



# 焼き調理における食肉中の液体成分移動シミュレーション

Internal liquid motion simulation during meat grilling

柴田真一<sup>1)</sup>, 長谷川晶一<sup>2)</sup>, 三武裕玄<sup>3)</sup>

Shinnichi Shibata and Shoichi Hasegawa and Hironori Mitake

1) 東京工業大学 総合理工学研究科知能システム科学専攻

(〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 R2-626, shibata@haselab.net)

2) 東京工業大学 精密工学研究所

(〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 R2-624, hase@haselab.net)

3) 東京工業大学 精密工学研究所

(〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 R2-624, mitake@haselab.net)

**概要:** 調理を上手に行うためには、調理中に食品に起こる物理的な変化や化学的な変化を手がかりとして適切な調理操作を加えなくてはならない。食肉の焼き調理過程における肉汁の流出や、水分分布の変化に伴う食肉表面のテクスチャの変化は焼き上がりを判定する為の重要な手がかりとなる。そこで本研究では焼き調理における食肉内部の液体成分移動シミュレーションを提案する。食品中の液体成分は、液体が持つ表面張力による毛管現象、液体の濃度勾配、食品中の圧力勾配により移動する。本研究では食肉を多孔体とみなし、有限要素法による液体成分の移動シミュレーションを行う。

**キーワード:** 液体成分移動, 多孔体, 毛管現象, 濃度勾配

## 1. はじめに

調理を上手に行うためには、調理中に食品に起こる物理的な変化や化学的な変化を手がかりとして適切な調理操作を加えなくてはならない。そのため、調理中に食品に起こる変化を提示するシミュレータを用いることで効果的な調理の練習ができることを考える。調理支援を目的としたシミュレータの研究には加藤ら [1] の研究がある。加藤らは食品の伝熱シミュレーションとそれに従った食品の外観及び内部のテクスチャの提示を行う調理シミュレータを提案し、ステーキの焼き調理実験によりシミュレータを用いた調理練習が有効であることを示している。しかし同時に、伝熱シミュレーションのみでは調理状況の再現には不十分であることも報告している。食肉の焼き調理過程において起こる食肉外への肉汁の流出や、水分分布の変化に伴う食肉表面のテクスチャの変化は、焼き上がりを判定する為の重要な手がかりとなるため、再現することでシミュレータによる調理練習の効果を上げることができると考えられる。肉汁の流出は食肉内部の水分と油分の流出であるため、再現するためには水分・油分移動シミュレーションが必要となる。そこで本研究では、調理シミュレーションのための食品中の液体成分移動シミュレーションを提案する。

## 2. 先行研究

調理過程における食肉内部の水分・油分移動については門馬ら [2] の研究があり、過熱水蒸気調理における食肉中の水分移動は水分濃度勾配による拡散と圧力勾配による流動、油分移動は圧力勾配による流動で起こるとして定式化し、有限要素法によるシミュレーションを行っている。境界条件は、食肉外への水分・油分の流出速度に加え、食肉表面温度が水の沸点未満のときは水蒸気の凝縮速度、沸点以上のときは水の蒸発速度を考えている。また石渡らは、フライパンを用いての焼き調理におけるポロニアソーセージ内部の水分移動は水分濃度勾配による拡散でおこるとして、有限要素法によるシミュレーションを行っている。

## 3. 提案手法

### 3.1 液体成分移動の機構

食品中の液体成分の移動は、液体が持つ表面張力による毛管現象、液体成分の食品中での濃度勾配による拡散により生じることが知られている [4]。また加熱調理においては、高温により食品に含まれるタンパク質が変性することで収縮が起こり、食品内部に圧力勾配が生じることによって液体成分の流動が生じる。

### 3.2 液体成分移動の計算

液体成分の移動は食品が持つ微細孔内で行われるため、本研究では食肉を主成分であるタンパク質とその内部にある

間隙からなる多孔質体とみなす。また、食肉が持つ液体成分は水分および油分とする。多孔質体内部の液体の挙動の計算方法としては Lenaerts ら [5] および Lenaerts らの手法を採用した芦田ら [6] の研究があり、多孔質体を固体要素と液体要素をあわせ持った要素で表現し、粒子法によるシミュレーションを行っている。本研究ではこれらの手法を有限要素法により実現する。

