

焼き調理における加熱条件と推定方法の検討

嶋田 さおり^{1*}, 渋川 祥子²

(¹ 松山東雲短期大学, ² 元横浜国立大学)

原稿受付 平成 24 年 4 月 19 日; 原稿受理 平成 25 年 2 月 13 日

Estimating the Optimum Heating Conditions for Cooking Meat

Saori SHIMADA^{1*} and Shoko SHIBUKAWA²

¹ Matsuyama Shinonome Junior College, Ehime 790-8531

² Yokohama National University, Kanagawa 240-8501

We estimated the optimal heating conditions for cooking food. We had previously estimated by unsteady heat conduction the heating time for a 20-mm-thick slice of beef, indicating the difference in results according to the heating conditions. We estimated here the heating time for 7-mm, 10-mm and 15-mm-thick beef steaks and hamburger steaks under the optimum heating conditions necessary to obtain good results. We also simultaneously estimated the necessary heating time from the thermo-physical properties of the food and by the principle of unsteady heat conduction. We then measured the heating time for these three sample thicknesses of beef and hamburger steak. The temperature ranges used for the cooking pan were 160-220 °C for the beef steak and 150-180°C for the hamburger steak. We compared the heating time and examined the influence of the heating temperature on the surface color and hardness of the beef and hamburger steak.

A pan temperature of less than 220°C failed to brown the 15-mm-thick beef on the surface, and the temperature at the center of the beef only rose to 85°C. The distance from the pan surface to the center of the meat sample was 1/2 of the thickness of the meat before and after heating.

The color of the hamburger surface changed with the pan temperature. Although we found no difference in the meat hardness, we could show the optimal pan temperature and heating time according to the desired color of the hamburger steak.

With the exception of the 7-mm-thick beef steak, we could estimate the optimal heating time by applying the principle of unsteady heat conduction and using the thermo-physical properties calculated from the various components of the meat. We achieved similar results with the hamburger steak.

Keywords : pan frying 熱板焼き, beef 牛肉, hamburger steak ハンバーグ, thermo-physical properties 熱物性値, heating conditions 加熱条件

1. 緒 言

近年, 日本では食生活の多様化に伴い, 調理方法は煮物中心から焼き物, 揚げ物, 炒め物などの頻度が高くなっていく. 中でも, 熱板を用いる間接焼きは直火焼きやオーブ

ン焼きよりも, 日常的に行われる調理操作である.

間接焼きは, 油を薄くひいた鉄板またはフライパンなどの熱板上に食品を直接触れさせて加熱する調理方法であり, 熱板に直接触れた食品の表面は, 熱板からの伝導伝熱によって非常に早く加熱され, 焼き色をつけることが容易である. また, 食品の表面を速く焦がすことによって, 食品の風味や旨味を逃さずに調理することができる. しか

*To whom correspondence should be addressed
E-mail : shimada@shinonome.ac.jp

し、熱板焼き調理は、煮物や蒸し物のように一定の温度を保ちにくい上に、焼いているときの温度を簡単に測ることができないために、表面だけ焦げて内部は加熱不足になったという経験がある人も多い調理法である。これは、熱板に接触した表面部分は温度が上昇しやすいが、食品の内部は熱板に比べ熱伝導率が低いために、表面と内部の温度差が生じやすいためである。しかも、肉料理については、内部を何度まで加熱するかがその調理成績に大きく関係する。一般には、火加減や焼き時間は、経験や勘で、表面の焼き色や形などの観察によって判断することが多く、調理書にも食品を焼くときの条件を明確に表示しているものは少ない。

一方、加熱機器の進歩は著しく、温度調節のできるものが普及し始めている。熱板の設定温度と加熱時間を指示することによって、調理経験の少ない人でも、内部の温度が適温で表面に適度の焼き色がついた調理成績のよいものを得ることができると考えられる。

加熱条件を求める方法として、熱伝導方程式を利用した計算式で推算が可能であれば、多くの食品の調理条件の決定に利用することができる。これまでに熱伝導方程式で加熱時間を求めた先行研究としては、茹で加熱に関して、香西らの非定常熱伝導の三次元微分方程式を用いたもの¹⁾や、差分法で求めたもの²⁾などがある。また、熱板焼きに関しては、鶏挽き肉と卵白ゲルを試料とした熱板焼き調理のモデル実験³⁾が行われている。これは、鶏挽き肉と卵白ゲルの熱伝導率を測定し、その熱伝導率から加熱に要する時間を非定常熱伝導方程式の解を用いて推算し、実測値に近い値が得られている。しかし、これはあくまでも組成の均一なモデル食品についての研究結果であり、日常的にはもっと組成の複雑な食品を焼いている。

著者らは、日常的に使用されている食品について実験で加熱条件を求めると同時に、簡単な計算式を用いて、実用的な加熱条件を推定することの可能性を検討した。

前報⁴⁾において、熱板焼き調理される代表的な食品の1つである牛肉(試料厚さ20mm)を試料として測定を行い、表面の焼き色は焼き温度や焼き時間によって大きく変わるが、肉の硬さは焼く時の熱板温度には関係せず、肉内部の加熱終了時の中心温度によって決まることがわかった。これらの結果から、厚さ20mmの牛肉については、表面の焼き色との関係をもとに、好ましい中心温度までの加熱条件を提示することができた。その加熱条件(熱板温度や加熱時間)を、実測および計算により求めた熱物性値を使い、非定常熱伝導方程式の解を用いて推定した。その結果、非定常熱伝導方程式の解を用いて計算した値は、下部から上部への一方向の熱移動であるとしたことや食品からの水分の蒸散や熱板と食品間の境界抵抗を無視するなど、計算上

