

乳清について

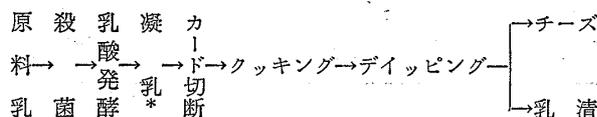
安藤 邦雄*

1. 乳清とは

まず読者にとって乳清とは耳なれない言葉と思うので、若干の説明から始めたい。乳清は英語で Whey, ドイツ語で Molke と呼ばれ、その定義としては「乳(ほとんどが牛乳)からチーズを製造するさい、副生する液体の部分」を指している。その成分をおおまかにみると乳の主要蛋白であるカゼイン、乳脂肪および脂溶性ビタミンと一部のミネラルが除去された液体部分である(図1)¹⁾。

言うまでもなくチーズは、遊牧民と遊牧民を祖先とする人々(ヨーロッパ、中央アジア、中東およびアフリカの一部)の常食の一つであって、栄養的に優れた保存食として世界の食文化の中で大きな地位を占めている。世界的にみてもチーズの生産量は莫大であり、その製造にともなって副生する乳清の量も我々の想像を越えるほどに大きい。牛乳は栄養的にみて理想に近い食品であり、その一部である乳清にも栄養的にみて優れた価値があることは想像にかたくない。しかし理想的な保存食品、チーズをつくりだした遊牧民も、副生する乳清の利用までは考え及ばなかったらしい。わずかにギリシャ・ローマ時代に低カロリー健康飲料として飲まれた記録が残っていたり、中世以降、現在にいたるまで西欧の一部では医療用の健康飲料として飲まれ続けてきた程度である²⁾。一方、昨年、来日した長寿で有名なコーカサス、グルジア共和国の長寿訪日団の談話によれば、同地方では乳清を乾燥物とまぜて盛んに飲んでいるそうである。しかし、これらはむしろ例外で、これまで乳清のほとんどは廃棄されるか、家畜の飼料にされていた。

牛乳が原料でありながら大部分の乳清が廃棄されてきた理由は、①チーズ製造のさい乳酸発酵させるので腐敗しやすいこと②水っぽくて味がわるいこと、などがあっ



* 凝乳には凝乳酵素, レンネットが用いられる。

図 1. チーズと乳清の製造法

* 中外製薬(株)

たためと思われる。

チーズ製造工場が大規模になるにつれ、それまでのように副生する乳清を廃棄して環境汚染をおこしたり、家畜の飼料とすることは経済的な損失につながると考えられるようになってきた。また、最近の技術的な進歩にもなって、粉末化した乳清の品質も向上していること、および新鮮な乳清を乳蛋白と低分子の画分に分けることも可能になって、各々の成分について利用の道が開けるようになり、新しい用途の開発が活発になってきた。

2. 乳清の生産量

さきにも触れたようにチーズ製造にともなって副生する乳清の量は莫大なものがある。乳清には牛乳固形分として約6%が含まれるので、表1に示すように1983年度では固形分に換算した乳清の生産量は、717.4万トンに達すると推定される³⁾。この固形分に含まれてくる牛乳成分は①糖質②乳清蛋白質③ミネラル、水溶性ビタミンおよびその他の低分子物質などである。この固形分には約12%の蛋白が含まれているので、蛋白質の総量は約90万トンに達することになる。この量は日本人が年間に消費する食肉蛋白、59万トン、卵蛋白、24万トンと比べても決して少ない量ではない。

主要なチーズ生産国である西欧、ソ連を含む東欧およびアメリカ、カナダなどの北米が乳清の大生産国であって、その他の地域は量的に少ない。オーストラリア、ニュージーランドのように牛乳の生産コストが非常に低い

表 1. 世界における利用可能な乳清固形分

国名	副生量(キロトン)	割合(%)
EEC	2,353	33
EEC 以外の西欧	362	5
東欧	1,601	22
北米	1,558	22
南米	192	3
オーストラリア	168	2
その他	940	13
総計	7,174	100

