

項目1：

ルーメンマイクロバイオームと代謝性水素の動態の徹底解明

主たる実施者： 佐々木 修（農研機構畜産研究部門 研究領域長）

キーワード： ルーメン、メタン、プロピオン酸、相関ネットワーク、代謝性水素動態

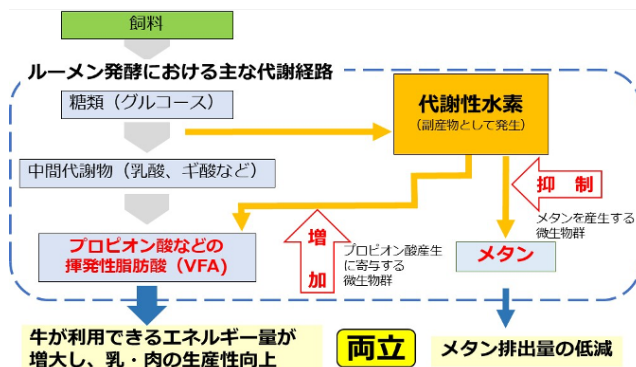
研究背景と達成目標

研究開発テーマの背景と必要性

ルーメン発酵では多種の微生物が餌を分解して牛の栄養に変えるとき、副産物としてメタンが生じます。栄養の中のプロピオン酸割合を増やすとメタン産生を減らす事ができます。プロピオン酸を増やす微生物の資材開発と、多種の微生物が関与するルーメン発酵を俯瞰するマイクロバイオームのモデル化が必要です。

技術開発目標

低メタン産生牛でのプロピオン酸増加に関わる細菌群の特定と培養化による資材化をめざします。ルーメン内でのメタン産生メカニズムの関係解明と鍵となるポイントの特定に取り組みます。



主な研究成果

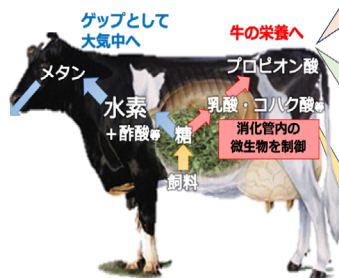
- ① 低メタン産生牛からプロピオン酸増強の鍵となる新種嫌気性細菌の特定と分離培養化に成功しました。菌株レベルでその発酵特性を解明しました。これらの有用な菌を牛に投与できる完全合成培地を開発し、飼料添加資材に使用する大量培養に向けた培養スケールアップに成功しました。
- ② 乳牛のルーメン細菌群が大きく8つのグループに分類できることを見出しました。揮発性脂肪酸（VFA）やメタンとの相関が強い細菌OUT^{注1)}は全体の6%程度と判明しました。ネットワーク解析から泌乳期と乾乳期にルーメン内のOTUが大きく変化していることを明らかにしました。
- ③ 日本国温室効果ガスインベントリ^{注2)}に採用されている乾物摂取量を説明変数とする推定式と同等の推定精度をもつ、ルーメン内VFA(揮発性脂肪酸)組成および乳量乳成分を説明変数とするメタン産生量推定式を作成しました。

【具体的成果】

低メタン産生牛のルーメンマイクロバイオームの鍵となる細菌を分離培養化

低メタン産生牛のルーメン発酵において高プロピオン酸産生に貢献する新規嫌気性細菌*Prevotella lacticifex*、およびその発酵補助機能を持つサポーター菌の分離培養化に成功。機能評価し、低メタン産生牛をモデルとしたプロピオン酸増を担う菌の組み合わせを確定しました。

低メタン産生牛の微生物相の解明と応用
(プロピオン酸産生増強によるメタン削減と生産性向上)

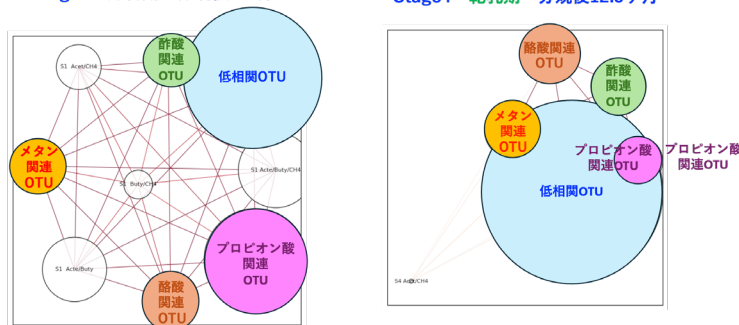


- P. lacticifex**菌を分離し、応用利用へ
・プロピオン酸産生を増強するプレボテラ属新細菌を発見・特許化
・完全合成培地を開発（飼料安全法対応）
・資材化に向け、民間企業との共同研究で30ℓタンクでの大量培養に成功
- P. lacticifex**菌の機能を増強するサポーター菌の特定と活用
・サポーター菌の特定と分離培養化に成功
・高効率で乳酸からプロピオン酸を産生することを確認
- P. lacticifex**菌の増殖資材の開発
・ゲノム解析でのプレバイオティック資材の推定と評価