多くの仮説を設けているにも関わらず、実測値に近い値を得ることができ、この方法で加熱時間の推定ができることを明らかにした。

肉を試料とした焼き調理に関する研究としては、これまでに、炭素鋼製とフッ素樹脂加工アルミ製フライパンを用いた焦げ速度についての報告⁵⁾や、ハンバーグステーキ焼成時の内部温度についての報告⁶⁾が見られるが、衛生的に安全かつ外観や食味が好ましい状態に焼くための加熱条件を推定する方法は検討されていない。

そこで本研究は、厚さ20mmの牛肉だけでなく、日常的に熱板焼き調理されることの多い厚さのものや、肉にくつつかの材料を混合した場合の熱板焼き調理について、各熱板温度での加熱時間や焼き色、硬さを測定して、加熱条件を提示すると同時に、前報の非定常熱伝導方程式の解を用いる方法が加熱時間の推定に応用できるかを検討することを目的に実験を行った。

牛肉の厚さを7, 10, 15mmの3段階に変えた試料を用い、混合材料の場合については、牛挽肉に玉ねぎなど副材料を混ぜたハンバーグを用いて実験を行った。

2. 方法

(1) 試料の調整

1) 牛肉

オーストラリア産の冷凍牛ヒレ肉を輸入業者から一括購入して使用した。業務用フリーザー内で-40℃で凍結保存しているものを冷蔵庫内に移し、約18時間かけて解凍した。包丁で筋線維に対して直角に厚さ7, 10, 15mmに切断し、コルクボーラー(直径50mm)で型抜きして、円筒形の試料とした。試料内部の温度を3~5℃に安定させるため、24時間冷蔵し、加熱実験に使用した。

2) ハンバーグ

ハンバーグの配合はTable1に示す。作り方(40個分)は次の通りである。

- ① パン粉は牛乳で浸しておき、卵は溶いておく。
- ② 玉ねぎを粗いみじん切りにし、ミキサーで1分間粉砕し、バターを溶かしたフライパンで1分15秒間、強火で炒める。
- ③ ①と②および牛挽肉、溶き卵、塩、こしょうをパンこね機(大正電気(株)製、レディースニーダ、うどん用ハネ使用)に入れて30秒攪拌したのち、手作業でゴムベラを用いて上下が均一になるように混ぜる。これを3回繰り返す、さらに1分間パンこね機で攪拌する。
- ④ ③を内径60mm、高さ11mmのリング状の金属型に35g詰めて成型し、ラップフィルムで二重に包み-40℃で急速凍結する。凍結した試料は牛肉試料と同

Table 1 Composition of the hamburger steak and major components of foods

Materials	Weight (g)	Water (g)	Protein (g)	Fat (g)	Carbo. (g)	Fiber (g)	Ash (g)
Beef (Australia)	700	523.6	148.4	18.9	1.4	0.0	7.7
Onion	350	314.0	3.5	0.4	30.8	5.6	1.4
Egg	120	91.3	14.8	12.4	0.4	0.0	1.2
Bread crumb	100	13.5	14.6	6.8	63.4	4.0	1.7
Milk	100	87.4	3.3	3.8	4.8	0.0	0.7
Butter	20	3.2	0.1	16.2	0.0	0.0	0.4
Salt	13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0
Pepper	1	0.1	0.1	0.1	0.7	0.0	0.0
Total (g)	1404	1033.1	184.8	58.5	101.5	9.6	26.1
Mass percentage (%)		73.6	13.2	4.2	7.2	0.7	1.9

様に、凍結保存し使用前日に冷蔵庫へ移して解凍した。

(2) 試料中心温度の測定方法

熱電対は、シース型直径 0.5mm のアルメル・クロメルを使用した。熱電対の肉への差し込み方法は、前報¹⁾同様、試料の直径と同じ長さのステンレス棒を用い、熱電対の先端の測温部がステンレス棒の中心部に重なるように取り付け、ジャッキの上を滑らせて差し込んだ。

温度変化はレコーダー（東亜電波工業製、FBR-253A）に自記させた。

(3) 加熱実験

試料の加熱には、業務用ガスグリドル（フジマック製、FGFT50S）を使用した。この機器は下部からのガスバーナーで熱板を加熱する方式であり、ガスの流量の自動調節により温度制御を行う方式である。熱板は厚さ 19mm の鋼板 SS400 で、300℃まで 1℃単位の温度設定が可能であり、常に設定温度に保たれるよう設計されている。この機器の表面にはフッ素樹脂加工を施した。熱板表面の温度を放射温度計（日本アビオニクス製、TVS-2100ST）を用いて測定し、±3℃以内の最も温度むらが少ない位置で試料を加熱した。熱板の表面温度が安定したのち、試料を所定の位置に置き、試料と熱板の接触をよくするために、牛肉試料には 91.7g の重りをのせた。ハンバーグ試料には、加熱により膨らむことを妨げず、かつ十分に熱板に接触させるため 49.7g の重りをのせて加熱した。試料を裏返す際には、速やかに重りをはずし、熱電対を差し込んだまま、試料の上下を返し、再度重りをのせた。

