
研究報文

グアー起泡性アルブミンの起泡特性

細見 典子, 原田 麻子, 下山 亜美*, 土居 幸雄

Foaming properties of guar foaming albumin

Noriko Hosomi, Asako Harada, Ami Shimoyama*, Yukio Doi

From guar meal we recently isolated an albumin fraction with a high foaming ability, named guar foaming albumin (GFA). Here, we further characterized the foaming activity, foam stability and surface tension of GFA solutions. Foaming activity and foam stability were estimated by measuring the conductivity of foam using a glass column with a conductivity cell. Surface tension was measured by the drop weight method using a stalagmometer. GFA showed higher foaming activity than casein at any protein concentrations compared. Foam stability of GFA was comparable to that of casein. The reduction of disulfide bonds of GFA did not significantly affect its foaming properties at higher concentrations (> 3 mg/ml) of GFA. The ability of GFA to reduce surface tension was substantially affected by the ionic strength of solutions, suggesting the importance of the electrostatic interaction of GFA in its foaming activity. These results indicated a potential usefulness of GFA as a foaming agent in food processing.

(Received September 16, 2009)

はじめに

グアー豆 (*Cyamopsis Tetragonolobus*) の胚乳部から工業的にガラクトマンナンが精製され、グアーガムとして広く食品に用いられている。グアーガムを工業的に精製する際、グアー豆の約30%に相当する胚芽・種皮部 (ミール) が廃棄されており、ここには豆全体に含まれるタンパク質の約45%が含まれる^{1),2)}。我々は、このグアーミールの水抽出画分に高い起泡性を見出し、pH 4.0で等電点沈殿するタンパク質が高い起泡性を持つことを示し、グアー起泡性アルブミン GFA (Guar Foaming Albumin) として単離した³⁾。GFA の主成分は、見かけの分子量 6 kDa と 11kDa の 2 本のポリペプチドがジスルフィド結合した単純タンパク質である。GFA のアミノ酸組成は、植物タンパク質としては栄養価が高く、第 1 制限アミノ酸はリシンで、アミノ酸価は 82 であっ

た。小麦アレルギー患者の血清に対しても交差を示さず、泡沫安定性の高い卵白などの代替タンパク質としての利用が示唆された。

タンパク質で安定化された泡を利用した食品はアイスクリーム、スポンジケーキ、メレンゲをはじめとして数多くある。一方、泡の発生には γA に相当するエネルギーが必要である。ここで、 γ は溶液の表面張力、 A は新しく作られる表面積である。溶液の面積が最小値ではないため、泡沫は熱力学的に不安定な系といえる。したがって、これらの食品でタンパク質が安定な泡沫を作り出すには、タンパク質の持つ以下の能力が重要となる：1) 界面に素早く吸着出来る能力、2) 界面において速やかに変性し、疎水性/親水性のバランスを最適に保つ能力、3) 界面において変性したタンパク質同士が相互作用し、強く凝集し、高い粘弾性を持ったタンパク質の薄膜を形成する能力。最初の 2 つの能力はタンパク質が溶液の表面張力を減少し起泡性を示す必須要件であり、3 番目の能力は安定な泡沫特性を示すために必要となる。

京都女子大学食物栄養学科

* 大阪薫英女子短期大学生活科学科

これまでの研究では、濃度の非常に低いタンパク質試料溶液をサーモミキサーで攪拌して泡立て、生じた泡の体積により起泡性を評価した³⁾。この方法では、タンパク質間の相互作用が起りにくいいため、主にタンパク質の界面への吸着のしやすさと、タンパク質が本来持っている疎水領域と親水領域のバランスによる表面張力低下能が起泡性に大きく影響すると考えられる。しかし、泡の体積から評価される起泡性は、濃度や大きさのような泡の質的要因を必ずしも反映せず、泡の体積や、泡からの流動体の漏出の速度を正確に測定することが普通は難しいという指摘もある。このため、ラメラ（泡の膜）に含まれる液体の導電率を測定することにより起泡性を評価する方法が開発されている⁴⁾。本研究においては、この導電率の測定により、広い範囲のタンパク質濃度で起泡性と泡沫安定性の評価を行い、 β -カゼインなど他の起泡性の高いタンパク質と比較した。また、還元剤の添加による影響を調べるとともに、表面張力の測定を種々のタンパク質濃度で行い、起泡性につながる界面吸着のしやすさを他のタンパク質と比較した。

