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[†]井原啓一[§], 丸屋美樹*, 尾崎裕司**, 嶋田康伸***, 浅野祐三, 岩附慧二

森永乳業株式会社食品基盤研究所

* 森永乳業株式会社分析センター

** 森永乳業株式会社応用技術センター

*** 森永乳業株式会社食品総合研究所

Influences of Bubble Size and Fat Globules Aggregation
on the Physical Characteristics of Whipped Cream
(Studies on Factors Influencing Physical Characteristics of Whipped Cream Part II)Keiichi Ihara[§], Miki Maruya*, Yuji Ozaki**, Yasunobu Shimada***,
Yuzoh Asano and Keiji IwatsukiFood Science & Technology Institute, Morinaga Milk Industry Co., Ltd.,
5-1-83 Higashihara, Zama, Kanagawa 228-8583* Analytical Research Center, Morinaga Milk Industry Co., Ltd.,
5-1-83 Higashihara, Zama, Kanagawa 228-8583** Product Evaluation Center, Morinaga Milk Industry Co., Ltd.,
5-1-83 Higashihara, Zama, Kanagawa 228-8583*** Food Research & Development Institute, Morinaga Milk Industry Co., Ltd.,
5-1-83 Higashihara, Zama, Kanagawa 228-8583

The size of bubbles and degree of fat globule aggregation in cream have been reported to influence the shape retention ability of whipped cream. Shape retention ability also changes when whipped cream is stored. In order to investigate bubble size and fat globule aggregation, fresh cream with 45% (w/w) fat was whipped to stiffness at different speeds (140, 180 or 200 rpm). Differences in resistivity against deformation during storage were found in whipped cream prepared at different whipping speeds. It appears that the degree of fat globule aggregation and overrun of the whipped cream influenced resistivity against deformation. Furthermore, higher correlation was found between the overrun and the continuous phase viscosity of the sample whipped at 140 rpm, and between the average bubble size and the degree of fat globules aggregation of the sample prepared at 200 rpm. The present results suggest that the degree of fat globule aggregation in the continuous phase influence the shape retention ability of cream whipped at 140 rpm, and that the presence of aggregates of fat globules on the surface of bubbles influence the shape retention ability of the cream whipped at 200 rpm. (Received Jun. 8, 2006 ; Accepted Jan. 18, 2007)

Keywords : whip, cream, physical characteristics, fat globule aggregation, foam**キーワード :** ホイップ, クリーム, 物性, 脂肪球凝集, 気泡

ホイップしたホイップクリーム (ホイップドクリーム) は経時的に保形性が低下していく。その原因としてはホイップドクリームからの液状部分の流下, オストワルド熟成による気泡の成長, 気泡の崩壊などが考えられている¹⁾。

一方, 気泡の周りには脂肪球が集まっており²⁾³⁾ それらの脂肪球の凝集体は気泡表面の安定性, 気泡間のネットワークの形成を行っている³⁾と報告されており, ホイップドクリームの保形性を維持するのに役立っている。従って, 脂肪球凝集体の経時変化も保形性の変化に大きな影響を及ぼしているものと思われる。しかし, ホイップドクリームの経時的な保形性変化と気泡, 脂肪球凝集状態の変化との関係について解析した報告はほとんどないのが現状である。

また, 経時的な保形性変化はホイップ速度によって異なり, 前報⁴⁾では, 高速ホイップ品は保形性および気泡径の

[†] ホイップドクリーム物性に影響を及ぼす因子に関する研究 (第2報) (前報, 文献4))

* 〒228-8583 神奈川県座間市東原 5-1-83)

** 〒228-8583 神奈川県座間市東原 5-1-83)

*** 〒228-8583 神奈川県座間市東原 5-1-83)

[§] 〒228-8583 神奈川県座間市東原 5-1-83)

連絡先 (Corresponding author), k_ihara@morinagamilk.co.jp

変化が大きく、低速ホイップ品は保形性および気泡径の変化が小さいことを示した。本研究ではホイップ速度を変えてホイップしたクリームの経時的な力学物性変化について測定し、脂肪球凝集体、気泡の状態変化が保形性に与える影響について検討したので報告する。

