

ルーメンマット形成とルーメンの健全性

泉 賢一 (いずみ けんいち) ●酪農学園大学 農食環境学群 循環農学類 ルミノロジー研究室 教授

乳牛のルーメン内容物は階層構造を有しており、ルーメンの背中側から中心部にかけて繊維などの比重の軽い飼料片が堅いマット状の塊を形成している。この塊はルーメンマットとよばれる。ルーメンマットにはいくつかの機能があると考えられているが、その一つに反芻の誘起があげられる。ルーメンマットがルーメン背囊粘膜に対して接触刺激をもたらすことで反芻反射が生じる。反芻によって吐き戻された食塊を咀嚼する際に大量の唾液が分泌され、咀嚼物とともにルーメンに流入する。牛の唾液はアルカリ性であり、飼料の発酵によって酸性に傾いたルーメンpHを引き上げる効果がある。ルーメンマットは反芻刺激を有するので、間接的ではあるがルーメンpHを適正に保つための役割を担っていると考えられている。

ルーメンマットのもう一つの機能として、小飼料片のマット内部への取り込みがある。穀物などの飼料粒子がマット内部へ取り込まれることで、長時間ルーメン内に滞留することになり、飼料の消化率が向上すると考えられている。したがって、ルーメンマットの厚さや堅さといった物理性が低下すると、小飼料片はルーメンマット内部に取り込まれずに、未消化のままルーメンから流出してしまうので飼料消化率にも影響が及ぶと推測される。

従来、ルーメンマット機能に関して以上のようない理論が想定されてきたが、ルーメンマット構造

の定量手法が存在しなかったために、これらの理論は推測の域をでなかった。反芻誘発刺激には飼料粒度と飼料中繊維含量が関連していることから、Mertens (1997) は物理的有効繊維 (physically effective Neutral Detergent Fiber: peNDF) という概念を提唱した。Mertens (1997) や Zebeli *et al.* (2012) は、peNDFを適正量含む飼料を摂取した乳牛では充実したルーメンマットが形成されると想定したが、ルーメンマットの定量法が確立していないことから、この想定が評価されるには至っていない。

このような背景から、私たちの研究室では土壌硬度の評価指標である貫入抵抗に着目し、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、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。本手法では、ルーメンマットと非マット層を区分するだ

けでなく、同時にルーメンマットの堅さの平均値も算出できるので、ルーメンマットの形成状況と生産性との関連が検討可能になった。

本稿では、私たちの研究室で得られた知見を中心に、ルーメンマットの形成とその機能およびルーメンの健全性について考えてみたい。

繊維給与とルーメンマット形成

飼料中 peNDF 含量との関係

peNDF 含量が低い飼料では、ルーメンマット形成が不十分になり、反芻刺激の微弱化、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、飼料中 peNDF 含量の違いがルーメンマット機能に及ぼす影響について評価するために、通常の TMR (対照区) と切断した TMR (細断区) を泌乳牛に給与し、試験を実施した (表 1)。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が低いと判断できた。しかし、ルーメンマットの堅さは対照区との間に有意な差はなく、むしろ細断区ではマットの厚みが有意に増すことが示された ($P < 0.05$)。ルーメンマットの物理性に差がなかったことから、ルーメン pH、反芻時間、乳量および乳脂率にも、飼料の違いによる影響はみられなかった。

飼料粒度の縮小により採食速度が速まると、採食時の嚥下食塊形成に要する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、嚥下食塊に混入する唾液の量も減り、食塊の比重は小さくなる。比重が小さく軽い飼料片はルーメンマットの主要な構成要素であるので、細断区では比重の小さい飼料片が短時間に大量に流入したことでマットの厚みが増したと考えられる。マットの厚みが増したことで、堅さの減少傾向が補われ、反芻時間が維持された

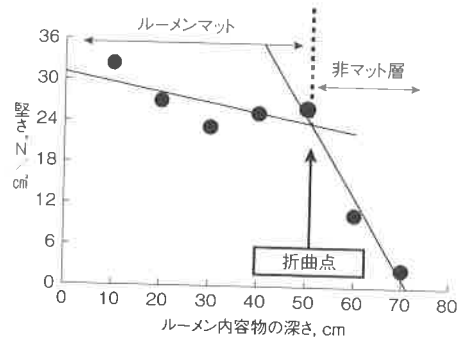


図 1 ルーメン内容物の堅さと深さからルーメンマットを定義

表 1 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	堅さ, 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
乳生産	酪酸, mM	18.6	21.3	NS
	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

