

令和元年6月18日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00808

研究課題名(和文) 通電加熱を利用した新規加熱調理に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Basic research on new cooking method by using ohmic heating

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：通電加熱は加熱媒体なしで食品内部から加熱できることから、従来の加熱法よりも環境負荷の低減と食品の品質向上が期待できる。そこで、本研究では従来法に代わる通電調理法の開発を目的として、調理実験および理論的な解析を行った。理論解析においては、通電加熱解析、品質変化解析モデルを構築すると同時に、解析に必要な物性値(電気伝導度、タンパク質変性速度定数)を取得した。具体的な食材としては卵、ビーフ、ハンバーグおよびホタテ貝柱をそれぞれ用いて、通電加熱の有用性について、理論的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

肉等の低温調理に関する研究はこれまでも多く研究されてきた。しかし、そのほとんどは、恒温湯槽やスチームコンベクションオーブン等の外部加熱法によるものである。本研究において、食品内部から加熱の可能な通電加熱を低温調理に適用できることを示したことは社会的な意義が大きい。また、通電加熱時の現象を、内部発熱を含む熱移動と温度上昇にともなうタンパク質変性として捉え、その理論解析手法を示したことは学術的意義が大きいと考える。

研究成果の概要(英文)：Since Ohmic heating can be performed from the inside of a food without a heating medium, reduction in environmental impact and improvement in food quality can be expected compared to conventional heating methods. In this study, cooking experiments and theoretical analysis were conducted for the purpose of developing an alternative Ohmic heating to conventional methods. In the theoretical analysis, the heat transfer analysis and the quality change analysis model were constructed, and at the same time, the physical property values (electrical conductivity, protein denaturation rate constant) necessary for the analysis were obtained. Using eggs, beef, hamburger and scallop as concrete food materials, respectively, we theoretically clarified the usefulness of Ohmic heating.

研究分野：食品工学

キーワード：通電加熱 肉の低温調理 タンパク質変性 電気伝導度 シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の日本の食品産業において、安全性を保ちつつ、栄養価に富み、食味・食感に優れた高品質な食品を消費者へ提供することが求められ、その一つとして、真空低温調理 (sous-vide) が注目されている。真空低温調理は、(1)食材を真空パック専用袋に入れて脱気・密封し、(2)恒温湯槽やスチームコンベクションオーブンで食材に適した温度下で加熱を行う、という二つの基本的な操作から成り立つ。加熱温度帯が比較的低い(60 ~ 80)ことから食材の歩留まりが高く、ビタミン類など栄養成分の破壊が少ないという品質上の利点のほか、集中大量調理が可能といった調理上の利点や、真空包装による二次汚染の予防および貯蔵・運搬性の向上といった集中調理システムでの管理上の利点が挙げられる。

一方で、素材の大きさや形状によって最適調理時間が変動するという欠点の他、加熱温度を比較的低く設定することから、温度上昇が遅く、調理時間が著しく長く、熱エネルギーの消費が大きい等の欠点がある。そこで、高品質かつ省エネルギーを実現する新たな調理加工システムの開発が望まれていた。

2. 研究の目的

従来の加熱法に代わり、加熱媒体なしで食品内部から加熱できる通電加熱を用いることで、環境負荷の低減と食品の品質向上を目指した新規低温調理法の開発を目的とした。具体的な研究目的は以下のとおりである。

(1) 通電加熱モデルの構築

通電加熱における食品内温度分布は、食品の形状・大きさ、食品の成分(電気伝導度)、電極の位置等によって大きく変化する。そのため、最適な加熱条件を探索するために試行錯誤的に実験を行うのであれば、多大な時間と労力を要する。そこで、これらの影響を定量的に把握するために、通電加熱モデルを構築する。

(2) 食品電気物性(電気伝導度)の測定

食品内発熱分布を計算するためには、食品の電気伝導度が必要となる。電気伝導度は、食品の水分・油分および塩分濃度と温度に依存するため、種々食品の電気伝導度を測定し、水分・油分、塩分濃度および温度と電気伝導度の関係を明らかにする。

