

肉類の過熱水蒸気調理における水分・油分移動について

Water and Oil Transfer in Meat during the Superheated Steam Cooking

門馬 哲也*¹ 酒井 昇*² 中門 千晴*² 福岡 美香*² 高見 星司*¹
 Tetsuya Kadoma Noboru Sakai Chiharu Nakakado Mika Fukuoka Seiji Takami

要 旨

過熱水蒸気 (SHS) を用いた肉類の調理において脱油の効果が注目されている。本研究では、この脱油に着目して実験を行い、他の調理法に比べて過熱水蒸気調理の脱油率が高いことを確認した。また、調理過程を解析するためには、食品内部での熱移動と水分・油分移動について定量的に評価する必要があり、実験結果に基づき数学モデルを構築した。

The experiment was carried out to evaluate the oil reducing effect in the superheated steam cooking. It was confirmed that the oil reducing rate in meat cooked in the superheated steam was higher than that cooked on a pan or in a natural convection oven. Based on the experimental results, a simulation method was developed which enables to estimate the heat and mass (water and oil) transfer in meat during the superheated steam cooking.

まえがき

近年、過熱水蒸気による食品加工・調理が注目されている。これは、ガスなどの燃焼による加熱と異なり、無酸素雰囲気中での加熱が可能となり、その食品加工の特徴が食品の脂質や栄養成分に大きく影響するものと考えられている。すなわち、過熱水蒸気適用により、脂質の酸化防止と脱油効果、栄養成分の保持、風味の改良、賞味期限の改善などの可能性を秘めており、近年の健康志向と相俟って、食品加工に新たな展開を生むものと期待されている。しかし、食品加工・調理における過熱水蒸気の効果は未解明の部分が多く、その理論的、実験的解明が待たれるところである。そこで、本研究では、特に過熱水蒸気調理時の肉類の脱油現象を明らかにすることを目的として、調理過程における熱と水分・油分移動について実験的および理論的に検討を行った。

1. 実験装置および方法

使用した実験装置の概略図を図1に示す。ボイラにより発生した水蒸気を過熱器で再加熱し、過熱水蒸気を発生させた。加熱庫が冷えたまま水蒸気を供給する

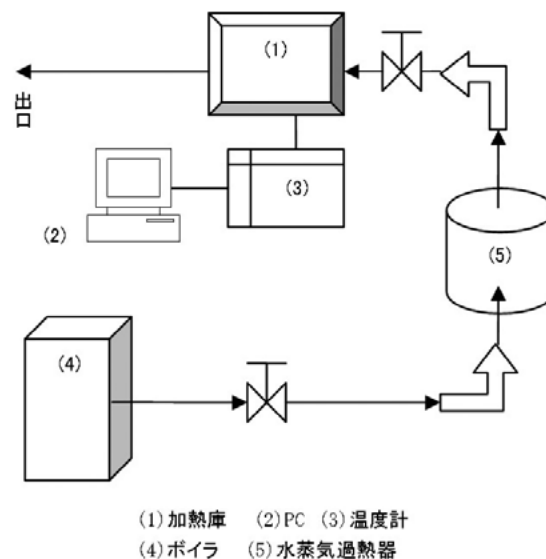


図1 実験装置概略図
 Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

と、所定温度まで到達するのに時間がかかり、水蒸気の過熱度も一定とならないので、加熱庫自体を予め加熱した。

*¹ 電化システム事業本部 電化商品開発センター 第2開発室

*² 東京海洋大学 海洋科学部 食品生産科学科

試料としては、牛肉（カルビ、ヒレステーキ）、豚肉（バラ肉）と鶏肉（手羽先）を使用した。牛ヒレステーキ肉は、厚さ2cm、重量約95gに切断して使用し、手羽先はそのままの形で使用した。試料を中心温度が75℃になるまで加熱し、加熱中の温度変化は試料表面と中心に設置した熱電対により測定した。また、重量変化の測定は、加熱前後の試料重量変化より求めた。脱油率は以下のように求めた。加熱時に試料の下にペーパータオルを敷き、加熱時に出てきた油と水（ドリップ）を染み込ませる。加熱終了後、乾燥機で24時間乾燥させて水分を蒸発させて染み込んだ油の量を測定し、脱油率を求めた。

