



微生物学的視点から見た乳業の衛生と洗浄

～乳業工場における洗浄手順の確立と ATP ふき取り検査の活用事例～

よつ葉乳業(株) 中央研究所首席研究員 元島 英雅 氏

本稿は、キッコーマンバイオケミファ(株)が9月8日に北海道経済センターで開催した第107回「ルミテスターセミナー」において、よつ葉乳業(株)中央研究所の元島英雅氏が行った講演の要旨である(ルミテスターは、キッコーマンバイオケミファ社が取り扱うATPふき取り検査装置の名称)。

元島氏は北海道大学農学部を卒業後、北海道農協乳業(株)(現在のよつ葉乳業(株))に入社、2002年に同社リサーチセンター所長に就任(リサーチセンターは1988年に中央研究所に改称)。その後、生産統括部技術開発部長、同部技術施設グループ部長などを経て、現在に至る。

なお、よつ葉乳業のHACCPに関する取り組みとしては、総合衛生管理製造過程承認を取得(1998年に牛乳部門、99年に加工乳・乳飲料・クリーム・脱脂乳部門、2006年に脱脂粉乳部門で取得)している他、2013年に十勝主管工場・根釧工場・オホーツク北見工場・宗谷工場・東京工場でFSSC22000認証を取得している。

よつ葉乳業の企業概要

当社は1967年、北海道十勝管内の8農協が出資して北海道協同乳業(株)として設立しました(1972年に北海道農乳業(株)、1986年によつ葉乳業(株)に社名変更)。主管工場は当社の発祥の地である十勝・音更町にあり、そこでは粉乳やバター、チーズ、生クリームなどを製造しています(写真1)。その他、道内では根釧工場、オホーツク北見工場、宗谷工場、道外では東京工場(千葉県)を運営しています。



写真1 よつ葉乳業の十勝主管工場

2015年度の生乳処理量は76万5000トンで、国内の生乳生産量の約1割を占めています。写真2に示すような消費者向けの乳・乳製品を製造していますが、当社が製造する商品の約7割は業務用(脱脂粉乳、バター、クリーム、濃縮乳、チーズなど)です。

はじめに ～世界は微生物で満ちている～

本講演では乳業における微生物制御について述べていきますが、その前に「地球上のほとんどすべての空間は微生物に満ちている」という認識を共有してほしいと思います。これはアランナ・コリン著「あなたの体は9割が細菌：微生物の生態系が崩れはじめた」(矢野真千子訳、河出書房新社)やポール・G・フォーコスキー著「微生物が地球をつくった：生命40億年史の主人公」(松浦俊輔訳、青土社)など、さまざまな書籍などで解説されている考え方です。例えば、土壌中には培養可能な微生物だけでも 10^{11} /g、糞便中には $10^{11} \sim 10^{12}$ /gの微生物が存在し、難培養微生物も含めれば膨大な数の微生物が存在しています。加工食品であっても、缶詰やLL製品(LL = long life)などを除けば、かなりの数の微生物が残存しています。そのため、食品企業は、さまざまな保存条件(例えば温度や水分活性、pHなど)を調整し、かつ科学的根拠に基づいて賞味期限を設定することで、品質保証や安全性確保を図っています。

一方、食品製造設備も無菌設備でない限り微生物が常に存在し、増殖の機会を狙っています。そのため、機器類の洗



写真2 一般消費者向けの商品群の一部

浄が不十分だと、製品の微生物学的品質にきわめて大きな影響を与え、企業を存亡の危機にさえ陥れるリスクがあります。

そこで、本講演では「微生物学的観点から見た乳業における衛生と洗浄」というテーマで、洗浄理論に関する情報を提供するとともに、当社におけるATPふき取り検査（以下、ATP検査）を用いた洗浄効果の確認の取り組みなどについて紹介します。

低温でも微生物は増殖可能

(1) 生乳の成分規格

乳等省令（乳及び乳製品の成分規格等に関する省令、昭和26年制定）では、生乳（搾乳しただけの加工していない乳）の細菌数は400万/ml（ 4×10^6 /ml）以下と定められています。このような高い菌数が上限規格になっているのは、冷蔵技術が不十分であった時代の数値が反映しており、現在ではこのような高い菌数の生乳を工場が受け入れることはありません。

しかしながら、生乳は4℃で保管した場合であっても、次第に菌数が増加することが知られています。表1は牛乳・乳製品で重要な細菌の世代時間（菌数が2倍に増えるのに要する時間）を挙げていますが、例えばシュードモナス属は4℃では6時間、10℃では3.2時間で2倍に増殖します。「10℃以下でも多くの種類の菌が非常に早く増殖できる」ということは認識しておかなければなりません。そのため、乳業では「生乳は受入れ後、できるだけ早く処理（殺菌）すること」が鉄則とされています。

