

課題名

物体周りの流れの可視化

学籍番号

37024647

氏 名

島瑛都

メールアドレス

hwh31532@kwansei.ac.jp

提出時のチェックシート

チェック項目		TA チェック
実験	使用した実験機器 (装置名, 型番, メーカー名)	
	簡略図等を用いて実験や PIV 計測の原理を説明する.	
理論計算	実験によって得られたデータを基に, 流れを評価する計算を行う.	
	等計算書の根拠を示す参考文献 (記載は最後)	
シミュレーション	物性値	
	モデル	
	解析条件	
	解析結果	
まとめ・考察	実験値, シミュレーション値の比較. 得られた算出値からの考察 (オプション)	
	誤差に関する考察	
参考文献	考察する際に使用した参考文献	

## 1. 目的

本実験の目的は一様の速度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とである。また、SolidWorks Flow Simulation によるシミュレーションを通して、流体力学の概念を学ぶとともに実験データとシミュレーション結果を比較・考察をすることで理論と実験を結びつける。

## 2. 実験

スモーク風洞実験装置を用いてモデル周りに流れる流体の動きを PIV 解析する。

### 2.1 PIV 計測の原理

PIV とは、非接触で断面中の速度分布を計測する手法である。流体内の微細な粒子をレーザー光で照らすことで、その様子を撮影する。得られた連続した画像から粒子の動きを解析し、流速分布を求めるのが PIV 計測の原理である。

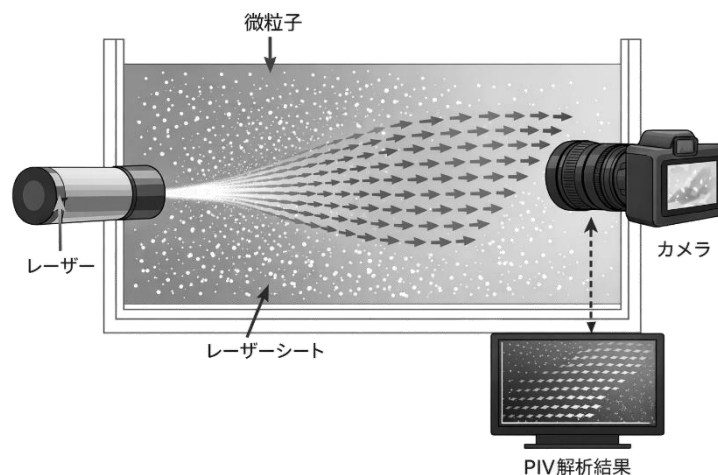


図 1 原理の簡略図

### 2.2 実験器具

実験に用いた実験器具を以下に示す。

使用機器

- ・スモーク風洞実験装置 (AF80 ; TecQuipment)
- ・ハイスピードカメラ (HAS-DX ; DITECT)
- ・LED ライト (EDF-60M, JINBEI)
- ・熱線式風速計 (DT-8880 ; エムケー・サイエンティフィック)
- ・ライセンス認証用の USB ドングル
- ・測定対象物 : 円柱, 半円柱 (直径 45 mm)

<ul style="list-style-type: none"> <li>スモーク風洞実験装置 (AF80 ; TecQuipment)</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>測定対象物：円柱，半円柱 (直径 45 mm)</li> </ul> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>ハイスピードカメラ (HAS-DX ; DITECT)</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>LED ライト (EDF-60M, JINBEI)</li> </ul> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>熱線式風速計 (DT-8880 ; エムケー・サイエンティフィック)</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>ライセンス認証用の USB ドングル</li> </ul> 