牛肉試料では、熱板温度を 160, 180, 200, 220℃の 4 段階とした。加熱の終了は、試料中心温度が 55, 70, 85℃に達した時とした。前報⁴⁾と同様に、加熱終了時の試料中心温度が 55℃のときは試料中心温度が 40℃に達したときに裏返し、同様に 70℃のときは 45℃、85℃のときは 60℃に達したときに裏返すこととした（以下、これらの条件を 40-55, 45-70, 60-85 と略す）。熱板温度ごとにそれぞれの試料中心温度で 4 から 7 回の繰り返しを

行った。

ハンバーグ試料では、衛生的に安全な温度まで加熱する必要があるため、予備実験の結果から試料中心温度 60℃で裏返し、80℃で加熱終了とした。熱板温度は焦げすぎないように牛肉より低く設定し、予備実験から 150, 160, 170, 180℃とした。熱板温度ごとに 5 から 10 回の繰り返しを行った。

(4) 調理成績の測定方法

1) 厚さ

加熱終了後、10 分間室温に放置したのちラップフィルムをかけ、さらに 30 分放置後、試料の中央部分を幅 10mm に切り、両端の 2 つの中央部分の厚さを測定した。試料の両端の 2 つの厚さの平均値を各試料の厚さとし、5～6 回の測定を行った。測定には、クリーブメータ（山電製、HC-3305）を使用した。

2) 焼き色

最初に焼いた面の焼き色を、画像処理装置（日本アビオニクス製、SPICCA）で測定した。試料の上部 2 方向から白熱電球で照らし、照度計の値が 370 ルクスになるように明るさを調節し、付属のカラービデオカメラ（TK-1070）で画像を読み込んだ。これを付属のソフトを用いて、色調 RGB の G 値のヒストグラムで表し、この平均値で焼き色を評価した。

3) 硬さ

加熱後のハンバーグの硬さを、クリーブメータで測定した。貫入力は、表面の焼いた面も含めて全体の硬さを、直径 8mm の円筒型プランジャーで焼いた面の上部から圧縮した。剪断力は、内部の硬さを測定するために、刃巾 1mm、刃長 30mm の V 型プランジャーで、試料の切り口を上にして測定した。剪断力、貫入力ともスピードは秒速 1mm、クリアランスは 2mm に設定した。試料は厚さ測定に使用したものをを用い、1 試料につき 2 箇所ずつ測定した。

(5) 熱物性値の測定方法

加熱時間の算出には、試料の熱拡散率が必要である。本実験で使用した試料の熱拡散率は未知であるため、熱伝導率、比熱、密度から算出した。これらの熱物性値は、測定可能なものは測定すると同時に、成分組成から Table 2 に示す Choi の式⁷⁾ に示す値を使用して算出した。

1) 密度

密度は、体積と重量から算出するため、水中置換法により体積の測定を行った。なお、生肉については常に円柱に成型するため、体積の測定は行わず、計算によって求め、体積と重量から算出した。

2) 比熱

食品成分表⁸⁾の牛肉の成分組成をもとに、Choi の式により算出した。

なお、ハンバーグはいくつかの食品を配合して試料を調整しているため、これらの成分組成を食品成分表で調べ、配合割合から質量分率を求めた。

3) 熱伝導率

試料の熱伝導率は平板比較法熱伝導率計 (Dynatech 製, C-Matic) で測定した。この測定機器では、上面と下面の温度を設定し、熱流を測定することができる。標準試料と

して、厚さ 10.0mm 熱伝導率 1.116W/(m・K) のパイレットス板、厚さ 9.0mm 熱伝導率 0.933 W/(m・K) の樹脂、厚さ 10.15mm 熱伝導率 0.29 W/(m・K) のベーク材を 5 回ずつ測定し、検量線を求めた。牛肉試料およびハンバーグ試料ともに、熱板温度 200℃で試料中心温度 85℃まで焼いた肉の焦げた面だけの部分と焦げた面を除いた部分、および生をそれぞれ 4~7 回測定した。なお、試料は機器に入る厚さが 11mm であり、測定中の変形を防ぐためにベーク材の円筒枠 (内径 46mm, 高さ 11mm, 厚さ 1mm) に入れて測定した。ベーク材は食品の熱伝導率に近く、平板比較法は平板状試料の一面を断熱し、他方の一面から一定速度で熱を供給し、試料内の数箇所を経時的に温度を測定して熱伝導率を求めるので、薄いベーク材の枠を使用する影響はないと判断した。

4) 熱拡散率

密度、比熱、熱伝導率から算出した。

5) Choi の式による算出方法

Table 1 に各材料の使用量に応じて、水分、たんぱく質、脂質、糖質、食物繊維、灰分の含有量を示した。各成分ごとに合計し質量分率を求め、それぞれの成分ごとに Table 2 に示す Choi の式を使用して各成分の熱物性値を算出し、

Table 2 Group models of major components of foods for the thermo-physical properties