(3) 食品品質変化予測手法の確立

本研究で対象とする畜肉および魚肉は、加熱とともにタンパク質が変性し、加熱しすぎると固くなり不味くなる。低温調理法は過度のタンパク質変性を防ぎ、肉質を柔らかくするとともに歩留まりを良くする調理法であるが、食品内温度分布にしたがい、どの程度タンパク質変性が進行するかを実験的に定量化することは不可能である。そこで、シミュレーションにより、通電加熱時の温度分布変化にともなうタンパク質変性分布を予測する手法を確立する。

3. 研究の方法

タンパク質食品として、ホタテ貝、卵、ハンバーグおよび牛肉の通電加熱調理について研究を行ったが、本報告では主に牛肉について記す。

(1) 電気伝導度測定

試料として輸入牛(豪州タスマニア産ブラックアンガス種、牛ランプ肉)と内部に脂肪の多い和牛(熊本県産黒毛和種、牛ランプ肉)を用いた。

図1に電気伝導度測定装置の概略を示す。試料は縦・横・高さを各30mmとし、容器は発泡スチロールを用いて断熱した。試料の側面にチタン製電極を配置し、温度測定用に光ファイバー温度センサを試料中心と側面に挿入した。また、筋繊維方向と電流が平行及び垂直となるように試料方向を変えて充填した。

容器に充填した試料を用いて、温度を5刻みで通電して昇温し、5 から 65 までの電気特性をLCRメーターを用いて測定した。

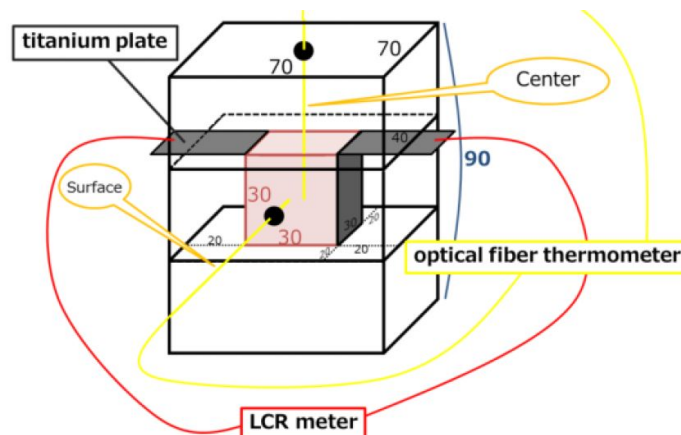


図1 電気伝導度測定装置の概略

(2) タンパク質変性速度の推算

本研究では、タンパク質変性の中でも特にテクスチャーに強く影響するミオシン及びアクチンを対象とした。これらのタンパク質変性を一次の反応速度式で表すと次式となる。

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

ここで、 C_p (mol/g_{meat}) は未変性のタンパク質濃度である。また、 k (1/min) は反応速度定数で、次のアレニウスの式で表される。

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

式中の速度パラメータである活性化エネルギー E_a (kJ/mol) と頻度因子 k_0 (1/min) は DSC-Dynamic 法より算出した。DSC-Dynamic 法では、一定の昇温速度 (1/min) で DSC 測定を行った際に観測されるピーク温度 T_{max} () が、昇温速度を大きくすると、高温側へシフトすることを利用したもので、昇温速度とピーク温度 T_{max} の関係式として次式が得られる。

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_{max}^2}\right) = \ln\left(\frac{k_0 R}{E_a}\right) - \left(\frac{E_a}{RT_{max}}\right) \quad (3)$$

上式の直線の切片と傾きから、頻度因子 k_0 と活性化エネルギー E_a を決定した。

(3) 通電加熱調理実験と調理過程のシミュレーション

加熱調理実験には図 1 に示した、電気伝導度測定装置と同様の通電装置を用いた。高密度ポリスチレン製の 50mm × 100mm × 50mm の容器に、重量を測定した試料を充填し、0 に設定した低温恒温機中で保存して試料の温度を 5 以下にした。通電加熱装置を用いて 50、100、200V の定電圧で中心温度が 63 に到達するまで通電加熱を行った。その際、中心温度と表面温度の温度履歴を光ファイバー温度計で、電流値と電圧値をデジタルマルチメーターで測定した。また、加熱終了後、断面熱画像を取得した。

