

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350092

研究課題名(和文)高齢者世帯を意識した美味しさと簡便さを目指す電子レンジ炊飯・調理に関する基礎研究

研究課題名(英文)Basic research on microwave cooking and rice-cooking, which aim to taste and simplicity

研究代表者

酒井 昇(Sakai, Noboru)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：20134009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：まず、現在主流のフラットテーブル型の電子レンジ解析モデルを作成した。モデルにおいては、発熱性を決める誘電物性に温度依存性があるため、食品内部の伝熱計算も電磁波解析と同時に行っている。作成した電子レンジモデルを用いて煮魚調理を想定した解析を行った。モデル系として、塩水中に魚が入っているモデルを作成して計算したところ、その温度履歴および温度分布は実測値と良好に一致した。また、加熱とともに起こる魚のタンパク質変性をモデルに組み込み、タンパク質変性分布を予測することが可能となった。一方、炊飯過程の解析においても、(水と米の混合)および(空気と米の混合)における加熱解析手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：A computational model based on the finite element method was established for predicting the temperature distributions in food by coupling an analysis of the electromagnetic field and heat transfer. The heating characteristics of the domestic flatbed microwave oven were investigated by observing the temperature distributions in different foods. The predicted temperature results agreed well with the experimental results.

The microwave cooking process was simulated via the computational model. On the basis of simulated temperature profiles and the parameters deduced from DSC experimental data, the time-dependent degrees of protein denaturation during cooking were estimated. The temperature and denaturation information were finally animated so that they could be investigated easily. On the other hand, also in the analysis of the microwave rice cooking process, an analysis method of heating process was established for (a mixture of water and rice) and (a mixture of air and rice) systems.

研究分野：食品工学

キーワード：電子レンジ 加熱調理 シミュレーション 電磁界解析 熱伝導解析 電子レンジ炊飯 誘電物性

1. 研究開始当初の背景

現在の日本においては高齢者の世帯が増え、少人数で食べることも多いことから、一人や二人分でも美味しくかつ簡便に調理することが望まれている。このような背景の下、電子レンジは冷凍食品や調理済み食品の加熱のみならず、炊飯や調理にも利用されるようになってきた。しかし、電子レンジは加熱むらが大きく、炊飯や調理においてうまくいかない原因となっている。この加熱むらの起こる原因として、次のことが考えられる。

- i) 食品は多くの場合、エネルギー吸収性(誘電特性)の不均一な素材からなる。
- ii) 食品の形状・大きさによってマイクロ波の集中の様子が変わる。
- iii) 電子レンジ内の電界強度が一定でない。

しかしながら、これらの因子がどのように食品内温度分布に影響するか総合的に検討した研究は極めて少なく、シミュレーション手法も開発されていなかった。

2. 研究の目的

電子レンジを用いた食品の加熱に関してはこれまでも多く研究されてきた。しかし、その多くは食品に対するものであり、電子レンジ全体の電磁波解析に基づいて解析した研究は非常に少ない。特に、ターンテーブルの回転を電磁波解析に組み込み、食品の温度解析と連成させた研究はこれまでになく、申請者らが世界に先駆けて解析手法を示した。しかし、現在市販されている電子レンジはフラットテーブル型が主流であり、本研究では、回転アンテナを有するフラットテーブル型の電子レンジを対象として解析を行い、シミュレーション手法を開発することを目的とした。

また、電子レンジは炊飯・調理を目的としても使用されており、美味しく炊飯・調理するためには、熱移動のみならず、澱粉の糊化やタンパク変性等の成分変化を考慮したモデルの開発が不可欠である。そこで、電子レンジ加熱における食品内温度変化をもとに成分変化を計算し、炊飯・調理過程をシミュレーションする手法を開発することを研究目的とした。

3. 研究の方法

(1) フラットテーブル型電子レンジモデルによる解析

本研究で用いるフラットテーブル型電子レンジの解析モデルの開発を目的とし、含水率が80%のマッシュポテトを対象に、電子レンジ加熱における温度解析を行った。解析では、フラットテーブル型電子レンジ(日立; MRO-CF 6)および、マッシュポテト、容器の形状を基に、市販のモデル作成ソフト FEMAP (Siemens PLM Software Inc.) を用い

