

ウシルーメン発酵 由来メタン排出量 推定マニュアル

呼気中メタン / 二酸化炭素濃度比
を活用した on farm 測定法

これまでウシのあい気（ゲップ）のメタン定量には特別な施設が必要でしたが、呼気中メタン / 二酸化炭素濃度比を測定するスニファー法によりメタン排出量を簡易に推定することができます。

ルーメンとは反すう動物の反すう胃を意味します。ルーメン内での摂取物の発酵によって発生するメタンはあい気とともに大気中に放出されます。

気候変動緩和コンソーシアム
2022年3月

はじめに

畜産分野における温室効果ガス削減技術を確立するため、2017年度から2021年度の期間で農林水産省の農林水産研究推進事業（委託プロジェクト研究）「農業分野における気候変動緩和技術の開発－畜産分野における気候変動緩和技術の開発－」が農研機構を中核研究機関とする気候変動緩和コンソーシアムにより、次の3つの課題を軸として進められました。

- I. 飼養管理技術の改善による畜産分野からの温室効果ガスの排出削減技術の開発
- II. 牛の生体・個体差に基づく消化管内発酵由来メタン削減技術の開発
- III. 畜産システムとしての温室効果ガス削減方策の提示

このうち、課題IIでは多頭数のウシから排出されるメタンの把握を目的に、ウシの呼気中メタン/二酸化炭素濃度比を利用した測定技術が開発されましたのでマニュアルとして公表いたします。

ウシのルーメン発酵由来メタン、いわゆるウシのあい気（ゲップ）に含まれるメタンはこれまでチャンバー等を用いた特別な施設で精密な測定がなされてきましたが、多頭数の生産現場のウシについて測定情報を得るには問題がありました。一方で、ウシの呼気中メタン/二酸化炭素濃度比を利用した測定技術は、精度は従来法より劣りますが生産現場で測定できるという大きな強みを持った測定技術です。

本マニュアルでは初めにルーメン発酵由来メタン排出状況と多様な測定方法を1章で俯瞰しました。対象となる家畜は搾乳ロボットで搾乳される乳牛（2章）と肥育牛（3章）であり、それぞれ測定の背景、測定の実際、計算方法、データの解釈について解説し、本マニュアルを読むことにより測定から排出量の算出まで一通りできるような内容となるよう努めました。また、本測定技術はメタン排出量の少ないウシを育種するための評価手法として開発されましたが、参考情報として、プロジェクト成果を元にした育種改良の可能性についてもまとめました。また、現状では、どなたでも測定に取り組むためには、特にガス分析計のコストがネックとなりますが、簡易な測定方法についてもその可能性について紹介しています。

多くの方々に様々なアイデアでメタン排出抑制に取り組んでいただきたい。本マニュアルがそのための一助となれば幸いです。

気候変動緩和コンソーシアム
研究開発責任者 長田 隆

略語

| | |
|--------------------|---------------------------------------|
| BMS | 脂肪交雑基準 |
| BW | 体重 |
| BW ^{0.75} | 代謝体重 (体重の 0.75 乗) |
| FS | フルスケール |
| CH ₄ | メタン |
| CO ₂ | 二酸化炭素 |
| CP | 粗タンパク質 |
| DC | 直流 |
| DMI | 乾物摂取量 |
| ECD | 電子捕捉型検出器 |
| ECM | エネルギー補正乳量 |
| IPCC | 気候変動に関する政府間パネル |
| LMD | レーザーメタンディテクター |
| kcal | キロカロリー (1 kcal = 10 ³ cal) |
| kt | キロトン (1 kt = 10 ³ t) |
| mA | ミリアンペア (1 mA = 10 ⁻³ A) |
| MCF | メタン転換効率 |
| Mcal | メガカロリー (1 Mcal = 10 ⁶ cal) |
| MEI | 代謝エネルギー摂取量 |
| N ₂ O | 一酸化二窒素 |
| NFC | 非繊維性炭水化物 |
| NDF | 中性デタージェント繊維 |
| PMR | 部分的混合飼料 |
| QTL | 量的形質遺伝子座 |
| RMSE | 平均平方二乗誤差 |
| RQ | 呼吸商 |
| SF ₆ | 六フッ化硫黄 |
| SNP | 一塩基多型 |
| TDN | 可消化養分総量 |
| TMR | 混合飼料 |
| V | ボルト (電圧) |
| WCS | ホールクロップサイレージ |

目次

| | |
|--|----|
| はじめに | 1 |
| 略語 | 2 |
| 1 背景 | 4 |
| 2 乳牛 | |
| 2.1 測定手法 | 8 |
| 2.1.1 搾乳ロボットを利用した CH ₄ と CO ₂ の測定方法 | 8 |
| 2.1.2 CH ₄ /CO ₂ 比を用いた CH ₄ 排出量推定方法 | 23 |
| 2.2 測定精度に影響する諸要因 | 28 |
| 2.2.1 飼料 | 28 |
| 2.2.2 泌乳ステージ | 32 |
| 2.2.3 環境温度 | 32 |
| 2.2.4 行動 | 33 |
| 3 肉用牛 | |
| 3.1 測定手法 | 35 |
| 3.1.1 ドアフィーダーでの測定 | 35 |
| 3.1.2 自動切替による多頭数測定 | 43 |
| 3.2 測定精度に影響する諸要因 | 47 |
| 4 参考 | |
| 4.1 CH ₄ 関連形質の育種改良 | 49 |
| 4.2 安価なガスセンサーを用いた多頭数測定 | 55 |
| 引用文献 | 58 |
| 執筆者一覧 | 62 |

1 背景

2021年8月に公表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書第I作業部会報告書（自然科学的根拠）では、人為的な影響による地球温暖化は疑いのない事実であるとされており、将来世代に対する悪影響を少しでも緩和するため、2100年までに地球の温度上昇を2°C以内に、できれば1.5°C以内に収めるべく努力することが訴えられています（IPCC, 2021）。経済活動に伴う地球温暖化の原因物質としては、CO₂、CH₄、N₂Oなどが挙げられていますが、このうち、CH₄とN₂Oは農業生態系からの発生量が大きな割合を占めているとされており、反すう動物はCH₄の大きな発生源の一つであると指摘されています。

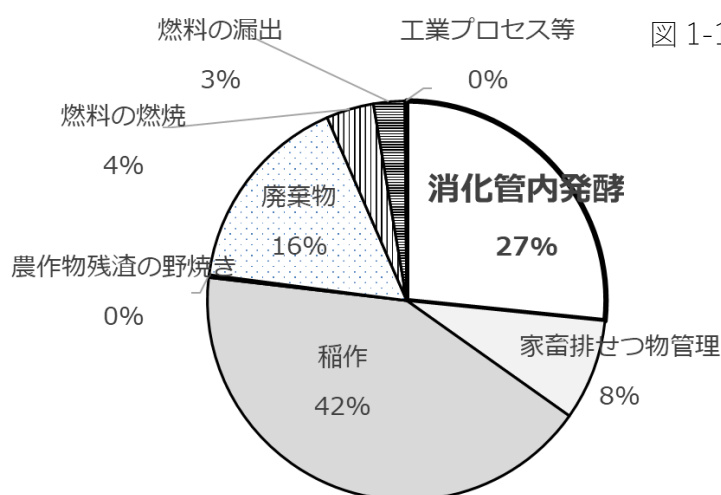


図 1-1 日本の CH₄ 排出量（28,416 kt CO₂ 換算、2019 年度確報値）の発生源割合（国立環境研究所, 2021）

図 1-1 は我が国における CH₄ の発生内訳を示したものであり、水田に次いで、ウシが大きな発生源であることをご理解いただけたらと思います。反すう動物に由来する CH₄ 排出は主に反すう動物特有のルーメン発酵に由来するもので、未利用あるいは低利用の飼料資源を効率的に活用することができる、ヒトにとっても有用なシステムではありますが、その際に温室効果ガスである CH₄ がルーメン微生物によって作られてしまいます。そのため、反すう動物の有用な飼料利用システムを阻害することなく、ウシ消化管内発酵由来の CH₄ 排出量を抑制するため、各種の栄養・飼料給与技術やルーメン微生物叢の制御技術の開発が続けられています（Shibata と Terada, 2010、Arndt ら, 2021）。さらに、今後は生産性との調和を考慮しつつ、国レベルで CH₄ 排出量を削減することが重要になりますので、経営体当たりで泌乳量や増体量の改善、繁殖成績の向上等の生産性の向上を図り、生産物当たりの排出量を低減することが求められることとなります。また、温室効果ガスの抑制は時間との競争ですから、開発された技術の可及的速やかな普及を図ることも喫緊の課題となります。

そのような背景において、近年、育種改良による CH₄ 低減技術の研究開発が注目さ

れており (Knapp ら, 2014、de Haas ら, 2017、寺田, 2020)、遺伝的な改良の可能性を示す遺伝率は 0.1~0.6 程度と報告されています (第 4 章に育種改良法の原理とその具体的な成果を取りまとめました)。育種改良の取組みは、今まで多くの研究が行われてきた飼料とルーメン微生物叢の制御による抑制技術に加えて、飼料を利用する微生物の生息環境を左右するウシ生体の影響を評価し、CH₄ 排出量低減を可能とするルーメン生態の環境整備を育種改良の手法により推進しようとしたものといえます。

しかし、育種改良の可能性を評価するためには多頭数のデータを収集する必要があります。従来、CH₄ 排出量測定のゴールドスタンダードとして、呼吸試験チャンバー (写真 1-1) が用いられてきましたが、この手法はウシルーメン発酵由来の CH₄ 排出量を精密に測定することは可能であっても、多頭数の測定にはコスト面、労力面から不向きと言わざるを得ません。そのため、研究のスタートにおいて、まず、多頭数を供試してデータを収集することが可能となる手法の開発が必要になります。



写真 1-1 間接式開放型呼吸試験チャンバー (農研機構畜産研究部門 (つくば))

育種改良による CH₄ 低減の可能性を評価するための研究で用いられてきた CH₄ 排出量データを求める主な手法は、

1) 乾物摂取量 (DMI) や飼養成績に基づく推定、2) 簡易測定法による実測、3) チャンバー法による実測の 3 種類です。ウシ用呼吸試験チャンバー (およびその簡易型のヘッドボックス) の利用は得られるデータは正確ですが、遺伝的評価に耐える例数を得ることは我が国の現状では困難と言わざると得ません。ヤギ・ヒツジ用呼吸試験チャンバーを多数整備して遺伝的評価を行うことも一つの方策ではありますが、生産形質との関連性の検討が行えないという問題が残ります。遺伝的影響の検討には生産環境の影響評価も併せて行わなくてはならないことを考慮しますと、農場レベルでの測定が可能な技術開発が必要だと考えます。その点、DMI 等に基づく推定式の活用は、他の方法に比べて多数の現場データの収集が可能なので有用であると評価できますが、実測値ではないので個体情報を十分に評価するには至っていないという課題が残ります。

これらの点を考慮して、農林水産省の農林水産研究推進事業 (委託プロジェクト研究) 「畜産分野における気候変動緩和技術の開発」 (以下、本プロジェクトと略) では CH₄/CO₂ 比 (CO₂ 濃度に対する CH₄ 濃度の比) に基づく簡易測定法 (スニファー法あるいはスポット法と呼ばれています) (Madsen ら, 2010、Haque ら, 2015) をベースに、遺

伝的効果の解明にアプローチすることとしました。この方法の基本は、CO₂をインデックスガスとして CH₄ 排出量を推定しようとしたものであり、CO₂ 排出量の正確な推定と CH₄/CO₂ 比の測定精度の向上が課題となります。これらの点については第 2 章において詳述します。また、本来、この方法は搾乳ロボットを活用することを前提としたものですが、本プロジェクトでは肉用牛への応用も試みしました(第 3 章で取り上げます)。なお、育種データの取得に利用可能と思われる CH₄ 排出量の簡易測定法については SF₆ 法、GreenFeed 法、レーザーメタンディテクター法があります(参考 スニファー法以外の簡易測定法)。

さて、我が国は 2030 年までに温室効果ガスを 46%削減、2050 年にはカーボンニュートラルの実現を目標として掲げています(第 203 回臨時国会菅義偉内閣総理大臣所信表明演説、2020 年 10 月)。そのためには、増大する世界の食料需要を満たし、飢餓を撲滅することを前提として、ウシルーメン発酵由来の CH₄ 排出量を大幅に削減することが求められます。削減手段は、前述のように① 飼料構成、飼料資材(添加物)等の工夫、② CH₄ 産生阻害剤の投与、③ 育種改良を含む生産性向上などがありますが、単一の手法で目標を達成することは困難であり、経営条件、生産体系、地域条件等にあわせて、複数の手法を組み合わせることで対応することが求められています。また、これらの技術を経営体に迅速に普及するためには、開発技術のコストパフォーマンスが大きな課題となってきます。その点、育種改良は従来から公的機関が担うことが多く、経営体に対する負担は他の手法に比べて小さく、しかも確実な効果を見込むことが可能です。一方で、育種改良は他の手法のような即効性がなく、地道な努力が求められていることにも留意しなくてはなりません。

本マニュアルを参考に育種手法によるウシルーメン発酵由来 CH₄ の削減に、多くの方々が取組んでいただけることを期待しています。

参考 スニファー法以外の簡易測定法

SF₆ 法(写真 1-2、Johnson ら、1994)インデックスガスとして六フッ化硫黄(SF₆)を利用する方法。一定時間当たりの SF₆ 放出量を測定済の徐放性カプセルをルーメン内に投与し、鼻先にガス採取用のノズルを取り付け、長時間にわたって呼気の採取を継続します。採取ガスはガスクロマトグラフィー法により分析します(SF₆ の測定には電子捕捉型検出器(ECD)を使用します)。



写真 1-2 SF₆ 法
採取装置を装着した試験牛。

GreenFeed 法 (写真 1-3、Hristov ら, 2015)

移動式のフィードステーションにガス採取・分析システムを付置した機材です。CO₂、CH₄ 分析装置と流量計が設置されており、フィードステーション利用時間の CH₄ 排出量を実測することができます。



写真 1-3 GreenFeed 法
(C-Lock 社より掲載許可取得)

レーザーメタンディテクター (LMD) 法 (写真 1-4、Chagunda ら, 2009)

ガス漏れ検知に使われていた CH₄ 探知機を使用し、CH₄ の濃度変化をもとに CH₄ 排出量を推定します。



写真 1-4 LMD 法による測定状況

2 乳牛

2.1 測定手法

測定機器の選択、設置から実際の測定、得られたデータからの CH₄ 排出量算出方法までを示します。

2.1.1 搾乳ロボットを利用した CH₄ と CO₂ の測定方法

- 測定精度確保のためサンプルガスの CH₄、CO₂ 濃度をできるだけ高くします。
- 吸引口の設置位置はサンプルガス濃度をみて決定します。
- 測定は最低 7 日間、連続で行います。
- サンプルガス濃度を高めるため搾乳ロボット周囲の風に注意が必要です。

設置

測定システムは簡単です。搾乳ロボット内飼槽周辺の空気をポンプで吸引し、これをガス分析計に送り CH₄、CO₂ 濃度を測定、記録するだけです (図 2-1、2-2)。

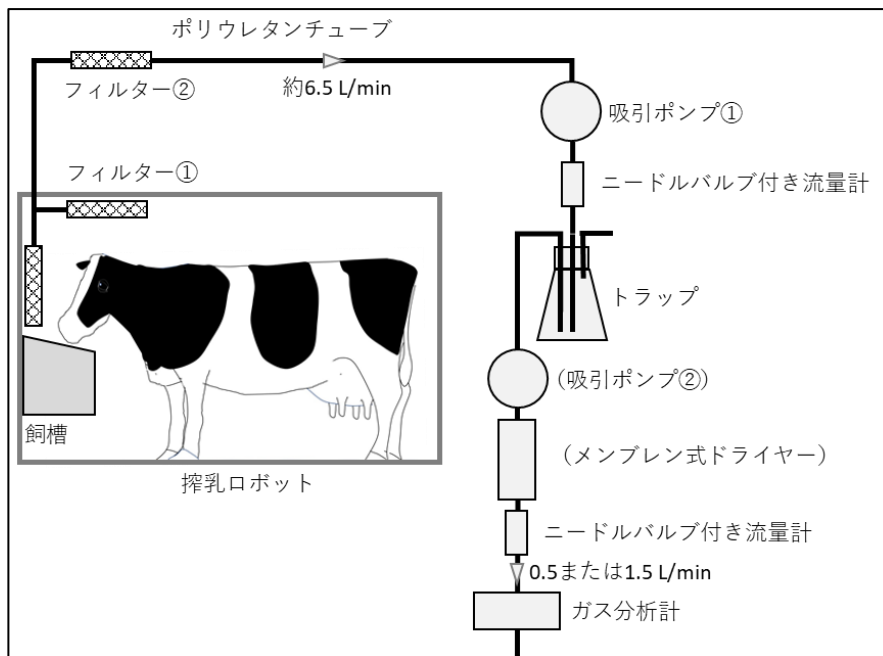


図 2-1 測定システム概要 (トラップ有り)

これに粉塵除去のためフィルターとガス流量のチェックと制御のために流量計が必要です。ポンプを内蔵しない分析計を使う場合は分析計へガスを送るためのポンプが必要

となり、乾燥空気が必要なガス分析計の場合はドライヤー(除湿器)が必要となります。ガス分析計手前のトラップではサンプルガスを一度トラップすることにより、ガス濃度の急激な上昇/下降を抑えることができ、ガス濃度が分析計の測定レンジから外れることを防ぎます(図 2-1)。このような心配のない場合は図 2-2 のようにトラップ無しでも測定は可能です。使用する資材については表 2-1 を参考にしてください。

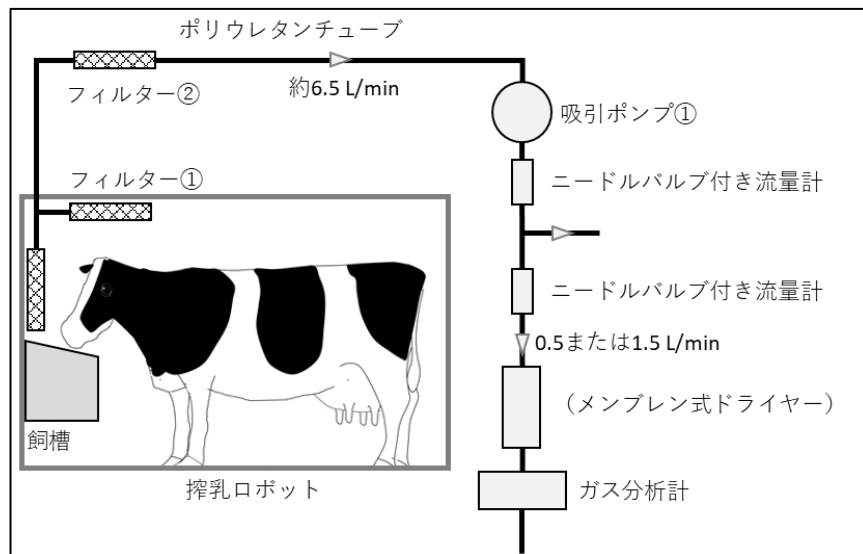


図 2-2 測定システム概要 (トラップ無し)

