

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

オーブン加熱における肉類焼成の最適調理に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-07-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 湯野, 翔太 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2480

修士学位論文

オーブン加熱における肉類焼成の
最適調理に関する研究

2020 年度
(2021 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
食機能保全科学専攻

湯野 翔太

修士学位論文

オーブン加熱における肉類焼成の
最適調理に関する研究

2020 年度
(2021 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
食機能保全科学専攻

湯野 翔太

目次

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景及び目的.....	1
1.2 オープン加熱の基礎.....	2
1.2.1 オープンについて.....	2
1.2.2 伝熱機構.....	2
1.3 肉類と加熱調理.....	3
1.3.1 肉類の成分及び特徴.....	3
1.3.2 肉類の構造.....	4
1.3.3 加熱調理における変化.....	7
1.4 本論文の構成.....	8
1.5 参考文献.....	8
第2章 牛ヒレ肉における伝熱シミュレーション構築.....	11
2.1 はじめに.....	11
2.2 理論.....	11
2.2.1 放射率.....	11
2.2.2 タンパク質熱変性速度論[3].....	14
2.2.3 DSC-Dynamic 法[3].....	15
2.3 実験方法.....	16
2.3.1 牛ヒレ肉焼成実験.....	16
2.3.2 放射率測定.....	18
2.3.3 示差走査熱量測定 (DSC).....	19
2.3.4 収縮率の測定.....	19
2.4 解析.....	21
2.4.1 焼成モデル.....	21
2.4.2 基礎式.....	21
2.4.3 解析方法.....	22
2.5 結果及び考察.....	23
2.5.1 放射率の算出.....	23
2.5.2 タンパク質変性速度パラメータの算出.....	23
2.5.3 収縮率.....	29
2.5.4 牛ヒレ肉焼成過程における温度履歴及び現象把握.....	32
2.5.5 牛ヒレ肉焼成過程における温度及びタンパク質変性シミュレーション.....	35
2.6 結論.....	38
2.7 参考文献.....	38

第3章 鶏モモ肉における伝熱シミュレーション構築	41
3.1 はじめに	41
3.2 実験方法	41
3.2.1 鶏モモ肉焼成実験	41
3.2.2 鶏モモ肉色彩値取得	42
3.2.3 MRI 測定	43
3.2.4 オープン伝熱量における放射割合の算出	43
3.3 COMSOL Multiphysics による伝熱解析	45
3.2.1 解析モデル	45
3.2.2 基礎式	45
3.2.3 解析方法	47
3.4 結果及び考察	52
3.4.1 鶏モモ肉温度履歴及び重量変化	52
3.4.2 鶏モモ肉焼成過程における色彩値取得	53
3.4.3 プロトン強調画像	55
3.4.4 オープン内における伝熱量の割合測定	58
3.4.5 鶏モモ肉焼成過程における温度予測	59
3.5 結論	63
3.6 参考文献	64
第4章 丸鶏における伝熱シミュレーション構築	65
4.1 はじめに	65
4.2 実験方法	65
4.2.1 空洞系	65
4.2.2 充填系	66
4.3 COMSOL Multiphysics による伝熱解析	67
4.3.1 解析モデル	67
4.3.2 基礎式	67
4.3.3 解析	69
4.4 結果及び考察	73
4.4.1 丸鶏焼成過程における温度履歴及び重量変化の比較	73
4.4.2 丸鶏空洞系における温度及び水分濃度シミュレーション	75
4.4.3 丸鶏充填系における温度及び水分濃度シミュレーション	78
4.5 結論	80
4.6 参考文献	80
第5章 総括	81
謝辞	83

第1章 序論

1.1 本研究の背景及び目的

食品の調理過程において食材の加熱は必要不可欠であり、食生活において欠かせない工程である。加熱調理は、食品の安全性やおいしさを高めること、栄養の消化吸収性向上といった目的があり、一般的な加熱方法では、焼く、煮る、茹でる、蒸すなどが挙げられる。この加熱過程に用いられる焼成機器として、オーブンは工業的にも一般家庭においても使用される機会は多く、調理機器として広く知られている。オーブン加熱では、食品を均一に加熱出来るだけでなく、複数食品を同時に調理可能という利点があり、その構造や操作も容易である。一方、加熱温度及び調理時間の設定は経験的に決定されており、食品個々の形状や大きさに応じた調理の最適化は未だ難しいといえる。加熱不足では微生物学的衛生上の問題、過加熱では有害因子の発現やフードロス等の問題があり、調理の最適化及びその技術の確立は食品の品質向上及び安全性確保の観点からも要求されている。更に、オーブン加熱における食品内の熱物質移動を表す数学モデルの構築は、スケールアップや新しい機器及び条件での調理の最適化に向けて重要であり、特に求められる。

また近年、日本では社会環境や生活習慣の変化などによって、食生活を取り巻く環境も大きく変化しており、いわゆる“食の欧米化”が進行している。実際に、魚介類の消費量が長期的に減少している一方、肉類の消費量は年々増加しており、平成30年度食料需給表によると年間1人当たりの魚介類の消費量は23.9 kgであるのに対し、肉類の消費量は33.5 kgと魚介類の消費量を上回っている[a]。すなわち、現在日本において肉類を食する機会の方が魚を食する機会より多いといえ、実際に家庭における肉類の支出も増加傾向にある[b]。一方で、肉類の加熱不足や不十分な調理による食中毒も多発しており[1, 2, c]、適切な加熱は美味しさを向上させるだけでなく、安全性や健康衛生上も必要不可欠である。

そこで、本研究では肉類を対象としたオーブン加熱における食品内の熱物質移動を表す数学モデルの構築を目指し、オーブン加熱過程における温度シミュレーションの確立を目的とする。

肉類の伝熱及び物質移動シミュレーションにおいては、これまで主に牛肉[3, 4, 5, 6]、鶏肉[7, 8]、豚肉[9, 10]について研究例が報告されている。食品内での伝熱解析では、基本的に Fourier の法則に基づいた方程式が用いられ、食品内部の水輸送に関する熱物理特性が組み込まれる場合が多い[7, 11]。フーリエの法則に基づき伝熱解析を行うためには、対象とする食材の熱物性値が必要であり、対象である食材に即した値を用いることが重要であると考えられている[12]。また N. Singh *et al.* (1984)は、肉類の焼成において水分損失は重要な要因として水分移動をモデル化する必要性を示しており[13]、肉類では主に伝熱解析だけでなく水分移動についても考慮した解析が行われている。水分移動に関して、H. Chen *et al.* (1998)は、チキンパテの伝熱及び拡散に基づいた水分移動についてモデル化している[14]。一方、R. G. M. van der Sman (2007)は、肉調理中の水分移動について純粋な拡散モデルでは適切に説明できないとして、Flory-Rehner 理

論とダルシーの法則を使用したモデル，すなわちタンパク質変性に伴う圧力勾配に基づいた水分輸送のモデルを提案している[15]．そして A. H. Feyissa *et al.* (2013)は，焼成過程における肉の微細構造（透過性），保水力及び弾性率の変化の影響を組み込んだモデルを開発しており[16]，物理的性質を考慮した解析についても研究が進んでいる．

一方，モデルや解析に関しては単純化したものが主であり，実際の調理場面に応じた，食材の反転や皮の剥離などを考慮した例は少ない．また，オープン加熱で重要となるヒーターの位置や照射角度を反映させたオープン全体としての解析も極めて少ない．オープン調理過程の定量的な理解はオープン調理のスケールアップ，新たな調理条件の検討，自動制御の適用に大いに有効であり，フードロス解消にも貢献可能であると考えられる．この為，本研究では，肉類を対象としてオープン調理過程の解析を行った．その妥当性を検証し，オープン調理過程におけるシミュレーション技術の向上及び解析方法の確立を目指した．

1.2 オープン加熱の基礎

1.2.1 オープンについて

オープンとは，囲われた空間内で食品を加熱する加熱機器（焼成機器）であり，家庭や厨房において一般に用いられる調理機器である．元々はヨーロッパで育った加熱機器であり，本来，土やレンガで築かれ，その下部で火を燃やしたものであったとされている[17]．現在では，材質のほとんどが金属製であり，熱源としてはガスや電気を使用される場合が多い[18]．オープン加熱では，食品を加熱する際，熱された空気からの対流伝熱，ヒーターや庫壁からの放射伝熱，天板からの伝導伝熱の影響を受けており[19]，オープン庫内での伝熱様式は複雑である．そして，その伝熱様式の違いにより，主に放射式（自然対流式）と強制対流式に分類され，現在では，その形状や熱源の違い，加熱様式の違いにより，多種多様なオープンが存在する[20]．

また，オープン加熱の特徴として，周囲から同時に加熱することが可能なため，体積の大きいものや形を崩したくないものの加熱に適しており，一般に肉類を塊で加熱する場合や型に入れたケーキ，クッキーなどの菓子類の加熱に用いられる[17]．更に，オープン調理の際には，食品を庫内にいれたのち加熱温度と加熱時間を設定するだけで調理は完了するため，簡便であるほか，調理時間の有効活用ができることや手間がかからない点にも特徴があるといえる．

1.2.2 伝熱機構

オープンの伝熱機構は，対流，放射，伝導といった複数の伝熱から構成されており，オープン加熱の際にはこれらが複合的に関与するため，その解析は複雑である．ここで，強制対流式ガスオープン及び電気オープン（自然対流式）それぞれの伝熱機構の特徴について Fig. 1-1 に示す．

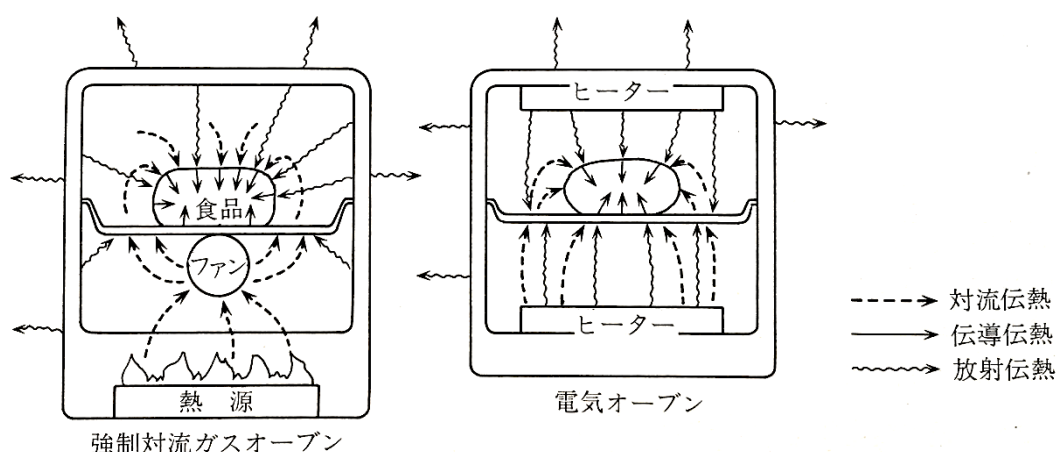


Fig. 1-1 Heat transfer mechanism in the oven [17]

強制対流式オーブンでは庫内にファンが取り付けられており、熱風を強制的に対流させる仕組みとなっている。この為、対流伝熱による影響が主となり、オーブンの加熱能に占める放射の伝熱の割合は25~40%にとどまるとされている[21]。一方、ヒーター露出型の電気オーブンでは自然対流のため、放射の影響が主となっており、加熱能のうち 70~80%が放射伝熱によって占められるとされている[21]。以上述べたように、オーブンの伝熱機構は複合的であるが、その様式によって加熱における主たる伝熱は異なることがわかる。本研究では、初めに自然対流式の電気オーブンを想定した研究を行った後、強制対流式の電気オーブンを用いて研究を進める。

1.3 肉類と加熱調理

1.3.1 肉類の成分及び特徴

肉類とは、食料需給表においては、牛、豚、鶏、鯨、馬、めん羊、やぎ及びうさぎの肉のこととされているが [d]、主として牛肉、豚肉、鶏肉が扱われる場合が多い。食肉の化学的成分は、家畜の種類、年齢、性別、栄養状態あるいは筋肉部位によって異なるが、その主成分はタンパク質と脂肪であり、炭水化物の含有が少ない点に特徴がある[22]。また、全成分に対する割合はごくわずかであるが灰分としてカルシウム、リンなどの多くのミネラルやビタミン類を含有することから、極めて栄養価の高い良質の食品ともいえる[22]。その成分の構成は、おおむね水分 65~70%、タンパク質 20%、脂肪 10~15%、灰分 1%と考えることができ[22]、実際に Table 1-1 では本研究で使用する牛ヒレ肉、鶏モモ肉を中心として代表的な肉類の 100 g 中に含まれる栄養素を示す。

Table 1-1 Typical meat nutrition [23]

食品名		Water [%]	Protein [%]	Fat [%]	Carbohydrate [%]	Ash [%]
牛	国産, ヒレ, 赤肉, 生	64.6	19.1	15.0	0.3	1.0
	輸入, ヒレ, 赤肉, 生	73.3	20.5	4.8	0.3	1.1
豚	国産, もも, 皮下脂肪なし, 生	63.4	20.2	15.5	0.6	1.0
	中型種肉, もも, 皮下脂肪なし, 生	69.6	21.3	7.8	0.2	1.1
鶏	若鶏, もも, 皮なし, 生	76.1	19.0	5.0	0	1.0
	皮, もも, 生	41.6	6.6	51.6	0	0.2

代表的な肉類の栄養素構成比率は先に記載した割合とおおむね一致することが確認できる。豚や鶏において脂質割合がやや低い値を示したのは皮下脂肪や皮なしの値を使用しているためであり、脂質を多く含有する皮下脂肪及び皮を含めた値で考えると脂質の割合は 15%前後となる。

また、肉類や動物性たんぱく質を摂取する肉食の文化は、我々の進化の歴史や食生活におけるエネルギー摂取の観点から重要な役割を担っており[24]、今日の食生活において肉類は非常に好まれる食材である。これら肉類の消費量について、日本では年々増加傾向にあり、平成 30 年度には年間 1 人当たり消費量は 33.5 kg にものぼるとされている[a]。世界的に見てもその消費量は莫大であり、2020 年には全体で約 2.6 億トン、牛肉に関しては約 6 千万トン、鶏肉に関しては約 1 億トンの消費が見込まれている[e]。

本研究においては、牛ヒレ肉、鶏モモ肉及び丸鶏を対象として実験を行う。ヒレ (Fillet) は、サーロイン部の脊椎内側に付着している細長い筋肉で、運動にほとんど使われない筋肉のため、肉のきめが細かいほか脂肪も少なく、最も柔らかい部位として知られており、切断面を空気中に放置すると、肉の変色の程度が大きいことも特徴である[25]。鶏モモ肉は、脚からもものつけ根にかける部分で、運動するときによく使われる筋肉が多いため、肉質はむね肉に比べると硬めであることが知られており、鶏肉の中では最も鉄の含有量が多く、肉色が濃いことが特徴として挙げられる[25]。

1.3.2 肉類の構造

我々が“肉”と称して利用する体組織は筋肉であり、厳格な意味で食肉として利用される筋肉は骨格筋である[26]。この骨格筋は筋線維と間質によって構成されており、間質には、結合組織のほかに、血管、神経、脂肪組織などがある[26]。このうち筋線維の長軸方向に並行して収縮構造をもった円筒状の筋原線維が多数存在しており、位相差顕微鏡で確認すると、規則正しい連続した横紋構造がみられる。この横紋は、密度が低く単屈折性（等方性）を示す I 帯 (isotropic band) と呼ばれる明るい部分と密度が高く複屈折性（異方性）を示す A 帯 (anisotropic

band) と呼ばれる暗い部分によるものであり、更に拡大して観察すると A 帯の中央部には細い M 線、その両側は多少電子密度が低い H 帯が存在し、I 帯の中央に Z 帯と呼ばれる電子密度の高い線がみられる[26, 27, 28]. この Z 線から Z 線までを筋節 (sarcomere) と呼び、筋原線維の最小単位となる. この筋節は 2 種類のフィラメント、すなわち太いミオシンフィラメントと細いアクチンフィラメントで構成され、Z 線によって仕切られる[27, 28].

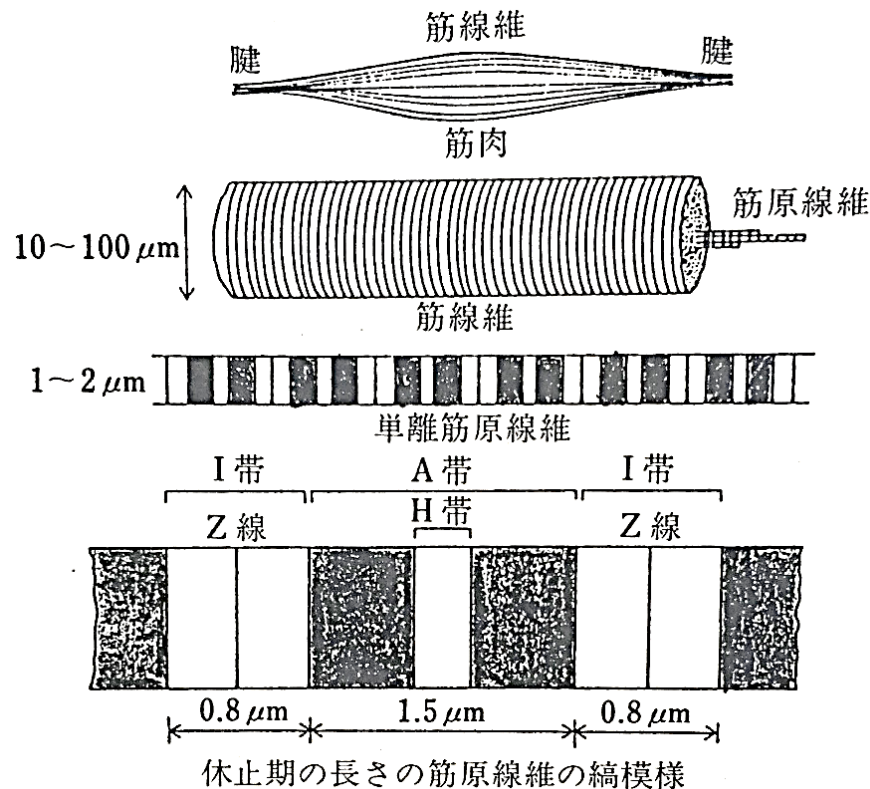


Fig. 1-2 Structure of skeletal muscle myofibrils [28]

以上、骨格筋の構造を簡単に述べてきたが、筋肉タンパク質については、その存在様式に基づいて筋線維タンパク質と結合組織タンパク質に 2 大別される[26]. また、各タンパク質の含量は、一般に筋原線維構成タンパク質が 50~60%, 細胞液に溶存するタンパク質が 25~30%, 筋線維中の細胞小胞体のタンパク質が 5%, 結合組織のタンパク質が 5% であり、筋原線維のタンパク質が量的にも骨格筋組織の主体であることがわかる[26]. この中でもミオシン (Myosin) は筋原線維の主要構成成分であり、全筋原線維タンパク質の 43% を占め、筋原線維において、先程記載した太い線維 (ミオシンフィラメント) の主成分である[26, 27, 28]. 次いで全筋原線維タンパク質の 22% を占めるのがアクチン (Actin) であり、細い線維 (アクチンフィラメント) を構成している[26, 27, 28]. これらミオシンとアクチンは筋収縮の素反応を司ることから収縮タンパク質と呼ばれ[26], 収縮を考慮するうえで極めて重要なタンパク質といえる. ここで、筋

節（サルコメア）と各フィラメントの構造について以下の Fig. 1-3 に示す。

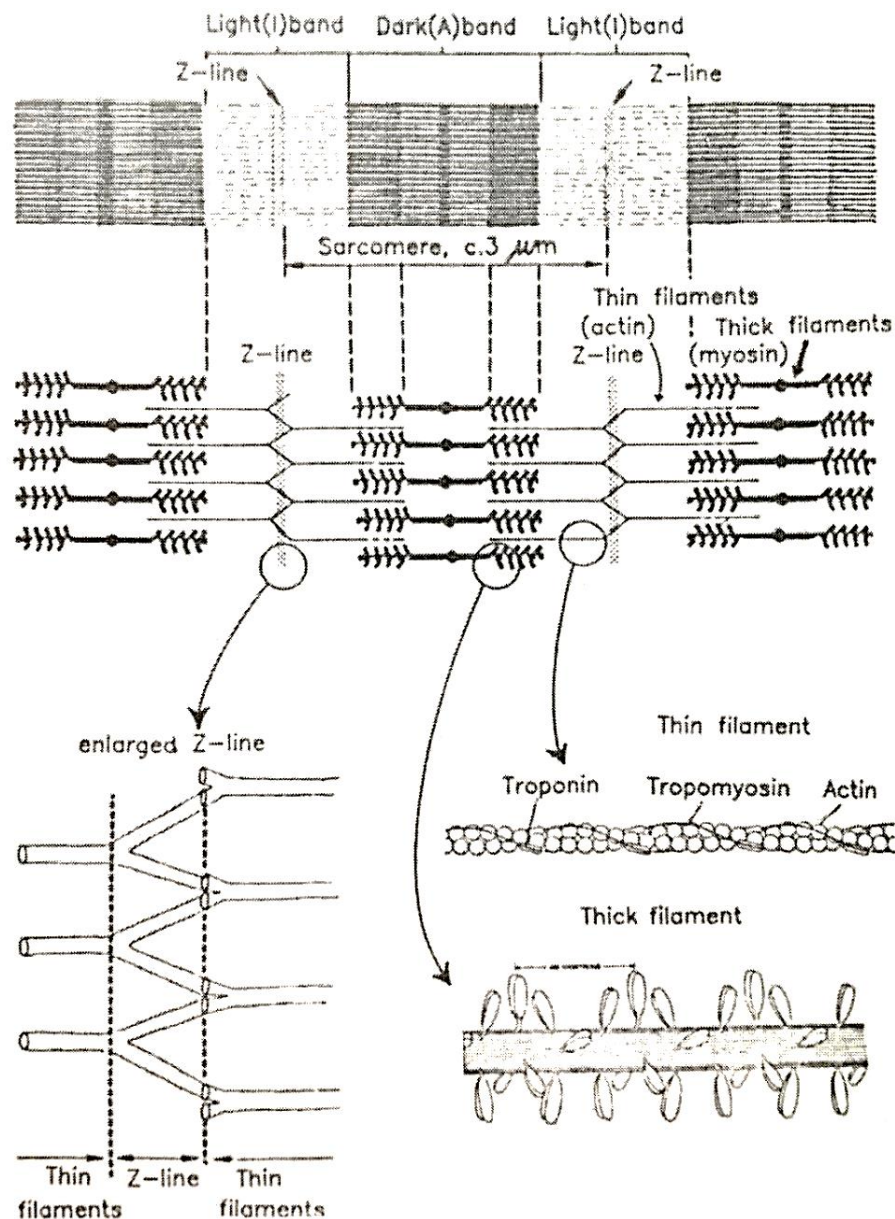


Fig. 1-3 The structural build-up of the sarcomere, the thin and thick filaments [29]

次に、結合組織のタンパク質についてであるが、その特徴としては、線維状であり、筋肉組織を一定の状態に保持する役割を果たしている[28]. その中でもコラーゲンは結合組織の主要なタンパク質であり、直接食肉の硬さに反映され、特に不溶性コラーゲンの量が硬さと関係する[28]. 家畜の加齢による食肉の硬化は、コラーゲン分子が分子内あるいは分子間に架橋を形成して不溶性になるためであり、結合組織の多い部位の食肉を長時間調理すると柔らかくなるのは、コラーゲンが加熱され分解し、水溶性のゼラチンに変化する（ゼラチン化）ためである[28, 30].

1.3.3 加熱調理における変化

肉類は一般に加熱して供される場合が多く、加熱によって、肉の構成成分は物理的・化学的に影響を受け、その結果として肉の硬さや柔らかさ、色、味、香りなどが変化する[30].

物理的变化としては、加熱によるタンパク質の変性が挙げられ、タンパク質変性に伴い肉は収縮し、水分や油脂成分が流出するため、重量は減少する。筋原繊維タンパク質の主たる構成成分であるミオシンは 55°C、アクチンは 70~80°C で凝固すると言われており[31, 32], 筋繊維全体は 65°C 付近から収縮するとされている[33]. この為、70°C 以上で加熱した場合、ミオシン、アクチン、アクトミオシンの網状構造の間に保持されている水が収縮により押し出され、保水性の低下をもたらし、肉の重量は 20~40% 減少する[30]. そして、タンパク質変性に伴い、テクスチャーの変化も生じる。テクスチャーの変化は、主として筋原繊維タンパク質と、結合組織の主成分であるコラーゲンの変化に影響され、加熱中の肉の硬さや柔らかさは筋原繊維タンパク質の変性凝固による硬化の進行と、コラーゲンの収縮による硬化、それに続くゼラチン化の軟化の進行との兼ね合いで決定されるとされている[35]. 具体的には、80°C 付近に達するとミオシン、アクチンの熱変性は完了し、筋周膜などの結合組織が収縮して肉は硬くなるが、90°C 以上で長時間加熱した場合には結合組織コラーゲンがゼラチン化し、筋繊維がほぐれて肉は柔らかくなる[30].

化学的变化としては、メイラード反応に代表される褐変反応などが挙げられ、肉色や風味に影響を与える。肉色については、生肉では主として筋肉組織内に存在するミオグロビン由来により赤色を呈しているが、加熱によってミオグロビンのタンパク質部分であるグロビンが変性し、同時にヘム色素も酸化されることで褐色になる[35]. 肉色の変化については、加熱方法、加熱時間、加熱温度などに影響を受けるが、特に加熱温度の影響が最も大きいとされている[34]. 特に、牛肉では肉の焼き加減が重要視されており、Table 1-2 のように分類される。

Table 1-2 Degree of roast and internal temperature of beef [35]

焼き加減	内部温度	特徴
レア	55~65°C	肉の内側のほとんどまたは中心部は鮮赤色、切ると赤い肉汁が出る
ミディアム	65~70°C	外側は灰色がかっているが内側はバラ色で赤身が少ない、切ると肉汁は少ししか出ない
ウェルダン	70~80°C	熟成条件や温度上昇速度によって色は異なるが一様に灰色、内部温度が高く切ると肉汁は出ない
ベリーウェルダン	90~95°C	加熱中の重量減が大きく、長時間の加熱で肉の筋繊維はばらばらに崩れる傾向にある

また、風味では生肉において弱い血液に匂いや動物特有の臭気の混じった匂いをもっているが、加熱することで、香ばしいローストした肉の焙焼香気が感じられる。これは、赤身肉の水溶性成分（アミノ酸、ペプチド、糖類など）や肉の脂質、脂質中の微量成分から加熱中に酸化、分解、熱分解及びメイラード反応により生成したものとされている[35]。これらのように肉類の加熱における変化では、これらの物理的・化学的变化が同時に進行するため、極めて複雑な現象といえる。

1.4 本論文の構成

本論文は、以下の5章によって構成される。

第1章では、本研究の背景及び目的について明示するとともに、加熱機器として用いるオーブンの特徴及び伝熱機構について説明した。また、本研究対象とした肉類の成分及び特徴とその構造について述べ、加熱調理における変化について説明した。

第2章では、牛ヒレ肉を対象とした輻射式オーブン加熱について、温度及びタンパク質変性シミュレーションを行った。ここでは、オーブンの加熱特性を明らかにすると同時に、牛ヒレ肉について、変性速度定数の温度依存性を示差走査分析法（Differential Scanning Calorimetry : DSC）により実測した。また、タンパク質変性度合いに対する収縮率についても比重法を用いて実測した。

第3章では、骨付き鶏モモ肉を対象とした強制対流式オーブン加熱について、温度及び水分移動シミュレーションを行った。ここでは、加熱過程における重量変化についても予測したと同時に、水分移動の様子についてもMRI法（Magnetic Resonance Imaging : MRI）により実測し、水分移動について検討した。

第4章では、丸鶏を対象とした強制対流式オーブン加熱について、温度シミュレーションを行った。ここでは、丸鶏空洞への詰め物の有無における差異について実測及び解析を用いて比較検討した。

第5章では、本研究の総括、ならびに今後の展望を述べた。

1.5 参考文献

- 1) K. Ono, Y. Ando, R. Doi, Y. Fujiwara, Y. Hamada, K. Ohtsuka, Y. Shibata, H. Sato, T. Masutani, R. Kobayashi, K. Yanagawa; “A Food Poisoning Outbreak Caused by *Campylobacter jejuni* Associated with Barbecue”(in Japanese). Jpn. J. Food Microbiol., **20**, 83-86 (2003).
- 2) 品川邦汎; “食肉による微生物食中毒とその予防”, フェルマシア, **49**, 22-26 (2013).
- 3) E. Obuz, T. H. Powell, M. E. Dikeman; Simulation of Cooking Cylindrical Beef Roasts. Lebensm.-Wiss. u.-Technol., **35**, 637-644 (2002).

