

# 航空宇宙工学実験 I

## 実験番号 3

### 流れの観察法

実験班: 11 班      学年: 2 年

---

学生番号:      9081 番

---

氏名:      西園   尚輝

---

## [ I ] 概要

風洞実験を通して流体现象の計測法と観測法を習得し、報告書の書き方を学習することができた。回転数と風速の測定実験では、それぞれの大きさが比例関係であることが分かり、また風洞の特性を知ることができた。円柱の圧力分布を測定する実験では、圧力分布から剥離点の位置を求めたり、抵抗係数を求めることができた。物体周りの流れの可視化実験では、翼型のように流線に沿った形であるほど剥離を起こしにくく、後方に渦を作りにくいことが分かった。

## [ II ] 目的

風洞実験を通して流体现象の計測法と観測法を習得し、それらを基本として物体の周りの流れを正しく理解し、工学分野における報告書の書き方を学習する。

## [ III ] 理論

### IV-1 粘性

流体を変形させるときに変形速度に応じた力が必要とされる性質を粘性と呼ぶ。

ここで、間隔  $H$  だけ隔たった平行な 2 枚の平板間を流体で満たし、図 1 のように片方の平板だけを速度  $U$  で平行に動かした時を考える。このとき、平板を動かすときに必要な力は、流体の種類と平板の速度によって変化し、粘りの強い流体ほど大きな力が必要になる。平板の速度が小さいときには、流体の速度分布が直線的になりクエット流れと呼ばれ、そこでのせん断応力  $\tau$  以下の式で定義することができる。

$$\tau = \mu \frac{U}{H} \quad (1)$$

ここで、比例定数  $\mu$  を粘度といい、物体の種類、温度、圧力によって定まる粘性の強さを表す物性値である

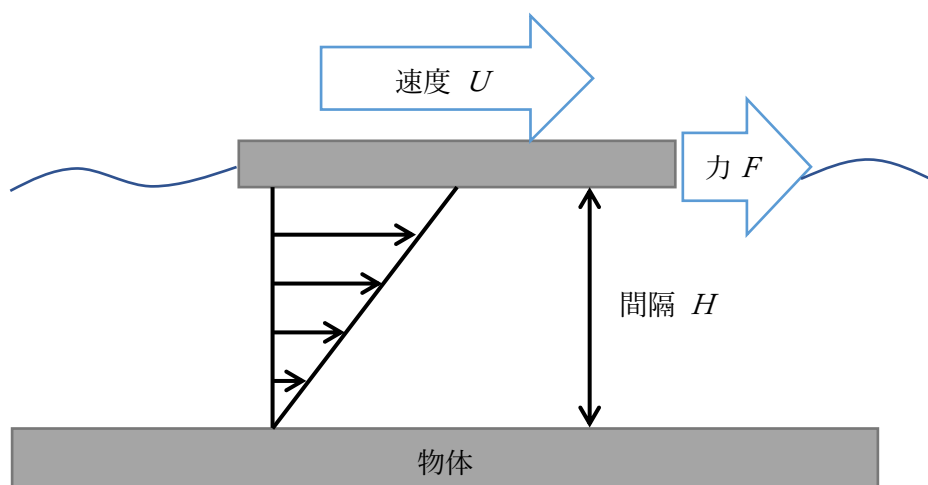


図1 クエット流れ

#### IV-2 境界層

理想流体では流体に粘性がないのでせん断応力を受けることがなく、物体表面上においても図2のように流体は一定の速度で流れることができる。しかし、実在流体には粘度が存在し、その影響によって物体表面上における流体の速度は急激に減少する。以上の事から表面付近には図2のように速度分布が変化している層が存在し、この層のことを境界層と呼ぶ。この境界層内の流れは、はじめのうちは層流として滑らかに流れるが、下流のある点において乱流へ変化をする。ここで層流として流れている範囲を層流境界層、乱流として流れている範囲を乱流境界層、境界が変化する点を遷移点と呼ぶ。

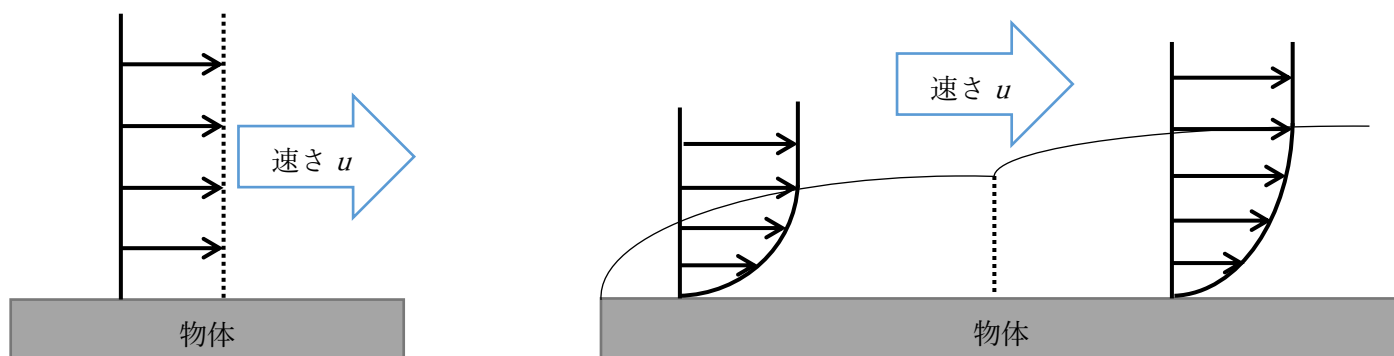


図2 理想気体と実在気体の流体の変化

#### IV-3 剥離

境界層の内側では粘性による摩擦抵抗によって、流体の運動エネルギーが徐々に減少していき、とある点で静止してしまい、この点より先の部分では逆流が生じる(図3)。そこに後ろからくる流体と重なり渦ができ、流れが壁面から離れていく。この現象を境界層の剥離と呼び、この剥離が生じている点を剥離点と呼ぶ。

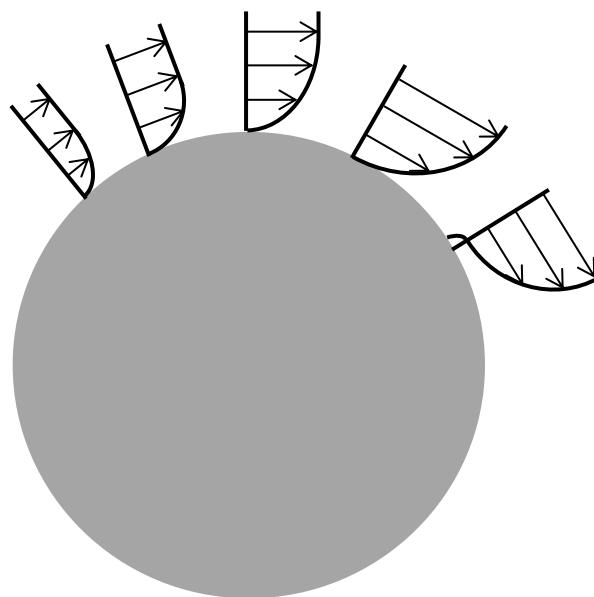


図3 円柱表面に沿った速度分布

## [IV] 実験装置

今回の実験で使用した装置の諸元票を以下に示す.