表 2-1 必要な資材

| 資材 | 数量 | 備考 |
|--------|----------|--|
| チューブ | 10~20m程度 | チューブの外径 6mm、内径 4mm。長さは搾乳ロボットと設置場所の距離によります。ポリウレタンあるいはテフロン製が望ましく、ビニルチューブ等柔らかい素材は折れてしまうので避けてください。 製品例；タッチチューブ TE-6 (千代田通商) |
| フィルター① | 1 個 | 湿度が高く、配合飼料の粉塵が多い環境にあるので交換の頻度が高くなります。サンプルガスの流量に低下が見られたら交換します。インサイチュ培養に用いるポリエステル製メッシュでできたサンプルバッグ(目開き 53 μ m)が最適ですがこれに限りません。 製品例；メーカー Bar Diamond (三紳工業扱い)、型番 BG0510 |
| フィルター② | 1 個 | ろ過度 5 μ m 程度。目詰まりの頻度はフィルター①より |

| | | |
|--------------|------|---|
| | | りは低いです。 製品例；メーカーSMC、型番インラインエアフィルタ ーZFC74 |
| 吸引ポンプ① | 1台 | チューブの長さやフィルターの設置が抵抗となり、 流量計のバルブを全開にしてもポンプの定格流量通 りの流量を得ることはできません。想定する流量の 倍程度の定格流量を持つ吸引ポンプを選択してくだ さい。 製品例；DAP-12S（12 L/分、吸引圧力 24.0kPa） （ULVAC） |
| ニードルバルブ付き流量計 | 1~2個 | 製品例；樹脂製フローメーター RK20T-V-Air- 10L/min、および RK20T-V-Air-1L/min または RK20T- V-Air-5L/min（コフロック） |
| 吸引ポンプ② | 適宜 | 吸引ポンプを内蔵していないガス分析計の場合に必要 となります。分析計の流量要件を満たすことができ る能力のポンプを選択してください。 |
| ドライヤー（除湿器） | 適宜 | 乾燥ガスが要件のガス分析計の場合に必要となりま す。メンブレン式ドライヤーには乾燥空気（パージガ ス）を導入する必要があるため、パージガス調製のた めのドライヤーとこれを送り込むポンプが必要とな ります。ペルチェ素子等を用いる冷却式のドライヤ ーも利用可能です。 製品例；メンブレン式ドライヤーSWF-M06-400 およ び SWC-M08-100（AGC）パージガス調製に使用 吸引ポンプ（DA-40S, ULVAC）パージガス供給に使用 |
| トラップ | 1個 | 1L容程度の三角フラスコやボトルをゴム栓等で密 閉し、(1)サンプルガス導入、(2)分析計へのトラップ ガス供給、そして(3)余剰ガス放出のための3本のガ ラス管を挿入します。外気吸引を防ぐため、(1)と(2) のガラス管は深く、(3)は浅く挿入してください。 |
| チューブ継手 | 適宜 | ストレート、L字、T字があると便利です。 製品例；タッチコネクターファイブユニオン FR6- 00U、ユニオンエルボ FR6-00UL、ユニオンティ FR6- 00UT（千代田通商） |
| チューブカッター | | チューブは工作用カッターで切断できますが、切断 面が整っていないチューブの継手への接続はガス漏 |

れの原因となります。安価ですので専用のカッターの利用をお勧めします。

製品例；TC-16（千代田通商）

ガス分析計の選択にあたり、測定可能範囲、反応速度、データ記録間隔、データ出力方法に注意が必要です。確認が取れているガス分析計は表 2-2 の通りです。これら以外のガス分析計を採用する場合、表 2-2 のガス分析計性能を参考に採用してください。出力がアナログ電流あるいは電圧出力の場合は AD コンバーターとデータロガーあるいはパソコンが必要になります。

表 2-2 使用が確認できているガス分析計

| 資材 | 備考 |
|--|---|
| 温室効果ガスアナライザー M-LDS-918（ABB-Los Gatos Research） | 測定原理；キャピティエンハンスド吸収分光法 測定レンジ；0.01~1,000 ppm(CH ₄), 0~10%(CO ₂) 標準偏差；3 ppb(CH ₄), 2 ppm (CO ₂) ※測定間隔 1 秒の場合 フロー時間応答；1 秒 データ記録間隔；1 秒 データ出力；テキスト形式ファイルでデータが蓄積されます。 内蔵 Wi-Fi 経由でファイルを取得。 その他；標準ガスによる校正頻度は 1 回/年程度実施。持ち運び可能。電源 ON 後 10 秒程度で測定と記録が自動で始まりま す。 |
| ポータブルガス分析計 PG- 324（堀場製作所） | 測定原理；非分散形赤外線吸収方式 測定レンジ；0~2,000 ppm(CH ₄), 0~5%(CO ₂) ※測定で使 したレンジ 流量；0.5L/分 繰り返し性；±1.0% 直線性；±2.0%FS ゼロ/スパンドリフト；±1%FS/日 90%FS 応答時間；装置入口から 45 秒以下 データ記録間隔；1 秒 データ出力；アナログ電圧または電流出力（DC4~20mA また は DC0~1V）。ガス濃度は別途 CSV 形式で SD カードへ自動で 書き込み。 その他；標準ガスによる校正が必要。サンプルガスは除湿の 必要あり。持ち運び可能。電源 ON 後 30 分以上の暖機運転が |

必要です。

赤外線ガス分析計 ZRH (富士電機)

測定原理；非分散型赤外線吸収法単光源単光束

測定レンジ；0~2,000 ppm (CH₄), 0~5%(CO₂)

※測定で使用したレンジ

流量；0.5L/分

繰り返し性；±0.5%FS

直線性；±1%FS

ゼロ/スパンドリフト；±2%FS/週

90%FS 応答時間；ガス置換時間含め 10~30 秒

データ記録間隔；1 秒

データ出力；アナログ電圧または電流出力 (DC4~20mA または DC0~1V)。

その他；標準ガスによる校正が必要。データの蓄積はできません。サンプルガスは除湿の必要あり。据え置き型。電源 ON 後 1 時間以上の暖機運転が必要です。

ガス分析計の校正

ガス分析計 PG-324 および ZRH は少なくとも 2 回/週、できれば毎日、標準ガスを用いた校正が必要です。校正には窒素濃度 99.99%以上のゼロガス、測定レンジ上限に近い濃度の CH₄ および CO₂ ガス (どちらも窒素との混合ガス) をスパンガスとして使用しますので合計で 3 本の標準ガスが必要になります。M-LDS-918 は 1 回/年程度の校正頻度であり、持ち運びも容易です。

ガス吸引口および風よけの設置

測定システム設置の際、最も重要なのはガス分析計の測定レンジの中でできるだけ高い CH₄、CO₂ 濃度のサンプルガスが得られるようにすることです。そのためにはまず、サンプルガス吸引口をできるだけ乳牛の口の近くに設置する必要があります。約 5 分程度の搾乳中、乳牛は断続的に自動給与される配合飼料を飼槽に頭を下げて摂取しているか、顔をあげて咀嚼しているか、あるいは顔をあげて顔を前面あるいは側面に向けています。吸引口はガス採取チューブを、T 字コネクターを用いて枝分かれさせて複数個所から採取するようにします。配合飼料採食中のガス採取をターゲットとしたガス吸引口を飼槽内に設置するとともに、顔をあげたときのガスを高濃度で採取することを目的とした吸引口を飼槽上部の側面に 1 ないし 2 カ所設置します。いずれも乳牛にいたずらされない位置を選択する必要があります。ガス濃度が低すぎる場合は枝分かれさせない飼槽内の 1 ヶ所からの採取でも対応できます。呼気ガス濃度を高めるためのビニールシートやアクリル板の設置も有効です (写真 2-1)。吸引口設置にあたってはさらに、配合

飼料の粉塵やボックス内洗浄時の飛び散った汚水による汚れや乳牛によるいたづらを防止するための対策が必要です。以下に設置事例をいくつか示します。



写真 2-1 風よけのためのビニールシート設置例

Delaval 社 VMS V300（群馬県畜産試験場）での設置例（図 2-3）

ガス濃度を高めるために搾乳ロボット前部の片側（作業者通路側）開放部の前方 2/3 程をアクリル板で塞いでいます。ガス吸引口は配合飼料吐出口裏側と飼槽横の合計 2 カ所です。

Delaval 社 VMS クラシック（家畜改良センター）での設置例（図 2-4）

ガス濃度を高めるために搾乳ロボット前部の片側（作業者通路側）開放部をアクリル板で塞いでいます。また、牛群の搾乳時間が比較的長く、頭を上げている時間が長かったため、頭を上げたときの呼気ガスを採取する飼槽脇のガス吸引口を左右 2 カ所に設置しています。なお、搾乳ロボットへの侵入方向は群馬県畜産試験場の機種とは左右逆になっています。

Lely 社 Astronaut A2（群馬県畜産試験場）での設置例（図 2-5）

飼槽前面のやや下部と正面の 2 カ所に吸引口を設置しています。吸引口とチューブは乳牛がいたづらできる位置にあるため、塩ビ管、ホースとプラスチックネットで保護しています。

Lely 社 Astronaut A3 Plus（広島大学）での設置例（図 2-6-1~3）

3 通りの設置例を示しました。この中で乳牛がいたづらできない場所に設置する方法（図 2-6-2、2-6-3）では吸引口先端は粉塵除去のためのメッシュによる保護だけでガス採取は可能です。乳牛がいたづらできる場所での設置は塩ビ管による保護が必要です

(図 2-6-1)。

GEA 社 Mlone (農研機構) での設置例 (図 2-7)

Mlone は他機種に比べると頭部周辺の気密性が高いため、アクリル板の設置が無くても比較的高濃度の呼気ガスを得ることができます。配合飼料の粉塵と高湿度により吸引部のフィルターは目詰まりしやすいため、使い捨てシリンジを加工して、フィルターの表面積を大きくしています。

搾乳ロボットの全景



搾乳ロボット内飼槽に向かって

飼槽側から

飼槽側 2 / 3 をクリア
パネルで塞いでいます。

左サンプリング口
数カ所4mm程度の穴を
開けた塩ビ管にガス採
取用チューブを入れて
います。



飼槽裏サンプリング口
ビニルホースをガイドにして、
飼槽の裏に先端を出しています。

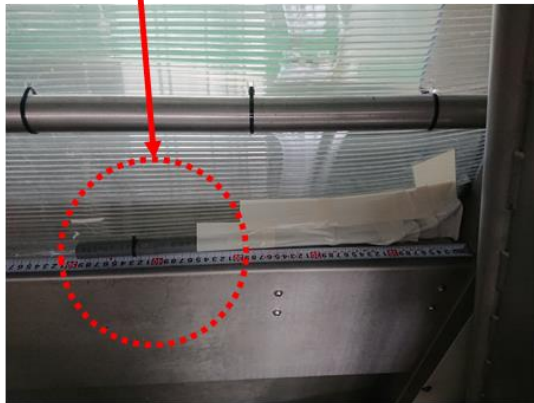


図 2-3 Delaval 社 VMS V300 (群馬県畜産試験場) での設置例



図 2-4 Delaval 社 VMS クラシック（家畜改良センター）での設置例

搾乳ロボットの全景



呼気ガス採取の様子



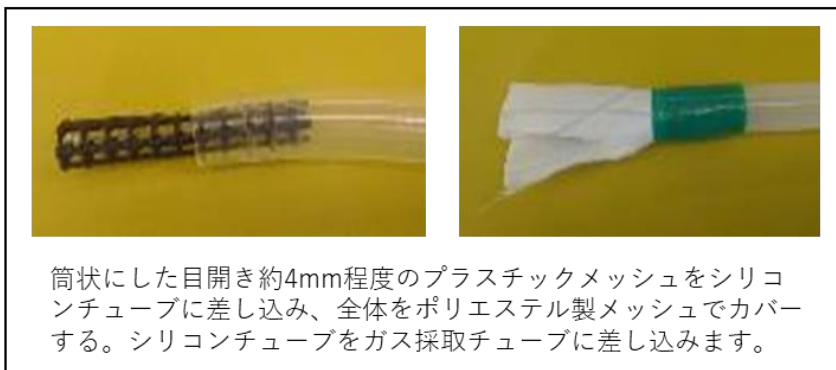
搾乳ロボット内飼槽に向かって



右サンプリング口
ビニルホースをガイドにして、採取口先端をプラスチックネット（目開き約4mm）で保護しています。

左サンプリング口
数カ所4mm程度の穴を開けた塩ビ管にガス採取用チューブを入れてあります。

吸引口の保護



筒状にした目開き約4mm程度のプラスチックメッシュをシリコンチューブに差し込み、全体をポリエステル製メッシュでカバーする。シリコンチューブをガス採取チューブに差し込みます。

図 2-5 Lely 社 Astronaut A2（群馬県畜産試験場）での設置例



図 2-6-1 Lely 社 Astronaut A3 Plus (広島大学) での設置例
塩ビ管外筒を用いて飼槽縁に固定する方法



図 2-6-2 Lely 社 Astronaut A3 Plus (広島大学) での設置例
飼槽の飼料投下口上縁 (黄色円部分) にある穴を利用してチューブを固定する方法。



飼槽壁面の隙間にチューブを押し込み、ナイロンバックでカバーした先端部（吸引口）をわずかに露出させます。塩ビ管外筒がウシになめられて外されてしまう場合に使用します。飼料投下口上端の穴に固定したチューブ（図2-6-2）と壁面のチューブの2か所でガスを採取することでメタンのピーク形状の整ったガスの採取が可能です。

チューブの先端部分は、ファイバーバック（ファイバーバッグADF用（100枚入り）、ゲルハルトジャパン株式会社）で覆います。飼料の粉は表面にこびりつくものの、2週間以上の使用が可能です。

チューブ先端部

図 2-6-3 Lely 社 Astronaut A3 Plus（広島大学）での設置例
飼槽壁面の隙間を利用して固定する方法。

搾乳ロボットの全景



飼槽支持アーム裏側

牛が顔を上げているときに高濃度の呼気ガスを得ることができます。

ロボット内飼槽に向かって



配合吐出口裏側

吐出口から配合飼料摂取時の高濃度の呼気ガスを得られます。チューブは保護板の裏にあり、ロボット上部から挿入します。

吸引口の保護

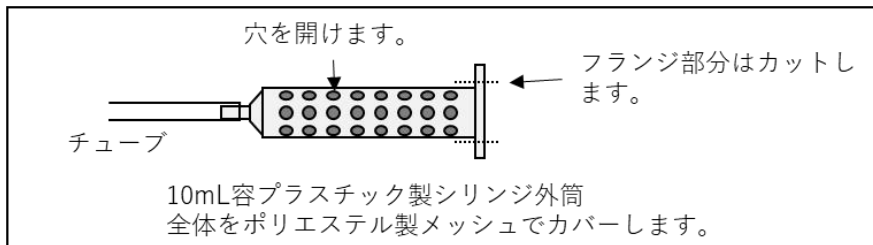


図 2-7 GEA 社 MIOne（農研機構）での設置例

測定

搾乳ロボットでのガス測定は日内変動の影響を小さくするために 7 日間以上連続して実施してください。乳牛がない場合でもロボット内ガス濃度はわずかに変動するため、期間中は（必要な場合）分析計の校正による中断を除き、24 時間連続で測定・記録をしてください。

日内変動

乳牛の CH₄ 排出量は 1 日を通して一定ではありません。図 2-8 はチャンバー法で測定した乳牛の 1 分当たり CH₄ 排出量の 1 日の推移です。このケースでは 1 日 2 回飼料を給与していますが、飼料摂取時に CH₄ 排出は上昇し、その後緩やかに低下してゆくのわかります。CH₄ 排出にはルーメン内発酵とルーメン内容物充満状態の日内変動が影響しています。このため、スニファー法によるガス採取でも飼料摂取から搾乳ロボット訪問までの経過時間が搾乳中の呼気ガス濃度に影響します。7 日間以上の測定により、1 頭の乳牛から様々な時間に測定された呼気ガスを得ることができますので、得られた呼気ガス濃度から平均値を求めることにより日内変動の影響を小さくすることができます。また、飼料給与回数を増やすことができれば、飼料摂取後の CH₄ 排出量低下の影響を小さくすることができます。

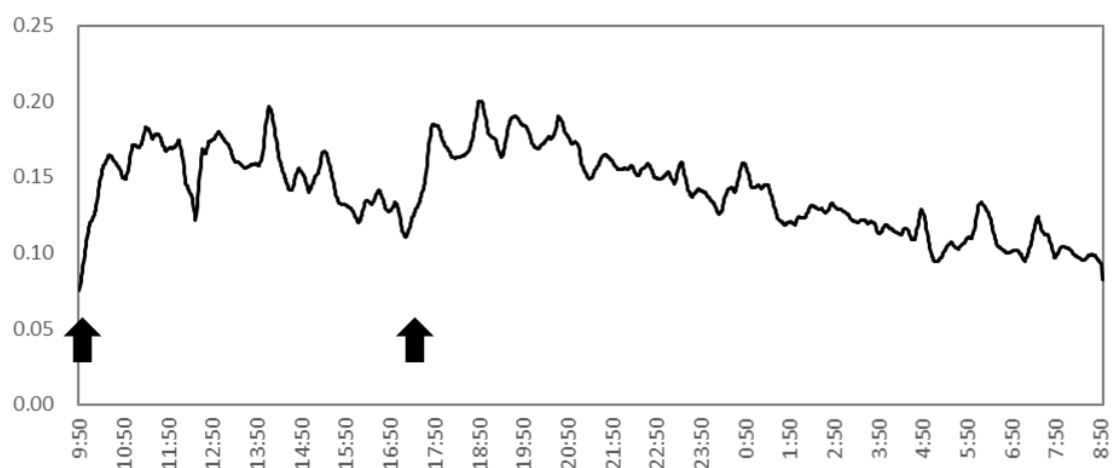


図 2-8 チャンバー法で測定した乳牛における 1 日の CH₄ 排出量の推移
矢印は飼料給与。縦軸は 1 分当たり CH₄ 排出量 (L/分)。

風などによる呼気濃度低下の影響

CH₄排出量算出に CH₄/CO₂ 比 (CO₂ 濃度に対する CH₄ 濃度の比) を用いることは、CH₄ 濃度そのものを用いる場合よりも頭部の位置や風による呼気ガス拡散の影響は受けにくいのですが、可能な限り呼気が多く含まれるようにしてください。ロボットの機種によってロボット内の閉鎖性は異なり、風の影響を受けやすい機種、受けにくい機種があります。図 2-9 は搾乳ロボットの上部に小型扇風機を設置し、ロボット内飼槽へ向けて送風した場合のガス濃度と補正後 CH₄/CO₂ 比の推移を示しています。強風 (図 2-9 下段) ではガス濃度が低すぎるため CH₄/CO₂ 比は誤差の影響を強く受けています。弱風 (中段) ではガス濃度は低いのですが、CH₄/CO₂ 比はきれいにとれているように見えます。しかし、風による CH₄ 濃度の低下の影響が大きく、搾乳時の平均 CH₄/CO₂ 比は低くなっています。測定の際には図 2-9 上段のグラフのようなガス濃度推移を得られているかを確認してください。

