

令和4年度畜産関係学術研究委託調査報告書

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ベースライン調査

学校法人北里研究所 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 鍋西 久 ・ 小室 真悟

[nabe9@vmas.kitasato-u.ac.jp](mailto:nabe9@vmas.kitasato-u.ac.jp)

## 【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する必要があるが、高額な分析装置等の導入がネックとなっていた。そこで、我々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。

## 目 次

1	はじめに	・・・1
2	反芻動物からのメタン排出量を測定・推定できる代表的な方法	・・・2
	2. 1 呼吸チャンバー	
	2. 2 六フッ化硫黄トレーサー法	
	2. 3 GreenFeed 法	
	2. 4 スニファー法	
3	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	・・・6
4	畜産現場におけるメタンガス濃度のベースライン調査	・・・9
	4. 1 酪農フリーストール牛舎	
	4. 2 酪農繋ぎ飼い式牛舎	
	4. 3 肥育牛舎	
	4. 4 肥育豚舎	
	4. 4 ブロイラー鶏舎	
5	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	・・・28
	5. 1 搾乳牛	
	5. 2 肥育牛	
	5. 3. 頭絡型センサーを用いた繁殖雌牛のメタンガスモニタリングの試み	
6	まとめと今後の展望	・・・37

## 1. はじめに

地表から放射される赤外線の一部を吸収することによって温室効果をもたらす気体を温室効果ガス（GHG）と定義される。GHGには二酸化炭素、メタン、水蒸気、亜酸化窒素などがあり、合成ガスとしてフロン、ハイドロフルオロカーボン、パーフルオロカーボン、六フッ化硫黄などが大気中に存在する。農業生産システムは大気中の GHG 排出の主要源であり、土地被覆の変化に伴う間接的な排出を含め、人為的排出全体の約 30%を占めている。なかでも畜産は GHG の主要な排出源であり、二酸化炭素の温室効果の 28 倍と言われるメタンの排出量は年間約 8000 万トンから 9500 万トンと推定され、成熟した牛では、1 日最大 500 リットルのメタンを暖気（げっぷ）として主に口や鼻孔から排出する。

メタンは反芻動物の第一胃の嫌氣的発酵の副産物であると言える。第一胃は原生動物、細菌、古細菌、ウイルス、真菌、バクテリオファージ等からなる複雑なシステムで、これらすべてが食物エネルギーの収穫とその後の宿主への栄養素の供給に寄与している。メタンは第一胃内における飼料の嫌氣的分解過程において主にメタン菌によって生産される。第一胃で消化される繊維質の量は第一胃代謝産物の量に比例するため、反芻動物が消化する繊維質が多ければ多いほど、第一胃内の酢酸と水素の量が増えるため、より多くのメタンが生成される。

近年、畜産・酪農現場からの GHG 排出や、地球温暖化・気候変動との関連性について世界的に関心が高まってきており、反芻動物からのメタン排出を低減する方法を開発するための多くの研究が進められている。第一胃内でのメタンの発生を抑えるための栄養管理方法として、飼料中の粗飼料（繊維質）と濃厚飼料の比率を下げる、植物性化合物のようなメタン拮抗物質を飼料に組み込む、または飼料中の脂質含量を増やすことは、すべてメタン軽減のための栄養的選択肢となり得る。脂質は飼料中の第一胃発酵性有機物を代替し、不飽和脂肪酸を水素化することでメタン生成を抑制し、第一胃内のメタン生成菌と原虫の数を減少させる。海藻がメタン排出に与える影響についての研究もよく知られている。しかしながら、研究論文で発表されている飼料添加物のなかには、実験室では効果があっても生産現場レベルでは効果がないものもある。将来の世界的な需要を満たすために、畜産業界は飼料利用効率の向上、抗生物質の代替、反芻動物のメタン排出量削減を実現する飼料添加物の探索や低メタン牛の育種選抜方法の検討といった対策を加速させる必要がある。

そのような状況下、環境への GHG の悪影響を低減し緩和戦略を評価するために、反芻動物からのメタン排出量を算出することに大きな関心が集まっている。反芻動物からのメタン排出量を測定するためにいくつかの方法が開発されてきたが、どの手法も適用範囲、利点、欠点が異なっており、すべての面で完璧なものはない。

## 2. 反芻動物からのメタン排出量を測定・推定できる代表的な方法

### 2. 1. 呼吸チャンバー

呼吸チャンバーは、100年以上前から動物のエネルギー代謝や反芻動物のメタンエネルギーロスを研究するために使用されてきた（写真2-1）。第一胃発酵による総メタン排出量を正確に測定できる「ゴールドスタンダード」と言える方法である。この手法では動物を快適に収容できる大きさの密閉されたチャンバー内で飼養する。メタン排出量は、測定された気流に入口と出口の濃度差を乗じることで算出できる。これは、赤外線ガス分析器を用いた自動サンプリングと分析によって容易になり、吸気と排気の両方におけるメタン濃度を繰り返し測定することができる。多くの場合、メタン、二酸化炭素、酸素、アンモニアなどの測定を統合したマルチガス分析器を用いて、動物のGHG排出量と熱生産量を同時に測定することができる。呼吸チャンバーの利点は、リアルタイムのメタン濃度を記録できることで、1日当たりの平均メタン排出量を推定することができる点である。これにより、第一胃内メタン生成の基本的なメカニズムに関する洞察が得られ、飼料栄養価や飼料添加物からのフィードバックを即時反映することができる。デメリットとしては、技術的に難しい分析装置が含まれ、その構築と維持に費用がかかることである。また、一度に実験できる動物の数に制約がある。さらに、評価する前に動物を呼吸チャンバーの囲いに耐えられるように馴致させる必要があり、高い労働力と時間的コストがかかる。さらに懸念されるのは、メタン生成の測定が、動きが制限された動物に対して人工的な条件下で行われることであり、生産現場における環境との乖離が懸念されている。



写真 2-1 呼吸チャンバー

Animals 2012, 2(2), 160-183; <https://doi.org/10.3390/ani2020160>

## 2. 2. 六フッ化硫黄トレーサー法

六フッ化硫黄トレーサー法は非同位体トレーサー法であり、屋内および放牧された反芻動物からのメタン産出を測定するために使用されてきた（写真 2-2）。六フッ化硫黄は不活性ガスであり反芻動物が自然に生成することはない、第一胃の正常なプロセスに影響を与えることはない。この技術では、液体六フッ化硫黄を充填した放出制御型の小型チューブを動物の第一胃に経口投与する。キャピラリーチューブを取り付けた頭絡を動物の鼻の上に置き、首に装着したポンペに接続する。キャニスター内の真空度が下がると、動物の口と鼻の穴の周りから六フッ化硫黄とメタンの放出がキャピラリーチューブにサンプリングされる。六フッ化硫黄の放出は、口付近のガスの希釈を考慮する手段となる。動物から取り外した後、キャニスターの内容物をガスクロマトグラフィーで分析し、メタンと六フッ化硫黄濃度を測定する。六フッ化硫黄トレーサー法は、動物を閉じ込める必要がなく、比較的安価に実施でき、比較的非侵襲的であるという多くの利点がある。このため、多数の放牧動物からのメタン排出を同時に調査するのに非常に適している。一方で、六フッ化硫黄トレーサー法の相対的な精度と正確さについて議論の余地があるとともに、動物の福祉と行動を考慮して、装置のサイズ、重量、装着性にも特に注意を払う必要がある。

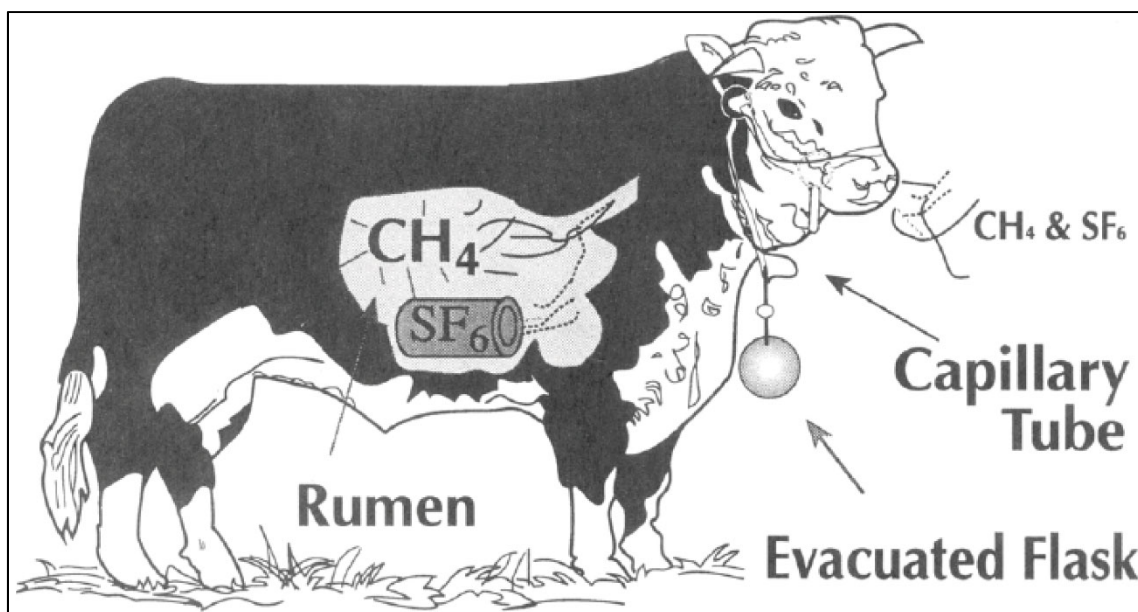


図 2-2 六フッ化硫黄トレーサー法のイメージ

Animals 2012, 2(2), 160-183; <https://doi.org/10.3390/ani2020160>

### 2. 3. GreenFeed 法

GreenFeed (C-Lock Inc, Rapid City, SD, USA) は、反芻動物のメタン排出量とガス交換のスポットサンプリングのためのポータブル型給餌ステーションとを組み合わせた自動ヘッドチャンバーシステムである (写真 2-3)。このシステムは、ガス濃度、気流、飼料の摂取量の測定と、動物が餌に近づくと高周波識別イヤータグを通じて動物の個体識別を自動認識することを統合している。ガスサンプリングシステムは、動物が GreenFeed の飼料を食べるタイミングを基準に自動化されている。このシステムは、動物の鼻と口から空気をダクトに吸い込み、気流を測定する。次に、サブサンプルがガス分析システムに取り込まれ、非分散型赤外線センサーを使用してメタン濃度が測定される。通常、動物のガス濃度は、数日間 GreenFeed 内の飼料供給を制御することにより、1 回 3~7 分以内で 1 日に数回測定される。一組の GreenFeed システムは 20 頭もの動物を測定できるように設計されており、数日間で収集された個々の動物データは、一日平均のメタン排出量を算出するために使用される。GreenFeed にインストールされたプログラムは、各動物の飼料摂取のタイミングと量を制御し、24 時間の給餌サイクルの中で測定値を均等に配分する。データは、メタン排出量推定のためにメーカーが開発したクラウドベースの分析システムにリアルタイムでアップロードされる。GreenFeed の利点の一つは、屋内と放牧の両方の条件下で個々の動物のメタン排出量を推定する際に、携帯可能で自動化された技術としての代替手段を提供することである。各動物の測定のタイミングと時間が適切に制御されていれば、信頼性の高い結果を得ることができる。GreenFeed の欠点は、日間や動物間のばらつきが大きいこと、高額なことである。

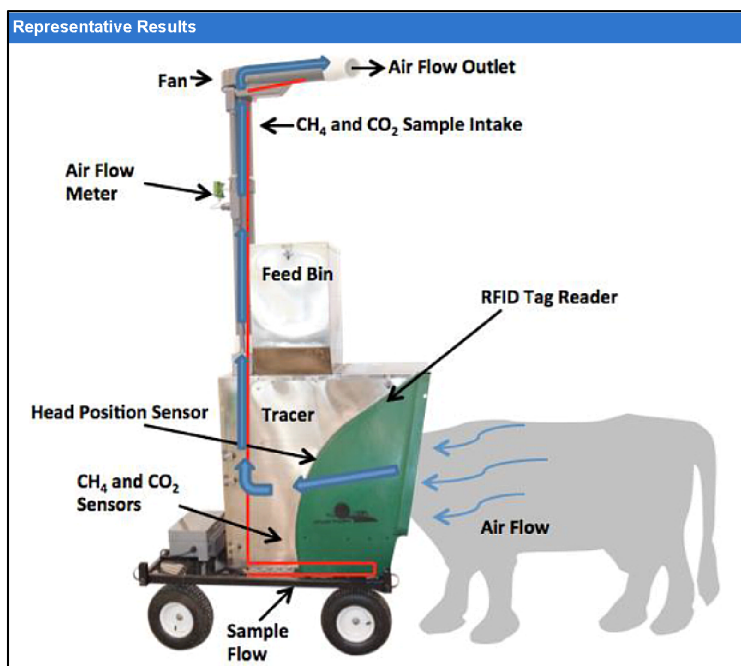


図 2-3 GreenFeed 法

## 2. 4. スニファー法

スニファー法は Garnsworthy らによって最初に考案された。この方法は自動搾乳システムまたは濃厚飼料給餌器のフィードトラフから吐き出された空気の短時間連続呼気分析に基づくものである（写真 2-4）。搾乳中に動物が吐き出す空気を収集するために、サンプルインレットが搾乳ロボットシステムの自動給餌機に挿入されている。スニファー法のサンプル分析は、動物の鼻孔付近のメタンと二酸化炭素濃度を測定するガス分析計を使用したシステムによる空気の連続サンプリングによって行われる。この方法では、農場での個々の動物による毎日のメタン総排出量を推定することができる。また、二酸化炭素をトレーサーガスとして使用してメタンと二酸化炭素濃度を同時に測定し、その比（メタン/二酸化炭素）を説明変数として含む推定式によって 1 日当たりのメタン排出量を算出する手法も報告されている。メタン/二酸化炭素濃度比を用いる方法は、サンプリングした大気中の呼気濃度の影響をほとんど受けないという利点がある。



