

空気抵抗を軽減する形状の追究

静岡県立清水東高等学校
理数科 3 年 山本ひより 他 5 名

1 動機

ミサイルをはじめ、ロケットや 500 系新幹線、弾丸などの先頭形状は尖っている。これは、空気抵抗の軽減に役立っていることが知られている。特に近年、より高速で快適な車両の開発が求められる中で、空気抵抗の存在は無視できなくなっている。そこで、形状が空気抵抗に与える影響とは一体どのようなものなのか、興味を持ち、実験を行った。研究の目的は空気抵抗に影響を与える要因を調べ、どのような形状が空気抵抗を軽減するのかを明らかにすることである。

2 研究内容

実験を行うにあたり、以下の 2 つの仮説を立てた。

I 投影面積が小さいほど空気抵抗が軽減される。

II 先頭が尖っているほど空気抵抗が軽減される。

これらの仮説を実証するために以下のような実験を行った。

(1) 実験 1

紙粘土で雫型、ドーナツ型、円盤、球、正三角錐、立方体、直円柱、直円錐の模型を製作し、床から 3 m90 cm の高さから落下させた。模型の質量は 10 g で統一し、形状のみを変えた。落下を開始してから接地するまでにかかる時間を 60fps で動画を撮影し、コマ数をもとに落下時間を割り出した。結果を図 1 に示す。

図 1 より、円盤の落下時間が他の形状に比べ約 0.1 秒長いことが分かる。その他には大きな差は見られなかった。

次に形状による落下時間の差をより明確にするために、扇風機を落下位置の真下に置き、下から上方向に風を発生させた。同様に 60fps で動画を撮影し、コマ数をもとに落下時間を割り出した。このときの落下時間は、落下を開始してから床から 50 cm の位置を通過するまでの時間とした。結果を図 2 に示す。

円盤の落下時間が他と比べて約 0.2 秒長い。その他の模型には目立った差はみられなかった。

＜実験 1 の考察＞

円盤がより大きな空気抵抗を受けていることから、風を受ける面積が大きいほど空気抵抗が大きくなると思われる。しかし、落下中に物体の正面に均一に風が当たらなかったため、実験の精度が上がらなかったと考えられる。

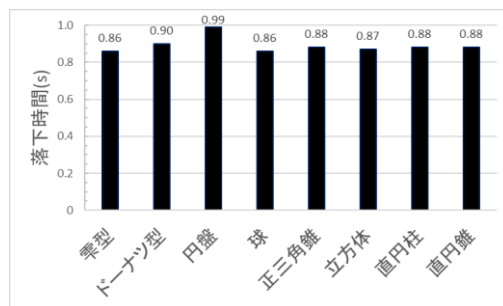


図 1 落下時間 扇風機なし

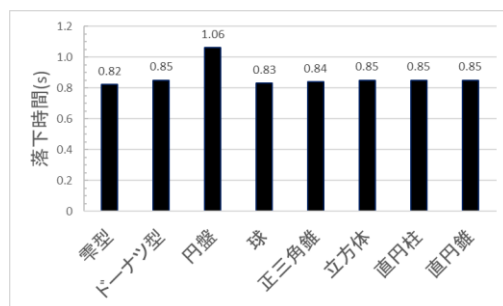


図 2 落下時間 扇風機あり

(2) 実験 2

実験 1 では、円盤しか大きな違いが得られなかった。そのため、実験方法を変更し、風洞を用い空気の流れを一定にした。また、密度が小さい発泡スチロールを用いて模型を製作した。扇風機の渦を巻く風を一定方向に整流するために、図 4 のようなハニカム構造の整流器を自作した。先行研究より正六角形のハニカム構造が最も整流作用が高いことが分かっているため、採用した。整流器は、トイレットペーパーを正六角形に折り両面テープを用いて隙間なく接着して自作した。台車は力学台車、扇風機はトヨトミの FS-F40J（強風）を使用した。模型は発泡スチロールの塊から、発泡スチロールカッターと鋸を用いて切り出すことで製作した。

図 3 は実験装置の模式図である。模型を台車から伸ばした棒の上に設置する。台車の前後には糸を取り付け、片方のおもりが床に置いたはかりに接地するように、両方の先端におもりをつける。扇風機の風を横から風洞内に送り込み、整流器を通し模型に当てる。模型に連動して台車、おもりも風からの力を受けるため、それによって変化するのはかりの示す値を計測する。

