

ミルクで学ぶ食品の機能

大谷 元*

* OTANI Hajime (信州大学大学院農学研究科)

Key Words：ミルク・食品の機能

はじめに

ミルクは哺乳類の新生動物が最初に摂取する食物であり、動物の種類によりその成長に適した成分組成と泌乳量のミルクが母動物から与えられる。表1にヒトと私たちのよく知る動物のミルクの成分組成を示した¹⁾。表1から各動物のミルクの成分組成がその動物の発育にとって如何に適したものであるかが考察できる。

すなわち、クジラやシロクマなどの水中や寒い地域で棲息する動物のミルクはヒトやイヌ、ブタ、ウシなどの家畜のミルクと比べて脂肪濃度が非常に高く、乳糖濃度が低い。これは水中や寒い地域での生活はエネルギーの消費量が多

く、エネルギーを効率よく生産する食物を摂取する必要がある。そのために寒い地域や水中で生活する動物のミルクには糖質やたんぱく質よりも重量当たりのエネルギー生産量がそれらの2倍である脂肪含量が多くなっている。また、クジラのように水中で授乳する動物は脂肪の濃度が高いと水中で拡散し難いという利点もある。一方、哺乳類の体は細胞を構成単位として、それに骨、歯、毛など加わってできている。細胞の固形物のおよそ半分はたんぱく質、骨と歯の主要成分はカルシウムとリンなどの無機質とたんぱく質、毛の主要成分はたんぱく質である。したがって、体の形成にはたんぱく質と無機質

表1 ミルクの成分組成 (%)

動物種	固形分	脂肪	たんぱく質	乳糖	無機質	出生時の体重が2倍になるのに要する日数
クジラ	51.8	34.8	13.6	1.8	1.6	-
シロクマ	42.9	31.0	10.2	0.5	1.2	-
イヌ	21.1	8.6	7.4	4.1	1.2	9
ブタ	19.2	7.6	5.9	4.8	0.9	14
ヤギ	12.1	3.7	3.3	4.3	0.8	22
ウシ	12.0	3.8	3.1	4.4	0.7	47
ウマ	10.1	1.3	2.1	6.3	0.4	60
ヒト	12.0	3.5	1.1	7.2	0.2	180

(大谷 元, ミルクの先端機能, p27, 1998)

が不可欠である。表1に示すように、ミルク中のたんぱく質濃度と無機質濃度との間には正の相関があり、それらと出生時の体重が2倍になるまでの日数との間には負の相関がある。これは速く体重が増加するためには、たんぱく質と無機質を多く摂取する必要があることを意味している。種保存のための食物として母動物が造るミルク中の各成分は、その種の新生動物の健全な発育のために最も適した濃度になっており、私たちの日々の生活においても年齢や運動量を考慮した食生活をするのが健康を維持する上で重要であることを示唆している。

近年、食品成分の評価は、生きるために不可欠な栄養素としての栄養機能（一次機能）、五感により満足感を与える感覚機能（二次機能）、生命維持には不可欠ではないが健康の維持や増進のための生体調節機能（三次機能）に分類されている。ミルクの三大栄養素は、一次機能において優れているだけではなく、二次機能や三次機能においても種保存のための特徴を備えている。このことはミルク科学の専攻者は周知のところであり決して新しいことではないが、ミルクの三大栄養素が有する二次機能や三次機能を考えることは食品の機能を知る原点と思われる。そこで、以下にミルクの三大栄養素の食品機能について概説する。

1. ミルクの脂肪の食品機能¹⁾

ミルクの脂質の殆どはトリグリセリドであり、脂肪球というエマルジョンを形成してミルク中に分散している。脂肪球が分散できるのは脂肪球が乳腺細胞の細胞膜や細胞質成分からなる脂肪球皮膜によって覆われているからである。脂肪球皮膜は非極性のトリグリセリド、両親媒性のリン脂質、ポリペプチド、グリコペプチドなどから構成されている。図1に示すよう

