

# 空気抵抗を受けにくい形状の追究

静岡県立清水東高等学校

3年 岩崎健太 鈴木悠斗 新村脩悟 長澤果穂 大野辰馬 西田陸人

## 1 研究の動機

空気中を物体が移動するとき空気抵抗を受けるが、鉄道などではこの空気抵抗が高速化の障壁となっている。そこで、形状が空気抵抗に与える影響を分析し、最も空気抵抗を受けにくい形状を追究したいと考えた。

## 2 研究の目的

空気抵抗は物体の形状に影響を受け、その大きさは物体の形状によって大きく異なる。形状的な要素と空気抵抗との関係性を見出し、空気抵抗を受けにくい形状を追究することを目的とする。

## 3 実験 1 風洞装置を用いた実験

### (1) 方法

まずは角度が空気抵抗に大きく影響を与えていると予想し、角度と空気抵抗の関係を調べた。縦 18cm、横 6cm、高さ 6cm の規格のもと奥行を一定にし、前方の傾斜を変化させ、後ろの部分に長方形を取り付けた。縦 50cm、横 15cm、高さ 13cm の風洞装置を作り、内部に糸を張り、ストローを物体の上面に取り付けて吊った。ドライヤーを風洞装置に固定して物体に風をあて、角度を変えたそれぞれの物体の進んだ距離を計測した。前方の角度を変えた際と同様の装置を使い、前後の向きを逆にした物体に風をあてて、角度を変えたそれぞれの物体の進んだ距離を計測した。計測は前方、後方ともに 5 回行った。

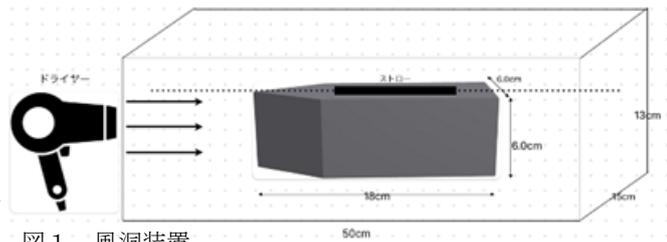


図 1 風洞装置

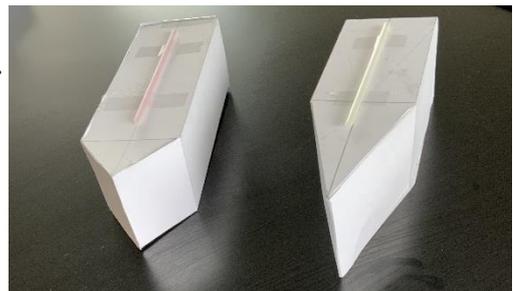


写真 1 実験 1 の物体

### (2) 結果

表 1 前方の角度を変化させた場合 (cm)

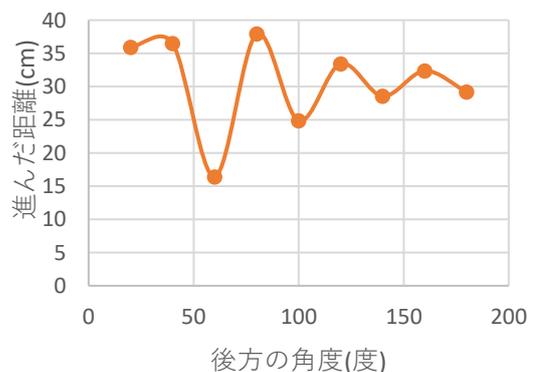
前方の角度(度)	20	40	60	80	100	120	140	160	180
進んだ距離(cm)	0.00	1.14	0.00	2.80	1.34	7.80	11.24	27.36	29.20

表 2 後方の角度を変化させた場合 (cm)

後方の角度(度)	20	40	60	80	100	120	140	160
進んだ距離(cm)	35.94	36.48	16.42	37.92	24.88	33.44	28.56	32.36



