

# レイノルズ乱層流実験装置を用いた 乱層流に関する研究

ダワァ ガンバット\*・坂口 暢也\*\*・ファジルル シャ\*\*\*

## Flow Regimes Study by Using Reynolds Number Experimental Apparatus

Ganbat Davaa\*, Nobuya Sakaguchi\*\* and Shah Fadzirul\*\*\*

### Abstract

Many of the flows occurring around us can be classified into turbulent flows. For laminar flows, the flow spatial structures are relatively simple and their calculations tend to be easier than for the turbulent flows. It is rather difficult to calculate the turbulent flows. Moreover understanding the movement mechanisms for each spatial structure of turbulent flows is not a simple matter. In this work, by using a Reynolds number experimental apparatus, we observed the stream lines formed inside the experimental pipe during quantitatively studying the relation between the Reynolds numbers and the flow regimes of laminar and turbulent. In addition, the fluid velocity distributions have been analyzed by our carrying out simulations of the flows established during the experimental studies with CFD Phoenics, the heat fluid analysis software.

### 1. 緒言

流れは、その運動状態の複雑さによって、大きく層流と乱流とに区別することができる。流体の分子が流れの方向に規則正しく一定の線を成して流れるとき、この流れを層流と言う。層流は流体の動粘度が比較的大きいときか、狭い隙間や細い管内を極めて遅く流れるときに生じやすい。また、流体の分子が入り乱れる不規則な流れを乱流と言う。乱流は、流体の動粘度が比較的小さいときか、広い流路や太い管内を流れるとき、および流速の大きいときに生じやすい<sup>[1]</sup>。

レイノルズは、水槽内のガラス管内を流れる水に色素液を注入し、管内を流れる水の流れを観測するという実験を行った。この実験により、レイノルズは管内の流れが層流か、乱流であるかを求めることができるレイノルズ数 ( $Re$ ) を見出した<sup>[2]</sup>。

円管内では  $Re < 2300$  ならば層流、 $4000 < Re$  ならば乱流となる。この間の  $2300 \leq Re \leq 4000$  の範囲では判別は不明瞭であって、遷移域と呼ばれ、層流から乱流に変化するときの  $Re$  を臨界レイノルズ数という。これはレイノルズによる先駆的な実験以来よく知られている<sup>[3]</sup>。

我々の身のまわりに生じている流れの多くは、乱流である。乱流の不規則で不安定な運動は、効率よく運動量や熱を輸送することができる。しかし、乱流による圧力損失は大きく、地球環境保護を目的とした省エネルギーを考慮すると、流れを乱流に遷移させず層流状態を維持できることが望ましい。

層流では流れの空間構造が比較的単純で容易に計算することができるが、乱流ではそれが複雑で、個々の流れの構造で生じている運動のメカニズムを理解することは容易ではない。

この点から、本研究ではレイノルズ乱層流実験装置を用いて、管内で見られる流線を観測するとともに、層流、乱流などの現象とレイノルズ数との関係について定量的に解析した。

さらに、熱流体解析ソフトウェア (CFD PHOENICS) によって実験と同じ条件でシミュレーションを行い、速度分布を解析した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験装置

本実験では東京メーター株式会社が製造したレイノルズ乱層流実験装置RNM-15-900 (Fig.1) を用い

\* 電子機械工学科

\*\* 電子機械工学科 5 年生 (現: 長岡技術科学大学 工学部)

\*\*\* 電子機械工学科 5 年生 (現: 秋田大学 工学資源学部)

た<sup>[4]</sup>。水槽の大きさは幅150mm×長さ900mm×高さ250mm、観測管はガラス円管（管内内径は15mm）を使用し実験を行った。



Fig.1 レイノルズ乱層流実験装置

この実験装置は、水槽の中に観測管があり、この観測管で流れの状態を観測することができる。また、流量調節弁を開くことにより、観測管内に水が流れ、横の目盛りを使って流量を設定する。観測管内に空気がある場合、上部コックを開け、空気を排除する。色素液容器に色素液を入れると、チューブを通して、観測管内に流入される。排出口より、水が排出される。

