



持続可能な畜産経営に向けて ～環境負荷の軽減および技術開発により 地球にやさしい経営を推進～

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
本部企画戦略本部セグメントⅣ理事室 長田 隆

【要約】

昨今、国内外で多発する過去に例を見ない気象災害や、将来の気候変動対策として、その主たる原因とされる温室効果ガスについて、畜産経営へも応分の排出削減が求められている。本稿では、各畜種の経営から排出される温室効果ガスの特徴と排出削減技術について、農研機構が中核となり取り組んできた技術開発研究の成果に基づき紹介した。これらは経営への収益向上には直接つながるものではないが、生産者にとって経済的にも比較的負担が少なく、かつ取り組みやすい技術も多い。畜産物の需要が高まる中、持続可能な経営に向けて今後各生産者が生産性をさらに高めていく必要がある。

1 はじめに

COP26（Conference Of Parties、国連気候変動枠組条約第26回締約国会議）が英国グラスゴーにおいて、2021年10月31日から開催され、予定会期を1日延長し、11月13日に閉幕した。昨今話題となっている気候変動に関するCOPは、1995年からほぼ毎年開催されている気候変動枠組み条約の締結国会議であり、今回は26回目を迎え、条約に加盟する197カ国の首脳や政府代表が参加した。同会議では、最終的に世界の平均気温の上昇を1.5度未満に抑えるための削減強化を各国に求める「グラスゴー気候合意」が採択、パリ協定のルール作り（6条：市場アプローチに関する合意）も、ほぼ完成して、

気候変動の緩和に向けた対策が全世界で本格化することとなる。

なお、1997年に開催されたCOP3では、先進国に温室効果ガス排出削減を義務付けた京都議定書が採択され、2015年に開催されたCOP21では、京都議定書に代わるパリ協定をまとめ、世界の平均気温上昇を産業革命前と比べて1.5℃に抑えるよう努力することで合意している（表）。

農業という人間活動も、気候変動と無関係ではない。昨今の報道では畜産業、とりわけ牛肉生産からの温暖化寄与について、ともすれば過剰に訴える報道も見聞きすることが増えてきている。

表 国連気候変動枠組条約第26回締約国会議への動き

年	経緯
1992年	国連気候変動枠組条約が採択
1994年	国連気候変動枠組条約が発効
1995年	COP1がベルリンで開催
1997年	COP3が京都で開催、「京都議定書」を採択 (国際的削減数値目標、先進国に義務付け)
2005年	京都議定書が発効
2015年	COP15がパリで開催、「パリ協定」を採択 (国が自主的に決定する貢献-削減目標、すべての国に削減目標、 5年ごとに更新)
2016年	「パリ協定」が発効
2021年	COP26がグラスゴーで開催、「グラスゴー気候合意」を採択 パリ協定の本格的な稼働への合意 (気温上昇を1.5℃に制限する努力の追求を決意、石炭火力発電 を「フェーズダウン」(段階的に削減)、パリ協定市場メカニズ ムのルール合意、適応能力の向上と適応資金の強化)

資料：筆者作成

本稿では、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構（以下「農研機構」という）が中核となり5大学、8設試、家畜改良センターに加え、四つの民間企業の協力を得て実施した研究活動の成果を報告し、各畜

産経営がすぐに取り組むことができる温室効果ガス削減手法を紹介する。なお、ここで紹介する技術は、2021年10月に改定された「農林水産省地球温暖化対策計画の概要」に明記されていることを申し添える。

2 温室効果ガスの排出量

地球温暖化に関する最新の知見の評価を行い、対策技術や政策を検討する科学者の国際専門機関であるIPCC（気候変動に関する政

府間パネル）の六巡目の報告書が順次発刊されているところである。温室効果ガスの農業セクターからの排出は、IPCCの最新報告書

図1 世界の農業からの温室効果ガス排出
(人為的温室効果ガス排出の10~12%程度：年間54億トン)の内訳



資料：筆者作成

で約24%、年間118億トン二酸化炭素等量の寄与が指摘されている。農業活動自体（林業およびその他土地利用などからの排出を除く）からの排出は10~12%程度（年間54億トン）と推定され、その中身を概括してみると図1のような各排出源の寄与率となる（IPCC, 2018）。