て3次元要素モデルを作成した。作成した要素モデルを基に PHOTO-series (フォトン社製) を用いて電磁界解析モデルおよび熱伝導解析モデルを作成し、それぞれのモデルに初期条件および熱物性値と誘電物性値のパラメータの設定を行った。また、回転アンテナをモデル上で回転すると節点がずれ、計算不能となる。この問題を解決するため、スライドインターフェイスを適用し、節点ずれの補正を行った。

実際の計算においては、電磁界解析モデルを用いて、電子レンジ庫内の電界強度を計算し、試料内の発熱量分布を算出した。さらに、熱伝導解析モデルを用いて、算出した発熱密度分布を反映した熱伝導解析を行った。この電磁界解析および熱伝導解析を組み合わせた解析を繰り返し行うことで、試料内温度分布の経時変化を求めることができる。計算においては、各物質の誘電特性および熱物性の温度依存性、さらにフラットテーブル型電子レンジのアンテナの回転を反映している。

(2) 電子レンジ調理の解析

作成した電子レンジ解析モデルを用いて、魚調理過程の解析を行った。まず、魚タンパク質変性の速度定数を求めるために、サケを試料として DSC (Differential Scanning Calorimetry) 測定を行った。市販のサケ切り身から採取した 15mg の試料を耐圧性アルミニウム容器に封入した。DSC 装置にて、昇温速度 5~20°C/min の条件で 5~110°C の温度帯における測定を行った。得られた DSC 曲線のピーク温度から、DSC ダイナミック法を用いて、反応速度定数の活性化エネルギーと頻度因子を算出した。

次に、煮魚を想定し、サケと塩分を調整した塩水(煮汁の代用)を入れた容器を電子レンジに投入し、加熱途中の温度変化を光ファイバー温度計で測定した。同時に、加熱後に取り出した魚を切断し、断面を赤外線放射温度計で温度分布を測定した。

電子レンジ庫内に、容器、サケ、塩水を含むモデル(図1)を作成し、(1)と同様に電磁界解析および熱伝導解析を組み合わせた解析を行い、試料温度分布の履歴およびタンパク質変性分布を計算した。



図1 魚調理モデル概略図

(3) 電子レンジ炊飯過程の解析

炊飯が進行するのに伴い、被加熱物は水-米の混合物から空気-米(ごはん)の混合物へ変化する。そのため、電子レンジ炊飯過程

においては、被加熱性を決める誘電特性が大きく変化する。そこで、本研究では水-米系および空気-米系の誘電物性の推算を行い、電子レンジで加熱したときの加熱特性について検討した。

誘電特性については、米単体の誘電率、誘電損率の温度依存性を誘電損率測定装置で測定した。水-米系および空気-米系の誘電特性については、米単体および水、空気の誘電特性を用いて対数混合則で表されるか検討した。また、空気-米系の加熱特性については(1)で開発した電子レンジ加熱モデルを用いて、検証した。

4. 研究成果

(1) フラットテーブル型電子レンジモデルによる解析

作成したフラットテーブル型電子レンジモデルの概略を図2に示す。電子レンジ底部に同軸導波管が設置され、この導波管からマイクロ波は入射される。荷重条件としてこの導波管に、発熱量に応じたマイクロ波の電界強度を与えた。また、導波管上部に回転アンテナ(図3)を設置し、この回転アンテナを通して電子レンジ庫内にマイクロ波が照射される。電磁界解析においては1ステップ毎にアンテナを回転させて計算を行った。図3は1ステップ(1秒)進んだ時の回転アンテナの位置を表している。

