

クリーム及びそのホイップ製品の物性に及ぼす
分散構造及び連続相物性の影響に関する研究

2020 年 1 月

井 原 啓 一

クリーム及びそのホイップ製品の物性に及ぼす
分散構造及び連続相物性の影響に関する研究

筑波大学大学院
生命環境科学研究科
生命産業科学専攻
博士（農学）学位論文

井 原 啓 一

目 次

第1章 緒論	1
1-1 食品用クリーム類の市場	1
1-2 食品用クリーム類の規格およびその用途	1
1-3 本研究に関わる技術とこれまでの研究	2
1-3-1 クリーム製造	2
1-3-2 クリームの組成	3
1-3-3 クリームに求められる特性および従来技術	3
1-3-4 クリームのホイップ操作	4
1-4 本研究の目的と意義	7
第2章 ホイップ時の気泡導入と脂肪球凝集の生じるタイミングが ホイップドクリーム構造および5℃保存時の硬さ変化に及ぼす影響	18
2-1 序	18
2-2 材料と方法	19
2-2-1 クリームおよびホイップ	19
2-2-2 ホイップドクリーム硬さ	19
2-2-3 連続相粘度	20
2-2-4 脂肪球凝集率	20
2-2-5 オーバーラン	21
2-2-6 ホイップドクリーム気泡観察	21
2-2-7 平均気泡径測定	21
2-3 結果と考察	22
2-3-1 各攪拌速度でホイップした時のオーバーラン、連続相粘度変化	22
2-3-2 気泡導入、脂肪球凝集進行のタイミングが脂肪球の凝集状態に 及ぼす影響	22
2-3-3 気泡導入、脂肪球凝集進行のタイミングがホイップドクリーム	

構造および硬さに及ぼす影響	23
2-3-4 5℃保存中のホップドクリームの硬さ変化とそれに影響を 及ぼす因子	24
2-3-5 ホイップドクリームの構造形成ならびに硬さ発現機構に関する考察	25
2-3-6 5℃保存時の硬さ変化の機構に関する考察	25
2-4 結論	26
第3章 固体脂含量がホイップ物性に及ぼす影響解析	41
3-1 序	41
3-2 材料と方法	42
3-2-1 クリームおよびホイップ	42
3-2-2 固体脂含量	42
3-2-3 ホイップドクリーム硬さ	43
3-2-4 連続相粘度	43
3-2-5 気泡径および気泡表面積	43
3-2-6 動的表面張力	44
3-3 結果と考察	45
3-3-1 固体脂含量がホイップドクリーム物性に及ぼす影響	45
3-3-2 ホイップ時の硬さ発現に影響を及ぼす因子の考察	46
3-4 結論	47
第4章 生産性及び物性を両立させたホイップドクリーム製造法の開発 及びその機構の推定	56
4-1 序	56
4-2 材料と方法	56
4-2-1 クリームおよびホイップ	56
4-2-2 ホイップドクリーム硬さ	57
4-2-3 連続相粘度	57

4-2-4	オーバーラン	57
4-2-5	ホイップドクリーム気泡観察	57
4-2-6	ホイップドクリーム平均気泡径の計算	57
4-3	結果と考察	58
4-3-1	各攪拌速度でホイップした際のホイップ時間、5℃保存時の硬さ 変化の再現性	58
4-3-2	攪拌速度の変更がホイップ時間、硬さ変化、オーバーランに 及ぼす影響	59
4-3-3	ホイップドクリームの硬さ変化に影響を及ぼす因子	60
4-3-4	気泡観察法の検討	60
4-3-5	変速ホイップ品の 5℃保存時の硬さ変化に影響を及ぼす因子	61
4-3-6	2 変速での効果	62
4-3-7	スケールアップの効果	62
4-4	結論	63
第 5 章	総括	73
引用文献		76
謝辞		81

目 次

1-1	クリーム生産量の推移	8
1-2	事業所規模別の洋菓子店事業所数の推移	9
1-3	乳脂肪クリーム(a)および合成クリーム(b)の製造工程	10
1-4	連続式クリーム分離機の外観(a)および構造(b)	11
1-5	プレート式熱交換器の外観(a)および構造(b)	12
1-6	均質機の外観(a)およびその原理(b)	13
1-7	調理用クリーム(a)、コーヒークリーム(b)およびホイップ用クリーム(c) で求められる特性	15
1-8	各種ホイップ方法	16
1-9	ホイップドクリーム中の気泡分散構造(a)と脂肪球ネットワーク構造(b)	17
2-1	ペネトロ針入度計外観(a)、針入度表示部(b)及びコーン針入の様子(c)	28
2-2	連続相粘度測定概念図	29
2-3	脂肪球凝集率測定原理	30
2-4	120 rpm(a)、140 rpm(b)、180 rpm(c)、220 rpm(d)攪拌品の オーバーランと連続相粘度の増加タイミングの比較	31
2-5	120 rpm(a)、140 rpm(b)、180 rpm(c)、220 rpm(d)攪拌品の 脂肪球凝集率と連続相粘度の増加タイミングの比較	32
2-6	120 rpm(a)、140 rpm(b)、180 rpm(c)、220 rpm(d)攪拌品中の 気泡の走査型電子顕微鏡観察	33
2-7	5℃保存後の 120 rpm(a)、140 rpm(b)、180 rpm(c)、220 rpm(d)攪拌品中 の気泡の走査型電子顕微鏡観察	34
2-8	各条件での 5℃保存前後のホイップドクリーム貯蔵弾性率比較	35
2-9	140 rpm(a)、180 rpm(b)、200 rpm(c)攪拌品におけるペネトロ針入度 の 5℃保存中の変化	36
2-10	140 rpm(a)、180 rpm(b)、200 rpm(c)攪拌品における 5℃保存中の オーバーラン変化とペネトロ針入度変化との相関	37

2-11	140 rpm(a)、180 rpm(b)、200 rpm(c)攪拌品における 5℃保存中の 気泡径変化とペネトロ針入度変化との相関	38
2-12	140 rpm(a)、180 rpm(b)、200 rpm(c)攪拌品における 5℃保存中の 脂肪球凝集率変化とペネトロ針入度変化との相関	39
2-13	気泡先導入条件(a)、同時進行条件(b)でのホイップ直後の構造及び 5℃保存時の硬さ変化の機構予測	40
3-1	各温度でのクリーム中油脂の固体脂含量 (SFC)	49
3-2	SFC とホイップ時間(a)、終点オーバーラン(b)、終点連続相粘度(c) との相関	50
3-3	ホイップ時のオーバーラン(a)、連続相粘度(b)の経時変化	51
3-4	クリーム温度(a)および固体脂含量(b)がホイップドクリーム平均気泡径 に及ぼす影響	52
3-5	気泡表面の動的表面張力差の温度依存性(10 ms での値－1 s での値)	53
3-6	ホイップ過程でのひずみ抵抗性(a)および貯蔵弾性率(b)変化に影響を 及ぼす因子	54
3-7	気泡間の脂肪球ネットワークの形成(a)、気泡同士の接触による ネットワークの形成(b)による硬さ発現に関する考察	55
4-1	攪拌速度がホイップ時間(a)、5℃保存時ペネトロ硬度差(b)および ホイップ直後のオーバーラン(c)に及ぼす影響	64
4-2	210 rpm 攪拌時のオーバーラン、連続相粘度の変化	65
4-3	210→140 rpm 変速時におけるホイップ時間(a)、ペネトロ硬度変化(b)、 オーバーラン(c)への 210 rpm ホイップ進捗率の影響	66
4-4	210→160 rpm 変速時におけるホイップ時間(a)、ペネトロ硬度変化(b)、 オーバーラン(c)への 210 rpm ホイップ進捗率の影響	67
4-5	ホイップ直後のオーバーランが 5℃保存時硬さ変化に及ぼす影響	68
4-6	位相差顕微鏡(a)および X 線 CT(b)により観察される ホイップドクリーム気泡の比較	69
4-7	ホイップ直後の気泡径(d_{32})が 5℃保存時硬さ変化に及ぼす影響	70

表 目 次

1-1	45%(w/w)脂肪率の乳脂肪クリーム組成	14
4-1	2 変速ホイップによる生産性およびホイップドクリーム物性への効果	71
4-2	スケールアップ時の変速導入効果	72

第1章 緒 論

1-1 食品用クリーム類の市場

食品用クリーム類の生産量は着実な増加を続けている（図 1-1）。それには、2010 年ごろからのコンビニスイーツのヒットなどがその背景にある。一方、熟練したパティシエが経営する個人営業の洋菓子店は徐々に減少している。図 1-2 に示すように、従業員数が 19 名以下、特に 9 名以下の小規模事業所数が減少する一方、従業員数が多い事業所についてはその数を維持している。大規模事業所では非熟練のアルバイトが作業に関わることが多く、その人たちがマニュアルを見ながらクリームを使用した製品の製造をしている。それ故に、パティシエが作業している時は問題とならないようなクリーム物性であったとしても、非熟練作業員にとっては難易度が高くなる。そのため、近年、取り扱いが容易なクリーム物性もしくは作業のためのシステムが求められている。現状では、作業性の良い合成クリームを使用することで、アルバイトでも作業可能となっている。一方、消費者のほうでは本物志向が進んできており、ホイップ時の物性制御の困難な乳由来のフレッシュクリームを使用した洋菓子が好まれてきている。このように、は非熟練者でも取り扱い可能となる乳由来クリームのホイップ技術が求められており、そのホイップ機構の解明が待たれている。

1-2 食品用クリーム類の規格およびその用途

クリーム類には、乳及び乳製品の成分規格等に関する省令（以下、乳等省令と称す）で定義されている生乳由来の「クリーム」（以下、乳脂肪クリームと称す）とそれ以外の「合成クリーム」（油相部と水相部との乳化物）がある。乳等省令上の「クリーム」である乳脂肪クリームは、乳脂肪風味が豊かであるため、市場からの引き合いが多いが、「生乳、牛乳又は特別牛乳から乳脂肪分以外の成分を除去したもので、乳脂肪分が 18%以上」と定義されており、原料、製法が限られ、物性の制御が困難なものである。一方、合成クリームは、油脂、乳化成分、呈味成分、香料などを適宜選択することができるため、乳脂肪クリームより多くの機能性を持つ製品が多く上市されている。

それらのクリームは、調理、コーヒー用途では液体のまま用いられることが多く、洋菓子用途ではホイップされて用いられることが多い。以下、調理用途の乳脂肪クリーム、合成クリームを総称して調理用クリームと呼び、ホイップ用途のそれらのクリームを総称してホイップ用クリームと呼ぶ。また、用途関係なく、乳脂肪クリーム、合成クリームを総称する場合は、クリームと呼ぶことにする。この総称としてのクリームは、乳等省令上の「クリーム」とは異なるものである。

1-3 本研究に関わる技術とこれまでの研究

1-3-1 クリーム製造

乳脂肪クリームは生乳を原料とし、連続式分離機による脂肪分の濃縮（クリームと脱脂乳の分離）、プレート式熱交換器による加温、殺菌、均質機による脂肪球の微細化、プレート式熱交換器による冷却およびタンク中でのエイジングを経て、製品となる。一方、合成クリームは、乳化成分、呈味成分、香料などを含んだ油相部、水相部を混合、予備乳化した後、乳脂肪クリームの加温、殺菌以下と同様な工程を経て製造される（図 1-3）。各工程で使用する機器の詳細は以下に述べる。

分離

乳脂肪クリームは、図 1-4 に示す連続式クリーム分離機を用いて、生乳を遠心分離して製造する。遠心分離操作により、脂肪分がすべて軽液側に移行するようにし、更にバルブで軽液側出口にかかる圧力を制御することで、軽液側と重液側に向かう脱脂乳流量の分配率を制御し、クリームの脂肪率を調整する。

加温及び殺菌

プレート式熱交換器による殺菌、バッチ式殺菌、蒸気を直接製品と接触させる直接式殺菌などが存在する。クリーム製造では、その中でもプレート式熱交換器を用いることが多い。プレート式熱交換器は、図 1-5 に示したように、プレート間の間隙中に製品、熱媒を通すことで製品を加熱する手法であり、熱効率が高い

ことが特徴である。

均質

乳脂肪クリーム、合成クリームとも、分散相である脂肪球と連続相である水相部とからなり、分散相と連続相の比重が異なるため、保存中に脂肪が浮上し、製品の上部にクリーム層ができてしまうといった課題がある。ストークス式で示される通り、脂肪球の浮上速度は分散相の径の2乗に比例することから、その課題の解決には脂肪球を微細化する必要がある。クリームの製造では、脂肪球の微細化のために均質機（図 1-6）を用いる。均質機では、製品に圧力をかけてバルブ、バルブシート間の狭い間隙を通すことで、脂肪球は微細化される。ただし、脂肪球の過度の微細化は、クリーム粘度の増加、ホイップ時間の遅延やホイップエン ド幅の短縮も招きホイップの難易度が増すため、その適切な制御は重要である。

冷却・エージング

均質処理されたクリームは、プレート式熱交換器にて冷却された後、低温（5℃前後）で一晩以上保存（エージング）される。エージングはクリーム脂肪球中の油脂を十分に結晶化させ、クリームの物性を安定化させる目的で実施される。

1-3-2 クリームの組成

45%(w/w)脂肪率の乳脂肪クリームの組成を表 1-1 に示した。脂肪分と水分がほぼ半分ずつの体積を占めるものである。クリーム中の脂質は、様々な脂肪酸から構成させるトリグリセリドであり、脂肪酸の種類、グリセリンへの配位位置により、融点、結晶型など変わり、油脂物性、については脂肪球の安定性に大きな影響を及ぼす。タンパク質は、風味の付与や製造時の乳化力の付与などの特性を持つ。灰分、炭水化物は主としてクリームに風味を与える。

1-3-3 クリームに求められる特性および従来技術

クリームは保存時に脂肪浮上すると、外観を損ねるため、脂肪浮上が少ないこ

とが望まれる。さらに、調理やコーヒークリームとして用いられたり、ホイップして用いられていたりするため、求められる特性は用途により異なる（図 1-7）。

調理用途ではクリームを液体のまま使用することが多く、その際、食塩、酸、アルコールなどがクリームに混合されて加熱される。クリームは、連続相である脱脂乳と分散相である脂肪球から構成されるが、調理ではクリーム中の固形分のほとんどを占める分散相である脂肪球の状態変化がクリーム品質に大きな影響を及ぼす。具体的には、脂肪球の乳化破壊による油浮き、脂肪球の凝集を原因とした外観の悪化などが起こることがある。それらの防止のためには、乳化安定性が重要となってくる。ここでいう乳化安定性とは、脂肪球の凝集の起きづらさや調理操作に対して脂肪球被膜が破壊されないことがあげられる。そのために、脂肪球被膜を適切な物質で覆う必要があると考えられる。

一方、洋菓子用途では、クリームをホイップして硬さが発現した状態にする。そのため、クリームには相反する特性が要求される。すなわち、保存時には脂肪が浮上しないこと、輸送時の振動などで脂肪球が凝集・固化しないこと、など乳化が安定であることが求められている。しかし、ホイップ操作では脂肪球が適切に解乳化されることが求められている。乳化が安定すぎると、ホイップ操作による脂肪球凝集が起こらず、乳化が不安すぎると、輸送中の振動などでクリームが固化してしまうなどの問題が生じる。そのため乳化安定性を適切に制御することが重要となる。

1-3-4 クリームのホイップ操作

ミキサーの種類（立型、連続式）

クリームのホイップにはその処理量に応じて、様々なスケールのミキサーが用いられる（図 1-8）。それらについて以下で説明をする。

手作業によるホイップ

図 1-8(a)のホイッパーでクリームを攪拌することで、クリームをホイップする手法である。家庭でホイップする時など極少量のクリームの処理に用いられるほ

か、以下に述べる立型ミキサーでのホイップの終点付近での仕上げに使用されることもある。

立型ミキサー（バッチ式ミキサー）

図 1-8(b)、(c)のミキサーのボウルにクリームを入れ、所定の物性になるまで機械で攪拌するバッチ式ホイップ方法。オーバーラン、硬さ、組織（外観）を指標にホイップ終点を決めるが、オーバーラン、硬さを独立に制御できず、どちらか一方は成り行きとなる。比較的少量（～10kg）処理に向いた方法である。

連続式ホイップマシン

図 1-8(d)のマシンなどを用いてクリームに所定量のオーバーランとなるように気泡を導入し、連続的攪拌してホイップする方法。多量のクリームの処理に向く。また、導入気泡量、ダッシャー回転速度を独立に設定できるため、オーバーランと硬さをある程度独立に制御することが可能となる。

ホイッピング過程の概要

ホイップドクリームは、クリーム部分の連続相と導入された気泡といった分散相からなる。分散相の気泡は、クリームのホイップ操作により導入され、脂肪球が凝集してネットワークの形成が始まり、最終的には硬さが付与されホイップドクリームとなる（Noda and Shiinoki 1986、 van Aken et al. 2001、 Hotrum et al. 2005）。このホイップドクリームはクリーム中に分散された気泡間が脂肪球ネットワークで結ばれている（図 1-9）。このように、ホイップドクリームの硬さ付与には、分散相である気泡の状態と連続相中の脂肪球の凝集が重要な役割を果たす。Hotrum et al. (2005) はホイップ過程を三段階に分類し、一段階目では気泡が導入され、同時にその表面へタンパク質が吸着し、二段階目では気泡表面へ脂肪球が吸着し蓄積され、最終段階では脂肪球凝集体によるネットワーク形成が生じると報告した。一方、Noda and Shiinoki (1986) はホイップ期間を四等分し、それぞれの段階での解乳化、気泡導入が硬さ発現に及ぼす影響を調べ

た。更には、気泡表面に脂肪球が蓄積されネットワーク形成する様子も観察した。このように、ホイップ操作中では気泡がまず導入される。Jakubczyk et al. (2006) は気泡導入そのものが、硬さ発現に影響を及ぼしていると報告しており、ホイップドクリーム物性制御には分散相である気泡の物性制御が重要であると考えられる。一方、気泡はその表面に粒子が吸着したり、タンパク質が構造体を形成したりすると安定化することが報告されている (Murray et al. 2007)。ホイップドクリーム中の気泡では、その表面に吸着するものはタンパク質のほかにも脂肪球が考えられるため、脂肪球の物性も気泡の安定性に大きな影響を及ぼすと考えられる。更には、前述のとおり、脂肪球の凝集は脂肪球ネットワークを形成し、硬さを付与するため、この制御も適切なホイップのためには重要となる。

以上のように、ホイップ操作中の気泡の導入・分散、脂肪球凝集の進行は、ホイップドクリーム品質に関与する重要な因子であるが、それらはホイップ用クリームの特性、ホイップ条件の影響を受ける。気泡を適切に分散させるためには、導入の為にかけるエネルギー、導入速度が重要な役割を果たす。導入のためのエネルギーには使用する攪拌機の回転速度により規定され、導入速度は攪拌子の形状、回転速度、容量、容量とクリーム量との比率といった攪拌機の条件により通常制御される。また、ホイップ用クリームの性状として重要な特性としては、クリームの表面張力、粘度などが挙げられるが、それらはクリームの温度、脂肪率、タンパク質種類・濃度などが大きな影響を与える。それらの条件が、気泡導入速度、気泡微細化度合いを決定し、最終的には、気泡量、気泡径分布が決まる。

一方、連続相中の脂肪球の凝集は、ホイップ時のせん断力で生じるため、被膜界面の強度、油脂結晶型、クリーム脂肪率、脂肪球径などが重要な影響を及ぼす。それらの制御のため、タンパク質、低分子乳化剤の種類や量、使用する油脂の選択、目的に応じた脂肪率や脂肪球径を設定する。その他にも、気泡表面に吸着した脂肪球を核とした脂肪球凝集 (Noda and Shiinoki 1986) も生じているため、気泡の分散状態も脂肪球凝集に大きな影響を及ぼす。それらの条件が、乳化安定性、脂肪球凝集速度を規定し、最終的には、脂肪球凝集体の量や特性を決める。このように、ホイップドクリームは様々な要因が絡み合っ初めて硬さが発現さ