FAO（国際連合食糧農業機関）は、反すう家畜からのメタン排出（21億トン）と家畜排せつ物の管理など（合計約14億トン、

草地のふん尿等の排出を含む）からの排出を合わせた家畜生産に起因する温室効果ガス排出は、農業排出の3分の2（約65%）に達すると指摘して、増大する世界人口を賄う生産とゼロエミッション^{（注）}への努力を強く求めている（FAO, 2016）。

（注）人間の活動から発生する環境負荷を限りなくゼロにすることを旨しながら最大限の資源活用を図り、持続可能な経済活動や生産活動を展開する理念と方法。

3 国内の農業・畜産業からの温室効果ガス排出

国内の主な排出源を図2に示した。消化管内発酵によるメタン、家畜排せつ物管理によるメタンと一酸化二窒素などの明確な排出に加え、農業土壌からの一酸化二窒素と燃料消費などに伴う二酸化炭素の排出にも、家畜飼養、管理や飼料生産に関わる機械や施設の活動が含まれている（日本国インベントリ報告書, 2019）。国内でも農業分野排出の半分程度が家畜生産関連であると推定される。総務省統計局の家計調査において、2013年から肉類への支出が魚介類への支出を上回るようになった。畜産物の需要が高まる中、その要

請に応え続けるため、畜産経営が持続可能な生産性をさらに高めていく必要がある。

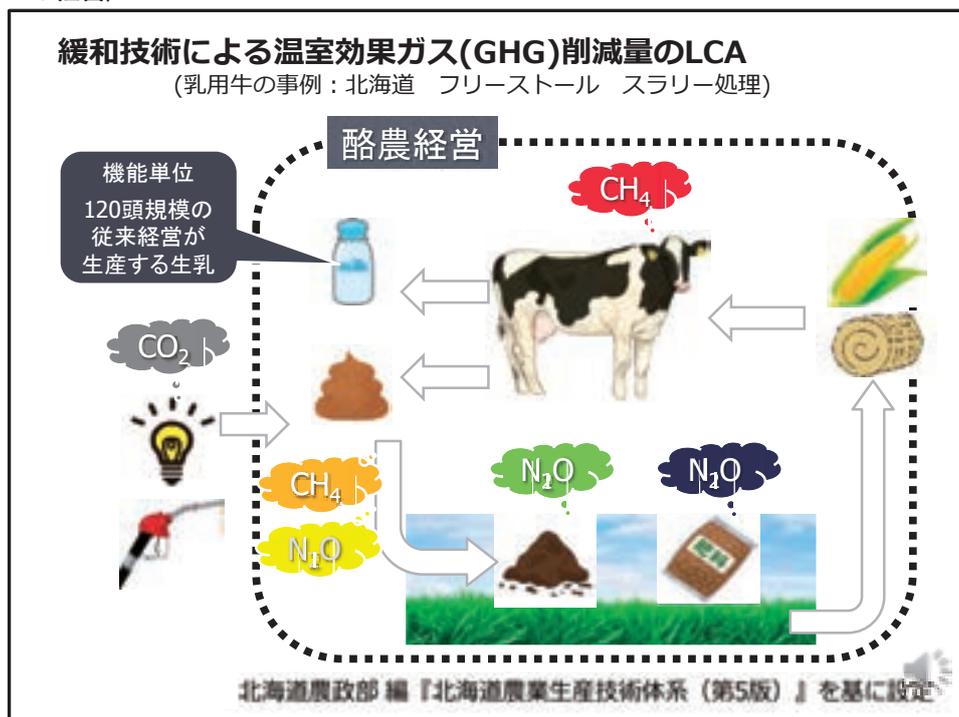
政府の地球温暖化対策計画に掲げられた中期目標の着実な達成に向け、農林水産分野の地球温暖化対策を総合的かつ計画的に推進するため、「農林水産省地球温暖化対策計画」が昨年改訂された。また、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現する「みどりの食料システム戦略」（令和3年5月12日）と共に地球温暖化防止に寄与する施策の推進を図っているところである。

図2 日本農業から排出される温室効果ガス（排出源区分別）



資料：農研機構技報4より転載

図3 乳用牛の事例
 (北海道の120頭、フリーストール飼養の酪農経営でふん尿混合のスラリー処理を行っている経営)

