

管内流の損失測定実験装置の製作と評価

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

増淵 寿, 猪瀬 眞司*¹, 松本 啓助*²

Hisashi Masubuchi, Shinji Inose and Keisuke Matsumoto

1. はじめに

我々が流体を輸送するとき、多くの場合ポンプ(流体が空気の場合はファンやブローア)を使って流体の圧力を高め、管、ダクト、水路、ホースなどをつなぎ合わせて目的の場所まで導く。したがって、ポンプによる流体へのエネルギー供給と、管路を流れる流体のエネルギー損失は工学的に特に重要な内容である。このため、「ポンプの性能実験」と「管内流の損失測定実験」は、流体工学分野の学生実験のテーマとして、機械工学を専攻する工業系の学校で広く採用されている。

本校でも、総合水力学実験装置(森山精機製、S44年製造)を使用し、両テーマの実験を機械工学科4年生を対象に実施してきたが、装置の老朽化に伴い、装置の更新が必要となった。そこで、ポンプの性能試験については実験装置を新規購入し、管内流の損失測定装置は自作することにした。本報では、後者の管内の流れの状態(速度)と、エネルギー損失(圧力損失)との関係を計測する実験装置の製作と、装置の評価(理論式との比較)の結果について報告する。

おもな記号

u	: 管内流の平均速度 (m/s)
Q	: 管内流の体積流量 (l/min)
p	: 圧力 (Pa)
ρ	: 流体の密度 (kg/m^3)
ν	: 流体の動粘性係数 (m^2/s)
Re	: レイノルズ数 (-)
λ	: 管摩擦係数 (-)
ζ	: 管路の損失係数 (-)

2. 実験装置と実験方法

2.1 測定の原理 実在の流体は粘性を有するため、直管内を流体が流れる際には、壁面との間にせん断応力(摩擦)が発生し、流体の持つ力学的エネルギーは流れに従って次第に減少する。そこで、本研究の実験装置は、図1のように、直管に流体を流し、その際のエネルギー減少分(圧力損失 $\Delta p = p_1 - p_2$)と、流体の管内平均速度 u とを測定できればよい。ただし、管内流のエネルギー損失の機構は、流れの状態(層流か乱流か)によって様相が

異なっており、この違いを理解させるためには、層流と乱流の両方の状態を含む広範囲な Re について実験を行えるようにしたい。管内流の臨界レイノルズ数は $Re_c \approx 2.3 \times 10^3$ であるので、装置の仕様として、測定できる Re 範囲の目標を $2.0 \times 10^2 \sim 5.0 \times 10^4$ と定めた。

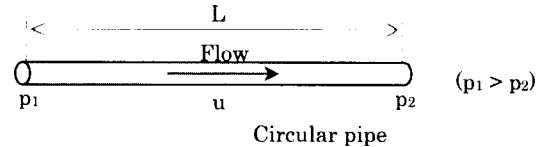


Fig. 1 Friction loss in pipe flow.

2.2 乱流域実験装置

2.2.1 装置の設計と製作 製作した実験装置を図2に示す。装置は遠心式ポンプを用いて、塩ビ製の直管内(測定部の内径 $d=25\text{mm}$ 、全長 3600mm)に動作流体の水道水を循環させるものである。管内流れが乱流の場合、助走区間の長さは Richmann and Azad の理論・実験式⁽¹⁾より約 $50d=1250\text{mm}$ である。本実験装置では、エルボの後方に余裕をとって 2300mm の直管部分を設け、圧力損失の測定部は、更にその下流側の長さ 1000mm の範囲とした。

流量の調整は、当初、流量計の下流に設けた流量調整弁1(玉型弁)の開閉だけで行っていた。この場合、低流量の実験を行うために弁を閉めていくと、管内の圧力が高くなってしまい、最も弱い部分が破損するなど装置の強度・安全性の面で不安があった。そこで、管路の途中に図2の破線内に相当するバイパス管を設け、ポンプから流出した水の一部を測定部を通さず、直接タンクへ戻せるようにした。流量が $Q < 40\text{l/min}$ の範囲では、このバイパス管を利用することで、小流量時の測定も安全に行えるようになった。

次に、使用する遠心ポンプの選定にあたり、まず管路の全抵抗を計算で求め、図3の抵抗曲線を描いた⁽²⁾。この際、流量計内部の損失など、抵抗値が不明な部品があったため、研究室にあったポンプ(エレポン化工機製 SL-20SN)と仮組みした配管を用いて予備実験を行った。その結果、流量の予想値 47l/min に対し、実測値 45l/min とほぼ等しい値が得られたため、計算時に考慮しなかった部分の抵抗は小さく、図3の抵抗曲線は妥当なものと判断した。そこで、この抵抗曲線とポンプの性能曲線とを比較して、弁全開の状態でも流量が 66l/min ($Re=5.55 \times 10^4$)となるポンプ(同社製 SL-35SF)を選択した。