ルーメン細菌とプロピオン酸産生の関連性解明と関連細菌の特定

泌乳期と乾乳期はルーメン内環境が大きく変化し、泌乳期にはプロピオン酸関連のOTU^{注1)}が増加、乾乳期は低相関OTUが多くを占めることを明らかにしました。「科^{注2)}」レベルでルーメン細菌をまとめると、*Prevotellaceae*科、*Lachnospiraceae*科、*Clostridia*科がプロピオン酸との相関が強く、プロピオン酸産生の増加への寄与が期待できることを明らかにしました。

短鎖脂肪酸に関連するOTUのネットワーク解析 Stage1 泌乳期 分娩後2ヶ月



代謝性水素の発生を反映するルーメン液中のVFA組成を説明変数とするメタン産生推定式を作出

ルーメン内VFA(揮発性脂肪酸)組成および乳量・乳成分を説明変数とするメタン産生量推定式を作成しました。推定精度は日本国温室効果ガスインベントリ^{注3)}に採用されている飼料乾物摂取量を説明変数とするメタン産生量推定式と同等であり、メタンとVFAの関係を定性・定量的に示した成果です。

	推定式	adj R ²
CH ₄ (L/day)	= 36.13×((A+B)/P) + 10.64×ECM + 56.64	0.7676
	= 16.93×(PCA1) + 10.6×ECM + 178.37	0.7722
	= 12.42×ECM + 119.62	0.7627
	= 27.83×DMI – 112.2	0.7625

$(A+B)/P = ((\text{酢酸} + \text{酪酸}) / \text{プロピオン酸}) \text{の濃度比率}$
 $(\text{PCA1}) = (-0.018 \times \text{総VFA濃度}) + (0.13 \times A\%) + (-0.11 \times P\%)$
 $\quad + (0.33 \times B\%) + (1.17 \text{ pH}) - 15.3$
 ECM=エネルギー補正乳量
 DMI=飼料乾物摂取量

今後の研究の展開方向

牛へのプロバイオティクス（動物により影響を与える生きた微生物やそれらを含む飼料・飼料添加資材）候補素材の資材化および投与条件と効果検証のデータを蓄積します。ルーメン内環境データと飼料データを数理モデルで解析し、ルーメン発酵の推定モデルのプロトタイプを構築します。代謝性水素、微生物構成、ゲノム構成、代謝産物等を解析し、これらの関係性を整理することでメタン産生量推定を精緻化します。メタン削減資材・メタン産生と代謝ネットワークの関係を解析し、メタン削減代謝ネットワークを最大化するためのポイントを明らかにします。

令和7年度から“BRIDGE”予算を獲得、微生物を用いた大規模飼養試験を開始し、開発と社会実装を加速します。

分担機関（太字は主たる実施者の機関）

(2)農業・食品産業技術総合研究機構/ (3)名古屋大学/ (4)全農飼料畜産中央研究所/

注1) OUT(Operational Taxonomic Unit) : 近縁な菌体を分類するための単位。

注2) 科：生物分類における基本的階級のひとつで、下（種）から3番目。

注3) 日本国の温室効果ガスインベントリ：国連気候変動枠組条約に基づく温室効果ガスの排出量と吸収量を整理した報告。

項目 2 :

発酵動態解明に向けたスマートピルの開発

主たる実施者： 伊藤 寿浩（東京大学 教授）

キーワード： スマートピル、VFAセンサ、無線通信システム

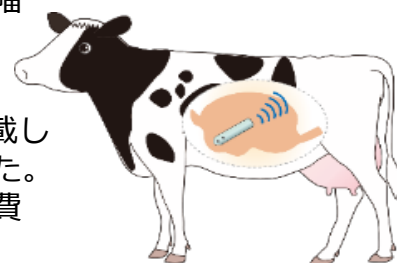
研究背景と達成目標

研究開発テーマの背景と必要性

牛の第一胃（ルーメン）に留置して揮発性脂肪酸（VFA）中のプロピオン酸の量（割合）を測定し、無線通信によってそれをリアルタイムモニタリングできるデバイス＝“スマートピル”が実現できれば、ルーメン内発酵動態の解明と、メタン生成の大幅削減に寄与すると期待できます。

