

1. 実験の目的

- (1) 一様な流れの中に置かれた円柱の表面での圧力分布を測定し、完全流体の場合の圧力分布と比較することにより、円柱周りの流れの様子について考える。
- (2) 表面に働く圧力による力の流れに平行な成分を全表面にわたって積分することにより、円柱表面に働く抗力及び抗力係数を求める。
- (3) 円柱後方にできる後流の速度分布を測定し、流体が円柱を通過するときに失った運動量を計算し、それによって円柱に働く抗力及び抗力係数を計算する。
- (4) 異なる方法 (2), (3) で求めた結果を比較考察する。

2. 実験結果

先ず、実験時の温度は 15° で気圧は 1026 hPa であった。そして、その時の水と乾燥空気の密度、粘度、動粘度を表 1 に示す。

表 1 水及び乾燥空気の密度、粘度、動粘度

	水	乾燥空気
密度 ρ [kg/m ³]	9.991×10^2	1.226
粘度 μ [Pa·s]	1.138×10^{-3}	1.784×10^{-5}
動粘度 ν [m ² /s]	1.139×10^{-6}	1.455×10^{-5}

次にマンオメータの状態を表 2 に示す。

表 2 マノメータの状態

	マンオメータ A	マンオメータ C
原点 [cm]	4.3	6.3
傾斜角 [deg]	10.62	11.31

次に、測定結果を表 3, 4 に示す。

表 3 測定結果 (円柱表面の圧力分布)

角度 θ [deg]	測定値 [cm]	角度 θ [deg]	測定値 [cm]	角度 θ [deg]	測定値 [cm]
0	23.6	110	24.6	270	25.3
10	23.6	120	24.5	280	26.4
20	20.3	130	25.0	290	26.5
30	15.1	140	25.2	300	26.2
35	10.5	150	25.7	310	19.2
40	2.7	160	26.0	315	14.6
付け替え		170	26.4	320	9.8
45	8.0	180	26.5	325	5.0
50	6.3	190	26.6	付け替え	
55	17.0	200	26.2	330	8.7
60	20.3	210	25.7	335	13.0
65	23.5	220	25.5	340	16.8
70	26.1	230	25.4	345	19.8
80	26.7	240	24.5	350	21.8
90	26.2	250	24.2	360	23.5
100	25.0	260	24.9		

表 4 測定結果 (後流の速度分布の測定)

位置 (高さ) H [mm]	測定値 [mm]	位置 (高さ) H [mm]	測定値 [mm]
31.0	24.8	19.0	20.3
30.0	24.8	18.5	21.2
29.0	24.7	18.0	22.0
28.0	24.6	17.0	23.2
27.0	24.0	16.5	23.8
26.0	22.9	16.0	24.0
25.0	21.2	15.5	24.2
24.0	18.6	15.0	24.3
23.0	15.0	14.0	24.2
22.0	17.3	13.0	24.1
21.0	18.4	12.0	24.0
20.0	17.2	11.0	23.8
19.5	19.0	10.0	22.7
		9.0	20.0

3. データ整理

抗力と抗力係数の算出

- (1) 実験時の流れのレイノルズ数を求める.

速度 u_∞ を求めるために $\theta = 0^\circ$ のときの圧力が岐点圧 $\frac{1}{2}\rho u_\infty^2$ に等しいことを用いる.

実験時の気温 15°C での水の密度は $\rho = 999.1 \text{ kg/m}^3$, $\theta = 0^\circ$ のときの圧力は $P_{\theta=0} = 348.26 \text{ Pa}$ である.

また, 気温 15° での空気の密度 $\rho = 1.226 \text{ kg/m}^3$ より $u_\infty = 23.84 \text{ m/s}$ である.

この u_∞ を使ってレイノルズ数を求める. ここで, 空気の動粘性係数 $\nu = 1.455 \times 10^{-5}$ だから, $Re = 54070.10$ となる.

- (2) 測定した円柱表面の圧力分布を図 1, 図 2 に示す.

