

卒 業 論 文

鍋の伝熱学的研究

通し番号 1 - 90 完

平成 16年 2月 6日 提出

指導教官 庄司 正弘 教授

学籍番号 20178 氏名 高尾 俊匡

目次

用語, 記号と単位	11
第1章 序論	13
1.1 研究の背景	14
1.2 従来の研究	17
1.3 研究の目的	18
第2章 実験・測定	19
2.1 実験装置	20
2.1.1 実験装置概要	20
2.1.2 鍋	20
2.1.3 水	20
2.1.4 熱源とガス流量計	20
2.2 測定装置	24
2.2.1 放射温度計	24
2.2.2 接触式温度計	24
2.2.3 測定方法	24
2.3 実験方法	27
2.3.1 加熱時	27
2.3.2 冷却時	27
2.3.3 実験時のパラメータ	27
2.3.4 各温度の定義	28
2.3.5 対流空気の温度の可視化	28
第3章 実験結果	30
3.1 加熱時の特性	31
3.1.1 各記号の定義	31
3.1.2 金属製鍋の材質	31
3.1.3 金属製鍋の形状	33

3.1.4	金属製鍋と土鍋	33
3.1.5	水量	33
3.1.6	火力	33
3.1.7	蓋	33
3.1.8	ガスの放射熱	38
3.1.9	流体	38
3.2	冷却時の特性	41
3.2.1	鍋・水量	41
3.2.2	蓋・流体	41
3.3	対流空気の温度の可視化	45
3.3.1	ガス加熱時の空気の対流	45
第4章	考察	47
4.1	加熱時の特性	48
4.1.1	金属製鍋の材質	48
4.1.2	金属製鍋の形状	48
4.1.3	金属製鍋と土鍋	48
4.1.4	水量	50
4.1.5	火力	50
4.1.6	蓋	50
4.1.7	ガスの放射熱	50
4.1.8	流体	51
4.1.9	対流空気の温度の可視化	51
4.2	冷却時の特性	52
4.2.1	鍋の材質・形状	52
4.2.2	蓋・流体	52
4.3	鍋の伝熱モデル	53
4.3.1	温度上昇特性	53
4.3.2	温度降下特性	54
第5章	結論	57
5.1	結論	58
5.2	今後の課題	59
5.3	謝辞	60
	参考文献	61

第 6 章	実験データ集	62
6.1	加熱データ	63
6.2	冷却データ	83

目 次

2.1	実験装置概要	21
2.2	鍋 1, アルミ, 中厚	22
2.3	鍋 2, アルミ, 厚	22
2.4	鍋 3, 銅	22
2.5	鍋 4, ステンレス	22
2.6	鍋 5, アルミ, テーパ付き	23
2.7	鍋 6, アルミ, ボウル	23
2.8	鍋 7, アルミ, 外輪	23
2.9	鍋 8, 土鍋	23
2.10	ガスコンロ	23
2.11	ガス流量計	23
2.12	放射温度計	25
2.13	データコレクタ	25
2.14	サーモグラフィの視点	26
2.15	熱電対を貼り付けた鍋	26
2.16	黒色スクリーンの設置	29
3.1	鍋 1 について水量を変化させた際の熱効率	35
3.2	鍋 2 について水量を変化させた際の熱効率	35
3.3	鍋 3 について水量を変化させた際の熱効率	36
3.4	鍋 4 について水量を変化させた際の熱効率	36
3.5	鍋 1 についてガス流量を変化させた際の熱効率	37
3.6	鍋 4 についてガス流量を変化させた際の熱効率	37
3.7	鍋 1 における粘性流体と水の温度上昇の比較	40
3.8	鍋 4 における粘性流体と水の温度上昇の比較	40
3.9	鍋 1 について熱容量を標準化した際の温度降下	42
3.10	鍋 2 について熱容量を標準化した際の温度降下	42
3.11	鍋 3 について熱容量を標準化した際の温度降下	43
3.12	鍋 4 について熱容量を標準化した際の温度降下	43

3.13	鍋 7, 8 において熱容量を標準化した際の温度降下	44
3.14	蓋, 流体が異なる際の温度降下	44
3.15	蓋をしない場合の温度分布	46
3.16	蓋をした時の温度分布	46
3.17	蓋をしないで粘性流体を加熱した時の温度分布	46
3.18	温度範囲	46
4.1	ΔT_{pw}	49
4.2	$(\rho cV)_p$ と η_p の関係	49
4.3	温度上昇特性	55
4.4	Fig.4.3 における温度差	55
4.5	モデルと実験値の比較 1	56
4.6	モデルと実験値の比較 2	56
6.1	鍋 1 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]	63
6.2	鍋 1 水量 2.0 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]	63
6.3	鍋 2 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]	63
6.4	鍋 2 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]	63
6.5	鍋 2 水量 2.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]	64
6.6	鍋 1 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]	64
6.7	鍋 2 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]	64
6.8	鍋 1 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]	64
6.9	鍋 2 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]	65
6.10	鍋 1 水量 0.1 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]	65
6.11	鍋 1 水量 0.1 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]	65
6.12	鍋 2 水量 0.1 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]	65
6.13	鍋 1 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]	66
6.14	鍋 2 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]	66
6.15	鍋 1 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]	66
6.16	鍋 2 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]	66
6.17	鍋 1 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 1.5 [ℓ/min]	67
6.18	鍋 2 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 1.5 [ℓ/min]	67
6.19	鍋 1 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]	67
6.20	鍋 1 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 1.5 [ℓ/min]	67
6.21	鍋 2 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 1.5 [ℓ/min]	68
6.22	鍋 1 水量 0.1 [ℓ] ガス流量 1.5 [ℓ/min]	68

6.23	鍋 2	水量 0.1 [ℓ]	ガス流量 1.5 [ℓ/min]	68
6.24	鍋 4	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	68
6.25	鍋 3	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	69
6.26	鍋 4	水量 0.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	69
6.27	鍋 3	水量 0.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	69
6.28	鍋 3	水量 1.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	69
6.29	鍋 4	水量 1.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	70
6.30	鍋 3	水量 0.2 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	70
6.31	鍋 4	水量 0.2 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	71
6.32	鍋 3	水量 2.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	71
6.33	鍋 4	水量 2.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	71
6.34	鍋 2	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	71
6.35	鍋 4	水量 0.2 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	72
6.36	鍋 3	水量 0.2 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	72
6.37	鍋 2	水量 1.5 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	72
6.38	鍋 4	水量 0.5 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	72
6.39	鍋 3	水量 0.5 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	73
6.40	鍋 2	水量 2.0 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	73
6.41	鍋 4	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	73
6.42	鍋 3	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	73
6.43	鍋 5	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	74
6.44	鍋 6	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	74
6.45	鍋 5	水量 0.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	74
6.46	鍋 6	水量 0.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	74
6.47	鍋 5	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	75
6.48	鍋 6	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	75
6.49	鍋 6	水量 0.5 [ℓ]	ガス流量 2.0 [ℓ/min]	76
6.50	鍋 1	水量 0.6 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	76
6.51	鍋 1	水量 0.7 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	76
6.52	鍋 1	水量 0.8 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	76
6.53	鍋 1	水量 0.9 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	77
6.54	鍋 1	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	77
6.55	鍋 4	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	77
6.56	鍋 1	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	77
6.57	鍋 1	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり	78

6.58	鍋 4	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり	78
6.59	鍋 1	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり	78
6.60	鍋 4	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり	78
6.61	鍋 1	水量 1.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり	79
6.62	鍋 1	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり 粘性流体	79
6.63	鍋 1	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり 粘性流体	79
6.64	鍋 4	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり 粘性流体	79
6.65	鍋 1	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]		80
6.66	鍋 2	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]		80
6.67	鍋 3	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]		80
6.68	鍋 4	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]		80
6.69	鍋 5	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]		81
6.70	鍋 6	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]		81
6.71	鍋 3	水量 1.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]		81
6.72	鍋 1	水量 0.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]		81
6.73	鍋 4	水量 1.5 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]		82
6.74	鍋 7	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり	82
6.75	鍋 8	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり	82
6.76	鍋 4	水量 1.0 [ℓ]	ガス流量 2.7 [ℓ/min]	蓋あり 粘性流体	82
6.77	鍋 1	水量 1.5 [ℓ]			83
6.78	鍋 1	水量 1.0 [ℓ]			83
6.79	鍋 2	水量 1.0 [ℓ]			83
6.80	鍋 2	水量 1.5 [ℓ]			83
6.81	鍋 2	水量 2.0 [ℓ]			84
6.82	鍋 1	水量 0.5 [ℓ]			84
6.83	鍋 2	水量 0.5 [ℓ]			84
6.84	鍋 1	水量 0.2 [ℓ]			84
6.85	鍋 2	水量 0.2 [ℓ]			85
6.86	鍋 1	水量 0.1 [ℓ]			85
6.87	鍋 4	水量 1.0 [ℓ]			85
6.88	鍋 3	水量 1.0 [ℓ]			85
6.89	鍋 4	水量 0.5 [ℓ]			86
6.90	鍋 3	水量 0.5 [ℓ]			86
6.91	鍋 3	水量 1.5 [ℓ]			86
6.92	鍋 4	水量 1.5 [ℓ]			86

6.93 鍋 3 水量 0.2 [ℓ]	87
6.94 鍋 4 水量 0.2 [ℓ]	87
6.95 鍋 3 水量 2.0 [ℓ]	87
6.96 鍋 4 水量 2.0 [ℓ]	87
6.97 鍋 1 水量 1.0 [ℓ] 粘性流体	88
6.98 鍋 1 水量 1.0 [ℓ] 蓋あり	88
6.99 鍋 7 水量 1.0 [ℓ] 蓋あり	88
6.100 鍋 8 水量 1.0 [ℓ] 蓋あり	88
6.101 鍋 4 水量 1.0 [ℓ] 蓋あり 粘性流体	89

表 目 次

2.1	実験装置各部名称	21
2.2	各鍋の特徴	21
2.3	各物質の物性値	22
3.1	水量：0.2 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率 .	32
3.2	水量：0.5 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率 .	32
3.3	水量：1.0 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率 .	32
3.4	水量：1.5 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率 .	32
3.5	水量：2.0 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率 .	34
3.6	鍋の形状が異なる場合の熱効率	34
3.7	金属製鍋と土鍋の熱効率の比較	34
3.8	鍋 1 についての蓋の影響	39
3.9	鍋 2 についての蓋の影響	39
3.10	鍋 3 についての蓋の影響	39
3.11	鍋 4 についての蓋の影響	39
3.12	放射熱の影響	39

用語，記号と単位

記号

c	: 比熱 (specific heat), [J/kg·K]
d	: 厚さ (thickness), [m]
E	: 射出能 (emissive power), [W/m ²]
f	: 体積流量 (volume flow), [ℓ/min]
Gr	: グラスホフ数 (Grashof number), [-]
g	: 重力加速度 (accelation of gravity), [m/s ²]
h	: 熱伝達率 (heat transfer coefficient), [W/m ² ·K]
L	: 代表長さ (characteristic length), [m]
Nu	: ヌッセルト数 (Nusselt number), [-]
Pr	: プラントル数 (Prandtl number), [-]
Q	: 伝熱量 (heat transfer rate), [W]
q	: 熱流束 (heat flux), [W/m ²]
Ra	: レイリー数 (Rayleigh number), [-]
S	: 表面積 (surface area), [m ²]
T	: 温度 (temperature), [K]
t	: 時間 (time), [sec]
V	: 体積 (volume), [m ³]

ギリシャ文字

α	: 温度伝導率 (thermal diffusivity), [m ² /s]
β	: 体膨張係数 (volumetric thermal expansion), [1/K]
Δ	: 刻み (increment), [-]
ε	: 射出率 (emissivity), [-]
η	: 熱効率 (heat efficiency), [-]
θ	: 無次元温度 (dimensionless temperature), [-]
λ	: 熱伝導率 (thermal conductivity), [W/m·K]
ν	: 動粘度 (動粘性係数) (kinematic viscosity), [m ² /s]
π	: 円周率 (circle constant), [-]
ρ	: 密度 (density), [kg/m ³]
σ	: ステファン-ボルツマン定数 (Stefan-Boltzman constant), [W/m ² ·K ⁴]

添え字

d	:	下側 (downside)
ex	:	外側 (exterior)
g	:	ガス (gas)
in	:	内側 (interior)
m	:	平均 (mean)
o	:	初期値 (initial value)
p	:	鍋 (pot)
sat	:	飽和状態 (saturated condition)
u	:	上側 (upside)
w	:	水 (water)
∞	:	雰囲気 (ambient)

第1章 序論

1.1 研究の背景

「鍋」とは、「肴(な)」を煮る「瓮(へ)」の意味であり、食物を煮るのに用いる金属製または陶器製の器のことを言う [1]。また、英語では浅鍋を「Pan」、深鍋を「Pot」という。加熱容器としての鍋には、現在の日本においては和食、洋食、中華等の異なる調理様式が定着していることもあり、材質、形状の異なる非常に多くの種類が存在している。これには、煮る、茹でる、焼く、蒸す、揚げる、炒めるなどの加熱調理法や、食材、熱源の違いも多種多様な鍋が存在する理由である [2]。

鍋の素材として、高熱に対して安定であること、食品に対して安定であることが要求される。そのため材質には金属やセラミック類が用いられている。金属は、一般的に耐熱性、耐衝撃性があり、熱伝導率が大きく、鍋に適した素材である。主素材金属元素としてはアルミニウム、鉄、銅、チタンがあり、セラミック類としてガラス、陶磁器などで作られている。

現在最も多く用いられている材質はアルミニウムであり、その理由として、熱伝導率が $237 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ と非常に大きく、成型しやすく、密度が $2688 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ と軽く、安価であるなどが挙げられる。しかしながら食品の酸、アルカリには不安定であり、腐食を防ぐためにシュウ酸や硫酸で酸化皮膜を形成しておくことが多い。これをアルマイトという。鉄は、熱伝導率が $80.3 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ と大きく、融点が $1537 \text{ [}^\circ\text{C]}$ と高く、高温加熱の繰り返しにも強いが、酸化されやすく、さびが出やすいので手入れに手間がかかってしまうという欠点がある。ステンレスは鉄にクロムやニッケルを添加し耐食性を高めた合金であり、非常にさびにくい、熱伝導率が $16 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ と小さい。銅は熱伝導率が $398 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ と非常に大きい、さびやすく、密度が $8880 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ と重く、また、価格も高いので一般家庭にはあまり普及していない。また、腐食を防ぐために錫メッキが施されているが、錫の融点が $232 \text{ [}^\circ\text{C]}$ と低いため、高温加熱には適さない。チタンは密度が $4506 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ と軽く、耐食性、耐熱性、耐摩耗性富む。しかし、熱伝導率が $21.9 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ と低い。また、加工性が悪いので製品が作りにくく、高価であるため主に業務用として使われている。ガラス、セラミック、陶器に関しては食品の成分に安定であるが、熱伝導率が低く、また、金属製の鍋に比べて衝撃に弱く、割れやすいという欠点がある [2] [3] [4]。

鍋底の形状としては平底のものと底が湾曲したものがある。この形状の違いは熱源によって異なっている。囲炉裏のように燃える火に対して

鍋をつるして使ったり、かまどを使う場合には底が湾曲しているものが用いられる。これに対して、鍋底で平らに支えて使う熱源、つまりガスや電磁調理器では平底のものが使われている。現在では中華鍋、釜を除いてはほとんど平底の鍋が用いられている。

熱源としては、ガスコンロ、電気ヒーター、電磁調理器などがある。ガスコンロはバーナー部分と五徳で構成されている。バーナーの多くはリング状であり、空気孔から供給される空気とガスが混合されて燃焼する。電気ヒーターはニクロム線に電流を流し、その発熱を熱源とするものである。電気ヒーターは放射熱が大きいという特徴があり、オーブンやトースターの熱源としても利用されている。電磁調理器とはコイルから 20～30 [kHz] の高周波電流を流し、磁力線を発生させて、鍋底に起電力が生じ、渦電流が発生して発熱する。そのため、以前までは磁性体のみ使用でき、鉄や磁性のあるステンレスで使用するのが望ましく、アルミニウムや銅、セラミックには適さないと言われていた。しかし、最近ではより高い周波数の電流を流し、全ての金属製鍋の加熱を可能にした電磁調理器が開発され、すでに市販されている [4]。

鍋を用いた加熱調理には煮る、茹でる、蒸す、焼く、揚げる、炒める等がある。この中で水を熱の媒体とする加熱方法は煮る、茹でる、蒸すがある。煮るという加熱方法は、食品の加熱と同時に調味を行うものであり、茹でるとは多量に水中で食品を加熱することであるが、加熱に用いた水は利用しないという点が煮る操作と異なる。蒸すとは水蒸気の潜熱 (2257 [kJ/kg]) を食品に与えることで加熱する方法である [3] [4]。

また、鍋は調理器具の中で最も種類が多く、汎用性があり、多用されている。各家庭の保有数は加熱用具の中で一番多く、一軒につき平均 10 から 15 程度とも言われている。このように、我々の日常生活においても重要な位置を占めている鍋であるが、鍋を購入する際に参考する情報は、その鍋の調理特性よりもデザインや価格、使用する際の使いやすさ、手入れのしやすさを基準にすることが多い。というのは、様々な調理法が試みられ、加熱中におきる食品の変化が注目されたり、オーブンや電子レンジなどの調理機器を駆使した調理法がもてはやされている中で、鍋の役割や使い方についての著述が少なく、鍋の多様性の割には選択をするための情報が少ないからであると言われている [2]。

現在、調理法についての研究は数多くなされているが、鍋そのものの比較研究は少ない。その研究の多くは調理学や家政学の分野でものもであり、工学の分野で鍋に関する研究は今まであまりなされていない。しかし、

これからは調理機器の機能の向上や使いやすさ，そして効率化や省エネルギー等を追求する必要がある．

1.2 従来の研究

従来の研究の中で，鍋の特性を研究したものに辰口ら [5] や，肥後ら [6] のものが挙げられる．辰口らは，湯沸し時の水へ伝わるガスの熱効率を算出している．しかし，鍋の温度分布は空焚き時のものを参考にしており，鍋から水への熱伝達を考える際に，湯沸し時の鍋の温度分布は，空焚き時のものと同じとは考えにくい．肥後らの研究も鍋底の温度は空焚き時のものを示しており，焼く，炒めるといった調理に適した鍋を示していると考えられる．

また，伝熱諸量を用いて加熱調理の定量化を示している研究には長尾ら [7] [8] のものが挙げられる．

1.3 研究の目的

本研究では、日常でも馴染み深い現象である湯沸しに注目し、鍋という調理器具の科学的意味を伝熱工学の観点から研究していくことを目的とする。特に、湯沸しにおける熱伝導、熱伝達、沸騰などの伝熱現象から解明することを目指す。

第2章 実験・測定

2.1 実験装置

2.1.1 実験装置概要

実験装置の概略図を Figure 2.1 に、各部名称を Table 2.1 に示す．実験方法と手順は 2.3 節にて説明する．

2.1.2 鍋

鍋は8種類用い、それぞれの写真を Figure 2.2 から Figure 2.9 に示す．鍋の特徴を Table 2.2 に示す．また、これらの鍋の物性値は文献値 [9] を用いることにする．その詳細を Table 2.3 に示す．また、実験時は放射温度計で鍋の壁温を取得できるように黒色塗料を鍋の一部に塗った．

2.1.3 水

水は蒸留装置で作った蒸留水を用い、水量はメスシリンダーを用いて体積を測った．メスシリンダーの容量は 500 [cc] である．体積はメニスカスの部分を目で見て測定した．