図 2-4 スニファー法で用いられる搾乳ロボットの例（GEA AMS Systems）



### 3. 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

上述したように、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。スニファー法は、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。

牛のげっぷ由来のメタン排出を削減するために、消化管内の微生物叢を制御する研究や新たな飼料添加物の開発、育種改良に関する研究のほか、家畜排せつ物の処理方法に関する取り組みなどが国内でも一部の大学や研究機関で進められている。一方で、畜産現場レベルでメタン排出削減対策を実践するための技術情報は著しく不足している。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なか、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する必要があるが、高額な機器類の導入がネックとなり、畜産現場で容易に取り組める状況にはなかった。

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。我々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から成り、パソコン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（写真3-1）。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。

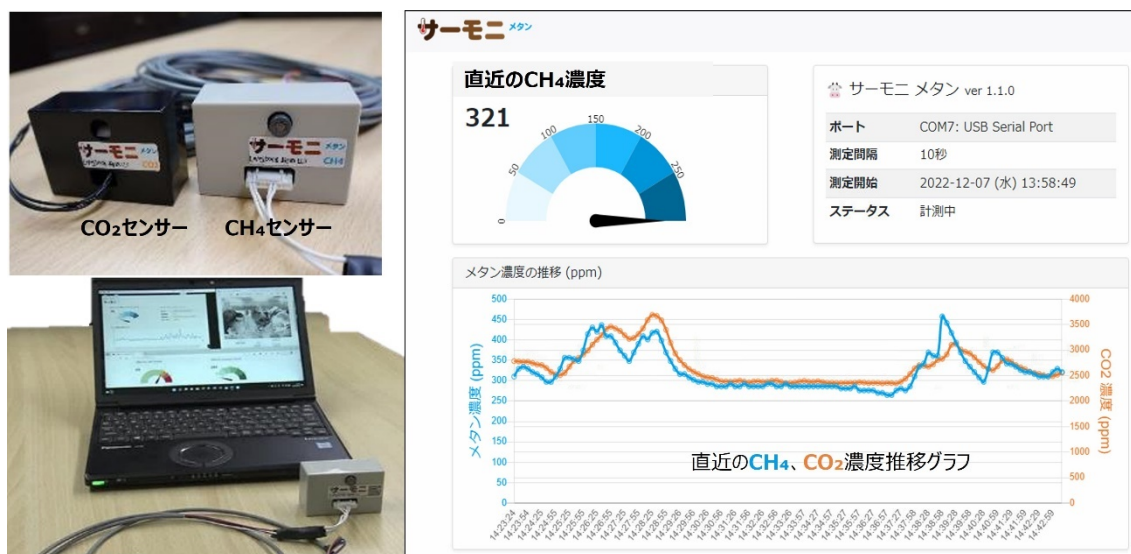


写真3-1 簡易メタンガスモニタリングシステム“サーモニメタン”

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吸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。簡易メタンガスモニタリングシステム“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 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。SB-12A はメタンに対する高感度、高選択性を持つ酸化スズ半導体ガスセンサーである。センサー出力信号をモジュールに搭載されたサーミスタで温度補正し、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。

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。

上述のメタン、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で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、シチュエーションに応じて 2 秒、10 秒、1 分、5 分、10 分、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.形式で測定中でもデータ出力できる。

我々は、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 3-2)。



図 3-2 データ取得用 PC

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 3-3,4 に示す。メタンについては、低濃度域で僅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。

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、より多くの機関で実現できるようになり、様々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。

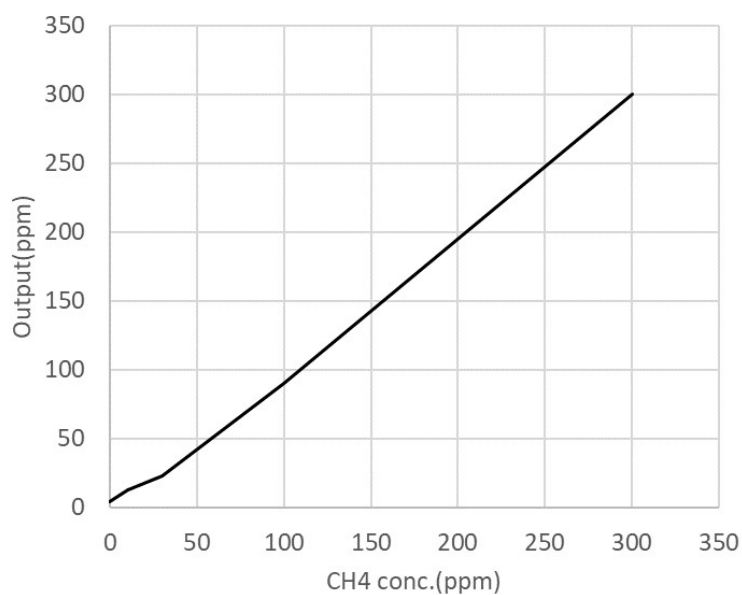


図 3-3 メタン出力例

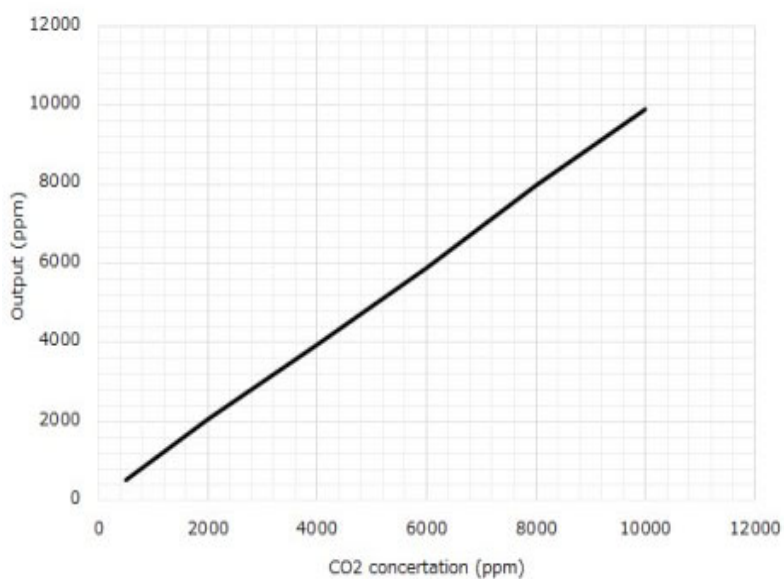


図 3-4 二酸化炭素出力例

#### 4. 畜産現場におけるメタンガス濃度のベースライン調査

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なか、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する必要がある。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した。

##### 4. 1. 酪農フリーストール牛舎におけるベースライン調査

北海道紋別郡興部町の民間酪農場である株式会社 Farm to-mo の搾乳フリーストール牛舎の中央付近にメタンセンサー（サーモニメタン：ライブストックジャパン合同会社製）を設置し、1分毎にメタンガス濃度を測定した（写真 4-1-1,2）。また、試験期間中における1時間毎の牛舎内温度、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（サーモニ二酸化炭素プラス：ライブストックジャパン合同会社製）を用いて、1時間毎に測定した。測定期間は2022年9月1日～12月31日とした（停電等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時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移を図 4-1-1 に、温度と相対湿度の推移を図 4-1-2 に示した。期間中の平均メタン濃度は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、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 4-1-3 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 4-1-4 に示した。両者とも日中 (9:00-16:00) に低く推移した。試験期間中における温度と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 4-1-5)。12月におけるメタン濃度と二酸化炭素濃度の比 ( $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ ) 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 4-1-6)。

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、すなわち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。