実験方法

1. GFAの調製

主に既報³⁾に従って行った。その概略を記すと、グアーミールに対し、50倍量の水を加え、低温室で一晩抽出を行なった後、4℃、8,000rpm、25分間遠心分離を行なった。得られた上清液を水抽出画分とした。その水抽出画分を4 M HClでpH 4.0に調製した後、1時間放置し遠心分離を行ない、得られた酸沈殿画分を、少量の10mM Tris-HCl (pH 7.8)を用いて溶かした後、1 M NaOHでpH 7.0に調製し、測定に使用する緩衝液に対して低温室で一晩透析を行なった。遠心分離後得られた上清液をGFAとして使用した。

2. 試料溶液の調製

起泡性と泡沫安定性の実験のための試料の調製には、すべて20 mM Tris-HCl (pH 7.8) 緩衝液を用いた。表面張力のNaCl濃度依存性を測定する際には、5 mM Tris-HCl (pH 7.8) 緩衝液に、NaClを必要な濃度になるように添加した。表面張力のpH依存性を測定する際は、GFAのリン酸バッファー溶液(0.1M NaCl, 5 mM PBS)を使用し、pHを調整した。タンパク質濃度は0.7mg/mlとした。

水溶性卵白溶液は、卵白部分をガーゼで濾し、濃厚卵白を除き、それぞれの緩衝液に透析して調製した。 β -カゼインは市販のもの(Sigma社)を使用

した。

3. タンパク質の定量

タンパク質の定量は、Bradford法により測定した⁵⁾。市販のプロテインスタンダードII牛血清アルブミン(Bio-Rad社)をスタンダードとし、その溶液濃度は吸光係数係数 $A^{1\%}=7.4$ を使用し、280nmにおける紫外線の吸光度から計算した。純水で5倍希釈したプロテインアッセイ染色液(Bio-Rad社, Bio-Rad Protein Assay)を用い、595nmでの吸光度の測定から求めた。

4. 起泡性及び泡沫安定性の測定

泡の起泡性と安定性は、伝導度計を用いて泡の導電率を測定することで評価した⁴⁾。すべての結果は少なくとも5回の独立した測定結果の平均値で示した。

a. 導電率の測定

ガラス管(内径1.7cm,長さ22cm)の片方を注射針(ゲージ番号26)を通したシリコン栓でふさぎ、垂直に固定する。上端から伝導度計(オムロン社, ES-51)の電極を差し込み、試料溶液2mlを入れた時に、伝導度計の下端が試料溶液水面から2.7cmになるように固定した。注射針から水蒸気で飽和した窒素ガスを試料溶液に通し、発生した泡の導電率を測定した。伝導度計にパソコンを接続し、経時的にデータを取り込んだ。

b. 起泡性の評価

試料溶液に窒素を流して始めて、発生した泡が伝導度計に入る瞬間(導電率が上昇した時)を測定開始時とし、泡が伝導度計の空気穴の下端(液面より10.3cm)に達したとき窒素を止めた。測定開始から、窒素流出停止までの時間を窒素流出停止時間とし、起泡性の評価に用いた。

c. 安定性の評価

窒素の流出を停止した瞬間を時間0とし、経時的に導電率を少なくとも5分間計測した。各種のタンパク質で測定した結果、本装置では、全てのタンパク質濃度で5分後の導電率は実質的に0となった。そこで、測定時間0での導電率の値を1とし、測定開始から5分後の値を0として、相対的な導電率の変化を求めて比較した。泡沫安定性は、相対的導電率が1/2となった時間($t_{1/2}$)により評価した。

5. 滴重法による表面張力の測定

a. 滴重法の原理

外径 $2r$ (cm)の滴数計の管より落下する液の一滴の重量を m (g)とすれば、この一滴に下向きに加わる重力は mg (dyn)である。液の表面張力を γ (dyn/cm)とすれば、管と液滴との境界線は管の外

