◇◇◇◇ 原著論文 ◇◇◇◇

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

佐合 徹[†], 山崎栄次

三重県工業研究所

Preparation of Ice Cream in Small Quantities and Measurement of Physical Changes during the Freezing Process

Toru SAGO[†], Eiji YAMAZAKI

Mie Prefecture Industrial Research Institute, 5-5-45 Takajaya, Tsu, Mie 514-0819, Japan

The purpose of this study is to prepare ice cream and sorbet in small quantities and to measure the physical changes that take place during the freezing process using a starch pasting device. Ice cream and sorbet were prepared with 25 g of the mix using a starch pasting device rotating at 15 revolutions per second and a cooling rate of 1°C/min. The flavor of the ice cream and sorbet were almost the same as those prepared with a batch freezer. The increased rotation rate of the ice cream mix reduced the rate of increase in viscosity beyond the freezing point and elevated the levels of overrun after making the ice cream. As the cooling rate of the mix increased, the increase in the viscosity was found beyond the freezing point and the overruns increased after making the ice cream. The application of a starch pasting device allows numerical values to be ascribed to the changes taking place during the production of ice cream and sorbet. In conclusion, small scale production methods can contribute to reducing a large amount of waste generated during trial production and indeed facilitate the trial production of new ice cream products.

Keywords: ice cream, sorbet, physical changes, overrun

1. 緒 言

アイスクリームは、調合・殺菌した液体状のアイスクリームミックスを攪拌し、凍結（フリージング）させ、硬化した食品であり、主に、氷結晶、脂肪および空気の3成分から構成される[1]。H. D. Goffらによると、アイスクリームのフリージング工程における変化は次の通りである[2]。まず、フリージングによりミックス中に氷核が発生し、それと同時にミックスが増粘される。発生した氷核が装置の壁面にて成長するが、スクレーパーによる掻き取りと攪拌によって氷の結晶サイズや形が適当な範囲で整う。また同時に、脂肪球の破壊、凝集が促進されるとともに、攪拌によって取り込まれた空気を安定的に包接されるといわれている。

アイスクリームの品質評価は、通常原料ミックスと製品アイスクリームに分けて行われている。ミックス

に関しては、均質化条件設定のための脂肪球粒径測定、各種物性改良添加物の効果を見積もるための粘度測定、および色調を確認するための測色測定等[1]が行われている。製品のアイスクリームに関しては、脂肪球の破壊・凝集状態確認のための粒径測定[3]、さじとおり[4,5]や硬さ[6]を測るためのレオメータといった機器を用いた物性測定、食感・舌触りに影響を及ぼす氷結晶の観察[8,9]、溶けやすさを確認するための融解性測定[10,11]、官能評価[12,13]およびアイスクリームの食感に重要な影響を及ぼす空気含有量測定（オーバーラン測定）[14]などが行われている。

一方、アイスクリームの試作検討には、少なくとも2つの課題がある。1つ目の課題は、試作の規模に関することである。フリージング工程において小型のフリーザを使用した場合でも数kg以上の原料を必要とし、商品開発の過程で大量の廃棄物が発生してしまう。2つ目の課題は、フリージング工程における物性変化がよくわかっていないことである。アイスクリームのフリージング装置（バッチフリーザおよび連続式フリーザ）が密閉系であるといった構造上の問題と、ミックスか

（受付 2015 年 6 月 30 日，受理 2015 年 11 月 1 日）

〒514-0819 三重県津市高茶屋 5-5-45

Fax: +81-59-234-3982, E-mail: sagout00@pref.mie.jp

らアイスクリームへの変化は温度に関して極めて不安定であるため、一時的に装置を止めたとしてもアイスクリームの状態を正確に評価することは困難である。したがって、評価対象は前述の通り原料のミックスと製造された製品に限られる。

本研究では、一般的なバッチフリーザによる場合と比較し約 1/100 の少量でのアイスクリームを製造する技術の開発と、フリージング工程の物性変化の可視化を目的とした。試料には、国内で乳成分の量によって 4 つに分けられるアイスクリーム類のうち、代表的な配合のアイスクリームと、そのアイスクリームと大きく配合が異なる氷菓のミックスを用いた。

