



新規開発モニタリングシステムを用いた 畜産現場におけるメタンガス濃度の モニタリング・調査

北里大学 獣医学部動物資源科学科 動物飼育管理学研究室 准教授 鍋西 久
北里大学 獣医学部動物資源科学科 動物飼育管理学研究室 専攻生 小室 真悟

【要約】

畜産からのメタン排出削減の取り組みを加速させるためには、さまざまな条件下でメタンガスをモニタリング・調査する必要があるが、高額な分析装置などの導入が障壁となっていた。そこで、筆者らが新たに開発したメタンガスモニタリングシステムを用いて畜産現場（酪農、肉用牛、養豚、養鶏）におけるメタンガス濃度を連続的にモニタリング・調査することによって、畜舎で発生するメタンガスの濃度、推移、季節変動や飼養管理方法との関連性を検討した。

1 はじめに

食料の安定供給・畜産の持続的発展と地球環境の両立が強く求められている中、畜産からのメタン排出削減の取り組みを加速させるためには、さまざまな条件下でメタンガスをモニタリング・調査する必要があるが、高額な分析装置などの導入が障壁となり、畜産の現場で容易に取り組める状況にはない。そのため、普及性の高いメタンガス計測手段の開発が求められていた。筆者らはこのほど、上述の課題の解決を図るため、半導体ガスセンサーを用いた簡易メタンガスモニタリングシ

ステムを新たに開発したところである。

そこで本研究では、新たに開発したメタンガスモニタリングシステムを用いて畜産現場（酪農、肉用牛、養豚、養鶏）におけるメタンガス濃度を連続的にモニタリング・調査することによって、畜舎で発生するメタンガスの濃度、推移、季節変動や飼養管理方法との関連性を検討し、畜産からのメタン排出を削減するための研究や取り組みに寄与する情報を提供することを目的とする。

2 半導体センサーを用いた簡易メタンガスモニタリングシステムについて

反芻動物からのメタン排出量を測定・推定できる既存の方法では、いずれも大掛かりな設備や高額なガス分析計が必須となる。メタン排出量を測定する方法の一つであるスニフ

アー法^(注1)は、一般の農場でも導入が進んでいる搾乳ロボットや自動給餌機を活用した測定ができる点で、他の技術よりは普及性が高い方法であると考えている。しかしながら、高価な

ガス分析計が必須であることに変わりはない。

(注1) 呼気中のメタンと二酸化炭素の濃度比を用いた推定法。

畜産からのメタン排出削減の取り組みを加速するためには、より生産現場に近い環境で、かつ多くのデータを取得することが必要であり、そのためには低価格でメタンガス濃度をモニタリングできる技術が不可欠であると考えた。筆者らが新たに開発した簡易メタンガスモニタリングシステム「サーモニメタン」は、半導体ガスセンサー（メタン、二酸化炭素）、ケーブルと専用のアプリで構成され、PCでアプリを起動してメタンガスと二酸化炭素濃度を連続的にモニタリングするものである（図1）。半導体ガスセンサーの採用は、家庭用のガス警報器から着想を得た。

都市ガス警報器用のメタンセンサーには、酸化スズを用いた半導体ガスセンサーが広く用いられている。酸化スズはn形半導体で、清浄空気中では酸素の電子吸着により抵抗値が高くなっているが、メタンなどの可燃性ガスが存在すると吸着酸素がガスと反応し酸化スズ中のキャリア濃度が増加するため電気抵抗が減少する。この電気抵抗の変化をガス濃度に対応した出力信号に変換することでメタンガスを検知するものである。「サーモニ

メタン」では、低濃度メタンを選択的に検知できる酸化スズ半導体ガスセンサー SB-12A（NISSHAエフアイエス株式会社製）を搭載し、濃度信号を出力するモジュールをメタンセンサーとして採用している。

二酸化炭素については、単光源二波長の非分散型赤外線（NDIR）式センサーである IR-93S-04/100（NISSHAエフアイエス株式会社製）を採用している。この方式では、放射された赤外線が対象ガスの分子振動を引き起こすことにより、特定波長の赤外線が吸収される現象を利用してガス濃度を検知するものである。受光部に搭載されたサーミスタで温度補正を行い、予めマイコンに収納された補正式からガス濃度を算出する。この方式による二酸化炭素センサーは、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）対策としての換気状態のモニタリングや施設園芸における植物の生育環境管理として一般的に活用されている。

前述のメタン、二酸化炭素濃度センサーから出力されるシリアルデータをUSBケーブル経由でPCに取り込み、測定データの可視化とモニタリング、データ保存が行えるアプリを併せて構築した。開発したアプリでは、畜産現場でのメタンモニタリングを容易に

図1 簡易メタンガスモニタリングシステム「サーモニメタン」



資料：筆者作成

きるようにするため、センサー制御と測定条件の設定、メタン濃度推移を把握するグラフ表示機能、データ保存機能を搭載した。測定間隔は、利用方法に応じて2、10秒、1、5、10、60分の6段階から選択できるようになっており、測定データはCSV形式で出力され、測定中でもデータを出力できる。

筆者らは、このシステムをインストールしたインターネット接続済みのモニター無し小型PCをプラスチックボックスに収納し、遠隔操作アプリを用いてセンサーデータをどこからでもリアルタイムで取得する仕組みを構築している（写真1）。

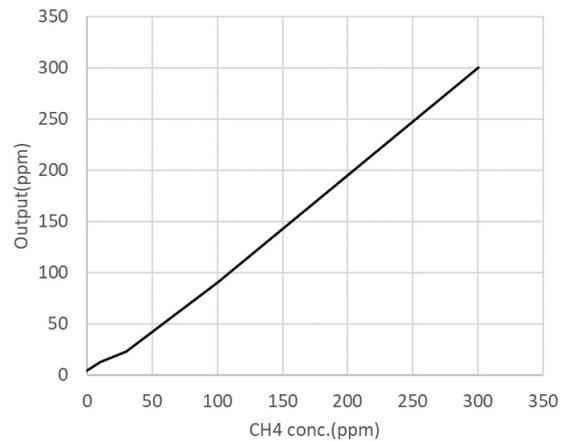
本システムにおけるメタンと二酸化炭素濃度の測定精度を図2、3に示す。メタンについては低濃度域でわずかな誤差はあるものの、生産現場レベルでの実証に用いるには十分な精度ではないかと考えられる。



