

ラクトースフリーミルクの開発

渡 邊 格

(株式会社明治 研究本部 商品開発研究所, 〒192-0919 東京都八王子市七国 1-29-1)

Development of Lactose-Free Milk

Kaku Watanabe

(Food Development Laboratories R&D division Meiji Co., Ltd. 1-29-1 Nanakuni, Hachioji, Tokyo 192-0919, Japan)

要 旨

牛乳はエネルギーおよび栄養素の供給源として優れた食品である。しかし、乳糖不耐症者は牛乳に含まれる乳糖（ラクトース）を十分に消化することができず、胃部不快感などの症状を呈するため牛乳の飲用を忌避する傾向がある。この問題に対処するため、海外では乳糖を含まないラクトースフリーミルクが広く普及している一方、日本国内ではそれに相当する市場が存在していない。本稿では当社が国内市場向けに開発、上市したラクトースフリーミルクを題材に、乳糖とその生体内での消化機序、そして乳糖不耐症のメカニズムを解説する。既にラクトースフリーミルクへの認知が浸透している海外主要市場と、そこで確立された主要ブランドについて簡潔に紹介した後に、当社のラクトースフリーミルクの製品概要、およびその開発過程における課題に対する具体的な解決策を紹介する。

はじめに

牛乳はエネルギーおよび栄養素の供給源として非常に優れた食品の一つであり、ヒトの成長に有用な食品である。牛乳にはタンパク質、脂質、炭水化物がバランスよく含まれており、小児期の健全な身体成長に利する観点から、国内では学校給食に広く取り入れられている。一方で、加齢、先天性、あるいは何らかの病気によって引き起こされる「乳糖不耐症」の方は牛乳中に含まれる乳糖（ラクトース）を消化できずに消化管症状を呈し、そのため牛乳摂取を避ける消費者も多く存在している。

乳糖とは^{1,2,3,4)}

乳糖はグルコースとガラクトースが β -1, 4 結合した中性の二糖である。牛乳中には4.5%の糖質が遊離状態で存在し、その99.8%を乳糖が占めてい

る。乳糖の生合成には乳腺上皮細胞でのみ作られる α -ラクトアルブミンという乳タンパク質が必須であるため、乳以外に存在しない極めて特殊な糖質である。乳糖の消化には小腸内腔での β -ガラクトシダーゼ（ラクターゼ）による加水分解が必要である。乳児ではラクターゼ活性が高いため、乳糖の大部分は小腸で消化吸収されるほか、一部の未分解乳糖は大腸まで移動して大腸内に存在する乳酸桿菌やビフィズス菌などの腸内細菌の増殖に寄与している。これらの腸内細菌発酵により産生される乳酸や酢酸などによって大腸内容物 pH が低下し、それが腐敗菌などの有害菌の増殖抑制に影響を及ぼしている。すなわち乳糖にはプロバイオティクス菌の増殖および作用を高める機能があると言える。さらに、乳糖はカルシウムや鉄の吸収促進作用を持つことが知られており、これらを同時摂取することでカルシウムや鉄の吸収率が向上することがヒト試験で示さ