2. 実験

2.1 アイスクリームおよび氷菓の配合

アイスクリームミックスは、市販品（無脂乳固形分 6.0%, 植物性脂肪分 6.0%, 日世）を使用した。氷菓（食品衛生法にもとづく厚生省告示「食品、添加物等の規格基準」により定義された乳固形分 3.0% 未満のものを示す。）のミックスは、オレンジ・うんしゅうみかん混合果汁（商品名：POM ポンジュース、えひめ飲料）70%, 水あめ（商品名：水飴、三重化糧）30% の基準品と、基準品にペクチン（商品名：共立ペクチン、共立食品）1.0% 添加（w/w）したものを混合し、75℃、10 分の殺菌後、氷水にて冷却したものの 2 種類を使用した。

2.2 アイスクリームおよび氷菓の製造条件

アイスクリームと氷菓は、動的粘弾性測定装置（AR-G2, TA Instruments）におけるデンプンの糊化特性評価システム（Starch pasting cell）（Fig. 1）により、約 10℃ のミックス 25g をアルミ製円柱状容器（内径 37

Fig.1 Photograph of a Starch pasting cell.

mm, 高さ 64 mm) に入れ、攪拌治具と容器のギャップは 1.0 mm とし、攪拌速度を 5, 15 および 25 rps, 冷却速度を 0.8, 1.0 および 1.6℃/min と制御してフリージングを行った。また、アイスクリームと氷菓の官能評価を見た目の色の濃さ、ざらつき、後味の 3 項目について、7 段階評点にて専門パネル 4 名で行った。

2.3 アイスクリームおよび氷菓に含有されるオーバーランの測定

アイスクリームの空気量（オーバーランという）は、フリージング前の試料であるミックスを容量 10 mL のプラスチック製カップに充填し重量を計測しておき（A g）、フリージングを経たアイスクリームあるいは氷菓を同様に重量計測し（B g）、(1) 式より算出した [15]。

$$\text{オーバーラン}(\%) = (A/B - 1) \times 100 \quad (1)$$

3. 結果および考察

3.1 アイスクリームの少量製造

攪拌速度を 5, 15 および 25 rps とし、冷却速度を一定（1.0℃/min）とした場合のフリージング工程におけるアイスクリームミックスの粘度変化、温度変化を Fig. 2 に示す。バッチフリーザにおけるアイスクリーム製造条件を参考にすると、少量製造では攪拌速度 15 rps, 冷却速度 1.0℃/min という製造条件と合致する。そこで、Fig. 2 におけるその条件での結果に着目した。市販のアイスクリームは、ミックスを冷却して -3.0℃ から -9.0℃ 付近で氷結晶が生成し、粘度上昇とともにオーバーランが増加し、アイスクリームになるといわれて

Fig.2 Effect of the rotation rate on the viscosity and the temperature of ice cream mix (cooling rate 1.0℃/min). Rotation rate at 5 rps : viscosity ($\triangle$), temperature ($\blacktriangle$), Rotation rate at 15 rps : viscosity ($\square$), temperature ($\blacksquare$), Rotation rate at 25 rps : viscosity ($\circ$), temperature ($\bullet$).

いる [1,2]. 本研究では, 攪拌しながら温度を低下させたところ, 凍結温度となる -5.4°C を境にして温度が -2.0°C まで急上昇するとともに粘度が上昇した (Fig. 2).

