

オリジナルレイノルズ実験装置の作成

浅尾 慎一^{*1}, 伊來川 大貴^{*2}, 清水 悠貴^{*2}, 杉本 吉悠^{*2},
羽川 洗貴^{*2}, 前田 楓^{*2}, 松井 宝珠^{*2}

Construction of Original Reynolds' Experimental Apparatus

Shinichi ASAO^{*1}, Daiki ISAGAWA^{*2}, Yuki SHIMIZU^{*2}, Yoshiyuki SUGIMOTO^{*2},
Koki HAGAWA^{*2}, Kaede MAEDA^{*2} and Hoju MATSUI^{*2}

Synopsis :

Mechanical engineering experiments are classified for students to obtain knowledge by actually conducting experiments. In the field of fluid mechanics, the Reynolds experiment to visualize fluid flow is well known. However, fluid mechanical experiments have not been conducted for several years, and opportunities to learn its theory are decreasing in this college. Therefore, in order to increase opportunities to learn fluid mechanics, a Reynolds experiment apparatus that can be used in a lecture room was Constructed for the 2022 graduation thesis. In addition to the conventional flow visualization function, a function to check the effect of pressure loss on the flow inside a circular tube was added to make students be able to understand fluid mechanics more deeply. As a result, it was possible to visualize the flow and reproduce the pressure loss. For laminar and turbulent flows, both flows could be reproduced. For the pressure loss, the value of the loss head was larger than the theoretical value.

(Received Sep. 8, 2023)

Key words : Reynolds' experimental apparatus, flow visualization, pressure loss

1. はじめに

本学機械工学科の必須科目である機械工学実験は、各テーマに沿って実際に実験を行って知見を得る授業である。流体力学の分野においても流体の流れを可視化する「レイノルズ実験」が知られている。しかしながら、数年前から流体の実験が実施されていない現状であり、流体力学を学ぶ機会が減少している問題点がある。

そこで 2022 年度卒業研修では、流体力学を学ぶ機会を増やすことを目的に、講義室内で使用できるレイ

ノルズ実験装置を作成した。さらに流体力学をより深く学べるよう、従来の流れの可視化機能に加えて、円管内の流れにおける圧力損失の影響を確認できる機能を追加した。

本報では本学の機械工学実験で使用することができる実験装置の作成にあたり、その作成過程と作成後の実験結果を示す。

*1 産業技術短期大学 准教授 博士 (工学) 機械工学科

*2 産業技術短期大学 機械工学科 2022 年度 卒業生

2. 実験原理

2.1 レイノルズ実験装置

流体の流れには層流 (laminar flow) と乱流 (turbulent flow) の二つの状態がある。層流は流体が層をなして整然と流れる状態であり、乱流は時空間的に不規則に速度が変動しながら流れる状態である。この二つの流れによって、ポンプの性能¹⁾や流体の圧力損失²⁾などが変化する。

層流から乱流への流れの状態の変化は、流速 U の違いだけでなく円管の内径 D と流体の動粘性係数 ν にも依存して生じ、これらを用いた式 (1) のような無次元数 Re (レイノルズ数: Reynolds number) によって、一律に表される^{2, 3)}。

$$Re = \frac{DU}{\nu} \quad (1)$$

このレイノルズ数は、オズボーン・レイノルズが、Fig. 1 のように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実験より見出した⁴⁾。

この実験はレイノルズ実験と呼ばれており、円管内では $Re < 2300$ ならば層流、 $4000 < Re$ ならば乱流、 $Re = 2300 \sim 4000$ ならば層流から乱流に変わる遷移域となることが知られている³⁾。層流、乱流の状態の例を Fig. 2 に示す。

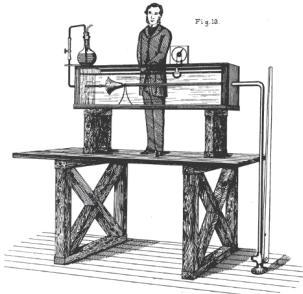


Fig. 1 Reynolds' experimental apparatus⁴⁾.

