

## Temperature Measurement of a Pot with Water for Boiling and Heat Transfer Enhancement

Takashi YANAGIHARA\*, Hiroki TANAKA\*, Kyoji INAOKA\*\*, Mamoru SENDA\*\*

(Received January 19, 2016)

Heat transfer experiments have been conducted for a boiling water process of a pot heated by a cartridge-type gas stove. To grasp the basic heat transfer phenomena of the heating process of the boiling pot, time variation of the water temperature, total boiling time of the water, and amounts of heat including the heat transferred to the pot material, water and exhaust gas were respectively measured. In order to enhance the heat transfer from the hot gas into the water, measurements have also done for the cases when extended fin surfaces have been attached on the hot gas side of the bottom surface of the pot. Two types of material of the pot, stainless steel and aluminum, were examined. Three types of fins having different heat transfer areas and arrangements were also tested. It was found from the heat balance analysis that 46% of the heat supplied by the hot gas was used for boiling the water and 52% of the heat was wasted as exhaust gases flowing toward the side of the pot. As a result, about 420 seconds were required to boil two-liter water for the normal pot without fins and no dependency was found in the boiling time for the different pot materials. It was also revealed that the treated fins can enhance the heat transfer from the hot gas into the water. From the heat balance analysis, 67% of the heat was utilized for boiling the water in the maximum area case. This heat transfer enhancement caused about 30% shorter boiling time compared to the time of the normal pot without fins, hence, about 30% energy saving was achieved by introducing the extended surfaces in this study.

**Key words :** boiling pot, heat transfer, heat transfer enhancement, fin

**キーワード :** 湯沸し鍋, 熱伝達, 伝熱促進, フィン

## 湯沸し鍋の温度測定と伝熱促進

柳原 敬志\*, 田中 裕貴\*, 稲岡 恭二\*\*, 千田 衛\*\*

### 1. はじめに

2011年に起きた東日本大震災の影響もあり, 防災と減災に対する意識は日々高まっている. 本研究で注目する熱湯は, 緊急災害時においては食事用途に, また, 医療機器と調理器具の熱湯消毒に用いられ, それを安定的に供給することは, 人命救助と不安の軽減の両面で重要である. しかし, 例えばライフラ

インが断たれた災害時には, 電源を要する給湯機器は使用できず, 救援物資として準備できるカセットガスによる湯沸しに頼る状況が想定される. この観点から, 本研究では湯沸し鍋を伝熱工学的視点から調査し, より短時間で, より省燃料で熱湯を作る方法について検討している.

湯沸し鍋の沸騰は伝熱工学的にはサブクール, プ

\* Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

\*\*Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-0774-65-6460, E-mail: dup0588@mail4.doshisha.ac.jp

ール沸騰に分類される．この湯沸し鍋の沸騰は日常的に良く見受けられるにもかかわらず，特許などの関係もあると推測され，論文としての報告例は極めて少ない．関連する報告例としては，肥後と平野<sup>1)</sup>，辰口と渋川<sup>2)</sup>，高尾<sup>3)</sup>の研究例がある．肥後と平野<sup>1)</sup>は，様々な市販鍋の伝熱効率と鍋底の温度分布が鍋材の熱伝導率に関係することを報告している．また，辰口と渋川<sup>2)</sup>は，材質の異なる市販鍋の温度上昇と鍋底の厚みには相関があることを報告している．同様に，高尾<sup>3)</sup>は，材質の異なる市販鍋を対象として，湯沸し時の水量と鍋蓋の熱効率に及ぼす影響を報告している．しかし，湯沸し現象の伝熱現象の理解を深め，省エネ効果をも論じているものは見当たらない．そこで本研究は，湯沸し鍋の温度環境を測定し，湯沸し鍋の伝熱現象を理解することを目的の一つとした．また，入熱量促進手法としてフィン（拡大伝熱面）を鍋底のガス側表面に導入する場合に着目した．伝熱促進フィンは，工業的に製作しやすいコルゲートフィンを採用した．ガス側の鍋底表面部の半径方向の外縁近傍にフィンを設置し，フィンの材質，形状，枚数を変化させて水温，鍋周囲温度，鍋側面温度，鍋底温度を計測することで沸騰所要時間，熱量割合，熱伝達率を算出し，フィンが持つ伝熱促進効果について検討した．

