

ゆで加熱における鍋容器内の温度分布

—— 具材の大きさによる影響 ——

Temperature distribution of boiling water and food stuffs in a cooking pot

—— Size effects of food stuffs ——

原 知 子
吉 永 隆 夫

キーワード：ゆでる、ジャガイモ、熱伝達、ポアラスメディア

要 約

煮物における煮汁と具材の温度変化を実験及び解析により調べた。実験では大きい芋と小さい芋の2種類の場合について調べており、加熱時には大きい芋ほど煮汁の対流が起こりやすく、鍋内温度分布は一樣になる。一方芋内部の温度変化は表面温度を煮汁温度として、熱伝導を仮定することにより決定され、大きい芋ほど煮汁温度変化に対して中心部温度は遅れて変化する。また、芋の大きさに対する鍋内部での煮汁の温度変化や温度分布はポアラスメディアに基づく熱流動モデルの数値解析と定性的に一致する。

1. 緒言

煮る・ゆでる、蒸す、焼く、揚げる、炒める、などの加熱調理においては、適切な温度条件を把握することが重要であり、食材表面から内部への熱伝達、温度変化、水分移動などを考慮する必要がある。特に煮る・ゆでる、においては、対流による煮汁の熱流体運動、具材と煮汁間での熱・物質移動、さらに、沸騰、凝縮の効果などを明らかにする必要がある。「煮る」の理論的な取り扱いに関しては、鍋容器内での空間・時間的に変動する熱流体運動と、煮汁と個々の食材間における熱物質輸送の効果を同時に考慮にいった、両者の効果を含む熱流動モデルを構築する必要がある。

数理モデルを用いた解析の例には、食材内部への伝熱の影響¹⁾、ジャガイモの表面温度を与えた時の内部温度や軟化率の予測^{2, 3)}、などがある。しかし具材が煮汁の熱対流に及ぼす影響や、食材内部の温度や濃度の変化が熱対流に及ぼす効果などといった煮汁と食材間の相互作用については、現象が複雑になるためにこれまでほとんど調べられていない。

本研究では、煮物における熱流動運動に関するモデルを構築し、ゆで加熱調理におけるゆで水や具材の温度分布予測、および制御を行うことを目的とし、煮物における煮汁の状態や具材の状態をポーラスメディア中での熱流体流動モデルを用いて解析し、モデルの妥当性を見るため、実験との比較検討を行う。今回その途中経過として、ゆで水の温度分布に及ぼす具材の大きさの影響について報告する。

2. 方法

2. 1 ゆで加熱における温度実測

容器はステンレス製 IH 対応鍋 (SUS430, RSX-1, 18Cr, $\phi=22\text{cm}$)、熱源としてナショナル IH クッキングヒーター火力 3 (KZ-DS13 100V, 1200W) を用いた。ゆで水は脱イオン水 2 ℓ、具材としてジャガイモ (北海道産メークイン) 約 15 個 (総重量 $1700 \pm 50\text{g}$) を用いた。具材は大小の 2 種類を用い、大は皮むきのものを丸ごと (長径約 10cm、短径約 4 ~ 6 cm)、小は 1 cm 角に成形したものである。

温度測定はシースおよびシート熱電対、サーモロガー (安立計器) を用い、鍋の中心点、および中心点から半径方向に 50mm の鍋底面、各々の半径箇所で鍋底から 10mm 上、および液面から 10mm 下の液温、底から 30mm 上の鍋側面の温度を記録した。中心温度を測定した芋は、大小とも液面から 30 ~ 40mm に位置していた。

2. 2 芋の硬さ

芋の煮熟の目安の一つとして、破断強度を測定した。測定条件は、クリープメーター RE-3305 (山電製) を用いて、ロードセル 2 kg、プランジャー $\phi=40\text{mm}$ 、圧縮速度 10mm/秒、圧縮率 90%、芋小 (1 cm 角に成形後加熱したもの) は、加熱終了後、鍋上部から順に鍋下部と区別して取り出し、室温にて 30 分放冷後、上部、下部を交互に測定した。丸ごと加熱した芋大については、室温にて 30 分放冷後、中心部を 1 cm 角に切りだし、芋小と同様に測定した。

