

流体の流れと損失（流動）

目 的

化学工学において、そのプロセス中には原料や生成物の物質移動の手段として流体の輸送が含まれる。そこで、「化学工学入門」の講義で学んだ流動論を検証することを目的に、

- ① 管内における「流れ」を「可視化」し、その観察により「層流」と「乱流」との差違とレイノルズ数の算出結果よりその関係を理解する。
- ② 流体移送時に使用する「流路」（直管）や「管挿入物」（管継手や弁類）の部分で発生する「流れの摩擦損失」を実験的に求め、これら損失係数とレイノルズ数との関係を理解する。
- ③ オリフィスやベンチュリ管を用いた実験結果より、流量測定の実験式ならびに実験式・理論式中に含まれる流量係数とレイノルズ数との関係を検討すると共に、流動操作を理解する。

キーワード・調査事項

流動・流速と平均流速・体積流量と密度・層流と乱流・レイノルズの式とレイノルズ数・分子拡散・ポンプと管挿入物・管摩擦と管摩擦係数・管挿入物の相当長さ・圧力損失と摩擦圧損失。

実験操作

1. 基本データの測定

- ①水温（温度計にて測定）。②水および水銀の密度。③水の粘度。

なお、上記②および③の値は、各自が事前に文献値を調査すること。そして、文献値をもとに各種補間法を用いて、①で測定した水温におけるそれぞれの数値を各自が算出する。

2. 可視化による流れ（層流・乱流）の観察と測定

- ① 水道元栓、給水弁（VF4）と排水弁（VF5）、色素導入部・上部左側の色素注入コックならびに右側の脱気コックが閉じていることを確認する。
- ② 排水（貯水）タンクに接続されている排水ホースを、所定の排水口に接続する。
- ③ 色素水溶液を入れる容器と実験装置・色素導入部の色素注入コックとをチューブで接続し、中間部をピンチコックで止める。続いて、この容器に色素を数滴加えた水を入れる。
- ④ 排水弁（VF5）と水道元栓、給水弁（VF4）、色素導入部・上部左側の色素注入コックならびにピンチコックを開き、色素導入部・上部右側の脱気コックを開き、実験装置やチューブ内の脱気を行った後、脱気コックを閉じる。
- ⑤ 給水弁（VF4）と色素注入コックを調節し、流れの状態を観察する。

※1. 水の流量を増加・減少させる観察の各段階で、排水側で採水カップに水を受け、1リットルに達するまでの時間を計測し、水の体積流量を求める。 $[l/**sec] \rightarrow [m^3/s]$ へと単位換算すること。

※2. 観察の各段階で水の流量を求めたならば、右式より平均流速 u を求める。
$$\bar{u} = \frac{V}{\pi \cdot \left(\frac{D^2}{4}\right)}$$
なお、管内径 $D=0.020[m]$ とする。

※3. これらの結果をもとに、観察の各段階におけるレイノルズ数を求める **水の密度 ρ に注意!**。

- ⑥ 給水弁 (VF4) を調節して水の流量を最低量から段階的に増加させ、層流から乱流へと変化することを確認し、さらに水の流量を増加させる。
- ⑦ 乱流状態から給水弁 (VF4) を調節して、水の流量を段階的に減少させ、レイノルズ数が約 2300 付近で層流へと変化することを確認し、さらに水の流量を減少させる。
- ⑧ 実験終了後、色素水溶液が管内から無くなるまで水を流し、色素注入コックを閉じる。
- ⑨ 最後に水道元栓、給水弁 (VF4)、排水弁 (VF5) を閉じる。

3. 管摩擦の実験と測定

a. 実験前準備

- ① 貯水 (排水) タンク内に水が無いこと、ならびに脱気コック (VA : 流量計横の 90° エルボ部、装置右端部配管の上下 2カ所、急拡大縮小管の上部 2カ所) と排水弁 (VD) が閉じていることを確認する。続いて水道元栓を開き、貯水タンクの 7割程度まで水を注入する。
- ② 仕切弁・コック・玉形弁、そして流路出口側の仕切弁 (VF3) を全て「全開」にする。
- ③ ポンプ部のバイパス弁 (VF1)、ならびに流量計横の流量調節弁 (VF2) を開く。
- ④ 主幹電源を ON にし、続いてポンプ電源を ON にする。ポンプが動作し、配管内に水が流れていることを確認する。なお、ポンプ部のバイパス弁 (VF1) を開くことで流量は低下し、流量計横の流量調節弁 (VF2) を開くことで流量は上昇する。

b. 実験装置配管内の脱気

- ① 脱気コック (VA : 流量計横の 90° エルボ部、装置右端部配管の上下 2カ所、急拡大縮小管の上部 2カ所) を開き、配管内から気泡が無くなるまで脱気を行った後、閉じる。
- ② 操作パネルの 1H-1L コック (番号ごとに H・L はペア) を開き、気泡が無くなるまで脱気を行った後、閉じる。続いて 2H-2L から 14H-14L コックまで同様に脱気操作を行う。