と推測される。

以上の結果は、peNDF 含量とルーメンマットの物理性の間には、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メカニズムが存在することを示唆している。

非粗飼料繊維源 (副産物飼料) 多給時のルーメンマット構造

副産物飼料は、一般に peNDF 含量が低く、ルーメン内での繊維の発酵も速いとみなされている (Voelker and Allen, 2003)。堅く締め厚

表2 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

みを有するルーメンマットは粗剛な繊維質が集積することで形成されると考えられているので、副産物の給与法によっては強固なルーメンマットが形成されないおそれがある。そこで、食品製造副産物由来の非粗飼料繊維源の給与および組み合わせる粗飼料の草種とルーメンマット形成の関係を検討するために試験を実施した(表2)。

アルファルファ乾草とビートパルプ(BP)の給与比を8:2あるいは2:8としたA8B2、A2B8、イネ科乾草とBPを同様の比率で給与したG8B2、G2B8の4処理を設けた(Izumi and Unno, 2010)。ルーメンマットの堅さはG8B2が最も堅く、A2B8が最も軟らかかった。反芻時間はアルファルファ乾草よりもイネ科乾草が長く(P<0.01)、BP2割よりもBP8割が短かった(P<0.05)。乾草20%で比較した場合、イネ科乾草はルーメンマットの物理性、反芻時間、ルーメンpHが適正範囲に収まっていたが、アルファルファ乾草ではマット物理性が低下し、反芻時間も極端に短縮した。さらに、ルーメンpHはA2B8のみがルーメンアシドーシスの指標である6.0を下回る時間帯が存在した(図2)。

これらのことから、非粗飼料繊維源とアルファルファ乾草を組み合わせると軟弱なルーメンマットになってしまい、ルーメン発酵にも悪影響が及ぶ

ことが示された。副産物を多給するようなケースでルーメンを健康に保つためには、堅固なマットを形成できるイネ科乾草を給与することが推奨される。

ルーメンマットの構造と機能

反芻刺激効果

ルーメンマットの厚さはその容積を反映しており、厚みが増すほどマット容積は増大し、ルーメン背囊壁に接触する面積や圧力も増加すると考えられる。一方、

ルーメンマットが堅くなると、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と予測される。このようにマット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、両者の積をルーメンマット階層化指数(Ruminal mat stratification index: RMSI)と定義した(泉, 2016)。

本研究室で得られた一連の試験結果から、RMSIと反芻時間の関係を求めたところ、両パラメーターの間には正の直線関係が確認された(図3)。さらに、RMSIが707.8 N/cm²・cmに達すると反芻時間は522.0分/日でプラトーに達することも示された。折曲点における反芻時間

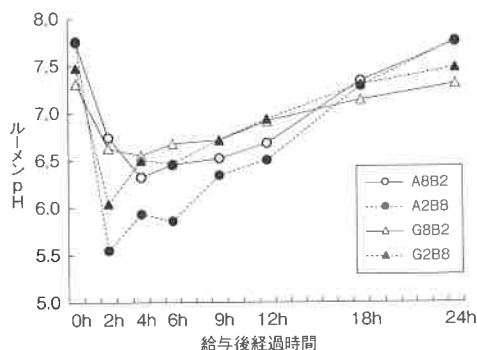


図2 乾草とビートパルプの給与が非泌乳牛のルーメンpH日内パターンに及ぼす影響

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

は、1日の上限に達していると考えられた(岡本、1979)。

これらの結果は、ルーメンマット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ルーメンマットを構成する繊維が微細化され、マット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ルーメンマット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

ルーメンマットのメイン機能の一つに穀物飼料片の取り込みによる消化促進があげられている。これは“filter bed effect”理論(Kennedy and Murphy, 1988; Zebeli *et al.*, 2012)といて、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ぺんとうモロコシの給与順序の違いが、ルーメンマット内への圧ぺんとうモロコシ飼料片の取り込み効果に及ぼす影響について検討した(Izumi, 2013)。

ルーメンマット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3)。両処理と

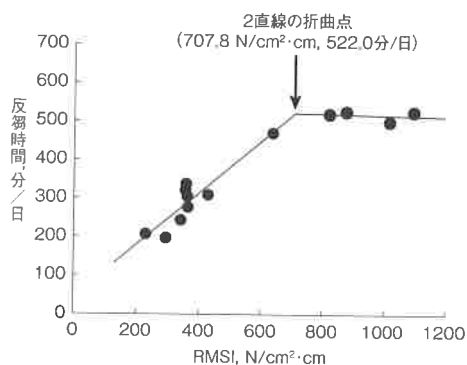


図3 乳牛におけるルーメンマット階層化指数(RMSI)と反芻時間の関係

RMSI: ルーメンマットの堅さ(N/cm²)と厚さ(cm)の積

もに圧ぺんとうモロコシ飼料片は給与1時間後にはルーメン底部(非マット層)に多量に沈んでいた。すなわち、摂取された圧ぺんとうモロコシはルーメンマット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ルーメンマットへの穀物飼料片取り込み機能は過大評価であっ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。

