

アイスクリーム製造におけるファインバブル技術の利用

佐合 徹*, 山崎栄次*

Application of Fine Bubble Technology to Ice Cream Manufacturing

Toru SAGO and Eiji YAMAZAKI

The purpose of this study is to manufacture the high quality ice cream by an application of fine bubble technology to the manufacture of ice cream. The ice cream mix was prepared with a fine bubble device. The viscosity at 5°C, the dissolved oxygen concentration, and the degree of fat globule aggregation of the ice cream mix were investigated. The freezing time which the ice cream mix cooled from 5°C to -4.5°C was determined. The overrun and the degree of fat globule aggregation of the ice cream were measured after manufacturing the ice cream with a batch freezer. The viscosity and fat globule aggregation rate of the ice cream mix containing fine bubble increased. So, the time freezing the ice cream mix containing fine bubble decreased, the overruns and the fat globule aggregation rate of the ice creams were almost equivalent. In conclusion, the application of fine bubble technology in ice cream manufacturing could improve the quality of ice cream mix and might contribute to the low cost production.

Key words: Ice Cream Manufacturing, Fine Bubble, Viscosity, Fat

1. はじめに

ファインバブルとは、液体の中に気体が分散した系で存在する気泡であり、ナノメートルサイズからマイクロメートルサイズまでの粒径の総称である。近年、ファインバブル技術の利用は広がりを見せており、例えば、医療分野での超音波造影剤¹⁾、環境分野での排水処理²⁾、農業分野での水耕栽培³⁾、水産分野でのカキ養殖⁴⁾といったことが行われている。食品分野においても、食用油の分離⁵⁾、クリーム製造中の酸化の抑制⁶⁾、清酒の貯蔵劣化の抑制⁷⁾に活用されており、さらなる展開が期待されている。

一方、泡を有効に利用した食品は珍しくない。例えば、飲料としては、ビール、カフェラテ、炭酸飲料等、加工食品としては、ホイップクリーム、アイスクリーム、エアインチョコ、練り製品等がある。中でも、アイスクリームは、泡含有製品と

して、老若男女問わず人気があり、世界中で親しまれている。

これまでに、我々は、泡の利用に関する予備実験を行い、簡易に泡を製造する装置や泡を保型した状態の製品を利用するとアイスクリーム製造に役立つことを報告した⁸⁾。他にも、我々は、アイスクリーム製造中の粘度や温度の変化を通常の1/100のスケールにて検証する方法を確立した⁹⁾。また、寺坂らの報告⁵⁾によると、脂肪を分離する際にファインバブル技術が利用できるということから、脂肪を多く含み、泡を含有するアイスクリームの製造にファインバブル技術を利用することを試みた。アイスクリームの製造は、アイスクリームミックスをアイスクリームフリーザーにより攪拌しながら冷却（フリージング）し、容器等に充填して、急速凍結するという工程により行われる¹⁰⁾。アイスクリームフリーザーによる工程は、運転に多くのエネルギーを必要とすること、攪拌作

* 食と医薬品研究課

業により金属製の筒状のシリンダー部と攪拌部が摩耗し、その金属片が異物となって製品に混入する恐れがある。また、高脂肪のアイスクリームミックスでは、脂肪凝集の進行の制御、安定した製造が難しいことから、改善が望まれている。

本報では、アイスクリーム製造の工程改善を図ること、口当たりが良く、濃厚、高品質なアイスクリームの製造法の確立を目的に、ファインバブル発生装置を用いてアイスクリームを試作し、アイスクリームミックスの物性、溶存酸素濃度およびアイスクリームの品質を評価した。

2. 実験方法

2. 1 アイスクリームミックスの配合

従前の製造研究から最適な配合のアイスクリーム(食品衛生法に基づく乳及び乳製品の成分規格等に関する省令により定義された乳固形分 15.0 %以上、乳脂肪分 8.0 %以上のものを示す。)のミックスは、脱脂粉乳(明治脱脂粉乳, 明治製) 8.9 %, 生クリーム(フレッシュクリーム, 中沢フーズ製) 30.1 %, 砂糖(グラニュー糖 GIG2, 伊藤忠製糖製) 12 %, 2.0%加糖卵黄(加糖凍結卵黄 20, キュービー製), 水 46.6 %を総量 3 kg となるように混合し、75 °C, 10 分の殺菌後、氷水にて冷却したものを使用した。