れるため、硬さ発現を適切に制御するためには、高度な技術を要する。

1-4 本研究の目的と意義

以上のように、クリームは求められる特性が多種多様であるばかりでなく、乳化安定性に関して相反する特性が必要となっているため、その製造には高度な技術が必要となる。様々な特性を持った新規クリーム製品の創出をめざすには、その開発基盤となる基礎的知見を得ることが必須となるため、その取得を目的とした。

そのために、本研究では、洋菓子用途で重要な因子となるホイップ操作中での硬さ発現および 5℃保存時の硬さの変化に注目した。ホイップ時の硬さ発現および 5℃保存時の硬さ変化は、分散相である気泡導入や連続相中の脂肪球の解乳化・凝集が適切に制御されることにより、クリームは良好な物性となる。その気泡導入、脂肪球凝集には、ホイップ条件、クリームの固体脂含量 (Solid Fat Content : **SFC**)、クリーム中の成分などが大きな影響を及ぼす。本研究では、これらの因子が及ぼす影響について解析した。

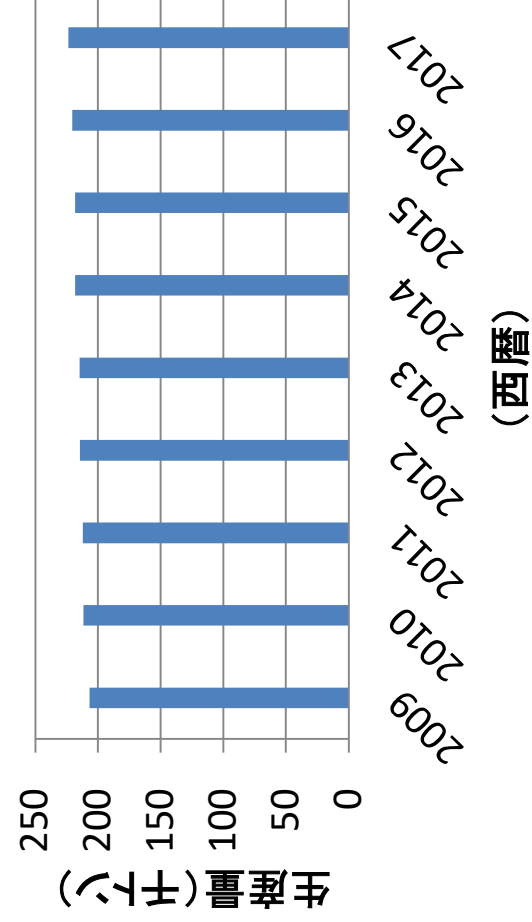


図 1-1 クリーム生産量の推移

2018 年 食品マーケティング便覧 5 (富士経済) より引用

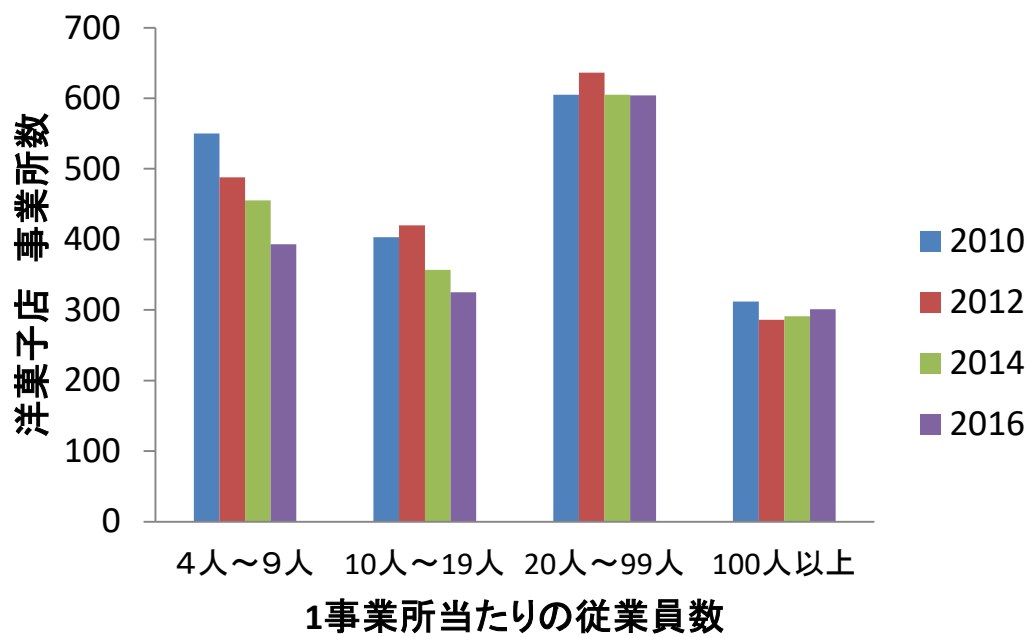
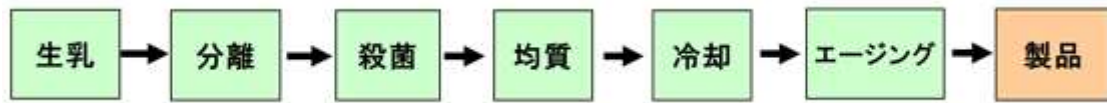


図 1-2 事業所規模別の洋菓子店事業所数の推移
 工業統計表「品目編」（経済産業省）の 2011、2013、2015、2017 年版のデータを抜粋しまとめ直したもの

(a)



(b)

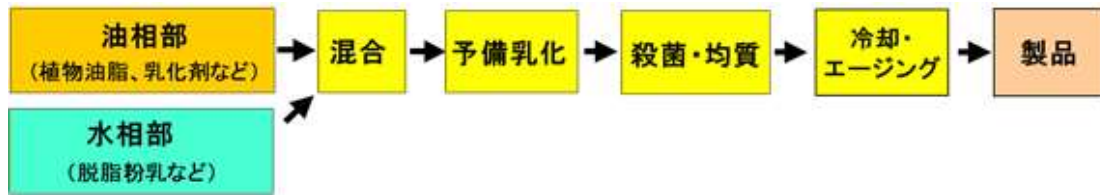


図 1-3 乳脂肪クリーム(a)および合成クリーム(b)の製造工程

(a)



(b)

1. 牛乳の分離
2. クリーム吐出口
3. 脱脂乳吐出口
4. 脱脂乳セントリペダルポンプ
5. クリームセントリペダルポンプ
6. 牛乳供給管
7. 分配器
8. 分離板群
9. セパレーティングディスク
10. ソフトストリームシステム
11. 上昇孔
12. 固形物堆積部
13. 固形物排出孔
14. スライディングピストン
15. ボウル閉用水路
16. ボウル開用水路
17. ピストン弁
18. 固形物出口

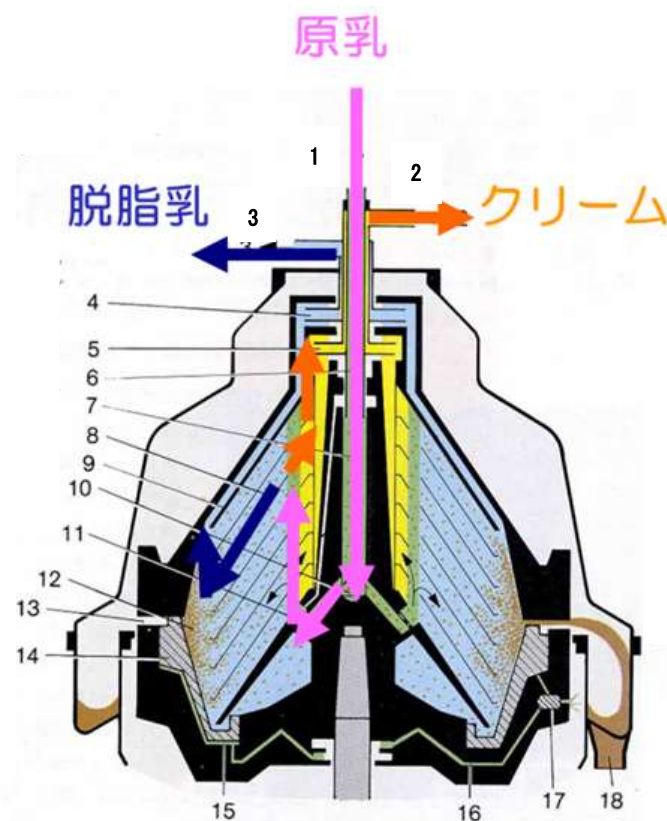


図 1-4 連続式クリーム分離機の外観(a)および構造(b)
GEA 社カタログより抜粋

(a)



(b)



図 1-5 プレート式熱交換器の外観(a)および構造(b)

(a)



(b)

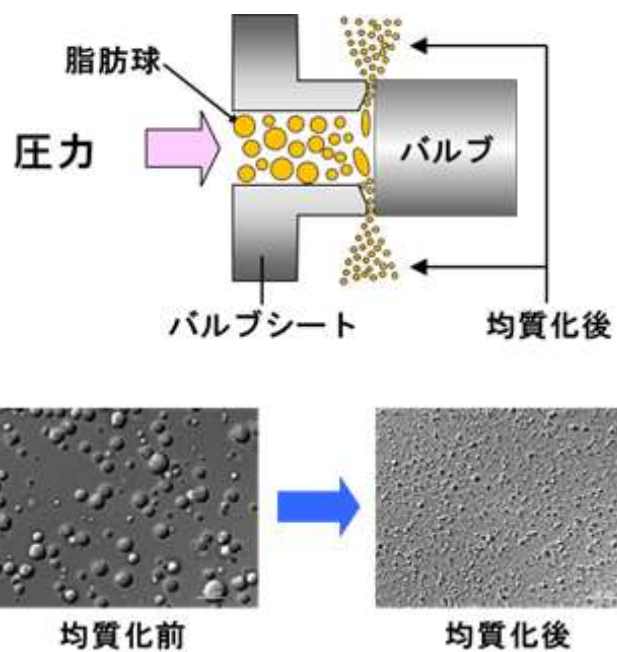


図 1-6 均質機の外観(a)およびその原理(b)

表 1-1 45%(w/w)脂肪率の乳脂肪クリーム組成

	水分	脂肪	タンパク質	炭水化物	灰分
クリーム	49.5	45.0	2.0	3.1	0.4

表中の数字は百分率（％）

七訂日本食品標準成分表 2015 年版より

(a)



良好



オイルオフ

(b)

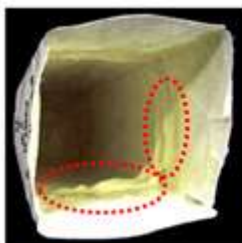


フェザリングの有無



オイルオフの有無

(c)



保存時の脂肪浮上



もどり



正常



しまり

ホイップ後の保形性の良否

図 1-7 調理用クリーム(a)、コーヒークリーム(b)およびホイップ用クリーム(c)で求められる特性

(a)



(b)



(c)



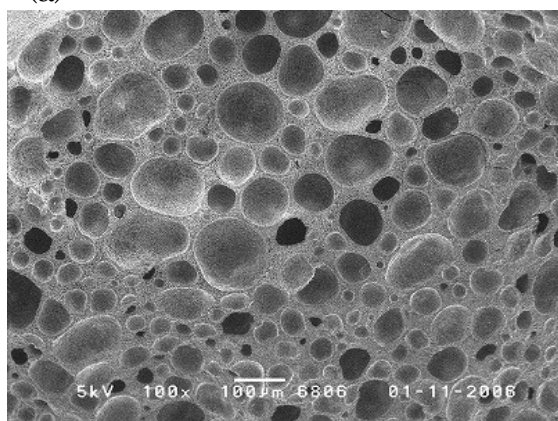
(d)



図 1-8 各種ホイップ方法

手作業のホイッパーといった小容量処理法 (a)、1 kg程度までの処理量の卓上電動ミキサー (b)、数 kg処理量の床据え置き型電動ミキサー (c)、500 L/h の食品工業用の設備 (d)

(a)



(b)

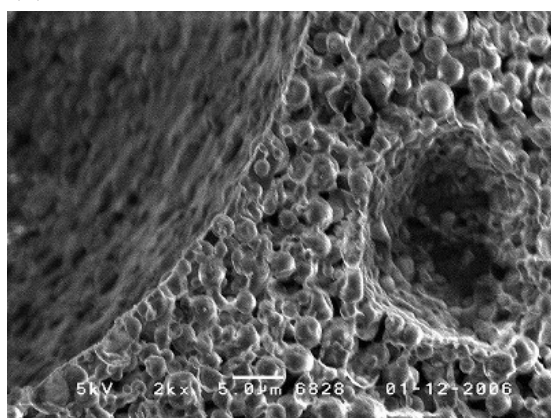


図 1-9 ホイップドクリーム中の気泡分散構造(a)と脂肪球ネットワーク構造(b)

第2章 ホイップ時の気泡導入と脂肪球凝集の生じるタイミングがホイップドクリーム構造および5℃保存時の硬さ変化に及ぼす影響

2-1 序

ホイップ操作により、分散相である気泡がクリームへ導入されると共に、連続相であるクリーム中に存在する脂肪球の凝集が進行する。それらの因子がどのような挙動をしているのか理解することは、ホイップドクリームの構造形成、硬さ発現機構の解明のために必要である。しかし、両因子はお互いに影響を及ぼし合いながら進行するため、影響を分離して評価することは困難である。そこで本研究では、ホイップ時の気泡の導入、脂肪球の凝集が生じるタイミングの違いに注目し、それらがホイップドクリームの硬さ発現および5℃保存時の硬さ変化に及ぼす影響について調査した。気泡導入と脂肪球凝集が生じるタイミングとしては、以下の3パターンが考えられる。①気泡が先に十分に導入され、後に脂肪球凝集が起きる、②気泡の導入と脂肪球凝集が同時進行する、③脂肪球凝集が十分に生じ、後に気泡が導入される。しかし、脂肪球凝集が先に生じると、クリーム粘度が増すため気泡導入が不十分となり、高品質なホイップドクリームが得られないことが経験的に知られている。そこで、①と②のケースに関してその影響の解析を行うことにした。

また、ホイップドクリームはホイップ後、経時的に硬さが低下していく。その原因としてはホイップドクリームからの液体成分の流下、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 (Walstra et al. 2006)。一方、気泡の周りには脂肪球が吸着しており (Noda and Shiinoki 1986、Goff 1997)、それらの脂肪球が気泡表面の安定化し気泡間でネットワークを形成していると報告されており (Goff 1997)、ホイップドクリームの硬さを発現する役割を果たしている。しかし、気泡、脂肪球凝集状態の変化がホイップドクリームの保存時の硬さ変化に及ぼす影響に関して解析した報告はほとんどない。

本章では、気泡導入と脂肪球凝集の進行タイミングを変えてホイップし、その時のクリームの気泡および脂肪球凝集各因子がホイップ時および保存時にどのような挙動を示すかについて研究した。更には、それらの因子が、ホイップドク

リーム構造および保存時のホイップドクリーム硬さ変化に及ぼす影響について考察した（井原ら 2005 年、井原ら 2007 年）。

2-2 材料と方法

2-2-1 クリームおよびホイップ

生乳由来の脂肪率 45%(w/w)の乳脂クリーム（森永乳業製）を使用した。クリームに対してショ糖を 8%(w/w)添加し、7℃に調整したものをホイップ用試料とした。ホイップ過程テストでは、上記の砂糖溶解クリーム 432 g を卓上式ミキサー（ケンミックス シェフ、Kenwood 製）でホイップした。本研究では、攪拌子の公転速度を攪拌速度とし、120、140、180、220 rpm の 4 水準でホイップした。ホイップ終点は、菊地（1992）が用いたペネトロ針入度測定で決定し、ホイップドクリームのペネトロ針入度が 20.5～22.5 mm の範囲に達した時をホイップ終点とした。この硬さはケーキのデコレーションに適した硬さの範囲内である。ペネトロ針入度の詳細は後に述べる。ホイップドクリームの 5℃保存時の硬さ変化を評価するテストでは、試料量が多く必要であったため、砂糖溶解クリーム 1080 g を、卓上式ミキサー（ケンミックス メジャー Kenwood 製）でホイップした。この場合の最大攪拌速度は 200 rpm であったため、140、180、200 rpm の 3 水準で検討を行った。

2-2-2 ホイップドクリーム硬さ

ペネトロ針入度および動的粘弾性測定で算出される貯蔵弾性率(G')を用いた。ペネトロ針入度は、重さ 12 g、先端角 40°、長さ 33 mm の円錐型コーンを装備し、クリーム表面から自重で落下させた時の 5 秒後の針入度(mm)を硬さの指標とした。装置の外観、コーンの写真および測定時の状態を図 2-1 に示す。硬いもののほど、針入度が小さくなる。本測定方法では、短時間（ホイップ後 1 分以内）にその硬さを評価することができ、時間経過による物性変化の大きなホイップドクリームの硬さ評価に一般的に用いられている手法である。動的粘弾性測定では、ARES 粘弾性測定装置（TA インストルメント製）を用い、温度 5℃、ひず

み 1%、周波数 1Hz の条件で測定した。 G' は、微小変形に対する硬さ評価に用いた。

2-2-3 連続相粘度

Noda and Shiinoki (1986) の手法を用いた。具体的には、ホイップドクリームを真空ポンプにて脱気した試料を 5℃に調温し、粘度を測定した。粘度は、コーンプレート型粘度計 (Roto Visco 1 Thermo Electro 製) を用い、せん断速度 300 s⁻¹ で測定した時の、測定開始後 25 秒から 35 秒の期間の平均値を連続相粘度とした。その時間帯での粘度の再現性が良かったためその条件を採用した。

ホイップドクリームは気泡、脂肪球凝集体、脱脂乳画分からなり、気泡を除くと脂肪球凝集体と脱脂乳画分のみ残る (図 2-2)。この粘度は、脱脂乳画分は、ホイップ操作によって粘度が変化しないと考えられる一方、脂肪球はホイップによって凝集しその粘度を変えるため、脂肪球凝集の進捗指標として用いることができるかと判断した。

2-2-4 脂肪球凝集率

小久保ら (1994) がアイスクリームの脂肪球凝集率を測定した方法をクリームに応用した。図 2-3 にその原理を示したが、具体的には、ホイップ前及びホイップ後のクリームをレーザー回折式粒度分布計 (LA-500 堀場製作所) で測定し、ホイップ前の粒度分布の 90%径 (d_{90}) および、ホイップ後に d_{90} 以上となった粒子の体積頻度 V_w を求め、以下の式を用いて脂肪球凝集率 AR(%)を計算した。

$$AR = \frac{(V_w - 10)}{90} \times 100 \quad (2-1)$$

d_{90} はおよそ 4 μm であったため、脂肪球が 4 μm 以上の凝集体を形成している割合を評価することができる。

2-2-5 オーバーラン

オーバーラン（OR）は、使用したクリーム体積に対する出来上がったホイップドクリームの体積比のことであり、以下の式で計算される。

$$OR = \frac{(V_{wd} - V_l)}{V_l} \times 100 \quad (2-2)$$

ここで、OR はオーバーラン、 V_{wd} は出来上がったホイップドクリーム体積、 V_l は使用したクリームの体積である。

しかし、実際の測定ではホイップ前後のクリームの比重を測定するため、上式を以下の式に変換して、オーバーラン計算に用いる。

$$OR = \frac{(SG_l - SG_{wd})}{SG_{wd}} \times 100 \quad (2-3)$$

ここで、 SG_{wd} は出来上がったホイップドクリーム比重、 SG_l は未ホイップのクリーム比重である。

2-2-6 ホイップドクリーム気泡観察

ホイップドクリームを液体窒素にて急速凍結し、切断面を凍結ステージ（Gatan C1002、オックスフォード・インストゥルメンツ製）を装備した走査型電子顕微鏡（SM-200、トプコム製）にて観察した。観察はステージ温度 -100°C の条件で行った。

