

乳牛の飼養管理と生乳の品質，風味について

三 谷 朋 弘

(北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター，〒001-0811 札幌市北区北11条西10丁目)

Quality and flavor of milk related with feeding management for dairy COWS

Tomohiro MITANI

(Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, Kita-11, Nishi-10, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 001-0811, Japan)

要約

生乳において官能的品質は，成分的品質および衛生的品質に次ぐ第3の乳質といえる。これまで実際の酪農現場では，数値評価が可能な成分および衛生的品質が重視されてきた。しかしながら，平成29年に発生した学校給食牛乳での風味変件事案を発端に牛乳の風味すなわち官能的品質への関心が高まっている。しかし，風味変化の事案は収束することなく，実際の酪農現場においても異常風味としてバルク乳の廃棄が散発している。生乳の風味に関する知見は成分的品質や衛生的品質に比べると非常に少なく，実際の酪農現場において対応が遅れている可能性がある。本論文では，生乳の風味，特に異常風味である移行臭，脂肪分解臭および脂質酸化臭についてその発生メカニズムと現時点で考えうる対応策について概説し，さらに関連の強い乳成分である乳脂肪および脂肪酸組成の生成メカニズムおよび飼養管理との関連について概説する。

1. はじめに

生乳の品質を表す乳質という言葉は，現場で日常的に用いられている。しかし，いざ乳質とは何かという問いに正しく答えることはかなり難しい。なぜならば，乳質という言葉に明確な定義はなく，人それぞれに重要視している乳の品質が異なるからである。一般的には，生乳には成分的品質，衛生的品質および官能的品質の3つの品質があると考えられている。

成分的品質とは，乳脂肪率や乳タンパク質率など数値で表現可能な品質である。成分的品質は，酪農家にとっては乳価に直結する重要な品質であり，製造者（乳業メーカー）にとっては製品の歩留まりな

どに影響する重要な品質である。衛生的品質は，細菌数や乳房炎に関連する体細胞数などが挙げられる。これらは，公衆衛生上，当然のごとく担保しなければならない品質である。これら成分的品質および衛生的品質については，厚生労働省が定める「乳及び乳製品の成分規格等に関する省令（通称，乳等省令）」に数値として基準が示されている。そのため，従来は（現在も）成分的品質および衛生的品質が重視され，第3の品質である官能的品質については，あまり重視されてこなかった。

成分的品質である一般乳成分や衛生的品質である細菌数や体細胞数などは，近年の分析機器の発展のおかげで比較的容易かつ正確に測定可能となってきた。そのため，数値目標として重視される傾向が強

い。しかし、官能的品質については明確な数値基準がある訳ではなく、風味について言及している農林水産省令「畜産経営の安定に関する法律施行規則」においても生乳の正常な風味とは「新鮮良好な風味と特有の香気を有し、飼料臭、牛舎臭、酸臭その他の異臭又は酸味、苦味、金属味その他の異味を有しないもの」とだけ表現されている。実際にこの品質の評価自体はヒトの官能評価で実施されるため、非常に取り扱いが難しい品質である。しかしながら、平成29年に立て続けに発生した学校給食牛乳における風味異常の事案が発端となり、近年乳の風味に対する関心が高まっている。マスコミなどにも大きく取り上げられたため、事態は収束に向かうと考えられていたが、実際には毎年のように乳の風味に関する事案が発生している。これは成分的品質や衛生的品質に比べて官能的品質の評価が難しく、その対応も非常に難しいということを表している。

現在、業界では「異常風味」や「風味異常」、「異味異臭」という言葉は誤解を招く表現だということで、「風味変化」という言葉を用いている。確かに、どの濃度までが正常で、どの濃度以上だと異常という閾値は、性別や年齢、育ってきた環境などにより異なるため、明確な閾値を設定することは困難である。したがって、上記の学校給食の事案においても明確な原因究明がされていないのが現状である。しかしながら、「風味変化」の延長上に「異常」があるということ意識しつつ、第3の品質である官能的品質に真摯に向き合うことは酪農乳業界全体の大きな課題である。

官能的品質は、製品や製造工程で解決できる問題は現在の衛生条件の整った工場などで原因が確認されない事例もあり、原料である生乳に由来する要因についても検討する必要がある。そのため、これまで散発的に発生している製品における風味の事案に対しては保健所や衛生部局のみの対応であったものが、平成30年6月に厚生労働省から農林水産省や生産者団体へ協力要請の文書が発出された。すなわち、事案が解決できない、原因が特定できない場合には集乳業者、さらには生産者まで対象を広げ、原

料乳について検査が行われる可能性がでてきたということである。一方で、統計的な情報は公表されていないが、酪農家のバルク乳の段階で風味不良ということで集乳拒否され、廃棄されている事例も実際にはかなりの数にのぼっている。一旦、風味不良と判断された場合には風味が改善されるまで集乳拒否される場合が多く、酪農家にとっては金銭的負担に加え、精神的な負担もかなり大きい。

以上より、本論文の前半では第3の乳質である「官能的品質」に関わる生乳の風味、特に異常とされる風味について解説し、特にこれらの風味の中でも「移行臭」、「脂肪分解臭」および「脂質酸化臭」についてはその発生メカニズム、現状における対処方法について解説する。これらの風味は酪農家段階での集乳拒否の主な原因となっている風味である。次に後半では、これらの異常風味の中でも「脂肪分解臭」および「脂質酸化臭」に強く関連する乳脂肪、特に脂肪酸の組成について、その生成メカニズムおよび乳牛の飼養管理との関連について解説する。