また、オープンおよびフライパンでも同様の実験を行い、調理法の違いによる加熱速度および脱油率の違いを検討した。

2. 結果および考察

2・1 温度変化と重量変化

図2に、フライパン、オープンおよび過熱水蒸気で牛ヒレ肉を調理したときの表面温度（Ts）と中心温度（Tc）の変化を示す。フライパンの場合、温度センサーと牛肉の接触が難しいので、表面温度はここには記載されていない。フライパンで調理する場合、牛肉は直接フライパンに接触するため表面温度の上昇速度は大きいことがわかる。一方、オープンで加熱した場合は、熱は対流熱伝達で移動するため、表面温度上昇速度はフライパンに比べるとかなり遅くなる。同じ熱伝達

でも過熱水蒸気の場合は、表面温度が飽和温度に達していないと水蒸気が凝縮する、いわゆる凝縮熱伝達が起こり、表面の温度上昇速度は大きいことがわかる。それにしたがって、中心温度もオープンに比べて速く上昇する。この加熱速度が大きいことは、過熱水蒸気調理の特徴のひとつである。

加熱初期に水分の凝縮がどの程度起こっているかを確認するために、初期の重量変化を測定した結果を図3に示した。図中の○は、試料を天秤の一方の皿に載せ、試料よりも一定重量重い分銅を、試料と別の皿に載せた天秤を加熱庫に入れ、天秤が吊りあったときの時間を測定したものである。また、□は試料を加熱庫から取り出して重量を測定したものである。したがって、□は牛肉単独の重量変化を、○は水蒸気が試料表面で凝縮した後に、流れ落ちて下に敷いたペーパータオルに浸み込んだ量も含む結果である。縦軸は、重量変化量を初期重量で割ったもので、プラスは重量増をマイナスは重量減少を表す。図から初期に水蒸気が凝縮し重量が増加するが、表面温度が100℃に到達すると、水分の蒸発が始まり、重量が減少することがわかる。一方、牛肉のみの重量変化（□）をみると、初期の段階でも重量は減少し、凝縮した水は試料内部へは浸透せず、むしろ脱水が起こっていることがわかる。

2・2 脱油率測定

まず、豚バラ肉、牛カルビを試料として実験を行ったときの結果を以下に示す。100℃から250℃まで50℃

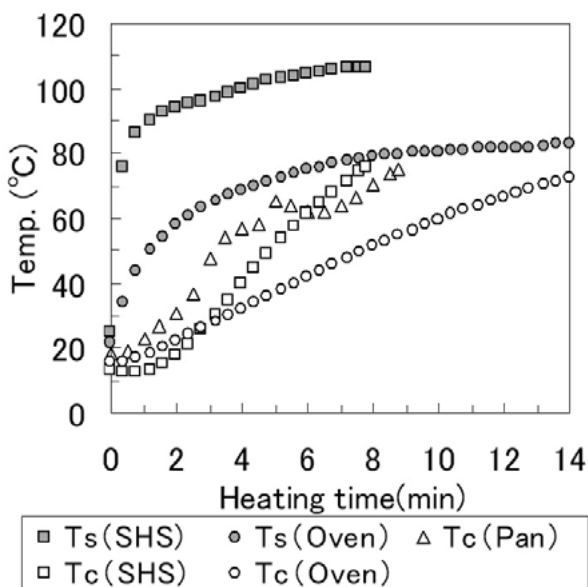


図2 表面温度と中心温度の変化
Fig. 2 Surface and center temperature histories.

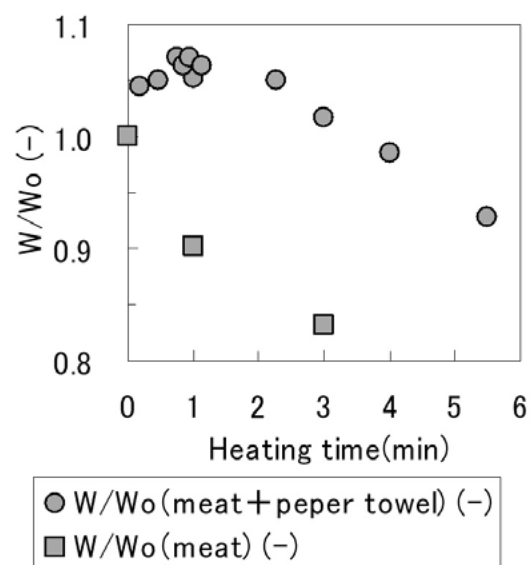


図3 過熱水蒸気調理時の重量変化
Fig. 3 Sample weight change during SHS cooking.

