

物体の形状変化と抗力の相関性

河井 健吾 佐野 愛華 島 耕平 鳥井 優一 深田 明希
兵庫県立神戸高等学校 総合理学科 2年

実在する物体は運動する際に運動方向と逆向きに空気抵抗をはじめとした抗力を受け、その運動が阻害されている。今回私たちはその抗力に着目し、物体の先端部の形状の変化による抗力の数値的变化について調べ、より抗力の受けにくい形状を模索した。研究では実際に物体を水中で動かす実験を行い、そこで得られたデータから抗力を求めて考察を行った。

1. はじめに

新幹線やロケットなどをはじめとした動体は、動いている際にその向きに逆らう方向に抗力がかかり、運動が阻害されている。その力を抑えることは、機体への負担削減や速度の追求につながる重要な課題である。

抗力は物体の形状ごとに決まる抗力係数と物体の速度によって決まるが、抗力係数は計算ではなく、実験によってのみ求められる。

そこで今回の研究では、物体の先端部を変化させ、それぞれの抗力係数及び抗力を実験値から算出し、形状変化による抗力の変化をグラフ化することで、形状が抗力にどのように影響を与えているのか考察した。

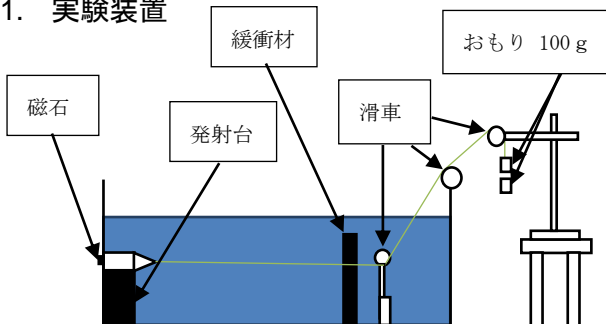
なお今回の実験は水中で行ったが、それは水が空気より粘度が高く、空気中で行うよりも流体による物体への影響が大きくなるためである。

2. 研究の目的

物体の先端に着目して形状ごとの抗力を実験により求め、物体の形状と抗力の相関性を明らかにし、抵抗の少ない形状を探る。

3. 方法

3.1. 実験装置



- 水槽…アクリル製。高さ 60cm、横 150 cm、奥行き 50 cm。
- 発射台…スポンジを使用。

- 緩衝材…飛翔体の先端が欠けることを防ぐために設置。
 - 磁石…ネオジム磁石を使用。物体を発射地点に固定するために取り付けた。
 - 滑車…3つ使用。
 - おもり…50 g のものを 2つ使用した。
- ↓実験で使用した高速度カメラ



Phantom v211

3.2. 実験方法

水槽中で、一定質量の 5 種類の物体をおもりにより水平方向に直線運動させ、その運動の様子を高速度カメラで撮影し、速度を測定、画像解析を行い抗力の値を求めるのに必要なデータを得る。

おもりは手で支え、静かに手を離すことによって物体の運動を開始させる。

この実験において、先端の角度ごとの物体の運動の様子、レイノルズ数(*1)と抗力係数(*2)の相関性、レイノルズ数と抗力の相関性を調べ、抵抗の少ない形状について考察する。

*1 レイノルズ数…流体を特徴づける無次元量。レイノルズ数 Re は(1)式によって求められる。

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

μ = 流体の粘性係数 [kg/(m·s)]

v = 代表速度 [m/s]

ρ = 流体の密度 [kg/m³]

L = 代表長さ [m] (ここでは円柱の直径)

*2 抗力係数…流体を特徴づけるレイノルズ数の関数。

・物体について

物体は以下の 5 種類を製作し、実験した。

先端*	180°	120°	90°	60°	45°

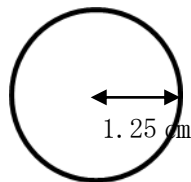
*先端…物体の横方向の投影図について、三角形の頂角を指す。

また、抗力を決める要素として物体に対し進行方向の前方から投影図を得たときの面積(前面投影面積)があるが、この実験では全て $4.90 \times 10^{-4} \text{m}^2$ である。

