

管内流の損失測定実験装置の改良と評価

Improvement and Evaluation for Experimental Apparatus
of Friction Loss in Pipe Flow.

増淵 寿, 大山 圭一※¹
Hisashi Masubuchi and Keiichi Ohyama

1. はじめに

1.1 管摩擦損失の測定 日常生活に不可欠な水や空気などの流体を輸送する際、管やダクトをつなぎあわせた管路を利用するのが一般的である。管路を流体が通過する際には粘性によるエネルギー損失（＝静圧の低下）が生じる。この静圧低下と管路内の流れの状態との関係は実用上重要であり、本学でも機械工学科4年生を対象として「管内流の損失測定実験」を続けている。学生実験に用いる装置は、著者らが自作したもの⁽¹⁾で、直管内流れの摩擦損失を測定することが可能である。しかし、この装置で得られた実験データについては、測定器の精度や、実験方法自体を原因とする幾つかの問題点がみられる。そこで、より正確で広範囲なReに対する実験が可能となるよう装置の改良および新設を行ったのでその経過について報告する。

1.2 学生実験の結果と問題点 実験装置は、直管を流れる水の流量と静圧低下とを測定するもので、層流および乱流状態を対象とした装置をそれぞれ1つ有している。その詳細については既報⁽¹⁾を参照されたい。この既存の実験装置で行った学生実験の結果（H16年度10回分）を図1に示す。このデータから、以下の問題点が明らかとなった。

1. 測定可能なReの範囲は $4.0 \times 10^2 \sim 6.0 \times 10^4$ と層流域から乱流域まで網羅しているが、その境界となる遷移領域（ $Re \approx 2300$ 前後）の測定ができないため、実験としての面白みに欠ける。

2. 層流域の実験結果では管摩擦係数 λ が、Hagen-Poiseuilleの理論式よりも平均30%ほど大きい。これは、管路の入口損失と助走区間の付加損失とを考慮せずに、管摩擦損失に含めてしまっている実験方法自体に問題がある。

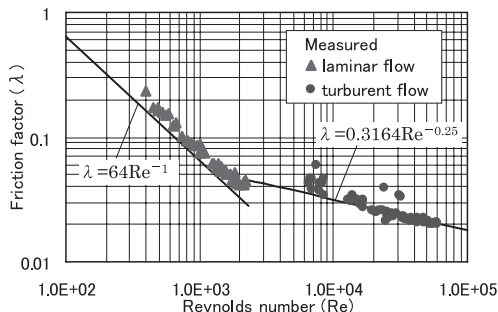


Fig.1 Comparisons of experimental and theoretical λ values. (Moody diagram)

※1 2005 年度機械工学科卒業 現 岩手大学工学部機械工学科 3 年生

3. 乱流域の実験結果では $Re < 10^4$ の範囲でデータのばらつきが大きく、かつBlasiusの実験式との差も顕著である。これは、流量を測定する面積流量計、圧力差を測定するU字管マノメータのいずれもが、Reが小さくなると読み取り誤差が拡大する傾向にあることが原因と考えられる。

1.3 装置改良の目標 上述した実験装置の問題点を考慮し、実験装置改良の目標を以下のように設定した。

- ・ 遷移領域における管摩擦の測定を可能とする。
- ・ 層流域については全体で、乱流域については $Re < 10^4$ の範囲で、測定誤差ができるだけ小さくなるようにする。

具体的には実験方法自体に問題のある層流域実験装置は新たに製作し直し、問題のない乱流域実験装置は装置の改良（測定管の増設）を行うこととする。

おもな記号

- u : 管内流の平均速度 (m/s)
- Δp : 管内流の静圧低下 (Pa)
- Δh : 管内流の損失ヘッド(mmH₂O) $\Delta h = \Delta p / \rho g$
- Q : 体積流量 (l/min)
- ρ : 流体の密度 (kg/m³)
- ν : 流体の動粘性係数 (m²/s)
- d : 測定管内径 (mm)
- Re : レイノルズ数 (—) $Re = u d / \nu$
- $Re_c = 2300$: 管内流に対する臨界レイノルズ数 (—)
- λ : 管摩擦係数 (—)
- ζ : 管路の損失係数 (—)

