

ヨーグルト脱酸素発酵技術の開発とその後の展開

堀内 啓史

一般に、ヨーグルトは2種の乳酸菌 *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (ブルガリア菌) と *Streptococcus thermophilus* (サーモフィルス菌) の共生作用で乳を発酵させて生産する。これらの乳酸菌は、通性嫌気性菌であり、酸素の存在下でも活発に生育する。そのため、従来、酸素がヨーグルトの発酵に及ぼす影響について着目した研究はほとんどなかった。そこで、筆者は、ヨーグルト乳酸菌であるLB81乳酸菌(ブルガリア菌2038株、サーモフィルス菌1131株)を用いて、酸素が発酵に及ぼす影響についての研究を行った。結果、LB81乳酸菌は、発酵中に培地(乳)の溶存酸素を減少させ、およそ0 ppmに到達した後、活発な増殖を開始することが明らかとなった。このことにより、あらかじめ乳中の溶存酸素を減じてから発酵することで発酵時間を短縮できることを見いだした(脱酸素発酵法)。また、「脱酸素発酵法」と「低温発酵(通常、ヨーグルトは、40~45°C程度で発酵する。筆者は、これより低い発酵温度を「低温発酵」と定義した)」と組み合わせた「脱酸素低温発酵法」(「まるやか丹念発酵」)は、まるやかでコクのあるヨーグルトの製造を可能とした。「脱酸素低温発酵法」は、3つの特許(特許第3644505号、特許第3666871号、特許第3968108号)を取得しており、2012年現在、「明治ブルガリアヨーグルトLB81そのまま」、「明治ブルガリアヨーグルトLB81脂肪ゼロ低カロリー」、そして、「明治プロビオヨーグルトLG21低脂肪」の3商品に適用しており、いずれも全国殆どの量販店でみかけることが出来るヒット商品となっている(図1)。

また、「脱酸素低温発酵法」は、2006年に「農林水産大臣賞」、「明治プロビオヨーグルトLG21低脂肪」は、2007年に「新技術・食品開発賞」(食糧新聞社制定)を

受賞した(図2)。「脱酸素低温発酵法」は、ヨーグルト業界において大きな軌跡を残すことができたと思う。

「脱酸素低温発酵」という技術開発は、素焼きの壺で作るブルガリアの伝統的なヨーグルトの工業的再現の検討がきっかけであった。

素焼きの壺で作るブルガリアの伝統的なヨーグルト

一般に、工業的なヨーグルトは、図3に示したような連続的な製造工程によって作られる。すなわち、牛乳、脱脂粉乳、バター、等を混合溶解したヨーグルトミックスを殺菌し、ヨーグルト乳酸菌であるブルガリア菌とサーモフィルス菌(スターター)を添加し、紙容器などに充填してから40~45°Cで発酵させる。発酵は、所定の乳酸酸度(濃度)になるまで行い、冷却によって発酵を止める。無脂乳固形分10%程度のヨーグルトの場合、



図2. 「農林水産大臣賞」(左)と「新技術・食品開発賞」(右)受賞トロフィー



図1. 「脱酸素低温発酵(まるやか丹念発酵)」を適用しているヨーグルト商品(2012年3月現在)

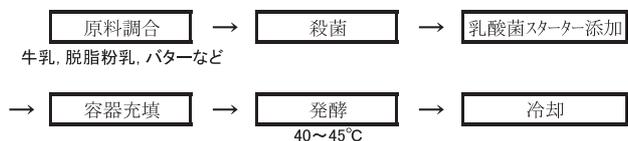


図3. 一般的なヨーグルトの製造工程



図4. 素焼きの壺で作るブルガリアの伝統的なヨーグルト

乳酸酸度0.7%程度 (PH: 約4.7) まで発酵する。

ヨーグルトの本場ブルガリアには、素焼きの壺で作る昔ながらの伝統的なヨーグルトがある(図4)。絞りたての生乳を煮立てて人肌くらいに冷ましてから、素焼きの壺に入れ、前日作っておいたヨーグルトを種菌(スターター)として加える。その壺を布で包んで保温して放置すると、発酵してヨーグルトになっていく。発酵中に素焼きの壺が生乳から水分を吸収し、生乳が濃縮され、さらに、壺の表面からその水分が蒸発する際に気化熱を奪うため「低温発酵」となる。このようにして作られたヨーグルトは、なめらかでコクがあり、非常においしい。そこで、この伝統的なヨーグルトを工業的に再現しようと試みた。