## 2. 実験方法および解析方法

### 2.1 実験装置

本実験では，ガスカートリッジとしてイワタニカセットガスを使用した．燃料はブタン純度 95%以上（ブタン成分構成比イソブタン約 30%，ノルマルブ

タン約 70%）であり，加熱装置は新富士バーナー製の SOTO レギュレーターストーブ（以下ガスストーブ）を用いた．実験に使用した鍋は，フィン無し鍋 2 通り，フィン付き鍋 4 通りとした．ただし，鍋の基準寸法はいずれも直径 230 mm，高さ 230 mm，板厚 1 mm で等しい．鍋の材質は SUS310S（以下 SUS）と Al1100（以下 Al）を用意した．鍋は SUS 製フィン無し鍋（以下 S0）を基本とし，SUS 製フィンを 45 枚スポット溶接した鍋（S1）．また，Al 製フィン無し鍋（A0）を基本とし，Al 製フィンを 45 枚超音波溶接した鍋（A1），Al 製フィンを内側に 62 枚，外側に 86 枚，計 148 枚超音波溶接した鍋（A2），Al 製フィン 236 枚を YAG レーザーにて溶接した鍋（A3）の 6 つの試作品を用いて実験を行った．このうち，フィン付き鍋のフィン配置を Fig. 1 に示す．フィン高さは全て 12 mm とした．各場合のフィンピッチ  $p$ ，フィン枚数  $N$ ，鍋底面積  $A$ ，フィン部総表面積  $A_f$  を Table 1 に示す．

### 2.2 実験方法および条件

水を入れた湯沸し鍋をガスストーブで加熱し，水温，鍋底温度，鍋側面温度，鍋周囲温度を計測する実験を行った．ガスストーブの供給熱量  $Q_g$  は，式 (1) のようにブタンガスの消費量  $m_g$  とブタンガスの低位発熱量 45.7 kJ/g の積より求めた．

$$Q_g = 45.7 \times m_g \quad (1)$$

ここで，ブタンガスの消費量  $m_g$  は加熱前後のカセットガスの質量差を電子天秤により測定し求め

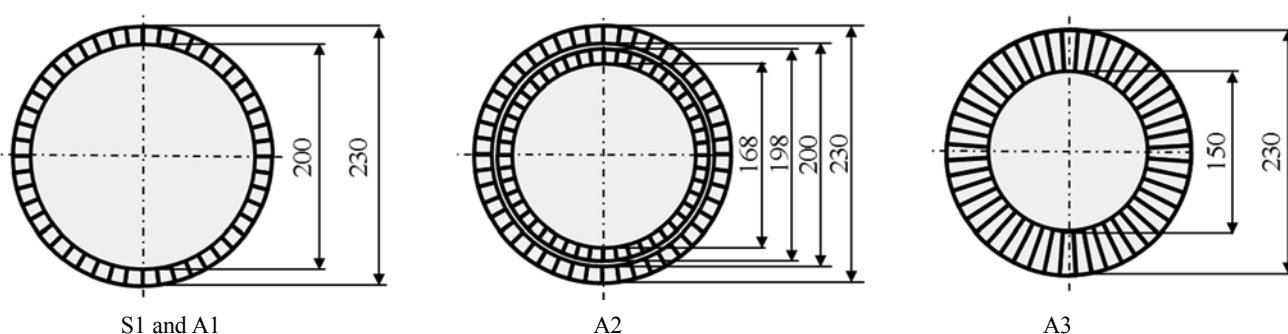


Fig. 1. Fin arrangement on the outside surface of pots for each case.

Table 1. Specifications of fins attached to the pot.

case	S1, A1	A2	A3
$p$ mm	15.0	7.5	3.0
$N$	45	148	236
$A$ mm <sup>2</sup>	42000	42000	42000
$A_f$ mm <sup>2</sup>	16000	53000	230000