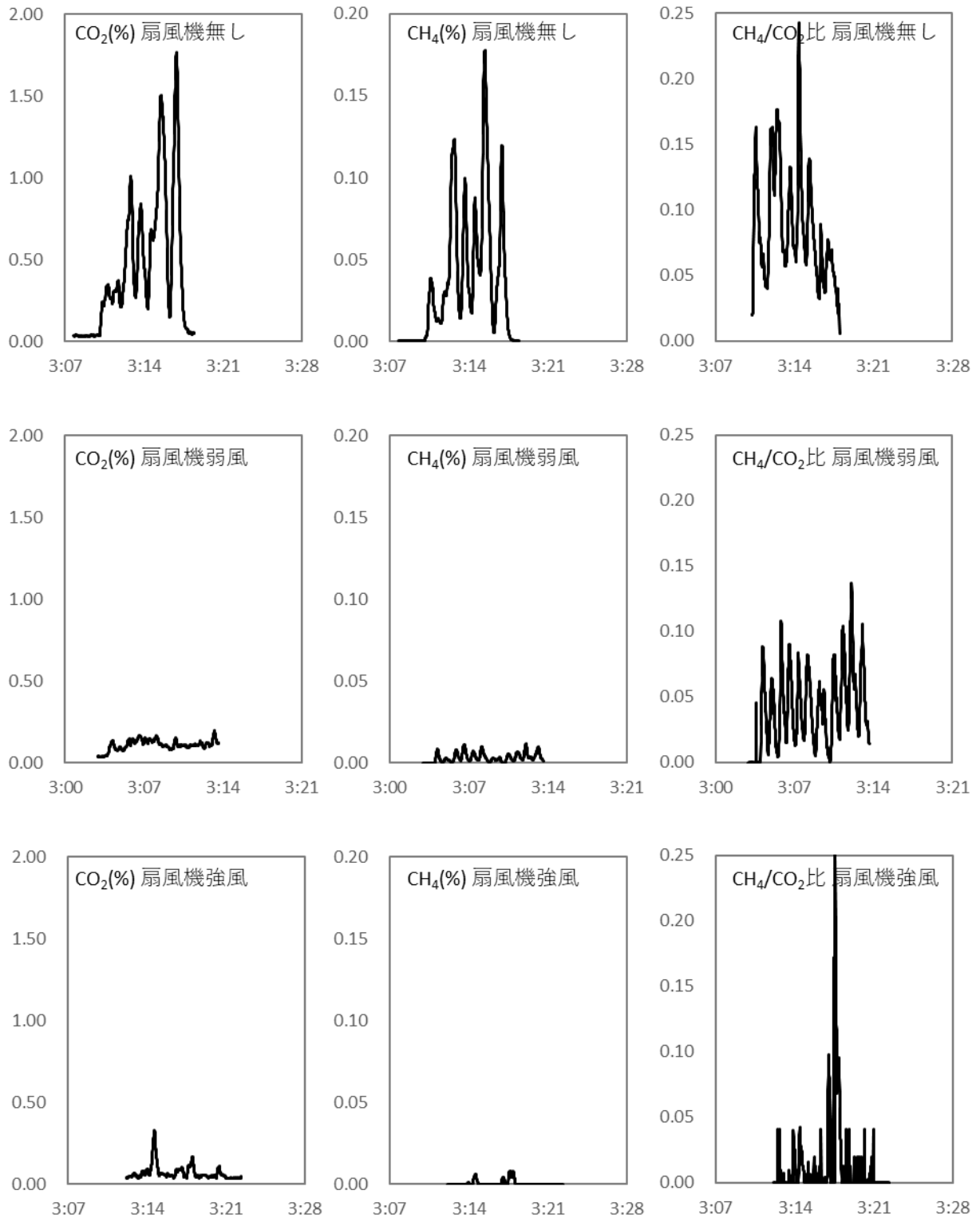


図 2-9 搾乳ロボットに小型扇風機で送風したときの CO₂ 濃度 (左)、CH₄ 濃度(中)、および補正後 CH₄/CO₂ 比 (右)
 上段は扇風機を止めた場合、中段は風量を弱風とした場合、下段は強風とした場合の乳牛 1 頭の濃度推移 (横軸は時刻)。

2.1.2 CH₄/CO₂比を用いた CH₄排出量推定方法

- CH₄/CO₂比を求めるためにバックグラウンド濃度の補正を行います。
- CO₂濃度 0.05%以下のデータの足切りをします。
- 足切り後 CH₄および CO₂濃度総和を求め、この比を CH₄/CO₂比とします。
- 求める推定精度と利用可能な測定項目から推定式を選択します。

訪問時平均 CH₄/CO₂比 (CO₂濃度に対する CH₄濃度の比) の計算

得られたガス濃度データは(1)バックグラウンド濃度を補正し、(2) CO₂ 低濃度のデータは除外し、(3)訪問時の濃度総和を求め、CH₄/CO₂比を求めます。図 2-10 に測定例を示しました。このときの滞在時間は 7 分 19 秒 (439 秒) です。各段階での計算方法は以下の通りです。

(1)分析計から得られたガス濃度はウシ呼気のガス濃度とロボット内 (バックグラウンド) のガス濃度の和であるため、バックグラウンドのガス濃度を差し引く必要があります (図 2-10 上段)。バックグラウンド濃度も変動するため、乳牛がロボットを訪問した前あるいは後で 5 分程度の平均ガス濃度を求め、これをバックグラウンド濃度とします。

(2)(1)で求めたバックグラウンド濃度を測定毎 (1 秒毎) のガス濃度から差し引きます (図 2-10 中段)。

(3)(2)で求めたバックグラウンド濃度補正済みの CO₂濃度について、0.05% (500ppm) 以下の値を足切り (除外) します。搾乳中にもかかわらず CO₂濃度が極端に低い場合、頭部が飼槽から離れ、場合によっては口や鼻がロボット外に出ている可能性や、風による呼気ガスの拡散の可能性が考えられます。このような場合、サンプルガス中の呼気の比率は極めて低くなり、これを計算に含むと誤差の要因となるため除外する必要があります。そこで、バックグラウンド補正後 CO₂濃度 0.05%以下の場合、呼気ガス採取が十分ではないと考えこのときの CO₂濃度、同じ時刻の CH₄濃度を除外します。図 2-10 下段では除外後の濃度をプロットしています。次に 0.05%以下濃度除去後のデータ数 (秒数) が 240 個 (秒) 以上であることを確認してください。CH₄濃度はあい気時に高くなるため、除去後のデータに含まれるあい気が少ないと誤差の要因となります。およそ 1 分に 1 回あい気が排出されますので、データが 240 秒以上あれば 3 回以上のあい気を含んでいると考えられます。図 2-10 の例では除去後のデータは 382 個 (秒) でした。最後に除去後の CH₄濃度、CO₂濃度それぞれで訪問時各秒の総和を求め、CH₄濃度の和/CO₂濃度の和を CH₄/CO₂比とします。

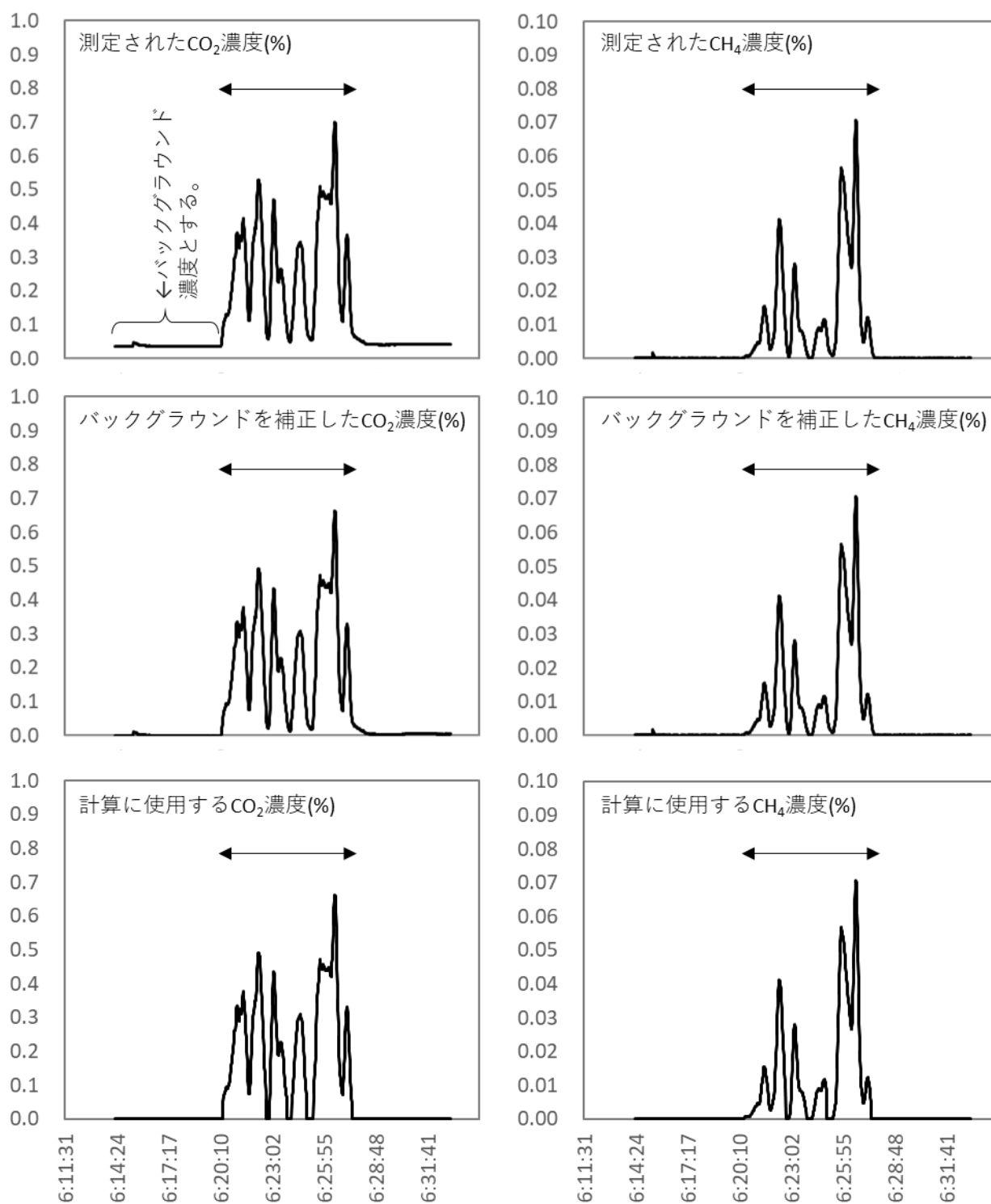


図 2-10 CH₄/CO₂ 比算出に使用する CO₂ 濃度 (左列) と CH₄ 濃度 (右列) の例
 ガス分析計出力 (上段)、バックグラウンド濃度を差し引いた後のガス濃度 (中段)、および計算に使用するガス濃度 (下段)。矢印の期間は乳牛一頭が搾乳されていた期間を示す。

CH₄/CO₂比の計算例

図 2-10 の測定例での計算結果は以下の通りです。

バックグラウンド CO₂ 濃度；0.0368%

バックグラウンド CH₄ 濃度；0.00010%

バックグラウンド補正後 CO₂ 濃度が 0.05%以上の CO₂ 濃度総和；0.268%

バックグラウンド補正後 CO₂ 濃度が 0.05%以上のときの CH₄ 濃度総和；0.0165%

CH₄/CO₂ 比；0.0165/0.268 = 0.0618

推定式の選択

得られた CH₄/CO₂ 比を用いて表 2-3 の式に代入して CH₄ 排出量を計算します。CH₄/CO₂ 比以外に体重等の測定値が必要となってきますが、測定項目（推定式中の独立変数）が多いほど推定精度は高くなります。許容できる推定精度や利用できる測定項目に基づいて推定式を選択してください。CH₄ 排出量推定値は推定式によって異なりますので推定値を公開する際には必ず用いた推定式を併記してください。それぞれの推定式の特徴について以下解説します。式(1)は最も精度が高い推定式です。独立変数のうちエネルギー補正乳量（Energy corrected milk, ECM）は乳量、乳脂率および乳タンパク質率を用いた以下の式(Tyrrell と Reid, 1965)により求めます。

ECM (kg/日)

$$= \text{乳量(kg/日)} \times [376 \times \text{乳脂率(\%)} + 209 \times \text{乳タンパク質率(\%)} + 948] / 3138$$

ここで乳量は搾乳ロボットからの出力、乳脂率および乳タンパク質率は直近の分析値あるいは乳検成績表のデータを用いてください。体重も直近の測定値を用いますが体重自動計測機能を持った搾乳ロボットであれば搾乳ロボットからの出力を用いてください。体重測定が難しい農場ではウシの胸囲から体重を推定する乳牛用体重推定尺（富士平工業）の使用を検討してください。乾物摂取量(kg/日)は乾物飼料給与量と乾物残飼量の差です。乾燥重量は 65°Cで 48 時間程度通風乾燥した後、105°Cで 3 時間あるいは 135°Cで 2 時間乾燥後に計量します。多頭数で測定を行う場合、式(1)の変数の中で乾物摂取量の測定がネックになる農場が多いと思われます。式(2)は式(1)から乾物摂取量を除いた推定式です。さらに体重を除いた推定式が式(4)で CH₄/CO₂ 比とエネルギー補正乳量から CH₄ 排出量を求めます。CH₄/CO₂ 比を用いない式が式(6)および(7)です。特に式(7)の決定係数(R²)は高く、乾物摂取量の CH₄ 排出量への影響の大きさが分かります。一方で式(7)は乾物摂取量の影響しか反映しないため、得られた CH₄ 排出量は乳牛向けの一般的な飼料を給与した場合の排出量の目安と考えてください。式(8)は Madsen ら(2010)による推定式でヨーロッパにおいて利用されています。

CH₄ 転換効率 (Methane conversion factor, MCF) は総エネルギー摂取量当たりの CH₄ のエネルギーで表され、摂取したエネルギーの CH₄ 産生による損失の比率を示します。飼料の総エネルギーの測定にはカロリメーターによる分析が必要になりますが、表 2-3 の推定式では総エネルギーの分析無しで CH₄ 転換効率を求められるという利点があります。

推定式の選択についてですが、低 CH₄ 牛育種を目的とした CH₄ 排出量推定では、多頭数での乾物摂取量の測定が難しいため、式(2)あるいは(8)を利用します。式(2)は式(8)に比べ妊娠後日数が必要ないという利点があります。CH₄ 転換効率の推定には乾物摂取量がない場合、ECM と CH₄/CO₂ から求める式(11)を利用してください。

表 2-3 CH₄ 排出量推定式

| 推定式 | R ² | RMSE |
|---|----------------|-------|
| CH ₄ (L/day) | | |
| = -397 + 0.317 × BW + 13.3 × DMI + 3.14 × ECM + 4343 × CH ₄ /CO ₂ …(1) | 0.898 | 31.9 |
| = -507 + 0.536 × BW + 8.76 × ECM + 5029 × CH ₄ /CO ₂ …(2) | 0.833 | 40.8 |
| = -346 + 0.277 × BW + 18.0 × DMI + 4040 × CH ₄ /CO ₂ …(3) | 0.886 | 33.8 |
| = -248 + 10.5 × ECM + 5169 × CH ₄ /CO ₂ …(4) | 0.734 | 51.5 |
| = -219 + 20.4 × DMI + 3991 × CH ₄ /CO ₂ …(5) | 0.864 | 36.8 |
| = 230 + 9.54 × ECM …(6) | 0.354 | 80.2 |
| = 109 + 21.7 × DMI …(7) | 0.638 | 60.1 |
| = 24 × 180 × HPU × CH ₄ /CO ₂ (Madsen ら., 2010) …(8) | - | - |
| ここで、HPU = (5.6 × BW ^{0.75} + 22 × ECM + 1.6 × 10 ⁻⁵ × 妊娠後日数 ³) / 1000 | | |
| MCF (J/100 J) | | |
| = 0.01 + 0.00004 × BW - 0.002 × DMI + 0.0003 × ECM + 60.7 × CH ₄ /CO ₂ …(9) | 0.766 | 0.440 |
| = 1.44 + 0.00352 × BW - 0.148 × DMI + 57.9 × CH ₄ /CO ₂ …(10) | 0.755 | 0.450 |
| = 2.91 - 0.0498 × ECM + 51.0 × CH ₄ /CO ₂ …(11) | 0.604 | 0.572 |
| = 3.06 - 0.118 × DMI + 57.3 × CH ₄ /CO ₂ …(12) | 0.713 | 0.487 |
| = 1.43 + 53.5 × CH ₄ /CO ₂ …(13) | 0.490 | 0.649 |

MCF, CH₄ 転換効率 (CH₄ のエネルギー/総エネルギー摂取量); BW, 体重(kg); DMI, 乾物摂取量 (kg/日); HPU, 熱発生単位; ECM, エネルギー補正乳量(kg/日); CH₄/CO₂, 呼気中 CH₄/CO₂ 比; RMSE, 平均平方二乗誤差
Suzuki ら(2021)より

CH₄排出量の算出事例

参考までに紹介した測定方法と算出方法を用いて求めた CH₄ 排出量を表 2-4 に示します。表は 18 頭のホルスタイン種泌乳牛に NDF 含量 32 から 47% (乾物ベース) の範囲にある PMR を給与したときの結果です。表が示すように CH₄ 排出量は推定式によって異なります。また、一般的にスニファー法で求められた CH₄ 排出量は実際の排出量よりも低くなりますので、値の検討や公表の際には必ず、CH₄ と CO₂ の濃度をスニファー法で測定したものと、用いた推定式を明示してください。

表 2-4 CH₄ 排出量の算出事例

| | 平均 | 標準偏差 | 最小 | 最大 |
|------------------------------------|-------|--------|-------|-------|
| 産次 | 3.0 | 1.19 | 2 | 5 |
| 分娩後日数 | 139 | 36.3 | 79 | 204 |
| 体重 (kg) | 690 | 53.4 | 618 | 784 |
| 乾物摂取量 ¹ (kg/日) | 26.0 | 3.19 | 20.0 | 30.5 |
| エネルギー補正乳量 (kg/日) | 35.4 | 6.49 | 25.6 | 48.1 |
| CH ₄ /CO ₂ 比 | 0.079 | 0.0161 | 0.043 | 0.103 |
| 推定 CH ₄ 排出量 (L/日) | | | | |
| 式(1) | 620 | 112.9 | 379 | 781 |
| 式(2) | 568 | 136.0 | 318 | 794 |
| 式(8) | 526 | 141.4 | 253 | 789 |
| 推定 MCF (J/100J) ² | 5.2 | 0.73 | 3.7 | 6.38 |

¹ ロボット内での配合飼料摂取量も含む。

² 式(11)を用いて推定。

2.2 測定精度に影響する諸要因

乳牛からの CH₄ 排出量 on-farm 測定では、農場の立地条件などに関連した様々な要因が測定値とその精度に影響します。また、測定精度を高めるためには、それらの要因を理解した上で測定方法や飼養方法に工夫を加えることも必要です。乳牛個体からの CH₄ 排出量の測定精度に関与するものに、①測定システム自体の誤差（値のばらつき）や偏差（真の値からのずれ）と、②測定条件による誤差や乳牛の飼養条件に起因する偏差があります。①については、前章で説明しましたので、ここでは主に②について説明します。

2.2.1 飼料

- 1日の平均搾乳回数が3回以上になるように PMR の栄養濃度を調整します。
- 搾乳ロボット配合飼料の給与量は乳量に応じて調整します。
- PMR の NDF 含量は測定値に影響します。
- 測定開始前に PMR の NDF 含量を確認しましょう。

