

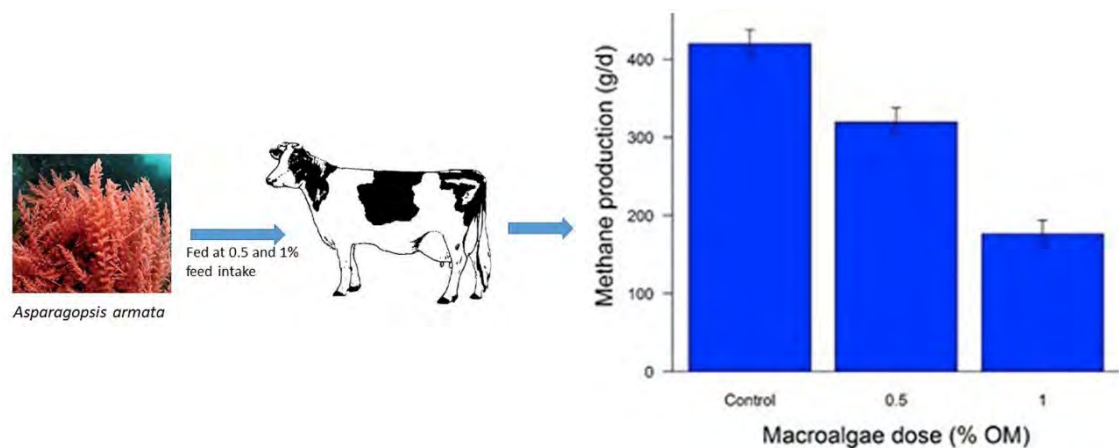


図 42 *A. armata* 含有飼料を与えた牛のメタン生成量²³²

② 3-ニトロオキシプロパノール (3NOP)

これまでの研究において、3-ニトロオキシプロパノール (3NOP) が授乳中の乳牛の腸管メタン放出を一貫して減少させることが示されている。3NOP は、メタン生成経路において最終段階の反応を触媒するメチル補酵素 M (CoM) レダクターゼの活性を阻害する小分子であり、3NOP が有効なメタン阻害剤であることが実証された²³³。

ペンシルベニア州立大学の **Lopes, JC** らは、メタン放出の減少に加えて、3NOP が授乳中の乳牛におけるメタン生成の生理機能または環境条件の変化により、メタン同位体組成に影響を与えるかどうかを検討した。テストされたメタン阻害剤である 3NOP は授乳中の乳牛の第一胃において、腸内メタン放出を 31% 減少させ (表 3)、酢酸とプロピオン酸の比率を減少させ、プロピオン酸と酪酸のモル比率を増加させ、アンモニア濃度を減少させた。阻害剤は反芻胃の古細菌の組成に影響を与えなかったが、反芻胃内容物全体におけるメタン生成菌細胞数の割合を減少させる傾向があった²³⁴。

233 <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1504124112>

234 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030216301801>

表 3 授乳中の乳牛における CO₂、CH₄、および H₂ 排出に対する 3NOP の影響²³⁴

Item	Treatment ¹		SEM ²	P-value
	CON	3NOP		
CO ₂ , g/d	14,303	14,905	623.5	0.15
CH ₄ , g/d	487	335	40.1	<0.001
CH ₄ , g/kg of DMI ³	20.7	13.6	1.40	<0.001
CH ₄ , g/kg of milk ³	18.0	11.9	2.35	<0.001
H ₂ , g/d	0.0 ⁴	1.3	0.13	<0.001

¹Treatments were control (CON), and 60 mg of 3NOP/kg of feed DM (3NOP).

²Largest SEM published in table; n = 61 for all variables (n represents the number of observations used in the statistical analysis).

³Based on milk yield and DMI data during the gas measurement periods.

⁴0.005 g/d.

CON:Control

(2) イネの育種

メタンの排出を抑え、かつ収量も増えるイネの新品種が、米国、スウェーデン、中国の研究機関・大学によって共同開発された。米パシフィック・ノースウェスト国立研究所の研究チームはまず、転写因子とよばれる特別なタンパクが作られる場所を調節することにより、植物内で炭素と生産物である糖がどのように蓄積されるかを解明した。さらに、光合成により大気中から取り込んだ炭素の大半を葉や種子だけに供給し、根や土壌には回さない働きを持つ **SUSIBA2** と呼ばれる転写因子をオオムギから発見した。この新しいイネ系統は、オオムギの転写因子 **SUSIBA2** をコードする単一遺伝子を従来のイネ栽培品種に導入することで作出された。根や土壌への炭素供給を断てば、イネの根や土壌中のメタン発生源である微生物が必要とする炭素も断つことになり、メタン発生を抑えることが期待できる。研究チームが **SUSIBA2** を一般的なイネに組み込み、3 年間中国で栽培実験を続けた結果、**SUSIBA2** を組み込んでいないイネに比べて常に収量が多く、メタンの発生もほとんど抑えられることが確認できた (図 43)²³⁵。

235 https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20150807_01/

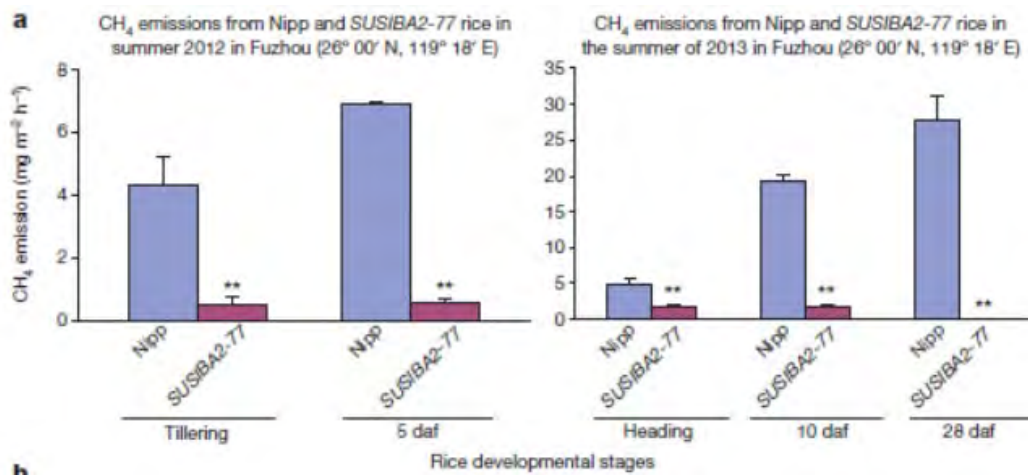


図 43 SUSIBA2 米による水田からのメタン排出削減²³⁵

a、2013 年の 4 つのイネ (n54) および 2012 年の 3 つのイネ (n53) からのメタン放出。

(3) FFAR Consortium : 家畜由来メタン削減のための業界コンソーシアム

第 26 回国連気候変動締約国会議 (COP26)で、食品農業研究財団(FFAR) と米国乳製品イノベーション センターは、業界志向のコンソーシアムである Greener Cattle Initiative を発表した。今後 5 年間で 500 万ドルを投じて、肉牛の生産者に腸内メタン排出の緩和策を提供し、激化する気候危機を抑制する研究に資金を提供する。Greener Cattle Initiative は、乳製品と牛肉のバリュー チェーン全体から利害関係者を集め、腸内メタン排出量を削減する実践と技術の研究開発への投資を活用する。このイニシアチブは、生産者、動物の健康、遺伝子、飼料、栄養に関する研究機関および企業から情報を得ている。Greener Cattle Initiative は、複数の利害関係者が知識を共有し、腸内メタン排出を削減して持続可能な牛肉と乳製品の生産を可能にする拡張可能で商業的に実現可能な技術の開発を加速するための手段として機能する。

Greener Cattle Initiative は、次の分野の研究を支援している。

- ・ 腸内メタン放出を抑制する飼料添加物およびサプリメント
- ・ 代謝経路を変更して腸内メタン排出を削減する飼料成分
- ・ メタン排出量の少ない牛の遺伝子選抜
- ・ 牛のマイクロバイオームの組成と活動に関する理解の向上
- ・ 腸内メタン排出または関連する生理学的指標を監視するためのセンサー、ロボット、人工知能などの技術
- ・ 腸内メタン緩和の実践と技術の社会経済分析

2. 5. 2. オーストラリア

反芻動物、主に牛による植物を材料とした微生物発酵で発生する腸内メタンは、大気中に放出されるメタンの約 30% を占めており GHG 排出の大きな要因となっている。一方、国連食糧農業機関（FAO）は、開発途上国における人口の増加と生活水準の向上に対応するために、赤身肉の需要が年間約 1.5% の割合で増加し続けると予測している²³⁶。そのため、赤身肉の消費や反芻動物の数を減らすのではなく、反芻動物からのメタン排出量を減らすことが、緩和アプローチとして重要となっている。オーストラリアの人口は約 2,500 万人であるが、約 6,000 万人分の食料を生産している。農業生産の約 70%を輸出していることから、世界の食料安全保障に大きく貢献しており、家畜サプライチェーンからの GHG 排出削減は、オーストラリアのみならず、世界の世界の食料安全保障における課題となっている。

オーストラリアは 2016 年に排出削減基金（Emissions Reduction Fund : ERF）を導入した。この基金は、メタン削減（またはその他の温室効果ガス削減）の承認された方法が政府の承認を得ている場合において、一次生産者が温室効果ガスの排出を削減するために支払われる。参加者は、プロジェクトによって保存または回避された二酸化炭素換算排出量 1 トン（tCO₂-e）ごとに、オーストラリアの炭素クレジット単位（ACCU）を獲得できる。ACCU は、炭素削減契約を通じてオーストラリア政府に売却するか、流通市場で企業やその他の民間の購入者に売却して収入を得ることができる。ACCU の政府による購入は、Powering the Regions Fund を通じて行われる²³⁷。オーストラリアの赤身肉産業が 2030 年までにカーボンニュートラルになるという目標を設定する先駆者として、Meat and Livestock Australia（MLA）は、国立家畜メタンプログラム（NLMP）において、反芻動物の潜在的なメタン緩和戦略を幅広く検討した。

（1）メタン等の発生を抑える家畜飼料の開発

① ジェームズクック大学による大型紅藻 *Asparagopsis* の研究

大型藻類のいくつかの種は、*in vitro* 発酵で抗メタン化活性を持っている。オーストラリアのジェームズクック大学の Robert D. Kinley らは、第一胃の接種材料を用いた *in vitro* 発酵を使用して、72 時間の発酵を通じて、腸内メタン生成と消化効率に対する大型紅藻 *Asparagopsis taxiformis* の含有率の影響について調べた。基質の 1% 以下の用量レベルでは、ガス発生とメタン生成への影響は最小限だったが、含有量が 2% 以上の場合、ガス発生が減少し、発酵中のメタン生成が排除され、最小阻害用量レベルが示された。5%以下の大型藻類含有物では基質の消化率に悪影響はなかったが、10%の含有物では有意な低下が観察された（図 44）²³⁸。

236 <https://www.fao.org/3/y4252e/y4252e07.htm>

237 <https://www.dcccew.gov.au/climate-change/emissions-reduction/emissions-reduction-fund>

238 <https://www.publish.csiro.au/AN/AN15576>

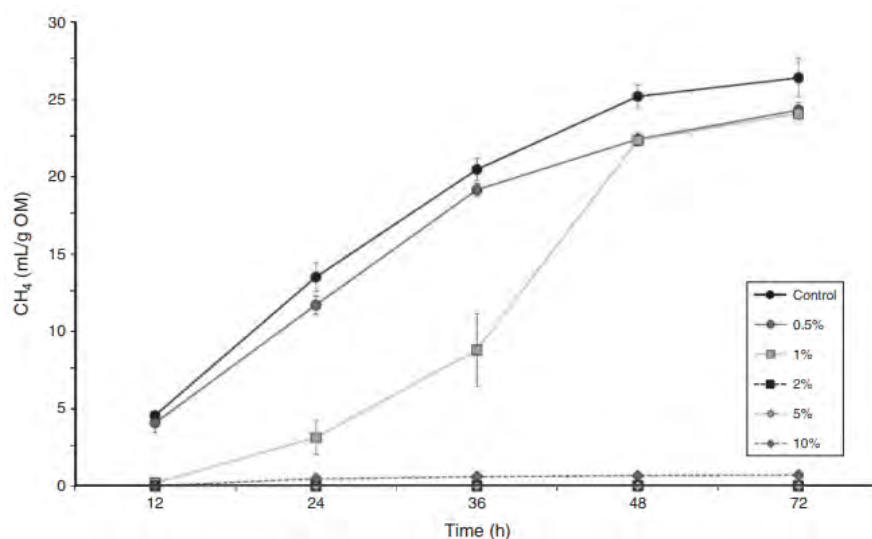


図 44 *Asparagopsis* の用量増加が in vitro メタン生成 (mL/g 有機物) 平均 (±s.e.m.) に及ぼす時系列効果。Control：高品質のローズグラスの干し草²³⁹

Asparagopsis を家畜の飼料として十分な規模で生産するには、機能性飼料原料として製品化する前に開発が必要である。*Asparagopsis* のバイオマスを乾燥させ、その後保存するさまざまな方法が、二次代謝産物のレベルと抗メタン生成効力にどのように影響するかは不明であるため、最も適切な方法の特徴付けが必要である。

② CSIRO による大型紅藻 *Asparagopsis* の研究

CSIRO (Scientific and Industrial Research Organisation) は、MLA (Meat & Livestock Australia) およびジェームス クック大学と協力して、FutureFeed と呼ばれる費用対効果の高い海藻飼料成分を開発した²⁴⁰。FutureFeed は、メタン排出量を大幅に削減し、家畜の生産性を高める可能性があるオーストラリア原産の *Asparagopsis* 種の海藻を使用している。*Asparagopsis* 種の海藻は、ブロモホルムと呼ばれる生理活性化化合物を生成し、ブロモホルムは飼料の消化中に腸内の特定の酵素を阻害することでメタンの生成を防ぐ。すなわち、メタン生成の最終段階に関与する重要な酵素である補酵素 M の合成に必要な、cobamide 依存性メチル転移反応を阻害することによる²⁴¹。2020 年 8 月、CSIRO はスピンオフ企業 FutureFeed 社を設立し、家畜飼料を市場に投入した。

239 <https://www.researchgate.net/publication/293800275>

240 <https://www.csiro.au/en/research/animals/livestock/FutureFeed>

241 https://www.researchgate.net/publication/299274346_Identification_of_bioactives_from_the_red_seaweed_Asparagopsis_taxiformis_that_promote_antimethanogenic_activity_in_vitro

③ Meat and Livestock Australia (MLA)による研究

オーストラリアの肉牛・羊の生産者団体である **Meat and Livestock Australia (MLA)** は 2012 年～2015 年、全国的な共同研究プログラムである **National Livestock Methane Program (NLMP、国立家畜メタン計画)** において、家畜からの腸内メタンの排出を削減するための実用的な技術開発研究を行った。NLMP は、5 つのテーマ、16 の研究プロジェクト、および NLMP の調査結果のデータベースを開発する 1 つのプロジェクトで構成されている。代表的なプロジェクトとして、「家畜用の **GreenFeed 排出監視ユニット**の評価と最適化」、「オーストラリア北部の牛生産システムにおける温室効果ガス排出と炭素隔離に対する **Leucaena (ロイカエナ)** プランテーションの影響」、「牛の腸内メタン排出量を削減する藻類ベースの機能性食品の開発」、「オーストラリアの肉牛からのメタン排出を削減する遺伝子技術」などがある²⁴²。ロイカエナは、オーストラリア北部で最も生産的で持続可能な熱帯の飼料用マメ科植物である。ロイカエナの葉はタンパク質が豊富で、反芻動物によって容易に消化される。牛は他のほとんどの飼料よりもロイカエナを好むため、摂取量が多くなり、その後の体重増加につながる。消化率の高いロイカエナ飼料は、牛のメタン生成を 20～30% 削減することができる²⁴³。

(2) 乳牛における GHG 排出量に対する遺伝的選択

乳牛の選択的育種は、環境への影響を最小限に抑えて追加費用がほとんどないことから、中長期的に GHG 排出量を削減する費用対効果の高い手段を提供する可能性がある。

バランス パフォーマンス インデックス (BPI) として知られるオーストラリアの国家育種目標には、乳生産、寿命、繁殖力、飼料効率、健康に関連する生物学的特性が含まれる。節約された飼料として知られる飼料効率繁殖値には、残りの飼料摂取量のゲノム繁殖値と、予測された牛の体重に基づく維持要件の繁殖値が含まれる。