- 4) S. M. Goñi, V. O. Salvadori; Prediction of cooking times and weight losses during meat roasting. *J. Food Eng.*, **100**, 1-11 (2010).
- 5) M. A. Townsend, S. Gupta, W. H. Pitts; The Roast: Nonlinear Modelling and Simulation. *J. Food Process Eng.*, **11**, 17-42 (1989).
- 6) N. E. Bengtsson, B. Jakobsson, M. D. Sik; Cooking of beef by oven roasting: A study of heat and mass transfer. *J. Food Sci.*, **41**, 1047-1053 (1976).
- 7) F. Rabeler, A. H. Feyissa; Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convection oven. *J. Food Eng.*, **237**, 60-68 (2018).
- 8) E. Bottani, A. Volpi; An analytical model for cooking automation in industrial steam ovens. *J. Food Eng.*, **90**, 153-160 (2009).
- 9) P. Sebastian, D. Bruneau, A. Collignan, M. Rivier; Drying and smoking of meat: heat and mass transfer modeling and experimental analysis. *J. Food Eng.*, **70**, 227-243 (2005).
- 10) M. Miyahara, S. Kobata, T. Morich; “Thermal Analysis of Loin Ham by Finite Element Method” (in Japanese). *J. Jpn. Society for Food Sci. and Tech.*, **45**, 261-264 (1998).
- 11) M. J. Blikra, D. Skipnes, A. H. Feyissa; Model for heat and mass transport during cooking of cod loin in a convection oven. *Food Control*, **102**, 29-37 (2019).
- 12) 石渡奈緒美; “熱・物質移動および反応を考慮したタンパク質食品の調理工学的解析”. 東京海洋大学博士学位論文 (2014).
- 13) N. Singh, R. G. Akins, L. E. Erickson; Modeling heat and mass transfer during the oven roasting of meat. *J. Food Process Eng.*, **7**, 205-220 (1984).
- 14) H. C. Chang, J. A. Carpenter, R. T. Toledo; Modeling Heat Transfer During Oven Roasting of Unstuffed Turkeys. *J. Food Sci.*, **63**, 257-261 (1998).
- 15) R. G. M. van der Sman; Moisture transport during cooking of meat: An analysis based on Flory-Rehner theory. *Meat Sci.*, **76**, 730-738 (2007).
- 16) A. H. Feyissa, K. V. Gernaey, J. A. Nissen; 3D modelling of coupled mass and heat transfer of a convection-oven roasting process. *Meat Sci.*, **93**, 810-820 (2013).
- 17) 渋谷祥子編; “食品加熱の科学”, 朝倉書店, 1996, pp.122-134.
- 18) 渋谷祥子; “加熱調理機器 (I) 加熱調理機器の種類とオーブンの加熱能”. *日本調理科学会誌*, **22**, 26-31 (1989).
- 19) K. Sugiyama; “Baking in Oven” (in Japanese). *J. the integrated study of dietary habits*, **13**, 251-255 (2003).
- 20) 佐藤秀美; “オーブンによる加熱調理”. *日本調理科学会誌*, **33**, 137-143 (2000).
- 21) 渋谷祥子; “「焼く」調理の熱科学”. *熱物性*, **5**, 317-322 (1991).
- 22) 沖谷明紘編; “シリーズ《食品の科学》 肉の科学”, 朝倉書店, 1996, p. 48.
- 23) 文部科学省 科学技術・学術審議会 資源調査分科会編; “日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂) ”, 2019, pp.363-385.
- 24) R. Wrangham; “Catching Wire -How Cooking Made Us Human-“(in Japanese), T. Yoda tr., NTT Publishing, 2010, p. 7, 63.

- 25) 沖谷明紘編; “シリーズ《食品の科学》 肉の科学”, 朝倉書店, 1996, p. 31, 37.
 - 26) 沖谷明紘編; “シリーズ《食品の科学》 肉の科学”, 朝倉書店, 1996, pp. 39-41.
 - 27) 鈴木淳士, 渡部終五, 中川弘毅編; “食品成分シリーズ タンパク質の科学”, 朝倉書店, 1998, pp. 22-47.
 - 28) 山本啓一, 丸山工作; “Bioscience Series 生命現象への化学的アプローチ 筋肉”, 化学同人, 1986, pp.11-66.
 - 29) E. Tornberg; Effect of heat on meat proteins – Implications on structure and quality of meat products. *Meat Sci.*, **70**, 493-508 (2005).
 - 30) 下村道子, 橋本慶子編; “調理科学講座 5 動物性食品”, 朝倉書店, 1993, pp. 8-25.
 - 31) C. S. Cheng, F. C. Parrish Jr; Heat-induced changes in, myofibrillar proteins of bovine longissimus muscle. *J. Food Sci.*, **44**, 22-24 (1979).
 - 32) R. Hamm, F. E. Deatherage; Changes in hydration, solubility and charges of muscle proteins during heating of meat. *J. Food Sci.*, **25**, 587-610 (1960).
 - 33) 武恒子, 木寺博子, 右田節子, 石川寛子; “食と調理学”, 弘学書院, 1984, p. 138.
 - 34) 食肉加工シリーズ編集委員会編; “<食肉加工シリーズ>2 食肉加工のユニット・プロセス”, 光琳書院, 1963, p. 200.
 - 35) 沖谷明紘編; “シリーズ《食品の科学》 肉の科学”, 朝倉書店, 1996, pp. 112-118.
-
- a) 農林水産省; “食料需給表, 確報, 平成 30 年度食料需給表”, 2020.
<https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/fbs/> (Dec. 10, 2020)
 - b) 総務省統計局; “家庭調査, 家計収支編, 時系列データ, 総世帯, 品目分類, 支出金額”, 2020
<http://www.stat.go.jp/data/kakei/sokuhou/tsuki/index.html#nen> (Dec. 10, 2020)
 - c) 厚生労働省; “食中毒統計資料”, 2020.
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryoku/shokuhin/syokuchu/04.html
(Dec. 11, 2020)
 - d) 農林水産省; “食料需給表の概要, 7. 肉類”.
<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/zyukyu/gaiyou/index.html> (Dec. 22, 2020)
 - e) Foreign Agricultural Service, USDA; “Livestock and Poultry: World Markets and Trade”, 2020.
https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf (Dec. 22, 2020)

第2章 牛ヒレ肉における伝熱シミュレーション構築

2.1 はじめに

本研究では、肉類を対象としたオープン調理過程の解析、伝熱シミュレーションの構築を目的としている。本章では、最初にこれら肉類の中でも形状成型が容易であり、オープンで一般に調理される機会が多い、牛ヒレ肉を対象として研究を行った。

伝熱シミュレーションにあたって、初めに牛ヒレ肉焼成過程における温度変化や現象把握のため、焼成実験及び重量変化測定を行った。次に、試料及びフライパンが受ける放射の影響を知るために、熱電対と放射温度計の温度差から放射率を算出した。そして、テクスチャーや品質に大きな影響を及ぼすタンパク質変性に関しても予測するため、DSC (Differential Scanning Calorimetry) -Dynamic 法により変性速度定数を取得した。また、タンパク質変性に伴う収縮率とタンパク質未変性率との関係を明らかにするため、比重法により加熱に伴う体積変化を実験的に求めた。最後に、求めたパラメータを用いて牛ヒレ肉を対象試料とした温度及びタンパク質変性シミュレーションの構築を行った。

2.2 理論

2.2.1 放射率

本研究で用いる赤外線放射温度計では、物体から放射された赤外線量により、基準温度・放射率による調整のあと、温度に変換され表示される。ここで基準となる、表面に入射された光を反射も透過もせず完全に吸収する理想的な物体のことを黒体と言い[a]、黒体の放射する放射エネルギーは Stefan-Boltzmann の法則より、次式 (2.1) で表される。

$$E = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

E : 放射エネルギー [W/m²]

T : 絶対温度 [K]

σ : 5.67×10^{-8} [W/(m²·K⁴)] (Stefan-Boltzmann 定数)

しかし、実際の物体では、多少なりとも反射、透過があるため[a]、黒体より放射エネルギーは小さくなり、

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.2)$$

ここで、 ε [-]は放射率と呼ばれ、物体固有の定数として知られており、理想的な黒体を 1、完全反射体を 0 とする 0~1 の値で定義づけられる[a].

また、物体はエネルギーを放射すると同時に吸収もしている[1]. 実際の固体表面に放射エネルギーが吸収されたとき、一部は反射し、一部は吸収あるいは透過する. 照射されたエネルギー量に対して、吸収、反射及び透過する量の割合を α, ρ, τ とすると

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.3)$$

ここで、物体が十分に厚い場合には、透過する量を見捨てる($\tau = 0$)ため、

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.4)$$

更に、この場合において、吸収率 α と放射率 ε は等しいことが知られている($\alpha = \varepsilon$)ため[1], 光が透過しない物体の放射率 ε と反射率 ρ の関係は、

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (2.5)$$

以上のように表すことができる.

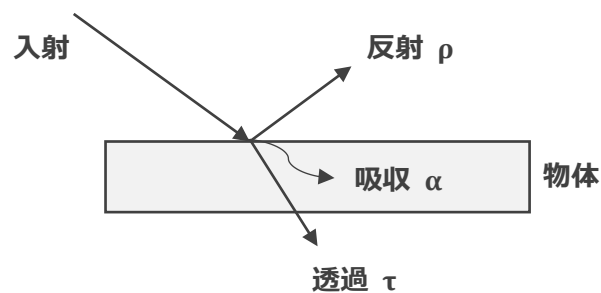


Fig. 2-1 Reflection, absorption, transmission of radiation

また、ここで本研究における放射率補正モデルを以下の Fig. 2-2 に示した.

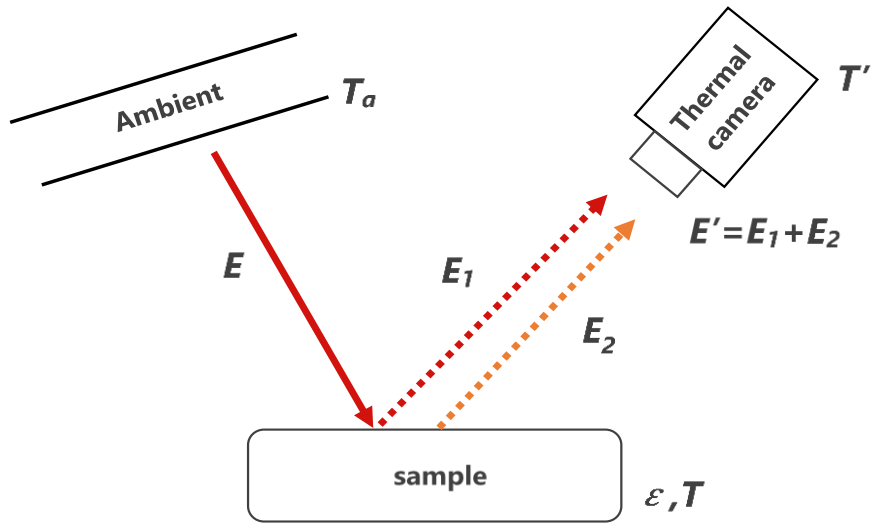


Fig. 2-2 Emissivity correction models [2]

まず、式(2.1)より、放射率 1.0 に設定した放射温度計が受けたエネルギー E' [W/m^2]と放射温度計で測定した試料の表面温度 T' [K]の関係は(2.6)式で表される.

$$E' = \sigma T'^4 \quad (2.6)$$

また、 E' は周囲から放射されたエネルギーの一部を食品表面が反射したエネルギー E_1 [W/m^2]と食品表面が放射したエネルギー E_2 [W/m^2]の合計であることから

$$E' = E_1 + E_2 \quad (2.7)$$

更に、本試料では照射されたエネルギーが透過しないと考えられるため、(2.2), (2.5)式より、

$$E_1 = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.8)$$

$$E_2 = (1 - \epsilon)E \quad (2.9)$$

環境からの放射エネルギーに関する放射率を 1 とすると、物体の放射率 ϵ は、

$$\begin{aligned}
E' &= E_1 + E_2 = \sigma T'^4 \\
\Leftrightarrow \quad \varepsilon \sigma T^4 + (1 - \varepsilon)E &= \sigma T'^4 \\
\Leftrightarrow \quad \varepsilon \sigma T^4 + (1 - \varepsilon)\sigma T_a^4 &= \sigma T'^4 \\
\Leftrightarrow \quad \varepsilon &= \frac{T'^4 - T_a^4}{T^4 - T_a^4} \tag{2.10}
\end{aligned}$$

T' : 放射温度計で測定された温度 [K]

T : 熱電対によって測定された温度 [K]

T_a : 雰囲気温度 [K]

以上のように求めることができる。

2.2.2 タンパク質熱変性速度論[3]

タンパク質の熱変性速度は、未変性のタンパク質濃度 C [mol/g_{meat}] に比例する一次反応と仮定すると、速度式は(2.11)式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = -kC \tag{2.11}$$

k : タンパク質熱変性速度定数 [1/min]

ここで、未変性のタンパク質濃度を初期濃度で無次元化した値（未変性率）を X [-] とすると、(2.11)式は(2.12)式で表される。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{C_t}{C_0} \right) = \frac{dX}{dt} = -k(T)X \tag{2.12}$$

C_0 : タンパク質初期濃度 [mol/g]

C_t : 時間 t における未変性タンパク質濃度 [mol/g]

また、タンパク質熱変性速度定数 k の温度依存性は、(2.13)式に示すアレニウスの式に従うとする。

$$k = Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.13)$$

E_a : 活性化エネルギー [kJ/mol]
 R : 気体定数 ($=8.314 \times 10^{-3}$) [kJ/mol·K]
 T : 温度 [K], Z : 頻度因子 [1/min]

2.2.3 DSC-Dynamic 法[3]

タンパク質が DSC 測定により一定の昇温速度で加熱されると、加熱温度と昇温速度の関係は(2.14)式で表される。

$$dT = \beta dt \quad (2.14)$$

β : 昇温速度[°C/min]

従って、(2.12)式及び(2.13)式は(2.15)式に置き換えられる。

$$\begin{aligned} \beta \frac{dX}{dT} &= -ZX \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \\ \frac{\beta}{Z} \frac{d^2T}{dT^2} &= -\left[-\frac{Z}{\beta} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) + \frac{E_a}{RT^2}\right] X \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

また、タンパク質未変性率 X とタンパク質の熱変性に要した吸熱エンタルピー ΔH [J/g]の関係は(2.16)式で表される。

$$X = \frac{\Delta H_T}{\Delta H_0} \quad (2.16)$$

ΔH_T : 温度 T 及び時間 t におけるタンパク質の熱変性に要するエンタルピー [J/g]

ΔH_0 : タンパク質の熱変性に要するエンタルピー [J/g]

DSC 曲線は温度 T もしくは時間 t の関数であるため、タンパク質未変性率 X と吸熱ピーク T_{max} の関係は、(2.17)式で表される。

$$\frac{d^2X}{dT^2} \Big|_{T=T_{max}} = 0 \quad (2.17)$$

また、(2.15)式及び(2.17)式より、DSC で観測された吸熱ピーク T_{max} と昇温速度 β の関係は(2.18)式で表される。

$$\begin{aligned} -\frac{Z}{\beta} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{max}}\right) + \frac{E_a}{RT_{max}^2} &= 0 \\ \ln\left(\frac{\beta}{T_{max}^2}\right) &= \ln\left(\frac{ZR}{E_a}\right) - \left(-\frac{E_a}{RT_{max}}\right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

つまり、(2.18)式に従い OZAWA プロット $\left(-\ln\left(\frac{\beta}{T_{max}^2}\right) \text{ vs. } 1/T_{max}\right)$ を実施することで、各タンパク質の速度パラメータが算出可能となる。

2.3 実験方法

2.3.1 牛ヒレ肉焼成実験

実験試料として、牛ヒレ肉（オーストラリア産、肉のハナマサ）を 5°C で冷蔵保管したものを用いた。冷蔵保管された試料は30 min 常温放置した後、厚さ25.4 mm（1"）×直径60.0 mmの円柱形にカットし、重量を測定した。その後、牛ヒレ肉の上面（表面）、下面（裏面）及び中心、雰囲気、フライパン（直径26 cm、本体：アルミニウム合金、(株)ニトリ）表面、ヒーターにK型熱電対（東洋熱科学(株)）を各々設置したのち、 20°C に設定した低温恒温槽（FMU-054I, 福島工業(株)）で恒温になるまで放置した。恒温になった後、サラダ油を薄く塗ったフライパンの中心に牛ヒレ肉を置き、火力設定“1”（消費電力1.0 kW）で30 min 予備加熱をした上火式電気焼成器（GNU-31, ニチワ電機(株)）で焼き具合がMediumとなるよう表面6 min、裏面4 min 加熱を行った。この際、上火式電気焼成器をオープン構造とするため、アルミ製のガードによって前面に蓋をした。また加熱後、試料重量を測定し、重量損率を以下の(2.19)式より求めた。

$$\text{Weight loss ratio [\%]} = \frac{W_b - W_a}{W_b} \times 100 \quad (2.19)$$

ここで, W_b : 加熱前重量 [g], W_a : 加熱後重量 [g]

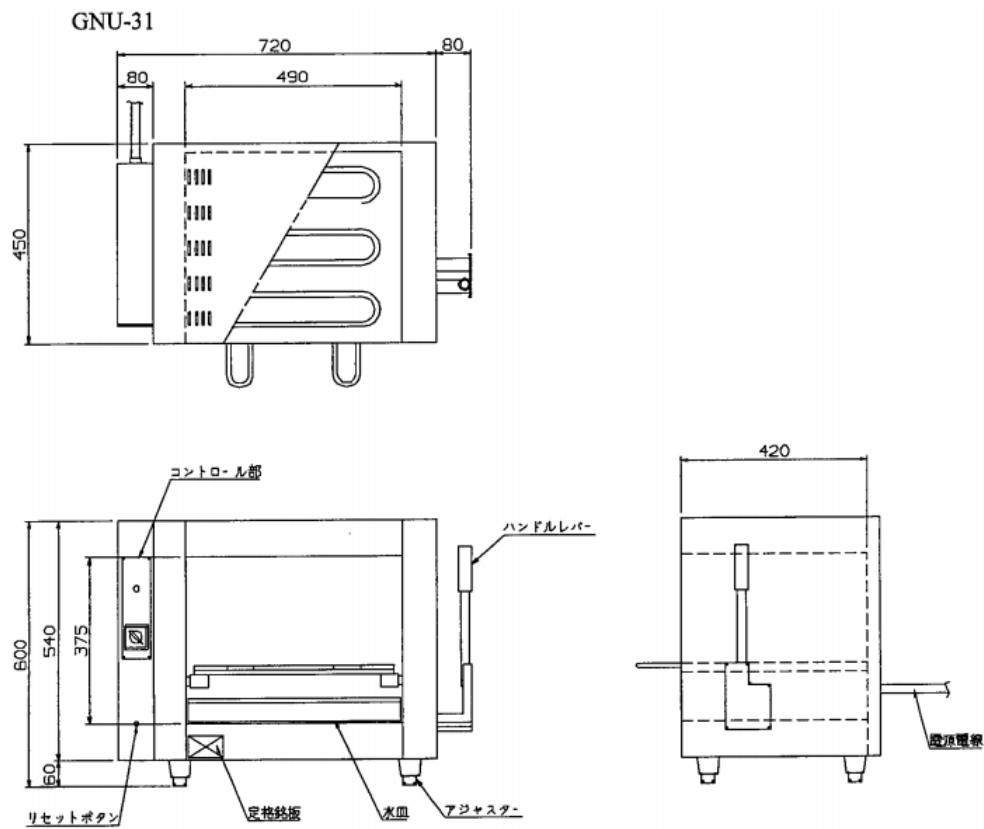


Fig. 2-3 Appearance of the top-fired electric heating machine (from the instruction manual)

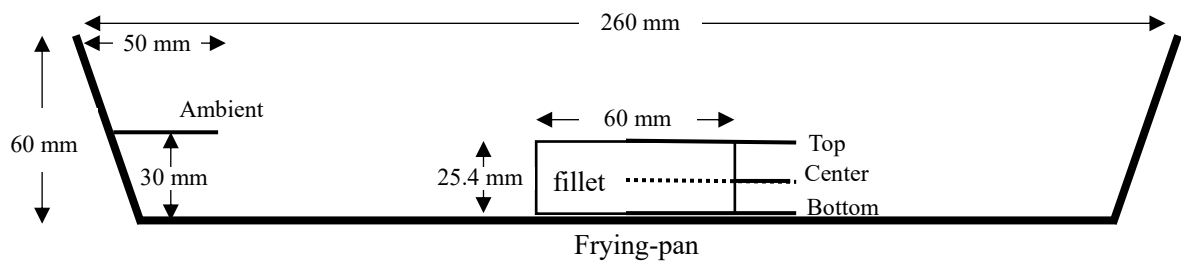


Fig. 2-4 Thermocouple location

Table 2-1 Heating conditions in this experiment

	上火式電気焼成器	オープン記載マニュアル
Thickness	24.5 mm	1”
Level	“1” (1.0 kW)	Hi
Rack position	15 cm from heater	5
Cooking time	6 min	6:00-6:30 (1st side)
	4 min	4:30-4:00 (2nd side)

2.3.2 放射率測定

(1) 牛ヒレ肉

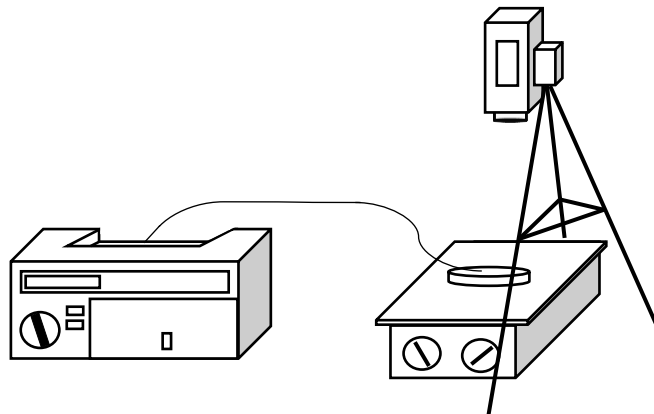
厚さ 3 mm にカットした牛ヒレ肉（オーストラリア産，肉のハナマサ）の表面中心に K 型熱電対（東洋熱科学(株)）をカプトンテープ及びクリップを用いて固定し，40℃に設定したホットプレート（IKA® C-MAG HS7）上に載せ，温度が一定になるまで放置した。

牛ヒレ肉の温度が一定になった後，放射率を 1.0 に調整した赤外線放射温度計（サーモレーサ TH7102WVS, NEC 三栄（株））によって，熱画像を撮影し，(2.10)式より放射率を求めた。

(2) フライパン

フライパン（直径 26 cm, 本体：アルミニウム合金, (株)ニトリ）の表面中心に K 型熱電対（東洋熱科学(株)）をカプトンテープ用いて固定し，160℃に設定したホットプレート（IKA® C-MAG HS7）上に載せ，温度が一定になるまで放置した。

フライパンの温度が一定になった後，放射率を 1.0 に調整した赤外線放射温度計（サーモレーサ TH7102WVS, NEC 三栄（株））によって，熱画像を撮影し，(2.10)式より放射率を求めた。

**Fig. 2-5** Schematic diagram of emissivity measurement

2.3.3 示差走査熱量測定 (DSC)

市販牛ヒレ肉（オーストラリア産、肉のハナマサ）を 5°C 冷蔵保管したものを試料とし、採取した約 50 mg をステンレス鋼容器（KIT No. 0319-0218）に封入した。DSC 装置（Pysis1 DSC, Perkin Elmer Inc.）にて、20°C で 5 min 温度を保持したのち、昇温速度 5, 7.5, 10 及び 12.5 °C/min の条件で 20~110°C まで測定を行った。リファレンスには、何も充填していない空の容器を用いた。測定終了後、容器を変形させ、105°C に設定した送風定温乾燥機（東京理科器械, WFO-520W）を 24 時間乾燥させ、試料の乾物重量を測定した。

2.3.4 収縮率の測定

市販牛ヒレ肉（オーストラリア産、肉のハナマサ）を 5°C で冷蔵保管したものを用いた。冷蔵保管された試料を 30 min 常温放置したのち、厚さ 1 mm × 縦 20 mm × 横 20 mm にカットした。その後、ハバード型比重瓶及び栓の重量 (m_0)、蒸留水を標線まで満たしたハバード型比重瓶の重量 (m_W) を測定したのち、試料を入れたハバード型比重瓶及び栓の重量 (m_M)、そこへ蒸留水を標線まで満たしたハバード型比重瓶 (SIBATA) の重量 (m_F) を測定した。これら測定結果より、以下の (2.20) から各試料密度を算出した。

$$d = \frac{m_M - m_0}{M_W - m_F + m_M} \times D_w \quad (2.20)$$

d : 試料密度 [g/cm³]

M_W : 比重瓶水当量 ($m_W - m_0$) [g]

m_W : 蒸留水の入った比重瓶及び栓の質量 [g]

m_0 : 空の比重瓶及び栓の質量 [g]

m_F : 試料及び蒸留水の入った比重瓶及び栓の質量 [g]

m_M : 試料の入った比重瓶及び栓の質量 [g]

D_w : 水の密度 [g/cm³]

次に、各試料をフリーザーパック（CO-OP）に空気が入らないように充填したのち、DSC-Dynamic 法により得たタンパク質変性速度パラメータを用いてタンパク質変性度分布をあらかじめ予測し、決定した加熱条件に従って、恒温湯槽（THOMAS, T-104NA）により等温加熱処理

を行った。この際の加熱条件及び各加熱条件におけるタンパク質の未変性率を Table 2-2 に示す。加熱処理後にはタンパク質変性を進行させない為、直ちに氷水で冷却した。その後、先程と同様にハバード型比重瓶を用いて各重量を測定し、密度を算出した。これら加熱前後で求めた密度より各々体積を算出し、加熱前後の体積から式 (2.21) を用いて比較することで、体積収縮率（収縮率）を求めた。

$$X_v = \frac{V_a}{V_b} \quad (2.21)$$

X_v : 体積収縮率 [-]

V_a : 加熱後体積 [m³]

V_b : 加熱前体積 [m³]

Table 2-2 Heating conditions in volume shrinkage experiments and protein non-denaturation ration

Heating condition		Total non-denaturation ratio [-]			
Temp. [°C]	Time [min]	Myosin	collagen	Actin	Total
45	2.00	0.80	1.00	1.00	0.92
	6.18	0.50	0.99	1.00	0.81
	14.37	0.20	0.97	1.00	0.69
50	11.10	0.00	0.87	1.00	0.60
55	13.90	0.00	0.40	0.99	0.51
65	3.35	0.00	0.00	0.91	0.40
	13.27	0.00	0.00	0.70	0.31
70	4.52	0.00	0.00	0.50	0.22
	10.48	0.00	0.00	0.20	0.09
75	6.33	0.00	0.00	0.00	0.00