表 1 風洞の諸元

風洞の諸元	
形式	吸込式 2 次元煙風洞
縮流比	12 : 1
ダンピングスクリーン	20 メッシュ 6 枚
観測部	長さ 1250 mm 高さ 400 mm 幅 100 mm
観測部窓	幅 600 mm 高さ 300 mm
電動機	0.75 kW 200 V 0~2000 rpm
送風機	50 m <sup>3</sup> /min 20 mmAq 196 Pa
風速	1.55~15.92
主流流れ	未計測

表 2 煙発生装置の諸元

煙発生装置	
液消費量	約 0.21/hour ( $3.5 \times 10^{-6}$ m <sup>3</sup> /min)
スモーク量	30 m <sup>3</sup> /min
スモーク粒子	約 1~50 $\mu$ m
吐出口径	$\Phi$ 25 mm
電源電圧	AC 100V
煙誘導構造	翼型導管構造
ノズル間隔	25 mm
ノズル径	$\Phi$ 1.2~1.4 mm
ノズル数	40 本

表 3 各計測装置の諸元

計測器	
おんどとり	温湿度・大気圧データロガー TANDD Thermo Recorder TR-73U
圧力	Honeywell 圧電抵抗センサー 163PC01D75 $\pm 2.5$ inH <sub>2</sub> O ( $\pm 623$ Pa)
パソコン	DELL Vostro 2520 BTX
A/D コンバーター	日本ナショナルインスツルメンツ DAQ 16 bit $\pm 10$ V (分解能 15.3 mV)
計測ソフトウェア	日本ナショナルインスツルメンツ LabVIEW

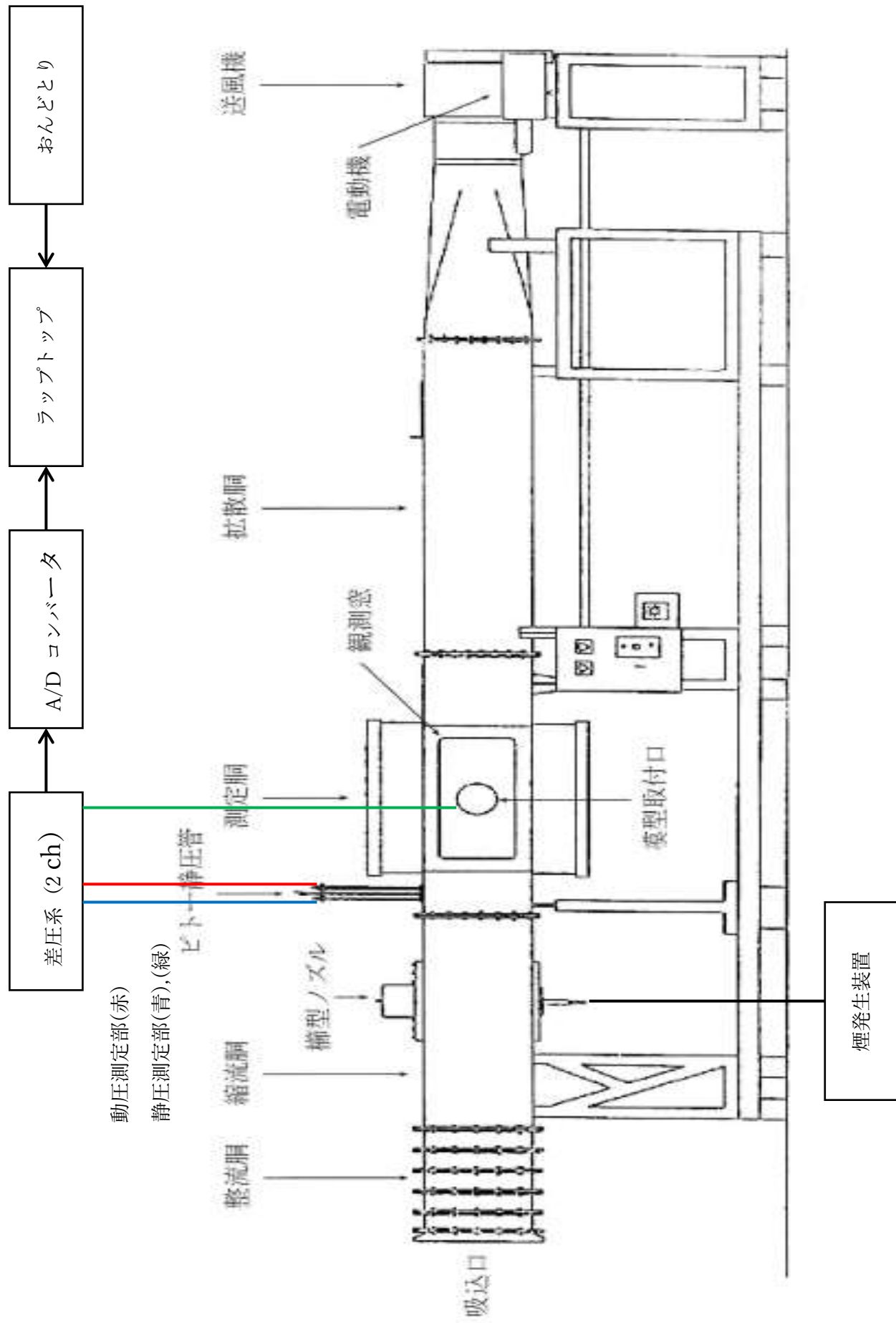


図 4 吸込式 2 次元煙風洞の構成図



図5 おんどとり



図6 A/D コンバーター

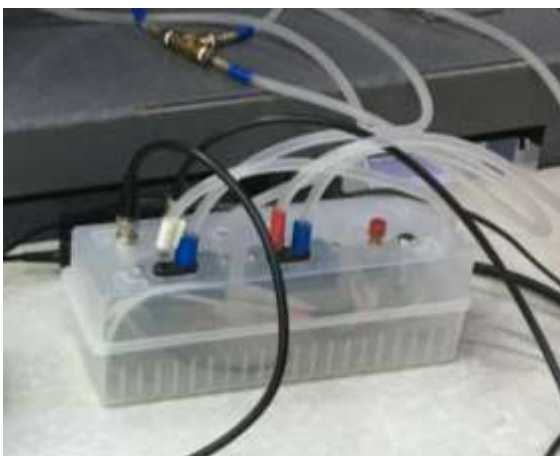


図7 差圧系 (2ch)



図8 ピトー静圧管

## [V] 実験方法

### V-1 電動機の回転数と測定部の風速

風洞の計測可能風速範囲を計測する.

- (1) 実験室内の大気圧・気温・湿度（気象条件）を計測する.
- (2) 計測器の初期設定を行う.
- (3) 送風機の回転数を変えながら，動圧と風速を計測する.
- (4) 実験室内の大気圧・気温・湿度を計測する.