写真 4-1-1 試験牛舎の様子

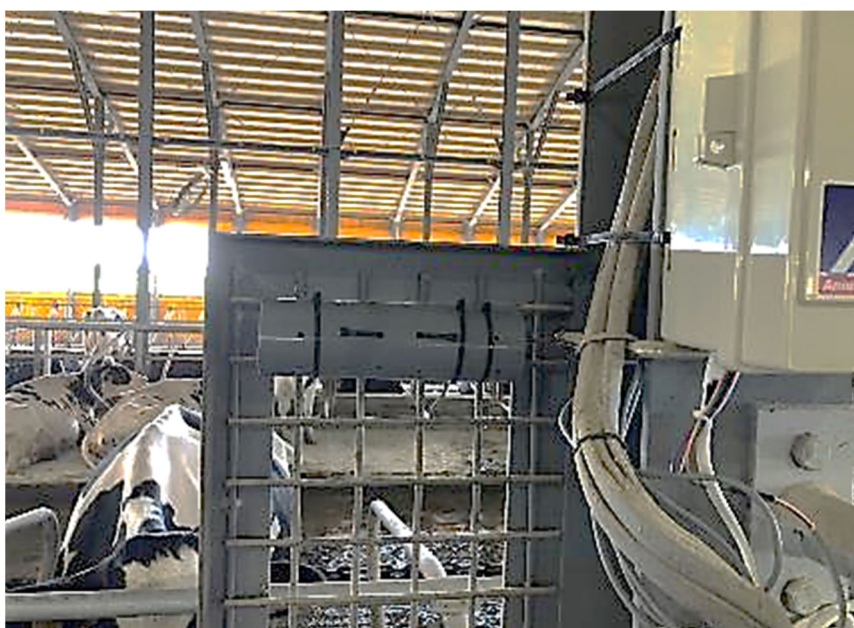


写真 4-1-2 試験牛舎での測定の様子（塩ビ管内にセンサーを配置）

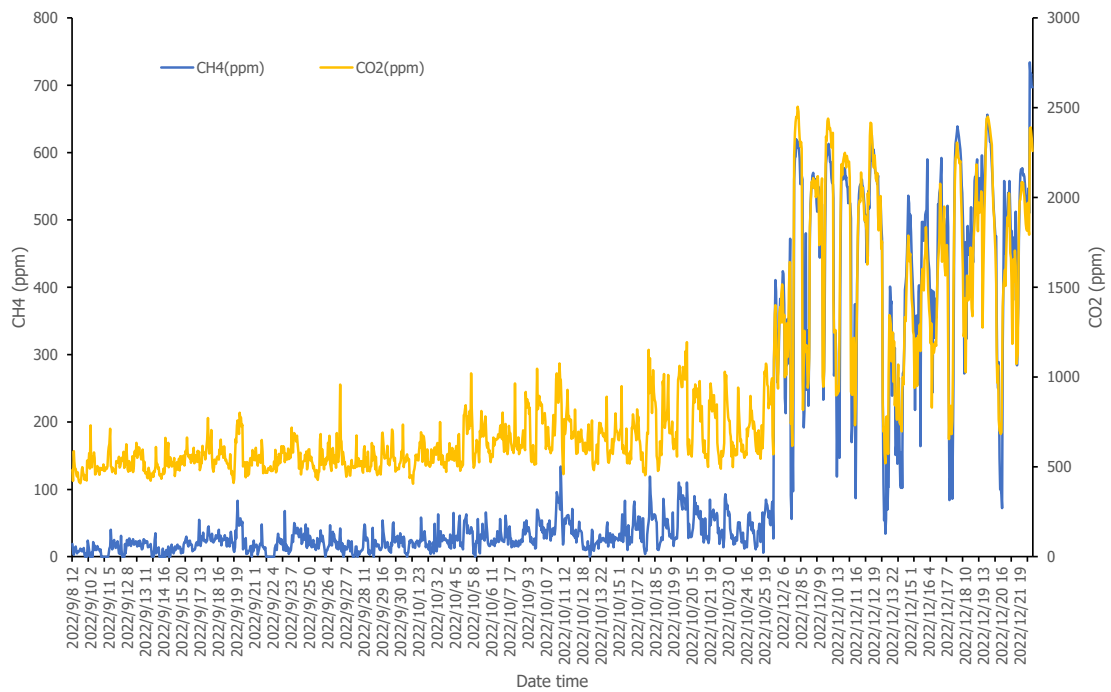


図 4-1-1 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移

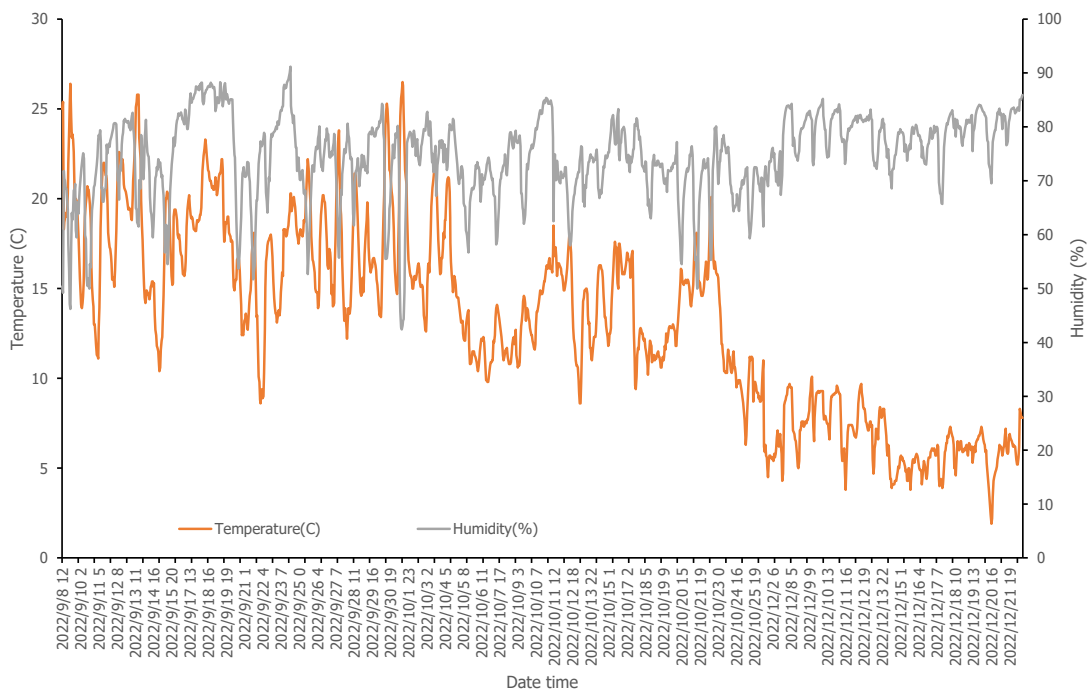


図 4-1-2 1時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移

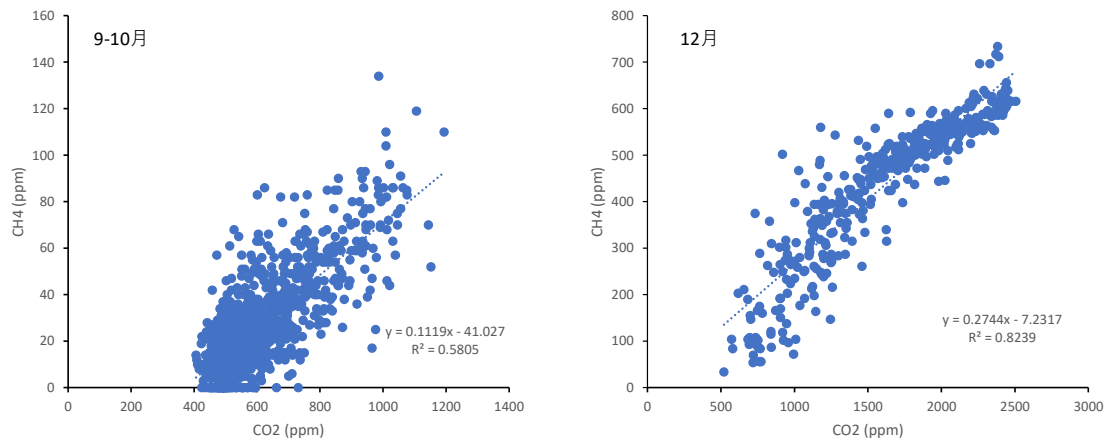


図 4-1-3 9-10月と12月のメタン濃度と二酸化炭素濃度の関係

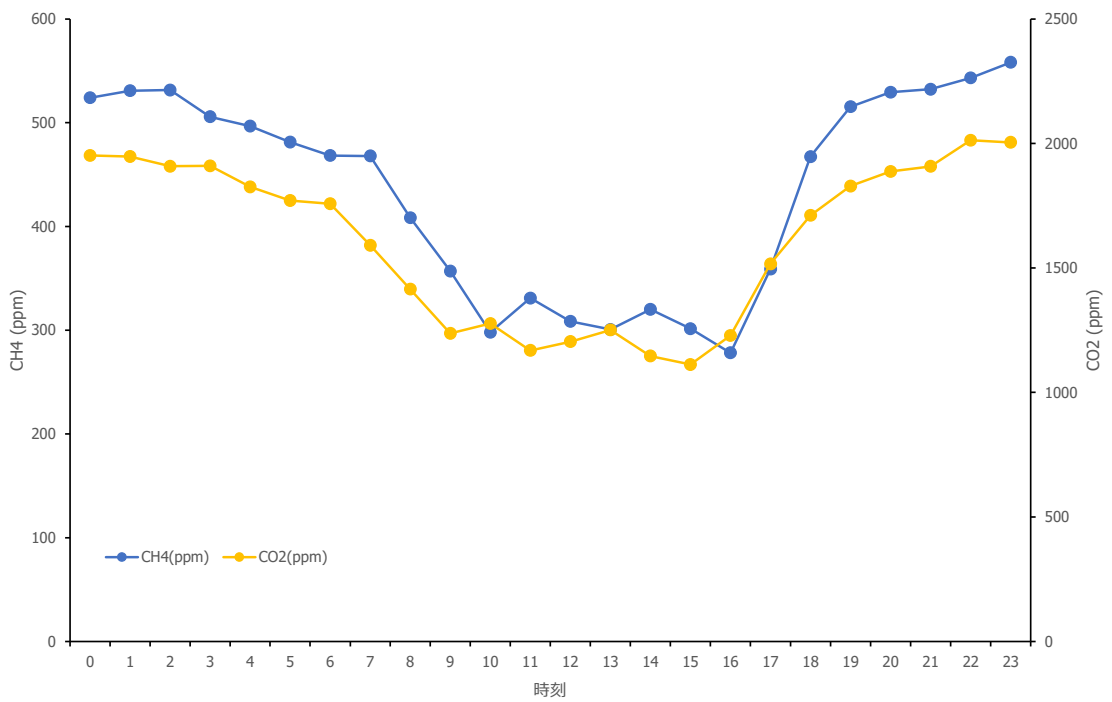


図 4-1-4 12月におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移

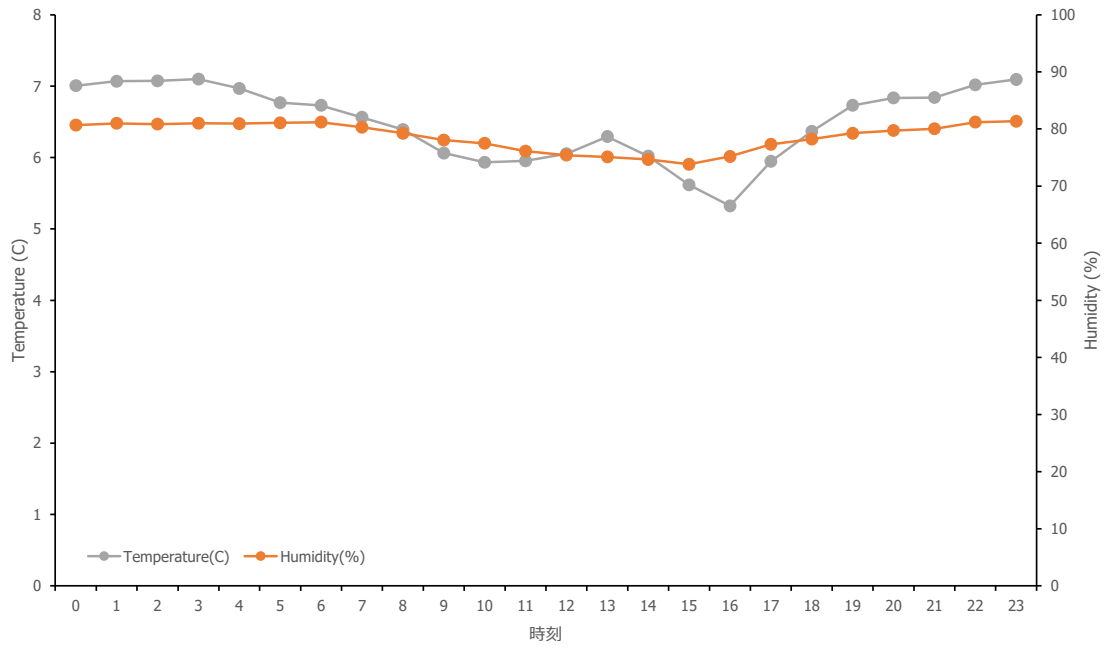


図 4-1-4 12月における温度と湿度の日内変動の推移

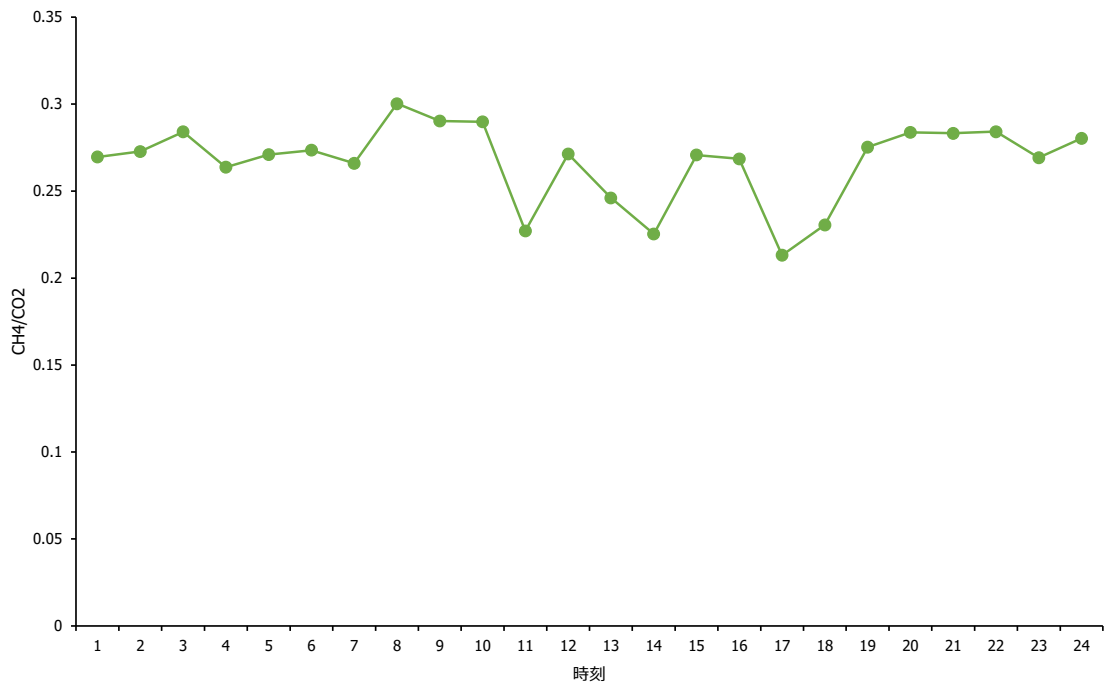


図 4-1-5 12月におけるメタン濃度と二酸化炭素濃度比 (CH4/CO2) の日内変動の推移



#### 4. 2. 酪農繋ぎ飼い式牛舎におけるベースライン調査

青森県内の民間酪農場の繋ぎ飼い式牛舎（尻合わせ）の通路中央上部にメタンセンサーを設置し、上述と同様の方法でメタンガスと牛舎内温度、相対湿度、二酸化炭素濃度を測定した（写真 4-2-1）。測定期間は 2023 年 2 月 1 日～3 月 6 日とした。



写真 4-2-1 試験牛舎での測定の様子

繋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 4-2-1 に、温度と相対湿度の推移を図 4-2-2 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 4-2-3 に示した。両者とも日中（9:00-15:00）に低く推移した。試験期間中における温度と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 4-2-4）。試験期間中におけるメタン濃度と二酸化炭素濃度の比（ $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ ）の日内変動は 0.05-0.08 で推移した（図 4-2-5）。

