

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 9 日現在

機関番号：44513

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500749

研究課題名（和文） 煮物における煮汁の温度・濃度分布特性とマルチスケール熱流体流動モデルによる解析

研究課題名（英文） Characteristic distributions of temperature and solute concentration in a surrounding fluid of boiling foods and their analysis by means of a multi-scaled thermal fluid flow model

研究代表者 原知子

（ HARA TOMOKO ）神戸山手短期大学・准教授

研究者番号：40192281

研究成果の概要（和文）：

煮物調理を行う上で適切な加熱条件を知ることは重要であり，そこでは食材と煮汁間の熱物質輸送が重要な役割を果たす．本研究では，ポーラスメディア理論を用いた煮物調理の数値モデルを提案し，煮汁の熱対流運動や煮汁食材間での熱物質輸送を数値解析により明らかにした．ジャガイモを用いた煮物実験との比較や一次元モデルの援用により，熱輸送効果の有効な食材径が存在し，食材のしみ込み濃度や硬さが予測できることを示した．

研究成果の概要（英文）：

It is important to know suitable heating conditions in cooking processes when foods are boiled, where heat and mass transfer play an important role between food stuffs and surrounding fluids. In the present study, by using a mathematical model for cooking process based on the porous media theory, thermal fluid convection and heat and mass transfer are numerically examined in the foods and surrounding fluids. In comparison with boiling experiments using potatoes and with the help of a one-dimensional model, it is found that preferable sizes of food stuffs for effective heat transfer can exist and solute concentrations and hardness of the food stuffs can predict.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2011年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2012年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,000,000 | 900,000 | 3,900,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：生活科学・食生活学

キーワード：煮る，調理，対流，ポーラスメディア，熱伝達，ダルシー数，ヌッセルト数

1. 研究開始当初の背景

古くからある加熱調理法のひとつに「煮る」があるが、「焼く」や「揚げる」などの他の料理法とは異なり，煮汁の熱対流により食材を比較的緩やかかつ長時間にわたり加熱する．このような料理法に関する学術的な研究は国内外共に古くから行われているが，熱対流に及ぼす食材の影響や，食材内部の温度や

濃度の変化に及ぼす熱対流の効果などといった煮汁－食材間の相互作用に関しては，現象が複雑になるためこれまでほとんど調べられていない．しかし，このような相互作用による影響を明らかにすることにより，より精密な加熱プロセスの予測やきめ細かい加熱温度制御などが可能になるばかりではなく，新たな加熱方法やプロセスの開発にも貢

献すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、食材間での煮汁と個々の食材内部の熱流動運動を調べるため、二種類のスケール(マルチスケール)を持つポーラスメディア中での熱流体流動モデルを提案し、このモデルを解析することにより煮物における煮汁や食材の温度・濃度分布特性を明らかにする。特に、実験結果を参考にして設定したパラメータを用いて、種々の条件下での食材の加熱過程の温度・濃度の予測や加熱温度制御の有効性を示す。

3. 研究の方法

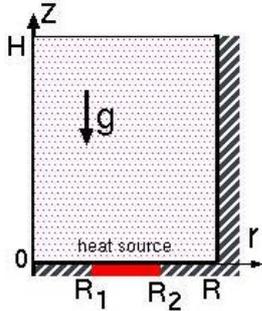


図 1 解析モデル

(1) モデル解析
図 1 に解析モデルを示す。解析では容器中での具材の分布を示す大きなスケールのポーラスメディア領域 (I) と具材内部を示す小さなスケールのポーラスメディア領域 (II) の二つに分けて考える。

(I) 大きなスケール：領域 $0 \leq r \leq R$, $0 \leq z \leq H$ において r, z 軸対称系を仮定し、無次元化された以下の基礎方程式系がブシネ近似のもとで得られる：