2. 乱流域実験装置

2.1 装置改良の方針 乱流域装置の改良は、測定の精度を低下させずに実験可能なReの下限をできるだけ小さくすることが目的である。Reを小さくする方法としては、定義式から① u を低下、② d を縮小、③ ν を増加の3種類が考えられる。①は弁の開閉によって容易に実現可能であるが、この場合、概略 u^2 に比例する摩擦損失 Δp が極めて小さくなってしまい測定精度に問題が生じる。③は流体の種類の変更（例えば、グリセリン水溶液の使用）で実現できるが、学生実験用の装置であることを考慮すると流体の入れ替えに手間がかかりすぎる。そこで、②の d の小さい管を増設することに決定した。

実験装置（図2）は遠心式ポンプを用いて、塩ビ製の直管内に動作流体の水道水を循環させるもので、破線内部が追加する部分である。主な変更点は、Test section2で示さ

れる測定管の増設と、複数箇所の差圧を1つの逆U字管マノメータで測定できるように、マニホールドと弁とを使った切替え装置を追加することである。

2・2 測定管の仕様設計 増設する測定管の仕様（内径 d 、測定区間長 L_T ）を次の条件を満たすように決定する。

- ・測定管の全長 L はフランジ間の距離=2900mmとする。
- ・管内流量 Q は浮子式面積流量計2の測定範囲内（ $1.0 \leq Q \leq 10 \text{ l/min}$ ）に収める。
- ・測定区間での管摩擦損失 Δp が49Pa（ $\Delta h=5 \text{ mmH}_2\text{O}$ ）以上となるようにする。

最後の条件は、マノメータの読み取り誤差を許容範囲内（誤差率が20%未満）に収めるための制約である。次に設計の手順を記す。

① 測定区間長の決定： d を仮定し、助走区間の長さ L_E を乱流に関するRichmann and Azad⁽²⁾の理論・実験式(1)より求める。

$$L_E = 50d \quad \dots\dots\dots (1)$$

測定管の全長 L は2900mmで固定されているから、測定区間の最大長さは $L_T = L - L_E$ で定まる。

② 摩擦損失の算出：測定区間における摩擦損失をDarcy-Weisbachの式(2)から算出する。この際、 u の上限と下限とは流量計の測定範囲から決定し、 λ の計算には平滑管に対するBlasiusの式(3)を用いる。

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda = 0.3164 \text{Re}^{-0.25} \quad \dots\dots\dots (3)$$

内径 $d=13 \sim 25 \text{ mm}$ の円管に対して①および②を計算した結果が図3である。図の横軸は u の代わりに Re をとり、摩擦損失 Δp は、マノメータの読みを容易に想像できるように損失ヘッド Δh で表わした。

設計条件である $\Delta h > 5 \text{ mmH}_2\text{O}$ を満足するのは図3の破線の上で、 $d=13$ あるいは 15 mm とすれば $\text{Re} \approx 2.0 \times 10^3$ 以下まで測定下限を低下できる。実際には、フランジの前後にレデュサーの取り付けスペースが必要なため L_T は①の値より短くなることを考慮して、 $d=13 \text{ mm}$ 、 $L_T=2.0 \text{ m}$

と決定した。なお、図3の各線分の間が測定可能な範囲で、太い管ほど測定できる Re の範囲が小さい側に移動している。これは u ではなく Q の範囲を固定しているためである。

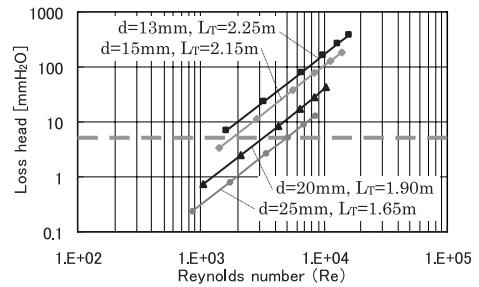


Fig.3 Relationship between Reynolds number and loss head.