図 2 器具

## 2.3 実験手順

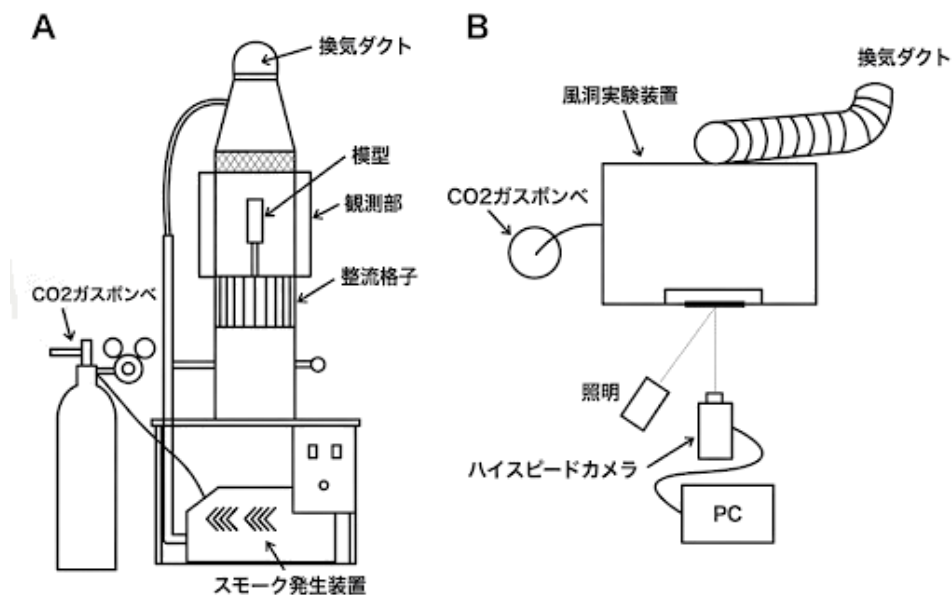


図 3 実験準備の簡易図

### 【スモーク風洞実験装置の実験準備】

- ① 実験室の環境を確認.  
・実験室の換気扇を起動した.

- ・右のように実験装置の排気ダクトを窓からだした.
  - ・測定対象を風洞に取り付ける.その後,アクリル板を取り付けた.
- ② スモーク発生装置の操作
- ・スモーク発生装置の電源を入れ,温度が設定温度になるまで待機した.
  - ・設定温度になった後, スモーク発生装置 のファンスイッチを ON にした.
- ③ 風洞装置のファンの調整
- ・風洞装置のファンスイッチを ON にした後,風洞装置のファンスイッチ下部のダイヤルを回すことでファンが作動していることを確認した.
- ④ CO<sub>2</sub>ガスボンベの調整
- ・スモーク発生装置の煙発生ボタンを ON にした.
  - ・CO<sub>2</sub>ガスボンベのバルブのハンドルを 反時計回りに回してバルブを開けた.
  - ・CO<sub>2</sub>ガスボンベに付属しているレギュレータのハンドルを時計回りに回し,煙が吐出されることを確認した.そして煙の吐出を確認した後,レギュレータを反時計回りに回して煙の吐出を止めた.
- ⑤ 試験機まわりの明るさ調整
- ・工作室の風洞側の電灯を消灯し,風洞装置左側の LED 用のスイッチを ON にした.

#### 【ハイスピードカメラの実験準備】

- ① 撮影条件を決定する.

表 1 設定数値

Frame Rate[fps(=frames per second, コマ/秒)]	500
Window Size[pixels]	800×600
Shutter Speed[sec]	1/2000
Gain[dB]	8

- ② グリッド線の表示をする.
- ・左下のアイコンの左から 4 番目をクリック.「line num」を 1 に設定 → 画面にグリッドが表示される.右上の Fit をクリックして画面を最適化.グリッドの交点に対象物の中心に来るようにカメラ位置を調整する.
  - ・左下のアイコンの左から 3 番目をクリック.ゲインを調整して映像の明るさを調整する.

#### 【風洞実験・計測】

- ① ファンの始動確認
- ・スモーク発生装置と風洞装置の両方のファンスイッチが ON になっているか確認.
  - ・風洞装置のダイヤルが回っていることを確認.
- ② CO<sub>2</sub>ガスで煙を発生させる
- ・CO<sub>2</sub>ボンベのレギュレータを時計回りに回して煙を出す.
  - ・レギュレータと風洞装置のダイヤルを調整し煙は濃く,風速は遅くになるように設定する.

### ③ 風速計の準備と計測

・風速計と測定器をしっかりと接続.風速計の先端キャップを閉じたまま電源を入れる.キャップを外し,アクリル板を少しずらして隙間から風速計を挿入.風速計先端の矢印方向に風が当たるようにして計測する.

### ④ HAS-XViewer で撮影

- ・画面の「Rec」をクリックして録画.
- ・終わったら「Rec stop」をクリック.

### ⑤ データの保存

- ・画面下部の保存アイコンをクリック.そして PC に保存.
- ・設定

(1)ファイル形式:Avi

(2)フレームレート:最大

(3)画像に情報を書き込む:ON

(4)設定アイコンから以下を調整

・Grid:OFF

・Bit shift:OFF

・Size/FPS/Shutter speed/Gain/Time/Frame:ON

・「保存」をクリックし、名前をつけて保存.フレームレートと記録時間により,保存に数分かかる場合がある.データが正しく保存されているか確認.

