

SDGs と酪農 / メタンガス抑制の取り組み

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畜産研究部門, 〒305-0901 茨城県つくば市)

SDGs and dairy industry / Efforts for mitigation of methane emission from dairy cattle

Fuminori TERADA

(Institute of Livestock and Grassland Science, National Agriculture and Food Research Organization., Tsukuba, Ibaraki, 305-0901, Japan)

要 旨

酪農産業では、栄養価に優れる牛乳・乳製品を効率的に生産すべく技術開発が進められてきたが、今後、国際連合により提唱されている SDGs の取り組みを進めるために、地球温暖化問題の解決に向けて温室効果ガス、特にウシ消化管内発酵に由来するメタン産生を削減することが求められている。メタン削減対策を適切に講じるためにはその産生量を正確に把握することが必要であることから、農場レベルで簡易に温室効果ガス産生量を測定できる手法の開発が進められている。削減技術としては、栄養・飼料管理による産生量の制御、メタン産生抑制効果を有する添加剤の開発、低メタン産生牛の育種、生産性改善による生産物当たりのメタン産生量の削減などの取り組みが行われている。2050年までに酪農産業におけるネットゼロを達成するためには、単一の技術のみで削減することは困難であり、家畜個体だけでなく、経営体やサプライチェーンとしての排出量を削減することを目標として、総合的な技術体系を構築する必要がある。

はじめに

2015年の国連総会において、17項目のSDGs (持続可能な開発目標, Sustainable Development Goals)¹⁾ を掲げた人類の発展と地球環境の保全との両立を目指した取り組みが提案され、世界各国でその具体化が進められている。17の目標のうち、酪農産業には、飢餓の撲滅、健康の増進、陸域の保全、地域の振興等、多くの目標への貢献が期待されており、我が国においても、牛乳の栄養価値の有用性や酪農の展開による社会的な意義に関する啓発等²⁾ を含め、関係団体、大学、研究機関等におけ

る積極的な取り組みが行われている。

一方、産業革命以来の工業化の進展と人口増加に伴って発生した地球環境の悪化に対する懸念が深刻化しつつあり、Rockströmら³⁾ は自然のレジリエンスに期待できる地球の限界 (Global boundary) を提案し、窒素やリンなどの化学物質の使用量低減や生物種の多様性の保全に加えて、地球温暖化対策等を緊急に対応すべきものとして指摘している。これらの課題に対する農業分野の影響も無視できず、生産技術面での対応だけでなく、食習慣まで踏み込むべきとの意見もあり⁴⁾、酪農産業においても積極的な対応が求められている。

本稿では、それらの課題のうち、地球温暖化問題

* E-mail : teradafuminori@gmail.com

として注目されている乳牛の消化管内発酵由来メタンに焦点を当てて、その抑制方法の開発研究と今後の展開方向についてSDGsへの取り組みの視点から論考する。

1. 我が国の酪農産業から発生する温室効果ガスについて

2015年に開催された第21回国連気候変動枠組条約締約国会議（通称COP21）では、「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃以内に抑える努力をする」ことを目標として、温室効果ガス排出量の大幅な削減を図っていくことが合意された⁵⁾。温室効果ガスとして最も大きく影響しているものは社会生活や工業生産における化石燃料の燃焼にともなって排出される、あるいは土地や森林の利用変化に伴って増加する二酸化炭素（CO₂）であり、次いで、農業生産体系からの排出量が多いメタン、一酸化二窒素（N₂O）と推計されている⁶⁾。我が国における温室効果ガス排出量における農業分野からの排出割合は4.4%に達し、その排出量の2/3をメタン、N₂Oが占めている。そして、その内訳として水田作に次いで、畜産関係（家畜消化管内発酵、糞尿処理等）に由来するものが多く、その抑制対策は喫緊の課題と言わざるを得ない状況にある（図1）⁷⁾。

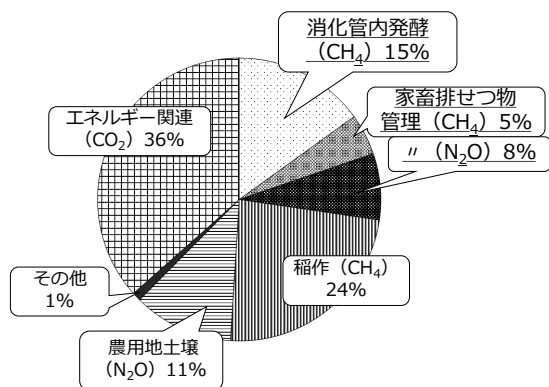


図1 農林水産業分野からの温室効果ガス排出量（5,084万t-CO₂）の内訳
国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス（GIO）編日本国温室効果ガスインベントリ報告書2022年⁷⁾に基づき作成

我が国で飼養されている家畜に由来する1頭1年当たりの発生量を見ると、乳牛が最も多く、次いで、肉用牛、水牛、ウマとなっており（図2）、さらに、乳牛から発生する温室効果ガスの内訳をみると、消化管内発酵に由来するメタンが最も多く発生量の半分以上を占めている⁷⁾。酪農産業における温室効果ガス抑制策として、消化管内発酵に由来するメタンの抑制対策を急ぐ理由がここにある。

なお、これらのガスの温室効果はその種類や想定する年限によって大きく異なっており、そのため、温室効果ポテンシャル（GWP）によってCO₂換算で基準化することが行われている。100年間の温室効果を前提とした場合、最新の数値では、メタンはCO₂の27倍、N₂Oは273倍の効果があるとされている⁸⁾。

