

研究紹介

広島県立総合技術研究所畜産技術センター飼養技術研究部

福馬 敬紘
小林 純子

発酵TMRによる搾乳牛からのメタン排出抑制について

●ポイント

- ・牛から排出されるメタンは、飼料エネルギーのロスや地球温暖化に関与していることから、その抑制に関する研究が長年にわたって行われている
- ・牛の第一胃でのメタン生成を抑制する機序として、第一胃内で生成する水素をメタン生成以外の経路（プロピオン酸生成経路）で消費させる考え方がある
- ・発酵TMR中に含まれる乳酸は、第一胃内でプロピオン酸に変換されると考えられており、その変換過程で水素が消費されれば、メタン生成が抑制できる可能性がある
- ・生産現場でのメタン排出量の評価が可能なスニファー法を用いて、搾乳牛からのメタン排出量を調査したところ、フレッシュTMRに比べて発酵TMRを給与した場合にメタン排出量が減少することを確認した
- ・発酵TMRの活用によるメタン抑制に関しては、その多様な発酵品質を踏まえてさらなる研究による詳細な抑制機序解明が期待される

1. はじめに

牛などの反芻動物は摂取した飼料を第一胃内の微生物群の力を借りて分解し、その分解物を栄養分として吸収して、生乳などの畜産物を生産しています。メタンはこの第一胃内での微生物群の活動に伴って発生し、同じく第一胃内で生じた二酸化炭素とともにあい気（ゲップ）として体外に排出されています。このメタン排出を抑制する試みは古くから取り組まれてきたテーマですが、近年メタン測定技術の進歩により農場レベルでの測定も可能になっており、現在でも活発に研究が行われています。本稿では搾乳牛でのメタン測定において発酵TMRの給

与によるメタン排出の減少を確認しましたので、その取組の背景や試験内容についてご紹介します。

2. メタン排出抑制の必要性

牛などの反芻家畜の第一胃から排出されるメタンには、飼料エネルギーのロスと地球温暖化という2つの課題があり、その抑制に関する研究が活発に行われています。

【飼料エネルギーのロス】メタンは天然ガスの主成分であることから分かるようにエネルギーを持っていますが、そのメタンが牛の体外に放出されてしまうということは、摂取した飼料の一部が無駄になっていることになります。牛のメタンによる損失は、摂取した飼料のエネルギーの1割程度になると報告されています。搾乳牛で調査した報告¹⁾によると飼料エネルギーの7%がメタンとして排出されていたのに対して25%が乳のエネルギーとなっており、メタンによるエネルギー損失は決して少なくありません。このため、メタンの排出を抑制できれば、その分のエネルギーが乳生産などの生産活動に利用され、牛の生産性が高まると考えられています。

【地球温暖化】地球温暖化は二酸化炭素のような温室効果ガスによって引き起こされていますが、メタンにも同様に温室効果があります。メタンの総排出量は二酸化炭素に比べると少ないものの、その温室効果は二酸化炭素の二十数倍にもなるため、その影響は二酸化炭素に次ぐ状況となっています。また、大気中のメタンは二酸化炭素に比べて分解されやすいため、その排出を抑制することによって大気中濃度が早期に低下することで、地球温暖化の進行を遅らせることができると考えられています。こうしたことから地球温暖化対策としてメタン排出抑制が果たす役割は非常に重要です。国内における牛の第一胃を含む家畜の消化管内発酵由来のメタン排出は総メタン排出の30%程度を占めており、環境保全の観点からも牛からのメタン排出の抑制が喫緊の課題と

なっています。

3. メタン生成機序 (図1)

牛が摂取した飼料に含まれる炭水化物（繊維、デンプン、糖など）は第一胃内の微生物によって主に揮発性脂肪酸（VFA）と呼ばれる酢酸・プロピオン酸・酪酸に分解されます。このうち酢酸及び酪酸への分解過程では水素が発生しますが、水素は第一胃内に過剰に蓄積すると飼料分解に関わる微生物の働きを低下させてしまいます。このため、水素を取り除く仕組みが第一胃内には備わっており、それがメタン生成になります。その役割を担っているメタン生成菌は、飼料の分解によって生じた水素と二酸化炭素からメタンを合成しており、このメタンを牛があい気によって体外に排出することで第一胃内か