れている。以上より、乳糖はエネルギー源としての役割と栄養素の吸収や腸内環境の正常化という役割を併せ持つ、乳の主要な栄養素の一つである。

乳糖不耐症とは^{5,6)}

前述した通り、乳糖は栄養素として有用であるが、一方で乳糖不耐症という症状を起こす原因となる物質でもある。乳糖不耐症とは牛乳や乳製品に含まれる乳糖の消化不良および吸収不良によって引き起こされる胃腸の不調症状を指し、代表的な症状としては腹部膨張、腹鳴、鼓腸、腹痛、下痢などが挙げられる。前出の通り、乳糖は小腸においてラクターゼによって加水分解され吸収されるが、ヒトを含む多くの哺乳動物では離乳に伴いラクターゼが完全欠損あるいは活性低下する。そのため、ラクターゼでグルコースとガラクトースに分解され、小腸内壁から吸収されるはずの乳糖が腸内に残存し続ける。その結果、腸内の浸透圧が高まることで腸内に多量の水が入り込む。さらに、小腸から大腸に移動した乳糖は腸内細菌によって発酵され、ガス（二酸化炭素、水素、メタンなど）や短鎖脂肪酸（ギ酸、酪酸、プロピオン酸など）などが産生される。その結果、未吸収ガスは腸管の膨張を引き起こし、短鎖脂肪酸は腸壁を刺激して腸内における水様物が合わさって下痢が引き起こされる（図1）。

乳糖不耐症者の割合は国や地域によって異なることが分かっている（図2）。伝統的に牧畜を営んできた欧州地域では乳糖不耐症者が少ないのに対し、牧畜よりも農耕が発展した日本を含むアジア地域では乳糖不耐症者が多くなっている。

ラクトースフリー製品の市場動向^{7,8)}

前項で示した通り、乳糖不耐症者は欧米以外の地域に多くみられるが、乳・乳製品の消費量の多さから、乳糖を低減した商品の主な市場は欧米中心となっている。日本においても乳糖分解を実施した商品は存在するものの、ラクトースフリーを明確に訴求した商品は上市されていなかった。ラクトースフリーミルクの市場規模について情報を取得できたア

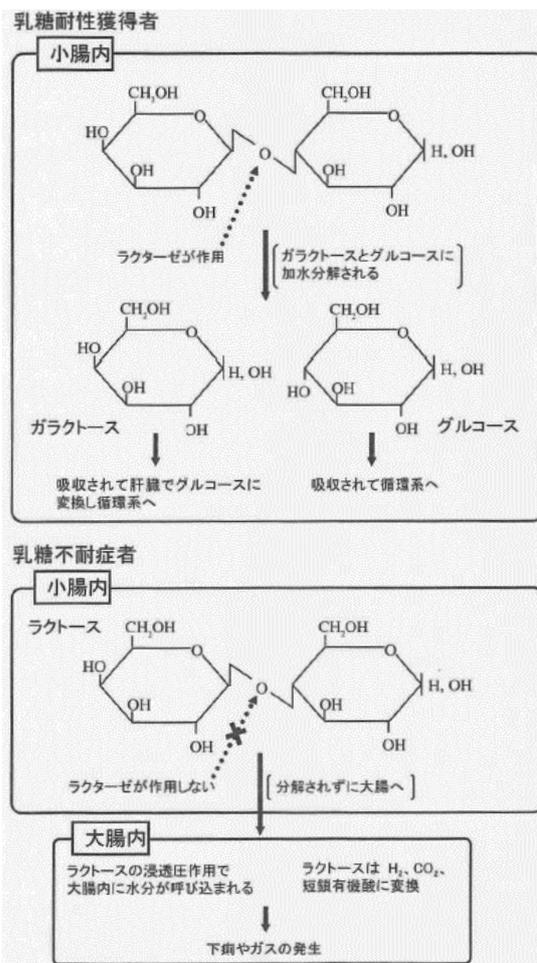


図1 乳糖不耐症による症状発生のメカニズム⁵⁾

地域(民族)	ラクターゼ非持続性 (LNP)の比率
北欧	2~15%
アメリカ系白人	6~22%
中欧	9~23%
インド(北部)	20~30%
インド(南部)	60~70%
ヒスパニック	50~80%
黒人	60~80%
アメリカ原住民	80~100%
アジア	95~100%

図2 民族・人種による乳糖不耐症者の割合⁶⁾

メリカ、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツを比較した（図3）。5か国とも重量ベース（左図）で年々市場規模は増加しており、アメリカが圧倒的に大きい。一方、重量ベースの市場規模を人口で割った一人当たりの市場規模（右図）でみると