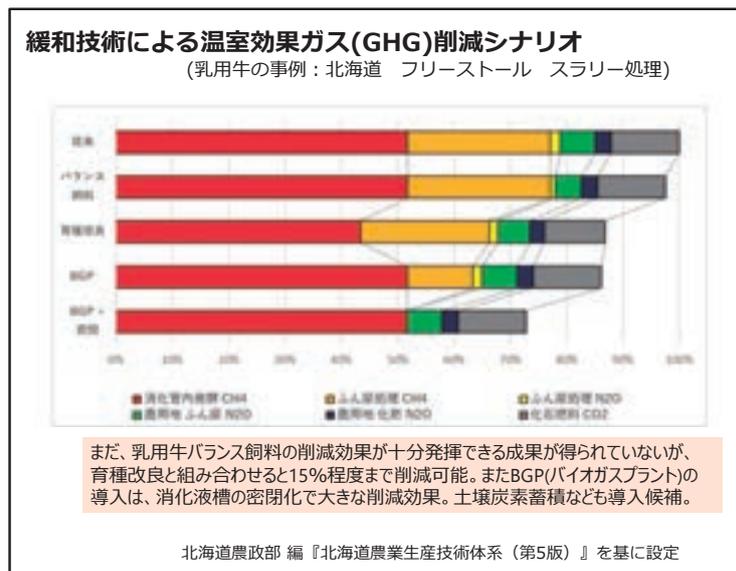


資料：酪農学園大学 日向准教授から提供

2017年より開始された「畜産分野における気候変動緩和技術の開発（気候変動緩和プロジェクト）」では、主要な5畜種（乳用牛、肉用牛、養豚、採卵鶏、ブロイラー）の各経営を対象に「令和3年度までに1経営体からの温室効果ガスの排出量を20%削減可能な技術の開発」を目標にして最終成果の公表を準備中である。「2050年までに国内GHG排出ゼロエミッションの達成」を目指す現在の世界の立ち位置から考えると、十分な技術開発目標ではなく、物足りないと感じる向きもあるかもしれない。しかし、現時点で経営にとっても、さらに家畜にとっても、無理なく取り組みが可能なシステム策定に欠かせない削減技術を開発してきた。経営体規模や施設などを規定した「乳用牛」を図3に例示する。図3のように代表事例を設定し、ライフサイクルアセスメント（LCA）という環境影響評価手法にのっとりターゲットである温室

効果ガスの削減を検討した。この酪農経営にとって一番無理のない削減策を選択して、提示していくことにしている。この一例は、すでに令和2年12月18日に行った、当方研究コンソーシアム主催の研究発表会において途中経過を公表している（図4）。なお、昨年12月に開催された研究発表会の概要については、農研機構畜産研究部門のホームページ（参考資料）において公表されている。短い時間ではあるが、ここに紹介したような国内外の排出状況や動きとともに、乳用牛（酪農学園大学 日向貴久准教授）、肉用牛（京都大学大学院農学研究科 大石風人助教）および中小家畜（農研機構畜産研究部門 荻野暁史上級研究員）の動画を確認することができる。

図4 設定された代表的な乳用牛経営に導入可能な温室効果ガス削減策とその効果（北海道の120頭、フリーストール飼養の酪農経営でふん尿混合のスラリー処理を行っている経営）



資料：酪農学園大学 日向准教授から提供

4 導入が推奨される開発削減手法～技術選択の考え方～

ア 概要

畜産の「気候変動緩和」として、各個別経営が導入できる技術は、各経営のさまざまな環境や方針を考慮して無理のないものにする必要がある。直接利潤につながらないシステムや施設導入を積極的に考える要素は、「今はない」と考えている。

また、畜産起源の温室効果ガス排出は各畜種経営で大きく異なるため、各経営における排出に効果的な削減策を検討し、導入する必要がある。例えば、肉用牛の飼養管理では、その温室効果ガス排出の3分の1が家畜排せつ物の一酸化二窒素などであり、残りの3分の2がルーメンメタンであるが、図3の乳用牛「従来」の通り、同じウシでも乳用牛では約5割のルーメンメタン以外のふん尿やエネルギー消費からの温室効果ガスがさまざま存在する。