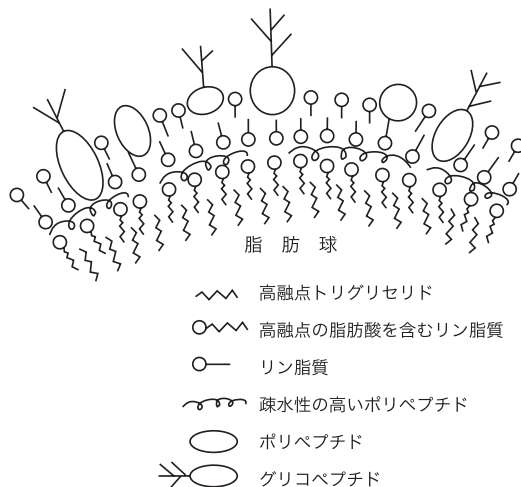


図1 脂肪球皮膜の模式図

(菅野長右エ門, 日本畜産学会報, 51, p75, 1980)

に、トリグリセリドのような非極性物質は皮膜の内部に位置し、リン脂質やグリコペプチドなどの両親媒性物質が外側に親水基を向けて外部に位置している²⁾。脂肪球皮膜に覆われることにより脂肪同士が重合せずに脂肪球として存在でき、このことは、脂肪の表面積を大きく保ち、消化管で脂肪球が酵素と接する機会を多くし、脂肪の消化吸收の向上に寄与する。また、ミルクの色やミルクを飲んだときに感じるまろやかさは、脂肪球に負うところが大きく、二次機能においても脂肪球の意義は大きい。

2. ミルクの糖質の食品機能¹⁾

私たち成人が主食として摂取するご飯やパンに含まれる主要糖質はデンプンであるが、ミルクの主要糖質は乳糖である。乳糖は人乳にはおよそ7.2%含まれ、牛乳にはおよそ4.4%含まれる。乳糖は、以前はエニシダの花粉やアカテツ科の果実などにも含まれると考えられていたが、現在ではミルクにしか含まれていないと考えられている。

デンプンの部分構造と乳糖の構造を模式的に

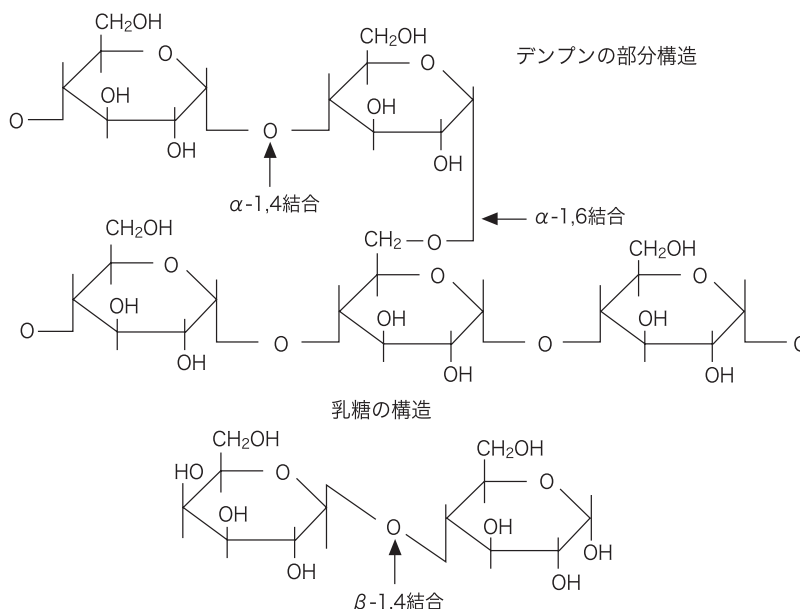


図2 デンプンの部分構造と乳糖の構造 (大谷 元, ミルクの先端機能, p33, 1998)

図2に示すが、前者は多数のD-グルコースが α 1,4結合と α 1,6結合により重合した多糖類であり、後者はD-ガラクトースとD-グルコースが各1分子 β 1,4結合により重合した二糖類である。乳糖1g当たり4キロカロリーのエネルギーを生じるために計算上は人乳の生産する全エネルギーのおよそ半分が、また、牛乳のおよそ1/3が乳糖に由来することになる。

