

2025年9月4日



NPO法人東海生研(東海地域生物系先端技術研究会)
第2回セミナー

畜産の環境問題について考える —最新の知見に基づく検討—

京都大学農学研究科 名誉教授
廣岡 博之

自己紹介： 廣岡 博之（1958年生まれ）



研究分野：システム畜産学、家畜育種学

略歴：京都大学農学研究科博士課程修了(1987年)

農学博士(1988年)

日本学術振興会特別奨励研究員

龍谷大学経済学部 講師、助教授を経て

京都大学大学院農学研究科 教授(2001年～2024年)

現在、京都大学大学院農学研究科名誉教授

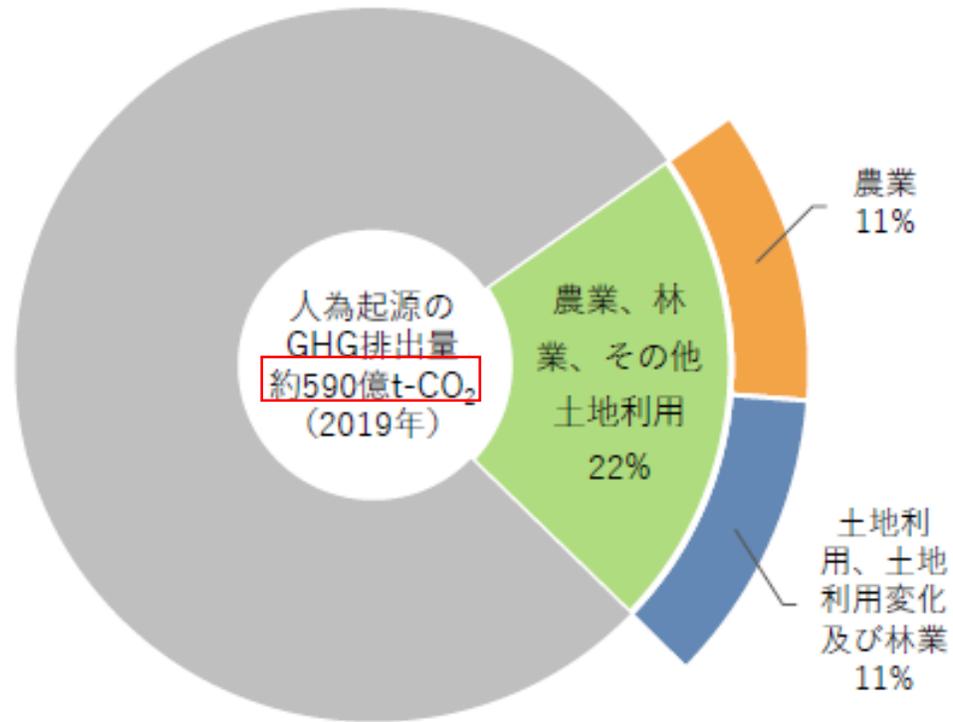
- 畜産を対象に文理融合研究を目指す
- 研究のライフワーク：遺伝子から国家までの畜産システムのモデル化とシミュレーション
- 家畜生産に関する様々な統計手法を用いたデータ解析
- 和牛の脂肪交雑に関する研究
- 消費者調査データの解析

本講演の概要

1. ウシにおけるメタンに関する問題とその低減策
2. ウシは本当に悪者なのか
3. ライフサイクルアセスメントについて

メタンの排出と低減

■ 世界の農林業由来のGHG排出量

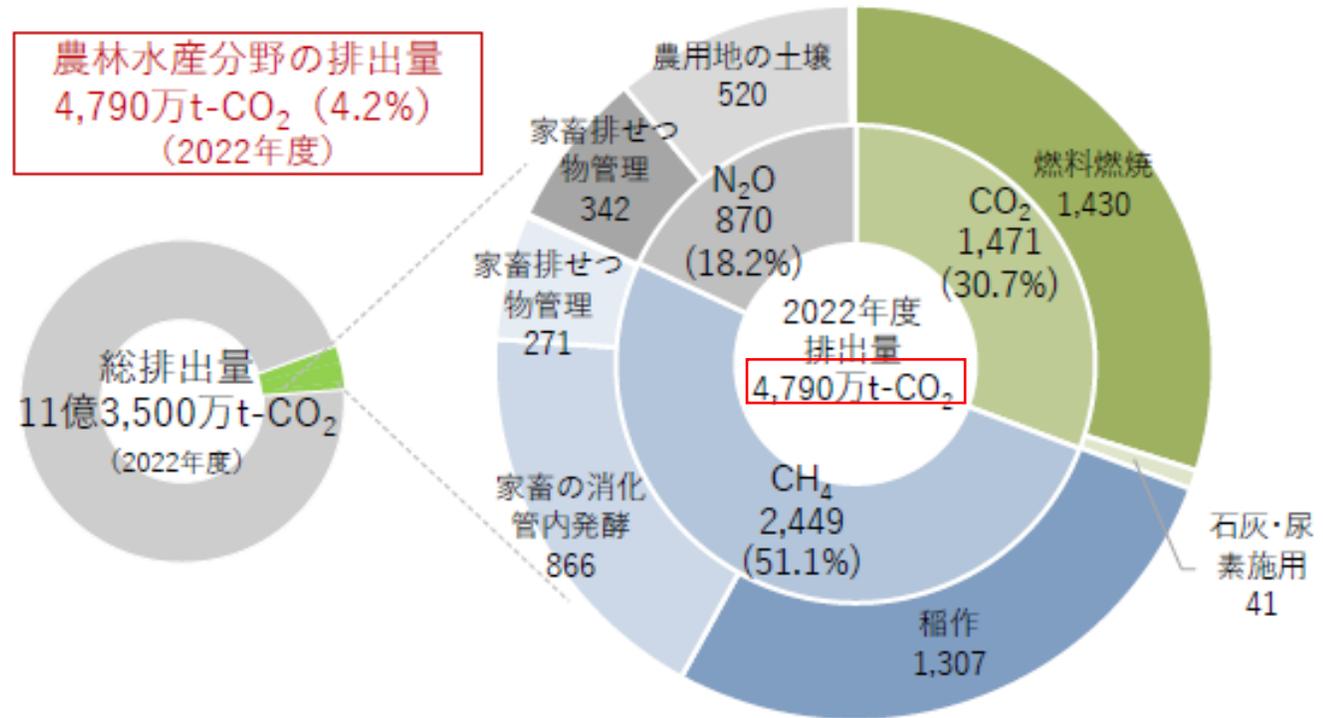


単位：億t-CO₂e換算

* 「農業」には、稲作、畜産、施肥などによる排出量が含まれるが、燃料燃焼による排出量は含まない。

出典：「IPCC第6次評価報告書第3作業部会報告書（2022年）」を基に農林水産省作成

■ 日本の農林水産分野のGHG排出量



単位：万t-CO₂e換算

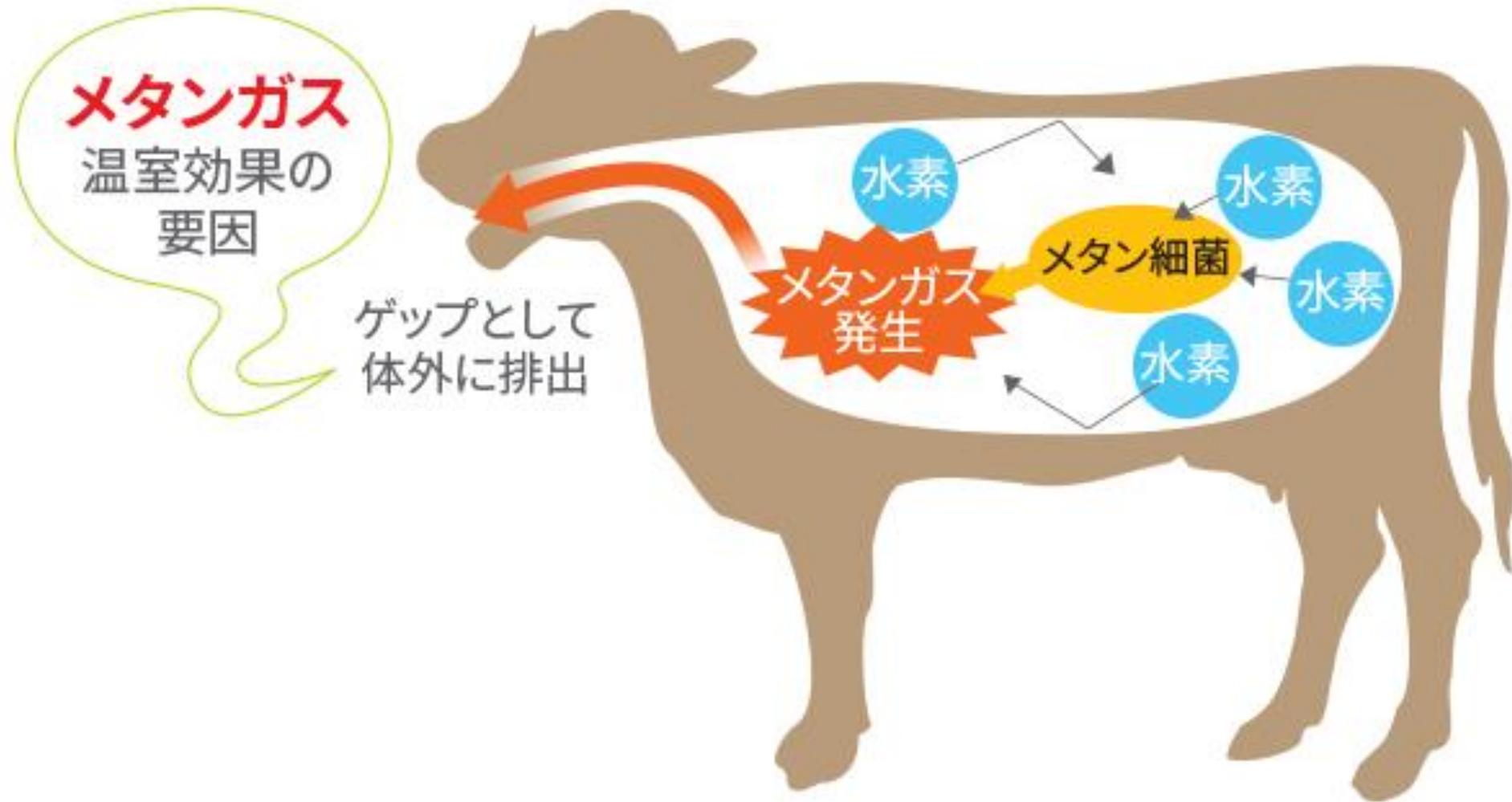
* 温室効果は、CO₂に比べCH₄で28倍、N₂Oで265倍。

* 排出量の合計値には、燃料燃焼及び農作物残渣の野焼きによるCH₄・N₂Oが含まれているが、僅少であることから表記していない。このため、内訳で示された排出量の合計とガス毎の排出量の合計値は必ずしも一致しない。

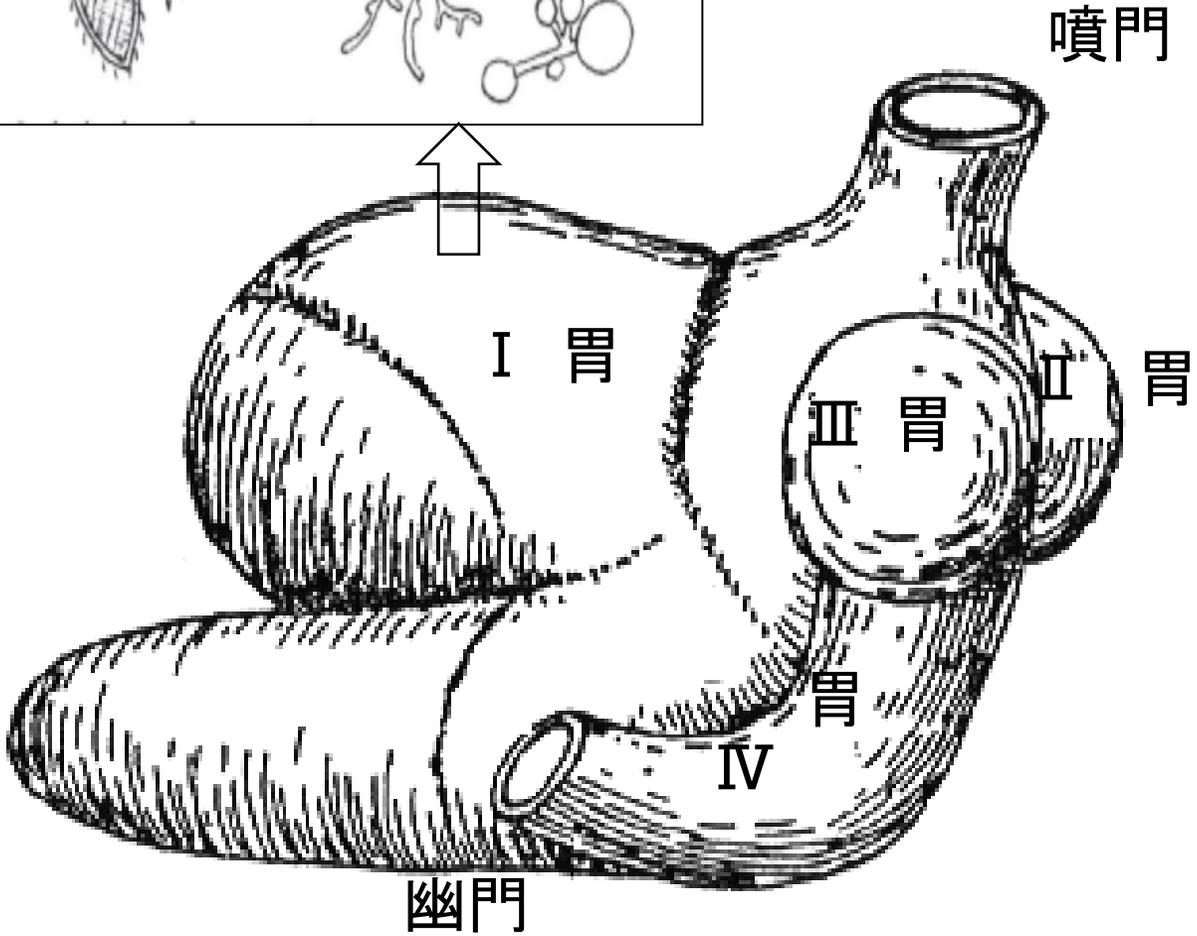
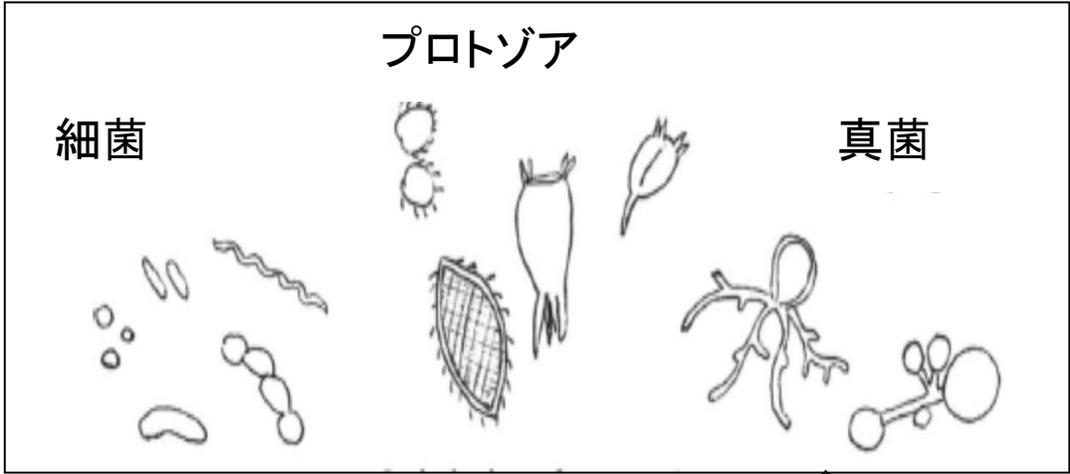
出典：国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス「日本の温室効果ガス排出量データ」を基に農林水産省作成

〈牛の体内でのメタンガス発生の仕組み〉

※イメージ

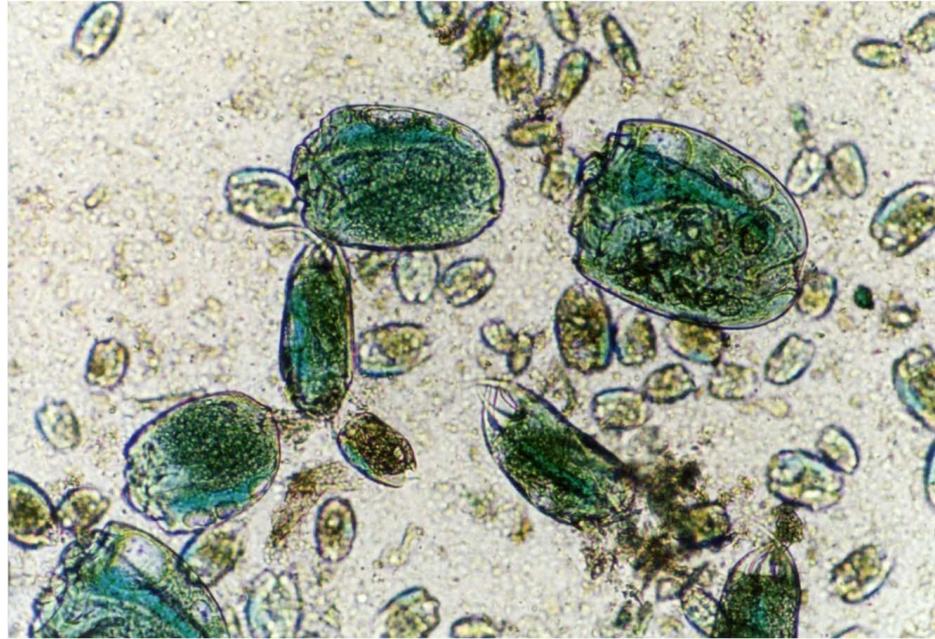


<https://www.nichireifresh.co.jp/product/livestock/detail/?id=334>より





11-27 プロトゾアの体表に付着しているメタン細菌
(上藤)



