

平成 30 年 9 月 8 日現在

機関番号：44202

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25350117

研究課題名(和文) 微小重力環境における煮物調理とその数学的モデル

研究課題名(英文) Cookery by simmering and its mathematical model under micro-gravity circumstances

研究代表者

原 知子 (Hara, Tomoko)

滋賀短期大学・その他部局等・教授

研究者番号：40192281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：煮物調理における加熱過程を理解するために、ポラスモデルを用いた解析を行った。解析では、容器内での具材の配置や大きさを流体で満たされた大きなスケールのポラスメディアとみなし、具材自体を小さなスケールのポラスメディアとみなすマルチスケールモデルを構築した。数値解析では、円筒容器底面からリング状に一定熱流束が流入しその他は断熱とする境界条件を用い、非平衡3次元解析を行った。その結果、熱対流が最も盛んになり容器内温度がより均一になる臨界ダルシー数が存在することが明らかになった。この値を用いることで、経済的な調理法のための、容器径に対する具材の大きさや、煮汁-具材の体積比を決めることができる。

研究成果の概要(英文)：In order to understand a simmering process of food stuff in a liquid, investigations are performed based on a multi-scale porous model that configurations and placements of food stuff are considered to be like a submerged porous medium with a larger characteristic scale, while each food stuff is a porous medium with a finer characteristic scale. A full three-dimensional numerical analysis is performed in a cylindrical coordinate system under a non-equilibrium thermal boundary condition that a constant heat flux is given in a ring region at the bottom and otherwise adiabatic. It is found that there is a critical Darcy number for which a thermal convection is most prevailed. This enables us to determine a suitable scale of food stuff and volumetric ratio between a liquid and food stuff for energy saving cookery.

研究分野：調理科学

キーワード：煮物 ポラスメディア 対流 ダルシー数

1. 研究開始当初の背景

加熱調理法のひとつである「煮る」は他の「焼く」や「揚げる」などとは異なり、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、煮物調理では煮汁の鍋容器にわたる温度分布や温度変化を知ることが重要である。そのため、煮汁温度の精密な予測が求められ、煮汁に対する具材の大きさや量が煮汁の局所的、大域的な温度分布にどのような影響を及ぼすかを理解する必要がある。

これまでの研究では、食材での熱伝導やしみこみ濃度などが主に調べられているにすぎない。しかし、より現実的な問題として、加熱過程における具材を含む鍋容器内での煮汁の温度上昇や温度分布、それに伴う煮汁から食材内部への熱伝導や煮汁-食材間での物質移動などを総合的に理解する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、このような現実的な問題を取り扱う手掛かりとして、鍋容器内で食材を含む煮汁の、温度上昇に伴う温度分布や煮汁の対流速度などの非平衡状態での熱現象を取り扱う。

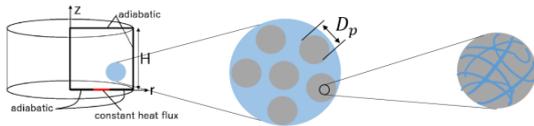


図1 ポーラスメディアモデル

3. 研究の方法

本研究では、煮汁中での食材を流体に浸されたポーラスメディアとみなし、食材間での煮汁の熱流体運動をポーラスメディア理論を用いて解析し、煮汁の容器内での速度、温度分布の時間発展を数値的に明らかにする。

4. 研究成果

4. 1 基礎方程式と解析モデル

容器中での煮汁の流動と温度分布を調べるため、容器中の食材が流体で満たされたポーラスメディア状態にあるとみなす。また、食材自身もスケールの異なるポーラスメディアである。

鍋容器内運動に関する基礎方程式は(r, θ, z) 円筒座標系で 0 ≤ r ≤ R/H, 0 ≤ z ≤ 1 において、ブシネ近似を用いて以下のように与えられる：

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

$$[\phi^{-1} \partial \mathbf{v} / \partial t + \phi^{-2} (\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v})] = -\nabla P + (Pr/\phi) \nabla^2 \mathbf{v} - (Pr/Da) \mathbf{v} + PrRa [0, 0, (T-T_0)]$$

(運動方程式)

$$\partial T / \partial t + \sigma \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla^2 T \quad (\text{エネルギー式})$$

ここで、平均速度を $\mathbf{v} = (u, v, w)$ 、平均温度を T 、容器半径と高さを R, H とする。このとき、無次元パラメータは $Ra = g\beta \Delta T H^3 / (\nu \alpha_m)$ (Rayleigh 数), $Da = K/H^2$ (Darcy 数), $Pr = \nu / \alpha_m$ (Prandtl 数)

