

総 説

反芻家畜に由来するメタンガス排出抑制技術の新しい展開 — 育種改良の可能性 —

寺田 文典*

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構畜産研究部門 茨城県つくば市池の台2 〒305-0901
旧所属 東北大学大学院農学研究科 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 〒980-8572

キーワード：育種改良 温室効果 反芻家畜 メタン

New development of technology to mitigate methane emission from ruminants – Possibility of breeding improvement –

Fuminori Terada

Institute of Livestock and Grassland Science, NARO.
2 Ikenodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0901, Japan

Keywords : Animal breeding, Greenhouse effect, Methane, Ruminant

2020年5月7日受付, 2020年5月8日受理

はじめに

2015年に開催された第21回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）では、世界各国が協力して温暖化防止に向けた取り組みを行うことが合意された（UNFCC, 2016）。わが国では2016年に本協定を締結、地球温暖化対策計画を策定して2030年度の目標として2013年度比で26%の温室効果ガス削減を掲げ、現在、各分野で取り組みが進められている。

農業分野は温室効果が大きいメタンガスや一酸化二窒素の主要な排出源となっていることから、その削減技術の開発が急がれている（農林水産省, 2017）。わが国の農業分野から発生するメタンガスのおよそ2割は牛のルーメン発酵に由来するものであるとされており（図1）、一

日一頭当たりの発生量は乳牛が圧倒的に多いものの、産業からの発生量としてみると、飼養頭数の関係から乳牛と肉牛でそれぞれ1/3程度を占めている状況である（国

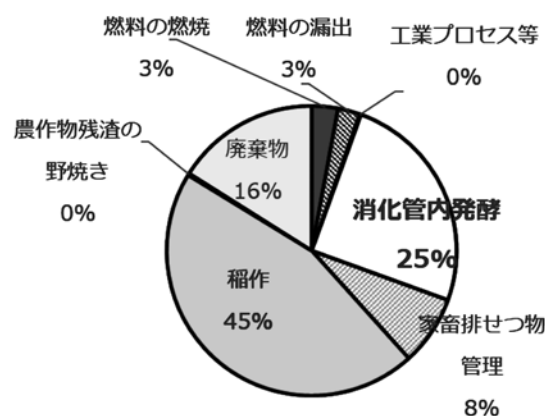


図1. 日本のメタン排出量
(29,696 ktCO₂換算、2018年度確報値) の発生源別割合

日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2018年度）
国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス（GIO）2020
http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/data/data-updated_7gas_j.html より作成

* 連絡者：寺田 文典（てらだ ふみのり）
（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構畜産研究部門）
〒305-0901 茨城県つくば市池の台2
TEL, 029-838-8655
E-mail: teradaf832@affrc.go.jp

立環境研究所, 2020)。このように発生量が多い反芻動物の消化管内発酵由来のメタンガスを抑制する技術として、①ルーメン微生物叢の制御、②栄養管理技術の改善によるメタン産生量の抑制、③生産性の向上による生産物当りの発生量の低減、④育種改良による抑制などが提案されている (Knapp ら, 2014)。

ルーメン微生物叢の制御技術として、メタン産生菌のメタン合成系を阻害する3-ニトロオキシプロパノール (Jayanegara ら, 2018) 等の活用、抗菌活性を有するアナカルド酸 (カシューナッツ殻油) (真貝ら, 2014) や中鎖脂肪酸 (Machmüller, 2006) による微生物叢の制御、ハロゲン化物が豊富なカギケノリ (海藻) の給与による抑制 (Kinley ら, 2016) などの技術に加えて、最近では、ルーメンからのメタン産生量の多少を特徴づけるルーメン微生物叢と個体の遺伝的特性との関連性に関する研究 (Difford ら, 2018) も開始されている。

栄養管理技術の改善によるメタン産生量の低減については、良質粗飼料の多給、適切な粗飼料濃厚飼料比の維持 (Hristov ら, 2013) のほか、ルーメン内で発生する水素のメタンに代わる処理系としてのフマル酸 (Bayaru ら, 2001) の給与や不飽和脂肪酸カルシウム (柴ら, 2003)、硝酸塩 (Lee と Beauchemin, 2014) の活用なども提案されている。