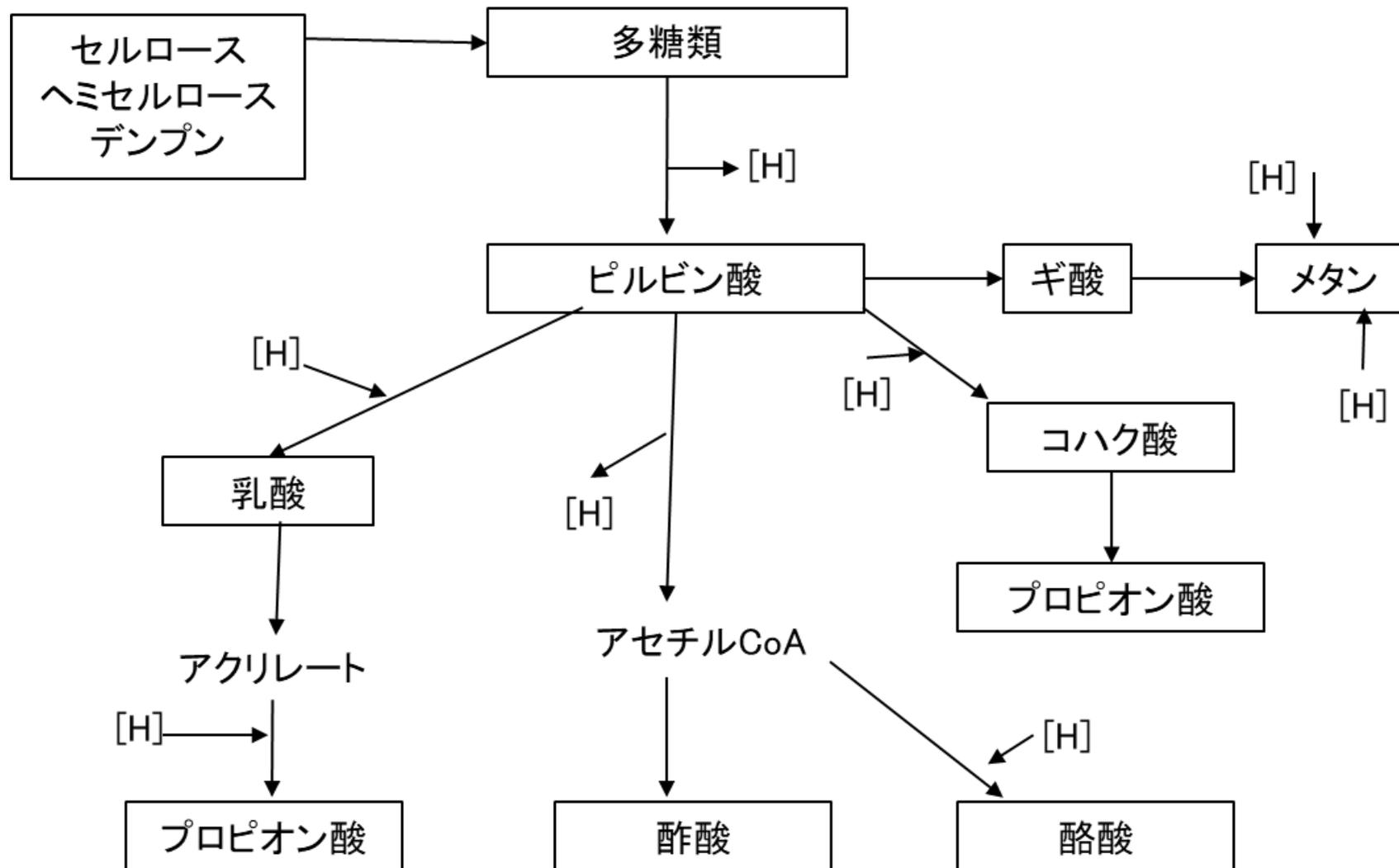
松本(2011)

ルーメン内容物1gには、10から100億の細菌、10万から100万のプロトゾア、千から10万の真菌が存在

セルロース分解菌：酢酸を生成

メタン生成菌：メタンを生成

プロトゾア：発酵産物として水素を生成し、その水素をメタン生成菌が利用。



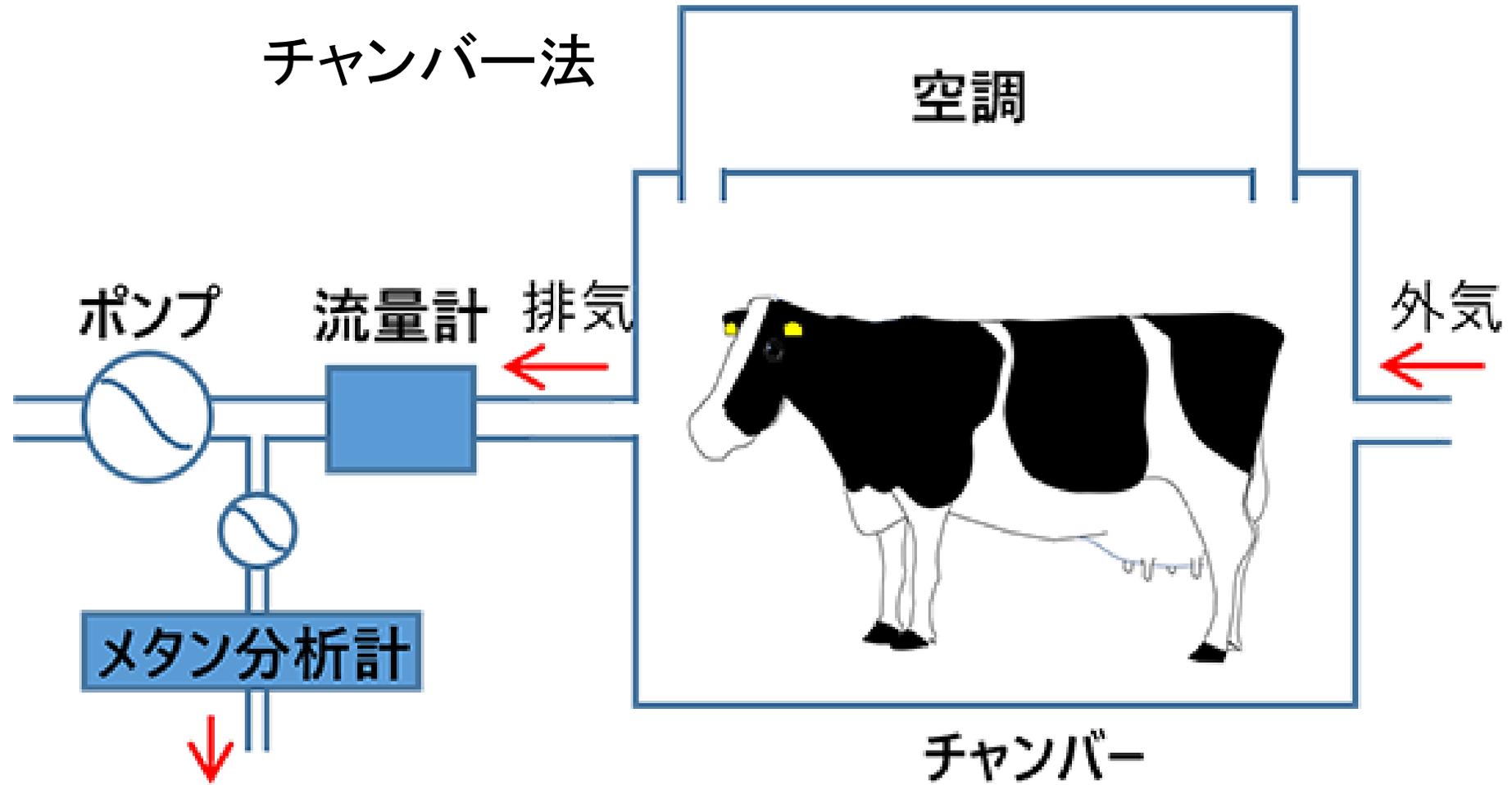
反芻胃におけるメタン生成のメカニズム

メタン測定法

- チャンバー法
- マスク法
- SF6法
- スニフアー法
- GreenFeed法
- レーザー
メタン探知法

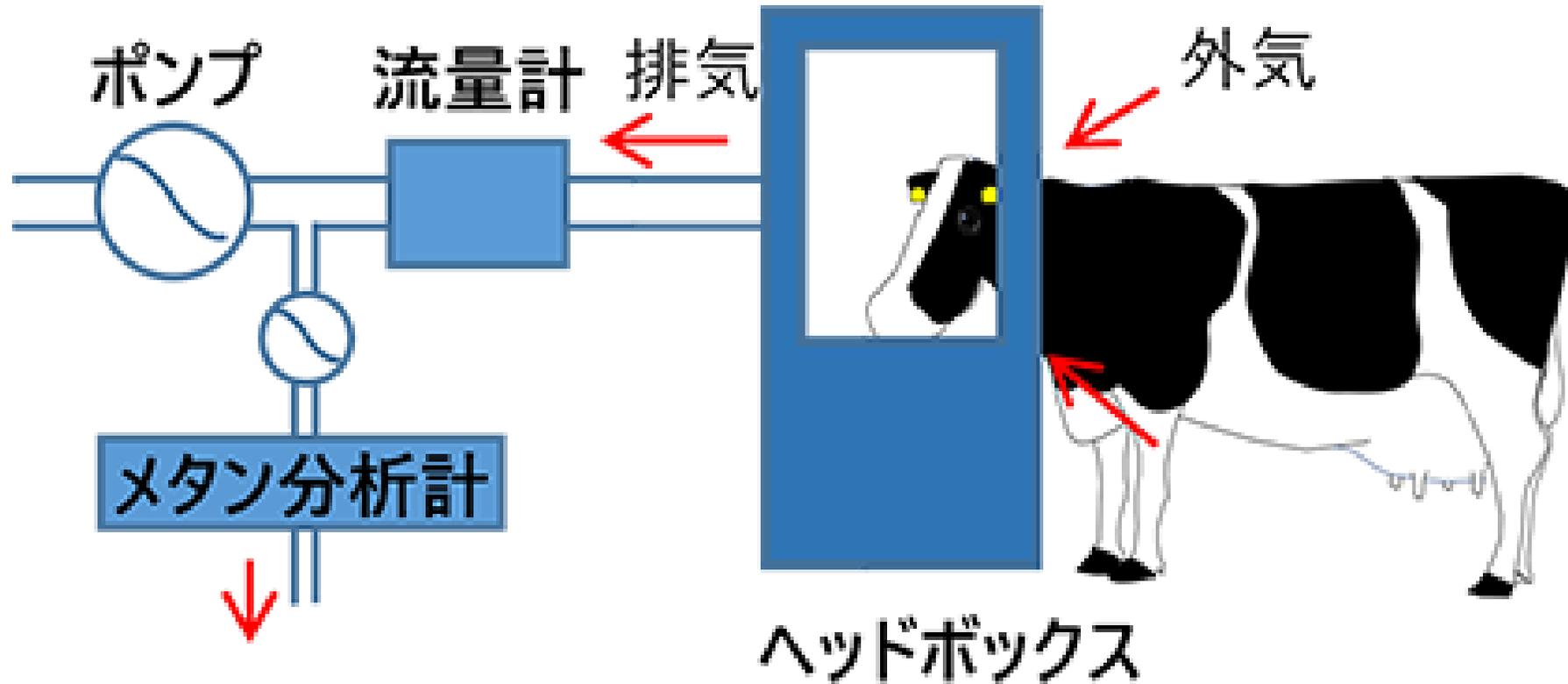


開放型呼吸試験チャンバー(農研機構畜産研究部門)



外気の流入と排気が管理されたチャンバーと呼ばれる部屋に牛を入れて、単位時間当たりのメタン排出量を連続測定する基本の測定法。最も精度が高いのですが施設の建設や運用のコストも最も高い方法である。
https://www.naro.go.jp/laboratory/nilgs/enteric_methane/

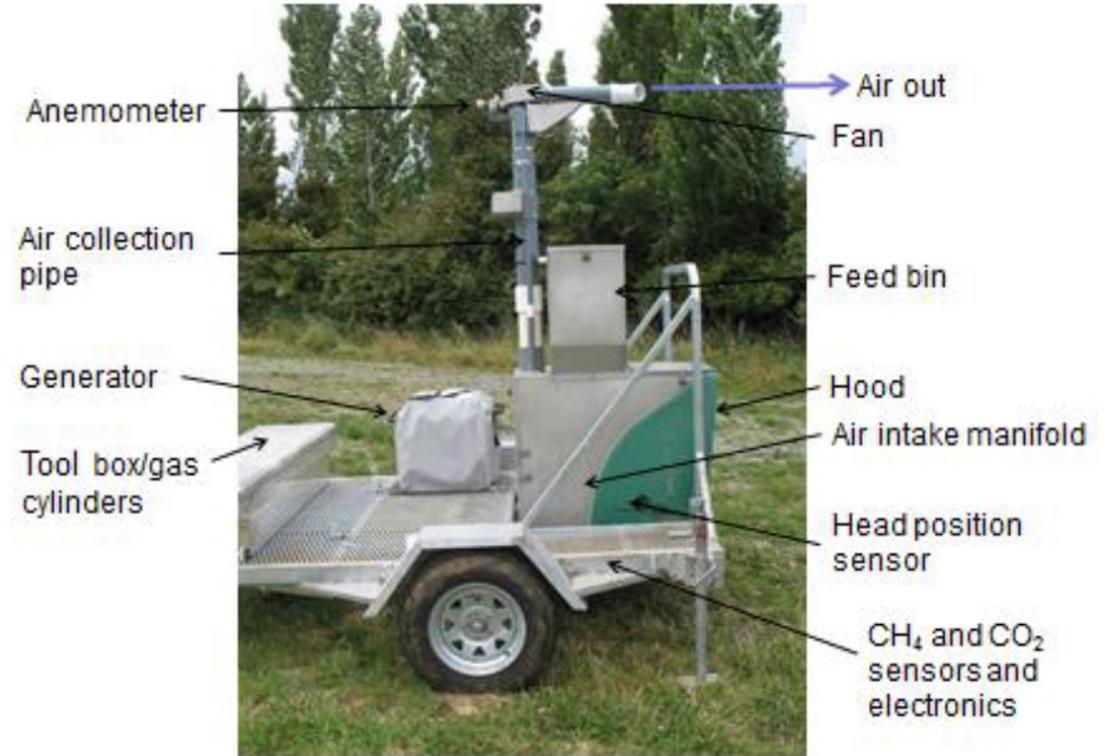
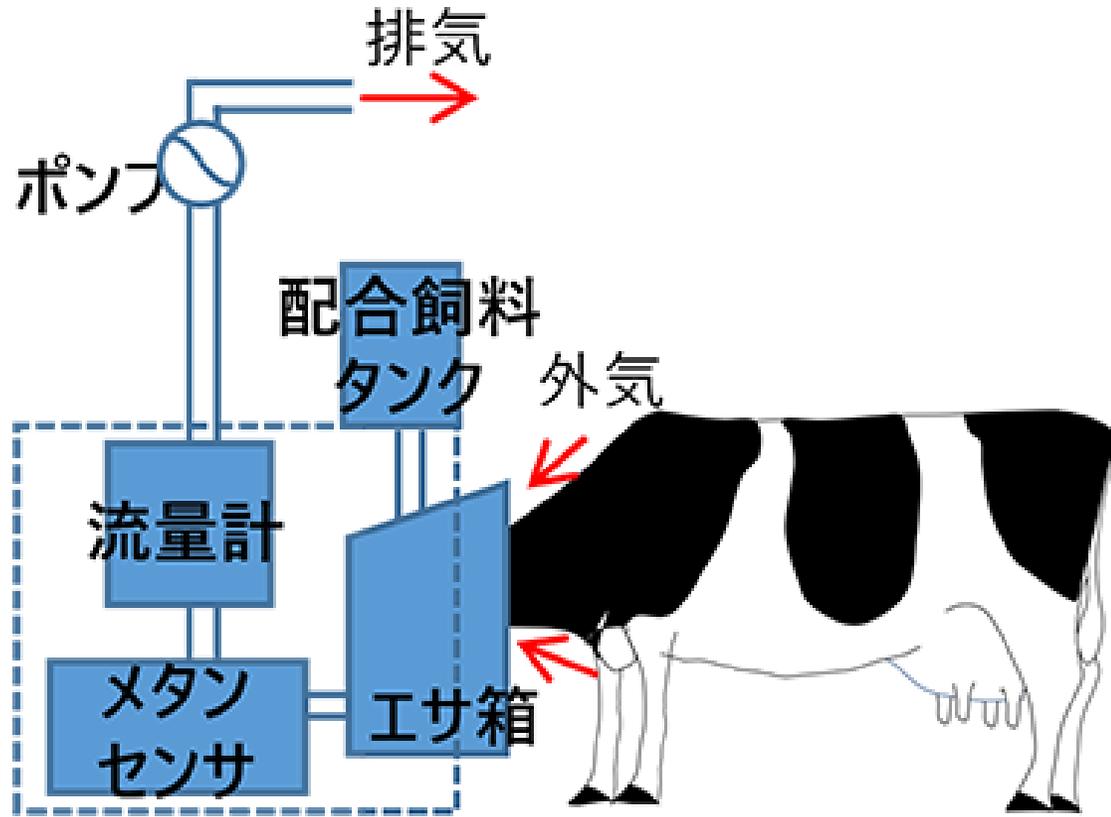
ヘッドボックス法