## 2.4 解析手順

### 【Flownizer Ver.1.3.0 による流体解析】

#### ① Flownizer の起動

- ・ノート PC に USB ドングルを挿入.
- ・スタートメニューから「Flownizer64 1.3.0Ver」を起動.

#### ② プロジェクトの作成

- ・「ファイル」から「プロジェクトの新規作成」.
- ・PIV 2D-2C を選択.
- ・プロジェクト名と保存先を設定し「OK」.

#### ③ 校正用画像の読み込み

- ・サイドツリーの「校正用画像」をクリック.
- ・「校正用画像の読込・表示」から「読込」.
- ・「ファイル」の「開く」から実験画像を選択し読み込む.

#### ④ 簡易キャリブレーション

- ・「キャリブレーションの実行」から「簡易キャリブレーション」.
- ・距離単位を millimeter に設定.

- ・「比率」から「画面上で指定」で既知の長さをドラッグして選択.
  - ・「キャリブレーションファイルの作成」の「OK」から「閉じる」.
- ⑤ 粒子画像の読み込み
- ・サイドツリーの「粒子画像」の「粒子画像の読込」から「読込」.
  - ・使用する粒子画像を読み込む.
- ⑥ マスク画像の作成
- ・サイドツリーの「マスク画像」から「マスク画像の作成・編集」.
  - ・測定対象物に合わせて円柱：円形, 半円柱：多角形を選択.
- ⑦ 解析条件の設定
- ・サイドツリーの「計算」から「比較フレームの設定」.
  - ・結果表示単位は 秒(s)に設定.
- ⑧ 計測領域・検査領域・探査領域の設定
- ⑨ PIV 解析の実行
- ・「2D-2C PIV の実行」→「計測開始」.
  - ・計算が終わると「終了しました」と表示されるので「OK」.

## 2.5 解析結果

速度ベクトル, 流線ベクトル, 速度  $U$  のカラーコンターの結果を以下に示す.

- ・半円柱の場合



図 4 測定画像（半円柱）

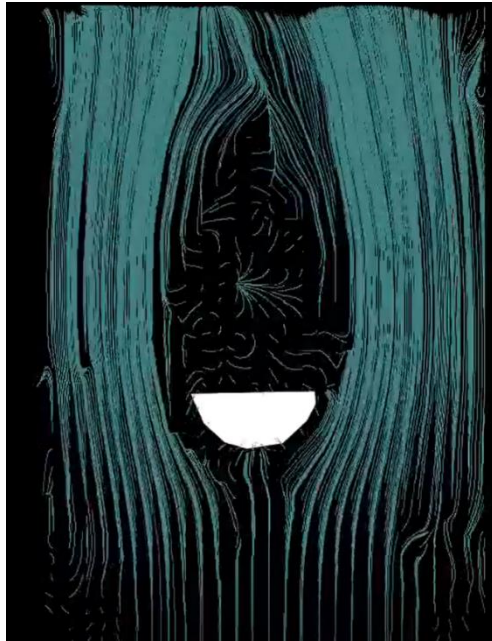


図 5 流線画像(半円柱)

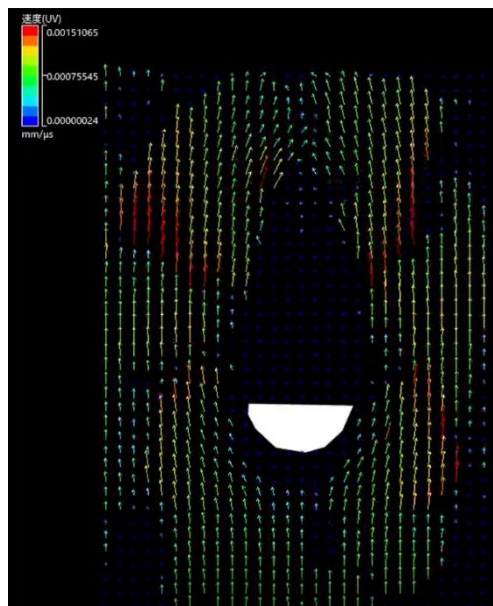


図 6 速度ベクトル (半円柱)

