

肉用牛における消化管内発酵由来のメタン排出について考える

京都大学農学研究科 教授 広岡 博之

1 はじめに

近年、世界的に畜産による温室効果ガスの排出量が農林業由来の温室効果ガスの中で最も多く、その低減のための対策が求められている。具体的には2019年現在、世界の農林業由来の温室効果ガスは二酸化炭素（CO₂）換算で120億トンにのぼり、人為起源の排出量の約23%を占め、その中で農業は62億トンになり全体の半分以上を占めている。また、家畜の消化管内発酵によるメタン排出量は農業由来のメタン排出量の40%とその割合は大きい。このことから、近年、欧米を中心に家畜、特にウシをはじめとする反芻動物が悪者扱いされている。

しかし、誤解を恐れず、最初にはっきりさせておきたいのは、このような海外からの声とは裏腹に、日本の農林水産分野の温室効果ガスの排出量は、2018年現在、二酸化炭素換算でわずかに5001万トンと少なく、メタンの排出量は日本では稲作が最も多く1356万トンで、次いで家畜の消化管内発酵によるものが747万トン、家畜排せつ物管理によるものが232万トンである点である。これらの数値は、他の先進主要国と比べてもかなり少ないものである。実際、アジアに目を向ければ、家畜の消化管内発酵についてインドと中国が突出しており、その2か国で全体の6割を占め、また東南アジアで言えば、ミャンマーとインドネシアが他国と比べて大きく、日本はこれらの国々と比べても少ないことが示されている（鈴木ら、2017）。しかし、そのことを踏まえたうえでも、メタンのような気体には国境がなく、日本が全く無関係と言ってよいわけではなく、メタン排出量の削減は、日本も避けて通れない課題と考えることもできる。

2 なぜ、ウシはメタンをゲップとして出すのか

前述のように、近年、家畜由来の温室効果ガスについて議論する際に、ウシやヒツジ、ヤギなどの反芻動物の消化管内発酵によるメタン産生が問題視されることが多い。通常、畜産由来の温室効果ガスとしては、主に二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素が議論の対象になるが、特に本稿では、肉用牛からの消化管発酵由来のメタン排出に焦点を絞って議論することにしたい。そこでまず、ウシからのメタン排出の問題についての現状確認をしておこう。

まず第1に、反芻動物であるウシが消化管内発酵に基づくメタンをげっぷ（嗳気）として排出しているかのメカニズムについて触れておくことにする。ウシはこれまで、家畜として人類に良質の乳や肉を提供してくれてきた。そもそもウシが、人間の利用できないセルロースを多く含む牧草や野草を、人間の食料となる肉や乳などに変換してくれるのは、ウシの第一胃（ルーメンとも呼ばれる）に生存している多種多様な微生物（細菌、プロトゾア、真菌など）のおかげである。摂取した飼料中のセルロース、ヘミセルロース、デンプンなどを含む炭水化物は、第一胃内の嫌気条件下で微生物に分解され、エネルギー源となるプロピオン酸、酢酸、酪酸などの揮発性脂肪酸になる。その過程でメタンがげっぷとして排出される。専門外の方には難しいかもしれないが、そのメカニズムを図1で示すことにする。給与された飼料から摂取された炭水化物は、ピルビン酸に代謝される過程で水素（図中で[H]で表現）が産生され、また、ピルビン酸が酢酸になる過程でも水素が産生される。一方、プロピオン酸や酪酸が産生される過程では水素が消費されている。このような水素の産生と消費の過程において、過剰となった水素から第一胃内に生息するメタン生成菌によってメタンが生成され、げっぷとして体外に排出される。このメタンが生成される過程は以下の化学反応式で表すことができる。

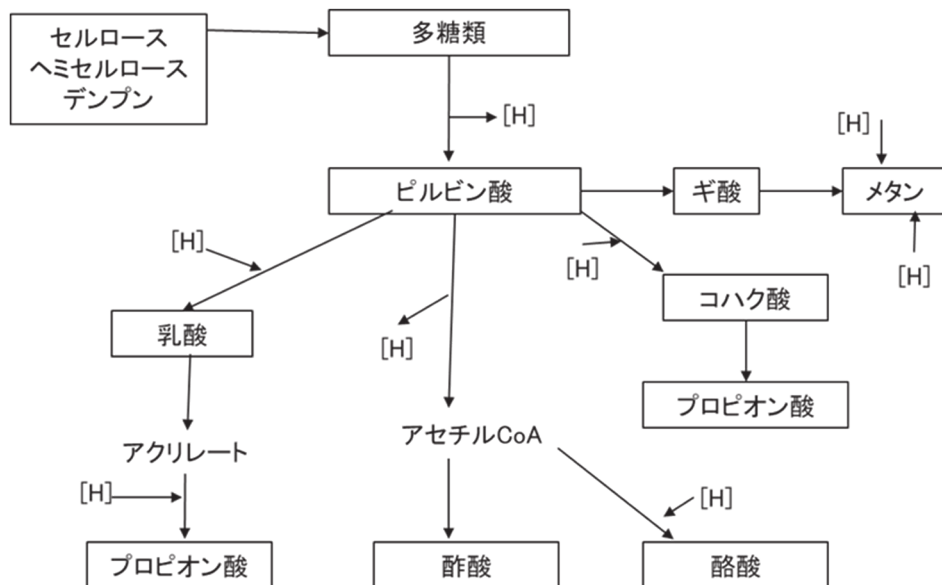
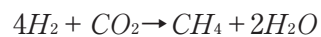


図1 炭水化物（セルロース、ヘミセルロース、デンプン）から低鎖脂肪酸（プロピオン酸、酢酸、酪酸）とメタンの生成プロセス

肉用牛における消化管内発酵由来のメタン排出について考える

つまり、メタン生成菌によって4つの水素分子から1つのメタンが生成されることがわかる。ここで注意すべきは、炭水化物の分解過程で多くの水素が生成され、もし過剰な水素が第一胃内に留まったらウシの生存が危ぶまれることになる点である。ウシの立場に立てば、げっぷでメタンを体外に排出することではじめて健康が保たれているわけで、この作用はウシにとっては生きるための重要な生理機能である。そう考えれば、このようなウシが生きるために行っている生理機能に対して文句を言うのも、ウシに対しては気の毒な話である。