Thermo-physical properties	Major components	Group models temperature function
k (W/(m・K))	Protein	$K = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$
	Fat	$K = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$
	Carbohydrate	$K = 2.0140 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$
	Fiber	$K = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$
	Ash	$K = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$
$\alpha \times 10^{-6}$ (m ² /s)	Protein	$\alpha = 6.8714 \times 10^{-2} + 4.7578 \times 10^{-4}T - 1.4646 \times 10^{-6}T^2$
	Fat	$\alpha = 9.8777 \times 10^{-2} - 1.2569 \times 10^{-4}T - 3.8286 \times 10^{-8}T^2$
	Carbohydrate	$\alpha = 8.0842 \times 10^{-2} + 5.3052 \times 10^{-4}T - 2.3218 \times 10^{-6}T^2$
	Fiber	$\alpha = 7.3976 \times 10^{-2} + 5.1902 \times 10^{-4}T - 2.2202 \times 10^{-6}T^2$
	Ash	$\alpha = 1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4}T - 1.2244 \times 10^{-6}T^2$
ρ (kg/m ³)	Protein	$\rho = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}T$
	Fat	$\rho = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}T$
	Carbohydrate	$\rho = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}T$
	Fiber	$\rho = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}T$
	Ash	$\rho = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}T$
C _p (J/(kg・K))	Protein	$C_p = 2008.2 + 1.2089T - 1.3129 \times 10^{-3}T^2$
	Fat	$C_p = 1984.2 + 1.4733T - 4.8008 \times 10^{-3}T^2$
	Carbohydrate	$C_p = 1548.8 + 1.9625T - 5.9399 \times 10^{-3}T^2$
	Fiber	$C_p = 1845.9 + 1.8306T - 4.6509 \times 10^{-3}T^2$
	Ash	$C_p = 1092.6 + 1.8896T - 3.6817 \times 10^{-3}T^2$

k(W/(m・K)):Thermal conductivity
 $\alpha \times 10^{-6}$ (m²/s):Thermal diffusivity
 ρ (kg/m³):Density
 C_p(J/(kg・K)):Specific heat
 T(°C):Temperature of the food

質量分率を各成分の密度で除して体積分率を求め、各熱物性値の算出に使用した。

- ① 密度:各成分の密度の値に体積分率を乗じて合計した。
- ② 比熱: Table 2 の式で算出した各成分の比熱の値に質量分率を乗じて算出した。
- ③ 熱伝導率: 各成分の熱伝導率に体積分率を乗じて合計した。
- ④ 熱拡散率: 各成分の熱拡散率に体積分率を乗じて合計した。

(6) 加熱時間の推定

加熱時間は、以下に示す半無限固体の非定常熱伝導方程式の解を用いて、試料の中心部が所定の温度になるまでの時間を算出した。

$$\frac{T - T_0}{T_s - T_0} = \text{erfc}(X)$$

$$X \equiv \frac{X}{2\sqrt{\alpha t}}, \quad \text{erfc}(X) \equiv 1 - \text{erf}(X)$$

T_0 : 試料初期温度 (°C)

T : 距離 X (試料中心) における試料内部温度 (°C)

T_s : 試料表面温度 (°C)

α : 熱拡散率 (m^2/s)

t : 加熱時間 (s)

試料表面温度 T_s は熱板の表面温度と等しいと仮定し、距離 X は、加熱前後の試料の厚さの平均値とした。試料初期温度 T_0 は冷蔵庫から出したときの温度とし、一律に 4°C とした。erf (X) の値は誤差関数表⁹⁾により求めた。

3. 結果及び考察

(1) 牛肉の加熱条件の測定

1) 加熱時間の実測

裏返すまでの加熱時間の測定結果を、Table 3 に示した。

2) 牛肉表面の焼き色と加熱時間の関係

厚さ 20mm の牛肉の場合⁴⁾には、熱板温度によって変わるのは焼き色であり、硬さは肉内部を何度まで加熱するかによって異なることが明らかになった。

そこで、加熱時間が短い薄い肉についても、焼き色と加熱時間、加熱温度の関係について検討した。焼き色は肉の表面部分と熱板温度との関係で決まるので、牛肉試料の厚さは 10mm のみで、10 秒ごとに 60 秒までと 120 秒後について、1 つの条件につき 3 ~ 5 回測定した。なお、熱板温度 160, 180°C については、予備実験から 20 秒程度焼いてもほとんど色がつかなかったため、20 秒以下の測定は行わなかった。

測定結果は Fig.1 に示す。0 秒後の値は生の状態の測定結果である。前報⁴⁾では、適切な焼き色は、G 値が 45

~ 55 であることを報告している。熱板温度 200 および 220°C では、10 ~ 20 秒後に G 値は 74 ~ 80 と高くなり、その後時間の経過とともに低くなった。10 ~ 20 秒後の表面の焼き色を肉眼で観察すると、加熱変性によって白っぽくなり赤みはなくなっていた。このことが G 値の上昇に反映されていると考えられる。熱板温度 160 と 180°C では 30 から 120 秒の加熱では G 値 60 以上の値を示し、肉の変性により色は変わっているものの、焼き色はつかなかった。

(2) ハンバーグの加熱条件の測定

1) 加熱時間の測定

直径 60mm, 厚さ 11mm のハンバーグ試料について、最適な加熱条件を知るために熱板温度 150, 160, 170, 180°C で焼き、調理成績を検討した。焼き上がりは、試料中心温度が 60°C に達した時に裏返し、80°C で加熱終了とした。加熱時間の測定結果は Table 4 に示した。

なお、おもてと裏の加熱時間は前報⁴⁾と同様に、試料の最終中心温度の 75% に達したときに裏返すとほぼ同じ時間になることが予想されたが、結果は、Table 4 に示すように、熱板温度によって異なり、おもての加熱時間が裏の加熱時間の 71.5 ~ 88.5% であった。

2) 焼き色の測定

先に焼いた面の焼き色を測定した結果を Fig.2 に示す。牛肉の結果から求めたほどよい焼き色である G 値 45 ~ 55 になるのは、160°C 前後の熱板温度であることが明らかになった。

