

II 円柱周りの流れ

(流体抵抗の計測と流れの可視化)

II 円柱周りの流れ

(流体抵抗の計測と流れの可視化)

担当研究室

流体力学研究室

連絡先：平原教授 (TEL:048-858-3446 hkira@mail.saitama-u.ac.jp)

姜東赫 (TEL:048-858-3443 kang@mech.saitama-u.ac.jp)

目次

1. 実験の目的	II-2
1.1 概要	
1.2 円柱周りの流れ	II-2
2. 実験の方法	
2.1 噴出し風洞	II-5
2.2 測定部気流流速分布	II-5
2.2.1 装置および計測法	
2.2.2 計測内容	
2.2.3 結果のまとめ方	
2.3 円柱周りの圧力分布測定	II-6
2.3.1 装置および計測法	
2.3.2 計測内容	
2.3.3 結果のまとめ方	
2.4 円柱周りの流れの可視化による渦放出周波数	II-7
2.4.1 装置および計測法	
2.4.2 計測内容	
2.4.3 結果のまとめ方	
2.5 考察について	II-8
付録	II-8

1. 実験の目的

1.1.1. 概要

この実験では、一様な速度の流体（空気や水など）の流れの中に物体を置いたとき、物体が流体から受ける力について学ぶ。ここでは、物体として円柱を取り上げる。円柱周りの流れには、流体の力学としての多くの学ぶべき要素が含まれているので、後々の講義で学ぶ流体力学の諸問題を理解するために、まず、実験を通じて流れの様子を把握することが本実験の主目的である。

さて、一般に、流体から受ける力としては、移動物体が周りの流体から力を受ける場合と、流れの中に物体があって、流体の力によって物体が力を受ける場合とに分けられるだろう。この時には、物体と流体との相対速度をとって考えれば、両者は、力学的に等価であるということはすぐに理解できるであろう。このような場合には、実験でも理論でも、物体を固定して考察するのが最も解析（理解）しやすい。ここでも、‘風洞’という装置を用いて、円柱に一様な流れを衝突させることで実験的な考察を行う。

1.2. 円柱周りの流れ

平行で一様な空気流中に円柱が流れに対して垂直に置かれた時に生じる流れ場は、流体力学の基礎的理解の上でも、実用的にも、多くの応用ができるので、ここでそれをしっかりと理解しよう。まずは、最も基本的な流れの一つから紹介する。それは、粘性も圧縮性もない流れで、これを完全流体の流れ（別名：ポテンシャル流れ）と呼ぶ。図1に、円柱周りのポテンシャル流れの例を示す。円柱周りに描かれているのは、流線であり、流体はこの流線に沿って移動する。流線が上下左右に対称であることに注目してもらいたい。

図2は、円柱の表面に作用する力に関して、上部半面の流れを示したものである。円柱の表面には、紙面に対して垂直方向に単位長さ1の円柱表面を考えると、面積要素 $a d\theta$ に、 $p a d\theta$ の面に対して垂直の力が作用する。また、流体と円柱表面との間には摩擦（せん断応力 τ ）が働くので、この面積要素には面に接線方向に $\tau a d\theta$ の力も作用する。ただし、ポテンシャル流れでは $\tau=0$ であることは言うまでもない。円柱に作用する力はこれがすべてであって、この圧力と応力の分布が分かれば、これらを円柱表面全体にわたって積分することで、水平方向および垂直方向に作用する流体力 X および Y が求まることになる。