刻みで加熱温度を変えて、中心温度が75℃になるまで加熱したときの加熱時間、重量減少率、脱油率の測定結果を図4（豚バラ肉）および図5（牛カルビ）に示す。重量減少率は加熱前後の試料の重量から求めている。また、個々の試料について初期の脂肪含有率を測定するのは難しいので、ここでは脱油率の定義は初期重量あたりに出てきた油の重量としている。

豚バラ肉、牛カルビとも脱油率は過熱水蒸気よりも加熱時間の長いオーブン加熱のほうが大きくなっていく。これは、豚バラ肉や牛ヒレ肉のように脂肪と赤身が分離している場合、肉の内部が同じ温度に到達する

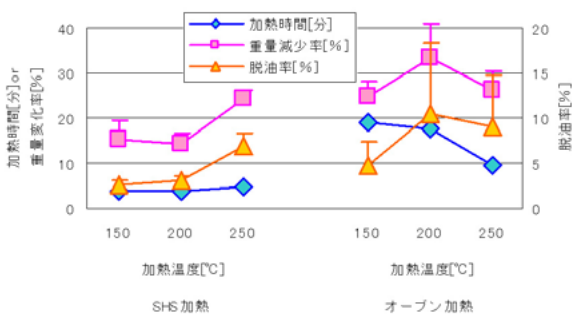


図4 豚バラ肉調理時の SHS 加熱とオーブン加熱の比較
Fig. 4 Comparison of SHS cooking with oven cooking for pork.

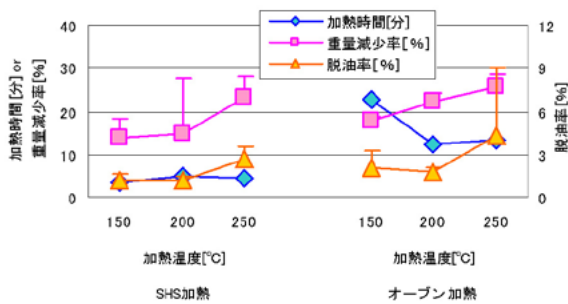


図5 牛カルビ調理時の SHS 加熱とオーブン加熱の比較
Fig. 5 Comparison of SHS cooking with oven cooking for beef.

と脂が溶け出すためと考えられる。同じ加熱時間で比較した場合、オーブンよりも過熱水蒸気調理のほうが、脱油率が大きいと考えられているが、これらの結果は中心温度を同じ温度まで加熱すると必ずしも油が多く溶け出ないことを示す。

次に、皮が付いている例として鶏手羽先を用いて同様の実験を行った。そのときの結果を図6に示した。鶏手羽先の場合、全重量に占める骨の重量の割合が

大きいので、見かけ上の脱油率は減少する。そこで、加熱終了後骨を取り出して骨の重量を測定し、骨の重量を除いたものを初期重量とした。鶏手羽先の場合、オーブンと過熱水蒸気調理で脱油率に差が認められた。これは皮の影響と考えられる。すなわち、過熱水蒸気で調理した場合、オーブンに比べて皮の部分が柔らかく調理され油が透過されやすいものと考えられる。

フライパン調理と比較した場合、過熱水蒸気調理のほうが、脱油が大きいと言われている。ここでは、それを検証するために脂身が分散している牛ヒレ肉を用いて実験を行った。調理終了時の重量変化および脱油率を図7に示した。また、牛肉中心温度が75℃に到達した時点として調理終了としているが、そのときの時間も合わせて同図に示した。

オーブンと過熱水蒸気を比較すると、加熱時間は過熱水蒸気のほうが短く、その分、重量減少率は小さくなっているが脱油率は逆に大きくなっていることがわかる。一方、過熱水蒸気とフライパンを比較すると、重量変化に大きな差はないが、脱油率が過熱水蒸気のほうが大きいことがわかる。これは、フライパンの場合、初期の段階で肉表面が焼き固められ、油が出にくくなったものと考えられる。このことを確認するために、過熱水蒸気とフライパンで調理したときの重量

