TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

畜肉加工品の加熱調理における熱および物質移動解 析

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2012-10-05
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 堤, 一磨
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/946

修士学位論文

畜肉加工品の加熱調理における熱および物質移動解析

平成 22 年度

(2011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

堤 一磨

第一章 序論

1.1研究の背景および目的	1
1.1.1 はじめに	
1.2 IH クッキングヒーターの構造と原理	1
1.3 畜肉加工について	2
1.3.1 食肉の歴史	
1.3.2 畜肉製品の種類	
1.4 ハンバーグの作製および料理人による焼成について	8
1.5 工場の現状	10
1.6 既存の研究	12
1.6.1 ハンバーグ焼成に関する研究	
1.6.2 畜肉加工品の伝熱および物質移動の研究	
1.7 本論文の構成	13

第二章 シリコン焼成過程における加熱条件検討および熱移動解析

2.1	緒言		14
2.2	加索	や条件検討	14
2.	2.1	フライパンの検討	
2.	2.2	油およびフタの有無検討	
2.	2.3	焼成方法の検討	
2.3	シリ	リコン焼成(反転タイミングによる影響)	26
2.4	熱利	多動解析	29
2.	4.1	熱移動モデル	
2.	4.2	シリコン物性値の確認	
2.	4.3	フライパンの発熱量	
2.	4.4	計算領域の検討	
2.	4.5	発熱分布を考慮したフライパンの発熱量	
2.	4.6	シリコン(昇温加熱)熱伝導解析	
2.	4.7	シリコン(高温投入加熱)熱伝導解析	
2.5	本章	ぎのまとめ	41

第三章 ボロニアソーセージ焼成過程における熱および物質移動解析

3.1	緒言		43
3.2	ボロ	1ニアソーセージ焼成	43
3.	2.1	豚脂の有無比較	
3.	2.2	シリコンとの比較	
3.3	熱お	よび物質移動解析	47
3.	3.1	水分移動を考慮した解析	
3.	3.2	ボロニアソーセージ(昇温加熱)熱物質移動解析および殺菌価の予測	
3.	3.3	ボロニアソーセージ(高温投入加熱)熱物質移動解析および殺菌価の予測	
3.4	含水	<率および重量減少率確認実験	64
3.	4.1	含水率(内外)の比較	
3.	4.2	重量減少とドリップ割合の比較	
3.5	本章	至のまとめ	68

第四章 ハンバーグ焼成過程における熱および物質移動解析

4.1	緒言	言6	9
4.2	ハン	/バーグ焼成実験	9
4.3	熱ネ	および物質移動解析	3
4.	3.1	熱移動モデル	
4.	3.2	熱と水分移動解析	
4.	3.3	膨潤・収縮の解析	
4.	3.4	ハンバーグ反転の取り決め	
4.	3.5	ハンバーグ加熱温度に伴う重量および体積変化	
4.	3.6	ハンバーグの加熱に伴う収縮確認実験	
4.	3.7	ハンバーグ(高温投入加熱)熱および物質移動解析	
4.4	物質	質移動およびドリップ割合確認実験9	3
4.	4.1	水分移動およびドリップ測定実験	
4.5	本章	章のまとめ	6
第五	章	総括	8
参考	文献	<u>.</u>	1
謝辞	÷		3

第一章 序論

1.1 研究の背景および目的

1.1.1 はじめに

1996年、日本では腸管出血性大腸菌 0157 による集団食中毒が多発した. この菌は 1982年 にアメリカで発生したファストフード店のハンバーガーによる食中毒ではじめて確認された もので(Riley et al.1983)、1997 年夏にはアメリカで冷凍ハンバーグのパティ (ham-burger patties)から 0157 が検出され、パティや原料の牛肉約 1 万トンが回収された (Newsweek 1997). 2010年1月にも、宮城県の大手ハンバーグレストランで食事をした男女 13 人が嘔吐や下痢、 腹痛などの食中毒症状を発症したと事例が発生しており、現在もなお食中毒被害の危険性は根 絶されていない (産経新聞 2010). 厚生省(1996)は、食品を扱う際の注意のなかで、「75℃ 以上 1 分間の加熱により菌は死滅するといわれているため、調理にあたっては、中心部まで十 分に加熱するとともに、調理した食品はすみやかに食べる.」と、指導している¹⁾.このこと から、畜肉加工品を提供する食品企業は、80℃以上の過度な加熱処理を行っていることが少な くない.しかし、この温度帯における加熱処理は畜肉のオーバークッキングを招き、畜肉本来 の美味しさを損ねる可能性が高い.

そこで本研究では、ハンバーグの焼成をモデルとした畜肉加工品の熱伝導解析を行うと共に、 タンパク質変性による収縮およびそれに伴ったドリップの流出と保水性の維持など加熱に伴 う物質移動解析を行い、75℃1分相当の加熱を守った上で、より加熱負荷の少ない加熱法を検 討した.加熱機器には、近年、安全性、簡便性などから家庭に広く普及し、チルドおよび冷凍 ハンバーグの製造ラインでも導入されている IH(電磁誘導加熱)クッキングヒーターを用い た.また、熱および物質移動解析をすすめるにあたり、水分蒸発、収縮などのないモデル試料 と見なせる①シリコンを用いて調理空間の伝熱パラメーターを決定した後、水分蒸発はあるが、 収縮の少ない食品モデル試料である②ボロニアソーセージで解析を行い、最終ステップとして 水分蒸発、ドリップ流出および収縮の起こる系である③ハンバーグでの解析を行った.これら 熱物質移動解析ととともに対象危害微生物の殺菌価シミュレーションを行い、微生物リスクの ない、かつ品質の向上を両立させた最適な調理方法(反転タイミングなど)を解明し、美味し く安全な商品の開発および製造ラインの確立に寄与することを目的とした.

1.2 IH クッキングヒーターの構造と原理

始めに、本研究で採用した加熱機器である IH クッキングヒーターの構造と原理について説 明する.

IH クッキングヒーターの IH とは誘導加熱(Induction Heating)のことであり、電磁誘導加 熱といわれる.加熱原理の図を Fig.1-1 に示す.IH では、トッププレートの下に「加熱コイル」 と呼ばれる渦巻状のコイル存在し、このコイルに交流電流を流すと、加熱コイルを取り巻くよ うに磁力線が発生する.磁力線が発生すると、コイルに最も近くに存在する電気を通す物質で ある鍋底にうず電流と呼ばれる電流が流れる.なべ底のうず電流によって、鍋底自身が発熱す る.金属には通常電気抵抗があるため、金属に電流が流れると「電力=電流 2×電気抵抗」分の ジュール熱が発生して金属が加熱される.このように電流が流れるときの抵抗を利用している ため、抵抗の小さいアルミニウムや銅のような鍋は使用できなかったが、2002年にはアルミ ニウム鍋でも用いられる IH クッキングヒーターも発売された²⁾³⁾.また、温度調整がしやす く、火を使わないため安全であることなどがメリットとして挙げられる.



Fig.1-1 IH クッキングヒーターの加熱方式

1.3 畜肉加工について

1.3.1 食肉の歴史

「角をためて牛を殺す」,「羊頭狗肉」,「牛歩」,「馬の耳に念仏」,「牛飲馬食」など 家畜にかかわる諺などは非常に多く,家畜が我々の生活に密接な関わりのあることがよくわか る.

人類の食生活は肉食から始まったといわれている.狩猟によって得た獣の肉は最も手軽に確 保できる食糧であったと思われ、貝塚からは多くの貝殻にまじって、猪や鹿など獣の骨が出土 していることからもうかがい知ることができる.わが国の肉食の歴史も、有史以前から鳥獣を 捕獲して食用にしており、農耕文化が大陸から伝来したのちも、穀物と肉類の併食を食生活の 基本にしていたといわれている.

ハムなどの食肉加工の始まりは非常に古く、紀元前8世紀、ギリシャのホメロス時代に、く ん製肉や塩漬肉があったといわれ、ローマ時代には遠征軍の携行食糧として利用されたとされ ているが、いずれにせよ狩猟民族が獲物を貯蔵するために、乾燥したり、塩漬けにしたり、焚 火でくん製にしたりしたのが、ハムの原型といわれている⁵.

我が国の現在の食肉加工の歴史は、1872 年 (明治5年)に長崎に来遊したアメリカ人ペンス ニにより骨付きハムの製法が伝授され、製造を開始したのが最初で、1874 年(明治7年)、イギ リス人のウィリアム.カーティスが横浜の在で製造を始めたのが鎌倉ハムの起こりといわれて いる.

昭和 40 年から今日までの約 30 年間における食肉消費の推移を「家計調査年報」にみると, 1 世帯における購入数量は, 豚肉では 182%, 牛肉では 146%と伸び, 今日の食生活における 洋風化に伴う肉類の需要の増加, 簡便化としての加工食品の伸びなど, その流れをよく物語っ ている ⁴⁾.

	豚 肉			牛肉				加工品		
	金 額 (円)	%	数量 (kg)	%	金 額 (円)	%	数 量 (kg)	%	金 額 (円)	%
昭和40年	5 772	100	8.80	100	6 192	100	8.36	100	3 377	100
50年	25 233	437	18.22	207	18 566	300	7.78	93	12 859	381
55年	28 630	496	20.87	237	28 313	457	9.15	109	17 268	511
60年	27 296	473	18.42	209	31 324	506	9.82	117	18 449	546
62年	25 000	433	18.23	207	33 181	536	10.42	125	18 559	550
63年	23 886	414	17.67	201	33 986	549	10.76	129	18 057	535
平成元年	24 048	417	17.64	200	34 444	556	10.73	128	18 673	553
2年	24 421	423	17.29	196	35 570	574	10.82	129	18 921	560
3年	24 136	418	16.84	191	36 779	594	11.35	136	18 689	553
4年	24 063	417	16.57	188	36 100	583	11.44	137	18 520	548
5年	21 292	369	16.46	187	34 101	550	11.77	141	18 168	538
6年	21 413	371	16.03	182	32 906	531	12.24	146	17 190	509

Table 1-1 肉類の消費動向(1世帯年間)⁶⁾

注) %は昭和40年を100とする指数。

1.3.2 畜肉製品の種類

畜肉製品とは、一般的に畜肉を主材料にした加工食品の総称で、もともとは生肉の貯蔵手段 として工夫されたものである.種々の工夫によって生肉に貯蔵性を与えて、随時食用に供し、 加工することで家畜の飼育と畜肉の生産の需給調整を図ったといわれている⁴⁾.

以下に本研究で用いたソーセージ(ボロニアソーセージ)およびハンバーグについて記す.

1.3.2.1 ソーセージ

ソーセージ類は原料肉が多種類であり、使われる添加物も種類が多いなどから、製品に対す る不信感の強かった時期があったが、最近はウインナーソーセージのもつ、愛らしい形態、適 当な値頃、栄養に加えて、ファッション性も手伝い、さらには利用の簡便性なども加わって需 要が多くなってきた⁴⁾.

【種類と特徴】

一般には貯蔵性からドメスチックソーセージ(保存性低い)とドライソーセージ(保存性高い)に分けられ、さらにドメスチックソーセージは製法別に、フレッシュソーセージ,スモー クソーセージ、クックドソーセージに分類される.ボロニアソーセージはスモークソーセージ の一種である. ・スモークソーセージ

·

最も一般的なソーセージで、くん煙とボイルがフレッシュソーセージの工程に加わり、 色や 香りで食欲をそそり、やや保存性が向上するなど、一番需要が多い.ケーシングや内容物によ って, ウインナー, ボロニア, フランクフルト, リオナソーセージなどと呼ばれている. ウインナーソーセージは、牛や豚肉などを原料として、羊腸に充填したもの. ボロニアソーセージは、羊腸に充填したもので太さが 36mm 以上あるもの. フランクフルトソーセージは、豚腸に充填し、太さが 20~36mm のもの. リオナソーセージは、クリーンピースやピーマンなどの野菜、穀類、ベーコン、ハムやチーズ などを加え、羊腸に充填した大型のスモークソーセージである.

ソーセージ類の JAS の定義は, Table 1-2 の通りである.

用語	定義
ソーセージ	次に掲げるものをいう.
	1 家畜,家禽若しくは家兎の肉を塩漬し又は塩漬しないで,ひき肉したもの(以下単に「原
	料畜肉類」という)に,家畜,家禽若しくは家兎の臓器若しくは可食部分を塩漬し又は塩
	漬しないで,ひき肉し又はすりつぶしたもの(以下単に「原料臓器類」という)又は魚肉
	若しくは鯨肉を塩漬し又は塩漬しないで、ひき肉し又はすりつふしたもの(魚肉及び鯨
	肉の製品に占める重量の割合が 15%未満であるものに限る.以下単に「原料魚肉類」と
	いう)を加え又は加えないで,調味料及び香辛料で調味し,結着補強制,酸化防止剤,合
	成保存料等を加え又は加えないで練り合わせたものをケーシング等に充てんした後、く
	ん煙し又はくん煙しないで加熱し又は乾燥したもの(原料畜肉類中家畜の肉の重量が家
	禽及び家兎の肉の重量を超え、かつ、原料畜肉類の重量が原料臓器類の重量を超えるも
	のに限る).
	2 原料臓器類に、原料畜肉類(その重量が原料臓器類の重量を超えないものに限る)若しく
	は原料魚肉類を加え又は加えないで、調味料及び香辛料で調味し、結着補強制、酸化防
	止剤、合成保存料等を加え又は加えないで練り合わせたものをケーシング等に充てんし
	た後、くん煙し又はくん処しないで加熱したもの
	3 1又は2に、でん粉、小麦粉、コーンミール、植物性たん白、脱脂粉乳その他の結着材
	料を加えたものであって,その原材料に占める重量の割合が 15%以下であるもの.
	4 1,2又は3に,クリーンピース,ピーマン,にんじん等の野菜,米,麦等の穀粒,ベ
	ーコン、ハム等の肉製品、チーズ等の種ものを加えたものであって、原料畜肉類又は原
	料臓器類の製品に占める重量の割合が 50%を超えるもの.
	5 1, 2, 3又は4をブロックに切断し,又は薄切りして包装したもの.
ボロニア	ソーセージ1又は3のうち,牛腸を使用したもの又は製品の太さが 36mm 以上のものをい
ソーセージ	<i>э</i> .

Table 1-2 ソーセージ類の JAS の定義

スモークソーセージの製造工程を Fig.1-2 に示す.



Fig.1-2 スモークソーセージの製造工程

1.3.2.2 ハンバーグ

ハンバーグは、古くはロシアのタタール地方に住んでいた騎馬民族が考え出した携行食が原型といわれている⁷⁾.彼らは塩、こしょう、玉ねぎ汁で味付けをした生の肉を鞍の間にはさみ、 騎乗することで肉をもみほぐし、軟らかくして食べていた.その後、タタール地方に来たドイ ツの船乗りが、この料理が気に入りドイツに持ち帰り、肉をもむかわりにひき肉にしてパティ 状に固めて外側をほどよく焼いた「ハンバーグステーキ」を考え出したのが、今日のハンバー グの始まりといわれている.19世紀の初めにドイツ移民と共に入ってきたこの料理がハンバ ーグとしてアメリカで普及し、ホットサンドイッチとしてのハンバーガーが簡便性も手伝って 急速に普及した.わが国には戦後アメリカ軍の進駐によって紹介され、以来ひき肉に玉ねぎ、 パン粉、卵などを加えた和製洋食的な独特の日本風ハンバーグの企業的生産が始まり、さらに はハンバーガーのレストランチェーン店の出現なども加わって今日の盛況をみるに至ってい る⁴.

【種類と特徴】

ハンバーグにかかわる用語として,ハンバーグステーキ,ハンバーガーパティ,ハンバーガ ーなどが知られているが,ハンバーグは日本的なひき肉調理品ハンバーグステーキのことであ り,ハンバーガーはトーストしたパンにハンバーグ様のパティをはさんだものといえる.

これらのもののうち, JAS で規定されているのは, ハンバーガーパティ, チルドハンバーグ ステーキ, チルドミートボールである.以下にハンバーガーパティおよびチルドハンバーグス テーキの詳細を記す.

・ハンバーガーパティ

ハンバーガーパティは JAS において Table1-3 のように定義されている.

その品質は、上級と標準に分けられ、品位は加熱調理したものの色沢、香味および性状が優 良または良好であるものとし、品温は-18℃以下で保存されていることとなっている. 原材料 としては、上級では牛肉、調味料、香辛料だけで、標準ではその他に豚肉、馬肉、めん羊肉、 肉様の組織を有する植物性タンパク、粒状植物性タンパク、繊維状植物性タンパク、調味粒状 植物性タンパク,調味繊維状植物タンパク,玉ねぎ,つなぎが使用できる.食品添加物は上級 では使用できないが,標準では L-グルタミン酸ナトリウムなどの化学調味料の使用ができる. 上級の牛肉の割合は 95%以上であり,標準では畜肉が 75%以上で,畜肉のうち牛肉は 50%以 上としている.標準における肉様の組織を有する植物性タンパクは 20%以下,玉ねぎは 10% 以下,つなぎは 5%以下としている.粗脂肪は上級,標準とも 28%以下で,厚さは 5mm 以上 となっている.

Table 1-3 ハンバーガーパティの JAS の定義

用語	定義
ハンバーガー	畜肉(牛肉,豚肉,馬肉,めん羊肉又は山羊肉をいう.以下同じ)を荒びきしたもの又はこ
パティ	れに肉様の組織を有する植物性たん白を加えたものに、調味料、香辛料、玉ねぎ、つなぎ等
	を加え又は加えないで練り合せた後、円盤状等の形状に成形して急速凍結したものであって、
	ハンパーカーの材料として加熱講理して使用されるものをいう(植物牲たん白の製品に占め
	る重量の割合が、20%以下であり、かつ、つなぎの製品に占める重量の割合が10%以下であ
	るものに限る).
つなぎ	でん粉,粉末状植物性たん白,脱脂粉乳等で畜肉をあらびきしたもの等に加えるものをいう.

・チルドハンバーグステーキ

チルドハンバーグステーキとは、定義として Table 1-4 に示す通りである.

品質は、上級と標準に分けられ、品位は色沢、香味および性状が優良または良好であることとしている.原材料は、上級では牛肉、豚肉、馬肉、めん羊肉、鶏肉、家兎肉、ベーコン、ハムなどの畜肉製品、肉様の組織を有する植物性タンパクとあり、標準では、これに山羊肉、家 禽肉、魚肉の使用が認められている.つなぎ、野菜、食用油脂、調味料、糊料、香辛料、着色料の使用は上級、標準とも基準は同じに定められている.食品添加物は、化学調味料、結着補 強剤、乳化安定剤、抗酸化剤、pH 調整剤、合成保存料の使用が、指定されたものについて認 められており、標準ではさらに着香料の使用も認められている.畜肉の量は、上級では 80% 以上で、そのうち牛肉は 30%以上とあり、標準では畜肉は 50%以上としている.魚肉は標準 のみ 20%以下、内様植物性タンパクは上級で 10%以下、標準は 20%以下、つなぎは上級では 10%以下、標準は 15%以下としている.粗脂肪の量は 28%以下、厚さは 5mm 以上となって いる.

