

卒業論文

多孔質環状流路内の熱対流

1 - 80ページ 完

平成14年2月8日提出

指導教官 庄司 正弘 教授

00271 石川 桂

目次

1.序論	4
1.1.序文	4
1.2.研究の背景	4
1.3.サーモサイフォンの1次元の数学モデル	6
1.4.多孔質の場合の1次元の数学モデル	8
2.実験装置及び実験方法	11
2.1.実験装置概要	11
2.2.本体	12
2.3.測定部	15
2.4.その他の部分	17
2.5.実験手順	19
3.実験結果	21
3.1.上部銅 - 下部ガラスについて	21
3.2.上部ガラス - 下部ガラスについて	23
3.3.上下ガラスに多孔質を入れた場合	24
3.4.考察	27
4.結論	30
5.実験データ	32
あとがき	78
参考文献	79

第一章

序論

1.序論

1.1.序文

ドーナツ型の円管を縦におき、内部に流体を満たし、熱による浮力を用いて流体に対流を起こし、円管の中の流体をぐるぐると回転させる、という装置をサーモサイフォンという。サーモサイフォンは、メカニカルでないヒートポンプとして、太陽熱温水器、地熱発電、核反応炉の緊急冷却等に幅広く応用されている。

サーモサイフォンは一定の条件の下で、カオス現象を引き起こす事が知られている。このカオス現象は、ローレンツカオスと呼ばれる現象で、カオスを生じる最も簡単なモデルの一つとして大変幅広く研究されている。本研究では、管材質を熱伝導率の高い銅にした場合、対流のカオス現象にどのような影響があるのかを観測するのが一つ目の目的である。

一方、サーモサイフォンの管内部を多孔質にした場合については、まだ実験がなされたことがない。多孔質サーモサイフォンは、地熱発電の良いモデルにもなりうるし、この実験は今までなされたことがないので、何らかの有用な性質を発見できる可能性がある。本研究の二つ目の目的は、サーモサイフォンの管内部を多孔質にした場合の対流の性質を観測することである。

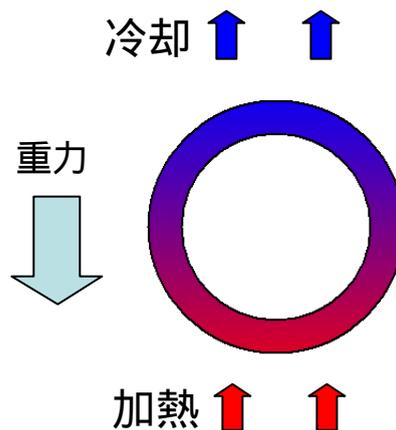


図 1.1. サーモサイフォンのしくみ

1.2.研究の背景

中に流体を満たした環状の装置を縦に置き、下部を加熱し、上部を冷却する。下部にある流体は加熱されると密度が低くなり浮力を生じ、上昇しようとする。一方上部にある流体は、冷却され密度が高くなり下降しようとする。この結果として、円環の中の流体に対流が生じ、円環の中を流体がぐるぐると回転しだす。加熱量が小さい場合、浮力と摩擦力が一致する状態で安定になり、この回転は一定の速度に落ち着く。

Creveling[1]らは、一定の条件の下で加熱量を大きくすると、流体の速度が一定にならず不安定な発振現象が生ずることを発見した。次のグラフはこの不安定現象のグラフである。グラフの right 及び left とは、サーモサイフォンの左（時計の針で言えば 9 時）と右（時計の針で言えば 3 時）の温度を計測しているものである。左の温度が右よりも高ければ流体が熱せられたことを意味するので、対流は時計回りになっている。右のほうが高いならば反時計回りである。グラフ

から、流体が振動し、頻繁に向きを反転させていることがわかる。

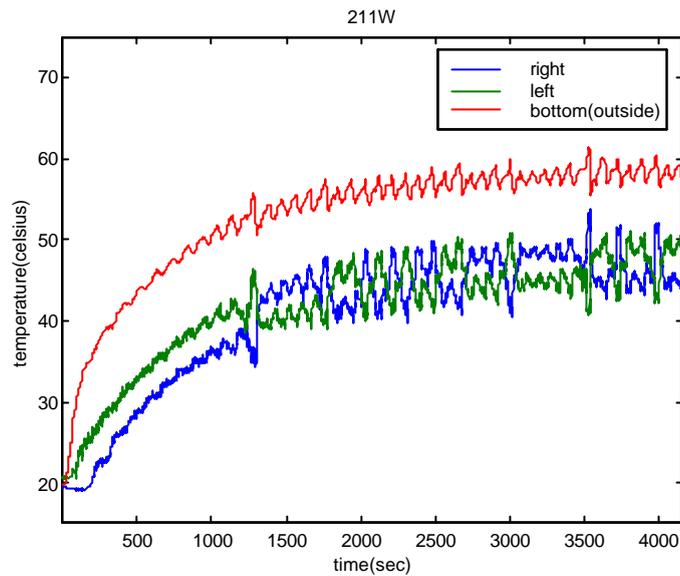


図 1.2. 不安定現象（ローレンツ現象）

Gorman[2]らは、この発振現象が発生する原因は、この系がカオス理論のローレンツ方程式で表されるためであることをみつけ、この現象を5つの状態に区分けした。それぞれ加熱量が小さいものから順番に並べていくと、安定状態、安定循環、遷移状態、サブクリティカル、グローバルカオスの5つである。

Damerell と Schoenhals[3]は、不安定現象が装置の角度の影響を受けることを示した。彼等の理論的予測では0度に対流の速度のピークがくるが、実験では60度ぐらいにピークがあることがわかっている。この相違は、0度から60度の間では冷却部で管壁の付近で下方への速度が生じるため、完全に発達した層流という仮定が成り立たなくなり、摩擦力の影響が大きく変わるためとした。

サーモサイフォンについてはたくさんの研究が行われているが、ローレンツ現象の発生の有無は、熱伝導率の低いガラス管を用いた場合についてのみ議論されており、熱伝導率が高く工業的利用可能性がより幅広いと考えられる銅管については、研究が行われておらず、成瀬[8]、芝[9]は、ガラスをすべて銅管に変えて実験を行った。しかしローレンツ現象は発生せず、Jiang ら[4]のシミュレーションによると、加熱量が一定の場合、下部の銅管がカオスの発生に強い影響を与えていることがわかった。よって本研究の第一の目的は、下部の銅管をガラスに変えて実験することで、カオスが発生するかどうかを検証することにある。

一方、サーモサイフォンの管内部を多孔質にした場合については、まだ実験がなされたことがない。多孔質サーモサイフォンは、地熱発電の良いモデルにもなりうるし、多孔質流体の熱対流のより深い理解につながる可能性がある。Jiang ら[5]によりシミュレーションは行われているが、実験はされていないので、本研究では、実験により対流の性質を観測することで、シミュレーションの検証を行う。本研究の二つ目の目的は、サーモサイフォンの管内部を多孔質にした場合の対流の性質を観測することである。

1.3.サーモサイフオンの1次元数学モデル

下部については流入熱量を一定とする加熱、上部については一定温度での冷却として考える。

実際の現象は管内部にも小さな対流があるので3次元であるが、簡単のため、管の軸方向のみ考え、管の半径方向については考えない1次元モデルについて考えることにする。

まず運動量方程式である。 ρ は密度、 r は管の半径、 R は円環の半径、 v は流体の速度、 P は圧力、 g は重力加速度、 t_w はせん断力である。

流体のコントロールボリュームにおける運動量変化はそれぞれ

$$\text{慣性力の項は } F_q = \rho r p r^2 R d q \frac{dv}{dt}$$

$$\text{圧力項は } F_p = -\rho r^2 R d q \frac{1}{R} \frac{dP}{dq}$$

$$\text{質量力の項は } F_g = -\rho g r p r^2 R d q \cos q$$

$$\text{せん断力の項は } F_s = -t_w 2pr R d q$$

以上をまとめると、運動量方程式は、

$$\rho r p r^2 R d q \frac{dv}{dt} = -\rho r^2 d q \frac{dP}{dq} - \rho g r p r^2 R d q \cos q - t_w 2pr R d q$$

質量力の項のみ $r = r_w (1 - b(T - T_w))$ とし、他の項は $r = r_w$ とするブシネ近似を用い、せん断

応力は層流かつ低レイノルズ数の場合、 $t_w = \frac{8r_w v^2}{Re}$ と表されることを利用し、 q を 0 から 2

まで積分する。なお、 T_w は冷却部の壁面の温度で、レイノルズ数は $Re = \frac{2r_w v r}{\mu}$ であり、 μ は粘

性係数である。圧力項は 0 から 2 まで積分すれば打ち消される。

$$r_w \frac{dv}{dt} = \frac{b g r_w}{2\rho} \int_0^{2p} (T - T_w) \cos q dq - \frac{8\mu v}{r^2} \quad (1)$$

次に、エネルギー保存方程式を考える。 c_p は定圧比熱、 q_{in} は流入する加熱量、 h は熱伝達率とする。

流体のコントロールボリュームにおける熱エネルギー変化は、

$$\Delta Q = r_w c_p \rho r^2 R d q \frac{DT}{Dt} = r_w c_p \rho r^2 R d q \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial q} \right)$$

である。円環の下側ではこれは $\Delta Q_B = 2pr R q_{in} d q$ に一致する。円環の上側では、 $\Delta Q_T = -2pr R d q h(T - T_w)$ に一致する。

よって、エネルギー保存方程式は次のように書ける。

$$r_w c_p p r^2 R d\mathbf{q} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} \right) = \begin{cases} -\frac{2h(T-T_w)}{r} & (0 < \mathbf{q} < p) \\ \frac{2q_{in}}{r} & (p < \mathbf{q} < 2p) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、円環上側内部の温度 T については一定と仮定した。

さて、(1)および(2)を無次元化する。

$$\Phi = \frac{h(T-T_w)}{q_{in}}, w = \frac{v}{V}, t = \frac{Vt}{2pr}, V = \sqrt{\frac{gbrRq_{in}}{2pcm}}, D = \frac{2pRh}{r_w crV}, \Gamma = \frac{16pnR}{r_w r^2 V} \text{ とすると、}$$

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} + \Gamma w &= \frac{p\Gamma}{4D} \int_0^{2p} \Phi \cos \mathbf{q} d\mathbf{q} \\ \frac{d\Phi}{dt} + 2pw \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{q}} &= \begin{cases} -2D\Phi & (0 < \mathbf{q} < p) \\ 2D & (p < \mathbf{q} < 2p) \end{cases} \end{aligned}$$

これをローレンツ方程式に当てはめるために、 $\Phi = a \cos \mathbf{q} + b \sin \mathbf{q}$ として、フーリエ級数の一つ目のモードで表す。

運動量方程式は、

$$\frac{dw}{dt} + \Gamma w = \frac{p^2 \Gamma}{4D} a \quad (3)$$

エネルギー保存方程式は

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} \cos \mathbf{q} + \frac{db}{dt} \sin \mathbf{q} + 2pw(b \cos \mathbf{q} - a \sin \mathbf{q}) \\ = \begin{cases} -2D(a \cos \mathbf{q} + b \sin \mathbf{q}) & (0 < \mathbf{q} < p) \\ 2D & (p < \mathbf{q} < 2p) \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式には二つのモードが含まれているので、両辺にそれぞれ $\cos \mathbf{q}$ と $\sin \mathbf{q}$ をかけ、0 から 2π まで積分し、モードを分離する。これらをまとめると、

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= \frac{p^2 \Gamma}{4D} a - \Gamma w \\ \frac{da}{dt} &= -2pwb - Da \\ \frac{db}{dt} &= 2pwa - Db - \frac{4D}{p} \end{aligned}$$

である。これはローレンツ方程式の変形したものといえる。

ここで、 $x = 2paw, y = ba, z = -db + R_{ay}, t' = gt$ として、 $a = \frac{1}{D}, b = \frac{p^3}{2D}, g = D, d = -b$ とお

く。サーモサイフの場合の $b=1$ としてローレンツ方程式を求めると、

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{dt'} &= s(y-x) \\
\frac{dy}{dt'} &= -zx + R_{ay}x - y \\
\frac{dz}{dt'} &= xy - z
\end{aligned}
\tag{5}$$

となる。ここで、 $s = \frac{\Gamma}{D} = \frac{8mc_p}{rh}$ 、 $R_{ay} = \frac{2p^2}{D^2} = \frac{r_w^2 c^2 r^2}{2R^2 h^2} \frac{g b R r q_{in}}{2pcm}$ である。

1.4. 多孔質の場合の1次元の数学モデル

先の通常のサーモサイフオンの数学モデルと同じく、下部については流入熱量を一定とする加熱、上部については一定温度での冷却として考える。

多孔質の場合においても、実際の現象は管内部にも小さな対流があるので3次元であるが、簡単のため、管の軸方向のみ考え、管の半径方向については考えない1次元モデルについて考えることにする。

記号について、文字の右下についている小さい文字の f は流体のもの、 s は多孔質の固体側、 e は多孔質全体のものである。例えば r_f は流体の密度のことである。

まず運動量方程式である。 ρ は密度、 ϵ は空隙率、 R は円環の半径、 μ は粘性係数、 K は浸透率、 \bar{w} は流体の速度である。

$$\frac{r}{e} \frac{d\bar{w}}{dt} = -\frac{1}{R} \frac{dP}{dq} - r g \cos q - \frac{m}{K} \bar{w}$$

ここで、 $-\frac{m}{K} \bar{w}$ はダーシー項とよばれ、多孔質による抵抗力のことである。

これにブシネ近似を行い、0 から 2π まで積分する。 g は重力加速度、 β は体膨張係数、 T は流体の温度、 T_c は冷却部の壁面の温度である。

$$2p \frac{r_f}{e} \frac{d\bar{w}}{dt} = \int_0^{2\pi} g \beta (T - T_c) \cos q dq - 2p \frac{m}{K} \bar{w}$$

次にエネルギー方程式をたてる。 c_p は定圧比熱、

$$\text{は多孔質の熱容量比 } s = \frac{(rc_p)_f e + (rc_p)_s (1-e)}{(rc_p)_f}、h \text{ は熱伝達率、 } r \text{ は管の半径、 } q_{in} \text{ は流入}$$

する加熱量である。

$$(\mathbf{rc}_p)_f \left(\mathbf{s} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\bar{w}}{R} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} \right) = \begin{cases} -\frac{2h(T-T_C)}{r} & (0 < \mathbf{q} < \mathbf{p}) \\ \frac{2q_{in}}{r} & (\mathbf{p} < \mathbf{q} < 2\mathbf{p}) \end{cases}$$

これらを次の式を用いて無次元化する。ここで、 a は温度伝導率である。

$$t = \frac{\mathbf{S}r^2}{a_e} \mathbf{t}, \bar{w} = \frac{a_e}{r_0} w, L = r, T = \Phi(T - T_C) = \frac{q_{in}}{h}$$

運動方程式は

$$2\mathbf{p} \frac{Da}{\mathbf{Prse}} \frac{d\bar{w}}{dt} = Ra \int_0^{2\mathbf{p}} \Phi \cos \mathbf{q} d\mathbf{q} - 2\mathbf{p}w$$

Da はダーシー数 $Da = \frac{K}{r^2}$ 、 \mathbf{Pr} はプラントル数 $\mathbf{Pr} = \frac{\mathbf{n}_f}{a_e}$ 、

Ra はレイリー数 $Ra = \frac{\mathbf{r}_f g \mathbf{b} (T_H - T_C) r K}{a_e \mathbf{m}_f}$ である。

エネルギー方程式は

$$(\mathbf{rc}_p)_f \left(\mathbf{s} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{w}{R} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{q}} \right) = \begin{cases} -Nu\Phi & (0 < \mathbf{q} < \mathbf{p}) \\ Nu & (\mathbf{p} < \mathbf{q} < 2\mathbf{p}) \end{cases}$$

Nu はヌッセルト数 $Nu = \frac{2hr}{k_e}$ 、ここで k は熱伝導率である。

このエネルギー方程式の温度を $\Phi = a_0 + a_1 \cos \mathbf{q} + a_2 \sin \mathbf{q}$ とし、フーリエ級数の一つ目のモードで表す。

$$\left(\frac{\partial(a_0 + a_1 \cos \mathbf{q} + a_2 \sin \mathbf{q})}{\partial t} + \frac{w}{R} (-a_1 \sin \mathbf{q} + a_2 \cos \mathbf{q}) \right) = \begin{cases} -Nu(a_0 + a_1 \cos \mathbf{q} + a_2 \sin \mathbf{q}) & (0 < \mathbf{q} < \mathbf{p}) \\ Nu & (\mathbf{p} < \mathbf{q} < 2\mathbf{p}) \end{cases}$$

これらには二つのモードが含まれているので、両辺にそれぞれ $\cos \mathbf{q}$ と $\sin \mathbf{q}$ をかけ、0 から 2 まで積分し、モードを分離する。まとめると、

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{\mathbf{Prse}}{Da} (0.5Ra \cdot y - x) \\ \frac{dy}{dt} &= -Nu \cdot y - \frac{xz}{R} \\ \frac{dz}{dt} &= -\frac{4Nu}{\mathbf{p}} - Nu \cdot z + \frac{xy}{R} \end{aligned}$$

ここで、 $x = w, y = a_1, z = b_1$ とした。

第二章

実験装置及び実験方法

2.実験装置及び実験方法

2.1.実験装置概要

実験装置は、大きく分けると本体と測定部の2つに分かれている。



図 2.1 全体写真(左が本体・机の上にあるのが測定部)

2.2.本体

本体は冷却部、加熱部、連結部、及びボディーの部分にわかれている。冷却部及び加熱部はそれぞれ実験に応じて素材を銅とガラスの2種類に変更することができるようになっている。パイプの内径は2.3 mm、外形は2.6 mmで、円環の半径は380 mmである。円環の中には蒸留水を入れる。

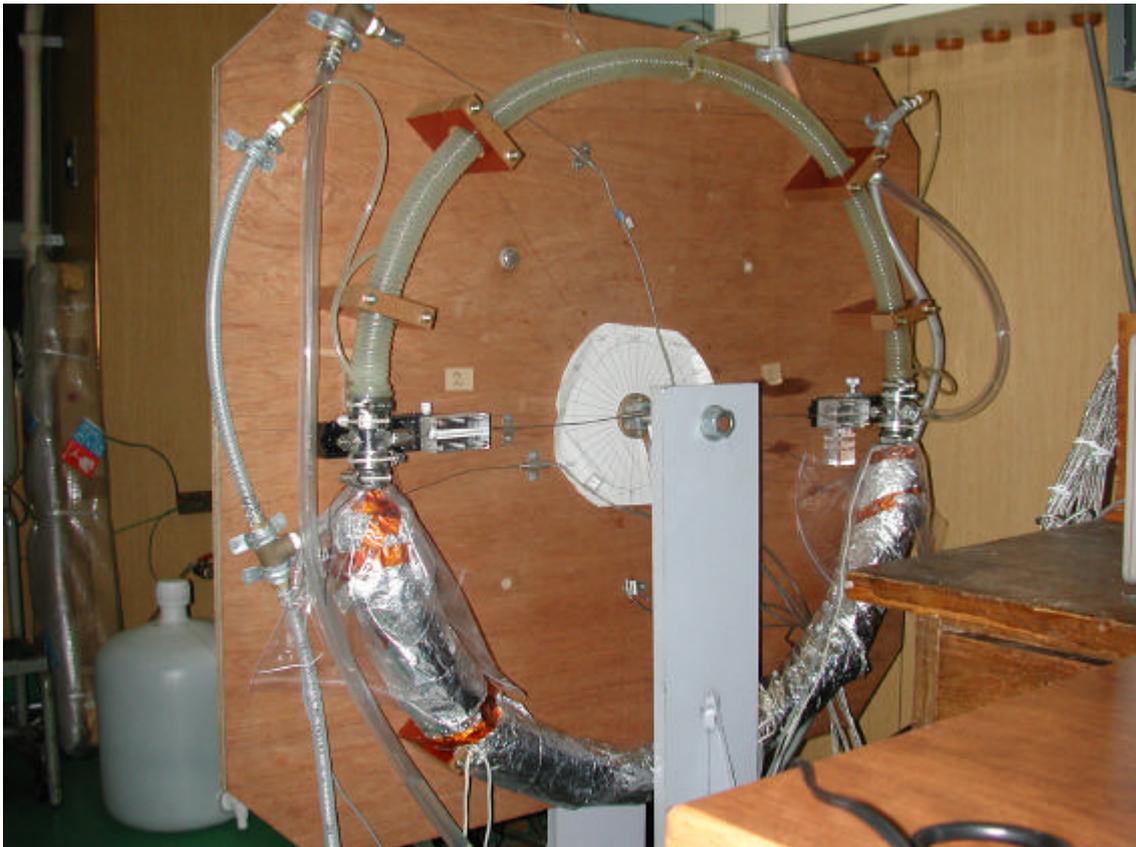


図 2.2. 本体写真

2.2.1.冷却部

冷却部の中には半円の形をしたパイプがあり、このパイプは銅とパイレックスガラスの2つに変更することができる。パイプが銅の場合とガラスの場合では、冷却方法はそれぞれ異なる。銅管の場合は、外側に冷却水を通す2重パイプを用いる。ガラス管の場合は、パイプの外側に冷却水の通るチューブをまきつける。写真はガラス管の場合で、チューブが巻きつけてある。



図 2.3. 冷却部

2.2.2.加熱部

加熱部も冷却部と同様に、半円の形をしたパイプが入っており、これは銅とパイレックスガラスの2種類に変更することができる。加熱方法は素材の違いにかかわらず同じで、管の外側にゴムヒーターを巻きつけ、そのまわりに断熱材（ニチアス・マリンテックス TOMBO テープ 2 . 5）を巻きつける。写真に見えるように、その外側には粘着アルミガラスクロステープをまいてある。



図 2.4. 加熱部

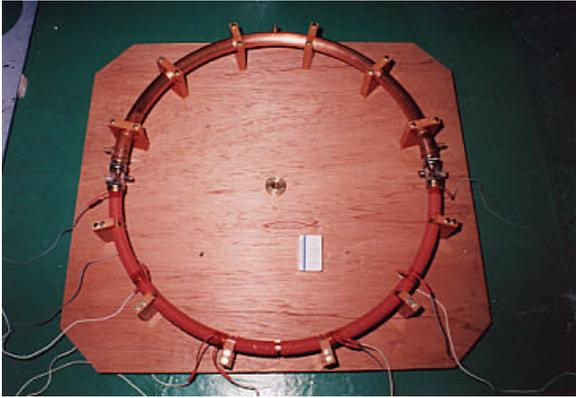


図 2.5. ヒーター

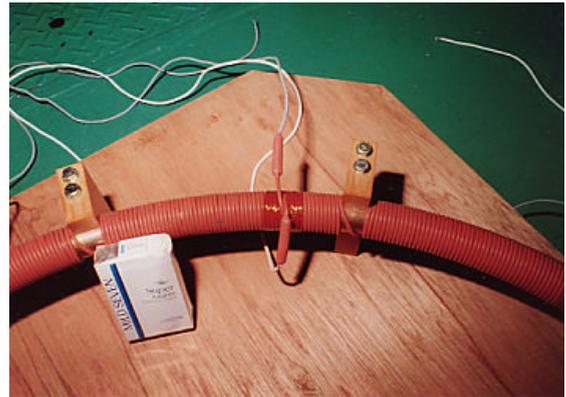


図 2.6. ヒーター拡大写真

2.2.3.連結部

連結部は冷却部と加熱部を連結する部分である。内部を可視化できるように透明なアクリルでできており、注水口と熱電対がついている。熱電対には微動装置がついていて、パイプの内側から外側まで熱電対の位置を変更し、局所的な温度を測定することができる。多孔質の実験では、ガラスビーズが連結部内部まで入っていると熱電対を自由に動かすことができず、可視化も不可能になる。そのため多孔質の実験では、連結部と冷却部及び加熱部との境目に網を入れ、ビーズが連結部に入り込まないようにした。



図 2.7. 連結部

2.2.4.ボディー

ボディーには冷却部、加熱部、連結部を取り付けてある。ボディー自身は円環の部分をつけたまま、15度ずつ回転をさせ角度を変えることができる。中心軸におもりをつけることで、さらに細かい角度の指定も可能である。



図 2.8. 傾き = 0°

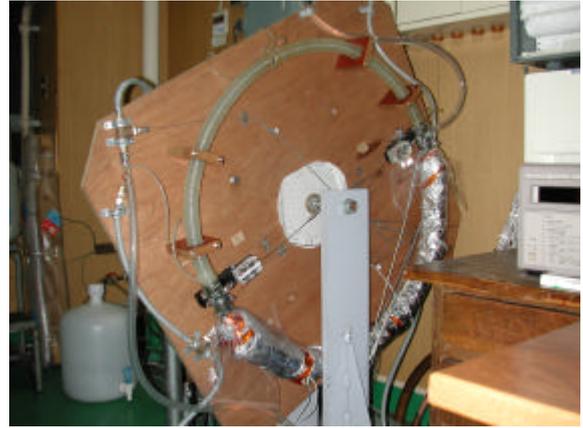


図 2.9. 傾き = 30° (反時計回り)

2.3.測定部

測定部には、温度を測定する部分、電流・電圧を測定する部分、測定データを処理するコンピュータの部分でできている。

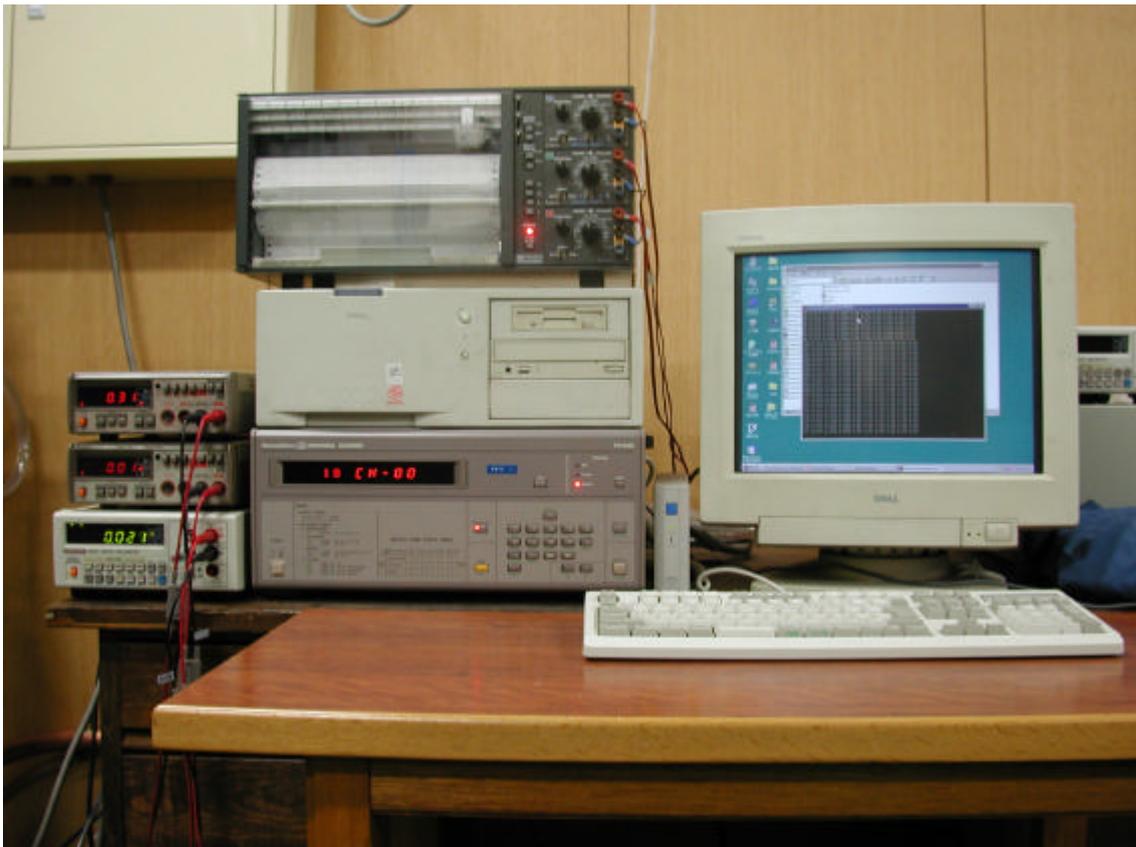


図 2.10. 測定部

2.3.1.温度測定部

熱電対は、パイプの連結部の内側 2 つと、パイプ下半分の中心のパイプ外側 1 つと、冷却水の

冷却を行う前2つ及び冷却後の温度1つの合計6つの箇所にある。熱電対の温度データはコンピュータ側とペンレコーダーに出力する。コンピュータ側は、ユニバーサルスキャナを介してデジタルマルチメーターで測定し、そのデータはGP/IBを使って送られる。ペンレコーダーが取り込めるデータは3つしかないので、連結部内側の2つと、パイプ外側についている1つの合計3つを取り込む。熱電対は銅コンスタンタン熱電対である。熱電対の応答時間は、60%で約0.03秒、90%でやく0.05秒であり、サンプリングタイム1秒には十分であるといえる。

温度測定用デジタルマルチメーター： TakedaRiken TR Digital Multimeter
 ペンレコーダー： YEW TYPE3056 Pen Recorder

2.3.2.電流電圧測定部

ヒーターの電流と電圧をデジタルマルチメーター2つで測定し、GP/IBを使ってコンピュータ側に出力する。電流の測定は、ヒーターに直列にシャント抵抗を入れ、その電圧を測定することで行っている。

電流電圧測定用デジタルマルチメーター： Advantest R6511 Digital Multimeter

2.3.3.コンピューター部

温度と電流・電圧のデータはコンピューターにGP/IBを使い入力される。コンピューターに入力されたデータは、自作プログラムでデータ変換をされ、ファイルに保存される。このデータ変換とは、電圧信号で得られる熱電対のデータを、二分法のアルゴリズムをもちいて温度に変換するものである。

ユニバーサルスキャナ： TakedaRiken TR Universal Scanner
 GP/IB カード： National Semiconductor AT-GPIB/TNT
 GP/IB ドライバ： National Semiconductor NI-488.2 Software Ver.1.60
 コンピューター： Dell Optiplex GXMS200

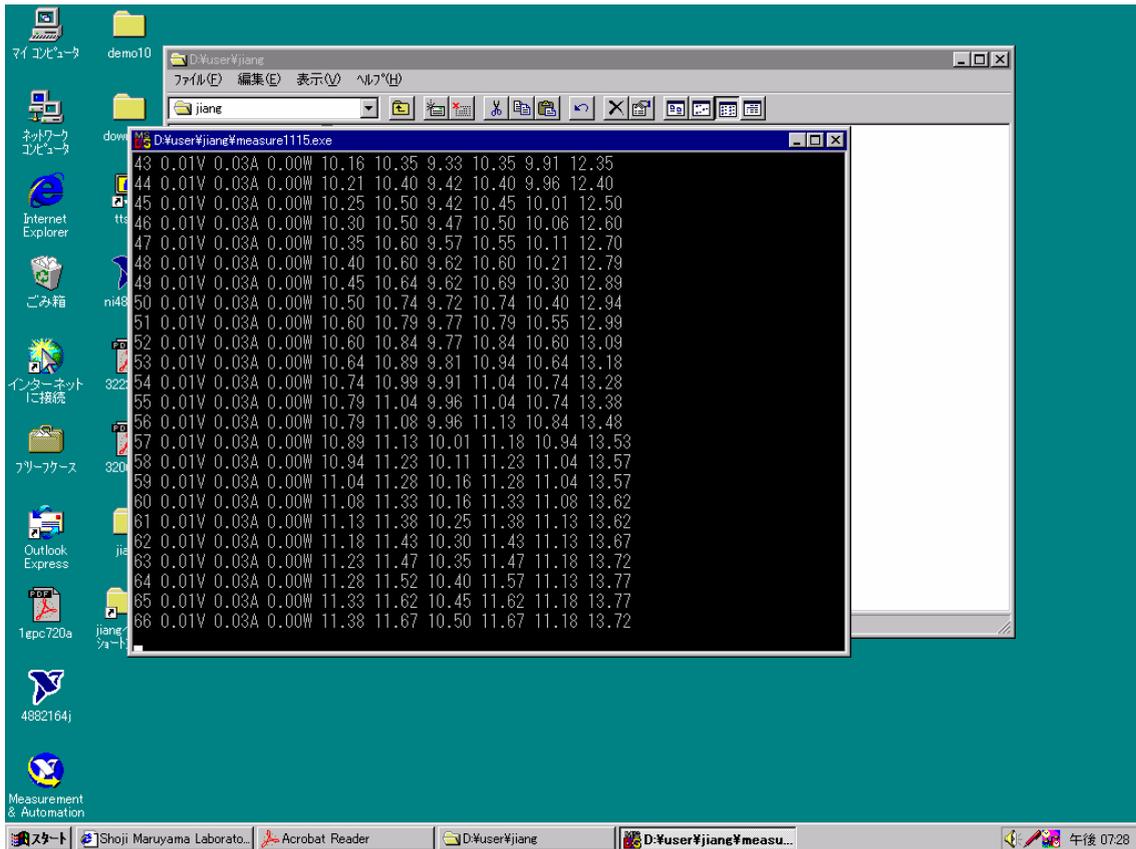


図 2.11. コンピューター画面

2.4. その他の部分

スライダック (トランス)

ヒーターに入力する電力を自由に変えられるスライダックがついている。このスライダックにより、実験装置には約 1300 W まで電力を変更して入力することが可能である。ただし、ガラスパイプの場合この電力を最大にすると熱応力が生じてパイプが割れてしまう可能性があるため、加減して使う。

可視化

多孔質でない実験において、可視化のため、ポリスチレン (密度 $1.03 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$) を少量のアルコールに混ぜ、蒸留水に投入する。

ガラスビーズ

ガラスビーズは、3mm と 7mm のものを使った。ガラスの密度は 2.52 g/cm^3 である。マイクロメーターによる直径の測定結果は次の通りである。

	平均直径	標準偏差	測定個数	空隙率
3mm	2.616	0.109	200	0.423
7mm	6.979	0.129	100	0.454

表 2.1. ガラスビーズの特性



図 2.12. ガラスビーズ (直径 7 mm)

2.5.実験手順

2.5.1.装置の起動

1. 容器内に流体を充填する。
2. 冷却水を流しはじめる。流量計をみて左右均等に流れるように注意する。
3. 実験装置に水漏れなどの異常がないことを確認する。
4. アイスボックスに蒸留水で作った氷を入れて、熱電対の零接点とする。これは三十点が実現するまで十分な時間の間待たなければならない。
5. コンピューター、ペンレコーダー、デジタルマルチメーター、ユニバーサルスキャナのそれぞれの電源を入れる。
6. コンピューターのプログラム及びペンレコーダーを用い、系全体が安定したことを確認する。

2.5.2.実験

1. コンピューター上で計測プログラムを起動し、データの記録を開始する。
2. コンピューター画面上に表示された値を見ながら、スライダックのつまみを回し、加熱したい電力をかける。
3. ペンレコーダー、コンピューターの画面の両方を見て、異常がないことを確認する。

2.5.3.装置の停止

1. スライダックのつまみを回し、加熱を止める。
2. コンピューターのプログラムを停止し、ユニバーサルスキャナを止める。
3. ペンレコーダーを見て、系が十分に冷却されたかどうか判断する。(続けて実験を行う時は、この後実験の項に戻る)
4. 冷却水をとめる。
5. ペンレコーダーのペンを記録用紙から上げる。
6. ペンレコーダー、デジタルマルチメーター、ユニバーサルスキャナ、コンピューターの電源を切る。

第三章

実験結果

3.実験結果

3.1.上部銅 - 下部ガラスについて

図 5.1.1 ~ 5.1.50 は加熱量を 5 W から 1 0 4 0 W まで変化させ、各部の温度を測定したものである。それぞれのデータについて、温度の時系列と温度差のグラフを図 5.1.1 ~ 5.1.34 に、パワースペクトラムのグラフを図 5.1.35 ~ 50 にのせてある。