写真1 データ取得用PC

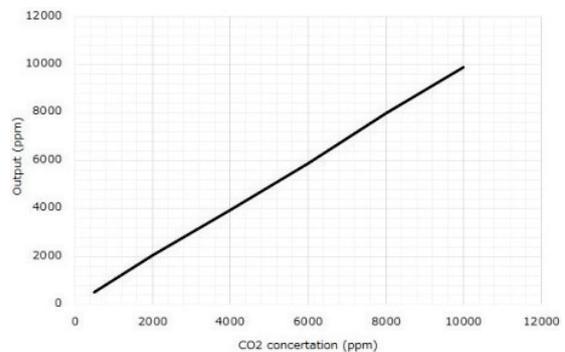
従来のガス分析計と比較して大幅なコストダウンを実現したことにより、一部の研究機関や大学でしか行えなかった畜産現場のメタン計測を、より多くの機会で実現できるようになり、さまざまなアプローチによるメタン排出削減対策の実践にも寄与するものと考えている。

図2 メタン出力例



資料：筆者作成

図3 二酸化炭素出力例



資料：筆者作成

3 畜産現場におけるメタンガス濃度などのモニタリング・調査

(1) 酪農フリーストール牛舎におけるモニタリング・調査

北海道紋別郡おこっぺ興部町の民間酪農場である株式会社Farm to-mo（以下「Farm to-mo」という）の搾乳フリーストール牛舎の中央付

近にサーモメタン（ライブストックジャパン合同会社製）を設置し、1分ごとにメタンガス濃度を測定した（写真2、3）。また、試験期間中における1時間ごとの牛舎内温度、相対湿度、二酸化炭素濃度についても通信機能付センサー（サーモ二酸化炭素プラ

ス：ライブストックジャパン合同会社製）を用いて、1時間ごとに測定した。測定期間は2022年9月1日～12月31日とした（停電などにより一部のデータ欠損あり）。

フリーストール牛舎における1時間ごとの



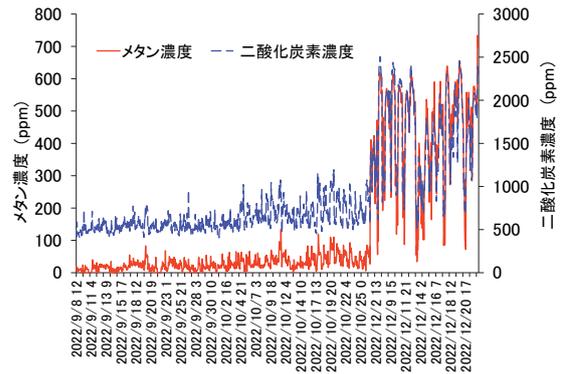
写真2 試験牛舎の様子



写真3 試験牛舎での測定の様子
(塩ビ管内にセンサーを配置)

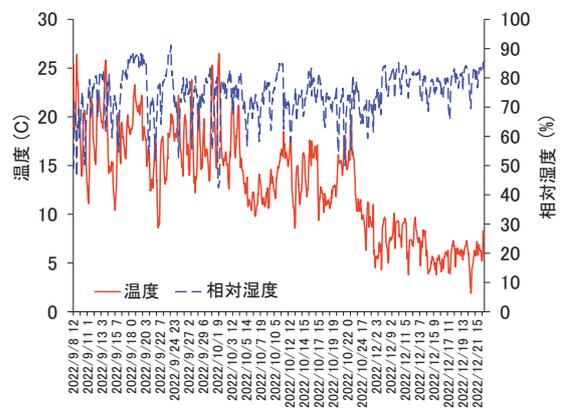
平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移を図4に、温度と相対湿度の推移を図5に示した。期間中のメタン濃度は9月で平均17ppm、12月では429ppmであった。また、二酸化炭素濃度は9月で平均534ppm、