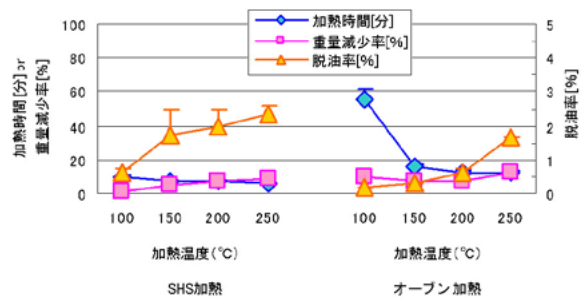


図6 鶏手羽先加熱後の重量減少率と脱油率
Fig. 6 Comparison of SHS cooking with oven cooking for chicken hand feather tip.

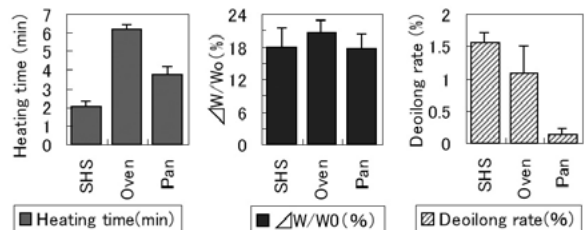


図7 各調理法における加熱時間、重量変化、脱油率
Fig. 7 Comparison of final heating time, weight loss, and deoiling rate in each cooking method.

変化および脱油率を測定した(図8)。図8から、脱水は同じように起こるが、脱油は初期の段階からフライパンのほうが少なく、上述のことを裏付けるものである。

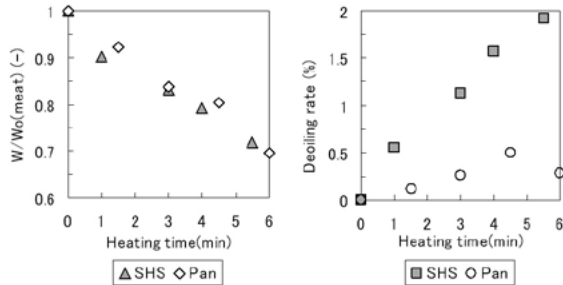


図8 調理過程の重量変化と脱油率変化
Fig. 8 Change of weight loss and deoiling rate during cooking.

2・3 収縮率測定

以上のように、牛肉の焼成においては脱水と脱油が起るが、この過程では、牛肉の加熱による収縮が影響していると考えられる。そこで、焼成時にどの程度収縮しているかを、過熱水蒸気とフライパンの場合について実測した。試料の形状は1辺2cmの立方体とし、加熱後の各方向の辺の長さ(L_1, L_2, L_3)を測定した。牛肉の場合、繊維の方向によって収縮の割合が異なることが予想されるので、繊維方向(L_1)と繊維方向に直角な方向(L_2, L_3)に分けて考える。図9に繊維方向の収縮率($S_L = L_1 / L_0$)、それと直角方向の面積収縮率($SS = L_2 L_3 / L_0^2$)および体積収縮率($S_V = L_1 L_2 L_3 / L_0^3$)を示した。図9から繊維方向、すなわち縦方向への収縮が大きく、横方向へはむしろ広がっていることがわかる。この現象は、フライパンよりも過熱水蒸気のほうが顕著である。

3. 過熱水蒸気調理における熱・物質移動解析

3・1 脱油メカニズムのモデル化

水蒸気の凝縮しないオープン加熱においても脱油現象は起こることから、肉が加熱されるとタンパク変性によって収縮し、発生する内部圧力によって水分(ドリップ)および油が出てくると考えられる。このとき、凝縮した水と一緒に流れ落ちるものと考えられる。

鶏手羽先をオープンと過熱水蒸気で調理すると、過熱水蒸気のほうが、脱油率が大きく、目視では、皮の性状が異なることから、油の透過性が違うことが示唆された。さらに、過熱水蒸気、オープン、フライパンを用いた調理について比較したところ、フライパン調

