

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 ～

藤本 正直 檜崎 桃子 藤田 一貴
兵庫県立神戸高等学校 総合理学科2年

私たちは、走っているときに受ける風や蛇口から流れ出る水など様々な流体の「流れ」を感じ、目にしている。しかし、空気の流れの様子を目で見ることは困難である。そこで私たちは、風洞実験器を自作し、それを用いて空気の流れを可視化することにした。さらに今回は10種類の紙飛行機を製作し、そのまわりの空気の変化と飛び方の関係についても調べた。

1. はじめに

1.1. 概要

自動車企業において、新車の開発や競技用車両の研究及び改良において欠かせないことのひとつに「空気の流れ」がある。空気抵抗を減らすことに加え、目的に応じて空気を利用して速く走るための研究が世界各地で行われている。その研究に欠かせないもののひとつに「空気の流れの可視化」がある。しかし、その可視化方法に必要な風洞実験器を高精度で製作するのは、企業や大学及び研究機関レベルでないと困難である。そこで、高校生レベルでできるだけ高精度な風洞実験器を製作することにした。高校生レベルで高精度な風洞実験器を自作することができれば、身近な物体のまわりの空気の流れをより手軽に観察することができる。今回は誰もが一度は遊んだことがあるであろう「紙飛行機」を題材とした。

1.2. 風洞とは

風洞とは人工的に空気の流れを発生させるトンネル型の実験器である。実験器内に物体を入れることで物体が受ける風の流れや乱れを再現することができる。

2. 研究目的

2.1. 研究目的

本研究の目的は大きく分けて二つある。一つ目は、高精度な風洞実験器を自作し各部の仕組みを理解するとともに完成した風洞を用いて、空気の流れが最も見えやすい可視化方法を検討することである。二つ目は、紙飛行機のまわりの空気の流れを可視化し、紙飛行機の形状の違いによる空気の流れの変化を観察し、飛行特性との関係を調べることである。

2.2. 風洞実験器の必要性

空気力学が応用されている代表例として航空機や競技用車両の開発などが挙げられる。また近年の市販

車も燃費の向上を狙って空力を強く意識したデザインになっている。それぞれ空気の力を利用して飛ぶ、空気の渦の抵抗を利用して速く走るなど様々な目的がある。その他にスポーツ用品の製品開発や傘の耐風試験などの身近なものもある。その際、空気の流れをコンピューターシミュレーションにより可視化している。だが同時により細かな状況を再現するために風洞実験も必要不可欠になっている。

3. 風洞実験器の製作

3.1. 風洞の仕組み

空気の流れを作る方法には2種類ある。ひとつは実験器に空気を吹き込む「吹き込み型」で、もうひとつは実験器の中の空気を吸い出す「吸い出し型」である。風洞実験器を製作している高校は他にもあるが、そのほとんどが「吹き込み型」を採用していた。しかし、気密さえ確保すればより高精度な観測ができ送風機を小型化できるというメリットがあるので、私たちは「吸い出し型」を採用した。図1は私たちの製作した風洞の仕組みを示したものである。送風機で図1の矢印の向きに空気を吸い込み、風洞内に流れを発生させる。そのままではまっすぐな流れ(整流)とならず正確に調べることができない。そのため、整流器(ハニカムと縮流胴)と正方形の整流器を設置することで整流を作る。図2は私たちが製作した風洞実験器のおおまかな設計図で、写真1はその実物写真である。

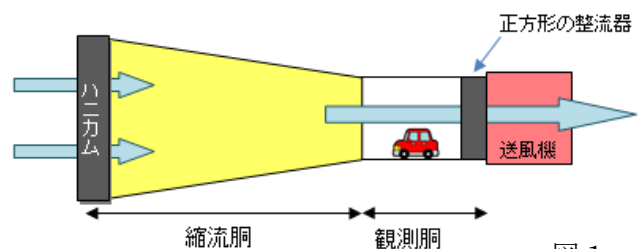


図 1

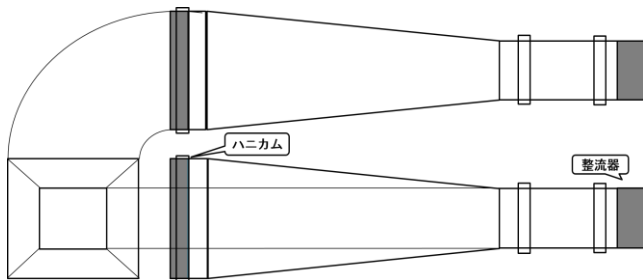


図 2



写真 1

3.2. ハニカムについて

ハニカムとは「蜂の巣」という意味で、六角形を隙間なく並べた構造のことである。私たちの製作した風洞には整流器の一部としてこのハニカムを使用した。隙間なく並べることのできる正多角形としては正三角形、正方形、正六角形の 3 種類があるが、できるだけ円形に近い正多角形を隙間なく並べることによって効率の良い整流をすることができる。