c. マノメータの脱気と設定

- ① 操作パネルの 1H-1L 弁～14H-14L コックが全て閉じていることを確認する。
- ② マノメータ切替コックの「逆 U 字管 (下部)」と「逆 U 字管 (上部)」を同時に開き、「逆 U 字管 (水) マノメータ」上部の脱気コックを開き、導圧管内に気泡が無くなるまで脱気を行う。
- ③ 操作パネルの H-L 弁の集合部右端にある「均圧コック」を開く。その後、「逆 U 字管 (水) マノメータ」下部の排水コック (どちらか一方) をゆっくりと開き、マノメータの水位を 100mm 以下まで下げた後に排水コックを閉じ、つづいて均圧コックと脱気コックを閉じる。最後にマノメータ切替コックの「逆 U 字管 (下部)」と「逆 U 字管 (上部)」を同時に閉じる。
- ④ マノメータ切替コックのうち、「U 字管 (下部)」と「U 字管 (上部)」を同時に開き、「U 字管 (水銀) マノメータ」最上部にある脱気コック (左右 2カ所) を開き、導圧管内に気泡が無くなるまで脱気を行う。
- ⑤ 「U 字管 (水銀) マノメータ」の脱気コックの直下にある、横向き「均圧コック」を開く。マノメータ内の水銀の液面 (位置は 300mm 程度) 上部に水が満たされていれば圧力の測定が可能となる。脱気後、均圧コックと脱気コックをそれぞれ閉じる。最後にマノメータ切替コックの「U 字管 (下部)」と「U 字管 (上部)」を同時に閉じる。

d. 管挿入物各部位における圧力損失の測定方法

各班が測定すべき個所ならびに流量設定値を下記の表に示す。

表1 測定個所に対応するH・L弁番号ならびに設定流量

A班			B班		
測定個所	H・L No	設定流量 m^3/h	測定個所	H・L No	設定流量 m^3/h
仕切弁	4H-4L	仕切弁を全開の状態 で流量が $3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ と なるように設定する。 その後、流量を $2.0 \rightarrow 1.0$ の順に仕切弁で 変化させて実験する。	玉形弁	6H-6L	玉形弁を全開の状態 で流量が $3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ と なるように設定する。 その後、流量を $2.0 \rightarrow 1.0$ の順に玉形弁で 変化させて実験する。
15A 直管	11H-11L		25A 直管	9H-9L	
90°エルボ	1H-1L		90°ベンド	12H-12L	
緩拡大管	2H-2L		急拡大管	13H-13L	
緩縮小管	3H-3L		急縮小管	14H-14L	
ベンチュリ	7H-7L		オリフィス	8H-8L	

- ① ポンプ部のバイパス弁 (VF1)を開くと流量は低下し、流量計横の流量調節弁 (VF2)を開くと流量は上昇する。これらを組み合わせて、まず流量を $3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ に設定する。
- ② ポンプ入口側の吸入圧力はVG1 コックを開くことで、また、ポンプ出口側の吐出圧力 (≒配管内の圧力)はVG2 コックを開くことで、それぞれの圧力 (ゲージ圧)が確認できる。
- ③ 使用するマノメータに応じ、均圧弁ならびに切替コック (下部と上部)を開く。

マノメータの選択について

U字管 (水銀) マノメータ : 差圧 = 損失が大きい場合 流量 $1 \sim 3 \text{ m}^3/\text{h}$ における玉形弁・オリフィス・ベンチュリ管)の測定に有効。圧力が増すと高压側の水銀液面は降下し、低压側の水銀液面は上昇する。

逆U字管 (水) マノメータ : 差圧 = 損失が小さい場合の測定に有効。圧力が増すと高压側の水位は上昇し、低压側の水位は降下する。

マノメータは右側が上流 (高压側 : H)、左側が下流 (低压側 : L)。

- ④ 各班の測定個所に対応した操作パネル上の同番号のH-L コック (表1を参照)を開く。
- ⑤ 均圧弁をゆっくりと閉じ、マノメータの差圧 (水柱と水銀柱の違いに注意!)を読み取る。
- ⑥ 測定終了後、均圧コックを開く (各測定個所につき3回計測を行い記録する)。
- ⑦ 一連の測定が終了後、A班は仕切弁を、またB班は玉形弁を調節し $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ に流量を設定して、上記③～⑥の実験操作を行う。続けて流量 $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ についても同様に計測・記録する。

e. 実験装置の停止

- ① 全ての測定が終了後、均圧弁ならびに切替コック (下部と上部)を閉じる。
- ② 装置の電源をOFFにし、ポンプならびに水の流れが停止したことを確認する。
- ③ 全ての弁・コック類を閉じる。その後、主電源をOFFにする。
- ④ 排水 (貯水) タンクの排水ホースを所定の位置に接続し、水槽の排水弁 (VD)を開いて排水する。排水終了後、水槽の排水弁 (VD)を閉じる。