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (\text{連続の式}) \quad (1)$$

$$[\phi^{-1} \partial \mathbf{v} / \partial t + \phi^{-2} (\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v})] = -\nabla P + (\text{Pr} / \phi) \nabla^2 \mathbf{v} - (\text{Pr} / \text{Da}) \mathbf{v} + \text{Pr} \text{Ra} [0, (T - T_{\text{ave}})] \quad (\text{運動方程式}) \quad (2)$$

$$\partial T / \partial t + \sigma \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla^2 T \quad (\text{熱伝導方程式}) \quad (3)$$

ここで、流速ベクトル $\mathbf{v} = (u, v)$ 、温度 T 、体積 V で平均化された温度 $T_{\text{ave}} = (1/V) \int T dV$ である。また、(3)式を体積積分することによる平均ヌッセルト数は

$$\text{Nu} = 1 + \sigma \int (\nu T) dV \quad (4)$$

で与えられる。

(II) 小さなスケール：個々の具材を有効直径 D_p の球とみなして、球内部 ($0 \leq r \leq D_p/2$) での温度 T_s および染み込み濃度 C_s は以下の式で記述される：

$$\partial T_s / \partial t = (\kappa_s / \kappa_m) \nabla \cdot (\nabla T_s) \quad (\text{熱伝導方程式}) \quad (5)$$

$$\partial C_s / \partial t = (1 / \kappa_m) \nabla \cdot (D_s \nabla C_s) \quad (\text{濃度方程式}) \quad (6)$$

ここで、具材内部流体の流速は十分小さいとして対流項を無視した。拡散係数 D_s は温度 T_s の関数であり、アレニウスの式で活性度 E 、ガス定数 R を用いて

$$D_s = D_0 \exp[-E / (RT_s)] \quad (7)$$

で与える。

上述ではボイド率(液相体積/全体積) ϕ を用いて、固体部(s)、液体部(f)の平均量として、比熱と密度の関 $(\rho c)_m = (1 - \phi) (\rho c)_s + \phi (\rho c)_f$ 、熱伝導率 $k_m = (1 - \phi) k_s + \phi k_f$ 、熱拡散率 $\kappa_m = k_m / (\rho c)_m$ 、比熱密度関の比 $\sigma = (\rho c)_f / (\rho c)_s$ 等が導入される。また、無次元化は、代表長さ H 、速度 κ_m / H 、時間 H^2 / κ_m 、温度 ΔT と選んだ。また、以下の無次元パラメータが導入されている： $\text{Ra} = g\beta\Delta T H^3 / (\nu \kappa_m)$ (レイリー数), $\text{Da} = K / H^2$ (ダルシー数), $\text{Pr} = \nu / \kappa_m$ (プラントル数)。ただし、浸透率 $K = D_p^2 \phi^3 / [180(1 - \phi)^2]$ で与えられ、 $\Delta T = Q_{\text{in}} H / k_m$ のように流入熱流束 Q_{in} により定義される。

容器底面より一定熱流束が流入しているとして、境界条件は以下のように与える：

$$\left. \begin{aligned} (i) \quad z=H \text{ で } \partial u / \partial z = 0, v = 0, \partial T / \partial z = 0, \\ (ii) \quad r=R \text{ で } u = v = 0, \partial T / \partial r = 0, \\ (iii) \quad r=0 \text{ で } u = 0, \partial v / \partial r = \partial T / \partial r = 0, \\ (iv) \quad z=0, 0 < r < R \text{ で } u = v = 0, \\ \quad \quad z=0, R_1 < r < R_2 \text{ で } \partial T / \partial z = -1, \\ \quad \quad \text{それ以外で } \partial T / \partial z = 0. \end{aligned} \right\} (8)$$

$$(R_1 = 0.4R, R_2 = 0.7R).$$

容器境界条件(8)と球具材表面 $r = D_p/2$ での境界条件 $T_s = T$, $C_s = C_0$ (const.) のもとで(1), (2), (3), (5), (6)式を有限差分法により数値的に解き、容器内での煮汁の流速や温度、具材内の温度、濃度の空間分布の時間発展を求める。特に(2)式では数値不安定性を避けるためスタガード格子を用い、圧力項はHSMAC法を、移流項は上流差分法を用いる。計算領域は $R=H=1$ とし (r, z) 空間分割数は 80×80 とし、時間分割ステップは 10^{-7} とする。

