

飼料学(33)

誌名	畜産の研究 = Animal-husbandry
ISSN	00093874
著者名	板橋,久雄 石橋,晃
発行元	養賢堂
巻/号	60巻12号
掲載ページ	p. 1301-1308
発行年月	2006年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



飼料学 (33)

— V. 産業動物 IV. 反芻動物 (3) —

板橋 久雄*・石橋 晃**

5. ルーメンにおける栄養素の代謝

1) 炭水化物の代謝

飼料の炭水化物は、構造的のものと非構造的のものに分けられる。前者にはセルロース、ヘミセルロースがあり、リグニンとともに植物の細胞壁を構成し、後者は澱粉、糖、ペクチンなどで細胞内容物の区分である。

(1) 繊維成分の分解

植物細胞壁を構成する多糖はヘテロで複雑な構造をしている(表4)。セルロースは細胞壁の主成分で、微生物はこれを分解し多量のVFAを生成する。微生物により分泌されるセルラーゼは、その起源によって特異性があるだけでなく、同一生物でも基質特異性を異にした多成分から構成されており、セルロースの分解はそれらの相補的な作用によって効率よく進むと考えられている。繊維分解の主体は細菌とプロトゾアであるが、真菌には難分解性の繊維を分解するという特徴がある。

表4 牛用飼料のNDF含量と細胞壁構成モノマーの組成 (g/kg乾物)

NDF	448.9
ラムノース	0.8
アラビノース	18.8
キシロース	98.9
マンノース	3.1
ガラクトース	6.4
グルコース	169.4
グルクロン酸	4.8
ガラクトツロン酸/4-O-メチルガラクトツロン酸	10.8
アセチルプロミドリグニン	74.6
フェルラ酸 (エステル結合)	2.5
フェルラ酸 (エーテルおよびエーテル結合)	5.4
p-クマル酸 (エステル結合)	4.5
p-クマル酸 (エーテルおよびエーテル結合)	5.7

飼料：スーダングラス乾草+乳牛用配合飼料 (8:5) (Kasuya *et al.*, 2006)

セルロースは直鎖グルカン分子が集まったマイクロフィブリルからなり、D-グルコースが β -1,4結合したものが基本構造である。このグルカン鎖は60~70本束ねられて微結晶単位を形成する。セルロースの束にはエクステンシンやその他のグリシンリッチあるいはプロリンリッチな特殊な構造的蛋白質が含まれており、これらは細胞壁中のマイクロフィブリルを束ね、物理的強度を高め、その間隙をキシラン、ペクチン、グルコマンナン、そしてリグニンが充填している。したがって、植物細胞壁の分解にはさまざまな酵素が必要である。植物細胞壁分解の速度や程度に影響を与える主な要因はリグニン含量であり、その含量が高まると分解率は低下する。また、リグニン関連物質としてパラクマル酸やフェルラ酸などのフェノール化合物があるが、これらも飼料分解の障害になっている。飼料分析ではセルロースは酸性デタージェント繊維 (ADF) とリグニンの差で求められる。

セルロースの加水分解は、エンドグルカナーゼ、エキソグルカナーゼおよび β -グルコシダー

表5 ルーメン発酵と乾物消失率に及ぼすセロビオース添加 (mg) の影響 (*in vitro* 実験)

	0	40
培養液 pH	5.9	5.8
アンモニア-N (mg/dL)	16.5	15.6 *
VFA (mM)	66.3	69.3 *
酢酸 (mol%)	57.6	56.6 *
プロピオン酸 (mol%)	25.5	27.5 *
酪酸 (mol%)	12.7	13.3 *
プロトゾア数 ($\times 10^4$ /mL)	12.5	11.6
CH ₄ 発生量 (mL)	15.4	15.6
H ₂ 発生量 (mL)	0.03	0.04
乾物消失率 (%)	45.2	49.6 *
セルロース分解菌数 ($\times 10^6$ /mL)	4.7	5.7 *

希釈ルーメン液60mLを用い基質として乾草+濃厚飼料 (1.5:1) を添加し、6時間培養 (DM消失率は24時間培養) * $P < 0.05$ (Lila *et al.*, 2006)

* 東京農工大学大学院 (Hisao Itabashi)

** (社) 日本科学飼料協会 (Teru Ishibashi)

ゼの3つの異なる酵素の作用による。この中でエキソグルカナーゼが分解速度を律速するとされており、これはセルロース分子の非還元末端側からグルコース2分子からなるセロビオース単位で切断していく。生成したセロビオースは、微生物細胞内に取り込まれてから β -グルコシダーゼの作用によってグルコースに分解される。セルラーゼの発現はセロビオースによって誘導されることもあるので、セロビオースの飼料添加で繊維分解が高まる可能性がある(表5)。