2.1.4 熱源とガス流量計

熱源は卓上コンロを用いた．Figure 2.10 に示す．燃焼ガスは都市ガス 13 A であり、バーナーの直径は 8 [cm]，バーナーから鍋までは 25 [mm] である．都市ガス 13 A の燃焼熱は $11000 \text{ [kcal/m}^3] = 46.1 \text{ [kJ/}\ell\text{]}$ とする．火力とガス流量 f_g の関係は、 f_g が 2.7 [ℓ/min] を強火、2.0 [ℓ/min] を中火、1.5 [ℓ/min] を弱火とする．

また、本研究では実験条件に合わせてガス流量を一定に保つために浮き子式流量計を用いた．その写真を Figure 2.11 に示す．流量計の目盛りは 500 [cc/min] から 5000 [cc/min] である．つまみを回してガス流量を調整することになるが、最小目盛りが 500 [cc/min] であり、浮き子が微小な振動を起こすため、測定誤差が生じてしまう．

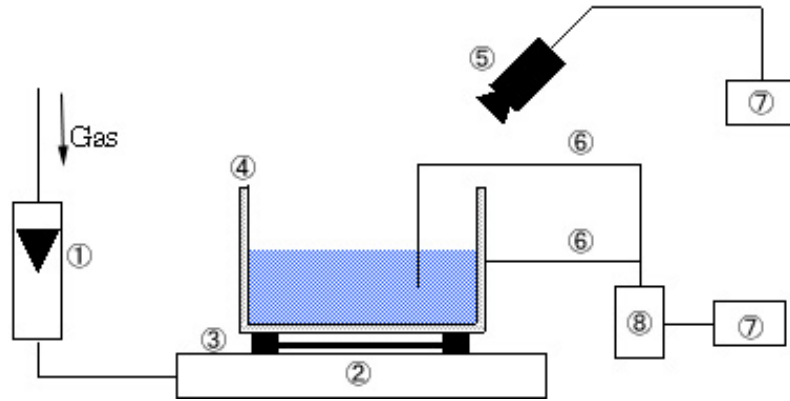


Fig. 2.1: 実験装置概要

番号	説明	番号	説明
①	Gas Flowmeter	②	Stove Burner
③	Trivet	④	Pot
⑤	Thermography	⑥	Thermo Couple
⑦	PC	⑧	Data Collector

Table 2.1: 実験装置各部名称

鍋番号	材質	内径	高さ	底厚	壁厚
鍋 1	Al1100	180	110	2.5	2
鍋 2	Al1100	180	110	3.0	2.5
鍋 3	Cu	180	110	1.0	1.0
鍋 4	sus445	180	110	1.2	1.2
鍋 5	Al1100	210	110	3.0	3.0
鍋 6	Al1100	210	110	1.0	2
鍋 7	Al1100	210	70	3.0	3.0
鍋 8	陶器	180	80	10	15

Table 2.2: 各鍋の特徴, 単位は [mm]

材質	密度 ρ	比熱 c	熱伝導率 λ	温度伝導率 $\alpha(\times 10^{-6})$
Al1100	2710	904	237	90.6
Cu	8880	386	398	117
sus445	7920	465	16.0	4.07
陶器	2350	1000	1.3	0.55

Table 2.3: 各物質の物性値



Fig. 2.2: 鍋1, アルミ, 中厚



Fig. 2.3: 鍋2, アルミ, 厚



Fig. 2.4: 鍋3, 銅



Fig. 2.5: 鍋4, ステンレス



Fig. 2.6: 鍋5, アルミ, テーパ付き



Fig. 2.7: 鍋6, アルミ, ボウル



Fig. 2.8: 鍋7, アルミ, 外輪



Fig. 2.9: 鍋8, 土鍋



Fig. 2.10: ガスコンロ



Fig. 2.11: ガス流量計

2.2 測定装置

2.2.1 放射温度計

放射温度計（NEC 三栄製，型番 TH3102MR）を Figure 2.12 に示す．スターリングクーラー内臓の赤外線放射温度計であり，1次元スキャンと2次元スキャンが可能である．本実験では2次元スキャンを使用し，放射率は1.0とした．取得データは縦 239pixels，横 255pixelsである．赤外線は物体表面温度が同じでも，必ずしも一様に放射温度計に届いているとは限らないため，測定誤差が生じてしまうことは否定できない．

2.2.2 接触式温度計

直径 0.2 [mm] のアルメル線とクロメル線を溶接し，アルメルクロメル熱電対を製作した．これを使用し，Figure 2.13 に示すデータコレクタ（キーエンス製，型番 MR-1100）で温度データを収集する．このデータコレクタを用いることで，同時に16点のデータを取得することが可能である．

2.2.3 測定方法

Figure 2.14 のように斜め前からの視点になるようにサーモグラフィを設置し，2次元スキャンで温度データを取得する．Figure 2.15 のように熱電対を所定の位置に耐熱テープで貼り，水中の温度は熱電対を鍋の上部で固定し，水中に位置するように配置する．温度データはデータコレクタを用いて取得する．



Fig. 2.12: 放射温度計



Fig. 2.13: データコレクタ



Fig. 2.14: サーマグラフィの視点



Fig. 2.15: 熱電対を貼り付けた鍋

2.3 実験方法

2.3.1 加熱時

加熱時の温度を測定するために、以下の手順で実験を行う

1. 鍋を五徳の上に載せる
2. 放射温度計を適当な場所に設置，熱電対を貼り，データコレクタにつなぐ
3. 水を汲み，適当な水量を鍋に流し入れる
4. 鍋と水の温度を同じにするために5分置く
5. 換気扇を回す
6. ガス流量計，ガスの元栓を開く
7. 温度測定を開始し，点火する
8. 測定が終了したら消火し，ガス流量計とガスの元栓を閉め，換気扇を止める

2.3.2 冷却時

冷却時の温度は，室温で自然冷却させて測定する．温度の測定方法は加熱時と同様である．

2.3.3 実験時のパラメータ

- 金属製鍋の材質
- 金属製鍋の形状
- 金属製鍋と土鍋
- 水量
- 火力
- 蓋
- ガスの放射熱
- 流体

2.3.4 各温度の定義

温度を表す記号を以下のように定める

記号	意味
T_w	: 水温
T_p	: 鍋温
$T_{p\text{ in u}}$	: 鍋の内壁で水に接していない部分の温度
$T_{p\text{ in d}}$	: 鍋の内壁で水に接している部分の温度
$T_{p\text{ ex u}}$	: 鍋の外壁で水に接していない部分の温度
$T_{p\text{ ex d}}$	: 鍋の外壁で水に接している部分の温度
$T_{p\text{ in}}$	: 鍋の内壁の温度
$T_{p\text{ ex}}$	: 鍋の外壁の温度

熱電対で測定した場合は，水中の温度の平均を水温 T_w とする．放射温度計で測定した場合は，水面の中心部と端部の midpoint の温度を水温 T_w とする．鍋温 T_p は表面積 S を用いて以下のように定義する

$$T_{p\text{ in}} = \frac{T_{p\text{ in u}} S_{p\text{ in u}} + T_{p\text{ in d}} S_{p\text{ in d}}}{S_{p\text{ in u}} + S_{p\text{ in d}}} \quad (2.1)$$

$$T_{p\text{ ex}} = \frac{T_{p\text{ ex u}} S_{p\text{ ex u}} + T_{p\text{ ex d}} S_{p\text{ ex d}}}{S_{p\text{ ex u}} + S_{p\text{ ex d}}} \quad (2.2)$$

$$T_p = \frac{T_{p\text{ ex}} S_{p\text{ ex}} + T_{p\text{ in}} S_{p\text{ in}}}{S_{p\text{ ex}} + S_{p\text{ in}}} \quad (2.3)$$

2.3.5 対流空気の温度の可視化

対流空気の温度は，放射率が非常に低いため，放射温度計では測定できない．また，熱電対を空中に固定することは困難なので，熱電対を用いても温度を測定することは難しい．そこで，Figure 2.16 のように鍋の上面に黒いスクリーンを設置し，対流空気によって温められたスクリーンの温度を放射温度計で計測する．この方法では，正確な温度を測定することはできないが，温度分布を可視化するということに関しては有効である．



Fig. 2.16: 黒色スクリーンの設置

第3章 実験結果

3.1 加熱時の特性

実験データについては Fig.6.1 から Fig.6.76 までを参照のこと.

3.1.1 各記号の定義

無次元温度 θ を

$$\theta = \frac{T - T_o}{T_{\text{sat}} - T_o} \quad (3.1)$$

と定義し、全ての火力で到達する値である $\theta_w = 0.9$ までの所要時間、水温、鍋温の温度上昇をそれぞれ t_a , ΔT_w , ΔT_p とする. ガスの燃焼による熱量 Q_g は

$$Q_g = \frac{46100}{60} f_g \quad (3.2)$$

となり、熱効率 η_w , η_p , η をそれぞれ

$$\eta_w = \frac{(\rho c V)_w \Delta T_w}{Q_g t_a} \quad (3.3)$$

$$\eta_p = \frac{(\rho c V)_p \Delta T_p}{Q_g t_a} \quad (3.4)$$

$$\eta = \frac{(\rho c V)_w \Delta T_w + (\rho c V)_p \Delta T_p}{Q_g t_a} = \eta_w + \eta_p \quad (3.5)$$

とする.

3.1.2 金属製鍋の材質

金属製鍋の材質による熱効率への影響を確かめるために、形状が同じである、鍋 1, 2, 3, 4 を比較する. ガス流量を 2.7 [ℓ/min] にし、水量ごとに η_w , η_p , η を求めた結果を Tab.3.1 から Tab.3.5 に示す. どの水量においても鍋 1 から鍋 3 の各熱効率の値に大きな違いはない. 水量が少なければステンレス製の鍋は他の 3 つの鍋に比べて熱効率は小さくなる. しかし、水量が多くなれば鍋ごとの合計熱効率の差は小さくなっていく.

鍋番号	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋 1	0.29	0.13	0.42
鍋 2	0.30	0.12	0.42
鍋 3	0.28	0.14	0.42
鍋 4	0.27	0.12	0.39

Table 3.1: 水量：0.2 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率

鍋番号	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋 1	0.34	0.081	0.42
鍋 2	0.33	0.079	0.41
鍋 3	0.34	0.084	0.42
鍋 4	0.31	0.083	0.39

Table 3.2: 水量：0.5 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率

鍋番号	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋 1	0.37	0.048	0.42
鍋 2	0.38	0.048	0.42
鍋 3	0.38	0.046	0.42
鍋 4	0.37	0.042	0.41

Table 3.3: 水量：1.0 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率

鍋番号	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋 1	0.40	0.033	0.43
鍋 2	0.40	0.035	0.43
鍋 3	0.40	0.030	0.43
鍋 4	0.40	0.026	0.43

Table 3.4: 水量：1.5 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率

3.1.3 金属製鍋の形状

アルミニウム製である，鍋1と鍋5，6，7を比較する．ガス流量を2.7 [ℓ]，水量を1.0 [ℓ]にしたときの η_w ， η_p ， η を求め，比較した結果をTab.3.6に示す．これらから，形状が変わっても η_w ， η には大きな差は出ない．その一方で η_p には差が出た．

また，鍋の大きさを変えることで η が変化した．すなわち鍋が大きくなると，熱効率が大きくなった．

3.1.4 金属製鍋と土鍋

形状が同じ鍋である，鍋7と鍋8を比較する．ガス流量を2.7 [ℓ]，水量を1.0 [ℓ]にし，蓋をして実験を行った．この際の η_w ， η_p ， η を求め，比較した結果をTab.3.7に示す． η_w にも η_p にも差が出ることになる．

3.1.5 水量

水量による熱効率の影響を確かめるために，鍋1から鍋4について，横軸を水量，縦軸を η_w ， η_p ， η にしたグラフをそれぞれFig.3.1からFig.3.4に示す．どの鍋についても η_w の値は水量が多くなるにつれて大きくなり， η_p は水量が多くなるにつれて小さくなる．また， η は水量が多くなるにつれて大きくなるのが分かる．

3.1.6 火力

火力による熱効率への影響を確かめるために，鍋1と鍋4について，横軸をガス流量 f_g ，縦軸を η_w ， η_p ， η にしたグラフをFig.3.5，Fig.3.6に示す．これらから，同じ材質，水量であるならば，火力を変化させても熱効率には影響しないことになる．

3.1.7 蓋

蓋による熱効率への影響を確かめるために，鍋ごとに蓋をしたときとしないときを比較することとする．ガス流量を2.7 [ℓ]，水量を1.0 [ℓ]にしたときに， η_w ， η_p ， η を求め，比較した結果をTab.3.8からTab.3.11

鍋番号	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋 1	0.42	0.023	0.44
鍋 2	0.41	0.026	0.43
鍋 3	0.42	0.022	0.44
鍋 4	0.42	0.018	0.44

Table 3.5: 水量：2.0 [ℓ], 火力：2.7 [ℓ/min] で加熱した場合の熱効率

鍋番号・状態	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋 1 蓋なし	0.37	0.042	0.41
鍋 5 蓋なし	0.35	0.060	0.41
鍋 6 蓋なし	0.36	0.022	0.38
鍋 1 蓋あり	0.41	0.046	0.45
鍋 7 蓋あり	0.42	0.064	0.48

Table 3.6: 鍋の形状が異なる場合の熱効率

鍋番号	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋 7	0.42	0.064	0.48
鍋 8	0.33	0.11	0.44