温度上昇は, 氷の生成による凝固熱の放出に伴うものと考えられ, 氷の生成, 成長が引き金となってミックスの流動性は低下し, 粘度が上昇したと考えられる. 攪拌により取り込まれた空気は微細化, 均一化されミックス内に安定的に残るため, オーバーランの値は上昇する. アイスcreamは, バッチフリーザあるいは連続式フリーザにてミックスを攪拌しながら冷却しており, フリーザから取り出すときの温度が製造工程において重要とされている. 市販のアイスcreamのフリーザ取り出し温度は $-3.0^{\circ}\text{C} \sim -6.0^{\circ}\text{C}$ [16] であることを考慮し, -3.5°C に達した時点でフリージングを終了したところ, 粘度が 5.4 Pas で, オーバーランは19%を示した (Table 1). 官能評価の結果, 少量製造したアイスcreamの風味と食感はバッチフリーザで製造した場合とほぼ同等であった. すなわち, 重量比で約1/100の少量で製造したアイスcreamとバッチフリーザで製造したアイスcreamの品質は同等であったことを確認した. また, 今回のフリージングは600秒程度で完了した. バッチフリーザおよび連続式フリーザによる実生産時のフリージング時間は600秒程度で行われていることから, 少量での冷却速度は実生産時の冷却速度とほぼ一致していた. そこで, 以降のフリージングは, 600秒間で行うこととした.

本研究による手法は, バッチフリーザなどと比較して極端に少量の製造が達成できるが, 官能評価において十分な試料量を確保することが困難であるといったデメリットがある. しかしながら, アイスcreamの新商品開発過程にて発生する廃棄物を大幅に減らすことが可能である. さらに, フリージング工程の物性変化を粘度と温度により可視化することにより, 試作および製造現場にて熟練作業者の経験に委ねられてきた作業を客観的に評価ができるようになることで, 数値によって作業者全員が共通の指針をもって理解することができる. それにより, 経験だけでない次世代のものづくり技術の継承に大いに役立つこと, 製造中のトラブルへの対処が迅速にできるようになり, 生産性が安定することが期待できる.

Table 1 Overruns after freezing the ice cream mix.

Rotation rate (rps)	Cooling rate ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Overrun (%)
5	1.0	8.3
15	1.0	19.0
25	1.0	37.0
15	0.8	12.4
15	1.6	30.6

3.2 攪拌速度がアイスcreamのフリージング工程の粘度変化, 温度変化およびオーバーランに与える影響

3.1でアイスcreamの少量製造が可能となった. この方法を用いて, 冷却速度を一定にして, 攪拌速度がフリージング工程の粘度変化, 温度変化およびオーバーランに及ぼす影響を調べた.

攪拌速度を5, 15 rpsとした時と比べて攪拌速度を25 rpsに上昇すると, 凍結温度が約 3.0°C 下がり, -8.7°C となった (Fig. 2). 激しく攪拌されることにより, 凍結により生じた氷核の成長よりも, 再融解が優先となり, 凍結温度が低下したと考えられる. H. D. Goffら [2]は, ミックスを冷却していくことで凍結する温度である凍結点をショ糖濃度を基準とし算出する方法や測定する方法を紹介している. しかしながら, 彼らの手法は, 静置状態で導出され, 攪拌が考慮されていない. 本研究手法でモニタリングし測定した凍結温度は, 実際の攪拌と同様の工程により得られた値であり, 真の凍結温度と推定される.

攪拌速度が上昇すると, 凍結温度を超えた後の粘度上昇の傾きが緩やかになり, 攪拌速度5 rpsおよび25 rpsの時は, それぞれ600秒後の粘度が 16 Pas および 3.1 Pas となった. この結果は, S. Kokuboら [17]による連続式フリーザでの結果と類似するものであった. S. Kokuboら [17]は攪拌速度が上昇すると, 脂肪球の凝集が促進されることにより, 粘度はやや低い範囲にとどまるものの保形性が改善されると考えている. アイスcreamの保形性が向上すると, 食べやすい物性を保持したまま外観上溶けにくくなる. アイスcreamが溶けにくくなったことで, 消費者はアイスcreamをより長い時間楽しむことができる. 本研究の手法は, 保形性の評価に活用できると考えられ, アイスcreamの品質改良にも貢献できる可能性がある.

