



ウシからの消化管内発酵由来のメタン排出について考える

京都大学大学院農学研究科 名誉教授 広岡 博之

【要約】

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中で最も多く、その低減のための対策が求められている。特にメタンの排出量が注目されてきたが、同じ温室効果ガスである二酸化炭素や亜酸化窒素とは異なり短寿命である点などからメタンに対する考え方が変わってきている。また、温暖化への直接的な影響をより正確に表す新しい指標（GWP*^{スター}）によると、従来の指標（GWP）と比べ算出されるメタン排出量が大きく異なることが明らかになり、経営形態によっては地球温暖化より地球冷却化に貢献していることが言える。

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、世界の温室効果ガスの排出量は二酸化炭素（CO₂）換算で590億トンにのぼり、そのうち農業が62億トンで全体の11%を占めている。家畜の消化管内発酵によるメタン排出量は農業からの排出量のうちの40%と割合は大きく、そのことで近年、欧米を中心に家畜、特に消化管発酵由来のメタンをゲップとして排出するウシをはじめとする反芻動物が悪者扱いされてきた。それに対して2022年現在の日本における温室効果ガス排出量は全体で11億3500万トン、農林水産分野では4790万トン、家畜の消化管内発酵によるメタン排出量は866万トンで、稲作の1307万トンに続いて2番目に大きい

とはいえ、世界とは比べ物にならないほど低い水準である。それにもかかわらず、欧米からの情報をそのままのみにしてウシを悪者扱いしているのは本当に正しいことなのだろうか。

以前、筆者もその著書（広岡ら2015）でウシ1頭からのメタン排出量と車1台からの二酸化炭素排出量は同程度に地球温暖化に対して影響を与えていることに言及し、その一方でウシの立場に立って「ウシは人間が利用できない牧草や野草を利用して乳や肉などの食料に変換することの代わりにゲップとしてメタンを排出しており、ウシ側から見れば避けることのできない生理機能で、責めるのはあまりにも気の毒な気がする」と擁護した。実際、当該著書を書いた当時は筆者もメタンそのものの性質についての知識が乏しく、

単純にメタンは二酸化炭素と比べて28倍も地球温暖化に影響するので地球環境問題の原因の一つだと信じていた。実際、現在も多くの畜産学研究者はウシからの消化管発酵由来のメタン排出量（以降、メタン排出は消化管発酵由来に限定することにする）の低減の問題に正面から取り組んでいる。

しかしながら、最近、地球科学や気象学の研究成果から欧米ではウシなどの生物由来のメタンに対する考え方に変化の兆しが見られ、地球温暖化の問題で最も重要視すべき気体はメタンから亜酸化窒素（ N_2O ：一酸化二窒素とも呼ばれる）やアンモニア（ NH_3 ）に移り、削減の対象が家畜排せつ物処理に移りつつある。このような意識の変化の背景には、メタンは同じ温室効果ガスに分類される二酸化炭素や亜酸化窒素とは異なり短寿命である点や、広く使われている地球温暖化係数（GWP）では、世界の平均気温の上昇を産業革命以前と比べて1.5度に抑えるとするパリ

協定の目標に対応できていないことなどが挙げられている。そのような観点から、最近、温暖化への直接的な影響をより正確に表す新しい指標（GWP*^{スター}）が気象学の分野から提唱されている（Cainら2021）。筆者はすでにわが国の酪農生産と肉用牛（和牛）肥育生産について従前の指標（GWP）を用いて得られた二酸化炭素換算メタン排出量とGWP*による温暖化換算メタン排出量の比較を行い、算出されるメタン排出量が大きく異なることを明らかにした（広岡2024）。しかし、この原著論文には多くの数式が含まれていたせいか、あまり理解されていないようである。

そこで本稿では、まずこの論文について分かりやすく解説することから始め、続いて国内外における研究成果をもとにウシに対する誤った風評とその誤りの根拠について言及する。