## 2. 2 実験条件

今回の実験では、流量を0 [L/H] ~ 200 [L/H] までの間、20 [L/H] ずつ変化させ、以下の条件で実験を行った。

- 測定時間  $t$  を120秒として、水の温度  $T$  が10℃, 25℃, 30℃の場合。
- 水の温度  $T$  を25℃として、測定時間  $t$  が60秒, 120秒, 180秒の場合。

## 2. 3 実験方法

最初に水槽に水を溜める。このときに、水の温度  $T$  も測定しておく。流量調節弁を開き流量を設定する。観測管内に空気がある場合は観測管出口の上部コックを開けて排除する。色素液を観測管内に流入させ、流れの状態を観測する。流量調節弁を徐々に操作し、流量を変化させて、流れの状態を観測する。測定時間  $t$  を設定し、排出口より排出する水をバケツで受け、水の質量  $M$  [kg] を量る。排出された水の質量  $M$  と、測定時間  $t$ 、密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] を式(1)に代入し体積流量  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] を求める。

体積流量  $Q$  は、水の重量  $G$  [kgf] と比重  $\gamma$  [kgf/m<sup>3</sup>]、測定時間  $t$  で表されるが、次のように式

変形することができる。

$$Q = \frac{G}{\gamma t} = \frac{Mg}{\rho g t} = \frac{M}{\rho t} \quad (1)$$

式(1)より求めた体積流量  $Q$ 、円管の内径  $d$  [m] を代入し平均流速  $v$  [m/s] を求める。

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}d^2} \quad (2)$$

最後に、レイノルズ数  $Re$  を求める。レイノルズ数とは無次元数であり、慣性力と粘性力の比で表される。式で表すと、流速  $U$  [m/s]、代表長さ  $L$  [m]、動粘性係数  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] を用いて、次のように表される。

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

動粘性係数  $\nu$  は、粘性係数  $\mu$  [Pa·s] と、密度  $\rho$  で表される。

ここで、代表長さ  $L$  は、最も流れに影響のあると考えられる長さを選択する。そのため、円管の流れでは、粘性の影響は円管の壁からの距離に強く影響されるため、代表長さ  $L$  は管内の内径  $d$  を用いる。流速  $U$  においても、管内の流れは一定ではないため、平均流速  $v$  を用いる。

そのため、式(3)は次のように式変形することができる。

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (5)$$

これらの式を用いてレイノルズ数を求め、実験での流線と計算結果を比較する。

## 3. 実験結果

### 3. 1 層流・乱流

層流、乱流の流線の形状をFig.2, Fig.3に示す。層流の特徴として、流体の分子の流れが規則正しく流れており、管内の速度分布は放物線状である。

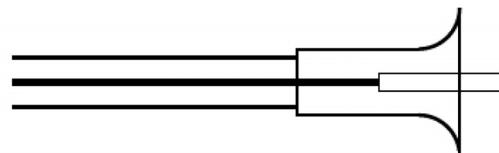


Fig.2 層流の流線

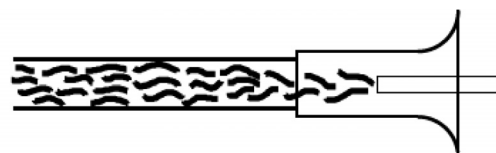


Fig.3 乱流の流線

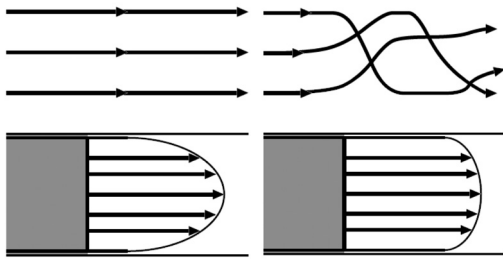


Fig.4 層流・乱流の特徴

乱流の特徴として、流体の分子が入り乱れ不規則に流れており、管内の速度分布はフラットに近い形状である。それぞれの特徴を、Fig.4に示す。

### 3. 2 10℃の流れの状態

測定時間120秒、水の温度10℃の条件で実験を行った場合の流線は、流量  $Q$  が80 [L/H] まで層流であった (Fig.5参照)。流量が100 [L/H] になったとき、横から撮影したFig.6では層流に見えるが、上から撮影したFig.7では流れが乱れて見える。これは流れが、層流から乱流へ移行する遷移域に入ったため、層流と乱流が混在した状態になる。Fig.6とFig.7が違って見えるのは、そのためである。流量が140 [L/H] まで遷移域は続き (Fig.8参照)、流量が160 [L/H] から乱流になっている (Fig.9参照)。