セルロースの分解では、微生物がつくった酵素を有効に機能させるために、微生物は特殊な機構をもっていることが知られている。その一つはセルロソームとよばれる繊維質分解酵素複合体で、多くの嫌気性菌に認められる(図2)。細菌の表面には多くの突起物が存在し、その中に酵素複合体が含まれている。複合体はセルラーゼ、キシラナーゼなど10数種類の酵素によって構成され、その周りは吸着機能をもつ物質で覆われ、微生物菌体を繊維質に吸着固定し、繊維を分解して栄養源を取り込む。菌体と飼料とが近接しているので分解産物を他の微生物に奪われることなく確保できる仕組みになっている。このセルラーゼ複合体のシステムをもつことにより、この種の微生物は少量の酵素生産で繊維の分解を効率的に行うことが

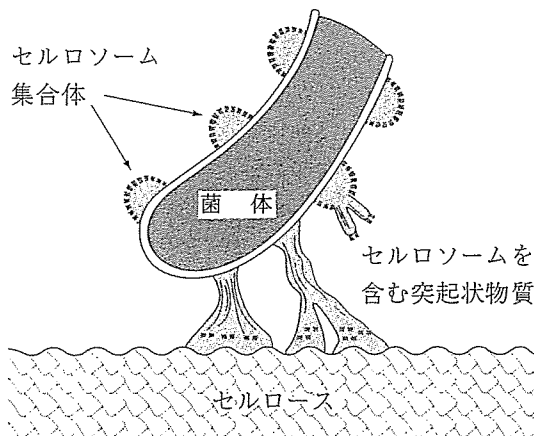


図2 セルロソーム(セルラーゼの複合体)の菌体表面における局在性を示す模式図(大宮, 2004)

突起状物質はセルロソームの集合体として菌体表面に存在する。それが成長して管状に伸び、セルロース表面と結合したセルロソームをセルロースに付着させ、分解を行う。

できる。また、繊維分解の微生物は、繊維に付着すると基質利用性の異なる複数の種が共存するコンソーシアムを形成し、複雑な化学組成の植物細胞壁を分解する。

ヘミセルロースの主要な成分はキシロースが β -1,4結合したキシログルカン鎖であるが、その分解には各種の酵素が関与し、最終的にキシロースを生ずる。飼料分析では中性デタージェント繊維(NDF)とADFの差で求められる。

リグニンもルーメン真菌などにより僅かに分解される。構造的炭水化物は飼料の物理性(かさ)を供給する点でも重要である。その物理性によって、膨大なルーメン内を満たし粘膜を刺激し、ルーメン運動、反芻行動や唾液分泌を促すので、必須の成分である。

ペクチンはガラクトソロン酸が α -1,4結合することでできた直鎖状分子である。コロイド状の細胞間充填物質で柔軟で親水性が高い。ペクチンは酸・アルカリ処理で抽出されるので、飼料分析ではNFEに含まれる。テンサイ、カブなどの根菜類に多く含まれ、牧草にも数%含まれるが、マメ科牧草の方が含量が多い。牧草などのペクチンはセルロースなどよりも容易に分解される。ペクチンは各種の繊維分解菌やプロトゾアによって分解され、最終的にはVFAや乳酸を生成する。

プロトゾアはデンプンを最もよく分解するが、繊維成分ではセルロースよりヘミセルロースに対する分解活性が高い。近年、プロトゾアも独自のエンドグルカナーゼを分泌することが明らかにされた。ルーメン真菌は各種の細胞壁分解酵素によりセルロースやキシランを分解するが、とくにセルロース分解活性は高い。しかし、ペクチン分解活性は認められない。

(2) 澱粉の分解

澱粉は300~3,000個のグルコースが α -1,4結合したアミロースと、アミロースの糖鎖に分枝した糖鎖が α -1,6結合した1万~10万個のグルコースで構成されるアミロペクチンとからなる。澱粉はトウモロコシやムギ類などの穀類に多く含まれ、易発酵性のエネルギー源の主体である。ルーメンでの澱粉の分解率は穀類の種類によって異なり、大麦はトウモロコシやソルガムに比べ消化され易い。

澱粉は主に細菌とプロトゾアの α -アミラーゼによって分解される。澱粉の消化は速やかに行われるが、プロトゾアはそれを体内で緩やかに消化するので、急激な発酵が抑えられ、pHの低下や乳酸の蓄積などルーメン環境の急変を招かないようになる。