図4 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移



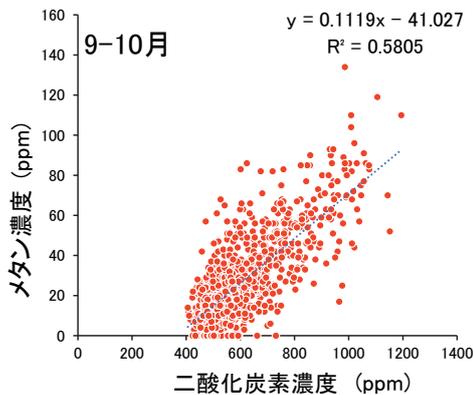
資料：筆者作成

図5 1時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移

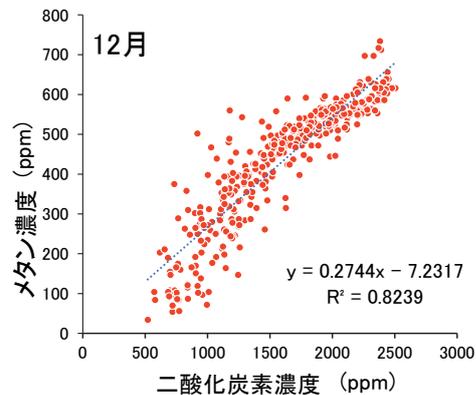


資料：筆者作成

図6 9・10月と12月のメタン濃度と二酸化炭素濃度の関係



資料：筆者作成

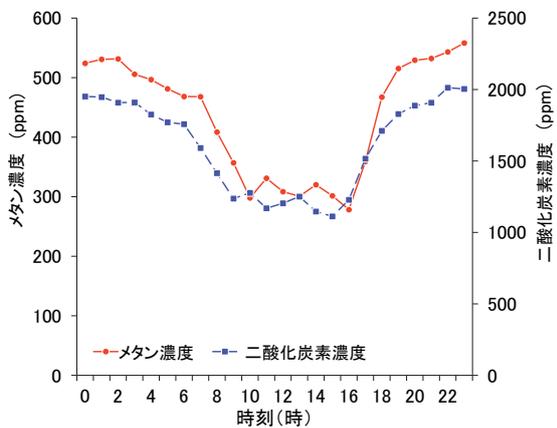


12月では1596ppmとなり、いずれも9月が12月と比べて有意に低く推移した。12月においてはメタン、二酸化炭素ともに明確な日リズムが観察された。

フリーストール牛舎における9・10月と12月のメタン濃度と二酸化炭素濃度の関係を図6にそれぞれ示した。それぞれの期間において、両者間には有意な正の相関が認められた ($P < 0.05$)。12月におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移を図7に示した。両者とも日中(9~16時)に低く推移した。試験期間中における温度と相対湿度の日内変動については大きな変動は認められなかった(図8)。12月におけるメタン濃度と二酸化炭素濃度の比(CH_4/CO_2)の日内変動は0.21~0.30で推移し、大きな変動は認められなかった(図9)。

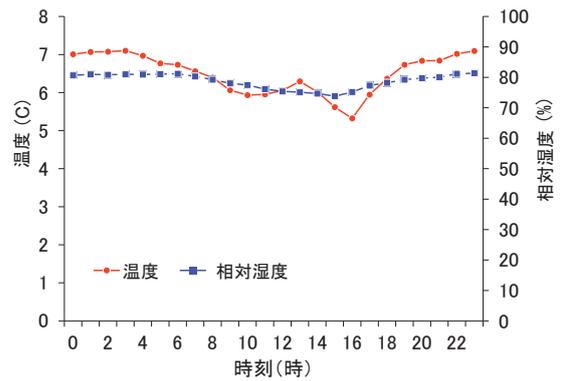
酪農牛舎においては暑熱ストレス緩和のために主に夏期では換気扇の運用が行われている。9月の二酸化炭素濃度、メタン濃度が低かったのは牛舎内換気の影響により発生したガスが畜舎外に放出されたためであると考えられた。換気が弱まる冬期においては高い二酸化炭素濃度、メタン濃度が観察されたことから、酪農牛舎における搾乳牛の生産活動を反映したものと考えられる。

図7 12月におけるメタン濃度と二酸化炭素濃度の日内変動の推移



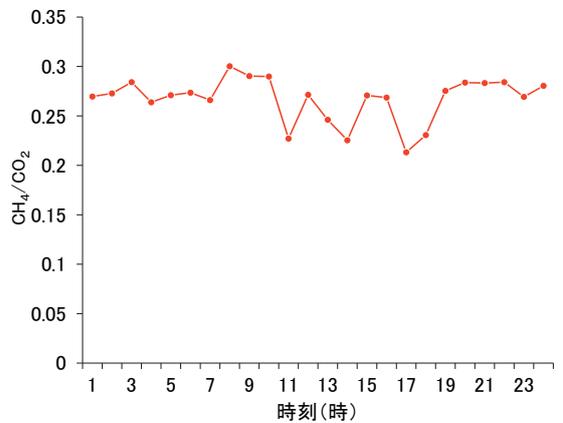
資料：筆者作成

図8 12月における温度と相対湿度の日内変動の推移



資料：筆者作成

図9 12月における CH_4/CO_2 の日内変動の推移



資料：筆者作成

(2) 酪農つなぎ飼い式牛舎におけるモニタリング・調査

青森県内の民間酪農場のつなぎ飼い式牛舎(尻合わせ)の通路中央上部にサーモメタンを設置し、3の(1)と同様の方法で測定した(写真4)。測定期間は2023年2月1日~3月6日とした。



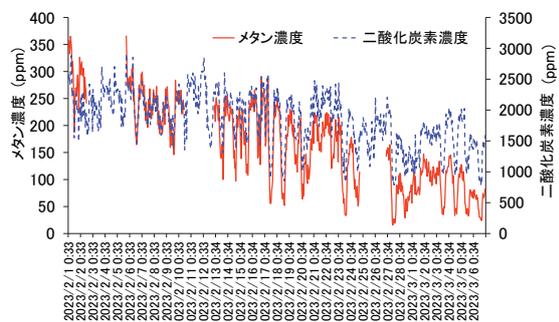
写真4 つなぎ飼い式牛舎での測定の様子

つなぎ飼い式牛舎における1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移を図10に、温度と相対湿度の推移を図11に示した。期間中の平均メタン濃度と二酸化炭素濃度は試験期間後半において低下傾向で推移した。

試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移を図12に示した。両者とも日中(9~15時)に低く推移した。試験期間中における温度と相対湿度の日内変動については大きな変動は認められなかった(図13)。試験期間中におけるCH₄/CO₂の日内変動は0.05~0.08で推移した(図14)。

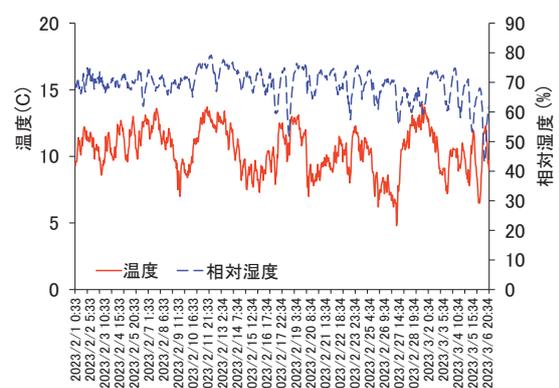
1日当たり平均メタン濃度と合計乳量との関係、およびCH₄/CO₂と合計乳量との関係を図15に示した。1日当たり平均メタン濃