2. 乳牛におけるメタン産生経路と産生量の測定方法

1) 乳牛におけるメタン産生経路

乳牛の消化管内発酵に由来するメタンのうち、その多くは第一胃（ルーメン）に由来し主に暖気として排出され、一部は下部消化管において産生されるものの血液中に吸収され呼吸として放出されることから、そのほとんどは経口的に放出されるものとさ

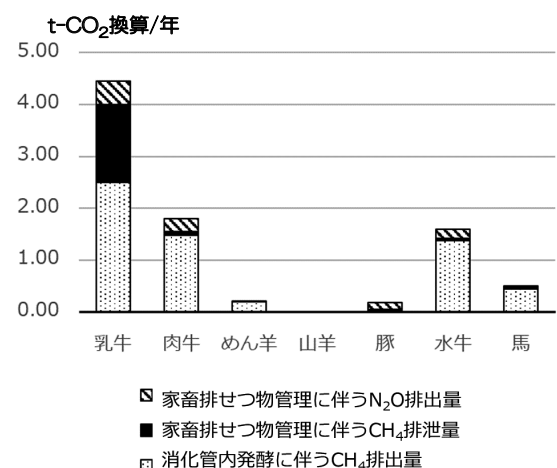


図2 我が国で飼養される家畜1頭1年当たりの温室効果ガス排出量（kg-CO₂換算/年）
国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス（GIO）編日本国温室効果ガスインベントリ報告書2022年⁷⁾に基づき作成

れている⁹⁾。飼料由来の炭水化物は乳牛のルーメン内に生息する微生物により短鎖脂肪酸に変換され、乳牛はこれをエネルギー源として利用している。この過程において、蓄積すると微生物の発育に悪影響を及ぼす水素が発生する（図3）が、共生するメタン生成古細菌等がこれを利用し、メタンとして処理している。換言すると、メタン産生は粗飼料等のヒトが利用できない資源を良質のタンパク質資源に変換する際に生じる副産物と捉えることができる。したがって、その抑制策を検討する際には、単純にその発生を抑制するのではなく、ヒトと競合しない飼料資源を有効に活用できる反芻動物としての特性を損なわない形を目指す必要がある。「角を矯めて牛を殺す」といったことはあってはならない。

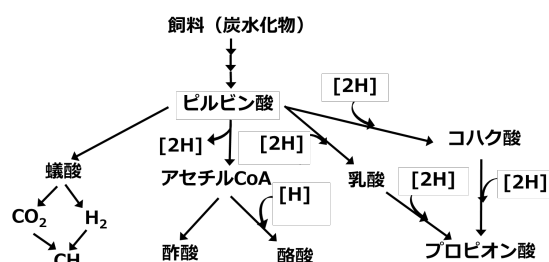


図3 第一胃内における炭水化物代謝と水素の出納
注：[H]は代謝性水素、矢印はその出納を示す

2) メタン産生量の測定方法

乳牛由来のメタンを実測する手法としては、家畜栄養学分野の伝統的なエネルギー代謝研究手法である開放型呼吸試験装置（図4）¹⁰⁻¹²⁾を用いた方法が最も精度が高い方法とされている。しかし、この方法は施設の建設・維持に高額な経費が掛ることから、より簡易なフード法が広く用いられている^{13,14)}。また、放牧牛を対象とした方法として、六フッ化硫黄（SF₆）をインデックスガスとして使用するSF₆法¹⁵⁾がある。

しかし、これらの方法は研究機関において使用することは可能であるが、農場等の実証現場での測定に使用することは困難であることから、より簡便な手法として、移動式の給餌システムとガス分析システムを組み合わせたGreenfeed法、部分ガスサンプルの採取に基づくSniffer法や携帯型レーザー測定

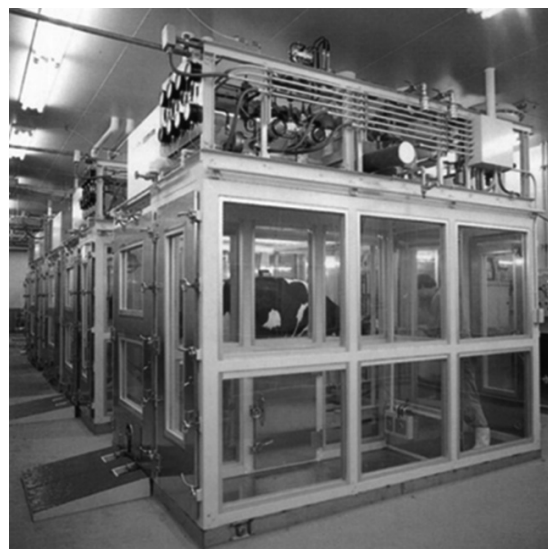


図4 開放型呼吸試験チャンバー
（農研機構畜産研究部門（つくば））

装置を用いたLaser Methane Detector法などの開発研究が進められている¹⁶⁾。特に、Sniffer法については、搾乳ロボットシステムを用いて、飼槽周辺から採取したガス成分（メタンとCO₂）の分析を通じてメタン産生量を推定できることから、我が国でもその活用が試みられている¹⁷⁻¹⁹⁾。

また、メタン抑制資材の開発にはスクリーニング手法として*in vitro*試験法も活用されており、バッチ法、連続法等、目的に応じて利用されている²⁰⁾。

3) メタン産生量の推定法

メタン排出量の削減を図るためには、抑制技術の開発と同時にその抑制効果を確認することができるモニタリング手法を開発することが求められる。そのため、国家レベルあるいは農場レベルでのモニタリングを目指して、メタン排出量の概略を把握するための推定式の開発が進められている。国連気候変動枠組条約締約国は定期的に各国の排出量を報告することが義務づけられているが、その手法は気候変動に関する政府間パネル（IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change）によって標準化されており²¹⁾、我が国もそれに準拠しつつ、柴田らの式（図5）²²⁾を活用して算出している。ただし、柴田らの式は当時の飼養試験データベースを用いた多変量解析により開発されたものであり、提案されて