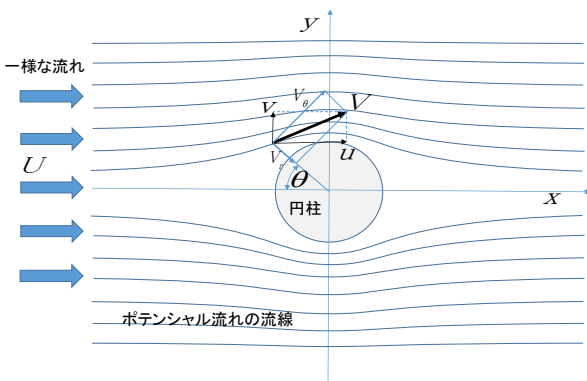


図1 円柱周りのポテンシャル流れ

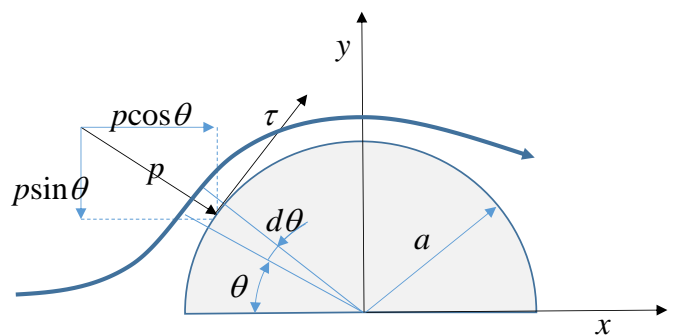


図2 円柱表面に作用する圧力 と応力

円柱の表面に沿った θ 方向の速度は

$$v_\theta = 2U \sin \theta \tag{1}$$

で表され（応用流体力学で学ぶ）、これとベルヌイの式（基礎流体力学で学ぶ）より、円柱周りのポテンシャル流れの、円柱表面に沿う流れの圧力 p の分布は、次式で求めることができる。

$$p = p_\infty + \frac{1}{2} \rho U^2 (1 - 4 \sin^2 \theta) \tag{2}$$

円柱表面の圧力 p と周囲の圧力 p_∞ との差 $p - p_\infty$ を流体の持つ運動エネルギー $\frac{1}{2} \rho U^2$ で無次元化したものを圧力係数と呼び、次式で定義する。

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \tag{3}$$

これを用いると、式(2)より

$$C_p = 1 - 4 \sin^2 \theta \tag{4}$$

となり、図3のような分布となる。式(2)に示される圧力を、流れの方向成分と流れに垂直方向の成分に分解し、円柱表面積全体にわたって以下のような積分をすると、単位長さ当たりの円柱に作用する流れ方向流体力（抗力 X ）と、流れに垂直な方向の流体力（揚力 Y ）が

$$\begin{aligned} X &= \int_0^{2\pi} (-p \cos \theta + \tau \sin \theta) a d\theta \\ Y &= \int_0^{2\pi} (-p \sin \theta - \tau \cos \theta) a d\theta \end{aligned} \tag{5}$$

として求まる。ポテンシャル流れでは、これらの積分値はいずれもゼロとなり、円柱には流体力は働かないことになる。

しかし、実際の流れではこのような理論的結果とは異なり、抗力や揚力が生じる。その理由について理解することが本実験の目的である。現実の問題において抗力と揚力が作用するのは、次の二つの要因によるところが大きい。

- ① 理想的な流れを形成することが困難な場所があって、その部分で流れが壁面から「はく離」する。このことによって発生する抗力を「形状抗力」と呼ぶ。
- ② 実際の流れは、粘性という性質を完全に無視することはできない。そのため、物体の周りには境界層と呼ばれる流れの遅い薄い層が形成される。粘性によって発生する抗力を「粘性抗力」と呼ぶ。

粘性の影響の程度を示す指標として、レイノルズ (Re) 数と呼ばれる無次元数があり、いま考えている円柱周りの流れについては、

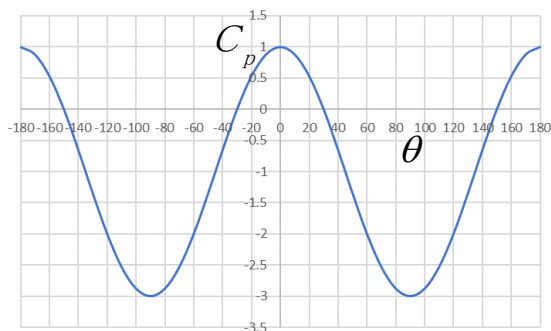


図3 円柱周りの圧力係数分布
(ポテンシャル流れ)