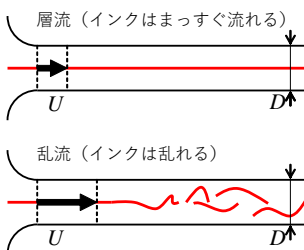


Fig. 2 Laminar and turbulent flows.

2.2 圧力損失

どのような流れにおいても、流体の粘性によって摩擦抵抗が作用する。摩擦抵抗は流れのエネルギー損失となる。この粘性によるエネルギー損失は圧力損失、摩擦損失、圧力降下とも呼ばれる。この圧力損失が目に見える形の例として、Fig. 3 のような状況がある。

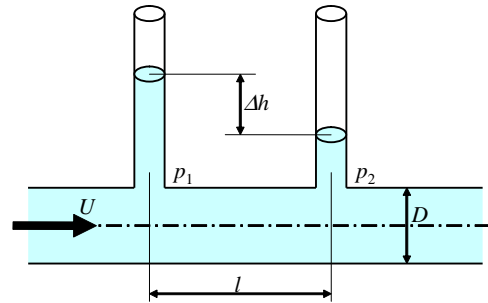


Fig. 3 Viscous fluid flow inside a circular tube.

水平に置かれた円管の上流側と下流側に穴をあけて細管を立てると、2本の細管内の液面高さが異なる。その液面高さの差 Δh 、上流側の圧力を p_1 、下流側の圧力を p_2 とすると圧力損失 Δp は

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g \Delta h \quad (2)$$

と書ける。ここで、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度である。この圧力損失により、円管内の粘性流体流れは、上流側の圧力が高く下流側に行くほど圧力が低下するとされている⁵⁾。

3. オリジナルレイノルズ実験装置

3.1 実験装置の作成

3.1.1 実験装置の概要

作成したレイノルズ実験装置の外観を Fig. 4 に示す。アクリル材質の水槽にアクリル配管 2 本を平行に、1 本を垂直に挿入した。平行に挿入されているアクリル配管の径が細い方 ($\phi 18$) を圧力損失確認用、径が太い方 ($\phi 22$) を流れの可視化用として使用する。圧力損失確認用のアクリル配管にはマンメーターを取り付け、水槽の水位とマンメーター部の水位を比較し、圧力損失を確認できる構造とした。流れの可視化用の配管に、着色液を流し込むための細管を設置し、流れの可視化を再現できる構造とした。

垂直に挿入したアクリル配管はオーバーフロー管として、水槽の水位を一定に保つ役割を担っている。装

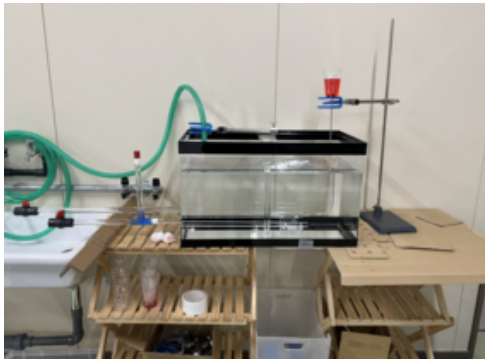


Fig. 4 Appearance of the apparatus.

置の寸法を Fig. 5, 6, 7 に示す。

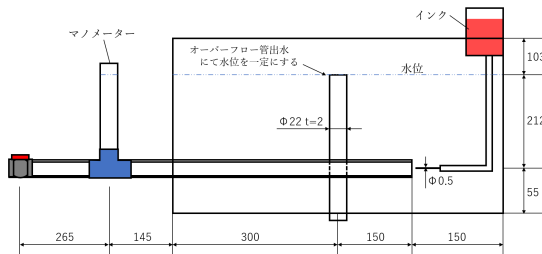


Fig. 5 Dimensions of the apparatus (front view).

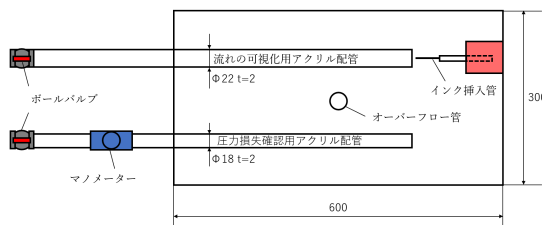


Fig. 6 Dimensions of the apparatus (top view).