EEC Dairy Facts & Figures より引用

乳清について

表 2. EEC 諸国における乳清固形分の利用状況

用 途	EEC 諸国	イギリス
家畜飼料 (液状)	45%	25%
乳清粉末	30%	51%
乳糖, 脱乳糖	15%	13%
副産物		
乳清蛋白	—	3%
その他	10%	8%

EEC Dairy & Figures より引用

表 3. アメリカにおける乳清固形分の利用

品 目	食品用 (%)	飼料用 (%)	合計 (%)
濃 縮 乳 清	7.1	3.8	10.9
粉 末 乳 清	31.5	34.1	65.6
低乳糖乳清	3.2	—	3.2
低ミネラル乳清	3.0	3.6	6.6
乳 清 蛋 白	4.9	—	4.9
濃 縮 物			
乾 燥 乳 清	—	7.2	7.2
乳清固形混合物	—	0.8	0.8
そ の 他		1.0	1.0
合 計	49.7	50.5	100%

Whey products Institute, USA 調査より引用

国でも、意外なことに乳清の生産量は少ない。その理由としてチーズの大消費国は、自国の酪農を保護するために高い貿易障壁を設けて安い乳製品の輸入を防いでいるからである。したがってオセアニア州の国々には人口が少ないので、自国の消費を賄うだけではチーズの生産量はそれほど大きくない。

次に EEC 諸国における乳清の副生状況を表 2⁹⁾ に示す。

表から明らかなように、西欧諸国では多量の乳清が液体のまま家畜の飼料にされていて、食品素材として活用されている部分は少ない。また、大酪農国のアメリカでも、液体のまま家畜の飼料にまわされる乳清が相当な部分を占めるものと推定される。アメリカの酪農企業は1983年61.1万トンの乳清固形分を生産しているが、用途の内訳は表 3 に示す通りである。

アメリカの乳清固形分を回収する工程は、西欧で使われている粉霧乾燥ではなく、ドラム乾燥機を使用しているために、若干品質面で劣るといわれるが、食品用と飼料用がほぼ 1 : 1 の割合である。

さらにアメリカにおける食品用としての乳清固形分の用途は表 4⁹⁾ に示す通りである。

表から明らかなように、食品用としての乳清は、乳児用粉ミルク、チーズスプレッドなどの乳製品を強化する

表 4. 乳清固形分の食品への利用 (USA, 1983)

用 途	%
乳 製 品	26.6
製 パ ン	22.3
ドライミックス	22.4
蛋白増量剤	19.1
製 菓 用	1.2
ス ー プ 用	1.1
マーガリン用	1.0
化学薬品用	0.4
肉製品増量剤	0.3
研 究 用	0.3
ソフトドリンク/特殊治療食用	0.1
そ の 他	5.2

Whey products Institute, USA 資料より引用

ために消費される部分が1/4強、その他に製パン用、ドライミックス、混合用が大きな部分を占めている。したがって、後述するように乳清本来の性質を生かした食品分野の用途はまだ開拓されていないといっても過言はでない。

我が国における乳清固形物の年間使用量は約1万トンといわれ、専ら育児用粉ミルクの蛋白組成改良および食品加工用に使われていたが、最近、飲料用としての用途がこれに加わった。日本ではチーズの生産量が少ないこともあってその生産量は限られていて、かなりの部分を輸入にあおいでいる。

最近にいたり酪農が農業の中心である欧米諸国では、食材用として良質の粉末乳清および乳清蛋白粉末が、登場し始めたことは注目にあたいする。これらはチーズ製造直後の新鮮な乳清を粉霧乾燥したり、乳清を膜技術によって処理して蛋白を濃縮した製品で、品質的にも徐々に向上してきている。したがって、食用に適した高品質の粉末乳清およびその成分の入手も次第に容易になってきている。