2.4 解析

2.4.1 焼成モデル

本解析モデルとして、対象は牛ヒレ肉及びフライパンを想定し、オーブンで焼成することを考えた。試料の形状としては円筒形と仮定し、軸対称性が成り立つとした。そして、オーブン内での熱移動は対流熱伝達と壁面からの放射伝熱を考慮し、内部は熱伝導により熱移動は起こるものとして考えた。

以上をモデル化するために基礎式は熱伝導方程式を用い、パラメータは熱物性値（熱伝導度、比熱、密度）、熱伝達係数、放射伝熱係数とした。

2.4.2 基礎式

フーリエの熱伝導法則を基に、熱収支をとると、次式を得る。

$$\rho_b C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} \quad (2.22)$$

・初期条件

$$T = T_0 \quad (2.23)$$

壁面からの輻射エネルギーは試料表面で吸収され、試料内部に浸透しないとすると境界条件は次式で表される。

・境界条件

$$-k \operatorname{grad}(T) \cdot n = h_t(T_{\text{air}} - T) + \phi \sigma (T_h^4 - T^4) \quad (2.24)$$

h_t : 熱伝達係数 [J/(s・cm²・K)], T_{air} : 雰囲気温度 [K]

T_h : ヒーター温度 [K], ϕ : 総括放射伝熱係数 [-]

σ : Stefan-Boltzmann 定数 [W/(m²・K⁴)]

2.4.3 解析方法

肉焼成過程における温度及びタンパク質変性シミュレーションを行った。本シミュレーションで用いた解析モデルを Fig. 2-6 に示し、この際に用いた各物性値及びパラメータを Table 2-3, タンパク質変性に用いたパラメータを Table 2-4 に示した。

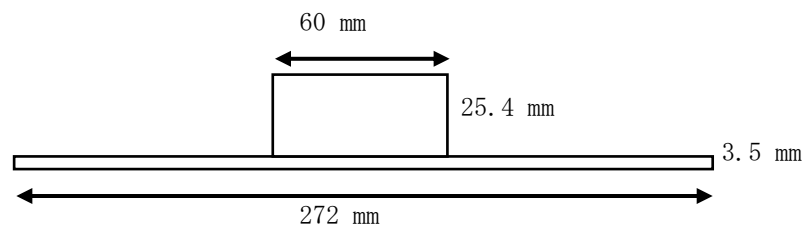


Fig. 2-6 Analysis model

Table 2-3 Physical properties and conditions used in the simulation

	Beef (fillet)	Frying pan
diameter	60 mm	260 mm
thickness	25.4 mm (=1")	3.5 mm
thermal conductivity	0.45 W/(m·K) [4]	230 W/(m·K) [b]
specific heat	3.20 J/(g·K) [4]	0.90 J/(g·K) [b]
density	1.06 g/cm ³ [4]	2.70 g/cm ³ [b]
heat transfer coefficient (Top)	13.6 W/(m ² ·K)	
heat transfer coefficient (Bottom)	12.4 W/(m ² ·K)	
radiation coefficient	0.325	0.251
heater temperature	573.07°C	
radiant direction	Top & Side	

Table 2-4 Activation energy and frequency factors used in this simulation

	E_a [KJ/mol]	Z [1/min]
myosin	247.05	4.08E+39
collagen	289.20	7.35E+44
actin	282.21	1.78E+42

本研究では牛ヒレ肉の熱物性値に関して, S. Oillic *et al.* (2011)が牛肉の調理損失速度の解析で用いた値を使用した[4]. 熱伝導率では, M. S. Baghe-Khandan *et al.* (1981)がプローブ法により測定した値 0.45~0.49 W/(m·K) [5]や新編熱物性ハンドブックにおける水分 78.5%, 0°Cにおける牛赤身肉の値 0.479 W/(m·K) [6]と同等であり, 用いた熱伝導率は適当であると考えられる. 比熱及び密度についても, 新編熱物性ハンドブックから推算した比熱 3.55 J/(g·K) [6], 著者が比重法により算出した密度 1.06 g/cm³ と同等であり, 用いた各熱物性値は適当な値であると考えられる. フライパンの熱物性値に関しては, アルミニウム合金の値を用いた[b].

また, 推定熱伝達係数についてはフィッティングにより設定したが, K. Sugiyama (2003)が電気ヒーター式オーブンの複合熱伝達係数(対流及び輻射)は 24~27 W/(m²·K)であるとしており[7], このうち放射伝熱の割合を考慮すると設定した値は適切な範囲内であると考えられる. 輻射係数に関しては, 物質の放射率, ヒーター面積及びヒーター試料距離を包括しているため, 推算は困難であるが, ヒーター面積を考慮すると妥当であると考えられる.

2.5 結果及び考察

2.5.1 放射率の算出

牛ヒレ肉, フライパンの温度を赤外線放射温度計, 熱電対によって測定した結果, 室内温度及び(2.10)式によって得られた放射率を以下の Table 2-5 に示した.

Table 2-5 Results of temperature measurement and emissivity

	Radiation thermometer [°C]	Thermocouple temperature [°C]	Room temperature [°C]	Emissivity ϵ [-]
Beef (fillet)	47.39	47.0	24.2	0.98
Frying pan	74.1	77.7	25.1	0.92

放射率は牛ヒレ肉で 0.98, フライパンで 0.92 と算出された. メーカーによる目安値によると, 表面状態, 形状, 温度等によって異なるものの, 牛・魚では 0.98, フライパン・鉄板などでは 0.85 であるとされているため[c, d], 本実験結果は妥当なものであると考えられる.

2.5.2 タンパク質変性速度パラメータの算出

昇温速度 10°C/min で測定した際の DSC 測定結果を Fig. 2-7 に示す.

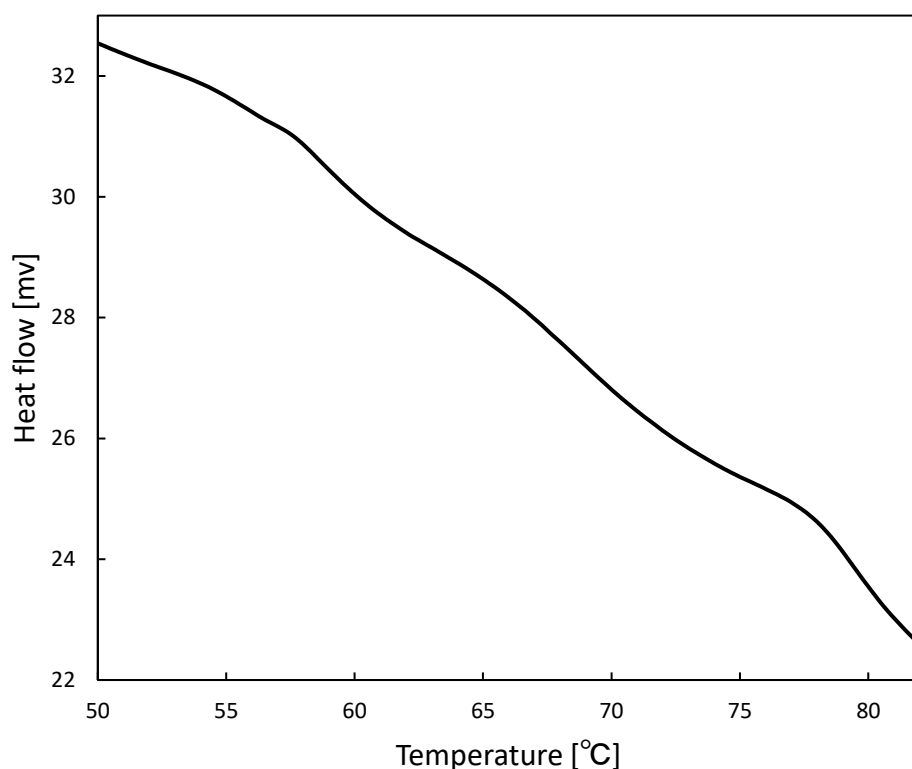


Fig. 2-7 DSC measurement results of beef fillet (10°C/min)

57.36°C, 65.54°C, 77.58°Cの3箇所、ピークの幅は広いものの吸熱ピーク温度 T_{max} を観測することができた。肉類を試料としたDSC測定は多数行われており[8, 9, 10], 54~58°Cで観測される吸熱ピークは、筋原線維タンパク質のミオシン、65~67°Cで観測される吸熱ピークは、結合組織タンパク質であるコラーゲン、75°C付近で観測される吸熱ピークは筋原線維タンパク質のアクチン由来であると報告されている[8, 11].

また、本実験の各タンパク質の吸熱ピークの妥当性を判断するために、本研究対象と同じ牛肉を中心とした肉類の各タンパク質における吸熱ピークをまとめたものを以下の Table 2-6 に示す。

Table 2-6 Peak temperature in meat products

sample	Peak [°C]		
	myosin	Collagen (Sarcoplasmic proteins)	actin
Beef (fillet)	55.89±0.91	66.38±0.80	79.07±1.36
Beef (round) [3]	56.3±0.28	—	73.2±0.12
Rabbit (back and hind-leg) [12]	60	67	80
Beef (biceps femoris muscle) [13]	59	66	82
Beef [10]	62	—	77
Bovine (semitendinosus, pH 5.6) [8]	57.8±0.6	63.9±1.0	74.2±0.4

Table 2-6 からミオシンの吸熱ピークは 56~62°C、コラーゲンの吸熱ピークは 63~67°C、アクチンの吸熱ピークは 73~82°C 程度であることがわかり、本実験結果は妥当なものであると判断できる。その為、本実験で得られた 3 箇所吸熱ピーク温度は、第 1 ピークを筋原線維タンパク質のミオシン、第 2 ピークを結合組織タンパク質であるコラーゲン、第 3 ピークを筋原線維タンパク質のアクチン由来であると判断した。また、他の昇温速度においても常に 3 箇所吸熱ピークが観測できたと同時に、昇温速度が速くなるに従い、吸熱ピークが高温度側へとシフトする傾向を示した。一方、再現性のある筋肉サーモグラムを得るためには厳密な pH 調整が必要であるとされており[14]、一般に pH が高くなるほどピークは 2 つに収束する[8]。従って、本実験結果を更に再現性のあるものとするためには、pH 調整を行う必要があると考えられる。

また、ここで昇温速度 10°C/min における変性開始温度 Onset [°C]、吸熱ピーク Peak [°C]、変性終了温度 End [°C]、熱変性に要したエンタルピー ΔH [J/g] を Table 2-7 に示す。

Table 2-7 Experimental values of Onset, Peak, End and ΔH (10°C/min)

		onset [°C]	peak [°C]	end [°C]	ΔH [J/g]
Beef (fillet)	myosin	51.21±1.83	55.89±0.91	59.98±1.03	0.2714±0.25
	collagen	61.03±1.09	66.38±0.80	70.09±1.69	0.1275±0.05
	actin	74.53±1.21	79.07±1.36	82.50±1.90	0.3137±0.06

次に、観測された各昇温速度における吸熱ピーク T_{max} [°C] を (2.16) 式に従い OZAWA プロットした結果を Fig. 2-8 に示す。その結果、ミオシン、コラーゲン、アクチンともに線形を示したことから（ミオシン： $R^2=0.997$ 、コラーゲン： $R^2=0.821$ 、アクチン： $R^2=0.962$ ）得られた直線の

傾きと切片より、各タンパク質の活性化エネルギー E_a [kJ/mol]及び頻度因子 Z [1/min]を算出し、得られた結果を Table 2-8 に示す。

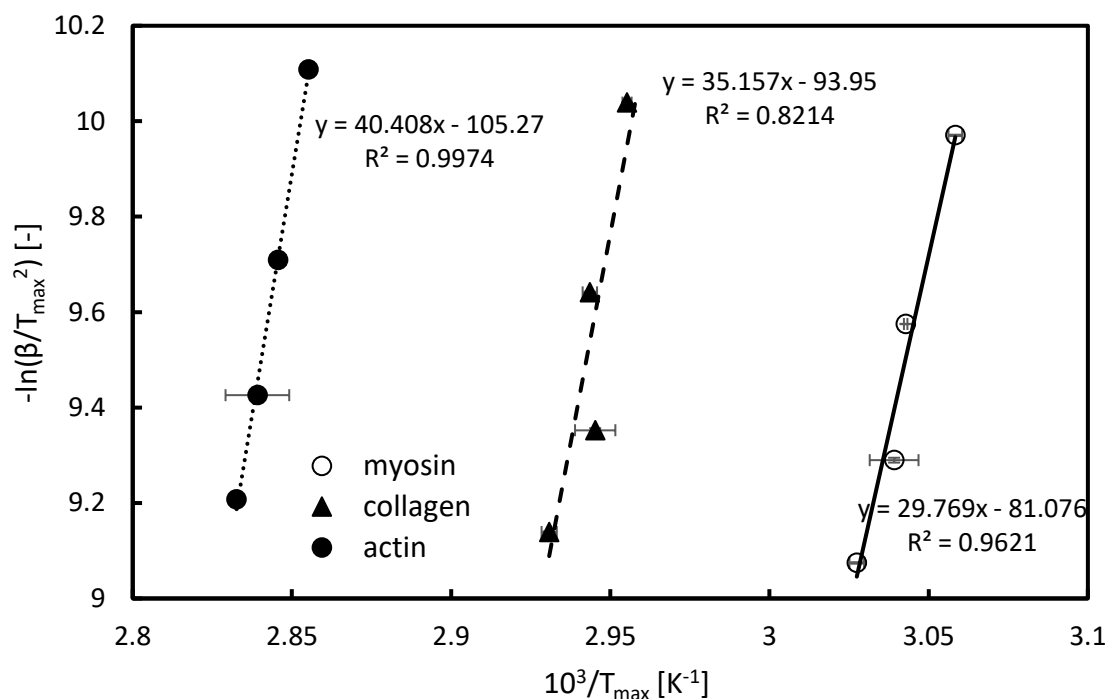


Fig. 2-8 OZAWA plot of each protein by DSC-Dynamic method

Table 2-8 Calculated values of activation energy and frequency factor for heat denaturation

	E_a [kJ/mol]	Z [1/min]
myosin	247.5	4.84×10^{39}
collagen	292.3	2.23×10^{45}
actin	336.0	2.12×10^{50}

Table 2-8 より、牛ヒレ肉における活性化エネルギー及び頻度因子が求められたが、本実験の値が妥当なものであるか検証するため J. R. Wagner *et al.* (1985)が牛の半腱様筋（アルゼンチン産）をサンプルとしたとき[8], 石渡が牛モモ肉（国産）をサンプルとしたとき[3]の活性化エネルギー及び頻度因子を以下の Table 2-9 に示した。

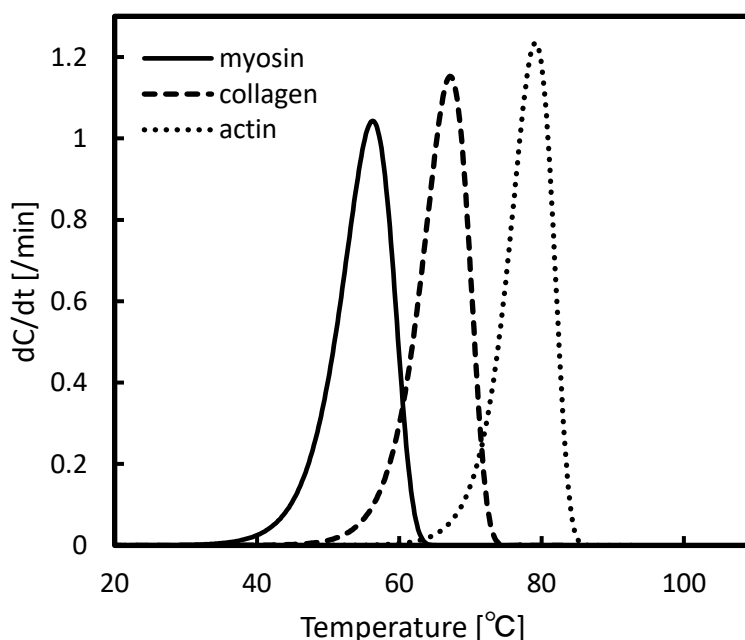
Table 2-9 Comparison of activation energy and frequency factors

	Beef (portmorten semitendinosus muscle)		Beef (thigh)	
	J. R. Wagner <i>et al.</i> (1985) [8]		石渡 (2014) [3]	
	E_a [kJ/mol]	Z [1/min]	E_a [kJ/mol]	Z [1/min]
myosin	228.0 ± 27.28	2.4×10^{36}	240.9 ± 7.66	4.69×10^{36}
collagen	225.2 ± 24.48	9.5×10^{39}	—	—
actin	379.1 ± 28.53	3.9×10^{57}	380.3 ± 27.5	8.17×10^{55}

Table 2-9 における値と本実験結果を比較すると myosin では同程度の値が得られているのに対し, collagen では本実験値の方が活性化エネルギー, 頻度因子とも高く, actin においては本実験値の方が活性化エネルギー, 頻度因子とも低い結果となっている. これらの差異は筋肉部位の違い由来が要因もしくは実験操作由来であることが推察される.

また, 以上のように各タンパク質の活性化エネルギー及び頻度因子が明らかになったことで, 任意の温度における各タンパク質の熱変性速度定数を(2.13)式に従い算出することが可能となり, 更に得られた速度定数を(2.12)式に用いることで, 各タンパク質の未変性率の予測計算が可能となった.

試料の初期温度を 20°C とし, 昇温速度を $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で加熱した際の各タンパク質未変性率変化と, DSC で算出したタンパク質速度パラメータの妥当性の検証として, 各タンパク質の変性率増加率を単位時間で微分した値, すなわち, dC/dt の変化を Fig. 2-9 に示し, 温度とタンパク質未変性率との関係を Fig. 2-10 に示す.

**Fig. 2-9** Denaturation increase rate of each protein ($10^{\circ}\text{C}/\text{min}$)

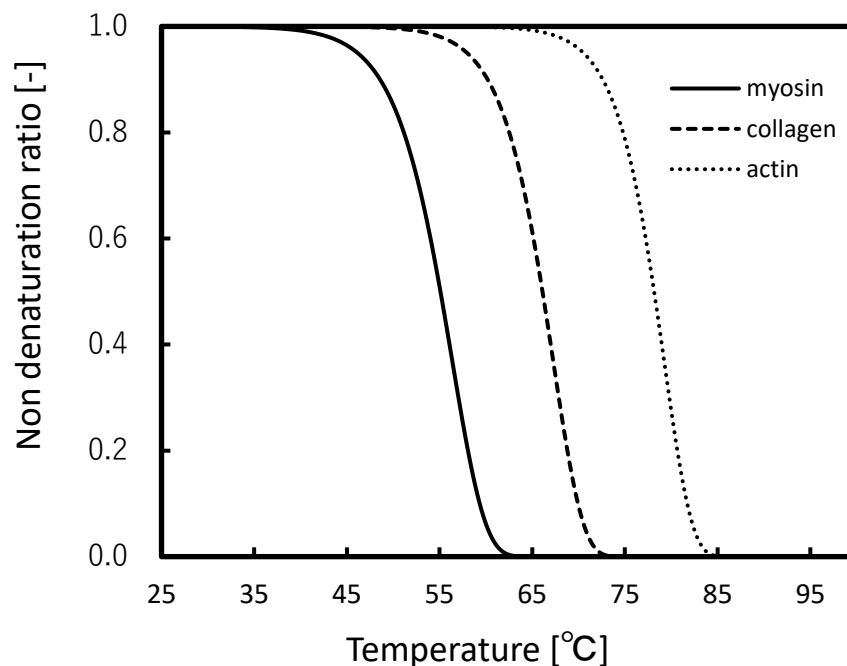


Fig. 2-10 Relationship between temperature and protein non-denaturation ratio (10°C/min)

ミオシンは 35°C付近から徐々に変性が開始され、65°C付近において変性が完了、コラーゲンは 50°C付近から変性が始まり、75°C付近において変性が完了、アクチンでは 55°C付近から変性が開始され、85°C付近において変性が完了していることが見て取れる。この為、タンパク質の種類によって同じ筋原線維タンパク質であったとしてもその変性が進行する温度帯は大きく異なることが明らかとなった。

また、本実験では、タンパク質未変性率 X が 0.999 に到達した時点を変性開始温度、0.001 に到達した時点を変性終了温度とした。これらにより算出した各タンパク質の変性開始温度 (Onset) と終了温度 (End)、タンパク質の変性増加率を時間で微分した値の最大値を吸熱ピーク (Peak) とみなし、DSC 測定で観測された温度を Table 2-10 に示し、各々比較を行った。

Table 2-10 Comparison of experimental and calculated values of Onset, end, and peak for each protein

	myosin		collagen		actin	
	exp.	cal.	exp.	cal.	exp.	cal.
onset [°C]	33.67	51.21±1.83	46.50	61.03±1.09	59.67	74.53±1.21
end [°C]	63.33	59.98±1.03	73.50	70.09±1.69	85.00	82.50±1.90
peak [°C]	56.33	55.89±0.91	67.17	66.38±0.80	79.17	79.07±1.36

変性開始温度は各タンパク質において予測値の方が実験値よりも 20℃程度低い温度となっていることが示された。これは、予測値の変性開始温度付近では変性速度が遅く、変性量が微量であることから、変性開始時に要したエンタルピーを DSC 装置が感知できなかったことが要因であると考えられる。一方で、吸熱ピーク及び変性終了温度は予測値と実測値が同程度の値であることから、算出した各タンパク質の変性速度パラメータは妥当であると判断した。

2.5.3 収縮率

タンパク質未変性率に対する比重法により算出した体積変化の結果を Fig. 2-11 に示す。

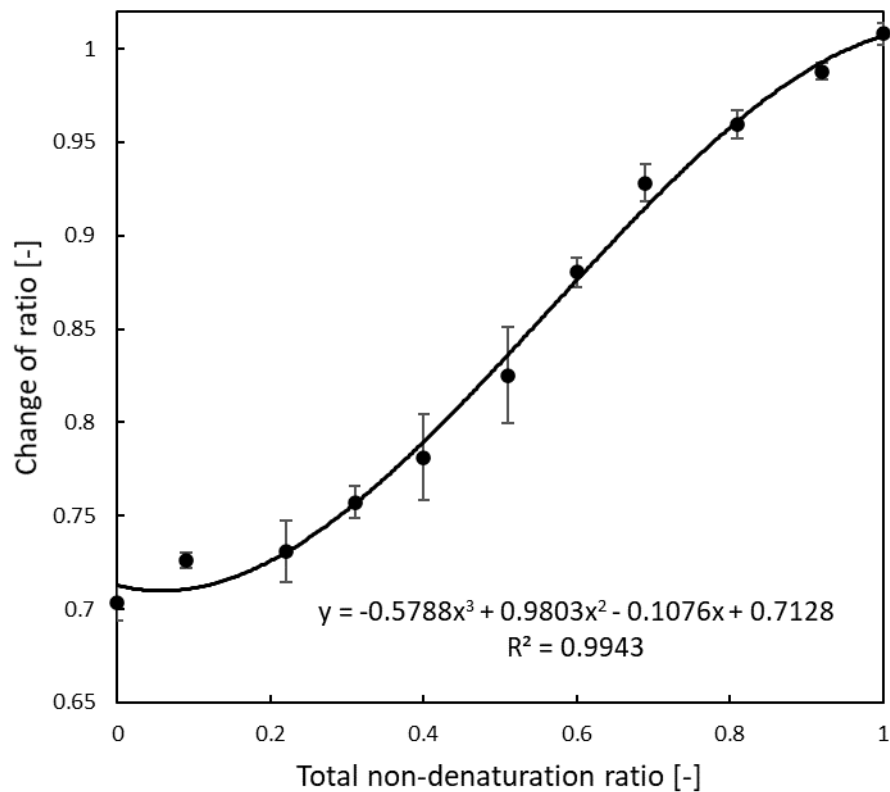


Fig. 2-11 Relationship between volume shrinkage ratio and protein non-denaturation ratio

タンパク質未変性率の低下すなわちタンパク質の変性に伴い、試料の収縮が進行している様子が見て取れる。また、タンパク質未変性率が 0.6 以上はミオシンが変性している領域、0.4~0.6 はコラーゲンが変性している領域、0.4 以下はアクチンが変性している領域であるが、ミオシンが完全変性した時点で 0.85 程度まで収縮し、コラーゲンが完全変性した時点では 0.78 程度、アクチンまで完全変性された時点では 0.70 程度まで収縮していることが示されている。肉の収縮

に伴う体積変化は40~50℃で開始され、60℃以上になると更なる収縮が進行するとされおり[15], 50~60℃ではミオシンの変性温度帯であることから、本実験のタンパク質未変性率に対する体積収縮率は妥当であると考えられる。

また, Fig. 2-11 に示した結果より, タンパク未変性率と収縮率の相関は式(2.25)で表すことができた。

$$X_V = -0.5788X_t^3 + 0.9803X_t^2 - 0.1076X_t + 0.7128 \quad (2.25)$$

X_V : 収縮率 [-]

X_t : タンパク未変性率 [-]

また, ここで妥当性を確認するため, 石渡[3]によって行われたスライスした牛モモ肉におけるタンパク未変性度に伴う重量変化と比較したものを以下の Fig. 2-12 に示す。

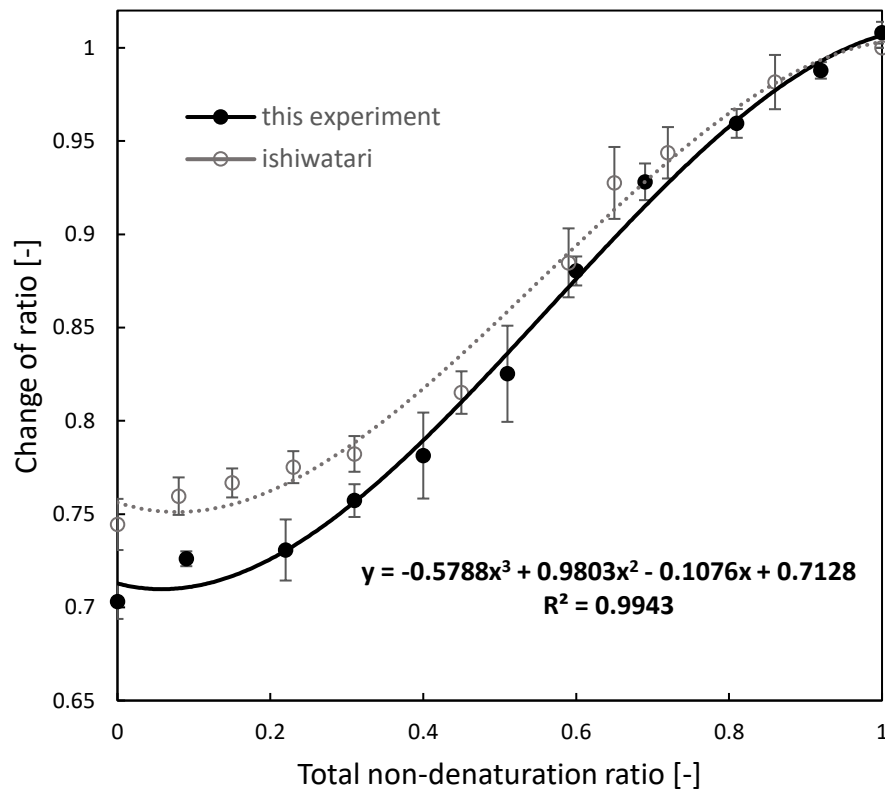


Fig. 2-12 Comparison of relationship between volume shrinkage ratio and non-denaturation ratio