3) 硬さの測定

ハンバーグは、内部がふっくらとやわらかく焼けたものが好まれる。異なる熱板温度で焼いた場合に、硬さに違いがあるかを明らかにするために、150, 160, 170, 180°C で焼いたときの剪断力と貫入力をクリープメータで測定した。その結果を Fig.3 に示す。ハンバーグの場合、40% 変形したときには組織がプランジャーによりつぶされているので、測定結果は歪率 40% の荷重で表した。

剪断力は熱板温度が上昇するにつれて低下した。逆に貫入力は熱板温度が上昇するにつれて大きくなり、170°C で最大となり、それ以上の熱板温度に対し低下するように見える。しかし、剪断力、貫入力ともに有意差は見られなかったため、熱板温度の違いによる硬さの差はないと判断される。

(3) 加熱時間の推定

1) 牛肉の加熱時間の推定と実測値の比較

著者らは前報⁴⁾で、厚さ 20mm の牛肉について、非定常熱伝導方程式の解を用いた方法で、加熱時間の推定を行った。その際、熱物性値は、測定値と成分組成から算出した値を用いたが、推定した加熱時間と実測値の差はほぼ

Table 3 Comparison of the heating time

Thickness of the sample(mm)	Center temperature of the sample (°C)	Pan Temperature (°C)	Measured heating time A ± S.D.*(sec.)	Estimated heating time B** (sec.)	Difference (B-A)/A × 100 (%)
7	40-55	160	31 ± 11	28	-8
		180	26 ± 4	25	-4
		200	22 ± 5	22	2
		220	22 ± 9	21	-6
	45-70	160	36 ± 7	32	-9
		180	27 ± 8	27	1
		200	22 ± 10	25	14
		220	22 ± 5	23	4
	60-85	160	51 ± 9	48	-5
		180	44 ± 11	40	-8
		200	33 ± 10	35	4
		220	27 ± 4	31	15
10	40-55	160	64 ± 17	56	-12
		180	51 ± 9	50	-2
		200	50 ± 10	45	-9
		220	47 ± 7	43	-9
	45-70	160	67 ± 13	65	-2
		180	57 ± 10	57	1
		200	49 ± 7	51	3
		220	47 ± 7	46	-2
	60-85	160	93 ± 21	98	5
		180	85 ± 18	79	-7
		200	75 ± 14	71	-4
		220	67 ± 28	64	-5
15	40-55	160	121 ± 17	113	-7
		180	105 ± 13	99	-6
		200	90 ± 21	89	-2
		220	83 ± 11	81	-2
	45-70	160	125 ± 12	120	-4
		180	114 ± 6	106	-7
		200	96 ± 15	94	-2
		220	90 ± 10	85	-6
	60-85	160	194 ± 12	178	-9
		180	168 ± 15	144	-14
		200	134 ± 10	130	-3
		220	116 ± 18	120	4

* Standard deviation of measured heating time.

** Calculated by the principle of unsteady heat conduction in a semi-infinite plate.

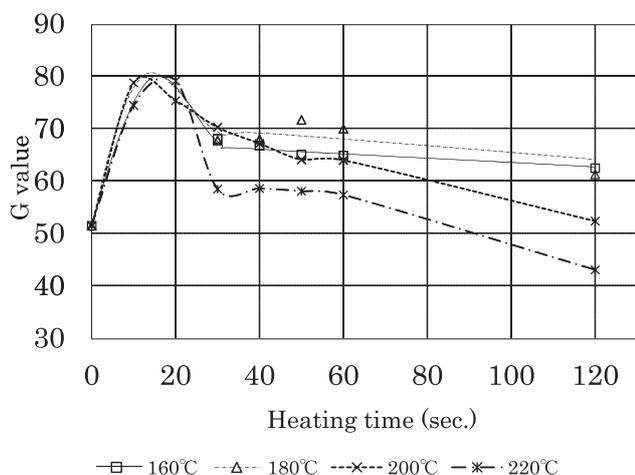


Fig. 1 Surface color of the beef

Table 4 Heating time of the hamburger steak

Pan temperature (°C)	Measured time (sec.)		T/B × 100
	Top T	Bottom B	
150	171 ± 15	206 ± 58	88.5
160	156 ± 19	189 ± 36	85.1
170	153 ± 15	193 ± 25	80.3
180	137 ± 13	202 ± 54	71.5

T: Heating time of the top of the hamburger steak.

B: Heating time of the bottom of the hamburger steak.

The pan temperature was 150, 160, 170, 180°C. The hamburger steak was turned over when the center temperature reached 60°C and was ended when it reached 80°C.

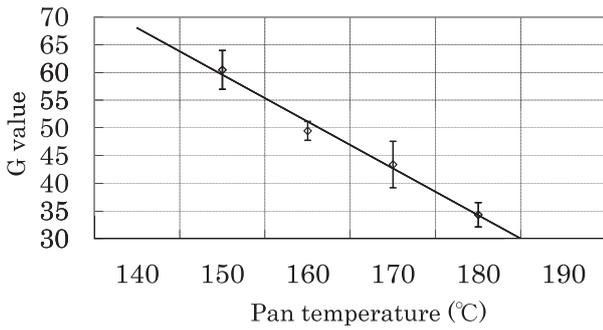


Fig.2 Surface color of the hamburger steak

The pan temperature was 150, 160, 170, 180°C. The hamburger steak was turned over when the center temperature reached 60°C and was ended when it reached 80°C. Each bar shows the standard deviation of 5 measurements.