技術開発目標

まずVFA総量を測定できるセンサを開発し、そのセンサを搭載したスマートピルのプロトタイプを実現することを目標としました。このスマートピルと基地局との間を確実に無線通信する超低消費電力無線通信技術の開発にも取り組みました。



主な研究成果

- ① VFA総量センサを搭載した経口投与可能なサイズのスマートピルのプロトタイプを製作し、一定時間牛ルーメン内で想定通り稼働することを確認できました。
- ② PBD（ポリブタジエン）を用いた共振式VFAセンサを開発し、牛ルーメン内で一般的に変動する濃度範囲：約1-50 mMのプロピオン酸・酢酸・酪酸を検出可能であることを実験的に明らかにしました。
- ③ 無線通信を成立させるためのみに使われる情報を最少化することで、スマートピルに必要な送信データ量の場合では、低消費電力長距離無線通信技術としてよく使用されるLoRaと比較し、約1/4以下の消費電力で通信できる通信技術を開発しました。

【具体的成果】

経口投与可能なスマートピルプロトタイプを開発

小型（コイン程度の大きさ）のセンサ駆動用・無線通信用回路モジュールを開発するなどして、牛への負担をできるだけ低減したVFA総量センサを搭載した経口投与可能なサイズのスマートピルのプロトタイプデバイスを製作しました。そして、デバイスが一定の時間、牛ルーメン内で想定通り稼働することが確認できました。

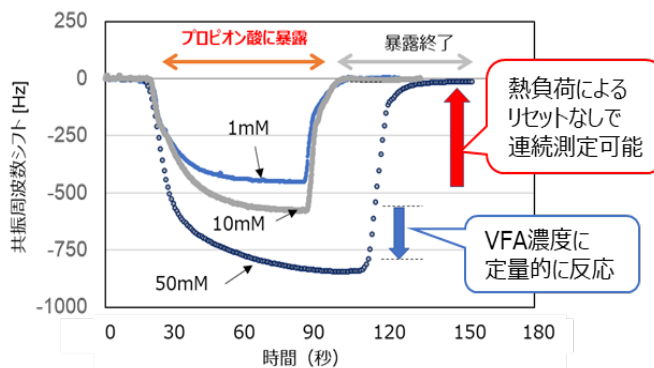


直径35 mm 長さ110 mm

【具体的成果】

牛ルーメン内に相当するVFA濃度範囲を 検出可能な共振式VFAセンサを開発

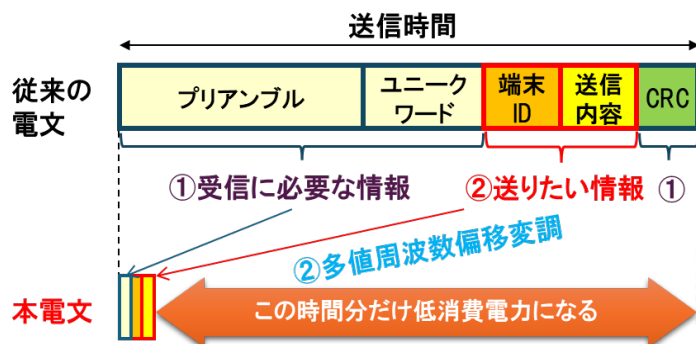
PBD（ポリブタジエン）を用い、VFAを感度よく測定するための共振式Vセンサ^{注4}を開発し、牛ルーメン内に相当するVFA濃度範囲を検出可能であることを実験的に明らかにしました。共振式VFAセンサの共振周波数はルーメン内のVFA濃度に定量的に反応します。この方式にはセンサが接している気相中のVFA濃度が下がると吸収したVFAが自然にセンサから脱離するという優位性があります。



プロピオン酸暴露による周波数シフト

超低消費電力長距離無線通信技術を開発

通信成立のために従来必要だった情報を低減し、送信情報を多値化^{注5}して送信する通信プロトコルを開発しました。それを実現する送受信機を試作し、牛に投与した実証実験において、1か月以上の連続受信ができることを実証しました。