実 験 方 法

1. 試 料

本試験で用いるホイップクリームは、森永乳業(株)製の脂肪率 45%、脂肪球の体積基準によるメディアン径(50%径)が 2.2 μ m から 2.3 μ m の範囲のフレッシュクリームを用いた。

2. 脂肪球の粒度分布および平均粒子径測定法

(株)堀場製作所製レーザー回折式粒度分布計 LA-500 を用いた。逆浸透膜処理した後にイオン交換処理された 25℃ の純水(電気伝導度 1 ms/cm 以下)に希釈したクリームを測定試料にした。

3. ホイップ方法

ホイップにはバッチ式ホイッパーである愛工舎のケンウッド社製ミキサー(ケンミックスメジャー、攪拌子のワイヤー 12 本)を用いた。ホイップには 1 kg のクリームを用い、クリームへのショ糖の添加はクリーム重量に対して 8% とした。ホイップ開始のクリーム温度は 7℃ とし、ホイップ後にはホイップドクリームの温度はおおよそ 11℃ から 12℃ の範囲となった。ペネトロ針入度試験機⁵⁾で測定したホイップドクリームのペネトロ針入度が 135 $\pm$ 2, 200 $\pm$ 2 または 215 $\pm$ 2 となったところをホイップの終点とした。本研究ではペネトロ針入度測定において菊地⁶⁾が用いた方法を採用し、質量 12 g, 先端角 40°, コーン最上部の直径 24 mm, コーン下端から最上部までの長さが 33 mm の円錐状コーンを用い、コーンが試料に針入してから 5 秒後の値を用いた。

ホイップ速度は攪拌子の回転数として 140 rpm, 180 rpm, 200 rpm の 3 水準であった。

4. ホイップドクリーム中の脂肪球凝集率の推定法

脂肪球凝集率の測定には前報⁴⁾と同様に小久保ら⁷⁾がアイスクリームで使用した方法を用いた。すなわち、ホイップ操作前のクリームにおける体積頻度による 90% 径以下の脂肪球を「未凝集」の脂肪球と定義し、ホイップ操作後にどのくらいの割合が 90% 径以上に「凝集」しているか推定したものである。この凝集率測定法により、脂肪球数個の小さな凝集体から多数個の脂肪球が凝集して大きくなった凝集体までの合計量を求めることができる。

5. 平均気泡径測定法

ホイップ済み試料を液体窒素にて凍結させ、液体窒素中にて割断した。その試料を液体窒素で冷却していたステージに載せ、走査型電子顕微鏡(トプコン(株)製 SM-200)を用いて高真空(10⁻³ Pa)にて蒸着処理無しで観察した。

加速電圧は 5 kV, スポットサイズとしては No. 5 の条件を用いた。そして、その画像の気泡径を測定し平均径を求めた。すなわち、画像中 0.3~1.8 mm² の領域の気泡(気泡個数として 150~200 個)の円相当直径を求め、野田ら⁸⁾が用いた下式の平均体積径を求め平均径とした。

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

D_v : 平均体積気泡径 [μ m]

D_a : 個々の気泡径 [μ m]

n : 測定個数 [-]

6. ホイップドクリーム連続相の粘度測定

前報⁴⁾と同様に Noda ら²⁾の方法を用いた。すなわち、ホイップドクリームをアスピレーターにて脱気し、それをコーンプレート型粘度計(Haake 社製 Roto Visco 1)を用いて粘度測定をした。測定には 35 mm 径、角度 1#66 のコーンを用い、温度 5℃, セン断速度 300 s⁻¹ の条件を用いた。以上の方法によりホイップドクリームの気泡以外の部分である「連続相」の粘度を測定した。