2. 生乳の風味について

生乳および牛乳の風味の評価には、数多く（ここでは省略する）の官能評価用語が用いられる¹⁾。しかし、ほとんどの用語がネガティブな表現であることから、基本的に牛乳の風味評価は減点方式であることが分かる。すなわち、正常な（おいしい）牛乳とは「おいしくなくない」牛乳であるというのが、乳に対する風味評価の現状である。したがって、乳の風味評価においては異常な風味を理解することが重要とされている。

生乳の「異常風味」については、発生原因により大まかに表1のようにまとめられている。乳牛を取り巻く外部環境の臭気が牛乳に移行する移行臭、脂肪が分解することにより発生する脂肪分解臭、脂質が酸化することにより発生する脂質酸化臭、光に暴露されることにより発生する光誘導臭、微生物が増殖することにより発生する微生物性異常風味、その他の異常風味である。以上の異常風味の中でも移行臭、脂肪分解臭および脂質酸化臭については実際

表1 生乳の異常風味、その原因別種類と一般名・関連名

原因別種類	一般名・関連名
移行臭	飼料臭・雑草臭・乳牛臭・牛舎臭
脂肪分解臭	ランシッド・酪酸臭・苦味・ヤギ臭
脂質酸化臭	紙臭・カードボード臭・金属臭・油臭・魚臭
光誘導臭	光臭・日光臭・活性化臭
微生物性異常風味	酸臭味・苦味・フルーツ臭・麦芽臭・腐敗臭・不潔臭
その他	吸収味・収斂味・渋味・苦味・薬剤臭・淡味・塩味・異常味・白墨味・新鮮味不足

※アメリカ酪農科学会資料 改変

の現場でしばしば問題となっている異常風味である。これら以外の光誘導臭や微生物性異常風味は主にヒューマンエラーが原因で起こる異常風味であり、その発生原因を明確にすることは比較的容易である。ただし、明確な発生原因が不明な場合もしばしばあり、またそれぞれが単独に発生せず複合的に発生する場合もある。異常風味の対応には要因を一つ一つ潰していくしか対策方法はなく、地道な対応が必要となる。

(1) 移行臭

移行臭は、表現としては、飼料臭、サイレージ臭、乳牛臭、牛舎臭などと表現される。牛乳は匂いを吸着しやすいため、移行臭は牛舎環境の臭気がバルクタンクにおいて保管時に吸着したと考えられやすいが、多くの場合は乳牛の呼吸器を介して移行した臭気と考えられている。グラスサイレージの給与前後の牛乳の官能評価を行った試験では、グラスサイレージ給与前の牛乳と比較してグラスサイレージ給与後30分、3時間後に搾乳した牛乳で飼料臭が検出されたと報告されている²⁾。わずか30分や数時間で乳牛の呼気由来の臭気が肺から吸収され、血流によって乳に排泄されるということは驚くべき移行速度である。当然ながら日常的に牛舎内環境の臭気が強い場合には、その臭気が日常的に乳牛の呼吸器を介して乳に移行すると考えられる。牛舎全体の環境

を改善することは当然ながら、臭いの強いサイレージなどの飼料を給与する場合にはその給与タイミングも考慮する必要がある。

移行臭に含められているが乳牛臭については別の要因でも発生する。乳牛臭の指標物質はアセトンなどのケトン体であると考えられている。乳牛が負のエネルギーバランス（摂取したエネルギーに対して乳生産に利用されるエネルギーが多い状態）に陥った場合、貯蓄していた脂肪が動員され肝臓においてケトン体が生成される。この中でもアセトンが閾値以上に含まれた場合、乳は獣臭い臭気、すなわち乳牛臭を発するとされている。乳牛臭を含めて移行臭に関しては、乳牛を取り巻く環境が要因であるため、適切な飼養環境を整えることが防止策として重要である。ただし、本来は異常風味の防止が目的ではなく、乳牛に快適な環境を提供することは効率的な生乳生産を行う上で必然の管理である。

(2) 脂肪分解臭

脂肪分解臭はランシッドとも呼ばれ、非常に古くから知られている異常風味である。乳脂肪中の中性脂肪（トリグリセリド）に脂肪分解酵素（リパーゼ）が反応し、脂肪酸が遊離して発生する異常風味である。したがって、遊離した脂肪酸（遊離脂肪酸）が原因物質であり指標物質となる。乳脂肪中に含まれる脂肪酸は炭素数が4つの酪酸から炭素数が22～24程度の脂肪酸までが含まれているが、炭素数が少ない揮発性の高い脂肪酸、酪酸（C4:0）やカプロン酸（C6:0）、カプリル酸（C8:0）などが脂肪分解臭の原因となる。風味の特徴は、生乳であるのに熟成したチーズやバターのような臭いがすることである。顕著な場合は、口に含まずとも臭気が感じられる。ちなみに、加熱殺菌された牛乳では、脂肪分解酵素が失活しているため脂肪分解は進行しない。

乳脂肪は、生乳中には乳脂肪球という球状の状態ですべて浮遊している（図1）。脂肪球は平均3.5～3.8μmほどの大きさで、内部はほぼ中性脂肪、外側を10～50nmほどの薄さの脂肪球膜で覆われている^{3,4)}。脂肪球膜の構成成分はほとんどがリン脂質

とタンパク質で、3層構造かならなり、1層目は乳腺細胞内の小胞体由来、2および3層目は乳腺細胞自体の細胞膜由来である。この脂肪球膜は非常に薄い膜であるので過度の刺激が加わると、膜が壊れ球内の中性脂肪が露出し、生乳中に存在する脂肪分解酵素と直ちに反応して脂肪分解臭が発生する。乳房炎に罹患している乳中には脂肪分解酵素が多く存在することが知られている⁵⁾。