2. 3 数値解析

煮汁中の具材の状態を流体中でのポーラスメディアとみなし、流体の熱流動運動を数値的に解析した。解析では金属容器上下面での温度差を与えた場合、芋の大きさにより対流がどのように起こり、煮汁の温度分布がどのように変化するかを調べた。

3. 結果および考察

3. 1 ゆで水とジャガイモの温度変化

芋の大きさが異なると、温度変化に実測的な差が存在するかどうかをみるために芋を丸ごとでゆでる場合 (芋大) と芋を 1 cm 角に成形してゆでる場合 (芋小) について実測した。

図1に水にジャガイモ（大）を入れた場合の温度変化を示す。IH加熱のために、鍋中心部と、半径方向に50mmの位置で、鍋底の温度、鍋底から10mmおよび液面下10mmにおけるゆで水の温度を示している。鍋底面の温度（■）は、底面近傍（□）及び表面近傍（○）よりも必然的に高いが、底面近傍および表面近傍の温度はほぼ同じである。これは水の場合も同様で、鍋底面以外の水の温度は対流による熱伝達により、底面近傍と表面近傍の温度にほとんど差がなく、均一になっている。つまり、ジャガイモ（大）の場合、ジャガイモ間の隙間が大きいいため、対流による均一化が十分おこっていると考えられる。また、（△）はジャガイモ中心部の温度変化を示しており、熱伝導のため鍋内の水温よりも遅れて温度が上昇していることがわかる。

一方、水とジャガイモ（小）を加熱した場合を図2に示す。この場合、同時刻での温度は鍋底（■）、鍋底面近傍（□）、水面近く（○）の順で低下する。このことから、小さいジャガイモの場合、対流による温度の均一化はおこっておらず、熱伝達は底面からの熱伝導が優位であると考えられる。また、ジャガイモ中心部（△）と周囲の水温（○）はほとんど同じであることから、表面から中心部の距離が5mm程度と短い場合、ジャガイモ内部への熱伝導は速やかに起こっていることがわかる。