AgriBioscience センター 及び**ラトロブ大学**の **Jennie E. Pryce** らは、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した。詳細は、2.7.2 (2) (170 ページ) に示した。

242 <https://www.mla.com.au/Research-and-development/Environment-sustainability/National-livestock-methane-program>

243 <https://www.mla.com.au/research-and-development/Grazing-pasture-management/leucaena-hub/>

2. 5. 3. ニュージーランド

ニュージーランドは家畜や食肉の輸出大国で、約 1,000 万頭の牛と 2,600 万頭の羊が飼育されている。農畜産業由来の GHG 排出量は、ニュージーランド全体の排出量の 48% を占めており、農畜産業で発生する GHG の大部分は、反芻家畜のゲップ由来のメタンが占めている。そのため、GHG 排出量削減のためには、家畜由来の GHG 排出量の削減が不可欠である。ニュージーランドが中心となって、農業分野の GHG 排出削減等に関する研究ネットワークとして「グローバル・リサーチ・アライアンス」(GRA) の設立を各国へ呼びかけ、2009 年 12 月にコペンハーゲンで開催された COP15 において、正式な立ち上げに向けて共同声明が発出された。なお、ニュージーランドが関係しているフラグシッププロジェクトは 6 件中 1 件のみ。現在、世界のすべての地域から 60 か国以上が参加しており、政策立案者、科学コミュニティ、および農業指導者への知識の普及を担当する主要な国際および地域組織と提携している。GRA はまた、フラグシップ プロジェクトを提供するために協力している。これらは、研究の専門知識と GRA のグローバル メンバシップに特に適していると特定された重要な優先プロジェクトで、農業の温室効果ガスをよりよく理解し、世界的な関連性と適用性を持ち、高い科学的影響を生み出すための新しい知識を開発する²⁴⁴。

(1) 反芻胃のメタン生成削減のためのワクチン接種

反芻胃のメタン生成菌に対するワクチン接種は、反芻胃に入り、メタン生成菌がメタンを生成する能力を損なう唾液中の抗体を誘導することにより、メタン排出を削減する可能性がある。

AgResearch²⁴⁵ホップカーク研究所 (マッセイ大学キャンパス内) の **Supatsak Subharat** らは、唾液抗体中の免疫グロブリンの主要なクラスを確認し、羊の反芻胃内容物中の免疫グロブリンの安定性を評価し、他のアジュバントと比較してより高いレベルの唾液抗体を誘発するアジュバントを検討した。

モデルメタン生成菌抗原、すなわち 4 つのアジュバント (サポニン、Montanide ISA61、キトサンサモゲル、脂質ナノ粒子/カチオン性リポソームアジュバント) の 1 つを配合した組換えグリコシルトランスフェラーゼタンパク質 (rGT2) を 3 週間間隔で 2 回、ヒツジにワクチン接種した。唾液と血清の両方で最高の抗原特異的 IgA および IgG 応答が

244 <https://globalresearchalliance.org/about/>

245 NZ では、科学イノベーションは、7 つの **Crown Research Institutes (CRIs)** (CRIs 担当大臣および財務大臣が株を保有する国有企業法人) が推進しており、その一つである **AgResearch** がメタンガス削減の技術イノベーションを実施するニュージーランド農業温室効果ガス研究センター (NZAGRC) に出資している。NZAGRC の研究開発分野は、以下の 5 つである。(1)低メタン排出乳牛・羊種の特定と育種 (・低排出乳牛・低排出羊) (2)飼料 (3)Alternative forages (代替飼料) (4)メタン生成阻害剤 (5)抗メタン生成ワクチンの開発

観察されたのは、Montanide ISA61 であり、2 番目に強力なアジュバントであるサポニンよりも 5 倍高いレベルの唾液抗体を促進した。ワクチン接種前の唾液 (A) および血清 (B) では、低レベルの rGT2 特異的 IgA および IgG が検出された。ワクチン接種を受けていない対照動物 (Control) と比較して、様々なアジュバントと共に処方された rGT2 でワクチン接種されたヒツジは、唾液 (C) および血清 (D) において特異的な IgA および IgG 抗体応答を生じた (図 45)。抗体はルーメン内で 1~2 時間は比較的安定した状態を保つことができるが、効果的なワクチン接種戦略では、強力なアジュバントを使用して抗原を調合し、ルーメン内で十分に高レベルの抗体を利用して、表面上の標的と相互作用できるようにする必要があるとしている²⁴⁶。

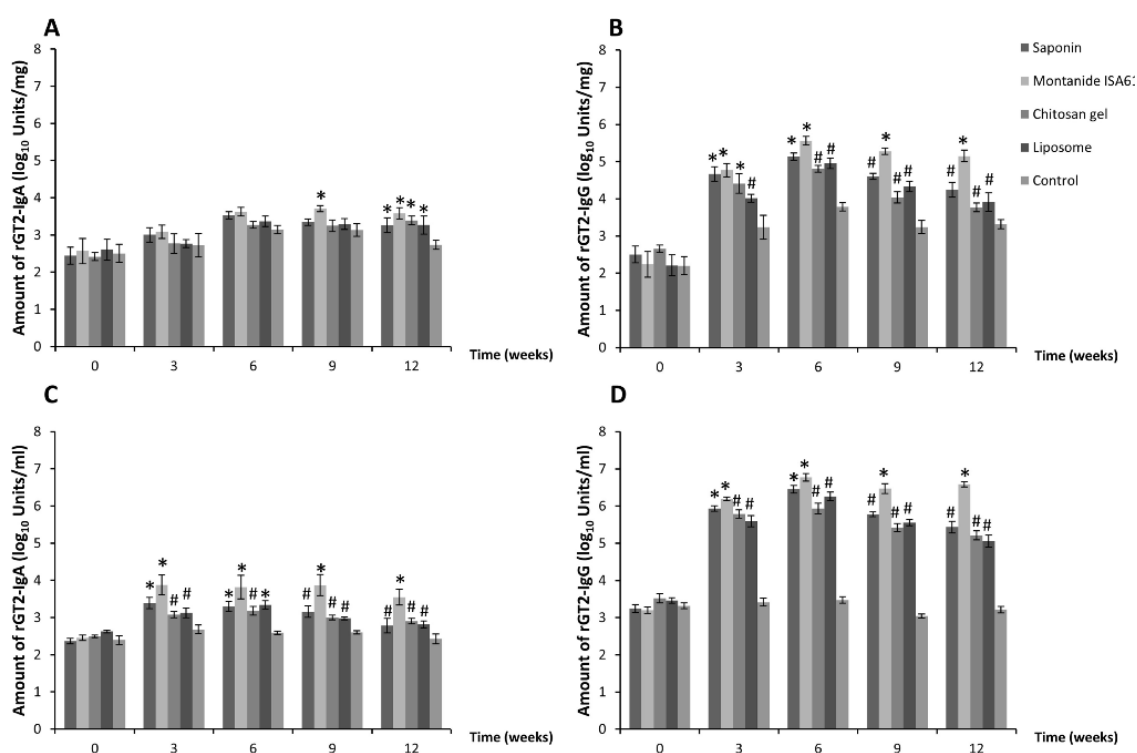


図 45 サポニン、Montanide ISA61、キトサンゲル、脂質ナノ粒子/カチオン性リポソーム、およびワクチン未接種の Control (すべて n = 6)²⁴⁶

(2) 機能化されたナノ粒子によるルーメンメタン生成菌の阻害

腸内メタン放出は主に反芻動物の前胃での飼料の微生物発酵に由来し、一般にメタン生成菌として知られる古細菌の特殊なグループが二酸化炭素の還元を通じて遊離水素を変換する。ルーメンメタン生成菌の数または代謝活性を低下させることを目的として、腸内メタン排出を軽減するためのさまざまな戦略が追求されている。

AgResearch 及びマッセイ大学の Eric Altermann らは、腸内メタン放出を削減するため

246 <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0159861>

の新しい方法として、機能化されたポリヒドロキシブチレート (PHB) ナノ粒子による第一胃のメタン生成菌の阻害を検討した。ナノ粒子には、ルーメン中の様々な *Methanobrevibacter* 種に対して活性な古細菌ウイルス溶解酵素 (PeiR) を含む。

ルーメンのメタン生成菌に対する機能化ナノ粒子の影響を、純粋培養、第一胃バッチおよび連続フロー第一胃モデルで実証した結果、機能化されていないコントロールと比較して、二重融合 PeiR ナノ粒子を追加すると、メタンが 5~15% 減少した。持続的なメタン阻害が観察されたが、阻害の程度は発酵の過程で変動した²⁴⁷。詳細は、2.7.3 (3) (178 ページ) 示す。

(3) 反芻動物のメタン生成菌特異的阻害剤アッセイ法の開発

水素栄養メタン生成菌の培養には、 H_2 と CO_2 の過圧を伴うガラス管内での厳密な嫌気性培養条件を必要とし、通常、時間とコストの両方がかかる。ハロゲン化合物 (例えば、クロロホルムやブromクロロメタン) は、反芻動物におけるメタン生成の非常に強力な阻害剤であるが、これらの化合物は環境、ヒトの健康および動物福祉の懸念から、現在の畜産での使用には適していないと考えられている。より強力で、より特異的で、毒性が低く、動物の生産性に悪影響を与えることなくメタン生成を標的とする狭スペクトルのメタン生成菌選択的阻害剤を発見する必要がある。

オタゴ大学の M. R. Weimar らは、反芻胃 (*Methanobrevibacter species* AbM) および環境 (*Methanococcus maripaludis* 株 S2) のメタン生成菌を増殖させるためのハイスループット 96 ウェルマイクロタイタープレートアッセイを開発、最適化、および検証を行った。培養は、 H_2 による過圧の代わりに還元剤として硫化ナトリウムを用いた、ギ酸を含む基礎増殖培地 (McF) を選択し、嫌気性チャンバー内でインキュベートした。ナトリウムイオノフォアであるモネンシンと、メチル補酵素 M の類似体である 2-ブロモエタンスルホン酸 (BES) は、メタン生成菌の強力な阻害剤である。モネンシン ($1 \mu M$) または BES ($30 \mu M$) を使用すると、両方の株でほぼ完全な阻害、つまり 85% を超える増殖の減少が観察された (表 4)。

また、このプラットフォームを使用して、メタン生成菌増殖のいくつかの新しい阻害剤を特定した²⁴⁸。

247 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8963448/>

248 <https://journals.asm.org/doi/10.1128/AEM.00396-17#>

表 4 96 ウェルマイクロタイタープレート形式での *Methanobrevibacter* 種 AbM4 の増殖
248

Replicate	Final OD ₆₀₀ ^a						
	Medium only	Inoculum only (2.5%)	Inoculum only (5%)	Inoculum only (10%)	DMSO (2%)	Monensin (1 µM)	BES (30 µM)
R1	0	0.179	0.376	0.451	0.254	0.039	0.062
R2	-0.003	0.161	0.370	0.442	0.278	0.045	0.049
R3	-0.002	0.174	0.379	0.438	0.282	0.040	0.061
R4	-0.003	0.275	0.397	0.348	0.285	0.038	0.053
R5	-0.003	0.157	0.421	0.479	0.292	0.038	0.062
R6	-0.004	0.149	0.430	0.408	0.280	0.041	0.069
R7	-0.002	0.157	0.365	0.411	0.257	0.016	0.053
R8	-0.002	0.190	0.428	0.398	0.254	0.026	0.049
Avg	-0.002	0.180	0.396	0.422	0.273	0.035	0.057
SD	0.001	0.041	0.027	0.040	0.015	0.010	0.007

^a還元剤 (0.05%システイン [wt/vol]) を含む培地で 5%の接種物 (およそ 0.020 の開始 OD₆₀₀) を使用して、38° C で 4 日間インキュベーションした後に記録

2. 5. 4. EU

1962 年に開始された EU の共通農業政策 (CAP) は、EU の長期予算から引き出された 2 つの基金、「欧州農業保証基金 (EAGF)」と「農村開発のための欧州農業基金 (EAFRD)」によって支えられている。2023 年から 2027 年までの新しい CAP の総配分額は 3,866 億ユーロに達する。EAGF (AP の「第 1 の柱」) には 2,911 億ユーロが割り当てられ、主に農家の所得支援と市場対策に資金を提供する。EAFRD (CAP の「第 2 の柱」) は、割り当て総額は 955 億ユーロで、農業の競争力を高め、天然資源の持続可能な管理と気候変動対策を奨励し、農村経済とコミュニティのバランスの取れた領土開発を達成するために、資金を提供している。これらの目的は、EAFRD と EU 諸国の国家予算が共同出資する国および地域の農村開発プログラム (RDP) を通じて実現される。欧州委員会は RDP を承認および監視するが、プロジェクトの選択と支払いの付与に関する決定は、国および地域の管理当局によって処理される。2014 年から 2020 年のプログラミング期間中には、118 の国・地域の RDP があり、EAFRD は RDP に 1,000 億ユーロを寄付した²⁴⁹。

2022 年 2 月、欧州委員会は、2020 年をカバーする提案の募集を経て選定された、環境および気候保護のための LIFE プログラム統合プロジェクトへの 1 億 1,000 万ユーロ以上の投資を発表した。この資金は、11 の EU 加盟国における新しい主要な環境および気候プロジェクトを支援する。これらのプロジェクトは、2050 年までに EU を気候ニュートラルかつ汚染ゼロにするという欧州グリーン ディールの目標をサポートする。LIFE プログラムは、1992 年から運営されており、EU 内外で 5,500 以上のプロジェクトに共同出資している。委員会は、2021 年から 2027 年の期間に LIFE プログラムの資金をほぼ 60% 増加させ、現在は、54 億ユーロに達している。LIFE には現在、自然と生物多様性、循環経済と生活の質、気候変動の緩和と適応、クリーンエネルギーへの移行の 4 つのサブプログラムがある²⁵⁰。

EU のメタン戦略²⁵¹は、メタン排出量を抑制し、大気質を改善し、気候変動との闘いにおける EU の世界的なリーダーシップを強化することを目的としている。メタン排出量の削減は、2020 年 10 月に発表された欧州グリーンディールと EU のメタン戦略の優先イニシアチブの 1 つであり、温室効果ガス削減への野心の高まりなど、主要な気候目標に向けた EU の取り組みを後押しする有望な可能性を示している。この戦略は、2050 年までの気温経路を抑制し、大気質を改善し、気候変動との闘いにおける EU の世界的なリーダーシップを強化することを目的としている。エネルギー、農業、廃棄物部門は人為的なメタン排出量のほぼ全体を占めるため、これらの分野でのメタン排出量の削減に焦点を当てる。この分野横断的なアプローチは、バイオメタンの生産など、セクター間の相乗効果を利用しながら、各分野で的を絞った行動を取る。

249 https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/financing-cap/cap-funds_en

250 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_864

251 https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/methane-emissions_en#eu-methane-strategy

(1) メタン等の発生を抑える家畜飼料の開発（乳牛）ーオランダ

Royal DSM が開発した、新しい飼料添加物 Bovaer®を乳牛の飼料に加えることで、メタンの排出量を大幅に削減できることが、オランダ レーワルデンにある Wageningen Livestock Research の Dairy Campus で行った試験で実証された。牛 1 頭あたりのメタンガス削減量は 27～40%であり、飼料の種類と Bovaer®の添加量によって変わる。この試験では、オランダのさまざまな地域で一般的に見られる手法である牧草サイレージとコーンサイレージを 3 種類の配合率で粗飼料に混ぜたものに対して、Bovaer®を 2 種類の分量で添加して、メタンの削減量を調査した。泌乳中期のホルスタイン・フリーシアン種 64 頭を調査対象とし、配合の異なる飼料にそれぞれメタン抑制剤を補給し、その効果を調査した。Bovaer®は、DSM が 10 年以上の年月を費やして研究開発した、乳牛などの養牛、羊、ヤギなどの反芻動物向けの飼料添加物である。牛の第一胃では、食物から分解された水素と二酸化炭素が微生物由来の酵素によってメタンに変換されるが、Bovaer® はメタンを生成する酵素を抑制する。牛 1 頭 1 日あたり、小さじ 1/4 杯の Bovaer®を与えるだけで、腸内メタンの排出量を約 30%削減できるとしている²⁵²。