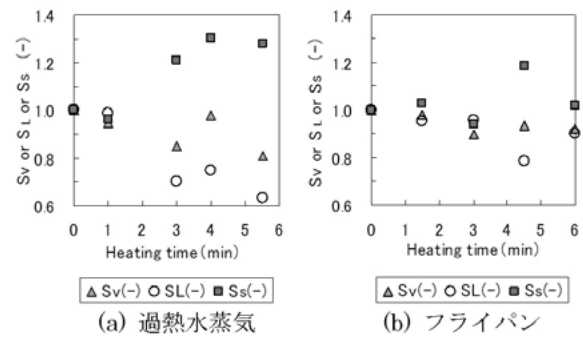


図9 調理過程の収縮率変化
Fig. 9 Change of shrinkage factor during (a) SHS cooking and (b) pan cooking.

理の脱油率が低いことが確認できた。フライパン調理の場合、180℃前後に熱したフライパンで表面を焼き固めるため、表面に油の透過し難い層が形成されたことが示唆された。

以上の観察結果から、以下の様な脱油メカニズムが考えられる。

- (1) 加熱初期の水蒸気凝縮により、急速に加熱される。
- (2) 肉が加熱されることにより、タンパク質が変性し収縮が起こる。同時に内部の圧力が増大する。
- (3) 発生した圧力勾配を駆動力として、水分と油分の流動が起こる。ただし、表面圧力は常に大気圧に維持される。
- (4) 水の流動と油の流動は競争的に起こり、粘度が小さく、透過係数が大きいほど流動によって出てくる油の量は多くなる。温度が高いほど油の粘度は低下するので、昇温速度の大きい過熱水蒸気は有利である。また、鶏肉の皮や、ステーキにおける表面の焼き固められた層等の透過係数が大きいことが予想され、脱油率が大きくなる。
- (5) 凝縮した水および中から出てきた水と一緒に油が流れ落ちる。

3・2 熱と物質(水分・油分)移動の基礎式

上記メカニズムによる水分・油分移動を定量化するために現象を数式化した。食品の形状としては、計算の簡略化のため円筒形としている。

水の移動は、水分濃度勾配をドライビングフォースとする拡散と、圧力勾配を駆動力とする流動により起こるとする。拡散はフィックの拡散法則、流動はダルシーの法則に従うとすると、水の流束 j_m (g-water / cm²s)は次式で表される。

$$j_m = -\rho_w D_w \text{grad}(W_w) - \frac{\lambda_w}{\mu_w} \text{grad}(P) \quad (1)$$

ここで、 D_w は拡散係数 (cm^2 / s)、 W_w は含水率 ($\text{g-water} / \text{g-solid}$)、 ρ_s は固体密度 ($\text{g-solid} / \text{cm}^3$)、 λ_w は透過係数 ($\text{g-water} / \text{cm}$)、 μ_w は粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)である。この式を基に、食品内部での水の蒸発は起こらないとして、食品内で水の物質収支をとると、基礎式として次式を得る。

$$\begin{aligned} \text{水: } \rho_s \frac{\partial W_w}{\partial t} = & \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho_s D_w r \frac{\partial W_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_s D_w r \frac{\partial W_w}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda_w}{\mu_w} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\lambda_w}{\mu_w} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

食品内部の油の移動は、圧力勾配を駆動力とする流動によって起こる (油の濃度勾配による拡散は考慮しない)とすると

$$\text{油: } \rho_s \frac{\partial W_o}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda_o}{\mu_o} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\lambda_o}{\mu_o} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right\} \quad (3)$$

同様に、フーリエの熱伝導法則を基に、熱収支をとると、(4)式を得る。

$$\text{熱: } \rho_b c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} \quad (4)$$

また、境界条件は次式で表される。

$$\text{水: } -D_w \rho_s \text{grad}(W_w) \cdot n - \frac{\lambda_w}{\mu_w} \text{grad}(P) \cdot n = R_s - R_{Dw} \quad (5)$$

$$\text{油: } -\frac{\lambda_o}{\mu_o} \text{grad}(P) \cdot n = -R_{Do} \quad (6)$$

$$\text{熱: } -k \text{grad}(T) \cdot n = \Delta H_v R_s + h_i (T - T_{air}) + \sigma \varphi (T_h^4 - T^4) \quad (7)$$