グラフ 1 前方の角度を変化させた場合



グラフ 2 後方の角度を変化させた場合

### (3) 考察

前方の角度が小さくなるほど空気抵抗が減少する傾向があることが分かったが、後方の角度については角度と空気抵抗の関係性は見出せなかった。しかし、今回の実験では物体の質量を揃えることが出来なかったため、正確な値の比較はできず、また後方の角度と空気抵抗の関係性を見出せなかったのも、このためであったと考えられた。そこで、コンピューターシミュレーションを用いて実験1と同条件下で物体の空気抵抗を直接推定、比較することにした。

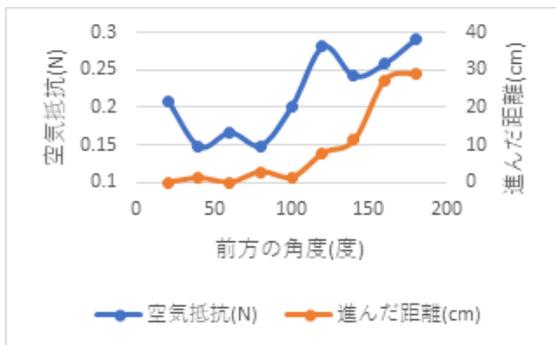
## 4 実験2 コンピューターシミュレーションを用いた実験

### (1) 方法

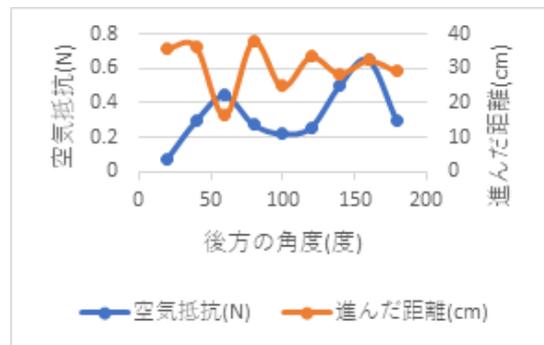
コンピュータシミュレーションソフト『フロースクエアプラス』を用いて、実験1と同条件下で物体に加わる空気抵抗を推定し、角度ごと比較した。

### (2) 結果

各角度と一定ステップあたりの空気抵抗の中央値との関係をグラフに示した。ここでは実験1の結果を示すものも合わせて表示した。グラフ3が前方の角度を変化させた場合、グラフ4が後方の角度を変化させた場合である。青色の線が空気抵抗、橙色の線が進んだ距離である。



グラフ3 前方の角度を変化させた場合



グラフ4 後方の角度を変化させた場合

### (3) 考察

シミュレーションにより前方の角度が小さくなるほど空気抵抗が小さくなる傾向があることが分かった。しかし、傾斜部と直方体が物体を占める割合が角度ごとに異なること等により角度のみを抽出できたとは言い難いと考えた。後方の角度を変化させた場合は、シミュレーションの結果より角度が小さくなるほど空気抵抗が小さくなる蓋然的な傾向があると分かった。ただし、シミュレーションの値にはかなりばらつきがあり、これは今回のような小規模の実験では後方の形状が空気抵抗に及ぼす影響は小さく、それを実験あるいはシミュレーションの誤差が上回ってしまったことが原因だと予想した。なお、前方の角度が小さくなるほど空気抵抗が減少するのは前方の尖りにより、圧力が分散し圧力抵抗が小さくなった為だと考え、後方の角度が小さくなるほど空気抵抗が減少するのは空気がより物体に沿って流れるようになり、境界層剥離が起りにくくなる為だと考えた。

以上を踏まえると今回の実験からは角度の変化と空気抵抗の関係のおおまかな傾向は得られたが、シミュレーションにまでも誤差が伴うため、一概に正確な比較を行うことは難しいことが分かり、また、角度のみを抽出して空気抵抗との関係を考察することまでには至らなかった。そこで、まずは質量の影響を排除して空気抵抗のみを比較することができる実験方法を構築することにした。この時、後方の形状が空気抵抗に与える影響は小さいという予想を踏まえて前方にのみ焦点を当てて角度と空気抵抗の関係を評価し直すことを考えた。