周 $2\pi r$ (cm) であり、液滴に上向きに加わる抗力は $2\pi r\gamma$ (dyn) で表わされる。液滴が成長しまさに落下しようとする瞬間に、これらの力が釣り合い、 $mg = 2\pi r\gamma$ が成立するので、液滴の表面張力 γ (dyn/cm) は次の式で与えられる。

$$\gamma = m \times \frac{g}{2\pi r} \times \phi \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 g は重力加速度 (cm/s^2) である。また実際には、液滴のすべてが落下するわけではなく、重力加速度 g が必ずしも鉛直に働かないため補正が必要となる。この補正項が ϕ である。この式より、液滴の重量を測定することで、表面張力を求めることができる。なお、 ϕ は Harkins と Brown の実験結果より V を一滴の体積 (cm^3) として、 r/V の関数として与えられており、これを利用した⁶⁾。

b. 滴数計の使用

滴数計は市販 (株式会社相互理科学硝子製作所) のものを使用し、本実験を行う前に純水を用いて滴数計の校正を行った。滴数計に毛細管をシリコンチューブでつなぎ、滴数計の純水 1 滴の落下時間が 2 分以上になるように毛細管を調整した。滴数計を固定するスタンドは振動を防ぐため下にゴム製のマット上に設置し、四方と上面をアクリル板の囲いで覆い、その内部の水蒸気を飽和状態に保つため水を入れた瓶を設置し、瓶の中に温度計を置いた。液滴計は洗剤で洗った後、蒸留水でよく洗浄し、アセトンを通して内部を乾かして使用した。特に、液滴の付着する滴数計の下端部は、洗浄後絶対に触らないようにし、汚れや傷、欠け等が無いことを確認した。

測定時は、まず試料溶液 (2 ml) を滴数計の管の下端から吸い上げる。管の真下にあらかじめ秤量した秤量瓶を設置する。液滴が 5 滴落ちたら、すぐに秤量瓶のふたをしめ、重量を求める。秤量瓶とふたの風袋を差し引き、1 滴の液滴の重さを計算する。重量測定は各濃度あたり必ず 3 回以上行い平均値を求めた。液の濃度が変わる際には、新しく測定する溶液を用いて滴数計の内部・下端を共洗いした。

c. 滴数計の校正

純水 1 滴の平均重量 m_{av} (g) と、測定時の液温に対応する水の密度 ρ_w (g/cm^3) をもとに 1 滴の体積 V (cm^3) = $m_{av} \div \rho_w$ および $V^{1/3}$ (cm) を求めた。測定時の液温に対応する水の表面張力 γ_w は判明しているため³⁾、(1)式に代入、変形し、

$$\left\{ \frac{m_{av} \times g}{2\pi} \times \frac{\phi}{r} \right\} = \gamma_w \quad \dots\dots(1a)$$

となるように方程式(1a)を解くが、この際 Harkins-Brown の補正定数 ($r/V^{1/3}$ と ϕ) を利用した⁶⁾。ここで $r/V^{1/3}$ に ϕ が対応している。つまり補正定数の $r/V^{1/3}$ に $V^{1/3}$ を乗ずると $r/V^{1/3} \times V^{1/3} = r$ が求まるため、式(1a)は、以下の式(1b)のように置換できる。

$$\left\{ \frac{m \times g}{2\pi \times V^{1/3}} \right\} \left[\frac{\phi}{\frac{r}{V^{1/3}}} \right] = \gamma_w \quad \dots\dots(1b)$$

式(1b)の左辺第 1 項は定数項となる。よって、式(1b)を満足するまで、つまり (左辺 - γ_w) = 0 となるまで補正定数の $r/V^{1/3}$ と ϕ を順次代入して、試行錯誤により解を求める。しかし、通常式 (1b) を完全に満足する結果は得られないため、(左辺 - γ_w) が 0 前後になる領域で、補正定数から求めた $r/V^{1/3}$ と ϕ との関係式を利用し、さらに細かく $r/V^{1/3}$ と ϕ を推定し、式(1b)に代入する方法により最適解を得た。

結果と考察

1. 窒素流出停止時間による起泡性の評価

窒素ガスを流出し、泡が伝導度計に入る瞬間を測定開始とし、発生した泡が一定の体積 (23.3 cm^3) に達し伝導度計の空気穴の下端 (10.3cm) に到達するまでの時間を窒素停止時間として求めた。GFA と β -カゼインの試料溶液で、タンパク質濃度と窒素停止時間の関係を図 1 に示した。

