

令和5年度豆類振興事業調査研究

**えんどうタンパク質のゲル化、乳化等
特性を利用した食品加工品の調製**

愛国学園短期大学教授 江木伸子

● 1. はじめに

豆のタンパク質の利用は、1950年代以降の脱脂大豆の有効利用を目的に始まり、大豆タンパク質が有する、乳化性、保水性、結着性、ゲル化などによる食品の品質改良機能や、健康維持機能が注目され、様々な食品に利用されるようになった。一方、近年は健康問題や環境問題の高まりを受けて、植物性タンパク質を用いた代替肉が登場し、大豆タンパク質の利用に加えて、えんどうタンパク質の利用も注目を集めている。

本研究はえんどうタンパク質のゲル化、乳化の特性を食品の加工に利用するために、報告者らが携わってきた研究をもとに進めた。ゲル化については、豆腐の調製¹⁾と、硫酸アンモニウム抽出と透析によりビシリン含有比率を高めたえんどうタンパク質をクエン酸の中で加熱すると透明なゲルを形成するという報告²⁾を確認するために、調製したえんどう分離タンパク質（えんどうに含まれるタンパク質を分離・精製したもの）を用いて、硫酸カルシウム、グルコノデルタラクトン、クエン酸の添加時のゲル化について検討した。また、乳化については、大豆分離タンパク質をタンパク分解酵素により加水分解することで、乳化性の向上を得たので、その実績の活用を主眼として進めた。乳化の研究を具体的に紹介すると、一つは、加水分解分離大豆タンパク質を水で溶解後、油脂で乳化させ、その後酢を添加することにより保形性および安定性の高いエマルションを調製でき、続いて加水分解分離大豆タンパク質、油脂、酢水の3成分の材料配合比を変化させることにより、ホイップクリーム状、マヨネーズ状、スプレット状など異なる形状を持つエマルションの調製を可能にした。さらに加水分解分離大豆タンパク質に砂糖や水溶性食物繊維を混合することにより水と油脂の含量を減少させ、スプレッドを調製し、焼成が可能になったエマルションでケーキを焼成した³⁻⁵⁾。二つ目は、酵素製剤パパインとパイナップル、キウイ、イチジク、メロン、パパイヤ（未熟）の果汁により大豆タンパク質を処理することで、11Sの酸性サブユニットが消失し、エマルションの安定性を向上させることが示唆され、目的とする

加水分解大豆タンパク質が調製できることを確認した⁶⁾。

以上を念頭において、乾燥えんどうから分離タンパク質を調製して、これを用いてゲル化と乳化性について検討した。なお、乳化性については、乾燥えんどう全粒を実際的な加工に応用できるように、加熱と加水分解処理の影響を検討した。さらにこの結果をもとに乾燥えんどうを煮熟し、果実により処理した乳化物を用いてカップケーキ、パン、ディップの調製を試みた。

2. 研究方法

(1) えんどう分離タンパク質のゲル化性と乳化性の検討方法

乾燥えんどう（赤えんどう、北海道産）を50℃、4時間浸漬後脱皮して、10倍の蒸留水を添加して粉碎した。これを1N NaOHでpH8.5に調整してタンパク質を抽出し、これを遠心分離して得た上澄み液を1N HClでpH4.5に調整し、これを遠心分離して得た沈殿物を蒸留水に溶解して1N NaOHでpH7.0に調整後凍結乾燥してえんどう分離タンパク質を得た。また、ゲル化性で比較とした大豆分離タンパク質は、とよまさり（北海道産）を粉碎し、n-ヘキサンで脱脂したものを同様の操作によって調製した。

ゲル化については、4～5%タンパク質濃度になるようにタンパク質溶液を調整し、90℃で12分間加熱後、無水硫酸ナトリウム2%、グルコノデルタラクトン1%、クエン酸2%を加えて70℃または80℃で60分間加熱後各々のゲル化の状態を観察した。

乳化性は、市販加水分解大豆分離タンパク質：加水分解SPI（不二製油（株））で調製したエマルションを比較対照とした。エマルションの組成は、分離タンパク質10.4%、蒸留水42.3%、大豆油42.3%、酢5%で合計100%とした。加熱処理は、分離タンパク質に蒸留水を混合したのち75℃、85℃、90℃で3分間加熱した。加水分解処理は、各温度で加熱処理した分離タンパク質溶液に、エマルション全量に対して0.2%のパパイン（富士フィルム和光純薬（株））を添加して50℃、30分間処理した。加熱処理および、加水分解物処理後のタンパク質組成・分子量の変化は、SDS電気泳動で分析した。エマルションは、それぞれの温度で加熱した分離タンパク質溶液と加熱後加水分解処理した分離タンパク質溶液を、大豆油で乳化後酢を添加して調製した。エマルションの物性は、エマルションの一部をコーンプレート型粘度計（東機産業、TV22型）にて流動履歴曲線を測定することにより解析した。