3.1.2 作成に使用する機材と作成手順

Table 1 にレイノルズ実験装置の作成に必要な材料および工具を示す。

下記に実験装置の作成手順を示す。

1. 糸鋸を用いてアクリル配管を任意の長さに切断した。
2. 電工ドリルと下穴用キリを用いてアクリル水槽にオーバーフロー用の下穴をあけた。電工ドリルとホルソーを用いてアクリル水槽に管を通すための穴をあけた。

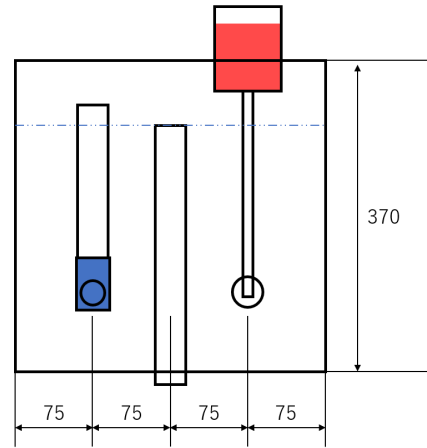


Fig. 7 Dimensions of the apparatus (side view).

Table 1 Materials and tools to make apparatus.

No.	名称
1	アクリル水槽 (600 × 300 × 400)
2	アクリル配管 (φ22, t = 2)
3	アクリル配管 (φ18, t = 2)
4	ボールバルブ
5	インクタンク
6	インク挿入管 (φ0.5)
7	塩ビ用チーズ
8	接着剤 (シリコン, アクリル)
9	シールテープ
10	食紅 (インク用)
11	文房具用カートリッジ (インク用)
12	ホルソー (φ22, φ18 用)
13	下穴用キリ (φ2, φ6 用)
14	オーバーフロー水受けバケツ
15	計測バケツ (φ95, h = 114)
16	ホース
17	温度計
18	タイマー

3. アクリル配管とボールバルブ及び塩ビ用チーズを差し込み接続した。なお、接合部にはシールテープを巻いた。
4. 接続した配管を水槽の穴に挿入した。
5. 挿入した配管と水槽の接触面を接着剤で接合した。
6. 電工ドリルと下穴用キリでインクタンクに穴をあけ、インクタンクの穴にインク挿入管を挿入し、接着剤で接合した。その後、接着剤が乾くまで放置した。
7. 水道蛇口とホースを接続し、水槽に水を溜め、接合部分から漏れがないか確認した。漏れている接合部はシールテープの巻きなおし、接着剤の塗布した。

3.2 実験装置の有効性の確認

作成した実験装置が理論値通りに作動するか確認を行う。レイノルズ数と層流および乱流の挙動が理論値と一致しているかどうか、圧力損失が理論値と一致しているかどうか比較する。2つの確認手順について下記に示す。

3.2.1 層流および乱流の確認手順

まず、圧力損失確認用配管のボールバルブを全閉を確認したのち、水道の蛇口から水槽に水を入れた。Fig. 8のようにオーバーフロー管から出水させて水位を一定にした。

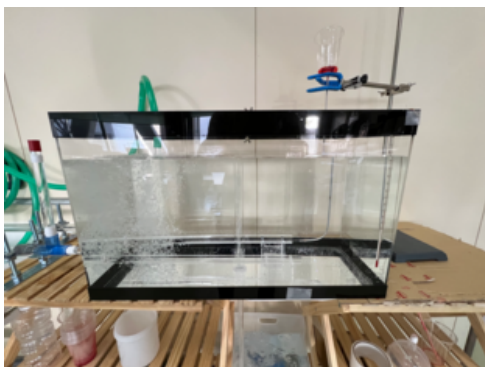


Fig. 8 Water coming out of the overflow pipe.

流れ可視化用配管のボールバルブを全開にして気泡を除去した。その後、流れ可視化用配管のボールバル

ブの開度を調整し、水槽内の水位が一定になるように給水量を調整した。Fig. 9のように温度計にて水槽内の温度を計測した。

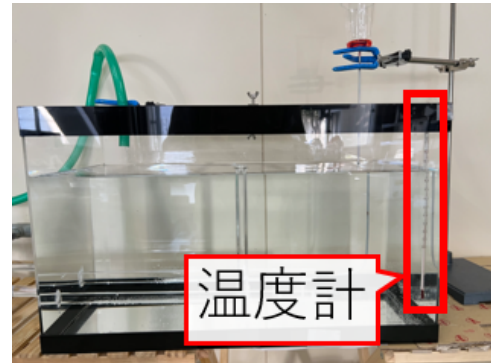


Fig. 9 Measuring temperatures.

