## <u>卒業論文</u>

## <u>サーモサイフォンにおける熱対流の実験的研究</u>

## <u>1P 94P 完</u>

## <u>平成11年2月5日提出</u>

# <u>指導教官 庄司 正弘教授</u> <u>丸山 茂夫助教授</u>

## <u>学生証番号 70196 芝 正竜</u>

## 目次

記号表

#### 第一章 序論

- 1.1 序文
- 1.2 サーモサイフォン概要
- 1.3 ローレンツの式
- 1.4 研究目的

### 第二章 実験装置

- 2.1 実験条件
- 2.2 実験装置概要
- 2.3 サイフォン部
  - 2.3.1 パイプ
  - 2.3.2 加熱部
  - 2.3.3 冷却部
  - 2.3.4 連結部
- 2.4 測定部
  - 2.4.1 熱電対
  - 2.4.2 流量計
  - 2.4.3 電流電圧測定器
  - 2.4.4 測定装置
  - 2.4.5 記録装置
- 2.5 加熱·冷却系
  - 2.5.1 ヒーター
  - 2.5.2 スライダック
  - 2.5.3 シャント

### 第三章 実験

- 3.1 実験準備
  - 3.1.1 作動流体の充填
  - 3.1.2 熱電対の記録チャンネル選択
  - 3.1.3 ペンレコーダーのチャンネル選択
- 3.2 実験手順

- 3.2.1 装置の起動
- 3.2.2 実験
- 3.2.3 装置の停止
- 3.3 装置の詳細
  - 3.3.1 結合部の着脱
  - 3.3.2 装置の回転
- 第四章 実験結果及び考察
  - 4.1 熱電対の配置
  - 4.2 シース熱電対
    - 4.2.1 実験結果
    - 4.2.2 考察
  - 4.3 連続三点裸線熱電対
    - 4.3.1 実験結果
    - 4.3.2 考察
  - 4.4 パワースペクトラム
    - 4.4.1 解析結果
    - 4.4.2 考察

第五章 結論

謝辞

参考文献

付録 熱電対検定結果

## 記号表

### Ra: レイリー数

- :熱膨張率
- g:平均流体密度
- C<sub>p</sub>:熱容量
  - :熱伝導係数
- Pr: プラントル数
  - :動粘性係数
- Nu: ヌッセルト数
  - :熱拡散
- h:熱伝達率
- B: ビオ数

第一章 序論

#### 1.1 序文

固体面から気体や液体などの流体への伝熱は流体が静止していると熱伝導によるが、流体に運動があるとそれによる熱の輸送が加わり、熱伝導とは見かけの異なった伝熱形態になる。この形態が熱伝達と呼ばれるものである。

熱伝達は流れの様相と密接に関係し、浮力による自然対流と機械的に流体を駆動する強制対流とでは大きさがかなり異なる。

ここでは自然対流伝達を考えてみる。

殆どの流体の密度は温度が高くなると小さくなる。従って、流体が局所的に加熱される と、密度の変化と重力の作用によって浮力が働き対流が発生する。これが自然対流の基本 的な構造である。

自然対流は強制対流に比べ一般に流速は小さく、従って熱伝達も大きくない。このため 保温や遮熱には適した伝熱形態ではあるが、伝熱の促進を図りたい場合には熱抵抗の原因 となる。

自然対流は、大気の流れなど気象を左右し、ごく身近に接することの出来る自然現象で ある。また、ソーラーヒーター、緊急核反応の冷却、など工学的にも極めて重要な役割を 果たしている。

そのように、自然対流は我々生活に大変密着しているものであるが、その現象はとても 複雑である。

近年、大気の流れをモデル化したローレンツの式から始って、この分野におけるカオス 解析が盛んになり、様々な興味深い研究が行われている。

取り分け、自然対流を最も単純にしたサーモサイフォンという系は、かなり研究が進ん できている。

しかし、まだそれを工学的に応用するところまではきていないというのが現状であり、 更に応用しやすい形態での具体的な研究が求められている。 1.2 サーモサイフォン概要