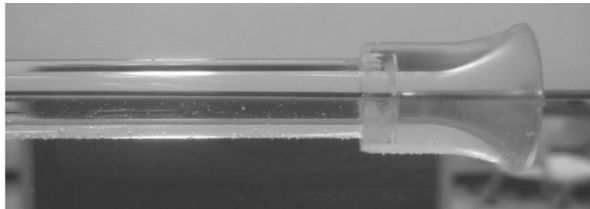


Fig.5  $Q=80$  [L/H] の流線：層流

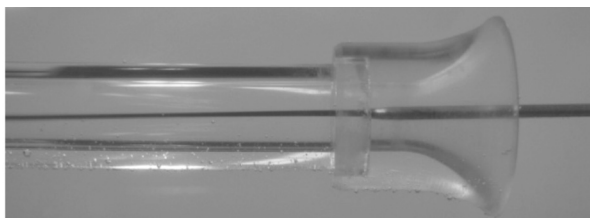


Fig.6  $Q=100$  [L/H] の流線：遷移域 (横から撮影)

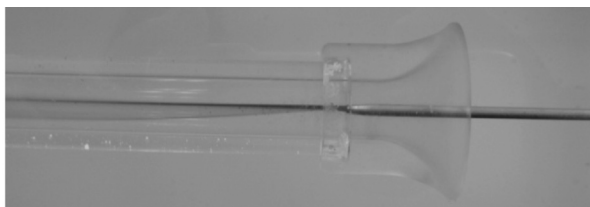


Fig.7  $Q=100$  [L/H] の流線：遷移域 (上から撮影)

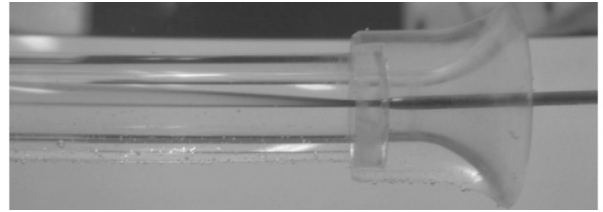


Fig.8  $Q=140$  [L/H] の流線：遷移域

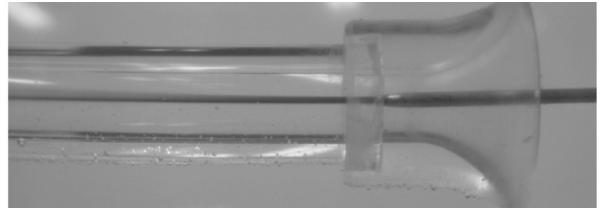


Fig.9  $Q=160$  [L/H] の流線：乱流

### 3. 3 30℃の流れの状態

測定時間120秒、水の温度30℃の条件で実験を行った場合の流線は、流量  $Q$  が80 [L/H] になったとき層流だが、流れが少し不安定になっている (Fig.10参照)。

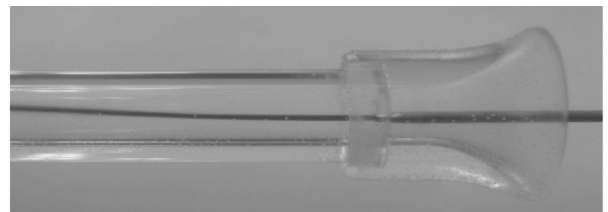


Fig.10  $Q=80$  [L/H] の流線：層流

そして、流量が100 [L/H] になったとき完全に遷移域に入っている (Fig.11参照)。流量が140 [L/H] から乱流になっている (Fig.12参照)。