いずれのタンパク質試料溶液も、濃度が高くなるにつれて窒素停止時間が短くなったが、GFA は β -

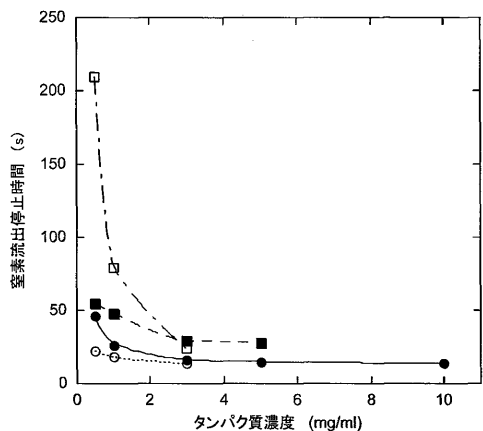


図 1 窒素流出停止時間のタンパク質濃度による変化

起泡性の評価のために、発生した泡が一定の体積に到達するまでの時間を窒素流出停止時間として求めた。GFA (●)、 β -カゼイン (■)、100mM 2-メルカプトエタノール存在下の GFA (○)、100mM 2-メルカプトエタノール存在下の β -カゼイン (□)

カゼインよりも窒素停止時間が短かく、 β -カゼインよりも起泡性の高いことが示された。なお、オボアルブミンを使い同様の実験をしたところ、3 mg/ml以下では発生した泡が不安定で装置の上端にまで達しなかったため図示していないが、それ以上の濃度では β -カゼインよりも窒素停止時間が短く、高い起泡性を示した。ただし、いずれのタンパク質濃度でもオボアルブミンの起泡性がGFAのそれを上回ることにはなかった。したがって、GFAは、10mg/ml以下のいずれの濃度においても β -カゼインとオボアルブミンより高い起泡性を持つことが示された。

タンパク質が起泡性を示し泡沫安定性を持つ機構は、以下のように考えられている⁷⁾。溶液中のタンパク質は、まず気液界面に吸着する。この過程は拡散による界面への吸着であるので、タンパク質の拡散速度により規定されるため、一般的には低分子タンパク質のほうが速い。また、この過程は、低分子界面活性剤などでは可逆的であるが、タンパク質の場合吸着後引き続き起こるタンパク質のコンフォメーション変化のために、不可逆的である。吸着されたタンパク質は、界面で疎水性領域を気相に、親水性領域を液相に配向することで水の表面張力を低下させ、泡沫の発生を助ける。タンパク質が気液界面に配向する際に、タンパク質の高次構造の安定性が問題となる。いわゆる柔軟性が高く、堅固な構造をもたない β -カゼインのようなタンパク質は非常に起泡性が高いが、堅固な構造を持つオボアルブミンやリゾチームのような球状タンパク質の起泡性は低い。界面に配向したタンパク質は、さらに変性を起こし、互いに相互作用することで安定なタンパク質薄膜を形成し、気泡の安定性に寄与する。気泡は2層のタンパク質膜の間に水が保持されたラメラ構造を持っており、一般にタンパク質濃度が高いほど薄膜の粘度が上がりラメラの安定性が大きくなり、泡沫安定性が増加する。

球状タンパク質で、安定したコンフォメーションを持つ未変性オボアルブミンは、卵白の主要タンパク質であるが、卵白と異なり精製された場合は起泡性の低いことが知られている⁷⁾。一方、分子量が大きく、安定した2次構造のない β -カゼインは、熱やpHなどにより容易に変性され、柔軟なコンフォメーションを持つことが知られており、起泡性の高い代表的なタンパク質である⁸⁾。これに対して、GFAは、比較的分子量の小さいタンパク質が主成分であり、また、アミノ酸分析の結果からシステインを多く含むことが明らかになっており、少なくとも一つ

の分子間ジスルフィド結合を含むことが示されている⁹⁾。もしGFAが、その主成分である見かけの分子量6 kDaと11 kDaの2本のポリペプチド鎖だけから成るとすれば、アミノ酸組成の結果から最大3個の分子内ジスルフィド結合を持つ計算となる。従って、GFAは安定な3次構造を持つ低分子の球状タンパク質であることが予想されるにもかかわらず、 β -カゼインより高い起泡性を持っていることになる。GFAの分子量が β -カゼインよりも小さいことは気液界面への拡散速度が大きいことになり、GFAの高い起泡性と一致する。ただし、硬い構造にもかかわらず界面の表面吸着が強く、起泡能力の大きいことは、GFAの未変性状態の疎水性と親水性のバランスが適切に保たれているためであると考えられる。