本実験結果は、石渡 (2014) [3]が求めた収縮率曲線と同様の挙動を示しているが、最終的な完全変性した場合における体積変化率は 5%程度小さいことが見て取れる。これは、牛肉中に含まれる水分量の違いに由来するものであると考えられ、以下の Table 2-11 に示したように本実験試料である牛ヒレ肉（輸入牛肉）の方が石渡の実験で用いた牛モモ肉（国産）よりも水分が約 6%高い。これにより、収縮した際に損失する水分量が本実験で用いた牛ヒレ肉の方が多くなり、それに伴い体積変化率も大きくなったものと考えられる。また、筋肉からの水分損失は様々な構造的な影響を受けるとされており[16]、実験試料の筋繊維の状態やサイズ、カットの方向によって水分損失量が異なっている可能性も考えられる。

Table 2-11 Composition of imported beef fillet and Japanese beef thigh [17]

	Water	Protein	Fat	Carbohydrate	Ash
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Imported beef (fillet, raw)	73.3	20.5	4.8	0.3	1.1
Japanese beef (thigh, raw)	67.0	21.3	10.7	0.6	1.0

また、ここでミオシン、コラーゲン、アクチンが完全に変性した時点の外観をそれぞれ示したものを以下の Fig. 2-13, Fig. 2-14 に示した。

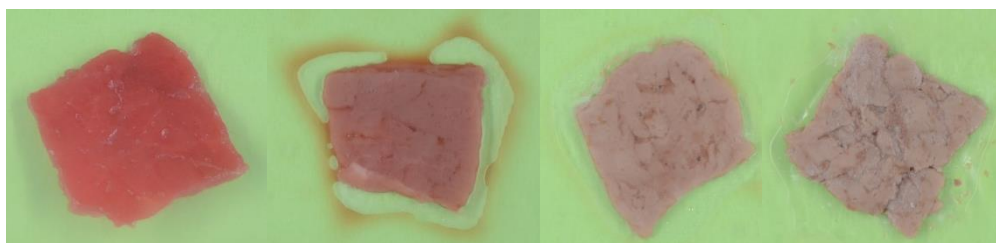


Fig. 2-13 Appearance during heating phase (A)

(From left to right: Undenatured, Myosin denatured, Collagen denatured, Actin denatured)



Fig. 2-14 Appearance during heating phase (B)

(From left to right: Undenatured, Myosin denatured, Collagen denatured, Actin denatured)

Fig. 2-13 よりミオシン完全変性時点では水分の流出が顕著にみられ、コラーゲン完全変性時点では水分だけでなく油脂成分のようなものの流出も見て取れる。また、アクチン完全変性時点では肉組織の損失も観察できる。また、Fig. 2-14 からは、ミオシン完全変性時点ではピンク色をしていることが確認できるものの収縮している様子は見て取れない。コラーゲン完全変性では全体的に白っぽくなっており、収縮によるしわや溝のようなものが確認できる。更にアクチン完全変性時点では、部分的に茶色いものが確認でき、全体として収縮が確認できる。従って、ミオシン変性域から筋繊維の収縮は開始されるが、これらは徐々に進行し、アクチン変性終了時点において目に見える収縮となるということが確認できた。すなわち、筋繊維の収縮はミオシン変性過程から生じるが、全体として収縮するにはアクチン変性程度にまで達する必要があることが示唆された。

2.5.4 牛ヒレ肉焼成過程における温度履歴及び現象把握

肉焼成前後の重量変化を Table 2-12、厚さ方向における収縮率を Table 2-13 に示す。

Table 2-12 Weight change before and after meat roasting

Weight before roasting	Weight after roasting	Weight change	Weight change ratio
76.71 g	62.83 g	13.88 g	-18.10%

Table 2-13 Thickness change before and after meat roasting

before roasting	after roasting	Change thickness	Change ratio
25.4 mm	22.25 mm	-3.2 mm	-12.4%

焼成終了時点における重量変化は-13.88 g、重量変化率は-18.10%であった。調理中の水分損失の大部分は、タンパク質変性及び収縮によって排出されており、これは調理の温度によって変化するとされている[18]。本焼成実験において、中心の加熱終了時温度は 63°Cであり、H. Martens *et al.* (1982)が同加熱温度帯における牛肉の調理損失を実測した結果 20%弱であった[19]ことから本実験での重量損率は適当な値であることが考えられる。また、調理中の水分損失については水分蒸発の影響も考えられるが、蒸発の大部分は既に収縮によって排出されているドリップからくるものが大半であるとされている[18]。本実験においても、水分蒸発の影響はあるものの、収縮により排出されたドリップがフライパンへ流出して蒸発しているものが大部分であると考えられる。

焼成完了時点における厚さ方向の変化では、変化量は-3.2 mm、変化率は-12.4%であり、加熱によって厚さ方向の収縮が生じていることが確認できた。また、本実験結果を含む同条件焼成での厚さ方向の収縮は平均して 10.1% ($n=4, SD=1.86$) であり、各実験において厚さ方向の収縮が観察された。筋組織は、異なる温度で繊維の横方向及び縦方向の収縮程度は異なることが知られており[11], J. M. Hughes *et al.*(2014)も両方向の収縮した結果、体積変化していることを実験的に示している[16]。この為、本実験においても体積変化を考えるには横方向の収縮についても検討する必要があると考えられる。肉の収縮については、温度シミュレーションにも影響を与えることが考えられ、適切な温度解析を行うためには、これらを考慮する必要があることが示唆された。

次に、肉焼成過程における温度履歴を以下の Fig. 2-15 に示す。

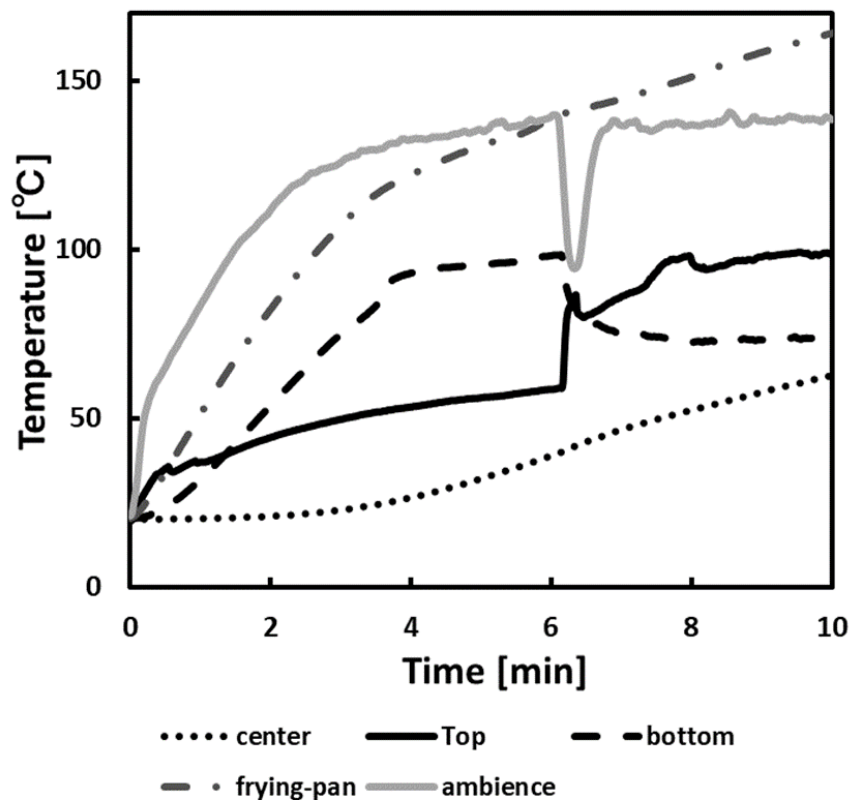


Fig. 2-15 Temperature history during the meat roasting process

加熱開始直後、上面の温度が急激に上昇したのち、すぐさまフライパンの温度が直線的に上昇、これに伴って、下面の温度が上昇していることが見て取れる。また、中心温度は 4 min 程度までは大きな温度変動は見られないが、4 min 以降徐々に温度上昇が開始され、6 min の反転を経て、10 min 後の終温は 63°Cにまで達している。以上の温度履歴から、加熱直後は輻射の影響が大きく、上面の温度上昇に大きく寄与しているが、フライパンも輻射の影響を受け温度上昇

するに伴い、フライパンからの伝導伝熱の影響が上回り、下面の温度が 100℃程度に達するまで急激に上昇していることが伺える。また、ここで下面の温度上昇が 100℃程度で一定温度に留まるのは水分蒸発の影響によるものと考えられ、6 min で反転させたのちフライパンに接している面でも同様の傾向がみられる。

本実験では、焼き加減の目標を“Medium”として焼成実験を行い、焼成終了時点での中心温度は 63℃であった。焼き加減と温度の目安[15]から考えると、本実験試料では“Rare”もしくは“Medium - rare”程度であることが考えられる。

ここで、焼成完了前後における牛ヒレ肉の表面及び側面を Fig. 2-16, Fig. 2-17, 断面の様子を Fig. 2-18 に示す。



Fig. 2-16 Appearance before roasting meat (left: top, right: side)



Fig. 2-17 Appearance after roasting meat (left: top, right: bottom)



Fig. 2-18 Cross section after meat roasting

焼成前と比較して、焼成後では楕円系となっており、収縮による溝や割れ目が多数確認できる。また、上面及び下面とも褐色を呈しており、適度な焼成度合いであることが見て取れる。食品表面の焼き色に関しては、放射伝熱の強い熱源では焼き色が付きやすいとされており[20, 21]、本実験においても放射伝熱が主たる伝熱であったことから、表面は色づきやすかったものと考えられる。

また、肉焼成後断面様子から、全体的に鮮赤～ピンク色を呈しており、赤色のドリップが流出していることが観察できる。この為、肉内部の色から判断しても“Rare”もしくは“Medium - rare”程度であることが見て取れる。また、その褐変の進行度合いから上面及び下面から同程度に加熱がされていることも伺える。一方、S. P. Suman *et al.* (2016)は加熱調理された肉の褐変の要因となるミオグロビンの熱変性は、pH、種、酸化還元状態といった内因性因子と包装、保存といった外因性因子の影響を受けるとしており[22]、内部の色から判断は慎重にすべきであることが示唆されている。この為、焼き程度は微生物的安全を担保するといった面からも肉内部温度から判断すべきであるとされており[23]、本実験試料は肉断面の色だけでなく温度から考えて、“Rare”もしくは“Medium - rare”程度であると判断した。

2.5.5 牛ヒレ肉焼成過程における温度及びタンパク質変性シミュレーション

牛ヒレ肉焼成過程における温度シミュレーションと本実測実験結果の比較を Fig. 2-19 に示す。

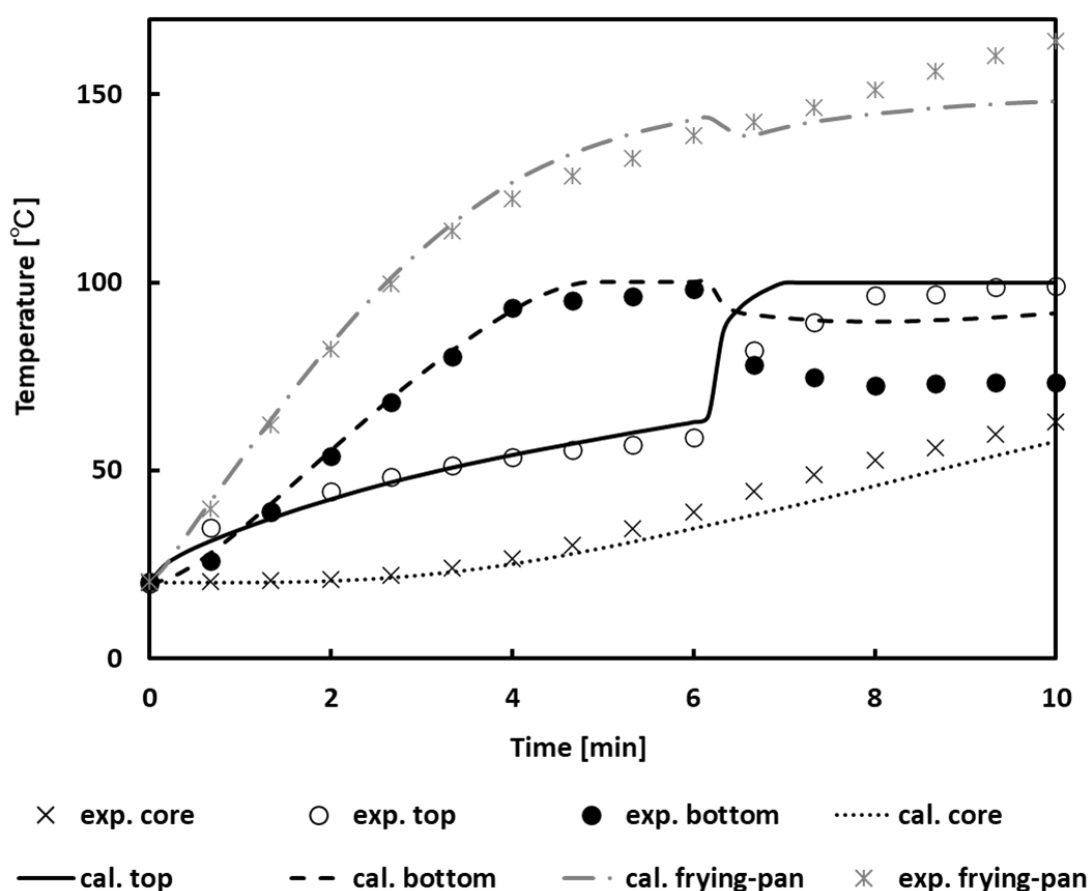


Fig. 2-19 Comparison of calculated and measured temperatures during the meat roasting process

シミュレーションによる計算値 (cal.) と肉焼成実験による実測値 (exp.) は反転直前 (6 min) までは概ね一致していることが見て取れる。一方、反転後では、両者にはずれが生じており、特に下面において実測では反転後温度が 70°C 程度まで低下するのに対し、計算値では大きな温度低下はみられない。また、時間経過に伴い中心の計算値と実測値に差が生じており、本シミュレーションでは考慮していない水分蒸発の影響やタンパク質変性に伴う収縮及び水分流出の影響が関係しているものと考えられる。この為、より精度の高い温度予測を確立するためには、水分蒸発やタンパク質変性に伴う収縮及び水分損失を考慮する必要があることが示唆された。

他方で、肉焼成過程における実測値の取得方法にも両者の差異が生じる要因があると考えられる。本実験においては、上面及び下面の温度は表面付近に突き刺すような形で設置した熱電対から取得しており、実際には表面より僅かに内側の温度を取得している可能性が考えられる。本解析では、試料最上面及び最下面の温度を予測しており、この僅かな差異が温度履歴の差に影響していることも考えられる。また、S. Ouilic *et al.* (2011) は調理中の熱電対による温度測定に

ついて、試料中心部に対し、測定値が試料表面に近づくにつれて位置に関連した誤差は増加するとしている[4]。これは、調理前の熱電対設置精度が低いことや調理中のタンパク質変性による収縮により熱電対がずれてしまうことが理由とされているが、本実験においては反転を伴うため、反転時の影響で熱電対の位置がずれることも考えられる。そして、実際に反転後において上面の計算位置を最表面から 0.5 mm 程度内部にずらすと実測値と適切に一致することがわかっており、解析のみならず実測値の適切な取得についても考える必要があることが示唆された。

またここで、反転前（6 min）及び加熱終了時（10 min）時点での温度分布、タンパク質変性率の予測について可視化したものを Fig. 2-20 に示す。

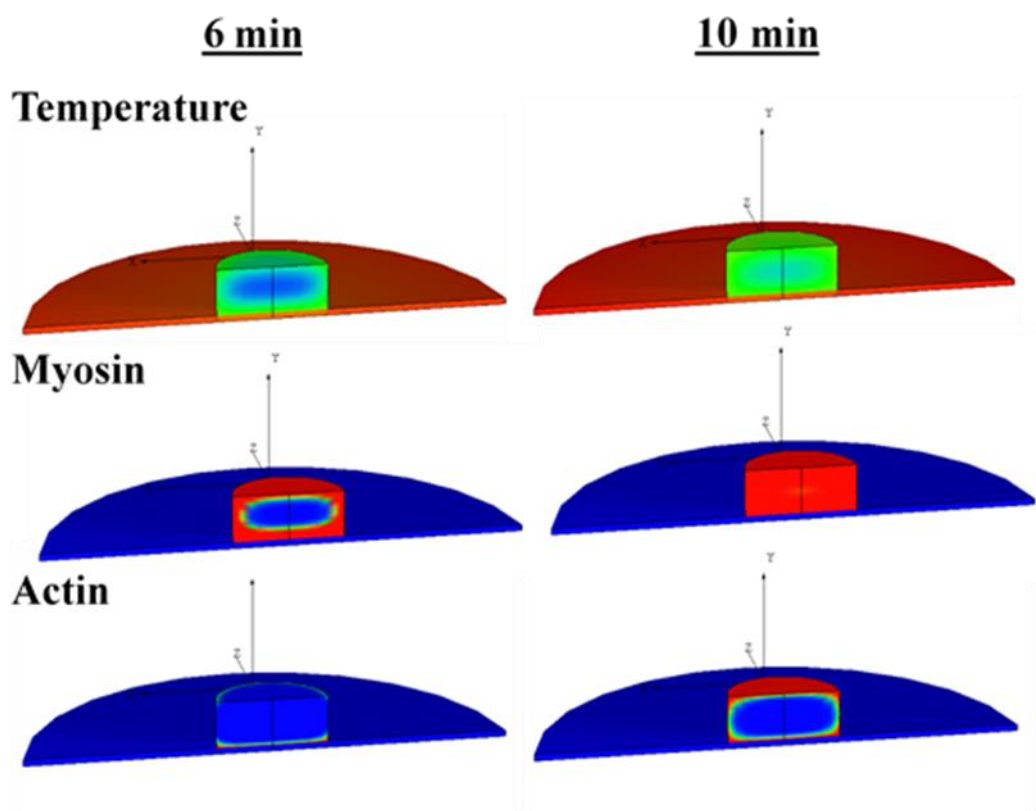


Fig. 2-20 Visualization of temperature and protein denaturation at the inversion and the end of roasting

温度では、反転直前（6 min）において上面が受ける放射の影響よりフライパンからの伝導伝熱の影響が大きいことが見て取れる。一方、その後の反転を経て、加熱終了時点（10 min）では上下両面から均等に加熱されている様子がわかる。これは先に示した加熱終了時点での実際の断面様子（Fig. 2-18）と同様であり、適切な温度シミュレーションであることが考えられる。タンパク質変性においてはミオシン及びアクチンについて示したが、反転直前においてミオシン

は周囲が変性しているのに対し、アクチンはフライパン側でしか変性がみられていないことがわかる。一方、加熱終了時点において、ミオシンは全体が変性しており、アクチンにおいても周囲が変性している様子が示された。

2.6 結論

本章では、牛ヒレ肉を対象としたオープン調理過程の解析、伝熱シミュレーションの構築を目的とした。

牛ヒレ肉焼成過程における温度履歴及び現象把握では、始め、ヒーターからの放射の影響を受け上面温度の上昇がみられたが、時間経過に伴って、熱されたフライパンからの伝導伝熱の影響により下面の温度上昇が上回ることがわかった。そして、この際の重量損率は 18.10%であり、加熱後には肉の収縮や水分の流出が確認された。

放射率では、牛ヒレ肉が 0.98、焼成の際に用いるフライパンが 0.92 であると算出された。これらはいずれも放射温度計メーカーの目安値と概ね一致しており、本実験結果の妥当性も確認した。

タンパク質変性速度パラメータの算出では、57°C付近、65°C付近、77°C付近で吸熱ピークを観察でき、既存の研究からそれぞれ筋原線維タンパク質のミオシン、結合組織タンパク質のコラーゲン、筋原線維タンパク質のアクチン由来であると判断した。更に、本結果と DSC-Dynamic 法により、加熱変性速度算出に要する速度パラメータを算出しところ、ミオシンでは $E_a : 247.5$ kJ/mol, $Z : 4.84 \times 10^{39}$ 1/min, コラーゲンでは $E_a : 292.3$ kJ/mol, $Z : 2.23 \times 10^{45}$ 1/min, アクチンでは $E_a : 336.0$ kJ/mol, $Z : 2.12 \times 10^{50}$ 1/min と得ることができた。

収縮率では、比重法を用いた実験を行った結果、相関性の高い 3 次曲線が得られ、収縮率 $[-]$ を X_V 、タンパク未変性率 $[-]$ を X_t としたとき $X_V = -0.5788X_t^3 + 0.9803X_t^2 - 0.1076X_t + 0.7128$ と表された。また、本結果からミオシン変性開始時点から収縮が開始され、最終的には元の体積の 0.7 程度にまで収縮していることがわかった。

牛ヒレ肉焼成過程における温度及びタンパク質シミュレーションでは、6 min の反転以前において解析値は実測値と特に良好に一致しており、反転後も水分蒸発や収縮を考慮することでより精度の高い温度予測となることが示唆された。また加熱完了後、温度分布より上下均等に加熱されていることが示され、タンパク質変性に関しては、ミオシンが完全に変性しているのに対し、アクチンが表面近傍のみで変性していることが明らかとなった。

2.7 参考文献

- 1) 脇坂元貴; “魚焼成における焼き色変化の二次元的解析”. 東京海洋大学修士学位論文 (2014).

- 2) 竹森健二; “ナス焼成時の熱・水分移動と焼き色の解析”. 東京海洋大学修士学位論文 (2015).
- 3) 石渡奈緒美; “熱・物質移動および反応を考慮したタンパク質食品の調理工学的解析”. 東京海洋大学博士学位論文 (2014).
- 4) S. Oillic, E. Lemoine, J.B. Gros, A. Kondjoyan; Kinetic analysis of cooking losses from beef and other animal muscles heated in a water bath - Effect of sample dimensions and prior freezing and ageing. *Meat Sci.*, **88**, 338-346 (2011).
- 5) M. S. Baghe-Khandan, M. R. Okos; Effect of Cooking on the Thermal Conductivity of Whole and Ground Lean Beef. *J. Food Sci.*, **46**, 1302-1306 (1981).
- 6) 日本熱物性学会; “新編 熱物性ハンドブック”, 養賢堂, 2008, pp.514-535.
- 7) K. Sugiyama; “Baking in Oven” (in Japanese). *J. the integrated study of dietary habits*, **13**, 251-255 (2003).
- 8) J. R. Wagner, M. C. Añon; Denaturation kinetics of myofibrillar proteins in bovine muscle. *J. Food Sci.*, **50**, 1547-1550 (1985).
- 9) N. C. Bertola, A. E. Bevilacqua, N. E. Zaritzky; Heat treatment effect on texture changes and thermal denaturation of proteins in beef muscle. *J. Food Process. Pres.*, **18**, 31-46 (1994).
- 10) 山口達彦, 赤崎哲也, 中村文雄; “示差走査熱量分析計(DSC)による肉たんぱく質の熱変性測定”. 関税中央分析所報, **43**, 5-8 (2003).
- 11) E. Tomberg; Effects of heat on meat proteins -Implications on structure and quality of meat products. *Meat Sci.*, **70**, 493-508 (2005).
- 12) D. J. Wright, I. B. Leach, P. Wilding; Differential scanning calorimetric studies of muscle and its constituent proteins. *J. Sci. Fd Agric*, **28**, 557-564 (1977).
- 13) N. P. Brunton, J. G. Lyng, L. Zhang, J.C. Jacquier; The use of dielectric properties and other physical analyses for assessing protein denaturation in beef *biceps femoris* muscle during cooking from 5 to 85°C. *Meat Sci.*, **72**, 236-244 (2006).
- 14) E. Stabursvik, H. Martens; Thermal denaturation of proteins in *post rigor* muscle tissue as studied by differential scanning calorimetry. *J. Sci. Food Agric*, **31**, 1034-1042 (1980).
- 15) 沖谷明紘編; “肉の科学”, 朝倉書店, 1996, pp.112-113.
- 16) J. M. Hughes, S. K. Oiseth, P. P. Purslow, R. D. Warner; A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. *Meat Sci.*, **98**, 520-532 (2014).
- 17) 文部科学省 科学技術・学術審議会資源調査分科会; “日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）”, 2019, pp. 152-159.
- 18) A. Kondjoyan, S. Oillic, S. Portanguen, J.B. Gros; Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat. *Meat Sci.*, **95**, 336-344 (2013).
- 19) H. Martens, E. Stabursvik, M. Martens; Texture and colour changes in meat during cooking related to thermal denaturation of muscle proteins. *J. Texture Studies*, **13**, 291-309 (1982).
- 20) S. Shibukawa; “Heating ability of ovens different in heat transfer methods (Part 3) The ration of the amounts of heat transfer by radiation and baking color” (in Japanese). *J. home economics of Jpn.*, **36**, 492-496 (1985).

