

肉類のオーブン加熱終了後の内部温度変化に及ぼす放置条件の影響

Effects of Placement Conditions on the Internal Temperature Change after Oven Heating of Meat and Poultry

日本調理科学会加熱調理研究委員会 余熱研究グループ*§

Research committee on heating for cookery, Remaining heat research team

The effects on the internal temperature of meat and poultry after oven heating (remaining heat), of the oven heating conditions, of the kind of placement medium, and of the presence of a cover were investigated by actual measurements. The time for maintaining a temperature of over 75°C due to the remaining heat was also predicted by a numerical analysis using a simplified heat transfer model. No marked difference was apparent in the three kinds of placement medium (stainless steel, wood or *gotoku*) which had different thermophysical properties. This was due to the small contact area between the medium and the oven plate. The effect of a cover was strong in retaining the remaining heat. The time predicted by the simplified numerical model for maintaining over 75°C of internal temperature in the meat was similar to that of the actual measurements, confirming the validity of the heat transfer model.

キーワード：余熱 remaining heat；オーブン加熱 oven heating；内部温度 internal temperature；肉類 meat and poultry；伝熱モデル heat transfer model

緒言

食品の加熱調理においては、衛生上の条件を満たし、かつ嗜好性の高い調理品を得ることが望まれる。獣鳥肉類のオーブン加熱をはじめとする高温の条件下での加熱の際、加熱条件や加熱終了直後の放置条件によっては、加熱を終了した後も食品中心部の温度上昇が続き、過加熱により調理成績の低下を招くことがある。そのため、加熱終了後の温度上昇をふまえた加熱条件を設定することで、最も良い調理成績が得られる可能性がある。しかし、オーブンの種類によって加熱性能（加熱時間）やオーブン角皿などが異なるうえに、加熱終了直後には、さまざまな放置条件を取りうる可能性がある。そこで、普遍性のある余熱利用の条件を提示するためには、多様な加熱および放置条件における測定データの蓄積が必要であり、加えて、理論に基づいた計算による予測が必須になると考えられる。

そこで、筆者らは、限定された場所での実験だけでなく、複数の実験室で異なる機種種のオーブンを使用し、多くの場所でのデータの蓄積を行うことにした。前報¹⁾では、6研究室で異なる6機種種のオーブンをを用い、厚さ15mmの肉を試料とし、庫内設定温度230°Cと270~280°Cの2条件

で余熱の有効利用について検討した。その結果、庫内空気温度の平均値が250°C以上の条件で加熱した場合には、肉の内部温度が70°Cに達してから1分間で加熱を終了しても、取り出したオーブン角皿上で余熱を利用することによって、肉の内部温度を75°C1分間以上保持することができた。高温を維持することのできるオーブンは限られており、3機種種での実験結果ではあるが、75°Cに達してから1分間加熱したものに比べ、重量減少および破断応力は有意に小さいことを明らかにした。

前報¹⁾における肉を加熱した際に用いたオーブン角皿をオーブンから取り出した時の放置場所は、ステンレスの調理台、木の調理台、ガスコンロのごとくの上など様々な場所および状況で、実験室間で統一されていなかったが、いずれの条件でも、70°C1分間加熱後の余熱利用で肉の内部温度は75°C1分間保持の条件を満たすことができた。

その一方で、加熱直後の食品を放置した際に、食品の温度変化に及ぼす要因として、室温、湿度、風速、放置場所などの放置環境や食品の形状、物性など様々な要因が挙げられる。その他、フライパンでハンバーグステーキを焼成した際には、ふたをすることで最高温度が高くなり、75°C保持時間が長くなることが明らかとなっている²⁾ことから、覆いの有無も食品の温度変化に影響を及ぼす要因の一つと考えられる。しかしながら、様々な放置条件下での肉への伝熱および放置中の放熱の実態についての詳細な報告は見あたらない。また、これまでに加熱調理における伝熱工学的なアプローチはいくつか報告されている^{3,4,5)}が、オーブン加熱における余熱をふまえた検討は行われていない。

そこで、本研究では、オーブンでの加熱条件と放置条件の影響をさらに精査し、余熱利用の普遍的条件を得ること

* 高崎禎子[§](Sadako Takasaki, 信州大学), 阿部芳子 (Yoshiko Abe, 相模女子大学), 石渡仁子 (Kimiko Ishiwata, 関東学院大学), 中村恵子 (Keiko Nakamura, 福島大学), 原知子 (Tomoko Hara, 神戸山手短期大学), 松田康子 (Yasuko Matsuda, 女子栄養大学), 山形純子 (Junko Yamagata, 大阪市立大学), 伊與田浩志 (Hiroyuki Iyota, 大阪市立大学), 杉山久仁子 (Kuniko Sugiyama, 横浜国立大学), 渋川 祥子 (Shoko Shibukawa, 元横浜国立大学)

§ 連絡先 信州大学教育学部
〒380-8544 長野市大字西長野6のロ
TEL 026(238)4186

を目的に、その第一段階として、8機関（6実験室）における共同研究として、肉中心部の温度が70℃に達してから1分間加熱した後、室内に放置した際に、オープンでの加熱条件や放置場所の違い、覆いの有無などが肉中心部の温度変化に及ぼす影響について実測により検討を行った。さらに、簡略化した伝熱モデルを用いた数値計算によりオープン加熱後の食品の温度変化の予測を試みた。

実験方法

1. 試料の調製

前報¹⁾と同様に市販の豚ヒレ肉を用い、繊維方向に直角に厚さ15 mmに切断し、1個の試料重量は30 g前後とし、直径約50 mmの円筒型に成形した。この際、肉は鋭敏なスライサーなどで切断し、できるだけ条件に合致するものを実験に供した。肉の厚さの平均値は15.4±1.2 mm、肉の直径は47.7±3.0 mmであった。成形した試料は、オープン角皿（付属、鉄ホーロー製）にクッキングペーパーを敷き、3×3列の合計9個を置いた。9個の試料の総重量は、270±27 gに調製した。初期品温は18.7±1.5℃であった。オープン角皿上の対角線上の3試料の肉中心部の温度を測定できるよう前報¹⁾と同様の方法で直径1.0~1.5 mmのKまたはEシース熱電対を試料側面から中心まで挿入した。