### V-2 円柱の圧力分布

円柱の圧力分布を計測する。風洞の閉塞率を確認する.

- (1) 実験室内の大気圧・気温・湿度を計測する.
- (2) 計測器の初期設定を行う.
- (3) 送風機の回転数を設定し，動圧と風速を計測する.
- (4) 円柱を時計回りに回転させ， $-20^{\circ}$  から  $200^{\circ}$  まで  $10^{\circ}$  おきに変化させる．それぞれの角度において，円柱表面の圧力と変動率を計測する．その際，PC に表示されている圧力の変動なども同時に観察する.
- (5) 計測を行いながら，同時に剥離点の推定を行う。圧力の変動から推定できる.
- (6) 実験室内の大気圧・気温・湿度を計測する.
- (7) 計測後，適切な圧力分布が得られたかどうかを計測結果から判断する.

### V-3 物体まわりの流れの可視化

円柱，角柱，二次元翼について流れの可視化を行う.

- (1) 各模型の代表長さを計測する.
- (2) 実験室内の大気圧・気温・湿度を計測する.
- (3) 計測器の初期設定を行う.
- (4) 煙の流れが良く見えるように送風機の回転数を設定し，動圧と風速を計測する.
- (5) 物体まわりの流れを可視化した写真を撮影する．この時，撮影位置，方向，角度などを固定して撮影を行い，必要であれば三脚を使用する.
- (6) 煙の線が意味する現象，煙の線の形状から何がわかるのかを考察しながら観察する.
- (7) 模型形状の影響を観察する．鈍頭物体，流線形物体の相違など.



## [VI] 実験結果

### VI-1 電動機の回転数と風洞測定部の風速

以下に実験の気象条件と回転数  $R$ ，動圧  $q$ ，風速  $U$ ，変動率の実験結果を示す表，および  $U$ - $R$  グラフを示す。

表 4 実験V-1 の気象条件

	実験前	実験後	平均
気温 $t$ [°C]	26.2	26.2	26.2
湿度 $\phi$ [%]	41.6	47.2	44.4
大気圧 $H$ [hPa]	1001.2	1001.1	1001.2
密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.161	1.160	1.161
動粘性係数 $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	$1.588 \times 10^{-5}$	$1.589 \times 10^{-5}$	$1.589 \times 10^{-5}$

表 5 実験V-1 の計測結果

回転数 $R$ [rpm]	動圧 $q$ [Pa]	風速 $U$ [m/s]	変動率 [%]
200	1.40	1.55	0.04
400	5.13	2.97	0.05
600	13.7	4.86	0.04
800	24.7	6.52	0.04
1000	44.0	8.70	0.06
1200	63.9	10.5	0.07
1400	89.4	12.4	0.10
1600	117	14.2	0.11
1800	147	15.9	0.12

表 5 の計測結果から，回転数と風速の関係を以下のグラフに示す．

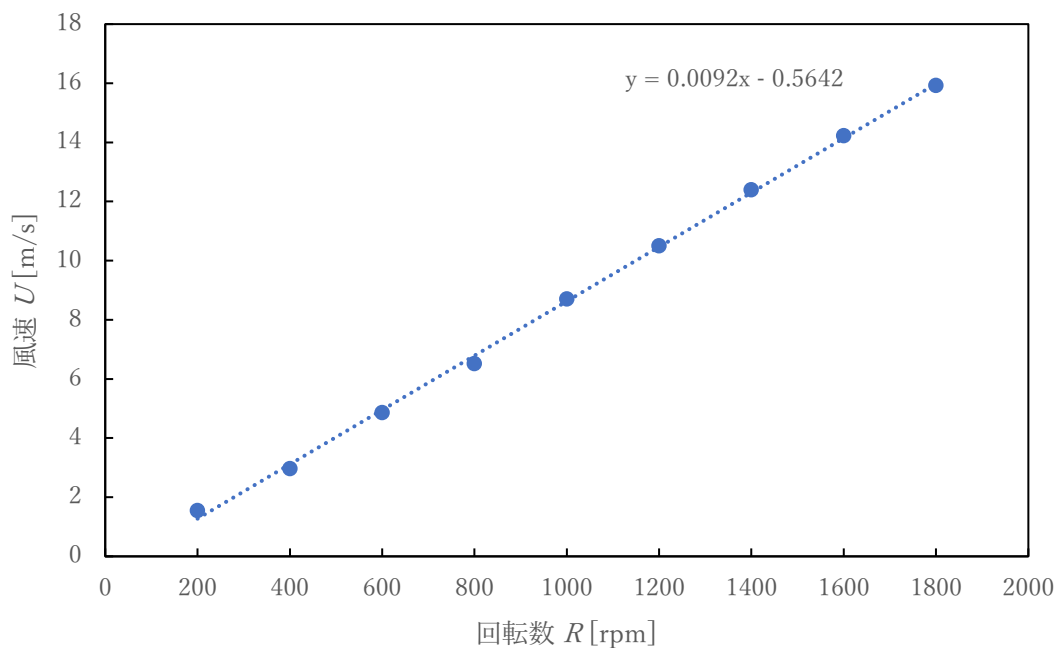


図 9 回転数と風速の関係

## VI-2 円柱の圧力分布の実験結果

以下にこの時の気象条件，実験条件，角度  $\theta$ ，圧力  $p - p_{\infty}$ ，と変動率の実験結果を示す表を示す．また，閉塞率  $BR$  (模型がどれだけ流路を塞いでいるかの割合)を求めるには，測定部の面積のうちの模型が占めている割合を求めればよいので，次式のようになる．

$$BR = \frac{\text{円柱の正面投影面積}}{\text{測定部の断面積}} \times 100 \quad (2)$$

表 6 実験 V-2 の気象条件

	実験前	実験後	平均
気温 $t$ [°C]	24.4	26.0	25.2
湿度 $\phi$ [%]	48.0	55.3	51.6
大気圧 $H$ [hPa]	1000.9	1001.0	1000.1
密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.168	1.160	1.164
動粘性係数 $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	$1.571 \times 10^{-5}$	$1.588 \times 10^{-5}$	$1.580 \times 10^{-5}$

表 7 実験条件

モーター回転数 $R$ [rpm]	1200
動圧 $q$ [Pa]	65.6
風速 $U$ [m/s]	10.5
円柱の直径 $d$ [mm]	30
レイノルズ数 $Re$ [-]	$1.99 \times 10^4$
測定部の幅 [mm]	100
測定部の高さ [mm]	400
閉塞率 $BR$ [%]	7.5

表 8 実験 V-2 の計測結果

角度 $\theta$ [deg]	圧力 $p-p_\infty$ [Pa]	変動率 [%]	角度 $\theta$ [deg]	圧力 $p-p_\infty$ [Pa]	変動率 [%]
0	63.2	0.10	100	-75.8	0.63
10	57.8	0.12	110	-78.3	0.63
20	38.2	0.14	120	-77.7	0.68
30	12.2	0.18	130	-77.5	0.65
40	-22.6	0.22	140	-80.5	0.72
50	-55.4	0.32	150	-82.2	0.76
60	-79.5	0.41	160	-82.7	1.12
70	-91.1	0.60	170	-85.1	0.85
80	-82.3	0.57	180	-93.3	0.90
90	-77.2	0.60			