- 21) S. Shibukawa; “Studies on heat transferic analysis of cooking and cooking quality” (in Japanese). J. home economics of Jpn., 49, 949-958 (1998).
- 22) S. P. Suman, M. N. Nair, P. Joseph, M. C. Hunt; Factors influencing internal color of cooked meats. Meat Sci., **120**, 133-144 (2016).
- 23) N. J. King, R. Whyte; Does it look cooked? A review of factors that influence cooked meat color. J. Food Sci., 71, R31-40 (2006).
-
- a) 株式会社堀場製作所; “放射温度計のすべて”, 2008.
<http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Process-Environmental/Documents/thermometry.pdf> (Jan. 3, 2021)
- b) 株式会社 UACJ ; “アルミの基礎知識 アルミ合金の物理的性質”.
<https://www.alumi-world.jp/chishiki/03seishitsu.html> (Dec. 12, 2018)
- c) 株式会社佐藤計量器製作所; “放射率表”.
<https://www.sksato.co.jp/html/doc/emissivity.html> (Jan. 18, 2021)
- d) 株式会社佐藤計量器製作所; “食品用放射温度計”.
https://www.sksato.co.jp/modules/shop/product_info.php?products_id=341 (Jan. 18, 2021)

第3章 鶏モモ肉における伝熱シミュレーション構築

3.1 はじめに

本研究では、肉類を対象としたオープン調理過程の解析、伝熱シミュレーションの構築を目的としている。本章では、形状が複雑であり、皮や骨など複合的な要素が含まれる骨付き鶏モモ肉を対象として強制対流式オープンでの加熱を想定した研究を行った。

伝熱シミュレーションにあたって、初めに焼成過程における鶏モモ肉の温度履歴取得や現象把握のため、焼成実験及び重量変化測定を行った。同時に、焼成過程における色彩変化についても実験を行った。次に、加熱過程における鶏モモ肉の内部構造変化と水分移動の把握のために、MRI (Magnetic Resonance Imaging) 測定を行った。最後に、加熱特性を把握するため、強制対流式オープンの伝熱量における放射の割合を実験的に求めた後、鶏モモ肉を対象とした温度及び水分濃度変化シミュレーションの構築を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 鶏モモ肉焼成実験

実験試料として、冷凍若鳥骨付きモモ肉（アメリカ産、肉のハナマサ）を 5℃冷蔵解凍したものを用いた。冷蔵解凍された試料は水洗いし、キッチンペーパーで十分水気をとった後、皮、上面、下面、中心及び雰囲気、鉄板に K 型熱電対（東洋熱科学(株)）を設置した。熱電対を設置した骨付きモモ肉は鉄板中心部に載せ 20℃に設定した低温恒温槽（福島工業(株), FMU-054I）で恒温となるまで放置した。その後、強制対流式電気オープン（SAMSUNG）の下段（Rack : 3, 28 cm from heater）に設置し、予備加熱なしで 205℃（400°F）, 30 min 加熱した。本加熱過程での温度履歴を取得したと共に加熱前後の重量を測定し、10 min, 20 min, 30 min における重量損率を以下の(3.1)式より求めた。

$$\text{Weight loss ratio [\%]} = \frac{W_b - W_a}{W_b} \times 100 \quad (3.1)$$

ここで、 W_b : 加熱前重量 [g], W_a : 加熱後重量 [g]

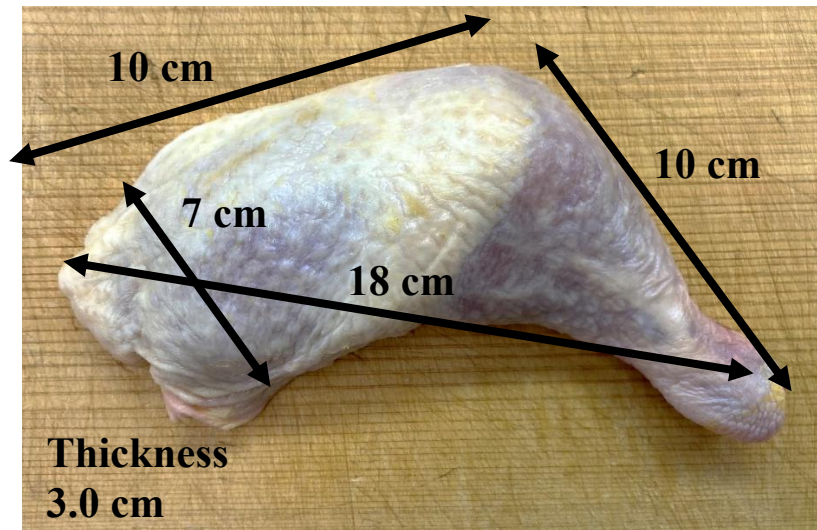


Fig. 3-1 Measurements of chicken thigh meat

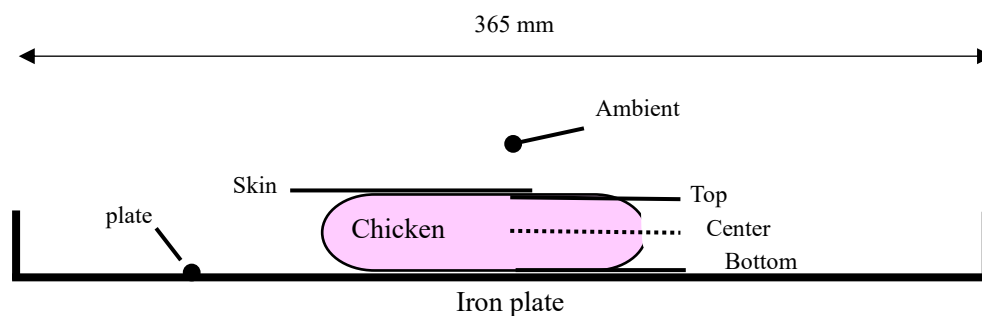


Fig. 3-2 Thermocouple location

3.2.2 鶏モモ肉色彩値取得

実験試料として、冷凍若鳥骨付きモモ肉（アメリカ産、肉のハナマサ）を 5℃冷蔵解凍したものを用いた。冷蔵解凍された試料は水洗いし、キッチンペーパーで十分水気をとった後、皮、上面、下面、中心及び雰囲気、鉄板に K 型熱電対（東洋熱科学(株)）を設置した。熱電対を設置した骨付きモモ肉は鉄板中心部に載せ 20℃に設定した低温恒温槽（福島工業(株), FMU-054I）で恒温となるまで放置した。その後、強制対流式電気オーブン（SAMSUNG）の下段（Rack : 3, 28 cm from heater）に設置し、予備加熱なしで 205℃（400°F）, 30 min 加熱した。この際、0 min, 10 min, 20 min, 30 min における鶏モモ肉表面を暗室にセットし、デジタルカメラ(Nikon D5100)で撮影した。ここで、デジタルカメラの条件は、F 値 5.6, シャッタースピード 1/20, ISO400, 焦点距離 105mm, WB 晴天, フラッシュ無しで暗室左右の蛍光灯を点灯して撮影した。

デジタルカメラで撮影した焼き色の写真は、試料の焼き色の部分のみをトリミングし、画像

解析ソフト Pop Imaging (3.7 Digital being kids Co. LTD. Yokohama, Japan) を用いて RGB 値を抽出し, $L^*a^*b^*$ 値へ変換した。また, a^* 値 b^* 値を用いて鮮やかさを示す彩度 C^* 値を次式によって求めた。

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3.2)$$

3.2.3 MRI 測定

実験試料として, 冷凍若鳥骨付きモモ肉 (アメリカ産, 肉のハナマサ) を 5°C 冷蔵解凍したものをを用いた。冷蔵解凍された試料は水洗いし, キッチンペーパーで十分水気をとった後, MRI (コンパクト MRI, 0.3T, (株)エム・アール・テクノロジー) によりプロトン密度強調画像を得た。測定は multi-slice spin-echo 法により行い, 繰り返し待ち時間 (TR) : 2,000 ms, エコー時間 (TE) : 40 ms, マトリックスサイズ : 256×256 , スライス厚さ : 10 mm とした。本測定を強制対流式オーブン (205°C) で 10 min, 20 min, 30 min 焼成した鶏モモ肉についても同様に行った。

3.2.4 オーブン伝熱量における放射割合の算出

同形の銅板 ($15 \times 30 \times 0.6 \text{ mm}$) に, 一方はアルミホイルテープ張り (白ブロック), 他方は黒色塗料を塗り (黒ブロック) 表面の放射率を変えたものを作成した。この両ブロックを取り付けた測定装置を庫内が一定温度になったのち, 庫内中心部に置き, それぞれのブロックの温度変化を測定した。算出法については Shibukawa (1985) が考案した以下の計算方法[1]により行った。

二つのブロックが同じ温度 ($T^{\circ}\text{C}$) に達した時点では

$$\Delta Q_1 = mc\Delta T_1 \quad (3.3)$$

$$\Delta Q_2 = mc\Delta T_2 \quad (3.4)$$

ΔQ_1 : 単位時間当たりの白ブロックの受熱量[kJ]

ΔQ_2 : 単位時間当たりの黒ブロックの受熱量[kJ]

m : ブロックの質量[kg], c : ブロックの比熱[kJ/(kg·K)]

ΔT : 単位時間 (Δt) あたりの温度差[K]

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_{R1} + \Delta Q_{c1} \quad (3.5)$$

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_{R2} + \Delta Q_{c2} \quad (3.6)$$

ΔQ_R : 放射伝熱による受熱量, ΔQ_c : 対流伝熱による受熱量

両ブロックが $T^\circ\text{C}$ になったときの対流による受熱量は等しいから

$$\Delta Q_{c1} = \Delta Q_{c2} = \Delta Q_c \quad (3.7)$$

放射伝熱において、放射面（H）に対して受熱面（C）が小さいときには、 $Q_{HC} = A_c \varepsilon_c \{4.88(T_H/100)^4 - 4.88(T_C/100)^4\}$ が成り立つので（ Q_{HC} : 放射伝熱量, A_c : 受熱面表面積, ε_c : 受熱面の放射率）

$$\Delta Q_{R1} = \varepsilon_1 \delta A (T_0^4 - T^4) \Delta t \quad (3.8)$$

$$\Delta Q_{R2} = \varepsilon_2 \delta A (T_0^4 - T^4) \Delta t \quad (3.9)$$

ε_1 : 白ブロックの放射率, ε_2 : 黒ブロックの放射率

δ : ステファン・ボルツマン定数, A : ブロックの表面積[m²]

T_0 : 放射面（庫壁およびヒーター）の温度[K]

(3.8), (3.9)式より $\Delta Q_{R1}/\Delta Q_{R2} = \varepsilon_1/\varepsilon_2$. これより

$$\Delta Q_{R2} = (\varepsilon_2/\varepsilon_1) \Delta Q_{R1} \quad (3.10)$$

(3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.10)式より

$$\Delta Q_1 = mc\Delta T_1 = \Delta Q_{R1} + Q_c \quad (3.11)$$

$$\Delta Q_2 = mc\Delta T_2 = (\varepsilon_2/\varepsilon_1) \Delta Q_{R1} + Q_c \quad (3.12)$$

$\Delta T_1, \Delta T_2$ は実測できるため $\Delta Q_1, \Delta Q_2$ を求め、(3.11), (3.12)式より ΔQ_{R1} を求めることが出来る。
したがって $\Delta Q_{R1} = (Q_1 - \Delta Q_2)/(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ となり、任意の温度における放射による伝熱量の割合 $\delta[\%]$ は $\delta = (\Delta Q_{R1}/\Delta Q_1) \times 100$ となる。

一定温度ごとに、上計算式に従って δ を計算し、その平均値を求めてオープン放射による伝熱量の割合を算出した。

3.3 COMSOL Multiphysics による伝熱解析

3.2.1 解析モデル

本解析では、骨付き鶏モモ肉を強制対流式電気オーブン（SAMSUNG）で加熱することを想定した。鶏モモ肉は鉄板上に設置し、上部ヒーターからの放射伝熱、ファンによる庫内の対流伝熱を考慮した。また、鶏モモ肉及び鉄板内では熱伝導により熱移動するとし、鶏モモ肉表面からの水分蒸発、タンパク質変性に伴う収縮によりドリップが生じ、皮は身から剥離することを想定した。

3.2.2 基礎式

(1) 熱移動

本解析における熱移動は、フーリエの熱伝導法則に従うとし、熱流束 J [W/m²]は

$$J = -k \text{ grad}T \quad (3.13)$$

ここで、 k ：熱伝導率[W/(m・K)], T ：温度[K]

この式を基に、熱収支をとると基礎式として(3.14)式を得る。

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q_v \quad (3.14)$$

$$Q_v = \lambda \cdot u \quad (3.15)$$

ここで、 ρ ：密度[kg/m³], C_p ：比熱容量[J/(kg・K)], t ：時間[s]

Q_v ：水分蒸発による吸熱[W/m³], λ ：蒸発のモル潜熱[J/mol]

u ：内部蒸発速度[mol/m³・s]

$$T = T_0 \quad (3.16)$$

境界条件は

$$\mathbf{n} \cdot (k \nabla T) = h_t (T_{air} - T) + \varepsilon \sigma (T_h^4 - T^4) + \lambda \mathbf{n} \cdot (D \nabla c) \quad (3.17)$$

ここで, h_t : 熱伝達係数[W/(m²·K)], T_{air} : 雰囲気温度[K], T_h : ヒーター温度[K]
 ε : 放射率[-], σ : Stefan Boltzmann 定数[W/(m²·K⁴)]
 D : 水分拡散係数[m²/s], c : 濃度[mol/m³]

(3.16)式において, $\lambda \cdot (D\nabla c)$ の項は水分蒸発した際の熱流束を表しており, 沸点に近づくと影響を与えるスイッチ関数が含まれている. 境界条件における水分蒸発項の考慮は, H. Chen et al. (1999)がチキンパテにおける対流調理をモデル化したものを参考にしており[2], スイッチ関数については A. H. Feyissa et al. (2013)が肉の対流オープン調理, M. J. Blikra et al. (2019)がタラの対流オープン調理における熱及び物質移動解析で用いたモデル[3, 4]を参考として組み込んだ.

(2) 水分移動

本解析における水の移動は水分濃度勾配に比例し, フィックの法則に従うものとする. 水の拡散流速 J [mol/(m²·s)]は

$$J = -D \text{grad}(c) \quad (3.18)$$

ここで, D : 水分拡散係数[m²/s], c : 濃度[mol/m³]

この式を基に, 食品内で水の物質収支をとると, 基礎式として(3.18)式を得る.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (-D\nabla c + u + v) \quad (3.19)$$

ここで, u : 内部蒸発速度[mol/(m³·s)]

v : タンパク質変性に伴う水分消失速度[mol/(m³·s)]

内部蒸発速度及びタンパク質変性に伴う水分消失速度は, 一般に多孔質媒体で利用される圧力勾配による水分移動速度[3, 5, 6]の代替として組み込んだ. 内部蒸発速度は, 内部での水分蒸発を想定しており, タンパク質変性に伴う水分損失速度は 2.5.2 で導いた速度パラメータのうち, アクチンの変性進行に伴って水分が排出されることを想定した. また, 初期条件は選択ドメイン内での水分濃度は均一とし

$$c = c_0 \quad (3.20)$$

境界条件は

$$\mathbf{n} \cdot (D\nabla c) = k_c(c_b - c) \quad (3.21)$$

ここで, k_c : 物質移動係数[m/s], c_b : 庫内固体相当濃度[mol/m³]

2.3.3 解析方法

数学モデルは, ソフトウェア COMSOL Multiphysics®バージョン 5.6 の有限要素法 (FEM) を使用して計算した. 全てのドメインはフリー四面体法を使用してメッシュ化し, COMSOL Multiphysics により定義されたメッシュ分割設定”Extra fine”を鶏モモ肉, 骨, “coarse”を鉄板, ヒーター, オープンに適用した. また, 解析モデルは実測寸法を再現して作成しており, 全体のモデルを Fig. 3-3 に示す. ここで, 各熱物性値 (熱伝導率, 密度, 比熱) 及び各種条件を Table 3-2, 本解析において使用したオープン温度及び雰囲気温度履歴を Fig. 3-4 に示す. 更に, 本解析では皮の剥離を考慮する為, 2.5.2 で導いた速度パラメータのうちアクチン変性に伴って皮と身の間には 0.1 mm の空隙が生じることを想定した. 解析は時間依存ステップとし, 0 s ~ 1800 s まで 1 s 刻みとして計算を行った.

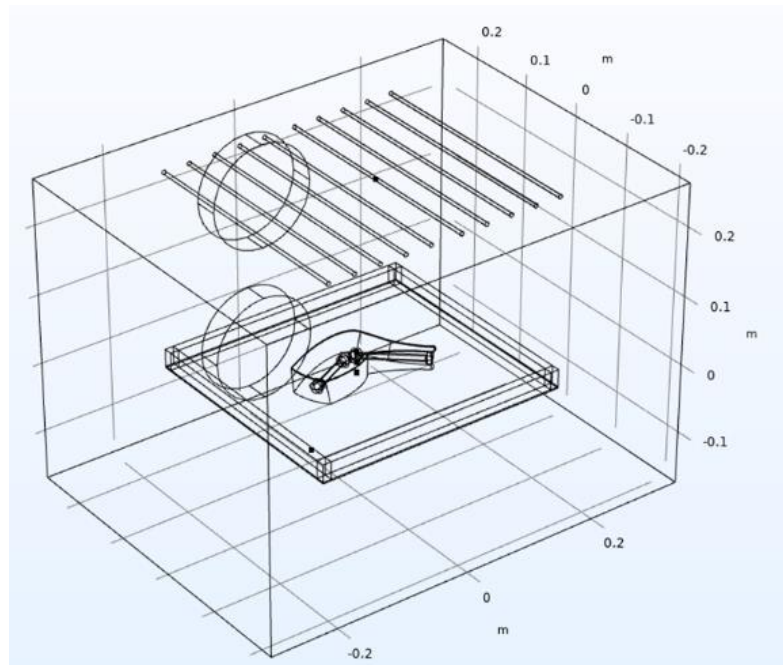


Fig. 3-3 Analysis model

Table 3-1 Measurements of model

	Width [m]	Length [m]	Height [m]
Oven	0.635	0.49	0.435
Heater	ϕ 0.006		0.34
Iron plate	0.365	0.335	0.01

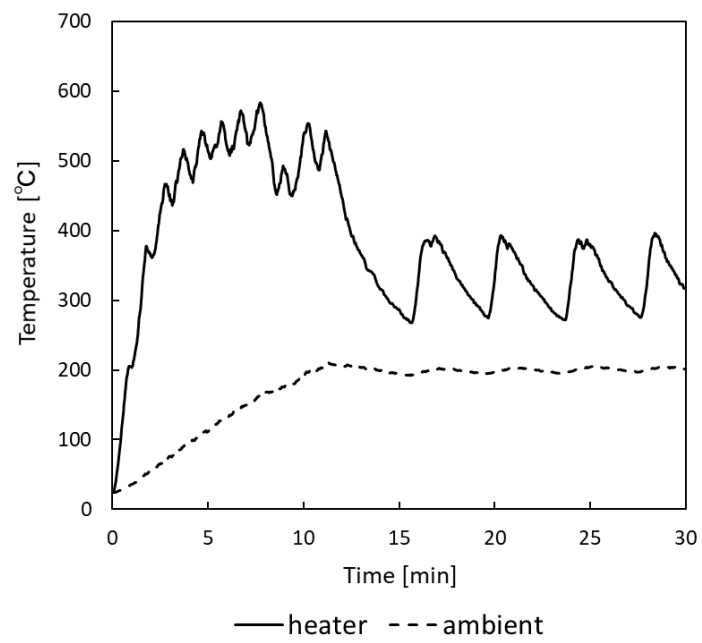
**Fig. 3-4** Temperature history of heater and ambient

Table 3-2 Input properties in the model

symbol	property	subject	Value/equation	unit	source
k	thermal conductivity	chicken	0.513	W/(m·K)	K. Sugiyama. (2013) [7]
		skin	0.37	W/(m·K)	COMSOL Multiphysics Material Library (skin)
		bone	0.32	W/(m·K)	COMSOL Multiphysics Material Library (bone)
		plate	50	W/(m·K)	COMSOL Multiphysics Material Library (cast iron)
C_p	specific heat	chicken	3591	J/(kg · K)	K. Sugiyama. (2013) [7]
		skin	3391	J/(kg · K)	COMSOL Multiphysics Material Library (skin)
		bone	1313	J/(kg · K)	COMSOL Multiphysics Material Library (bone)
		plate	420	J/(kg · K)	COMSOL Multiphysics Material Library (cast iron)
ρ	density	chicken	1062	kg / m ³	K. Sugiyama. (2013) [7]
		skin	1109	kg / m ³	COMSOL Multiphysics Material Library (skin)
		bone	1085	kg / m ³	measured
		plate	7000	kg / m ³	COMSOL Multiphysics Material Library (cast iron)
ε	emissivity	chicken	0.86	-	measured
		plate	0.92	-	measured
σ	Stefan-Boltzmann's constant		5.676×10^{-8}	W/(m ² ·K ⁴)	
h_t	heat transfer coefficient	chicken	40	W/(m ² ·K)	fitting parameter
		plate	40	W/(m ² ·K)	fitting parameter
T_0	initial temperature		20	°C	measured
T_{air}	ambient temperature		Fig. 3-4	°C	measured
T_h	heater temperature		Fig. 3-4	°C	measured
λ	latent heat of evaporation		2.3×10^6	J/kg	H. Chen <i>et al.</i> (1999) [2]

D	diffusion coefficient		3.91×10^{-10}	m^2/s	COMSOL Application Library (CONVECTION COOKING OF CHICKEN PATTIES)
c_0	initial moisture concentration	chicken	$\frac{0.736\rho}{M_{H_2O}}$	mol/m^3	COMSOL Application Library (CONVECTION COOKING OF CHICKEN PATTIES)
		skin	$\frac{0.416\rho}{M_{H_2O}}$	mol/m^3	COMSOL Application Library (CONVECTION COOKING OF CHICKEN PATTIES)
c_b	air moisture concentration		$\frac{0.02\rho}{M_{H_2O}}$	mol/m^3	COMSOL Application Library (CONVECTION COOKING OF CHICKEN PATTIES)
k_c	mass transfer coefficient		5.06×10^{-7}	m/s	COMSOL Application Library (CONVECTION COOKING OF CHICKEN PATTIES)
M_{H_2O}	water molecular weight		18	g/mol	

本研究において、鶏肉及び鉄板に対する熱伝達係数はフィッティングパラメータとなっており、解析では $40 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ を用いた。熱伝達係数は、一般に流体の種類や流れの速度、伝熱面の形状によって変化する複雑な量であるとされており、定量的に求めるのは難しい[8]。この為、既往の研究で用いられた熱伝達係数から値の妥当性を検証した。

Table 3-3 Heat transfer coefficient

h [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]	Reference
19.252*	H. C. Chang (1998) [9]
25*	H. Chen (1999) [2]
35*	K. Sugiyama (2003) [10]
33.4*	A. H. Feyissa <i>et al.</i> (2013) [3]
44*	F. Rabeler <i>et al.</i> (2018) [5]
41	M. J. Blikra (2019) [4]

*effective (total) heat transfer coefficient (includes the radiative effect)

伝熱解析において、熱伝達係数は輻射の影響を含めた一括もしくは有効熱伝達係数として算出されている場合が多いことがわかる。また、熱伝達係数は先にも述べた通り、風速や対象物の形状によっても変化するため、文献値における熱伝達係数のばらつきも大きい。一方で、近年になるにつれて実測された熱伝達係数は大きくなっていることが見て取れ、オープンのファン機能や性能が向上していることが考えられる。本研究で用いた熱伝達係数については、特に近年の文献値と比較して近い値を示しており、適切な範囲内であると判断した。

3.4 結果及び考察

3.4.1 鶏モモ肉温度履歴及び重量変化

鶏モモ肉焼成過程における温度履歴を Fig. 3-5 に示す.

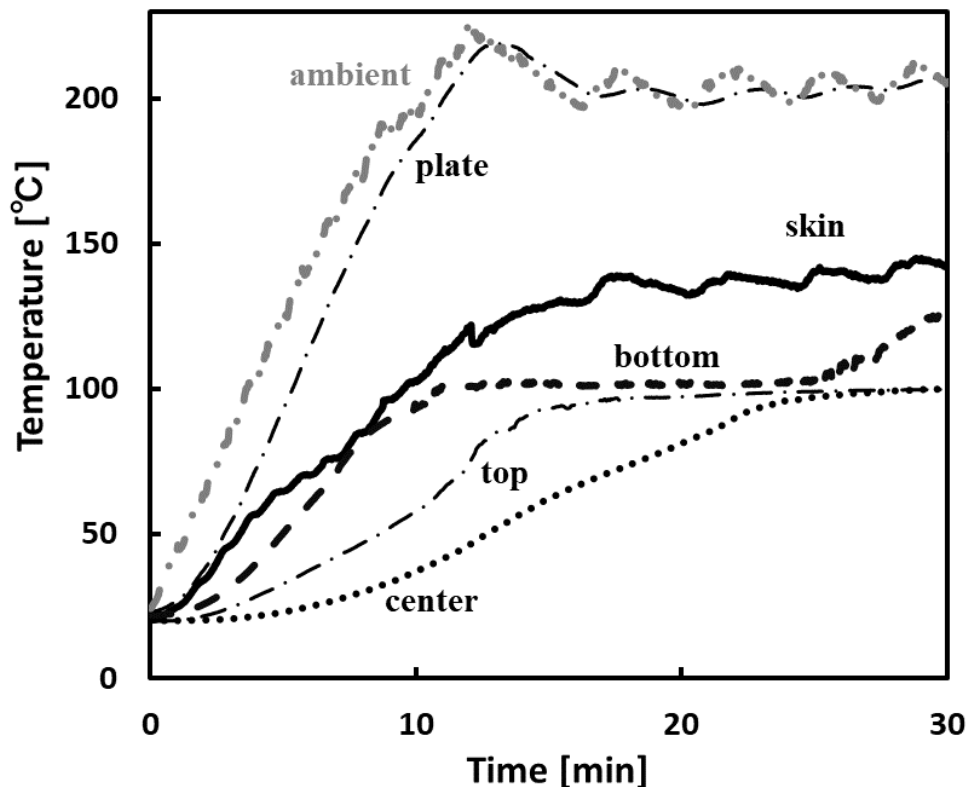


Fig. 3-5 Temperature history during the roasting process of chicken thigh meat

加熱開始後、雰囲気温度が急激に上昇しており、10 min 過ぎには設定温度の 205°C 付近まで到達していることが見て取れる。雰囲気温度の上昇に伴い鉄板温度も上昇しており、雰囲気温度から 2 min 程度遅れて同じ挙動を示している。次に、皮の温度上昇が早く、放射の影響を大きく受けていることが考えられる。下面は鉄板からの伝導伝熱の影響を受け、10 min 程度で 100°C に達しており、以降はドリップの影響により 100°C を超えていないものと考えられる。一方、25 min 以降では温度上昇をしているおり、これは下面の水分が完全に蒸発したためであると考えられる。中心温度は緩やかに上昇していることが見て取れ、25 min 付近で 100°C に達していることが見て取れる。

ここで、重量変化の結果を Table 3-4 に示す。

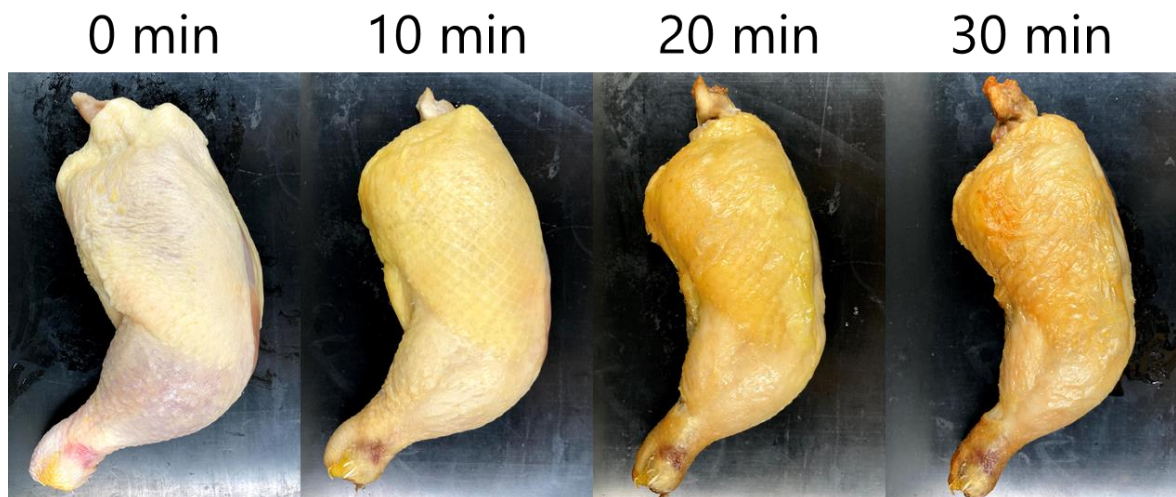
Table 3-4 Weight change during the roasting process of chicken thigh meat

	10 min (n = 3)	20 min (n = 3)	30 min (n = 5)
weight change ratio [%]	3.23	18.91	31.98
standard deviation	0.50	2.53	2.43

重量損率は加熱後 10 min では 3.23%と僅かであるのに対し、20 min では 18.91%, 30 min では 31.98%と減少率が高い。これは、収縮の進行度合いが関係していると考えられ、10 min では皮及び下面のみでしかアクチン変性帯である 80°C付近[11]に達していないのに対し、20 min 以降では中心を含めて 80°Cに達しており、全体が収縮しドロップが流出したため重量損率も大きくなったと考えられる。重量損失については、水分蒸発についても考えられるが、蒸発の大部分は既に収縮によって排出されているドロップからくるとされており[12]、本実験においても収縮によって排出されたドロップの影響が大きいものと考えられる。

3.4.2 鶏モモ肉焼成過程における色彩値取得

加熱 0 min, 10 min, 20 min, 30 min の試料写真を Fig. 3-6, 各時間における $L^*a^*b^*$ 値及び皮表面の温度履歴を Fig. 3-7 に示す。

**Fig. 3-6** Appearance of chicken thigh meat during the roasting process

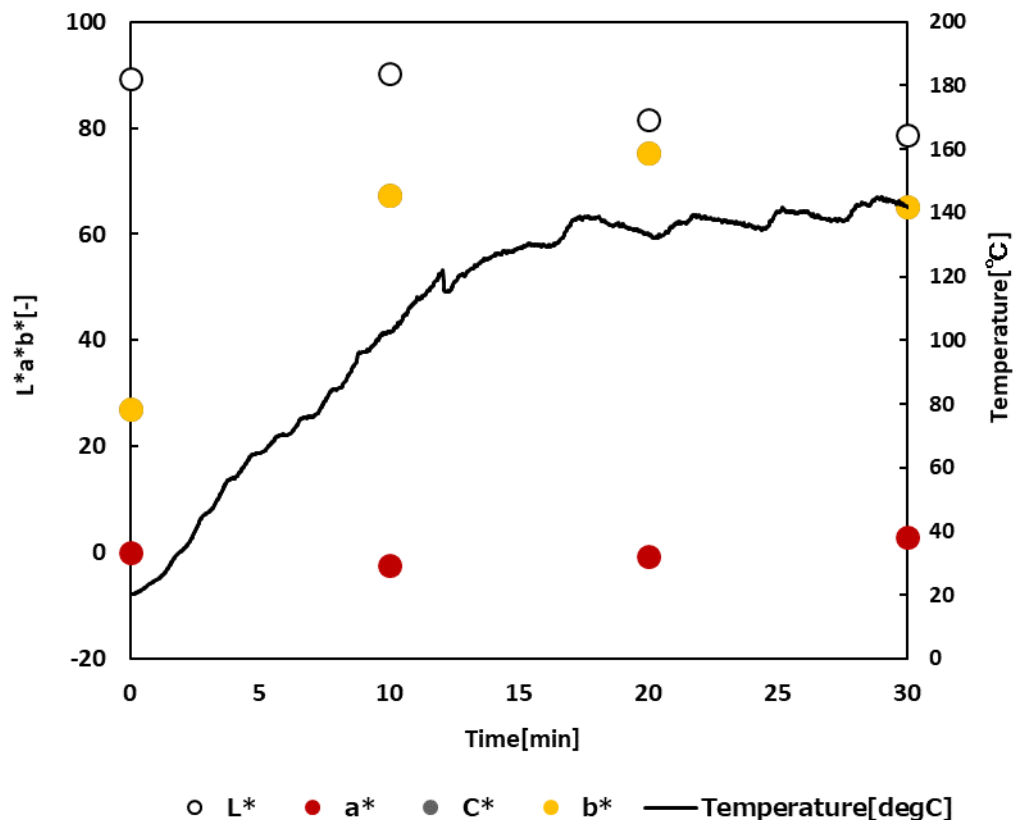


Fig. 3-7 Color change during the roasting process of chicken thigh meat

皮表面の状態について、未加熱（0 min）ではやや皮表面の皺や垂れが見受けられるが、10 min では表面に張りや皮表面の規則的な溝、20 min では全体的な皺や収縮の様子、30 min では細かい多数の皺が観察でき、鶏全体や皮におけるタンパク質変性の様子が見て取れる。

色彩について、未加熱状態（0 min）では皮表面が白～薄いピンク色を呈しているが加熱時間に伴い、薄い黄色～褐色へと変化していることが見て取れる。特に、加熱開始から 20 min までは b*値が急激に上昇しており、加熱に伴って黄色味が増してくることが値からもわかる。一方、a*においては変化が微小であり、赤-緑方向への色度の変化は小さい。L*値に関しては、加熱後 10 min 程度から低下しており、温度にして 100°Cを超えた付近から明度が小さくなり、褐色へと色づいていることがわかる。加熱中の鶏肉における b*値の上昇と a*値の変動については D. L. Fletcher *et al.* (2002)及び S. Wattanachant *et al.* (2005)が報告している例[13, 14]と同様の傾向を示す一方、L*値に関しては上昇傾向を示すとされており、本実験結果とは異なる。これは、対象部位や温度範囲の違いによるものと考えられ、報告例では鶏胸の筋肉を使用、温度範囲は 100°C以下であるのに対し、本実験では皮付きの鶏モモ肉を使用、温度は 10 min 以降において 100°Cを超えていることに由来する。100°Cを超える鶏肉の加熱については、褐変反応、そして炭化に向かって L*値は下降するとされていることから[15]、本実験においても適切な色彩値

の取得ができたと考えられる.

