

さまざまな温度での科学的なフォームミルクの分析

1. はじめに

ココアの小さな泡は、泡の崩壊を引き起こさず長持ちします。コーヒーを飲む多くの人は、完璧なミルクコーヒーやカプチーノを期待しており、一杯のために生成されたフォームミルクは、ますます人気が高まっています。この状況は、牛乳の起泡特性に関する研究努力の高まりに反映されています。このアプリケーションノートでは、フォームミルクに関する公開済みの研究[1]をまとめています。

調査の過程で、動的フォームアナライザ DFA100 を使用して、4 種類の牛乳（低温殺菌された牛乳と脂肪 1.5%、3.5%の UHT：超高温熱処理牛乳）を調査しました。測定は、どちらも牛乳の種類と温度に依存する、起泡性と泡安定性に焦点を合わせました。また、これらの測定結果と決定された安定性パラメータの関係を調査するために、泡サイズと泡のサイズ分布の観点から泡の構造を分析しました。

2. 背景

牛乳にはたんぱく質が含まれており、これは天然の界面活性剤として脂肪/水エマルションの安定性と泡の形成に関与しています。さまざまな種類の牛乳を使用して飲料にフォームミルクを生成するため、泡の量とその安定性は牛乳の特性に依存します。脂肪含有量の他、UHT 牛乳と低温殺菌牛乳の異なる処理方法、さらに起泡中の牛乳の温度は、起泡特性に大きな影響を与えます。



3. 試料と測定方法

○ 試料

脂肪分がそれぞれ 1.5%と 3.5%の低温殺菌牛乳と UHT 牛乳（超高温熱処理牛乳）の市販品

○ 起泡性と泡安定性の測定

測定は、動的フォームアナライザ DFA100を使用しました。この装置は、ソフトウェアで制御される送気を使用してフィルター上に液体試料を再現性良く起泡させるのに使用されます。DFA100 は、LED バーとラインセンサーを使用して、起泡中および崩壊時の泡高さを正確かつ経時的に測定します。研究の範囲内で泡の最大高さと同減期に基づく安定性から起泡性が調査されました。体積流量、フィルターの細孔サイズ、起泡時間などの条件はすべて同条件で行いました。いずれも 3 回の測定で再現性の高い結果が示されました（図 1 参照）。

○ 温度依存測定

泡測定は、5～60℃で行われました。これまでの研究とは対照的に、起泡前に液体が温度制御されただけでなく、崩壊中のカラムも温度制御されました。この目的のため、温度制御測定用の KRUSS 社製 CY4503 二重ガラスシリンダーが使用されました。

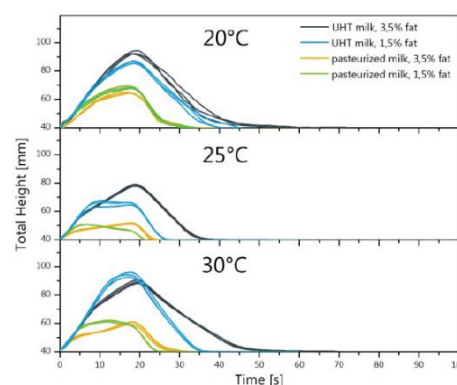
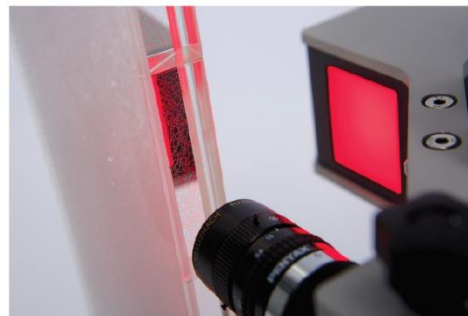


図 1:異なる温度での泡高さ測定。グラフは、測定された各種の牛乳の 3 回の測定結果を示しています。（図は[1]から適用）

○ 泡サイズ測定

泡サイズの光学測定は、DFA100 の泡サイズ解析モジュール FSM で実行されました。このモジュールでは、プリズム部の泡の二次元断面のカメラ画像がキャプチャされます。