ら水素が除去されています。また、酢酸への分解ではギ酸が生成する分解経路もあり、このギ酸もメタンに変換されます。一方、もう一つの主要なVFAであるプロピオン酸への分解は、水素は生成するもののそれ以上に消費されるため、メタン生成以外の水素消費経路としても機能しています。ただし、第一胃内でのプロピオン酸生成は酢酸・酪酸生成に比べて少ないため、第一胃内の機能維持においてメタン生成による水素消費が重要な役割を果たしています。

4. メタン生成の抑制

第一胃内でのメタン生成機序を踏まえると、その生成を抑制するためのポイントが3点あると考えられます（図2）。1点目はメタン生成を直接抑制す

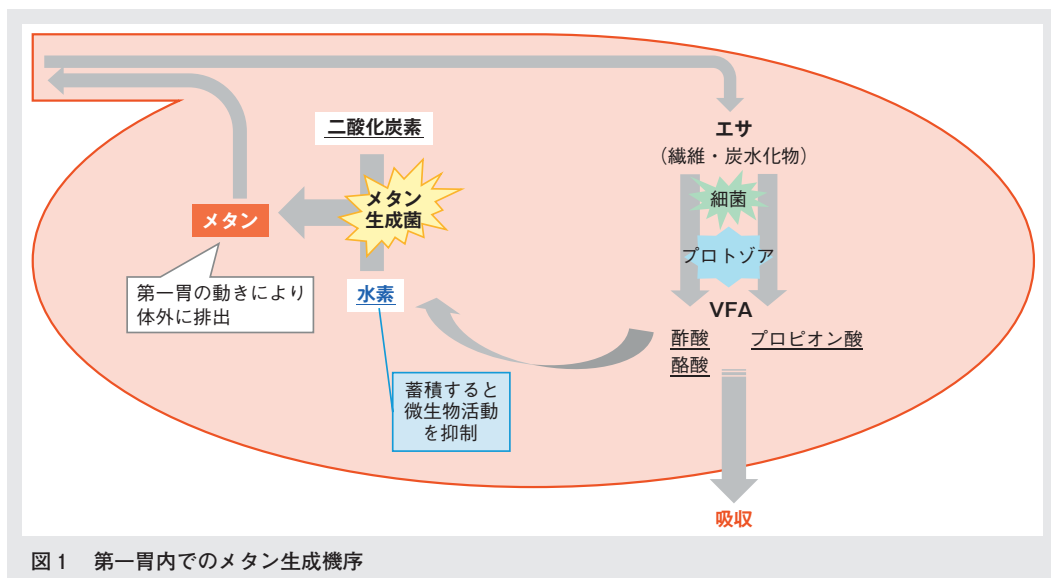


図1 第一胃内でのメタン生成機序

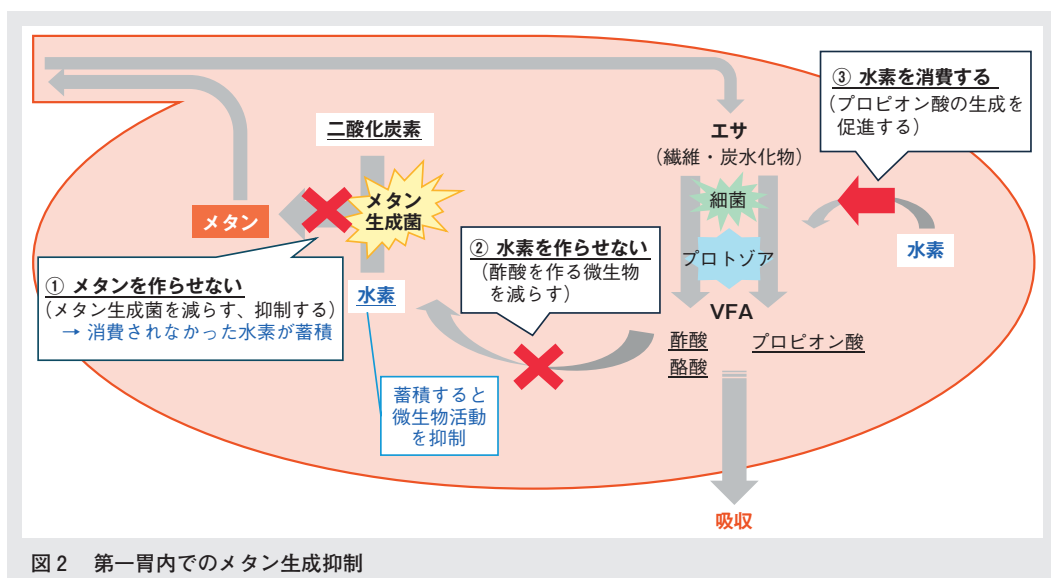


図2 第一胃内でのメタン生成抑制

るパターンで、メタン生成菌を減らしたり、あるいはその機能を阻害したりする方法が考えられます。この場合、メタン生成が抑制される結果、メタン生成に利用されるはずであった水素が第一胃内に残存することになります。残存する量が少なければ、あい気としての排出やプロピオン酸生成などの代替経路によって処理されますが、過度にメタン生成が抑制されると、処理しきれなくなった水素が第一胃内に蓄積して、微生物の働きを低下させてしまう可能性があります。2点目はメタン生成の材料となる水素の生成を低減するパターンで、主に水素生成を伴う酢酸の生成に関与する微生物を抑制する方法が考えられます。この方法であれば水素の発生量を減らすことでメタン生成を抑制するため、水素の蓄積が生じることはありません。しかし、この方法は飼料の分解に関与する微生物の働きを妨げることになるため、第一胃内の発酵状態に悪影響を及ぼすことが懸念されます。3点目はメタン生成以外で水素の消費を増やす考え方で、その一つとして先に述べたプロピオン酸生成を促進する方法が考えられます。この場合、水素の蓄積が生じることはなく、また第一胃内の微生物を抑制するものでもないため、第一胃内の環境にネガティブな影響は起きにくいと考えられます。

これまでに行われてきた数多くの研究において、こうした抑制パターンを通じてメタン抑制に有効な抗生物質、植物由来抽出物、化学物質などが見出され、その一部は既に添加剤として実用化されているものも存在します。そうした中、我々は異なる視点でのアプローチとして既存の飼料調製・加工技術を通じたメタン抑制の検討を進める中で発酵TMRに着目しました。