結果、台車が動かず値を計測できなかった。

<実験 2 の考察>

模型が受ける空気抵抗に比べて台車の車輪と床との摩擦が大きかったため、測定できなかったと考えられる。

(3) 実験 3

実験 2 より、図 5 のように床との摩擦をなくすため風洞を縦にし、風を下から模型にあてて測定した。無風状態の時と空気抵抗を受けた時ののはかりの示す値を比較し、差分を空気抵抗として求めた。風洞は段ボールで製作し、中の様子が見られるようにアクリル板の窓を付けた。扇風機から 80 cm の高さに模型の先端を合わせ、吊るした。計測はそれぞれ 5 回ずつ行い平均を求めた。ここで、空気抵抗 $D[N]$ は $D = C_d(\rho V^2/2)S \cdots$ (式 1) (C_d は抗力係数、 $\rho [kg/m^3]$ は空気密度、 $V[m/s]$ は風速、 $S[m^2]$ は前面投影面積) で求められることが知られている。なお、 C_d 値は物体の形に依存し、実験からしか求めることができない。また、空気抵抗には大きく分けて圧力抵抗と摩擦抵抗の 2 種類があることが分かっている。圧力抵抗は、先頭と後尾の圧力差によって生じる抵抗であり、摩擦抵抗は、物体の表面に生じる抵抗である。

実験 3 では、図 7 のように模型を 3 分割し、風の当たるほうから、先頭形状、胴体、後尾形状と呼ぶこととする。

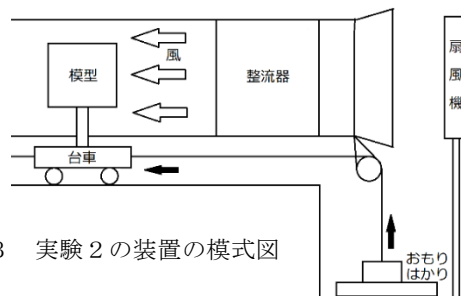


図 3 実験 2 の装置の模式図

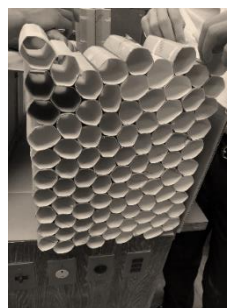


図 4 ハニカム構造の整流器

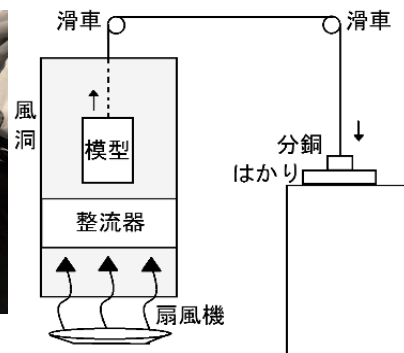


図 5 実験 3 の装置の模式図



図 6 実験 3 の装置

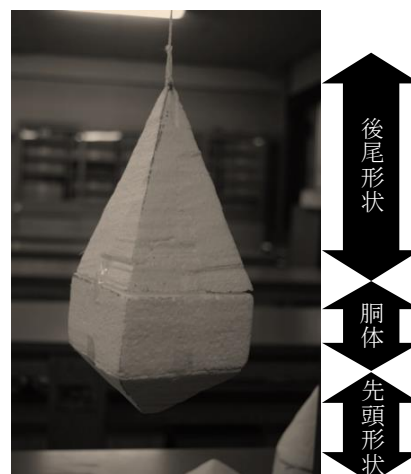


図 7 模型

ア 実験 3-1

立方体の模型の上部におもりを貼り付け、模型の重さのみを変化させ、空気抵抗への影響を計測した。おもりは1つ10 gのワッシャーを用いた。おもりは模型に対して十分に薄いため、Cd 値には影響がないと考えた。結果を図8に示す。重さに関わらず空気抵抗は一定の値を取った。よって、重さの違いは空気抵抗に影響を及ぼさないことがわかった。