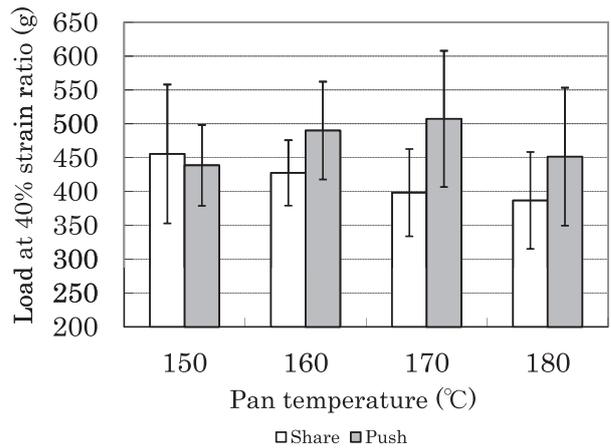


Fig.3 Hardness of the hamburger steak

The hamburger steak was turned over when the center temperature reached 60°C and was ended when it reached 80°C. Each bar shows the standard deviation of 5 measurements.

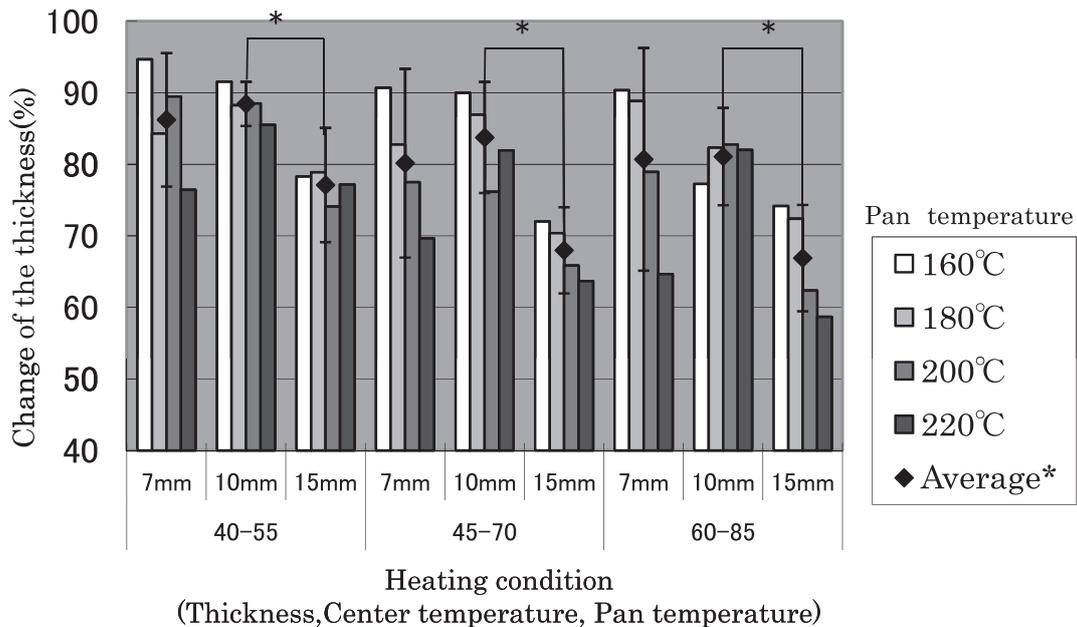


Fig.4 Change of the thickness of the meat after heating

* Average of the thickness when heated at each pan temperature (160, 180, 200, 220°C). Each bar shows the standard deviation when baked at each pan temperature (160, 180, 200, 220°C).

10%以下であった。

厚さ 7, 10, 15mm の牛肉の裏返すまでの実測値と、前報と同様の方法で推定した加熱時間を比較した。一般的に熱板焼き調理をする際には様々な食品を使用することが考えられるため、その都度熱物性値を測定する必要がないように、成分組成から算出した熱拡散率 $0.131 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ を用いて、加熱時間を推定した。なお、計算する際の肉の厚さは実測値から概算することとした。実測し

た肉の厚さの変形率（生肉の厚さに対する焼き上がりの肉の厚さの割合）を加熱条件ごとに Fig.4 に示す。測定結果は、厚さが薄く、加熱終了の中心温度が低く、熱板温度が低いほど、肉の変形率は大きい傾向があったが、肉が薄いためと試料の厚さの調整が困難なことから、ばらつきの大きい値となったため、有意差は出にくかった。図中の平均値は肉の厚さ別、肉の中心温度別に全ての熱板温度での値を平均したものである。肉の中心温度ごとに見ると、厚さ

10mm と 15mm の間でいずれも有意差が見られた。そこで、厚さ 15mm の変形率は、中心温度 40-55 については 77%、中心温度 45-70 と 60-85 については 67% とした。厚さ 7mm と 10mm については有意差が見られなかったため、すべて平均し変形率を 84% とした。これらの変形率を初期の厚さにかけた値を焼き上がりの厚さとし、加熱前後の厚さの平均の 2 分の 1 を試料中心部までの距離として加熱時間の算出に使用した。

実際に測定した、裏返すまでの加熱時間（以下、実測値と略す）と推算した時間（以下、推算値と略す）との比較を Table 3 に示す。実測値と推算値の差は 15% 以内であったので、非定常熱伝導方程式の解と成分組成から算出した熱物性値を用いる方法で、加熱時間の推定がほぼ可能であると考えられる。