2-2-7 平均気泡径測定

ホイップドクリーム試料を液体窒素にて凍結させ、液体窒素中にて切断した。前章と同じ走査型電子顕微鏡を用いて、その試料を観察し、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 $0.3 \sim 1.8 \text{ mm}^2$ 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、2-4 式の平均体積径を求め平均径とした。

$$D_v = (\sum(nDa^3) \div \sum n)^{1/3} \quad (2-4)$$

ここで、 D_v は平均体積気泡径(μm)、 D_a は個々の気泡径(μm)、 n は測定した気泡の個数である。

2-3 結果と考察

2-3-1 各攪拌速度でホイップした時のオーバーラン、連続相粘度変化

ホイップ操作中の気泡導入と連続相粘度の変化のタイミングを比較すると、120、140 rpm では、オーバーランが先に最大値近くまで達した後に、連続相粘度が大きく増加していた (図 2-4a,b)。すなわち、先に気泡を十分に導入し、後に脂肪球凝集を生じさせるためには、低速でホイップする必要があった。一方、気泡導入と連続相粘度の増加タイミングを近づけるためには、高速でホイップする必要があった (図 2-4c,d)。これは、脂肪球凝集が速く進むためであるが、せん断速度が高くなると、脂肪球凝集が促進されると報告されており (Fredrick et al. 2010)、その結果と合致する。以上の結果から、攪拌速度により連続相粘度の増加すなわち脂肪球凝集進行と気泡導入のタイミングを変えることができることが判明した。

2-3-2 気泡導入、脂肪球凝集進行のタイミングが脂肪球の凝集状態に及ぼす影響

脂肪球凝集率は、細かな脂肪球凝集から大きな脂肪球凝集までを「凝集体」と評価する方法である。一方、連続相粘度は、粘度増加に寄与するような、大きな脂肪球凝集体が存在すると粘度が高まる。この二つの脂肪球凝集指標の変化を比較すると、脂肪球凝集体の性質をより詳細に評価できるものと考えた。そこで、ホイップ過程でのクリームの脂肪球凝集率と連続相粘度の変化を比較してみた

ところ、脂肪球凝集より気泡が先に導入される条件（気泡先導入条件：120、140 rpm）では、脂肪球凝集率が先に高くなり、その後に連続相粘度が高くなった（図 2-5a,b）。一方、気泡導入と脂肪球凝集とが同時に進行する条件（同時進行条件：180、220 rpm）では、脂肪球凝集率と連続相粘度が同時に増加していた（図 2-5c,d）。ここで、連続相粘度と脂肪球凝集率が意味する現象を考えてみると、連続相粘度は脂肪球凝集体を主とした粘度である一方、脂肪球凝集率は脂肪球中で d_{90} （おおよそ 4 μm ）より大きく凝集している脂肪球の割合を示している。連続相粘度が低いまま脂肪球凝集率が高くなった場合は、粘度の増加効果が僅かな「小さな凝集体」が多く発生し、脂肪球凝集率が低いまま連続相粘度が高い場合は、未凝集の脂肪球が多いながら、粘度を増加させるほどの「大きな凝集体」が形成されていると考えられる。そのことから、気泡先導入条件では、細かな凝集体が先に生成し、それが脂肪球ネットワークに成長していると考えられる。同時進行条件では、ホイップ終点までの時間が短い。これは、大きな脂肪球ネットワークが短時間で出来ている事を示している。短時間での凝集体形成では、全体のネットワーク形成に寄与しない独立した凝集体も多く発生するものと思われる。

2-3-3 気泡導入、脂肪球凝集進行のタイミングがホイップドクリーム構造および硬さに及ぼす影響

気泡導入、脂肪球凝集進行のタイミングが大きく異なる条件でのホイップドクリームの構造を走査型電子顕微鏡で観察したところ、気泡先導入条件の試料では、気泡は中程度の大きさとなり比較的均一な気泡径分布となった（図 2-6a,b）。気泡が十分導入されてからの攪拌時間が長いため、最初は不均一であった気泡径がミキサーのせん断により徐々に揃ってきたと考えられた。一方、同時進行条件の試料は細かな気泡が多いが、大きな気泡も存在し、気泡の大きさが不均一であった（図 2-6c,d）。ホイップ終了に要する時間が短いため、気泡導入時の気泡径の不均一さがそのまま残ったものと考えられた。それらの試料を 5℃保存すると、ホイップ直後に均一なものは、保存後も比較的均一性を維持した（図 2-7a,b）。

一方、不均一だったものでは気泡径の増大が認められた（図 2-7c,d）。Young-Laplace 式より、液中の小さな気泡の内圧は高く、大きな気泡の内圧は低いことが知られている。その内圧差から小さな気泡から大きな気泡へ気体に移行することが気泡径の不均一性が高まる原因の一つであると考えられる。また、両条件での気泡表面の安定性の差が、保存後の気泡の大きさ分布の差となった可能性も考えられる。すなわち、短時間で脂肪球凝集が生じるこの条件では、脂肪球から遊離した遊離脂肪の発生が多くなり、気泡の表面を不安定化させている可能性も考えられる。

また、気泡先導入条件の試料では、5℃保存中で硬さの変化は小さかった一方、同時進行条件の試料では大きく低下した（図 2-8）。以上の結果から、気泡導入と脂肪球凝集の起こるタイミングがホイップドクリームの構造、硬さ変化に影響を及ぼしていると考えられた。これは、気泡径分布、脂肪球凝集体の差異のどちらかもしくは両方が原因であると推察された。

2-3-4 5℃保存中のホップドクリームの硬さ変化とそれに影響を及ぼす因子

ホイップ直後、5℃保存 1 日後および 2 日後の硬さを測定したところ、気泡先導入条件（140 rpm）でホイップされたものは保存時の硬さ変化が小さかった。また、同時進行条件（180、200 rpm）でホイップしたものでは硬さ変化が大きくなった（図 2-9）。そこで、図 2-9 で示した実験の結果を用いて、各条件でホイップしたものの 5℃保存時硬さ変化に影響を及ぼす因子の解析を行った。まず、ホイップ直後、保存 1 日後および 2 日後における、オーバーランとペネトロ針入度（Pe）との相関を調べた（図 2-10）。保存期間が長くなるほど Pe が大きくなるため（図 2-9）、Pe が大きいほど保存期間の長い試料となる。気泡先導入条件品（140 rpm）では、オーバーランが減少すると共に Pe が上昇し（図 2-10a）、オーバーランの減少が硬さ低下の原因の一つであることを示唆された。しかし、硬さ変化の大きかった同時進行条件品（180、200 rpm）ではオーバーランとの相関は認められなかった（図 2-10b、c）。次に、同時進行条件品（180 rpm）では、保存により気泡径が増加すると共に Pe が増加（図 2-11b）したため、気泡

が大きくなることが保存中の硬さ低下原因の一つであることが示唆された。もう一つの同時進行条件品である 200 rpm 品においても 180 rpm 品ほどではないものの相関が認められた (図 2-11c)。次に、脂肪球凝集率変化との相関を見たところ、同時進行条件品 (200 rpm) で、脂肪球凝集率の低下と共に Pe が増加した (図 2-12c) ため、脂肪球凝集率の低下についても硬さが低下する原因の一つであることが示唆された。また、データには示さなかったが気泡先導入条件品 (140 rpm) では、オーバーランほどではないが連続相粘度が低下すると Pe が高くなる傾向にあった ($R^2 = 0.678^*$) ため、脂肪球ネットワークの変化も硬さ変化に影響を及ぼしている可能性が考えられた。

2-3-5 ホイップドクリームの構造形成ならびに硬さ発現機構に関する考察

気泡導入と脂肪球凝集のタイミングがホイップドクリームの構造および硬さに及ぼす影響に関して考察した。気泡先導入条件パターンでは、脂肪球凝集速度が比較的遅く、凝集体のネットワークがホイップドクリーム全体をつなげるように成長する。更には、長いホイップ終了時間により、気泡径が比較的均一となり、気泡が安定化する。この、脂肪球ネットワークと安定な気泡がホイップドクリーム全体の構造を安定化させ、保存時の硬さ変化が少なくなる (図 2-13a の上図)。一方、同時進行条件パターンでは、脂肪球の急速な凝集が生じ、細かな、すなわち全体のネットワーク構造に寄与しない凝集体が多く形成していると推察された (図 2-13b の上図の球状の凝集体)。また、気泡径分布のばらつき又は気泡表面の安定性の低下が、保存時の気泡の合一、巨大化を引き起こす (図 2-13b の下図)。それらが、保存時のホイップドクリーム硬さを大きく変化させている可能性が考えられた。

2-3-6 5℃保存時の硬さ変化の機構に関する考察

5℃保存時の結果から、気泡先導入条件パターン (140 rpm) では、気泡がホイップドクリームの系外に排出され、保存中の硬さが低下すると考えられた。ここでは、脂肪球ネットワークの崩壊が気泡排出を促進している可能性が考えられ

た（図 2-13a 下図）。しかし、この条件では、保存時の硬さ低下は小さいため、その機構による硬さ低下はあまり大きくないと思われた。一方、同時進行条件（200 rpm）では、脂肪球凝集率の低下と気泡径の増大とは相関が認められた。一般的に、気泡表面には脂肪球が集まっており（Noda and Shiinoki 1986、Goff 1997）、脂肪球およびその凝集体が気泡の表面張力を下げつつ表面の力学的強度を高めていると報告されている（Dickinson and Stainsby 1982、Anderson and Brooker 1988、Goff 1997）。逆に言うと、気泡径の増大により気泡表面の脂肪球凝集体が破壊され、更には連続相のネットワークが破壊された可能性が考えられた（図 2-13b）。同時進行条件品である 180 rpm 品では、気泡径が硬さ低下に影響を及ぼしている結果となったが、気泡径とオーバーランにも相関が見られたことから、気泡先導入条件（140 rpm）と同時進行条件（200 rpm）の中間の性質を示していると考えられた。

2-4 結論

気泡導入と脂肪球凝集進行のタイミングが異なるホイップ条件が、ホイップドクリーム of 構造並びに硬さに及ぼす影響の検討を行い、以下の知見を得た。

（1）ホイップ過程での気泡導入と脂肪球凝集のタイミングの影響

攪拌速度を変えることにより、気泡導入と脂肪球凝集が進行するタイミングを変えたホイップ条件を得ることができた。このタイミングの違いにより、ホイップドクリームの気泡分散状態および脂肪球凝集の状態が変わった。更には、ホイップドクリームの保存時の硬さ変化も、異なる結果が得られ、このタイミングの違いが、ホイップドクリーム物性に大きな影響を及ぼすことが判明した。

（2）気泡分散状態および 5℃保存時の硬さ変化に影響を及ぼす因子の考察

気泡導入が先に生じる場合、気泡径が比較的揃い、脂肪球凝集も徐々に進行する現象が見られた。気泡の安定化、脂肪球ネットワークの効率的な形成を通じてホイップドクリームの安定な構造形成を進めていると考えられ、それは、保存時の硬さ変化に影響を及ぼしていると考えられた。一方、

気泡導入と脂肪球凝集とが同時に進行する場合は、気泡径の不揃い、短時間での脂肪球凝集が生じるため、気泡の不安定化、全体のネットワークに参加しない脂肪球凝集体の存在を通じて不安定なホイップドクリーム構造を形成すると考えられた。また、この不安定な構造体が、保存時の硬さ変化に影響を及ぼしているものと考えられた。

(3) 5℃保存中のホイップドクリーム硬さ変化とそれに影響を及ぼす因子

脂肪球凝集進行より気泡が先に導入される 140 rpm 品では、硬さ変化が小さいものの、硬さ変化はオーバーランの低下によって引き起こされているものと考えられた。脂肪球凝集と気泡導入が同じタイミングである 180 rpm、200 rpm 品では、保存時の硬さ変化が大きく、その変化は、180 rpm 品では、気泡径の増大が、200 rpm 品では、脂肪球凝集体量を示している脂肪球凝集率の低下によって引き起こされていると考えられた。

(4) ホイップドクリーム硬さ変化の機構に関する予想

脂肪球凝集進行より気泡が先に導入される条件では、脂肪球ネットワークの部分的な崩壊により気泡の系外への排出が促進され、気泡量の低下を直接的な原因として、硬さが低下する。しかし、この条件では硬さ変化は小さいため、この機構での硬さ変化は限定的なものであると推察された。一方、気泡導入と脂肪球凝集が同時に進行する条件、特に 200 rpm 品では、気泡が大きくなることをきっかけに、脂肪球凝集の量が減少し、それらの効果で保存時の硬さ変化が大きくなると推察された。

以上の知見から、気泡導入と脂肪球凝集の進行のタイミングが、脂肪球凝集、気泡の保存中の変化に影響を及ぼし、更には 5℃保存時の硬さ変化にも影響を及ぼしていることが判明した。分散相である気泡分散と、連続相中の脂肪球凝集がホイップドクリームの物性に重要な役割を果たしていることを示す結果である。これらをクリーム成分で制御できれば、ホイップ後の保存時の物性が良好なクリームを製造することができるなど、特徴的なクリーム製造に重要な示唆を与える知見である。

(a)



(b)



(c)



図 2-1 ペネトロ針入度計外観(a)、針入度表示部(b)及びコーン針入の様子(c)

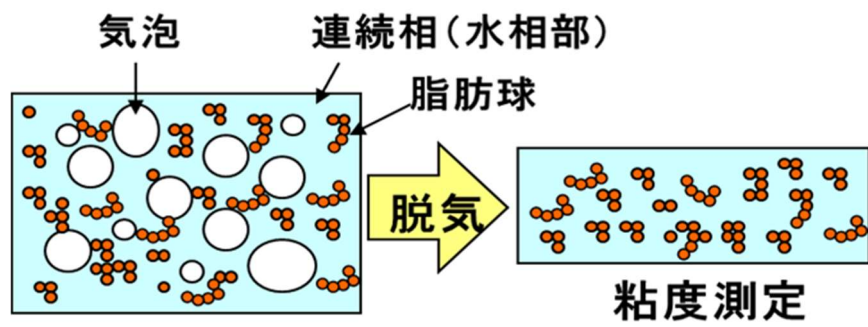
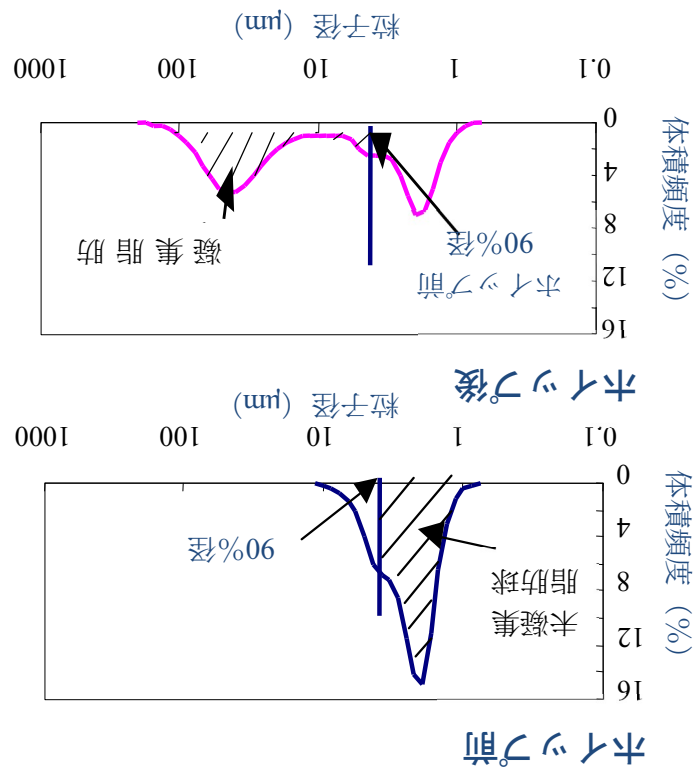
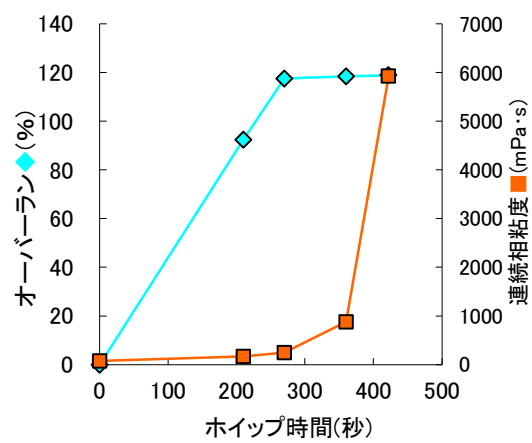


図 2-2 連続相粘度測定概念図

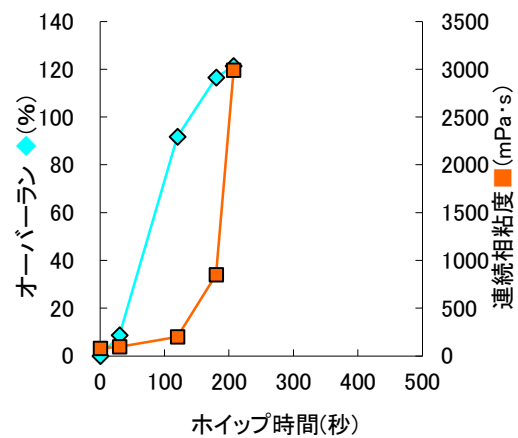
図 2-3 脂肪球凝集率測定の方法 (小久保ら 1994)



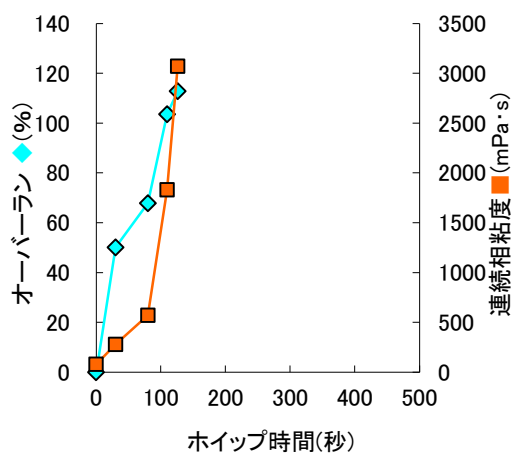
(a)



(b)



(c)



(d)