そこで、ジスルフィド結合を解裂する2-メルカプトエタノールを添加したときの影響を調べてみると(図1)、GFAでは、低タンパク質濃度でメルカプトエタノール添加時に窒素停止時間が短くなり、ジスルフィド結合の還元により起泡性が増加することが示された。しかし、3 mg/ml以上になると還元の影響は少なくなった。この結果は、前報で³⁾、低濃度で起泡性を調べた時、還元の影響が少なかった結果と矛盾した。前報での起泡性測定では、試験管の激しい振動(90秒間)により泡を発生させており、この過程でタンパク質の界面変性が進み、還元の影響が少なかったのかもしれない。つまり、後述するように、GFAの安定性が還元により増加していることを考慮すると、前報の結果は、起泡性に加えて安定性も加味された結果である可能性がある。いずれにしろ今回、3 mg/ml以上の濃度では還元の影響が少ないことから、GFAの場合、分子間および分子内ジスルフィド結合解裂による自由度の増加よりも、疎水性/親水性のバランスが起泡性により重要であることを示唆している。一方、 β -カゼインの場合は、低いタンパク質濃度で窒素停止時間が長くなり、還元による起泡性の低下が見られたが、高いタンパク質濃度(3 mg/ml以上)では、GFAの場合と同様に、還元による影響は見られなくなった。比較的濃度の高い領域では気液界面に吸着されたタンパク質同士の相互作用により、安定なラメラの形成がされやすくなるため、還元による影響は少なくなったと考えられる。低いタンパク質濃度において還元すると起泡性が低下するのは、 β -カゼインの界面変性では不均一に β -カゼインの凝集が起こることが知られており⁸⁾、この凝集に κ -カゼインの

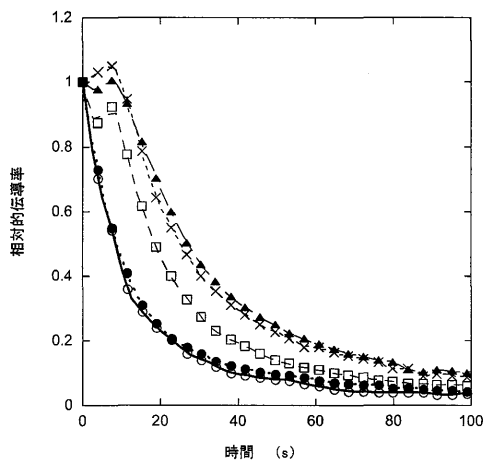


図 2 種々のタンパク質濃度における伝導率の変化

泡沫安定性の評価のために、窒素流出停止後の伝導率の時間変化を種々の GFA タンパク質濃度で測定し、測定開始時の伝導率を 1 として相対的伝導率で表した。結果は同一条件下での 5 回の測定結果の平均値で示してある。GFA の濃度は、0.5 (○), 1.0 (●), 3.0 (□), 5.0 (×), 10.0 (▲) mg/ml である。

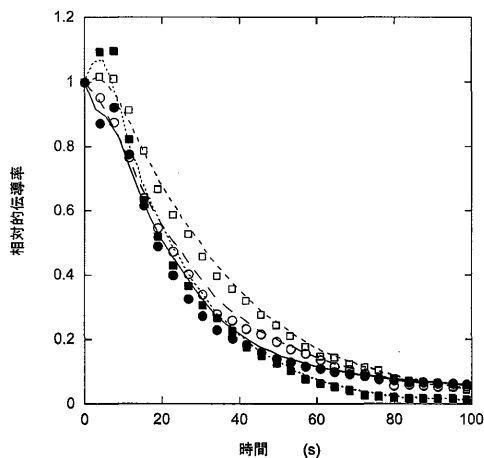


図 3 一定のタンパク質濃度 (3 mg/ml) における GFA と β -カゼインの伝導率の変化

図 2 と同様に測定した結果である。GFA (●), β -カゼイン (■), 100mM 2-メルカプトエタノール存在下の GFA (○), 100mM 2-メルカプトエタノール存在下の β -カゼイン (□)

ジスルフィド結合が関与しているためかも知れない⁹⁾。

2. 導電率による泡沫安定性の評価

図 2 は各種の GFA タンパク質濃度で、泡がガラス管の上端に達し窒素を止めた時点の導電率の値を 1 とし、相対的な導電率の変化を比較したものである。濃度が高くなるにつれ、導電率の値がゆるやか