攪拌速度を5 rpsから25 rpsに増加させると, オーバーランは8.3%から37%に増加した (Table 1). 攪拌により空気を取り込みの増加と, 脂肪凝集による気泡の安定が並行して進行したため, オーバーランが増加したと考えられる. 今回の条件では, 攪拌が早いほどオーバーランは増加したが, 攪拌速度をさらに増加させた場合, 脂肪凝集が進みすぎることによるチャタリング (バターのような状態になる) の発生が考えられる. 今後, 攪拌速度とチャタリング現象との関係を検討していきたい.

3.3 冷却速度がアイスcreamのフリージング工程の粘度変化, 温度変化およびオーバーランに与える影響

攪拌速度を一定にして, 冷却速度 $0.8, 1.0$ および $1.6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした場合のフリージング工程での粘度変化, 温度変化を Fig. 3に, フリージング後のアイスcreamのオーバーランを Table 1に示す.

Fig.3 Effect of cooling rate on the viscosity and temperature of ice cream mix (rotation rate 15 rps).

Cooling rate at 0.8°C/min : viscosity ($\triangle$), temperature ($\blacktriangle$),
Cooling rate at 1.0°C/min : viscosity ($\square$), temperature ($\blacksquare$),
Cooling rate at 1.6°C/min : viscosity ($\circ$), temperature ($\bullet$).

冷却速度を 1.0 および 1.6°C/min とした時、凍結温度が 0.8°C/min に比べて約 3.0°C 上昇し、-6.0°C となった (Fig. 3). 冷却速度の増加は、氷核の発生と成長を促進させるため、凍結温度が上昇したと考えられる。粘度に関しては、冷却速度が 0.8°C/min から 1.6°C/min に増加すると、600 秒後の粘度は 0.8 Pas から 7.0 Pas に上昇した。同様に、オーバーランも、冷却速度が 0.8°C/min から 1.6°C/min に増加すると、それぞれ 12% から 31% に増加した。冷却速度が増加すると、氷核の生成と成長が促され、アイスクリームの組織の中で、固体である氷の占める割合が大きくなり、粘度上昇の程度が急になったと考えられる。さらに、粘度の上昇により、取り込まれた空気は移動しにくくなることから、オーバーランは増加したと考えられる。今回の条件では、冷却速度を上げるほどオーバーランは増加したが、さらに、冷却速度を増加した場合、フリージングに必要なもう 1 つの要素である攪拌が追いつかず、十分な食感をもったアイスクリームにならない可能性も考えられる。今後、アイスクリームの食感に対する冷却速度と攪拌速度の相関性を検討していく必要がある。

本研究において攪拌速度および冷却速度を制御しつつ、フリージング工程の温度と粘度を測定することにより、フリージング工程の凍結温度や粘度変化が、オーバーランに密接に関係していることを明らかにした。つまり、温度や粘度を制御することにより、オーバーランを自在に調整できる可能性を実証したものと考えられる。オーバーランは、アイスクリームのやわらかさやなめらかさといった食感に影響を及ぼすだけでなく、歩留りに直結することから、アイスクリーム製造

での最も重要な管理指標の 1 つである。本研究の少量製造でのオーバーランを調整することで、新商品の開発設計や生産性の向上に貢献できる。

3.4 少量での氷菓の製造、フリージング工程の物性変化

アイスクリームとは大きく配合が異なる氷菓に本研究の少量製造技術の適用を試みた。ペクチン添加量を 0% および 1% とし、攪拌速度と冷却速度を一定 (15 rps, 1°C/min) とした場合のフリージング工程における粘度変化、温度変化を Fig. 4 に示す。一般に、市販の氷菓は、ミックスを冷却して -3.0°C から -9.0°C 付近で氷結晶が生成し、粘度上昇とともにオーバーランが増加し、氷菓になる [1, 2]。本研究では、攪拌しながら冷却したところ、ペクチンを添加しない場合、-8.7°C を境にして温度が -3.3°C まで急上昇するとともに粘度が上昇した (Fig. 4)。