2. 2 ファインバブル注入

ファインバブルの発生には、マイクロバブル発生器(泡多郎 A-PW-04, ニッタ製)を用いた。この装置は、気液混相流に旋回流を付加し吐出することで気相が細かくされファインバブルを発生させる仕組みである。得られるファインバブルのサイズは、2~50 μm であり、空気を気相とした。ノズル 1 基あたりの吸気量は、約 12 mL/min, 流量は、3 L/min とした¹¹⁾。この装置を用いて、2.1 アイスクリームミックスの配合のアイスクリームミックス 3 L を 5 分間循環させてファインバブルを注入した。

2. 3 アイスクリームミックスの粘度

ファインバブル注入前と注入後のアイスクリームミックスを試料とし、動的粘弾性測定装置(AR-G2, TA Instruments 製)を用いて粘度を測定した。試料 2 mL を試料台の上に秤量し、治具は 60 mm コーンプレート(角度 2°), 測定温度 5 °C の条件で測定した。せん断速度 1~100 1/s まで変

化させて行った。せん断速度に対する粘度を測定した。

2. 4 アイスクリームミックスの溶存酸素濃度

ファインバブル注入前のアイスクリームミックス、注入している間の 1 分ごとのアイスクリームミックスおよび 5 分後のアイスクリームミックスを試料とし、溶存酸素計(生化学用高感度溶存酸素計オキシグラフ 9 型, セントラル科学製)の溶存酸素電極を試料に入れて溶存酸素濃度を測定した。溶存酸素濃度の増加は、液体にファインバブルが含まれているかどうかの判断材料の一つとして考えられることから溶存酸素濃度を測定した。

2. 5 アイスクリームミックスの脂肪球凝集率

ファインバブル注入前に対しての注入後のアイスクリームミックスの脂肪球凝集率をレーザ回折式粒度分布測定装置(SALD2100, 島津製作所製)を用いて測定した。ファインバブル注入前後のアイスクリームミックスを 5 倍量の精製水に分散し、これを試料とした。ファインバブル注入前の試料の脂肪球粒度分布においてその累積分布が全粒子の 90 % を占める際の粒径を指標とし、ファインバブルを注入した時の脂肪球粒度分布から指標とした粒径以下の累積分布 X % を求めた。この注入前後の累積分布の差 $(90-X)$ を求め、この割合を脂肪球凝集率(製造工程中に発生した凝集の割合)とした¹²⁾。

2. 6 アイスクリーム製造と評価

ファインバブル注入前と注入後のアイスクリームミックス 3 L を試料とし、バッチフリーザー(ハイパートロンIV, エフ・エム・アイ製)にて凍結・攪拌し、製品温度 -4.5 °C となったところでバッチフリーザーから取り出した。その後、容量 100 mL の紙製カップに充填し、-40 °C の急速冷凍庫(ブラストチラーEF20.1, エフ・エム・アイ製)にて硬化することによりアイスクリームを製造した。この時、バッチフリーザーにアイスクリームミックスを投入してから取り出すまでの時間(フリージング時間)を測定した。

充填時の重量を測定し、(1)式より空気量を算出した¹³⁾。この際、充填時の 100 mL あたりの重量と、凍結後の 100 mL あたりの重量に違いがないことを確認したので、充填時の重量をアイスクリー

ム重量として空気量を求めた。

空気量 (%) =

$$(\text{アイスクリームミックス重量} - \text{アイスクリーム重量}) / \text{アイスクリームミックス重量} \times 100 \quad (1)$$

ただし、重量は 100 mL あたりを示す。

また、製造したアイスクリームの脂肪球凝集率を次のとおり算出した。2.5 アイスクリームミックスの脂肪球凝集率と同様の方法で、ファインバブル注入前のアイスクリームミックスの脂肪球粒度分布においてその累積分布が全粒子の 90 % を占める際の粒径を指標とし、アイスクリームの脂肪球粒度分布から指標とした粒径以下の累積分布 X % を求めた。このアイスクリームミックスと作製したアイスクリームの累積分布の差 (90- X) を求め、この割合をアイスクリームの脂肪球凝集率とした。