Table 3.7: 金属製鍋と土鍋の熱効率の比較

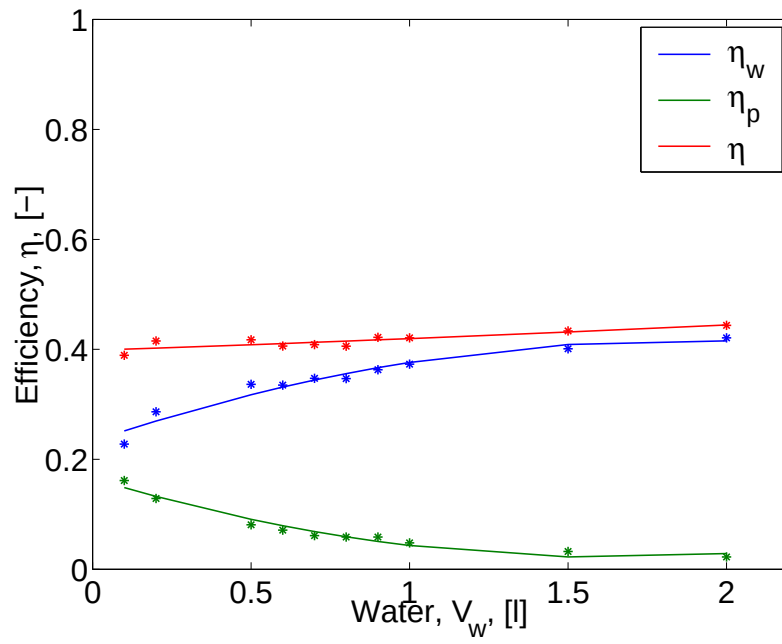


Fig. 3.1: 鍋 1 について水量を変化させた際の熱効率

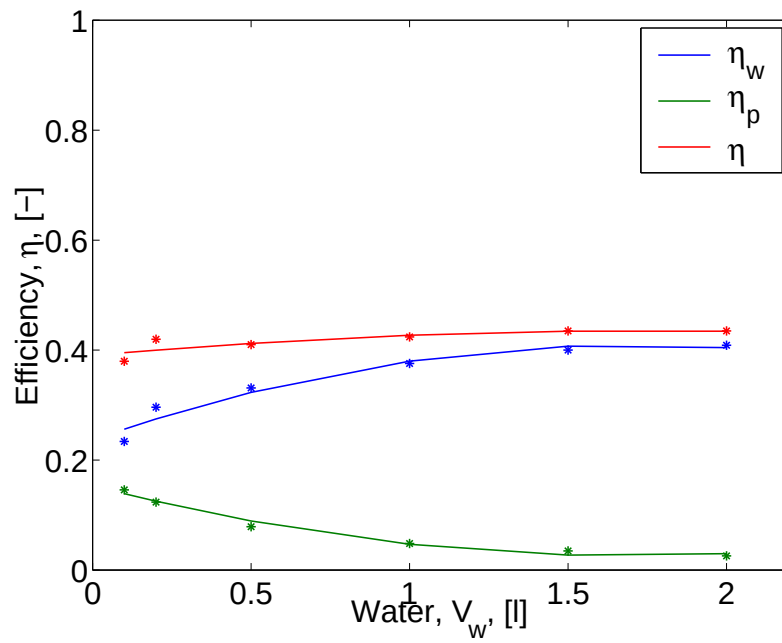


Fig. 3.2: 鍋 2 について水量を変化させた際の熱効率

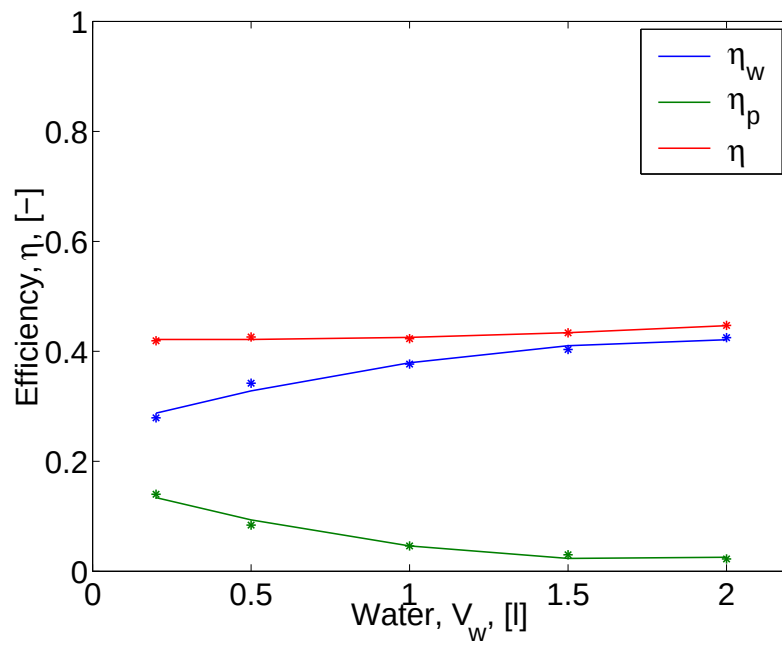


Fig. 3.3: 鍋 3 について水量を変化させた際の熱効率

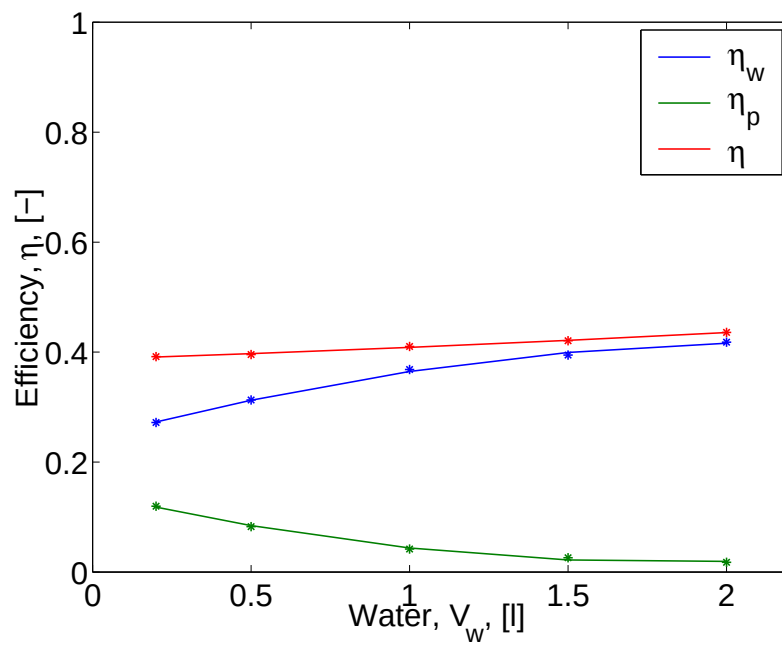


Fig. 3.4: 鍋 4 について水量を変化させた際の熱効率

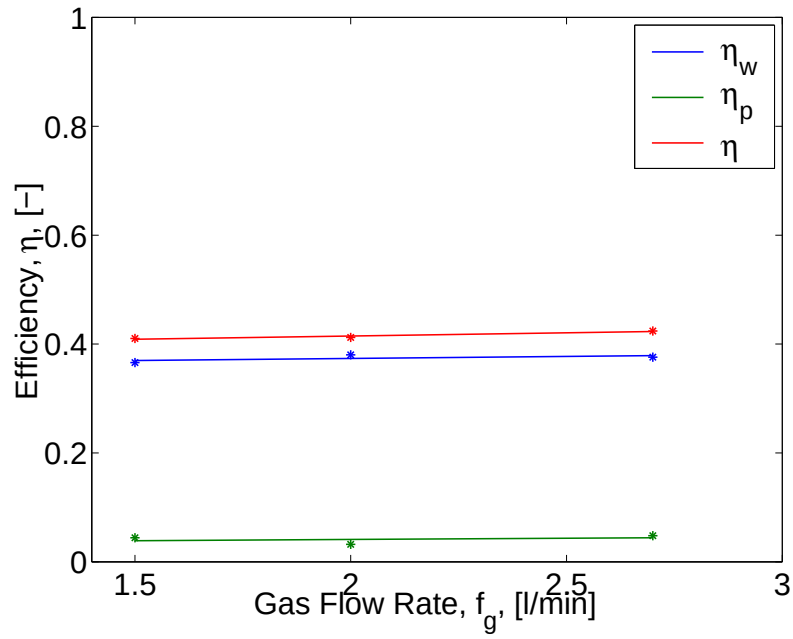


Fig. 3.5: 鍋 1 についてガス流量を変化させた際の熱効率

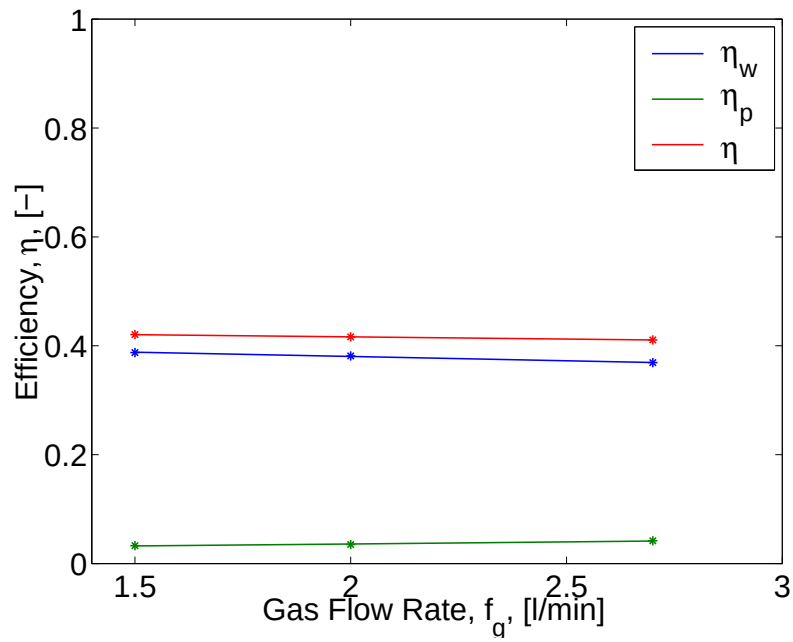


Fig. 3.6: 鍋 4 についてガス流量を変化させた際の熱効率

に示す. どの鍋においても蓋をした場合, η_w が 3 % から 5 % 上昇している. また, η_p は大きな変化はない. η も 3 % から 5 % 上昇している.

3.1.8 ガスの放射熱

金属の吸収率は一般的に低い (0.1 程度) ため, 鍋 2 において底面を黒色塗料で黒くしたものとししないもので, ガスの放射熱の影響を比較する. 結果を Tab.3.12 に示す. 底面を黒くしても熱効率 η は変わらない. 放射熱は小さいことが分かる.

3.1.9 流体

片栗粉を 10 [g] / 水 1 [kg] の割合で混合させ, 一旦強火で加熱し, ゲル状の粘性流体を作る. その後室温で冷却し, 1 [ℓ] 分を鍋に入れてガス流量 2.7 [ℓ/min] で加熱する. 鍋 1 と鍋 4 でガス流量 2.7 [ℓ/min], 水量 1.0 [ℓ] の条件で加熱した場合において, 水の場合と粘性流体の場合の鍋温 T_p , 水温 T_w を比較したグラフを Fig.3.7 から Fig.3.8 に示す. これらから, 粘性流体を加熱した場合, 水と比べて T_p の上昇が早く, T_w の温度上昇率が一定ではないことになる. また, 同じ条件で実験しても加熱時間に差が出ている

鍋・状態	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋1 蓋なし	0.37	0.048	0.42
鍋1 蓋あり	0.41	0.046	0.45

Table 3.8: 鍋1 についての蓋の影響

鍋・状態	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋2 蓋なし	0.38	0.048	0.42
鍋2 蓋あり	0.41	0.044	0.45

Table 3.9: 鍋2 についての蓋の影響

鍋・状態	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋3 蓋なし	0.38	0.046	0.42
鍋3 蓋あり	0.42	0.048	0.47

Table 3.10: 鍋3 についての蓋の影響

鍋・状態	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋4 蓋なし	0.37	0.042	0.41
鍋4 蓋あり	0.42	0.041	0.45

Table 3.11: 鍋4 についての蓋の影響

鍋・状態	水の熱効率	鍋の熱効率	合計熱効率
鍋2 蓋あり	0.41	0.044	0.45
鍋2 蓋あり 黒色	0.41	0.045	0.46

Table 3.12: 放射熱の影響

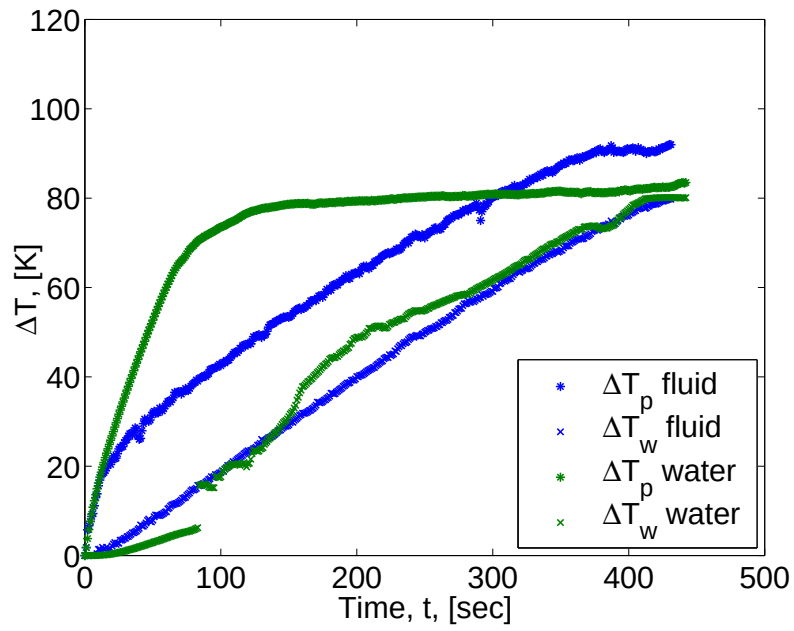


Fig. 3.7: 鍋 1 における粘性流体と水の温度上昇の比較

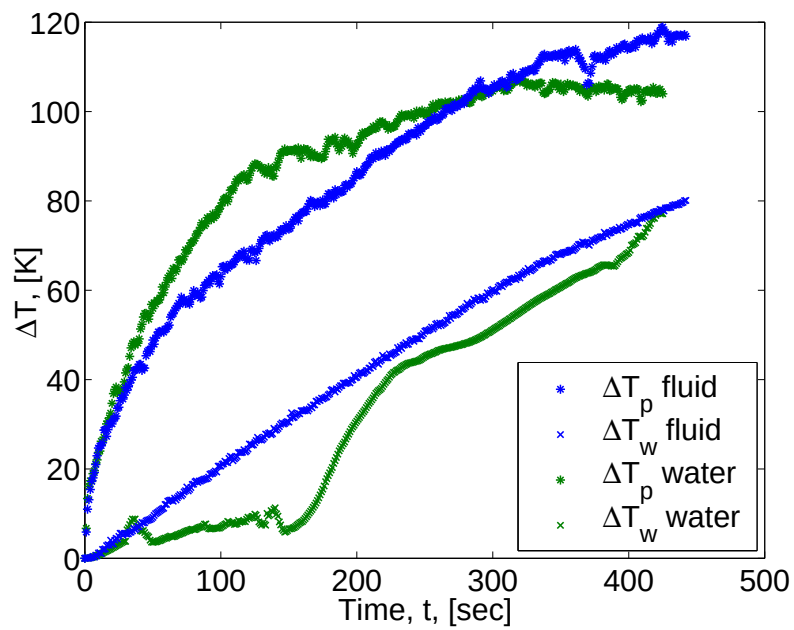


Fig. 3.8: 鍋 4 における粘性流体と水の温度上昇の比較

3.2 冷却時の特性

実験データについては Fig.6.77 から Fig.6.101 までを参照のこと。

鍋温と水温の差が小さく，一体で同一温度とみなし，熱バランスを考えると

$$-\rho c V \frac{dT}{dt} = hS(T - T_{\infty}) \quad (3.6)$$

が成り立つ． h 一定としてこの微分方程式を初期条件 $t = 0$ で $T = T_o$ の下で解くと，温度の時間変化に関して

$$T = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_o) \exp\left(-\frac{hS}{\rho c V} t\right) \quad (3.7)$$

が得られる．合計熱容量を

$$(\rho c V)_{\text{sum}} = (\rho c V)_w + (\rho c V)_p \quad (3.8)$$

とおき，合計熱容量に依存しない時間量

$$t_n = \frac{t}{(\rho c V)_{\text{sum}}} \quad (3.9)$$

を定義する．

3.2.1 鍋・水量

各鍋について，横軸を時間量 t_n ，縦軸を温度 T_w にしたグラフを Fig.3.9 から Fig.3.13 に示す．これらから，金属製鍋では，形状が同じならば，冷却時の温度特性は合計熱容量に依存していることが分かる．金属製鍋と土鍋では同じ熱容量ならば土鍋のほうが冷めやすい．

3.2.2 蓋・流体

鍋1において，水量を 1.0 [ℓ] としたとき，蓋の有無，流体による違いを Fig.3.14 に示す．横軸を時間量 t_n ，縦軸を温度 T_w とした．この図から，粘性流体で蓋をした場合が最も温度が下がりにくく，以下順に水で蓋をした場合，粘性流体で蓋をしない場合，水で蓋をしない場合と続く．

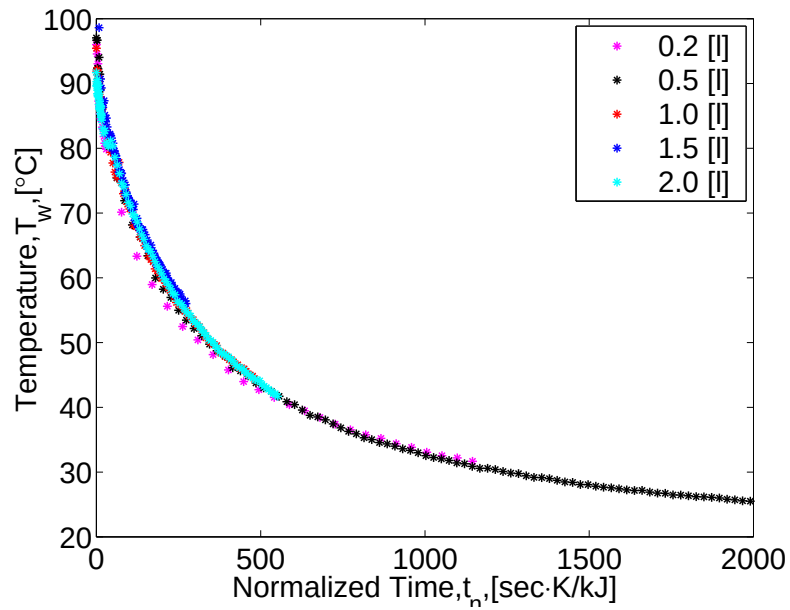


Fig. 3.9: 鍋 1 について熱容量を標準化した際の温度降下

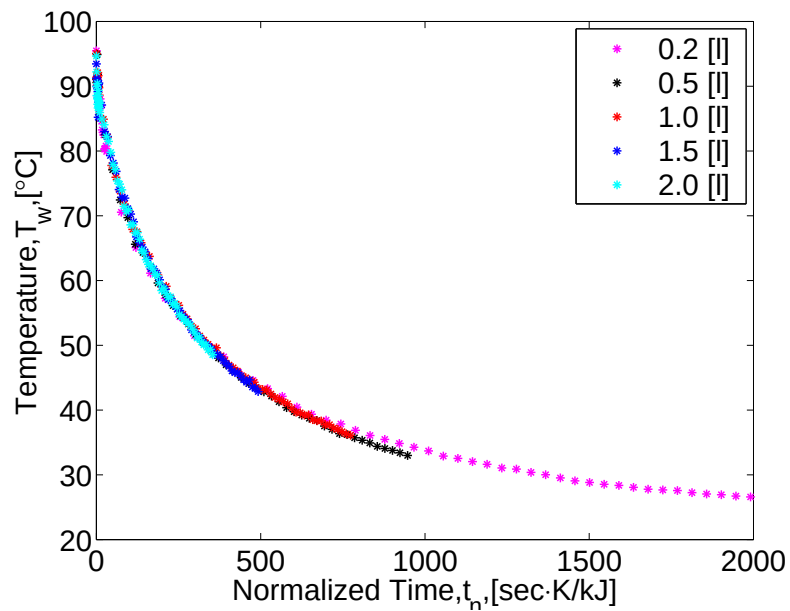


Fig. 3.10: 鍋 2 について熱容量を標準化した際の温度降下

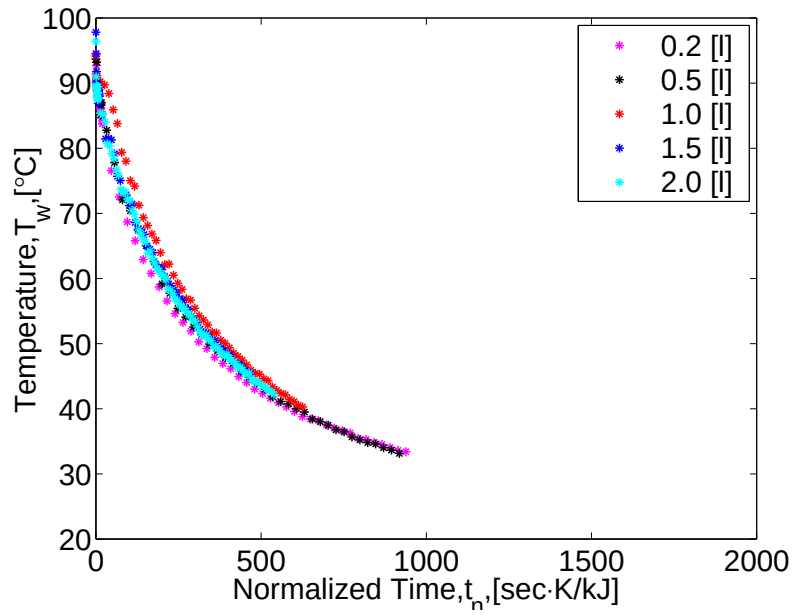


Fig. 3.11: 鍋 3 について熱容量を標準化した際の温度降下

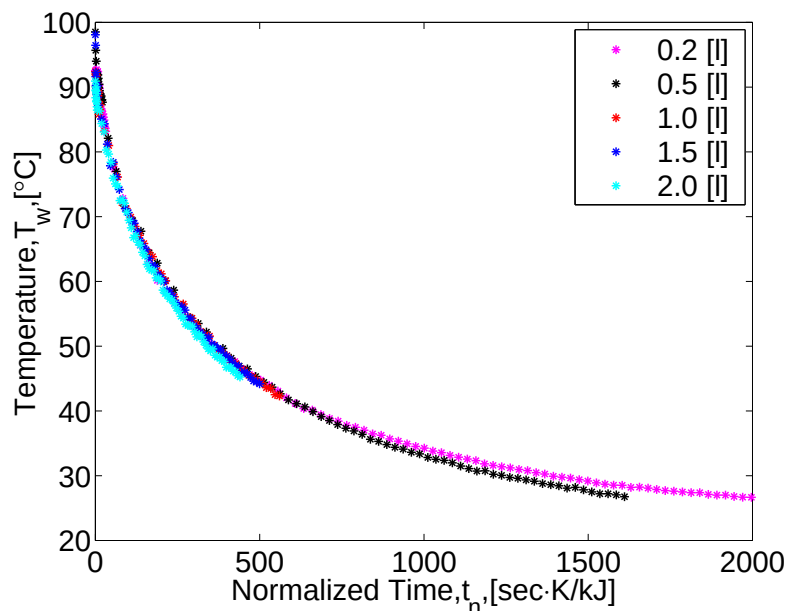


Fig. 3.12: 鍋 4 について熱容量を標準化した際の温度降下

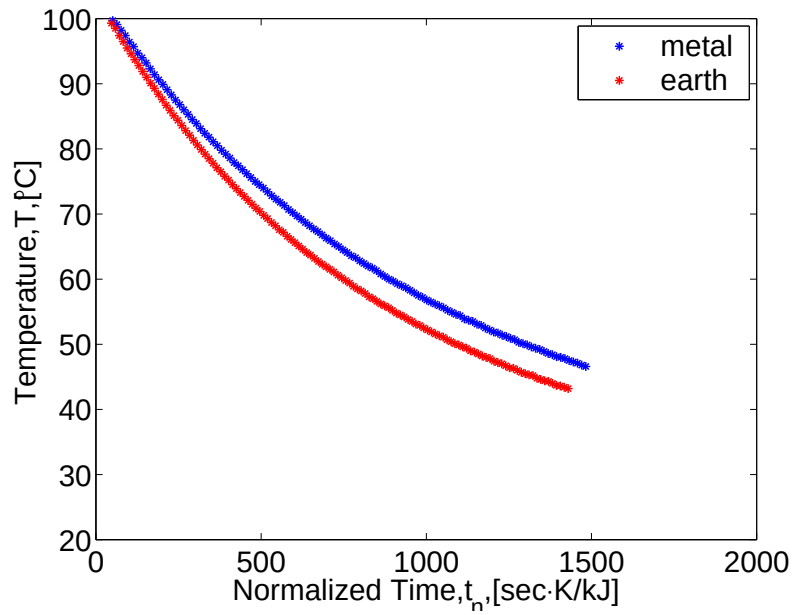


Fig. 3.13: 鍋 7, 8 において熱容量を標準化した際の温度降下

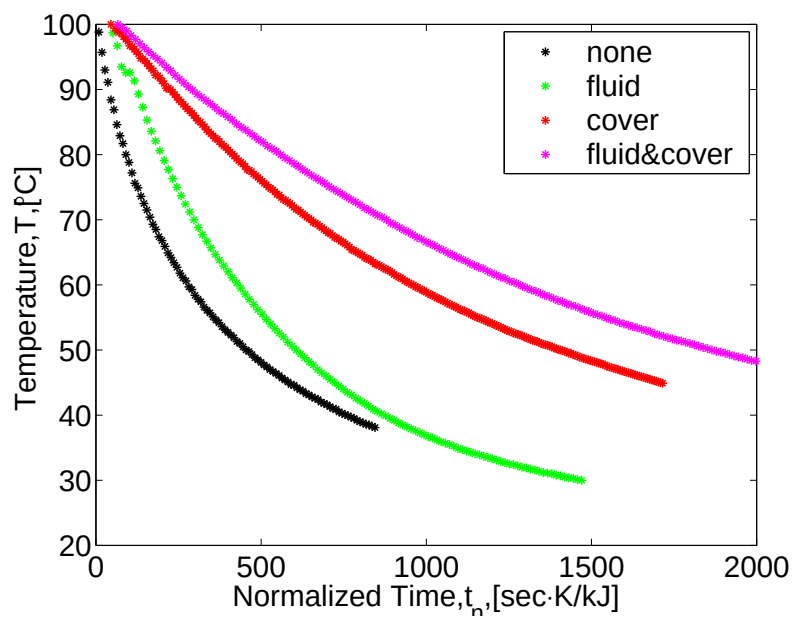


Fig. 3.14: 蓋, 流体が異なる際の温度降下

3.3 対流空気の温度の可視化

3.3.1 ガス加熱時の空気の対流

ガス流量を $2.7 [\ell/\text{min}]$ ，水量を $1.0 [\ell]$ にし，蓋をしない場合，蓋をした場合，蓋をしないで粘性流体を加熱した場合のそれぞれについて，加熱開始から $400 [\text{sec}]$ 後のスクリーンの温度を放射温度計で取得したものを Fig.3.15 から 3.17 に示す．これらから，ガス加熱の場合，鍋の側面からの空気の対流が起きていることが分かる．その空気の正確な温度を測定することは困難であるが，黒色スクリーンの温度が $90 [^{\circ}\text{C}]$ を超えていることから，鍋の外壁よりも高温であると予測できる．また，水面から蒸発する水蒸気によってスクリーンが熱せられている．