(2) ハードルテクノロジーの考え方

ただし、微生物が増殖するためには「必要な条件」があり、その条件が揃わなければ増殖はできません。「必要な条件」を大別すると、物理的要因（例えば温度、浸透圧、光線、静水圧など）、化学的要因（例えば水分・水分活性、pH、栄養、化学物質、酸素など）、生物学的要因（例えば拮抗作用、共生作用、初期菌数など）に分類できます。例えば、粉乳は水分活性を低くすることで、室温でも1年半ほどの保管が可能です（粉乳の水分活性は0.2未満）。

そもそも、冷蔵庫のない時代であっても、食品を腐敗させないためにさまざまな手段が用いられてきました。例えば「殺菌する」「涼しいところに置く」「発酵する」「乾燥する」「塩や砂糖を加える」「酸を加える」「煮詰める」「空気を抜く」といった手段を用いる（あるいは、これらの手段を組み合わせる）ことで、冷蔵庫がなくても長期間の保管を可能にしました。こうしたコンセプトは「ハードルテクノロジー」（Hurdle technology）*と呼ばれており、現在でも食品保存の根本的な技術として用いられています（複数の技術を組み

牛乳・乳製品で重要な菌群の世代時間

	世代時間 (h)		
	5℃	15℃	30℃
乳酸菌	> 20	2.1	0.5
シュードモナス	4	1.9	0.7
大腸菌群	8	1.7	0.45
耐熱性連鎖球菌	> 20	3.5	0.5
好気性芽細菌	18	1.9	0.45

牛乳・乳製品で重要な細菌の低温での世代時間

出典：Walstra 他 Dairy Technology (1999)

菌種	世代時間 (h)			
	4℃	6℃	8℃	10℃
<i>Pseudomonas</i> sp.	6.0	4.7	3.8	3.2
<i>Pseudomonas</i> sp.	8.0	5.6	4.0	3.2
<i>Enterobacter cloacae</i>	8.0	5.5	3.7	2.6
<i>Achromobacter</i> sp.	10.0	7.5	5.3	4.3
<i>Enterobacter hafniae</i>	12.0	8.0	5.3	4.0
<i>Klebsiella aerogenes</i>	> 30.0	> 30.0	11.0	6.0
<i>Lactococcus cremoris</i>	-	-	8.5	5.6
<i>Lactococcus lactis</i>	> 30.0	> 30.0	11.0	6.0
<i>Bacillus cereus</i>	> 30.0	> 30.0	6.5	4.0
<i>Alcaligenes tolerans</i>	> 30.0	> 30.0	13.0	8.0

表1 牛乳・乳製品に関する重要な微生物の世代時間

出典：IDF Bulletin 281/1993



写真3 冷蔵庫がない地域での乳製品の例（写真提供：よつ葉乳業）

合わせる考え方を「マルチプル・ハードルテクノロジー」と呼びます。

例えば、乳製品で例を挙げると、モンゴルには「タラグ」「馬乳酒」などの発酵乳があります（馬乳酒は、室内で頻りに攪拌しながら発酵させます）。また、発酵後にチーズにしたり、チーズをさらに天日干しにするような伝統食品もありますが、これらはまさにハードルテクノロジーによる産物です（写真3）。微生物が存在してもハードルを高くすれば、増殖が遅くなるわけです。生乳の場合は、温度を低くすることがハードルです。製造設備で微生物が増えないように対策する場合でも、ハードルテクノロジーのコンセプトは参考になります。

* Lothar Leistner, Review Basic aspects of food preservation by hurdle technology, International J. Food Microbiology, 55, 181-186 (2000)

微生物汚染の経路と生乳の殺菌技術

(1) 農場から乳業工場までの流れ

近代乳業では、農場から工場に至るまで低温管理（冷蔵保管）が徹底されています。農場で搾乳された生乳は、農場ごとのバルククーラーで冷却され、貯乳されます（4℃以下での保管が指導されています）。貯乳された原乳は、毎日（あるいは隔日）ローリー車によって工場に運ばれます。一般的に、工場では5℃以下の受入れが徹底されています。

こうした低温管理に対する不断の努力により、牛乳の微生物学的品質は昔よりも格段に良くなっています。北海道で生産される生乳については、「約99%が生菌数1万個/ml以下」という統計もあります。このような菌数は、世界の格付け基準（表2参照）に照らすと「特級」に相当する品質といえます。

(2) 生乳の微生物汚染の経路とリスク

生乳については、さまざまな箇所（経路）からの微生物の混入リスクが考えられます（図1参照）。そのため、「生乳の飲用は人畜共通感染症に感染する可能性がある」と認識されており、ほとんどすべての国で生乳販売は禁止されています。特に幼児や妊婦が生乳を飲むことは、リステリア症などの感染リスクが高いことが知られています。また、海外での未殺菌チーズの喫食も非常に高いリスクがあるといわれています（一例を表3、表4に示します）。米国では1950年代まで生乳の殺菌が義務づけられていなかったため、牛乳・乳製品による食中毒が数多く発生していましたが、生乳の販売が禁止されて以降は食中毒の発生が顕著に減少しました。ちなみに、日本では生乳や未殺菌チーズを飲食する習慣がほとんどないため、生乳に起因する食中毒の発生はまれです。

