

循環型畜産に向けた家畜栄養の探求と表現 ～“包括的な”ウシ由来温室効果ガス削減に 必要な手段手法とは～

信州大学農学部 准教授 上野 豊

1 はじめに

世界の人口増加と食料需要の高まりにより、動物性たんぱく質への需要が急速に拡大している。これに伴い、持続可能で収益性の高い畜産の実現が求められている。また、直線経済と表現される従来型経済での資源・エネルギーの消費増加と廃棄物増加が深刻な課題となっており、資源を循環的に利用する「循環経済」への移行が、新たな競争力の鍵を握ると考えられている。畜産分野においても、環境負荷を軽減しつつ費用対効果の高い飼養戦略の導入が急務であるなか、食料安全保障の観点から、輸入飼料への依存を減らす取り組みの重要性は一層高まっている。我が国の乳牛・肉牛生産では、地域資源を活用した飼料開発と、その経済的価値を定量的に評価し、持続可能な利益を創出することがイノベーションを加速させる鍵となる。

本稿では、とくに乳牛肉牛生産に伴うメタン排出の削減に向けた技術の課題を明らかにし、今後必要とされる技術や知見を提案する。また、農業食品由来の未利用資源を輸入飼料に代わる栄養源として活用することで、GHG（温室効果ガス）の効果的な削減の可能性についても説明する。

2 国内畜産業が直面する課題と対応する政策など

現在、国内の畜産業は多くの困難に直面している。

—雇用・経営

- 従事者高齢化に伴う後継者不在、他業種と比較して高い労働負荷
- 製造費の高騰（とくに飼料価格）と消費低迷/価格転嫁遅れによる経営悪化→廃業（酪農家は2022年度以降毎年平均6%ずつ廃業）

—国際競争

- 輸入飼料依存（飼料自給率26%）労働集約型生産に伴う高い製造コスト

—環境負荷

- 家畜由来地球温暖化ガス（とくに消化管発酵由来メタン）低減に向けた対策の要望

輸入飼料価格は、周辺国との需要競合や地政学的な要因による需給の逼迫、そして円安局面の継続による為替相場の悪化などが重なって高騰が続いているだけでなく、トウモロコシや大豆などの主要飼料原料は商品投機の対象ともなり、極端な価格変動が発生している。こうした背景から、輸入飼料に依存した現在の乳牛・肉牛生産の仕組みを根本的に見直す必要がある。さらに、地球温暖化対策の観点からも、畜産分野における GHG 排出削減が大きな課題として注目されている。特に牛のような反芻動物の栄養消化過程で発生するメタン (CH_4) の削減は、農林水産分野として削減を果たすべき最重要 GHG のひとつとして認識されている。

令和2年に策定された「食料・農業・農村基本計画」に基づき、令和6年施行の改正法では食料安全保障の確保が明記され、安定した供給体制の確立が求められている。しかし、輸入飼料依存が続く中で飼料費の高騰が畜産経営を圧迫しており、国産飼料の利用促進は毎年の政策課題として予算を伴う対処が施されている。また、「みどりの食料システム戦略」では、2050年までに農林水産業の CO_2 ゼロエミッション化を目指す方針が掲げられた。この目標の達成に向けて、畜産分野では以下の取り組みが進められている：

- 家畜排せつ物管理や消化管内発酵由来のメタン排出削減技術の開発・普及
- 生産性向上による GHG 排出量削減（例：放牧やメタン抑制飼料の活用）
- 家畜改良や微生物機能を利用したメタン削減システムの開発

さらに、飼料組成の調整と最適化によるメタン排出削減も重要視されている。具体的には、飼料利用効率の高い家畜への改良や GHG 削減飼料の開発、家畜排せつ物由来堆肥の広域流通を通じた資源循環などが課題として挙げられる。

また、環境省では2008年に指針を策定し、カーボン・オフセット制度いわゆる J クレジット制度が創設され、運用されている。ただし、現時点で J-クレジット方法論として認められている「アミノ酸バランス飼料給与による排泄物中窒素濃度低減」のクレジット取得には、飼料中粗たんぱく質含有量の低減を証明するため、複数の飼料調達実績などを組み合わせて申請する必要があり、簡便性という点で現実的な運用から乖離したものとなっている。また、2024年に新規追加された方法論「肉用牛へのバイパスアミノ酸の給餌」においてはメタンと一酸化二窒素の双方の削減量を算入可能だが、ここでのメタン削減はバイパスアミノ酸の給与で直接胃内発酵が制御されることになるメタン発生低減を加味したものではなく、使用による生産効率向上すなわち早期出荷（飼養日数削減）に基づき計算される。したがって、「飼養管理方法の変更による直接的なメタン排出削減」を訴求する方法論は現状皆無である。

