ホイップクリームの物性に及ぼす均質処理の影響

野田正幸*・山本晴敬*

The Effect of Homogenization on the Physical Properties of Whip Cream

Masayuki NODA and Haruyoshi YAMAMOTO

*Snow Brand Milk Products Co., Ltd. Technical Research Institute
1-1-2, Minamidai, Kawagoe-shi, Saitama 350-11*

It is known that the physical properties of whip cream vary with homogenization. However few investigators have referred to whipping properties. The effects of homogenization on the physical properties of imitation whip cream were investigated in this study. The whip cream consisted of 40% vegetable fat, 4% skim milk powder, 0.8% emulsifiers, 0.1% phosphate, and was homogenized at 0, 2, 5, 10, 20, 30 and 50 MPa using a 3-piston 200 l/h flat-valve homogenizer. The fat globule diameter and the free fat in the whip cream continuously decreased with an increase in homogenization pressures. Agglomeration of fat globules was observed at homogenization pressures higher than 20 MPa. While the whipping time was a maximum at a homogenization pressure of 20 MPa. The reason why the whipping time increased with an increase of homogenization pressures below 20 MPa is that both of the fat globule diameter and the free fat, which is one of the main elements of the structure of typical whipped creams, decreased. The reason why the whipping time decreased at pressures higher than 20 MPa is interpreted to be due to the fact that fat globules agglomerate to contribute to formation of whipped cream structure. Agglomeration of fat globules was not observed in whip creams to which sodium caseinate was added. Consequently, the whipping time increased with an increase of homogenization pressures, and the whip cream became unwhippable at the pressures higher than 20 MPa.

(Received Dec. 26, 1994)

現在市場で流通しているホイップクリームの多くは植物脂肪を原料とした合成ホイップクリーム（以後、クリームという）であり、組成や調製方法によってその特性は異なる。クリームは水、油脂、乳成分および乳化剤から構成され、これらを混合、乳化して得られる。クリームの乳化における均質処理は、クリームの乳化状態および物性を制御する重要な工程である。

工業的均質処理には高圧バルブ均質機が使用され、これの操作条件と物性との関係に関する報告がある。例えば、KIESEKER *et al.*¹⁾²⁾は10 MPa以下の均質圧力を適用したクリームが圧力の増加とともにホイップ時間が増加すること、野田ら³⁾は20 MPa以下の均質圧力で調製したクリームが、7.5 MPaでホイップ時間が最大値を示

すことを報告した。均質圧力が高くなるとクリーム中の脂肪球が微細化するので、乳化安定性が向上し⁴⁾ホイップ時間が増加すると考えられるが20 MPa以上の均質処理に関する報告はない。また、均質圧力が高くなると脂肪球が凝集することが報告されているが⁵⁾、ホイップ時間におよぼす影響については明らかではない。

本研究では、0~50 MPaの圧力範囲で、均質圧力がクリームの安定性およびホイップ時間におよぼす影響、さらに脂肪球の凝集とホイップ時間との関係を明らかにすることを目的とした。

実験方法

1. クリームの組成と調製方法

* 雪印乳業(株)技術研究所 (〒350-11 埼玉県川越市南台 1-1-2)

クリームの組成を Table 1 に示した。上昇融点 33℃ の脂肪 40.0%，脱脂粉乳 4.0%，乳化剤 0.8%，リン酸塩 0.1% を基本組成とし，必要に応じて 0.5 および 1.0% のカゼインナトリウム（以後，カゼインという）を添加し

Table 1 Formulation used for preparation of whip cream

Composition (g/100 g)		
Fats	40.0	
Skim milk powder	4.0	
Emulsifiers	Lecithin	0.5
	Monoglyceride	0.1
	Sugar ester	0.2
Phosphate	0.1	
Water	55.1

Fig. 1 Preparation process for whip cream

た。クリームの調製方法を Fig. 1 に示した。原料を秤量，溶解，加熱後，ホモミキサー（特殊機化工業）で 5 分攪拌し予備乳化とした。その後，3 ピストン平型バルブ均質機（三和機械，200l/h）を用い 0，2，5，10，20，30，50 MPa の圧力で処理した。このとき用いた均質バルブの概略図を Fig. 2 に示した。均質ハンドルでバルブを押し込んだ時にできるシートとバルブの間の約 100 μm の間隙をクリームが流動するときに脂肪球は細かく分散する。均質処理時のクリーム温度は 60±2℃ であった。均質処理したクリームを直ちに氷水中で 5℃ まで冷却し，5℃ 冷蔵庫に一夜冷蔵保存後，測定に供した。クリーム調製から測定までの一連の実験を 2 回実施した。