Table 1-3 チルドハンバーグステーキの JAS の定義

用語	定義
チルド	食肉(牛肉, 豚肉, 馬肉, めん羊肉, 山羊肉, 家と肉または家禽肉をいう. 以下同じ)をひ
ハンバーグ	き肉したもの又はこれに魚肉(鯨その他魚以外の水産動物の肉を含む.以下同じ)を細切し
ステーキ	若しくはすりつふしたもの (その使用量は食肉の使用量を超えないものに限る)若しくは
	肉様の組織を有する植物性たん白を加えたものに、玉ねぎその他の野菜をみじん切りした
	もの、つなぎ、諸味料、香辛料、結着補強剤、合成保存料等を加え又は加えないで錬り合
	せた後、楕円形状等に成形し、食用油脂で揚げ、焙焼し若しくは蒸煮したもの又これにソ
	ース(動植物の抽出濃縮物、トマトペースト、果実ピューレ、食塩、糖類、香辛料等で調
	整した調味液をいう.以下同じ)を加えたものを包装したものであって、チルド温度帯にお
	いて冷蔵してあるものをいう(食肉の製品 (ソースを加えたものにあっては、ソースを除
	く.以下特段の定めのない限り同様とする)に占める重量の割合が 50%を超え、かつ、植
	物性たん白の製品に占める重量の割合が 20%以下であるものに限る).
つなぎ	パン粉,小麦粉,粉末状植物性たん白等で食肉をひき肉したもの等に加えるものをいう.

冷凍, チルド, レトルトなどの各種ハンバーグ製品の製造工程の概要は Fig.1-3 に示すとおりである.



Fig.1-3 ハンバーグの製造工程図7)

1.4 ハンバーグの作成および料理人による焼成について

本研究に用いたハンバーグの作製方法を示した上で、ハンバーグ加熱の例として、プロの料理人二人(以後、料理人Aおよび料理人Bと表記)による異なる焼成方法を紹介する.両者の特徴を比較し、ハンバーグ製造ラインへの応用を検討した.

【試料】

ハンバーグの材料を Table 1-4 に示す.

10010 1 1					
	配合量(g)	配合割合(%)			
牛肉①(ウデ)	528.0	37.8			
豚肉(ウデ)	226.0	16.2			
豚脂 P-B脂	178.0	12.8			
塩	6.7	0.5			
ソテー玉ねぎ(ソテー歩留 70%)	283.0	20.3			
卵白液	53.0	3.8			
牛乳	33.0	2.4			
赤パン粉	83.0	5.9			
香辛料①	1.8	0.1			
香辛料②	0.6	0.0			
香辛料③	2.7	0.2			
計	1395.8	100			

Table 1-4 ハンバーグの配合量

【調理方法】

ハンバーグの調理方法を以下に示す.なお,焼成方法は,料理人 A および料理人 B による 異なる方法を記載した.

(1) 肉ミンチ作製

・肉(牛,豚),豚脂および牛脂をチョッパーで挽く.(目穴5mm径)

- ・品温 0~5℃が理想
- (2) タマネギの用意
 - ① ミジン切り

・フードプロセッサーでも良い. その場、ミキシング前に水を切る.

② タマネギソテー

・タマネギ重量に対して 10%のサラダ油を添加.フライパンに油を添加してあらかじめ 加熱し(強火),タマネギ投入.

- * 焦がさない.水分が蒸発して焼成音がするまで.歩留り約 70%までソテー.シャキシ ャキで若干甘くなる程度まで.
- (3) ミキシング
 - ① 肉, 脂, 塩ミキシング
 - ・低速で 30s. 肉初期温度 0~5℃で行う.

- ② タマネギ類をすべて添加してミキシング
- ・ミキシング時間低速で1分30秒.
- * 温度 10℃以下に抑える. *添加する卵白は溶かない.
- (4) 成形
 - ① プラスチックシャーレにビニールをひき、ミキシング後の試料を 90g 計量した.
 - ② 試料の空気を抜き、プラスチックシャーレで成形.
 - ③ 焼成まで冷蔵庫で保存し、芯温を揃える.
- (5) 焼成
 - ・料理人A
 - 油適量をひいたフライパン(25cm 程度)をガス強火で加熱し、ハンバーグを4枚をのせて焼成.両面に焦げ色をつけた.業務用コンロの内輪火を使用.
 - ② 弱火にしてフタをし、数回反転させながら芯温 75℃1 分を目指した.料理人Aの加熱 工程 Fig.1-5 に示す.なお、裏表をA面およびB面と表記した.



Fig.1-5 料理人Aのハンバーグの加熱工程

・料理人B

- ハンバーグをフライパン(22cm程度)に乗せた状態で、フタをせずIH弱火(500W) で加熱した.
- ② 試料の高さ半分まで熱変性による変色(灰褐色)が起こったことを確認し,反転した.
- ③ 全体まで火が通ったら試料を皿に上げた(常温放置).
- ④ フライパンに残った油をふき取り, IH強火(2000W) で加熱した.
- ⑤ ③の試料を投入し、両面に焼色を付けた.料理人Bの加熱工程Fig.1-6に示す.なお、 裏表をA面およびB面と表記した.



Fig.1-6 料理人Aのハンバーグの加熱工程

【考察】

料理人Aおよび料理人Bの焼成方法は、大きく異なった.料理人Aは、初めに強火でハンバー グの両面を40秒程度焼き付けた後に、弱火で加熱を行なった.また、弱火にするタイミングで フタを使用した.それに対し、料理人Bは、徹底して低温調理を心掛け、ゆっくり熱を入れて、 最後に10秒程度ずつ焼き付けを行う方法であった.また、フタを使用せず、蒸すような工程を 行わなかった.そのため、焼成時間は22.3分と料理人Aと比べ、2倍以上長くなった.

また、料理人Aは、焦げを防ぎ、均等に火が通るよう何度も反転を行なったが、料理人Bは3 回と少なかった.

強火焼き付け工程において,料理人Aは,肉汁の流出を防ぐ手段というイメージであったが, 料理人Bは,見た目と香ばしさ,食感のために行なっているという印象を受けた.料理人Aは, 肉汁を閉じ込めたハンバーグに,料理人Bは,ふっくらしたハンバーグに仕上がっていた.

両者の焼成方法を考慮した上で工業的な視点からみると、焼成時間および一度温めた鉄板を 冷やすことへのコストを考え、料理人Aの方法が現実的であると考えた.しかし、料理人Bの ように反転をより少なく調理を行なうことが理想である.

1.5 工場(ハンバーグ製造ライン)の現状

ハンバーグ製造ラインの工程を、参考文献⁴⁾より引用し、ハンバーグ製造ラインの現状と して以下に記す.製造ライン中の焼成工程には、素材を加工し美味しさを添加する「調理」 と製品中に存在する微生物を死滅減少させて製品に保存性を持たせる「殺菌」という二つの 側面が存在する.工場での製造工程においては、製品を安全に消費者の元へ流通させるため 保存性すなわち加熱殺菌が重要となる.また、加熱機器は様々なものがあり、単一機器およ び複数機器を組み合わせて加熱および殺菌を行なっている.

- (1) ミキシングおよび形成
 - ・挽き肉、卵白、生タマネギ、調味料などを混合
 - ・成型機によって楕円形などの製品独自の形状に分割(品温0~5℃)
- (2) 焼成

ハンバーグ類の加熱および殺菌は,製品中に存在する微生物を死滅減少させて製品に保存 性を持たせることと,食中毒の排除にあるので,原材料の取り扱いには十分配慮して行なう ことが大切である.ハンバーグ類の焼成工程で使用されている加熱機の例を Fig.1-4 に示す. メーカー各社はこれら加熱機を独自に組み合わせて,様々なハンバーグ焼成ラインを構築し ている.

 IH加熱 ・鉄板による焼きつけ ・表面を焼き固める 	電気プレート加熱 ・上下面よりベルトで挟み込み、 食品を焼き上げる
・焼き色をつける	・表面に焼き色をつける
ガス火加熱 ・焦げ付かぬよう品温を上げる ・余分な脂を流出させる	過熱水蒸気 ・品温を上げる ・歩留まり良く加熱
蒸気加熱・品温を上げる	・未分な脂を流出させる
 ・食品の水分を補いながら加熱 	

Fig.1-4 ハンバーグ類の焼成工程で使用されている加熱機器例

- (3) 最終チェック
 - ・品温(目標温度をクリアしているかチェック)
 - ・重量および形のチェック
- (4) 冷却,凍結および包装

加熱処理をした製品が、引き続き包装工程に進む場合には、殺菌直後 10℃以下に急冷するか(チルド製品)、-18℃以下に冷凍する(冷凍製品).

- ・冷却は、氷水などを用いて加熱直後の製品を冷却する方法が多くとられている.
- ・凍結は、空気凍結、接触凍結、浸漬凍結などの方法が多くとられている.
- ・包装は、真空式のパウチ充填包装機や深絞り包装機などがある.

1.6 既存の研究

1.6.1 ハンバーグ焼成に関する研究

2009年8月,病原性大腸菌O157による食中毒で,日本の某ステーキチェーンが全店舗で休業 し,大きな問題となった事例は記憶に新しい.このとき原因となった食品が,ハンバーグの様 に細かい肉を結着処理し,成型した肉(成型肉)であった.このように,テンダライズ処理(筋 切り,細切り),タンブリング処理(味付け),さらに結着処理(肉の塊にする)によって加工 された成型肉は,調理過程で内部まで食中毒菌に汚染される危険性が高い.これらの背景から, ハンバーグなどの成型肉での加熱調理において厚生省の推奨する75℃以上1分間の加熱を目的 とした研究が多く挙げられる.

大島ら¹⁾は、 O157を対象とした75℃1分間加熱を基準として、ハンバーグ焼成時の内部温 度についてオーブンを用いて測定している.この結果,試料内部の最低温度点を確認し、初期 温度の違いが焼成時間に有意な差をもたらすことを発表した.また、70℃および75℃加熱ハン バーグの官能検査を行い、有意な差が見られなかったことから、厚生省指導による75℃以上1 分間加熱は、ハンバーグの焼き色、香り、食感、味などの点で十分賞味できるものであるとし ている.

大喜多ら⁸⁾は、一般家庭におけるハンバーグ焼成方法の実態調査において、ハンバーグを焼 く際、フライパンの使用が95%をしめ、その材質はフッ素樹脂加工が58%を占めていることを 報告している.また、焼く時、フタをして焼く者は多いが、フタをしないものも15%見られる ことから、安田ら⁹⁾は、フッ素樹脂加工フライパンを使用して流量調整したガスコンロでのハ ンバーグ焼成における内部温度(最低温度点)を経時的に測定し、フタの有無による温度変化 を報告している.これらから畜肉加工品の家庭調理におけるフライパンおよびフタの有用性が 明らかとなった.

1.6.2 畜肉加工品の伝熱および物質移動の研究

畜肉は一般に生で食べることは少なく加熱処理を行うことが多い.また,食品産業にとって は、食品の保蔵・加工プロセスに用いる伝熱は製品の品質変化のみならず,加熱殺菌効果の意 味も含んでいる.

一方,加熱処理を行うほど多くの微生物を死滅させることが可能であるが,その反面,過度 な加熱処理はテクスチャー,味,栄養素等の品質にも影響を与えるため,食品としての価値を 損ねぬよう,殺菌と品質のバランスが大事であり,対象となる食品の形状や物性および加熱機 器など様々な要因を考慮して,適切な加熱を目指す必要がある.これらから対象食品の伝熱の 挙動やそれに伴う物質移動などを予測することは,商業的規模での生産の観点から考えても極 めて重要な課題である.このように安全性,品質向上および効率の良い加熱法の検討などから 食品の伝熱計算を行うことは大切であり,それゆえ様々な研究が行われている.

宮原ら¹⁰⁾は、有限要素法(ANSYS)の熱解析ソフトを用いてロースハムの製造工程における熱処理過程の温度変化について熱解析のシミュレーションを行い、実測値との比較を行っている.

Ven¹¹⁾は、多孔質媒質中の流れに関するDarcyの法則により改良されたFlory-Rehner理論の 線形化からなる数学モデルを用いて、牛肉の長方形片で行った加熱実験をシュミレーションし、 比較している.その結果、食肉加熱時の水分移動はゴム弾性のFlory-Rehner理論により記述で きると提案している.

Wichchukit¹² は、ハンバーガーパティを両面から加熱したときの接触熱伝達率をグリルの プレート温度、パティ表面温度および熱流束値から算出した.熱伝達率は、プレート温度や両 プレートの隙間の間隔により250~650W/m²・℃と変化し、最大値に達したのちに減少し、加 熱サイクルの最後に漸近値に達することを報告している.

Pan¹³⁾は、異なる加熱温度およびそのときの加熱特性を測定してハンバーガーパティを調理 するための接触加熱工程の推定モデルを開発した.このモデルは標題のパティを実際に加熱し たときに得られた実測値で検証されたが、中心温度の推定値は実測値とよく一致した.官能検 査も、加熱状態の影響を分析するために利用された.また、グリルの加熱温度と熱伝達係数、 パティの厚さが、パティの中心温度プロフィールに影響する主要な要素であることを報告して いる.

これらのように畜肉加工品の加熱実験や伝熱および物質移動の様々な解析が行われており, 安全で高品質な加熱法の解明が期待されていることがわかる.特にハンバーグは,人気のある 食品であることに加え,微生物の繁殖の危険性が高いことから家庭および工業的に考えても重 要な研究対象であるといえる.しかし,ハンバーグは,畜肉だけでなく卵白やパン粉などを加 えて成型した混合体であることに加え,加熱による収縮やそれに伴ったドリップ流出,さらに 加熱中の反転作業など解析条件が複雑であり,これらを考慮したシミュレーション構築は難し く,これらを総合的に解析した研究例は少ない.そこで,ハンバーグなど畜肉加工品の加熱に おける伝熱解析やそれに伴った物質移動シミュレーションを行った.その際,家庭に広く普及 し,チルドおよび冷凍ハンバーグの製造ラインでも導入されているIHクッキングヒーターを用 い,解析では,試料だけでなくフライパン全体を熱移動計算の領域に含めた.また,畜肉加工 品の加熱調理において頻繁に行われる反転に着目し,反転タイミングの違いが及ぼす温度上昇 への影響を解析し,厚生省の指導する75℃1分間加熱を満たすため,試料内部の温度変化から 殺菌価 (75℃加熱相当時間)を算出し,最適な反転タイミングを検討した.

1.7 本論文の構成

本論文は、以下の五章より構成される.

第一章においては,以上述べてきたような研究の背景および目的,既存の研究事例を示した. 第二章では,シリコン焼成過程における加熱条件検討および熱移動解析を行った. 第三章では,ボロニアソーセージ焼成過程における熱および物質移動解析を行った. 第四章では,ハンバーグ焼成過程における熱および物質移動解析を行った. 第五章では,本研究の研究結果を総括したものを示した.

第二章 シリコン焼成過程における加熱条件検討および熱移動解析

2.1 緒言

畜肉加工品(ハンバーグ等)をフライパンで加熱すると,熱移動と物質移動(水分・油分) の他にタンパク変性および収縮が起こる.一度にこれらの要因をモデルに組み込むのは難しい ため,まず熱移動についてモデル化を行う.その際,水分移動を考慮しなくても良いモデル食 品としてシリコンを使用し,理論解析と比較検討を行った.

本研究では、加熱手法として IH クッキングヒーターおよびフライパンを用い、試料一つを 焼成する系で行なった.その際、試料焼成シミュレーションを実施する上で、調理空間での伝 熱モデル構築(フライパンと試料との接触部における境界条件の設定、試料上部、側面におけ る境界条件すなわち雰囲気との熱伝達)のための検証が必要となる.

本章では、実際に IH クッキングヒーターおよびフライパンを用いて、ハンバーグ試料と同様の形状に成型したシリコンの加熱を行い、二次元熱伝導解析の結果と比較した.このとき、 調理空間の熱伝達条件や発熱分布を考慮したフライパンの発熱量や数値計算における計算領 域の検討など基本となる解析条件を確立し、昇温加熱および高温投入加熱における反転操作を 考慮した熱伝導解析を行った.

2.2 加熱条件検討

2.2.1 フライパンの検討

調理を行う上で、加熱機器によって生じる調理空間の不均一な温度分布は、食品の不均一な 加熱を招き、安全性の面で不安であることに加え、大量生産を行なう場合には製品のばらつき を生む原因となる.また、熱移動解析において、試料への不均一な熱伝導および熱伝達を再現 しにくいことなどからも、より均一に加熱できる加熱機器が必要となる.そこで、使用する IH クッキングヒーターによるフライパン加熱の温度上昇およびそれに伴った加熱機器(フライパ ン)内の温度ムラ(温度差)がどの程度起こるか確認することを目的とした.

第一章で述べたように、電磁誘導加熱では、金属に存在する電気抵抗が大きく影響すること から、フライパンの材質により発熱量や熱の伝わりに大きな差が生まれる。今回は、①単層厚 底構造フライパンおよび②多層構造フライパンの二種を用いて温度ムラを確認し、今後用いる フライパンの決定を目的とした。 【実験装置】

- ・ IH ローレンジ
 FICL05HA (内輪 100%で使用) 火力は1から 10 までダイヤルで制御されており火力1が 500W,火力2が 1000W というように 500W ずつ大きくなり, 最大が火力10の 5000W となっている.また,業務用であるた めコイルが内輪,外輪の二重コイル構造であるが,今回は内輪の みを用いた.火加減については,IHの火力調節目安表 ¹⁸⁾ から得 た消費電力を採用した.
- IH 対応フライパン① SUPERDENJI SUS444 遠藤商事株式会社 単層厚底構造 ステンレス鋼(クローム 19%・ニッケル 0%・モリブデン 2%) 底面直径 18.5cm
- IH 対応フライパン② KING-DENJI 中尾アルミ製作所 多層構造 (ステンレス 0.3mm・アルミニウム 2.8mm・テフロン被覆) 底面直径 22.0cm
- ・ 放射温度計
 NEC 製
 TH7102WV

放射率は 0.98 とした.

※放射温度計は物体から電磁波として放射される放射エネル ギーを測定している.この際,放射率が必要であるため事前に今 回使用するフライパンの放射率を測定し,放射率 0.98 として計 測した.

【方法】

火力1(500W)および火力3(1500W)で二種類のフライパンを90秒空焚きし,0秒,30秒,60秒および90秒での底面温度を放射温度計で測定した.その後,画像処理を行い0秒,30秒,60秒および90秒でのフライパン底面の温度分布を算出した.