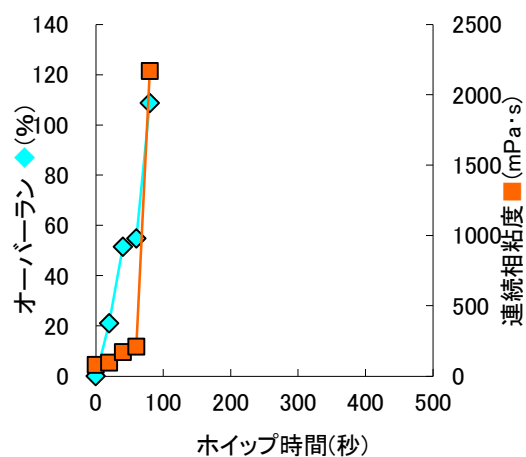


図 2-4 120 rpm(a)、140 rpm(b)、180 rpm(c)、220 rpm(d) 攪拌品のオーバーランと連続相粘度の増加タイミングの比較

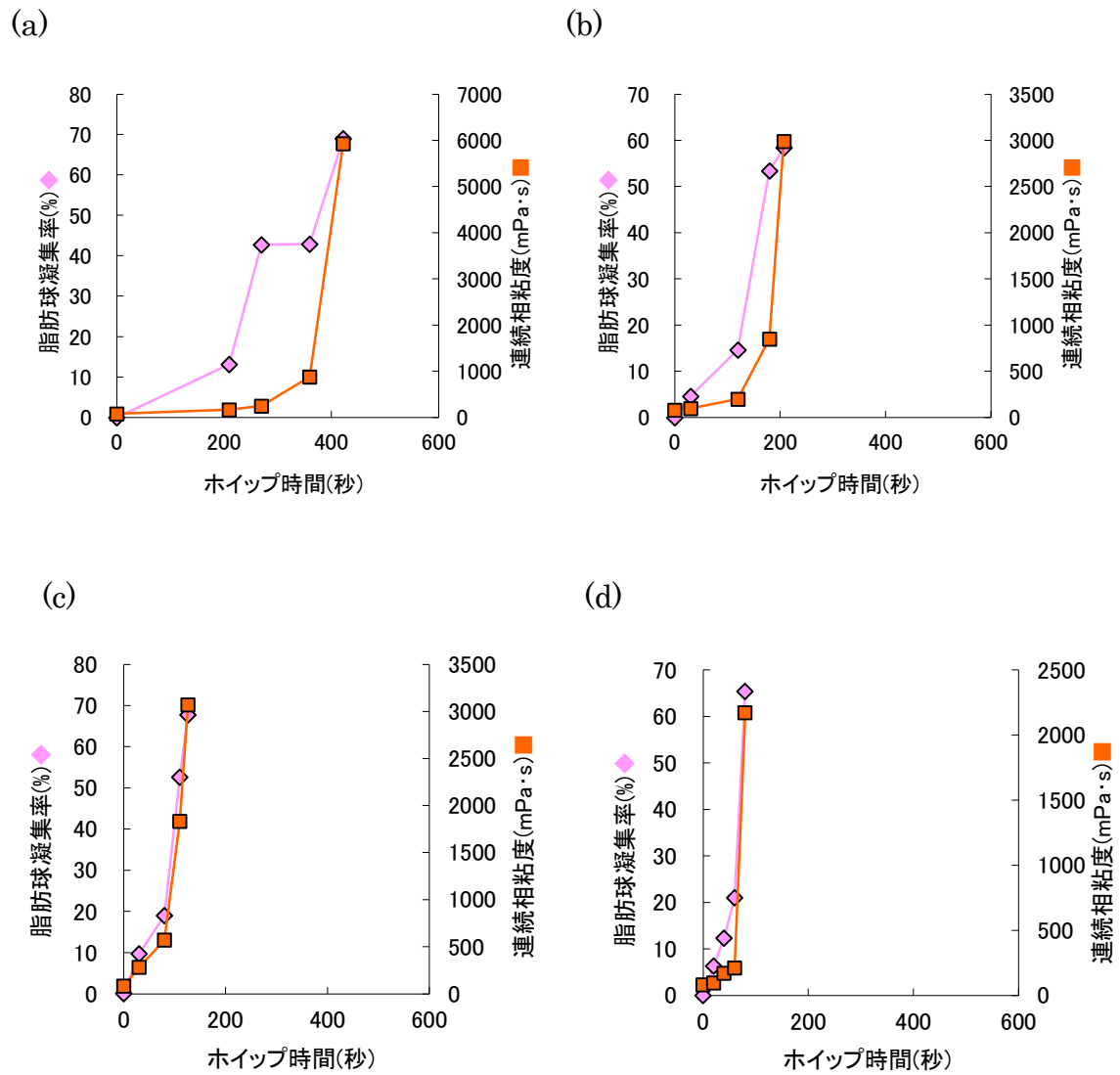
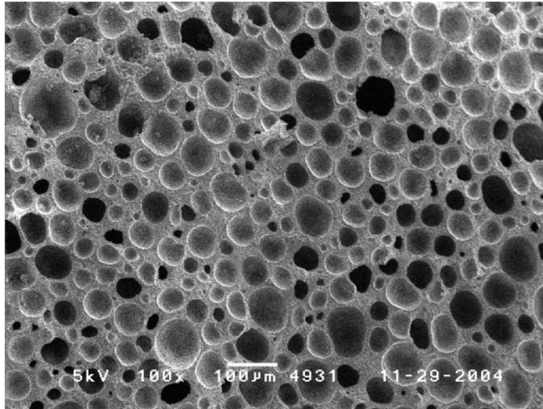
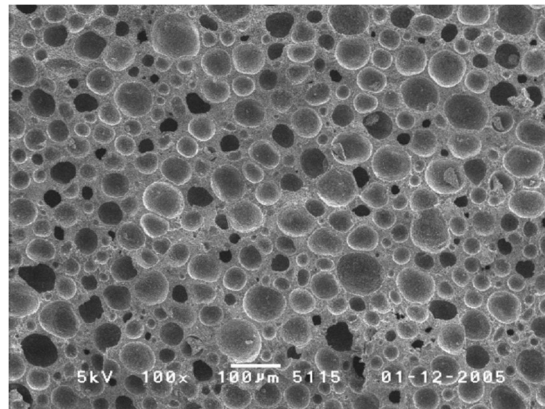


図 2-5 120 rpm(a)、140 rpm(b)、180 rpm(c)、220 rpm(d)攪拌品の脂肪球凝集率と連続相粘度の増加タイミングの比較

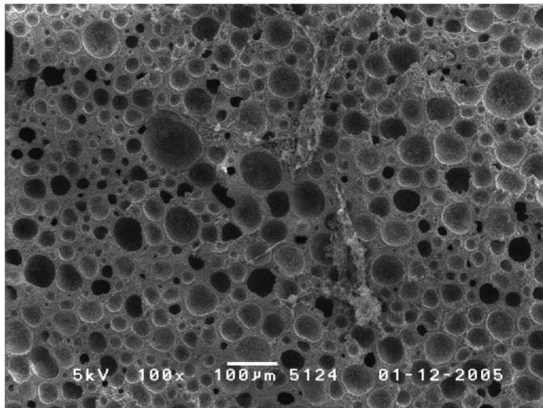
(a)



(b)



(c)



(d)

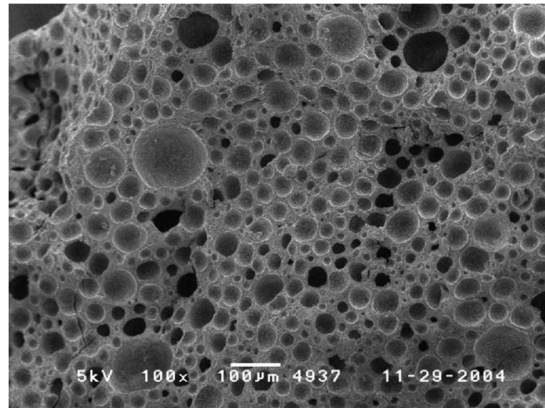


図 2-6 120 rpm(a)、140 rpm(b)、180 rpm(c)、220 rpm(d) 攪拌品中の気泡の走査型電子顕微鏡観察

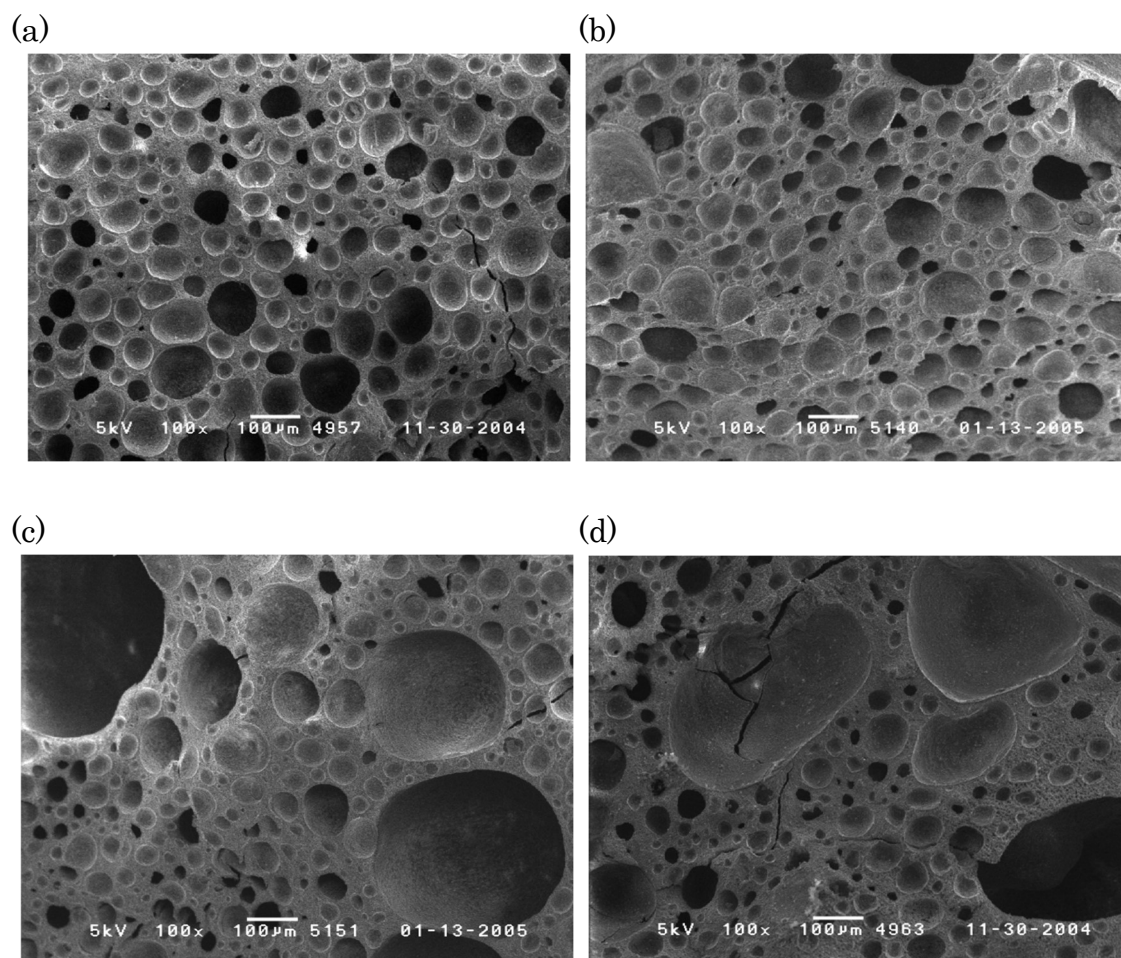


図 2-7 5°C保存後の 120 rpm(a)、140 rpm(b)、180 rpm(c)、220 rpm(d)攪拌品中の気泡の走査型電子顕微鏡観察

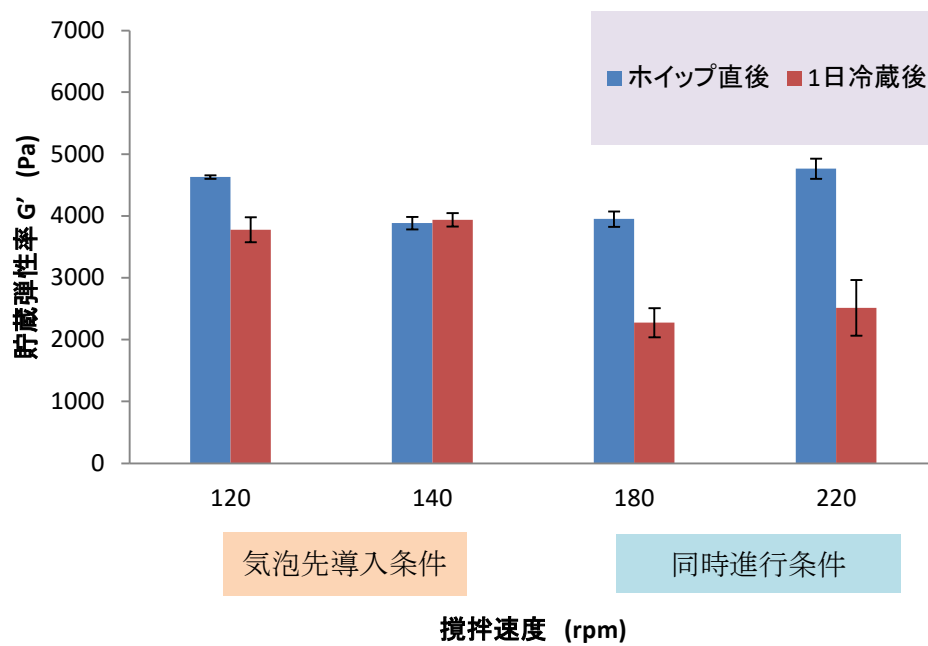
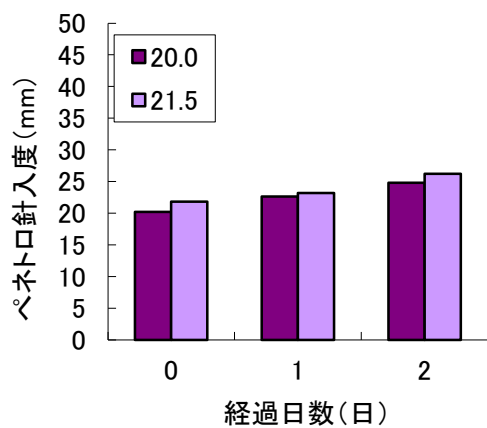
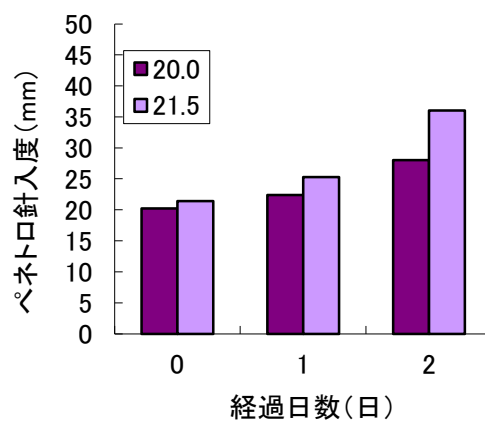


図 2-8 各条件での 5°C 保存前後のホイップドクリーム貯蔵弾性率比較
エラーバーは標準偏差を示す (n = 3)。

(a)



(b)



(c)

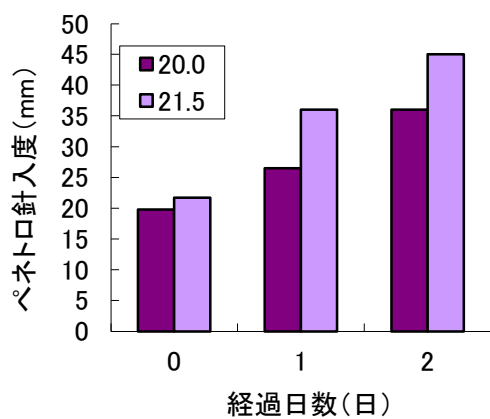
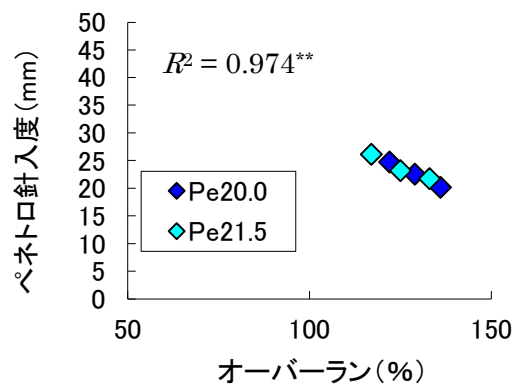
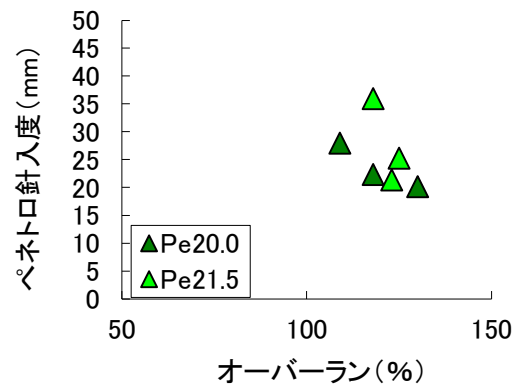


図 2-9 140 rpm(a)、180 rpm(b)、200 rpm(c)攪拌品におけるペネトロ針入度の 5℃保存中の変化
凡例はホイップ直後でのペネトロ針入度 (mm)

(a)



(b)



(c)

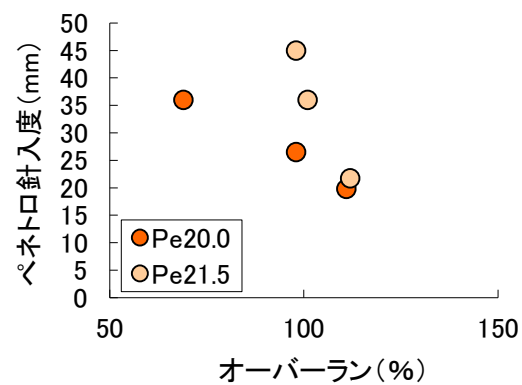


図 2-10 140 rpm(a)、180 rpm(b)、200 rpm(c)攪拌品における 5℃保存中のオーバーラン変化とペネトロ針入度変化との相関

凡例はホイップ終点でのペネトロ針入度 (mm)

図中の寄与率は硬さ違い、保存日数違いの 6 点のデータからの値

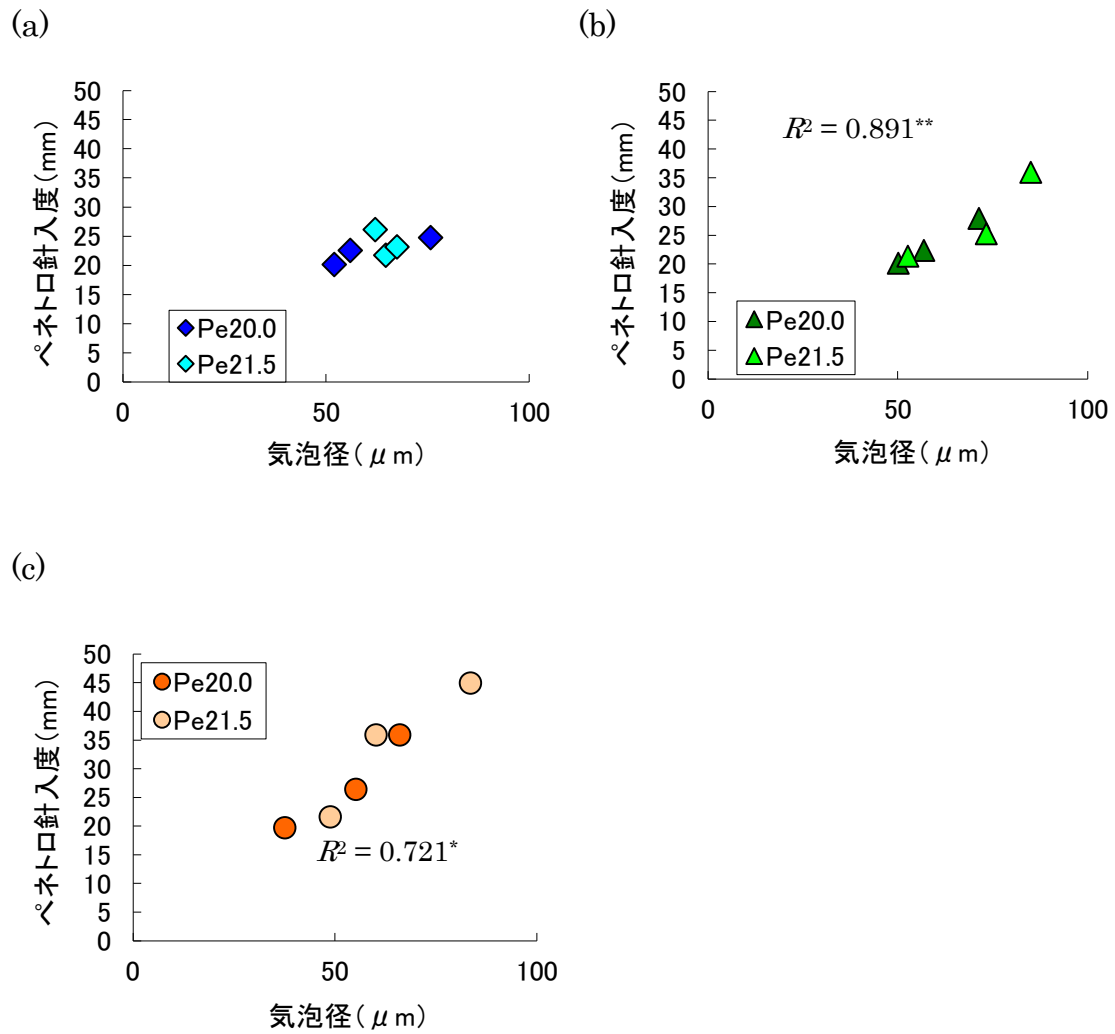
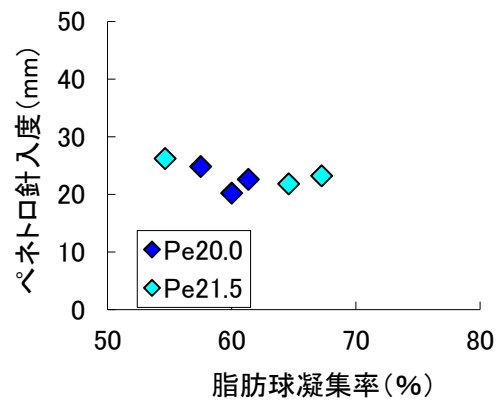
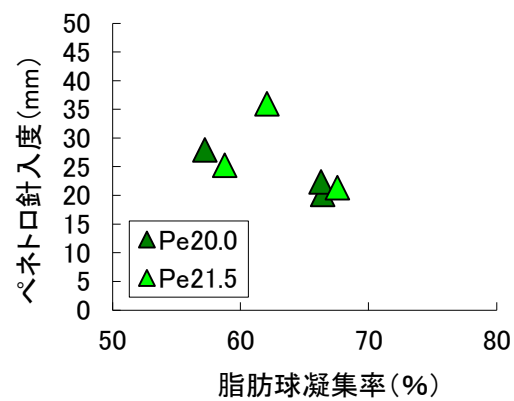