## 5 実験3 質量の影響を排除した空気抵抗の評価法の確立

### (1) それぞれの物体の質量の変化を考慮せずに空気抵抗を評価する方法を考えた。

空気抵抗力は $F = kv^t$  ( $F$ は空気抵抗力、 $v$ は流速、 $t$ は1または2、 $k$ は定数)と表される

ことが知られおり、レイノルズ数( $Re = \frac{vL}{\nu}$ で表される無次元量で、 $v$ は物体の流れに対する相対的な速度、 $L$ は特性長さ、 $\nu$ は動粘性係数を表す)が小さいときは層流状態となり  $t=1$ 、大きいときは乱流状態となり  $t=2$ となる。

風洞装置中で風は流入口から離れるにつれて減衰し、これに伴って空気抵抗も減少する。物体が静止するときこの最終的な空気抵抗とストローと糸間での最大静止摩擦力 $\mu mg$  ( $m$ は質量、 $g$ は重力加速度、 $\mu$ は静止摩擦係数)が釣り合う。よって $kv^t = \mu mg$ が成り立ち $\frac{k}{\mu g} = \frac{m}{v^t}$ と変形できる。ここでストローの長さを揃えたため、静止摩擦係数 $\mu$ と重力加速度 $g$ は一定であり、 $m, v$ に各値を代入することで空気抵抗係数 $k$ の値を比較することができる。ただし、ここでは $t$ の値がまだ定まっていないため次の実験で $t$ の値を定めた。

(2)  $t$ の値を決定する実験

ア 方法

縦横 6cm、高さ 18cm の直方体で質量のみが異なる物体を 2 つ用意した。これらに実験 1 同様進んだ距離を計測し、2 つの物体は形状が同じで  $k$  の値も等しいため、 $\frac{m}{v^t}$  に  $m, v$  の値を代入し、 $t$  が 1 と 2 のどちらのとき  $\frac{k}{\mu g}$  の値が一致するかを調べた。

イ 結果

表 3  $t$  の値と  $\frac{k}{\mu g}$  の値との関係

	質量 (kg)	風速 (m/s)	$t = 1$ での $k / \mu g$	$t = 2$ での $k / \mu g$
物体 1	$1.067 \times 10^{-3}$	3.664	$2.912 \times 10^{-3}$	$0.7948 \times 10^{-3}$
物体 2	$2.045 \times 10^{-3}$	5.034	$4.065 \times 10^{-3}$	$0.8081 \times 10^{-3}$

※流速は 5 回実験して得られた物体の止まった位置の平均値での風速を示した。

$t = 2$  のとき 2 つの物体の  $\frac{k}{\mu g}$  の値がおおよそ一致した。よって  $\frac{k}{\mu g} = \frac{m}{v^2}$  を用いて空気抵抗を比較できると分かった。