牛乳において脂肪分解臭が発生する要因には、牛乳に含まれる脂肪酸の構成比が強く関連している。牛乳に含まれる脂肪酸はヒトと比較して揮発性の高い短鎖の脂肪酸が多く含まれる（表2）。詳しくは

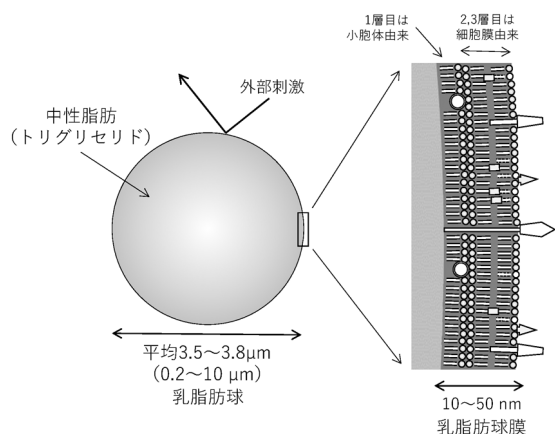


図1 乳脂肪球の構造

後述するが、ヒトを含む単胃動物の乳脂肪はほとんどが摂取した脂肪に由来するのに対して、ウシを含む反芻動物の乳脂肪では反芻胃の発酵産物である短鎖脂肪酸由来であること（*de novo* 合成）が特徴である。人乳ではほとんど含まれていない短鎖脂肪酸が、牛乳ではモル比（分子の数）で4割以上を占めることから、反芻動物の乳汁は必然的に脂肪分解臭が発生しやすい乳であることが分かる。

脂肪分解臭の発生要因としては、大きく2つの要因が考えられる。1つは物理的な外部からの刺激による脂肪球膜の崩壊であり、もう1つは飼養管理面での不備が原因で脂肪球膜が崩壊しやすい状態になることである。物理的な外部からの刺激で良く報告されるのは、バルクタンクにおける過攪拌やパイプラインの設置不良による生乳への物理刺激の増加である。特に搾乳頭数に対してバルクタンクが大きい、極端に搾乳量が少なくバルクへの乳の投入量が小さい場合に過攪拌が起りやすい。状況としては、バルク内のアジテータに中途半端にしか乳が届いておらず、中途半端に届いているアジテータの羽が生乳を激しく攪拌（チャーニング）する状況である。この場合、アジテータの羽にチャーニングされた脂肪がバターのように付着していることがある。また、アジテータの羽がバルクに投入された乳に届

表2 ヒトとウシの乳脂肪中の脂肪酸組成

	構造式	ヒト		ウシ	
		(重量%)	(モル比)	(重量%)	(モル比)
酪酸	C4:0	0	0.0	9.8	22.5
カプロン酸	C6:0	0	0.0	5.0	8.7
カプリル酸	C8:0	0	0.0	2.4	3.4
カプリン酸	C10:0	1.9	3.0	4.8	5.6
ラウリン酸	C12:0	7.4	10.1	4.1	4.1
ミリスチン酸	C14:0	8.4	10.0	11.8	10.4
パルミチン酸	C16:0	24.0	25.5	36.5	28.7
パルミトレイン酸	C16:1	2.1	2.2	1.1	0.9
ステアリン酸	C18:0	5.7	5.5	8.6	6.1
オレイン酸	C18:1	29.4	28.3	13.0	9.3
リノール酸	C18:2	15.3	14.8	0.4	0.3
リノレン酸	C18:3	0.6	0.6	0	0.0
その他		5.2		2.5	

※「乳肉卵の機能と利用 新版」改変

かず乳を攪拌できない場合にも脂肪分解が起こりやすくなる。これは、過冷却により生乳が凍結してしまうためである。

飼養管理面での不備としては、過度の多回搾乳（搾乳間隔の短さ）が問題とされている。なぜ大きくなるかのメカニズムは詳細には明らかとなっていないが、多回搾乳をした場合には、脂肪球のサイズが大きくなる現象が明らかとなっている⁶⁾。大きな脂肪球はそれ自体が保有する物理的な力が大きくなるため、脂肪球同士がぶつかったときの衝撃が大きく崩壊しやすいとされている。現在、我が国でも自動搾乳システムが広く普及してきており1日1頭当たりの搾乳回数を容易に増やすことが可能となっている。1日1頭当たりの搾乳回数を増やすと1日の搾乳量が増加することが知られているため、自動搾乳システム導入により1日の搾乳回数の設定を多めに設定する例がみられる。ただし、過度の搾乳回数の増加は脂肪分解のリスクを増加させるために避けるべきである。適切な搾乳間隔としては6時間以上、1回の搾乳量は8 kg以上が推奨されている⁷⁾。給与飼料との関連については不明な部分が多いため、現時点ではそれほど関係がないとする。ただし、極端な泌乳初期および泌乳末期乳の脂肪球は大きくなる傾向があり、乳腺での脂肪の合成との関連が予測される（三谷未発表データ）。

以上のように、脂肪分解臭については機器の不良や設定のミス、乳牛の飼養管理など要因が明確であるため、正しい知識を持てば対応および対策が可能な異常風味と考えられる。また、近年、生乳成分の自動分析装置のオプションとして遊離脂肪酸（Free Fatty Acids: FFA）の測定が可能となっており、日々のモニタリングが可能となってきた。必ずしも高遊離脂肪酸（FFA）= 脂肪分解臭発生となるわけではないが、日々のモニタリングの中から急激な上昇などの現象が観察された場合には搾乳機器や飼養管理の不備を疑い、再度それらの状況をチェックした方が良いであろう。

