

豆の種類による Aquafaba の泡沫特性

Foaming properties of Aquafaba by the kind of beans

舟橋 由美 Yumi Funahashi
(家政学部管理栄養学科)

抄 録

卵白は起泡性に優れている食品であるが、アレルギー物質を含む特定原材料 7 品目の 1 つでもあるため、その代替として起泡性を有する Aquafaba（豆のゆで汁）を利用しようと考えた。そこで、Aquafaba の調理特性を探るべく、大豆とひよこ豆、手亡いんげん豆のゆで汁の起泡性や泡沫の安定性の比較検討を試みた。ひよこ豆ゆで汁の泡沫は離水量が少なく、安定性が非常に高かった。大豆のゆで汁は起泡力に優れており、950rpm での攪拌条件下で卵白と同等の起泡力が得られた。ひよこ豆のゆで汁については、試料温度 40℃において卵白より攪拌に時間を要するものの、卵白と同等の起泡力が得られた。

キーワード

アクアファバ Aquafaba／豆 Beans／起泡 Whipping／泡沫 Foam

目 次

- 1 緒言
- 2 方法
 - 2.1 試料調製
 - 2.2 試料
 - 2.3 操作手順
- 3 結果および考察
 - 3.1 起泡性
 - 3.2 泡沫の安定性
- 4 まとめ

1 緒言

令和 3 年度食物アレルギーに関連する食品表示に関する調査研究事業報告書¹⁾によると、即時型食物アレルギー原因食物のうち最も多いのが鶏卵（33.4%）で、牛乳（18.6%）、木の実類（13.5%）が鶏卵に続く。年齢群別に原因食物をみると、鶏卵のアレルギーは 0 歳では 60.6%、1～2 歳では 36.3%、3～6 歳では 14.7%、7～17 歳では 14.5%と加齢に伴い減少していく¹⁾。鶏卵の主なアレルゲンは、オ

ボムコイドやオボアルブミンなど卵白に多く含まれているタンパク質であり、アレルギー発症の主要原因食物と同時に、鶏卵は様々な料理や菓子、加工品に幅広く利用されている。特に卵白は起泡性に優れており、菓子作りに欠かせない特性の一つでもある。また、アレルギーが原因で食べられない人だけでなく、自ら口にしない人もいる。完全菜食主義であるヴィーガンは、動物に苦しみを与えることへの嫌悪から動物の肉（鳥肉・魚肉・その他の魚介類）と卵・

乳類を食べず、また動物製品（皮製品・シルクウール・羊毛脂・ゼラチンなど）を身につけたりしない人たち²⁾であり、ヴィーガンは野菜や果物、穀類、豆類などの植物性食品を食べていることが知られている。

2015年頃からひよこ豆缶の残りの液体を泡立てたものを卵白の代替品として多くのデザートに利用されるようになってきた。その後、ラテン語で水を意味する「Aqua」と豆を意味する「faba」を連結した「Aquafaba」という言葉が生み出され、ソーシャルネットワークを通じて、新しい鶏卵代替品としてヴィーガンの間で広まった。

栄養学的見地からの評価の高まりや食材として広く用いられるようになった背景から、これまでに豆乳を用いて攪拌条件を変化させ泡沫を調製し、泡沫の特性について検討した報告^{3~5)}があるものの、Aquafabaの調理特性に関する報告が見当たらなかった。そこで、Aquafabaの調理特性を探るべく、本研究では大豆とひよこ豆、手亡いんげん豆のゆで汁の起泡性や泡沫の安定性の比較検討を試みた。

2 方法

2.1 試料調製

1) 大豆

- ①乾燥大豆(2018年北海道産つるのこ大豆)400gに豆重量の3.5倍の水を加え、冷蔵庫内で48時間浸漬した。
- ②鍋に浸漬した豆ともどし汁を入れ、沸騰するまで強火で8~9分加熱してから、スロークッカー(TWINBIRD ED-4717)の鍋に移し、「強」で90分加熱した。
- ③そのまま煮汁中で4時間冷ました後、冷蔵庫で16時間保存した。
- ④裏ごし器(30メッシュ)を利用してゆで汁と豆を分け、ゆで汁のpHを測定(pH計ASONE AS600)した。pH : 6.23

2) ひよこ豆

- ①乾燥ひよこ豆(アメリカ産)400gに豆重量の3.5倍の水を加え、冷蔵庫内で48時間浸漬した。
- ②鍋に浸漬した豆ともどし汁を入れ、沸騰するまで強火で8~9分加熱してから、スロークッカー(TWINBIRD ED-4717)の鍋に移し、「強」で90分加熱した。
- ③そのまま煮汁中で4時間冷ました後、冷蔵庫で16

時間保存した。

- ④裏ごし器(30メッシュ)を利用してゆで汁と豆を分け、ゆで汁のpHを測定(pH計ASONE AS600)した。pH : 6.36

3) 手亡いんげん豆

- ①乾燥手亡いんげん豆(2018年北海道産)600gに豆重量の2.5倍の水を加え、冷蔵庫内で48時間浸漬した。
- ②鍋に浸漬した豆ともどし汁を入れ、沸騰するまで強火で8~9分加熱してから、スロークッカー(TWINBIRD ED-4717)の鍋に移し、「強」で50分加熱した。
- ③そのまま煮汁中で4時間冷ました後、冷蔵庫で16時間保存した。
- ④裏ごし器(30メッシュ)を利用してゆで汁と豆を分け、ゆで汁のpHを測定(pH計ASONE AS600)した。pH : 6.38