6 実験 4 角度のみの影響を抽出した実験

(1)  $\frac{k}{\mu g} = \frac{m}{v^2}$  を用いた実験 1 の結果の検証

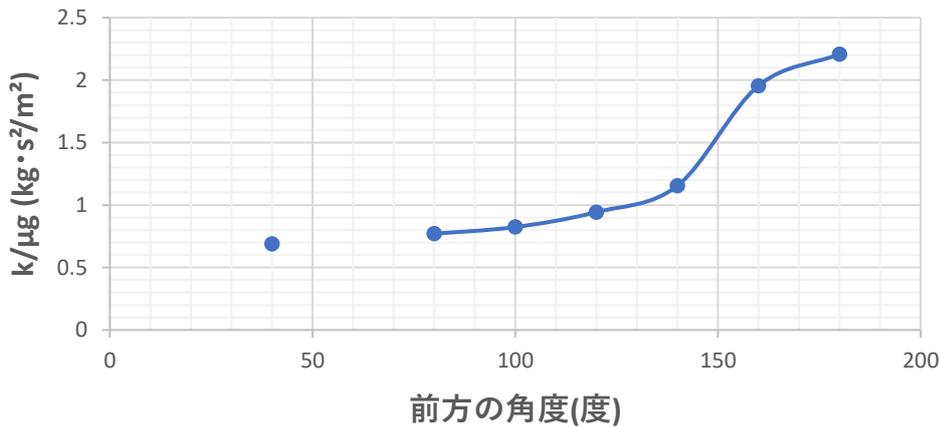
ア 方法

始めに、実験 3 で考えた  $\frac{k}{\mu g} = \frac{m}{v^2}$  を用いて物体ごとの質量の影響を排除して実験 1 の結果を比較した。

イ 結果

表 4 前方の角度と  $\frac{k}{\mu g}$  の値

角度(度)	40	80	100	120	140	160	180
$\frac{k}{\mu g} (\times 10^{-4})$	2.483	2.766	2.966	3.397	4.157	7.040	7.948



グラフ5 前方の角度と  $\frac{k}{\mu g}$  の値との関係

$\frac{k}{\mu g} = \frac{m}{v^2}$  を用いて空気抵抗の影響を排除した場合の実験1の結果を上に表示した。これより前方の角度が小さくなるほど、空気抵抗が減少することが分かった。ただし、実験1の方法では角度のみの影響を抽出することは出来ていなかったため、次の実験で角度のみの抽出を試みた。

(2) 傾斜部を取り出し、奥行きを一定にした実験

ア 方法

実験1の方法では物体を占める傾斜部や直方体の割合や、傾斜部の奥行きが異なってしまった。そのため、傾斜部のみを取り出し、三角形の奥行きを3cmで一定にした。ただしこの時角度ごとに物体の前方投影面積が異なってしまう。ここで前方投影面積のみを変化させた物体を用いて

$\frac{k}{\mu g}$  の値を調べた結果、その値は前方投影面積に比例した。よって、 $\frac{k}{\mu g}$  を物体の前方投影面積で

割った数値  $\frac{k}{\mu g S}$  を用いることで断面積の違いによる影響を排除して空気抵抗を比較することが出来ると考えた。

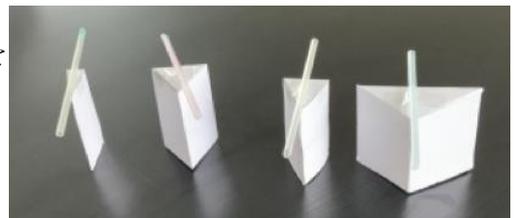
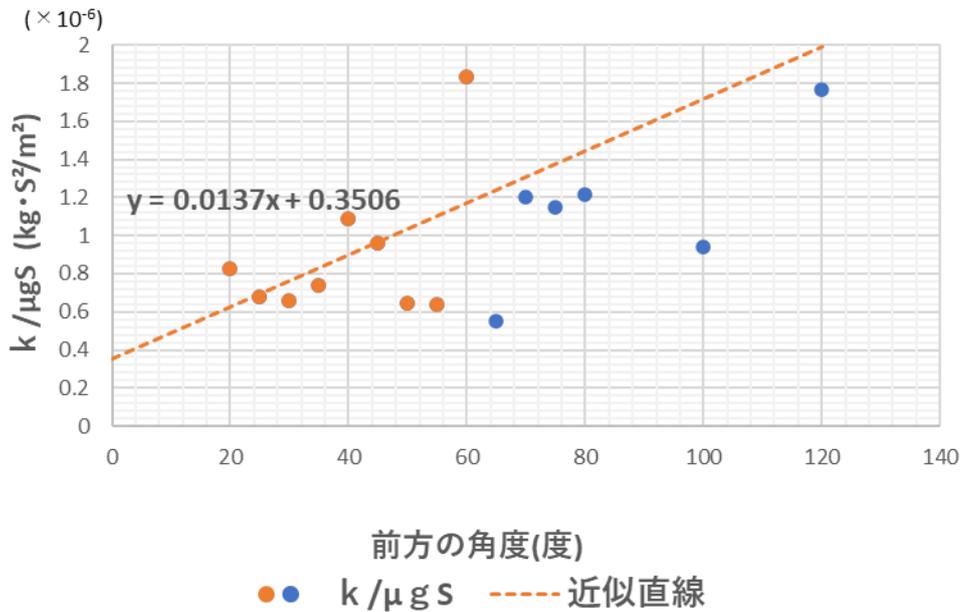


