

‡ 研究紹介 ‡

乳牛におけるルーメンマット構造の定量とその形成およびルーメンマット機能を活かした TMR 給与法に関する研究

酪農学園大学 農食環境群循環農学類
ルミノロジー研究室 泉 賢一

いずみ けんいち

1. はじめに

乳牛のルーメン内容物はガス層、固体層、液状層と階層構造を有している。ルーメン背囊部から中心部にかけての固体層には、繊維を中心とした比重の軽い飼料片が堅いマット状の塊を形成しており、ルーメンマット (RM) とよばれている。RM がルーメン背囊上皮に接触刺激をもたらすことで反芻が生じる。反芻によってルーメンへの唾液流入量も増加するので、RM はルーメン pH を適正に保つために重要な役割を担っている。さらに RM は小飼料片の取り込み効果も期待されるため、RM の厚さや堅さといった物理性が低下すると小飼料片のルーメン内滞留時間が短くなり、飼料消化率にも影響が及ぶと推測されている。

RM 機能に関しては、このような理論が想定されてきたが、RM 構造を実際に測定する方法がなかったために、これらの理論は推測の域をでることはなかった。RM 形成状況を間接的に把握するために物理的有効繊維 (peNDF) という概念が利用されている。peNDF は飼料粒度と飼料中繊維含量を用いて計算されるので、peNDF が適正量含まれている飼料であれば RM が形成され、反芻刺激効果が高まると考えられている (Mertens, 1997)。peNDF 理論では、強固な RM を形成するためには粗飼料のように長く堅い繊維が必要になる。乳牛の繊維源としては、副産物飼料などに代表される非粗飼料繊維源も利用されるが、それらはペクチンといった消化の早い繊維が主体であり、その粒度も細かいものが多い。したがって、織

維源の大半を粗飼料から非粗飼料繊維源に置き換えると、強固な RM が形成されない可能性が指摘されている (Mertens, 2000)。

一方で、peNDF 理論が普及すると、peNDF 給与試験における乳牛の生産性や生理反応が研究間で異なることが明らかになってきた (Grant et al., 2005; Zebeli et al., 2012)。また、飼料中 peNDF 含量や peNDF 摂取量と RM 形成との関連を検討した研究は見当たらない。

そこで本研究では、RM 構造の測定方法を開発し、粗飼料や非粗飼料繊維源といった飼料タイプの違いが RM 形成に及ぼす影響を明らかにすることを第一の目的とした。基礎的な知見が集積してきた現在、私たちの研究室では次のステップとして、RM 機能に関する情報を活かした TMR 飼料設計法を模索中である。



2. ルーメンマット構造定量法の確立

土壌硬度の評価指標である貫入抵抗の測定原理に着目し、ルーメン内容物の堅さや深さを測定するためのルーメン内容物貫入抵抗測定装置を開発した (泉ら, 2008)。ロッドがルーメン内容物を貫入する際の堅さとその時の深さを計測するために、測定装置には圧力計と変位計を組み込んだ。

ルーメン上部に位置するマット層とその下側に存在するスラリー状の非マット層を分割

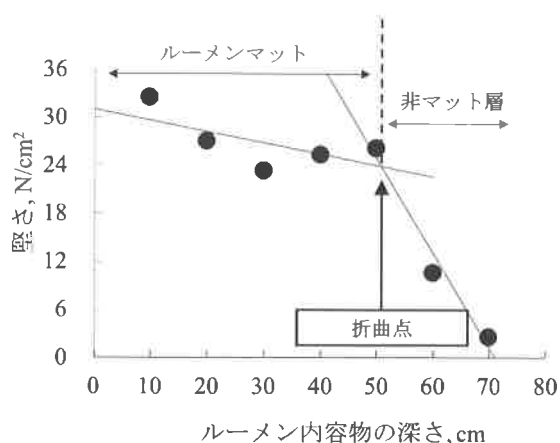


図1 ルーメン内容物の堅さと深さからルーメンマットを定義。

するために、深さと堅さの関係を折れ線グラフで表した。グラフ上に明確な折れ線が描かれたとき、2本の直線が交わる点(折曲点)を基準として、上側(背中側)の内容物をマット層、下側(腹側)の内容物を非マット層と定義した(図1)。折曲点が求められない場合にはマット層と非マット層を区分する明瞭な境目が存在しないと判断した。