【結果と考察】

火力3で空焚きした 60 秒後の放射温度計画像をフライパン①および②それぞれ Fig.2-1 お よび Fig.2-2 に示した. なお,図中の矢印はフライパンの底面部分を示した. また,火力1お よび火力3で空炊きし,経時的(0秒,30秒,60秒および90秒)に撮影した後,画像処理ソ フトで解析し,まとめたものをそれぞれ Fig.2-3, Fig.2-4 および Fig.2-5, Fig.2-6 に示した. なお,図中にある縦線はフライパン中心部でハンバーグを加熱した時の直径(8.2cm)を表し た.

この範囲内における温度ムラはフライパン①でM形に,②では中心部でほぼ一定となった. また,どちらのフライパンでも火力1より火力3の方が大きくなり,最大温度差は単層構造の フライパン①で 8.1℃ (火力1), 32.9℃ (火力3)となったのに対し,多層構造のフライパ ン②では 2.0℃ (火力1), 8.6℃ (火力3)となり,フライパンの違いにより,加熱ムラに大 きな差が生じた.このことから,今後の実験において,より温度ムラの少ない多層構造のフラ イパン②を用いて行なうこととした.



Fig.2-1 放射温度計の画像(火力3, 60 s)



Fig.2-2 放射温度計の画像(火力3, 60s)



Fig.2-3 IH 加熱空炊き時の場所と温度(フライパン①,火力1)



Fig.2-4 IH 加熱空炊き時の場所と温度(フライパン①,火力3)



Fig.2-5 IH 加熱空炊き時の場所と温度(フライパン②,火力1)



Fig.2-6 IH 加熱空炊き時の場所と温度(フライパン②,火力3)

2.2.2 油およびフタの有無検討

IH およびフライパンを用いた加熱調理において、試料とフライパンの接触部分において油 を添加することやフタを用いるなど様々な調理法が存在する. 今後の実験において、それらの 基本的な取り決めを行なうため、プロの料理人加熱例やより効率的に加熱できるかなどの点か ら考察することを目的とした.

【実験試料と装置】

- ・円筒形シリコン(直径 8.0cm,厚さ 1.5cm,株式会社扶桑ゴム産業) シリコン物性値 (密度:1.16g/cm³,比熱:1.53J/g·℃,熱伝導度:2.37×10⁻³W/cm·℃) 実験装置は2.2.1と同様に
- ・IHローレンジ
- 多層構造フライパン

【方法】

熱源に使用している IH クッキングヒーターの出力を火力1 (500W) および火力4 (2000W) に設定し、加熱におけるシリコンの温度履歴を測定した.加熱時間はそれぞれ5分および1.5 分である.シリコン内部には等間隔で3点,表面にはカッターで切れ目をつけシースK型熱電 対(φ0.5mm)を差し込み測定した(Fig.2-6参照).また,環境温度は,フライパンの高さの 中間,端から 5cm の場所に固定したシース K 型熱電対で測定した.あらかじめフライパンに シリコンを乗せてから加熱を開始した.

比較条件

- ① フライパンとシリコンにおける接触層での「油の有無」による違い
- ② 「フタの有無」による違い





Fig.2-6 温度測定位置の模式図

【結果】

シリコン焼成の温度履歴を Fig. 2-7 (火力1) および Fig. 2-8 (火力4) に示した. フタの 有無により,環境温度に大きな差が生じた. それぞれの加熱終了時では,火力1で約 30℃, 火力4で約 40℃の差となった. フタの使用による環境温度の上昇に伴い,シリコン内部の温 度上昇も大きくなった.

また,油の添加によりシリコン中心(下)の温度上昇が5℃程度大きくなった.このことから,油の添加の有無によって伝熱速度は異なり,油と試料が接触することで加熱面における伝 熱抵抗が小さくなったと予想された.

これらの結果から、今後の実験をより効率良く焼成できる「油あり、フタあり」という条件 で行うこととした.加えて、フライパンでの焼成を想定した伝熱モデルにおいて、加熱面にお ける伝熱抵抗は、重要な因子となることが示唆された.



Fig.2-7 油およびフタの有無によるシリコンの温度変化(火力1)



油およびフタの有無によるシリコンの温度変化(火力4) 22 Fig.2-8

2.2.3 焼成方法の検討

ここでは焼成方法を検討した. ハンバーグ加熱調理をモデルとしたとき,一般的な加熱法は 加熱したフライパンにパテを投入して焼成する方法である. 第一章の料理人Aの焼成において も加熱したフライパン(140~150℃)を用いて調理を行っていた. これに対し,工業的な実現 は難しいが,常温のフライパンにあらかじめハンバーグを置いた状態から火力1でゆっくりと 加熱を行うという加熱法を行うシェフ(料理人Bなど)もいる. これらのことから,今回の加 熱実験において二種類の加熱法を用いて加熱を行うこととした. なお, 2.2.3.1 に焼成方法の説 明を記す.

2.2.3.1 昇温加熱および高温投入加熱の焼成方法

·昇温加熱

常温のフライパンに試料を置き,フタをした状態で IH クッキングヒーター火力1 (500W) で加熱した.

·高温投入加熱

フタしない状態で、フライパンを火力4で40秒加熱した後、火力2で30秒加熱し、火力1 に戻して10秒経過したときに試料を投入し、フタをしてIH クッキングヒーター火力1 (500W)で加熱した.

なお、試料投入時のフライパン温度を2.2.3.2で検証した.

2.2.3.2 高温投入加熱の投入タイミング検証

ハンバーグ製造ラインにおいて加熱した鉄板で焼成を行っていたが、その時の温度は140~ 150℃であった.よって、2.2.3.1の高温投入加熱の投入時のフライパン表面温度が140~150℃ であるか検証を行った.

【試料および実験装置】

試料および実験装置は2.2.2と同様.

【方法】

フライパンにシート K 型熱電対をアルミテープで固定した後,火力4 で 40 秒加熱した後, 火力2 で 30 秒加熱し,火力1 に戻して 10 秒加熱したときの温度上昇を測定した.また,同時 に放射温度計でフライパン全体の温度分布を測定した.

【結果】

フライパン表面温度の測定結果を Fig. 2-9 に示した. 図には,シート K 型熱電対と放射温度 計のフライパン中心点の温度を示している.シート型熱電対と放射温度計で温度差は約 10℃ あるものの 140~150℃で安定していることがわかる. さらに,この時の放射温度計画像を Fig. 2-10 に示した. なお,低温に見える部分は,シート型熱電対を固定したアルミテープであり, 点線の円はフライパンに試料を投入した時の範囲を示したものである. また,放射温度計画像 より算出したフライパン底面の経時的な温度分布を Fig. 2-11 に示した. なお, 今回も点線は, 試料直径を示す. これから 80 秒でのフライパン温度は, 試料の範囲において約 140℃で一定 であることがわかった.

よって、今後の高温投入実験における投入タイミングは、火力4で40秒加熱した後、火力 2で30秒加熱し火力1に戻して10秒加熱したときとした.



Fig.2-9 フライパン表面温度の変化



Fig. 2-10 80 秒加熱時の放射温度計画像



Fig. 2.-11 フライパン底面の経時的な温度分布

2.3 シリコン焼成(反転タイミングによる影響)

シリコンを用いて,加熱中に試料を反転させた場合の温度データを取得し,反転のタイミン グによる内部温度上昇への影響を検討した.

【実験試料および装置】

試料および実験装置は2.2.2 と同様.

【方法】

昇温加熱途中,シリコンを反転させた場合の温度履歴を測定した.シリコン内部には等間隔 で3点,表面にはカッターで切れ目をつけシース K 型熱電対 (φ1.0mm)を差込み測定した. また,環境温度は,フライパンの高さの中間,端から5cmの場所に同様のシース K 型熱電対 を固定して測定した.条件は,火力1,油あり,フタありで行い,中心温度が 30℃,40℃, 50℃,60℃および 70℃になった時に一度反転した.焼成終了のタイミングは,ハンバーグの 焼成要件である「中心温度 75℃,1分相当の加熱」の目安として,中心温度が 75℃に到達し てから1分経過とした.

【結果】

それぞれの反転タイミングにおけるシリコンの焼成履歴を Fig.2-12~2-17 に示した. 今回の 加熱実験において、「①全焼成時間」、「②最終中心温度(℃)」「③最低温度点が 75℃以 上で1分を保持できたか」をまとめ、Table 2-1 に示した. この結果、シリコンにおいて、中 心温度が 75℃に到達してから1分経過した時点で、50℃以下の反転では中心(下)はまだ 75℃、 1分に達していないことが分かった. また、中心温度が 75℃1 分に要する時間やその時の温度 は、低い温度で反転するほど、早く高温となり、シリコン内での温度差が大きくなったと考え られた. このことから、シリコンにおける反転タイミングは、中心温度が 60℃以上に達した 時が良いのではないかと考えられた.

このようにシリコンにおいて反転タイミングの違いが加熱ムラに大きく影響することがわ かった.また,その反面,反転タイミングを考慮することでより過度な加熱を防ぐ焼成法(反 転タイミング)を見つけ出すことが可能であると考えられた.そのために試料全体の温度分布 を予測計算する必要がある.次節に,シリコン焼成における熱移動解析を行った後,シリコン で得られた条件を基に食品であるボロニアソーセージ(熱移動と物質移動(水分・油分)を考 慮した解析)およびハンバーグ(熱移動と物質移動(水分・油分)に加えてタンパク変性,収 縮を考慮した解析)の内部温度分布および反転タイミングを検討していく.

反転タイミング	なし	30°C	40°C	$50^{\circ}\mathrm{C}$	60°C	70° C
全焼成時間(分)	12.8	14.3	15.7	15.3	14.1	14.0
最終中心温度(℃)	79.8	79.0	78.7	78.2	78.1	77.7
最低温度点が 75℃1 分を保持できたか	×	×	×	×	\bigcirc	\bigcirc

Table 2-1 シリコン焼成結果













Fig. 2-17 70℃反転におけるシリコンの焼成 28

2.4 熱移動解析

畜肉加工品(ハンバーグ等)をフライパンで加熱すると,熱移動と物質移動(水分・油分) の他にタンパク変性および収縮が起こる.一度にこれらの要因をモデルに組み込むのは難しい ので,まず熱移動についてモデル化を行う.また,食品を加熱すると水分移動を無視すること は出来ない.そこで,まず理論解析と比較する実験試料として,シリコンを用いて検討を行っ た.

2.4.1 熱移動モデル

フライパンから試料(今回はシリコン)への熱移動は,固体一固体間の熱移動であり,完全 に密着しているわけではないのでその取扱いは難しい.従来は,主に接触伝熱としてフライパ ンからの熱伝達的な取扱いが行われてきた.この場合,フライパン表面の温度データと伝熱係 数 hの値が必要である.また,熱したフライパンに冷えた試料を接触させたときのフライパン 自体が冷える影響や,接触面での水分蒸発の影響なども考慮しにくい.そこで,本研究ではフ ライパンも熱移動計算の領域に含めて考える.フライパンと試料の接触部分においては,油ま たは空気の極薄い層を考え,この層が接触抵抗となると考える.また,加熱源が IH である場 合は,フライパン自体が発熱するので,フライパンに発熱層を設定する.加熱モデルを Fig. 2-18 に示す.モデルは円筒形とし,半径方向および高さ方向の二次元で計算を行なった.



Fig. 2-18 ハンバーグ加熱モデル

フーリエの熱伝導法則を基に,熱収支をとると,以下の基礎式(フーリエの熱伝導方程式) が得られる.

$$\rho_{b}C_{p}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(kr\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right\} + Q$$
(1)

 P_b :密度 (g/cm³), Cp:比熱 (J/g・ \mathbb{C}), T:温度 (\mathbb{C}), t:時間 (s), r:半径 (cm), k:熱伝導度 (W/cm・ \mathbb{C}), z:高さ (cm), Q:内部発熱量 (J/s・cm³),

ここで、Qは内部発熱項を表し、フライパンでの発熱を表す.

初期条件は

 $T=T_0$

(2)

境界条件は、ハンバーグの上面と側面に熱伝達があるとすると次式となる.

$$-k \operatorname{grad}(T) \cdot n = h_{t}(T_{a} - T)$$
(3)

(1)の方程式を初期条件(2),境界条件(3)を用いて解くことにより,温度変化を求めることができる.ここでは有限要素法の一種であるガラーキン法を用い,数値計算を行った.

2.4.2 シリコン物性値の確認

試料としたシリコンの物性値は、シリコンを購入した株式会社扶桑ゴム産業よりいただいた 値を用いた.この値が妥当であるかを確認するため、シリコンを強制対流下の恒温水槽中に投 入し、中心温度の実測値と計算結果を比較した.

• 実験条件

円筒形シリコン(半径:4cm,厚さ1.5cm,初期温度20℃),恒温水槽温度80℃ 計算に用いた物性値

密度:1.16g/cm³,比熱:1.53J/g·℃,熱伝導度:2.37×10⁻³W/cm·℃ 熱伝達係数 1.0W/cm²・℃

計算ではシリコン全面で熱伝達があるとした.また,用いた熱伝達係数の値は,表面熱抵抗 がほとんど無い場合に相当する.円筒形試料の中心温度計算結果と実測値の比較を Fig. 2-19 に示したが、よく一致していることがわかる.



Fig. 2-19 計算結果と実測値の比較

2.4.3 フライパンの発熱量

Fig. 2-18 に示した加熱モデルを考える場合, IH 加熱におけるフライパンの発熱量を求める 必要がある.フライパンを空焚きしたときの放射温度計による温度測定データとフライパンだ けを計算領域とした計算結果と比較することで発熱量を求めた.

Fig. 2-20 にフライパンを空焚きしたときのフライパン温度分布を示す. ほぼ軸対称性を示し ていることがわかる. 半径方向温度分布の経時変化を Fig.2-21 に示す. 試料を載せる中心部分 ではほぼ一定の温度分布となっている. そこで, 試料が載っている部分の発熱は均一と仮定し, 発熱量を求めた.

フライパンを2層構造とし、フライパンを IH で加熱した場合を考える.計算領域は被加熱

物の大きさと同じとする.

IH フライパン:テフロン皮膜+アルミ(2.8mm) +ステンレス(0.3mm)

ステンレス物性値:密度=7.91g/cm³,比熱=0.46J/g℃,熱伝導度=0.138W/cm℃

アルミ物性値:密度=2.71g/cm³,比熱=0.897J/g℃,熱伝導度=2.03W/cm℃

フライパン表面中心温度変化の計算結果と実測値の比較を Fig. 2-22 に示す. 熱伝達係数の 値は 1.0×10⁻² W/cm²℃, 雰囲気温度はフライパン初期温度で一定としている. また, 出力と 発熱量の関係を Fig. 2-23 に示した. 出力4の場合, 発熱量にフライパンの厚みと面積をかけ て,

(トータルの発熱量) =100×0.03×11²×π=1140 W に相当する.



Fig. 2-20 放射温度計によるフライパン温度分布(左:火力1 120s,右:火力4 60s)



Fig. 2-21 フライパン温度測定結果 (火力1)



Fig. 2-22 フライパン中心温度変化の実測値との比較 Fig. 2-23 出力と発熱量の関係

2.4.4 計算領域の検討

シリコン,接触層,フライパン,フライパン発熱層の4層構造とし,シリコンの上面と側面のみ熱伝達条件とする.火力1の条件(Q=15 W/m³, h=1.0×10⁻² W/cm²℃)として計算したときの結果を Fig. 2-24 に示す.また,比較としてシリコンを火力1で加熱した際の実測値を Fig. 2-25 に示す.

計算結果において底面すなわちフライパンとの接触面の温度が高く、シリコン表面の温度が 低いことがわかる.フライパンの上にシリコンを置いたため、放熱が制限され、計算では温度 上昇するが、実際にはフライパンは熱伝導が良いため、シリコンの載っていない面から放熱さ れると考えられる.このことからフライパン全体を計算領域とする必要がある.

一方,表面温度が実測値よりも低いのは,雰囲気温度を試料初期温度と等しくしているため,加熱されると冷却面になるが,実際には雰囲気温度が高くなるため,加熱面となる.したがって,雰囲気温度変化を考慮する必要がある.



Fig. 2-24 中心軸上の温度変化(計算)

Fig.2-25 中心軸上の温度変化(実測値)

計算領域をフライパン全面に拡張したときの計算結果を Fig.2-26 に示す. 計算条件は以下の とおりである.

フライパン直径 22cm,フライパン発熱量:Q=15 W/m³,熱伝達係数:h=1.0×10⁻² W/cm²℃ 試料初期温度:17℃,雰囲気温度:20℃
図中の実線赤がフライパン全体を計算領域とした結果であるが,途中から温度上昇が遅くなることがわかる.



Fig. 2-26 フライパン全体を計算領域とした時のシリコン中心軸上の温度変化(計算)

2.4.5 発熱分布を考慮したフライパンの発熱量

上記の結果から, 試料の載っていない領域から放熱が起こり, フライパン温度は上昇しない ことがわかった. 2.4.4 の計算ではフライパンの発熱を均一としたが

,実際には発熱分布が生じている.この分布の決定を試みた.

Fig. 2-27 に火力4 で短時間フライパンを加熱した時の発熱分布を示す. 放熱および熱伝導を 無視できるとすると発熱量 *Q* は次式で与えられる.s:ステンレス, A:アルミと表記した.

$$Q 2\Delta r \pi L_s t = 2\Delta r \pi L_s C_{ns} \rho_s \Delta T + 2\Delta r \pi L_A C_{nA} \rho_A \Delta T$$

$$\therefore \quad Q = (C_{ps} \rho_s \Delta T + \frac{L_A}{L_s} C_{pA} \rho_A \Delta T) / t$$

 $Q: 発熱量 (J/s \cdot cm^3), r: 半径 (cm), L: 高さ (cm), P: 密度 (g/cm^3),$ $Cp: 比熱 (J/g \cdot C), T: 温度 (C)$

-20 5 120 -15 s -10 s 100 -5s 0s 80 温度(°C) 60 40 20 0 0 5 20 10 15 フライパン位置(cm) Fig. 2.27 フライパン発熱分布(出力4) 33

5 秒加熱したときの温度から計算した発熱分布を Fig.2-28 に示す.また,この発熱量分布に 基づく温度分布計算結果を Fig.2-29 に示す.計算結果は実測値と比較して温度分布の幅が小さ いことがわかる.熱伝導がないと見なして,5秒加熱後のフライパンの温度分布から発熱量分 布を求めたが,実際には5秒間でも熱伝導が無視できないことが示された.



Fig.2-28 発熱量分布



Fig.2-29 発熱分布を考慮したフライパンの温度分布計算結果

出力4で5秒フライパンを空焚きした温度分布から発熱量分布を求めたが、5秒間において も熱伝導があるため、求めた発熱量分布から計算した温度分布は実測値と一致しなかった.よ って実際の発熱分布は大きいと考えられ、以下の取扱いを行った.