素材：アクリル樹脂粘土

(密度：1.26 g/cm³)

質量：35.0 g



前面投影面積

注) 物体を発射地点に固定するために、ネオジム磁石を物体の後ろに取り付けた。上の質量は磁石も含んだ質量である。

・抗力の求め方について

一般に抗力 D_o [N] は次の式によって求められる。

$$D_o = \frac{\rho v^2 A C_D}{2} \quad (2)$$

ρ = 流体の密度 [kg/m³]

v = 物体と流体の相対速度 [m/s]

A = 前面投影面積 [m²]

C_D = 抗力係数

今回の実験では、物体にかかる力は重力と浮力の影響を無視するため図 1 のように表せる。

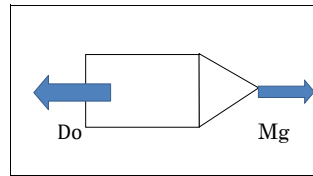


図 1

(M=おもりの質量)

物体にかかる力について運動方程式を立て、抗力係数を得る。

$$(M+m)a = Mg - D_o \quad (m = \text{飛翔体の質量})$$

$$C_D = \frac{2\{Mg - (M+m)a\}}{\rho v^2 A}$$

実験によって得た物体の速度、加速度をこの式に代入し、これを(2)式に代入して抗力の値を得る。

・画像解析について

下記のフローチャートのプログラムを C++(OpenCV) で構築し、1000 fps の動画を解析した。

画像解析の概要を図 2 に示す。

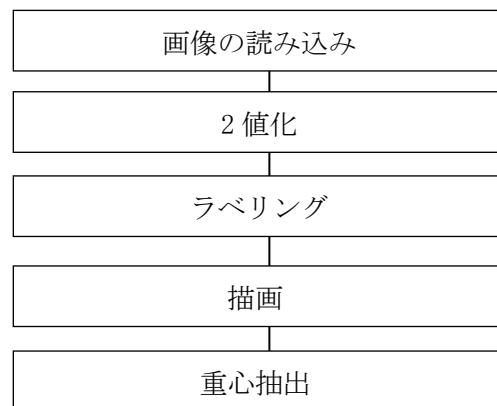


図 2

解析によって得た物体の速度、加速度などを用いて前述した通り抗力係数、抗力を求め、結果に示すグラフを得た。

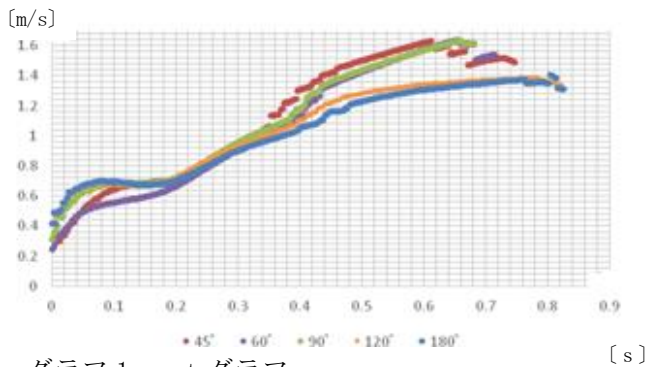
4. 実験結果

それぞれの物体の運動は表 1 のように大別できた。

45°	60°	90°	120°	180°
直進	直進	直進	蛇行	蛇行

表 1 実験時の物体の進み方

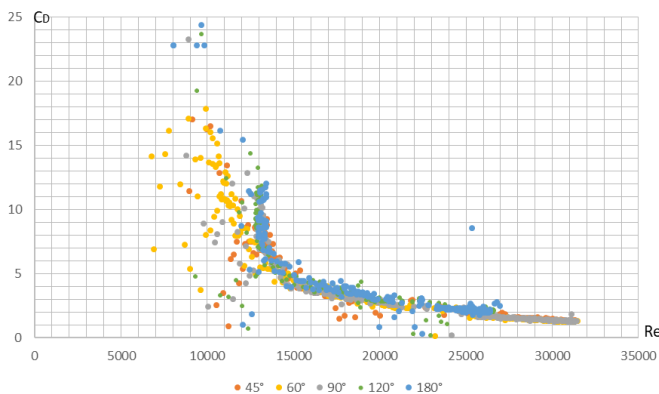
実験で得た値を次のグラフ 1 に示す。



グラフ 1 v-t グラフ

横軸：時間 [s]
縦軸：速度 [m/s]