タイプの異なる飼料を給与して、RM 定量法の検証を行った(表1)。グラスサイレージ(GS)を給与すると最も堅いRMが形成されたが、その厚みは薄かった。短草利用の放牧地草(GG)は軟らかく厚みのないRMであったが、これにロールサイレージを併給するとRMの厚みが増した。TMRは摂取量が少なかったために極端に軟らかいRMとなり、非マット層

表1 飼料タイプの違いがルーメン内貫入抵抗測定試験に及ぼす影響

	GG	GG+GS	GS	TMR
総ルーメン内容物				
堅さ, N/cm ²	9.1	10.2	13.0	4.5
深さ, cm	52.8	59.9	61.0	59.5
ルーメンマット ²				
堅さ, N/cm ²	10.4	10.9	15.8	5.5
深さ, cm	36.8	48.9	32.5	35.1
非マット層 ³				
堅さ, N/cm ²	7.39	5.88	8.18	4.30
深さ, cm	16.0	11.2	28.5	22.2

GG: 放牧地草; GG+GS: 放牧地草+イネ科ロールペールサイレージ; GS: イネ科ロールペールサイレージ; TMR: 高泌乳牛用の混合飼料

もほとんど固形分のない液状の内容物であった。このように、土壌硬度の測定方法を応用したルーメン内貫入抵抗測定装置を用いると、簡便な操作でルーメン内容物の堅さと深さを計測でき、同時にRMと非マット層が区分可能となった。

3. 繊維給与とルーメンマット形成

・飼料中 peNDF 含量との関係

粗飼料の切断長が短くなるか、粗濃比が低下すると、peNDF含量は低下する。peNDF含量の低い飼料では、RM形成が不十分になり、反芻の微弱化、ルーメンpHやルーメン内消化率の低下が懸念される(Grant and Cotanch, 2012)。そこで、これらの関連について実証することを目的に、通常のTMR(対照区)と飼料用カッターに2度通すことで細断したTMR(細断区)を泌乳牛に給与し、飼料中peNDF含量の違いがRM機能に及ぼす影響について検討した(泉ら, 2008)。

結果を表2にまとめた。細断区は対照区と比べて飼料中peNDF含量が6%以上低下し、peNDF摂取量も少なかったことから、対照区よりも飼料の物理的有効度は低かったと判断できた。RMの堅さは対照区と比べ軟らかくなる傾向を示したが($P < 0.10$)、細断区ではRMの厚みが有意に増した($P < 0.05$)。ルーメン発酵は細断区で促進傾向にあった。さらに、細断区において採食速度の増加傾向も確認されたが($P < 0.10$)、反芻活動や乳生産に処理による違いはなかった。

飼料粒度の縮小により採食速度が速まると、採食時の咀嚼回数が減少する。喫食から嚥下までの咀嚼回数が減少すると、嚥下食塊に含まれる唾液の量も減り、食塊の比重は小さくなる。比重が小さく軽い飼料片はRMの骨格となるので(Van Soest, 1994)、細断区では比重の小さい飼料片がルーメンに短時間に大量に流入したことでRMの厚みが増したと考えられる。