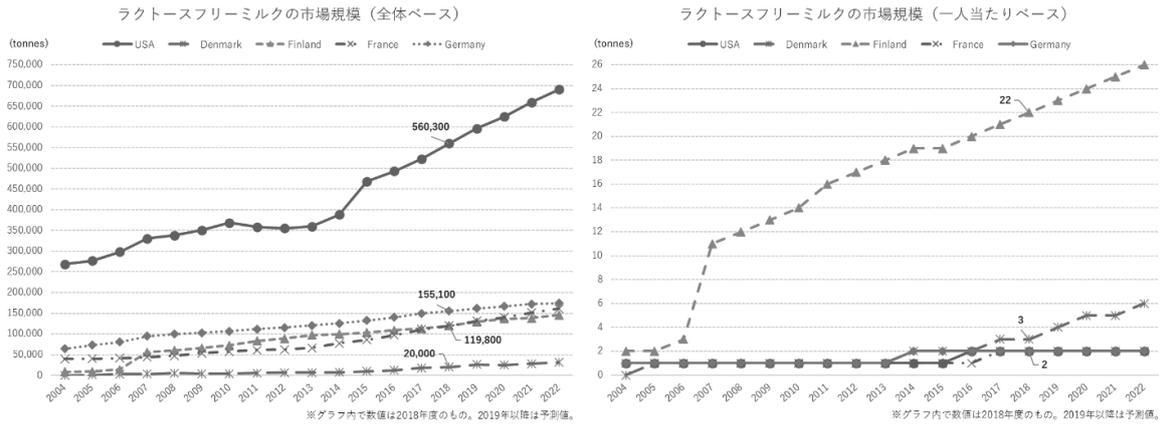
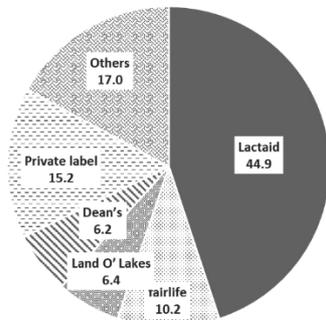
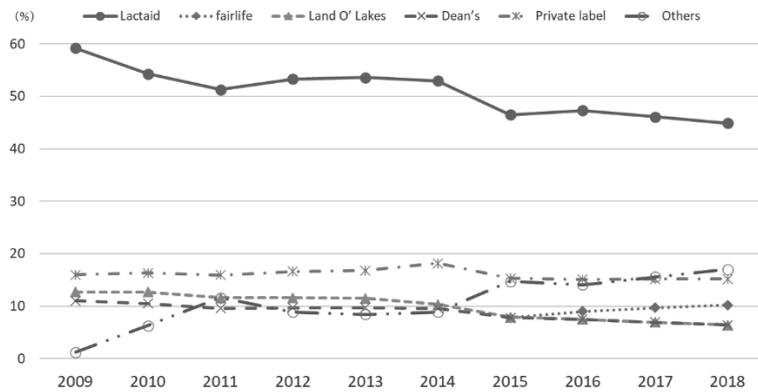


図3 各国のラクトースフリーミルク市場規模⁷⁾

2018年のブランドシェア構成比



ブランドシェアの構成比の推移



Local Brand Name	Global Brand Name	National Brand Owner	Global Brand Owner	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Lactaid	Lactaid	HP Hood LLC	Johnson & Johnson Inc	59.2	54.3	51.3	53.3	53.6	53.0	46.5	47.3	46.1	44.9
fairlife	fairlife	fairlife LLC	fairlife LLC	-	-	-	-	-	-	7.8	9.0	9.7	10.2
Land O' Lakes	Land O' Lakes	Land O' Lakes LLC	Land O' Lakes Inc	12.7	12.7	11.6	11.6	11.5	10.3	7.9	7.5	6.9	6.4
Dean's	Dean's	Dean Foods Co	Dean Foods Co	11.0	10.5	9.6	9.7	9.7	9.6	7.8	7.5	6.9	6.4
Private label	Private label	Private label	Private label	16.0	16.3	15.9	16.6	16.8	18.2	15.3	15.1	15.2	15.2
Others	Others	Others	Others	1.2	6.3	11.6	8.9	8.4	8.9	14.7	14.1	15.6	17.0