次に、円柱の圧力分布のグラフを書くために、円柱の圧力係数を計算する。圧力係数  $C_p$  は次式で求めることができる。

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q} = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (3)$$

ここで、各角度における圧力係数を以下の表に示す。

表 9 各角度における圧力係数

角度 $\theta$ [deg]	圧力係数 $C_p$	角度 $\theta$ [deg]	圧力係数 $C_p$
0	0.985	100	-1.18
10	0.901	110	-1.22
20	0.595	120	-1.21
30	0.190	130	-1.21
40	-0.352	140	-1.25
50	-0.863	150	-1.28
60	-1.24	160	-1.29
70	-1.42	170	-1.33
80	-1.28	180	-1.45
90	-1.20		

表 6 の圧力係数から，グラフを書くと以下のようなになる．

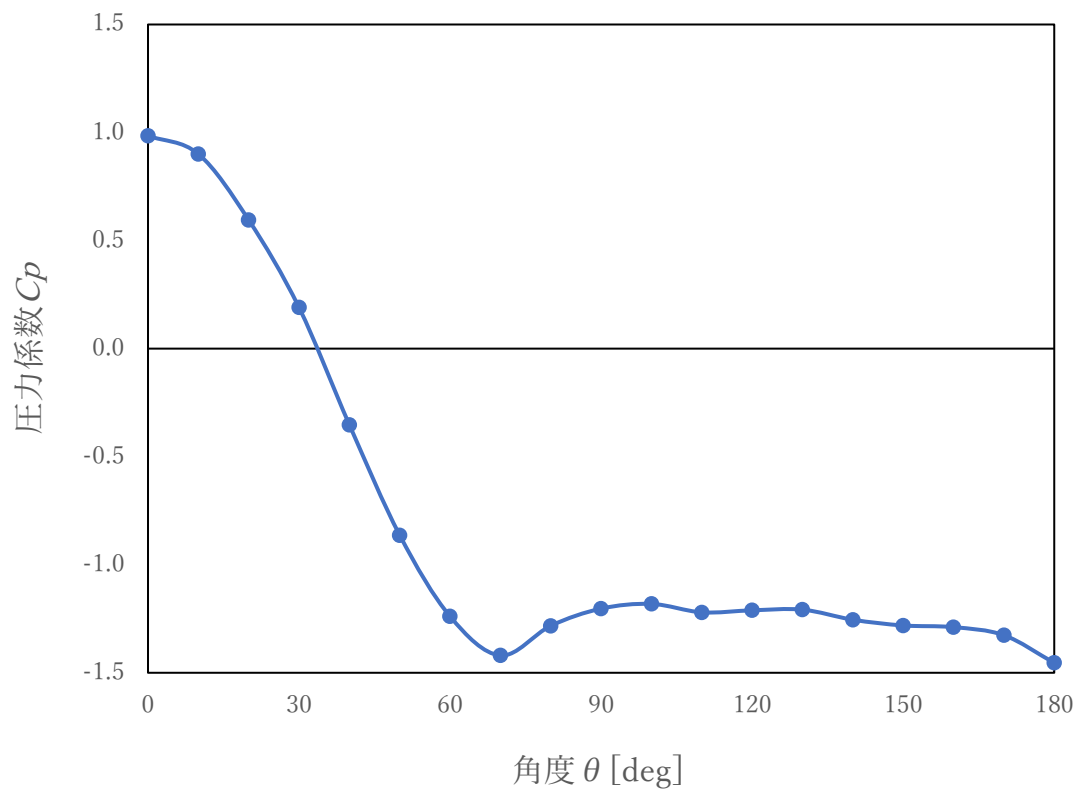


図 10 圧力係数と角度の関係

次に円柱の抵抗係数  $C_D$  を求める.

この  $C_D$  は、圧力抵抗係数または形状抗力係数と呼ばれ次式で求めることができる.

$$C_D = \frac{\int_S p \cos \theta dA}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} = \frac{\pi}{180} \int_0^{180} C_p \cos \theta d\theta \quad (4)$$

ここで表面全面積を $S$ 、傾きを考慮した面素を $A$ 、 $\theta$ は度数法で表記されている. 以上の式より10度刻みの各 $C_p$  から $C_p \cos \theta$  を計算する. その計算結果を以下の表に記載する.

表10 各角度における  $C_p \cos \theta$  の値

角度 $\theta$ [deg]	$C_p \cos \theta$	角度 $\theta$ [deg]	$C_p \cos \theta$
0	0.985	100	0.205
10	0.887	110	0.417
20	0.559	120	0.605
30	0.165	130	0.776
40	-0.270	140	0.961
50	-0.555	150	1.11
60	-0.619	160	1.21
70	-0.486	170	1.31
80	-0.223	180	1.45
90	0.000		

上の表の  $C_p \cos \theta$  の値から以下の2通りで  $C_D$  の値を求める.

- (1) 台形法により数値積分して,  $C_p \cos \theta$  から  $C_D$  を求める.
- (2) シンプソンの公式により数値積分して,  $C_p \cos \theta$  から  $C_D$  を求める

#### (1) 台形法での解法

台形法では区分求積法と同様に、図形の面積を求めて足し合わせていく方法である. ここで区分求積法は長方形なのに対し、台形法では以下の図 11 のように台形を用いて計算をする. 以上の解法より、図 11 面積  $S$  の大きさを求める式は以下のようになる.

$$S = \int_a^b f(x)dx \cong \sum_{i=1}^{j=4} \frac{h}{2} (f_{i-1} + f_i) \quad (5)$$