サーモサイフォンとは一般的に、トーラス状の容器に流体を入れ、部分的に熱を加え て、対流を引き起こす系のことである。

サーモサイフォンは、ポンプを使わずに流体の循環を促すことができるため、その研 究は、ソーラーヒーター、緊急核反応の冷却などに応用される。また、温泉、海の地殻に おける海水の循環、などの理解の助けにもなる。

加熱冷却の方法により様々な体系のサーモサイフォンが考えられるが、ここでは、ト ーラスの下半分を加熱して、上半分を冷却するサーモサイフォンを考える。(Fig2.1 参照)



Fig2.1 サーモサイフォン

(実験)

Fig2.1 に見られるようなトーラス状容器のなかに水を入れたサーモサイフォンについ て、これまでには、上、下、左、右の四ヶ所の温度を測り、チモールブルーで DC 電極周 りの青色の流線を観察して、流れの方向を調べた研究などが存在する。(Bau [1]) そこで観察された現象は以下のようなものである。

### 初期条件は全体等温

加熱度が小さい場合、熱の移動は熱伝導のみに依存し流体の動きはない。 ある加熱度を越えると流体は循環を始め、その後、流体の回転方向は保たれる。 流速は加熱度に依存し、加熱度が一定ならば流れは定常である。 さらにある加熱度を越えると、流れは定常を止めて、間欠的な逆転をともなう振動 を始め、カオス的挙動を見せる。

カオス的挙動のときの、トーラスの右端と左端の温度差の変化を時系列にとったのが Fig2.2 である。



Fig2.2 カオス的挙動

このパワースペクトラムを取ると Fig2.3 のようになる。



Fig2.3 パワースペクトラム

(数学モデル)

サーモサイフォンについて、数学的なモデリングを示す。 簡単のため、トーラス内流体の挙動を一次元で考える。また、非圧縮ニュートン流体を仮 定する。

ブシネ近似を使い、質量保存とエネルギバランスの式を立てて、それを無次元化すると以 下のようになる。

連続の式 : 
$$u = u(t)$$
 (1)  
運動量保存 :  $\dot{u} = \frac{1}{p} Rar \oint T \cos(q) dq - Pu$  (2)  
エネルギー則 :  $\dot{T} = -u \frac{\partial T}{\partial q} + b \frac{\partial^2 T}{\partial q^2} + [T_w(q,t) - T]$  (3)

これは非線型微分-積分方程式であるから、正確な解は得られない。よって、壁面と流体の温度に関してフーリエ級数展開する。

$$T_{W}(\boldsymbol{q},t) = W_{0}(t) + \sum_{n=1}^{\infty} W_{n}(t) \sin(n\boldsymbol{q}) \qquad (4)$$
$$T(\boldsymbol{q},t) = \sum_{n=1}^{\infty} S_{n}(t) \sin(n\boldsymbol{q}) + C_{n}(t) + C_{n}(t) \cos(n\boldsymbol{q}) \qquad (5)$$

(4),(5)を(1),(3)に代入し、適切な投影空間を取ると、

$$\frac{\dot{u}}{p} = c - u \qquad (6)$$

$$\dot{c} = -us - c \qquad (7)$$

$$\dot{s} - uc - s - Ra[1 + \mathbf{e}f(t)] \qquad (8)$$

=0 のとき壁面温度は時間の関数となり、(6)~(8)はローレンツの式(Lorenz [3])となる。

即ち、この系でのカオス的挙動は、ローレンツの式(Lorenz [3]) でモデリングできると 言える。 1.3 ローレンツの式

ローレンツの式(Lorenz [3])は、大気の対流(特にベナール問題)を粗い近似を使ってモ デリングしたものである。

Lorenz equations :

 $\dot{x} = s(y - x)$  (9)  $\dot{y} = rx - y - xz$  (10)  $\dot{z} = -bz + xy$  (11)