図 2-11 140 rpm(a)、180 rpm(b)、200 rpm(c)攪拌品における 5℃保存中の気泡径変化とペネトロ針入度変化との相関
 凡例はホイップ終点でのペネトロ針入度 (mm)
 図中の寄与率は 6 点のデータからの値

(a)



(b)



(c)

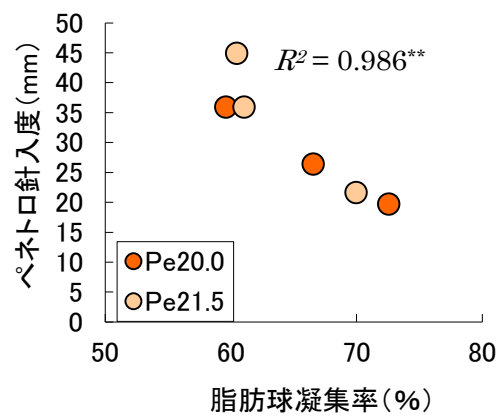


図 2-12 140 rpm(a)、180 rpm(b)、200 rpm(c)攪拌品における 5℃保存中の脂肪球凝集率変化とペネトロ針入度変化との相関
凡例はホイップ終点でのペネトロ針入度 (mm)
図中の寄与率は 6 点のデータからの値

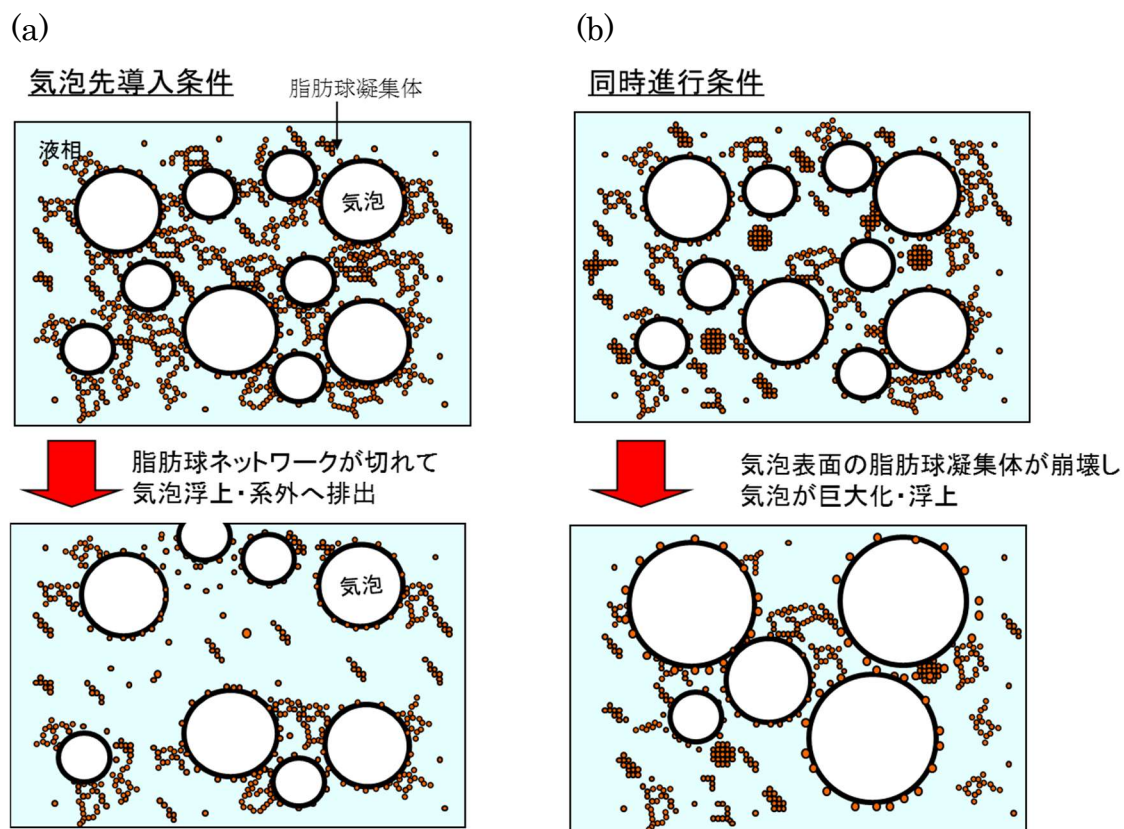


図 2-13 気泡先導入条件(a)、同時進行条件(b)でのホイップ直後の構造及び
5℃保存時の硬さ変化の機構予測

第3章 固体脂含量がホイップ物性に及ぼす影響解析

3-1 序

クリームを適切にホイップするためには、気泡の導入、脂肪球の凝集を制御する必要がある。クリーム組成、ホイップ条件を検討することでそれらを適切な状態にできることは経験的に知られているが、それらの科学的解析はあまりなされていない。前章では、その中でも脂肪球凝集のタイミングと気泡導入のタイミングの影響を解析し、気泡の大半が導入された後に脂肪球が凝集し始める条件ではホイップドクリームの5℃保存時の硬さ変化が少ないことを示し、その原因として脂肪球ネットワークの形態の違いおよび気泡の安定性の可能性を挙げた。

一方、ホイップ特性に影響を及ぼす因子として、Kamath et al. (2008) はクリーム温度に注目し、起泡性との関係について研究を行い、5℃では起泡性が高く、25℃では認めないと報告した。その原因として、脂肪球中の液体脂肪と固体脂肪の共存による脂肪球被膜の破壊を挙げており、脂肪球被膜の破壊により液体の脂肪が気泡表面に吸着されると気泡が不安定化されると考察した。更に、Drelon et al. (2006) は、ホイップドクリームの保存温度の影響について検討を行い、4℃の保存ではオーバーランが低下する一方、25℃のテンパリング処理を行うと、保存時のオーバーランおよび硬さの変化が少なかったと報告し、その原因として25℃のテンパリング処理による更なる解乳化の進行とそれによる脂肪球ネットワークの補強を挙げた。また、温度が上昇するとクリーム粘度、表面張力が低下し (Kristensen et al. 1997)、気泡導入に影響を及ぼすことも考えられる。クリームの温度変化はその他に、脂肪の結晶状態に影響を及ぼすは脂肪結晶の状態が乳化安定性に影響を及ぼすことも報告されている (van Voekel and Walstra 1981、Rousseau 2000)。また、油脂結晶が脂肪球表面に存在すると、脂肪球被膜を貫通し、それにより脂肪球が不安定になる (van Voekel and Walstra 1981)。脂肪球中の油脂結晶状態は温度により大きく変化し、更には吸着タンパク質量にも影響を与える (Sugimoto et al. 2001)。また、固体脂含量は温度に依存しており (Darling 1982)、解乳化の速度はその影響を大きく受けている。このように、油脂の結晶状態はクリーム物性の制御に非常に重要である。

本章では、クリーム分散相である脂肪球の油脂結晶量（固体脂含量）がホイップ性、ホイップドクリーム硬さ発現、硬さ変化に及ぼす影響に注目した。クリーム中の脂肪は、温度によりその固体脂含量が変化し、ホイップ性が変化することが予想されるが、ホイップ時にはクリーム温度が変化するため固体脂含量の影響の正確な評価はほとんどされていなかった。そこで、本研究では、ホイップ時に温度変化が生じない条件を用いてホイップ時の脂肪の固体脂含量を一定とし、固体脂含量のホイップ性及びホイップドクリーム物性への影響の評価を行った（Ihara et al. 2010）。

3-2 材料と方法

3-2-1 クリームおよびホイップ

使用したクリームおよびホイップ方法は、基本的に前章と同条件とし、ミキサーはケンミックス メジャーを用いた。ただし、ホイップ開始時のクリーム温度と室内温度とを同一にし、5、7.5、10、12.5、15℃の5水準でホイップした。これにより、ホイップスタートから終了までのクリームの温度がほぼ変化しなかった。また、攪拌速度を通常ホイップ検討で用いられる条件である 180 rpm とし、ペネトロ針入度が 20.5～22.5 mm に達した時をホイップ終点とした。ホイップドクリームは直ちに測定に供される部分を除いて、5℃で保存した。また、ホイップ終点に達した時間（ホイップ時間）の 85%、95%、97.5%での実験も独立に行い、ホイップ過程におけるデータとした。ただし、15℃ホイップ試料のみホイップ終点近傍での状態変化が大きく、攪拌を止める僅かのタイミングの誤差が大きくなったため、85%、90%でのホイップとした。

3-2-2 固体脂含量

固体脂含量（SFC）は、パルス NMR（Minispec mq、Bruker 製）にて測定した。解析方法として直接法を用いた。具体的には、クリームの測定値（SF）を測定してから、総脂肪量に対する固体脂含量を以下の式を用いて算出した。

$$\text{SFC} = \text{SF} \div \text{FAT} \times 100 \quad (3-1)$$

ここで、SFC は固体脂含量(%）、SF はクリーム量に対する固体脂含量の NMR による測定値(%）、FAT はクリームの脂肪率%(w/w)である。

3-2-3 ホイップドクリーム硬さ

ペネトロ針入度および貯蔵弾性率 (G') は、前章と同様に測定した。また、硬さの別の評価法として、本検討では、以下で説明する「ひずみ抵抗性」を本章では定義し、評価に用いた。具体的な測定法は、TA インストルメント製の ARES 粘弾性測定装置を用い、試料厚み 2 mm、温度 5°C の条件で、応力を 2 分間で 0 から 200 Pa まで変化させた時に、試料厚みの 10% まで試料が歪んだ時のせん断応力をひずみ抵抗性と定義した。ひずみが 1% で測定する G' と異なり、比較的変形が大きな際の硬さを評価するために用いた。

3-2-4 連続相粘度

前章と同じ方法を用いて測定した。

3-2-5 気泡径および気泡表面積

気泡の観察は、前章と同じ方法で行った。本章での気泡径は、走査型電子顕微鏡画像から画像処理ソフト (Image Pro Plus, Media Cybernetics 製) を用いて円相当径を測定し、3-2 式で計算されるザウター径 d_{32} を算出した。

$$d_{32} = \Sigma d^3 / \Sigma d^2 \quad (3-2)$$

ここで、 d は各気泡の円相当径である。

各試料 2 視野の気泡を測定し、トータル 500 から 800 個の気泡を計測した。ザウター径は母集団と同一の比表面積を持つ径であるため、その径とオーバーラン (OR) からホイップドクリーム 100 mL 当たりの気泡表面積 $A_b(\text{m}^3)$ を算出でき

る。実際には、以下の式を用いた。

ホイップドクリーム 100 mL つまり $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 当たりの気泡量 $V_b(\text{m}^3)$ は

$$V_b = 10^{-4} \times \frac{\text{OR}}{(100+\text{OR})} \quad (3-3)$$

$d_{32}(\mu\text{m})$ の径を持つ気泡の比表面積 ASP (m^2/m^3)は

$$\begin{aligned} \text{ASP} &= \{4 \times \pi \times (d_{32}/2 \times 10^{-6})^2\} \div \{4/3 \times \pi \times (d_{32}/2 \times 10^{-6})^3\} \\ &= \frac{6 \times 10^6}{d_{32}} \end{aligned} \quad (3-4)$$

である。

よって、ホイップドクリーム 100 mL 当たりの気泡表面積 $A_b(\text{m}^2)$ は

$$\begin{aligned} A_b &= V_b \times \text{ASP} \\ &= 600 \times \frac{\text{OR}}{(100+\text{OR}) \times d_{32}} \end{aligned} \quad (3-5)$$

となる。

3-2-6 動的表面張力

動的表面張力計（Bubble Pressure Tensionmeter BP2, Kruss 製）を用い、上記 45%(w/w)クリームを RO 膜処理水で希釈したものを測定した。動的表面張力は泡寿命 10 ミリ秒から 10 秒までの範囲での測定を実施し、10 ミリ秒と 1 秒との表面張力の差分を求めた。式(3-6)で示される Gibbs の吸着等温式より、表面張力が低下すると気泡表面への物質の吸着量が増えることが示されている。

$$\Gamma = -\frac{c}{RT} \frac{d\gamma}{d \ln c} \quad (3-6)$$

ここで、 F は物質吸着量、 R は気体定数、 T は絶対温度、 γ は表面張力、 α は溶液中の物質の濃度、 C は定数である。

Gibbs の吸着等温式から予想される通り、気泡寿命が長いほど表面張力が低下したため、10 ミリ秒と 1 秒との表面張力の差分は物質の吸着速度の指標となると考えた。

3-3 結果と考察

3-3-1 固体脂含量がホイップドクリーム物性に及ぼす影響

各温度におけるクリームの SFC を測定した (図 3-1)。ホイップ用のクリームは通常 3~7℃の範囲で保存される。5℃付近では、温度による SFC 変化が少なく、10℃を超えると SFC 変化率が大きくなることから、通常の保存温度は SFC の変化が小さいことを意識したものであることが考えられた。また、各 SFC のクリームをホイップすると、SFC が高いものほどホイップ時間が増加し、ホイップ終点におけるオーバーラン (終点オーバーラン) は高くなった (図 3-2a,b)。また、ホイップ時でのオーバーラン変化は SFC に関係なく攪拌時間に依存する (図 3-3a)。しかし、終点オーバーランは SFC と高相関 ($R^2 = 0.958^{**}$) を示した。ホイップ時間と終点オーバーランとも高相関 ($R^2 = 0.910^{**}$) を示したため、直接的には、ホイップ時間の長さがオーバーランを決めている可能性も考えられた。連続相粘度の経時変化は、SFC が 49~57%の範囲では、攪拌時間のみに依存して連続相粘度が増加しており (図 3-3b)。ホイップ時の脂肪球のネットワーク形成速度は SFC に依存していないことを示すものである。SFC45%では、脂肪球凝集性が大幅に変化したため、49%以上のものと異なる挙動を示していると思われた。更に、ホイップ終点での連続相粘度 (終点連続相粘度) も SFC に依存していなかった (図 3-2c)。

終点オーバーランと SFC に相関が認められたことより、別の気泡の特性値である気泡径について、温度、SFC との関連性を解析した。気泡径は、10~12.5℃で極小値を示し (図 3-4a)、SFC では 50%近傍で極小値を示した (図 3-4b)。

ホイップドクリームの気泡はまずはタンパク質に覆われ (Wilde et al. 2007)、その後、脂肪球に覆われ安定化される (Dickinson and Stainsby 1982, Anderson and Brooker 1988, Goff 1997)。そこで、脂肪球の気液界面への吸着速度を評価するため、各温度での動的表面張力を測定した。高脂肪であるクリームの動的表面張力を測定すると、測定箇所に凝集したクリームが付着し測定が困難であったため、RO 膜処理水にて脂肪率 5%(w/w)に希釈したクリーム試料を測定した。連続相のタンパク質の温度影響も評価するため、脱脂乳も測定した。その結果、脂肪球を含む試料 (5%脂肪試料) は 12.5℃付近で、動的表面張力の 10 ミリ秒値と 1 秒値との差分が極大をとった一方、脱脂乳では顕著な極大値は認められなかった (図 3-5)。Gibbs の等温吸着式より、この差分値は気泡への粒子の吸着速度の指標と考えられるため、脂肪球は 12.5℃付近において、気泡への吸着速度が極大となると考えられた。脂肪球の吸着が気泡表面を安定化した結果、12.5℃で気泡径が極小となったと推察された。5 から 12.5℃までは温度が上昇するごとにクリーム粘度が低下するため、脂肪球の拡散速度が速くなり、それが脂肪球の気泡への吸着速度を上げている可能性があげられた。15℃すなわち、SFC45%で脂肪球の気泡表面への吸着速度が低下しているが、液体脂が増加して大きな脂肪球凝集体が発生し、脂肪球の気泡への移動速度が低下したためである可能性が考えられた。

3-3-2 ホイップ時の硬さ発現に影響を及ぼす因子の考察

硬さは様々な測定方法があるが、比較的大きな変形 (ひずみ 10%) を付与した時の硬さであるひずみ抵抗性と微小変形時 (ひずみ 1%) の硬さである貯蔵弾性率 (G') の 2 種類を指標とした。まず、連続相粘度とひずみ抵抗性の間には相関が認められた (図 3-6a)。この相関は SFC に依存しなかった。このことより、ひずみ抵抗性は、脂肪球凝集ネットワークの形成度合いに依存していることが推察された。Noda and Shiinoki (1986) も 連続相粘度の上昇と共にホイップドクリームの弾性率の上昇が起こることを報告しており、その結果と一致する。次に、 G' は気泡表面積がホイップ過程で増加すると共に上昇した (図 3-

6b)。Jakubczyk et al. (2006) はオーバーランが最大に達するとそれ以上ホイップしても貯蔵弾性率がほぼ一定となり、気泡量がホイップドクリーム構造体形成に寄与していると結論しており、この結果を支持するものである。15℃では異なる挙動をしているが、その温度では主として脂肪球凝集が硬さ発現に影響しているためと考えられた。

このように、変形が大きくなると脂肪球凝集、変形が小さいと気泡表面積が各々ホイップドクリームの硬さ発現に影響を及ぼしていることが推察された。そのモデルを図 3-7 に示した。すなわち、ホイップドクリームの体積の半分以上を占める気泡が、脂肪球のネットワークによって固定化されるパターン（図 3-7a）と気泡の表面同士の引っ掛かりによって、気泡が固定されるパターン（図 3-7b）の少なくとも二つの機構によって、ホイップドクリームの硬さが発現しているものと思われた。

3-4 結論

クリーム連続相中の脂肪球の固体脂含量（SFC）の影響を解析するため、5 水準のクリーム温度での実験を行い、以下の結論を得た。

（1）SFC がホイップ特性、ホイップドクリーム物性に及ぼす影響

ホイップ時間、終点オーバーランが SFC に依存していた一方、終点気泡径、終点連続相粘度は SFC とは無相関であった。ホイップ時の連続相粘度は、ホイップ時間に依存していた。また、気泡径は、SFC が 49～54% の範囲で極小を示したが、これは気泡表面への脂肪球の吸着速度の違いが原因の一つであると考えられた。