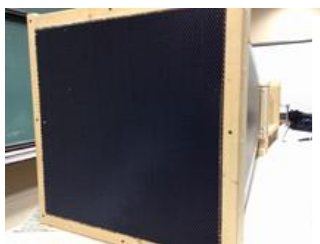


写真 2

※使用したハニカム
新日本フェザーコア株式会社 AF-46(6.3mm)
600×600×50mm

3.3. 正方形の整流器について

風洞実験器には整流器に加え送風機と観測胴の間に正方形の整流器が設けられる。これは送風機のプロペラによる不均一な空気の流れを一時的にせき止め、その分布をできるだけ均一にする効果がある。今回はアクリル板を組み合わせて自分たちで製作した。

3.4. 縮流胴の形状について

縮流胴があることにより、ハニカムの正六角形構造の端部にできる隙間で生じる気流の乱れを小さくすることができる。また、多くの風洞は縮流胴が曲線になっているが、それらは省スペースで小さな風洞を作るための技術であり縮流前断面の一辺の 2 倍の距離をとれば直線でも問題はないため、今回私たちが製作した縮流胴は直線型にした。

3.5. 風洞実験器の整流効果の確認

整流できているかどうかは次の二つの条件から調べることができる。

①風速分布の均一性

②風速の時間変化の小ささ

今回は①の風速分布の均一性を調べることで整流効果を確認した。方法は、風洞実験器の観測胴の断面を 5cm 四方に分け、それぞれの区画の風速を測定することで均一性を確認する。風速は観測胴の上面にわずかな隙間を作り、そこに棒に取り付けた風速計を挿入して測定した。整流器ありの場合となしの場合の風速分布を比較することで整流効果を比較したところ、図 3 に示すような明らかな差が見られ、整流されていることが確認された。整流器ありの場合に上下で若干の風速の差が見られるが、これは前記した風速を測定する際にできた隙間により流れが乱れたためだと考えられる。

整流器なしの場合の風速分布

m/s	1	2	3	4	5	6
A	8.1	9.8	10.8	10.6	8.9	6.7
B	11.0	11.8	12.6	13.0	12.4	10.5
C	11.6	12.5	13.0	13.1	13.0	12.6
D	12.6	13.1	13.2	13.4	13.3	12.9
E	11.4	13.3	13.3	13.3	12.1	12.1
F	9.2	12.9	13.6	13.1	12.6	8.4

整流器ありの場合の風速分布

(m/s)	1	2	3	4	5	6
A	10.7	10.8	10.4	10.4	10.7	10.9
B	11.4	11.1	11.1	11.2	11.2	11.1
C	11.7	11.5	11.3	11.3	11.3	11.1
D	11.2	11.6	11.4	11.5	11.6	11.5
E	11.7	12.1	11.9	12.0	12.2	12.1
F	12.4	12.9	12.6	12.8	12.9	12.8

図 3

4. 風洞実験器の精度と可視化方法の考察

4.1. 整流前と後の空気の流れ



整流前



整流後

写真 3

写真3を見ても分かるが整流前（整流器未装着）では気流が安定しない。それに対して整流後（整流器装着）はほとんど気流の乱れがない。風速分布のデータと合わせると整流器の重要性が分かるだろう。

4.2. 可視化方法の検討

可視化方法において、今回は「人間の目で観察しやすいこと」と「鮮明な撮影ができること」に重点を置いて検討した。可視化には線香の煙、湯気、スモークマシンの3種類を用いた。以下にそれぞれの特徴を挙げる。

① 線香の煙

灰が落ちて観測胴に流入してしまう。発生させることのできる煙の量が少ない。線香の火が消えてしまう。

② 湯気（電気ケトルで水を沸騰させる。）

連続して発生させ続けることが困難である。線香の煙に比べると観察しやすいが、薄さが感じられる。水滴が観測胴や送風機に付着してしまう。発生場所の調整が困難。

③ スモークマシン

湯気よりもさらに鮮明になった。連続して煙を出し続けることができる。湯気と同様に水滴が観測胴や送風機に付着してしまう。

以上より、スモークマシンによる可視化が最適であると判断し採用した。しかし、発生場所の調整が可能になれば湯気でも十分に観測可能であることがわかった。写真4はそれぞれの煙の様子を撮影したものである。