3 メタンの測定法

そうはいつても、ウシからのメタン排出を減らすことは、現在の喫緊の課題である。ウシの消化管由来のメタン排出量の削減を目指す研究において最も高い障壁は、メタンは目に見えず、加えてそのウシからの排出量を実測することが困難な点である。実は、ウシなどの大型反芻家畜のメタン排出量に関する研究の歴史は古く、家畜栄養・飼養学の分野では、呼吸試験チャンバー（外気の流入と排気が管理された試験装置）を用いるエネルギーの出納試験が古くから実施されてきた。実際、日本では1950年代から農林省畜産試験場において大家畜用の呼吸試験用チャンバーが導入され、その後、農林水産省草地試験場、九州農業試験場、北海道農業試験場に次々と導入され、海外の研究と比べても決して引けを取らない肉用牛と乳用牛に関する代謝試験が実施され、同時にメタン排出量も求められた。しかしながら、これらの装置は建築費や維持コストが極めて大きい。現在では農研機構の畜産草地試験場の装置が稼働しているだけである。

その後、1990年代からは家畜栄養・飼養学の研究というよりは家畜由来の環境負荷物質として消化管内発酵によるメタン排出が問題視されるようになり、このようなメタン排出量を実測する必要に迫られるようになってきた。特に、今世紀に入ってから、生産現場において消化管内発酵によるメタン排出量を測定することが最も重要な課題となっている。

改めて、現在、ウシなどの反芻動物からの消化管内発酵によるメタン排出量を測定する方法の一覧は、表1で示すとおりである。昔も今も、ウシからのメタン測定の黄金律（gold standard）は、呼吸試験チャンバーを用いる方法である。しかし、呼吸試験チャンバーを生産現場で利用することは現実的でなく、その他の方法の中で現在、日本で最も注目されている手法は、スニファー（sniffer）法と呼ばれる方法である。この方法は、近年、世界的には、生産現場で搾乳ロボットと組み合わせて搾乳牛の呼気からメタン排出量を推定する手法としてその実用化が進められている。また、肉用牛に対してもドアフィーダーやスタンションを装備した飼槽に設置するなどして、飼料を摂取した際に生産現場でのメタン排出量を測定する試みが行われている。しかし、このような肉用牛に対する方法は、搾乳されている間は比較的小となしい搾乳牛と比べても、なかなか測定が困難であるのが実情である（写真）。

表1 メタン測定法の一覧

1. 呼吸試験チャンバー法	長く栄養・飼養学でメタン測定の gold standardの方法
2. SF6 (Sulfur Hexafluoride) 法	六フッ化硫黄 (SF6) をインデックスガスとして用い、SF6カプセルをルーメン内に投入し採取ガスのSf6濃度とメタン濃度の関係からメタン排出量を推定
3. スポット法	
(1) フェースマスク (face mask) 法	牛の鼻腔部をマスクで覆い、ガスを吸引する方法
(2) ヘッドボックス法	首をフードに入れて呼気を回収する方法
(3) Greenfeed法	移動式のフィードステーションにガス採取・分析システムを設置
(4) スニファー法	半開放空間で呼気ガス濃度を測定する方法
4. レーザーメタン探知法	ガス漏れ探知機を応用したもの
5. Invitro インキュベーション法	生体ではなく、実験室でルーメン液を用いる方法

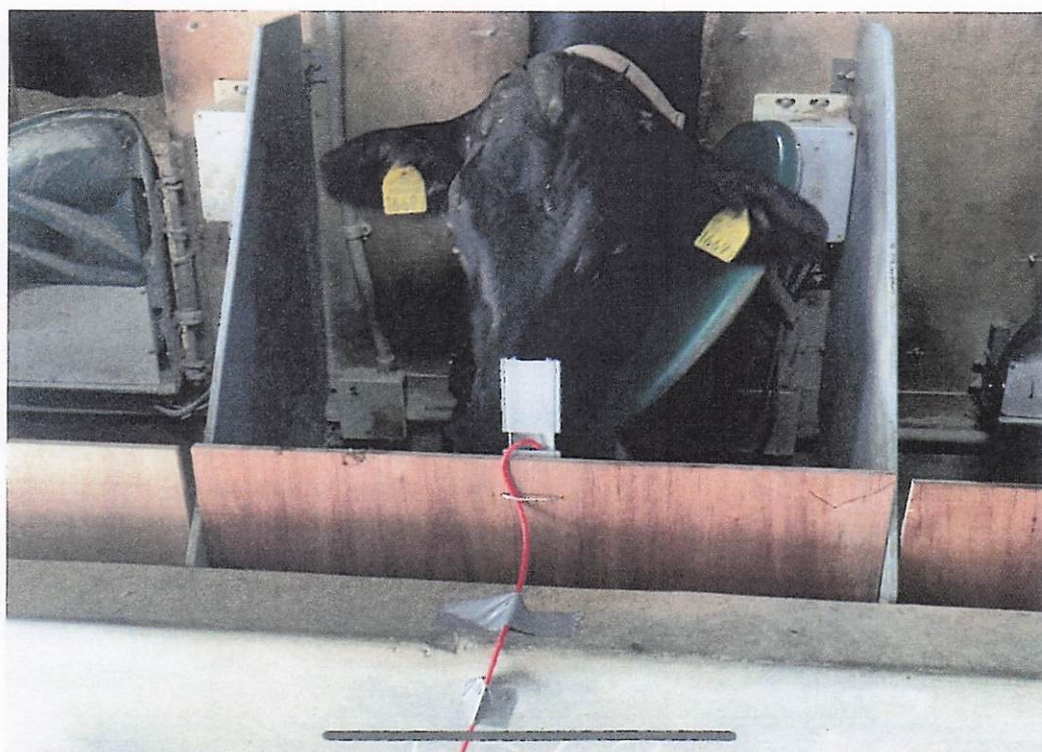


写真 飼槽に設置されたスニファー法の機器 (熊谷氏提供)