日平均メタン濃度と日合計乳量との関係、およびメタン濃度と二酸化炭素濃度比と日合計乳量との関係を図 4-2-6 に示した。日平均メタン濃度、メタン濃度と二酸化炭素濃度比ともに日合計乳量との間に有意な負の相関が認められた。

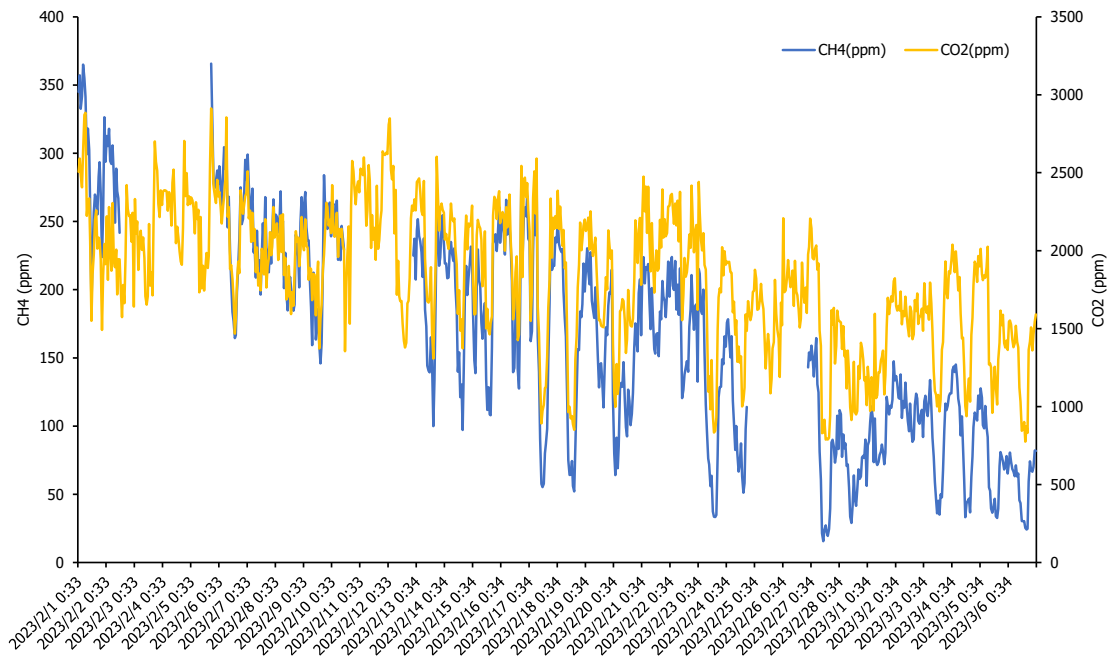


図 4-2-1 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移

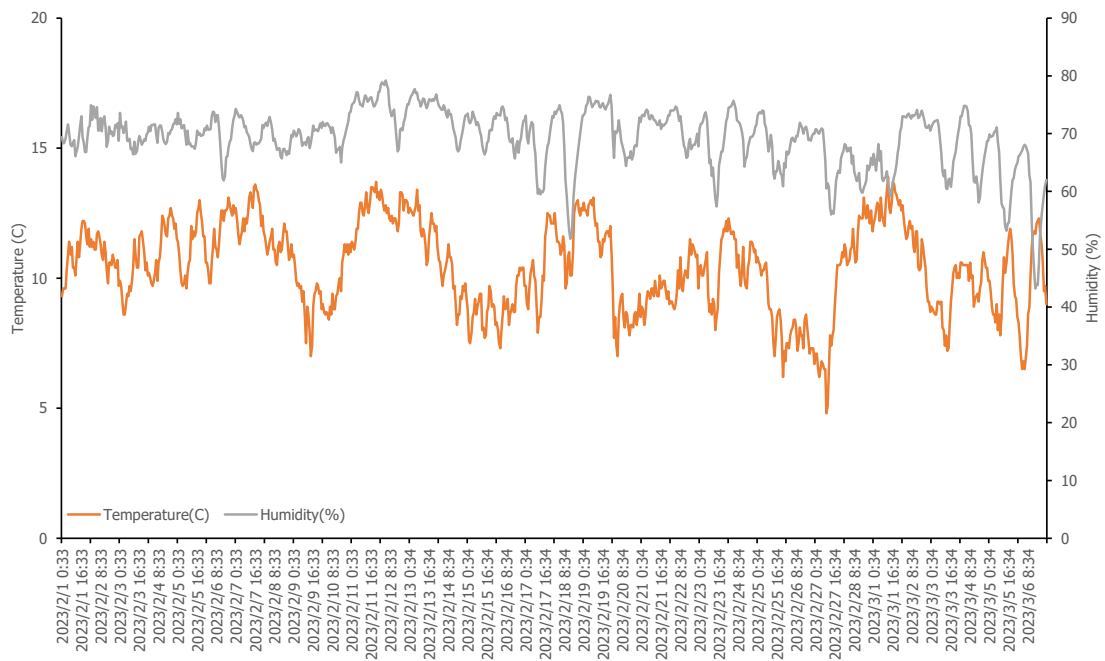


図 4-2-2 1時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移

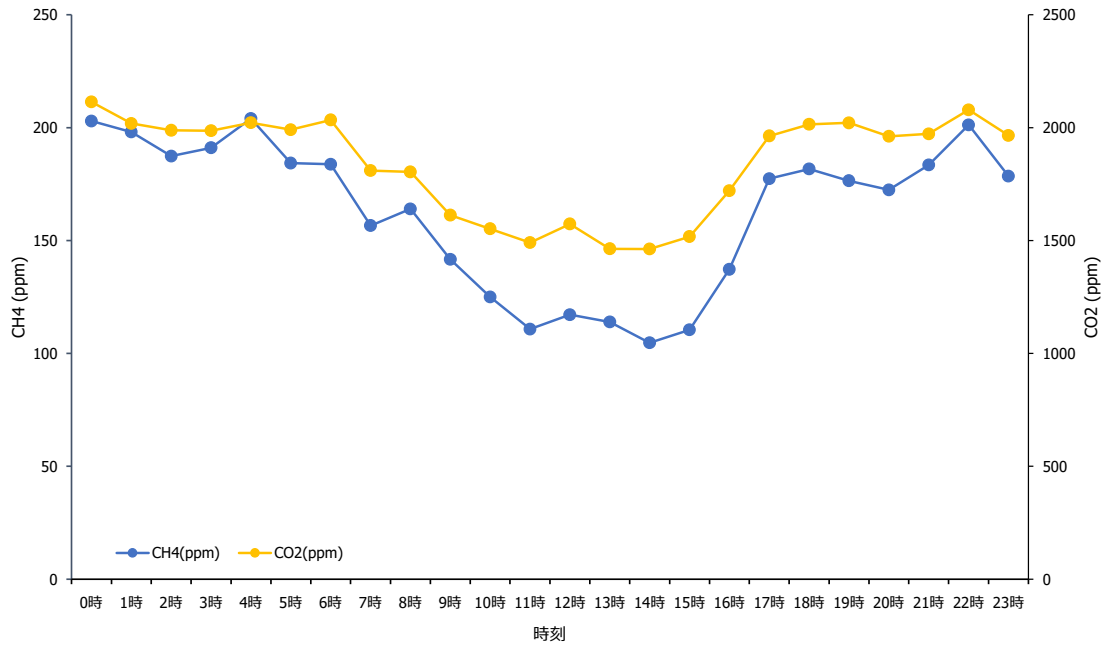


図 4-2-3 試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移

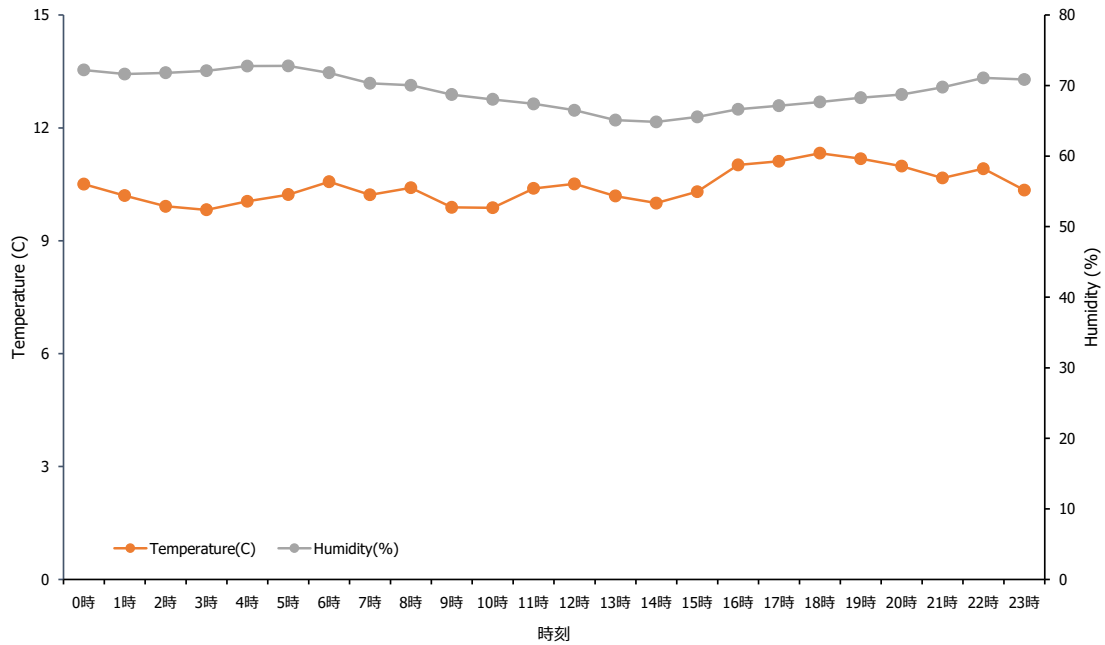


図 4-2-4 試験期間中における温度と湿度の日内変動の推移

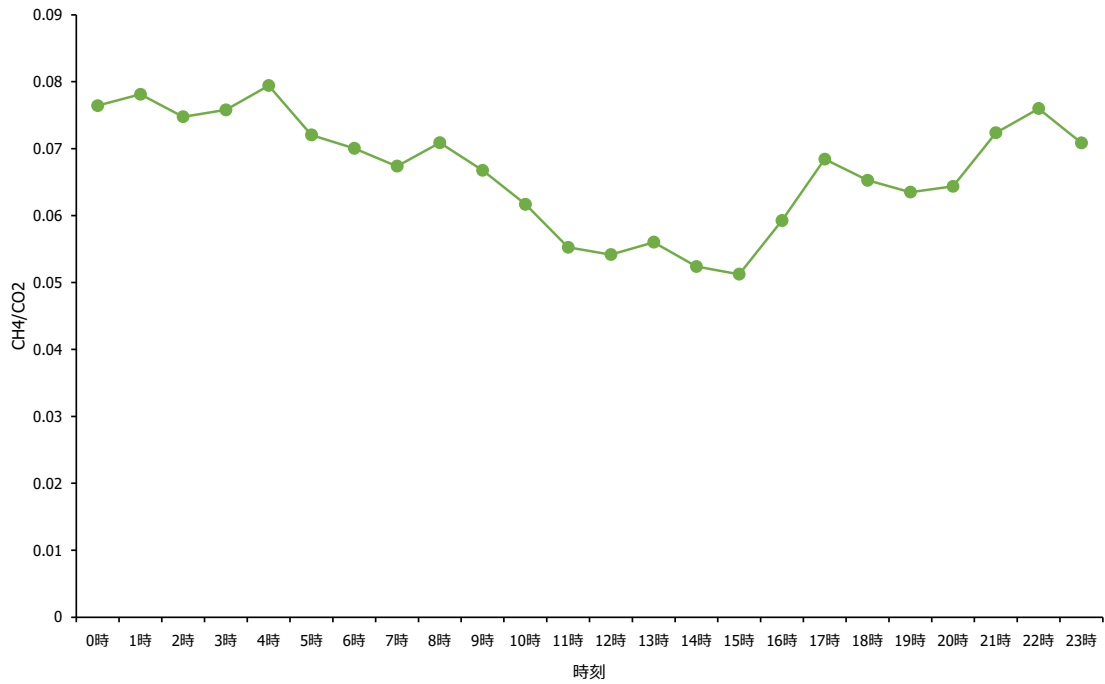


図 4-2-5 試験期間中におけるメタン濃度と二酸化炭素濃度比 (CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>) の日内変動の推移

