

令和元年 12 月 23 日

第 3 回 HAKKO 熱の実験コンテスト

鋳鉄製フライパンの伝熱性能

神奈川大学 工学部機械工学科

原村研究室 山下遼太

1. 概要

本研究は「鋳鉄製フライパンを用いると肉が上手く焼ける」という話について、そのメカニズムを伝熱力学の観点から明らかにすることを目的とする。フライパンは焼く、炒める調理器具の最も基本的なものであり、この「焼く」調理における加熱の原理として、(1) 熱伝導、(2) 食材から発生して浸透する水蒸気による加熱、(3) 熱放射を考え、それぞれの寄与を定量的に評価する。特に熱放射に関しては、食材に多く含まれる水は遠赤外線を良く吸収するため、遠赤外線が食材の深部まで到達すると考えにくい、焼いたときにできる水分が少ない層は異なることが考えられるため、その影響を実験的に明らかにする。

2. 研究背景

2019年1月10日にテレビ東京で放送された番組「カンブリア宮殿」の中で錦見鋳造の開発した「魔法のフライパン」という鋳鉄製のフライパンを使うと肉が上手く焼けるという話があった⁽¹⁾。錦見鋳造によると、従来の鋳鉄製鍋の厚さが4~5mmであるのに対して魔法のフライパンは1.5mmなので熱伝導性が高く、肉の表面を素早く焼くことが出来るという。また、鋳鉄に含まれる炭素が遠赤外線を出すことで加熱効果が高まり、一方でフライパンの温度も下がりにくいという⁽²⁾。特に魔法のフライパンには炭素が多く含まれており炭素の遠赤外線効果による加熱効果が大きいとされている。

3. 目的

本研究は、鋳鉄製フライパンを用いると肉が上手く焼ける原因等について伝熱工学の観点から解明することを目的とする。肉が焼ける際、熱伝導によって熱が伝わるほかに、肉に含まれる水分が蒸発してより低温の部分まで浸透して凝縮・加熱をするという「蒸す」効果が存在するものと推定される。また、テレビ放送で指摘されていた放射による伝熱も調べる必要がある。そのために、フライパンの表面温度の測定、加熱時の肉内部の温度分布の測定、各材質のフライパンの放射強度の測定、放射による肉内部の温度分布の測定、以上の4つの実験を通して熱伝導、蒸す、熱放射による加熱を分離して、各々の効果について実験的に明らかにする。比較対象としてステンレス製フライパンでも測定する。ステンレス鋼は、鋳鉄に比べて熱伝導率と放射率がともに低く、これらの影響を評価する。

4. 実験機器

4.1 全測定で用いた実験機器

本実験ですべての測定に使用する実験機器について表1に示し、それぞれの説明を箇条

書きで示す。

表 1. 実験機器

名称	製造企業	型番
カートリッジヒータ	八光電機	H L C 1407
データロガー	KEYSIGH	Agilent34972A
デジタルコントローラ	E5CC-CQ0ASM-000	OMRON
ミニチュアコネクタ	OMEGA	SMPW-K-M(F)
カプトンテープ	寺岡製作所	650#50
スライドトランス	TOKYO-RIKOSHA CO.LTD	RSA-30
アルメル熱電対 (K型)	OMEGA ENGINEERING,INC.	TFAL-005-50 FT
クロメル熱電対 (K型)	OMEGA ENGINEERING,INC.	TFCY-005-50 FT
シース熱電対 (E型, 接地型)	CHINO	SUS316

- ・カートリッジヒータ：本研究の熱源として出力400Wのヒータを5本用意し銅板に差し込みスライドトランスで電圧を調整することで温度コントロールをしている。
- ・アルメル・クロメル熱電対 (K型)：フライパンの表面温度と肉の内部の温度の測定に使用。線径0.25mmのテフロン被覆線で、接点付近のみ被覆をはがして溶接している。
- ・シース熱電対 (E型)：銅板内の温度のモニタリングをするために使用
- ・データロガー：熱電対から送られてくる信号を処理しパソコンにデータを送るのに使用。また、各チャンネルに接続された箇所の温度のモニタリングに使用。
- ・デジタルコントローラ：フライパンの表面温度をモニタリング維持するのに使用。
- ・カプトンテープ：フライパン表面に熱電対を密着させるのに使用。
- ・スライドトランス：カートリッジヒータへ伝わる電圧を調整するのに使用。

4.2 加熱装置

実験で使用する加熱装置について説明する。実際の調理においては加熱にガスコンロやIHコンロを用いるが、実験ではフライパンを安定した温度に設定できるよう、カートリッジヒータで加熱される銅ブロック（加熱ブロック）の上にフライパンを設置して肉を焼いた。特に「魔法のフライパン」は底面（炎が当たる側）に放射状と円環状の突起があるので、フライパンの設置の際、銅ブロック上面とフライパンの間にスズを流して熱抵抗を低減した。スズを溶かす際には銅ブロック間がスズで満たされ、フライパン底面とスズの間に空気が入り込まないように、以下のような手順で真空グローブボックス中でスズを流す作業をおこなった。銅板の溝部分にスズ250gを敷きスズの上にフライパンを乗せた状

態でフックのボルトを締めてフライパンを固定し、スズが溶け出したときにフライパンの底面が銅板に密着するようにフライパンの上に2kgのおもりを乗せている。また、溶けたスズが流れていかないようにフットジャッキの高さを調整し、銅ブロックを水平にしている。ボックス内な空気を抜いて真空状態にした後に加熱を開始し、モニターの温度が250°C程でスズが溶けていることを確認出来たらボックス内にアルゴンガスを流し入れて冷却する。十分冷却したのちにフタを開けてフックのボルトを締め直し、フライパンが十分に固定されていることを確認してからボックスから加熱装置を取り出し、測定に使用する。

4.2.1 加熱ブロック

図1にこの実験のために製作した加熱ブロックを示す。加熱ブロックの寸法は縦200mm横300mm厚さ20mmであり、上面にはスズを流し入れるための縦横180mm深さ3mmの池を作った。また、銅板の上面の四隅とその内側には銅板を支えるフットジャッキを通す穴とフライパンを固定するフックを通す穴が開いている。フックはボルトを締めることでフライパンの底面と銅板が密着するようにしてあり、また放射に関する測定の際はフライパンをさかさまに固定するための役割を果たしている。加熱ブロックの正面には直径8mmの全貫通の穴が45mm間隔で計5つ開けてカートリッジヒータを挿入している。また中央から20mmの位置に深さ80mmの穴をあけて直径1.6mmのシース熱電対を挿入して加熱ブロックの温度を測定する。



図 1.銅板加熱ヒータ

4.3 試料

実験で使用する試料について図 2 に示す。試料の構成は以下のようにになっている。

- ・豚肉のロースを半分に切ったもの（概ね 70mm×70mm）を 1 つの試料とし、厚さは約 15 mm のものを用いている。
- ・熱電対を挿入する際に測定点がずれないようにするため肉を冷蔵庫内で 2 時間程度冷凍し、取り出して電子レンジで 20 秒加熱した後に半冷凍の状態です熱電対を挿入する。
- ・測定点は伝熱面からの距離が 2 mm, 4 mm, 6 mm の 3 点であり、図 3 のアルミブロックを用いて肉内部にそれぞれの熱電対を水平に挿入する。
- ・熱電対をミニチュアコネクタのオスに接続し、この状態でキッチンペーパーを敷いた皿に置き一晩冷蔵庫内で一様温度にしている。
- ・冷蔵庫から出し、素早くデータロガーの各チャンネルに接続されているミニチュアコネクタのメスに接続して測定を行う。