さらに、ここで示した図3の乳用牛経営は北海道の1事例である。さらに大規模な乳用

牛経営、飼料や飼養管理方法にこだわった家族経営、また都府県の経営などでは排出温室効果ガスの構成も違うものになっているはずである。

こうしたさまざまな経営環境に合わせた合理的な削減システムについては、今年度中に情報提供する予定としている（具体的には2022年3月を予定）。もちろん、組み合わせる削減技術も多くが実証段階を経て、一部の農家では導入されている。

また、気候変動緩和プロジェクトで取り組んできた下記カテゴリーの開発技術について概要を紹介する。

- (1) 家畜排せつ物起源の温室効果ガス排出抑制のために、
- ・一酸化二窒素については「低タンパク質飼料利用による排せつ物管理からの温室効果ガス排出削減」がすべての家畜種で有効
 - ・炭素繊維リアクターや亜硝酸酸化細菌添加法などの温室効果ガス削減手法

- (2) ルーメンメタンの削減のために、
- ・「低メタン産生牛の育種によるメタン排出削減」
- (3) ゼロエミッション（温室効果ガスの排出を総合的にゼロにする）のために、
- ・「草地の吸収能力を活用した土壌炭素蓄積」（土壌炭素蓄積）
 - ・嫌気性消化（メタン発酵）による化石エネルギー代替効果
- (4) 削減手法の導入がもたらす「個別農家の温室効果ガス排出削減」検証・認定のために

イ 開発技術の詳細

(1) 家畜排せつ物起源の温室効果ガス排出抑制のために

すべての家畜種の排せつ物管理過程で発生がみられる一酸化二窒素については、アミノ酸添加バランス改善飼料（以下「バランス改善飼料」という）の導入が有効である。穀物主体で構成された飼料に単体のアミノ酸を添

加して、無駄なたんぱく質の給餌を減らすことにより畜体からの排尿窒素が大きく減少して、排せつ物管理からの一酸化二窒素の排出を削減する。

肥育豚のバランス改善飼料の導入には、農研機構のホームページ(参考資料参照)に導入のための標準手順書も公開している。また、肥育豚とブロイラーのバランス改善飼料は、すでにJ-クレジットの方法論となっており、飼料の導入プロジェクトが登録されることで削減量がクレジットとして扱える状態になっている。

このプロジェクトでは、新たに肉用牛、乳用牛および採卵鶏の残り主要3畜種向けのバランス改善飼料を開発した。肉用牛に関しては、栃木県との共同実証研究を栃木県内肥育経営で削減効果を実証、来春には実証農家から「地球にやさしい肉」が販売開始される予定となっている（図5）。採卵鶏でも茨城県内採卵鶏農家で、搾乳牛では埼玉県畜産試験場における実証試験が行われている。