まず、実験室にて伝統的なヨーグルトを再現するところから検討を開始した。43°Cに加熱した生乳を素焼きの壺に注ぎ、スターター(LB81乳酸菌)を加え、43°Cの培養庫にて発酵させた。結果、時間と共に生乳の温度は低下し、発酵終了時には37°C程度になっていた(図5)。また、発酵終了後、生乳は約1.2倍に濃縮されていた。したがって、この伝統的なヨーグルトは、“濃縮した生乳”を「低温発酵」させることで工業的に再現できると考えられた。

“濃縮した生乳”は、生乳、脱脂粉乳、バターなどを原料として容易に再現できた。

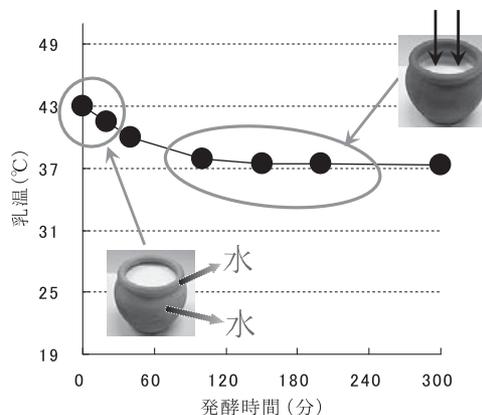


図5. 素焼き壺で発酵させた乳の発酵中の温度変化

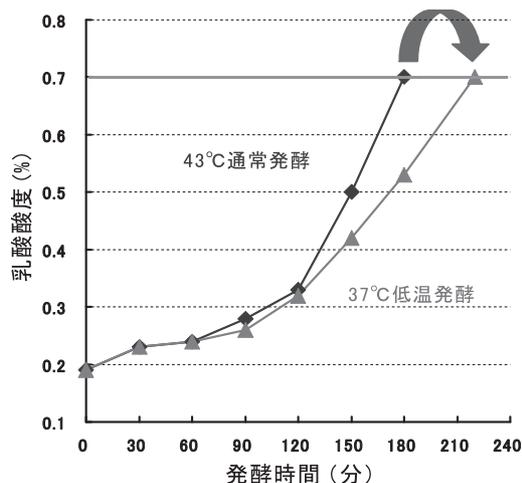


図6. 低温発酵による発酵時間の遅延

低温発酵

次に、「低温発酵」について検討した。「低温発酵」は、非常になめらかな組織のヨーグルトを作り出すことができるメリットがある反面、発酵に長時間を要するデメリットがある。通常、ヨーグルトの発酵は、乳酸菌の乳酸生成が最も活発な40~45°Cで行う(通常発酵)が、37°C程度で「低温発酵」を行うと、発酵の進行は著しく遅延する。LB81乳酸菌を用いた「低温発酵」では、「通常発酵」に比べて発酵時間が約40分間長くなった(図6)。これは、工業的大量生産を行う場合の生産性を大きく低下させる。よって、「低温発酵」を工業化するためには、発酵時間を短縮させる新たな発酵法の確立が不可欠であった。