ここで(5)式中の h は

$$h = \frac{(b-a)}{4} \quad (6)$$

である．また, (5), (6)式を一般化すると以下のような式になる

$$S = \int_a^b f(x)dx \cong \sum_{i=1}^j \frac{h}{2} (f_{i-1} + f_i) \quad (7)$$

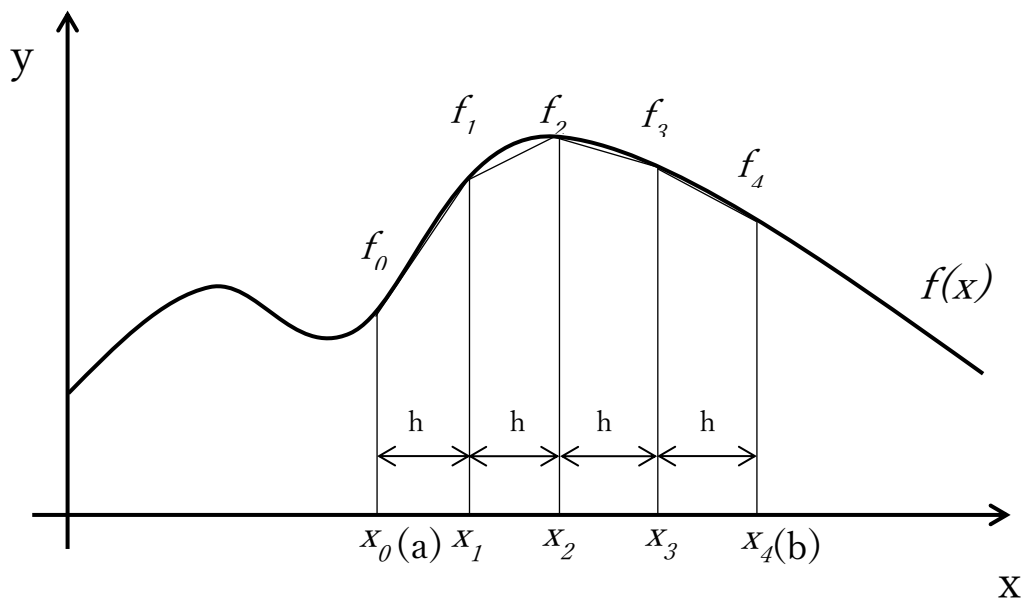


図 11 台形法による面積の求め方

次に, 台形法を用いて  $S' = \int_0^{180} C_p \cos \theta \, d\theta$  の値を求める. 表 7 の結果から, 各区間の台形の面積を求めると以下の表のようになる.

表 11 各区間の台形面積

角度 $\theta$ [deg]	台形の面積	角度 $\theta$ [deg]	台形の面積
0~10	9.360	100~110	3.112
10~20	7.233	110~120	5.114
20~30	3.620	120~130	6.909
30~40	-0.526	130~140	8.687
40~50	-4.124	140~150	10.35
50~60	-5.872	150~160	11.60
60~70	-5.525	160~170	12.59
70~80	-3.542	170~180	13.80
80~90	-1.114		
90~100	1.026	合計	72.702

以上の表より,  $\theta = 0 \sim 180^\circ$  までの面積  $S'$  は

$$S' = \int_0^{180} C_p \cos \theta \, d\theta = 72.702 \dots \cong 72.702 \quad (8)$$

となるので, 抗力係数  $C_D$  の値は次式のようにになる.

$$C_D = \frac{\pi}{180} \int_0^{180} C_p \cos \theta \, d\theta = \frac{\pi}{180} \times S' = 1.2689 \cong 1.269 \quad (9)$$

## (2) シンプソンの公式での解法

シンプソンの公式では, 台形公式と同様に区間を分割して積分計算を行う方法である. ここで区間  $[a, b]$  を  $2m$  等分する際の計算方法を考えると次式のようにになる.

$$\int_a^b f(x) dx \cong \sum_{i=1}^m \frac{h}{3} (f_{2i-2} + 4f_{2i-1} + f_{2i}) \quad (10)$$

ここで(10)式中の  $h$  は

$$h = \frac{b-a}{2m} \quad (11)$$

と表される．ここで，(10), (11)式において，区間を $[0, 180]$ ,  $m=9$  と置くと

$$\int_a^b f(x)dx \cong \sum_{i=1}^9 \frac{10}{3} (f_{2i-2} + 4f_{2i-1} + f_{2i}) \quad (12)$$

となる．(12)式に表 10 の値を代入すると面積  $S'$  は以下のようになる．

$$S' = \int_0^{180} C_p \cos \theta \, d\theta \cong \sum_{i=1}^9 \frac{10}{3} (f_{2i-2} + 4f_{2i-1} + f_{2i}) \quad (13)$$

$$= \frac{10}{3} (f_0 + 4f_1 + f_2 + f_2 + 4f_3 + f_4 + \cdots f_{16} + 4f_{17} + f_{18}) \cong 72.60 \quad (14)$$

となるので，抗力係数  $C_D$  の値は次式のようになる．

$$C_D = \frac{\pi}{180} \int_0^{180} C_p \cos \theta \, d\theta = \frac{\pi}{180} \times S' = 1.2672 \cong 1.267 \quad (15)$$

以上の(9),(15)式から求めた  $C_D$  の値を過去に行われた実験の結果にプロットすると以下のようになる．

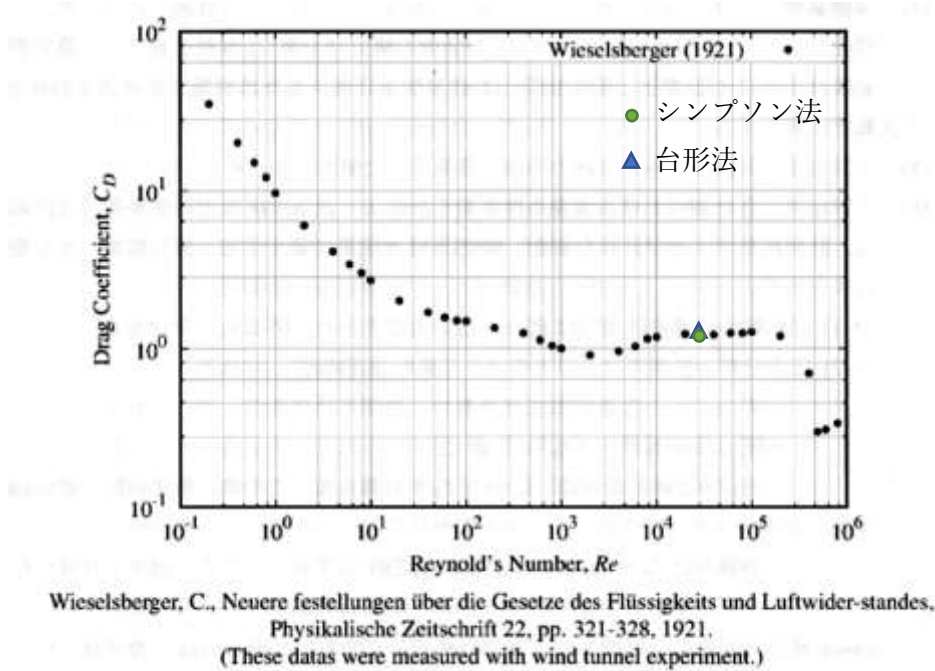


図 12 抗力係数  $C_D$  の比較



### VI-3 物体まわりの流れの可視化

以下に実験時の気象条件，計測条件，各模型の代表長さ，角度範囲，レイノルズ数を示した表を以下にそれぞれ示す．

表 12 気象条件

気温 $t$ [°C]	26.8
湿度 $\phi$ [%]	38.1
大気圧 $H$ [hPa]	1007.4
密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1.166
動粘性係数 $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	$1.583 \times 10^{-5}$

表 13 計測条件

回転数 $R$ [rpm]	400
動圧 $q$ [Pa]	4.61
風速 $U$ [m/s]	2.811

表 14 各模型の諸元

	代表長さ $L$ [mm]	角度範囲 $\theta$ [deg]	レイノルズ数 $Re$
円柱	30	0	$5.327 \times 10^3$
角柱	30.2	0~45	$5.363 \times 10^3$
翼型 NACA 2418	139.8	-5~15	$2.482 \times 10^3$