2.2 試料

試料調製にて得られた各豆のゆで汁 30g

2.3 操作手順

1) 起泡力の測定

(1) 条件

試料温度 : 10℃、25℃、40℃

攪拌速度 : 650rpm、950rpm

攪拌時間 : 1分、2分、3分、4分、5分、6分、8分、10分、15分、20分

(2) 操作

- ①パイレックスボウルに各試料30gを秤量してポリエチレン製フィルムで覆い、恒温槽にて条件温度に達したところで、ハンドミキサー(MK-H4 Panasonic、带状攪拌翼)で泡立てた。
- ②直ちにシャーレ(Φ4.8×1.4 cm)に泡沫を充填し、泡沫の重さを3回測定した。泡沫中の液体体積に対する気体体積の割合を起泡力³⁾として算出した。

$$\text{起泡力} = \text{気体体積} / \text{液体体積} \times 100$$

$$\text{液体体積} = \text{泡沫重量} / \text{試料密度}$$

$$\text{気体体積} = \text{シャーレの容積} - \text{液体体積}$$

2) 泡沫の安定性

(1) 条件

試料温度 : 10℃、25℃、40℃

攪拌速度：650rpm、950rpm

攪拌時間：5 分、10 分

(2) 操作

①パイレックスボウルに各試料 30g を秤量してポリエチレン製フィルムで覆い、恒温槽にて条件温度に達したところで、ハンドミキサー (MK-H4 Panasonic、带状攪拌翼) で泡立てた。

②50ml 容量のメスシリンダーの上に $\phi 7.5\text{cm}$ の目皿付き漏斗を 2 本置き、これに 10.0g ずつ泡沫を乗せ、3 分、5 分、10 分、15 分、必要に応じて 20 分、25 分、30 分ごとに離水の質量を測定し、離水率³⁾を算出した。

離水率 (%、w/w) = 離水量 (g) / 10 × 100

3) 統計解析

統計ソフト: EZR (64-bit) ver.1.40 統計解析: t 検定、一元配置分散分析 (one-way ANOVA)、Tukey の多重比較

3 結果および考察

3.1 起泡性

攪拌速度 650rpm における大豆、ひよこ豆、手亡いんげん豆のゆで汁の起泡力を図 1 に示した。

攪拌時に起泡の状態を観察したところ、いずれのゆで汁も攪拌 3 分では泡沫が粗く、液体部分がある状態であったが徐々に液体部分が減り、大豆のゆで汁は 4~5 分、ひよこ豆のゆで汁は 5~6 分経過時で安定した状態となったが、手亡いんげん豆のゆで汁の泡沫は他の 2 つと比べるとやや粗く水っぽい状態であった。

試料温度 10℃において、起泡力が 600 に達するまでにかかった時間は、大豆のゆで汁が 4 分であったのに対し、ひよこ豆や手亡いんげん豆のゆで汁は 15~20 分であった。25℃と 40℃において、起泡力が 600 に達するまでにかかった時間は、大豆のゆで汁が 3 分、ひよこ豆のゆで汁が順に 8 分・6 分、手亡いんげん豆のゆで汁が順に 5 分・10 分であり、時間の経過とともにいずれの豆のゆで汁の起泡力は上昇した。攪拌速度 650rpm では、試料温度が高くなるにつれて起泡力が高くなり、いずれの試料温度においても大豆のゆで汁の起泡力が高くなった。