これはベナール問題には近似が粗過ぎて十分なモデルではないかも知れないが、サーモ サイフォンの問題に関してはかなり良い近似になっているのである。 1.4 研究目的

従来のサーモサイフォン研究において使用されたトーラス状容器は、熱伝導率が低く 熱容量が大きなガラス製であった。

しかし、工学的には、熱を移動させる管としては一般的に銅が利用されているのだか ら、ガラスの場合の実験成果が即応用というわけには行かないというのが現状である。

ガラスと銅とでは、熱伝導率も熱容量も格段に違う。ガラスを銅に代えることによっ て、流体が全く違った動きを見せるかもしれない。

従って本研究は、上述の研究を踏まえつつ、従来壁面がガラス製であったところを、 銅製に変えて、実験を行うものである。

## 第二章 実験装置

### 2.1 実験装置概要

実験装置は、サイフォン部、測定部、加熱・冷却部から成り立っている。Fig2.1、Fig2.2 に全体写真を、概略図をFig2.3 に示す。





Fig2.1 全体写真1

Fig2.2 全体写真 2



## Fig2.3 装置概略図

測定系の写真を Fig2.4 に、概略図を Fig2.5 に示す。



Fig2.4 測定系



Fig2.5 測定系概略図

2.2 サイフォン部

2.3.1 パイプ

銅製、内径 、トーラスの径 780mm

2.3.2 加熱部

容器下半分にゴムヒーターを巻き付ける。 Fig2.6 に示す。



Fig2.6 加熱部

2.3.3 冷却部

容器上半分に冷却水の流れるパイプで覆う。 Fig2.7 に示す。



Fig2.7 冷却部

2.3.4 連結部

アクリル製

Fig2.8 に示す。

連続三点測定用裸線熱電対三本、及びシース熱電対一本が取り付けられている。 また、水の取り替えが可能なように、外側にねじが切ってある。



Fig2.8

### 2.4 測定部

### 2.4.1 熱電対

下左右用シース熱電対

左側の熱電対については Fig2.8 参照。

### 連続三点裸線熱電対

裸線銅、コンスタンタン 右左にそれぞれ三本、計六本 左側の熱電対については Fig2.8 参照。

冷却水用シース熱電対

入り口各一本、計二本 出口一本

2.4.2 流量計

流量計仕様

右側入口用

3 l/min まで測定可能 Fig2.9 左

上側出口用

15 l/min まで測定可能 Fig2.9 右





2.4.3 電流電圧測定器

デジタルマルチメータ仕様

TakadaRiken TR DIGITAL MULUTIMETER Fig2.10 参照

2.4.4 測定装置

デジタルマルチメータ仕様

ADVANTEST R6511 DIGITAL MULTIMETER Fig2.10 参照

スキャナ仕様

TakadaRiken TR UNIVERSAL SCANNER Fig2.10 参照



Fig2.10 測定装置

## 2.4.5 記録装置

ペンレコーダー仕様

YEW TYPE3056 PEN RECORDER Fig2.11 参照。



Fig2.11 ペンレコーダー

## 2.5 加熱·冷却系

- 2.5.1 ヒーター仕様
  - Fig2.12、Fig2.13 参照。



Fig2.12 ヒーター



Fig2.13 ヒーター拡大図

## 2.5.2 スライダック仕様

RIKO SLIDE TRANS TYPE RSD-10A CAP 1KVA INPUT 100V Fig2.14 参照。



Fig2.14 スライダック

2.5.3 シャント仕様

Fig2.15 参照。



Fig2.15 シャント

第三章 実験

3.1 実験準備

3.1.1 作動流体の充填

実験を行うたびに、容器内流体が結合部から漏れ出すので、毎実験ごとに補充しなけれ ばならない。

そのために、前板を90度回転し、結合部を上に向け、蓋を外し、蒸留水を注入する。 回転に際しては、3.3.2を参照のこと。

3.1.2 熱電対の記録チャンネル選択

本装置には、容器内右、左、下の全三本、左右に等間隔に流速測定用がそれぞれ三本 ずつ、冷却水入り口右、左、出口に全三本、の計十二本の熱電対がある。

しかし、コンピュータには、熱電対六本分だけを記録するようにしているため、測定 する熱電対の選択をしなければならない。