7. ホイップドクリームの変形抵抗性測定

粘弾性測定装置(ティール・エー・インスツルメンツ社製 ARES)を用いた。測定セルには 25 mm 径の平行円板を用い、試料をその 2 枚の平板間に充填し、1.8~2.0 mm 程度の厚みとなるようにして測定した。試料を 5℃ にして応力掃引モード(200 Pa/2 分間の変化率)でひずみを測定し、試料のひずみが 0.1 となった時点での応力を本研究では「変形抵抗性」と定義した。ここで、変形抵抗性が大きいほど保形性のあるホイップドクリームであると考えられる。

8. ホイップドクリームの保形性の測定

絞り袋を用いてホイップドクリームを黒色の紙の上に 15 g だけ絞り出し、Fig. 1a のような花の形状にして、直ちに上部より撮影した。その写真よりホイップドクリームの底面積を求めた。この値を本研究におけるホイップドクリームの特性値である形状安定性すなわち「保形性」の指標値とした。花を描いたときの底面積が小さいほど、重力に対して形を保つ力すなわち保形性が大きいといえる(Fig. 1 (a))。逆に保形性が小さいと描いた直後に花がつぶれて、底面積が大きくなる(Fig. 1 (a))。前項の変形抵抗性がいわゆるホイップドクリームの「保形性」と相関性があり、有効な測定値であるかどうかの検証に用いた。

実験結果および考察

1. ホイップドクリームの保形性と変形抵抗性との関係

変形抵抗性が保形性を代表しえるパラメータであるかどうかを検証するため、それらの関係を Fig. 1 (b) に示した。Fig. 1 (a) の写真に示したとおり、ホイップ直後のホイップドクリームを絞り袋に入れて花を描くと、自重でのひずみが小さいため底面積が小さく、保形性が良好であることが分かった。一方、冷蔵(5℃)保存したホイップドク

Fig. 1 Correlation between resistivity against deformation and base area of whipped cream

(a) Observation of shape retention of the whipped cream.

(b) Correlation between resistivity against deformation and base area.

** : Significant at $p < 0.01$.

Fig. 2 Resistivity against deformation of whipped cream

(a) Test at penetrometer value of 215.

(b) Test at penetrometer value of 200.

n=3.

リームでは花が自重によってひずみ、底面積が増加し、保形性が低下していることが分かった。様々な保形性を持つホイップドクリームについて検討するため、Fig. 1 (b) はホイップ終了時の硬さを変えて（ペネトロ針入度が 135, 200 または 215）ホイップしたクリームを 0, 1 および 2 日間冷蔵保存したときの結果である。この結果より変形抵抗性の対数値と底面積は高い負の相関 ($r = -0.924$, $p < 0.01$)

を示すことが分かった。変形抵抗性は、底面積と負の相関、すなわち「保形性」とは正の相関があると推察された。よって、本研究では変形抵抗性を保形性の指標値とした。

2. 冷蔵保存時のホイップドクリームの保形性変化

ホイップドクリームを 5℃ にて保存した際の変形抵抗性の変化を Fig. 2 に示した。ホイップ終了時の硬さによって傾向が異なるが、ホイップ速度 200 rpm で調製したホイッ

Fig. 3 Relation between the whipping speed and the each factor of whipped cream at the end point of whipping

(a) Degree of fat globules aggregation, (b) continuous phase viscosity, (c) overrun.

ブドクリームは保存中に変形抵抗性が低下しており、140 rpm 調製品は3条件の中では変形抵抗性が最も良く維持されていた。前報⁴⁾においても140 rpm 調製品での貯蔵弾性率の低下が最も少なく、200 rpm 調製品では顕著に低下している現象が観察され、今回得られた結果は前報⁴⁾の傾向と一致した。一方、前報⁴⁾と同じ条件であるペネトロ針入度が215になる180 rpm 調製品は、前報⁴⁾と同様1日保存後で変形抵抗性が140 rpm 調製品より低下しているが、前報⁴⁾よりも固めにホイップしたペネトロ針入度が200の試料では、変形抵抗性の変化傾向が140 rpm 調製品とほぼ同様であった。その原因について考察するため、脂肪球凝集と気泡の状態変化との関係をFig. 3に示した。脂肪球凝集率 (Fig. 3 (a)) およびオーバーラン (Fig. 3 (c)) は、ペネトロ針入度の違いの影響が見られなかった。一方、Fig. 3 (b) に示した連続相粘度は、ホイップ直後のペネトロ針入度により傾向が変わることが分かった。すなわち、180 rpm 調製品と200 rpm 調製品とが同程度の保形性であったペネトロ針入度215の試料では、両者の連続相粘度も同程度であった。また、180 rpm 調製品と140 rpm 調製品とが同レベルの保形性であったペネトロ針入度200の試験では、両者の連続相粘度も同程度であった。これらの結果から、ホイップ直後の連続相粘度は、保存時の保形性に影響を及ぼしていると推察された。