肉用牛における消化管内発酵由来のメタン排出について考える

スニファー法はもともとヨーロッパで開発された手法で（Madsenら2010）、英語で sniffer と言えは「においをかぐ」の意味で、呼吸試験チャンバー法のように排出されるメタンをすべて回収するのではなく、1回の呼吸の一部を採取する（かぎとる）ことによってメタン排出量を推定する方法である。

スニファー法は、呼吸試験チャンバー法と比べていくつかの欠点が指摘されている（鈴木 2022）。その第1としてはサンプリングしたガスに含まれる呼気の割合が低いと測定精度に影響するため正確な測定が困難になる点がある。また、スニファー法は、メタンの排出量そのものを測定しているわけではなく、呼気から得られたサンプルのメタンと二酸化炭素の比が得られているため、その情報からメタン排出量を推定するためには、体重や乾物やTDN摂取量などの情報が必要となる。このような欠点をいかに克服するかが、今後の普及のための重要な課題となっている。

4 推定式の利用

国際的な機関から、国別のウシからの消化管内発酵によるメタン排出量や温室効果ガス量の数値が報告されているが、これらの数値は現在のところ以下のような推定式を用いて算出されている。実は、日本は他国とは異なるメタン排出量の推定式を用いているので、そのことも踏まえてここで紹介することにする。

まず、国際的には、消化管内発酵によるメタン排出量を推定する推定式として以下の式が用いられている（IPCC 2016）。

$$EF_{IPCC} = \frac{18.4 \times DMI \times \left(\frac{Y_m}{100} \right)}{55.65} \quad (1)$$

ここでDMIは1日乾物摂取量（kg/日）、 Y_m はメタン変換係数と呼ばれ、肥育牛のフィードロット生産の場合には Y_m の値には3.0が用いられている（IPCC 2019）。またこの式の55.65はメタン1kgの持つエネルギー量である（MJ/kg）、18.4は乾物1kgの持つ総エネルギー（MJ）の値である。この値は1頭1日当たりの数値なので、肥育牛であれば、肥育日数と飼養頭数を乗ずれば、国や地域レベルの肥育牛からの総メタン排出量を算出することができる。

一方、日本では式（1）の代わりに次のShibataら（1993）の式が使われ、得られたメタン排出量が世界に報告されている（National Green Gas Inventory Report of Japan, 2023, Page 5-5）。

$$EF_{shibata} = \frac{0.016 \times (-17.766 + 42.793DMI - 0.849DMI^2)}{22.4} \quad (2)$$

ここで、22.4はメタン1モルの体積（L/モル）、0.016はメタン1モルの重量（kg/モ

ル)で、これらはリットルで表された式を IPCC と同じ kg 単位で表すためのものである。なお、この推定式は、搾乳中や乾乳中の乳牛や肉用繁殖雌牛、肉用肥育牛および乳用肥育牛、ヒツジやヤギの様々な種や生理状態の家畜を含めて作成されている点に注意する必要がある。

図2はこれらの2つの式から得られたメタン排出量を比較したものである。この図から分かるように、日本で用いられている推定式(上記の式(2))では、同じ乾物摂取量を仮定した場合に、メタンの排出量がかなり過大に推定されていることがうかがえる。このことはあまり知られていない事実であるが、国際的な比較において、肥育牛からのメタン排出量の推定式を日本独自の推定式ではなく国際基準の推定式にすれば、少なくとも肥育牛からのメタン排出量をかなり削減して報告できるわけである。国際的な温室効果ガスの場に、あえて過大に推定してしまう独自の式を用いて数値を提示することは、国策として再検討すべき時期に来ているのではないだろうか。

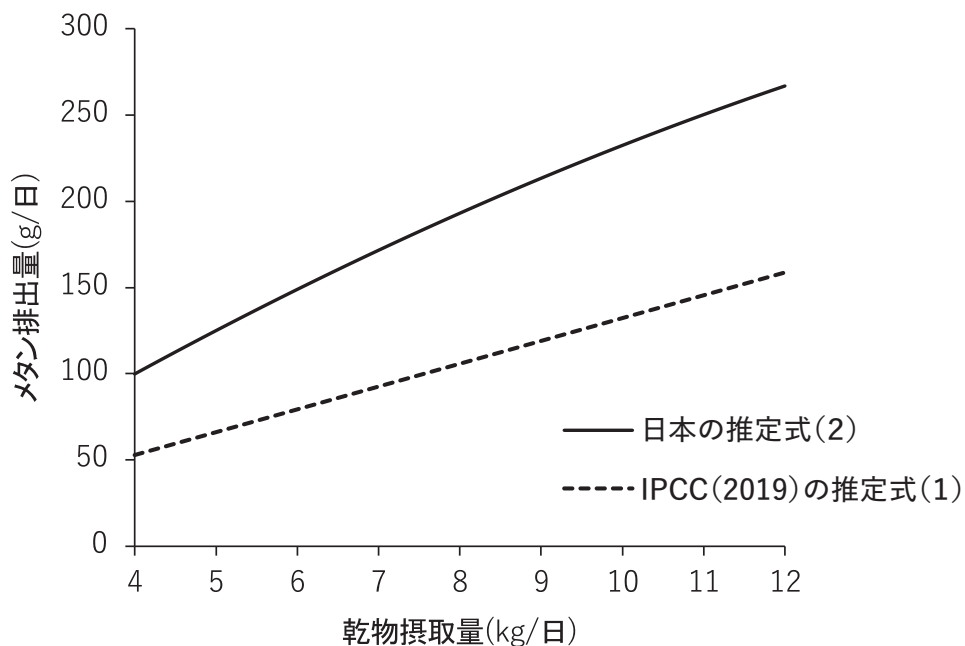


図2 日本の推定式と IPCC の推定式から得られたメタン排出量の比較

5 メタン排出量の評価法

ウシからのメタン排出量を評価する場合、世界的には主として次の3つの指標(数値)が用いられている。その一つが、メタン産生量(methane production; L/日または g/日)で、ウシ1頭当たりどれだけメタンを排出するかを示したもっとも直接的