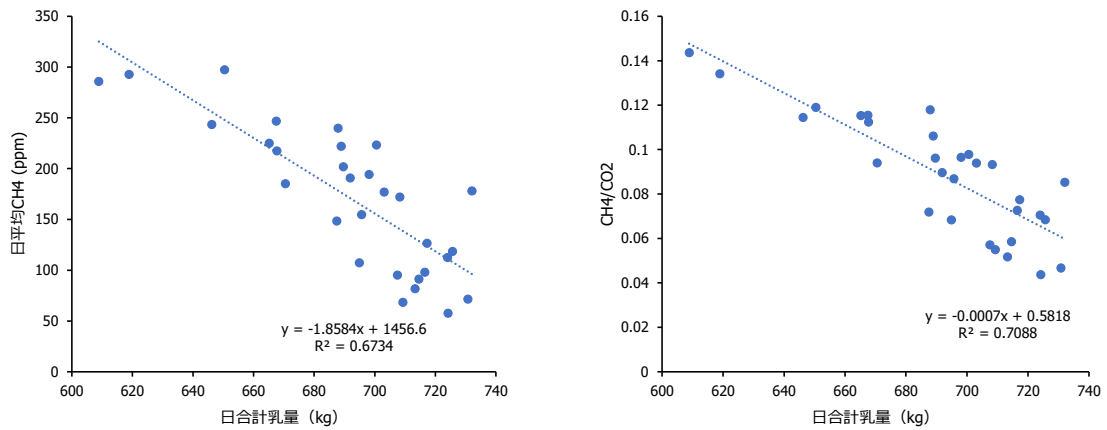


図 4-2-6 日平均メタン濃度 (左)、メタン濃度と二酸化炭素濃度比 (右) と日合計乳量との関係

#### 4. 3. 肥育牛舎におけるベースライン調査

青森県内の民間肉用牛（F1）肥育牛舎の飼槽上部にメタンセンサーを設置し、上述と同様の方法でメタンガスと牛舎内温度、相対湿度、二酸化炭素濃度を測定した（写真 4-3-1）。測定期間は 2023 年 2 月 7 日～2 月 15 日とした。



写真 4-3-1 試験牛舎での測定の様子

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 4-3-1 に、温度と相対湿度の推移を図 4-3-2 に示した。期間中の平均メタン濃度と二酸化炭素濃度は上述の酪農牛舎と比較していずれも低く推移した。

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 4-3-3 に示した。両者とも飼料給与時（8:00 と 16:00）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 4-3-4）。

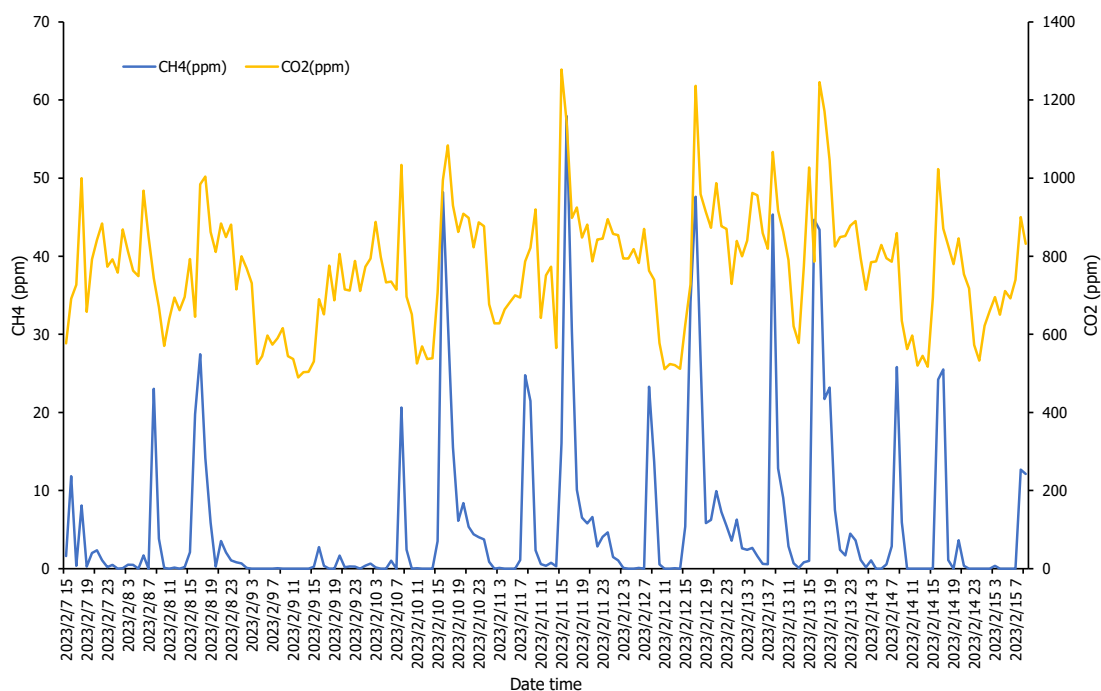


図 4-3-1 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移

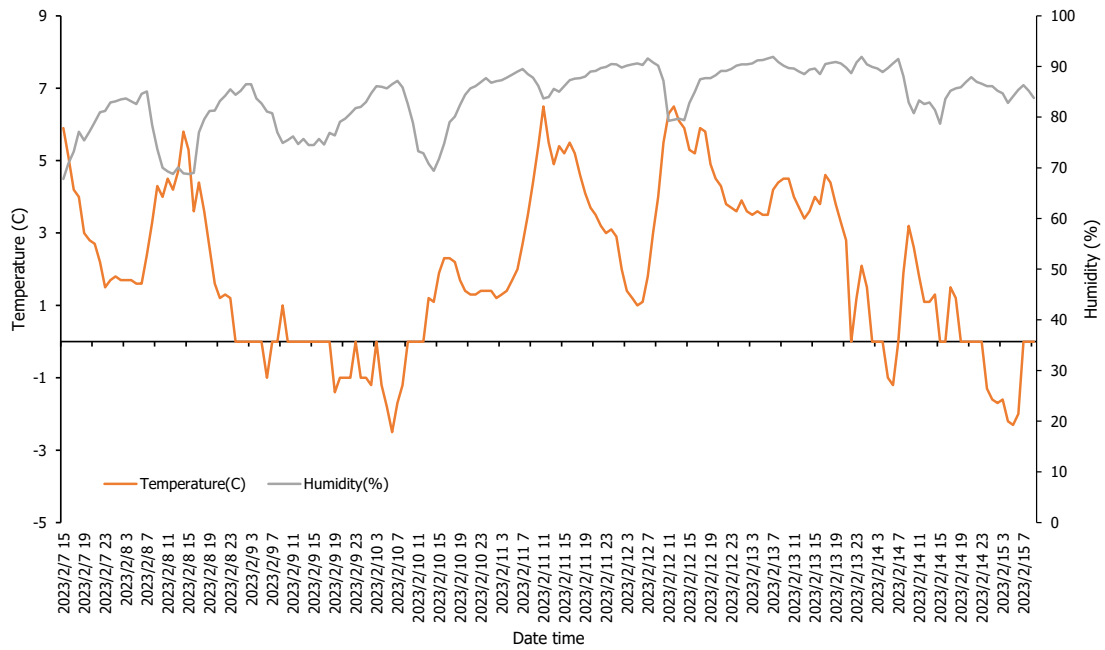


図 4-3-2 1時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移

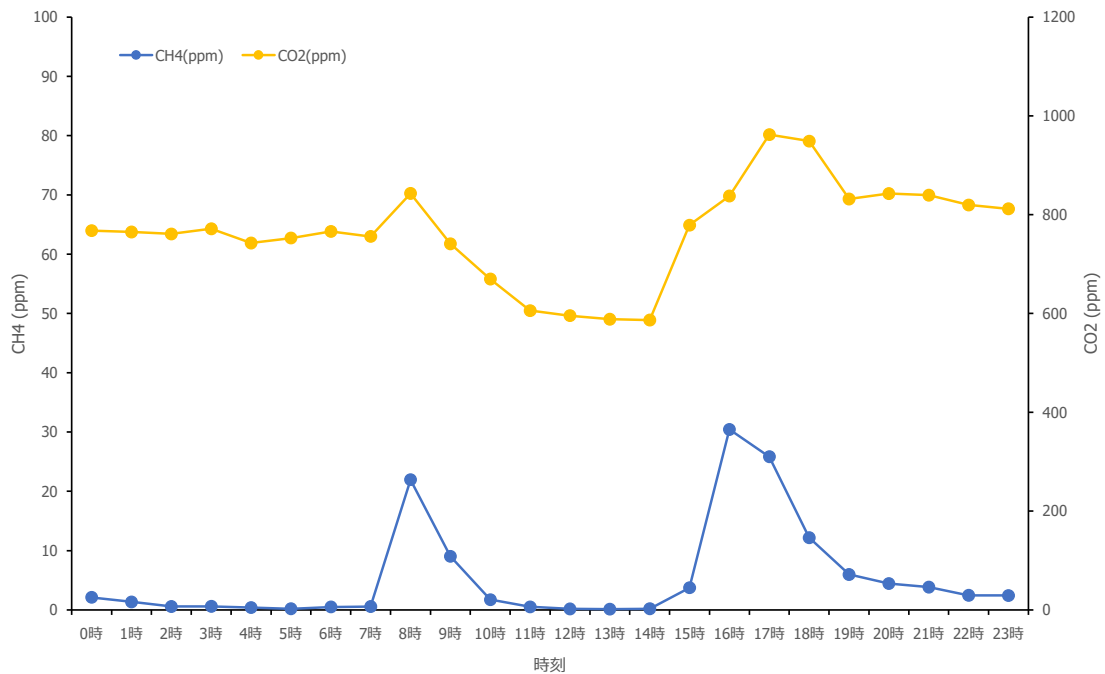


図 4-3-3 試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移

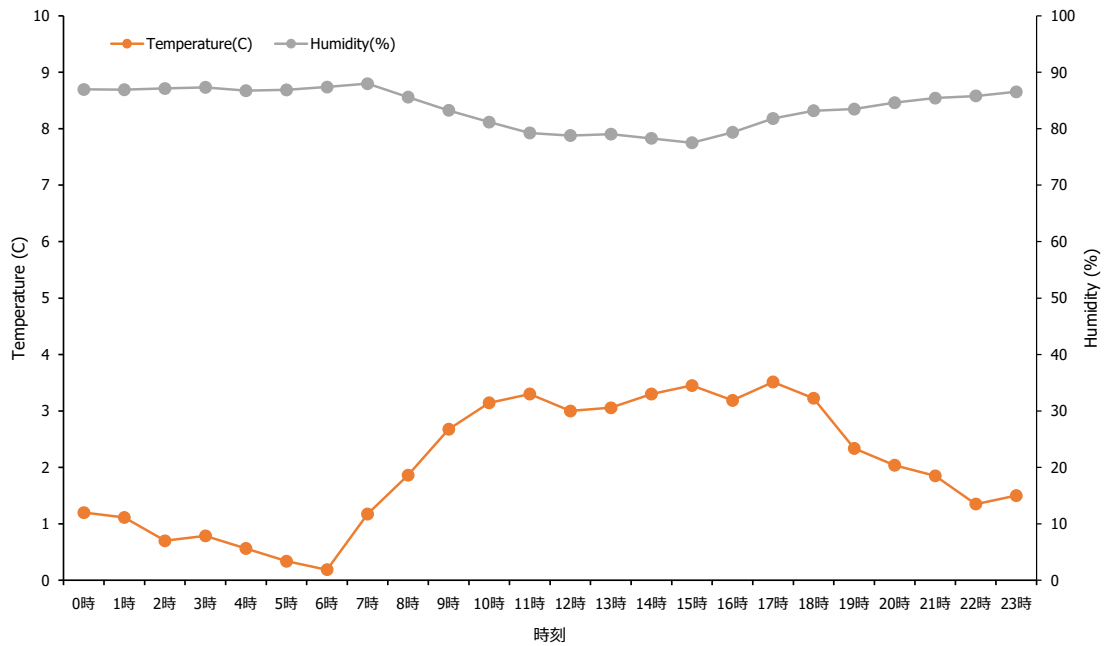


図 4-3-4 試験期間中における温度と湿度の日内変動の推移

#### 4. 4. 肥育豚舎におけるベースライン調査

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メタンセンサーを設置し、上述と同様の方法でメタンガスと牛舎内温度、相対湿度、二酸化炭素濃度を測定した(写真 4-4-1,2)。測定期間は 2022 年 12 月 13 日～2023 年 2 月 28 日とした。



写真 4-4-1 試験豚舎の様子





写真 4-4-2 試験豚舎での測定の様子

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 4-4-1 に、温度と相対湿度の推移を図 4-4-2 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、豚舎内のスクレーバ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 4-4-3 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 4-4-4)。