図4 アメリカのラクトースフリーミルクブランドシェア⁷⁾

フィンランドが最も大きく、特に2007年で急増して以降も着実に増加している。アメリカとフィンランドのラクトースフリーミルク市場動向について以下に記載する。

アメリカ

アメリカではアメリカ農務省が子供に対し、毎日3杯の牛乳を飲むことを推奨するなど牛乳の飲用が盛んであり、成人の67.9%が牛乳を飲用するというデータもある。また、アメリカ人にとって牛乳の摂取は、骨の強化、心臓病のリスク低減、カルシウムやビタミンの補給等の観点から人体に欠かせない大事な食品と認識されており、牛乳の機能性を残したラクトースフリーは飲用乳のみならず、チーズ、

ヨーグルト、アイスクリームなど多くの製品カテゴリで増加を続けている。これはアメリカ系白人の乳糖不耐症者が15%程度と少ないのに対し、ネイティブアメリカンの74%が乳糖不耐症と言われており、国内で乳糖不耐症者が相当数いる状況を示していると考えられる。2018年のラクトースフリーミルクのブランドシェアは、「Lactaid」44.9%がトップであるが、2009年時点では6割を占めていた市場シェアを年々落とし、2015年には5割を切っている。他方、2015年にラクトースフリーミルク市場に参入した「fairlife」は近年着実にシェアを伸ばし、2018年には10.2%となっている（図4）。

・アメリカの主なラクトースフリーミルクブランド
図5に各ブランドの主要製品を示した。

◆ Lactaid (ラクタイド)

アメリカ国内 No.1 ラクトースフリーミルクブランド。近年ではラクターゼ酵素サプリメントも手掛けている。乳糖除去方法はラクターゼによる分解。

◆ fairlife (フェアライフ)

コカ・コーラが展開するラクトースフリーミルクブランド。製品の品質だけでなく、持続可能な農業や環境への配慮といった訴求に焦点を当てて近年成長している。乳糖除去方法は UF (Ultrafiltration) 膜等を用いた膜分離とラクターゼによる分解の組み合わせ。

フィンランド

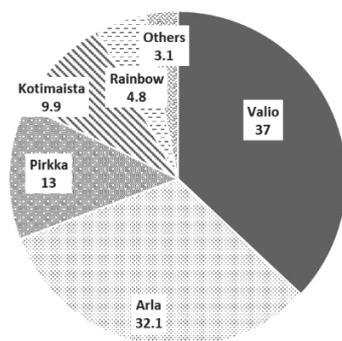
フィンランドは乳製品大国であり、人口当たりの牛乳消費量は約 140 L と世界トップクラスである。ミルクをはじめとするラクトースフリー乳製品の充実度が非常に高く、世界的に見ても技術開発における貢献度が高い。フィンランド人口のおおよそ 17% が乳糖不耐症であると言われており、世界的に見れば非常に低いことも特徴的である。

2018 年のブランドシェアは、「Valio」37.0% がトップ。次いで、「Arla」32.1%、「Pirkka」13.0% と続いている (図 6)。「Valio」は、2009 年時点では約 7 割 (69.9%) のシェアを誇っていたが、アメリカにおける Lactaid と同様に年々シェアを落と