な指標である。なお、本稿では、「産生量」とせず「排出量」としているが、同じ意味で用いている。この指標は、多くの方々にとって最も理解しやすく、最も公正な指標と思われるが、実際には後述するように世界的に以下の2つの指標がよく用いられている。畜産学分野で最もよく用いられている指標がメタン集約度（methane intensity）と呼ばれる指標である。これは乳用牛ならば乳量1kg当たりのメタン排出量、肉用牛なら体重や枝肉量あるいは1日増体量1kg当たりのメタン排出量で、世界的には、研究目的ではこの指標が最もよく用いられている。この指標を用いると都合のよい点は、分母が生産物量であるため、生産技術の向上や遺伝的改良によって生産物の量を増加させることができれば、この指標の分母が大きくなるため、同じメタン排出量であってもメタン集約度は小さく算定することができる。したがって、この指標で評価すれば、生産技術の向上や遺伝的改良の成果をより強調することができる。第3の指標はメタン収量（methane yield）と呼ばれる指標で、通常、乾物摂取量当たりのメタン排出量で表されるものである。後述するように乾物摂取量の増加に伴ってメタン排出量が増加することはよく知られているが、この指標を用いれば乾物摂取量の違いを補正することが可能となる。

6 どうすれば、メタン排出量を低減できるのか？

（1）栄養・飼養面からの方策

まず栄養・飼養の視点から述べると、ウシからの消化管内発酵によるメタンの排出量を低減する方法として、第一に濃厚飼料の多給があげられる。濃厚飼料には多くの穀物が含まれ、デンプンが多く、セルロースなどの繊維含量が少ないため、図2を見ていただければわかりやすいが、酢酸の産生量が少なく、プロピオン酸の産生量が多くなるので、結果としてメタン産生が抑えられる。したがって、このことから濃厚飼料を多給すべきという議論も起こりえるが、ここで注意しておくべき論点は、一般に牧草や野草などの粗飼料の摂取は人間の食料と競合しないため、飼料と食料の競合問題を緩和するにはむしろ粗飼料の給与が推奨されているが、少なくとも消化管内発酵によるメタン排出量の低減を考える上では、粗飼料の多給は好ましくないことになる点である。ここにこの問題の解決の難しさがある。さらに言えば、放牧は環境に良いように思われがちであるが、放牧下においてウシが摂取する飼料は、当然、繊維を多く含む牧草主体なので、家畜のメタン排出の低減という視点から見れば決して環境に良いとは言えない。同じ牧草でもマメ科牧草はセルロースなどの繊維含量が低いいため、ルーメン発酵が少なく、メタンの排出は抑えられる。

第二に油脂添加物の利用があげられる。油脂添加物は第一胃内の微生物に対して害作用があり、プロトゾアやメタン産生菌の増殖を抑制作用のあることが知られている。また、ナタネ油や亜麻仁油などの不飽和脂肪酸を飼料に添加して給与することで、不飽和脂肪酸が第一胃内で水素添加を受け飽和化することで過剰な水素が減らせるので、

げっぶとしてのメタン排出を抑えることができる。

飼料からメタン産生を低減する方法としてメタン産生菌の不活性化やメタン生成経路を阻害する方法もある。その代表的なものとしてモネンシンやサリノマイシン、ラテロシドなどのイオノフォアと呼ばれる抗生物質の投与がある。このような抗生物質は微生物の細胞膜の透過性に影響を与えてメタン産生菌のメタン産生量を減らすことができる。しかしながら、近年、このような抗生物質の使用はヨーロッパでは禁止されており、代わりにタンニンを多く含む牧草を給与することが行われているが、抗生物質に比べればその効果は低い。その他、メタン産生菌のメタン合成系を阻害する3-ニトロプロパノールの利用やわが国における研究ではカシューナッツ殻油に含まれるアルカロイド酸の利用が、メタン抑制効果のあることが報告されている（小林，2013）。最近、特にメタン排出抑制効果の高いものとして海藻類のカギケノリが注目されている。カギケノリを給与することで劇的なメタン低減効果があることがわかり、多くの企業がその利用に参入しようとしている。しかし、そのメカニズムはカギケノリに含まれる臭素化合物がメタン生成菌の合成を阻害しているためと考えられ、このような臭素化合物の家畜本体への影響には十分に注意を払う必要があると考えられる。

（2）育種学的アプローチ

ウシからのメタン排出量の遺伝性を調べる研究は、2010年以降に乳用牛を中心に、盛んに行われてきたが、肉用牛に関する研究は相対的に少ない。Hayesら（2016）はメタン排出量の実測値から1日当たりのメタン排出量の遺伝率は0.27と報告している。ちなみに、この遺伝率とは表現型値（測定値）のバラツキのうちどれくらいが遺伝によるものかを表した指標で、メタン排出量の遺伝率が0.27ということは、実際のメタン排出量のバラツキにおいて27%が遺伝で説明できることを示している。日本ではいまだにメタン排出量を実測したデータからの遺伝率の推定に関する報告離されていないが、Uemotoら（2020）は推定式（式（1）や（2）と比べて複雑なのでここでは示さない）を用いる方法から遺伝率を推定したところ0.59と報告している。また、最近、われわれは、黒毛和種の直接検定記録を用いてUemotoら（2020）と同じ式を用いて種雄牛候補牛の遺伝率を求めたところ、同じく0.59と報告し、少なくともこのような予測式に基づくメタン排出量をもとに選抜を行う場合、遺伝性が高いため、かなりの遺伝的改良が期待できると予想している。実際に直接検定の種雄牛候補若雄1,400頭からメタン排出量の少ない20%（1/5）に当たる280頭の推定育種価をもとに選抜したと仮定する模擬選抜（コンピュータを使う机上実験とも呼ぶ）を行ったところ、選抜集団は元の集団と比べて、遺伝的改良量は -17.3 g （ $= -13.39 - 3.90$ ）となり、実際のメタン排出量を 28.1 g （ $= 208.44 - 236.54$ ）削減できることが示された（表2）。このことから、メタン排出量についても育種選抜によって、かなりの割合で低減できることが明らかになった。