3. 保存時の変形抵抗性に影響を与える因子の抽出

前項の検討で連続相粘度が保存時の保形性に影響を及ぼしていることが示唆された。また、脂肪球凝集体は気泡とともに全体の構造を形成していると考えられ²⁾³⁾、脂肪球凝集体の状態および気泡の存在状態は全体の力学物性に影響を与えていると思われる。そこで、保存中のホイップドクリームの変形抵抗性とオーバーラン、脂肪球凝集率との相関をFig. 4に示した。2つの実験結果をまとめて示したが、ホイップドクリームは保存するほど変形抵抗性が低下し、脂肪球凝集率ならびにオーバーランも低下した。よって、図中の右上のデータはホイップ直後のものであり、左下のデータは冷蔵保存期間が長いものである。

脂肪球凝集率は、各ホイップ速度において変形抵抗性と比較的高い相関を示しているが、ホイップ速度200 rpm 調製品では相関が低くなる傾向が見られた。オーバーランは、ホイップ速度180 rpm 調製品、200 rpm 調製品で変形抵抗性と相関が高く、脂肪球凝集率と変形抵抗性との相関よりも高くなった。よって、ホイップ速度が小さいほど脂肪球の凝集状態が変形抵抗性へ直接に影響を与え、ホイップ速度が大きいほどオーバーランが変形抵抗性へ直接に影響を与えていると推察された。

Noda ら²⁾によるとホイップドクリームの連続相粘度は全体の粘度より低く、連続相粘度だけでは全体の力学物性を説明しきれず、他の因子の影響も存在すると考察してい

Fig. 4 Correlation among the resistivity against deformation, the degree of fat globules aggregation and the overrun

Whipping speed : (a) 140 rpm, (b) 180 rpm, (c) 200 rpm.

* : Significant at $p < 0.05$, ** : significant at $p < 0.01$.

Fig. 5 Factors of fat globules aggregation for maintaining overrun

Whipping speed : (a) 140 rpm, (b) 180 rpm, (c) 200 rpm.

* : Significant at $p < 0.05$.

る。本結果からも脂肪球凝集体と気泡の両方の因子が全体の力学物性に影響を及ぼしていると推察され、両方の因子の挙動について解析した。

4. オーバーラン保持に影響を及ぼす脂肪球因子の抽出
前報⁴⁾では低速でホイップすると比較的しっかりと

脂肪球ネットワークが形成され、反対に高速でホイップすると脂肪球ネットワークは比較的不完全であると考察した。さらに、低速ホイップ品では、気泡径の変化が小さく、逆に高速ホイップ品では気泡径の変化が大きいことを見出した。また、脂肪球ネットワークは気泡を保持すると報告

Fig. 6 Model for changing in the shape retention ability of whipped cream at different whipping speeds

Fig. 7 Relation between the degree of fat globules aggregation and the diameter of bubbles

Whipping speed : (a) 140 rpm, (b) 180 rpm, (c) 200 rpm.

* : Significant at $p < 0.05$.

