

# 航空工学実験 I

## 流れの観察法

2 班 2 年 2020 番 大村蒼摩

実験日:2023 年 7 月 11 日

審査日:2023 年 7 月 11 日

## 目次

1	概要	2
2	目的	2
3	理論	2
3.1	粘性 <sup>[8]</sup>	2
3.2	境界層 <sup>[8]</sup>	2
3.3	剥離 <sup>[3]</sup>	3
3.4	風洞の種類, 特徴 <sup>[4]</sup>	4
3.5	風洞実験での圧力の計測方法	5
3.6	流れの可視化 <sup>[9]</sup>	5
3.7	円柱周りの流れ	5
4	実験手順	5
4.1	電動機の回転数と測定部の風速	5
4.2	円柱の圧力分布	6
4.3	物体まわりの流れの可視化	6
4.4	円柱の抗力係数の推算	6
5	実験装置	7
5.1	風洞	8
5.2	電動機・制御盤	9
5.3	煙発生装置	10
5.4	計測器	11
6	実験結果	11
6.1	電動機の回転数と測定部の実験結果	11
6.2	円柱の圧力分布の結果	12
6.3	物体まわりの流れの可視化の実験結果	18
7	考察	21
7.1	電動機の回転数と測定部の風速の計測値	21
7.2	円柱の圧力分布の結果 <sup>[7]</sup>	22
7.3	物体まわりの流れの可視化 <sup>[1][3]</sup>	22

## 1 概要

今回の実験では、流体现象の計測法、観察法、物体まわりの流れを正しく理解するために、電動機の回転数と測定部の風速の測定、円柱周りの圧力分布の測定、流れの可視化の3つの実験を行った。そこから回転数と風速には比例関係があることや、圧力分布から剥離点の角度の測定、物体形状と剥離領域の関係などについて考察した。

## 2 目的

本実験では、風洞実験を通じて流体现象の計測法と観察法を習得し、それらを基礎に物体まわりの流れを正しく理解する。

## 3 理論

### 3.1 粘性<sup>[8]</sup>

クエット流れの微小部分について考えてみると、その部分は速度の異なる2つの層から構成されている。上の層の流体を構成している分子は、あらゆる方向に運動しているが、その平均をとってみると流れ方向にある速度で運動している。その速度の大きさは、下の層に分子の平均的な速度より少し速い。分子が境界層を越えて他の層に入り込み衝突を繰り返すうちに、上の層の分子は下の層の分子を加速する。反対に、下の層の分子は上の層の分子を減速する。すなわち、衝突によって分子の速度を一様化しようとする作用がある。この作用のことである。

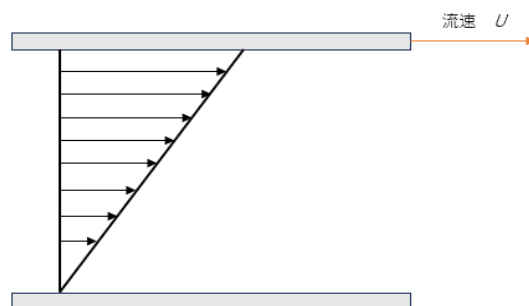


図1 クエット流れ

### 3.2 境界層<sup>[8]</sup>

実際の流体運動を扱う際には、流れ場を

- 物体表面近くの粘性の影響の大きな領域
- 物体から離れた粘性の影響が小さい領域

に考えなければならない．レイノズル数は，慣性力と粘性力の比である．レイノズル数が大きくなると粘性力の影響は物体表面近くの限られた領域に限定されてくる．この物体表面の薄い層のことである．

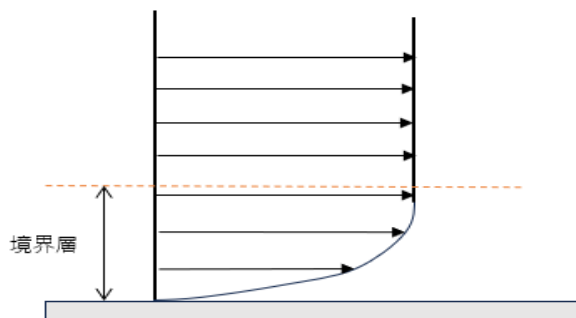


図2 境界層

### 3.3 剥離<sup>[3]</sup>

物体表面に形成された境界層は流れの方向に厚さを増加させながら流れていき，表面が凸形状になっていると下流において圧力が増加し，境界層の中でも圧力が増加していく．物体の表面上の流れは粘性力の影響で両側が遅くなり，下流に向かって流れていくことができなくなる．このようなことより，図3のように反対方向に流れる．また完全流体では，円柱の周りの流れは上下左右対称となり，境界層は発生しない．この場合，円柱表面での圧力は次のようになる．

$$C_P = 1 - 4\sin^2\theta \quad (1)$$

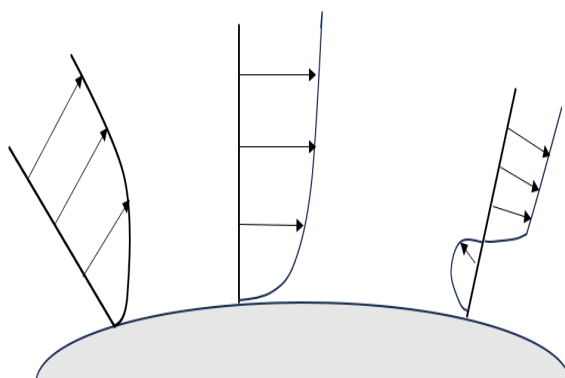


図3 円柱周りの剥離

## 3.4 風洞の種類, 特徴<sup>[4]</sup>

### 3.4.1 低速風洞

低速風洞は開放型と回流型の二つに分類できる。開放形風洞はエッフェル形と呼ばれ、吸入口と吹出し口が大気に直接開放されているのが特徴である。この構造の風洞は、一定の風速における必要動力が大きいという欠点がある。一方で、同じ空気を循環していないか、あるいは部屋の広さが広いがゆえに、煙による流れの可視化実験のときは、長時間運転させることが可能である。回流形はゲッチング型と呼ばれ、空気変換器をつけていない限り、同じ空気を循環させるため、動力は小さくなる。さらに、回流形は二つに分けることが可能である。単帰路式と複帰路式だ。単帰路式では送風機部の風路が1本であるが、複帰路式は2本必要になる。