3. 結果と考察

3. 1 ファインバブルの注入がアイスクリームミックスの粘度に及ぼす影響

ファインバブル注入前と注入後のアイスクリームミックスの試料をせん断速度 1~100 1/s まで変化した時の 5 °C での粘度 (図 1) を示す。品温 5 °C では、ファインバブルを注入すると、注入前のアイスクリームミックスに比べ、粘度は高くなる傾向がみられた。アイスクリームミックスは、脂肪分が高いこと、脂肪球の凝集が進行することで、粘度が上昇することが知られている。また、粘度ではなく、固体的挙動か液体的挙動を示す動的粘弾性評価を行った柘植らによると、豆乳を試料として、マイクロバブル起泡を行うことで、固体的挙動を示すことが報告されている¹⁴⁾。今回の結果は、ファインバブルをアイスクリームミックスに注入する過程において、脂肪球の凝集が進み、粘度の上昇が起きたと考えられる。アイスクリームミックスが高粘度であることは、フリージング中のアイスクリーム組織形成 (例えば、氷結晶の形が小さいと食感がなめらかとなる、気泡の形や大きさが均一になることで柔らかく食べやすくなる) に良い影響を与える。ファインバブルを注入することがアイスクリーム製造において有用である。従来は、増粘多糖類等の食品添加物をアイスクリームミックスに加えることで、粘度を制御していたが、ファインバブルの利用によりアイスクリームミックスを増粘させることが可能と考えられる。エージング時間の影響、アイスクリ

ームミックスからアイスクリームになる過程での粘度変化および動的粘弾性についても検証し、増粘に対する効果を検証していく。また、井原らは、ホイップクリームの製造における気泡の大きさと脂肪球凝集が物性に影響を及ぼすと報告している¹⁵⁾。今回のファインバブル技術を利用したアイスクリーム製造中での気泡の大きさがアイスクリームミックスの粘性といった物性値にどのような影響を及ぼすかを検討していく必要がある。

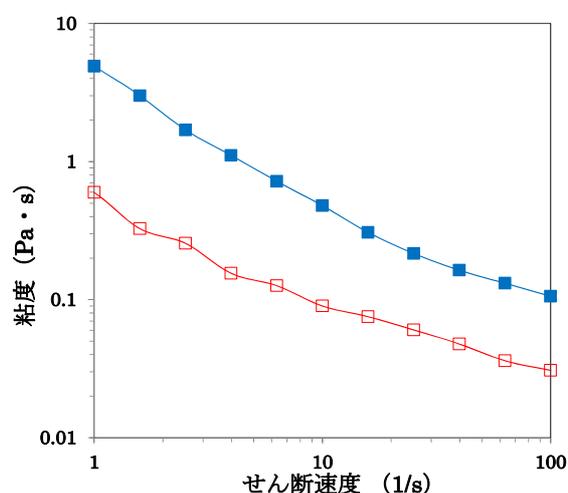


図 1 アイスクリームミックスせん断速度の粘度への影響 (5 °C)

■: ファインバブル注入後のアイスクリームミックス

□: ファインバブル注入前のアイスクリームミックス

3. 2 アイスクリームミックスへのファインバブル注入時間が溶存酸素濃度増加に及ぼす影響

ファインバブル発生器を運転開始前の溶存酸素濃度を基準として、注入時間 1 分ごとの溶存酸素濃度の差 (図 2) を示す。注入前のアイスクリームミックスに比べて、注入開始 1 分後からアイスクリームミックスの溶存酸素濃度は上昇していた。南川らは、マイクロサイズのバブルを発生させることで溶存酸素濃度が増加し、水質の浄化につながるこ

とを報告している¹⁶⁾。また、中野は、ファインバブルの直径が小さくなるほど、取り込んだ気体が液体中に溶解しやすくなり、その様子を装置稼働時間の増加とともに溶存酸素濃度が増加することで報告している¹⁷⁾。溶存酸素濃度の増加は、液体にファインバブルが含まれているかどうかの判断材料の一つとして考えられる。今回の結果は、注入直後から溶存酸素濃度が増加したことから、ファインバブルがアイスクリームミックスに導入されていることが推定される。

