積比から計算された期待値と異なる」という帰無仮説を基に2項検定が実施された。*と**はそれぞれ5%、1%レベルで有意差があることを示す。期待されるふん数は1日のふん数合計(計の値)と面積比、草地:通路:水・休息場 = 18.5:4.5:1から計算された。

†, 夏と秋のふん数の差について測定日を反復、放牧された牧区をペアとして対応のあるt検定を行った。NSは有意差なし(p > 0.1)。

表3 - 15 乳牛の昼夜、夜間及び日中放牧における屋外と屋内に排出されたふん数

| | ふん数(頭・日) | | | 放牧法の違いによる ふん数の差†, 有意性 |
|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| | 昼夜放牧 20.0:4.0(h) | 夜間放牧 14.0:10.0(h) | 日中放牧 9.6:14.4(h) | |
| 屋外ふん | 11.5a | 6.4b | 4.3c | p<0.01 |
| 屋内ふん | 2.3c | 3.8b | 5.3a | p<0.01 |
| ふん合計(屋外+屋内) | 13.8a | 10.1b | 9.5b | p<0.01 |
| 実測値と期待値との差 *, 有意差 | NS | NS | NS | |

†:「屋外と屋内に排出されるふん数はその滞在時間割合から期待されるふん数と同じである」という帰無仮説をもとに、2項検定が実施された。

†, 放牧方法の違いが各場所のふん数の差に及ぼす影響について分散分析により解析した。その後 Tukey-Kramer の多重比較検定を行った。行ごとに異なる文字間で有意差あり(p < 0.01)。

ふんと比較して多くの温暖化ガスを発生させるといえる。特に、水飲み場など水分率が高い場所の裸地ではメタンガスの発生が高まるのが秋山ら(本成果プロジェクト)により明らかとされた。夏の水・休息場では面積に比して有意にふんが蓄積されやすかったことから、草地からのガス発生量精緻化のためにはこの分について推定することが必要と判断され、またこの時期に水・休息場にふんを集中させないような対策を施すことが必要と考えられた。一方、通路についてはふん数が季節を通じて一貫して少なくそのふん数の推計は面積比よりも小さくても構わないことが示唆された。

②放牧方法の違いが乳牛の屋外と屋内に排出するふん数の割合に及ぼす影響

昼夜放牧(屋外:屋内、20.0:4.0(h))、夜間放牧(14.0:10.0(h))及び日中放牧(9.6:14.4(h))

における乳牛1頭あたりのふん数/日は、それぞれ13.8、10.1および9.5であり、昼夜放牧でそのふん数が有意に多かった(表3-15)。屋外と屋内の場所別で見ると、屋外ではその滞在時間の順と同様にふん数が昼夜(11.5) > 夜間(6.4) > 日中(4.3)の順で有意に多かった。また、屋内でも同様にその滞在時間の順と同様にふん数が日中(5.3) > 夜間(3.8) > 昼夜(2.3)の順となった。屋外と屋内に排出されたふん数の割合とその滞在時間に基づいた期待値との差を比較したところ、全ての放牧形態で有意な差はなかった。

泌乳牛の1日あたりふん数については Waite *et al.* (1951) は9 - 13/日(平均10.7/日)、Aland *et al.* (2002) は8 - 29/日(平均16.1/日)であったと報告している。本試験で得られた1日あたりふん数もこの範囲にあった。