一方、(3)式を容器体積で積分し壁面での法線方向速度が零であることを考慮することにより、 T_{ave} に関する以下のような簡単な方程式を得ることができる：

$$dT_{\text{ave}} / dt = [Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}] \quad (9)$$

ここで、 Q_{in} は底面からの流入熱流束で、 Q_{out} は上面からの流出熱流束で、実験との比較のために以下のように与える：

$$Q_{\text{out}} = (T_{\text{ave}} - T_a) \text{Nu}^* + D \exp[\Gamma(1/T_a - 1/T_{\text{ave}})] \quad (10)$$

ここで、 T_a は室温、界面での熱伝達係数 h を用いて局所ヌッセルト数 $\text{Nu}^* = Hh / \kappa_m$ が定義され、右辺第2項はクラウジウス-クラペイロンの式を用いている。定系数 D は蒸発速度 w 、潜熱 λ 、室温での飽和蒸気圧 p_a を用いて $D = Hw p_a \lambda / (\Delta T \kappa_m)$ で与えられ、ガス定数 R を用いて潜熱パラメータ $\Gamma = \lambda / (R \Delta T)$ が定義されている。解析では具材表面 $r = D_p/2$ で $T_s = T_{\text{ave}}$, $C_s = C_0$ (const.) として(5),(6),(9),(10)式を解くことで、平均温度場に対する具材温度や濃度が決定できる。さらに、具合硬さを評価するため、初期硬さ F_0 とし、反応による硬さ変化が具材の局所温度 T_s にのみよるとして速度論に従いアレニウスの式を用いる。こ

のとき硬さ比は以下のように定義できる:

$$F/F_0 = \exp[-\int^t A \exp(-E/RT_s) dt] \quad (11)$$

ここで、 E は活性化度、 A は頻度因子である。以上より、鍋容器内での煮汁温度分布及び食材内部の温度、濃度、硬さの変化を解析的に調べる事ができる。

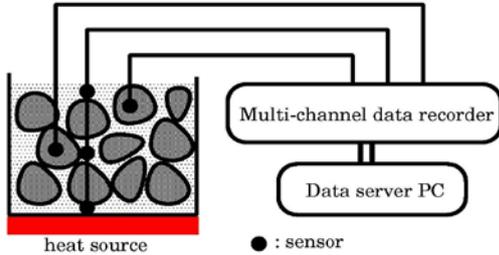


図 2 実験及び測定装置の概要

(2) 実験

解析結果との比較のため実験を行う。実験及び測定装置の概要を図 2 に示す。鍋容器内の数か所に温度センサーを設置して煮汁及び食材の温度を経時的に測定する。加熱は IH ヒーターを用いて行い、得られた計測データは温度記録装置(Multi-channel recorder)を通して、データサーバ用のパソコン(Data Server PC)に取り込む。実験では、ステンレス製 IH 対応鍋(直径 22cm)に水(20)とジャガイモ(北海道産メークイン 15 個, 総重量 $1700 \pm 50g$)を入れ[ボイド率 $\phi = 0.549$], IH クッキングヒーター(ナショナル KZ-DS13, 100V, 1200W)を火力 3 で加熱して経時的温度変化を測定する。鍋容器の中央底面, 中央底面近傍(鍋底から 1cm 上), 中央液面近傍(液面から 1cm 下), 鍋中央上部にあるジャガイモの中心点を測定点とし, (i) ジャガイモまるごと(長径約 10cm, 短径約 4 から 6cm)[芋大 ($Da = 3.8 \times 10^{-4}$)]と(ii) ジャガイモを 1cm 角に切りそろえたもの[芋小 ($Da = 1.6 \times 10^{-5}$)], の二つの場合について経時的温度変化を測定する。