た．また，水量  $m_w$  は全ての実験で 2.0 l とした．

### 2.3 測定装置および測定位置

座標系を Fig. 2 に示す．鍋底中心を原点にとり，半径方向を  $r$ ，高さ方向を  $y$  とする．ここで，ガスによって供給された熱はまず鍋を暖め，水へと入熱し，その残りは鍋の下方から側方へと排熱すると仮定する．そのため，本実験では鍋，水，外気の 3 要素が重要であり，温度測定する必要があると考えた．水温  $T_w$  と入熱量を見るために，原点から 5 mm 上方の 5 箇所 ( $y=5, r=0, 25, 50, 75, 100$ ) に熱電対を設置し測定した．周囲への熱の逃げを見るために，鍋側方の ( $y=-10, r=115$ ) から ( $y=25, r=130$ ) の範囲である，35 mm×15 mm の領域の空気温度  $T_a$  を楕形熱電対で測定した．鍋の温度，並びに鍋への入熱量を見るために，鍋全体を鍋底，鍋側面水接触部，鍋側面空気接触部の 3 つの領域に分けて温度測定した．鍋底温度  $T_{pb}$  は鍋底内側壁面 ( $y=0, r=0, 25, 50, 75, 100$ ) の 5 箇所に熱電対を設置し測定した．鍋外側壁面は水接触部  $T_{pw}$  ( $y=21, r=115$ ) および空気接触部  $T_{pa}$  ( $y=136, r=115$ ) の 2 点に熱電対を設置し測定した．

## 2.4 解析方法

### 2.4.1 沸騰所要時間

加熱実験を始め，水温が 25℃ から 98℃ に達するまでの時間を沸騰所要時間  $t_{\text{boil}}$  とした．フィン付き鍋 A1, A2, A3 の沸騰所要時間のフィン無し鍋 A0 の沸騰所要時間に対する比を沸騰時間比  $\eta_t$  とし，式(2)で求める．

$$\eta_t = t_{\text{boil}} / t_{\text{boil0}} \quad (2)$$

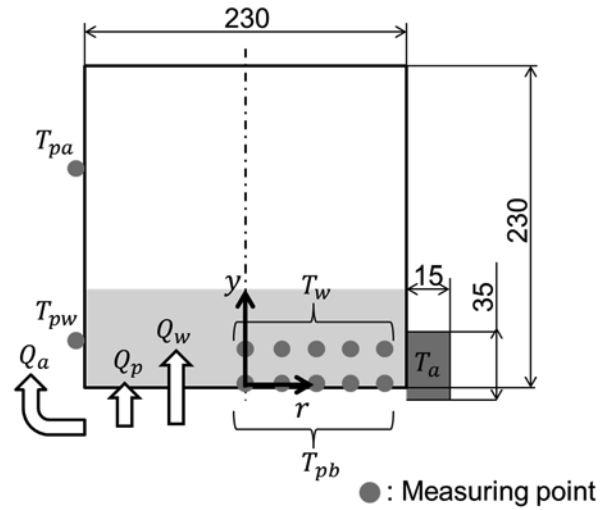


Fig. 2. Coordinate system and measuring point.

### 2.4.2 熱量割合

各部に伝わった単位時間当たりの熱量  $\Delta Q$  は式(3)のように，各要素の質量  $m$ ，比熱  $c$ ，単位時間当たりの温度差  $\Delta T$  の積で算出する．水への単位時間当たりの熱量を  $\Delta Q_w$  とし，側面水接触部，側面空気接触部，鍋底部，各部への単位時間当たりの熱量を，それぞれ  $\Delta Q_{pw}$ ,  $\Delta Q_{pa}$ ,  $\Delta Q_{pb}$  と分けて算出する．鍋全体への単位時間当たりの熱量  $\Delta Q_p$  は  $\Delta Q_{pw}$ ,  $\Delta Q_{pa}$ ,  $\Delta Q_{pb}$  の和で与える．

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (3)$$

また，各部への総入熱量  $Q$  は単位時間当たりの熱量  $\Delta Q$  の実験開始時刻から  $t_{\text{boil}}$  にわたる総和で表す．ここで，外気への排熱量  $Q_e$  は，式(4)で算出する．

$$Q_e = Q_g - (Q_w + Q_p) \quad (4)$$

また，各部の熱量を供給熱量  $Q_g$  で除したものを熱量割合と定義し，水の熱量割合  $\eta_w$ ，鍋の熱量割合  $\eta_p$ ，排熱の熱量割合  $\eta_e$  を定義した．