2 わが国の酪農生産と和牛肥育生産におけるメタン排出量

まず図1を見ていただきたい。横軸は西暦の年次、縦軸は従前の方法で求めた二酸化炭素換算メタン排出量（ CO_{2e} ）と新しい指標で求めた温暖化換算メタン排出量（ CO_{2we} ）の推移を示したものである。それぞれの排出量については後述するが、 CO_{2e} は現在、最もよく使われている指標で、排出後100年間の放射強制力の積算を基準に CO_2 排出量に換算した28の数値（ GWP_{100} ）をもとに算出されたものである。具体的には CO_{2e} は実際の排出メタン量を28倍して求められる（ $28 \times CH_4$ 排出量）。一方、 CO_{2we} は後述する式（4）をもとに算出されたものである。図1のメタン排出量は、わが国の酪農生産を想

定して、温室効果ガスインベントリオフィスによる「日本国温室効果ガスインベントリー報告書（2024）」（以下「ガスインベントリー報告書」という）に掲載されている1990年から2022年までの乳用牛の3区分の搾乳牛（3産以上の搾乳牛、2産の搾乳牛、初産の搾乳牛）、乾乳牛、2区分の育成牛（7～24カ月齢未満、3～6カ月齢）の合計6区分の乳用牛の消化管内発酵に関するメタン排出量（1年1頭当たりキログラム）、飼養頭数、搾乳牛の乳量（1年当たりキログラムに換算）のデータを用いて推定したものである。ここで、 CO_{2e} は1990年から2022年までの実測値がすべて得られているが、 CO_{2we}

については2010年からの数値のみが示されている。このような欠測が生じるのは、 CO_{2we} の計算には20年前の数値が必要なため、1990年から2009年までの20年間の数値は求められないことによる。

図1の結果から酪農生産においては、 CO_{2e} は一貫して減少しており、このことは乳牛の飼養頭数の減少によるものである。一方、 CO_{2we} は2015年前後を底に、最近は増加していることがうかがえる。このことは最近のメタン排出の低下割合が減っているためと推察される。しかしながら、数値を見てわかるように2010年から2022年までの数値はいずれも大きく負の値で、このことからわが国の酪農生産は地球温暖化に対して負の影響、すなわち地球冷却化に貢献していることがうかがえる。

また、図2で示す肉用肥育牛（和牛）においてもメタン排出量の算出にも、ガスイベントリー報告書に掲載されているデータを用いている。なお、同報告書では雌雄とも7カ月齢以上1歳未満と1歳以上の2区分に分けられ、現実の肥育期間である9カ月齢から30カ月齢までとは異なっているため、本研究

では7カ月齢以上を肉用肥育牛と考えて計算することにした。また、出荷体重については1990年から2022年までの畜産物生産費統計（農林水産省大臣官房統計部）に記載されている数値を用いた。なお、出荷体重については肥育用には去勢牛（雄）も未經産雌牛（雌）も含まれていると考えられるので、未經産肥育雌牛の出荷体重は去勢牛の85%と仮定して、以下のように雌雄の頭数の相違も考慮して出荷体重を算出した。

図2の結果を見ると、 CO_{2e} は1990年から2022年の間には増減があり、この増減は主に肉用肥育牛の飼養頭数の増減を反映したものである。それに対してGWP*を用いて得られた CO_{2we} は2010年当初は減少するものの、2014年を底に増加に転じ、最近では CO_{2e} に迫るほどに増加している。このことについては、一つ目に最近の肉用肥育の飼養頭数の増加によるものと言えるが、二つ目に CO_{2we} は短期的なメタン排出量の変化に大きく影響される指標と言える。さらに、 CO_{2we} は常に CO_{2e} よりも数値が小さく推定されるわけではなく、メタン排出量が増加すると地球温暖化への影響は CO_{2e} よりも大きくなる