外気の流入と排気が管理されたボックスで牛の頭部と飼槽を覆い、単位時間当たりのメタン排出量を連続測定する方法であり、チャンバー法の簡易版といえる。

https://www.naro.go.jp/laboratory/nilgs/enteric_methane/

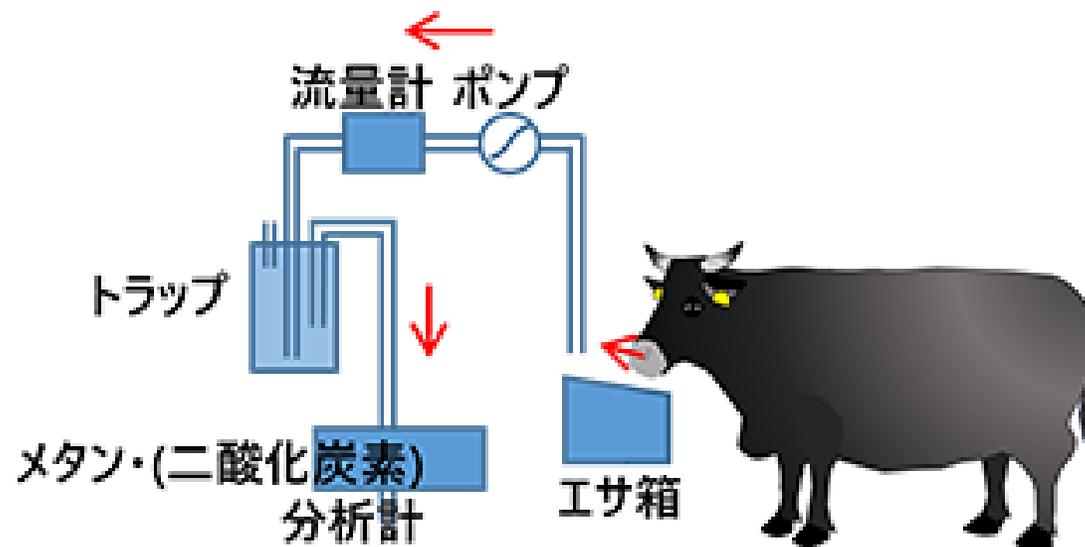
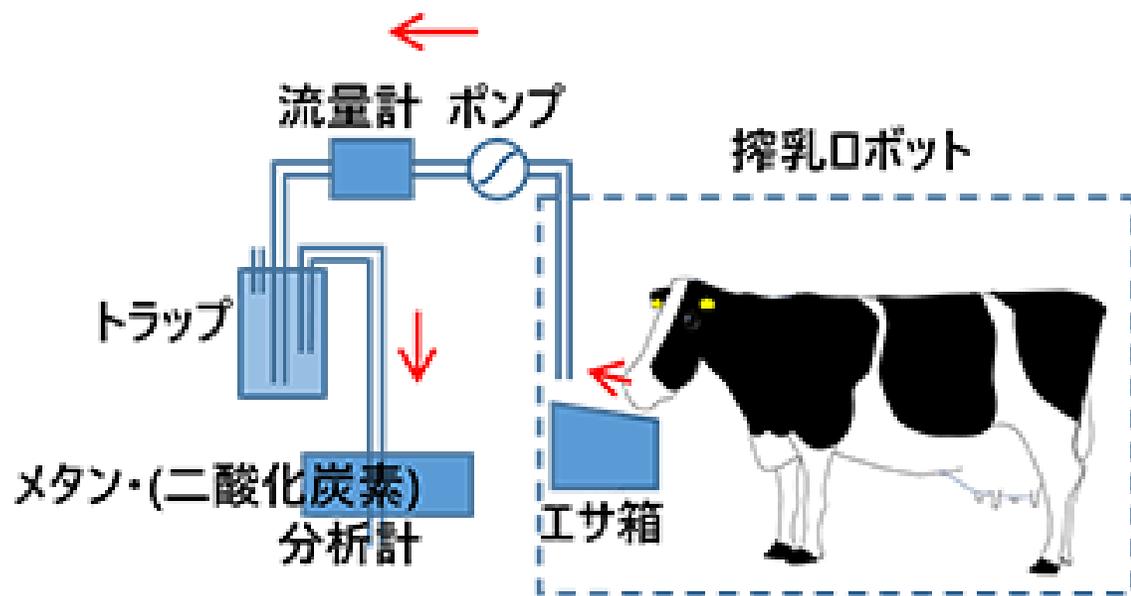
GREENFEED法



アメリカC-Lock社のGREENFEEDと呼ばれるマスク法を自動化した装置により測定。配合飼料を摂取するために訪れた牛のメタンを自動で測定。測定中の牛の拘束はない。

https://www.naro.go.jp/laboratory/nilgs/enteric_methane/

Sniffer法



搾乳ロボットやエサ箱周辺で呼気の一部を採取する方法で、メタン排出量の算出には、サンプルガス中のメタン濃度と呼気希釈率からメタン排出量を求める方法と、メタンに加え二酸化炭素濃度を測定し、二酸化炭素をインデックスとして用いる方法がある。https://www.naro.go.jp/laboratory/nilgs/enteric_methane/

乳牛に関するSniffer法によるメタン排出量予測

$$VCH_4 = 5029 \times CH_4/CO_2 + 0.536 \times BW + 8.76 \times EMILK - 507$$

VCH₄ ; 1日のメタン排出量 (L/日)

CH₄/CO₂ ; サンプルガスのメタン濃度/二酸化炭素濃度比

BW; 乳牛の体重 (kg)

EMILK ; エネルギー補正乳量(kg/日)

ここで、

$$EMILK = MY \times (376 \times Fat + 209 \times Prot + 948) / 3138$$

MY; 乳量 (kg/日)

Fat ; 乳脂率 (%)

Prot ; 乳タンパク質率 (%)

大問題:もし、この方法を育種に利用する場合、メタン排出量は乳量や体重に依存することになる



肉牛に関するSniffer法を利用したメタン排出量予測式

$$VCH_4 = HP/4.89 \times cRQ \times CH_4/CO_2$$

VCH_4 ; 1日のメタン排出量 (L/日)

HP ; 熱発生量 (kcal/日)

cRQ; 補正呼吸商

CH_4/CO_2 ; サンプルガスのメタン濃度/二酸化炭素濃度比

ここで、

$$cRQ = 1.074 - 0.003283 \times Fratio + 0.6478 \times MEI/BW^{0.75}$$

$$HP = [(MEI - BW^{0.75} \times MEm) \times 0.48 + BW^{0.75} \times MEm] \times 1000$$

$$MEI = TDNI \times 3.62$$

Fratio ; 粗飼料比率(%乾物ベース)

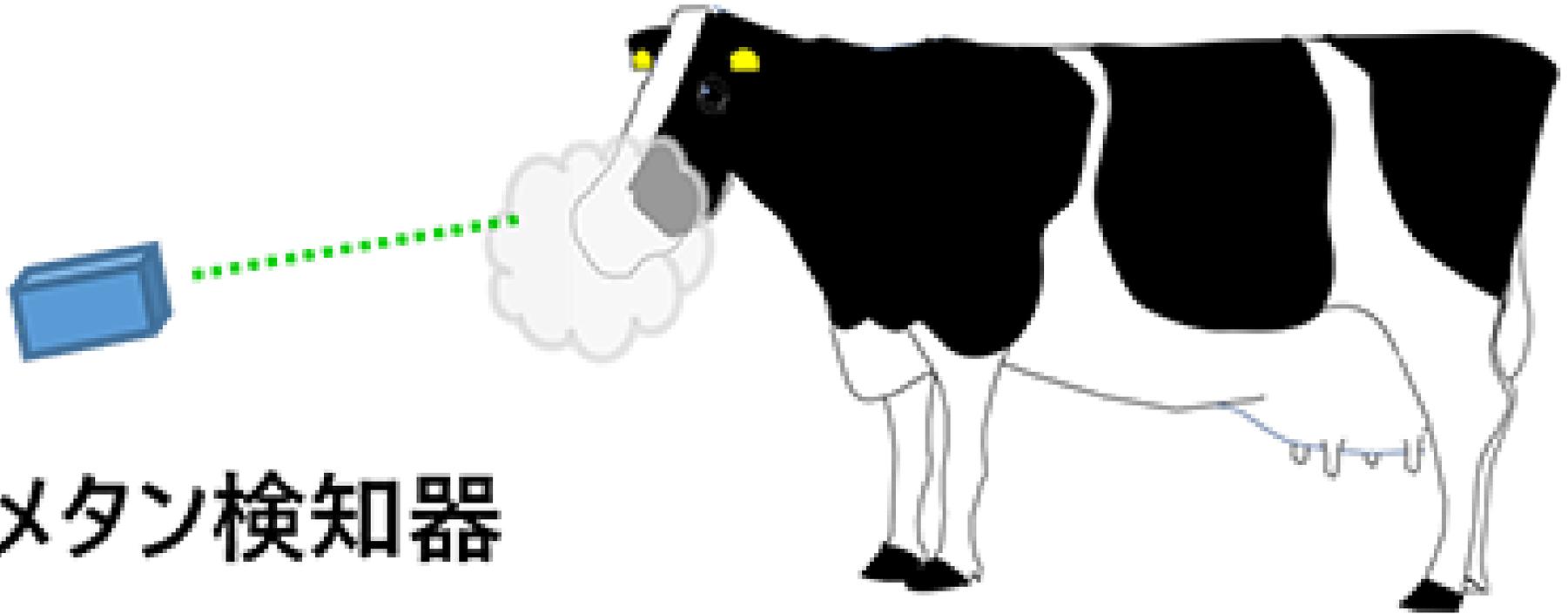
MEI; 代謝エネルギー摂取量 (Mcal/日)

BW ; 体重 (kg)

MEm ; 維持に要する代謝エネルギー(Mcal/BW^{0.75}; 雌0.1108, 去勢雄0.1124)

TDNI ; 可消化養分摂取量 (kg/日)

レーザーメタン探知器法



レーザーメタン検知器

牛の鼻口部周辺のメタン濃度を数分間測定し、得られたメタン濃度の波形からメタン排出量を推定する方法。携帯型レーザーメタン検知器(東京ガスエンジニアリングソリューションズ株式会社)を用いる。

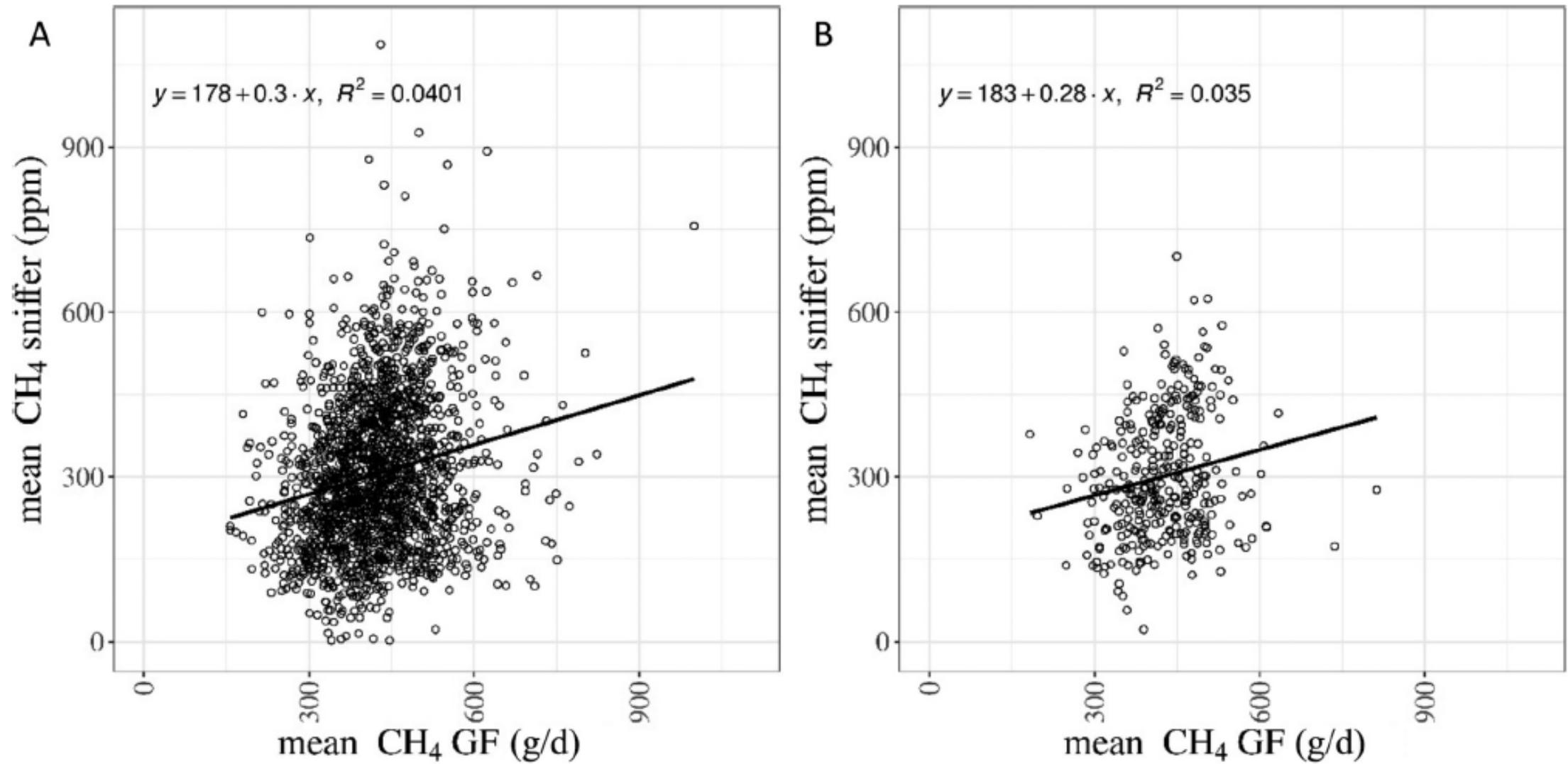


Figure 3. The relationship between methane (CH₄) production measured by GreenFeed (GF, grams/day) units and CH₄ concentrations measured by sniffers (ppm) from repeated measurements on (A) 75 dairy cows as means per day and (B) 73 dairy cows as means per week.

Table 3. Phenotypic (above the diagonal) and genetic correlations (below the diagonal) between methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) recorded by GreenFeed (GF, production: CH₄p in grams/day) units or sniffers (concentration: CH₄c in ppm) and averaged per day or per week (\pm SE)¹

Item	GF CH ₄ p day	GF CO ₂ p day	GF CH ₄ p week	GF CO ₂ p week	Sniffer CH ₄ c day	Sniffer CO ₂ c day	Sniffer CH ₄ c week	Sniffer CO ₂ c week
GF CH ₄ p day	*0.19 \pm 0.02	0.72 \pm 0.01	0.70 \pm 0.01 ²	0.53 \pm 0.01	0.39 \pm 0.03	0.20 \pm 0.04	0.37 \pm 0.04	0.18 \pm 0.04
GF CO ₂ p day	0.68 \pm 0.04	*0.24 \pm 0.03	0.58 \pm 0.01	0.77 \pm 0.01 ²	0.32 \pm 0.04	0.25 \pm 0.04	0.35 \pm 0.04	0.27 \pm 0.04
GF CH ₄ p week	0.99 \pm 0.01 ²	0.66 \pm 0.05	*0.33 \pm 0.04	0.75 \pm 0.01	0.27 \pm 0.04	0.15 \pm 0.05	0.37 \pm 0.05	0.19 \pm 0.06
GF CO ₂ p week	0.64 \pm 0.05	1.00 \pm 0.01 ²	0.65 \pm 0.05	*0.34 \pm 0.05	0.22 \pm 0.04	0.18 \pm 0.04	0.31 \pm 0.05	0.24 \pm 0.06
Sniffer CH ₄ c day	0.71 \pm 0.13	0.54 \pm 0.15	0.74 \pm 0.15	0.69 \pm 0.16	*0.18 \pm 0.01	0.78 \pm >0.01	0.73 \pm <0.01 ²	0.62 \pm 0.01
Sniffer CO ₂ c day	0.39 \pm 0.16	0.51 \pm 0.15	0.47 \pm 0.17	0.63 \pm 0.16	0.93 \pm 0.01	*0.20 \pm 0.01	0.65 \pm 0.01	0.76 \pm <0.01 ²
Sniffer CH ₄ c week	0.71 \pm 0.14	0.60 \pm 0.15	0.76 \pm 0.15	0.72 \pm 0.16	1.00 \pm <0.01 ²	0.92 \pm 0.01	*0.32 \pm 0.02	0.84 \pm <0.01
Sniffer CO ₂ c week	0.35 \pm 0.17	0.51 \pm 0.15	0.41 \pm 0.18	0.60 \pm 0.17	0.91 \pm 0.01	1.00 \pm <0.01 ²	0.93 \pm 0.01	*0.32 \pm 0.02

¹The heritabilities are reported on the diagonal and marked with an asterisk. The heritabilities were reported as the mean of all runs.