### 3.4.2 超大型風洞

超大形低速風洞の目的はレイノルズ数の効果を緩和するために、実機を供試体として実験することだ。特徴は、名前からわかる通り、ほかの風洞に比べて超大形ということだ。カリフォルニア州のNASA Ames研究所の風洞は12.2m×24.4mと24.4m×36.6mの風洞がある。この風洞は最大風速134m/s出すことができる。この風洞に必要な動力は100670kWである。

### 3.4.3 高レイノルズ数

風洞実験において高レイノルズ数を得るために、測定部内の空気の密度を上げる方法が長年利用されている。NASAにある高レイノルズ数は、実験気圧を最大20気圧まで圧縮することが可能である。また、液体窒素を噴射状にして風路内の空気と混合させ、低温にすることで高レイノルズ数を得る方法もある。このような風洞ではマッハ0.2からマッハ1.2の範囲で運転が可能である。

### 3.4.4 V/STOL 用風洞

V/STOL機は、一般航空機に比べて吹下し角が大きく、汎用風洞測定部では壁干渉が大きくなり、好ましくない。そのため、壁干渉を軽減するように測定部を一段と大きくしたものである。

### 3.4.5 突風風洞

測定部の風上に正弦波の突風を発生させる装置がある。一連の翼を機械的に振動することによって任意の周期と振動を持った突風が得られる。航空機の突風応答実験に用いられる。

### 3.4.6 アイシング風洞

翼の前縁、エンジンインレットなどにおける氷結状態および防除氷装置の効果を実験する風洞実験である。

### 3.4.7 環境用試験用風洞

大気拡散問題の研究、建築構造物の風圧特性の実験、風害、台風災害対策の実験などに用いられる。

## ピトー静圧管

- ピトー静圧管は圧力計と組み合わせて使うことで、動圧を計測する装置である。

- ピトー管の総圧： $p_0$ , 静圧： $p_\infty$ , 動圧： $q = \frac{\rho U^2}{2}$  とするとベルヌーイの法則より風速： $U$  は次式のように書くことができる．実際に実験では  $p_0 - p_\infty$  を計測している．

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

$$U = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_\infty)}{\rho}} \quad (3)$$

### 3.5 風洞実験での圧力の計測方法

模型の表面に多数の測圧孔を規則正しく分布して，この孔にかかる圧力を測定する．方法としては，模型内部でチュービングまたは管を使って，孔からの圧力測定器具につないで測定を行う．ただし，模型表面の測圧孔の周りは，突起物，まくれが無いように注意する．

### 3.6 流れの可視化<sup>[9]</sup>

流れの可視化することの利点は，1枚の写真から広い流れの場の空間的に構造が瞬間的に手力的に得られること．同じ量の情報を流れの可視化以外の方法で得るのは難しい．短所は，圧力や渦度に関する情報を直接的には得ることが困難なこと．

### 3.7 円柱周りの流れ

円柱周りの流れは，層流境界層が形成される場合と乱流境界層が形成される場合がある．レイノズル数が  $2.0 \times 10^5$  の流れのとき，円柱表面には層流境界層が形成され，剥離点は前方にあって剥離領域は大きく，その結果円柱が受ける抗力は大きくなる．レイノズル数が  $4.2 \times 10^5$  の流れのとき，境界層は乱流境界層になり，剥離点が後退し，剥離領域も小さくなっている．その結果，円柱の受ける抗力は小さくなる．また，物体後方に互い違いに形成された渦列をカルマン渦列という．これは円柱にだけ発生する現象ではなく，流れに平行な平板のように剥離のない物体の後流でも形成される．つまりは，後流の不安定さで形成されるかが決まる．

## 4 実験手順

実験中に，実験装置のスケッチ又は写真撮影を行う．また，実験中に風洞周辺で起きた事象は実験結果へ影響する場合があるので，詳細に記載する．このとき，模型の取り付け位置，ピトー静圧管の直径を測定する．

### 4.1 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．

## 4.2 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， $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $10^\circ$  おきに变化させる．
5. 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．
6. 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．
7. 実験室の大気圧・気温・湿度を計測する．
8. 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．

## 4.3 物体まわりの流れの可視化

円柱，角柱，二次元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. 煙の流れがよ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．このとき，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，煙の線お形状から何が分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，竜泉物体の相違など．

## 4.4 円柱の抗力係数の推算

1. 圧力係数の計算

測定された円柱表面の圧力差  $P - P_\infty$  をそれぞれの角度で無次元化し，圧力係数  $C_P$  とする．圧力係数は次式で定義される．

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{Q} = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho U^2}{2}} \quad (4)$$

2. 円柱の抵抗係数  $C_D$  は次式によって求められる．この  $C_P$  は圧力による抵抗係数で，圧力抵抗係数または形状抗力係数と呼ばれる．

$$C_D = \frac{\int_S p \cos \theta dA}{\frac{\rho U^2 S}{2}} = \frac{\pi}{180} \int_{180}^0 C_P \cos \theta d\theta \quad (5)$$

ここで，表面積： $S$ ，傾きを考慮した面素： $A$  である．また， $\theta$  は弧度法でなく度数法で表記される．また，

実際の流れでは、常識の解析的な積分が行えない。そのため、この式を用いるため、まず  $10^\circ$  刻みの各  $C_P$  から  $C_P \cos \theta$  を計算する。そして、以下の2通りの方法で  $C_D$  を数値積分により算出する。