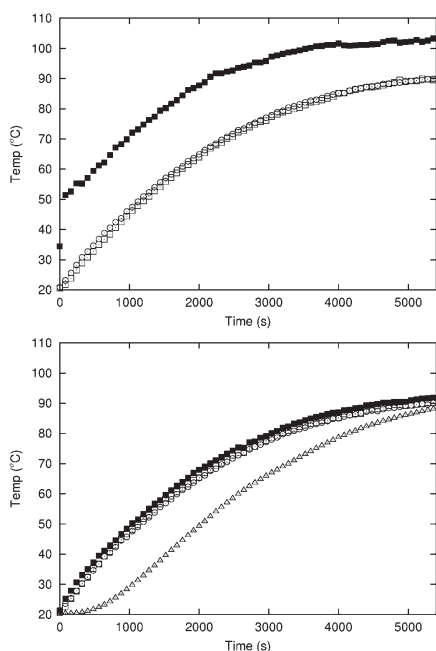


図1 ジャガイモ（大）加熱時のゆで水の温度変化

上図は鍋中心から半径方向に50mmにおける鍋底と鍋底から10mm、液面から10mmにおける温度、下図は鍋中心点における鍋底及びゆで水の温度。

■：鍋底面、□：下から10mm、○：液面から10mm、△：芋中心温度

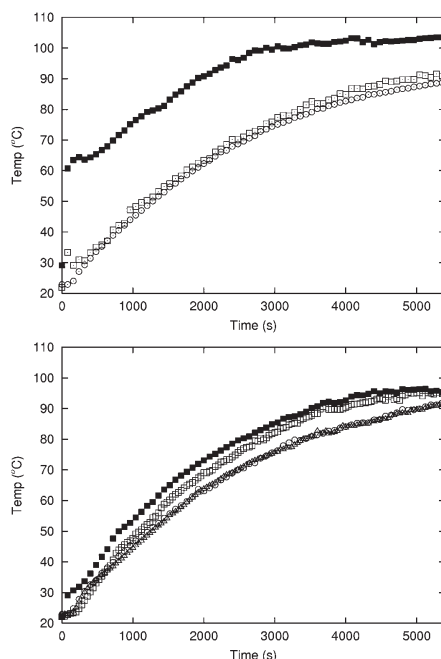


図2 ジャガイモ（小）加熱時のゆで水の温度変化

上図は鍋中心から半径方向に50mmにおける鍋底と鍋底から10mm、液面から10mmにおける温度、下図は鍋中心点における鍋底及びゆで水の温度。

■：鍋底面、□：下から10mm、○：液面から10mm、△：芋中心温度

3. 2 ジャガイモ内部の温度予測

ジャガイモ中心部の温度変化を表面温度変化より求めることができることを以下に示す。中心部温度を T_p 、表面温度を T_w として、表面温度を水温に等しいと仮定し

$$T_w = A[1 - \exp(-\gamma t)] + B \quad (1)$$

のように表面温度の時間変化が指数関数で表わされるとする。このとき、半径 a の球中心部での温度は以下のように与えられる⁴⁾：

$$T_p = A[1 - \exp(-\gamma t) a \sqrt{\gamma/\kappa} \sin(a \sqrt{\gamma/\kappa}) - 2\gamma a^2 \sum_{n=1}^{\infty} [(-1)^n \exp(-\kappa n^2 \pi^2 t/a^2)/(\kappa n^2 \pi^2 - \gamma a^2)]] + B. \quad (2)$$

ここで、 A 、 B 、 γ は表面温度から決まる定数であり、 κ は熱拡散率である。上式でパラメータを $A = 76.0^\circ\text{C}$ 、 $B = 21.0^\circ\text{C}$ 、 $\gamma = 0.00048/\text{s}$ 、 $\kappa = 1.5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 、 $a = 2.97 \text{cm}$ 、 $n = 4$ と選んだ (n は 4 以上で結果は変わらない)。このとき、図中実線は(1)式による表面温度の時間変化、破線は(2)式によるジャガイモ中心部 (半径 a の球とみなす) の温度変化を示しており、実験結果とよく一致していることがわかる。

このことから、具材内部の熱伝達は伝導によると考えてよい²⁾ ことが確認できる。

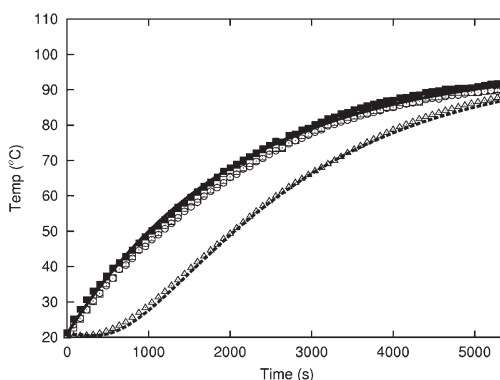


図3 ジャガイモ (大) 加熱時の温度変化と計算予測値

実測温度変化 (鍋中心点における ■：鍋底面、□：下から10mm、○：液面から10mmおよび△：芋中心温度)、水+ジャガイモ：3.645 ℓ
実線——：ジャガイモ表面温度計算値、破線-----：ジャガイモ中心部温度計算値

3. 3 数値解析結果

ジャガイモ内部の温度変化について、熱伝導方程式により、実測値と精度よく一致したことから、表面温度が与えられると、内部温度も予測できると考えられる。そのため、鍋内の煮汁の温度変化を求めることが重要であることが分かる。

そこで、鍋内の煮汁の温度、流速をポーラスメディア理論⁵⁾を用いた解析により調べた。すなわち、現象がポーラスメディア中での熱流動運動でモデル化されるとして以下の方程式⁶⁾で示される。

流体の連続の式および運動方程式は

$$\phi \partial \rho_f / \partial t + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0, \quad (3)$$

$$\rho_f [\varphi^{-1} \partial \mathbf{v} / \partial t + \varphi^{-2} (\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v})] = -\nabla P + (\mu/\varphi) \nabla^2 \mathbf{v} - \mu \mathbf{v} / K. \quad (4)$$

