

表 13 薬用植物の葉からのインビトロ総ガスおよびメタン生成 (ml/200 mg DM) に対する PEG-6000 添加の効果 (PEG-6000 を添加するとタンニンの効果が減衰する) ³⁰⁵

Scientific name	Total [#] gas (ml/200 mg DM)*		TBA [‡]	Methane (ml/200 mg DM) [‡]	
	-PEG	+PEG		-PEG	+PEG
<i>Lagerstroemia speciosa</i>	10.4 ⁱ	20.8 ^f	100 ^{ab}	1.44 ^{ghi}	2.96 ^{hi}
<i>Christella parasitica</i> (L.) Lev.	33.3 ^a	34.9 ^b	5.00 ^f	5.84 ^a	6.34 ^d
<i>Leucas linifolia</i>	28.2 ^b	30.5 ^d	8.40 ^f	5.40 ^{ab}	6.68 ^{cd}
<i>Ficus hispida</i>	15.9 ^{gh}	29.4 ^d	84.8 ^{bc}	1.78 ^{ghi}	4.50 ^{ef}
<i>Antidesma ghaesembilla</i>	14.0 ^h	15.3 ^h	9.60 ^f	1.92 ^{gh}	2.28 ^{hi}
<i>Elaeocarpus floribundus</i>	17.6 ^{efg}	20.6 ^f	18.0 ^{ef}	3.06 ^{ef}	4.70 ^{ef}
<i>Syzygium cumini</i>	16.1 ^g	20.8 ^f	30.4 ^{ef}	1.42 ^{ghi}	4.10 ^{fg}
<i>Baccaurea ramiflora</i>	18.6 ^{def}	30.9 ^d	66.8 ^{cd}	4.46 ^{cd}	7.54 ^{bc}
<i>Litchi chinensis</i>	10.0 ⁱ	16.1 ^g	61.6 ^{cd}	1.04 ⁱ	2.12 ⁱ
<i>Mallotus ferrugineus</i>	16.0 ^g	18.2 ^g	13.8 ^{ef}	1.80 ^{ghi}	2.72 ^{hi}
<i>Mesua ferrea</i>	19.3 ^{de}	34.9 ^b	80.6 ^{bc}	3.12 ^e	8.00 ^b
<i>Melastoma malabathricum</i>	10.8 ⁱ	24.2 ^e	128 ^a	1.12 ^{hi}	3.20 ^{gh}
<i>Flacourtia jangomos</i>	24.7 ^c	30.4 ^d	23.2 ^{ef}	4.88 ^{bcd}	7.04 ^{bcd}
<i>Citrus grandis</i> (L.) osb.	27.8 ^b	36.9 ^a	32.6 ^{ef}	5.52 ^{ab}	10.8 ^a
<i>Machilus bombycina</i>	16.7 ^{fg}	22.0 ^f	32.4 ^{ef}	2.12 ^g	5.14 ^{ef}
<i>Achras zapota</i>	20.6 ^d	37.7 ^a	83.0 ^{bc}	2.24 ^{fg}	8.08 ^b
<i>Aquilaria malaccensis</i>	29.4 ^b	34.2 ^c	16.4 ^{ef}	5.24 ^{abc}	6.52 ^{cd}
<i>Terminalia chebula</i>	10.4 ⁱ	14.4 ^h	38.6 ^{de}	1.82 ^{ghi}	2.96 ^{hi}
<i>Alstonia scholaris</i>	24.1 ^c	29.4 ^d	22.0 ^{ef}	4.24 ^d	6.56 ^{cd}
<i>Michelia champaca</i>	18.3 ^{ef}	20.8 ^f	13.6 ^{ef}	4.24 ^d	5.18 ^a
SEM	0.67	0.75	3.67	0.17	0.23
p value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

PEG=Polyethylene glycol, TBA=Tannin bioassay, SEM=Standard error of mean.

*各値は 5 回の観測の平均である。列に異なる上付き文字を付けた平均値は有意である (p<0.05)。
[#]総ガス = (24 時間でのプランジャー位置 - 0 時間でのプランジャー位置) ÷ x ml-空の注射器で生成されたガスの平均 = 総ガス/サンプル 200 mg、これはサンプルの DM 含有量に変換されるため、総ガス/200 mg DM)。DM=乾物

2. 6. 3. インドネシア

インドネシアは温室効果ガス（GHG）の排出が世界 6 位と多く、経済成長に伴う旺盛なエネルギー需要に対応しつつ、GHG 排出削減の対策も進めていかなければならないという新興国特有の課題をかかえている。国家決定公約（NDC：Nationally Determined Commitment）の下で、インドネシア政府は 2030 年までに総排出量を、特段の対策がないケース（BAU：Business as Usual）と比較して、国際支援がないケース、国際支援のあるケースでそれぞれ 29.1%減、41.3%減を削減目標としている。農業、林業、土地利用（AFOLU）部門では、季節的な森林火災および急速な森林破壊と森林劣化に対する対策に加え、人口密度の高い国として、農業生産を維持することによって食料の持続可能性を確保する必要がある³⁰⁶。農業分野においては、反芻動物からの腸内 CH₄ 放出を削減するために、飼料に天然物を添加したり、プロバイオティクスを使用したりする試みが行われている。また、水管理とイネ品種を組み合わせることで GHG 排出を削減するためのイネの育種も行われている。

「農業における応用研究と革新システム」（ARISA：Applied Research and Innovation Systems in Agriculture）は、インドネシアのパートナーと協力して CSIRO によって実施されている。このプログラムは、公的研究機関とアグリビジネス間の協力を強化して、小規模農家に適した技術とビジネス ソリューションを育成し、提供することを目指している。プログラムの地理的な焦点はインドネシア東部である。このプロジェクトは、オーストラリア貿易外務省（DFAT）によって資金提供されており、2018 年末までに、11,144 世帯の小規模農家の純収入を平均 117% 増加させた。

（1）メタン等の発生を抑える家畜飼料の開発

① 黒または緑茶葉の利用

タンニン、メタン生成細菌への種間 H₂ の移動を減少させ、その結果、メタン生成菌の増殖を抑えることにより、ルーメンの CH₄ 排出量を減少させる可能性があることが知られている。茶葉製品の生理活性成分がルーメンの機能や飼料の分解性に影響を与えることなく家畜の生産量を増やすことができれば、2017 年からインドネシアにも禁止が拡大された成長促進剤または抗生物質に代わる天然の代替品として活用される可能性がある。

パジャジャラン大学畜産学部の Diky Ramdani らは、黒（BTL：black tea leaves）または緑（GTL：green tea leaves）の茶葉とその使用済み（STL：spent tea leaves）茶葉を、ライグラス（RH）または稲わら（RS）ベースの飼料に添加し、*in vitro* にてルーメン分解性、発酵プロファイル、および CH₄ 収量に及ぼす影響を調べた。BTL または GTL の茶葉とその STL にはタンニン（主にカテキンとテアフラビン）などのポリ

306 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8506077/>

フェノールが豊富に含まれ、どちらのタイプの茶葉も、ルーメンの分解性を低下させることなく、CH₄ とアンモニア (NH₃) の生成を大幅に削減するのに効果的であった。茶葉とその STL 含有物は、酢酸とプロピオン酸の比率 (A : P) を大幅に増加させた。酢酸はルーメン内で酢酸生成菌により H₂ と CO₂ を使用して作られ、A : P 比の増加は、乳脂肪合成の増加と低脂肪乳症候群の減少につながる可能性がある。余剰または廃棄された茶葉製品は、ルーメン機能を最適化し、反芻動物への給餌による環境への影響を最小限に抑えるための持続可能な栄養源として使用できることを示した³⁰⁷。

②プロバイオティクス *Lactobacillus plantarum*

プロバイオティクスは反芻動物の生産に広く使用されているが、反芻動物のプロバイオティクスとしての *Lactobacillus plantarum* (*L. plantarum*) の可能性に関する情報はまだ限られている。代謝から乳酸を生成する *L. plantarum* の培養物を *in vitro* ルーメン発酵に加えると、プロピオン生産が増加し、酢酸生産と累積メタン生産が減少するという報告がある。インドネシア科学院の Wulansih D. Astuti らは、反芻動物のプロバイオティクスとして *L. plantarum* 菌株を選択し、*in vitro* ルーメン発酵と微生物集団に対する *L. plantarum* 添加の効果を評価した。まず、ルーメン牛から分離された *L. plantarum* の 14 株を選択するためにランダム化されたブロック デザインを使用して行われた。それらの中で、メタン/総ガスの生成が少ない (27.39%) *L. plantarum* U32 と、第一胃の乾物および有機物の消失が最も高かった (56.45 および 56.44%) U40 の 2 株が選択された (図 63)。

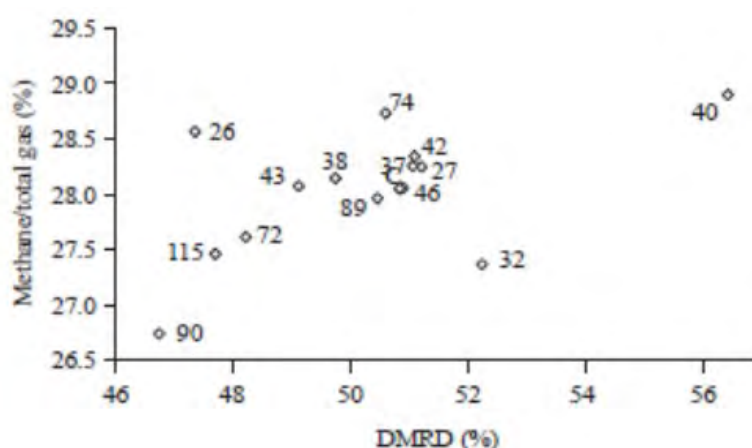


図 63 *L. plantarum* を添加した *in vitro* ルーメン発酵による DMRD (Dry matter rumen disappearance、%) とメタン/総ガス生成量(%) の相関³⁰⁸

307 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8833588/>

これら *L. plantarum* U32 および U40 をプロバイオティクスとして添加すると、VFA（揮発性脂肪酸）の総生産量に大きな影響はなかったが、VFA の組成が変化した。コントロール処理と比較して、酢酸は有意に減少し（ $p<0.05$ ）、プロピオン酸は有意に増加した（ $p<0.05$ ）。予測されるメタン生成は、計算式を使用して、酢酸、プロピオン酸、および酪酸の生成から算出された。プロピオン酸が増加すると、ルーメンでのメタン生成のための H_2 の供給が減少しメタン生成が減少するため、ルーメン発酵に有益な効果があった³⁰⁸。

③マメ科植物 leucanea

マタラム大学の Dahlanuddin らは、農場で栽培されたマメ科植物 leucanea（ロイカエナ）からの飼料に基づく家庭用肥育場生産システム（2～20 頭の牛）を導入することにより、インドネシア東部スンバワ島での牛肉生産の強化の可能性を評価した。このプロジェクトサイトは、農業とバリューチェーンのパフォーマンスを改善することにより、小規模農家の収入を増やすことを目的とした、「農業における応用研究とイノベーションシステム」（ARISA）の一部である。この研究では、システムダイナミクスアプローチを使用して、バリューチェーン全体をモデル化し、牛群のダイナミクス、需要のダイナミクス、および季節性を考慮した。調査結果は、2023 年までにプロジェクト地域の肉牛農家の年間収益性が最大 415% 向上することをシミュレートするうえで、生物物理学的証拠となった。農場の利益の増加は、ロイカエナ給餌システムの高い生産性とそれに伴う価格プレミアムに等しく依存することが示された。さらに重要なことは、2020 年までに牛群からの GHG 排出強度を 16% 削減できることとしたことである（表 14）³⁰⁹。

表 14 2020 年の腸内メタン生産に関する GHG 排出強度 (kgCO₂-eq kg CW-1)³⁰⁹

	Baseline	Scenario 2	Reduction
Tier 1^a	60.9	51.2	16%
Tier 2^b	45.2	38.2	16%

CW : carcass weight、Scenario 2 : ロイカエナベースの肥育場システムへの転換とマーケティングベースの価格改善を行ったシナリオ

- これらの結果は、アジアの牛に関連する IPCC Tier 1 排出係数に基づいており、これは 47 (kg CH₄ head-1 yr-1) に相当する。
- これらの結果は、IPCC Tier 2 排出係数に基づいており、群れ内のさまざまな牛コホート（牛、未經産牛、雄牛、代用動物など）の体重と、成長率や飼料の質などのパフォーマンス要因を考慮して計算される。

308 <https://scialert.net/fulltext/?doi=pjn.2018.131.139&org=11>

309 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5560717/>

(2) イネ品種と水管理を組み合わせた GHG 排出削減

水管理とイネ品種を組み合わせることで GHG 排出を削減しようとする研究も行われている。インドネシア農業環境研究所の **A Pramono** らは、水田における CF (Continuous flooding、連続湛水) および AWD (Alternate wetting and drying、交互湿潤および乾燥湛水灌漑) 下での正味の GHG 排出に対するイネ品種の影響を検討した。2つの水管理システム、すなわち (1) CF および (2) AWD 灌漑と、3つのイネ品種、すなわち (1) Ciherang、(2) Inpari 32、および (3) Mekongga を組み合わせた無作為化完全ブロックデザインを使用した。その結果、Ciherang、Inpari 32、および Mekongga を組み合わせた場合、CF と比較して、AWD 灌漑が地球温暖化係数をそれぞれ 51%、40%、および 19% 減少させることが示された (図 64)。AWD 灌漑と Inpari 32 品種の組み合わせは、7,899 kg ha⁻¹ ですべての処理の中で最高の純 GHG バランスであり (エラー! 参照元が見つかりません。)、IDR (インドネシア ルピア) 1830 万 ha⁻¹ で最高の利益でもあった。緩和オプションとして技術的および経済的に実現可能な水管理とイネ品種を適切に選択することにより、水田からの GHG 排出を削減する可能性を明確に示唆した³¹⁰。

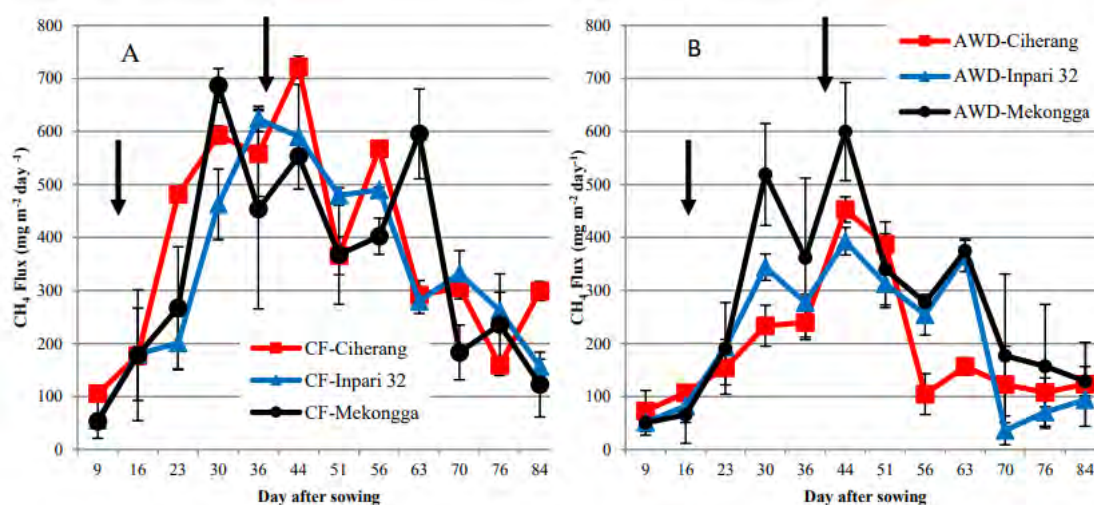


図 64 CF プロット (A) および AWD (B) プロットからの CH₄ 排出量の季節変動、Pati (インドネシアのジャワ島)、雨シーズン、2017-2018 年³¹⁰
各ポイントのバーは、平均の標準誤差 (SE) の範囲を示す。下向きの矢印は受精の時期を示す。

