

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500934

研究課題名(和文)水蒸気オーブンの利用技術向上のためのシミュレーションソフトウェアの開発

研究課題名(英文)Development of simulation software for improved utilization of steam oven

研究代表者

伊與田 浩志(Iyota, Hiroyuki)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10264798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：大量調理で広く用いられているスチームコンベクションオーブンを用いて、ホットエアーまたはコンビモード(数種の蒸気量設定値)における庫内温度と水蒸気量の時間的な変化を測定した。その結果から、装置の構造や自動制御の方式、食材と気流間の熱・物質移動現象をモデル化し、数値シミュレーションソフトウェアを作成した。単純形状のモデル材料として耐火断熱レンガを用いた実験結果は、計算結果と一致した。水蒸気オーブンの利用技術向上を目的に、オーブンの構造、加熱調理における水蒸気の役割と効果、実際の利用状況や最新動向、本研究の成果等を含めて、スチコンを様々な視点からわかり易く解説するための小冊子を制作した。

研究成果の概要(英文)：The steam mole fraction in the steam convection oven chamber was measured under several different operating conditions. Simulation software has been developed based on a model of heat transfer between the flow and the food material in the oven chamber during operation. The software model also considered the oven structure, regulation system, and algorithms. Materials with simple shapes were used as samples to be heated, i.e., fire bricks containing water, meat pates, and sliced breads. The calculation results agreed with the experiments when characteristic parameters suitable for the oven were used. A brochure regarding the steam convection oven, which explains the significant data and results of this study as well as utilization trends, has been produced and distributed.

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：スチームオーブン 過熱水蒸気 数値計算 調理 給食経営管理 湿度 色 計測

### 1. 研究開始当初の背景

加熱用の食品機械には、身近な家庭用調理機器から、業務用では大量調理と呼ばれる給食室、あるいはレストランの厨房などで使われる大型のコンロ、炊飯器、鍋（回転釜、蒸気釜）などがある。近年は作業性向上（加熱条件の自動制御機能が充実）、食品の安全管理（温度と時間の管理）面から、水蒸気を利用したスチームコンベクションオープン（スチコン）と呼ばれる多目的の調理機器が広く普及してきた。また、家庭用のオープンにおいても、水蒸気を発生させて庫内に供給する機能を有するものが、比較的手軽に入手できるようになった。さらに、高齢化や医療制度の変革と、食品の流通・販売のシステムが大きく変化する中で、業務用、家庭用の双方ともに、より社会ニーズに即した食品機械の開発と利用が求められており、水蒸気の利用技術とその高度化は、将来の社会と生活の豊かさ、QOLの向上に寄与する重要な課題になると考えられる。

そのような中で、水蒸気を利用して目的にあった食品加熱を行うためには、使用者側においても、加熱機器の構造や原理を理解し利用することが望ましい。しかし、例えばスチコンでは、表示部・操作部がパネル化され、自動制御の方式や内部構造はメーカー毎に独自の工夫がなされていること、高温になる庫内の水蒸気の量を簡便に直接測定する手段がこれまでなかったこと、水蒸気を利用した加熱は水蒸気の凝縮現象を伴うために熱・物質移動が複雑化することなどから、使用者らが装置を使用する際に、調理マニュアルや経験に頼らざるを得ないことが多かった。

### 2. 研究の目的

(1)市販の実際に販売されているスチコンを解析対象とし、その構造、制御方式などの特性を把握する。また、装置の作動状態とともに、これまで曖昧であった装置内の気流温度、風速、ふく射の寄与、水蒸気量（濃度）などを定量的に測定・把握し、特に水蒸気量については設定値との差異を明確にする。

(2)加熱後の食品の品質に与える水蒸気量や風速等の影響を知るため、実際の食品とモデル材料を用いた実験により、庫内状態を測定しながら加熱中および加熱後の温度、水分量、食品品質や性質の変化について調べる。食品を用いた加熱実験においては、品質評価の一つとして表面の色に注目し、加熱中の色変化の連続測定を行なう。その結果を庫内の水蒸気量の実測値と比較することで、庫内水蒸気量が食品の色変化に与える影響について把握する。