・対流開始点について

定常状態では、エネルギー保存式 $Q = rpr^2 v c_p \Delta T$ より、左右の温度差と加熱量から速度が計算できる。その計算を行ったのが次のグラフである。

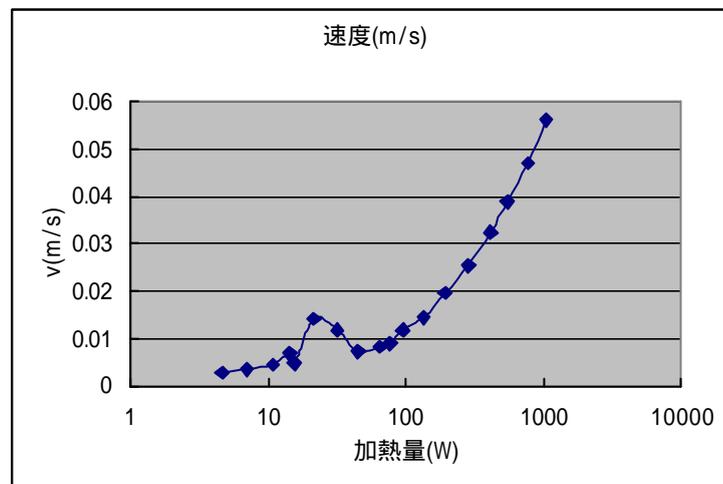


図 3.1. 加熱量と流速の関係（横軸は対数）

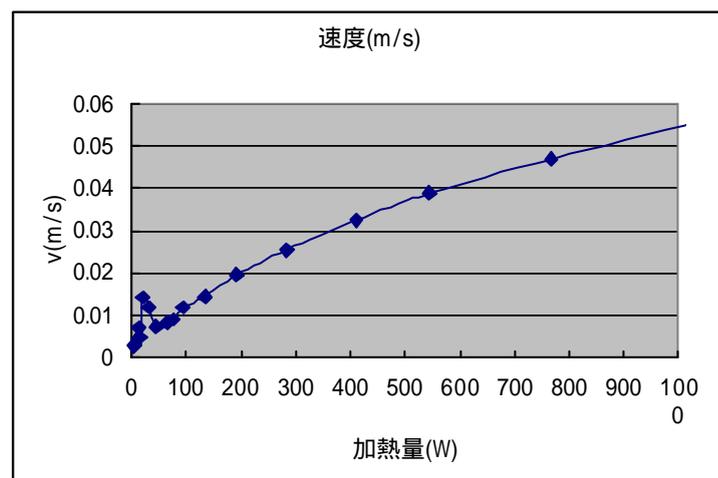


図 3.2. 加熱量と流速の関係

熱量がある大きさになるまでは熱は熱伝導によってのみ伝わり、その値より大きくなると対流が発生し熱伝達がおこるはずである。熱伝導では流体に速度が生じないので、流体の速度はほぼ0にならなければならない。熱伝達では流体に速度が生じるので、加熱量と速度のグラフに傾きが生じるはずである。

グラフを見ると、45W付近が境目となって速度が増加していく様子がうかがえる。

45W以下は対流が発生せず熱伝導のみが起きていると考えられるが、得られたデータのグラフには速度が存在するので、熱対流が起きている可能性がある。

45Wから1040Wについて、電力と速度の間に相関関係が見られる。この部分は確実に熱対流が起きている部分である。

・カオス現象について

定常状態でカオス現象は見られなかった。この結果は上部下部ともに銅で実験を行った成瀬[8]と芝[9]の実験と同じであった。定常状態では見られなかったが、600Wから1000Wの領域で、過渡状態では過渡カオス(図：顕著な例)が見られた。このことも先の実験と同じである。今回の実験では、過渡カオスについて、600Wから1000Wの間で起こることは確認したが、先の実験で50W付近でみられた部分において、今回は過渡状態のデータは取っていない。この領域での比較は今後の課題といえるだろう。

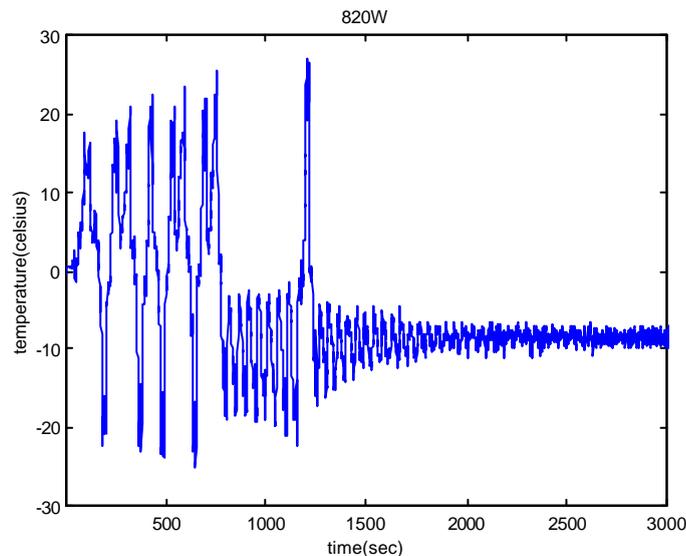


図 3.3. 過渡カオス現象

・管路の固有周波数

560W～1040Wの波に見られる強い振動成分は、周波数と加熱量の間に関連関係が見られる。この種の振動はパワースペクトラムを見ると195Wのデータから見つけることができる。この周波数成分はそれぞれの電力値に対応する速度と相関関係があるので、管の長さに固有の振動であると考えられる。この周波数と速度から逆算すると、管路長は約2.2(m)である。実際の実験装置の管路長は2.5(m)でできているので、誤差が1～2割存在するといえる。

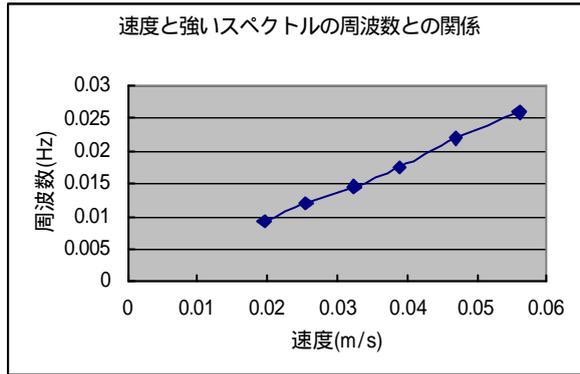


図 3.4. 速度と強いスペクトルの周波数

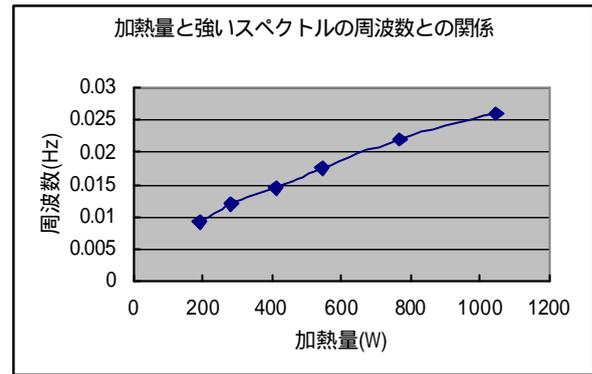


図 3.5. 加熱量と強いスペクトルの周波数

以下はそれぞれの加熱量で生じた現象についての説明である。

- ・ 5 W ~ 8 W

左右に温度差が見られる。温度の振動はごく小さいものである。この振動は熱雑音と考えられる。

- ・ 10 W ~ 15 W

片側の温度に振動が見られる。10 Wの振動の周波数は、約 0.018 Hz。間欠的(?)な振動。温度の低い側で起こっている。

- ・ 31 W

温度の高い側にランダムな比較的強い温度変動が見られる。

- ・ 45 W

温度の高い側に温度振動が見られる。パワースペクトラムを見ると、0.01 Hz にピークがある。そのまわりに 0.0033 Hz ぐらいずつはなれているピークも見られる。

- ・ 64 W

温度の高い側とともに、温度の低い側にも弱めの温度振動がある。パワースペクトラムを見ると、0.023 Hz にピークがある。

- ・ 75 W ~ 410 W

温度の高い側と低い側の両方にノイズのような振動が見られる。パワースペクトラムの非常に強い波はそんなに見られない。94 W では、パワースペクトラムのピークは 0.04 Hz。後述の管の長さに固有の周波数が 194 W ぐらいから見られる。

- ・ 560 W ~ 1040 W

温度の高い側と低い側の両方に振動が見られる。75 W ~ 410 W と違い、ノイズ成分が比較的に小さく、波形から強い波が存在することがわかる。この波は、560 W で 0.0175 Hz、760 W で 0.022 Hz、1040 W では 0.026 Hz であり、電力と相関関係がある(上述)。

3.2. 上部ガラス - 下部ガラスについて

この実験については、他研究者により研究がたくさん行われているので、カオスの発生する領域である 110 W ~ 400 W の間の実験のみを行い、この実験装置の評価を行うことだけを目的

にした。温度の時系列と温度差のグラフを図 5.2.1 ~ 5.2.18 に、パワースペクトラムのグラフを図 5.2.19 ~ 27 にのせてある。

Creveling ら[1]によると、カオスの発生する領域は、熱流束 $q=0.11 \sim 0.70$ で、これは加熱量に直すと、 $Q=100W \sim 600W$ にあたる。今回の実験では $400W$ 以上はガラス管が熱くなりすぎて、管に生じる熱応力のために実験装置が壊れる可能性があったため、実験を行わないことにした。

・発生したローレンツ現象について

$110W$ 、 $150W$ 、 $170W$ については、カオスが生じていない。これは Gorman ら[2]によるサブクリティカル領域にあたり、カオスが生じる可能性が確率に支配されているためと考えられる。

・管路の固有周波数

カオスの生じていないデータについて、内部流体の速度はそれぞれ $0.020(m/s)$ 、 $0.022(m/s)$ 、 $0.025(m/s)$ である。これらから管路長を求めると、約 $2.4m$ である。よって、上部銅・下部ガラスのときと同じく、管に固有の周波数の振動が存在する。なお、カオスが生じているときは、速度の変動が激しすぎ、平均速度を求めることが難しいので、計算を行っていない。

3.3. 上下ガラスに多孔質を入れた場合

上下ガラスのとき、管内にガラスビーズをいれて実験を行った。

直径が $3mm$ のガラスビーズと $7mm$ のビーズを使って実験した。

ビーズ直径が $3mm$ の時、管全体での対流は生じず、ガラス管の温度が高くなり 100 度以上に達し、内部流体が沸騰をはじめてしまったため、想定していた実験データが取れないと判断し、実験を続行しないことにした。これはビーズが小さすぎて流体に対する摩擦力が過大になったため流体に速度が生じにくかったためや、ビーズの熱容量によるためと考えられる。 $7mm$ のビーズを用いた時には対流は生じた。以下に述べるのは、 $7mm$ のビーズを用いた実験についてである。

なお、温度の時系列のグラフを図 5.3.1 ~ 5.3.9 にのせてある。

3.3.1. 加熱量による変化

管全体の対流が $11W$ という非常に小さい加熱量でも発生した。これは多孔質ではない実験とは異なる。多孔質状態では微小な温度差では対流が起こりにくいので、加熱した熱がたまりやすく、その結果として温度差が上昇して対流が生じる結果になったのではないか。

次のグラフから、加熱量の増加とともに内部流体の対流の速度が上昇することがわかる。

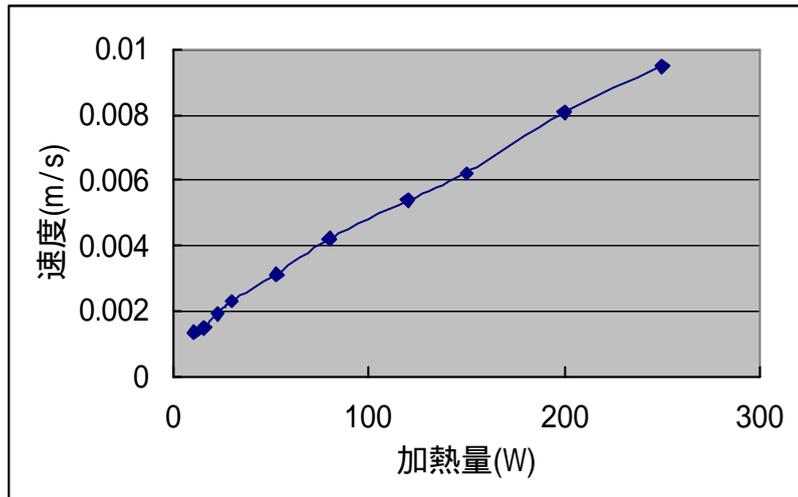


図 3.6. 加熱量と流速の関係

次のグラフから、対流が定常状態に至るまでの時間は、加熱量が小さいほど長く、加熱量が大いほど短いことがわかる。

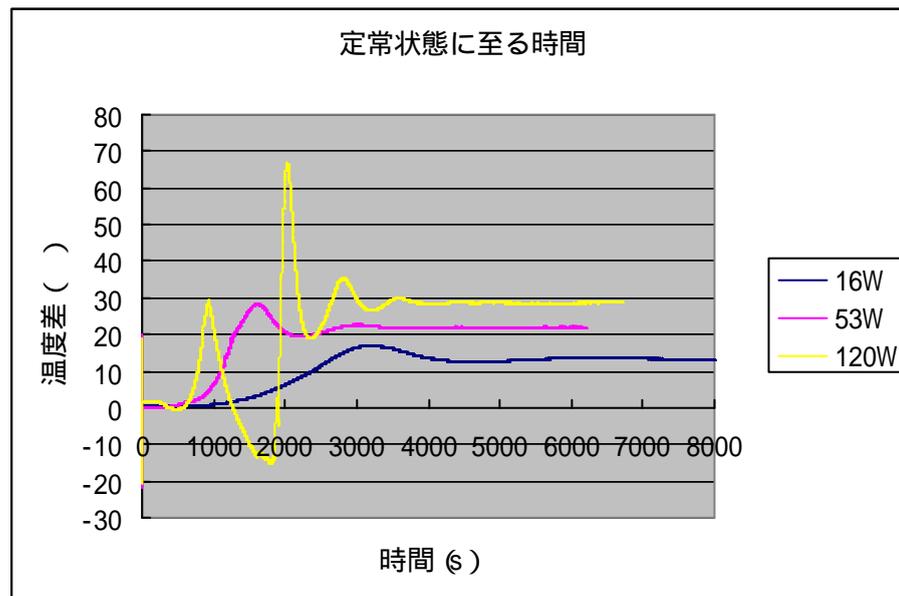


図 3.7. 定常状態に至るまでの時間

・現象の説明

入れられた熱は、まずヒーターの巻かれているガラスパイプの外壁を暖める。その熱はガラスパイプの内壁へと伝わり、内壁から段々と内部の流体に伝わっていく。内部流体の温度上昇とともに対流が起こる。その対流の速度が増加するとガラスパイプの内壁が冷え、内壁が冷えると外壁が冷える。ガラスパイプが十分に冷えると対流の速度が減り、ガラスパイプは段々と暖かくなる。温度が高くなると対流の速度が増加し... というようにして安定状態に至ることがわかる。

以下は現象についての説明である。

- ・ 11W ~ 80W

特徴的な現象は見られない。

- ・ 120W

過渡状態で流れの向きが反転が2回見られる。現象がとても複雑なため、この反転が起こる理由はよくわからない。熱くなった水が浮力で上昇して、慣性により冷たい部分を行き過ぎて暑い部分にまで達した結果、逆の方向の浮力が生じるためではないか。

- ・ 200W ~ 250W

過渡状態で温度が上昇しすぎ100度以上になり得、実験装置の耐熱性能を超えそうであること、および沸騰が生じることによるデータに誤差が生じることから、加熱量は徐々に上げていくという形をとった。

高温側で温度に乱れが見られるのは、連結部にビーズが詰まっていないことにより、熱対流がおきやすくなっているからであるのか、高温のため熱応力が生じ水漏れが起こったためではないかと考えられる。

3.3.2. 傾きによる変化

対流の速度のピークは20度ぐらいのところにある。その角度から角度を増していくと、対流のスピードは落ちてくる。角度を減じていくと、-35度ぐらいになるとかた状態の振動が収束しなくなり、それ以上大きくなると流れの方向が変わり安定状態に落ち着く。

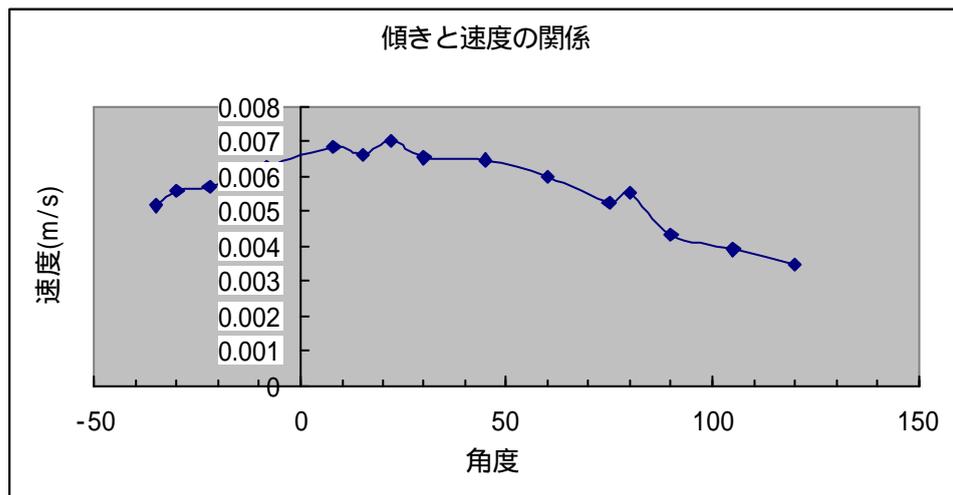


図 3.8. 傾きと速度の関係

Damerell らの研究によると、ビーズを入れない単相流では、理論的予測では0度に対流の速度のピークがくるはずであるが、実際には60度ぐらいにピークがあることがわかっている。こ

の相違は、0度から60度の間では冷却部で管壁の付近で下方への速度が生じるため、完全に発達した層流という仮定が成り立たなくなり、摩擦力の影響が大きく変わるためとされている。多孔質流では、摩擦力の影響が全く違うためにピークの位置が変わったのではないと思われる。

3.3.3.管内の流速分布

温度が低いのは、冷たい領域を経てきたためで、温度が高いのは、暖かい領域を経てきたためである。まず、グラフの縦軸の温度から見て、管全体の対流は反時計回りである。一方グラフから、円環の内側が温度が低く、外側は高いことがわかる。これは、熱電対のある連結部分に、局所的な対流が存在するためと考えられる。そのことから、局所的対流は、外側を上昇して、内側を下降しているものであるのではないか。

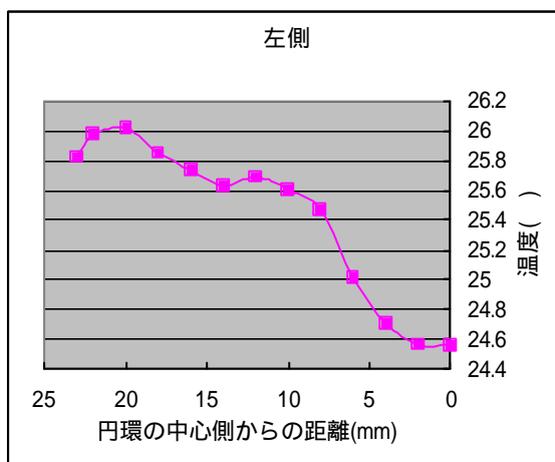


図 3.9. 左側（下方向に速度）

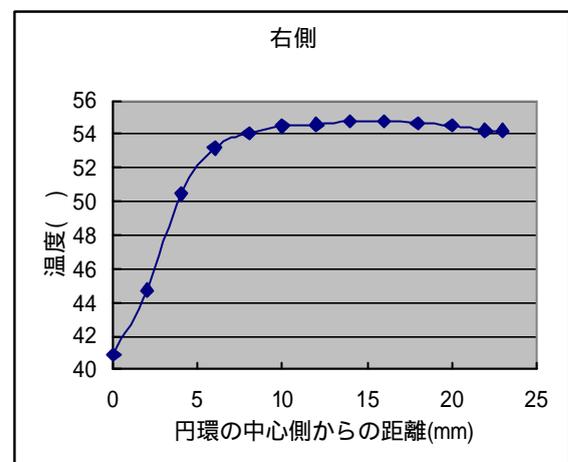


図 3.10. 右側（上方向に速度）

3.4.考察

・対流の回転方向について

理論的には、対流が時計回りになるか反時計回りになるかはランダムに決まり、それぞれの確立は半々にある。今回の実験では、上部銅・下部ガラスの実験ではすべて時計回りになっており、多孔質の実験では120W までについてはすべて時計回り、200W～250W については反時計回りであった。実験装置の微妙な角度差、ヒーター部の巻き具合、流量計の誤差による左右の冷却水の速度の違い等から、実験装置が厳密に左右対称でないからである可能性がある。

・銅管を使うと定常状態でカオスが起らない理由

銅管を使うと、定常状態ではカオスが発生しなかった。この理由については2つ考えられる。1つ目は、加熱部で加熱されて温度の高くなった流体が冷却部に入ると、銅管は熱伝導率が高いので冷却部に入った直後に熱を吸収してしまい、浮力がなくなってしまいうためにカオスがおこらないということである。2つ目は、銅管を通して流体と平行に熱が運ばれるために、カオスが発生するのにとって重要な温度の乱れが均一化されてしまうことである。

実験結果から、例えば560Wのグラフを見ると温度の低い側でも約29℃あり、冷却水の温

度の 18 度と比べて十分な差があるので、熱が冷却部で完全に吸収されたとはいえないのではないかと考えられる。

このことから、先に述べた 1 つ目の理由は有効ではなく、2 つ目の銅管を通して流体と平行に熱が運ばれ温度の乱れが均一化されてしまうことのほうがカオスが起こらない原因として重要であると考えられる。

第四章

結論

4.結論

4.1.上部銅・下部ガラスについて

- ・管全体の対流の発生しはじめる加熱量は約 4.5 W。
- ・銅を使うと定常状態でカオスは起こらない。
- ・銅を使うと過渡カオスは起こる。
- ・管路の固有周波数から管路長が約 2.2(m)と計算された。(実際の管路長は 2.5(m))

4.2.上部ガラス・下部ガラスについて

- ・他研究者と同じく、ローレンツ現象が生じることが確認された。
- ・管路の固有周波数から管路長が約 2.4(m)と計算された。(実際の管路長は 2.5(m))

4.3.上下ガラスに多孔質を入れた場合

- ・ガラスビーズ直径 3 mm では管全体の対流が発生するまで実験装置が耐えられなかった。7 mm では管全体の対流が存在した。
- ・多孔質でない場合と比較して、加熱量が小さくても対流が起こる。
- ・定常状態に至るまでの時間は、加熱量が小さいほど長く、加熱量が高いほど短い。
- ・装置を傾けたとき約 20° ぐらいでもっとも流速が高くなる。約 - 35° では、振動が起こり、収束しにくい。- 40° まで傾けると、逆方向に回りだす。
- ・流速分布は、円環の内側が温度が低く、外側は温度が高い。

4.4.考察

- ・装置を傾けてなければ、対流は時計回りと反時計回りの両方の可能性が半々にあるはず。偏りがあったのは、装置の名微妙な傾き、ヒーターの巻き具合、左右の冷却水の速度の違い等にあるのではないか。
- ・銅管を使うとカオスが発生しない理由について、銅管を通して流体と平行に熱が運ばれ温度の乱れが均一化されてしまうことのほうが、冷却により温度が下がり浮力が失われることよりも重要ではないか。

第五章

実験データ

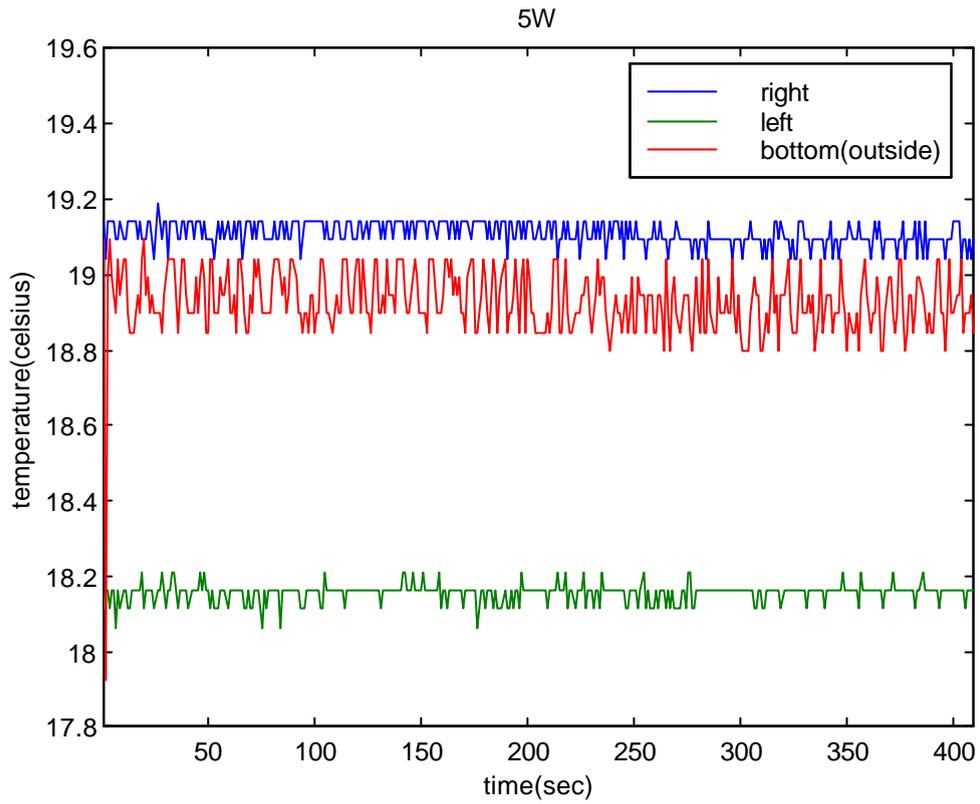


図 5.1.1. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (5 W)

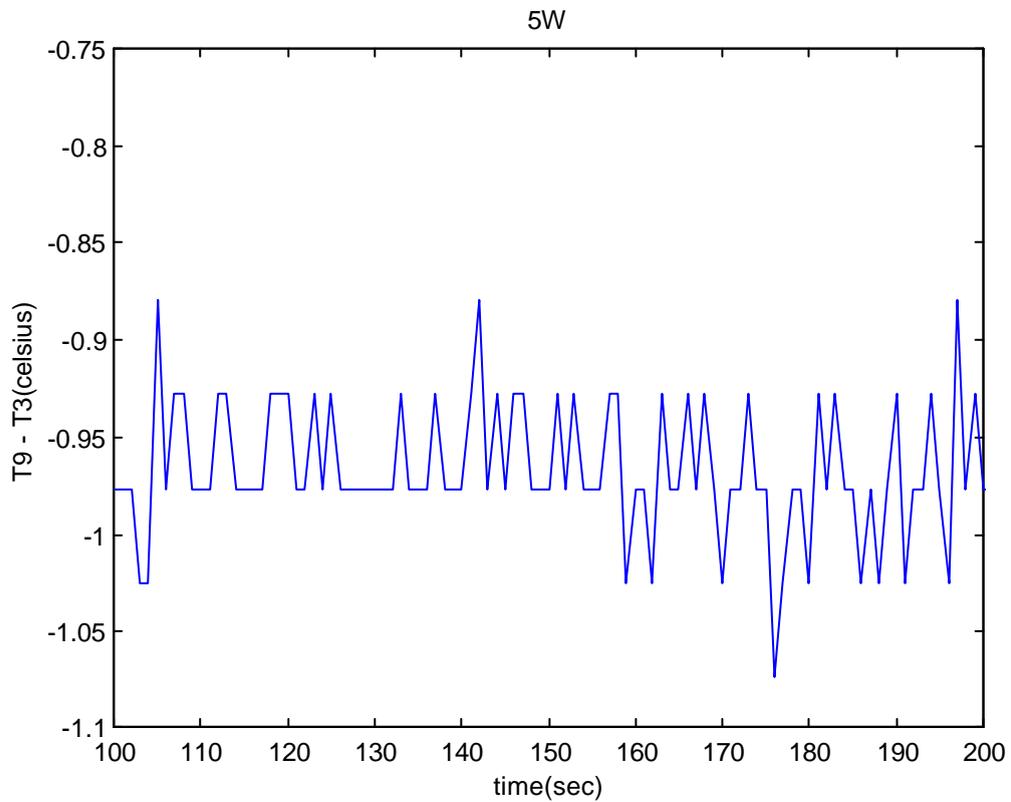


図 5.1.2. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (5 W)

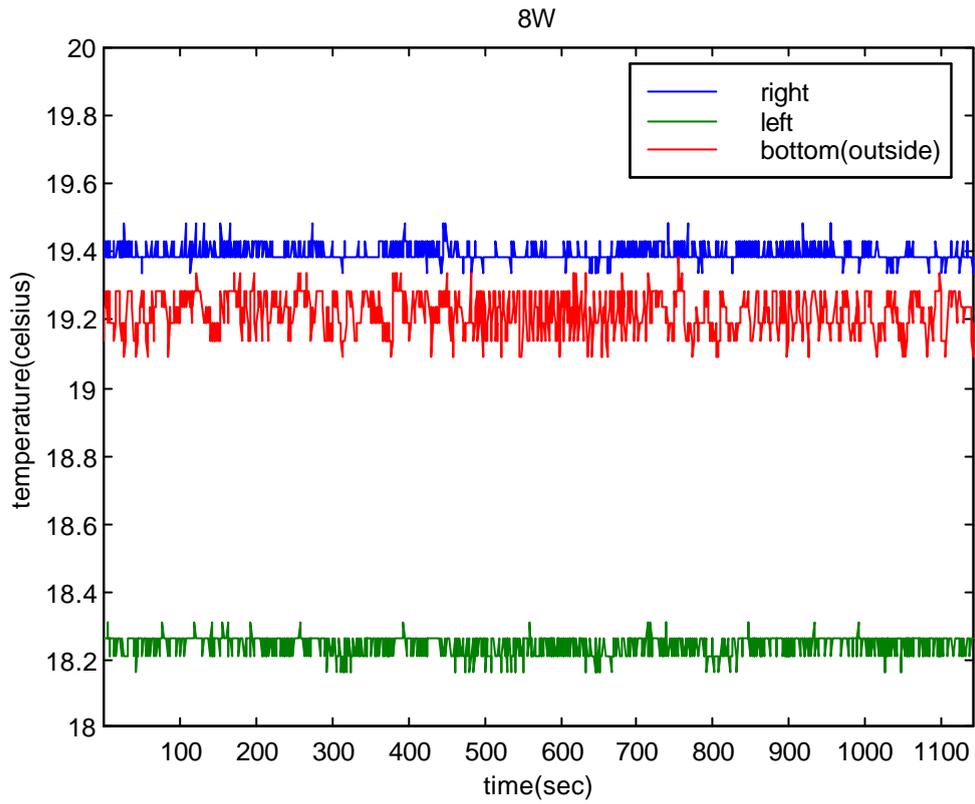


図 5.1.3. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (8W)

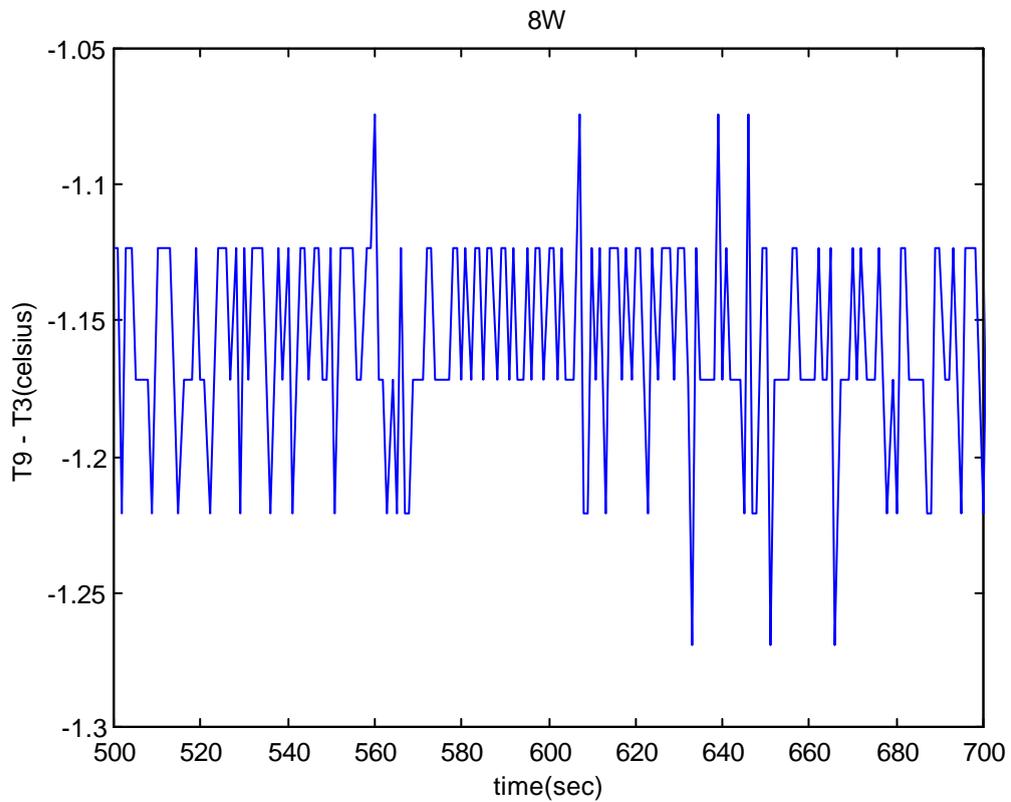


図 5.1.4. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (8W)

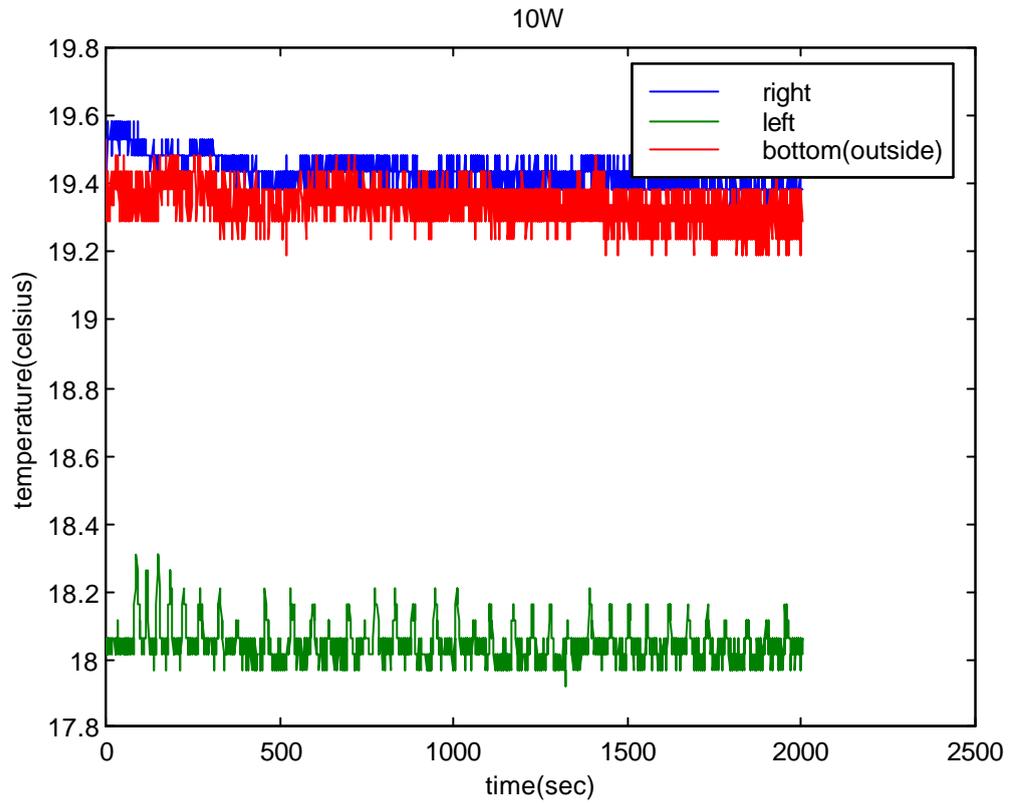


図 5.1.5. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (10W)