図2. 豚肉ロース

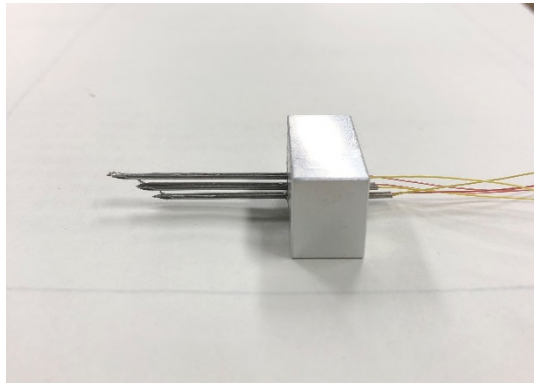


図3.アルミブロック

4.4 フライパン

この実験で使用する2種類のフライパンについて説明する。

図4に示す「魔法のフライパン」は、寸法が外径260 mm、底径160 mm、深さ45 mmであり底の突起を含めない厚さは1.5 mmである。材質は鋳鉄であるが、テレビ番組⁽¹⁾によると通常の鋳鉄の2倍の炭素を含むようである。

ステンレス製フライパンの寸法は外径180 mm、底径160 mm、深さ40 mm、厚さ2.5 mmであり、材質はSUS444である。

この実験で使用する2種類のフライパンをそれぞれ図4、図5に示す。また一般的な鋳鉄であるFC250とSUS444の熱伝導率を表2に示す。熱伝導率には1.6倍程度の違いがある。



図4. 魔法のフライパン



図5. ステンレスフライパン

表2 熱伝導率

	熱伝導率, W/(mK)
FC250 (C 3.35%, Si 1.87%)	42.8 ⁽³⁾
SUS444 (Cr 17~20%, Mo1.75~2.50%)	26.0 ⁽⁴⁾

5. 実験方法

5.1 フライパン表面及び肉内部の温度分布の測定

肉に3本の熱電対を差し込んだ状態で加熱したフライパンの上に置きフライパン表面と肉内部の温度変化を測定する。その際、熱伝導と蒸す効果を分離するために、フライパンの設定温度を、160°Cの肉を焼く際の通常温度と90°Cの蒸発がほとんど生じない温度の2とおりで行う。「魔法のフライパン」と比較するためにステンレス製フライパンでも測定し、材質による違いも調べる。

フライパンを設定温度に維持するときはカートリッジヒータの出力は40Vにしており、測定中も同様の出力のままで行っている。加熱ブロックの熱容量は大きいので、測定中の加熱ブロックの温度変化は無視できる。本実験の実験の状況を図6に、そして実験系の構成を図7に示す。

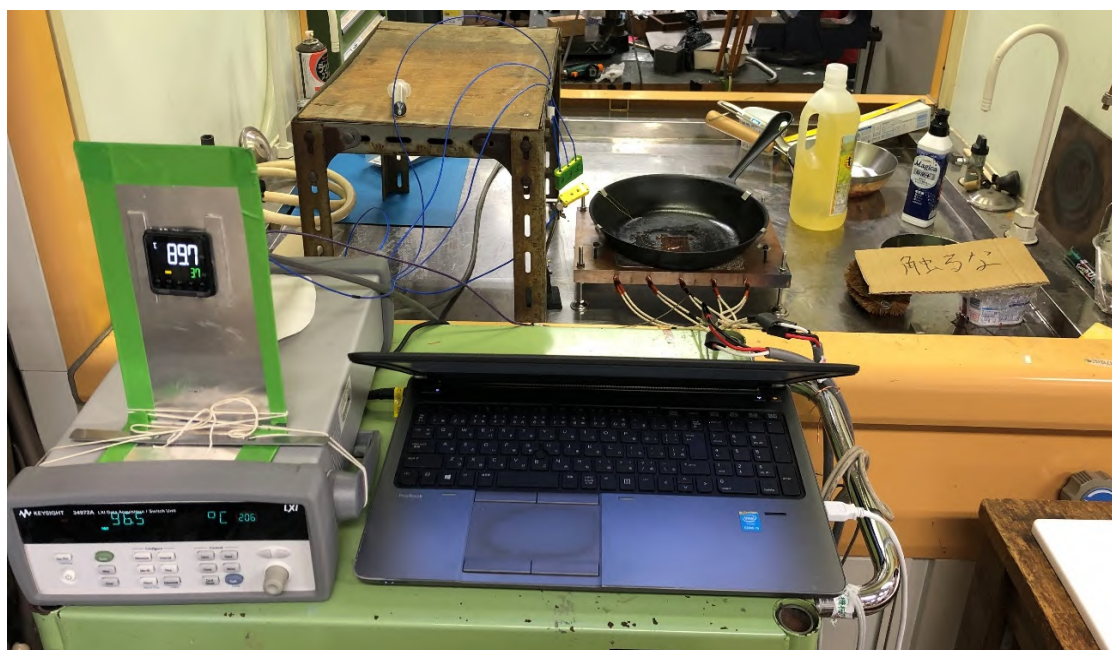


図6. 表面及び肉内部の温度測定時の構成

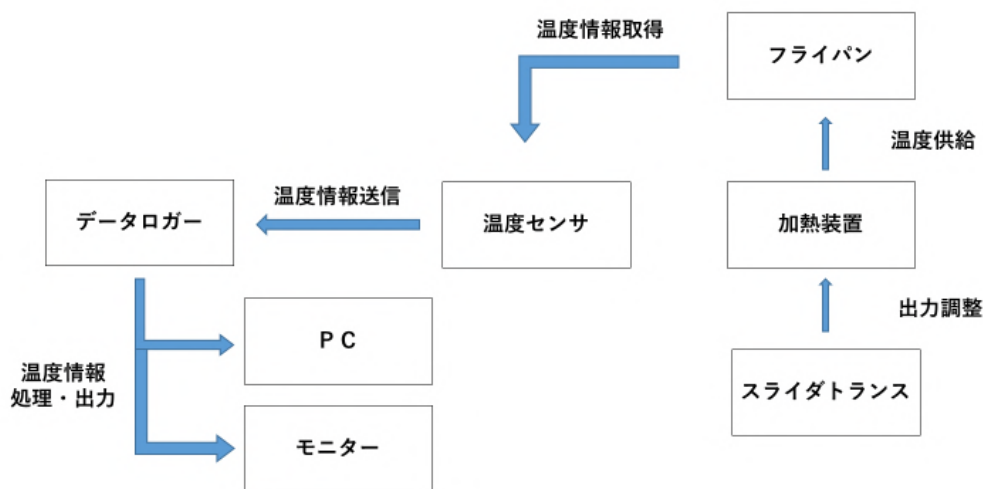


図 7. 表面及び肉内部の温度測定時の温度調節判定のブロック図

フライパンの表面温度を測るアルメルクロメル熱電対はカプトンテープで覆うように貼っており、測定後に付着する肉の油分による測定誤差を考慮して毎回交換している。温度の測定にはソフトウェアは Data Logger3(Agilent BenchLink)を使用している。データロガーの各チャンネルの構成及び設定については以下に示す。

Ch201：フライパン表面

Ch202：深さ 2 mm

Ch203：深さ 4 mm

Ch205：深さ 6 mm

Ch206：銅板

スキャン間隔：250m s

スキャン時間：5 min

5.2 放射による肉の温度変化の測定

この測定では放射による食材への熱の伝わり方を調べる。測定に使用する試料やデータロガーなどの構成は 5.1 節の測定と同様であり、フライパンを下向きに固定した状態で設定温度 (160°C) まで加熱した後に肉をフライパンの下に設置して測定を行う。