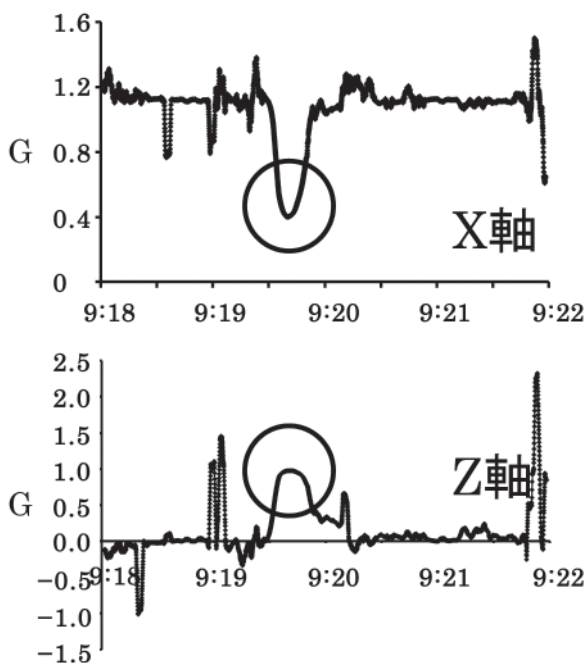


図3 - 11 去勢牛のふん排出時の尻尾の加速度値変化(x軸とz軸)

2010年7月2日9:18-9:22の牛227の尻尾に装着した加速度計値
印は直接行動調査により排ふんを観察した時間帯

乳牛放牧では一定時間牛舎や搾乳施設に滞在することから、これらの放牧地での温室効果ガス発生量を精緻化するためには屋外(放牧地)で排出されたふんと施設で排出されたふんの割合を把握する必要がある。本試験により放牧時間の増加により屋外で排出されるふん数が増加すること、また、牛舎等施設に滞在する時間の増加に伴い屋内に排出されるふん数も増加することが明らかとなった。さらに、屋外と屋内へのふんの排出割合は放牧方法の違いにかかわらず牛の滞在時間に基づいた期待値と異なることが明らかとなった。これにより放牧時間(滞在時間)と1日あたりふん数の把握により屋外へのふん数の推定が可能になることが示された。ただし、1日あたりふん数は昼夜放牧で有意に高まっていたことから、この値は放牧法により異なると判断された。昼夜放牧では1日の餌はほとんど放牧地の生草でまかなわれるが、日中放牧や夜間放牧では放牧時間の減少に伴う採食量減少を補うためサイレージなどの粗飼料が給与される。これら水分率の異なった餌の違いなどがふん数に影響を及ぼした可能性がある。1日の総ふん数に及ぼす餌の影響について今後調査が必要である。

2) 加速度センサーを利用したふん排出時間の測定法の開発

① 去勢牛のふん排出時の尻尾の加速度値変化

尻尾に加速度計を装着した去勢牛3頭の行動調査を放牧地で計80時間(牛221、31時間;牛225、19時間;牛227、31時間)行い、3頭合わせて52回(221、15回;225、12回;227、25回)のふん排出を観察した。その直接観察した時間帯について加速度の変化を見ると52回の全てのデータセットで、z軸ではふん排出時に上に凸の放物線を描き、x軸では下に凸の放物線を描くことが示された(図3-11)。しかしy軸では排出時に特徴的な波形は確認できなかった。

② GPSと加速度センサーを組み合わせた放牧牛のふん排出時間と場所の特定

加速度値の時間推移グラフから17時間の測定期間中計10回のふん排出が目視で識別された。ふん排出を識別した時間と最も近いGPS測定時間を選び、その時の牛の位置をふん排出が行われた場所としてGIS地図上に示した(図3-12)。ふんの排出は午前中は比較的平坦な草地に、夕方から夜にかけては傾斜草地の標高の高い場所で行われたことが明らかとなった。

本試験では加速度センサーとGPSの記憶容量の制限により、長期間のデータ取得はできなかったが、今後これらの克服により大規模定置放牧地などこれまで長期の測定が困難であった草地での知見が得られることが期待される。