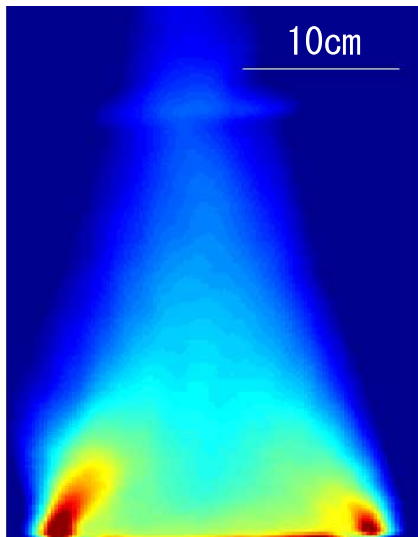


Fig. 3.15: 蓋をしない場合の温度分布

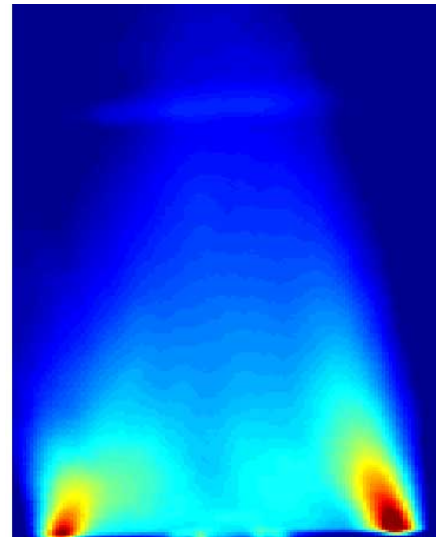


Fig. 3.16: 蓋をした時の温度分布

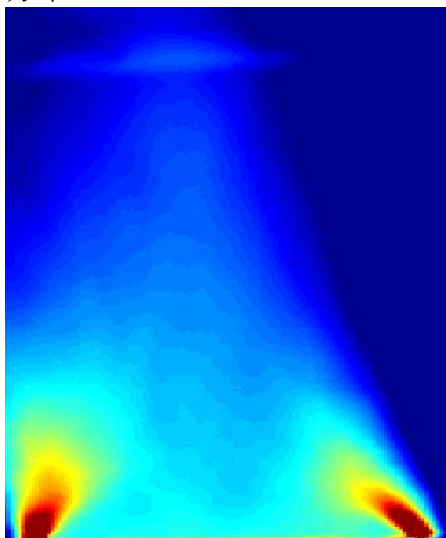


Fig. 3.17: 蓋をしないで粘性流体を加熱した時の温度分布

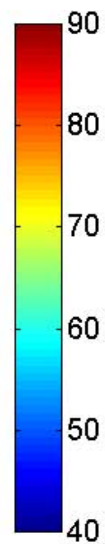


Fig. 3.18: 温度範囲

第4章 考察

4.1 加熱時の特性

4.1.1 金属製鍋の材質

材質の違いは、熱容量 ρcV の違いと熱伝導率 λ の違いに分けられる。ここで、水に接している部分と水温の差を

$$\Delta T_{pw} = T_{p\text{ind}} - T_w \quad (4.1)$$

とする。各鍋の ΔT_{pw} をプロットしたグラフを Fig.4.1 に示す。これらから、 ΔT_{pw} には材質によって差があることが分かる。その一方で水温の上昇には大きな差はない。すなわち、材質が湯沸しの効率に大きな影響を及ぼさないのは、 $(\rho cV)_w$ が $(\rho cV)_p$ に比べて大きく、鍋の材質による鍋温の差があっても結果的に熱効率 η には影響が少ないからであると考えられる。

4.1.2 金属製鍋の形状

本実験ではアルミニウム製の鍋の比較を行ったが、同じ材質でも形状が違えば、 η_p が変化する。しかし、各形状とも加熱時間に大きな差がなく、 η_w における差は小さい。また、 $(\rho cV)_p$ と η_p との関係のグラフを Fig.4.2 に示す。加熱時間が変わらなければ、Eq.3.4 より、 η_p は熱容量 $(\rho cV)_p$ に比例すると考えられる。よって、ほぼ同じ大きさの鍋ならば、鍋の形状よりも熱容量が加熱時間に影響する。

また、鍋を大きくすると、熱せられた空気と鍋との接触面積が大きくなるため、熱伝達による熱の移動が促進されるため η が大きくなると考えられる。

4.1.3 金属製鍋と土鍋

土鍋の特徴として、熱容量が大きく、熱伝導率が小さいことが挙げられる。そのため、鍋温 T_p が金属製鍋に比べて上昇する。鍋を加熱するために熱が使われることによって、加熱時間がかかり、 η_w が低くなると考えられる。また、合計熱効率が金属製鍋に比べて小さくなるため、湯沸しには金属製鍋の方が所要時間が少なくて済む。

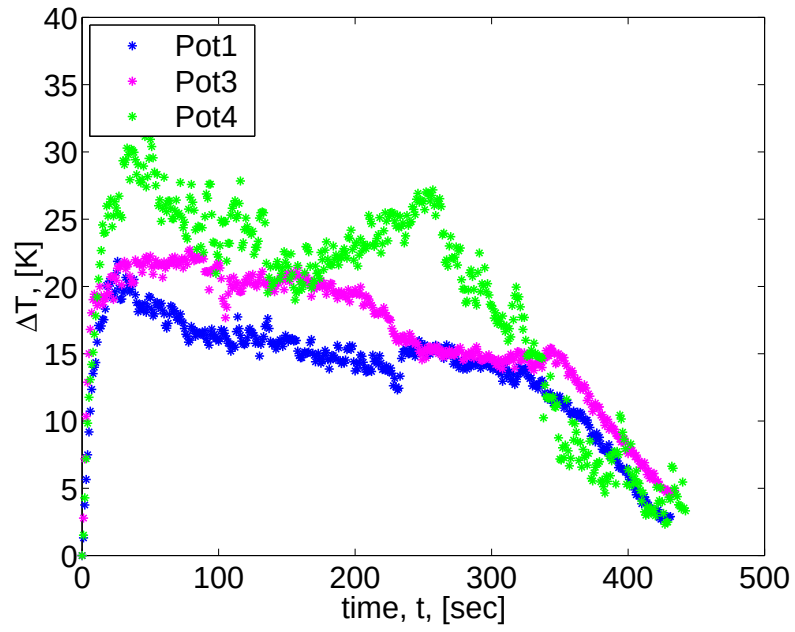


Fig. 4.1: ΔT_{pw}

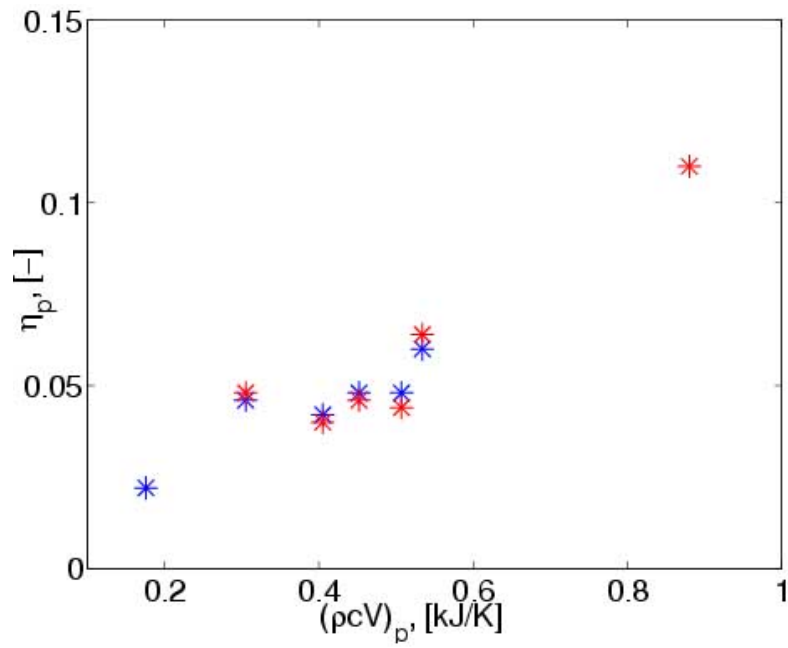


Fig. 4.2: $(\rho c V)_p$ と η_p の関係

4.1.4 水量

水量が少ないほど鍋への熱効率 η_p は上がる．これは、水との接触面積が小さいため、鍋から水への熱伝達が小さくなり、鍋の温度が上昇するためであると考えられる．水量が多くなるにつれて合計熱効率 η が大きくなるが、これは鍋の内壁と水との接触面積が大きくなるために、鍋の空気に触れている部分の表面積が小さくなり、環境に逃げる熱量が少なくなる．その結果効率が上がると考えられる．

4.1.5 火力

火力を変化させたとしても熱効率は変わらない．しかし、ガス流量が低い場合は無次元温度 θ_w が 1 にならないため、低い温度までの熱効率 η を計算したためと考えられる．すなわち、水蒸気の蒸発の影響が少ない場合にのみ η が同じであるといえる．水蒸気の蒸発による影響が大きい高温領域においては、低ガス流量では水温が上昇しにくいいため、単純に η が変わらないとは言えない．

4.1.6 蓋

蓋がある場合、水蒸気によって水面から逃げていく熱が抑えられるため、水温の上昇が蓋のない場合に比べて温度上昇が早い．蓋をすることによって、水蒸気の熱量を逃がさず、損失が少なくなった．このため、加熱時間が短くなり、熱効率 η が上昇したと考えられる．また、鍋の温度には大きな差はないため、水面からの損失に比べて鍋からの損失は小さく、 η の差は水の蒸発によるものがほとんどであると考えられる．

4.1.7 ガスの放射熱

底面を黒色に塗った鍋と塗っていない鍋の差はほとんどない．ガスの燃焼熱に比べて放射熱の値が小さいためであるからと予想される．ここで、ガス塊から面が受ける放射熱流束は

$$q = \frac{E}{dS} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4.2)$$

で与えられる [10]. 二酸化炭素と水蒸気が射出していると考え、ガスバーナーと鍋の間に気体が存在するとする. 各値を $\varepsilon = 2 \times 10^{-6}$ $\sigma = 5.667 \times 10^{-8}$ $T = 2 \times 10^3$ とおくと, $q = 8 \times 10^{-1}$ になる. この結果から考えるとガスの燃焼熱に比べて放射熱は小さく, ガスの燃焼熱は全て気体を加熱するものに使われると考えることができる.

4.1.8 流体

流体を粘度を大きくすると, 温度上昇特性が変わった. 流体の粘性が大きくなり, 水への対流が抑えられたことで, 鍋から水への熱伝達が小さくなり, 鍋温が一気に上昇し, 水温はゆっくりと温度が上昇する. 加熱を続け, 鍋の壁面から沸騰が始まると, 沸騰による熱伝達が大きくなり, 水温が上昇し, 逆に鍋温は温度上昇が鈍くなると考えられる. 水の場合と比較して加熱時間に差が出ることは, 対流が弱いことから, 水温が一樣になりにくいいためであると考えられる. 特に高粘度の流体を用いて実験をした場合は, 水温が一定になりにくい.

4.1.9 対流空気の温度の可視化

温度分布を可視化することで, ガス加熱の場合, 鍋の側面に沿って上昇する空気によって鍋の外壁が温められていると考えられる. この点がガス加熱の特徴であり, 電気ヒーターや電磁調理器と異なっている. また, 蓋をしないで加熱した場合, 水面から蒸発する水蒸気によって熱が逃げていくことが分かる.

4.2 冷却時の特性

4.2.1 鍋の材質・形状

金属製鍋で同じ形状の場合，時間 T を熱容量 $(\rho c V)_{\text{sum}}$ で割った時間量 T_n を用いると，温度降下特性が一致する．すなわち冷却時間は熱容量に比例していることになる．蓋をせずに自然冷却すると，熱伝達率 $h = 2.3 \times 10^2 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ 程度になる．

4.2.2 蓋・流体

冷却時は，水面からの蒸発と鍋の外壁面と水面からの熱伝達で熱が逃げていると考える．そのため，鍋の外壁の温度と水温が熱伝達に影響すると考えられる．温度降下時の特性は，粘性流体で蓋をした場合が最も温度が下がりにくかった．その理由としては，粘性流体によるものと，蓋によるものがあると考えられる．まず，蓋をすると，加熱時と同様に水面からの蒸発が抑えられるので，温度降下しにくくなった．この場合は鍋からの熱伝達によって熱が逃げていくと考えられる．このとき，熱伝達率 $h = 72 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ 程度になる．また，粘性があるために水温に温度分布ができ，粘性が小さい場合と比べて温度が一様になりにくく、水から鍋への熱伝達が小さくなる．結果，鍋の温度が低くなり，環境へ逃げる熱が少なくなる．これが温度降下が遅くなる理由の一つであると考えられる．蓋をしない場合，熱伝達率 $h = 2.1 \times 10^2 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ 程度になり，蓋をした場合，熱伝達率 $h = 45 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ 程度に下がる．

4.3 鍋の伝熱モデル

4.3.1 温度上昇特性

Fig.4.3, Fig.4.4 に示すような大きく3つの状態に分けて考えることとする．どの状態でも共通して考えられることは，ガスの燃焼によって熱せられた空気による熱伝達で鍋の温度が上昇し，水温は鍋の内壁と接触している部分での熱伝達によって温度が上昇していることである．どの状態でも鍋と水の温度上昇率はほぼ一定であるので，鍋と水に流入する熱量は一定であると考えられる．しかしながら，各状態で温度上昇率が異なっている．このことについては以下のように考察する．

まず状態1では，ガスの燃焼による熱量は，鍋の内部を伝わるだけなので，鍋の温度は大きく上昇する．また，鍋の内壁と水との温度差が小さいので，熱伝達によって水に伝わる熱量は小さく，水の温度上昇率は小さい．ここで，円筒の熱通過の式 [10]

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad (4.3)$$

ただし， R , L , d はそれぞれ熱抵抗，半径，厚さで，

$$R = \frac{d}{S\lambda} \quad (4.4)$$

$$S = 2\pi Ld \quad (4.5)$$

から温度を計算する．

状態2では，鍋の温度が高くなっていることによって，鍋の内壁と水との温度差が大きくなるために，自然対流が起こり，鍋から水への熱伝達が大きくなる．その結果，鍋の温度上昇に使われる熱量は，状態1よりも少なくなり，温度上昇率が低くなる．一方で水に伝わる熱量は大きくなり，水の温度上昇率は状態1よりも高くなる．ここで，垂直平板モデルと仮定し，熱伝達率を

$$Nu = 0.546 \left(\frac{Pr}{0.8 + Pr} \right)^{1/4} Ra^{1/4} \quad (4.6)$$

ただし

$$Ra = Gr Pr \quad (4.7)$$

$$Gr = \frac{\beta g (\Delta T) L^3}{\nu^2} \quad (4.8)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.9)$$

$$\Delta T = T_{\text{p ind}} - T_w \quad (4.10)$$

とする[10]と、状態2の段階ではヌッセルト数 $Nu = 1.6 \times 10^2$ でほぼ一定になり、自然対流による熱伝達が大きくなる。そこで、ヌッセルト数から熱伝達率を求め、温度を計算する。

状態3では、鍋の内壁の温度が水の飽和温度に達し、鍋と水が接している部分において、沸騰が始まる。鍋の壁面から気泡が発生し、蒸発潜熱を奪うため、鍋の温度上昇は鈍くなっていく。結果、自然対流による熱伝達は $Nu = 1.2 \times 10^2$ と状態2に比べて小さくなるが、代わりに沸騰による熱伝達が増大するため、水温は上昇していくと考えられる。沸騰時の熱伝達率は $h_{\text{boil}} = 3000 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$ と置き、熱流束は、表面積 S を用いて

$$q_{\text{boil}} = h_{\text{boil}} S (T - T_{\text{sat}}) \quad (4.11)$$

とする。

以上の3つに加えて、水の蒸発と熱伝達による熱量の損失を考慮する。損失の係数として冷却時の熱伝達率の値を用いることとする。また、鍋の形状は円筒形のもので、大きさは内径 18 [cm] であるとする。

これらの式から計算し、実験から得られた温度データと比較したグラフを Fig.4.5 に、また粘性流体の場合の温度データと比較したグラフを Fig.4.6 に示す。ここで、実線部分が計算により求めた値である。水の場合でも粘性流体の場合でも温度上昇傾向を示すことができた。

4.3.2 温度降下特性

鍋と水の温度を一定とみなせる場合は

$$T = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_o) \exp\left(-\frac{hS}{\rho c V} t\right) \quad (4.12)$$

とおくことで温度を予測できる。しかし、水の熱伝導率 λ は温度によって変化するが、おおよそ $0.6 [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ と小さい。そのため、粘性流体のように ν が大きくなると熱伝達による熱の移動が少なくなり、流体内部で温度分布ができてしまうため、適用できなくなってしまう。