搾乳回数への影響

2.1.1 の日内変動の項でも示しましたように、乳牛の CH₄ 排出には飼料摂取に伴う日内変動が認められます。そのため、搾乳ロボットを用いて測定を行う場合は、搾乳期間中の1日当たりの平均搾乳回数が3回以上となるようにして、期間内で得られる日内の測定時点をできるだけ多くとるようにします。搾乳ロボットでの搾乳回数は、搾乳ロボットでの搾乳方法（搾乳間隔など）の設定によって調整しますが、畜舎内での乳牛の移動方法とそれに関連するウシの自発的訪問行動によっても左右されます。この乳牛の自発的訪問行動は、飼料給与方法と関連があります。搾乳ロボットを用いた飼養方法では、①搾乳ロボット乳牛を誘導するための搾乳ロボット配合飼料と、②TMR から搾乳ロボット配合飼料分を差し引いた PMR（部分混合飼料）と呼ばれる混合飼料を給与します。

フリーストール牛舎での搾乳ロボットへのウシの訪問方法には、休息場所から搾乳ロボットを訪問してから PMR の採食場所へ移動させたり、あるいは PMR 採食場所を経てから搾乳ロボットへ訪問させるようにする、移動を一方向に制限する移動経路制御型と、休息場所、採食場所、搾乳ロボットの間での移動方向を制限しない自由往来型のふたつに大別されます（図 2-11）。

移動経路制限型では、PMR を摂取する飼槽への移動が搾乳ロボットへの訪問の主なモチベーションとなることから、呼びエサとしての搾乳ロボット配合飼料の給与量を少なくしても、搾乳ロボットへの訪問回数は比較的多く保たれます。一方で、自由往来型

で1日3回以上の搾乳を行わせるには、搾乳ロボットで給与する配合飼料に訪問のモチベーションを持たせるために、PMRの栄養濃度を低くすることが有効となります。例えば、平均乳量が36 kg/日程度、平均分娩後日数が200日程度の牛群(35頭規模)の場合、TDN含量(乾物中)を73%としたPMRの給与では群平均の搾乳回数が3回に及びませんでした。PMRの乾物中TDN含量を70%、搾乳ロボットでの配合飼料(乾物中TDN含量85%または90%)を個体の乳量に応じて1日2~6kg(乾物量)程度給与する条件では、平均搾乳回数が1日3回となる成果が得られています(表2-5)。この場合、PMRのTDN含量が違って、乳生産成績やルーメン内pHに影響は認められませんでした。また、乳量に応じて搾乳ロボット配合飼料の給与量が多くなると、搾乳回数は多くなる傾向がみられます。

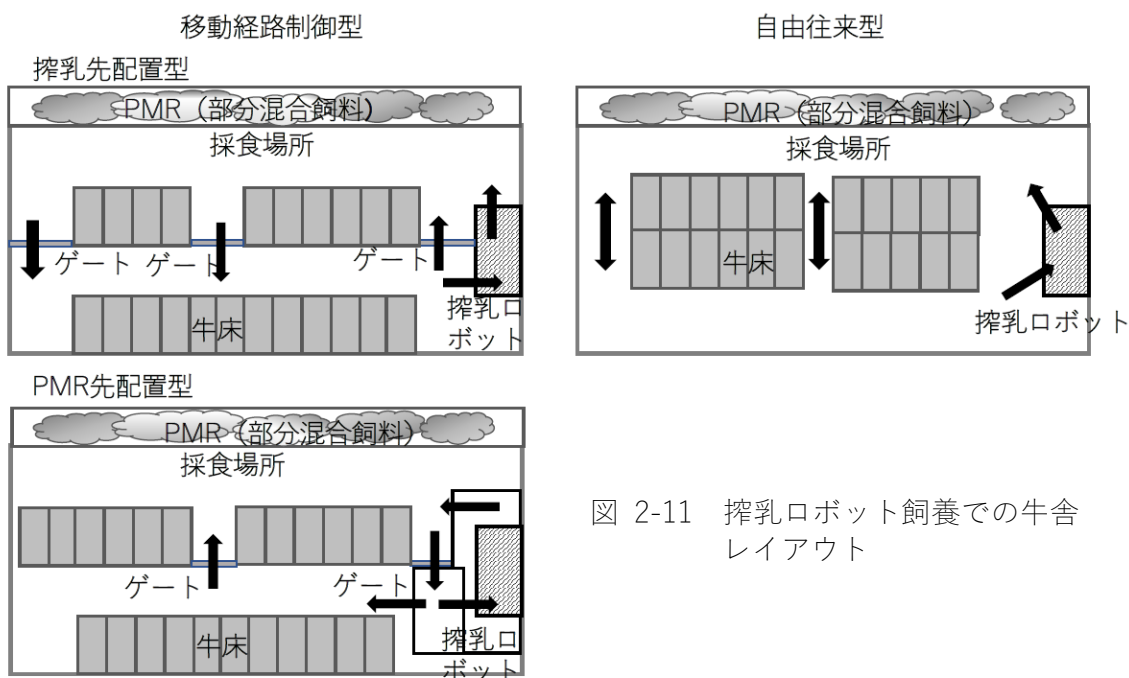


図 2-11 搾乳ロボット飼養での牛舎レイアウト

測定値への影響

一般に、飼料中の粗飼料割合や粗飼料の質などは、ルーメン内発酵に影響し CH₄ 排出量も変化することから、PMR の配合組成や粗飼料の質が大きく異なる条件では、給与飼料の違いが CH₄ 排出量測定値に影響する場合があります。Suzuki ら(2021)による CH₄ 排出量の測定事例では、PMR の乾物中 NDF 含量が 32%から 47%に増加すると、CH₄/CO₂比の牛群での平均値は 0.068 から 0.090 に上昇する結果が得られました(表 2-6)。一方、別の給与試験では、NDF 含量が 40%から 48%の範囲で変化しても、CH₄/CO₂比は 0.080 程度で飼料区間には違いは認められませんでした。また、別の試験ですが、NDF 含量が同じになるように PMR 中のビートパルプをトウモロコシ蒸留粕に代替した場合は、CH₄/CO₂比には影響はありませんでした(表 2-7)。NDF 含量が 10%以上異なる飼料の場合には、飼料間での CH₄/CO₂比に違いが生じるようです。粗飼料の NDF 含量は収穫ステージや購入時期によって変動しやすいので、使用する飼料の NDF 含量を CH₄ 排出量の測定開始前に確認しておくといでしょう。

表 2-5 牛群平均で 1 日 3 回の搾乳が得られた給与飼料の例

| PMR (自由採食) | | 搾乳ロボット配合飼料 (2~6 kg/日) | |
|-----------------------|------|---------------------------|------------|
| 原料組成 (乾物中%) | | 原料組成 | |
| トウモロコシサイレージ | 8.0 | ペレットフレーク配合飼料 | |
| エンバク乾草 | 10.0 | (TDN76.5、CP19.2 原物中) をベース | |
| チモシー乾草 | 11.3 | に圧ペントウモロコシと大豆で調整 | |
| アルファルファ乾草 | 11.5 | 成分含量 | |
| 配合飼料(TDN 70%,CP17.5%) | 45.0 | TDN | 85.0 |
| 圧ペントウモロコシ | 4.1 | CP | 20.4 |
| 圧ペン大麦 | 5.5 | NDF | 22.2 |
| 加熱圧ペン大豆 | 2.8 | NFC | 48.8 |
| 大豆粕 | 1.8 | 乳生産成績 (群平均) | |
| 成分含量 (乾物中%) | | 泌乳日数 (日) | 215 |
| 水分 (調整後原物中) | 55.0 | ロボット配合飼料 (kg/日) | 6.3 |
| TDN | 70.0 | 搾乳回数 (回/日) | 3.0 |
| CP | 16.0 | 乳量 (kg/日) | 36.0 |
| NDF | 40.3 | 乳脂率 (%) | 3.8 |
| NFC | 35.2 | 乳タンパク質 (%) | 3.4 |

表 2-6 乳牛での測定事例 1 (飼料中 NDF 含量の影響)

| | 低 NDF 区 | 中 NDF 区 | 高 NDF 区 |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| PMR 原料組成 (乾物中%) | | | |
| 乳牛用配合飼料 | 35 | 26 | 16 |
| 大豆粕 | 5 | 9 | 12 |
| 粳米サイレージ | 20 | 20 | 20 |
| トウモロコシサイレージ | 15 | 8 | - |
| イネ WCS | 25 | 15 | 5 |
| チモシー乾草 | - | 24 | 47 |
| 成分含量 (乾物中%) | | | |
| CP | 14.0 | 14.0 | 14.0 |
| NDF | 31.6 | 37.0 | 47.1 |
| CH₄/CO₂比 | 0.068 | 0.077 | 0.090 |

搾乳ロボット配合飼料給与量は 1.0 kg/日.

表 2-7 乳牛での測定事例 2 (副産物飼料の影響)

| | 試験区 | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|
| | ビートパルプ区 | 蒸留粕区 |
| PMR 原料組成 (乾物中%) | | |
| 乳牛用配合飼料 | 34 | 38 |
| 大豆粕 | 7 | - |
| ビートパルプ | 9 | - |
| トウモロコシ蒸留粕 | - | 12 |
| グラスサイレージ | 14 | 14 |
| ソルガムサイレージ | 10 | 10 |
| オーツ乾草 | 11 | 11 |
| アルファルファ乾草 | 14 | 14 |
| 成分含量 (乾物中%) | | |
| CP | 15.7 | 15.7 |
| NDF | 31.4 | 31.9 |
| CH₄/CO₂比 | 0.089 | 0.088 |

搾乳ロボット配合飼料給与量は 4~7 kg/日

2.2.2 泌乳ステージ

- 泌乳期の進行に伴い、1日当たり、乳量当たり、乾物摂取量当たりのCH₄排出量は変動します。
 - 測定時の分娩後日数を記録しておきましょう。
-

泌乳牛は分娩後、急激に乳量が増加し、飼料摂取量も増加していきます。分娩80日程度で泌乳ピークとなり、その後緩やかに低下していきます。また、前述したように、乳量の変化に伴い、搾乳ロボットでの配合飼料給与量も変化します。そのため、飼料全体に占める濃厚飼料の割合が、泌乳期の進行に伴って変わります。乳量の違いによって搾乳ロボット配合飼料の原物給与量を5kg/日と8kg/日にした場合では、配合飼料の給与量の違いはCH₄/CO₂比に影響しませんでした。

CH₄排出量の推定式(表2-3)からもわかるように、1日のCH₄排出量は乳量および乾物摂取量と正の相関がありますので、1日当たりのCH₄排出量は、分娩後から泌乳ピークにむけて増加し、泌乳中期ではほぼ一定で推移し、乾乳期にむけて低下する推移を示します。一方、乳量当たりのCH₄排出量は、乳量の多い泌乳最盛期で少なく、泌乳後期では多くなります。乾物摂取量当たりのCH₄排出量は、泌乳最盛期以降、ほぼ一定の値で推移します。測定したときの乳牛の泌乳日数を記録しておきましょう。CH₄排出量の個体差や飼料の影響を検討する場合、1日当たりのCH₄排出量だけではなく、乳量当たりや乾物摂取量当たりのCH₄排出量に加え、乳量から予想されるCH₄排出量と実測値の差分(余剰CH₄排出量)についても算出するとよいでしょう(4.1を参照のこと)。

2.2.3 環境温度

- 暑熱環境はCH₄排出量に影響します。
 - 測定時の舎内気温や湿度を記録しておきましょう。
 - 換気ファンやミストなどの舎内環境の稼働状況も記録しておきましょう。
-

一般に、夏季暑熱時には、適温期に比べて、乳牛の乾物摂取量や乳量の低下が見られます。乾物摂取量の低下によって1日当たりのCH₄排出量は低下しますが、乾物摂取量当たりのCH₄排出量は増加する場合があります。これは、乾物摂取量の低下に伴い、ルーメン内容物の滞留時間が増加し、消化率が高まることと関係があるようです。一方で、酷暑が長期間継続すると、乾物摂取量当たりのCH₄排出量が低下することもある

ようです。図 2-12 に、広島の農場で測定された、CH₄/CO₂ 比の牛群平均値を示しました。7月上旬から下旬の気温上昇に伴い、CH₄/CO₂ 比は上昇していますが、さらに気温が上昇すると、この比は低下しました。したがって、夏季暑熱時での CH₄ 排出量の測定は、環境温湿度の影響を受けやすくなるため注意が必要です。CH₄ 排出量の測定にあたっては、牛舎温度や湿度、送風機やミストなどの環境条件についても記録しておくとうよいでしょう。

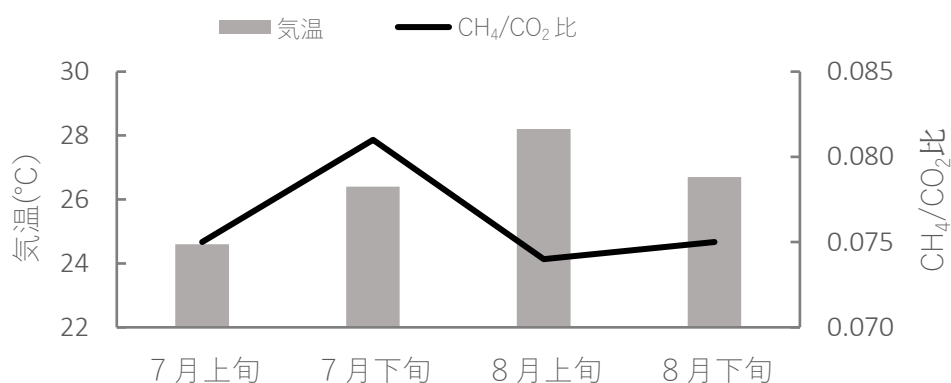


図 2-12 夏季の進行に伴う気温と CH₄/CO₂ 比の変化

2.2.4 行動

- 呼気中の CH₄/CO₂ 比は PMR 摂取後に上昇する日内変動があります。
- PMR の頻回給飼やエサ寄せをして採食行動を分散させるとよいでしょう。
- PMR の給飼開始時刻を記録しておきましょう。

搾乳ロボットを用いたフリーストールでの飼養では、PMR の給飼開始に伴い乳牛の採食行動が活発化します。乳牛の1日の CH₄ 排出は給飼後の採食開始とともに増加してピークとなり、その後低下する日内の変動パターンを示します。牛群の平均値でみると、CH₄/CO₂ 比も給飼後の採食開始から上昇する傾向がみられます (図 2-13)。搾乳ロボットでの飼養方法では、飼料摂取後から搾乳までの時間間隔を制御することは難しいために、PMR の摂取と搾乳のタイミングによって、搾乳ロボットでの測定時における飼料摂取からの経過時間が異なります。そのため、個々の乳牛についてみると、PMR 摂取後すぐに搾乳ロボットに移動して測定された場合と、PMR 摂取後しばらくしてから搾乳ロボットに移動して測定された場合とでは、CH₄/CO₂ 比が異なる可能性があります。自由往来型の牛舎レイアウトで測定した例では、PMR 摂取後1時間以内での搾乳時に測定された CH₄/CO₂ 比に比べて、4時間以降に測定された CH₄/CO₂ 比は約 10%

低値を示しました（図 2-14）。この調査では、PMR を採食してから 1 時間以内に搾乳ロボットへ進入する行動をとるケースが多くみられました（図 2-15）。採食から搾乳までの経過時間が均一になるように、頻回給飼やエサ寄せをすることで、採食行動が一定の時間に偏らないようにするとよいでしょう。

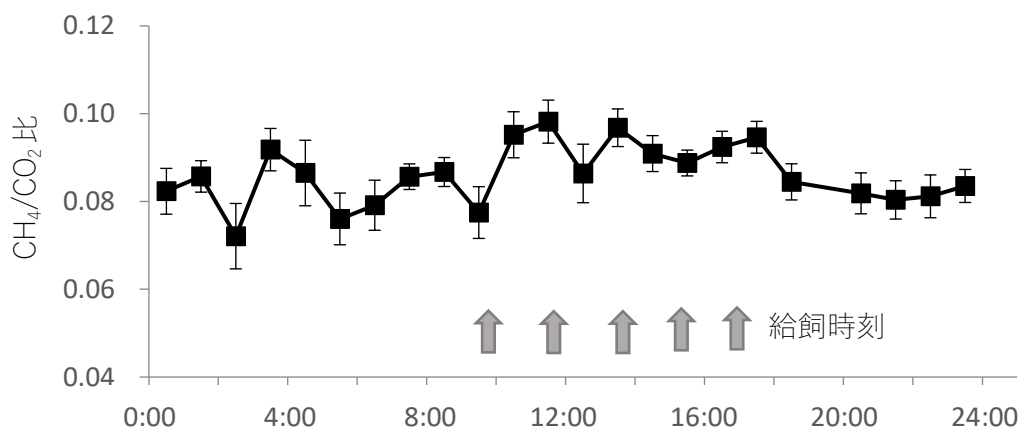


図 2-13 CH₄/CO₂ 比の時間ごとの平均値
各プロットは各時間の 4 日間平均値

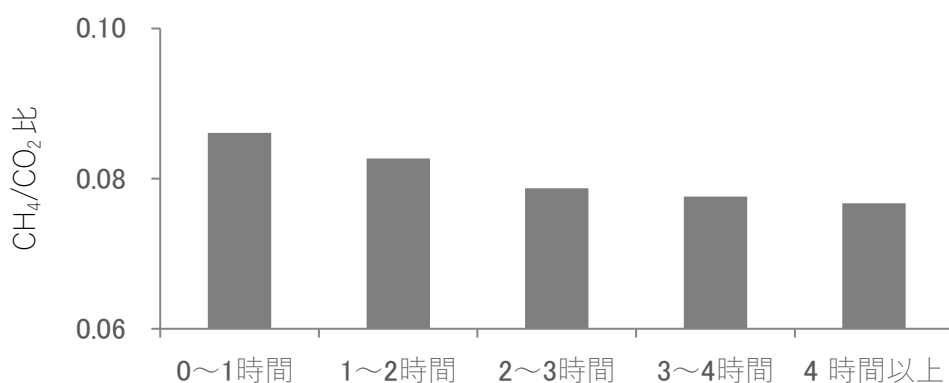


図 2-14 PMR 採食後の時間と CH₄/CO₂ 比

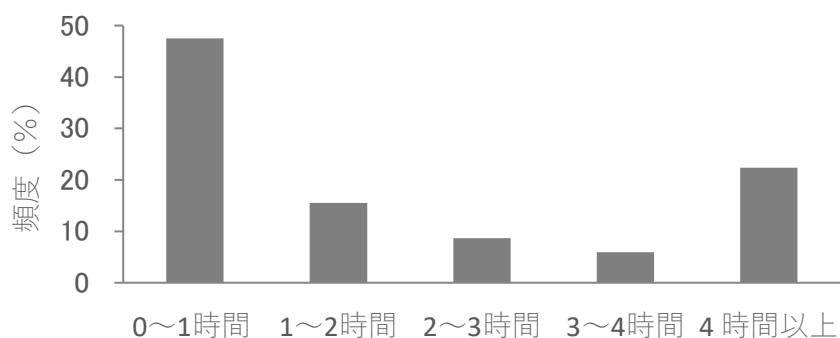


図 2-15 PMR の採食から搾乳までの時間
各時間区分に該当する観測数の全体の観測数に対する比率。

3 肉用牛

肉用牛 1 頭当たりの CH₄ 排出量は泌乳牛に比べるとおよそ半分程度ですが、我が国からの CH₄ 排出量に占める肉用牛の割合は、飼養頭数が乳牛よりも多いためにほぼ乳牛からの排出量に匹敵する量となっています(図 3-1)。したがって、ウシ消化管内発酵由来 CH₄ 排出量の削減を図るためには、肉用牛からの削減策を充実させることが必須といえます。