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (6)$$

で定義される。ここで、 U ：一様流の速度、 D ：円柱の直径、 ν ：空気の動粘性係数 ($=\mu/\rho$)、 μ ：空気の粘性係数、 ρ ：空気の密度である。このレイノルズ数の物理的意味は、流れにおける慣性項と粘性項の大きさの比を表しており、

Re ：大 → 粘性の影響小

Re ：小 → 粘性の影響大

となることを示している。 Re 数の値が非常に大きければ、流れ場全体では粘性の影響は無視できる。しかし、物体の表面近くには粘性の影響が無視できない層が存在し、それは境界層と呼ばれる。本実験では、 Re の値が十分大きい値をとるときの円柱周りの流れについて調べる。このような流れの状態を改めて考えてみる。

③ Re 数の値が大きい場合にも、円柱周りに薄い境界層が形成される。

④ 境界層の外側はポテンシャル流れに近い。

実際の流れはさらに複雑であるが、ここでは、上の③と④についてしっかりと理解しておこう。

さて、実際の流れでは、図1に示した上下左右対称のポテンシャル流れからは、ほど遠い様相を呈する。流速が遅いほうから説明しよう。流速が非常に小さいと、 Re 数は小さく、この場合には流れ場の全領域において粘性が支配的であって、渦が観測されない。しかしながら、流れは左右対称ではなく、ポテンシャル流れからはほど遠い流線となる。 Re 数が20程度までは、円柱背後に双子渦が形成され、これは安定的に円柱後方に存在する。流速を上げて Re 数を増大させると、やがて渦が後流に放出されてカルマン渦と呼ばれる渦の列を放出するようになる。このような変化は、流体力学の講義の中で詳細に説明する。ここで、知っておくべきことは、円柱後方に渦が形成され、流れが左右非対称になる結果、円柱に抗力が作用するということである。

最後に、後流への渦放出がどのような周期で生じるかについて説明しよう。円柱からの渦の放出周期を決める無次元パラメータとして、以下に示すストローハル数 St を用いる。

$$St = \frac{fD}{U} \quad (7)$$

ここで、 f は渦放出の周波数である。このストローハル数の値は、 Re 数によって変化するが、これまでの研究によれば、

$$400 < Re < 3 \times 10^5 \quad \text{において、} \quad St \approx 0.2$$

となることが分かっており、 Re 数の広い範囲で、ストローハル数は、ほぼ一定の値をとる。このような関係は、工学的には大変便利であって、円柱に作用する揚力や抗力変動の解析や、円柱が流れの中で振動を起こすときなどの周波数の予測に用いることができる。これに関連する現象としては、電線や木の梢から生じるエオルス音や、熱交換器、ボイラーなどの中におかれた管群の振動などがある。

2. 実験の方法

本実験においては、以下の項目について調べる。

- (1) 測定部気流流速分布の確認
- (2) 円柱周りの圧力分布計測
- (3) 円柱周りの流れの可視化観測および渦放出周波数の確認

各実験項目では以下の風洞と円柱を使用する。

風洞：小型噴出し風洞（出口径 50mm）

風速制御用電源：インバータ電源

供試物体：円柱（直径 12mm）

2. 1 噴出し風洞

風洞は、物体周りの流れを調べる基本的な設備であり、計測対象の物体が置かれる測定部で、可能な限り乱れのない一様な流れを実現するためのものである。本実験では噴き出し型風洞と呼ばれている形式の風洞を用いる。図4にその概要を示す。流れは、大気中に噴出し、外部において計測を行う形式のものである。噴き出す流れ（噴流と呼ぶ）は、可能な限り、乱れのない状態であることが望ましい。そのために、風洞内部では送風機からの乱れや管路で発生する乱れを消滅させるために整流格子が設置されていて均一な流れを作り出している。しかしながら、ノズルから流出する噴流は、周囲の気体と干渉して乱れを発生する。実験では、均一な流れが形成されている範囲をあらかじめ測定しておくことが必須となる。