単糖類以外の糖質が私たちのエネルギー源となるためには、消化管で単糖に消化(分解)されなければならない。デンプンを消化するアミラーゼは出生時に既に多量消化管に存在すが、乳糖を消化するラクターゼ(β 1,4ガラクトシダーゼ)は単糖やデンプンなどがなく、エネルギー源として乳糖を利用しなくてはならない場合においてのみ私たちの消化管内で生合成される。そのために、デンプンや砂糖と比べて空腸における乳糖の消化性は悪く、乳糖の一部はグルコースとガラクトースに分解されずに回腸に到達する。乳糖はカルシウムと結合する能力を持っており、カルシウムを結合して回腸に到達

した乳糖はカルシウムがリン酸と結合して無機リン酸塩として沈殿するのを阻害することにより、カルシウムの吸収を促進する。また、大腸に到達した乳糖は、大腸で溶解するために水分を腸管内に取り込む。その時の水分の移動により腸管が刺激される。また、乳酸菌や大腸菌により乳糖は乳酸や炭酸ガスに変換される。乳酸や炭酸ガスは腸管を刺激して腸の蠕動運動を促し、新生動物の排便を促し、新生動物が便秘に陥るのを防ぐ。また、乳酸菌により生産された乳酸は腸管でたんぱく質の消化により生じるアンモニアやアミンなどの有害物質を中和するとともに、病原性細菌の増殖を抑制し、新生動物が発病するのを抑える。さらに、乳糖の甘さはグルコースの22%であり、同じ二糖類の砂糖の16%しかない。このことにより、多量糖質が含まれているのにも関わらずミルクの甘さは抑えられ、栄養素を摂取するのに必要量飲まなくてはならないミルクを新生動物に飽きさせることなく必要量飲ませることができる。すなわち、乳糖は成人が通常摂取するご飯やパンの

主要糖質であるデンプンにはない食品の二次機能や三次機能を持つことにより新生動物の健全な発育に寄与していると考察される。

なお、成人が牛乳を飲用すると下痢をする場合がある。これは乳児期と比べて成人ではラクターゼ活性が低いことやラクターゼが欠損していることに起因する。このような症状は乳糖不耐症とか低ラクターゼ症と呼ばれ、牛乳を飲むと乳糖が腸管で消化されないために腸管に大量蓄積し、その溶解のために腸管浸透圧に大きな変化を生じることや腸内細菌により大量の炭酸ガスや乳酸が生成することによるものである。牛乳の摂取により下痢を起こす人はラクターゼにより予め乳糖を分解した加工乳やスターター細菌が乳糖を分解したヨーグルトの摂取が推奨される。

3. ミルクのたんぱく質の食品機能^{1,3)}

ミルクのたんぱく質はその存在形態により3種類に大別され、それらは脂肪球皮膜たんぱく質、カゼイン、ホエイたんぱく質と呼ばれている。脂肪球皮膜たんぱく質については既に述べたとおりであるが、ミルクから脂肪を除去した脱脂乳を20℃に保ち、pH 4.6に調整したときに沈殿するたんぱく質をカゼイン、上澄み(ホエイと言う)に残るたんぱく質をホエイたんぱく質と呼んでいる。

カゼインは乳腺細胞で複数の遺伝子により合成されるたんぱく質であり、例えば牛乳を例に用いると4種類の遺伝子により合成されることから、それらは α_{s1} -カゼイン、 α_{s2} -カゼイン、 β -カゼインおよび κ -カゼインと呼ばれている。各カゼイン成分は、ポリペプチド鎖として合成された後にリン酸化やグリコシル化を受けた複合たんぱく質である。牛乳の4種類のカゼインはすべてセリン残基かスレオニン残基の幾つか

α_{s1} -カゼイン、 α_{s2} -カゼインおよび β -カゼインは連続した3個のセリン残基がリン酸化されたホスホセリン集中域を有する。 κ -カゼインはホスホセリン残基を1個しか持たないが、他の3種類のカゼイン成分とは異なりグリコシル化を受けた糖たんぱく質でもある。ホスホセリン残基を1個しか持たない κ -カゼインはカルシウムが共存しても沈殿しないが、ホスホセリン集中域を持つカゼインは一定濃度以上のカルシウムが共存すると沈殿する性質がある(α_{s1} -カゼイン、 α_{s2} -カゼインおよび β -カゼインはいずれも牛乳中のカルシウム濃度では沈殿する)。そのために、 α_{s1} -カゼイン、 α_{s2} -カゼインおよび β -カゼインはカルシウム感受性カゼインと呼ばれ、 κ -カゼインはカルシウム非感受性カゼインと呼ばれている。牛乳中にカルシウム感受性カゼインの沈殿が見られないのは、カルシウム感受性カゼインを内部にして外部をカルシウム非感受性カゼインが覆うカゼインミセルと呼ばれる会合体を形成して存在しているからである。