各測定要素部の緒元

配管 (SUS304 ステンレス鋼管) の実内径 $d_{25}=0.0280\text{m}$, $d_{15}=0.0167\text{m}$ 。

各種直円管の測定部長さは $L=2.00\text{m}$ 。管挿入物・弁・コック類の接続部の管径は d_{25} 。

緩拡大・縮小管と急拡大・縮小管 縮小部の管径は d_{25} , 拡大部の管径 $d_{40}=0.0426\text{m}$ 。

オリフィス径 $d_0=0.01475\text{m}$, ベンチュリ管の小径部 $d_v=0.0119\text{m}$ 。接続部の管径は d_{25} 。

実験結果と考察

- ① 可視化観察・測定結果より、各段階における流れの観察状況と、レイノルズ数の算出結果とを表 1 を参考にまとめよ。
- ② 管径の異なる 25A 管・15A 管 (長さは全て 2.00m) について、各設定流量 $V[\text{m}^3/\text{h}]$ において測定したマノメータの差 (Δh) より、それぞれの管の円管摩擦係数 f (ファンニングの式より) とレイノルズ数 Re を算出し、表 2 を参考にまとめよ。
- ③ 各設定流量 $V[\text{m}^3/\text{h}]$ におけるレイノルズ数 Re に対する各管径の円管摩擦係数 f との関係 (Moody 線図) を図示し、用いた円管の内面粗滑度について検討せよ。
- ④ (A, B) 班ごとに指定された直管・弁・管挿入物について、各設定流量 $V[\text{m}^3/\text{h}]$ における測定結果 (マノメータの差 Δh または $\Delta h'$) より、直管・弁・管挿入物の損失係数 n とレイノルズ数 Re を算出し、表 3 を参考にまとめる。あわせて理論式の検討を行い、考察せよ。
- ⑤ 管路の (急激・緩やかな) 拡大・縮小に関して、拡大時においては縦軸に F_e 、横軸に $(u_1-u_2)^2$ をとり、流量 1.0 および 2.0 $[\text{m}^3/\text{h}]$ の 2 点のプロットより直線を引き、直線の傾きより損失係数を求めよ。また、縮小時においては縦軸に F_c 、横軸に u_2^2 をとり、その直線の傾きより縮流係数 K を求めよ。可能であれば、実験結果と理論値とを比較・考察せよ。
- ⑥ オリフィスやベンチュリ管では、流体が通過する際、流速に応じて圧力差が生じる。そこで表 4 を参考に実験・算出結果をまとめると共に、両対数方眼紙を用いて、横軸に各設定流量 $V[\text{m}^3/\text{h}]$ を、縦軸にマノメータの差 (Δh または $\Delta h'$) をとり実験結果を plot し、検量線をそれぞれ作図せよ。
- ⑦ オリフィスやベンチュリ管における流体計測の理論式より流量係数 C を求め、片対数方眼紙を用いて縦軸に流量係数 C を、横軸 (対数軸) にレイノルズ数 Re (オリフィスやベンチュリ管の小径部における) をとり実験結果を plot し、流量係数 C とレイノルズ数 Re との関係を図示せよ。可能であれば、これらの関係は何を意味しているか考察せよ。

以上

----- 表の例 -----

表 1 可視化による流れの観察実験結果

1l を貯留するのに 要した時間[sec]	体積流量 V [m^3/s]	平均流速 u [m/s]	レイノルズ数	層流／乱流の判定	備考

表 2 管径の異なる各円管における管摩擦係数 f とレイノルズ数 Re との関係

体積流量 V [m^3/s]	25A 直円管				15A 直円管			
	平均流速 u [m/s]	Δh [mH_2O]	管摩擦係数 f	Re	u [m/s]	Δh [mH_2O]	管摩擦係数 f	Re

表 3 各種管挿入物における損失係数 n とレイノルズ数 Re との関係

体積流量 V [m^3/s]	平均流速 u [m/s]	Re	15A直管							
			Δh [mH_2O]	損失 係数 n	Δh [mH_2O]	損失 係数 n	Δh [mH_2O]	損失 係数 n	$\Delta h'$ [mHg]	損失 係数 n

表 4 各体積流量におけるオリフィス・ベンチュリ管の流量係数 C とレイノルズ数 Re との関係

体積流量 V [m^3/s]	オリフィス				ベンチュリ管			
	Δh [mH_2O]	流量係数 C	u_0 [m/s]	Re	Δh [mH_2O]	流量係数 C	u_v [m/s]	Re