2. クリーム物性の測定方法

クリームの乳化安定性の指標として脂肪球径，脂肪球の形状，粘度，遊離脂肪量を，ホイップ特性の指標としてホイップ時間，オーバーラン，ホイップドクリームとの遊離脂肪量を以下の方法で測定した。本報でいうクリームとはホイップ前の液状体を，ホイップドクリームとはホイップ後の気泡を含む塑性体を指す。

(1) 脂肪球径……位相差顕微鏡で観察した脂肪球を 200 個計測し (1) 式⁶⁾ で体積平均径を求めた。

$$D_v = (\sum (D_a^3) / n)^{1/3} \quad (1)$$

ここで D_v は体積平均径 (μm)， D_a は計測した脂肪球径 (μm)， n は個数 (—) である。

Fig. 2 Details of the valve and seat

The seat is a plane-faced type with sharp inlet.

(2) 脂肪球の形状……位相差顕微鏡で撮影した脂肪球について、画像解析装置 (PIAS LA 555) を用いて (2) 式で定義した形状係数⁷⁾を求めた。

$$\text{形状係数} = (4\pi \times \text{面積}) / (\text{周囲長})^2 \quad (2)$$

この形状係数は、1.0 のとき円を示し 1.0 から離れるとともに円形から遠ざかり不定形となる。

(3) 粘度……B 型粘度計 (東京計器) を用い 10°C で測定。

(4) 遊離脂肪量……クリームあるいはホイップドクリームに含まれる脂肪のうち、四塩化炭素で抽出可能な部分を遊離脂肪量と定義し NODA⁸⁾の方法に従って測定した。クリームの遊離脂肪量は脂肪球皮膜の壊れやすさを表す⁹⁾。

(5) ホイップ時間……GE ミキサー (GENERAL ELECTRICS) を組み込んだホイップ試験機¹⁰⁾を用いてクリームのホイップ時間を求めた。ホイップ試験機を Fig. 3 に示した。この試験機は、ミキサーとその制御部、ひずみゲージと増幅器および記録計から構成され、ボウルに定量入れたクリームをホイッパーで攪拌した時に生じるホイップドクリームの硬さをひずみゲージで検出し増幅して記録する。ホイップ経過に伴う造花性とホイップドクリームの硬さの変化を求め、最適造花性を示すホイップドクリームの硬さを設定しホイップ終点とした³⁾。

(6) オーバーラン……ホイップドクリームのオーバーランは (3) 式で算出した。

$$\text{オーバーラン (\%)} = ((A - B) / B) \times 100 \quad (3)$$

ここで A は一定容積のクリーム重量、B は同容積のホイップドクリームの重量である。

結果と考察

1. クリームの乳化安定性におよぼす均質圧力の影響

Fig. 3 Experimental apparatus for whip test

クリームの乳化安定性はクリーミングと脂肪球の安定性で評価される¹¹⁾が、ホイップ特性に影響するのは後者である。本研究では、脂肪球の安定性を脂肪球径と遊離脂肪量で評価した。最初に、均質圧力と脂肪球径との関係について調べた。

均質圧力 0, 2, 10, 50 MPa におけるクリームの脂肪球分散状態を Fig. 4 に示した。均質圧力が高くなるとともに脂肪球は微細化し、30 MPa を超える均質圧力で脂肪球の凝集体が観察され、この凝集体は振盪しても再分散しなかった。凝集体発現と並行してクリームの流動性が低下した。凝集体を除いた脂肪球の粒径におよぼす均質圧力の影響を Fig. 5 に示した。脂肪球径は、20 MPa までは圧力に対して指数関数的に減少し、20 MPa を超えるとほぼ一定になった。均質圧力が高い領域で脂肪球径が一定になったのは、均質処理における脂肪球微細化と合一がくりあったためと考えられる。

つぎに、均質圧力とクリームの遊離脂肪量との関係を Fig. 6 に示した。均質圧力 0 MPa で 62%, 2 MPa で 32% と高い値を示したが、10 MPa 以上で約 10% になり、50 MPa まではほぼ一定であった。遊離脂肪量は脂肪球皮膜の壊れやすさを表すので、均質圧力の増加とともに乳化安定性が向上することが判った。