牛乳のカゼインミセルの成分組成を表2に示す⁴⁾。カゼインミセルの約93%はカゼイン成分であり、カルシウムとリンはともにおよそ

表2 牛乳カゼインミセルの成分組成

成分	含量 (g/100g ミセル)
カゼイン	93.3
α_{s1} -カゼイン	35.6
α_{s2} -カゼイン	9.9
β -カゼイン	35.9
κ -カゼイン	11.9
無機質	6.30
カルシウム	2.87
リン	2.89
マグネシウム	0.11
ナトリウム	0.11
カリウム	0.26
その他	0.06
クエン酸	0.40

(大谷 元, 乳肉卵の機能と利用, p115, 2007)

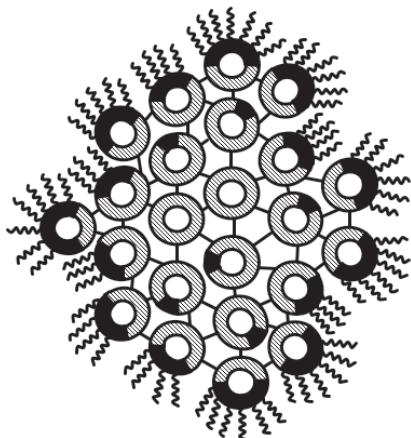


図3 Schmidt (1980) と Walstra のモデル (1990) に基づき作図したカゼインミセルの模式図

ドーナツ状の丸はサブミセル、黒色部分はカルシウム非感受性カゼイン (κ -カゼイン)、斜線部部分はカルシウム感受性カゼイン (α_{s1} -カゼイン、 α_{s2} -カゼイン、 β -カゼイン) の重合体を示す。波線および直線は、それぞれ κ -カゼインの C-末端側の親水性領域およびコロイド性リン酸カルシウムクラスターの架橋を示す。

2.9% である。それ故に、これら 3 成分だけで 99% 近くを占める。また、このようなカゼインミセルの成分組成、電子顕微鏡によるカゼインミセルの観察結果、カゼインミセルにキレート剤を作用させると小さなミセルになることおよび κ -カゼイノグリコペプチドを優先的に遊離するキモシンを作用させるとカゼインミセルは凝集するという現象に基づいて考えられたカゼインミセルのモデルに基づき描いたカゼインミセルの模式図を図 3 に示す。

ミルク中の主要たんぱく質であるカゼインがミセルとして存在することは新生動物の栄養生理学上、すなわち、一次機能と三次機能において重要な意義を担っている。すなわち、ミルク成分が胃に到達するとペプシンやキモシン (本酵素は反芻動物の胃にのみ存在する) の作用を受け、カゼインミセルを安定化しているミセル表面の κ -カゼインから κ -カゼイノグリコペプチドが遊離することにより、カゼインミセルは

凝固し、それに伴い牛乳全体がゲル化する (凝乳現象という)。ゲル化したミルク成分は液体のミルクの場合よりも消化管の移動速度が遅くなり、牛乳成分の消化吸収を促進する。一方、カルシウム感受性カゼインはミルク中でカルシウムが無機のリン酸と結合して沈殿するのを阻害する作用を有しているが、一定量のカルシウムと結合したカルシウム感受性カゼインは沈殿する。そのために、カゼイン成分がミルク中でミセルを形成して存在していることは、ミルク成分の消化吸収を向上させるとともに、新生動物の発育期に多量必要なカルシウムの吸収を促進することになる。なお、ヒトは、カゼインミセルにキモシンやペプシンのような κ -カゼイノグリコペプチドを優先的に遊離させる酵素を作用させると牛乳が凝固することに着目し、チーズの製造技術を確認した。また、カゼインミセルの等電点は pH 4.6 付近であり、牛乳に乳酸菌を加えて培養すると乳糖が乳酸に変換することにより牛乳はゲル化するというに着目し、ヨーグルトを製造している³⁾。

