

I-02 液体の流量および抵抗測定

担当：真田 俊之（総 R410）
内線：1605, Email:ttsanad@ipc.shizuoka.ac.jp

本実験の準備

レポートに必要な図等の電子データは、真田の Web ページ (<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~ttsanad/lecture.html>) に置いていますので自由に使用下さい。（本質の理解に十分な時間を使って欲しいため）

- ・ 実験にはノートパソコンを持参すること。（エクセルが使用できる環境が必要）
- ・ USB メモリを持参すること。（グループでのデータの受け渡しに使用）
- ・ 実験の内容に加え、ブルドン管およびダイアフラム型の圧力計の測定原理について調べておくこと

関連する講義：流れ学、流体力学 I、流体力学 II、環境工学

1. 目的

我々の日常生活から工場プラントまで非常に広範囲にわたり、流体の輸送に円管が使用されている。管壁に囲まれた流れである円管内の流れは、内部流れの基本的なものであり、準一次元の流れ (quasi-one-dimensional flow) として取り扱うことが多い。すなわち、流管内の諸量が流れの方向の距離のみの関数として表され、管断面積のみが変化しているとする。このような管内の流れにおいては、流量、平均流速、圧力が重要なパラメータとなり、管摩擦損失を見積もることは配管系の設計において欠かすことはできない。なお本実験では時間に関して諸量は変化しないとする定常状態のみを取り扱う。

本実験では、ターボ機械（遠心ポンプ）の入口および出口圧力、配管内の流量を計測することによって、液体の流量や圧力計測法について学ぶ。圧力の計測においては様々な単位（工学単位、SI 単位等）が混在するのが現状であり、その単位換算の習得や、流量計測の原理を理解することを目的とする。さらに計測圧力から管内の損失を見積ることで、配管設計に関する演習を行う。これらの作業を通して、使用するターボ機械の性能評価を行う。

2. 理論

2・1 管内の流れ

本実験で使用する水など、液体はそのほとんどが非圧縮性流体として取り扱うことが可能となる。そのため、質量保存則である連続の式 (continuity equation) は、体積流量 Q が一定として示されることが多い。任意の断面 1 および 2 において、それぞれ断面積 A と平均流速 U は

$$Q = A_1 U_1 = A_2 U_2 \quad (1)$$

と表される。そのため、断面積が増加すれば、流速は減少する。

次に運動量の保存則から導かれるベルヌーイ式は、流線に沿って成立し (2) 式で表される。

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + z_2 = \text{const.} \quad (2)$$

ここで、式(2)は水頭(head)バランスを表す式で、第1項を圧力ヘッド、第2項速度ヘッド、第3項を位置ヘッドと呼び、単位は[m]となる。この式は理想流体を仮定しており損失が無い場合であるが、実在流体の場合、式(3)のように損失ヘッド Δh を用いてベルヌーイ式を拡張する。

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + z_2 + \Delta h \quad (3)$$

ここで、管内流れの場合、この損失ヘッドは直管部での損失とその他の諸損失との和になる。直管部での損失はダルシー・ワイズバッハの式で表され、

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho g} = \lambda \frac{l}{d} \frac{U^2}{2g} \quad (4)$$

となる。ここで λ は管摩擦係数で、層流の場合には $\lambda = 64/Re$ で与えられるが、乱流の場合には多数の実験式が提案されている。またその他の諸損失、例えば、流れの方向の変化(ベンド、エルボ等)、流路断面積の変更(広がり管、細まり管)は一般的に

$$\Delta h = \xi \frac{U^2}{2g} \quad (5)$$

で表される。ここで平均流速 U は、損失の生じる場所を通過し速度が減少する場合(広がり管など)、損失の生じる場所の影響を受け始める管断面積における平均流速を、逆に損失の生じる場所を通過し速度が減少する場合(細まり管など)、その影響を受け終わり流れが常態に復帰した管断面積における平均流速を用いる。式(5)の ξ は損失係数で、一般に管路要素や流路の形状を表すパラメータとレイノルズ数 Re の関数である。