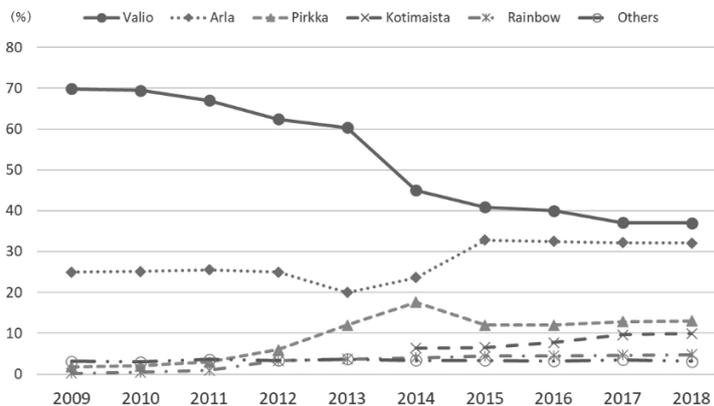


図 5 Lactaid および Fairlife の商品⁸⁾

2018年のブランドシェア構成比



ブランドシェアの構成比の推移



Local Brand Name	Global Brand Name	National Brand Owner	Global Brand Owner	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Valio	Valio	Valio Oy	Valio Oy	69.9	69.5	67.0	62.4	60.4	45.0	40.9	40.0	37.1	37.0
Arla	Arla	Arla Oy	Arla Foods Amba	25.0	25.1	25.5	25.0	20.0	23.6	32.8	32.5	32.2	32.1
Pirkka	Private label	Kesko Oy	Private label	1.8	2.0	3.0	6.0	12.0	17.6	12.0	12.0	12.9	13.0
Kotimaista	Private label	S Group	Private label	—	—	—	—	—	6.4	6.5	7.7	9.6	9.9
Rainbow	Private label	S Group	Private label	—	—	—	3.3	3.7	4.0	4.4	4.5	4.6	4.8
Rainbow	Private label	Inex Partners Oy	Private label	0.2	0.4	0.9	—	—	—	—	—	—	—
Others	Others	Others	Others	3.1	3.0	3.6	3.4	3.7	3.4	3.4	3.2	3.5	3.1

図 6 フィンランドのラクトースフリーミルクブランドシェア⁷⁾

し、2017年には4割を切っている。シェア2位の「Arla」は2015年に3割を超え、以降3割をキープしている。「Pirkka」や「Kotimaista」などのプライベートブランドもシェアを伸ばしおり、各メーカーのシェア格差が縮まっている。

・フィンランドの主なラクトースフリーミルクブランド

図7に各ブランドの主要製品を示した。

◆ Valio (ヴァリオ)

ラクトースフリーミルクではヨーロッパで最大のシェアを誇る。ラクトースフリーミルクを製造する独自技術を開発し、2001年に既存ラクトースフリーミルクよりも牛乳の風味に近いラクトースフリーミルクを発売した。乳糖除去方法は膜ろ過やクロマトグラフ分離による除去とラクターゼによる分解の組み合わせ。さらにろ過で取り除かれたミネラルを回収して牛乳へ戻すことで、風味・栄養を牛乳に近づけている。

◆ Arla (アーラ)

ヨーロッパ最大の乳製品メーカーであり、世界最大規模の乳製品メーカー。フィンランドでは老舗である Valio 社のライバル的ポジションで、独占市場をめぐる衝突もたびたび起こって

いる。環境問題への取り組みに積極的で、カートン内面ポリエチレン層に生分解性バイオプラスチックを採用し、化石系プラスチックおよび二酸化炭素排出量の削減に取り組んでいる。乳糖除去方法は膜ろ過による除去とラクターゼによる分解の組み合わせ。

ラクトースフリーの基準について⁹⁾

各国のラクトースフリーに関する制度を表1に示した。乳糖不耐症はアレルギーとは異なるため、アメリカやEUのように明確な含量を定めた制度が存在せず、各メーカーの自主基準で運用している国が多い。その一方で、デンマークやフィンランドなどはラクトースフリーだけでなく「低ラクトース」の基準も設けている。日本においてはラクトースフリーの基準を明確に定めた制度は存在しないため、当社では海外での一般的なラクトースフリー商品の乳糖濃度を参考に自社基準 (0.1g/100g) を制定し、国内初となるラクトースフリーミルクを上市した。