可視化のためのインクについて、層流に関しては、食紅を水で溶かしインクを作成した。乱流に関しては、文房具用カードリッジでインクを作成した。これは、食紅で作成するインクは薄いため、乱流挙動を肉眼で見ることが困難となるためである。インクをインクタンクに注ぎ、インクの挙動を確認した。

Fig. 10のようにボールバルブから出水している水を計測バケツで受け、計測バケツが満水になる時間を計測した。



Fig. 10 Measuring the outflow of water.

温度計にて計測した温度から Table 2 を用いて水の動粘性係数 ν を求めた。

計測バケツの直径を d 、バケツの高さを h 、バケツが満水になる秒数を t_f として、体積流量 Q を式 (3) で求めた。

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \times h \div t_f \quad (3)$$

Table 2 Kinematic viscosity of water⁶⁾.

温度 [°C]	動粘性係数 [mm ² /s]
0	1.7909
5	1.5186
10	1.3068
15	1.1388
20	1.0034
25	0.8925
30	0.8005
35	0.7232
40	0.6576
45	0.6019

流れ可視化用のアクリル配管の断面積 A と式 (3) で得られた体積流量 Q を用いて、流速 U を式 (4) で求めた。

$$U = \frac{Q}{A} \tag{4}$$

流れ可視化用のアクリル配管の直径を D 、水の動粘性係数を ν とし、レイノルズ数 Re を式 (5) で求めた。

$$Re = \frac{DU}{\nu} \tag{5}$$

式 (5) で得られたレイノルズ数 Re から層流 ($Re < 2320$) であるか乱流 ($Re > 4000$) であるかを確認した。その結果と流れ可視化用アクリル配管内のインクの挙動が一致しているか確認した。

3.2.2 圧力損失の確認手順

まず、前節の層流および乱流の確認手順と同様に、流れ可視化用配管の全閉を確認し、水道の蛇口から水槽に水を入れた。オーバーフロー管から出水させて水位を一定にし、圧力損失確認用配管のボールバルブを全開にして気泡を除去した。流れ可視化用配管のボールバルブを動かし、水槽内の水位が一定になるように給水量を調整した。Fig. 11 のように、マンメーター部の水位をマーキングした。このときテープの下端が水面と合うように、マンメーターにテープを張り付けた。

次に、前節の層流および乱流の確認手順と同様に、温度計にて水槽内の温度を計測した。ボールバルブから出水している水を計測バケツで受け、計測バケツが満水になる時間を計測した。

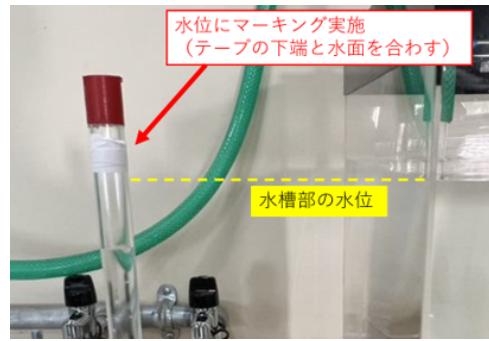


Fig. 11 Marking of water level.

Fig. 12 のように水槽内の水位とマンメーター部の水位の差を計測した。

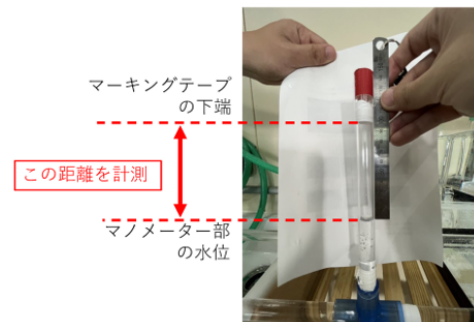


Fig. 12 Measurement of pressure loss head.