たんぱく質の重要な食品機能はアミノ酸の供給源である。たんぱく質は一般に煮たり焼いたりすると変性して消化性が向上する。カゼインは本来変性したたんぱく質と言われる繊維状たんぱく質であり、消化性に優れているとともにアミノ酸バランスが良いことからミルクの重要なアミノ酸供給源である。

一方、ミルクたんぱく質においても一つの重要な機能は生体防御機能である。誕生時期よりも早く出生した新生動物はもとより、母動物の体内に十分にいて出生した新生動物においても出生時には感染防御をはじめとした生体防御機構は完成しておらず、その機能はミルクに依存している。表 3 に牛乳と人乳の主要感染防御たんぱく質とその濃度を示すが、初乳、とくに出生後 1 週間以内のミルクには、抗体、ラクトフェリン、リゾチームなどの多様な感染防御機

表3 ミルク中の主要感染防御たんぱく質

たんぱく質	牛乳 ~含量 g/kg, () 内は初乳~	人乳
抗体 (免疫グロブリン)		
IgG	0.72 (32 ~ 212)	0.03 ~ 0.04 (0.43)
IgG ₁	0.6 (20 ~ 200)	
IgG ₂	0.12 (12)	
sIgA	0.13 (3.5)	1 (17.35)
IgM	0.03 ~ 0.04 (8.7)	0.1 (1.59)
ラクトフェリン	0.02 ~ 0.2 (1)	2 ~ 4 (6 ~ 8)
リゾチーム	0.001 以下	(0.4)

(大谷 元, *Biophilia*, 4 (3), p43, 2008)

能を有するたんぱく質が豊富に含まれており、新生動物の健全な発育のための三次機能を担っている。

おわりに

ミルクの三大栄養素が有する主要な潜在的食品機能を中心に概説した。これらの機能に加え

て、ミルク成分は多様な顕在的三次機能を有しており、カゼインの消化により生じるペプチドを用いたカルシウムの吸収促進を目的とした特定保健用食品や血圧の上昇を抑えることを目的とした特定保健用食品が開発され販売されている。経口摂取したペプチドが標的器官や標的細胞に目的とする活性を維持したまま到達するこ

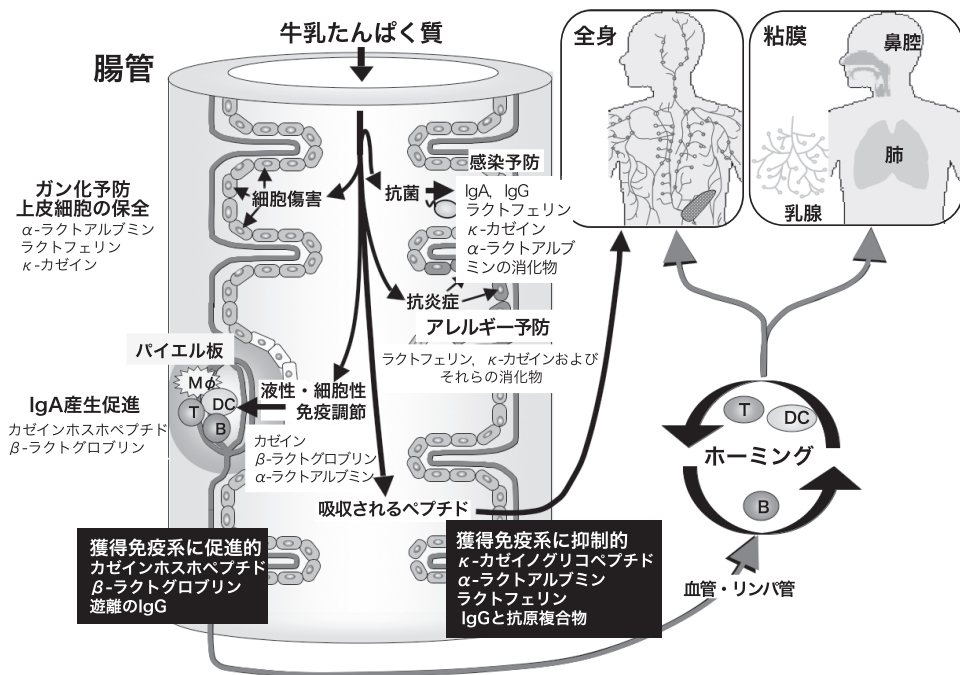


図4 牛乳中の主要たんぱく質およびその消化により生じるペプチドの免疫調節作用

(大谷 元, *ミルクサイエンス*, 55, p1, 2006)

