

II-02 物体まわりの流れと抗力

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、マノメータについて復習しておくこと

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

流体の流れの中にある物体と流体との間に相対速度があるとき、その物体には流体から力が作用する。この力のうち、相対速度に平行な方向の成分を**抗力** (drag)，垂直な方向の成分を**揚力** (lift) と呼ぶ。抗力や揚力は、自動車や航空機、スポーツなど幅広い分野で非常に重要な事項である。例えば、自動車では抗力低減によって燃費が向上でき、より環境に配慮したものづくりが可能となる。また新幹線や航空機などの高速な輸送機器においては、騒音の問題とも密接に関連している。

抗力は、物体表面に作用する流体摩擦による力（摩擦抵抗：friction drag）と圧力分布による力（圧力抵抗：pressure drag または形状抵抗：form drag）とに分けて考えることができる。本実験では抗力を計測することを通して、物体形状による抗力の違いや抗力の発生メカニズム、特にはく離について理解を深める。さらに、流速と圧力の測定を通して、**ベルヌーイの定理**などの流体力学に関する知識と経験を融合することを目的とする。実験では（1）天秤（2）物体表面の圧力分布、による 2 種類の方法によって、抗力を測定する。

2. 理論

一様流中に置かれた円柱まわりの流れを考える。理想流体の場合、円柱表面の任意の点における流体の速度 v は以下の式で表される⁽¹⁾。

$$v = 2U \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 U は一様流の流速、 θ は円柱表面よどみ点からの角度である。速度が $\sin \theta$ で表されるため、よどみ点で速度はゼロになり、 90° で最大速度 $2U$ となる。

一様流中の圧力を p_0 、流体の密度 ρ をとすれば、円柱表面任意の点における圧力を p はベルヌーイの定理によって

$$p + \frac{\rho}{2}v^2 = p_0 + \frac{\rho}{2}U^2 \quad (2)$$

より求めることができる。このような半径 R の円柱まわりの理想流体の流れを図 1 に示す。図に示されるように、円柱前後で流線が対称となり、また $\theta = 90^\circ$ 付近で流線の間隔が狭くなり、流れが加速されていることがわかる。

一様流

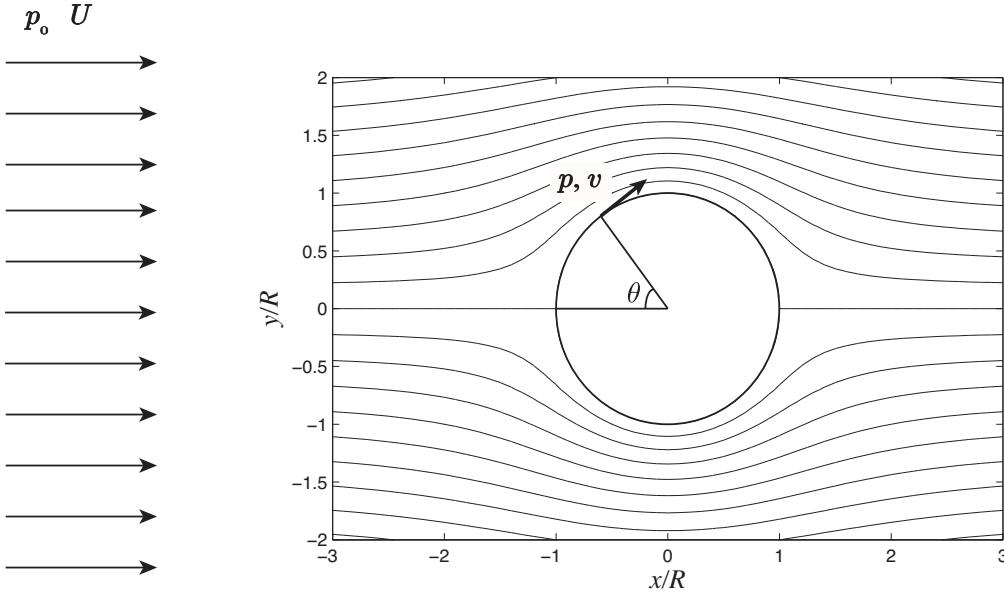


図 1 円柱まわりの理想流体の流れ（図の曲線は流れ関数の等値線、すなわち流線を示す。）

本実験では、一様流中の動圧（式 (2) の右辺第二項： $\rho U^2/2$ ）を用い、抗力係数 C_D と呼ばれる無次元数を抗力 *Drag* 用いて定義する。

$$C_D = \frac{Drag}{\frac{\rho}{2}U^2 A} \quad (3)$$

ここで、 A は物体の基準面積であり、物体の正面投影面積が一般的に使用される。抗力係数は、抗力の指標となる無次元数であり、例えば、同一断面積の物体が、同一流速の中に置かれた際に、その抗力の違いを示す。本実験では、単位長さあたりの抗力 D を定義し、円柱直径 d を用いて