出力4でフライパンを空焚きしたときの半径方向温度分布から,熱伝導がないとして逆算したときの発熱分布を Fig.2-30 に示す.



Fig.2-30 フライパン発熱分布

Fig.2-30 のように、ピークを境に線形近似を行った. Fig. 2・27 の発熱分布に近づくように、 内側の発熱分布直線(Qr = 6.88611r + 102.28)の傾きを5倍にしたときの発熱分布を緑の実 線で示した.この発熱分布による総発熱量は元のものと同じである(計算はAppendix 1 参照). この発熱分布を用いて、熱伝達係数 *h*=0.018 W/cm²・℃として計算したときの結果を Fig.2-31 に示した.実測値と良好に一致していることがわかる.





2.4.6 シリコン(昇温加熱)熱伝導解析

2.4.6.1 雰囲気温度上昇の取扱いについて

フライパンから放出された熱は空気を暖める.特に,フライパンにふたをした場合は,空気の温度上昇が大きく,試料の温度よりも上昇するため,試料が空気を通じて加熱されることになる.このことを考慮するために,雰囲気温度上昇について以下のように数式化を行った.

・雰囲気温度上昇の解析

フライパンにふたがしてあることを想定し、その密閉空間にフライパン表面から放熱し、雰 囲気温度が上昇するとする.また、試料表面については、試料表面温度と雰囲気温度の差によ って熱の授受が起こるとする.

フライパンから密閉空間中への放熱量 Qspc (J) は

$$Q_{spc} = \int h_t (T - T_{spc}) dS = \sum h_t (T - T_{spc}) S_e$$
(10) Se: 表面積 (cm²)

ここで、 $T_{
m spc}$ は密閉空間の温度である.また、密閉空間から空気中への放熱 $Q_{
m air}$ (J/s) は

$$Q_{air} = US_{cv} \left(T_{spc} - T_{air} \right)$$
(11)

ここで、Uは総括伝熱係数($W/cm2 \cdot C$)で、ふたの熱容量を考慮していない。密閉空間温度が dt時間に dT_{spc} だけ上昇したとすると

 $\rho_{a} C_{rp} V_{d} d_{r}^{T} C_{s} P_{c}^{\prime} dt = Q_{s} P_{c}^{\prime} Q_{a} V_{c}^{\prime}$ $V : \Leftrightarrow \overline{\mathfrak{h}} (\mathrm{cm}^{3})$

$$\frac{dT_{spc}}{dt} = \frac{Q_{spc} - Q_{air}}{\rho_{air} C_{pair} V}$$

以上から IH 出力1のときの温度変化の結果を Fig.2-32 に示したが, 雰囲気温度の傾向は実 測値と異なることがわかる. これは, 密閉空間内で自然対流があり, 温度分布が存在すること, およびふたの熱容量を考えていないことによるものと思われる. 使用するフライパンによって この状況は変化し, ハンバーグの加熱の本質的な部分ではないので, ここでは雰囲気として実 測値を使うこととする.

(12)



Fig.2-32 雰囲気温度変化を数式化したときの温度変化

2.4.6.2 反転するまでの温度解析

IH 出力1でシリコンを加熱したときの計算値と実測値の比較を行った.フライパンの発熱 分布はIH 出力1であることを考慮して, Fig.2-30の値に Fig. 2-23の出力と発熱量の関係よ り考慮した 0.14を掛けた値を使用した.また,雰囲気温度は実測値を使用した.その他計算 に用いた物性値は以下のとおりである.

密度:1.16g/cm³,比熱:1.53J/g·℃,熱伝導度:2.37×10⁻³W/cm·℃ 熱伝達係数 0.018 W/cm²·℃

計算結果と実測値の比較を Fig.2-33 に示す. 試料表面温度の計算値が実測値に比べてかなり 大きいことがわかる. これはフライパンの加熱から計算した熱伝達係数が大きすぎるためと考 えられる. 厚さ 1.5cm の平板として, Bi 数 (= h R/k)の逆数を計算すると, k / h R =0.15 となり, 計算では表面の熱抵抗が小さいことがわかる.



Fig.2-33 シリコンを加熱したときの温度時間変化

2.4.6.3 熱伝達係数の温度依存性について

自然対流における熱伝達係数は、物体と空気の温度差に依存する.たとえば、垂直平板の熱伝達係数h (W/cm²· $^{\circ}$)は

$$h = 1.8 \times 10^{-4} \left(\Delta T\right)^{0.25} \tag{1}$$

で与えられる 19). 水平平板の式は見当たらないので, (1)式と同じ依存性とし次式を仮定する.

$$h = a(\Delta T)^{0.25} \tag{2}$$

a=7.0×10⁻³ としたときのフライパン温度計算結果を Fig.2-34 に示したが, Fig.2-31 と同様の結 果が得られることがわかる. なお, 雰囲気温度は測定していないため, 初期温度のままとした. 同じ値を用いてシリコンを計算した結果を Fig.2-35 に示す. Fig.2-33 よりは試料表面温度上 昇は小さくなったが, 依然実測値を再現できない. フライパンの加熱面においては空気の上昇 速度が大きく, hが大きく, 加熱されていない面には適用できないといえる.





Fig. 2-35 シリコンを加熱したときの温度変化

2.4.6.4 加熱面の熱伝達係数を考慮したときの解析

フライパンにおける熱伝達係数と試料表面における熱伝達係数は違うことがわかったので, 試料表面における熱伝達係数を試料表面温度と一致するように決定した.

フライパンの熱伝達係数h=0.018 W/cm²・℃, 試料表面の熱伝達係数h=0.0012 W/cm²・℃と したときの計算結果を Fig. 2.4.6-5 に示す. 実測値をほぼ再現していることがわかる.



Fig. 2-36 シリコンを加熱したときの温度変化

2.4.6.5 反転する際の雰囲気温度の取り扱いについて

反転するとき、フライパンのふたを開けるので雰囲気温度は連続しない.そこで、反転前後 で雰囲気温度の時間変化を表した実験式を使用した.(Fig.2-37)



Fig. 2-37 雰囲気温度の時間変化

2.4.6.6 加熱途中で反転したときの温度解析

以上を考慮して、シリコン昇温加熱 40℃反転の実験と同じ条件下(反転時間=370s)での 温度履歴計算の比較した.本計算において、接触層の取り扱いは難しい.計算においては、接 触層(0.1mm)の物性値として油の物性値を用いたところ、熱の伝わりがうまく行なわれなか ったため、接触層の熱伝導度をこの値の 100 倍として計算したときの温度変化を Fig. 2-38 に 示す.その結果、中心、表面上下共に傾向が良好に一致していることがわかる. 蒸発なし,初期温度:25℃,フライパン火力1, 熱伝達係数(W/cm²℃) h_t=0.0012 (試料上部) h_t=0.018(フライパン上部) 雰囲気温度 T_{spc} =-2.07E-05 t² + 1.27E-01 t + 2.17E+01 (反転前) T_{spc} = 1.27E-06 t³ - 2.47E-03 t² + 1.65 t - 2.88E+02 (反転後) 接触層物性値 密度:0.9 g/cm³,比熱:1.0 J/g·℃,熱伝導度:1.0×10⁻¹W/cm·℃



Fig. 2-38 反転時の接触抵抗を考慮したときの温度変化

2.4.7 シリコン(高温投入加熱)熱伝導解析

シリコンを高温フライパンに投入し、中心温度が 40℃のときに反転した時の温度変化とシ ミュレーションの比較を Fig.2-39 に示した. 投入フライパン温度は実測値より 140℃とした. その結果,実測と計算での傾向は一致したが,反転後の表面(下)の温度変化に差が出る結果 となった.反転後,表面下の計算値が高くなった原因としては,実際に試料を反転する際に 10 秒から 20 秒の時間がかかり,その間に温度が低下したことが考えられた. また,中心温度に おいて実測値と計算値が良好に一致していることがわかる.

蒸発なし、初期温度:24℃,投入フライパン温度:140℃,フライパン火力1, 熱伝達係数(W/cm²℃) ht=0.002 (試料上部) ht=0.04 (フライパン上部) 雰囲気温度 T_{spc} =-3.53E-07 t⁴ + 1.39E-04 t³ + - 1.98E-02 t² + 1.34E+00 t +2.74E+01 (反転前) T_{spc} =-2.89E-09 t⁴ + 5.16E-06 t³ - 3.53E-03 t² + 1.14E+00 + 1.34E+00 t - 5.92E+01 (反転後) 接触層物性値 密度:0.9 g/cm³,比熱:1.0 J/g·℃,熱伝導度:1.0×10⁻¹W/cm·℃



Fig.2-39 高温投入 40℃反転の計算値と実測値の比較

2.5 本章のまとめ

本章では, IH クッキングヒーターを用いたフライパン調理における条件検討と解析を行った. 試料として,水分蒸発,収縮などのないモデル試料であるシリコンを用いた.

フライパンの検討において、単層厚底構造と多層構造のフライパンの温度ムラの比較を行った結果、多層構造の方が、ムラが小さかったため、こちらを採用することとした.さらに、油およびフタの有無検討においては、油およびフタの両者を用いた方が、加熱時間の短縮が見込めることが分かったため、今後は油あり、フタありの条件で加熱を行うこととした.

焼成方法は、油をひいた常温のフライパンに試料を置き、フタをした状態で火力1(500W) で加熱した「昇温加熱」と油をひいたフライパンを 140℃~150℃に加熱して試料を投入した 「高温投入加熱」の二種類で行った.

シリコン加熱における反転タイミングの違いによる影響では、シリコン内部には等間隔で3 点、表面上下に K 型熱電対(φ 1.0mm)を差込み測定した.その結果、反転タイミングの違い が加熱ムラに大きく影響することがわかり、反転タイミングを考慮することでより過度な加熱 を防ぐ焼成法(反転タイミング)を見つけ出すことが可能であると考えた.

シリコンの熱移動解析では,IH クッキングヒーターおよびフライパンを用いて,シリコン の加熱を行い,Fortranを用いた伝熱解析の結果と比較を行った.その際,計算領域をフライ パン全体とし,試料には接触層を介して熱伝導によって起こるとした.また,発熱分布を考慮 したフライパンの発熱量を計算し,昇温加熱および高温投入加熱における反転操作を考慮した 熱伝導解析を行った.その結果,両加熱共に反転後の表面(下)の温度変化に差が出る結果と なったが,実測と計算での傾向が一致し,特に中心温度において実測値と計算値が良好に一致 していることがわかった. $\boldsymbol{\cdot} \operatorname{Appendix} 1$

図2のように、ピークを境に線形近似する. ピーク前後の総発熱量は

$$Q_{1} = 2\pi L_{s} \int_{0}^{R_{1}} (a_{1}r + b_{1})r \ d \neq 2\pi L_{s} \left(\frac{a_{1}}{3}R_{1}^{3} + \frac{b_{1}}{2}R_{1}^{2}\right)$$
(1)

$$Q_{2} = 2\pi L_{s} \int_{R_{1}}^{R} (a_{2}r + b_{2})r \ d \neq 2\pi L_{s} \left\{ \frac{a_{2}}{3} \left(R^{3} - R_{1}^{3} \right) + \frac{b_{2}}{2} \left(R^{2} - R_{1}^{2} \right) \right\}$$
(2)
ここで、 R_{1} は発熱量ピークの半径である.

発熱分布を大きくするために、傾きを a_{1T} に大きくした時、総発熱量 Q_1 が同じであるためには

$$Q_{1} = 2\pi L_{s} \left(\frac{a_{1T}}{3} R_{1}^{3} + \frac{b_{1T}}{2} R_{1}^{2} \right) \quad \therefore \quad b_{1T} = \frac{Q_{1}}{\pi L_{s} R_{1}^{2}} - \frac{2a_{1T}}{3} R_{1}$$
(3)

外側の発熱量分布を考えると r = R1 では、内側の発熱量と一致するので

$$Q_{r1} = Q_{r2}$$
 \therefore $a_{1t}R_1 + b_{1t} = a_{2t}R_1 + b_{2t}$ (4)

また,発熱量は元の値と等しいとすると

$$Q_{2} = 2\pi L_{s} \left\{ \frac{a_{2t}}{3} \left(R^{3} - R_{1}^{3} \right) + \frac{b_{2t}}{2} \left(R^{2} - R_{1}^{2} \right) \right\}$$
(5)

(4), (5)式をそれぞれ次式のようにおく.

$$E_1 = c_1 a_{2t} + d_1 b_{2t} \tag{6}$$

$$E_2 = c_2 a_{2t} + d_2 b_{2t} \tag{7}$$

 $\sub{\"}, \ E_1 = a_{1t}R_1 + b_{1t}, \ c_1 = R_1, \ d_1 = 1, \ E_2 = Q_2,$

$$c_{2} = \frac{2}{3}\pi L_{s} \left(R^{3} - R_{1}^{3} \right), \quad d_{2} = \pi L_{s} \left(R^{2} - R_{1}^{2} \right)$$

(6), (7)式の解は

$$a_{2t} = \frac{\begin{vmatrix} E_1 & d_1 \\ E_2 & d_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_1 & d_1 \\ c_2 & d_2 \end{vmatrix}} = \frac{E_1 d_2 - E_2 d_1}{c_1 d_2 - c_2 d_1}$$
(8)

$$b_{2t} = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & E_1 \\ c_2 & E_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_1 & d_1 \\ c_2 & d_2 \end{vmatrix}} = \frac{c_1 E_2 - c_2 E_1}{c_1 d_2 - c_2 d_1}$$
(9)

第三章 ボロニアソーセージ焼成過程における熱および物質移動解析

3.1 緒言

ハンバーグ焼成シミュレーションを実施する上で必要となる,調理空間での伝熱モデル構築 (フライパンとの接触部における境界条件の設定,試料上部,側面における境界条件すなわち 雰囲気との熱伝達)のための検証を目的とし,これまでは,水分蒸発,収縮などのないモデル 試料であるシリコンを用いてきた.次のステップとして,水分蒸発はあるが,収縮の少ないモ デル試料と見なせるボロニアソーセージを用いて加熱実験を行い,反転操作に伴う試料内温度 分布および殺菌価分布をシミュレーションすることを目的とした.

3.2 ボロニアソーセージ焼成

3.2.1 豚脂の有無比較

ハンバーグなど畜肉加工品は、製造工程の中でジューシー感や旨味の増加のため、意図的に 脂を添加する場合がある.今回の加熱実験では、試料であるボロニアソーセージの豚脂添加の 有無による温度および重量変化の違いを比較するため、豚もも100%ボロニアソーセージおよ び豚もも80%-豚脂20%ボロニアソーセージの二種を用いて行った.その後、水分蒸発のない 試料であるシリコンとの比較を行った.

【試料および装置】

企業より提供して頂いたボロニアソーセージ (直径約 8.7 cm, 高さ 1.5 cm の円筒形) ① 豚もも 100%

②豚もも 80%-豚脂 20%

(水分 58.3%, タンパク質 17.2%, 脂質 19.3%, 炭水化物 2.5%, 灰分 2.7%) 実験装置は 2.2.2 と同様.

【方法】

昇温加熱における二種類のボロニアソーセージ温度変化を測定した. 試料の中心部および試 料表面付近にシース K 型熱電対を差込み, 雰囲気温度は, フライパンの高さの中間, 端から 5 cm の場所に固定してしたシース K 型熱電対を用いて測定した (Fig.3-1). あらかじめフライ パンにボロニアソーセージを乗せた状態で, IH 出力を火力1に設定して加熱を開始し, 25 分 間の加熱を行った. 実験は, 豚もも 100%および豚もも 80%・脂 20%でそれぞれ行った. 条件 は油あり, フタありである. また, 加熱に伴う重量, 直径および含水率の変化を測定した. 含 水率は, 加熱前後の2種のボロニアソーセージを対象として減圧加熱乾燥法で行い, 50℃, 約 100時間真空減圧下(真空度 13hPa)で乾燥させ, 乾燥前後の重量を測定した.



【結果】

豚もも 100%ボロニアソーセージおよび豚もも 80%・豚脂 20%ボロニアソーセージの昇温加 熱に伴う重量および直径の変化を Table 3-1 に,加熱に伴う温度履歴を Fig.2-2 に示した.ま た,Fig.3-3~3~6 に焼成前後のボロニアソーセージ加熱面の写真を載せた.この結果,今回の 加熱条件では,重量変化は-9.22g および-13.16g と減少したが,直径の変化は-0.10cm および 0.03cm と直径方向の減少は小さかった.また,加熱による温度履歴では,同様の温度上昇を 示し,脂の有無による有意な差はないと考えた.表面(下)では,100℃付近で温度上昇が緩 やかとなった.焦げ色においては,豚もも 80%・豚脂 20%ボロニアソーセージの方が全体的に 焦げ付くことがわかった.また,含水率から豚もも 80%・豚脂 20%ボロニアソーセージの方が あらかじめ保持している水が少ないことおよび焼成による水分の変化が大きいことが示唆さ れた.

脂の有無により温度上昇に有意な差は見られないと判断し、今後はよりハンバーグの成分に 近い豚脂 20%添加の試料を用いて、熱および物質移動解析を行っていくこととした.

試料		重量(g)	重量変化率	直径(cm)					直径変化率 合水 恋 (04)	含水率	
			(-)	1	2	3	4	Ave	(-)	百万平(90)	変化率(-)
100%豚もも	加熱前	97.94	0.09	8.7	8.6	8.7	8.8	8.70	0.01	65.19	0.07
	加熱後	88.72		8.5	8.5	8.8	8.6	8.60		60.78	
80%豚もも-20%脂	加熱前	93.16	0.14	8.7	8.8	8.7	8.7	8.73	0.00	56.38	0.12
	加熱後	80.00		8.7	8.8	8.8	8.7	8.75		49.47	

Table 3-1 加熱に伴うボロニア・ソーセージの重量および直径の変化



Fig. 3·2 豚もも 100%ボロニア・ソーセージおよび
 豚もも 80%-豚脂 20%ボロニア・ソーセージ加熱に伴う温度履歴



Fig. 3-3 豚もも 100%ボロニア・ソーセージ(加熱前)



Fig. 3-4 豚もも 100%ボロニア・ソーセージ (加熱後)





Fig. 3-5 豚もも 80%-脂 20%ボロニア・ソーセージ(加熱前) Fig. 3-6 豚もも 80%-脂 20%ボロニア・ソーセージ(加熱後)

3.2.2 シリコンとの比較

【方法】

3.2.1 の脂の有無比較実験と同様にシリコンを加熱し, 豚もも 80%-豚脂 20%ボロニアソー セージの結果と比較した.