肉の設置に要する時間で加熱される影響を抑えるために、肉を設置する場所とフライパンの間にアルミ板を置いて放射を遮断した状態で肉を設置し、温度測定を開始した後このアルミ板を引き抜いてフライパンからの放射を当てる。

フライパンから肉までの距離は約 70 mm であり、フライパンを下向きに設置することで

対流による伝熱を抑えて、放射だけによる肉内部の温度変化を測定できるようにしている。実験の状況を図 8 に示す。



図 8. 放射による測定の実験状況（緑色のプラスチック製箱の上にキッチンペーパーに載せた肉を載せる）

5.3 材質の違いによる放射強度の測定

この測定ではレーザーパワー&エネルギーメータを用いてそれぞれのフライパンの放射強度について調べる。本測定で使用するレーザーパワー&エネルギーメータは入射口の奥に黒体に近い受光面があり、そこで吸収される光を熱として測定するもので、黒体塗料を縫った面の放射強度がステファンボルツマンの法則による理論値と十分な精度で測定できることを確認している。

実験の状況を図 9 に示す。メータのセンサ部の設定位置の再現性を確保するために、スタンドに固定した水平な棒にセンサ部を取り付け、支柱を回転させてセンサ部をスライドさせてメータをフライパンの下に移動させて測定を行う。またフライパンの下に移動させる直前に、室温になっている黒体塗料を塗布した厚紙をメータの上部に乗せてゼロ点を設定を行う。この測定で使用するレーザーパワー&エネルギーメータを図 10 に示す。



図 9. 放射強度の測定の実験状況

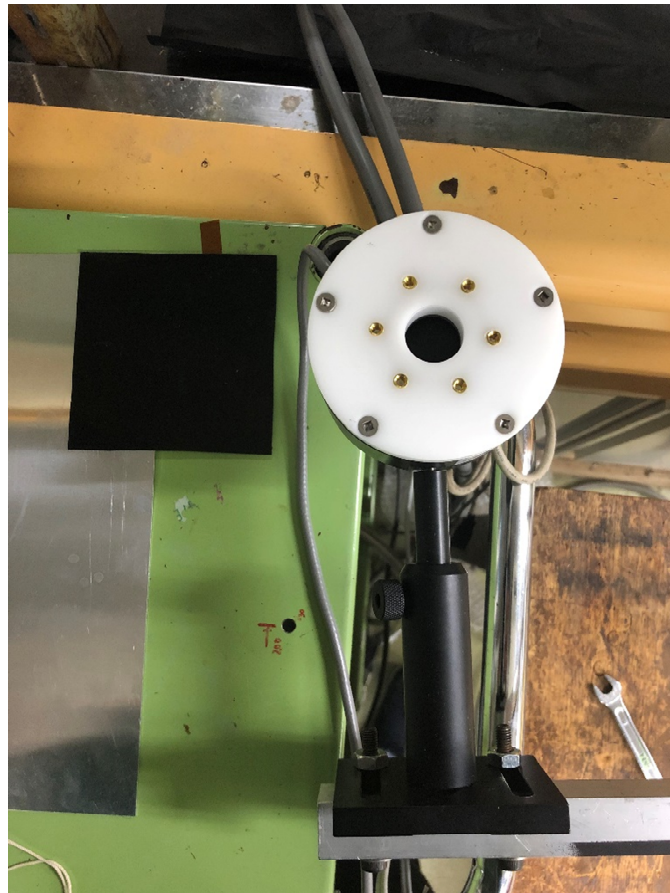


図 10. レーザーパワー&エネルギーメータ

5.4 数値解析の方法

実験で得られた肉内部温度の測定値から等価な熱伝導率と局所の熱流束を決定するために数値解析を行っている。この解析は、1次元非定常熱伝導

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

(λ は熱伝導率, ρ は密度, c は比熱) をクランク・ニコルソン法で差分化した

$$\frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_{j+1/2}^{n+1}}{\rho c} \frac{T_{j+1}^{n+1} - T_j^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\lambda_{j+1/2}^n}{\rho c} \frac{T_{j+1}^n - T_j^n}{\Delta x} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_{j-1/2}^{n+1}}{\rho c} \frac{T_j^{n+1} - T_{j-1}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\lambda_{j-1/2}^n}{\rho c} \frac{T_j^n - T_{j-1}^n}{\Delta x} \right) \right] \quad (2)$$

すなわち

$$\begin{aligned} -FO_{j+1/2}^{n+1} T_{j-1}^{n+1} + (1 + FO_{j+1/2}^{n+1} + FO_{j+1/2}^n) T_j^{n+1} - FO_{j+1/2}^n T_{j+1}^{n+1} \\ = FO_{j-1/2}^{n+1} T_{j-1}^n + (1 - FO_{j-1/2}^{n+1} - FO_{j-1/2}^n) T_j^n + FO_{j-1/2}^n T_{j+1}^n \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\text{ここで } FO = \frac{\lambda \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} \quad (3)$$

によっている。ここで、 Δt は時間ステップ幅、 Δx は節点の間隔である。接点の間隔は0.2mmで一様としている。下付の添え字 j は空間に関するものであり、 $j \pm 1/2$ は、熱伝導率に $j \pm 1$ と j の点の平均値を用いることを意味する。上付きの添え字 n は時間に関するものであり、 n は温度分布が決定した最新の時刻での値を、 $n+1$ は新しく温度分布を決定する時刻での値を示す。

境界条件は、両端の節点温度が深さ2mmと6mmの熱電対による測定温度と一致するとしている。

熱伝導率を温度の関数として扱う。これを実現するために、時間を Δt 進める1ステップで、式(2a)による計算を2回行う。1回目は λ_j^n 、 λ_j^{n+1} とも T_j^n における熱伝導率とし、2回目には、 λ_j^n を T_j^n における熱伝導率、 λ_j^{n+1} を1回目求めた T_j^{n+1} における熱伝導率として式(2a)を T_j^{n+1} について解いている。

6. 実験結果

6.1 フライパン表面及び肉内部の温度変化

本実験の結果について述べる。フライパンによる肉加熱時の温度変化の測定を通して、以下の3つの一般的傾向がみられた。

- (ア) 浅い位置(特に 2 mm)フライパンに肉を置いた直後から温度が上がりだす。深い位置(6 mm)の温度は、最初は一定のままで、しばらくしてから上昇が開始する。
- (イ) 100°C近くになると温度上昇が抑えられる。100°Cで温度上昇が抑えられる原因は、肉に含まれる水分の蒸発に熱が費やされるからである。
- (ウ) 肉とフライパンの密着度のばらつきに起因すると思われる温度上昇の仕方の違いが観察される。