当社におけるラクトースフリーミルクについて

商品概要

当社では2023年に国内初となるラクトースフ



図7 Valio および Arla の商品⁸⁾

表1 各国のラクトースフリーに関する制度⁹⁾

国名	日本	米国	EU	デンマーク	フィンランド	ドイツ	豪州・ニュージーランド	中国
制度内容	制度無し (明治がラクトースフリーミルクを発売 自社基準 0.1g/100g以下)	制度なし	制度なし	ラクトースフリー： 0.01g/100g以下 低ラクトース： 1g/100g	ラクトースフリー： 0.01g/100g以下 低ラクトース： 1g/100g	ラクトースフリー： 0.1g/100g以下 低ラクトース： 制度なし	検出可能なラクトースを含んでいない	0.5g/100g以下

リーミルク「明治 TANPACT みんなのミルク」(同年9月に「明治 TANPACT ミルク」にリニューアル)を上市した。本品は乳飲料として初となるラクトースフリーに加え、高タンパク質、低脂肪を特徴とし、牛乳の栄養を取りたくても取れなかった乳糖不耐症者にも胃部不快感を気にすることなく飲めるよう風味設計している。ラクトースフリーミルクの製造にあたり、乳糖を除去する方法として、①膜分離、②ラクターゼ処理が考えられた。膜分離はUF膜を用いて乳糖を除去するが、同時に乳中のミネラルまで除去されてしまうため、牛乳と比較してボディ感が失われる。また膜処理設備は長大になりやすく、設備導入コストが増大する。一方、ラクターゼ処理は生体内での分解と同様に酵素を添加し、乳糖を加水分解する方法である。膜分離のような大型専用設備は不要だが、酵素反応に時間がかかり、乳糖分解による甘味の変化(後述)を伴う。本品においては当社の現有設備の状況を踏まえてラクターゼ処理を採用している。開発にあたっての技術課題とその解決策は後述する。

低乳糖原料(MPC)の活用

本品ではラクターゼにより乳原料中の乳糖を加水分解することでラクトースフリーを実現しているが、乳糖から生じるグルコースとガラクトースの甘味度が乳糖に比べて高い(乳糖が約0.2に対してグルコースが約0.7、ガラクトース約0.3)ことから、分解後は甘味が上昇する。牛乳にはおおよそ4.8gの乳糖が含まれており、乳糖を全量分解したラクトースフリーミルクには約2.5gのグルコースとガラクトースが含まれる(加水分解により糖総量はやや増加する)。分解前の牛乳の甘さを1とすると、ラクトースフリーミルクの甘さは2.5倍となり、牛乳のほのかな甘みとは乖離のある甘さを感じる。本品ではすっきりとした後味を実現し、かつ高タンパク質組成とするため、乳糖含量の少ない乳タンパク質原料であるMPC(Milk Protein Concentrate)を主要乳原料として採用している。

酵素反応時間の短縮¹⁰⁾

乳糖のラクターゼ処理には長い時間を要する。ラクターゼ活性の至適温度は約40℃だが、微生物増殖の観点からこの温度帯で未殺菌原料ミックスの長時間貯液は避けるべきである。一方、低温条件下ではラクターゼ活性が低下し、生産効率は著しく低下する。そこで本品では分解時間を短縮するためMgCl₂を配合している。本品で使用しているラクターゼは*Kluyveromyces lacis*由来であり、活性化・安定化には2価金属イオンであるMg²⁺、Mn²⁺を必要とすることが報告されている。図8に示した通り、MgCl₂を添加すると濃度依存的に乳糖分解効率が向上し、生産効率が改善されている。