これより、以降の実験は重さの違いは無視できるものとして行う。

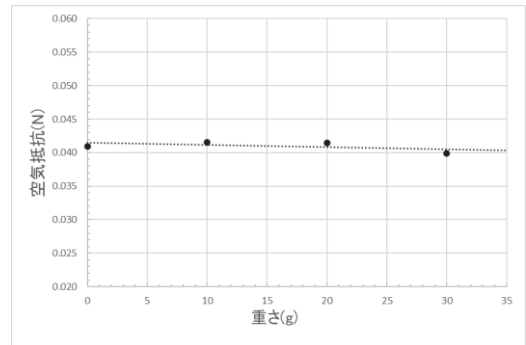


図8 重さと空気抵抗

イ 実験 3-2

立方体を用いて前面投影面積が空気抵抗に及ぼす影響を計測した。Cd 値を変えずに実験を行うために、相似の立体を用い、前面投影面積についての対照実験を行った。立方体の底面積を 25 cm^2 から 25 cm^2 刻みで 225 cm^2 まで大きくした。結果を図9に示す。前面投影面積に比例して空気抵抗は大きくなった。

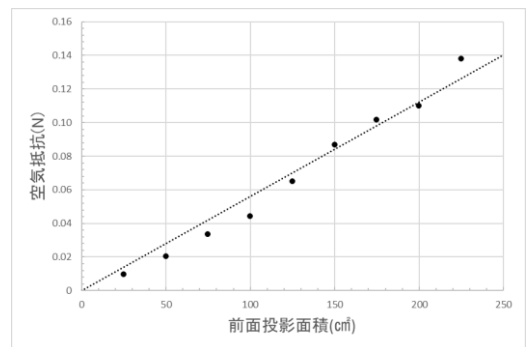


図9 投影面積と空気抵抗

ウ 実験 3-3

先頭形状のみを変化させ、空気抵抗への影響を計測した。正四角錐、直円錐ともに投影面積を 100 cm^2 に固定し、高さ5 cm、10 cm、15 cmの模型を用いて実験した。結果を図10に示す。角がなく、より尖っている方が空気抵抗は小さくなった。

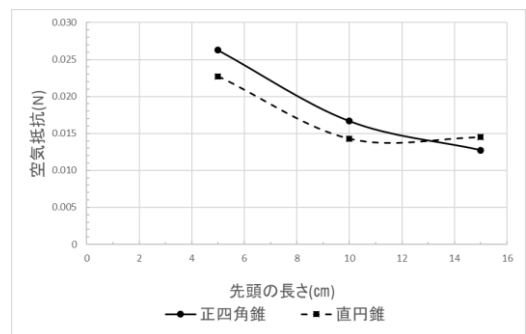


図10 先頭形状と空気抵抗

エ 実験 3-4

先頭形状と胴体の長さを変化させ、その関係を計測した。投影面積を 100 cm^2 に固定し、5 cm、10 cm、15 cmの錐の後ろに、正四角錐には直方体、直円錐には直円柱を付けた。直方体と直円柱はそれぞれ5 cm刻みで高さを変えて実験を行った。結果を図11-(A)、(B)に示す。胴体の長さと空気抵抗は単純な比例関係ではなく、ある長さまでは空気抵抗を軽減する効果があったが、その長さを超えると空気抵抗は緩やかに増加傾向にあった。先頭形状の長さにかかわらず、空気抵抗が最も小さくなる胴体の長さはほぼ一致した。なお、正四角錐に比べ直円錐の方が、空気抵抗が最も小さくなる長さは5 cmほど長くなった。

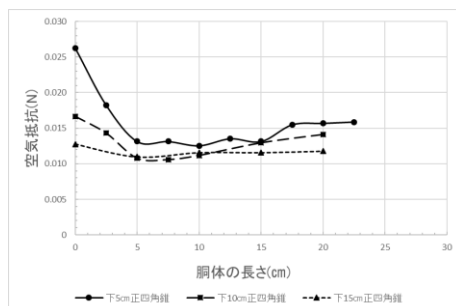


図11-(A) 直方体の長さと空気抵抗

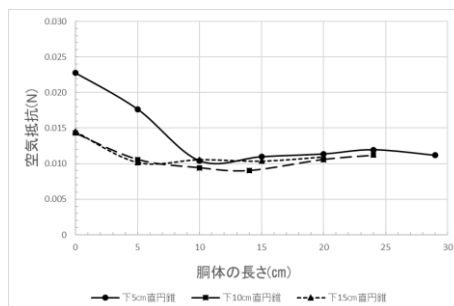


図11-(B) 直円柱の長さと空気抵抗

オ 実験 3－5

先頭形状に加え、後尾形状の違いが空気抵抗に及ぼす影響を計測した。投影面積を 100 cm²に固定し、実験 3－4 で空気抵抗が小さかった形状（高さ 5 cm の正四角錐、その後ろに高さ 5 cm の直方体を付けた模型）に絞り、その最後尾に正四角錐を取り付け、錐の長さを変化させて実験を行った。結果を図 12 に示す。後尾形状の長さを長くするほど空気抵抗が小さくなった。