2・2 流体機械の性能

ポンプを揚水装置として使用する際に必要な知見について述べる。ポンプで実際に揚水する高さを実揚程と呼ぶが、ポンプでは前節で述べた管摩擦等の損出があるため、ポンプではそれらの損失に相当する高さ(損失水頭)を加えたものを水に与える必要がある。ポンプが水に与える水頭を全揚程 H と呼ぶ。図1に示されるように、このポンプの全揚程 H は、ポンプ吐出全圧水頭 H_d と吸込全圧水頭 H_s より次式で与えられる。

$$H = H_d - H_s \quad (6)$$

ここで、ポンプ吐出全圧水頭および吸込全圧水頭とは、ポンプの出口および入口(吸込部)における水頭を表しているため、次式で求めることができる。

$$H_d = \frac{p_d}{\rho g} + \frac{U_d^2}{2g} \quad (7)$$

$$H_s = \frac{p_s}{\rho g} + \frac{U_s^2}{2g} \quad (8)$$

なお、ここではポンプの入口および出口に取り付けられた圧力計の取り付け位置によるヘッド差を無視している。 p_d および p_s はそれぞれポンプ出口および入口における静圧である。また U_d および U_s はそれぞれ両断面を通過する平均流速である。なお本実験では、吸込全圧水頭を吸込側仕切弁によって調整している。

ポンプが水に与える動力 L_w は、密度 ρ 、流量 Q の液体を全揚程 H の高さに揚水するため、

$$L_w = \rho g Q H \quad (7)$$

で与えられ、この動力を水動力と呼ぶ。電動機によりポンプに与えられる軸動力 L は、トルク T と角速度 ω より与えられ、

$$L = T \cdot \omega \quad (8)$$

となる。よってポンプ効率 η は、ポンプの軸動力 L と水動力 L_w の比から

$$\eta = \frac{L_w}{L} \quad (9)$$

で求めることができる。このようにして得られた、ポンプの吐出し量（流量） Q と全揚程 H 、軸動力 L 、効率 η の関連を示した図をポンプの性能曲線といい、通常ポンプの試験成績表に記入されている。ポンプの性能曲線の例を図 2 に示す。