(3) 脂質酸化臭

脂質酸化臭は脂質が酸化することにより発生する異常風味である。その中でも自発性酸化臭は現場において最も厄介な異常風味の一つといえる。自発性酸化臭は豆臭や紙臭、段ボール臭などと表現される。自発性酸化臭は、まず多価不飽和脂肪酸に活性酸素が反応することにより反応が始まる（図2）。多価不飽和脂肪酸は、酸化の過程で脂質ラジカル、脂質ペルオキシラジカル、最終的には脂質ヒドロペルオキシドにまで酸化される。脂質ヒドロペルオキシドに鉄や銅などの2価の金属イオン、酵素などが反応し、酸化部分が開裂し、アルデヒドが生成される。特に炭素数が6のアルデヒドであるヘキサナールが多く産生されることから、ヘキサナールが自発性酸化臭の指標物質とされている。

この異常風味が厄介な点は、不飽和脂肪酸から脂質ヒドロペルオキシドに至るまでの酸化過程の途中で生成される過酸化物質自身が、基の物質自体の酸化を促進するという連鎖反応を示すことである。したがって、一度この反応が始まるととめどなく酸化反応が進行する。また、この反応は冷蔵状態でも継続するため、バルクタンクから乳を出荷した段階では酸化臭が発生しておらず問題なく乳を出荷したつもりでも、数日の冷蔵保管（移送）中に酸化反応が進行し、顕著な異常風味として発覚するケースが実

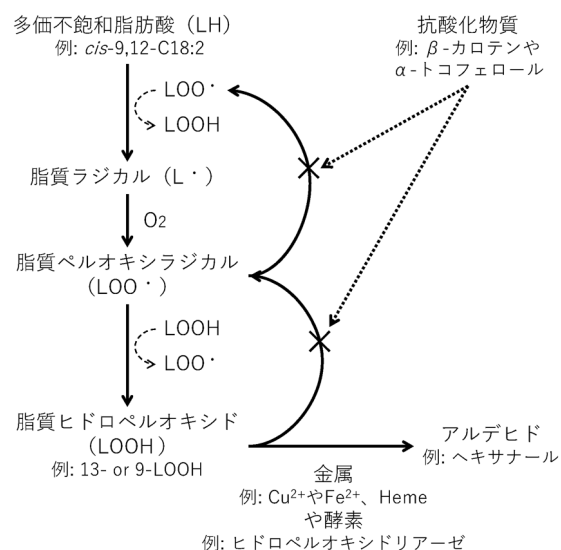


図2 脂質酸化臭の生成経路

際に発生している。酪農家としては集荷では問題なかった乳が後々に受け入れ拒否されたという不満がつのり、流通業者にとっては流通段階の不備が疑われ、受け入れ業者としても乳を受け入れ拒否せざるを得ない状況に陥ることで、いずれの関係者にとっても不利益な状況となる。

乳中の抗酸化物質である α -トコフェロール（ビタミンE）や β -カロテンは過酸化脂質生成の連鎖反応を抑制する働きを持つ。したがって、原料となる多価不飽和脂肪酸の量と抗酸化物質量のバランス、さらには金属イオンや酵素の存在量、これらの不均衡により自発性酸化臭の発生リスクが高まるとされている。現状では、原料となる多価不飽和脂肪酸の量が多く抗酸化物質が少ない場合に発生しやすい（リスクが高い）と考えられている。これらのリスクを低下させるような飼養管理が防止策として望ましい。

乳中脂肪酸の合成と飼養管理との関連については次節で詳しく解説するが、乳中の多価不飽和脂肪酸は、体内に多価不飽和脂肪酸が多く吸収される条件、すなわち多価不飽和脂肪酸を多く含む飼料の多給、また反芻胃内での微生物による多価不飽和脂肪酸に対する水素添加能が低下した状況において増加する。実際の飼養条件としては、穀類や食品製造副産物（粕類）の多給が考えられる。穀類や粕類は元々多価不飽和脂肪酸であるリノール酸（C18:2）を多く含むばかりでなく、粗飼料のように反芻を誘起する機能が乏しく反芻胃内のpHが低下しやすい。反芻胃内pHの低下は反芻胃内微生物の水素添加能を低下させ、この場合、多価不飽和脂肪酸のまま吸収される割合が多くなる。また、これらの飼料は牧草類（特に青草やサイレージ）と比較して抗酸化物質であるビタミンEや β -カロテンの含有量が低いことも特徴として挙げられる。牧草類はリノール酸以上に酸化されやすい α -リノレン酸（C18:3）を多く含有するものの、牧草多給下では酸化臭発生のリスクは低いと考えられている。それは牧草類に抗酸化物質が多く含まれているためであると考えられる^{8,9)}。

以上から、穀物や副産物多給条件は自発性酸化臭のリスクを高めると考えられるが、穀物多給であれば必ず発生するわけではなく、むしろ発生することは稀である。乳牛に対する（酸化）ストレスの増加も要因ではないかと考えられているが、どのような条件下で発生しやすいか、どのような成分バランスで発生しやすいかなどの自発性酸化臭の発生条件については、いまだ不明な点が多い。したがって、現状で発生してしまった場合の対策としては、給与飼料の見直しが第一に考えられ、それでも解決されない場合はビタミンE剤などの抗酸化物質の補給が効果的と考えられている。ただし、ビタミンEなどのサプリメントは非常に価格が高く、吸収効率もそれほど高くないのでなるべくは給与飼料の見直しで解決したい。