こうした政策等を実際の現場に効果的に適用し、施策の実効性を高めるためには、乳牛肉牛の生産についての基本的なメカニズム、すなわち牛のなかで飼料がどうやって利用され、そこに GHG はどう関連し、どこが問題でどのような解決策が考えられるかの考察が必要となる。

3 反芻動物とルーメン微生物の共生

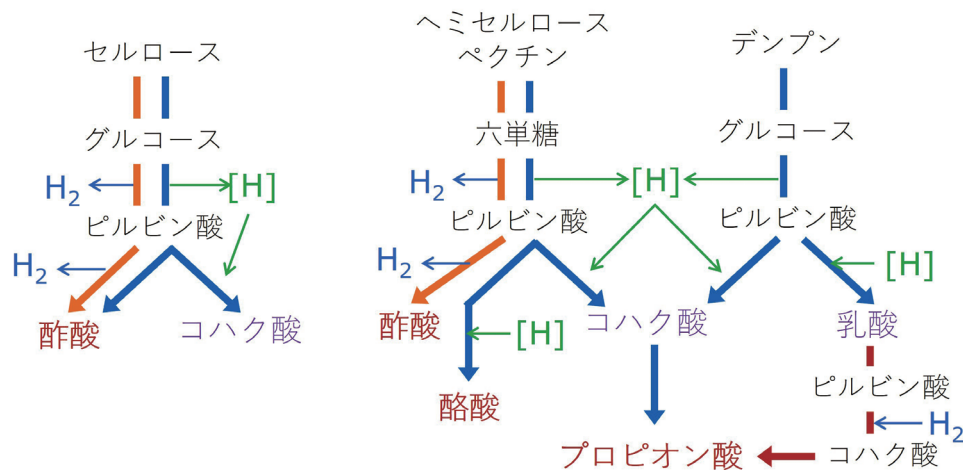
牛は4つの胃を持ち、1番目の胃がルーメンと呼ばれ、容積のほとんどを占める。ルーメンは微生物活動に最適な環境を提供する発酵タンクであり、細菌、古細菌、プロトゾア、真菌など多種多様な嫌気性微生物が生息している。ルーメンの機能の大部分は、これらルーメン微生物群集の働きによるものである。反芻動物と微生物は、栄養素の共有という点で相互に補完し合う仕組みを持っている。共生の仕組みには主に2つの方法がある。1つは、微生物が「食べ残し」として生成する代謝産物を牛の栄養源として利用することである。ルーメン微生物は繊維を含む炭水化物を分解し、その過程で生成された揮発性脂肪酸（VFA）がルーメン上皮から吸収され、牛の主要なエネルギー源となっている。一方で、微生物は代謝産物として牛が直接利用できない有機酸や水素といった「廃棄物」を生じる場合もあるため、これら进行处理する別の微生物を活用することがもう1つの仕組みである。たとえば、乳酸やコハク酸をプロピオン酸に変換する菌や、水素をメタンに変換するメタン菌がこれに該当する。後者がいわゆるメタン菌であり、水素をメタンガスに変え、気として体外へ排出することで、ルーメンの環境維持に貢献し、嫌気発酵プロセスを効率的に進める役割を果たしている。宿主個体レベルではこのメタン発酵プロセスこそが発酵最適化に不可欠の要素だが、反芻動物由来の地球温暖化ガス発生に寄与していることが世界的な懸念材料となってしまう。こうした反芻動物と微生物の共生のしくみ詳細は、別誌記事を参照されたい^{1) 2)}。