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2}U^2 d} \quad (4)$$

とする。抗力が動圧に対し比例関係にある場合、その傾きから抗力係数 C_D を求めることができる。実験において得られた抗力が DI だった場合 (I は物体の長さ、 $Id = A$)、動圧 ($\rho U^2/2$) との比例係数 a は式 (5) のように表される。そのため、抗力係数は式 (4) より、式 (6) で得られる。

$$a = \frac{DI}{\frac{\rho}{2}U^2} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2}U^2 d} = a/dI \quad (6)$$

円柱表面の圧力を無次元化した圧力係数 C_p は

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{\rho}{2} U^2} \quad (7)$$

と表される。理想流体の場合、圧力係数は式 (1) および (2) より

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{\rho}{2} U^2} = 1 - \left(\frac{v}{U} \right)^2 = 1 - 4 \sin^2 \theta \quad (8)$$

となる。したがって理想流体では、圧力分布が円柱の前後において対称となるため、圧力抵抗はゼロとなる。

一方、粘性流体では圧力抵抗が生じる。円柱表面に境界層が形成され、それが途中で表面からはがれて後流を形成し、圧力分布が非対称となるためである。図 2 に示されるように、単位長さあたりの円柱に働く抗力 D は、微小面積要素 ds に働く力 δD の流れ方向成分を積分することによって得られる。ここで、粘性による摩擦力は無視している。

$$\delta D = pds \quad (9)$$

$$D = \oint p \cos \theta ds \quad (10)$$

式 (10) を無次元化する。

$$\frac{D}{\frac{\rho}{2} U^2 d} = \frac{1}{d} \oint \frac{p}{\frac{\rho}{2} U^2} \cos \theta ds = \frac{1}{d} \oint C_p \cos \theta ds \quad (11)$$

図 2 より、円柱の場合には

$$ds = R d\theta = \frac{d}{2} d\theta \quad (12)$$

が成立するため、抗力係数 C_D は圧力係数 $C_p \cos \theta$ を積分することによって得られる。ここで積分範囲が $0 \sim 180^\circ$ であることに注意する。

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} U^2 d} = \frac{2}{d} \int_0^\pi C_p \cos \theta \frac{d}{2} d\theta = \int_0^\pi C_p \cos \theta d\theta \quad (13)$$

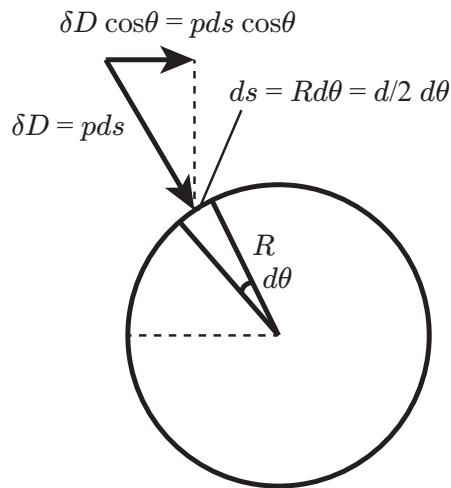


図 2 円柱微小面積要素に働く力

3. 実験

2種類の方法によって物体に働く抗力を計測する。以下それぞれの実験について実験方法について述べる。なお実験開始前に室内温度と大気圧を計測しておくこと。

3・1 (実験1) 天秤による抗力の測定

円柱や翼、平板に働く抗力を、天秤を用いて直接測定する。図3に測定の概略を示す。図に示すように計測原理は単純で、気流により試験体にかかる抗力を、重りを用いて天秤で釣り合いを取り測定をする。以下に測定手順を示す。実験後のデータ処理に必要となるため、試験体の仕様を図4および表1に示す。なお、本実験装置ではすでに校正済みのため、得られた釣り合い値がそのまま抗力値となる。

- (1) 試験体（円柱・翼・平板）およびバランスアームを設置する。なお試験体は実験時に指定する。
- (2) 流れが無い状態での釣り合いを取り、釣り合い値を基準値としてメモを取る。
- (3) チャンバー（ほぼよどみ点状態：風速ゼロ）および測定部の圧力測定孔とマノメータをビニールチューブで接続する。
- (4) 風洞の電源を入れて流れを作り、バランスアームが釣り合う重さを測定し抗力を求める。同時に釣り合ったときの圧力（チャンバー内圧力 P （全圧）、測定部圧力 p_0 （静圧））を計測する。
- (5) 風速を3点程度変化させながら(4)を繰り返す。なお風速の調整は、風速調整バルブによって行う。このとき、バルブの根本にあるダイアルはバルブを固定するためのもので、これを閉めるとバルブが動かなくなり、一定の流速に固定することができる。実験中はバルブを固定しておくこと。