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。

一般に、抵抗係数  $C_D$  はレイノルズ数が  $Re$  に対して表される。

## 5 実験装置

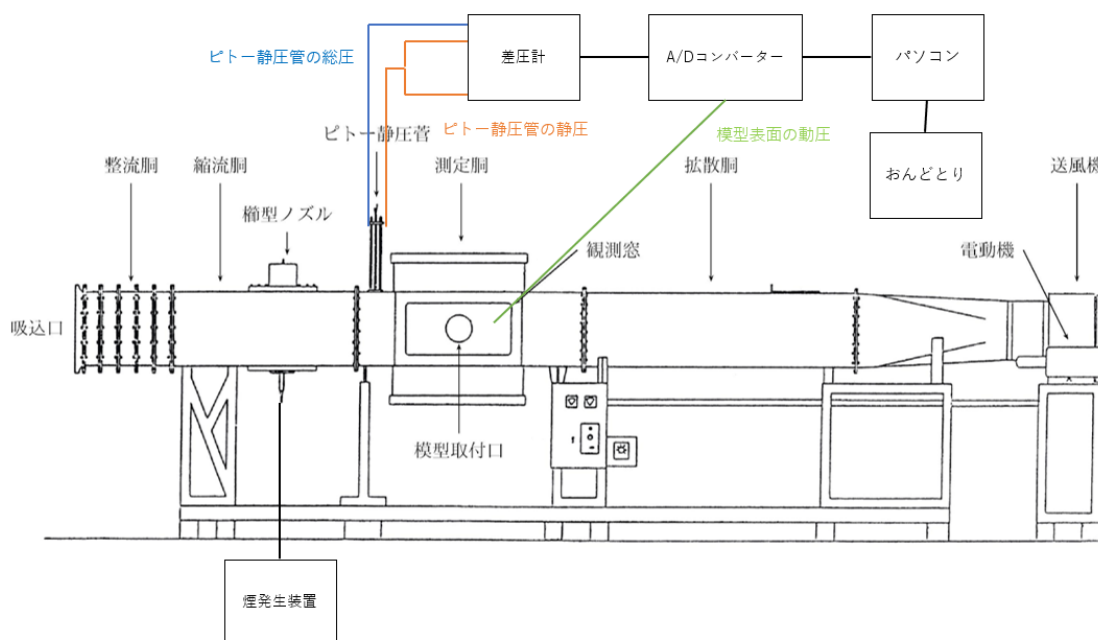


図4 実験装置の簡略図



## 5.1 風洞



図 5 風洞

表 1 風洞

風洞	
形式	吸込 2 次元煙風洞
縮流比	12:1
ダイビングスクリーン	20 メッシュ 6 枚
観測部	長さ 1250mm 高さ 400mm 幅 100mm
観測部窓	幅 600mm 高さ 300mm
送風機	50m <sup>3</sup> /min
風速	2.145～14.562m/s
主流流れ	未計測 m/s

## 5.2 電動機・制御盤



図 6 制御盤

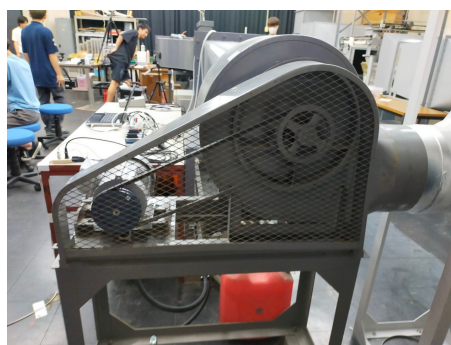


図 7 電動機

表 2 電動機・制御盤

電動機・制御盤	
制御方式	誘導モータ＋インバータ制御
電動機	0.75kW 4P 3φ200V 全閉外扇
インバータ	ファン・ポンプ用インバータ 0.75kW 3φ200V
制御盤	電源ブレーカハンドル・設定用回転数表示機能・操作パネルボックス (本体寸法：H500×W400×D200 ※凸部除く)
通信	RS485 (4 線式)

### 5.3 煙発生装置



図 8 煙発生装置

表 3 煙発生装置

煙発生装置	
メーカー/製品名	STAGE EVOLUTION /SN1200 II
ヒーターパワー	1100W
ウォームアップ	8min
フォグ容量	198m <sup>3</sup> /min
タンク容量	2.5L
電源電圧	AC100V
煙導構造	翼型導管構造
ノズル間隔	25mm
ノズル径	φ1.2 1.4mm
ノズル数	40 本

## 5.4 計測器

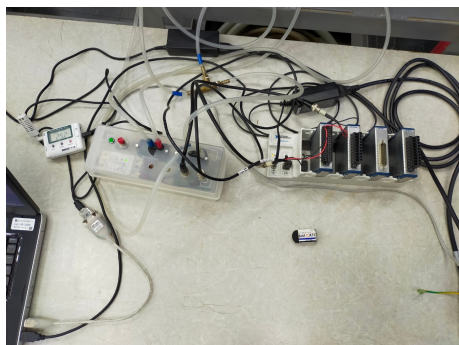


図9 おんどとり, 圧力センサ, A/D コンバーター



図10 パソコン

表4 計測器

計測器	
おんどとり	温湿度・大気圧データロガー TANDO Thermo Recorder TR-73U
圧力	Honeywell 圧電抵抗センサー 163Pc01D75 $\pm 2.5$ inH <sub>2</sub> O (???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メンツ DAQ 16bit $\pm 10$ V (分解能???mV)
計測ソフトウェア	日本ナショナルインスツメンツ LabVIEW

## 6 実験結果

### 6.1 電動機の回転数と測定部の実験結果

#### 6.1.1 電動機の回転数と測定部の風速結果

以下の表は実験前に測定した気象条件である。結果として実験前と実験後では数値はほぼ年化していないことが分かる。

表5 気象条件

	実験前	実験後	平均
気温 [°C]	24.6	25.0	24.8
湿度 [%]	75.2	65.6	70.4
大気圧 [hPa]	1000.2	1000.0	1000.1
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	1.163	1.162	1.1625
動粘性係数 [m <sup>2</sup> /s]	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.581 \times 10^{-5}$	$1.5795 \times 10^{-5}$

### 6.1.2 電動機の回転数と測定部の風速の計測値

以下の表は回転数ごとに計測した動圧，風速，変動率をまとめたものである．

表 6 計測結果

回転数	動圧 [Pa]	風速 [m/s]	変動率 [%]
100	1.04	2.145	0.05
200	4.87	2.739	0.04
300	10.32	4.826	0.05
400	16.78	5.423	0.06
500	27.98	6.855	0.05
600	44.21	8.538	0.07
700	63.80	10.194	0.06
800	77.35	11.561	0.06
900	98.52	12.942	0.08
1000	122.11	14.562	0.09