よって、どの熱電対を何チャンネルへ振り当てるかを決め、配線する必要がある。

3.1.3 ペンレコーダーのチャンネル選択

ペンレコーダーは二台合わせて五チャンネルしか持たないため、記録する熱電対を 選択して接続しなければならない。 3.2 実験手順

#### 3.2.1 装置の起動

以下の手順に従って、装置を起動し、実験を行う。

- 1. 気温、大気圧を測定する。
- 2. 実験装置内に漏れ等、異常がないかどうかを観察する。
- 3. 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。これは三重 点が実現するまで約一時間待たねばならない。
- 4. ペンレコーダーの電源を入れ、ペンを記録用紙に下ろす。
- 5. コンピュータの電源を入れる。
- 6. 三台のデジタルマルチメータの電源を入れる。
- 7. デジタルマルチメータの電源が入ったことを確認し、スキャナの電源を入れる。
- 8. スキャナが安定するまで一時間待つ。
- 9. ペンレコーダーで、零接点が安定したことを確認する。

3.2.2 実験

- 1. コンピュータ上から、計測開始の信号を送ると共に、データの画面表示と記録を開 始する。
- 2. コンピュータ画面に表示された値を見ながら、スライダックを捻り、加熱したい電力をかける。
- 3. 二つの流量計を見ながら、左右均等に冷却水を流し始める。 電力を変化させて、温度変動を観察する。
- 3.2.3 装置の停止
- 1. 加熱を止める。
- 2. スキャナをローカルにして、停止させる。
- 3. コンピュータ上で、データ取得プログラムが停止するのを待つ。
- ペンレコーダーで作動流体の温度を見て、系が十分に冷却されたと判断されたら、 冷却水を止める。
- 5. ペンレコーダーのペンを記録用紙から上げ、電源を切る。
- 6. スキャナの電源を切る。
- 7. スキャナの電源が切れたことを確認し、デジタルマルチメータの電源を切る。

3.3 装置の詳細

3.3.1 結合部の着脱

結合部は、アクリル製、銅製の二つが用意されている。

アクリル製は主として、トレーサーを充填し内部流体を観察するときに使用する。

銅製は、容器全体を等質にしたいときに使用する。従って、実験目的によっては、こ れら二つの結合部を取り替える必要が生じる。

また、熱電対を付け替えたり、容器内部にポーラスを詰めたりするときには、結合部 を取り外さなければならない。

その場合は、以下の手順に従って、結合部の着脱を行う。

(アクリル製)

取り付け

- 1. 内径 25mm のビニールチューブを 20mm × 4 本切り出しておく。
- 2. アクリル部の上下に真鍮製のリングを各一個入れる。
- 3. 冷却部のベークライト支持を外し、針金などで倒れない程度に押さえておく。
- 4. 取り付け部上下にホースバンドを予め入れておく。
- 5. 切り出されたビニールチューブを水で十分濡らし、アクリル部に嵌め込む。
- 6. アクリル部をビニールチューブでしっかりと銅管に嵌める。
- 7. 両側取り付けが完了したら、ベークライトで装置を固定する。
- 8. 銅管とアクリル部に隙間がないことを確認したら、ホースバンドをきつく締める。 取り外し
- 1. ベークライト支持を外す。
- 2. ビニールチューブをカッターナイフで切断する。

(銅製)

取り付け

- 1. ベークライト支持を外す。
- 結合部を銅管にカチッと音がするまで挿入する。銅管と結合部が中途半端に点接触していると装置の一体性がなくなるので、銅製のものを取り付ける意味を失うので注意を要する。
- 3. ベークライトで装置を固定する。
- 水漏れを防ぐために、銅管と結合部の間の隙間に、シリコン系接着剤を封入する。
   取り外し
- 1. ベークライト支持を外す。
- 2. 結合部を引き抜く。

3.3.2 装置の回転

装置の回転を行わなければならないときが屡々あるが、その場合は、以下の手順に従って行う。

- 1. スライダックからヒーターを外す。
- 2. 熱電対が絡まぬよう針金などで纏めておく。
- 3. 踏み台の上に冷却水出口用の流速計をホースが捩じれないように乗せる。
- 4. 表板と裏板とを止めている四本のボルトを外し、表板を時計周りに九十度回転する。