下の図 13~20 に可視化した際の写真を記載する．

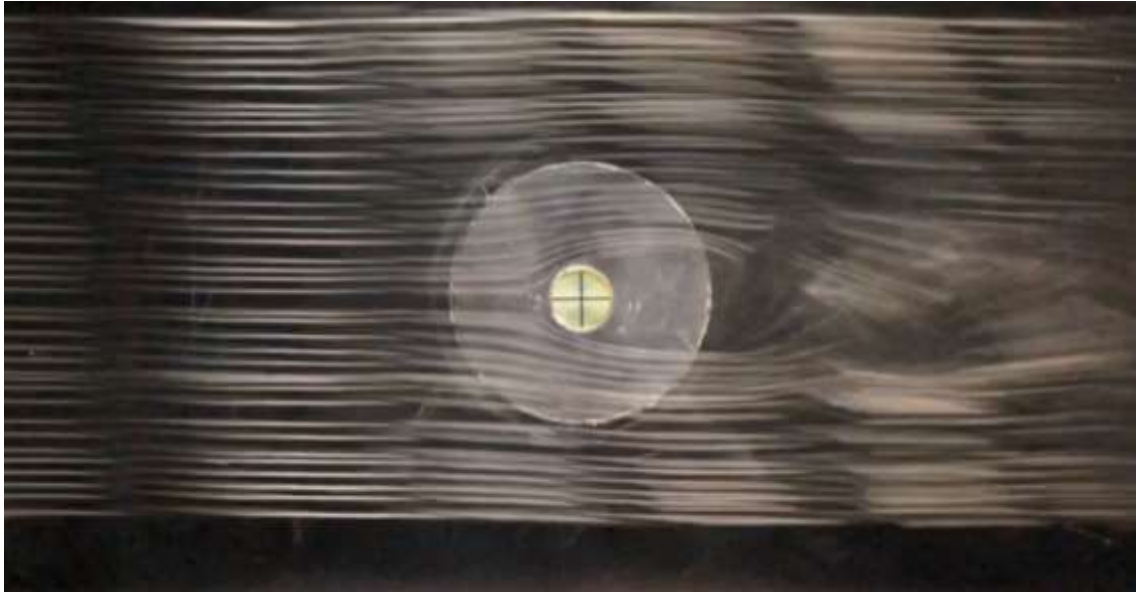


図 13 円柱周りの流れ

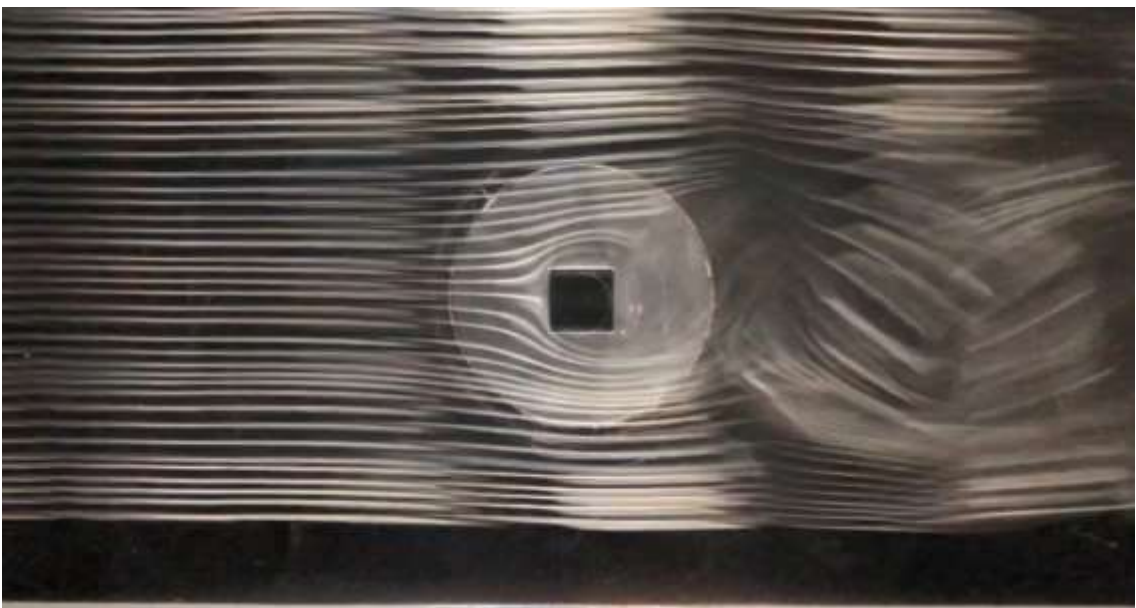


図 14 角柱( $\theta = 0^\circ$ ) の時の流れ

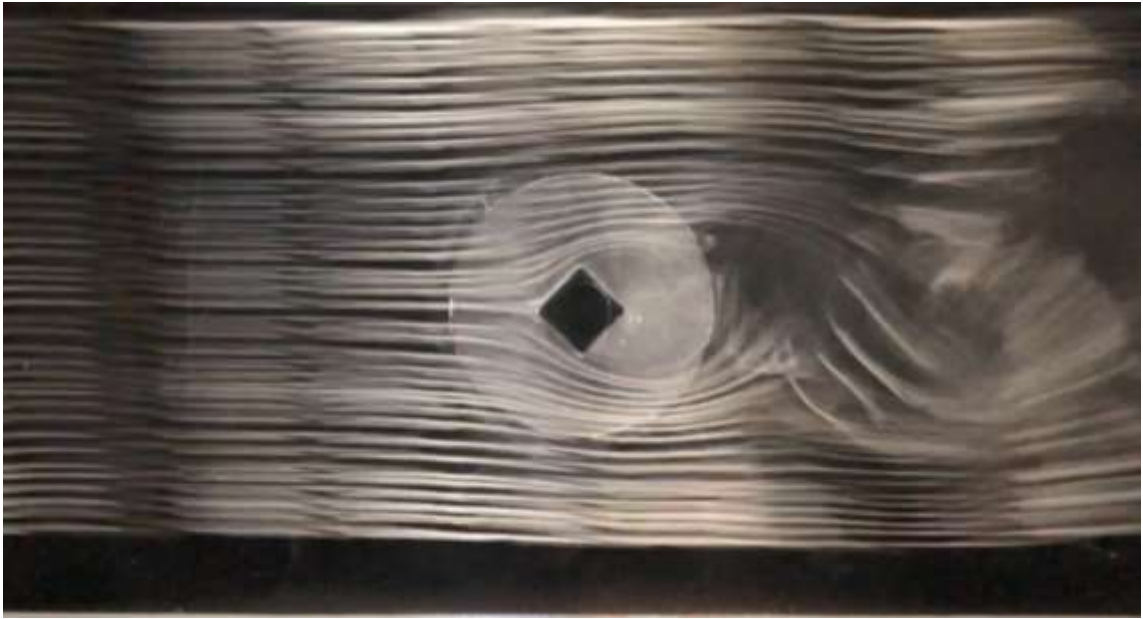


図 15 角柱( $\theta = 45^\circ$ ) の時の流れ

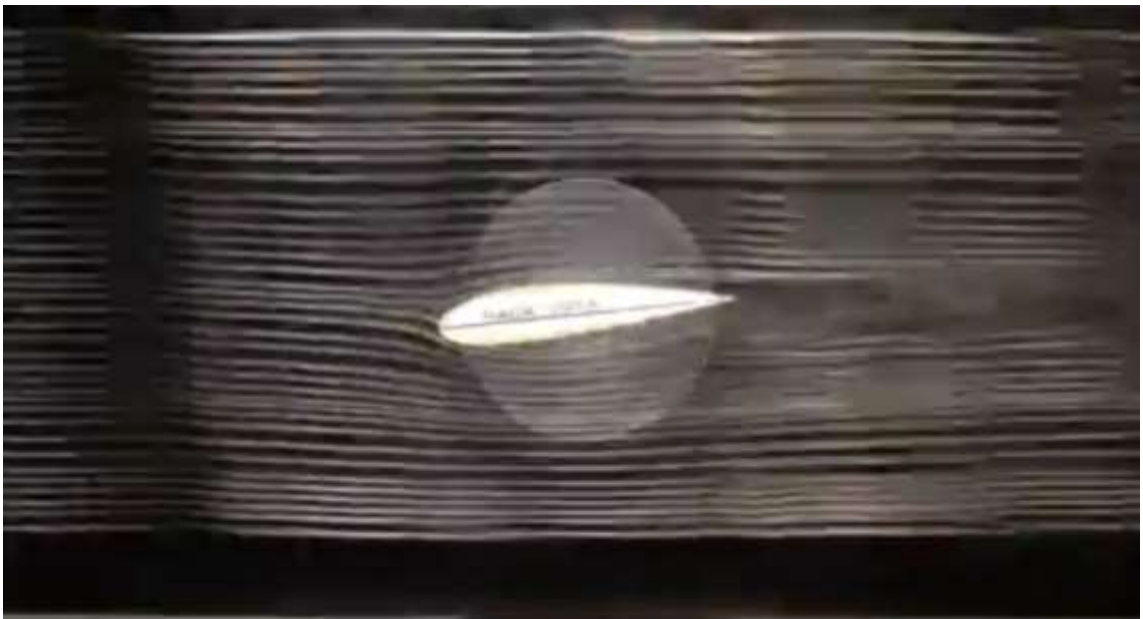


図 16 翼型周りの流れ( $\theta = -5^\circ$ )

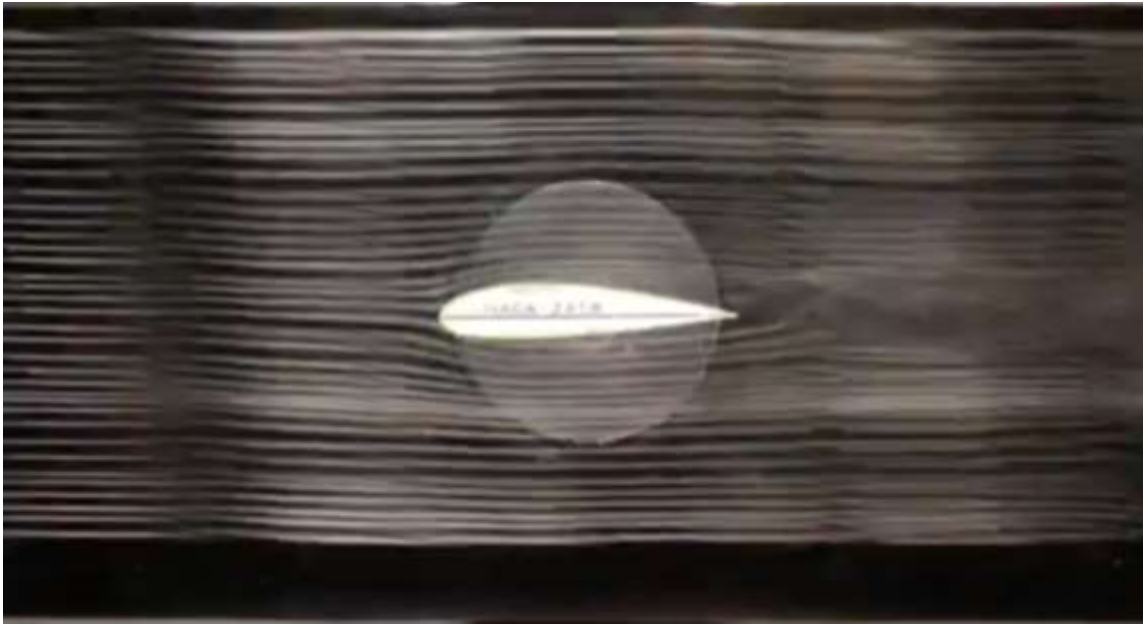


図 17 翼型周りの流れ( $\theta = 0^\circ$ )



図 18 翼型周りの流れ( $\theta = 5^\circ$ )



図 19 翼型周りの流れ( $\theta = 10^\circ$  )



図 20 翼型周りの流れ( $\theta = 15^\circ$  )