さらに、 $K = Dp^2 \phi^3 / [180(1-\phi)^2]$ (浸透率), ϕ (空隙率), Dp 食材の有効直径, g 重力加速度, β 体膨張率, ν 動粘性率, ρ 密度, c 比熱, α 温度拡散率, k 熱伝導率 (添え字 m は平均量を示す)。一方、代表温度 ΔT は $q_{in} = km \Delta T / H$ により、容器底面での流入熱流束 q_{in} で与え

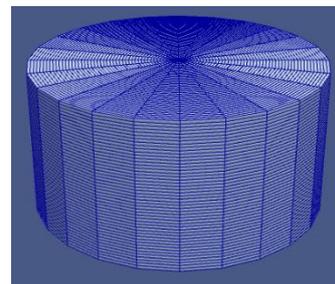


図2 計算格子

られる。

一方、個々の具材に関しては、表面温度が流体温度と同じとして、具材の熱伝導方程式を解くことにより求められる。ここでは簡単のため、具材を直径 Dp の球体として解析を行う。

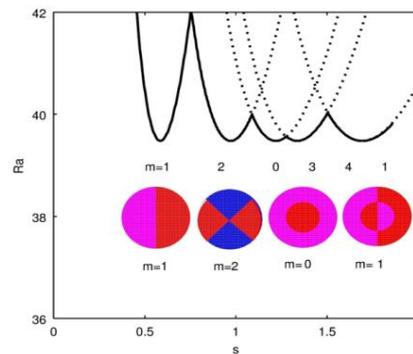


図3 線形安定領域

4. 2 解析手法とパラメータ

有限差分法を用いてプログラムコードを作成した。このとき、空間離散化は2次中心差分を、時間進行法では拡散項と Darcy 項は Crank-Nicolson 法を、その他の項は Adams-Bashforth 法を用いた。また、圧力と速度のカップリングは HSMAC 法を用い、移流項に対してはエネルギー保存差分スキームを用いた。計算格子はスタガード格子を用い、図に示すように領域 $0 \leq r \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq z \leq 1$ で格子点数は $48 \times 24 \times 48$ をとり、時間刻

み Δt は 10^{-6} とした. パラメータは $\phi=0.549$, $R=H=1$, $Pr=6.67$, $Ra=6.73 \times 10^{10}$ で固定し, Da , ΔT は制御パラメータとする. 境界条件は加熱部を除く上下側面は断熱壁, 下面加熱部は (i) リング状 ($0.4 < r < 0.7$) 加熱または (ii) 全面 ($0 < r < 1$) 加熱とする.

4. 3 熱対流の発生(上下面で温度差)

容器上下面で一定温度差を与えた場合, 臨界値 ($RaDa=39.9$) で発生する対流パターンの線形理論を図3に, 数値解析結果を図4に示

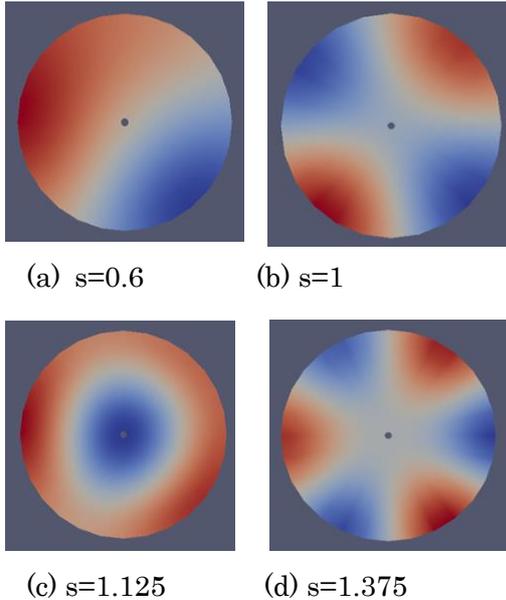


図4 臨界値付近での数値結果

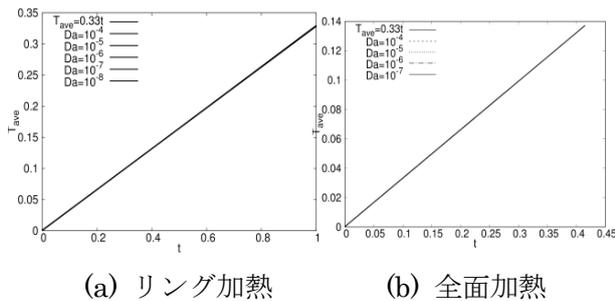


図5 平均温度の時間発展

す. 両図では赤い領域は上昇流を, 青い領域は下降流を示す.