通電加熱調理過程の予測計算を行うために、市販の有限要素作成ソフト (FEMAP) を用いて、通電加熱モデルを作成した (図 2)。作成したモデルを電磁場解析ソフト (PHOTO-Wavej) と熱伝導解析ソフト (PHOTO-Thermo) を用いて、両者の強連成解析を行った。電磁界解析に必要な牛肉の電気伝導度は (1) で得られた測定値を用いた。また、(2) で得られた反応速度定数をもとにタンパク質変性分布の経時変化を計算した。

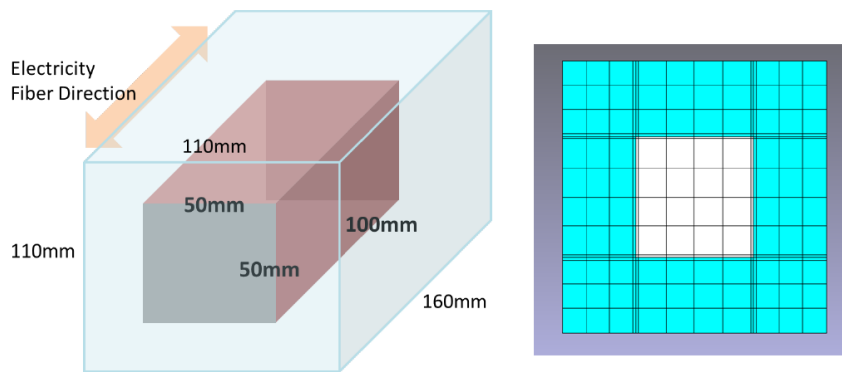


図 2 通電加熱解析モデルの概略

4. 研究成果

「3. 研究の方法」と同様に、本報告では主に牛肉について記す。

(1) 電気伝導度測定

輸入牛および和牛について電気伝導度を測定した結果を図 3 に示す。いずれの試料においても温度上昇に伴って電気伝導度が上昇している。脂質が少ない輸入牛のほうが、また、繊維方向が電流に対して平行な試料のほうが電気伝導度が高くなることがわかる。一般に脂質は赤身よりも電気伝導度が小さいことが知られており、試料を構成する脂質の割合が大きい和牛の電気伝導度が小さくなったと考えられる。また、電流方向に対して畜肉を垂直に充填した場合、筋肉を構成する繊維を横切って電流が流れるため、平行に充填した場合よりも電気伝導度が小さくなったと考えられる。