(3) 生乳の殺菌

① 殺菌の定義

以上のような背景から、生乳が乳製品になるまでには必ず「殺菌工程」が組み込まれます。とりわけ近代乳業においては、多数の乳牛から搾乳された生乳が、大きな工場に集中しているため、潜在的な危険性を防ぐ上で殺菌は「必須の工程」と

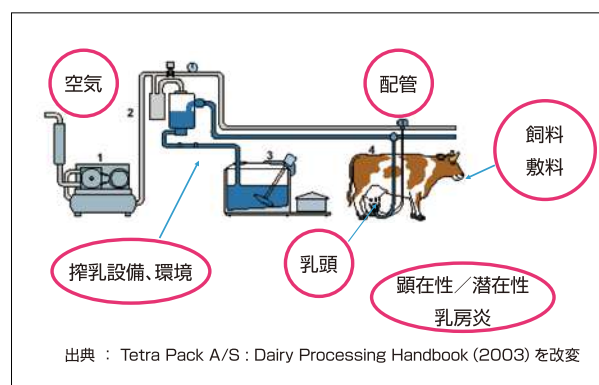
位置づけられています。

ちなみに、乳業で「殺菌」という用語（パストリゼーション（pasteurization）：日本では殺菌あるいは低温殺菌と訳されている）は、国際的には「顕著な健康危害を与えない程度までに危害微生物の数を減少させるために乳やクリームを加熱処理すること」と定義されています。牛乳の殺菌条件は、もともとは生乳の飲用による人畜共通感染症（特に結核）の予防のために導入されたものですが、国際的には「結核菌よりもやや耐熱性の高いQ熱リケッチアを、少なくとも10⁵分の1程度に殺菌する条件」と認識されています。

	特級	I	II	III
オーストラリア		< 5	< 15	> 15
ベルギー	< 5	< 10	< 30	> 30
ドイツ	< 10	< 30	< 80	> 80
デンマーク	< 3	< 7.5	< 30	> 30
イギリス	< 2	< 10	> 10	
ノルウェー	< 3	< 10	< 50	> 50
オランダ		< 10	< 25	> 25
ニュージーランド	< 5	< 10	< 20	> 20
スウェーデン		< 10	< 50	> 50
米国		< 10	< 30	

日本：乳等省令の基準（生乳）400万個/ml以下（特別牛乳）3万個/ml以下

表2 各国の格付け基準（単位：万個/ml）



出典：Tetra Pack A/S : Dairy Processing Handbook (2003) を改変

図1 搾乳段階での微生物の混入経路

国	年	患者数	製品	毒素型	殺菌	
スコットランド	1985	2	ヤギ乳チーズ	未特定	未殺菌	Sharp (1996)
米国	1985	8660	チョコミルク	未特定	殺菌	Evenson et al. (1988)
イスラエル	1987	3	ヤギ乳チーズ	SEA, SED	生乳	Gross et al. (1988)
イギリス	1988	155	チーズ	未特定	未殺菌	Maguire et al. (1991)
ブラジル	1994	7	チーズ	SHE	非特定	Pereira et al. (1996)
フランス	1997	140	チーズ	未特定	生乳	Kerouanton et al. (2007)
フランス	1998	62	チーズ	未特定	生乳	Kerouanton et al. (2007)
フランス	1998	37	セミハードチーズ	未検出	生乳	Kerouanton et al. (2007)
日本	2000	13,420	粉乳	SEA, SHE	非特定	Asao et al. (2003)
フランス	2001	4	ソフトチーズ	SEA	非特定	Kerouanton et al. (2007)
フランス	2001	46	セミハードチーズ	SED	生乳	Kerouanton et al. (2007)
フランス	2002	104	羊乳チーズ	SEA	生乳	Kerouanton et al. (2007)
フランス	2009	23	チーズ	SEE	未殺菌	Ostyn et al. (2010)

表3 黄色ブドウ球菌による乳・乳製品の食中毒事例 出典：Cretenet 他, Dairy Sci. & Technol. (2011)

国	発生年	患者数	製品
ドイツ (ザーレ)	1949～57	～100	生乳、サワークリーム、カッテージチーズ
米国 (マサチューセッツ)	1983	49	殺菌乳
米国 (カリフォルニア)	1985	～300	メキシカンスタイルチーズ
スイス (ヴォー)	1983～87	122	ヴァシュラン・モン・ドール (伝統的なチーズ製品)
米国 (イリノイ、ミシガン、ウィスコンシン)	1994	66	チョコレートミルク
フランス	1995	33	ブリードモーチーズ
フランス	1997	14	ボンレベックチーズ
フィンランド	1998～99	25	バター
米国 (ノースカリフォルニア)	2000	13	メキシカンスタイルチーズ
カナダ (ケベック)	2002	17	生乳チーズ
カナダ (ケベック)	2008	22	生乳ソフトチーズ