4. 研究成果

(1) 数値解析結果

代表的なパラメータとし $\phi = 0.549$, $Ra = 7.29 \times 10^7 \times \Delta T$ ($\Delta T = 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100$), $Pr = 6.7$ と選ぶ。図 3 に容器内での平均流速, 温度の時間発展を示す。芋大 ($Da = 3.8 \times 10^{-4}$), 小 ($Da = 1.6 \times 10^{-5}$) の二つの場合に対して, 底面での温度差 $\Delta T = 100$ として流入熱流束を与える。

図で破線は芋大の場合 ($Da = 3.8 \times 10^{-4}$), 実線は芋小の場合 ($Da = 1.6 \times 10^{-5}$) の場合を示す。図で大きな Da に対する平均速度 q_{ave} は小さな Da の場合よりも大きいことより, Da が大き

いほうが対流による流体運動が大きくなる

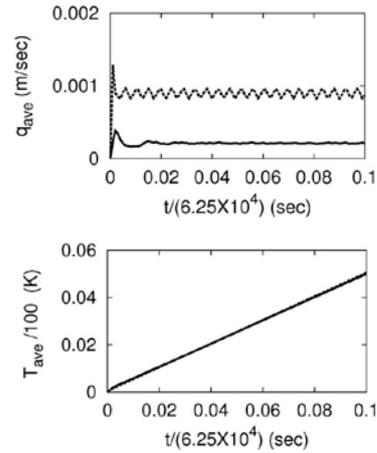


図 3 速度温度平均の経時変化: 実線は芋小, 破線は芋大

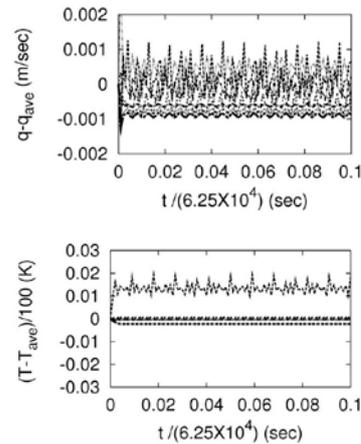


図 4 局所流速, 温度の平均値からのずれ (芋大)

ていることがわかる。一方, 平均温度 T_{ave} は両 Da に対して差は認められない。これは, 流入熱流束がどちらの場合も同じであることによる。

次に局所流速や温度の平均値からのずれについて示す。図 4 は芋大 ($Da = 3.8 \times 10^{-4}$) の場合を示している。速度の平均値からのずれが

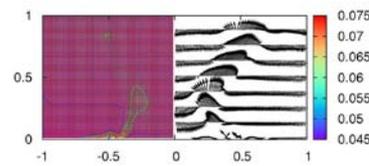


図 5 温度, 速度分布 (芋大, $t=0.1$)

大きい対流の影響が大きくなり, 温度の平均からのずれが小さくなっている。そのた

め、芋大の場合対流熱伝達が大きく起っていることが予想される。図5は時刻 $t=0.1$ で容器内での温度、速度分布の様子を示している。対流が大きいため加熱部近傍を除いて容

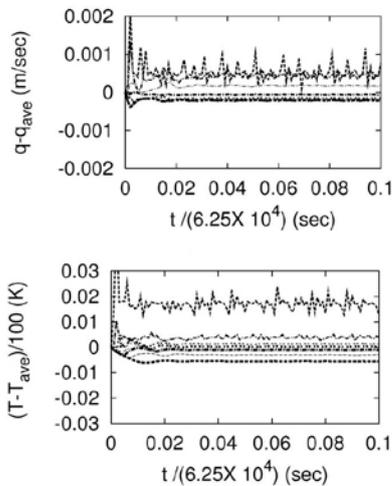


図 6 局所流速,温度の平均値からのずれ (芋小)