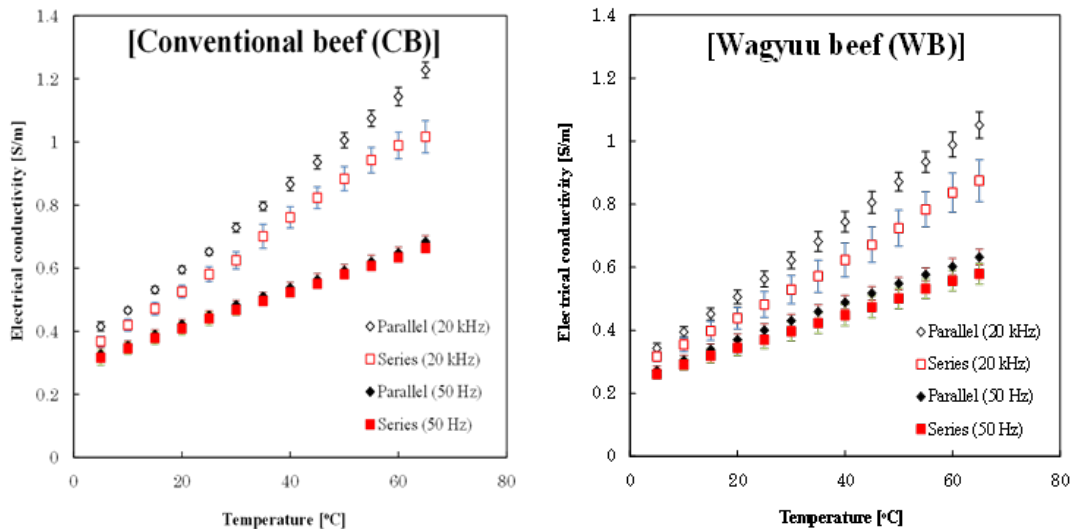


図3 牛肉の電気伝導度（左図：輸入牛、右図：和牛）

(2) タンパク質変性

図4に、輸入牛についてDSC測定結果の一例を示す。約50 から90 にかけて、温度の低い方から順にミオシン、コラーゲン、アクチンと推察される吸熱ピークが確認できる。昇温速度を8~20°C/minで変化させてDSC測定を行い、(3)式左辺と1/Tの関係性を求めた結果を図5に示す。ミオシン、アクチン由来のプロットそれぞれで良好な直線関係が得られている。各直線の切片と傾きから、頻度因子 k_0 と活性化エネルギー E_a を求めた結果を表1に示した。

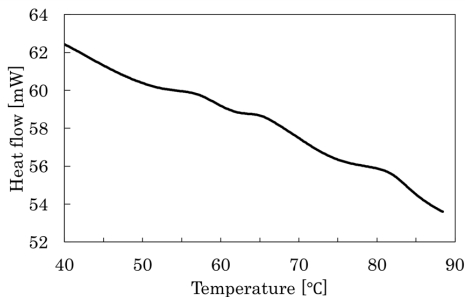


図4 10 /minにおけるDSC吸熱曲線

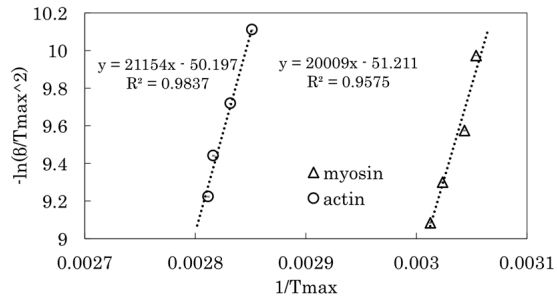


図5 DSC Dynamic法に基づく一次式プロット

表1 輸入牛肉のタンパク質変性反応速度パラメータ

	k_0 (1/s)	E_a (J/mol)
Myosin	5.84E+24	1.66E+05
Actin	2.23E+24	1.76E+05

(3) 通電加熱調理実験と調理過程のシミュレーション

輸入牛肉を試料として通電加熱したときの温度履歴を図6に示す。通電加熱の結果、200Vでは約80秒、100Vでは約300秒、50Vでは約1400秒で目的温度とした63 に達した。電圧が高いほど、加熱に要する時間は著しく減少した。

図7に、各電圧で加熱したときの試料断面の熱画像を示した。いずれの試料でも内部で発熱分布に偏りが見られた。これは、繊維の方向や分布に偏りがあるために、発熱が一樣にならなかったと推察される。一方で、多少の加熱ムラは生じたが、従来の伝導伝熱加熱と比較すると、温度ムラは小さくなっており、通電加熱を用いることで加熱ムラを少なくし、温度制御を容易にすることが可能であるといえる。

図8に、(1)で得られた電気伝導度をもとに、電圧を50Vおよび200Vとしたときの中心温度変化の計算結果を示した。電圧を200Vにすることにより、加熱時間は大幅に短縮できることが理論的にも明らかとなった。中心温度が63 に達したときの試料断面の温度分布予測を図9に示す。図から、表面より中心部のほうが温度は約2 ほど高いものの、試料全体がほぼ均一に加熱されることがわかる。また、実際の実験同様に加熱に要する時間が長くなる50Vの場合、容器の温度が上昇し、温度分布も広がった。そのため、断熱材を用いた場合でもある程度の熱の流出があることがわかる。