²Estimate with the highest likelihood but with convergence problems due to closeness to unity of the correlation.

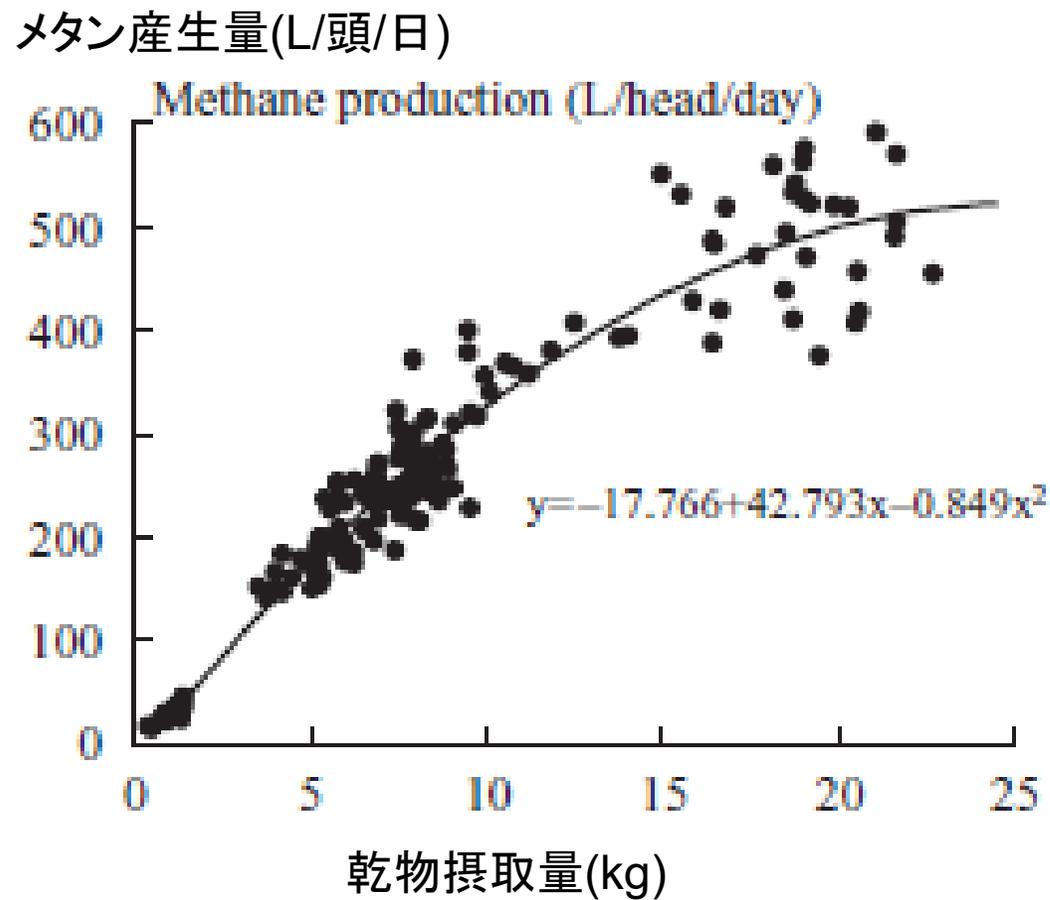


Figure 1 Relationship between dry matter (DM) intake (kg/day) and methane production (L/head/day). Data from Shibata *et al.* (1993).

Terada and Shibata (2010)

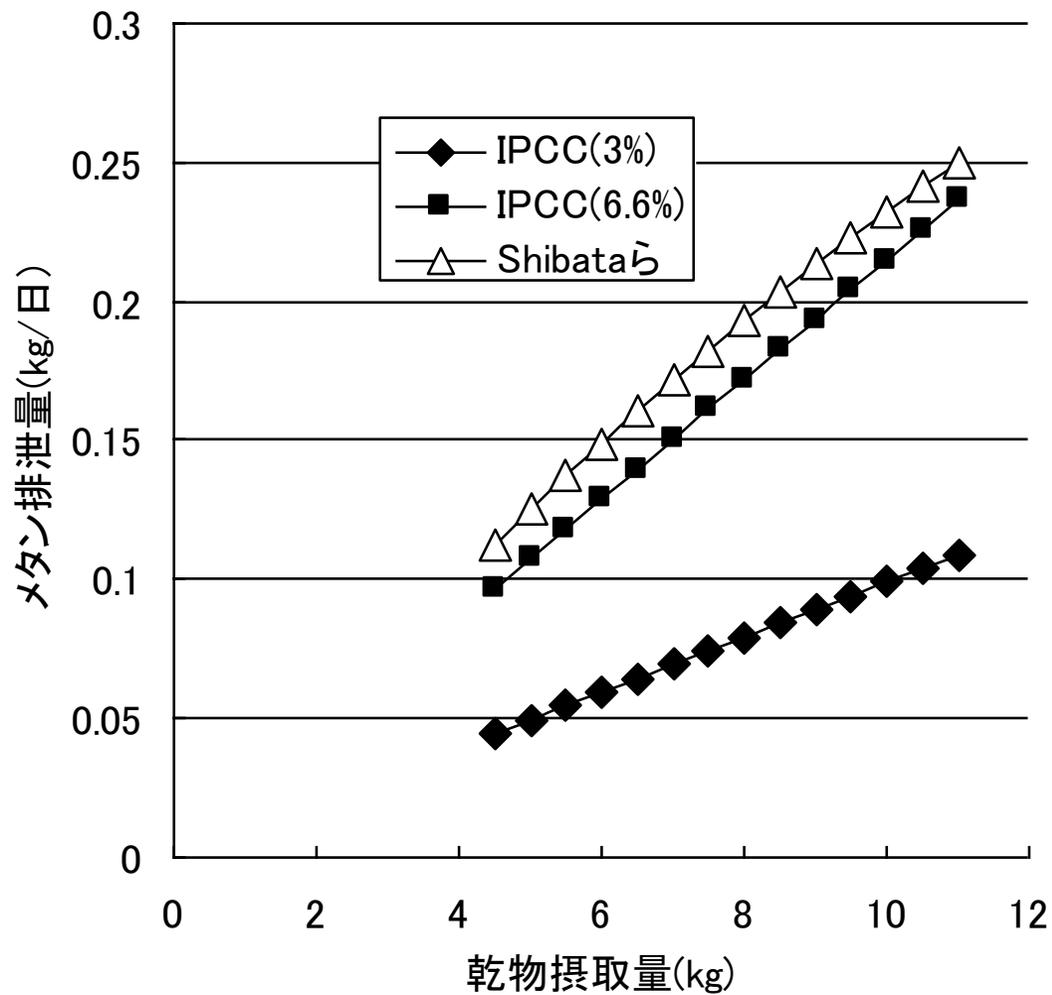
メタン産出量推定式(ウシ)

- 日本
$$EF = \frac{Y}{22.4} \times 0.016$$

$$Y = -17.766 + 42.793DM - 0.849DM^2$$

- IPCC
$$EF = \frac{18.4DM(Y_m / 100)}{55.65}$$
 肥育牛の場合3%

EF (kg/頭/日)、DM=乾物摂取量(kg/日)、22.4=メタン1モル当たりの体積、0.016=メタンの分子量、55.65=メタンのエネルギー含量(MJ/kg)



乳牛に関しては、日本の式とIPCCの式はよく一致しているが、肥育牛に関しては日本の式は倍以上、過大推定している。世界基準のICPPの式を使ったら、少なくとも肥育牛に関する日本のメタン排出量は半分以下にできる。

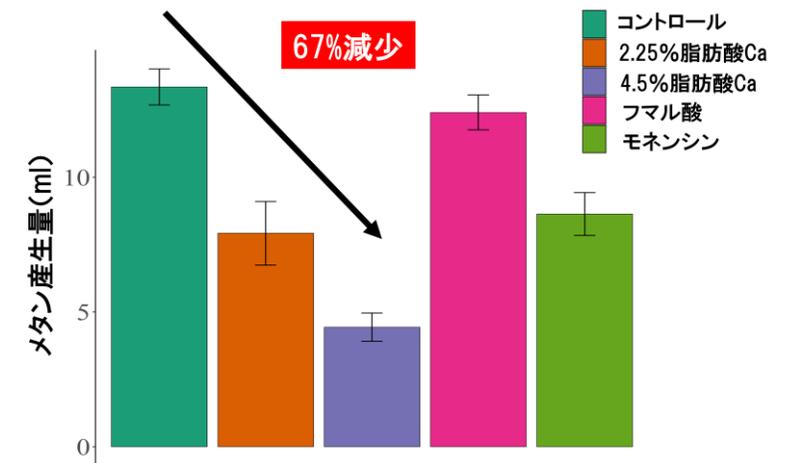
反芻家畜の消化管内発酵によるメタン排出の低減方法の例

1. 濃厚飼料の給与割合を増やす(注:放牧は粗飼料である牧草摂取が多いのでメタン排出は増える)
2. 油脂添加物を給与(第1胃内の微生物に対する害作用、不飽和脂肪酸給与は水素添加によってメタン産生を制限)
3. 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(メタン産生菌の不活性化やメタン生成経路の阻害)。しかしヨーロッパでは禁止。
4. 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カシューナッツ殻油に含まれるアルカロイド酸の利用。
5. メタン排出の少ないウシを選抜し、遺伝的に改良する。

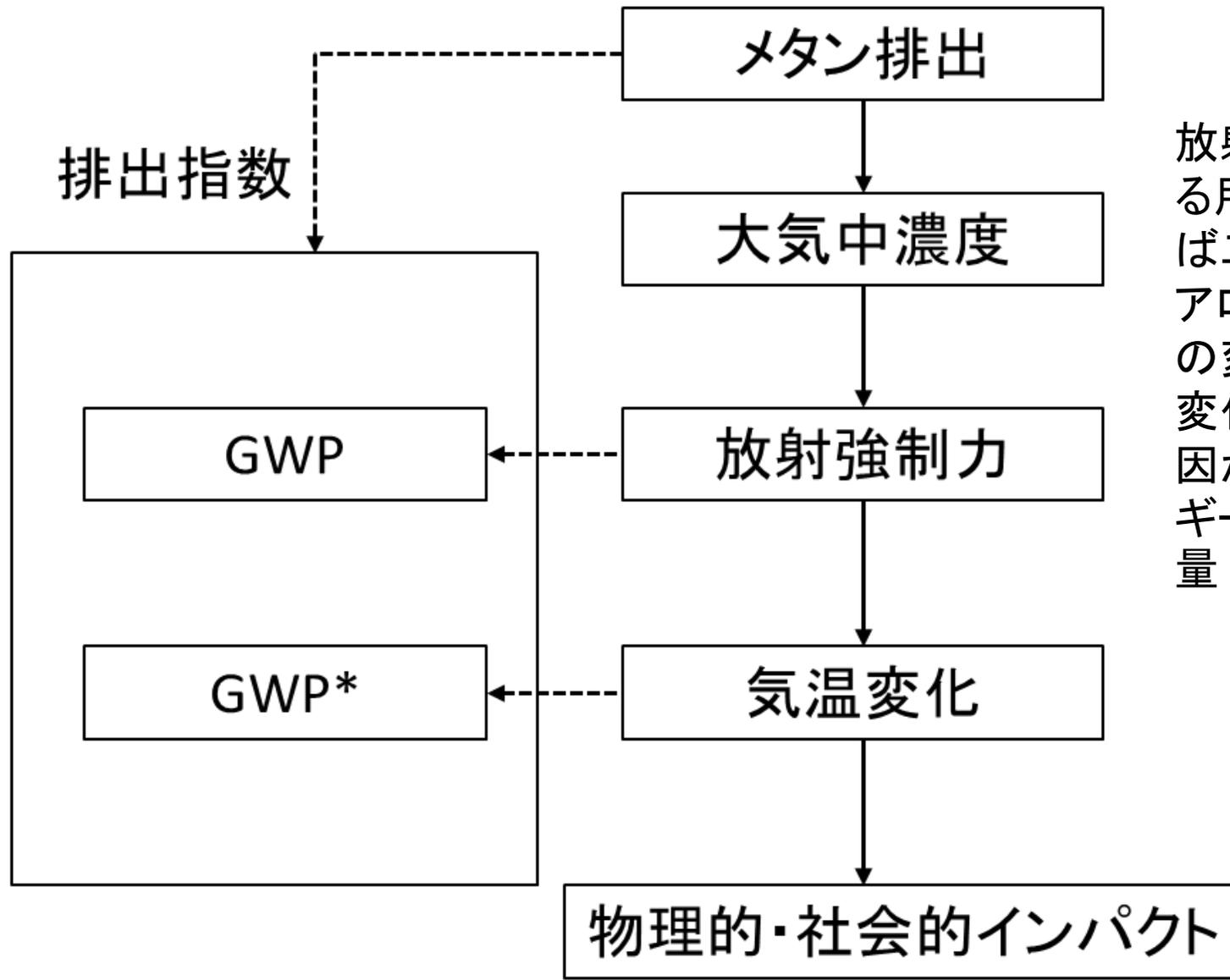


<https://kuroshio.or.jp/creature/%E3%82%AB%E3%82%AE%E3%82%B1%E3%83%8E%E3%83%AA/>

メタン低減効果



亜麻仁油脂肪酸CA給与の効果(Satoら2020, PLOS ONE, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242158>)
In vitro試験、賦形剤として食用シリカゲルを利用



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、雲分布の変化等)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

GWPは放射強制力を反映し、GWP*は気温変化を反映している指標

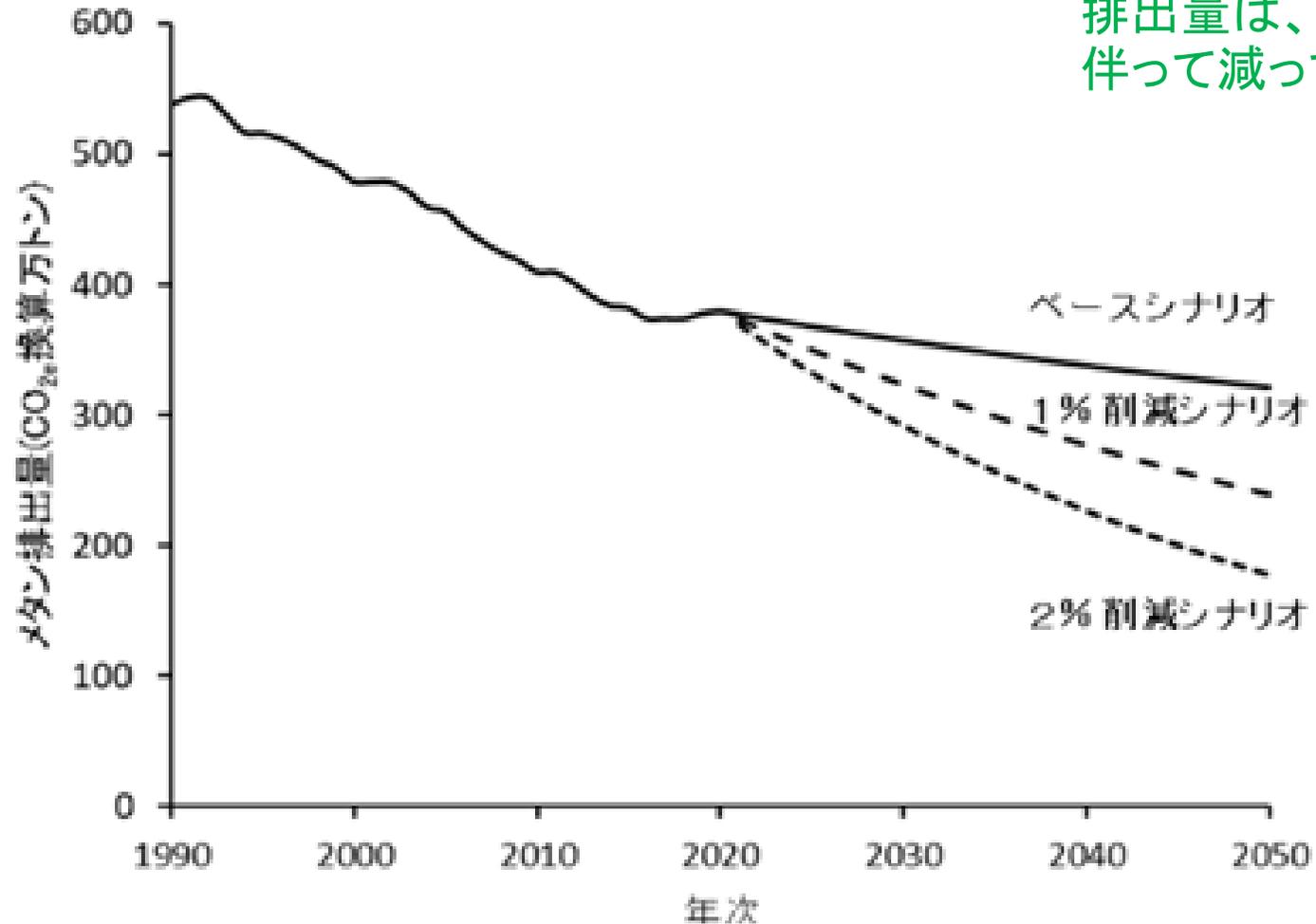
地球温暖化係数(GWP)は二酸化炭素を基準として、CO₂以外の温室効果ガスがどれだけ温暖化に影響するかを表す数値の値