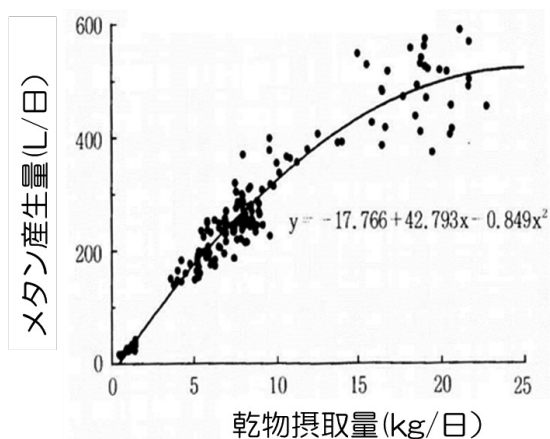


図5 乾物摂取量とメタン産生量の関係
Shibata et al., 1993²²⁾

すでに30年近くを経過していることから、最新のデータを用いた、メタン産生量の多い乳牛に焦点を当てた新たな推定式の作成が望まれる。なお、肉用牛については、Uemotoら²³⁾が、我が国の長期の肥育期間に対応できる式を提案している。

推定式の精度を高めるためには、給与飼料成分に関する情報やルーメン発酵に関する情報を取り込むことが有効であるが、モニタリングを目的とした場合には、一方で、汎用性、普及性に係る課題も同時に解決することが求められる。飼料成分については近赤外分析等の迅速非破壊計測手法の普及や、ルーメン液性状をモニタリングするIoT機器の開発²⁴⁾が進みつつあることから、これらを活用したモニタリング技術の実用化が期待される。

3. 乳牛からのメタンガス抑制技術

ルーメンにおけるメタン産生の機序は、微生物発酵にともなって発生した代謝性水素の処理という側面があること²⁵⁾から、その抑制技術は、①水素の生成量を抑制する発酵パターンに誘導する、②生成した水素イオンをメタン産生以外の系に振り向ける等が考えられる。そして、生産性との調和を前提とした抑制技術を開発する場合、産生量の単なる抑制ではなく、消化性や採食性を阻害することのない技術を開発することが重要である。そのため、乾物摂取量当たり、あるいは生産物当たりでの抑制効果を意識して多くの開発研究が行われている²⁶⁻²⁹⁾。そ

のような観点から、現在、開発されている抑制技術を、1) 栄養・飼料管理、2) 抑制資材、3) 育種改良、4) 飼養管理に区分して紹介する。

1) 栄養・飼料管理

粗飼料、濃厚飼料比や粗飼料の品質は、ルーメン内発酵パターンに影響を及ぼすことから、メタン産生量の抑制技術として活用することが可能である。イネ科とマメ科では繊維含量や消化速度の違いなど飼料の消化特性の違いがあるので、それらがメタン産生量に影響する可能性がある。さらに、両者の窒素施肥条件が大きく異なることから、栽培時の N_2O 発生量も含めた温室効果ガスの発生量に影響することが考えられる。また、乳牛の消化特性に対する濃厚飼料多給の影響は、濃厚飼料原料やその加工方法の違いによっても影響されることから、これらの要因はメタン産生量にも影響することが容易に推測できる。一方、濃厚飼料を多給することはメタン産生の抑制には有効であっても、アシドーシスのリスクや飼料自給率に係る我が国の課題を考慮すると、慎重な対応が求められる。その点、良質な自給飼料生産を推進、活用する技術開発は、家畜の健全性を高めつつメタンの抑制を図ることを可能とする技術と言える。

脂質はメタン生成古細菌やプロトゾアに対する阻害効果があることから、脂肪質飼料の給与割合を高めることはメタン産生の抑制に有効である³⁰⁾。また、脂肪の適量の活用は乳牛生体のエネルギー利用効率を高めるので、メタン転換効率(Methane Conversion Factor, メタンエネルギー/総エネルギー)の抑制につながる。しかし、給与割合を高めすぎると消化性の低下等を招くので、注意が必要である。また、含有する脂肪酸の種類によってメタンの抑制効果が異なり、飽和脂肪酸よりも不飽和脂肪酸で、長鎖脂肪酸よりも中鎖脂肪酸で、効果が大きいことが報告されている³¹⁾。最近、泌乳牛用飼料において使用量が増加している脂肪酸カルシウムは、ルーメン微生物に対する阻害作用が脂質よりも軽減されることから生産性に対する影響が緩和され、不

飽和結合を有する脂肪酸であればその一部が生物学的水素添加を受けることで、メタン転換効率の抑制につながることも明らかにされている³²⁾。

2) 抑制資材

ルーメンにおけるメタン産生を抑制する各種資材の開発が進められており、① ルーメン微生物相を制御する抗菌性物質や植物の二次代謝産物、② 微生物のメタン合成系を抑制する化学物質、③ 生菌剤やワクチンによる微生物相の改変等の取り組みが行われている。