(3)庫内と制御部を含む装置全体を数値モデル化し、加熱中の庫内風速・温度、水蒸気濃度（湿度）の時間的な変化、並びに、条件設

定値の違いが調理中・調理後の食品の温度や水分量に与える影響をパーソナルコンピュータ上で予測するためのソフトウェアを開発する。

(4)これらと並行して、現場における装置の操作状況やニーズ等を連携研究者らとともに調査する。その調査結果を含めて、配布対象を、栄養士養成校の学生、機械技術者・研究者、機器メーカー、現場の栄養士・管理栄養士、調理師、教育機関関係者等を想定した、スチームコンベクションオープンを題材にした小冊子を制作する。

冊子の中で、本研究成果を含めながら、社会情勢の中での食品産業の動向、設備の動向、スチコンの構造や制御方法に関する解説、具体的な使用方法、熱・物質移動現象とモデル化、調理における水蒸気の役割等を解説する。

以上の取り組みを通じて、水蒸気を利用したオープンの利用技術、ならびに装置の高性能化のための知見を得るとともに、特に使用者の技術向上を目指す。

### 3. 研究の方法

(1)市販のガス式スチコンを対象に、ガス流量や庫内の温度・湿度の測定が可能な実験装置を製作した。次に、スチコンの2つの動作モード（コンビ、ホットエアー）で、庫内の風速、水蒸気濃度、温度の測定を行ない、定量的に庫内の状態を把握した。その際、研究代表者らが開発してきた湿球温度に基づいた水蒸気濃度の測定方法を用いた（図1）。

加熱実験の第一段階として、上述のような非常な相変化現象（水分の蒸発や水蒸気の凝縮）を伴う伝熱条件下において、形状や物理化学的な変化のない円柱状の含水耐火断熱レンガ（B-1(JIS-R2611)、直径50mm、厚さ15mm、湿量基準での含水率約55%）をモデル材料（被加熱材料）とし、水蒸気量の設定値別（ホットエアー、20%、60%、100%）に材料中心温度、庫内の温度・水蒸気量の変化を測定し、計算結果と比較した。

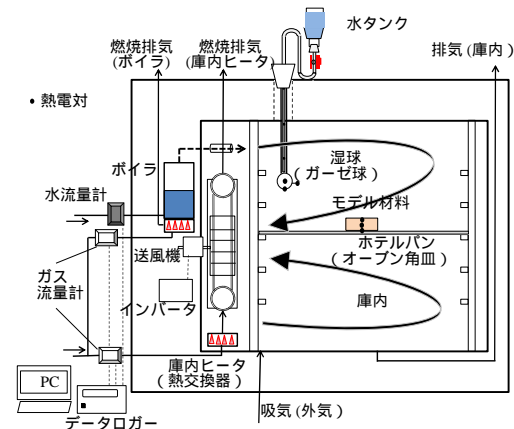


図1 実験に使用した装置概略の一例（装置の基本仕様は市販品と同じ。研究・測定用に一部改造）

(2)第二段階として、熱によって性質が変化するモデル食材(鶏肉、牛肉のパテ、食パン)を被加熱材料として用いた加熱実験を複数の動作モードで実施した。その際、加熱中の食品の状態をリアルタイムでモニタリングするために、試料表面の色(分光反射率)を光ファイバーと小型分光器により連続的に測定し、動作モード(庫内の水蒸気量の時間変化)による違いを調べた。また、温度や質量の変化について、耐火断熱レンガの場合との差異とその原因を検討し、食材の簡便なモデル化として水分活性を食品の含水率の関数として与える方法について検討した。

(3)実測したスチコン庫内の水蒸気量と温度変化の測定結果から、装置の内部機器の一つであるボイラの蒸発能力、温度や蒸気発生に関する制御方法やパターン、外気空気の吸気量(相当量)、放熱量等を含めて、装置の構造や制御方式を把握した。さらに装置と装置庫内の熱・物質移動をモデル化した。そのモデルに基づいて数値計算プログラムを作成した。

開発したソフトウェアを用いた計算結果と実験結果を比較し、その予測の精度と予測限界について考察した。

(4)病院関係の現場作業員(管理者、管理栄養士、調理師等)、装置メーカー技術者・営業担当者、管理栄養士養成校の教員等に対し、スチコンの利用状況、ニーズや課題について連携研究者と共にインタビューを行った。その結果をふまえながら、連携研究者らとともにスチコンを題材とした小冊子を作成し、インタビュー協力者と学校関係を中心に配布し、また、読者の意見や感想も収集した。