図5 バランス改善飼料を導入して肉用牛生産、販売を開始する肉用牛経営（前田牧場）

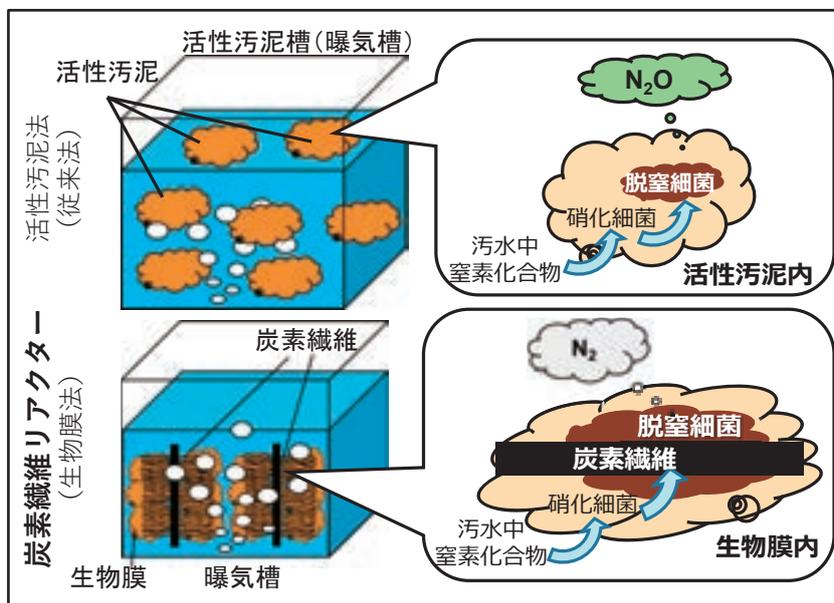


出典：前田牧場ホームページ

排せつ物管理のうち、養豚経営で必須の汚水浄化処理から発生する一酸化二窒素の排出抑制には「炭素繊維リアクター」の導入が効果的である。昨今の排水規制強化、特に硝酸性窒素等の暫定基準の改定に伴い、養豚排水に限らず酪農雑排水においてもこれからは浄化処理の導入事例は増えていくものと考えられる。対象の汚水中の汚濁物質の一つである窒素の脱窒過程で発生する一酸化二窒素を削減するシステム（炭素繊維リアクター）がJA岡山畜産の肥育豚舎付帯の浄化処理施設

で検証され、近々販売を開始できる状況である。岡山県と農研機構が開発した炭素繊維リアクターは、その導入により、主に脱窒細菌が増殖、養豚汚水浄化処理施設における温室効果ガスの排出を約80%削減できることを農家施設で実証した。本技術を全国の処理施設に導入できれば、二酸化炭素換算で年間60万トンの温室効果ガス排出を削減できると試算される。図6は炭素繊維リアクターの概要である。

図6 既存の活性汚泥法と炭素繊維リアクターの一酸化二窒素排出の違い



資料：筆者作成

家畜排せつ物の大半は堆肥化され、有機性肥料として農業利用されており、昨年5月12日に策定された「みどりの食料システム戦略」の推進には欠かすことのできない資材である。この生産過程で排出される温室効果ガス排出を削減する必要がある。

堆肥化過程起源の温室効果ガス排出削減には、乳用牛の高水分ふん尿混合物からのメタンの削減のための「水分調整堆肥化」と、肥育豚ふんや、肉用牛ふんのような多くの窒素を含有するふん尿混合物からの一酸化二窒素排出抑制のための「亜硝酸酸化細菌添加堆肥」

が実証試験中である。実験段階では、共に、温室効果ガス排出を50%以下に削減できる技術であることが確認されており、今後、その導入方法を検討し、普及させていきたいと考えている。

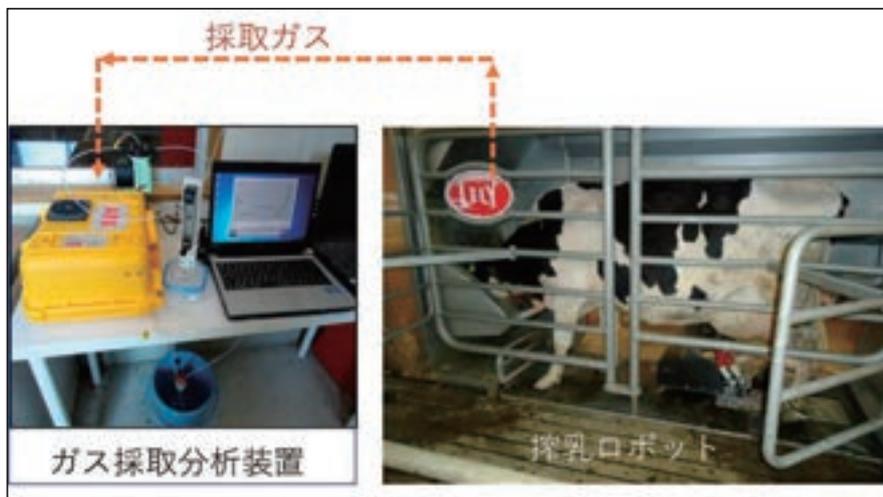
(2) ルーメンメタンの削減のために

このプロジェクトでは、「低メタン産生牛」、つまり、メタン産生量の少ないウシを選び(育種選抜)、その子孫を増やしていけば、将来においてウシ消化管からのメタン産生量を減

らせる可能性について国内の乳用牛と肉用牛について確認している。これまでに削減策開発に取り組んできた知見から、飼料が同じであってもメタン産生量は個々のウシで異なる、すなわちメタン排出にはウシの大きな個体差の存在が判明している。このことに着目し、それらの特性が産子に遺伝することが明らかにされていることから、国内でメタンの少ない牛の育種改良の可能性について現在検討を行っている。この削減手法は、生産性の向上（繁殖性の向上や疾病対策なども含む）と同様に、家畜に特別な飼料添加物などを与えることなく生産物当たりのメタン排出量を抑えることが期待できる。これまでに得られた測定データの解析から、育種選抜での削減に十分なメタン排出に関する牛の個体差が存在することが確認され、5～10年程度で10%近い排出削減も期待されている。