310 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/648/1/012095/meta>

2. 6. 4. タイ

コメはタイの全農地の約半分で栽培されており、農業からの GHG 排出量の約 55% を占めている。タイは、コメに関連する GHG の排出量が世界で 4 番目に多い国である。タイ中部の 6 つの州の稲作農家を支援し、コメ生産の効率を高めながら低排出コメ生産に移行できるようにする目的で、「タイ米 NAMA (Nationally Appropriate Mitigation Action) プロジェクト」が実施されている。このプロジェクトは、農業協同組合省 (MoAC) やその他のパートナー機関に代わって米局 (RD) によって執り行われ、ドイツ政府と英国政府を主な寄贈者とする NAMA ファシリティによって資金提供されている。プロジェクトの実施期間は、2018 年 8 月から 2023 年 8 月までの 5 年間である³¹¹。

家畜の飼料に動植物由来の成分や廃棄物をサプリメントとして使用してメタン生成を減少させる技術が多く報告されている。タンニン、サポニンなどの植物由来ポリフェノール類が代表的である。

(1) 稲作からの GHG 排出の緩和

① 水管理技術の比較

キングモンクット工科大学トンプリー校の Kazuyuki Yagi らは、日本の農林水産省が支援する「東南アジアにおける気候変動と闘うための健全な土壌管理」に関する FAO 地域イニシアチブによって資金提供された調査を行った。東南アジア諸国において地域の水田からの GHG 排出量を削減するためのさまざまな技術オプションの効果について、その可能性を評価した。調査結果は、AWD (代替湿潤乾燥) などの SD (単一排水) および MD (複数排水) アプローチを含む水管理オプションが、CH₄ + N₂O (正味 GWP) の複合効果の一貫して大きな緩和の可能性を示しており、特に有望な低排出オプションであることを示唆していた (図 65)。前の作物からの稲わらの除去は、短期的には最も効果的なオプションとして特定されたが、長期的には土壌の肥沃度を低下させる深刻な制約がある可能性がある³¹²。

311 https://www.thai-german-cooperation.info/en_US/thai-rice-nama-nationally-appropriate-mitigation-action/

312 <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00380768.2019.1683890>

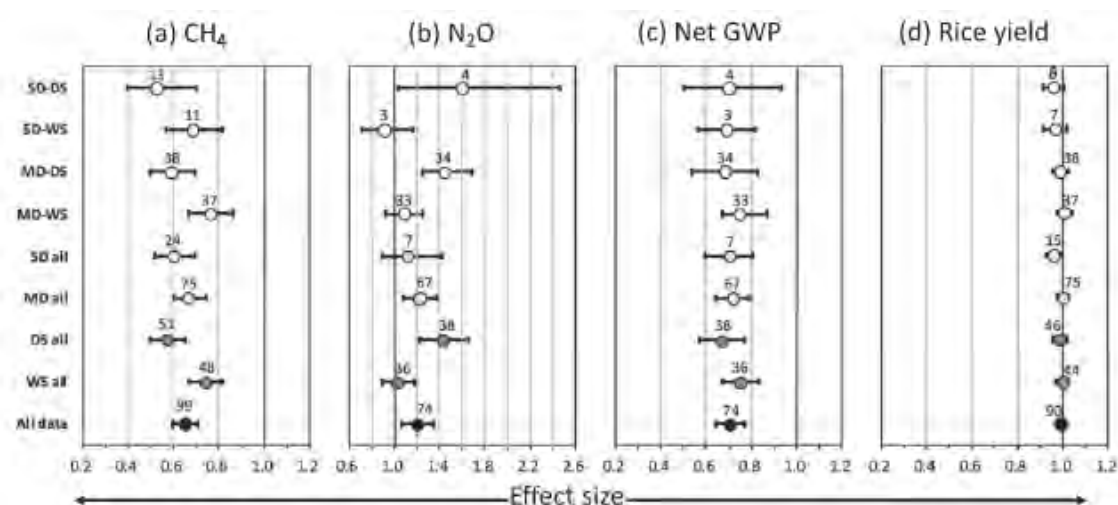


図 65 東南アジア諸国の稲作からの CH₄ 排出量(a)、N₂O 排出量(b)、正味 GWP (c)、および米収量 (d)に対する水管理オプションの影響³¹²

平均効果と 95% 信頼区間は、それぞれ記号とバーで表示。数字はデータ数を示す。SD：単一排水；MD：AWD を含む複数の排水。DS：乾季、WS：雨季。

②AWD の気候適合性評価

国際稲研究所（International Rice Research Institute (IRRI)、フィリピン）が開発した節水を目的とする水管理技術である AWD（Alternate Wetting and Drying）は、アジアを中心とする水稻生産国において普及活動が展開されている³¹³。

IRRI は、AWD の適用可能性に影響を与える可能性のある気候および土壌パラメーターによって与えられる潜在的な空間的および時間的境界を決定するために、タイの中央平原の水田に対する AWD の気候適合性を評価するために開発された方法論を適用した。対象州におけるメタン緩和の可能性も評価した。その結果、対象 6 州の全域が稲作の主要（雨期）と後期（乾期）の両方で気候的に AWD に適していることが示された³¹⁴。

（2）メタン等の発生を抑える家畜飼料の開発

植物栄養素凝縮タンニン（CT）およびサポニン（SP）は重要な反芻動物飼料添加物であり、特に CH₄ 緩和戦略として使用し、ルーメン揮発性脂肪酸（VFA）プロファイルを改善するために使用される。CT は、タンパク質との親和性が高いポリフェノール化合物で、タンパク質性アドヘシンまたは細胞エンベロープの一部に結合することにより、ルーメンのメタン生成古細菌に直接影響を与える。それによってメタン生成菌原生動物複合体の形成を損ない、種間の水素移動を減少させ、メタン生成菌の成長を阻害する。マンゴスチン（*Garcinia mangostana*）の皮は、16.7% CT と 9.8%

313 https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/niaes/2017/niaes17_s12.html

314 <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/110714>

SP を持つ熱帯の国の農業副産物であり、一部のルーメン微生物を阻害して腸内 CH₄ 生成を最小限に抑える可能性がある。

① マンゴスチンの皮の液体で保護された大豆粕

ナコンパノム大学の Kampanat Phesatcha らは、マンゴスチンの皮の液体で保護された (MPLP-) 大豆粕 (SBM) が飼料タンパク質の栄養を改善し、授乳中の乳牛の乳量と乳質を改善できるか評価するために、ルーメン発酵、マイクロバイーム、微生物タンパク質の合成、泌乳中の乳牛の乳量と組成に対する MPLP-SBM の効果を調査した。マンゴスチンの果実はタイのコンケンにある地元の市場から購入、乳牛は4頭の交配泌乳ホルスタイン フリージアン牛 (75% ホルスタイン フリージアン、25% タイ在来種) を用いた。その結果、高レベルの粗タンパク質と MPLP-SBM により、ルーメンのプロピオン酸が強化され、酢酸とプロピオン酸の比率とメタン生成を減少させた。全細菌、*Fibrobacter succinogenes* および *Butyrivibrio fibrisolvens* のルーメン微生物集団は、高粗タンパク質濃縮物 (HPC) によって増加し、リアルタイム PCR により、HPC における MPLP-SBM による反芻胃のメタン生成菌の 30.6% の減少が明らかになった (表 15) ³¹⁵。

表 15 粗タンパク質レベルとマンゴスチンの皮の液体で保護された大豆粕が、泌乳中の乳牛の反芻胃発酵に及ぼす影響 ³¹⁵

Items	Low crude protein		High crude protein		SEM	<i>p</i> -Value		
	–	+	–	+		Pro	MPLP	Pro × MPLP
	MPLP	MPLP	MPLP	MPLP				
Ruminal fermentation								
pH	6.7	6.8	6.8	6.8	0.564	0.62	0.41	0.54
Temperature, °C	39.7	39.6	39.5	39.6	0.311	0.42	0.75	0.18
NH ₃ -N, mg/dl	13.9	12.1	17.1	15.0	0.791	0.02	0.04	0.09
Blood urea nitrogen, mg/dl	14.7	12.6	18.1	16.8	0.609	0.04	0.02	0.41
VFA								
Total VFA, mmol/l	106.7	110.6	111.6	118.7	0.508	0.04	0.04	0.71
Acetic acid (C ₂), mol/100 mol	64.8	64.4	65.4	64.6	0.971	0.12	0.11	0.88
Propionic acid (C ₃), mol/100 mol	23.9	25.7	24.2	26.0	0.633	0.21	0.02	0.09
Butyric acid (C ₄), mol/100 mol	11.3	9.9	10.4	9.4	0.442	0.32	0.02	0.68
<i>p</i> -Value	2.7	2.5	2.7	2.5	0.194	0.14	0.03	0.65
Methane, mM/l ^a	27.1	25.9	26.9	25.6	0.709	0.08	0.03	0.21

Pro : タンパク質レベル、MPLP : マンゴスチンの皮の液体保護処理、SEM : 平均値の標準誤差

^a : Moss らに従って計算 [メタン生成 = 0.45 (酢酸塩) - 0.275 (プロピオン酸塩) + 0.4 (酪酸塩)]

315 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8821873/>

②タイ原産植物 *Mitragyna speciosa*

ポリフェノール類を含む植物をタイ原産の肉用牛の飼料に加えてメタン産生が減少するかをラジャマンガラ工科大学の **Burarat Phesatcha** らが検討している。*Mitragyna speciosa* (通称 kratom) は、タイ、インドネシア、マレーシアなどが原産、低用量ではコカインに似た覚醒作用があり、高用量ではオピオイドに似た鎮静作用があり、前臨床研究では、*M. Speciosa* の抗酸化、抗菌、抗増殖、抗炎症、および抗侵害受容特性が確認されている。タイ原産の肉牛に、稲わらベースの餌に MSLP (*M. speciosa* Korth 葉ペレット) を 10~30g / 日で補給して与えると、栄養素の消化率、プロピオン酸の割合、および微生物のタンパク質合成が大幅に増加し、原生動物の個体数と推定 CH₄ 生産量が減少した (表 16) ³¹⁶。

表 16 *Mitragyna speciosa* Korth 葉ペレット補給がタイ原産の肉用牛の発酵特性と血漿尿素窒素に及ぼす影響 ³¹⁶

Items	MSLP ¹ (g/hd/d)				SEM	Contrast	
	0	10	20	30		Linear	Quadratic
Ruminal pH	6.6	6.8	6.7	6.7	0.26	0.068	0.093
Temperature, °C	39.1	39.3	39.2	39.1	0.19	0.283	0.425
NH ₃ -N, mg/dL	15.6 ^b	14.3 ^b	12.1 ^a	11.9 ^a	0.31	0.041	0.045
PUN, mg/dL	13.4 ^b	12.7 ^b	11.6 ^a	11.8 ^a	0.42	0.064	0.083
Total VFAs, mmol/L	91.1 ^a	95.3 ^b	99.7 ^c	102.5 ^c	2.53	0.041	0.046
VFAs, mol/100 mol							
Acetic acid (C ₂)	68.3 ^b	67.5 ^b	65.6 ^a	64.8 ^a	0.59	0.033	0.042
Propionic acid (C ₃)	20.2 ^a	22.8 ^b	24.9 ^c	26.7 ^d	0.46	0.025	0.032
Butyric acid (C ₄)	11.5	9.7	9.5	8.5	0.32	0.058	0.069
C ₂ :C ₃	3.38	2.96	2.63	2.43	0.11	0.183	0.314
<u>CH₄ (mM)</u>	<u>29.6 ^c</u>	<u>27.8 ^b</u>	<u>26.4 ^{ab}</u>	<u>25.1 ^a</u>	0.73	0.022	0.035

¹MSLP = *Mitragyna speciosa* Korth 葉ペレット、SEM : 平均値の標準誤差、NH₃-N : アンモニア態窒素、PUN : プラズマ尿素窒素、VFA : 揮発性脂肪酸、CH₄ : Moss らに従って計算されたメタン生成 [CH₄ = 0.45 (C₂) - 0.275 (C₃) + 0.4 (C₄)]、列内の異なる上付き文字は統計上の差異を示す

2. 6. 5. ベトナム

ベトナムは世界第5位のコメ生産国であり、2019年のコメの年間作付面積は750万ha、生産量は4,400万tであった。特にベトナム南西部のメコンデルタ地域は、農家が年に3回コメを栽培できる良好な水と気候条件を備えており、ベトナムのコメ生産量の半分を占めている。イネの成長と発育には大量の淡水が必要であり、栽培期間中に大量のメタンが排出される。これらはどちらもベトナムの主要な問題であり、気候変動の悪化と人口密集地での水の消費量の増加につながる。カントー大学は日本の国際農研（国際農林水産業研究センター：JIRCAS）と共同で、2008年から農業分野のGHG排出削減に向けた共同研究を進めている。これまでの共同研究により、間断灌漑の導入による水田の水管理の改善、カシューナッツ殻液の肉牛への給与によるGHGの排出削減といった、農業の生産性の維持あるいは増加と両立できる環境保全型の農業システムの開発に取り組んできた。

（1）節水灌漑によるGHG排出削減のための最適な水位管理

水と肥料の使用効率を改善することにより、米の収量と穀物の品質を改善し、持続可能な米生産を促進するための新しい水管理システムが開発されている。AWD（Alternative wetting and drying：代替湿潤乾燥）は、フィリピンのIRRI（International Rice Research Institute：国際稲研究所）によって確立された節水灌漑システムである。この管理アプローチは、省全体に完全な堤防システムが確立されていることから、ベトナム・メコンデルタに位置するAn Giang（アンザン）省でも広範に広がっている。AWDの高い採用率の潜在的な理由は、従来の灌漑システム（連続湛水、すなわちcontinuous flooding：CF）で得られる収量と比較して、米の収量が向上し、CH₄排出量が削減される可能性があることである。カントー大学は国際農研と共同で、ベトナムのアンザン省の6か所で、特定の水位管理慣行が農業条件下での米の収量とGHG排出に及ぼす影響を調べた。CH₄排出量は、水管理とGHG排出量との関係を分析するために計測された。水位の季節変動に応じて、ほとんどのCH₄排出量は、CF管理よりもMD（multiple drainage：複合排水）管理の方が低かった。MDとCFの管理方法の間で、コメの収量とCH₄排出量に有意差が見られ、p値はそれぞれ0.0039と0.0019であった（表17）³¹⁷。

317 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9657519/>

表 17 An Giang 地域の 3 つの稲作シーズンにおける収量とメタン排出量の有意な差

317

	Df	Rice Yield					CH ₄ Emissions				
		Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr (>F)		Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr (>F)	
Season	2	12.35	6.173	2.928	0.0608	ns	12.9	6.451	1.207	0.3058	ns
Water management	1	17.09	17.092	8.956	0.00385	**	61.7	61.7	11.61	0.00111	**
Soil type	1	6.66	6.663	3.16	0.0803	ns	21.8	21.794	4.079	0.0477	*
Water management × soil type	1	34	34	6.398	0.01375	**	0.13	0.126	0.066	0.79811	ns
Residuals	63	132.84	2.109				336.6	5.343			

* and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively; ns indicates no significance.