3.4.3 プロトン強調画像

MRI により得た各焼成時間におけるプロトン密度強調画像をそれぞれ Fig. 3-8, 3-9, 3-10 に示す.

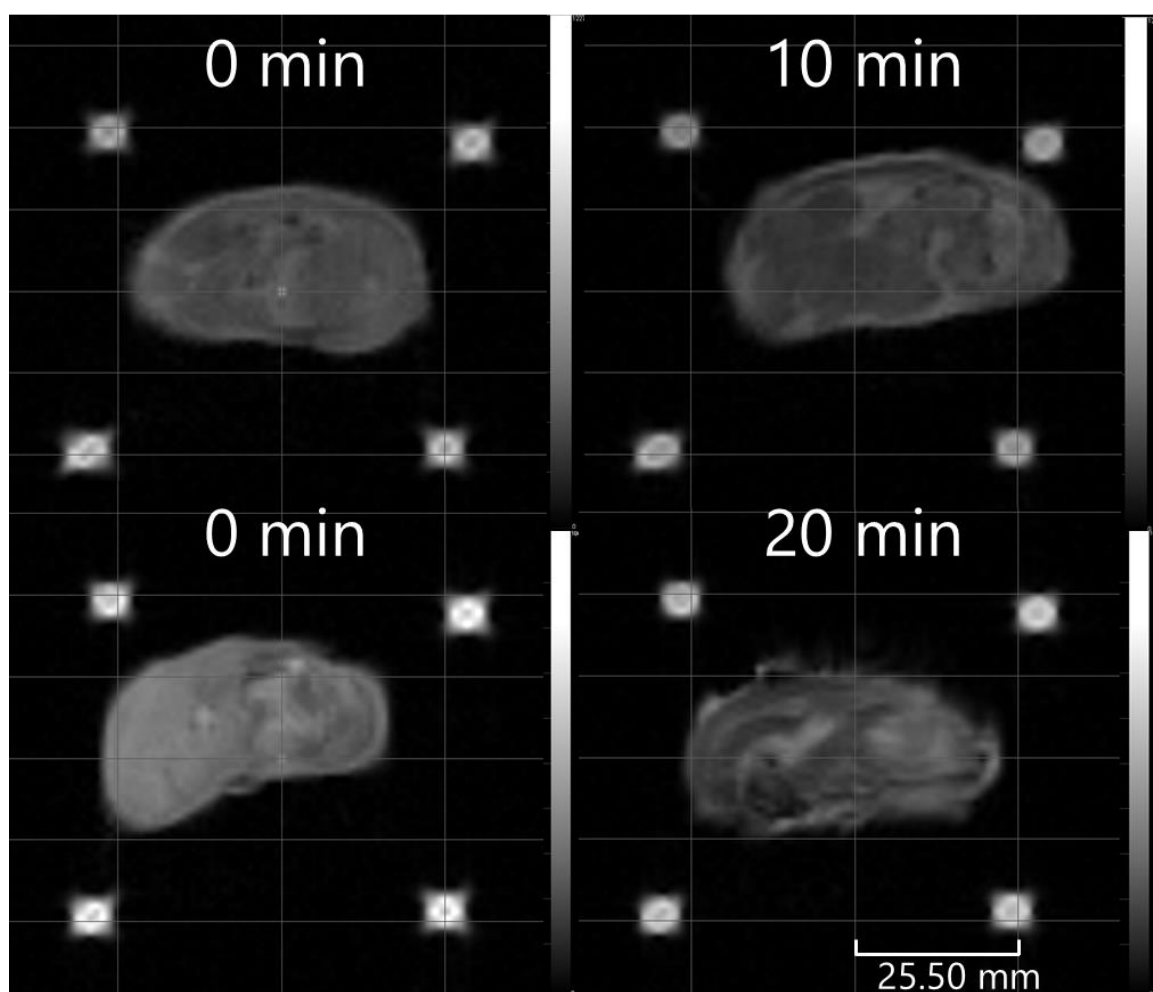


Fig. 3-8 Proton density-weighted images (10 min & 20 min, vertical)

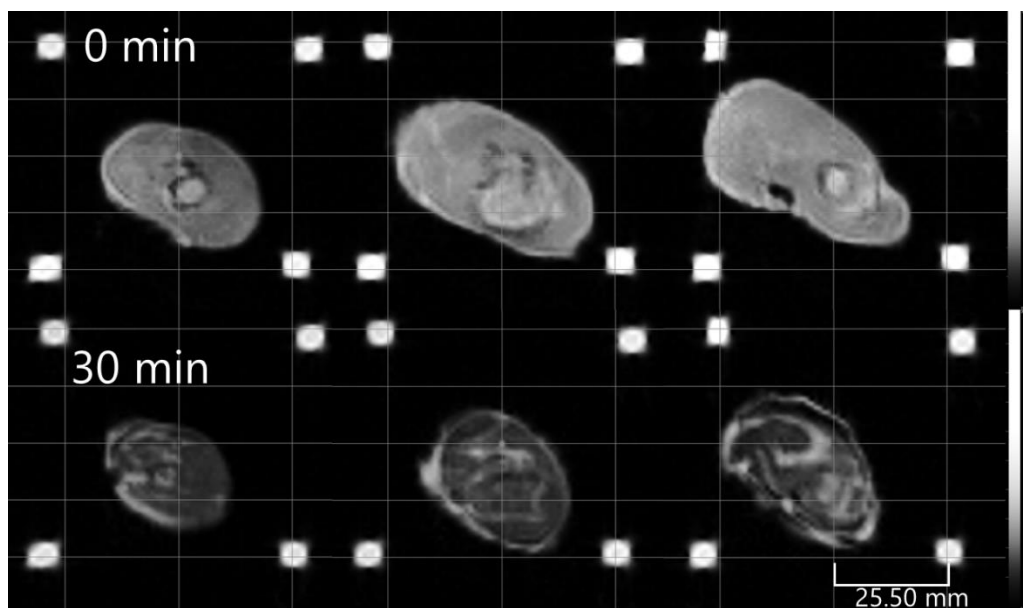


Fig. 3-9 Proton density-weighted images (30 min, vertical)

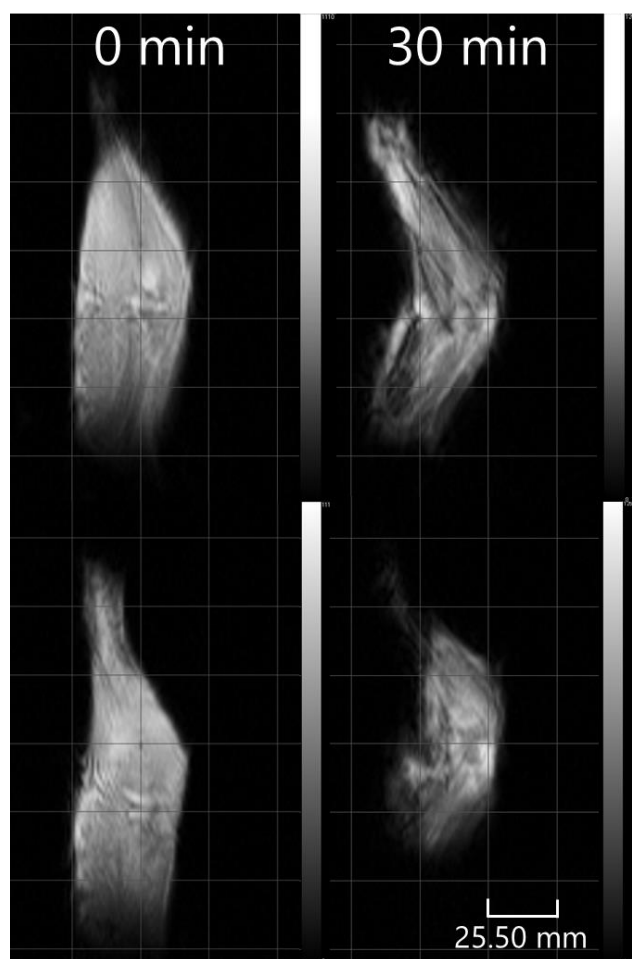


Fig. 3-10 Proton density-weighted images (30 min, horizontal)

Fig. 3-9 は 30 min 焼成前後における同一断面での MRI 画像である。加熱前では画像のシグナル濃淡が均一に分布しており、水分が肉内部で均一に分布している様子が見て取れる。一方、30 min 焼成後の画像では、肉内部での均一性が失われており、収縮によるドリップの流出及び収縮による空隙へのドリップの蓄積が影響していると考えられる。また、30min 焼成後では皮の剥離や全体的な収縮の様子も見て取れ、異なる 5 カ所の断面における平均面積収縮率は 24.9%であった。Fig. 3-10 では鶏モモ肉縦方向断面の MRI 画像であるが、加熱後は縦方向に高強度帯と低強度帯が分布していることが見て取れる。これは、収縮が影響していると考えられ、水分を排出した部分と空隙にドリップが蓄積される部分が存在していることが考えられる。鶏モモ肉縦断面における平均面積収縮率は 11.97%、全長収縮率は 6.48%であり、横断面収縮率を考慮した体積収縮率は 29.8%と加熱前後における重量損率 31.98%と概ね傾向が一致することわかった。

Fig. 3-8 においても加熱前ではプロトンの信号強度が均一であることが見て取れる。20 min 焼成後では水分の流出及び収縮の様子が確認できたが、10 min 焼成後では両者には著しい差異は見受けられなかった。これはタンパク質変性が大きく関与しており、特にアクチン変性温度帯に達していない 10 min 加熱の試料では構造の変化が微小であったと考えられる。また水分分布については主要な変化が 42, 46, 57, 66 及び 76°Cであることが報告されており[16]、10 min 加熱試料においても僅かながら水分の減少の様子が見受けられたのは 40°C程度の温度帯で筋原線維格子からの水の排出があったためと考えられる。そして、細胞外水、筋線維及び網上組織内の水及びマクロ分子と相互作用する水のうち、最長の T2 は”自由水”または”排水”に対応するとされており[17]、高強度に観察される部分は自由水もしくはドリップであることが考えられる。

3.4.4 オーブン内における伝熱量の割合測定

各ブロックにおける温度履歴を Fig. 3-11 に示す.

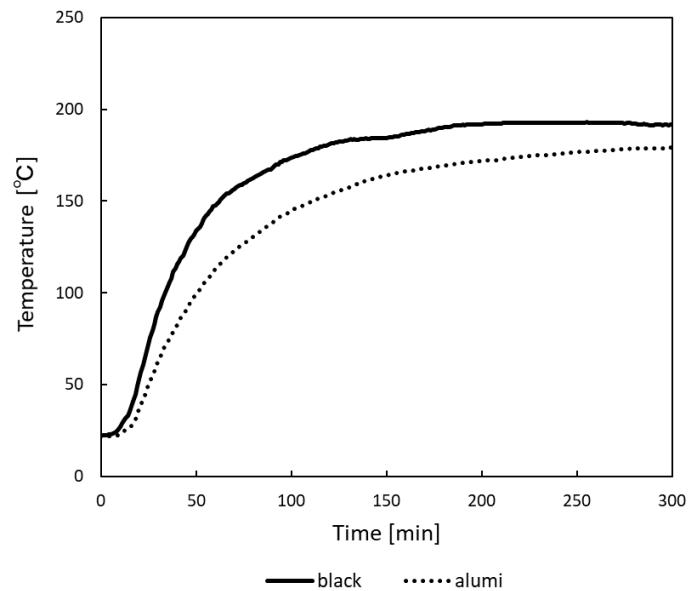


Fig. 3-11 Temperature rise curves for both blocks

両者とも類似した温度推移ではあるものの黒ブロックの方がやや高温であることが見て取れる. これは放射率の違いによるものであると考えられ, 同実験を行った Shibukawa (1985)が示した強制対流式ガスオーブン及び電気オーブンの温度上昇曲線と同様の結果を得た[1]. これより, (3.11), (3.12)式から放射による伝熱量の割合を算出した結果を以下の Fig. 3-12 に示す.

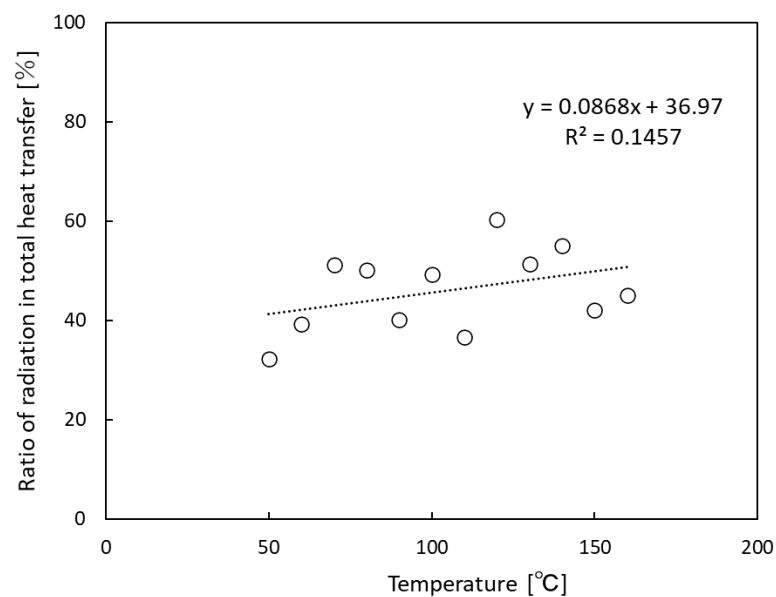


Fig. 3-12 Ratio of radiation in total heat transfer (convective roast oven)

各点にバラつきはあるものの概ね 40~60%の範囲に収まっており、高温側になるにつれて伝熱量のうち放射が占める割合が大きくなる傾向が見て取れる。また、本算出値の平均は 46%であり、Shibukawa (1985)が同実験による強制対流式電気オーブンの放射による伝熱量を 40%程度であると報告していることから[1], 本オーブン（強制対流モード）における結果も妥当な範囲であることが考えられる。

3.4.5 鶏モモ肉焼成過程における温度予測

焼成完了後における外観温度を Fig. 3-13, 断面温度を Fig. 3-14, 断面水分濃度分布を Fig. 3-15 に示す。

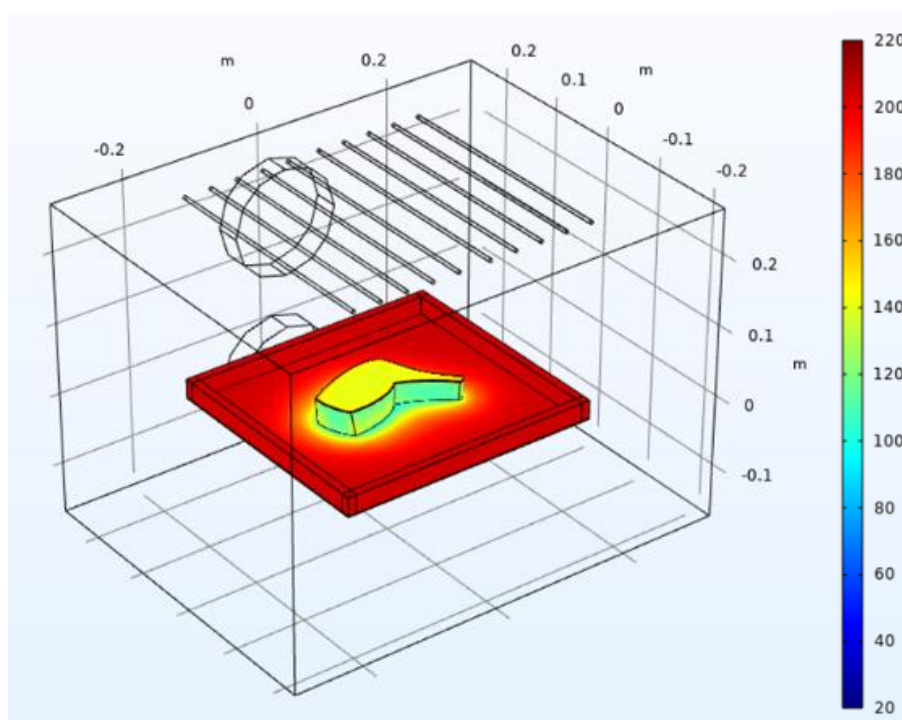


Fig. 3-13 Appearance of analysis temperature

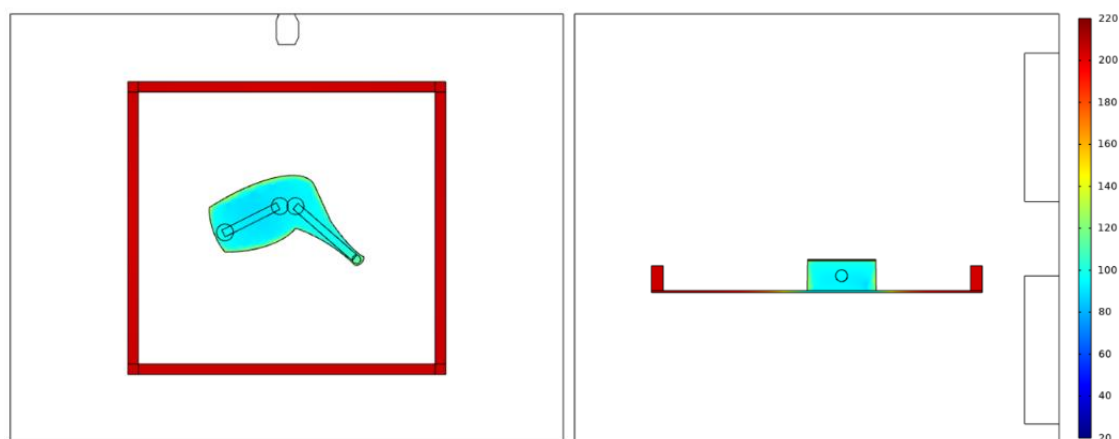


Fig. 3-14 Cross section of analysis temperature

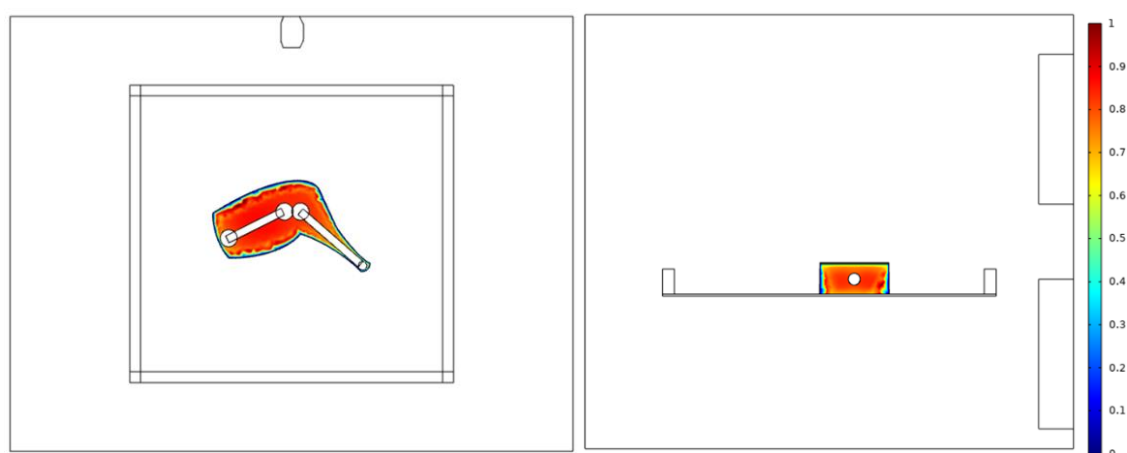


Fig. 3-15 Cross Section of analysis moisture concentration

外観温度から加熱終了時点で、鉄板は200℃程度、鶏モモ肉においては皮表面が140℃程度まで上昇しており、側面では100℃~140℃程度での分布がみられる。断面温度からは、骨を含めた内部全体として100℃程度である一方、最表面の一部や脚先や周囲では120~140℃に達している。

また、断面濃度分布から初期状態と比較して、水分は最表面において0%を示している一方、中心部では80~90%程度であることが見て取れる。本解析では、収縮によるドリップ排出及び内部水分蒸発を考慮したが、表面からの水分蒸発の影響が大きいことわかる。

ここで、実測値とシミュレーションの温度履歴の比較を Fig. 3-16、加熱過程の重量減少と全体の水分濃度減少との比較結果を Fig. 3-17 に示す。

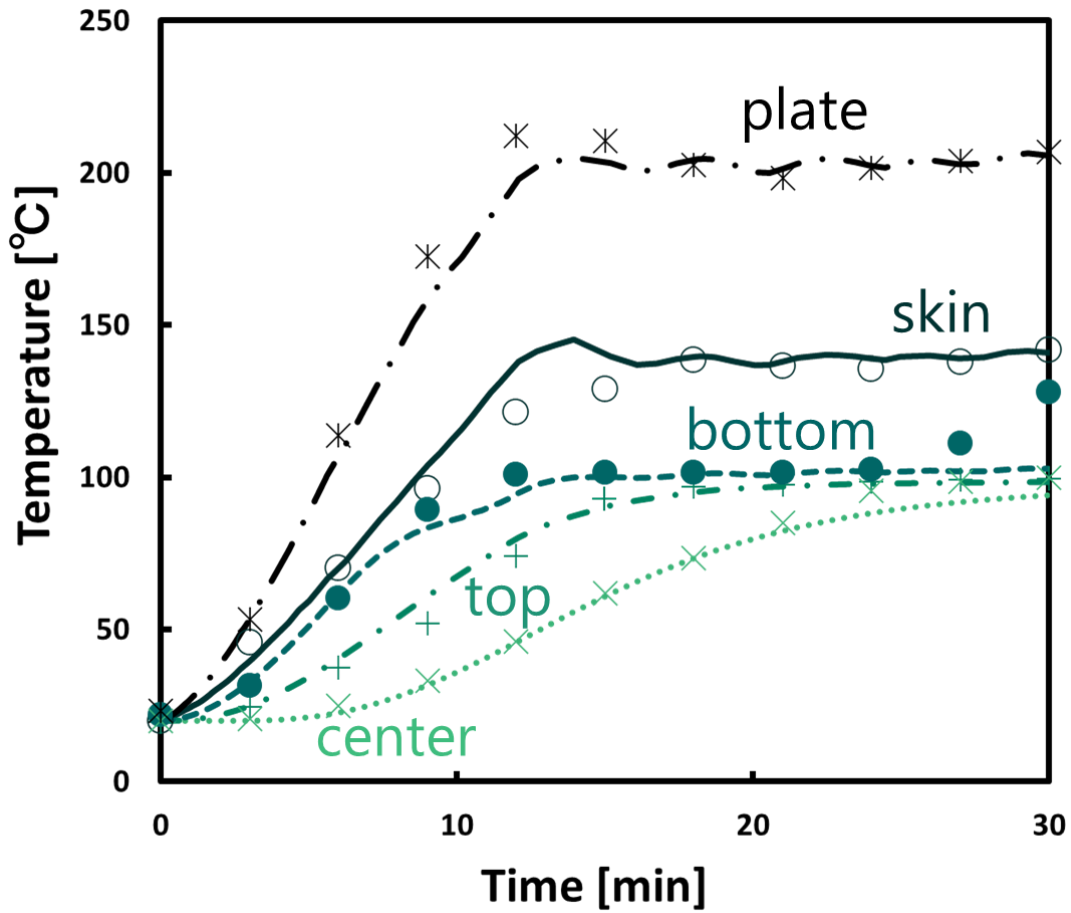


Fig. 3-16 Temperature history and temperature simulation in the roasting process of chicken thigh meat