図10 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移



資料：筆者作成

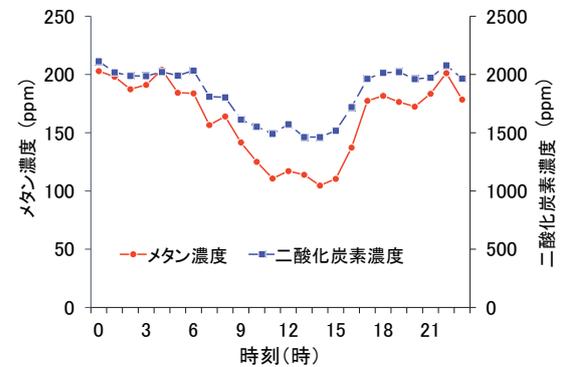
図11 1時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移



資料：筆者作成

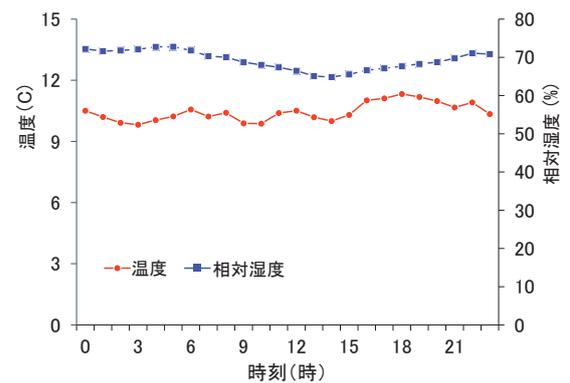
度、CH₄/CO₂ともに1日当たり合計乳量との間に有意な負の相関が認められた。

図12 試験期間中におけるメタン濃度と二酸化炭素濃度の日内変動の推移



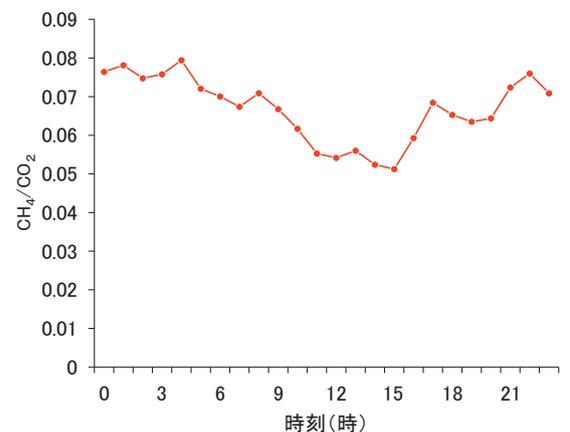
資料：筆者作成

図13 試験期間中における温度と相対湿度の日内変動の推移



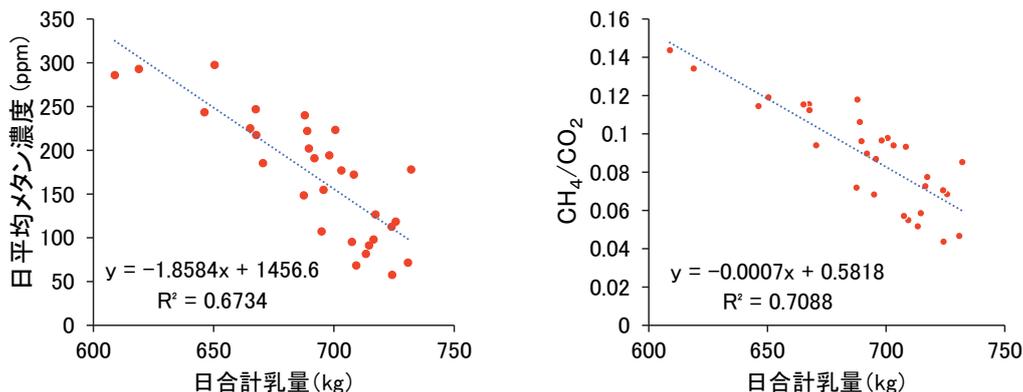
資料：筆者作成

図14 試験期間中におけるCH₄/CO₂の日内変動の推移



資料：筆者作成

図15 日平均メタン濃度 (左)、CH₄/CO₂ (右) と日合計乳量との関係



資料：筆者作成

(3) 肥育牛舎におけるモニタリング・調査

青森県内の民間肉用牛（交雑種）肥育牛舎（以下「肥育牛舎」という）の飼槽上部にサーモメタンを設置し、3の（1）と同様の方法で測定した（写真5）。測定期間は2023年2月7～15日とした。

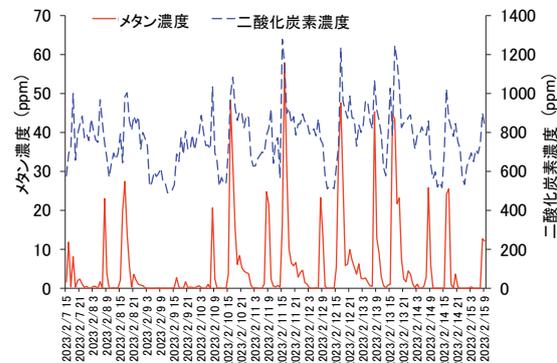
肥育牛舎における1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移を図16に、温度と相対湿度の推移を図17に示した。期間中の平均メタン濃度と二酸化炭素濃度は3の（2）の酪農つなぎ飼い式牛舎と比較していずれも低く推移した。