攪拌速度 950rpm における大豆、ひよこ豆、手亡いんげん豆のゆで汁の起泡力を図 2 に示した。

大豆のゆで汁とひよこ豆のゆで汁は攪拌 3 分では

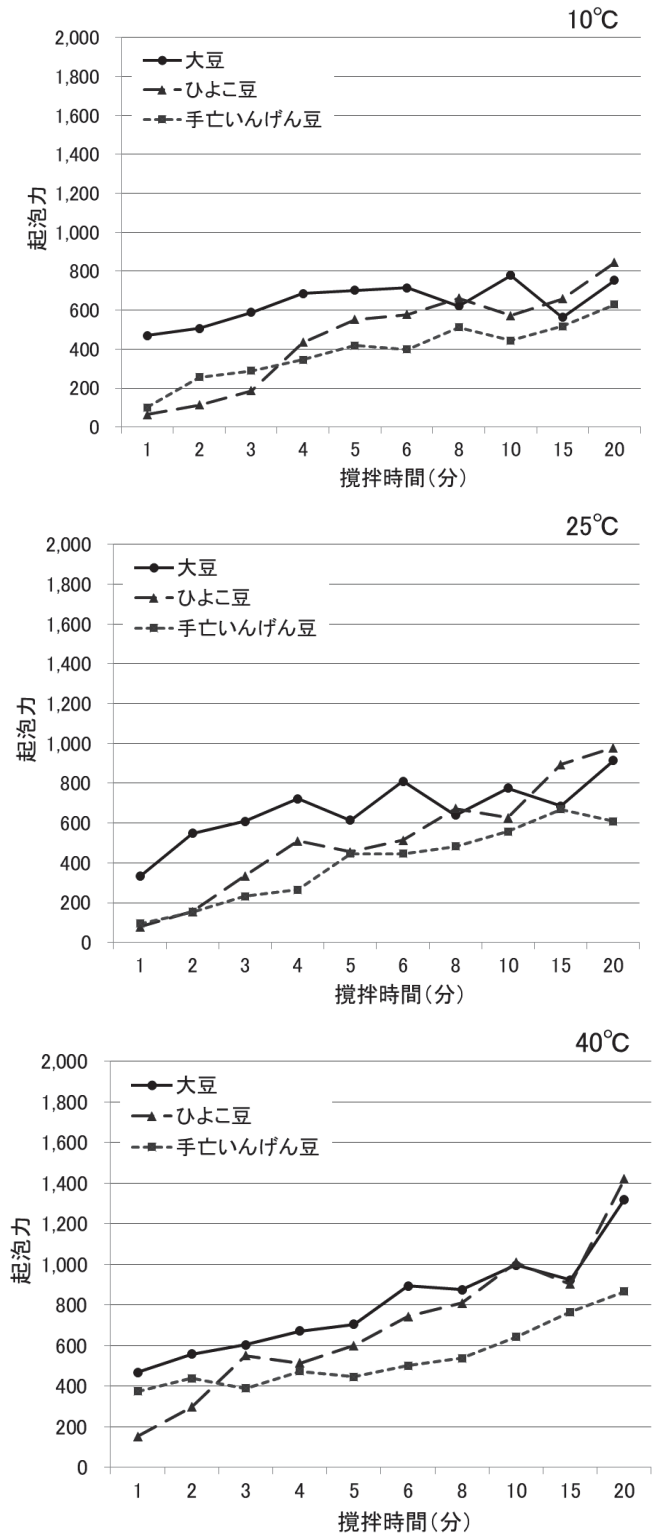


図 1 攪拌速度 650rpm での Aquafaba の起泡力

泡沫が粗く、液体部分がある状態であったが、徐々に液体部分が減って泡沫が均一になっていき、4~5 分以降で安定した状態となり、ひよこ豆ゆで汁の泡沫は微細であった。一方、手亡いんげん豆のゆで汁は攪拌 8 分以降で均一な泡沫となってきたが、他の 2 種と比較すると泡沫は粗かった。

試料温度 10℃と 25℃において、起泡力が 600 に

達するまでにかかった時間は、ひよこ豆ゆで汁が8分、手亡いんげん豆のゆで汁が15分であったのに対し、大豆のゆで汁は大豆のゆで汁は攪拌時間3分で起泡力が約800となった。試料温度40℃において、起泡力が600に達するまでにかかった攪拌時間は、大豆のゆで汁が2分、ひよこ豆のゆで汁が4分、手亡いんげん豆のゆで汁が10分であり、時間の経過とともにいずれの豆のゆで汁の起泡力は上昇した。攪拌速度950rpmにおいても試料温度が高くなると起泡力が上昇する傾向がみられ、その傾向は特にひよこ豆のゆで汁で顕著であった。また、回転速度650rpmと同様にいずれの試料温度においても大豆のゆで汁の起泡力が高くなった。

攪拌速度650rpmで起泡した場合と比べると、大豆のゆで汁とひよこ豆のゆで汁は950rpmで起泡した方が起泡力が高くなる傾向が見られ、特に大豆のゆで汁は650rpmよりも有意に高い起泡力を示した($p<0.05$)。ひよこ豆のゆで汁は大豆のゆで汁と異なり、攪拌速度を上げて起泡力の大きな上昇が見られなかった。ひよこ豆のゆで汁は試料温度10℃と25℃において安定した泡沫が得られたのは攪拌5～6分以降で、大豆のゆで汁よりも安定した泡沫が得られるまでに時間がかかった。この理由の一因としてひよこ豆のゆで汁の粘性が高かったことが挙げられる。柘植らの報告⁹⁾より、粘性の高い液体は、粘性の低い液体に比べ起泡力が低値を示す傾向にあるという。このことから、大豆のゆで汁に比べひよこ豆のゆで汁は、回転速度が低い場合や試料温度が低温でゆで汁の粘性が高い状態では起泡しにくかったのではないかと推測される。一方、試料温度40℃においては、ゆで汁の粘度が低下したため、回転速度の影響を受けやすくなったと考えられる。

手亡いんげん豆のゆで汁における攪拌速度による起泡力への影響をみると、攪拌時間が長くなっても起泡力の差が大きくなることはなく、650rpmと950rpmの起泡力はほとんど同値であった。手亡いんげん豆のゆで汁は、大豆のゆで汁やひよこ豆のゆで汁と比べて粘度が非常に低く、得られた泡沫は水っぽいものであった。さらに、回転速度950rpmにおいて大豆のゆで汁とひよこ豆のゆで汁は、いずれの試料温度においても起泡力が1,000を超えたが、手亡いんげん豆のゆで汁は20分攪拌しても起泡力は1,000には至らなかった。