- (3) 完全流体に関する圧力分布も図 1, 図 2 に (2) と一緒に示す。
 (4) 抗力係数 C_d を求めるために図 1 に $C_p \cos \theta$ のグラフを示す。この曲線と θ 軸とに囲まれる部分の面積を求めると、

$$C_d = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \cos \theta d\theta$$

の積分の部分になる。

面積を求めるには、求積法を用いる。

$$\begin{aligned} S &:= \frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{44} (C_p \cos 0 + 2(C_p \cos \theta_1 + \cdots + C_p \cos \theta_{n-1}) + C_p \cos 2\pi) \text{ より} \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{44} \{1.0 + 2(0.9848 + \cdots + 0.8930) + 0.9948\} \\ \therefore S &= 2.3881 \end{aligned}$$

従って、 C_d は

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{1}{2} \times S \\ &= \frac{1}{2} \times 2.3881 \\ \therefore C_d &= 1.1940 \end{aligned}$$

となる。抗力 D は、

$$\begin{aligned} D &= C_d \times \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 d \text{ より} \\ &= 1.1940 \times \frac{1}{2} \times 1.226 \times 23.84^2 \times 0.033 \\ \therefore D &= 13.728 \text{ N} \end{aligned}$$

以上の計算結果を表 5, 6 に示す。

表 5 計算結果 1

角度 θ [deg]	測定値 [cm]	l [cm]	$l \sin \alpha$ [cm]	圧力 P [Pa]	流速 u [m/s]	レイノルズ数 Re
0	23.6	19.3	0.0356	348.26	23.84	54059.62
10	23.6	19.3	0.0356	348.26	23.84	
20	20.3	16.0	0.0295	288.71	21.70	
30	15.1	10.8	0.0199	194.88	17.83	
35	10.5	6.2	0.0114	111.88	13.51	
40	7.5	3.2	0.0059	57.74	9.71	
45	-8.0	-12.3	-0.0227	-221.95	19.03	
50	-6.3	-10.6	-0.0195	-191.27	17.66	
55	-17.0	-21.3	-0.0393	-384.35	25.04	
60	-20.3	-24.6	-0.0453	-443.90	26.91	
65	-23.5	-27.8	-0.0512	-501.64	28.61	
70	-26.1	-30.4	-0.0560	-548.56	29.91	
80	-26.7	-31.0	-0.0571	-559.38	30.21	
90	-26.2	-30.5	-0.0562	-550.36	29.96	
100	-25.0	-29.3	-0.0540	-528.71	29.37	
110	-24.6	-28.9	-0.0533	-521.49	29.17	
120	-24.5	-28.8	-0.0531	-519.68	29.12	
130	-25.0	-29.3	-0.0540	-528.71	29.37	
140	-25.2	-29.5	-0.0544	-532.32	29.47	
150	-25.7	-30.0	-0.0553	-541.34	29.72	
160	-26.0	-30.3	-0.0558	-546.75	29.87	
170	-26.4	-30.7	-0.0566	-553.97	30.06	
180	-26.5	-30.8	-0.0568	-555.77	30.11	
190	-26.6	-30.9	-0.0569	-557.58	30.16	
200	-26.2	-30.5	-0.0562	-550.36	29.96	
210	-25.7	-30.0	-0.0553	-541.34	29.72	
220	-25.5	-29.8	-0.0549	-537.73	29.62	
230	-25.4	-29.7	-0.0547	-535.92	29.57	
240	-24.5	-28.8	-0.0531	-519.68	29.12	
250	-24.2	-28.5	-0.0525	-514.27	28.96	
260	-24.9	-29.2	-0.0538	-526.90	29.32	
270	-25.3	-29.6	-0.0546	-534.12	29.52	
280	-26.4	-30.7	-0.0566	-553.97	30.06	
290	-26.5	-30.8	-0.0568	-555.77	30.11	
300	-26.2	-30.5	-0.0562	-550.36	29.96	
310	-19.2	-23.5	-0.0433	-424.05	26.30	
315	-14.6	-18.9	-0.0348	-341.04	23.59	
320	-9.8	-14.1	-0.0260	-254.43	20.37	
325	-5.0	-9.3	-0.0171	-167.81	16.55	
330	8.7	4.4	0.0081	79.40	11.38	
335	13.0	8.7	0.0160	156.99	16.00	
340	16.8	12.5	0.0230	225.56	19.18	
345	19.8	15.5	0.0286	279.69	21.36	
350	21.8	17.5	0.0323	315.78	22.70	
360	23.5	19.2	0.0354	346.46	23.77	