2. 加熱方法および放置条件

実験に使用したオープンおよびオープン角皿の特徴を表1に示す。今回の実験では、実験時の条件を満たす電気式オープンの入手が困難であったために、結果的にガス式のオープンのみを用いた。また、オープンの詳細な選定は普遍性を高めるために行わず、オープンの設定温度は260~300℃とした。試料の加熱前に予熱を行い、庫内温度が安定していることを確認してから試料9個をのせたオープン角皿を投入して加熱を行った。庫内空気温度は、シース熱電対の先端部をオープン角皿の中央付近の40~50 mm上部になるように設置し、1または2秒間隔で測定した。試料を加熱している時の庫内空気温度の平均値が245℃以上となっているもののみ、実験データとして用いた。

加熱開始後、2番目に温度上昇が早い試料の中心部の温度が70℃に達して1分後を加熱終了とし、直ちにオープンからオープン角皿ごとに取り出した。取り出したオープン角皿を熱伝導率等の物性値などが異なるステンレス、木、木の上に置いたごとくいずれかの上におき、そのまま放置する場合と、アルミホイルでオープン角皿全体を被覆した場合について、それぞれ図1に示すような状態で30分間放置した。覆い無の実験は、すべての実験室が放置媒体3種につき繰り返し数2~3回で行った。覆い有の実験については、1種の放置媒体につき2実験室で行い、3種の放置媒体について分担し、繰り返し数2~3回で実験を行った。

実験時の室温は、21.6~30.1℃（平均値25.9±1.7℃）、湿度は41.5~86.0%（平均値60.0±8.4%）であり、実験に用いた放置媒体の温度は室内温度程度であった。

3. 温度と重量変化の測定および分析

温度測定は自動式データコレクターを用い、加熱終了後5分間までは1または2秒間隔で、それ以降は1~10秒間隔で記録した。放置条件の違いによる肉中心部の温度への影響を分析するために、中心部の温度を測定した3試料のうち70℃に達して1分間加熱した試料の温度測定データから、75℃保持時間、試料の到達した最高温度、加熱終了時の温度と放置中の最高温度との差を求めた。加熱終了後5分以内に解析に用いたすべての試料の中心部の温度は最高温度に達し、その後低下していた。そこで、放置媒体の違いおよび覆いの有無が温度降下に及ぼす影響を調べるために、肉中心部の最高温度と最高温度到達5分後の温度差を求め、温度降下度と定義した。なお、加熱終了時の肉中心部の温度と75℃保持時間の関係を分析する際には、温度を測定したすべてのデータを用いた。

重量測定は、加熱前、加熱終了直後、放置30分後に、オープン角皿上にあるドリップは含めないで試料の重量を電子天秤により測定した。加熱前の重量から加熱終了直後または加熱終了30分後の重量を差引いて、加熱前の重量に対する割合を算出し、重量減少率とした。このとき、放置30分後の重量減少率の算出には9試料の合計を用い、

表1. 実験に使用したオープンおよびオープン角皿の特徴

実験室	オープンの特徴				角皿の特徴（材質：鉄ホーロー製）		
	加熱方式 (ガス式)	可能設定温度 (℃)	庫内容積* (L)	ガス消費量 (kW)	角皿重量 (g)	角皿面積** (cm ²)	重量/底面積 (g/cm ²)
A	強制対流式	~300℃	24.8	6.16	927	896	1.0
B	強制対流式	~300℃	34.3	6.16	931	872	1.1
C	強制対流式	~300℃	23.6	6.16	924	880	1.1
D	強制対流式	~300℃	44.7	5.47	1,602	1,466	1.1
E	強制対流式	~300℃	33.8	6.16	902	880	1.0
F	自然対流式	~300℃	33.3	2.67	760	896	0.8

*庫内容積は、庫内内寸より算出した。

**角皿の底面積は、底面の縦×横で算出した。

実験は、覆い無は、AからFの条件で、覆い有は、ステンレス台はAとB、木の台はCとD、ごとくはEとFの条件で行った。

肉類のオープン加熱終了後の内部温度変化に及ぼす放置条件の影響

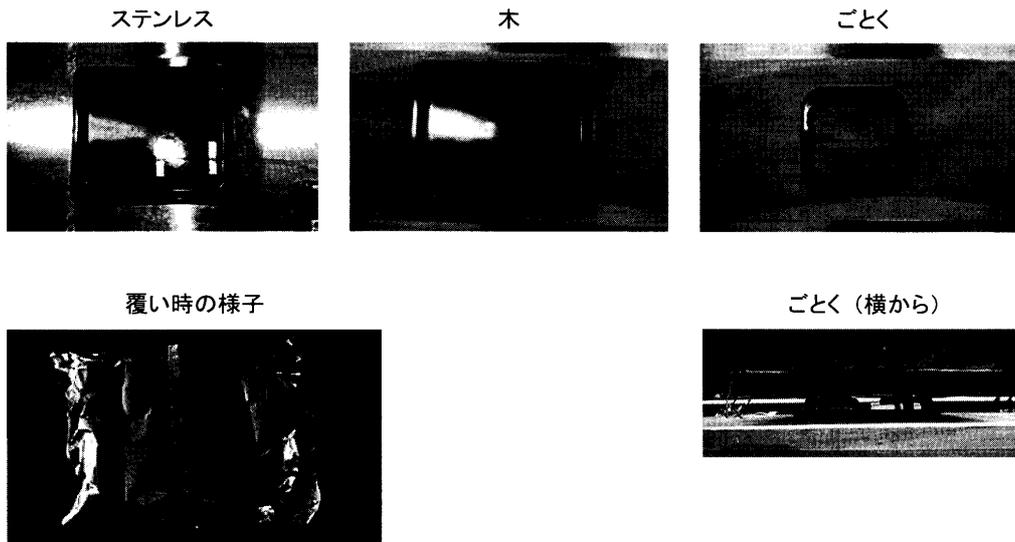


図1. 放置媒体の状態

加熱終了直後の重量減少率は、中心部の温度を測定した試料の隣の試料1個のデータより求めた。

4. 統計処理

測定値は統計解析ソフトエクセル統計を用いて1元配置の分散分析を行い、条件間で差が見られたものについては、TukeyのHSDによる多重比較により有意差検定を行った。

実験結果および考察

1. 放置条件による肉中心部の75℃保持時間への影響

庫内空気温度が245℃以上(平均 $267 \pm 12^\circ\text{C}$)のオープンで試料を加熱した。実験時のオープン庫内空気温度と加熱時間、実験室の室温と湿度を表2に示す。従来より報告³⁾されているように、ガス自然対流式のオープン(条件F)では、庫内空気温度がほぼ同じであっても、ガス強制対流式に比べ加熱時間が顕著に長くなっていた($p < 0.01$)。