温度履歴の比較の結果、全体として両者は一致していることが見て取れる。本解析では、タンパク質変性に伴った鶏皮の乖離を考慮したが、皮温度の解析値と実測値から適切に反映されていることが見て取れる。一方で、20 min 以降における下面の温度上昇並びに、中心温度の最終到達温度においてはやや両者に乖離がみられる。これは下面がドリップ（水分）で十分に満たされ続けるという仮定のもと計算しているためであり、ドリップの蒸発を反映させる必要があると考えられる。ここで、解析値と実験値の差を数値化するために両者の平均平方二乗誤差（RMSE）、平均平方二乗誤差率（RMSPE）を算出した。

$$\text{Root Mean Squared Error (RMSE)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=0}^n (T_{exp} - T_{cal})^2} \quad (3.22)$$

$$\text{Root Mean Squared Percentage Error (RMSPE)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left(\frac{T_{exp} - T_{cal}}{T_{exp}} \right)^2} \quad (3.23)$$

T_{exp} : 温度の実測値[°C], T_{cal} : 温度の解析値[°C]

Table 3-5 RMSE and RMSPE of this analysis result

	RMSE [°C]	RMSPE [%]
center	3.71	3.96
skin	8.29	5.93
top	3.71	4.25
bottom	6.48	4.09
plate	7.48	3.22

本解析結果において、実測値との比較の結果、いずれの点においてもその差は 5%以下であることが見て取れ、精度の高い温度シミュレーションが構築できたと考えられる。またここで、各焼成過程における重量変化の実測値と解析値の結果を Fig. 3-17 に示す。

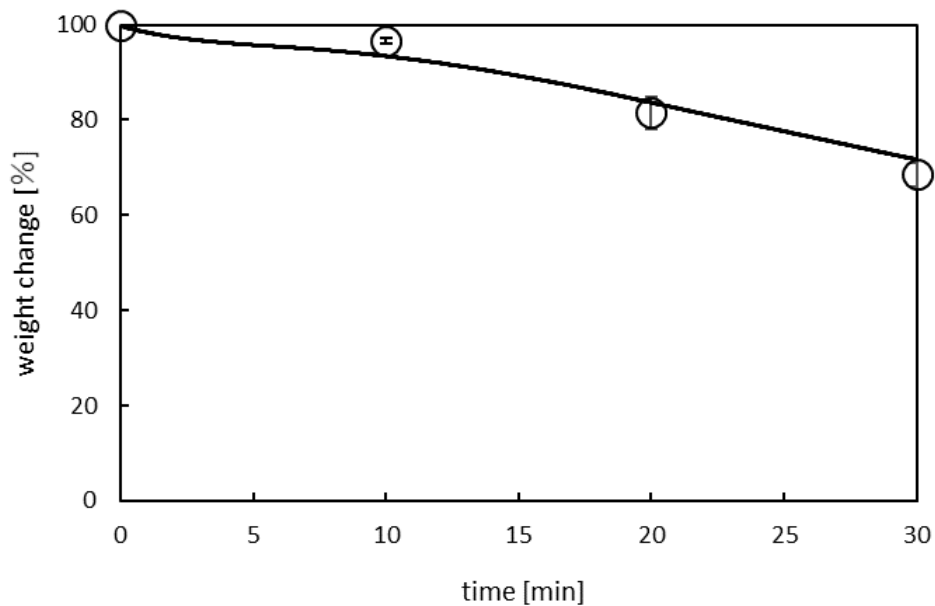


Fig. 3-17 Weight change analysis of chicken thigh meat during roasting process

重量変化において、解析値は水分濃度変化の割合から算出しているが、減少傾向は一致していることが見て取れる。一方で、解析値について 10 min では実測値を下回っているのに対し、20 min, 30 min では実測値を上回っている。これは、タンパク質変性に関しての遅延が組み込まれていないことが要因であると考えられる。実際には、タンパク質変性してからドリップ流出まで時間を要することが考えられるため、これを適切な遅延の係数を組み込むことでより高精度な予測が可能になると推察される。

3.5 結論

本章では、骨付き鶏モモ肉を対象とした強制対流式オーブンでの調理過程の解析、伝熱シミュレーションの構築を目的とした。

鶏モモ肉の温度履歴及び現象把握では、強制対流の影響により、雰囲気温度、皮温度、鉄板温度が急激に上昇し、これに伴い下面温度が上昇した。上面温度の上昇はやや遅く、15 min 程度で 100°C に達し、中心温度は緩やかに上昇し 25 min 付近で 100°C に達した。加熱終了時における重量損率は 31.98% であり、調理過程の重量損率からタンパク質変性による収縮の影響が大きいことがわかった。

鶏モモ肉焼成過程における色彩値の取得では、 a^* 値の変化は微小であったのに対し、加熱開始から b^* 値の急激な上昇がみられた。 L^* は皮表面温度が 100°C を超えた付近から下降しており、褐変の様子が数値からも伺えた。これらの色彩変化は既往の研究と同様の傾向であった。

MRI 測定では、加熱に伴った全体としての収縮の様子や水分流出の様子が確認できた。加熱前は内部の水分分布は均一であったのに対し、加熱後では不均一となっており、収縮後の空隙にドリップが保持されている様子が伺えた。

本研究で使用するオーブンの伝熱量における輻射の割合を算出した結果、40~60% 程度であることがわかった。また、温度が高温側になるにつれてその割合が高くなる傾向も見て取れた。

鶏モモ肉焼成過程における温度シミュレーションでは、皮の剥離も含めて全体的な一致を示した。ドリップ蒸発後の挙動を計算できなかった下面を除いては、実測値と解析値の平均平方二乗誤差率は 5% 以内であった。また、水分濃度変化予測についても実測した重量減少傾向と一致した。

3.6 参考文献

- 1) S. Shibukawa; “Heating ability of ovens different in heat transfer methods (Part 3) The ration of the amounts of heat transfer by radiation and baking color” (in Japanese). J. home economics of Jpn., **36**, 492-496 (1985).
- 2) H. Chen, B. P. Marks, R.Y. Murphy; Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties. J. Food Eng., **42**, 139-146 (1999)
- 3) A. H. Feyissa, K. V. Gernaey, J. A.-Nissen; 3D modelling of coupled mass and heat transfer of a convection-oven roasting process. Meat Sci., **93**, 810-820 (2013).
- 4) M. J. Blikra, D. Skipnes, A. H. Feyissa; Model for heat and mass transport during cooking of cod loin in a convection oven. Food Control, **102**, 29-37 (2019).
- 5) F. Rabeler, A. H. Feyissa; Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convective oven. J. Food Eng., **237**, 60-68 (2018).
- 6) R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, eds.; “Transport phenomena (2nd ed.)” John Wiley & Sons, Inc., 2001, p. 148, 149.
- 7) K. Sugiyama; “Cooking and thermal properties” (in Japanese). J. cookery sci. Jpn., **46**, 299-303 (2013).
- 8) 渋川祥子編; “食品加熱の科学”, 朝倉書店, 1996, pp. 19-22.
- 9) H. C. Chang, J. A. Carpenter, R. T. Toledo; Modeling heat transfer during oven roasting of unstuffed turkeys. J. Food Sci., **63**, 257-261 (1998).
- 10) K. Sugiyama; “Baking in Oven” (in Japanese). J. the integrated study of dietary habits, **13**, 251-255 (2003).
- 11) J. M. Kijowski, M. G. Mast; Thermal properties of proteins in chicken broiler tissues. J. Food sci., **53**, 363-366 (1988).
- 12) A. Kondjoyan, S. Oillic, S. Portanguen, J.B. Gros; Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat. Meat Sci., **95**, 336-344 (2013)
- 13) D. L. Fletcher, M. Qiao, D. P. Smith; The relationship of raw broiler breast meat color and pH to cooked meat color and pH. Poultry Sci., **79**, 784-788 (2000).
- 14) S. Wattanachant, S. Benjakul, D. A. Ledward; Effect of heat treatment on changes in texture, structure and properties of Thai indigenous chicken muscle. Food Sci., **93**, 337-348 (2005).
- 15) 石澤薫; “鶏肉の焼成過程における焼き色変化と香気成分の関係”. 東京海洋大学修士学位論文 (2020).
- 16) E. Micklander, B. Peshlov, P. P. Purslow, S. B. Engelsens; NMR-cooking: monitoring the changes in meat during cooking by low-field 1H-NMR. Trends in Food Sci. & Tech., **13**, 341-346 (2002).
- 17) P. S. Belton, A. M. Gil, G.A. Webb, D. Rutledge ed.; “Magnetic Resonance in Food Science Latest Developments”, The Royal Society of Chemistry, 2003, pp. 161-171.

第4章 丸鶏における伝熱シミュレーション構築

4.1 はじめに

本研究では、肉類を対象としたオープン調理過程の解析、伝熱シミュレーションの構築を目的としている。本章では、形状が複雑であり、内部に空洞が存在する丸鶏を対象として強制対流式オープンでの加熱を想定した研究を行った。

伝熱シミュレーションにあたって、初めに焼成過程における丸鶏の温度履歴の取得や現象把握のため、焼成実験及び重量変化測定を行った。この際、丸鶏内部が空洞である空洞系とマッシュポテトを詰めた充填系で比較し、その差異についても把握した。そして、丸鶏の空洞系と充填系を対象とした温度及び水分濃度変化シミュレーションの構築を行った。

4.2 実験方法

4.2.1 空洞系

実験試料として、国産若鳥中抜き（丸鶏、肉のハナマサ）を 5°C で冷蔵保管したものを用いた。冷蔵保管された試料は内部を水洗いし、キッチンペーパーで十分水気をとった後、丸鶏の表面（上面）、裏面（下面）、空洞及び雰囲気、鉄板に K 型熱電対（東洋熱科学(株)）を設置した。熱電対を設置した丸鶏は鉄板中心部に載せ 20°C に設定した低温恒温槽（福島工業(株), FMU-054I）で恒温となるまで放置した後、強制対流式電気オープン（SAMSUNG）の下段（Rack : 1, 38 cm from heater）に設置した。その後、予備加熱なしで 205°C（400°F）、60 min 加熱し、加熱過程での温度履歴を取得し、加熱前後の重量変化から重量損率を(4.1)式より求めた。

$$\text{Weight loss ratio [\%]} = \frac{W_b - W_a}{W_b} \times 100 \quad (4.1)$$

ここで、 W_b : 加熱前重量 [g], W_a : 加熱後重量 [g]

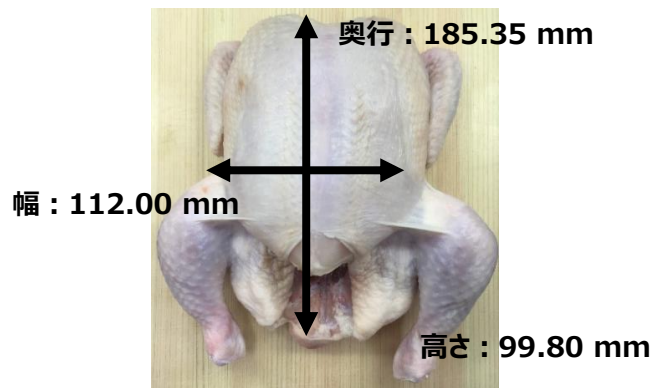


Fig. 4-1 Measurements of chicken thigh meat

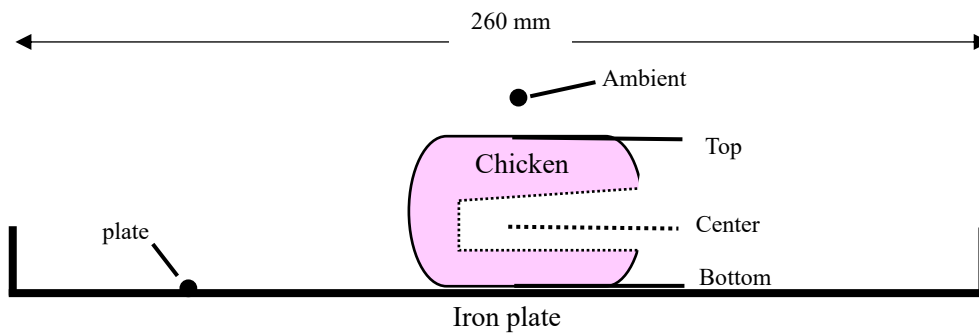


Fig. 4-2 Thermocouple location

4.2.2 充填系

実験試料として国産若鳥中抜き（丸鶏，肉のハナマサ）を 5℃で冷蔵保管したものを用いた。また，空洞充填物にはマッシュポテト（乾燥ポテト 100 g + 熱水 400 ml）を使用し，丸鶏と同様に試料調製後，5℃で冷蔵保管した。冷蔵保管された丸鶏は内部を水洗いし，キッチンペーパーで十分水気をとった後，マッシュポテトを空洞に充填し，丸鶏の表面（上面），裏面（下面），空洞中心部及び雰囲気，鉄板に K 型熱電対（東洋熱科学(株)）を設置した。熱電対を設置した丸鶏は鉄板中心部に載せ 20℃に設定した低温恒温槽（福島工業(株), FMU-054I）で恒温となるまで放置した後，強制対流式電気オーブン（SAMSUNG）の下段（Rack : 1, 38 cm from heater）に設置した。その後，予備加熱なしで 205℃（400°F），60 min 加熱し，加熱過程での温度履歴を取得し，加熱前後の重量変化から重量損率を(4.1)式より求めた。

4.3 COMSOL Multiphysics による伝熱解析

4.3.1 解析モデル

本解析では、丸鶏を強制対流式電気オーブン（SAMSUNG）で加熱することを想定した。丸鶏は鉄板上に設置し、上部ヒーターからの輻射伝熱、ファンによる庫内の対流伝熱を考慮した。また、丸鶏及び鉄板内では熱伝導により熱移動するとし、丸鶏表面からの水分蒸発を考慮し、空洞系では空洞内で空気による自然対流が生じることを想定した。

4.3.2 基礎式

(1) 物質移動

本解析における水の移動は水分濃度勾配に比例し、フィックの法則に従うものとする。水の拡散流速 J [mol/(m²·s)] は

$$J = -D \operatorname{grad}(c) \quad (4.2)$$

ここで、 D ：水分拡散係数[m²/s]、 c ：濃度[mol/m³]

この式を基に、食品内で水の物質収支をとると、基礎式として(2)式を得る。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c) = 0 \quad (4.3)$$

また、初期条件は選択ドメイン内での水分濃度は均一とし

$$c = c_0 \quad (4.4)$$

境界条件は

$$\mathbf{n} \cdot (D \nabla c) = k_c (c_b - c) \quad (4.5)$$

ここで、 k_c ：物質移動係数[m/s]、 c_b ：庫内固体相当濃度[mol/m³]

(2) 熱移動

本解析における熱移動は、フーリエの熱伝導法則に従うとし、熱流束 J [W/m²] は

$$J = -k \text{ grad}T \quad (4.6)$$

ここで, k : 熱伝導率[W/(m·K)], T : 温度[K]

この式を基に, 熱収支をとると基礎式として(6)式を得る.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \nabla \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (4.7)$$

ここで, ρ : 密度[kg/m³], C_p : 比熱容量[J/(kg·K)], t : 時間[s]

また, 初期条件は選択ドメイン内での温度分布は均一とし

$$T = T_0 \quad (4.8)$$

境界条件は

$$\mathbf{n} \cdot (k \nabla T) = h_t (T_{air} - T) + \varepsilon \sigma (T_h^4 - T^4) + \lambda \mathbf{n} \cdot (D \nabla c) \quad (4.9)$$

ここで, h_t : 熱伝達係数[W/(m²·K)], T_{air} : 雰囲気温度[K], T_h : ヒーター温度[K]

λ : 蒸発のモル潜熱[J/mol], D : 水分拡散係数[m²/s], c : 濃度[mol/m³]

ε : 放射率[-], σ : Stefan Boltzmann 定数[W/(m²·K⁴)]

(3) 自然対流

本解析において, 丸鶏内の空洞が空気で満たされている場合, 温度差による自然対流が生じるものとする. 流体は空洞内を自由に移動することは可能だが, 不透過性の壁から流出することはない. ここで流体は非圧縮性流とすると Navier-Stokes 方程式及び連続の式より

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right\} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (4.10)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4.11)$$

ここで, $\mathbf{u}$: 流速ベクトル, p : 圧力[Pa], $\mathbf{g}$: 重力加速度 (=9.8 m/s²)

ρ : 密度[kg/m³], μ : 粘性係数[Pa · s]

また、定常状態では、流体の熱バランスは次の方程式で表される。

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (4.12)$$

ここで、 T : 温度[K], k : 熱伝導率[W/(m · K)], C_p : 流体の比熱 [J/(mol · K)]

4.3.3 解析

数学モデルは、ソフトウェア COMSOL Multiphysics®バージョン 5.6 の有限要素法（FEM）を使用して計算した。全てのドメインはフリー四面体法を使用してメッシュ化し、COMSOL Multiphysics により定義されたメッシュ分割設定”Extra fine”を丸鶏, ”Finer”を空洞, ”Extremely coarse”を鉄板及びヒーター, ”Coarser”をオープンに適用した。

また、解析モデルは実際寸法を再現して作成しており、全体モデルを Fig. 4-3、各寸法を Table 4-1 に示す。丸鶏モデルでは、主に空洞内の影響を解析するため、胴体部分のみに着目しており、手羽、脚及び骨のモデル化は行っていない。ここで、各熱物性値（熱伝導率、密度、比熱）及び条件を Table 4-3 に示す。また、本解析において空洞境界は開放境界とし、境界面での流入量の条件設定は行っていない。解析は時間依存ステップとし、0 s～3600 s まで 0.1 s 刻みとして計算を行った。

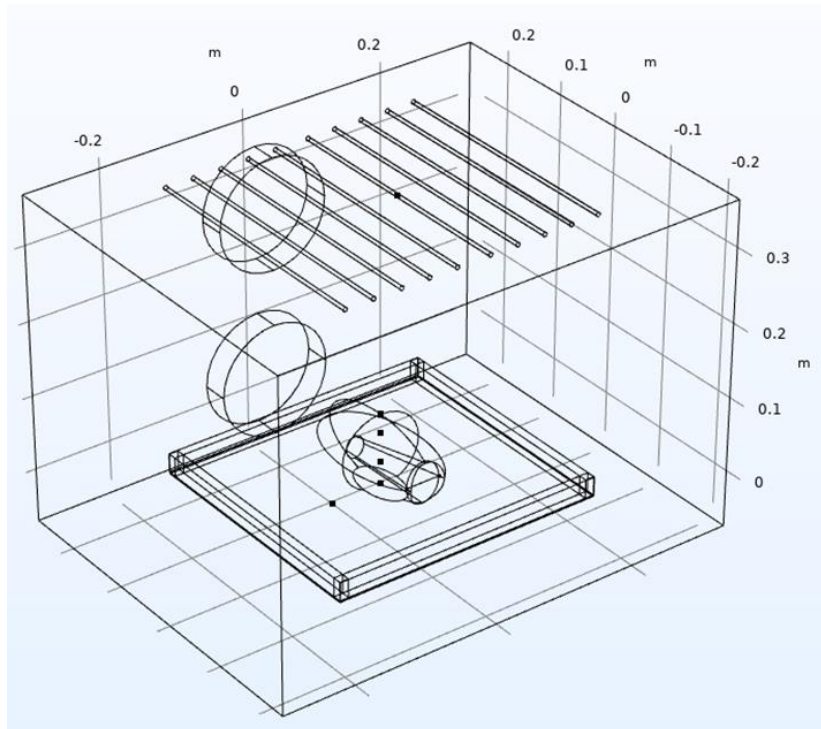


Fig. 4-3 Analysis model

Table 4-1 Measurements of model

	Width [m]	Length [m]	Height [m]
oven	0.635	0.49	0.435
heater	ϕ 0.006		0.34
plate	0.365	0.335	0.01
whole chicken	0.055 (a-radius)	0.1 (b-radius)	0.05 (c-radius)
hollow	0.03 (a-radius)	0.025 (b-radius)	0.15

また, Table 4-3 に示すマッシュポテトの熱物性値のうち, 熱伝導率 k [W/(m·K)], 比熱 C_p [J/(kg·K)]については Y. Choi *et al.* (1986)が提案している食品組成成分から概算する方法[1]により算出した. 本研究では, 日本食品標準成分表 2015 年版(七訂)に掲載されている乾燥マッシュポテトの組成成分[2]及び水との混合比(1:4)から各値を算出した.

$$k = 6.2313 \times 10^{-6} T^2 + 5.0898 \times 10^{-3} T - 0.42235 \quad (4.13)$$

$$C_p = 5.4857 \times 10^{-6} T^2 + 3.2749 \times 10^{-3} T + 3.2092 \quad (4.14)$$

T : 温度 [K]

Table 4-2 Composition of dried mashed potato [2]

	Water	Protein	Fat	Carbohydrate	Ash
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Dried mashed potato	81.5	1.3	0.1	16.6	0.5

Table 4-3 Input properties in the model

symbol	property	subject	Value/equation	unit	source
k	thermal conductivity	chicken	0.513	W/(m·K)	K. Sugiyama. (2013) [3]
		potato	eq. (4.13)	W/(m·K)	Y. Choi <i>et al.</i> (1986) [1]
		plate	50	W/(m·K)	COMSOL Multiphysics Material Library (cast iron)
C_p	specific heat	chicken	3591	J/(kg · K)	K. Sugiyama. (2013) [3]
		potato	eq. (4.14)	J/(kg · K)	Y. Choi <i>et al.</i> (1986) [1]
		plate	420	J/(kg · K)	COMSOL Multiphysics Material Library (cast iron)
ρ	density	chicken	1062	kg / m ³	K. Sugiyama. (2013) [3]
		potato	1050	kg / m ³	M. Kawaguchi (2020) [4]
		plate	7000	kg / m ³	COMSOL Multiphysics Material Library (cast iron)
ε	emissivity	chicken	0.86	-	measured
		plate	0.92	-	measured
σ	Stefan-Boltzmann's constant		5.676×10 ⁻⁸	W/(m ² ·K ⁴)	
h_t	heat transfer coefficient	chicken	30	W/(m ² ·K)	fitting parameter
		plate	30	W/(m ² ·K)	fitting parameter
T_0	initial temperature		20	°C	measured
T_{air}	ambient temperature		Fig. 4-4, 4-5	°C	measured
T_h	heater temperature		400	°C	measured
λ	latent heat of evaporation		2.3×10 ⁶	J/kg	H. Chen <i>et al.</i> (1999) [5]
D	diffusion coefficient		3.91×10 ⁻¹⁰	m ² /s	COMSOL Application Library (CONVECTION COOKING OF CHICKEN PATTIES)
c_0	initial moisture concentration		$\frac{0.736\rho}{M_{H_2O}}$	mol/m ³	COMSOL Application Library (CONVECTION COOKING OF CHICKEN PATTIES)

c_b	air moisture concentration	$\frac{0.02\rho}{M_{H_2O}}$	mol/m ³	COMSOL Application Library (CONVECTION COOKING OF CHICKEN PATTIES)
k_c	mass transfer coefficient	5.06×10^{-7}	m/s	COMSOL Application Library (CONVECTION COOKING OF CHICKEN PATTIES)
M_{H_2O}	water molecular weight	18	g/mol	
p_0	relative pressure constraint	0	Pa	
p_{ref}	reference pressure	1.0133×10^5	Pa	

4.4 結果及び考察

4.4.1 丸鶏焼成過程における温度履歴及び重量変化の比較

丸鶏焼成過程について空洞系の温度履歴を Fig. 4-4, 充填系の温度履歴を Fig. 4-5 に示す.

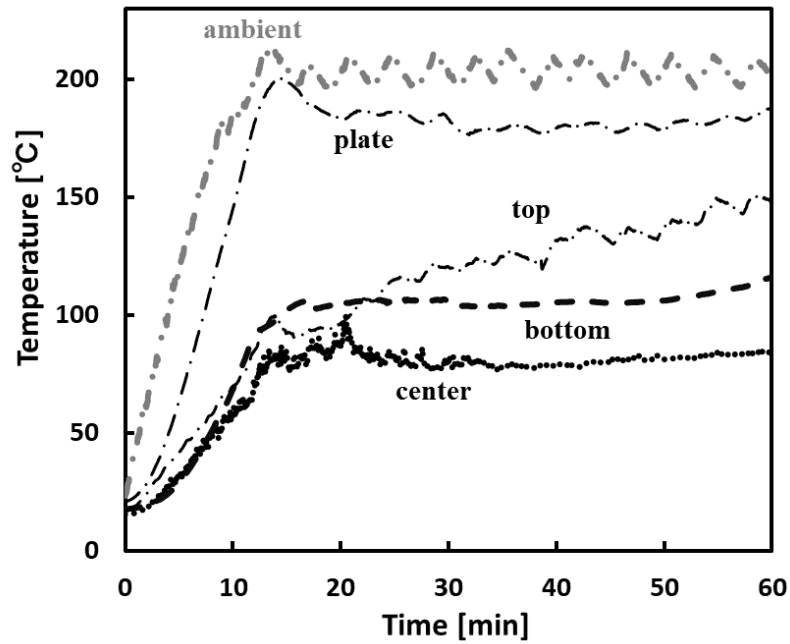


Fig. 4-4 Temperature history in the hollow model

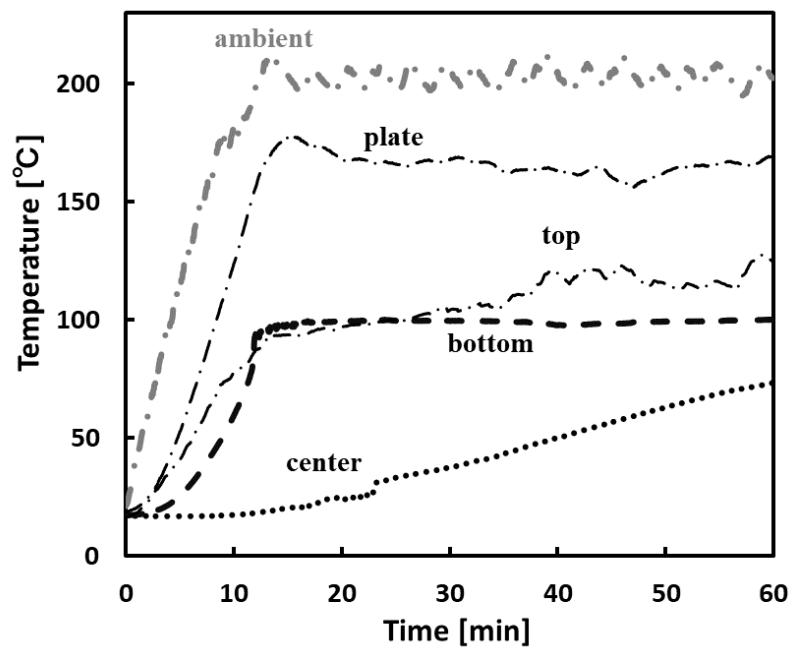


Fig. 4-5 Temperature history in the stuffing model

加熱開始後、空洞系、充填系ともに雰囲気温度が急激に上昇し、10 min 過ぎには設定温度の 205°C 付近まで達していることが見て取れる。雰囲気温度の上昇に伴い、鉄板温度も上昇しているが、到達温度が異なり、空洞系では 180°C 程度で一定になっているのに対し、充填系では約 10°C 程度低い位置で一定になっていることがわかる。これは、単なる測定差であることも考えられるが、丸鶏と鉄板の接触面積の差異やドリップ量の多寡に影響されている可能性も考えられる。次に、上面の温度上昇度合いが早く、100°C 付近で一度停滞した後、両系とも 100°C を超えて温度上昇していく様子が見て取れる。これは、第 3 章における鶏モモ肉焼成実験でも同様の傾向を示しており、上面（皮部分）における水分蒸発の影響が大きいと考えられる。下面では、温度上昇した鉄板からの伝導伝熱によって、温度が上昇していると考えられる。下面に関してはドリップの影響により水分が鉄板と下面の空隙に留まっているため、100°C 付近で温度が停滞することが推察される。最後に中心温度であるが、空洞系及び充填系の温度履歴において最も差が顕著であった。空洞系では、下面や上面温度と同程度の温度上昇度合いを示しており、オーブン庫内の熱風が空洞にすぐさま流入していることが伺える。一方で、80°C 程度からは温度上昇をしておらず、空洞内での水分蒸発やドリップ流出により温度が停滞していたことや対流によって熱電対位置がずれており、内部の肉部分に接触していた可能性が考えられる。充填系では、空洞系での温度上昇に反して、緩やかに温度上昇しており、空洞内に隙間なく食品を充填した場合、単一食品のような温度上昇を示すことが明らかとなった。