北畠ら⁶⁾は、泡沫の形成は三段階に分かれ、第一段階ではタンパク質分子が溶液中に拡散して気一液

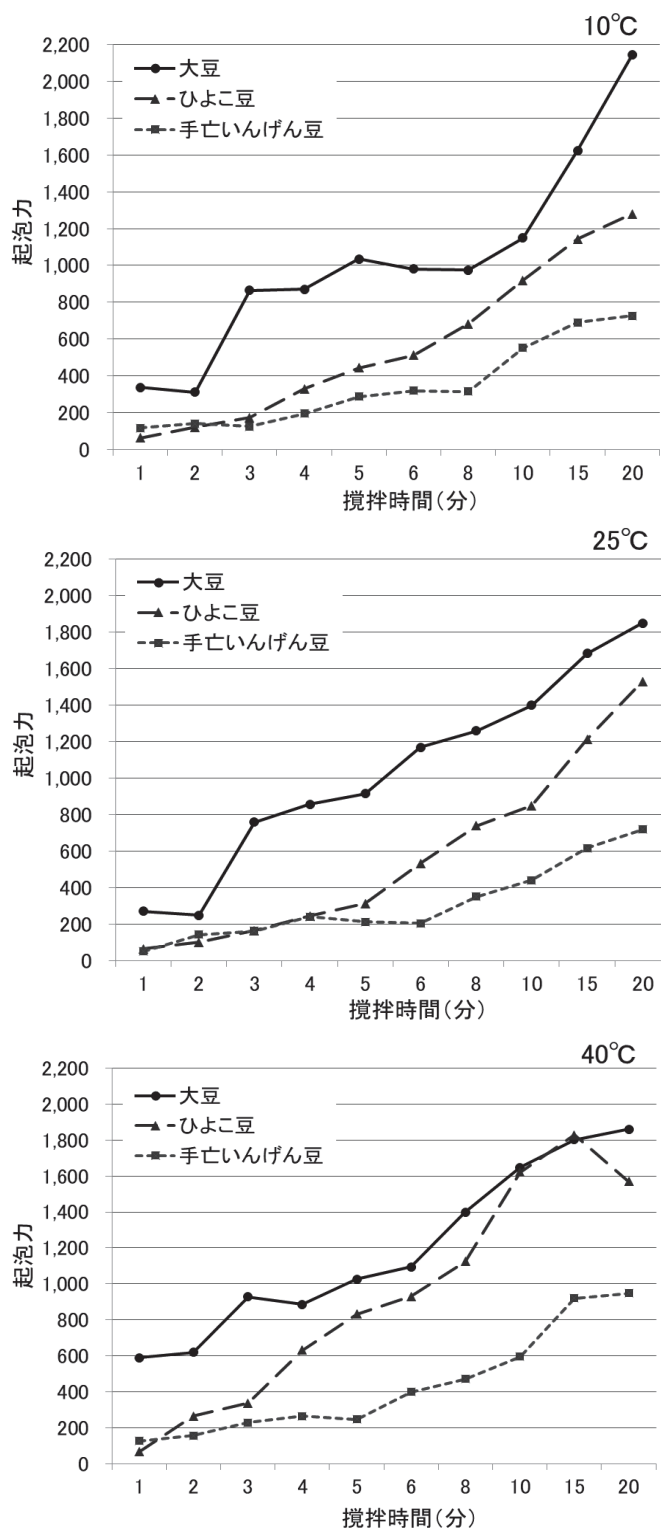


図2 攪拌速度950rpmでのAquafabaの起泡力

界面に到達し、第二段階ではタンパク質の界面への吸着が起こり、表面の膜を形成する。第三段階では吸着タンパク質分子同士が互いに相互作用して、タンパク質の二次元網目構造が形成され、結果としてより安定な泡沫になる。卵白や大豆タンパク質等では第三段階に入るまでに時間がかかるために、この間に攪拌の機械的作用によって破泡が起きてしまい、

起泡と破泡が繰り返されるようになると述べている。したがって、手亡いんげん豆のゆで汁の場合には、他の豆のゆで汁に比べて早期に破泡と起泡が繰り返し行われているために、起泡力にほとんど変化が見られなかったと考えられる。

金親ら³⁾は、ハンドミキサーを用いて市販無調整豆乳を起泡しているが、攪拌初期に起泡力が高く、起泡2分後以降は破泡と起泡が繰り返されて、起泡力にほとんど変化が見られなかったと報告している。粘度が低い豆乳と同様に、手亡いんげん豆のゆで汁は破泡が早く、高い起泡力は得られにくいと推測される。

金親らの報告³⁾より、950rpmにおける卵白の起泡力の図を引用した(図3)。本実験で用いたハンドミキサーに装着した攪拌翼は带状攪拌翼であり、図3のFlatに該当する。卵白を950rpmで攪拌した場合、6分では1,100、8分では約1,400の起泡力を示している。大豆のゆで汁の起泡力は、試料温度40℃において攪拌6分では1,094、8分では1,400を示し、また、試料温度25℃では、攪拌6分では1,167、10分では1,398となり、卵白の起泡力と遜色ない結果であった。ひよこ豆のゆで汁の起泡力は、試料温度40℃において攪拌10分で1,345となり、卵白より攪拌に時間を要するものの、卵白の起泡力と同程度の値となった。