【結果】

豚もも 80%・豚脂 20%ボロニアソーセージとシリコンの加熱に伴う温度履歴を Fig.3-7 に示 した. その結果, シリコンの方がより大きな温度上昇を示すことがわかった. これは, 表面(下) で見て取れるように, ボロニアソーセージは, 水分を含むため 100℃付近で試料表面からの蒸 発が進行し, 温度上昇が一時緩やかとなったと考えられた. このことから, 前章のシリコンの 熱伝導解析に加え, 水分蒸発を含む試料のシミュレーションを行う必要があるとわかった.



Fig.3-7 豚もも 80%-豚脂 20%ボロニア・ソーセージとシリコンの加熱に伴う温度履歴

3.3 熱および物質移動解析

3.3.1 水分移動を考慮した解析

加熱条件を決めるために、シリコン加熱について実測値と計算値の比較を行った.計算条件 は以下のとおりである.

蒸発なし、初期温度:22℃、フライパン火力1、

熱伝達係数(W/cm²℃) h_t=0.002 (試料上部) h_t=0.01 (フライパン上部)

雰囲気温度 T_{spc} = -2.78E-05t² + 1.05E-01t + 2.22E+01

実測値との比較を Fig.3-8 に示したが、良好に一致していることがわかる.

同様に, 試料物性値のみを文献¹⁰⁾より得たロースハムの物性値である密度 1.08 g/cm³,比 熱 3.54 J/g・℃,熱伝導率 0.005W/cm・℃)に変えて計算した結果を Fig.3-9 に示す.結果と して,水分蒸発を考慮していないため 100℃付近でも温度上昇が緩やかにならず,シリコンと 同様の傾向となった.



計算と実測の比較(シリコン)

Fig.3-8 シリコン加熱の計算と実測の比較



計算と実測の比較(ボロニアソーセージ)

Fig.3-9 ハム加熱の計算と実測の比較

次に,フライパンに接している層のみで蒸発が起こるとして,熱および水分移動の計算を行った.計算条件は以下のとおりである.

蒸発あり、初期温度:20℃、フライパン火力1

熱伝達係数(W/cm²℃) ht=0.002 (試料上部) ht=0.01 (フライパン上部)

水の拡散係数 3×10⁻⁴ cm²/s

試料底部のみ蒸発(T>100, u>0) u は無次元含水率 u=W/Wo

Ve=0.02*(T-100.0)*u Ve は蒸発速度(g/scm³)

蒸発を考慮した拡散方程式

$$\overline{\rho}_{S} \frac{\partial W_{w}}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{w} r \overline{\rho}_{S} \frac{\partial W_{w}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{w} r \overline{\rho}_{S} \frac{\partial W_{w}}{\partial z} \right) \right\} - V_{e}$$

 $\rho_{s}:$ 固体密度 (g_{solid}/cm^{3}), W_{W} : 含水率 (g_{water}/g_{solid}), t:時間 (s), r: 半径 (cm), z: 高さ (cm), D_{w} : 拡散係数 (cm^{2}/s), V_{e} : 内部蒸発速度 ($g_{water}/s \cdot cm^{3}$)

計算で得られた各点の温度変化と最終温度分布および水分分布を Fig.3-10~3-12 に示す. 結果として表面(下)の傾向が一致したが、中心および表面(上)で温度上昇が緩やかにはならなかった.



計算と実測の比較(ボロニアソーセージ)









Fig.3-12 ハム加熱における水分分布(1500s)

これらの結果より、フライパンに接触している層のみでの蒸発では水分の拡散が追い付かず、 内部には水があるにも関わらず、100℃以上に上昇していることがわかった.そこで、内部で も水分蒸発が起こるとして計算を行った.その際、水の拡散係数および蒸発速度はフィッティ ングパラメーターを用い、底部のみの場合と比べ小さくした.

蒸発あり、初期温度:20℃、フライパン火力1

熱伝達係数(W/cm²℃) h_t=0.002 (試料上部) h_t=0.01(フライパン上部)

水の拡散係数 3×10⁻⁵ cm²/s

試料内部で蒸発(T>100, u>0) u は無次元含水率 u=W/W0

Ve=0.01*(T-100.0)*u Ve は蒸発速度(g/scm³) 計算結果を Fig.3-13~3-15 に示す. フライパンと接触している点の温度は計算値のほうが速く 上昇するが,その傾向は良く一致する結果となった.



計算と実測の比較(ボロニアソーセージ)

Fig.3-13 ハム加熱の計算と実測の比較



Fig.3-15 ハム加熱における水分分布(1500s)

3.3.2 ボロニアソーセージ(昇温加熱)熱物質移動解析および殺菌価の予測

IH を用いたボロニアソーセージのフライパン調理において,厚生労働省の推奨する加熱条件(75℃1分間)で加熱を行った際の熱移動をシミュレーションし,反転のタイミングによる加熱ムラおよび熱移動解析の結果を用いて殺菌価の分布を確認した.実験は,ボロニアソーセージを常温から加熱した場合(常温加熱実験)で行った後,次のステップとして,あらかじめフライパンを加熱し,ボロニアソーセージを投入した場合(高温投入加熱実験)の二種で行った.

【実験試料および装置】

試料は 3.2 と同様の豚もも 80% 豚脂 20% ボロニアソーセージ. 実験装置は 2.2.2 と同様.

【方法】

ボロニアソーセージを昇温加熱し、一度反転させた場合の温度履歴を測定した. ボロニアソ ーセージ内部には中心および表面(上)、表面(下)にシース K 型熱電対を差込み測定した. また、雰囲気温度は、フライパンの中心、底から約 2.5cm の場所にシート K 型熱電対を固定 して測定した.条件は、火力1、油あり、フタありで行い、中心温度が 30℃、40℃、50℃お よび 60℃になった時に一度反転した.その後、同条件でシミュレーションを行い、ボロニア ソーセージ内部の温度分布および殺菌価分布を比較した.シミュレーションの条件および殺菌 価の基礎式は以下の通り.Z値は、安全性の面から大腸菌(6~7℃)などより高めの 10℃とし て計算を行った.

蒸発あり,初期温度:18.3℃,フライパン火力1 熱伝達係数(W/cm²℃) ht=0.001 (試料上部), ht=0.0055(フライパン上部) 水の拡散係数 3×10⁻⁵ cm²/s Ve=0.01*(T-100.0)*u Ve は蒸発速度(g/scm³) ・殺菌価の基礎式

$$Fp = \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{T(t)-75}{2}} dt$$

Fp:殺菌価 (min) , t : 時間 (min) , T:温度 (℃) , Z : Z値 (℃) ※Z値10℃とした

【結果と考察】

各反転タイミングにおけるボロニアソーセージ加熱実験の実測と計算の比較を Fig.3-16~ 3-19 に示した.この結果から全てにおいて反転直後の表面下は実測値よりも計算値が高くなっ たが、中心および表面上においては良好に一致した.反転後、表面下の計算値が高くなった原 因としては、実際にボロニアソーセージを反転する際に 10 秒から 20 秒の時間がかかり、その 間に温度が低下したことが考えられた.しかし、中心および表面上においてはどのシミュレー ションにおいても良好に一致しており、傾向も一致しているため、このシミュレーションを用 いて、反転タイミングによる影響を検討した.

Table 3・2 にそれぞれの反転シミュレーションにおける 75℃1 分間加熱に要する時間と最終 的な中心温度を示す.また、このときのボロニアソーセージ内部の温度分布、殺菌価(75℃加 熱相当時間)および水分分布を Fig.3・20~3・23、Fig.3・24~3・27 および Fig.3・28~3・31 に示 した.なお、図において殺菌価 5 分以下のみを示した.Fig.3・20~3・31 はボロニアソーセージ の断面図であり、高さ 1.5cm、横幅は左右対称形であるため 0cm (中心)から 4cm (半径距離) で表した.Table 3・2 より、反転のタイミングにより加熱時間に差が生じることがわかった. 加熱時間および最終温度を考慮すると 40℃および 50℃反転が好ましいと考えられた.

また, Fig.3-20~3-23 の温度分布では外側が少し高くなる傾向となった. この原因としては, 試料外側が発熱コイル上にあるため温度上昇が高くなったと考察した. これは, 多層構造のフ ライパンを用いても多少温度差が生じることおよび 3.2.1 でのボロニアソーセージ加熱実験 (25 分加熱)において底面の外側から焦げが生じていることからも妥当であると考えられた.

また, 3.4.1 で確認実験を行っている.

次に、殺菌価の結果(Fig.3・24~3・27)では、30℃反転で、高さ1.0・1.5cmの部分で殺菌価 1分以下と加熱不足となり適切な加熱とは言えないことがわかった.また、40℃反転では、高 さ1.0・1.2cm、直径で中心から2cm以内の位置において加熱不足がみられる結果となった.次 に、50℃反転では、全体が75℃1分以上の加熱となり、今回の4つの反転において最も良好な 加熱といえた.最後に、60℃反転では、75℃1分相当を越える高さ方向で均一な加熱が行われ ているが、75℃5分以上の過度な加熱が最も多くなった.このことから、今回の加熱条件にお いては中心温度が、50℃の反転が最も望ましいと考えた.

反転タイミング	加熱時間(s)	最終温度 (℃)
30°C	880	77.41
$40^{\circ}\mathrm{C}$	796	77.64
$50^{\circ}\mathrm{C}$	796	77.97
$60^{\circ}\mathrm{C}$	816	79.02

Table 3-2 反転シミュレーションにおける 75℃1 分間保持に要する時間と最終的な中心温度



Fig.3-18 50℃反転の実測と計算の比較



120 100 Temperature (°C) ■ 実測(上) ◆ 実測(中) ▲ 実測(下) -計算(上) 20 -計算(中) 計算(下) 0 10 0 2 4 6 8 12 Time (min)









Fig.3-30 50℃反転でのボロニアソーセージ水分分布(880 s)



3.3.3 ボロニアソーセージ(高温投入加熱)熱物質移動解析および殺菌価の予測

調理において、加熱したフライパンにパテを投入するのが一般的である.第一章の料理人Aの焼成においても加熱したフライパン(140~150℃)を用いて調理を行っていた.今回の実験では、140℃~150℃に温めたフライパンにボロニアソーセージを投入し、実測データを得ると共に、シミュレーションを行い、3.3.2の昇温加熱実験と同様に反転のタイミングによる加熱ムラおよび殺菌価の分布を確認することを目的とした.

【実験試料および装置】

試料は 3.2 と同様の豚もも 80% -豚脂 20% ボロニアソーセージ. 実験装置は 2.2.2 と同様.

【方法】

試料および測定方法は 3.3.2 と同様であるが,今回はフライパンを火力4で 40 秒,火力2で 30 秒加熱した後,火力1に戻してボロニアソーセージを投入し(フライパン温度約 140~ 150℃),加熱途中で反転させた場合の温度履歴を測定した.条件は,火力1,油あり,フタあ りで行い,中心温度が 40℃,50℃および 60℃になった時に一度反転した.その後,同条件で シミュレーションを行い,ボロニアソーセージ内部の温度分布および殺菌価の分布を比較した. シミュレーションの条件は以下の通り.殺菌価の計算は 3.3.2 と同様に行った.

蒸発あり,初期温度:15~16℃,フライパン火力1 熱伝達係数(W/cm²℃) ht=0.003(試料上部),ht=0.007(フライパン上部) 水の拡散係数 3×10⁻⁵ cm²/s 初期フライパン温度 140℃ Ve=0.01*(T-100.0)*u Ve は蒸発速度 (g/scm³)

【結果と考察】

各反転タイミングにおけるボロニアソーセージ高温投入加熱実験の実測と計算の比較を Fig.3-32~3-34 に示した.反転後の表面下は実測値よりも計算値が多少高くなったが、中心お よび表面上においては良好に一致した.また,他の反転温度においても同様の傾向を示したた め、この計算結果を基に反転の違いによる最終温度分布および殺菌価(75℃加熱相当時間)を 計算した.

Table 3·3 にそれぞれの反転シミュレーションにおける 75℃1 分間保持に要する時間と最終 的な中心温度を示す.また、このときのボロニアソーセージ内部の温度分布、殺菌価(75℃加 熱相当時間)および水分分布を Fig.3·35~3·37、Fig.3·38~3·40 および Fig.3·41~3·43 に示 した.なお、図において殺菌価 5 分以下のみを示した. Table 3·3 と常温から加熱した Table 3·2 を比較すると、高温投入を行うことで、常温から加熱を始めるより 3.6 分以上早く焼成が可能 であると予測できた.最終温度は 40℃反転、50℃反転および 60℃反転でそれぞれ+0.34、+0.56 および-0.08℃と大きな差は見られなかった.

次に,殺菌価の結果では、40℃反転で、高さ 1.1cm の中心付近で殺菌価 1 分以下の部分あり、適切な加熱とは言えなかった.また、 50℃および 60℃反転では、全体で十分な殺菌価を

得られた.しかし,常温加熱同様 60℃反転に比べて 50℃反転の方が 75℃5 分以上の過度な加 熱部分が少なかったことおよび中心部の殺菌価も小さいことから,今回の加熱条件においては 中心温度 50℃での反転が最も望ましいと考えた.このことから,75℃以上で1分間加熱する 場合,常温および高温投入加熱の双方において中心温度 50℃での反転が望ましいと考えた. しかし,40℃での反転でも大部分で 75℃1 分相当の加熱が行われており,より加熱負荷が少な いことから 40℃から 50℃の間での反転が,最適なタイミングであることが示唆された.

	加熱終了時間(s)	最終温度(℃)
40℃反転	570	77.98
50℃反転	560	78.53
60℃反転	600	78.94

Table 3-3 反転シミュレーション(高温投入)における 75℃1 分間保持に要する時間と最終的な中心温度







Fig.3-33 高温投入 50℃反転の実測と計算の比較







3.4 含水率および重量減少率確認実験

加熱に伴う重量変化(水分および油分)の現象確認実験を行なうと共に, 3.3 で行なったシ ミュレーションの結果と実測値の比較を行なった.

3.4.1 含水率(内外)の比較

3.3 のシミュレーションにおいて焼成後の試料中心部および側面部の含水率に差が生じていた.そこで,ボロニアソーセージ昇温加熱後に試料中心部および側面部にわけて含水率を測定し,実際に差が生じるか確認することを目的とした.

【実験試料および装置】

試料は 3.2 と同様の豚もも 80%-豚脂 20%ボロニアソーセージ. 実験装置は 2.2.2 と同様.

【方法】

3.3.2 ボロニアソーセージ昇温加熱実験の30℃反転同様にボロニ アソーセージを加熱した.焼成後,Fig.3・44 の様に試料の中心から 2cm 以内の部分(内)と2cm 以上の部分(外)に分けて,減圧加熱 乾燥を行い,加熱前後の含水率を測定し比較した.未加熱試料も同 様にわけて測定した.



Fig.3-44 ボロニアソーセージ切断図

【結果】

試料の中心から 2cm 以内の部分(内) と 2cm 以上の部分(外) とで加熱前後の含水率を測 定した結果を Table 3-4 および Fig.3-45 に示した.その結果,加熱前に内側,外側共に約 58% と同等であった含水率が,加熱後では内側および外側で 55.52%および 54.36% となり内側の 方が 1.16%多く水分を保持する結果となった.この原因としては,試料外側が発熱コイル上に あるため温度上昇が高くなり蒸発が大きくなったと考察した.このことから 3.3 のシミュレー ションから得た含水率分布の傾向は一致していると確認できた.



3.4.2 重量減少とドリップ割合の比較

3.3 のボロニアソーセージの加熱シミュレーションでは、熱移動に加え、物質移動を考慮し て計算を行った.そこで、確認実験として、ボロニアソーセージ昇温加熱および高温投入加熱 における重量減少の測定およびドリップ中の成分割合を測定し、計算値と比較することを目的 とした.なお、物質移動では、加熱に伴って流出したドリップに加え、蒸発した水分を考慮す る必要がある.そこで、焼成に伴った重量減少は水分蒸発とドリップによって起こると考え、 下の関係式 (Fig. 3·46)を基に試料内部およびドリップ中にどれくらい油が含まれるかを減圧 加熱乾燥法で確認し、加熱前後の重量を用いて、加熱に伴う重量ロスの水分と油の割合を予測 した.



Fig. 3-46 加熱における重量変化の関係式

【実験試料および装置】

試料は 3.2 と同様の豚もも 80%-豚脂 20%ボロニアソーセージ. 実験装置は 2.2.2 と同様.

【方法】

ボロニアソーセージをフライパンに乗せ常温から加熱した場合(昇温加熱)および加熱した フライパンに投入した場合(高温投入加熱)の重量ロスおよび含水率を測定した.加熱条件は, 火力1,フタありで行い,中心温度が50℃になった時に一度反転した.

含水率は、加熱開始から0分、反転時間、加熱終了時間(中心75℃以上1分間)の3点と その中間点の2点(全5点)で測定した.測定法は、減圧加熱乾燥法で行い、50℃、約100 時間真空減圧下(真空度13hPa)で乾燥させ、乾燥前後の重量を測定した.また、ドリップは 十分に乾燥したクッキングペーパーで拭き取り、同様に減圧下で加熱乾燥し、ドリップ内の水 分と油の割合を計算した.

【結果】

本実験の焼成は 3.3 で行ったボロニアソーセージ昇温加熱 50℃反転(Fig.3-47) および高温 投入加熱 50℃反転(Fig.3-48) と同条件で行った. そして,それぞれの図中の5点における加 熱に伴う重量変化率とシミュレーションによって得られた計算値との比較を Fig.3-49 および Fig.3-50 に示す. この結果,中心温度を 75℃で 1 分間以上保持させた加熱において昇温加熱 の方が高温投入加熱より重量変化が少ないことがわかった.また,計算値との比較において昇 温加熱の加熱開始 10 分間で水分蒸発が起こらず 2%前後の差が生じたが,高温投入加熱では 重量変化が良好に一致した.この原因として計算では,試料が 100℃以上となった位置で蒸発 が起こると設定しているのに対し,実測では 100℃に満たない時間帯でも多少の蒸発および油 の流出が生じているため差が生じたと考えた. 次に昇温加熱および高温投入加熱における試料の含水率変化を Fig.3-51 および Fig.3-52 に 示した. その結果,初め 56-57%であった含水率が加熱に伴い減少し,加熱最終時には 55.3% および 54.3%に減少した.

また,減圧加熱乾燥法により算出した重量ロス(蒸発物+ドリップ)中の成分の割合を Fig.3-53 および Fig.3-54 に示した.この結果,焼成に伴って生じた重量ロスは大半が水分で あり,水分と油の割合は約8:2 であることがわかった.また,焼成後フライパンに残った肉 汁にはほとんど水分が含まれていないことがわかった.

これらから加熱に伴う重量ロスの計算値と実測値で傾向が一致することがわかった.また, ボロニアソーセージのドリップ中の成分割合を予測することができた.