ここで、空洞系および充填系の重量変化及び重量損率を Table 4-4 に示す。

Table 4-4 Comparison of weight change

	Hollow model	Stuffing model
weight before roasting [g]	1176	1554
weight after roasting [g]	848	1299
weight change [g]	-328	-255
weight loss ratio [%]	27.9	16.4

重量損率に関して、空洞系では 27.9% であったのに対し、充填系では 16.4% とその差は約 10% であった。これは、充填物からの水分損失が僅かであったことや丸鶏から排出された空洞内でのドリップが充填物に吸収され流出が抑制された可能性が考えられる。

4.4.2 丸鶏空洞系における温度及び水分濃度シミュレーション

焼成完了後（60 min）における外観温度を Fig. 4-6、断面温度、空洞内速度及び水分濃度分布予測を Fig. 4-7 に示す。

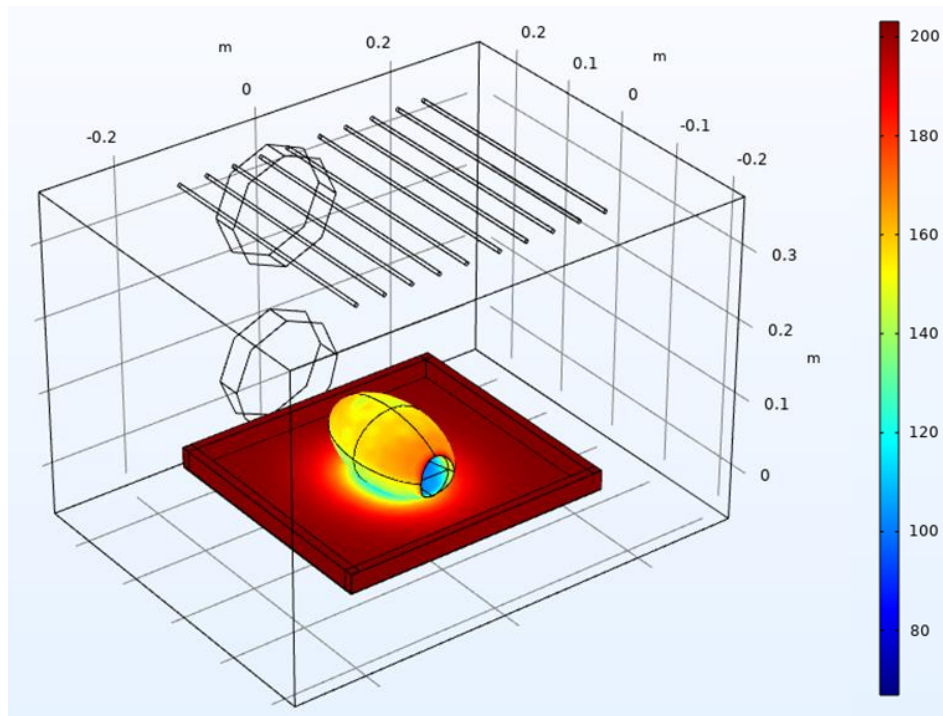


Fig. 4-6 Appearance of analysis temperature

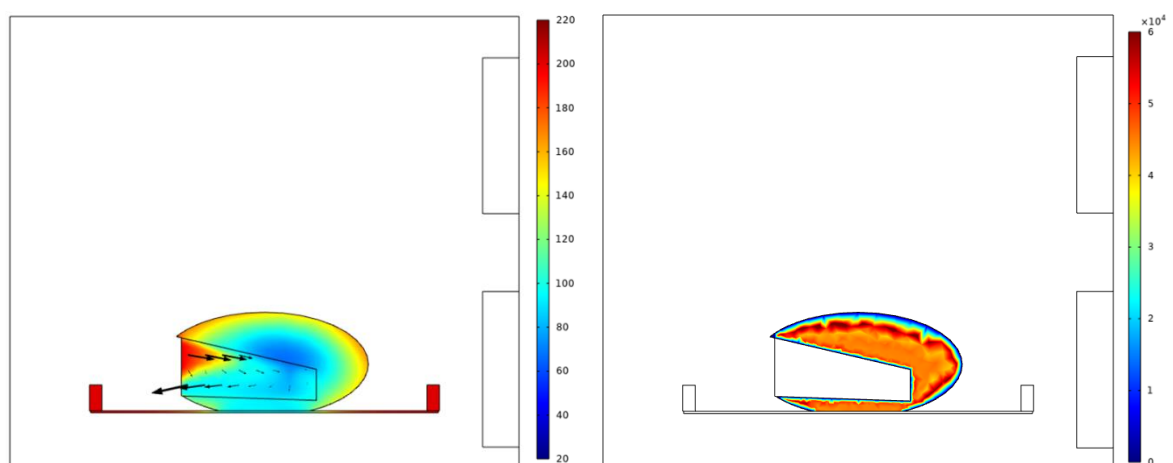


Fig. 4-7 Cross-sectional distribution (left: temperature & speed, right: moisture concentration)

表面温度に関して、Fig. 4-6 から均一な温度分布ではなく、ムラがあることが見て取れる。これは、放射が影響していると考えられ、ヒーター照射角度及び被照射物表面の角度によって受ける熱量が異なることが要因であると考えられる。断面の温度分布に関して、空洞境界部では雰囲気温度（205℃）程度の高温になって一方、空洞深層部では温度上昇が限定的であり、100℃程度に留まっていることが見て取れる。これは、空洞内での水分蒸発を考慮していることや空気の流れが空洞深層部にまで達していないことが要因であると考えられる。空気の流速については最大で 0.2~0.3 m/s であり、空洞境界上部から流入し、空洞全体に拡散しながら空洞境界下部から流出している様子が見て取れる。また、丸鶏の温度分布に着目すると空洞深層上部付近で最も低い温度帯となっており、空洞からの伝熱が微小であることが伺える。濃度に関しても同様の傾向にあり、表面に対して空洞からの減少率は僅かであることが見受けられる。

次に、実測値とシミュレーションの温度履歴の比較を Fig. 4-8 に示す。

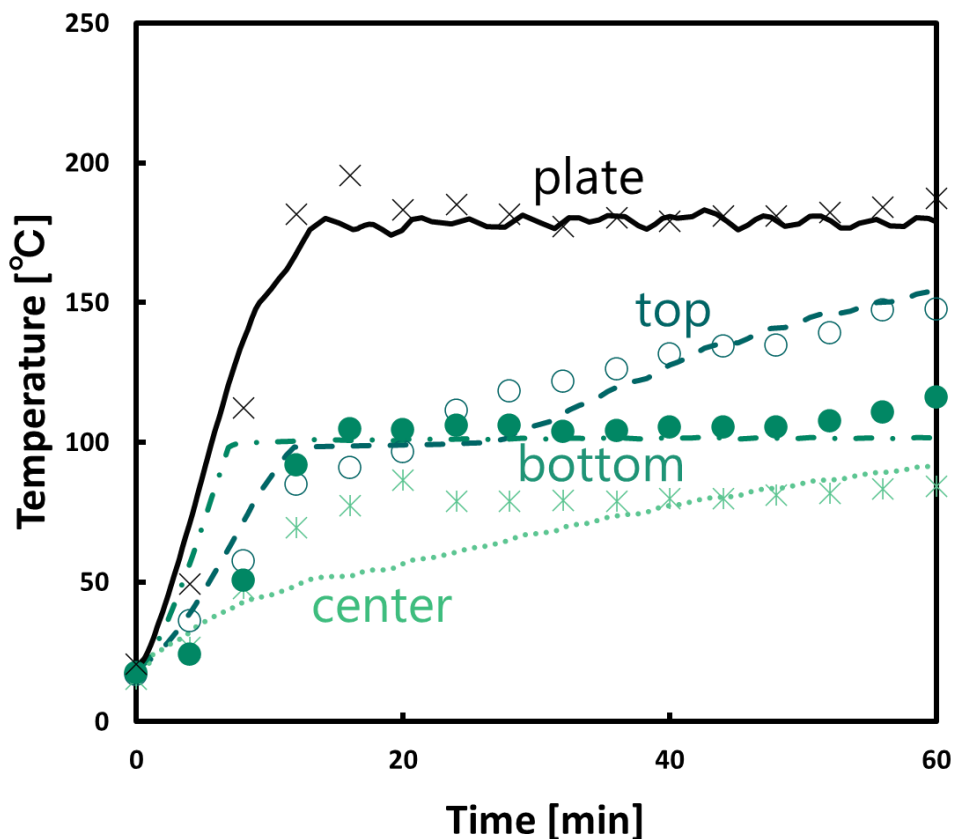


Fig. 4-8 Temperature history and temperature simulation in the roasting process of whole chicken

シミュレーションによる解析値と実験による実測値との温度履歴比較の結果、両者は概ね一致していることが見て取れる。鉄板温度では、温度上昇度合いに僅かに差が見られるものの、

180°C付近で温度が一定になる点において解析値は実測値と一致する．上面温度では、100°C付近の温度停滞後からの立ち上がり時間には差異があるものの水分蒸発まで適切に反映されていることがわかる．一方、空洞では特に 10~20 min 付近での両者の乖離は大きく、庫内の対流や空洞への流入速度が影響していることが考えられるほか、4.4.1 で述べたように空洞を計測する熱電対設置位置が対流によってずれた可能性も考えられる．また下面では、加熱開始及び加熱終了付近において両者に差が見られ、前者では熱電対設置に係る問題、後者ではドリップ蒸発後の解析が考慮されていないことが要因であると考えられる．

4.4.3 丸鶏充填系における温度及び水分濃度シミュレーション

焼成完了後（60 min）における外観温度を Fig. 4-9, 断面温度及び水分濃度分布予測を Fig. 4-10 に示す.

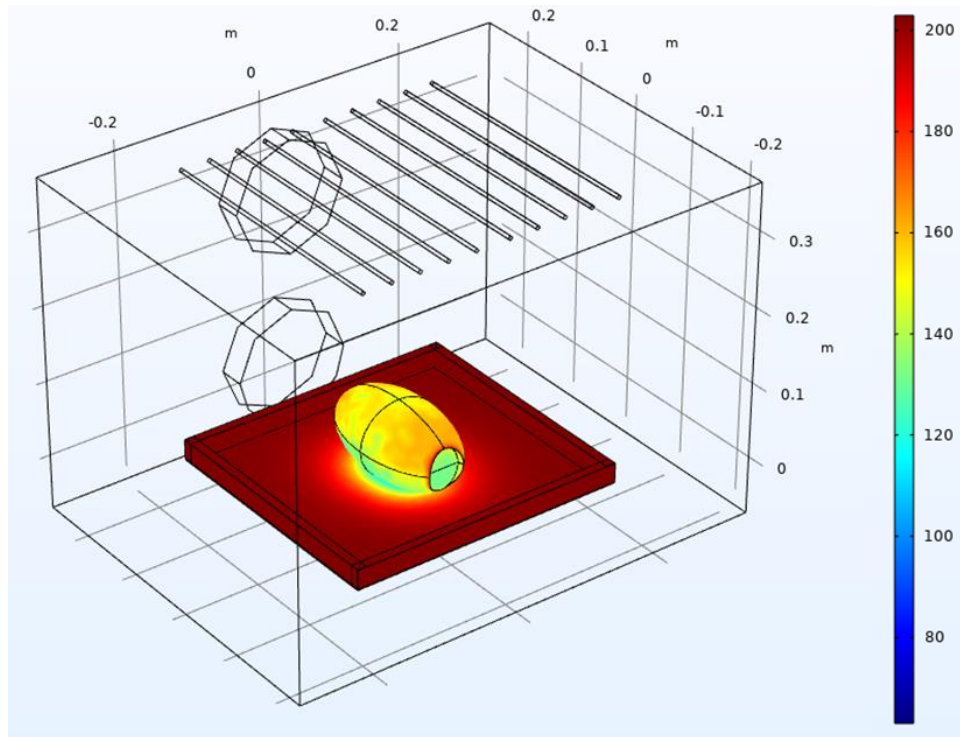


Fig. 4-9 Appearance of analysis temperature

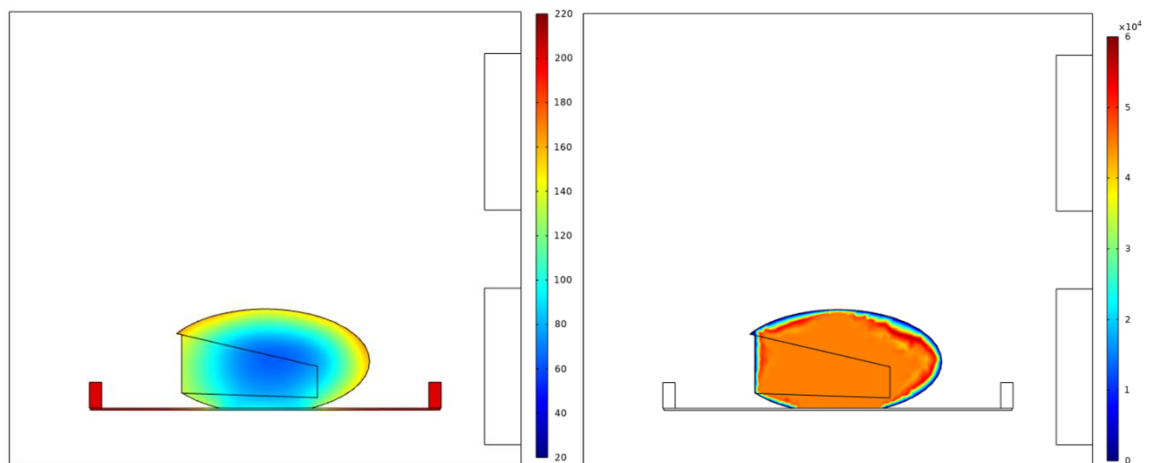


Fig. 4-10 Cross-sectional distribution of analysis result
(Left: temperature, Right: moisture concentration)

表面温度に関して、空洞系と同様に、一様な温度分布でなく、温度ムラがあることが見て取れる。これは、放射が影響していると考えられ、ヒーター照射角度及び被照射物表面の角度によって受ける熱量が異なることが要因であると考えられる。また断面温度に関しては、丸鶏及び充填物における伝熱の差はみられず、一体のものとして外部から熱移動している様子が見て取れる。これは、丸鶏と充填物（マッシュポテト）が同程度の含水率であり、熱物性値の差が小さいためであると考えられる。一方、本解析において、丸鶏の骨や皮は無視しているため、これらの影響により実際には内部温度に分布が生じている可能性も考えられる。濃度に関しても同様であり、外部との濃度差によって拡散するものとしているため、丸鶏及び充填物が一体として扱われ周囲から同程度に水分濃度の減少が見受けられる。

ここで、実測値とシミュレーションの温度履歴の比較を Fig. 4-11 に示す。

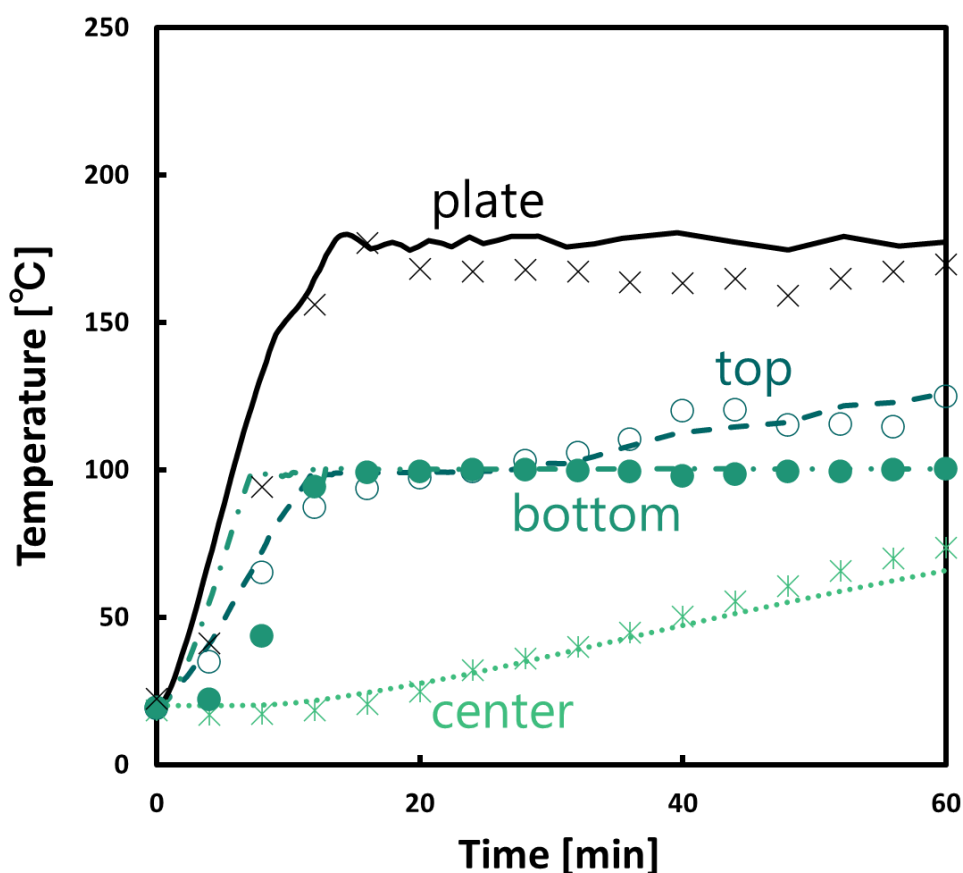


Fig. 4-11 Temperature history and temperature simulation in the roasting process of whole chicken

解析による計算値は実験による実測値と全体として良好に一致していることが見て取れる。特に上面においては、水分蒸発後の挙動についても適切に一致していることがわかる。一方で、

下面における加熱初期の温度上昇や鉄板の 180°C 程度到達後の挙動については乖離がみられる。下面においては、熱電対位置に要因があると考えられ、実際の温度取得では熱電対が丸鶏側に差し込まれていたため実測の温度上昇は緩やかになったことが考えられる。また、鉄板温度については、主に丸鶏－鉄板間における接触面積の問題であると考えられ、シミュレーションで考慮している接触面積と実際に接触している面積が異なることが要因であると考えられる。

4.5 結論

本章では、丸鶏（空洞系、充填系）を対象とした強制対流式オーブンでの調理過程の解析、伝熱シミュレーションの構築を目的とした。

丸鶏の温度履歴及び現象把握では、強制対流の影響により、雰囲気温度、鉄板温度が急激に上昇し、これに伴い下面温度が上昇した。上面温度の上昇は下面温度上昇と同程度であり、10 min 過ぎには 100°C に達し、その後温度上昇を続けた。中心温度では、空洞系及び充填系に大きな差異が見受けられ、空洞系では温度上昇は上面及び下面と同程度であったのに対し、充填系では焼成完了まで緩やかに上昇し、60 min 時点において 80°C 程度であった。加熱終了時点における重量損率は、空洞系では 27.9% であったのに対し、充填系では 16.4% とその差は約 10% であった。

丸鶏焼成過程における温度シミュレーションでは、空洞系及び充填系ともに概ね良好な一致を示した。一方、空洞系における中心部（空洞部）においては一部で乖離も見られ、流入部での流速の設定や温度履歴取得方法の改善により、さらに高精度な予測となることが考えられた。また、空洞系、充填系における温度分布及び水分濃度分布の差異も明らかとなり、温度に関しては空洞系では空洞からの伝熱の影響を受け、空洞上部付近で最も低い温度を示したのに対し、充填系では中心部が最も低い温度を示した。水分濃度分布では両者とも表面から減少度合いが大きく、空洞系において空洞内部からの水分濃度減少は僅かであった。

4.6 参考文献

- 1) Y. Choi, M.R. Okos; Food engineering and process applications Vol.1.
ed. M. Lemaguer and P. Jelen, Elsevier Applied Science Pub., 93-101 (1986).
- 2) 文部科学省 科学技術・学術審議会資源調査分科会; “日本食品標準成分表 2015 年版（七訂）”, 2019, p. 48.
- 3) K. Sugiyama; “Cooking and thermal properties” (in Japanese). J. cookery sci. Jpn., **46**, 299-303 (2013).
- 4) 川口 毬; “加熱処理におけるジャガイモの物性変化と反応速度解析”. 東京海洋大学修士学位論文 (2020).
- 5) H. Chen, B. P. Marks, R.Y. Murphy; Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties. J. Food Eng., **42**, 139-146 (1999).

第5章 総括

本研究では、調理の最適化、食品の安全性確保及び品質向上を目指すべく、肉類を対象としたオーブン調理過程の解析、伝熱シミュレーションの構築を行った。

第1章では、本研究の背景及び目的について明示するとともに、加熱機器として用いるオーブンの特徴及び伝熱機構について説明した。また、本研究対象とした肉類の成分及び特徴とその構造について述べ、加熱調理における変化について説明した。

第2章では、牛ヒレ肉を対象とした輻射式オーブン加熱について、温度及びタンパク質変性シミュレーションを行った。まず、牛ヒレ肉焼成過程における温度履歴取得及び現象把握を行い、加熱開始後ヒーターからの放射の影響を受け、上面温度の上昇がみられたが、時間経過に伴って、熱されたフライパンからの伝導伝熱の影響により下面の温度上昇が上回ることがわかった。そして、この際の重量損率は18.10%であり、加熱後には肉の収縮や水分の流出が確認された。また、牛ヒレ肉について、変性速度定数の温度依存性を示差走査分析法（Differential Scanning Calorimetry：DSC）により実測し、57℃付近、65℃付近、77℃付近で吸熱ピークを得た。既存の研究からそれぞれ筋原線維タンパク質のミオシン、結合組織タンパク質のコラーゲン、筋原線維タンパク質のアクチン由来であると判断した。更に、DSC-Dynamic法により、加熱変性速度算出に要する速度パラメータを算出し、各タンパク質の活性化エネルギー及び頻度因子を得た。収縮率測定では、タンパク質変性率と体積変化率の関係を比重法により実測し、相関性の高い3次関数の相関式を得た。また本結果からミオシン変性開始時点から収縮が開始され、最終的には元の体積の0.7程度にまで収縮していることが明らかとなった。最後に、実測データを基に、牛ヒレ肉焼成過程における温度及びタンパク質変性シミュレーションを行った結果、実測値と解析値は反転以前において特に良好に一致しており、反転後も水分蒸発や収縮を考慮することでより精度の高い温度予測となることが示された。この調理法では、厚み方向の温度分布は上下で均等であること、この時、タンパク質変性に関しては、ミオシンが完全に変性しているのに対し、アクチンは表面近傍のみで変性していることが予測計算から明らかとなった。

第3章では、骨付き鶏モモ肉を対象とした強制対流式オーブン加熱について、温度及び水分移動シミュレーションを行った。まず、鶏モモ肉の温度履歴及び現象把握において、強制対流の影響により、雰囲気温度、皮温度、鉄板温度が急激に上昇、これに伴い下面温度が上昇し、15 min程度で100℃に達するのに対し、中心温度は緩やかな上昇を示し25 min付近で100℃に達した。加熱終了時における重量損率は31.98%であり、調理過程の重量損率からタンパク質変性による収縮の影響が大きいことが示唆された。また、色彩値の取得では、a*値の変化は微小であったのに対し、加熱開始からb*値の急激な上昇がみられた。L*は皮表面温度が100℃を超えた付近から下降しており、褐変の様子が数値からも伺えた。MRI（Magnetic Resonance Imaging）測定では、加熱に伴った全体としての収縮の様子や水分流出の様子が確認できた。加熱前は内部の水分分布は均一であったのに対し、加熱後では不均一となっており、収縮後の空隙にドリ

ップが保持されている様子が伺えた。また、本研究で使用するオーブンの伝熱量における輻射の割合を算出した結果、40~60%程度であることがわかった。そして、温度が高温側になるにつれてその割合が高くなる傾向が示された。最後に、鶏モモ肉焼成過程における温度シミュレーションについて、タンパク質変性に伴うドリップや皮の剥離を考慮した数学的モデルを構築したところ、温度の実測値と解析値は平均平方二乗誤差率 5%以内の精度で一致し、水分濃度変化予測についても実測した重量減少傾向と一致した。

第4章では、丸鶏を対象とした強制対流式オーブン加熱について、温度シミュレーションを行った。まず、丸鶏の温度履歴及び現象把握では、強制対流の影響により、上面、雰囲気、鉄板温度が急激に上昇、これに伴い下面温度が上昇し、空洞系及び充填系においても 10 min 過ぎには 100°Cに達することが分かった。中心温度において、空洞系では雰囲気温度とともに上昇したのに対し、充填系では焼成完了まで緩やかに上昇し続け、両系の中心温度上昇に関して、大きな差異が見受けられた。また、加熱終了時点における重量損率は、空洞系では 27.9%であったのに対し、充填系では 16.4%とその差は約 10%であることがわかった。そして、丸鶏焼成過程における温度シミュレーションでは、空洞系及び充填系ともに良好な一致を示した。また、空洞系、充填系における温度分布では、空洞における伝熱の影響が顕著な差異として現れた。更に、水分濃度では外気接触面からの水分減少が著しく、空洞からの減少の影響は僅かであることが示された。

以上述べた通り、本研究では、肉類を対象とした加熱様式の異なるオーブンでの調理解析、伝熱シミュレーションを構築し、その妥当性を検証した。また実験的に、肉類調理過程における色彩変化、MRI 法による水分分布の把握、タンパク質変性速度パラメータの取得及び収縮率との関係性を算出し、肉類の加熱変化として特徴的な現象の把握を行った。しかしながら、本研究では、最適制御や異なる形状、他のタンパク質食品への応用には至っておらず、今後の更なる検証が必要である。オーブン調理過程の最適化は、食品の安全性の確保及び品質向上に繋がり、その定量的な理解はオーブン調理のスケールアップ、新たな調理条件の検討、自動制御の適用に大いに有効である。本研究では、食品を対象としたシミュレーションの構築、オーブン調理の最適化に向けた技術の発展に貢献できたと考える。そして、本研究で得た知見が、食品産業の更なる発展に寄与されることを願う。

謝辞

本研究は、東京海洋大学大学院 食機能保全科学専攻 食品熱工学研究室において 2018 年 4 月から 2021 年 3 月に渡り行ったものです。この間、甚大なるご協力と親身なご指導を賜りました、主指導教官である、東京海洋大学 酒井昇教授、福岡美香准教授に深く感謝申し上げます。また、お忙しいにも関わらず、渡辺学教授に御高覧、数多くの助言を賜りましたことを厚く御礼申し上げます。また、本研究にあたり、ご助言いただきました株式会社サムスン日本研究所 清水和生様、赤澤由章様に心より感謝申し上げます。

そして、共に切磋琢磨し、支えてくれた同級生をはじめ、食品熱操作工学研究室で出会った数多くの先輩、後輩、何より、大学生活において学業、研究活動に邁進できる環境を与えてくれた家族に、深く感謝申し上げます。

最後に、ここでお名前を挙げるのでできなかった方へお詫びすると共に、支えてくださった皆様に改めて感謝の意を表し、今後とも相変わりがせぬご指導、ご鞭撻の程、お願い申し上げます。