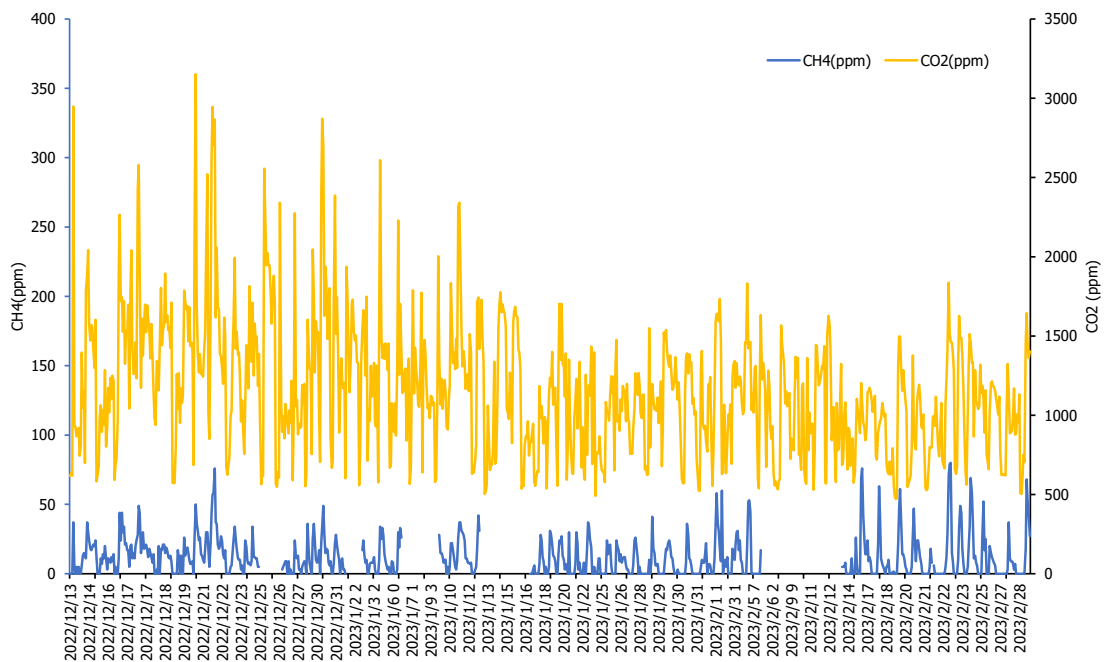


図 4-4-1 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移

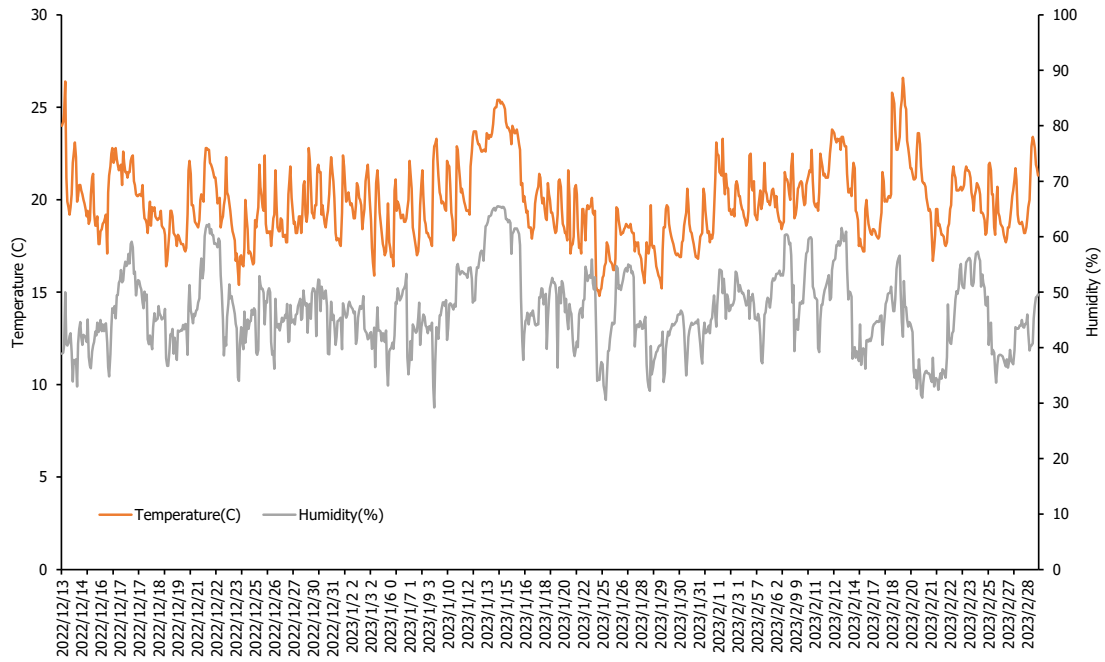


図 4-4-2 1 時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移

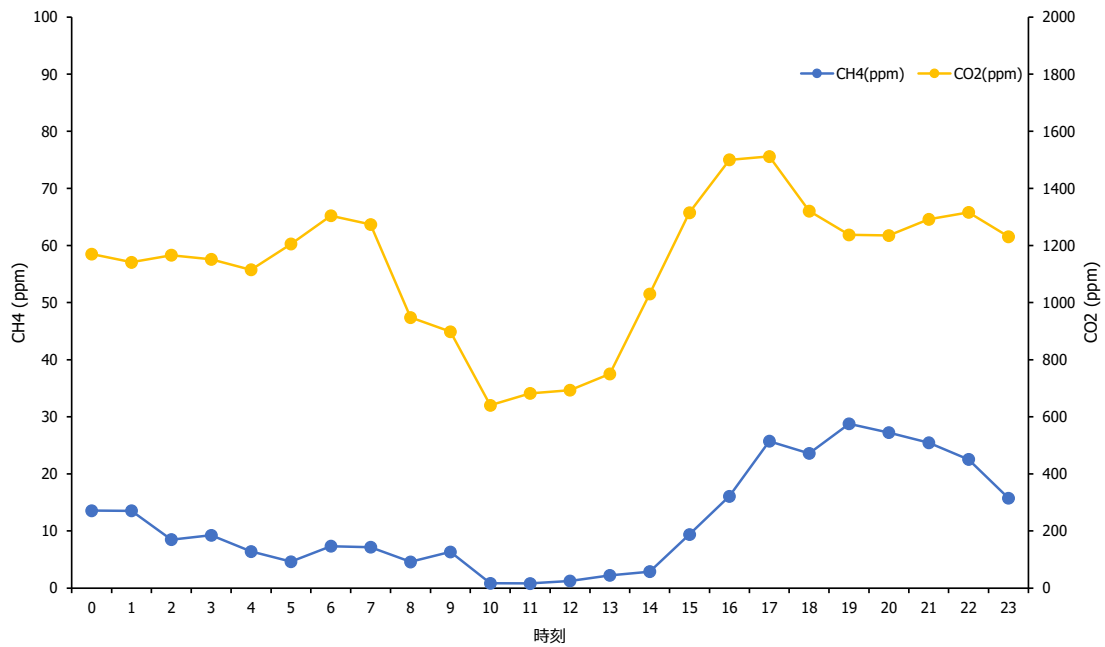


図 4-4-3 試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移

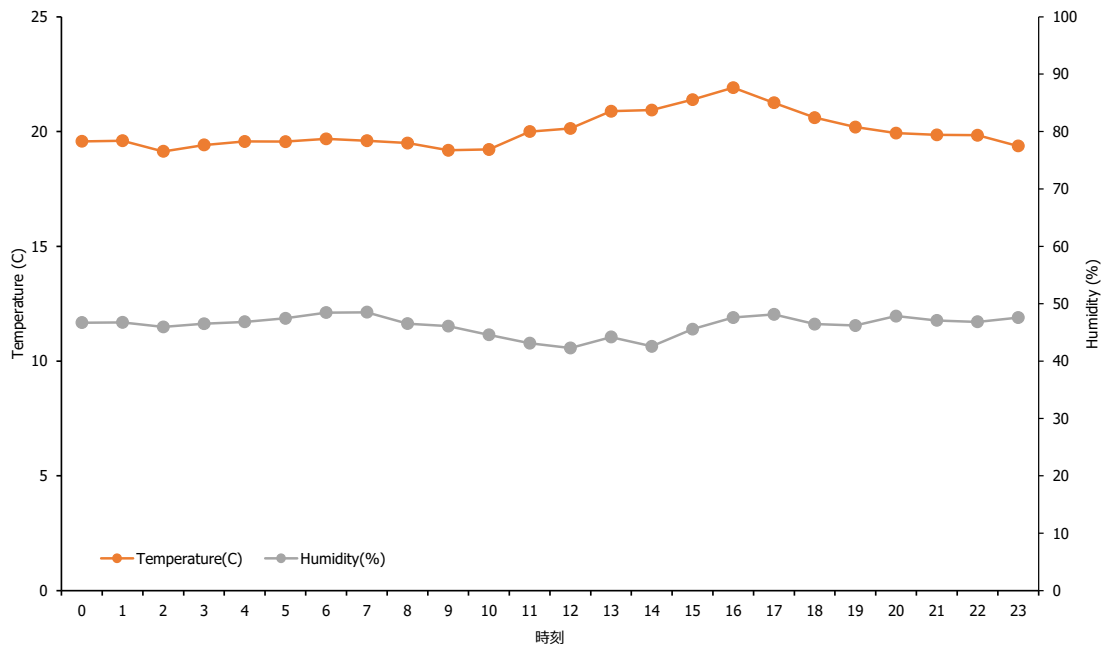


図 4-4-4 試験期間中における温度と湿度の日内変動の推移

#### 4. 5. ブロイラー鶏舎におけるベースライン調査

青森県南部町の民間ブロイラー鶏舎内にメタンセンサーを設置し、上述と同様の方法でメタンガスと牛舎内温度、相対湿度、二酸化炭素濃度を測定した（写真 4-5-1,2）。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～2023 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 4-5-1 に、温度と相対湿度の推移を図 4-5-2 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（餌づけステージ）でもっとも高く、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°C 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 4-5-3 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 4-5-4）。

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、このタイミング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 4-5-1 試験鶏舎の様子（入雛直後）