器内での温度分布がほぼ一定になっていることがわかる。一方, 図6は芋小の場合 ($Da=1.6 \times 10^{-5}$) を示

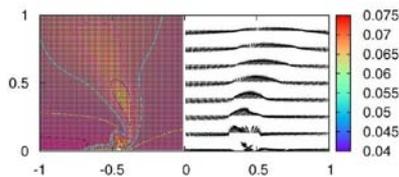


図 7 温度,速度分布 (芋小, $t=0.1$)

す。この場合対流は弱く, 流速の平均速度からのずれが小さいため, 局所的な温度の差はより大きくなる。その結果, 芋小の場合, 主なる熱伝達は熱伝導によることが予想される。図7は $t=0.1$ の場合の局所的な温度, 流速分布を示しているが, 流速分布が大きく変化していないために対流が起こりにくく, 容器内での温度差が加熱部近傍を含め大きくなっていることがわかる。

図8は Da 数が 10^{-8} から 10^{-1} まで変化するときの容器内温度差の最大値と平均 Nu 数(4)式の計算結果を示している。図よりわかるように, Da が 10^{-5} よりも小さくなると, 最大温度差は急激に大きくなり, Nu 数は小さくなる。 Nu 数は伝導熱伝達に対する対流熱伝達の割合を示すので, Nu が小さくなると容器全体で

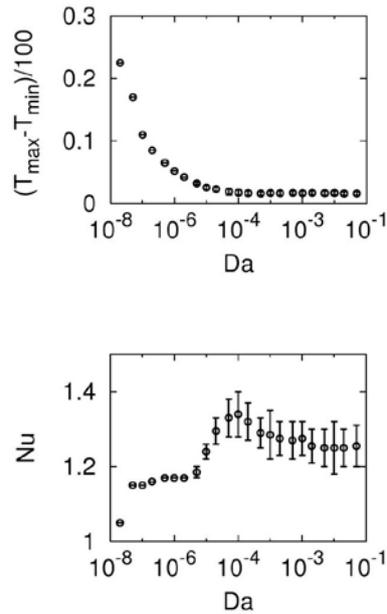


図 8 Da に対する最大温度差と平均 Nu 数の変化

熱伝導が支配的になる。さらに, Da が 10^{-5} から 10^{-4} にかけて Nu 数が急激に増加することから, Da のこの近辺で対流による熱伝達が最大になっていることがわかる。このとき定義より

$$10^{-5} < (Dp/H)^2 \phi^3 / [180(1-\phi)^2] < 10^{-4} \quad (12)$$

となるので ($\Delta T=100$), 対流熱伝達の効果が最大となるときの Dp/H と ϕ の関係が得られる。したがって, この関係のもとでの煮物調理を行うことが最も熱的に効率が良いと見込まれる。

(2) 実験結果との比較と濃度, 硬さ予測
先に示した一次元モデル(9), (10)式と(5), (6)式を用いた計算結果と実験結果の比較を示す。

図9は煮汁及び具材内部での温度変化を示す。 $t=6000$ まで加熱し以後放熱している。上図は芋小の場合 ($Da=1.5 \times 10^{-5}$) を, 下図は芋大の場合 ($Da=3.8 \times 10^{-4}$) を示す。一次元モデルによる煮汁温度を太い実線で, 具材中心部温度を破線で示す。一方, \circ , \bullet はそれぞれ容器上部, 底部での具材中心部での温度の測定結果である。図より分かるように, 両者とも計算結果は測定結果とよく一致している。また, 芋小の場合, 煮汁, 具材温度ともに加熱中は同じ様に時間とともに増加した後, 放熱