報告書ごとのGWP値の変遷

	IPCC 2 nd SAR	IPCC 4 th AR4	IPCC 5 th AR5
CO ₂	1	1	1
CH ₄	21	25	28
N ₂ O	310	298	265

酪農
GWPを利用

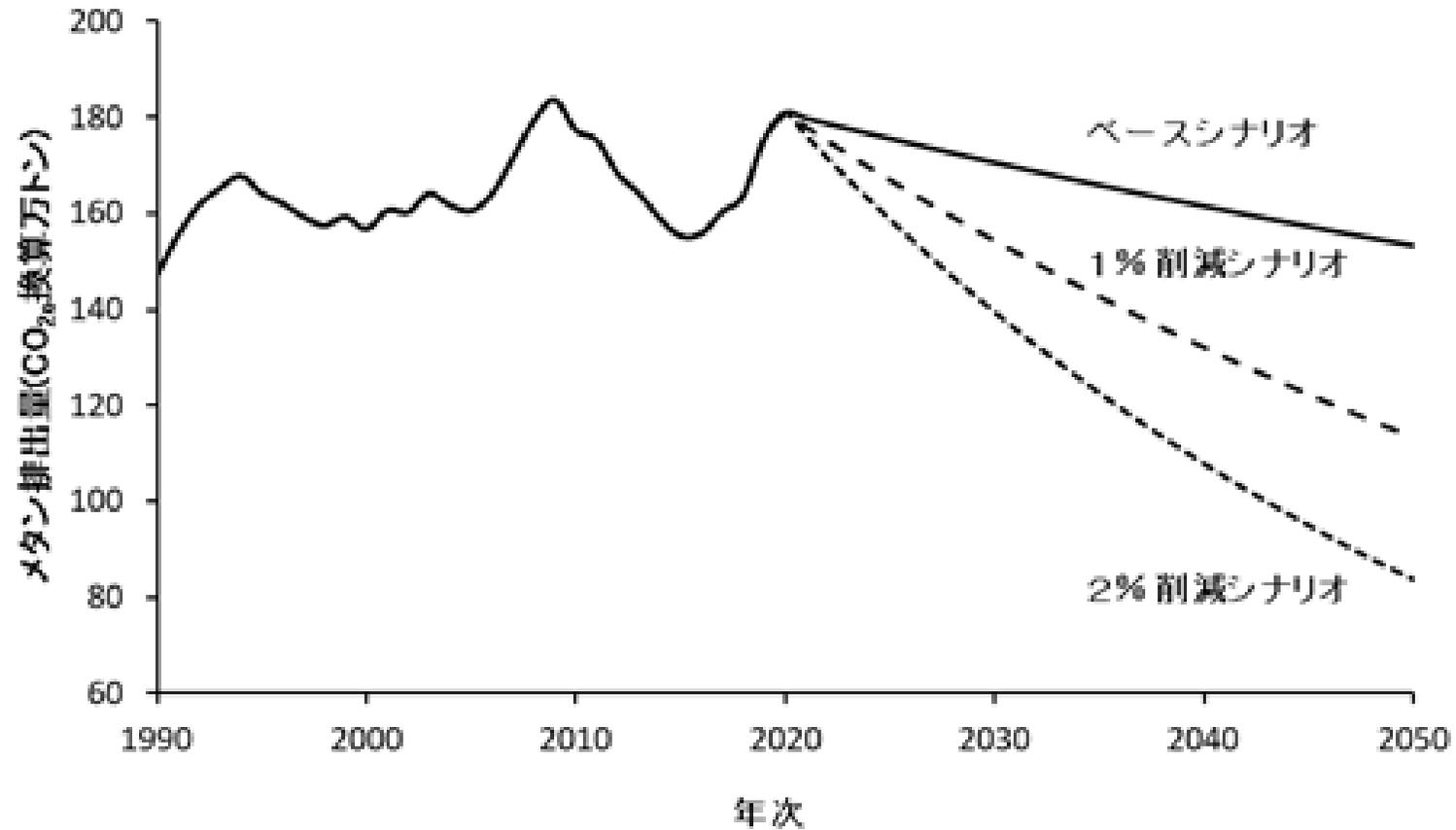
酪農からの乳牛の消化管由来メタン
排出量は、年々、飼養頭数の減少に
伴って減っている



年次に伴う乳生産からの二酸化炭素換算メタン排出量(CO_{2e})

広岡(2024)

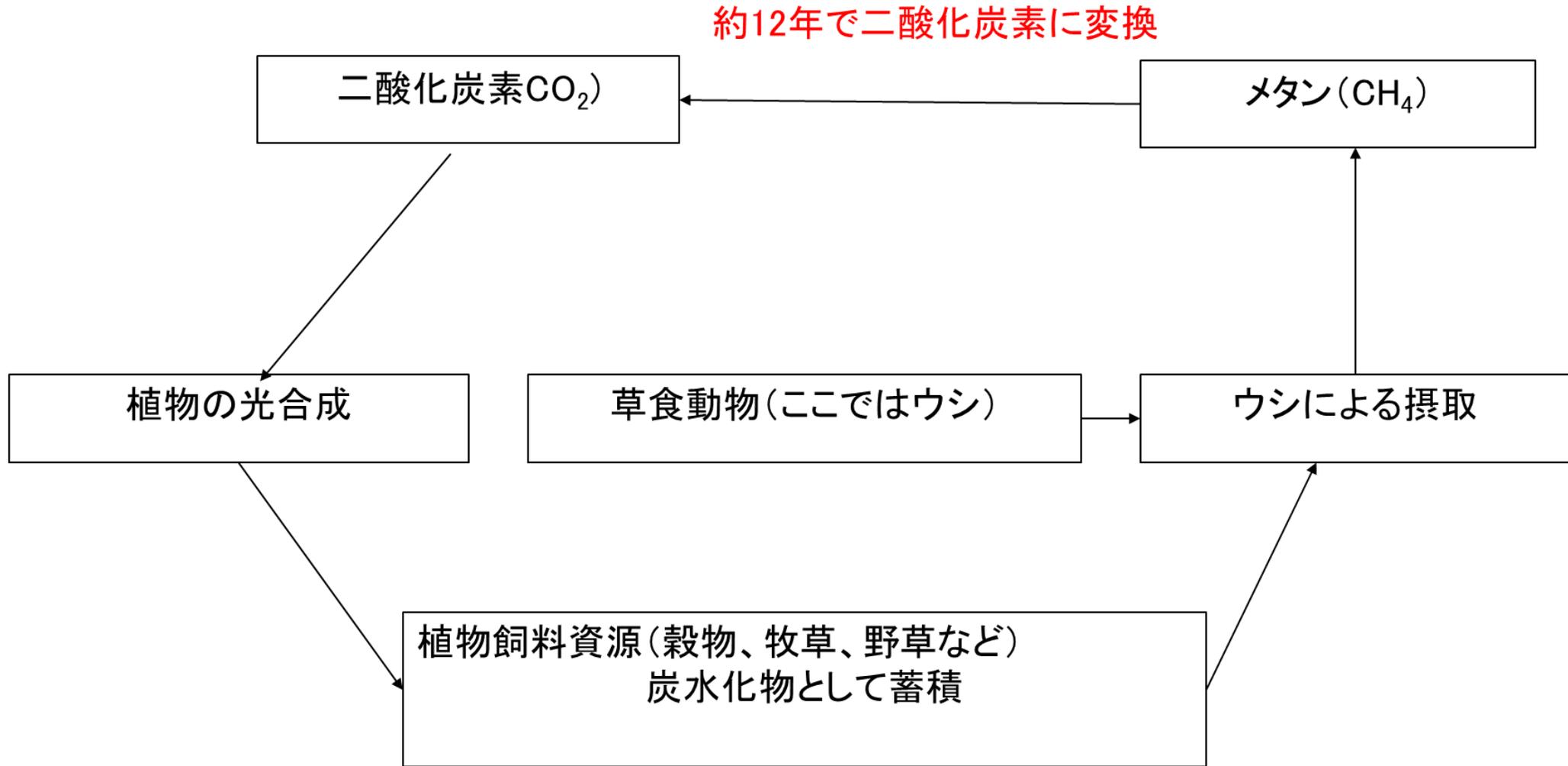
肉用肥育生産
GWPを利用



年次に伴う肉用肥育生産からの二酸化炭素換算メタン排出量(CO_{2e})

広岡(2024)

ウシからのメタンは、生物循環の一環である。



牛由来のメタンガスの特性と生物循環

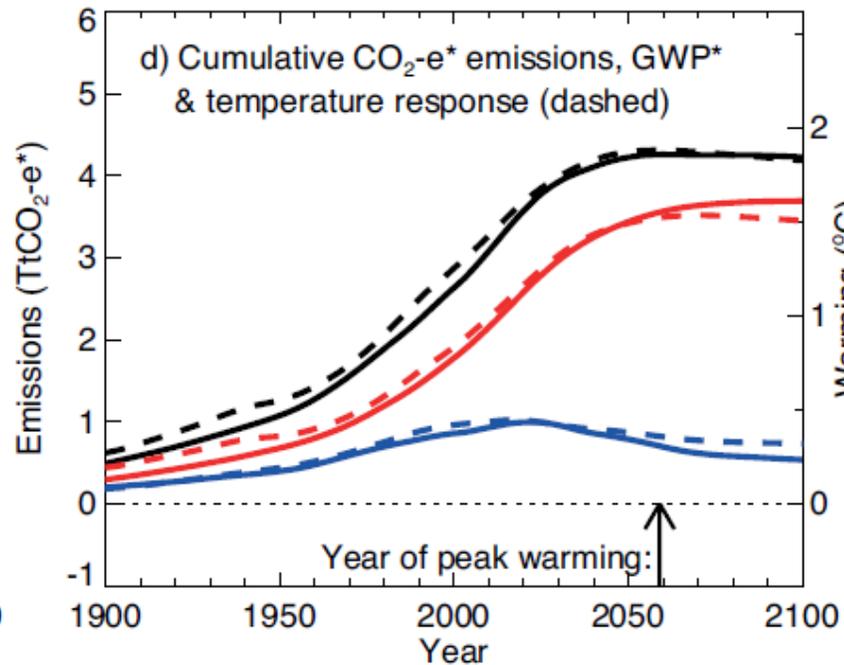
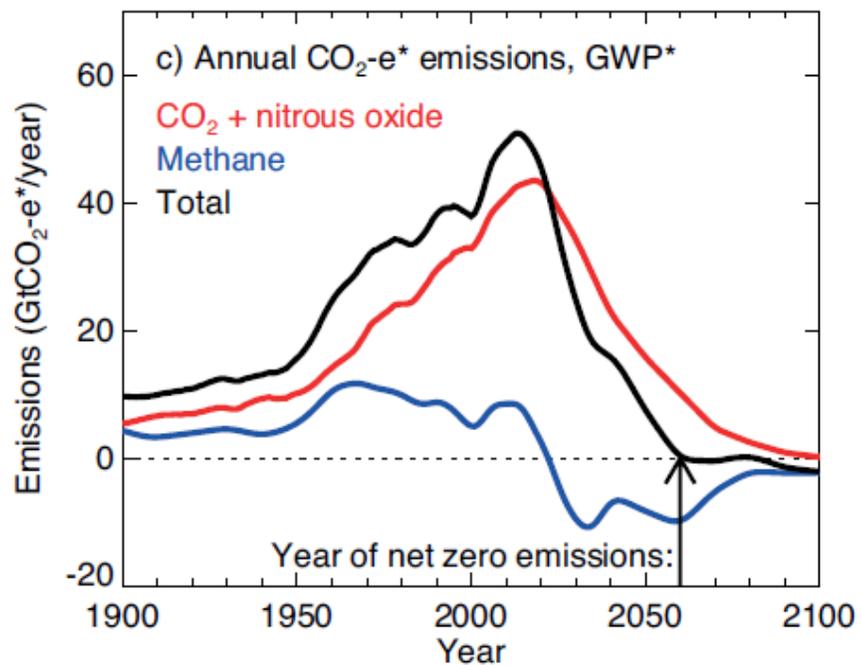
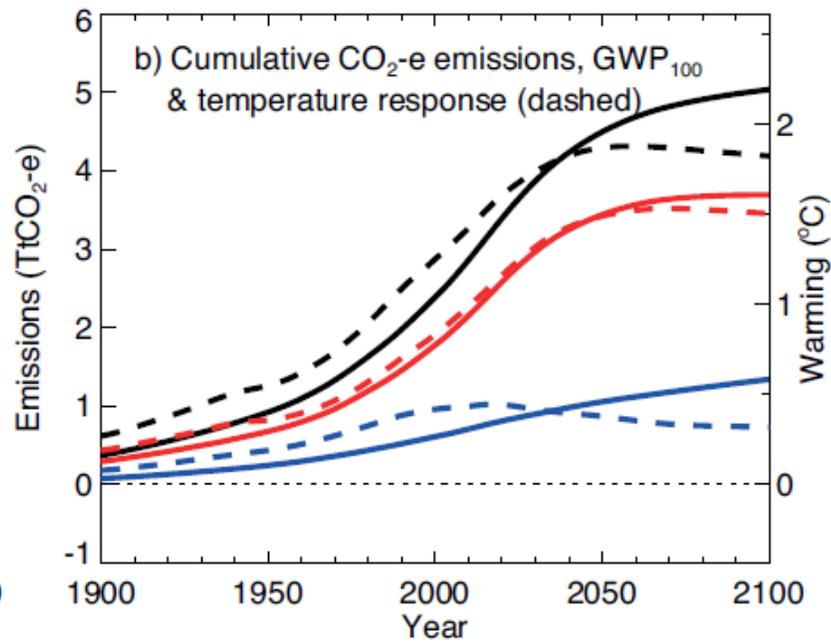
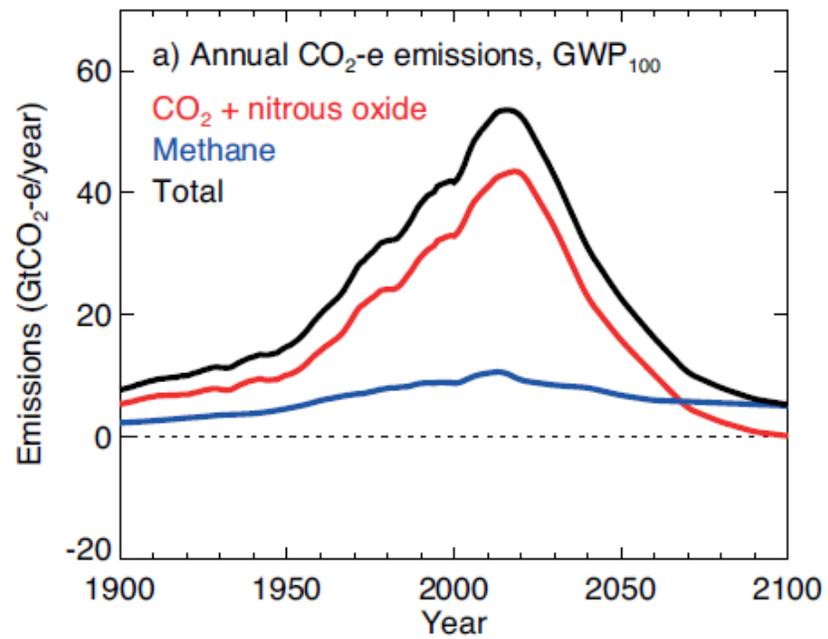
GWP*に基づく温暖化換算メタン排出量(CO₂換算)

$$\begin{aligned} CO_{2we} &= 28 \times \left\{ 0.75 \times \frac{TME_{(t)} - TME_{(t-20)}}{20} \times 100 + 0.25 \times TME_{(t)} \right\} \\ &= 28 \times \{ 4 \times TME_{(t)} - 3.75 \times TME_{(t-20)} \} \end{aligned}$$