図1 酪農生産から排出されるメタン排出量の推移

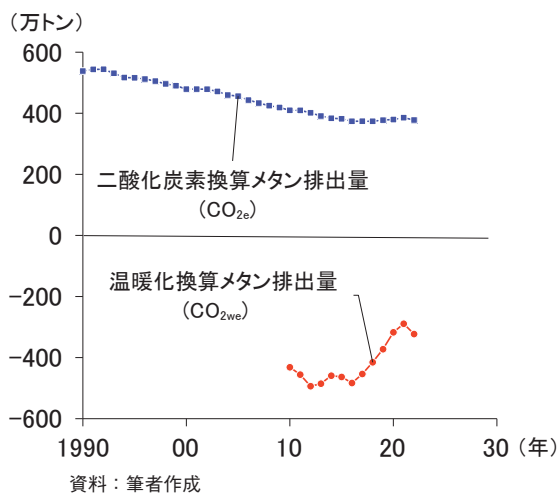
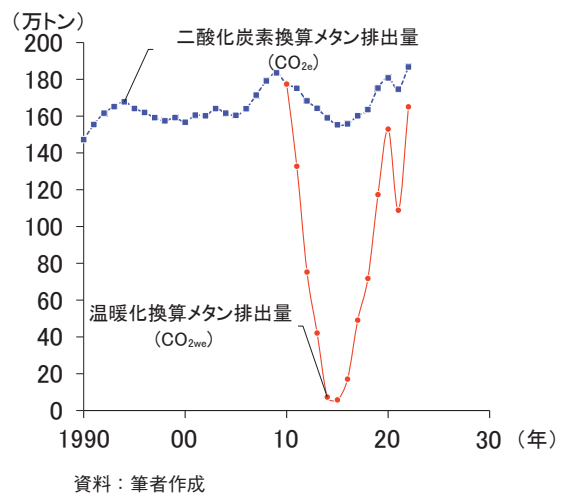


図2 肉用肥育牛（和牛）生産から排出されるメタン排出量の推移



という特性は重要である。

表1は、酪農生産からの総乳量と肉用肥育生産からの部分肉の供給量を2022年の水準のままで維持したと仮定した場合のメタン排出量（CO_{2e}、CO_{2we}）の将来予測を示したものである。また、同表では、現状のままの想定（ベース条件）に加えてメタン排出量の削減のオプションとしては10年間で10%と20%の削減を想定した二つの代替ケースの予測結果も示している。表1の結果から酪農生産からの温暖化換算メタン排出量（CO_{2we}）はいずれのケースも一貫して負の数値で地球冷却化に寄与し、メタン削減率が高いほど、その地球冷却化への貢献が大きいことがうかがえる。それに対して肉用肥育生産については、CO_{2we}はベース条件ではしばらくは正の

値を示して地球温暖化に対して正に寄与しているが、その後、負の数値に転じている。またメタン排出の削減率が20%のケースでは一貫して負の値を示し、地球の冷却化に寄与すると予測された。なお、このような予測結果は、牛乳や牛肉の総供給量を2022年の水準に維持するものと仮定されているため、乳量や出荷体重の遺伝的改良による生産量の増加は飼養頭数の減少によって相殺され、その結果として予測メタン排出量が減少しているものと解釈される。このことについて、家畜の能力を改良することで飼養頭数を減らすことは、乳製品や牛肉の必要な需要量を満たすのであれば、重要なメタン削減策として期待できる。

表1 ベースシナリオと二つの代替シナリオにおける酪農生産と肉用肥育生産からのメタン排出量の予測

(単位：万トン)

年次	酪農生産						肉用(和牛)肥育牛					
	GWPからの二酸化炭素換算量			GWP*からの温暖化換算量			GWPからの二酸化炭素換算量			GWP*からの温暖化換算量		
	ベース条件	10%削減	20%削減	ベース条件	10%削減	20%削減	ベース条件	10%削減	20%削減	ベース条件	10%削減	20%削減
2030	360.6	336.2	313.3	-107.9	-218.3	-322.3	172.5	159.2	146.8	20.3	-32.3	-88.5
2035	350.5	311.0	275.7	-35.7	-214.4	-374.5	167.7	147.2	129.0	61.8	6.9	-75.5
2040	341.1	288.2	243.2	-67.7	-307.2	-511.2	163.2	136.2	113.4	44.3	-15.1	-254.3
2045	332.3	267.5	215.0	-73.2	-335.4	-542.2	158.9	128.1	99.9	-34.7	-16.1	-257.9
2050	324.2	248.7	190.5	-64.0	-302.3	-468.3	154.9	116.9	88.0	-31.6	-14.7	-225.3