写真 4-5-1 試験鶏舎での測定の様子

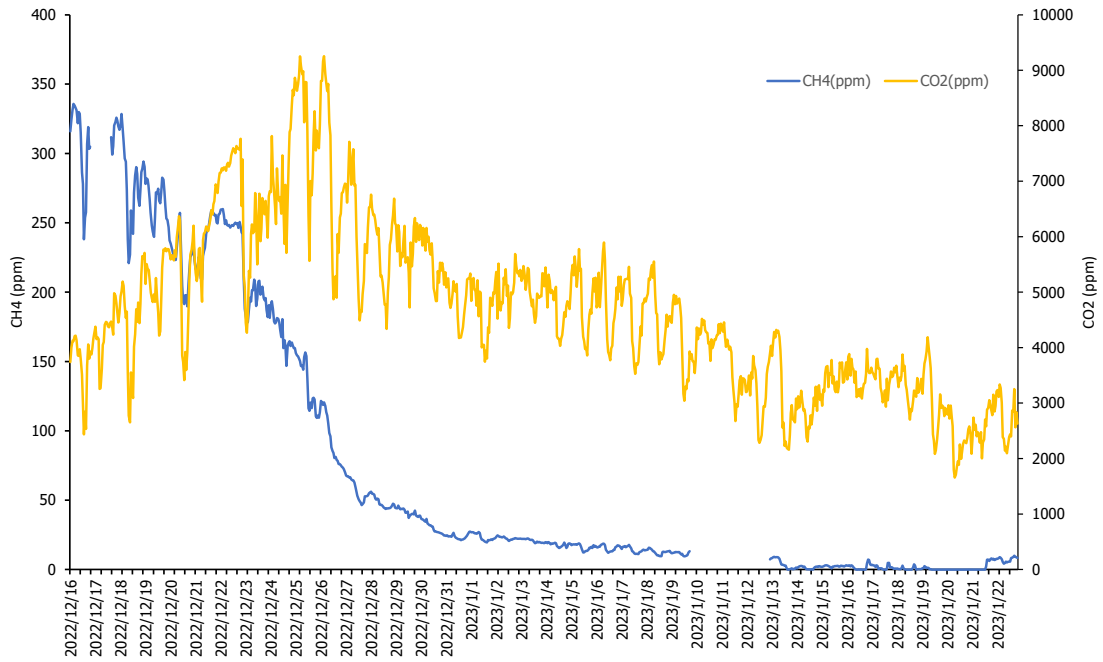


図 4-5-1 1時間ごとの平均メタン濃度と平均二酸化炭素濃度の推移

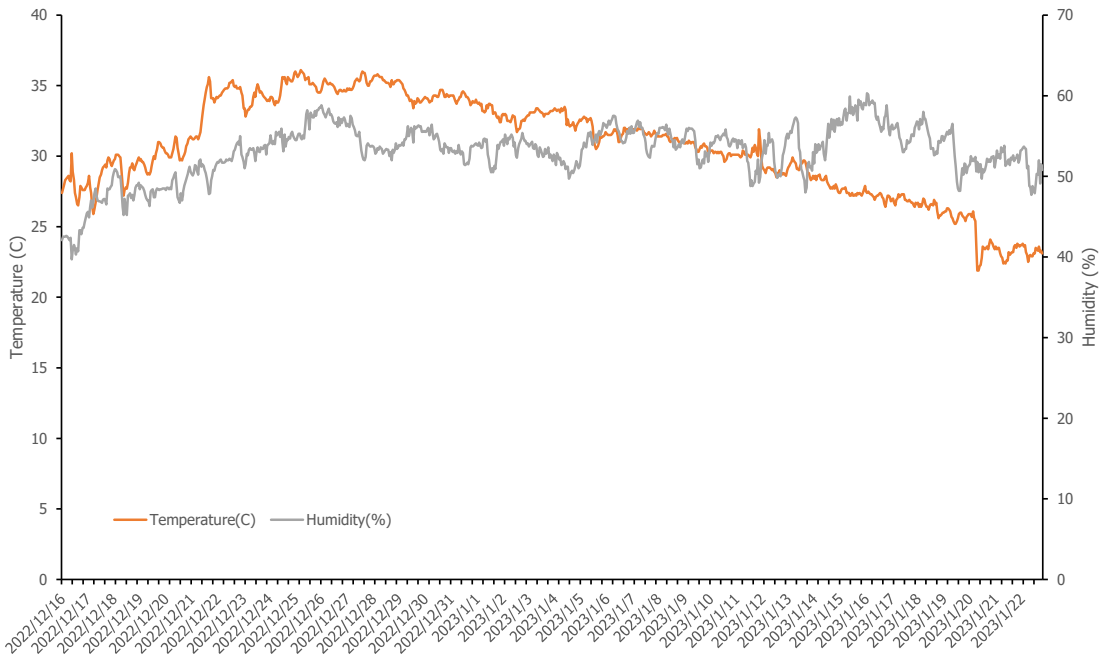


図 4-5-2 1時間ごとの温度と相対湿度の推移の推移

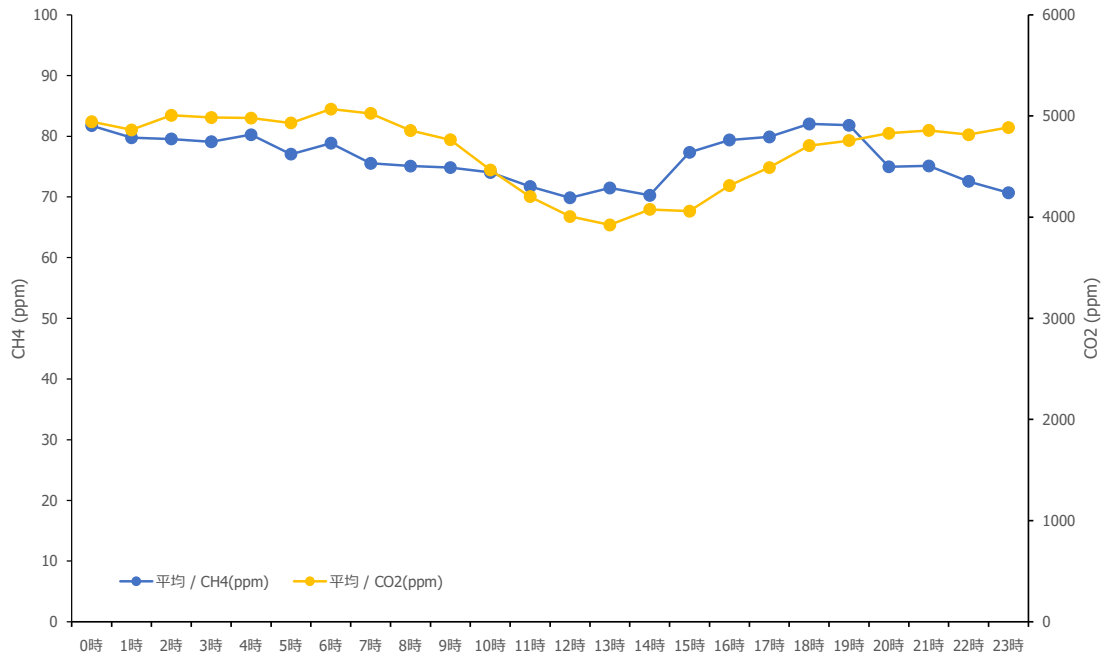


図 4-5-3 試験期間中におけるメタンと二酸化炭素濃度の日内変動の推移

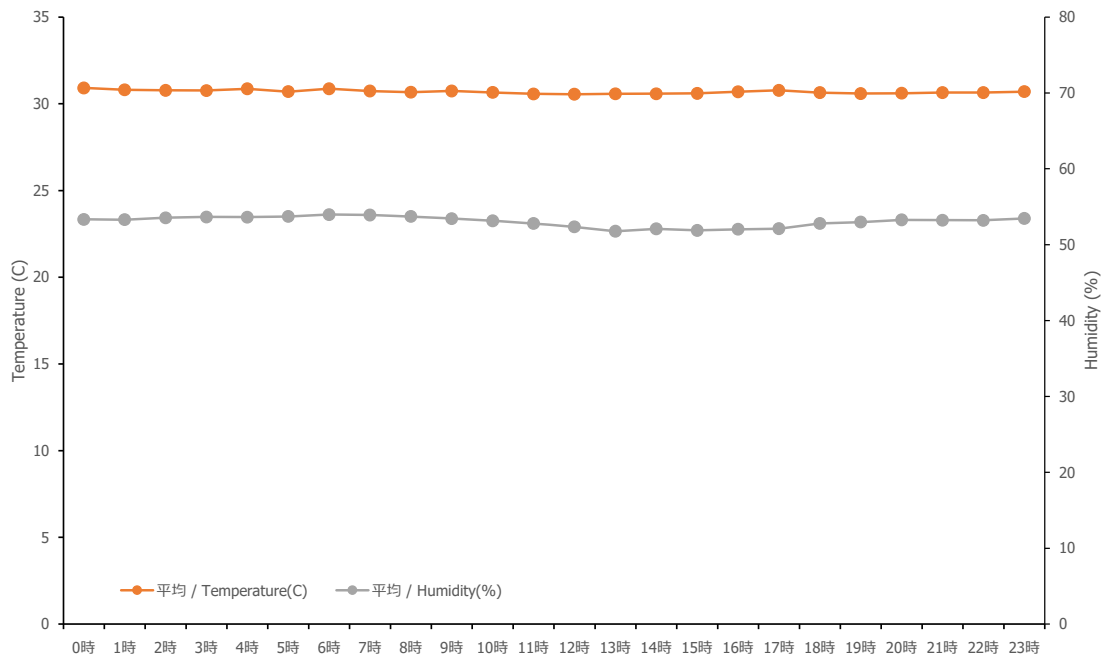


図 4-5-4 試験期間中における温度と湿度の日内変動の推移

## 5. 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

これまでの取り組みにおいては、畜舎の雰囲気中メタンおよび二酸化炭素濃度のモニタリングを行った。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を実施した。

### 5. 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

北海道紋別郡興部町の民間酪農場である株式会社 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メタンセンサー（サーモメタン二酸化炭素プラス：ライブストックジャパン合同会社製）を設置し、2秒毎にメタンガスと二酸化炭素濃度を同時に測定した（写真 5-1-1,2）。メタンおよび二酸化炭素の測定においては、搾乳ロボット訪問時の濃度から訪問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 台の搾乳ロボットを期間中 3 回以上訪問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、乳生産性、MCF（CH<sub>4</sub>転換効率）とし、これらの関連を検討した。乳生産性（乳量、乳成分）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、搾乳ロボット訪問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（農研機構）を参考に、以下の推定式を用いて求めた。

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

$$\text{ECM} = \text{乳量 (kg/日)} \times [376 \times \text{乳脂率 (\%)} + 209 \times \text{乳蛋白質率 (\%)} + 948] / 3138$$

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

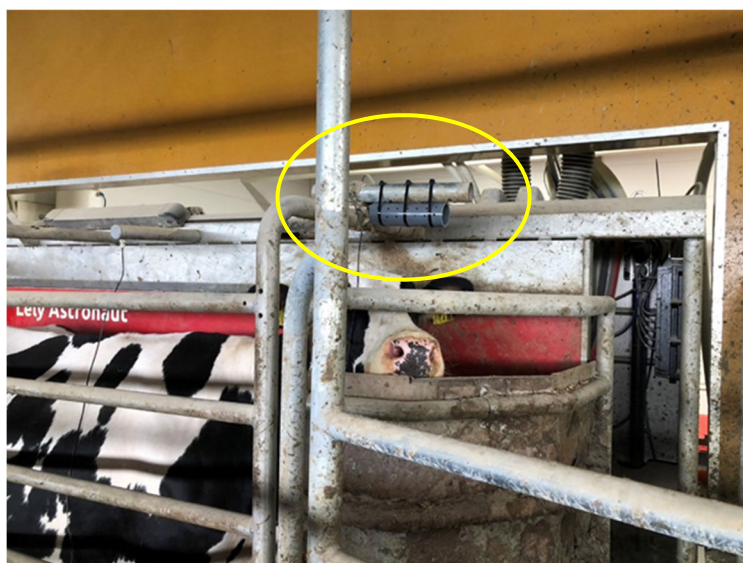


写真 5-1-1 搾乳ロボットでの測定の様子



写真 5-1-2 搾乳ロボットでの測定値

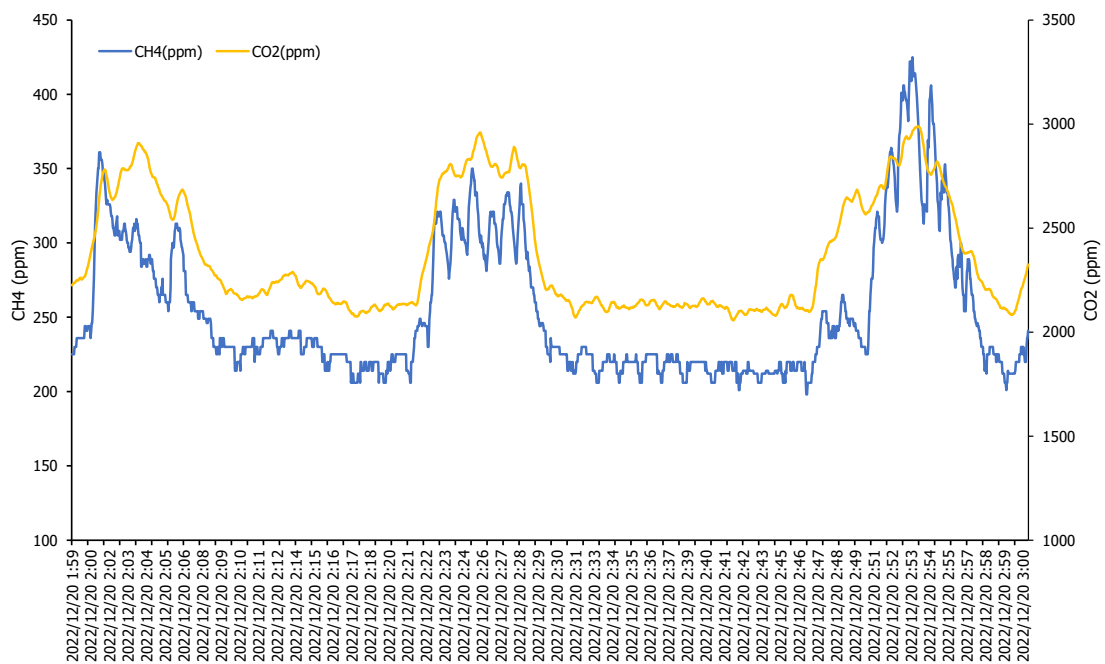


図 5-1-1 搾乳ロボットでの測定値  
(濃度上昇時に搾乳ロボットを訪問したことを示す)



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、乳用牛がロボットを訪問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 5-1-1）。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。ロボット訪問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め、メタン排出量の推定に用いた。

試験期間中の成績を表 5-1-1 に示した。供試牛の 1 日当たりの平均乳量は 48.7 kg であり、高泌乳牛といえる牛群が対象であった。1 日あたりの推定メタン排出量は平均 1027L/日、MCF（CH<sub>4</sub>転換効率）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、日乳量 55 kg 以上の牛では 45 kg 未満の牛と比べてメタン排出量が有意に多かった（図 5-1-2）。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 kg 以上の牛では 600 kg 未満の牛と比べてメタン排出量が有意に多かった（図 5-1-3）。

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みられ（図 5-1-4）、生産効率の高い牛では MCF が低くなる傾向が認められた。

表 5-1-1 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 <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> 比	0.155±0.002	0.125	0.182
CH <sub>4</sub> 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