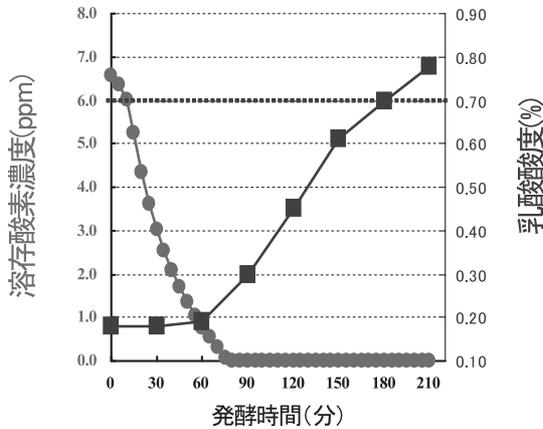


図7. ヨーグルト発酵中の溶存酸素濃度変化と乳酸酸度変化

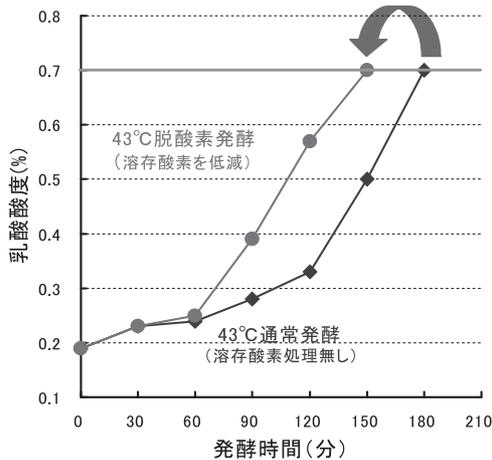


図8. 「脱酸素発酵法」による発酵時間短縮効果

脱酸素発酵法

ヨーグルトの発酵過程における乳中の溶存酸素と乳酸菌の挙動に着目して研究した。結果、乳酸菌を添加する前の乳中の溶存酸素濃度は43°Cで7 ppm程度であったが、乳酸菌を添加後、まず乳中の溶存酸素濃度低下が認められ、0 ppm程度に下がった後に乳酸の生成が活発になることが分かった(図7)。なお、培養(発酵)中に溶存酸素濃度が0 ppmまで低下する現象は、ブルガリア菌、サーモフィルス菌の単独培養時、混合培養時ともに認められたが、乳酸菌を加熱して死滅させると認められなかった。

このことから、溶存酸素がヨーグルトの発酵を阻害すると推察した。そこで、予め乳中の溶存酸素濃度を減らし、嫌気状態としてから発酵することで、発酵時間を短縮できると考え、検討した。その結果、通常、7 ppm程



図9. 明治ブルガリアヨーグルトLB81ドマッシュノ. 2004~2008年まで発売。

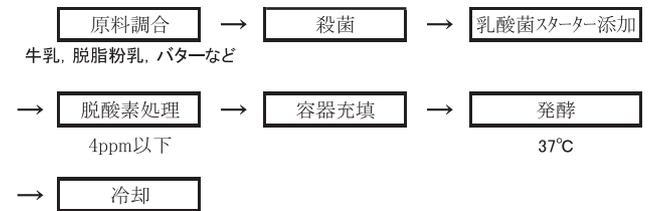


図10. 「明治ブルガリアヨーグルトLB81ドマッシュノ」の製造工程(「脱酸素低温発酵法」によるヨーグルトの製造工程)

度ある溶存酸素濃度を4 ppm以下に減らすことで発酵時間を短縮できることが分かった。LB81乳酸菌を用いたヨーグルトの発酵時間は、溶存酸素濃度を低下させない通常の発酵と比べて、43°Cで約30分間短縮された(図8)。乳中の溶存酸素濃度を減らしてから発酵する方法を「脱酸素発酵法」と命名したり。

また、筆者らは、溶存酸素が、2038株および1131株それぞれ単菌の生育には影響しないことを確認しており、その発酵時間短縮のメカニズムは、溶存酸素を除去した発酵は、共生作用の発現を早めるためであると推察している²⁾。

脱酸素低温発酵法

この「脱酸素発酵法」の発酵時間短縮効果により、「低温発酵」の工業化が可能となった。この「低温発酵」と「脱酸素発酵法」を組み合わせた製法を「脱酸素低温発酵法」と命名した(2005年特許取得)。

伝統的なヨーグルトの工業的再現

「脱酸素低温発酵法」を用いて、“濃縮した生乳”に相当する組成に調整したヨーグルトミックス(無脂乳固形分10.0%、乳脂肪分4.5%)を発酵させたところ、素焼きの壺で作ったような、なめらかでコクのあるヨーグルトとなった。「脱酸素低温発酵法」の開発により、ブルガリア伝統の素焼きの壺で作るヨーグルトの風味・物性

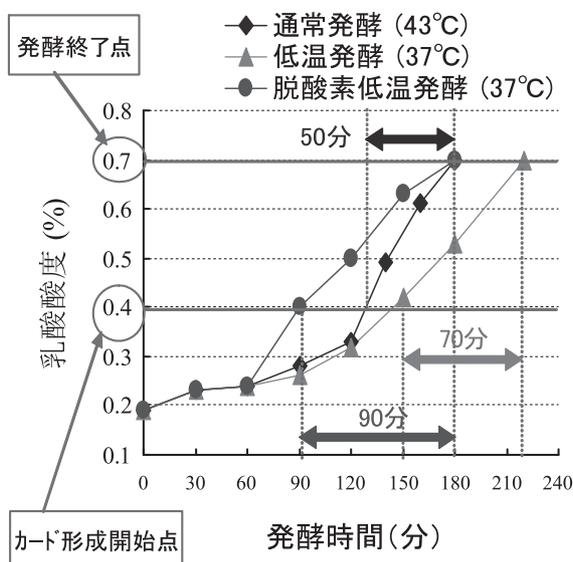


図 11. ヨーグルトのカード形成時間

を工業的に再現することに成功し、2004年「明治ブルガリアヨーグルトLB81ドマッシュノ」(図9)として発売した。図10にその製造工程を示す。

「低温発酵」がなめらかな組織のヨーグルトを作り出せる理由は、「低温発酵=長時間発酵」であるため、じっくり時間をかけて発酵が進むためであると考えられる。しかし、「脱酸素低温発酵法」は、短時間の発酵にも拘わらず、「低温発酵」と同等以上のなめらかさをもったヨーグルトを作り出せることが分かった。なお、食感のなめらかさは、物理的測定結果と官能評価を指標として判定した。