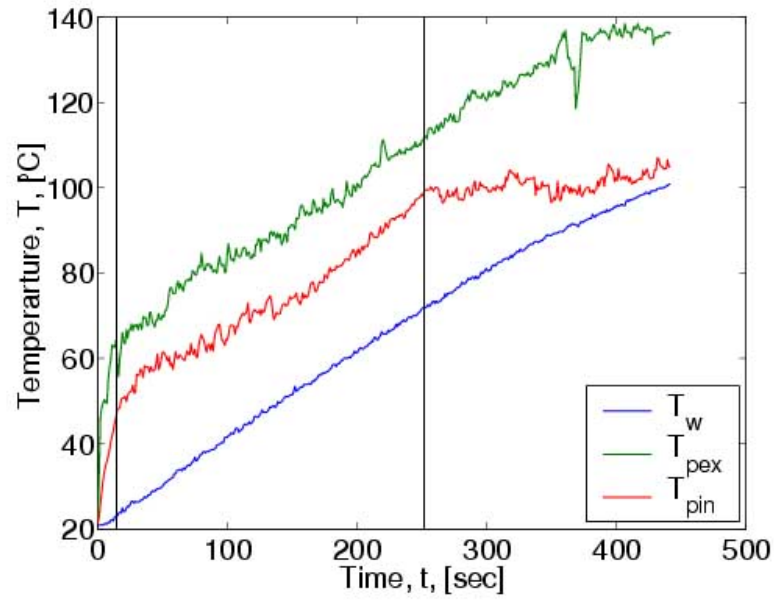


Fig. 4.3: 温度上昇特性

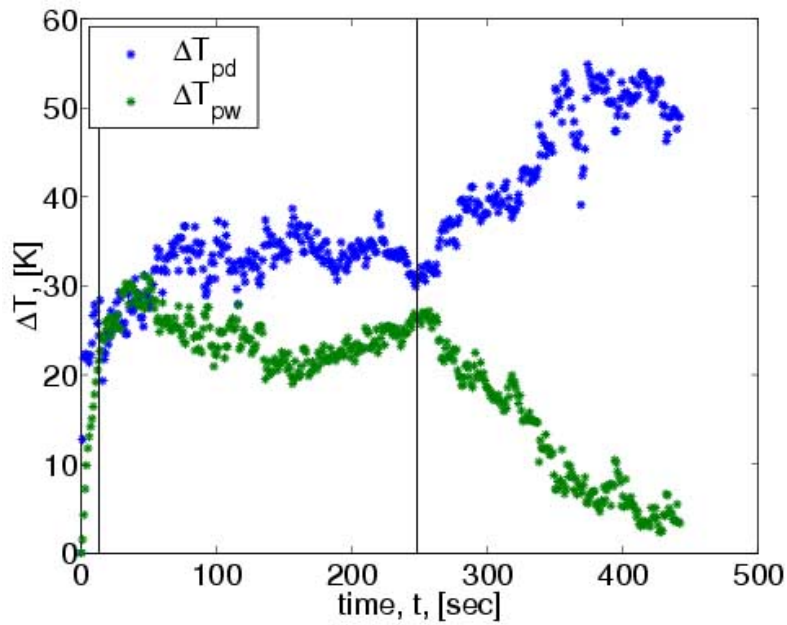


Fig. 4.4: Fig.4.3 における温度差

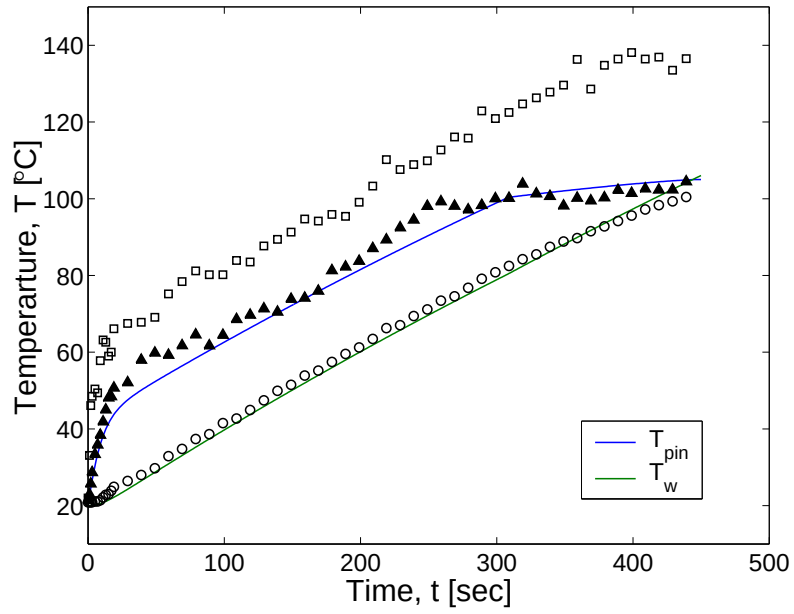


Fig. 4.5: モデルと実験値の比較 1

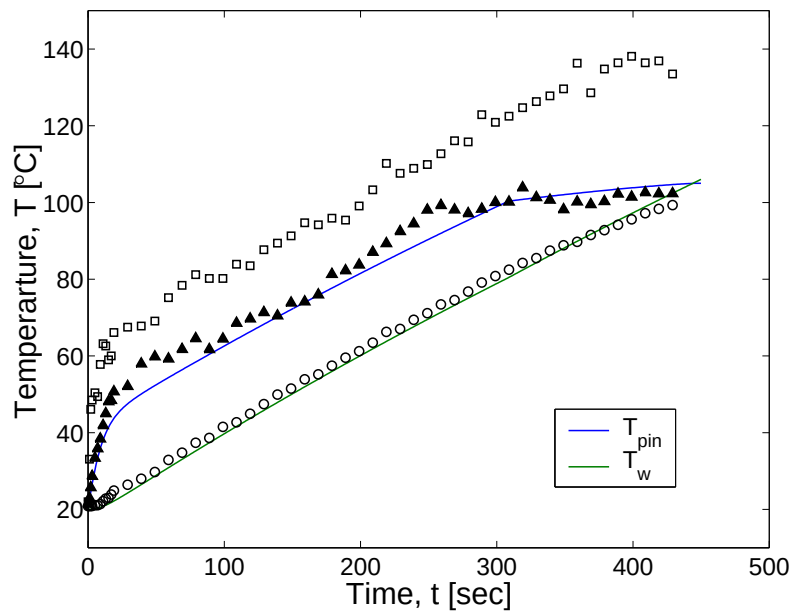


Fig. 4.6: モデルと実験値の比較 2

第5章 結論

5.1 結論

湯沸し時の熱効率，冷却時の温度降下特性は鍋の材質，大きさ，形状によって変化し得るが，水量が多くなると水の熱容量が鍋の熱容量の 10 倍以上になり，鍋の影響は水量の影響に比べて，ほとんどなくなってしまふ．特に金属製鍋では，湯沸しをしたり，鍋に水を入れて冷却したりする場合，よほどの厚手のものを使用するか，容量に対して水量が少ない場合で使用しない限り，湯沸し，温度降下にかかる時間はほとんど変わらない．

熱源がガスの場合，ガスの燃焼熱によって熱せられた空気が鍋の外壁に沿って上昇することで，底面からだけでなく，側面からも熱を伝えている．この点は底面からのみ熱を伝える，電気ヒータや電磁調理器と大きく異なっており，ガス加熱の特徴といえる．ガスの熱効率は蓋をして加熱した場合で 45 % 程度である．

また，蓋をすることで水面からの放熱を抑えることができ，熱効率は 3 % から 5 % 上昇する．水の代わりに高粘度流体を入れると対流による熱伝達が小さくなり，加熱特性も冷却特性も変化する．この場合，水の熱伝導率は $0.6 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ と小さいため，水温が一定になりにくく，一様に加熱することは難しい．

加熱時の温度上昇特性には 3 つの段階がある．各段階において熱伝導，自然対流，自然対流と熱伝達が主たる伝熱現象になっていると考えられる．そこでこれらの現象を式で表現し，計算した結果，温度上昇傾向を示すことができた．

5.2 今後の課題

鍋の大きさや形状を考慮した，より一般的な鍋の伝熱モデルを作り上げるべきである．また，ガス加熱だけでなく，電磁調理器加熱の場合の研究も進めるべきである．

5.3 謝辞

まずは、なんといっても私に鍋の伝熱学的研究という研究をやらせて頂いた庄司正弘教授に深く感謝致します。計画性が無く、努力も足りない私が論文を書くまでに至ることができ、この一年間は本当に貴重な体験ができたと感じています。また、本研究を行うにあたり、調理科学の観点から貴重な意見をいただいた東京家政大学の長尾慶子教授にはとても感謝しています。丸山茂夫助教授には研究会にて的確な考えを示していただき、研究の方向性を決める上で非常に参考になりました。渡辺誠技官には実験装置の使い方や、実験器具の購入等、実験全般でお世話になりました。

庄司研の先輩である、丹下さん、湯浅さん、石川さんには研究会だけではなく、実験時においても色々と指導していただきました。特に丹下さんには、研究の事柄から論文の書き方、ソフトウェアの使い方などなど些細なことまでお世話になりました、ありがとうございます。丸山研の先輩方とは雑談をすることも多く、楽しく過ごせました。また、コンピュータの調子が悪い時にはいつもすぐに対応していただきました。勿論、4年生の皆とは一緒にいる時間も長く、一年間よい環境にて過ごせたと思います。

参考文献

- [1] 松村明編,『大辞林 第二版』,(三省堂, 1995 年)
- [2] 肥後温子, 平野美那世編著,『調理機器総覧 電気ガス機器とつき合う』,(株式会社食品資材研究会, 1998 年)
- [3] 渋川祥子編,『食品加熱の科学』,(朝倉書店 1996 年)
- [4] 島田淳子、中沢文子、畑江敬子編,『調理学講座 2 調理の基礎と科学』,(朝倉書店 1993 年)
- [5] 辰口直子, 渋川祥子,「材質および厚さの異なる鍋の調理適性に関する研究」,『日本調理科学会誌』, Vol.33 No.2, (2000 年)
- [6] 肥後温子, 平野美那世,「材質の異なる 12 種類の鍋底の昇降温特性の分類」,『日本調理科学会誌』, Vol.34 No.3, (2001 年)
- [7] 長尾慶子, 畑江敬子, 島田淳子,「小麦粉ドウの伝熱特性に及ぼす加熱法の影響」,『日本調理科学会誌』, Vol.30 No.2, (1997 年)
- [8] 長尾慶子, 松田弥生, 畑江敬子, 島田淳子,「モデル試料を用いた天火加熱の伝熱機構に関する実験的検討」,『日本家政学会誌』, Vol.50 No.5, (1999 年)
- [9] 日本熱物性学会編,『熱物性ハンドブック』,(養賢堂 1990 年)
- [10] 庄司正弘著,『伝熱工学』,(東京大学出版会 1995 年)

第6章 実験データ集

6.1 加熱データ

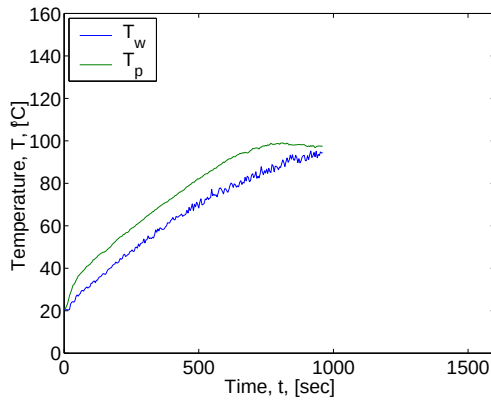


Fig. 6.1: 鍋1 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]

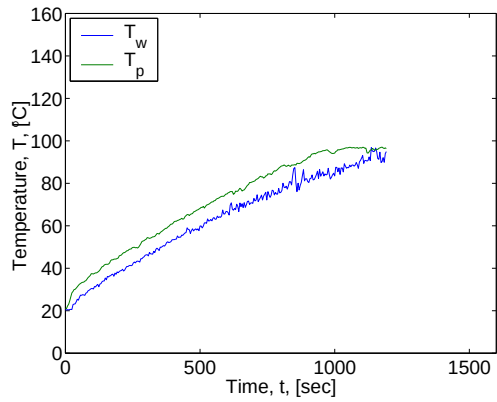


Fig. 6.2: 鍋1 水量 2.0 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]

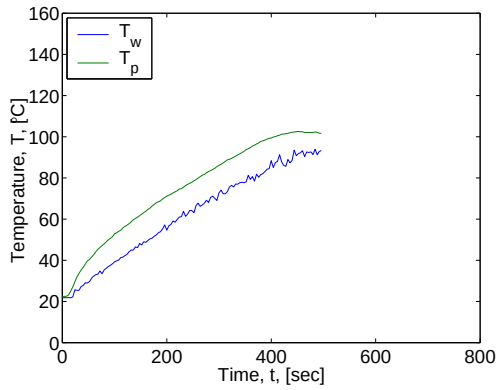


Fig. 6.3: 鍋2 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

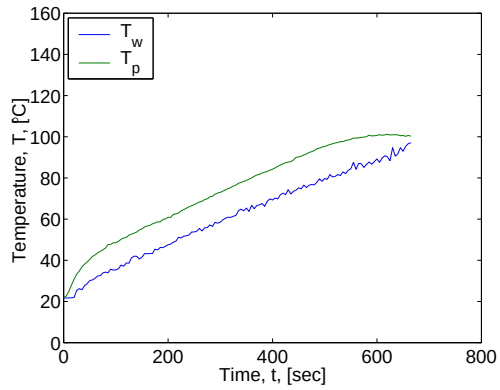


Fig. 6.4: 鍋2 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

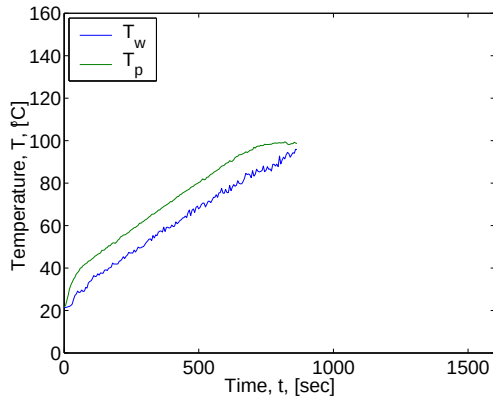


Fig. 6.5: 鍋 2 水量 2.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

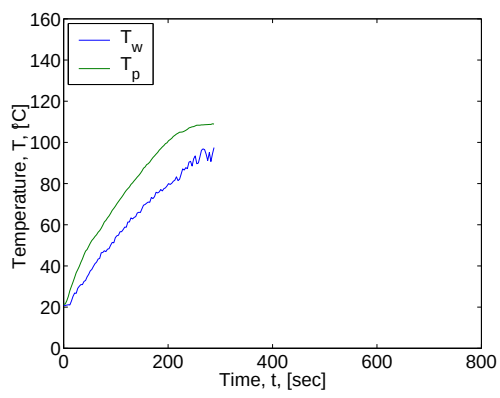


Fig. 6.6: 鍋 1 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

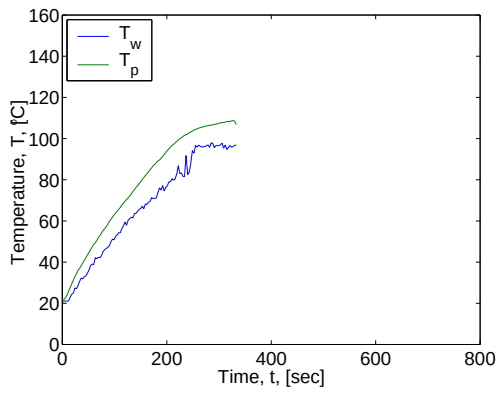


Fig. 6.7: 鍋 2 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

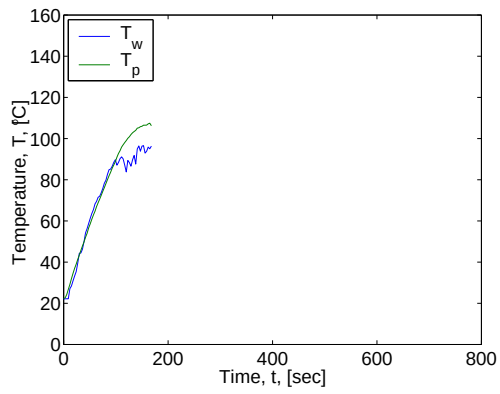


Fig. 6.8: 鍋 1 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

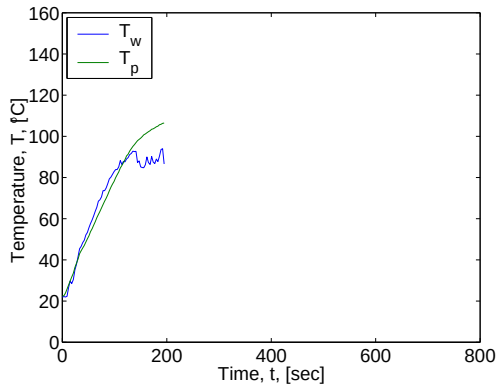


Fig. 6.9: 鍋 2 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

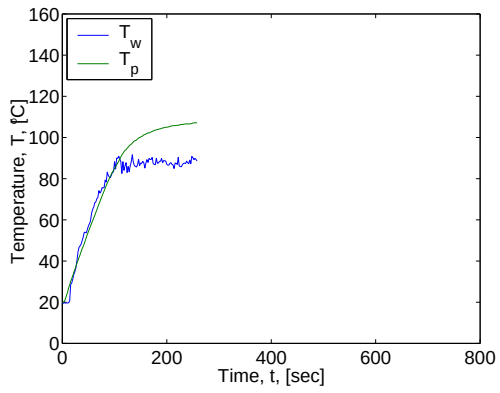
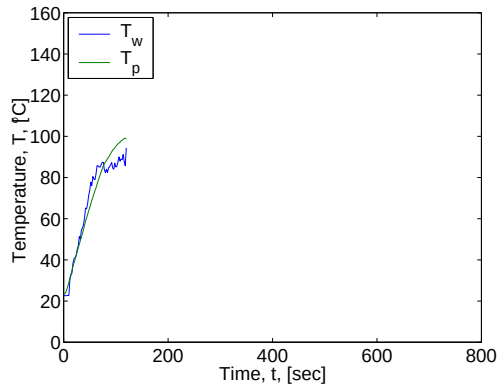
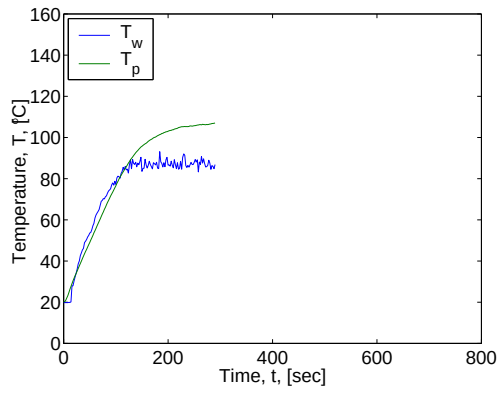


Fig. 6.11: 鍋 1 水量 0.1 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]



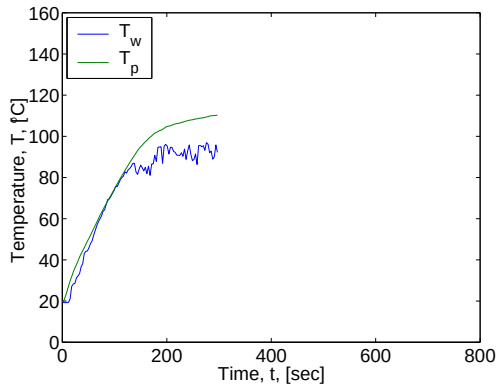


Fig. 6.13: 鍋1 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]