一方、流体部及び固体部の熱輸送方程式はそれぞれ

$$(1 - \varphi)(\rho c)_s \partial T_s / \partial t = (1 - \varphi) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + h(T_f - T_s), \quad (5a)$$

$$\varphi(\rho c_p)_f \partial T_f / \partial t + (\rho c_p)_f \mathbf{v} \cdot \nabla T_f = \varphi \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + h(T_s - T_f), \quad (5b)$$

で与えられる。ここで、空隙率（＝空隙体積／全体積）を φ （＜0.6程度）とすると、全体積で平均された Darcy 速度 \mathbf{v} と流体部分で平均された V の間で Dupuit-Forchheimer の関係 $\mathbf{v} = \varphi V$ が用いられている⁵⁾。また、 $K = K(D_p, \varphi)$ は浸透率である（たとえば、砂で $2 \times 10^{-7} \sim 1.8 \times 10^{-6} (\text{cm}^2)$ 程度）。さらに、流体密度の温度変化は

$$\rho_f = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)], \quad (6)$$

で与えられ、ブシネ近似（ ρ_f は T を通してのみ変化するとし、時間や空間変動とは独立。したがって(1)式は $\nabla \cdot (\mathbf{v}) = 0$ となる）に従うものとする。簡単のために等温度条件 $T_s \sim T_f = T$ を用いると、熱輸送方程式(5)は

$$(\rho c)_m \partial T / \partial t + (\rho c)_m \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_m \nabla T), \quad (7)$$

となる。ここで、 $(\rho c)_m = (1 - \varphi)(\rho c)_s + \varphi(\rho c_p)_f$, $k_m = (1 - \varphi)k_s + \varphi k_f$ である。

簡単のために、図4に示すように、 (r, z) 軸対称形で半径 R 高さ H の円筒容器内に流体があると仮定し、重力加速度を g とする。有限差分法（SMAC、風上）⁶⁾ により(3)(4)(5)式を解くことにより温度・速度分布を調べた。ここで液体部の速度ベクトル $\mathbf{u}=(u, v)$ 、圧力 P 、温度 T とするとき、境界条件として、上面（ $z=H$ ）、側面（ $z=R$ ）、下面（ $z=0$ 、加熱部と非加熱部）で以下の条件を課す。

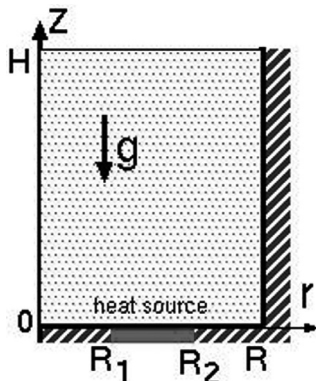


図4 数値解析モデル

(r, z) 軸対称系

方法：有限差分法（SMAC、風上）⁶⁾

$\partial u / \partial z = 0, v = 0, T = T_1, z=H$

$u = v = 0, \partial T / \partial r = 0$ or $r=R$

$u = v = 0, \partial T / \partial z = 0$ or $z=0, 0 < r < R_1, R_2 < r < R$ (非加熱部)

$u = v = 0, T=T_0$ or $z=0, R_1 < r < R_2$ (加熱部)

得られた数値結果を図5に示す。ただし、上下間温度差 $\Delta T = T_0 - T_1$ とし、温度および速度はそれぞれ $\Delta T, (g\beta \Delta TH)^{1/2}$ で無次元化されている。さらに、無次元パラメータとしてレイリー

数 $Ra=g\beta\Delta TH^3/(va)$ 、ダルシー数 $Da=K/H^2$ が導入されている。このとき K は浸透率で

$$K = (Dp^3/150) \varphi^3/(1-\varphi)^2$$

で与えられる。 Dp は芋の有効直径であり、同じ φ でも Dp が大きいほど浸透率は大きくなることに注意が必要である（大きい芋ほど隙間が大きくなり水が浸透しやすくなる）。