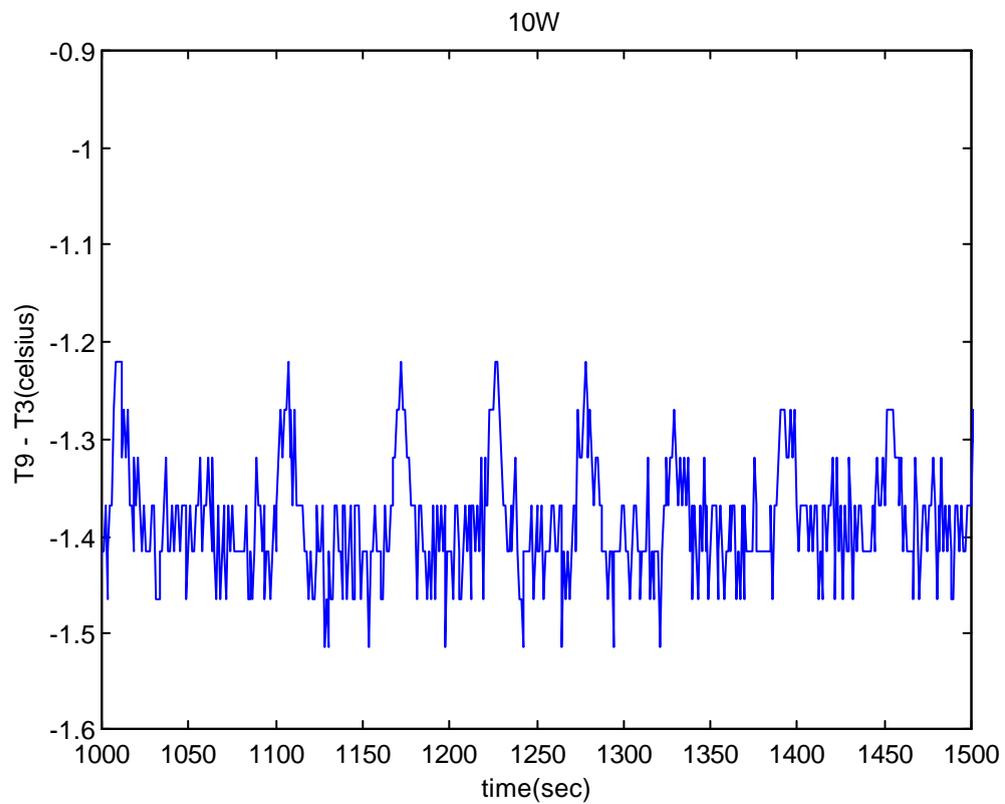


図 5.1.6. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (10W)

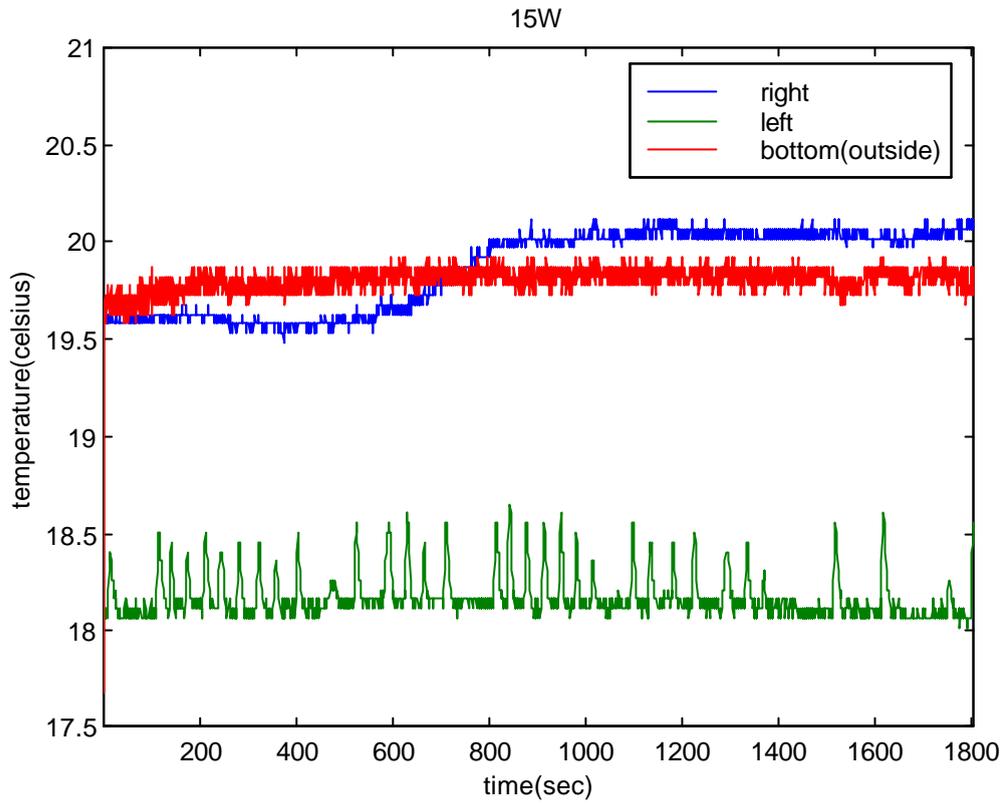


図 5.1.7. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (15 W)

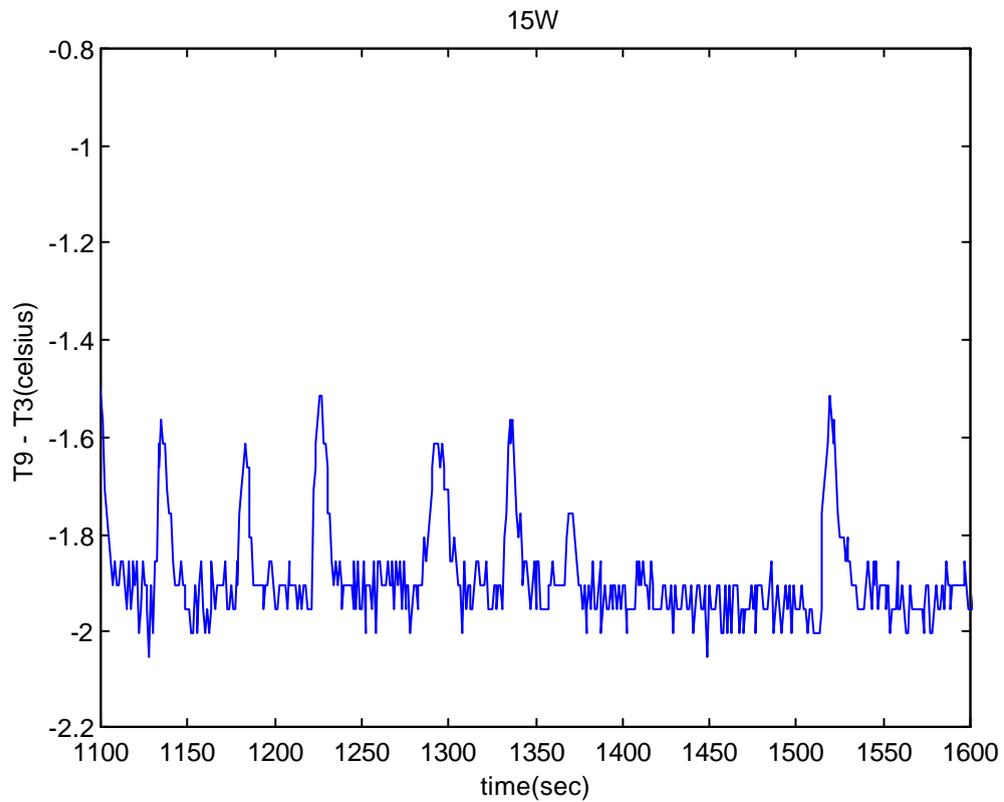


図 5.1.8. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (15 W)

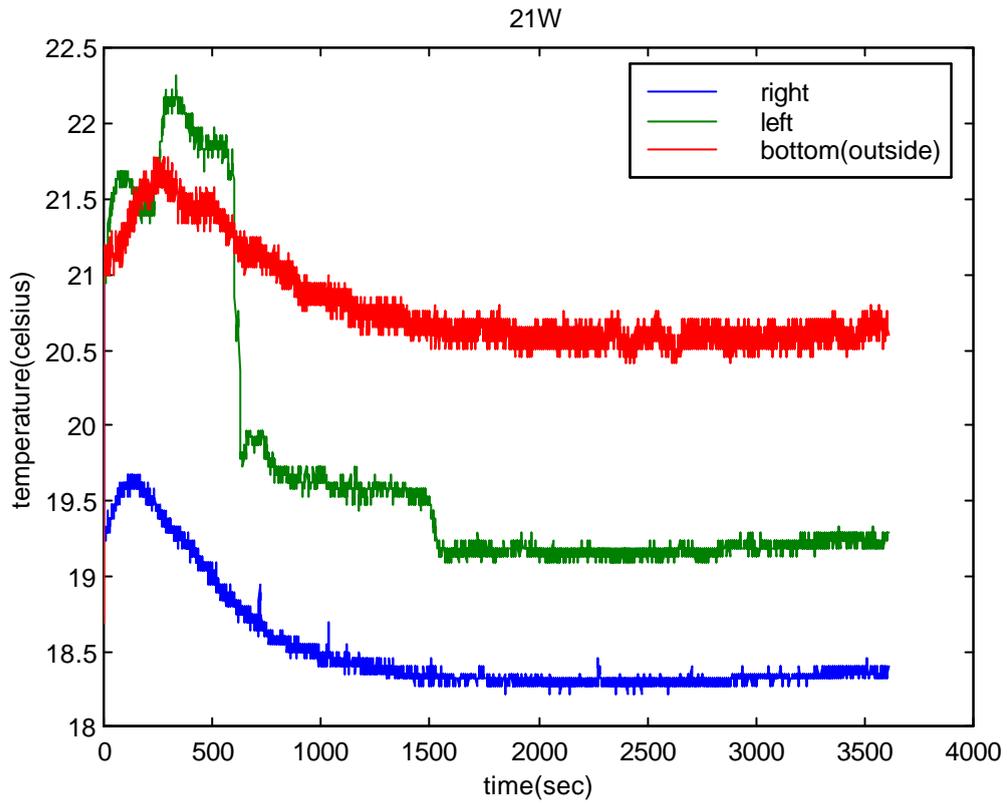


図 5.1.9. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (2 1 W)

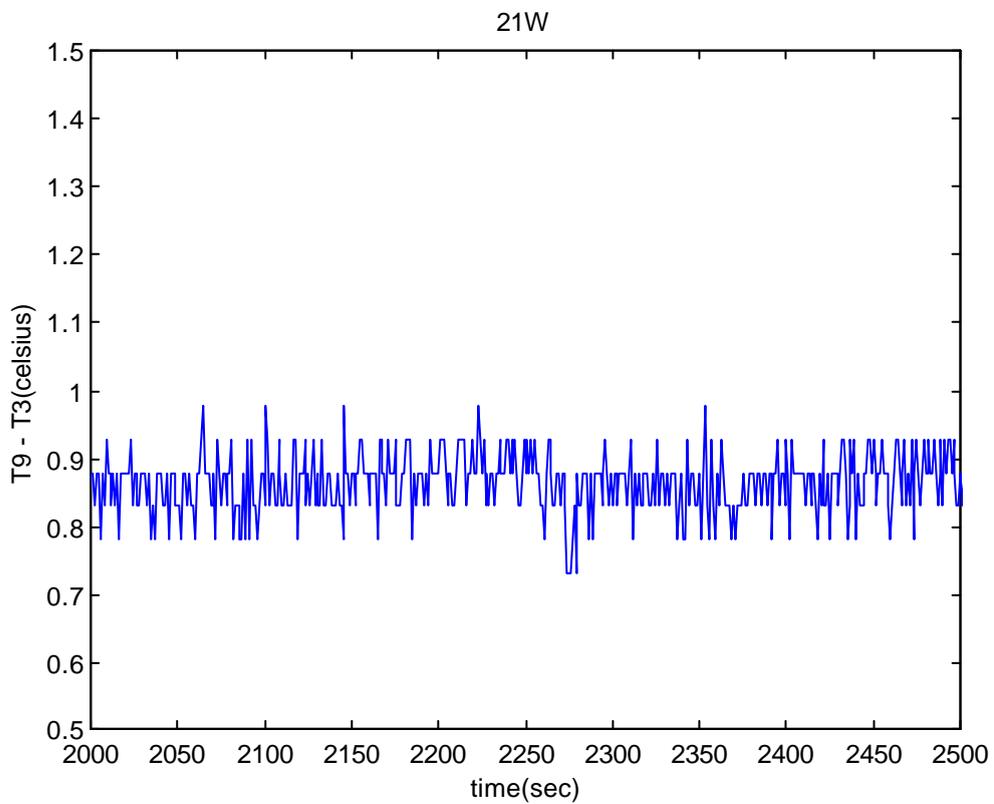


図 5.1.10. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (2 1 W)

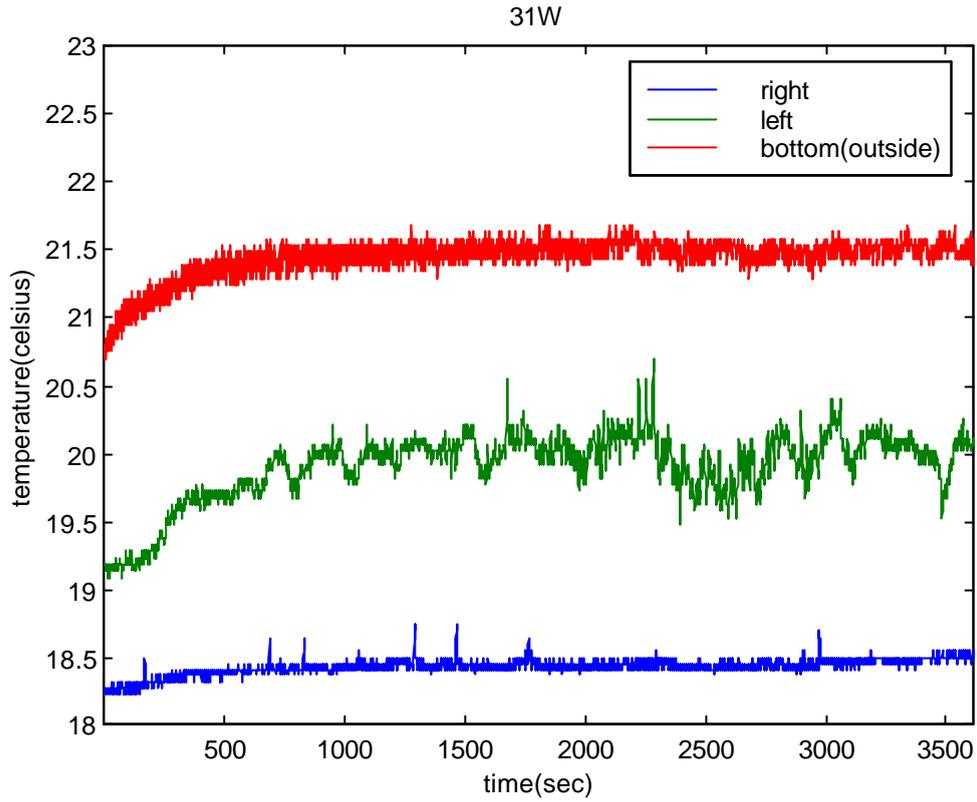


図 5.1.11. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (3 1 W)

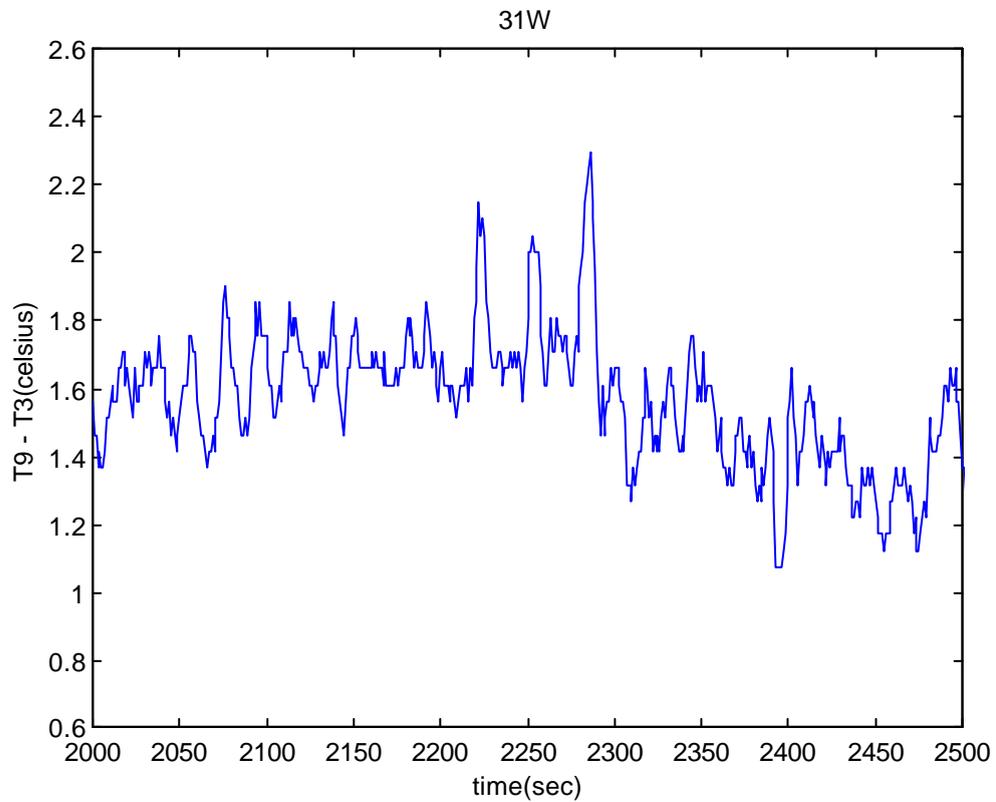


図 5.1.12. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (3 1 W)

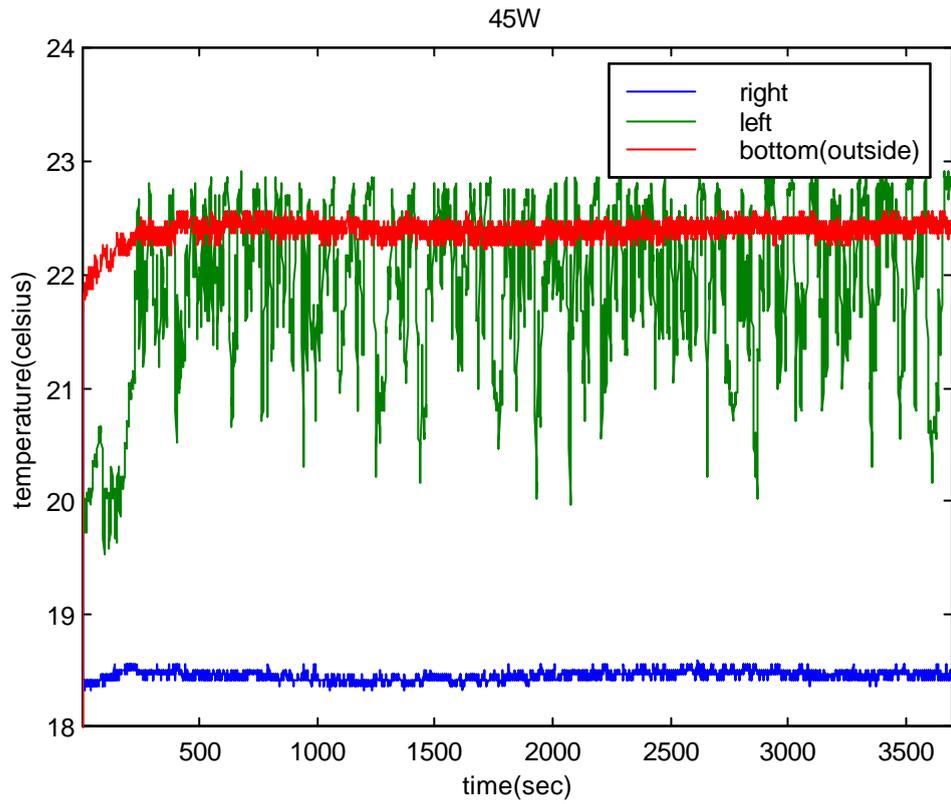


図 5.1.13. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (4 5 W)

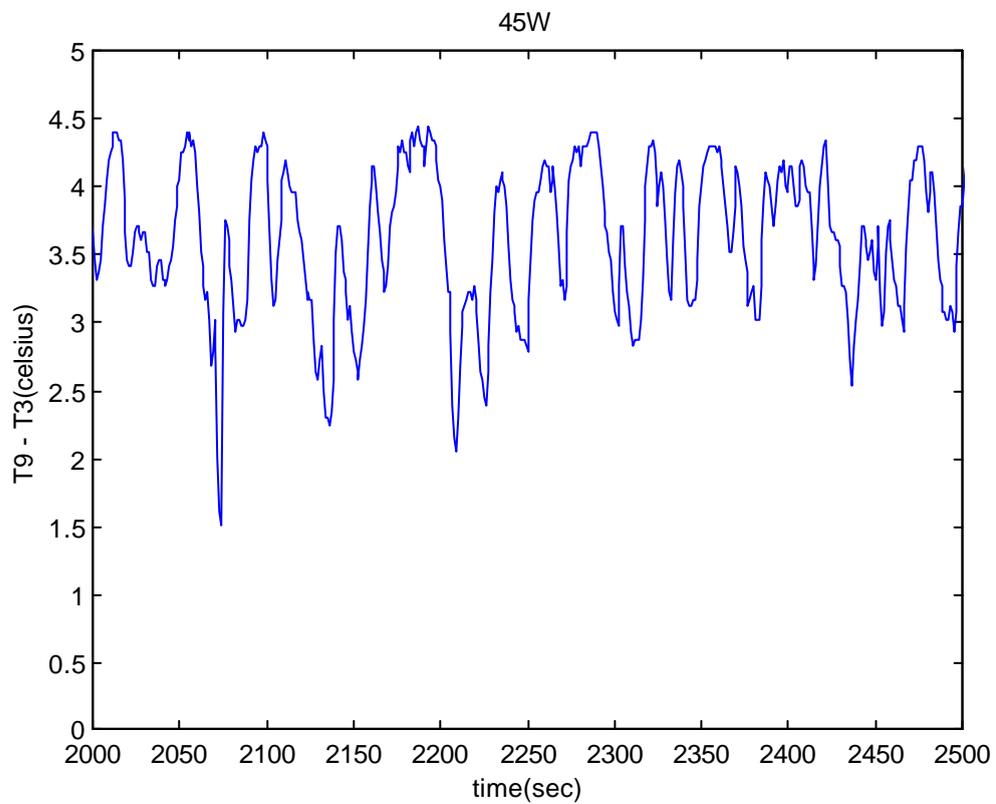


図 5.1.14. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (4 5 W)

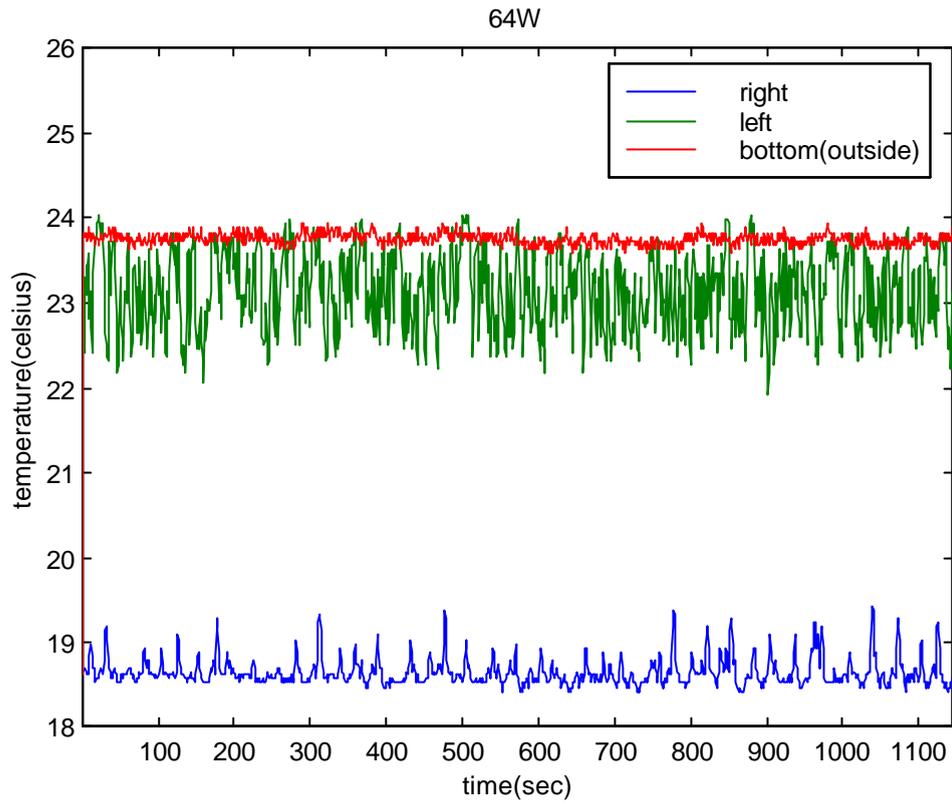


図 5.1.15. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (6 4 W)

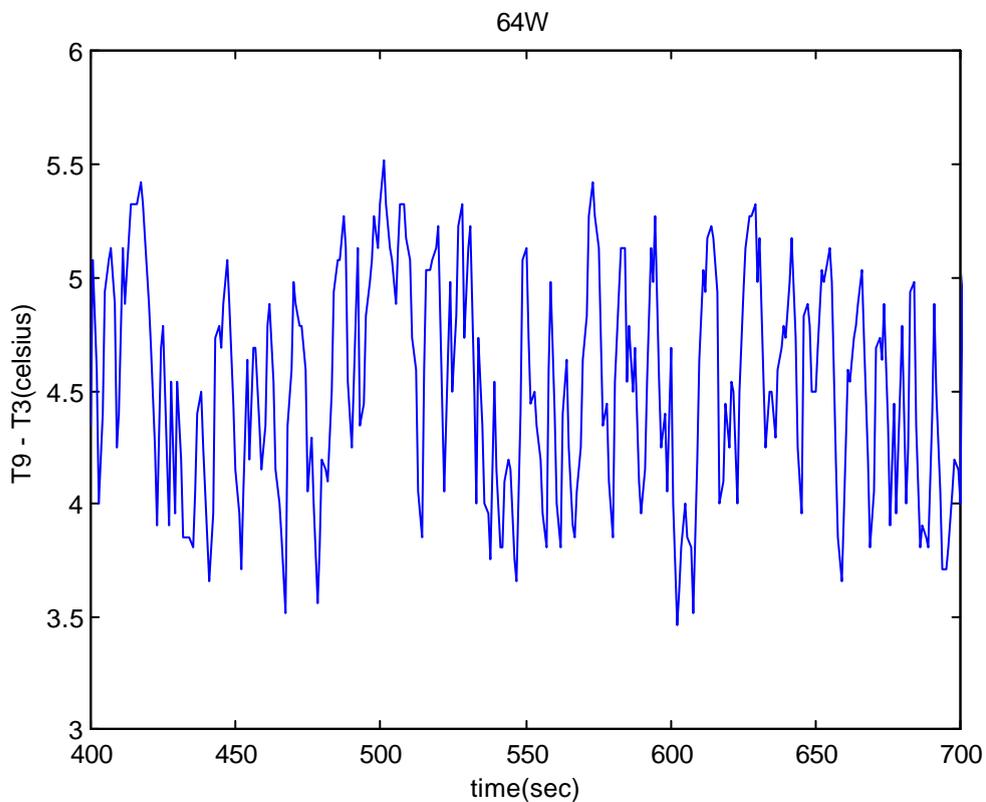


図 5.1.16. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (6 4 W)

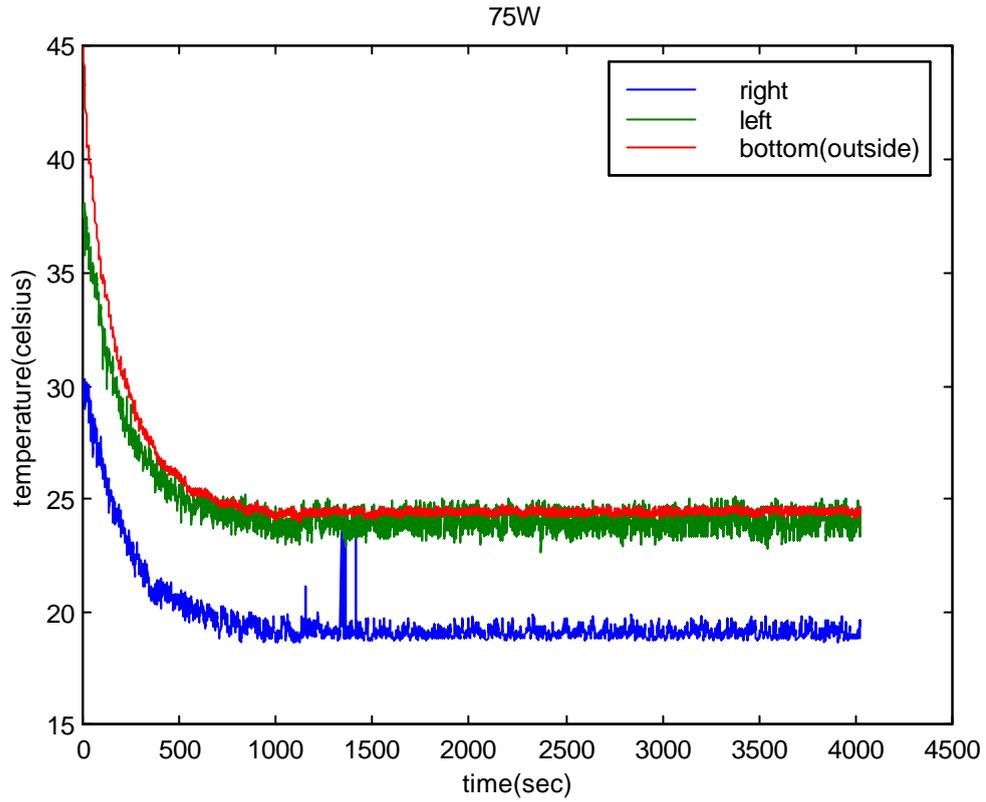


図 5.1.17. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (7 5 W)

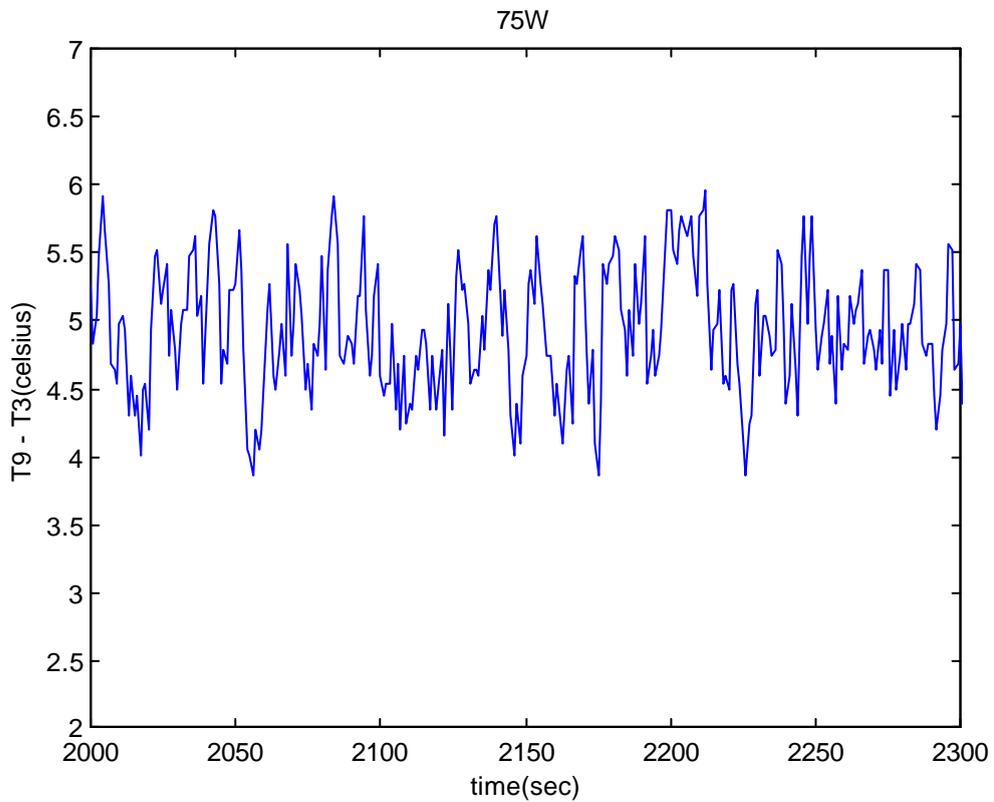


図 5.1.18. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (7 5 W)

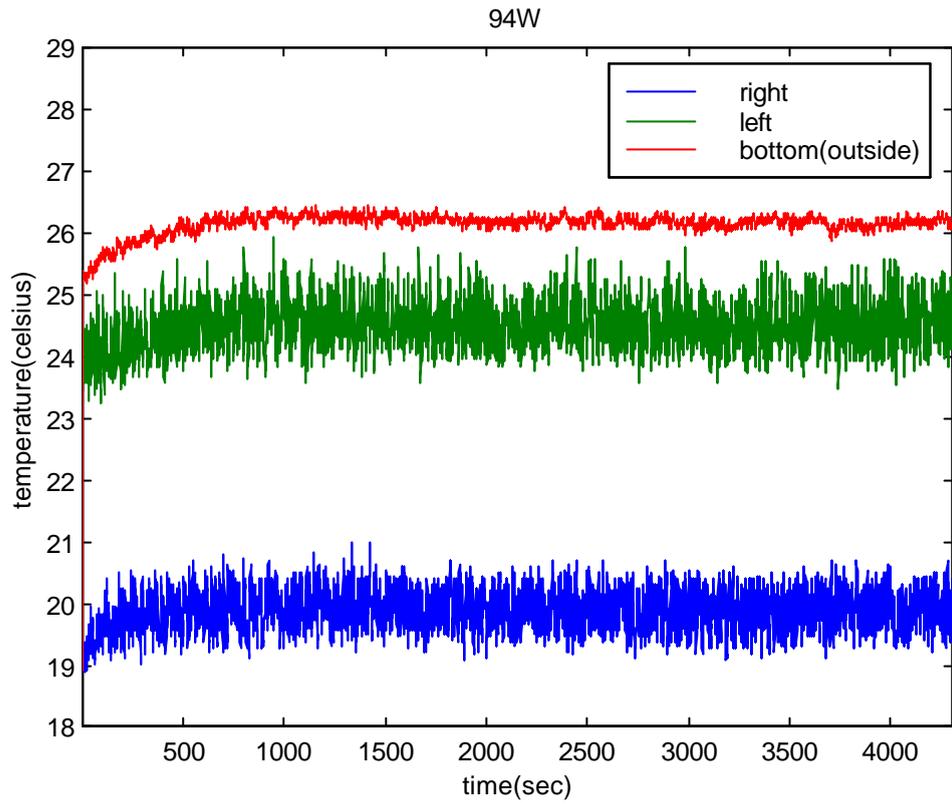


図 5.1.19. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (94W)