起泡力の高さは、大豆のゆで汁が最も高く、次いでひよこ豆のゆで汁であり、手亡いんげん豆のゆで汁の起泡力は最も低いという結果となった。

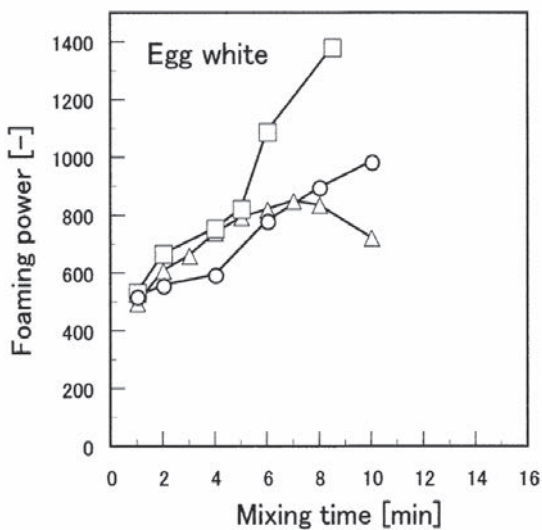


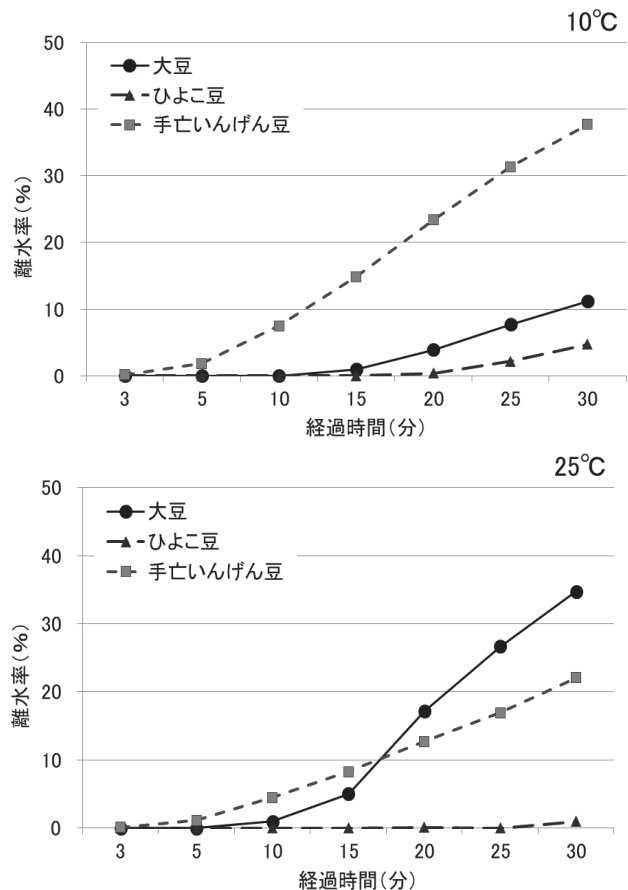
図3 Effects of mixing time on foaming power³⁾
with 3 types of agitator at 950 rpm
□ : Flat, ○ : stick, △ : whipper

起泡力は、通常、液相の界面活性剤もしくはタンパク質濃度の上昇とともに増加し、見かけ上一定値に達する⁶⁾。それぞれの豆100g中のたんぱく質の含有量は、黄大豆(国産・乾)32.9g、ひよこ豆(乾)16.7g、いんげん豆(乾)17.7g⁷⁾であり、大豆はたんぱく質が主成分である。また、大豆にはサポニンが含まれており、サポニンは界面活性作用を有する。合谷らの報告⁸⁾によると、市販の大豆サポニンを用いてサポニン水溶液の起泡性を調べたところ、サポニン濃度0.1%までは起泡性が急激に増加し、それ以上の濃度で一定となったとある。乾燥豆に含まれるたんぱく質の一部がゆで汁中に移行することを踏まえると、大豆はたんぱく質含有率が高く、起泡性を有するサポニンを含むため起泡力を高める一因となる可能性がある。