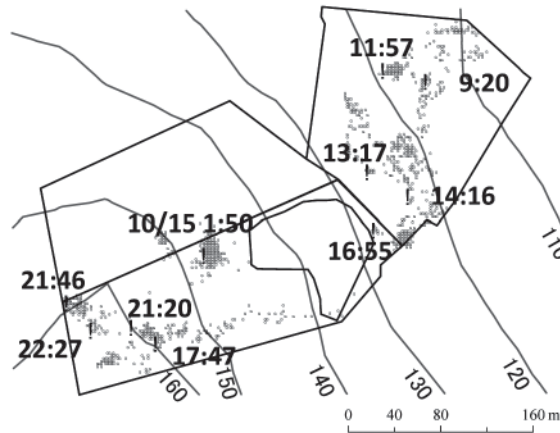
③ 加速度センサーによるふん排出時の自動的識別法の開発

加速度値のグラフ化により、可視的にふんの排出の識別が可能であることが示されたが、長期間に亘り得られたデータの全グラフ化と放物線の識別には多大な労力を必要とし、また上に凸あるいは下に凸の放物線の存在の判断も人によって異なる可能性もある。長期的かつ精度よくふん排出を解析するためには加速度の数値のみから自動的(統計的)に識別できる方法の開発が必要である。そこで、z軸の加速度値データを用いてふん排出を自動的に検出できるアルゴリズムの開発を試みた。

表3-16にその結果を示す。実際にふん排出を52回観察したのに対し本アルゴリズムにより推定

表3 - 16 加速度計を利用した排ふん時間検出システムの検討

| 調査時間 (h) | 排ふん 観察数 a | 検出数 b | 検出中 正答数 c | 未検出数 | 検出率(%) c/a | 検出正答 率(%) c/b |
|-------------|--------------|----------|--------------|------|---------------|------------------|
| 80 | 52 | 71 | 49 | 3 | 94.2 | 69.0 |



+ 30秒毎の牛の位置 ● フンをした位置と時刻

図3 - 12 GPSと加速度センサーを用いた放牧牛のふん排出時間と場所の特定

2008年10月14日AM9:00-15日AM2:00の17時間測定。
黒毛和種去勢牛221に装着

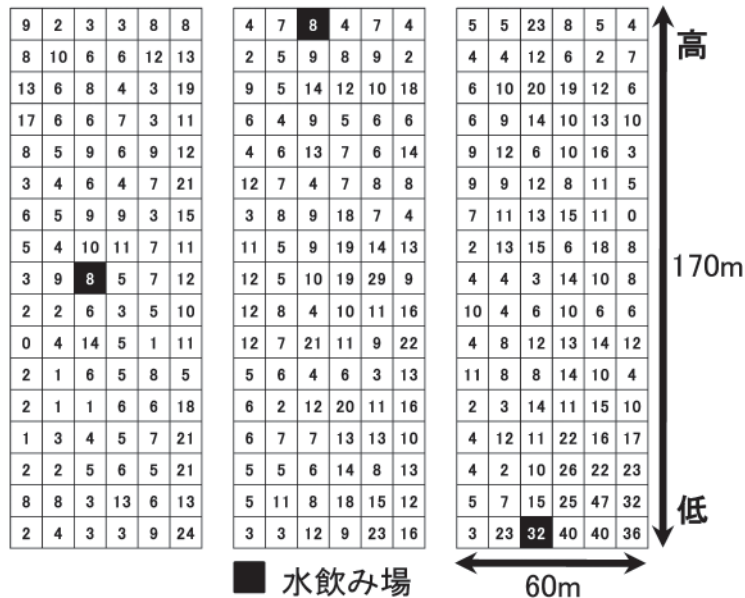


図3 - 13 水飲み場の設置位置の違いが傾斜放牧地のふん数に及ぼす影響

各枠は10m × 10m。枠中の数値は4日間に排出されたふん数。第 牧区データ。供試牛は黒毛和種繁殖牛の成牛とその仔牛。水飲み場斜面中(図左)、2008年6月19日-6月23日試験、成牛12、仔牛6頭。水飲み場斜面上(図中)、2009年6月1日-6月5日試験、成牛14、仔牛6頭。水飲み場斜面下(図右)、2010年6月1日-6月5日試験、成牛20、仔牛4頭。