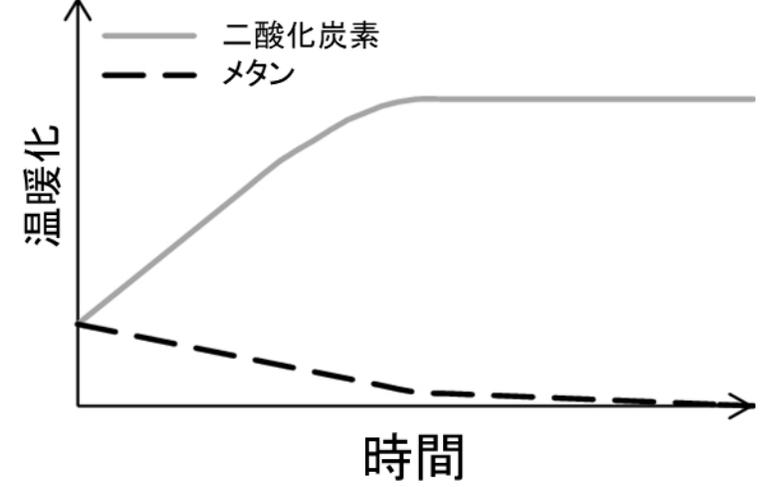
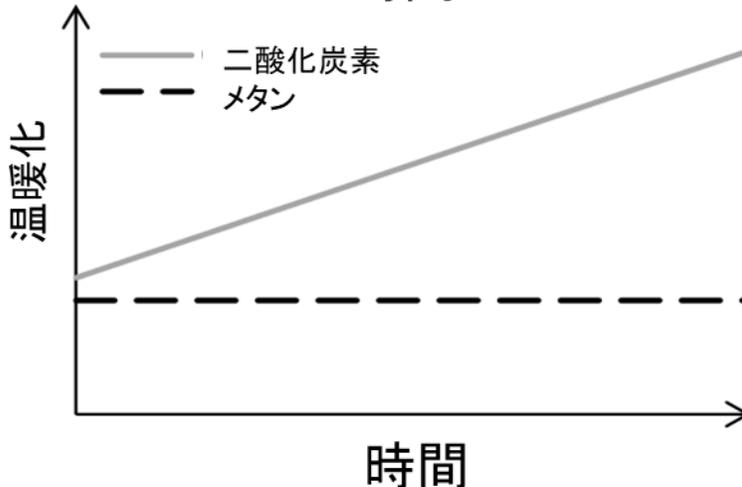
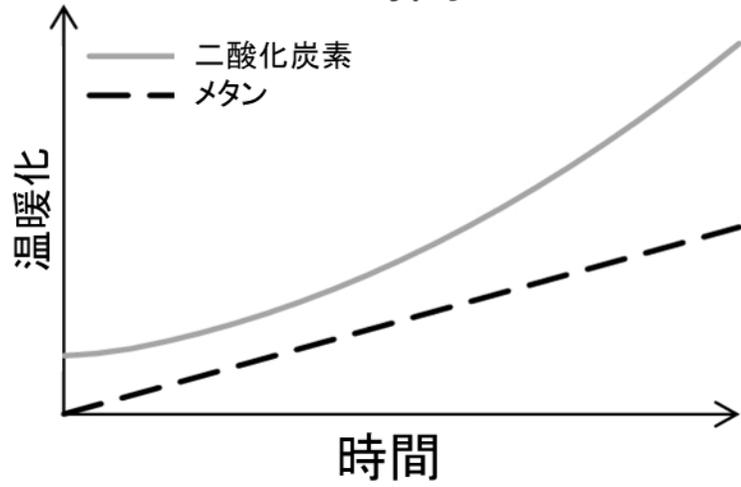
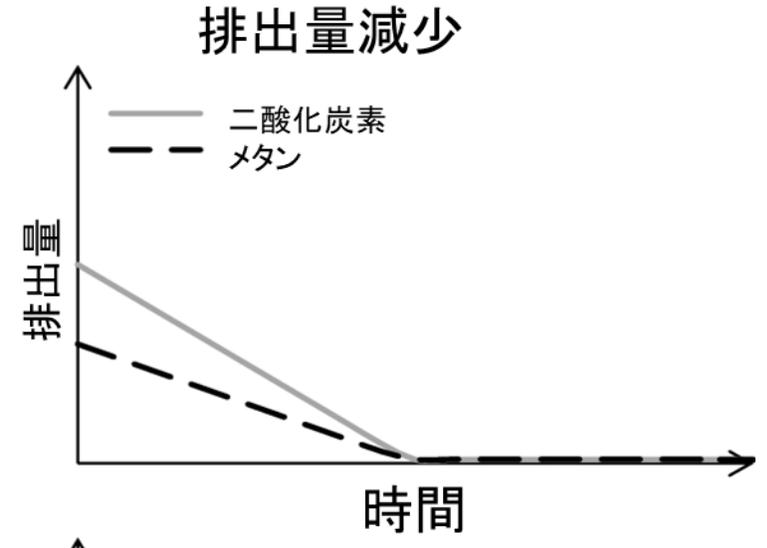
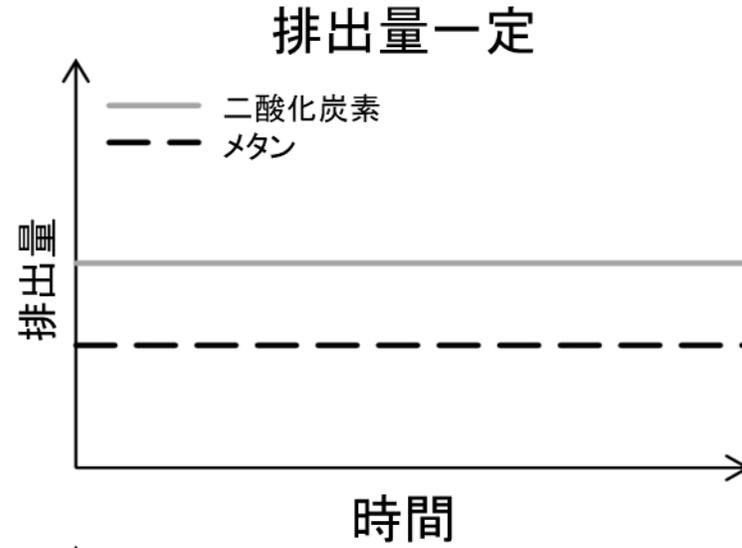
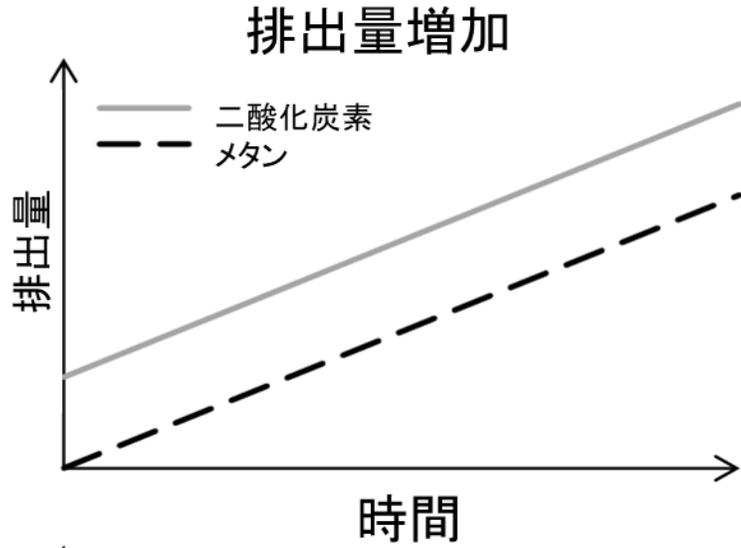
Allenら(2018)、Cainら(2019)、Lynchら(2021)、Smithら(2021)

TME_(t)は、年次tにおける総消化管由来メタン排出量

上式の第1項はフローを意味し、CO_{2we}の排出の影響がなくなり、気温への影響に対応する機関として20年を想定し、第2項はストックの部分を表し、過去における影響に対する長期的な均衡を表すものである(Cainら2019)

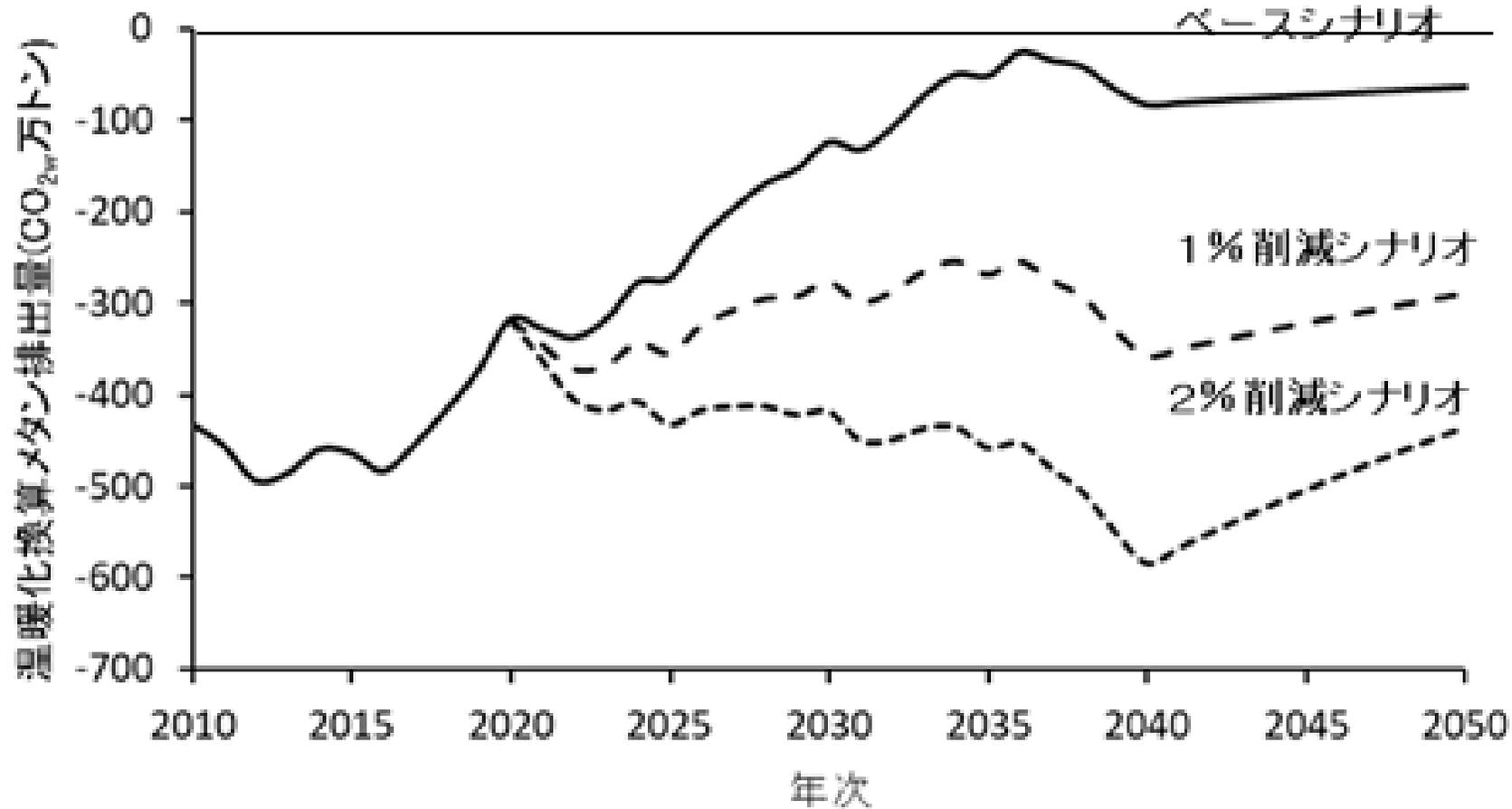


Allen (2017) Climate metrics under ambitious mitigation, Oxford Martin School



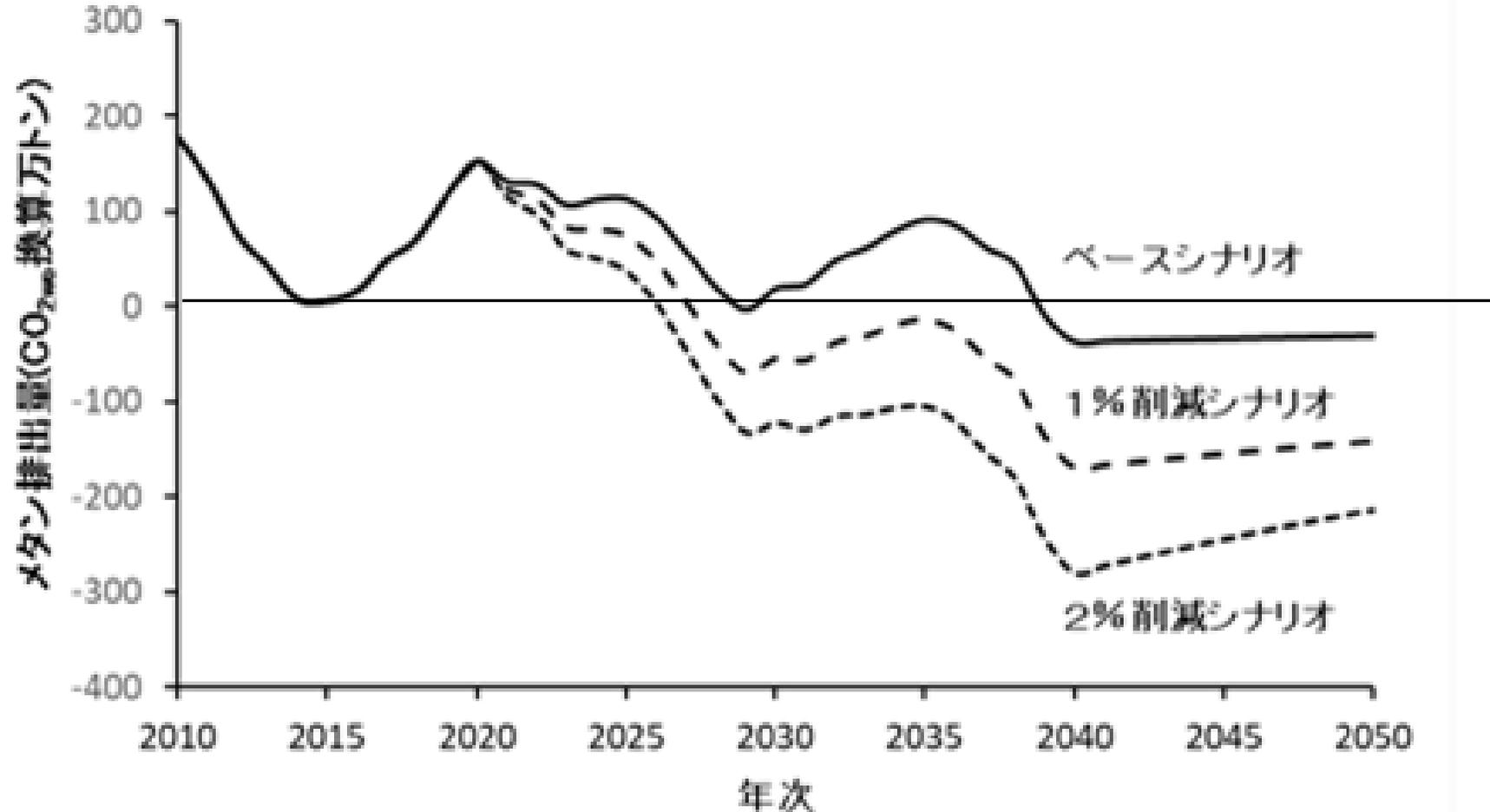
条件の違いによる二酸化炭素とメタンの増減量の推移

GWP*を用いた指標では、牛からのメタン排出量は負の数値で、実は地球冷却化に寄与している。

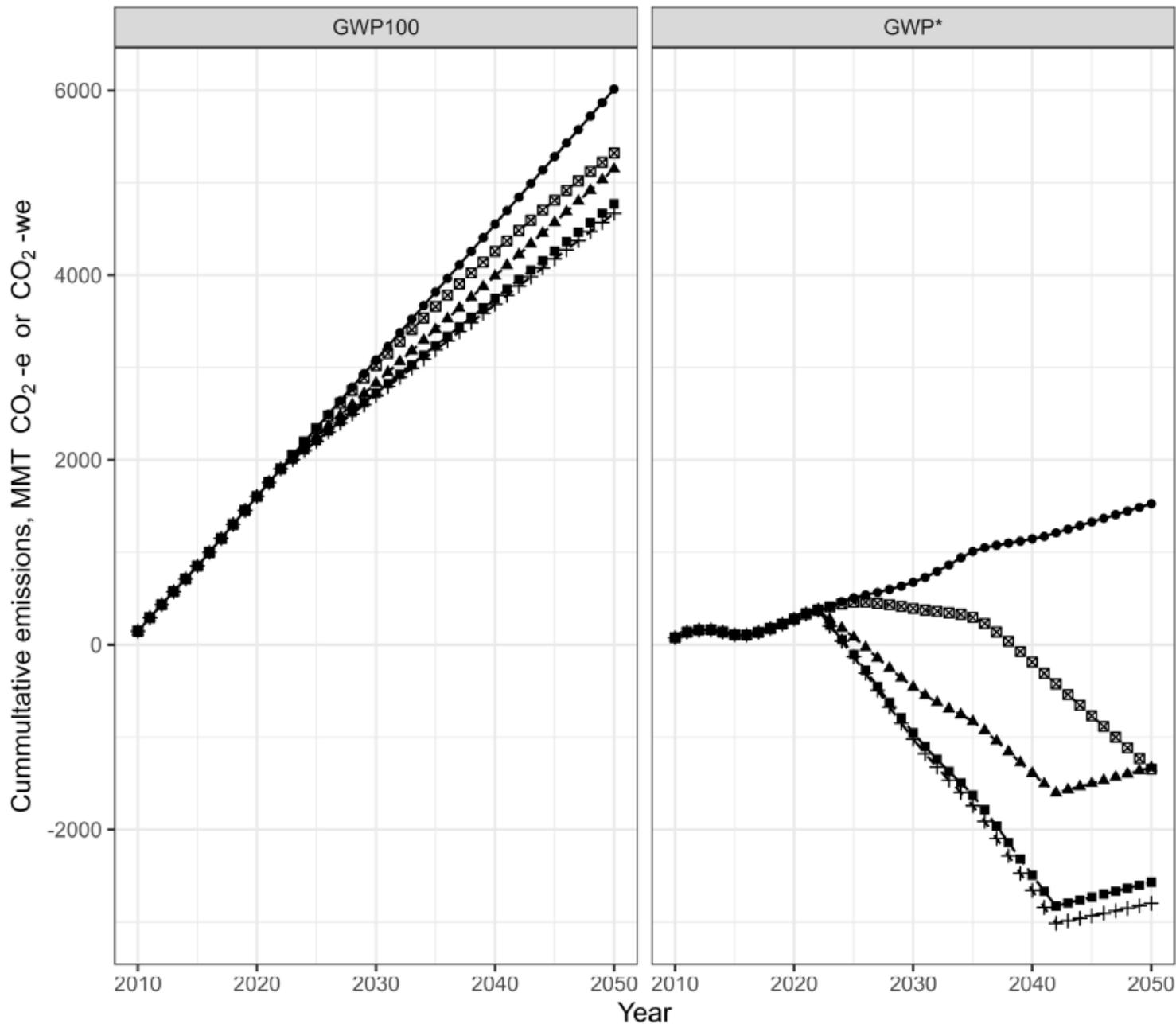


年次に伴う乳生産からのGWP*に基づく温暖化換算メタン排出量(CO_{2we})

肉用肥育生産 GWP*を利用



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})



- シナリオ1**: 消化管内発酵由来のメタンのみを23%削減
- シナリオ2**: 消化管内発酵由来のメタンのみを33%削減
- シナリオ3**: シナリオ2に加えて堆肥由来メタンと亜酸化窒素を30%削減
- シナリオ4**: 2040年に2022年と比べて消化管由来メタンを23%削減

Scenario

- BAU
- ▲ Scenario 1
- Scenario 2
- +
- Scenario 3
- Scenario 4

Thompson LR, Beck MR, Larson H, Rowntree JE, Place SE and Stackhouse-Lawson KR (2025) Is climate neutral possible for the U.S. beef and dairy sectors? *Front. Sustain. Food Syst.* 9:1556433. doi: 10.3389/fsufs.2025.1556433

LCA (Life Cycle Assessment)のはじまり

- 1969年、コカコーラ社の委託で、アメリカミッドウエスト研究所が飲料容器（リターナブルガラス瓶）を対象として実施したのが、最初
- LCAの国際規格がISO14040～14043として発行

畜産分野におけるLCAの応用

Ogino A, Kaku K, Osada T, Shimada K. 2004. Environmental impacts of the Japanese beef-fattening system with different feeding lengths as evaluated by a life-cycle assessment method. *Journal of Animal Science*, 82:2115–2122.