線香の煙

湯気

スモークマシン

写真4

また、より分かりやすく可視化するために細く煙を出す必要があった。そこでスモークマシンの煙排出口にガラス管とゴム管を取り付け、ガラス管を観測胴の上面に開けた穴から差し込み、観測胴内に細い煙の流れを作った。また観測、撮影しやすくするために観測胴の上面と側面を透明なアクリル板で製作し、背景となる面には黒色のボードを設置し、部屋を暗

くして間接照明を当てた。

煙による可視化のほかに、短冊状の紙などを物体に貼り流れの乱れを見るタフト法や、レーザーの光で可視化する方法もある。

5. 紙飛行機の形状と空気の流れ、飛行特性の変化

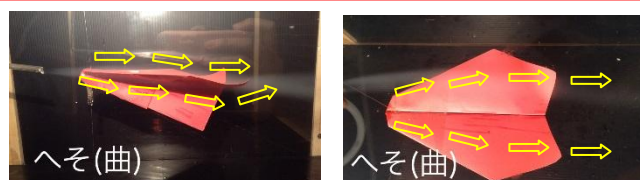
紙飛行機は飛行中にどのように風を受けているのかを観測するため、紙飛行機を製作し風洞実験器内で実験を行う。翼のまわりの空気の流れ及び紙飛行機全体にかかる揚力を測定する。また、実際に飛ばして滞空時間を比較する。

5.1. 実験方法

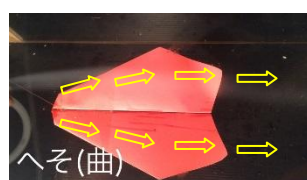
今回の実験には10種類の紙飛行機を画用紙で製作し、それらを風洞内に糸で固定して紙飛行機の翼のまわりの気流を可視化する。同時にニュートンばねばかりを用いて紙飛行機にかかる力を計測した。可視化する際はスモークマシンの煙に含まれる水分により重量が変化するので実験前と実験後の紙飛行機の重さを計測した。さらに紙飛行機を実際に弱い力、強い力で飛ばした時の滞空時間、それぞれの紙飛行機の形状の違いによる飛行特性を分類した。

6. 結果

6.1. 可視化した時の様子

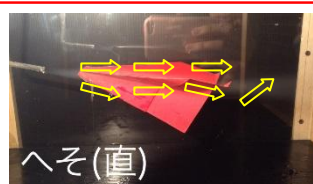


へそ(曲)

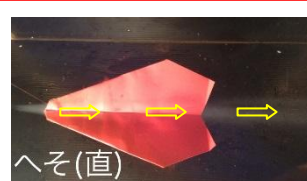


へそ(曲)

後端の跳ね上げ部分で緩やかに空気が上昇。

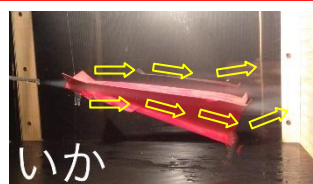


へそ(直)

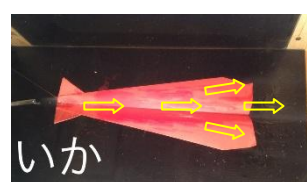


へそ(直)

後端の跳ね上げ部分で急に空気が上昇。



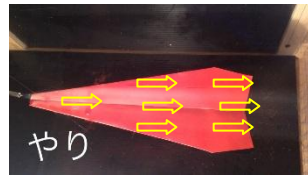
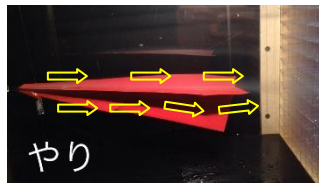
いか



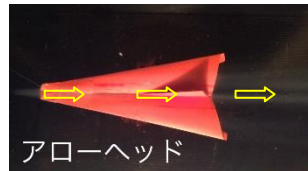
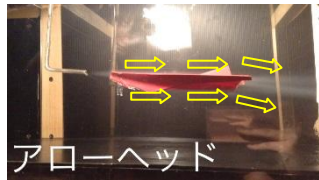
いか