しかしながら、これらの技術の実用化に関しては、必ずしも順調には進捗していない。なぜならメタンの抑制技術にコストをかける経済合理性が生産者側にとって十分には見出せていないからである。温室効果ガス抑制のための炭素税の創設や環境保全型農業直接支払い制度のような仕組みがさらに拡充すれば、これらの技術も各段に普及するものと思われるが、パリ協定にかかげる目標を達成するためにはそれを待つだけの時間的な余裕はな

い。そのため、今は可能性のある方策を積極的に試みていくべき時であり、短期的には生産性の改善により生産物当りのメタン産生量の抑制を目指すこと、長期的にはメタン産生量が少ない牛を育種していくことが重要になる。

たとえば、家畜改良増殖目標 (農林水産省, 2015) に示されている乳牛の改良目標が達成されると、わが国の乳牛からのメタン排出量は乳生産量が維持された場合との前提で8%削減されることになる。さらに、育種改良による効果は生産性の改善による効果だけでなく、メタン産生によるエネルギーロスを抑えた、すなわち、飼料利用効率の高い牛を育種することによってさらに加速されることが期待される。

メタン産生関連形質の遺伝的パラメータ

表1には、最近報告されたメタン産生関連形質の遺伝率を示した。一日当たりメタン産生量の遺伝率は0.1~0.6と明らかに育種改良が可能な形質であることがわかる。また、実際の選抜に際して重要な指標となる生産物あたりのメタン産生量、乾物摂取量当たりのメタン産生量についてもほぼ同様の値であった。

次に問題となるのは経済形質との遺伝相関である。肉用牛の経済形質についてみると、黒毛和種牛について検討した Uemoto ら (2020b) の報告ではメタン産生量と体重の間には強い遺伝相関が認められるが、皮下脂肪厚や脂肪交雑については弱い遺伝相関が認められるにとどまり、一方で、余剰飼料摂取量との間には中程度の遺伝相関が認められた。乳用牛においてもメタン産生量と乾物摂取量、乳量との遺伝相関では全般に中程度の値が認められているが、メタン産生量と繁殖成績や健全性に

表 1. メタン産生関連形質の遺伝率

	メタン産生量			(± 標準誤差)
	1 日当たり	乾物摂取量当たり	生産物当たり	メタン産生量の測定・推定方法
肉用牛				
Hayes ら (2016)	0.27 ± 0.06	0.22 ± 0.06		実測 (呼吸試験装置)
Uemoto ら (2020b)	0.59 ± 0.05	0.59 ± 0.05		推定 (DMI)
乳用牛				
de Haas ら (2011)	0.35 ± 0.12		0.58 ± 0.15	推定 (DMI)
Pickering ら (2015)	0.13 ± 0.04			推定 (DMI)
van Engelen ら (2015)		0.12 ± 0.06 ~ 0.44 ± 0.10		推定 (脂肪酸)
Lassen ら (2016)	0.21 ± 0.06		0.21 ± 0.06	実測 (AMS)
Pszczola ら (2017)	0.27 ± 0.09			実測 (AMS)
Zetouni ら (2018)	0.25 ± 0.07			実測 (AMS)
Breider ら (2019)	0.12 ± 0.16 ~ 0.45 ± 0.11			実測 (AMS)
Bittante と Cecchinato (2020)	0.17	0.25	0.12	推定 (脂肪酸)

呼吸試験装置, 呼吸試験チャンバーを用いた測定; DMI, 乾物摂取量からの推定; AMS, 搾乳ロボットを用いた Sniffer 法による測定; 脂肪酸, 脂肪酸組成に基づく推定

係る形質等との遺伝相関は弱いものにすぎないとの報告 (Zetouni ら, 2018) もある。メタン産生形質の遺伝的改良と経済形質の改良は必ずしも矛盾するものではないことが示されている。

ところで、メタン産生を制御する遺伝子とは何なのだろうか。ゲノムワイド関連解析結果をみるといくつかの遺伝子座の影響が指摘されているが、それらは必ずしも大きいものではなく、メタン産生能については多くの遺伝子による総合的な効果を想定することが妥当なようである (Hayes ら, 2016; Pszczola ら, 2018; Uemoto ら, 2020b)。