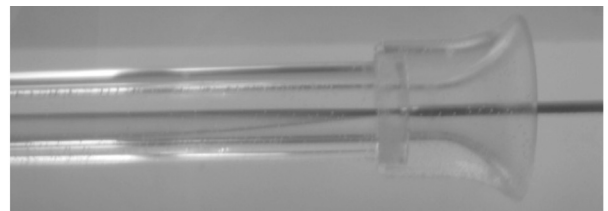


Fig.11  $Q=100$  [L/H] の流線：遷移域

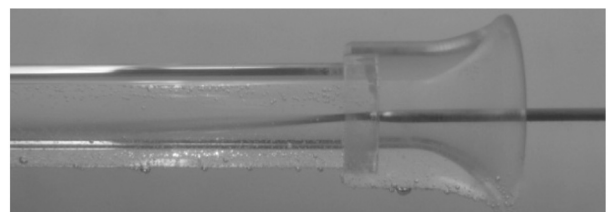


Fig.12  $Q=140$  [L/H] の流線：乱流

### 3. 4 排出される水の質量

横軸を流量  $Q$  [L/H], 縦軸に水の質量  $M$  [kg] をとったグラフをFig.13, Fig.14に示す。

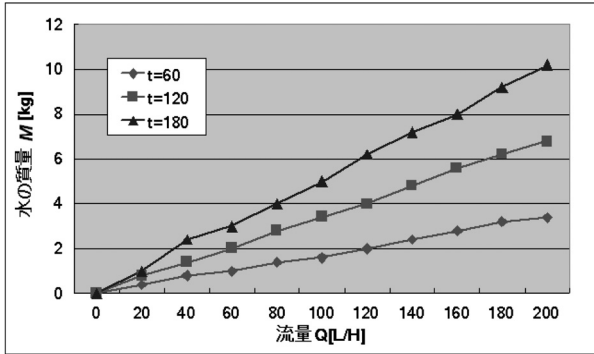


Fig.13 流量と水の質量に対する時間変化 ( $T=25^{\circ}\text{C}$ )

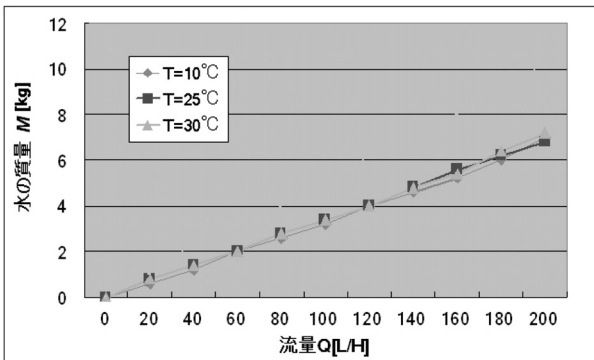


Fig.14 流量と水の質量に対する温度変化 ( $t=120$ 秒)

Fig.13は水の温度  $T$  が $25^{\circ}\text{C}$  のとき, 測定時間  $t$  を60秒, 120秒, 180秒とし, 流量  $Q$  を20 [L/H] ずつ変化させていったときに排出される水の質量  $M$  を, グラフに示したものである。測定時間  $t$  を変えて実験を行った場合, 水の質量は時間が長くなることにより, 質量も多く排出された。この結果より, 測定時間と水の質量は比例していることがわかる。

Fig.14は測定時間  $t$  を120秒とし, 流量  $Q$  を20 [L/H] ずつ変化させていったときに排出される水の質量  $M$  を温度別に示したグラフである。一方, 水の温度  $T$  を変えて実験を行ったが, 水の質量の差にあまり変化は見られなかった。

### 3. 5 体積流量

横軸を流量  $Q$  [L/H], 縦軸に体積流量  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] のグラフをFig.15, Fig.16に示す。

縦軸の体積流量  $Q$  は式 (1) から求めることができ, 今回の実験では水で行ったため, 水の密度  $\rho$  は約  $1000$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] である。

Fig.15は水の温度  $T$  が $25^{\circ}\text{C}$  のとき, 測定時間  $t$  を

60秒, 120秒, 180秒とし, 流量を20 [L/H] ずつ変化させていったときの体積流量のグラフである。Fig.16は測定時間  $t$  を120秒とし, 流量を20 [L/H] ずつ変化させていったときの体積流量を温度別に示したグラフである。測定時間  $t$ , 水の温度  $T$  を変えて実験を行ったが, 体積流量にあまり変化は見られなかった。