抗生物質の一つであるモネンシンに関して多くの研究があり、グラム陽性菌に対する選択的な抑制効果等によりルーメン微生物相に影響を及ぼし、プロピオン酸優先型の発酵パターンを導くことと飼料効率の改善効果によりメタン産生量を5~10%程度低減できるとされている³³⁾。しかし、抗生物質の利用に伴う薬剤耐性菌の問題³⁴⁾を考えるとメタン抑制を目的とした抗生物質の使用の妥当性については議論があるものと思われる。抗菌活性のあるアナカルド酸を含むカシューナッツ殻液もプロピオン酸優先型の発酵パターンを誘導し、メタン産生量を1~2割程度抑制することが報告されており³⁵⁾、今後は、経済性と抑制効果を踏まえた実用的な投与水準や長期連用における効果の持続性等について検討することが望まれる。メタン抑制効果が期待されている植物の二次代謝産物として、タンニン等のポリフェノール類、抗菌作用を有する精油（エッセンシャルオイル）や界面活性効果によりプロトゾアに影響を及ぼすサポニンなどが報告されている³⁶⁾。これらはその抑制効果が一定しないなどの課題はあるものの、欧米では抑制資材としての実用化が進みつつある。

また、硝酸塩の投与もルーメン内の新たな水素処理系の導入効果として明確なメタン抑制効果が認められる³⁷⁾。ただし、過剰な投与は硝酸塩中毒を引き起こすリスクがあるので、それを避ける工夫が必要であろう。

メタン生成古細菌のメタン合成過程を阻害する物

質としてプロモクロロメタンなどの臭素化合物が注目されていた³⁸⁾が、オゾン層破壊効果があることから、その資材化については実用に至らなかった。近年、注目されている紅藻類のカギケノリは臭素を含むハロゲン化合物の含有量が多く、メタン抑制効果が確認されている³⁹⁾。また、3-Nitrooxypropanol (3-NOP) もメタン生成古細菌のメタン合成経路の最終段階を触媒するメチル補酵素M還元酵素の活性を阻害することで、一般的な投与レベルで30%程度の抑制効果が認められるとした報告がある^{40,41)}。

なお、我が国における飼料添加物の利用は「飼料の安全性の確保及び品質の改善に関する法律（飼料安全法）」で規制されており、その添加効果と安全性が評価されたのちに利用が可能となる。牛の暖気中の温室効果ガス削減を目的とする飼料添加物についても評価基準が定められている。

メタン抑制技術の開発が進む中で、低メタン産生牛の存在が明らかにされており、そのルーメン内に存在する特徴的な微生物相を解明し、制御することで、メタン産生量の少ないルーメン環境を実現することが期待される。真貝ら⁴²⁾は低メタン産生牛に特徴的な微生物相を探索し、新規微生物であり、既存の細菌よりもプロピオン酸産生能に優れる*Prevotella*属細菌の特徴的な存在を見出し、その機能解明を進めている。また、放牧家畜における抑制手段として、メタン生成古細菌を抑制するワクチンを用いて、ルーメン微生物相を制御する研究が進められている⁴³⁾。

3) 育種改良

近年、低メタン産生牛の存在に対して遺伝的な差異が存在することが明らかにされ、育種改良によって低メタン産生牛を作出する試みが海外で進められており⁴⁴⁻⁴⁵⁾、我が国でも搾乳ロボットシステムを活用したSniffer法によって多数の測定値を収集し、育種改良に活かす試みが始まっている^{17-19,46)}。我が国の泌乳牛による呼吸試験成績では、乳牛のメタン転換効率において変動係数として15%程度の個体

差が存在することが示されている¹⁷⁾。そして、メタン産生関連形質の遺伝率については0.2前後の値が報告されており^{47,48)}、十分育種改良が可能な水準と判断できる。

エネルギー利用効率からメタン産生量抑制の効果を評価すると、メタン転換効率を改善することはエネルギーロスを抑えることで飼料効率を改善する可能性があるものの、飼料効率はメタン産生のほかに飼料摂取水準や消化率などの影響を大きく受けることから、メタン転換効率の改善が必ずしもエネルギー利用効率の改善につながらない可能性も考えられる⁴⁹⁾。そのため、今後、育種改良によるメタン産生量の低減を図るためには、生産性との遺伝相関等を確認し、育種改良方策の策定や育種改良に使用できる実用的な指標の検索等を進めることになる。なお、改良指標としては、メタン産生量、乾物摂取量(DMI)当たりのメタン産生量、乳量当たりのメタン排出量(Methane intensity, メタン排出原単位)、メタン産生量を体重、日増体量、乳量などから推定したメタン産生量との差として取り扱う余剰メタン産生量等が提案されている。

実際の育種改良を進めるためには表型値に関する多頭数の測定データが必要とされるが、メタンの実

測データの収集は容易ではないことから、一塩基多型(SNP)の活用による育種改良の可能性についても検討がなされている⁵⁰⁾。また、メタン産生量の間接指標による予測手法として乳脂肪酸組成に注目した報告が多くあり⁵¹⁾、我が国でも牛群検定事業への乳脂肪酸分析の導入が進みつつあることから、その検討に着手している。

4) 飼養管理

乳量当たりのメタン排出量を指標として抑制技術を検討した場合、分母である乳量の増加を図ることはメタンの抑制対策として有効な技術と評価できる。図6は育成期の日増体量の違いが育成期間中(生後3カ月齢～分娩3か月前まで)のメタンの総産生量に及ぼす影響を試算したものであり、適正な増体速度を維持することで、1日当たりのメタン産生量は増加するものの、この期間の排出総量を抑制できることが示されている。また、図7には4%乳脂補正乳(FCM)生産量の増加に対して、FCM当たりのメタン産生量は低下することが示されており⁵²⁾、環境負荷の少ない乳牛の飼養体系を構築することは、生産性と環境負荷低減を同時に実現できる技術であると評価することができる。実際、図7