本実験での測定のうち魔法のフライパンとステンレスのフライパンで行った設定温度 160°C のデータを図 11. 図 12. に示す。

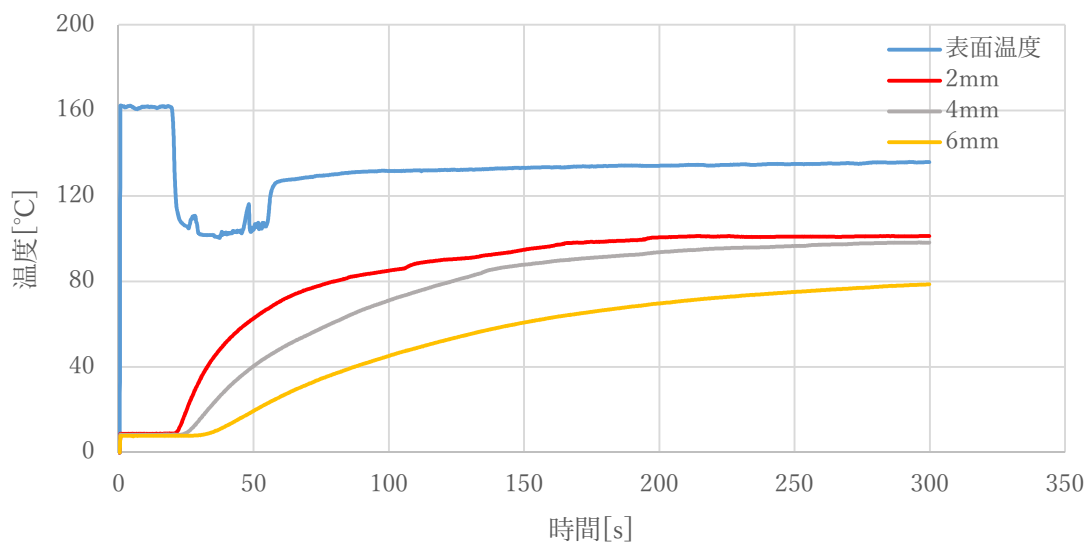


図 11. 魔法のフライパン, 160°C

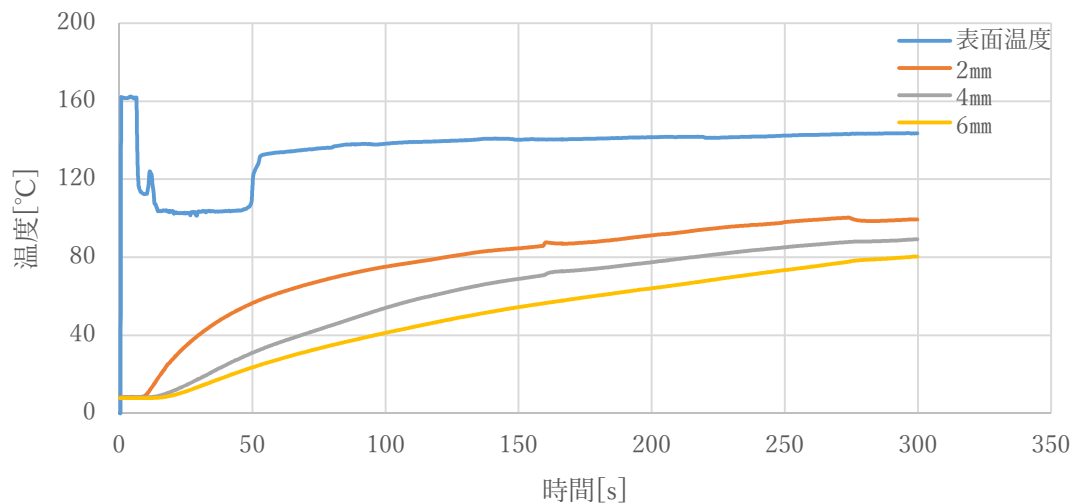


図 12. ステンレスフライパン, 160°C,

グラフより熱伝導率の高い魔法のフライパンのほうがステンレスフライパンよりも肉を置いてからの肉の浅い位置での温度の上りが早いことが分かる。また、どちらのフライパンの場合でも最終的な肉の温度は 100°C 付近に収束していつていることが分かる。

6.2 放射に関する測定

放射に関する実験結果について述べる。フライパンの材質の違いによる放射強度を測定した結果を図 13 に示す。魔法のフライパンによる放射強度が黒体塗料を塗布した黒体面とほぼ同等の値をとっていること、ステンレスフライパンではこれらの 1/3 であることが分かった。このことから、魔法のフライパンの放射特性はほぼ黒体とみなしてよい。金属の放射率は一般的に低く（酸化金属面でも 0.25~0.7⁽⁵⁾）、ステンレス製はその性質を持つが、「魔法のフライパン」は、それとは全く性質が異なる。

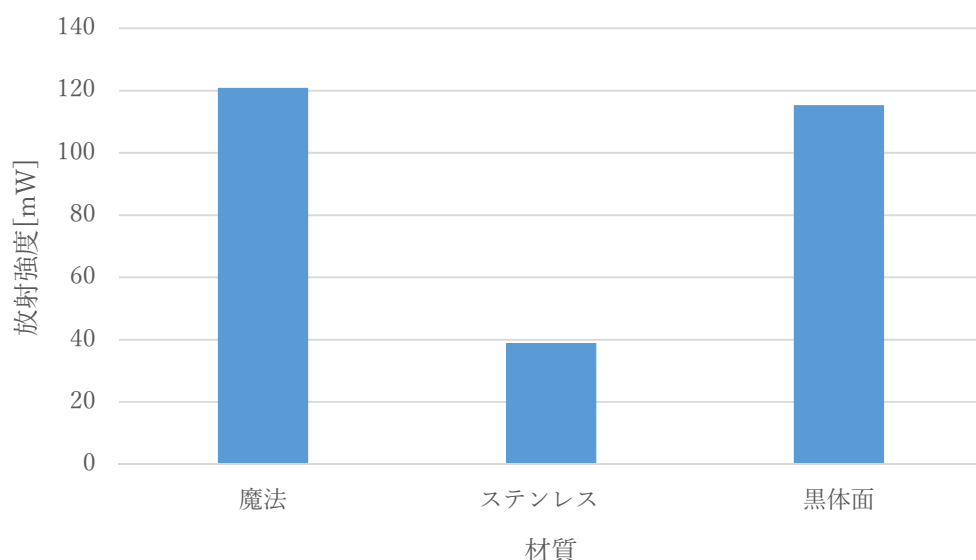


図 13. 放射強度の測定

次に、放射による肉加熱時の温度変化の測定を通して、フライパンでの直接の加熱に対しては微量ながらも放射による加熱の影響が肉の深部まで及んでいることが分かった。測定値のデータについては 7 節に譲ることとする

7. 考察

一連の実験から 1 次元的な伝熱を仮定して、熱電対を設置した各深さにおける熱流束を計算し、それに基づき、火の通り具合がフライパンによってどのように異なるかを調べる。熱流束の決定は 1 次元非定常熱伝導方程式を用いるが、加熱によって肉に含まれてい

る水分が蒸発し、それが奥まで浸透することで通常の熱伝導に比べて大量の熱を輸送すると考えられるので、最初に、最も典型的と考える測定結果を使って温度に依存する等価熱伝導率を決定し、次に決定した等価熱伝導率が一連の実験に適用可能かの検証を行う。そして最後に、決定した等価熱伝導率を使って熱流束を計算し、火の通り具合についてまとめる。

7.1 等価熱伝導率の推定

水蒸気の浸透によって熱が運ばれる効果を定量的に把握するために、温度の関数として変化する熱伝導率に基づいて熱伝導の法則にしたがって伝熱が起こると仮定し、その熱伝導率の温度関数を定める。このように定める熱伝導率を等価熱伝導率と呼ぶこととする。

①本実験での温度変化が典型的と思われる「魔法のフライパン」「160°C」の測定値を用いて計算を行った。

②深さ 2 mm と 6 mm の測定温度を境界条件として与えて、深さ 4 mm の計算値と測定値がほぼ一致するように等価熱伝導率の温度依存性を決定した。

③水の蒸発とそこで発生した蒸気が肉の内部を奥に流れることによる伝熱促進が予想され熱伝導率が水の熱伝導率から別の高い値に変化することを想定した。高い熱伝導率は、一定値であると想定して、関数の形として連続的ではあるがステップ的な変化を示す tanh