(2) コメ三毛作におけるメタン排出

メコンデルタはメタン排出のホットスポットである。排出量が多いのは、イネわらの混入によるものであるが、コメ三毛作によるメタン排出量は十分に研究されていない。カントー大学と国際農研は共同研究を実施し、メコンデルタの代表的な三毛作水田のメタン排出量を 5 年間（計 15 作）モニタリングした。結果は、作物シーズンの総排出量は、2 作目の作物では 2 倍になり、3 作目の作物では 3 倍になり、自然洪水の後にリセットされた（図 66）。これは、放出ピーク時（播種直後の小さな植物）のイネ由来炭素の量が少ないため、前作からのイネ残渣の蓄積、特に土壌に取り込まれたイネわらによって説明できる。稲作直前の有機物混入で水田のメタン排出量が大幅に増加する。対照的に、3 回目の収穫の直後に自然洪水が始まると、水には溶存酸素が含まれているため、田んぼに残ったイネわらが水中でメタン生成なしで分解されることになる。したがって、水田表層水中でイネわらを分解することは、この地域でのメタン排出を削減する有効な方法であることが示された³¹⁸。

318 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7059783/>

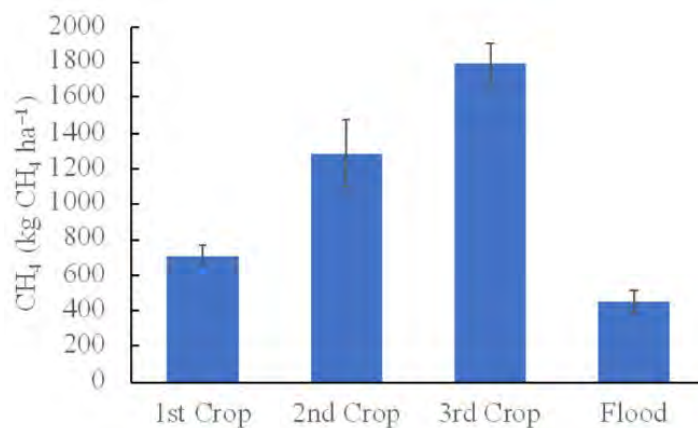


図 66 メタン総排出量³¹⁸
メコンデルタの三毛作水田の CH₄ 排出量の 5 年平均 (2011-2016)。
バーは 95% CI (n = 5) を表す。

(3) 水稲作と肉牛生産の複合システム

カントー大学と国際農研は、農研機構、宮崎大学と共同で、メコンデルタ農村地域において、GHG 排出量の削減と環境負荷低減の効果をライフサイクルアセスメント (Life-Cycle Assessment : LCA) により評価し、水稲作と肉牛生産にバイオガス生産を組み合わせた複合システムが、専業システムと比較して (図 67)、GHG 排出量を削減できることを明らかにした。

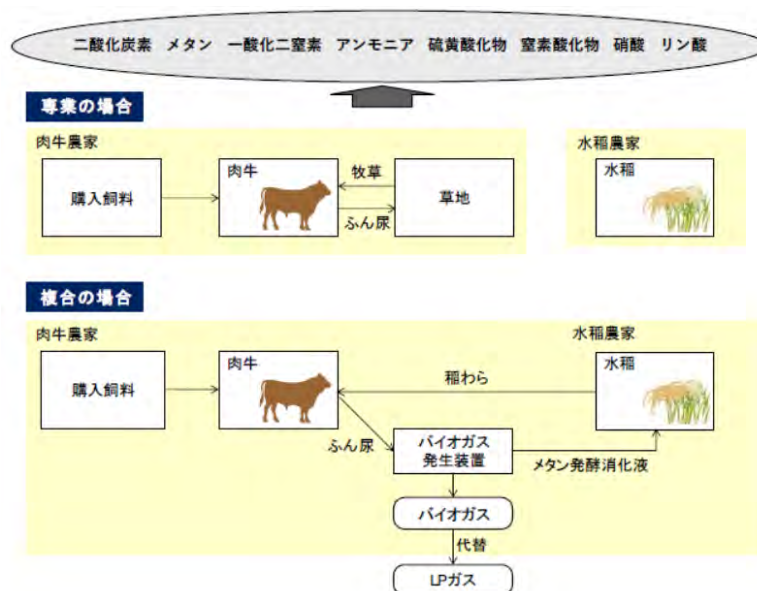
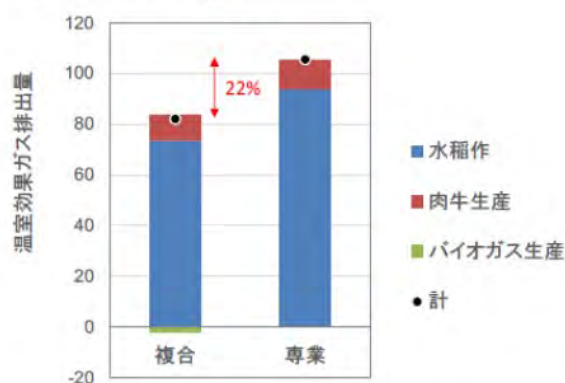


図 67 専業システムと複合システムの比較³¹⁹

本研究では、農家調査により、現地の農家における化学肥料や農薬などの農業用資材や肉牛の飼料などの投入量、水田の水管理、イネわら処理、家畜ふん尿処理などの

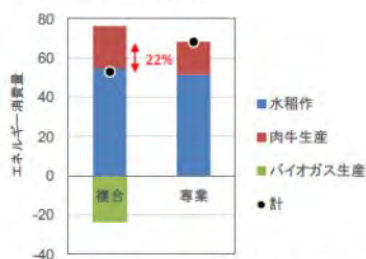
方法を明らかにし、営農に伴い発生する GHG などの環境に負荷を与える物質の種類や量を評価した。LCA の結果、複合システムは、専業システムと比較して、GHG の排出量を 22%削減できることが明らかとなった（図 68 (a)）。複合システムでは、肉牛の飼料としてイネわらを利用するので、イネわらの鋤き込みが抑えられ、水田からのメタン発生量が削減できるようになる。同様に、営農に伴うエネルギー消費量、水質汚濁の原因となるアンモニアなどの発生量（富栄養化ポテンシャル）は、複合システムの方がそれぞれ 22%、14%少ないことがわかった（図 68 (b)(c)）。このことから、複合システムは専業システムに比べ環境負荷の少ないシステムであることが明らかとなった³¹⁹。

(a) 温室効果ガス排出量(tCO₂換算)



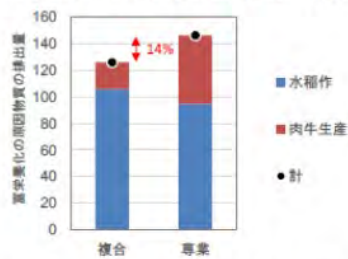
複合システムでは、稲わらは肉牛の飼料として利用され、水田に鋤き込む稲わらの量が減るため水田から発生するメタンを削減できる。システム全体でみると温室効果ガスの排出量を22%削減できる。

(b) エネルギー消費量(GJ)



複合システムでは、稲わらで不足する栄養素を濃厚飼料で補うため、その生産・輸送に係るエネルギー消費量が増えるが、バイオガスを利用できるためトータルでのエネルギー消費量を削減できる。

(c) 富栄養化の原因物質の排出量(kgPO₄換算^{**})



複合システムでは、消化液の施用により水田から発生するアンモニア等の水質汚濁の原因となる物質の量が増えるが、ふん尿や草地から発生する量をそれ以上に削減できる。

図 68 機能単位当たりの専業システムと複合システムの環境へのインパクト³¹⁹

319 <https://www.jircas.go.jp/ja/release/2021/press202106>

2. 7. 先進諸国におけるメタン排出削減技術

「3.5 先進各国の研究開発動向」では、先進諸国の研究開発動向を中心にまとめた。本項では、明らかとなった各国の研究開発動向の中から、特徴的と考えられる技術について、論文における研究結果を中心にまとめた。

2. 7. 1. 米国

(1) Invited Review: Methane sources, quantification, and mitigation in grazing beef systems

(放牧牛肉システムにおけるメタン源、定量化、および軽減)

[Applied Animal Science: Volume 36, Issue 4, August 2020, Pages 556-57](#)

L.R.Thompson J.E.Rowntree PA (Department of Animal Science, Michigan State University³²⁰)

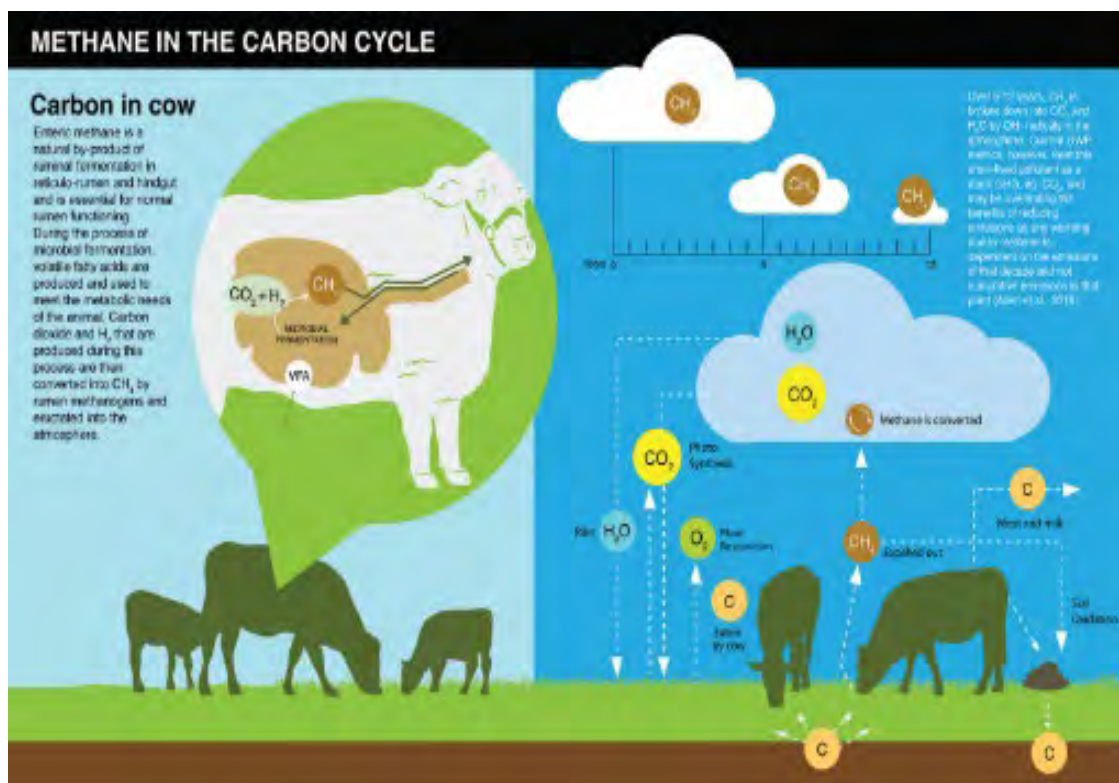
最近の気候変動に関する国際パネル（IPCC; IPCC, 2019）報告書は、世界の人為的温室効果ガス（GHG）排出量の 23%が農業、林業、その他の土地利用によるものであると推定している。これらの発生源は、すべてのメタン推定排出量の 44%を占めている。米国では、農業部門が GHG 総排出量の約 9%、運輸、産業、電力部門が排出量の大部分（全体の約 79%）を占めている。米国の農業生産に起因する 9.1%のうち、約 60%は酪農によるものであり、その約 60%は動物の腸内メタンに起因している。メタンは、CO₂ の 28 倍の地球温暖化係数（GWP）を持つ強力な GHG である。

最近のライフサイクル評価では、米国の牛肉産業の放牧部門に焦点を当てる必要性が浮き彫りになり、牛-子牛とストッカー牛の成分が米国の牛肉部門からの総 GHG の約 70～80%を占めている。このレビューの主な目的は、腸溶性メタン排出量への放牧部門の影響を考慮して、放牧の観点から削減戦略に焦点を当て、メタンを減らすために土壌-植物-動物の相互関係をどのように操作および強化できるかを調査することである。調査の結果以下の事が明らかになった。

- ・メタン放出は、粗飼料およびマメ科植物および回転放牧によって減少できる。
- ・縮合タンニンやサポニンのような有益な二次代謝物質を含む飼料はメタン分解能も有する。
- ・土壌メタン資化性は、メタン放出を部分的に相殺するかもしれないが、土壌のメタン取込速度は、ほとんどの放牧生態系において比較的低かった。
- ・メタンの地球温暖化ポテンシャルを定量化する新しい測定は、大気におけるメタンの挙動および影響を適切に考慮するための将来のモデル化を可能にする。

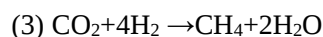
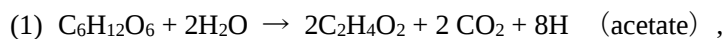
320 ミシガン州立大学の研究者は、腸内メタン排出源、定量化方法、および削減戦略の理解を深めるために、査読済みの文献を調査および評価している。彼ら（Jason E. Rowntree, PhD）の発見は、Applied Animal Science August 10, 2020 8月号に掲載されている

- ・脂質補給、アスパラゴプシス（海藻）の補給、有益な二次代謝物質を含む飼料の組み込み、腸内メタン低下のための遺伝的選択などの削減ツールは、牛肉生産者がカーボンフットプリントを削減するための実行可能なツールになる可能性がある。
- ・研究者は定量ツールを使用が簡単なものにするために、より長期のモニタリング実験を行う必要がある。



左図は牛腸内でのメタン発生の様式、右図は放牧環境における炭素循環を示す。〈メタン発生様式〉

発酵プロセス中に生成される VFA とタンパク質に加えて、ガス状 CO₂ および H₂ が生産される。これらは、メタン生成古細菌がメタンを生成するための主要な基質として機能し、以下の典型的な水素化代謝経路を経由する。



(2) Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions

(排出量削減の機会と影響の定量化)

[J. Dairy Sci. 97 :3231–3261, 2014](#)

J.R. Knapp, G.L. Laur, P.A. Vadas, W.P. Weiss, J.M. Tricarico (Fox Hollow Consulting LLC,