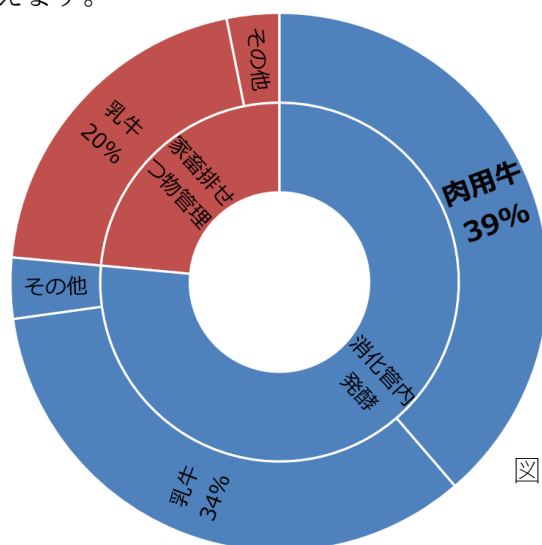


図 3-1 日本の畜産業に由来する CH₄ 排出量 (2019 年度確報値) (国立環境研究所, 2021)

3.1 測定手法

肉用牛の飼養形態は群飼が主であるため、個体ごとの CH₄ 排出量を測定するためにはいろいろな工夫が必要になります。ここでは 3.1.1 においてドアフィーダーでの測定を示します。この方法が基本となりますが、1 頭ごとに手動で分析システムを切替えてゆく必要があります。3.1.2 で示すドアフィーダーでの自動切替器を用いた測定方法は手動で行っている煩雑な切替を自動化したものであると同時に、ウシのヒトに対するストレスを軽減するものです。今後の検討が必要ですが、配合飼料を個別別に給与するフイードステーションでの測定についても参考としてご紹介します。

3.1.1 ドアフィーダーでの測定

- 飼槽で測定する点が乳牛と異なり、ウシの馴致が非常に重要です。
- 飼槽が浅い場合は、ガスが滞留しやすいように蓋や遮蔽物が必要です。
- 測定は最低 3 日間、朝夕給餌時に実施します (3.2 参照)。
- CH₄ 排出量算出には、CH₄/CO₂ 比と同時に TDN 摂取量、体重が必要です。
- 畜舎内の換気状況(風の動き)に留意してください。

ドアフィーダー（写真 3-1）は群飼をおこないつながら、個体毎に飼料給与量をコントロールすることができるシステムです。これを利用して肉用牛の採食時の CH₄ 排出量を測定することにより、育種改良のための個体ごとのデータを収集する方法について示します。



写真 3-1 ドアフィーダー

システムの概要

飼槽に設置した飼料飛散防止板や飼槽蓋を利用し、ガス吸引口を飼槽内に設置し、採取したガスの CH₄ および CO₂ 濃度を経時的に分析します（図 3-2）。

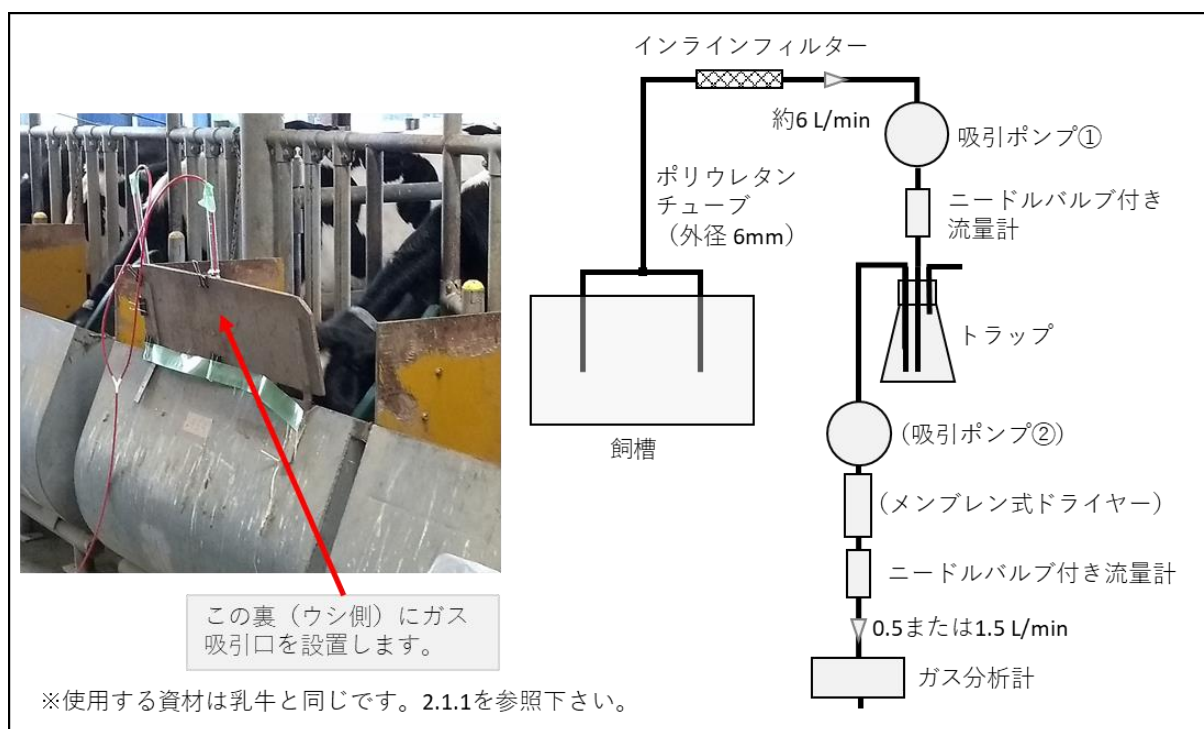


図 3-2 ガス採取システムの概要



写真 3-2 飼槽蓋にガス吸引口を設置した事例
丸印はガス吸引口の位置を示す。

また、写真 3-2 は飼槽蓋にガス吸引口を設置した事例です。ガスの吸引は毎分 6～8 L で、1 L 容のバッファー（分析計の測定レンジとの兼ね合いで適切なサイズを選択してください）を介してガス分析計にガスサンプルを供給します。使用するガス分析計は、赤外線分光法や半導体レーザー（近赤外線）分光法などによる分析計を用いることができます。詳細は 2.1.1 を参考にしてください。測定時間は最低でも 1 回 6 分間とし、最低 3 日間、朝夕飼料給与時に測定してください（参考「測定時間の検討（p. 38）」、参考「測定値に及ぼすサンプリングタイミングの影響（p. 40）」）。

なお、日常的に使用している飼料飛散防止板を使う場合に比べて、この事例のように日常的に使用していない飼槽蓋を使用する場合、測定を行う前にウシの馴致を 2 週間程度、十分に行う必要があります。

訪問時平均 CH_4/CO_2 比の計算

得られたガス濃度データは(1)バックグラウンド濃度を補正し、(2) CO_2 低濃度のデータは除外し、(3)訪問時の濃度総和を求め、 CH_4/CO_2 比を求めます。ここまでは乳牛の場合と同じですので、2.1.2 を参照下さい。

CH_4 排出量の算出

肉用牛の肥育時の CH_4 排出量は、1 日当たりの CO_2 排出量を代謝エネルギー摂取量（MEI）と体重（BW）から求めた酸素消費量の推定値と呼吸商に基づいて計算し、この値に実測した CH_4/CO_2 比を乗ずることで算出します。

$$\text{CH}_4\text{排出量 (L/日)} = (\text{熱発生量(kcal/日)} / 4.89) \times \text{補正 RQ} \times \text{CH}_4/\text{CO}_2\text{比}$$

係数 4.89 は酸素消費量 1 L 当たりの熱発生量を示す数値で、McLean (1972) の報告によっています。また、酸素消費量と CO₂ 発生量の割合は必ずしも等しくはなく、生産状態によって変動しますので、次式を利用して呼吸商（補正 RQ）を求め、補正します。

$$\text{補正 RQ} = 1.074 - 0.003283 \times \text{粗飼料給与割合}(\% \text{乾物}) + 0.6478 \times \text{MEI}(\text{Mcal/日}) / \text{BW}^{0.75} (\text{kg})$$

なお、この補正 RQ は、黒毛和種去勢牛 40 頭の肥育試験成績を用いて作成したものです。熱発生量の計算は日本飼養標準肉用牛 2008 年版（農研機構, 2009）および Terada ら（1989）に基づき以下の式から求めます。黒毛和種牛の代謝エネルギーの維持要求量（維持 ME 要求量、Mcal/BW^{0.75}kg）は、雌 0.1108 去勢雄 0.1124 を使用してください。

$$\begin{aligned} \text{熱発生量 (kcal/日)} = & [(\text{MEI (Mcal/日)} - \text{BW}^{0.75} (\text{kg}) \times \text{維持 ME 要求量}(\text{Mcal/BW}^{0.75}\text{kg})) \\ & \times 0.48 + \text{BW}^{0.75} (\text{kg}) \times \text{維持 ME 要求量}(\text{Mcal/BW}^{0.75}\text{kg})] \times 1000 \end{aligned}$$

$$\text{ここで、MEI (Mcal/日)} = \text{TDN 摂取量 (kg/日)} \times 3.62$$

TDN 摂取量（TDNI）は乾物摂取量に摂取した飼料の TDN 含量を乗じることにより求めます。飼料の TDN 含量は家畜を使った消化試験や飼料成分値を利用した推定式によって求めます。日本標準飼料成分表 2009 年版（農研機構, 2010）1.6 章、および三訂版粗飼料の品質評価ガイドブック（自給飼料利用研究会, 2009）4.2 章に詳しく解説されています。

参考 測定時間の検討

測定時間の検討を行うため、5 頭の肥育牛を供試し、前述のシステムを用いて朝夕の配合給与時のガス濃度の推移を計測しました（図 3-3）。採食時間は約 10 分程度であったことから、3 分ずつの測定を繰り返したと仮定して、個体間、朝夕間および朝夕同一時刻内反復測定に由来する誤差分散の大きさについて評価を行いました。

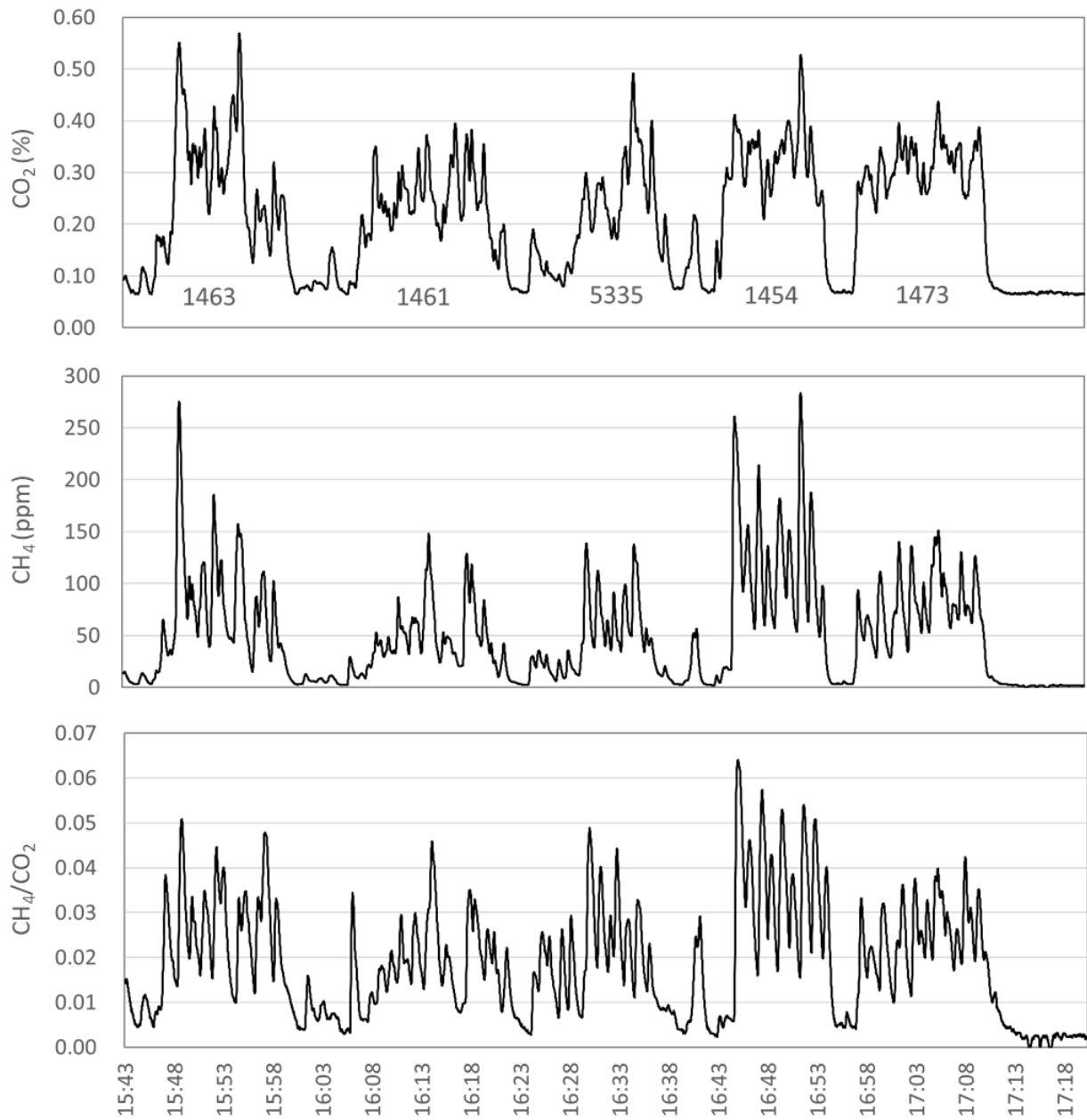


図 3-3 ガス濃度の測定例

上から CO₂ 濃度、CH₄ 濃度、CH₄/CO₂ 比。夕方の配合飼料給与時に測定。図中の数字はウシ番号。

その結果、同一時刻内反復測定値に由来する誤差分散が最も大きいものの(表 3-1)、現場で長時間の測定を行うことは困難であることから、本方式(ドアフィーダーを用いて、朝夕2回採材する)によりガス採取を行う場合、6分間のデータ収集を基本とすることとしました。

表 3-1 CH₄/CO₂ 比の分散成分

| 変量効果 | 分散比 | 分散成分 |
|-----------|------|------|
| 個体 | 0.44 | 0.08 |
| 測定時間(朝/夕) | 0.36 | 0.06 |
| 反復 | | 0.18 |
| 合計 | | 0.32 |

参考 測定値に及ぼすサンプリングタイミングの影響

乾乳牛を供試し、呼吸試験チャンバーを用いて実施した実験データを用いて、① 1日の総平均 CH₄/CO₂ 比、② 採食時の平均 CH₄/CO₂ 比、③ 朝夕の採食直後 10 分間の CH₄/CO₂ 比(スニファー法測定値)の三者を比較した成績を紹介します。

表 3-2 CH₄/CO₂ 比算出方法別の分散成分推定値

| 成分 | ①1日の総平均 CH ₄ /CO ₂ 比 | | ②採食時の平均 CH ₄ /CO ₂ 比 | | ③朝夕の採食直後10 分間のCH ₄ /CO ₂ 比 (スニファー法) | |
|---------------------------|---|-----|---|-----|---|-----|
| | 推定値 | 全体% | 推定値 | 全体% | 推定値 | 全体% |
| $\sigma_{\text{飼料}}^2$ | 0.64 | 40 | 0.39 | 20 | 0.53 | 14 |
| $\sigma_{\text{個体}}^2$ | 0.70 | 44 | 1.03 | 52 | 1.75 | 47 |
| σ_{e1}^2 | 0.18 | 11 | 0.40 | 20 | 0.49 | 13 |
| $\sigma_{\text{日}}^2$ | 0.09 | 6 | 0.14 | 7 | 0.00 | 0 |
| $\sigma_{\text{スニファー}}^2$ | | | | | 0.99 | 26 |
| 合計 | 1.61 | 100 | 1.96 | 100 | 3.75 | 100 |

σ_{e1}^2 は飼料と個体を一元配置として計算したときの分散

要因別分散成分の大きさを比較すると、総分散に占める割合は供試牛個体が最も大きく、40~50%を占めていました(表 3-2)。また、③朝夕の採食後 10 分間のデータから求めるスニファー法による値は、日間差は小さいものの反復誤差が大きいことから、これを採用する場合は、サンプリング点数を増やすことが必須であると判断されました。

さらに、①、②、③の CH₄/CO₂算定方式による値を平均±標準偏差の形で比較しますと、① 0.0589±0.0106、② 0.0568±0.0122、③ 0.0540±1.483 となり、①に比べて③では、8%ほど低い値を示しますが（図 3-4）、① 1日の総平均 CH₄/CO₂比と③ スニファー法データの相関は 0.88 であり（表 3-3）、簡便法として、十分利用可能であると考えられました。

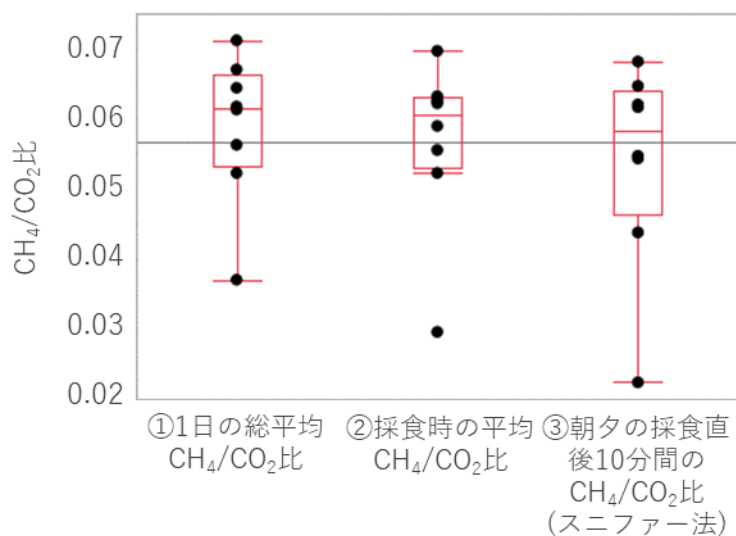


図 3-4 算定方式の違いによる CH₄/CO₂ 比の比較
 図中の横線は全体の平均値を示す。

表 3-3 算出方法別 CH₄/CO₂ 比の相関係数

| | ①1日の総平均 CH ₄ /CO ₂ 比 | ②採食時の平均 CH ₄ /CO ₂ 比 | ③朝夕の採食直後10 分間のCH ₄ /CO ₂ 比 (スニファー法) |
|---|---|---|---|
| ①1日の総平均CH ₄ /CO ₂ 比 | 1 | | |
| ②採食時の平均CH ₄ /CO ₂ 比 | 0.965 | 1 | |
| ③朝夕の採食直後10分間の CH ₄ /CO ₂ 比(スニファー法) | 0.879 | 0.939 | 1 |