4. 4 平均温度の時間発展

容器全体にわたる温度の体積平均 T_{ave} を Da 数の種々の値に対して数値的に求めた結果を図5に示す. リング加熱(a), 全面加熱(b)共に, Da の値にかかわらず一定の割合で温度が増加していることがわかる. この増加率は1次元近似(Lamped model)して得られる温度

増加率と一致することから, 本計算は十分な精度であると考えられる.

4. 5 温度場の方位角方向依存性

本解析が軸対称2次元モデルで記述できるかどうかは計算時間の短縮のために非常に重要である. 代表パラメータに $Da=10^{-7}$ 3次元性の指標として, Θ 方向偏差の平均:

$$\varepsilon = \iint_0^1 \sigma_{T,\theta}(r, z) dr dz$$

を考える. ここで,

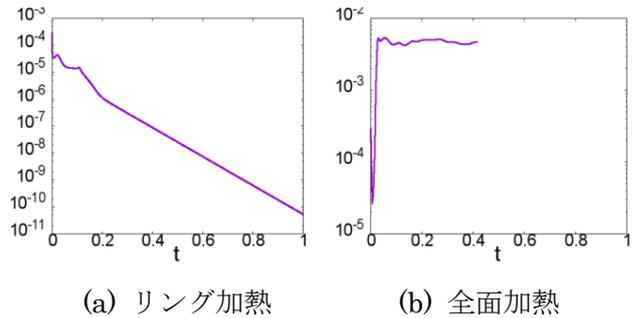


図6 温度場の方位角方向依存性

$$\sigma_{T,\theta}(r, z) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int \{T(r, \theta, z) - T_{ave,\theta}(r, z)\}^2 d\theta}$$

$$T_{ave,\theta}(r, z) = \frac{1}{2\pi} \int T(r, \theta, z) d\theta$$

図6はリング加熱(a)と全面加熱(b)の場合の ε の時間発展を示している. リング状加熱では ε が急激に下がっていることから, リング加熱の場合, 温度分布は軸対称性を仮定してよいことがわかる.

4. 6 グローバルヌッセルト数

対流の強さを調べるため, 以下の平均ヌッセルト数を導入する:

$$Nu_g = 1 + \frac{\langle wT \rangle_V}{\langle T_0 \rangle_S - \langle T_1 \rangle_S}$$

ここで, T_0, T_1 はそれぞれ底面, 上面での温度であり, 添え字 V, S はそれぞれ体積平均, 面積平均を示す. 図7はこのようなヌッセルト数を十分に長い時間にわたって平均したものをグローバルヌッセルト数 $\langle Nu_g \rangle_t$ として示している. 図(a)のリング加熱の場合 $Da \sim 10^{-7}$ までは Da の増加とともに指数関数的に増加し, そこでピークをとった後は大きく減少し $Da > 10^{-7}$ ではあまり変化しない. 一方, (b)の