Fig. 3-47 昇温加熱 50℃反転の実測と計算の比較





Fig.3-49 昇温加熱 50℃反転の重量変化率の比較



Fig.3-50 高温投入加熱 50℃反転の重量変化率の比較



Fig.3.-51 昇温加熱 50℃反転の含水率変化

Fig.3-52 高温投入加熱 50℃反転の含水率変化



Fig.3-53 昇温加熱 50℃反転の重量ロス中成分割合 Fig.3-54 高温投入加熱 50℃反転の重量ロス中成分割合

3.5 本章のまとめ

本章では, IH クッキングヒーターを用いたフライパン調理における条件検討と解析を行った. 試料として,水分蒸発はあるが,収縮の少ないモデル試料であるボロニアソーセージを用いた.

豚脂の有無における温度上昇および重量変化の比較を行った.重量変化は脂添加試料の方が 減少が大きくなったが,加熱による温度履歴では,同様の温度上昇を示し,脂の有無による有 意な差はないと考えた.このことから,今後はよりハンバーグの成分に近い豚脂 20%添加の 試料を用いて,熱および物質移動解析を行っていくこととした.

ボロニアソーセージとシリコンの温度上昇の比較では、水分の有無による違いから、ボロニ アソーセージは100℃付近で試料表面からの蒸発により温度上昇が一時緩やかとなった.この ことから、シリコンの熱伝導解析に加え、水分蒸発を含む試料のシミュレーションを行う必要 があるとわかった.

ボロニアソーセージの熱および物質移動解析では、水分移動を考慮して昇温加熱および高温 投入加熱における反転操作を考慮した熱伝導解析を行った.双方の解析において、反転後の表 面下は実測値よりも計算値が多少高くなったが、中心および表面上においては良好に一致した. そのため、この計算結果を基に反転の違いによる殺菌価(75℃加熱相当時間)を計算し、反転 タイミングの違いによる加熱負荷を検討した.その結果、昇温加熱および高温投入加熱双方に おいて、中心温度 50℃での反転が殺菌価 5 分以上の加熱部分が最も少なかったことおよび中 心部の殺菌価も小さいことから、今回の加熱条件において中心温度 50℃での反転が最も望ま しいと考えた.

シミュレーションにより得られたボロニアソーセージの含水率および重量減少の確認として、実測値と比較した結果、計算値と実測値で傾向が一致することがわかった.
第四章 ハンバーグ焼成過程における熱および物質移動解析

4.1 緒言

ハンバーグ調理では加熱に伴って温度分布が生じる.そこで衛生(殺菌)面および品質向上 の面から試料全体の温度分布および殺菌価の検討が必要である.このことから,IH フライパ ンを用いたハンバーグ調理におけるシミュレーション作成を目的とした.前章までに,水分蒸 発,収縮などのないモデル試料であるシリコン,次に,水分蒸発はあるが,収縮の少ないモデ ル試料であるボロニアソーセージを用いて加熱実験を行い,熱伝導解析や反転に伴う試料内温 度分布および殺菌価分布,重量減少などをシミュレーションしてきた.

今回は、これまでの解析結果に加え、収縮の解析を行い、厚生労働省の推奨する加熱条件 (75℃1分間)で加熱を行った際の伝熱解析に加え、水分および油の流出をシミュレーション し、反転のタイミングによる加熱ムラおよび殺菌価の分布を確認した.

4.2 ハンバーグ焼成実験

ハンバーグの温度測定は試料が柔らかい事や変形する事などから再現性のある温度測定(特 に中心温度測定)を行うことが難しい.よって、今回はハンバーグ焼成における測定条件を確 立し、各反転タイミングにおける温度履歴の計測を行うことを目的とした.測定方法として以 下の二つを考え、比較した.また、ボロニアソーセージまでの焼成において昇温加熱を行って きたが、工場などのハンバーグ製造ライン焼成工程において、鉄板を冷ました状態から焼成を 行うことは時間およびコストが増大することから、今回は加熱法を高温投入加熱として行った. 【実験試料および装置】

ハンバーグ(約 90g, 直径 8.2cm, 厚さ 1.7cm に成型)

・生 HB の分析値(水分 61.5%, 脂質 17.8%, タンパク質 12.7%, 炭水化物 6.8%) 本研究で用いたハンバーグの配合量を次に示した.

	配合量(g)	配合割合(%)
牛肉①(ウデ)	528.0	37.8
豚肉(ウデ)	226.0	16.2
豚脂 P-B脂	178.0	12.8
塩	6.7	0.5
ソテー玉ねぎ(ソテー歩留 70%)	283.0	20.3
卵白液	53.0	3.8
牛乳	33.0	2.4
赤パン粉	83.0	5.9
香辛料①	1.8	0.1
香辛料②	0.6	0.0
香辛料③	2.7	0.2
計	1395.8	100

Table 1-4 ハンバーグの配合量

・実験装置は、2.2.2 と同様であるが、熱電対に被覆型 K 型熱電対 (ϕ 0.25mm) を用いた.

【方法】

加熱法...3.3 のボロニアソーセージ同様,高温投入加熱.条件も同様. 反転タイミング...中心温度が 20,30,40 および 50℃になった時に一度反転

測定方法①

ハンバーグ中心温度測定はシース型熱電対(φ 0.5mm)を,表面(上・下)にはシート型 熱電対を用いて測定した.ただし、中心温度測定には、筒状のセラミックス細管(内径 2mm, 長さ約 2.5cm)を事前に側面から中心部に挿し込み(Fig.4-1)、その筒の中にシース型熱電対 を挿入して行った.また、反転の際にはシース型熱電対を抜いて反転させ、その後同位置に 挿入し直して測定した.

·測定方法②

ハンバーグ中心および表面(上・下)測定に被覆型 K 型熱電対(φ0.25mm)を用いて測 定した.ただし、中心においては Fig.4-2 のようにハンバーグ中心に深さ約 8mm の切り込 みを入れ、Fig.4-3 のようにゴムで固定した熱電対を挿入した.



Fig.4-1 筒挿入図

Fig.4-2 熱電対設置図

Fig.4-3 熱電対固定図

【結果】

2つの測定法を検討したが、測定方法①では初めに挿し込んだ筒が中心温度を精確に測定し ているか疑問が残ったことや反転直後に熱電対を挿し直した際、測定位置が変わることがあっ た.一方、測定方法②ではゴムで固定したことで反転時に熱電対が取れることもなくより再現 性のあるデータ取得が可能であった.また、収縮に伴った試料内部の動き(流動)により対応 できると考えた.このことから測定方法②を採用しハンバーグの温度測定を行うこととした.

Fig.4-4-Fig.4-7 に各反転タイミングにおけるハンバーグ高温投入加熱の温度測定結果を示 した.温度履歴の傾向としては、ボロニアソーセージと比べ、温度上昇が緩やかになることが わかった.これは、開始温度が低いこともあるが、加熱に伴い試料の高さが増大することによ る差であると考えた.また、加熱に要した時間(加熱終了時間)と終了重量を Table 4-2 に示 す.これより反転のタイミングの違いによって加熱に要する時間および終了重量が異なること がわかった.高温投入加熱において 40℃反転の 15.4 分が最も早くなった.また、終了重量は 30℃反転が最も大きくなった.ただし、ハンバーグ中心位置は加熱に伴って移動することが分 かっており、中心が試料内の最低温度点であるのかは不明であるため、シミュレーションによ る内部温度分布を用いた検討が必要であると考えた.加熱終了時間および終了重量の結果から 今後の収縮確認実験やドリップ確認実験などで、高温投入加熱 30℃反転を指標として実験を 行うこととした.

Table 4-2 升温	Table 4-2 昇温加熱および高温投入加熱における加熱終」時间			
加熱条件	高温投入加熱			
	20℃反転	30℃反転	40℃反転	50℃反転
加熱終了時間(min)	16.6	16.0	15.4	17.2
終了重量(g)	74.9	77.0	73.9	75.0

Table 4-2 昇温加熱および高温投入加熱における加熱終了時間



4.3 熱および物質移動解析

ハンバーグ調理では加熱に伴って温度分布が生じる.そこで衛生(殺菌)面および品質向上 の面から試料全体の温度分布および殺菌価の検討が必要である.このことから,IH フライパ ンを用いたハンバーグ調理におけるシミュレーション作成を目的とした.今回は,新たに収縮 の計算を加え,体積変化や収縮確認実験など実測値から得られたデータを基に熱および物質移 動解析を考慮したモデル作成を目指した.また,前章と同様,反転操作に伴う試料内温度分布 および殺菌価分布をシミュレーションすることを目的とした.

4.3.1 熱移動モデル

シリコンおよびボロニアソーセージと同様であるが、加熱モデルを図1に示す.



Fig.4-8 ハンバーグ加熱モデル

4.3.2 熱と水分移動解析

水(ドリップ)の移動は、水分濃度勾配をドライヴィングフォースとする拡散と、圧力勾配 を駆動力とする流動により起こるとする. 拡散はフィックの拡散法則、流動はダルシーの法則 に従うとすると、水の流束 jm(g-water/cm²s)は次式で表される.

$$j_m = -D_w \operatorname{grad}(C_w) - \frac{\lambda_w}{\mu_w} \operatorname{grad}(P)$$
(1)

ここで、 D_w は拡散係数 (cm²/s)、 C_w は水分濃度 (g-water/cm³)、 λ_w は透過係数 (g-water/cm)、 μ_w は粘度 (Pa·s) である.この式を基に、食品内で水の物質収支をとると、基礎式として次 式を得る.

$$\mathcal{K}: \qquad \frac{\partial C_{w}}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{w} r \frac{\partial C_{w}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{w} r \frac{\partial C_{w}}{\partial z} \right) \right\} \\ + \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda_{w}}{\mu_{w}} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\lambda_{w}}{\mu_{w}} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right\} - V_{e}$$

$$(2)$$

Ve は内部蒸発速度(g-water/s·cm³)

 $C_{\rm W}$ を含水率 $W_{\rm W}$ (g-water/g-solid), zは高さ (cm) を表わす.

$$\frac{\partial C_{w}}{\partial x} = \frac{\partial \rho_{s} W_{w}}{\partial x} = \rho_{s} \frac{\partial W_{w}}{\partial x} + W_{w} \frac{\partial \rho_{s}}{\partial x} = \rho_{s} \frac{\partial W_{w}}{\partial x} + W_{w} \frac{\partial W_{w}}{\partial x} \frac{\partial \rho_{s}}{\partial W_{w}}$$

$$= \left(\rho_{s} + W_{w} \frac{\partial \rho_{s}}{\partial W_{w}}\right) \frac{\partial W_{w}}{\partial x} = \overline{\rho}_{sw} \frac{\partial W_{w}}{\partial x}$$
(3)

ここで、ρ_sは固体密度(g-solid/cm³)である.
 (3)式を(2)式に代入することにより、含水率基準の基礎式が得られる.

$$\dot{\mathcal{K}}: \qquad \overline{\rho}_{s} \frac{\partial W_{w}}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{w} r \overline{\rho}_{s} \frac{\partial W_{w}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{w} r \overline{\rho}_{s} \frac{\partial W_{w}}{\partial z} \right) \right\} \\
+ \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda_{w}}{\mu_{w}} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\lambda_{w}}{\mu_{w}} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right\} - V_{e}$$
(4)

食品内部の油の移動は,圧力勾配を駆動力とする流動によって起こる(油の濃度勾配による 拡散は考慮しない)とすると

油:
$$\overline{\rho}_{S_o} \frac{\partial W_o}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda_o}{\mu_o} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\lambda_o}{\mu_o} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right\}$$
 (5)

ここで Woは含油率 (g-oil/g-solid),
$$\overline{\rho}_{s_o} = \left(\rho_s + W_o \frac{\partial \rho_s}{\partial W_o}\right)$$
である.

・初期条件

ハンバーグ内
$$W_{\rm w} = W_{\rm wi}, W_0 = W_{\rm oi}$$
 (6)

フライパンおよび接触層内
$$W_{w}=0, W_{o}=0$$
 (7)

·境界条件

$$\pi : \qquad -D_{w}\rho_{s} \operatorname{grad}(W_{w}) \cdot n - \frac{\lambda_{w}}{\mu_{w}} \operatorname{grad}(P) \cdot n = R_{s} - R_{Dw} \qquad (8)$$

油:
$$-\frac{\lambda_o}{\mu_o} \operatorname{grad}(P) \cdot n = -R_{Do}$$
 (9)

ここで Rsは食品表面における水の蒸発速度, RDw, RDoはそれぞれ水および油が食品から系外 へ流出する速度である.

同様に、フーリエの熱伝導法則を基に、熱収支をとると、(10)式を得る.

$$\rho_{b}C_{p}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(kr\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right\} + Q - Q_{v}$$
(10)

ここで、Qは内部発熱量(J/scm³)で、フライパンの発熱層以外は0である.また、Qvは水 分蒸発による吸熱(J/scm³)で、接触層で水分が蒸発すると考える.

$$Q_v = H_L V_e$$

ここで、 H_L は蒸発潜熱 (J/g)

・初期条件

$$T = T_0 \tag{11}$$

・境界条件

$$-k \operatorname{grad}(T) \cdot n = \Delta H_{v} R_{s} + h_{t} (T - T_{air})$$
(12)

なお、数値計算法として、有限要素法の一種であるガラーキン法を用いて計算を行った.

4.3.3 膨潤・収縮の解析

・基礎式

(1) 応力-ひずみ関係式

食品を粘弾性体と仮定し、局所的なひずみ増分は、弾性および粘性によるひずみ増分と吸水 によるひずみ増分の和で表されるとする.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon_s\} + \{d\varepsilon_c\} + \{d\varepsilon_0\}$$
(13)

(14)

弾性のひずみを考えると、次のように軸対称構成方程式(応力-ひずみ関係式)は次式で与 えられる.

$$\begin{bmatrix} d\sigma \end{bmatrix} = \begin{cases} d\sigma_{r} \\ d\sigma_{z} \\ d\sigma_{\theta} \\ d\tau_{rz} \end{cases} = \frac{E_{y}(1-v)}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{v}{1-v} & \frac{v}{1-v} & 0 \\ \frac{v}{1-v} & 1 & \frac{v}{1-v} & 0 \\ \frac{v}{1-v} & \frac{v}{1-v} & 1 & 0 \\ \frac{v}{1-v} & \frac{v}{1-v} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2(1-v)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_{s} \\ d\varepsilon_{s} \\ d\gamma_{srz} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} D \end{bmatrix} \{ d\varepsilon_{s} \}$$

粘性ひずみ増分{d□∂は

$$\{d\varepsilon_{c}\} = \begin{cases} d\varepsilon_{rc} \\ d\varepsilon_{zc} \\ d\varepsilon_{\theta c} \\ d\varepsilon_{\theta c} \\ d\gamma_{rc} \end{cases} = \frac{3}{2\overline{\sigma}} \begin{cases} \sigma'_{r} \\ \sigma'_{z} \\ \sigma'_{\theta} \\ 2\tau_{rc} \end{cases} d\overline{\varepsilon}_{c} = \frac{3}{2\overline{\sigma}} \begin{cases} \sigma'_{r} \\ \sigma'_{z} \\ \sigma'_{\theta} \\ 2\tau_{rc} \end{cases} d\overline{\varepsilon}_{c} \Delta t$$

$$(15)$$

と表される. ここで $d\overline{\epsilon}_c$, $d\overline{\epsilon}'_c$ はそれぞれ相当クリープひずみ増分及び相当クリープひずみ速度を表す. Δ t は時間増分である. $\sigma'_r, \sigma'_z, \sigma'_{\theta}$ は次式で表される偏差応力である

$$\sigma'_{r} = (2\sigma_{r} - \sigma_{z} - \sigma_{\theta})/3$$

$$\sigma'_{z} = (2\sigma_{r} - \sigma_{\theta} - \sigma_{r})/3$$

$$\sigma'_{\theta} = (2\sigma_{\theta} - \sigma_{r} - \sigma_{z})/3$$
さらに、 $\overline{\sigma}$ は次式で表される相当応力である.
$$(16)$$

$$\overline{\sigma} = \left[0.5\left\{\left(\sigma_r - \sigma_z\right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_\theta\right)^2 + \left(\sigma_\theta - \sigma_r\right)^2 + 6\tau_{rz}^2\right\}\right]^{1/2}$$
(17)

また,吸水に基づくひずみ増分は膨潤による体積増加に関係付けられる.

$$\{d\varepsilon_0\} = \begin{cases} d\varepsilon_{r0} \\ d\varepsilon_{z0} \\ d\varepsilon_{\theta0} \\ 0 \end{cases} = \begin{cases} dS_r \\ dS_z \\ dS_{\theta} \\ 0 \end{cases}$$
(18)

ここで S_r , S_z , S_θ は各方向の収縮率で、収縮が等方性の場合は体積収縮率 S_v を用いて、 $S_r = S_z = S_\theta = S_v^{1/3}$ (19)

で表される.

(2) ひずみ-変位関係式

いま取り扱っているのは軸対象問題であるから、0方向の変位はゼロとして、ひずみ-変位 関係式は次式で表される.

$$\{d\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0\\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1}{r} & 0\\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} du\\ dv \end{bmatrix} = [A]\{dU\}$$
(20)

ここで [A] はひずみ-節点変位マトリックス, {dU} は変位ベクトルである.

(3) 仮想仕事の原理

応力に関する平衡方程式および力学的境界条件の代わりに仮想仕事の原理を用いること ができる.外部から力および圧力がかからないとして,仮想仕事最小の原理を適用すると次式 が得られる.

$$\int_{V} \delta \left\{ d\varepsilon \right\}^{T} \left\{ d\sigma \right\} dV = 0 \tag{21}$$

(22)

有限要素内部の変位増分ベクトル{dU}は節点変位増分ベクトル{da}を用いて

$$\{dU\} = [N] \{da\}$$

と仮定する.ここで[N]は形状関数マトリックスである. (22)式を(20)式に代入すれば要素 内のひずみ増分ベクトル {*dɛ*s} は次式で表される.

$$\{d\varepsilon\} = [A]\{dU\} = [A][N]\{da\} = [B]\{da\}$$
 (23)
ここで[B]はひずみ-変位マトリックスである.

また, (14)式と(20)式から応力-ひずみ関係式は

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon - d\varepsilon_c - d\varepsilon_0\}$$
(24)

(21)式に(22)~(23)を代入することにより次式を得る.

$\int_{U} \left[B \right]^{T} \left[D \right] \left[B \right] dV \left\{ da \right\} = \int_{U} \left[B \right]^{T} \left[D \right] \left\{ d\varepsilon_{c} \right\} dV + \int_{U} \left[B \right]^{T} \left[D \right] \left\{ d\varepsilon_{0} \right\} dV$ (25)

(25)式を積分することにより得た代数方程式を解いて、節点の変位が求まる. さらに、(20)、(22)、(24)式から応力場が求まる.