多孔質体内部の水の流速  $\mathbf{v}_w$  は、ダルシーの法則より次のように表される。

$$\mathbf{v}_w = -\frac{K}{\phi\mu_w}(\nabla P^p - \nabla P^c - \rho_s \mathbf{g}) \quad (1)$$

ただし、 $K$  は多孔質体の浸透係数、 $\phi$  は間隙率、 $\mu_w$  は水の粘度、 $\rho_s$  は固体成分の密度、 $\mathbf{g}$  は重力加速度である。また、 $P^p$  は毛管圧力、 $P^c$  は毛管ポテンシャルであり、それぞれ

$$P^p = k^p S \left\{ \left( \frac{\rho_s}{\rho_{s0}} \right)^\gamma - 1 \right\} \quad (2)$$

$$P^c = k^c (1 - S)^\alpha \quad (3)$$

と表される。ここで  $k^p$ 、 $k^c$ 、 $\gamma$ 、 $\alpha$  は定数であり、 $0 < \alpha < 1$ 、 $\rho_{s0}$  は固体成分の密度の初期値である。また  $S$  は飽和率であり、水と油の空間密度  $\rho_w$ 、 $\rho_o$ 、水と油の密度  $\rho^{water}$ 、 $\rho^{oil}$  を用いて

$$S = \frac{\rho_w}{\rho^{water}\phi} + \frac{\rho_o}{\rho^{oil}\phi} \quad (4)$$

と表される。体積  $V$  内に質量  $m_l$  の液体が含まれるとき、その液体の空間密度  $\rho_l$  は

$$\rho_l = \frac{m_l}{V} \quad (5)$$

で求められる。

水の流速の式をもとに微小体積内での水の収支をとることで、次の基礎式が得られる。

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{v}_w \quad (6)$$

有限要素法の境界条件は、食肉表面での水分の蒸発速度を  $R_{evw}$ 、表面から外部へ向かう流速を  $R_{Dw}$ 、面の法線を  $\mathbf{n}$  とすると

$$\mathbf{v}_w \cdot \mathbf{n} = R_{evw} - R_{Dw} \quad (7)$$

とする。油分については油の粘度を  $\mu_o$  とすると、水分の場合と同様にして油分の流速  $\mathbf{v}_o$  および基礎式は、それぞれ次のように求められる。

$$\mathbf{v}_o = -\frac{K}{\phi\mu_o}(\nabla P^p - \nabla P^c - \rho_s \mathbf{g}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_o}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{v}_o \quad (9)$$

得られた基礎式 (6) と (9) はガラーキン法を適用することで空間について離散化し、その後に時間に関しての離散化を行い、ガウスザイデル法を用いて繰り返し計算を行うことで有限要素法による液体成分移動のシミュレーションを行う。

### 3.3 伝熱計算

加熱調理における食肉の温度変化と液体成分移動の関係を再現するために有限要素法による伝熱シミュレーションを行う。熱伝導の支配方程式は、エネルギー保存則とフーリエの法則より、ある点における温度を  $T$ 、熱伝導率を  $\lambda$  とすると次のように求められる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \lambda_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10)$$

$T$  はある点における温度、 $\rho$  は密度、 $c$  は比熱、 $\lambda$  は熱伝導率である。伝熱計算も液体成分移動計算と同様の離散化を行い、ガウスザイデル法を用いた有限要素法によるシミュレーションを行う。水分蒸発の潜熱については、水の沸点未満での蒸発量が少ないため無視できると考え、水の沸点以上での蒸発の潜熱のみを計算に含める。また、水分の蒸発が生じる領域は、試料の表面のみとする。潜熱の計算については、有限要素法による熱計算とは別に行っている。有限要素法による計算の結果水の沸点をこえている試料表面の頂点について、沸点をこえている余剰熱量をその頂点における水分蒸発のための潜熱の上限に設定し、それにより蒸発させることができる分量の水分を頂点を持つ水分から減じる。頂点を持つ水分量が蒸発させることができる水分量の上限値よりも少ない場合は、潜熱の上限から頂点を持つ水分すべてを蒸発させるのに必要な潜熱を減じ、その残りの熱量を頂点に戻し、温度を上昇させている。