5. 発酵TMRによるメタン抑制

TMR（Total Mixed Ration：完全混合飼料）は、給与する複数の飼料原料を予め均一に混合したものであり、給与対象となる牛群の養分要求量を満たすように設計された飼料です。そのうち、飼料原料を混合してそのまま給与するTMRがフレッシュTMR、混合したのち密封状態で一定期間発酵させたTMRが発酵TMRになります。発酵TMRは発酵中に生成された乳酸などの有機酸によってpHが下がることで保存性が高まり、長期間にわたって安定した品質で保管することが可能になります。また、給与後に飼槽内で発熱（好气的変敗）しにくくなるといったメリットがあります。本県では乳牛及び肉牛向けの

発酵TMRを製造・供給するTMRセンターが整備されており、普及が進んでいるところです。

良質な発酵TMRは乳酸が多く産生されており、牛はこの乳酸を摂取することになります。摂取された乳酸は牛の第一胃内でプロピオン酸に変換されると考えられており、この過程で水素が消費されることによってメタン生成が低減すると考えられています²⁾。実際に過去に行われた研究³⁾において、発酵TMRの利用によるメタン抑制を示唆する結果も報告されており、それらを踏まえ本稿で紹介する試験を実施しました。

6. 試験内容

【概要】試験は通常の飼養条件で管理している搾乳牛を用いて、発酵TMRの給与によるメタン排出の影響を明らかにすることを目的に実施しました。試験は2024年10～11月に当センターの搾乳ロボットを備えたフリーストール牛舎で実施しました。調査牛にフレッシュTMR、発酵TMRの順番に2週間ずつ給与して、各TMRについて前半1週間を慣らし期間、後半1週間をデータ収集期間としました。なお、搾乳ロボットでの飼養管理ではロボット内で配合飼料を給与するため、正確にはTMRではなくPMR（Partial Mixed Ration：部分的混合飼料）となりますが、本稿ではTMRと記述することとします。

【調査牛】当センターで飼養していたホルスタイン種搾乳牛17頭（平均分娩後日数（試験開始時）：219日、平均産次数：2.2）を供試しました。

【試験飼料】表1に示した飼料原料をセンター内の混合機で混合し、水分含量が50%となるよう水を添加してTMRを調製しました。なお、飼料原料にはサイレージなどの予め発酵した原料は使用しません