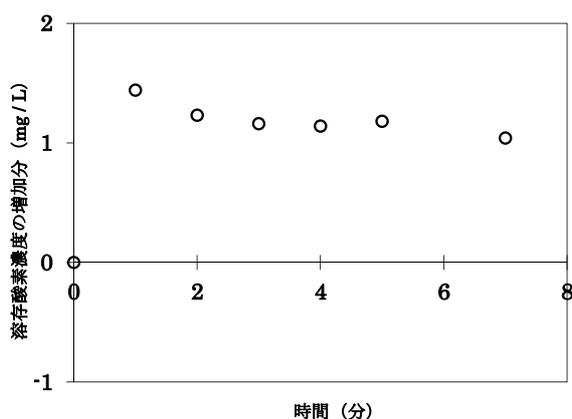


図 2 ファインバブル注入時間が溶存酸素濃度
に及ぼす影響
(運転開始前の溶存酸素濃度を基準とした.)

3. 3 ファインバブル注入したアイスクリームミックスとアイスクリームの脂肪球凝集率、フリージング時間およびアイスクリームの空気量

ファインバブル注入後のアイスクリームミックス、アイスクリームミックスをフリージングしたアイスクリームおよびファインバブル注入後のアイスクリームミックスをフリージングしたアイスクリームの脂肪球凝集率 (図 3) を示す。アイスクリームミックスをフリージングした時間 (図 3) も示す。アイスクリームミックスは、ファインバブルを注入したことにより脂肪球凝集率の上昇がみられた。バッチフリーザーから $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ にて取り出したアイスクリームの脂肪球凝集率は同等となった。また、製造したアイスクリームの空気量はどちらも 50 %となった。一方で、フリージング時間は、ファインバブルを注入したアイスクリームミックスを用いた時、ファインバブルを含まないアイスクリームミックスを用いた場合に比べて、1 割ほど短縮

されていた。

小久保らは、フリーザーからの取り出し温度によって脂肪球凝集率が異なると報告している¹⁸⁾。今回のファインバブル含有アイスクリームミックスは、取り出し温度 $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ のアイスクリームと同等であった。アイスクリームの品質に影響を与える脂肪球凝集率が、フリージングせずして 10 %増加させることができた。アイスクリームミックスにファインバブルを注入することで、脂肪球凝集率をフリージング前に上昇させ、凝集を制御する可能性が示された。

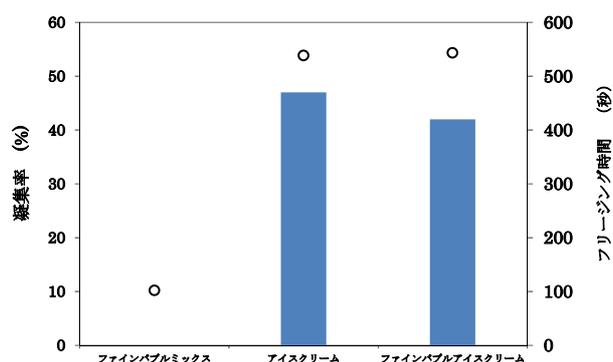


図 3 アイスクリームミックスの凝集率 (%), アイスクリームの凝集率 (%) とフリージング時間 (秒)
(○ : 凝集率 (%), 棒グラフ : フリージング時間 (秒))

凝集率: ファインバブルを注入していないアイスクリームミックスを 0 %として算出した。
ファインバブルミックス: ファインバブル注入後のアイスクリームミックス,
アイスクリーム: ファインバブル注入せずにアイスクリームミックスから製造したアイスクリーム,
ファインバブルアイスクリーム: ファインバブル注入後のアイスクリームミックスから製造したアイスクリーム。

すなわち、ファインバブルを注入すると、フリージングによる急激な凝集を抑えることが可能となり、製造中の問題である急激な脂肪の凝集がすすみ、バターのような塊ができるチャーニング現象を防ぐことができる。さらに、ファインバブルを注入することで、フリージング時間の短縮が可能となる。多くのエネルギーを用いるフリーザーの運転時間の短縮による省エネルギーにつながり、内部での異物混入の原因となるフリーザーの運転時間短縮