表2 飼料の切断長の違いが泌乳牛の採食量、採食反芻活動、ルーメン内容物性状および乳生産に及ぼす影響

	対照区	細断区 ¹	P値
peNDF ² , % DM	21.0	14.9	-
採食量			
DM, kg/日	19.7	19.7	NS
peNDF, kg/日	3.85	2.91	0.002
咀嚼活動			
採食時間, 分/日	329.6	310.2	NS
採食速度, gDM/分	55.5	62.2	0.09
反芻時間, 分/日	500.5	525.7	NS
ルーメンマット			
qc 値, N/cm ²	32.4	29.6	0.09
厚さ, cm	31.4	37.0	0.04
ルーメン発酵			
pH	6.21	6.16	NS
VFA			
総VFA, mM	125.3	147.6	0.09
酢酸, mM	75.3	87.6	0.09
プロピオン酸, mM	23.6	29.9	0.06
酪酸, mM	18.6	21.3	NS
乳生産			
乳量, kg/日	27.9	27.1	NS
乳脂肪率, %	4.08	4.34	NS
乳タンパク質率, %	3.42	3.46	NS
MUN, mg/dl	7.73	8.24	NS

¹ 細断区: 対照区TMRをフォレージカッターで2度切断したもの² 3段タイプのPenn State Particle Separator (PSPS)を用いて計測

NS: 有意差なし

この試験では、飼料中 peNDF 含量が変化しても反芻活動は影響を受けなかった。Yang and Beauchemin (2007)はアルファルファサイレージの粒度を変えることで給与飼料中の peNDF 含量を 13.9%から 19.8%に増加させたが、peNDF 含量と 1 日の採食、反芻および総咀嚼

時間との間に有意な正の関係を認めなかった。本試験も同様の傾向を示しており、飼料中の peNDF 含量だけでは反芻活動を説明できないことがわかった。

以上、細断区で RM の物理性が低下しなかったことから、peNDF 含量と RM の物理性は従来認識されてきたような直接的な関係では説明できないことが示唆された。

・非粗飼料繊維源(副産物飼料)多給時の RM 構造

副産物飼料は、一般に peNDF 含量が低く (Marchesini et al., 2011)、ルーメン内での繊維の発酵も速いとみなされている (Bhatti and Firkins, 1995; Voelker and Allen, 2003)。堅く締め厚みを有する RM は粗剛な繊維質によって作られると認識されているので (Robinson et al., 1987; Van Soest, 1994)、副産物を多給すると強固な RM が形成されないおそれがある。また副産物と組み合わせる粗飼料の種類や量によっても RM 構造や咀嚼活動は変化すると考えられる (Allen and Grant, 2000; Eastridge et al., 2009)。

そこで、副産物の給与量および組み合わせる粗飼料と RM 形成の関係を検討するために以下の試験を実施した (Izumi and Unno, 2010)。試験処理として、アルファルファ乾草 (AH) とビートパルプ (BP) の給与比を 8:2 あるいは 2:

表3 乾草とビートパルプの組合せが非泌乳牛の咀嚼活動およびルーメンマット性状に及ぼす影響

	飼料 ¹				効果、P値	
	A8B2	A2B8	G8B2	G2B8	乾草	給与比率 ²
採食量						
DM, kg/日	8.68	7.46	8.13	7.59	NS	0.02
NDF, kg/日	3.98	3.54	5.92	4.12	0.001	0.001
咀嚼活動						
採食時間, 分/日	208.3	88.7	286.6	120.0	0.06	0.001
反芻時間, 分/日	309.7	197.0	470.5	338.2	0.002	0.01
ルーメンマット						
堅さ, N/cm ²	13.2	11.5	19.1	13.5	0.03	0.04
厚さ, cm	32.3	25.6	33.2	26.5	NS	0.012
非マット層						
堅さ, N/cm ²	8.89	9.26	11.8	9.06	NS	NS
深さ, cm	22.2	23.3	28.3	27.8	NS	NS

¹ A8B2: アルファルファ乾草 (A) とビートパルプ (B) の給与比率が8対2、A2B8: 同2対8; G8B2: イネ科乾草 (G) とBの比率が8対2、G2B8: 同2対8、² 乾草とビートパルプの給与比率