(2) メタン等の発生の少ない牛の育種ーオランダ

Wageningen University & Research (WUR) の畜産部門は、メタン排出量を大幅に削減するという課題に取り組んでおり、その戦略の 1 つとしてターゲットを絞った育種を行っている。Topsector Agri and Food が資金を提供し、WUR が FrieslandCampina および CRV（畜産協同組合）と共同で行った研究において、対象を絞った繁殖プログラムを通じて個々の動物のメタン排出量を削減できるかどうかを調査している。一部の牛は自然にメタンの排出量が少ないことが示されていることから、これらの動物とその根底にある遺伝子プールを特定することが重要である。研究者は、多くの酪農場で乳牛の呼気を分析しており、個々の牛のメタン排出量の情報から、動物の遺伝子型を関連付け、各牛のメタン排出の遺伝的背景に関するより多くの情報を収集している²⁵³。

WUR の Y.de Haas らは 2019 年 3 月～2020 年 9 月に、オランダの 14 の商用酪農場の自動搾乳ステーション (AMS) でスニファーを用いたメタン排出量を調査し、メタンの遺伝率 (heritability) と再現性を推定した。スニファーは、赤外線分光法を使用して牛の呼気やげっふからのガス濃度を計測する装置で、AMS の飼料ビンに設置されて空気中のメタン濃度 (ppm) を連続的に測定する。牛は、Eurogenomics 10K チップで遺伝子型を決定し、遺伝子型データは 76,438 の SNP を持つ 1,817 頭の牛で構成され、そのうち 1,611 頭の牛がメタンの表現型を特定された。遺伝的パラメーターは、ASReml バージョン 4.2 の REML

252 https://www.dsm.com/japan/ja_JP/media/press-releases/2021/2021-02-08-dsm-new-feed-additives-significantly-reduce-greenhouse-gas-emissions-in-dairy-cows-in-dutch-tests.html

253 <https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/livestock-research/show-wlr/breeding-climate-friendly-dairy-cows.htm>

手順を使用して、繰り返し記録を含む単変量動物モデルで推定した。結果によると、平均訪問 (visit) 排出量から推定される遺伝率と再現性は、それぞれ 0.13 ± 0.01 と 0.30 ± 0.01 であった (表 5)。1 週間あたりの記録の平均では、平均メタン排出量の遺伝率と再現性はすべての形質で有意に増加した (それぞれ 0.32 ± 0.03 および 0.68 ± 0.01)。以前の研究では、スニファーによって測定された 1 週間あたりの平均メタン濃度 (ppm) および平均 log メタン排出量の遺伝率が 0.11 ± 0.03 から 0.26 ± 0.11 の範囲であることが報告されている。

表 5 平均メタン (CH₄) 排出量、中央値メタン排出量、log メタン排出量、平均 CO₂ 排出量、中央値 CO₂ 排出量、log CO₂ 排出量、メタン/CO₂ 比の遺伝率 (h²) および再現性 (t)、訪問ごと・1 週間あたりの平均 ($\pm$ SE) ²⁵⁴

Item	Visit		Week	
	h ²	t	h ²	t
Mean CH ₄ (ppm)	<u>0.13 ± 0.01</u>	<u>0.30 ± 0.01</u>	<u>0.32 ± 0.03</u>	<u>0.68 ± 0.01</u>
Median CH ₄ (ppm)	0.13 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.32 ± 0.03	0.68 ± 0.01
Log CH ₄	0.09 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.23 ± 0.03	0.65 ± 0.01
Mean CO ₂ (ppm)	0.16 ± 0.02	0.36 ± 0.01	0.33 ± 0.03	0.71 ± 0.01
Median CO ₂ (ppm)	0.16 ± 0.01	0.35 ± 0.01	0.34 ± 0.03	0.71 ± 0.01
Log CO ₂	0.07 ± 0.01	0.20 ± 0.01	0.20 ± 0.03	0.57 ± 0.01
CH ₄ /CO ₂	$0.01 \pm <0.01$	$0.08 \pm <0.01$	0.02 ± 0.01	0.15 ± 0.01

平均メタン排出量、中央値メタン排出量、および log メタン排出量の形質間の遺伝的相関は高く ($0.78 \sim 1.00$)、標準化後にこれらの形質を互換的に使用できることを示していた ²⁵⁴ (表 6)。

Item	Mean CH ₄ (ppm)	Median CH ₄ (ppm)	Log CH ₄	Mean CO ₂ (ppm)	Median CO ₂ (ppm)	Log CO ₂	CH ₄ /CO ₂
Mean CH ₄ (ppm)		$0.99 \pm <0.01$	0.72 ± 0.01	$0.85 \pm <0.01$	$0.84 \pm <0.01$	0.72 ± 0.01	-0.09 ± 0.01
Median CH ₄ (ppm)	$1.00 \pm <0.01$		0.70 ± 0.01	0.83 ± 0.01	0.83 ± 0.01	0.70 ± 0.01	-0.08 ± 0.01
Log CH ₄	0.80 ± 0.02	0.78 ± 0.02		0.71 ± 0.01	0.70 ± 0.01	0.70 ± 0.01	-0.09 ± 0.01
Mean CO ₂ (ppm)	0.90 ± 0.01	0.88 ± 0.01	0.76 ± 0.02		$0.99 \pm <0.01$	$0.88 \pm <0.01$	-0.22 ± 0.01
Median CO ₂ (ppm)	0.89 ± 0.01	0.88 ± 0.01	0.75 ± 0.02	$1.00 \pm <0.01$		$0.87 \pm <0.01$	-0.21 ± 0.01
Log CO ₂	0.89 ± 0.02	0.88 ± 0.02	0.80 ± 0.02	0.99 ± 0.01	0.99 ± 0.01		-0.45 ± 0.01
CH ₄ /CO ₂	-0.56 ± 0.22	-0.55 ± 0.22	-0.27 ± 0.16	-0.99 ± 0.30	-0.95 ± 0.29	0 ± 0	

表 6 毎週のメタンと CO₂ 形質 ($\pm$ SE) 間の表現型 (対角線の上) および遺伝的相関 (対角) ²⁵⁴

(3) メタン等の発生を抑える家畜飼料の開発 (子牛) —フランス

近年、離乳前のルーメンの微生物定着の変化がルーメンマイクロバイオーンを刻み込み、後の表現型に影響を与える可能性があることが示唆されている。

クレルモン・オーヴェルニュ大学の S. J. Meale らは、子牛の誕生からの食事操作が成

長、メタン生成、および消化管微生物生態学にどのように影響するかを調査した。18 頭のメスのホルスタイン種とモンベリアルデ種の子牛を無作為に処理群または対照群 (CONT) に割り当て、処理は、メタン阻害剤である 3-ニトロオキシプロパノール (3-NOP) を用い、出生から離乳後 3 週間 (14 週) まで毎日投与した。ルーメン液と糞便内容物のサンプルは、生後 1、4、11、14、23、および 60 週目に採取した。子牛は、離乳後 (生後 11~23 週および 56~60 週) に、GreenFeed システムを使用してメタン排出量を検査した。

3-NOP を投与された子牛は、離乳後 3 週間 (生後 14 週間) で治療を中止したにもかかわらず、離乳直後および離乳後 1 年を通じて、メタン排出量 (g CH₄/日) の持続的な減少を示した。子牛は離乳直後に 3-NOP を与えたが、CONT 子牛と比較して、3-NOP ではメタン排出量が 10.4% 低かった。11.9 %の減少は 23 週まで持続した。離乳後約 1 年 (57~60 週齢) に測定されたメタン排出量は、子牛として 3-NOP で処理された未経産牛で 17.5% 低かった (図 46)。

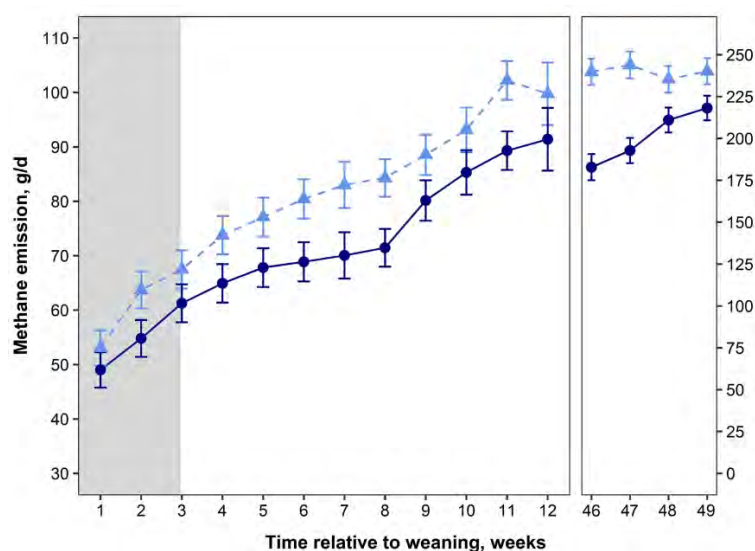


図 46 子牛のメタン排出量 (g CH₄/d) の 3-NOP の補給による影響²⁵⁵

コントロールの子牛：角形の水色の破線、生後 14 週まで 3-NOP を補給された子牛：丸付きの紺色の線、灰色の網掛け部分は離乳後の治療期間を表す。メタン排出量は GreenFeed System (C-Lock, Inc.) を使用して測定。

ルーメン微生物の存在量がわずかに変化していたが、メタン生成に対する 3-NOP の還元効果は、処理期間の停止後も持続していた²⁵⁵。

(4) メタン排出に関連するルーメン微生物バイオマーカーによる管理—フランス

メタン排出量を軽減すると同時に飼料効率を改善する可能性は、牛生産システムの持続可能性に大きく関係している。反芻動物を対象としたいくつかの研究では、ルーメン微

255 <https://www.nature.com/articles/s41598-021-82084-9>

生物叢の組成と飼料効率およびメタン排出との関係が調査されている。

パリ-サクレ大学の Ramayo-Caldas Y らは、メタン放出とルーメン微生物叢の構造に関連する微生物バイオマーカーを特定するために、16S rRNA とショットガン・メタゲノム シーケンス データを使用して統合的アプローチを実行した (図 47)。実験は、メジューソーム (フランス) の INRA 実験農場で実施した。メタン生成量 (CH₄) と乾物摂取量 (DMI) を 4~6 週間にわたって個別に測定し、牛 1 頭あたりのメタン収量 (CH₄y = CH₄/DMI) を計算した。クラスタリング、多変量モデル、および混合モデル分析の組み合わせを実装して、メタン収量とルーメン微生物群集の構造に関連する一連の運用分類単位 (OUT)²⁵⁶を特定した。

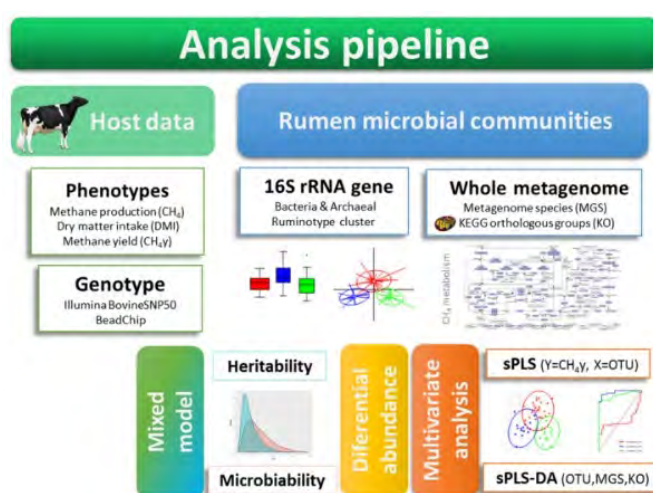


図 47 授乳中のホルスタイン種の牛におけるメタン放出の微生物バイオマーカーを特定するために採用された分析フレームワーク²⁵⁷

実験の結果、第一胃の細菌群集の構造とメタン放出との関連性を確認し、メタン収量放出とルーメン細菌群集構造に同時に関連する 86 の OTU を特定した。メタン収量放出に関連する OTU は主に水素産生細菌であり、メタン収量表現型分散の最大 24%を説明したが、宿主ゲノムの寄与は約 14%であった。メタタクソノミクスによって特定されたいくつかの識別可能な細菌 OTU は、メタゲノム全体によって確認された。特に、R2 にクラスタ化されたサンプル (高いメタン収量放出) は、*Succinivibrionaceae* 科および *Methanospaera* spp. の存在量が少ないことを示した。特定した一連の微生物バイオマーカーは、乳牛業界で対象を絞った管理のために、高排出牛を特徴付ける目的で使用できる可

²⁵⁶ OTU とは、ある一定以上の類似性 (一般的には 96-97%) を持つ配列同士を一つの菌種のように扱うための操作上の分類単位である。NGS (次世代シーケンサ) を利用した 16S rDNA のアンプリコン解析 (菌叢解析) では、環境より抽出した DNA から PCR 法で 16S rRNA 遺伝子を増幅した後、NGS を用いて網羅的に配列を決定し、低クオリティリードやキメラ配列の除去を行った後、配列同士をクラスタリングして解析を行う。この解析法による分類単位を OTU という (<https://www.nite.go.jp/nbrs/safety/ecosystem.html>)。

能性がある²⁵⁷。

（５）稲わらの管理によるメタン排出削減－イタリア

農業生産は、全世界で年間約 40 億メートルトンの作物残渣を生成し、そのうち年間 8 億から 10 億トンが稲わらである。作物残渣を土壌に戻すことは、肥沃度を維持し、栄養素を提供することで作物収量を改善できるが、わらの取り込みは水田からのメタン排出を大幅に増加させる。

トリノ大学の **Chiara Bertora** らは、稲わらを除去することでメタン排出量を軽減でき、その炭素 (C) インプットを未処理または固体の消化物（トウモロコシサイレージ、ライコムギサイレージ、押し出し稲わらを供給されたバイオガスパラントに由来）に置き換えることにより、作物、土壌、および排出反応の両方にとって価値のある代替手段になり得ると考え、メソコスム研究を行った²⁵⁸。詳細は、2.7.4（１）（183 ページ）記載した。

（６）イネの育種－スウェーデン

メタン生成は、イネの根からの有機浸出液を餌とする微生物群集によって引き起こされ、主要な分泌物の調節は、水田からのメタン放出を削減する主要な方法として提案されている。

フマル酸塩とエタノールが、水田からのメタン放出のレベルを決定する特定のイネによって組織化された化合物であるという発見に基づいて、**スウェーデン農業大学**は水田でのメタン放出を削減するための新しいシステムを導入し、新規品種が 2 つの化合物メカニズムによる水田メタン排出量を削減することを発表した²⁵⁹。

論文によると、炭素源として、高レベルのフマル酸は土壌微生物群集により多くの栄養を供給し、メタンの放出を促進する（図 48 a, b、両方の点線の左側）。しかし、根の発酵による十分な量のエタノールは、イネの根内部のフマル酸合成を阻害し、根圏のフマル酸のレベルを低下させる（図 48 a, b、両方の点線の右側）、と同時に根圏のメタン生成活動を阻害し、メタン放出を緩和する（点線の右側、図 48 b）。さらに、安定した低フマル酸-高エタノール分泌系統（LFHE）イネが雑種育種によって連続的に育種され、対照と比較して水田でのメタン排出量が約 70% 削減されることがわかった（図 48 c）²⁶⁰。

257 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6972549/>

258 メソコスム実験：生態系を創造できるスケールの空間を造り、環境条件を単純化して生態系の中で起こる現象の理解を容易にする実験手法

259 <https://europepmc.org/article/ppr/ppr433257>

260 <https://assets.researchsquare.com/files/rs-1087173/v1/08e55f5d-efcd-4961-942e-e221570980e8.pdf?c=1643211128>

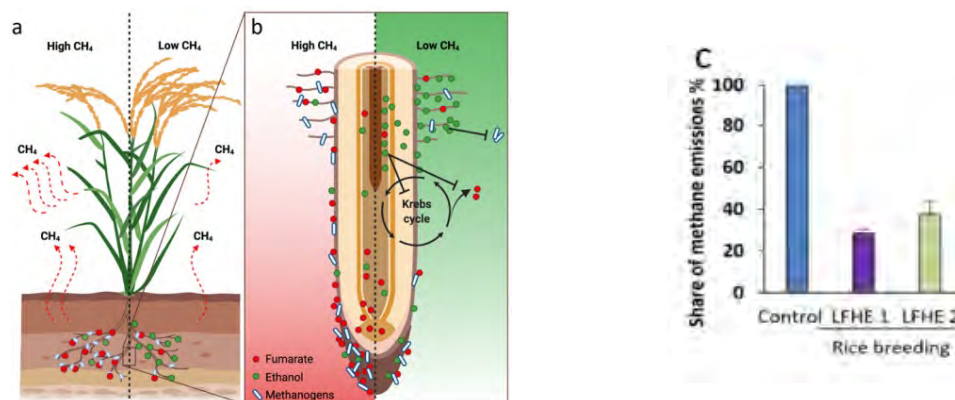


図 48 水田からのメタン放出の調節を示すモデルおよび低フマル酸-高エタノール分泌系統 (LFHE) イネのメタン排出への影響²⁶⁰

(7) CORDIS-EU

CORDIS (Community Research and Development Information Service) は、研究とイノベーションのために EU のフレームワーク プログラムによって資金提供され、欧州委員会が保持するすべてのプロジェクト情報を含む、豊富で構造化された公開リポジトリがある。オープンサイエンスを促進し、革新的な製品とサービスを作成し、ヨーロッパ全体の成長を刺激するために、研究結果を専門家に提供している。