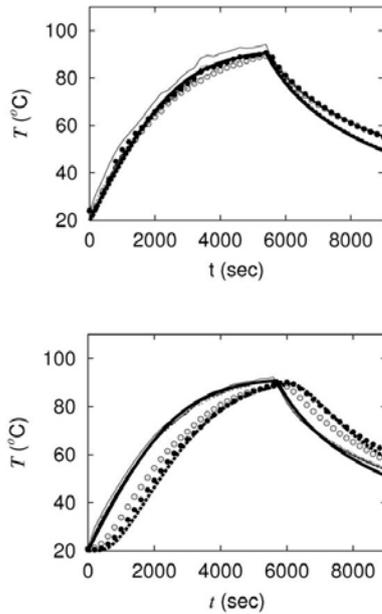


図 9 煮汁及び具材中心部の温度変化
上図：具材小，下図：具材大；太実線，太
破線は理論予測，○，●は測定結果.

時には同じように減少していることが分かる。

一方、芋大の場合、具材温度が煮汁温度に比べ遅れていることが分かる。これは具材が大きいいため、具材中心部まで温度が上昇するのに時間がかかるためである。反対に放熱時には具材中心部での温度低下は煮汁温度よりも遅れる。

最後に、一次元モデルによる温度、濃度及び硬さの予想結果を示す。図 10 上段に示すように、具材表面温度は最大温度 T_{max} が 90°C (実線)、 70°C (点線)、 50°C (一点鎖線) となる場合について示している。その時の具材中心部での塩分濃度比が図中段で示されている。図よりわかるように、表面最大温度が大きいほど塩分濃度はより早く増加するが、いずれの場合も最終的には濃度は等しく外部濃度 C_0 になる。一方、図下段では、硬さ変化を示している。図より最大温度により硬さが決定されていることの注意が必要である。硬さ比 $F/F_0 < 0.2$ となる場合を十分に軟化しているとすると、それに必要な最大表面温度 T_{max} が約 80°C 以上になる必要があることが見積もられる。なお、計算に用いたパラメータ値は、(9)式で $Q_m = 0.028 \times V(\rho c)_m$ 、 $hS = 0.0001 \times V(\rho c)_m$ と選び、(6)式では $\kappa_s / \kappa_m = 0.97$ 、(7)式では $E/R = 1700$ 、 $D_0 = 2.4 \times 10^{-6}$ 、(11)式では $E/R = 17000$ 、 $A = 1.67 \times 10^{18}$ とおいた。

以上の解析及び実験結果から、ポーラスメデ

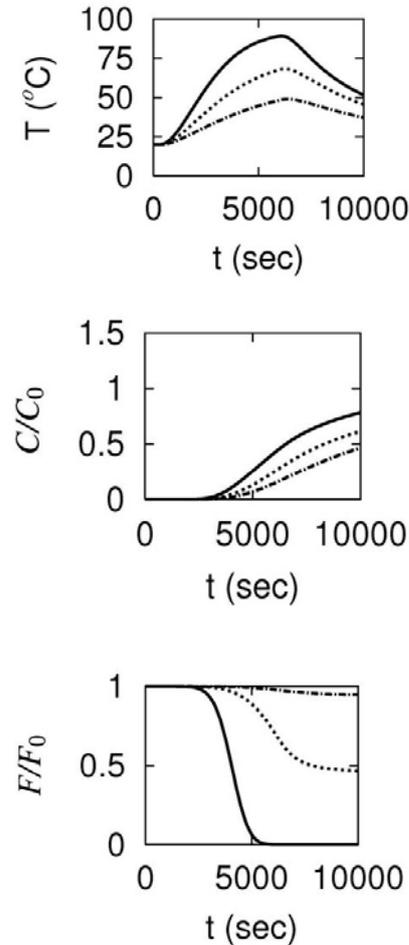


図 10 一次元モデルによる予測
上段図：表面温度変化（最大温度が 90°C (実線)、 70°C (点線)、 50°C (一点鎖線)）、中段
図：具材中心部濃度変化、下段図：具材中心部硬さ変化