Columbus, OH 43201³²¹⁾

メタンの GHG 効果は、しばしば CO₂-equivalent (CO₂e) ベースで表される。家畜の胃腸管で生成される腸内メタンは、畜産農業からの排出量の唯一最大の供給源であるが、人為的な GHG 排出量における割合は少ない。メタンには、いくつかの自然発生源（シロアリ、湿地、泥炭湿原、海洋堆積物、野生生物）と人為的発生源（天然ガス生産、石炭採掘、廃水処理、埋め立て地、農業）があり、人為的発生源は地球のメタン全排出量の約 58% を占めている。

本レビューの目的は ECM (energy-corrected milk エネルギー補正牛乳)³²²⁾ 単位あたりの乳牛からの排出量 (CH₄/ECM) を定量的かつ持続的に使用し、遺伝学、摂食と栄養、生理学、および健康のアプローチを統合することで腸内メタンを削減することが実証されている各オプションを評価することである。評価した結果、以下の事実が判明した。

- ・飼料効率、耐熱性、耐病性、および生殖能力のための遺伝的選択は、9～19%の削減の可能性がある、CH₄/ECM を低下させる選択肢を増やすことができる（図 69、165 ページ）。先進国においては集約的な酪農事業においての摂食と栄養は、腸内 CH₄/ECM を削減する可能性はわずか（2.5～15%）であるが、発展途上国では作物および飼料生産と組み合わせることで、はるかに大きな可能性がある。

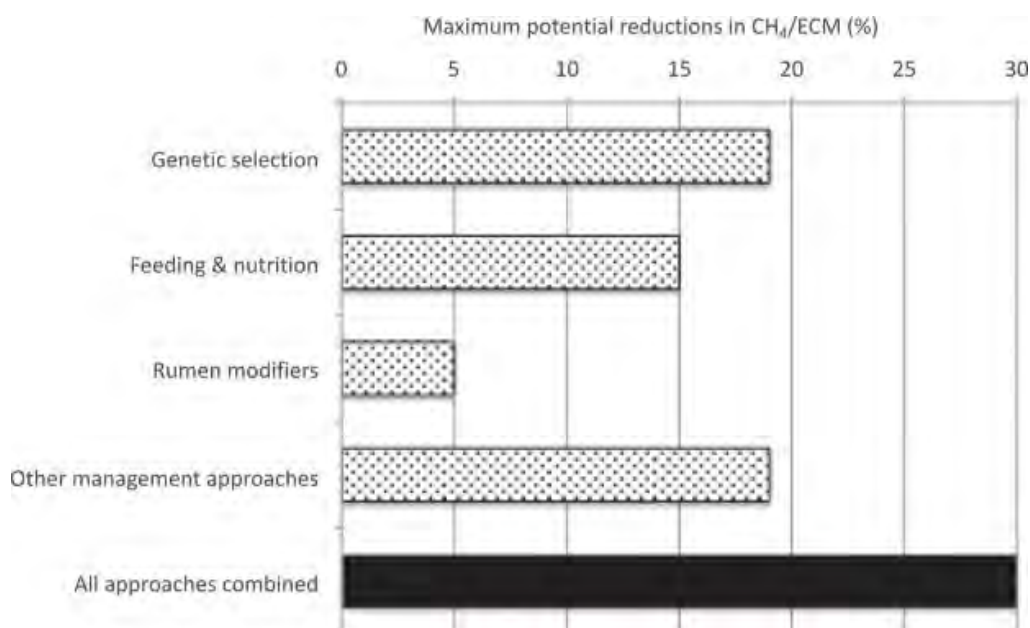


図 69 各種要因によるメタン削減可能性

321 飼料および畜産業における新製品およびサービスの開発に特化したコンサル企業

322 エネルギー補正牛乳は、3.5%の乳脂肪と 3.2%のタンパク質に調整された生産された牛乳

(3) Could the breed composition improve performance and change the enteric methane emissions from beef cattle in a tropical intensive production system?

(品種構成は、熱帯集約生産システムにおける肉牛からの腸内メタン排出量を改善し、変化させる可能性があるか?)

PLoS One. 2019; 14 (7) : e0220247

Isabella Cristina de Faria Maciel (Michigan State University, Department of Animal Science)

異種交配は肉用牛の成績を改善するために使用されてきたが、熱帯の集約的で統合されたシステムで飼育された牛からのメタン生産、ウシの収量および耐病性等の強度に対する品種構成の影響は不明のままである。品種構成が性能とメタン排出量に与える影響を評価することを目的として、ネロール (NEL) とアングス (AN) × ネロールの交雑種を比較した。両者は成長期には、放牧で飼育され、その後、肥育場で仕上げられた。各品種構成の雄牛を各段階で無作為に選択し、メタン生産を測定し、DM 摂取量 (DMI) を測定した。

その結果 NEL と比較して、AN は放牧期間中の総増体量と平均日増体量 (ADG) の両方が優れていた。結論として交雑育種は、パフォーマンスを改善し、熱帯気候条件で ADG あたりのメタンを削減するためのオプションである可能性があり、その結果、生産される食肉 1 kg あたりのメタン排出量が減少する。

AN は肥育場でより短い仕上げ期間でより多くの ADG を示し、枝肉の歩留まりと枝肉の ADG がより大きくなった。メタン生成量 (kg/期間) は放牧の AN よりも NEL の方が 19% 少なく、肥育場では差が認められなかった。NEL は放牧中のメタン強度 (CH_4/BW) が低かったが、AN と比較して肥育場の ADG 単位あたりのメタンが多かった。品種組成は、肥育場の DMI (kg/日) の違いにもかかわらず、どちらのフェーズでもメタン収量 (CH_4/DMI) に影響を与えなかった。(DM, dry matter; BW, body weight.)

表 18 Effects of breed composition on methane emissions of beef cattle in grazing and feedlot tests

	NEL (n = 8)	AN (n = 8)	SEM	P Value		
				Breed	Year	Breed*Year
Total DMI, kg/day	5.90	6.23	0.31	0.66	-	-
ADG, kg/day	0.680	0.729	0.03	0.22		
BW average, kg	314.6	336.6	9.33	0.07	-	-
ADG, kg/day	0.680	0.729	0.03	0.22	-	-
CH_4 , kg/period	17.21	21.17	0.85	<0.01		
Feedlot						
Total DMI, kg/day	9.29	12.44	0.39	<0.01	0.10	<0.01
ADG kg/day	1.49	2.26	0.07	<0.01	0.13	<0.05
BW average, kg	386.2	488.6	4.87	<0.01	<0.01	0.25

	NEL (n = 8)	AN (n = 8)	SEM	P Value		
				Breed	Year	Breed*Year
ADG kg/day	1.49	2.26	0.07	<0.01	0.13	<0.05
CH ₄ , kg/period	22.34	22.67	0.98	>0.10	0.05	>0.10

NEL = Nellore, AN = Angus x Nellore crossbred

(放牧および肥育場試験 (NEL = ネロール、AN = アンガス×ネロール交雑) における肉牛のメタン排出量に及ぼす品種組成の影響)

ADG, average daily gain; FL, feedlot; SEM, standard error of the mean (標準誤差)

(4) Effect of the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* on methane production and rumen microbiome assemblage

(大型藻類アスパラゴプシス・タキフォルミスがメタン産生とルーメン微生物叢群集に及ぼす影響)

[Animal Microbiome volume 1, Article number: 3 \(2019\)](#)

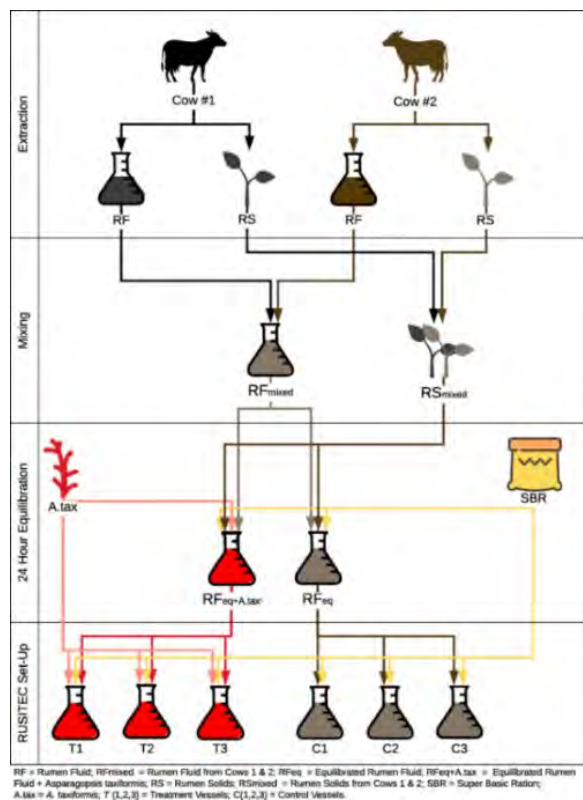
Breanna Michell Roque (Department of Animal Science, University of California³²³)

バッチ発酵を使用した最近の研究では、赤い大型藻類である *Asparagopsis taxiformis* をロードグラス干し草に添加すると、肉牛からのメタン (CH₄) 生成を最大 99% まで削減する可能性があることが示唆されている。そこで *A. taxiformis* が乳牛についてもメタン生成削減能力を有するかについて評価した。

その結果、半連続 In-vitro rumen system での発酵は、揮発性脂肪酸生産に明らかな悪影響を与えることなく、5% OM (有機物) 含有率で添加した場合、*A. taxiformis* が乳牛の家畜消化管内発酵によるメタン生産を 95% 削減できることを示唆している。このメタン生成菌量の減少は、実験の過程で平均した場合にのみ有意であった。これは、*A. taxiformis* が第一胃のメタン生成菌の代謝機能に即座に影響を与えるのに対し、マイクロバイオームの集合、特にメタン生成菌の存在量への影響は遅れることを示唆している。

結論としてルーメン発酵中の *A. taxiformis* のメタン削減効果により、この大型藻類は、乳牛の生物学的メタン削減戦略として有望な候補になる。しかし、生体内 (乳牛など) でのその効果は、動物実験でまだ調査されていない。さらに、メタンの大幅な削減に関与する生化学の全体的な理解を得るには、第一胃微生物叢と宿主動物の遺伝子発現プロファイルが必要である。

323 The California Dairy Research Foundation (CDRF) and University of California, Davis CLEAR Center は 2022 年 12 月 14 日メタン削減の進捗状況に関する新しい解析のリリース、「Meeting the Call: How California is Pioneering a Pathway to Significant Dairy Sector Methan Reduction」を発表 (後出米国 5) the release of a new analysis of methane reduction progress titled Meeting the Call:.



抽出:ルーメン液およびルーメン固形物を 2 頭の乳牛から採取した。混合:ルーメン液は均一に混合され、ルーメン固体は均一に混合された。混合後、ルーメン液を 2 つの三角フラスコに分離し、そこで処理を割り当てた。24 時間平衡化した。:対照フラスコに 30g の混合ルーメン固形物と 30g の SBR を加え、処理フラスコには 30g の混合ルーメン固形物、30g の SBR、および 1.5g の *A. taxiformis* を加えた。各フラスコが処理を行った後、24 時間平衡化した。平衡化の後、各フラスコを 3 つの容器に分割し、それぞれの処理液を与えた (対照= 10 g SBR/容器、処理= 10 g SBR/容器および 0.2 g *A. taxiformis*)

図 70 体外ルーメンシステムのセットアップ

RF=Rumen Fluid

RFmixed=Rumen Fluid from Cows 1&2

RFeq=Equillibrated Rumen Fluid

RFeq+A.tax=Equillibrated Rumen Fluid+A. *taxiformis*

RS=Rumen Solids

RSmixed=Rumen Solids from cows1&2

SBR=Super Basic Ration (in vitro 実験における給餌)

A. tax= *A. taxiformis*、T (1,2,3) =Treatment Vessels、C (1,2,3) =Control Vessels

(5) How California is Pioneering a Pathway to Significant Dairy Sector Methane Reduction

December 2022 (The California Dairy Research Foundation (CDRF) and University of California, Davis CLEAR Center)

Project Authors : Frank Mitloehner, Ph.D., Professor and Air Quality Specialist, Director, CLEAR Center, University of California, Davis

Ermias Kebreab, Ph.D., Associate Dean of Global Engagement, Director of World Food Center, University of California, Davis Daniel A. Sumner, Ph.D.

The California Dairy Research Foundation (CDRF、カリフォルニア酪農研究財団) と CLEAR Center, University of California, Davis は 2022 年 12 月 14 日、メタン削減の進捗状況に関する新しい分析「Meeting the Call : カリフォルニアが乳製品セクターの大幅なメタン削減への道を開拓している方法」を発表した。University of California, Davis の研究者が執筆したこの論文は、2030 年までに乳製品のメタン排出量を 40%削減するという世界をリードする同州の目標を達成するための取り組みが順調に進んでいると結論付けている。

この報告書は、カリフォルニア大気資源局が以前に実施した進捗状況の分析を拡張して、進捗状況と予測を包括的に検討している。この経路は、カリフォルニアの酪農場が 40%の乳製品メタン削減目標を完全に達成するために順調に進んでおり、2030 年までに「Climate Neutrality」³²⁴即ち大気に追加の温暖化が追加されないポイントに到達しているとしている。

今後数年間でいくつかの飼料添加物が市販される予定であり、カリフォルニアの乳牛群からの腸内メタン排出量を削減するために使用される可能性がある。報告書は、現在実施されているカリフォルニアのプログラムとプロジェクトからのメタン削減は、腸内排出を削減するための適度な飼料添加物戦略の実施と相まって、2030 年までに 7.61~1,059 万メートルトンのメタン (CO₂e) を削減する軌道に乗っていることを確認した。

カリフォルニア州の乳製品メタン削減の取り組みへの公的および民間の資金による集団投資は、現在 20 億ドルを超えている。カリフォルニア州食品農業省と協力して、最近、気候スマート商品パートナーシップの下で米国農務省から最大 8,500 万ドルを授与された。この資金調達により、追加のマッチング州基金と民間資本投資を活用して、合計 3 億ドル以上の新規投資を行う。

324 地球の自然吸収によって除去される排出量と同等（またはそれ以下）になるように、それらの排出量のバランスをとることにより、温室効果ガス排出量を正味ゼロにするという考えを指す。

2. 7. 2. オーストラリア

(1) Reducing greenhouse gas emissions through genetic selection in the Australian dairy industry

(オーストラリアの乳業における遺伝子選択による温室効果ガス排出量の削減)

[J. Dairy Sci. 105:4272–4288](#)

C. M. Richardson (Agriculture Victoria Research, AgriBio, Centre for AgriBioscience³²⁵, Bundoora, Victoria 3083, Australia)

この研究では、(1) 国家育種プログラムに環境要素を含め、(2) その後の指標の実施による経済的および環境的影響を推定することにより、オーストラリアの酪農産業における温室効果ガス (GHG) 排出量を削減するための可能なオプションを探ることにある。合計 12 の可能な選択指標があげられた。これらの指標は、4 つの異なる炭素価格³²⁶を用いて、動物 1 頭当たりの総メタン生産量の変化を予測するために開発され、それらを現在の国家選択指数に統合した。インデックス内に環境特性を含める場合、排出量の最大削減の約 40~50%を達成できる。国の育種プログラムに GHG サブインデックスを導入することで、現在の育種プログラムと比較して、農家にはば費用をかけずに、10 年間で残留メタンを最大 7.9%削減し、総排出量を 9 倍削減できる。2050 年までに、炭素価格が 250 豪ドル/トン (AUD\$1=0.71 米ドル)、または農家の機会費用が 87.22 豪ドルという、より保守的な指数シナリオの 1 つに基づいて選択することで、総排出量が 8.23%、排出原単位が 21.25%削減され、排出量を削減するのに効果的な緩和戦略が提供される。今回の研究で示された結果は、短期的には、農家が産業用途に使用できる GHG サブインデックスツールが、利益を維持しながら排出量を削減するのに効果的であることを示している。

(2) The impact of genetic selection on greenhouse-gasemissions in Australian dairy cattle

(オーストラリア乳牛の温室効果ガス排出に対する遺伝的選択の影響)

[Animal Production Science, 2017, 57, 1451–1456](#)

Jennie E. Pryce (Agriculture Victoria, AgriBio, Centre for AgriBioscience, Bundoora, Vic. 3083, Australia³²⁷.)

