

# よく飛ぶ紙飛行機Ⅷ ～飛ぶ力と翼端形状～

静岡大学教育学部附属浜松中学校

2 年 三宅 遼空

## 1 動機

紙飛行機をよく飛ばすには、どうしたらいいのか？

小1 から 7 年間、紙飛行機について色々な研究を続けてきた。

昨年の研究では、鳥の尾羽の形が飛行時と着地時では異なることに注目し、鳥、ムササビ、トビウオなどの飛行生物の尾羽を模倣した紙飛行機を作り、自作の風洞装置で空気の流れを可視化しながら尾翼の役割、性能の違いについて調査した。

昨年の研究で尾翼に流れる煙の流れを観察した際、尾翼の平面上では煙は翼に沿ってきれいに流れていたが、翼端では渦巻状の乱流となっており、なぜそのようになるのか不思議に思った。飛行生物の翼端形状を見ても様々な形状をしており、その形状の違いも飛ぶ力に関係しているのではないかと思い、色々な飛行生物の翼端形状を持つ紙飛行機の飛行特性（揚力・抗力）を調べることにした。

## 2 研究の目的

昨年の研究で尾翼の翼端にできた渦巻状の乱流は、実際の飛行機でも見られ、翼端渦と呼ばれる。

翼の上下面で生じる圧力差により、下面から上面に向かって空気が流れ込もうとするために発生する。この翼端渦が抵抗となり、飛行特性に影響を及ぼすため、飛行機では翼端形状を工夫している。

今回、飛行生物の翼端形状に着目し、なぜそのような形状をしているのか調べ、紙飛行機に応用すれば、もっとよく飛ぶ紙飛行機ができるのではないかと考え、翼端形状と飛ぶ力の関係について調査した。

## 3 研究の方法

### (1) 実験の進め方

ア 翼の性能は、揚力を抗力で割った「揚抗比」が大きいほど良いため、色々な翼端形状の飛行機の揚力と抗力を測定する。

イ アの結果がなぜそうなったのか、空気の流れを高速カメラで観察する。

ウ 紙飛行機を実際に飛ばし、どれが一番良く飛ぶか対決する。

### (2) 実験装置

#### ア 紙飛行機

翼端形状の違いを単純に比較するため、これまでの研究で使用した棒胴機（N-1141）にした。

#### イ 揚力、抗力測定装置と測定方法

揚力は機体を固定した支柱とリニアガイドを電子天秤の上に乗せ、浮き上がる力を測定する。

抗力はリニアガイドとおもりを糸で結び、引っ張られる力を測定する。

風を前からあてた時の電子天秤の目盛りを読み、最初に比べて軽くなった分が揚力、抗力になる。

#### ウ 風洞実験装置と観察方法

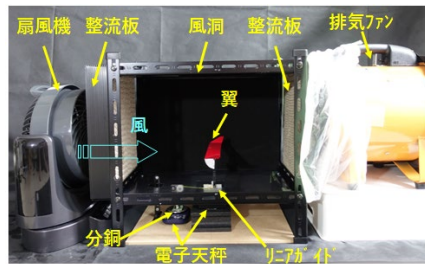
スチールラックとL字金具を使用し枠組みを作り、透明なアクリル板とプラダン（黒）で風洞（奥行 30 cm、長さ 45 cm、高さ 30 cm）を作る。

風洞の前後には機体に当てる風が一定になるように、塗装ブース用のハニカムフィルタを使用した整流板を置く。

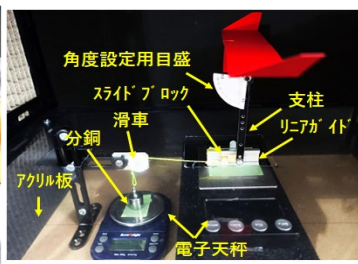
昨年の風洞実験ではスモークマシンの煙を直接当てたが、スモークマシンはそのまま煙を出すと風洞内で煙が広がってしまい、翼周りの気流がうまく見えなかった。今回は観察したい

箇所に煙を流すように改良した実験装置を製作した。

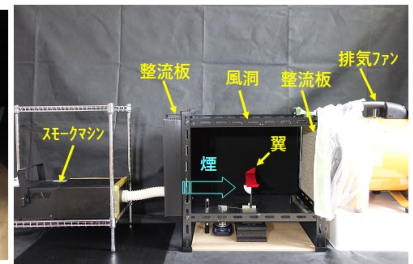
スモークマシンから出た煙をプラダンの箱に集め、それをホースで整流板まで直接送り出すように改良した。また、風洞の出口側に排気ファンを設置し、扇風機による煙の押し込みではなく、吸い込み式にすることで風洞内の気流を安定させた。