写真5 試験牛舎での測定の様子

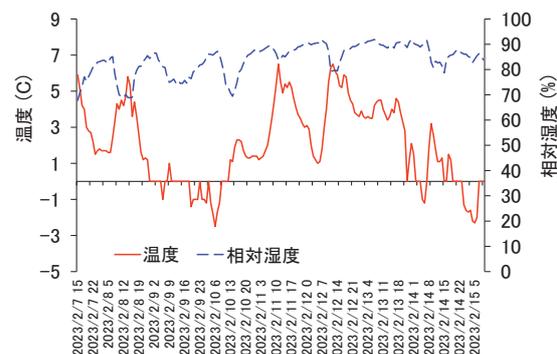
試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移を図18に示した。両者とも飼料給与時（8時と16時）に高くなる傾向が認められた。試験期間中における温度と相対湿度の日内変動については大きな変動は認められなかった（図19）。

図16 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移



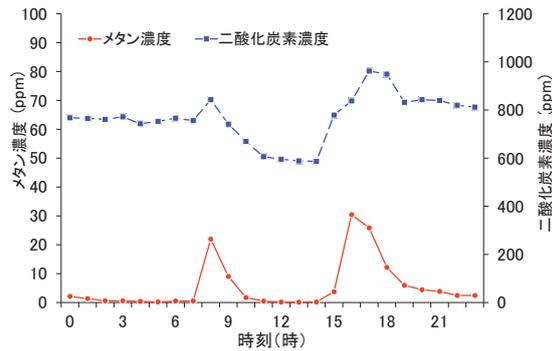
資料：筆者作成

図17 1時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移



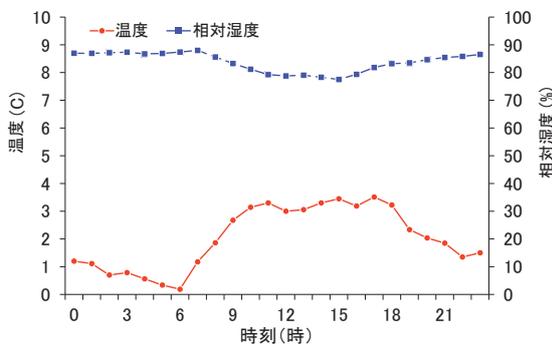
資料：筆者作成

図18 試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移



資料：筆者作成

図19 試験期間中における温度と相対湿度の日内変動の推移



資料：筆者作成

(4) 肥育豚舎におけるモニタリング・調査

宮崎県川南町の宮崎県畜産試験場川南支場内肥育豚舎の豚房にサーモメタンを設置し、3の(1)と同様の方法で測定した(写真6、7)。測定期間は2022年12月13日～23年2月28日とした。

肥育豚舎における1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移を図20に、温度と相対湿度の推移を図21に示した。期間中の平均二酸化炭素濃度は比較的高く推移したものの、平均メタン濃度は100ppm以下と低く推移した。また、豚舎内のスクレーパー運用とメタン濃度との関連も確認された。試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移を図22に示した。両者とも日中に低く推移し、夜間から翌朝にかけて高くなる日リズムが認められた。試験期

間中における温度と相対湿度の日内変動については大きな変動は認められなかった(図23)。

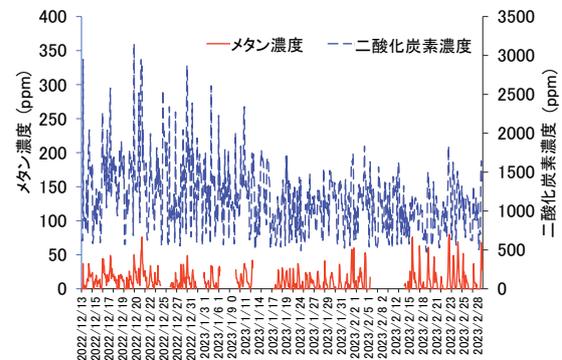


写真6 肥育豚舎の様子



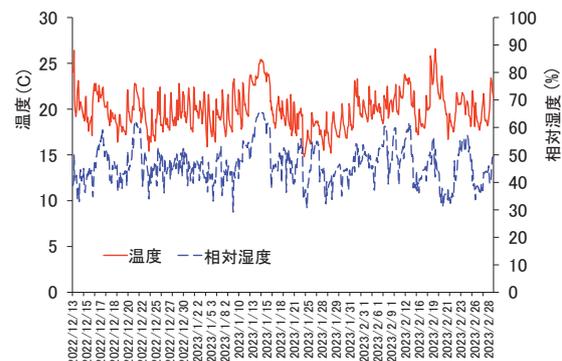
写真7 肥育豚舎での測定の様子

図20 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移



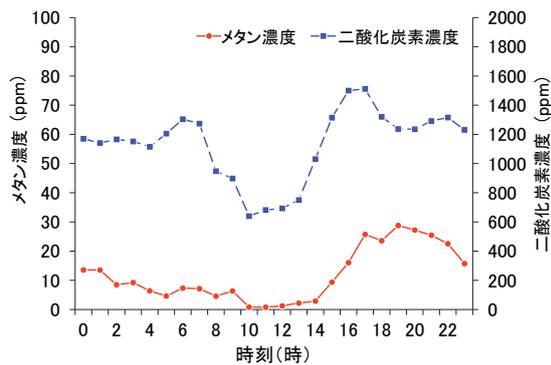
資料：筆者作成

図21 1時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移



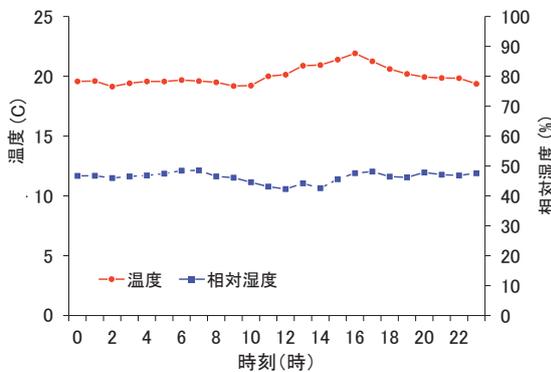
資料：筆者作成

図22 試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移



資料：筆者作成

図23 試験期間中における温度と相対湿度の日内変動の推移



資料：筆者作成

(5) ブロイラー鶏舎におけるモニタリング・調査

青森県南部町のブロイラー鶏舎内にサーモメタンを設置し、3の(1)と同様の方法で測定した(写真8、9)。測定期間は、鶏舎への入雛2日後から出荷までとなる2022年12月16日～23年1月22日とした。