表3 - 17 水飲み場設置場所の違いがふん数に及ぼす影響

| 水飲み場 場所 | 実測値 平均 | 期待値 平均 | t値 | 有意差 |
|------------|-----------|-----------|------|--------|
| 上 | 14.0 | 9.8 | 0.9 | NS |
| 中 | 12.3 | 8.0 | 1.1 | NS |
| 下 | 29.3 | 11.0 | 16.2 | p<0.01 |

「水飲み場設置場所内（10m × 10m）のふん数実測値と面積比から計算されたふん数期待値とが異なる」という帰無仮説のもと、対応のあるt検定が実施された。

表3 - 18 ステップワイズ重回帰分析により採用されたふん数の予測モデルとその変数

| | | 調整済み R ² | 選択された 変数 | 標準化 係数 |
|-------|------|------------------------|-------------|-----------------|
| I 牧区 | モデル1 | 0.30 | 牛滞在時間 | 0.555 |
| | モデル2 | 0.36 | 牛滞在時間 斜面 | 0.400 -0.273 |
| II 牧区 | モデル1 | 0.54 | 牛滞在時間 | 0.732 |
| | モデル2 | 0.55 | 牛滞在時間 | 0.671 |
| | | | 斜面 | -0.149 |
| | モデル3 | 0.57 | 牛滞在時間 | 0.642 |
| | | | 斜面 | -0.279 |
| | | 草質 | -0.185 | |

従属変数は「各場所でのふん排出数」とし、独立変数は「斜面位置」、「草量」、「草質（粗タンパク含量）」及び「牛の滞在時間」の中からステップワイズ法により選択された。

されたふん排出回数は71回であった。そのうち実際と一致したのは49回であり、22回は誤検出であった。検出した時間帯の中にほとんど実測した時間帯が含まれていたが（検出率94.2%（49/52））、誤検出分も合わせると正答率は低くなった（検出正答率69.0%（49/71））。今後、x軸の利用も含めた検出法の改善による精度向上が必要であった。

3) 傾斜地放牧におけるふんからの温暖化ガスを抑制する放牧技術の提示－水飲み場設置位置が傾斜放牧地のふん分布に及ぼす影響－

水飲み場を斜面上部、中部及び下部に設置したときの黒毛和種繁殖牛約16頭の4日間のふんの分布データが3牧区（3反復）で得られた（図3-13、第2牧区での例を示す）。各放牧試験（計9、処理3×牧区3）のふん分布について、各場所（10×10m）で排出されたふん数はその面積に基づいた期待値と同じかどうかを χ^2 適合度検定により評価したところ、全ての試験区で有意差があり（p<0.01、

表なし）、ふんの分布は面積に基づいた期待値と異なることが明らかとなった。次に、水飲み場の設置場所がその面積に基づいた期待値と異なるかどうかについて牧区を反復とした（反復数3）対応のあるt検定により解析した（表3-17）。その結果、斜面上部と中部への水飲み場設置では有意な差は見られなかったが、斜面下部への設置では有意差が検出され、水飲み場が設置された場所のふん数は期待値よりも増加することが示された。

水飲み場以外にふんの分布に重要な影響を及ぼす要因を明らかにするために、「斜面位置」、「草量」、「草質」及び「牛の滞在時間」を独立変数の候補としてステップワイズ重回帰分析が行われた（表3-18）。調査は斜面下部に水飲み場が設置されたときの2つの牧区（牧区IとII）で行われた。牧区Iでは、自由度調整済み決定係数（adj R²）が0.30と0.36の2つのモデル（モデルI-1とI-2）が採用された。モデルI-1では独立変数として「牛の滞在時間」（標準化係数0.55）が選ばれた。モデルI-2では「牛の滞在時間」と「斜面」が選ばれ、標準化係数はそれぞれ0.4及び-0.27であった。牧区IIでは3つのモデルが採用され（モデルII-1、II-2及びII-3）、それぞれの自由度調整済み決定係数は0.54、0.55及び0.57であった。モデルII-1では「牛の滞在時間」（標準化係数0.73）、モデルII-2では「牛の滞在時間」（0.67）と「斜面」（-0.15）、モデルII-3では「牛の滞在時間」（0.64）、「斜面」（-0.28）及び「草質」（-0.18）が選ばれた。牧区IとIIで共通して、「牛の滞在時間」が最もふんの分布に影響を及ぼしていることが明らかとなった。他に「斜面」もふんの分布に影響を及ぼしていたがその寄与度は「牛の滞在時間」と比較して低かった。