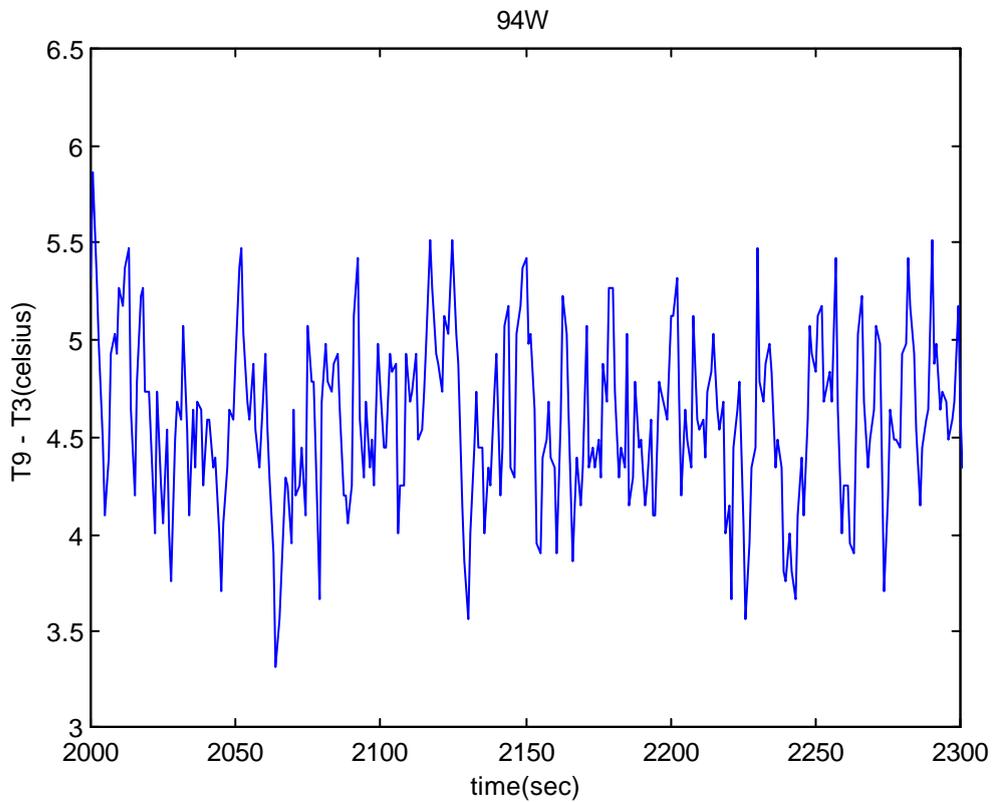


図 5.1.20. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (94W)

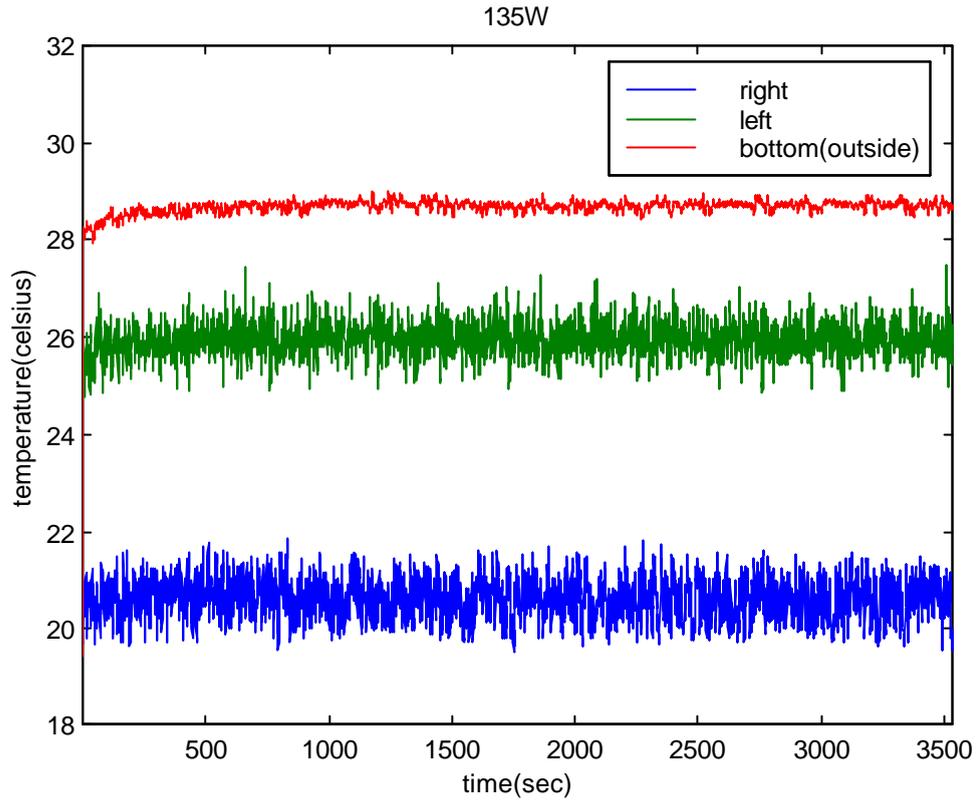


図 5.1.21. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (1 3 5 W)

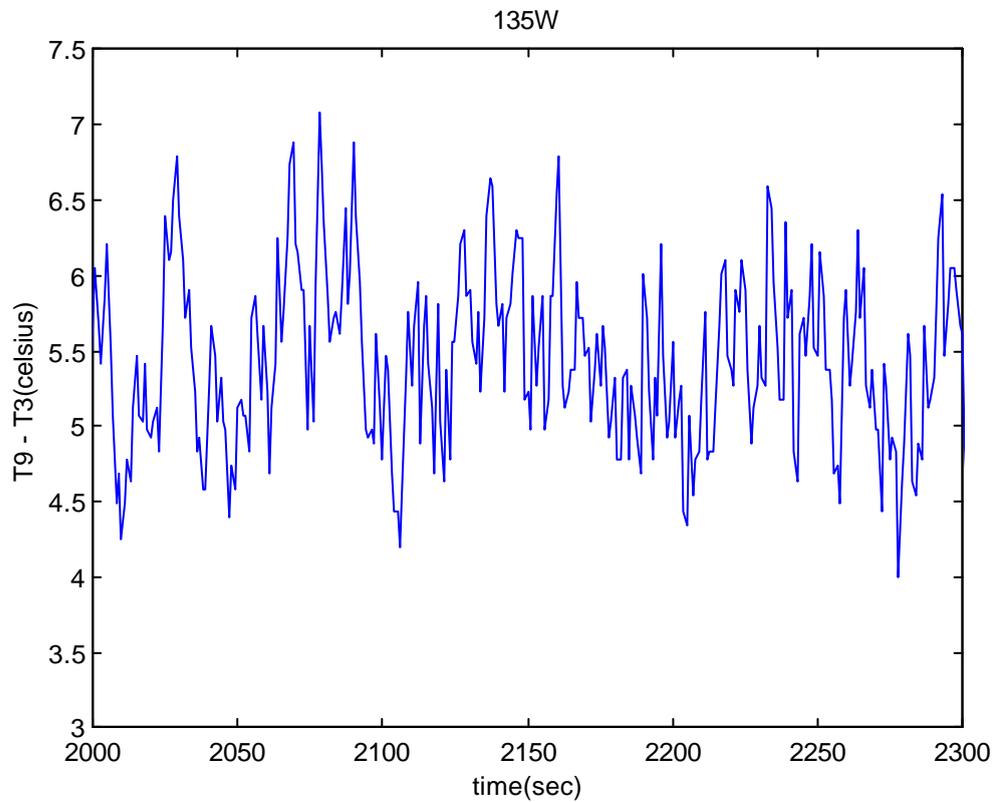


図 5.1.22. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (1 3 5 W)

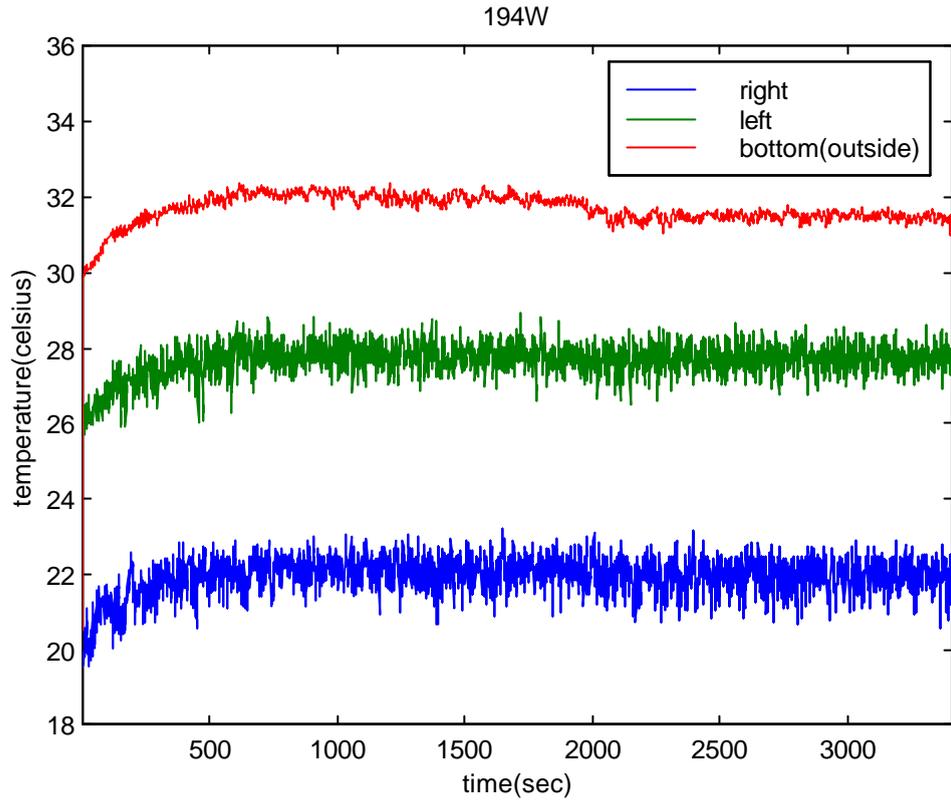


図 5.1.23. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (1 9 4 W)

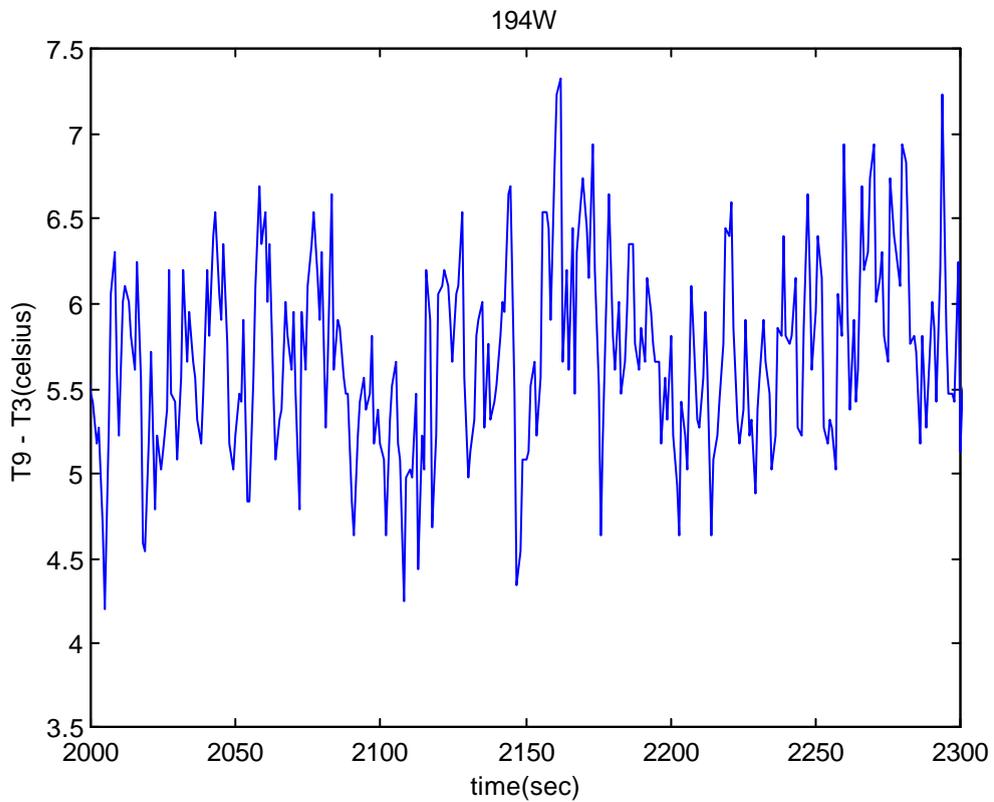


図 5.1.24. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (1 9 4 W)

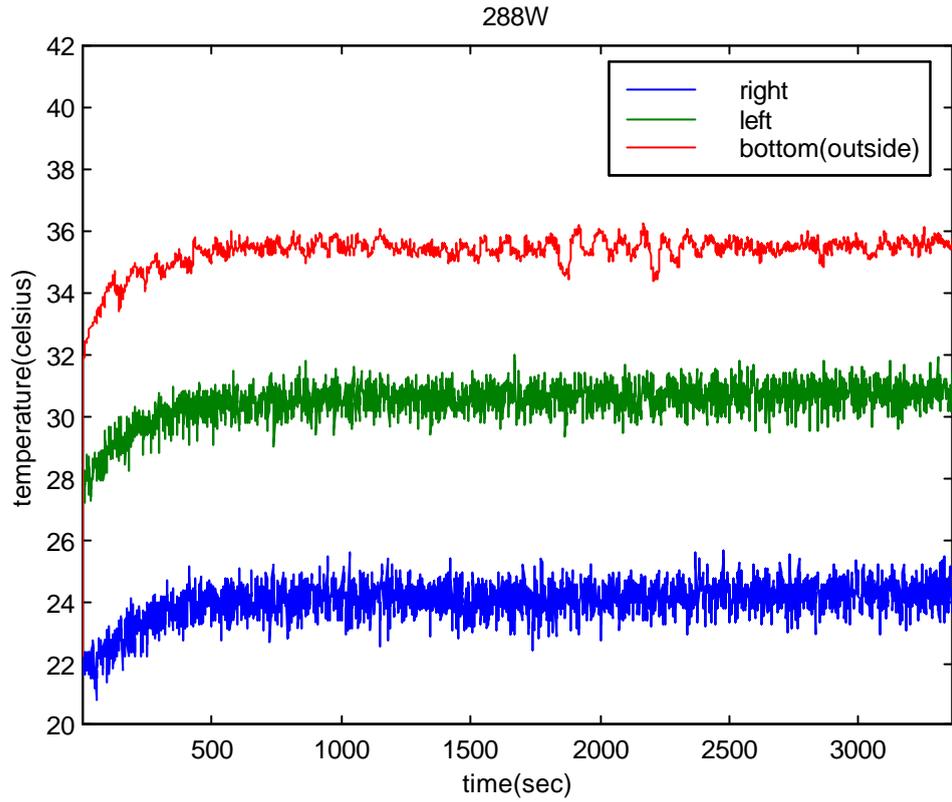


図 5.1.25. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (2 8 8 W)

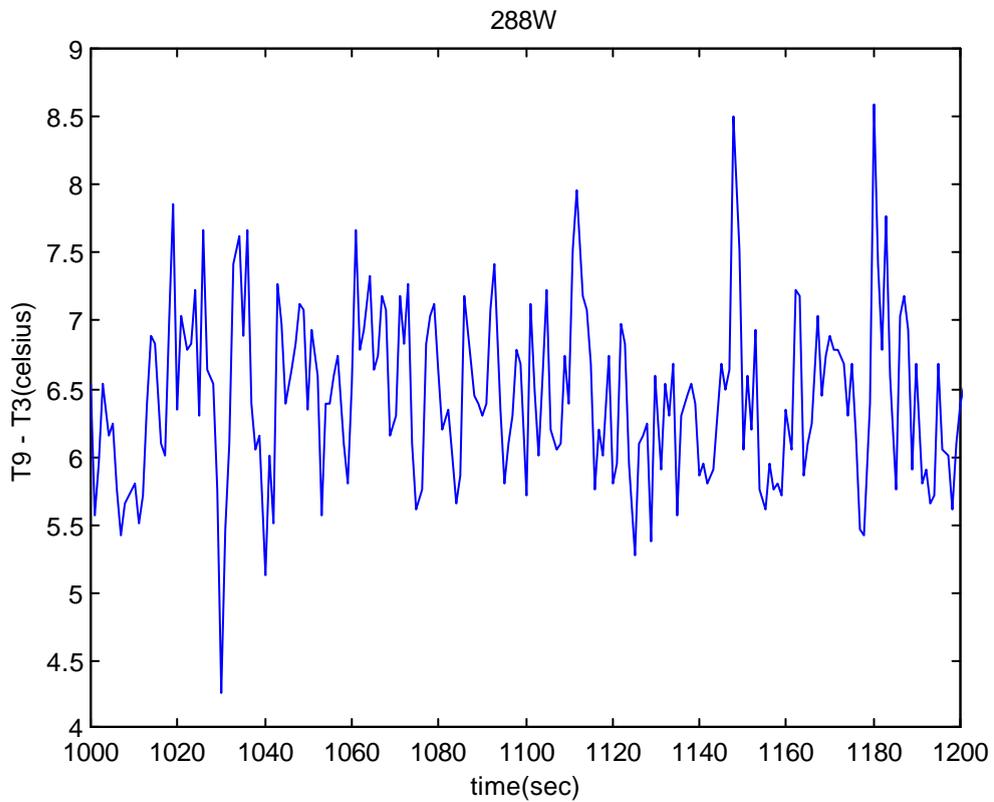


図 5.1.26. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (2 8 8 W)

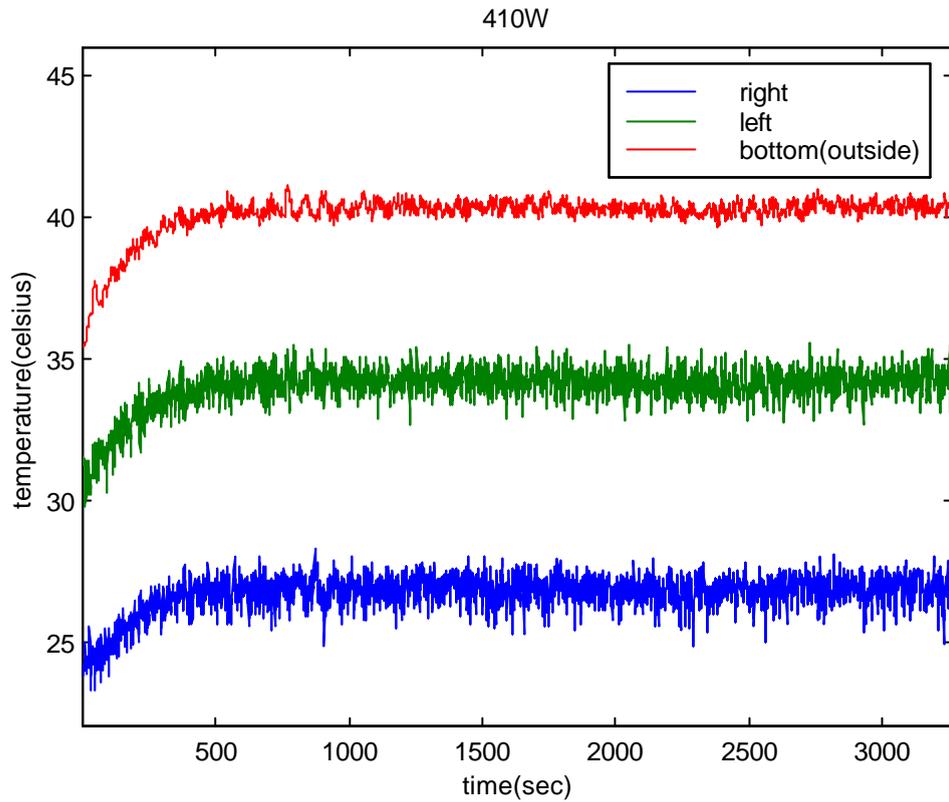


図 5.1.27. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (4 1 0 W)

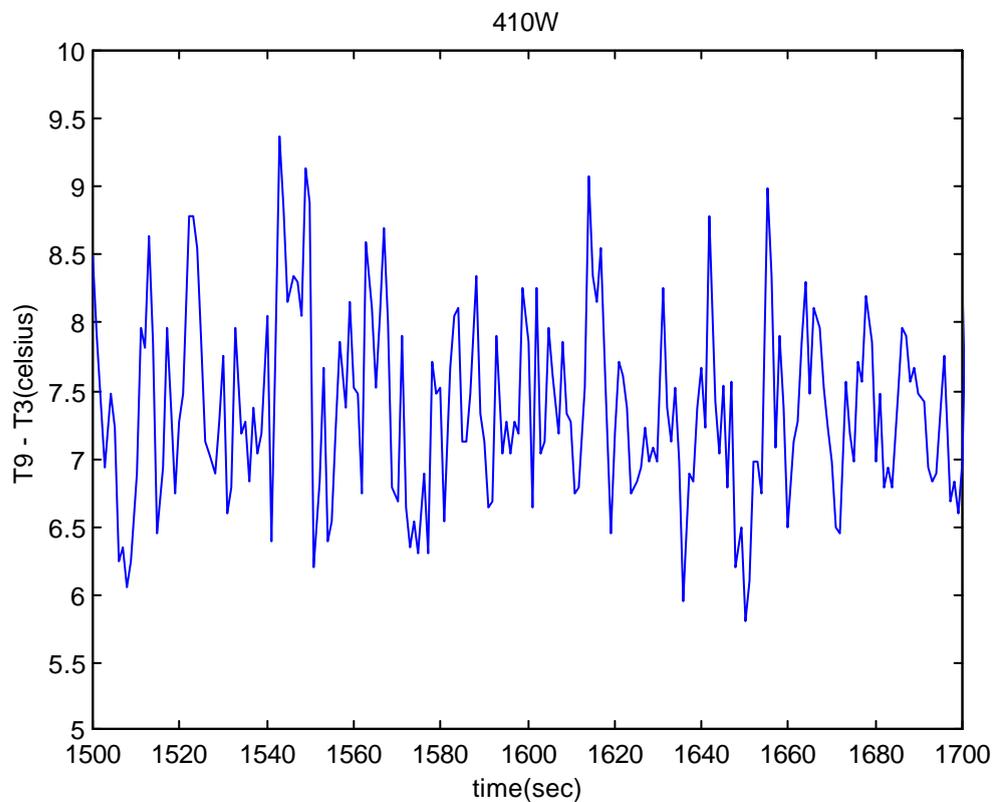


図 5.1.28. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (4 1 0 W)

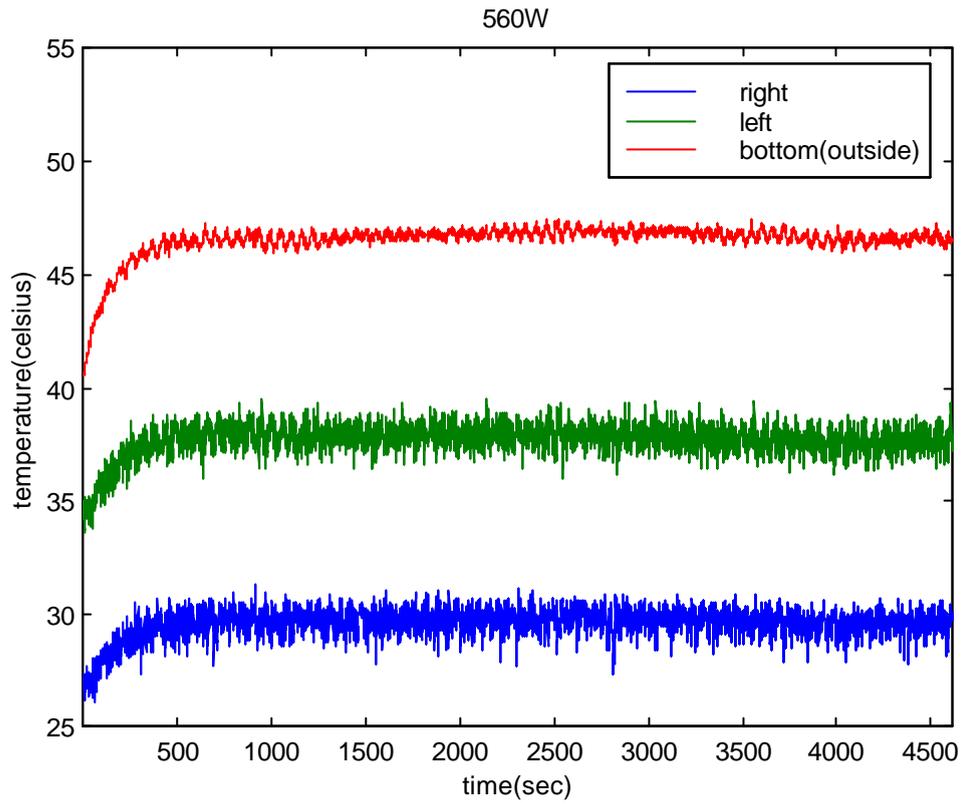


図 5.1.29. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (5 6 0 W)

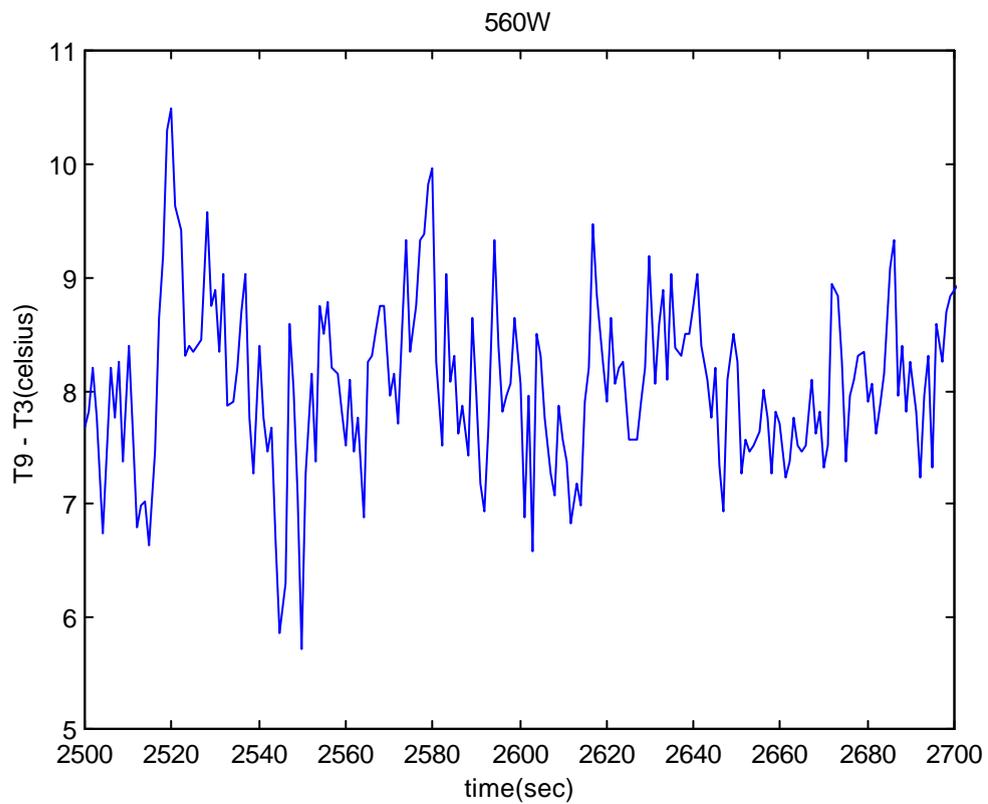


図 5.1.30. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (5 6 0 W)

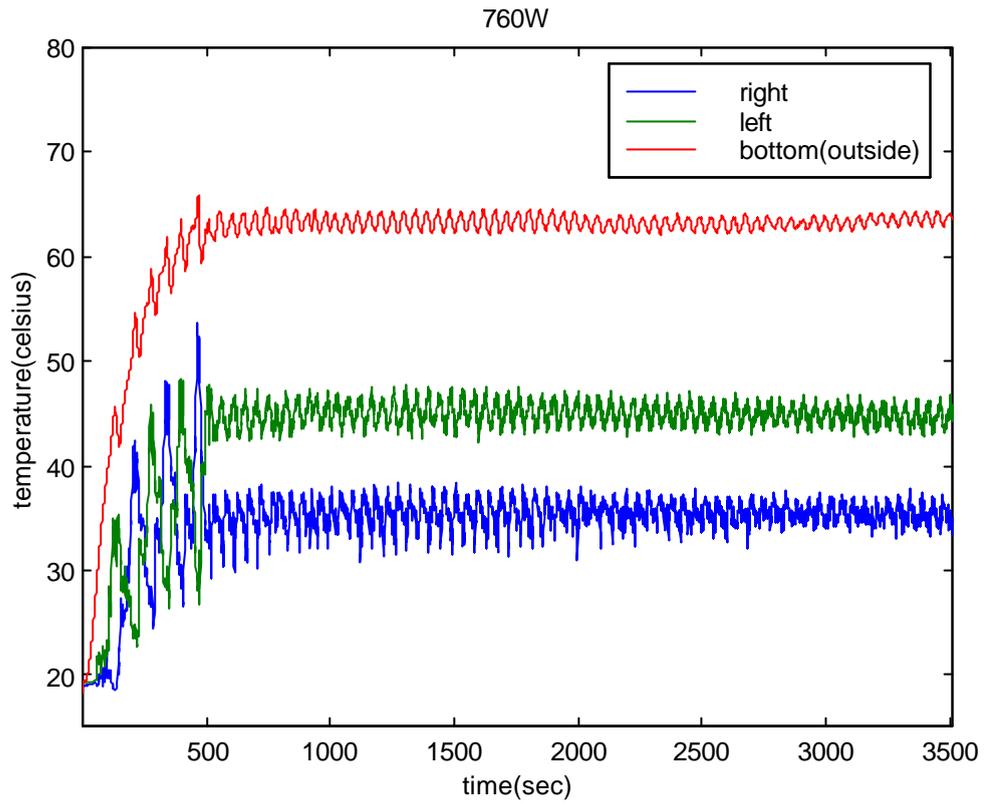


図 5.1.31. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (7 6 0 W)

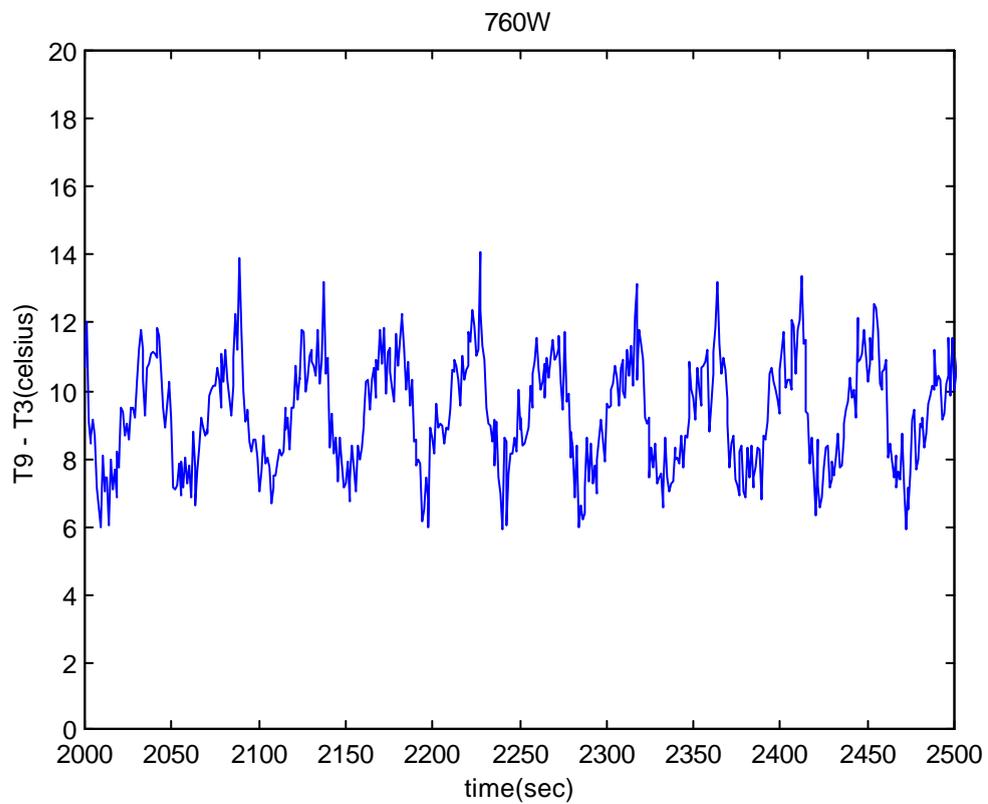


図 5.1.32. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (7 6 0 W)

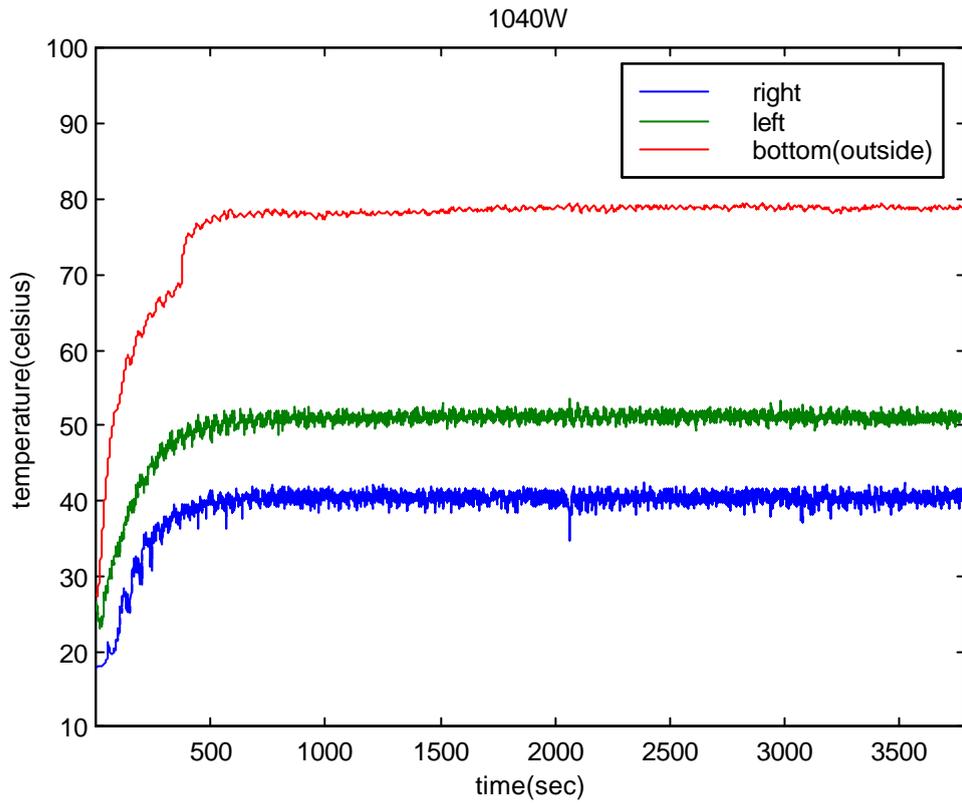


図 5.1.33. 上部銅・下部ガラスの熱電対の温度 (1 0 4 0 W)