による異物混入リスクの低減を図ることで、製品品質向上に貢献できる。凝集の制御、フリージング時間の短縮により、従来、脂肪分が高すぎるため、チャーニング現象が起りやすく、製造できなかった高脂肪のアイスクリームの製造や脂肪分が低くても、フリージング前に脂肪の凝集を進行させてフリージングすることで、低脂肪でも口に入れた時に満足のいく味の濃さを持つ商品の開発に役立つと考えられる。今後は、製造中の物性変化を確認し、製造プロセスでの省エネルギー化を検証するとともに、融解性、内部構造および官能検査といった製品品質を検証する必要がある。ファインバブルを利用して、脂肪の凝集を制御することで、アイスクリーム以外の食品での利用技術の開発が望まれる。

4. 結論

溶存酸素濃度の上昇によりアイスクリームミックスにファインバブルが注入されたことが確認できた。ファインバブルの注入は、アイスクリームミックスの粘度を上昇させた。食品添加物を用いることなく、ファインバブルの利用がアイスクリームミックスの物性改良につながる。また、ファインバブルの注入により、アイスクリームミックスとアイスクリームの品質に大きな影響を与える脂肪球凝集率を制御する可能性が示された。それにより、従来よりも高脂肪アイスクリームの製品開発や脂肪を抑えても濃厚なアイスクリームの製品開発が期待できる。

参考文献

- 1) 森安史則ほか：“微細気泡の最新技術”.NTS, p73-85(2006)
- 2) K. Terasaka et al.: “Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge”. Chem. Eng. Sci., 66(14), p3172-3179 (2011)
- 3) 水口義久ほか：“マイクロバブルを用いたトマトの水耕栽培に関する研究”. 日本機械学会第24回バイオフィロンティア講演会講演論文集, p3-4 (2013)
- 4) 大成博文ほか：“マイクロバブル技術によるカキ養殖効果”. 水工学論文集,46, p1163-1168 (2002)
- 5) 寺坂宏一：“ファインバブル技術のトレンドと課題”. 化学工学会誌,78(9), p580-584 (2014)
- 6) 小松恵徳ほか：“ナノろ過処理・脱酸素加熱殺菌クリームの特性”. 日本食品科学工学会誌,56(9), p490-494 (2009)
- 7) F. Kobayashi et al.: “Quality evaluation of sake treated with a two-stage system of low pressure carbon dioxide microbubbles”. J. Agric. Food. Chem., 62(48), p11722-11729 (2014)
- 8) 佐合徹：“食品製造における泡の制御技術に関する予備実験”. 三重県工業研究所研究報告, 38, p70-73 (2014)
- 9) 佐合徹ほか：“アイスクリーム少量製造技術の開発および粘度、温度変化の可視化”. 日本食品工学会誌,16(4), p291-296 (2015)
- 10) H. Douglas Goff et al.: “Ice Cream 7th”. Springer., p193-248 (2013)
- 11) 男成妥夫：“オゾンマイクロバブルと超音波照射による洗浄”. 分離技術,40(3), p12-17 (2010)
- 12) 小久保貞之ほか：“アイスクリームの脂肪球凝集に及ぼすダッシャータイプとその回転数の影響”. 日本食品科学工学会誌,42(3), p183-189 (1995)
- 13) 山内邦男ほか：“ミルク総合事典”. 朝倉書店, p336-337 (1992)
- 14) 柘植光代ほか：“豆乳泡沫の特性からみたマイクロバブル起泡の特徴”. 日本調理科学会誌,44(1), p39-48 (2011)
- 15) 井原啓一ほか：“ホイップドクリームの物性に及ぼす気泡の大きさと脂肪球凝集の影響”. 日本食品科学工学会誌,54(4), p173-180 (2007)
- 16) 南川久人ほか：“微細気泡の最新技術”.NTS, p172-184(2006)
- 17) 中野由則：“ファインバブルと電解水技術の融合による高度殺菌技術の確立”. 食品と開発, 49(3), p29-32 (2014)
- 18) 小久保貞之ほか：“アイスクリームの脂肪球凝集に及ぼすダッシャータイプとその回転数の影響”. 日本食品科学工学会誌,41(5), p183-189 (1995)