Ogino A, ORITO H, Shimada K, Hirooka H. 2007. Evaluating environmental impacts of the Japanese beef cow-calf system by the life cycle assessment method. *Animal Science Journal* 78:424–432.

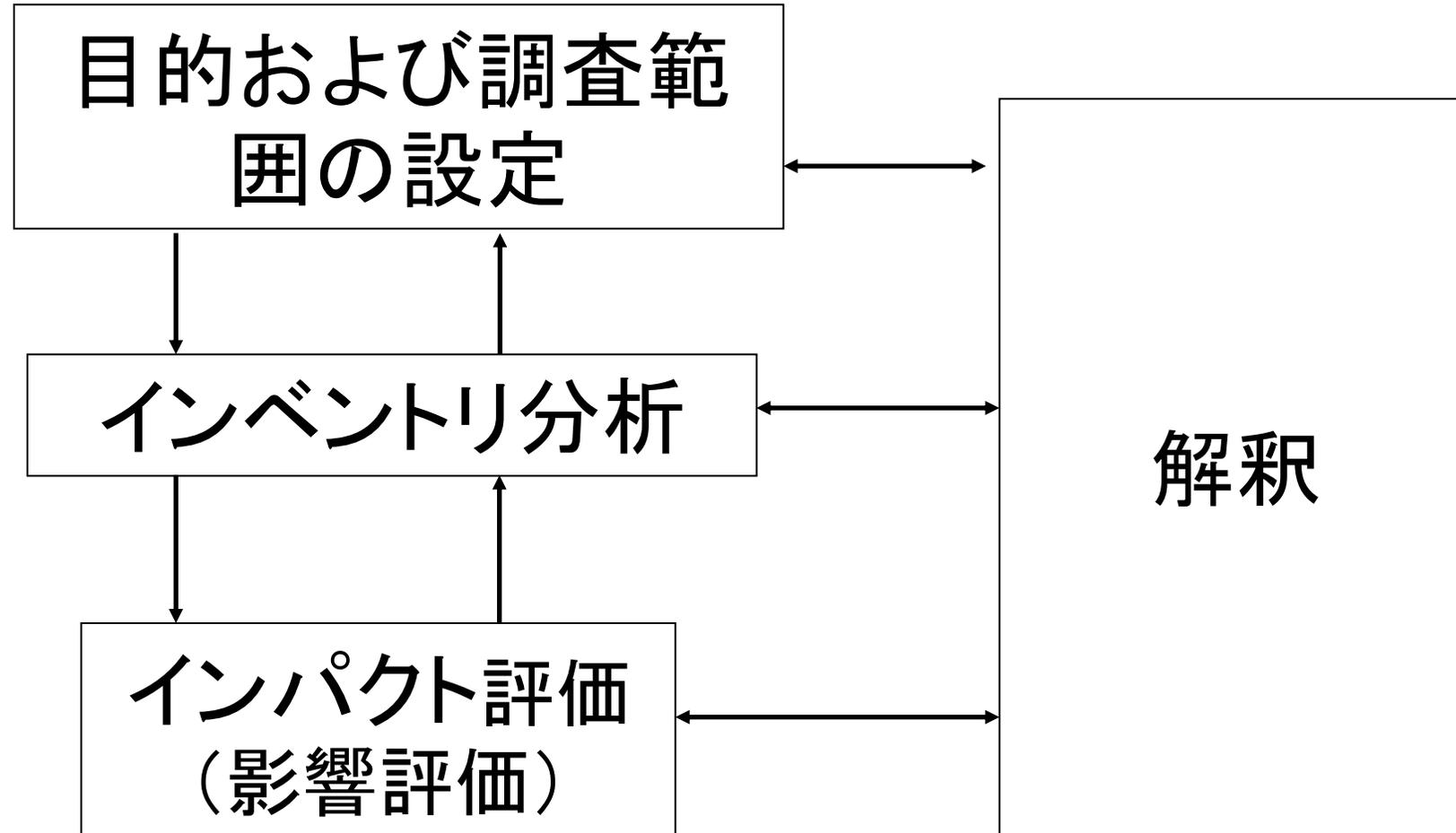
日本語の総説

林 孝. 1999. 家畜生産におけるLCA -肉牛生産を中心とした問題の整理-. *農林水産技術研究ジャーナル*. 22(10):26–32.

荻野 暁史. 2008. 畜産におけるライフサイクルアセスメント研究. *日本LCA学会誌* 4:119–123.

瀬戸口 暁, 大石 風人, 荻野 暁史, 広岡 博之. 2023. 畜産分野におけるライフサイクルアセスメント(LCA)研究の展開と将来展望. *日本畜産学会報* 94:397–411.

国際規格に基づいたLCAの実施手順



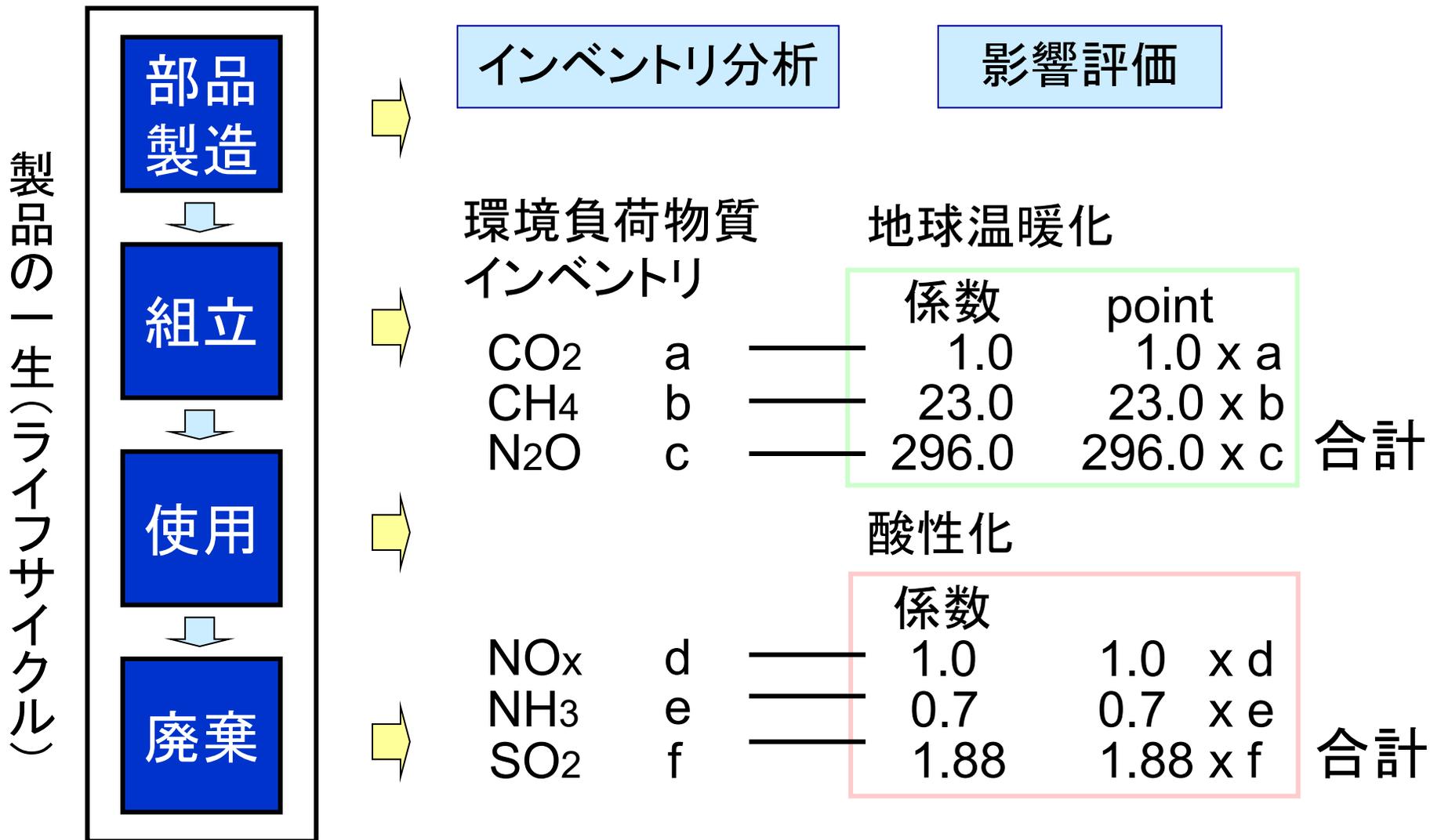
インベントリ分析とは

- データの収集
- 各単位プロセスにおける投入資源量および環境負荷物質排泄量(原単位)の調査
- あらかじめ設定された機能単位(重量、牛1頭、牛肉1kgなど)に関連付けされた産物量(プロセス量)の算出
- プロセス量に原単位を乗じて、各単位プロセスにおける負荷物質排泄量の算定
- 各プロセスを総和

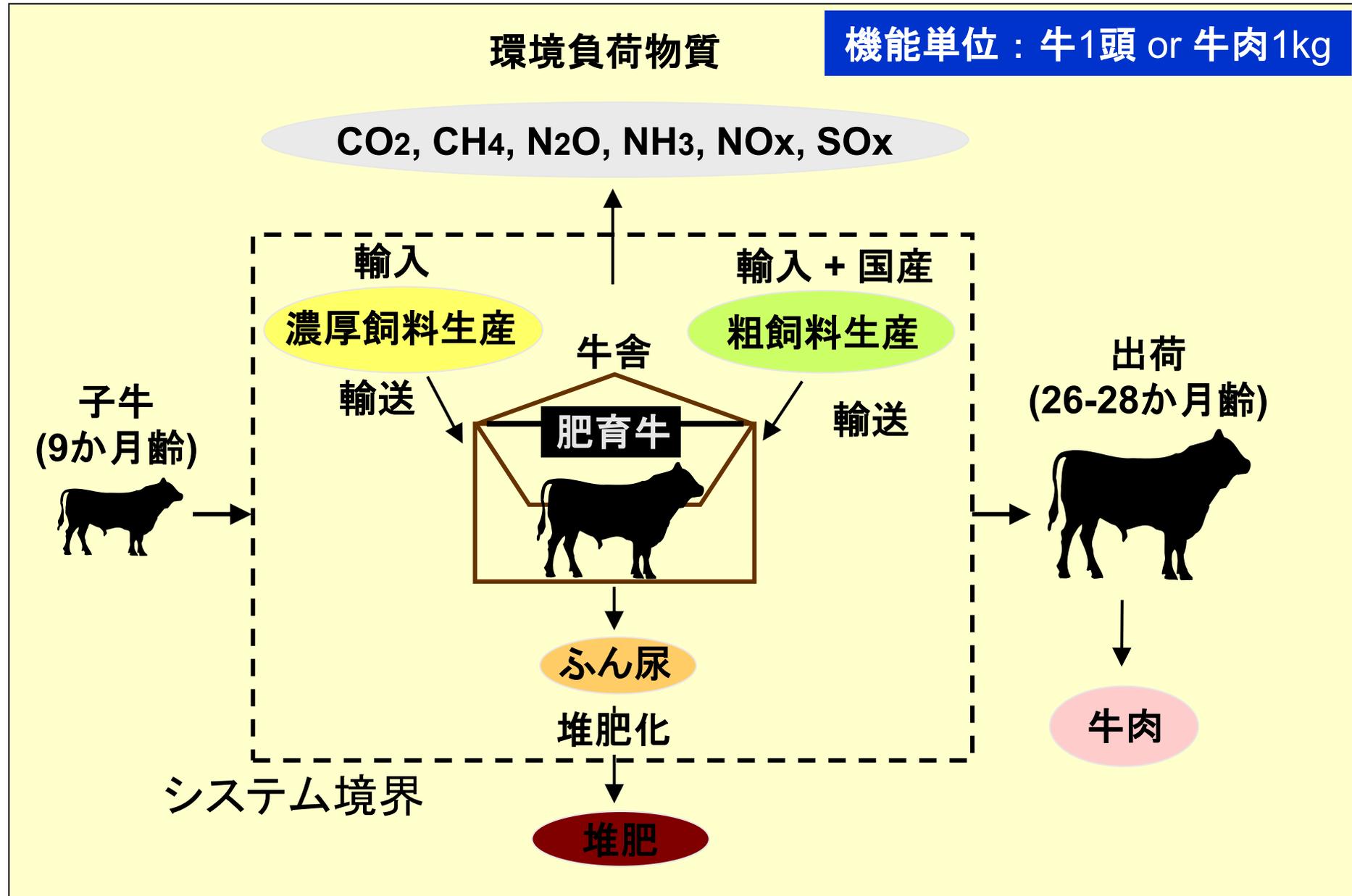
インパクト評価

- 環境負荷を各環境影響カテゴリーに分類
- 重み付け値を乗じて、基準物質質量に換算
- 影響を定量化
- **地球温暖化** ($\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$)、**酸性化** ($\text{NO}_x, \text{SO}_2, \text{NH}_3$)、**富栄養化** ($\text{NO}_x, \text{NH}_3, \text{T-N}, \text{T-P}$)