得られた中心温度から、中心部におけるタンパク質変性率を計算した結果を温度変化と合わせて図8に示した。目的温度である63 に到達した時点では、両電圧においてミオシンの変性

率は 100%であった。一方、アクチンに関しては 50V の場合、変性が 60%以上進行しているのに対し、200V では 10%程度に抑えられていることがわかる。これは加熱速度が遅い場合、変性可能温度帯に長く存在するため、よりタンパク質変性が進むためと考えられる。一般にアクチンまで変性すると肉の収縮と脱水が進行するため固くなることが知られているが、通電加熱によりアクチンの変性を制御し、収縮・脱水を抑えた調理が可能となる。

以上のことから、通電加熱による肉の低温調理は、迅速にかつ均一に加熱できるため、収縮・脱水が少なく、製品をよりジューシーに仕上げることができ、従来法に代わる新規加熱調理法となりえると言える。

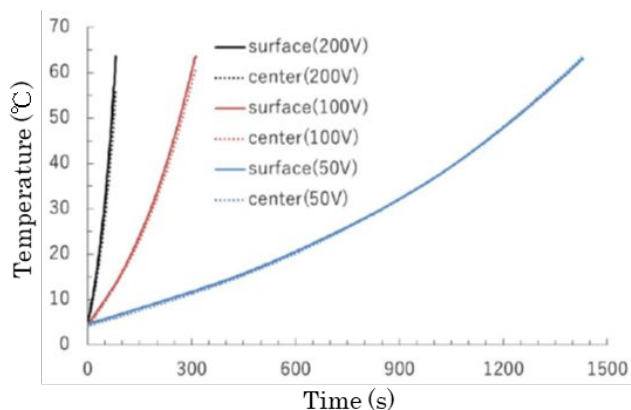


図 6 各電圧における試料中心温度履歴

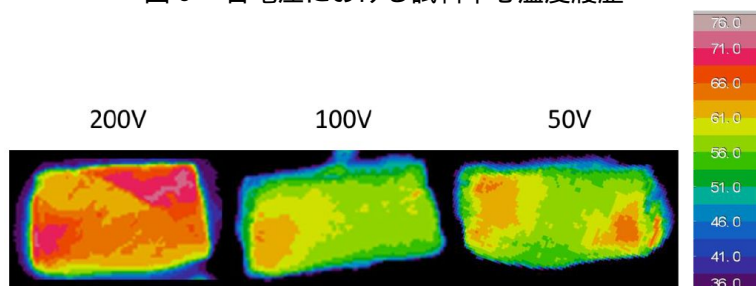


図 7 各電圧における加熱終了時の試料断面の熱画像

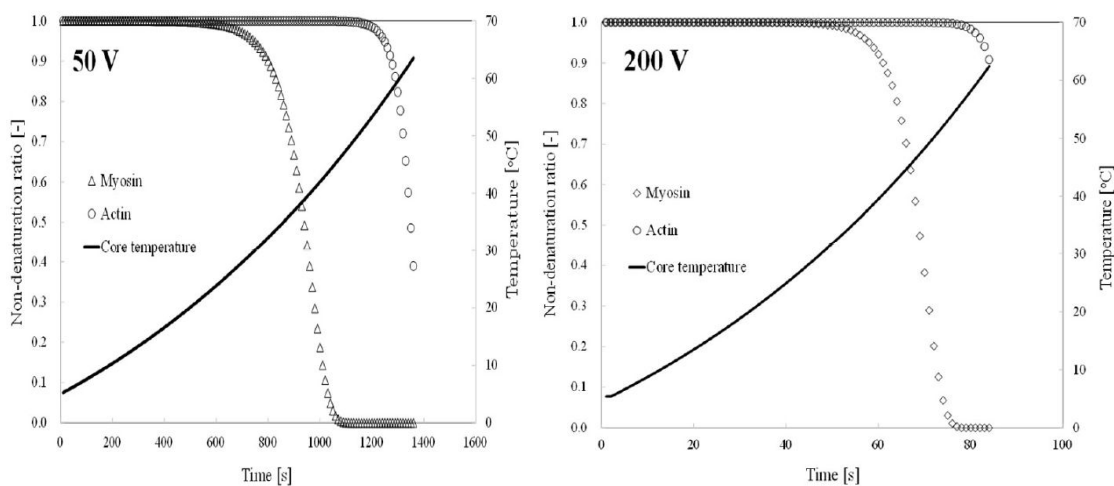


図 8 試料中心部の温度履歴とタンパク質変性予測

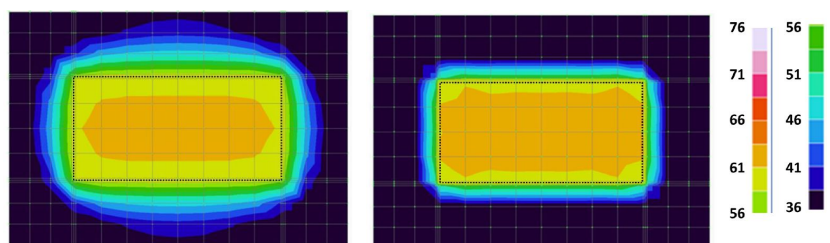


図 9 中心温度 63 到達時の温度分布計算結果 (左: 50V, 右: 200V)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

Y. Llave, S. Fukuda, M. Fukuoka, N. Shibata-Ishiwatari, N. Sakai, Analysis of color changes in chicken egg yolks and whites based on degree of thermal protein denaturation during ohmic heating and water bath treatment, Journal of Food Engineering, **222**, 151-161(2018) (査読有)
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.024>

Y. Llave, T. Udo, M. Fukuoka, N. Sakai, Ohmic heating of beef at 20kHz and analysis of electrical conductivity at low and high frequencies, Journal of Food Engineering, **228**, 91-101(2018) (査読有)
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.019>

〔学会発表〕(計 8件)