されている⁹⁾。このように気泡の保持は脂肪球凝集状態の影響を受けていると考えられる。

そこで、保存中のオーバーランと脂肪球凝集因子（脂肪球凝集率、連続相粘度）との相関を Fig. 5 に示した。Fig. 5 は 2 つの実験のデータであるが、経時的にオーバーランが低下したので、オーバーランが小さいものほど保存期間が経過したときのデータとなる。ホイップ速度 140 rpm 調製品では連続相粘度とオーバーランとは高い正の相関があった ($r=0.856$, $p < 0.05$)。このことから、Fig. 6 に示した保形性の変化機構のモデル (a) に示した通り、ホイップ直後には連続相の脂肪球ネットワークにより気泡がホイップドクリーム内に保持され、保存中のネットワーク崩壊によって気泡がホイップドクリームの外に放出されやすくなることが示唆された。一方、ホイップ速度 180 rpm 調製品

と 200 rpm 調製品とでは、脂肪球凝集率とオーバーランとの相関係数が高くなる傾向が見られた。また、連続相粘度とオーバーランとの関係では、140 rpm 調製品で相関が見られたが、180, 200 rpm 調製品では相関が見られなかったことより、連続相の脂肪球凝集ネットワーク以外の因子もオーバーランの低下に寄与しているものと考えられた。

5. 気泡径保持に影響を与える脂肪球凝集因子の抽出

連続相に存在する脂肪球凝集ネットワーク以外でホイップドクリームのオーバーラン低下を引き起こす因子としては、気泡径の増加が考えられた。そこで、保存中におけるホイップドクリームの気泡径変化と脂肪球凝集率との相関を Fig. 7 に示した。Fig. 7 は 2 つの実験でのデータであるが、経時的に気泡径は増加したので、気泡径が大きくなるほど保存期間が経過したときのデータとなる。ホイップ速

Fig. 8 Change in the increasing rate of average bubble diameter during refrigeration

(a) SEM images of the creams prepared at 140rpm immediately after whipping or stored for 2 days, (b) increasing rate of average diameter of bubbles.

度 140 rpm 調製品では、脂肪球凝集率と気泡径は無相関であるが (Fig. 7 (a)), ホイップ速度が高速になるに従って相関が高くなり、200 rpm 調製品では、有意な負の相関 ($r = -0.869$, $p < 0.05$) が見られた (Fig. 7 (c)). すなわち、ホイップ速度 200 rpm 調製品では、脂肪球凝集率が小さくなるにつれて気泡径が大きくなった。気泡径が大きくなるということは気泡が成長または合一することであり、気泡表面が不安定な状態であると推察される。Fig. 8 に示した気泡径変化率からもホイップ速度 200 rpm 調製品では気泡径が経時的に大きくなっていることが見出された。

気泡表面には脂肪球が集まっており²⁾、脂肪球およびその凝集体が気泡表面の表面張力を下げ、かつ力学的強度を高めていると考えられた。また、エマルションの界面において、オボアルブミンのような立体構造の変化が少ないタンパク質は界面弾性を増し、 β -カゼインのような変形しやすいタンパク質で覆われた界面の界面弾性は低いことが報告されている¹⁰⁾。気泡表面では変形しづらい小さな球状粒子である脂肪球と、立体的に比較的大きく変形可能である考えられる脂肪球凝集体で覆われていると考えられるが、上記の知見から、大きな脂肪球凝集体で覆われた気泡表面は表面弾性が低く、表面被覆率も低いと推察される。連続相粘度はホイップ速度 140 rpm 調製品では比較的低くて 1.0~3.5 Pa·s であり、ホイップ速度 200 rpm 調製品では比較的高くて 2.5~6.0 Pa·s であった (Fig. 5)。このように脂肪球凝集体が大きくなると連続相粘度が高くなることが考えられ、ホイップ速度 200 rpm 調製品における気泡

表面は、表面レオロジー的にも不安定であると推測された。しかし、脂肪球または脂肪球凝集体自身は気泡表面を保護しており、それらが表面から離脱しないと気泡の成長・合一は生じにくいと考えられた。Fig. 6 (b) に示したように、ホイップ速度 200 rpm 調製品では、冷蔵保存中に表面レオロジー的な不安定さが原因となって、気泡表面に存在している脂肪球凝集体が気泡表面から離脱しやすい状態になると考えられた。それは、気泡径と脂肪球凝集率との相関が得られたことから検証された (Fig. 7 (c)). 一方、データを示さなかったが、連続相粘度と気泡径とは無相関であったため、脂肪球凝集体の離脱は無ホイップクリーム 90% 径 (4 μ m) 以下である比較的小さな脂肪球凝集体が気泡表面から離脱する様式であると推察された。一方、ホイップ速度 140 rpm 調製品では、脂肪球凝集率と気泡径との相関が見られなかった。Fig. 8 に示した保存中の気泡径変化率から、気泡径もホイップ速度 140 rpm 調製品ではあまり変化していないため、脂肪球凝集体は気泡表面から離脱せず、表面を保護していると推察された。