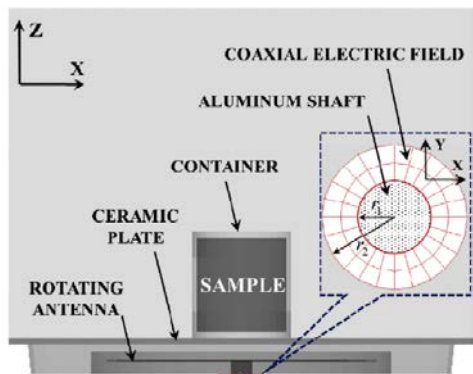


図2 フラットテーブル型電子レンジモデル概略図

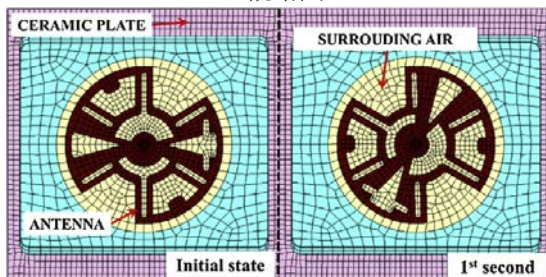


図3 回転アンテナ概略図
(左:初期、右:1ステップ回転)

図4に試料A(固形分20%マッシュポテト)および試料B(固形分20%マッシュポテト+

1%NaCl)の誘電率と誘電損率から算出した浸透深さを示す。NaClを含まない試料Aは温度上昇とともに浸透性が増加し、1%NaClを含む試料Bよりも浸透性が大きいことがわかる。また、試料Bの浸透深さの温度依存性は小さいと言える。

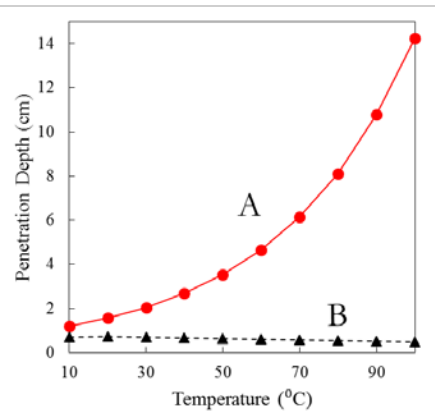


図4 試料浸透深さの温度依存性

図5に試料Aおよび試料Bを円筒形容器に入れて電子レンジで加熱した時の断面温度分布観察結果を示す。両方とも角の部分に電界が集中するため、角の領域の温度が高くなっている。特に、電界強度の強いと思われる下部の角の領域が高温となっている。また、両試料を比較すると試料Aのほうが中心部も加熱されていることがわかる。試料Bは電解質であるNaClを含んでいるため、電磁波の浸透性が低く周辺部のみが加熱されたものと思われる。一方、試料Aは比較的電磁波の浸透性があるため、中心部で電界の集中が起こり、中心部も加熱されたものと思われる。

シミュレーションにおいては電磁界解析と熱伝導解析を交互に行っているが、毎回両計算を交互に行うと計算に長時間を要する。そこで、熱伝導解析のタイムステップよりも電磁界解析のステップを長くして計算を行った。試料Bについて、回転ステップを40°と80°としたときの温度分布変化を図6に示す。40°刻みとの場合、回転アンテナが1回転する間に9回電磁界解析を行い、発熱量分布を更新することを意味し、80°は回転アンテナが2回転と80°毎に発熱量分布を更新することを意味する。図から回転ステップ40°と80°で試料内温度分布はほとんど同じことから80°でも十分な精度で計算できることがわかる。

マイクロ波浸透性の温度依存性が大きい試料Bについて、同様に計算した結果を図7に示した。回転ステップ40°と80°で試料内温度分布はほとんど同じことから、回転ステップを40°にすれば、十分な精度で計算できることがわかる。PCで計算する場合、電磁界解析に時間を要するため、回転ステッ

プを大きくすることにより、計算時間を大幅に短縮することができる。

計算結果を実測値（図 5）と比較すると、マイクロ波の浸透性が大きい試料 A は容器中心部と角が、マイクロ波の浸透性が低い試料 B は容器角の部分が加熱され、両者は良好に一致していることがわかる。