ルーメンマットと生産性の関係

事例1 DMIレベルとルーメンマットの物理性およびルーメン内滞留時間の関係

当研究室で現在取り組んでいるのが、ルーメンマット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

表3 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圧ぺんとうモロコシ(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 内容物の SFC飼料片 割合	給与 直前, %DM	総内容物 0.31 ルーメンマット 0.44	総内容物 0.46 ルーメンマット 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 ルーメンマット 2.88	総内容物 4.14 ルーメンマット 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

基礎飼料: イネ科乾草65%、酒粕35%

² SFCを1kg給与し、摂取後に基礎飼料を給与

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）では、同一TMRを給与した場合でもルーメンマットの堅さが異なると、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ルーメンマット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、当研究室ではマット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。

事例2 ルーメンマットスコアと子牛群事故率の関係

非カニューレ装着牛におけるルーメンマット形成状況の把握法を確立することは今後の課題である。阿部ら（2016）は、肉用子牛を用いてルーメンマットの形成状況を間接的に推測する手法を開発した。彼らは、拳を体表にあてた状態から開始して、内容物の固体と液体を攪拌混和するイメージで左けん部を反復圧迫し、内容物の固体と液体が混和され液状化するまでの過程をルーメンマットスコア（RMS）とする基準を考案した。肉用子牛牛群において、ルーメンが粘土状で堅い（RMS:5）個体が多くなるように給飼管理を続けることで、呼吸器病と消化器病において事故率が有意に減少した。このことは、子牛育成においてルーメンマット形成状況をモニタリングすることの重要性を明示している。

現在、RMS測定法を乳牛においても適用し、ルーメンマット物理性を把握可能であるか検討中である。

参考文献

- 阿部信介, 三上喜康, 壺岐佳浩. 2016. 第一胃反復圧迫法による粗飼料充満度の新規指標と子牛群給餌管理指導への応用. 家畜診療 63, 397-403.
- Grant RJ, Cotanch KW, 2012. Higher Forage Diets: Dynamics of Passage, Digestion, and Cow Productive Responses. In: Proceedings 2012 Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers. pp. 45-57.
- 泉 賢一, 坂本孝仁, 柴山草太, 辻 秀雄. 2008. 泌乳牛第一胃内容物の物理的性状の指標としての貫入抵抗値の評価. 日本畜産学会報 79, 361-368.
- Izumi K, Unno C. 2010. Effects of feeding ratio of beet pulp to alfalfa hay or grass hay on ruminal mat characteristics and chewing activity in Holstein dry cows. Animal Science Journal 81, 180-186.
- Izumi K. 2013. Effects of the feeding sequence of concentrate and forage and the feeding ratio of sake cake to grass hay on the characteristics and the entrapment effect of the ruminal mat in non-lactating dairy cows. Animal Science Journal 84, 543-550.
- 泉 賢一, 末廣 唯. 2015. 採食量の異なる乳牛におけるルーメンマット性状およびルーメン内飼料片滞留時間関係. 日本畜産学会第119回大会講演要旨, p124.
- 泉 賢一. 2016. 乳牛におけるルーメンマット構造の定量とその形成に関する研究. 酪農学園大学紀要 41. 1-70.
- Kennedy PM, Murphy MR. 1988. The nutritional implications of differential passage of particles through the ruminant alimentary tract. Nutrition Research Reviews 1, 189-208.
- Mertens DR. 1997. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. Journal of Dairy Science 80, 1463-1481.
- 岡本全弘. 1979. 反芻行動とその消化生理学的意義に関する研究. 北海道大学博士論文.
- Voelker JA, Allen MS. 2003. Pelleted beet pulp substituted for high-moisture corn: 3. Effects on ruminal fermentation, pH, and microbial protein efficiency in lactating dairy cows. Journal of Dairy Science 86, 3562-3570.
- Zebeli Q, Aschenbach JR, Tafaj M, Boguhn J, Ametaj BN, Drochner W. 2012. Invited review: Role of physically effective fiber and estimation of dietary fiber adequacy in high-producing dairy cattle. Journal of Dairy Science 95, 1041-1056.