関数を使用した。tanh 関数は水の熱伝導率 λ_0 からの増加分として $\Delta\lambda \tanh(T-T_1)/T_2$ と

し、パラメータが $\Delta\lambda$, T_1 , T_2 の 3 つ存在する。1 つの tanh 関数では十分に実験結果に合う熱伝導率の温度依存性を決定できなかったので、2 つの tanh 関数の重ね合わせとした。また、2 組の $\Delta\lambda$, T_1 , T_2 を決定して熱伝導率の温度依存性を決めた。

決定した熱伝導率の温度依存性を図 14 に、その等価熱伝導率を使って求めた深さ 4mm の点の温度変化のグラフを図 15 に示す。図 15 では、熱伝導率を λ_0 と 50W/(m・K)の一定値としたものもプロットしている。一定な熱伝導率を用いると、特に温度変化が小さくなる後半で、深さ 4mm の温度が深さ 2mm と 6mm の温度のほぼ平均値になって、どのような熱伝導率を与えても深さ 4mm の計算結果が測定結果に近くならない。すなわち、温度によって等価熱伝導率が変わると考えざるを得ない。

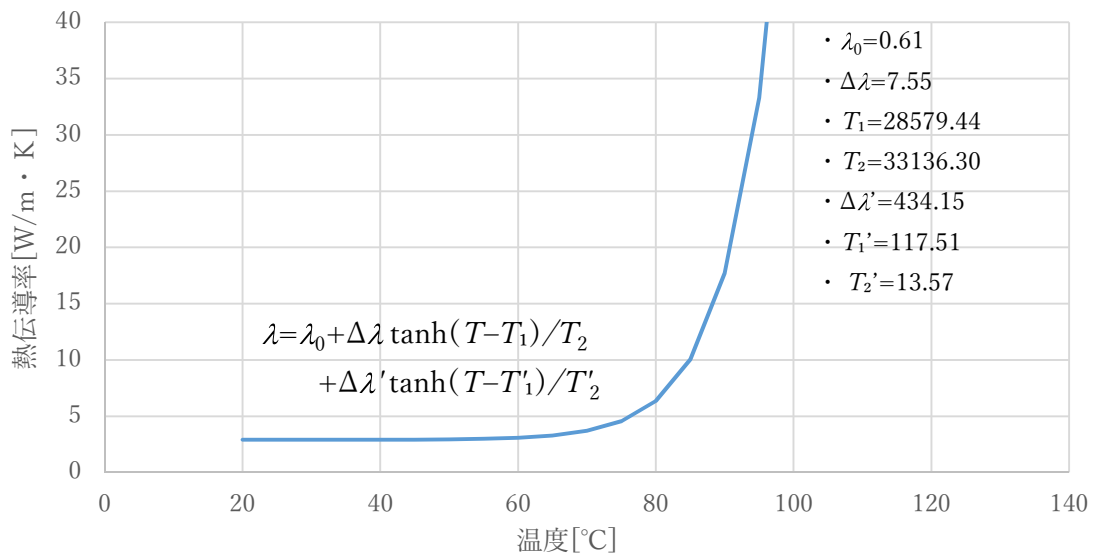


図 14. 等価熱伝導率

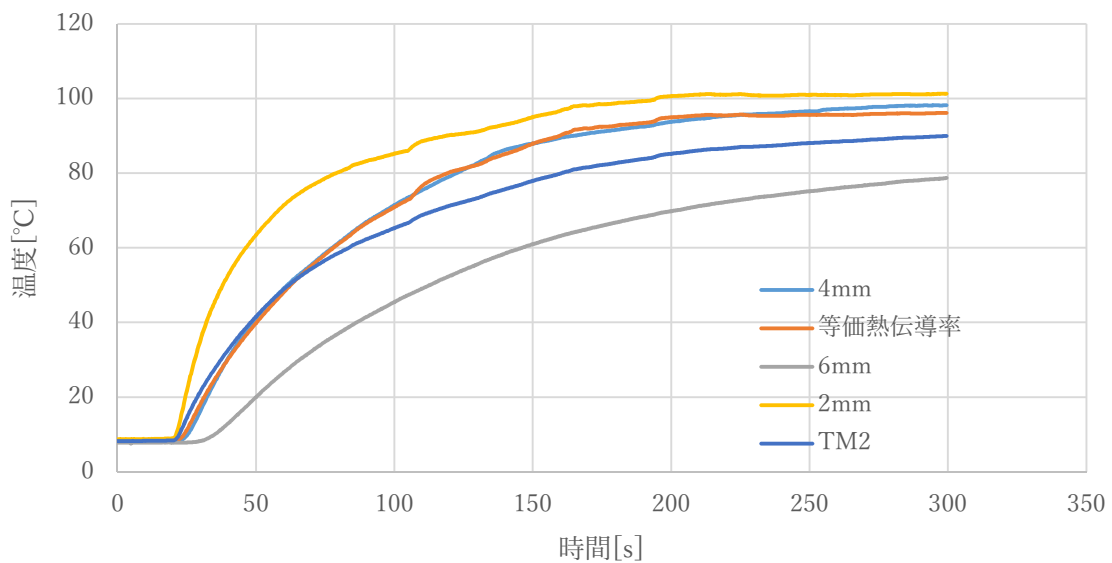


図 15. 魔法 160°Cの温度変化

7.2 等価熱伝導率の検証

2種類のフライパン、2種類の温度による等価熱伝導率の検証として前節で決定した温度に依存する等価熱伝導率と深さ2mmと6mmの測定値を使って深さ4mmの温度を計算し、それと測定値との比較を行った。それぞれの測定値と計算値について、以下図16～図21に示す。

前節で等価熱伝導率の温度関数を決まるのに用いた測定値以外を用いても、概ね深さ4mmの温度を計算できるので、図14に示した等価熱伝導率で一連の実験の熱伝導解析が可能であると判断する。次節ではこれを前提に、各深さでの熱流束について考察する。