3.2 泡沫の安定性

650rpmで5分攪拌した泡沫の離水率を図4に、650rpmで10分攪拌した泡沫の離水率を図5に示した。

650rpmで5分攪拌した場合、大豆ゆで汁の泡沫では試料温度が低い方が離水率は低くなり、ひよこ豆と手亡いんげん豆ゆで汁の泡沫では離水率が高くなった。



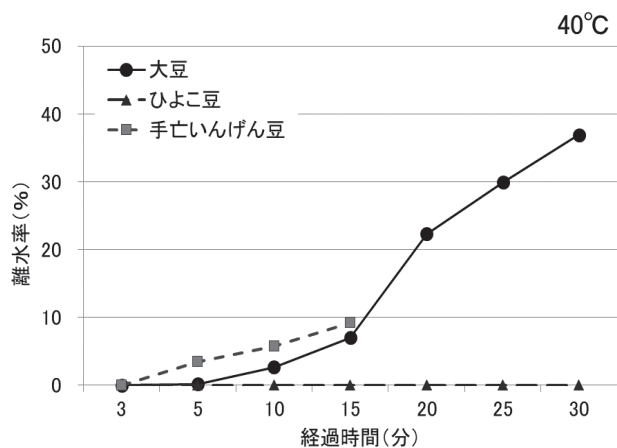


図4 650rpm で5分攪拌した泡沫の離水率

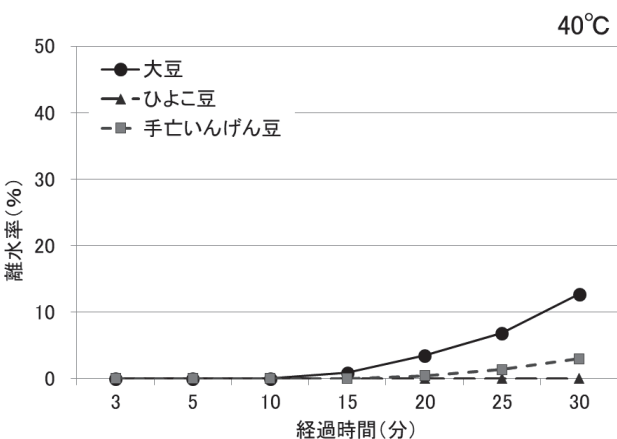
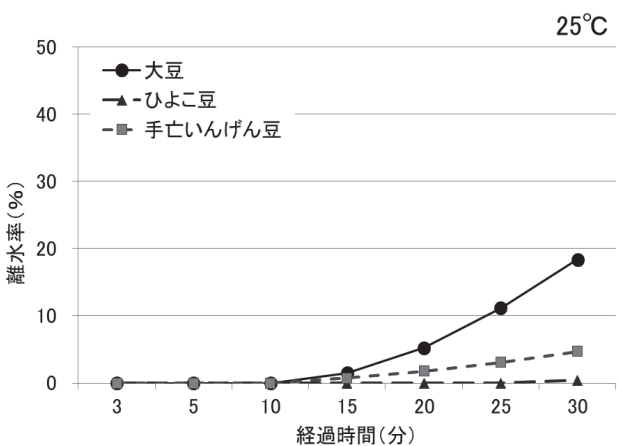
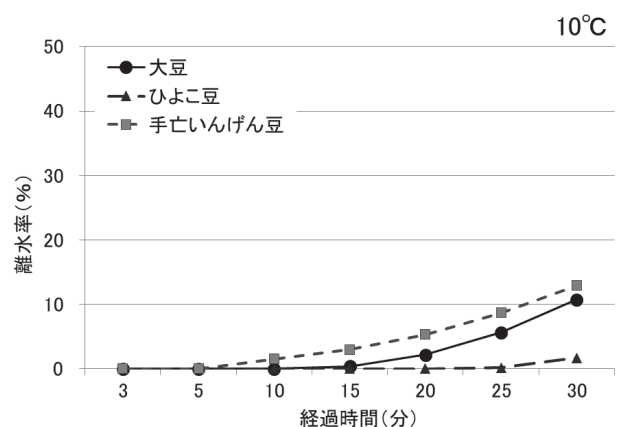


図5 650rpm で10分攪拌した泡沫の離水率

650rpm で10分攪拌した場合も同様な傾向であったが、5分攪拌の泡沫ほど顕著ではなかった。また、いずれも攪拌5分に比べて10分の方が離水率が低下した。特に、手亡いんげん豆のゆで汁と試料温度25℃と40℃における大豆ゆで汁で泡沫からの離水率が著しく低下した。

950rpm で5分攪拌した泡沫の離水率を図6に、950rpm で10分攪拌した泡沫の離水率を図7に示した。

950rpm で5分攪拌した大豆ゆで汁の泡沫と10分攪拌した泡沫とともに、試料温度が25℃において離水率が低く、いずれの試料温度でも攪拌10分の方が離水率が低くなった。

ひよこ豆のゆで汁は、攪拌5分の泡沫においても30分経過した時点での離水率が5%未満と非常に安定性が高かったが、攪拌10分ではさらに離水率が低下した。ひよこ豆ゆで汁の泡沫は、分離液量が非常に少なく、3種の豆のゆで汁の中で泡沫の安定性が最も高い結果となったが、攪拌時間だけでなく攪拌速度や試料温度の影響を受けにくいと推測される。

5分攪拌した手亡いんげん豆ゆで汁の泡沫の離水率は非常に高く、特に試料温度10℃と25℃で顕著であったが、10分攪拌した泡沫では離水率が有位に低下した(10℃と25℃で $p < 0.001$ 、40℃で $p < 0.05$)。手亡いんげん豆のゆで汁は、均一な泡沫が得られるまでに8分程度の攪拌を要した。そのため、攪拌5分では手亡いんげん豆ゆで汁の泡沫からの離水率が著しく高かったが、10分攪拌することで泡沫が緻密になり離水率が低下したと考えられる。試料温度40℃では、ひよこ豆や大豆ゆで汁の泡沫と同程度の安定性となった。

金親ら³⁾は、豆乳では攪拌温度を高くすると離水率が顕著に低下した。試料温度40℃で起泡すると、タンパク質の変性に伴い保水力が高まり、泡沫安定性が向上したものと述べている。本研究では、手亡いんげん豆とひよこ豆のゆで汁では同様な結果となった。一方、大豆のゆで汁では、650rpmにおいて温度が低い方が、950rpmにおいて25℃で泡沫安定性が向上し、金親らとは異なる結果となった。また、同程度の起泡力であっても、試料温度によって離水率が異なった。小山⁹⁾は、泡が生成しやすくても必ずしも安定な泡沫が得られるとは限らない。泡の生成と同時に同様の速度で崩壊するならば、泡沫の生成量は少ないこととなる。泡沫の安定性は液体膜の持続性にかかっているため、気泡をとり囲む液体膜