2. ホイップ特性におよぼす均質圧力の影響

均質圧力とホイップ時間との関係を Fig. 7 に示した。圧力の増加とともに、ホイップ時間は 20 MPa までは増加し、20 MPa で最大値を示し、20 MPa を超えると減少した。この結果は 10 MPa 以下で処理した KIESEKER *et al.*^{11,12)}の報告と一致したが野田らの結果³⁾とは最大値を示す均質圧力が異なった。後者の原因は、本実験のクリームの脂肪率が野田ら³⁾より低くホイップ終了が遅れたものと考えられる。Fig. 8 に、ホイップドクリームのオーバーランにおよぼす均質圧力の影響を示した。処理圧力の増加とともに、オーバーランは低下し、気泡が減少していることが判った。

ところで、Fig. 5, 6 に示したように、均質圧力の増加とともに脂肪球径は小さく遊離脂肪量は減少した。脂肪球径が減少すると剪断などの物理的衝撃に対して安定になり、遊離脂肪量の減少も脂肪球皮膜を強固にしいずれも乳化安定性を向上させホイップ終了を遅らせると推定できる。Fig. 7 に示したように、均質圧力が 20 MPa まではホイップ時間が増加し、推定と一致するが、20 MPa を超えるとホイップ時間が減少し、推定と異なった。均質圧力が 20 MPa 以上ではホイップドクリームの構造形成に寄与しホイップ時間を減少させる要因が存在すると

Fig. 4 Phase contrast observation of fat globules at various homogenization pressures
a, 0 MPa ; b, 2 MPa ; c, 10 MPa ; d, 50 MPa.

Fig. 5 Effect of the homogenization pressure on the fat globule diameter

Fig. 6 Effect of the homogenization pressure on the free fat content of whip cream

考えられる。

3. 高い均質圧力におけるホイップ時間減少要因

ホイップドクリームは、遊離脂肪、水相、凝集脂肪球および気泡からなるネットワーク構造である⁸⁾。ホイップドクリーム中の遊離脂肪は構成要素間の繋ぎとして働

きホイップ経過とともに増加してホイップドクリームの構造を強固にし、気泡と凝集脂肪球はネットワークを形成し構造に寄与していると考えられる。

そこで、ホイップドクリームの遊離脂肪量によぼす

Fig. 7 Effect of the homogenization pressure on the whip time

Fig. 9 Effect of homogenization pressure on the free fat content of whipped cream

Fig. 8 Effect of homogenization pressure on the overrun of whipped cream

均質圧力の影響を調べ結果を Fig. 9 に示した。遊離脂肪量は均質圧力 0 MPa で 65% を示し 20 MPa までは急激に、20 MPa を超えると緩やかに減少して 50 MPa では 32% となった。Fig. 7 および Fig. 9 の結果から、0~20 MPa の領域では遊離脂肪量の減少とともにホイップ時間が増加し、20 MPa 以上の領域では遊離脂肪量が少なく一定の状態ではホイップ時間が減少している。前者は、ホイップドクリームの遊離脂肪が構造形成に寄与している系であり、均質圧力が増加するとともに遊離脂肪量は減少して構造形成が遅れホイップ時間が増加する。一

方、後者では、ホイップドクリームの遊離脂肪量の平均値、約 50%⁹⁾ より低く、構造を維持するための量が不足している。しかしホイップ時間は減少している、この領域では遊離脂肪よりも他のホイップドクリーム構成要素の影響が大きいと考えられる。遊離脂肪以外に構造を支持する要素としては気泡と凝集脂肪が考えられる。Fig. 8 の結果から、気泡量は処理圧力とともに減少するので気泡の影響は小さいと判断した。

ところで、Fig. 4 に示したように、高い均質圧力では脂肪球の凝集体が観察され、流動性が低下した。流動性を評価するために、クリームの粘度におよぼす圧力の影響を Fig. 10 に示した。均質圧力 2~20 MPa では粘度が 100 mPa・s であったが 30 MPa を超えると 10 000 mPa・s 以上になった。高い均質圧力における脂肪球凝集体の発現とそれに伴う粘度増加は、クリームの状態で既にネットワーク構造を有しているとみることができ。従って、20 MPa を超える均質圧力でホイップ時間が減少したのは、クリーム中の脂肪球凝集体のネットワーク構造がホイップドクリームの構造形成に寄与したためと考えられる。

以上の結果から、ホイップドクリームの構造形成には、低い均質圧力では遊離脂肪、高い均質圧力では脂肪球の凝集体の影響が大きいと考えられる。この時のホイップドクリームの構造モデルを均質圧力が高い場合と低い場合とに分けて Fig. 11 に示した。図中の脂肪球は均質圧力の高低にかかわらず全て球として表した。