表1 TMRの配合割合（乾物中%）

原料	配合割合
スーダングラス乾草	22.7
オーツ乾草	17.2
圧べんとうモロコシ	26.2
ビートパルプ	12.0
大豆粕	9.3
綿実	6.5
糖蜜飼料	2.9
並塩	0.8
ミネラル剤	1.7
ビタミン剤	0.6

※ミネラル剤・ビタミン剤は給与直前に添加混合

でした。フレッシュTMRは給与当日の朝に調製したものを給与したのに対して、発酵TMRは混合した原料をポリエチレン製内袋に投入・密封し、フレコンバッグ内で21日以上屋外保管したものを毎日開封して給与しました。これらのTMRは調査牛ごとに個別に割り当てた飼槽に飽食となるように給与しました。加えて配合飼料を搾乳ロボットの飼槽で給与し、給与量は試験開始時に調査牛の乳量を踏まえて設定しました。

【メタン排出量の調査】本試験では調査牛のメタン排出量を推定するためにスニファー法と呼ばれる手法を用いました⁴⁾。スニファー法は牛の呼吸を含む空気を回収し、そのメタンや二酸化炭素の濃度の測定値を用いて牛1頭ごとのメタン排出量を推定する方法です。乳牛の場合、搾乳ロボットの飼槽を活用することで、多頭数のメタン排出量をまとめて調査することができます。従来のメタン排出量の測定は専用の測定施設が必要だったため特定の機関でしか実施できませんでしたが、スニファー法であれば実際の生産現場での調査が可能となることが大きな特長です。今回の試験では搾乳ロボットの飼槽内に呼吸を含む空気を吸引するためのチューブを設置し、これに吸引用ポンプ・ガス分析計を接続し、メタン・二酸化炭素濃度の測定・記録を行いました。搾乳ロボットへの牛の訪問記録と測定データから個体ごとの濃度値を算出し、その7日間分の平均値から下記の式を用いて1日当たりのメタン排出量を推定しました。

$$\begin{aligned} \text{メタン排出量 (L/日)} = & -397 + 0.317 \times \text{体重} + 13.3 \\ & \times \text{乾物摂取量} + 3.14 \times \text{エネルギー補正乳量} + 4,343 \\ & \times \text{メタン濃度} / \text{二酸化炭素濃度} \end{aligned}$$

【その他の調査項目】給与したTMRの一般成分・発酵品質、飼料摂取量や乳量などの飼養成績、第一胃内容液性状を調査しました。

7. 結果

【TMR成分値・発酵品質】

試験に用いたTMRの成分値・発酵品質を表2に示しました。TMRに使用した原料・構成比率は全く同じでしたが、フレッシュTMRと発酵TMRとの間に成分値の違いが認められました。特に非繊維性炭水化物（NFC）に分類されるデンプンが発酵TMRで減少しており、デンプンが発酵の過程で微生物によって分解されたと考えられました。また、発酵の程度を示す発酵品質も2種類のTMRで差異が認められました。フレッシュTMRは原料にサイ

表2 給与TMRの成分値・発酵品質

	フレッシュTMR	発酵TMR
成分値（乾物中％）		
CP（粗タンパク質）	11.7	12.2
EE（粗脂肪）	3.2	3.8
NFC（非繊維性炭水化物）	39.8	34.5
デンプン	18.6	14.2
aNDFom（中性デタージェント繊維）	41.1	44.7
CA（粗灰分）	6.4	7.2
発酵品質（原物中％、pH除く）		
pH	5.83	4.37
乳酸	0.10	4.49
酢酸	0.05	0.57
酪酸	ND	ND
エタノール	ND	0.30

※ND：検出限界以下（検出限界値は未確認）

レージなどの発酵飼料を使用しなかったことから発酵に伴い産生される乳酸などの成分はほとんど検出されず、pHもほぼ中性に近い非発酵状態のTMRとなっていました。一方で、発酵TMRは乳酸が4％以上検出され、pHが4台前半まで低下していました。また、不良発酵に伴い生成される酪酸は検出されず、酢酸やエタノールは低濃度であったことから、乳酸発酵が優勢に進んだTMRとなっていました。これらの結果から今回用いた発酵TMRでは、デンプンなどのNFCから乳酸を主体とする発酵産物が生成されていたと考えられ、試験に用いた2種類のTMRには発酵の有無による明確な違いが認められました。