*1 2002年度機械工学科卒業 現 森永製菓(株)

*2 2002年度機械工学科卒業

現 小山高専電子システム工学専攻科学生

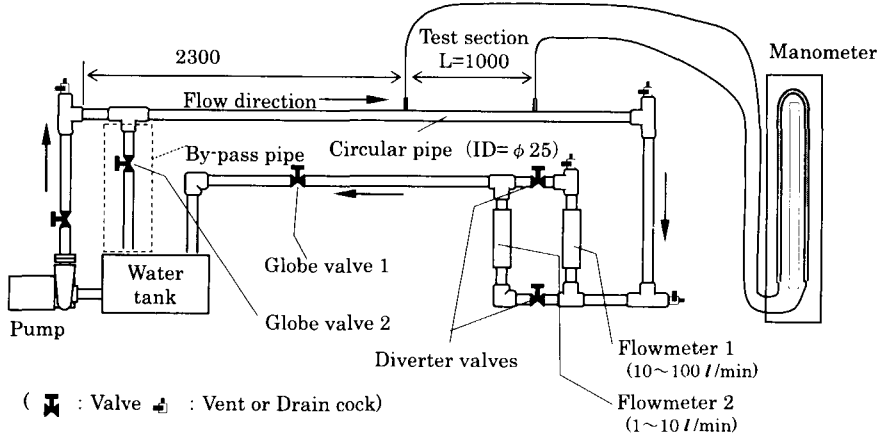


Fig.2 Experimental apparatus for turbulent flow.

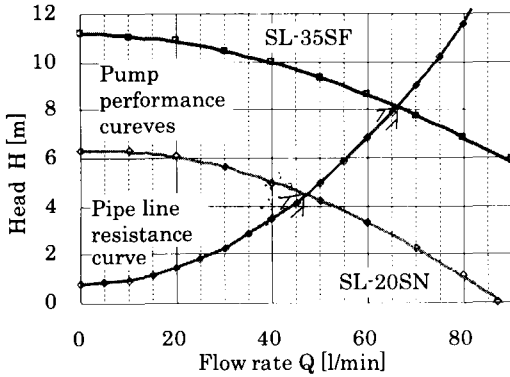


Fig.3 Performance curves and resistance curve.

2・2・2 実験方法 実験では、まず管内を流れる流量 Q を面積式(フロート式)流量計で測定し、管内平均流速 u を算出する。流量計は、2種類のもの(計測範囲がそれぞれ $10 \sim 100$ および $1 \sim 10$ l/min)を切り替えて使用することで、測定可能範囲を拡大している。

一方、直管部の圧力損失 Δp は逆U字型マンメータ(マンメータ液は空気)によって計測する。ところが、本装置の仕様では、 $Re=5.0 \times 10^3$ ($Q \approx 6$ l/min)で圧力損失は 31Pa ($\approx 3 \text{ mmAq}$)となり、液面振動による計測精度の低下を考慮すると、これより Re が小さく遅い流れに対しては、圧力損失の測定は困難である。圧力損失は管の長さに比例するため、測定部を伸張すれば、より小さい Re まで測定可能となるが、目標とする最小値 $Re=2.0 \times 10^2$ までこの方法で測定するのは現実的ではない。

これは、圧力損失はおおよそ流体の動圧(速度ヘッド)に比例し、かつ目標とした Re の範囲が広い(最小 Re は最大 Re の約 $1/10^2$ である)ことから、圧力損失の最小値は最大値の概略 $1/10^2$ となってしまうことが原因である。圧力損失の変化量があまりに大きいことから、1つの装置で、目標とする全範囲の Re の流れを測定するのは困難と判断した。そこで、この装置では、乱流域だけ($5.0 \times 10^3 \leq Re \leq 5.0 \times 10^4$)を測定し、これより Re が小さい層流域を測定する装置は、別にもう1台製作することとした。

2・3 層流域実験装置

2・3・1 装置の設計と製作 図4に、 Re が小さい層流域の流れ ($2.0 \times 10^2 \leq Re \leq 2.0 \times 10^3$)を測定する実験装置を示す。装置は、水道水を溜めたタンクから、アクリル製の直管(長さ $L=500\text{mm}$)を通して水道水を大気中に流出させる簡単なものである。動作流体を水のままで、 Re を小さくするには、管径 d と流速 u を小さくすれば良い。そこで、測定部には内径 $d=3 \text{ mm}$ の細管を用い、ポンプを使用せずにタンクの水面と管出口の水位差だけで微小流量の水を流出させるようにした。