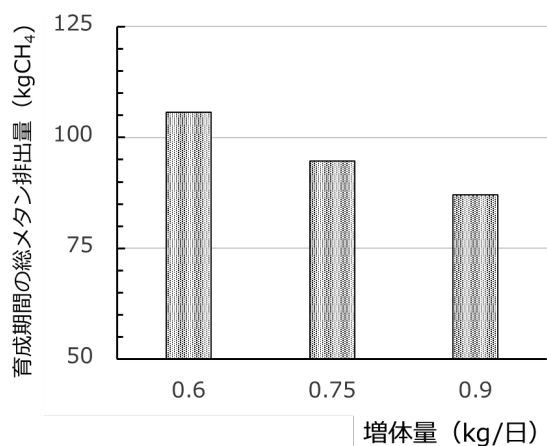


図6 増体量の違いが育成期間※の総メタン排出量に及ぼす影響について
 ※：分娩後3カ月から分娩前3カ月の期間を想定
 増体量0.6kg/日に比較して、0.75kg/日では10%、0.9kg/日では18%抑制されている。
 寺田ら(未発表)による試算値

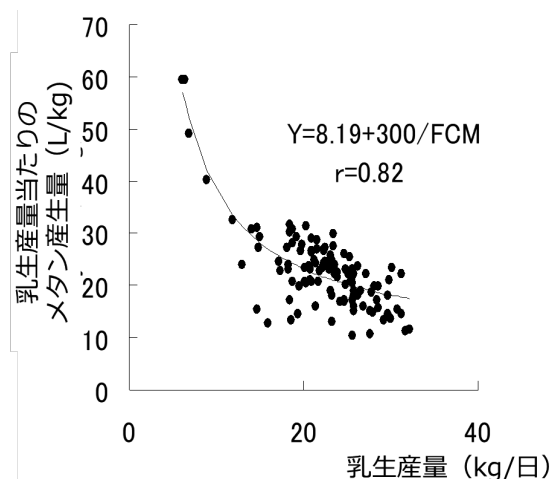


図7 乳生産量※当たりのメタン産生量
 ※4%乳脂補正乳量(FCM)
 Kurihara et al., 1997⁵²⁾

に示した栗原らの式⁵²⁾を用いて、我が国の酪農産業におけるメタン産生量の推移を試算すると、過去50年（1970年と2020年の値を比較）の間に、1頭当たりの乳生産量が2倍に増加している一方で、FCM当たりのメタン排出量は36%抑制されている。その結果、総生乳生産量は6割増加しているにもかかわらず、総メタン排出量はほとんど増加していない。同様の試算は各国で多く行われており、Capperら（2009）⁵³⁾は、米国では2007年において1944年比で37%低減していると報告している。

家畜生産における繁殖性や健全性を高めることは、生乳生産に必要な牛の頭数の削減を可能とすることからメタン排出量の削減につながる。疾病対策の徹底は生産性の損失を防ぐためにも重要であり、同時に環境負荷低減にも貢献するものとして考えられるが、温室効果ガス削減効果に関する評価手法が確立されていなかったことからその定量的な評価を行うことが難しかった。ライフサイクルアセスメント（LCA）手法による繁殖性や健全性の環境負荷低減効果の評価⁵⁴⁾は、それらの有効性を明確にするものと期待される。

4. 産業、経営体からのメタン排出量の低減

前項で述べた個別抑制技術は、乳牛個体を対象としたものであるが、これら単一の技術だけでは地球温暖化を防止するために必要な大幅な削減の達成は困難である²⁹⁾。そのため、複数の技術を同時に導入することが考えられるが、その際、それらの効果に相加的に働くのか、相乗的に働くのかといった点に関する知見は多くない。また、飼料中に配合した添加物が糞尿処理過程での温室効果ガス発生量に影響するか否かについても、確認することが必要であろう。さらに、抑制技術が、発生する温室効果ガス間、あるいは「飼料生産—家畜管理—糞尿処理」の一連の生産システム構成要素間のトレードオフの発生に繋がる可能性があることを考えると、酪農産業からの温室効果ガス発生抑制に取り組む場合には、農場レベル（経営体レベル）あるいはサプライチェーンからのメタン排出量抑制方策について議論

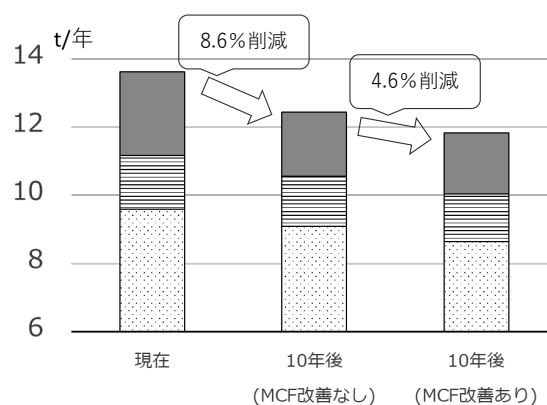


図8 酪農経営における家畜消化管内発酵由来メタン削減可能量の試算

同一生乳生産量を前提に一

仮定した条件（※乳牛飼養頭数の1/10000規模の経営体を想定）

- ①乳量 現在年間8636kg → 10年後9222kg
1頭当たり搾乳量の増加による搾乳牛頭数減少率0.936（FCM生産量は同一と仮定）
・育成牛、乾乳牛も同様に減少
- ②育成牛のDGの改善率1.056（25ヵ月齢が24ヵ月齢に短縮）
- ③初産分娩月齢改善に伴う育成牛減少率0.96（25ヵ月齢が24ヵ月齢に短縮）
- ④平均除籍月齢の改善効果（育成牛）0.86
- ⑤MCFの改善率 遺伝率0.2、1世代あたりの更新年数7.5年、1世代あたり改良量を3.8%と仮定