育種選抜には多頭数のメタン測定値が必要になり、現在の標準的な測定システムである開放型呼吸試験チャンバーは、ウシを数日間滞在させる方法で、精密測定では優れているものの多頭数のデータを得るには向いていない。このため、搾乳ロボット（図7）やドアフィーダーにおいて呼気ガスの部分サンプル（スポットサンプル）を採取して、そのガス中のメタン／二酸化炭素比（ CH_4/CO_2 比）を基に推定する手法を開発した。ウシが自動的に1日に2～3回搾乳ロボットを訪問し、搾乳中にウシの口先周辺をポンプで吸引してサンプリングし、携帯型分析計でメタンと二酸化炭素の濃度を分析する。具体的には1週間ほど継続して測定を行い、1日の平均メタン産生量を推定する。この測定方法は日本各地の搾乳ロボットでの適用が可能である。

図7 搾乳ロボットによるガス採取システム



資料：広島大学 小櫃教授から提供

(3) ゼロエミッション（温室効果ガスの排出を総合的にゼロにする）のために

「草地の吸収能力を活用した土壌炭素蓄積」（土壌炭素蓄積）は、畜産関係では数少ない炭素吸収活動である。飼料生産を行う草地に

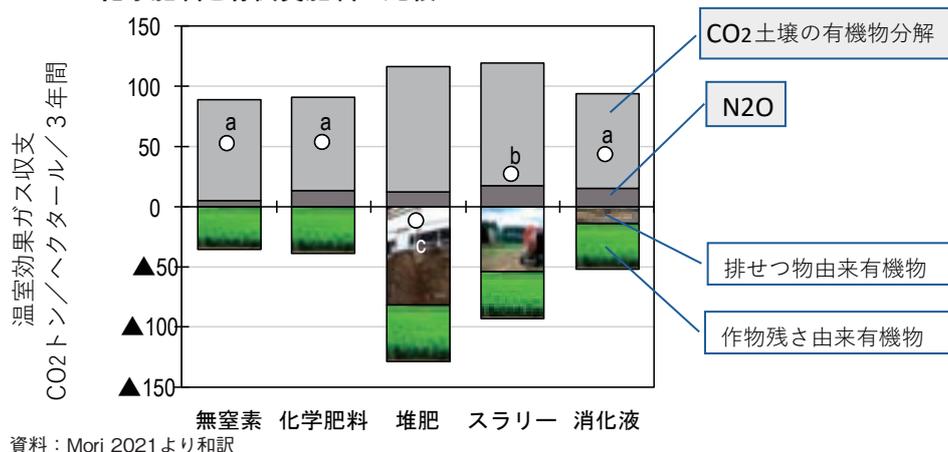
において、化学肥料の代替に堆肥やスラリーなどの家畜排せつ物起源の有機質肥料を活用することで、飼料生産を同じように保ちつつ、温室効果ガスの排出をマイナス（炭素吸収）にすることが可能であることが示された（Mori 2021）。

農研機構畜産研究部門畜産飼料作研究拠点

(那須塩原市)の二毛作飼料畑における温室効果ガス収支を紹介する(図8)。このときの温室効果ガス収支(図8の○印、異符号間で有意差あり)は、化学肥料区よりスラリー、メタン発酵消化液や堆肥区で小さい値(草地当たりの温室効果ガス排出が少ない)となっている。特に、堆肥区では負の値であったこ

とは、堆肥区が正味の温室効果ガス吸収源だったことを意味する。堆肥は飼料畑に有機物を供給して土壌炭素を蓄積するだけでなく、一酸化二窒素の発生量を減らす傾向や、根から土壌への有機物の供給量を増やすことでも、温室効果ガスの削減に寄与したことが3年に及ぶ試験によって確認された。