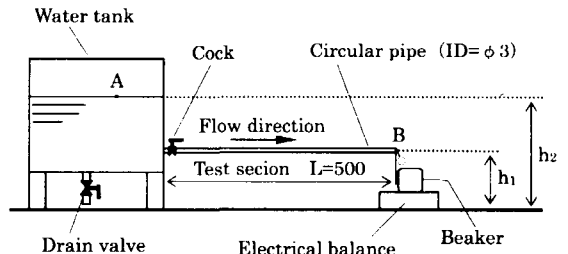


Fig.4 Experimental apparatus for laminar flow.

2・3・2 実験方法 この装置は、流量計も差圧計も使用しないところが特徴である。まず、直管のタンク接続部に取り付けたコックを全開にして水を流出させ、ストップウォッチでコックの解放時間 t を、電子天秤で水の流出流量 M を正確に測定する。管内の平均流速 u は質量法により、次式で求められる。

$$u = \frac{1}{\rho} \frac{M}{t \pi d^2} \dots \dots \dots (1)$$

次に、タンクの水面Aと管出口Bとの間で、ベルヌーイの定理を適用すると、次式が得られる。

$$p_0 + \frac{\rho \cdot 0^2}{2} + \rho g h_2 = p_0 + \frac{\rho u^2}{2} + \rho g h_1 + \Delta p_t$$

$$\therefore \Delta p_t = \rho g (h_2 - h_1) - \frac{\rho u^2}{2} \dots \dots \dots (2)$$

但し、 Δp_t : AB間の全損失, p_0 : 大気圧である。
式(2)の Δp_t は、水面Aと管出口Bとの間に存在する全ての損失を合計した値であるが、ここでは全損失のうち、直管部の摩擦損失 Δp_f が卓越するものとして、 $\Delta p_t \approx \Delta p_f$ とみなす。しからば、水位差($=h_2 - h_1$)と流速 u

とを用いて、式(2)から直管の圧力損失 Δp が得られるので、差圧計が不要となる。 Re が小さい層流域では、一般に圧力損失が小さくなるため、 Δp を実測しないで済ませるのは、実験の精度を高める上で有効な手段である。なお、水を流出させればタンクの水位は低下するが、今回は流出開始時と終了時の水位の変化が 1 mm 以内となるようコックの開放時間を定め、水位差の変化を無視することとした。

3. 実験結果

3-1 乱流域の実験結果 図2の装置を用いて実験を行い、流量 Q と圧力損失 Δp とを測定した。弁全開時の流量は72l/minで、設計時の予測値(66l/min)に近い値となった。マンメータの水面は、ポンプの脈動により上下に振動するため、今回は、ある瞬間における上下水面をデジタルカメラで撮影し、静止画像を拡大して水面位置を読み取った。この撮影を、時間をおいて3回行い、その平均値をマンメータの示差として差圧を計算した。こうして得られた管内流速 u と圧力損失 Δp との関係をグラフにしたものが図5である。圧力損失は流速とともに増加し、近似曲線から両者の関係はおおよそ $\Delta p \propto u^{1.71}$ となっていた。これは、平滑管の場合の $\Delta p \propto u^{1.75}$ に近い値であり、妥当な結果と判断できる。

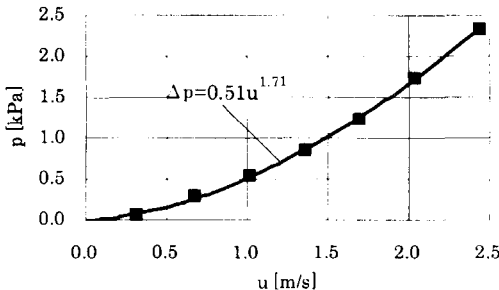


Fig. 5 Relationship between flow velocity and friction loss. (turbulent flow)

3-2 層流域の実験結果 図4の装置のタンク内の水量を調整し、水位差(= $h_2 - h_1$)を3 ~ 22cmに変化させて実験を行った。図6に、得られた管内流速 u と圧力損失 Δp との関係を示す。0.2 < u < 0.6 m/s のデータで近似曲線を求めると $\Delta p \propto u^{1.03}$ となり、圧力損失が流速に比例する層流の特徴が現れている。しかし、 $u=0.1$ m/s 付近および $u>0.6$ m/s では測定点と近似曲線との差が大きくなっていった。