図 5-1 および図 5-2 は上面と下面の温度差が比較的小さい状況を示している（ $\Delta T=0.1$ ）が、具材が大きい場合（図 5-1）には容器上部にも高温部が存在し、速度分布から対流が起こっていることがわかる。具材が小さい場合（図 5-2）にはほぼ流れの速度ベクトルに変化がなく、また熱源のある底面から上側に温度勾配が認められ、熱伝導が優位になっていると考えられる。しかし小さい具材でも図 5-4 のように、上下の温度差が大きくなると（ $\Delta T=1.0$ ）、対流が起こり、局所的に温度の高い部分と低い部分が認められる。さらに図 5-3 の大きな具材の場合には、温度差が大きくなるとさらに大きな対流が起こって、熱源に近接している部分以外では温度分布が均一になるほどの対流が起こっていると考えられる。これらの解析結果は、実際の温度測定データとも定性的に一致している。

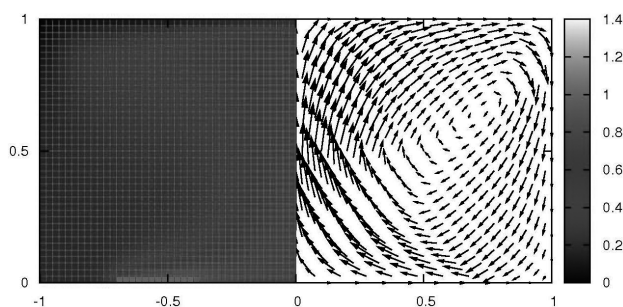


図 5-1 温度-速度分布（ $T/\Delta T$, $u/(g\beta\Delta TH)^{1/2}$ ）芋大、温度差小
(i) $\Delta T=0.1$, $RaDa=695$, $Da=3.8\times 10^{-4}$

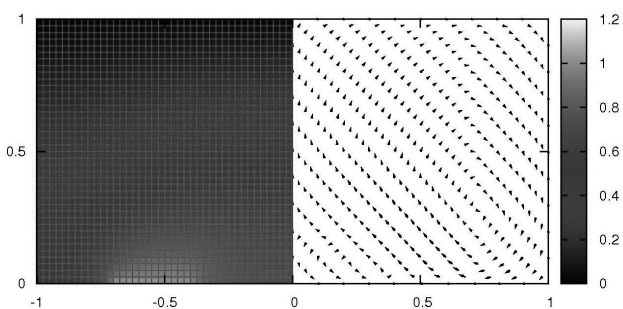


図 5-2 温度-速度分布（ $T/\Delta T$, $u/(g\beta\Delta TH)^{1/2}$ ）芋小、温度差小
(ii) $\Delta T=0.1$, $RaDa=27.4$, $Da=1.5\times 10^{-5}$

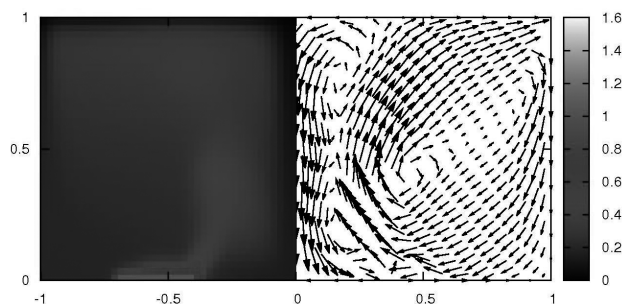


図5－3 温度－速度分布 ($T/\Delta T$, $u/(g\beta\Delta TH)^{1/2}$) 芋大、温度差大
(iii) $\Delta T=1.0$, $RaDa=6950$, $Da=3.8\times 10^{-4}$,

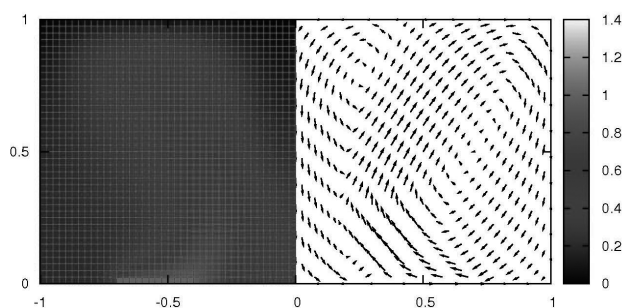


図5－4 温度－速度分布 ($T/\Delta T$, $u/(g\beta\Delta TH)^{1/2}$) 芋小、温度差大
(iv) $\Delta T=1.0$, $RaDa=274$, $Da=1.5\times 10^{-5}$