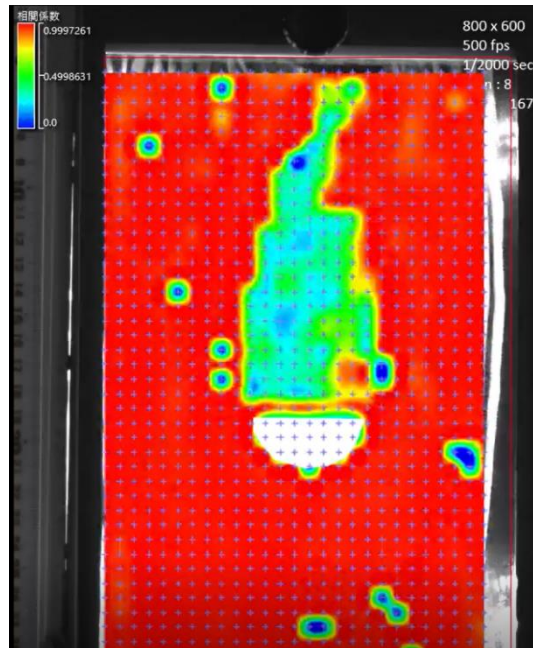


図 7 順方向のカラーコンター（半円柱）

・円柱の場合



図 8 計測画像（円柱）



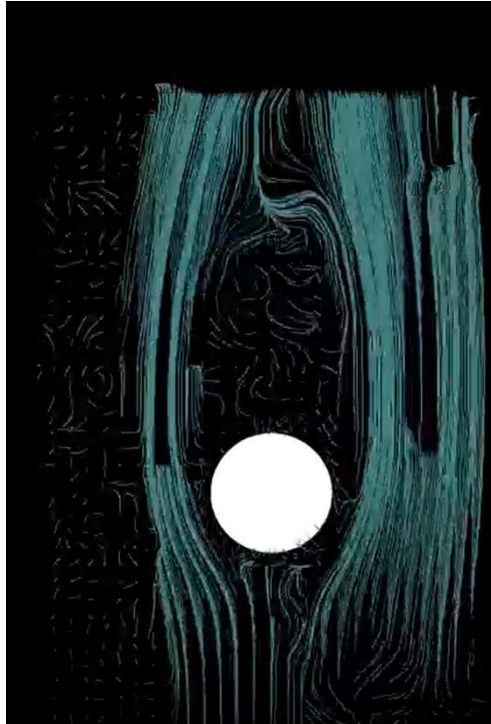


図 9 流線画像 (円柱)

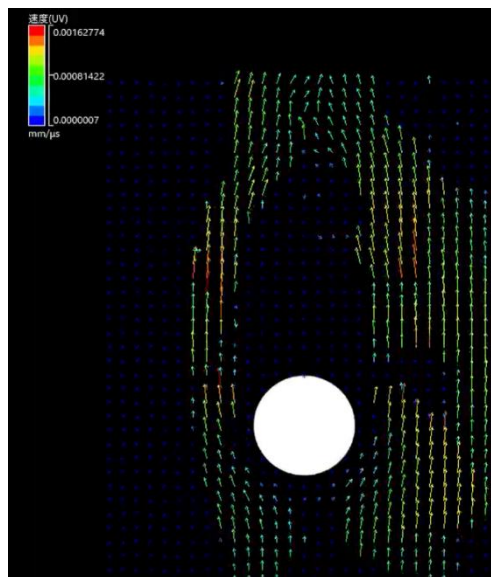


図 10 速度ベクトル (円柱)

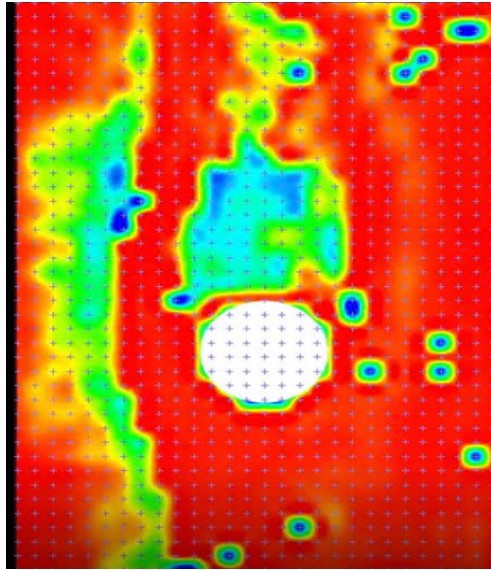


図 11 順方向の速度のカラーコンター(円)

### 3.シミュレーション

3.1. 解析モデル 半円柱モデル 半径 45[mm],厚み 95[mm]のを半円柱作成する.