オーストラリアでは、乳牛は国内の農業による GHG 排出量の約 12%を占めている。遺伝子選択はプラスの影響を及ぼし、主に乳牛 1 頭あたりの生産量の増加により、酪農システムからの GHG 排出量を削減した。これにより、(1) 同じ量の乳を生産するために必

325 オーストラリア初の統合農業システム生物学研究センターであり、オーストラリアでも有数の最先端のアグリバイオサイエンス研究施設の 1 つ。

326 carbon prices AUD\$150/t, AUD\$250/t, AUD\$500/t, and AUD\$1,000/t

327 前出の研究機関

要な乳牛の数が少なくなり、(2) 乳生産単位あたりの排出量が減少した。本研究の目的は、オーストラリアの国家育種目標に含まれる重要な形質の選択に対する実現および予測された反応を使用して、以前および現在の遺伝的選択慣行が炭素排出に及ぼす影響を評価することである。農場モデルを使用して、他のすべての形質を一定に保ちながら、これらの形質の単位変化あたりの二酸化炭素当量 (CO₂-eq) 排出量を予測した。過去 10 年間の牛 1 頭あたりの年間 CO₂ 換算排出量の実際の変化の推定値は、選択中の各形質の単位変化あたりの予測 CO₂ 換算排出量に、それらの形質のそれぞれにおける遺伝的利得の実現率を積算することによって行われた。総影響は 10 年間の選抜後、55 kg CO₂-eq/cow.year の増加になる。将来の CO₂ 換算排出量にも同じアプローチが適用されたが、バランス パフォーマンス インデックス (BPI) の選択を通じて、今後 10 年間に発生すると想定される遺伝的利得 (～10 年間の遺伝的改良) の予測率が使用された。BPI が 100 豪ドル増加すると、ウシ 1 頭あたりの排出量の増加は、37 kg CO₂ 換算/牛・年に減少すると予測される。乳生産形質は育種目標の大部分を占めるため、生産される乳の単位あたりの GHG 排出量は、効率と生産性の向上の結果として減少する。

過去 10 年間に生産された牛乳 1L あたりの排出量の希釈率は、年間 35.7 g CO₂-eq/kg 乳固形分と推定される。実際、牛の頭数は過去 10 年間で減少し、生産量は増加した。全体として、正味の影響は、年間の酪農産業からの総排出量の約 1.0%の CO₂ 換算排出量の削減であると推定される。牛の数または製品の量を一定に保つという 2 つの将来のシナリオを使用して、生乳生産量が一定のままである場合、正味の GHG 排出量は乳製品の総排出量の約 0.6%/年削減されると予測される。乳牛頭数は変わらず、乳生産特性の遺伝的改善が求められる。

表 19 調査したシナリオで想定される遺伝的増加率と集団サイズ、および対応する正味排出量レベル

Parameter	Historic (2004–2014)	Future (1) (2016–2026)	Future (2) (2016–2026)
Change in BPI/APR per year	AU\$8 ^A	AU\$10 ^B	AU\$10 ^B
Cows in Year	1 880 000	1 740 000	1 740 000
Cows in Year 10	1 740 000	1 687 874	1 740 000
Total annual population fat + protein in Year 0 (kg)	862 040 000	887 400 000	887 400 000
Total annual population fat + protein in Year 10 (kg)	887 400 000	887 400 000	914 805 000
Year 0: GHG emissions (t CO ₂ -eq)	8 498 701	7 961 306	7 961 306
Year 10: GHG emissions (t CO ₂ -eq)	7 644 504	7 523 827	7 756 180

^ARealised (ADHIS 2015) . ^BPredicted (Byrne *et al.* 2016)

Future (1) , fewer cows to produce the same amount of milk. Future (2) , same number of cows through the 10 years. APR,Australian profit ranking index; BPI, balanced performance index; CO₂-eq; carbon dioxide equivalent

(3) Effects of Feeding either Red or White Grape Marc on Milk Production and Methane Emissions from Early-Lactation Dairy Cows¹⁶⁵

(赤ブドウまたは白ブドウマークの給餌が早乳乳牛の乳量とメタン排出量に及ぼす影響)

Animals (Basel) . 2020 Jun; 10 (6) : 976

Peter J. Moate (Agriculture Victoria Research, Ellinbank VIC 3821, Australia³²⁸)

グレープマークは、ブドウを圧搾してワインを作った後に残るブドウの皮、種子、茎で構成されている。世界では、年間約 900 万トンのグレープマークが生産されている。しかし、赤ブドウと白ブドウのグレープマークの栄養価の比較と、乳牛に与えた場合の乳生産とメタン排出への影響についてはほとんど知られていない。本研究では放牧ベースのオーストラリアの酪農産業の飼料源としてのグレープマークの潜在的な役割を評価した。収穫した多年生ライグラスをベースにした飼料を授乳中の乳牛に与え、赤ブドウまたは白ブドウのグレープマークを多年生ライグラスの一部に代用した場合の乳量とメタン排出量を比較した。赤ブドウまたは白ブドウのグレープマークを含む食事は、乳量を約 10%、メタン排出量を 15% 減少させた。乳牛に与えると、グレープマークはメタン排出量を削減するが、乳量が減少する。メタン排出への影響は、主にグレープマークの高濃度のリグニンと脂肪によって媒介され、牛乳生産量の減少は代謝可能なエネルギーの摂取量の減少によるものであった。

表の説明

RGM 飼料を提供した牛と WGM 飼料を提供した牛は、CON 飼料を提供した牛よりもメタン排出量とメタン収量 (g / kg DMI) が低かった ($p \leq 0.001$)。しかし、食事療法は、(g / kg PFOM) と表した場合、メタン収量に影響を及ぼさず ($p = 0.336$)、メタン強度 (g / kg ECM) には効果がなかった。 ($p = 0.406$) いずれのメタン変数にもグレープマークの種類の影響はなかった ($p > 0.05$) ($p > 0.05$) ($p > 0.05$) ($p > 0.05$) ($p > 0.05$)。

表 20 Effect of feeding diets containing grape marc on methane emissions from dairy cows.

Variate	Diet ¹			SEM ²	Effect p-Value	
	CON	RGM	WGM		C v G ³	R v W ⁴
Number of cows	11	10	10	-		
Total DMI ⁵ (kg/d)	18.4	18.8	18.6	0.29	0.425	0.578
Methane emission (g/d)	383	326	326	12.9	0.001	0.930
Methane intensity (g/kg ECM ⁶)	13.3	12.8	12.5	0.47	0.206	0.666
Methane yield (g/kg DMI)	20.6	17.4	17.4	0.68	0.001	0.925
Methane yield (g/kg PFOM ⁷)	26.5	25.1	25.1	0.79	0.143	0.991

³²⁸Agriculture Victoria は、農家、産業、コミュニティ、その他の政府機関と協力して、ビクトリア州の農業を成長させ、確保している。

Variate	Diet ¹			SEM ²	Effect p-Value	
	CON	RGM	WGM		C v G ³	R v W ⁴
Methane (% GEI ⁸)	6.24	5.06	5.18	0.179	0.001	0.650

¹ Diets: CON = control diet, RGM = red grape marc diet, WGM = white grape marc diet; ² SEM = standard error of mean ³ p-value to test contrast between CON and grape marc; ⁴ p-value to test contrast between red grape marc and white grape marc; ⁵ DMI = dry matter intake, ⁶ ECM = energy corrected milk (see text for calculation), ⁷ PFOM = potentially fermentable organic matter, ⁸ GEI = gross energy intake.

(4) Methane Emissions from Ruminants in Australia: Mitigation Potential and Applicability of Mitigation Strategies

(オーストラリアにおける反芻動物のメタン排出削減ポテンシャルと削減戦略の適用可能性)

[Animals 2021, 11, 951](#)

John L. Black (Consulting, Warrimoo, NSW 2774, Australia³²⁹)

反芻動物の胃には、嫌気性発酵を利用して飼料を消化する多様な微生物がある。メタンは、消化プロセスの副産物として大気中に放出される。この腸内メタンは、主に牛だけでなく、ヒツジやヤギからのもので、毎日地球の大気中に放出されるメタンの30%を占めており、他のどのメタン源よりも多い。地球上の生態系を維持するには、反芻動物からのメタン排出量を大幅に削減することが不可欠である。農場運営における腸内メタン排出量を削減するためのさまざまな戦略が、緩和の可能性を定量化し、動物の生産性への影響と採用の可能性を判断する。市販製品の3-NOP (3-ニトロオキシプロパノール) と海藻の *Asparagopsis* という2つの飼料サプリメントは、メタン排出量をそれぞれ40%以上および90%削減でき、それに伴い動物の生産性が向上し、動物の健康や健康に悪影響を与えない。処理された動物が隔離されたままである場合、遺伝子選択、ワクチン接種、ブドウの絞りかす、硝酸塩、またはバイオ炭は、メタン排出量を10%ないしはそれ以下の程度削減した。最良の管理実施とマメ科植物である *Desmanthus* または *Leucaena* 種を牛に給餌することにより、少量のメタン削減と動物の生産性の向上がもたらされる。挽いた小麦を毎日大量に与えると、乳牛のメタン排出量が約35%減少したが、長期的には持続しなかった。

329 オーストラリアの国土開発企業

表 21 Potential benefit to Australian ruminant industries from adopting different methane mitigation strategies.

Methane Mitigation Strategy	Animal Methane Mitigation Potential	National Methane Mitigation Potential ^a	Productivity Gain	National Methane Mitigation Potential ^a	Proportion of Beef Herd Implicated	Expected Adoption	Benefit to Australian Industry	Time to Application
	(%)	(Mt/y)	(%)	(% Total)	(%)	(%)	AUD/y	y
<i>Asparagopsis</i>	90	42.91	20	66.22	100	20	\$2695.82 M	1–5 ^b
3-NOP	40	4.77	3	7.36	100	5	**	1–5
Microbe manipulation	30	11.44	20	17.66	80	20	\$979.25 M	1
<i>Desmanthus</i>	15	2.86	15	4.41	40	20	\$195.79 M	Now
<i>Leucaena</i>	18	1.72	20	2.65	20	20	\$29.69 M	Now
Grape marc	10	0.24	0	0.37	2	50	\$12.14 M	Now
Genetics	7	0.50	0	0.77	100	3	\$4.36 M	Now
Nitrate	5	0.07	0	0.11	4	5	–\$2.61 M	Now
Shrubs	4	0.06	5	0.09	5	5	–\$566.56 M	Now
<i>Biserrula</i>	16	0.11	–15	0.18	3	10	–\$1378.22 M	Now
Vaccination	5	0.12	2	0.18	100	0	0	
Wheat feeding dairy	35	0.00	10	0	2	0	0	
Biochar	0	0.00	0	0	0	0	0	
Total		64.8		100				

^a Based on 64.8 Mt/y total Australian enteric methane CO₂ equivalents) and animal types and numbers from Mayberry, et al.³³⁰ ^b 1 year for feedlot and dairy and up to 5 years for grazing animals; ** No financial calculations were made for 3-NOP because it is a commercial product not yet released.

(5) Effects of Marine and Freshwater Macroalgae on In Vitro Total Gas and Methane Production

(海洋および淡水大型藻類が in vitro 総ガスおよびメタン生産に及ぼす影響)

PLOS ONE January 22, 2014

330 15. Mayberry D., Bartlett H., Moss J., Davison T., Herrero M. Pathways to carbon-neutrality for the Australian red meat sector. Agric. Syst. 2019;175:13–21.

Lorenna.machado (School of Marine and Tropical Biology, James Cook University, Townsville, Queensland, Australia³³¹)

本研究は、低品質の粗飼料を与えられた牛のルーメン液中でインキュベートした場合の *in vitro* 発酵パラメータ、総ガス生産 (TGP) およびメタンに及ぼす 20 種の熱帯大型藻類の効果を評価することを目的としている。

大型藻類の主要な生化学的パラメータは特徴付けであり、近似の、元素および脂肪酸 (FAME) 分析を含んでいる。大型藻類および対照である剥皮した綿実ミール (DCS) を *in vitro* で 72 時間インキュベートし、そこでガス生産を継続的にモニターした。メタン生産量、pH、アンモニア、見かけの有機物分解性 (OMd)、および揮発性脂肪酸 (VFA) 濃度を含む発酵後パラメータを測定した。大型藻類のすべての種は DCS よりも TGP とメタン生産が低かった。*Dictyota* と *Asparagopsis* が、72 時間後に TGP を 53.2% と 61.8%、メタン生産量はそれぞれ 92.2% と 98.9% 阻害するという最も強い効果を示した。両種はまた、分析されたすべての種の中で最も低い総 VFA 濃度と最も高いモル濃度のプロピオン酸塩をもたらした。これは嫌気性発酵が影響を受けたことを示している。

全体として、TGP またはメタン生産と分析された 70 以上の生化学的パラメータの間に強い関係はなかった。ただし、亜鉛濃度 $>0.10 \text{ g.kg}^{-1}$ では他の生化学的成分と相互作用して、TGP およびメタン生産に影響を与える可能性がある。種の一次生化学とガスパラメータとの関係の欠如は、TGP とメタン生産の有意な減少は、効果的な大型藻類によって産生される二次代謝産物と関連していることを示唆している。最も効果的な種である *Asparagopsis* は、腸内メタン排出の削減のための最も有望な代替手段を提供する。ただし、これらの種は発酵にも影響し、総 VFA 濃度が低下した。それらの有効性により、低濃度でメタン生成を抑制し、嫌気性発酵における影響を最小限に抑えることができる可能性がある。対照的に、関節型の大型藻類の他の種は、高用量でメタン生成を減少させ、従来の飼料成分と同等の栄養を維持する可能性がある。

さらに、発酵に影響を与えずにメタンを減少させる最適な濃度と藻類の組み合わせを特定するための研究が進行中であり、最終的には生体内での大型藻類による腸内メタンの減少を評価している。それらの有効性のために、より低い濃度でもメタン生産を阻害し、嫌気性発酵への影響を最小限に抑えることができる可能性がある。対照的に、他の種、特に淡水大型藻類は、高用量でメタン排出量を減少させ、従来の飼料成分との栄養的同等性を維持する可能性がある。また、発酵に影響を与えることなくメタンを低下させる最適な濃度と藻類の組み合わせと、最終的に *in vivo* の大型藻類による腸内メタンの減少を評価するための研究が進行中である。

331 James Cook University の研究者は、温暖化と混雑した惑星の影響を緩和する上での藻類の価値を調査している

2. 7. 3. ニュージーランド

(1) Vaccination of Sheep with a Methanogen Protein Provides Insight into Levels of Antibody in Saliva Needed to Target Ruminal Methanogens

(メタン生成タンパク質によるヒツジのワクチン接種は、ルーメンメタン生成菌を標的とするために必要な唾液中の抗体レベルに関する洞察を提供する)

[PLoS One. 2016 Jul 29;11 \(7\)](#)

Supatsak Subharat³³² (AgResearch, Hopkirk Research Institute, Grasslands Research Centre, Palmerston North, New Zealand.)