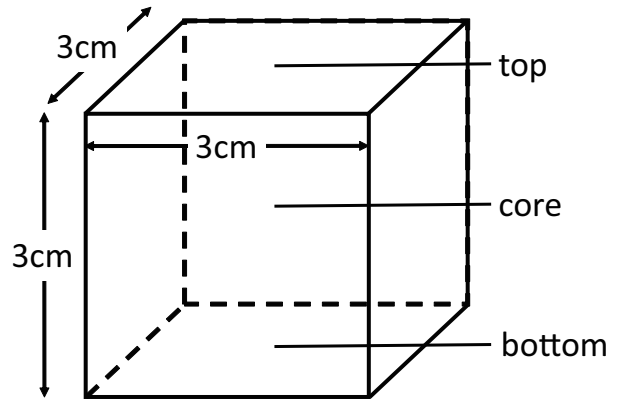


図 1: 試料

## 4. 実装結果

### 4.1 食肉加熱時の液体成分の挙動

食肉の加熱調理を行う際の液体成分の挙動を、食肉外部との収支と食肉内部での動きとに分けて考える。外部との収支については、食肉表面での水分の蒸発と、食肉の収縮・変形により圧力勾配が生じた場合の流出が考えられる。内部での動きとしては、蒸発により表面から失われた水分を内部から補充することと、食肉の収縮・変形により生じる圧力勾配に従う流れが考えられる。提案手法がこれらの液体成分の挙動を再現していることを確認するためのシミュレーションを行う。

## 4.2 実験

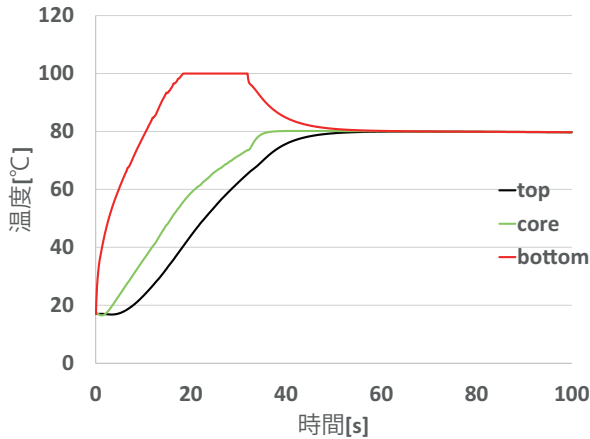


図 2: 温度履歴：加熱方法 1

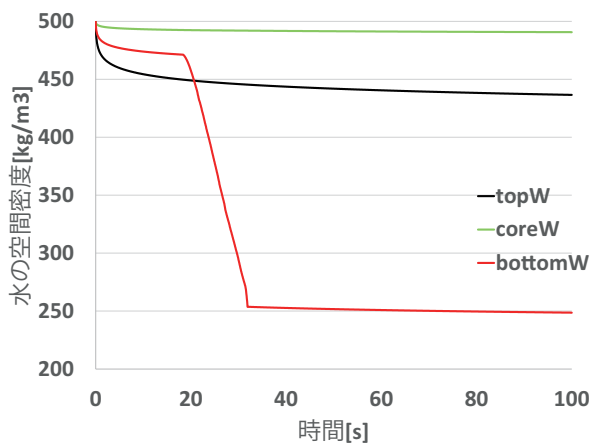


図 3: 水の空間密度履歴：加熱方法 1

### 4.2.1 試料・パラメータ

試料は、図 1 に示したような 1 辺の長さ 3cm の立方体の形状とした。試料の物性値については質量 27g、初期の質量に対する水分・油分の割合はそれぞれ 50%と 20%、熱伝導率  $55\text{W}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、比熱  $3.54 \times 10^3\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、浸透係数 0.3 とした。また、液体成分移動計算のパラメータは、 $\alpha = 0.1$ 、 $\gamma = 1.0$ 、 $k^c = 1.5 \times 10^4$ 、 $k^p = 5.0 \times e^4$  とした。有限要素法に用いる試料メッシュは、3D モデラで作成したポリゴンモデルを TetGen を用いて四面体メッシュ分割を行うことで作成した。