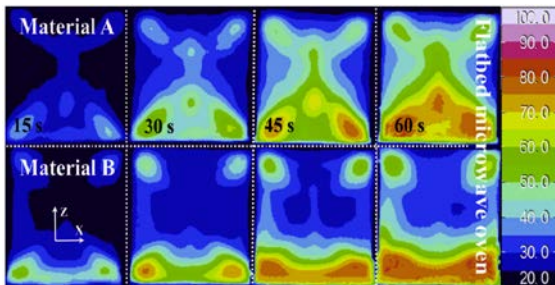


図 5 電子レンジ加熱時の温度分布観察結果

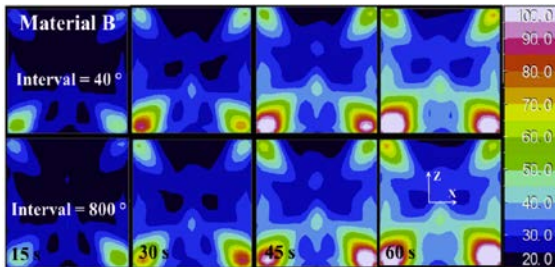


図 6 試料 B 加熱時の温度分布の計算結果
上：電磁界解析 1 ステップ回転角度 40°
下：電磁界解析 1 ステップ回転角度 800°

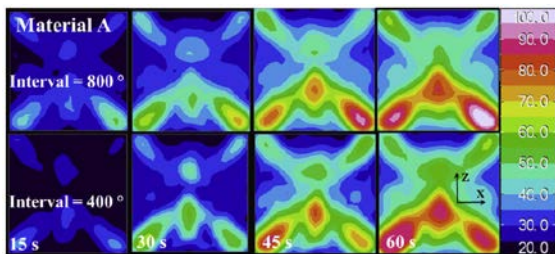


図 7 試料 A 加熱時の温度分布の計算結果
上：電磁界解析 1 ステップ回転角度 400°
下：電磁界解析 1 ステップ回転角度 800°

(2) 電子レンジ調理の解析

タンパク質変性の速度は、未変性のタンパク質濃度 C_p (mol/gmeat) に比例するとした次式の一次反応式で表すことができる。

$$\frac{dC_p}{dt} = -kC_p \quad (1)$$

ここで、速度定数 k (1/min) の温度依存性は、式(2)に示すアレニウスの式で表される。式中の速度パラメータ（活性化エネルギー E_a (kJ/mol) および頻度因子 k_0 (1/min)) は DSC-Dynamic 法より算出できる。DSC-Dynamic 法は、一定の昇温速度 β (°C/min) で DSC 測定を行った際に観測されるピーク温度 T_{max} (°C) が、昇温速度 β を大きくすると、

高温へシフトすることを利用したものである。

$$k = k_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2)$$

DSC-Dynamic 法により得られた速度パラメータの値を用いて、10°C/min の昇温速度で試料を加熱した場合の変性率の変化を計算した結果を図 8 に示した。温度上昇に伴ってミオシン、アクチンいずれも変性率 0 から 100% へ向けて増加していくが、ミオシンの変性が終了する間際から、アクチンの変性が開始する様子がわかる。また、変性率を時間で微分すると、図中に示した通りピークが得られる。このピークは DSC 測定における吸熱ピークに相当し、ピーク温度を読み取ると、DSC 測定結果とおおよそ一致することから得られたパラメータは妥当であると言える。

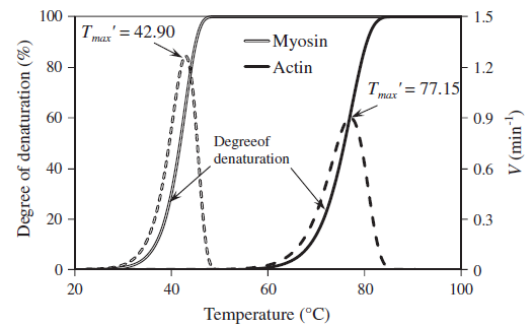


図 8 昇温過程におけるミオシン、アクチンの未変性率の変化（加熱速度 10°C/min）

実際の加熱においては、塩水が対流し容器内で対流による熱移動が起こる。本解析では自然対流による熱移動の計算を含んでいないため、塩水の熱伝導度を見かけ上大きくすることにより、自然対流の影響を表した。