ブロイラー鶏舎における1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移を図24に、温度と相対湿度の推移を図25に示した。期間中の平均二酸化炭素濃度は特に初期段階(餌づけステージ)において他の畜種と比較して著しく高く推移し、前期～中期～仕上げ期～出荷に近づくにつれて低下する傾向が認められた。平均メタン濃度も初期段階で

最も高く、その後前期から仕上げ期にかけて低下する傾向を示した。試験期間中の温度は25度以上、相対湿度は50～60%で推移した。

試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移を図26に示した。両者とも日中に低く推移し、夜間から翌朝にかけて高くなる日リズムが認められた。試験期間中における温度と相対湿度の日内変動については大きな変動は認められなかった(図27)。

ブロイラーでは発育ステージごとに給与飼料や温度調節が変わるが、初期段階でガス濃度に変動が認められたことから、給与飼料などの影響によるものと考えられた。

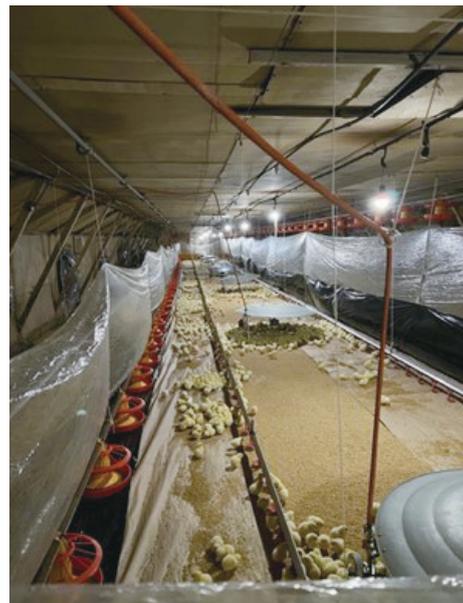
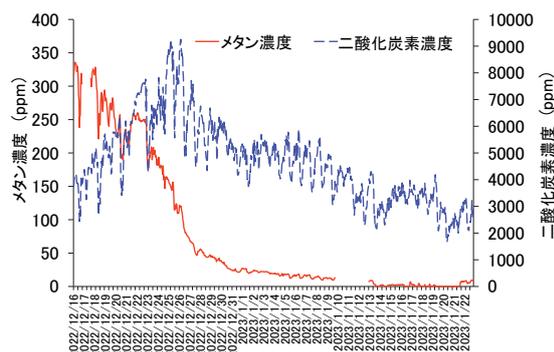


写真8 試験鶏舎の様子(入雛直後)



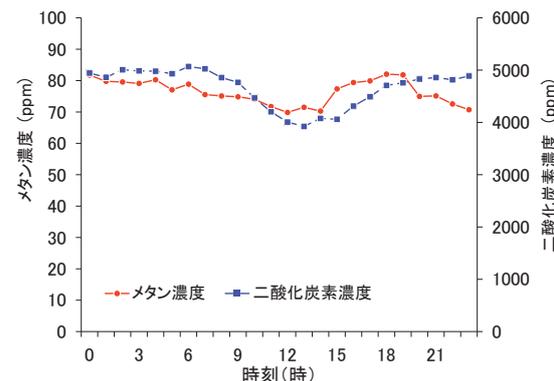
写真9 試験鶏舎での測定の様子

図24 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移



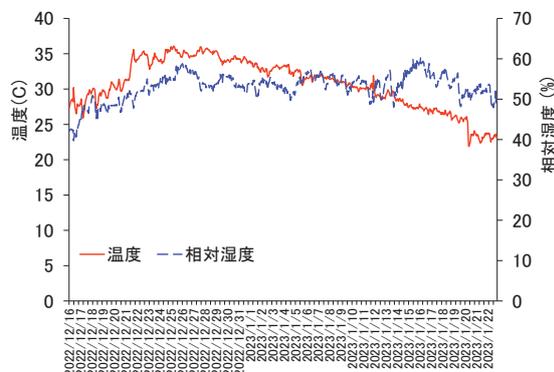
資料：筆者作成

図26 試験期間中におけるメタン濃度と二酸化炭素濃度の日内変動の推移



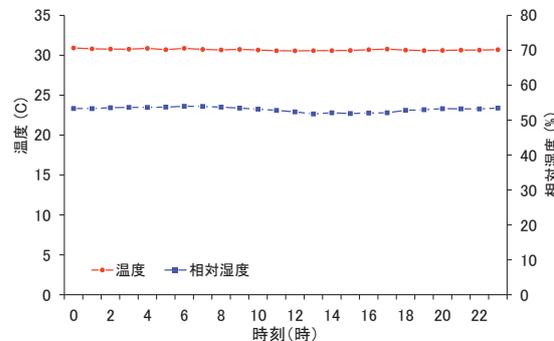
資料：筆者作成

図25 1時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移



資料：筆者作成

図27 試験期間中における温度と湿度の日内変動の推移



資料：筆者作成

4 乳・肉用牛における呼気中メタンガス濃度のモニタリング・調査

これまでの取り組みにおいては、畜舎の空气中メタンおよび二酸化炭素濃度のモニタリング・調査を行った。しかしながら、乳・肉用牛が排出する呼気中のメタンを計測するためには、より牛に近い環境で測定を行うことが必要となる。そこで、乳用牛においては搾乳ロボットの自動給餌機、肥育牛においては飼槽内にメタンと二酸化炭素を同時に測定可能なセンサーを設置し、乳・肉用牛の呼気中メタンガス濃度のモニタリング・調査を実施した。