ルーメンメタン生成菌に対するワクチン接種は、唾液中の抗体がルーメンに入り、メタンを生成する能力を損なうことにより、メタン排出量を抑制する可能性がある。現在、ワクチン接種がルーメン内のメタン生成集団を標的とするのに十分な量の抗体を唾液中に誘導できるかどうかは不明であり、ルーメン内の抗体がどのくらいの期間活性を維持するかについてはほとんど知られていない。本研究では、ヒツジは、モデルメタン生成菌抗原である組換え糖転移酵素タンパク質 (rGT2) を以下のアジュバント (サポニン、Montanide ISA61³³³、キトサンサーモゲル、または脂質ナノ粒子/カチオン性リポソームアジュバント (n = 6 / 製剤)) のいずれかで処方し、3 週間間隔で 2 回ワクチン接種された。対照群のヒツジ (n = 2) はワクチン接種を受けていない。唾液と血清の両方で最も高い抗原特異的 IgA および IgG 応答が観察されたのは、Montanide ISA61 で観察され、2 番目に強力なアジュバントであるサポニンよりも 5 倍高く唾液抗体のレベルを促進した。血清および唾液中の rGT2 特異的 IgG のレベルを決定するために、rGT2 特異的 IgG スタンダードが使用された。

GT2/Montanide ISA61 のワクチン接種では、唾液 1 リットルあたり 7×10^{16} 分子の抗原特異的 IgG の抗体ピーク濃度が得られ、ルーメン内にはメタン生成菌細胞ごとに 10^4 分子を超える抗原特異的 IgG が存在すると推定された。唾液中の IgG と IgA の両方がルーメン内で比較的安定していることが示された。in vitro 模擬ルーメン環境に 1~2 時間曝露された唾液抗体は、約 50% の抗原結合活性を保持していた。まとめると、抗体レベルと安定性の測定結果は、家畜が生成するメタンに対するワクチン接種ベースの抑制戦略が理論的に実行可能であることを示唆している。

(2) Development of Multiwell-Plate Methods Using Pure Cultures of Methanogens To Identify

332 AgResearch は Aotearoa にある 7 つの Crown Research Institutes の 1 つである。研究者は動物の健康と食品の安全性を改善するためのより良い戦略とソリューションを開発している。プログラムの 1 つにメタンを軽減するワクチン開発がある。AgResearch の研究開発分野は次ページに示す。

333 Montanide ISA 61 は、SEPPIC Inc. (フランス) が開発した新しい鉱物油ベースのアジュバントで、口蹄疫感染に対する臨床的保護に必要な高い免疫応答を備えている。

New Inhibitors for Suppressing Ruminant Methane Emissions

(メタン生成菌の純培養を用いたマルチウェルプレート法の開発 (反芻動物のメタン放出抑制のための新規阻害剤の同定))

[Appl Environ Microbiol. 2017 Aug 1; 83 \(15\) : e00396-17](#)

M. R. Weimar³³⁴ (Department of Microbiology and Immunology, University of Otago, Dunedin, New Zealand)

水素化栄養メタン生成菌は、通常、 H_2 と CO_2 の過圧を伴うガラス管内での厳密な嫌氣的培養条件を必要とし、時間とコストがかかる。化合物ライブラリーのスクリーニングスループットを向上させるために、海洋（環境）メタン生成菌 *Methanococcus maripaludis* S2 株およびルーメンメタン生成 *Methanobrevibacter* sp. AbM4 を増殖させるための 96 穴マイクロタイタープレート法が開発された。多くの重要なパラメータ（接種材料サイズ、培地調製用還元剤、アッセイ期間、阻害剤溶媒、培養量）を最適化して、ハイスループットマイクロタイタープレートフォーマットで堅牢で再現性のある増殖を達成した。この方法は、公表されたメタン生成阻害剤を用いて検証され、感度および再現性について統計的に評価された。1,280 の薬理学的に活性な化合物と社内の天然物ライブラリ（120 の化合物）を含むシグマアルドリッチ LOPAC ライブラリを、証拠として *M. maripaludis* 及び *M. AbM4* に対してスクリーニングした。開発された方法は、化合物ライブラリーのスクリーニングスループットを大幅に向上させ、反芻動物のメタン排出を軽減するための新しいメタン生成特異的阻害剤を発見するために、より大きな化合物ライブラリをスクリーニングするために使用できるようになった。

334 オタゴ大学の科学者は、世界の農業メタン排出量を削減するために重要な発見をした国際的な研究協力に加わっている。具体的には、メタン生成微生物（メタン生成菌）の主なエネルギー源である水素の供給を制御する微生物と酵素を決定した。

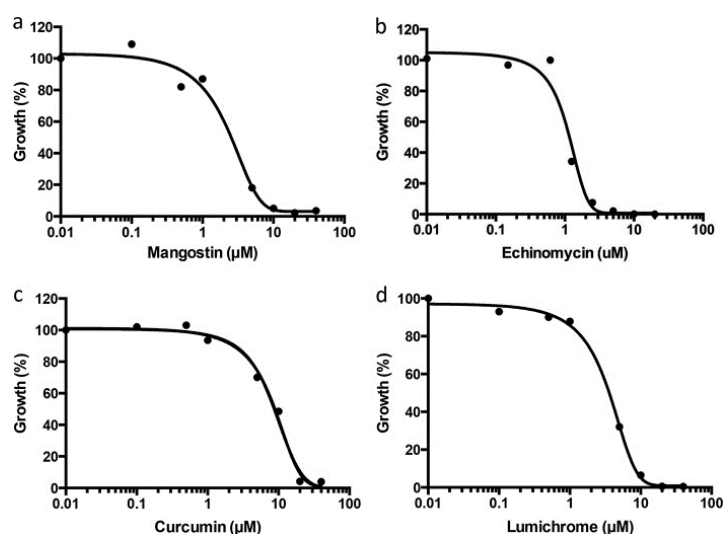


図 71 *M. maripaludis* の増殖 (%) に対する阻害剤の影響

阻害濃度の中央値 (IC₅₀ マンゴスチン (2.5 μ M) (a)、エキノマイシン (1.2 μ M) (b)、クルクミン (6.5 μ M) (c)、およびルミクロム (2.6 μ M) (d) の 96 穴マイクロタイタープレートフォーマットを使用した *M. maripaludis* の増殖 (%) に対する値。増殖は OD₆₀₀ から決定された。0.2% 硫化ナトリウム (wt/vol) および 400mM ギ酸ナトリウムを含む McF 培地を用いて、4% 接種用、37°C で 5 日間インキュベートした後に記録された。

(3) Tailored Nanoparticles With the Potential to Reduce Ruminant Methane Emissions

(反芻動物のメタン排出量を削減する可能性のあるカスタマイズされたナノ粒子)

[Front Microbiol. 2022; 13: 816695](#)

Eric Altermann (AgResearch Ltd., Palmerston North, New Zealand)

機能化されたバイオポリヒドロキシ酪酸 (PHB) ナノ粒子がルーメンメタン生成を阻害することによる、腸溶性メタン放出を抑制するための新しい概念が提供された。ナノ粒子は、さまざまなルーメン *Methanobrevibacter* sp に対して活性な古細菌溶解酵素 PeiR を用いて *in vivo* で機能化された。ルーメンメタン生成菌に対する機能化ナノ粒子の影響は、純粋培養、ルーメンバッチおよび連続フロールーメンモデルで実証され、最も複雑なシステムで 11 日間で最大 15% のメタン抑制をもたらした。さらに、ルーメン環境でのバイオナノ粒子発酵の証拠を提示する。反芻動物の栄養に不可欠な短鎖脂肪酸のレベルの上昇が記録され、メタンの抑制と動物の生産性の向上の可能性を組み合わせた有望な新しい戦略が生まれた。

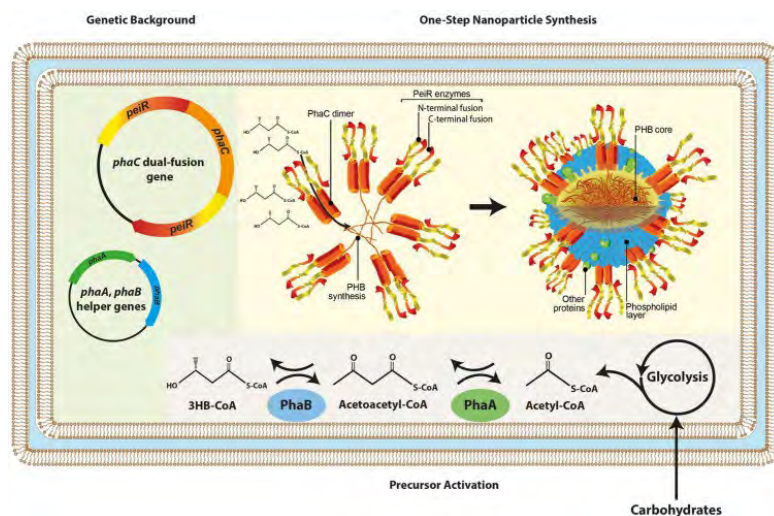


図 72 *in vivo* ナノ粒子合成の模式的提示

グラフィック表現は、二重融合機能化ナノ粒子に使用される遺伝子的バックボーン（薄緑色の背景）、その後の代謝前駆体のリダイレクトと活性化（灰色の背景）、および PeiR-PhaC-PeiR 融合二量体が PHB 合成を媒介するワンステップナノ粒子生合成、ナノ粒子に自動凝集する疎水性高分子を示している。PeiR-PhaC-PeiR 融合ダイマーは、ビーズ表面（黄色の背景）に方向性がある。生合成は大腸菌で行われる。3HB-CoA : 3-hydroxybutyryl coenzyme A

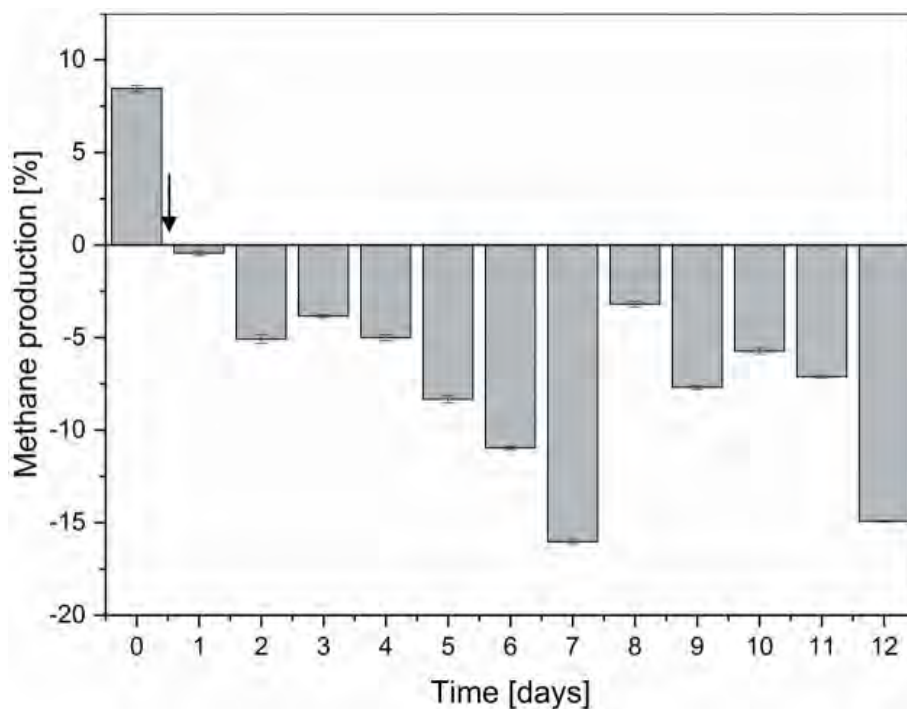


図 73 連続フロー発酵システムにおけるメタン抑制制度

非機能化および二重融合 PeiR ナノ粒子間のメタン阻害は、12 日間にわたって阻害パーセントとして表される。縦矢印は、反応容器へのナノ粒子添加の開始を示す。エラーバーは、2 つのリアクター容器の標準誤差を表し、それぞれ毎日 96 回のメタン測定を行う。

(4) Genetic parameters for residual feed intake, methane emissions, and body composition in New Zealand maternal sheep

(ニュージーランド産ヒツジの残留飼料摂取量、メタン排出量、体組成の遺伝的パラメータ)

Front Genet. 2022; 13: 911639

Patricia L. Johnson (Invermay Agricultural Centre, AgResearch Ltd., Mosgiel, New Zealand)

ニュージーランドの雌ヒツジにおける飼料効率(残留飼料摂取量: residual feed intake RFI)と GHG 形質との関係(遺伝的および表現型)はこれまで調査されておらず、体組成の詳細な推定値との関係もなかった。ニュージーランドの雌ヒツジにおけるこれらの関係を調査するために、2015 年に Mosgiel の AgResearch Invermay に、個々の給餌イベントを記録する自動給餌器で構成される飼料摂取施設が設立された。Sheep Improvement Ltd. のデータベースに登録された 3 つの血統記録された群れから供給された 986 頭の成長する雌ヒツジについて、飼料摂取量、摂食行動およびガス排出量の個々の測定値が作成された。体組成については、591 頭のサブセットから追加データを作成した(超音波およびコンピューター断層撮影スキャンを使用して推定)。RFI、メタンおよび $\text{CH}_4/(\text{CH}_4 + \text{CO}_2)$ の遺伝率推定値は、それぞれ 0.42 ± 0.09 、 0.32 ± 0.08 、および 0.29 ± 0.06 であった。体組成形質の遺伝率³³⁵推定値は、枝肉の痩せた形質と脂肪の形質で高かった。たとえば、内臓脂肪の遺伝率³³⁶は 0.93 ± 0.19 であった。RFI とメタン排出量の関係は複雑であり、食べる飼料が少ないと放出されるメタンの絶対量が低下するが、RFI と $\text{CH}_4/(\text{CH}_4 + \text{CO}_2)$ の間には、それぞれ -0.13 ± 0.03 および -0.41 ± 0.15 の負の表現型および遺伝的相関があった。また、RFI とメタンの両方の形質と体組成の間には、体内の内臓脂肪の割合と RFI の間の負の相関 (-0.52 ± 0.16)、体内の痩せた割合とメタンの割合の間の正の相関 (0.54 ± 0.12) など、ゼロではない遺伝的相関があった。さらにこれらの結果は遺伝的相関の最初の正確な推定値を提供するものである。