(1)と同様の電磁界解析、熱伝導解析により得られた温度分布経時変化から、試料内のタンパク質変性分布を計算した結果を図 9 に示す。図から 220 秒加熱時にミオシンはほぼ変性し、アクチンは試料表面のみが変性することがわかる。一般にアクチンまで全て変性すると肉質は固くなることが知られており、本計算によりタンパク質の変性度を予測することが可能であり、最適な電子レンジ調理時間等の操作条件の提示が可能となる。

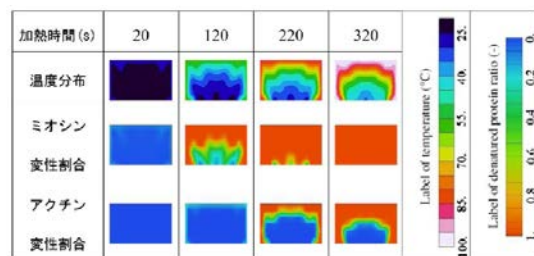


図 9 電子レンジ調理に伴う試料内タンパク質変性分布

(3) 電子レンジ炊飯過程の解析

炊飯過程においては、水中に米がある状態（水-米系）から、加熱に伴って米の吸水と水分蒸発が起こるため空気中にお米がある状態（空気-米系）に変化する。このとき、誘電特性は大きく変化することから、まず、（水-米系）の誘電物性について検討した。

米粒のまま、プローブ法を用いて誘電物性を測定するのは難しいことから、まず、飯粒をペースト状にした試料を測定した。ペースト状米の複素比誘電率は、米個体と水の対数混合則で表されると仮定すると(3)式で表される。測定したペースト状米の複素誘電率と水の値から(3)式を用いて米固体の複素誘電率を推算した。

$$\ln(\epsilon) = V' \ln(\epsilon') + V_m \ln(\epsilon_w) \quad (3)$$

ϵ : ペースト状米の複素誘電率

ϵ' : 米固体の複素誘電率

ϵ_w : 水の複素誘電率

V' : 米固体の体積割合

V_m : 米固体の体積割合

さらに米粒が水に分散した系を水と米粒固体の混合体と仮定し、(3)式と同様に混合体の複素誘電率を推算した。推算した結果を誘電率（上図）、誘電損率（下図）として図10に示した。同図に実測値も合わせて示したが、推算値と実測値は良好に一致していることがわかる。したがって、電子レンジ解析モデルに対数混合則を用いた誘電物性を使用することにより、米-水系の加熱過程を解析することが可能である。

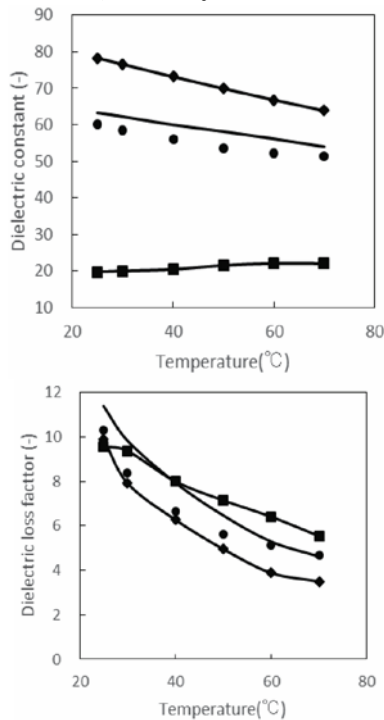


図10 米-水系の誘電率と誘電損率
 ● Actual value ◆ Water
 ■ Rice grain — Logarithm mix law

空気-米系の誘電特性は、空気と米で誘電物性が大きく異なるため、対数混合側では混合物の誘電特性を表すことができない。そこで、空気および米を1つの粒子と考え、各々に誘電特性を与える電子レンジ加熱モデルを作成した。概略図を図11に示す。(1)で作成した電子レンジモデルの試料部を粒子とし、試料の空隙率を19%と40%になるようにランダムに米と空気の物性値を各粒子に与えた。なお、空隙率19%は米粒をX線CTで観察し、画像解析により得られた値である。