GPSにより測定された牛の各場所の滞在時間について、首に装着した加速度計のデータを利用して「採食時間」（高い加速度値を記録したその他行動も含む）と「休息時間」（低い加速度値を記録したその他行動も含む）に分けた。そして、場所ごとの採食時間及び休息時間とふん数との関係について解析した（図3-14は牧区IIのデータを示す）。その結果、牧区IIでは、ふん数は「採食時間」とはほとんど関係しないが（R²=0.03）、「休息時間」とは大きく関係する（R²=0.53）ことが明らかとなった。牧区I

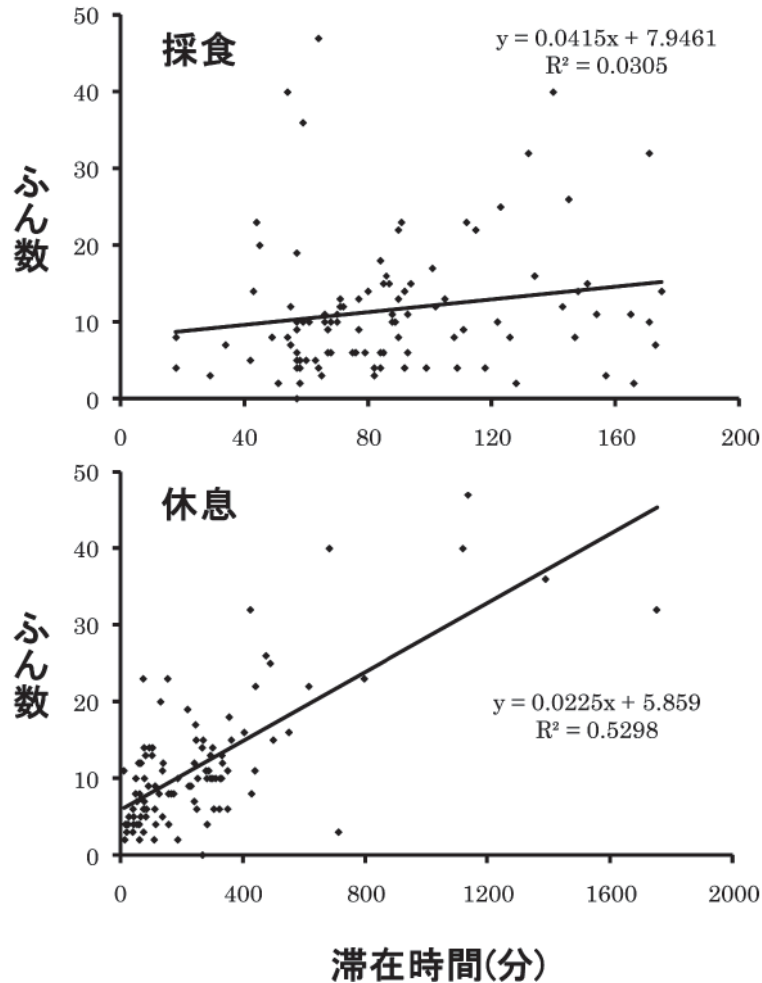


図3 - 14 傾斜放牧地における牛の行動別滞在時間とふん数との関係

2010年6月1日-6月5日にかけて黒毛和種成牛20頭、仔牛4頭の放牧が行われた牧区 のデータ。図中の各点は試験期間中のある区画(10m × 10m)での行動別(採食と休息)滞在時間とそこで排出されたふん数を示す