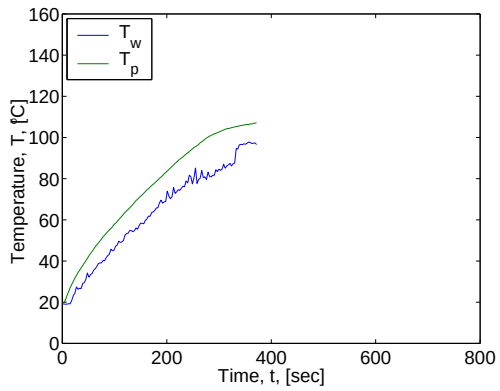
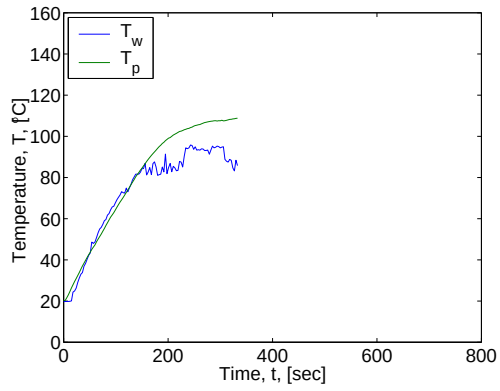
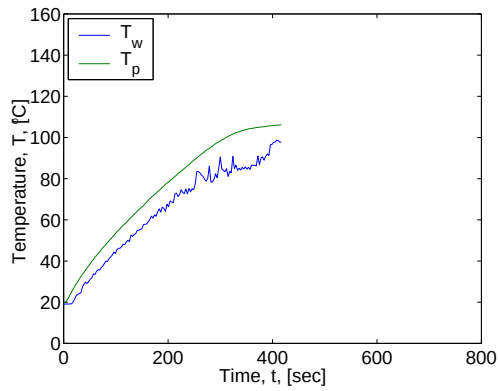


Fig. 6.15: 鍋1 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]



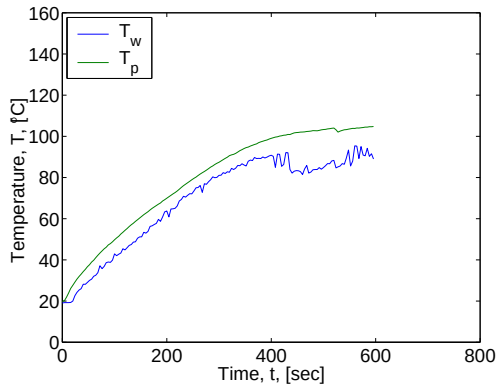


Fig. 6.17: 鍋1 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 1.5 [ℓ/min]

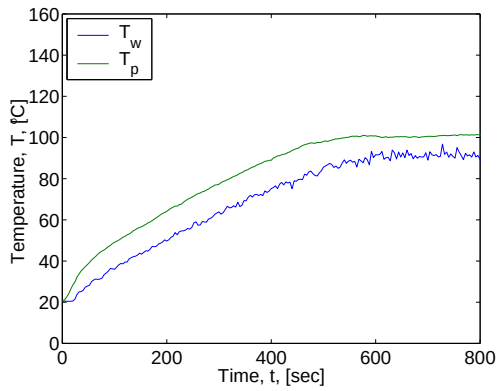
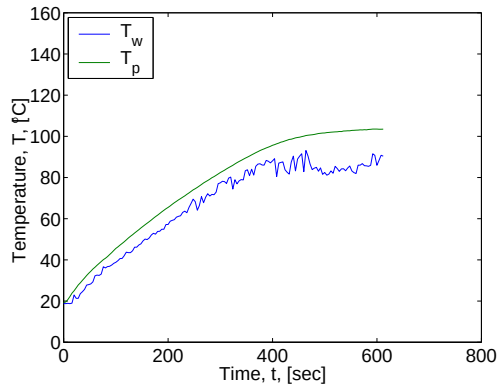
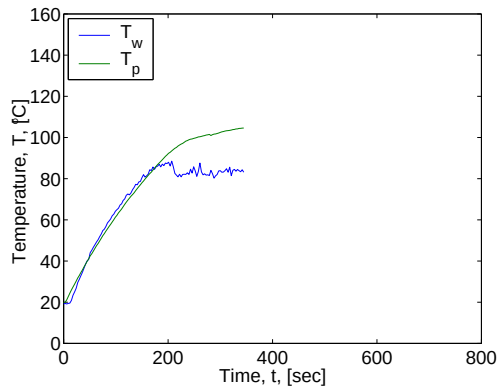


Fig. 6.19: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]



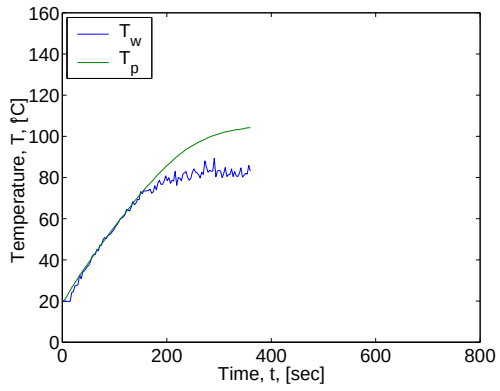


Fig. 6.21: 鍋2 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 1.5 [ℓ/min]

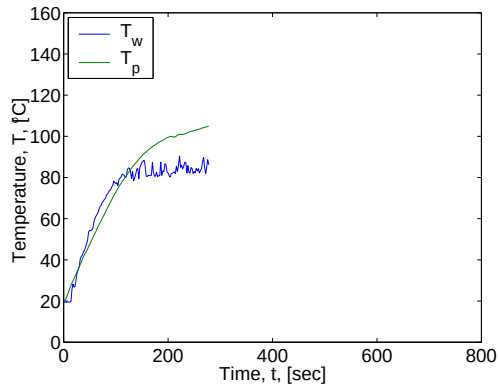


Fig. 6.22: 鍋1 水量 0.1 [ℓ] ガス流量 1.5 [ℓ/min]

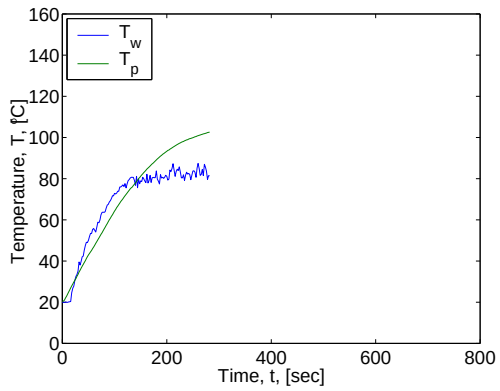


Fig. 6.23: 鍋2 水量 0.1 [ℓ] ガス流量 1.5 [ℓ/min]

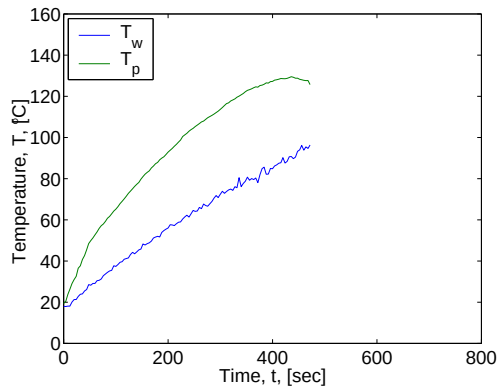


Fig. 6.24: 鍋4 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

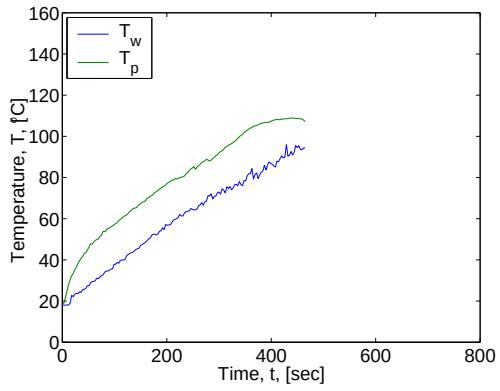


Fig. 6.25: 鍋3 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

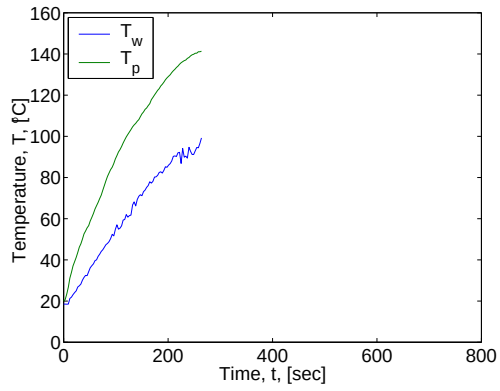


Fig. 6.26: 鍋4 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

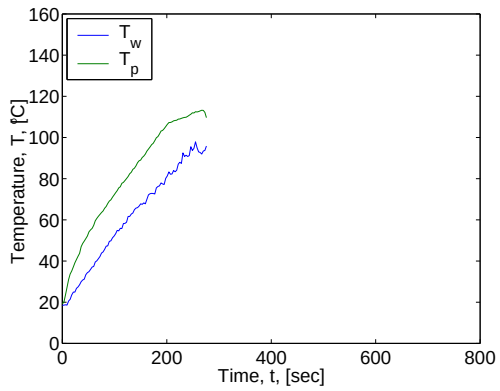


Fig. 6.27: 鍋3 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

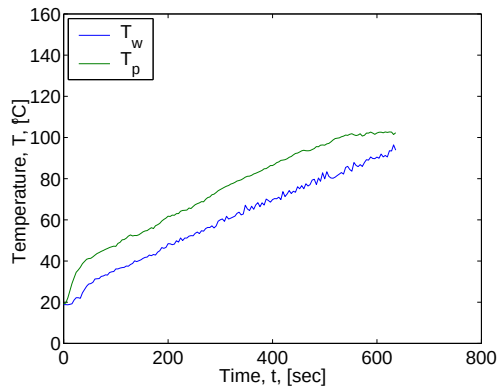


Fig. 6.28: 鍋3 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

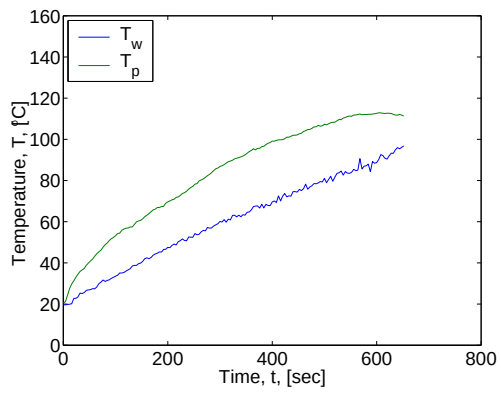


Fig. 6.29: 鍋4 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

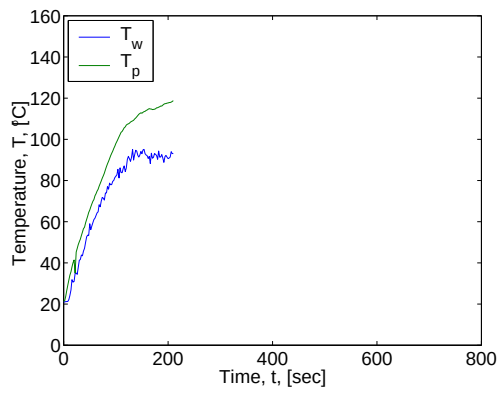


Fig. 6.30: 鍋3 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

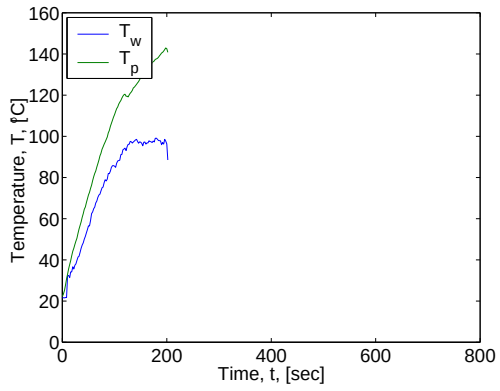


Fig. 6.31: 鍋4 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

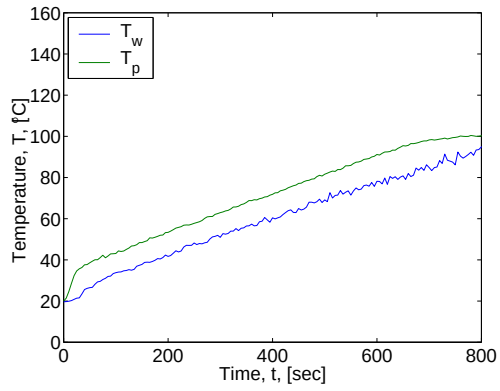


Fig. 6.32: 鍋3 水量 2.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

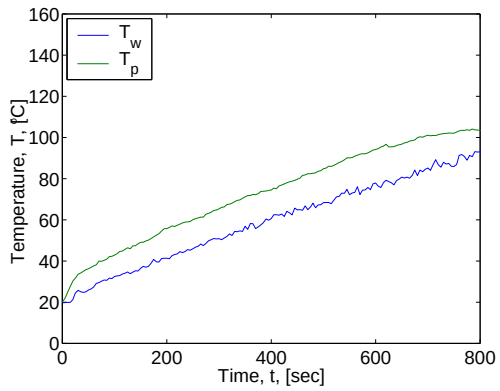


Fig. 6.33: 鍋4 水量 2.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

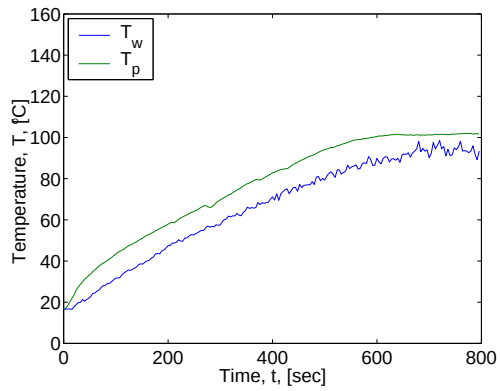


Fig. 6.34: 鍋2 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]

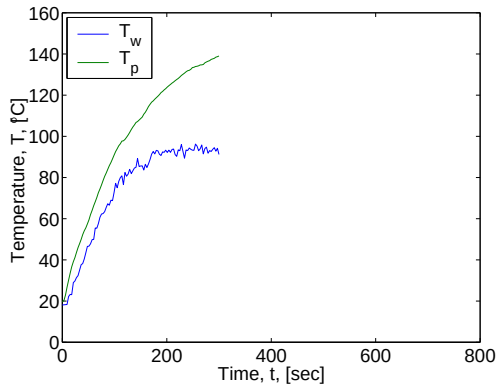


Fig. 6.35: 鍋4 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]

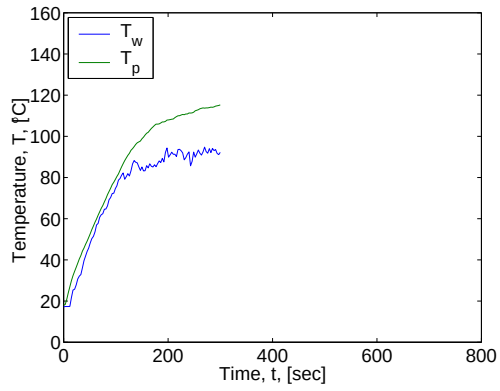


Fig. 6.36: 鍋3 水量 0.2 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]

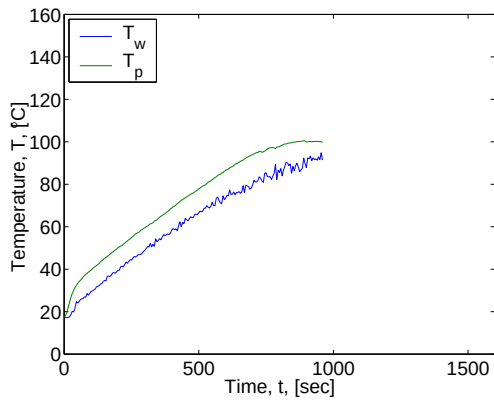


Fig. 6.37: 鍋2 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]

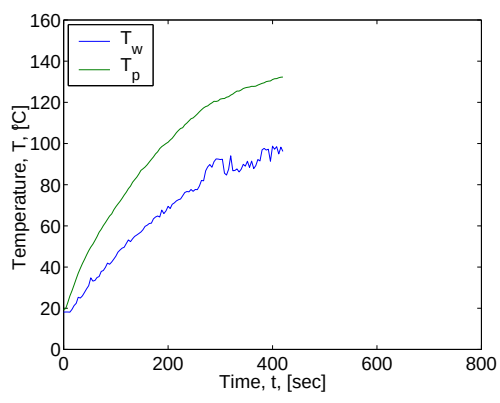


Fig. 6.38: 鍋4 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]

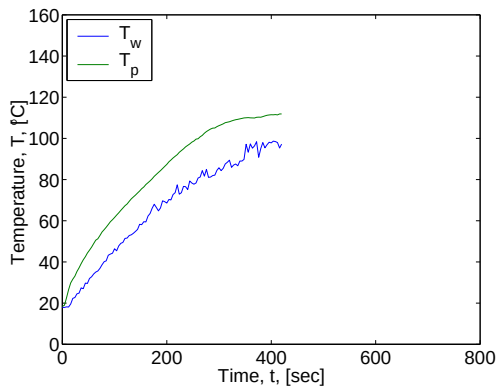


Fig. 6.39: 鍋3 水量 0.5 [ℓ] ガス流量
2.0 [ℓ/min]

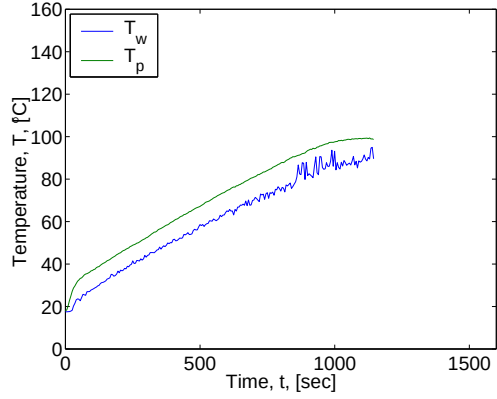


Fig. 6.40: 鍋2 水量 2.0 [ℓ] ガス流量
2.0 [ℓ/min]

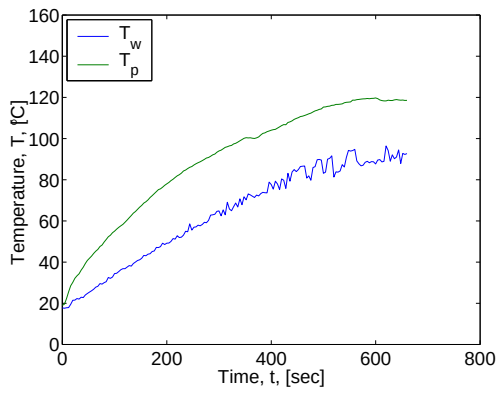


Fig. 6.41: 鍋4 水量 1.0 [ℓ] ガス流量
2.0 [ℓ/min]

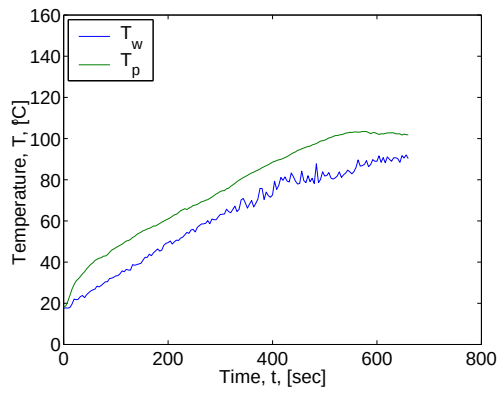


Fig. 6.42: 鍋3 水量 1.0 [ℓ] ガス流量
2.0 [ℓ/min]