温度上昇は、アイスクリームの場合と同様に氷核の生成による凝固熱の放出に伴うと考えられ、氷核の生成、成長が引き金となってミックスの流動性は低下し、粘度が上昇したのと考えられる。アイスクリームと同様にフリーザから取り出すときの温度が製造工程において重要とされている。市販の氷菓のフリーザ取り出し温度は -3.0°C ~ -6.0°C [16] であることを考慮し、-6.0°C に達した時点でフリージングを終了したところ、粘度が 2.4 Pas で、オーバーランは 14% を示した。攪拌により取り込まれた空気は微細化、均一化されミックス内に安定的に残るため、オーバーランの値は上昇したと考えられる。官能評価したところ、風味と食感

Fig.4 Effect of pectin addition on the viscosity and temperature of sorbet mix at a rotation rate of 15 rps and a cooling rate of 1.0°C/min.

Without pectin : viscosity ($\triangle$), temperature ($\blacktriangle$),
Containing of 1.0% pectin : viscosity ($\square$), temperature ($\blacksquare$).

がバッチフリーザで製造した場合とほぼ同等であった。したがって、3.1のアイスクリームと同様に本研究の技術は氷菓にも適用できることがわかった。

一般的な氷菓ミックスは、アイスクリームミックスと比べて水分量が多いため、氷核が発生、成長しやすく、生成した氷結晶が大きい。また、脂肪を含まないため、前述のアイスクリームのように凝集した脂肪が気泡を取り囲むことによるオーバーランの増加効果は期待できない。そのため、氷が直接舌に接するため冷たさが強調され、またアイスクリームのような気泡によるなめらかさが少ないとされている [1]。市販の氷菓は、ペクチンなどの増粘安定剤を添加し、氷核の発生、成長を抑制している。ペクチンは増粘安定剤として、氷核の発生、成長を抑制する効果や乳成分を安定化する効果が知られ、脱脂粉乳といった乳固形分を用いた氷菓やフローズンヨーグルトに添加されることが多い [1]。そこで、次にペクチンを添加し、その影響を検討した。

冷却速度 $1.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とし、ペクチンを 1.0% 添加した場合、凍結温度が約 1.0°C 上がり、 -7.4°C となった (Fig. 4)。粘度に関しては、ペクチンを 1.0% 添加すると、凍結後の粘度上昇の傾きが急になった。600 秒後の粘度は、ペクチン無添加および 1.0% 添加の時、それぞれ 2.4 Pas および 3.4 Pas となった。同様に、オーバーランはそれぞれ 14% および 22% となった。

フリージング工程におけるペクチン 1.0% 添加は、氷核の発生と成長を抑制する効果はほとんどなく、むしろわずかに促進する可能性があり、氷菓の組織の中で、固体である氷の占める割合が高くなり、粘度上昇の程度が急になったと考えられる。一方、粘度の上昇により、取り込まれた空気は移動しにくくなることから、オーバーランは増加したと考えられる。

本研究における氷菓のミックスでは、1.0% のペクチン添加では氷核の発生・成長抑制に効果が期待できなかった。氷菓は水分量が多いことから、アイスクリームと比較して氷核の生成・成長は早いと考えられる。氷核の生成・成長の抑制を図るためには、ペクチン添加量の増量や異なる種類の増粘安定剤を利用、あるいは併用することが必要となると考えられる。

4. 結 論

デンプンの糊化特性評価機器を応用して、アイスクリームや氷菓を一般的なバッチフリーザと比較して約 1/100 の少量で製造する技術を確立した。また、従来不明であったフリージング工程の粘度変化、温度変化を連続的にモニタリングすることに成功した。これら開発技術により、攪拌速度の増加は、凍結後の粘度勾配の緩化、オーバーランを増加させることを明らかにした。さらに、冷却速度の増加は凍結後の粘度勾配を上