メタン産生量を実測する

実際にメタン産生量の少ない牛を育種するためには、メタン産生量という表現形質を継続的に多頭数を対象として簡易に測定できる方法を開発する必要がある。現在、乳牛、肉用牛のメタン産生量を実測するために行われている測定方法には以下のものがある。

1) 間接式呼吸試験装置

大家畜のメタン産生量の測定は、家畜栄養・飼料学分野でエネルギー出納試験において従来から用いられていた呼吸試験チャンバーによる方法が基本である (写真1)。この方法は、メタン産生量をチャンバーから流出するガスの流量と出入するガス中のメタンガス濃度差から求める手法である。わが国における大家畜用の呼吸試験チャンバーを活用した研究は、農林省畜産試験場に1952年に建設されたものに始まり、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設置され、日本飼養標準の設定、改定をはじめとする大家畜の栄養研究の充実に成果を上げた。しかし、施設の建設費が高額であるだけでなく、維持コスト (金銭的、労力的) も大きく、現在国内で稼働しているのは農研機構畜産研究部門 (つくば) に設置されている呼吸試験装置のみといった状況にある。そのため、現在では、比較的低コストで設置・運用が可能な、本法の簡便法である飼槽部分のみを気密にしたフードシステムが世界的にも多く使われている (写真2)。

2) 六フッ化硫黄を用いたトレーサー法 (SF6法)

Johnson ら (1994) によって開発された六フッ化硫黄 (SF6) をインデックスガスとして用いる SF6法は、特段の施設を必要としないことや放牧などの現場でも利用が可能であるといった利点があり、家畜由来メタン産生量の測定手法として多くの場面で用いられている。こ

の方法は、ルーメン内にSF6ガスを少量ずつ放出するカプセルを留置し、鼻先に設置した簡易な吸引装置により連続的にガスを採取し、サンプリングしたガス中のメタンとSF6の比率にSF6の1日当たりの放出量を乗ずることによって算出するものである。

3) 簡便法 (Sniffer法、GreenFeed法)

1、2) の手法は、メタン産生量をそれぞれの条件下で精密に測定することを主眼としたものであるが、育種改良のように多頭数のデータを収集する目的には、必ずしも適合していない。そのため、現在、搾乳ロボット内での呼気ガスの測定成績から推定する Sniffer法 (Madsen ら, 2010) や放牧場で飼料給餌の際にメタン産生量を測定する手法 (GreenFeed法) (Hristov ら, 2015) などが注目されている。前者は、搾乳ロボットに進入した搾乳

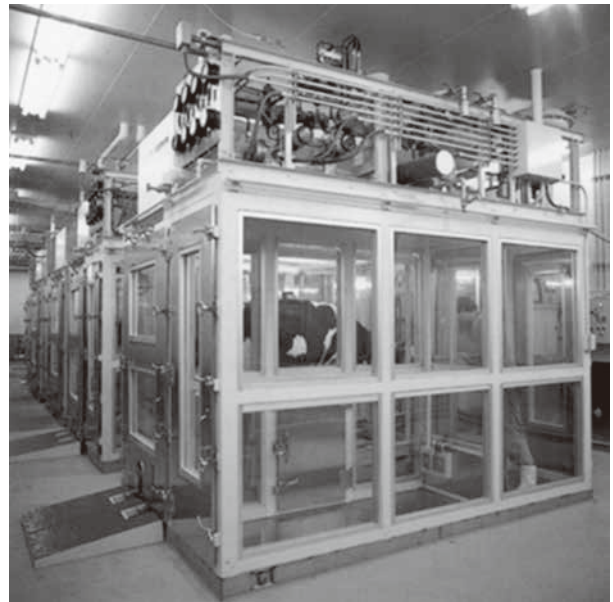


写真1. 間接式開放型呼吸試験チャンバー
(農研機構畜産研究部門 (つくば))



写真2. 呼吸試験用の簡易フード
(農研機構畜産研究部門 (つくば))

牛を対象として、飼槽近辺のガスを採取し、メタンガスと炭酸ガスを同時に分析し、両者の比と炭酸ガスの1日あたりの排出量（推定値）を掛け合わせることで推定するインデックス法である。後者は、移動式のフィードステーションにおいて濃厚飼料給与中のメタンガス産生量を実測する短時間の測定法である。