8としたA8B2、A2B8、イネ科乾草(GH)とBPを同様の比率で給与したG8B2、G2B8の4処理とした。

結果を表3に示す。RMの堅さはG8B2が最も堅く、A2B8が最も軟らかかった。反芻時間はAHよりもGHが長く($P<0.01$)、B2よりもB8が短かった($P<0.05$)。ルーメンpHはA2B8のみが6.0を下回る時間帯が存在した(図2)。

BP給与量を80%まで増加させてもRMは形成されたが、ルーメン環境は処理によって大きく異なった。非粗飼料繊維源の物理的有効度は高くないので、飼料中NDFが粗飼料由来であるのか、非粗飼料繊維源由来であるのかによって乳牛の繊維充足の程度は異なる。本試験において、A2B8のNDF含量(44.9%)はA8B2(42.9%)よりも高かったが、A2B8の咀嚼活動、RMの堅さや厚さおよびルーメン発酵はいずれも処理間で最も低い値となった。加えて、ルーメンpHが6.0を下回る時間も4処理中A2B8で唯一観察された。ルーメンpHが6.0を下回ると繊維分解菌の活性と繊維消化率が低下するので(Hoover, 1986)、A2B8では亜急性ルーメンアシドーシスの発症が疑われた。アルファルファはルーメン内の分解速度が速いので(Ueda et al., 2001)、非粗飼料繊維源とアルファルファを組み合わせるためには粗飼料給与比率を高める必要があると判断できた。

一方で、G2B8では粗飼料の比率が20%しか

なかったにもかかわらず、RMの堅さは粗飼料比率80%のA8B2と同程度であった。さらに、反芻活動も両処理は類似した値を示した。

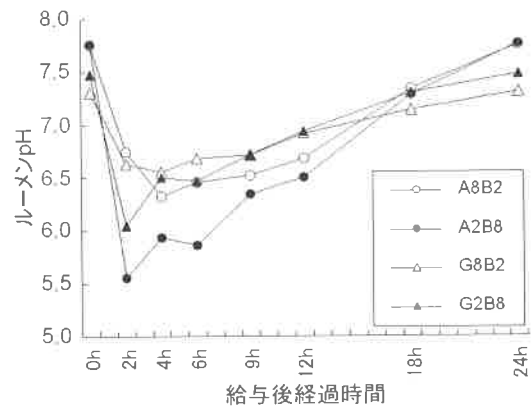


図2 乾草とビートパルプの給与が非泌乳牛のルーメンpH日内パターンに及ぼす影響。A8B2:アルファルファ乾草(A)とビートパルプ(B)の給与比率が8対2、A2B8:同2対8、G8B2:イネ科乾草(G)とBの比率が8対2、G2B8:同2対8。

Sudweeks et al. (1981)は roughage value index という飼料の物理性評価基準を提唱し、イネ科牧草の物理性はアルファルファよりも高いことを示している。これらの結果から、堅く締まったRMを形成するという点において、非粗飼料繊維源と組み合わせる粗飼料はイネ科牧草が望ましいことが示された。