に低下するという結果が得られた。また、低濃度 (0.5 mg/ml, 1.0 mg/ml) では、窒素を止めた時点 (0 秒) からすぐに値が低下しているが、高濃度 (5.0 mg/ml, 10.0 mg/ml) では窒素を止めた後も、10 秒程度その値を保ってから、ゆるやかに低下しており、高濃度における泡沫安定性の高さを示している。

同じタンパク質濃度 (3 mg/ml) で、 β -カゼインについても調べたところ (図 3), 同様な変化が認められ、GFA は β -カゼインに比べて、導電率の値が最もゆるやかに低下しており、泡沫安定性が高いことがわかった。なお、オボアルブミン (3 および 5 mg/ml) についても同様の実験を行なったところ、いずれの濃度においても、相対的導電率の低下は GFA よりも速かった (データ未掲載)。

また、2-メルカプトエタノールを添加したところ、グラフの形状から比較すると、GFA については大きな差が見られなかったが、 β -カゼインについては、導電率の値が半減するまでの時間が長くなり、泡沫安定性がやや増加した。ただし、タンパク質濃度の低い時 (0.5 mg/ml) には、逆に還元により泡沫安定性が低下した (データ未掲載)。

3. 表面張力の測定

a. GFA 溶液の表面張力

GFA 溶液 (5 mM Tris-HCl バッファー, 100 mM NaCl, pH 6.8) の表面張力はタンパク質濃度の上昇に伴い (0~0.1 mg/ml) 急激な減少がみられ (図 4),

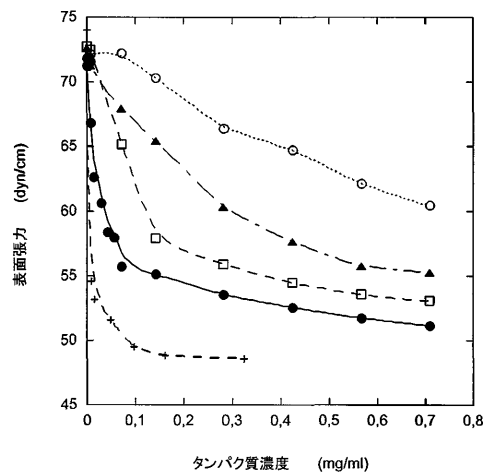


図 4 GFA の表面張力低下能力の NaCl 濃度依存性

表面張力低下能力に与えるイオン強度の影響を調べるために、種々のタンパク質濃度で表面張力を測定した。GFA 溶液 (5 mM Tris-HCl, pH 7.8) に、NaCl 濃度が 0 (○), 10 (▲), 50 (□), 100 (●) mM となるように添加した。 β -カゼイン溶液 (10 mM Tris-HCl, pH 7.8, 100 mM NaCl) の表面張力低下も参考に示した (+)。

それ以降もゆるやかであるが減少し、1.6mg/mlでおよそ43dyn/cmであった。GFAの表面張力低下能は、NaClの濃度に大きく依存し、食塩濃度を順次低下した時(50, 10, 0mM NaCl)その能力は大きく低下した。

β -カゼインの表面張力低下能と比較したところ、 β -カゼインのそれはGFAより大きく、低タンパク質濃度(0から0.16mg/ml)において急激な減少がみられ、0.12mg/mlでおよそ52dyn/cmまで減少した。ただし、 β -カゼインについては塩濃度の影響はGFA程大きくなく、図4には、100mM NaCl存在下での表面張力の変化のみ示してある。なお、卵白溶液について表面張力の変化を調べたところ、卵白の場合、もともとこの濃度範囲(1mg/ml以下)では表面張力低下能が見られなかったため、7mg/mlまでの範囲で調べたが、いずれの場合も、塩添加による影響は少なく、表面張力の低下は7dyn/cm程度であった(50mM NaCl存在下)。

GFAの表面張力低下能が、100mM NaCl存在下で最も高かったのは、塩イオンによるGFAタンパク質の表面電荷が中和されるためと考えられる。 β -カゼインよりも塩の影響が大きく、GFAの界面変性とそれに伴う分子間相互作用には、表面電荷が大きく影響するものと思われた。また、卵白は β -カゼインやGFAに比べ、表面張力の減少は小さく、起泡性は比較的低いことがわかった。