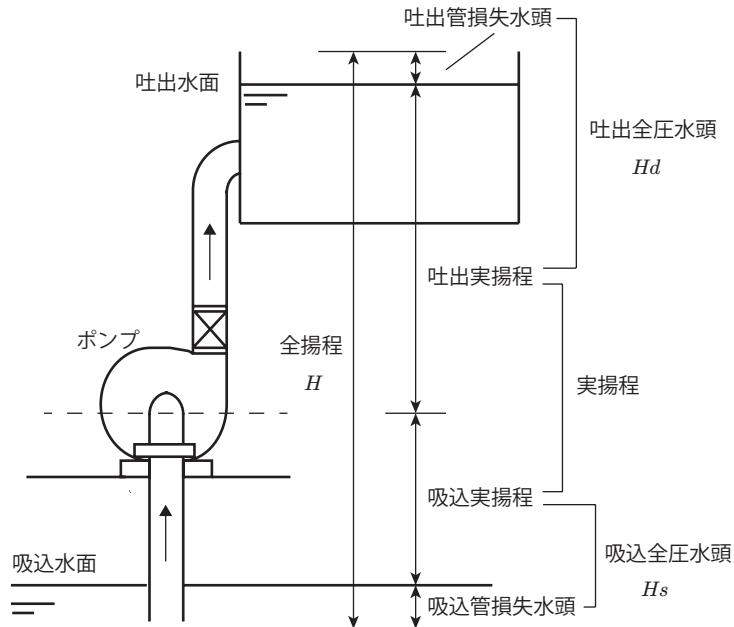


図 1 ポンプ揚水装置（全揚程 H の説明）

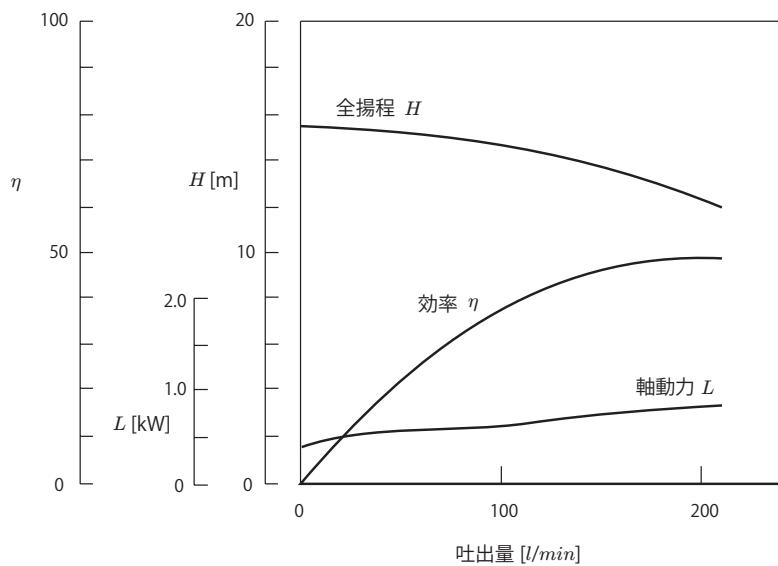


図 2 ポンプの性能曲線

3. 実験

図3に実験の概略図を示す。遠心型のポンプにはトルク計と電動機が取り付けてあり、トルクおよび回転数の計測が可能である。圧力は、ポンプの入口および出口において二種類の圧力計（ブルドン管およびダイアフラム型）を用いて計測する。また流量計を用いて管内の流量を計測することができる。なお実験開始前、実験終了時に液体温度を計測しておくこと。以下実験手順を示す。

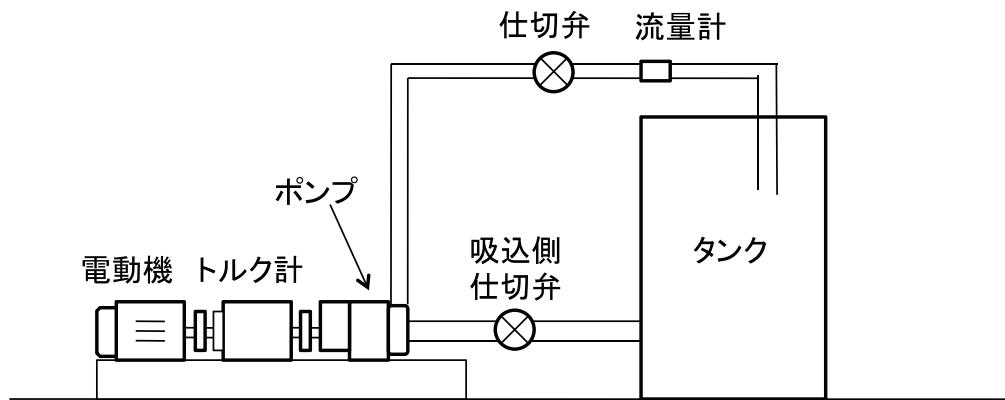


図3 実験装置概略図

3・1 圧力単位の決定

本実験では、単位換算の学習のため、圧力測定箇所に2種類の圧力計が設置されている。以下の指示に従い単位を求める。決定した単位は以下にメモを取っておく。

- (1) ポンプを静止させた状態で、デジタル表示されているポンプ入口の圧力の単位を、タンク水面とのヘッド差から決定する。
- (2) 仕切弁を全閉にし、ポンプを起動する。このとき吸込側仕切弁には触れないこと。
- (3) ブルドン管と比較することによってデジタル表示されているポンプ出口の圧力の単位を決定する。

ポンプ入口圧力の単位 []

ポンプ出口圧力の単位 []

3・2 ポンプの性能試験

ポンプの特性曲線を得るため、性能試験を行う。以下の指示に従いデータを取得する。

- (1) 電動機の回転数は 1715 [rpm]で一定とする（インバーターで 58.7 [Hz]）。
- (2) 仕切弁を全開にし、最大流量とする。回転数、トルク、流量、ポンプ入口圧力、出口圧力を計測する。このとき、流量の測定においては、流量の値が落ち着くまで十分に時間をおくこと。
- (3) 仕切弁を調節し流量を減少させながら、各測定点において (2) と同様に、回転数、トルク、流量、ポンプ入口圧力、出口圧力を計測する。
- (4) 最大流量から最小流量（全閉）までを 15 分割程度する。表 1 が完成したら、実験を終了しても良い。