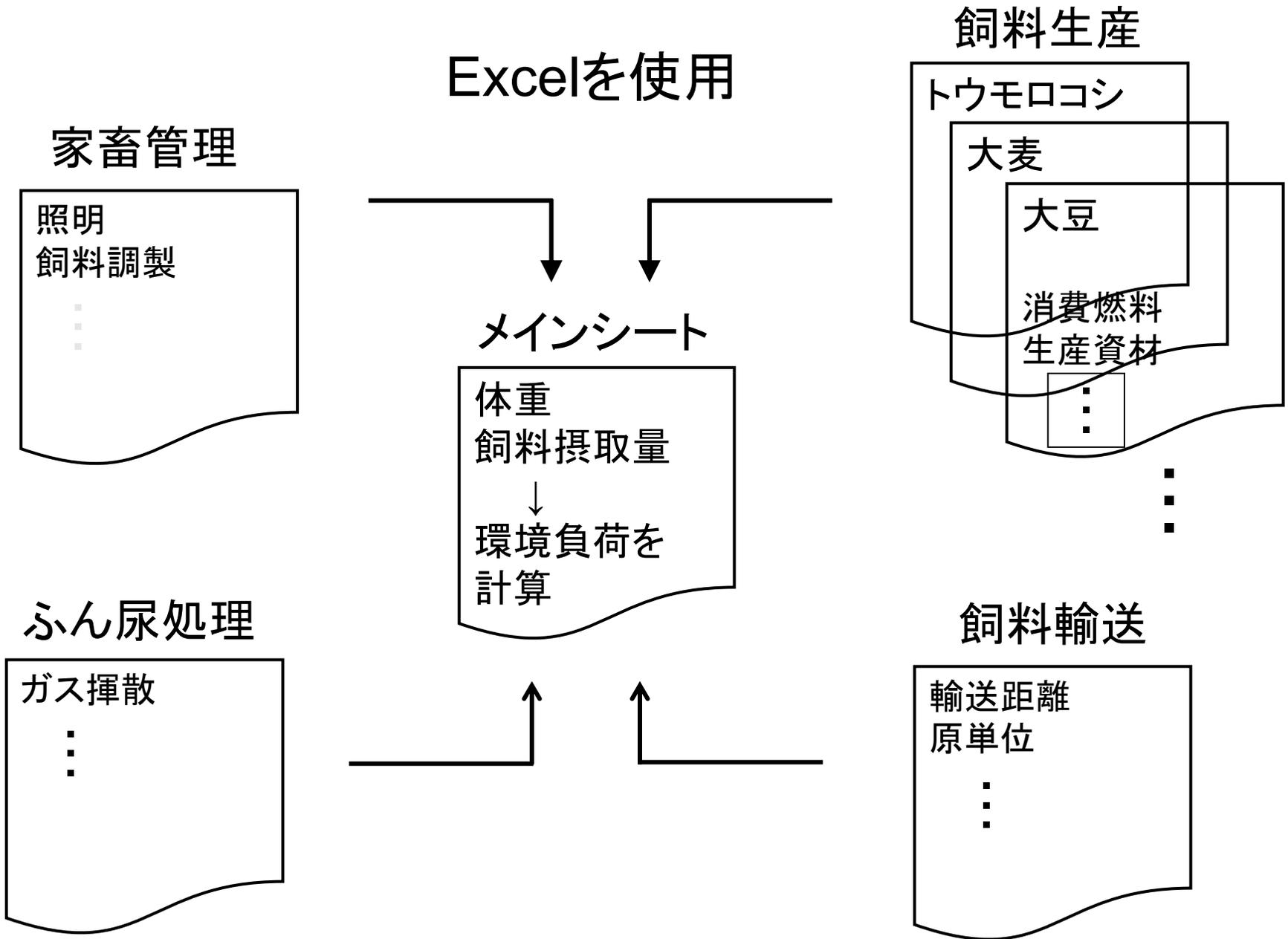
LCAとは？



今回解析した肉用牛肥育システムの概要

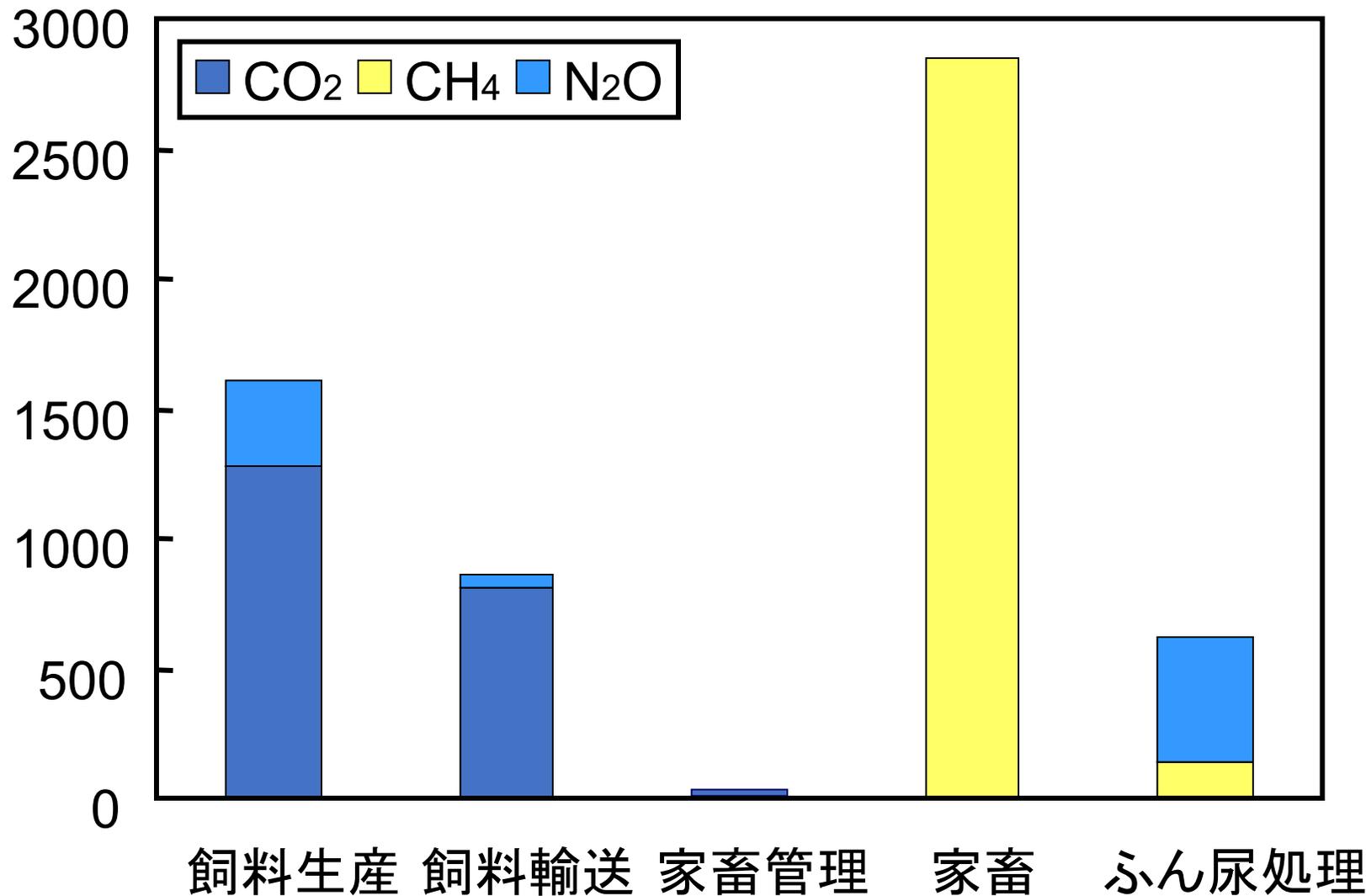


実際の計算方法

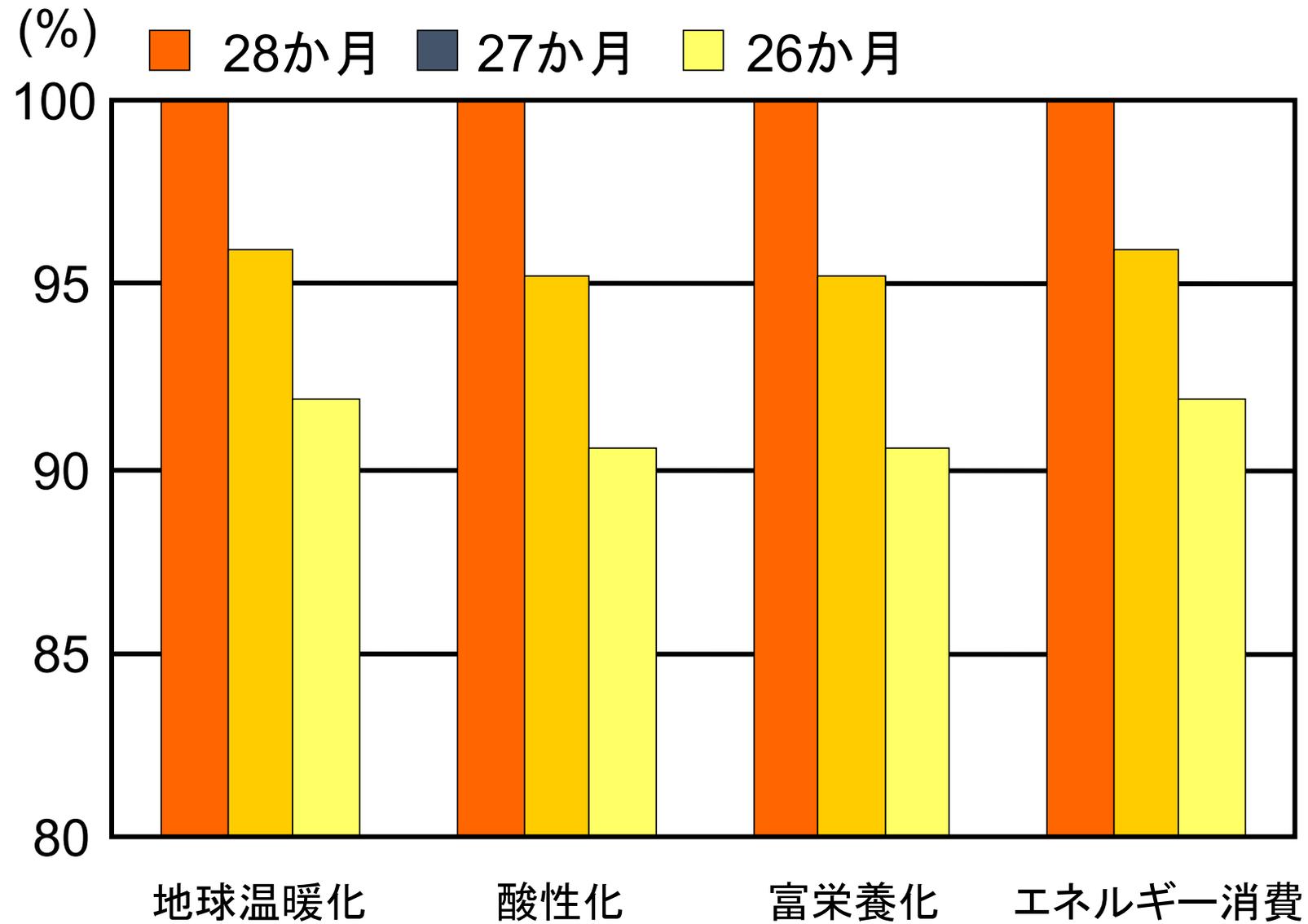


大型牛1頭あたりの地球温暖化への寄与

(CO₂換算kg)

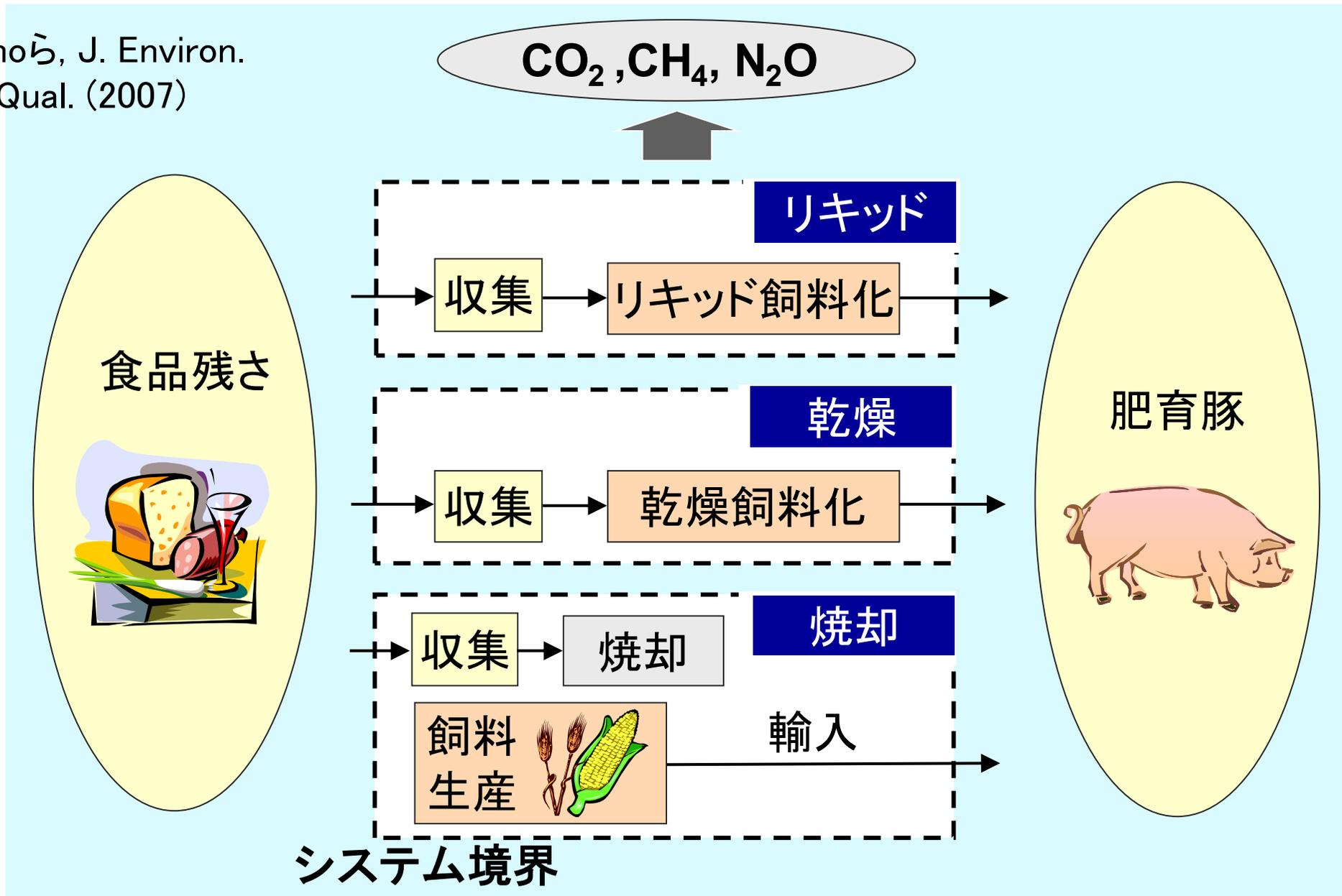


肥育期間が環境負荷におよぼす影響

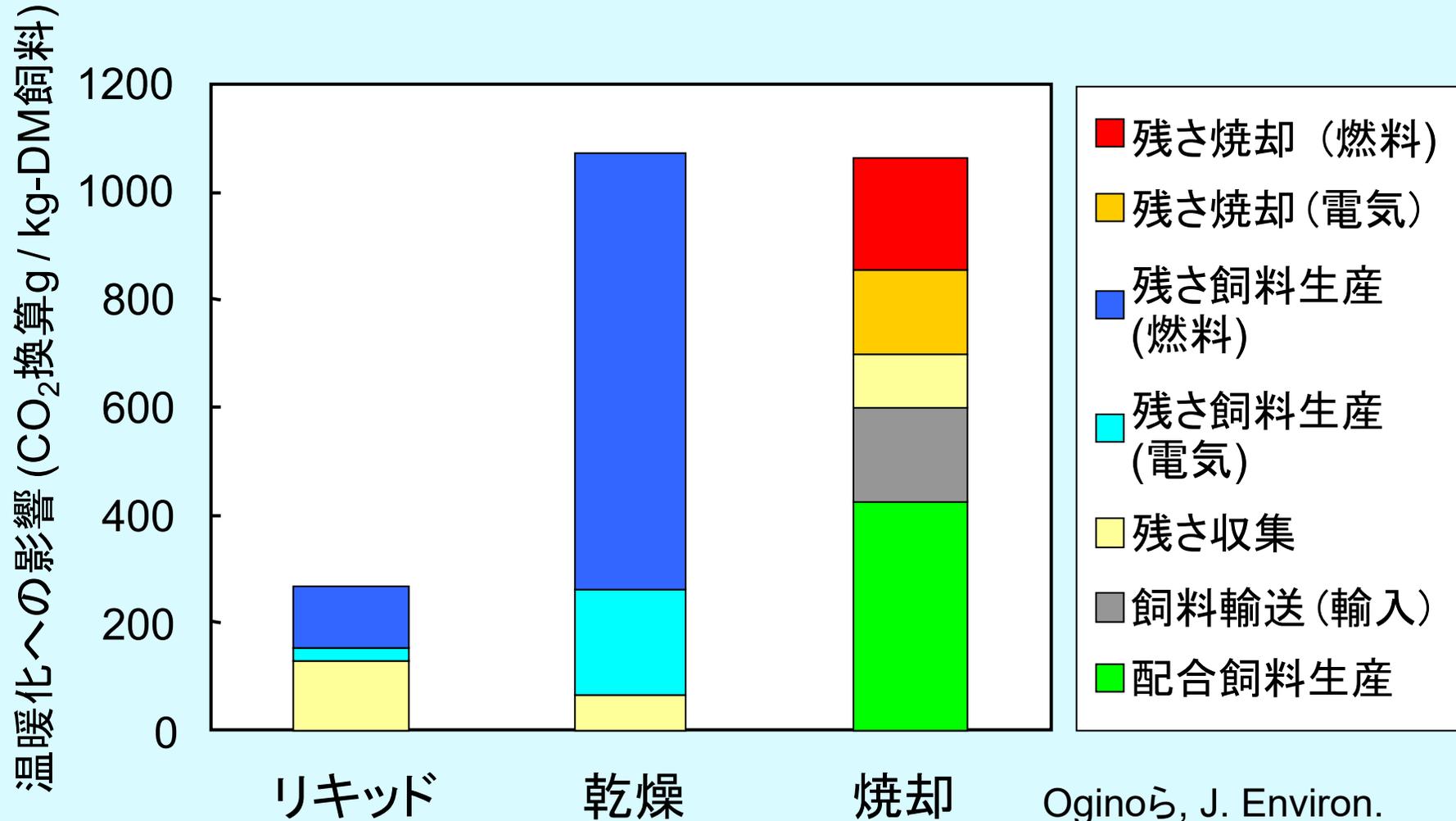


食品残さ処理・利用システム

Oginoら, J. Environ.
Qual. (2007)



食品残さ処理・利用における環境影響



Oginoら, J. Environ. Qual. (2007)

SDGsと家畜生産



1. 家畜は農村部の農家では重要な資産で家計には重要な役割を果たしている。
2. 家畜は食料と栄養に対して直接的間接的に貢献している
3. 人間、動物、環境の健康は密接につながっていると考える考え方(One Health)は人々の健康と家畜の生産性の維持に役立つ
4. 畜産物由来の食料は所得の向上と教育への出費に役立つ
5. 小家畜は女性のエンパワーメントに貢献する
7. 家畜の堆肥はバイオガスとして再生可能なエネルギーを創出する
8. 家畜生産は13億人の雇用を生み出し、国家経済と労働力の創出に貢献している
9. 畜産物の加工産業は、新興国では成長産業である
10. 畜産の発展は所得の増加をもたらす、不平等格差を減らす
12. 家畜全体の消費は生産者により良い収入をもたらす、全員の栄養の向上に寄与する
13. 小家畜による環境にやさしく再生的な生産システムは、エミッションを減らす
15. 家畜による放牧は、牧草管理、野生動物の保護、土壌の健全化に貢献する

まとめ

1. 本講演では、家畜由来のメタンの排出について、わが国における現状とその発生メカニズム、低減のためのアプローチについて紹介した。
2. 近年、畜産分野で環境評価手法としてよく用いられているライフサイクルアセスメント(LCA)法について紹介し、演者らの研究を紹介した。
3. 少なくとも日本の酪農や肥育生産からの消化管内発酵によるメタンは、最近の指標を用いた分析では地球温暖化にマイナスに影響しているとは言えない。