3. 層流域実験装置

3・1 装置の構造 既存の層流域装置には、測定法自体の問題があるため、図4に示す装置を新たに製作する。層流域から乱流域に至る $400 \leq \text{Re} \leq 4000$ の範囲まで測定範囲を拡大することが目標である。

図4の装置において、上部に設置したタンクAから水位差を利用して測定管内に水を流す仕組みや、流速 u を質量法で測定された流量 Q から算出する点は、既存の装置と共通している。異なるのは次の2点である。

・既存の装置では管内の圧力差を直接測定せずに、損失を考慮したベルヌーイの式から間接的に管摩擦損失を計算していた。新しい装置では乱流域の実験装置と同様に、測定管に静圧孔を開け、マノメータで管摩擦損失を直読する。

・実験中に流速変化がないよう、タンクAの水位を一定に保つ。このため、小型の揚水ポンプでタンクAに水を常時供給し、溢れた分は下部のタンクBへ別の配管（Overflow line）で戻す。測定管内の流量調整は測定管の上流側に設置した弁の開閉によって行う。

3・2 装置の仕様設計 実験装置の主要な仕様（測定管の内径 d 、全長 L ）を以下の条件を満たすように決定する。

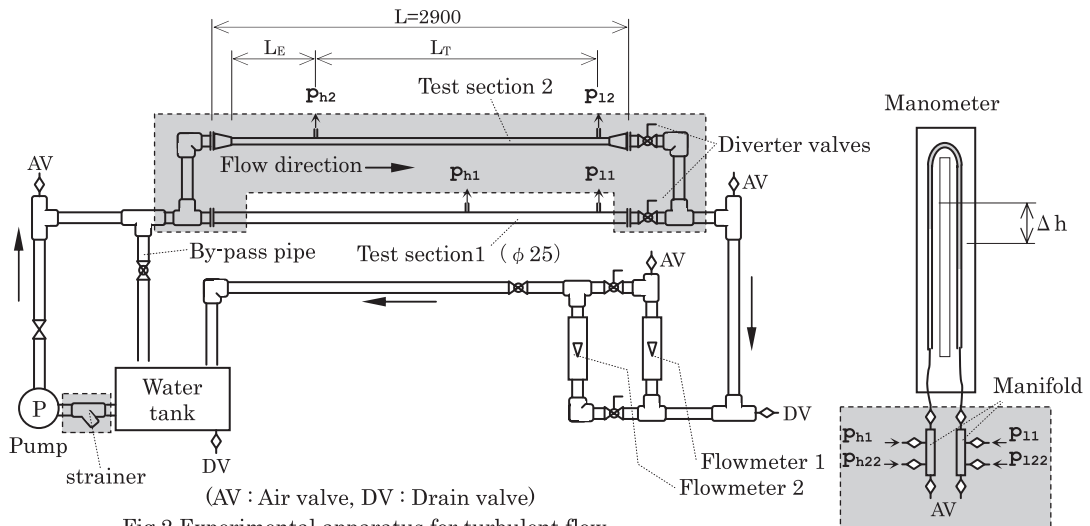


Fig.2 Experimental apparatus for turbulent flow.

・タンクAの水面と測定管出口との高さの差Hは0.60mとする。

・測定管の全長Lは1.0m以下に収める。

・最小流量の $Re=400$ のとき、測定区間での管摩擦損失 Δp が49Pa ($\Delta h=5\text{mmH}_2\text{O}$) 以上となるようにする。

次に設計の具体的な手順を記す。

① 最大流速の算出 : d および L を仮定し、流量調整弁が全開時の流速 $u_{\max}$ を求める。これには、タンクAの水面と測定管出口との間で損失を考慮したBernoulliの定理(4)を用いる。

$$\rho g H = \frac{\rho u^2}{2} + \sum \zeta \frac{\rho u^2}{2} + \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (4)$$