表 6 計算結果 2

角度 θ [deg]	C_p (実験値)	$C_p \cos \theta$ (実験値)	抗力係数 C_d	抗力 D [N]
0	1.000	1.000	1.1940	13.728
10	1.000	0.985		
20	0.829	0.779		
30	0.560	0.485		
35	0.321	0.263		
40	0.166	0.127		
45	-0.637	-0.451		
50	-0.549	-0.353		
55	-1.104	-0.633		
60	-1.275	-0.637		
65	-1.440	-0.609		
70	-1.575	-0.539		
80	-1.606	-0.279		
90	-1.580	0		
100	-1.518	0.264		
110	-1.497	0.512		
120	-1.492	0.746		
130	-1.518	0.976		
140	-1.528	1.171		
150	-1.554	1.346		
160	-1.570	1.475		
170	-1.591	1.567		
180	-1.596	1.596		
190	-1.601	1.577		
200	-1.580	1.485		
210	-1.554	1.346		
220	-1.544	1.183		
230	-1.539	0.989		
240	-1.492	0.746		
250	-1.477	0.505		
260	-1.513	0.263		
270	-1.534	0.000		
280	-1.591	-0.276		
290	-1.596	-0.546		
300	-1.580	-0.790		
310	-1.218	-0.783		
315	-0.979	-0.692		
320	-0.731	-0.560		
325	-0.482	-0.395		
330	0.228	0.197		
335	0.451	0.409		
340	0.648	0.609		
345	0.803	0.776		
350	0.907	0.893		
360	0.995	0.995		