3. 4 鍋内におけるジャガイモの硬さの不均一性

ゆでたジャガイモの状態の目安の一つとして、破断強度を測定した。図8に1 cm角の芋小の場合の結果を示した。

図では破断荷重は鍋上部の芋で $817.9\pm 380.2\text{gf}$ 、下部の芋で $452.0\pm 224.3\text{gf}$ であることを示している。硬さは 1635.8gf/mm 、 903.9gf/mm で、鍋上部と鍋下部では、軟化状態が有意に異なることが分かる。一方、芋大の場合では、上部下部の順に、破断強度 $726.0\pm 118.3\text{gf}$ $719.2\pm 119.6\text{gf}$ 、硬さも 14124.4gf/mm 1412.0gf/mm と差が認められなかった。このことより、硬さの変化は温度に敏感に依存し、鍋のゆで水の温度が不均一な場合には加熱状態が異なると考えられる。また、調味料の浸透等についても、塩ゆでした芋の塩分濃度が鍋上部と下部で異なることが報告⁸⁾ されてい

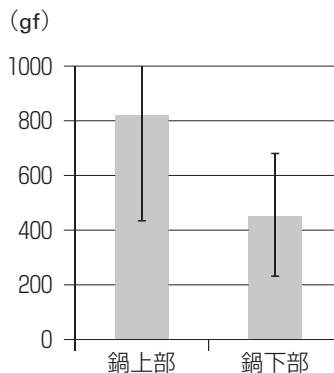


図6 鍋内の上下の位置による芋(小)の破断荷重

$P < 0.01$ (t test) で有意差、 $n = 10$

ることから、鍋容器内の温度分布が軟化や調味料の浸透に大きく影響すると考えられる。

4. 結論

- 1) ジャガイモが小さい場合、鍋の上下で温度差があり、大きい場合には温度差が小さいことから、ジャガイモが大きい方がより対流が発生していると予想される。
- 2) 浸透率の増加は Da 数の増加に対応するので、ジャガイモが大きいほど浸透率が大きくなり、対流現象が起こりやすい。
- 3) ポーラスメディアと仮定した熱流体運動の数値解析から、 $RaDa$ 数が大きくなるほどより強い対流現象が現れ、温度分布はより一様になる。
- 4) ジャガイモ内部の温度変化は、表面での温度変化に基づいて熱伝導を仮定した計算により予測できる。
- 5) ジャガイモが大きい場合は煮汁における熱伝達は対流によるのに対して、ジャガイモが小さい場合は熱伝導が主になる。
- 6) 容器内での温度分布は具材の硬さの違いに大きく影響を及ぼすため、3次元モデルでの解析で鍋容器内部でのより詳しい温度分布を知る必要がある。

5. 謝辞

本研究は科研費（No.22500749）の助成を受けたものである。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 洪川祥子：調理における加熱の基本，日本食生活学会誌，17（2006）89.
- [2] 香西みどり，中村文子，畑江敬子，島田順子：シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす形状の影響，日本調理科学会誌，32（1999）296.
- [3] P.M.Derbyshire and I.Owen: Transient heat transfer in a boiled potato: a study related to food process engineering, Int. J.Heat and Fluid Flow, 9（1988）254.
- [4] H.S.Carslaw and J.C.Jaeger: Conduction of heat in solids, (Oxford, 1959).
- [5] Donald A.Nield and Adrian Bejan: Convection in Porous Media, (Springer, 2010)
- [6] 吉永隆夫，原知子：固体液体間で熱物質輸送を伴う多孔質媒質中での熱対流現象，京都大学数理解析研究所講究録1761（2011）191.
- [7] 河村哲也：流体解析Ⅰ，（朝倉書店，1997）65.
- [8] 松元文子，板谷麗子：家政学雑誌，12（1961）393.