CORDIS のリポジトリには、プログラム HORIZON-CL5-2021-D2-01-10 の下で資金提供されたプロジェクト CANMILK (Carbon Neutral Milk、コーディネータ : Tutkimuskeskus vtt oy [フィンランド]、実施期間 : 2022 年 9 月 1 日 ~ 2026 年 8 月 31 日) が収められている。CANMILK は、農業におけるメタン削減において総コストが 80 ユーロ/トン CO₂e 未満で、使いやすく、メンテナンスが少ない技術を開発する。このプロジェクトは、メタン分解を可能にする非熱プラズマ由来の酸素または水素種によるメタンの活性化に焦点を当てている。その結果、1) 乳牛と肉牛の畜舎におけるメタン削減のためのシンプルで効率的な装置、2) プラズマベースのメタン削減の社会経済的および環境的実現可能性についての優れた見解、および 3) 実行可能なソリューションの公的、科学的、産業的な意識の取り組みの増加が期待される。CANMILK 技術の効率の見積もりは 90% のメタン変換であり、畜舎での最大利用の場合、約 100% の GHG の総削減につながる²⁶¹。

261 <https://cordis.europa.eu/project/id/101069491>

2. 5. 5. ドイツ

気候変動法が 2021 年 6 月に改正され、GHG 排出量実質ゼロ達成を改正前の 2050 年から 5 年前倒して 2045 年とし、2030 年までに 1990 年比で 55%減だった GHG 削減目標を 65%減に引き上げた。また、連邦政府は「即時気候変動対策プログラム 2022」を決定し、2022 年から 2025 年にかけて建築、交通、製造業、土地利用など、農業、エネルギー産業などの分野に総額 80 億ユーロ以上を拠出する見込みである。同プログラムは、産業部門の脱炭素化、グリーン水素、エネルギーに焦点を当てた建物の改修、気候に優しいモビリティ、持続可能な林業と農業への支援を強化することを目標とし、GHG 排出量削減が目に見えて表れることが期待できる短期的な対策に焦点を置いている²⁶²。

連邦政府は、気候変動への適応と農業における温室効果ガス排出の削減をさらに進めるために、研究開発プロジェクトに資金援助を行っている。特に有機農業のような、環境に優しく持続可能な土地管理手法に対する法的・財政的支援をさらに発展・改善させたいと考えており、「有機農業およびその他の持続可能な農業のための連邦スキーム (Federal Scheme for Organic Farming and Other Forms of Sustainable Agriculture)」は大幅に強化され、2020 年は連邦予算で 2900 万ユーロ近くがこのために利用できるようになっている。

(1) メタン等の発生を抑える家畜飼料の開発

in vitro 研究

① 海藻 *Ascophyllum nodosum* 及び *Fucus vesiculosus*

一部の海藻種はルーメンの CH₄ 生産に影響を与える可能性があり、メタン生成に対する海藻補給の効果がルーメン微生物叢の改変と関連していることが多くの研究で実証されている。

ホーエンハイム大学の **Susanne Künzel** らは、2 つの北大西洋海藻種 (*Ascophyllum nodosum* と *Fucus vesiculosus*) が in vitro メタン生成、栄養分解、および微生物叢組成に及ぼす影響を調査した。総混合飼料を、コントロールとして単独で、または長期ルーメンシミュレーション技術 (Rusitec) 実験で 2 つのレベル (乾物ベースで 2.5 および 5.0%) の各海藻と一緒に 14 日間インキュベートした。その結果、生成された総ガスのメタン濃度は、*A. nodosum* と *F. vesiculosus* の 5%含有レベルで、それぞれ 8.9% と 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、海藻含有量 5%ではさらに減少した (P<0.001、表 7)。飼料栄養素の分解と、流出液中の揮発性脂肪酸とアンモニアの生成も減少した。ほとんどの場合、両方の海藻の 5%含有レベルでより大きな影響があり、全体的な発酵が減少したことを示していた²⁶³。

262 <https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/07/a147a21fe8138847.html>

263 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9273974/>

表 7 5 回の処理の総ガス生産量と生産ガスのメタン濃度 (7~13 日目)、および分解有機物 1g あたりのメタン生産量 (OM [organic matter] ; 7~12 日目) ²⁶³

	Total gas (mL/d)	CH ₄ (% of total gas)	CH ₄ /degraded OM (mL/g)
<u>TMR</u>	1386 ^a	<u>16.9^a</u>	36.7 ^a
AN2.5	1238 ^b	16.6 ^{ab}	35.1 ^{ab}
<u>AN5</u>	1114 ^c	<u>15.4^c</u>	30.5 ^c
FV2.5	1177 ^{bc}	16.6 ^{ab}	35.9 ^{ab}
<u>FV5</u>	1114 ^c	<u>16.3^b</u>	32.6 ^{bc}
Pooled SEM	35.9	2.01	4.66
P	<0.001	<0.001	0.017

AN : *Ascophyllum nodosum*、FV : *Fucus vesiculosus* (2.5 または 5% の包含レベルの両方)
TMR : 総混合配給、^{a-c} 共通の上付き文字を示さない列内の平均は異なる (P < 0.05)

②3-ニトロオキシプロパノール (3-NOP)

反芻動物におけるメタン生成は、水素栄養メタン生成古細菌のメチル補酵素 M レダクターゼ (MCR) によって触媒される。合成物質の 3-ニトロオキシプロパノール (3-NOP) は、メチル補酵素 M (CoM) の構造類似体であることから、MCR の活性部位に結合し、不活化を引き起こす。

連邦動物衛生研究所 フリードリヒ・レフラー研究所の Matthias Schilde らは、メタン阻害剤 3-NOP の 4 つの用量間 (0、0.073、0.16、および 1.2 mg の活性 3-NOP 物質/g 飼料 DM) の用量反応関係と、低 (LC) または高 (HC) 濃縮飼料比率 (CFP) によるメタン削減に対する相乗効果の可能性を調査した。

飼料基質と 3-NOP をルーメン シミュレーション技術で培養し、揮発性脂肪酸 (VFA) の濃度と生成、発酵ガス、および基質の消失を測定した。その結果、メタン産生は、CFP に関係なく、3-NOP 封入率の増加に伴い用量依存的に 10%から 97% まで減少した。水素ガスは、3-NOP 投与量の増加に対応して蓄積した (表 8) ²⁶⁴。

264 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8232248/>

表 8 発酵ガスの生成と組成に関する 3-NOP 投与レベル (PLA: 0、LOW: 73、MED: 160、および HIGH: 1200 mg の 3-NOP/kg 飼料 DM) および飼料中の低 (LC) または高 (HC) 濃縮飼料比率 (CFP) の影響 ²⁶⁴

Item	Treatments [†]					SEM [§]	p-Values ⁺						
	CFP	PLA	LOW	MED	HIGH		CFP	Dose	CFP × Dose	L	Q	$\beta_L > F$	$\beta_Q > F$
Total GP [¶] (mL/d)	LC	1902	1904	1664	1818	18	0.506	0.600	0.978	0.411	0.479	0.823	0.732
	HC	1844	1797	1648	1654					0.543	0.705		
Gas production (mL/g of DMD [#])													
Total GP	LC	1091	977	938	1152	110	0.494	0.711	0.698	0.181	0.121	0.423	0.272
	HC	1042	970	982	944					0.703	0.825		
CH ₄	LC	15.8	12.2	5.2	0.5	1.2	0.419	<0.001	0.241	0.001	0.145	0.028	0.045
	HC	14.5	12.1	8.7	1.1					0.133	0.407		
CO ₂	LC	100.2	94.2	92.7	98.4	13.8	0.538	0.962	0.981	0.642	0.637	0.835	0.745
	HC	93.4	94.1	86.6	86.8					0.812	0.907		
H ₂	LC	0.44	2.11	6.03	11.89	1.92	0.579	0.001	0.623	0.290	0.766	0.595	0.859
	HC	1.42	3.21	3.80	8.96					0.749	0.584		
Gas composition (Vol.-%)													
CH ₄	LC	5.8	5.1	2.2	0.2	0.3	0.138	<0.001	0.094	0.002	0.566	0.082	0.124
	HC	5.5	5.0	3.6	0.5					0.241	0.119		
CO ₂	LC	36.6	38.5	39.6	33.5	1.9	0.567	0.430	0.302	0.146	0.066	0.173	0.086
	HC	35.6	37.8	35.0	36.6					0.979	0.959		
H ₂	LC	0.2	0.9	2.6	3.9	0.5	0.755	<0.001	0.458	0.046	0.579	0.233	0.307
	HC	0.5	1.2	1.5	3.7					0.699	0.368		
CH ₄ /CO ₂	LC	0.157	0.131	0.055	0.004	0.008	0.024	<0.001	0.026	<0.001	0.220	0.035	0.048
	HC	0.155	0.133	0.102	0.014					0.177	0.082		
CO ₂ /CH ₄	LC	6.4	7.8	18.9	915.6	193.2	0.185	0.036	0.179	0.398	0.066	0.592	0.238
	HC	6.5	7.6	10.0	163.6					0.887	0.741		
CH ₄ /H ₂	LC	39.45	5.84	0.86	0.04	2.65	0.002	<0.001	0.001	<0.001	0.001	0.001	0.002
	HC	10.53	4.32	3.00	0.22					0.183	0.422		

[†] LS 平均として提示された値、[§] SEM : 平均値の標準誤差、+ CFP, 3-NOP 用量, およびそれらの間の相互作用の影響、L, Q : 3-NOP の線形および二次効果の p 値、 $\beta_L > F$, $\beta_Q > F$: LC と HC の間の線形および二次回帰係数の差について F 分布の確率変数が観測された F を超える H₀ の下での確率、[¶] GP、ガス生産、[#] DMD、乾物分解、有意な値 (p ≤ 0.05 は太字で強調表示)

in vivo 研究

③メタン放出のバイオマーカーとしての糞便中メタン生成古細菌の細胞膜脂質

Archaeol (古細菌エーテル型脂質) は、糞便中に排泄されるメタン生成古細菌の細胞膜脂質であるため、個々のメタン放出 (MEM) の潜在的なバイオマーカーとなる。

キール大学の Lisa-Marie Sandberg らは、糞の古細菌濃度 (fArch) が異なる飼料を与えられた牛の MEM 予測の代用となる可能性を調べ、糞の収集時間が古細菌の濃度に影響するかどうかを評価した。すなわち (i) 呼吸チャンバー測定中に 8 時間以内に 3 回採取された糞便のスポットサンプルにおける fArch 濃度の変動、および (ii) 授

乳中の牛の fArch と MEM の関係に対する、栄養組成と正味エネルギー含有量が異なる 2 つの食事の影響を調査した。初産の 4 頭と経産の 6 頭の授乳中のホルスタイン種の牛で 2 回連続して呼吸試験を実施した。最初の試行 (T1) で 100±3 日間の牛乳 (IM) では、でんぷんと脂肪の含有量が中程度の飼料を自由に摂取させたのに対し、135±3 日間の IM での 2 回目の試験 (T2) では、乳牛はでんぷんと脂肪の少ない飼料を与えられた。個々の MEM (g/d) を 24 時間測定した。06:30、10:00、および 14:30 に糞便サンプルを採取し、ソックスレー脂質抽出と GC-MS を使用して fArch を分析した。その結果、牛は、T1 の間のメタン生成量が少なく (364 g CH₄ / d)、T2 (392 g CH₄ / d および 47.6 μg / g) と比較して fArch 濃度 (37.1 μg / g 乾物; DM) が有意に低かった。乾物摂取量 (DMI) 基準 (g / kg DMI) で表される fArch (μg / g 糞便 DM) と MEM の間に有意な正の関係が見られた。1 日に収集されたサンプルの中で、10:00 LT に収集されたサンプルは、MEM の決定係数が最も高かった (表 9) 。結論として、fArch は、糞便サンプルが 1 日の特定の時間に採取されたときに腸内メタンを低下させる育種スキームの代用として機能する可能性を提供した²⁶⁵。

表 9 牛の成績、糞便古細菌、メタン生成、および効率特性に対する試験効果の差の標準誤差 (SED) を含む最小二乗平均²⁶⁵

Trait ¹	Trial ²		SED	P-value
	T1	T2		
Dry matter intake, kg	16.3	14.8	1.43	0.312
Water intake, L d ⁻¹	65.9	62.5	5.07	0.511
Milk yield, kg	30.8	25.0	2.26	0.019
ECM, kg	34.4	27.6	2.35	0.011
Milk fat, %	4.69	4.66	0.31	0.948
Milk protein, %	3.40	3.07	0.08	0.010
MEM, CH ₄ g d ⁻¹	364	392	31.7	0.402
MY, g CH ₄ kg ⁻¹ DMI	22.5	26.6	1.08	0.001
MI, g CH ₄ kg ⁻¹ ECM	10.7	14.8	1.26	0.005
Average fArch, μg g ⁻¹ fecal DM	37.1	47.6	2.85	0.002
06:30 LT fArch, μg g ⁻¹ fecal DM	38.3	46.3	3.50	0.035
10:00 LT fArch, μg g ⁻¹ fecal DM	36.7	45.8	4.77	0.071
14:30 LT fArch, μg g ⁻¹ fecal DM	39.4	54.8	2.98	0.000

¹ ECM : エネルギー補正乳量、MEM : メタン排出、MY : メタン収率、MI : メタン強度、fArch : 糞便古細菌濃度、06:30 LT fArch : 06:30 LT に採取された糞便サンプルの fArch、10:00 LT fArch : 10:00 LT に採取された糞便サンプルの fArch、14:30 LT fArch : 14:30 LT に採取された糞便サンプルの fArch。² 牛 10 頭を用いた 2 回の連続呼吸試験。T1 : デンプンと脂肪の含有量が中程度の飼料を使用した牛乳 (IM) での 100±3 日間の呼吸チャンバー測定値、T2 : でんぷんと脂肪の含有量が少ない食事、135±3 日間 IM での呼吸チャンバー測定値。

2. 5. 6. 日本

(1) 中干し技術等の栽培法

イネを植えた直後の水田では、土壤に多くの酸素が含まれるためメタンを発生することはないが、分げつ期になるとイネが呼吸のために酸素を取り込んで土壤が還元状態になるため、嫌気性のメタン生成菌の活動が活発になる。稲わらなどの有機物を基質として、メタン生成菌によって生成されたメタンは、イネが自身の根に酸素を輸送する器官を通じて大気中に放出される（図 49）。

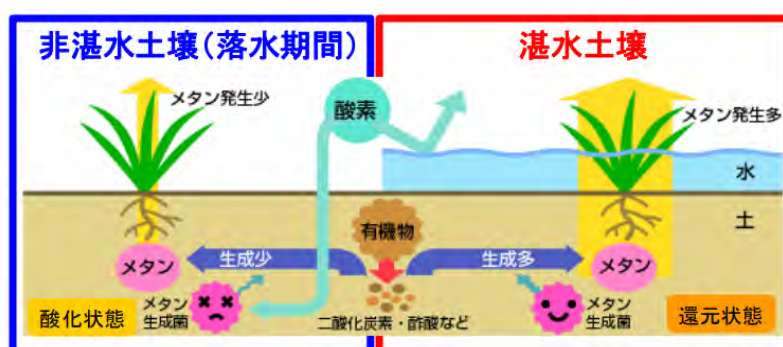


図 49 メタンが水田で発生するしくみ
(出典：農業温暖化ネット HP²⁶⁶)