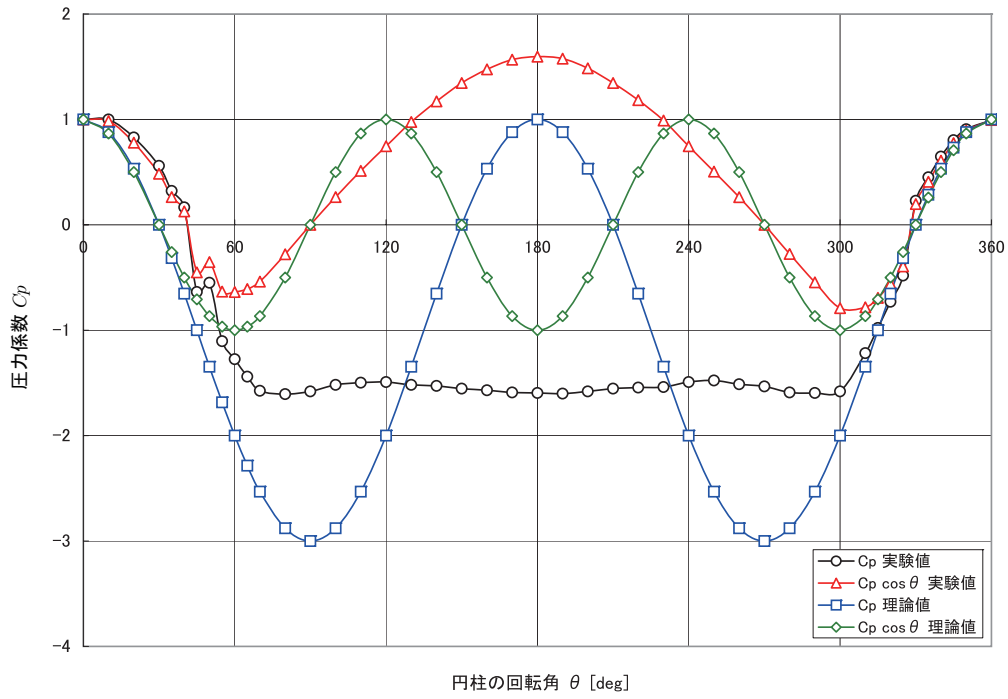


図 1 実在流体と完全流体の円柱表面の圧力分布 1

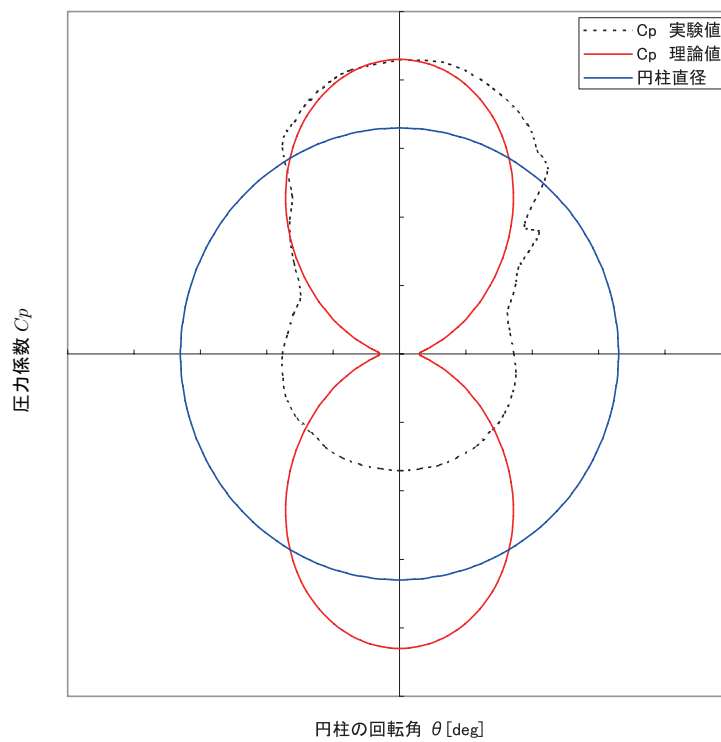


図 2 実在流体と完全流体の円柱表面の圧力分布 2

円柱の後流の速度分布と抗力係数の算出

- (1) 実験時のレイノルズ数を求める。流速 u_∞ は、円柱の影響を受けない高さの流速を用いる。

実験時の気温 15°C での水の密度は $\rho = 999.1 \text{ kg/m}^3$, $H = 31.0 \text{ cm}$ のときの圧力は $P_{H=31.0} = 355.24 \text{ Pa}$ である。

また、気温 15° での空気の密度 $\rho = 1.226 \text{ kg/m}^3$ より $u_\infty = 24.07 \text{ m/s}$ である。

この u_∞ を使ってレイノルズ数を求める。ここで、空気の動粘性係数 $\nu = 1.455 \times 10^{-5}$ だから、 $Re = 54598.67$ となる。

- (2) 測定した後流の速度分布を図 3 に示す。ここで、横軸 h/d 軸の h は圧力が最も低いデプスゲージの読み 23.0 cm の位置を 0 cm とおいた高さである。よってデプスゲージの読み $31.0 \sim 9.0 \text{ cm}$ は $8.0 \sim -14.0 \text{ cm}$ となる。以下において高さはこの値を用いる。
- (3) 抗力係数 C_d を求めるために、図 3 に $u/u_\infty \cdot (1 - u/u_\infty)$ のグラフを示す。この曲線と h/d 軸に囲まれた部分の面積を求めれば、抗力係数 C_d を求めることができる。

$$\begin{aligned} C_d &= 2 \int \frac{u}{u_\infty} \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right) \frac{dh}{d} \text{ より} \\ &\doteq 2 \times \frac{1}{2} \times \frac{2.424 + 4.242}{27} \times \{0.1200 + 2(0.05505 + \dots - 2.0056 \times 10^{-6}) - 2.0056 \times 10^{-6}\} \\ \therefore C_d &= 0.8813 \end{aligned}$$

となる。抗力 D は、

$$\begin{aligned} D &= C_d \times \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 d \text{ より} \\ &= 0.8813 \times \frac{1}{2} \times 1.226 \times 24.07^2 \times 0.033 \\ \therefore D &= 10.331 \text{ N} \end{aligned}$$

以上の計算結果を表 7, 8 に示す。

表 7 計算結果 3

位置 (高さ) H [cm]	測定値 [cm]	l [cm]	$l \sin \alpha$ [cm]	圧力 P [Pa]	流速 u [m/s]	レイノルズ数 Re
31.0	24.8	18.5	3.628	355.24	24.07	54598.67
30.0	24.8	18.5	3.628	355.24	24.07	
29.0	24.7	18.4	3.609	353.32	24.01	
28.0	24.6	18.3	3.589	351.40	23.94	
27.0	24.0	17.7	3.471	339.88	23.55	
26.0	22.9	16.6	3.256	318.76	22.80	
25.0	21.2	14.9	2.922	286.11	21.60	
24.0	18.6	12.3	2.412	236.19	19.63	
23.0	15.0	8.7	1.706	167.06	16.51	
22.0	17.3	11.0	2.157	211.22	18.56	
21.0	18.4	12.1	2.373	232.35	19.47	
20.0	17.2	10.9	2.138	209.30	18.48	
19.5	19.0	12.7	2.491	243.87	19.95	
19.0	20.3	14.0	2.746	268.83	20.94	
18.5	21.2	14.9	2.922	286.11	21.60	
18.0	22.0	15.7	3.079	301.47	22.18	
17.0	23.2	16.9	3.314	324.52	23.01	
16.5	23.8	17.5	3.432	336.04	23.41	
16.0	24.0	17.7	3.471	339.88	23.55	
15.5	24.2	17.9	3.510	343.72	23.68	
15.0	24.3	18.0	3.530	345.64	23.75	
14.0	24.2	17.9	3.510	343.72	23.68	
13.0	24.1	17.8	3.491	341.80	23.61	
12.0	24.0	17.7	3.471	339.88	23.55	
11.0	23.8	17.5	3.432	336.04	23.41	
10.0	22.7	16.4	3.216	314.92	22.67	
9.0	20.0	13.7	2.687	263.07	20.72	