Y. Llave, S. Fukuda, M. Fukuoka, N. Shibata-Ishiwatari, N. Sakai, Analysis of color changes of egg based on thermal protein denaturation, 30th EFFoST International Conference, Austria, 2016.11

Y. Llave, W.Guo, M. Fukuoka, N. Sakai, Modeling of Ohmic Heating at high frequency of two-component solid foods, Poster Presentation, IUFOST 18th World Congress of Food Science and Technology, Ireland, 2016.8

Y. Llave, T. Udo, M. Fukuoka, N. Sakai, Ohmic heating application in roast beef processing – Analysis of electrical conductivity. 18th Japan Food Engineering Conference, Osaka, 2017.8

有働淑史、L. Yvan、福岡美香、酒井昇、畜肉における通電加熱調理の解析、日本食品工学会、大阪、2017.8

Y. Llave, T. Udo, M. Fukuoka, N. Sakai, Ohmic heating of roast beef at high frequencies – Experimental and computer simulation, 31th EFFoST International Conference, Spain, 2017.11

守永仁彦、福岡美香、酒井昇、通電加熱を利用したホタテ低温調理の解析、日本食品工学会、札幌、2018.8

張烈、L. Yvan、福岡美香、酒井昇、Ohmic heating of hamburger-patty—Analysis of electrical conductivities、日本食品工学会、札幌、2018.8

Y. Llave, K. Morinaga, M. Fukuoka, N. Sakai, Ohmic Thawing of Frozen Scallops at 20 kHz and Analysis of Electrical Conductivity at Low and High Frequencies, IUFOST 18th World Congress of Food Science and Technology, India, 2018.10

〔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)研究分担者

研究分担者氏名：福岡 美香

ローマ字氏名：FUKUOKA, mika

所属研究機関名：東京海洋大学大学院

部局名：学術研究院

職名：准教授

研究者番号(8桁)：10240318

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。