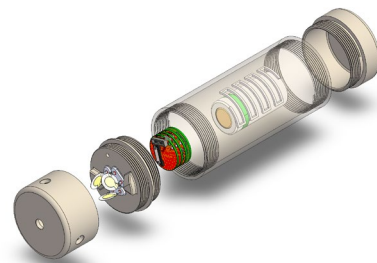


今後の研究の展開方向

牛ルーメン内で必要な期間（数ヶ月～1年）連続動作するスマートピルを実現します。（特にVFAセンサの安定性・耐久性を向上させる必要があります。）

VFAセンサは最終目標である、プロピオン酸の量が測れるセンサにバージョンアップさせます。

また、実験農場等に広く普及させるため、無線通信デバイスの小型化を進めるとともに、スマートピルの量産技術の開発に取り組みます。



- ・直径20 mm 長さ80 mm以下
- ・VFA組成センサ搭載
- ・超低消費電力通信
- ・自立発電機能（細菌発電）

分担機関（太字は主たる実施者の機関）

(2)農業・食品産業技術総合研究機構/(5)物質・材料研究機構/(6)**東京大学**/(7)産業技術総合研究所/

注4) 共振センサ：特定の化学物質を高感度に検出できるガスセンサの一種。

注5) 多値化：送信電波の周波数や振幅等の種類を多くし、一度の送信で通信できる情報量を増やす手法。

項目3：

メタン発生抑制飼料の開発及び最適飼養管理技術の確立

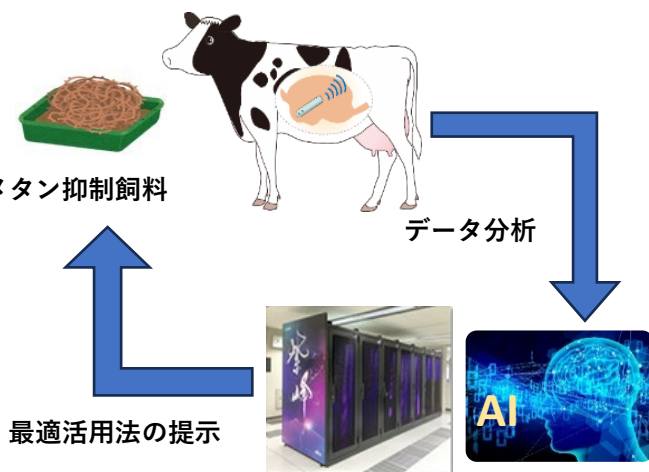
主たる実施者： 西田 武弘（帯広畜産大学 教授）

キーワード：メタン発生抑制素材、コンピュータシミュレーション、最適飼養管理技術

研究背景と達成目標

研究開発テーマの背景と必要性

ルーメン発酵で発生するメタンを抑制するための飼料はすでに市場に投入されていますが、さらに効果を高めるためには最適な給与量や給与タイミングの特定や複数素材の併用等が必要です。そのためには、より多くのメタン発生抑制飼料の選択肢を持つことと、それらの最適な活用法を提示するシステム開発が求められます。



技術開発目標

既存のメタン発生抑制飼料添加物と同等以上の効果をもつ新規素材を複数見出すことをめざしました。また、乳牛の生産にかかわる様々なデータを分析してメタン抑制に寄与する要因を特定するための解析基盤の構築に取り組みました。

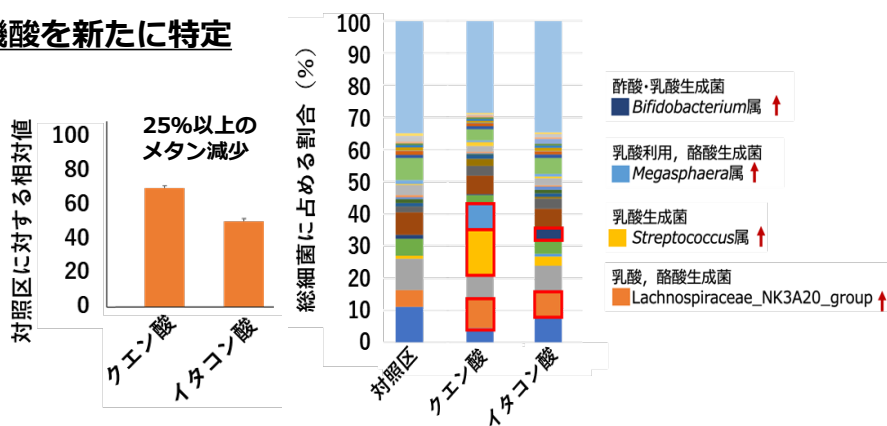
主な研究成果

- ① 実験室レベルで25%以上のメタン発生抑制効果を持つ新規素材を6種発見しました（1種は90%以上の抑制効果）。
- ② 乳牛のメタン排出量、飼料、乳量、乳成分、ルーメン発酵パラメータ、血液性状などを一元的に格納するデータベースを整備するとともに、メタン排出量の抑制に寄与する要因を特定するためのシミュレーション環境を構築しました。