【飼養成績】

飼料摂取量や乳量などの飼養成績を表3に示しました。飼料摂取量は、配合飼料ではTMR間で差はありませんでしたが、TMRではフレッシュTMRに比べて発酵TMRで少なく、総飼料摂取量も発酵TMRで少なくなりました。発酵TMRの摂取量減少の要因は明確ではありませんが、発酵に伴う成分値

表3 飼養成績

	フレッシュTMR	発酵TMR	
体重 kg	703.9±92.5	705.5±96.3	
乾物摂取量 kg	25.0±3.2	23.8±2.7	**
うちTMR	21.4±2.9	20.2±2.4	**
うち配合飼料	3.6±0.8	3.6±0.7	
乳量 kg	32.9±6.9	32.2±7.1	
ECM kg	33.3±6.0	33.0±5.8	
飼料効率	1.33±0.18	1.38±0.17	*

*：p<0.05、**：p<0.01

ECM：エネルギー補正乳量

飼料効率＝ECM/乾物摂取量

の変化や発酵産物の生成が影響した可能性があります。一方で各TMR給与終了時の体重やデータ収集期間中の乳量及びエネルギー補正乳量（Energy corrected milk：ECM）にTMR間での違いは認められませんでした。乾物摂取量1kg当たりのECM（飼料効率）を比較すると発酵TMRの方が3.7%高値となっており、より効率的に乳生産が行われていたことが示されました。発酵TMRでは元々含まれていた栄養成分の一部がその発酵の過程で徐々に分解されることで、牛にとって消化吸收しやすくなった可能性があり、そのことが生産効率に影響を及ぼしていたと考えられました。

【第一胃内容液性状】

各TMRのデータ収集期間に調査牛全頭から1回ずつ第一胃の内容液を採取し、その性状（pH、VFA濃度）を調査しました（表4）。pHはいずれのTMRでも6を上回っていましたが、フレッシュTMRに比べて発酵TMRで低くなっていました。また、VFA濃度については、酢酸濃度に差はありませんでしたが、プロピオン酸及び酪酸濃度は発酵TMRで高くなっており、これらのVFA濃度の総和も発酵TMRで高くなっていました。過去の研究⁵⁾においてTMRを発酵させることによって第一胃内でデンプンが分解されやすくなることが報告されており、今回の試験においても同様に第一胃内での分解性が高まった結果、VFAの生成量が増加し、濃度が上昇したと考えられ、このことがpHの変化にも影響を及ぼしたと推察されました。また、発酵TMRで第一胃内プロピオン酸濃度が30%程度上昇しており、第一胃内の酢酸濃度とプロピオン酸濃度の比率（A/P比）は低値となりました。この結果は発酵TMRの給与によって第一胃内のVFA生成経路としてプロピオン酸生成経路が増加したことを示しており、これは第一胃内のpH低下に伴う第一胃内微生物叢の変化、あるいは発酵TMRに含まれていた乳酸からプロピオン酸への変換が要因として考えられました。なお、発酵TMR給与時に第一胃内pH

は低値であったものの乳酸は検出されておらず、ルーメンアシドーシスの発生はなかったと推察されました。

【メタン排出】

表5にメタン排出量に関連するデータを示しました。スニファー法を用いて推定された1日当たりのメタン排出量はフレッシュTMRに比べて発酵TMRで8.7%（約60L）減少しました。これは発酵TMRにおいて第一胃内のプロピオン酸生成の傾向が強まったことで水素消費が増加した結果、メタン合成に使われる水素が減少したことによるものと推察されました。搾乳牛からのメタン排出の抑制効果を判断する場合、メタン排出量そのものを評価するとともに乳量などの生産量当たりのメタン排出量を評価することが重要です。これは、牛1頭からのメタン排出量が減少したとしても同時に乳量が減少していた場合、乳生産量を維持するためには増頭が必要となって結局メタン排出量が増加する可能性があるためです。このため、搾乳牛であれば乳量1kg当たりのメタン排出量が減少していることもメタン抑制効果を判断する上で重要となります。今回の試験では飼料摂取量1kg当たり、及びECM1kg当たりのメタン排出量も発酵TMRで低値となっており、発酵TMRの給与がメタン排出量の抑制と乳生産量の確保を両立できたことが示されました。