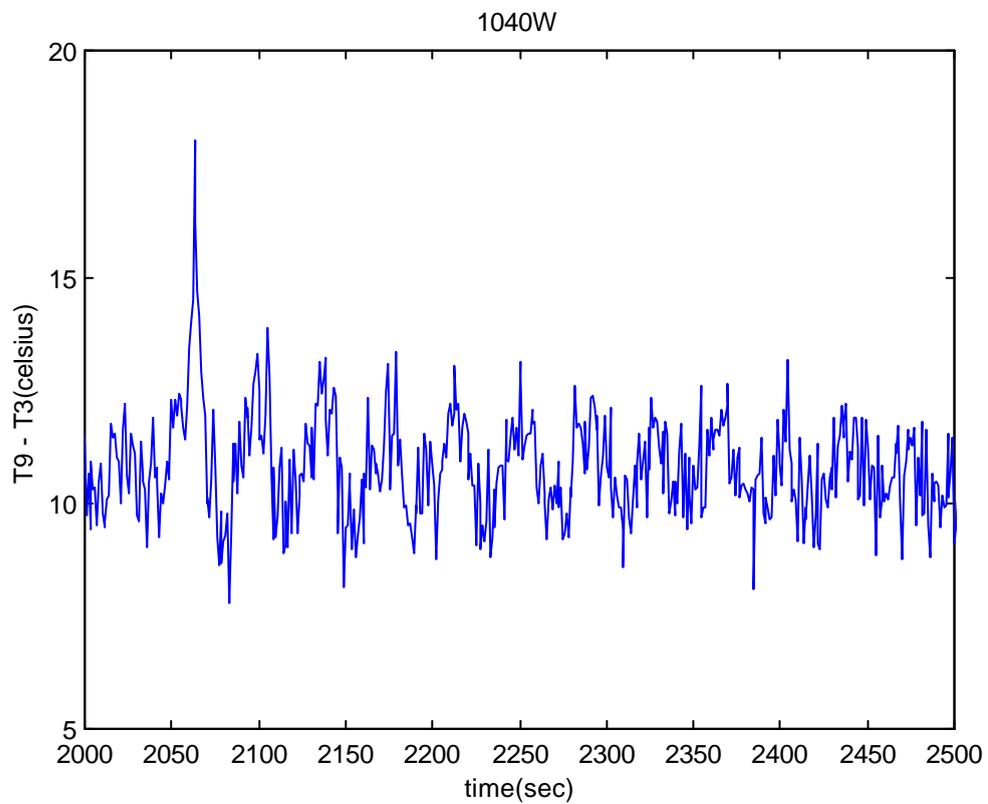


図 5.1.34. 上部銅・下部ガラスの左右の温度差 (1 0 4 0 W)

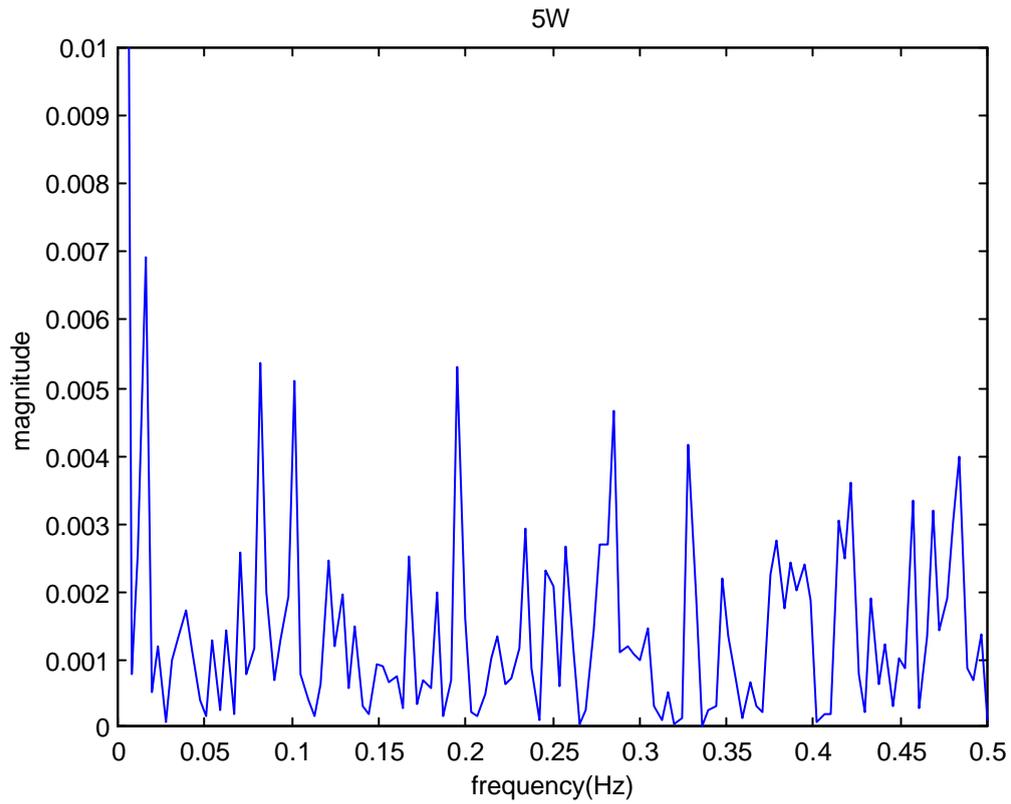


図 5.1.35. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (5 W)

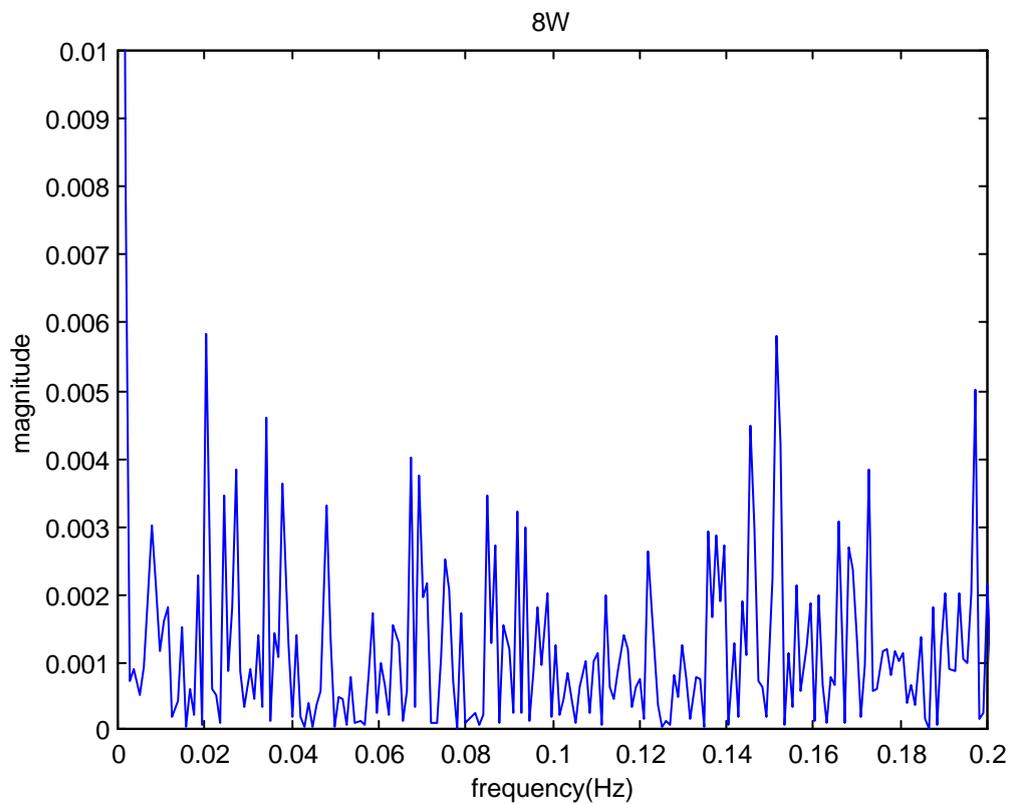


図 5.1.36. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (8 W)

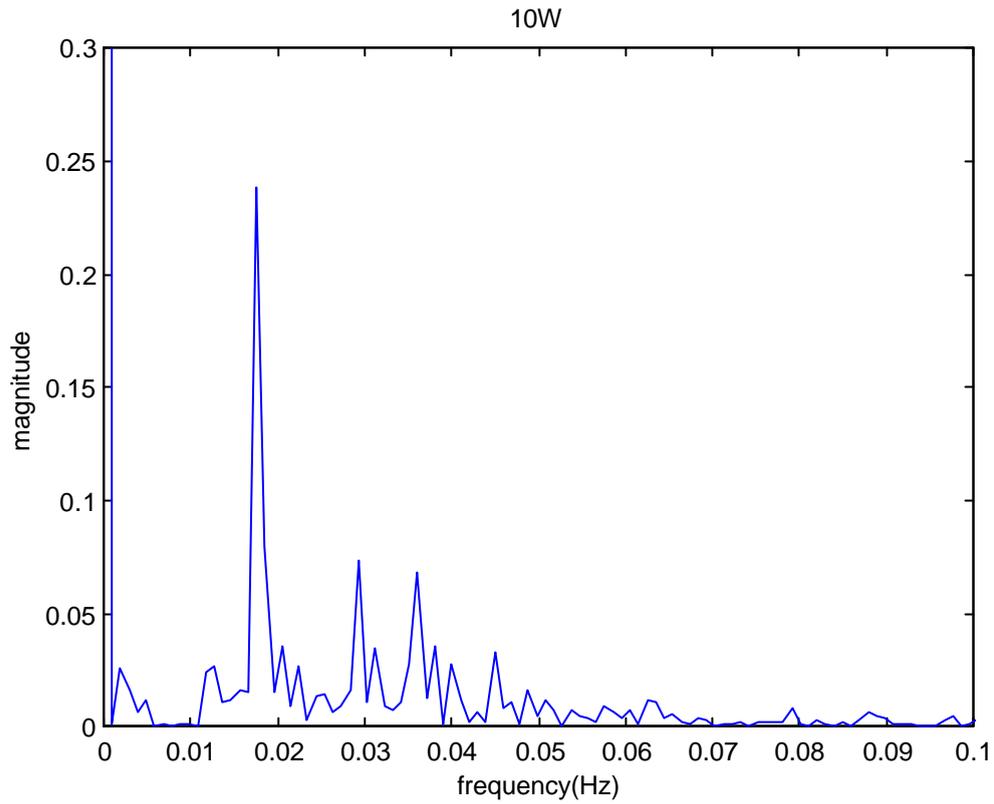


図 5.1.37. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (10 W)

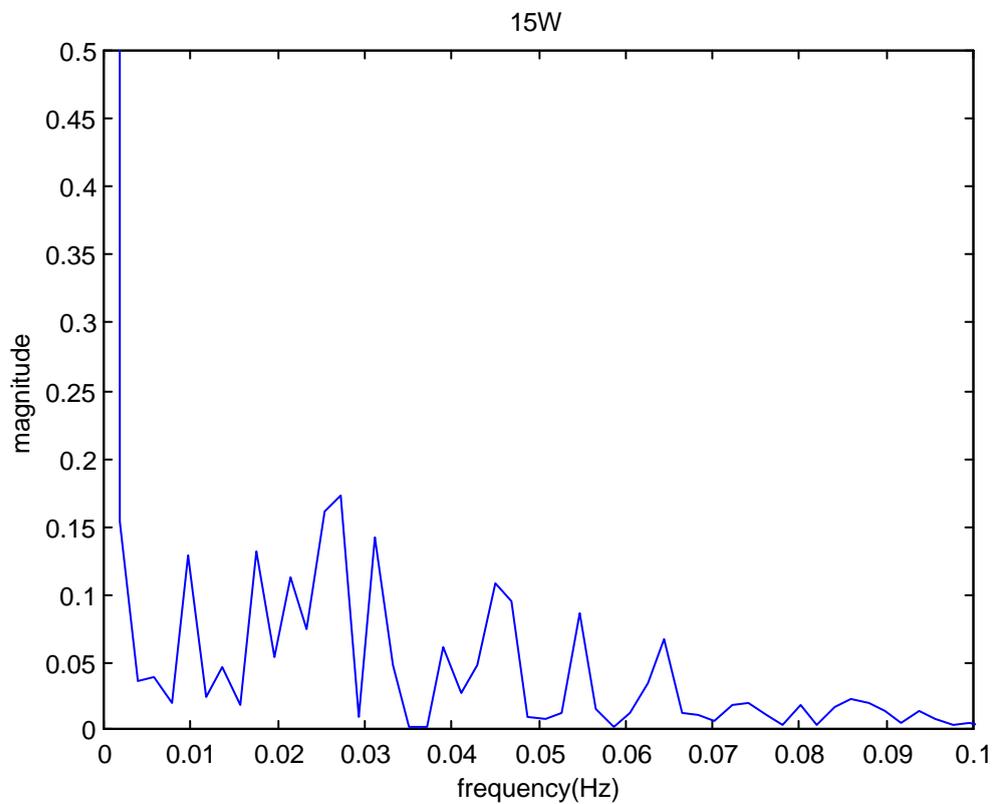


図 5.1.38. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (15 W)

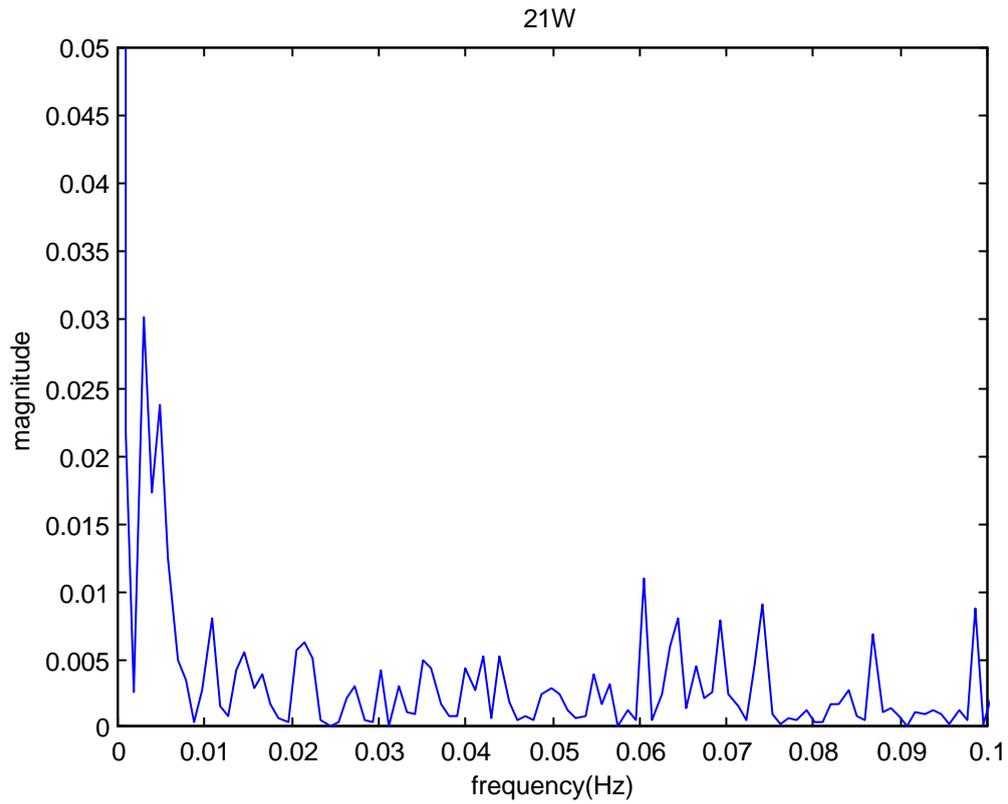


図 5.1.39. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (2 1 W)

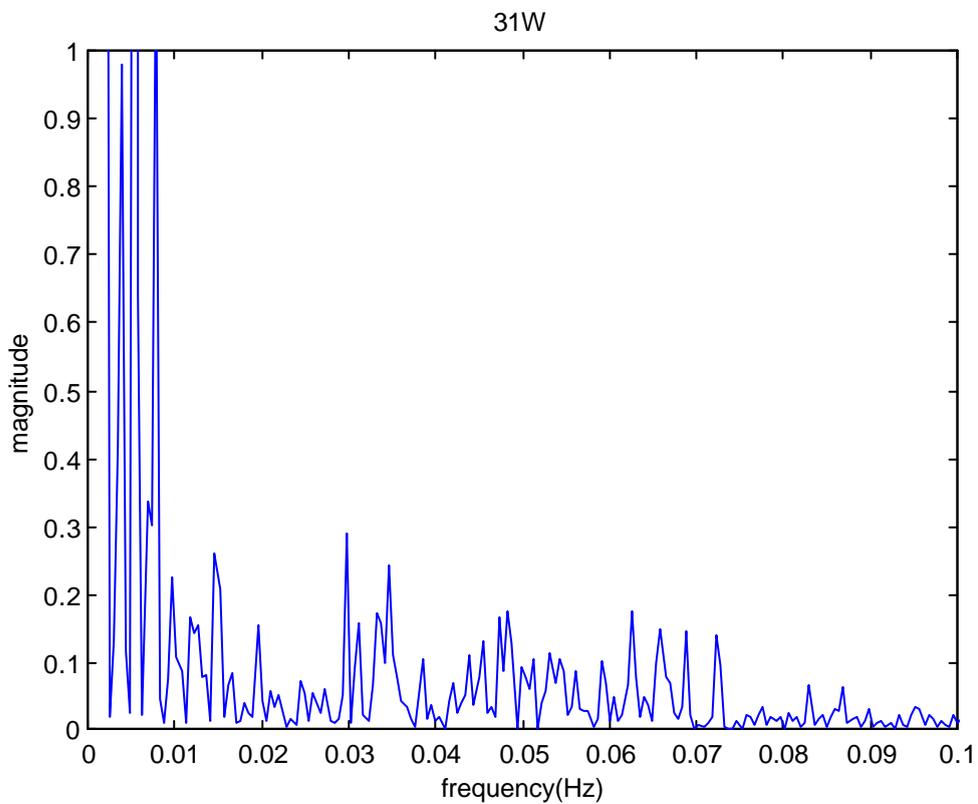


図 5.1.40. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (3 1 W)

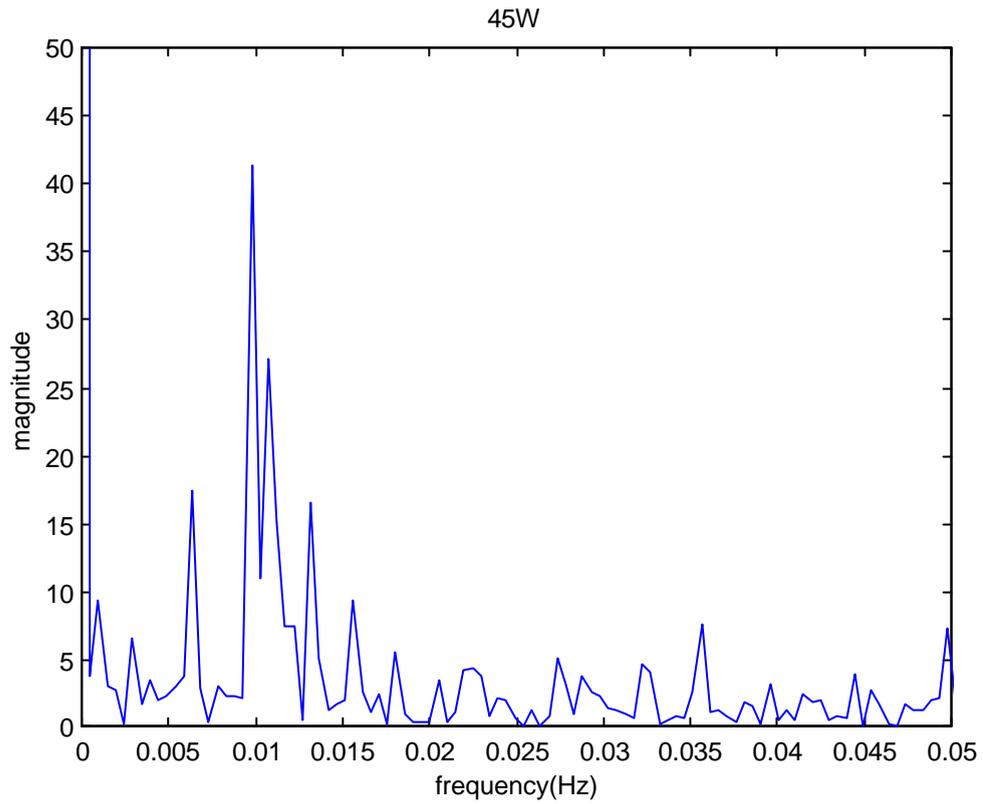


図 5.1.41. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (4 5 W)

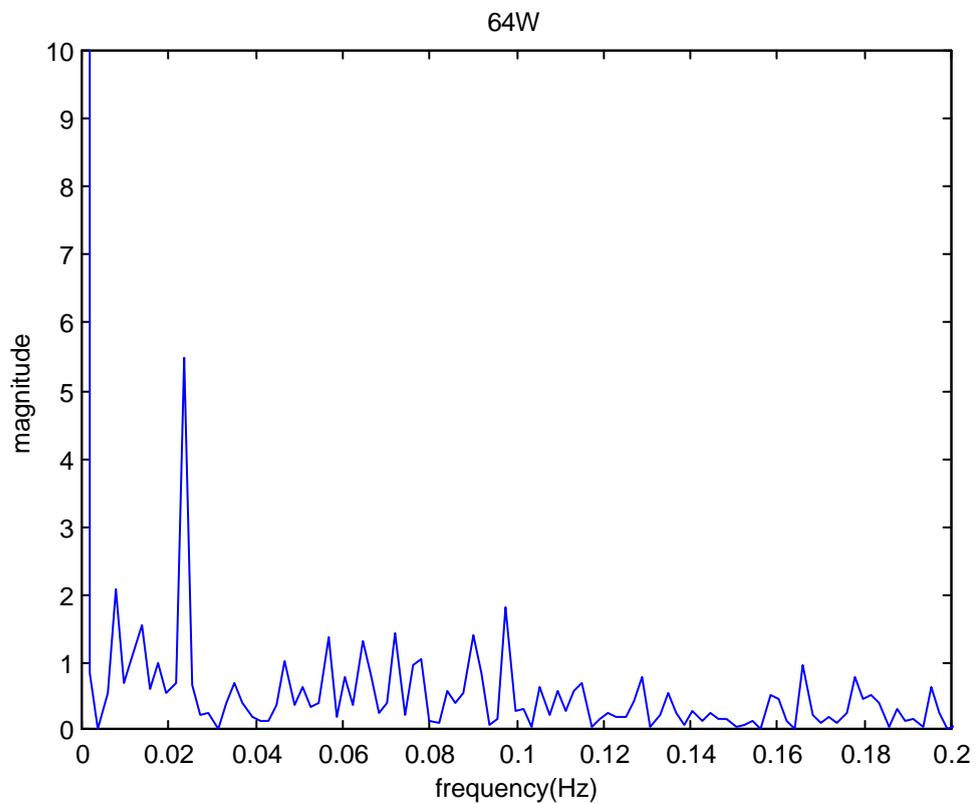


図 5.1.42. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (6 4 W)

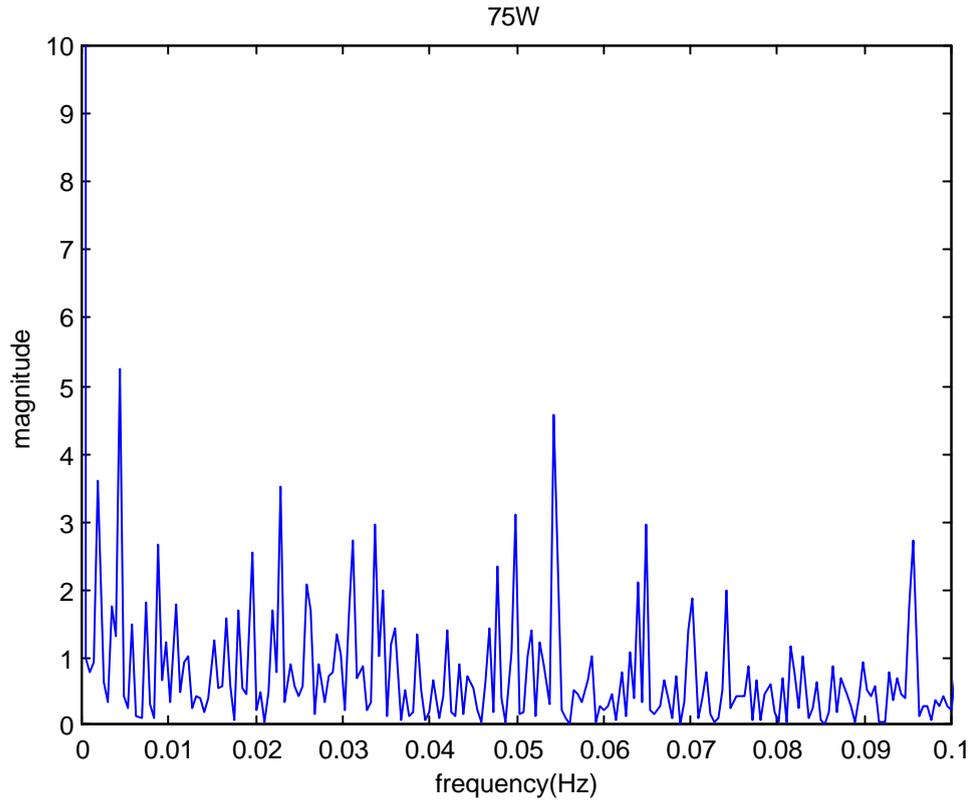


図 5.1.43. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (7 5 W)

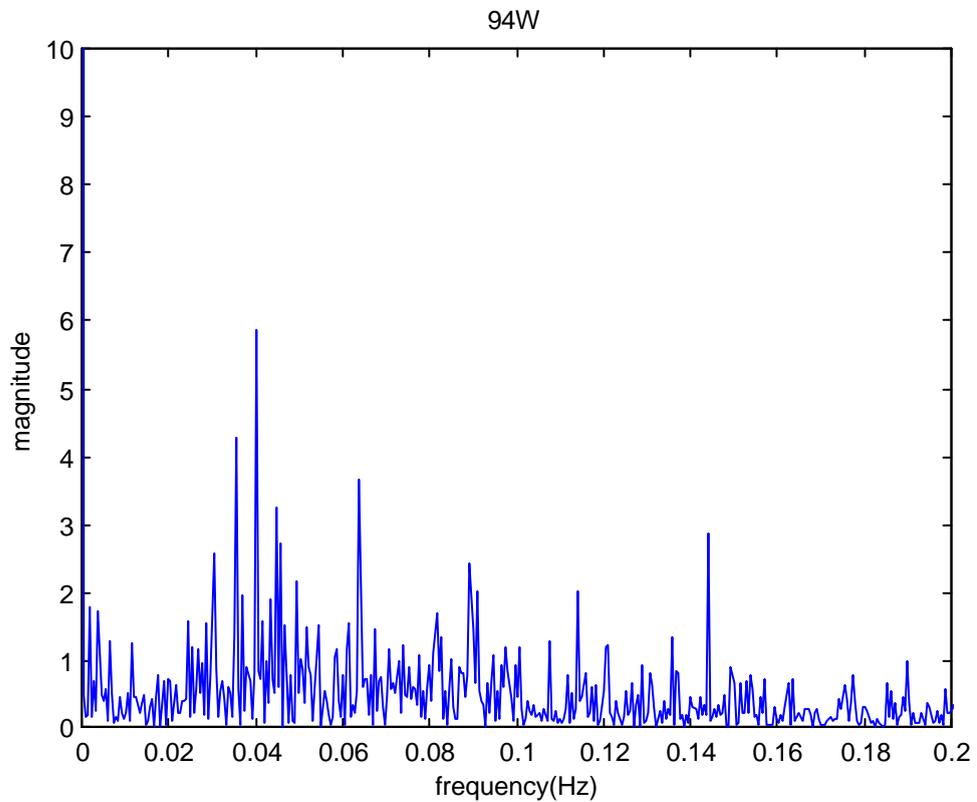


図 5.1.44. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (9 4 W)

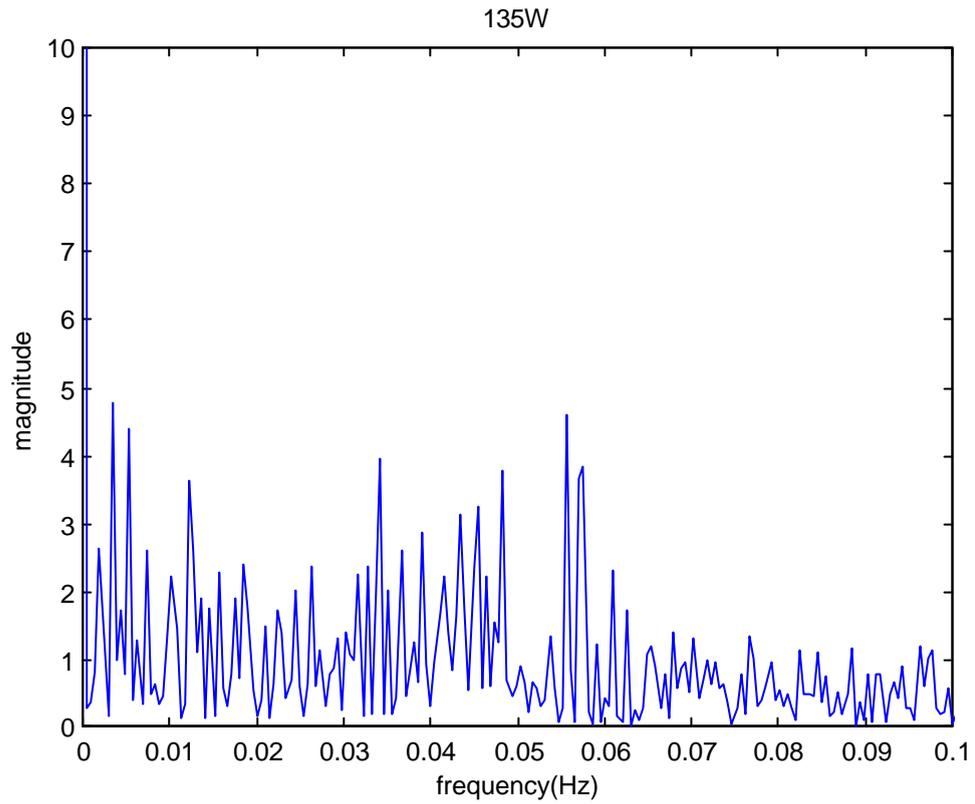


図 5.1.45. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (1 3 5 W)

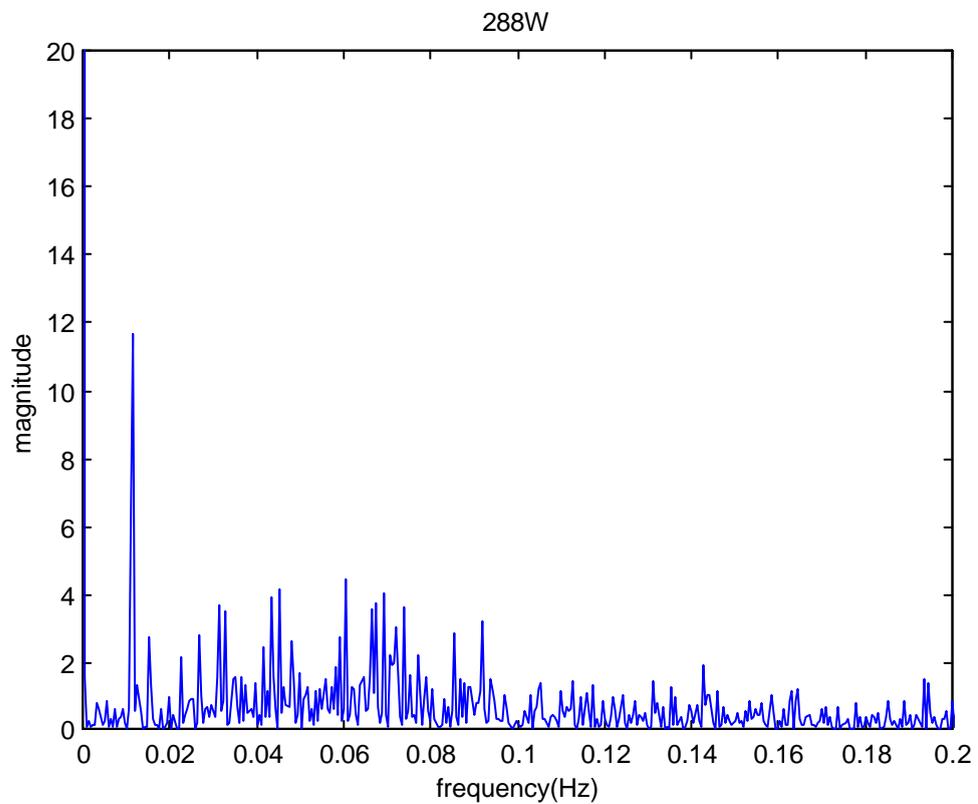


図 5.1.46. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (2 8 8 W)

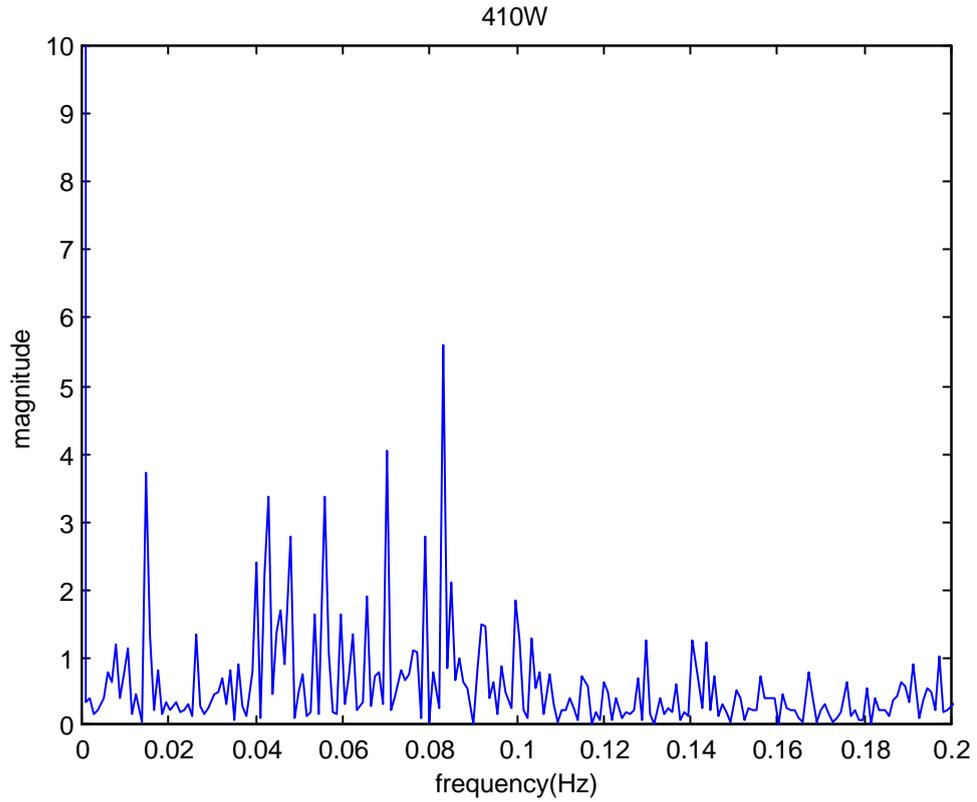


図 5.1.47. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (4 1 0 W)