（2）ホイップ時の硬さ変化に影響を及ぼす因子の解析

比較的大きく変形させた時の硬さであるひずみ抵抗性のホイップ時での変化は連続相粘度に、比較的微小変形時の硬さである貯蔵弾性率変化は気泡表面積と相関がみられた。このことより、ホイップドクリームには、

異なる硬さ発現機構が存在しているものと考えられた。

以上の結果から、固体脂含量に依存するホイップ特性因子、ホイップドクリーム物性と依存しない因子を分離することができた。**SFC** に依存する因子は、油脂、油脂乳化剤の配合により制御することができる。それ以外の因子は、脂肪球凝集因子、気泡導入因子であるため、連続相側の乳化剤、脂肪率などで制御することが可能なものであり、新規な特性を持ったクリーム製造にとって重要な知見となる。

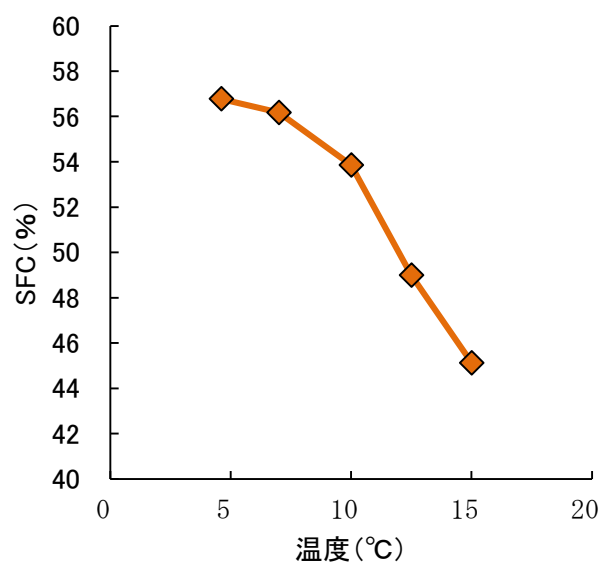


図 3-1 各温度でのクリーム中油脂の固体脂含量 (SFC)

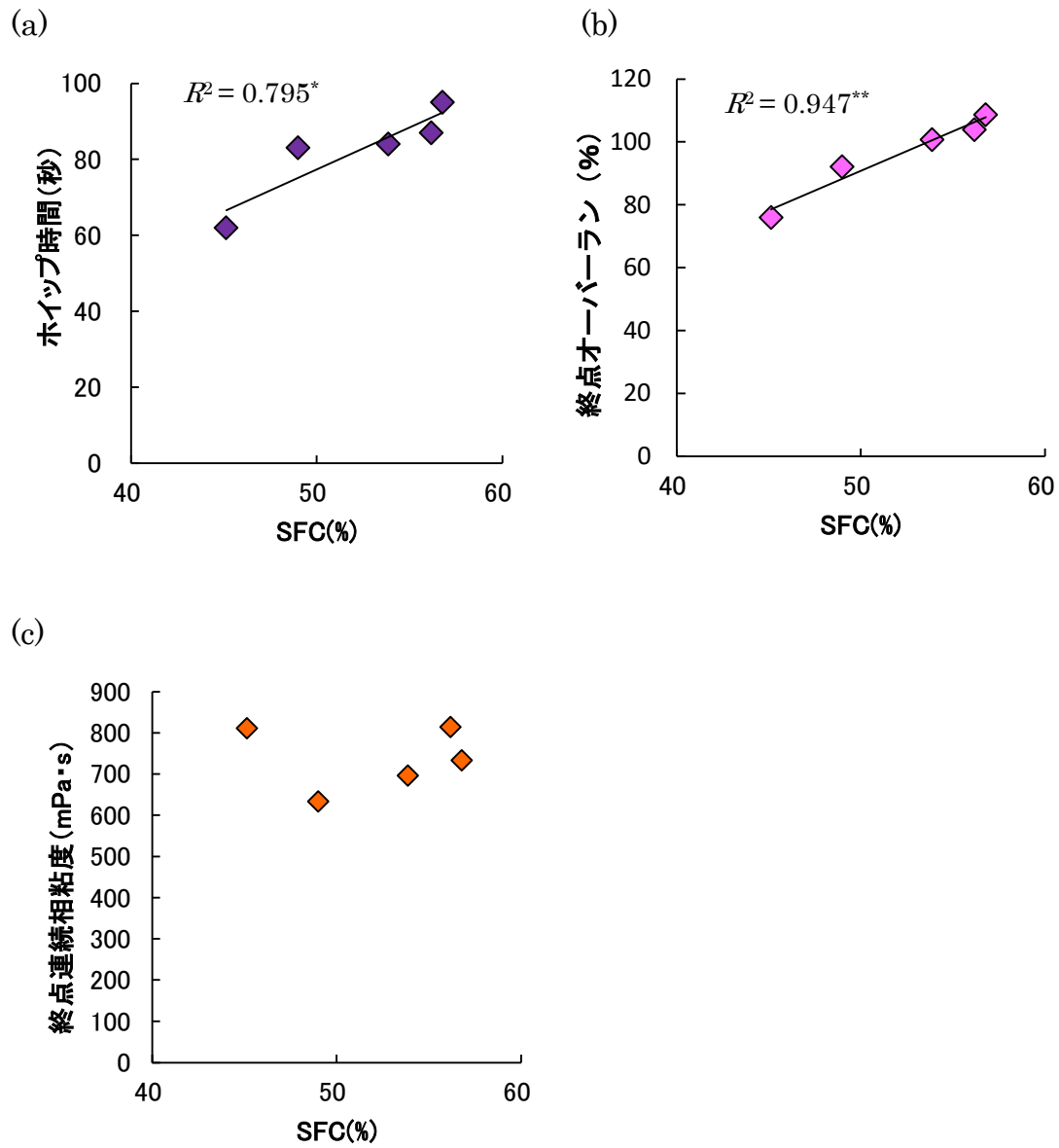
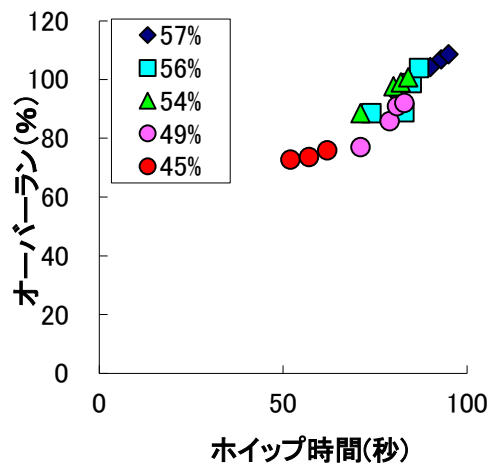


図 3-2 SFC とホイップ時間(a)、終点オーバーラン(b)、終点連続相粘度(c)との相関

(a)



(b)

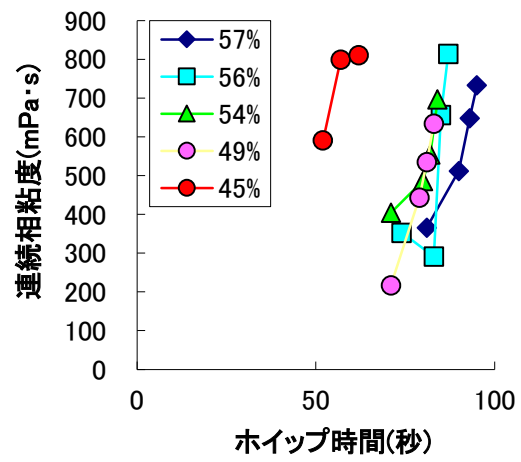


図 3-3 ホイップ時のオーバーラン(a)、連続相粘度(b)の経時変化

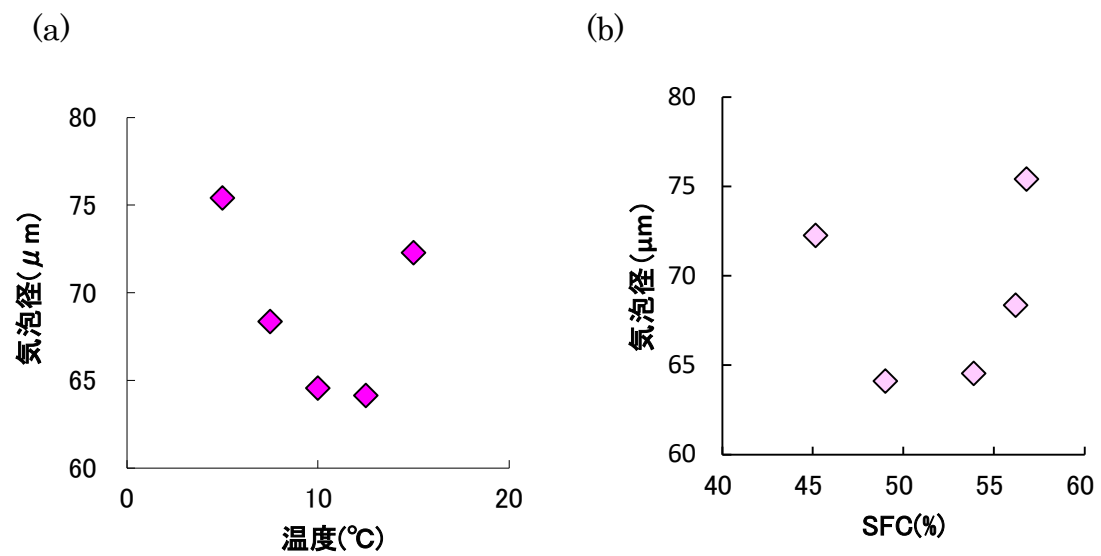


図 3-4 クリーム温度(a)および固体脂含量(b)がホイップドクリーム平均気泡径に及ぼす影響

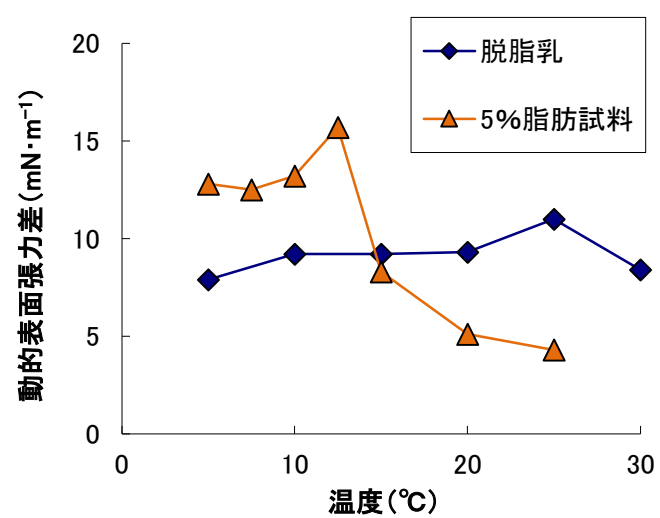


図 3-5 気泡表面の動的表面張力差の温度依存性(10 ms での値－1 s での値)

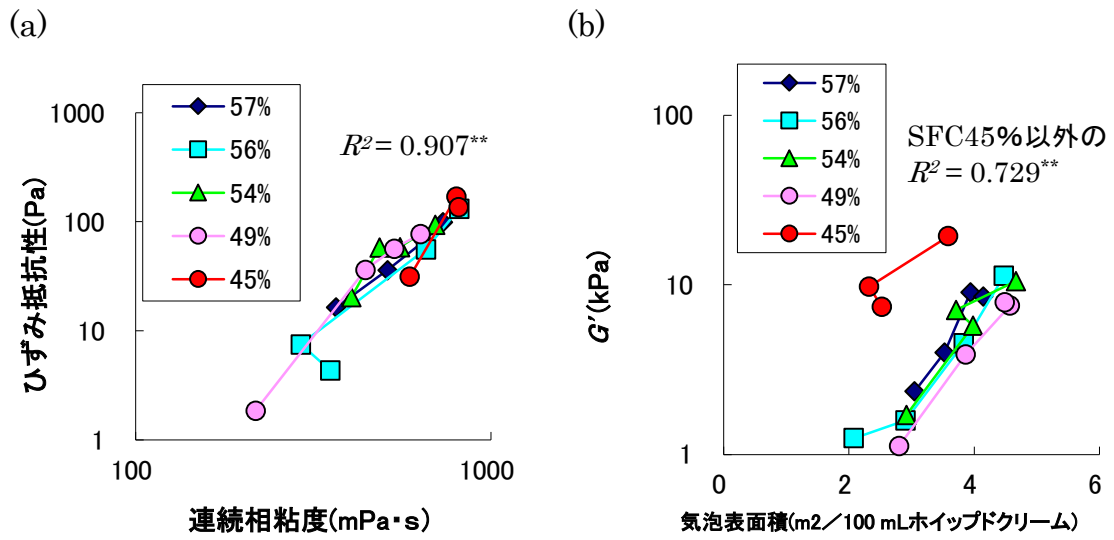


図 3-6 ホイップ過程でのひずみ抵抗性(a)および貯蔵弾性率(b)変化に影響を及ぼす因子

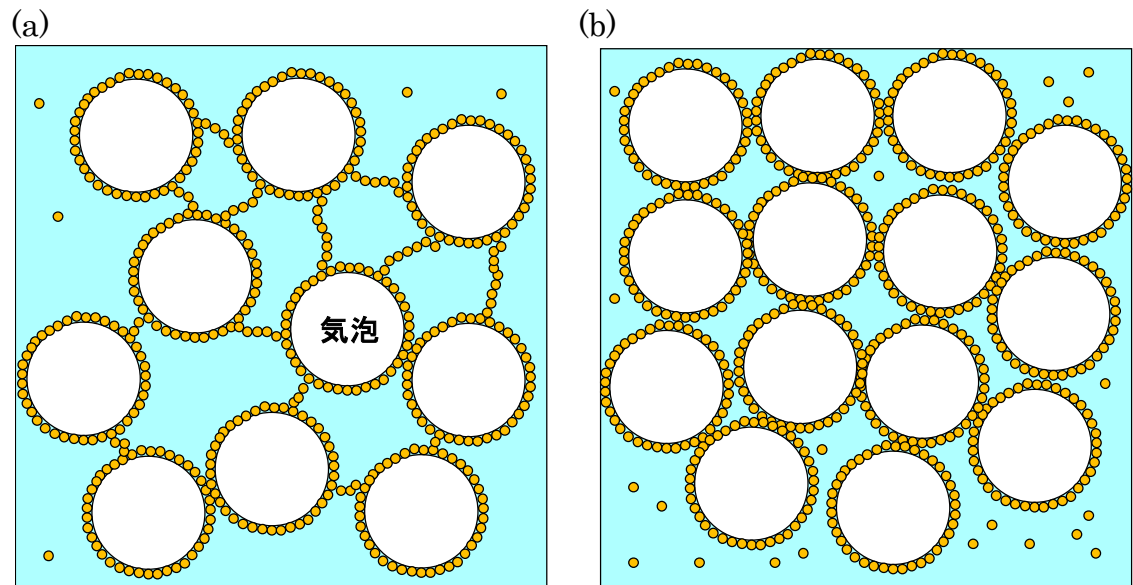


図 3-7 気泡間の脂肪球ネットワークの形成(a)、気泡同士の接触によるネットワークの形成(b)による硬さ発現に関する考察

第4章 生産性及び物性を両立させたホイップドクリーム製造法の開発及びその機構の推定

4-1 序

第2章での検討により、攪拌速度の条件設定がホイップドクリームの5℃保存時の硬さ変化に影響を及ぼすことが明らかとなったが、ホイップ時間を短くし生産性を上げようとする5℃保存時に硬さが低下し、逆に5℃保存時の硬さの維持を目指すホイップ時間が遅延し生産性が低下する結果となった。実際の製造においては、それらを両立させることが重要であり、その解決法が求められていた。ホイップ操作時には、気泡が液状のクリームに導入される現象と、クリーム中の脂肪球が凝集する現象の両方が起きる。気泡が十分にクリームに導入されてから脂肪球が本格的に凝集し始めると、5℃保存時の硬さ変化が小さいことが判明したため、気泡導入、脂肪球凝集の進行の各タイミングで、速度を変えることで高速度と低速度の両方の特性を持ったホイップドクリーム製造ができるのではないかと考え検討した。また、その際に、気泡、脂肪球凝集がその物性に及ぼす影響についても解析を試みた (Ihara et al. 2019)。

4-2 材料と方法

4-2-1 クリームおよびホイップ

生乳由来の脂肪率45%(w/w)の乳脂クリーム(森永乳業製)を使用した。クリーム使用量の8(w/w)%のショ糖をクリームに溶解し、7℃に調整した試料をホイップした。クリーム400 g使用したホイップには、卓上式ミキサー(シェフクラシック、Delonghi 製)を用い、スケールアップ検討では、クリーム800 g使用ホイップでは、卓上式ミキサー(ケンミックス メジャープレミア、Kenwood 製)、クリーム7 kg使用ホイップでは、60 コートミキサー(愛工舎製)を用いた。ホイップ終点は第2章と同様にペネトロ針入度測定で決定し、ホイップドクリームのペネトロ針入度が20.5~22.5 mmに達した時をホイップ終点とした。

4-2-2 ホイップドクリーム硬さ

第2章と同様にペネトロ針入度を用いた。

4-2-3 連続相粘度

第2章と同様の手法を用いた。

4-2-4 オーバーラン

オーバーラン (OR) は、使用したクリーム体積に対する出来上がったホイップドクリームの体積比のことであり、第2章の(2-3)式で計算される。

4-2-5 ホイップドクリーム気泡観察

ホイップドクリームを室温でスライドグラス上に置き、その周りを 0.15 mm 厚みのカバーグラスで囲んだ後、試料上部にカバーグラスを載せた。試料周囲のカバーグラスにより、試料が 0.15 mm 以下に圧縮されるのを防いだ。ホイップドクリームの気泡はおおよそ 10 から 100 μm (Labbafi et al. 2007)であるため、0.15 mm のスペーサーの存在により、上部カバーグラスの圧力によって気泡が変形されないことが期待された。その試料を位相差顕微鏡 (BX53、オリンパス製) にて観察した。なお、本観察法の妥当性を検証するため、X 線 CT (BL19B2 ビームライン、SPring-8) を用いても観察した。X 線 CT 観察では、Sato et al. (2016) の方法に従い、試料を以下のように調製した。ホイップドクリームをストロー (直径: 約 7 mm) 内部に採取し、それを液体窒素にて凍結・固定した。その試料を大気圧下に置き、液体窒素の噴霧により試料温度を保持した。以上の処理により、凍結乾燥および、カバーグラスなどによる圧縮が試料にかからない方法にて観察することが可能となった。しかし、X 線 CT は常時使用できる手法ではなかったため、光学顕微鏡観察結果の妥当性検証として用いた。

4-2-6 ホイップドクリーム平均気泡径の計算

光学顕微鏡画像の気泡は完全な円でない場合も多かったため、気泡の代表径と

して円相当径を求めることとした。画像処理ソフト Impage Pro Plus 7.0J (Media Cybernetics 製) を用い、気泡断面積を求めてから円相当径を算出した。また、第 4 章の結果からホイップドクリームの構造形成及び硬さ発現には気泡表面積が重要であると考えたため、第 3 章と同様に平均径としてザウター径 (d_{32}) を採用した。