③では同一時間帯で 2 回の算出を行っている。

参考 フィードステーションを利用した測定

今回紹介したシステムを応用して、フィードステーションを利用して呼気分析を行うことも可能です。十分な検討ができていないため参考情報としてご紹介いたします。写真 3-3 は屋外に設置されたフィードステーションの飼槽の背部にガス吸引口を設け、採食時の呼気ガス濃度の推移を計測したものです。この試行時にはフィードステーション上部から飼料落下口への下降気流があり、十分なガス濃度を得られない場合もありました。このような場所では風よけの設置が必要となります。また、搾乳ロボットでの設置と同様、粉塵対策と、ウシによるいたずらの対策が必要です。これらの対策については 2.1.1 「ガス吸引口および風よけの設置」を参考にしてみてください。



ガス吸引口

写真 3-3 フィードステーションにおける測定例

測定例を図 3-4 に示します。ガス濃度は十分なレベルまで上昇していますが、1 頭毎の測定時間（滞在時間）が十分とは言えません。あい気は 1 分間に 1 回程度排出されますので、これを 3 回くらい観測することが可能なように 3 分以上の滞在時間が必要です。また、ステーションの出入記録は秒単位で収集してください。

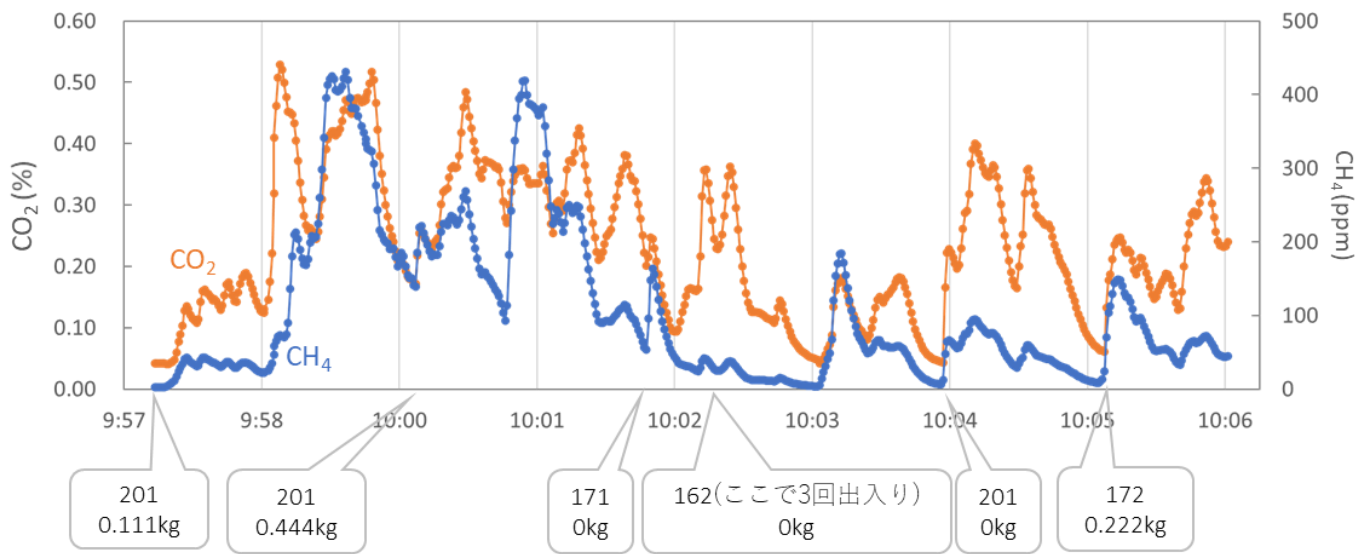


図 3-4 フィードステーションにおけるガス濃度の測定例

吹き出しはウシが訪問した時刻。内上段はウシ番号、下段は配合飼料給与量。

3.1.2 自動切替による多頭数測定

- ドアフィーダーのあるペン内で飼育されている複数の肥育牛から呼気ガスを採取するには、複数の飼槽から採取ガスを切り替える装置があると便利です。
- ウシの採食行動にあわせて流路の切り替えタイミングを設定することで、複数の飼槽からのガスを自動採取することができます。

ドアフィーダーと閉鎖型の飼槽を活用することによって、肥育牛でもスニファー法による CH_4 排出量の測定が可能ですが、多頭数の測定を行うには時間と労力がかかります。ここでは、同一ペンで飼育されている4頭の肥育牛の CH_4 排出量を個別に測定するために、複数の飼槽からサンプリングされるガスの流路を自動切換する装置(写真3-4)を用いた測定法について紹介します。

このガス流路の自動切替装置は、4つのドアフィーダーとそれに対応した飼槽が設置されているペンでの自動測定を行う場合などに適用します。1つのペンで最大4頭まで、4つのドアフィーダーと飼槽によって、1頭ずつの飼料摂取を制御している場合に適用できます。1日2回の濃厚飼料と粗飼料の分離給与に対応するように設計されています。例えば、午前と午後にそれぞれ1回ずつ給飼が行われており、いずれも粗飼料を先に給与し、その後で濃厚飼料を給与する分離給与体系などに適用することが可能です。兵庫県立畜産技術センターの肥育牛で観察した結果では、粗飼料および濃厚飼料ともに、それらが給与されると、ウシは採食を開始し、おおよそ30分程度で採食をやめ、その後

はドアフィーダーに入ったり出たりする行動をとっていました。こうした採食行動にあわせて、1頭当たりのガスの採取時間や順番などを設定できるように設計されています。

本装置は、ドアフィーダーを訪問して採食しているウシから排出される呼気ガスを、前章のようなカバーをとりつけた飼槽から吸引して、ガス中の CH_4/CO_2 比が測定できるように、以下のような構成となっています。この装置にガス分析計を接続してガスの濃度測定を行います。

- ・各飼槽のガスおよび外気（バックグラウンド）を吸引する5本のチューブ
- ・各チューブでのガスの吸引をオン・オフする電磁弁（計5つ）
- ・ドアフィーダーの開閉を感知する赤外線センサー（4つ）
- ・赤外線センサーからの入力に基づいて電磁弁の制御をするシークエンサー（マイクロコンピューター）
- ・制御盤
- ・記録装置（データロガー）
- ・吸引ポンプ

ドアフィーダーに設置したドアの開閉を感知する赤外線センサーからの入力信号と電磁弁の開閉が連動しており、1日の中で1頭当たり少なくとも2回のガス採取ができるようなプログラムを組むことができます。以下に、午前と午後に1回ずつ、それぞれ先に粗飼料を給与し、60分後に濃厚飼料を給与するような飼料給与方法に対応させる場合の設定例を示します。

- ・粗飼料給与後と濃厚飼料給与後でのそれぞれの測定時間
それぞれの測定時間を60分程度に設定します。
- ・飼槽からのガスの採取時間
飼料給与してから30分ぐらい採食しますので、その間に4頭分のガス採取を可能にするには、1頭当たりのガスの吸引時間を6分程度にします。
- ・飼槽のガス採取後の外気（バックグラウンド）の採取時間
1分程度に設定します。
- ・ガス採取するウシの順番
飼槽の並び順で流路を切り替える設定をします。
- ・粗飼料摂取時にガス採取できなかった個体の、濃厚飼料摂取時での優先採取
この設定によってガスを採取できないウシがないようにします。

上記の例での具体的なガス採取タイミングを図3-5に示しました。

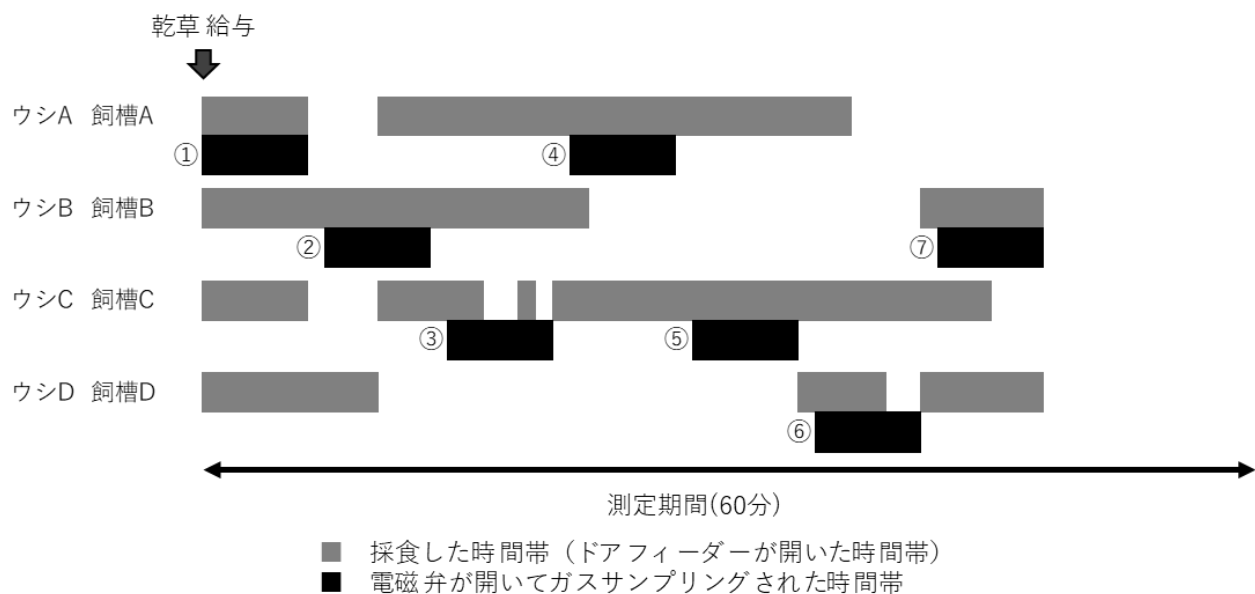


図3-5 自動切替装置によるガス採取の概要と動作順

■で示した時間帯に、ウシがフィーダーを開けて採食していたとします。

- ①飼槽 A から開始するように設定し、ガス採取を開始します。飼槽 A からの採気チューブの電磁弁が6分間開いた後で閉じられ、続いて外気用の電磁弁が1分間開き、外気を採取します。
 - ②次に A 以外の飼槽のドアの開閉状態を昇順に探査し、飼槽 B のドアが開いていることを認識することで、B 電磁弁が開き、飼槽 B のガスを6分間採取します。そのあと外気を1分間採取します。
 - ③次に飼槽 C のドアが開いていることを認識し、飼槽 C のガスを採取し始めます。C では途中でウシが採食をやめて飼槽から出ていますが、ガス採取は6分間継続されます。
 - ④次に昇順で飼槽 A のドアが開いていることを認識し、飼槽 A のガスを採取します。
 - ⑤昇順の探査で飼槽 C のドアが開いていることを認識し、飼槽 C のガスを採取します。
 - ⑥昇順の探査で飼槽 D のドアが開いていることを認識し、飼槽 D のガスを採取します。
 - ⑦昇順の探査で飼槽 B のドアが開いていることを認識し、飼槽 B のガスを採取します。
- 続いて、濃厚飼料給与後の測定が同様に行われます。

このようにひとつのペンについて4日程度測定したのち、次のペンに移動して測定を継続していきます。

本装置は、日新精器株式会社（〒734-0022 広島県広島市南区東雲 2-13-15、電話 082-286-7511）に作製を依頼しました。



写真 3-4 飼料給与後に一斉に採食開始している様子
手前にあるのが自動切換装置

3.2 測定精度に影響する諸要因

- 3日間以上の測定で変動幅±5%の測定を得ることができます。
- CH₄/CO₂比の正規性、等分散性は肥育ステージによる影響を受けません。
- 給与方法、給与時間についても、できるだけ統一して測定を行きましょう。

ドアフィーダーを利用した CH₄/CO₂比の測定値に及ぼす諸要因の影響について、肥育牛を用いて検討した結果を紹介します。

個体間、日間変動、日内変動（朝夕）の比較

3.1 で紹介したスニファー法により測定した肥育牛 53 頭の成績を用いて求めた分散成分を、個体間、日間、日内の分散成分の大きさと全分散に対する比率として図 3-5 に示しました。ここでは、ウシ毎に複数日、1日複数回測定していますが、全測定値のばらつきは、ウシ個体間、測定日間、測定日内、およびそれ以外の要因のばらつきの合計であると考え、全体のばらつきに対する各要因の寄与の程度を調べています。

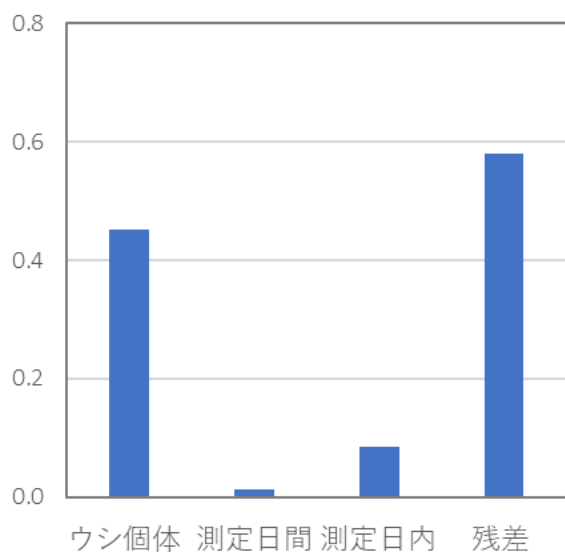


図 3-5 CH₄/CO₂比における分散成分の比較

縦軸は全分散に対する各分散成分の比率。

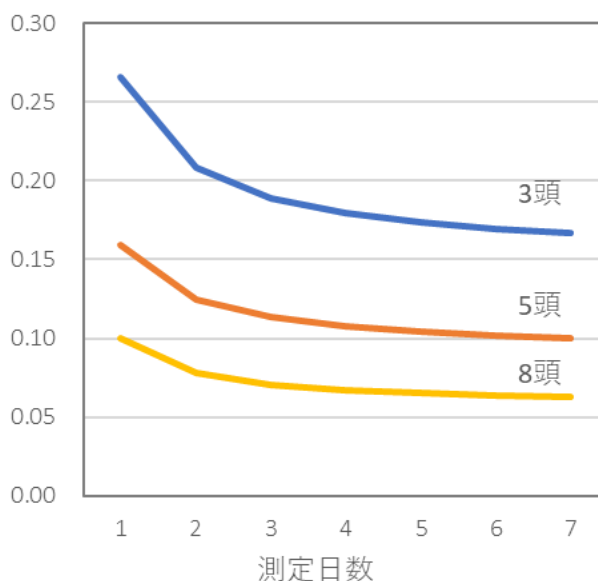


図 3-6 平均値の誤差分散（縦軸）に及ぼす供試頭数、試験日数の影響

測定誤差（図中に残差として示しました）は大きいものの、ウシ個体間のばらつきに対して測定日間のばらつきの大きさはおよそ 1/30、測定日内のばらつきは 1/5 程度でした。この結果をもとに、朝夕給与時に測定することとして、育種データを得るための個

体毎の CH₄ 排出量を ± 5 % の精度で推定するためには、各個体、最低 3 日間以上の測定を実施する必要があることとなります。また、複数頭数を供試して試験区の平均値を ± 5 % 程度 (分散として 0.112) の精度で測定するためには、5 頭を供試した場合、3 日間以上の測定を行えばよいことが推測されます (図 3-6)。

肥育ステージの影響

黒毛和種去勢牛 21~23 頭を対象に肥育期間を通して測定した CH₄/CO₂ 比を図 3-7 に示しました。粗飼料給与割合が高い肥育前期には、濃厚飼料を多給されている中後期に比べて CH₄/CO₂ 比が明らかに高くなるものの、正規性はいずれの時期にも担保されており、分散の大きさにおいてもステージによる影響は認められていません。

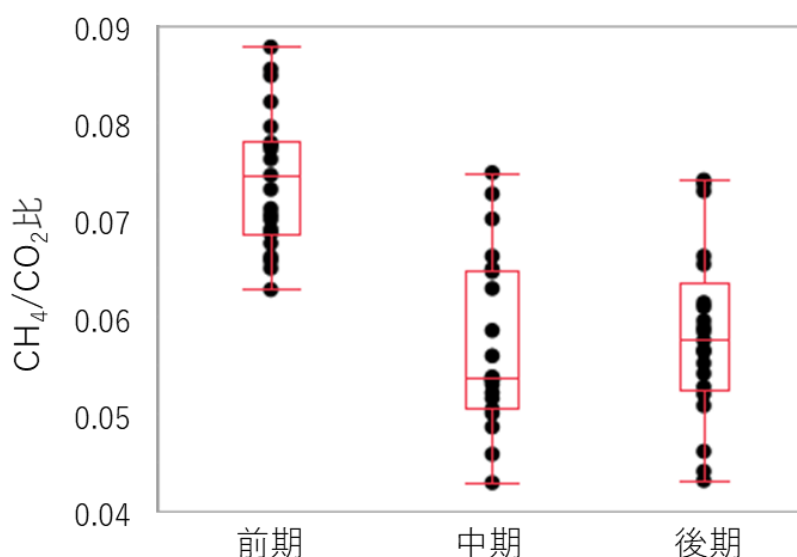


図 3-7 CH₄/CO₂ 比の分散に及ぼす肥育ステージの影響

給与飼料、給与方法による影響

ドアフィーダーを用いた CH₄/CO₂ 比の測定は、採食時に行わざるを得ないため、その測定値には、① 粗飼料、濃厚飼料の違い、② 採食速度、③ 馴致状況等が影響するものと推測されます。これらの影響を定量的に評価することは難しいものの、実験実施時には、その影響を最小化するように実験環境を整備することが求められます。本試験までに十分な馴致を行うことは言うまでもありませんが、給与方法、給与時間等についても、できるだけ統一してデータの収集を行うことが重要です。

4 参考

4.1 CH₄関連形質の育種改良

本マニュアルで紹介する、スニファー法によるウシルーメン発酵由来 CH₄ 測定法は育種改良によって CH₄ 排出削減を実現するために作られた方法です。ここでは低 CH₄ 排出牛育種の可能性について紹介します。

家畜の育種改良法

今回の対象形質であるウシルーメン発酵由来の CH₄ 排出量（以後、CH₄ 排出量）など、各個体で実際に測定できる値（これを「表現型値」といいます）は、親から受け継いだ遺伝要因と飼養条件などの環境要因から成り立っています。家畜の育種改良では、遺伝要因を数値化した育種価を指標に望ましい方向へ選抜・交配を実施することで、能力の高い個体群を造成していきます（図 4-1）。