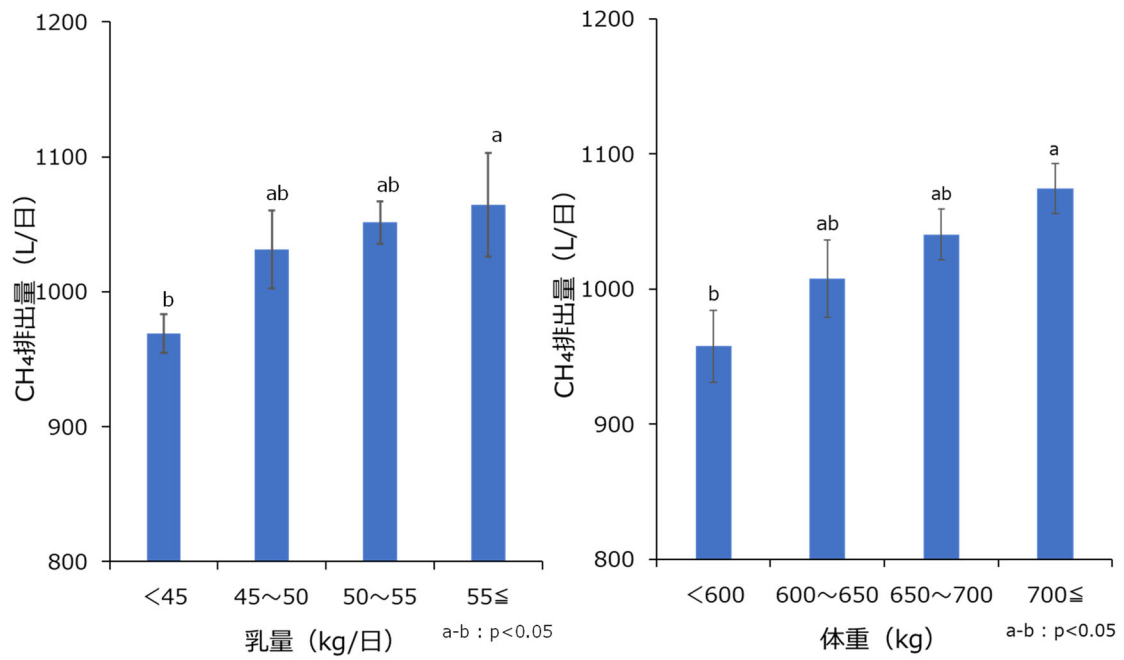


図 5-1-2 日乳量とメタン排出量との関係

図 5-1-3 体重とメタン排出量との関係

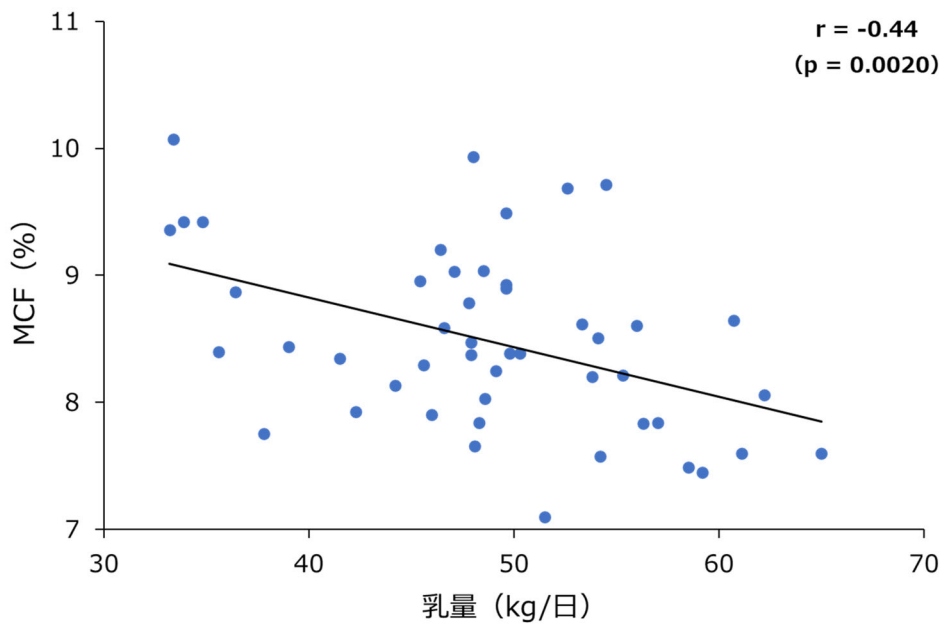


図 5-1-4 乳量と MCF (CH<sub>4</sub>転換効率) との関係

## 5. 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

青森県内の民間肉用牛（F1）肥育牛舎の飼槽内部にメタンセンサーを設置し、上述と同様の方法で2秒毎にメタンガスと二酸化炭素濃度を同時に測定した（写真5-2-1,2）。測定期間は2023年2月7日～2月15日とした。



写真 5-2-1 飼槽内での測定の様子



写真 5-2-2 飼槽内での測定の様子

肥育牛舎飼槽内に設置したセンサーで取得した2秒毎のメタン濃度と二酸化炭素濃度の推移を図 5-2-1 に示した。4-3 章において実施した同牛舎雰囲気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、呼吸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（8:00 と 16:00）に高くなる明瞭な日リズムが観察されたことから、肥育牛の呼吸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。

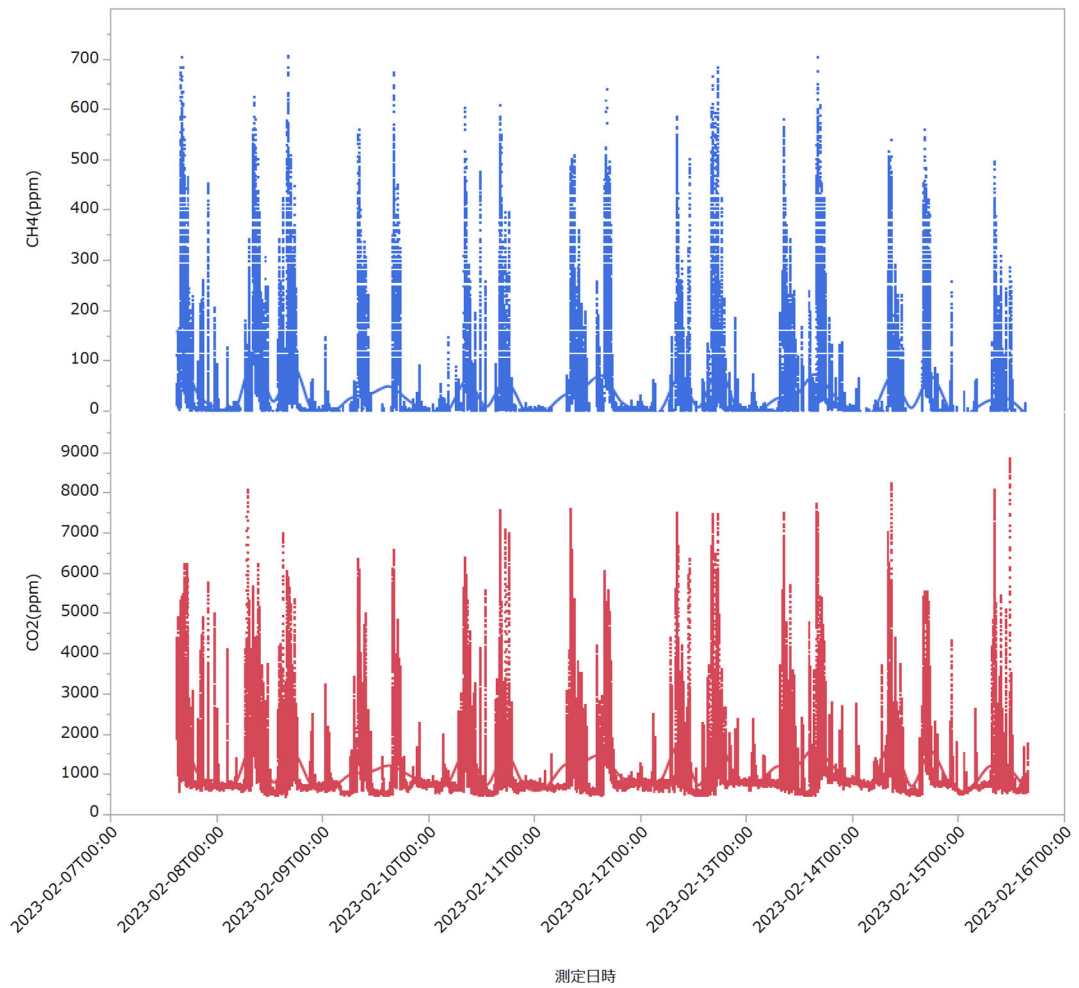


図 5-2-1 メタン濃度と二酸化炭素濃度の推移

### 5. 3. 頭絡型センサーを用いた繁殖雌牛のメタンガスモニタリングの試み

呼気中のメタンを測定するためには、できるだけ牛に近い位置にセンサーを設置する必要があるため、現在のところ給餌機や搾乳機での測定に限られており、連続的な測定を行うことができない状況である。そこで本研究では、牛からのメタン排出量を生産現場レベルで経時的にモニタリングするための頭絡型ウェアラブルデバイスを開発するとともに、実際に牛に装着して連続的にメタン排出量をモニタリングすることを試みた。

当研究室で開発した簡易モニタリングシステムをベースとして、ウシ用の頭絡にメタン、二酸化炭素ガスセンサー、両ガス濃度の測定を制御する小型 PC と電源供給バッテリーを装着したウェアラブルの頭絡型センサーデバイスを新たに試作し、両センサーが供試牛の鼻梁に配置されるようにし、2 秒間隔で 12 時間の測定を行った (写真 5-3-1,2)。

本研究によって得られた二酸化炭素濃度は、全期間を通して 500ppm 以上であったことから、確実に呼気を回収できていることが示された。メタン濃度は朝夕の採食時に高く推移する明瞭な日リズムが観察され、その後は暖気のタイミングで一過性の上昇が確認された (図 5-3-1)。以上のことから、本研究で新たに開発したウェアラブルの頭絡型センサーデバイスを用いて、繁殖雌牛の呼気中メタンと二酸化炭素を同時に経時的にモニタリングできることが確認された。今後は、システムの堅牢性、測定期間の延長などの対策を実施する予定である。



図 5-3-1 ウェアラブルセンサーの構成



図 5-3-2 供試牛への装着の様子

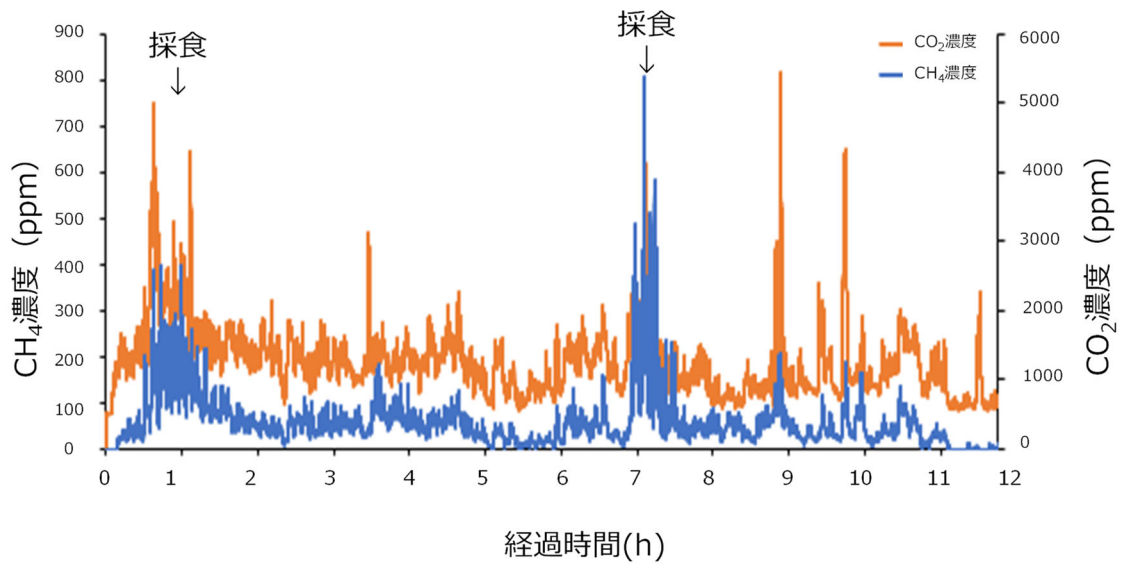


図 5-3-1 メタンと二酸化炭素濃度の推移

## 6. 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（計測）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る飼料価格高騰対策になり得る。

畜産業界では、新型コロナウイルス感染症の拡大、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、我々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ベースライン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もっとも合理的であるが、畜産現場の様々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なか、新たな畜産システムを構築するためには様々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）を行ううえで同じ測定条件のもと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。