#### 4. 研究成果

(1)これまでに水蒸気オープンと称されるにも関わらず、水蒸気が食品に与える影響を調べる研究において、これまでほとんど明確にされていなかったオープン庫内の水蒸気量の時間変化の測定結果を示した。その結果から、実際の庫内の水蒸気量は設定値とは異なり、機種によっても差異の傾向が大きく異なることを明らかにした(図2)。

このことは、使用する機種によって設定する温度や水蒸気量の最適値が異なることを意味する。従って、目的にあった加熱調理をより適切に行うためには、利用者が装置の諸特性(実際の庫内の水蒸気量の変化)とともに、時間的に変化する庫内の水蒸気量が食品に与える影響を理解しておくことが望ましいことを示した。

(2)食材を用いた加熱実験により、色変化と庫内の露点温度(時間的に変化する水蒸気量)を比較した結果、食材表面の色は、露点温度と強い関係があることを示した(図3)。

この結果は、加熱中の食品の熱的な変化を

解明する際には、庫内の水蒸気量を定量的に把握(測定あるいは推算等)することが必要であることを意味しており、今後のオープン等の加熱機器の高性能化、最適化を考える際に、庫内温度と同様に、水蒸気量のプロセス設計(時間変化等)の重要性を示した。

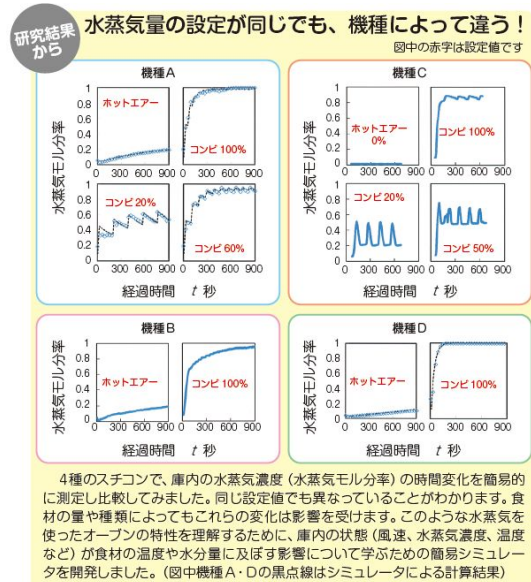


図2 庫内の水蒸気量の測定値とシミュレーションによる予測値との比較(小冊子P7)

#### 水蒸気量が多いとタンパク質の熱変性も早い

庫内の水蒸気濃度(露点温度)が高くなると、水蒸気の凝縮によって急速に加熱できる上限の温度が高くなります(P6参照)。また、加熱調理中の食品の温度は、タンパク質の熱変性、焼き色などに大きな影響を与えます。

そこで、庫内の露点温度の変化と、鶏肉のパテの表面の色変化を庫内で連続的に測定しました。

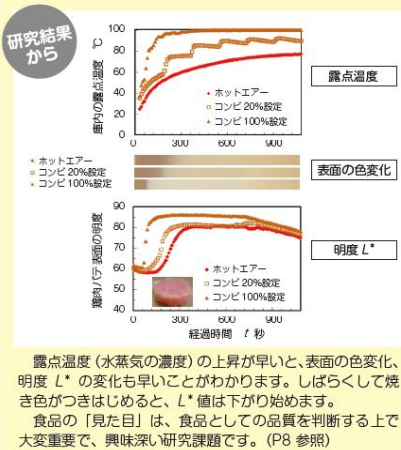


図3 庫内の露点温度と食品表面温度色変化の関係(小冊子P7)

(3)装置の制御を含めた熱・物質移動の数値モデル化とシミュレーション計算により、庫内の温度・水蒸気量を予測した。装置特性を意味するパラメータに対して実験結果に基づいて適切な値を与えることで、計算による予測値と実測値はよく一致した(図2の機種A、機種D)。なお、加熱後の被加熱材料の重量減少率は、凝縮水挙動(オープン皿への

流下等)をモデル化していないため、予測値は実測値より少なくなる傾向になった。

(4) スチコンの利用者からのインタビューでは、同種の食材であっても、スチコンのモードや水蒸気量の設定値は施設や現場によって異なっているものがあり、その主な原因は、使用する機種や、加熱調理時の食品素材の状態、喫食者の嗜好等の違いによると考えられた。また、作業効率向上、安全管理、作業者の負担軽減のための装置として、スチコンが期待されていることがわかった。また、管理栄養士養成校では、学生に対してスチコンに関する説明が十分ではないとの意見が多く聞かれた。