70℃1分間加熱をした試料(2番目に肉中心部の温度が70℃に達した試料)について、放置媒体の違いおよび覆いの有無が肉中心部の75℃保持時間に及ぼす影響を図2に示す。覆い無の場合は、ステンレス、木、ごつくのいずれの上にもオープン角皿をおいても、75℃保持時間に有意な差が見られなかった。

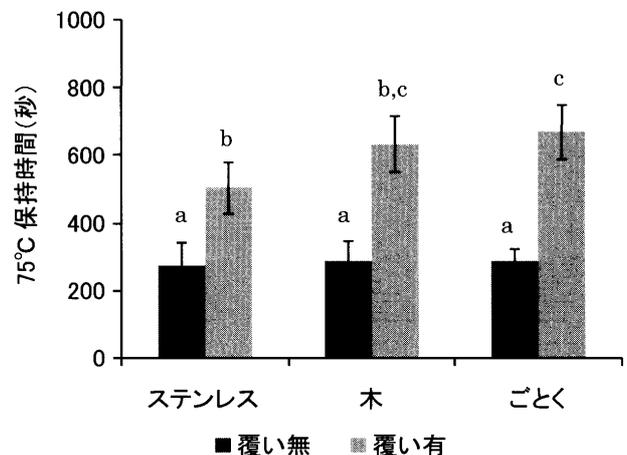


図2. 放置媒体の違いおよび覆いの有無が肉中心部の75℃保持時間に及ぼす影響

覆い無: n=17または18, 覆い有: n=5または6

abc: 異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.01$)

今回選定した放置媒体の材質はステンレス、木、鉄であり、それぞれの300Kにおける熱伝導率は、16.0 (SUS 304)⁶⁾, 0.069 (杉)⁷⁾, 80.3 W/(m·K)⁸⁾程度である。ごつくの場合は、材質が鉄であるため熱伝導率が高いが、オープン角皿との接触面積は小さく、オープン角皿の大半は空気(0.0261 W/(m·K))と接触することになる。そのため、ステンレス

表2. 実験時のオープン庫内空気温度と加熱時間、実験室の室温と湿度

実験室	設定温度 (℃)	庫内空気温度 (℃)	加熱時間 (秒)	実験室の室温 (℃)	実験室の湿度 (%)
A	270	264±4	341±15	25.2±0.9	51.4±5.7
B	260	251±2	362±26	27.9±1.2	60.1±3.3
C	280	273±8	381±35	25.0±0.7	61.9±3.4
D	300	288±4	359±25	24.3±1.0	58.7±4.0
E	280	268±3	383±27	26.9±2.2	69.3±10.5
F	280	259±7	439±17	26.2±0.4	58.6±9.8

各条件: n=12

では木やごとくに比べてオープン角皿からの熱の移動が大きく、冷めやすいと予想した。しかし、今回の結果で示されるように、覆い無の場合は大きな差異はなかった。その理由として、今回使用したオープン角皿はいずれも底面が平らではなく、中央部分の上に凸、周辺部分は下に凸状であったため、放置媒体3条件ともにオープン角皿と放置媒体との接触面積が小さく、放置媒体とオープン角皿の間に隙間(空気層)ができ、その結果、放置媒体の物性値の影響が小さくなったと推定される。

一方、アルミホイルで覆いをするにより、いずれの放置媒体においても、肉中心部の温度が75℃以上を保持した時間は、覆い無に比べ約2倍前後に延長された。これは、フライパンでハンバーグを焼いた時の「ふた」の効果と類似しており²⁾、アルミホイルの存在により試料ならびにオープン角皿からの放熱と、肉からの水分蒸発による冷却が抑えられたためと推定される。覆いをしてごとくの上に置いた場合は、覆いをしてステンレスに置いた時と比べ、75℃保持時間は1.32倍に延長された($p < 0.01$)。木(覆い有)に置いた場合は、ステンレス(覆い有)に置いた時と比べ、有意差はみられないものの75℃保持時間は1.26倍に延長された。

データを詳細に検討したところ、今回の6つの実験条件のうち、一つのオープン角皿(条件F)は、75℃保持時間が短い傾向にあった。オープン角皿の材質は、条件AからFですべて同じであったが、条件Fのオープン角皿は他のものと比べ単位底面積当たりの重量(g/cm^2) (以下「重量/底面積」と記す)が小さく、熱容量が小さいと考えられる。図2で示したように、覆い無では放置媒体により75℃保持時間に差が見られなかったため、3つの放置条件の結果をまとめ、重量/底面積 ≥ 1 と重量/底面積 < 1 のグループに分け、再解析を行った。その結果、重量/底面積 < 1 のオープン角皿では、75℃保持時間は 201.8 ± 41.0 秒であり、重量/底面積 ≥ 1 のオープン角皿の 297.3 ± 47.0 秒に比べ、75℃保持時間は約2/3に減少しており(図3)、オープン角皿の重量/底面積は、放置時における肉中心部の温度に影響を及ぼす要因の一つと推定された。

2. 加熱終了後の余熱による肉中心部の温度上昇

試料の到達した最高温度を求め、放置媒体の違いおよび覆いの有無が加熱終了後の余熱効果による肉中心部の温度上昇に及ぼす影響を図4に示す。覆い無の場合、加熱終了時点での肉中心部の温度の平均値は、 $78.1 \pm 1.5^\circ\text{C}$ であった。加熱終了後の放置中の温度上昇は、ステンレス、木、ごとくのいずれも 5°C 前後であり、放置媒体間に有意差は見られず、温度上昇効果に違いが見られなかった。

アルミホイルで覆いをするにより、ステンレスおよび木の場合は肉中心部の温度が覆い無に比べて前者は 2.6°C 、後者は 3.1°C 高くなる傾向であったが、有意差はみられなかった。ごとくの場合には覆いにより 3.8°C の温度上