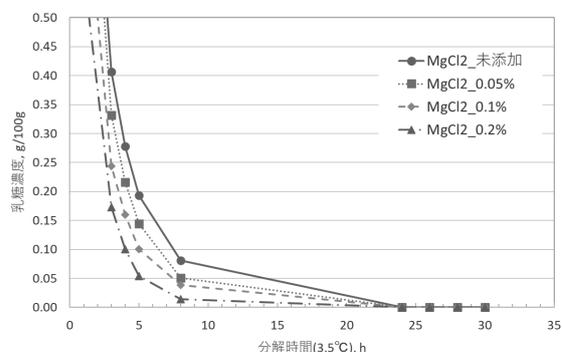


図8 MgCl₂添加と乳糖分解時間の関係

乳糖濃度の管理について

乳糖分析には高速液体クロマトグラフィー(HPLC)を用いる方法や酵素分析法が用いられる。HPLCは正確な測定結果が得られる反面、機器本体が高額になりやすく、測定においては一定の分析技術が求められる。一方、酵素分析法は分光光度計を用いたUV法や比色法であるため高額な機器は不要であり、キット化試薬を用いれば比較的簡便に測定可能である。製造現場においては乳糖濃度が出荷判定項目のひとつとなるため、迅速な測定が求められる。また、人員入れ替えなど作業者が製造ロット毎に異なっても測定精度のばらつきが出ないことが肝要である。当社では各種分析方法を比較し、酵素分析法を活用した専用測定機を導入することで、出荷判定における乳糖濃度0.1g/100g以下を安定的に確認できる体制を敷いている。

おわりに

ラクトースフリーミルクは諸外国の市場ではすでに浸透しているが、日本での普及はこれからといえる。日本を含め、乳糖不耐症者の多いアジア地域では欧州以上にラクトースフリーミルクの潜在需要が大きいと考えている。このような市場環境を踏まえ、当社は国内で初めてラクトースフリーミルクを上市した。乳から乳糖を除去する方法は複数あるが、当社では酵素による乳糖分解法を選択し、より自然な牛乳様風味とすべく原料の選定と組成の調整を実施した。海外メーカーでは原料製造の段階から大規模な膜除去設備を導入し、酵素による乳糖分解と組み合わせたラクトースフリーミルクの製造を実施している。将来、一定規模の市場に成長した際には、原料段階からのラクトースフリー化を念頭に置いた原料製造を行うことで、さらに自然な乳風味をもつラクトースフリーミルクの設計に挑戦していきたい。この度上市したラクトースフリーミルクが起点となり、日本においても乳糖不耐症の消費者へ配慮していくことが牛乳飲用者の QOL 向上や牛乳の飲用忌避理由の解消、ひいては国内乳消費の活性化につながれば幸いである。

引用文献

- 1) 斎藤忠夫, 乳糖, 上野川修一・他編, ミルクの事典, 朝倉書店, 30-31 (2009)
- 2) 清澤功, 糖質, 上野川修一・他編, ミルクの事典, 朝倉書店, 201-202 (2009)
- 3) E E Ziegler, S J Fomon: Lactose enhances mineral absorption in infancy, *J Pediatr Gastroenterol Nutr.* 1983 May;2(2):288-94.
- 4) KWAK Hae-soo, *et al.*: Revisiting lactose as an enhancer of calcium absorption, *International Dairy Journal.*, **22**(3), 147-151, (2012)
- 5) 浦島匡, 乳糖不耐症, 上野川修一・他編, ミルクの事典, 朝倉書店, 261-263 (2009)
- 6) FACTBOOK, よくわかる!乳糖不耐, 斎藤忠夫監修, 一般社団法人 J ミルク (2020)
- 7) 英調査会社ユーロモニターインターナショナル資料に基づき株式会社ネクストアイが作成 (2019)
- 8) 各社公式 HP より引用 (2023)
- 9) Scientific Opinion on lactose thresholds in lactose intolerance and galactosaemia, EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA), European Food Safety Authority (EFSA), Parma, Italy, EFSA J, 2010, 8(9), 1777
- 10) Rodrigues, A.P., et al.: Secretion and properties of a hybrid *Kluyveromyces lactis*/*Aspergillus niger* β -galactosidase. *Microbial Cell Factories*, 5, 41 (2006)