測定時間  $t$  を変えた場合, 水の質量  $M$  は変化した, Fig.13より, 測定時間と水の質量は比例しているため, 式 (1) より, 体積流量に変化は見られない。

水の温度  $T$  を変えた場合については, Fig.14より, 水の質量  $M$  にあまり変化がないため, 式 (1) より, 体積流量  $Q$  があまり変わらないことがわかる。

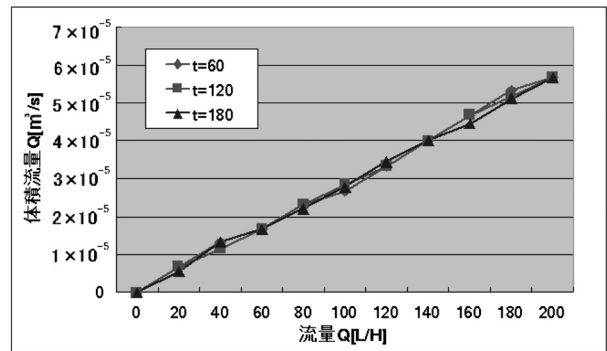


Fig.15 流量と体積流量に対する時間変化 ( $T=25^{\circ}\text{C}$ )

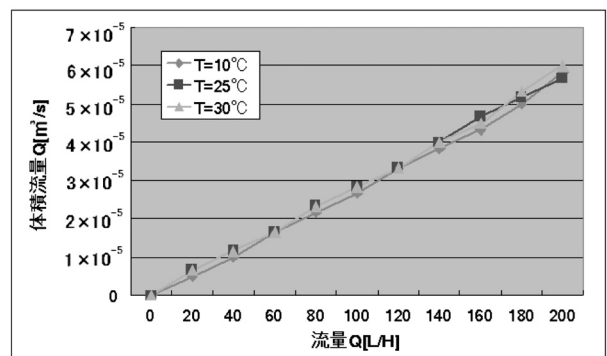


Fig.16 流量と体積流量に対する温度変化 ( $t=120$ 秒)

### 3. 6 平均流速

横軸を流量  $Q$  [L/H], 縦軸に平均流速  $v$  [m/s] のグラフをFig.17, Fig.18に示す。

縦軸の平均流速  $v$  は式 (2) から求めることができる。今回の実験では, 円管の内径  $d=15\text{mm}$  で行った。

Fig.17は水の温度  $T$  が $25^{\circ}\text{C}$  のとき, 測定時間  $t$  を60秒, 120秒, 180秒とし, 流量  $Q$  を20 [L/H] ずつ変化させていったときの平均流速  $v$  のグラフである。

Fig.18は測定時間  $t$  を120秒とし、流量  $Q$  を20 [L/H] ずつ変化させていったときの平均流速  $v$  を温度別に示したグラフである。

結果として、体積流量  $Q$  の変化は、測定時間  $t$ 、水の温度  $T$  が変わってもあまり変化しないため、式 (2) より平均流速  $v$  もあまり変化しないことがわかる。

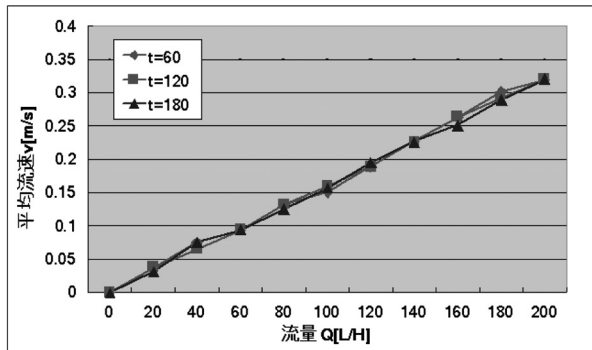


Fig.17 流量と平均流速に対する時間変化 ( $T=25^{\circ}\text{C}$ )

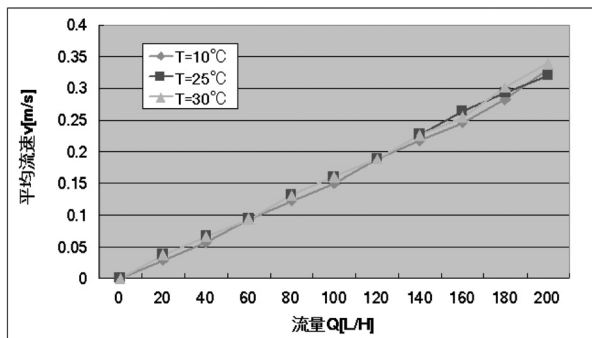


Fig.18 流量と平均流速に対する温度変化 ( $t=120$ 秒)