いずれの方法も多頭数のデータ収集を可能とするものの、1日の総メタン産生量の測定精度は必ずしも良くない。しかし、従来法に比べて、簡易であること、繰り返し測定することが容易であることなどの利点がある。なお、Sniffer法については、わが国においても農林水産省委託プロジェクト研究において、実用化が進められている。

メタン産生量を推定する

メタン産生量を実測することが育種改良を行う際の最も基本的な手法であるが、そういったシステムの開発は前項で紹介したように世界各地において試行されている段階である。これに代わる手段として、メタン産生量を間接的に推定することにより改良を進める可能性も検討されている。そのための手法としては、飼養成績等に基づく推定式やメタン産生関連生理指標の活用などがある。

1) メタン産生量推定式

メタン産生量の推定式については多くの提案がなされており、乾物摂取量や飼料成分を変数とした重回帰分析によるものや、消化特性を考慮するためにメカニスティックモデルを活用したものなどがある（Kebreabら, 2008）。しかし、育種現場やインベントリの算出で利用することを前提とした場合、現場で収集可能な情報に基づいたできるだけ簡便な手法を考える必要がある。そういった観点から、Shibataら（1993）は乾物摂取量を用いてわが国のインベントリ算出のための推定式を提案している。また、Uemotoら（2020a）は、我が国の飼養方式を前提とした肉用牛に特化した推定式を提案している。

メタン産生量を乾物摂取量から推定できるということは、メタン産生量抑制をめざす育種改良が飼料利用効率の改善をめざす育種改良と共通する要因を多く含んでいることを示唆している。そのため、飼料効率の改善とメタン産生抑制の関係について着目した研究も報告されている（Hegartyら, 2007）。

2) メタン産生関連生理指標の活用

メタン産生に関連した生理指標として、乾物摂取量、乳成分、ルーメン液性状およびルーメン微生物叢に関

する情報などが検討されている（de Haasら, 2017；Negussieら, 2017）。ルーメン液性状およびルーメン微生物叢については、メタン産生と関連が深いことから注目されるが、現場レベルでの測定項目として直接活用することには困難が伴う。乳成分のメタボローム解析結果（Antunes-Fernandeら, 2016）も報告されているが、これらの知見を実用面で活用するには至っていない。乳脂肪酸組成について、メタン産生量の指標として活用することも試みられている（van Lingenetら, 2015）。乳脂肪酸組成がエネルギー充足度を反映することを考えるとメタン産生の指標として活用することは合理的であるが、本法を広く活用していくためには、乳脂肪酸の簡易な測定方法の開発と給与飼料の影響を除去する方策を検討する必要がある。前者については、中赤外分析法による乳脂肪酸組成の迅速分析法が実用化されつつあることから（Soyeurtら, 2011）、メタン関連形質の推定方法としての利用の可能性は大いにあるものと考えられる。

メタン排出抑制技術研究の今後の展開方向

反芻家畜由来のメタン産生量の抑制を目指すことは地球温暖化の緩和を図るために重要な課題であり、畜産業の持続的な展開を支える技術開発であると言える。しかし、反芻家畜に由来する温室効果ガスの産生抑制を図る際には、グローバルな食糧問題や貧困問題等の解決策も念頭に置いて検討することが必要であり、複合的な視点から取り組まなければならない。これまでの研究開発は1頭当たりの産生量抑制を図る技術開発が主流であったが、今後はコストパフォーマンスも視野に入れた、経営体からあるいは地域（国）レベルでの効率的な排出抑制シナリオを描くことが求められている。そのための研究として、LCA研究は有望なツールになるものと考えられる（Gerberら, 2013）。

また、技術を普及させるためには、畜産農家の導入意欲を高める方策が必要であり、行政的には技術導入の支援策が、流通面からは環境問題に対する生産者の取り組みが消費者から評価されるような仕組み作りが重要であろう。本総説で取り上げた育種改良方策は、普及面からは有望であるものの、即効性には乏しいことから、一日も早くそのスタートを切ることが望ましいことを付記しておきたい。

謝 辞

本総説で紹介したメタン低減型育種に関する我が国の研究成果は、農林水産省委託プロジェクト研究「農業分野における気候変動緩和技術の開発 畜産分野における気候変動緩和技術の開発」において実施されたものである。