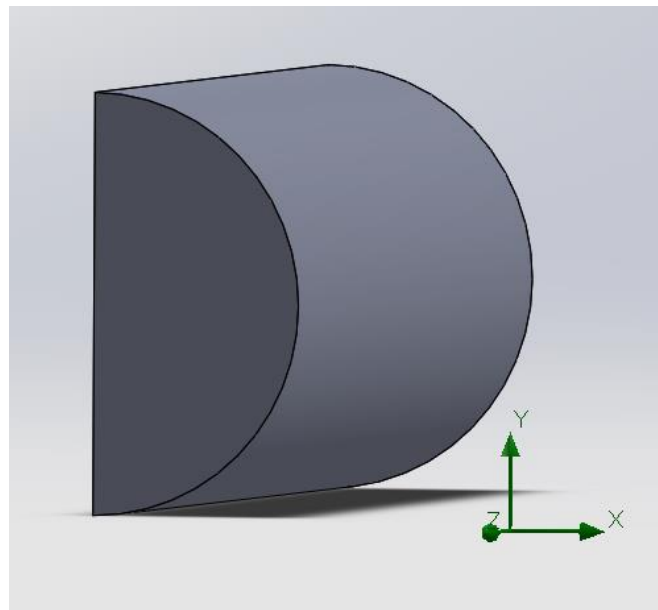


図 12 半円柱のモデル

- ・円柱モデル 半径 45[mm]，厚み 95[mm]の円柱を作成.

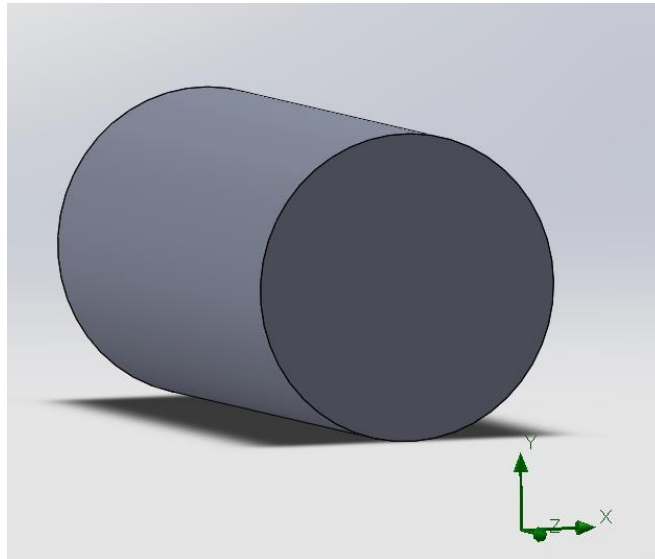


図 13 円柱のモデル

### 3.2. Flow Simulation の設定

- ① Flow Simulation タブのウィザードを右クリックして解析モデルをコンフィギュレーションに設定.
- ② 解析タイプを外部流れに設定.
- ③ プロジェクト流体に「空気」を選択し追加する.
- ⑤ 初期及び環境条件にて X方向の速度をそれぞれ 1.39[m/s],1.03[m/s]に設定. X 方向の速度は実験で得られた数値を利用する.
- ⑥ グローバルゴールを挿入し，力(x)を選択.
- ⑦ 方程式ゴールの挿入を選択し，次の方程式を入力した.

$$\{GG \text{ 力}(X) 1\} * 2 / (1.204 * 1.39^2 * .045 * .095)$$

上記の方程式は抗力係数を求める式である.

### 3.3 解析結果

上図に断面プロット，右図に流線図を示す.

- ・半円柱の場合

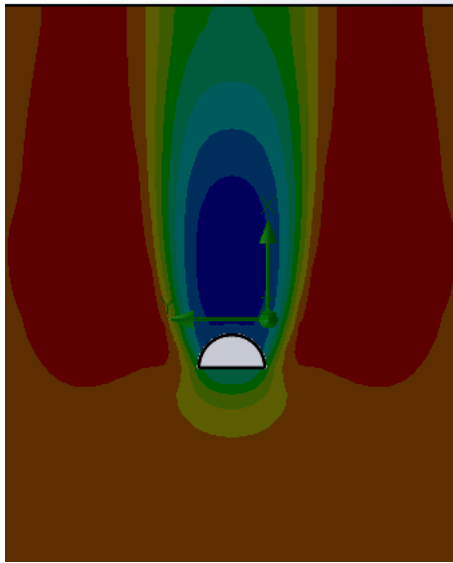


図 14 断面プロット(半円柱)