### 2.4.3 鍋底熱伝達率

鍋底面部の熱移動現象を考察するために，鍋底面部の平均熱伝達率，および，フィン設置部での入熱

促進を見るために局所熱伝達率を算出する．一般的に，プール沸騰熱伝達では，熱伝達率は下面加熱の自然対流熱伝達をもとにレイリー数とヌッセルト数の関係式より算出される<sup>4)</sup>．しかし，本報では実験で得られた温度をもとに，ニュートンの冷却法則で求めることとした．水側の瞬時の鍋底平均熱伝達率  $h_m$  は式(5)で算出する．

$$h_m = q / (T_{pb} - T_w) \quad (5)$$

ここで， $q$  は水への平均入熱流束であり， $\Delta Q_w$  を鍋底面積  $A$  で除して求める．また，鍋底では位置によって入熱量は異なるものと考えられる．局所熱流束が高いほど，その位置での温度上昇が大きい．したがって，各鍋の熱流束  $q_r$  は後述する鍋底温度上昇率に対応し分布するものと仮定し，平均鍋底温度上昇率に対する各点  $r$  での鍋底温度上昇率の比を平均入熱流束  $q$  に掛けて与える．その上で，鍋底温度測定点 5 点の瞬時の局所熱伝達率  $h_i$  を式(6)で算出する．

$$h_i = q_r / (T_{pb-r} - T_{w-r}) \quad (6)$$

### 3. 結果および考察

#### 3.1 フィン無し鍋の湯沸し現象

まず，フィン無し鍋に生じる熱移動現象を把握するため， $\Delta Q_g = 3.0 \text{ kW}$  を与えた Al 製 A0 鍋について，水温  $T_w$  の時間変化，および鍋底の平均温度  $T_{pb}$  の時間変化を Fig. 3 に示す．図より， $T_{pb}$  は加熱開始直後に著しく増加し，その後すぐに緩やかに増加することが分かる． $80^\circ\text{C}$  前後ではその傾きがさらに緩やかになり，温度上昇が鈍っていく．一方で，水温  $T_w$  は鍋底の温度とは異なり，加熱開始直後からほぼ同じ割合で増加していくことが分かった． $400 \text{ s}$  を超えると， $T_{pb}$  の上昇はごく緩やかになり， $T_w$  は飽和温度に達し，温度上昇しなくなることが分かった．

さらに，A0 鍋の加熱実験中の水の状態を示す．実験開始時から約  $280 \text{ s}$  までは水の対流だけが確認され，それ以降，沸騰が開始し，時間と共に沸騰は激しくなる．沸騰の状態は  $280 \text{ s}$  から  $370 \text{ s}$  の間では気泡微細化沸騰を伴ったサブクール沸騰が起こ

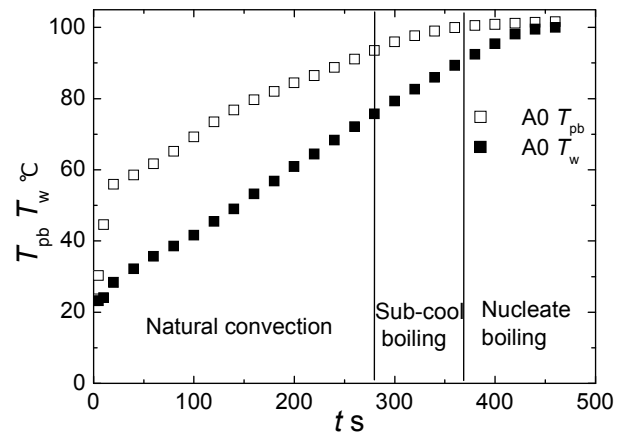


Fig. 3. Temperature variation of pot and water for A0.

る． $370 \text{ s}$  以降は核沸騰が生じることが確認された．

Fig. 4 に  $\Delta Q_g = 3.0 \text{ kW}$  とするときの S0 と A0 における水温の時間変化を比較する．S0 の沸騰所要時間  $t_{\text{boil}}$  は  $422 \text{ s}$  であり，また A0 のそれは  $416 \text{ s}$  であり，両者に大きな時間差は生じないことが分かった．次に，Fig. 5 に S0 と A0 の熱量割合を示す．水への入熱量は共に  $0.46$  であり，S0 と A0 に有意な差は見られなかった．これらより，鍋の材質は沸騰時間と熱量割合にはほとんど影響しないことが分かった．高尾<sup>3)</sup>によると，沸騰所要時間は主に鍋材と水の熱容量に影響を受けるが，鍋の材質の影響は小さいことが述べられている．本研究の S0 と A0 鍋の熱容量は，それぞれ  $1500 \text{ J/K}$ ,  $880 \text{ J/K}$  であり，水の熱容量  $8400 \text{ J/K}$  に対して，約  $18\%$  と約  $11\%$  程度と小さい．このため，鍋材の影響が現れなかったものと考えられる．