4. ルーメンマットの構造と機能

・反芻刺激効果

RMの厚さはその容積を反映しており、厚みが増すほどRM容積は増大し、ルーメン背嚢壁に接触する面積や圧力も増加する。一方、

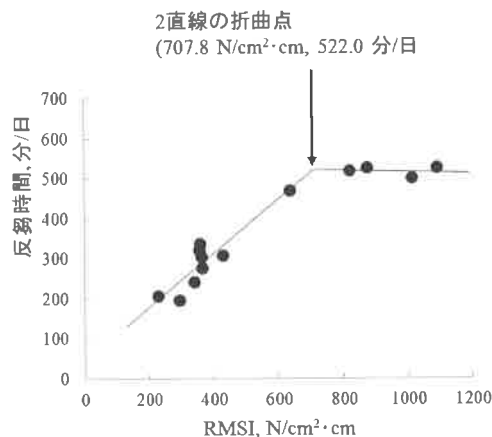


図3 乳牛におけるルーメンマット階層化指数(RMSI)と反芻時間の関係。RMSI: ルーメンマットの堅さ(N/cm^2)と厚さ(cm)の積。

RM が堅くなると、ルーメン背囊部への摩擦力が強まり反芻刺激効果は増加する。このように RM の堅さと厚さはそれぞれ単独ではなく相乗的に作用して反芻を刺激すると考え、両者の積を RM 階層化指数 (Ruminal mat stratification index: RMSI) と定義した (泉, 2016)。

RMSI を評価するために、本研究室で実施してきた 5 試験、延べ 49 頭のデータセットを用い、RMSI、RM の堅さおよび厚さと反芻時間との関係をそれぞれ解析した。その結果、RM の厚さ単独では反芻時間との間に関係性がなく、堅さおよび RMSI と反芻時間の間に関連が認められたが、反芻との関係がより強かったのは RMSI であった。RMSI と反芻時間の間には 2 本の直線で分割される折曲点が得られた (図 3)。

すなわち、当初は RMSI の上昇に比例して反芻時間も延長するが、RMSI が 707.8 N/cm²・cm に達すると、それ以降 RMSI が高まっても反芻時間は増加しないことが示された。その折曲点における反芻時間は 522.0 分/日であり、1 日の反芻時間の上限に達していると考えられた (岡本, 1979)。

この結果は、RM の堅さと厚さが相乗的に作用して反芻を誘起すること、RMSI があるラインを越えて上昇してもそれ以上反芻時間が増えないことを示している。反芻時咀嚼によって RM を構成する繊維が微細化され、RM 容積が縮小しルーメン内の充満が解消されると、次の採食が開始する。しかし、1 日の反芻時間には上限があるため (岡本, 1979)、堅さや厚さといった物理性の強すぎる RM はルーメン内に長時間滞留してしまい、採食行動を抑制する恐れがある。

・小飼料片の取り込み効果

RM のメイン機能の一つに穀物飼料片の取

表4 粗飼料と濃厚飼料の給与順序の違いがルーメンマットへの SFC 飼料片の取り込みに及ぼす影響

	基礎飼料 →SFC ¹	SFC→ 基礎飼料 ²	P 値
乾物採食量, kg/日	9.54	9.54	NS
咀嚼活動			
採食時間, 分/日	120.9	113.5	NS
反芻時間, 分/日	305.2	321.7	NS
ルーメンマット			
堅さ, N/cm ²	10.3	10.9	NS
厚さ, cm	35.2	32.5	NS
非マット層			
堅さ, N/cm ²	6.49	6.30	NS
深さ, cm	23.2	28.4	NS
ルーメン内容物中の SFC 飼料片割合			
給与直前, %DM			
総内容物	0.31	0.46	NS
ルーメンマット	0.44	0.39	NS
非マット層	1.61	0.39	NS
給与1時間後, %DM			
総内容物	4.98	4.14	NS
ルーメンマット	2.88	3.40	NS
非マット層	28.4	20.7	NS

¹ 基礎飼料を先に給与し、その1時間後に SFC を 1kg 給与

² SFC を 1kg 給与し、摂取後に基礎飼料を給与。

り込みによる消化促進が挙げられる。これは "filter bed effect" 理論 (Faichney, 1980; Kennedy and Murphy, 1988; Zebeli et al., 2012) といつて、広く浸透した考え方である。そこで粗飼料中心の基礎飼料と圧ペントウモロコシ (SFC) の給与順序の違いが、RM 内への SFC の取り込み効果に及ぼす影響について検討した (Izumi, 2013)。

RM の堅さや厚さといった物理的構造は両飼料とも同様であった (表 4)。

全ての処理において SFC 飼料片は給与 1 時間後にはルーメン底部 (非マット層) に多量に沈んでいることが観察された。すなわち、摂取された SFC は RM にほとんど取り込まれなかったか、一旦は取り込まれてもその後速やかにルーメン底部に沈んでしまうことが明らかになった。