これらのインタビューの結果と、研究成果を含めて、カラーA4で8ページのスチコンに関する小冊子を制作した(表紙図4、図2~6)。同小冊子は、小冊子を制作した連携研究者らを通じて管理栄養士養成校の学生に配布するとともに、インタビュー協力者等を中心に配布した。



図4 小冊子(表紙と目次)

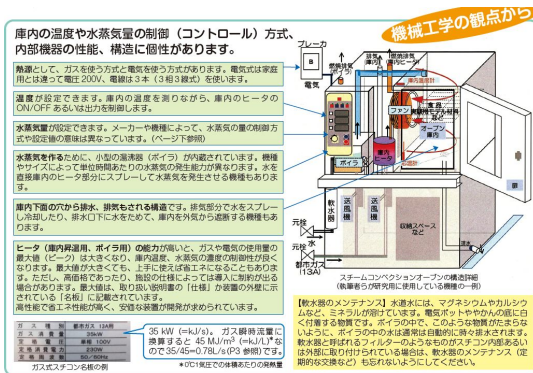


図5 装置構造や特性等の解説(小冊子P7)

配布の際に依頼したアンケートから、それぞれの立場で興味のあるページが異なっており、学生は実際の使い方を、その他は本研究成果となる水蒸気量の測定値(図2)や装置構造の詳細(図5)、水蒸気量の変化が食品に与える影響(図3、図6)に関する部分に対して特に有益であったとの意見が得られた。また、本研究で開発した数値計算プログラム(シミュレーションソフトウェア)の基礎となる考え方について解説したページ(図6)は、学生にとって難しいとの意見が聞かれたが、教員や装置技術者・学校関係者(教員)からは有益であったとの意見が多かった。

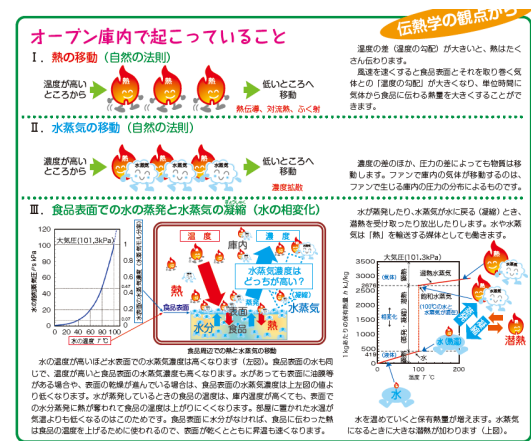


図6 加熱中のオープン庫内の物理現象の解説(小冊子P6)

(5)以上の取り組みと研究成果は、機械工学と調理科学・食品工学の橋渡しとなる研究であり、装置の性能向上のために役立つものと考えられる。

これまでの調理科学や食品工学の研究において、個別の機器構造に起因する水蒸気濃度などの加熱条件の非正常性は、加熱中の熱移動、栄養成分、脂質、水分などの物質移動、並びに食品を扱う上で重要な安全性、味、食感等にも影響しうるにもかかわらず、国内外共に十分に検討されているとは言い難い状況であった。本研究により、実用性と高い実験と測定手法の提案もできたと考えている。

また、水蒸気や空気を利用した加熱における熱・物質の移動現象は、様々な加熱調理や食品加工を理解するための基礎となるものである。そのため、食品やその加工機械に対する社会ニーズが変化する中で、これらの現象を理解できる人(装置開発者、使用者)の育成は、今後の社会を豊かにするために寄与する取り組みになると考える。

今後も引き続き、小冊子の改訂、ソフトウェアの改良、湿度や色の簡便な測定手法の提案と開発を行うとともに、オープンの高性能化と、水蒸気量が食品に与える影響の解明等、水蒸気の利用技術の向上のための取り組みを様々な立場の方々と意見交換し協力を得ながら継続する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Hiroyuki IYOTA, Hideki SAKAI and Yusuke MAMIYA, Color Measurement Methods for Optimization of Oven Operation(Baking of Sliced Bread with Superheated Steam and Hot Air), Food Science and Technology Research, 査読有, 19(6), pp.939-947, (2013)  
<http://dx.doi.org/10.3136/fstr.19.939>