揚力・抗力実験装置



揚力・抗力測定



風洞実験

#### 4 研究の内容と結果

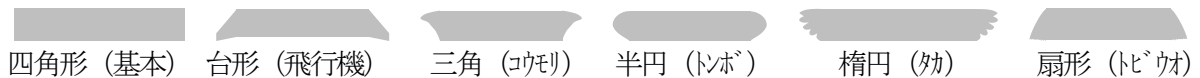
##### (1) 実験1 翼端形状の違いによる揚力、抗力測定

次の飛行生物の翼端形状をまねた飛行機を作成し、揚力、抗力を測定。

##### ア 翼の形

四角の基本形に対し、翼の面積が同等 (52.5 cm<sup>2</sup>) になるように作成した。

翼のキャンバーは約 15 度、上反角は 0 度で作成した。



##### イ 翼端の角度

角度による違いを調査するため、翼端角度について次のように設定した。

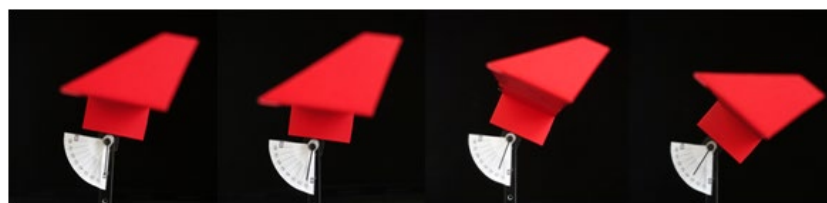
①0 度      ②上 45 度      ③上 90 度      ④下 45 度      ⑤下 90 度



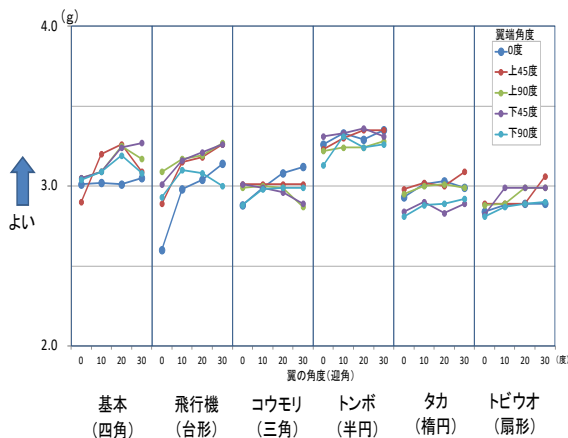
##### ウ 尾翼の角度

翼の角度（迎角）を 0 度から 30 度まで 10 度ごとに变化させた時の揚力、抗力を測定。

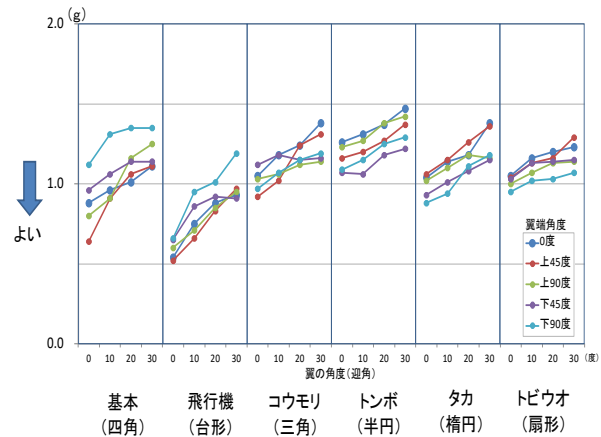
①0 度      ②10 度      ③20 度      ④30 度



## 揚力測定結果



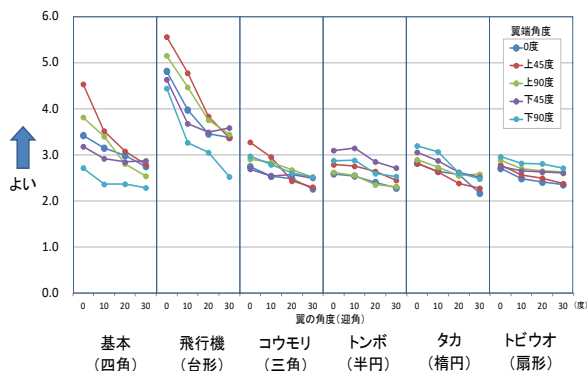
## 抗力測定結果



(分かったこと)