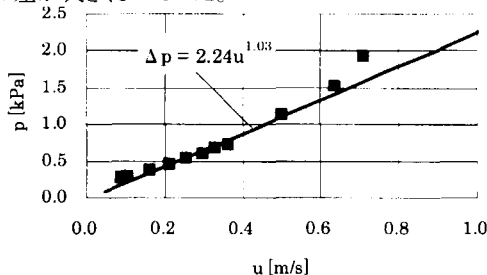


Fig. 6 Relationship between flow velocity and friction loss. (laminar flow)

4. 実験データの評価

4-1 Moody 線図 得られた結果を、これまでに明らかになっている理論式および実験式と比較するため、データ整理を行う。まず、各測定結果に対して、次式で管摩擦係数 λ と Re とを算出する。

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho u^2}{2} \text{ より, } \lambda = \Delta p \frac{d}{L} \frac{2}{\rho u^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$Re = \frac{u d}{\nu} \dots\dots\dots (4)$$

次に Re と λ とを両対数グラフに描く。図7はその結果で、一般に Moody 線図(3)と呼ばれるものである。

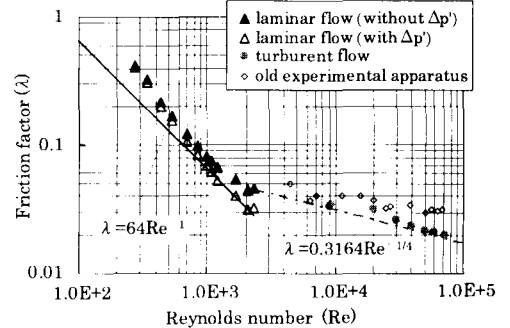


Fig. 7 Comparisons of experimental and theoretical λ values. (Moody diagram)

4-2 乱流域の評価 実験に使用した塩ビ管の等価粗さは資料(3)によると、 $ke=0.00162$ mmであり、管の相対粗度は $\epsilon = ke/d=6.48 \times 10^{-5}$ となる。このため、本実験の Re の範囲 ($5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$) では、流体力学的に十分に滑らかな管とみなすことができる。そこで、乱流域では、Blasius の滑らかな円管に対する次の実験式(3)と比較する。

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} \dots\dots\dots (5)$$

図7より、実験値(図の●点)は式(5)の近くに分布しており、1点を除き誤差は10%以内であった。 $Re \approx 2.0 \times 10^4$ のデータだけは、誤差が18%に達しているが、その原因としては、流量計の読み取り誤差が挙げられる。このデータは、流量が $Q \approx 20$ l/min の場合に相当し、面積式流量計1の測定下限(10l/min)に近かったため、誤差が相対的に大きくなり、 λ の違いを生んだものと考えられる(使用した面積式流量計の精度は $\pm 5\%$ FS)。なお、これより Re の小さい範囲の流量測定には、流量計2(測定範囲 1 ~ 10l/min)を使用している。

λ を算出する式(3)から誤差の伝播を考えると、速度 u の計算に用いる流量計は、差圧計の倍の精度が必要であることがわかる。このため、2種類の流量計の測定範囲を少し重複させ(流量計2の方を3 ~ 30l/min程度にして)、 $Q < 30$ l/min の場合には流量計2を使用するようにしておけば、この誤差はもっと小さくできたものと考えられる。

4-3 層流域の評価 $Re < 2300$ では、層流域に対する管摩擦係数の理論式である Hagen-Poiseuille の式(3)(6)と実験結果とを比較する。

$$\lambda = 64 Re^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

λ の実験値(図の▲点)は、いずれも理論式の値よりも大きくなっている。この原因の1つは、(2)式で省略してしまった管摩擦以外の損失の影響と考えられる。図4の装置で生じる損失としては、管摩擦以外に入口部損失と、流れが完全に発達するまでの間に発生する助走区間の付加損失が挙げられる。損失係数の値は、後者が層流では $\zeta = 2.25^{(4)}$ となるのに対し、前者は入口かど部に丸味をつけているためと $< 0.1^{(3)}$ と小さい。そこで、助走区間の損失 $\Delta p'$ だけを考慮し、データを修正する。式(2)の全損失を $\Delta P = \Delta p + \Delta p'$ と書き直し、助走区間の付加損失係数は既知($\zeta = 2.25$)として損失 $\Delta p'$ の大きさを式(7)で求め、管摩擦損失 Δp および係数 λ の値を計算し直した。