とは特定保健用食品として許可される上で不可欠である。腸管から容易に吸収されペプチドはトリペプチドまでであることは周知のところである。カゼインホスホペプチドはトリペプチドよりも大きいペプチドであり、腸管から積極的に吸収されることはできない。しかし、カルシウムの吸収促進においては、ペプチド自体が腸管から吸収される必要は無く、消化酵素に対して抵抗性を持ち、分解されずに消化管に滞在してカルシウムの吸収を促進できればよい。カゼインホスホペプチドはこの条件を満たすペプチドである。一方、血圧の上昇を抑えるペプチドは腸管から吸収される必要がある。カゼイン由来のアンジオテンシンⅠ変換酵素を阻害するペプチドのラクトリペプチドはその名の通り3個のアミノ酸からなるペプチドであり、腸管から容易に吸収される。そのために血圧の上昇が抑えられるのである³⁾。

一方、前述したように、免疫系が発達していない状態で出生する新生動物にとって、ミルクを介した母動物からの感染防御成分の授与はミルクの重要な使命である。ホエイたんぱく質の潜在的感染防御機能については既に述べたとおりであるが、筆者の研究室では牛乳たんぱく質を中心にミルクたんぱく質の顕在的免疫調節機能（消化物の生体防御機能）の特性付けを20数年前から行ってきた。その結果に基づき、牛乳たんぱく質とその消化により生じるペプチド

の生体防御系における機能を模式的に図4に示すが、牛乳たんぱく質は獲得免疫系に対して促進的に働くたんぱく質と抑制的に働くたんぱく質に大別されるという興味深い結果が得られている⁷⁾。すなわち、カルシウム感受性の β -カゼイン、牛乳ホエイたんぱく質の中で最も多い β -ラクトグロブリンおよびカルシウム感受性カゼインの消化により生じるホスホセリン集中域を持つカゼインホスホペプチドは獲得免疫系に対して促進的であり、カルシウム非感受性カゼインである κ -カゼイン、ホエイたんぱく質の中で2番目に多い α -ラクトアルブミンやカルシウム非感受性カゼインの消化により生じる κ -カゼイノグリコペプチドは獲得免疫系に対して抑制的であり自然免疫系に対して促進的である。このことは、カルシウム感受性カゼインと非感受性カゼイン、牛乳ホエイの中で最も多いたんぱく質と2番目に多いたんぱく質は獲得免疫系に対して全く逆の作用を有することを意味しており、このような現象は単なる偶然とは思えないように考えられる。

新生動物におけるミルクたんぱく質の潜在的生体調節機能についての議論は現時点では殆どなされていない。今後、新生動物におけるこれらペプチドの栄養生理学的意義が解明されるとともに、これらの潜在的免疫活性を有するペプチドがヒトの健康維持のために利用されることを期待したい。

・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 文 献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

- 1) 大谷元, ミルクの先端機能 (吉川正明, 細野明義, 中澤勇二, 中野覚編) pp.27-36, 弘学出版, 東京 (1998)
- 2) 菅野長右エ門, 日畜会報, **51**, 76 (1980)
- 3) 大谷元, たんぱく質の科学 (鈴木敦士, 渡部終五, 中川弘毅編), pp.47-66, 朝倉書店, 東京 (1998)
- 4) 大谷元, 乳肉卵の機能と利用 (阿久澤良造, 坂田亮一, 島崎敬一, 服部昭仁編) pp.115-121, アイ・ケイコーポレーション, 神奈川 (2007)
- 5) 大谷元, 21世紀の食・環境・健康を考える (唐沢豊編), pp.62-74, 共立出版, 東京 (1999)
- 6) 大谷元, *Biophilia*, **4**(3), 43-50(2008)
- 7) 大谷元, ミルクサイエンス, **55**, 1-14 (2006)