の表面積が小さいほど大きいと述べている。さらに、泡の安定性に関係する因子として、気泡壁における粘性や液体膜の表面粘性を挙げている。その他、液の粘性は泡沫の崩壊を抑制することに寄与しているとの報告^{10,11,12)}もある。ひよこ豆のゆで汁は、他の豆に比べて非常に粘性があり、生成された泡沫が微細であった。そのことが泡沫の安定性を高める要因となっている可能性がある。

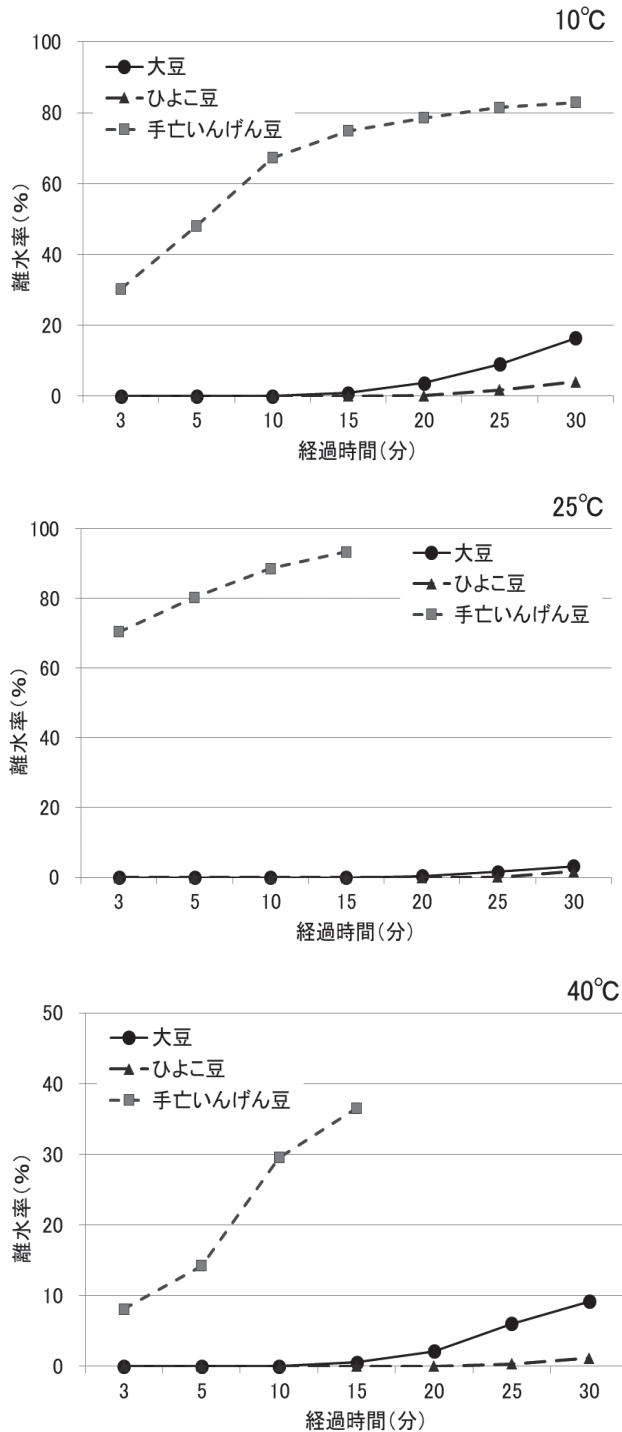


図6 950rpm で5分攪拌した泡沫の離水率

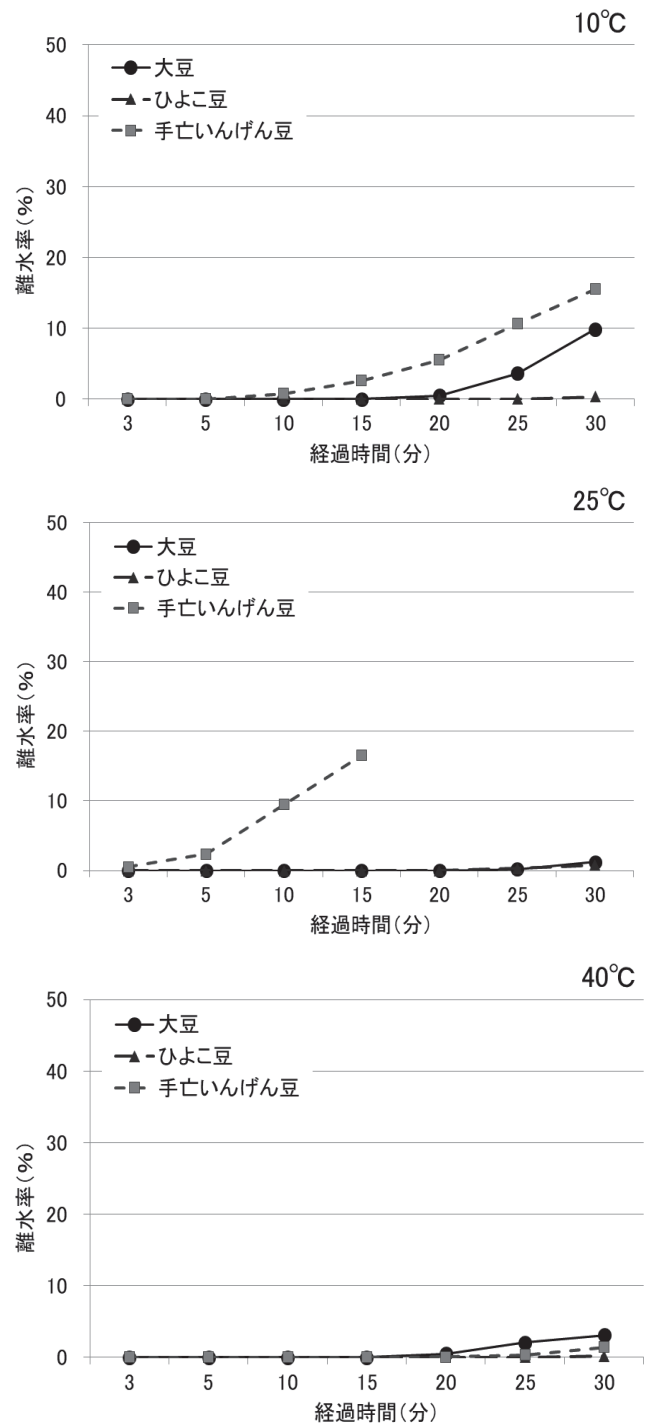


図7 950rpm で10分攪拌した泡沫の離水率

4 まとめ

大豆、ひよこ豆、手亡いんげん豆のゆで汁の泡沫特性について検討し、以下のような結果を得た。

- 1) 大豆のゆで汁は、攪拌速度や試料温度に関わらず、3種の豆のゆで汁の中で最も起泡力が高くなった。また、試料温度 25°C と 40°C においては、950rpm で攪拌した方が泡沫の安定性が向上した。
- 2) ひよこ豆のゆで汁の起泡力は、大豆ゆで汁に及ばなかったが、試料温度が高まると起泡力は向上

した。また、ひよこ豆ゆで汁の泡沫は、分離液量が非常に少なく、3種の豆のゆで汁の中で最も安定性が高かった。さらに、攪拌速度や攪拌時間、試料温度による差がわずかであった。

3) 手亡いんげん豆のゆで汁は、起泡力も泡沫の安定性も低かった。試料温度を40℃に高めると、攪拌速度に関わらず起泡力も泡沫の安定性も向上した。

4) 950rpmでの攪拌条件下で、大豆のゆで汁は卵白と同等の起泡力が得られた。ひよこ豆のゆで汁は試料温度40℃において、卵白より攪拌に時間を要するものの、卵白と同等の起泡力が得られた。

引用文献

- 1) 「令和3年度食物アレルギーに関連する食品表示に関する調査研究事業報告書」,消費者庁,令和4年3月
https://www.caa.go.jp/policies/policy/food_labeling/food_sanitation/allergy/assets/food_labeling_cms204_220601_01.pdf 2022/12/26
- 2) 市川拓也：なぜ、今ヴィーガン（ベジタリアン）なのか, 大和総研,2021年2月3日