この現象について考察を加えた。図11は、「脱酸素低温発酵法」(37°C)、「通常発酵」(43°C)、「低温発酵」(37°C)で発酵させた時の発酵中の乳酸酸度変化を示したものである。一般的に無脂乳固形分10.0%程度の発酵乳では、カードと呼ばれるヨーグルトの組織形成が乳酸酸度0.4%付近から始まる(ヨーグルトが固まり始める)。筆者は、発酵終了の乳酸酸度を0.7%としているので、乳酸酸度0.4%から0.7%に到達するのに要する時間が、ヨーグルトの組織を作る時間(カード形成時間)といえる。このカード形成時間が長い程、ヨーグルトの組織は緻密でなめらかになると考えられる。カード形成時間は、「脱酸素低温発酵法」で90分間、「通常発酵」で50分間、低温発酵で70分間となっており、「脱酸素低温発酵法」のカード形成時間が最長であることが認められた。

図12は、発酵時間を乳酸酸度0.4%未満のカード形成前時間(ヨーグルトが液状の状態)とカード形成時間に

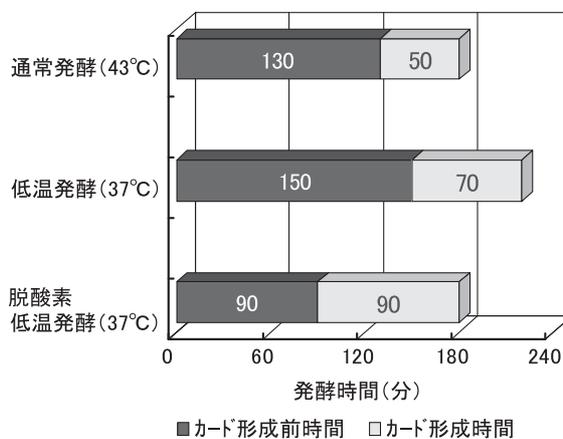


図 12. 発酵時間に占めるカード形成前時間とカード形成時間の割合

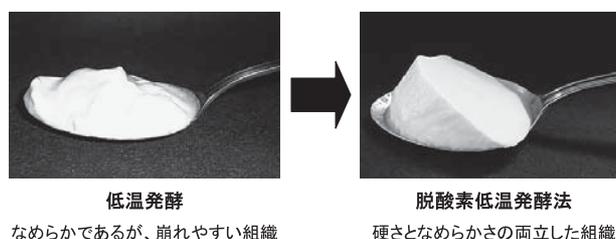


図 13. ヨーグルトの組織に及ぼす発酵法の影響

分けて示すものである。「脱酸素低温発酵法」のカード形成時間は、発酵時間180分間中90分間、「通常発酵」は180分間中50分間、「低温発酵」では、220分間中70分間である。「脱酸素低温発酵法」は、全体の発酵時間に占めるカード形成時間の割合が高く、これが、短時間の発酵でありながら、緻密さとなめらかさをもったヨーグルトの組織を作り出せる要因であると考えられる。

硬さとなめらかさの両立

「脱酸素低温発酵法」を適用したヨーグルトは、「流通の衝撃でも崩れにくい、しっかりとした硬さをもったヨーグルト組織(カード)」と「なめらかな食感」を両立していることが特長として挙げられる。これら2つの特性は、どちらも商品価値の観点から重要であるが、従来の発酵技術で、これらを両立させることは不可能であった。一般的に、カードが硬いと食感のなめらかさは失われ、食感のなめらかさが増すとカードの硬さが低下するからである。理論の解明は今後の課題であるが、「脱酸素低温発酵法」は、発酵時間の短縮以外に、本来は相反する品質特性を両立させることが出来る画期的な製法といえる(図13)。