資料：筆者作成

3 地球温暖化係数 (GWP) について

地球温暖化係数 (GWP) は二酸化炭素を基準として、CO₂以外の温室効果ガスがどれだけ温暖化に影響するかを表す数値である。このGWPは、これまで多くの研究分野で最もよく使われた指標である。この指標は単位質量 (例えば1キログラム) の温室効果

ガスが大気中に放出されたときに、一定時間内に地球に与える放射エネルギーの積算値をCO₂に対する比率として見積もった数値と定義できる。具体的には次の式から求められる。

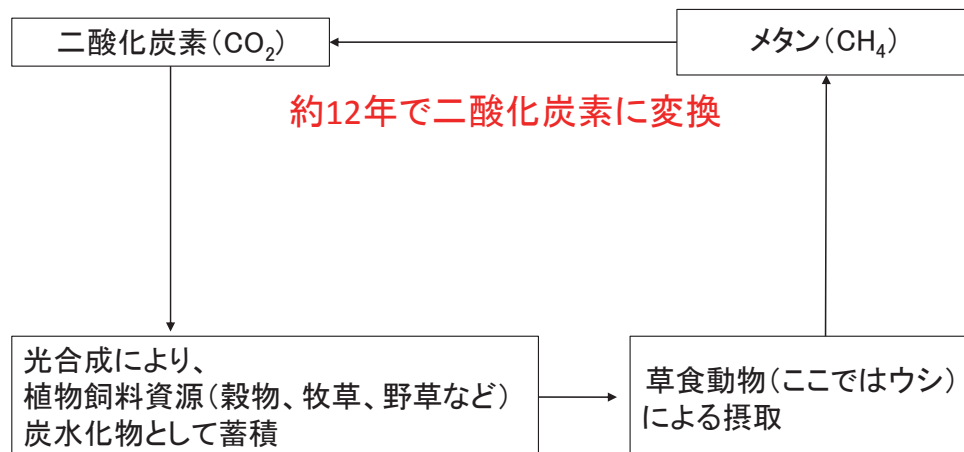
$$GWP_i = \frac{\int_0^H RF_i(t) dt}{\int_0^H RF_{CO_2}(t) dt} \quad (1)$$

ここで H は考慮する時間軸の長さ（通常100年）、 RF_i と RF_{CO_2} はそれぞれ温室効果ガス i （本稿ではメタン）と CO_2 の平均放射強制力（radiative forcing）である。本稿を読んでおられるほとんどの方は放射強制力という言葉にはなじみがないかもしれないが、放射強制力とは、気象学における用語で、何らかの要因（例えば二酸化炭素濃度の変化、エアロゾル濃度の変化、雲分布の変化など）により地球気候系に変化が起こったときに、その要因が引き起こす放射エネルギーの収支（放射収支）の変化量（ Wm^{-2} ）として定義される。しかし、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）では成層圏調整後放射強制力と呼ばれる定義が採用され、成層圏の温度構造が調整された上で、再び産業革命以前と現在の二酸化炭素が引き起こす対流圏における放射収支の変化が計算され、その変化を対流圏界面で算定したものを放射強制力と呼ぶことになっている（中島と竹村2009）。従って、温室効果ガスは直接的には放射強制力に依存しているため、式（1）で示すようにGWPは放射強制力のデータから算出されている。

しかし、メタンを対象とした地球温暖化の議論においてGWPを利用することは、地球科学や気象学ではしばしば批判されている。実際、GWPの数値は不確かで、メタンのGWPの数値は第1次評価報告書（1990年）と第2次評価報告書（95年）では21、第3次評価報告書（2001年）では23、第4次評価報告書（07年）で25、そして第5次評価報告書（13～14年）では28とされ、報告書ごとに数値が異なっている。また、このGWPを短寿命ガスであるメタンに適用しようとする場合、次のような問題がさらに生じることになる。