圧力損失確認用のアクリル配管を通る体積流量 Q 、流速 U 、水の動粘性係数 ν 、レイノルズ数 Re については 3.2.1 と同様の方法を用いて求めた。

圧力損失確認用アクリル配管の入口からマンメーターまでの距離を l 、重力加速度を g とし、得られた流速 U を用いて式 (6) のダルシーワイズバッハの式⁵⁾

$$\Delta h = \lambda \times \frac{l}{D} \times \frac{U^2}{2g} \tag{6}$$

を用いて圧力損失ヘッド Δh を求めた。摩擦損失係数 λ については層流の場合は式 (7) を、乱流の場合は式 (8) を用いた。

$$\lambda = \frac{64}{Re} \tag{7}$$

$$\lambda = 0.3164Re^{-0.25} \tag{8}$$

計測した圧力損失ヘッド (実験値) と式 (6) で得られた圧力損失ヘッド (理論値) を比較した。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 層流および乱流の確認

Fig. 13~Fig. 15 にレイノルズ数 Re が 2300 以下の層流域での可視化結果を示す。

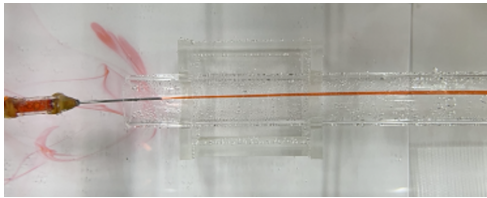


Fig. 13 Visualization of laminar flow ($Re = 345$).

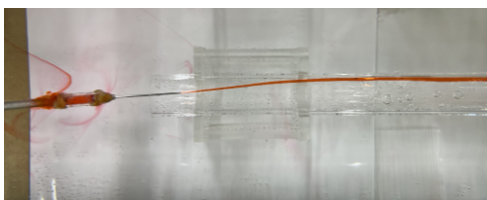


Fig. 14 Visualization of laminar flow ($Re = 769$).

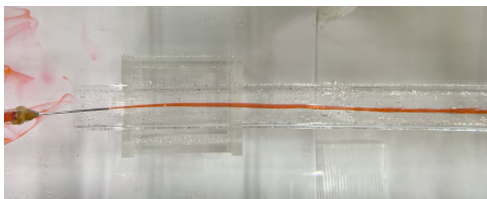


Fig. 15 Visualization of laminar flow ($Re = 1331$).

Fig. 13 はレイノルズ数 Re が 345 のときの、流れの可視化結果である。右側からインクを水槽内の流れ可視化用アクリル配管に流し込んだ様子を示している。Fig. 13 よりインクが排出口から一直線に流れるような挙動を示した。レイノルズ数 Re が 769, 1331 のときの結果について Fig. 14, Fig. 15 に示す。Fig. 13 のときと同様にインクが排出口から一直線に流れる挙動を示した。

Fig. 16 はレイノルズ数 Re が 2923 といった遷移域での結果を示す。

排出口からでたインクは一直線ではなくランダムに乱れる挙動を示した。

レイノルズ数 Re が 4000 以上の乱流域での結果を Fig. 17, Fig. 18 に示す。

Fig. 17 はレイノルズ数 Re が 4035 のとき, Fig. 18 はレイノルズ数 Re が 5531 のときの挙動である。

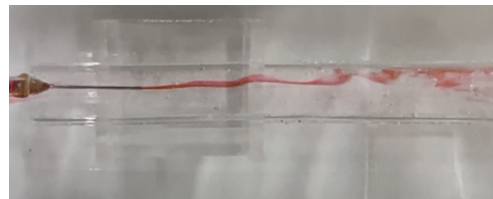


Fig. 16 Visualization of transition region ($Re = 2923$).

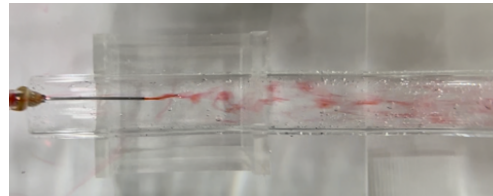


Fig. 17 Visualization of turbulence flow ($Re = 4035$).