### 3. 7 レイノルズ数

最後に、横軸に流量  $Q$  [L/H]、縦軸にレイノルズ数  $Re$  をとったグラフをFig.19, Fig.20に示す。

縦軸のレイノルズ数  $Re$  は式 (5) から求めることができる。

Fig.19は、水の温度  $T$  が $25^{\circ}\text{C}$  のとき、測定時間  $t$  を60秒、120秒、180秒とし、流量  $Q$  を20 [L/H] ずつ変化させていったときのレイノルズ数  $Re$  のグラフである。Fig.20は、測定時間  $t$  を120秒とし、流量  $Q$  を20 [L/H] ずつ変化させていったときのレイノルズ数  $Re$  のグラフである。

測定時間  $t$  を変えた場合、水の温度  $T$  が $25^{\circ}\text{C}$  で一定なため、水の動粘性係数  $\nu$  は変化せず一定である。そのため平均流速  $v$  の変化によってレイノルズ数  $Re$  は変化することになる。結果として、測定時間  $t$  を変えた場合、水の質量  $M$  は変化するが、

Fig.13より、測定時間  $t$  と水の質量  $M$  は比例しているため、体積流量  $Q$  には変化は見られない。また、平均流速  $v$  もあまり変化しない。そのため、測定時間  $t$  を変えても、レイノルズ数  $Re$  にあまり変化が見られなかった。

水の温度  $T$  を変えた場合、Fig.14より、水の質量  $M$  にあまり変化がないため、体積流量  $Q$ 、平均流速  $v$  もあまり変化しないが、水の温度  $T$  が変わることにより、水の粘性係数  $\mu$  が変化し、式 (4) より水の動粘性係数  $\nu$  も変化する。式 (5) より、水の動粘性係数  $\nu$  が変化すれば、レイノルズ数  $Re$  も変化する。そのため、水の温度  $T$  が変わるとレイノルズ数  $Re$  も変化した。

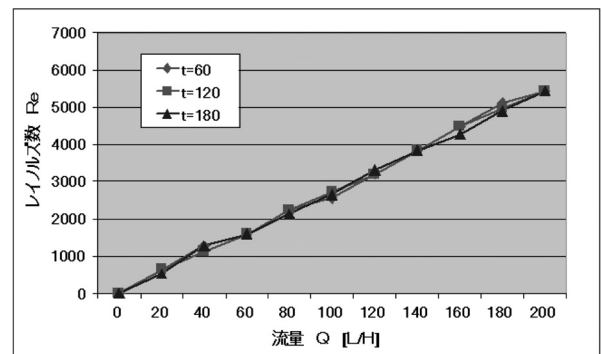


Fig.19 流量とレイノルズ数に対する時間変化 ( $T=25^{\circ}\text{C}$ )

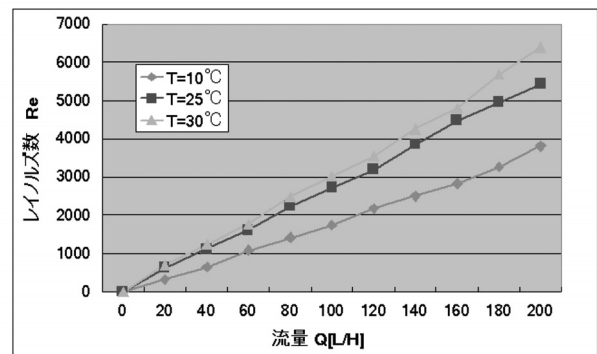


Fig.20 流量とレイノルズ数に対する温度変化 ( $t=120$ 秒)

## 4. シミュレーション

### 4. 1 PHOENICS

今回のシミュレーションではPHOENICSソフトを使用して、シミュレーションを行った。PHOENICSとは、有限体積法により質量、運動量、エネルギー等の保存則を定常あるいは非定常で1~3次元空間において解く汎用の熱流体解析ソフトで、その名前

