

# Technological approaches for controlling foaming properties of food proteins toward on-site consumption

(現場での泡立て・消費に向けた食品タンパク質の泡沫特性制御のための技術的取り組み)

佐藤 愛

食生活の充実を図るには食品の多様性を高めることが重要であるが、そのひとつの方法として泡沫の利用が考えられる。泡沫はボリューム感のある見た目や口にしたときにユニークな食感を与えることから嗜好性に大きく影響する。近年は、外食産業の消費現場での泡立て・消費の需要の高まりに伴い、様々な技術が発展してきた。この技術は大きく次の3つのステップ、飲料製造現場での原材料の改質（ステップ1）、貯蔵や輸送中の品質保持（ステップ2）、消費現場での泡立て法（ステップ3）に分けられる。これらは最終的な泡沫の特性に影響すると考えられることから、望ましい特性を備えた泡沫を得るためには、各ステップにおいて最終的な泡沫の品質に影響を与える因子を制御する必要がある。

そこで本研究では、各ステップで用いられる技術に着目し、現場での泡立て・消費に向けた食品タンパク質の泡沫特性を制御する因子を明らかにすることを目的とした。まずステップ1では、原材料であるタンパク質の高圧微細化処理の処理条件、ステップ2では品質保持目的で使用される乳化剤の添加条件、ステップ3では新奇の起泡沫法であるホイップクリームディスペンサーの使用条件に着目した。説明の都合上、以下の章では、ステップ2、1、3の順序で記載した。

## 第1章 ショ糖脂肪酸エステルを添加した乳飲料の泡沫特性

製造後、貯蔵・輸送中において飲料の乳化状態を安定に保つ目的で、しばしば乳化剤が使用される。そのような乳化剤は泡沫にも影響すると考えられるが、乳化剤の種類や添加濃度が飲料の泡沫特性に与える影響は明らかでない。本章では、一般に乳化目的で使用される乳化剤として親水性と疎水性の2種類のショ糖脂肪酸エステルを使用した。乳化剤最終濃度が0.0–0.4 wt%になるように牛乳に添加してモデル飲料を調製し、ミルクスチーマーで起泡沫して泡沫特性を評価した。親水性乳化剤を添加した場合、疎水性乳化剤よりも起泡沫直後の泡沫体積が高く、気泡サイズは小さい傾向にあり、その値は乳化剤無添加牛乳と同等であることが示された。どちらの乳化剤も起泡沫能力に与える添加濃度の影響は小さかった。泡沫安定性に関しては、乳化剤の親水性、疎水性に応じて、異なった添加濃度依存性を示した。具体的には、親水性乳化剤では、低濃度で添加し

たときに無添加牛乳よりも安定性が大きく低下した。無添加の場合、気泡表面（気水界面）では牛乳中から吸着したタンパク質が相互作用して界面を安定化しているが、少量添加された乳化剤がタンパク質間の相互作用を阻害することによって安定性が低下したと考えられる。しかし、この親水性乳化剤を高濃度で添加すると安定性が無添加牛乳と同等になるまで上昇した。高濃度域では界面を乳化剤が隙間無く覆うことによって安定化したと考えられる。疎水性乳化剤を添加した場合は、すべての濃度で高い泡沫安定性を示したが、これは乳化剤自体が固化（結晶化）して界面が安定化したためと考えられる。