表4 リステリア菌による乳・乳製品の食中毒事故
 出典: Encyclopedia of Dairy Science
 2nd ed. (2011)

②主な殺菌法

乳等省令では、平成14年に生乳の殺菌の条件について『これまで牛乳の製造の方法の基準として、62～65℃の間で30分間加熱殺菌するか、またはこれと同等以上の殺菌効果を有する方法で加熱殺菌することとされていたが、新たにQ熱病原体の耐熱性に関する知見が得られたことから、保持式により63℃で30分間加熱殺菌するか、またはこれと同等以上の殺菌効果を有する方法で加熱殺菌することとしたこと』と改正されました。この規定に基づき、現在、牛乳の主な殺菌法は①LTLT殺菌法 (Low Temperature Long Time 殺菌法/保持式の場合は63℃30分間保持の低温長時間殺菌、連続式の場合は65℃以上30分以上)、②HTST殺菌法 (High Temperature Short Time 殺菌法/72℃以上15秒以上保持の高温短時間殺菌)、③UHT殺菌法 (Ultra High Temperature 殺菌法/120～150℃1秒以上3秒以内の超高温殺菌) という3種類があります (注: これらは海外の定義とはやや異なる場合がある。海外の文献で「UHT牛乳」という場合、日本でいうLL牛乳 (常温保存可能品) に相当

する)。また、これら以外に75℃以上15分以上保持殺菌する方法も認められています。

ここで重要なことは、「通常、乳製品の殺菌は微生物を完全に死滅させるわけではない」ということです。図2に示すように、例えばHTST殺菌法によって危害微生物の大部分は安全なレベルまで減少しますが、芽胞菌や非芽胞形成菌であつても耐熱性の高い菌は生残が可能です。そのため、「殺菌工程後の低温管理」も重要な管理項目です。

洗浄・殺菌後の微生物汚染の予防が重要

(1) 乳製品の微生物汚染を予防する10箇条

近代の乳業工場では大量の製品を出荷するため、工場での小さな問題が一つあつただけでも (例えば製品に病原菌が存在するなど)、大規模な食品事故に発展するリスクが考えられます。そこで、国際酪農連盟 (IDF) では、下記のような「微生物問題を回避するための10箇条」を示しています (IDF Bulletin 276/1992)。