図3は、ウシから排出された生物由来メタンの炭素循環を示したものである。ウシの消化管発酵由来のメタンは短寿命の生物由来メタンで、ウシから排出されたメタンはわずか12年で二酸化炭素に変換され、さらにその二酸化炭素は光合成によって植物体に炭水化物として蓄積され、それをウシがまた摂取するという生物循環の一環の中にある。ここで重要な点は、メタンが二酸化炭素に変換されたことでその地球温暖化に対する影響は28分の1になるという点である。冒頭で述べた

図3 ウシから排出された生物由来のメタンに関する炭素循環



資料：筆者作成

「牛1頭のメタン排出は自家用車1台の二酸化炭素排出量に相当する」とする記述は必ずしも正しいとは言えず、自然のサイクルの中

にある生物由来メタンと化石由来の地下から新たに掘り起こされるガソリンを無条件で比較すること自体に誤りが含まれている。

4 GWP*について

現在、短寿命気体であるメタンの地球温暖化への影響について最も適切に表していると考えられている指標がGWP* (global warming potential star) である。前述のように、この指標はすでにIPCCでも認識され、議論にも取り上げられている (IPCC第6次評価報告書ワーキンググループ1第7章 p1014 – 1020)。この指標の誕生は新しく、

Allenら (2018) が従来のGWPで予測した地球気温のピークがうまく予測できないことに問題意識を持ち、気温の変化に対応できる新しい指標としてGWP*を提唱した。さらにCainら (2019) はGWP*に基づく温暖化相当指標CO_{2we}を以下のように求める方法を提唱した。

$$CO_{2we} = GWP_{100} \times \left\{ r \times \frac{\Delta CH_4}{\Delta t} \times H + s \times CH_4(t) \right\} \quad (2)$$

この式の意味を簡単に述べれば、この式のカッコ内の第1項は期間 (Δt) におけるメタン産生の変化量 (ΔCH_4) に対する地球気温の反応を表し、第2項はメタンの放射強制力の変化に対する短期間の気温の応答を表している ($CH_4(t)$ は t 年のメタン排出量)。換言すれば、第1項がメタンのフロー部の影響、第2項がメタンのストック部の影響を表すものと解釈できる。この式の r と s はメタ

ン排出に関するフローとストック部分との比を示すパラメータである。Cainら (2019) は1765年から2100年までのRCP2.6 (低位安定化シナリオ)、RCP4.5 (中位安定化シナリオ) およびRCP6.0 (高位安定化シナリオ) の場合に基づくメタンに関する放射強制力のデータにFaIRモデル (Smithら2018) を用いて算出された気温の変化 (ΔT) のデータを回帰式によって

$$\Delta T = a C_{GWP*} + b C_{GWP100} \quad (3)$$

に当てはめて係数 a 、 b を求めた。ここで C_{GWP*} と C_{GWP100} とはそれぞれGWP* と GWP_{100} を用いた累積メタン排出量で、この回帰式から得られた係数 a と b より、式 (2) の r と s がそれぞれ

$$r = a/(a+b), s = b/(a+b)$$

として得られる (ただし $r + s = 1$)。なお、それぞれのシナリオによって得られた r と s

の数値は表2に示す通りで、これらの平均を取って $r = 0.75$ 、 $s = 0.25$ が式 (2) で採用されている。また、メタンパルスの影響としては20年が採用されている ($\Delta t = 20$)。この後、Smithら (2021) は式 (2) についてさらに改善して以下の式を提唱した。

$$CO_{2we} = 28 \times 1.13 \times \left\{ 0.75 \times \frac{CH_4(t) - CH_4(t-20)}{20} \times 100 + 0.25 \times CH_4(t) \right\} \quad (4)$$