回転数と風速の関係は以下の図の通りである．

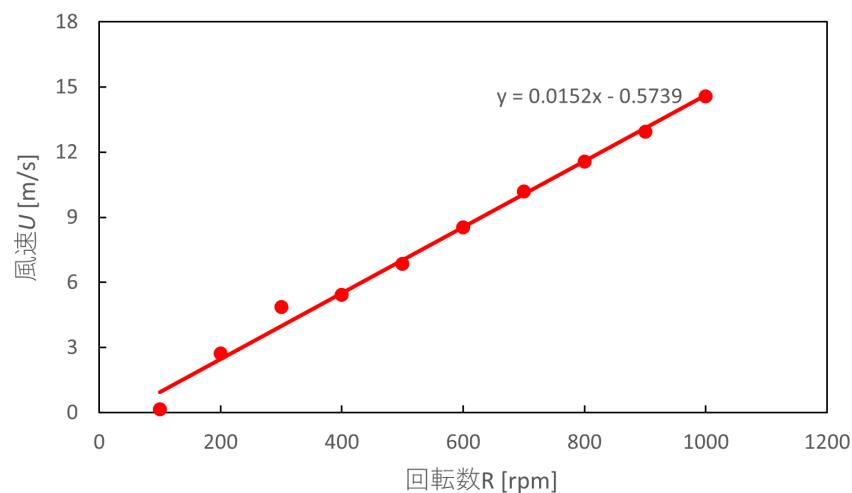


図 11 回転数と風速の関係

回転数と風速は比例の関係があることが分かる．

## 6.2 円柱の圧力分布の結果

まず最初に閉塞率を求める．

$$BR[\%] = \frac{\text{円柱の正投影面積}}{\text{測定部の断面積}} \times 100 \quad (6)$$

BR は閉塞率を表す.

$$\frac{30.45 \times 100}{100} \times 100 = 7.6125 \approx 7.61 \quad \% \quad (7)$$

一般的に閉塞率は 10% 以下がよいとされているため, 妥当な値だと考える.

表 7 気象条件

	実験前	実験後	平均
気温 [°C]	25.1	25.4	25.25
湿度 [%]	65.5	60.2	62.85
大気圧 [hPa]	1000.0	999.9	999.5
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	1.162	1.161	1.1615
動粘性係数 [m <sup>2</sup> /s]	$1.582 \times 10^{-5}$	$1.58 \times 10^{-5}$	$1.581 \times 10^{-5}$

ここで, レイノルズ数は以下の式で算出する.

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (8)$$

U: 風速    d: 代表長さ     $\nu$ : 動粘度係数

表 8 計測条件

回転数 [rpm]	1000
動圧 [Pa]	121.51
風速 [m/s]	14.523
円柱の直径 [mm]	30.45
レイノルズ数 [—]	$2.80 \times 10^4$
測定部の幅 [mm]	100
測定部の高さ [mm]	400
閉塞率 [%]	7.61

### 6.2.1 円柱の圧力分布の計測値

表 9 計測値

角度 [deg]	$P - P_\infty$	変動率 [%]	角度 [deg]	$P - P_\infty$	変動率 [%]
0	120.79	0.11	100	-138.56	0.84
10	103.92	0.12	110	-141.64	0.87
20	75.18	0.13	120	-143.16	0.99
30	11.83	0.19	130	-137.12	0.8
40	-51.74	0.28	140	-151.94	1.14
50	-108.65	0.37	150	-153.81	1.35
60	-154.11	0.69	160	-158.97	1.63
70	-162.99	0.84	170	-161.47	1.87
80	-144.67	1.05	180	-162.54	1.91
90	-142.06	0.90			

上の表から圧力係数  $C_P$  の算出を行う．圧力係数  $C_P$  は次式で定義された．

$$C_P = \frac{p - p_\infty}{q} = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho U^2}{2}} \quad (9)$$

式 (9) より，各角度における圧力係数を算出する．

表 10 各角度での圧力係数

角度 [deg]	圧力係数 $C_P$	角度 [deg]	圧力係数 $C_P$
0	0.986	100	-1.13
10	0.848	110	-1.16
20	0.614	120	-1.17
30	0.0966	130	-1.12
40	-0.422	140	-1.24
50	-0.8877	150	-1.26
60	-1.26	160	-1.30
70	-1.33	170	-1.32
80	-1.18	180	-1.33
90	-1.16		

表 10 より圧力係数  $C_P$  をグラフ化すると以下の通りになる．

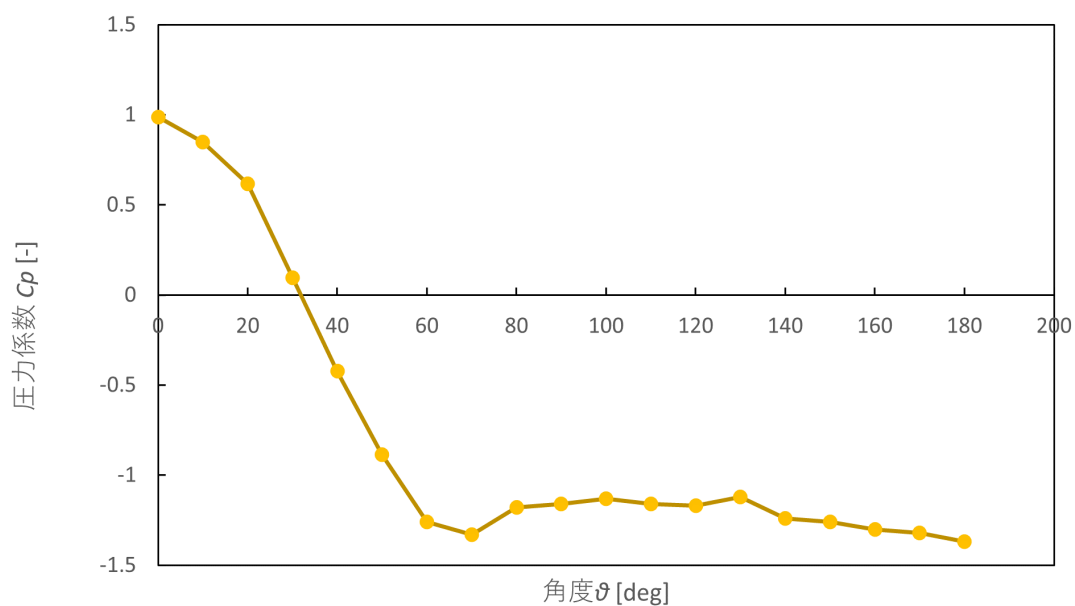


図 12 圧力係数と角度の関係

次に、抵抗係数  $C_D$  を求めるにあたって、 $C_P \cos \theta$  を算出する。

表 11 各角度での圧力係数

角度 [deg]	$C_P \cos \theta$	角度 [deg]	$C_P \cos \theta$
0	0.986	100	0.196
10	0.836	110	0.400
20	0.577	120	0.584
30	0.0840	130	0.720
40	-0.324	140	0.950
50	-0.570	150	1.09
60	-0.629	160	1.22
70	-0.455	170	1.30
80	-0.205	180	1.33
90	-0.00		