特殊な光学構成により、プリズム壁にある泡の鮮明な画像が得られます。これは、泡の内側にあるラメラによって損なわれることはありません。



DFA100 のソフトウェアは、泡の数とサイズ、および泡サイズの分布と平均泡サイズ、および標準偏差に基づいて泡の均一性を決定します。これらすべてのパラメータは測定時間の関数として記録されるため、崩壊過程の構造変化が正確に示されます。

図 2: 泡サイズ解析モジュール-FSM

3. 測定結果

○ 起泡性

私たちの研究の枠組みの中で、これまでの研究からの一般的なステートメントのいくつかを確認することに成功しました。低温では、UHT 牛乳は低温殺菌牛乳より起泡性が高く、セミスキムミルクは全乳よりも優れています。より高い温度では、すべての種類の牛乳が容易に起泡し、試料間の違いはありません。

図から明らかなように、この測定では、脂肪を含む牛乳の起泡性の最小値が 25°C で発生するという研究で発見された異常を確認することができます。[2]の著者は、25°C で半結晶構造の脂肪球が泡の形成にマイナスの影響を与えるという事実はこの影響があると考えています。

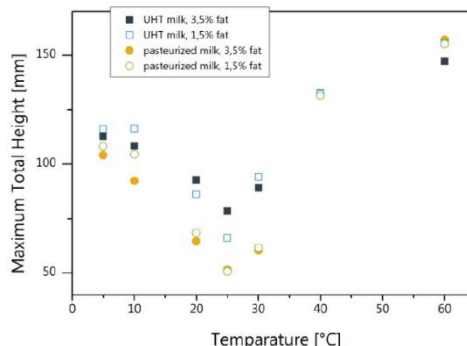


図 3: 起泡時の最大全高さに基づく起泡性の測定 (図は[1]から適用)

○ 泡安定性

[2]では、約 25°C での最低値は起泡性についてのみ発生し、泡の安定性に関しては発生していません。一般に、液体中の泡抑制物質も形成される泡の安定性に影響を与えるため、これは注目に値します。

対照的に、私たちの研究結果は、予想通り 25°C で泡の安定性も最低値が確認されました。

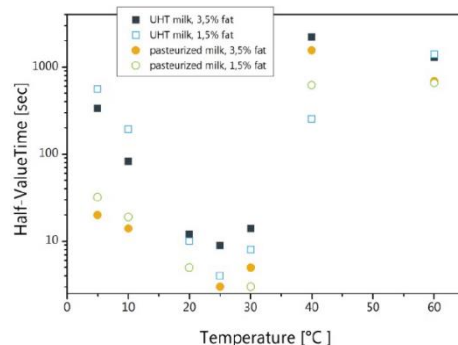


図 4: 減衰半減期に基づく泡の安定性測定。試料の安定性にはかなりの違いがあり、Y 軸を対数目盛としました。(図は[1]から適用)

私たちの見解では、この異なる所見は、起泡は[2]では温度制御されていましたが、崩壊挙動は温度制御なしで測定されたことに関連しています。

これが、分子構造を重ね合わせた、泡の冷却中に制御できない熱効果をもたらしたと考えられます。ただし、私たちの測定では、カラムも崩壊過程で温度制御されていました。その結果、予想通り起泡性と安定性の挙動は同様の温度依存性の推移を示しました。

40°C で形成される泡高さは、4 種類すべての牛乳でほぼ同じですが(図 3 を参照)、この温度での安定性は脂肪含量によって大きく異なります。乳脂肪は起泡性に影響を与えなくなり、実際に安定しています。

○ 泡サイズ

牛乳の泡評価では、泡の構造は二つの点で興味深いものです。第一に、消費者は一般に構造が良い感覚に直接影響するように、小さいサイズで均質なフォームミルクを好みます。第二に、安定性は泡サイズとサイズ分布にも依存します。