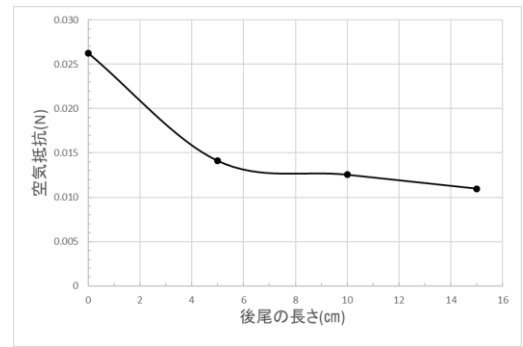


図 12 後尾形状と空気抵抗

カ 実験 3－6

スズランテープを細く割いて整流器の端に貼り付け、模型の周りの空気の流れを可視化した。結果を図 13 に示す。錐のついていない模型では表面にテープが沿っていたが、錐のついていない模型では内側に巻き込むようにテープが激しく動いた。2 つを比較し、先頭形状が錐になっているほうが、空気の流れの変化の度合いが緩やかになっている。また、後尾形状は錐のついていない模型では空気の渦が発生し、空気の流れが乱れているが、錐のついていない模型では空気の渦が見られない。

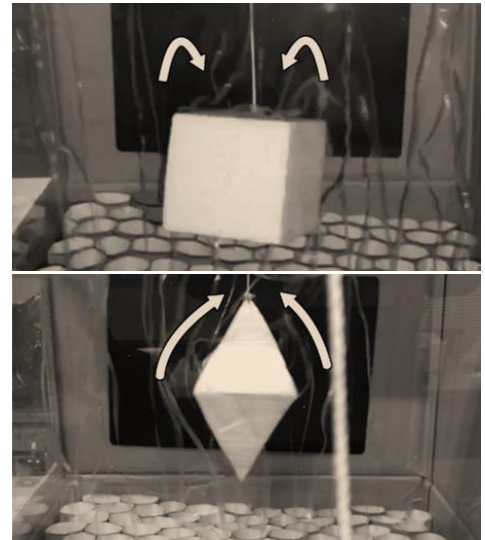


図 13 実験 3－6 の様子

<実験 3 の考察>

実験 3－1 より、空気抵抗は物体の重さによらないことが確かめられた。また、実験 3－2 より空気抵抗の大きさと前面投影面積との比例関係がわかり、この実験において空気密度と風速、Cd 値は一定なので、式 1 と一致する。よって、仮説Ⅰは実証された。実験 3－3 より、先頭形状や後尾形状はより尖っている方が空気抵抗を軽減することが分かった。先頭形状や後尾形状は長さを基準に変化させたため、長くなるにつれて尖り具合の変化量は小さくなってしまったと思われる。しかし図 14、15 のように頂角の大きさを基準に考察し直してみても傾向は同じであった。よって、仮説Ⅱは実証された。さらに、先頭形状及び後尾形状が長くなるほど空気抵抗の変化が小さくなっていることから、長さが空気抵抗に及ぼす影響には限りがあると考えられる。つまり、長くするほど空気抵抗が小さくなるが、物体の表面積が増えることにより物体表面の摩擦が増加してしまうため、長くしていくにつれて空気抵抗の減少割合が小さくなっていると考えられる。実験 3－6 より、後尾形状が錐の模型では表面に沿って空気が流れていたが、錐のついていない模型では後方で空気の渦、つまり乱流が発生していたと考えられる。実験 3－5 において錐のついていない模型は錐のついていない模型よりも空気抵抗が大きかったことから、この乱流が空気抵抗を大きくする原因の一つであると思われる。そこで、胴体の長さを伸ばすと、空気の流れの変化が緩やかになり空気抵抗が抑えられる。しかし、胴体の長さを伸ばすと側面積が増えてしまい、物体表面の摩擦が増加する。なお、物体後方の渦は伸ばし続けても変化しないため、最初の空気抵抗の減少が途中で止まったと考えられる。これより、図 11－(A)、(B) のように最小値が表れると考えられる。図 16 のように Flowsquare を用いて解析してみると、先頭を尖らせることで圧力の偏りが軽減されるため、圧力抵抗が小さくなるといえる。断面が急激に変化する部分では乱流も確認でき、模型の表面から空気が剥離していることで抵抗が生じていると考えられる。