- ・揚力は、半円のトンボが一番大きく、扇形のトビウオが一番小さかった。
- ・揚力は、台形の飛行機以外、翼の角度（迎角）による差はあまり大きくなかった。
- ・揚力は、翼端角度による差はあまり見られなかったが、四角の基本形、台形の飛行機では0度が小さい傾向にあった。
- ・抗力は台形の飛行機が一番小さく、半円のトンボが一番大きかった。
- ・抗力は揚力と違い、翼の角度（迎角）によって差があり、角度に比例していた。

## 揚抗比結果



揚抗比の結果は、

飛行機 > 基本 > コウモリ ≒ トンボ ≒ タカ ≒ トビウオ  
という順でよい結果となった

## (2) 実験2 翼端形状の違いによる空気の流れ観察

翼の角度を0から30度まで10度毎に変化させた時の翼端に当たる風の流れを観察する。

スモーク発生装置の煙を翼の周りに当て、横方向（翼側面）から高速カメラで観察した。

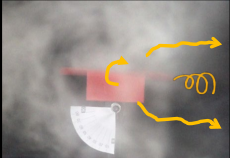
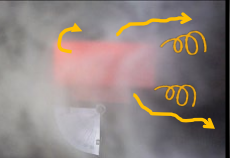
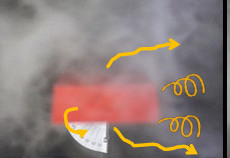
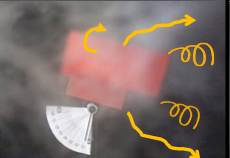
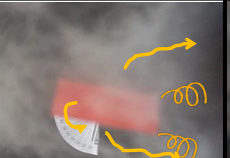
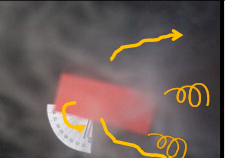
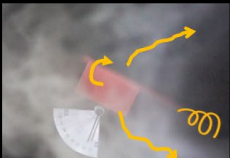
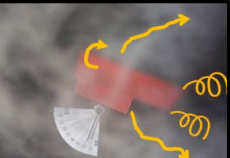
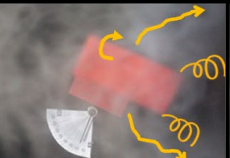
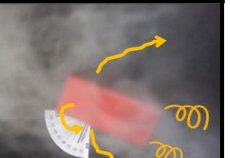
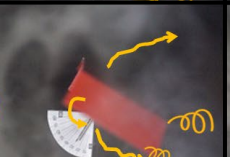
(分かったこと)

- ・翼端では、角度により上下方向に煙を巻き込んで渦ができる。
- ・翼の角度（迎角）が大きくなると、翼端後方での渦の広がりが大きくなる。  
特に、四角の基本形、台形の飛行機が目立った。
- ・翼端角度が大きくなると、角度に比例して巻き込んだ煙の流れが速くなり、翼端後方での渦の広がりが大きくなった。シンプルな形状の台形、四角の翼端形状の方がその傾向が顕著だった。
- ・翼端形状の違いで煙の流れ方に多少の変化が見られたが、タカ以外の形状では、揚抗比の結果ほど大きな違いはなかった。
- ・タカの翼端形状では、風切羽に似せた楕円の凹凸部で小さな渦が発生し、それが翼端周りで乱流となり、煙の塊ができていた。

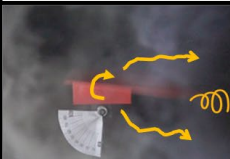
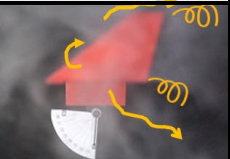
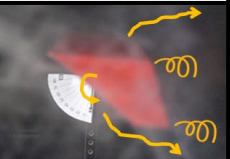
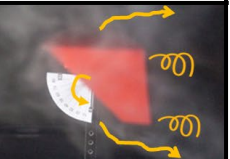
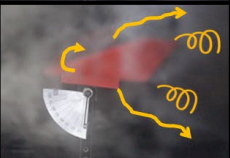
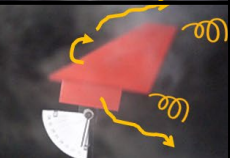
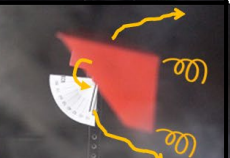
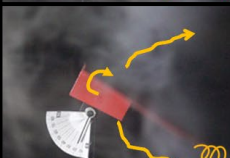
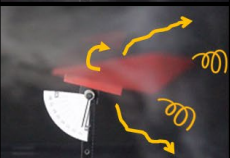
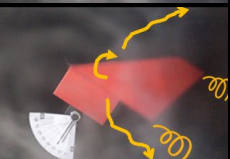
- ・風洞実験結果から、シンプルな翼端形状（四角の基本形、台形の飛行機）では、翼の角度（迎角）と翼による気流の変化が大きく、それ以外の翼端形状では、あまり差がでないことが分かった。