## [VII] 考察

### VII-1 電動機の回転数と風洞測定部の風速の測定実験

表 5 から回転数と風速には比例関係が成り立っていることが分かる。この関係をグラフとして表した図 9 を見ると、少しばらつきがあるものの直線になっていて、送風機の回転数によって風速を計算で求めることができることができ、実験前後での気象条件の変化は 2 つの関係性に影響を及ぼすことはほぼないことを示している。この近似直線の式を実際に求めてみると、切片がマイナスの値をとり回転数が 0 の時でも風洞内の流体に動きがあることを示している。この現象の原因として、今回使用した風洞がエッフェル型の開放型風洞であり、風洞の内外で圧力差が生じた際に流体が動いてしまった、A/D コンバータや数値を表示しているパソコンなどの変換の段階で誤差が生じてしまった、風洞内部での粘性抵抗によって各回転数での速度が低下してしまっている、などが考えられる。その他に、表 5 の変動率の数値を見ると回転数が上昇するとともに値が大きくなっていることが分かる。これは、今回の風洞に使用している送風機が、電動機とファンを V ベルトでつないで動力を伝達しているので、回転数が大きくなるほど回転数がファンに正確に伝わらない、回転数（風速）が上昇するほど風洞内に取り入れる空気が増えるため、常に一定量の空気を提供することが困難になってしまう、などの原因が考えられる。以上のことから、今回の実験に使用した開放型風洞は、定常的に流体を管理することができないので誤差が生じてしまうことが分かる。