引用文献

- Antunes-Fernandes EC, van Gastelen S, Dijkstra J, Hettinga KA, Vervoort J. Milk metabolome relates enteric methane emission to milk synthesis and energy metabolism pathways. *J. Dairy Sci.*, 99:6251–6262. 2016
- Bayaru E, Kanda S, Kamada T, Itabashi H, Andoh S, Nishida T, Ishida M, Itoh T, Nagara K, Isobe Y. Effect of Fumaric Acid on Methane Production, Rumen Fermentation and Digestibility of Cattle Fed Roughage Alone. *Anim. Sci. J.*, 72:139-146. 2001.
- Bittante G, Cecchinato A. Heritability estimates of enteric methane emissions predicted from fatty acid profiles, and their relationships with milk composition, cheese-yield and body size and condition. *Ital. J. Anim.*, 19:114–126. 2020.
- Breider IS, Wall E, Garnsworthy PC. Short communication: Heritability of methane production and genetic correlations with milk yield and body weight in Holstein-Friesian dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 102:7277–7281. 2019.
- de Haas Y, Windig JJ, Calus MPL, Dijkstra J, de Haan M, Bannink A, Veerkamp RF. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *J. Dairy Sci.*, 94:6122–6134. 2011.
- de Haas Y, Pszczola M, Soyeurt H, Wall E, Lassen J. Invited review: Phenotypes to genetically reduce greenhouse gas emissions in dairying. *Journal of Dairy Science*. 100:855-870. 2017
- Difford GF, Plichta DR, Løvendahl P, Lassen J, Noel SJ, Højberg O, Wright AG, Zhu Z, Kristensen L, Nielsen HB, Guldbbrandtsen B, Sahana G. Host genetics and the rumen microbiome jointly associate with methane emissions in dairy cows. *PLOS Genetics*. 14: e1007580. 2018.
- Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, Tempio G. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 2013.
- Hayes B, Donoghue KA, Reich CM, Mason BA, Bird-Gardiner T, Herd RM, Arthur PF. Genomic heritabilities and genomic estimated breeding values for methane traits in Angus cattle. *J. Anim. Sci.*, 94:902–908. 2016
- Hegarty RS, Goopy JP, Herd RM, McCorkell B. Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production. *J. Anim. Sci.*, 85:1479–1486. 2007.
- Hristov AN, Oh J, Firkins JL, Dijkstra J, Kebreab E, Waghorn G, Makkar HPS, Adesogan AT, Yang W, Lee C. SPECIAL TOPICS-Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *J. Anim. Sci.*, 91:5045-5069. 2013.
- Hristov AN, Oh J, Giallongo F, Frederick T, Weeks H, Zimmerman PA, Harper MT, Hristova RA, Zimmerman RS, Branco A.F. The Use of an Automated System (GreenFeed) to Monitor Enteric Methane and Carbon Dioxide Emissions from Ruminant Animals. *J. Vis. Exp.*, 103:e52904. 2015.
- Jayanegara J, Sarwono KA, Kondo M, Matsui H, Ridla M, Laconi EB, Nahrowi. Use of 3-nitrooxypropanol as feed additive for mitigating enteric methane emissions from ruminants: a meta-analysis. *Ital. J. Anim. Sci.*, 17:650–656. 2018.
- Johnson K, Huyler M, Westberg H, Lamb B, Zimmerman P. Measurement of Methane Emissions from Ruminant Livestock Using a SF6 Tracer Technique. *Environ. Sci. Technol.*, 28:359-362. 1994.
- Kebreab E, Johnson KA, Archibeque SL, Pape D, Wirth T. Model for estimating enteric methane emissions from United States dairy and feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 86:2738–2748. 2008.
- Kinley RD, Nys R, Vucko MJ, Machado L, Tomkins NW. The red macroalgae *Asparagopsis taxiformis* is a potent natural antimethanogenic that reduces methane production during in vitro fermentation with rumen fluid. *Anim. Prod. Sci.*, 56:282–289. 2016.
- Knapp JR, Laur GL, Vadas PA, Weiss WP, Tricarico JM. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *J. Dairy Sci.* 97:3231–3261. 2014.
- 国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) 編. 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2020 年. 2020. https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/unfccc/material/NIR-JPN-2020_J.pdf
- Lassen J, Løvendahl P. Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using