式(4)の右辺第2項の副損失として、測定管の入口損失と助走区間の付加損失とを考慮する。測定管に至るまでの導入管 ($\phi 25$) は測定管に比べて径が5倍以上も大きいので、流速は相対的に極めて小さくなり損失は無視できる。なお、 λ の計算式の形と助走区間の損失係数の値とは、流れが層流か乱流かで異なる。例えば、 λ は乱流の場合は式(3)で、層流の場合は、Hagen-Poiseuilleの式(5)で求められる。

$$\lambda = 64 Re^{-1} \quad (5)$$

このため、最大流速に対する Re と Re_c とを比較して用いる式および係数を変えている。さらに、乱流の場合には式(3)が原因で式(4)は u に関して非線形となるため、反復法を用いて解を求める。 $d=3, 4, 5\text{mm}$ の円管に対し、 $L=0.1\sim 1\text{m}$ の範囲で $u_{\max}$ を計算した結果を図5に示す。なお、縦軸は $u_{\max}$ の代わりに $Re_{\max}=u_{\max}d/\nu$ で表わした。

設計条件で H を一定にしているため、図5では d が太く L が短いものほど摩擦損失が小さくなり、 $Re_{\max}$ が大きくなる。装置の目標とする $Re_{\max}>4000$ を満足するのは破線の上部的場合である。

② 測定区間長の決定 : 必要な助走区間長さを L_E とすれば、 $L_T=L-L_E$ が測定区間の最大長さである。 L_E は流れが乱流の場合は式(1)で、層流の場合は式(6)で求められる。

$$L_E = 0.0566 Re d \quad (6)$$

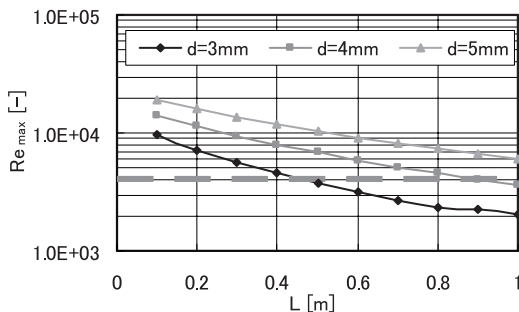


Fig.5 Relationship between tube dimension and Reynolds number.

一般に、流れが乱流になると、流体の激しい混合運動のため境界層の発達の方は早められ、助走区間は層流の場合に比べて短くなる。したがって、この実験のように層流から乱流に至るまで流速を変化させて実験を行う際には、助走区間の最大長さは $Re_{\max}$ で判断するのではなく、遷移領域と十分発達した乱流との境界となる遷移 Re を使い、式(6)から求める必要がある。この遷移 Re の決定法にはいくつかの基準があるが、「管摩擦係数が十分発達した乱流のそれに一致する」という基準を用いて遷移 $Re=3000$ と定める⁽³⁾。このとき、 L_E は表1のようになり、直径に比例してかなり長い距離が必要であることがわかる。

Table1 Entrance length

d [mm]	3.0	4.0	5.0
L_E [m]	0.51	0.68	0.85

③ 最小摩擦損失の確認 : $Re=400$ のとき、②で定めた測定区間長 L_T における摩擦損失を式(2)で求める。その結果が図6で、設計条件である $\Delta h>5\text{mmH}_2\text{O}$ を満たすのは破線より上部の場合になる。なお、最初に仮定した測定管の全長 L が、表1に示す必要な助走区間 L_E に満たない場合は $\Delta h<0$ として図から消去した。

図5および図6より、今回の設計条件のもとでは $Re_{\max}>4000$ 、かつ $Re=400$ のとき $\Delta h>5\text{mmH}_2\text{O}$ の両方は満足できないことが分かる。そこで、目標とした $Re_{\max}=4000$ は断念し、最小摩擦損失を優先して装置の仕様を $d=3\text{mm}$ (実測値3.3mm)、 $L=0.8\text{m}$ と決定した。この仕様では、理論上 $Re_{\max}=2300$ にしかならないため、本実験では測定