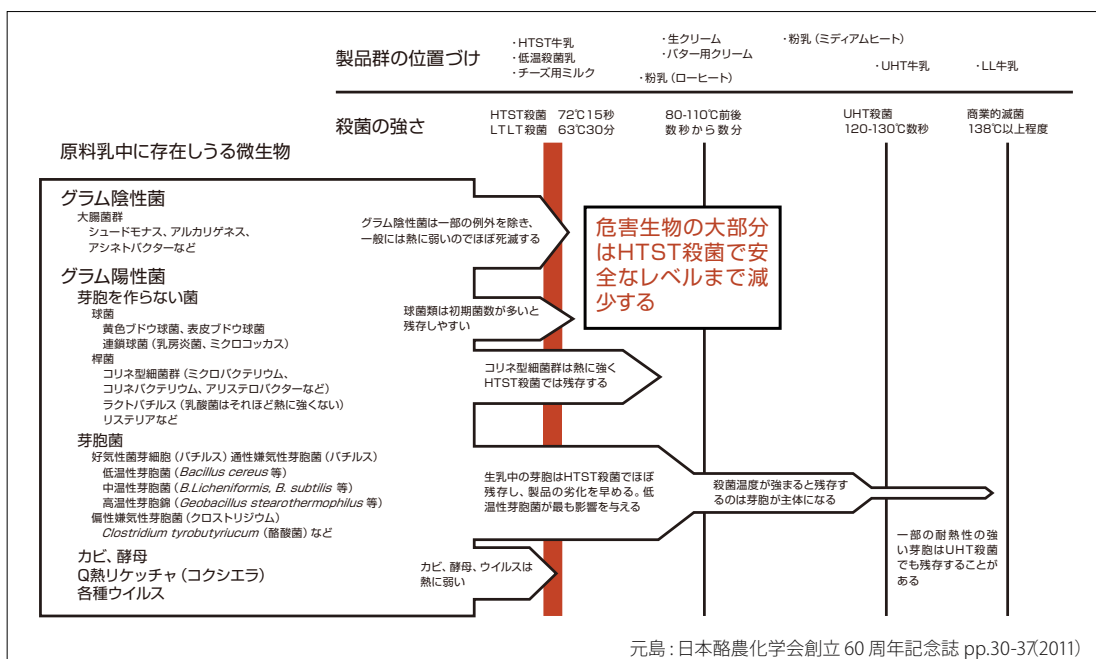


図2 生乳中に存在し得る微生物と殺菌方法の関係

- ① 生乳での最初の汚染を最小にすること。なぜなら、乳や乳製品が微生物で汚染されていないならば、増殖を阻止する必要もないし、物理的、化学的処理によって除く必要もないからである。
- ② ひどく汚染された乳を衛生的な乳に混ぜてはならない。
- ③ 望ましくない微生物は適切な加熱、ろ過、あるいはその他の適切な方法で除去しなければならない。
- ④ 輸送、貯蔵、加工の工程でさらに汚染することを避けなければならない。
- ⑤ 乳業工場での加熱の際に菌が増殖するのを避けなければならない。
- ⑥ 安全な包装で市場と消費者に配送しなければならない。
- ⑦ 製品をどうやって保存するのか、わかりやすく現実的な方法を表示すること。
- ⑧ 保証できもしない品質保持期限を決して設定してはならない。
- ⑨ リスクを「ゼロ」にするには、完全に密閉系でないと実現できない。
- ⑩ 一度問題が解決されても、その状態がずっと続くと思ひ込んではいない。

(2) 洗浄・殺菌後の汚染を予防する

上記の10箇条のうち⑤に注目してください。図3に加工段階で製品の品質に影響を及ぼす可能性がある要因を挙げていますが、特に重要なのが「洗浄・殺菌後の汚染 (Post pasteurization contamination) を起こさないこと」です。

洗浄・殺菌後の汚染については、**A** 殺菌後の装置外部からの汚染と **B** 製造機器の洗浄・消毒不良による (内部) 汚染——という2種類が考えられます。**A** ではグラム陰性菌や大腸菌群などの熱に弱い菌、**B** では耐熱性菌 (芽胞菌、非芽胞菌) が検出されることが多いです。また、**B** ではバイオフィームを形成している可能性を考慮する必要があります (バイオフィームについては後述)。

(3) 二次汚染の指標菌

日本では牛乳・乳製品の貯蔵温度は10℃以下と定められています。ほとんどの先進国では4~7℃以下とされています。牛乳の場合、現実問題として10℃でも多くのグラム陰性菌、腸内細菌科の細菌が増殖可能です。そのため、10℃以下で貯蔵する場合、わずかでもグラム陰性菌などの殺菌後汚染が起きていれば、それらの微生物が増殖して事故につながる可能性は考えられます (当社が独自に実施した実験結果からも、5℃以下での微生物の増殖が認められました)。「低温管理を徹底すれば事故は起きない」と断言することはできないのが現実です。

製品から耐熱性菌以外のグラム陰性菌や大腸菌群が検出された場合、それは「殺菌が破綻している」、あるいは二次

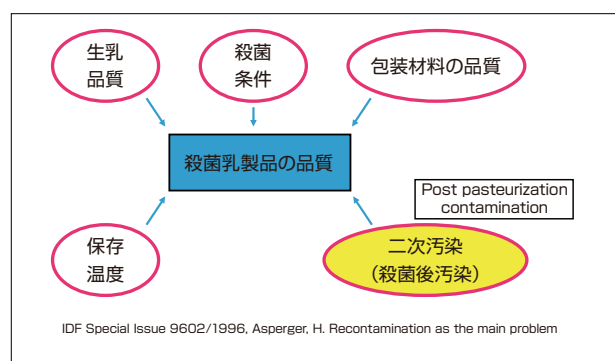


図3 製品の品質を決定づける要因

汚染を受けていることの指標となります。グラム陰性菌は二次汚染の兆候として製品に検出されやすいことから、大腸菌群の出荷検査以外に CVT 寒天培地などを用いてグラム陰性菌を汚染の指標菌としてモニタリングすることが一般に行われています。牛乳においては、グラム陰性菌が低レベルでも検出されるようになると、いずれは大腸菌群も検出されるようになって、重大事故につながる可能性があります。

(4) 乳業における主な耐熱性菌

殺菌後の汚染がなくても、「残存する耐熱性菌」の問題は残ります (ここでいう耐熱性菌とは「HTST 殺菌法などで生残する微生物」を指しており、必ずしも芽胞菌だけではありません)。芽胞を作らない中程度の耐熱性菌としては、例えば *Microbacterium lacticum*、*Streptococcus thermo-philus*、黄色ブドウ球菌などが挙げられます。ただし、これらの菌は10℃以下ではほとんど増殖しないので、殺菌後の低温管理を徹底していれば問題にはならないでしょう。

一方、芽胞を形成する耐熱性菌としては、*Bacillus cereus* やその近縁種、*B. licheniformis*、*B. subtilis*、*Anoxybacillus flavithermus*、*Geobacillus stearothermophilus*、*Clostridium tyrobutyricum* などが挙げられます。芽胞菌は熱に強く、製品でも残存することが多いですが、多くの菌は無害で、一部の菌種を除けば10℃以下ではほとんど増殖はしません (*B. cereus* などは低温でも増殖可能)。