MCF；メタン転換効率

FCM；4%脂肪補正乳

DG；日増体量

する必要がある。

図8は、現在、提案されているメタン抑制策とその効果を試算したものである。試算にあたって用いた基礎数値は、畜産統計調査⁵⁵⁾、家畜改良増殖目標（令和2年4月）⁵⁶⁾、および乳用牛群能力検定成績⁵⁷⁾によった。これらに従って、10年後、生産性が向上した場合に同一生乳出荷量である経営体を想定してメタンの抑制効果を試算すると、育種改良等による生産性の向上によって9%削減できる。さらにメタン転換効率に関する育種改良による改善効果を10年間で5%程度と見込み、同時に飼料添加物等の活用による抑制効果を期待することで、30%近い削減の可能性が見えてくる。

このように家畜生産性の改善がメタン排出量の低減策として有効であることは明らかであるが、濃厚飼料多給によってこれを実現する場合、食料資源のヒトとの競合や濃厚飼料の多給による疾病の多発などによる健全性の阻害、飼料自給率の低下など多くの問題が生じる。良質自給飼料の生産・利用を推進することは、それらの解決策として位置付けられる⁵⁸⁾。また、草地の有する炭素貯留能力を活用することは、ネットゼロを目指すうえでも欠かせない技術開発であるといえる⁵⁹⁾。

2050年ネットゼロ目標の達成に対する貢献を図るためには、今後も多くのメタン抑制資材の開発に取り組む必要があることに加えて、より精密なルーメン微生物相制御技術の開発を踏まえた精密飼養管理技術の開発、低メタン産生牛育種の加速等が求められる。また、対策技術の可及的速やかな普及・定着を図るためには、技術のコストや消費者による受容性等を踏まえた検討が必要となる。生産者に対しては技術導入のインセンティブとなるような工夫が必要であり、特に、メタン抑制資材の普及に際しては導入コストが課題となる。そのため、カーボンプレジットや排出権取引、炭素税の動向等⁶⁰⁾における牛消化管内発酵由来メタンの取扱いに関して、注目する必要がある。また、こういった動きに対応するためには、サプライチェーンあるいは経営体からの温室効果ガス排出量の提示（見える化）が必要となるが、それらは生産者の活動の確認となるだけで

なく、消費者に対して生産者の取り組みを伝え、生産物の安全・安心を担保する仕組みとしても有用であろう。

さらに、酪農産業からのメタン排出量の抑制を進めていくためには、サプライチェーンである飼料生産から商品販売までの流れの中でSDGsに貢献できる牛乳生産体系を構築していくことが求められるものと思われる（図9）。「飼料生産—家畜管理—糞尿処理」からなる経営体のサイクルの中で、メタンと同時にN₂OやCO₂も含めた温室効果ガスの排出総量を抑制するだけでなく、飼料の輸入や未利用資源利用、耕畜連携などによる削減努力や、生乳の加工・貯蔵・輸送や廃棄物処理に伴って発生する温室効果ガスの発生抑制などを総合的に評価し、優先度を付して対策に取り組んでいくことが必要であろう。

おわりに

本稿では、家畜消化管内発酵に由来するメタンに焦点を当てて考察してきたが、SDGsの達成に貢献できる環境と調和した酪農産業の持続的展開を考えるためには、温暖化問題だけでなく、生物多様性や化学物質使用低減等、地球の限界を考慮にいたした全体システムを考えていくことが必要であろう。酪農産業は土地利用型産業であり、循環資源利用に有利性を持つその特性を最大限に生かす形で、SDGs活動を目指した多様な取り組みを進めることができる。さらに、その生産物である、牛乳・乳製品は栄

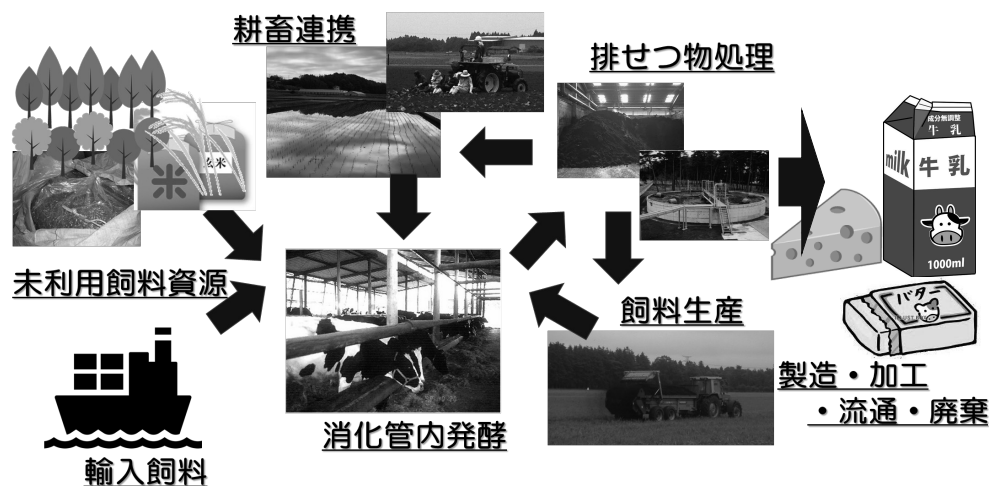


図9 サプライチェーンにおける温室効果ガスの発生要因

養学的に優れた食品であり、飢餓の撲滅、ヒトの健康増進に貢献するものであることに加えて、酪農産業は地域産業の振興を図る基幹産業と位置づけられることから、今後も、生乳生産性の向上を念頭に置きつつ、環境負荷の削減努力を大きく重ねていくことが酪農関係者に求められるものと考ええる。