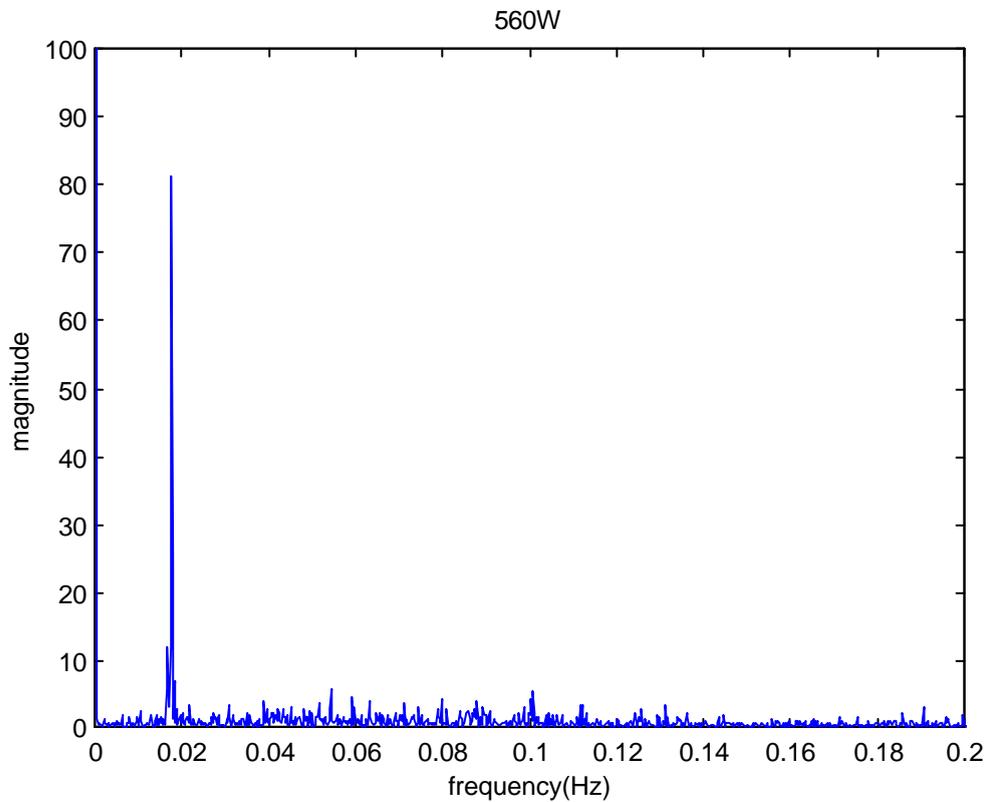


図 5.1.48. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (5 6 0 W)

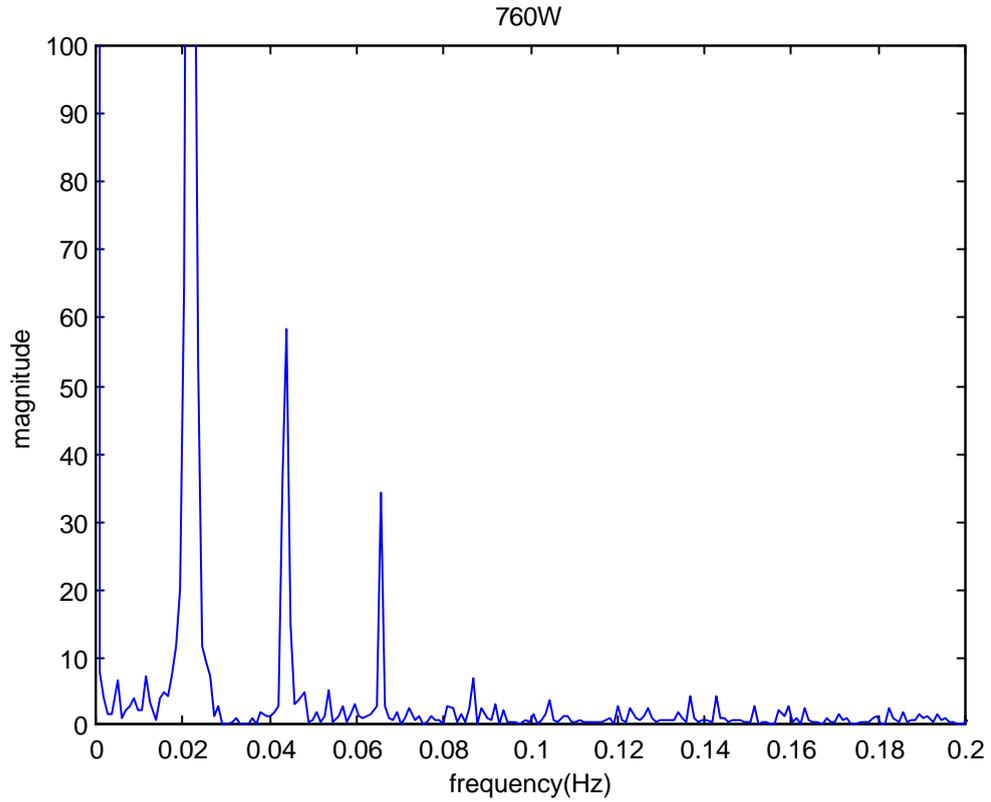


図 5.1.49. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (7 6 0 W)

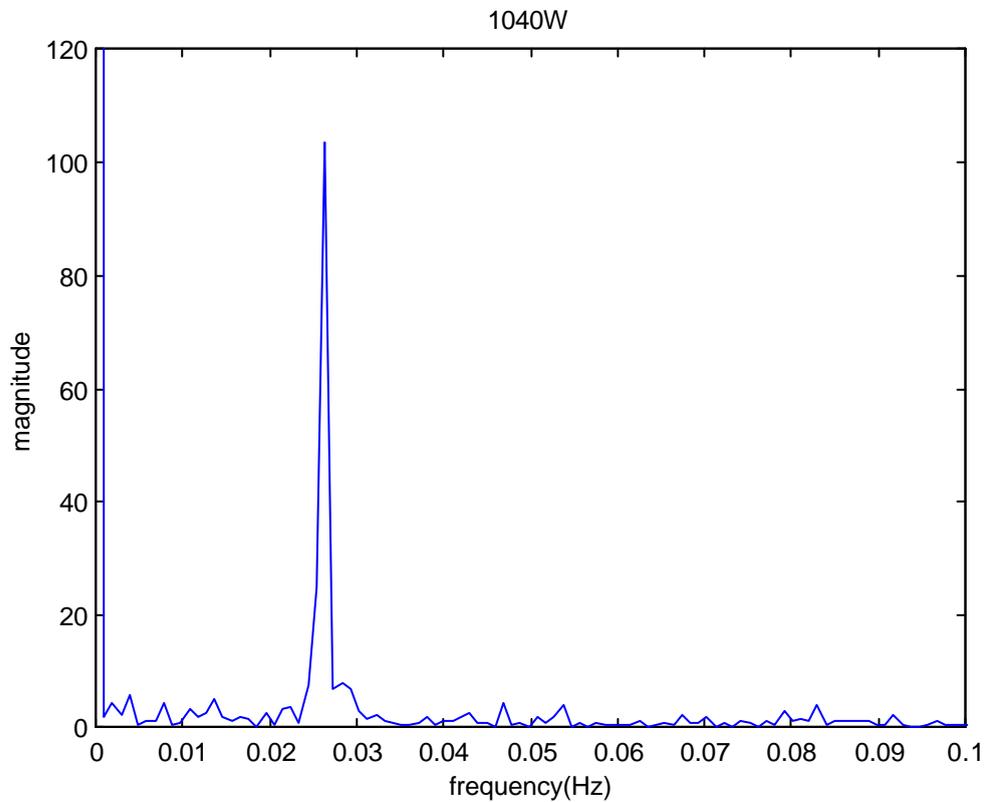


図 5.1.50. 上部銅・下部ガラスのパワースペクトラム (1 0 4 0 W)

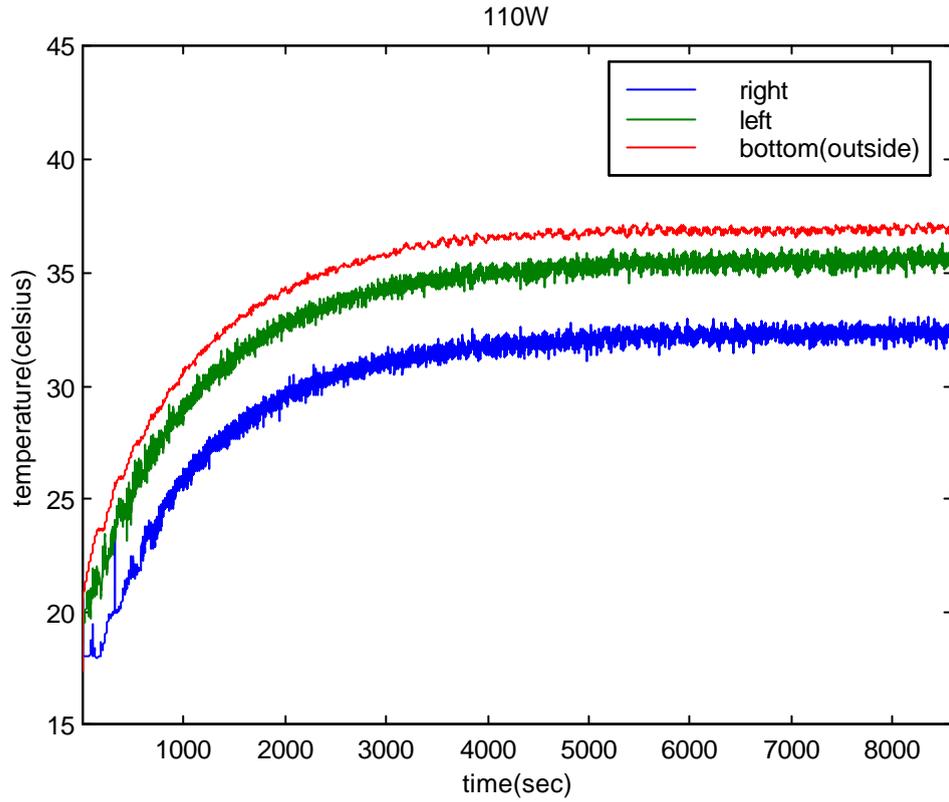


図 5.2.1. 上下ガラスの熱電対の温度 (1 1 0 W)

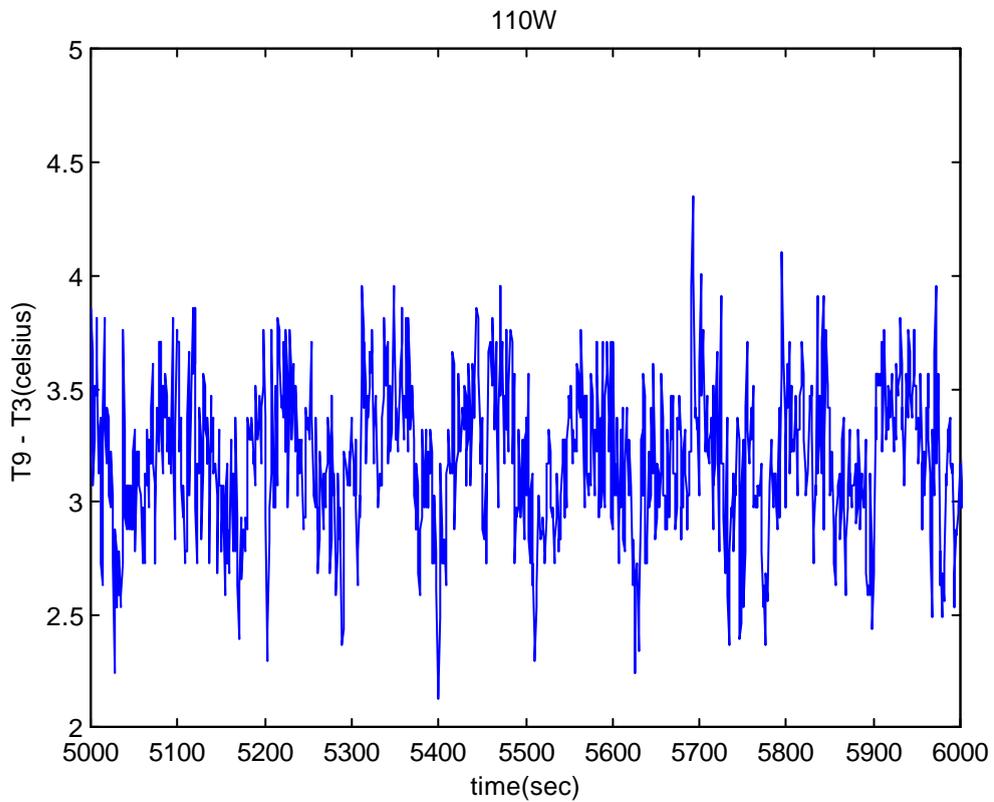


図 5.2.2. 上下ガラスの左右の温度差 (1 1 0 W)

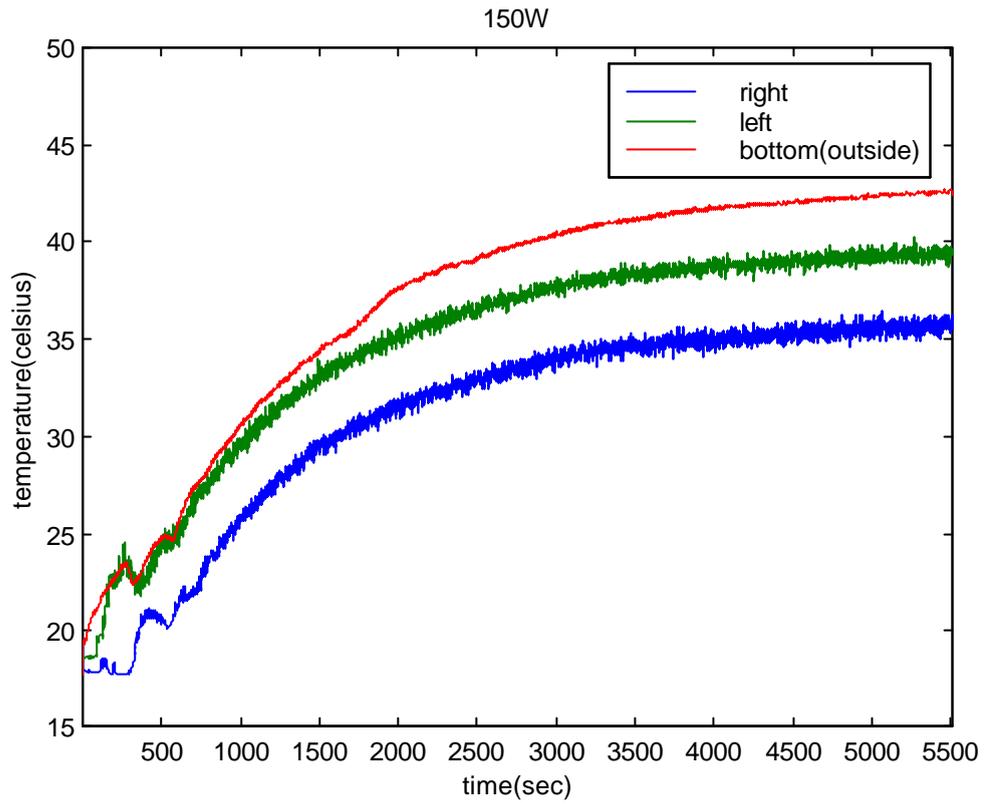


図 5.2.3. 上下ガラスの熱電対の温度 (1 7 0 W)

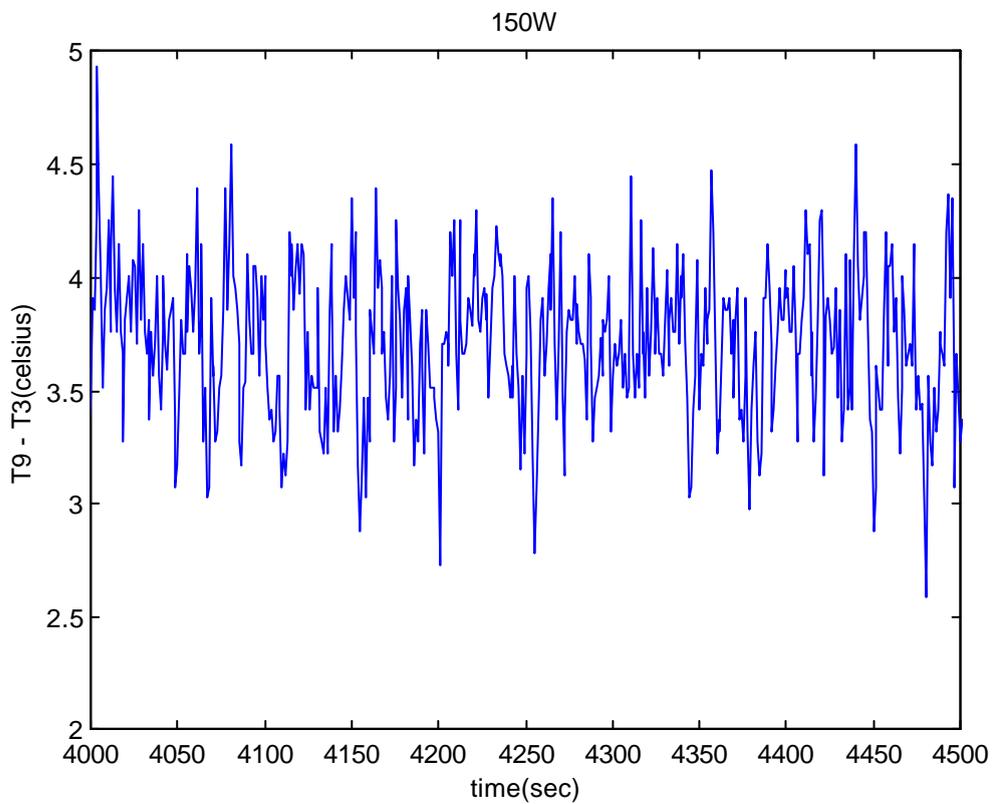


図 5.2.4. 上下ガラスの左右の温度差 (1 7 0 W)

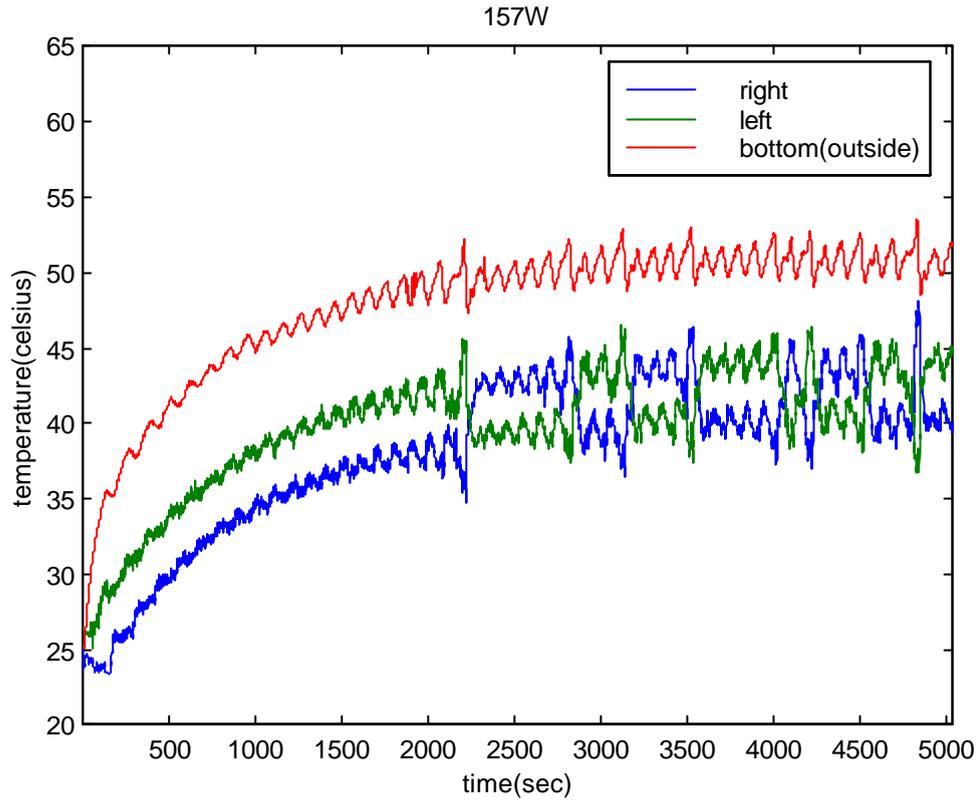


図 5.2.5. 上下ガラスの熱電対の温度 (1 5 7 W)

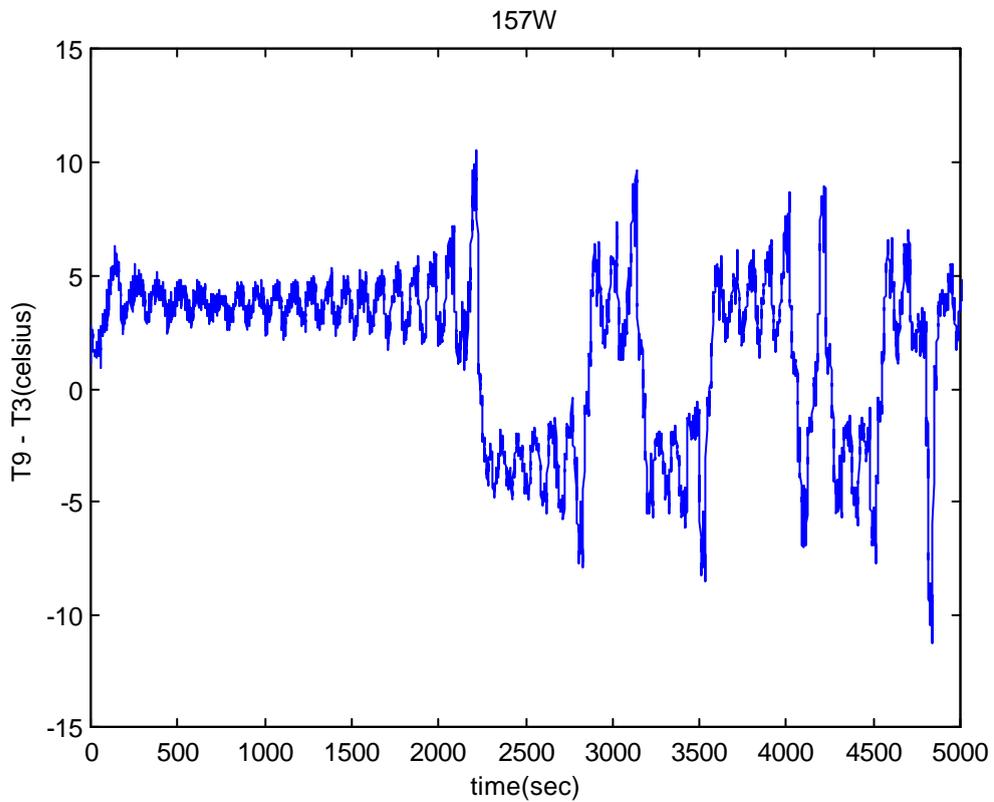


図 5.2.6. 上下ガラスの左右の温度差 (1 5 7 W)

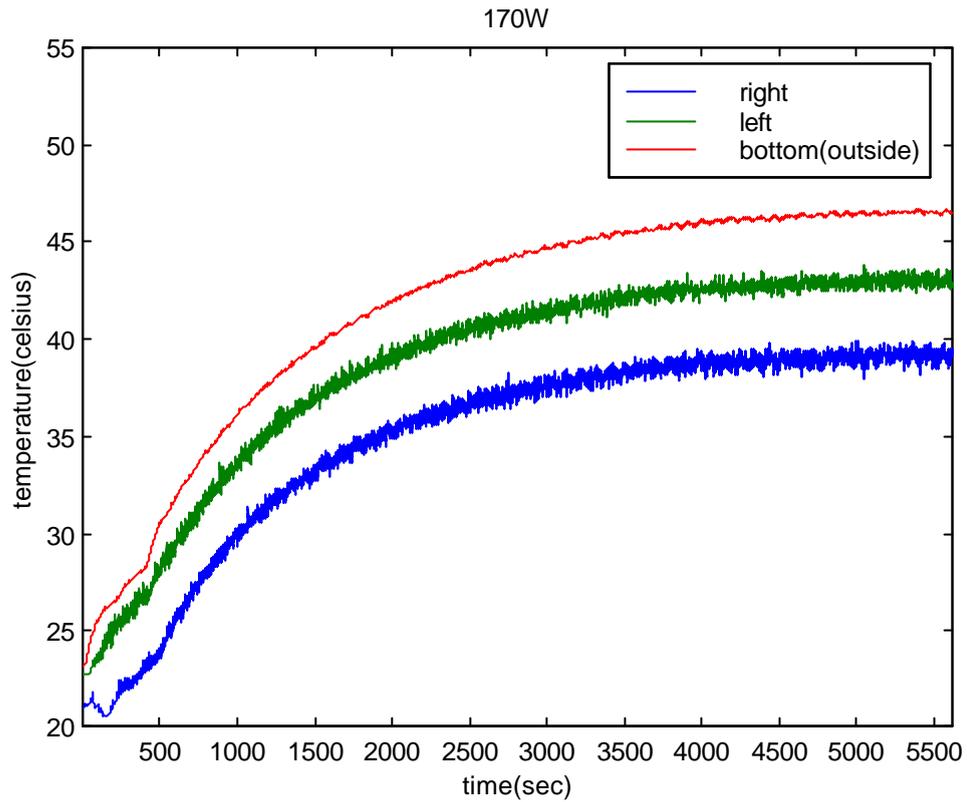


図 5.2.7. 上下ガラスの熱電対の温度 (1 7 0 W)

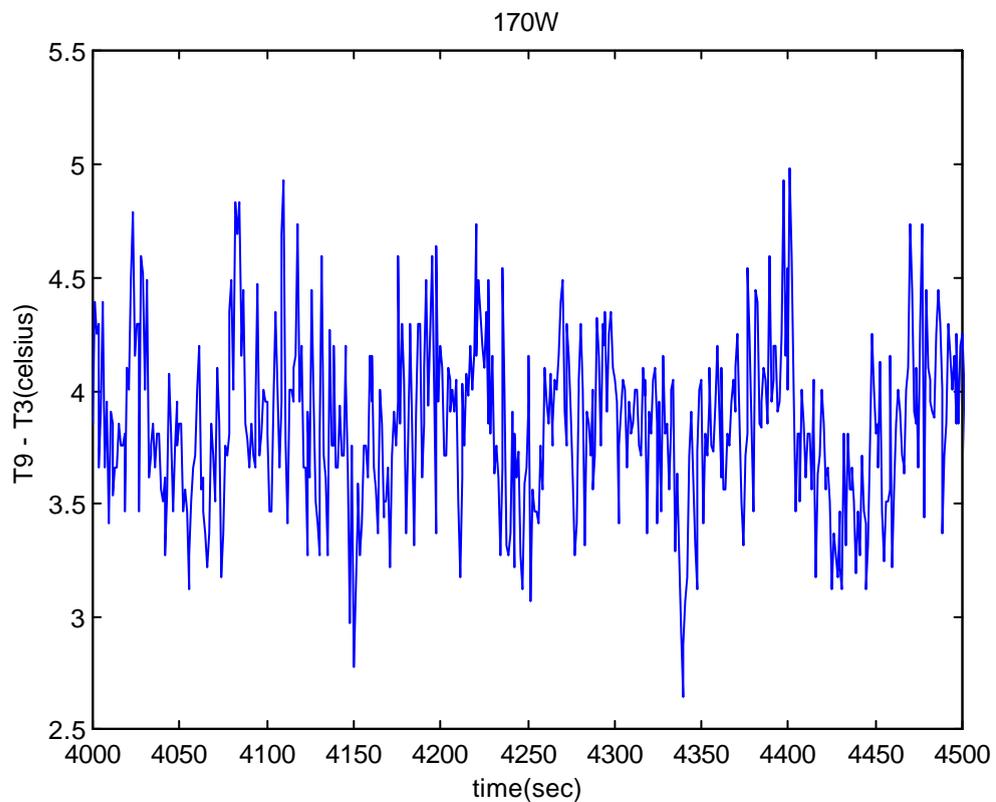


図 5.2.8. 上下ガラスの左右の温度差 (1 7 0 W)

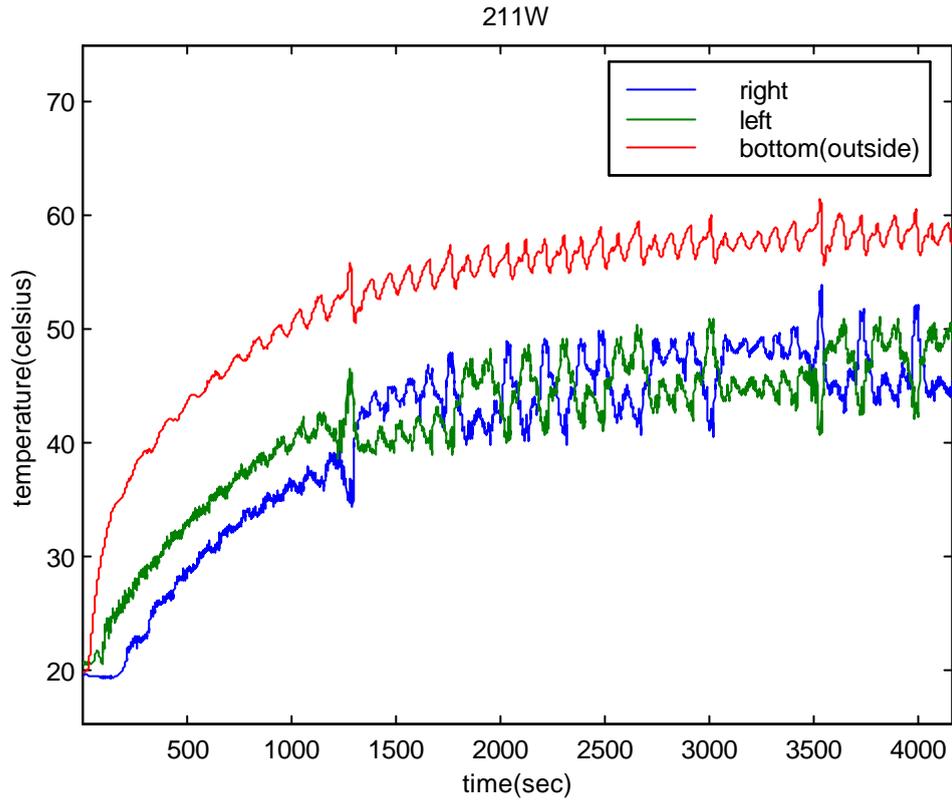


図 5.2.9. 上下ガラスの熱電対の温度 (2 1 1 W)

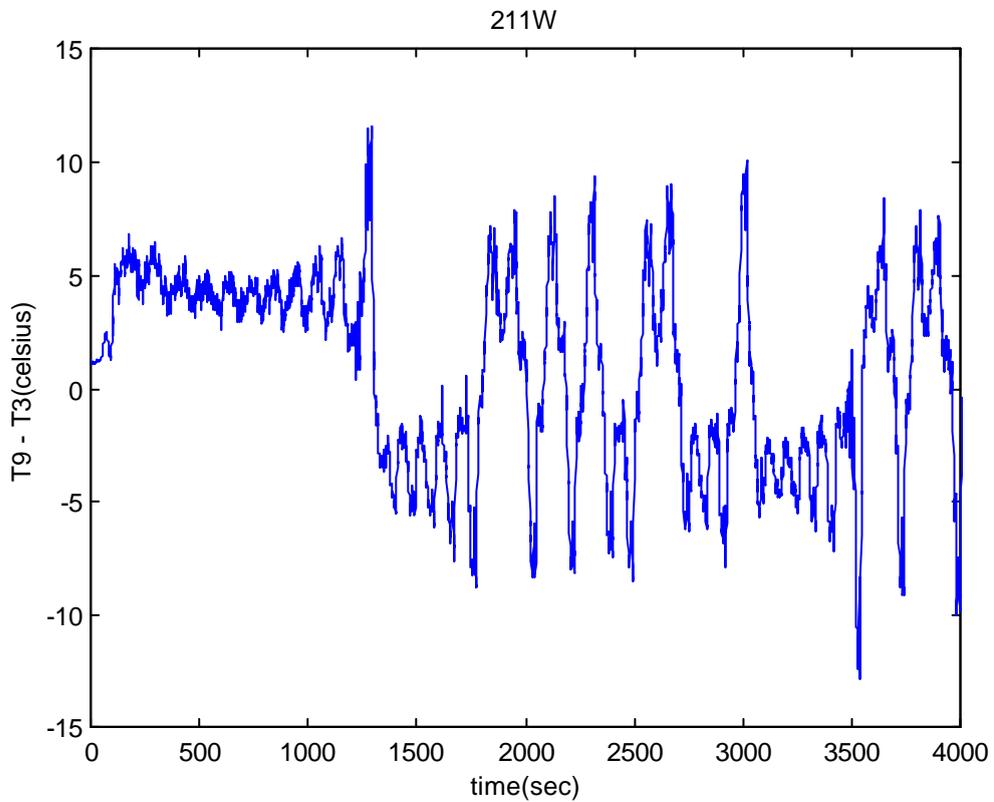


図 5.2.10. 上下ガラスの左右の温度差 (2 1 1 W)

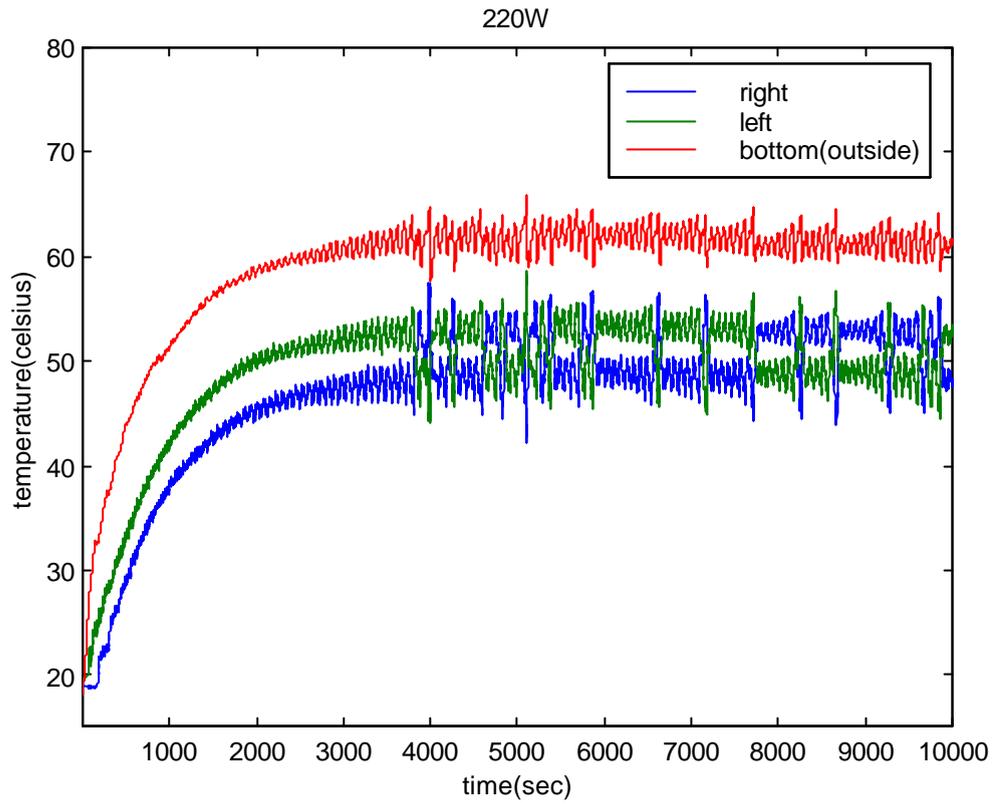


図 5.2.11. 上下ガラスの熱電対の温度 (2 2 0 W)