3. 乳脂肪の合成と飼養管理との関連

(1) 乳脂肪の生成メカニズム

生乳中には、約3.8%の乳脂肪や約3.2%の乳タンパク質、約4.6%の乳糖、約1%の灰分（ミネラルなど）の固形分が含まれる。摂取した栄養素から、それぞれの乳成分への合成経路を比較すると、比較的濃度変動の小さい乳タンパク質や乳糖の合成経路は比較的単純である（図3）。一方で、乳脂肪に関してはこれらの成分と比較して合成経路が複雑となる。合成経路が複雑であるがゆえに乳脂肪は摂取飼料の影響を非常に受けやすく、またその変動幅も非常に大きい。

前述の脂肪分解臭の項で示したように、乳脂肪は3.5 μ m程度の非常に小さな球状で乳汁中に分散している。その脂肪球は非常に薄い脂肪球膜で覆われており、その中身は中性脂肪（トリグリセリド）の脂肪滴である。乳脂肪の95%は中性脂肪で構成されており、中性脂肪を構成する脂肪酸の組成、その違いが乳脂肪の特性に強く影響する。中性脂肪を構成する脂肪酸自体は構成する炭素（C）数が増加すれば融点が上がリ、二重結合（不飽和度）が増加すれば融点が下がる。例を挙げると、C数16の飽和脂肪酸であるパルミチン酸（C16:0）の融点は63°C、

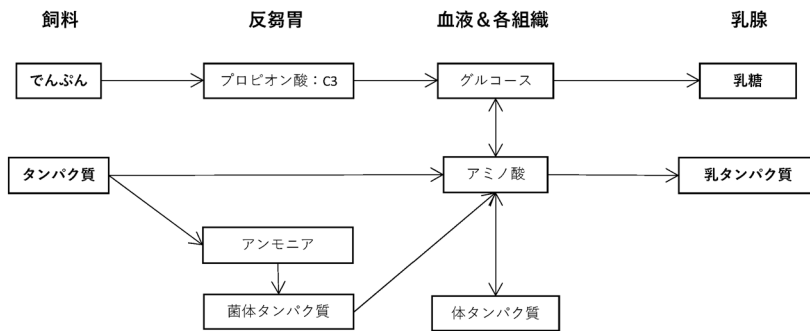


図3 乳糖および乳タンパク質の合成経路

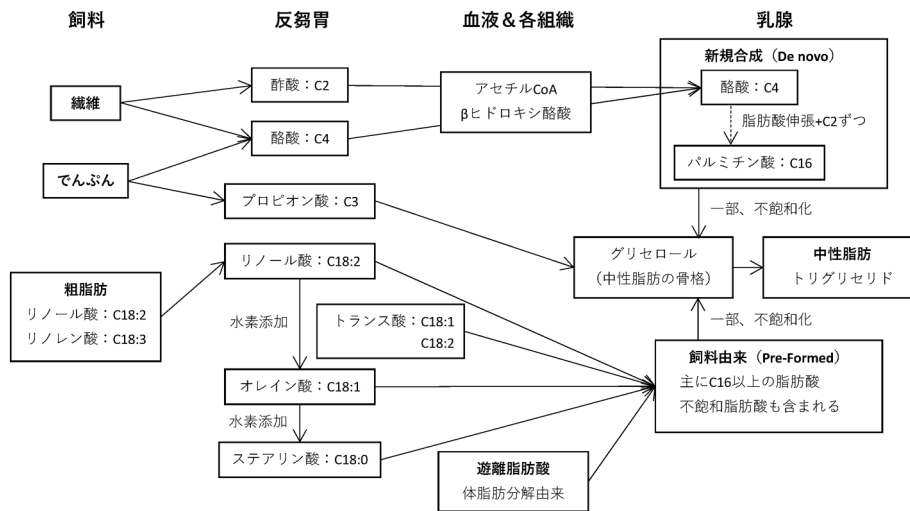


図4 乳脂肪の合成経路

対して C18 のステアリン酸 (C18:0) は 70.5°C と高く、室温や体温では融解しない。しかし、C18 で二重結合が一つ増えたオレイン酸 (C18:1) は 13.4°C、2 つのリノール酸 (C18:2) は -0.5°C と、乳脂肪中にこれら不飽和脂肪酸の割合が上昇すると室温や体温で融解し、口溶けの良い脂肪となる。

乳脂肪は、主に二つの経路から産生される (図 4)。一つは、摂取した飼料が反芻胃で分解された際に産生され反芻胃壁から吸収される短鎖脂肪酸 (SCFA) である揮発性脂肪酸 (VFA) 由来の経路である。反芻胃では、主に酢酸 (C2:0)、プロピオン酸 (C3:0) および酪酸 (C4:0) の VFA が飼料の分解により生成される。繊維質が多い粗飼料が分解された際には酢酸がメインに産生され、でんぷん質が多い穀類が分解された際にはプロピオン酸が多く産生される。これらの短鎖脂肪酸は反芻胃壁から吸

収され、血流によって各臓器に運ばれる。この内、酢酸および酪酸はそれぞれアセチル CoA および β -ヒドロキシ酪酸に転換され、乳腺において新規に生成される脂肪酸の原料となる。この合成反応は *de novo* 合成と呼ばれ、まず酪酸が作られ、脂肪酸伸長酵素により炭素が 2 つずつ付加され C16 のパルミチン酸までが合成される。反芻胃などの発酵器官を持たない単胃動物ではこの反応がないため乳脂肪中に短鎖脂肪酸はほとんど含まれない。

もう一つの経路は、摂取した飼料中の粗脂肪由来の経路である。牛が摂取する飼料に含まれる脂肪酸は、主に C16 以上の脂肪酸で、前述したがトウモロコシや大豆などの穀類にはリノール酸 (C18:2) が多く含まれ、牧草などにはリノレン酸 (C18:3) が多く含まれる^{10,11)}。したがって、飼料由来の脂肪酸は主に C16 以上の長鎖脂肪酸となる。ただし、