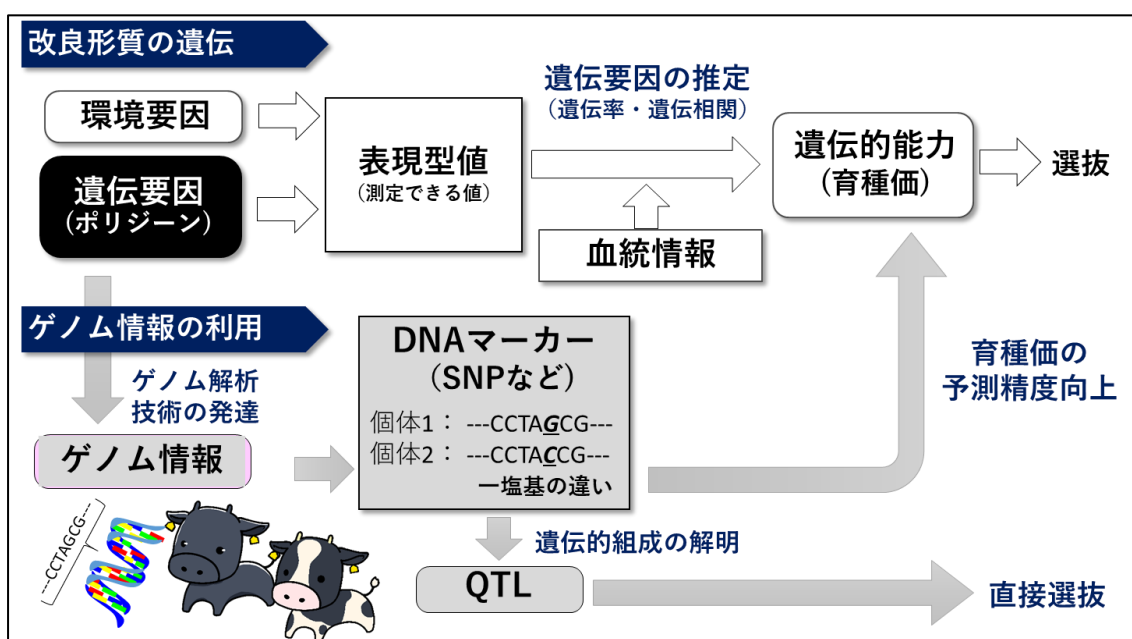


図 4-1 家畜の育種改良法

ここで、育種価とは、次世代に伝達できる遺伝的な能力値であり、集団内で血縁関係が既知の場合に各個体で予測できる相対評価値です。ゲノム情報が未知の場合、血統情報から個体間の遺伝的な似通い度合いを数値化し、その似通い値と表現型値との関係から育種価を予測することができます。このとき、効果の小さな多数の遺伝子（これを「ポリジーン」といいます）が表現型に影響を与えていると仮定します。このような育種価を指標とした選抜は、現在でも最も有効な手法として育種現場で用いられています。

育種価の予測精度は、対象形質の遺伝率によって大きく影響を受けます。ここで、遺

伝率とは、表現型値のばらつきに占める育種価のばらつきの割合であり、対象形質の遺伝的な寄与を示します。遺伝率は0から1の範囲で示され、1に近いほど遺伝的な影響が強いことを意味します。対象形質の遺伝率が高いと育種価の予測精度が高くなることから、育種価を指標とした選抜効果が発揮されやすくなります。そのため、対象形質の遺伝率を推定することは、家畜育種において最初のステップとなります。また、対象形質の改良を行う場合、他の有用形質への影響を考える必要があります。このとき、形質間の遺伝的な相関関係である遺伝相関を推定する必要があります。遺伝相関は-1から1の範囲で示され、1に近いほど正の相関関係を表します。このように、形質間の遺伝相関を推定することが次のステップとなります。

ゲノム情報の利用

近年、ゲノム解析技術が発達したことから、家畜育種においてもゲノム情報を積極的に利用できるようになりました。ここで、家畜育種で利用するゲノム情報とは、DNA上に見られる個体間の違いであり、DNA マーカーといいます。DNA マーカーは数種類からなり、特に一塩基のみ異なる一塩基多型 (SNP、スニップ) は、ゲノム上のいたるところに存在し、ウシにおいては現在までに数千万個以上がデータベースに登録され、ゲノム全体をカバーする DNA マーカーとして利用されています。SNP の多くは、ゲノム上のただの目印であり、このような SNP は親子判定や品種識別などで利用されます。一方、表現型値に直接影響を与える SNP もあり、このような SNP を量的形質遺伝子座 (QTL、キューティーエル) といいます。QTL は、統計遺伝学的手法により SNP と表現型値との関連性を調査しないと判断できません。そのためウシ集団では、SNP と表現型値との関連性を調査し、QTL を特定する研究が様々な形質にて行われてきました。しかし、QTL の検出には多くの費用・労力が必要であり、実際に QTL の特定に至った形質は、ほんの一握りです。そのため、QTL を指標とした選抜は、特定の形質・集団のみで行われています。

現在、ゲノム上の数万個の SNP を同時に遺伝子型判定できる SNP チップが市販されています。この SNP チップを用いて遺伝的能力を評価する方法をゲノミック評価といいます。ゲノミック評価は、SNP チップ上の全 SNP から各 SNP 効果を推定し、その合計である値 (これを「ゲノム育種価」といいます) を遺伝的能力値として評価する方法です (図 4-2)。ゲノミック評価では、資源集団といわれる SNP 遺伝子型および表現型値を持つ集団から、SNP 効果を推定します。次に、選抜集団といわれる SNP 遺伝子型のみを持つ集団のゲノム育種価を予測します。そして、ゲノム育種価の高い個体を選抜することで望ましい集団を造成していきます。特に、選抜集団のゲノム育種価を予測することをゲノミック評価といい、それを指標に選抜することをゲノミック選抜といいます。ゲノミック評価では、SNP チップ上の全 SNP を利用し、ポリジーン効果を含む全遺伝効果からゲノム育種価を予測することから、対象形質の QTL を見つける必要は

ありません。そのため、肉用牛では枝肉形質、乳牛では泌乳形質や体型形質などを対象形質として、ゲノミック評価が実用化されています。

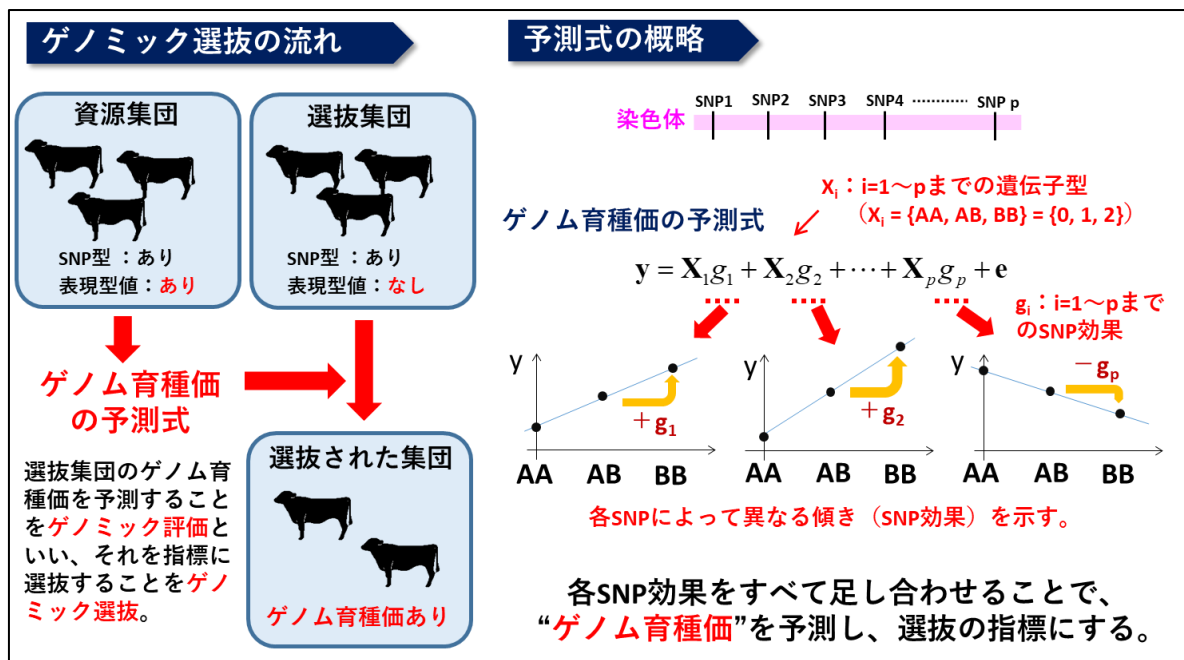


図 4-2 ゲノミック評価の概要

CH₄ 関連形質の遺伝性

これまでに示したように CH₄ 排出量の削減は、温室効果ガスの削減に大きく寄与することから、重要な課題となっています。また、CH₄ 排出量は、総エネルギー摂取量の 2~12% (Johnson と Johnson, 1995) を占めることから、飼料利用性の観点からも重要な改良形質として考えられます。CH₄ 排出量の削減方法として、飼料・栄養管理、ルーメン微生物制御、育種改良などが挙げられます (Knapp ら, 2014)。特に、育種改良による方法は、これまで大きく行われていなかったことから、近年注目されてきております。

CH₄ 関連形質の遺伝性について、2011 年以降から研究が始まっています (表 4-1)。特に、乳牛において数多くの研究が行われています。また、当初は DMI などから予測した値を指標としていましたが、近年の報告では、搾乳ロボットを用いたスニファー法など実測値を用いた遺伝率の推定が行われています。日本では、Uemoto ら (2020) が黒毛和種を対象に、飼料摂取量から推定した CH₄ 関連形質の遺伝率を報告しています。これは、家畜改良事業団にて実施された黒毛和種間接検定時に、約 5000 頭の飼料摂取量を測定していたことから、この測定値を利用して CH₄ 関連形質の遺伝性を評価しています。これまでの報告から、CH₄ 関連形質の遺伝的な寄与率を示す遺伝率は、約 0.1~0.6 の範囲で報告され (表 4-2)、CH₄ 排出量が遺伝的な影響を受けることが分かってきました。また、他の有用形質との遺伝相関についても報告されています (表 4-3)。

表 4-1 CH₄ 関連形質の遺伝率

| | 品種 | 対象頭数 | 測定方法 | 測定期間 |
|------------------------|-----------------|---------|-------------|------|
| 肉用牛 | | | | |
| Donoghueら(2016) | アングス種 | 1,043 | 実測 (CH) | 2日間 |
| Uemotoら(2020) | 黒毛和種 | 4,578 | 推定 (DMI,BW) | 1年間 |
| 乳牛 | | | | |
| de Haasら(2011) | ホルスタイン種 | 548 | 推定 (DMI) | 1乳期 |
| Pickeringら(2015) | ホルスタイン種 | 1,726 | 推定 (DMI) | 1乳期 |
| van Engelenら(2015) | ホルスタイン種 | 1,905 | 推定 (脂肪酸) | 1乳期 |
| Lassenら(2016) | ホルスタイン種 | 3,121 | 実測 (AMS) | 1週間 |
| Yinら(2015) | ブラウンスイス種 | 961 | 推定 (BW,MK) | 1乳期 |
| Kandelら(2017) | ホルスタイン種 | 336,126 | 推定 (MIR) | 1乳期 |
| Pszczolaら(2017) | ホルスタイン種 | 483 | 実測 (AMS) | 約2年間 |
| Zetouniら(2018) | ホルスタイン種 | 1,397 | 実測 (AMS) | 約2年間 |
| van Engelenら(2018) | ホルスタイン種 | 1,508 | 実測 (AMS) | 約2年間 |
| Breiderら(2019) | ホルスタイン種 | 184 | 実測 (AMS) | 約2年間 |
| Richardsonら(2021a) | ホルスタイン種 | 379 | 実測 (SF6) | 約5年間 |
| Manzanilla-Pechら(2021) | ホルスタイン種 (4か国集団) | 2,990 | 実測 (国別) | 国別 |

CH₄, 呼吸試験チャンバーを用いた測定; AMS, 搾乳ロボットを用いたスポット法 (スニファー法) による測定; SF6, SF6 トレーサー法による測定; DMI, 乾物摂取量からの推定; BW, 体重からの推定; MK, 乳量からの推定; 脂肪酸, 乳脂肪酸組成からの推定; MIR, ミルコスキャンによる赤外スペクトルからの推定; 国別, 国ごとに異なる測定法・測定期間により測定。

表 4-2 CH₄ 関連形質の遺伝率

| | CH ₄ 排出量 | | | |
|------------------------|---------------------|-----------|--------|-------------------|
| | 1日当たり | DMI当たり | 生産物当たり | 余剰CH ₄ |
| 肉用牛 | | | | |
| Donoghueら(2016) | 0.27 | 0.22 | | 0.19 |
| Uemotoら(2020) | 0.59 | 0.59 | | |
| 乳牛 | | | | |
| de Haasら(2011) | 0.35 | | 0.58 | |
| Pickeringら(2015) | 0.13 | | | |
| van Engelenら(2015) | | 0.12~0.44 | | |
| Lassenら(2016) | 0.21 | | 0.21 | |
| Yinら(2015) | 0.44 | | | |
| Kandelら(2017) | 0.25 | | | |
| Pszczolaら(2017) | 0.27 | | | |
| Zetouniら(2018) | 0.25 | | | |
| van Engelenら(2018) | 0.11 | | | |
| Breiderら(2019) | 0.12~0.45 | | | |
| Richardsonら(2021a) | 0.16 | 0.23 | 0.33 | 0.10~0.21 |
| Manzanilla-Pechら(2021) | 0.21 | 0.30 | 0.38 | 0.13~0.16 |

各報告の対象集団および測定方法は、表4-1に示す。

遺伝相関の概要として、1日当たりCH₄排出量は、体重、乳量およびDMIなどと正の遺伝相関となっています。特に、体重や乳量とは望ましくない関係となります。一方、DMI当たりのCH₄排出量はこれら形質と負の遺伝相関となり、望ましい関係となっております。

表 4-3 CH₄関連形質と有用形質との遺伝相関

| | 対象形質 | CH ₄ 排出量 | | |
|------------------------|---------|---------------------|--------|-------------------|
| | | 1日当たり | DMI当たり | 余剰CH ₄ |
| 肉用牛 | | | | |
| Donoghueら(2016) | DMI | 0.84 | -0.04 | -0.25~0.10 |
| | 屠畜時体重 | 0.79 | 0.05 | -0.11~0.18 |
| | 筋肉内脂肪 | 0.36 | 0.10 | 0.13~0.21 |
| Uemotoら(2020) | 枝肉重量 | 0.81 | -0.89 | |
| | BMS | 0.15 | -0.13 | |
| 乳牛 | | | | |
| de Haasら(2011) | 補正乳量 | 0.31 | -0.87 | |
| | 余剰飼料摂取量 | 0.32 | -0.84 | |
| Pickeringら(2015) | 乳量 | 0.55 | | |
| | 体重 | 0.84 | | |
| Lassenら(2016) | 補正乳量 | 0.43 | | |
| | 体重 | -0.18 | | |
| Yinら(2015) | 乳量 | 0.89 | | |
| | 空胎日数 | 0.86 | | |
| Zetouniら(2018) | 体型形質 | -0.30~0.28 | | |
| | 繁殖性形質 | 0.07~0.28 | | |
| Breiderら(2019) | 乳量 | 0.49~0.54 | | |
| Richardsonら(2021a) | DMI | 0.42 | -0.60 | -0.36~0.31 |
| | 補正乳量 | -0.08 | -0.53 | -0.53~-0.05 |
| Manzanilla-Pechら(2021) | DMI | 0.42 | -0.35 | -0.13~-0.02 |
| | 補正乳量 | 0.45 | 0.15 | -0.22~-0.05 |

各報告の対象集団および測定方法は、表4-1に示す。

CH₄関連形質に影響を与える QTL の探索について、肉用牛(Uemoto ら, 2020; Manzanilla-Pech ら, 2016) および乳牛 (de Haas ら, 2011; Pickering ら, 2015) で研究が行われています。日本では、Uemoto ら (2020) が黒毛和種を対象に実施し、枝肉重量や余剰飼料摂取量に影響を与える QTL と同領域に QTL を検出しています。しかし、その QTL 効果は小さいことから、実際の選抜指標に利用できる QTL を特定するには更なる調査が必要です。このように、CH₄関連形質の QTL は、これまでに報告があるものの、その多くが生産性や飼料利用性に影響を与える間接的な QTL でした。また、QTL 効果が小さく、QTL を指標とした選抜は現状では難しいことから、CH₄関連形質においても、ゲノミック選抜が考えられています。

CH₄関連形質の育種

CH₄関連形質の育種改良を行う場合、1日当たりCH₄排出量は、遺伝性を示すものの他の有用形質の多くと負の遺伝的関係を持っています。一方、DMI当たりのCH₄排出量などCH₄生産効率では、遺伝性を示し他の有用形質に悪影響を与えることなく実施できると考えられます。しかし、このような形質は比の形質といわれます。比の形質では、DMI当たりのCH₄排出量が減った場合、分子（1日当たりCH₄排出量）が減ったからか、分母（DMI）が増えたからか、判断できません。もし分母が増えた場合、望ましくない改良が実施されたこととなります。そのため、新たな指標として余剰CH₄排出量が考えられています。余剰CH₄排出量は、CH₄排出量の主要因となる形質（DMIやECM）からCH₄排出量の期待値を求めます。その期待値と実測値との差を余剰CH₄排出量として表します。例えば（図4-3）、ECMから余剰CH₄排出量を推定した場合、余剰CH₄排出量が高い個体は、期待値より高い値を持つことから、ECM以外の要因で無駄なCH₄排出を行っている個体だと判断できます。一方、余剰CH₄排出量が低い個体は、期待値よりも低い値を持つことから、ECM以外の要因ではCH₄排出を行っていない個体だと判断できます。ECMに由来するCH₄排出量は生理学的に除くことができないため、ECM以外の要因によるCH₄排出量を取り除こうというのが主な考え方です。また、余剰CH₄排出量は比の形質ではないため、改良の方向が判断しやすいのも特徴です。そのため、余剰CH₄排出量が有力な選抜指標として期待されています。

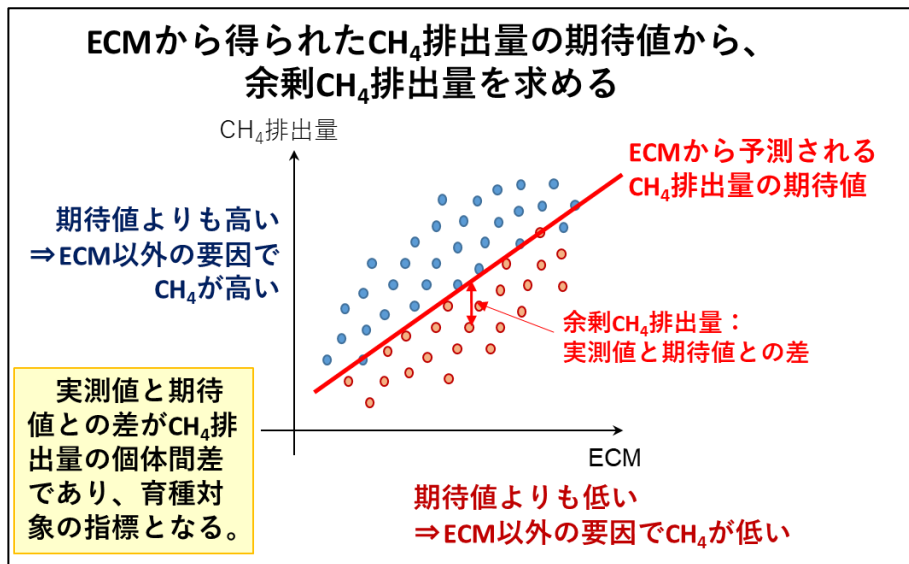


図 4-3 余剰 CH₄ 排出量

余剰 CH₄ 排出量の遺伝性について、肉用牛および乳牛にて近年報告されてきています（表 4-2、4-3）。余剰 CH₄ 排出量の遺伝率は 0.1～0.2 程度ですが、他の有用形質とは無相関または望ましい遺伝相関であることが大きな特徴です。そのため、改良指標としては有効となります。また、ゲノミック評価について、近年、オーストラリアなどでは