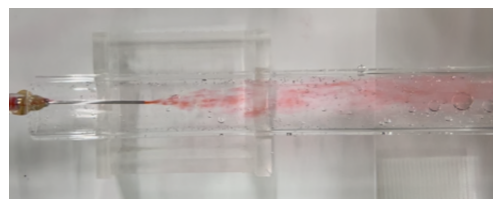


Fig. 18 Visualization of turbulence flow ($Re = 5531$).

Fig. 16 と同様にインクは乱れる挙動を示した。また Fig. 16~Fig. 18 より、レイノルズ数 Re の値が大きいほど、インクの乱れは激しくなった。

以上の結果より、レイノルズ数 Re が 2300 以下の層流域では、Fig. 13~Fig. 15 より、実際の流れも層流になっている。また、レイノルズ数 Re が 4000 以上の乱流域においても、Fig. 17, Fig. 18 より、実際の流れが乱流になっていることから、流れの可視化の再現ができたと言える。

なお、Fig. 16 は遷移域での可視化結果であり、乱流の挙動を示した。遷移域は層流が乱流に遷移する範囲であるため、明確な流れの区分がない。よって、今回の実験装置の有効性を確認する材料としては不十分であるといえる。

3.3.2 圧力損失の確認

Fig. 19 に圧力損失確認結果の一例を示す。

Fig. 19 は、レイノルズ数 Re が 975 のときの圧力損失確認結果である。マンメーター部に取り付けられているマーキングテープの下端は、水槽水位と同じである。よって、マーキングテープ下端からマンメーター

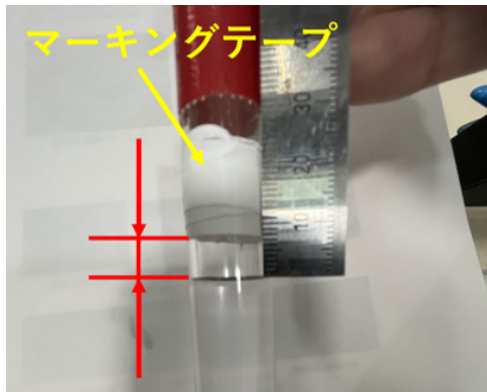


Fig. 19 Measurement of pressure loss ($Re = 975$).

部の水位までの距離をスケールにて計測した。Fig. 19より、計測した結果は 4.0 mm であった。

Table 3 は、圧力損失を確認する際の条件、式 (3)~(6) で得られた、レイノルズ数 Re 、流速 U 、Fig. 19 のように測定した圧力損失ヘッドの実験値、および、圧力損失ヘッドの理論値の結果を示す。

Table 3 Reynolds number, flow velocity, experimental pressure loss head, and theoretical pressure loss head.

Re	U [m/s]	Δh [mm]	
		実験値	理論値
411	0.03837	2.0	0.484
975	0.09097	4.0	1.147
1609	0.1501	7.0	1.892
2322	0.2166	12.0	2.731
3196	0.2981	14.5	3.758
4359	0.4066	20.5	5.126
5293	0.4938	36.0	19.10
6756	0.6302	54.0	29.27
9537	0.8897	108.0	53.51
10268	0.9579	123.0	60.90

なお、水温 T は 10°C 、水の動粘性係数 ν は $1.306 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であった。レイノルズ数がどの値であっても、圧力損失は発生し、発生した圧力損失ヘッド Δh は理論値よりも実験値が大きくなる傾向を示した。

Fig. 20, Fig. 21 はそれぞれ Table 3 より得られた層流域および乱流域における流速 U と圧力損失ヘッド Δh の関係を示すグラフである。ここで、■ は実験値、● は理論値である。縦軸は圧力損失ヘッド Δh 、横軸は流速 U である。

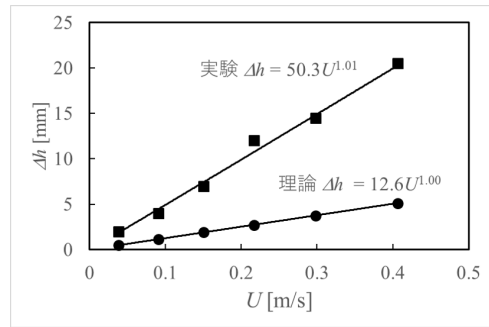


Fig. 20 Relationship between flow velocity U and pressure loss head Δh in a laminar flow.