- noninvasive methods. *J. Dairy Sci.*, 99:1959–1967. 2016.
- Lee C, Beauchemin KA. A review of feeding supplementary nitrate to ruminant animals: nitrate toxicity, methane emissions, and production performance. *Can. J. Anim. Sci.*, 94: 557-570. 2014.
- Machmüller A. Medium-chain fatty acids and their potential to reduce methanogenesis in domestic ruminants. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 112:107–114. 2006.
- Madsen J, Bjerg BS, Hvelplund T, Weisbjerg MR, Lund P. Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants. *Livest. Sci.*, 129:223-227. 2010.
- Negussie E, de Haas Y, Dehareng F, Dewhurst RJ, Dijkstra J, Gengler N, Morgavi DP, Soyeurt H, van Gastelen S, Yan T, Biscarin F. Invited review: Large-scale indirect measurements for enteric methane emissions in dairy cattle: A review of proxies and their potential for use in management and breeding decisions. *J. Dairy Sci.*, 100:2433–2453. 2017
- 農林水産省. 家畜改良増殖目標. 2015. https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kikaku/lin/l_hosin/pdf/h27_katiku_mokuhyo.pdf
- 農水産省. 農林水産省地球温暖化対策計画. 2017. https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/s_ondanka/attach/pdf/senryaku-2.pdf
- Pickering NK, Chagunda MGG, Banos G, Mrode R, McEwan JC, Wall E. Genetic parameters for predicted methane production and laser methane detector measurements. *J. Anim. Sci.*, 92:11–20. 2015
- Pszczola M, Rzewuska K, Mucha S, Strabe T. Heritability of methane emissions from dairy cows over a lactation measured on commercial farms. *J. Anim. Sci.*, 95:4813–4819. 2017.
- Pszczola M, Strabel T, Mucha S, Sell-Kubiak E. Genome-wide association identifies methane production level relation to genetic control of digestive tract development in dairy cows. *Sci. Rep.* 8:15164 | DOI:10.1038/s41598-018-33327-9. 2018
- 柴伸弥, 常石英作, 松崎正敏, 塩谷繁. 褐毛和種肥育牛に対するアマニ油脂肪酸カルシウムの給与がメタン発生と肥育成績に及ぼす効果. *日畜会報*, 74:37-42. 2003.
- Shibata M, Terada F, Kurihara M, Nishida T, Iwasaki K. Estimation of methane production in ruminants. *Anim. Sci. Technol.*, 64:790-796. 1993.
- 真貝拓三, 永西修, 三森眞琴, 長嶋協, 小林泰男. カシューナッツ殻液を利用した乳用牛からのメタン低減技術. *栄養生理研究会報*. 58:45-51. 2014.
- Soyeurt H, Dehareng F, Gengler N, McParland S, Wall E, Berry DP, Coffey M, Dardenne P. Mid-infrared prediction of bovine milk fatty acids across multiple breeds, production systems, and countries. *J. Dairy Sci.*, 94:1657–1667. 2011.
- The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. 2016. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>
- Uemoto Y, Ogawa S, Satoh M, Abe H, Terada F. Development of prediction equation for methane-related traits in beef cattle under high concentrate diets. *Anim Sci J.* 2020;91:e13341. <https://doi.org/10.1111/asj.13341>. 2020a.
- Uemoto Y, Takeda M, Ogino A, Kurogi K, Ogawa S, Satoh M, Terada F. Genetic and genomic analyses for predicted methane-related traits in Japanese Black steers. *Anim. Sci. J.*, 2020;91 in press 2020b.
- van Engelen S, Bovenhuis H, Dijkstra J, van Arendonk JAM, Visker MHPW. Short communication: Genetic study of methane production predicted from milk fat composition in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 98:8223–8226. 2015.
- van Lingen HJ, Crompton LA, Hendriks WH, Reynolds CK, Dijkstra J. Meta-analysis of relationships between enteric methane yield and milk fatty acid profile in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 97 :7115–7132. 2014.
- Zetouni L, Kargo M, Norberg E, Lassen J. Genetic correlations between methane production and fertility, health, and body type traits in Danish Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, 101:2273–2280.2018.