肉用牛における消化管内発酵由来のメタン排出について考える

表2 メタン排出量に関する卓上実験の結果（浅田ら2021より）

	選抜前集団	選抜後集団
<u>メタン排出量で選抜</u>		
メタン排出量（g／日）	236.54	208.44
推定育種価	3.9	-13.39
<u>余剰飼料摂取量（TDN）で選抜</u>		
メタン排出量（g／日）	236.54	214.33
推定育種価	3.9	-4.67

直接検定で1400頭の種雄牛候補若雄牛のメタン排出量の推定育種価でメタン排出量の少ない200頭を選抜したと仮定した結果

（3）間接的メタン排出量の抑制

これまでの話から、現状でいかにウシからのメタン排出量を測定することが難しいかを理解していただけたと思う。そこでここではメタン排出量を直接測定することなく、間接的にメタン排出量の削減が可能かどうかについて考えてみることにしよう。

まず、メタン排出量は乾物摂取量と関連性が強く、遺伝相関（遺伝的な関係性の強さを表す指標）は0.8以上と報告されている（Lakampら2022）。実際、前に示した式（1）や（2）においてメタン排出量は乾物摂取量の式で表されており、このことから関係性が非常に強いことがうかがえる。これらの式から、乾物摂取量が多い個体は同時にメタン排出量も大きいことがわかる。

また、メタン排出量は1日当たりの増体量や飼料利用効率とも関連性のあることが知られている。端的に言えば、よく食べる個体は発育がよく、その結果メタン排出量も多くなる。また、飼料利用性が高ければ、それだけメタン排出量も高くなることになる。このように、生産性の向上はメタン排出量を増やすことになり、このトレードオフの関係の解消こそが今後の重要な課題になろう。

一方、最近、メタン排出量と余剰飼料摂取量との関係が正に関係になっていることが我々の研究から明らかになった（浅田ら2022）。余剰飼料摂取量とは、実際に摂取した飼料の量とその個体が必要とする飼料の量（飼料要求量）との差を示す指標で、この数値が高ければ高いほど飼料が無駄に摂取されていることを表し、そのような個体は、非効率な個体と考えられる。したがって、余剰飼料摂取量とメタン排出量の間に正の関係があるということは、余剰飼料摂取量の少ない個体はメタン排出量も少なく、好ましい関係であると言える。表2で示した数値を見れば、もし、余剰飼料摂取量の低い方向に選抜を加えた場合、メタン排出量も -22.2 g （ $=214.33-236.54$ ）低下できることが試算されている。しかし、海外において逆の負の遺伝相関を報告している論

文もあり（Herdら2016）、まだ十分なコンセンサスが得られていない点に注意する必要がある。

最後に、わが国の黒毛和種牛の育種を考える場合、枝肉形質が最も重要視されている形質で、メタン排出量と枝肉形質の関係は気になるところである。この関係については、筆者の知る限り、わが国の肉用牛に関して枝肉形質とメタン排出量の遺伝的関係を調べた報告は見当たらない。そこで海外での研究を見ると、筋肉内脂肪（脂肪交雑）やロース芯面積とメタン排出の間には正の好ましくない関係が報告されており（Donoghueら2016）、このことが黒毛和種牛にも当てはまるようであれば、現在の育種改良の脂肪交雑やロース芯面積の向上をめざした育種選抜では、メタン排出量を増加させることになり、今後の肉用牛の育種選抜のための意思決定には、十分な検討が必要になると推察される。

7 肥育牛の短期肥育は、経済的にも環境にもよいか？

近年、飼料価格の高騰などによる生産コストの増加や持続可能な生産に向けた取り組みが重要視されている中、生産コスト削減のための肥育期間短縮（短期肥育）の必要性が指摘され、国策としてもその方向に向かっている。しかしながら、生産者は月齢に伴う脂肪交雑の増加を期待して、1970年代後半以降、一貫して出荷月齢は29ヵ月齢から30月齢でほとんど変わっていない。実際、短期肥育を推し進めようとする国の政策に対して、生産現場は懐疑的であるように見受けられる。そこで、本稿では、環境負荷と経済性の両面から短期肥育の是非について検討してみることにしよう。

まず、家畜改良センターで実施された実験結果を数値例として検討してみることにする。表3はその実験結果と令和3年度（2021）の畜産物生産費統計の数値を示した

表3 本稿で仮定した数値例
（阿部の試験結果と令和3年度畜産物生産費統計より計算）

	短期肥育	慣行肥育
枝肉重量（kg）	509.8	515.7
BMSナンバー	6.1	7.3
消化管内発酵メタン排出量（kg/頭）	92	108
販売価格（円）	1,283,167	1,360,034
枝肉単価（円/kg）	2,517	2,637
肥育期間（月）	17.5	20.5
全生産コスト（円）	1,287,631	1,368,067
素牛価格（円）	818,422	818,422

肉用牛における消化管内発酵由来のメタン排出について考える

ものである。26ヵ月齢出荷の短期肥育と29ヵ月齢出荷の慣行肥育の結果を比較すると短期肥育では枝肉重量は小さく、BMSナンバーも1.2程度低いが、メタン排出量は肥育期間を通じて16kg低かった。これらの数値から枝肉重量1kg当たりのメタン排出量を計算すると、短期肥育では0.180（=92/509.8）、慣行肥育では0.209（=108/515.7）となって、メタン集約度からも短期肥育は数値が低く、環境に良い結果となった。