(1) 乳用牛における呼気中メタンガス濃度のモニタリング・調査

Farm to-moの搾乳フリーストール牛舎内

の搾乳ロボット自動給餌機上部にサーモメタン二酸化炭素プラスを設置し、2秒ごとにメタンガスと二酸化炭素濃度を同時に測定した(写真10、図28)。メタンおよび二酸化炭素の測定においては、搾乳ロボット進入時の濃度から進入前後の濃度をバックグラウンド濃度として差し引いた。

試験期間は2022年12月13～15日の3日間とし、1台の搾乳ロボットに期間中3回以上進入したホルスタイン種乳用牛48頭を対象とした。評価項目はメタン排出量、体重(BW)、エネルギー補正乳量(ECM)、メタン転換効率(MCF)とし、これらの関連を調査した。乳生産性については、同期間中に実施された牛群検定の成績から入手し、搾乳ロボット進入データと体重は

搾乳ロボットにおける測定値を採用した。

メタン排出量の推定においては、ウシルーメン発酵由来メタン排出量推定マニュアル（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構）を参考に、以下の推定式を用いて求めた。

$$\text{CH}_4 \text{ 排 出 量} = -507 + 0.536 \times \text{BW} + 8.76 \times \text{ECM} + 5029 \times \text{CH}_4/\text{CO}_2$$

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

$$\text{MCF} = 2.91 - 0.0498 \times \text{ECM} + 51.0 \times \text{CH}_4/\text{CO}_2$$

搾乳ロボット自動給餌機上部にメタンセンサーを設置した今回の取り組みにおいて、乳用牛がロボットに進入した際に二酸化炭素濃度とメタン濃度が上昇することを確認できた（図29）。二酸化炭素濃度値から、呼気中のメタンを採取検知できていることが示された。ロボット進入中に得られた二酸化炭素濃度とメタン濃度のそれぞれの合計値の比を求

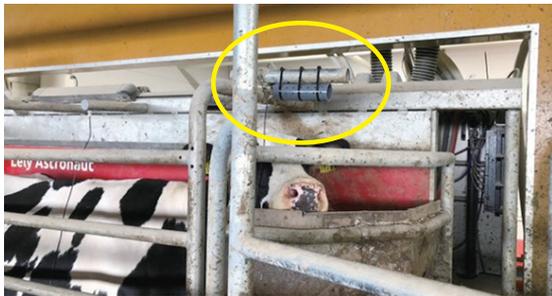
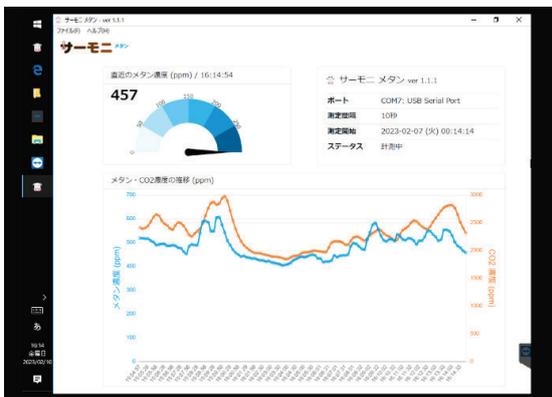


写真10 搾乳ロボットでの測定の様子

図28 搾乳ロボットでの測定値



資料：筆者作成

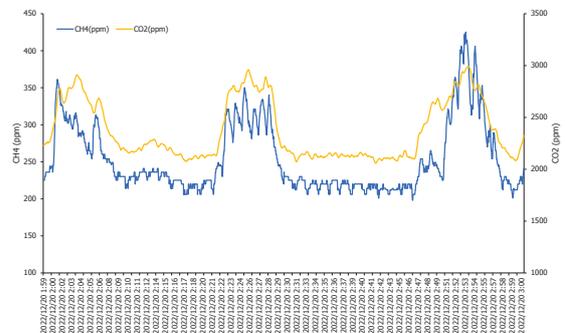
め、メタン排出量の推定に用いた。

試験期間中の成績を表に示した。供試牛の1日当たりの平均乳量は48.7キログラムであり、高泌乳牛と言える牛群が対象であった。1日当たりの推定メタン排出量は平均1027リットル、MCFの平均値は8.49%であった。

メタン排出量と乳量との間には有意な正の相関が認められ、1日当たり乳量55キログラム以上の牛では45キログラム未満の牛と比べてメタン排出量が有意に多かった（図30）。また、メタン排出量と体重との間には有意な正の相関が認められ、体重700キログラム以上の牛では600キログラム未満の牛と比べてメタン排出量が有意に多かった。

摂取したエネルギーのうち、メタン産生によって失われたエネルギーを示す指標であるMCFは、乳量と有意な負の相関が見られ（図31）、生産効率の高い牛ではMCFが低くなる傾向が認められた。

図29 搾乳ロボットでの測定値



資料：筆者作成

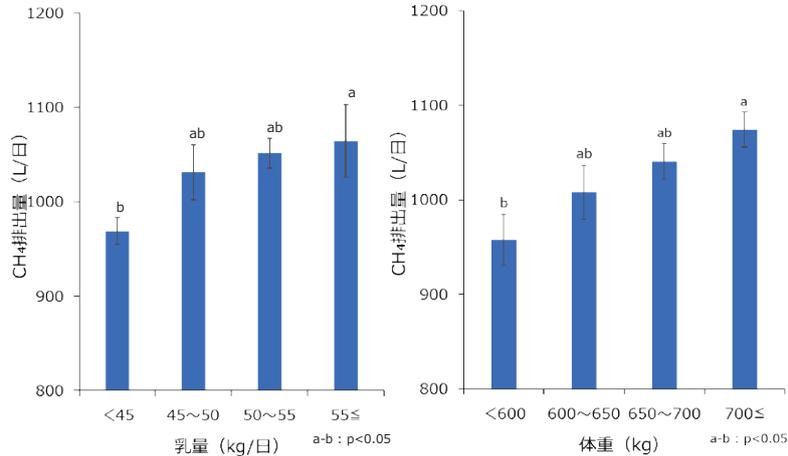
注：濃度上昇時に搾乳ロボットに進入したことを示す。

表 試験期間中の成績

	平均	最小	最大
産次	1.96 ± 0.03	1	2
体重 (kg)	658.3 ± 6.5	568	737
乳量 (kg/日)	48.7 ± 1.1	33.2	65.0
CH ₄ /CO ₂ 比	0.155 ± 0.002	0.125	0.182
CH ₄ 排出量 (L/日)	1027 ± 11.9	856	1199
乳脂率 (%)	3.76 ± 0.07	3.0	5.1
乳蛋白質率 (%)	3.18 ± 0.05	2.46	4.12
MCF (%)	8.49 ± 0.1	7.10	10.07