表 11 で求めた  $C_P \cos \theta$  を用いて 2 つの算出方法で抵抗係数  $C_D$  を求める。

1. 台形法により数値積分して求める。
2. シンプソンの公式より数値積分して求める。



### 6.2.2 台形法による求め方

台形法は区分求積法で発生する誤差をより小さくするために工夫された数値積分の手法である。台形法で求めるにあたって用いる式は以下の通りだ。h は横軸の角度の間隔を表している。今回は 18 個に分けて考えるため、h=10 である。また、ここでは面積を S' とする。

$$S' = \int_a^b f(x) dx = \sum_{n=0}^{k=18} \frac{h}{2} (f_{k-1} + f_k) \quad (10)$$

この式から求めた台形の面積は以下の表のとおりだ。

表 12 台形の面積

角度 [deg]	台形の面積 [m <sup>2</sup> ]	角度 [deg]	台形の面積 [m <sup>2</sup> ]
0~10	9.108	100~110	2.960
10~20	7.061	110~120	4.899
20~30	3.302	120~130	6.520
30~40	-1.200	130~140	8.349
40~50	-4.469	140~150	10.19
50~60	-5.996	150~160	11.54
60~70	-5.421	160~170	12.60
70~80	-3.301	170~180	13.13
80~90	-1.025		
90~100	0.982		

表 12 で算出した台形の面積を足し合わせれば、全体の面積 S が明らかになる。

$$S = \sum_{n=1}^{k=18} S = 69.2 \quad (11)$$

となるので、抵抗係数  $C_D$  は

$$C_D = \frac{\int_S p \cos \theta dA}{\frac{\rho U^2 S}{2}} = \frac{\pi}{180} \int_{180}^0 C_p \cos \theta d\theta = \frac{\pi}{180} \times S = 1.208 \quad (12)$$

### 6.2.3 シンプソンの公式による求め方

閉区間 [a,b] を 2n で等分すると次の近似式が成り立つ。

$$S = \int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{3} \{ (f_0 + f_{2n}) + 4(f_1 + f_3 \cdots + f_{2n-1}) + 2(f_2 + f_4 + f_{2n-2}) \} \quad (13)$$

h は  $\frac{(b-a)}{2n}$  で表すことができ、今回は n は 9 とする。式 (13) を用いて計算をすると

$$S = \int_0^{180} C_p \cos \theta d\theta = 68.77 \quad (14)$$

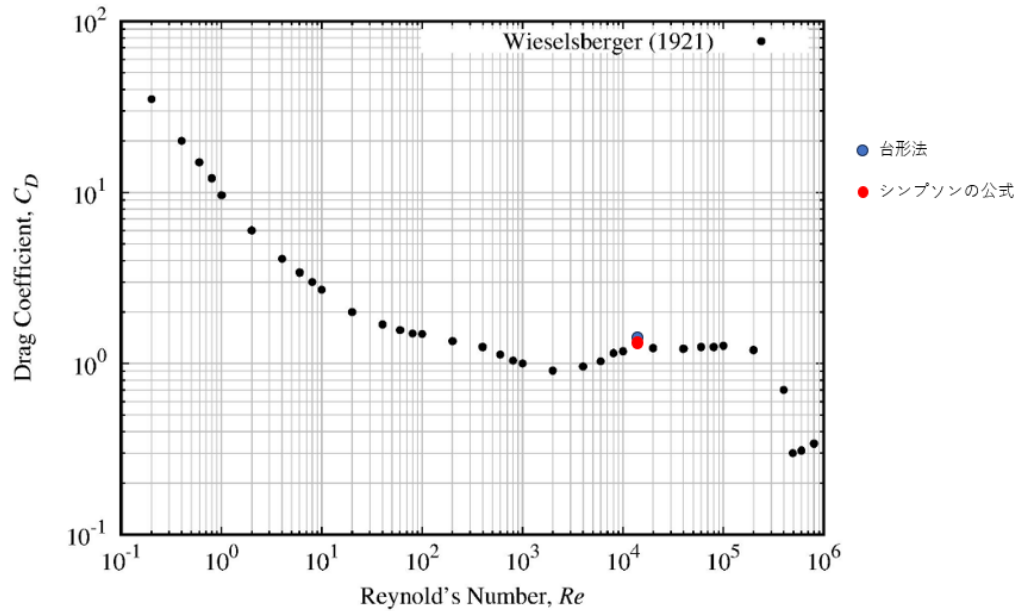
よって, 式 (5) より

$$C_D = \frac{\int_S p \cos \theta dA}{\frac{\rho U^2 S}{2}} = \frac{\pi}{180} \int_{180}^0 C_p \cos \theta d\theta = \frac{\pi}{180} \times S = 1.200 \quad (15)$$

表 13 台形法とシンプソンの公式で求めた面積  $S$  と抵抗係数  $C_D$

	面積 $S$	抵抗係数 $C_D$
台形法	69.2	1.207
シンプソンの公式	68.77	1.200

台形法とシンプソンの公式より  $C_p \cos \theta$  から  $C_D$  を求めることができた.



Wieselsberger, C., Neuere festellungen über die Gesetze des Flüssigkeits und Luftwiderstandes, Physikalische Zeitschrift 22, pp. 321-328, 1921.  
(These datas were measured with wind tunnel experiment.)