https://www.dir.co.jp/report/research/economics/japan/20210203_022067.pdf
- 3) 金親あつ美・高木稚佳子・大越ひろ・藤井恵子：食材料としての豆乳泡沫の特性, 日本調理科学会誌, Vol.42, No.6, p.378-385(2009)
- 4) 柘植光代・金親あつ美・藤井恵子・大越ひろ：マイクロバブルを用いた豆乳泡沫の起泡と排液, 日本調理科学会誌, Vol.43, No.1, p.10-16(2010)
- 5) 柘植光代・大越ひろ：豆乳泡沫の特性からみたマイクロバブル起泡の特徴, 日本調理科学会誌, Vol.44, No.1, p.39-48 (2011)
- 6) 北畠直文・土井悦四郎：泡沫の物性, 日本食品工業学会誌, Vol.34, No.8, p.549-557(1987)
- 7) 日本食品標準成分表 2022 年版（八訂）
- 8) 谷谷洋一・大須賀葉子・山野善正：市販大豆サポニンの起泡性と乳化性, 日本農芸化学会誌, Vol.59, No.1, p.25-30 (1985)
- 9) 小山基雄：泡について, 日本調理科学会誌, Vol.9, No.1, p.13-18(1976)
- 10) 北畠直文・土井悦四郎：食品タンパク質の泡沫特性, 「食品の物性 第9集」, 山野善正, 松本幸雄編, 食品資材研究会, p.53-65(1983)
- 11) Townsend, A—A. and Nakai, S. : Relationships between hydrophobicity and foaming characteristics of food proteins, J. Food Sci, 48, 588-594 (1983)
- 12) Pernell, C. W., Luck, P. J., Allen Foegeding, E., and Daubert, C. R. : Heat—induced changes in angel food cakes containing egg—white protein or whey protein isolate, J. Food Sci, 67, 2945-2951 (2002)

(原稿受理年月日：2023年1月10日)