ここで、 R_s は食品表面における水の凝縮あるいは蒸発速度で、次式で表されると仮定する。

$$\text{凝縮: } T_{sat} > T_s \quad R_s = r_c = a_c (T_{sat} - T_s)^n \quad (8)$$

$$\text{蒸発: } T_{sat} < T_s \quad R_s = r_v = a_v (T_{sat} - T_s)C \quad (9)$$

また、 R_{Dw} 、 R_{Do} はそれぞれ水および油が食品から系外へ流出する速度である。

3・3 タンパク変性による収縮と圧力の計算

タンパク変性に伴って肉は収縮し、変形すると同時に内部の圧力が上昇する。この収縮変形を計算するためには、食品内の応力解析が必要となるが、次の3つの式が基礎式²⁾となる。

(1) 応力-ひずみ関係式

(2) ひずみ-変位関係式

(3) 応力に関する平衡方程式あるいは仮想仕事の原理

具体的な基礎式は省略するが、これらの式を解くこ

とにより、加熱によってタンパクが変性したときの収縮変形が計算できる。

圧力に関しては、以下のように数式化した。いま、肉の構造を、タンパク質でできた容器の中に、水と油が分散していると考え、タンパク質の熱変性によって、容器が収縮すると中の水と油の圧力が增大すると仮定する。

肉内部の微小体積 (固体 1gあたりの体積 $V \text{cm}^3 / \text{g-solid}$) について考える。微小体積は、固形分 (タンパク質) と水分、油分から構成されるとし、固形分と水分および油分の初期体積をそれぞれ V_i 、 V_w 、 V_o とする。タンパク変性によって固体の体積が V に収縮し、水分および油分は物質移動によって含水率 w_w 、含油率 w_o (体積は V_w 、 $V_o \text{cm}^3 / \text{g-solid}$) に変化する。圧力は、固体の体積に対する (水分+油分) の体積比に比例すると仮定すると次式で表される。

$$P = P_i \frac{V_i}{V} \frac{V_w + V_o}{V_w + V_o} = P_i \frac{1}{S_v} \frac{V_w + V_o}{V_w + V_o} \quad (10)$$

ここで、 S_v は固体の体積収縮率である。

3・4 理論計算結果

上記基礎式を無次元化した後、有限要素法により数値計算を行い、食品内温度分布、水分分布、油分分布の経時間変化を求めた。代表的な計算例として、過熱水蒸気温度 250°C 、試料の大きさを半径 2cm 、高さ 2cm の円筒形として計算したときの結果を以下に示す。計算条件および計算に用いたパラメータは次のとおりである。

試料大きさ：半径 2cm 、高さ 2cm 、

初期水分割合：0.7、初期油分：0.1

初期温度： 20°C 、過熱水蒸気温度： 250°C

収縮率： $S_v = 0.0535 \times T + 1.0844$

(50°C で $S_v = 1$ 、 80°C 以上 $S_v = 0.65$)、

$S_z = S_v$ 、 $S_r = S_\theta = 1$

拡散係数： $D_w = 3 \times 10^{-5} \text{cm}^2 / \text{s}$ 、

熱拡散率： $a = 1.53 \times 10^{-3} \text{cm}^2 / \text{s}$ 、

熱伝達係数： $h_i = 7 \times 10^3 \text{cal} / \text{s cm}^2$

凝縮速度： $T_{sat} > T_s$ $R_w = r_c = a_c (T_{sat} - T_s)$ $a_c = 10 \times 10^{-5}$

蒸発速度： $T_{sat} < T_s$ $R_w = r_v = a_v (T_{sat} - T_s)W$ $a_v = 8 \times 10^{-4}$

油の粘度 [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]： $\mu = 108729 \times T^{2.072}$

水の粘度 [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]： $\mu = A \exp\left(\frac{1+BT}{CT+DT^2}\right)$

$A = 0.1257187 \times 10^{-1}$ 、 $B = -0.5806436 \times 10^{-2}$

$C = 0.1130911 \times 10^{-2}$ 、 $D = -0.5723952 \times 10^{-5}$

透過係数 ($\text{g-water} / \text{cm}$)： $\lambda_w = 3 \times 10^{-4}$ (水)、

$\lambda_o = 6 \times 10^{-4}$ (油)