「脱酸素低温発酵」のその後の展開

「脱酸素低温発酵」の適用により実現した「明治ブルガリアヨーグルトLB81ドマッシュノ」は、2004年の発売当初は、好調な売り上げを記録し、プレーンヨーグルトの市場活性化に貢献した。しかし、発売から年数を経るにつれ、売り上げは低下し、2008年をもって終売した。その当時、「脱酸素低温発酵」の適用商品を「ドマッシュノ」のみに限定していたら、商品の終売と同時に「脱酸素低温発酵」技術も脚光を浴びなかったと考えられる。

しかし、筆者は、「ドマッシュノ」の開発と同時進行でさまざまな「脱酸素低温発酵」の応用展開を準備していた。それが、“低脂肪”および“無脂肪”ヨーグルトへの展開である。「脱酸素低温発酵法」を適用したヨーグルトでは、組織が緻密になることで、脂肪が増したようなコクのある風味が得られる。たとえば、「ドマッシュノ」は、実際の脂肪分は、4.5%であるが、官能評価的には6%近い脂肪感を感じることができる。この脂肪感向上効果を応用することで、脂肪分が低い(低脂肪)、またはない(無脂肪)ヨーグルトを通常のヨーグルトの脂肪感(一般的なプレーンヨーグルトの脂肪分は3%)に近づけることに成功した。すなわち、「脱酸素低温発酵」により、従来にはない“おいしい低脂肪ヨーグルト”および“おいしい無脂肪ヨーグルト”を実現することができた。低脂肪および無脂肪ヨーグルトの欠点である“コクのなさ”や“水っぽさ”を、寒天やゼラチンなどの添加物に頼ることなく(原料コストをかけることなく)、“発酵技術”によって補うことができたのである。

2012年現在、「脱酸素低温発酵」は、「明治プロビオヨーグルトLG21低脂肪」「明治ブルガリアヨーグルトLB81そのまま」、そして「明治ブルガリアヨーグルトLB81脂肪ゼロ低カロリー」に応用されている(図1)。

新技術の定着に向けて

近年は、新技術(独自技術、特許技術)の開発が非常に重要になっている。なぜなら、独自技術で作られた商品は、同ジャンルの他社商品と差別化でき、市場で優位にたてるからである。

“独自技術の開発に成功した”というのは、その技術を応用した商品が市場に定着して初めて言えることであると思う。その道のりは、非常に険しいものである。まず、技術のシーズを見つけることから始め、商品への応用を考え、実用化までもっていき、そして、実用化した商品が市場に定着する、という幾つもの高いハードルを越えなければいけないからである。

- ・独自技術のシーズを見つける(気付き)
さまざまな実験を遂行していく中で、シーズを見つけることになるが、同じ実験結果からシーズを見いだせる人、見いだせない人がいる。いかに“気付き”が出来るかが重要である。
- ・商品への出口を必ず複数考える
商品への出口を、必ず、複数個準備することが必要である。複数の出口を設け、成功確率を高めることが重要である。出口が1つしかないとその商品が売れなかった場合、技術も共倒れになるからである。
- ・商品の上市を実現する
新技術の実用化には大なり小なり投資が発生する。そのため、投資以上のリターンがあると判断されない限り、実用化にもっていくことはできないであろう。開発した技術の有用性を会社が納得するように説明するというのも、研究開発者の重要な仕事である(商品出口を複数提案することは有効な手段の1つと考える)。
- ・上市した商品が市場に定着する
これは、いかに消費者のニーズに合致した商品ができたかにかかってくることで、商品の中身だけの問題ではないため、非常に難しい課題である。ここでも技術開発の出口を複数考えておくことが役立つ。新たな商品出口で再チャレンジできるからである。
なお、研究開発者にとって、自身が苦勞して開発した技術を定着させる方策を考えることも、重要な責務である。

おわりに

従来、ヨーグルトの製造において、発酵開始時に乳の溶存酸素濃度をコントロールして、発酵時間を操作する(短縮する)という発想はなかった。それは、ヨーグルトスターターであるブルガリア菌とサーモフィラス菌の共生作用による発酵は、酸素の存在下においてもスピーディーに進行するからである。しかし、今までほとんど注目されてこなかった“ヨーグルト乳酸菌に対する酸素の影響”に着目したことで、新しいヨーグルトの発酵技術を確立することができた。「脱酸素低温発酵法」は、2012年現在、3つの市販ヨーグルト商品に応用し、いずれもヒットしているが、今後、さらに本技術を応用したヨーグルト商品を展開し、ヨーグルト市場の活性化に寄与したいと考える。

文 献

- 1) 堀内啓史：化学と教育, **55**, 546 (2007).
- 2) Horiuchi, H. *et al.*: *J. Dairy Sci.*, **92**, 4112 (2009).