これまでの栄養・飼養の研究では、飼料中の炭水化物とタンパク質のバランスをどのように調整すればルーメン発酵が最適化されるかに重点が置かれてきた。適切な栄養管理を行ってルーメン微生物群集の定常状態を維持することでルーメン発酵を安定化させ、宿主個体の生産性を維持できると認識されている。現在の主要な牛飼養管理プログラムにおいては、ルーメン微生物群集は「生産を左右する重要な要素」として位置づけられ、宿主の代謝とルーメン微生物の代謝の両方を考慮して設計されている。一方でルーメン内の微生物組成は、乾物摂取量や飼料の種類、品質などの要因によって大きく影響を受ける。また、ルーメンからのメタン排出量も微生物群集の構成に依存するが、群集生態とその変動に対する理解については避けられてきた感があり、それがあまりにも複雑混沌とした世界であったからであろうと想像する。それでも、今後の温室効果ガス削減や持続可能な畜産技術の発展において、微生物群集の生態学的な視点を取り入れることは不可欠であろう。

4 ルーメン微生物とはどのような存在か

ルーメン微生物は、飼料を牛が利用可能な栄養素（VFA、糖、アミノ酸、脂肪酸など）に変換する発酵と消化のプロセスを担っている。飼料中の炭水化物は、リグニ

ンなど分解が難しいものを除き、ほぼすべてルーメン内で消化される。ルーメン微生物は自身の生存と複製のために飼料を分解し、エネルギーを得る一方、タンパク質を「リフォーム」して微生物タンパク質を合成する。このように微生物による自己の複製による存続いわばサバイバルの過程、炭水化物の消化と微生物タンパク質の合成がルーメン微生物の代謝の基盤であり、反芻動物はこれらの産物を吸収して維持や生産に利用している。ルーメン内の微生物群集は、環境に応じて異なる代謝経路を使い分ける柔軟性を持ち、複雑で多様性に富む。多くの菌がいわゆる「プランB」的代謝経路を持つ [図1]。かりに、特定の機能を持つ微生物が減ったり消えたりしても、他の微生物がその役割を補完することで群集全体の機能は維持され、見かけ上は安定した機能を示される。結果的に、ルーメン微生物群集は高い密度と頑健性を備えながら多様性を備えたフレキシブルな応答を可能にし、あたかも一つの器官のように機能している。しかしその内側では、だれが何をしているのかについて常に変化していることは見過ごされやすい。



->各VFAは多様な微生物がもつ「複数の」発酵経路で生成する
 ...同じ菌が同じ基質（炭水化物）を使って異なる代謝産物を合成する
 H₂は「微生物が捨てた」水素分子、[H]は「微生物が自分のなかで利用した」水素を示す

図1. ルーメン微生物による基質代謝と発酵産物生成 *例外多数あり

現在、ルーメン細菌には約1000種類が存在するとされ、そのほとんどがルーメン特有の環境に適応したものだと考えられている。2010年代以降、次世代シーケンシング技術が動物消化管のような複雑な微生物生態系を解析する一般的な方法となり、得られるデータ量はそれまでの100倍以上になった。ルーメン内で400以上の代表株が単離され、それは存在量として全体の75%がカバーされている。一方で、25%は未培養のままであることも注目に値する。それらは学名もなく、Bacteroidales RF16 (Bacteroidalesという細菌グループに属する、ルーメン液層 (rumen fluid) から検出された細菌 No16)

のようにコードネームのようなもので便宜的に区別される。後半で紹介するが、このような未知の微生物もまた飼料変更に伴って分布が増減しており、その変動には一貫性がない。こうした謎存在がまた、ルーメンという光の届きにくい世界を端的に示しつつ、ルーメン研究のさらなる発展余地でもあるように感じる。

5 メタン発生とその抑制

ルーメン内での微生物間の物質のやり取りによって発生するメタンは、反芻動物由来の温室効果ガスとして注目されている。これを抑制するためにさまざまな材料や方法が評価されてきた。抑制素材にも様々なものが試されてきている [表1]：

表1 メタン生成抑制素材の種類と作用のしくみ

作用のしくみと事例	欠点
①メタン発生に関係する菌の働きを抑える、または発生した水素がメタン合成に使われないようにする —抗生物質 —植物二次代謝産物 —不飽和脂肪酸 —カシュナッツ殻油 (CNSL)	• 抗生物質使用は時代の流れに逆行 • 特定の菌だけを抑えることは難しい • 素材と量によっては牛が食べるのを嫌がる
②できるだけ水素が発生しないように、牛に与えるエサを工夫する（配合飼料を多く与える）	• ほかの動物（人間含む）とエネルギー源が競合してしまう
③メタン生成菌がメタンを作りにくくするように、代謝の邪魔をする —プロモホルム（カギケノリに含まれる成分） —3-ニトロオキシプロパノール (3-NOP)	• メタン抑制の点では効果的だが、高価であり、生産性向上とかならずしも結びつかない