## 第四章 実験結果及び考察

4.1 熱電対の配置

熱電対の配置図を Fig4.1 に示す。

以後、この図に従って、それぞれの熱電対を呼ぶことにする。



Fig4.1 熱電対の配置

4.2 シース熱電対

#### 4.2.1 実験結果

熱電対を左、右、下へと設置して、その温度変化を時系列に取ったものを、以下に示す。

- 5W: Fig4.2参照安定すると殆ど温度変動がなくなる。 グラフには計測し得る温度変化の最小区分が見えている。 下の温度が、左右の温度に挟まれている。
- 20W: Fig4.3参照

殆ど温度変動はない。

30W: ex1... Fig4.4 参照

下の温度が、左右よりも大きいという不安定な状態。 大抵は直ぐに ex2 の状態に落ち着く。

ex2... Fig4.5 参照

下の温度が左右の温度に挟まれている。通常の安定な状態。 この状態になるともう戻ることはないと考えられる。

#### 40W: Fig4.6参照

殆ど温度変化は見られないが、安定後も僅かに振動している。 Fig4.7 に、時間を引き延ばしたものを示す。 振動に周期性などの特徴はないと思われる。 50W: Fig4.8参照

この実験結果は余り頻繁には実現しないものであり、同じ 50W の実験でも、Fig4.7 の 40W や Fig4.9 の 55W のような結果が得られることが多い。

過渡現象では、左右の温度の逆転が見られるのが注目に値する。このように過渡 現象において温度の逆転が起こることは屡々である。

また、安定後の温度変化に明確な周期性が存在する。

右、下、左の温度変化の間に位相差が見られ、それは容器全体でのマクロな対流 に由来するものだと予想される。

しかし、サンプリング周波数が小さいため、正確な相互相関を取ることは出来な かった。

左右下それぞれの温度変化の周波数解析を行った。これもマクロな対流による振動である可能性がある。

パワースペクトラムを Fig4.35 、Fig4.36 に示すが、左右下全て同じ周波数を持っている。

55W: Fig4.9参照

高温になっている左側で、大きな纏まりの振動がはっきりと観察される。 また下にも時折現れる乱れに周期が存在する。 低温の右側には、周期が見られない。

#### 60W: Fig4.10 参照

高温の左、低温の右ともに、周期性が見られる。 また、下の乱れにも周期が存在する。 この周期に関係が見られるので、 周波数解析を行った。 パワースペクトラムを Fig37、Fig4.38、Fig4.39 に示す。 左右下全て同じ周波数を出している。

65₩: Fig4.11 参照

過渡現象に左右の温度の逆転が見られる。

75W: Fig4.12参照

高温の右、低温の左ともに、激しく振動をしている。 下にも細かい乱れが生じ始めている。 時間を引き延ばした図を Fig4.13 に示す。 右左下、どれも周期性がある。 パワースペクトラムを Fig4.40 に示す。 全て同じ周波数を持っている。 100W: Fig4.14 参照

加熱度100W以上に典型的な結果である。 左右に加えて下までが激しい振動を起こしている。 時間を引き伸ばしてFig4.15、Fig4.16に示す。 下の温度変化に明らかに周期性が見られる。

200W: Fig4.17 参照 100Wの結果とほぼ同じであり、一つの安定系であるということが言えるだろう。 Fig4.18 に時間を引き伸ばした図を示す。 高温の右の温度変化と、下の温度変化に、周期性が存在する。

### 300W: Fig4.19 参照

三点とも激しく震動している。 Fig4.20に拡大図を示す。 右左下ともに周期があることが分かる。

- 500W: Fig4.21 参照 激しい振動。 Fig4.22 に拡大図を示す。
- 800W : Fig4.23 参照 Fig4.24 に拡大図を示す。
- 1000W: Fig4.25 参照 拡大図は Fig4.26。

4.2.2 考察

加熱 75W 付近までは.....