3. 乳清の組成

乳清はそのチーズの製造過程から容易に推定できるように、牛乳の脂質、カゼイン、カゼインと脂肪球などと挙動を共にするミネラル (Ca, P, Co, Mo, Mn など) および脂溶性ビタミンを除くすべての成分を含んでいる。

乳清は製造法によって二つのカテゴリーに大別される。一つはチェダー、ゴーダー、スイスチーズなどを製造するさいに副生する乳清 (Sweet whey) で、製造時の pH は、5.8~6.5 であって甘性乳清と呼ばれる。いま一つは酸性乳清 (Acid whey) で、酸によってカゼインを沈澱させたさいに副生する乳清である。後者では酸性のためカゼインに結合している Ca とリンが乳清画分に移行す

表 5. 乳清粉末の成分組成

	甘性乳清	酸性乳清
水分(%)	3.9	4.6
蛋白質(%)	13.0	11.7
非蛋白性(%)	0.5	0.6
窒素化合物		
乳糖(%)	69.4	63.2
脂質(%)	1.0	0.5
灰分(%)	8.3	10.6
滴定酸度(%)	0.10	0.39
pH	5.88	4.57

L. Glass et al. J. Dairy Sci. 60: 185~190, 1976, の表を一部改変

るので、前者とくらべ灰分が多く風味に問題があって用途は限定されている。食品用として今後用途開発の対象となると予想されるのは、甘性乳清のほうである。

乳清固形分の中で主要な成分は、表 5⁴⁾ に示す通りである。乳糖は固形物中で約70%を占める最大の成分である。乳糖は医薬品を製剤化するさい賦形剤として多用されるほかに、医薬品の原料（ラクチュロース、ラクトビオン酸など）および発酵原料（代謝速度が遅いので優れた炭素源である）などの用途がある。いずれにしても、乳糖は甘みがほとんどない糖なので、用途は限定されていて、乳糖を採取するために用いられる乳清の量は15%内外である。

この他にカゼインを除く牛乳蛋白のほとんどが乳清に移行する。すなわち、乳に特異的な β -ラクトグロブリン（全乳清蛋白の45%）、同じく乳特有の蛋白 α -ラクトアルブミン（同20%）、ラクトフェリン、血中と同じ免疫グロブリン（同13%）などの主要な蛋白の他に、リゾチーム、パーオキシダーゼ、リパーゼ、キサンチンオキシダーゼ、そのほか多くの酵素を含んでいる。しかし、チーズ製造にともなう加熱殺菌処理、凝乳酵素による分解および乳酸発酵の過程で、これらの蛋白がどのような修飾を受けるかは明らかでない。

乳清の主要蛋白である β -ラクトグロブリンは、蛋白として高い栄養価値をもつことのほかに、特殊な機能は見いだされていない。また、 α -ラクトアルブミンは、乳糖合成の最終段階を触媒する酵素の一部、B-蛋白と同一物であって、リゾチームと類似した蛋白である。代表的な機能性蛋白である免疫グロブリンは、牛乳中では大部分が IgG で、ヒト母乳中の免疫グロブリンが主として IgA から成り立っていることと対照的である。また、同じく機能性蛋白としては、血清中の鉄輸送蛋白、トランスフェリンと類似した性質をしめすラクトフェリンが含まれている。牛乳中のラクトフェリンもトランスフェリ

ンと同様に鉄イオンと強固な錯化合物を形成する性質をもち、鉄の飽和度が低いさいには周囲から鉄イオンを奪うので、ある種の病原性細菌にたいし *in vitro* で静菌作用を示す。ラクトフェリンは免疫グロブリンと相補的にはたらい、新生児の腸管を病原微生物の感染から保護していると推定されている。このように乳清蛋白の中には多くの機能性蛋白が含まれているが、市販されている粉末乳清あるいは乳清蛋白濃縮物がそれらの活性がどのくらい保持しているかについては報告がない。