謝辞

本総説で紹介したメタン低減型育種に関する我が国の研究成果は、農林水産省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」および「畜産からのGHG排出削減のための技術開発 (JPJ011299)」において実施されたものである。

引用文献

- 1) United Nations. Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals>
- 2) 中村丁次 監修. 栄養とSDGsと牛乳・乳製品. Jミルク. 2021. <https://www.j-milk.jp/report/study/h4ogb4000006tec.html#hdg8>
- 3) Rockström J., Steffen W., Noone K., et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14, 32. 2009. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
- 4) Willett W., Rockström J., Loken B., et al. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*, 393, 447–492. 2019. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- 5) 外務省. パリ協定. <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000196735.pdf>
- 6) IPCC. Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 221–228. 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf
- 7) 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 編. 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2022 年. 2022. https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm10000017uzyw-att/NIR-JPN-2022-v3.0_J_GIOweb.pdf
- 8) IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 923–1054. 2021. doi:10.1017/9781009157896.
- 9) Murray, R.M., Bryant, A.M., Leng, R.A. Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep. *Br. J. Nutr.* 36, 1–14. 1976.
- 10) 石橋晃監修. 動物栄養試験法. 198–218. 養賢堂. 2001.
- 11) Hammond, K. J., Crompton, L. A., Bannink, A., et al. Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 219, 13–30. 2016.
- 12) The Global Research Alliance’s Livestock Research Group. Livestock research group technical manual: respiration chamber designs. 2018. <https://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2018/02/LRG-Manual-Facility-BestPract-Sept-2018.pdf>
- 13) Suzuki, T., McCrabb, G. J., Nishida, T., et al. Construction and operation of ventilated hood type respiration calorimeters for in vivo measurement of methane production and energy partition in ruminants. In Makkar, H.P., Vercoe, P.E. (eds) *Measuring methane production from ruminants*. Springer. 125–135. 2007.
- 14) Place, S. E., Pan, Y., Zhao, Y., et al. Construction and operation of a ventilated hood system for measuring greenhouse gas and volatile organic compound emissions from cattle. *Animal*, 1, 433–446. 2011.
- 15) Berndt, A., Boland, T. M., Deighton, M. H., et al.

- Guidelines for use of sulphur hexafluoride (SF6) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants. Lambert, M. G. (ed). New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre. 2014. https://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2018/02/SF6-Tracer-Technique-Guidelines_April-2014.pdf
- 16) Jonker, A. Waghorn, G. C. Eds. Guideline for estimating methane emissions from individual ruminants using: GreenFeed, 'sniffers', handheld laser detector and portable accumulation chambers. New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre. 2020.
 - 17) Suzuki, T., Kamiya, Y., Oikawa, K., et al. Prediction of enteric methane emissions from lactating cows using methane to carbon dioxide ratio in the breath. *Animal Science Journal*, 92, e13637. 2021. <https://doi.org/10.1111/asj.13637>
 - 18) Oikawa, K., Kamiya, Y., Terada, et al. The influence of breath concentration in the gas sample on the accuracy of methane to carbon dioxide ratio using the sniffer method in dairy cows. *Animal Science Journal*, 93, e13745. 2022. <https://doi.org/10.1111/asj.13745>
 - 19) 農業・食品産業技術総合研究機構. ウシルーメン発酵由来メタン排出量推定マニュアル. 2022. https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/152088.html
 - 20) Bhatta, R., Enishi, O., Takusari, N. et al. Diet effects on methane production by goats and a comparison between measurement methodologies. *J. Agric. Sci.*, 146, 705–715. 2008.
 - 21) IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Buendia C., Tanabe E., Kranjc K., et al. (eds). 2019. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
 - 22) Shibata M, Terada F, Kurihara M, et al. Estimation of methane production in ruminants. *Animal Science and Technology* 64, 790–796. 1993.
 - 23) Uemoto Y, Ogawa S, Satoh M, et al. Development of prediction equation for methane-related traits in beef cattle under high concentrate diets. *Anim Sci J.* 91:e13341. 2020. <https://doi.org/10.1111/asj.13341>
 - 24) 宗田吉広・澤田浩・岡田浩尚 他. 牛のルーメンセンサとルーメン内細菌叢に関する最近の話題と研究. *日獣会誌*, 74, 121–126. 2021.
 - 25) Janssen, P. H. Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. *Anim. Feed Sci. Technol.* 160:1–22. 2010.
 - 26) Shibata M, and Terada F. Factors affecting methane production and mitigation in ruminants. *Anim. Sci. J.*, 81, 2–10. 2010.
 - 27) Hristov AN, Oh J, Firkins JL, et al. Special topics-Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *J. Anim. Sci.*, 91, 5045–5069. 2013.
 - 28) Knapp JR, Laur GL, Vadas PA, et al. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *J. Dairy Sci.* 97:3231–3261. 2014.
 - 29) Arndt C., Hristovb A.N., Pricec W. J., et al. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 °C target by 2030 but not 2050. *PNAS*, 119, e2111294119. 2022. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119>
 - 30) Patra A. K. The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: A meta-analysis. *Livestock Science*, 155, 244–254. 2015.
 - 31) Newbold, C. J., Fuente, G. D. L., Belanche, A. et