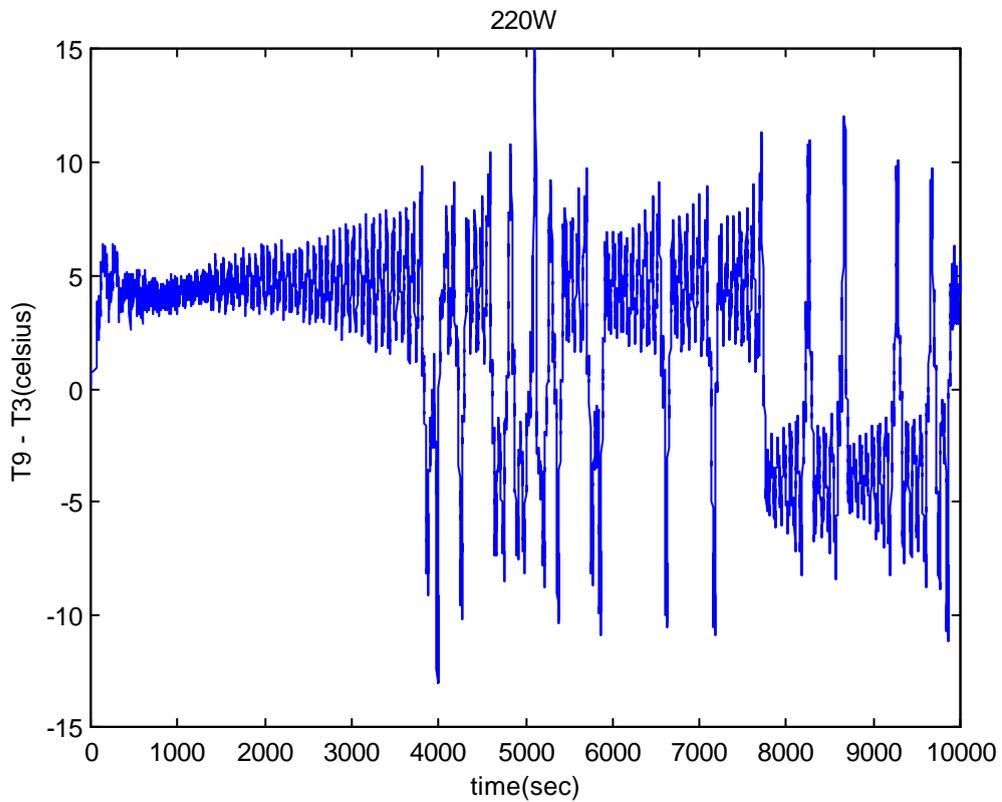


図 5.2.12. 上下ガラスの左右の温度差 (2 2 0 W)

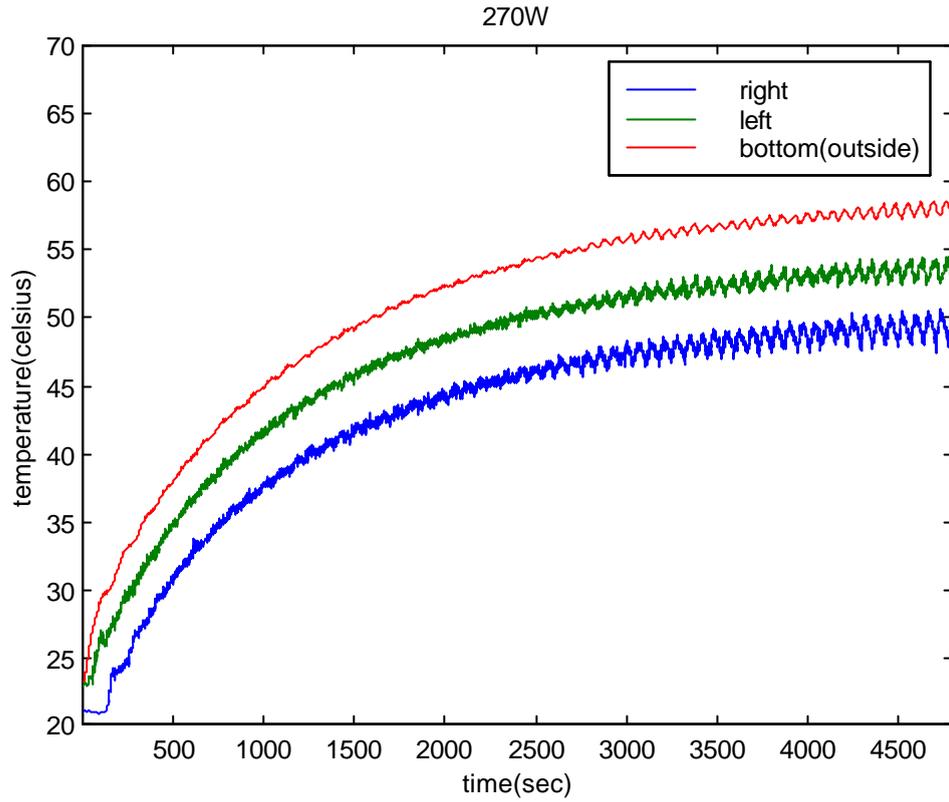


図 5.2.13. 上下ガラスの熱電対の温度 (2 7 0 W)

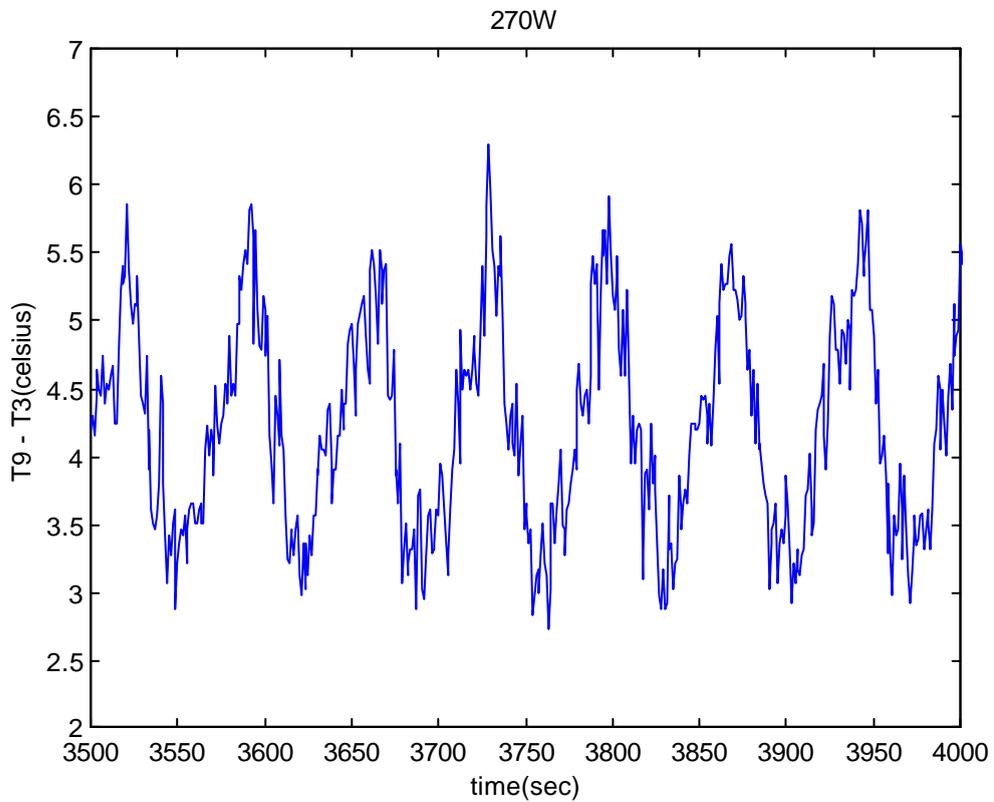


図 5.2.14. 上下ガラスの左右の温度差 (2 7 0 W)

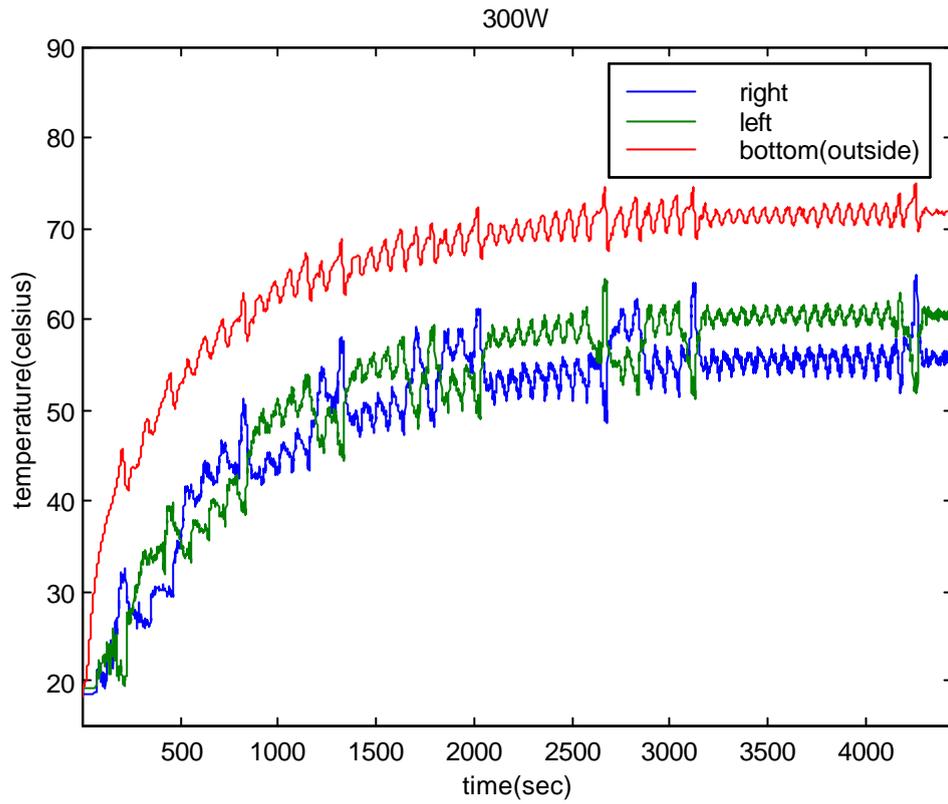


図 5.2.15. 上下ガラスの熱電対の温度 (3 0 0 W)

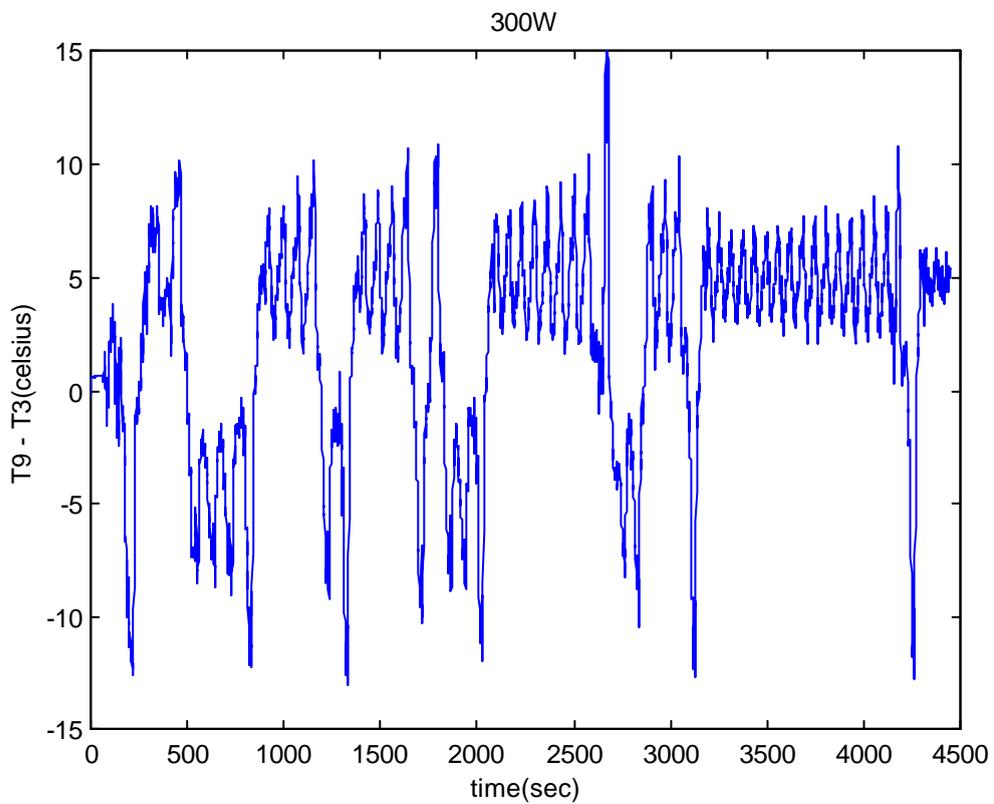


図 5.2.16. 上下ガラスの左右の温度差 (3 0 0 W)

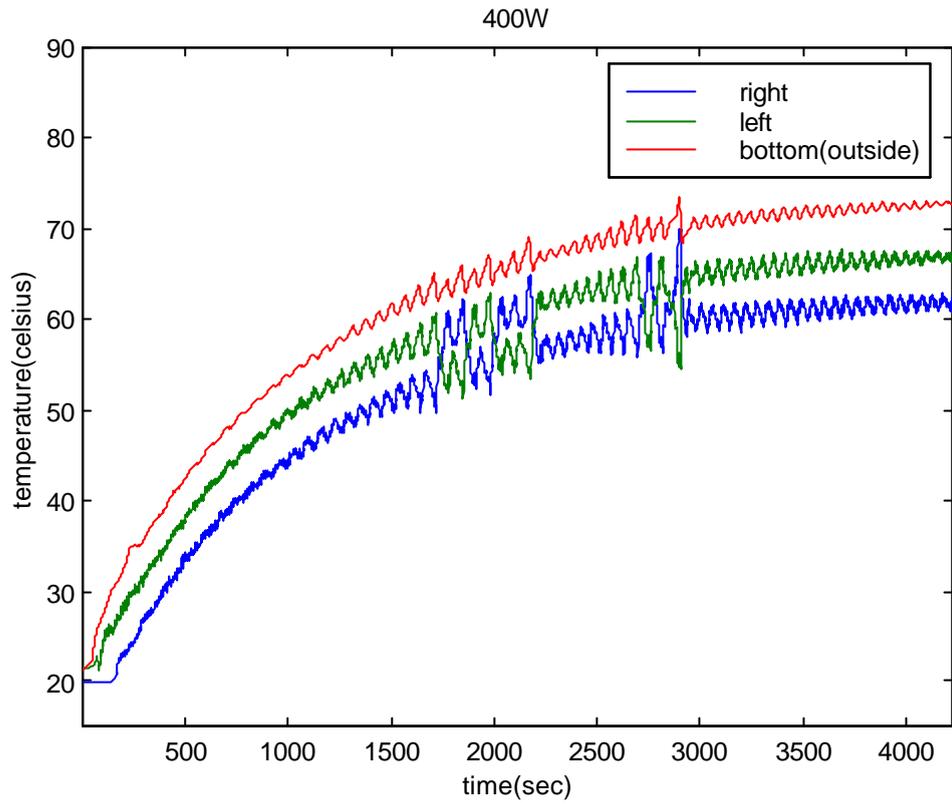


図 5.2.17. 上下ガラスの熱電対の温度 (4 0 0 W)

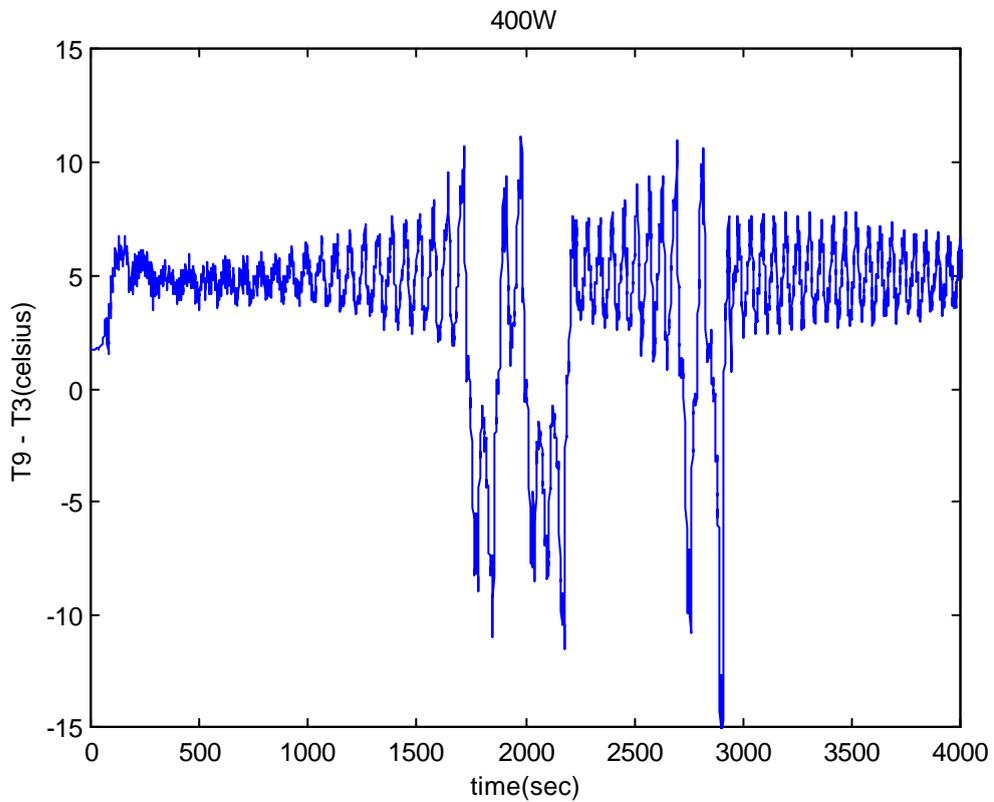


図 5.2.18. 上下ガラスの左右の温度差 (4 0 0 W)

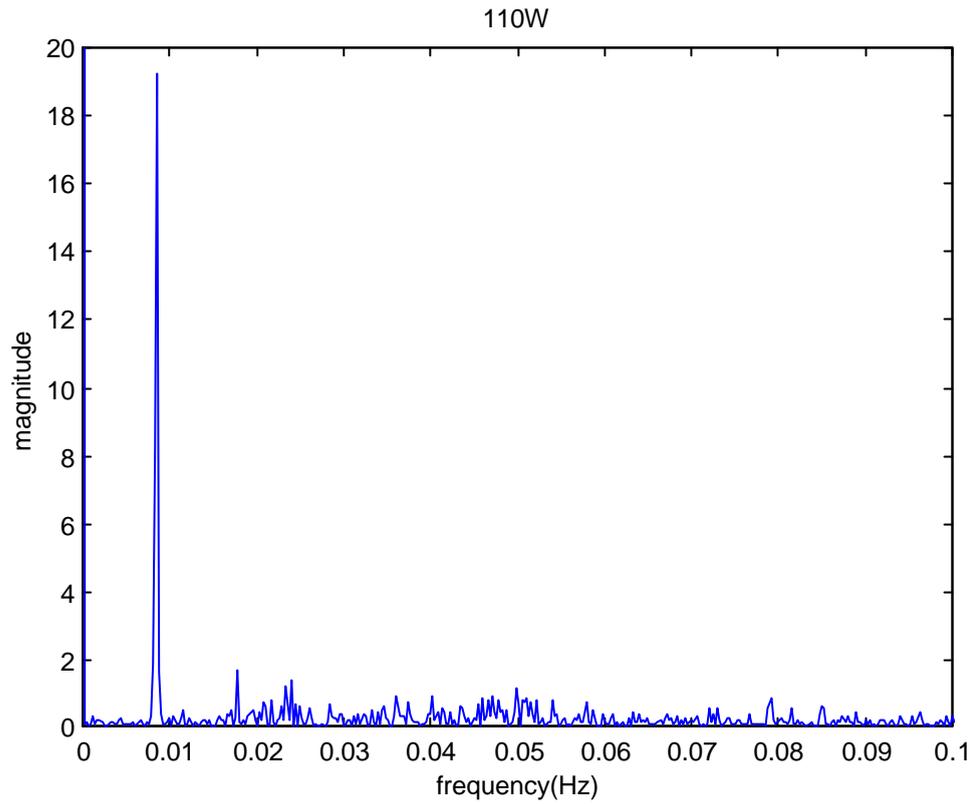


図 5.2.19. 上下ガラスのパワースペクトラム (1 1 0 W)

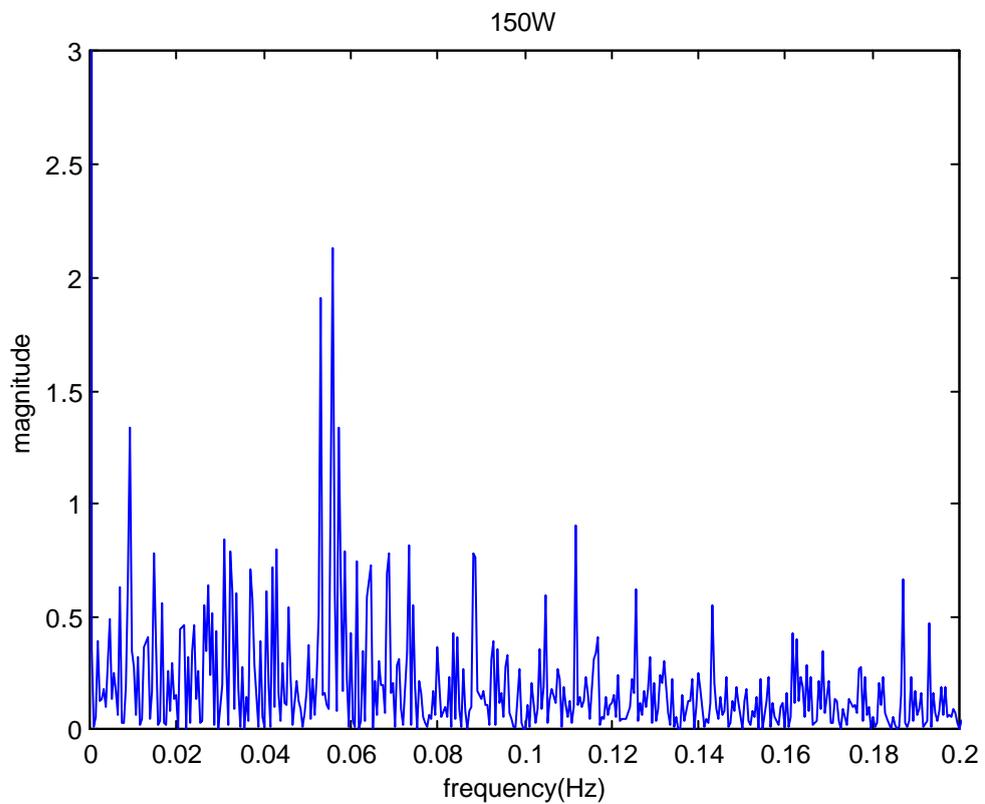


図 5.2.20. 上下ガラスのパワースペクトラム (1 5 0 W)

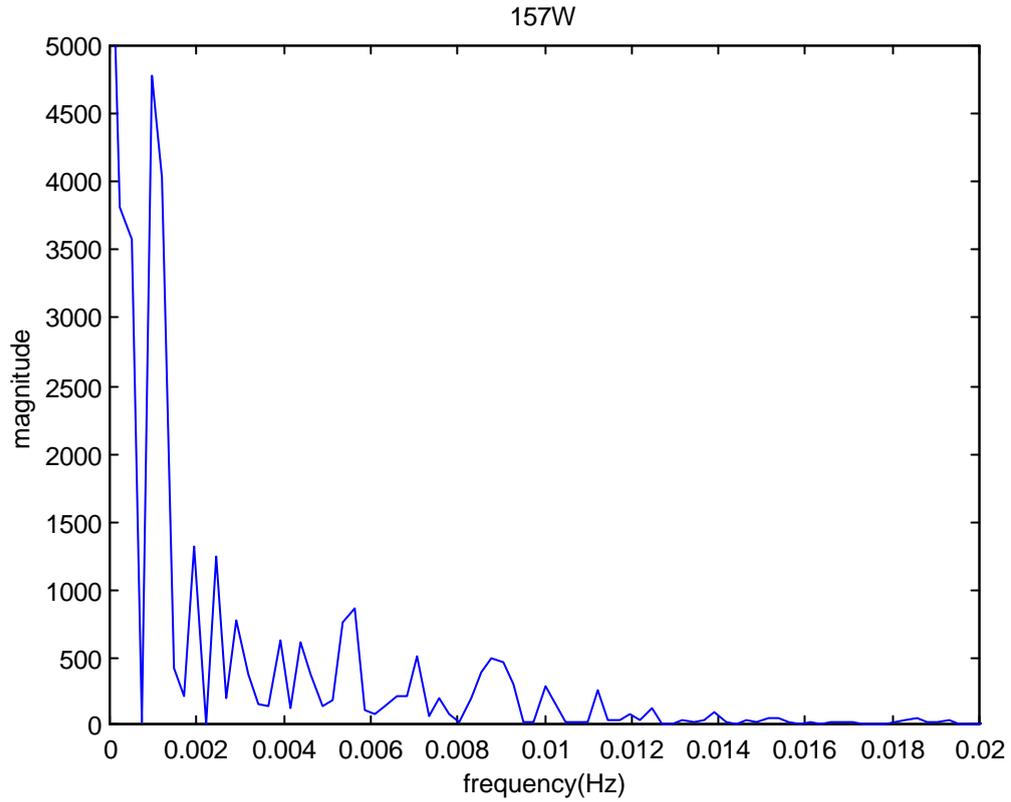


図 5.2.21. 上下ガラスのパワースペクトラム (1 5 7 W)

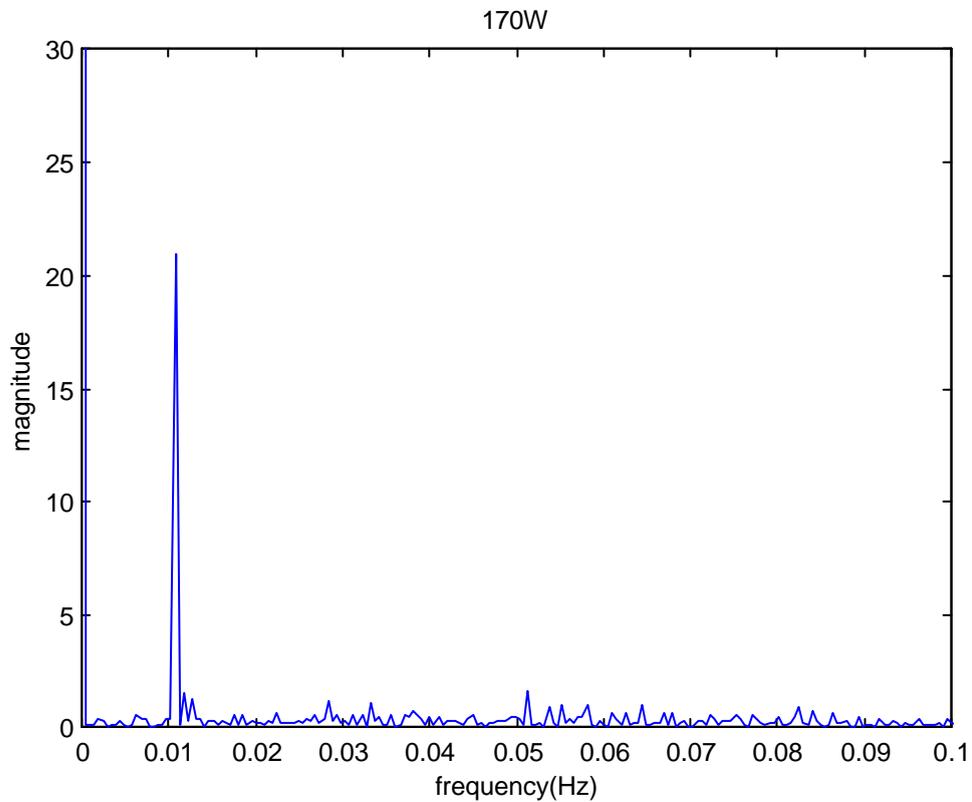


図 5.2.22. 上下ガラスのパワースペクトラム (1 7 0 W)

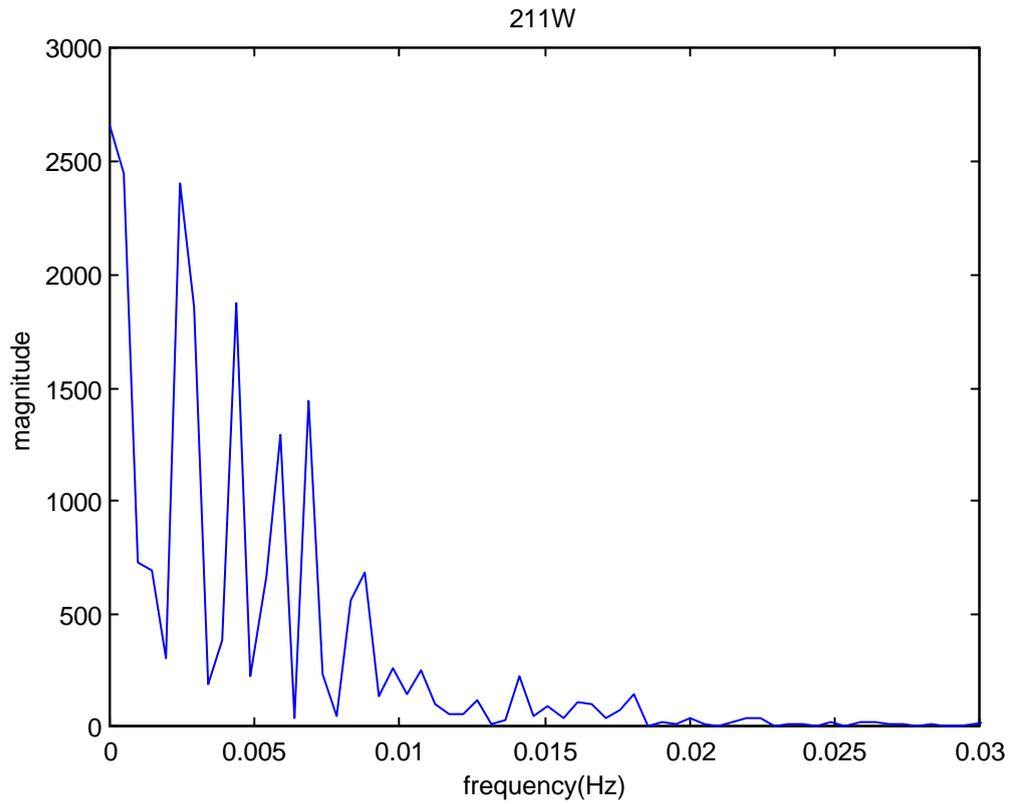


図 5.2.23. 上下ガラスのパワースペクトラム (2 1 1 W)

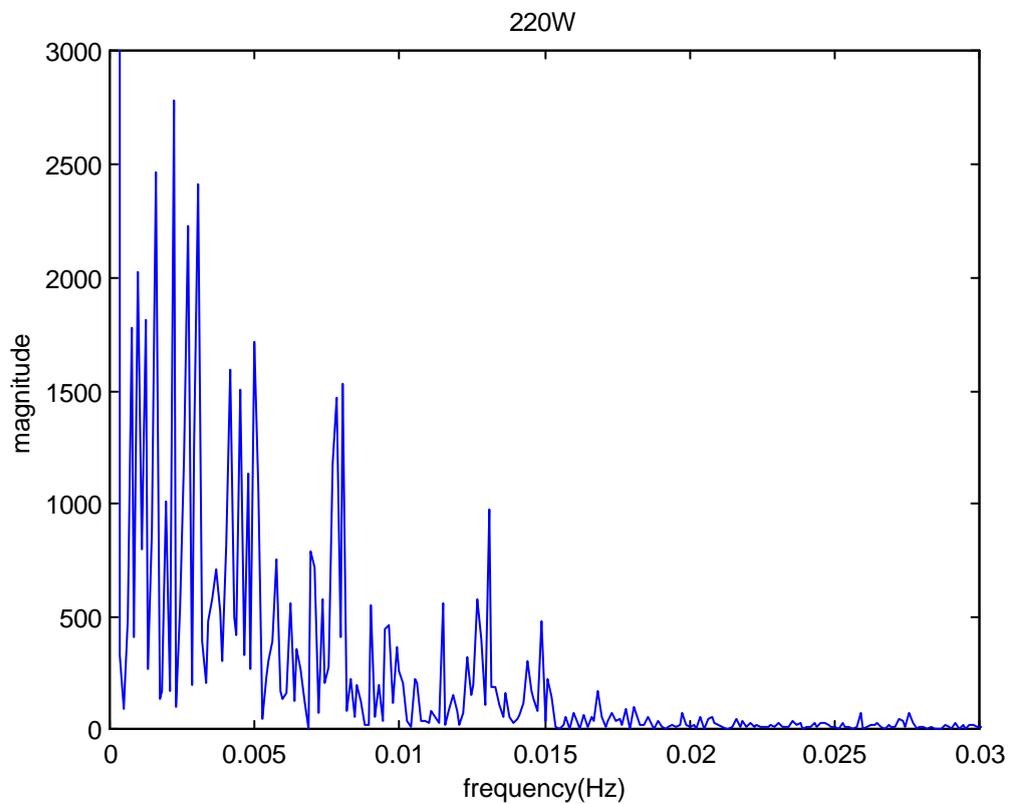


図 5.2.24. 上下ガラスのパワースペクトラム (2 2 0 W)

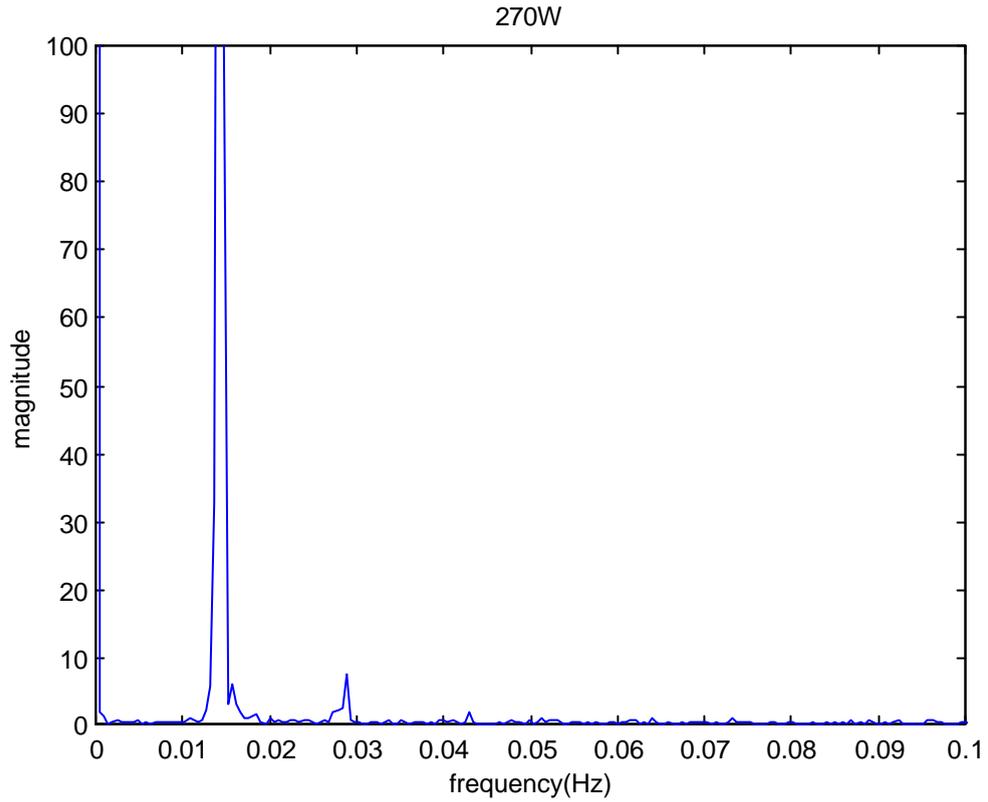


図 5.2.25. 上下ガラスのパワースペクトラム (2 7 0 W)