摂取したこれらの脂肪酸がそのまま吸収、乳汁に排出される訳ではなく、反芻胃内微生物の影響を強く受ける。反芻胃内には無数の微生物が共生しているが、その中でも粗飼料の繊維を分解する微生物である繊維分解菌が不飽和脂肪酸に水素を付加（水素添加）し、不飽和脂肪酸を飽和化する。基本的に反芻胃の中の脂肪酸は飽和化の方向に進むため、反芻動物の小腸で吸収される脂肪酸はステアリン酸（C18:0）が多い。長鎖の飽和脂肪酸が多いことも反芻動物の乳脂肪の特徴である。

さらに、反芻胃内では単に不飽和脂肪酸が飽和脂肪酸に飽和化されるだけでなく、微生物の影響を受け、二重結合の場所や結合の仕方が変化する異性化が起こることも特徴である。基本的に自然界に存在する二重結合は *cis* 型であるが、反芻胃内では *trans* 型への異性化も頻繁に起こる。したがって、自然界では C18:1 は 9 位に *cis* 型の二重結合があるオレイン酸（C18:1, *cis*-9）が多くを占めるが、反芻胃内では 11 位に *trans* 型の二重結合があるトランスバクセン酸（C18:1 *trans*-11）も生成され、小腸から吸収される。さらに、乳腺細胞では 9 位を不飽和化する酵素の活性も高いので、ステアリン酸（C18:0）はオレイン酸（C18:1, *cis*-9）に、トランスバクセン酸（C18:1 *trans*-11）は共役リノール酸（CLA, C18:2 *cis*-9, *trans*-11）に転換され乳汁中に排泄される¹²⁾。この共役リノール酸は反芻動物の脂肪にのみ自然界で存在する脂肪酸であるのでルメン酸とも呼ばれている。

さらに、泌乳初期や摂取飼料が不足した際には、乳牛は貯蓄している脂肪を動員してエネルギー源とする（脂肪動員）。このとき、血中には貯蓄脂肪が分解されたときに生成される遊離脂肪酸が増加し、この遊離脂肪酸も乳脂肪の合成に用いられる。貯蓄脂肪の多くは C16 以上の脂肪酸、特に C18 の脂肪酸であるため、貯蓄脂肪由来の脂肪酸は飼料由来の脂肪酸と区別することは難しい。

以上のように、乳脂肪中に含まれる脂肪酸は非常に複雑な経路で合成される。乳腺で合成もしくは乳腺に流れ着いた脂肪酸は、乳腺において血糖（多く

は反芻胃で産生されたプロピオン酸が原料）を材料として乳腺で合成されるグリセロールに結合し、中性脂肪となり乳汁中に排泄される。その由来から、乳脂肪中の脂肪酸は、乳腺で合成される脂肪酸である *de novo* 脂肪酸と飼料や体脂肪由来の脂肪酸である *pre-formed* 脂肪酸とに区別される。一般的には、C4～C14（C16 を含む場合もある）の脂肪酸を *de novo* 脂肪酸、C18 以上を *pre-formed* 脂肪酸と区別し、半分が *de novo* 合成由来で半分が飼料由来とされている C16 の脂肪酸は *mixed* 脂肪酸と区別している。

(2) 乳脂肪中の脂肪酸組成と飼養管理との関連

現在、我が国の生乳取引では、乳脂肪率 3.5% を取引基準と定めている場合が多い。乳脂肪率が高ければ高いほど生乳の単価、乳価は高くなるものの、逆に 3.5% を下回る場合にはペナルティを課せられる場合もある。したがって、低乳脂肪率を回避することは非常に重要であり、そのために様々な飼養管理の工夫が現場でなされている。乳脂肪中の脂肪酸組成と乳脂肪率には密接な関係がある。したがって、乳中脂肪酸組成のコントロール、すなわち乳中脂肪酸の生成メカニズムを理解することで、乳脂肪率自体のコントロールも可能となる。乳脂肪酸の生成経路のコントロールには、反芻胃内の状態が強く関わっており、それに関連する飼養管理との関連も非常に強い。

非常に古くから、乳脂肪率を高く維持するためには粗飼料を適切に給与することが重要であることは周知の事実である。これは、粗飼料が分解されるときに多く産生される揮発性脂肪酸のうち特に酢酸が乳脂肪の原料になるため、と考えられてきた。しかし、むしろ粗飼料が反芻自体を誘起し反芻胃内の pH を安定的に維持すること、反芻胃内を健康的に維持することの影響の方が強い。逆に、穀類などの濃厚飼料を多く給与した場合に乳脂肪率が低下することも良く知られている。これも、従来は反芻胃内の発酵がプロピオン酸産生に傾き、酢酸の生成量が低下するためだと考えられてきた。しかし、近年の

研究から別の要因も強く乳脂肪率低下に影響していることが明らかとなっている¹³⁾。

近年の研究から、血流によって運ばれ乳腺で不飽和脂肪酸が多く取り込まれた場合に、乳腺での *de novo* 合成が抑制され乳脂肪率が低下することが明らかとなっている。特に *trans* 結合を持つ不飽和脂肪酸が *de novo* 合成を抑制する。これらの脂肪酸は、反芻胃内の状況が健全でない、すなわち反芻が適切に行われず反芻胃内の pH が低下した条件下で生成されやすい。反芻胃内の pH が低下した場合は反芻胃内微生物の中でも特に繊維分解菌の活性が低下しやすい。上述したが繊維分解菌は不飽和脂肪酸に水素添加し飽和脂肪酸を生成するのに活躍する微生物である。これらの微生物による水素添加能が低下することにより多価不飽和脂肪酸の状態での吸収される脂肪酸の割合が増加する。また、低 pH 条件下では異性化され *trans* 型の不飽和結合を持つ脂肪酸も増加する。特に10位に *trans* 結合を持つ脂肪酸が増加し、*trans*-10脂肪酸は強力に乳腺での *de novo* 合成を抑制し、乳脂肪率を低下させることが知られている¹³⁾。以上の現象を考慮しても、大昔から伝えられている乳脂肪率の安定には適切な粗飼料の給与が重要であることは間違いのない事実である。