要 約

1. 保存時のホイップドクリームの変形抵抗性はホイップ速度が大きくなると低下、すなわち保形性が低下する傾向が見られた。
2. ホイップ速度 140 rpm 調製品では、脂肪球凝集率の変化が変形抵抗性に与える影響が大きく、200 rpm 調製品では、オーバーランの変化が変形抵抗性に大きく影響を与

えると推察された。すなわち、ホイップドクリームの保形性は、脂肪凝集率とオーバーランの両方の影響を受けると推察された。

3. ホイップ速度 140 rpm 調製品では、連続相粘度が低下するにつれてオーバーランが低下し、200 rpm 調製品では、脂肪球凝集率が低下するに従ってオーバーランが低下する傾向であった。

4. ホイップ速度 200 rpm 調製品では、脂肪球凝集率が減少するに従って気泡径が増加した。脂肪球凝集体が気泡表面より離れ、気泡表面が力学的に不安定な状態になることにより気泡径が増加し、オーバーランの減少につながっている可能性があった。一方、140 rpm 調製品では、保存中の気泡径の変化が小さく、脂肪球凝集率と気泡径との相関が無かったことより、脂肪球凝集体は気泡表面から離脱することなく、気泡表面が力学的に安定であると考えられた。

5. 脂肪球凝集体、気泡がホイップドクリームの保形性に与える影響に関するモデルを考察すると、140 rpm 調製品の保形性変化は、連続相中の脂肪球凝集ネットワークの変化が原因であり、200 rpm 調製品の保形性変化は、気泡表面からの脂肪球凝集体の離脱が原因であることが推察された。

文 献

- 1) Walstra, P., Wouters, J.T.M. and Geurts, T.J., Cream Products. In "Dairy Science and Technology" Second Edition (Taylor & Francis) pp. 457 (2005).
 - 2) Noda, M. and Shiinoki, Y., Microstructure and rheological behavior of whipping cream, *J. Texture Stud.*, **17**, 189-204 (1986).
 - 3) Goff, H.D., Instability and Partial Coalescence of Whippable Dairy Emulsions, *J. Dairy Sci.*, **80**, 2620-2630 (1997).
 - 4) 井原啓一, 加治屋千鶴, 嶋田康伸, 浅野祐三, 小久保貞之, ホイップドクリーム物性に及ぼすホイップ速度の影響, *食科工*, **52**, 553-559 (2005).
 - 5) 高分子学会レオロジー委員会, ペネトロメーター, レオロジー測定法, 初版 (共立出版, 東京), pp. 129-130 (1965).
 - 6) 菊地基和, クリームの連続式ホイッピングに関する研究, 東北大学学位論文 (1992.10 月).
 - 7) 小久保貞之, 桜井一美, 服部美穂, 富田 守, アイスクリュームの脂肪球凝集に及ぼすフリーザー出口温度とオーバーランの影響, *日食工誌*, **41**, 347-354 (1994).
 - 8) 野田正幸, 山本晴敬, ホイップクリームの物性に及ぼす均質処理の影響, *食科工*, **43**, 896-903 (1996).
 - 9) Darling, D.F., Recent advances in the destabilization of dairy emulsions, *J. Dairy Res.*, **49**, p. 695-712 (1982).
 - 10) Rousseau, D., Fat crystals and emulsion stability — a review, *Food Research International*, **33**, p. 3-14 (2000).
- (平成 18 年 6 月 8 日受付, 平成 19 年 1 月 18 日受理)