(3) 揮発性脂肪酸（VFA）の生成

炭水化物の消化で生じたグルコースなどの単糖類は解糖系によってピルビン酸に異化され、これより酢酸、プロピオン酸、酪酸などのVFAとメタン、二酸化炭素などが生成される。イソ酪酸、イソ吉草酸などの分枝鎖VFAも少量生成されるが、これらはセルロース分解菌などの増殖に不可欠の因子である。代謝の中間産物として、乳酸、コハク酸、ギ酸および水素もつくられるが、これらは他の微生物による発酵の基質として速やかに利用されるため、普通はルーメン内からはほとんど検出されない。

① 酢酸

ルーメン内でピルビン酸から酢酸がつくられる経路は菌種によって異なり、2つの方法がある。その一つはピルビン酸がリン酸化されてギ酸とアセチルリン酸を生じ、アセチルリン酸から加水分解により酢酸が作られる反応である。もうひとつの経路ではピルビン酸がCoA化されて、アセチルCoAとギ酸を生じ、アセチルCoAまたはアセチルリン酸が酵素分解されて酢酸が生じる。どちらの経路でもピルビン酸1モルから酢酸、水素と二酸化炭素とATPが1モルずつ生成される。

② プロピオン酸

プロピオン酸の生成は、コハク酸経路（ジカルボン酸経路）とアクリル酸経路（直接還元経路）によって行われる。コハク酸経路ではホスホエノールピルビン酸からフマル酸が生成され、さらに還元されてコハク酸となりメチルマロニルCoAを経てプロピオン酸が生成される。アクリル酸経路ではピルビン酸から乳酸が生成され、アクリルCoAを経てプロピオン酸が生成される。いずれの経路でもピルビン酸1モル代謝の過程で微生物の生育に有害な水素を2モル消費し、ATP1モルを生じる。通常はコハク酸経路が優勢であるが、濃厚飼料の給与割合が多くなるとアクリル酸経路の寄与が大きくなる。たとえば、乾草給与ではプロ

ピオン酸の92%はコハク酸経路で生成されるが、穀類多給ではアクリル酸経路は23%という報告がある。

③ 酪酸

酪酸の生成経路も2つある。1つは酢酸2分子の縮合でアセト酢酸ができ、その還元反応で酪酸ができる反応で、脂肪酸の分解反応である β 酸化の逆反応である。もう1つはピルビン酸からアセチルCoAを経る高級脂肪酸の合成反応であるマロニルCoA経路である。酪酸生成におけるこれら2つの経路の寄与程度についてはわかっていない。なお、酢酸を生成する細菌は酢酸と同時に酪酸も生成し、プロピオン酸生成菌は同時に酢酸も生成することが多い。

(4) 微生物の貯蔵多糖類

非構造化炭水化物から、微生物はさらに貯蔵多糖類を合成し、蓄積する。そのほとんどはグルコースからなるが、細菌のものはグリコーゲン様物質が多く、プロトゾアのはアミロペクチンが多い。貯蔵多糖類の含量は飼料給与後1~2時間目で最大となり、乾草などの粗飼料単独の場合には微生物乾燥重量の10%程度であるが、澱粉や糖類あるいは濃厚飼料を併給するとその割合は数倍になる。とくにプロトゾアは貯蔵多糖類を活発に合成し、その割合が40%になることもある。貯蔵多糖類は飼料給与後2時間目ごろから減少するが、これは微生物により分解されるため、プロトゾアでは水素、二酸化炭素、酢酸、酪酸や乳酸が生成される。通常、小腸に流入する α -グルカンの過半は微生物由来貯蔵多糖類である。

一般に穀類などが多給されると急激な発酵によりVFAや乳酸の生成が高まりpH低下などルーメン環境の悪化が進むが、主にプロトゾアによる貯蔵多糖類の合成はそれを防ぎ、澱粉などの急激な発酵を抑えルーメン発酵の安定化の役割を果たしている。

(5) メタンの生成とその抑制

① メタンの生成

ルーメン内では炭水化物代謝の最終産物のひとつとしてメタン（ CH_4 ）が常に生成される。メタンは難溶性なために血中にはほとんど吸収されず、あい気として口から排出されが、それにより損失するエネルギーは飼料エネルギーの3~12%

になる。また、メタンは温室効果ガスのひとつであり、大気メタンは毎年約1%の割合で増加しているとされているが、ルーメンからのメタンはその約15%を占めるので、メタン抑制は重要な課題になっている。