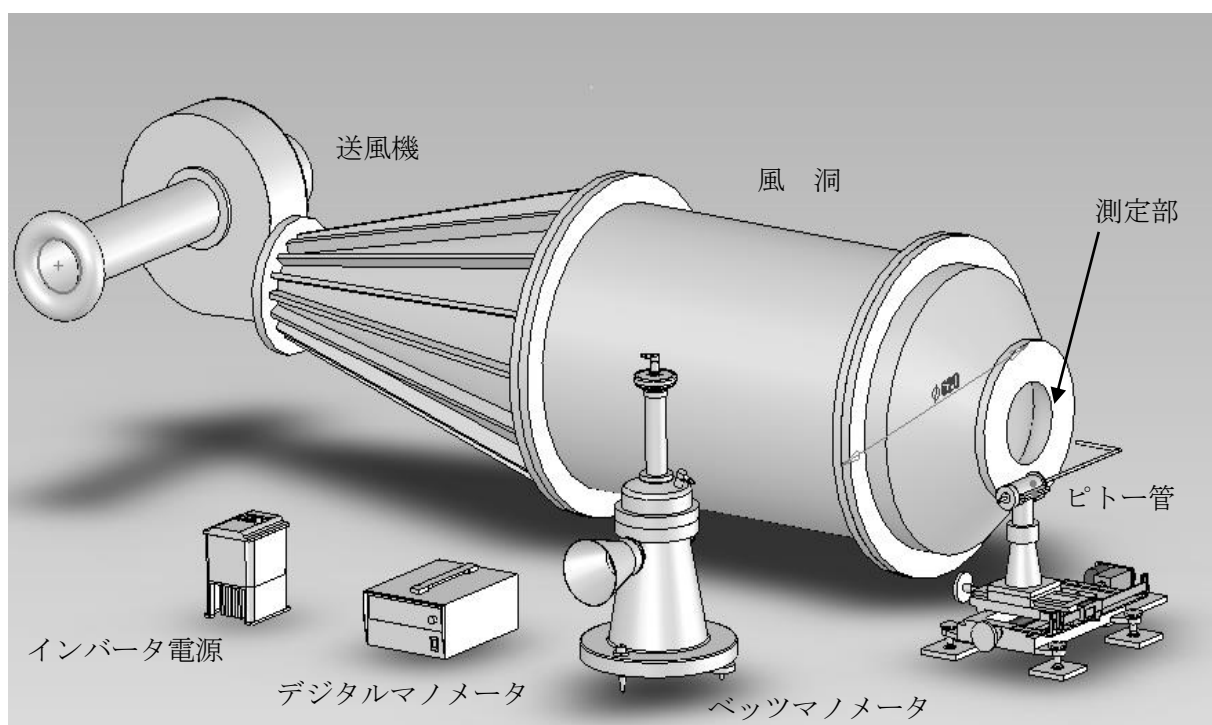


図4 小型開放型（噴出し）風洞

2. 2 測定部気流流速分布

2.2.1 装置および計測法

この実験では、以下の装置を使用する。流速分布計測装置：総圧ピトー管、ピトー管トラバース装置、ベッツマノメータ、デジタルマノメータ使用する風洞は、ほぼ円形の噴出し口を有する小型開放型風洞であり、空気取り入れ口、送風機、整流胴、噴出しノズルからなる。測定部は、ノズル出口からほぼ 250 mm程度までの領域である。インバータ電源の周波数を調整することにより送風機回転数が

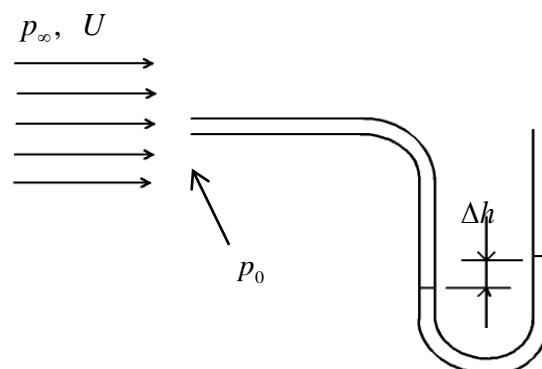


図5 ピトー管による流速測定

変化し、送風量が変化する。この送風量変化により、測定部気流流速が変化する。

測定部気流流速分布計測の目的は、測定部における流速を知ることと同時に、一様な流速分布を持つ領域が流れ方向にどのように変化するかを確認することである。計測は、総圧ピトー管を用いて行う。ピトー管を用いて流速を測定する原理は、ベルヌイの定理に基づいており、大気圧状態の一様な流れの中にピトー管が置かれると、