でも同様にふん数は「採食時間」($R^2=0.18$)よりも「休息時間」($R^2=0.29$)と大きく関係していた。

以上から、傾斜地放牧では水飲み場を斜面下部に設置したときに、水飲み場所のふん数が増加すること、またふんの分布は水飲み場の設置場所以外にも牛の滞在時間、特に休息時の滞在時間が大きな影響を持つことが明らかとなった。上述したように、水飲み場付近の湿った裸地ではメタンの発生量が多くなるゆえに、水飲み場近くへのふんの集中を避けることが必要である。本試験で斜面下部に水飲み場を設置したときに最もふんがそこに集中することが明らかになったことから、水飲み場は斜面中部または上部に設置することが望ましいと判断された。また、休息時間とふんの集中は大きく関係していたことか

ら、牛が好んでかつ裸地化しにくい休息場の開発や設置についての研究が今後必要といえる。

工 今後の課題

本研究ではふんの分布について取り扱ったが尿については取り扱わなかった。今後、放牧地の温暖化ガス発生量の精緻化のために尿の分布に関する知見が必要である。

オ 要約

昼夜放牧条件下における乳牛の草地、通路及び水・休息場へのふん排出割合について、夏と秋の2期で調査を行った。夏と秋で屋外へのふん数に違いはなかったが、場所別に見ると、夏では水・休息場に

その面積に比して多くのふんが排出されること、通路に排出されるふん数は放牧期間を通じて少ないこと、が明らかとなった。

乳牛の昼夜、夜間及び日中放牧における屋外と屋内に排出されるふんの割合を調査した。放牧時間の増加により屋外で排出されるふん数が増加し（昼夜>夜間>日中）、また、牛舎等施設に滞在する時間の増加に伴い屋内のふん数も増加した（日中>夜間>昼夜）。屋外と屋内へのふん排出割合は放牧方法の違いにかかわらず牛の滞在時間に基づいた期待値と異ならなかった。ただし、1日あたりふん数は昼夜放牧で有意に高まっていたことから、その値は餌の種類により異なるといえた。

加速度センサーを利用したふん排出時間の測定法の開発を行った。黒毛和種去勢牛の尾に3軸加速度計を装着し加速度を測定した結果、加速度の可視化によりふん排出時間の推定が可能であることが示された。またGPSと組み合わせることによりふんの排出場所推定も可能となった。さらに、統計的に識別できるアルゴリズムの開発を試みた結果、ある程度の精度（検出率94.2%、検出中正答率69.0%）で検出に成功した。

水飲み場を斜面上部、中部及び下部に設置したときの黒毛和種繁殖牛約16頭の4日間のふんの分布データを3牧区（3反復）で測定し、設置場所の影響を解析した。また草量、草質（粗タンパク含量）、斜面及び牛の各場所での滞在時間を測定し、ふん分布に影響を及ぼす水飲み場以外の要因を解析した。斜面下部への水飲み場設置ではふん数は面積に基づいた期待値よりも有意に増加することが示された。一方、斜面上部と中部への設置ではその期待値と異ならなかった。水飲み場以外の要因としては牛の滞在時間が最も重要であり、その滞在時間のうち休息時の滞在時間が重要であることが明らかとなった。

カ 参考文献

Aland A, Lidfors L, Ekesbo I (2002) Diurnal distribution of dairy cow defecation and urination. *Appl Anim. Behav Sci* 78: 43-54.

Waite R, Macdonald WB, Holmes W (1951) *Studies in grazing management. III. The behaviour of dairy cows grazed under the close-*

folding and rotational systems of management. J Agric Sci 41: 163-172.

(渡辺也恭・坂上清一)