乳業における洗浄理論

(1) CIP の効率化がもたらすメリット

では、ここからは乳業工場における洗浄の最適化について考えていきます。

乳業工場では、そこで作る製品の種類にもよりますが、製造機器の CIP (定置洗浄、Cleaning in Place) 洗浄に相当の時間とエネルギーを使用しています。そのため、洗浄を効果的・効率的に行うことは、(衛生面の向上だけでなく) 生産性向上にも寄与する、非常に重要な課題といえます。

CIPの一般的な手順は、①ライン中に残っている製品の回収→②プレリンス→③アルカリ洗浄（通常は0.8～2.5%程度の水酸化ナトリウム）→④中間リンス→⑤酸洗浄（通常は0.8～1.5%程度の硝酸）→⑥すすぎ→⑦殺菌（製造前に熱水などで）——となります。

CIPを改善することで期待されるメリットとしては、例えば①水の使用量が削減される、②洗剤（化学薬品）の使用量が削減される、③微生物学的品質が向上する、④廃水処理コストが削減される、⑤CIPに伴うエネルギーコストが削減できる、⑥（その結果として）製品原価が削減できる——などが挙げられます。ただし、CIPの効果的な改善を実現するためには、汚れや洗浄に関する知識や理論が必要であると思います。

(2) 汚れの種類は大きく2分類

一般に乳業工場では、製造後はすぐに製造ラインのCIPを行います。特に熱交換器は長時間運転すると、**図4**に示すように乳成分（タンパク、リン酸塩、炭酸塩、脂肪など）が

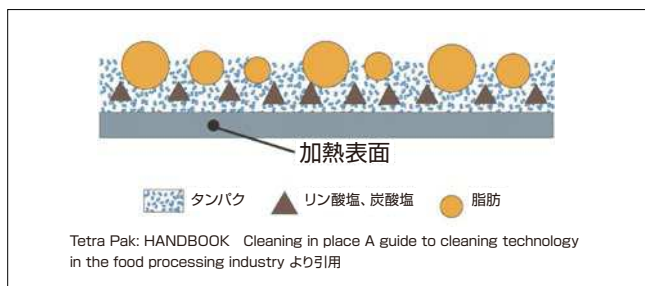


図4 熱交換器などの表面に付着する汚れのイメージ

汚れ成分	水への溶解度	洗浄しやすさ	
		低温 / 中温殺菌装置	高温殺菌装置 / UHT
糖	・溶解	・容易	・カラメル化 ・困難
資質	・溶解せず	・アルカリでは困難	・重酸化 ・困難
タンパク質	・溶解せず	・アルカリでは非常に困難 ・酸ではやや容易	・変性 ・非常に困難
ミネラル塩	・成分によって異なる ・ほとんどが酸に溶解	・成分によって異なる	・成分によって異なる

出典：Tetra Pak A/S: Dairy Processing Handbook (2003)

表5 乳成分と洗浄のしやすさ

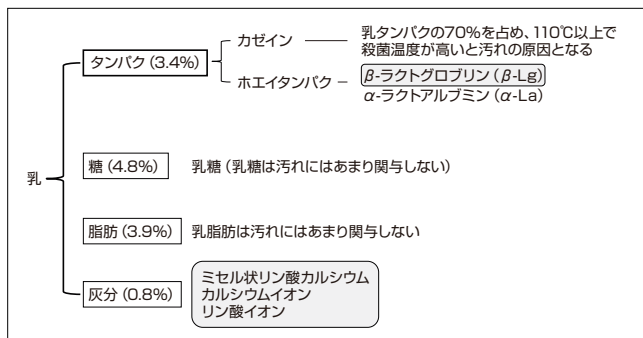


図5 熱交換器に付着する汚れの種類（β-Lgとリン酸カルシウムが特に重要）

ステンレス表面に付着・堆積し、汚れとなります（この堆積物を「乳石」と呼びます）。コーヒー牛乳やチョコミルク牛乳などを製造する場合、この乳石に加えて、コーヒーやチョコの成分などが残る可能性もあります。

とりわけ熱交換器の洗浄は、乳業工場において重要な管理項目の一つです。**表5**では、乳成分と洗浄のしやすさについてまとめています。例えば、糖はUHT殺菌するとカラメル化するので、汚れとして付着すると落としにくくなります。タンパク質も高温化では凝固してしまうので、洗浄が困難になります。なお、乳業における付着汚れには、大きくタイプAとタイプBの2種類があるといわれています。

【タイプA】熱交換器の温度帯が70～90℃

⇒スポンジ状、クリーム色、湿った感じ、タンパク60%、灰分30～40%（乾物重）

【タイプB】熱交換器の温度帯が110～140℃

⇒緻密、結晶、ガラス状、タンパク20%、灰分80%（乾物重）

図5は熱交換器に付着する汚れについて概説しています。特に重要なのはβ-ラクトグロブリン（β-Lg）とリン酸カルシウムです。β-Lgは70℃以上で加熱変性し、SH基が露出して、反応しやすくなります。一方、乳中に含まれるリン酸イオンとカルシウムイオンは加熱によってリン酸カルシウムとなり、不溶化してステンレスなどに結合（ステンレス表面などに付着）します。そうするとタイプAの汚れとなります。