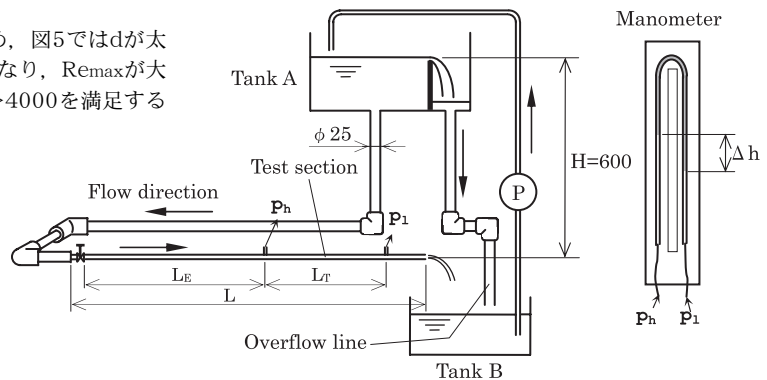


Fig.4 Experimental apparatus for laminar flow.

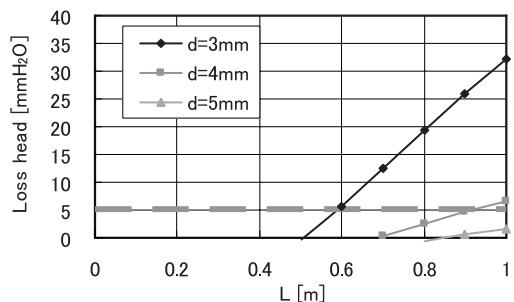


Fig.6 Relationship between tube dimension and loss head.

管の出口にビニールチューブを下向きに取り付けてHを増やし、最大流量を増加させる工夫を行っている。

4. 実験結果

4.1 流速と管摩擦損失との関係 完成した図2, 4の装置で測定された流速 u と、摩擦損失 Δp (損失ヘッド Δh) との関係をそれぞれ図7, 8に示す。まず、図7で増設した測定管 ($d=13\text{mm}$) に注目する。既設の $d=25\text{mm}$ に比べて、 d が細く L_T が長いために同一流速で比較すると摩擦損失は大きい。両者の関係は $\Delta h \propto u^{1.69}$ で、式(2),(3)から予測される指数の1.75に近く良好な結果と言える。増設管の測定区間長は $L_T=2.0\text{m}$ であり、図3の設計時よりも短くなったため、最小流量 $Q=1\text{l/min}$ のとき $\Delta h \approx 5\text{mmH}_2\text{O}$ で、設計条件をかなり満たしていた。

図8では、 u が 0.8m/s より小さい範囲では $\Delta h \propto u$ となる層流の特徴が現れているが、 0.8m/s 以上になると Δh は急激な増加に転じる。この実験条件では、 $u=0.8\text{m/s}$ のとき $Re=2200$ であり、 Δh の急増は流れが遷移状態へと変化したことを表わすものと判断される。 u が更に増加して乱流状態にまで達すれば、グラフの傾きは図7のように再び緩やかになるはずであるが、前述の通り、今回の設計条件の下ではそこまで u を増加させることはできなかった。

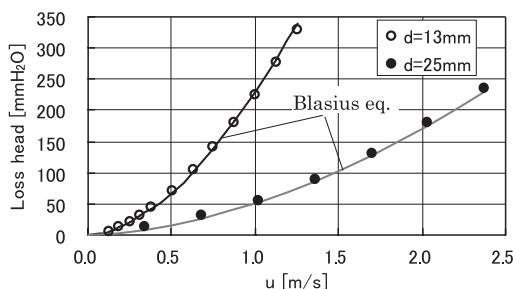


Fig.7 Relationship between flow velocity and friction loss. (turbulent flow)