$$\frac{p_{\infty}}{\rho} + \frac{1}{2}U^2 = \frac{p_0}{\rho} \quad (8)$$

の関係式が成り立つ。ここで、 p_{∞} 、 ρ 、 U は一様流の圧力(大気圧)、密度および流速であり、 p_0 はピトー管先端でのよどみ圧である。この関係を変形すると、

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_0 - p_{\infty})} \quad (9)$$

となり、圧力差($p_0 - p_{\infty}$)を測定すれば流速が求まる。この圧力差はきわめて微小であるため、微差圧測定用の水柱マノメータであるベッツマノメータが用いられる。計測されるものは水柱の高さであり、これを圧力の値に換算しなければならない。その換算式は、

$$\Delta p = (p_0 - p_{\infty}) = \rho_w g \Delta h \quad (10)$$

であり、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 Δh は水柱高さである。

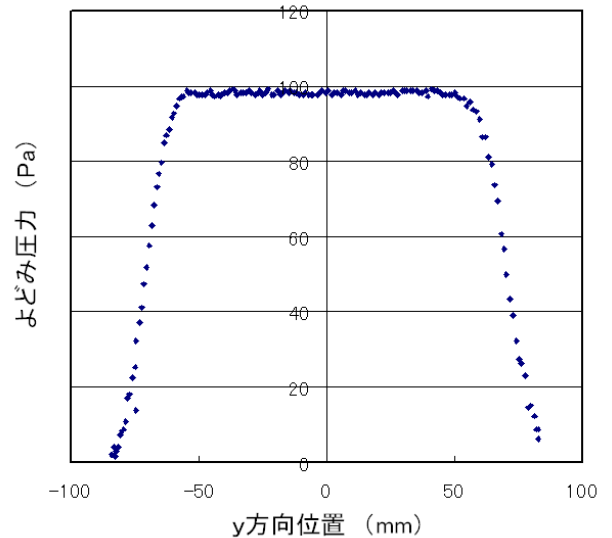


図6 風洞出口部から100 mmにおける水平方向よどみ圧力分布測定結果例

2.2.2 計測内容

インバータ電源周波数を、50Hzとしたときのノズル

出口直後と、水平方向100 mm後方の位置における、中心断面内の水平方向の流速分布測定を行う。(図6参照) さらに100 mmの位置における中心速度とノズル出口幅を用いて、測定部流れのレイノルズ数を求める。

2.2.3 結果のまとめ方

各流速状態における、測定部流速分布を図に示し、流れ方向に一様流領域幅が減少する状態を示せ。

2.3 円柱周りの圧力分布測定

2.3.1 装置および計測法

この実験では、前項目と同じ装置を使用し、一様流中の流れに垂直に置かれた円柱周りの圧力分布を、円柱表面に設けられた圧力孔の位置を周方向に回転させながら測定し、周方向圧力分布を求める。

2.3.2 計測内容

円柱をノズル出口から100 mmの位置に、流れに垂直に置き、インバータ電源周波数を、50 Hzとしたときの、円柱周りの圧力分布を5度おきに計測する(角度 $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)。 (このとき、圧力測定孔は局所圧力を計測するのに十分小さいが、圧力測定孔からベッツ型マノメータにいたるまでの空気体積は圧力変動に追従するほど小さくないため、圧力の平均値が計測されていることに注意する。)