この中でも、3-NOPは、家畜の生産性や生産物の安全性を損なうことなくメタン排出量を大幅に削減する効果が確認されており、日本国内でも昨年(「温室効果ガス削減を目的とするもの」として)抑制効果を表示可能となった。別の素材（カシュナッツ殻油、CNSL）についても、前後して飼料添加物承認が検討されている。上述のJ-クレジット方法論と同様だが、これらの素材使用による生産成績変化がどのくらい生じるかが計算できれば低減効果を定量的に訴求でき、加えてどのくらい経済的メリットが生じるのかまで定量化ができれば理想的である。例えば、「この飼料をこれだけ購入

（使用）すれば〇〇kgのGHG低減が図られる」のような簡便なロジックで表現できれば普及が進むであろうが、それにはGHG発生を含めた広い意味での生産効率を定量化するうえで、飼養環境の違いと個体生産パフォーマンスの差の両方を誤差として考慮する必要がある。それは実験頭数の確保と広範な飼養形態での効果検証による多数の測定データとともに、あえてルーメン（微生物）の「沼」に身を落とす覚悟も必要であろうが、沼の底にはGHG削減効果を最適化できるお宝が眠っているはずである。

6 メタン生成評価技術の洗練と応用・泌乳牛への紅茶かす給与によるメタン発生変化の定量³⁾⁴⁾

ルーメンからのメタン生成量を評価するためのハイスループット技術は、飼料のメタン低減効果のスクリーニング目的だけでなく、個体間のばらつきを一面的に評価するツールとしても利用可能である。これまでも、ルーメンメタン生成について信頼性が高く実用的な測定方法の確立が進められてきた（令和5年度知見集¹⁾を参照されたい）。呼吸チャンバーやフードデバイスシステムによる直接測定は精度が高いものの、実験動物への負担が大きい。一方、ルーメンの *in vitro* シミュレーションは、簡便で効率的な方法として、飼料や発酵レベルを評価する際に優位性を持つ。ただし、直接測定と比較した場合の精度や信頼性に課題が残る。

私たちは、飼料組成変更に伴うメタン生成抑制効果を高精度に評価するため、新たな *in vitro* 培養手法の開発を試みた。この方法では、培養手順を改善し、培養時間時間を従来より短縮（4～8時間）することで、牛ごとのルーメンメタン生成の変動を適切に反映可能な、Fast Ex Vivo（FEV）法を確立した〔図2〕。



図2. FEV法による胃液培養

さらに、第一胃内微生物代謝とVFA生産量を関連付けた化学量論的アプローチを用い、VFA濃度からメタン放出量を推定する回帰式から、両者に相関関係が見られた。

また、各個体のエネルギー摂取量と、FEV法によるメタン発生予測との相関、また乳量とメタン発生予測との相関関係を評価した。牛の乳生産能力は、エネルギー摂取量に依存するという原則に基づくもので、言い換えれば、エネルギー供給が多いほど、生産効率が高くなり、単位当たりのメタン生成量は減少する。FEV 値に基づくメタン推定値は、生産性と回帰式にうまく相関しており、各個体のメタン発生量と乳生産量の間には有意な負の相関関係が見られた。つまり、高泌乳個体ほど低いメタン生成能を示した。FEV法は、栄養成分がわずかに変化する飼料成分がルーメン発酵、特にメタン生成に与える影響を飼養試験レベルで評価する際に適していると考えられた。そこで、開発したFEV法を用いて、紅茶飲料製造残渣（紅茶かす、BTL）のメタン生成抑制効果を検証した。紅茶かすにはタンニンやサポニンといった植物二次代謝産物（PSM）が含まれ、メタン生成抑制が期待されている。以下の結果が得られた：

- 乳生産性への影響なし：紅茶粕の給餌は、乳牛の生産性、健康状態、牛乳の風味に影響を与えなかった。
- メタン生成の減少：給餌前後の ex-vivo 培養によるメタン生成量を比較したところ、有意な減少が確認された。乳生産量40kgの乳牛において、飼料中の2%をBTLに置き換え、3週間給餌した場合、メタン生成が約9%抑制と計算されたが、個体ごとでのCH₄削減の程度には一貫性がなかった [図3]。