① 中干し期間の延長

農業環境技術研究所の須藤重人らは、水田からのメタン発生を抑制する水管理手法を確立することを目的として、中干しの延長によるメタン発生抑制効果を検証した。その結果を基にして、水田からのメタン発生を抑制するための水管理のポイント及び留意すべき事項をマニュアルとして取りまとめた²⁶⁷。稲わら、麦わら等の有機物を施用した水田では、中干し期間を慣行からさらに1週間程度延長させることで、効果的にメタンの発生量を低減することができるとしている。中干しとは、イネの生育を調整し、根を健全に保つため一時的に水田から水を抜くという、農家が昔から行ってきた手法である。この中干しの期間を延長することにより、土壤は酸素が豊富にある状態になり、メタン生成菌の活動は抑えられる。

中干し期間延長を活用したメタンの発生抑制には福島県の農業総合センターが先行して取り組み、メタンの発生が抑えられたことから、全国8県9カ所で中干し期間延長による効果を調べる実証試験を行った。その結果、平均すると従来の期間での

266 https://www.ondanka-net.jp/index.php?category=measure&view=detail&article_id=437

267 https://www.naro.affrc.go.jp/archive/niaes/techdoc/methane_manual.pdf

中干しと比較して平均 3 割のメタンの発生を減らすことができ、収穫量に関しても大きく損なわれることはなかった（図 50）²⁶⁸。

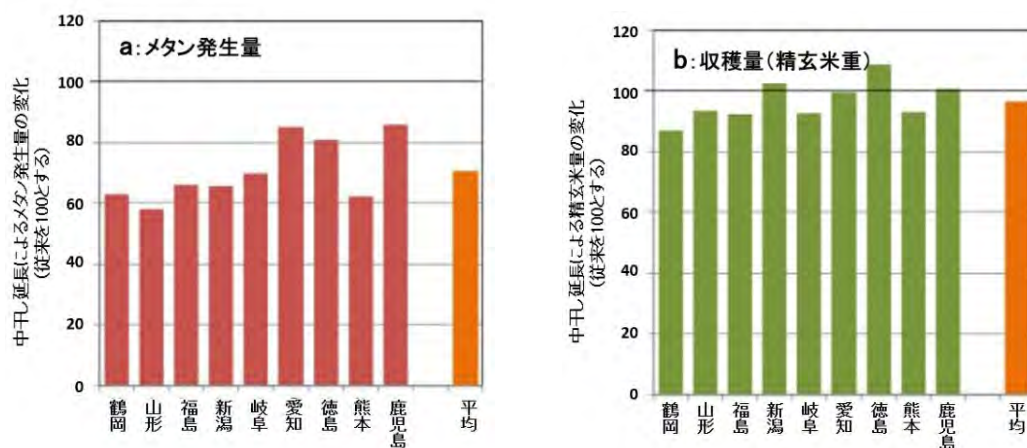


図 50 中干し延長によるメタン発生量、収穫量（精玄米量）の変化²⁶⁸

②不耕起乾田直播栽培との組み合わせ

岡山県農林水産総合センターの石橋英二らは、水田からの温室効果ガスの排出量を、岡山県の特徴である耕起乾田直播栽培、不耕起乾田直播栽培を耕起移植栽培と比較する中で、温室効果ガスの排出量を適正に評価した。さらに、これら栽培法の組み合わせにより水田からの温室効果ガスの排出量を抑制できることを示した。減水深の大きさにかかわらず、導入期間を数年以内に限定すれば、メタン発生量は不耕起直播栽培の導入によって半減する（図 51）。従って、水稻栽培期間中のメタン発生量の削減技術としては、暗渠の整備などで乾田化を図り、減水深を大きくすることと、不耕起直播栽培を導入することが効果的であると判断された。しかし、不耕起直播栽培を継続するとメタン発生量が徐々に多くなる傾向も認められ、その増加傾向は減水深が小さい圃場ではより顕著であった。不耕起直播栽培を 4～5 年間継続した後で、耕起移植栽培や耕起直播栽培に一旦転換することが有効である²⁶⁹。

268 https://scienceportal.jst.go.jp/gateway/sciencewindow/20200430_w01/

269 https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/778042_7231703_misc.pdf

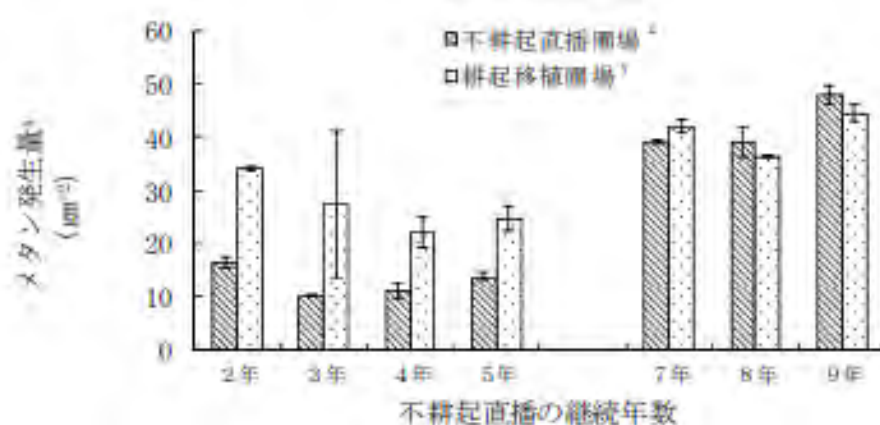


図 51 栽培様式と不耕起直播栽培の継続年数の違いが水稻栽培期間中のメタン発生量に及ぼす影響²⁶⁹

バーはデータの範囲 (n=2) を示す

z 2～5 年は ND 水門圃場, 7～9 年は ND 山陽 A 圃場

y 2～5 年は TT 水門圃場, 7～9 年は TT 山陽 A 圃場

x メタン発生量の計算期間; 6 月下旬～10 月下旬

③東南アジア 4 地点での AWD の効果

農研機構は、国内で行われている中干しの期間延長がメタン排出削減に有効であることを実証してきた。中干し延長の応用として、AWD (Alternate Wetting and Drying) も節水に加えて、水稻収量を維持しつつメタンの排出削減を実現できると考えられるが、アジアの多様な環境条件における定量的な効果は十分に把握できていなかった。そこで、東南アジア 4 地点 (ベトナム・フエ、タイ・プラチンブリ、フィリピン・ムニョス、インドネシア・ジャケナン) において 3 年間の圃場実験を実施し、乾季作と雨季作の年 2 作の灌漑水田における AWD の効果を、水使用量(灌漑水+降水)、水稻生産性、そして温室効果ガス排出の観点から評価した。その結果、表面水深を指標として実施する水管理手法である AWD は、東南アジア 4 地点の灌漑水田におけるメタン排出を、常時湛水と比べて、平均で 31%削減した (図 52)²⁷⁰。

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

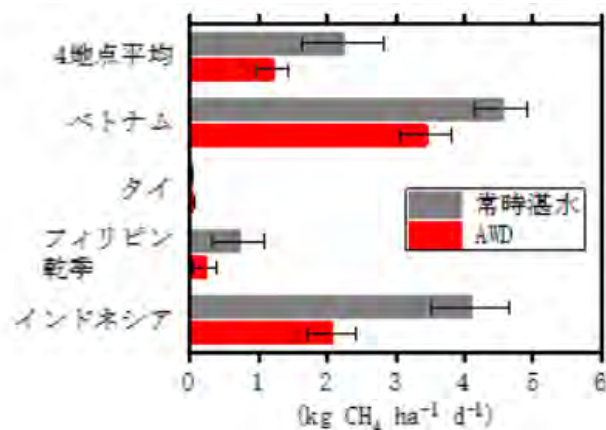


図 52 各地点および4地点平均の一日当たりのCH₄排出量
エラーバーは95%信頼区間

(2) イネの育種

ムーンショット型研究開発制度プロジェクトの課題IV「微生物-イネ共生系の最適化による水田CH₄排出削減」においては、イネ根圏土壤中のメタン酸化を促進する手法を開発し、イネ体内部に生息する微生物の力によってメタン酸化と窒素固定の同時促進を実現する。この技術開発によって、温室効果ガスであるCO₂が排出されるが、もともと大気中から光合成により回収したCO₂を排出することになるので、正味の温室効果ガスの排出はゼロ(カーボンニュートラル)となる(図53 右)²⁷¹。

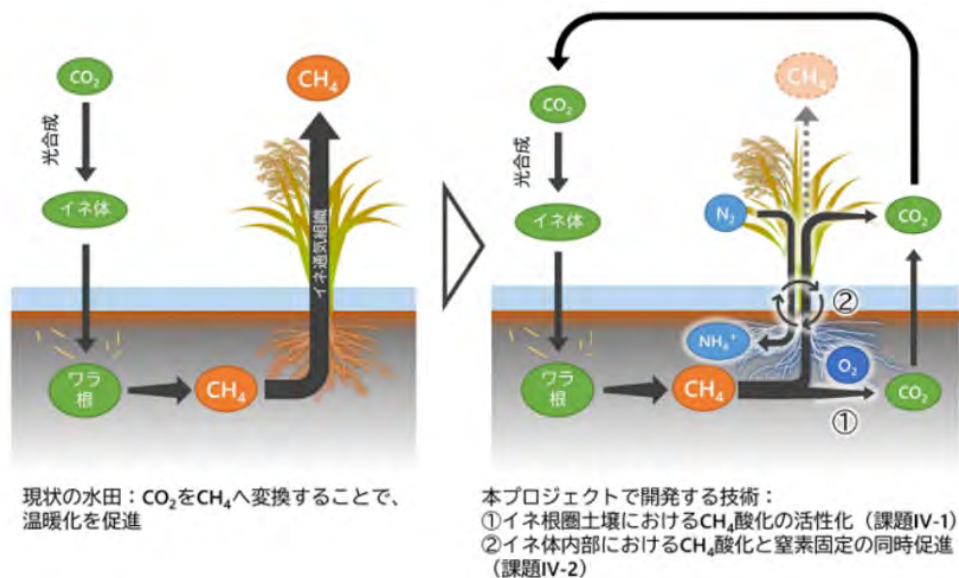


図 53 微生物-イネ共生系の最適化による水田メタン排出削減²⁷¹

271 <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/visit/09/minamisawa.html>

① メタンを CO₂ へ酸化するイネへの改変

農研機構農業環境研究部門の常田岳志らは、イネから発生する CH₄ を抑制しつつ、CH₄ を CO₂ へ酸化させることが出来るイネの改変技術を研究している。CH₄ 発生が少ない品種が世界には存在するものの、美味しくないなどの理由から商品価値がない品種がある。その品種と日本の主力品種であるコシヒカリを掛け合わせて、美味しい上に CH₄ 発生 40%削減を実現するイネ品種の作出を目指している。これまでの研究では、コシヒカリと低メタン品種タカナリの微生物性を比較したところ、タカナリは根に着生するメタン生成菌が少なく、株周辺土壌のメタン酸化遺伝子/メタン生成遺伝子比がコシヒカリより高いことが明らかとなっている。

一方、開発した新しいイネ品種の候補は実際の田んぼで栽培し、発生する CH₄ を測定する。多品種・多系統のイネを対象にメタン排出量を測定するため、常田岳志らは携帯型メタン分析計を用いたフラックス測定法の開発・評価を進めた。その結果、スループットを大幅に高めることに成功したほか、時間分解能の高いデータを使うことで、イネを経由する定常的な放出と、泡によって突発的に大気へ出てくる放出を分離定量する手法を見出した。これらにより、これまで考えられていたよりも、バブリングによる排出の寄与が大きいこと、低メタン品種ではバブリングによる排出が少ないことがわかった²⁷²。

② 節水技術へ適応するイネの育種

国際農研（茨城県つくば市）の Matthias Wissuwa は、国際稲研究所（International Rice Research Institute、IRRI）、ドイツのユーリッヒ研究センター（FZJ）と共同で、遺伝育種学に関する国際誌である「節水技術への適応を改善することにより、気候変動に対応するイネを育種する」と題した総説を Theoretical and Applied Genetics に発表した。完全に湛水（たんすい：水田に水を張ってため続けること）した条件下で水稻が栽培される期間を短縮し、それによって水利用の効率を改善し、メタン排出を削減する 2 つの節水技術に焦点を当てている。嫌気性条件下でも迅速で均一な発芽、苗の活力、雑草との競争力、根の可塑性、中程度の干ばつ耐性などの新しい適応形質を、現在のエリート稲品種に組み込む必要がある。これらの形質に関わる遺伝子の発見、それらの遺伝子の DNA マーカーを活用した優良イネ系統の選抜やイネ集団の改良が、どの程度対処されているかについてレビューされている²⁷³。

（３）土壌微生物の制御技術

① N₂O 無害化微生物

272 <https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-19H03096/>

273 <https://www.jircas.go.jp/ja/program/proc/blog/20210727>

東北大学の南澤究特任教授は、根粒菌などの N₂O 無害化微生物とイネ根圏の CH₄ 無害化微生物に関する研究を進めてきた。「ムーンショット型研究開発事業」においてプロジェクトマネージャーに選定され、プロジェクト「資源循環の最適化による温室効果ガスの排出削減」を開始した。土壌微生物の物質循環機能を活性化し、自然界の窒素の循環系を強力に回すことにより目標の実現に貢献するという課題では、これまでに取り組んできた研究を発展させ、これらの微生物の温室効果ガス削減能力を圃場レベルで最大化させる。南澤特任教授の率いる土壌微生物研究室では特に土壌から発生する N₂O の削減に向けた研究と技術開発を行なっている。これまでに取り組んできた根粒菌などの N₂O 無害化微生物に関する研究を推進するとともに、新たな、より強力な N₂O 無害化微生物にも注目する。ダイズ根粒菌である *Bradyrhizobium* 属細菌については、宿主植物との共生関係を最適化する研究や、より強力な N₂O 消去能力をもつ菌株の探索を行なっている。さらに、土に直接散布する微生物資材の開発を目指して、土壌の中から根粒菌以外の N₂O 無害化微生物を探索するとともに、土の中での微生物の生残性や動態について調べている²⁷⁴。

②製鋼スラグ肥料

製鋼スラグから溶出する鉄分が土壌の環境を酸化的にすることで、還元的な環境を好むメタン生成古細菌の活動を抑える試みがある。日本製鉄先端技術研究所の伊藤公夫らは、ベトナムの水田で製鋼スラグ施用によるメタンガス発生抑制と収量への効果を調べるための実証試験を行った。試験した製鋼スラグ肥料は、名古屋製鉄所の溶銑予備処理脱りんスラグを原料としたもので、有効成分であるけい酸、石灰、苦土、マンガンなどのほかに、鉄を 10%程度含んでいる。NPK（窒素、りん酸、カリウム）肥料については各地域の農家の標準的な施用方法に従い、NPK 肥料+製鋼スラグを原料とする肥料を施用した試験区のほか、NPK 肥料のみを施用した試験区を対照区として試験を実施した。

図 54 は、水田からのメタンガスの発生量を調べた 10 作（ベトナム北部 8 作、南部 2 作）について、同一収量あたりのメタン発生量の結果である。製鋼スラグを原料とする肥料を無施用の対照区のメタン発生量を 1 とした場合の、製鋼スラグを原料とする肥料を施用した試験区の相対的なメタン発生量で示した。ベトナム北部では 8 作すべてで、南部では 2 作中 1 作で、製鋼スラグを原料とする肥料の施用により同一収量あたりのメタン発生量が減少した。なお、収量は 17 作中 12 作で上がっていた²⁷⁵。

274 <https://lifescitohokuchiken.files.wordpress.com/2022/09/e7a094e7a9b6e5aea4e381aee9818ee58ebbe381a8e78bbe59ca8-2.pdf>

275 <https://www.nipponsteel.com/tech/report/nssmc/pdf/399-25.pdf>

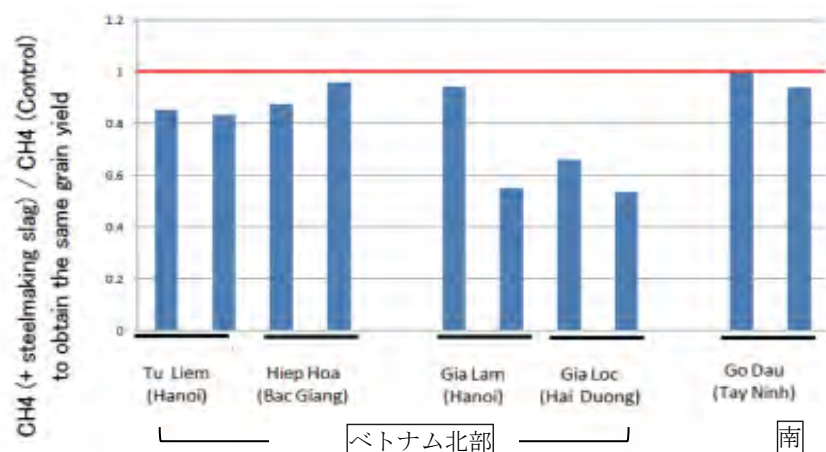


図 54 製鋼スラグを原料とする肥料の施用による水田からのメタン発生量への影響²⁷⁵

(4) 水田でのメタンの動態に関与する微生物群の生態

① 水田生態系における微生物群の解明

名古屋大学の土壌生物化学研究室（浅川晋教授）では、全国各地の水田土壌を用いて、そこに生息する各種微生物の動態と微生物間相互作用を解析し、水田生態系の生元素循環における微生物多様性と機能の実態と仕組みを解明することを目指している。現在の主な研究課題は、1) 水田でのメタンの動態に関与する微生物群の生態、2) 水田土壌の有機物分解に関わる微生物群、3) 水田土壌の微生物バイオマスカリウムの動態 である²⁷⁶。