$$\Delta p' = \zeta \frac{\rho u^2}{2} \dots\dots\dots (7)$$

この修正の結果を図7に記号△で示す。修正の効果は Re の大きい側で顕著であり、 $Re > 7.0 \times 10^2$ では理論式とかなり近い λ の値が得られるようになった。これは、層流域では、管摩擦損失が u に比例するのに対し、(7)で計算される助走区間の付加損失は u^2 に比例するため、流速が大きくなると、 $\Delta p'$ の影響を無視できなくなることを示している。なお、直管が長くなれば、管摩擦損失 Δp だけが増大するため、 $\Delta p'$ の影響を相対的に抑制することが可能である。この装置の改良点と考えられるが、学生実験用の装置という性格上、理論に近い結果を簡単に得られるより、若干の違いを発生させ、その原因を学生自らが考究するようしておいた方が教育的効果は高いと考え、あえて変更しなかった。

また、この修正を行っても、 $Re < 7.0 \times 10^2$ では λ の値に理論式との違いが見られる。この範囲では、流量が相当に小さくなるため、管から出た水が表面張力によって、一旦管の外壁を伝って根元の方へ逆流してから落下することが確認されている。図8は、この管出口部の流れを撮影したもので、 $Re = 7.0 \times 10^2$ を境に、左右の図のような流れの変化が見られた。 Re が小さい領域では、この出口部の流れが新たな損失を生み、誤った λ の増大に影響しているものと予想されるが、その詳細については現在調査中である。

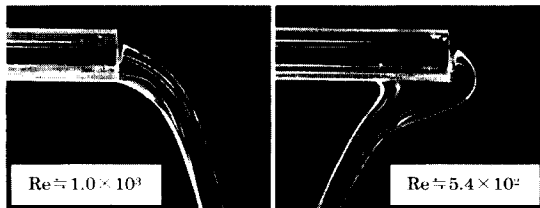


Fig. 8 Flow pattern behind the pipe exit.

4.4 従来の実験装置との比較 最後に、平成14年まで本校の学生実験で使用していた総合流体実験装置による測定結果を参考として図7に◇で示す。この装置の計測範囲は $4 \times 10^3 < Re < 7 \times 10^4$ で、乱流域のみの測定となる。本報で製作した装置とは管の状態が異なるため、 λ の変化の様子も違っており、 λ は Re が変化してもあまり変動せず、 Re が大きくなるとほぼ一定値($\lambda \doteq 0.3$)をとる。これは流体力学的に粗い管の場合に相当し、 λ の値から、管内壁に様にさびが出た状態と

想像される。 λ の測定値には、やや散ばりもみられ、市販の大型(管内径 $d=52.9\text{mm}$ 、測定部長さ $L=4000\text{mm}$)で高価な装置を用いても、必ずしも精度の高い結果が得られるわけではないことが分かる。

5. まとめと課題

管摩擦損失を測定する簡単な構造の実験装置を設計・製作し、管摩擦係数 λ と Re の関係を測定した。その結果、装置は、層流～乱流に至る広範囲な Re の流れを実現し、測定値は、従来の理論・実験公式にほぼ近い値を示すことが確認された。データの再現性も高いため、製作した2種類の装置は、管摩擦測定用として必要な精度を満たすものと判断し、平成15年度より、実際に学生実験用として供用することにした。

装置の更なる改良点としては、次の事項が挙げられる。

① 乱流域実験装置

- ・測定管の追加。(内壁の粗い管の実験を行うため)。
- ・ポンプの脈動の影響を抑制する圧力槽の設置。
- ・測定部長さの変更。($Re < 10^4$ では $L=2000\text{mm}$ とする)。
- ・タンクとポンプ吸込口の間へストレーナを設置。

② 層流域実験装置

- ・ $Re < 7.0 \times 10^2$ での λ の理論と実験値との不一致の原因解明。
- ・測定管の伸張。(助走区間の影響を小さくするため)。

今後は、今回の装置設計・製作で得られたノウハウを生かし、高分子や界面活性剤の添加による流体摩擦損失の低減効果の計測⁽⁵⁾へと発展させていきたい。

6. 参考文献

- (1) Richmann, J. W. and Azad, R. S., Appl. Sci. Res., 28 (1973), 419.
- (2) 須藤・横山, ポンプの上手な使い方, パワー社 (1989)
- (3) 日本機械学会, 管路・ダクトの流体抵抗, 丸善 (1979)
- (4) Bender E., Chem. Ing. Techn., 41 (1969), 682.
- (5) 李ほか2名, 日本機械学会 第81期 流体工学部門講演会講演論文集 (2003), 1007.

[受理年月日 2003年9月30日]