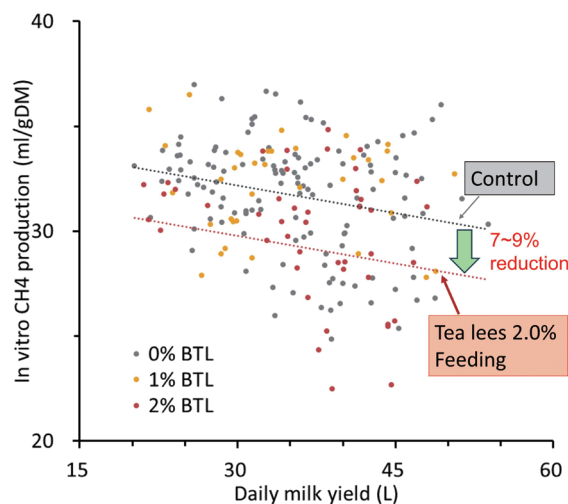


図3. 供試個体泌乳量とFEV法によるメタン発生量の相関

（本図の作成手順と説明）各個体について試験期ごとの泌乳量とメタン発生量(FEV法による)についてプロットし、すべての点に関して重回帰分析を行った結果、メタン生成量を目的変数としたときにBTL給与量と泌乳量を説明変数とした回帰式で表現可能であることがわかった。回帰式にBTL給与量水準を代入して、泌乳量とメタン発生量の回帰直線を描画した（図中点線で表示）。BTL給与によるメタン発生量低下の程度は泌乳量によって異なるが、7～9%であると推測された。

ハイスループットシーケンシングの普及によって、動物への処置介入を行ったときの微生物群集構造の一群を大きなデータセットとして取り扱うことが可能になった結果、変化したメンバーを特定するだけでなく、サンプル内での群集構造の多様性や、サンプル間の差異を評価し、コミュニティの全体像を比較することも可能である。そこに、FEVを組み合わせた微生物測定を組み合わせると、乳牛のメタン生成生態学に影響を与えるルーメン微生物の動態を解明するのに役立つ。そこで私たちは、BTL給餌に反応して特定の細菌に顕著な変化が生じたかどうかを解明するために、試験した動物のルーメン微生物群集構造を分析した。PCoA（主成分分析、図4a）により、BTL給餌後にバクテロイドータ門、フィルミクテス門、プロテオバクテリア門の割合が変化したことが示された。ただし、この変化の方向は個体ごとに異なっていた。ルーメン微生物叢の構成はBTLの摂取によって変化する可能性があり、その変化は各牛のルーメン内で主要な構成を占める微生物群に依存していると結論付けられ、これがBTLを摂