### 4.2.2 実験方法・結果

次の 3 つの方法で試料の加熱シミュレーションを実行した場合の図 1 における top、core、bottom 部分の温度履歴および水分の空間密度の履歴をそれぞれ示す。油分については、今回使用する試料は形状変化しないものとしているため圧力勾配による試料外への流出が生じず、分布が変化しないため省略した。

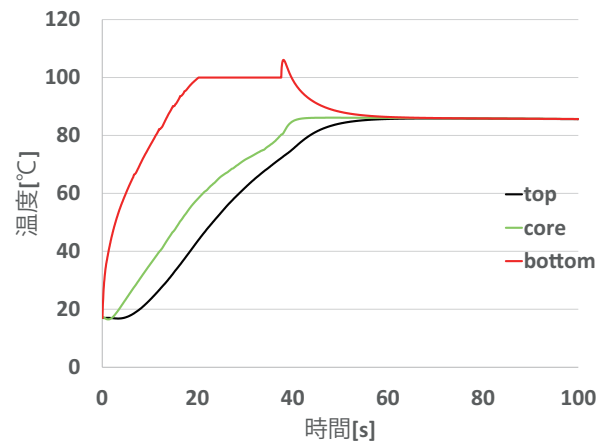


図 4: 温度履歴：加熱方法 2

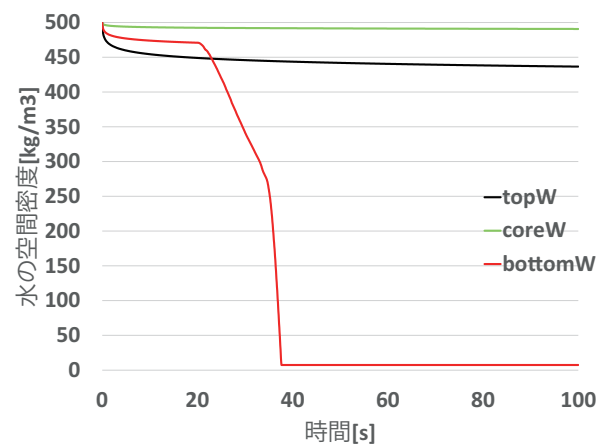


図 5: 水の空間密度履歴：加熱方法 2

1. 図 1 における bottom の部分の水の空間密度が初期値の半分になったら加熱をやめ、その後加熱開始から 100 秒が経過するまでシミュレーションを行う。
2. 図 1 における bottom の部分の水の空間密度が 0 に近づいたら加熱をやめ、その後加熱開始から 100 秒が経過するまでシミュレーションを行う。
3. 加熱開始から 100 秒が経過するまで加熱し続ける。

### 4.2.3 考察

- 食肉外部との液体成分の収支：

加熱方法 1~3 において、bottom の温度が  $100^\circ\text{C}$  に達した後は温度が上昇せず、加熱方法 2、3 において bottom の水分の空間密度が 0 に近づいた後に再び昇温し始めていることから、温度が  $100^\circ\text{C}$  に達した頂点の含水量が多い場合は加えられた熱量は水の状態変化に使われるため温度が上昇しないという現象が再現されている。また、すべての加熱方法において top、bottom ともに水の空間密度が少しずつ減少していることから、水の沸点未満での微量な蒸発を