基本形：四角の例

※撮影写真中の矢印は煙の流れのイメージを描いた

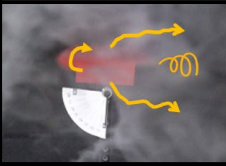
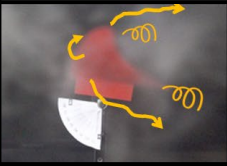
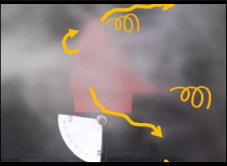
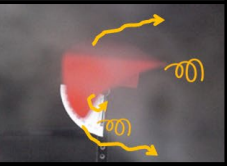
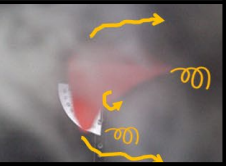
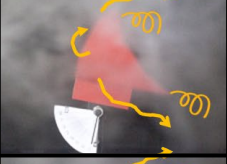
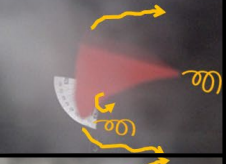
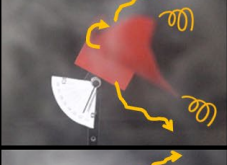
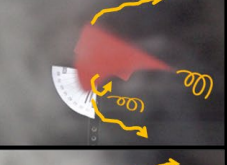
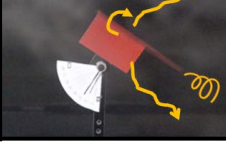
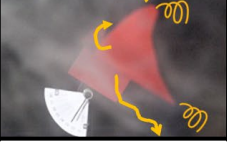
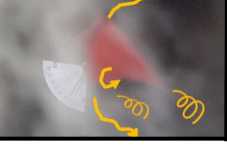
| 迎角  | 翼端角度                                                                               |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 0度                                                                                 | 上45度                                                                               | 上90度                                                                               | 下45度                                                                                | 下90度                                                                                 |
| 0度  |   |   |   |   |   |
| 10度 |   |   |   |   |   |
| 20度 |   |   |   |   |   |
| 30度 |  |  |  |  |  |

飛行機：台形の例

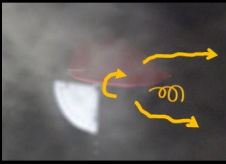
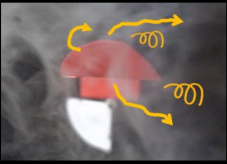
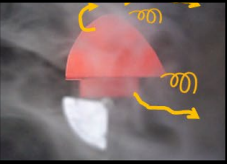
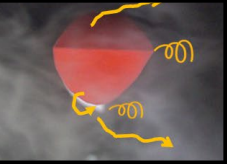
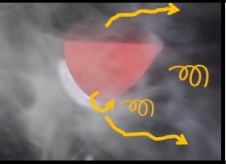
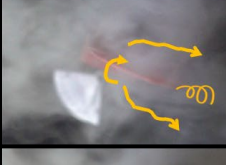
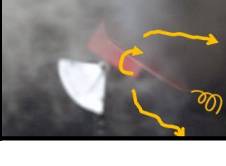
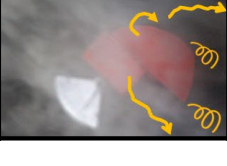
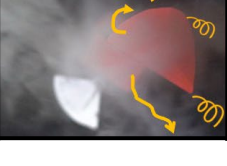
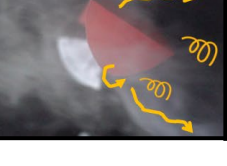
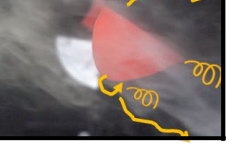
| 迎角  | 翼端角度                                                                                |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 0度                                                                                  | 上45度                                                                                | 上90度                                                                                | 下45度                                                                                 | 下90度                                                                                  |
| 0度  |  |  |  |  |  |
| 10度 |  |  |  |  |  |
| 20度 |  |  |  |  |  |
| 30度 |  |  |  |  |  |