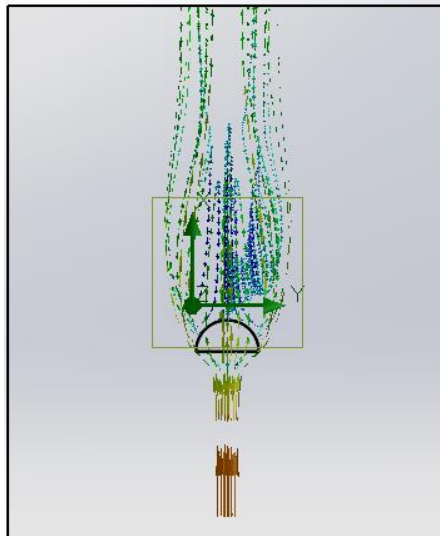


図 15 流線図(半円柱)

- ・円柱の場合

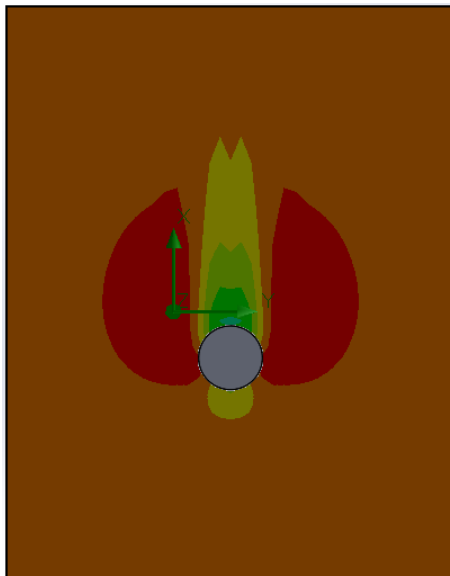


図 16 断面プロット（円柱）

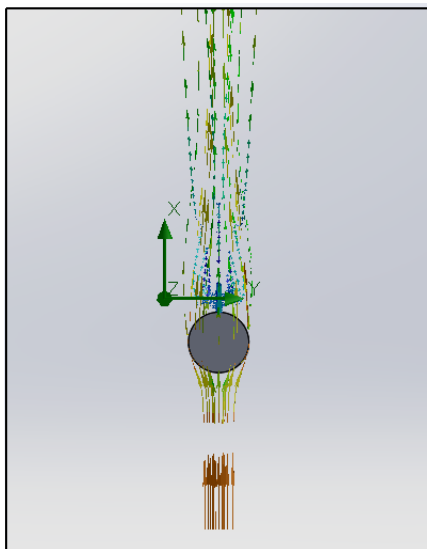


図 17 流線図（円柱）

ゴール名	単位	値	平均値	最小値	最大値	進展状況 [%]	収束において使用	デルタ	基準
方程式ゴール 1	[N]	1.305	1.305	1.297	1.306	100	はい	0.009	0.010

図 18 シミュレーション値（半円柱）

ゴール名	単位	値	平均値	最小値	最大値	進展状況 [%]	収束において使用	デルタ	基準
方程式ゴール 1	[N]	0.620	0.618	0.610	0.620	100	はい	0.010	0.010

図 19 シミュレーション値（円柱）

図 15,図 16 の値セルが抗力係数を示すので,それぞれの抗力係数は[半円柱]1.305,[円柱]0.620 である.

また MATLAB を用いてシミュレーションした.