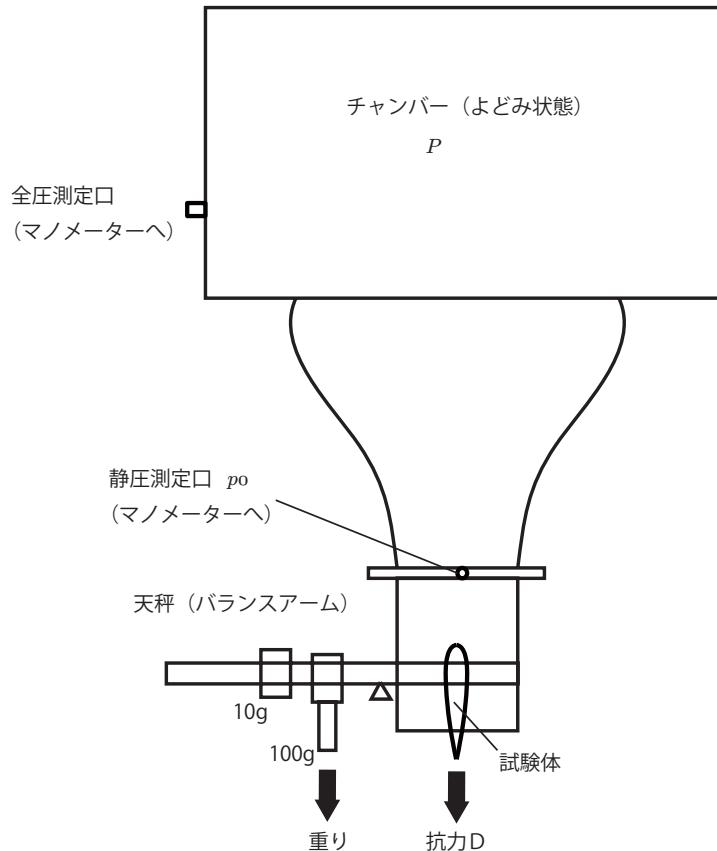


図3 実験装置概略図（天秤による抗力の測定）

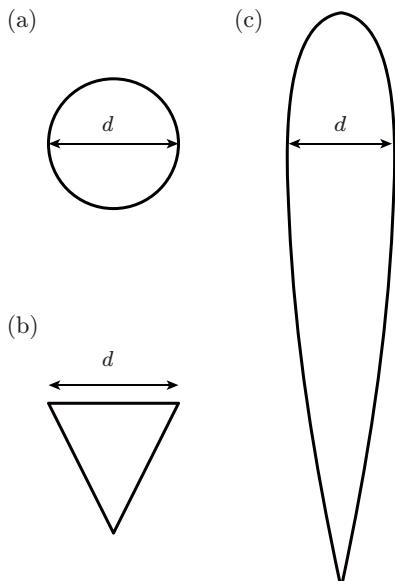


図4 試験体の形状 (a: 円柱, b: 平板, c: 翼型)

表1 試験体の形状 (a) 円柱 (b) 平板 (c) 翼型

試験体	代表寸法 d [mm]	長さ (紙面奥行き) I [mm]
(a) 円柱	12.5	48.0
(b) 平板 (三角形)	12.5	48.0
(c) 翼 (NACA0020)	12.5	48.0

3・2 (実験2) 圧力分布による抗力の測定

円柱に働く抗力を測定するために、円柱表面に設けられた圧力測定孔により、円柱まわりの圧力分布を計測する。圧力はマノメータを用いて測定する。なお圧力測定孔は一つしか設けられていないため、円柱を回転させることにより、圧力分布を求める。以下に測定手順を示す。

- (1) 試験体（円柱、角度指示器が付属しているもの）を取り付け、圧力測定孔とマノメータとをビニールチューブで接続する。
- (2) チャンバーおよび測定部の圧力測定孔とマノメータをビニールチューブで接続する。
- (3) 圧力測定孔をよどみ点 ($\theta = 0^\circ$) に設置する。風洞の電源を入れて流れを作り、測定部の圧力 p_0 (静圧) を測定する。
- (4) よどみ点から順番に円柱表面圧力 p を計測する。このとき、 5° ずつ $\theta = 180^\circ$ まで測定する。このとき、円柱表面圧力の変化を注意深く観察しておくこと。