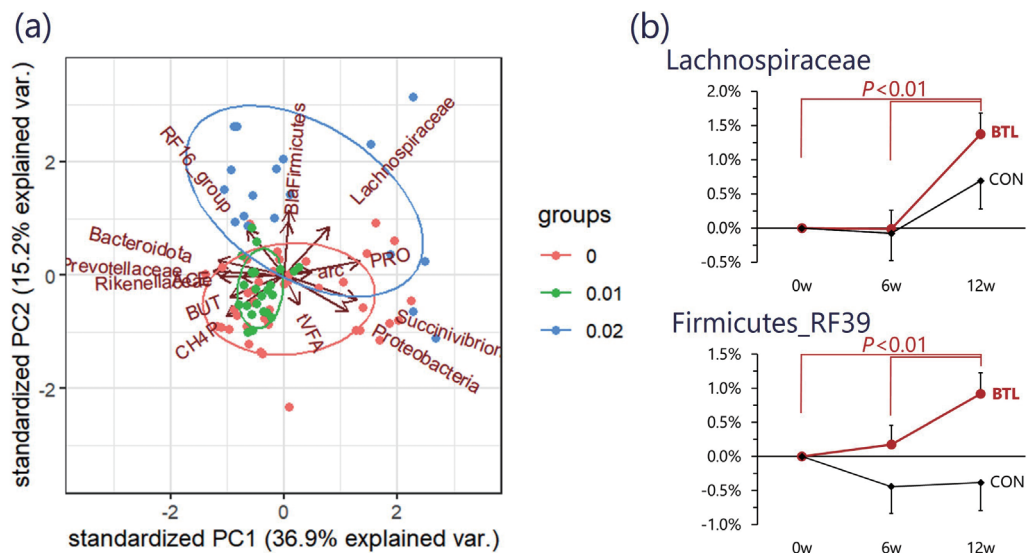


図4. 泌乳牛へのBTL給与による細菌叢構成と胃内成分の変化

(a) 胃内細菌叢と胃内成分の主座標分析(PCoA)結果 (b)BTL長期給与による特定グループの変動

- * 2% BTL給餌は、各牛のルーメン細菌群集構造に応じて、牛のルーメン発酵に異なる影響を与える可能性がある
- * この試験での供試牛の場合は、BTL給与有無にかかわらず、PrevotellaceaeとRikenellaceaeがルーメンCH₄生成に作用している可能性があり、Succinivibrio科細菌は、CH₄減少に作用している可能性がある
- * Lachnospiraceaeの場合は、BTL給与によっておこるCH₄減少に関与している可能性がある
- * Firmicutesに属する2つの科(LachnospiraceaeとFirmicutes RF39)は、12週間最大2%のBTLを与えられた牛のルーメンで比例的に変化した

取した乳牛のルーメンメタン緩和効果の程度の不一致を部分的に説明できる可能性がある。紅茶粕の利用は、乳牛のメタン生成を抑制する有望な手段と考えられたが、その効果の一貫性にはさらなる検討が必要である。特に、ルーメン微生物群集の変動を詳細に解析し、個体ごとの応答性を明らかにすることが重要となる。

ルーメンメタン発生とルーメン環境変化に関与する要因として、飼料組成と摂取量が挙げられる。乳牛の場合は、これらの要因は乳生産量や個体体重によって規定されるが、介入による効果の程度は個体差が大きい。そのため、副産物素材を活用したメタン発生抑制効果を一貫して定量化するには、さらなる実験実績の蓄積が必要である。一方、肉牛生産では、飼料摂取量が個体体重とその増加（発育）に大きく依存しており、考慮すべき因子が減る分、一般則を見出しやすい可能性がある。この点を踏まえた研究事例として、黒毛和牛におけるメタン抑制素材の給与効果について以下に紹介する。

7 黒毛和牛（和牛）のルーメン発酵特性の変化とルーメンからのメタン放出に対するカシューナッツ殻液 (CNSL) の給餌の影響⁶⁾

日本の代表的な牛肉品種である黒毛和牛は、優れた品質を維持するために特有の飼養管理が行われている。そこで、慣行的な飼養方法で発生するルーメンメタンを定量化し、CNSLを用いたメタン排出削減の可能性を評価するための試験を実施した。

独立行政法人家畜改良センターで飼育された黒毛和牛去勢牛27頭（肥育中期～肥育後期）を対象とし、慣行給与飼料に加えてそれぞれに1日0g、100g、200gのCNSLを3か月間給与した。メタン生成量はヘッドボックスに取り付けたガスモニタリング装置を用いてスニファー法で測定し、ルーメン内の微生物群集や発酵産物についても分析を行った。スニファー法については令和4年度知見集⁵⁾を参照されたい。

メタン生成量は1頭あたり173～340g/日で、肥育中期の平均は 265 ± 14 L/日、肥育後期は 248 ± 26 L/日であった。CNSL給与群間での有意差は見られなかった。相関分析の結果、メタン生成量は個体月例およびCNSL給与期間と負の相関が確認された。特に肥育中期では、CNSL給与総量（給与量と給与期間の積）に応じて代謝体重あたりのメタン生成量が減少し、CNSLが飼料摂取行動を変化させた結果、メタン生成が減少した可能性が示唆された。

微生物群集の変化として、CNSL給餌群では、BacteroidotaやFirmicutesに属する細菌が増加し、ルーメン酢酸の減少傾向が確認された。 β 多様性分析では、CNSL給与量の多い群では、CON群やLOW群と異なる独特の細菌群集構造が見られた（図5）。これにより、CNSLがルーメン環境に影響を与え、メタン生成抑制に寄与する可能性が示された。一方で給与による効果が、和牛の成長曲線に合わせた自然な飼料摂取量減少に伴うメタン発生低減を上回っているかどうかについては、さらなる例数増加による評価が必要であると考えられた。