- al. The role of ciliate protozoa in the rumen. *Front. Microbiol.*, 6, 1313. 2015. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01313>
- 32) Nishida T., Kurihara M., Pumomoadi A., et al. Methane suppression by calcium soaps of stearic, oleic and linoleic acid mixtures in cattle. In K.J. McCracken, E.F. Unsworth and A.R.G. Wylie. (Eds.) *Energy Metabolism of Farm Animals. Proceedings of the 14th Symposium on Energy Metabolism.* 379–382. 1998.
- 33) Appuhamy, J. A. D. R. N., Strathe A. B., Jayasundara S., et al. Antimethanogenic effects of monensin in dairy and beef cattle: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 96:5161–5173. 2013.
- 34) 農林水産省. 動物に使用する抗菌性物質について. <https://www.maff.go.jp/j/syouan/tikusui/yakuzi/torikumi.html>
- 35) 真貝拓三, 永西修, 三森真琴ら. カシューナッツ殻液を利用した乳用牛からのメタン低減技術. *栄養生理研究会報*, 58, 45–51. 2014.
- 36) Patra, A. K. Meta-analyses of effects of phytochemicals on digestibility and rumen fermentation characteristics associated with methanogenesis. *J. Sci. Food Agric.* 90, 2700–2708. 2010.
- 37) Lee C, Beauchemin KA. A review of feeding supplementary nitrate to ruminant animals: nitrate toxicity, methane emissions, and production performance. *Can. J. Anim. Sci.*, 94: 557–570. 2014.
- 38) Denman S. E., Tomkins N. W., McSweeney C. S. Quantitation and diversity analysis of ruminal methanogenic populations in response to the antimethanogenic compound bromochloromethane. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 62, 313–322. 2007.
- 39) Glasson C. R.K., Kinley R. D., de Nys R., et al. Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed *Asparagopsis* in feed for the reduction of methane production from ruminants. *Algal Research*, 64, 102673. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102673>
- 40) Yu G., Beauchemin K.A., Dong R. A. Review of 3-Nitrooxypropanol for Enteric Methane Mitigation from Ruminant. *Livestock. Animals*, 11, 3540. 2021. <https://doi.org/10.3390/ani11123540>
- 41) Kebreab E., Bannink A., Pressman E. M., et al. A meta-analysis of effects of 3-nitrooxypropanol on methane production, yield, and intensity in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 106, 927–936. 2023.
- 42) Shinkai T., Ikeyama N., Kumagai M., et al. *Prevotella lacticifex* sp. nov., isolated from the rumen of cows. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 72, 005278. 2022. DOI 10.1099/ijsem.0.005278
- 43) Wedlock D. N., Janssen P. H., Leahy S. C., et al. Progress in the development of vaccines against rumen methanogens. *Animal*, 7, 244–252. 2013.
- 44) de Haas, Y., Pszczola M., Soyeurt H., et al. Invited review: Phenotypes to genetically reduce greenhouse gas emissions in dairying. *J. Dairy Sci.* 100:855–870. 2017.
- 45) Lassen J., Difford G. F. Review: Genetic and genomic selection as a methane mitigation strategy in dairy cattle. *Animal*, 14, S3, s473–s483. 2020. doi:10.1017/S1751731120001561
- 46) 寺田文典. 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. 2020.
- 47) Manzanilla-Pech C. I. V., Løvendahl P., Gordo D. M., et al. Breeding for reduced methane emission and feed-efficient Holstein cows: An international response. *J. Dairy Sci.*, 104, 8983–9001. 2021.
- 48) Richardson C. M., Amer P. R., Quinton C., et al. Reducing greenhouse gas emissions through genetic selection in the Australian dairy industry. *J. Dairy Sci.*, 105, 4272–4288. 2022.
- 49) Arndt, C., Powell J. M., Aguerre M. J., et al. Feed

- conversion efficiency in dairy cows: Repeatability, variation in digestion and metabolism of energy and nitrogen, and ruminal methanogens. *J. Dairy Sci.* 98:3938–3950. 2015.
- 50) Pszczola M, Strabel T, Mucha S, et al. Genome-wide association identifies methane production level relation to genetic control of digestive tract development in dairy cows. *Sci. Rep.* 8:15164 | DOI:10.1038/s41598-018-33327-9. 2018
- 51) van Lingen HJ, Crompton LA, Hendriks WH, et al. Meta-analysis of relationships between enteric methane yield and milk fatty acid profile in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 97 :7115–7132. 2014.
- 52) Kurihara, M., Shibata M., Nishida T., et al. Methane production and its dietary manipulation in ruminants. In Onodera R. et al. (Eds). *Rumen Microbes and Digestive Physiology in Ruminants*. 199–208. Japan Scientific Societies Press, Tokyo. 1997.
- 53) Capper J. L., Cady R. A., Bauman D. E. The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *J. Anim. Sci.* 87:2160–2167. 2009.
- 54) Özkan, Ş., Teillard, F., Lindsay, B., et al. 2022. The role of animal health in national climate commitments. Rome, FAO. 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0431en>
- 55) 農林水産省. 畜産統計調査. <https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tikusan/>
- 56) 農林水産省. 家畜改良増殖目標. https://www.maff.go.jp/j/press/seisan/c_kikaku/attach/pdf/200331-2.pdf
- 57) 家畜改良事業団. 令和2年度乳用牛群能力検定成績のまとめ. <http://liaj.lin.gr.jp/japanese/newmilkset.html>
- 58) 築城幹典・齋藤弘太郎・前田武己. 酪農における環境影響の経年的変化のライフサイクルアセスメント. *システム農学*, 25, 185–194. 2009.
- 59) 森昭憲・宮田明. 日本の採草地の温室効果ガス収支—物質循環に立脚した草地管理の重要性—. *日草誌*, 62, 29–32. 2016.
- 60) 環境省. カーボンプライシング. <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cp/index.html>