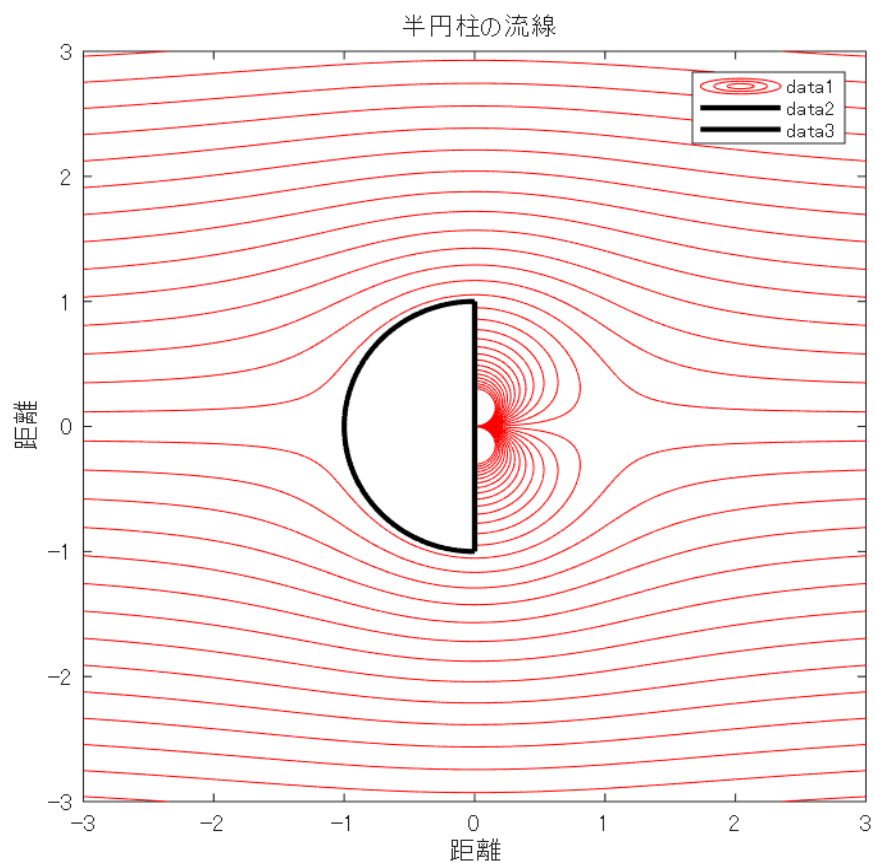


図 20 半円柱のモデル

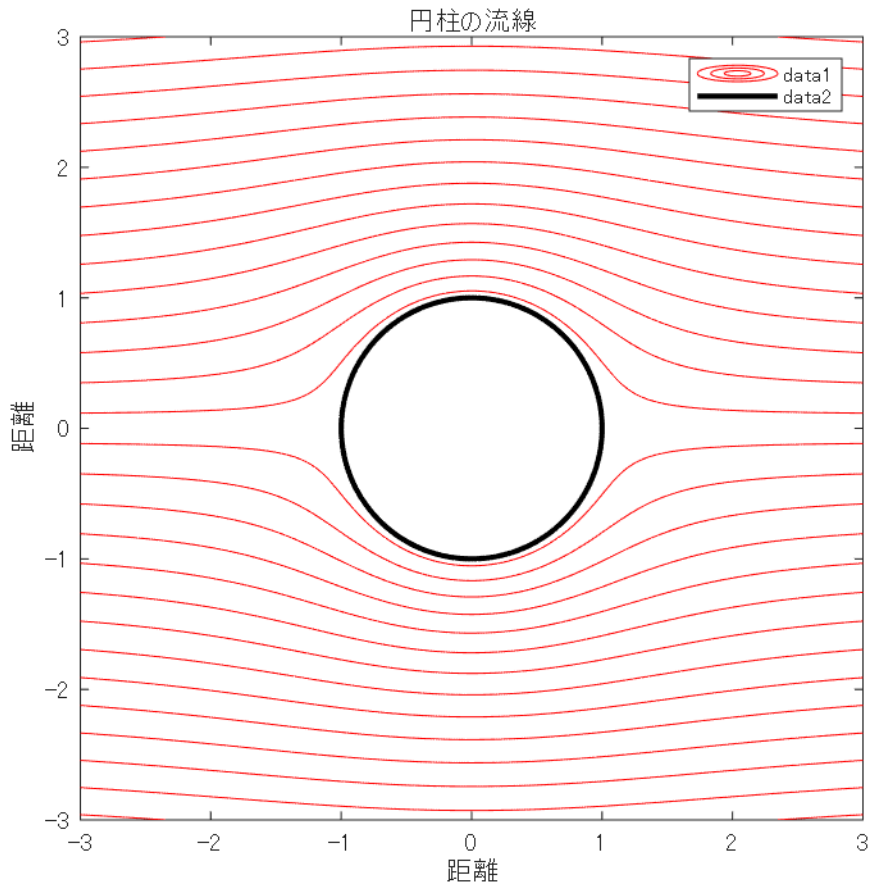


図 21 円柱のモデル

赤色の線が流線を示している。

#### 4.理論計算

ベルヌーイの定理（非粘性、定常流），

$p_{\infty}, p$ は圧力を表している.単位は[Pa]

$\rho$ は密度を表している.単位は[kg/m<sup>3</sup>]