表 8 計算結果 4

位置 (高さ) H [cm]	h/d	u/u_∞	$u/u_\infty \cdot (1 - u/u_\infty)$	抗力係数 C_d	抗力 D [N]
31.0	2.424	1.0000	-2.0×10^{-6}	0.8813	10.331
30.0	2.121	1.0000	-2.0×10^{-6}		
29.0	1.818	0.9973	0.00270		
28.0	1.515	0.9946	0.00539		
27.0	1.212	0.9781	0.02138		
26.0	0.909	0.9473	0.04996		
25.0	0.606	0.8974	0.09204		
24.0	0.303	0.8154	0.15053		
23.0	0	0.6858	0.21549		
22.0	-0.303	0.7711	0.17650		
21.0	-0.606	0.8087	0.15468		
20.0	-0.909	0.7676	0.17840		
19.5	-1.061	0.8285	0.14206		
19.0	-1.212	0.8699	0.11316		
18.5	-1.364	0.8974	0.09204		
18.0	-1.515	0.9212	0.07257		
17.0	-1.818	0.9558	0.04226		
16.5	-1.970	0.9726	0.02665		
16.0	-2.121	0.9781	0.02138		
15.5	-2.273	0.9837	0.01608		
15.0	-2.424	0.9864	0.01342		
14.0	-2.727	0.9837	0.01608		
13.0	-3.030	0.9809	0.01873		
12.0	-3.333	0.9781	0.02138		
11.0	-3.636	0.9726	0.02665		
10.0	-3.939	0.9415	0.05505		
9.0	-4.242	0.8605	0.12000		

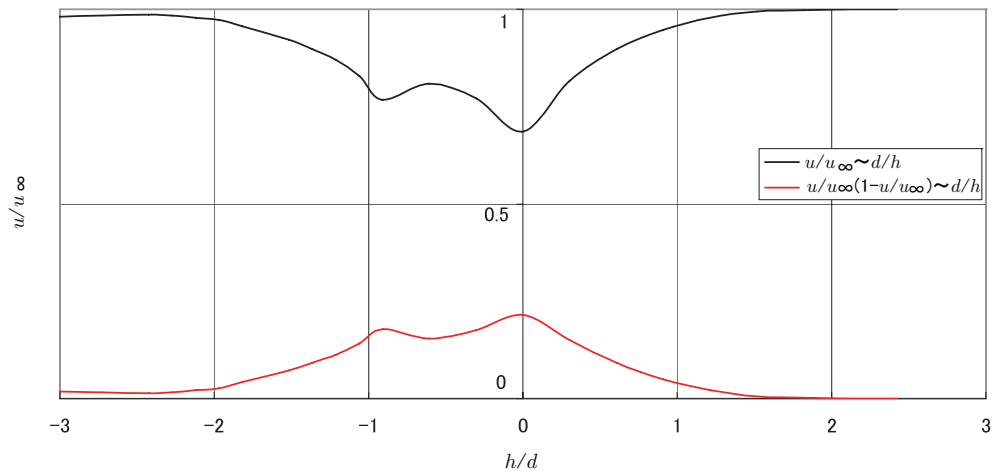


図 3 後流の速度分布

4. 考察

図 1, 2 より分かるように圧力係数 C_p は理論値と実験値が同じにならない。この原因は理論値では流体は完全流体で考えられており粘性はないとされている。それに対して、実験値は空気 (実在流体) であり、僅かであっても粘性があるため円柱周りの流れが完全流体と異なるからである。

次に、抗力係数 C_p について考える。円柱表面の圧力分布の C_p は 1.1940 で、後流の速度分布の C_p は 0.8813 であり、後者の方が小さい。これは、円柱表面の圧力分布の方は円柱の表面で直接圧力を測ったのに対して、後流の速度分布の方は円柱から離れた位置で圧力を測定したので円柱表面より圧力が小さくなり、 C_p が円柱表面の圧力分布から求めたものより小さくなったと考えられる。そして、2 つの C_p の誤差は 26.2 % である。また C_p と R_e の関係を見ると圧力分布の方は資料のグラフ通りであったが、速度分布の方は資料のグラフと誤差が C_d にあった。これは図 3 から分かるようにグラフの形が理論と違うため C_d の値に影響したと考えられる。そして図 3 のグラフの形は測定ミスによるものと考えられる。