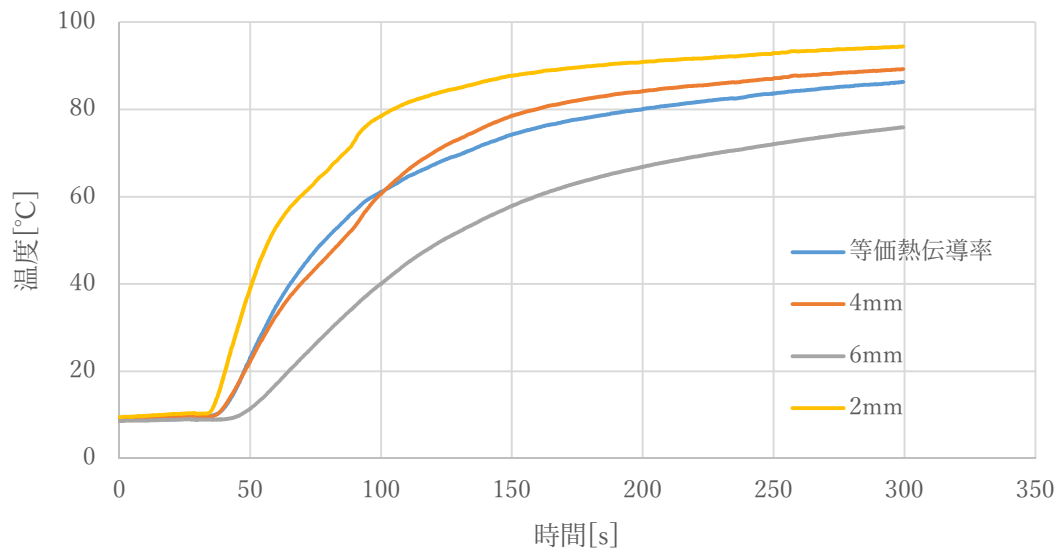


図 16, 魔法のフライパン 160°C

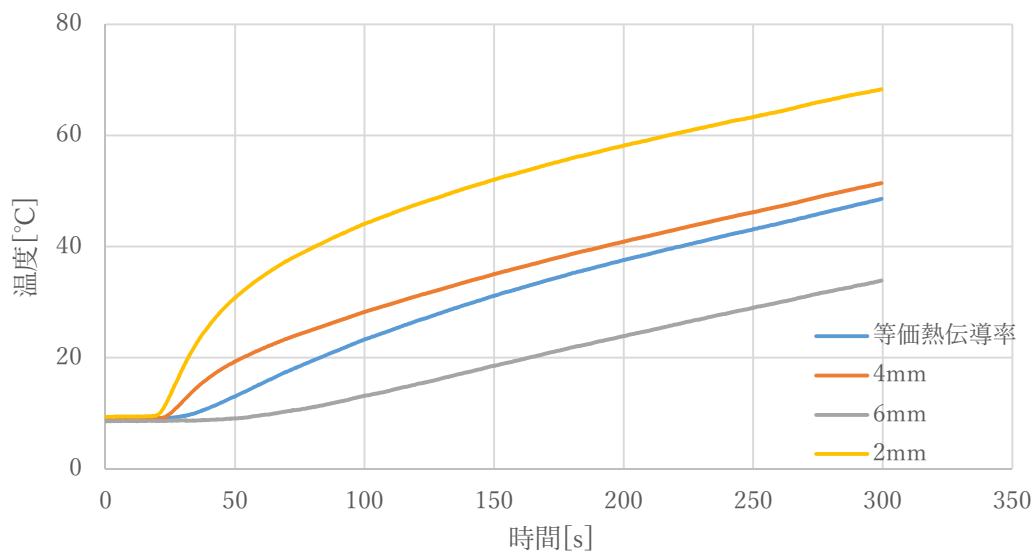


図 17. 魔法のフライパン 90°C

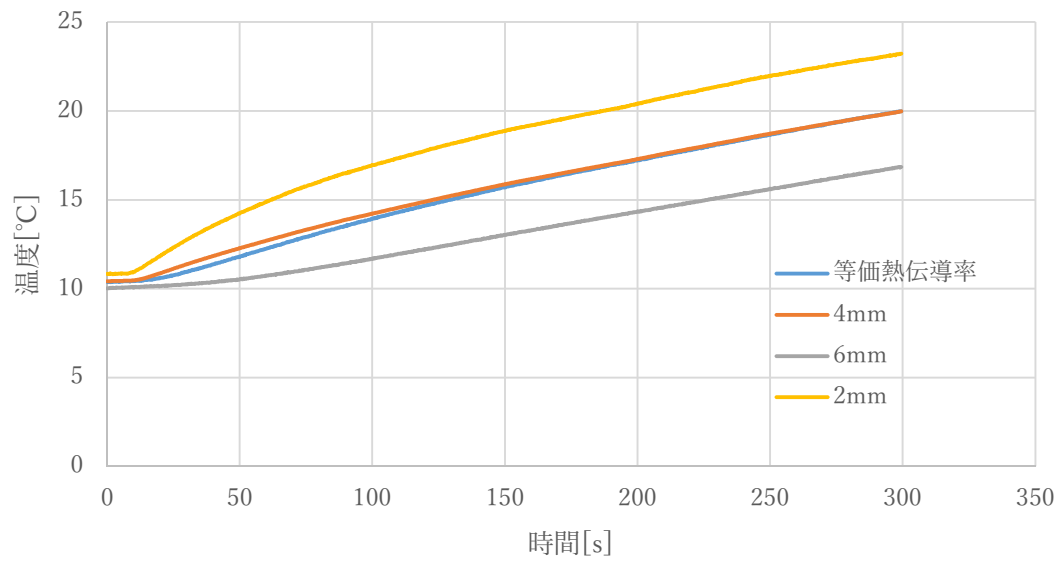


図 18. 魔法のフライパン 放射

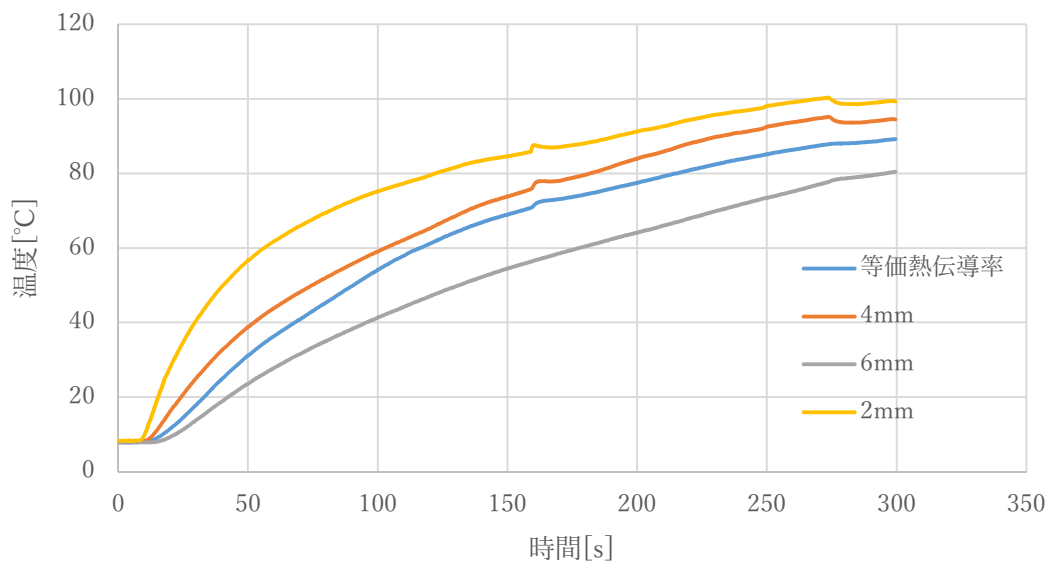


図 19. ステンレスフライパン 160°C

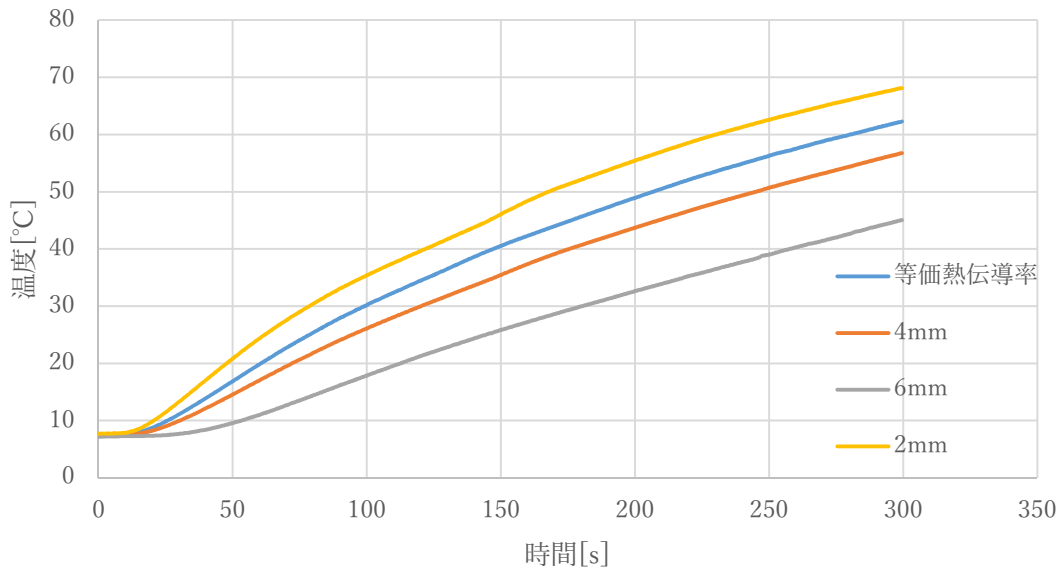


図 20. ステンレスフライパン 90°C

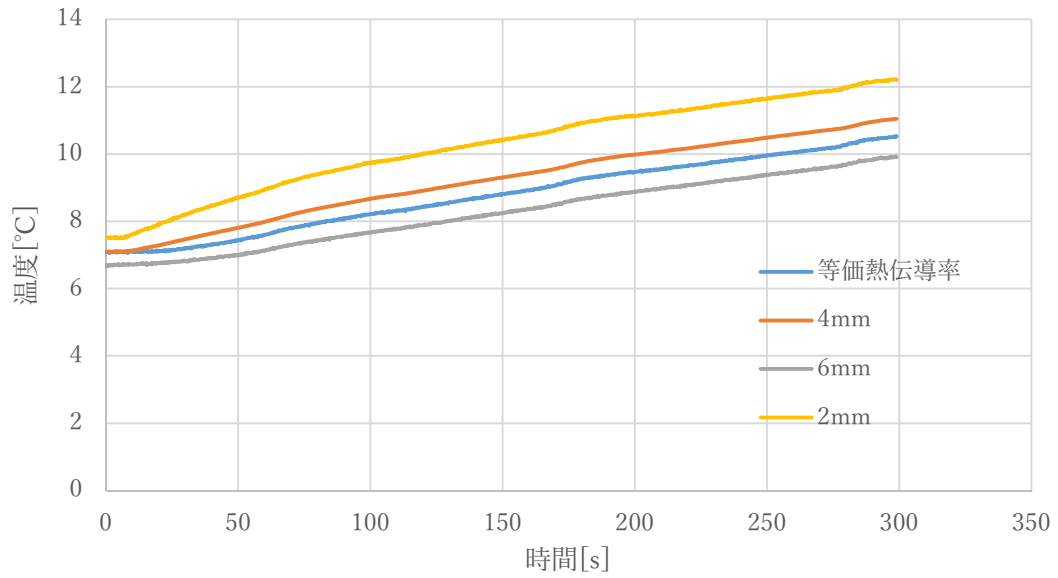


図 21. ステンレスフライパン 放射

7.3 熱流束の計算

7.1 節で推定した等価熱伝導率を用いて熱流束を計算する。2 種類のフライパンでのフライパン上での加熱による各熱電対位置における熱流束を図 22, 図 23 に示す。フライパン上による加熱の場合の熱流束は、最初の 2 分程度で $50[\text{kW}/\text{m}^2]$ 最大となる 3 分以降で約 $150[\text{kW}/\text{m}^2]$ となる。これはフライパンの種類による影響は小さいが、ステンレス製フライパンの方がやや小さい。

放射による肉の加熱の際の熱流束を図 24, 図 25. に示す。深さ 2 mm と 6 mm でノイズが大きく、深さ 4 mm で小さいのは、境界条件として深さ 2 mm と 6 mm の温度を使ってそこに含まれるノイズが直接熱流束に影響しているのに対し、少し離れた点ではノイズの影響が減衰するためと考えられる。フライパン上で焼くときは深さ 6 mm の温度の上がり始めが加熱開始から 20s 程度遅れるのに対して放射による遅れは 5s 程度と小さい。これは放射が途中であまり吸収されずに深くまで到達していることの現れであると考えられ、フライパン上での熱流束の約 20% 程度の加熱が行われていることと合わせて、放射の影響がある程度存在すると結論付けられる。