$U, v_{\theta}$ は速度を表している.単位は[m/s]

$$p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho U^2 = p + \frac{1}{2}\rho v_{\theta}^2$$

基準圧力を  $p_{\infty} = 0$  とすると，

$$p = \frac{1}{2}\rho(U^2 - v_{\theta}^2)$$

と表される。

円柱表面では  $v_{\theta} = -2U \sin \theta$  なので，

$$p = \frac{1}{2}\rho[U^2 - (-2U \sin \theta)^2] = \frac{1}{2}\rho(U^2 - 4U^2 \sin^2 \theta)$$

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

となる.また,無次元圧力係数  $C_p$  は，

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U^2} = 1 - 4\sin^2 \theta = 2\cos 2\theta - 1$$

となる.

### レイノルズ数

円柱直径  $D = 2a = 0.045$  を用いて、レイノルズ数  $Re$ ,

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

を利用する.

$U, D, \nu$  の単位はそれぞれ  $[m/s], [m], [m^2/s]$  である.

空気の動粘性係数  $\nu = 1.5 \times 10^{-5} [m^2/s]$  とすると,

$$Re = \frac{1.39 \cdot 0.045}{1.5 \times 10^{-5}} \approx 4160$$

となる.

$Re \approx 4,000$  は中程度のレイノルズ数で、円柱周りには境界層が発達することを示す.

### 円柱に作用する抗力・揚力

$p, a$  の単位はそれぞれ  $[Pa], [m]$  である.

ポテンシャル流れでは圧力分布は上下左右対称なので、円柱に作用する力では理論上は,

$$F_x = - \int_0^{2\pi} p \cos \theta a d\theta = 0$$

$$F_y = - \int_0^{2\pi} p \sin \theta a d\theta = 0$$

となる.

ダランベールのパラドックスは理論上、抗力・揚力が発生しない.

### 実験値とシミュレーション値の差分に関する考察

表 2 理論値とシミュレーション値の比較

項目	理論値	シミュレーション値
抗力係数	0	[円柱]1.305,[半円柱]0.620
揚力係数	0	時間平均値 0 だが渦の影響で変動あり
圧力分布	完全対称	前後で非対称

理想流れでは抗力係数  $C_D$  は理論的に 0 であるが、粘性の影響により実際の流れでは圧力分布が前後で非対称となり後方の後流域が形成される.これが主要な抗力の原因となる.その結果,円柱実験における抗力係数は典型的に有限の値となることが多い.これは理想値との大きな差異を示す.実験データは  $Re$  数に依存して変化が見られるが,粘性境界層と剥離点の動きが抗力に強く影響するためである.

## 5.結果と考察

物体表面を流れる流体は、物体に沿って速度が変化する。特に、物体表面近傍では流体速度が



遅くなるため、境界層が形成される。この境界層内では、粘性の影響が支配的となり、流れが徐々に減速する。上流と下流で圧力が等しい点に到達すると、流体は物体表面から離れる方向へ動き、剥離が生じる。この剥離現象は、剥離点の位置により流線の形状や流れ場全体の構造に大きく影響する。

剥離点の位置は、物体形状、流体条件、レイノルズ数などに依存する。本実験では、流体条件やレイノルズ数は一定に保たれており、形状の違いによる影響に注目する。

#### **円柱の場合**

円柱は断面が滑らかで、流体は側面に沿って流れる。その結果、剥離は下流側に発生し、流れは比較的安定して円柱周囲を回り込む。このため、円柱の後方では流線が緩やかに広がる。

#### **半円柱の場合**

半円柱は上流側のエッジが鋭角で、表面が急激に変化するため、剥離点は円柱に比べて上流側に現れる。このため、半円柱周りの流線は円柱に比べて早い段階で広がり、後方の乱れや渦の発生がより顕著になる。シミュレーション上でも、半円柱の流線が円柱より広がっている様子が確認できる。

#### **実験上の観察**

実験では外気の影響や微小な流れの乱れにより、剥離点の位置が上流側に移動し、半円柱と円柱の差異が理論よりも明確でない場合がある。しかし、基本的な傾向として、半円柱は剥離が早く起こり、流線の広がりが大きくなると考えられる。

## **6. 参考文献**

- ・日本風工学会誌.(2024)「境界層風洞の紹介と実験気流の生成手法:2024 年 7 月」.取得元:  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jawe/49/3/49\\_203/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jawe/49/3/49_203/_pdf/-char/ja) (閲覧日:2025 年 12 月 18 日)