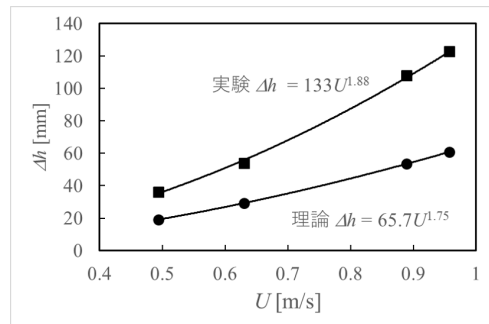


Fig. 21 Relationship between flow velocity U and pressure loss head Δh in a turbulence flow.

Fig. 20 より、層流域では、実験値、及び理論値の近似曲線はそれぞれ $\Delta h = 50.3U^{1.01}$ 、 $\Delta h = 12.6U^{1.00}$ であった。また、Fig. 21 より、乱流域では、実験値、及び理論値の近似曲線はそれぞれ $\Delta h = 133U^{1.88}$ 、 $\Delta h = 65.7U^{1.75}$ であった。

Fig. 20 より、層流域においては実験値の近似曲線の指数は理論値の 1 に近い 1.01 であることから、次元解析の点では正しいと考えることができる。また、流速 U が増加するにつれ圧力損失ヘッド Δh は線形的に変化していることがわかる。Fig. 21 より、乱流域においては実験値の近似曲線の指数は理論値の 1.75 より大きい 1.88 である。次元解析の点では流れ場の傾向は捉えられていると考えることができる。なお、層流と乱流の違いについて、次元解析の点から見ると層流と乱流で物理現象が異なっていることがわかる。一方で、実験値と理論値の係数については層流では 4 倍程度、乱流では 2 倍程度異なる結果となった。全ての測定において理論値よりも大きい値を示していることから、把握できていない何らかの損失が発生しているのではないかと考えられる。文献によると、入口の配管形状⁷⁾ や弁・バルブ⁸⁾ などによっても摩擦が発

生することがあるとされている。今回の確認では、入口形状およびバルブの摩擦係数は加味していない計算方法であるため、これらが圧力損失を増加させている可能性も考えられる。

4. おわりに

2022年度の卒業研修では流れの可視化と圧力損失の影響を確認できるオリジナルレイノルズ実験装置を作成した。

その結果、流れの可視化および圧力損失の再現をすることができた。層流および乱流の確認については、一般的な流れを再現することができた。圧力損失に関しては、圧力損失ヘッドが理論値よりも大きな値を示す結果となった。

今後については、圧力損失ヘッド Δh が理論値よりも大きく表れることから、損失に影響する他要因があると考えられる。この要因を洗い出し、より有意義な装置へと改善する予定である。

謝 辞

本実験装置に対して大変大きな助言を頂いた本学機械工学科の竹内 誠一教授、本学電気電子工学科の二井見 博文教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 大嶋 政夫, ポンプ性能に及ぼすレイノルズ数の影響, ターボ機械, **23** (1995), 577-582.
- 2) 杉山 弘, 遠藤 剛, 新井 隆景, 流体力学, 森北出版株式会社, 2021, 76.
- 3) “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”, <<https://cir.nii.ac.jp/crid/1520290883489496192?lang=en>>, (参照 2023-1-19).
- 4) 谷 一郎, 100年前のレイノルズの実験, 日本流体力学会誌「ながれ」, **3** (1984) 4-7.
- 5) 武居 昌宏, 単位が取れる流体力学ノート, 講談社, 2019, 144.
- 6) “温度依存性と計算式まとめ 機械技術ノート”, <<https://tec-note.com/322#toc4>>, (参照 2023-2-21).
- 7) “管路入口の損失係数 圧力損失 Scirnce.Tools”, <<https://cattech-lab.com/science-tools/dp-inlet-pipe/>>, (参照 2023-2-21).
- 8) “配管圧力損失の計算方法 – 雷電風雨のエンジニア”, <https://mimikousi.com/pressure_drop/>, (参照 2023-2-21).