表 1 測定結果

測定点	回転数 n	トルク T	流量 Q	入口圧力 p_s	出口圧力 p_d
単位	[]	[]	[]	[]	[]
1					
2					
・					
・					
15					

4. 整 理

実験終了後、以下の指示に従いポンプの特性曲線を求める。4 が終わり次第、実験を終了して良い。以下に従って測定データを整理し、表 2 を完成させよ。

4・1 ポンプの性能試験

- (1) 測定した流量 Q を SI 単位へ換算せよ。
- (2) 流量よりポンプ出口における平均流速 U_d を求め、速度ヘッド $U_d/(2g)$ を求めよ。
- (3) 圧力ヘッド $p_d/(\rho g)$ を求め、式 (7) より、吐出全圧水頭 H_d を求めよ。ここで液体密度の値は、表 3 を使用せよ。
- (4) ポンプ入口においても同様に、速度ヘッドおよび吸込全圧水頭を求めよ。
- (5) 式 (6) を用いてポンプの全揚程 H を求めよ。
- (6) 測定した回転数とトルクより式 (8) によって軸動力 L を求めよ。
- (7) 式 (7) を用いて水動力 L_w を求めよ。
- (8) 式 (9) によって、ポンプの効率を求めよ。
- (9) 図 1 に従い、ポンプの特性曲線を作図せよ。

表 2 測定結果の整理

測定点	Q [m ³ /s]	$U_d^2/(2g)$ [m]	$p_d/(\rho g)$ [m]	H_d [m]	$U_s^2/(2g)$ [m]	$p_s/(\rho g)$ [m]	H_s [m]	H [m]
1								
2								
•								
15								

測定点	L [W]	L_w [W]	η	Δh
1				
2				
•				
15				

表 3 液体密度 (1atm における水の密度)⁽¹⁾

温度 T [°C]	密度 ρ_w [g/cm ³]								
0	0.99984	7	0.99990	14	0.99924	21	0.99799	28	0.99623
1	0.99990	8	0.99985	15	0.99910	22	0.99777	29	0.99594
2	0.99994	9	0.99978	16	0.99894	23	0.99754	30	0.99565
3	0.99996	10	0.99970	17	0.99877	24	0.99730	31	0.99534
4	0.99997	11	0.99961	18	0.99860	25	0.99704	32	0.99503
5	0.99996	12	0.99949	19	0.99841	26	0.99678	33	0.99470
6	0.99994	13	0.99938	20	0.99820	27	0.99651	34	0.99437

4・2 吸い込み管における損失

- (1) タンク水面とポンプ入口の間に、損失ヘッドを含むベルヌーイの式 (3) を適用すると、式 (10) のようになる。ここで、 z_1 は吸い込み口から圧力計までの高さ、 z_2 は圧力計の高さと水面の高さの差である(図 4 を参照のこと)。空白を埋めよ。

$$z_1 + \left(\frac{p_s}{\rho g} \right) = \left(\frac{p_s}{\rho g} \right) + z_1 + \Delta h \quad (10)$$

- (2) Δh を計算せよ(表 2 に追加せよ)。なお、ここで z_2 は流量がゼロの場合の静圧ヘッドと等しくなる。

$$z_2 = \left(\frac{p_s}{\rho g} \right)_{Q=0} \quad (11)$$

- (3) 損失ヘッドと流量の関係をグラフに示せ。

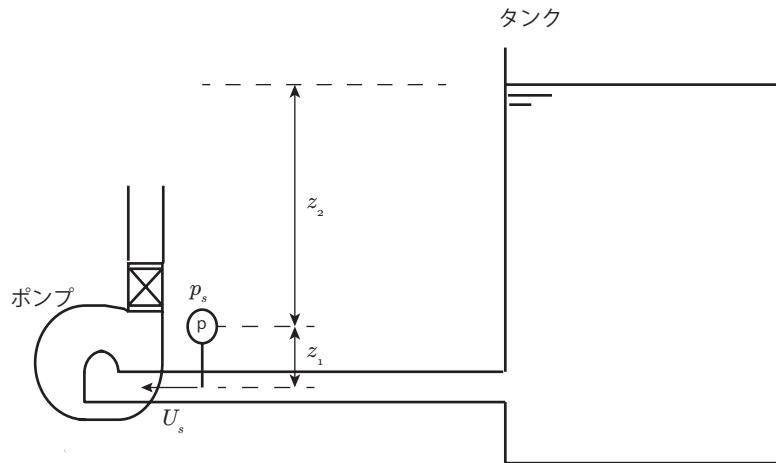


図4 ヘッド説明図

5. 検討

以下の事項について実験結果について考察せよ.

