加熱によるトリプシンインヒビターの熱変性がタンパク質消化性に与える影響

内田爽子

要旨

本研究では，鶏卵白中に含まれるトリプシンインヒビター(TI)がタンパク質の消化性に与える影響を，加熱温度の違いに注目して検討した。生卵を 60℃，72℃，80℃，90℃で加熱し，卵白を試料としてトリプシン処理後，Biuret 試薬を用いてタンパク質量を測定した。その結果，加熱温度の上昇に伴い測定されたタンパク質量は減少する傾向を示した。これは加熱により TI が熱失活し，トリプシンによる分解が進みやすくなったためと考えられる。一方で，固化が進むほど胃内停留時間が長くなる可能性も考察でき，卵の消化性は酵素活性と物質変性の双方の影響を受けることが明らかになった。

キーワード：茹で卵，トリプシンインヒビター，消化度

Ⅰ．はじめに

我が国における鶏卵消費量は年ごとに増大してきており，主要国の中ではトップレベルである。（農林水産省，2023）また，鶏卵，特に卵白中には通常，トリプシンインヒビター（以下 TI）が含まれている。(廣瀬・木戸，2002) TI とは，消化酵素であるトリプシンの活性を阻害する働きを持つ物質である。TI はタンパク質由来の成分であるため，熱失活性を持つ。(福永・古賀・中原、1991)

また福永ら(1991)によると，一般に半熟卵が最も消化に良いという俗説を引用しているが，これについての具体的なデータは無い。本研究では，半熟卵の消化率[1]が高いという俗説を，鶏卵中のタンパク質量を TI の量的変化に基づいて測定することで検証していく。

また，前述した福永ら（1991）は，生卵が半熟卵に次いで消化に良く，硬茹卵が最も消化に悪い状態であると述べている。これについて，A. F Morgan（1982）によると，卵白は加熱したほうが消化に良いということが明らかにされたが，本実験では乾燥卵白が使用されていたことから，実際に我々が口にする卵の状態とは差異がある。加えて，湯川（1910）によると，さまざまな状態の卵の胃中停留時間を比較したとき，硬茹卵が最も長く胃中に停滞することが明らかにされた。

これらの結果を合わせると半熟卵が最も消化に良いという説は，加熱という変数が要因となっていると推測できる。

本研究では，A. F Morgan（1982）で乾燥卵白が使用されたことと対比し，これを実際の調理手順[1)]等に基づいて調理した卵で実験を行うことで，より我々が口にする卵の状態での消化度を調べられると考え，これを先行研究との相違点として見出した。

Ⅱ. 手法

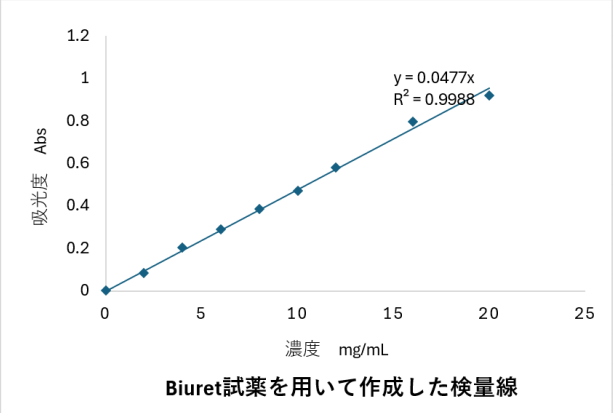
1．実験材料および試薬

実験材料として，ブタ肝臓由来トリプシン(Wako)，マッキルベイン緩衝液(pH)，ウシ血清アルブミンと前述したリン酸緩衝液を混合して作成した 20mg/mL BSA 溶液，Biuret 試薬を用いた。TI はニワトリ(*Gallus gallus domesticus*)の未受精卵を使用した。尚，下記するトリプシン溶液とはトリプシンを緩衝液に溶解させた 4.3×10^{-10}mol/L の水溶液であるとする。

[1] 消化率 h は伊藤[2)]より，摂取量 r と糞への排泄量 f から，$h=(r-f)/r$ で求められるが，本研究では体内で消化酵素により分解されやすくなることを消化に良い，すなわち消化率が高い状態にあると仮定した。

2. 検量線の作成

準備実験として，Biuret 法を参考にし，0mg/mL-20 mg/mL の範囲で検量線を作成した。



Biuret試薬を用いて作成した検量線

検量線の数式は y=0.0477x で表され R^2=0.9988 であった。下図がその検量線のグラフである。

図 1 検量線

3，本実験

本実験では，加水加熱した卵の卵白をサンプルとし，それらにトリプシンを加えた後 BSA 溶液を加えた。これらを希釈した後，検量線を作成した際と同様に Biuret 試薬を加え吸光高度計を用いてタンパク質を求めた。以下が本実験手順の詳細である。