図 13 抵抗係数  $C_D$  の比較

### 6.3 物体まわりの流れの可視化の実験結果

以下の表に実験時の気象条件，計測条件，各模型の代表さを，角度範囲，レイノルズ数を示した．

表 14 気象条件

	実験前
気温 [°C]	25.4
湿度 [%]	63.6
大気圧 [hPa]	1000.0
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	1.161
動粘性係数 [m <sup>2</sup> /s]	$1.585 \times 10^{-5}$

表 15 計測条件

回転数 [rpm]	500
動圧 [Pa]	27.38
風速 [m/s]	6.990

表 16 模型

模型	代表長さ [mm]	角度範囲 [deg]	レイノズル数
円柱	30.10	-	$1.327 \times 10^4$
角柱	30.25	0[deg],45[deg]	$1.334 \times 10^4$
翼型 NACA2418	139.90	-5[deg]~15[deg]	$6.20 \times 10^5$

以下に各模型の煙による可視化した流れを示す．

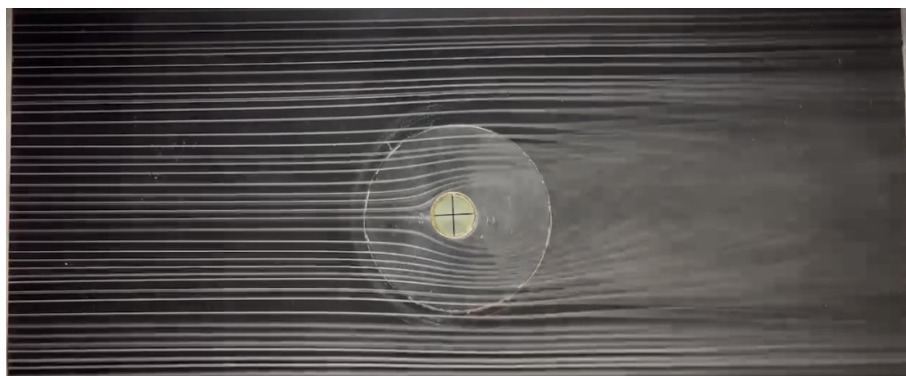


図 14 円柱周りの流れ

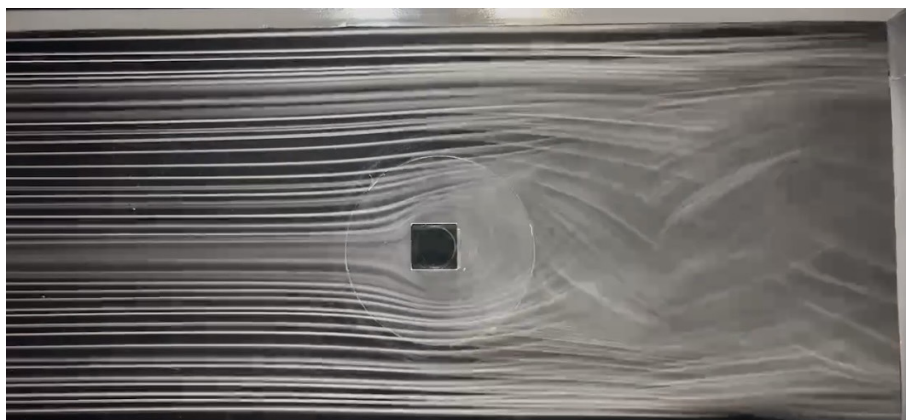


図 15 角柱 ( $\theta=0^\circ$ ) 周りの流れ

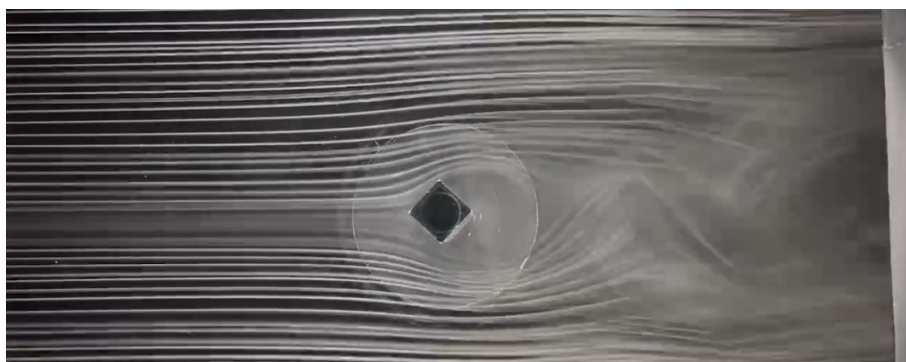


図 16 角柱 ( $\theta=45^\circ$ ) 周りの流れ

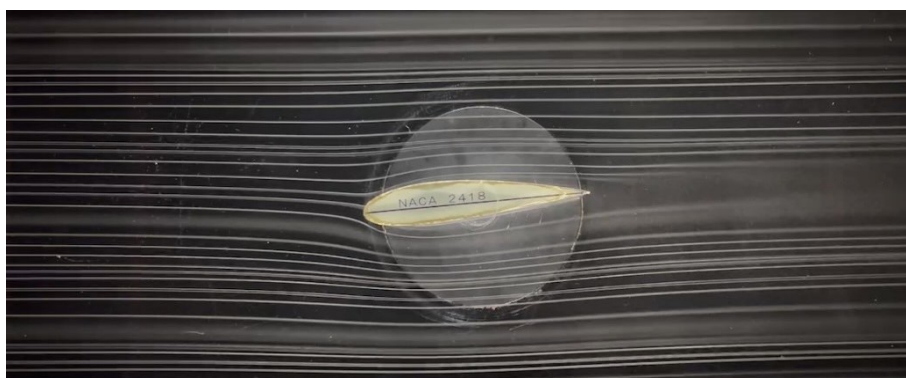


図 17 翼型模型 ( $\theta=-5^\circ$ ) 周りの流れ

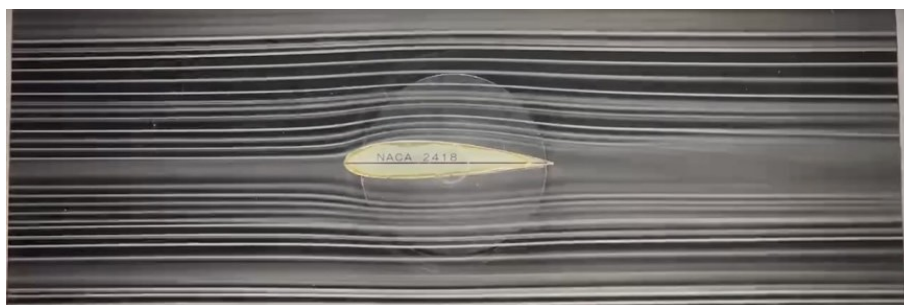


図 18 翼型模型 ( $\theta=0^\circ$ ) 周りの流れ

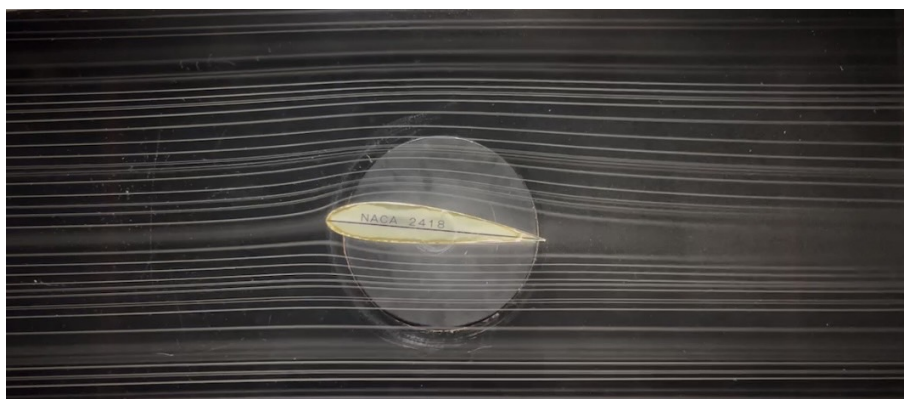