写真2 実験3の物体

イ 結果

表5 前方の角度と  $\frac{k}{\mu g S}$  との関係

角度(度)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
風速(m/s)	4.50	4.69	5.58	3.76	4.54	3.21	3.73	5.00	4.82
質量(g)	1.177	1.249	2.024	1.427	3.092	1.534	1.586	3.026	9.278
断面積(cm <sup>2</sup> )	7.015	8.400	9.821	13.640	13.754	15.494	17.640	18.910	21.780
$\frac{k}{\mu g S} (\times 10^{-5})$	0.829	0.676	0.662	0.740	1.091	0.961	0.646	0.640	1.833
角度(度)	65	70	75	80	100	120			
風速(m/s)	5.48	4.45	4.75	4.52	4.42	4.98			
質量(g)	3.797	6.446	7.276	7.597	7.917	27.816			
断面積(cm <sup>2</sup> )	23.068	27	28.08	30.5	43.2	63.4			
$\frac{k}{\mu g S} (\times 10^{-5})$	0.548	1.206	1.148	1.219	0.938	1.769			



グラフ6 角度と $\frac{k}{\mu g S}$ との関係と 60 度以下の $\frac{k}{\mu g S}$ の近似式

#### ウ 考察

グラフ6より値の上下はあるものの60°付近へ向けて値は増加した。しかし60°付近では断面積と風の流入口の面積が等しくなるため、これを超えると断面積全体に一樣な風が当たらなくなり、 $\frac{k}{\mu g S}$ を断面積 $S$ で割った時に、余剰に割ってしまうことが考えられた。よって60°付近以上の値は不適として考えた。60°以下で比較した場合、近似直線の傾きは0.0137となり正であるため、角度が小さくなるほど空気抵抗は減少する。したがって、角度の変化に伴う断面積と奥行きの変化を除くと角度の減少に伴って空気抵抗は減少する、すなわち、空気抵抗は、前方の角度が小さくなるほど一次関数的関係に減少することが実験から明らかになった。ただし、角度の変化には傾斜の傾きと流路の変化という2つの要素が伴い、それらの差異を排除することはできていないと考えられるため、単純な比較は出来ないが、大まかに見て角度という要素を抽出できたと考えた。基準の取り方を工夫するなどしながらこの要素についてさらに分析し、今後は他の要素についても考察していきたいと考えている。

#### 7 今後の展望

今回は $\frac{k}{\mu g S}$ という指標を用いることで、質量や前方投影面積の差異による影響を排除して角度と空気抵抗の関係性を評価することができた。しかし、今回検討した要素はいくつかの要素が関わり合いながら含まれていると考えられ、完全な抽出は難しかった。さらに分析し、また、他の要素についても考察していきたい。そして、今回は空気抵抗を受けにくい形状を考え出し、提示することまでには至らなかったため、要素の分析を踏まえて空気抵抗を受けにくい形状を検討したい。その際、直線的なものから曲線を含んだものにまでゆくゆくは形状を発展させたい。

## 8 参考文献

- 「鳩ぽっぽ 初心者のための航空力学講座」<https://pigeon-poppo.com/>  
「空気抵抗を低減する形状の追究」静岡県立清水東高等学校理数科課題研究  
「Flow Square Plus」  
「宇宙に入ったカマキリ」<https://takun-physics.net/page-1561/>  
「鉄道車両の空気抵抗低減量の評価方法」井門敦志  
「CYBERNET」<https://www.cybernet.co.jp/ansys/download/mn/201802/mcmnp201803-0213.html>