メタンは *Methanobrevibacter ruminantium* などのメタン菌によって生成されるが、これらは他の細菌と生化学的性質が異なる古細菌(アーケア)に属する。メタン菌は酸化還元電位(Eh)が-300mV以下のきわめて低い嫌気度でないとう生育できない偏性嫌気性菌で、他の細菌に比べ増殖速度は遅い。また、メタン菌は低pHに弱いので、ルーメン内pHの低下によりメタン生成は減少する。

メタン菌は主に H_2 と CO_2 とからメタンを生成し、ギ酸、メチルアミン、メタノールからもある程度メタンを生成する。メタン生成の経路は複雑であり2種類の補酵素が関与している。代謝経路の最後の段階に関与するものは補酵素Mであり、メチル基転移反応に関与しており、メチルー補酵素Mレダクターゼによって必要とされる因子である。この補酵素はメタン菌以外では検出されていない。

嫌気発酵では多量の H_2 を生成するが、 H_2 が蓄積するとヒドロゲナーゼ反応による H_2 生成が抑制され、微生物の活性は低下し、増殖が阻害される。こうして、発酵を活発にするためには水素分圧を低く保つ必要があり、メタン生成は H_2 除去のための重要な手段となっている。これにより、プロトゾアや繊維分解細菌の活性を高めることになる。つまり、メタン菌はプロトゾアや細菌と共生関係にあるので、メタン菌を完全に抑制することはできない。メタン菌の多くはプロトゾアの体表や細胞内に生息しているので何らかの方法でプロトゾアを除去するとメタン生成は20~35%減少するが、繊維の消化が著しく低下するという問題がある。

したがって、メタン生成を完全に抑制することは得策とはいえず、水素処理をプロピオン酸生成でより多く行うことが現実的なひとつの方法である。

②メタン生成の抑制

メタン生成は給与飼料の種類や構成により変化

し、一般に粗飼料の給与割合を低め濃厚飼料の割合を高めると低下する。これは濃厚飼料の給与によりプロピオン酸生成菌が多くなるためであり、飼料の栄養バランスの改善はメタン生成の抑制のための基本といえる。

乳牛ではメタン発生量は乳量が多くなるにつれて増加するが、乳量当りのメタン発生量は逆に減少する。また、脂肪含有率の高いビール粕やとうふ粕などを飼料中に約10%添加すると、メタン発生量は約10%低減する。

このような飼料給与法の改善と並んで、古くから各種の添加物によるメタン生成の減少が試みられてきた。これらの研究では、(1)代謝性水素のメタン以外の還元生成物の増強、(2)メタン菌やプロトゾアの抑制の2つの面から検討されてきた。前者の代謝性水素の処理としては、プロピオン酸生成の前駆物質の利用、長鎖脂肪酸や天然油脂の添加があり、後者ではメタン阻害剤やモネシンなどのイオノフォアの利用がある。しかし、多くの場合、これらの添加によりメタン生成は抑制されても同時にプロトゾアの著しい減少で繊維の消化が低下したり、化学物質に対するメタン菌の適応が生じたりするので、まだ効果的な抑制法は確立されていない。以下では(1)についてフマル酸を用いた場合、(2)についてサイクロデキストリン包接ブロモクロロメタン(BCM-CD)を用いた場合のメタン抑制効果を述べる。

フマル酸はルーメンでのプロピオン酸生成のひとつのルートであるコハク酸経路での前駆物質なので、その添加により還元反応が促進されプロピオン酸生成が増加し、メタン生成が低下する。この場合、プロピオン酸の増加量とメタンの減少量は化学量論的にほぼ等しいとされ、100gのフマル酸が還元されるとメタンが約5L減少することになる。

ウシにソルガムサイレージのみを給与し、フマル酸を飼料の2%添加すると、メタン発生量は約23%低下し、二酸化炭素発生量も約20%低下した。ルーメンのVFA濃度には変化は認められなかったが、プロピオン酸の比率は増大し、酢酸の比率は低下した。アンモニア態N濃度も低下したが、プロトゾア数には変化は認められなかった。フマル酸添加により、血漿のグルコース濃度は上