4-3 結果と考察

4-3-1 各攪拌速度でホイップした際のホイップ時間、5℃保存時の硬さ変化の再現性

第 2 章とはミキサーのメーカーが変わったため、再度、攪拌速度 120、160、180 および 210 rpm の 4 水準でのホイップデータを取りなおし、ホイップ時間、オーバーランおよび 5℃保存時の硬さ変化 (ペネトロ硬度差) の再現性を調べた。図 4-1 に示す通り、攪拌速度が速くなると、ホイップ時間は低下し、オーバーランも低下、ペネトロ硬度差は増加した。攪拌速度が速いと、短時間当たり多くのエネルギーをクリームに付与し、それにより気泡導入速度が上がる。また、せん断速度が高くなると、脂肪球凝集もより速くなる (Fredric et al. 2010)。この機構がホイップ時間を短縮したものと思われる。一方、図には示さなかったがオーバーランとホイップ時間に高い相関がみられた ($R^2 = 0.887^{**}$)。この相関は、攪拌速度とオーバーランとの相関 ($R^2 = 0.874^{**}$) より若干高かったため、ホイップ時間が直接オーバーラン量に影響を及ぼしている可能性も考えられた。この結果は、第 2 章の結果と一致する。しかし、硬さ変化であるペネトロ硬度差を小さくする条件を採用すると、ホイップ時間が遅延する。

本章では、ホイップ時間と硬さ変化の両方を満足できるレベルにすることを目標としたため、本ミキサーの最高速度 (210 rpm) での攪拌の途中で低速に変更し、高速、低速の両方の特性を得ることを目指した。そこで、使用したミキサーでの最高速度である 210 rpm ホイップで生じている現象を把握することも目的として、ホイップ過程でのオーバーラン、連続相粘度の変化を測定した (図 4-2)。210 rpm ホイップ時間 (ホイップが終了するまでの時間) の 25%の時間の

攪拌で気泡の大半が導入され、50%で連続相粘度が上昇し始め、75%で連続相粘度が急激に増加している。これらのタイミングで攪拌速度を低下させることで、高速攪拌時の問題点である、「5℃保存時の硬さ変化の増加」に影響を及ぼすのではないかと考えた。

4-3-2 攪拌速度の変更がホイップ時間、硬さ変化、オーバーランに及ぼす影響

210 rpm でスタートし途中でホイップ速度を変更する実験を行った。変速までの210 rpmでの攪拌時間を210 rpm攪拌時間を称する。また、210 rpmでのホイップ時間（ホイップ終了までの時間）に対する210 rpm攪拌時間のパーセンテージを、210 rpmホイップ進捗率と称する。210 rpmホイップ進捗率0%とは、低速でのみホイップした実験となり、100%とは210 rpmで最後までホイップした実験となる。

210 rpm から140 rpmに変速した実験では、210 rpm進捗度が増すごとにホイップ時間は低下した（図4-3a）。一方、ペネトロ硬度差は、210 rpm進捗度が0から80%の間では、ほぼ一定の値を示した（図4-3b）。これは、ホイップ時間を短縮しながら、ホイップドクリームの5℃保存時の硬さ変化を抑制できることを示している。また、オーバーランは0から50%の間は高レベル（130%前後）、75%以上では低レベル（115%前後）であった（図4-3c）。このことは、210 rpm進捗率の選択によりオーバーランを変えることが出来ることを示している。ホイップドクリームの食感は、オーバーランに大きく影響されており、ホイップドクリームの食感の制御に結び付く結果である。210 rpm から160 rpmに変速した実験（図4-4）においても、ホイップ時間とオーバーランの絶対値は異なったものの、140 rpm への変速実験と同じ傾向の結果となった。

また、データには示していないが、低速から高速に変速するホイップ方法においても、ある程度の効果がみられたが、高速から低速への変速する条件のほうがよりホイップ時間短縮、5℃保存時の硬さ変化の抑制の効果が高くなるという結果が得られた。ホイップ初期、中期、終期に必要な攪拌速度が異なると思われた。

4-3-3 ホイップドクリームの硬さ変化に影響を及ぼす因子

ホイップドクリームは、体積の 50%以上を占める分散相である気泡と連続相であるクリームからなる構造物である。また、連続相であるクリームはホイップ操作により脂肪球が凝集し、硬さを発現している (Hotrum et al. 2005)。そのため、ホイップドクリームの 5℃保存時の硬さ変化には、分散相若しくは連続相の変化が影響を及ぼしていると考えられる。そこで、本検討では気泡の評価パラメータとしてオーバーランを、脂肪球凝集度合のパラメータとして連続相粘度を評価指標として用いた。ホイップ終了時オーバーランとペネトロ硬度差との相関を図 4-5 に示した。一定速ホイップ実験では、オーバーランとペネトロ硬度差との相関が認められたが、変速ホイップ実験では相関が認められなかった。また、データとして示さなかったが連続相粘度は、いずれの実験に置いても相関が認められなかった。この結果は、第 2 章の結果と一致する。一定速実験と変速実験の結果は、オーバーラン 120%以下の場合では大きく異なり、変速実験ではホイップドクリームの硬さ変化が小さくなっていた。オーバーラン 120%以下となるのは、210 rpm 進捗度が 50%以上の時であり、連続相粘度が上昇を始めるタイミングであり、脂肪球凝集が進み始めているタイミングであると考えられる。脂肪球凝集が進み始める時に攪拌速度を下げると、脂肪球凝集の速度が遅くなると思われる。そのことにより、完全に乳化が壊れた結果生じる遊離脂肪（乳化被膜内部から外に出た脂肪）の発生が防いでいる可能性が考えられた。遊離した脂肪は、破泡効果を持つため、オーバーランの低下、ホイップドクリームの構造破壊を引き起こし、硬さ変化に影響を及ぼすと考えられた。しかし、脂肪球凝集の度合いの指標として用いている連続相粘度とペネトロ硬度差との間には相関が認められなかった。第 2 章の結果からは、気泡径分布が硬さ変化に影響を及ぼすことが示唆されていたので、気泡径の影響について調べた。

4-3-4 気泡観察法の検討

第 2 章では、走査型電子顕微鏡で気泡を観察したが、真空下での観察であるた

め、凍結乾燥の影響を受けている可能性も考えられた。そこで、光学顕微鏡での観察を試みた。しかし、光学顕微鏡での観察ではカバーガラスを試料上部に押し付けるため、その際に気泡が潰れる可能性が考えられた。そこで、カバーガラス（厚み 0.15 mm）をスペーサーとして用い、試料の周囲に置いたのちに、試料の上にカバーガラスを載せて観察した。ホイップドクリーム気泡は、おおよそ 10 から 100 μm 程度（Labbafi et al. 2007）と報告されており、0.15 mm スペーサーがあれば、気泡が押しつぶされる可能性が低減されると考えた。また、本方法の検証方法として、押しつぶしの工程がない X 線 CT スキャン法での測定も行った。その際の試料作製は Sato et al. (2016) の方法に従い、ストロー内部に試料を採取し、液体窒素で凍結固定したものを観察した。CT スキャン法では、試料に外力をかけることなく、また、常圧下で表面のみならず内部の構造を観察することが出来るため、本来の気泡構造を観察できると考えられた。しかし、設備を常にご利用できなかったため、光学顕微鏡観察法の妥当性の検証方法として X 線 CT スキャンを用いた。それらの比較結果を図 4-6 に示す。X 線 CT 画像の暗い部分が気泡となる。この観察結果からは、光学顕微鏡と X 線 CT スキャンとも大きな差は認められず、光学顕微鏡観察でもホイップドクリームの気泡径測定は可能であると考えた。

4-3-5 変速ホイップ品の 5℃保存時の硬さ変化に影響を及ぼす因子

第 3 章の結果よりホイップドクリーム中の気泡の表面積がホイップドクリーム硬さの発現に影響を及ぼしていることが分かったため、引き続きザウター径（ d_{32} ）を平均値として用いることにした。また、変速試験は 210 rpm から 140 rpm への変速もしくは 210 rpm から 160 rpm への変速で、210 rpm 進捗率 25, 80, 90%の条件で行った。進捗率 25%では、比較的ペネトロ硬度差が小さく、また、80 から 90%の間でペネトロ硬度差が大きく変化しているため、それらの条件を用いると、相関が検出しやすくなると考えたためである。図 4-7 に示した通り、 d_{32} が小さいほどペネトロ硬度差が小さくなる相関がみられた。この相関は、オーバーランが 120%以下で顕著である。そのオーバーラン範囲においては、気

泡径が小さくなるほど、5℃保存時の硬さ変化合いが小さくなることが示唆された。この機構については、今後の検討が必要である。

4-3-6 2 変速での効果

本章の検討により、高速から低速に攪拌速度を変えることにより、より短時間で、十分な程度の5℃保存時硬さ変化合いの抑制を果たすことが出来た。ここで、更なるホイップ時間の短縮をめざし、最後に高速でのホイップを導入した。その結果を、表 4-1 に示す。クリームのホイップに用いる標準的な攪拌速度は 180 rpm 程度であるため、180 rpm ホイップの結果と比較し、評価した。その結果、210→140→160 rpm、210→140→180 rpm、210→140→210 rpm の 3 条件の変速実験共に、180 rpm ホイップと同等以上の生産性、物性（5℃保存時の硬さ変化）を持ったクリームを得ることが出来た。これにより、攪拌速度を変更することで、生産性、物性を両立したクリームを得ることができた。

4-3-7 スケールアップの効果

ホイップでは、1kg 以下のクリームを用いる卓上式ミキサーから、食品工業で用いられる 10 kg 前後のコートミキサーまで用いられている。本検討では、400g のクリームを使用した実験を行ったが、それ以上のクリームを使用した場合に同様の結果が得られないと、実用上の効果は限られてくる。そのため、800 g、7 kg でのホイップでの効果について確認した。その結果を表 4-2 に示す。800 g ホイップでも、生産性（出来上がったホイップドクリームをホイップ時間で割った値）、ペネトロ硬度差とも良好なクリームが得られた。ホイップ途中で攪拌速度を変えることにより、低速ホイップよりホイップ時間が短縮し（13 分 6 秒→8 分 3 秒）且つ、低速ホイップ（40 cm/s）並みのペネトロ硬度差のホイップドクリームを得ることが出来た。このことは、食品工業での本技術の適用が可能であることを示す。

4-4 結論

ホイップ途中で攪拌速度を変える条件の効果の検討を行い、以下の知見を得た。

(1) ホイップ中に攪拌速度を変更することの効果

攪拌速度をホイップ途中で変えることにより、低速一定速ホイップよりもホイップ時間を短縮しつつ低速ホイップ並みに 5℃保存時の軟化が抑制されたホイップドクリームを得ることが出来た。

(2) 5℃保存時の硬さ変化を抑制する因子

一定速でのホイップでは、ホイップ直後のオーバーランが高いほど、5℃保存時の硬さ変化が抑制された。一方、ホイップ途中で攪拌速度を変更したホイップでは、オーバーランが 120%以下においても、5℃保存時の硬さ変化の抑制が認められた。特定の変速条件によりホイップ直後の気泡径を小さくすることが、5℃保存時の硬さ変化を抑制する可能性が示唆された。脂肪球凝集の指標である連続相粘度は、5℃保存時の軟化に影響を及ぼしている結果は得られなかった。他のホイップ方法でも、気泡径を小さくする若しくは、高オーバーランにすることで、5℃保存時の戻りを抑制することが出来る可能性がある。

(3) 2変速の効果

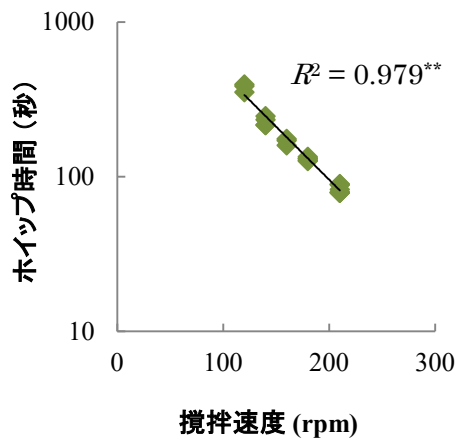
ホイップ途中で攪拌速度を 2 回変えると、5℃保存時の硬さ変化抑制度合いが低速ホイップ並みでありながら、標準的な時間までホイップ時間を短縮することが出来た。この技術により、生産性を維持しながら硬さ変化を標準的なレベル以上に抑制するホイップ手法が得られた。

(4) スケールアップ

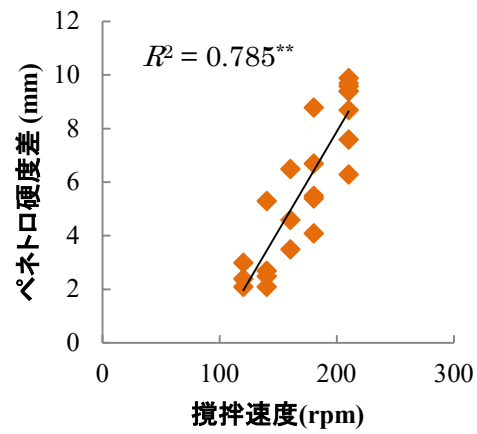
800 g、7 kg のクリームを使用した製造においても、生産性が高くなり、かつ低速ホイップ並みに軟化が抑制されたホイップドクリームを得ることが出来た。これは、様々な実製造条件においても、本技術が使用可能であることを示している。

以上の結果より、生産性を高めつつ良好な物性を得ることができるホイップドクリームの製造技術を確立することが出来た。

(a)



(b)



(c)

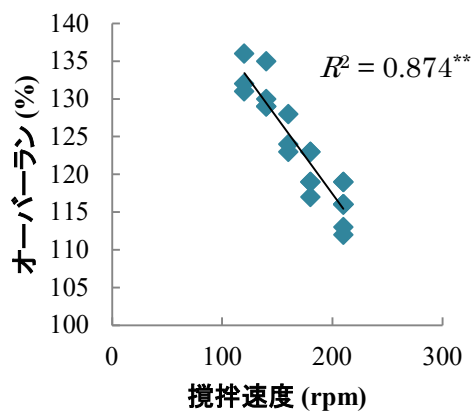


図 4-1 攪拌速度がホイップ時間(a)、5℃保存時ペネトロ硬度差(b)およびホイップ直後のオーバーラン(c)に及ぼす影響

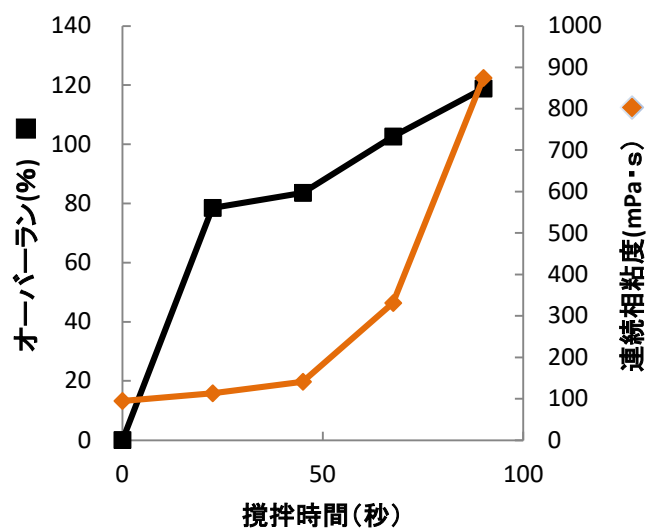
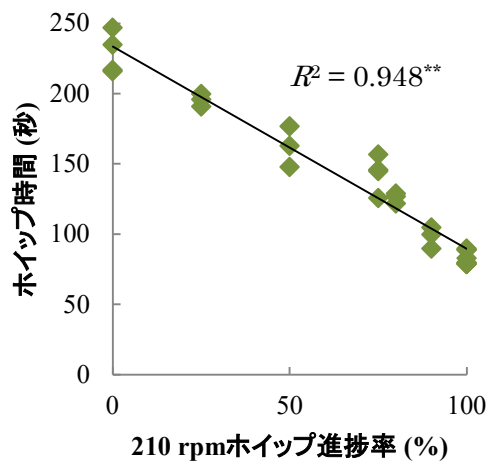
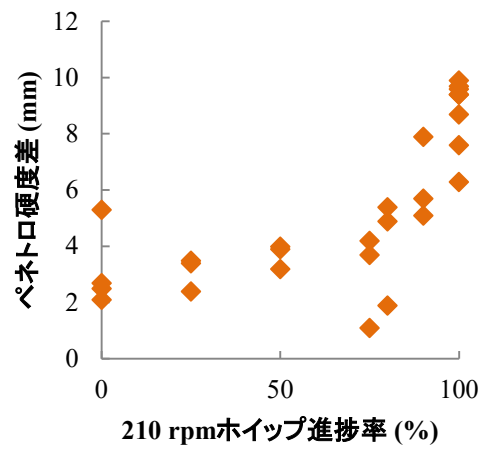


図 4-2 210 rpm 攪拌時のオーバーラン、連続相粘度の変化

(a)



(b)



(c)