はParabolic, Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series の頭文字から来ている。Parabolic は放物形で空間座標に関して一方向を持ち、Hyperbolic は双曲形で特性曲線上に一方向性を持つもので、Elliptic は楕円形で循環流を持つものを表す。

#### 4. 2 シミュレーションモデル

シミュレーションは実験と同じような条件で解析を行った。シミュレーションモデルとしてレイノルズ乱層流実験装置モデルRNM-15-900を使用した。また、条件を領域は900mm×150mm×250mm、円管の内径  $d=15\text{mm}$ 、円管の長さ  $L=750\text{mm}$ とした。実験と同じように温度25℃で層流の場合、流量  $Q=60\text{ [L/H]}$  と乱流の場合、流量  $Q=160\text{ [L/H]}$  を設定した。このシミュレーション条件で、層流と乱流の速度分布を調べる。Fig.21は実際に用いたシミュレーションモデルとなる。

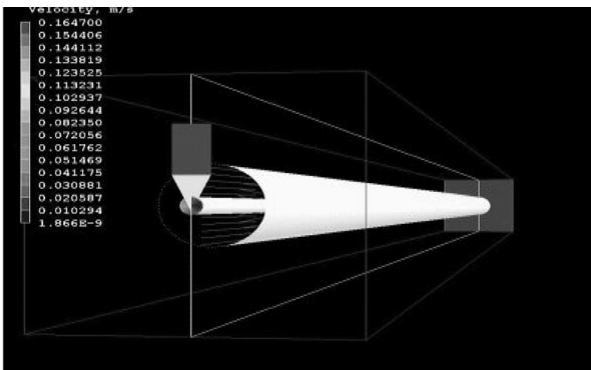


Fig.21 解析モデル

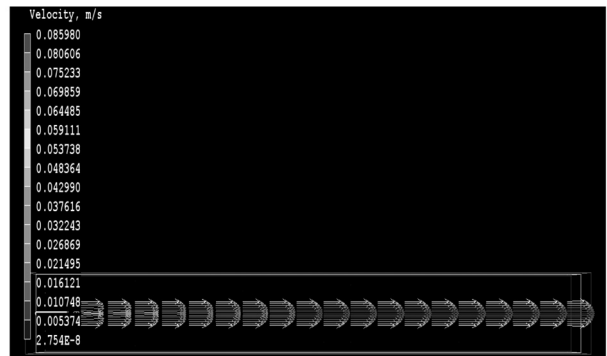


Fig.22 層流の速度分布



Fig.23 層流の速度分布 (拡大)

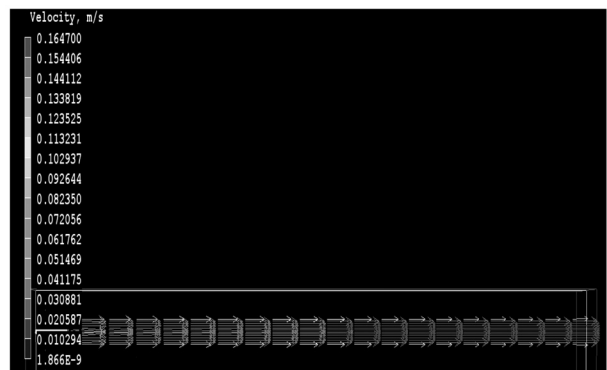


Fig.24 乱流の速度分布



Fig.25 乱流の速度分布 (拡大)

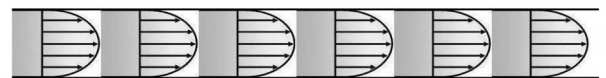


Fig.26 実際の層流の速度分布

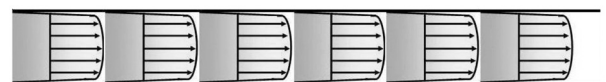


Fig.27 実際の乱流の速度分布

#### 4. 3 シミュレーション結果

Fig.22～Fig.27は速度分布の解析結果を示す。Fig.22とFig.23より、速度分布が放物線状で、円管の中心が最も速く、外側に広がるにつれてどんどん遅くなっていることが分かる。よってこの速度分布が層流の速度分布であることが分かる。このときのレイノルズ数は約1600であった。一方、Fig.24とFig.25では、速度分布がフラットに近い形状で、大部分が平均速度で放出され、均等に落下していることが分かる。よってこの速度分布は乱流の速度分布であることが分かる。このときのレイノルズ数は約4800であった。Fig.26とFig.27は、実際の層流と乱流の速度分布である。解析で得た速度分布は実際の速度分布と比較してもほぼ一致していることが分かる。