Fig. 6 に加熱量を二通りに変えた場合の A0 の鍋底温度上昇率を示す．鍋底中央部は火炎の影響を受けて値が高いのに対し，中央から離れるにつれて低下している．このことより，本研究では鍋底の外縁近傍の温度を上げることに湯沸し効率改善の余地があると考え，伝熱面積拡大フィンを鍋底外縁に溶接し，種々の実験を行った．

#### 3.2 フィン付き鍋の伝熱促進と熱量割合

Fig. 7 に  $\Delta Q_g = 3.0 \text{ kW}$  とするときの A0, A1, A2, A3 の水温の時間変化を示す．A1, A2, A3 の  $t_{\text{boil}}$  はそれぞれ  $392 \text{ s}$ ,  $311 \text{ s}$ ,  $285 \text{ s}$  であった．A1, A2, A3 の A0

に対する沸騰時間比  $\eta_t$  はそれぞれ 0.96, 0.76, 0.70 であり, 最大 30% の時間短縮となった。

全てのフィン付き鍋は沸騰所要時間が A0 より短くなり, フィンによる伝熱促進効果が得られること

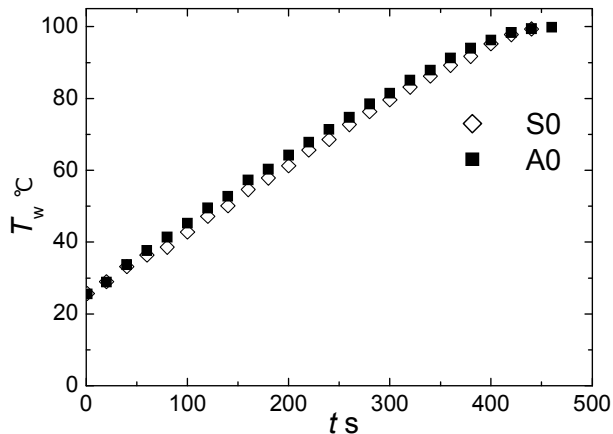


Fig. 4. Temperature variation of water for S0 and A0.

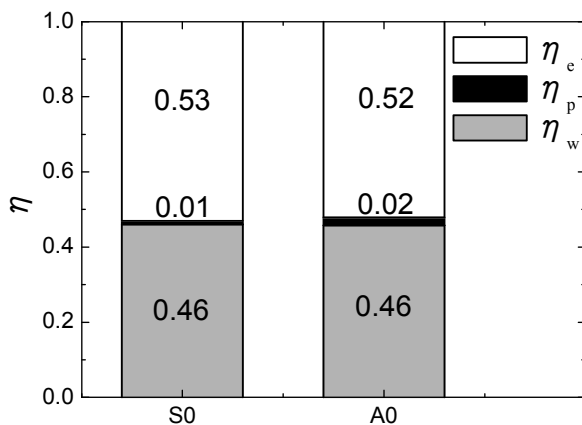


Fig. 5. Heat balance for the pot without fins, S0 and A0.

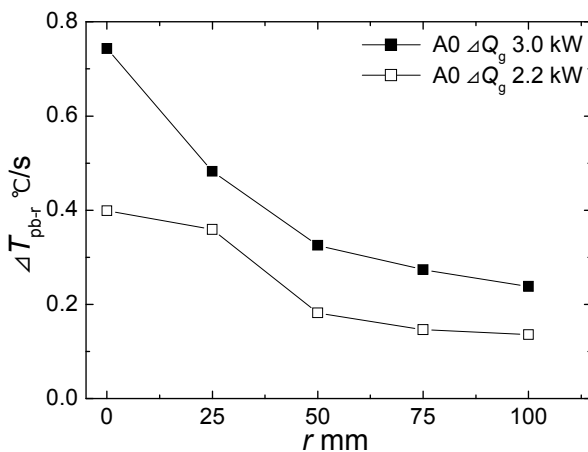


Fig. 6. Temperature rise rate of the bottom wall for A0.