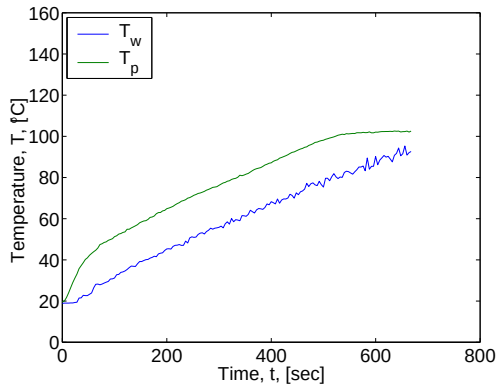


Fig. 6.43: 鍋5 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

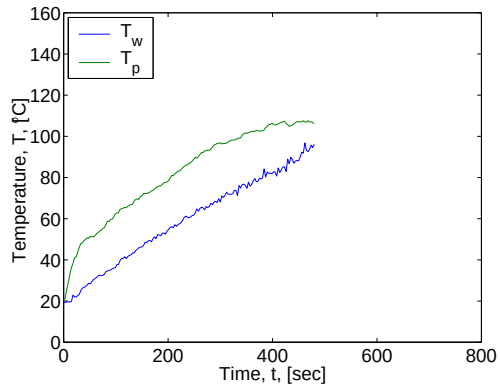


Fig. 6.44: 鍋6 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

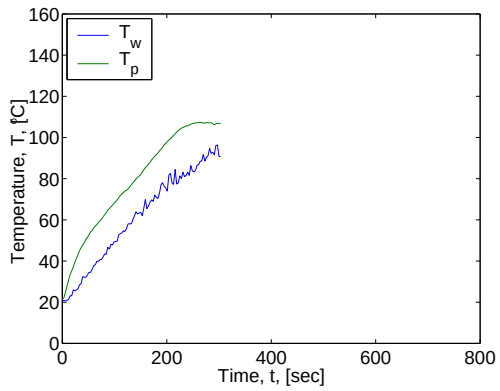


Fig. 6.45: 鍋5 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

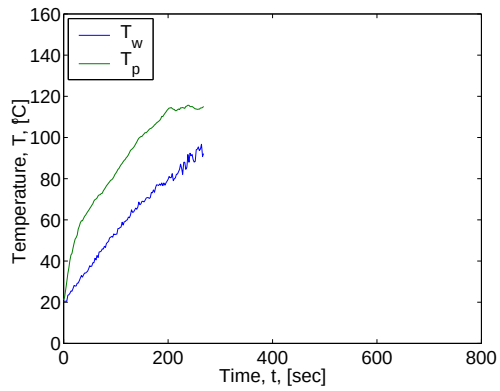


Fig. 6.46: 鍋6 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

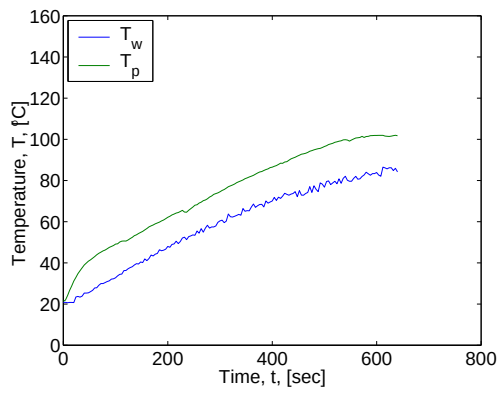


Fig. 6.47: 鍋5 水量 1.0 [ℓ] ガス流量
2.0 [ℓ/min]

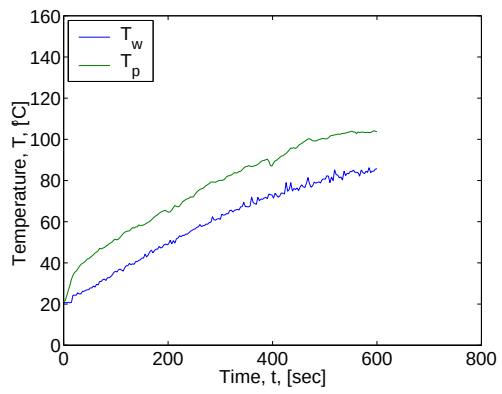


Fig. 6.48: 鍋6 水量 1.0 [ℓ] ガス流量
2.0 [ℓ/min]

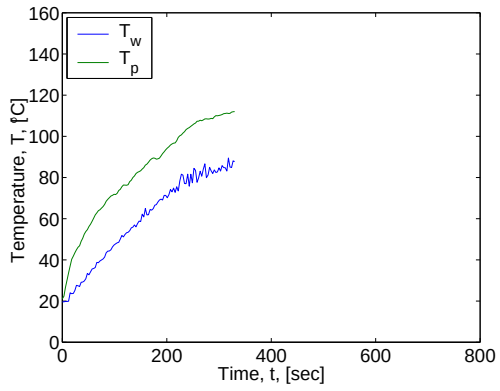


Fig. 6.49: 鍋6 水量 0.5 [ℓ] ガス流量 2.0 [ℓ/min]

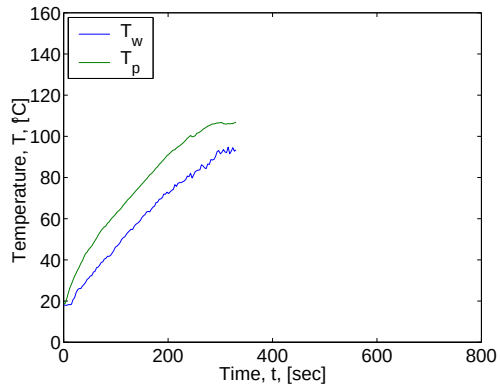


Fig. 6.50: 鍋1 水量 0.6 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

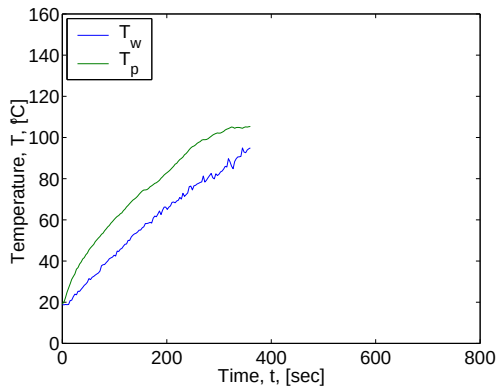


Fig. 6.51: 鍋1 水量 0.7 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

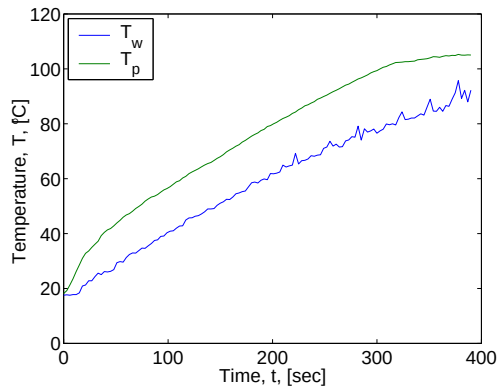


Fig. 6.52: 鍋1 水量 0.8 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

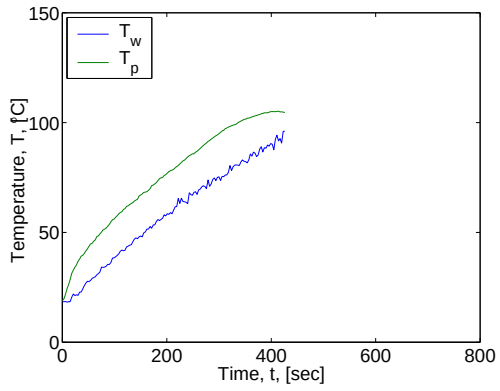


Fig. 6.53: 鍋1 水量 0.9 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

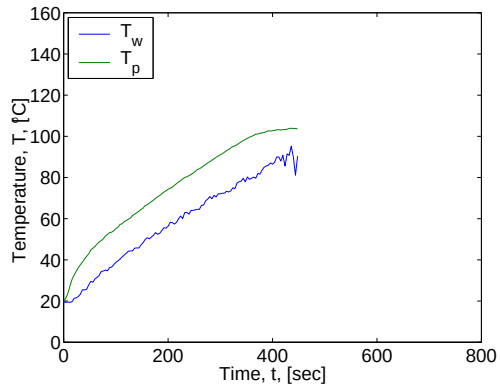


Fig. 6.54: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

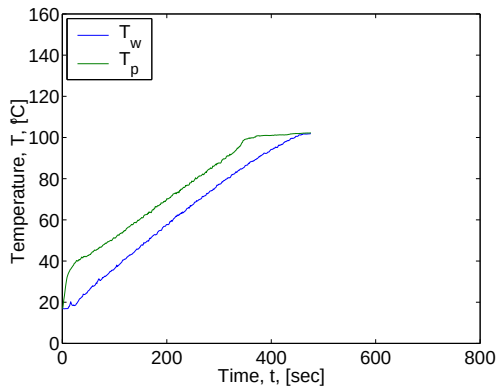


Fig. 6.55: 鍋4 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

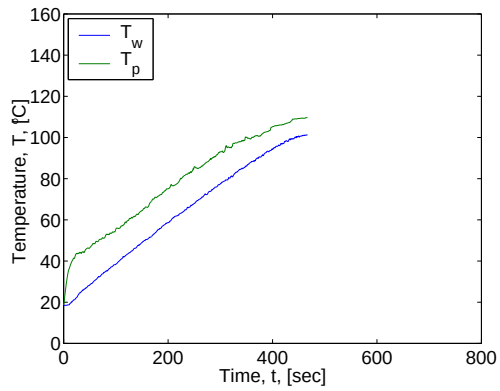


Fig. 6.56: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

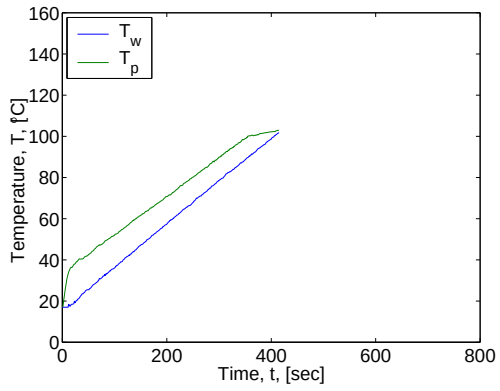


Fig. 6.57: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり

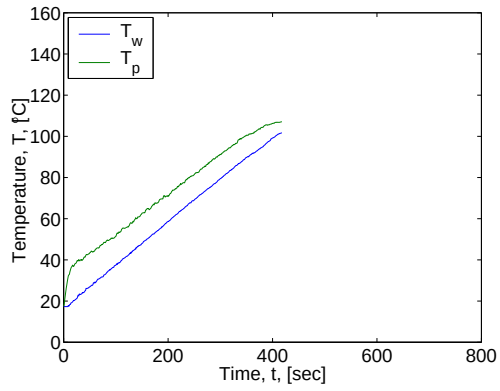


Fig. 6.58: 鍋4 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり

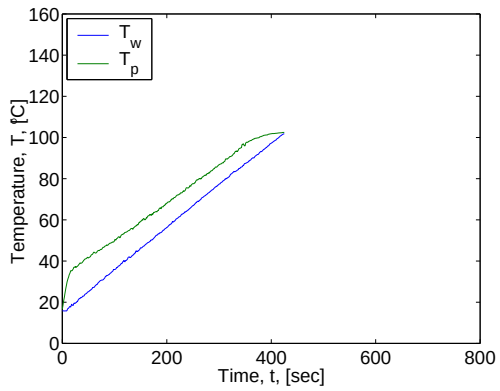


Fig. 6.59: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり

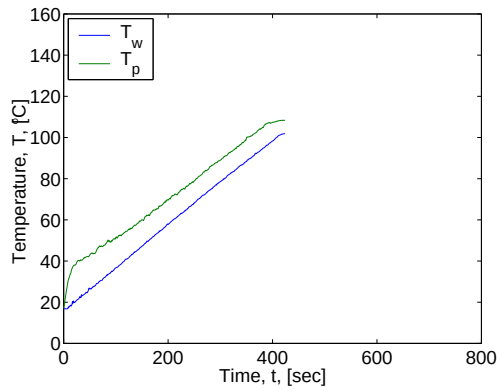


Fig. 6.60: 鍋4 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり

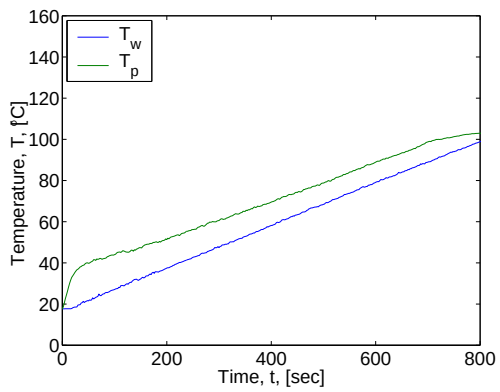


Fig. 6.61: 鍋1 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり

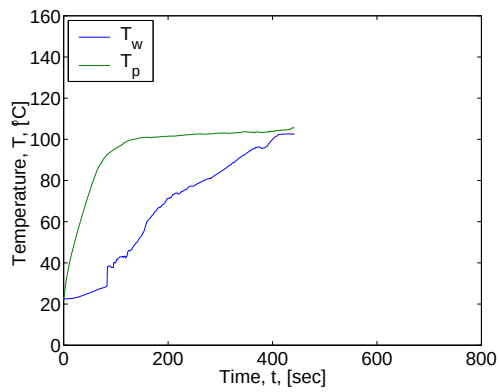


Fig. 6.62: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり 粘性流体

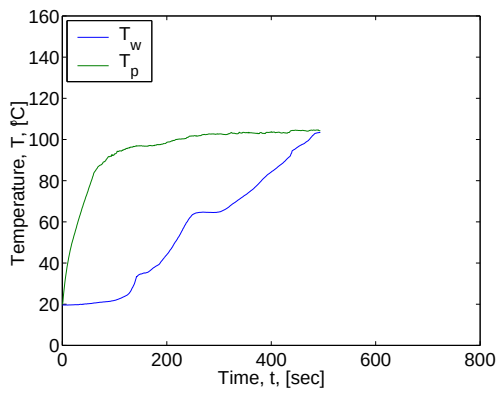


Fig. 6.63: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり 粘性流体

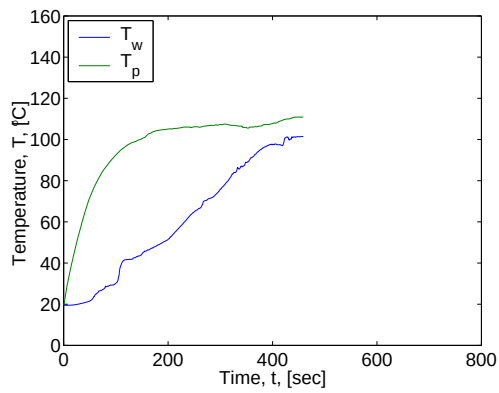


Fig. 6.64: 鍋4 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり 粘性流体

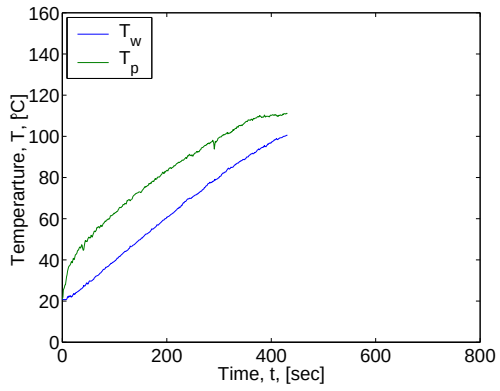


Fig. 6.65: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

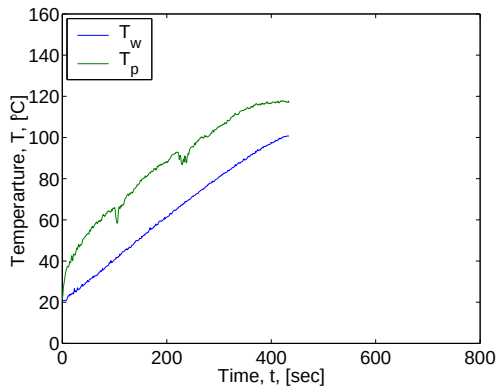
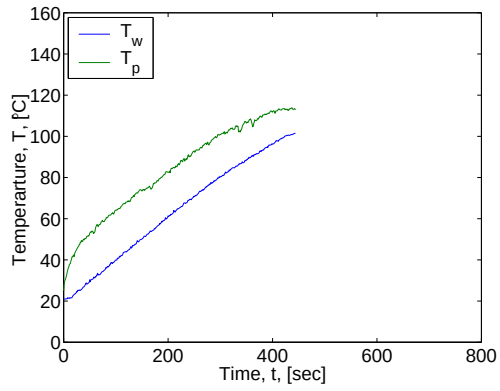
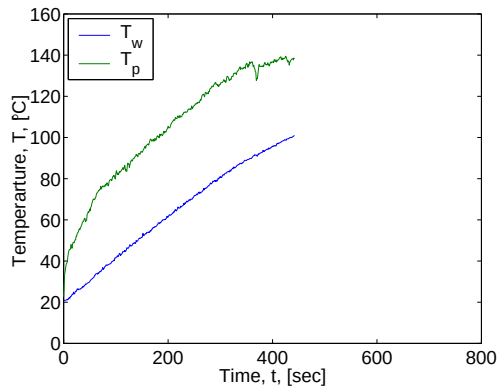


Fig. 6.67: 鍋3 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]



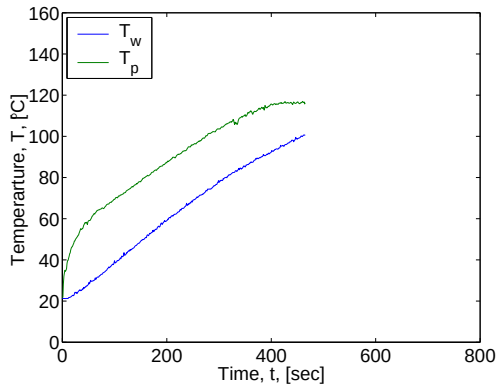


Fig. 6.69: 鍋5 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]

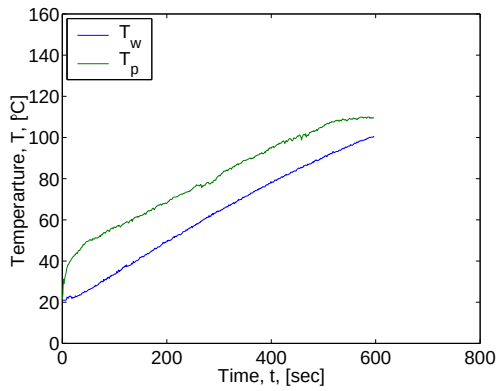
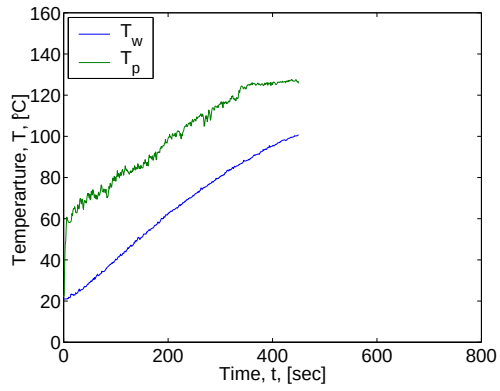
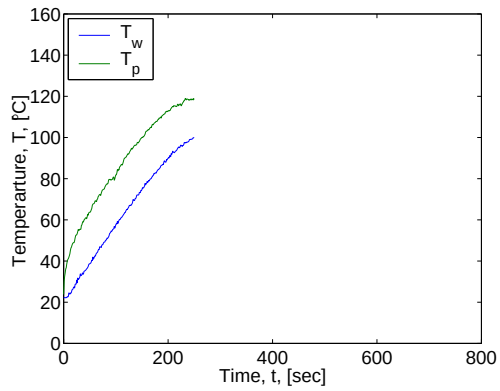


Fig. 6.71: 鍋3 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min]