他方、経済性については、たとえばBMSナンバーが1上がると枝肉単価が100円上がると仮定すると、現状のBMSナンバーの7.3、枝肉単価は2,637円なので、短期肥育の場合の枝肉単価は2,517円（=2637+（6.1-7.3）×100）となる。また、慣行肥育の肥育期間を20.5ヵ月、素牛価格以外の生産コストを541,612円（1,368,067-818,422）、1ヵ月を30.4日とすれば、1日当たりの生産コストは896円（=541,612/（20.5×30.4））となり、3ヵ月の肥育期間短縮によって生産コストは79,253円削減することができることになる。以上の条件では、慣行肥育の利益（ P_{29} ）は

$$P_{29} = 2637 \times 515.7 - 1368067 = -8166$$

となり、他方、短期肥育の利益は

$$P_{26} = 2517 \times 509.8 - 896 \times 17.5 \times 30.4 - 818422 = -4465$$

と求められる（労働費も生産コストに含まれるのでマイナスの利益もありえる）。このことから、以上の条件下ではいずれも利益がマイナスではあるが、短期肥育の方が利益が大きいのでは経済的にも短期肥育がまさっていることになる。

ここまでの計算では、メタン排出量と経済性（利益）とを別々に考えてきたが、メタン排出量と経済性を両方考慮して評価する指標として削減コストという指標がよく用いられる（広岡 2021）。この指標は、今回の例でいえば、慣行肥育から短期肥育に移行した場合、肥育期間の短縮によるメタン排出量の増減に対して利益（ここではコストの代わりに利益を利用）がどう変化するかを調べたものである。これを式で表せば、

$$\text{削減利益} = \frac{(\text{短期肥育の利益} - \text{慣行肥育の利益})}{(\text{短期肥育におけるメタン排出量} - \text{慣行肥育におけるメタン排出量})}$$

と求められる。表3は、実際に数値例で計算する前に、利益の変化とメタン排出量の変化に対する削減コストの符号とその関係性の一覧を示したものである。たとえば、本例で言えば、慣行肥育から短期肥育に移行した場合、メタン排出量は減少するので、符号は-となり、他方、短期肥育の利益はマイナスであるものの、慣行肥育よりは大きいため、符号は+となり、表4が示すようにウイン・ウインの関係となる。つまり、上記の例（BMSナンバーの1増加に伴って枝肉単価が100円高くなる）の条件下では、肥育期間を短縮することは、環境的にも経済的にもよいと判断できる。実際、この条件における削減利益は、-231円/kgで、メタン排出量が1kg増えれば、231円利益が

表4 経済性の指標としての利益とメタン排出量、および削減利益の符号と関係性

利益の変化	環境負荷の変化	削減利益	関係性
+	-	-	ウイン・ウイン
+	+	+	トレードオフ
-	-	+	トレードオフ
-	+	-	不成立

減少することになる。すなわち、換言すれば、このような条件では肥育期間を短縮してメタン排出量を低減することによって利益が増加し、ウイン・ウインの関係を形成できることを表している。

そこでより広く経済条件を検討するため、BMSナンバーの1増加に伴う枝肉単価の上昇を50円から150円までの幅を仮定して、削減利益を計算したものが図3である。本研究の例では、BMSナンバー1単位当たり枝肉単価の増加が106円以下であれば、削減利益は正になり、肥育期間短縮によってメタンの排出量が減少し、同時に利益も増加するため、ウイン・ウインの関係になる。しかし、BMSナンバー1単位当たり枝肉単価の増加が107円以上であれば、両者はトレードオフ関係となり、メタン排出量を削減しようとするれば利益の低下を招くことになる。さらに図3では素牛価格を除く生産コストが10%安価になった場合と20%安価になった場合について同様に削減利益を計算したところ、削減利益の直線は左に移動し、10%安価になった場合と20%安価に

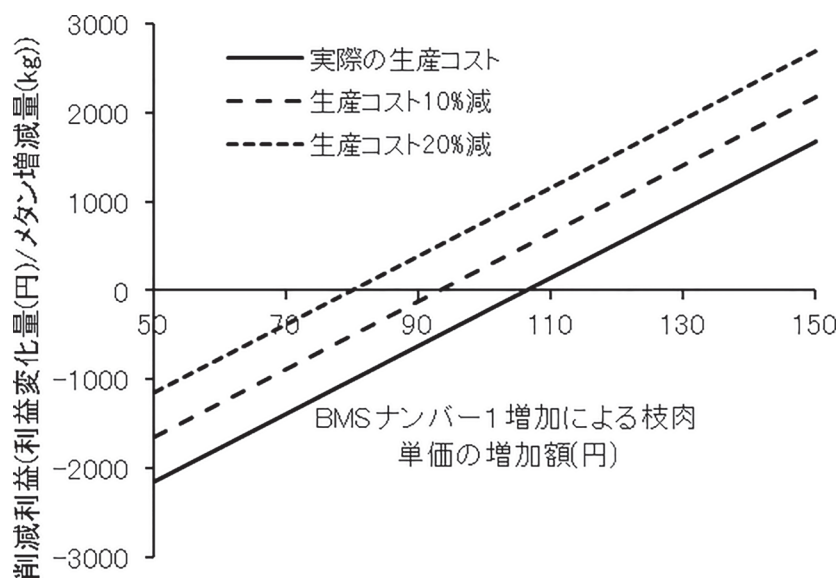


図3 BMSナンバーの枝肉単価に対する経済的影響と削減利益との関係

肉用牛における消化管内発酵由来のメタン排出について考える

なった場合における枝肉単価の増加量の分岐点は、それぞれ93円と79円と求められる。つまり、生産コストが10%低ければ、BMSナンバーの1増加に伴って枝肉単価が100円高くなる条件下では、短期肥育によってメタン排出量を削減しても、慣行肥育下での利益のほうが大きいため、トレードオフ関係になる。以上の結果から、短期肥育の短縮が妥当かどうかは様々な経済条件によって異なり、現在のように飼料価格が高騰し、生産コストが高い場合にはメタン排出量と利益の関係はウイン・ウインの関係になりやすく、生産コストが減少すれば、メタン排出量と利益の関係はトレードオフ関係になることがうかがえる。また、素牛価格に関しては、素牛価格が高いほど、高い素牛価格を相殺するため、利益を得るにはより長い肥育期間が必要となり、トレードオフ関係になりやすいことがわかっている。