現在の高泌乳牛を飼養するために、脂肪酸カルシウムなどのルーメンバイパス油脂製剤、加熱圧片大豆のような粗脂肪を多く含む飼料が良く用いられている。高泌乳牛に対するエネルギー源の給与が目的であるが、質や量を間違えると逆に乳脂肪率を低下させることにつながる。反芻胃内微生物は pH の低下に敏感であるとともに油脂の存在にも非常に敏感である。現象としては pH 低下と同様に飼料中の粗脂肪割合が増加すると微生物の中でも繊維分解菌の活性が低下し、上記と同様の反応で乳脂肪率が低下する。ルーメンバイパス油脂は反芻胃への影響を低減させるために反芻胃をバイパス（通過）するように加工されたものであるが、その油脂の組成が重要となる。現在はあまり用いられなくなったが、リノール酸を多く含むバイパス油脂はリノール酸の吸収量が増加、乳腺に到達するリノール酸の量が増加、乳

腺での *de novo* 合成を抑制し、乳脂肪率を低下させることがある。近年はリノール酸などの多価不飽和脂肪酸ではなくパルミチン酸など飽和脂肪酸を多く含むバイパス油脂が販売されており、この場合は *de novo* 合成に影響することなく直接的に乳脂肪率を上昇させる。特に、これらのバイパス油脂の給与は、暑熱時などの粗飼料の摂取量が低下するときに乳脂肪率を維持させるためには非常に有効ではあるが、安易な多給には注意が必要である。

放牧を含む青刈り草給与時にも乳脂肪率が低下することが良く知られている。こちらも従来は青刈り草の有効繊維不足による反芻胃内での酢酸産生低下が原因と考えられていた。確かに、繊維不足による乳脂肪率低下は否定できないが、摂取粗脂肪由来の原因が大きいと考えられる。青刈り草は調整によるロスがないため、サイレージや乾草と比較して粗脂肪含量が高く、さらに不飽和結合を3つ持つ α -リノレン酸 (C18:3 *cis*-9,12,15) がメインの脂肪酸となる。したがって、放牧飼養時には不飽和化が不完全な多価不飽和脂肪酸の吸収量が増加し、乳腺での *de novo* 合成を阻害する。これが放牧飼養時の低乳脂肪率の主な原因と考えられる。一方で、反芻胃内で α -リノレン酸 (C18:3 *cis*-9,12,15) が飽和化される際に異性化され、多くのトランス-バクセン酸 (C18:1 *trans*-11) や共役リノール酸 (CLA, C18:2 *cis*-9, *trans*-11) が生成される。上述したが、トランス-バクセン酸 (C18:1 *trans*-11) の一部は乳腺で不飽和化され共役リノール酸 (CLA, C18:2 *cis*-9, *trans*-11) が生成されるため、放牧飼養時の共役リノール酸 (CLA, C18:2 *cis*-9, *trans*-11) 含量は舎飼い飼養時の数倍の濃度になる。共役リノール酸 (CLA, C18:2 *cis*-9, *trans*-11) は抗がん作用や抗動脈硬化作用を持つことから健康面で一時期注目された脂肪酸である¹⁴⁾。放牧飼養時における低乳脂肪率低下を防ぐため、乾草やビートパルプの給与が推奨されるが、これらの給与は放牧草の摂取量を低下させる。放牧飼養時における低乳脂肪率は宿命のようなものであり、放牧草の利用を最大限にするか低乳脂肪率を受け止めるかを判断する必要がある。

表3 北海道各地の酪農家の摂取飼料および乳中脂肪酸組成^{15,16)}

	都市近郊型酪農地域	草地型酪農地域	
		舎飼時期	放牧時期
飼料摂取割合, %			
粗飼料			
放牧草	—	—	47.7
トウモロコシサイレージ	29.2	0.4	0.3
グラスサイレージ	3.7	20.2	4.5
乾草	18.5	37.0	11.9
濃厚飼料			
穀物飼料	35.3	32.7	26.4
ビートパルプ	8.4	9.7	9.0
その他 (副産物など)	4.8	0.1	0.2
乳脂肪率, %	3.95	4.23	3.80
乳中脂肪酸組成, %総脂肪酸			
炭素数の違い			
<C16	19.9	19.3	18.5
C16	33.3	36.1	29.4
>C18	38.5	36.3	43.2
飽和度の違い			
飽和脂肪酸	64.2	66.2	60.9
一価不飽和脂肪酸	25.9	24.8	28.3
多価不飽和脂肪酸	3.1	2.4	3.3
C18の脂肪酸の違い			
ステアリン酸 (C18:0)	11.2	10.9	12.9
オレイン酸 (<i>cis</i> -9 C18:1)	21.9	20.5	22.8
トランス-バクセン酸 (<i>trans</i> -11 C18:1)	1.4	1.4	3.1
リノール酸 (<i>cis</i> -9, 12 C18:2)	2.3	1.5	1.7
ルメニン酸 (<i>cis</i> -9, <i>trans</i> -11 C18:2)	0.5	0.5	1.1
α -リノレン酸 (<i>cis</i> -9, 12, 15 C18:3)	0.3	0.4	0.6