伊與田 浩志, 加熱媒体としての過熱水蒸気と湿り空気の利用、冷凍、査読無、88(1031)、pp.3-7、(2013)

杉山 久仁子, スチームコンベクションオープンにおける蒸気による焼き加熱、冷凍、査読無、88(1031)、pp.8-11、(2013)

山形 純子, 伊與田 浩志, 西村 伸也, 水蒸気凝縮を伴う調理オープンの伝熱機構解析、日本食品科学工学会誌、査読有、59(10)、pp.491-502、(2012)  
<http://dx.doi.org/10.3136/nskkk.59.491>

〔学会発表〕(計11件)

Shuhei NOMURA et al., Characterization of Baked Color of Cookie, Toast and Chicken: a Model of Light-colored Food, Proc. of the 1st Asia Color Association Conference, pp.252-255, (Dec. 12, 2013)(Thanyaburi, Thailand)

Hiroyuki IYOTA et al., Wide-Range Psychrometric Chart for Improved Utilization of Superheated Steam and Humid Air, Abstracts Book of Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science(TEMPMEKO 2013), p.255 (Oct. 14, 2013, Funchal, Madeira, Portugal)

古都 丞美 他, スチームコンベクションオープンにおける過熱水蒸気の有効利用に関する研究、日本調理科学会平成25年度大会研究発表要旨集、1P-32、(2013.8.23・奈良)

山形 純子 他, 簡易湿度測定法によるスチームコンベクションオープンの庫内湿度比較、日本調理科学会平成25年度大会研究発表要旨集、1P-33、(2013.8.23・奈良)

Hiroyuki IYOTA et al., Change in Food Color During Cooking with Steam Oven, Proc. of International Colour Association (AIC 2013), vol.3, pp.1241-1244, (July 8, 2013, Newcastle upon Tyne, UK)(on CD-ROM)

茅野 友広 他, スチームコンベクションオープンのモデル化と伝熱解析、第33回日本熱物性シンポジウム (2012.10.3-5・大阪)

古都 丞美 他, スチームコンベクションオープンの加熱特性 - 庫内温度、風速、蒸気量による影響 -, 第33回日本熱物性シンポジウム (2012.10.3-5・大阪)

Hiroyuki IYOTA et al., Effect of Time-Dependent Humidity Profiles on Change in Food Color during Heating with Steam Convection Oven, The International Congress on Food Engineering and Technology (IFET2012), (March 29, 2012) (Bangkok, Thailand)

岩波 伸悟 他, 水蒸気供給機能を有するオープンの対流・ふく射による加熱特性の簡易測定、日本食品工学会第13回(2012年度)年次大会講演要旨集、p.140、(2012.8.9・北海道)

〔その他〕

伊與田 浩志, 山形 純子, 赤尾 正, 杉山 久仁子, 藤原 政嘉, 富田 圭子, 酒井 英樹, 渋川 祥子, (小冊子)スチームコンベクションオープンの謎を解く、2014年3月、8(フルカラー)  
<http://steam.saloon.jp/hpub/index.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

伊與田 浩志 (IYOTA, Hiroyuki)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：10264798

### (2)研究分担者

杉山 久仁子 (SUGIYAMA, Kuniko)  
横浜国立大学・教育人間学部・教授  
研究者番号：30279799

### (3)連携研究者

渋川 祥子 (SHIBUKAWA, Shoko)  
横浜国立大学・教育人間学部・名誉教授  
研究者番号：80017996

酒井 英樹 (SAKAI, Hideki)  
大阪市立大学・大学院生活科学研究科・准教授,  
研究者番号：90277830

小西 洋太郎 (KONISHI, Yotaro)  
大阪市立大学・大学院生活科学研究科・教授,  
研究者番号：70116812

井上 保 (INOUE, Tamotsu)

東洋食品工業短期大学・包装食品工学・講師，  
研究者番号：50552882

(4)研究協力者

山形 純子 (YAMAGATA, Junko)  
京都光華女子大学・健康科学部・講師  
研究者番号：20709018

赤尾 正 (AKAO, Tadashi)  
大手前栄養専門学校・准教授

藤原 政嘉 (FUJIWARA, Masayoshi)  
大阪青山大学・教授