何通りかの結果が得られた。

30Wにおける Fig4.4 のように、下が最も高温を保ちながら安定する状態

50Wにおける Fig4.8のように、下が最も高温を保ちながら振動をする状態

一番頻度の高いものだが、右の温度と左の温度に、下の温度が挟まれる状態

これらのうちで、の状態は、長時間安定の後、ふとした弾みでの状態へと行してしまうことが多い。

の状態が最も安定な状態であろう。

そしての状態では、対流がもう始まっていると考えられ、流体中にトレーサーを注入 し可視化した観察によれば、対流が起こっていることはほぼ確実と言っても良いだろう。

加熱が 75\\ を超えると……

どれも 75W 以下の のように、左の温度と右の温度との間に下の温度が挟まれる状態となり、しかも激しく振動を始めるようになる。

これは明らかに対流が起こっており、流体は、右側の温度が高ければ反時計周り、左側 の温度が高ければ時計周りに回っているのである。

トレーサーによる流体運動の可視化によって、これは裏付けられた。

この回転方向は、浮力を考えた理論と一致している。

4.3 三点連続裸線熱電対

4.3.1 実験結果

右側と左側の両方にそれぞれ、裸線熱電対を 10mm 間隔で三点ずつ設置して温度を測 定した。その結果を以下に示す。

40W: Fig4.27 参照 振動が弱い。

50W: Fig4.28参照

60W: Fig4.29、Fig4.30 参照 位相差がはっきりと出ている。 サンプリング周波数が小さいため、正確な相互相関は求まらない。 しかし、目視によれば、約 10 mm/sec で回転していると算出される。 これは、約三分に一周回転する計算となる。

70W: Fig4.31 参照 正確な値は求まらないが、目算によれば、60Wの時よりも少し早めに回転してい るらしい。

100W: Fig4.32 参照

200W: Fig4.33 参照

400W: Fig4.34 参照

4.3.2 考察

加熱度の増加と周波数とには、目立った関係が見られなかった。 何れの加熱度でも、約10mm/sec付近で回転していると算出される。

流体は、約三分に一周循環しているということになる。

これはトレーサーによる流体の可視化を、高速ビデオで捕らえた参考映像に、概ね-致しているので十分信憑性がある。
## 4.4 パワースペクトラム

## 4.4.1 解析結果

幾つかの特徴的な現象についてパワースペクトラムを求めた。 結果は以下の通りである。

## 50W: Fig4.35 参照

Fig4.36 に拡大を示す。

0.006 Hz にピークがある。

これは周期 167 秒ということであり、流体が一巡するのに 167 秒(約三分)かかると 考えれば、他の考察と良く一致する。

## 60W: Fig4.37 参照

Fig4.38、Fig4.39 に拡大を示す。 0.005 Hz にピークがある。 これは周期 200 秒ということであり、約三分で循環していると考えられる。

75W: Fig4.40 参照

0.005 Hz 付近にピークがあるようだ。

4.4.2 考察

パワースペクトラムを取った結果、約三分で一周しているという他の実験の結果が 裏付けられた。









30W-2








































































# 第五章 結論

謝辞

本論文作成に際しご指導賜りました庄司正弘教授、丸山茂夫助教授に感謝致します。ま た、研究会において貴重なご助言を頂きました横谷助手、井上助手に厚くお礼申し上げま す。渡辺技官には実験に際し、何から何までご教示願いました。上野先輩、賀先輩、高木 先輩、小林先輩、李先輩、阿部先輩、伊藤先輩という研究室の諸先輩方のご助力には、感 謝の念に堪えません。研究室の同僚である石黒君、吉井君には、大いに啓発を受けました。 最後に、実験をともにした修士二年の成瀬さんには、多大なご迷惑をお掛けしましたこと を深くお詫びせねばなりません。どうもありがとうございました。

#### 参考文献

[1]Haim H.Bau and YuZou Wang, Chaos: A Heat Transfer Perspective, Annual Review of Heat Transfer

[2]P.Wealander, On the Oscillatory Instability of Differentially Heated Fluid loops, J.Fluid Mech. ,vol29,pp.17-30,1967.

[3]Edward N Lorenz, Deterministic Nonperiodic Flow, J Atmospheric Sci. ,vol.20,pp.130-141,1963.