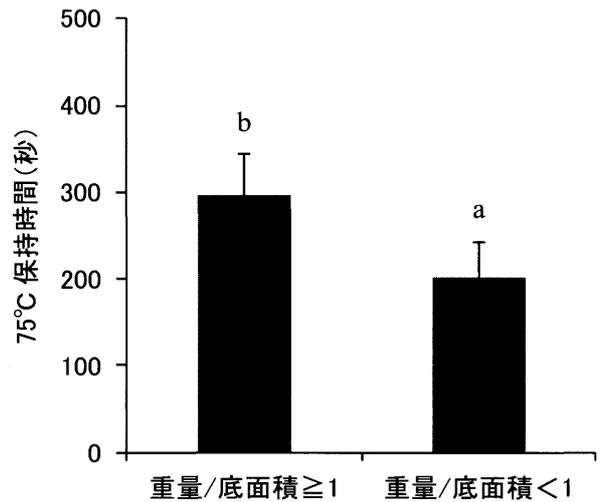


図3. オープン角皿の違いが肉中心部の75℃保持時間に及ぼす影響(覆い無)

重量/底面積 ≥ 1 : $n=44$, 重量/底面積 < 1 : $n=9$

ab: 異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.01$)

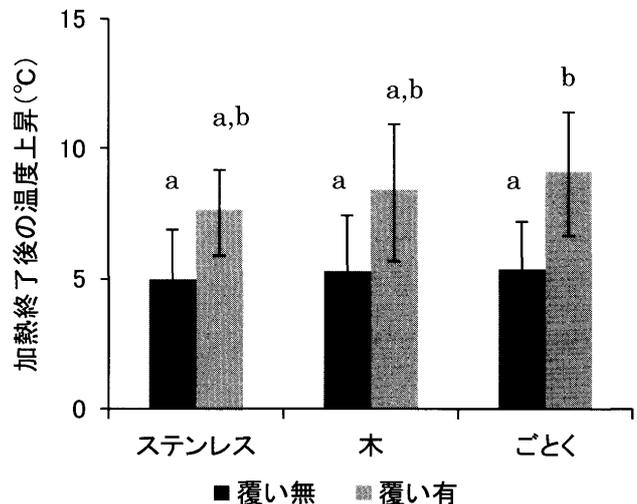


図4. 放置媒体の違いおよび覆いの有無が加熱終了後の余熱効果による肉中心部の温度上昇に及ぼす影響

覆い無: $n=17$ または 18 , 覆い有: $n=5$ または 6

ab: 異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.01$)

昇がみられ、肉中心部の温度は 88°C 近くまで上昇しており、覆い無に比べて有意に温度上昇が大きいことが明らかとなった($p < 0.01$)。また、覆いをした場合も、放置媒体の違いによる肉中心部の温度上昇に差はみられなかった。

オープン角皿の違いが加熱終了後の余熱効果による肉中心部の温度上昇に及ぼす影響(覆い無)を図5に示す。重量/底面積 ≥ 1 のオープン角皿では、 $5.7 \pm 1.8^\circ\text{C}$ の温度上昇であったが、重量/底面積 < 1 のオープン角皿では、 $2.8 \pm 1.3^\circ\text{C}$ と肉中心部の温度上昇が有意に低く($p < 0.01$)、肉中心部の温度上昇にオープン角皿の保有する熱容量が影響を及ぼすことが明らかとなった。

3. 最高温度到達後の温度降下

放置媒体の違いおよび覆いの有無が温度降下度に及ぼす

肉類のオープン加熱終了後の内部温度変化に及ぼす放置条件の影響

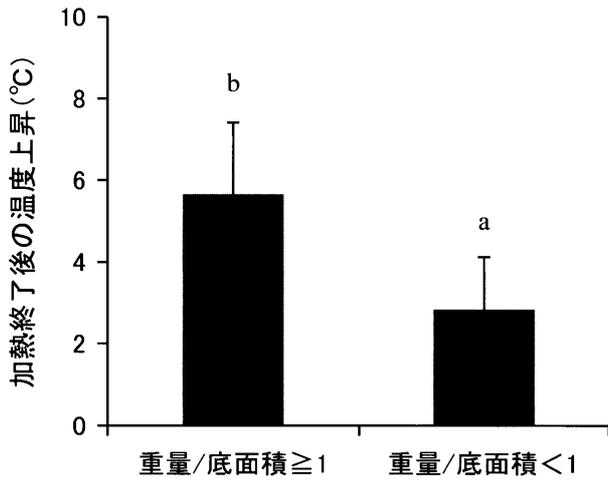


図5. オープン角皿の違いが加熱終了後の余熱効果による肉中心部の温度上昇に及ぼす影響（覆い無）
重量/底面積 ≥ 1 : n=44, 重量/底面積 < 1 : n=9
ab: 異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.01$)

影響を図6に示す。温度降下度は、放置媒体による差は認められず、覆い無の場合には、16.1~17.7°C/5分、覆い有の場合には、7.5~9.9°C/5分となり、覆いをすることで温度降下度が顕著に抑制されることが明らかになった。オープン角皿の違いにより、温度降下度に影響は見られなかった（図7）。

放置30分間の経時的変化を調べると、覆い無の場合は放置媒体による差はみられず、放置10分後で51~53°C、放置20分後で33~37°C、放置30分後で27~30°Cになった。覆いをした場合には、覆い無に比べ温度の低下が抑制されており、木とごつくでは、ステンレスに比べ有意に温度降下が緩やかな傾向であった。放置10分後において木では 76.0 ± 2.8 °C、ごつくでは 75.4 ± 2.0 °Cと75°C以上を保持しており、放置30分後においても両者ともに47~48°Cを保持していた。

4. 加熱終了直後および放置30分後の重量減少率

加熱中および放置中の水分を主とする成分の蒸発やドリップの程度を調べるために、重量変化の測定を行った。図8に加熱終了直後および放置30分後の重量減少率を示す。加熱終了直後では肉の重量は22~24%減少していた。放置30分の間に、重量はさらに減少し、加熱終了直後に比べ約5~8%の重量の減少が観察され、最終的には28~32%減となった。覆い無の場合には、いずれの放置媒体においても重量減少率は28.3%前後であり、差がみられなかった。覆い有の場合には、有意差はみられなかったが、ごつくではステンレスや木に比べ、重量減少率が増加していた。この理由として、ごつくでは75°C保持時間が長く、最高温度も高かったために水分などの蒸発やドリップが多くなったためと推定される。覆いの有無および放置媒体の種類による有意差は見られなかったが、放置中の重量減少率が覆い無よりも覆い有の方が大きくなる傾向が見られた。これ