このことから、従来認識されてきた RM への穀物飼料片取り込み機能は過大評価であつ

た可能性が示唆された。本試験は乾乳牛を用いており、搾乳牛と比べるとルーメン内容物は少なかった。ルーメン内容物の多い搾乳牛での検討が次の課題である。

5. ルーメンマット機能を活用した泌乳牛への TMR 給与法の検討

当研究室で現在取り組んでいるのが、RM 形成を考慮した泌乳牛への TMR 給与法の検討である。昨今の TMR 飼料設計には専用の PC プログラムが利用されることが多い。これらのプログラムでは飼料ごとに固有のルーメン内消化速度を設定し、計算結果に反映させている。一方、我々の試験結果(泉と末廣, 2015)から、同一 TMR を給与した場合でも RM の堅さが異なると、飼料のルーメン内滞留時間が変化することが確認されている。さらに、その傾向は粗飼料、非粗飼料繊維源あるいは濃厚飼料といった飼料のタイプによって異なることもわかってきた。飼料のルーメン内滞留時間が変化すると、それにともないルーメン内消化率も変化する。つまり、飼料のルーメン内消化性は RM 性状の影響を受けて動的に変化するといえる。

このような観点から、当研究室では RM の物理的性状とルーメン内の飼料利用率について体系化し、高泌乳牛 TMR の飼料設計に応用すべく検討を継続中である。

参考文献

- Allen DM, Grant RJ (2000) *Journal of Dairy Science* 83, 322-331.
- Bhatti SA, Firkins JL (1995) *Journal of Animal Science* 73, 1449-1458.
- Eastridge ML et al. (2009) *Animal Feed Science and Technology* 150, 86-94.
- Faichney GJ (1980) *Australian Journal of Agricultural Research* 31, 1129-1137.
- Grant RJ et al. (2005) In: *Proc. Cornell Nutr. Conf. for Feed Manufacturers*. October. pp. 18-20.
- Grant RJ, Cotanch KW. 2012. In: *Proceedings 2012 Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers*. pp. 45-57.
- Hoover WH (1986) *Journal of Dairy Science* 69, 2755-2766.
- 泉 賢一ら(2008) *日本畜産学会報* 79, 361-368.
- Izumi K, Unno C (2010) *Animal Science Journal* 81, 180-186.
- Izumi K (2013) *Animal Science Journal* 84, 543-550.
- 泉 賢一, 末廣 唯 (2015) *日本畜産学会第 119 回大会講演要旨*, p124.
- 泉 賢一 (2016) *酪農学園大学紀要* 41. 1-70.
- Kennedy PM, Murphy MR (1988) *Nutrition Research Reviews* 1, 189-208.
- Marchesini G et al. (2011) *Italian Journal of Animal Science* 10, 171-175.
- Mertens DR (1997) *Journal of Dairy Science* 80, 1463-1481.
- Mertens DR (2000) In: *The 11th Florida Ruminant Nutrition Symposium*. pp. 142-160.
- 岡本全弘 (1979) *北海道大学博士論文*.
- Robinson PH et al. (1987) *Livestock Production Science* 17, 37-62.
- Sudweeks EM et al. (1981) *Journal of Animal Science* 53, 1406-1411.
- Ueda K et al. (2001) *Animal Science Journal* 72, 198-208.
- Van Soest PJ (1994) In: *Nutritional ecology of the ruminant*. 2nd ed. pp. 230-252.
- Voelker JA, Allen MS (2003) *Journal of Dairy Science* 86, 3562-3570.
- Yang WZ, Beauchemin KA (2007) *Journal of Dairy Science* 90, 2826-2838.
- Zebeli Q et al. (2012) *Journal of Dairy Science* 95, 1041-1056.