2) ハンバーグの加熱時間の推定と実測値の比較

ハンバーグの場合も加熱時間の理論的算出の可能性を検討するために、ハンバーグの熱物性値を測定し、加熱時間の推算値と実測値の比較を行った。

①物性値

加熱時間の推算のためには熱物性値が必要である。実際に測定した値（以下、測定値と略す）と、成分組成から算出した値（以下、計算値と略す）を Table 5 に示す。

牛肉については、焦げた面の熱伝導率は生に比べて少し低くなったが、加熱肉の内部とは大きな差はなかった。ハンバーグについては、ハンバーグの加熱された内部の熱伝

導率は生より少し低くなり、焦げた面は生に比べてかなり低くなった。水分蒸発が大きく関係していると思われる。

生のハンバーグの熱伝導率の計算値は 0.518W/(m・K) となり、測定値は 0.500W/(m・K) であった。比熱の測定は行わなかったため、どちらも計算値を用いて熱拡散率を算出した。熱拡散率は計算値が $0.131 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 、測定値が $0.125 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ となり、約 5% 程度の差であった。

②厚さ

ハンバーグの加熱後の厚さは、加熱時間を推定する際に、試料中心までの距離を知るために必要である。加熱前の厚さに対する変形率を求め、熱板温度ごとに平均値を算出した。この結果を Fig.5 に示す。各熱板温度の間で有意差は

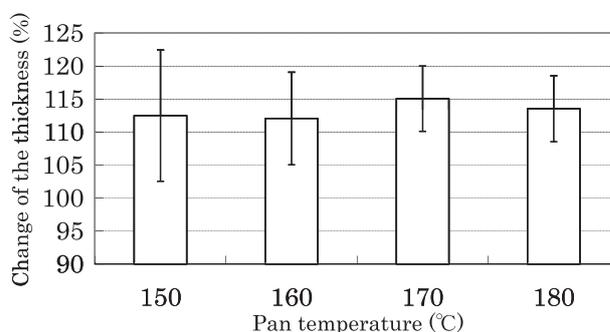


Fig.5 Change of the thickness of the hamburger steak after heating

Each bar shows the standard deviation of 5 measurements.

Table 5 Thermo-physical properties

		Thermal conductivity k (W/(m・K))	Density ρ (kg/m ³)	Specific heat Cp (J/(kg・K))	Thermal diffusivity α (m ² /s)
Raw beef	Literature*	0.519	1053.1	3220	0.153×10^{-6}
	Calculated**	0.527	1137.1	3403	0.131×10^{-6}
	Measured	***0.467 ± 0.009	****1018.4	3403	*****0.135 × 10 ⁻⁶
Heated beef (inside)	Calculated**	0.509	1090.3	3393	0.129×10^{-6}
	Measured	***0.475 ± 0.018	****1076.5	3393	*****0.130 × 10 ⁻⁶
Heated beef (surface)	Calculated**	0.425	1134.3	3073	0.115×10^{-6}
	Measured	***0.436 ± 0.020	****1133.2	3073	*****0.125 × 10 ⁻⁶
Raw hamburger steak	Calculated**	0.518	1061.0	3573	0.131×10^{-6}
	Measured	***0.500 ± 0.008	****1125.9	3544	*****0.125 × 10 ⁻⁶
Heated hamburger steak (inside)	Measured	***0.452 ± 0.014	-	-	-
Heated hamburger steak (surface)	Measured	***0.268 ± 0.025	-	-	-

* Lentz(1961)

** It was calculated by the Eq. of Choi from the component organization.

*** It was measured by C-matic (Dynatech production).

**** It was calculated from volume and weight.

***** It was calculated from measured density,calculated specific heat, and measured thermal conductivity.

認められず、一定の傾向も認められなかった。そこで、すべての値を平均すると 113.39% であり、約 115% とした。

③加熱時間

ハンバーグの中心温度が 60℃になるまでの加熱時間を推定し、実測値と比較した結果を Table 6 に示す。なお、ハンバーグは加熱により膨らむが、熱板表面から試料中心までの距離は、加熱前後の厚さの平均値の 2 分の 1 とした。

実測値はばらつきが 13 ~ 19 秒であり、実測値と推算値の比較では、計算による値の熱物性値を使った値の方が良く一致していて、推算値と土数%以内の誤差であった。このことから、ハンバーグについても非定常熱伝導方程式の解を用いた方法で、試料中心までの距離を加熱前後の厚さの平均値の 2 分の 1 と仮定し、熱物性値は生の計算値を使用することによって、加熱時間の推定が可能であることが明らかになった。

以上の結果から、使用した計算式は半無限固体の非定常熱伝導方程式の解であるが有限の大きさの試料に適用していること、距離として加熱前後の厚さの平均値を用いていること、加熱にしたがって熱物性値が変化することを考慮していないこと、境界抵抗や水分蒸発を無視していることなど、多くの仮定の下に行っているにも関わらず、おおよその時間を推定できたことは、今後、一方向からの加熱で中心が一定温度に達するまでの加熱条件を求める 1 つの有効な方法であると考えられる。実際の調理の分野では、熱伝導方程式の複雑な式を利用することは困難な場合が多いが、誤差関数を使う本法は非定常熱伝導方程式としては最も簡単なものである点で、熱板焼きの加熱条件設定に今後利用できると思われる。

(4) 良好な成績を得るための加熱条件

1) 牛 肉

Table 3 の結果から、厚さ 7, 10, 15mm の肉の場合も、計算により中心部の温度をほぼ予測することができた。しかし、Fig.2 の焼き色の結果と合わせて調理成績を考える場合、表面にちょうど良い焼き色がつくように焼ける条件