筆者が北海道各地の酪農家を調査し、飼養管理と乳中脂肪酸組成を調査した例を示す(表3)^{15,16)}。給与粗飼料の特徴としては、都市近郊型酪農地域では放牧の利用が基本的にはなく、トウモロコシサイレージが利用されていること、草地型酪農地域(放牧利用農家)の放牧時期は放牧が、舎飼時期はグラスサイレージや乾草(低水分サイレージ含む)が基礎粗飼料として用いられていることが特徴である。濃厚飼料としては、都市近郊型酪農地域では穀物(配合)飼料の給与に加えて食品加工副産物が利用されていること、草地型酪農地域の放牧時期の穀物(配合)飼料の給与量が低いことが特徴である。その結果、乳脂肪率は草地型酪農地域の舎飼時期が最も高く、次いで都市近郊型酪農地域、草地型酪農地域の放牧時期が最も低かった。乳中脂肪酸組成のC16および飽和脂肪酸の割合は、乳脂肪率と正の比例関係にあり、多価不飽和脂肪酸割合と乳脂肪

率は負の比例関係にあることから、上述した飽和および不飽和脂肪酸の吸収量、それに伴う *de novo* 合成の促進、抑制が乳脂肪率に強く影響していることが分かる。

C18の脂肪酸割合をみると、トウモロコシサイレージや副産物の給与量が多い都市近郊型酪農地域ではリノール酸(C18:1, *cis*-9,12)が多いこと、牧草飼料の給与量が多い草地型酪農地域の舎飼時期はいずれの不飽和脂肪酸も低いこと、放牧草の摂取量が多い草地型酪農地域の放牧時期はトランス-バクセン酸(C18:1 *trans*-11)や共役リノール酸(CLA, C18:2 *cis*-9, *trans*-11)が高いことが特徴となる。以上から、乳牛の飼養管理は乳中の脂肪酸組成に強く影響し、ひいては乳脂肪率に影響することが分かる。これは逆に、乳脂肪率や脂肪酸組成は乳牛の飼養管理でコントロール可能であることも示している。近年、ミルコスキャンなどの自動分析装置

のオプションで従来の一般乳成分に加え、乳中の脂肪酸組成がある程度正確に測定可能となってきている。いまだどのように有効活用するかについては迷走している部分はあるが、今後乳脂肪率や乳牛の飼養管理に対して有益な情報となる可能性を秘めている。

4. おわりに

生乳の風味、特に異常風味に関する問題は、酪農、乳業に関わる全ての人間が真摯に受け止め解決すべき課題である。一方で、乳脂肪率や乳中の脂肪酸組成に関しては、乳牛の飼養管理によりコントロール可能であることが示されてきている。したがって、乳脂肪を舞台にして発生する異常風味に関しては、飼養管理により防止できる可能性があるものの、これらの関連に関する情報はまだまだ不足しており今後のさらなる研究の進歩が望まれる。いずれにしても乳牛を健全に飼養することが大前提であり、今一度、乳牛を健全に飼養するためには何が重要なのか見つめ直す必要がある。

引用文献

- 1) 野口洋介, 牛乳・乳製品の知識, 幸書房, 187-193 (1998)
- 2) Mouchili, A., Wichtel, J. J., Bosset, J. O., Imhof, M., Altieri, D., Mallia, S. and Stryhn, H., *International Dairy Journal*, 15, 1203-1215 (2005)
- 3) Heid, H. W. and Keenan, T. W., *European Journal of Cell biology*, 84, 245-258 (2005)
- 4) Lopez, C., *Current opinion in colloid & interface science*, 16, 391-404 (2011)
- 5) Ma, Y., Ryan, C., Barbano, D., Galton, D., Rudan, M. and Boor, K., *Journal of Dairy Science*, 83, 264-274 (2000)
- 6) Wiking, L., Nielsen, J. H., Bavius, A. K., Edvardsson, A. and Svennersten-Sjaunja, K., *Journal of Dairy Science*, 89, 1004-1009 (2006)
- 7) 森田茂・平松恵・岡楓子・三谷朋弘・熊野康隆・小坂英次郎・飯田直子, *Animal Behavior and Management*, 55, 1-7 (2019)
- 8) Lucas, A., Coulon, J., Grolier, P., Martin, B. and Rock, E., *Indicators of milk and beef quality*, Wageningen Academic Publishers, 137-150 (2005)
- 9) Havemose, M. S., Weisbjerg, M. R., Bredie, W. L., Poulsen, H. D. and Nielsen, J. H., *Journal of Dairy Science*, 89, 1970-1980 (2006)
- 10) 上田宏一郎, 乳牛栄養学の基礎と応用, デーリィ・ジャパン社, 64-78 (2010)
- 11) Walker, G. P., Dunshea, F. R. and Doyle, P. T., *Australian Journal of Agricultural Research*, 55, 1009-1028 (2004)
- 12) Chilliard, Y., Ferlay, A. and Doreau, M., *Livestock Production Science*, 70, 31-48 (2001)
- 13) Bauman, D. E. and Griinari, J. M., *Annual Review of Nutrition*, 23, 203-227 (2003)
- 14) Clancy, K., *Greener pastures*, UCS Publications (2006)
- 15) Mitani, T., Kobayashi, K., Ueda, K. and Kondo, S., 87, *Animal Science Journal*, 233-241 (2016)
- 16) 三谷朋弘, 乳肉卵の機能と利用 新版, アイ・ケイ・コーポレーション, 19-25 (2018)