全面加熱の場合, Da の増加につれて単調に増

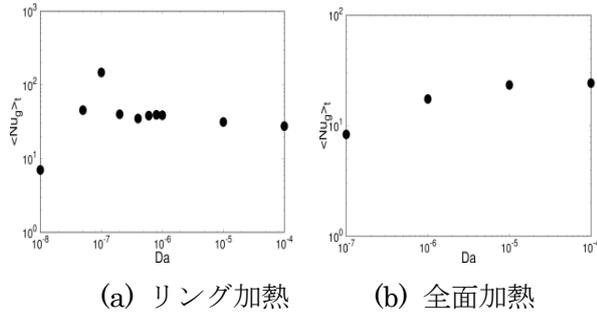


図 7 Da と $\langle Nu_g \rangle_t$ の関係

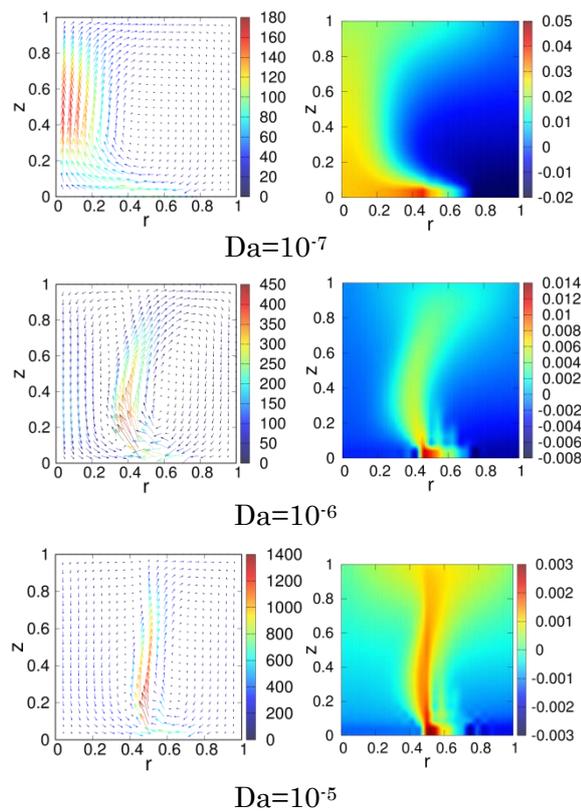


図 8 時間平均速度および温度分布
加し一定値に漸近することがわかる。

4. 7 時間平均速度および温度分布

リング加熱の場合, Da 数により時間平均された流れと温度分布の典型的なパターンを図 8 に示す. Da 数が増加するにつれて対流速度が増加し(左図), 温度分布はより均一になる(右図). 特に Da 数が 10^{-7} から 10^{-6} に増加すると, 対流ロールの数が 1 対(円筒中心部で上昇)から 2 対(加熱部から分かれる)へと変化する.

4. 8 結論

本研究では, 鍋の中の食材のゆで加熱調理の

モデルとして個々の食材を小スケールポーラスメディア, 食材と煮汁で満たされた円筒容器を大スケールポーラスメディアとする数学モデルを提案して, その内部での熱対流現象について理論と実験によりモデルの妥当性と最適加熱を与えるパラメータ領域を明らかにした. 以下で得られた結果をまとめる:

➤ 熱対流現象の 3 次元性について: 円筒容器内のポーラスメディアを下から熱したときに生じる熱対流現象が 3 次元であるのか, あるいは軸対称 2 次元であるのかという疑問に対する答えを得るために, 異なる 2 つの加熱条件 ((i) リング状加熱, (ii) 全面加熱) で $Da=10^{-7}$ とした場合において 3 次元数値シミュレーションを実行した. その結果, (i) の場合, には時間経過とともに現象が 2 次元的なものとなる一方で, (ii) の場合は 3 次元的な状態が続くことがわかった. (i) の場合でもより大きな $DaRa$ では 3 次元性が現われるものと予想されるが, 本研究の結果から, 少なくとも (i) の加熱条件よりも (ii) の加熱条件の方が 3 次元性が現われやすい.

➤ グローバル Nusselt 数と流れのパターン: (i) リング状加熱の時にはダルシー数 $Da=10^{-7}$ でピークを示し, (ii) 全面加熱の時には Da の増加とともに単調増加する. (i) の場合に $\langle Nu_g \rangle_t$ がピークを示すことには, $Da=10^{-7}$ を境に大きなロールのパターンが変化していることが関係していると考えられる.

➤ 一様な温度分布: 温度分布の非一様性の指標として温度の標準偏差 σ_T を導入し, σ_T が Da の変化と加熱条件の違いに対してどのような振る舞いをするかを調べた. その結果から, 加熱条件の違いにかかわらず $\sigma_T \propto Da^b$ なる関係が成り立つことがわかった.

➤ 最大ヌッセルト数を与える Da に対して $Da=K/H^2$, $K = Dp^2\phi^3 / [180(1-\phi)^2]$ より $Da \sim (Dp/H)^2\phi^3 / [180(1-\phi)^2]$ をみたすような H と ϕ が最も効率の良い具材径と具材の体積比であるといえる.

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)

T. Yoshinaga and T. Hara, "A mathematical model for a boiling process of food stuff based on the porous media theory" IHTC Digital Library (Begell house inc.) (2014) 1-10, DOI:10.1615/IHTC15.pmd.008742.

T. Hara and T. Yoshinaga "Prediction of optimum size and volume ratio of potatoes in boiling process for ecological and energy saving cooking" XXIII IFHE World Congress 2016 USB

memory (Ed. M. S. Park) (2016, Daejeon, Korea)

T.Hara, T.Takahashi and T.Yoshinaga

“Most effective conditions of size and volume of potatoes in a boiling process based on a porous model” ARAHE 2017(Asian Regional Association for Home Economics) (2017, Tokyo, Japan)

高橋徹, 原知子, 吉永隆夫 “液体で満たされたマルチスケールポーラスメディアにおける熱対流熱・伝導現象” 第31回数値流体シンポジウム(2017)京都工繊大(京都)

原知子, 高橋徹, 吉永隆夫 “煮物調理における鍋容器内での煮汁の熱対流現象” 第70回日本家政学会(2018)日本女子大学(東京)

[雑誌論文] (計 9 件)

[学会発表] (計 26 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者 原知子

滋賀短期大学・生活学科・教授

研究者番号 : 40192281

(2) 研究分担者 吉永隆夫

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号 : 40158481

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :

(4) 研究協力者

()