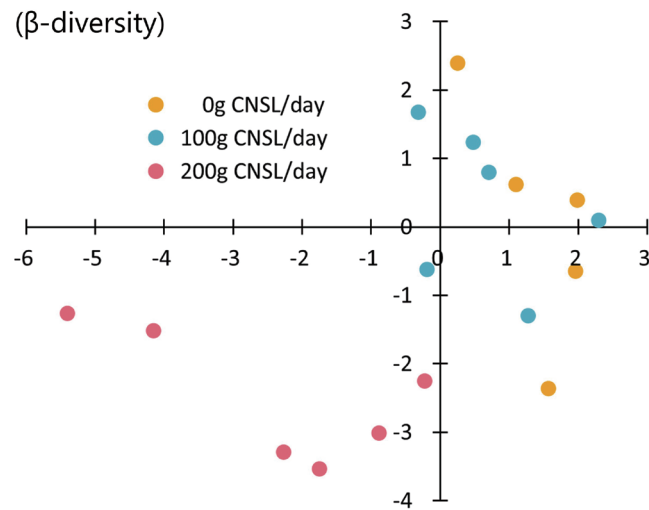


図5. 肥育中期黒毛和牛にCNSLを給与したときのルーメン細菌叢構成変動

図中の●は各個体の細菌叢構成を統計的に処理して座標に表示したもので、近接しているほど細菌叢構成が類似していることを示す。0g給与区個体（●）と100g給与区個体（●）はそれぞれの点が近く、細菌叢は比較的類似しているが、200g給与区個体（●）はそれらから離れており、異なる細菌叢を持つことが推察される。

乳牛と肉牛での飼養試験による評価は観点も手法も異なるものの、介入すなわちメタン抑制素材の給与によるルーメンメタンの低減は、「全体として有効性はあるが、個体によって効き方が異なる」ものであり、その背景には「素材摂取（もっと言えば飼料組成の変化）がもたらす胃内環境の変化が個体によって異なる」ことに由来するという点では、類似した帰結が得られたと考えている。いずれにしても、メタン抑制のための飼養管理による効果量が個体差を上回ることの検証には、さらなるデータ収集と解析が必要である。また、乳牛と肉牛それぞれの生産特性に基づいた最適な介入方法を開発し、持続可能な畜産を実現するための実用的な指針を示していく必要があると考えている。

8 食品副産物の活用と持続可能な畜産の展望

農業は環境負荷の大きい産業であり、年間10億トンにも及ぶ農業廃棄物が焼却等で処理されている現状がある。廃棄物の焼却はGHG排出の主な原因の一つとされ、廃棄物の削減が急務となっている。根菜、塊茎、油糧作物、果物、野菜、一部の穀類や豆類などは、加工過程で大きな損失が生じ歩留りが減少する。上記の数値とは別に、世界的に、2016年に生産された食品の13.8%が収穫後から小売段階の間に失われ、食品ロスと廃棄による世界の炭素排出量CO₂換算で3.3ギガトンに達すると推定されている。多くの食品副産物（FBP、農産物残渣も含む）は家畜の飼料として十分な栄養価を含

み、生産コストを抑えながら低炭素で健康的な代替品を従来の飼料源を効果的に置き換えることができることが示されている。輸入飼料を代替することで輸送由来のCO₂排出削減にも寄与する。さらに、農業廃棄物の堆肥化は化学肥料の代替手段だが、農業廃棄物をいちど飼料に使用し、次に動物の排泄物を肥料として利用することで、生物資源の循環が強化され、環境的価値と経済的価値を高める。このアプローチは環境汚染を軽減し、食料とエネルギーの安全保障を強化し、循環経済をさらに拡大する。廃棄または焼却されている食品副産物の行き先を埋立地から動物飼料に転換することは、畜産経営の戦略オプションあるいは農業の営みにおける資源循環という観点でみればカーボンニュートラルであるが、家畜個体レベルでの代謝による炭素収支としてはカーボンオフセットとなる。加えて、反芻動物の前胃からの腸内メタン生成を減らすことで温室効果ガスの排出緩和ができると、さらに利用価値は高まる。