表6 ウシのルーメン発酵とメタン発生量に及ぼす
フマル酸と BCM-CD の影響

	フマル酸		BCM-CD	
	対照区	添加区	対照区	添加区
ルーメン液性状				
総 VFA (mmol/dL)	6.5	6.9	7.1	6.5
酢酸 (mol%)	60.5	61.5	57.4	52.7
プロピオン酸 (mol%)	23.5	28.4*	26.3	26.6
アンモニア-N (mg/dL)	27.2	22.9*	27.7	25.1
プロトゾア数 ($\times 10^5$ /mL)	5.9	5.9	3.8	4.8
血漿成分				
グルコース (mg/dL)	64.3	78.3*	102.1	113.8*
尿素-N (mg/dL)	8.4	6.8*	7.8	6.8
消化率 (%)				
DM	57.4	57.6	57.4	54.2
NDF	71.2	69.8	71.0	69.6
CP	54.4	58.9	52.4	53.8
CH ₄ 発生量 (L/kg.DMI)	27.0	21.1*	22.8	1.1*
CO ₂ 発生量 (L/kg.DMI)	353.	286.9	301.1	348.7

ルーメン液と血液は飼料給与後2時間の試料, * $P < 0.05$ (Bayaru et al., 2003) DMは乾物摂取量

昇し、乾物と総繊維の消化率は変わらなかった(表6)。これらは、プロピオン酸の増加により糖新生が促進されメタン生成が低下し、飼料エネルギーの利用効率が向上したことを示している。なお、乾草+濃厚飼料給与の場合には、フマル酸添加によるメタン抑制は約7%と少なく、給与飼料の種類によってフマル酸の効果はやや相違することが示された。

また、BCM-CDを飼料の0.1%添加すると、メタン発生量は約95%抑制され、二酸化炭素発生量はやや増加した。ルーメンVFAの濃度と組成やプロトゾア数には大きな変化は認められなかった。添加により、血漿のグルコース濃度は上昇し、飼料の消化率は変わらなかった。BCMはメタン生成の最後の段階に関与するメチル基転移反応を阻害することが知られており、このためにメタン生成が著減したと考えられる。繊維の消化などは低下しないので、メタン阻害剤として利用できる可能性があるが、BCMはハロゲン化合物であることから使用量が微量とはいえ環境汚染が懸念されるので、現時点では実用化は困難と考えられる。

また、植物由来のサラサポニンの飼料添加でメタン生成は10~20%低下することも明らかとなった。今後はフマル酸やこれらの天然物質の併用でルーメン発酵に著しい影響をもたらさずにメタンを低減させ、エネルギー利用効率の向上を図る

ことが重要である。

2) 蛋白質・アミノ酸の代謝

ルーメン内では、飼料蛋白質および遊離アミノ酸や硝酸塩などの非蛋白態窒素化合物(NPN)のほとんどは微生物によって分解され、ペプチド、アミノ酸を経てアンモニアとなり、その後、微生物蛋白質が合成される。アンモニアは細菌のみによって利用される。プロトゾアは飼料や細菌の蛋白質を取り込み自らの蛋白質を合成する。飼料蛋白質の一部は分解されずに第四胃より小腸に移行するが、これを非分解性(バイパス)蛋白質という。小腸で吸収される微生物蛋白質とバイパス蛋白質を合わせたものは代謝蛋白質と呼ばれる。

アンモニア濃度は微生物蛋白質の合成効率の指標となり、5~10mgN/100mLが至適濃度である。それ以上の濃度ではルーメン粘膜より吸収されるアンモニア濃度が増加し、肝臓での尿素合成が高まり、尿中へのN損失量が増加する。また、それ以下では細菌の増殖に必要なNの供給が不足する。ルーメン内で合成される微生物蛋白質のうち、細菌態は50~60%を占め、残りはプロトゾア態である。微生物蛋白質は植物蛋白質に比べ、必須アミノ酸の割合が多く、栄養価が高い(表7)。プロトゾアにはとくにリジンが多く含まれているが、これはプロトゾアがリジンを合成する能力をもっているからである。

しかし、ルーメン微生物の蛋白質合成能力には限度があり、乳牛では1日2.5kg前後である。1日乳量45kgの場合、乳腺では約1.5kgの蛋白質が合

表7 ルーメン微生物の必須アミノ酸組成
(総アミノ酸に対する%)

アミノ酸	混合細菌	プロトゾア a)	真菌 b)	乾草
スレオニン	5.3	3.2	6.3	5.2
メチオニン	2.1	0.7	2.4	1.7
バリン	6.8	2.9	6.9	6.3
イソロイシン	6.6	3.3	6.2	4.9
ロイシン	7.5	4.8	7.6	9.4
フェニルアラニン	5.3	2.5	4.1	6.6
ヒスチジン	1.7	4.5	1.7	1.9
リジン	8.2	15.1	8.2	4.7
アルギニン	4.9	11.8	3.9	6.0

a) Ophryoscollecidae, b) Neocallimastigaceae (松本, 2004)