2.3.3 結果のまとめ方

設定速度の一樣流中に置かれた円柱周りの流れに対するレイノルズ数を計算せよ。得られた圧力分布を圧力係数の分布に変換して、ポテンシャル流れの場合と重ねて図に示せ。

2.4 円柱周りの流れの可視化観測およびうず放出周波数の確認

2.4.1 装置および計測法

この実験では、さらに以下の可視化装置を使用する。

可視化トレーサ発生装置：スモークワイヤー装置

照明光源：白色光源

画像記録装置：ビデオカメラ

画像取得装置：パーソナルコンピュータ

一樣流中に、流れに垂直に置かれた円柱周りの流れを、白色光源により照明されたスモークワイヤー法で可視化する。スモークワイヤー法は、測定部中央断面に加熱した線に沿って流動パラフィンを少量落下させながら、筋状の煙を発生させて円柱回りの流れを可視化する手法である。

2.4.2 計測内容

図8に円柱周りに形成されたカルマン渦の様子と、翼の周りの流れの様子を示す。流れは、非定常で時間的に変動するのであるが、これを瞬間撮影することによって、任意の時刻でのスモークが形成する流れの様子を得ることができる。この手法によって、必要な枚数の写真を取得せよ。

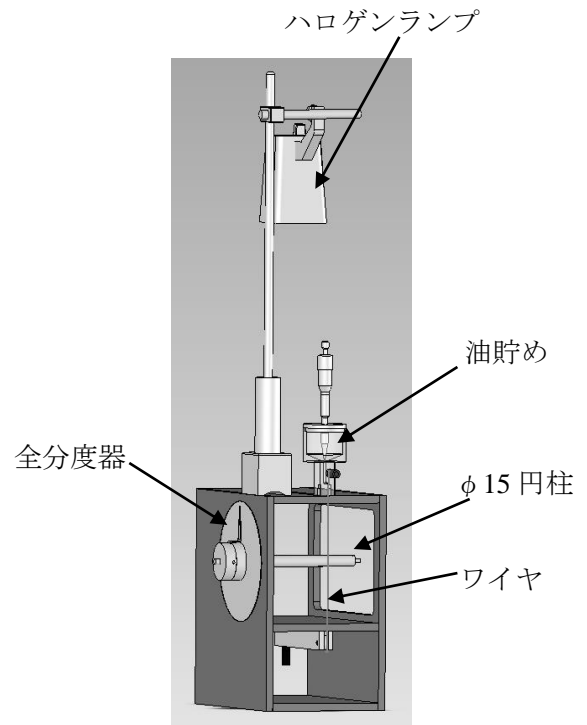


図7 可視化装置（スモークワイヤー法）



図8 可視化例（スモークワイヤー法、左：円柱周りに見られるカルマン渦の例、右：翼が大きく後縁はく離れた時の様子）

2.4.3 結果のまとめ方

流速に対する円柱からの剥離の状態および後流状態の変化について、前実験項目で求めた圧力分布と比較して考察する。

2.5 考察について

実験結果についてまとめた後に、以下の点に注意して考察せよ。

- 1) ポテンシャル流れではなぜ抗力が働かないのか。

- 2) 実際の流れではなぜ抗力が働くのか.
- 3) ピトー管とはどういう計測装置か.
- 4) 境界層とは何か.
- 5) カルマン渦とは何か, また, 観察した結果の印象について
- 6) 可視化で見たものは, なんだったのか. 流線, 流跡, 流脈, のいずれを見たのか. また, それで得られるものは何か.
- 7) 圧力と速度の関係は実験からどのように理解できたか.
- 8) 風洞という装置が大事なものは何か.
- 9) 他に流れを可視化する方法はないのか.
- 10) 速度を測定する方法はこれで良いのか.
- 11) それぞれの計測で発生する誤差を小さくするにはどうすべきか.
など, その他, 自由に考察し, 論述せよ.

付録

実験に用いる物性値の近似式

- (1) 空気の密度

$$\rho = p/RT \quad [\text{kg/m}^3]$$

ここで, T は大気温度, p は大気圧, R は気体定数(287.2 J/kgK)である。

- (2) 空気の粘性係数

$$\mu = 0.6924 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^{0.837} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}\right] \rightarrow [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$