一方、110℃を超える殺菌をするとタイプBの汚れが生じます。ただし、タイプBの汚れについては、主要成分がミネラルであることなどは知られていますが、タイプAの汚れに比べると未解明の部分が多いといわれています。

こうした性質を踏まえた上で、「いかに効果的かつ効率的な洗浄方法を確立するか？」が、乳業工場の生産効率や環境効率の向上を図る上で非常に大きなポイントとなります。多くの場合、洗浄条件は洗剤メーカーと相談するのが一番よい方法ですが、洗剤を減らしてコストダウンするためには、洗浄理論を知っている必要があります。

(3) 洗浄効果に影響を及ぼす4つの要素

乳業分野の洗浄に関する研究は数多くなされており、洗浄において①機械的剪断力（流速）、②化学的な力、③洗浄温度、④洗浄時間（汚れが落ちきる時間）という4項目が大きく影響することは、よく知られています（**図6**参照）。では、洗浄時間が最短になるような最適化を図るには、どのような検討をすればよいでしょうか。以下に、考え方の一例を紹介します。

①機械的剪断力（流速）

洗剤の流速が洗浄に大きな影響を与えることは知られています。ただし、（流速が）速ければよいというわけではありま

せん。配管の流速を 1.5 m/秒以上に上げて、効果は少ないといわれています。

②化学的な力

洗浄時間を最短にするには、「最適な洗剤濃度」にすることが重要なポイントになります。一般に、洗剤は濃い方がよく汚れが落ちると信じられていますが、タイプ A の汚れの場合、0.5%前後の水酸化ナトリウムが最適で、それ以上洗剤を濃くしても洗浄速度は低下するといわれています（50℃の場合）。一方、タイプ B の汚れの場合、水酸化ナトリウム濃度が 2.5%程度までは、濃度に比例して汚れが落ちやすくなるといわれています。

ただし、洗剤濃度だけではなく、洗浄温度（次項参照）も大きな影響を及ぼすことを理解しておかなければなりません。例えば、ホエイタンパクの場合、温度が高い方が洗浄速度は早くなります。しかし、温度が低くなると、洗剤濃度が高い方が、かえって洗浄速度は遅くなってしまいます。これは、低温で濃いアルカリにホエイタンパクが接触するとゲル化してしまうことが理由です。洗浄条件を確立する際には、洗剤の濃度と温度に密接な関係性があることに、十分な考慮が必要です。

③洗浄温度

一般に洗浄温度は高い方がよいですが、洗浄の目的によって最適温度があることが知られています（温度が高すぎると、パッキンや設備の劣化が早まるなどのデメリットも生じます）。

④洗浄時間

洗浄時間の管理も重要です。汚れに洗剤が浸み込み、汚れが落ちるのには一定の時間が必要です。一般に、洗浄ラインの戻りの液を分析して、必要な洗浄時間を明らかにすることができます。洗剤の種類や濃度や流速、洗浄温度等を最適化することで洗浄時間を短くすることができます。同じ洗浄条件でむやみに長く洗ったり、すすいだりしても効率化が図れません。

CIP の最適化は、乳業工場の環境効率（Eco-efficiency）の改善、製造コストの低減などにつながります。そのため、CIP に関する研究は現在も活発に行われています。特に、汚れの付着メカニズム、バイオフィーム形成のメカニズム、洗浄モニタリング方法などについては、まだまだ研究の余地があります。洗剤濃度の最適化の関する研究の他、UHT 殺菌後の洗浄（特に砂糖などが含まれている場合の洗浄）なども、まだまだ研究は不十分です。

ちなみに、CIP 改善の試みは世界的にも展開されています。例えば、海外では豪州ビクトリア州で 2004～07 年に 19 組織が協力して、洗剤の使用量を削減することを目的とした「Closing the Loop プロジェクト」を実施した事例などもあります。

(4) バイオフィームを形成させない

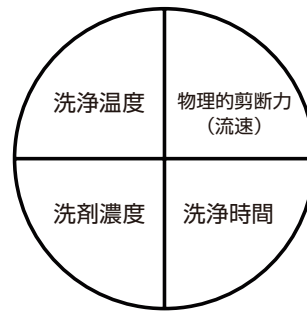


図 6

洗浄に重要な 4 つの要因
(Sinner サークル)

A. Tammine: Cleaning-in-Place: Dirty, Fppd and Beverage Operations (2008)

バイオフィームとは、「固体表面に付着することが特徴の固着した微生物集団」と定義され、細菌細胞と菌体外多糖類（EPS）、タンパク、DNA などを含みます。非常に薄く表面に形成されるもので、バイオフィームが形成されると洗浄がしにくくなります。