1） 鶏卵の加熱加工

まずはじめに，生の鶏卵(生卵)を，恒温槽で設定した温度で 20 分間殻のまま加水加熱を行い状態変化した鶏卵(茹で卵)を作成した。この時の恒温槽の設定温度は 60℃，72℃，80℃，90℃である。加熱後の卵は恒温槽から取り出し水気を拭き取った後，乳鉢の中で 5 分放置し余熱を加えた。余熱を加える前に卵表面の殻を乳棒で若干砕き内部の白身の温度を計測した。この後，砕いた面を乳鉢内で下にすることで，卵内部の熱を逃さないようにした。各温度で加熱した卵の内部温度は以下の表の通りである。

表 1 各温度別加熱後の卵の内部温度

恒温槽の設定温度	60℃	72℃	80℃	90℃
卵の内部温度(℃)	**55.9**	**70.8**	**77.5**	**88.1**

2） タンパク質量の測定

余熱後の卵の殻を割り，卵白と黄身を分離させた。白身のみを緩衝液 50mL と 200mL ビーカー内で合わせたのち，スターラーで 2 分間攪拌した。混合した溶液を 2mL マイクロチューブに取り，遠心分離機を用いて，4℃，5500rpm，2,200×g の条件下で 5 分間遠心分離した。遠心分離後のマイクロチューブ内の上澄みを卵白のタンパク質を含んだサンプルとした。

3） 吸光度の測定

抽出したサンプルをマイクロチューブに 0.5mL 入れ，そこにトリプシン溶液を 0.5mL 加え混ぜ合わせた。3 分ほど静置した混合液に BSA 溶液を 1.0mL 加えた後全体を緩衝液で 2 倍希釈した。それら混合液 200μL に対し 1.0mL の Biuret 試薬を加え、10 分静置したのち吸光高度計で吸光度を測定した。そこで測定した Abs の値から，含まれていたタンパク質を推測した。

III. 結果

加熱した温度別の卵白の Abs は以下の表の通りになった。

表 2 加熱した温度と各 Abs 値(Abs*は Abs と同条件で作成した異なるサンプルの結果を指す)

	60℃	*72℃*	*80℃*	*90℃*
Abs	0.919	0.898	0.881	−
*Abs**	0.923	0.890	0.881	−

上表より，Abs と Abs*の平均値を測定値として使用したときの，各温度でのタンパク質の推定値は以下のようになる。

表 3 各加熱温度，吸光度と濃度の推定値

加熱温度 (℃)	吸光度(Abs)	濃度の推定値 (mg/mL)
60	0.921	**19.4**
72	0.881	**18.5**
80	0.802	**16.9**
90	−	−

また、上表の吸光度と濃度の推定値をグラフにすると，下図のように表される。尚、卵白を含まないサンプル(緩衝液+トリプシン+BSA+Biuret 試薬)の吸光度は 0.221 Abs であり，生卵白にトリプシンを加えないサンプル(緩衝液+卵白+BSA+Biuret 試薬)の吸光度は 0.993 Abs であった。

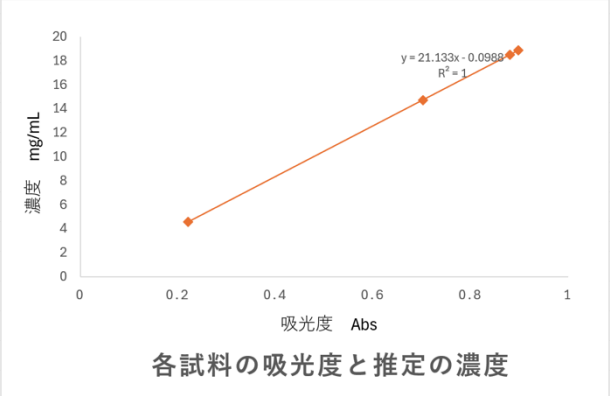


図 2 タンパク質の推定値のグラフ

また，加熱する温度とタンパク質量の関係をグラフで表すと図 3 のようになる。またこの時，加熱せず生卵を使用したサンプルについて，加熱温度 0℃として数値を用いた。