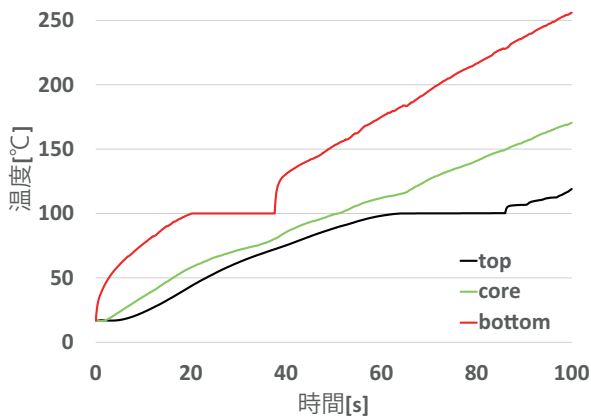


図 6: 温度履歴: 加熱方法 3

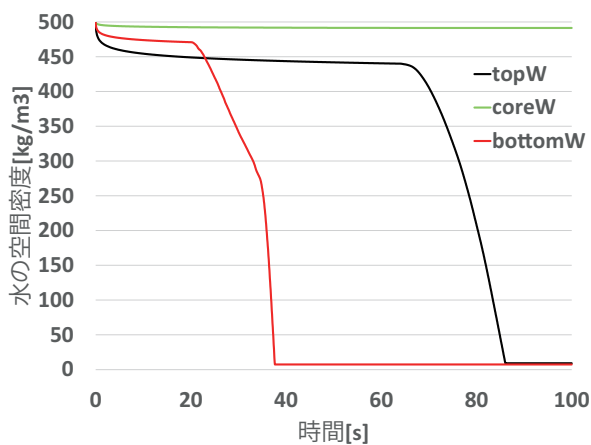


図 7: 水の空間密度履歴: 加熱方法 3

再現出来ている。

- 食肉内部での液体成分の挙動：  
加熱方法 2、3 において、bottom の水の空間密度が 0 に近づいた後も蒸発が起こっているにもかかわらず完全に 0 にはならないことから、食肉表面で水分が失われても内部から補充される機構を再現していることがわかる。また、すべての加熱方法において食肉内部は蒸発計算を行う領域に含めていないにもかかわらず core の水分の空間密度が減少していることから、水分の拡散が生じていることがわかる。

## 5. まとめ

本論文では食肉の加熱調理状況再現のために、食肉に含まれる液体成分移動をモデル化しシミュレーションを行った。その結果、食肉表面での水分の蒸発、蒸発潜熱が奪われることによる食肉表面での昇温の停止、毛管現象による食肉内部から乾燥表面への水分の供給、食肉内部での水分の拡散と同等の機構を実現できた。しかし食肉の実測値に沿った値ではないため、実際に食肉を加熱調理する際の温

度履歴および液体成分量を測定し、液体成分移動計算のパラメータを同定する必要がある。また、タンパク質の変性による食肉の収縮が原因で生じる、圧力勾配に従う液体成分の移動の再現ができておらず、外部への液状の水分および油分の流出が扱えないため、肉汁の流出を再現するための課題となる。

## 参考文献

- [1] Fumihiro Kato, Shoichi Hasegawa “Interactive Cooking Simulator: Showing food ingredients appearance changes in frying pan cooking”, 5th Workshop on Multimedia for Cooking and Eating Activities (CEA) in conjunction with the ACM International Conference on Multimedia, full paper, pp33-38, 2013
- [2] 門馬哲也, 酒井昇, 中門千晴, 福岡美香, 高見星司 “肉類の過熱水蒸気調理における水分・油分移動について”, シャープ技報第 94 号, pp10-15, 2006
- [3] 石渡奈緒美, 堤一磨, 福岡美香, 渡部賢一, 田口靖希, 工藤和幸, 渡辺至, 酒井昇 “殺菌価を考慮したフライパンによるハンバーグ焼成時の最適調理 (第 1 報) モデル試料を用いた IH クッキングヒーターによるフライパン焼成伝熱および水分移動モデルの確立”, 日本調理科学会誌, pp265-274, 2012
- [4] 野口駿, 食品と水の科学, 幸書房
- [5] T.Lenaerts, B.Adams, P.Dutre “Porous Flow in Particle-Based Fluid Simulations”, ACM Transactions on Graphics, Vol.27, pp491-498, 2008
- [6] 芦田洋敏, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 鍵山善之, 大城理 “液体を含む多孔質体の力覚表現”, TVRSJ Vol.15, pp633-641, 2010