4. 整理

それぞれの実験において、以下の指示に従い抗力係数を求めよ。4が終わり次第、実験を終了して良い。

4・1 (実験1) 天秤による抗力の測定

試験によって得られたデータを、以下に従って整理し、表2を完成させる。

- (1) チャンバーと測定部のマノメータの読みの差 Δh より差圧を求める。なお液体密度 ρ_w は、液体温度が気温と同じと仮定し、表3を使って求めよ。

$$P - p_0 = \rho_w g \Delta h \quad (14)$$

- (2) チャンバーと測定部との間でベルヌーイの式 (15) を適用し、測定部での動圧および速度を求める。気体密度 ρ_a は気体の状態方程式 (16) を使って求める (式 (16) は例として、大気圧で温度が 18°C の場合を示している)。

$$P - p_0 = \frac{1}{2} \rho_a U^2 \quad (15)$$

$$\rho_a = \frac{p}{RT} = \frac{1.013 \times 10^5}{287.2 \times (273 + 18)} \cong 1.212 [\text{kg/m}^3] \quad (16)$$

- (3) 測定値に対し基準（風速ゼロの時の測定値）との差を取り、抗力値を求める。また $1\text{gmf} = 9.81 \times 10^{-3} \text{ N}$ の関係を用い、単位換算することにより試験体全体に加わる抗力値を求める。

- (4) 図 4 に示すように、動圧と抗力値との関係をプロットする。比例していることを確かめ、その傾きから式 (6) を用いて抗力係数を得る。

表 2 秤量法によって得られた抗力値

読み h_p	読み h_{p0}	差圧 $P - p_0$	動圧 $1/2 \rho U^2$	速度 U	測定値	基準との差	抗力 DI
[mm]	[mm]	[Pa]	[Pa]	[m/s]	[gmf]	[gmf]	[N]
117	94				33		
134	98				42.5		