FBPを家畜飼料として利用する際の安全性と品質管理に留意する必要がある。ほとんどの場合、FBPは高水分含有量や生分解性成分で“意図しない”微生物の増殖が起こるため、出てきたところで直ちに腐敗を防止するための加工が必要となるほか、その後の保存と輸送のシステム整備が求められる。実用的な加工技術として、乾燥や発酵が挙げられるが、それぞれ課題が伴う。乾燥には動力コストの問題があり、発酵では均一で高品質な製品を得るための技術高度化が必要である。さらに、FBPの栄養価は素材によって大きく異なる。生産者が一貫した飼料品質を確保し、効率的な飼料管理を行うことが可能となるような、信頼できる栄養データの整備が不可欠である。

筆者は拠点とする長野県で、野菜かす、きのか廃培地、酒粕、おから、果物加工残渣といった地域資源を活用し、牛反芻胃由来メタン排出も削減可能な環境負荷軽減飼料の開発と実証に取り組んでいる [表2]⁷⁾。これら「リージョナルFBP」の中には、単独では効果が小さいものの、組み合わせによって相乗効果を発揮する可能性のあるメタン抑制作用を持つ素材も含まれる。副産物飼料を用いた取り組みを拡大するには、ここでも結局は導入コストとCO₂削減効果を定量化し、具体的なメリットを可視化することが重要であるが、国産食品製造残渣の飼料化によって、輸入飼料使用量低減による、輸送由来CO₂の軽減については確実に実現可能である。

表2. メタン生成抑制素材としても利用可能な地域未利用資源の飼料化

素材	成分 (PSM：植物二次代謝産物)
柿皮	[糖] [PSM]
野菜残渣	[糖] [繊維]
きのか廃培地	[繊維]
おから	[タンパク] [繊維]
酒粕	[タンパク] [糖]

さまざまな素材を組み合わせれば、結果的に栄養のバランスもとれる

9 おわりに

今後の研究と実践において、飼料の効果的な利用による環境負荷削減とその経済性について定量化し、畜産業が気候変動対策に積極的に貢献する姿勢を示すべきであり、その取り組みが、地球規模の持続可能な食料供給システムの構築に寄与すると考えている。牛ルーメン内でメタンができてそれを減らすメカニズムについての研究に関しては、上述の通り、新しい解析技術が導入されることにより得られる情報は増えているが、現在のところは理解広まったというよりも、情報が細分化されて一貫性のある説明ができないことのほうが増えている状況である。介入などによる微生物構成の量的変動を比較するだけでなく、微生物の機能そして宿主動物との相互作用として理解を深めることで、効率的かつ持続可能な乳肉生産を可能にする未来こそが、この分野のDXのひとつであろう。

動物飼料の生産は、他の食品に比べて環境への影響が大きく、持続可能で効率的な技術の実践が極めて重要である。FBPの飼料再利用は、従来の穀物ベースの飼料生産に伴うエネルギー、肥料、水、土地などの資源使用量を削減できる。これは動物生産システムに対する現在の要求とよく一致している。これにより、畜産がひきつづき高品質の動物性タンパク質供給に貢献しながら持続可能性を高める。

本稿で紹介した研究の観点を包含して、筆者は現在、流通可能な飼料を試作するための設備を整備したうえで新規飼料開発を行い、試作飼料導入による農家単位での経済効果および地球温暖化ガス発生に及ぼす変動（低減）効果の両面から定量評価を行っている。これらの新しい着眼点からの評価についてご興味のある方は、ぜひ筆者までお問合せください⁸⁾。

【謝辞】

本稿作成にあたっては、信州大学農学部・大学院総合理工学研究科農学専攻 小間佳樹、小巻眞子、遠藤アリマリ、斎藤絵里佳、富士村佳純、および株式会社大澤屋 高橋隆治の各氏から情報と資料提供をいただいた。ここに記し、厚く御礼申し上げます。

【引用・発表・注記】

- 1) 広岡博之 肉用牛における消化管内発酵由来のメタン排出について考える 肉用牛生産における GHG 削減実用技術・知見集（令和5年度版）（全国肉牛事業協同組合）6-21
- 2) 上野豊 ルーメン微生物 臨床獣医2024年臨時増刊号「飼養管理に活かす牛の消化と吸収」（杉野利久監修、緑書房）2-6
- 3) Uyeno, Y., et al. "Suppression of methane production from rumens of dairy cows by feeding post-extracted black tea lees." Poster presentation at IDF