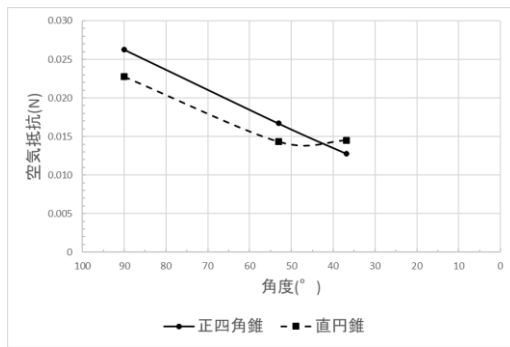


図 14 先端形状と空気抵抗

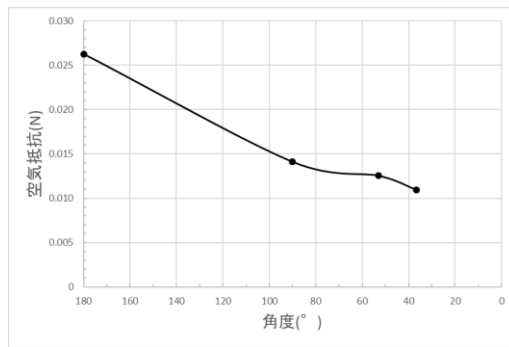


図 15 後尾形状と空気抵抗

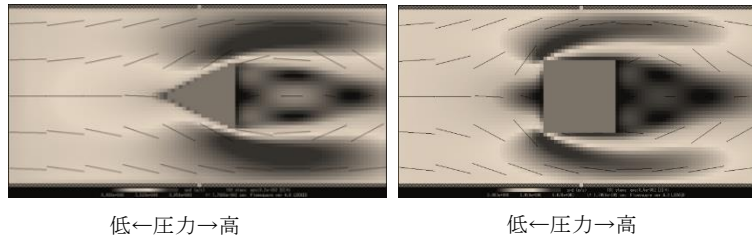


図 16 圧力図

3 結論・課題

物体の先端形状と後尾形状が滑らかに尖っていて、物体に角がないほど空気抵抗は小さくなるとわかった。実験 3－6 では大まかな空気の流れを確認できたが、詳細な可視化はできなかったため、実際の空気の流れを細部まで可視化する方法を確立したい。模型の表面の材質の違いが及ぼす影響も今後調べていきたい。また、文献より大きな変化はないとされていたため今回は考慮しなかったが、式 1 から空気抵抗には空気密度も影響していることもわかったので調べる方法を検討したい。そして、今回一定にして計測を行った風速が及ぼす影響も調べたい。さらに、発泡スチロールは加工が難しかったので、より扱いやすい材料を用いた模型の製作にも取り組んでいきたい。縮流胴を取り付けるなどして風洞を改良し、より斑のない様な風を発生させることで実験の精度も高めていきたい。また、具体的な Cd 値も割り出していきたい。今後、球をはじめとしたその他の形状でも同様に実験を行い、さらなる空気抵抗を軽減する形状の追究をしていきたい。

4 参考文献

- 「円錐形状尖頭物体の頂角と空気抵抗の相関に関する研究」大石涼太、桜木俊一
- 「円柱とその他形状の抗力係数」 skomo.o.oo7.jp/f28/hp28_63.htm
- 「流体解析シミュレータの覚書」 http://www.suke-blog.com/flowsquare_tips/
- 「自作風洞実験器を用いた空気の流れの可視化～紙飛行機の形状と空気の流れ～」
[seika.ssh.kobe-hs.org/media/commom/KadaiKenkyuu/buturi/2013/2013 風洞-論文.pdf](http://seika.ssh.kobe-hs.org/media/commom/KadaiKenkyuu/buturi/2013/2013風洞論文.pdf)
- 「統合 2 次元流体シミュレーションフリーソフトウェア Flowsquare」 <http://flowsquare.com>

5 謝辞

本研究を行うにあたり私たち課題研究班の担当、森下健治先生には研究の進め方や研究方法についての有益な助言を賜りましたことを、この場を借りて厚く御礼を申し上げます。