【メタン排出抑制対策としての発酵TMRの活用】

今回の試験結果を基に試算したところ、飼料効率の改善による生産性向上のうち、メタン排出抑制に伴う飼料エネルギーロスの低減による効果は、全体の一部にすぎないことが示唆されました。これは今回確認された生産性向上にはメタン生成抑制による効果に加えて発酵TMRの特性による効果もあったと考えられました。このような生産性の向上は生乳販売などによる収入増加もしくは給与飼料の減少による支出抑制につながることを期待されることから、メタン生成抑制以外に起因する生産性向上を期待できる可能性があることは他の抑制技術に対して発酵TMRの強みになる可能性があります。ただし、それでも発酵TMRの導入に伴うコスト（梱包

表4 第一胃内容液性状

	フレッシュTMR	発酵TMR	
pH	6.74±0.19	6.45±0.29	**
総VFA mmol/L	93.5±7.4	104.0±12.5	*
酢酸 mmol/L	62.7±4.6	65.0±5.4	
プロピオン酸 mmol/L	19.7±3.4	25.8±6.7	**
酪酸 mmol/L	11.0±1.7	13.2±2.2	**
酢酸/プロピオン酸比	3.27±0.54	2.71±0.74	**

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

表5 メタン排出量

	フレッシュTMR	発酵TMR	
メタン排出量 L/日	696.9±91.2	636.0±78.3	**
乾物摂取量当たり排出量 L/kg	27.9±1.8	26.7±1.5	**
ECM当たり排出量 L/kg	21.4±3.6	19.7±2.9	*

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

材などの資材費、製造に要する労働費など）が生産性向上によるコストメリットを上回る可能性が十分想定されることから、今後メタン抑制技術として発酵TMRの利活用を推進するには、メタン抑制の確実性を高めつつ、発酵TMRの利用に要するコスト負担を軽減できるような技術開発が求められます。また、元々発酵TMRが持つ優れた特性（好氣的変敗抑制など）を含めたメリットと併せて評価していくことも必要になると考えられます。

8. おわりに

ここまで発酵TMRの給与により搾乳牛からのメタン排出が抑制された試験結果についてご紹介してきました。その一方で発酵TMRの品質は原料、発酵期間、貯蔵温度などにより多様なTMRが存在すると考えられ、過去の研究報告⁶⁾でも発酵TMRによる抑制効果が認められなかった事例もあることから、今後より詳細な抑制機序の解明に向けた研究の実施が期待されます。また、今回の試験では発酵飼料を全く含まないフレッシュTMRとの比較ということで、飼料原料に用いた粗飼料は全て購入乾草を用いましたが、昨今の飼料価格の状況を踏まえると牧草サイレージや稲ホールクロップサイレージなどの自給粗飼料サイレージを活用した発酵TMRでの比較など現場での利活用を念頭に置いた条件での評価も必要になると考えられ、当所においても引き続き調査を実施してまいります。

本稿の内容は農林水産省委託プロジェクト研究「畜産からのGHG排出削減のための技術開発」(JPJ011299)の補助を受けて実施したものです。

9. 参考文献

- 1) 早坂貴代史、田鎖直澄、山岸規昭 (1995). ホルスタイン種泌乳牛のエネルギー代謝. 日畜会報. 66. 374-382
- 2) 曹陽、堀口健一、高橋敏能 (2009). 食品残渣と乳酸菌の利用が飼料イネTMRサイレージの発酵品質改善ならびにin vitroによる乾物消失率およびメタンと揮発性脂肪酸生成に及ぼす影響. 日草誌. 55. 1-8
- 3) Cao Y, Takahashi T, Horiguchi K, Yoshida N, Zhou D (2012). *In vitro* ruminal dry matter digestibility and methane production of fermented total mixed ration containing whole-crop rice and rice bran. *Grassl. Sci.* 58: 133-139
- 4) 農業・食品産業技術総合研究機構. ウシルーメン発酵由来メタン排出量推定マニュアル (2022) http://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/152088.html
- 5) Miyaji M, Matsuyama H and Nonaka K (2017). Effect of ensiling process of total mixed ration on fermentation profile, nutrient loss and *in situ* ruminal degradation characteristics of diet. *Anim. Sci. J.* 88: 134-139
- 6) Wang C, Uyeno Y, Jayanegara A, Kondo M, Ban-Tokuda T, Matsui H (2016). Changes in *in vitro* rumen fermentation characteristics of different compositions of total mixed rations (TMR) and the ensiled TMRs. *Adv. Anim. Vet. Sci.* 4 (4): 178-182