(1)と同様に、電磁波解析および熱伝導解析を行って得られた試料内の温度分布計算結果を図12、図13に示す。同図に、容器にご飯を充填した試料を電子レンジで加熱し、加熱後の水平断面温度分布観察結果も合わせて示した。図から、空隙率が大きいほど温度上昇は大きく、実測値と計算値の温度分布の傾向は大まかに一致していることがわかる。しかし、加熱時間が長くなると、実測値のほうが試料内温度差が小さくなっている。これは、加熱が進むと高温部で水蒸気が発生し、低温部で凝縮が起こるため、温度の均一化が起こったものと考えられる。今後はこの水蒸気による伝熱の影響も考慮に入れた電子レンジ加熱モデルの開発が必要である。

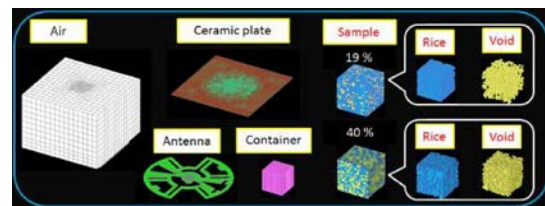


図11 空気-米系混合モデル概略図

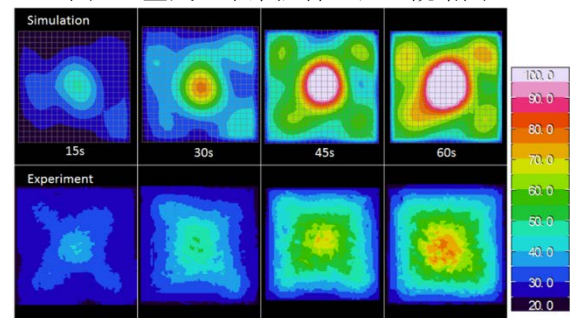


図12 水平断面温度分布(空隙率19%)

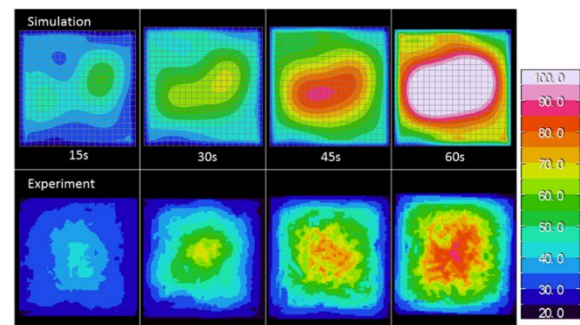


図13 水平断面温度分布(空隙率40%)

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2件)

- ① S. Liu, X. Yu, M. Fukuoka, N. Sakai, Modeling of fish boiling under microwave irradiation, Journal of Food Engineering, 140, 9-18 (2014) (査読有)
- ② S. Liu, Y. Ogiwara, M. Fukuoka, N. Sakai, Investigation and modeling of temperature changes in food heated in a flatbed microwave oven, Journal of Food Engineering, 131, 142-153 (2014) (査読有)

[学会発表] (計5件)

- ① Y. Ogiwara, M. Fukuoka, N. Sakai, Simulation of temperature distribution of the multiple foods heated in a domestic microwave oven, 12th International Congress on Engineering and Food, Canada, 2015. 6. 15
- ② 平野琢磨、森勝哉、福岡美香、酒井昇、マイクロ波炊飯を支配する米粒分散体の誘電物性、日本熱物性シンポジウム、東京、2014年11月22日
- ③ S. Liu, X. Yu, M. Fukuoka, and N. Sakai, Estimation of Fish Cooking Process during Microwave Heating, The 10th Asian Thermo-physical Properties Conference, Korea, 2013. 10. 1~3
- ④ 劉世雄、于星怡、福岡美香、酒井昇、マイクロ波加熱時煮魚調理過程の理論解析、化学工学会秋季大会、岡山、2013年9月17日
- ⑤ 荻原歎子、劉世雄、福岡美香、酒井昇、フラットテーブル型電子レンジの解析モデルの開発、日本食品工学会、京都、2013年8月9、10日

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~fukuoka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 昇 (SAKAI NOBORU)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：20134009

(2) 研究分担者

福岡 美香 (FUKUOKA MIKA)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：10240318