ィアモデルにより熱対流を最も強く引き起こす具材径やポイド率を見積もることができる。そして、比較的大きな具材では、具材温度、濃度、硬さなどの予測にはより解析が簡単な一次元モデルが有効であることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 吉永 隆夫, 原 知子, 液体で満たされた多孔質媒質中での熱物質輸送を伴う対流現象 (II), 京都大学数理解析研究所講究録, 査読なし, **1800** (2012) 156-160.
- ② Tomoko HARA, Takao YOSHINAGA, Numerical simulations for a heating process in a boiling potatoes based on

a multi-scale porous model, 査読あり, IFHE 2012, Abstracts (2012) P.164 (CD-ROM: ISBN 978-0-9808246-6-7).

- ③ 吉永 隆夫, 原 知子, 鍋容器内での食材のゆで加熱過程とその数学的モデル, 査読なし, 第 61 回理論応用力学講演会論文集, (2012) GS02-07 (USBメモリー).
- ④ 原 知子, 吉永 隆夫, ゆで加熱における鍋容器内の温度分布, 査読なし, 神戸山手短期大学紀要, **54** (2012)89-96.
- ⑤ 吉永 隆夫, 原 知子, 液体で満たされた多孔質媒質中での熱物質輸送を伴う対流現象, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読なし, **1761** (2011) 191-199.

[学会発表] (計 10 件)

- ① 原 知子, 吉永 隆夫, 鍋容器中でのジャガイモのゆで加熱に及ぼす放熱条件の影響, 日本調理科学会平成 24 年度大会, 2012 年 8 月 24 日, 秋田大学, 秋田市.
- ② Tomoko HARA, Takao YOSHINAGA, Numerical simulations for a heating process in a boiling potatoes based on a multi-scale porous model, IFHE 2012, July 18th, Melbourne, Australia.
- ③ 原 知子, 吉永 隆夫, 鍋容器中での食材のゆで加熱過程とその数学的モデル, 日本家政学会第 64 回大会, 2012 年 5 月 12 日, 大阪市立大学, 大阪市.
- ④ 吉永 隆夫, 原 知子, 鍋容器内での食材のゆで加熱過程とその数学的モデル, 第 61 回理論応用力学講演会, 2012 年 3 月 9 日, 東京大学, 東京.
- ⑤ 原 知子, 吉永 隆夫, 芋のゆで加熱における鍋容器内の温度分布, 日本家政学会関西支部研究発表会, 2011 年 10 月 15 日, 滋賀県立大学.
- ⑥ 吉永 隆夫, 原 知子, 液体で満たされた多孔質媒質中での熱物質輸送を伴う対流現象 (II), 京都大学数理解析研究所研究集会, 2011 年 10 月 14 日, 京都大学, 京都市.
- ⑦ 原 知子, 吉永 隆夫, ゆで加熱における熱伝達に及ぼす具材の大きさの影響, 日本調理科学会平成 23 年度大会, 2011 年 8 月 30 日, 高崎健康福祉大学, 高崎市.
- ⑧ 原 知子, 吉永 隆夫, ゆで加熱過程における具材の大きさがゆで水の温度分布に及ぼす影響, 日本家政学会第 63 回大会, 2011 年 5 月 29 日, 和洋女子大学, 市川市.
- ⑨ 原 知子, 吉永 隆夫, 加熱過程におけるゆで水の温度変化に及ぼす具材の大きさの影響, 日本家政学会関西支部第 32 回研究発表会, 平成 22 年 10 月 23 日, 兵庫県立大学, 姫路市.
- ⑩ 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

象-煮物料理における煮汁の温度分布予測-, 京都大学数理解析研究所研究集会「非線形波動現象の多様性と普遍性」, 平成 22 年 10 月 15 日, 京都大学数理解析研究所, 京都市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 知子 (HARA TOMOKO)

神戸山手短期大学・生活学科・准教授

研究者番号: 40192281

(2) 研究分担者

吉永 隆夫 (YOSHINAGA TAKAO)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号: 40158484