表 22 雌ヒツジの飼料摂取量、摂食行動およびガス排出量の測定

	Mean	s.d.	Direct $h^2 \pm \text{s.e.}$	Maternal $h^2 \pm \text{s.e.}$	Repeat. $\pm \text{s.e.}$ 14 Day
BW (kg)	57.6	8.6	0.43 ± 0.11	0.15 ± 0.07	0.95 ± 0.003
CH_4 g/day	17.2	3.51	0.32 ± 0.08	0.01 ± 0.04	0.31 ± 0.03
CO_2 g/day	1,248	235	0.32 ± 0.08	0.04 ± 0.05	0.57 ± 0.02
$\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ (mol)	29.4	5.44	0.31 ± 0.08	0.04 ± 0.05	0.57 ± 0.02
$\text{CH}_4/(\text{CH}_4 + \text{CO}_2)$ (mol/mol)	0.037	0.0070	0.29 ± 0.06		0.32 ± 0.03

³³⁵ 遺伝率 (heritability) は、ある表現型の遺伝的要因の重要性を測る尺度である。全表現型分散に対して遺伝分散が占める割合で定義される。量的遺伝学において平均への回帰の程度を示す量であり、小さいほど回帰が大きい。

要約統計量（平均、s.d）、遺伝率（h²） 推定値（±s.e.）（直接および母体）、体重（BW）およびメタン（CH₄）の14日間の再現性推定値（±s.e.）。
二酸化炭素（CO₂）および酸素（O₂）は、ポータブルアキュムレーションチャンバーを使用して測定。
結果は968頭のデータに基づいている。

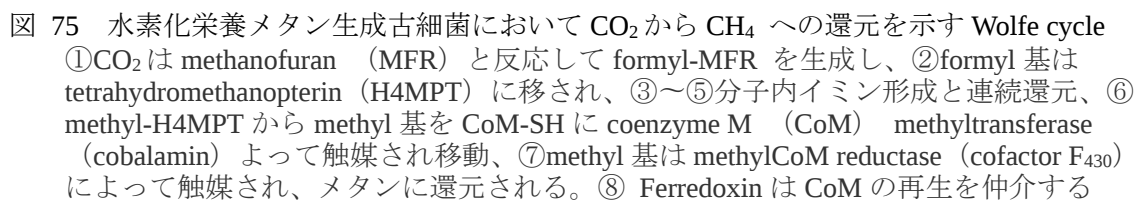
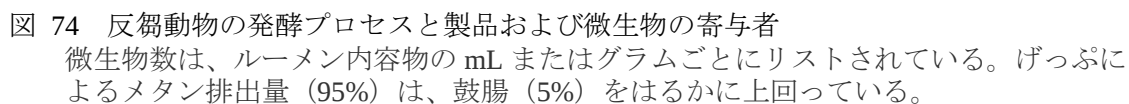
（５） Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed *Asparagopsis* in feed for the reduction of methane production from ruminants

（反芻動物からのメタン生成を減らすために、海藻 *Asparagopsis* を含む bromoform を飼料に含めることの利点とリスク）

[Algal Research](#) Volume 64, May 2022, 102673

Christopher R.K. Glasson (University of Waikato, Te Aka Mātuatua - School of Science, Environmental Research Institute, Tauranga 3110, New Zealand)

反芻動物のメタン生成を軽減するための戦略には、メタン生成阻害剤の使用が含まれる。例えば、牛やヒツジの飼料に低濃度で含まれる海藻 *Asparagopsis taxiformis* and *Asparagopsis armata* は、メタン生成を最大 98%阻害し、飼料利用効率の改善が見られた。その結果、これらの海藻への関心と需要が世界的に高まっている。これに対応して、*Asparagopsis* の大規模養殖を促進し、高品質で一貫したサプライチェーンを可能とする養殖生産システムを開発するための研究が急速に進んでいる。持続可能な生産のための堅牢な戦略を開発することに加えて、その生産とその後の抗メタン生成飼料としての使用に関連する利点とリスクを検討および評価することが重要である。このレビューでは、*Asparagopsis* のメタン生成阻害の主要な活性成分である bromoform (CHBr₃) に関連するルーメンの生化学的経路、分解、毒物学的リスク、および *Asparagopsis* の生産と反芻動物の飼料成分としての使用が大気化学に及ぼす影響に焦点を当てている。



2. 7. 4. EU

(1) Carbon input management in temperate rice paddies: implications for methane emissions and crop response

(温帯水田における炭素投入管理:メタン排出と作物応答への影響)

[Italian Journal of Agronomy 2020; 15:1607](#)

Chiara Bertora (Department of Agricultural, University of Turin, Italy.)

農業は世界の人為的 GHG 排出量の 20%以上を占めており、灌漑水田はメタン排出量の 5~10%を占めている。メタン生成基質を提供する主な有機投入物はわらである。稲わらを除去することでメタンの排出を抑制でき、その炭素 (C) 投入量を生消化物または固体消化物に置き換えることは、作物、土壌、排出反応の両方にとって貴重な代替手段になり得るという仮説が立てられた。わらを入れない土壌は、わらの鋤き込み後の土壌よりも平均 38%少ないメタン排出量であった。また、用いた有機肥料は鉍物性窒素の施用と比べてメタン排出量を増加させることはなかった。さらに、用いた有機肥料は、鉍物性窒素と比べて作物中の窒素必要量を完全に維持することができなかった。したがって、わらの管理は、イネの収量とメタン排出量の両方を決定するために決定的であったが、施肥処理の影響は作物の生産性にのみ重要であった。

有機肥料 (消化またはその固形画分) の生産のためのバイオガスプラントの原料の一部としてのわらの代替使用およびその後の土壌への還元は、フィールドスケールでのメタン排出を軽減し、ミネラル N 施肥を部分的に代替することができるが、短期的には作物収量の減少につながる可能性があることに注意が必要である。これらの有機物を繰り返し添加することで、有機物プールの発生に及ぼし、収量の安定化を保証し、メタン排出量を増加させることなく SOC ストックを強化する有益な効果を評価するには、さらなる調査が必要である。

(2) Methane mitigating options with forages fed to ruminants

(反芻動物に与えられた飼料によるメタン抑制オプション) [Grass Forage Sci.](#)

[2021;76:196-204](#)

Maguy Eugène³³⁷ (INRAE -Université Clermont Auvergne - VetAgro Sup, UMR 1213

Unité Mixte de Recherche sur les Herbivores, Centre de recherche Auvergne- Rhône-Alpes, Theix, France)

飼料管理対策を含む栄養戦略は、メタン及び全体的な GHG 削減の有望な方法である。

337 INRAE - Université Clermont Auvergne - VetAgro Sup, UMR 1213 Unité Mixte de Recherche sur les Herbivores, Centre de recherche Auvergne- Rhône- Alpes, Theix, France 気候変動における反芻動物農業の影響を定量化し、削減するために、フランスの温室効果ガス (GHG) インベントリを担当する組織であるシテパと共同で、INRAE (UMRH) の研究者と AgroParisTech によって新しい方法論が開発された。

ここでは、飼料の品質（digestive organic matter（可消化有機物、DOM）と飼料の種類（草とマメ科植物、トウモロコシ）の影響に関連して、文献からのエビデンスをレビューする。メタン発生量（g/kg DMI（Dry Matter Index、乾物摂取量））は、乳牛とヒツジの両方の飼料の消化率の増加とともに減少し、メタン強度（g/kg 牛乳）は、乳牛の飼料の消化率の増加とともに減少する。反芻動物の給餌システムで飼料マメ科植物を使用すると、窒素（N）肥料の使用と関連する排出量の減少により、全体的な GHG 排出量を削減できる。推奨される食事による削減策は、多くの場合、動物のニーズに対する食事性タンパク質のより良いマッチング、尿から糞便への N 排泄のシフト（低レベルのタンニン含有による）、排泄される発酵性有機物の量の減少など、N 排泄の減少に関連している。メタンは、タンニンが豊富なマメ科植物飼料の摂取量の増加とともに減少し、尿中 N から糞便 N への N 分配のシフトがある。メタンの低下飼料ベースの食事で飼育されている反芻動物からの排出は、家畜と農業の CO₂ 排出量を抑制し、反芻動物の生産効率を改善する。

高品質の飼料に基づく反芻動物の給餌システムは、家畜や農業の GHG への寄与を減らすことができる。反芻動物は、価値の低い飼料からヒトの栄養を担う食物を生産する能力を保持する。これらの新たな戦略を採用することで、発展途上国と先進国の両方で反芻動物の生産効率を向上させることができる。

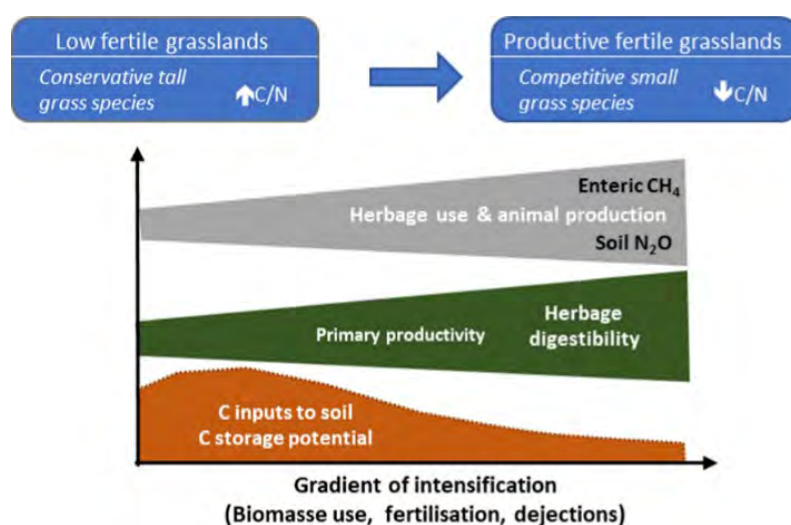


図 76 放牧（x 軸）と施肥（y 軸）による草地強化の影響の推定範囲と方向性

放牧システムを強化する際に考慮する必要がある多くのトレードオフがある。(a) 生産性の向上（およびその後のバイオマス除去）は、土壌に戻される有機炭素の量の減少につながる。(b) 飼料品質の最大化（低い C/N 比）および関連する消化率の増加（すなわち、動物生産の改善）は、土壌有機 C の平均滞留時間の低下（すなわち、根および芽の分解性の増加）をもたらす。(c) 肥料供給およびマメ科植物による正味一次生産性の増加（生物学的窒素固定）は N₂O（肥料と尿から）排出量とメタン飼料品質の向上による腸溶発酵からの排出の増加をもたらす。

(3) Use of Lactic Acid Bacteria to Reduce Methane Production in Ruminants, a Critical Review

(反芻動物のメタン生成を減らすための乳酸菌の使用、重要なレビュー)

[Front. Microbiol., 01 October 2019 Sec. Systems Microbiology](#)

Natasha Doyle (Teagasc Moorepark Food Research Centre, Fermoy, Ireland)

畜産からのメタン排出量を抑制するための革新的なソリューションとして考えられるアプローチの1つは、炭水化物発酵の主要な最終産物として乳酸を生成する乳酸菌(LAB)の使用である。LABは反芻動物から容易に分離でき、現在、農場で直接給餌微生物(DFM)およびサイレージ接種剤として使用されている。LABを使用して反芻動物のメタン生成を減らすことができると提案されているが、これまでのところ研究は限られており、この概念を裏付ける説得力のある動物データは不足している。このレビューでは、現在の文献を批判的に評価し、メタン緩和戦略としてのLABの潜在的な使用とメカニズムの包括的な分析と要約を行った。

研究では、*in vitro*でLABは効果的にメタン生産を減らすことができる結果が得られているが、その効果は明らかに株に依存しており、LABまたはその代謝産物がメタン生成に必要な基質を産生する他のルーメン微生物に影響を与えるかどうかは確認されていない。*in vivo*では、LAB補充とメタン抑制策を調査する動物試験(適切な動物数、関連する治療群、試験期間、および株の有効性)の欠如により、現時点では包括的な結論を出すことは不可能である。ルーメン修飾剤としてのLABの使用の背後にあるメカニズムを理解するには、さらに多くの研究が必要である。しかし、適切なLAB培養物が特定され、*in vivo*で有効であることが証明されれば、DFM³³⁸やサイレージ接種剤など、世界の農業システムですでに受け入れられているさまざまな送達オプションが利用可能になる。これは、ワクチンや現在開発中のメタン産生阻害剤などの他のメタン削減オプションと組み合わせて使用可能なメタン削減研究への代替アプローチを示している。農場管理の実践により動物あたりのパフォーマンスが向上するシステム(たとえば、牛1頭あたりの乳固形分、雌ヒツジ1頭あたり得られるラム肉のkg、牛1頭あたり得られる牛肉のkgなど)、飼育率の低下と組み合わせられて、メタン排出量を削減できる。LABの補給は、反芻動物家畜からのメタン排出を減らすための実用的で効果的かつ自然なアプローチを提供でき、メタン排出量とメタン抑制に取り組む農場管理に貢献することができる。

338 DFM 社が提供する farm automation system

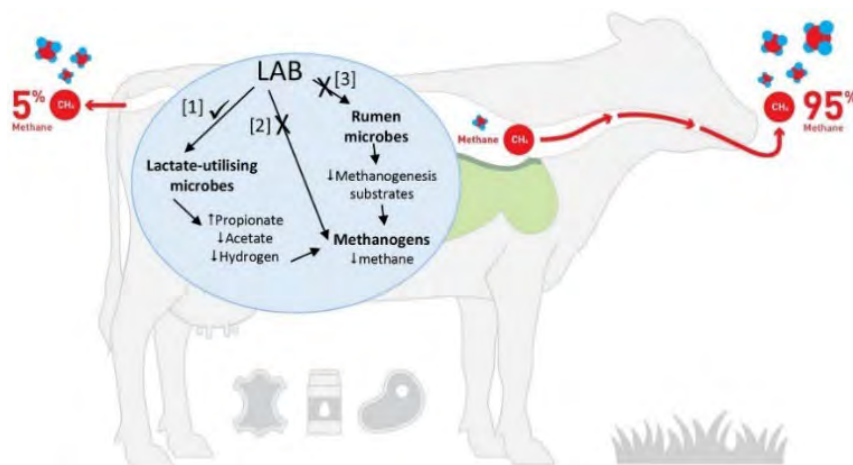


図 77 メタン生産を減らすために LAB によって調節される可能性のある潜在的な経路

LAB は 3 つの可能な方法でルーメンメタン生成に影響を与える可能性があるという仮説が立てられている (1) LAB またはその代謝物を使用してルーメン発酵をシフトし、対応するメタン産生を減少させる、(2) ルーメンメタン生成物質を直接阻害するための LAB またはその代謝物の使用、および (3) H_2 を産生する特定のルーメン細菌またはメタン生成の基質であるメチル含有化合物の生産を阻害するための LAB またはその代謝物の使用。