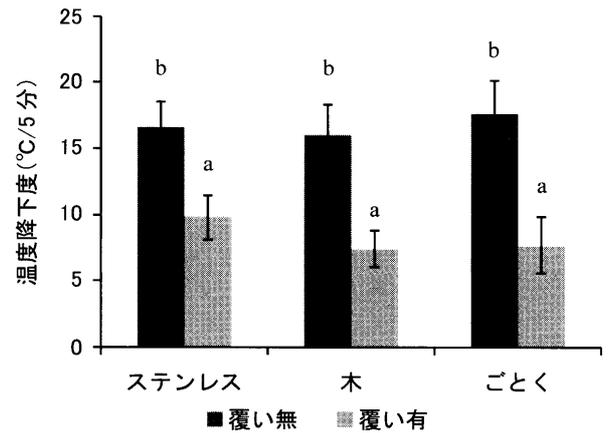


図6. 放置媒体の違いおよび覆いの有無が温度降下度*に及ぼす影響

覆い無: n=17または18, 覆い有: n=5または6

ab: 異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.01$)

*温度降下度(°C/5分)=最高温度(°C)

-最高温度到達5分後の温度(°C)

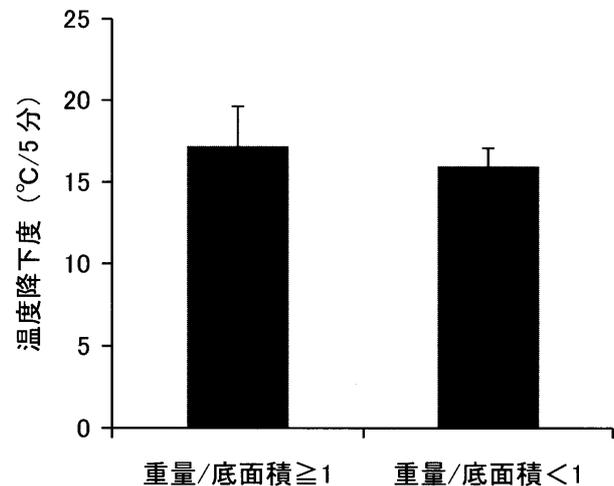


図7. オープン角皿の違いが温度降下度*に及ぼす影響（覆い無）

重量/底面積 ≥ 1 : n=44, 重量/底面積 < 1 : n=9

*温度降下度(°C/5分)=最高温度(°C)

-最高温度到達5分後の温度(°C)

は、覆いをすることによって試料表面からの水分蒸発は抑制されると考えられるが、高温に保持される時間の延長により試料からのドリップが増加したためと推察される。

5. 加熱終了時の肉中心部の温度と75°C保持時間の相関

肉中心部の温度を測定したすべての試料について、加熱終了時の肉中心部の温度と75°C保持時間の関連を図9に示す。本実験条件下では、加熱終了時に70°Cに達していないものがあったが、ばらつきがあるものの、図9からも余熱により75°C1分を保持していることが明らかとなった。データの中には、加熱終了時の温度が80°Cであっても75°C保持時間が131秒と、加熱終了時の温度が70°C前後の場合と75°C保持時間が同程度のものもあった。覆い無の場合には、放置媒体の種類による差がなく、加熱終了時

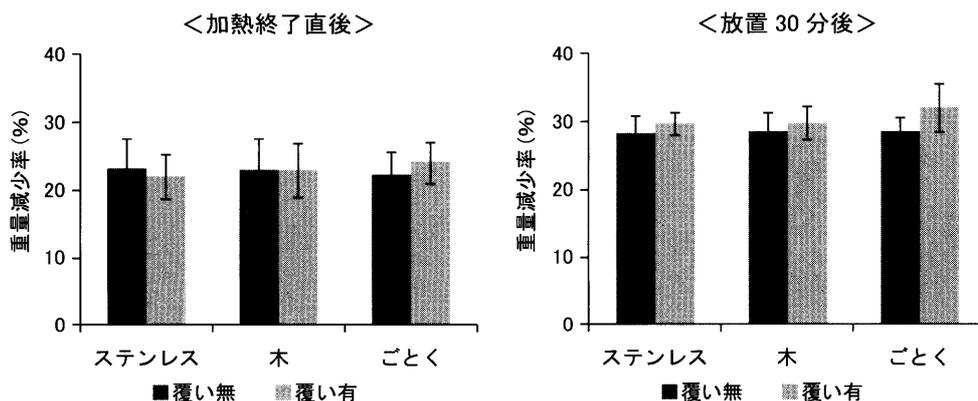


図 8. 放置媒体の違いおよび覆いの有無が加熱終了直後、放置 30 分後の重量減少率*に及ぼす影響
 覆い無：n=17 または 18, 覆い有：n=5 または 6
 *加熱終了直後の重量変化率は指定した 1 個の肉で、また、放置 30 分後の重量変化は 9 個の肉の総重量で評価した。

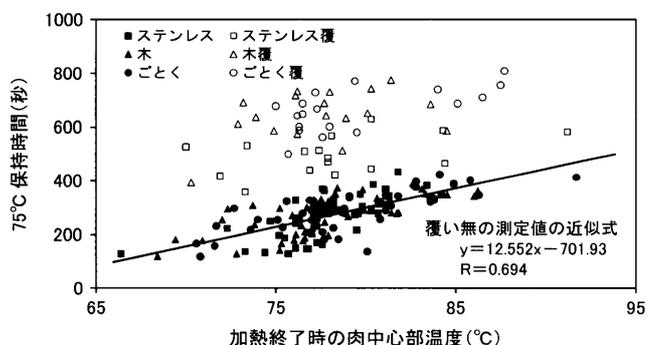


図 9. 加熱終了時の肉の中心部温度と 75°C 保持時間の関係

の肉中心部の温度と 75°C 保持時間の間に相関がみられた (相関係数 0.694) (図 9)。

アルミホイルで覆いをした場合は、全体的に 75°C 保持時間が大幅に長くなった。各実験室で覆いの仕方を統一したものの 75°C 保持時間にばらつきがみられ、高い相関は得られなかった。この結果より、75°C 保持時間は加熱終了温度よりも覆いによる影響が大きいことが明らかになった。また、本実験で取り扱った条件パラメータ以外にも、さまざまな要因により 75°C 保持時間に影響を及ぼす可能性があることが推察される。今回のように底面が平らではないオープン角皿の場合には、放置する媒体との間に空気層ができ、媒体の材質の影響を受けにくいと予想される。オープン角皿の底面が平らで媒体との接触面積が大きくなるようなケースについては今後検討が必要である。また、本実験で内部温度を測定した試料は 9 個のうち 3 個であること、自然対流式のオープンなど加熱能の低いオープンを使用した場合は余熱効果が小さくなる可能性があることなどから、安全性に配慮するためには覆いをするのが有効であろう。