4. 高い均質圧力における凝集体の発現

高い均質圧力における脂肪球凝集体の発現について考察する。VAN BOEDEL¹²⁾は脂肪球の凝集は脂肪球が接近した時、表面に存在する結晶脂肪が相手の脂肪球を貫き界面の一部を共有するためであると推定した。凝集の原因が結晶脂肪による脂肪球の損傷とすれば、凝集体が発現した30 MPa以上でクリームの遊離脂肪量が増加すると考えられる。しかし、Fig. 6に示したように5 MPaを超えると遊離脂肪量は10%でほぼ一定であり、凝集の原因は他にあると考えられる。ところで、Fig. 4を観察すると、0~10 MPaの圧力では脂肪球は円形であった

Fig. 10 Effect of homogenization pressure on the viscosity of whip cream

が、50 MPaでは脂肪球(凝集体を除く)の形状が円形から外れるものが多かった。この時の脂肪球の形状を定量化し粘度との関係を調べた結果をFig. 12に示した。形状係数が小さいほど、即ち脂肪球の形状が円形から遠ざかると粘度は増加した。この結果は、脂肪球の形状が不定形になって脂肪球同志の相互作用が大きくなり凝集することを示唆している。

つぎに脂肪球が不定形になる原因を検討した。脂肪と

Fig. 12 Relation between the shape factor and the viscosity

Correlation equation and coefficient :
 $\text{viscosity} = 1.31 \times 10^{18} \times \exp (-37.6 \times \text{shape factor})$, $r=0.76$.

Fig. 11 The possible model for the structure of whipped cream treated with low or high homogenization pressure.

The whipped cream consists of following four elements.

●, fat globule ; ⊙, aqueous phase ; ●, free fat ; ○, air bubble.

して本実験使用油脂およびこれとは別の液状油を用い、凝集が発現した 50 MPa で均質処理し結晶脂肪の影響を調べた。Fig. 13 に、クリームを均質した直後と一日冷蔵保存後の脂肪球の形状係数を示した。形状係数は脂肪の違いにかかわらず均質直後に 0.9 以下となり、本油脂を使用した場合保存後にさらに 0.8 まで減少した。Fig. 12 の結果は、形状係数 0.9 で既に凝集が発現し 0.8 でそれが顕著になることを示している。均質直後の形状係数 0.9 は均質圧力の影響、本実験油脂使用の一日冷蔵保存後に 0.8 に低下するのは脂肪の結晶化の影響と判断した。均質直後の形状変化は脂肪球表面積の増加に見合うタンパク質が不足するため、一方冷蔵保存中の形状変化は、脂肪球が界面を接して密充填状態で存在するために、脂肪球の変形が結晶固化後も保持されたと考えられる。

5. 脂肪球凝集を抑制したクリームの調製とその特性

高い均質圧力で処理したクリームのホイップ時間が減少する原因は、脂肪球の形状変化に伴う脂肪球の凝集であることが判った。これを確認するために、脂肪球凝集を抑制したクリームを調製しその特性を調べた。タンパク質は乳化剤の外側に吸着し脂肪球皮膜を安定化する¹³⁾ことが知られている。そこで人為的に脂肪球の安定性を変えるために、タンパク質としてカゼインを 0.5 および 1.0% 添加し、脂肪球凝集、脂肪球の形状係数およびホイップ時間を調べた。

カゼインの添加量と均質圧力が脂肪球の凝集におよぼす影響を Table 2 に示した。カゼイン無添加では 30

Fig. 13 Effect of the fats and oils and the aging on the shape factor

All creams were prepared with the homogenization pressure of 50 MPa. Bars indicate standard deviation.

□, immediately after homogenization; ■, after overnight aging.

Table 2 Effect of homogenization pressure on the aggregation of fat globules prepared with various concentration of sodium caseinate

Sodium caseinate (%)	Homogenization pressure (MPa)						
	0	2	5	10	20	30	50
0	—	—	—	—	—	+	+
0.5	—	—	—	—	—	—	+
1.0	—	—	—	—	—	—	—

—, Without aggregation; +, aggregation.

Fig. 14 Effect of homogenization pressure on the shape factor of fat globule

Concentration of sodium caseinate (%): ○, 0.0; ◐, 0.5; ●, 1.0.