(2) 乾燥えんどう全粒を用いたカップケーキ、パン、ディップの調製方法

えんどう分離タンパク質の乳化性に及ぼす、温度や加水分解処理についての実験結果を踏まえ、乾燥えんどう（赤えんどう、北海道産）全粒を利用した。浸漬温度がマメの風味に影響を与えるという報告⁷⁾をもとに、浸漬温度20℃、50℃、熱湯に浸してその後温度調節をしないで25℃の室温に放置した3つの温度条件でマメ重量が一定量になるまで浸漬した。その後の加熱条件としては、沸騰してマメが煮崩れない温度とした90℃で、5、10、15、20、30、60分間加熱後のえんどうの状態について調べた。

カップケーキは、乾燥えんどうを20℃で一晩、50℃で4時間浸したものと50℃で4時間浸漬後90℃で30分間および同じく60分間加熱したものをそれぞれ脱皮後粉碎した。これを125g計量し、パイナップル果汁液75g添加して粉碎後、砂糖20g、サラダ油30gを加え乳化し、酢を5g加えて混合してえんどう乳化物とした。この乳化物に薄力粉110g、ベーキングパウダー11gを加えて混合し、30gをカップ容器に入れ、180℃、17分間焼成してケーキを得た。ケーキは、クリープメータ（山電）による物性測定と自由記述にて官能評価を行った。

パンについては、同じく乾燥えんどうを50℃で4時間浸漬後、90℃で30分間加熱し脱皮せずにフードカッターで粉碎した。これを210g計量し、キウイ（皮を除く）80gを加え粉碎後、ヒマワリ油30gで乳化、レモン搾汁5gを添加してえんどう乳化物とした。これに小麦粉（全粒粉100g、中力粉100g）、砂糖10gと塩2gおよび乾燥野生酵母5gを加え、全体をニーダーで30分間攪拌後型に入れ35℃、40分間発酵後、170℃、40分間焼成してパンを調製した。キウイを添加してえんどうを加水分解したものと、キウイの代わりに同量の水を添加したパンを調製して風味を比較・評価した。

ディップは、乾燥えんどうを、50℃で4時間浸漬後90℃で30分間加熱して、脱皮後粉碎した。これを80g計量し、すりおろしたキウイ30gを加えて攪拌、オリーブオイル30gを添加して乳化した後ライム果汁5gを混合して乳化物を調製した。これに刻んだ香辛野菜（ペパーミント3g、バジル3g、ニンニク3g、パセリ1g）と胡椒0.2g、塩0.5gを加えてディップとし、食味を評価した。

3. 結果および考察

(1) えんどう分離タンパク質のゲル化性と乳化性

・ゲル化性

唯一、えんどう分離タンパク質がゲル化したのは、グルコノデルタラクトンを添加したものであり、硫酸カルシウムとクエン酸を添加したものにゲル化は認められなかった。また、添加後の70℃と80℃の加熱温度においてゲルの形成状態に差は認められなかった。4%タンパク質濃度においてグルコノデルタラクトン添加で形成したゲルは、非常に軟らかく、弱すぎてクリープメータによる物性は測定できなかった。一方、大豆分離タンパク質は5%タンパク質濃度において、グルコノデルタラクトン、硫酸カルシウム、クエン酸のいずれの添加においてもクリープメータによる物性測定の可能をしっかりしたゲルを形成した。クエン酸添加によるゲルは透明ではなかった。研究論文の事前調査²⁾でも、えんどうタンパク質のゲル化はタンパク質調製条件による変動が大きいことと、10%以上のタンパク質濃度が必要であるとしており、高濃度での検討は必要である。また、調査文献では、塩析分離のタンパク質で透明ゲルの調製ができたと報告されてはいるが、今回の研究では実用性が乏しいと考えられた。更に検討は要するものの、えんどうのゲル化を豆腐のような食品に応用する実用的価値はほとんどないと考えられた。

・乳化性

えんどう分離タンパク質は、大豆分離タンパク質に比べて容易に溶解し、乳化性が高く、市販の酵素処理大豆分離タンパク質と同程度の高い乳化性を示した。また、加熱による凝集性は弱く、柔らかい凝集体を形成した。加熱温度が高い方が、パパイインによる加水分解が早く進み、分子量の低下が認められた(図1)。図2の流動曲線は、エマルションの粘度特性をずり速度とずり応力の関係で視覚的に示したもので、ずり速度はどのくらいの速さで変形するかを表し、ずり応力は変形で生じる抵抗力を示す。それぞれの条件での粘度は、ずり応力／ずり速度で計算できる。また、曲線内の面積は、力を加えるのをやめると硬くなる性質を示し、面積が大きい方が硬い。えんどう分離タンパク質のエマルションは、加熱温度が高くなるほど粘度が高かく、硬いエマルションとなったが、適度に酵素分解することで粘性を保ちつつ柔らかいエマルションを調製できることが分かった。えんどう分離タンパク質の