図 19 翼型模型 ( $\theta=5^\circ$ ) 周りの流れ

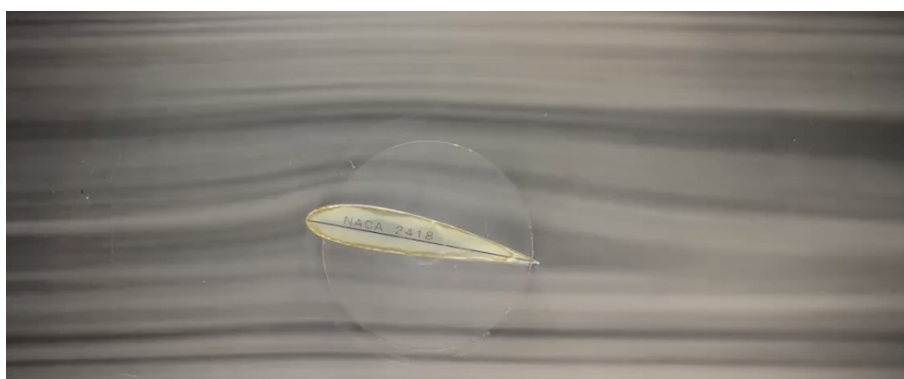


図 20 翼型模型 ( $\theta=10^\circ$ ) 周りの流れ

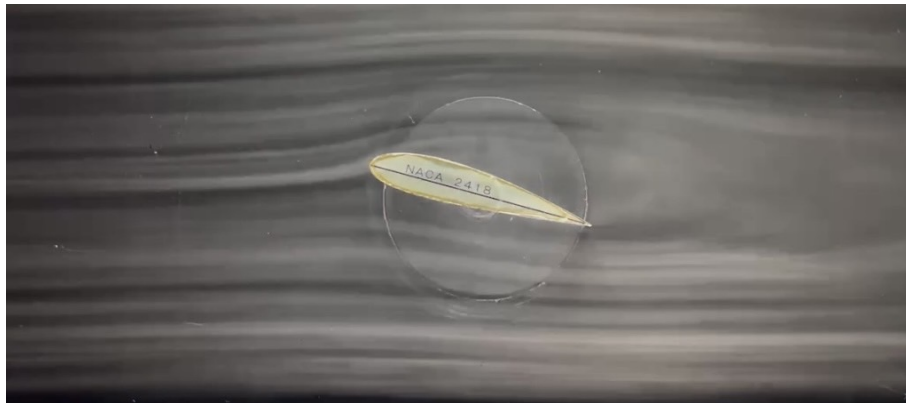


図 21 翼型模型 ( $\theta=15^\circ$ ) 周りの流れ

## 7 考察

### 7.1 電動機の回転数と測定部の風速の計測値

表 5 より，気象条件が実験の前後で変化が少ないことから，送風機の風速気象条件に左右されていないことが分かる．加えて，表 6 より電送機の回転数を増加させると風速や動圧の値も大きくなっていることが分かった．このことに注目してみると，図 11 より回転数  $R$  と風速  $U$  には比例の関係があることが明らかである．これは，今回用いた風洞が開放型風洞であるため，大気が直接取り込まれるからだ．よって，回転数を上げると風速が強くなると考えた．さらに，図 11 でプロットした値では近似曲線からずれている値が数か所あるが，原因としてはパソコン上で波形を読み取る際に，1 秒ごとの更新された波形が表示されていたため，その値を正確に読み取ることは困難だった．このようなことから，読み取るときの誤差がプロットがずれた原因だと考えた．

また，動圧の式は以下のように表すことができる．

$$P = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (16)$$

$\rho$  は一定であると考える．

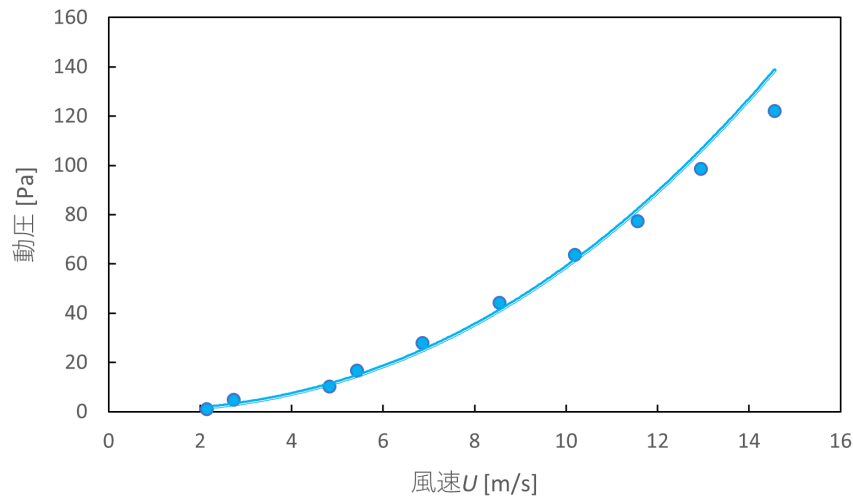


図 22 動圧と風速の関係

図 22 より、動圧が風速  $U$  の 2 乗に比例するのは明らかである。また、図 22 は 2 乗の近似曲線を用いて近似をしたが、プロットがずれている箇所が多いが、これは冒頭で述べた通り、パソコンの表示波形が 1 秒ごとに更新されるため、正確な数値が読み取れてなかったのが原因と考える。