4.3.4 ハンバーグ反転の取り決め

ハンバーグの反転は、シリコンおよびボロニアソーセージとは異なり、収縮の影響で反転前後の形状が変わる.そのことから、シミュレーションにおける反転後の取り決めを行った.今回は、反転前後で表面上面(反転後は表面下面)の長さに変化が起こるかを計測した後、そのデータを基にシミュレーション上の反転法を検討した.

【実験試料および装置】

実験試料および装置は、4.2と同様.加えて、紐を用いた.

【方法】

ハンバーグを高温投入加熱 30℃反転と同様に加熱した.その際,①加熱前,および②5 分 30 秒(中心 30℃)の表面上面の直径を紐を用いて測定した.その後,②を反転させた状態で 一度-58℃で凍結させた後,ひっくり返して底面の直径を紐を用いて測定した.

【結果】

Fig.4-9 に加熱前のハンバーグの上および横からの写真を示す.次に Fig. 4-10 に 5 分 30 秒 加熱した後の同様の写真を示す.また, Fig.4-11 の左に Fig.4-10 を反転させた直後, Fig.4-11 の右にそれを凍結させたもの示した.最後に凍結した試料をひっくり返したものを Fig. 4-12 に示す.この結果, Fig.4-13 のように加熱前,加熱後および反転後それぞれの表面上面の直径 が得られた.このことから反転前後で表面上面の直径に有意な差がないことがわかった.

これらの結果から、シミュレーション上の反転において、Fig.4-14 のように加熱されたハン バーグの y 軸の最大点を基準として、上面を Fig.4-15 のように一定に合わせた後、Fig.4-16 のように上面を軸として反転させ、下にずらすように行うこととした.



Fig.4-9 加熱前のハンバーグ(左:上,右:横)



Fig.4-10 5分30秒加熱した反転前のハンバーグ(左:上,右:横)



Fig.4-11 5分30秒加熱した反転後のハンバーグ(左:凍結前・横,右:凍結後・横)



Fig.4-12 Fig.4-11 の右をひっくり返したハンバーグ(左:上,右:横)



Fig.4-13 生,反転前および反転後の表面上面の紐長さ比較



Fig.4-14 解析上の反転過程① (単位は cm)



Fig.4-15 解析上の反転過程② (単位は cm)



4.3.5 ハンバーグ加熱温度に伴う重量および体積変化

ハンバーグは加熱に伴い、ドリップの流出による重量および体積変化が起こる.しかし、どの温度でどれくらいの重量変化および体積変化が起こるのかはわからない.そこで、加熱に伴うハンバーグの重量および体積変化の測定法を検討し、焼成温度に伴うそれらの変化を測定した.

【実験試料および装置】

実験試料および装置は、4.2 と同様.加えて、シリコンおよび比重瓶(内径 2.0cm)を用いた.

【方法】

厚み 0.5 cm のシリコンに 1.0×1.0×0.5 cm³の穴をあけ, ハンバーグを詰めてプラスティッ クフィルムで減圧包装した.次に, 20℃~90℃の恒温槽にて所定時間等温加熱処理し, 冷水 で冷却した.その後,加熱前後の重量変化を測定した後,比重瓶を用いて比重および体積を 算出した.算出方法および計算式は以下の通り.

「比重瓶(内径 2.0cm)に蒸留水を満たした際の重量(X)」,「秤量瓶に試料と蒸留水で満 たした際の重量(Y)」,「試料のみの重量(Z)」を測定することで, Eq.(1)より試料の比 重を算出した.また, Eq.(2)より試料の体積を算出し, Eq.(3)より加熱による体積変化 率を得た.そして,加熱前後の試料重量を測定することで, Eq.(4)より重量変化率を算出 した.

specific gravity
$$(g \cdot cm^{-3}) = \frac{Z \cdot \rho_{water}}{X - Y + Z}$$
 Eq. (1)

 $Volume (cm³) = Z \times \frac{X - Y + Z}{Z \cdot \rho_{water}}$ Eq. (2) X (g):秤量瓶+水 Y (g):秤量瓶+水+試料 Z (g):試料のみの重量 ※水の密度:1.00 (g・cm⁻³) Volume change ratio (-) = $\frac{V_{after}}{V_{before}}$ Eq. (3) Vbefore (cm³):加熱前の試料体積, Vafter (cm³):加熱後の試料体積 Weight -loss ratio (-) = $\frac{W_{after}}{W_{before}}$ Eq. (4)

Wbefore (g):加熱前の試料重量,

Wafter (g):加熱後の試料重量

【結果】

Eq. (3) および Eq. (4) より得られた 80℃加熱におけるハンバーグの体積および重量変化 率の経時変化を Fig.4-17 に示した. 加熱における特徴として,重量変化に比べ体積変化が大 きくなり,20 分加熱においてそれぞれ 0.78 および 0.74 となった. 体積減少率と重量減少率が 一致しているということは,流出した液体の密度と試料密度がほぼ一致していることに相当す

る.一方,両者が異なれば,流出した流体の密度と試料密度が異なり,特に,流出流体の密度 が小さければ、重量減少に比べて、体積減少が大きくなる.80℃加熱において見られる両者の 差は, 流出液体 (ドリップ) が主に密度の軽い油分であることに起因すると考えられる. また, Fig.4-17 より体積および重量変化率は約 10 分で平衡化していることから,次に様々な温度帯 で10分間加熱した際の体積および重量変化率を測定した.

各温度 10 分間加熱におけるハンバーグの体積および重量変化率を Table 4-3 および Fig. 4-18 に示した. 全体で,重量変化に比べ体積変化が大きくなった.これは,先ほどの80℃加熱同 様,流出した流体(ドリップ)の密度が試料密度と比べ小さいことから,重量減少に比べて体 積減少が大きくなったと考えた.また,50~80℃の温度帯で変化が大きくなったが,この一因 としてアクチンの変性が考えられた. アクチンの変性に伴って畜肉の肉質硬化およびドリップ の増大が起こることが知られており¹⁵⁾¹⁶⁾,石渡ら¹⁶⁾が行った牛肉のDSC 測定で得られたア クチンの変性開始温度(58.1℃)および終了温度(82.8℃)の結果からも妥当な結果であると 考えた. また, 30℃ですでに小さな減少が起きていた. これは, ハンバーグに添加されている 豚脂の融点が 27~40℃であることから, 豚脂の融解による重量および体積減少が考えられた. さらに、20℃では約2%の減少がみられた.しかし、重量および体積の差がほとんどなかった ことから包装した際のプラスティックフィルムおよび肉を抜き出した際のシリコンへの付着 が原因である可能性が考えられた.また、今回得られた体積変化率を近似した3次式 (v=1.5415×10⁻⁶x³-2.5571×10⁻⁴x²+8.8667×10⁻³x+8.8736×10⁻¹)を用い、ハンバーグ焼成シミ ュレーションを行っていく.



Fig.4-17 80℃加熱におけるハンバー 81 - グの体積および重量変化率

Table 4-3 各温度における質量および体積変化	率
----------------------------	---

温度(℃)	重量(-)	体積(-)
20	$0.977 {\pm} 0.001$	0.980 ± 0.010
30	0.976 ± 0.003	0.954 ± 0.012
40	0.946 ± 0.010	0.926 ± 0.012
50	0.922 ± 0.017	0.903 ± 0.020
60	0.858 ± 0.008	0.827 ± 0.009
70	0.816 ± 0.016	0.780 ± 0.018
80	0.770 ± 0.017	0.747 ± 0.030
90	0.757 ± 0.007	0.740 ± 0.015



Fig.4-18 20℃~90℃加熱(10分間)におけるハンバーグの体積および重量変化率

4.3.6 ハンバーグの加熱に伴う収縮確認実験

ハンバーグは加熱により収縮し,直径が縮小すると共に厚みが増すことが経験的にわかって いる.しかし,内部でどのように流動しているかはわからない.そこで,本実験では,加熱に 伴いハンバーグ内部でどのような収縮(流動)が起こっているのか調べることを目的とした.

【実験試料および装置】

実験試料および装置は、4.2 と同様.加えて、3mmの立方体であるゴムを用いた.

【方法】

Fig.4-19 のように試料中心を通る深さ約 8mm の切り 込みを入れ,一辺約 3mm の立方体であるゴム(トレー サー)を 5 つ埋め込んだ.その後,高温投入加熱 30℃ 反転と同様の方法で加熱し,中心温度が 30℃となった 5.5分および加熱終了時間である 17.2分で加熱を終了し, 即座に-58℃で凍結した.また,加熱開始から反転およ び反転から終了までの間で数点および未加熱の試料に も同様に埋め込み,それぞれ加熱し,凍結した.凍結後 取り出し,包丁で切った後にどのように移動したかを検 証した.



Fig.4-19 HB 内マーカー図

【結果】

Fig.4-20 および Fig.4-21 にハンバーグ凍結後断面図およびトレーサー位置を示した.なお, Fig.4-20 は反転前, Fig.4-21 は一度反転した状態である.「0分」より初めの状態でトレーサ ーはほぼ中心に埋め込まれていることが確認された.次に,反転するまででは,中心付近3点 のトレーサーで0.2~0.3 cmの大きな上昇が見られたのに対し,外側の2点では約0.1 cm以下の 小さな上昇となった.また,反転してから加熱終了まででは,上下面で0.1-0.2 cm 上昇するこ とがわかった.さらに,10分20秒から17分10秒の間では,重量は減少するもののトレーサ ーの移動は小さかった.

これらの結果から今回の加熱に伴うハンバーグ収縮の動きとして以下のことが示唆された. ・反転までは,加熱による直径の減少に伴い,全体で厚みが増大するが,中心付近で特に大き な増大が起こり,流動の方向は熱源とは逆方向であった.

・また、反転後は未加熱部分で 0.1-0.2cm 上昇するが、反転前の上昇が大きく、反転後も中心 上部が増大するため、初めの中心点は厚み方向の半分よりやや下となる.

また, Fig.4-22 に焼成に伴う重量,直径および厚みの変化を示した.この結果から,重量および直径方向の減少に伴い厚み方向への増大がみられることがわかる.これらの結果を次節のシ ミュレーションに活かしていく.



重量,直径,厚みの変化





Fig.4-20 ハンバーグ加熱に伴う収縮確認(反転前)



Fig.4-21 ハンバーグ加熱に伴う収縮確認(反転後)

4.3.7. ハンバーグ(高温投入加熱)熱移動および物質移動解析

4.3 で解析および測定してきた結果を用いて,ハンバーグ(高温投入加熱)熱移動および物 質移動解析を行うことを目的とした.また,熱伝導解析の結果を 4.2 で行ったハンバーグ焼成 実験の結果と比較した.

【方法・解析条件】

ハンバーグ高温投入加熱における実測値と計算値の比較を行った.計算条件における物性値 は, Susana ら ¹⁷⁾の文献よりミートパテ(密度 1.06 g/cm³,比熱 3.27 J/g・℃,熱伝導率 0.004W/cm・℃)を用いて計算した. 熱伝達係数(W/cm²・℃)の条件は、ボロニアソーセー ジ高温投入加熱と同様の条件である 0.003 (試料上部), 0.007 (フライパン上部)とした. 収縮は温度に依存すると考え,4.3.5 より得た焼成温度に伴う体積変化を近似式する実験式を採 用した(y=1.5415 ×10⁻⁶ x³ - 2.5571 ×10⁻⁴ x² + 8.8667 ×10⁻³ x + 8.8736 ×10⁻¹). ただし, 20°C未満は 体積変化が起こらず、90℃以上は体積変化率 0.74 で一定とした.次に、実際の調理において ハンバーグは半径方向に収縮し,厚さ方向に膨らむため,シミュレーションでは,温度に伴っ て半径方向に収縮し,厚さ方向は半径方向の収縮率に対し,3分の1膨らむよう解析条件に含 んだ. また, 試料内の水および油の透過係数 (m/s) は, 文献ではなかなか得られず, 実験よ り算出するのも困難である.しかし,重量変化(物質移動)を算出するのに必要であることか ら、重量変化の実験値に近づくような値を見つけ、この数値を解析値として採用した(水: **λwater=9.0×10⁻⁵,油:λoil=1.24×10⁻⁴).** さらに,水,油分の粘度の温度依存性は文献値を採 用した(水: μ water=A×exp((1.0+B×T)/(C×T+D×T²)) A=0.01257187, B=-0.005806436, C=0.001130911, D=-0.5723952×10⁻⁵, 油: µoil=108729×T^{-2.072}). 雰囲気温度 Tspc (℃) は, 実験で得た温度履歴を4次式に近似して用いた数式を採用した(三章と同様に反転前後で二式).

【結果】

各反転タイミングにおけるハンバーグ高温投入加熱実験の実測と計算の比較を Fig.4・23~ 4・26 に示した.反転後の表面下は実測値よりも計算値が多少高くなった.この現象はボロニア ソーセージでも同様であった.反転後,表面下の計算値が高くなった原因としては,実際に試 料を反転する際に10秒から20秒の時間がかかり,その間に温度が低下したことが考えられた. しかし,中心および表面上においては,どのシミュレーションにおいても傾向が一致している ため,この計算結果を基に反転の違いによる最終温度分布,殺菌価(75℃加熱相当時間),水 分分布および油分分布を計算した.

Table 4-4 にそれぞれの反転シミュレーションにおける 75℃1 分間保持に要する時間と最終 的な中心温度を示す. なお,このときの中心温度とは加熱前での中心点温度であり,収縮に伴 って移動している. この結果から,30℃反転が最も短時間で加熱することができ,50℃反転 で最も遅くなった.

また,このときのハンバーグ内部の最終温度分布を Fig.4-27~4-28 に示した.この結果から,加熱終了時,最低温度点は底部から 1.5~2.0cm と中心よりやや上部に存在することが示唆された.また,30℃反転加熱終了時の形状変化をみると,中心部の厚みおよび直径は,2.61cm お

よび 7.27cm となった. 4.3.6 の加熱終了時の断面図では,それぞれ 2.5cm および 6.80cm と なっていることから,厚みの変化はよく再現できたが,直径方向が少し大きくなっている. こ れは,解析モデルでは,厚み 1.7 cm, 直径 8.2cm の円筒形として行なったが,実測ではどう しても精確な円筒形にはならず,4.3.6 の未加熱時の断面図をみてわかるように,側面が初め から丸みを帯び,楕円形のようになっている. このような違いから直径方向への差が生じたと 考察したが,全体的に再現できていると考えた.

次に、ハンバーグ内部の殺菌価(75℃加熱相当時間)の分布を Fig.4-31~4-34 に示した. なお、図において殺菌価 5 分以下のみを示した. 殺菌価の結果では、20℃反転で、高さ 2cm の中心付近で殺菌価 1 分以下の部分あり、適切な加熱とは言えなかった. また、 30℃、40℃ および 50℃反転では、全体で十分な殺菌価を得られた. しかし、 40℃反転および 50℃反転に 比べて、30℃反転の方が 75℃5 分以上の過度な加熱部分が少なかったことに加え、焼成時間が 最も短くなったことから省エネルギーでの焼成が可能であるため、今回の加熱条件においては 中心温度 30℃での反転が最も望ましいと考えた.

最後にハンバーグ内部の水分分布および油分分布を Fig.4-35~4-38 および Fig.4-39~4-42 に示した.全ての水分および油分分布で中心付近に多く保持ししていることがわかる.また,表面付近で一部多く保持している部分もあるが,これは加熱に伴う圧力および濃度勾配によって中心から移動してきた水分および油分であると考えた.しかし,全体的に大きな差は見られなかった.次節に高温投入 30℃反転における水分および脂分変化率の計算値と実測値の比較検証行う.

反転タイミング	加熱時間(s)	最終温度(℃)
$20^{\circ}\mathrm{C}$	1130	76.6
30° C	1030	76.9
40°C	1050	77.2
$50^{\circ}\!\mathrm{C}$	1180	77.3

Table 4-4 反転シミュレーションにおける中心温度 75℃1 分間保持に要する時間と最終温度













4.4 物質移動およびドリップ割合確認実験

加熱に伴う重量変化(水分および油分)の現象確認実験を行なうと共に,4.3 で行なったシ ミュレーションの結果と実測値の比較を行なった.

4.4.1 ハンバーグ焼成 水分移動およびドリップ測定実験

ハンバーグを焼成した際,水分蒸発とドリップによって重量の減少が起こる.この重量ロス の中にどれくらい油が含まれるかを減圧加熱乾燥法で確認し,加熱前後の重量を用いて,加熱 に伴う重量ロス中の水分と油の割合を予測した.また,その結果を用い,高温投入 30℃反転 における水分および油分変化率の計算値との比較,検証を行った.

【実験試料および装置】

実験試料および装置は、4.2と同様.

【方法】

ハンバーグを加熱したフライパンに投入した場合(高温投入加熱)の重量ロスおよび含水率 を測定した.加熱条件は、火力1、フタありで行い、中心温度が 30℃になった時に一度反転 した.

含水率は、加熱開始から0分、反転時間、加熱終了時間(中心75℃以上1分間)の3点と その間の点、3点(全6点)で測定した.測定法は、減圧加熱乾燥法で行い、50℃、約100時 間真空減圧下(真空度13hPa)で乾燥させ、乾燥前後の重量を測定した.また、ドリップは十 分に乾燥したクッキングペーパーで拭き取り、同様に減圧下で加熱乾燥し、ドリップ内の水分 と油の割合を測定した.

【結果】

高温投入 30℃反転加熱に伴う重量変化および重量変化率を Table 4-5 に示す. 今回の加熱に おいて終了時の重量変化率は 84.75%となった. また, 重量ロス率は反転する 5 分 30 秒まで に 3.19%減少したのに対し,反転後から加熱終了までに 12.06%減少となり反転後に大きく重 量変化が起こることがわかった. 次に, Table 4-5 の重量変化率と計算値との比較を Fig.4-43 に示した. この結果,実測値と計算値は良好に一致していることがわかった.

次に、重量ロス中の成分を Fig.4-44 に示した.これより、重量ロス量は加熱に従って大きく なることがわかった.また、焼成後フライパンに残った肉汁にはほとんど水分が含まれていな いことがわかった.さらに、Fig.4-44 の結果より重量ロス中の水分と油分の割合をみると、加 熱時間 2 分 45 秒では水分と油分の割合が 0.43:0.57 であったのに対し、17 分 10 秒では 0.64: 0.36 と水分と油分の割合が逆転していることがわかる.これは、Fig.4-44 で、水分は加熱終了 までほぼ一定の割合で流出しているのに対し、油分は 7 分 55 秒以降、流出が緩やかとなって いることが理由であると考えた.この原因としては、ハンバーグに添加されている豚脂の融点 が 27~40℃であることから、油は加熱初期の段階から流出し始め、7 分 55 秒以降、流出され る油量が少なくなるが、水分は、加熱終了まで一定の速さで流出および蒸発が起こったため、

割合が逆転したと考察した.