図8 畜産飼料作研究拠点(那須塩原市)の二毛作飼料畑における温室効果ガス収支～化学肥料と有機質肥料の比較～



また、家畜排せつ物、特に乳用牛ふんの嫌気性消化(メタン発酵、バイオガスプラント)はメタン生成と発電により化石エネルギーの代替として注目され、これまでも固定価格買取制度(FIT)などの経済的サポートにより普及が徐々にではあるが北海道を中心に進んできている。このメタン発酵処理の精緻な温室効果ガス軽減効果を、酪農生産系のオフセットに使用可能なクレジットとなるように精緻化しておく必要がある。このため、本プロジェクトではメタン発酵後の消化液の管理から排出される温室効果ガスの「実規模プラントにおける測定システム」の開発を行っている。

(4) 削減手法の導入がもたらす「個別農家の温室効果ガス排出削減」検証・認定のために

上記のように削減技術が開発されて国内畜

産農家に普及したとしても、この削減策の導入が温室効果ガス削減行為としてクレジット化されたり、目標である日本国インベントリ(NIR)に反映されて、気候変動に関する国際連合枠組条約事務局(UNFCCC)に認められる必要がある。このための国内手続きは、十分整備されているとは言い難い状況である。われわれは、ここまで紹介してきた削減技術の開発段階で、実際の家畜飼養現場での測定が可能な測定システムも整備してきた。図9は主な家畜排せつ物処理施設からの温室効果ガスを把握するシステムである。これらの測定システムにより、多くの国内排出が畜産現場で測定され、日本国インベントリが精緻化されてきた。

搾乳ロボット(図7)やドアフィーダーにおいて呼気ガスの部分サンプル(スポットサンプル)の実際の測定方法をマニュアルとして今年3月に紹介する予定である。

図9 日本国内の主要な家畜排せつ物処理からの温室効果ガスを測定するシステム



資料：筆者作成

5 おわりに

温室効果ガスの削減技術は、経営への収益向上には直接つながるものではなく、また、今日明日に効果を確認することはできず、検証も難しい。だからといって、畜産関係者が何らかの取り組みに着手しないわけにはいかないことを肌で感じられる。昨今の国内外で発生する気候変動、気象災害などは前代未聞の様相である。農業従事者の方々の飼養環

境や栽培環境に、これまでにない変化を感じ、今後の経営計画に「これまで通りのやり方大丈夫なのだろうか」と不安になることもあろう。温暖化起源の暑熱対策などを講じつつ、是非、開発技術のラインナップをご確認いただき、無理なく始められる「持続可能な経営」への第一歩踏み出していただきたいと考えており、本稿がその一助となれば幸いである。

【参考資料】

- ・気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 「1.5°C 特別報告書 (*)」の公表 (第48回総会の結果) について (環境省HP)

<https://www.env.go.jp/press/106052.html>

- ・FAO'S work on climate change GHG emissions 2016

<https://www.fao.org/3/i6340e/i6340e.pdf>

- ・日本国インベントリ報告書 (NIR: National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN)

<https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/index.html>

- ・「農林水産省地球温暖化対策計画」農林水産省地球温暖化対策計画（令和3年10月27日改定）
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/taisaku/top.html>
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/taisaku/attach/pdf/top-17.pdf>

- ・「みどりの食料システム戦略」（令和3年5月12日）
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html>
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/index-7.pdf>

- ・農研機構技報（NARO Technical Report）No. 4
https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/laboratory/naro/naro_technical_report/134176.html

- ・農研機構畜産研究部門ホームページ／研究成果発表会「地球温暖化対策の要請に応える日本の家畜生産」を開催
https://www.naro.go.jp/project/research_activities/laboratory/nilgs/138285.html

- ・農研機構 養豚におけるアミノ酸バランス 改善飼料の設計と給与効果
https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/SOP19-008K20200331.pdf

- ・Suzuki T, Kamiya, Y, Oikawa, K et al. (2021) Anim. Sci. J. 92 (1), e13637.
<https://doi.org/10.1111/asj.13637>

- ・Uemoto Y, Takeda M, Ogino A, et al. (2020) Anim. Sci. J. 2020;91 : e13383.
<https://doi.org/10.1111/asj.1338>

- ・Mori A (2021) Farmyard manure application and associated root proliferation improve the net greenhouse gas balance of Italian ryegrass – Maize double-cropping field in Nasu, Japan. Sci Total Environ 792 : 148332