6. 数値計算による簡便な予測方法の検討

1) 伝熱モデル

以上の実測結果をふまえて、簡易な伝熱モデルを用いた

数値計算により、オープン加熱終了後の各種放置条件下での食品の温度変化の予測を試みた。伊與田らは、高温気流中で気流条件が時間と共に変化する条件下で、球状試料を乾燥するモデル⁹⁾を提案しており、その計算方法を今回の実験条件に適用した¹⁰⁾。

図 10 に伝熱モデルの概略を示す。①試料は、②オープン角皿上に置かれている。試料の上側の表面から、加熱中はオープン庫内空気から対流による伝熱ならびにオープン庫内壁面からふく射による伝熱により加熱され、放置中は実験室内の空気による対流と実験室壁面へのふく射による伝熱で冷却される。図 10 は放置中の状態を示しており、実験結果をふまえてオープン角皿の下面の③空気層を介して④放置媒体に伝導による伝熱により下面からも冷却される。本解析では、計算時間の短縮と伝熱モデルの簡便化のため、加熱および放置中の水平方向の熱移動は考慮せず、垂直方向の 1 次元のみとした。また、試料内の水分移動、温度と水分量変化による形状と物性値の変化、ドリップとその影響は考慮しなかった。

図 10 の①試料と②オープン角皿間の熱抵抗は、蒸発の有無にかかわらず 0.01 K/W で与えた。②オープン角皿と

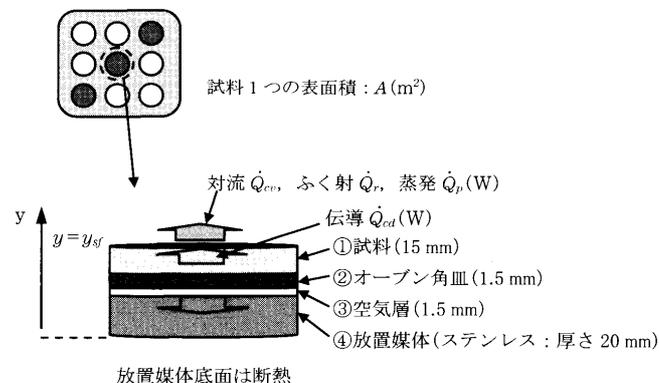


図 10. 伝熱モデルの概略 (カッコ内は Case 1 の場合の値)

肉類のオープン加熱終了後の内部温度変化に及ぼす放置条件の影響

④放置媒体間の熱抵抗は、双方に凹凸があることなどから、
 ③空気層に相当する熱抵抗 (25 K/W = 層厚さ/(空気の熱伝導率×面積)) があるものとした。このとき、空気層を挟んで向かい合う両面でふく射による伝熱も存在するが、両面の温度差が小さくそれぞれの放射率が不確定で、また、高温側のオープン角皿の温度は 120℃ 程度と予想されたために、熱抵抗の値を仮定する際にふく射の影響は考慮しなかった。ごとくを放置媒体とした場合は、オープン角皿底面積 1% がごとくと密着し、接触しない部分は試料表面と同じく対流による伝熱により放熱するものとした。試料下面で、試料が 100℃ に達した後に加えられる熱は水分蒸発に使われるとした。

つぎに境界条件となる部分での熱収支モデルについて述べる。図 10 中の y 方向を正として熱の移動を考えると、試料の上面、オープン角皿の下面ならびに放置中の試料の上面では、気流方向への対流による伝熱 \dot{Q}_{cv} (W)、ふく射による伝熱 \dot{Q}_r (W) と、試料の上面では蒸発に起因する放熱 (水分蒸発による吸熱) による伝熱 \dot{Q}_p (W) がある。このとき、試料内部から表面への伝導による伝熱を \dot{Q}_{cd} (W) とすると、試料表面では以下の式が成り立つ。

$$\dot{Q}_{cd} = \dot{Q}_{cv} + \dot{Q}_r + \dot{Q}_p \quad (1)$$

このとき、

$$\dot{Q}_{cv} = h(T_{sf} - T_g)A \quad (2)$$

$$\dot{Q}_r = \varepsilon\sigma(T_{sf}^4 - T_g^4)A \quad (3)$$

ここで、対流熱伝達係数 h (W/(m²·K))、 T_{sf} (℃) は試料表面温度、 T_g (℃) は空気温度、 A (m²) は表面積 (試料の上面)、 ε (-) は放射率、 σ (W/(m²·K⁴)) はステファン・ボルツマン定数である。また、水分蒸発に伴う吸熱をフィックの法則と等温自由空間内の一方拡散式¹¹⁾ から得られる以下の式で求めた¹²⁾。

$$\dot{Q}_p = A\gamma h_D \rho \ln((p_T - p_{sg}) / (p_T - p_{ssf})) \quad (4)$$

ここで、試料表面の水蒸気分圧 p_{ssf} (kPa)、周囲の気流の水蒸気分圧 p_{sg} (kPa)、蒸発潜熱 γ (J/kg)、試料表面と空気の平均温度での水蒸気密度 ρ (kg/m³)、全圧 (大気圧) p_T (kPa) である。

物質伝達係数 h_D (m/s) は Chilton-Colburn の相似則¹³⁾ が成り立つとし、対流熱伝達係数より近似的に $h_D = h/710$ として求めた。

以上に述べたモデルに基づいて、所定の境界条件のもと

で熱伝導方程式を中心差分法により離散化して解き、試料中心部の温度変化を予測した。分割数は、試料 7、オープン角皿 2、放置媒体 7 とした。これらの計算は表計算ソフトエクセルと VBA (Visual Basic for Applications) を用いて行った。計算時間は 1 条件約 100 秒であった。

2) 計算条件

計算を行った条件を表 3 に示す。実測結果と比較するために、表で示す 7 つの Case で計算を行うことにした。前述の簡易モデルに基づいて計算を行うためには、実際の実験におけるそれぞれの値が必要となるが、全てのパラメータは把握できていないため、これまでの実測結果をふまえて、一部仮定した値も含めて下記とした。