成されるが、消化吸収率や利用効率を考えるとCPとしては約4kgが必要となる。この不足分は飼料からの非分解性蛋白質で補わねばならない。飼料蛋白質のルーメン分解率は加熱処理によって低下するので、大豆(粕)などではこの処理が行われている。

多くの研究によれば、乳牛飼料の主要蛋白質源が大豆(粕)などのマメ科である場合にはメチオニンが、穀類由来の蛋白質が多い場合にはリジンが最も不足し易いアミノ酸とされている。これらを比較的多く含むバイパス率が高い加熱大豆(粕)などの利用が一般に行なわれるが、これらのバイパスアミノ酸製剤の利用も進められている。バイパスアミノ酸製剤の添加により、乳量と乳蛋白質率の増加のみならず窒素の排泄量の低下の可能性も示されている。

プロトゾアは摂取した蛋白質を分解し、アミノ酸やペプチドを体外に放出する。ここで生じた遊離アミノ酸は主に細菌によって速やかに分解されアンモニアになるので、通常、遊離アミノ酸の蓄積は少ないが、これらは細菌の代謝を活発にして生育を促進する。

プロトゾアは特殊なアミノ酸から特殊な化合物を生成する。たとえば、リジンからピペコリン酸を、メチオニンとスレオニンから2-アミノ酪酸を、メチオニンからメチオニンスルホキシドを、アルギニンからシトルリンやオルニチンを生成する。この中でピペコリン酸は脳の安定化に関与する神経伝達物質ギャバ(GABA, γ -アミノ酪酸)の脳内放出を促進する神経変調物質であることが知られており、ウシが落ち着いて鎮静な状態を保つのに関係していると考えられている。ルーメン液と血漿のピペコリン酸濃度は飼料給与後1~2時間後に高くなる。最近、プロトゾアを除去した

ウシではそれが存在するウシに比べ、ルーメン液および血漿中のピペコリン酸濃度が低下することが明らかにされたが(表8)、プロトゾア存在によりウシの脳が鎮まり安定化され、乳生産にも寄与することが考えられる。

3) 脂質の代謝

一般に、ウシの飼料には脂質が2~5%含まれており、これは構造脂質と貯蔵脂質とからなっている。構造脂質は葉の表面のロウや細胞膜の糖脂質やリン脂質として存在する。貯蔵脂質は主に種実に含まれ、この多くは中性脂肪である。脂質の大部分はルーメン微生物により分解されるが、ロウだけは分解されない。

通常の乳牛の給与飼料では、脂質の43%は脂肪酸であり、8%はガラクトース、4%はクロロフィルで、ロウは17%となっている。牧草の糖脂質にはガラクトースが多く含まれている。飼料中の脂肪酸としては、C18:1(オレイン酸)、C18:2(リノール酸)およびC18:3(リノレン酸)のような不飽和脂肪酸が多く含まれる。

飼料中の脂質は微生物のリパーゼにより加水分解され、遊離された不飽和脂肪酸は水素添加される。主要な脂質分解菌としては*Anaerovibrio lipolytica*が知られており、これは $10^7/g$ の密度でルーメンから検出され、C12以上のエステル化脂肪酸を加水分解する。水素添加は微生物に有害な代謝性水素の除去に寄与し、嫌気的な環境で生息している微生物の増殖を高める。不飽和脂肪酸が多いと、疎水性の被膜で微生物を覆い、また繊維質などの基質に微生物が付着できなくなるため、ルーメン発酵は阻害される。そのため、飼料中の脂質の割合は5%以下にする必要がある。加水分解では長鎖脂肪酸とグリセロールやガラクトースが生じ、長鎖脂肪酸はVFAやCO₂への異化などはほとんどなく、ルーメン粘膜からは吸収されずに小腸粘膜から吸収される。グリセロールなどからはプロピオン酸や酪酸が生成される。

分解された脂質成分の一部は微生物に取り込まれ、細胞膜や体成分の構成素材となる。細菌の脂質含量はDM当りで10~15%であり、約30%のリン脂質を含んでいる。細菌の脂質は飼料中の脂質を取り込んだもの(内因性)と*de novo*合成したものからなり、その割合は飼料の脂肪含量と細

表8 ウシのルーメン液と血漿のピペコリン酸の濃度(μM)に及ぼすプロトゾアの影響

飼料給与後時間 (h)	ルーメン液			血漿		
	0	2	5	0	2	5
プロトゾア存在牛	18.3	65.0*	52.2*	7.4*	10.6*	7.8*
プロトゾア不在牛	20.6	41.9	14.3	2.1	4.8	3.3