が分かった。A2 や A3 が A1 と比べ伝熱促進効果が大きい理由は, フィン総面積に依っており, A2 フィン部の面積は, A1 フィンの約 3 倍, A3 フィンの約 14 倍と大きいことが原因であると考えられる。

Fig. 8 に A0, A1, A2, A3 の鍋側方の周囲温度分布を示す。フィン枚数の増加とともに周囲温度が低下していることが分かる。また, Fig. 9 に A0, A1, A2, A3 の鍋底温度上昇率を示す。フィンが溶接されている場所での温度上昇率が A0 に対して高くなっており, 特に A3 の  $r=75$  の地点で温度上昇率が高くなっていることが分かる。これらのことから, フィンによって鍋への入熱が促進されたことが分かる。Fig. 8 で見られた周囲の温度低下は, フィンが排熱を回収し, 回収された熱がフィン溶接部から鍋に入熱し, 伝熱が促進され, その分排熱が減り, 外気温度が低下したものと考えられる。

Fig. 10 に  $\Delta Q_g=3.0$  kW とするときの各鍋の熱量割合を示す。フィン枚数が増加するほど水への熱量割合が増加し, A0 では 0.46 であったのに対し, 最大で 0.67 に達し, 0.21 もの入熱促進が確認できた。フィンの設置が排熱をフィン方向に回収するうえで有効に作用し, 回収した熱が鍋に伝わることで, 水への入熱量が増えたことが確認できた。なお, 鍋の熱量割合はフィンの有無と枚数によらず変化が見られなかった。これは上述のように, 鍋の熱容量が水の熱容量に対して小さいことが原因と考えられる。

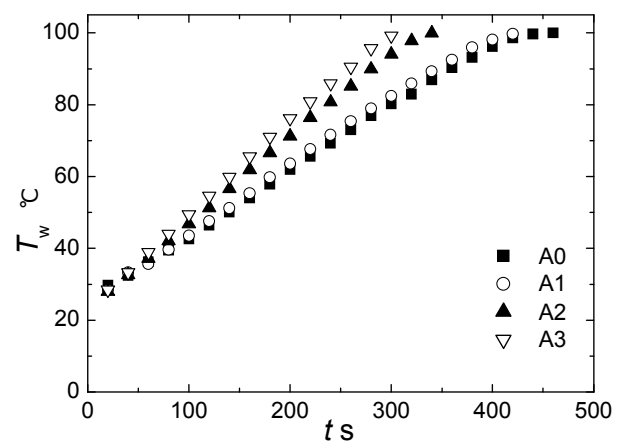


Fig. 7. Temperature variation of Al pots.

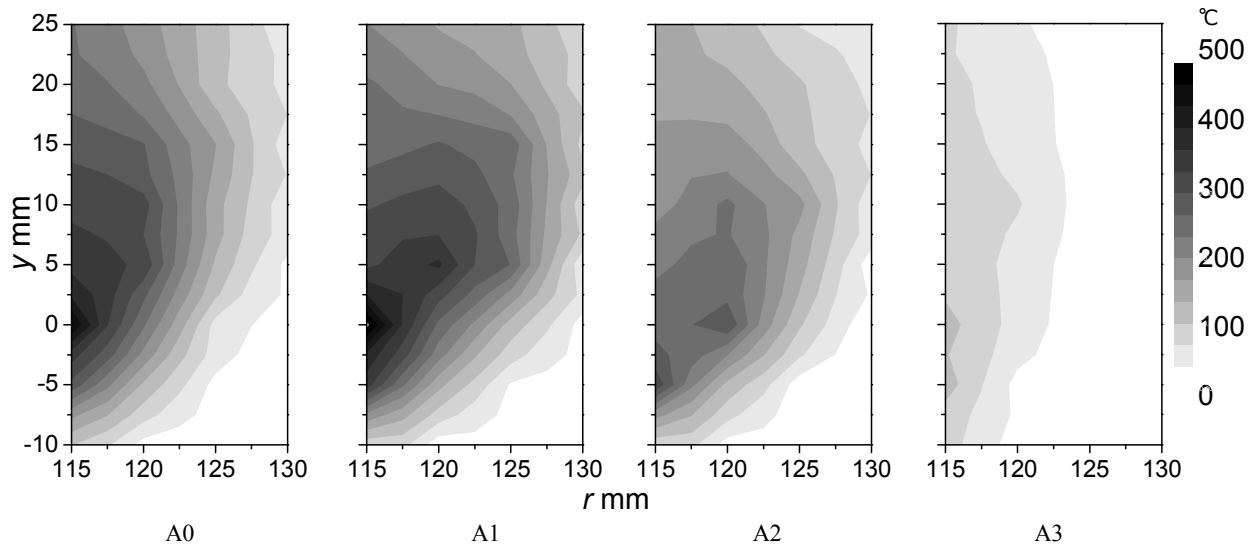


Fig. 8. Air temperature around the pot for Aluminum pots.