まず、加熱中の気流条件として、オープン庫内空気温度は加熱開始後 80 秒で 280℃ となり、その後一定とした。庫内の水蒸気分圧 (湿度) はガスの燃焼により生じる水蒸気と試料から蒸発する水蒸気を考慮して加熱開始後 200 秒で 24 kPa に達し、その後一定として与えた。対流熱伝達係数 h は 50 W/(m²·K) とした。また、放置時の気流条件として、気温は 26℃、水蒸気分圧 2.5 kPa (相対湿度 74%)、対流熱伝達係数 (試料上面、放置時のごとくと接触していないオープン角皿下面) は 10 W/(m²·K) で一定とした。

オープン加熱中の試料、および放置時の試料の放射率 ε は 0.5 とし、試料を取り囲む周囲壁面の面積は試料に比べて十分大きく、壁面の温度は空気温度 T_g と同じとした。

試料表面の水分活性 Aw は、一般に表面含水率の減少と共に減少する。本計算では、加熱中の温度変化が実測値とほぼ一致するように、近似的に $Aw = 1 - \text{重量減少率} \times 2$ で与えた。なお、覆い有の場合は、重量減少率にかかわらず $Aw = 0$ とし、試料表面で水分蒸発が起こらないとした。式(4)における p_{ssf} は、各時間での試料表面温度 T_{sf} における飽和蒸気圧 p_{ssat} より、 $p_{ssf} = p_{ssat} \times Aw$ で求めた。飽和蒸気圧は以下の Antoine 式で求めた。

$$P_{ssat} = 10^{(7.07406 - 1657.46 / (227.02 + T_{sf}))} \quad (5)$$

試料 (肉) の物性値は、熱伝導率 0.5 W/(m·K)¹⁴⁾、比熱 3,433 J/(kg·K)¹⁵⁾、密度 1,130 kg/m³ とした。また、加熱前の試料温度は 20℃ とした。

以上の条件で計算を行い、加熱中に肉中心部の温度が 70℃ に達して 60 秒後に、境界条件を放置条件に変化させ、約 1,200 秒経過するまで計算を行った。

表 3. 計算条件

	放置媒体*	空気層	角皿の厚さ	覆いの有無
Case 1	ステンレス	有 (1.5 mm)	1.5 mm	無
Case 2	ステンレス	無 (0 mm)	1.5 mm	無
Case 3	ステンレス	有 (1.5 mm)	1.0 mm	無
Case 4	ステンレス	有 (1.5 mm)	1.5 mm	有
Case 5	木	有 (1.5 mm)	1.5 mm	無
Case 6	ごとく	無・媒体と 1% 接触	1.5 mm	無
Case 7	ごとく	無・媒体と 1% 接触	1.5 mm	有

*放置媒体の厚さは 20 mm とした。

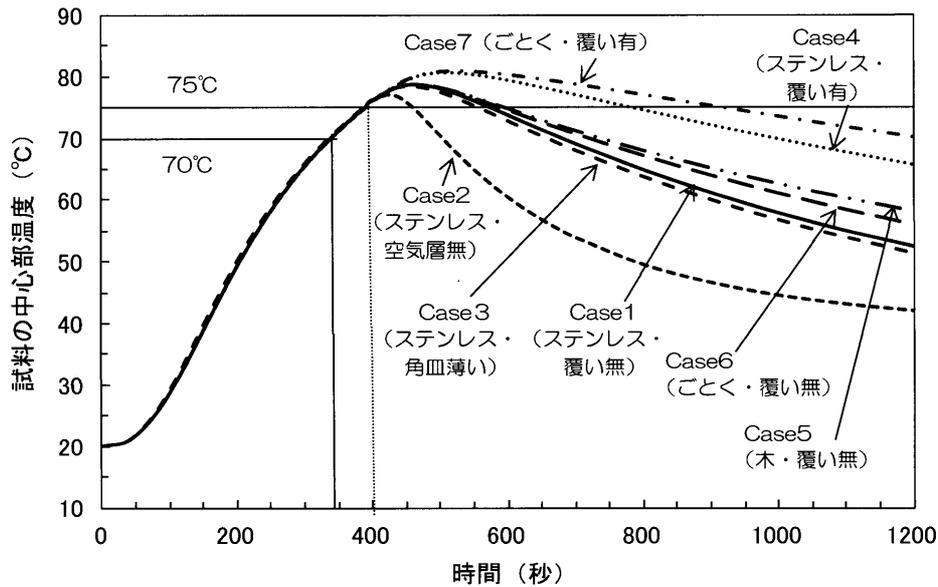


図 11. 計算による肉中心部温度の予測結果
*各計算条件 (Case 1~7) は表 3 を参照

3) 計算結果

図 11 に計算による肉中心部温度の予測結果を示す。加熱時の条件 (対流による伝熱, 庫内の温度と湿度の時間変化) は Case 1~7 で同じであり, 約 340 秒の時点で 70°C に到達した。そこから 60 秒後の 400 秒の時点において, 計算条件を加熱から放置に変更した。放置が始まってからも, 中心部温度は数十秒にわたって上昇を続け, その後, 低下することがわかる。Case 1, Case 5, Case 6 は 3 つの放置媒体で覆い無の条件, Case 4, Case 7 は, ステンレスとごとかの覆い有の条件であり, 覆いをすることで, 75°C 以上の保持時間が大幅に伸びていることがわかる。Case 2 は, オープン角皿が放置媒体であるステンレスに密着したとした場合の計算結果であり, 他の条件に比べて急速な温度低下が見られる。

図 11 に示したこれらの計算結果から, 各計算条件 (Case 1~7) での肉中心部の 75°C 保持時間の計算値を求め, それらを実測値と比較した結果を図 12 に示す。覆い無の Case 1, Case 5, Case 6 についてみると, 放置媒体の物性値を変えて計算したものの, 実測結果と同様に, 大きな差異はなかった。その原因として, オープン角皿と放置媒体の間に 1.5 mm の空気層があるため, 放置媒体の熱物性の影響が上面からの放熱量と比較して相対的に小さくなったためと考えられる。一方, 覆い有の Case 4, Case 7 と覆い無の Case 1, Case 6 を比較すると, 大幅に 75°C 保持時間が伸びており, また, 増加量の傾向も, 実測結果と一致した。蒸発を抑制する覆いをするすることで, 保持時間が増加すると共に, 放置媒体の影響が出やすくなるのが計算結果からも示された。これらの計算には, オープン角皿と放置媒体の間の熱抵抗として前項 1) 伝熱モデルで述べた値を用いているが, 仮に両壁面の放射率を 0.8 とし, ふ