昇させ、オーバーランを増加させることを明らかにした。なお、本研究による少量製造技術およびフリージング中の物性変化モニタリング技術は氷菓製造にも利用可能であった。

引 用 文 献

- 1) S. Yuyama; "Production of Ice Cream", Kourin, Tokyo, Japan, 1996, pp. 216-238.
- 2) H. D. Goff, R. W. Hartel; "Ice Cream 7th", Springer, 2013, p. 313-339.
- 3) C. M. Velasco, H. D. Goff; Fat structure in ice cream: a study on the types of fat interactions. Food Hyd., **29**, 152-159 (2012).
- 4) S. Bolliger, H. Wildmoser, H. D. Goff, B. W. Tharp; Relationships between ice cream mix viscoelasticity and ice crystal growth in ice cream. Int. Dairy J., **10**, 791-797 (2000).
- 5) B. Elhweg, I. W. Burns, A. B. Russell, D. I. Wilson; Viscous dissipation and apparent wall slip in capillary rheometry of ice cream. Food Biopro. Pro., **87**, 266-272 (2009).
- 6) A. M. Roland, L. G. Phillips, K. J. Boor; Physical characteristics of frozen desserts made with cream, anhydrous milk fat or milk fat fractions. J. Dairy Sci., **82**, 2094-2100 (1999).
- 7) A. M. Rahman, S. A. Madkor, F. S. Ibrahim, A. Kilara; Effects of fat replacers on the sensory properties, color, melting, and hardness of ice cream. J. Dairy Sci., **80**, 1926-1935 (1997).
- 8) A. A. Flores, H. D. Goff; Ice crystal size distributions in dynamically frozen model solutions and ice cream as affected by stabilizers. J. Dairy Sci., **82**, 1399-1407 (1999).
- 9) T. Hagiwara, R. W. Hartel; Effect of sweetener, stabilizer, and storage temperature on ice recrystallization in ice cream. J. Dairy Sci., **79**, 735-744 (1996).
- 10) M. M. Koxholt, B. Eisenmann, J. Hinlichst; Effect of the Fat Globule Sizes on the Meltdown of Ice Cream. J. Dairy Sci., **84**, 31-37 (2001).
- 11) M. R. Muse, R. W. Hartel; Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness. J. Dairy Sci., **87**, 1-10 (2004).
- 12) D. B. Aime, S. D. Arntfield, L. J. Malcolmson, D. Ryland; Textural analysis of fat reduced vanilla ice cream products. Food Res. Int., **34**, 237-246 (2001).
- 13) T. Toyoda, M. Mayanagi; "A factor analysis model for an experiment having repeated measures -a sensory evaluation of ice cream-" (in Japanese). J. Behav. Soc. Japan., **28**, 1-7 (2001).
- 14) Y. Chang, R. W. Hartel; Development of air cells in a batch ice cream freezer. J. Food Eng., **55**, 71-78 (2002).
- 15) K. Yamauchi, K. Yokoyama; "Milk Sougou Jiten", Asakurashoten, Tokyo, Japan, 1992, pp. 336-337.

- 16) K. Inoue; "Control of quality of ice cream with freezing process" (in Japanese). Japan Milk Science, **59**, 37-47 (2010).
- 17) S. Kokubo, K. Sakurai, M. Hattori, M. Tomita; "Effects of dasher type and revolution number of dasher on de-emulsified fat of ice cream" (in Japanese). Japan Nippon Shokuhin Kagaku Kougaku Kaishi, **42**, 183-189 (1995).

要 旨

デンブンの糊化特性評価機器を応用し、アイスクリームおよび氷菓の少量製造とフリージング工程の物性変化の可視化を試みた。10℃のミックスを一般的なバッチフリーザ容量の約 1/100 (25 g), 攪拌速度 15 rps,

冷却速度 1℃/min で製造を試みたところ-5.4℃で凍結が確認され, 終了時の粘度およびオーバーランは, それぞれ 5.4 Pas および 19% となった。製造されたアイスクリームの食味は, バッチフリーザで製造されたものと同等であった。この製造技術は氷菓にも利用可能であった。攪拌速度の増加は, 凍結後の粘度勾配の緩化, オーバーランを増加させることを明らかにした。さらに, 冷却速度の増加は凍結後の粘度勾配を上昇させ, オーバーランを増加させることを明らかにした。フリージング工程の物性変化を数値化できた。本手法は, 試作時の大量の廃棄物を削減できるだけでなく, 新商品開発に貢献するものと期待できる。