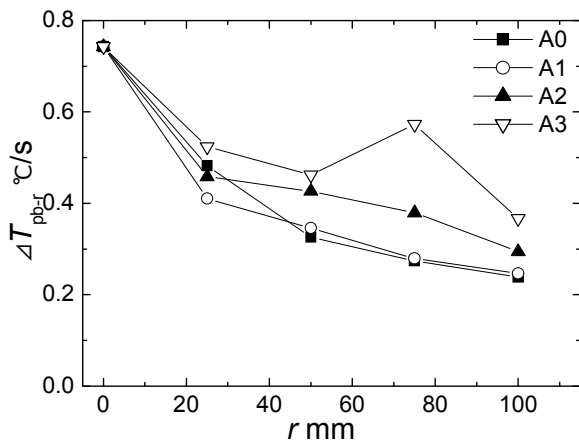


Fig. 9. Temperature rise rate of the bottom wall for Aluminum pots.

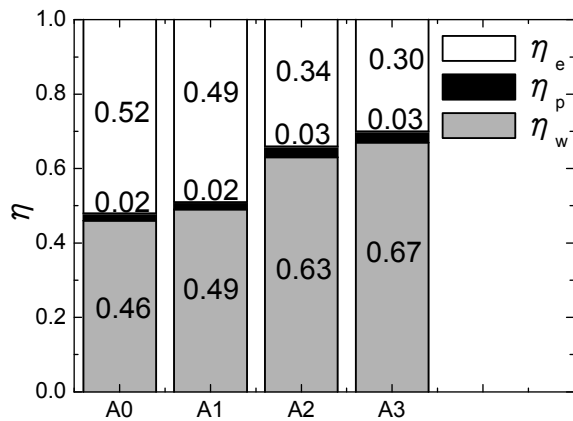


Fig. 10. Heat balance for A0, A1, A2 and A3.

### 3.3 鍋底の熱伝達率

$\Delta Q_g = 3.0 \text{ kW}$  とするときの A0, A1, A2, A3 の鍋底全体にわたる平均熱伝達率  $h_m$  の時間変化を Fig. 11 に示す. 図より, 平均熱伝達率は時間経過とともに少しずつ増えていき, また, ある時間から急激に増加することが分かる. これは,  $\Delta Q_g$  が一定であるのに対し, 鍋底と水の温度上昇率が異なり, 鍋底と水の温度差が小さくなっているためである. いずれの鍋でも 180 s 前後から  $T_{pb}$  が上昇しなくなる. 鍋底と水の温度差はこの時間付近で急激に小さくなり, 熱伝達率が急上昇すると考えられる. 次に, 水温が  $90^\circ\text{C}$  になるまでの  $h_m$  の平均値は, 各鍋についてそれぞれ  $1.7 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ,  $1.8 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ,  $2.1 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ,  $2.2 \text{ kW/m}^2\text{K}$  であった. A1, A2, A3 のフィン付き鍋の  $h_m$  は, A0 に対し約 2.5%, 約 19%, 約 29% それぞれ増加し, フィン枚数が増えるほど入熱が増加することが熱伝達率の観点からも分かった.

A0 鍋と入熱が最大の A3 鍋について, 各所の局所熱伝達率  $h_i$  の時間変化を Fig. 12(a) と (b) にそれぞれ示す. 図を見比べると, 鍋中央  $r=0$  においては値そのものに大きな違いは認められないものの, それ以外の各点, 特にフィン溶接部の  $r=75$  での値が大きく改善しており, フィンの伝熱促進効果と考えられる. また, 中心以外の位置でも値が大きくなっており, フィン設置による副次的な伝熱促進効果があるものと推察される.