また、乳清には牛乳中のミネラルのうち、かなりの部分が移行する。一価のアルカリ・カチオンであるカリウムとナトリウムおよび塩素イオンは、牛乳中のほとんどが乳清に移行する。カゼインと結合しているカルシウムとリン酸は、チーズ製造のさい一部がカードとして沈殿するので、牛乳と比べれば減少する。また、牛乳の脂肪球皮膜に結合している Cu, Mn, Co, Mo などの微量元素もチーズにほとんど全量が移行するので乳清中の含量は激減する。したがって、乳清は黄緑野菜と同様に多量のカリウム、カルシウムと微量必須ミネラルを含んでいるので、ミネラルの供給源としても有力である。

4. 乳清蛋白の栄養学的意義

乳清にはいろいろの成分が含まれるが、最も栄養学的に価値が高いものが、乳清蛋白であることは疑問の余地がない。一例をあげれば、体重 70 kg の成人男子の一日あたりの蛋白必要量は、卵白で 17.4 g、牛乳蛋白で 28.4 g、カゼインのみで 24.4 g であるのに対し、乳清蛋白ではわずかに 14.5 g で充分であると報告されている⁵⁾。

一般的にみて乳蛋白は他の蛋白とは違って幼動物の成長のために分泌されたものなので、栄養的にアミノ酸バランスがよく整っている。表 6⁶⁾ に代表的な乳蛋白、カゼインと対比して乳清蛋白アミノ酸組成を示した。表から明らかなようにカゼインおよび乳清蛋白のアミノ酸組成は優秀で、すべての必須アミノ酸にわたって FAO の基準を越える量を含んでいる。乳清蛋白の芳香族アミノ酸とバリン含量は、カゼインと比べるとやや少ないが、含硫アミノ酸（メチオニンとシスチン）とリジンが多量に含まれている点に特徴がある。

表 7 に乳清蛋白の蛋白効率 (PER) と正味蛋白利用率 (NPU) を他の蛋白と比較して示す⁷⁾。これらは幼若ラットを用いる蛋白の栄養評価法で、価が高いほど良質の蛋白ということになる。

表から明らかなように、乳清蛋白の栄養価値は群を抜いて高く、乳の主要な蛋白であるカゼインよりスコアが大きい。また、植物性のコメおよび小麦粉の蛋白とは比

乳清について

表 6. カゼインと乳清蛋白のアミノ酸組成

必須アミノ酸	カゼイン 蛋 白	乳清蛋白	FAO の暫 定パターン
イソロイシン	6.1	6.2	4.0
ロイシン	9.0	12.3	7.0
リジン	8.2	9.1	5.5
メチオニン	2.8	2.3	3.5
シスチン	0.3	3.4	
フェニルアラニン	5.0	4.4	6.0
チロシン	6.3	3.8	
スレオニン	4.9	5.2	4.0
トリプトファン	1.7	2.2	1.0
バリン	7.2	5.7	5.0

蛋白質 100g 中のアミノ酸含量 (g)

表 7. 乳清蛋白の PER と NPU

蛋 白	蛋白効率 (PER)	正味蛋白利用 率 (NPU)
牛 乳	3.6	75
カゼイン蛋白	3.3	79
乳 清 蛋 白	4.0	94
β -ラクトグロブリン	3.5	87
α -ラクトアルブリン	4.0	90
コ メ	—	57
小 麦 粉	—	52

鍋田文三郎著「乳清の神秘」より引用

較にならないほど高い価を示すことがわかる。乳清蛋白がなぜ乳の主要蛋白であるカゼインよりすぐれたスコアを示すかについては、発生学的にも興味がある問題でいろいろ推測されているが、はっきりした回答は得られていない。