* $P < 0.05$ (Hussain-Yusuf *et al.*, 2004)

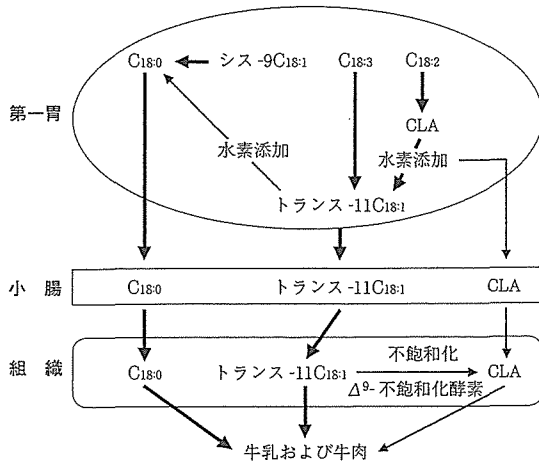


図3 ルーメン内および組織内でのCLA（シス-9, トランス-11）合成経路（田中, 2004）

菌の種類により異なる。脂質の脂肪酸ではC16:0（パルミチン酸）やC18:0（ステアリン酸）などの飽和脂肪酸が多く、さらにC15やC17の奇数炭素や分枝脂肪酸を含む特徴があり、これらはミルクの脂肪酸になる。プロトゾアもグルコースを細胞内に取り込み脂肪酸合成を行っている。プロトゾアの脂質は細菌よりも多くの割合でリン脂質を含み、脂肪酸組成では細菌に比べ、C16:0の割合は多く、C18:0の割合は少ない。微生物が合成する脂質は、乳牛では1日に140gにもなるが、その半分以上はプロトゾア由来とされている。水素添加では各種の脂肪酸の異性体も生じるが、これらはミルクの重要な香気成分になる。

近年、リノール酸の幾何および位置異性体であり、抗ガンや抗動脈硬化などの生理活性作用をもっている共役リノール酸（シス-9, トランス-11, CLA）が注目されている。CLAは飼料中のリノール酸が水素添加される過程での中間産物で、関与する菌としては*Butyrivibrio fibrisolvens*が知られ、ルーメン酸とも呼ばれている（図3）。CLAは牛乳や牛肉など反芻家畜由来の食品中に多く含まれていることから、これらのCLA含量を高める研究が行われている。CLA生成には別のルートの可能性もある。これは他の中間産物であるトランスバクセン酸（トランス-11C18:1）が体内に吸収後、乳腺や脂肪組織に取り込まれ、不飽

表9 ルーメン細菌とプロトゾアの脂肪酸組成 (g/100 g 総脂肪酸)

脂肪酸	細菌	プロトゾア
C12:0	0.57	0.19 **
C12:1	0.77	0.11 **
C13:0	0.48	0.26 **
C14:0	2.20	1.55 **
C14:1	1.36	0.87 **
C15:0	2.62	1.12 **
C16:0	20.74	33.41 **
C16:1	0.81	1.86 **
C17:0	1.01	0.60 **
C18:0	37.40	11.56 **
C18:1	7.78	20.21 **
C18:2	4.83	8.82 **
C18:3	0.15	0.49 **
TVA	3.96	5.54 **
総CLA	1.02	1.64 **
総USFA	22.32	41.28 **
総SFA	65.02	48.69**

** P < 0.01. (Halima et al., 2004)

TVA, トランスバクセン酸（トランス-11 C18:1）; CLA, 共役リノール酸
USFA, 不飽和脂肪酸; SFA, 飽和脂肪酸

和化酵素によってCLAに変換されるというものである。細菌に比べプロトゾアはリノール酸を多く含むが、CLA含量もプロトゾアの方が多いたことが最近明らかとなった（表9）。

従来、濃厚飼料多給などによる乳脂率の低下はルーメンでのプロピオン酸生成の増加が原因であると説明されていたが、最近、ルーメンで生産されるCLAやトランスバクセン酸は乳脂肪合成の阻害物質であることがわかり、それらの生成増加が原因のひとつであるという説が提唱されている。

泌乳初期や暑熱期には乳牛のエネルギー摂取量の不足を補うためにバイパス油脂が利用されることがある。これには脂肪酸のカルシウム塩がよく用いられるが、ルーメン発酵には影響を与えないで乳量や乳脂率を高めることができる。近年、大豆油やアマニ油由来の脂肪酸カルシウムの飼料添加で乳量増加とともに乳中のCLAも数倍に高まることが明らかにされた。また、放牧主体の乳牛では、乾草やサイレージ給与に比べて、乳中のCLAが増加することも知られている。これはこれらの油脂や牧草にリノール酸やリノレン酸が多く含まれているためである。牧草をサイレージや乾草にするとその過程で不飽和脂肪酸の水素添加