オストワルド熟成は泡崩壊を加速させるメカニズムであり、泡のサイズによる内圧差に依存します。これにより、小さな泡の数は時間とともに減少し、大きな泡はより大きくなります。泡が均質になるほど、泡同志の内圧差が小さくなり、オストワルド熟成が遅くなります。

この関係は、次の図 5 に示すように泡サイズ測定によっても確認されます。泡高さ測定によると、最も安定した泡は、40°Cで UHT 牛乳(脂肪 3.5%)でした(図 4 を参照)。この泡サイズ測定により、平均泡サイズからの標準偏差が最も小さい最小の泡が明らかになり、そのため均質性が最も高くなりました(図 5 左)。崩壊測定でははるかに不安定であった 1.5% UHT 牛乳からの泡(右)は、泡立った直後に均一性が低く、より大きな泡を示しています。1800 秒の崩壊時間後の二つの画像は、試料間の安定性の違いを示しています。関数として記録されるため、崩壊過程の構造変化が正確に示されます。

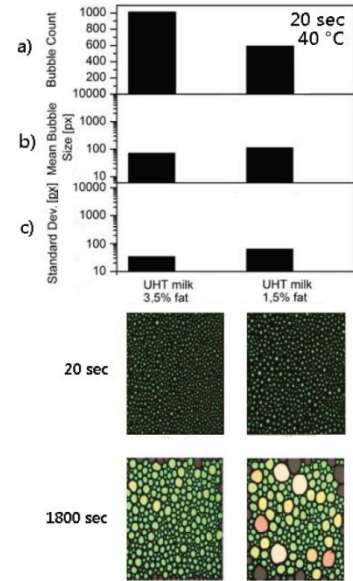


図 5: 40°Cで UHT 牛乳(脂肪分 3.5%および 1.5%)を起泡させた直後の泡個数(a)、平均泡サイズ(b)、および平均値の標準偏差(c)。下の画像は起泡後および 1800 秒後の減衰時間後に画像認識によって決定された泡を示しています。(図は[1]より適用)

4. まとめ

研究の範囲内で、製造方法(低温殺菌または UHT 牛乳)と脂肪含量(3.5%と 1.5%)が異なる 4 つの牛乳試料の泡特性を調査しました。これは、起泡性と泡安定性に対する温度と牛乳の性質の影響に焦点を当てています。文献に記載されているように、25°Cで最小の起泡性を確認できました。カラムを温度制御することにより、入手した調査結果とは異なり、泡の安定性についても同じように 25°Cで最小となりました。泡サイズの測定により、一方で泡サイズとその分布、他方で泡安定性の相関が明らかになりました。最小サイズ、最も均一な泡(40°Cで 3.5%の脂肪を含む UHT 牛乳)は、同時に最も安定していました。

最後に、フォームミルクの生成に関するいくつかの経験則は、測定値から導き出すことができます。:

- 良く泡立たせるために、理想的には牛乳は冷蔵庫から直接取り出すか、加熱されるべきです。常温の牛乳は適していません。
- 低脂肪製品は全乳よりも有利であり、UHT 製品は低温殺菌牛乳よりも冷たい牛乳を泡立てるのに適しています。
- 大量の均質で安定した泡は、温かい UHT 全乳の起泡から生じます。

このアプリケーションノートのメインとなる文献[1]には、詳細な結果、試料の正確な性質、泡分析の測定条件、および研究文献の完全なリストなどのすべての詳細が含まれています。

3. 参考文献

- [1] K. Oetjen, Ch. Bilke-Krause, M. Madani, Th. Willers, Temperature effect on foamability, foam stability, and foam structure of milk, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 460 (2014), 280-285.
- [2] S. Kamath, T. Huppertz, A.V. Houlihan, H. Deeth, The influence of temperature on the foaming of milk, *International Dairy Journal* 18 (2008) 994-1002.