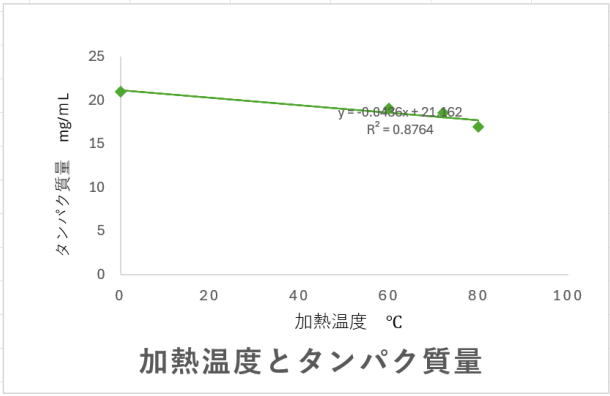


図 3　加熱温度別のタンパク質量

IV. 考察

結果より，加熱温度が高くなる，つまり固ゆで卵にち近づいた状態であるほど測定されるタンパク質量が多くなることが読み取ることができる。

表 1 の内部温度は，白身が凝固するであろう温度を推測できる。卵の白身は，60℃前後で凝固が始まり 80℃以上で完全に凝固する。[3] また，約 65℃程度で流動性がなくなっていくとされている[4] よって 60℃で加水加熱した卵は内部温度が 55.9℃であることからも，タンパク質の変性は開始しているものの生卵や温泉卵に近い流動性がある状態の白身であったことを表すことができる。90℃で加熱した卵については内部温度も 88.1℃より，80℃を大幅に超えており，弾性なども感じられる程度に白身が凝固していた。

表 2 より，各温度で微小であるが数値の変化が見られた。この値により大きな差異を見出すため，希釈倍率をより大きくとりデータを測定する必要がある。また今回，90℃で加熱した場合の Abs を測定することができなかった為，今後測定しより細かいデータで全体の相関を求めていきたい。表 3 についても検量線を用いて推定のタンパク質量を求めたが，検量線で濃度の最大値を 20mg /mL で設定していることから，最大値に近い数値に結果が偏っている。卵白を含まないサンプルの Abs は 0.221 でタンパク質量が 4.6mg /mL であることから，これらも卵白のサンプルの希釈濃度を調整することで解決できると考察した。

図 2 については非常に高い相関が得られた。図 3 で表されるように，加熱温度が高いほどタンパク質量が減っていることが読み取れる。

V. 結論

これらの結果より，加熱温度の上昇に伴い，トリプシン処理後に残存するタンパク質量が減少したこれについて，TI はタンパクであることから，熱失活が起こっていると考えられる。前述した通り TI は消化酵素トリプシンの阻害因子であるので，TI が活性化状態にある時，卵白内のタンパク質はトリプシンによって分解されにくい。つまり卵を加熱することでトリプシンが阻害されなくなるため消化が働きやすくなる。

ここで湯川(1910)の結果と合わせて考えると，加熱すればするほど消化しやすくなるという説は誤りであると考えられる。固茹で卵が最も胃中に長く停留しているのは，胃では蠕動によって胃中の物体をより細かく，液状に近い状態まで分解す

る働きを持つからである。前述した，卵のゲル化した状態より完全凝固時の方が固いという結果を用いると，胃中に停留している間はトリプシンの働きを受けずペプシンのみが分解する。つまり生卵の方がより早く，消化という作業を効率的に行うことができると考えられる。この場合，消化酵素トリプシンは加える熱が高いほど消化を促し，卵の状態変化の観点では加える熱が高いほど消化に時間がかかることから，「半熟卵が最も消化に良い」という俗説はそれら２つの考察を合わせて考えると検証が成立する。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方々にご支援とご教授いただきました。研究全体を通して，日頃より丁寧にご指導賜りました日浦要先生に深く感謝いたします。

文　献

農林水産大臣官房調査課編（2023）；食料需給表

令和五年度

廣瀬優子・木戸詔子(2002);食物アレルゲン・卵

白オボムコイドの不均一性とアレルゲン性

福永隆生･古賀克也･中原浩(1991);鶏卵の半熟,

完熟処理に伴うオボインヒビターの活性変化と

卵白の消化性

A.F. Morgan（1951）；J. Nutrition. 43 63

湯川玄洋(1910)；日本消化器病学会雑誌　6 397

森永宏太郎(2001)；

大豆種子の組織破壊が加水加熱時のトリプシン

インヒビター失活に及ぼす影響

[1] キッコーマン株式会社;ゆで卵(半熟卵・固ゆで)の作り方(2026.2.19 閲覧)

[2] 伊藤稔(2011);日本畜産学会報　48 巻 5 号

[3]日本調理アカデミー;卵の凝固温度(2026．2.20 閲覧)

[4]本田技研工業株式会社;自由研究-とろとろ温泉卵を作ろう(2026.2.20 閲覧)