以上のパラメータを用いて計算したときの温度変化

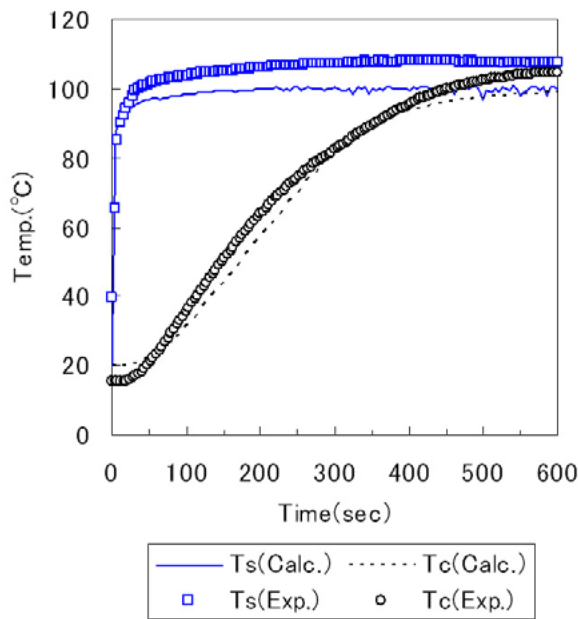


図 10 温度変化の計算値と実測値の比較

Fig. 10 Comparison of calculated temperature with experimental one.

を図10に、水分と油分変化を図11に示した。表面温度変化(図10)をみると、60秒ほどで100℃に到達している。この付近で水分増加が最大値となり、その後減少していることがわかる。体積変化は中心温度が80℃に到達した時点でそれ以上減少しないが、油分はそれ以降も減少しており、平衡に到達するのに時間がかかっていることがわかる。また、図10および図11には実測値を合わせて示したが、実測値と計算値の傾向は良好に一致していることがわかる。ただし、現在使用している物性値およびパラメータについては今後その妥当性を検証する必要がある。

むすび

過熱水蒸気調理における肉類の脱油に着目して実験を行った結果、皮の付いている鶏肉の場合、オープン調理に比べて脱油率が大きいこと、牛ヒレ肉の場合、フライパン調理に比べて脱油率が大きいことが確認された。高齢社会を迎える日本にとって、脂肪の摂取を

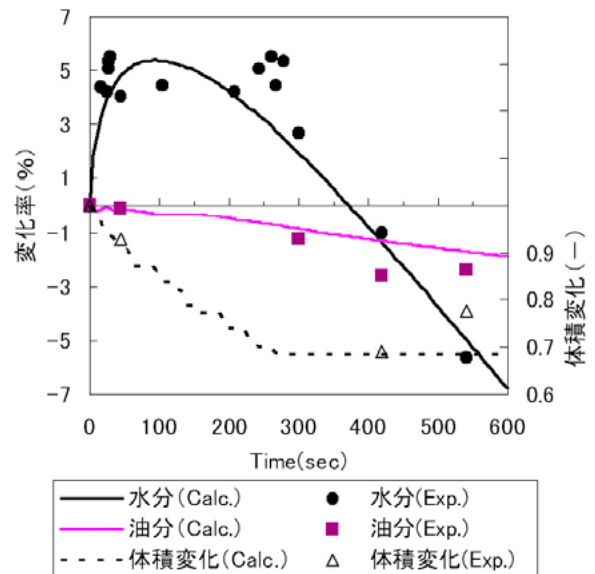


図 11 水分・油分変化の計算値と実測値の比較

Fig. 11 Comparison of calculated results with experimental ones for moisture content and oil content.

抑えることは健康面から考えて重要であり、過熱水蒸気による調理はこの点で有効であると考えられる。

また、実験結果に基づき、熱と水分・油分の移動について数学モデルを構築した。この数学モデルにおいては、加熱によってタンパク質が収縮し、内部で圧力が発生するため、油と水分が押し出されるとした。このときの油と水の透過性を考慮することにより、実験結果を説明できることを示した。この数学モデルを最適な加熱調理プロセスを決めるためのシミュレータとして使うためには、拡散係数、透過係数、タンパク質の変性速度定数・収縮率など、様々な物性値が必要であり、今後データの蓄積に期待するところである。

参考文献

- 1) 矢川元基, 宮崎則幸, “有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析”, pp.135-161, サイエンス社(1985).

(2006年6月1日受理)