[4]庄司正弘, 伝熱工学, 東京大学出版会

装置を組み上げる前に計六本の熱電対に対し検定を行い、電圧と温度の換算により精密 さを与える。結果は以下の通り。

heat1

Eq: %0i\*X^i (i=0-9)

%00 = -1.8479980e+00 %01 = 3.9930149e+01 %02 = -4.1328144e+01 %03 = 5.9340251e+01 %04 = -4.9024381e+01 %05 = 2.4452760e+01 %06 = -7.5116225e+00 %07 = 1.3909358e+00 %08 = -1.4243317e-01 %09 = 6.1961649e-03

points = 16

<DY^2> = 3.5318749e-01

 $|\mathbf{r}|$  or  $|\mathbf{R}| = 9.9993970e-01$ 

Eq: %0i\*X^i (i=0-9)

%00 = -1.9461155e+00 %01 = 4.1550069e+01 %02 = -4.6750051e+01 %03 = 6.8008546e+01 %04 = -5.6966094e+01 %05 = 2.8881059e+01 %06 = -9.0324736e+00 %07 = 1.7042503e+00 %08 = -1.7787750e-01 %09 = 7.8865420e-03

points = 16

<DY^2> = 6.9269637e-01

 $|\mathbf{r}|$  or  $|\mathbf{R}| = 9.9976801e-01$ 

Eq: %0i\*X^i (i=0-9)

%00 = -1.5690623e+00 %01 = 3.8211825e+01 %02 = -3.4824079e+01 %03 = 4.7996205e+01 %04 = -3.8715110e+01 %05 = 1.9086157e+01 %06 = -5.8486854e+00 %07 = 1.0876685e+00 %08 = -1.1239379e-01 %09 = 4.9500870e-03

points = 16

<DY^2> = 4.6321706e-01

|r| or |R| = 9.9989627e-01

Eq: %0i\*X^i (i=0-9)

%00 = -1.3074252e+00 %01 = 3.8909362e+01 %02 = -3.8266923e+01 %03 = 5.2785700e+01 %04 = -4.2260029e+01 %05 = 2.0595215e+01 %06 = -6.2184488e+00 %07 = 1.1362574e+00 %08 = -1.1510423e-01 %09 = 4.9611412e-03

points = 16

<DY^2> = 6.0175514e-01

 $|\mathbf{r}|$  or  $|\mathbf{R}| = 9.9982493e-01$ 

Eq: %0i\*X^i (i=0-9)

%00 = -1.2264890e+00 %01 = 3.8869520e+01 %02 = -4.0422917e+01 %03 = 5.8511970e+01 %04 = -4.8850561e+01 %05 = 2.4757864e+01 %06 = -7.7569956e+00 %07 = 1.4673941e+00 %08 = -1.5350239e-01 %09 = 6.8139247e-03

points = 16

<DY^2> = 7.3516569e-01

|r| or |R| = 9.9973869e-01

Eq: %0i\*X^i (i=0-9)

%00 = -1.6018137e+00 %01 = 4.2732137e+01 %02 = -5.3046039e+01 %03 = 7.7410200e+01 %04 = -6.4293043e+01 %05 = 3.2258913e+01 %06 = -9.9905537e+00 %07 = 1.8686273e+00 %08 = -1.9351417e-01 %09 = 8.5181228e-03

points = 16

<DY^2> = 1.4158795e-01

|r| or |R| = 9.9999031e-01

結論

- 容器の物性によって、内部流体の挙動が変わることが分かった。
  従来のガラスによる実験と、銅による当実験の結果に違いが見られたのである。
  これは、銅の熱伝導率が極めて高いということに関係があると思われる。
  工業的応用を考えると、熱の輸送には、銅管が用いられることが多い。
  よって工業的には、従来のガラスによる実験結果よりも、本実験の結果がより重要なものとなるはずである。
- 銅容器の場合、内部流体は一度回転を始めると、循環の向きが逆転することはなく、 一定方向に流れ続ける。
   しかし、流体には温度振動があり、ときには間欠的な温度振動も現われる。













### <u>1P 94P 完</u>

<u>卒業論文</u>

### <u>平成11年2月5日</u>

## <u>学生証番号 70196 芝 正竜</u>