SDS電気泳動パターンは、7Sコンビシリンのサブユニット分子量は70kDa、11Sレグミンのサブユニット分子量は60～65kDa、7Sビシリンのサブユニット分子量は48～50kDaとされるが²⁾、酵素分解の効果は特異性というよりは、タンパク質の低分子化が乳化性の向上に関与していると考えられ、加水分解が進みすぎると乳化性は低下した。

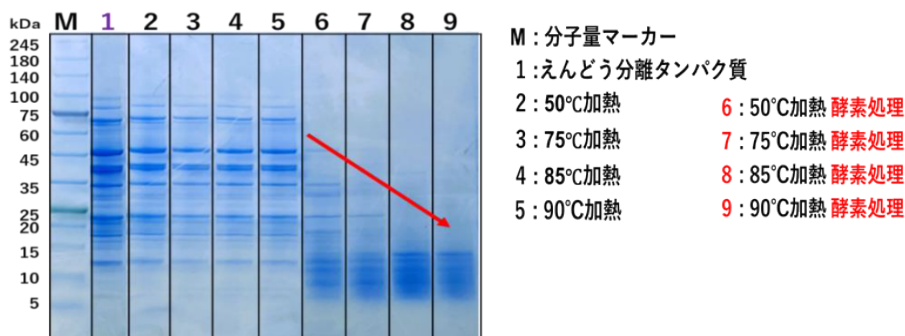


図1 えんどう分離タンパク質の加熱と酵素処理の影響～SDS電気泳動～

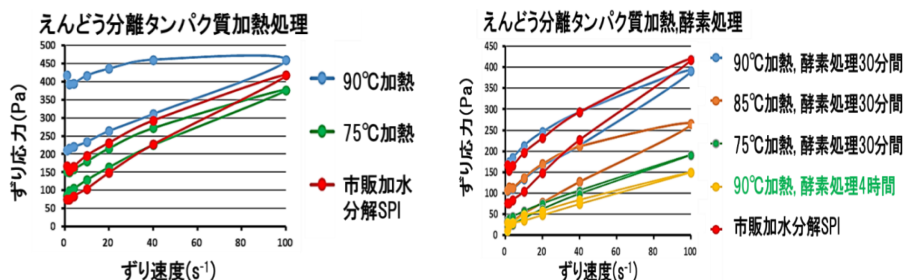


図2 えんどう分離タンパク質の乳化性に及ぼす加熱と酵素処理の影響～流動曲線～

(2) 乾燥えんどう全粒を用いたカップケーキ、パン、ディップの調製

・カップケーキ

乾燥えんどうの浸漬は、浸漬温度20℃で10時間、50℃で4時間、熱湯に浸しその後温度調節をしないで25℃の室温に放置3時間で重量が2.1倍になり、その後は一定となった。20℃と50℃の浸漬では、50℃の方がえんどうの風味がよく、温水での浸漬により膨潤が早まり、胚軸から不快な風味を有するサポニン系の物質が浸出する⁷⁾という報告もあり、浸漬時間は早い方がよいと考えられたが、実験条件を一定にするために50℃で4時間浸漬とした。その後の加熱温度は、タンパク分解酵素として果汁を用いることを念頭に90℃加熱とした。えんどうは、加熱時間が長くなるほど、やわらかく、青臭みや苦み

が無くなった。図3に乾燥えんどうの浸漬、加熱条件の異なるカップケーキの物性と官能評価を示した。図3に示す比容積とは、ケーキ重量1gに占める体積を示し、 $1 < 2 < 3 < 4$ の順で大きく、浸漬時間が早く、加熱時間が長い方が、より膨らんでいる状態を示した。また、破断応力とは、ケーキが力によって破壊されずに耐えることができる荷重、すなわち硬さを示し、破断エネルギーは、ケーキが破壊するまでに消費されるエネルギー、すなわち噛み切りにくさを示す。また、破断歪率とは、元のケーキの厚さに対する破壊される直前の歪の割合で、形を変えながらも最終的に破壊されるまで耐える粘り強さを示す。これらはいずれも $4 < 3 < 2 < 1$ の順で大きく、浸漬20℃よりは50℃の方がケーキはやわらかく、さらに加熱時間が長い方が、よりやわらかくソフトな物性を示した。えんどう分離タンパク質の乳化性の実験で、加熱温度が高い方が、パパイニンによる加水分解が早く進み、分子量の低下が認められ、乳化性が向上したことから、加熱時間が長い方が、膨化性が高く、やわらかい組織を持ったケーキになると考えられたが、加熱時間60分間では、えんどうがやわらかくなりすぎて、ケーキにべたつきがあり評価が落ちた。これらのうち3のケーキすなわち、50℃4時間浸漬、90℃30分間加熱えんどうを用いたケーキが物性や風味から最も好まれた。