## 7.2 円柱の圧力分布の結果<sup>[7]</sup>

今回の実験で得られたデータ図 12 を見てみると圧力係数  $C_p$  は  $0^\circ$  から三角関数的に推移していき  $70^\circ$  で最小値を取っている。それ以降、 $90^\circ$  まで少し増加し、一定の値になっている。これは、剥離により、圧力が低くなったため、周囲から力が働いたからであると考えられる。また、周囲からの力は抵抗力として働いた。よって、図 12 を見てみると抵抗係数が増加している  $70^\circ \sim 90^\circ$  付近が剥離点であると推測できる。また、剥離が起きると円柱表面に沿って流れることが不可能になるので、値はほぼ一定になったと考えた。以下に理想流体と実験で得たデータを示す。

理想流体では、粘性、空気抵抗が考慮されていないため、円柱まわり流れは上下対称になり、境界層は発生しない。よって、綺麗な曲線になっていると考えられる。一方で今回の流体では  $Re$  は  $2.80 \times 10^4$  であり、一般的に円柱周りの臨海レイノズル数は  $2.0 \times 10^5$  であるため、層流であり、層流境界層が形成されたと考えられる。よって、理想流体と比較したときに異なる形状のグラフになった推測した。この実験では、台形法とシンプソンの公式を用いて抵抗係数  $C_D$  を求めた。台形法はグラフを折れ線グラフにして台形の面積で求め、シンプソンの公式はデータを微小区間で放物線に近似して抵抗係数を算出した。表 13 よりどちらからほぼ同じ値が求められた。データの量などで適切に使い分けののが良いと考える。

## 7.3 物体まわりの流れの可視化<sup>[1][3]</sup>

図 13 より、円柱周りの流れは、円柱の断面を単位円として考えたとき、 $\frac{\pi}{2}$  の付近で流れが乱れ始めていることが分かる。流れがまともにあたる  $\pi$  の部分では圧力が最も高く、それ以降表面に沿って圧力は減少していき、 $\frac{\pi}{2}$  で圧力の最小値を取る。しかし、0 に行くにつれて増加していく。圧力勾配について考えてみると、 $\pi$

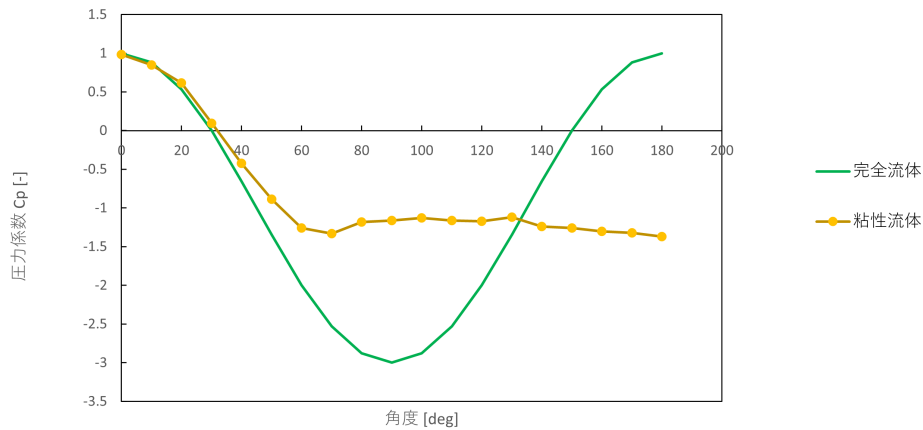


図 23 理想流体の圧力係数と実験値の関係

から時計回りに  $\frac{\pi}{2}$  をたどると、圧力勾配は負 (マイナス) である。一方で、 $\frac{\pi}{2}$  から時計回りに 0 までたどると、圧力は増加するため、圧力勾配は正で登り坂になることが分かる。境界層内の流体は粘性摩擦を受けるため、運動エネルギーを消費することから、次第に速度が遅くなり、0 の位置までたどりつくことができず、途中の箇所で静止し、逆流が生じてしまう。その後、模型の後ろ側に渦ができていたのが確認できた。これはカルマン渦と呼ばれるもので、流体が模型を通過したことで、模型の後方で流速が遅くなって形成されていると考えた。また、カルマン渦列は、物体からの剥離剪断層が主流と直角方向に振動し、その 1 周期ごとに反対符号の渦が放出されるので、物体の下流に互い違いに並んだ渦ができる。この減少は各角柱 ( $\theta=0^\circ, 45^\circ$ ) でも同じ現象が確認できる。翼型模型では、空気は物体のまわりを流れるとき、物体の摩擦などから小さな渦を生じ、流れるにしたがってその渦も大きくなり物体の表面に沿いきれず剥離してしまう状況がある。本実験では  $\theta=15^\circ$  で明らかに確認できる。角度を大きくとった  $\theta=15^\circ$  では前縁で剥離が起きていることから、圧力抵抗が増加し、揚力が減少している状態。つまり、前縁失速しているということを意味している。翼の理想の流れとしては翼の表面に均一に流れがあることだ。



## 参考文献

- [1] コロナ社・ルードウィヒ・プラントル『流れ学(下)』, (昭和 50 年)
- [2] 『カルマン渦』, <https://www.marine.osakafu-u.ac.jp/phenomenon/%e3%82%ab%e3%83%ab%e3%83%9e%e3%83%b3%e6%b8%a6/>, (2023 年 7 月 11 日)
- [3] 木村秀政『航空用語辞典』, (昭和 56 年 7 月 15 日)
- [4] コロナ社・新藤章二郎『低速風洞実験法』(1992)
- [5] 『カルマン渦って何?』, <https://energy-kanrishi.com/karman-vortex/>, (2023 年 7 月 11 日)
- [6] 『翼型の失速』, <https://pigeon-poppo.com/aifoil-stall/>, (2023 年 7 月 11 日)
- [7] 『流体の剥離による抵抗』, <http://www.hikonehg-h.shiga-ec.ed.jp/blog/wp-content/uploads/2020/08/0d1fdb2ef8ef74bc9a3458fb3b3ba554.pdf>, (2023 年 7 月 11 日)
- [8] 理工学社・生井武文, 井上雅弘『粘性流体の力学』
- [9] 朝倉書店, 流れの可視化学会『流れの可視化ハンドブック』(1986)