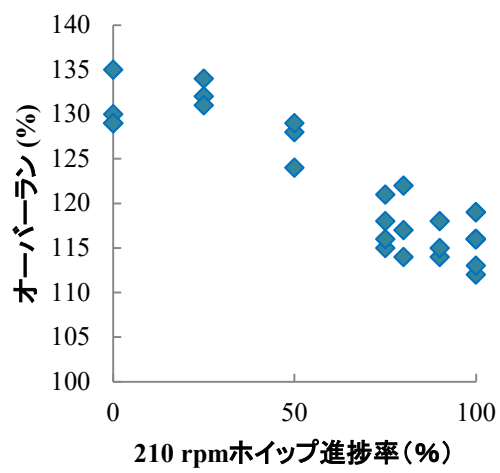


図 4-3 210→140 rpm 変速時におけるホイップ時間(a)、ペネトロ硬度変化(b)、オーバーラン(c)への 210 rpm ホイップ進捗率の影響

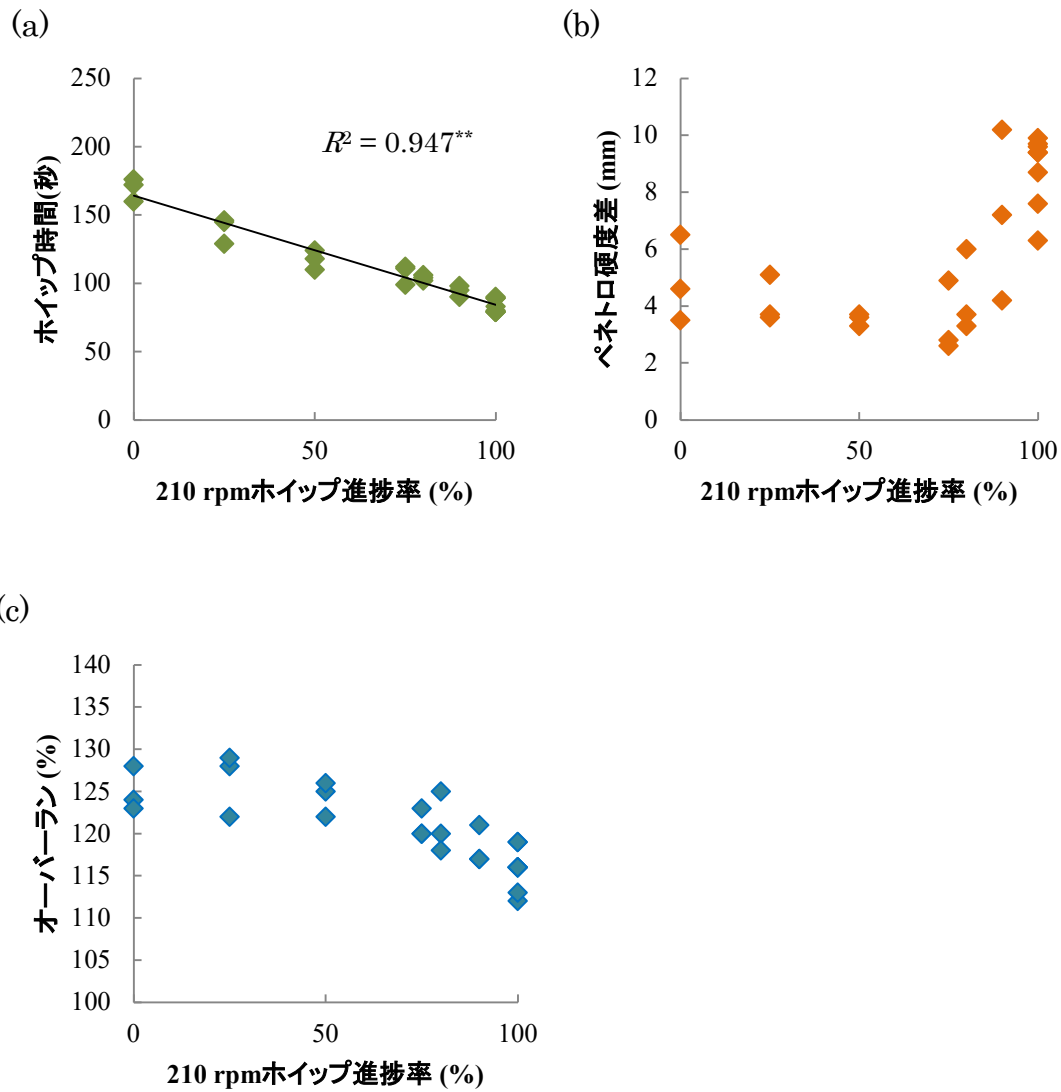


図 4-4 210→160 rpm 変速時におけるホイップ時間(a)、ペネトロ硬度変化(b)、オーバーラン(c)への 210 rpm ホイップ進捗率の影響

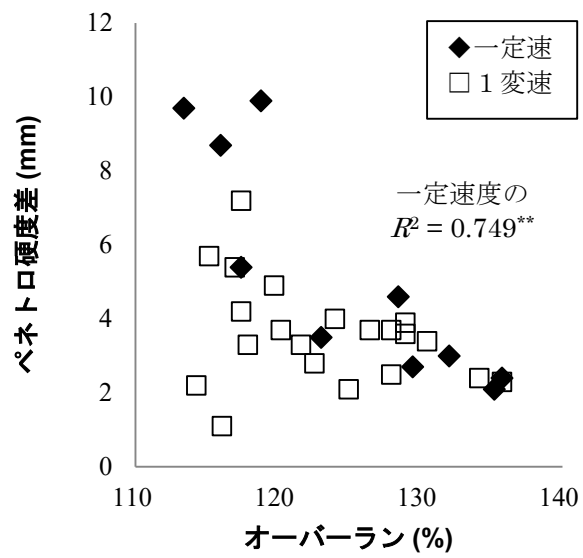
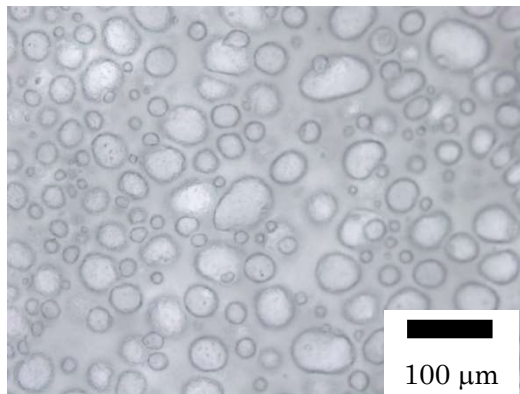


図 4-5 ホイップ直後のオーバーランが 5℃保存時硬さ変化に及ぼす影響

(a)



(b)

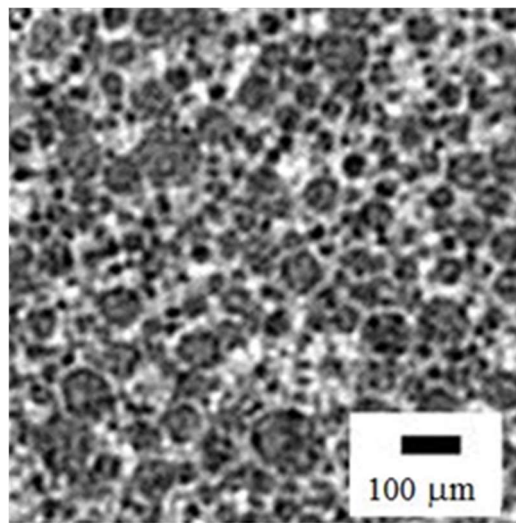


図 4-6 位相差顕微鏡(a)および X 線 CT(b)により観察されるホイップドクリーム気泡の比較

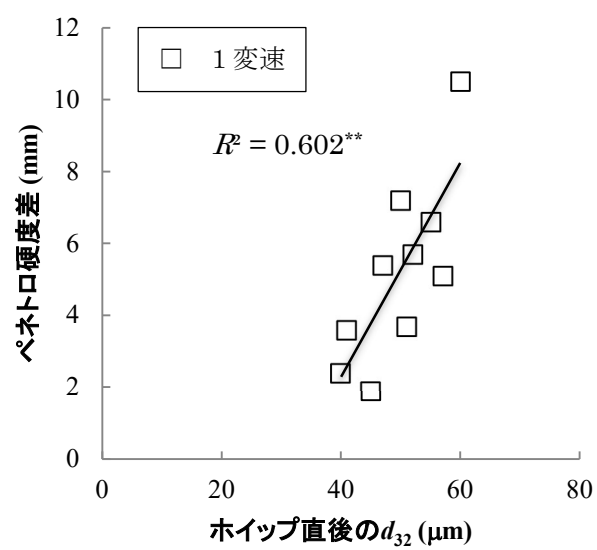


図 4-7 ホイップ直後の気泡径 (d_{32}) が 5℃保存時硬さ変化に及ぼす影響

表 4-1 2 変速ホイップによる生産性およびホイップドクリーム物性への効果

第一速度	210	210	210
第二速度	140	140	140
第三速度	160	180	210
(rpm)			
第一速度での攪拌時間(秒)	42	42	42
第一速度での進捗率	50%	50%	50%
第二速度での攪拌時間(秒)	54	54	54
生産性(g/分)			
180 rpm : 183	185	186	202
210→140 rpm : 147			
ペネトロ硬度差 (mm)			
180 rpm : 6.1	4.1	3.5	4.6
210→140 rpm : 3.7			
オーバーラン (%)			
180 rpm : 120	131	132	126
210→140 rpm : 127			

180 rpm は、ホイップ評価で用いられる標準的な速度

表 4-2 スケールアップ時の変速導入効果

	速度変更		速度一定(参考)		
クリーム量(g)	400	800	7000		
ミキサー種類	Delonghi Chef classic	Kenwood Major Premier	愛工舎 30 コートミキサー		
第一攪拌速度	210 rpm (55 cm/s)	210 rpm (55 cm/s)	94 rpm (59 cm/s)	94 rpm (59 cm/s)	64 rpm (40 cm/s)
第二攪拌速度	140 rpm (37 cm/s)	140 rpm (37 cm/s)	64 rpm (40 cm/s)	-	-
第一速度での 進捗率(%)	50	50	50	-	-
生産性 (g/分)	147 140 rpm 105 180 rpm 183	369 140 rpm 172 180 rpm 522	870	1918	534
ペネトロ硬度差 (mm)	3.7 140 rpm 3.2 180 rpm 6.1	1.1 140 rpm 4.3 180 rpm 7.3	-0.5	7.5	2.0
オーバーラン (%)	127 140 rpm 131 180 rpm 120	130 140 rpm 131 180 rpm 120	112	91	113

180 rpm は、ホイップ評価で用いられる標準的な速度

第5章 総括

液体クリームの特性の制御、クリームのホイップ特性およびホイップ品の物性に影響を及ぼす因子の理解及び制御が本研究の目的である。液体クリーム及びホイップドクリームは分散相と連続相からなり、各々が影響しあいながら安定性に影響を及ぼしている。しかし、分散相である脂肪や気泡が高含有率であるため液状クリームおよびそのホイップ品は物性的に不安定なことが多い。そのためそれらの制御は経験に基づくものが多く、プロの調理人やパティシエなどの手腕によるところが多い一方、近年は非熟練者がそれらを扱うシチュエーションも多くなり、それらの容易な制御方法が求められている。

第1章では、日本におけるクリーム生産量の推移や、クリーム使用者の現状について概説し、非熟練者でも扱えるようなクリームの使用方法の確立の重要性について述べ、そのための液状クリーム、ホイップドクリームの安定性に関する機構の確立を目指すことを定め、本研究の意義を明らかにし、目的と方針をまとめた。

第2章ではホイップ用途を想定して、先ずホイップ時の気泡、脂肪球凝集のタイミングをホイップ時の攪拌速度の調整にて達成することを見出し、それらのタイミングの違いがホイップドクリーム構造およびホイップドクリームの5℃保存時の硬さ変化に及ぼす影響についてその機構の推定を行った。気泡先導入条件においては、脂肪球凝集が段階的に進み、比較的均一な大きさの気泡を含むホイップドクリーム構造となった。一方、同時進行条件においては、脂肪球凝集が急速に進行したうえ、大きさが不均一な気泡を含む構造となった。また、気泡先導入条件品は、5℃保存時の硬さ変化が比較的小さく、硬さ変化の原因は脂肪球凝集がほどけたことによるものと推察された。一方、同時進行条件品は、5℃保存時の硬さ変化が大きく、経時的な気泡径の増加および脂肪球凝集の低下が原因であると推察された。このように、脂肪球凝集、気泡導入のタイミングの制御により、ホイップドクリームの構造、物性をデザインでき、様々な物性を持ったホイップドクリームを得ることができることを示した。

第3章では、クリーム脂肪球中の固体脂含量がホイップ性及び5℃保存性に及ぼす影響について検討を行った。ホイップ性の指標である、ホイップ時間（ホイップ終点時の時間）およびホイップ終点でのオーバーランは、固体脂含量が多くなるほどそれらの値は高値を示した。一方、ホイップ時の硬さ発現については、固体脂含量に依存せず、経時的な連続相粘度の上昇もしくは気泡表面積の増加に伴って硬さが増していった。固体脂含量は乳化安定性に影響を及ぼしている報告されている因子であるが、ホイップ物性に関しては、それに依存するもの、依存しないものが存在することが明らかとなった。また、固体脂含量が高くなると、気泡同士の接触により硬さが発現される気候が推察された。また、固体脂含量が低いと脂肪球の凝集が進行し、脂肪球ネットワークによる硬さが発現される機構が推察された。

第4章では、第2章での知見を基にホイップドクリームの物性と生産性とを両立させた製造方法の確立を目的とした。ホイップ中に攪拌速度を変えることで物性の良さと生産性とを両立させることに成功し、それらは小スケールから大スケールでのホイップにおいても、有用であることも示した。これは、パティシエが経営するような個店から食品工業までで使用可能な技術であることを示している。この変速ホイップでは、短時間でオーバーランを上昇させることが原理の一つであることが示唆された。また、低オーバーラン品を得たい場合は、変速ホイップにより気泡径が小さくなっていることが良好な物性のホイップドクリームを得る原因となっていることが示唆された。

以上の知見により、ホイップドクリーム中の分散相である気泡の安定性が、トータルとしてのホイップドクリームの安定性に大きな影響を及ぼしていることも判明した。更には、気泡の安定性は、脂肪球凝集の機構に依存する可能性も示唆された。気泡安定性に対する脂肪球凝集の影響を今後解析していくことによって、安定したホイップドクリームを製造する方法の開発につながり、非熟練者でも作業可能なホイップシステムの構築を可能とする技術開発につながると思われる。最近の人件費の高騰といった状況からも、安価で品質の良い製品を作るためには、非熟練者でも直ちに高品質のものを安定して製造できるシ

システムが待ち望まれている。本研究で明らかになったことを、それらの成果につなげるためには、以下の課題を検討していくことが必要である。

- ①脂肪球凝集、導入気泡量、気泡径のホイップ中における連続測定法の開発
- ②脂肪球凝集と気泡導入の相互作用の更なる解明
- ③ホイップドクリーム物性に影響を及ぼす因子のさらなる精査
- ④実際の現場でのビッグデータ取り扱いによる、原因因子と物性との相関の精度の向上

これらの課題を解決していくことにより、乳業技術、洋菓子製造技術の進展につながり、更には、社会の満足感の向上に貢献できることを期待する。

引用文献

Anderson M., and Brooker B.E. (1988). Dairy foams. In: E. Dickinson and G. Stainsby, editor. *Advances in Food Emulsion and Foams*. Elsevier, London pp. 221-253.

Darling D. F. (1982). Recent Advances in the Destabilization of Dairy Cream. *Journal of Dairy Research*, 49, 695-712.
doi:<https://dx.doi.org/10.1017/S0022029900022834>

Dickinson E, and Stainsby G. (1982). Colloids in food processing. In: E. Dickinson and G. Stainsby, editor. *Colloids in Food*. Applied Science Publishers, New York. pp. 462-498.

Drelon N., Gravier E., Daheron L., Bosserie L., Omari A., Leal-Calderon F. (2006). Influence of tempering on the mechanical properties of whipped dairy creams. *International Dairy Journal*, 16, 1454-1463.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.12.003>

Fredrick E., Walstra P., and Dewettinck, K. (2010). Factors governing partial coalescence in oil-in water emulsions. *Advanced Colloid Interface Science*, 153, 30-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cis.2009.10.003>

Goff, H. D. (1997). Instability and Partical Coalescence of Whippable Dairy Emulsions. *Journal of Dairy Science*, 80, 2620-2630.
doi:[https://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76219-2](https://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76219-2)

Hotrum N.E., Cohen Stuart M.A., van Vliet T., Avino S.F., van Aken G.A. (2005). Elucidating the relationship between the spreading coefficient, surface-mediated partial coalescence and the whipping time of artificial cream. *Colloids Surfaces. A* 260(1-3), 71-78.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.03.004>

Ihara K., Habara K., Ozaki Y., Nakamura K., Ochi H., Saito H., Asaoka H., Uozumi M., Ichihashi N., Iwatsuki K. (2010). Influence of whipping temperature on the whipping properties and rheological characteristics of whipped cream. *Journal of Dairy Science* 93(7): 2887-2895.
doi:<https://doi.org/10.3168/jds.2009-3012>

Ihara K., Nishimura Y., Habara K., Abe F. (2019). Influences of Beating Speed on Whipping and Physical Properties of Whipped Cream. doi:
<https://doi.org/10.3136/fstr.25.391>

Jakubczyk E., Niranjana K. (2006). Transient Development of Whipped Cream Properties. *Journal of Food Engineering*, 77, 79-83.
doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.046>

Kamath S., T. Huppertz, A. V. Houlihan, H. C. Deeth. (2008). The influence of temperature on the foaming of milk. *International of. Dairy Journal*, 18, 994-1002. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.05.001>

Kristensen D., Jensen P. Y., Madsen F., Birdi K. S. (1997). Rheology and Surface Tension of Selected Processed Dairy Fluids: Influence of Temperature. *Journal of Dairy Science*, 80:2282-2290.
doi:[https://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76177-0](https://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76177-0)

Labbafi, M., Thakur, R.K., Vial, C., and Djelveh, G. (2007). Development of an on-line optical method for assessment of the bubble size and morphology in aerated food products. *Food Chemistry*, 102, 454-465.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.011>

Murray B. S., Cox A., Dickinson E., Nelson P. V., Wang Y. (2007). Coalescence of Expanding Bubbles; Effects of Protein Type and Induced Oil Droplets. In: Dickinson, E. and Leser M. E., editor. *Food Colloids: Self-Assembly and Material Science*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK. pp 369-382.

Noda M., Shiinoki Y. (1986). Microstructure and Rheological behavior of whipping cream. *Journal of Texture Studies*, 17, 189-204.

doi:<https://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4603.1986.tb00404.x>

Rousseau D. (2000). Fat Crystals and Emulsion Stability – a review. *Food Research International*, 33, 3-14. doi:[https://dx.doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00017-X](https://dx.doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00017-X)

Sato M., Kajiwarra K., Sano N. (2016). Non-destructive three-dimensional observation of structure of ice grains in frozen food by X-ray computed tomography using synchrotron radiation. *Journal of Food Engineering*, 17, 83-88. doi:<https://doi.org/10.11301/jsfe.17.83>

Sugimoto T., Mori T., Mano J., Mutoh T., Shiinoki Y., Matsumura Y. (2001). Effects of Fat Crystallization on the Behavior of Proteins and Lipids at Oil Droplet Surfaces. *Journal of American Oil Chemists' Society*, 78, 183-188. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s11746-001-0241-z>

van Aken G. A. (2001). Aeration of emulsions by whipping. *Colloids and Surfaces*, 190, 333-354. doi:[https://dx.doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)00709-9](https://dx.doi.org/10.1016/S0927-7757(01)00709-9)

van Voekel M.A.J.S., Walstra, P. (1981). Stability of oil-in-water emulsions with crystals in the dispersed phase. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 8, 109-118.
doi:[https://dx.doi.org/10.1016/0166-6622\(81\)80071-6](https://dx.doi.org/10.1016/0166-6622(81)80071-6)

Walstra P., Wouters J.T.M., and Geurts T.J. (2006). Part III Products. Chapter 17 Cream products. In: Walstra P., Wouters J.T.M., and Geurts T.J. editor. Dairy science and technology, Second edition (Food Science and Technology series). Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida. pp 455.

Wilde P.J., Mackie A.R., Ridout M.J., Husband F.A., Moates G.K., Robins M.M. (2007). Role of protein-stabilized interfaces on the microstructure and rheology of oil-in-water emulsions. In: Dickinson E, and Leser MR, editor. Food colloids: Self-assembly and material science. Cambridge UK: The Royal Society of Chemistry, pp 385-397.

井原啓一、加治屋千鶴、嶋田康伸、浅野祐三、小久保貞之 (2005). ホイップドクリーム物性に及ぼすホイップ速度の影響. 日本食品科学工学会誌 52(12), 553-559. doi: <https://doi.org/10.3136/nskkk.52.553>

井原啓一、丸屋美樹、尾崎裕司、嶋田康伸、浅野祐三、岩附慧二 (2007). 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), 173-180. doi: <https://doi.org/10.3136/nskkk.54.173>

菊地基和 (1992). 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.

小久保貞之, 桜井一美, 服部美穂, 富田守 (1994). アイスcream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. 日本食品科学工学会誌, 41(5), 347-354. doi:<https://dx.doi.org/10.3136/nsk1962.41.347>

謝 辞

本論文の作成に当たり終始御懇切なご指導および御校閲を賜りました生命環境系 教授 北村 豊 博士、同教授 楊 英男 博士、同教授 宮崎 均 博士、同准教授 吉田 滋樹 博士に深甚の謝意を表します。

また、生命環境系 助教の粉川 美踏 博士には、本論文作成に際しまして適切なアドバイス、フォローを頂きました。心より感謝申し上げます。

本研究に深いご理解と全面的なご援助を与えてくださいました森永乳業株式会社 宮原 道夫 代表取締役 社長、大川 禎一郎 専務取締役 研究本部長、阿部 文明 執行役員 素材応用研究所長、小久保 貞之 元常務取締役、岩附 慧二元食品基盤研究所長、市橋 信夫 元食品総合研究所長、魚住 充男 元応用技術センター所長のご厚意に感謝申し上げます。

また、森永乳業株式会社 素材応用研究所の齋藤 仁志 グループ長、越智 浩 グループ長、ならびに元森永乳業株式会社の嶋田 康伸 氏、朝岡 宏 氏、プラスチック容器包装リサイクル推進協議会の浅野 祐三 博士にはクリーム研究業務全般への御理解とご指導、激励を賜り、研究者としての礎を築くことができました。厚く御礼を申し上げます。

さらには、実験・分析及び解析に多大のご協力を戴いた森永乳業株式会社の羽原 一宏 グループ長、尾崎 裕司 マネージャー、丸屋 美樹 研究員、加治屋 千鶴 研究員、浦川 (旧姓中村) 香奈子 マネージャー、西村 康宏 副主任研究員の諸氏、並びに素材応用研究所、フードソリューション研究所の関係者諸氏に感謝いたします。

2020 年 1 月 井原 啓一