蛋白の栄養価は、単にそれを構成するアミノ酸のバランスだけで決まるとは限らない。最も簡単な例では、必須アミノ酸をバランスよく配合して動物に与えても、同一組成を持った蛋白の栄養価には及ばないことが一般的である。アミノ酸のような低分子化合物は、一部が肝臓で捕捉されて脱アミノ反応を受けるからである。したがって、乳清蛋白はその構成アミノ酸のバランスがよいことに加え、PER と NPU からみて消化性と、その配列順序もよいので、栄養価値としては最高の蛋白の一つといえよう。特に、リジンおよび含硫アミノ酸の供給源としては非常に優れた価値を持っている。

6. 乳清蛋白の病態生理学的な意義

乳清蛋白がリジン及び含硫アミノ酸に富んでいることは、栄養学的な価値ばかりでなく病態生理的にも大きな意義がある。高蛋白食が高血圧の発症と増悪を抑制する効果をもっていることは、既にヒト並びに実験動物で実

証されて定説になっている。高蛋白食のどの必須アミノ酸が高血圧を抑制するかを研究した成果によれば、抑制効果が強いアミノ酸は、リジンおよび含硫アミノ酸である。高蛋白食の高血圧抑制に関する作用機作については、①含硫アミノ酸の代謝物が中枢の昇圧機構を抑制する②アミノ酸から生成した尿素が利尿的（尿を増加させること）に作用してナトリウムを排泄させる③これらのアミノ酸は血管の弾力性を維持させる働きがある④食塩に対する嗜好を変化させ、食塩の摂取を減少させる、などの機構が提唱されている。家森らは脳卒中自然発症ラット（SHRSP 系）を用い高血圧を抑制することで知られる κ -カゼインを含むカゼイン画分と乳清蛋白とを含む高蛋白食を与え、脳卒中死に対する延命効果を比較した。その結果によれば、両者ともに悪性高血圧の持続を抑制する点では共通していたが、乳清蛋白のほうが優れた延命効果を示した⁸⁾。従って、乳清蛋白は魚肉および大豆蛋白などと並んで、食品素材として循環器疾患の予防治療に有用と思われる。

最近の国民栄養調査によると、日本人の栄養摂取はほぼ理想に近い水準に到達していると報告されている。しかし、一方ではカロリーの過剰摂取と偏った食事のために、成人病の増加が憂慮される状況になってきた。すなわち、成人男性の6割強が、一日あたり2600カロリー以上のエネルギーを摂取していて、その割合は年々増加する傾向にある。学童にも肥満および高コレステロール、高中性脂肪血症のような代謝異常が高い頻度で観察されるようになったからである。このさいなんらかの対策を講じないかぎり、将来はアメリカ型の循環器疾患（狭心症、心筋梗塞）が多発するであろうと推定されている。このような状況を是正するためには、適度な運動と生活環境から過剰のストレスを排除することと並んで①カロリー過剰摂取を控えること、②蛋白質を重視したバランスのとれた食事をとること、などの食生活改善が必須とされている。しかし実際にはバランスがとれた低カロリー高蛋白の食事を用意することは非常に難しい。良質の蛋白はほとんどが動物性であって、十分な蛋白を摂取しようとすれば、同時に多量の脂肪を摂取することになるからである。すなわち、高蛋白にしよとすれば、どうしても高カロリーになってしまうからである。この点で、大豆蛋白とならんで乳清蛋白は、脂肪フリーの良質な蛋白からなる食材である。今後、高蛋白、低カロリーの加工食品を製造するさい、乳清蛋白はよい素材と思われる。しかし各種の治療および予防食の開発にとって必須の乳清蛋白の物性研究は、まだ始まったばかりである。