8 生物由来の短寿命気体としてのメタンの性質

冒頭でウシなどの反芻動物が排出するメタンの温室効果ガスに対する影響が問題視されていることを述べたが、実は、一般の人々にほとんど知らされていない事実がある。そもそもウシの排出するメタンは、生物由来の短寿命の気体であり、このようなメタンガスは12年程度の短期間で二酸化炭素に変換される。すなわち、前述のようにウシは飼料として植物体を食し、その分解過程・消化過程でゲップとしてメタンを排出するが、このような生物由来のメタンは短期間で二酸化炭素になり、それを植物体が光合成で吸収するため、大きくみると生物由来の二酸化炭素の循環の一部と見なすことができる。したがって、生物由来のメタンは、二酸化炭素や亜酸化窒素のような長寿命の気体のようにストックとして蓄積されずに、フローとしての性質を示すことになる（この意味では、稲作からのメタン産生も同様）。

最近、このような生物由来のメタンの短寿命性まで考慮した地球温暖化係数（GWP*と呼ばれている）が気象学や大気科学の分野で報告されている（Allenら2018；Cainら2019；Smithら2022）。このGWP*は、従来の地球温暖化係数よりも実際の地球温暖化への影響を正確に表すことが指摘され、最近、海外ではオーストラリア（Ridoutt 2021）、イタリア（Corredduら2023）、米国（Placeら2022）などで実際の家畜からのメタン排出量をこのGWP*で推定、将来予測した研究が報告されている。最近、筆者（広岡2024）は、わが国の酪農における乳牛と肉用肥育生産からのメタン排出量をGWP*を用いて推定と将来予測を実施した。図4は肉用肥育牛に関する2020年までのメタン排出量の推移とその後の2050年までの予測をGWP*を用いて二酸化炭素換算で示したものである。この結果から、今のままの状況（ベースシナリオ）でもメタン排出量による地球温暖化への影響はほとんどなく（数値がゼロに近いことに注目）、さらにメタン排出を削減できるのであれば、メタン排出量はゼロを下回り、地球冷却化に寄与すると考えられる。もちろん、ウシからのメタンを削減することは、まちがいがなく地球温暖化を減らす方向に働くが、ウシからのメタン排出を、化石由来の二酸化炭

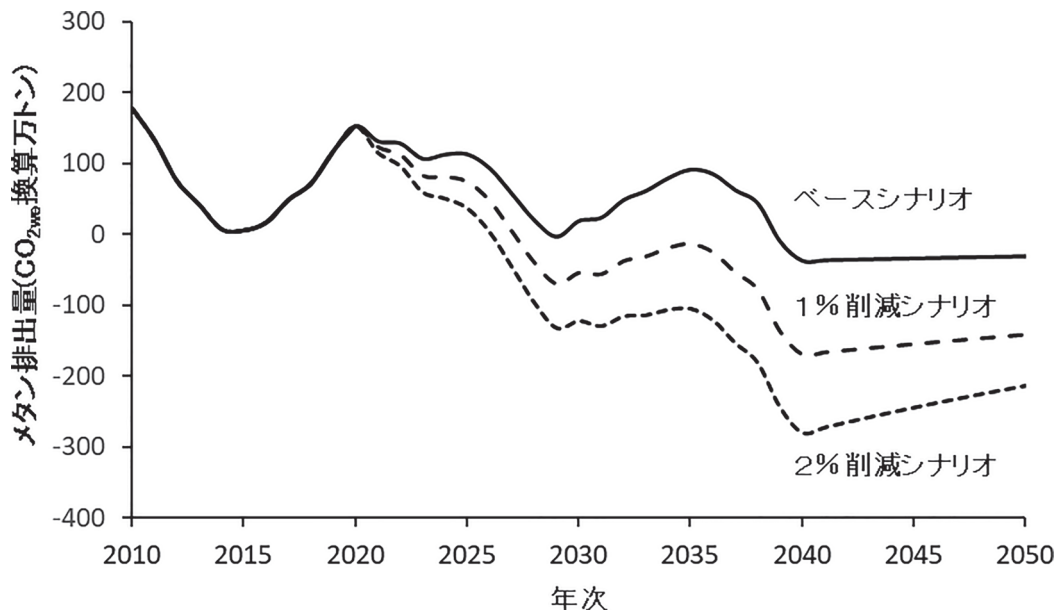


図4 年次に伴う肉用肥育生産からの温暖化換算メタン排出量 (CO_{2we})
 広岡 (2024) より

素を排出している他の人的な活動と同様に環境に悪く、地球温暖化をもたらしている「悪」とレッテルを張ることは明らかな誤りといえる。

9 おわりに

本稿では、冒頭で日本の畜産由来のメタン排出量は世界的に見て非常に少ないことを述べ、またウシがげっぷとしてメタンを排出するのは生理機能で、われわれに肉や乳を提供してくれる代償であることにも言及した。さらに現実的な問題として、生産現場においてウシからのメタン排泄量を測定することは難しく、その結果、どのウシがメタンを多く排出し、どのウシのメタン排出が少ないかを生産現場で判別ことが困難で、そのことがウシからのメタン排出量の低減を目指した政策提言を行おうとする場合の最も高い障害となっていることを指摘した。さらに最後に、最近の気象学や大気科学の知見をもとにウシなどによる生物由来のメタンの短寿命性について言及し、他の地下から掘り出される化石由来の二酸化炭素や亜酸化窒素とは区別して検討する必要のあることを指摘した。