② 減肥や硝化抑制剤による肥料からの N₂O 発生抑制

農耕地から発生する一酸化二窒素(N₂O)の主要な発生源の一つはアンモニア酸化細菌である。これまでアンモニア酸化細菌のアンモニア酸化反応を担うアンモニアモノオキシゲナーゼ(AMO)を阻害する硝化抑制剤が開発されたが、AMO は精製が困難なため酵素タンパクの構造に関する情報が極めて少ない。一方、アンモニア酸化反応を担うもう一つの酵素ヒドロキシルアミンデヒドロゲナーゼ(HAO)は詳細な構造が明らかにされており、HAO 阻害剤の開発が可能である。農研機構・農業環境変動研究センターは既知の HAO 阻害剤の硝化抑制効果を評価した結果、アンモニア酸化細菌のヒドロキシルアミンデヒドロゲナーゼ阻害剤フェニルヒドラジン、土壌において硝化抑制効果を示し、アンモニア酸化菌の増殖を阻害することが分かった²⁷⁷。

③ 冠水時の N₂O 大量発生に対する脱窒菌群の影響

²⁷⁶ https://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~soil/Soil_Biology_and_Chemistry/yan_jiu_nei_rong.html

²⁷⁷ https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/niaes/2017/niaes17_s09.html

転換畑土壌の短期間の冠水による N₂O 大量発生時の脱窒菌群の特徴が**農研機構・農業環境変動研究センター**により明らかにされた。脱窒では嫌気条件下で硝酸や亜硝酸が還元される過程で N₂O が発生する。このため脱窒反応による N₂O 発生は酸素濃度の影響を強く受け、特に降雨により、転換畑土壌が冠水すると短時間に大量の N₂O を発生する。その原因は冠水により表層土壌の脱窒反応が活性化するためであり、土壌表層の脱窒菌の群集構造が重要である²⁷⁸。

④放牧草地の硝化抑制剤施用

農研機構・農業環境変動研究センターはまた、放牧草地の硝化抑制剤施用は N₂O 発生を削減、硝酸流亡を低減し収量を増加させることを明らかにした。放牧草地の家畜糞尿中の窒素の約 3 割が硝酸流亡により失われていると考えられている。これを低減できる可能性がある資材として、硝化抑制剤 (DCD および PD)やウレアーゼ阻害剤(NBPT)、バイオ炭の施用について、世界の様々な地域において圃場試験が行われている。圃場試験データを収集して統計的解析を行い、これらの資材の施用による環境汚染低減および牧草収量増加について、世界における平均的な効果を明らかにする²⁷⁹。

(5) メタン等の発生を抑える家畜飼料の開発

① ムーンショット型研究開発

内閣府が主導する「ムーンショット型研究開発制度」に牛メタン削減プロジェクトが採択され、**北海道大学**の**小林泰男**特任教授がプロジェクトリーダーとして率いている。同プロジェクトでは、牛のルーメン発酵（ゲップ）に伴うメタン産生的大幅削減と、乳・肉の生産性向上を両立させる新たな持続的家畜生産システムを実現し、食料生産増大と温室効果ガス 80%削減を同時に実現する。まず、メタンを強力に抑制する飼料や微生物相をメタン最小化に導くプロ・プレバイオティクスを新たに開発する。これらの効能を、ルーメン内に留置し発酵状況をリアルタイムで体外へ発信する新規デバイス（スマートピル）により解明する一方、受信した牛個体別発酵データを AI 解析を通じた精密給餌プログラムの提案につなげる。すなわち、個体別にルーメンマイクロバイオーームと動物栄養を制御・管理できる未来型の飼養管理システムを確立・普及拡大させることで、メタン削減と生産性向上の世界的展開をはかる。メタン削減資材は北大が科学的な探索を、**科学飼料協会**が飼料化を、マイクロバイオーームは**農研機構畜産部門**が制御戦略を、スマートピルは**東大・物材研**が技術革新を担う

²⁸⁰。

278 https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/niaes/2017/niaes17_s10.html

279 https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/niaes/2017/niaes17_s11.html

280 <https://anim-func-nutr.agr.hokudai.ac.jp/project/prj-introduction/>

②好熱菌プロバイオティクス *C. hisashii*

九州大学の高橋秀之准教授らは、離乳直後の黒毛和種仔牛への *C. hisashii* (*Caldibacillus hisashii* : 好熱菌プロバイオティクス) 給与が、発育成績や腸内環境に及ぼす影響を検討した。その結果、*C. hisashii* 給与により仔牛の飼料効率が向上し、これには腸内細菌叢の変化が関与することが示唆された。特に、給与した仔牛では、*Bacteroidetes* 門の糞中に占める割合が増加した。*Bacteroidetes* 門は牛の飼料中に多く含まれる繊維やデンプンなどの分解を得意とするグループであるため、*Bacteroidetes* 門の増加は飼料効率の改善に関与している可能性がある。さらに、興味深いことに、*C. hisashii* を給与した仔牛では、メタン産生菌の一種である *Methanobrevibacter* 属の構成割合が減少した。

③タンニン

農研機構畜産研究部門（当時は畜産草地研究所）の樋口浩二らは、タンニンのタイプの違いによるメタン産生抑制効果を調べるとともに、タンニンを添加した飼料を山羊に給与してメタン産生抑制効果を明らかにした。基礎飼料(乾物比でチモシー乾草 65%、圧ペントウモロコシ 20%、大豆粕 15%)0.2g に、加水分解型タンニン(HT) と縮合型タンニン(CT)の含量が異なる市販の 6 種類のタンニン 0.2g をそれぞれ 100ml のシリンジに入れ、培養液 30ml を加えて 39℃ で 24 時間 培養してメタン産生量を測定した。その結果、CT を含むタンニンを添加した場合での メタン産生量は少なかった。加水分解型に比べ縮合型タンニンでメタン産生抑制効果が大きく、飼料にタンニンを添加することで、生産性にほとんど影響することなく、メタン産生量の低減が可能である²⁸¹。

④脂肪酸カルシウム

農研機構畜産研究部門の小林洋介らは、令和 3 年度も前年と同様に脂肪酸カルシウム等の国内流通量などを調査し、脂肪酸カルシウム等の家畜への長期給与等による温室効果ガス削減の効果及び飼養成績への影響等を調査した。結果を Shibata らの推定式を用いて換算すると、乾物摂取量が 25kg の乳牛から排出されるメタン (L/日/頭) を 521.5L から 519.2L に減少させることができた。基礎飼料中の粗脂肪含量や脂肪酸カルシウムの種類の影響、および乾物摂取量が 25kg 以上の場合など、より精度の高いデータを獲得するためにはさらなる検証が必要であるとしている。ルーメン液中の短鎖脂肪酸 (VFA) 濃度、pH および酢酸/プロピオン酸比 (A/P 比) については試験期間中の変化はなかったことが確認された²⁸²。

281 <https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/nilgs/2007/nilgs07-24.html>

282 https://www.maff.go.jp/j/chikusan/sinko/lin/l_siryu/attach/pdf/index-125.pdf

⑤ユーグレナ

ユーグレナ（ミドリムシ、*Euglena gracilis*）は、淡水で光合成によって増殖するため高温環境である熱帯地域が培養に適しており、燃料を抽出した後の粕は飼料資源として有望である。ユーグレナを飼料として加えることによって反芻家畜からのメタンが抑制されれば、新たな温室効果ガスの削減手法として有効である。帯広畜産大学家畜生産科学分野の西田武弘教授は、培養試験でユーグレナ給与量とメタン抑制効果について、種々の投与量で検討を行ったところ、メタン生成抑制効果は5%添加から観察され、40%以上でより大きくなることが確認された（図 55）。さらに、ヒツジの飼料中乾物当たり 15%の濃厚飼料とユーグレナを置換すると、無添加区と比べて添加区では有意にメタン発生量は低下した（図 56）。高温環境である熱帯地域の方がユーグレナの培養に適しているという点から、東南アジアやアフリカにおける普及が有望であるとしている²⁸³。

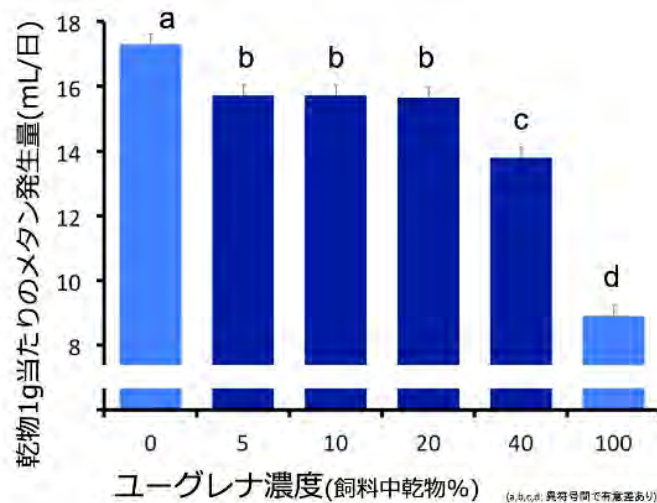


図 55 ユーグレナの投与がウシ反芻胃液からのメタン発生量に及ぼす影響
(培養実験)²⁸³

283 <https://www.obihiro.ac.jp/faculty-r/takehiro-nishida>

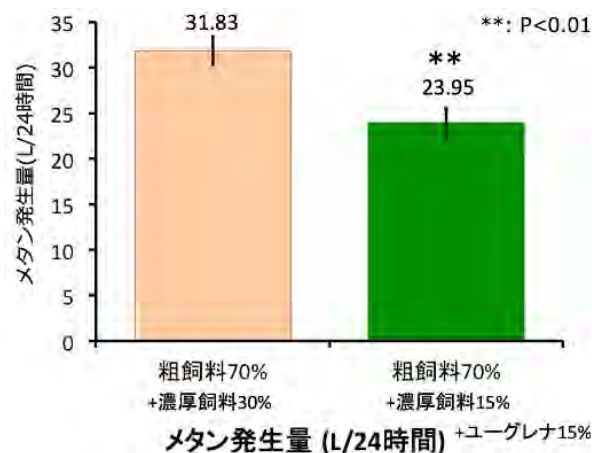


図 56 ユーグレナの投与がウシ反芻胃液からのメタン発生量に及ぼす影響(培養実験)²⁸³

⑥低蛋白質飼料

これまで肥育豚への低蛋白質飼料の給与は、肥育豚のふん尿中の窒素量を約 30% 削減できることから、環境保全的であると考えられてきたが、温室効果ガスの削減効果が検証されていないために、温暖化緩和対策としては生産現場への導入が躊躇されていた。このため、**農研機構畜産研究部門**（当時は畜産草地研究所）の**長田隆**らは、家畜排せつ物から発生する温室効果ガスを精密に測定・評価する方法を開発するとともに、新潟大学、群馬県畜産試験場、味の素（株）と共同で、肥育豚への低蛋白質飼料給与による温室効果ガス削減効果の評価を行った。まず、家畜排せつ物から発生するメタンおよび一酸化二窒素（N₂O）を精密に測定・評価することができるガス発生量計測システムを開発した。そして、結晶性アミノ酸でバランスを整えた低蛋白質飼料（表 10）を給与した肥育豚のふん尿と、慣用飼料を給与した肥育豚ふん尿を採取して、その処理全過程で発生する温室効果ガス発生総量を比較した。その結果、アミノ酸でバランスを整えた低蛋白質飼料を給与することによって、従来の飼料に比べ、生産性に影響することなく温室効果ガスを約 40%削減できることが確認できた（図 57）。

この成果により、国内で初めて一酸化二窒素の排出削減量が「オフセット・クレジット（J-VET）制度」及び「国内クレジット制度」のクレジットとして認証され、肥育豚への低蛋白質飼料の給与をカーボン・オフセットや排出権取引に利用することが可能になった²⁸⁴。

284 https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nilgs/018554.html

表 10 慣用飼料と低蛋白質飼料の組成の違い²⁸⁴

	慣用飼料(CP16.0)	低蛋白質飼料(CP13.1)
トウモロコシ	61.2	69.05
大豆粕	25.8	15
玄米	10	10
L-リジン塩酸塩	-	0.21
L-トレオニン	-	0.06
DL-メチオニン	-	0.06
L-トリプトファン	-	0.02
食塩、ビタミン等	2.6	2.6
合計	100	100

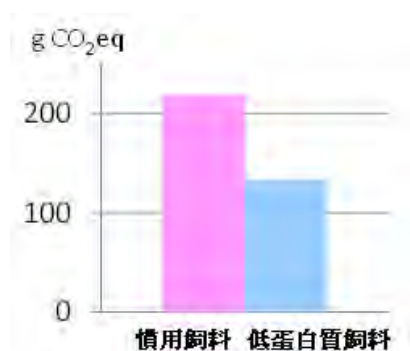


図 57 温室効果ガス発生量の比較²⁸⁴

CO₂eq：温室効果ガスの温暖化効果を二酸化炭素の温室効果に換算した値

⑦カシューナッツ殻液混合飼料（ルミナップ®）

出光興産株式会社は、全国肉牛事業協同組合が推進する「肉用牛生産における温室効果ガス削減可視化システム構築事業」（実施期間：2022～2024 年度）において、同社が開発したカシューナッツ殻液混合飼料（製品名：ルミナップ®）の提供と、生産現場における GHG 削減の実証評価に協力する。事業は、1) 牛のゲップ中メタンが削減できる飼料の給与、2) 排せつ物の早期好気性発酵促進など、生産現場での先進的な取り組み事例における GHG 削減の実態を科学的に把握し、かつ理解しやすく可視化するもので、GHG 削減に対する明確な対応方策を肉用牛生産者へ提示できる仕組みを構築する。ルミナップ®は、出光興産の子会社である株式会社エス・ディー・エス バイオテック（SDS Biotech K.K.）のアニマルニュートリション部（出光興産 旧 アグリバイオ事業部）が研究開発・販売している²⁸⁵。

出光興産は 2006 年からの北海道大学と共同研究の成果として、カシューナッツ殻液製剤（CNSL）がメタンガスを大幅に抑えることを実験室試験で見出した。さらに、CNSL を牛に与えることで、牛のルーメンから排出されるメタンを約 2 割低減することを確認している²⁸⁶。

²⁸⁵ <https://www.idemitsu.com/jp/news/2022/220617.html>

²⁸⁶ https://www.sdsbio.co.jp/products/anim/cnsl_lp/

(6) メタン等の発生の少ない牛の育種

① メタン産生に関連する生理的パラメーター

メタン産生量が高いまたは低い牛の特定などの研究が行われているが、そのためにはメタン産生量に応じた個体毎の生理的な特徴を明らかにすることが必要である。東北大学の盧尚建教授のグループは、兵庫県立農林水産技術総合センターと共同で、黒毛和種の肥育前期、中期、後期に測定されたメタン排出量、血液中の代謝産物・ホルモン・アミノ酸の濃度、ルーメン液性状および肝臓トランスクリプトーム解析などの生理的な代謝情報を用いて、メタン産生と生理的特徴との関係を解明した。メタン排出量が多い肉用牛は、メタン産生によるエネルギー損失を補うため、体内のアミノ酸を積極的に活用している可能性が示唆された。また、血液中のインスリンとケトン体、およびルーメン液中のプロピオン酸と酪酸の各濃度は、メタン排出量を予測する重要な因子であることが明らかになった。本研究でメタン産生との関係が明らかになった生理的パラメーターは、国内で飼育されている黒毛和種のメタン排出量を予測する指標として活用できることが期待される²⁸⁷。

② メタン産生量の測定技術開発

農研機構畜産研究部門乳牛精密栄養管理グループ（グループ長：野中最子）では、乳牛の生産性向上とウシ消化管からのメタン削減、それらの遺伝的能力の改良を目的に、下記のような研究テーマに取り組んでいる。