が起こり、リノール酸などは減少すると考えられる。今後は、C18不飽和脂肪酸が豊富にある飼料を給与して乳脂肪中のCLA含量を増加させ、牛乳の機能性を高めることも重要な方向といえる。

主な参考文献

- Church D.C.(1988) .The Ruminant Animal, Digestive Physiology and Nutrition (Church D.C. ed.). Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Driesch, A. von den. (1995). Domestic ruminants: Their incorporation and role in early rural societies. In 'Ruminant Physiology, Digestion, Metabolism, Growth and Reproduction.' (Engelhardt, W. v. et al. eds.), Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, Berlin.
- Hofmann, R.R. (1985) Digestive physiology of the deer-their morphological specialization and adaptation. *Biology of Deer Production* (Roy. Soc. N. Z., Bull., 22): 393 - 407.
- 亀高正夫ら (1994). 基礎家畜飼養学, 75 - 82, 養賢堂.
- 加茂儀一 (1973). 家畜文化史, 507 - 642, 法政大学出版会.

- 神立誠・須藤恒二監修 (1985). ルーメンの世界 - 微生物生態と代謝機能, 農文協.
- Minato, H., et al. (1992) Colonization of microorganisms in the rumen of young calves. *J.Gen.Appl.Microbiol.*, 38: 447 - 456.
- 小野寺良次監修・板橋久雄編 (2004). 新ルーメンの世界 - 微生物生態と代謝制御, 農文協.
- 佐々木康之監修・小原嘉昭編 (1999). 反芻動物の栄養生理学, 農文協.
- 島崎三郎訳 (1968). アリストテレス全集 7, 動物誌, 上, 55 - 57, 岩波書店.
- 高槻成紀 (1991). 草食獣の採食生態・現代の哺乳類学 (朝日稔・川道武男編), 119 - 144, 朝倉書店.
- 津田恒之 (2001). 牛と日本人 - 牛の文化史の試み, 13 - 31, 東北大学出版会.
- Wells, J. E. and J. B. Russell (1996) Why do many ruminal bacteria die and lyse so quickly? *J.Dairy Sci.*, 79: 1487 - 1495.

◀新刊紹介▶

「新編 飼料原料図鑑」

飼料原料図鑑編集委員会 編
 体裁 A4版 約 170頁
 定価 7,500円 (本体価格 7,143円)
 荷送料 500円
 発行予定 平成18年11月

お申込み先

〒104-0033 東京都中央区新川 2-6-16
 社団法人 日本科学飼料協会 技術部 松丸
 TEL 03-3297-5631 FAX 03-3297-5633
 お申し込みは社団法人 日本科学飼料協会の
 FAX 03-3297-5633 あてでお願いします。

飼料原料図鑑編集委員会により刊行された「飼料原料図鑑」(芝光社)は、配合飼料原料として使用されている各種の穀類や副原料の原物写真と実体顕微鏡等による拡大写真を幅広く掲載したわが国唯一の図鑑として皆様にご活用頂いております。しかし、平成9年に発行されて以来すでに10年近くが経過し、この間の飼料原料の輸入状況の変化や、機能性を期待して使用される新規原料等の開発が行われ、使用されている飼料原料の

種類も増加しております。このため、近年新たに使用されるようになった原料を加えた図鑑の発行の要望が数多く寄せられておりました。

このため、本協会では、飼料原料図鑑編集委員会および発行元である芝光社のご了解の下、今般、「新編 飼料原料図鑑」を編集・発行することと致しました。

本図鑑は、飼料原料の輸入業者、配合飼料製造業者だけでなく、飼料輸出入協議会、日本養魚飼料協会、日本植物油協会、日本畜産副産物協会等の各団体と、独立行政法人肥飼料検査所のご協力を得て、現時点において日本国内の配混合飼料工場で使用されているほとんどの原料を網羅し、それらの現物写真(拡大写真を含む300枚程度)及び顕微鏡写真(100枚程度)を掲載しております。また、旧編にない、巻末には飼料の鑑定法、公定規格による検定等の検査法に関する解説を付しております。

本図鑑は、配合飼料、混合飼料の製造に従事する関係者の方々ばかりではなく、大学や各種試験研究機関の職員の方々の研究の一助にもなるものと確信しております。