## 5. 結言

測定時間  $t$  を変えた場合、水の質量  $M$  は変化するが、測定時間  $t$  と水の質量  $M$  は比例しているため、体積流量  $Q$  に変化は見られない。また、今回の実験では断面積  $A$  は一定であるため、平均流速  $v$  もあまり変化しない。そのため、測定時間  $t$  を変えても、レイノルズ数  $Re$  にあまり変化が見られなかった。水の温度  $T$  を変えた場合は、水の質量  $M$  にあまり変化がないため、体積流量  $Q$ 、平均流速  $v$  もあまり変化しないが、水の粘性係数  $\mu$  は変化し、水の動粘性係数  $\nu$  が変化する。そのため、水の温度  $T$  が変わるとレイノルズ数  $Re$  も変化した。

実験で確認した流線を計算結果と比較した場合、 $10^{\circ}\text{C}$  の場合では一致しなかった。実験で確認した流線では、流量  $Q$  が  $80\text{ [L/H]}$  までが層流であり、流量  $Q$  が  $100\text{ [L/H]}$  から遷移域となっている。流量  $Q$  が  $140\text{ [L/H]}$  まで遷移域は続き、流量  $Q$  が  $160\text{ [L/H]}$  から乱流になっている。ところが計算結果では、流量  $Q$  が約  $120\text{ [L/H]}$  から遷移域に入っており、流量  $Q$  が  $200\text{ [L/H]}$  になっても乱流域には入っておらず、まだ遷移域のままである。これは、実験の最中に水の温度  $T$  が上昇し、水の動粘性係数  $\nu$  が変化したためであると考えられる。

$30^{\circ}\text{C}$  の場合では、実験で確認した流線と計算結果はほぼ一致している。実験で確認した流線では、流量  $Q$  が  $80\text{ [L/H]}$  になったとき流れが不安定になり、流量  $Q$  が  $100\text{ [L/H]}$  になったとき遷移域に入り、流量  $Q$  が  $140\text{ [L/H]}$  になったときから乱流になっている。計算結果でも、流量  $Q$  が  $80\text{ [L/H]}$  から遷移域に入り、流量  $Q$  が  $140\text{ [L/H]}$  から乱流になっている。シミュレーションを行うことによって層流、乱流の速度分布を確認することができた。

## 参考文献

- [1] 森田泰司：流体の基礎と応用 (1997), 42, 東京電機大学出版局
- [2] 笠原英司：現代水力学 (1983), 40, オーム社
- [3] 主査 石線良三：流体力学テキスト (2005), 19-20, JSME テキストシリーズ出版分科会
- [4] レイノルズ乱層流実験装置取扱説明書 (1988), 4-6, 東京メーター株式会社
- [5] 生井武文, 井上雅弘：粘性流体の力学 (1978), 理工学社
- [6] 岡本純三, 中山景次, 佐藤昌夫：トライポロジー入門, 摩擦・摩耗・の基礎 (1991), 幸書房
- [7] 乱流モデル (2007), 12.1-12.45, 熱流体解析ソフトウェア PHOENICS 日本語総合マニュアル, CHAM Japan

- [8] H. Tennekes, J. L. Lumley : A first course in turbulence (1972), 6th Edition, MIT Press
- [9] J. O. Hinze : Turbulence (1975), 2nd Edition, McGraw Hill, New York
- [10] P. Bradshaw : Turbulence, Topic in Applied Physics, Vol.12 (1978) Springer, Verlag
- [11] W. Rodi : Turbulence models and their applications in hydraulics- "A state of the art review" (1980) Book publication of IAHR, Delft, The Netherland
- [12] Introduction to the modeling of turbulence, (1993) VKI Lecture Series 1991-1992