- ・個体ごとの物質出納を実測することで乳生産への効率を把握し、ルーメン発酵の代謝動態の解明や微生物機能の改善を通してメタン削減技術を開発する。
- ・ウシ消化管からのメタン産生量を簡便に測定する技術を作成し、国産飼料を最大限に利用したメタン排出抑制と乳生産性向上の両立を目指す飼養管理技術を開発する。
- ・エネルギーバランスや各種センサーから得られるデータなど、新たな遺伝的能力を改良するための指標を探索し、その確立を進める²⁸⁸。

(7) 牛のげっぷ由来のメタン排出削減

① 新規嫌気性細菌(*Prevotella* 属細菌)

牛は、第一胃に共生する微生物の作用により飼料を分解、発酵し、発酵で生じるプロピオン酸などの短鎖脂肪酸を主要なエネルギー源として利用している。農研機構畜産研究部門の真貝拓三らは、同機構が保有する胃液中のプロピオン酸濃度の高い乳用牛から、コハク酸、乳酸、リンゴ酸などのプロピオン酸前駆物質を産生する新規の嫌気性細菌(*Prevotella* 属細菌)を分離した。本菌は、第一胃内に生息する既知の

287 https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20220712_01web_cow.pdf

288 <https://www.naro.go.jp/laboratory/nilgs/introduction/chart/0601/index.html>

Prevotella 属細菌よりもプロピオン酸の前駆物質を多く生成する特徴がある。第一胃においてプロピオン酸が多く産生されると、メタン産生が抑制されることが知られている。本菌の発酵機能や増殖促進条件を明らかにすることで、乳用牛のげっぷ由来のメタン排出削減、さらには地球温暖化の緩和に貢献すると期待される²⁸⁹。

②スニファー法によるメタン排出量・推定式

農研機構畜産研究部門の鈴木知之らは牛のルーメン発酵由来メタン排出量を、搾乳ロボット等で測定した呼気中のメタン/二酸化炭素濃度比から求める、従来算出式より使いやすい算出式を開発した。牛からのメタン排出量を正確に測定するためには、大型の特別な施設（チャンバー）を使う必要があるが、多くの牛を測定することは困難である。多くの頭数でメタン排出量を測定するために欧州で開発されたスニファー法（sniffer 法：1日の呼気の一部を採取する [嗅ぎとる] ことによってメタン排出量を推定する方法）は、呼気中のメタンと二酸化炭素の濃度を1日数回測定し、これと乳生産量等の情報を利用してメタン排出量を推定する。1日のメタン排出量を推定するためには算出式が必要であるが、農研機構は自身を持つチャンバーによる測定値を用いて、スニファー法向けの簡易な算出式を開発した。また、スニファー法により、牛の飼料によるメタン排出量の違いを評価できることを明らかにした²⁹⁰。

農研機構が代表を務める気候変動緩和コンソーシアムは、この成果も含めて「ウシルーメン発酵由来メタン排出量推定マニュアル」を公表した。本マニュアルでは、搾乳ロボットで搾乳される乳牛及び肥育牛について、それぞれの測定の背景、測定の実際、計算方法、データの解釈について解説している。特にガス分析計のコストがネックとなるが、誰でも取り組めるように簡単な測定方法についても紹介している。表11は18頭のホルスタイン種泌乳牛にNDF（中性デタージェント繊維）含量32～47%（乾物ベース）の範囲にあるPMR（部分的混合飼料）を供与したときの算出事例である。メタン排出量は推定式によって異なり、スニファー法で求められたメタン排出量は一般的に実際より低くなるため、用いた推定式と、メタンとCO₂の濃度をスニファー法で測定したことを明示する必要がある²⁹¹。

289 https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nilgs/144910.html

290 https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nilgs/153466.html

291 https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/152088.html

表 11 メタン排出量の算出事例 ²⁹¹

	平均	標準偏差	最小	最大
産次	3.0	1.19	2	5
分娩後日数	139	36.3	79	204
体重 (kg)	690	53.4	618	784
乾物摂取量 ¹ (kg/日)	26.0	3.19	20.0	30.5
エネルギー補正乳量 (kg/日)	35.4	6.49	25.6	48.1
CH ₄ /CO ₂ 比	0.079	0.0161	0.043	0.103
推定 CH ₄ 排出量 (L/日)				
式(1)	620	112.9	379	781
式(2)	568	136.0	318	794
式(8)	526	141.4	253	789
推定 MCF (J/100J) ²	5.2	0.73	3.7	6.38

¹ ロボット内での配合飼料摂取量も含む。

² 式(11)を用いて推定。

MCF：メタン転換効率

(8) 家畜の排せつ物処理

① 精緻化された排出係数

農研機構畜産研究部門の長田隆、白石誠、水木剛らは、家畜の排せつ物を精密管理することによるメタン、N₂O の排出抑制の研究を行った。養豚、乳用牛の浄化処理における温室効果ガス排出量を実施設で実測し、その排出係数を精緻化した。すなわち、国内 5 ヶ所の浄化処理施設の年間測定結果より算出された豚舎排水浄化処理からの排出係数は 0.91% (g CH₄/g 有機物)、2.87% (g N₂O-N/g 窒素) であった。また、乳用牛浄化処理からの排出係数は、岡山県畜産総合センタ内浄化処理施設における 6 年間の様々な処理条件下の排出に基づいて算出しており、0.30% (g CH₄/g 有機物)、2.88% (g N₂O-N/g 窒素) であった。N₂O 排出係数は現行係数 5%の半分程度であることがわかった (図 58)。実測に基づき精緻化された排出係数を豚と乳用牛・肉牛に適用した場合、汚水浄化区分の年間排出量は CH₄ では 2.29 万 t 増 (CO₂ 換算)、N₂O では 64.6 万トン減 (CO₂ 換算) となり、温室効果ガス全体では約 60 万トンの低減 (CO₂ 換算) となった (図 58) ²⁹²。

²⁹² https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/nilgs/2017/17_063.html

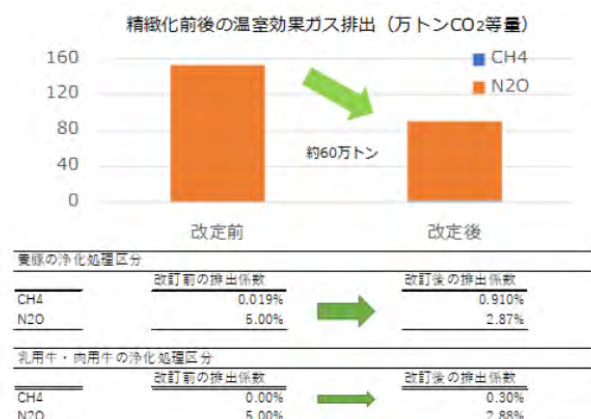


図 58 精緻化された温室効果ガス排出係数の排出区分への効果²⁹²

②麦稈によるふん尿の水分調整

麦稈による乳牛ふん尿の水分調整が温室効果ガス排出量に及ぼす影響を検証するために、株式会社ズコーシャの保井聖一らは北海道農家慣行の実規模無通気堆積法に基づく堆肥化試験を実施した。試験区は、高水分区（水分 82.3%、容積重 888 kg m⁻³）、中水分区（79.1%、796 kg m⁻³）および低水分区（75.9%、679 kg m⁻³）の計 3 試験区とし、111 日間の堆肥化過程における温室効果ガス発生量および堆肥温度を測定した。堆肥の腐熟度は、高水分区は未熟に近い状態、低水分区は完熟に近い状態であり、中水分区は両者の中間であった。メタンおよび N₂O の積算発生量は、低<高<中水分区の順に低く、麦稈を多量に混合することが温室効果ガスの発生を大幅に抑制することが示された。CO₂ 等価ガス累積排出量は、高水分区が 572 kg-CO₂eq、中水分区が 850 kg-CO₂eq、低水分区が 518 kg-CO₂eq であり、低水分区は高水分区、中水分区に比べ、それぞれ 9.4%、39.1%削減された。乳牛ふん尿に麦稈を積極的に混合し、原料を堆肥化適正水分に調整かつ膨軟化して発酵を促進する堆肥化技術は、酪農現場からの温室効果ガスの発生量の削減に寄与できることが明らかになった²⁹³。

③堆肥化発酵過程における亜硝酸酸化菌添加

家畜排せつ物の堆肥化処理過程からは悪臭の他、N₂O 等の温室効果ガスが発生しており、抑制技術を開発する必要がある。農研機構畜産研究部門の福本泰之らは、堆肥化過程においては亜硝酸が蓄積すると N₂O が多く発生することから、堆肥化発酵の途中で硝化菌として亜硝酸酸化菌（NOB：nitrite-oxidizing bacteria）を追加することで、N₂O 発生量が低減できることを見いだした。この技術は、成熟した堆肥を NOB ソースとして使用できるため、費用対効果も高くなる。N₂O 排出を軽減することで、肥料として価値の高い硝酸態窒素（NO₃⁻）を堆肥製品に保つことができる。さらに、

293 https://www.jstage.jst.go.jp/article/dojo/93/3/93_930301/_article/-char/ja/

この手法は、化学試薬を用いた NH_3 緩和の手法と組み合わせることができることを確認した。実際の使用にあたっては、 NO_3 還元による N_2O の発生を防ぐための NOB 源を添加する最適なタイミングを見極める方法を検討する必要がある²⁹⁴。

294 https://researchmap.jp/read0081963/published_papers/15354655

2. 6. 開発途上国の研究開発動向

2. 6. 1. 中国

中国の GHG 排出量は特に 2000 年代からの伸びが大きく、これまではほぼ一貫して増加傾向にあったが、2014 年～2017 年には 3 年連続で減少し、現在は再び増加に転じている。中国の CO₂ 排出量が世界全体に占める割合は、1960 年代は 5%に満たなかったが、2019 年時点で 28.8%に達している²⁹⁵。

中国における公的研究開発費では、近年、地方政府からの支出が中央政府の支出を上回っている。2020 年の公的研究開発費は総額で 1 兆 95 億元（約 18 兆 1,710 億円）となり、地方政府は 6,337 億元（62.8%）、中央政府は 3,758 億元（37.2%）をそれぞれ支出した。中央政府による競争的研究資金については、既存のプログラムの廃止・合併などにより、5 つのカテゴリーに集約された。その 1 つの「国家自然科学基金 National Natural Science Foundation of China (NSFC)」は、国家自然科学基金委員会により管理されている。同委員会は、国の方針及び政策に基づき、基礎研究と応用研究の一部を国の財政資金で助成している。2018 年 3 月の省庁再編により、国務院直下の組織から、科学技術部傘下となった。2020 年の実績は、17 プログラムの 45,656 件のプロジェクトに対し、直接費用・間接費用含め、336 億元（約 6,048 億円）を支援している²⁹⁶。以下の福建省農業科学院 LinDu らの「低メタン形質イネによるメタン緩和」研究は、国家自然科学基金の支援を受けて行った。

（1）低メタン形質イネによる CH₄ 緩和

稲作は、地球規模の気候変動に劇的な影響を与える人為起源メタンの主な発生源である。光合成産物の分布を最適化することが米の収量を増やし、メタン排出を軽減するために重要である。福建省農業科学院の Lin Du らは、穀物に高い光合成フラックスを与えるオオムギ SUSIBA2 遺伝子を用いてイネを育種し、SUSIBA2 の機能の包括的な評価を行った（図 59）。SUSIBA2 イネとその野生型を用いたフィールド調査は、イネの 3 シーズンにわたって実施し、メタン生産プロセスに関連する微生物群集の形質、メタン排出量、米収量等を分析した。SUSIBA2 ジャポニカ米は、稲作初期（2015 年 5 月から 8 月）および稲作後期（2015 年 7 月から 11 月）に福建省の寿山農場で、または冬の稲作シーズン（2016 年 2 月から 4 月）に海南省の三亜農場で実施した。SUSIBA2 インディカ米は、2016 年の自然生育期（4 月から 9 月）に寿山農場で実施した。SUSIBA2 ジャポニカおよびインディカ米のフィールド調査からのデータを使用して、複数のイネ品種における CH₄ 産生の軽減における SUSIBA2 の効率を評価した。

295 https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/01/13fd569cc2d59802/20210020.pdf

296 <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/FR/CRDS-FY2021-FR-02.pdf>

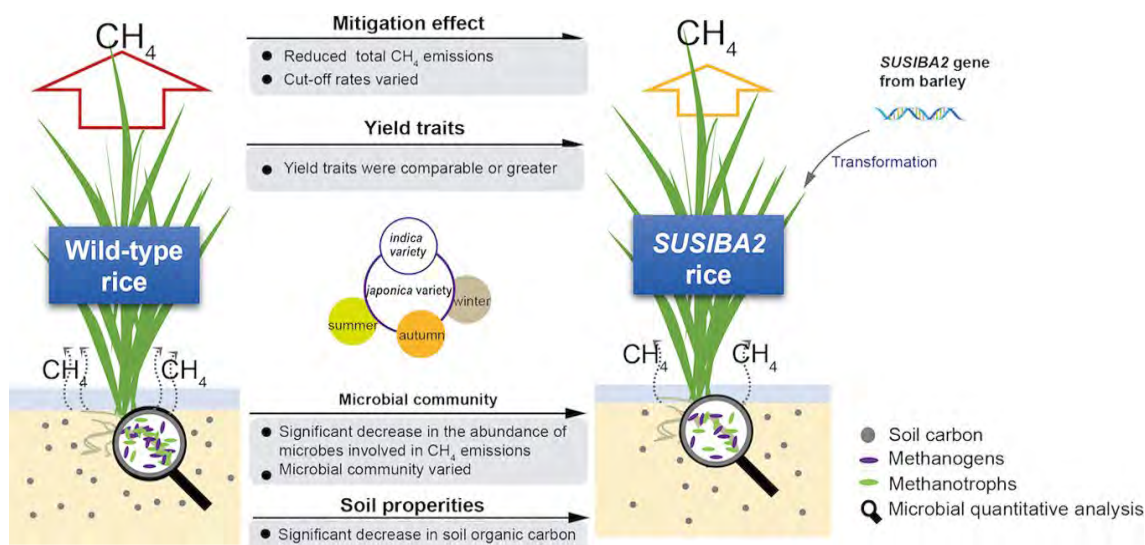


図 59 SUSIBA2 イネの育種とメタン緩和²⁹⁷

SUSIBA2 イネの早い時期と遅い時期に栽培されたイネは同様の CH_4 緩和効果を示し、減少率は早いイネで 50.98%、遅いイネで 50.97%であった。SUSIBA2 米の冬稲作期の削減率は、他の稲作期に比べて有意に低かった (22.26%)。削減率もイネ品種間で異なり、SUSIBA2 ジャポニカ米は SUSIBA2 インディカ米よりも有意な CH_4 緩和効果を示した。野生型と比較して、SUSIBA2 イネは土壌の有機炭素特性と CH_4 関連微生物の存在量を大幅に減少させ、メタン生成およびメタノトローフ群集を変化させた²⁹⁷。

(2) 3-ニトロオキシプロパノール (3-NOP) による腸内メタン軽減

家畜消化管内発酵による CH_4 の緩和戦略は、環境にやさしく、生産者が簡単に採用でき、消費者に受け入れられる必要があるが、利用可能で持続可能なメタン緩和アプローチは少ない。最近の研究では、化学的に合成されたメタン生成阻害剤 3-NOP が、腸内メタン軽減に対する効果的なアプローチの 1 つであることを示している。3-NOP は、メチル補酵素 M レダクターゼを特異的に標的とし、ルーメン古細菌におけるメタン生成の最終触媒段階を阻害する (図 60)。調査研究で乳牛と肉牛に 3-NOP を与えると、腸内メタン生成が一貫して平均 30% 減少し、場合によっては 82% も減少した。有効性は 3-NOP 投与量に正の相関があり、食事の中性デダージェント繊維 (NDF) 濃度によって負の影響を受け、同じ投与量で比較した場合、肉牛と比較して乳牛でより大きな反応が見られた²⁹⁸。