6. 食品素材としての乳清蛋白⁹⁾

一般的に言って、乳清蛋白は 60°C 以上の温度で影響を受けるが、影響の程度は、分子構造、濃度、pH、イオン強度に依存する。加熱によってコンパクトな球状構造のみだれが生じて、安定なランダムコイル状の構造に変化して蛋白変性がひきおこされる。この変性は、ペプチド鎖の疎水結合および内部の S-S 結合の変化に由来する。乳清中には乳糖が共存するので、そのさいメイラード反応によってリジンの減少がおこる。しかし、この反応によって失われるリジンは 5% 以内で、しかも乳清蛋白の制限アミノ酸ではないので事実上問題にならない。乳清蛋白は変性によってゲルを形成したり、沈殿物を形成したりする。乳清蛋白の不溶化と変性は、通常、pH 4.6-5.0 における溶解度の減少によって示され、変性度はゲル電気泳動によって調べることができる。

これまでに得られた乳清蛋白に関する知見をまとめると下記の通りである。

(1) 広い pH 範囲でかなりの溶解性を示す。

(2) 濃度が 5% 以上の場合には加熱によって固いゲルを形成する。最適なゲル強度は、10~15% のさいに得られる。

(3) 変性時には優れた抱水性と抱脂性を示す。

(4) すぐれた起泡剤となる。

このような性質は、乳清蛋白の製造法によって変化することが知られているが、概して食品としての機能を広い範囲にわたって備えていることはまちがいない。

7. むすび

最近、我が国を含め欧米諸国では①食生活の見直し②ジョギングに代表されるスポーツブーム③自然食品、健康食品の流行などに端的にあらわれているように、「健康指向」が異常ともみえる盛り上がりを見せている。このような動きの根底には、衣食住が完全とはいえないが、ほぼ充足された人々が、自身の健康を含め将来に対し漠然とした不安を抱いているからであろう。

我が国の食生活が昭和30年代を境に大きく変化したことは周知の事実である。この食生活上の変化が、我々の疾病構造を大きく変え、平均寿命の延長にいかにか寄与したかは誰でも異論がないことであろう。しかし、何事も

「過ぎたるは及ばざるがごとし」である。「飽食の時代」を迎えた我が国では、昔では考えられなかった疾病構造が定着しようとしている。すなわち、エネルギーの過剰摂取からくる肥満によって誘発される成人病の増加である。このままでは我が国は「経済大国」であると同時に欧米並の「肥満大国」にもなりかねない。

この短文でプロフィールを紹介した乳清は、このような傾向を是正する素材として期待される。しかし、何分にもごく最近になって食材として適した粉末乳清が供給されるようになったばかりであり、本格的な開発はこれからである。言うまでもなくただ栄養的に優れていたり、時代の要請に合致しているだけでは食品とは言えない。乳清を素材としてヒトの味覚を満足させる食品を開発することがこれからの課題である。なお乳清については鶴田、祐川らによる優れた総説¹⁰⁾があるので、興味がある読者は参照していただきたい。

謝 辞

本稿を書くにあたって、ご指導ご鞭撻を受けた帯広畜産大学、前教授、祐川金次郎先生並びに東京農業大学、教授、鶴田文三郎先生に深く感謝する。

引用文献

- 1) 鶴田文三郎, “乳清の神秘” p. 48 (1985) 講談社
- 2) Anemuller, H., “Die Molke Trinkkur” 1982, Walter Hadecke Verlag.
- 3) Symposium: Whey process for profit. J. Soc. Dairy Technology. **38**, 97 (1985)
- 4) Glass, L., et al., J. Dairy Sci. **60**, 185 (1976)
- 5) 祐川金次郎: 乳技協資料, **35**, 1 (1985)
祐川金次郎: 化学と生物, **10**, 230 (1976)
- 6) Wingord, W.H.: J. Dairy Sci. **54**, 1234 (1974)
- 7) Werner, H.: Dairy Sci. International **33** (1980)
- 8) 家森幸男, 私信
- 9) Evans, H. T. F., and Gorden, J. F.: Whey proteins in Applied protein chemistry. ed. by R. A. Grant, Applied Science Publishers LTD. London. 831 (1980)