(4) The rumen microbiome inhibits methane formation through dietary choline supplementation

(ルーメン微生物叢は、給餌にコリンを加えることでメタン生成を阻害する)

[Scientific Reports | \(2021\) 11:21761 Nature portfolio](#)

Yang Li¹³³⁹ (Institute of Agricultural Sciences, ETH Zurich)

この研究は、ルーメン微生物叢の操作によるメタン抑制のための別のアプローチを追加することを目的としている。メタン生成に対するコリン補充の効果は、ルーメンシミュレーション技術³⁴⁰を使用して *in vitro* で定量化された。補充 200mM 塩化コリンまたは重炭酸コリンを補充するとその後のメタン排出量を 97-100%削減した。メタン生成の減少に関連して、メタボロミクス分析は、高濃度の処理後エタノールを示したが、これは主要な水素吸収源として機能した可能性が高い。メタゲノムシーケンシングは、メタン生成菌群集がほぼ完全に失われ、水素シンクとして乳酸、エタノール、またはギ酸塩のいずれかを生成できるコリン利用細菌が濃縮されていることを示した。メタン削減に最も強く関連する分類群は、*Megasphaera elsdenii* および *Denitrobacterium detoxificans* であり、どちらも中間生成物であり水素吸収源である乳酸を消費できる。したがって、コリン代謝は、細菌が代替水素吸収源を利用する能力を促進し、メタン生成の基質としての水素の減少をもたらした。しかし、コリンの補給では繊維と全有機物の発酵を完全に維持することがで

339 動物栄養学の教授であり、家畜からの温室効果ガス排出防止のバイオニアである Michael Kreuzer は飼料添加物だけではなく、研究者として植物、動物、環境の間の相互作用の多様性に興味を持っている。

340ルーメン発酵を調べるための確立された半連続 *in vitro* モデル

きず、アミノ酸の脱アミノ化とエタノールアミン異化により過剰なアンモニアが生成され、飼料効率が低下し、生きた動物のパフォーマンスに悪影響を及ぼす。

モデルとして、コリン特に塩化コリンの形での処理はメタン生成を阻害し、メタンを検出限界以下まで減らす新しい方法を示している。しかしこの処理は *in vitro* 連続培養システムの消化率を低下させ、ルーメンアンモニア濃度を大幅に高めるため、動物の健康と福祉上の理由から生きた動物で実施するには適していない。

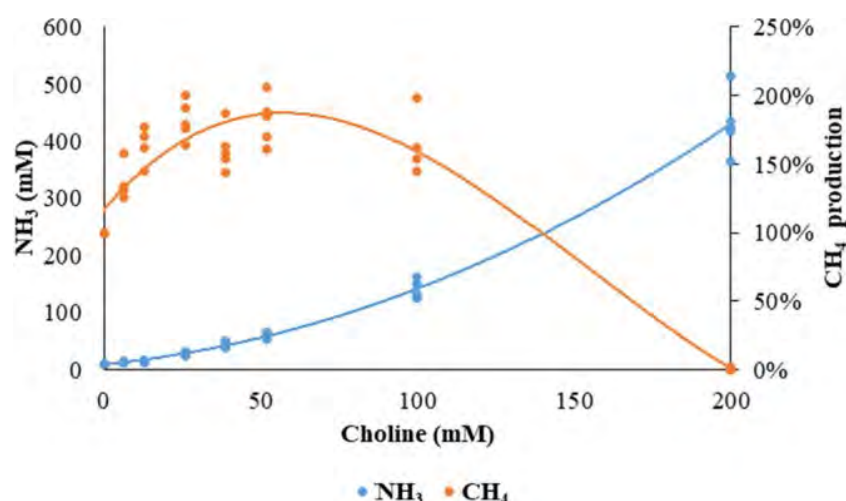


図 78 メタン生成とルーメン発酵に対するコリンの影響

メタン及び NH₃ 生産に対するコリン補充の投与量反応 (dose-response)。0、6.5、13、26、39、52、100 および 200mM のコリンが、人工唾液に 15 日間補充された。散布図にはメタン発生量が表示される。11 日目から 15 日目までの間のメタン生産はオレンジで、NH₃ 濃度は青色で表示されている。

(5) Mitigation of greenhouse gas emissions and reduced irrigation water use in rice production through water-saving irrigation scheduling, reduced tillage and fertiliser application strategies.

(節水灌漑スケジューリング、耕作および肥料施用戦略の削減による稲作における温室効果ガス排出の緩和と灌漑用水使用量の削減)

[Science of the Total Environment 739](#) (2020)

S.F. Islam et al³⁴¹ (Soil Biology Group, Wageningen University, Droevendaal, Netherlands)

米生産システムは世界的な GHG 排出の主要な原因である。水利用効率を改善し、GHG 排出量を抑制するために、いくつかの農業戦略が提案されている。この研究の目的は、節水灌漑 (alternate wetting and drying (AWD) : 交互湿潤乾燥 vs soil water potential : 土壌水ポ

341 土壌生物学 (SBL) グループは、土壌生物を持続可能な (農業) 生態系の鍵と見なしている。土壌中の元素 (炭素、栄養素) 変換における土壌生物の役割を研究している。

テンシャル (SWP))、対照的な土地確立 (代掻き vs 耕作の削減) および肥料施用方法 (撒布 vs 液肥) が水利用効率、GHG 排出量および米収量に与える影響を評価することである。実験は、8 つの処理 (3 つの因子のすべての組み合わせ) と 4 つの反復を伴うランダムな完全ブロックデザインでレイアウトされた。撒布施肥と組み合わせた AWD は、収量を維持するという点で SWP よりも優れていた。ただし、季節性亜酸化窒素 (N_2O) 排出量は、AWD の対応する処理と比較して、撒布 SWP および液体肥料 SWP 処理でそれぞれ 64% および 66% 大幅に抑制された。SWP はまた、季節メタンの排出を撒布および液体施肥処理においてそれぞれ 34% および 30% 削減した。面積スケールの GWP は、AWD の対応する処理と比較して、撒布 SWP および液体肥料 SWP 処理でそれぞれ 48% および 54% 減少した。撒布 -SWP < 撒布-AWD = 液体肥料-SWP < 液体肥料-AWD。生育期の水使用量は、節水 AWD と比較して SWP 処理で 15% 少なかった。この研究の結論は、改善された水管理と窒素肥料と作物需要のタイムリーな調整により、水の使用量、 N_2O 排出を介した N 損失とメタン排出量を抑制できるということである。

この実験は、土壌水分条件を効果的に制御できる乾季に実施されたが、地下水測定を含む可変環境条件下でのより長期的な実験データは、これらのアプローチの全範囲への影響を明らかにするために有益である。

収量スケールの Global warming potential (地球温暖化係数、GWP) は、液体肥料-AWD 処理で最も高く、平均 0.48 kg CO_2 等価 kg⁻¹ 米粒。最も低い収量スケールの GWP (0.17 kg CO_2 等価 kg⁻¹ 米粒) を撒布-SWP 処理から記録した。SWP 灌漑処理では、収量スケール GWP は AWD 処理よりも撒布および液体施肥でそれぞれ 46% および 37% 低かった。

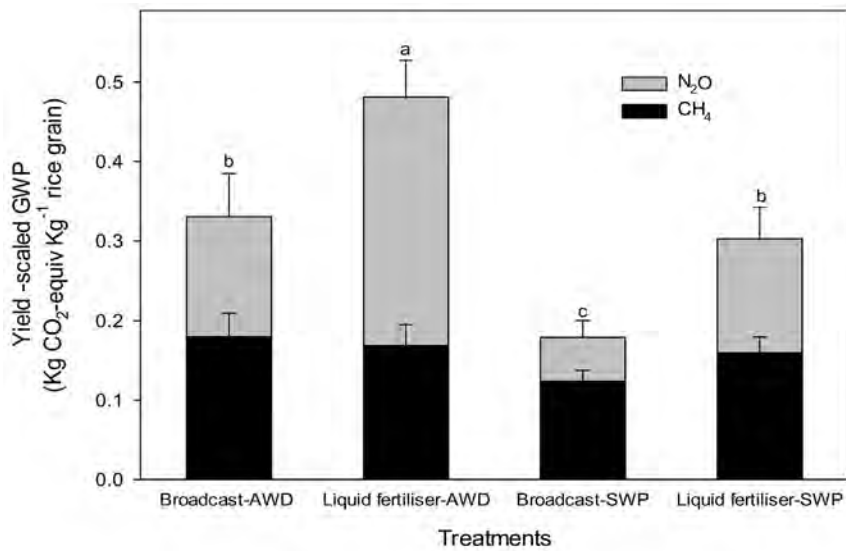


図 79 2つの節水代替水管理体制と施肥方法の影響を受ける収量スケールのGWP
 エラーバーは1 SEM (n = 4)を示す。異なる文字は、米生産の扱いの有意性 (p < 0.05)を示す(小文字)。AWDは、交互の湿潤と乾燥でスケジュールされた表面灌漑を表し、SWPは、土壌水ポテンシャルでスケジュールされた表面灌漑を表す。

2. 7. 5. ドイツ

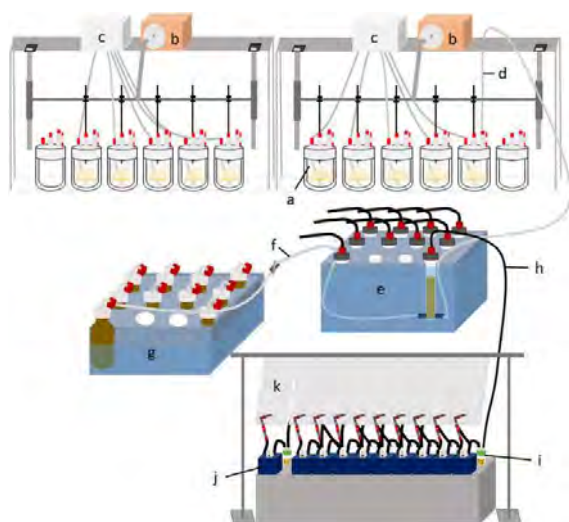
(1) Methane Reduction Potential of Brown Seaweeds and Their Influence on Nutrient Degradation and Microbiota Composition in a Rumen Simulation Technique

(ルーメンシミュレーション手法による褐藻のメタン抑制ポテンシャルと栄養物分解及び微生物叢組成への影響)

Arch. Anim. Breed., 63, 211–218, 2020

Susanne Künzel³⁴² (Institute of Animal Science, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany)

この研究は、2 種類の褐藻 (*Ascophyllum nodosum* および *Fucus vesiculosus*) が *in vitro* でのメタン生産、栄養物分解および微生物叢組成に及ぼす影響を調査することを目的としている。総混合配給量 (TMR) は、長期ルーメンシミュレーション技術 (Rusitec) 実験において、対照として単独で、または各海藻と一緒に 2 種類の含有量 (乾物ベースで 2.5 および 5.0%) でインキュベートされた。生成した総ガスのメタン濃度は、*A. nodosum* および *F. vesiculosus* の 5% 含有量でそれぞれ 8.9 および 3.6% 減少した。総ガス生産量はすべての海藻によって減少し、5% の海藻含有量でさらに減少した。両海藻を 5% の含有量で補給すると、試験した海藻のヨウ素含有量が高いため、全ガス中のメタン濃度が低下したが、実際の給餌の適用には注意が必要である。



廃液は、冷却水浴 (e) のガラスボンベ内で、冷却水浴 (g) のガラス瓶に集められた廃液 (f) とガス状廃液 (h) に分離される。ガス状廃液は、H のコールドトラップを通過する。2S 吸収体顆粒 (i)、ガスカウンター (j) で測定し、ビニール袋 (k) 中でメタン分析のためにサンプリングする。

図 80 リフトモーター (b)、バッファーポンプ (c)、および排水用の気密管 (d) に接続された 12 個の発酵槽 (a) を備えた **Rusitec** の概略

表 23 5 つの処理のうち、生成ガスの総ガス生産量とメタン濃度 (7～13 日目)

342 畜産学研究所は、資源を節約し、動物福祉を遵守することにより、健康な動物との持続可能な食料生産の目的を推進している。家畜の微生物叢と動物や環境との相互作用に関する研究は、研究所の重要なトピックの 1 つである。

	Total gas (mL/d)	CH ₄ (% of total gas)	CH ₄ /degraded OM (mL/g)
TMR	1386	16.9	36.7
AN2.5	1238	16.6	35.1
AN5	1114	15.4	30.5
FV2.5	1177	16.6	35.9
FV5	1114	16.3	32.6

AN, *Ascophyllum nodosum*; FV, *Fucus vesiculosus* (both with 2.5 or 5% inclusion level) ; TMR, total mixed ration

(2) Application of Mootral™ Reduces Methane Production by Altering the Archaea Community in the Rumen Simulation Technique

(Mootral™ の利用は、ルーメンシミュレーション技術において古細菌群集を変化させることによってメタン生成を抑制する)

[Front Microbiol. 2018; 9: 2094](#)

Melanie Eger³⁴³ (Institute for Physiology, University of Veterinary Medicine Hanover, Hanover, Germany)

ニンニク (*Allium sativum*) からの有機サルファー化合物はおよびフラボノイドはメタン生成を減らすことができる有望な植物由来化合物として同定されている。本研究では、ルーメンシミュレーション技術を *ex vivo* モデルとして、ニンニク粉末とビターオレンジ (*Citrus aurantium*) 抽出物である Mootral の組み合わせがルーメンメタン産生、ルーメン発酵およびメタンを生成する古細菌群集に及ぼす影響を評価した。実験は、7 日間の平衡期間、8 日間の実験期間、および 4 日間の離脱期間で構成された。実験期間中、3 つの発酵槽がそれぞれ対照 (CON) として処理され、低用量の Mootral (LD)、高用量のミュートラル (HD)、またはモネンシン (MON) をポジティブコントロールとして投与された。Mootral の適用は、発酵ガス中のメタンの割合とメタンの生成速度を大幅に低下させた。さらに、実験混合物は、短鎖脂肪酸の生成速度および酪酸のモル比の用量依存的な増加を誘導した。古細菌のファミリーの間では、*Methanobacteriaceae* の割合は、Mootral の両方の用量の適用中に減少した。さらに、処理グループ間および LD および HD 群の添加剤の離脱後に OUT (Operational Taxonomic Unit)³⁴⁴ レベルでいくつかの有意差が観察された。14 日目に、4 つの OTU がメタン生成と正の相関を示した。結論として、ニンニクと柑橘類の化合物のこの混合物は、ルーメン発酵にネガティブな副作用を示すことなく、古細菌群集の変化によってメタン生成を効果的に減少させると考えられた。

³⁴³ 主な研究分野は、感染症の生物学、臨床研究、システム神経科学、動物の健康と飼料の品質である。

³⁴⁴ 近縁な個体をひとまとめに分類するための操作上の単位