297 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720380396?via%3Dihub>

298 <https://www.mdpi.com/2076-2615/11/12/3540>

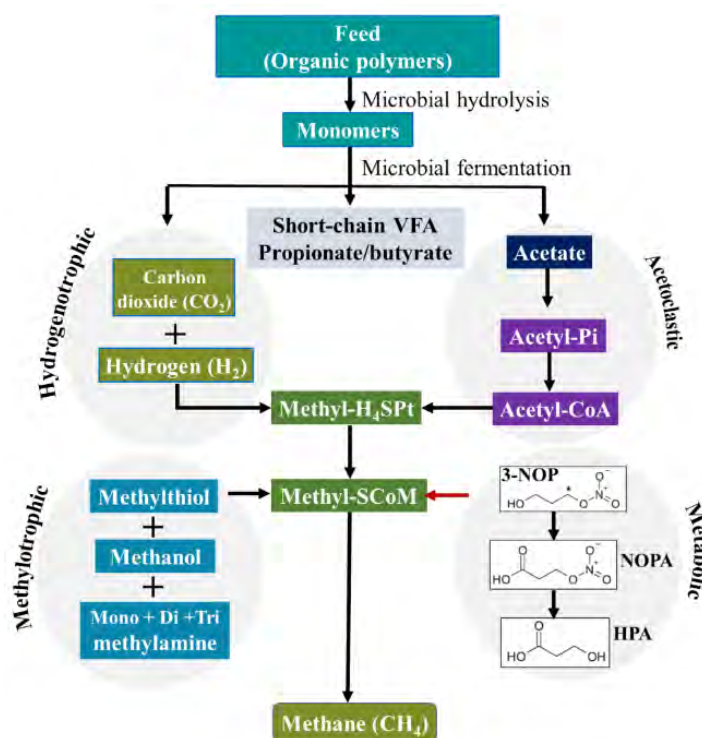


図 60 反芻動物のルーメンにおける主要な CH₄ 形成経路と 3-NOP によるその阻害 (3-NOP : 3-ニトロオキシプロパノール、NOPA : 3-ニトロオキシプロピオン酸、HPA : 3-ヒドロキシプロピオン酸) ²⁹⁸

① in vitro での 3-NOP とフマル酸の組み合わせによる効果

中国においても 3-NOP は、多くの in vitro および in vivo 反芻動物研究で評価されている。中国農業科学院の Zihao Liu らは、in vitro で乳牛の揮発性脂肪酸、メタン生成、および微生物群集構造に対するフマル酸と組み合わせた 3-NOP の効果を調べた。フマル酸は第一胃で最初にコハク酸に還元されて、水素消費を伴う脱炭酸によってプロピオン酸に変換され、メタン生成を競合的に阻害する。2 つの 3-NOP レベル (0 または 2 mg/g 乾物 [DM]) および 2 つのフマル酸レベル (0 または 100 mg/g DM) を使用して実行した。3 頭の授乳中のホルスタイン種の牛から、反芻胃液を採取した。その結果、3-NOP とフマル酸の組み合わせは、乾物分解性に影響を与えることなく、メタン排出量を 11.48% 削減した。また、プロピオン酸濃度が増加し、アセテート/プロピオン酸比が大幅に減少した (表 12)。これらの結果は、3-NOP とフマル酸塩の組み合わせが、3-NOP のみと比較して、水素の蓄積を緩和し、メタン生成の抑制を強化できることを示した ²⁹⁹。

299 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8939354/>

表 12 3-NOP とフマル酸の組み合わせが in vitro での CH₄ 産生、揮発性脂肪酸プロファイル、および他の発酵パラメータに及ぼす影響^b

Parameter	Value for treatment ^a				SEM	P value		
	CON	F	3-NOP	NPF		3-NOP	F	NPF
pH	6.60 A	6.57 B	6.61 A	6.57 B	0.004	0.171	<0.001	0.431
DMD	0.694	0.695	0.673	0.697	0.005	0.361	0.298	0.236
Gas production (mL)	140.7 B	153.5 A	136.1 B	152.1 A	1.622	0.267	<0.001	0.536
CH ₄ (mL)	9.58 A	8.69 B	8.65 B	8.48 B	0.132	0.024	0.035	0.152
Concn (mM)								
Total VFA	102.07 B	105.12 A	99.74 B	104.61 AB	0.537	0.138	<0.001	0.337
Acetate	65.20	64.99	63.67	64.34	0.268	0.053	0.666	0.405
Propionate	19.67 B	24.03 A	19.89 B	24.45 A	0.308	0.135	<0.001	0.631
Isobutyrate	1.00	0.96	0.97	0.96	0.008	0.287	0.123	0.450
Butyrate	12.69 A	11.73 A	11.86 A	11.54 B	0.155	0.091	0.035	0.283
Isovalerate	1.77	1.68	1.70	1.65	0.018	0.169	0.071	0.644
Valerate	1.73	1.71	1.65	1.66	0.012	0.056	0.898	0.433
Acetate/propionate ratio	3.32 A	2.71 C	3.20 B	2.63 C	0.042	0.004	<0.001	0.603

^a 大文字が異なる行内の平均は異なる (P < 0.05)

^b CON : 対照群、基本総混合配給、F : CON とフマル酸塩 (100 mg/g DM)、3-NOP : CON および 3-ニトロオキシプロパノール (2 mg/g DM)、NPF : 3-ニトロオキシプロパノール (2 mg/g DM) とフマル酸塩 (100 mg/g DM)、DMD : 乾燥物質の分解

②in situ での 3-NOP による効果

中国科学院の Xiu Min Zhang らは、3-NOP を肉用牛へ給餌することによってみられる、反芻胃繊維分解および微生物群集組成に対する影響を in situ で調査した。反芻動物の飼料に 3-NOP を使用してメタン生成を阻害すると、ルーメン内の溶存 H₂ (dH₂) とガス状 H₂ が増加することがこれまでに示されており、ルーメンの H₂ 分圧の上昇はルーメンでの炭水化物の発酵速度と消化率を低下させる可能性がある。飼料を構成する飼料基質（大麦サイレージと干し草）は、ルーメン内で最大 288 時間培養され、neutral detergent fiber (NDF) 分解の動力学が測定された。ルーメンの dH₂ 濃度と、培養飼料に直接付着した細菌群集の動的变化も測定した。その結果、3-NOP の食事補給は、溶存メタン濃度を減少させ (-53%)、溶存 H₂ を増加させた (+780%)。2 ルーメン液中の濃度は変化した、in situ NDF 分解は実質的に変化しなかった (図 61) ³⁰⁰。

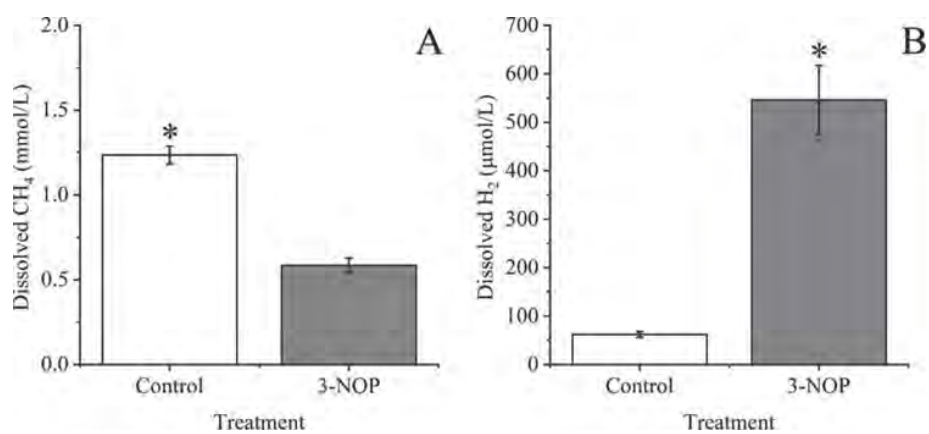


図 61 高飼料規定食を与えられた肉用牛のルーメン溶存 CH₄ (A) および H₂ (B) 濃度に対する 3-ニトロオキシプロパノール (3-NOP) 補給の効果³⁰⁰
エラーバーは SEM。*は P ≤ 0.05 を示す。

2. 6. 2. インド

温室効果ガス観測技術衛星「GOSAT」は、環境省、国立環境研究所（NIES）、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が共同で開発し、地球上の二酸化炭素とメタンの濃度を観測している。2009 年に GOSAT、2018 年に後継機 GOSAT-2 が打ち上げられ、それらによる観測の結果、中国、インドの人口密度の高い都市部から人為起源のメタン濃度が目立って高い結果が得られている。2009 年 6 月から 2012 年 12 月までの間の観測データを分析した結果によると、人口密集地域、大規模な農業地域、天然ガス・石油の生産・精製地域等で人為起源メタン発生が多く、周辺よりも明らかにメタン濃度が高いことがわかった³⁰¹。米生産からのメタン排出は重要な役割を果たし、主に水田からの CO₂ とメタンはかなりの量となっている。また、インド、特にインド北西部での作物残渣の燃焼は、温室効果ガスの排出の原因となっている。

インド政府は 2011 年、インド農業研究評議会（ICAR）、農業農業福祉省とともにフラグシップネットワークプロジェクト「気候変動に強い農業における国家革新」（NICRA）を立ち上げた。農業における気候変動の影響を最小限に抑えるために、農家やその他の利害関係者の間で意識を高めてきた。戦略的研究でカバーされる主な推力分野は、(i) 最も脆弱な地区/地域の特定、(ii) 適応と緩和のための作物品種と管理慣行の進化、(iii) 家畜、漁業、家禽への気候変動の影響の評価と適応戦略の特定である。2021 年までに、気候変動に対するインドの農業のリスクと脆弱性を評価することに加えて、7 つの気候回復力のある品種と 650 の地区の農業緊急時対応計画が策定されている。また NICRA プロジェクトの下で、16,958 のトレーニング プログラムが全国で実施され、気候変動と回復力のある技術のさまざまな側面について利害関係者を教育してきた³⁰²。

（1）直播米（DSR）技術によるメタン排出削減

稲作の総面積は、世界規模では約 1 億 6,350 万ヘクタールであり、インドでは約 4,250 万ヘクタールで栽培されている。インドの人口増加により、2025 年までに 25% 多いコメが必要になる。北インドのガンジス平原（IGP）にあるパンジャブ州は、国内の米の 50%を生産しており、IGP における稲作の最も一般的な方法は水たまり移植である。長期にわたる浸水は嫌気性土壌条件をもたらすため、この浸水稻作はメタン排出の主な原因となっており、全世界のメタン排出量の 10~20%を占めている。

インド農業研究所の Pathak らは、代掻き移植米（PTR：puddled transplanted rice）や直播米（direct-seeded rice：DSR、苗床から苗を移植する代わりに田んぼに直接種をまくこと）の GHG 緩和、水、および省力化の可能性を定量化するために、インドのパンジャブ州のジャランダル地区で 2 年間の野外実験を実施した。彼らは、PTR に

301 <https://rief-jp.org/ct8/56555>

302 <https://pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=1743354>

における CO₂、メタンおよび N₂O の平均 GWP（地球温暖化係数）が 2.91 トン/ha であり、DSR では 1.94 トン/ha であることを発見した。また、PTR の州全体が DSR に変換された場合、GWP は 33% 減少すると結論付けられた。これに加えて、3~4 回の灌漑が DSR の下で収量の損失なしに節約された。TPR 比較して、DSR ではトラクターの使用が 58%に減少し、人的労働の使用が 45%に減少した。これは、収穫量を減らすことなく GHG 排出量、水、および労働力（人間と機械の両方）を削減することにより、気候変動の緩和と適応、および農家の収入の増加のために、DSR が PTR の実行可能な代替手段になり得ることを示していた³⁰³。

（２）インドにおける作物残渣燃焼（CRB）によるメタン排出への対策

米収穫後の残渣管理において、焼却は、主にその単純さ、低コスト、機械収穫の増加、米の収穫と小麦の播種の間の短い合間、および残渣の実行可能な用途がないために、米作物残渣を管理するための最も一般的な方法である。年間約 50Mt の稲わらが燃やされ、その半分近くが 10 月から 11 月にかけてインド北西部で発生する。燃焼残渣は大気汚染の主な原因であり、1 億 5,000 万トンの CO₂ およびその他の温室効果ガス（NO₂、SO₂、CO、CH₄、NH₃ など）を排出している。作物残留物を管理するための協調的な取り組みと進化する新しい技術により、インド北西部での CRB の発生率は 2016 年以降減少しているが、かなりの割合の残渣がまだ焼かれている。

作物の収量と収益性を向上させると同時に、残留物の燃焼による環境への悪影響を軽減するために、マルチングまたは残留物を土壌に組み込むための技術的改善策が推進されている。稲株を含む大量のわら屑の間を通過して播種することができる不耕起播種機ハッピーシーダー（Happy Seeder）を用いたり、既存のコンバインが収穫エリア内にわらを散布するための付属装置であるストロー管理システム（SMS）によって現場でのわら管理を改善したりしている。インドの PAU が開発した、トラクターに取り付けるストローチョッパー兼スプレッダーは、作物を収穫し、わらを切り刻み、畑に均等に広げるマルチとしての使用や土への混合を行う（図 62）³⁰⁴。

303 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9075927/>

304 <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.614212/full>

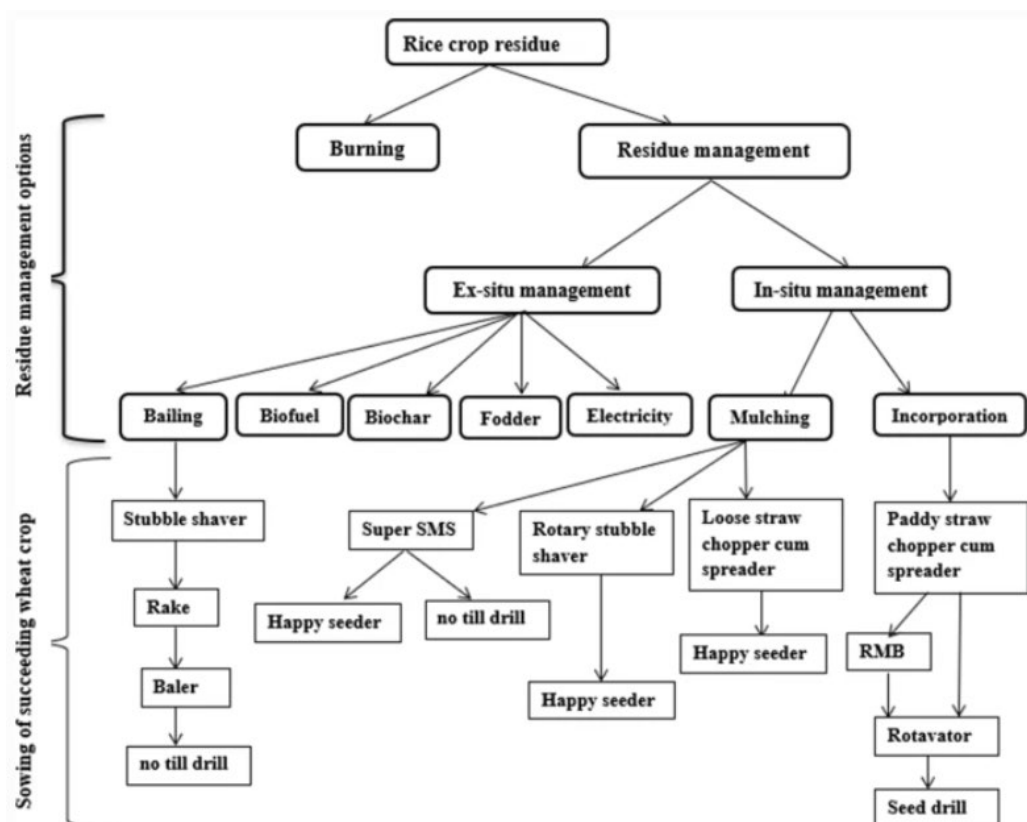


図 62 次の小麦作のための米残渣管理オプションと作付け技術³⁰⁴

(3) メタン等の発生を抑える家畜飼料の開発

インド農業研究協議会 (ICAR) 国立動物栄養生理学研究所の Luna Barua らは、インドのアッサム州北東部から 20 の植物源を収集し、植物源のタンニン含有量を分析した後、ルーメン液を用いた *in vitro* システムでインキュベートして生成ガスの量を計測して抗メタン作用の可能性を調査した。

その結果、*Litchi chinensis* (レイシ [ライチ])、*Melastoma malabathricum* (ノボタン)、*Lagerstroemia speciosa* (サルスベリ)、*Terminalia chebula* (ミロバラン)、および *Syzygium cumini* (ムラサキフトモモ) は、24 時間の *in vitro* 試験で観察された強力なメタン抑制特性を有することが示された (表 13)。これらの葉は、メタンの排出を減らすために動物の食事で補うことができると言える³⁰⁵。

305 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6048080/>