は、15mm の 45-70 の場合は、220℃で 90 秒、60-85 の場合は 220℃で 116 秒、200℃で 134 秒のみであった。15mm の肉でも内部の温度を低めに焼く場合や、より薄い肉では中心部が適温になる時間内では表面に適度な焼き色はつかなかったので、色がついたちょうど良い焼き具合になる熱板温度と時間が予測できたとは言い難い。そのため、このような薄い肉を焼く場合は、本実験で行った熱板温度の範囲では、タレをつけて焼くといった工夫が必要であると考えられる。また、15mm より薄い肉については、内部温度が低めかつ表面に焼き色を付けるためには、より高い温度設定が必要である事が明らかになった。本研究の方法でより高い設定温度における加熱時間の推定も可能であると考えられる。

2) ハンバーグ

ハンバーグの表面の焼き色は、牛肉と同様、熱板温度と加熱時間に大きく関係しており、硬さは 150 ~ 180℃の熱板温度では何度で焼いても変わらないことが明らかになった。適切な加熱条件を求めるにあたって、おもてと裏が同じ加熱時間になるように計算しなおした。60℃で裏返す条件では、裏のほうが加熱時間が長かったので、裏返す温度を 62℃に設定し、その温度になるまでの加熱時間を計算し、実測を行って確認したところ、おもてと裏の加熱時間がほぼ同じになった。

この加熱時間に、色の測定結果を組み合わせると、11mm 厚さのハンバーグの加熱条件としては、熱板温度 155℃で 3 分、160℃で 2 分 40 秒焼き、裏返して同時間焼くとよいことが明らかになった。

4. 要 約

本研究は、肉類の熱板焼きに適した加熱条件を提示することおよび非定常熱伝導方程式の解による加熱条件推定の可能性を検討することを目的とした。試料は、厚さを 7, 10, 15mm にした牛肉と、ハンバーグを使用した。牛肉試料は 160 ~ 220℃、ハンバーグ試料は 150 ~ 180℃の

Table 6 Comparison of the heating time

Pan temperature (°C)	Measured time	Estimated time**		Difference × 100(%)	
	A* ± S.D.(sec.)	B (sec.)	C (sec.)	(B-A)/A	(C-A)/A
150	171 ± 15	176	184	3	8
160	156 ± 19	158	166	1	6
170	153 ± 15	154	161	1	5
180	137 ± 13	136	142	-1	4

* It was measured at such heating time that the center temperature of the hamburger steak becomes 60°C.

** It was calculated by applying the principle of unsteady heat conduction in a semi-infinite plate.

B: It was calculated by using the thermo-physical properties calculated from the component organization.

C: It was calculated by using the measured thermo-physical properties.

範囲で焼いたときの加熱時間を実測し、それを推定した時間と比較した。同時に、熱板温度の違いが表面の焼き色や硬さに及ぼす影響を検討した。結果は次のようにまとめられる。

- (1) 15mmより薄い肉を熱板温度220℃以下で焼く場合には、試料中心温度が85℃以下では表面に焼き色をつける焼き方はできなかった。そのため、このような薄い肉を焼く場合は、本実験で行った熱板温度の範囲では、タレをつけて焼くといった工夫が必要であることが示唆された。また、15mmより薄い肉で内部温度を低めにかつ表面に焼き色を付けるには、より高い温度設定が必要である事が明らかになった。
- (2) ハンバーグについて、熱板温度によって変わるのは表面の焼き色であり、硬さの差は見られなかった。焼き色をもとに判断した結果、良い調理成績が得られる加熱条件は、厚さ11mmのハンバーグの場合、熱板温度155℃で3分、160℃で2分40秒焼き、裏返して同時間焼くことであった。
- (3) 牛肉で厚さを3段階に変えた試料は、7mmを除いて、非定常熱伝導方程式の解と成分組成から算出した熱物性値を用いる方法で加熱時間を推定することができた。これはハンバーグにおいても同様であった。この時、熱板表面から試料中心部までの距離は、加熱前後の厚さの平均値の2分の1を使用した。

本研究にご協力いただきました東京ガス(株)玉川雅章氏に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 香西みどり, 中村文子, 畑江敬子, 島田淳子. シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間に及ぼす形状の影響. 日本調理科学会誌. 1999, 32, p.296-303
- 2) 香西みどり, 中村文子, 畑江敬子, 島田淳子. 非等温加熱における最適加熱時間の予測. 日本調理科学会誌. 1998, 49, p.373-381
- 3) Shoko Shibukawa and Kuniko Sugiyama. Estimation of Heating Conditions for Pan Frying. Thermophysical Properties. 1994, p.359-362
- 4) 貝田さおり, 玉川雅章, 渋川祥子. 牛肉の熱板焼き調理における最適加熱条件. 日本家政学会誌. 1999, 50, p.147-154
- 5) 肥後温子, 水上和美, 富永暁子. 乾熱加熱時における鉄製とフッ素樹脂加工アルミ製フライパンによる焦げ速度. 日本調理科学会誌. 2004, 37, p.170-179
- 6) 日本調理科学会近畿支部 焼く分科会. ハンバーグステーキ焼成時の内部温度. 日本調理科学会誌. 1999, 32, p.338-345
- 7) Choi, Y. and M. R. Okos. Food Engineering and Process Application., Applied Science Pub., GBR, 1986, Vol.1, p.93-101
- 8) 香川芳子監修. 新しい「日本食品標準成分表2010」による食品成分表改定最新版, 女子栄養大学出版社, 2010
- 9) 日本機械学会. 伝熱工学資料. 丸善. 1986, p.6