5・1 流量および抵抗測定

- 損失ヘッドと流量の関係について考察せよ.
- 指示された条件におけるレイノルズ数を求め、層流か乱流か判断せよ。なお水の粘度および動粘度の値は表4から適宜に補間することで求めよ。

表4 水の粘度と動粘度 (圧力: 1atm)⁽¹⁾

温度 T [°C]	粘度 η [10^3 Pa·s]	動粘度 ν [$m^2 \cdot s^{-1}$]
0	1.792	1.792
5	1.520	1.520
10	1.307	1.307
15	1.138	1.139
20	1.002	1.0038
25	0.890	0.893
30	0.797	0.801
40	0.653	0.658

- 指示された条件におけるAからBにおける損失ヘッドを、以下の図5を参考に求めよ。なお、装置に設置されているバルブはないものとして扱う。

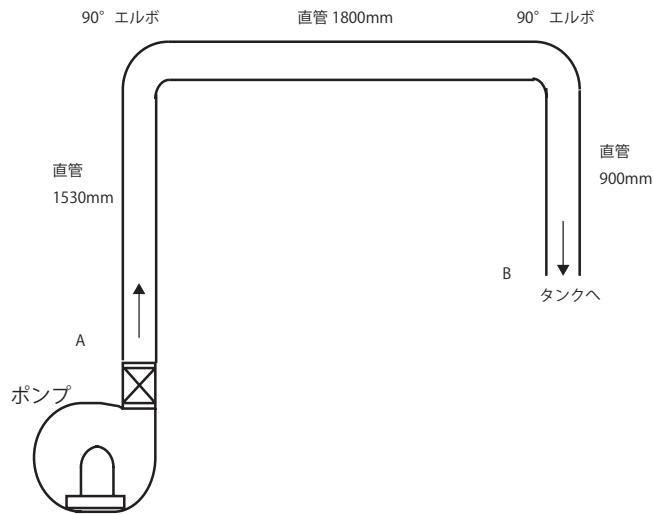


図 5 配管概略図

5・2 ポンプの特性曲線

- ポンプ設計において重要な無次元パラメータに比速度がある。比速度 n_s は以下の式で表される。

$$n_s = \frac{NQ^{\frac{1}{2}}}{(gH)^{\frac{4}{3}}} \quad (12)$$

ここで、 N , H , Q の単位はそれぞれ $1/s$, m^3/s , m であるが、日本では慣用的に N , H , Q の単位に rpm , m^3/min , m を用いた N_s が慣用的に使用されている（その他 g を省略した形など様々なものが混在している）。 N_s と n_s の関係を求めると共に、今回の実験値から比速度を求め、その値について考察せよ。

5・3 その他関連する事項

- 今回使用した流量計は電磁流量計である。電磁流量計の測定原理についてまとめると共に、その他どのような流量計があるか調べ、報告せよ。

6. 記号

A	配管の断面積	T	トルク
g	重力加速度	U	平均流速
H	全揚程	Re	レイノルズ数
H_d	吐出全圧水頭	η	効率
H_s	吸込全圧水頭	ρ	密度
L	軸動力	μ	粘度（粘性係数）
L_w	水動力		
n	回転数		添字
p_d	ポンプ出口部の圧力	d	ポンプ出口部
p_s	ポンプ入口部の圧力	s	ポンプ入口部
Q	流量		

文 献

- (1) 国立天文台編, “理科年表”, 物理/化学, 機械的物性.

レポートについて

レポートの構成は以下の通りとする.

1. 実験の目的
2. 実験内容
3. 実験結果
4. 課題 (テキスト 5.の検討)
5. 感想

感想では, 実験の改善点についての意見も歓迎する.

試問では, 本テキストで, ゴシック体で示したキーワードの理解が必要となる.