GFA溶液のpHによる影響を調べたところ、pH5.5~9.0の範囲ではpH7.0で表面張力は最低となり、pH9.0最大であった(図5)。

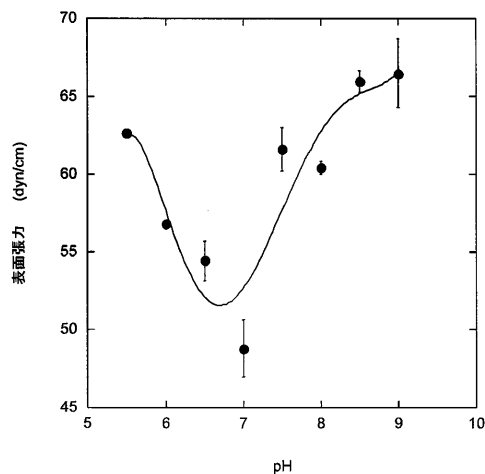


図5 GFA溶液の表面張力pH依存性

GFAの表面張力低下能力に与えるpHの影響を調べた。4回の測定の平均値と標準偏差を示してある。

通常、タンパク質溶液の泡安定性は、そのタンパク質が可溶性の場合、等電点付近で最高になることが知られている⁷⁾。GFAは、pH4.0で等電点沈殿して得られた画分であり、酸性側で泡沫安定性が上昇することが期待される。しかし、表面張力の変化をみるとpH5.5からpH7.0に向けて減少し、pH7.0付近で最低となり、pH7.0からpH9.0に向けて上昇した。今回測定したpH5.5~pH9.0ではpH9.0で最高値を示した。等電点pH5.0における表面張力は溶液が沈殿するため測定していないが、おそらくpH5.5よりも表面張力の減少は少なく、高い値を示す可能性がある。これは、等電点に近いほど可溶性タンパク質が少なくなるので、タンパク質濃度が下がり、水の表面張力が十分に低下しないためである。

要 旨

【目的】我々はグアー豆からグアーガムを精製する際に廃棄されるグアーミールから、起泡性の高いタンパク質画分を単離し、グアー起泡性アルブミンGFA (Guar Foaming Albumin)と命名した。本研究ではGFAの起泡性及び泡沫安定性を導電率によって定量的に測定し、さらに、起泡性の第一要件である表面張力の低下減少能を滴重法により測定することで、GFAの起泡特性を詳細に調べることとした。

【方法】タンパク質試料溶液に窒素ガスを通し、発生した泡の導電率を測定した。発生した泡がガラス管の上端に達するまでの時間を起泡時間とし、起泡性の評価として用いた。また、導電率の値の低下から、泡沫安定性を評価した。表面張力の測定には滴重法を用いた。

【結果・考察】GFAは、オボアルブミンや β -カゼインと比べて、起泡性、泡沫安定性ともに優れていることがわかった。またGFAは、ジスルフィド結合を切断するメルカプトエタノールを加えても、影響を受けにくいことが示された。GFA溶液の表面張力は低タンパク質濃度で急激な減少を示したが、 β -カゼインよりも低下可能は低かった。また塩の添加により表面張力低下能は促進された。pHによる影響を調べたところpH7.0で表面張力は最低の値を示した。これらの結果、起泡性を利用する食品で、GFAは卵白などの代替タンパク質として使用できることが示唆された。

引用文献

- 1) J. P. Nath, N. Subramanian, M. S. Narasinga-Rao: *J. Agric. Food Chem.*, 26, 1243 (1978)

- 2) J. P. Nath, N. Subramanian, M. S. Narasinga-Rao :
J. Agric. Food Chem. , **28**, 844 (1980)
- 3) A. Shimoyama, S. Kido, Y. Kinekawa, Y. Doi : *J. Agric. Food Chem.* , **56**, 9200 (2008)
- 4) A. Kato, A. Takahashi, N. Matsudomi, K. Kobayashi:
J. Food Sci. , **48**, 62 (1983)
- 5) M. M. Bradford : *Anal. Biochem.* , **72**, 248 (1976)
- 6) W. D. Harkins, F. E. Brown: *J. Am. Chem. Soc.* , **41**, 499 (1919)
- 7) S. Damodaran : Amino acids, peptides, and protein.
In *Fennema's Food Chemistry*, 4 th ed.; Damodaran, S.; Parkin, K.L.; Fennema, O. R. , Eds.; CRC Press: New York, 2007 ; p. 277–281.
- 8) D. Langevin : *Chem. Phys. Chem.* , **9**, 510 (2008)
- 9) H. M. Farrell, Jr., E. D. Wickham, M. L. Groves : *J. Dairy Sci.* , **81**, 2974 (1998)