## 第2章 気相の種類がタンパク質泡沫の特性に与える影響

近年、ホイップクリームディスペンサー（WCD）という起泡のための装置が開発され注目を集めている。WCDでは、攪拌法などの空気や窒素（ $N_2$ ）が気相として用いられている従来の起泡法と異なり、亜酸化窒素（ $N_2O$ ）や二酸化炭素（ $CO_2$ ）が一般的に気相として用いられる。このように泡沫生成に使用されるガスの種類は多様化しているが、このガスがタンパク質の泡沫に与える影響については不明な点が多い。本章では、乳由来の分離ホエイタンパク質（WPI）、カゼインナトリウム（SC）、卵白タンパク質（EW）、大豆分離タンパク質（SPI）、酵素部分分解したSPI（SPI-LMW）の5種類のタンパク質溶液を対象として、WCDを用いて起泡し、その泡沫特性を検討した。気相として4種類のガス、すなわち  $N_2O$ 、 $CO_2$ 、空気（Air）、 $N_2$  を注入し、シリンダーに吐出することで泡沫を得た。起泡能力を評価した結果、水への溶解度が高い  $N_2O$  や  $CO_2$  を気相とした場合には、低い Air や  $N_2$  よりも泡沫高さが高くなることが示された。一方で、 $CO_2$  泡沫ではタンパク質の凝集体が観察され、泡とみなせなかったため、以降の実験では測定対象から外した。泡沫安定性に関しては、Air や  $N_2$  泡沫の方が  $N_2O$  泡沫よりも高いことが明らかになったが、これは、 $N_2O$  の場合には、溶解度が高く、生じた気泡のサイズも大きいことで、不均化や排液が起りやすくなったためと考えられる。タンパク質間を比較すると、泡沫安定性は  $EW > WPI > SPI = SC > SPI-LMW$  であり、その安定性の違いには、泡沫形成から一定時間経過した後、の界面強度が寄与していることが示唆された。ただ、このタンパク質間の違いは、3種類のガスの平均値を比較した時に導かれたものであり、改めて  $N_2O$  泡沫についてのみ検討した結果、泡沫形成直後の界面強度が大きく影響していることが示唆された。

### 第3章 超高压微細化処理がホエイタンパク質とミセル性カゼインのコロイド・界面・泡沫特性に与える影響

タンパク質の機能特性を物理的に改変する手段として、加熱のほかに、高压微細化処理が注目を集めている。超高压下での高压微細化処理では「力学的な力によるタンパク質の改質」に加え「高压処理に伴う温度上昇によるタンパク質の改質」が起こると考えられるが、これらを区別した研究はない。そこで本章では、WPIの変性温度を踏まえて高压微細化処理前のWPI溶液の温度を制御し、「力学的な力のみ」と「力学的な力+温度上昇」がWPIの泡沫特性に与える効果を区別して検討した。高压微細化処理は240 MPaで0-3回行った。WPIに加え、乳タンパク質の主要タンパク質であるミセル性カゼイン（MC）についても同条件で高压微細化処理の影響を検討した。WPIでは、SDS-PAGEと表面疎水性測定、粒子径測定の結果、「力学的な力のみ」ではタンパク質は構造変化せずに、より微細に分散されることが示された。一方、高压処理による温度上昇に伴うことでタンパク質が構造変化し、凝集することが示された。また、ゼータ電位測定の結果、「力学的な力のみ」では、タンパク質間の静電反発力が低下することが示されたのに対し、「力学的な力+温度上昇」では増加することが示唆された。MCでは、処理温度に関わらず、高压微細化処理でタンパク質は構造変化せずに微細に分散し、溶解度が上昇することが示され、「力学的な力のみ」の方がより影響が大きかった。次にタンパク質溶液を攪拌することで起泡し、起泡能力と泡沫安定性を評価した。その結果、WPIでは、起泡能力は高压微細化処理を繰り返すほど上昇し、その上昇程度は「力学的な力+温度上昇」の影響の方が大きかった。泡沫安定性は高压微細化処理することで低下し、その低下程度は「力学的な力のみ」が与えられたときの方が大きいことが示された。MCでは、起泡能力は高压微細化処理するほど上昇し、その上昇程度は「力学的な力のみ」の影響の方が大きかった。泡沫安定性は「力学的な力のみ」が与えられたときに上昇し、「力学的な力+温度上昇」では変化しなかった。

本研究により、各技術における泡沫特性の制御因子とその条件が示され、これらを適切に選定することで現場での泡立て・消費に向けた製品の泡沫特性を制御できる可能性が示された。