そのような中、筆者は、比較的容易に実現できそうな当座の低減策として、第6章(2)で述べた育種学的手法による低メタン排出牛の選抜を提案したい。メタンは目に見えず生産現場での測定が難しいが、もし給与飼料の成分とそれらの給与量がわかれば、第6章(2)で示した方法から推定式よりメタン排出量を算出できることを示し

た。実際、わが国の種雄牛の造成において実施されている直接検定では、飼料に関する情報はすべて個体ベースでデータとして得られており、そのような情報から推定式によってメタン排出量を予測すれば、メタン排出量に関する遺伝的能力を表す育種価を個体ごとに容易に計算することができる。さらには、血統情報に含まれるならば、父である種雄牛や母である繁殖雌牛の育種価も得ることができる。以上のように次世代の種雄牛候補の若雄牛、あるいはすでに供用されている種雄牛や繁殖雌牛に関するメタン排出量の推定育種価を見れば、それらの種牛や種牛候補個体が低メタン排出牛であるかどうかを予想することが可能となる。もちろん、このような推定式から得られてメタン排出量よりも実測のメタン排出量のほうが正確であることは言うまでもないが、当座の対応策としてこのような推定育種価を用いて個体のメタン排出量を知ることが一つの手段として有用であると考えられる。

肉用牛についてもメタン排出量の低減は世界的な喫緊の課題であることは確かで、わが国においても決して無視してよいものではない。その意味で、本稿で検討したテーマは、これからも産官学一体となって取り組んでゆくべき最重要課題であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 阿部 剛. 2021. 肥育期間を短縮した黒毛和種の枝肉格付に差がなく、温室効果ガス低減にも貢献する。畜産技術 11:12-16.
- 2) Allen, M. R., Shine, K. P., Fuglestedt, J. S., Millar R. J., Cain, M., Frame, D. J., Macey, A.H. 2018. A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *njp Climate and Atmospheric Science*, Vol. 1, 16.
- 3) 浅田伊純・西 和隆・大石風人・熊谷 元・広岡博之. 2022. 黒毛和種直接検定記録を用いた予測環境負荷関連形質に関する遺伝的分析. 日本畜産学会報 93 (4) 313-321. <https://doi.org/10.2508/chikusan.93.313>
- 4) Cain, M., Lynch, J., Allen, M.R., Fuglestedt, J.S., Frame, D.J., Macey, H.A., 2019. Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants. *njp. Climate and Atmospheric Science* Vol.2, 29.
- 5) Correddu, F., Lunesu, M.F., Caratzu, M.F., Pulina, G., 2023. Recalculating the global warming of Italian livestock methane emission with new metrics. *Italian Journal of Animal Science*, Vol.22 (1), pp.125-135
- 6) Donoghue KA, Bird-Gardiner T, Arthur PF, Herd RM, Hegarty RF. 2016. Genetic and phenotypic variance and covariance components for methane emission and postweaning traits in Angus cattle. *Journal of Animal Science* 94:1438-1445.
- 7) Greenhouse Gas Inventory Office of Japan and Ministry of the Environment, Japan (eds), 2023. National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan 2023, Center of Global Environmental Research, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies, Japan.

- 8) Herd RM, Velazco JI, Arthur PF, Hegarty RF. 2016. Associations among methane emission traits measured in the feedlot and in respiration chambers in Angus cattle bred to vary feed efficiency. *Journal of Animal Science* 94: 4882–4891.
- 9) 広岡博之. 2021. 家畜生産における環境負荷低減のための施策の経済性評価について. *日本畜産学会報* 92 (4):503–510.
- 10) 広岡博之. 2024. 日本の乳生産と肉用肥育生産からの消化管内発酵によるメタン排出量の評価. システム農学 (印刷中)
- 11) 小林泰男. 2013. カシューナッツ副産物給与によるウシからのメタン生成削減. *Journal of Environmental Biotechnology* 13 (2):89–93.
- 12) Lakamp AD, Weaber RL, Bormann JM, Rolf MM. 2022. Relationships between enteric production and economically important traits in beef cattle. *Livestock Science* 265:105102.
- 13) Madsen J, Bjerg BS, Hvelplund T, Weisbjerg MR, Lund P. 2020. Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants. *Livestock Science* 129:223–227.
- 14) Place, S.E., McCabe, C.J., Mitloehner, F.M., 2022. Symposium review: Defining a pathway to climate neutrality for US dairy cattle production. *Journal of Dairy Science*, Vol.105, pp.8558–8568.
- 15) Ridoutt, B. 2021. Climate neutral livestock production – A radiative forcing-based climate footprint approach. *Journal of Cleaner Production* 291, 125260.
- 16) Shibata M, Terada F, Kurihara M, Nishida T, Iwasaki K, 1993. Estimation of methane production in ruminants. *Animal Science and Technology* 64, 790–796.
- 17) Smith, M.A., Cain, M., Allen, M.R., 2021. Further improved of warming-equivalent emissions calculation. *npj. Climate and Atmospheric Science*, Vol. 4, 19.
- 18) 鈴木知之. 2022. 牛のあい氣に含まれるメタンの畜舎での測定風景紹介. 畜産技術 2022年4月号 41–43.
- 19) 鈴木知之・寺田文典・川島知之. 2017. 日本および東南アジアにおけるウシからの消化管発酵由来メタン排出抑制の可能性. *家畜栄養生理研究会* 61 (2):21–31.
- 20) Uemoto Y, Ogawa S, Satoh M, Abe H. 2019. Development of prediction equation for methane-related traits in beef cattle under high concentrate diets. *Animal Science Journal* 91:e13341