最後に、4.3.7 で解析した水分および油分変化率の計算値と実測値の比較を Fig.4-45 および Fig.4-46 に示す.この結果、水分および脂分変化率は共に良好に一致していることがわかった.しかし、油分変化率において 10 分以降で減少が小さくなった.原因は、解明できていないため、今後の課題とする.

Table 4-5 加熱に伴う重量変化および重量変化率

	初期重量	終了重量	重量変化率
	(g)	(g)	(%)
生	90.00	90.00	100
2'45	90.13	88.60	98.30
5'30	89.56	86.70	96.81
7'55	91.16	83.77	91.89
10'20	90.89	80.90	89.01
13'45	90.79	79.07	87.09
17'10	90.86	77.00	84.75

重量変化率の比較 100 計算値 95 量変化率(%) 実測値 90 畺 85 80 0 5 10 15 20 時間(分)

Fig.4-43 高温投入加熱 30℃反転における重量変化率変化







4.5 本章のまとめ

本章では, IH クッキングヒーターを用いたフライパン調理における条件検討と解析を行った. 試料として,水分蒸発および収縮の起こるモデル試料であるハンバーグを用いた.

ハンバーグ焼成における温度履歴の取得は、困難であったがゴムで固定した被服型熱電対 (φ0.25mm) 埋め込み測定することで、再現性のあるデータを取得することが出来た.また、 各反転タイミングにおける温度履歴の計測を行い、反転のタイミングの違いによって加熱に要 する時間および終了重量が異なることがわかった.高温投入加熱において 40℃反転が最も早 く、終了重量は 30℃反転が最も大きくなった.

ハンバーグの熱および物質移動解析では,膨潤・収縮の解析条件に加え,ハンバーグの反転 の取り決めにおいて,反転直前の上面を平らにし,上面を軸として反転するように取り決めを 行った.

ハンバーグ焼成温度に伴う重量および体積変化では、シリコンに 1.0×1.0×0.5 cm3 の穴をあ け、ハンバーグを詰めてプラスティックフィルムで減圧包装した後、所定時間等温加熱処理し、 重量変化および比重瓶を用いて比重および体積変化を算出した.その結果、重量変化に比べ体 積変化が大きくなる傾向となった.また、50~80℃の温度帯で変化が大きくなった.今回得ら れた 20℃~90℃における体積変化率を近似した 3 次式を、ハンバーグ焼成シミュレーション の温度に伴う収縮率に採用した.

ハンバーグ加熱に伴う収縮確認実験では,一辺約 3mm の立方体であるゴム(トレーサー) を5つ埋め込んで焼成し,凍結後切断して加熱に伴う収縮(内部流動)確認を行った.その結 果,反転までは,加熱による直径の減少に伴い,全体で厚みが増大するが,中心付近で熱源と は逆方向の大きな増大が起こった.また,反転後は,未加熱部分で0.1-0.2cm 上昇するが,反 転前の上昇が大きく,反転後も中心上部が増大するため,初めの中心点は厚み方向の半分より やや下となることが示唆された.

ハンバーグ高温投入加熱の熱および物質移動解析では、前章までの解析結果に加え、収縮を 考慮した解析を行った.反転後の表面下は実測値よりも計算値が多少高くなったが、中心およ び表面上においては一致した.そのため、この計算結果を基に反転の違いによる最終温度分布、 殺菌価(75℃加熱相当時間)、水分分布および油分分布を計算し、反転タイミングの違いによ る加熱負荷おび物質移動を検討した.この結果から、30℃反転が最も短時間で加熱することが でき、50℃反転で最も遅くなった.また、加熱終了時、最低温度点は底部から1.5~2.0cmと中 心よりやや上部に存在することが示唆された.また、30℃反転加熱終了時の形状変化をみると、 中心部の厚みおよび直径は、2.61cmおよび7.27cmとなった.これより、厚みの変化はよく再 現できたが、直径方向が少し大きくなっている.これは、解析モデルでは、厚み1.7 cm、直 径 8.2cmの円筒形として行なったが、実測ではどうしても精確な円筒形にはならず、側面が初 めから丸みを帯び、楕円形のようになっていることから、このような違いによって直径方向へ の差が生じたと考察したが、全体的に再現できていると考えた.

殺菌価の結果では、20℃反転で、高さ 2cm の中心付近で殺菌価 1 分以下の部分あり、適切 な加熱とは言えなかった.また、 30℃、40℃および 50℃反転では、全体で十分な殺菌価を得 られた.しかし、 40℃反転および 50℃反転に比べて、30℃反転の方が 75℃5 分以上の過度な 加熱部分が少なかったことに加え、焼成時間が最も短くなったことから省エネルギーでの焼成 が可能であるため、今回の加熱条件においては中心温度 30℃での反転が最も望ましいと考え た.最後にハンバーグ内部の水分分布および油分分布の結果では、全ての水分および油分分布 で中心付近に多く保持ししていることがわかる.しかし、全体的に大きな差は見られない結果 となった.

ハンバーグ焼成に伴う水分移動およびドリップ測定実験では、高温投入 30℃反転において 終了時の重量変化率は 84.75%となった.また、重量ロス率は反転する 5 分 30 秒までに 3.19% 減少したのに対し、反転後加熱終了までに 12.06%減少となり反転後に大きく重量変化が起こ ることがわかった.重量変化率と計算値との比較を行なった結果、実測値と計算値は良好に一 致していることがわかった.重量ロス中の割合をみると、加熱時間 2 分 45 秒では水分:油分 が 0.43:0.57 であったのに対し、17 分 10 秒では 0.64:0.36 と逆転することがわかる.これ は、水分は加熱終了まで線形的に上昇しているのに対し、油分は 7 分 55 秒以降、上昇が緩や かとなっていることが要因であると考えた.また、焼成後フライパンに残った肉汁にはほとん ど水分が含まれていないことがわかった.

シミュレーションにより得られたハンバーグの水分および油分変化率の確認として、実測値 と比較した結果、計算値と実測値で傾向が一致することが確認された.しかし、計算において 反転タイミングによる物質移動の有意な差はみられなかった.

第五章 総括

畜肉を対象とした加熱調理,加工は具体的な多様な加熱様式が存在する.しかし,その 反面,加熱不十分な畜肉食品による O157 食中毒事件が多発している.そのため厚生労働省 は,畜肉加工品調理時において、「75℃以上1分間の加熱」を推奨している.これをうけ食 品産業では,安全性の観点から 80℃以上の温度帯で調理を行っている.しかし,この温度 帯における加熱調理は,畜肉の過加熱を招き,本来の美味しさを損ねる可能性が高い.そ こで本研究では,畜肉加工品の加熱調理における伝熱解析および,加熱調理時に生じる物 質移動解析を行った.加熱手法としては,近年,安全性,簡便性などから家庭に広く普及 し、チルドおよび冷凍ハンバーグの製造ラインでも導入されている IH(電磁誘導加熱)調 理器を用いた.また,熱および物質移動解析において,水分蒸発,収縮などのないモデル 試料である「①シリコン」を用いて行った後,水分蒸発はあるが,収縮の少ない食品モデ ル試料である「②ボロニアソーセージ」で解析を行い,最終ステップとして水分蒸発,ド リップ流出および収縮の起こる食品モデル試料である「③ハンバーグ」での解析を行った. その際,実際の調理で頻繁に行われている反転に着目し,反転タイミングの違いが及ぼす 温度上昇および殺菌価(75℃加熱相当時間)への影響をもとに,加熱負荷の少ない加熱法 を検討することで,最適な反転タイミングを検討した.

第二章では,水分蒸発,収縮などのないモデル試料である「シリコン」を用い,焼成過 程における熱移動解析を行った.

始めに、熱移動解析を行うための加熱条件検討を行った.フライパンの検討において、 単層厚底構造と多層構造のフライパンの温度ムラの比較を行った結果、加熱ムラが小さか った多層構造フライパンを採用することとした.さらに、油およびフタの有無検討におい て、油およびフタの両者を用いた方が、加熱時間の短縮が見込めることが分かったため、 油あり、フタありの条件で加熱を行うこととした.焼成方法は、油をひいた常温のフライ パンに試料を置き、フタをした状態で火力1 (500W)で加熱した「昇温加熱」と、フライ パンを 140℃~150℃に加熱して試料を投入した「高温投入加熱」の二種類で行った.

シリコン加熱における反転タイミングの違いによる影響を検討した.その結果,反転タ イミングの違いが加熱ムラに大きく影響を与えることがわかり,反転タイミングを考慮す ることでより過度な加熱を防ぐ焼成法(反転タイミング)を見つけ出すことが可能である と考えた.

シリコンの熱移動解析では、実際にシリコンの加熱を行い、有限要素法による数値計算 によって二次元非定常伝熱解析を行なった結果と比較した.その際、計算領域をフライパ ン全体とし、試料には接触層を介して熱伝導によって起こるとした.また、使用した IH 調 理機における発熱分布を考慮したフライパンの発熱量を計算し、昇温加熱および高温投入 加熱における反転操作を考慮した熱伝導解析を行った.その結果、両加熱共に反転後の表 面(下)の温度変化に差が出る結果となったが、実測と計算での傾向が一致し、特に中心 温度において実測値と計算値が良好に一致していることがわかった.

第三章では、水分蒸発はあるが、収縮の少ないモデル試料である「ボロニアソーセージ」 を用い、焼成過程における熱および物質移動解析を行った.

始めに, 豚脂の有無における温度上昇および重量変化の比較を行った. 重量変化は脂添 加試料の方が,減少が大きくなったが,加熱による温度履歴では,脂の有無による有意な 差はないと考えた.このことから,今後はよりハンバーグの成分に近い豚脂 20%添加の試 料を用いて,熱および物質移動解析を行っていくこととした.

ボロニアソーセージとシリコンの温度上昇の比較では、水分の有無による違いから、ボ ロニアソーセージは 100℃付近で温度上昇が一時緩やかとなった.このことから、シリコン の熱伝導解析に加え、水分蒸発を含む試料のシミュレーションを行う必要があるとわかった.

ボロニアソーセージの解析では、昇温加熱および高温投入加熱における反転操作を考慮 した熱移動解析と水分移動を考慮した物質移動解析を行った.双方の解析において、反転 後の表面下は実測値よりも計算値が多少高くなったが、中心および表面上においては良好 に一致した.そのため、この計算結果を基に反転の違いによる殺菌価(75℃加熱相当時間) を計算し、反転タイミングの違いによる加熱負荷を検討した.その結果、昇温加熱および 高温投入加熱双方において、中心温度 50℃での反転が 75℃5 分以上の過度な加熱部分が最 も少なかったことおよび中心部の殺菌価も小さいことから、今回の加熱条件において中心 温度 50℃での反転が最も望ましいと考えた.

シミュレーションにより得られたボロニアソーセージの含水率および重量減少の確認と して,実測値と比較した結果,計算値と実測値で傾向が一致することがわかった.しかし, 計算において反転タイミングによる物質移動の有意な差はみられなかった.

第四章では、水分蒸発および収縮の起こるモデル試料である「ハンバーグ」を用い、焼 成過程における熱および物質移動解析を行った.

ハンバーグ焼成における温度履歴の取得は、困難であったがゴムで固定した被服型熱電 対(φ0.25mm)埋め込み測定することで、再現性のあるデータを取得することが出来た. さらに、各反転タイミングにおける温度履歴の計測を行い、反転のタイミングの違いによ って、加熱に要する時間および終了重量が異なることがわかった. 高温投入加熱において 40℃反転が最も早く、終了重量は30℃反転が最も大きくなった.

ハンバーグの熱および物質移動解析では,膨潤・収縮の解析条件に加え,反転の取り決めを行い,反転直前の上面を平らにし,上面を軸として反転することとした.

ハンバーグ焼成温度に伴う重量および体積変化を算出した.その結果,重量変化に比べ 体積変化が大きくなる傾向となった.また,50~80℃の温度帯で変化が大きくなった.今 回得られた 20℃~90℃における体積変化率を近似した 3 次式を,ハンバーグ焼成シミュレ ーションの温度に伴う収縮率に採用した.

ハンバーグ加熱に伴う収縮確認実験を行った.その結果,反転までは,加熱による直径 の減少に伴い,全体で厚みが増大するが,中心付近で熱源とは逆方向の大きな増大が起こ った.また,反転後は,未加熱部分で0.1-0.2cm 上昇するが,反転前の上昇が大きく,反転 後も中心上部が増大するため,初めの中心点は厚み方向の半分よりやや下となることが示 唆された.

ハンバーグ高温投入加熱の熱および物質移動解析では、前章までの解析結果に加え、収 縮を考慮した解析を行った.反転後の表面下は実測値よりも計算値が多少高くなったが、 中心および表面上においては一致した. そのため、この計算結果を基に反転の違いによる 最終温度分布,殺菌価,水分分布および油分分布を計算し,反転タイミングの違いによる 加熱負荷おび物質移動を検討した.この結果から、30℃反転が最も短時間で加熱すること ができ, 50℃反転で最も遅くなった. また, 加熱終了時, 最低温度点は底部から 1.5~2.0cm と中心よりやや上部に存在することが示唆された.また、30℃反転加熱終了時の形状変化 では,厚みの変化はよく再現できたが,直径方向が少し大きくなった.これは,解析モデ ルと実測では初期の形が違うことから差が生じたと考察したが、全体的に再現できている と考えた.殺菌価の結果では、20℃反転で、高さ2cmの中心付近で殺菌価1分以下の部分 あり,適切な加熱とは言えなかった.また, 30℃,40℃および 50℃反転では,全体で十 分な殺菌価を得られたが、 30℃反転の方が、75℃5 分以上の過度な加熱部分が少なかった ことに加え、焼成時間が最も短くなったことから省エネルギーでの焼成が可能であるため、 今回の加熱条件においては中心温度 30℃での反転が最も望ましいと考えた. 最後にハンバ ーグ内部の水分および脂分分布の結果では、全ての水分および油分分布で中心付近に多く 保持ししていることがわかる.しかし、全体的に大きな差は見られない結果となった.

ハンバーグ焼成に伴う水分移動およびドリップ測定実験では、高温投入 30℃反転におい て終了時の重量変化率は 84.75%となった.また、重量ロス率は反転する 5 分 30 秒までに 3.19%減少したのに対し、反転後加熱終了までに 12.06%減少となり反転後に大きく重量変 化が起こることがわかった.重量ロス中の割合をみると、加熱時間 2 分 45 秒では水分:油 分が 0.43:0.57 であったのに対し、終了時の 17 分 10 秒では 0.64:0.36 と逆転すること がわかった.また、焼成後フライパンに残った肉汁にはほとんど水分が含まれていないこ とがわかった.シミュレーションにより得られたハンバーグの水分および油分変化率の確 認として、実測値と比較した結果、計算値と実測値で傾向が一致することが確認された. しかし、計算において反転タイミングによる物質移動の有意な差はみられなかった.

本研究では、畜肉加工品の加熱調理における熱および物質移動解析を行なった.その中で 最適な加熱調理の検証手段として、殺菌価を考慮した評価が可能となった.様々な加熱機 器の調理空間での伝熱モデル構築を行なうことは困難であるが、本研究が、微生物リスク と品質を両立した最適な調理方法解明の一助となることを切望する.

【引用文献】

1)大島英子,ハンバーグステーキ焼成時の内部温度 腸管出血性大腸菌 O157 に関連して 第
1 報 焼成条件の違いが内部温度に及ぼす影響,日本調理科学会誌, Vol.32, No.4, Page.338-345 (1999)

2) 渋川祥子, 食品加熱の科学, 朝倉書店(1996)

3)中山由美子, IH クッキングヒーターについて, 日本調理学会誌, Vol.39,No.2,p171-175(2006)

4) 鈴木普, 食肉製品の知識, 幸書房(1992)

5) 食の科学, N0.5, 「特別企画豚肉」, 日本評論社(1972)

6)総務省 家計調査年報 肉類の消費動向

7) ハンバーグ製造講座(財)日本ハンバーグ・ハンバーガー協会(1983)

8) 大喜多祥子, ハンバーグステーキ焼成時の内部温度 腸管出血性大腸菌 O157 に関連して 第4報 一般家庭におけるハンバ-グステーキの焼成方法に関する実態調査, 日本調理科学 会誌, Vol.37, No.2, Page.224-233 (2004)

9) 安田直子, ハンバーグステーキ焼成時の内部温度 腸管出血性大腸菌 O157 に関連して 第 5 報 フライパン使用時の場合,日本調理科学会誌,Vol.37, No.4, Page.366-374 (2004)

10) 宮原晃義, 有限要素法によるロースハムの製造工程における熱解析, 日本食品科学工 学会誌, Vol.45, No.4, Page.261-264 (1998)

11) VAN DER SMAN R.g.m., Moisture transport during cooking of meat: An analysis based on Flory-Rehner theory ,Meat Sci , Vol.76 ,No.4, Page.730-738 (2007)

12) WICHCHUKIT, Contact heat transfer coefficient during double-sided cooking of hamburger patties, J Food Process Preserv, Vol.25, No.3, Page.207-221 (2001)

13) PAN, Predictive modeling of contact-heating process for cooking a hamburger patty, J Food Eng , Vol.46, No.1, Page.9-19 (2000)

14) 望月英男, 食品の調理科学, 医歯薬出版株式会社 (1962)

15) 安井勉, 筋肉タンパク質の加熱ゲル形成その1, NEW FOOD INDUSTRY,vol.27,No.7(1985)

16) 石渡奈緒美,牛肉タンパク質の変性制御,東京海洋大学卒業論文(2009)

17) Susana E. Zorrilla, Heat transfer in double-sided cooking of meat patties considering two-dimensional geometry and radial shrinkage, Journal of Food Engineering, Vol. 57, Pages 57-65 (2003)

18) オール電化 JP IH 火力調節目安表 http://www.alldenka.jp/modules/aboutalldenka/index.php?content_id=48

19) R.L.Earle, Unit Operations in Food Processing Second Edition, PERAMON PRESS

謝辞

本研究を行うにあたり、御指導御鞭撻を賜りました東京海洋大学食品生産科学科熱操作 工学研究室 酒井昇教授ならびに福岡美香准教授に心より感謝を申し上げます.

本研究は、日本ハム株式会社との共同研究の一部を担っており、研究実施にあたり多大 なる御協力いただいたと共に日本ハム株式会社、渡辺至氏、工藤和幸氏、田口靖希氏、渡 部賢一氏に深く感謝申し上げます.

研究の過程において,様々なご指導と御鞭撻を賜りました,東京海洋大学食品生産科学 科食品プロセス工学研究室の崎山高明教授ならびに萩原知明助教授に深謝申し上げます.

また,熱操作工学研究室の先輩方,ならびに後輩の皆さまに様々な御助言と御激励を賜 りました.ここに感謝いたします.

最後になりましたが、研究室の生活において、楽しいときも辛く落ち込んだときも苦楽 を共にし、支え合ってきた熱操作工学研究室同期メンバーである石渡奈緒美さん、清水徹 氏に感謝の意を表します.