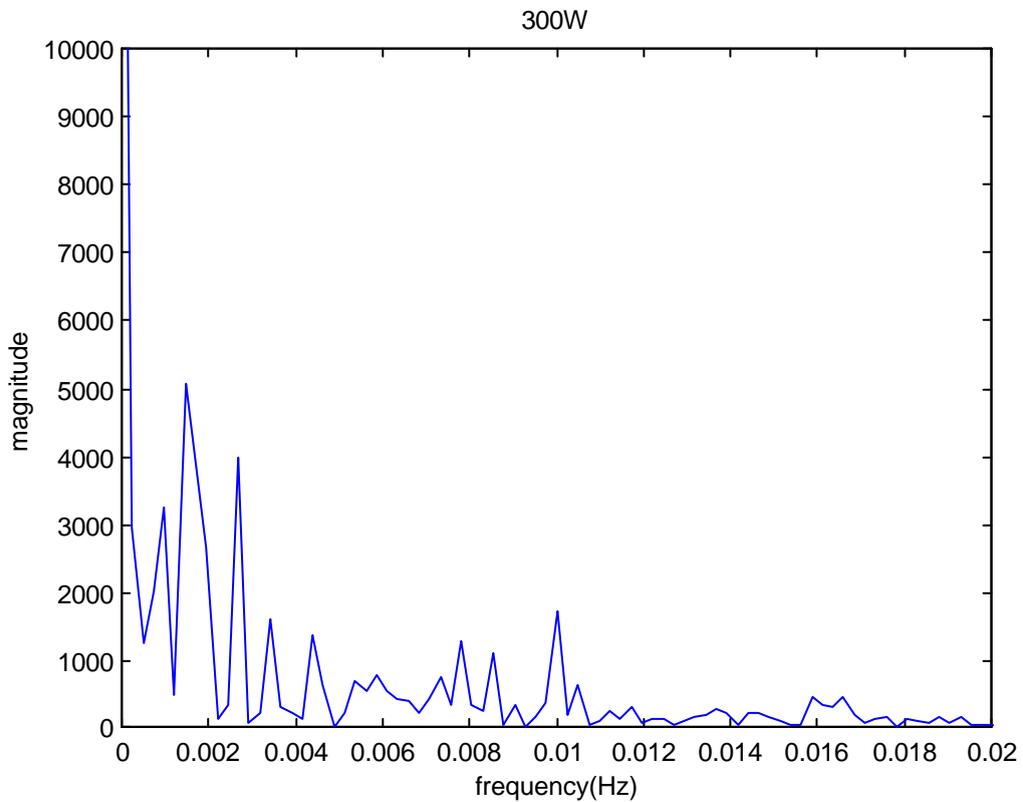


図 5.2.26. 上下ガラスのパワースペクトラム (3 0 0 W)

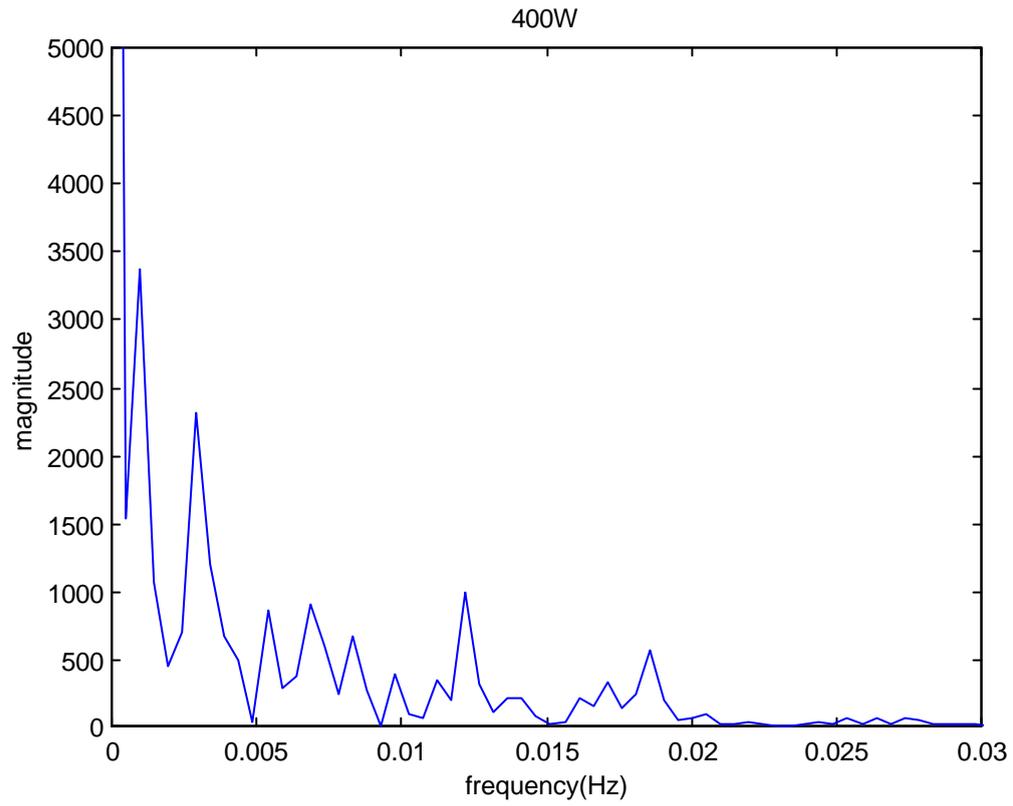


図 5.2.27. 上下ガラスのパワースペクトラム (400W)

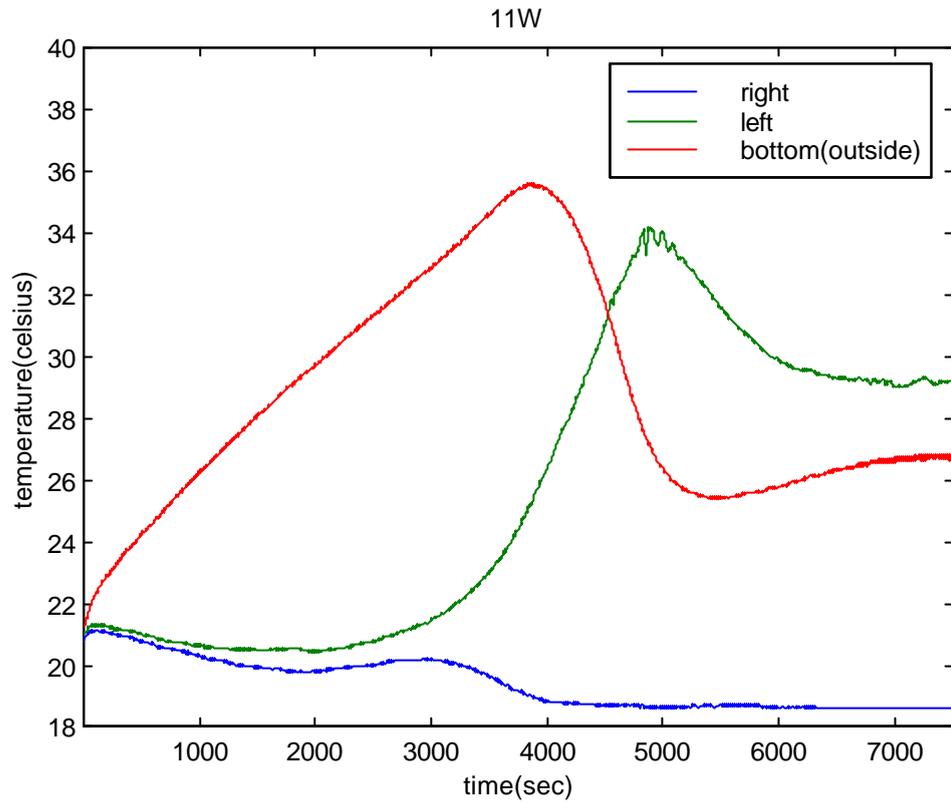


図 5.3.1. 多孔質を入れた場合の熱電対の温度 (1 1 W)

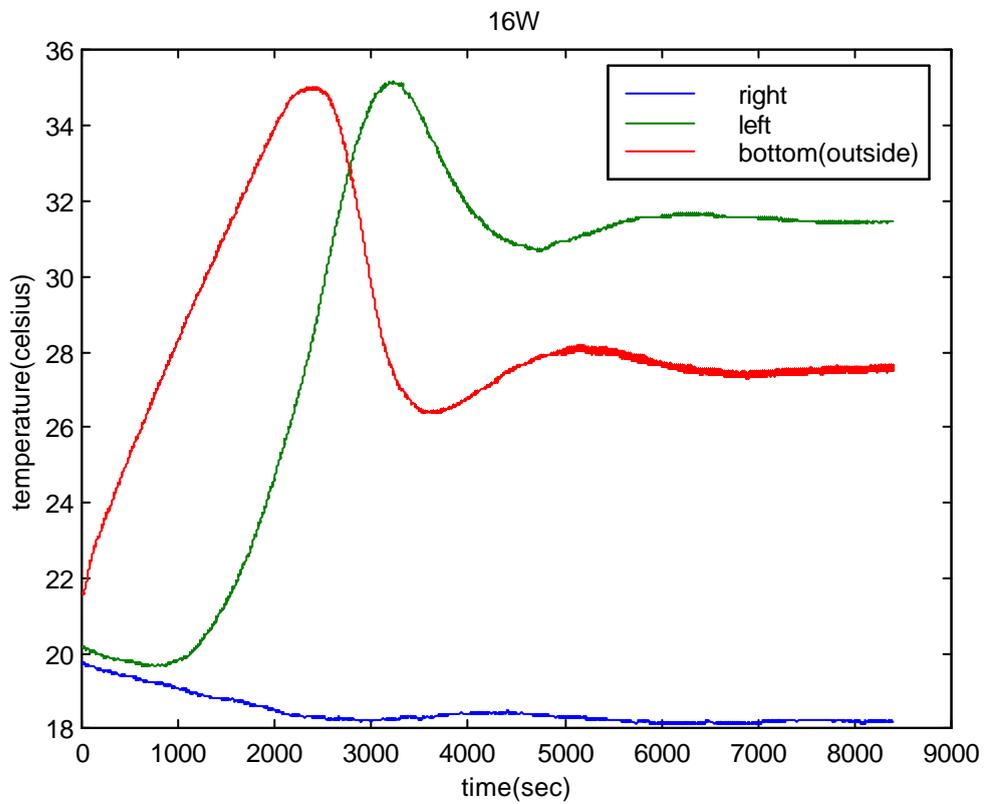


図 5.3.2. 多孔質を入れた場合の熱電対の温度 (1 6 W)

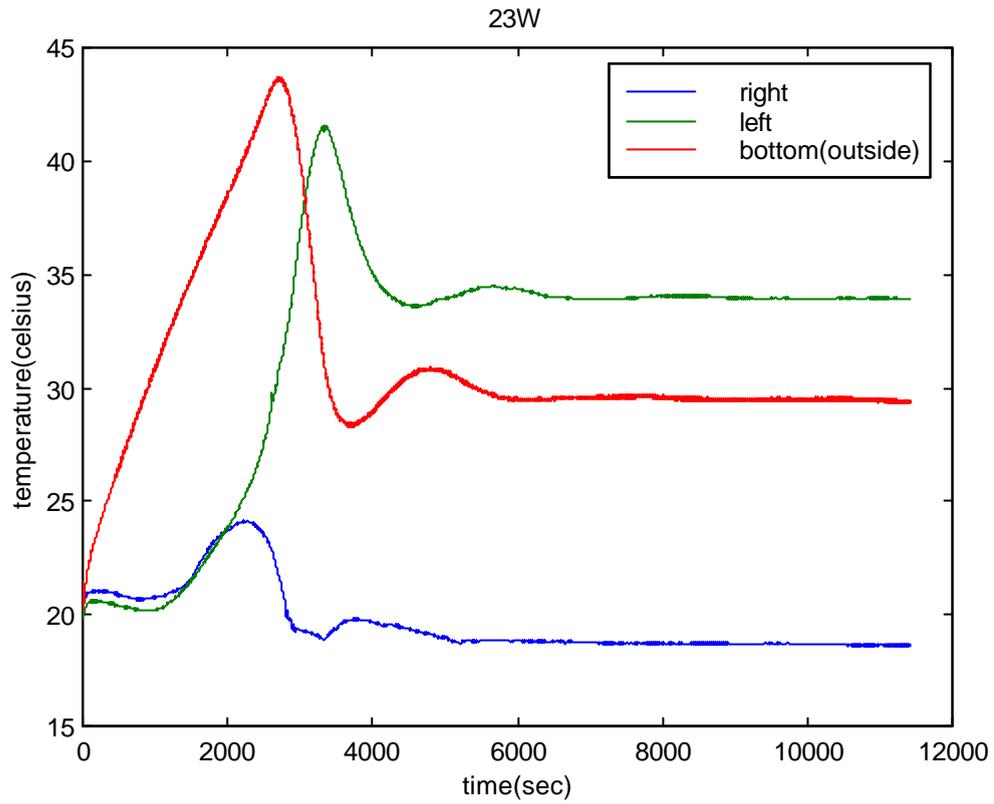


図 5.3.3. 多孔質を入れた場合の熱電対の温度 (2 3 W)

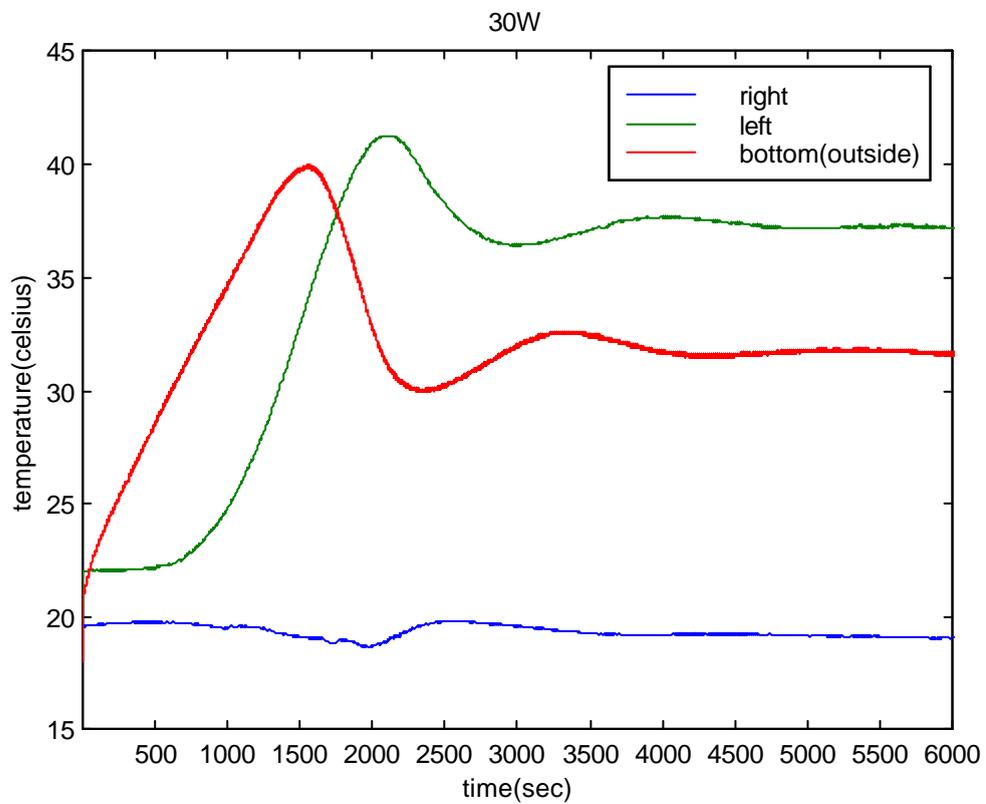


図 5.3.4. 多孔質を入れた場合の熱電対の温度 (3 0 W)

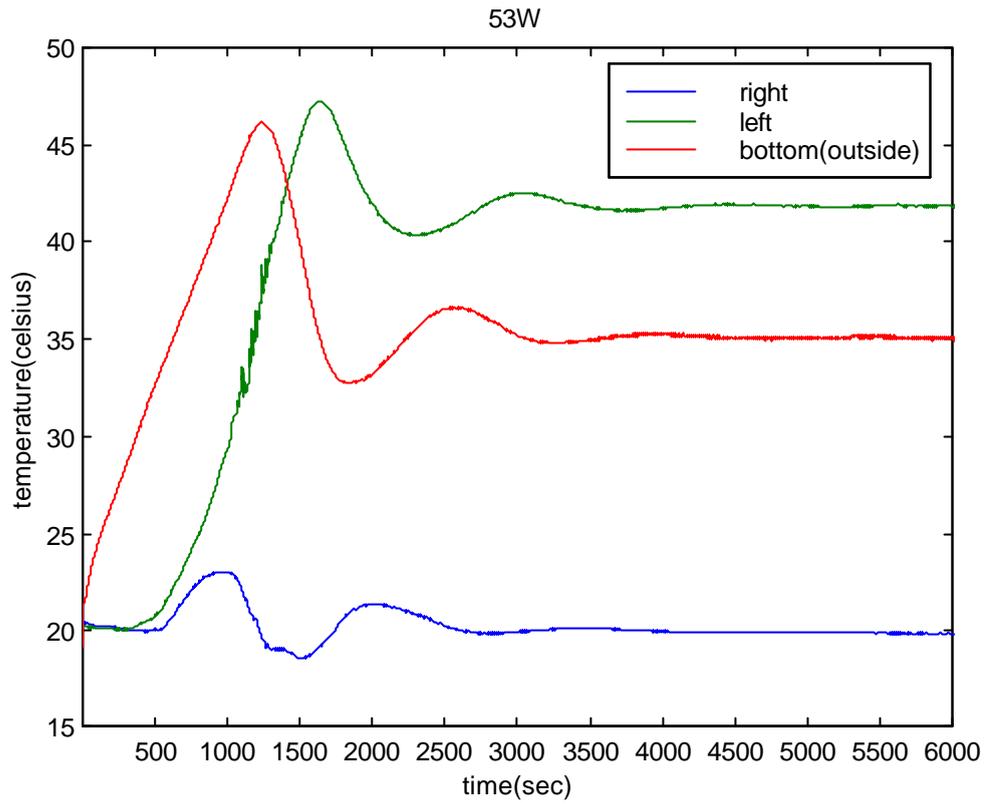


図 5.3.5. 多孔質を入れた場合の熱電対の温度 (5 3 W)

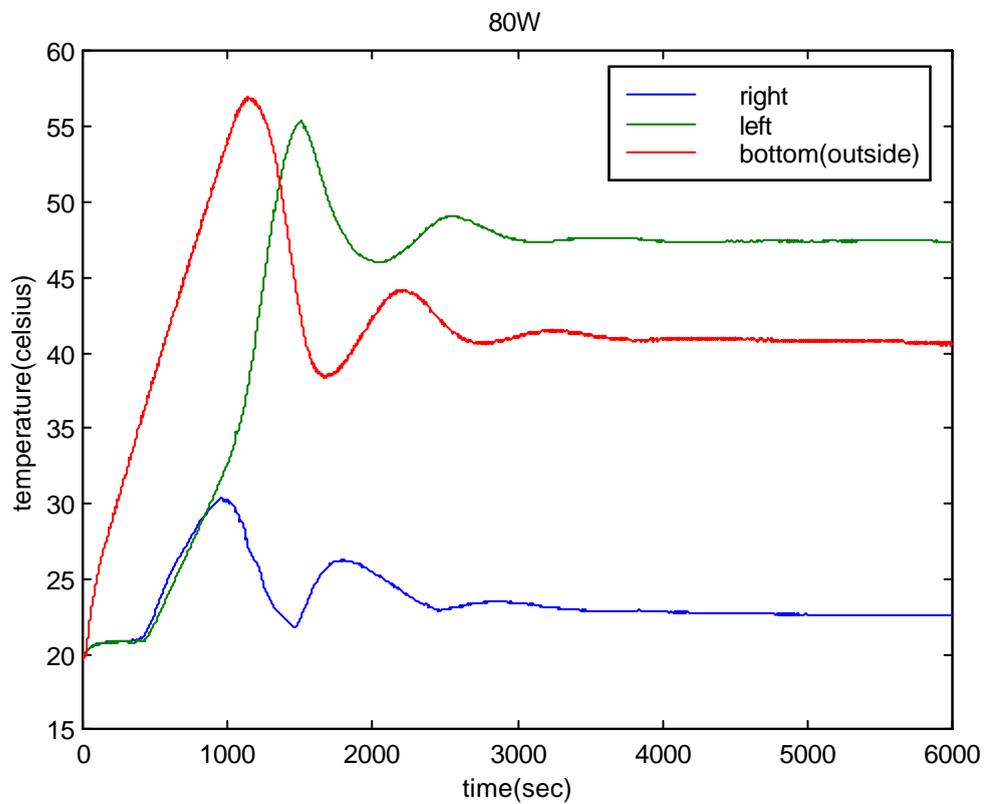


図 5.3.6. 多孔質を入れた場合の熱電対の温度 (8 0 W)

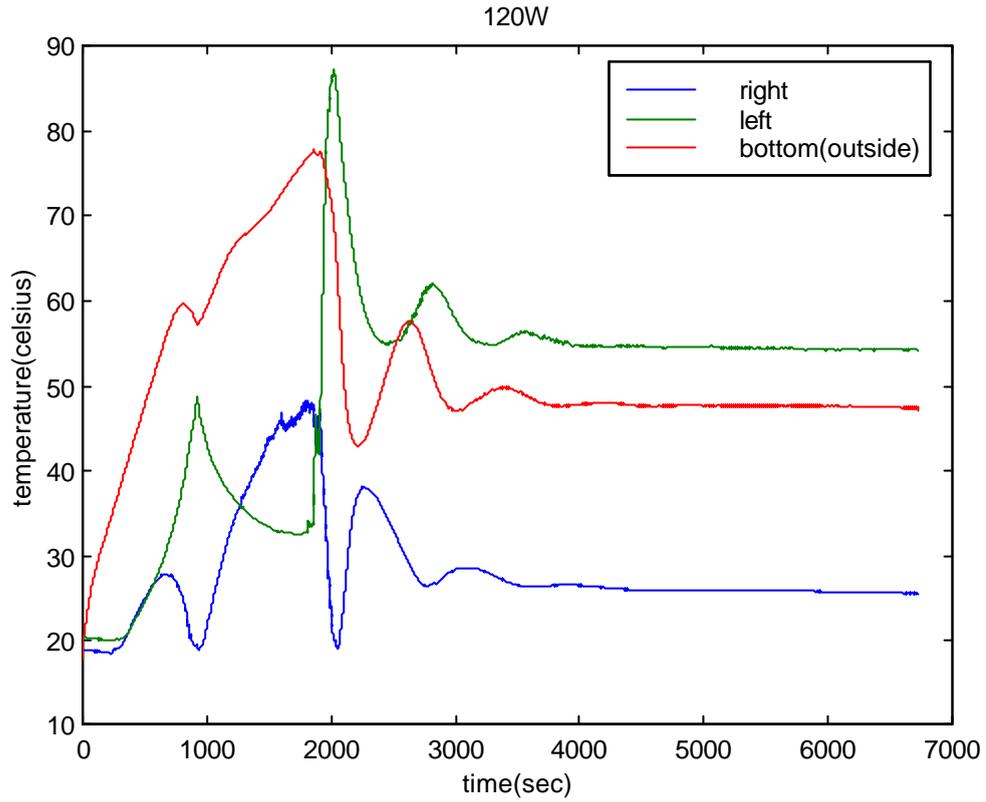


図 5.3.7. 多孔質を入れた場合の熱電対の温度 (1 2 0 W)

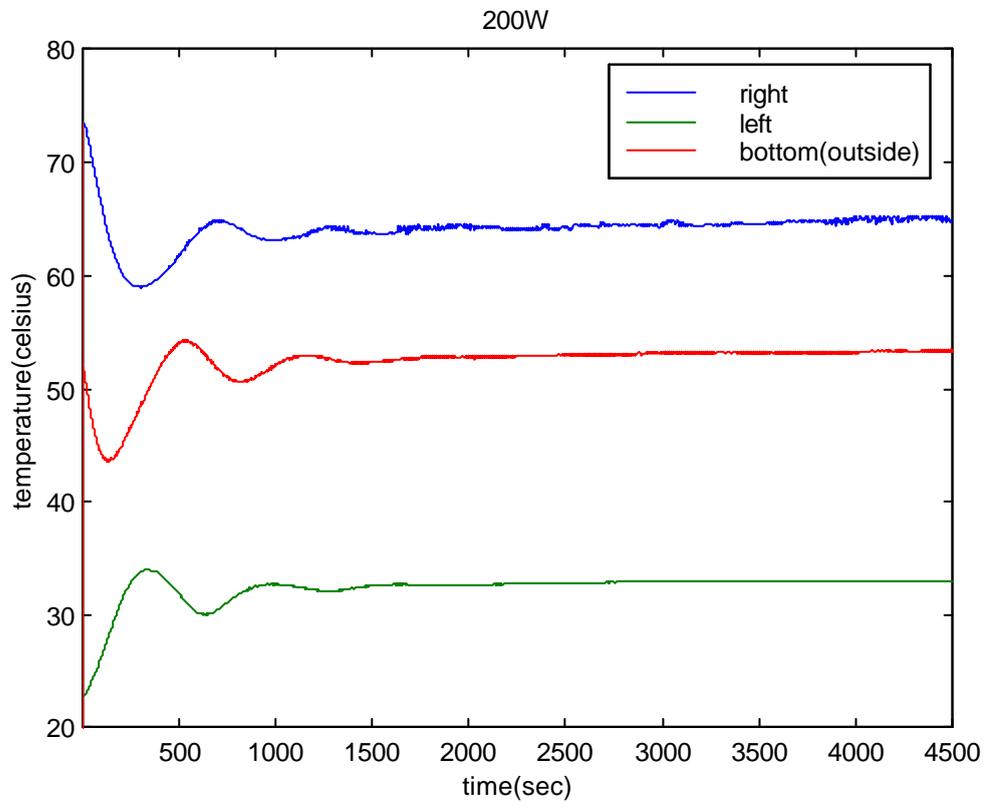


図 5.3.8. 多孔質を入れた場合の熱電対の温度 (2 0 0 W)

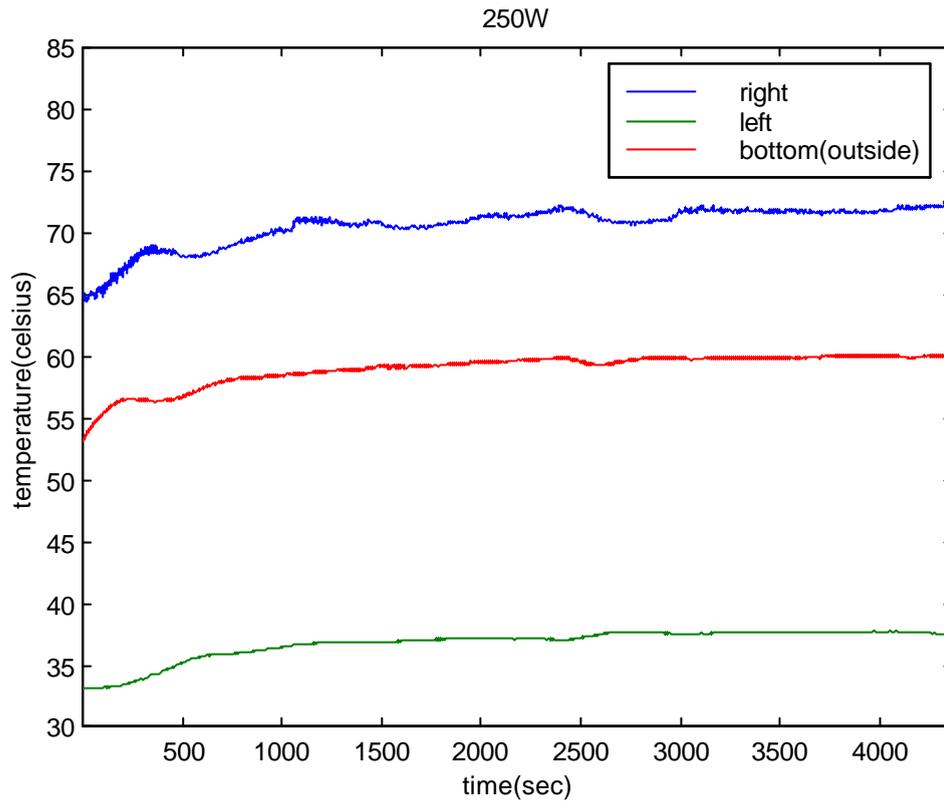


図 5.3.9. 多孔質を入れた場合の熱電対の温度 (2 5 0 W)

	PSのデータ開始	PSのデータ数	平均電力(W)	平均温度差	速度(m/s)	方向	固有周波数(Hz)	管路長(m)
5	100	256	4.632	0.95	0.00282	反時計回り		
8	50	1024	7.023	1.154	0.00352	反時計回り		
10	500	1024	10.88	1.384	0.004547	反時計回り		
14	1500	1024	14.37	1.195	0.006955	反時計回り		
15	1100	512	15.5	1.887	0.004751	反時計回り		
21	2000	1024	21.42	0.871	0.014223	時計回り		
31	1500	2048	31.7	1.546	0.011859	時計回り		
45	1500	2048	44.75	3.554	0.007283	時計回り		
64	400	512	64.6	4.484	0.008332	時計回り		
75	1800	2048	76.69	4.909	0.009035	時計回り		
94	1500	2048	94.42	4.612	0.011841	時計回り		
135	1000	2048	134.7	5.387	0.014462	時計回り		
194	1000	2048	192.6	5.673	0.019636	時計回り	0.0092	2.134326
288	600	2048	283.7	6.451	0.025435	時計回り	0.012	2.11961
410	1000	1024	411	7.33	0.03243	時計回り	0.0145	2.236531
560	500	4096	545.2	8.105	0.038905	時計回り	0.0175	2.223155
760	1500	1024	767.3	9.456	0.046931	時計回り	0.022	2.133242
1040	1700	1024	1045	10.78	0.056066	時計回り	0.026	2.156399

表 5.4.1. 上部銅・下部ガラスのデータ

	PSのデータ開始	PSのデータ数	平均電力(W)	平均温度差	流速(m/s)	備考
110	4000	4096	112.61	3.192	0.020404	
150	3000	2048	146.35	3.694	0.022914	
157	900	4096	157.41	1.266	0.071912	カオス
170	3000	2048	167.64	3.836	0.025276	
211	1500	2048	212.22	-1.139	-0.10776	カオス
220	1800	8192	217.39	1.465	0.085824	カオス
270	2500	2048	263.03	4.206	0.036169	カオス
300	300	4096	303.17	2.341	0.074901	カオス
400	1800	2048	404.63	2.88	0.081259	カオス

表 5.4.2. 上部ガラス・下部ガラスのデータ

	データ開始	データ終了	平均電力(W)	平均温度差	方向	流速(m/s)	備考
11	6701	7500	11.18307	10.6015	時計回り	0.001344	
16	5001	8000	15.42339	13.28128	時計回り	0.001479	
23	6001	10000	22.86326	15.25433	時計回り	0.001909	
30	4001	6000	32.57898	18.12292	時計回り	0.00229	
53	4001	6000	53.52867	21.9162	時計回り	0.003112	
80	3501	6000	81.42599	24.63541	時計回り	0.004211	
120	4001	6500	120.4094	28.51447	時計回り	0.00538	
150	3501	6000	151.0661	30.97079	時計回り	0.006214	
200	1801	4000	200.2988	31.525	反時計回り	0.008094	水漏れあり
250	2001	4000	252.8758	33.9805	反時計回り	0.00948	水漏れあり

表 5.4.3. 多孔質の電力による変化のデータ

角度	データ開始	データ終了	平均温度差	流速(m/s)	備考
120	500	1300	55.21	0.003461	
105	600	1600	48.95	0.003904	
90	800	1200	44.08	0.004335	
80	1500	3500	34.62	0.005519	
75	600	1400	36.43	0.005245	
60	600	1600	31.85	0.005999	
45	1500	3000	29.53	0.006471	
30	1500	3000	29.19	0.006546	
22	1500	4000	27.25	0.007012	
15	2500	4000	28.79	0.006637	
8	3000	5000	27.87	0.006856	
-8	2500	3000	30.39	0.006288	
-15	1000	4000	31.97	0.005977	
-22	3000	3500	33.58	0.00569	
-30	4000	5000	34.16	0.005594	
-35	2500	4500	36.99	0.005166	振動発生
40	2000	4000	29.07	0.006573	方向逆転

表 5.4.4. 多孔質の傾きによる変化のデータ

	右側	左側
0	40.88135	24.56161
1	44.71117	24.56585
2	50.46174	24.71022
4	53.17117	25.00955
6	54.06759	25.46174
8	54.4752	25.59868
10	54.57074	25.68678
12	54.7894	25.63052
14	54.75597	25.73348
16	54.64186	25.84706
18	54.52297	26.01265
20	54.22257	25.97656
22	54.2024	25.81946
23	53.87812	25.6284

表 5.4.5. 多孔質の管内の流速分布のデータ

あとがき

本論文の作成に際してご指導していただいた庄司教授には厚くお礼申し上げます。そして共同で実験をやった博士課程に在籍している姜さんには、ほとんどなにからなにまでやっていただき、本当にご迷惑をおかけしました。渡辺助手には、実験装置の設計や組み立てにおいて、色々と教えていただき、大変勉強になりました。そして、庄司研の先輩方、4年生、丸山研の方々には、酒席等で話し相手やお世話をしていただき、どうもありがとうございました。来年度も庄司研に所属する予定ですので、皆さん今後ともよろしく願いいたします。

参考文献

- [1] Creveling, H. F., dePaz, J. F., Baladi, J. Y. and Schoenhals, R. J., "Stability Characteristics of a Single-Phase Free Convection Loop," *J. Fluid Mech.*, Vol. 67, Part I, 1975, pp. 65-84.
- [2] Gorman, M. and Widmann, P. J., "Nonlinear Dynamics of a Convection Loop: A Quantitative Comparison of Experiment with Theory," *Physica* 19D, 1986, pp. 255-267.
- [3] Damerell, P. S. and Schoenhals, R. J., "Flow in a Troidal Thermosyphon with Angular Displacement of Heated and cooled Sections," *Transactions of the ASME*, Vol. 101, 1979, p.p. 672-676.
- [4] Jiang, Y. Y., Shoji, M. and Naruse, M., "Boundary Condition Effects on the Flow Stability in a Torsoidal Thermosyphon," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.23, 2002, p.p. 81-91.
- [5] Jiang, Y. Y. and Shoji, M., "Thermal Convection in a Porous Toroidal Thermosyphon," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, in print.
- [6] Kaviany, M., "Principles of Heat Transfer in Porous Media," 2nd ed., Springer, 1995.
- [7] 庄司正弘, 『伝熱工学』, 東京大学出版会, 1995.
- [8] 成瀬正史, 『環状サーモサイフォンにおける熱対流の非線形挙動』, 東京大学大学院工学系研究科修士論文, 1998.
- [9] 芝正竜, 『サーモサイフォンにおける熱対流の実験的研究』, 東京大学工学部卒業論文, 1998.

以上

1 - 8 0 ページ 完

卒業論文

平成 1 4 年 2 月 8 日提出

0 0 2 7 1 石川 桂