後端の跳ね上げ部分で急に空気が上昇。

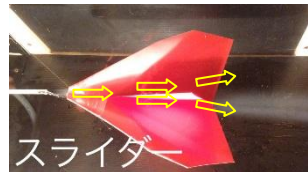
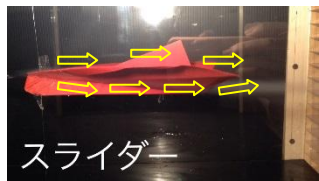
翼で空気が拡散。



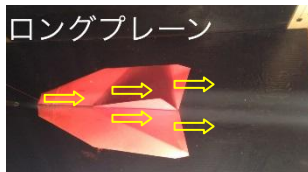
後端の跳ね上げ部分で緩やかに空気が上昇。
翼で空気が拡散。



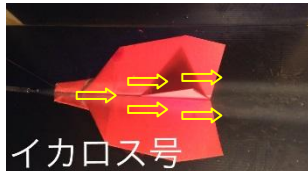
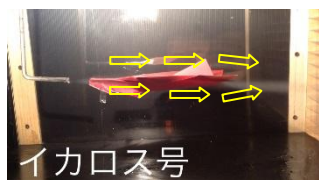
空気がまっすぐ流れる。後端で空気が降下。



後端の跳ね上げ部分で緩やかに空気が上昇。
中央の突起で空気が分散。



空気がまっすぐ流れる。中央の突起で空気が分散。



後端の跳ね上げ部分で緩やかに空気が上昇。
中央の突起で空気が分散。

6.2. 実験で測定した値

実験から以下のことがわかった。測定した値は表 1 に記したとおりである。

- ・横長大の翼は他の飛行機より大きな力を受けている。投げ方により違いはあるが滞空時間が長い。
- ・縦長大の翼は安定した軌道で長く飛ぶ。
- ・後端に跳ね上げのないものは滞空時間が短い。
- ・後端で空気が降下しているときは飛びにくい。
- ・中央の突起で空気が分散するが、滞空時間には関係しない。

※元の画用紙の重さは7.20 g。A4サイズの紙で試作したのちバランスを考慮し防水も兼ねてセロテープで補強した。

※スーパーフィンとかもめは不安定でうまく飛ばすことができなかった。(紙の質によるものか)

	翼の形状	跳ね上げ	計測前の質量[g]	計測後の質量[g]	受けた力[N]	滞空時間(弱)	滞空時間(強)
へそ(曲)	横長小	○(曲)	8.50	8.77	0.01	短	長
へそ(直)	横長小	○(折)	7.93	8.19	0.01	長	長
いか	縦長大	○(折)	9.56	10.04	0.01	長	長
やり	縦長大	○(曲)	7.80	8.16	0.02	長	長
アローヘッド	縦長小	×	5.90	6.27	0.01	短	短
スライダー	横長大	○(曲)	8.18	8.40	0.02	短	長
ロングプレーン	縦長小	×	7.60	7.60	0.01	短	短
イカロス号	横長大	○(曲)	8.04	8.04	0.01	長	短
スーパーフィン	四角形	×	8.10	×	×	×	×
かもめ	カモメ形	×	7.73	×	×	短	×

表1

紙飛行機を実際に弱い力、強い力で飛ばした時の滞空時間を長か短で判断した。また、紙飛行機の形状を縦長か横長か、翼の面積を大か小かで分類した。翼のg後端をひねって跳ね上げたものは○(曲)、端を折って跳ね上げたものは○(直)、跳ね上げていないものは×で示している。

7. 考察

翼の後端を跳ね上げるにより滞空時間を長くできる。これは翼の後端で空気が上昇することにより安定して力が得られるからだろう。それに対して空気をまっすぐにしか送れない形状は重力に従い落下する。跳ね上げは滞空時間に、翼の形状は軌道の安定と滞空時間に関係することが分かった。

紙飛行機は後端の跳ね上げや重量バランスにより理想の軌道に乗せるのは難しい。

8. おわりに

風洞実験器を製作する過程で多くの時間を費やしてしまったので紙飛行機の実験を深めることができなかったのが残念だ。しかし、今回の実験を通して風洞実験器の利用の幅をもっと広げることができるのではないかと感じた。今後の物理実験の参考にしたい。

また、本研究を進めるにあたってご指導いただいた先生方、中間発表などでの的確なアドバイスをしてくださった方々、その他お世話になった方々にこの場を借りて厚くお礼申し上げます。

【参考文献・参考URL】

- 1, 橋本孝明著(2005)身のまわりから学ぶ流体力学 晃洋書房
- 2, 久保田浪之介著(2006)おもしろ話で理解する流れ学入門 日刊工業新聞社
- 3, おりがみヒコーキの HP <http://www.oriplane.com/>