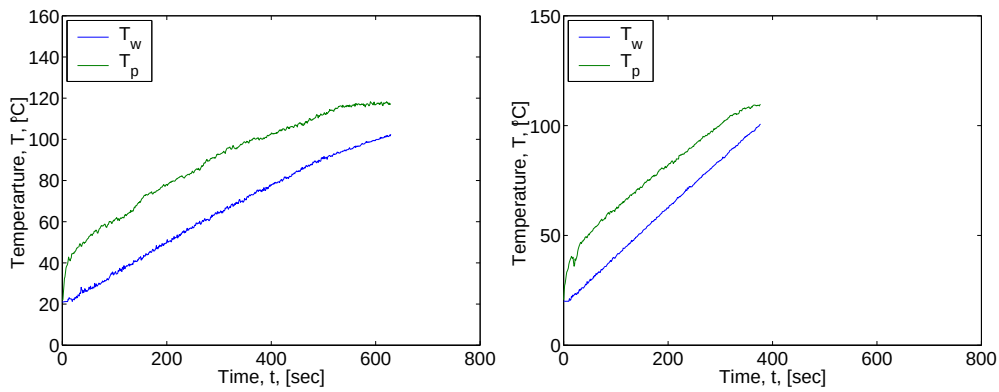


Fig. 6.73: 鍋4 水量 1.5 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] Fig. 6.74: 鍋7 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり

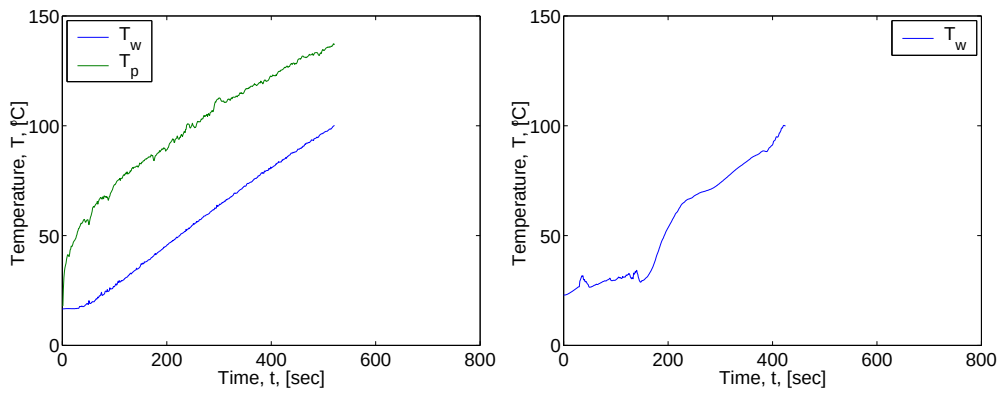


Fig. 6.75: 鍋8 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり Fig. 6.76: 鍋4 水量 1.0 [ℓ] ガス流量 2.7 [ℓ/min] 蓋あり 粘性流体

6.2 冷却データ

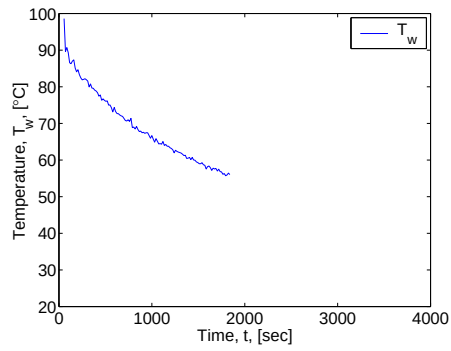


Fig. 6.77: 鍋1 水量 1.5 [ℓ]

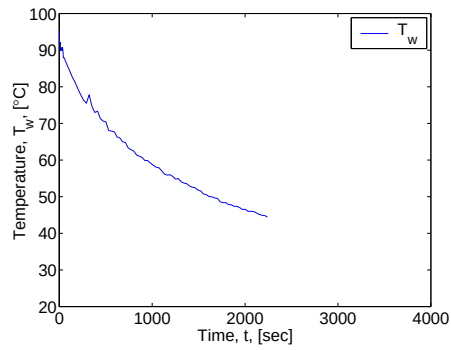


Fig. 6.78: 鍋1 水量 1.0 [ℓ]

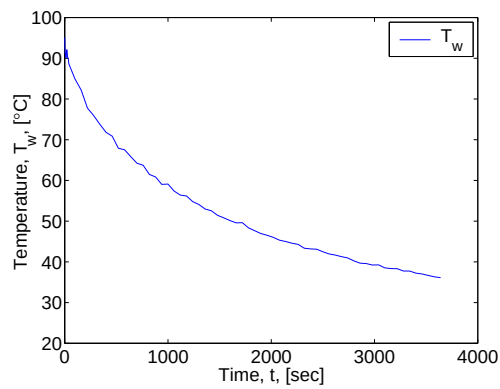


Fig. 6.79: 鍋2 水量 1.0 [ℓ]

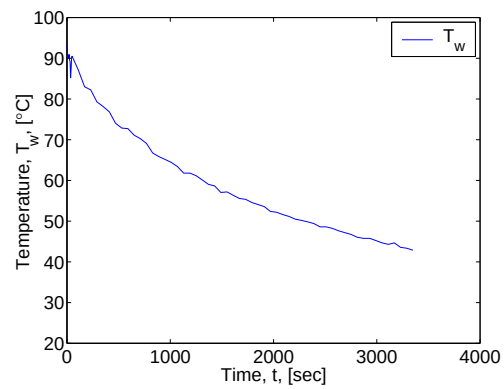


Fig. 6.80: 鍋2 水量 1.5 [ℓ]

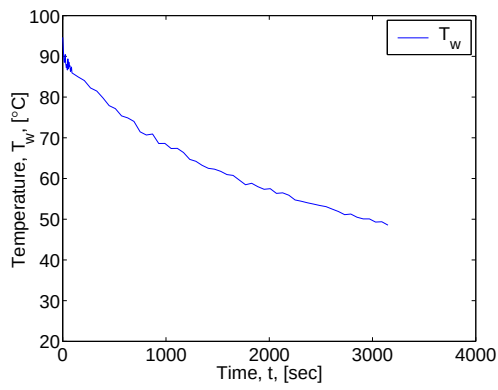


Fig. 6.81: 鍋 2 水量 2.0 [ℓ]

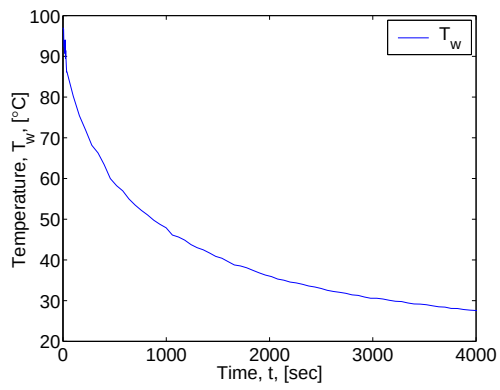


Fig. 6.82: 鍋 1 水量 0.5 [ℓ]

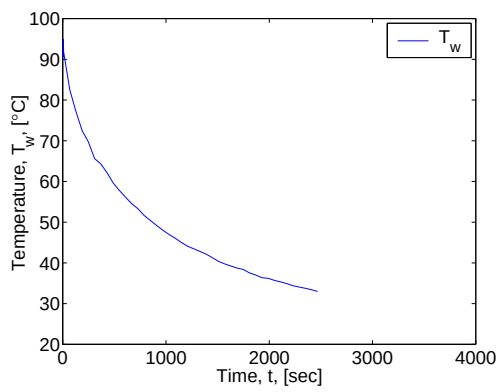


Fig. 6.83: 鍋 2 水量 0.5 [ℓ]

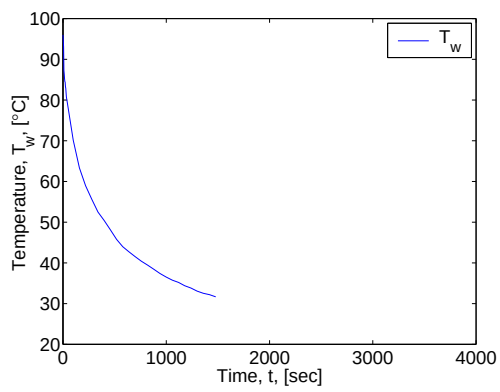


Fig. 6.84: 鍋 1 水量 0.2 [ℓ]

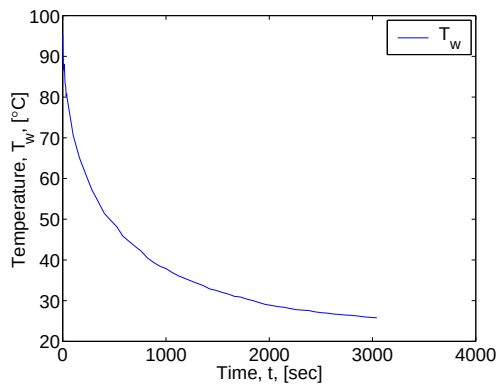


Fig. 6.85: 鍋 2 水量 0.2 [ℓ]

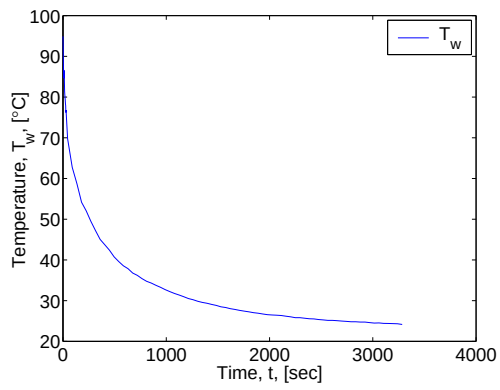


Fig. 6.86: 鍋 1 水量 0.1 [ℓ]

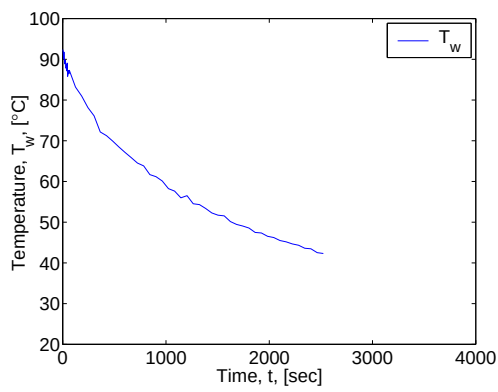


Fig. 6.87: 鍋 4 水量 1.0 [ℓ]

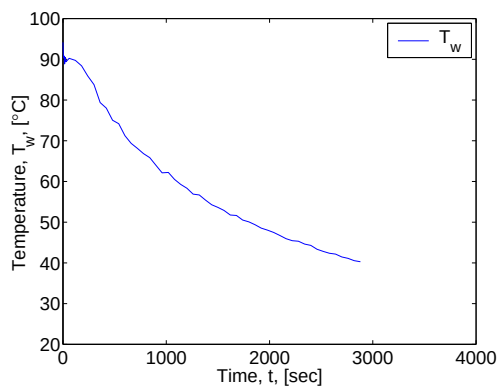


Fig. 6.88: 鍋 3 水量 1.0 [ℓ]

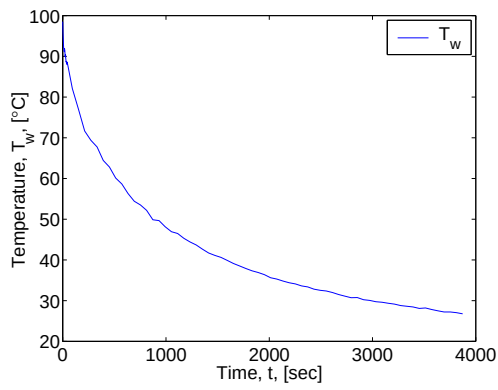


Fig. 6.89: 鍋4 水量 0.5 [ℓ]

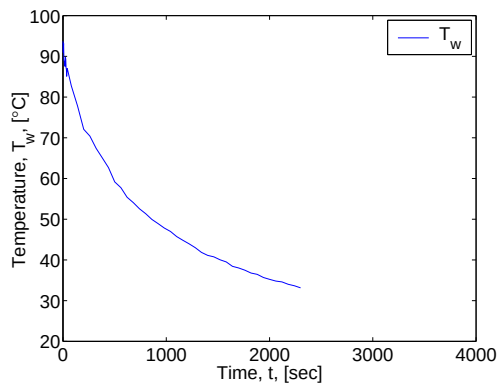


Fig. 6.90: 鍋3 水量 0.5 [ℓ]

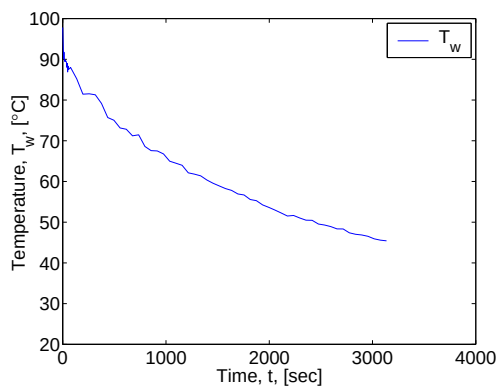


Fig. 6.91: 鍋3 水量 1.5 [ℓ]

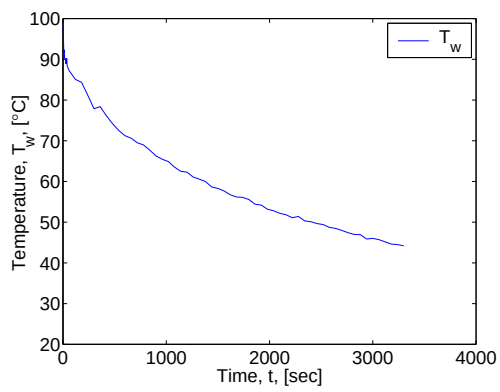


Fig. 6.92: 鍋4 水量 1.5 [ℓ]

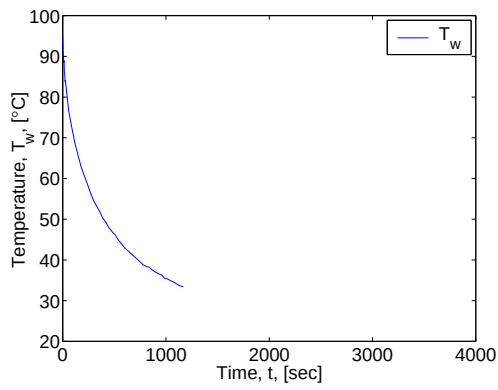


Fig. 6.93: 鍋3 水量 0.2 [ℓ]

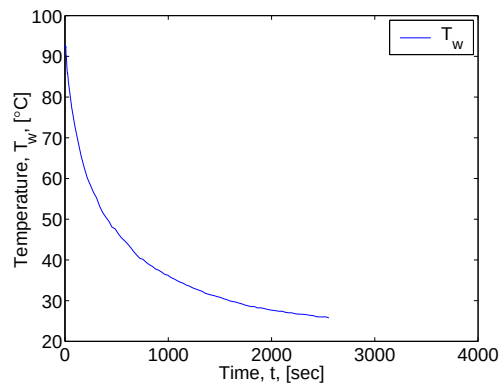


Fig. 6.94: 鍋4 水量 0.2 [ℓ]

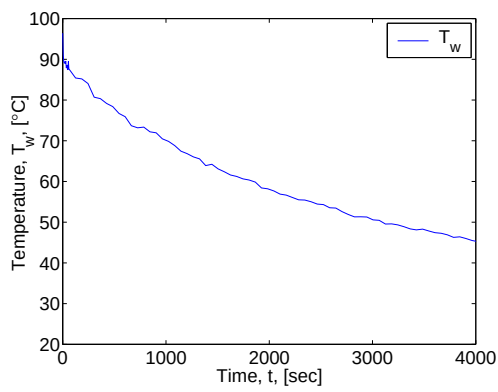


Fig. 6.95: 鍋3 水量 2.0 [ℓ]

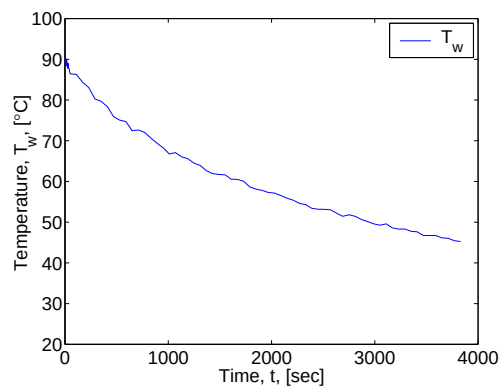


Fig. 6.96: 鍋4 水量 2.0 [ℓ]

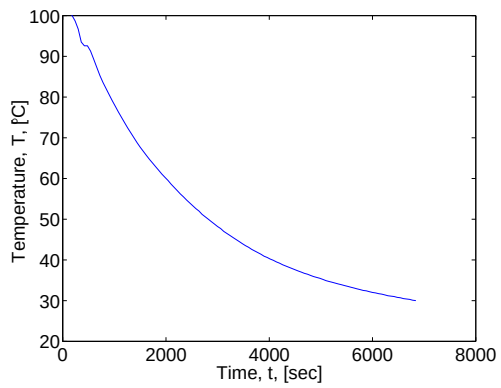


Fig. 6.97: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] 粘性流体

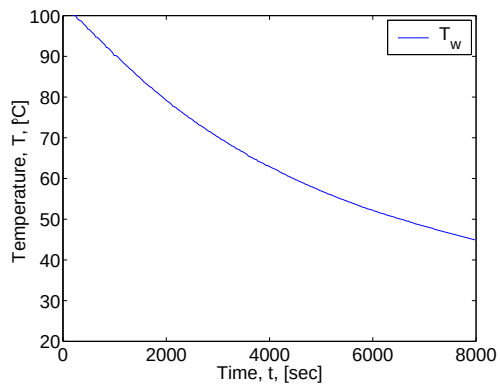


Fig. 6.98: 鍋1 水量 1.0 [ℓ] 蓋あり

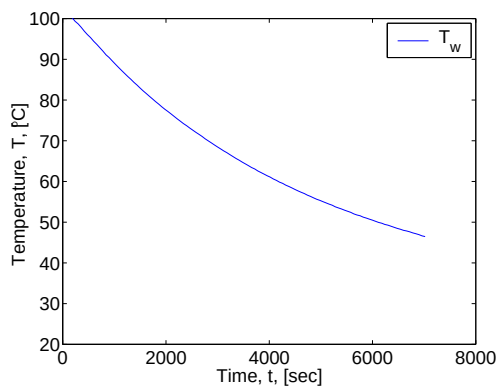


Fig. 6.99: 鍋7 水量 1.0 [ℓ] 蓋あり

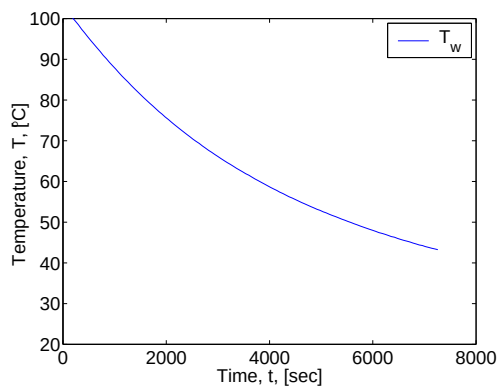


Fig. 6.100: 鍋8 水量 1.0 [ℓ] 蓋あり

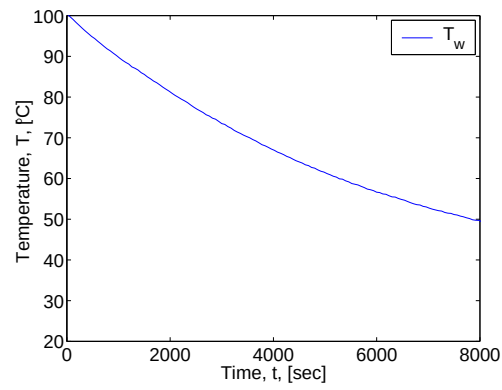


Fig. 6.101: 鍋4 水量 1.0 [ℓ] 蓋あり 粘性流体

以上

通し番号 1 - 90 完

卒業論文

平成 16 年 2 月 6 日 提出

20178 高尾 俊匡