表 3 液体密度（1atm における水の密度）⁽²⁾

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

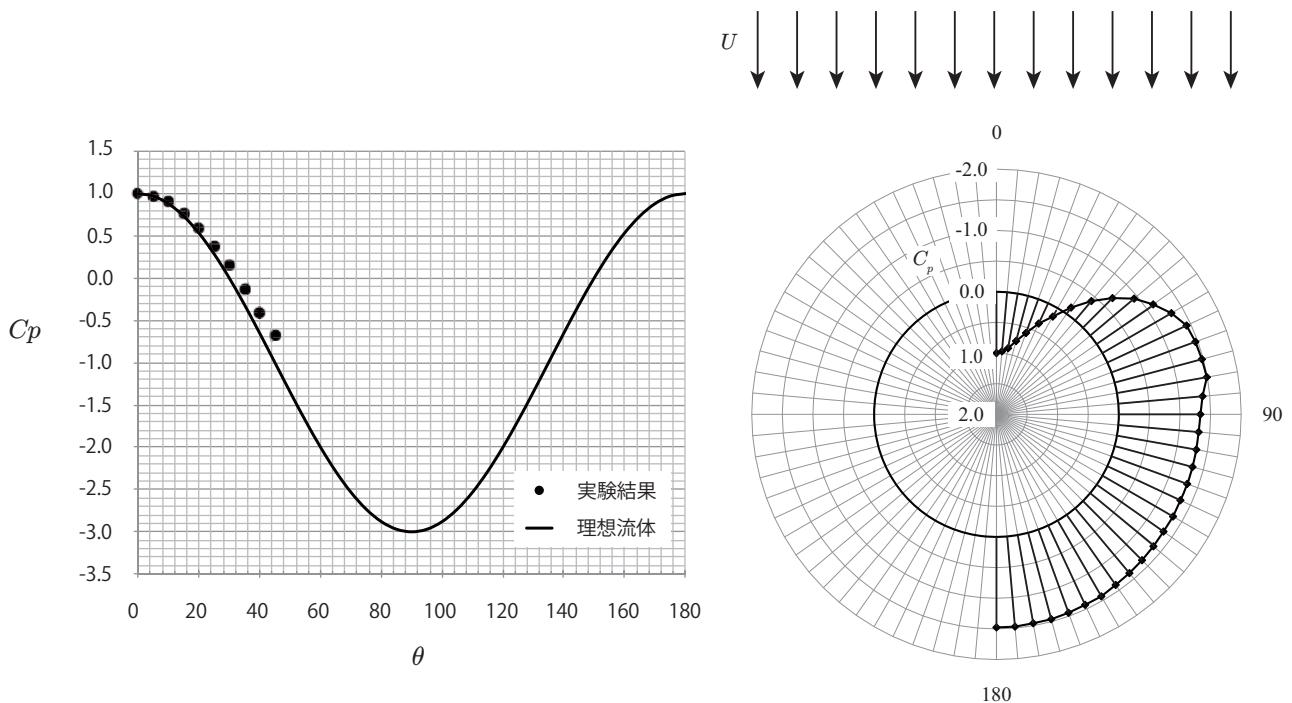


図4 円柱まわりの無次元圧力分布（圧力係数分布図、右：円グラフ）

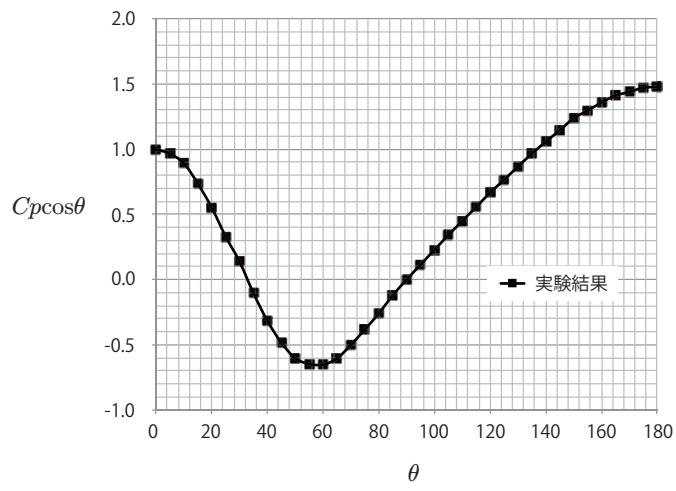


図5 円柱まわりの $C_p \cos \theta$

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 （実験1）天秤による抗力の測定

実験した試験体の抗力係数を比較し、抗力係数の違いについて考察せよ。

5・2 （実験2）圧力分布による抗力の測定

円柱まわりの流れにおいて、はく離と抗力との関係について述べよ。

- 実験時の Reynolds 数を計算し、得られた抗力係数を文献値と比較せよ。ここで Re 数は式 (15) で示される。なお粘度の値はサザランドの式 (16) を用いて計算せよ。

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} = \frac{U d}{\nu} \quad (15)$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_0 + C}{T + C} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2/3} \quad (16)$$

ここで、標準大気圧で 0°C の粘度は $\mu_0 = 1.72 \times 10^{-5} [\text{Pa}\cdot\text{s}]$, T_0 は $273.15 [\text{K}]$, C はサザランド定数で空気の場合 $C = 117$ である。なお特に高圧でない限り、粘度の圧力依存性は無視できる。

- 今回の実験範囲において、円柱まわりに形成される境界層は層流境界層か、もしくは乱流境界層か議論せよ。その理由も示せ。

5・3 その他関連する事項

- ピト一管についてまとめよ（測定原理、使用例など）。

6. 記号

a	抗力と動圧の比例係数	P	全圧（チャンバー内圧力）
A	基準面積	R	円柱半径
C	サザランドの定数（空気の場合 117）	R	空気のガス定数（ $287.2 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ）
C_D	抗力係数	Re	レイノルズ数
C_p	圧力係数	T	温度
d	代表寸法（円柱の場合直径）	U	一様流の速度
ds	微小面積要素（単位長さ）	v	円柱表面速度（ θ 方向）
D	単位長さあたりの抗力	θ	よどみ点からの角度
$Drag$	抗力	φ	マノメーターの傾斜角度
g	重力加速度	ρ	密度
h	マノメーターの読み	μ	粘度（粘性係数）
Δh	マノメーターの読みの差		
l	傾斜マノメーターの読み	添字	
I	物体の長さ	a	空気
p	円柱表面圧力（ θ の関数）	w	水
p_0	一様流の圧力	0	標準状態（ 0°C , 標準大気圧）

文 献

- (1) 例えば、日本機械学会編，“流体力学（JSME テキストシリーズ）”，第 10 章ポテンシャル流れ。その他、流体力学の一般的なテキストの理想流体やポテンシャル流れの章を参照。
- (2) 国立天文台編，“理科年表”，物理/化学，機械的物性。

レポートおよびプレゼンテーションについて

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。

プレゼンテーションの課題については、実験時に指示する。

試問では、以下の知識が必要となる。

- ・ 剥離のメカニズム
- ・ 層流境界層と乱流境界層の剥離
- ・ 圧力抵抗（形状抵抗）と摩擦抵抗