ステンレス製のフライパンでは放射（射出）自体が黒体に比べて小さいために、その分、熱流束も低くなっている。

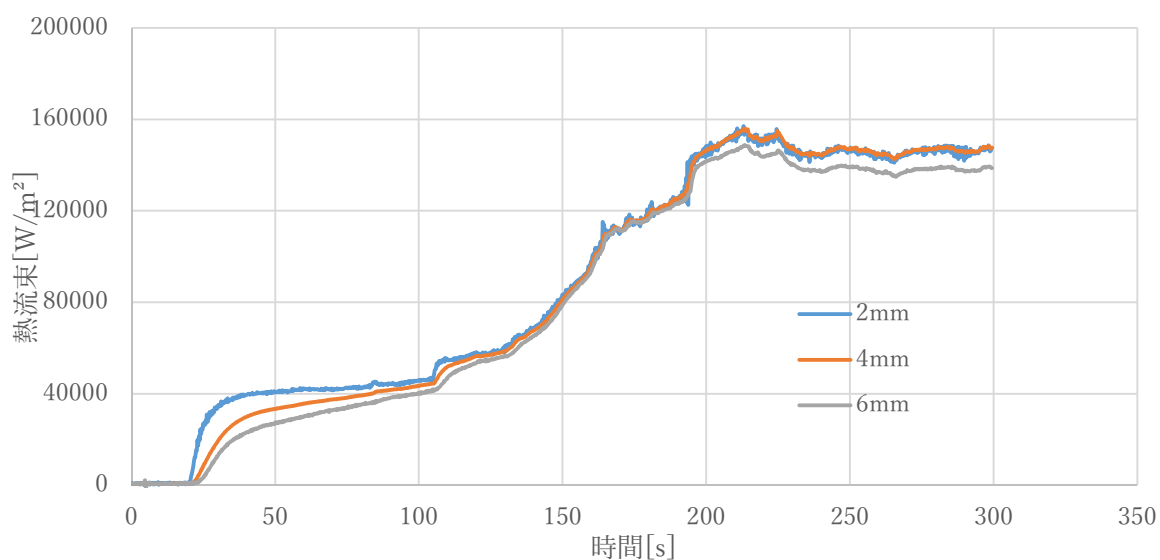


図 22, 魔法のフライパン 160°C

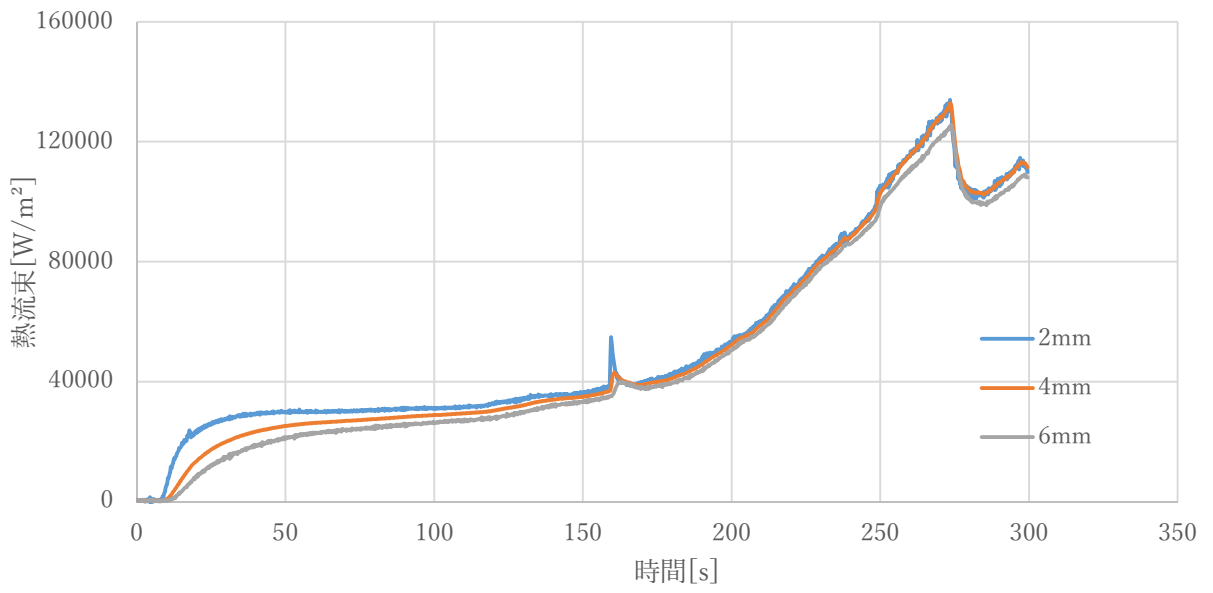


図 23, ステンレスフライパン 160°C

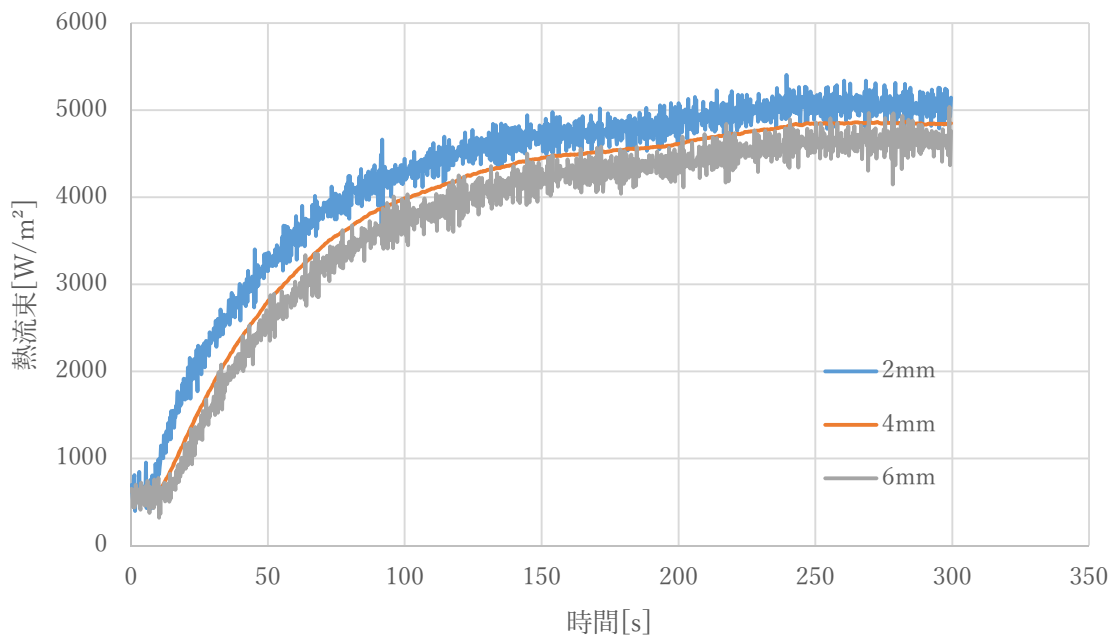


図 24. 魔法のフライパン, 放射

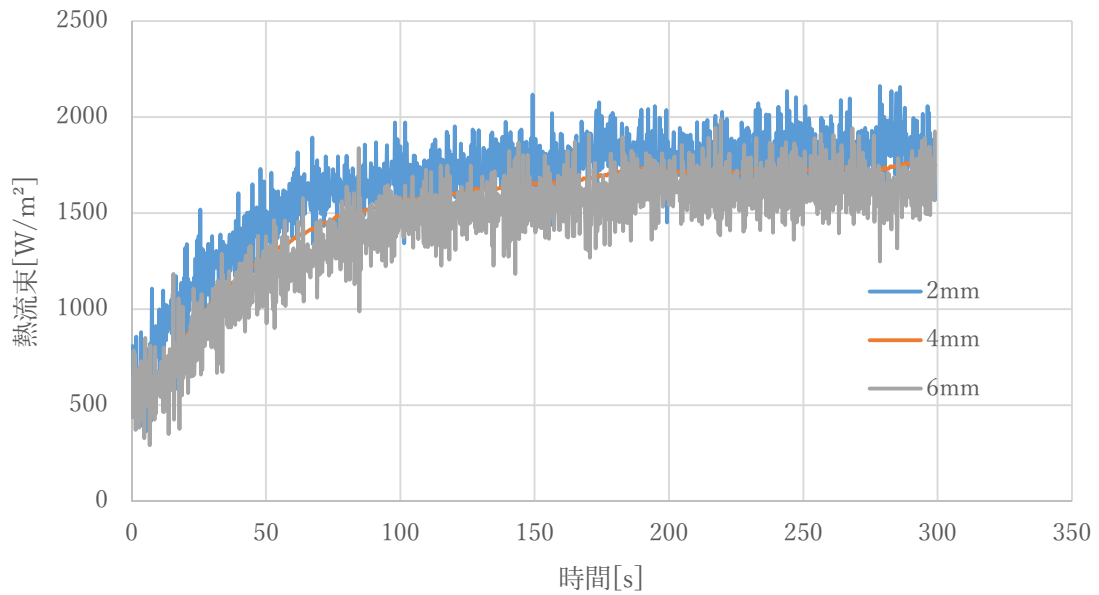


図 25. ステンレスフライパン，放射

8. まとめ

本研究では魔法のフライパンとステンレス製フライパンの2種類のフライパンを用いて (1) 肉の加熱時の温度測定，(2) 放射強度の測定，(3) フライパンからの放射による肉の加熱時の温度測定，(4) 実験結果に基づいた熱伝導解析を行なった。その結果，以下が分かった。

- ①肉の浅い位置（特に 2mm）は，フライパンに置いたほぼ直後から温度が上がり出し，深い位置（6mm）の温度は，最初は一定のまま，しばらくしてから上昇が開始する。
- ②100° C に近くなると温度上昇が抑えられる。
- ③測定した温度変化を説明できる等価熱伝導率は温度の上昇に伴って大幅に熱伝導率が増加するものである。これは，温度上昇に伴って蒸発が盛んになり，水蒸気によって熱が遅れていることを実証している。
- ④両フライパンで放射特性の違いにより熱流束の違いが生じている。
- ⑤放射による加熱は肉の深さ 6 mm 程度の深さまであまり減衰されずに，しかも小さな時間遅れで伝わっている。
- ⑥放射による加熱は，熱伝導（水蒸気によるものも含む）による加熱に比べて「魔法」でも 5 分の 1 程度であるが，無視できない。ステンレス製フライパンは放射強度が弱く放射の影響はこの 3 分の 1 程度になり，極めて小さい。

9. 参考文献

[1] カンブリア宮殿 (2019/04/25)

<https://www.tvtokyo.co.jp/cambria/backnumber/>

[2] 錦見鋳造 (2019/04/25)

<https://www.nisikimi.co.jp/mahonofrypan/>

[3] 新編熱物性ハンドブック「日本熱物性学会編」 pp.23-213, 養賢堂 2001年発行

[4] 森松工業 技術関連資料

<http://www.morimatsu.jp/data/stainless.html>

[5] 円山重直「光エネルギー工学」