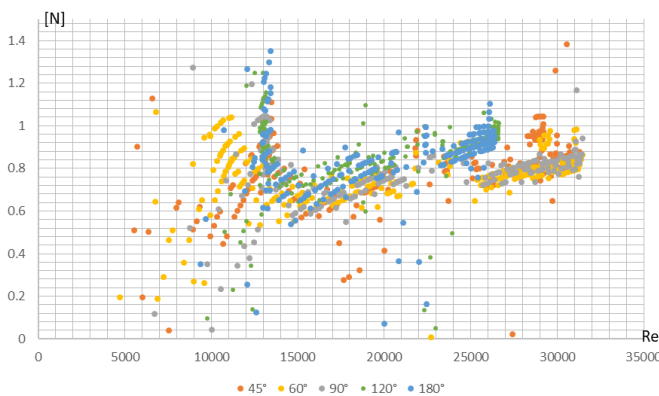
実験値から算出し、グラフ 2 を得た。



グラフ 2 抗力係数とレイノルズ数の相関性

横軸：レイノルズ数 Re
縦軸：抗力係数 C_d

グラフ 2 の抗力係数の値から算出し、グラフ 3 を得た。



グラフ 3 抗力とレイノルズ数の相関性

横軸：レイノルズ数 Re
縦軸：抗力 [N]

それぞれの角度において実験 3 回分のデータの平均値からグラフを作成した。

またグラフについて、抗力係数はレイノルズ数の関数であるため、横軸はレイノルズ数をとった。

レイノルズ数は速度に比例するため、グラフにおいて右に行くほど速度が大きいことを示す。

なお、相関から著しく離れた値は解析の際生じたノイズと考えられるので考慮しない。

5. 考察

注) 以下物体の区別を先端の角度で行う。

…先端 180° の物体 = 180°

表 1 より先端が鈍角であるほど物体の運動は安定しないと思われるが、この原因としてグラフ 2 からわかるように、先端が鋭角であるほど抗力の値の変化が小さく運動が安定し、逆に鈍角であるほど抗力の値の変化が大きく運動が安定しないと思われる。

グラフ 2 より抗力係数はレイノルズ数に対して反比例的に変化しているため、この実験のレイノルズ数の範囲においては抗力係数は速度が増加するにつれ小さくなっていくと考えられる。

グラフ 2、3 より、すべての角度で抗力係数、抗力の両方においてそれぞれの値の間に大きな差がなく、ほとんど一致していることがわかる。このことから、円錐の直線運動において先端の角度は抗力には影響を与えていないと考えられ、抵抗の少ない形状について考察することはできなかった。

また、グラフ 2、3 より 120° 、 180° は最大レイノルズ数がほかの角度に比べて小さく、速度があまり上がらなかったことがわかる。これは 120° 、 180° が蛇行したためであると思われる。

6. おわりに

今回の研究では、物体の先端の形状が抗力にほとんど影響を及ぼさないことが分かったが、物体の先端ではなく後端や側面などの条件を変えることで、形状ごとの抗力の変化がみられるかもしれない。

また先行研究より、円柱におけるレイノルズ数ごとの抗力係数の増減はレイノルズ数によって大きく異なっており、円柱に類似した形状を用いた今回の実験でも、物体の運動速度を大きく変えればレイノルズ数と抗力係数の相関性は変わり、結果も変わるとと思われる。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、施設の提供、専門的なアドバイス等、終始丁寧にご指導いただいた神戸大学海事科学研究科の宗 明良 教授、多くのアドバイスをくださった理化学研究所の前島 康光 様、本校サイエンスアドバイザーの小林 秀和 様、本校教諭

前島 歩 先生、そして研究に協力いただいたすべての方々に厚く御礼申し上げます。

[参考文献・参考URL]

1. 粘性流体力学

<http://fluid.nuae.nagoya-u/ac.jp>

2. 円柱とその他の形状

<http://skomo.o.oo7.jp>