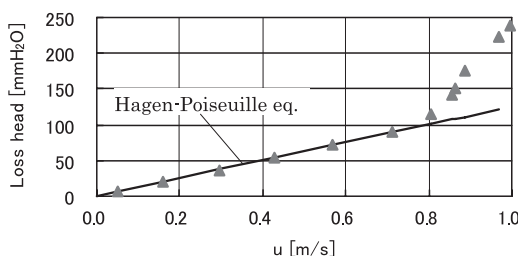


Fig.8 Relationship between flow velocity and friction loss. (laminar flow)

4.2 Moody線図 実験データを、 λ と Re とで整理し、理論および実験式と比較した結果を図9に示す。層流域装置では $144 \leq Re \leq 2810$ 、乱流域装置の増設管 ($d=13\text{mm}$) では $1720 \leq Re \leq 17200$ の範囲を測定することができた。層流域装置では最小摩擦損失の確保を優先したため、 Re は当初の目標より小さい側にシフトしている。また、乱流域装置では $LE=0.65\text{m}$ であり、

層流状態が必要とされる助走区間の最大長 (約 2.2m) に満たないため、層流領域でのデータの信頼性は保証されていない。

次に、層流域装置の λ を式(5)と、乱流域装置の $d=13\text{mm}$ の λ を式(3)とそれぞれ比較する。その結果、測定された λ の誤差率は平均で3.6%および3.3%と小さく、以前の装置 (図1) と比べて、層流領域の λ が理論値に近づいている。

最後に、既設の $d=25\text{mm}$ では、 Re が小さい側で λ が式(3)よりも大きくなった。そこで、差が大きかった $Q=10 \sim 20\text{ l/min}$ の場合について、管内を流れる実流量を体積法で確認してみた。その結果、実流量は面積流量計の表示よりも約 $1.5 \sim 2.0\text{ l/min}$ だけ多かった。図9の■はこの実流量で λ を計算し直した結果で、 λ は式(3)にかなり近くなる。これより誤差の主な原因は流量計にあると考えられる。

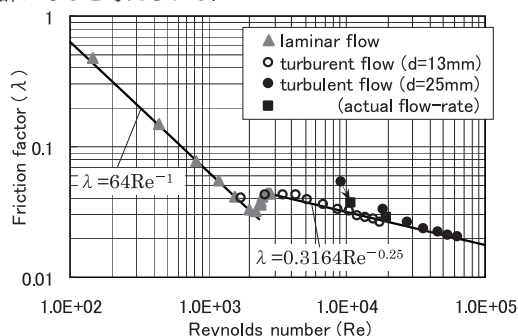


Fig.9 Comparisons of experimental and theoretical λ value. (Moody diagram)

5. まとめ

管摩擦測定用の実験装置の改良および新設を行い、目標とした遷移領域の測定、測定精度の向上については、ほぼ達成できた。最後に、実験の際に気づいた点を以下に記す。

- ① Hagen-Poiseuilleの法則 ($\Delta p \propto d^{-4}$) から層流域の摩擦損失は d に大きく影響される。しかも装置の d は 3mm と細いため、 d は他の寸法に比べて高精度な計測が要求される。
- ② 静圧測定孔は小さい方が望ましく、今回は $\phi 0.8\text{mm}$ とした。この小さな孔の周囲にバリがあると測定値に大きな誤差が生じるため、加工時には細心の注意が必要である。
- ③ 流量が零のときはマノメータの水位差も零となるはずだが、実際には気泡の混入などが原因で僅かな差が生じることが多い。差圧が小さい場合には、このずれが無視できないため、実験開始時に空気だまりがないよう注意する。また、空気抜きを装置の適所に設置することも重要である。
- ④ 実験に使用する面積流量計の器械的誤差の許容値は最大流量の3%であるため、流量が少ない場合に相対誤差が大きくなり、実験の精度を低下させている。測定精度の高い絞り形流量計などを併設することが望ましい。

6. 参考文献

- (1) 増淵ほか2名, 小山高専研究紀要, 36 (2004), 83
- (2) Richmann, J.W. and Azad, R.S., Appl. Sci. Res., 28 (1973), 419.
- (3) 日本機械学会, 管路・ダクトの流体抵抗, 丸善, (1979), 25