### VI-2 円柱の圧力分布の測定実験

実験 VI-1 から、実験前後での気象条件の変化は今回の実験に大きな影響を及ぼすことはなく、使用した円柱の正面投影面積から風洞の閉塞率は 7.5 % 前後であることが分かるので、実験で得られた数値は適切であることが想定できる。ここで、完全流体の圧力係数の変化と今回の実験で得られた圧力係数の変化を表したグラフを以下に示す。図 20 の青線は測定値、オレンジ線は粘性のない完全流体の圧力係数を表していて、角度が  $70^\circ$  の付近を境に特性が大きく異なっていることが分かる。まず完全流体に着目すると、粘性がないことにより境界層が発生しないので、左右、上下対称のきれいな曲線になっていることが分かる。一方、測定値のグラフを見ると  $20^\circ$  付近までは理論値とほぼ同等の変化を見せ、 $20^\circ$  から  $70^\circ$  までは理論値より徐々に圧力係数が大きくなっているものの、似たような曲線を描いていることが分かる。しかし、 $70^\circ$  を境に徐々に値が大きくなり、 $90^\circ$  前後から値がほぼ一定の大きさになっていることが分かる。以上のことから、円柱の表面を流れている流体は粘性によって徐々にエネルギーが減っていき、圧力が低下していると推測できる。また  $90^\circ$  前後のグラフの動きに関しては、表面上の流体がその付近で剥離していて、その後は剥離によって動圧が変化することがなくなり、値が一定になったことが考えられる。

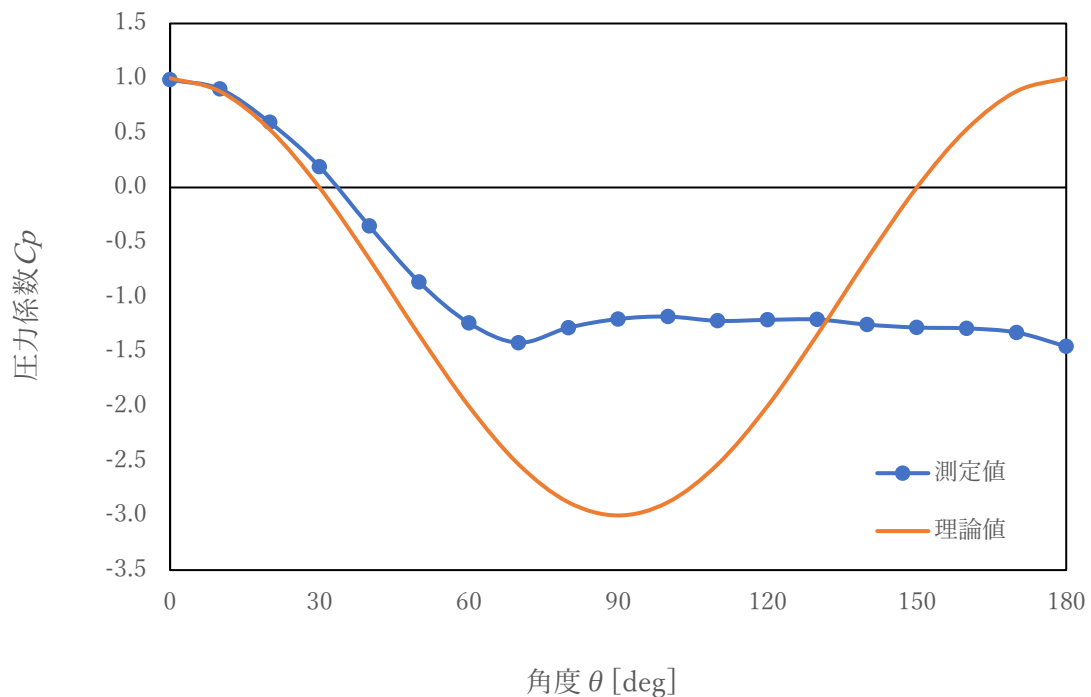


図 21 圧力係数  $C_p$  の比較

次に、圧力係数をもとに求めた抗力係数  $C_D$  の大きさについて考える。

実験結果の値をもとに、台形法とシンプソンの公式の2通りで値を求めた。ここでそれぞれの計算方法について考えると、台形法は区分求積法などの長方形のもとに考える方法と違い、台形による1次近似を行っているため誤差が少なくなるやり方である。しかし、シンプソンの公式では2次近似を用いているため、より正確な値が求められることが分かる。実際の計算結果を比較してみると、それぞれの値で大きな変化は見られていない。これは今回の関数が  $\cos \theta$  であり、グラフの形が滑らかな曲線であるため、それぞれのやり方で値に大きな変化が見られなかったと考えられる。

### VI-3 物体まわりの流れの可視化実験

初めに図13の円柱周りの流れを見てみると、丁度  $90^\circ$  の付近を境に流体が表面から剥離をしていて、後方に空気が流れていないため圧力抵抗が生じていることが画像から推測される。また、今回の円柱の実験におけるレイノルズ数は、 $Re=5.327 \times 10^3$  より  $60 \sim 6000$  の範囲内であるので円柱後方にできている渦はカルマン渦であることが考えられる。

次に図14, 15の角柱における物体周りの流れについて考える。どちらの画像からも、角柱の角になっている部分から剥離が起きていて、その後方に渦を作っていることが分かる。これは、角で物体の表面形状が急変している所以抗力が大きくなり、流体が物体表面上を流ることができなくなってしまったことによって発生したと考えられる。



最後に、図 16~20 までの NACA2418 翼型の周りの空気の流れについて考える。図 16,17 を見てみると、前縁から流れてきた流体は、翼の表面に沿いながら層流境界層を形成していて、エネルギーを失っていく後縁付近になると剥離してしまっていることが分かる。図 18~20 に関しては、前縁の直後付近からすでに剥離が始まっており、最大翼厚位置後方から後縁にかけて、流体が翼からはがれていることが分かる。この状態では急激に抗力が増加し、一方揚力は急激に低下をしてしまうため、失速状態に近い状況であることが分かる。しかし、先に実験を行った円柱や、角柱と比較をすると、剥離後の流体の流れが穏やかであり圧力抵抗の値も小さくなることが推測できる。以上のような剥離の現象を防ぐ、和らげるためには、流体のエネルギーを極力減らさないように翼弦長を短くするか、流れる流体の速度を速めることでエネルギー量を大きくするか、流体の流線に近い形状の翼型を作成するなどの対策をする必要があると考えられる。

## [VIII] 結論

- ・ 電動機の回転数と風速は比例関係にある。
- ・ 開放型の風洞では一定量の空気を常に供給するのが難しいので、風速などの値で誤差が生じる。
- ・ 円柱の圧力分布の関係性から、剥離点の位置を求めることができた。
- ・ シンプソン法と台形法では、それぞれ 2 次近似, 1 次近似と差があるので求めた値の正確性も変わる。
- ・ 円柱や角柱といった流体が正面に当たる物体では、抗力が大きくなり渦が発生しやすい。
- ・ 翼の迎角を上げていくと剥離点が後縁付近から前縁に向かって移動をする。

## [IX] 参考文献

- ① 日本機械学会：JSMEテキストシリーズ流体力学，丸善出版，2005
- ② 牧野光雄：航空力学の基礎,産業図書, 1989.
- ③ 基礎流体力学編集委員会：基礎流体力学，産業図書，1989
- ④ <https://automatic-browsing.com/2020/08/15/> 数値積分-台形公式とシンプソンの公式の導出  
(11/07 12:35 参照)
- ⑤ <https://pigeon-poppo.com/pressure-coefficient/> 鳩ぽっぽ初心者のための航空力学講座  
(11/18 10:36 参照)