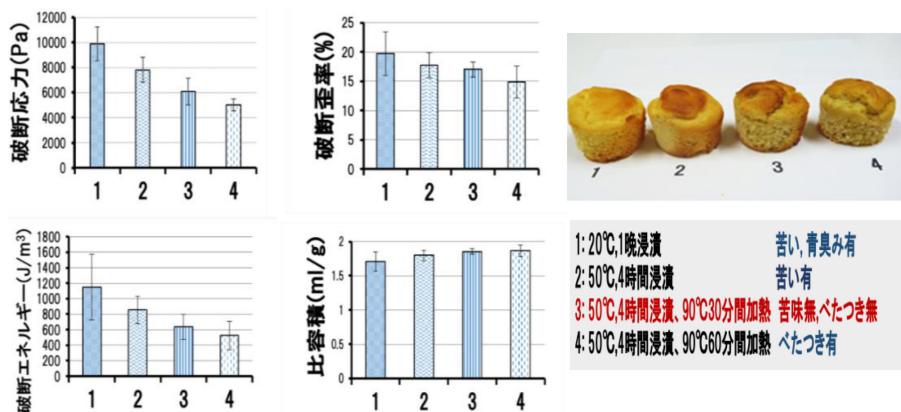


図3 乾燥えんどうの浸漬、加熱条件の異なるカップケーキの物性と官能評価の結果

・パンとディップ

乾燥えんどうを50℃で4時間浸漬し、90℃で30分間加熱後キウイを添加して乳化したパンとキウイ無添加（キウイの代わりに水を添加）のパンでは、無添加の方が色は薄く、膨化も良いが、加水分解処理のパンの方が若干のぼ

そつき感があるが、全体のテクスチャーがやわらかく、苦みがなく、心地よい酸味があり、好評価であった。膨化やぼそつき感については、果汁の酵素が小麦のタンパク質に作用している可能性があり、添加量を考慮する必要がある。

ディップについては、エマルションの乳化安定性が高く、離水はほとんど認められなかった。舌触りがなめらかで通常のパンやサラダにも広く適用可能であると考えられた。



図4 キウイによる加水分解処理の有無による えんどうパン（上；処理、下；無処理）



図5 えんどうのディップ

4. まとめ

えんどう（完熟、乾燥、北海道産赤えんどう）の新規利用に関し、タンパク質の機能性の基礎的な解析を試みて、タンパク質以外の成分をも含む、ほぼ全粒を用いた新たな食品の開発を目指した。実用に向けた細部の検討や調整が必要ではあるが、全粒の利用が栄養の面からも、食品ロスの軽減のためにも社会に貢献できうる加工方法として、提案していければと考える。

5. 謝辞

本研究は、令和5年度公益財団法人日本豆類協会からの研究助成を受けて実施しました。深く感謝し御礼申し上げます。

（参考文献）

- 1) 渡辺篤二、齋尾恭子、豆腐を考える化学と生物 11 (10)、631-640 (1973).
- 2) 齋尾恭子、江木伸子、廣瀬理恵子、平尾和子、えんどうタンパク質に関する研究とその利用の現状、愛国学園短期大学紀要、第42号、53-64 (2024).
- 3) 江木伸子、平尾和子、廣瀬理恵子、齋尾恭子、村上昌弘、大豆タンパク質添加エマル

ションの物性とそのエマルション特性を利用した食品の調製、日本食品科学工学会誌、63(5)、225-235(2016)。

- 4) 愛国学園短期大学、不二製油(株)、焼成食品の製造法、特願2015-184332、2015-09-17。
- 5) 江木伸子、平尾和子、廣瀬理恵子、齋尾恭子、大豆タンパク質エマルションを利用したケーキとスプレッドの開発、愛国学園短期大学紀要、第37号、1-9(2019)。
- 6) 江木伸子、廣瀬理恵子、平尾 和子、野田誠司、齋尾恭子、果汁を用いて加水分解した大豆タンパク質の乳化性、日本食品科学工学会誌、70(10)、505-511(2023)。
- 7) 浅野三夫、大久保一良、山内文男、大豆の部位別（種皮、胚軸、子葉）温水浸漬と不快味成分挙動、日本食品工業学会誌、37(5)、375-379(1990)。