#### 4. 結論

湯沸し鍋およびフィン付き湯沸し鍋の水溫、鍋溫度、鍋周囲溫度を測定し、熱量割合と熱伝達率を求め、伝熱促進効果について検討した。本研究で得られた主な結果は次のとおりである。

1. 沸騰所要時間と熱量割合は、本実験条件下では鍋の材料には依存しない。
2. フィン無し鍋では、ガス発熱量の 46%が水の加熱に使われる。
3. 本実験で使用したフィン付き鍋では、ガス発熱量の 67%が水の加熱に使われ、フィンによる伝熱促進効果は約 20%に及ぶ。
4. ガス側鍋底に付設したフィンは、鍋側方へと逃げる排熱を回収し、湯沸し時間を最大 30%短縮できる。したがって、フィンの設置は湯沸し時の伝熱促進に有効である。

フィン付き鍋の加工には、株式会社最上インクスの竹原努氏、中谷公治氏、中尾隆治氏のご協力を得た。本研究は、2014 年度同志社大学理工学研究所研究助成金によって行われた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 肥後温子，平野美那世，“底厚の異なる 5 種類の鍋底の昇降温特性”，日本調理科学会誌， 33[4], 426-436 (2000).
- 2) 辰口直子，洪川祥子，“材質および厚さの異なる鍋の調理特性に関する研究”，日本調理科学会誌， 33[2], 157-165 (2000).
- 3) 高尾俊匡，“鍋の伝熱学的研究”，東京大学工学部卒業論文，(東京大学，東京，2004)，1-90.
- 4) 日本機械学会，伝熱工学資料改訂第 5 版，(日本機械学会，東京，2009)，97-98.

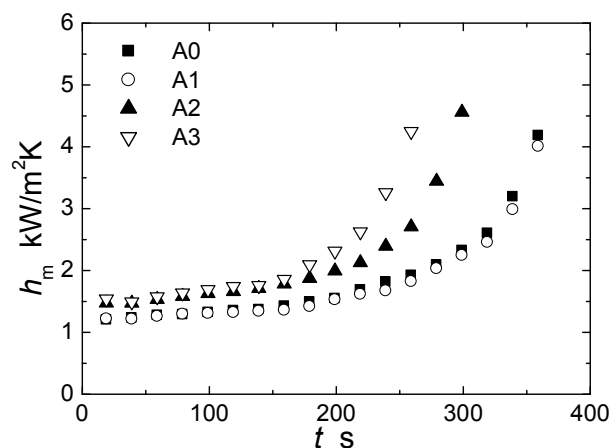
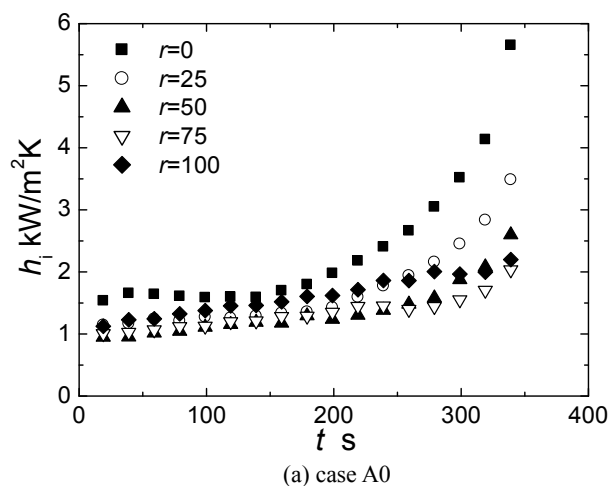
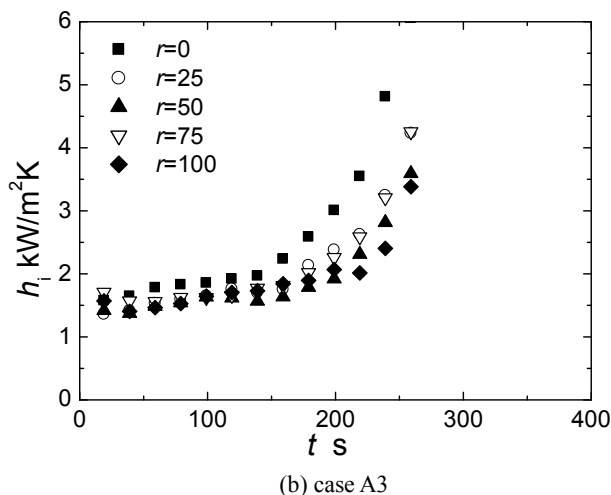


Fig. 11. Average heat transfer coefficient.



(a) case A0



(b) case A3

Fig. 12. Local heat transfer coefficient.