CH₄関連形質のゲノミック評価に向けた検討が行われています (Richardson ら, 2021b)。この対象形質は、余剰 CH₄排出量です。このように、近い将来、ゲノミック評価の項目に余剰 CH₄排出量が各国で検討されていくことが考えられます。しかし、余剰 CH₄排出量の計算には、CH₄排出量の実測値が必要となります。そのため、本マニュアルにて誰でも取り組めるような測定システムが確立できれば、CH₄排出量の育種改良は可能となってきます。本マニュアルによる CH₄ 排出量の測定が、ひいては効果的な育種改良につながることを期待します。

4.2 安価なガスセンサーを用いた多頭数測定

ウシルーメン発酵由来の CH₄ 排出量を測定するための課題の一つが、分析計の価格です。搾乳ロボットの測定では 1 台のガス分析計で多頭数の測定ができますが、搾乳ロボット数に応じた分析計台数が必要になります。ドアフィーダーで多頭数の測定を行う場合、3.1.2 で示したガス流路切り替え器を用いることにより 1 台のガス分析計で複数のウシを測定することができますが、測定頭数には限度があります。ガス分析計が複数台あれば測定搾乳ロボット数や測定頭数を増やすことができますが、分析計の価格がネックとなります。ガス分析計に比べ安価なセンサーとして、CH₄については酸化スズ半導体センサー、CO₂については非分散型赤外線式ガスセンサーが複数のメーカーから販売されています。これらセンサーを用いたスニファー法による CH₄/CO₂比測定の可能性と解決すべき課題についてご紹介します。

設置

センサーの評価には CH₄測定のために酸化スズ半導体センサーSB-12A-00 (NISSHA エフアイエス株式会社)、CO₂測定のために非分散型赤外線式センサーCDM7160 (フィガロ技研株式会社) を用いました。SB12A-00 の出力は電圧 (0~5V)、CDM7160 は評価用モジュール EM7160 を使用することにより、シリアル通信 (UART または I2C) による出力、PWM 出力、電圧出力 (0~5V) が可能です。ここでは両センサーとも 1 秒毎に電圧を取り出して濃度に変換します。測定システムへの接続は基本的にはガス分析計をセンサーに置き換えるだけですが、反応速度をあげるためにセンサーへのサンプルガス供給は 4 L/分程度必要です (図 4-4)。

検量線の作成

CO₂ 赤外線式センサーについてはスニファー法での測定レンジにおいて濃度と出力電圧は直線関係にあるとみなして検量線 (出力電圧からガス濃度を求める換算式) を作成することができます。酸化スズ半導体センサーの CH₄ 測定レンジにおいて濃度と電圧出力は直線関係にありません。このため校正のための標準ガスは 3 本以上必要です。

CH₄濃度は電圧の指数関数の2次式で表され、これを検量線とします。

図4-5の例では、CO₂検量線作成のため、2本のCO₂（0.039および0.356%）と空気との混合ガスを使用し、CH₄については4本のCH₄（2、51、202、および608 ppm）と空気との混合ガスを使用しました。酸化スズ半導体センサー表面は大気中の酸素がイオンの形で吸着しており、この酸素イオンとCH₄の反応により電荷が生じ変動する電圧によりガス濃度を読み取っています。このため、使用するCH₄標準ガスはCH₄と空気の混合ガスである必要があります。なお、センサーは個体によって感度が異なる可能性があるためセンサー個体毎に検量線を作る必要があります。

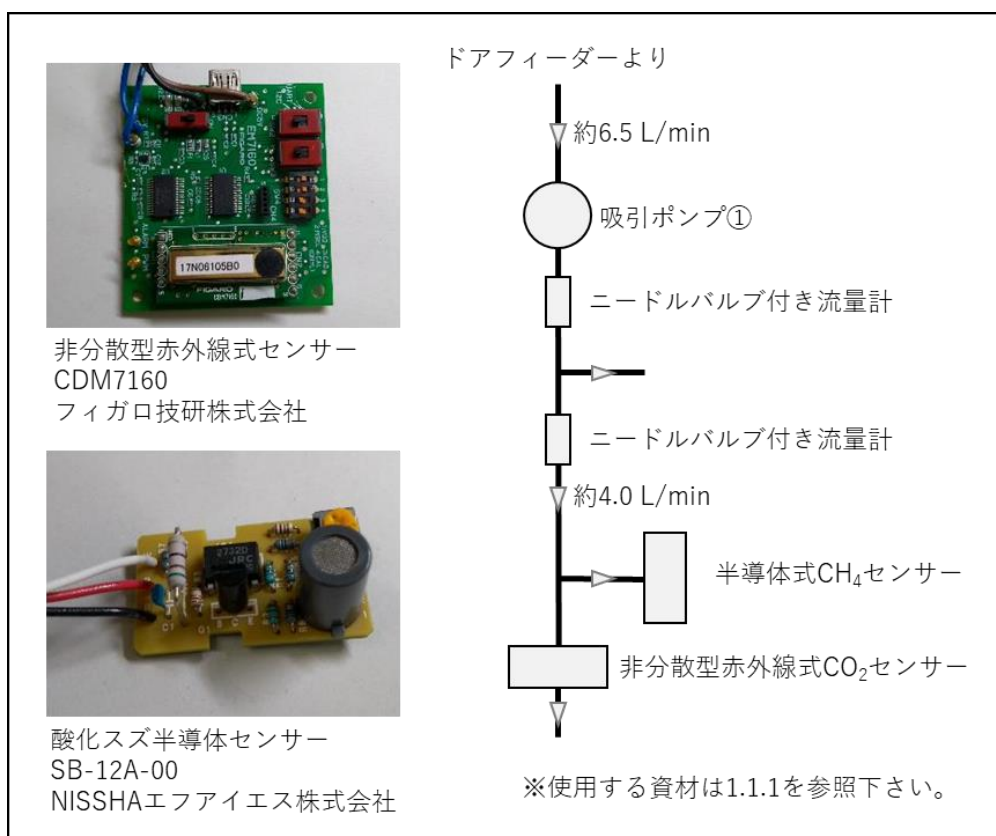


図4-4 評価に用いたガスセンサーおよびガスセンサーの配置

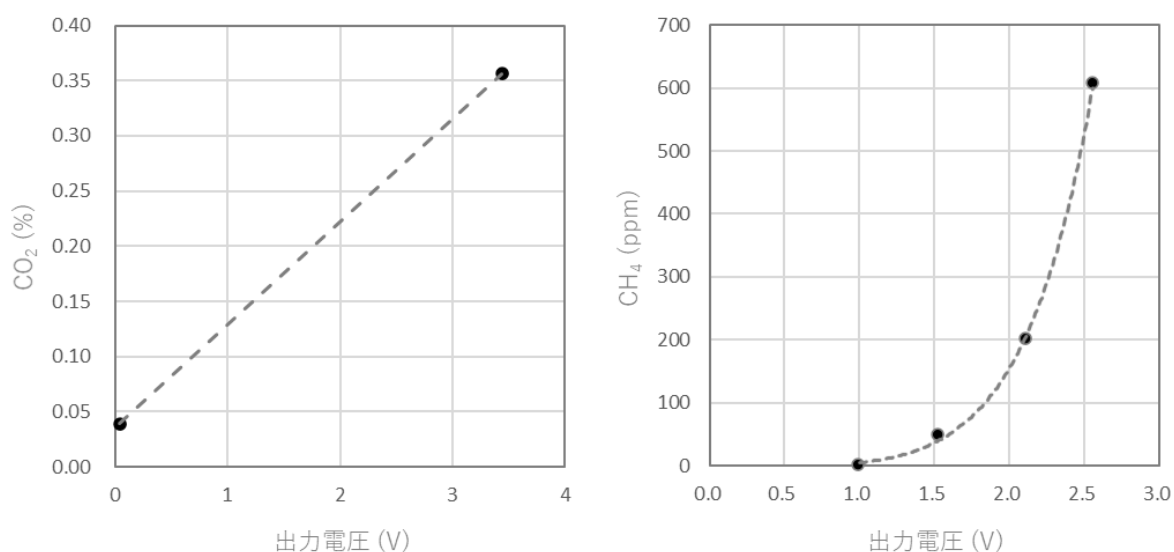


図 4-5 CO₂濃度 (%、左図) および CH₄濃度 (ppm、右図) とセンサー出力電圧 (V) との関係

スニファー法での利用の可能性

このシステムにより黒毛和種去勢牛の呼気を測定したところ、CH₄についてはセンサー出力と真値との間に数十秒の時間差が見られました。時間差を補正するとセンサー出力と真値に追従しよく一致していますが、センサー出力濃度の測定期間における平均値は真値の約 1.2 倍となっていました。酸化スズ半導体センサーは CH₄ 以外のガス種にも反応するため呼気中の水素等 CH₄ 以外のガス種に反応し、CH₄ 濃度を過大評価している可能性があります。CO₂ についてもセンサー出力と真値との間に数十秒の時間差が見られました。CO₂ センサー出力の追従性は CH₄ センサーに比べ劣りますが濃度の平均値は真値とほぼ一致しました。その結果、センサー出力濃度で算出した CH₄/CO₂ 比は真値よりも大きくなりました。

スニファー法でこれらセンサーを用いる場合、CH₄ 測定に用いる酸化スズ半導体センサーの過大評価が問題となり、これを解決しなくてはなりません。また、校正の煩雑さについても改善が必要です。課題は多く残されていますが、安価である魅力はとて大きく、普及型 CH₄ 排出量モニタリングシステムとしての活用が期待されます。

引用文献

1 背景

- Arndt, C., Hristov, A. N., Pricec, W. J., McClelland, S. C., Pelaeze, A. M., Cuevas, S. F., Ohb, J., Banninke, A., Bayatf, A. R., Crompton, L. A., Dijkstra, J., Eugèneh, M. A., Kebreabi, E., Kreuzerj, M., McGeek, M., Martinh, C., Newbold, C. J., Reynolds, C. K., Schwamm, A., Shingfield, K. J., Venemann, J. B., Yáñez-Ruizo, D. R., & Yu, Z. (2021). Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions by Ruminants – A Way to Approach the 2.0°C Target. CABI preprint 20210085288, Wallingford, UK. <https://doi.org/10.31220/agriRxiv.2021.00040>
- Chagunda, M. G. G., Ross, D., Roberts, D. J. (2009). On the use of a laser methane detector in dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68, 157–160.
- de Haas, Y., Pszczola, M., Soyeurt, H., Wall, E., & Lassen, J. (2017). Invited review: Phenotypes to genetically reduce greenhouse gas emissions in dairying. *Journal of Dairy Science*, 100, 855-870.
- Haque, M. N., Cornou, C., & Madsen, J. (2015) Individual variation and repeatability of methane production from dairy cows estimated by the CO₂ method in automatic milking system. *Animal*, 9, 1567-1576.
- Hristov, A. N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T., Weeks, H., Zimmerman, P. A., Harper, M. T., Hristova, R. A., Zimmerman, R. S., & Branco, A. F. (2015). The Use of an Automated System (GreenFeed) to Monitor Enteric Methane and Carbon Dioxide Emissions from Ruminant Animals. *Journal of Visualized Experiments*. <https://doi.org/10.3791/52904>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Johnson, K., Huyler, M., Westberg, H., Lamb, B., & Zimmerman, P. (1994). Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF₆ tracer technique. *Environmental Science & Technology*, 28:359-362. 1994. <https://doi.org/10.1021/es00051a025>
- Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97, 3231–3261. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>
- 国立環境研究所. (2021). 日本の温室効果ガス排出量データ (1990～2019 年度) 確報値. <http://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html>
- Madsen, J., Bjergh, B. S., Hvelplund, T., Weisbjerg, M. R., & Lund, P. (2010). Methane

and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants. *Livestock Science*, 129, 223-227.

<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.01.001>

Shibata, M., & Terada, F. (2010). Factors affecting methane production and mitigation in ruminants. *Animal Science Journal*, 81, 2-10. 2010.

<https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2009.00687.x>

寺田文典. (2020). 反芻家畜に由来するメタンガス排出抑制技術の新しい展開 – 育種改良の可能性 –. *東北畜産学会報*, 70, 1-6.

2 乳牛

Madsen, J., Bjergh, B. S., Hvelplund, T., Weisbjerg, M. R., & Lund, P. (2010). Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants. *Livestock Science*, 129, 223-227.

<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.01.001>

Suzuki, T., Kamiya, Y., Oikawa, K., Nonaka, I., Shinkai, T., Terada, F., & Obitsu, T. (2021). Prediction of enteric methane emissions from lactating cows using methane to carbon dioxide ratio in the breath. *Animal science journal*, 92, e13637.

<https://doi.org/10.1111/asj.13637>

Tyrrell, H. F., & Reid, J. T. (1965). Prediction of the energy value of cow's milk. *Journal of Dairy Science*, 48, 1215- 1223.

[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(65\)88430-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(65)88430-2)

3 肉用牛

自給飼料利用研究会(編). (2009). 三訂版粗飼料の品質評価ガイドブック. 日本草地畜産種子協会, 東京.

国立環境研究所. (2021). 日本の温室効果ガス排出量データ (1990~2019 年度) 確報値.

<http://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html>

McLean, J. A. (1972). On the calculation of heat production from open-circuit calorimetric measurements. *British Journal of Nutrition*, 27, 597 - 600.

農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構). (2009). 日本飼養標準肉用牛(2008 年版). 中央畜産会, 東京.

農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構). (2010). 日本標準飼料成分表 2009 版. 中央畜産会, 東京.

Terada, F., Abe, H., & Shibata, M. (1989). Comparison of energy utilization between Japanese Black and Holstein steers. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2, 299-300.

4 参考

- Breider, I. S., Wall, E., & Garnsworthy, P. C. (2019). Heritability of methane production and genetic correlations with milk yield and body weight in Holstein-Friesian dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 102, 7277-7281.
- de Haas, Y., Windig, J. J., Calus, M. P. L., Dijkstra, J., De Haan, M., Bannink, A., & Veerkamp, R. F. (2011). Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *Journal of Dairy Science*, 94, 6122-6134.
- Donoghue, K. A., Bird-Gardiner, T., Arthur, P. F., Herd, R. M., & Hegarty, R. F. (2016). Genetic and phenotypic variance and covariance components for methane emission and postweaning traits in Angus cattle. *Journal of Animal Science*, 94(4), 1438-1445.
- Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 73, 2483-2492.
- Kandel, P. B., Vanrobays, M. L., Vanlierde, A., Dehareng, F., Froidmont, E., Gengler, N., & Soyeurt, H. (2017). Genetic parameters of mid-infrared methane predictions and their relationships with milk production traits in Holstein cattle. *Journal of Dairy Science*, 100, 5578-5591.
- Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97, 3231-3261.
- Lassen, J., & Løvendahl, P. (2016). Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods. *Journal of Dairy Science*, 99, 1959-1967.
- Manzanilla-Pech, C. I. V., De Haas, Y., Hayes, B. J., Veerkamp, R. F., Khansefid, M., Donoghue, K. A., ... & Pryce, J. E. (2016). Genomewide association study of methane emissions in Angus beef cattle with validation in dairy cattle. *Journal of Animal Science*, 94, 4151-4166.
- Manzanilla-Pech, C. I. V., Gordo, D. M., Difford, G. F., Pryce, J. E., Schenkel, F., Wegmann, S., ... & Lassen, J. (2021). Breeding for reduced methane emission and feed-efficient Holstein cows: An international response. *Journal of Dairy Science*, 104, 8983-9001.
- Pickering, N. K., Chagunda, M. G., Banos, G., Mrode, R., McEwan, J. C., & Wall, E. (2015). Genetic parameters for predicted methane production and laser methane detector measurements. *Journal of Animal Science*, 93, 11-20.
- Pszczola, M., Rzewuska, K., Mucha, S., & Strabel, T. (2017). Heritability of methane

- emissions from dairy cows over a lactation measured on commercial farms. *Journal of Animal Science*, 95, 4813-4819.
- Richardson, C. M., Nguyen, T. T. T., Abdelsayed, M., Moate, P. J., Williams, S. R. O., Chud, T. C. S., ... & Pryce, J. E. (2021a). Genetic parameters for methane emission traits in Australian dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 104, 539-549.
- Richardson, C. M., Sunduimijid, B., Amer, P., van den Berg, I., & Pryce, J. E. (2021b). A method for implementing methane breeding values in Australian dairy cattle. *Animal Production Science*, AN21055.
- Uemoto, Y., Takeda, M., Ogino, A., Kurogi, K., Ogawa, S., Satoh, M., & Terada, F. (2020). Genetic and genomic analyses for predicted methane - related traits in Japanese Black steers. *Animal Science Journal*, 91, e13383.
- Yin, T., Pinent, T., Brügemann, K., Simianer, H., & König, S. (2015). Simulation, prediction, and genetic analyses of daily methane emissions in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 98, 5748-5762.
- van Engelen, S., Bovenhuis, H., Dijkstra, J., Van Arendonk, J. A. M., & Visker, M. H. P. W. (2015). Genetic study of methane production predicted from milk fat composition in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 98, 8223-8226.
- van Engelen, S., Bovenhuis, H., Van der Tol, P. P. J., & Visker, M. H. P. W. (2018). Genetic background of methane emission by Dutch Holstein Friesian cows measured with infrared sensors in automatic milking systems. *Journal of Dairy Science*, 101, 2226-2234.
- Zetouni, L., Kargo, M., Norberg, E., & Lassen, J. (2018). Genetic correlations between methane production and fertility, health, and body type traits in Danish Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 101, 2273-2280.

執筆者一覧

| | |
|------|--------------------------|
| 上本吉伸 | 国立大学法人 東北大学大学院農学研究科 |
| 及川康平 | 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 |
| 長田 隆 | 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 |
| 小櫃剛人 | 国立大学法人 広島大学大学院・統合生命科学研究科 |
| 鈴木知之 | 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 |
| 寺田文典 | 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 |
| 都丸友久 | 群馬県畜産試験場 |
| 西川悠貴 | 独立行政法人 家畜改良センター |
| 野中最子 | 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 |
| 正木達規 | 兵庫県立農林水産技術総合センター畜産技術センター |

気候変動緩和コンソーシアムは、利用者が本マニュアルに記載された技術を利用したこと、あるいは技術を利用できないことによる結果について一切責任を負いません。

本マニュアルは、農林水産省の農林水産研究推進事業（委託プロジェクト研究）「農業分野における気候変動緩和技術の開発」「畜産分野における気候変動緩和技術の開発」の研究成果を基に作成したものです。複製、転載などの利用に当たっては事前に気候変動緩和コンソーシアム事務局（農研機構畜産研究部門）の許可を得てください。

ウシルーメン発酵由来メタン排出量推定マニュアル

呼気中メタン/二酸化炭素濃度比を活用した on farm 測定法

発行日：2022年3月

問い合わせ先：

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 畜産研究部門

TEL：029-838-8292/FAX：029-838-8606

Web 問い合わせフォーム：<http://www.naro.go.jp/inquiry/index.html>

印刷：株式会社 近代工房