MPa, 0.5% 添加系では 50 MPa で脂肪球の凝集が発現したがカゼイン 1.0% 添加系では発現せず、カゼインを添加することによって凝集が抑制された。この結果からタンパク質を添加することで均質処理に起因する脂肪球表面積の不足を補うことができることが判った。この時の均質圧力と脂肪球の形状係数との関係を Fig. 14 に示した。カゼイン無添加系と比べると、カゼイン添加系では、形状係数は 1.0 に近づいた。ただし、凝集が観察されたカゼイン 0.5% 添加系は 50 MPa で 0.85 まで低下した。なお、別の実験でカゼインを 0.5 あるいは 1.0% 添加したクリームの脂肪球径は無添加系に比べて若干小さく、遊離脂肪量は均質圧力 20 MPa を超えると 5% 以下となることを確認した。従って、カゼインを添加することによって、脂肪球皮膜が保護され、均質処理、脂肪結

Table 3 Effect of homogenization pressure on the whip time of the cream prepared with various concentration of sodium caseinate

Sodium caseinate (%)	Homogenization pressure (MPa)						
	0	2	5	10	20	30	50
0	2.08	5.42	7.43	7.61	11.07	9.08	5.97
0.5	2.60	4.69	7.81	7.66	UW*	UW	4.93
1.0	2.67	7.45	10.59	9.71	UW	UW	UW

* UW means unwhippable.

晶化の影響が低下し脂肪球の形状が円に近づくと考えられる。

カゼインを添加したクリームのホイップ時間を Table 3 に示した。均質圧力の増加およびカゼインの増加とともにホイップ時間は増加し、カゼインを添加した均質圧力 20 MPa を超える系ではホイップ不能となった。ただし、凝集が発現したカゼイン 0.5% 添加、均質圧力 50 MPa の系はホイップ可能であった。20 MPa を超える均質圧力では、脂肪球径および遊離脂肪が減少してクリームの安定性が増加するのでホイップ時間は増加し、カゼインを添加すると脂肪球の凝集が抑制されてさらに時間が増加すると考えられる。この結果は、高い均質圧力における脂肪球の凝集がホイップ時間を減少させる要因であることを支持する。

要 約

0~50 MPa の範囲の均質圧力がクリームの安定性、ホイップ時間におよぼす影響について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 均質圧力の増加とともに、脂肪球径が減少して、脂肪球皮膜は壊れにくくなり、乳化安定性は向上した。
- (2) ホイップ時間は、均質圧力の増加とともに 20 MPa 以下では増加し 20 MPa を超えると減少した。低い均質圧力領域では、ホイップドクリームの遊離脂肪量、高い均質圧力領域では脂肪球凝集がホイップドクリームの構造形成に寄与していると考えられる。
- (3) 高い均質圧力領域における脂肪球凝集の原因は、脂肪球の形状変化であり、これは脂肪球皮膜物質の不足と脂肪球密充填による変形に起因する。

(4) カゼインを添加して、高い均質圧力領域における脂肪球凝集を抑制するとクリームのホイップ時間が増加した。この結果は、脂肪球凝集がホイップ時間減少の原因であることを支持した。

文 献

- 1) KIESEKER, F.G. and ZADOW, J.G.: *Australian J. Dairy Technol.* **28**, 108 (1973).
- 2) KIESEKER, F.G. and ZADOW, J.G.: *Australian J. Dairy Technol.* **28**, 166 (1973).
- 3) 野田正幸・加藤正敏・林 弘通: 雪印乳業技術研究所報告, 79, 1 (1984).
- 4) WALSTRA, P.: *Neth. Milk Dairy J.*, **29**, 279 (1975).
- 5) OGDEN, V., WALSTRA, P. and MORRIS, H.A.: *J. Dairy Sci.*, **59**, 1727 (1976).
- 6) 井伊谷綱一: 粉体工学ハンドブック, 朝倉書店, p.42 (1970).
- 7) PIAS 画像計算ソフトウェア: (株)ピアス (1989).
- 8) NODA, M. and SHIINOKI, Y.: *J. Texture Stud.*, **17**, 189 (1986).
- 9) FINK, A. and KESSLER, H.G.: *Milchwissenschaft*, **38** (6), 330 (1983).
- 10) 野田正幸・山本晴敬: 日食工誌, **41**, 327 (1994).
- 11) MULDER, H. and WALSTRA, P. *Milk Fat Globule: Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Bucks., England*, p.102 (1974).
- 12) VAN BOEKEL, M.A.J.S. and WALSTRA, P.: *Colloids Surf.*, **3**, 109 (1981).
- 13) 加藤正敏・近藤 敏: 油化学, **29**, 402 (1980). (平成 6 年 12 月 26 日受理)