なお、 $CH_4(t-20)$ は t から20年前のメタン排出量を表し、また、この式の1.13の導出は難しいので補正係数と理解してもらえれば結構である。

図4はGWPとGWP*の比較を示したものである。この図の実線矢印は因果関係を表し、メタン排出は大気中のメタン濃度に影響

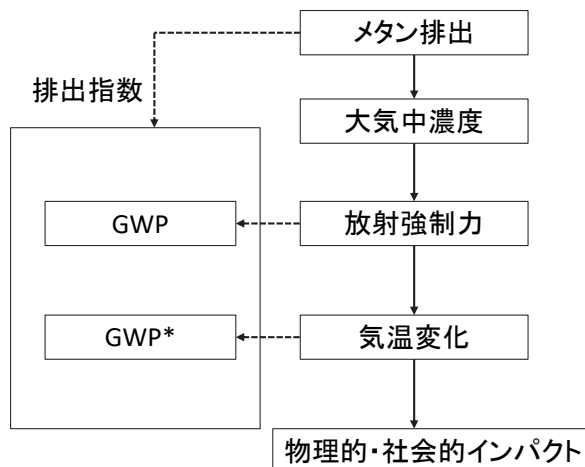
し、放射強制力を変化させて、その結果、気温の変化が起こり、物理的・社会的インパクトをもたらされることになる。この図からもGWP*が地球の平均気温に基づいて求められた指標であるため、従来のGWPよりもパリ協定の目標に適していることがうかがえる。

表2 1900年から2100年までの期間三つのシナリオ (RCP2.6、RCP4.5、RCP6) を想定した時の r と s の計算値

シナリオ	r	s	可能性の高い気温変化
RCP2.6	0.68	0.32	+0.3 ~ +1.7
RCP4.5	0.80	0.20	+1.1 ~ +2.6
RCP6	0.77	0.33	+1.4 ~ +3.1
平均	0.75	0.25	

資料：Cainら（2019）の計算値を基に筆者作成

図4 排出メタンが物理的・社会的インパクトを及ぼすまでの因果関係と二つの排出指数との関係性



資料：筆者作成

5 最近の畜産に関するGWP*を用いた研究の動向

筆者が知る限り、わが国の乳用牛や和牛肥育牛に対して前述のような指標を用いてメタン排出量の推移を調べた研究は広岡（2024）のみである。しかし海外では近年、本研究と同様に二つの指標を用いた研究が畜産分野の

有名な雑誌に掲載されている。例えば、乳用牛に関してはPressmanほか（2023）はカリフォルニア州における1950年から2017年までの乳用牛全体のメタン排出量のデータを用いて CO_{2e} と CO_{2we} の推移を比較し、さらに

2018年から2029年までの予測を行っている。その結果、CO_{2we}はメタンが増加過程にあるときはCO_{2e}よりも大きく、メタンが減少過程にある時はCO_{2e}より小さくなることを示している。また、Placeほか（2022）は米国全体の乳用牛のメタン排せつ量の推移を調べ、2020年にはCO_{2we}はCO_{2e}よりも大きかったが、2030年には逆転すると報告している。さらに、その研究においては2040年の直前以降は、CO_{2we}はゼロを下回り、マイナスになると予測されている。Hortenhuberほか（2022）はオーストリアの全畜種を対象にCO₂換算したGHGガス（メタンと亜酸化窒素の合計）の排出量の推移CO_{2e}とCO_{2we}で比較し、GHGガスの産出量は減少しているが、CO_{2we}を指標として用いた方がその傾向は強まると述べている。一方、Ridoutt

（2021）はオーストリアの全畜種を対象に温室効果（GHG）ガスの推移を二つの指標で調べ、豪州ではヒツジの生産のみがマイナスで他の畜種はいずれの指標を用いてもプラスになると報告している。さらにCorredduほか（2023）は、CO_{2we}を用いた場合、水牛以外の畜種はいずれも2010年から2020年まで減少しており、イタリア全体のGHGガスの排出量はCO_{2we}を指標とした場合はマイナスであったが、CO_{2e}ではプラスになったと報告している。また、Samsonstuenら（2024）はノルウェーにおける乳と肉の生産のLCA解析に従来のGWPとGWP*を用いて比較を実施し、どちらの指標を用いるかによって結果が異なることを示し、注意を喚起している。