装置などの洗浄不足でバイオフィームが形成されると、それが製品を汚染するだけでなく、（殺菌前の初期菌数が増えるので）殺菌や滅菌が本来の効果を発揮できなくなる可能性があります。すなわち、CIP の不良やバイオフィームの形成は、乳業工場にとって致命的な状況を生み出す可能性があるのです。一般的に、複数の製品から同一の菌株が検出された場合は、バイオフィームが形成されている可能性が疑われます。私たちの工場経験でいうと「休日後の製品で細菌数が多い」という場合は、特に要注意です。

衛生的な対策を講じるためには、微生物に関する十分な知識が必要です。乳業分野ではバイオフィームに関する教科書が多数刊行されており、2015 年に SDT (Society of Dairy Technology, UK) が刊行した「Biofilms in the Dairy Industry」などは大いに参考になります。

洗浄効果のモニタリングに ATP 検査を効果的に活用

乳業工場では、製造ラインの洗浄や滅菌が十分に行われ、かつ再汚染が起こらないことを常時モニタリングすることが特に重要です。通常、製造作業は毎日行われるので、できるだけ迅速かつ簡便に「汚れの有無」を判定する必要があります。そこで、当社では「洗浄後のラインの衛生性のチェック」の手段として、①ATP 検査と②すすぎ水の微生物チェック——を実施しています。

ATP 検査（写真 4）は CIP の完全性の確認に大きな効果を発揮しています。とりわけ洗にくい箇所の衛生が保たれているかの確認を重視しています。ATP 検査の主要な用途としては、主に以下の 3 種類があります。

①日常的なふき取り（検証）

製造ラインでは必要に応じて 1 日 2 回（ラインの使用前と CIP の終了後）の ATP 検査を実施しています。

その他、手で洗う必要がある箇所（言い換えると、CIP に比



写真4 ATPふき取り検査の活用例1
製造ラインの使用前とCIP後は必ず清浄度を確認
(洗いにくい箇所、見にくい箇所などをふき取る)



写真5 ATPふき取り検査の活用例2
分解して手で洗浄する箇所などをふき取る

写真5 汚染源調査のための検査体制も整備されている(左:DNAシーケンサー、右: MALDI-TOF/MS biotyper)

べて洗浄効率が劣る箇所)の洗浄後のATP検査も行っています(写真5は機器の分解洗浄後にATP検査を行っている様子)。

②定期的なふき取り(検証)

一度決定した洗浄プランの検証のため、ふき取り機器を決定し、定期的にATP検査を実施しています。

③機器の新規導入時のふき取り(妥当性)

洗浄プランの決定および検証においてもATP検査を実施しています。

合格・不合格の判定基準は、ステンレス表面の場合は200RLU ※未満(凹凸面や樹脂表面などの場合は500RLU未満)と設定していますが、現場では「100RLU未満」(製造品目に応じて100RLU～200RLU)を基準に管理しています。
※RLU=Relative Light Unit(ATP検査に特有の単位)

補足:微生物問題が発生した際の汚染源調査について

日常的な清浄度確認に加えて、もう一つ重要なことは、万一、製品から望ましくない微生物が検出された場合の「迅速かつ正確な汚染源調査」を実施することです。当社では、MALDI-TOF/MS(質量分析装置、写真6)と遺伝子レベルでの同定ができる検査体制を整備しています。

特に、汚染源を特定するには、株ごとの区別をする必要があります。株の分別はRAPD(Randomly Amplified Polymorphic DNA)やPFGE(Pulsed-Field Gel Electrophoresis)、MLVA(Multiple-locus variable-number tandem repeat analysis)が可能です。

最後に

乳業工場において「洗浄の最適化」は、衛生管理の観点でも生産管理の観点でも、きわめて重要な課題です。乳業分野では、現在も洗浄に関する研究が進められているので、関係者には常に「最新の洗浄理論を取り入れる」という姿勢が求められると思います。

「どのように洗浄すればよいか？」を考える際には、微生物学的な視点を持ち、理論的に洗浄手順を構築すべきです。とりわけ注意が必要なのは「洗浄不良によるバイオフィルムの形成」を防止することです。適切なCIPの実施は、乳業工場にとって「会社の命運を左右する」といっても過言ではないくらい重要な命題です。当社では、ATP検査を用いることで「日常的な洗浄がうまくいっているか？」をモニタリングしています。一方で、製品に微生物学的な異常があった場合に備えて、迅速な同定や汚染源調査ができるような体制も整備しています。

食品工場が事故を未然に防ぐためには、「日常のモニタリング」と「微生物学的知識の社内普及」が非常に重要であると考えています。

[発行元]

 **kikkoman**

キッコーマンバイオケミファ株式会社

TEL03-5521-5490 FAX03-5521-5498

Email: biochemifa@mail.kikkoman.co.jp