【具体的成果】

メタン発生抑制効果を持つ有機酸を新たに特定

食品添加物にも使われるクエン酸にメタン発生抑制効果があることを発見しました。クエン酸により乳酸を利用してプロピオン酸を産生する細菌群が増加することで、低メタン型のルーメン発酵へと変化することを突き止めました。同様の効果はイタコン酸でも確認されました。



有機酸により菌叢が変化してプロピオン酸増加、メタン減少の発酵パターンにシフト



連絡先：牛メタン削減プロジェクト

<https://anim-func-nutr.agr.hokudai.ac.jp/ms-pj/ms-pj-introduction/>



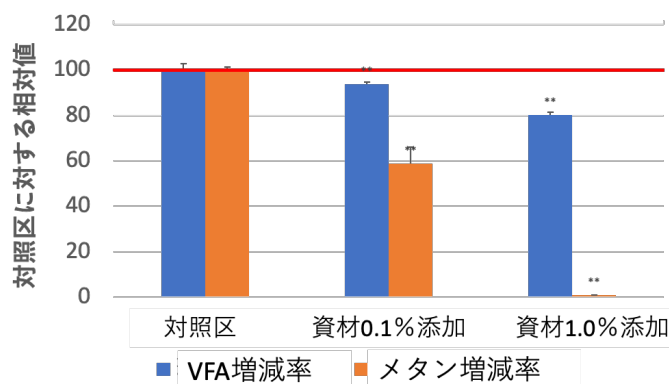
国立大学法人北海道国立大学機構
帯広畜産大学

Obihiro University
of Agriculture and Veterinary Medicine

【具体的成果】

大幅メタン削減が期待される新規素材の発見

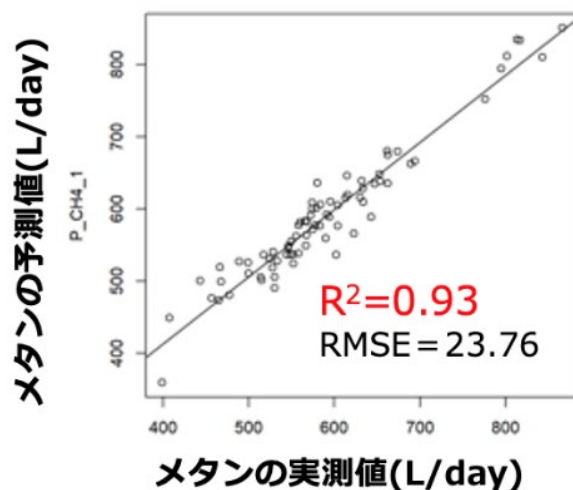
試験管内でメタン発生を9割以上抑制する植物由来素材のスクリーニングに成功しました。その他、複数の新規メタン抑制素材も見いだしており、有望素材の飼料化が期待されます。



植物由来素材によるメタン抑制効果

メタン発生を予測するシミュレーション技術を構築

乳牛の飼養試験で得られた乳、飼料給与、ルーメン液、血液等の30項目からメタン産生量推定に寄与する説明変数を6項目に絞り込み、メタン推定モデルを構築しました。また、確率モデルネットワークにより変数の関係性を可視化し、ルーメン液の性状、乳量、飼料、牛の生体情報などからメタン発生に影響を及ぼす可能性がある要因を解析するシミュレーション技術を構築しました。



今後の研究の展開方向

これまでに発見した新規素材の飼料化を進めると同時に、複数素材を組み合わせることでメタン発生抑制効果の向上を目指します。素材の選択肢はより多く確保することが望ましいので、新規メタン抑制素材の探索は継続して取り組んでいきます。

乳牛の飼養試験データの収集を継続し、データベースを拡充することでシミュレーションの精度を向上させます。また、ルーメン発酵を見える化するためのAI解析技術の開発にも取り組みます。

分担機関 (太字は主たる実施者の機関)

- (1)北海道大学/ (2)農業・食品産業技術総合研究機構/ **(8)帯広畜産大学/**
(9)北海道立総合研究機構/