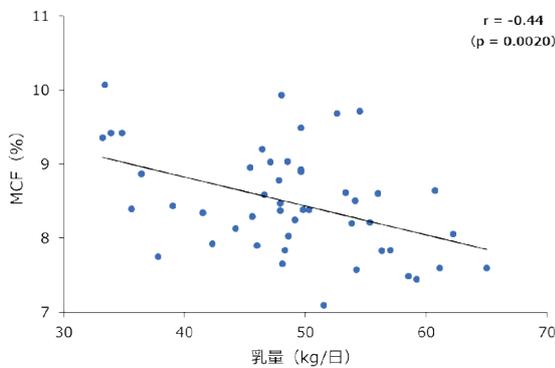
資料：筆者作成

図30 1日当たり乳量とメタン排出量との関係（左）体重とメタン排出量との関係（右）



資料：筆者作成

図31 乳量とMCFとの関係



資料：筆者作成

(2) 肥育牛における呼気中メタンガス濃度のモニタリング・調査

肥育牛舎の飼槽内部にサーモメタン二酸化炭素プラスを設置し、4の(1)と同様の方法で測定した(写真11、12)。測定期間は2023年2月7～15日とした。肥育牛舎飼槽内に設置したセンサーで取得した2秒ごとのメタン濃度と二酸化炭素濃度の推移を図32に示した。3の(3)において測定した同牛舎空气中濃度よりも著しく高い濃度のメタン、二酸化炭素濃度が記録されたことから、呼気を採取できていることが示された。また、両ガスともに朝夕の飼料給与時(8時と16時)に高くなる明瞭な日リズムが観察されたことから、肥育牛の呼気中メタンガス

濃度のモニタリングとしては、個体識別などの課題も残されているが、飼料摂取時における牛に近い位置での測定として飼槽内での測定が有効と考えられた。

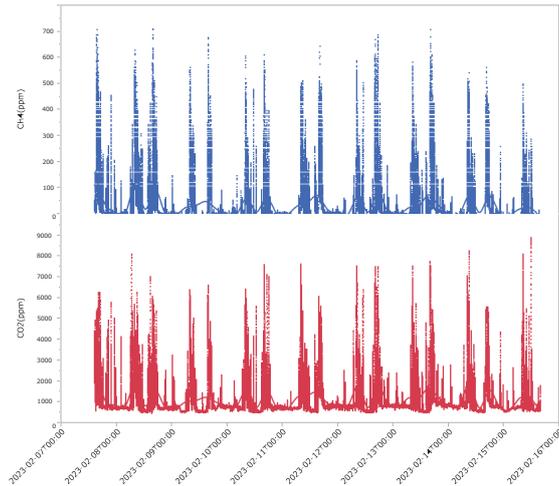


写真11 飼槽内での測定の様子



写真12 飼槽内での測定の様子

図32 メタン濃度と二酸化炭素濃度の推移



資料：筆者作成

5 おわりに～まとめと今後の展望～

畜産現場で発生するメタンガスをモニタリングし、何らかの対策によってメタン排出量をコントロール（制御・抑制）することができれば、それによって得られた畜産物はまさに“エシカル^(注2)商品”と言え、地球環境と両立する畜産の持続的な発展に寄与するものと考えられる。

また、牛からのメタン排出削減は、一見、環境対策としてのみ捉えられがちだが、バイオマスエネルギーにもなるメタンの排出は、牛側からすると”エネルギーの損失”とも言え、摂取した飼料エネルギーの12%にも及ぶとの報告もある。呼気からのメタン排出削減は、体内でのエネルギーバランスの改善＝生産効率の改善（乳量、増体）につながるため、農家側としても、飼料利用効率が改善することにより飼料価格高騰対策になり得る。

畜産業界では、COVID－19の拡大、コロナ禍からの経済回復に伴う原油価格上昇によるエタノール生産量の増加や海上運賃の上昇に加え、ウクライナ情勢によるかつてないほどの配合飼料価格、資材価格の高騰が大きな課題として立ちはだかつてきており、生産性の向上と持続性の両立を実現するため、新た

な視点に立った経営方式が求められている。

本研究では、筆者らが新たに開発した簡易メタンガスモニタリングシステムを用いて、これまで簡単には実施できていなかった畜産現場におけるメタンガス濃度のモニタリング・調査を同時進行的に実現することができた。測定精度を求めるならば、呼吸チャンバーでの測定が最も合理的であるが、畜産現場のさまざまな環境下における取り組みを行うためには不向きである。生産性の向上と持続性の両立が強く求められる中、新たな畜産システムを構築するためにはさまざまなアイデアに基づく試行錯誤が必要であり、そのためには畜産現場レベルで容易に実施可能な測定方法が不可欠であると考えられる。重要なことは、何らかの対策（処置）を行う上で同じ測定条件の下でその効果を確認することである。

今後は、これまでの取り組みを発展させつつ、畜産からのメタン排出削減のための対策を施すことによって、実際にメタンガスの発生を抑制する取り組みを進めていかなければならない。

(注2) 倫理的・道徳的の意味。人・社会・地域・環境に配慮したものを指す。