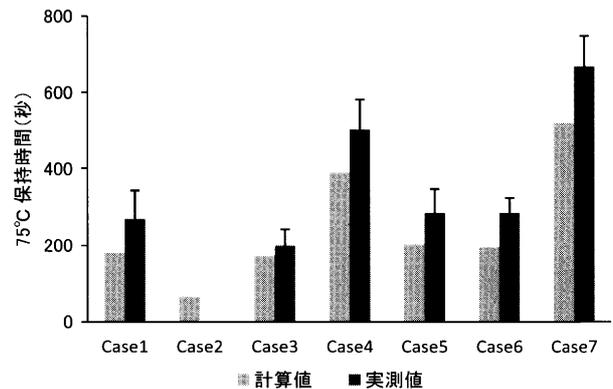


図 12. 各計算条件 (Case 1~7)* での肉中心部の 75°C 保持時間の計算値と実測値の比較
*各計算条件 (Case 1~7) は表 3 を参照

く射を考慮して 75°C 保持時間を試算したところ, 計算結果の傾向は上述と同じであるものの, Case 4 で約 9%, その他で最大 3.9% 短くなった。

つぎに, オープン角皿が放置媒体と密着する場合の Case 2 は Case 1 と比較すると, 75°C 保持時間が大幅に短縮することがわかる。角皿の厚さが 1.0 mm の Case 3 と Case 1 との比較からオープン角皿の厚さ (重量/底面積) の影響についてみると, 計算結果でも薄い方が減少する傾向が見られるものの実測結果ほど顕著ではなかった。これは計算時, オープン角皿の平面方向の熱伝導を無視しているため, オープン角皿の熱容量が過小評価されているためと考えられ, さらに, このことは, 全条件において実測結果よりも計算結果の方が, 75°C 保持時間が短くなった原因の一つと考えられる。

多くの近似を導入した簡易化したモデルを用いた予測において, 実測結果と同様の傾向を得ることができ, モデル

肉類のオープン加熱終了後の内部温度変化に及ぼす放置条件の影響

の有効性を明らかにすることができた。なお、引き続き、加熱時の条件、食材の種類や形状・物性、さまざまな放置条件の簡易なモデル化を推進するとともに、それらの適用範囲の検証などが必要である。

要 約

オープン加熱終了後の肉の温度変化（余熱）に及ぼす加熱条件ならびに放置媒体の種類と覆いの有無等の影響を実測により検討した。さらに、簡略化した伝熱モデルを用いた数値計算により余熱を含めたオープン加熱における肉中心部の75℃保持時間の予測を試みた。

1. 熱物性の異なる3種類の放置媒体（ステンレス、木、ごとく）を用いたところ、放置中の肉中心部の温度変化に顕著な差は認められなかった。これは、放置媒体とオープン角皿の接触面積が小さいことに起因すると推察される。
2. 覆いによる余熱の効果は大きいことが実証できた。
3. 簡略化した計算モデルを用いて肉中心部における75℃保持時間を予測した結果、実測結果と同様の傾向が得られ、モデルの有効性を明らかにすることができた。

本研究は、日本調理科学会加熱調理研究委員会の一つのテーマとして共同研究したものである。

文 献

- 1) 日本調理科学会加熱調理研究委員会 余熱研究グループ (2011), 肉類の加熱における余熱の有効利用, 日調科誌, **44**, 72-78
- 2) 日本調理科学会近畿支部 焼く分科会 (2004), 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, 日調科誌,

37, 366-374

- 3) 洪川祥子 (1998), 調理における加熱の伝熱的解析および調理成績に関する研究, 日本家政学会誌, **49**, 949-958
- 4) 杉山久仁子, 洪川祥子 (1998), 食品の熱板焼きにおける加熱条件推定法の検討, 熱物性, **12**, 191-197
- 5) 貝田さおり, 玉川雅章, 洪川祥子 (1999), 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, **50**, 147-154
- 6) 日本機械学会 (2009), 「伝熱工学資料 (改訂第5版)」, (社) 日本機械学会, 東京, p. 285
- 7) 日本機械学会 (2009), 「伝熱工学資料 (改訂第5版)」, (社) 日本機械学会, 東京, p. 289
- 8) 日本機械学会 (2009), 「伝熱工学資料 (改訂第5版)」, (社) 日本機械学会, 東京, p. 282
- 9) Iyota, H., Inoue, T., Yamagata, J. and Nishimura, N. (2008), Effect of Time-Dependent Humidity Profiles from Air to Superheated Steam on Drying of a Wetted Starch Sphere, *Drying Technology*, **26**, 211-221
- 10) 伊與田浩志, 山形純子, 高砂裕行 (2010), 表計算ソフトを用いた各種オープンの加熱特性の検討, 日本調理科学会平成22年度大会研究発表要旨集, p. 113
- 11) Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N. (2002), Concentration Distributions in Solids and in Laminar Flow, "Transport phenomena revised second editio", John Wiley and Sons, Inc, New York, pp. 545-551
- 12) 一色翔悟, 伊與田浩志, 井上保, 山形純子 (2009), 湿潤材料の温度測定による過熱水蒸気と空気混合比の簡易測定法, 日本機械学会2009年度年次大会講演論文集, **3**(09-1), 101-102
- 13) 井出光夫, 今駒博信, 小野実信, 川合純夫, 鈴木睦 (1999), 調湿・水冷却・乾燥, 「化学工学便覧, 改訂6版」, 化学工学学会編, 丸善, 東京, p. 759
- 14) Mohsenin, N. N. (林弘通監訳) (1985), 「食品の熱物性」, 光琳, 東京, p. 178
- 15) 日本熱物性学会 (2008), 「新編熱物性ハンドブック」, 養賢堂, 東京, p. 527

(平成23年1月24日受付 平成23年6月3日受理)

和文抄録

オープン加熱終了後の肉の温度変化（余熱）に及ぼす加熱条件ならびに放置媒体の種類と覆いの有無等の影響を実測により検討した。さらに、簡略化した伝熱モデルを用いた数値計算により余熱を含めたオープン加熱における肉中心部の75℃保持時間の予測を試みた。

熱物性の異なる3種類の放置媒体（ステンレス、木、ごとく）を用いたところ、放置中の肉中心部の温度変化に顕著な差は認められなかった。これは、放置媒体とオープン角皿の接触面積が小さいことに起因すると推察される。覆いによる余熱の効果は大きいことが実証できた。簡略化した計算モデルを用いて肉中心部における75℃保持時間を予測した結果、実測結果と同様の傾向が得られ、モデルの有効性を明らかにすることができた。