6 おわりに

最近、ある学会の発表で、メタンは短寿命の気体だから削減効果が大きく削減対象として最適という意見を聞いたが、このことは確かに短期的には正しいのかもしれないが、長期的に俯瞰した^{ふかん}場合、12年のわずかな期間で二酸化炭素になるメタンを削減することによってどれほどの意味があるのかとの疑問も起こる。

本稿で述べてきたように、現在、欧米では家畜からのメタン排出の地球温暖化に対する影響の評価にはGWPから本研究で示したGWP*を用いる動きが見られつつある。本研究の結果から、酪農生産については新しい指標であるGWP*を用いてメタン排出量を評価した場合、現状のままでも地球温暖化

よりはむしろ地球冷却化に貢献していることが明らかになった。一方で、肉用肥育生産の場合、GWP*を用いて評価すると最近急激にメタン排出量が増加しているが、将来予測ではメタン排出に対する削減策を講じることでCO_{2we}を負にすることが可能になることが示唆された。しかし、注意すべき事項として、現在のわが国の農政は和牛肉の輸出の促進を考えているようであるが、輸出量の増加に伴って飼養頭数が増加し、メタン排出量の増加がもたらされるならば、CO_{2we}で評価しても急激なメタン排出の増加が予想されることになる。従って、畜産物の海外輸出とメタン排出量について、両者のバランスを見ながら取り組むことが重要と考えられる。

参考文献

- Allen, M. R., Shine, K. P., Fuglestvedt, 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* 1:16.
- Cain, M., Lynch, J., Allen, M.R., Fuglestvedt, 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* 2:29.
- Correddu, F., Lunesu, M.F., Caratzu, M.F., Pulina, G., 2023. Recalculating the global warming impact of Italian livestock methane emission with new metrics. *Italian Journal of Animal Science* 22:125-135
- Del Prado, A., Lynch, J., Liu, S., Ridoutt, B., Pardo, G. Mitloehner, F. 2023. Animal board invited review: Opportunities and challenges in using GWP* to report the impact of ruminant livestock on global temperature change. *Animal* 17:100790.
- 広岡博之、片岡文洋、松永和平、佐藤正寛、大竹聡、後藤達彦. 2015. おもしろい!日本の畜産はいま. p.1-92, ミネルヴァ書店、京都
- Hörtenhuber, S.J., Seiringer, M., Theurl, M.C., Größbacher, V., Piringer, G., Kral, I., Zollitsch, W.J., 2022. Implementing an appropriate metric for the assessment of greenhouse gas emissions from livestock production: A national case study. *Animal* 16:100638.
- Lynch, J., Cain, M., Frame, D., Pierrehumbert, R., 2021. Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO₂-emitting sectors. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4:518039.
- 中島映至・竹村俊彦. 2009. 放射強制力. 天気 56:997-999.
- 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* 105:8558-8568.
- Pressman, E.M., Liu, S., Mitloehner, F.M., 2023. Methane emissions from California dairies estimated using novel climate metric Global Warming Potential Star show improved agreement with modeled warming dynamics. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6:1072805.
- Reisinger, A., Clark, H., Cowie, A.L., Emmet-Booth, J., Fischer, C.G., Herrero, M., Howden, M., Leahy, S., 2021. How necessary and feasible are reductions of methane emissions from livestock to support stringent temperature goals? *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 379:20200452.
- Ridoutt, B., 2021. Short communication; climate impact of Australian livestock production assessed using the GWP* climate metric. *Livestock Science* 246:104459.
- Samsonstuen S, Moller H, Aamaas B, Knudsen MT, Mogensen L, Olsen HF. 2024. Choice of metrics matters—Future scenarios on milk and beef production in Norway using an LCA approach. *Livestock Science* 279:105393.
- Smith, M.A., Cain, M., Allen, M.R., 2021. Further improvement of warming-equivalent emissions calculation. *njp. Climate and Atmospheric Science* 4:19.
- Smith, C. J., Forster, P. M., Allen, M., Leach, N., Millar, R. J., Passerello, G. A., and Regayre, L. A. 2018. FAIR v1.3: a simple emissions-based impulse response and carbon cycle model, *Geoscientific Model Development* 11:273-2297.