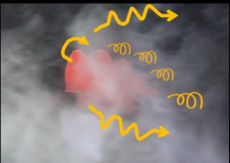
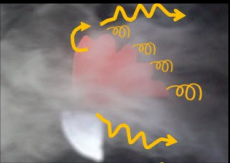
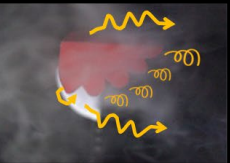
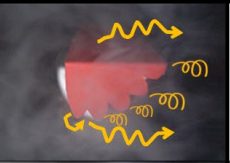
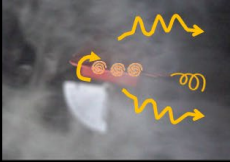
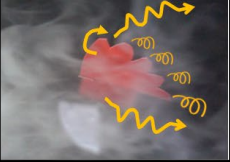
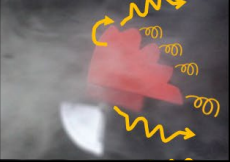
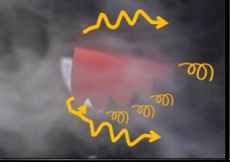
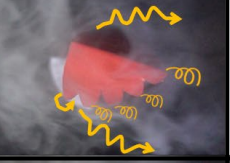
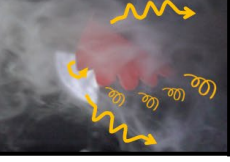
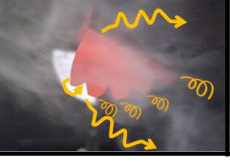
コウモリ：三角の例

| 迎角  | 翼端角度                                                                               |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 0度                                                                                 | 上45度                                                                               | 上90度                                                                               | 下45度                                                                                | 下90度                                                                                 |
| 0度  |   |   |   |   |   |
| 10度 |   |   |   |   |   |
| 20度 |   |   |   |   |   |
| 30度 |  |  |  |  |  |

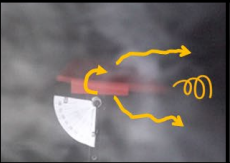
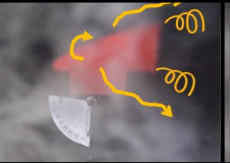
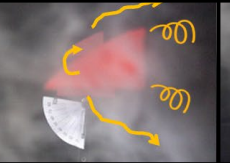
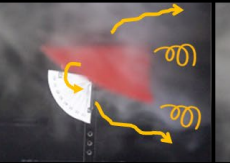
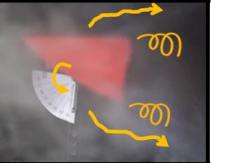
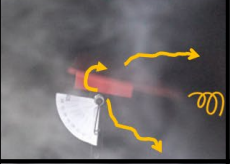
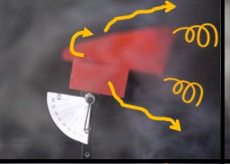
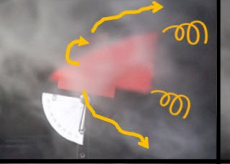
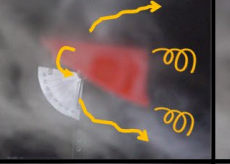
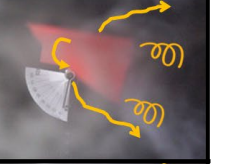
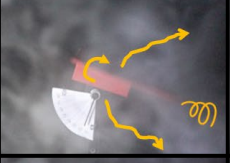
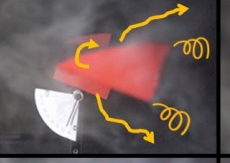
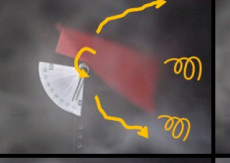
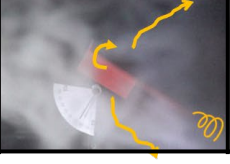
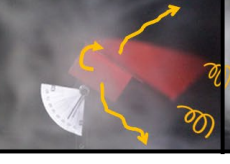
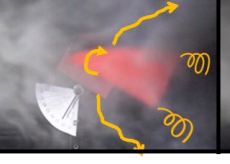
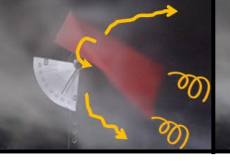
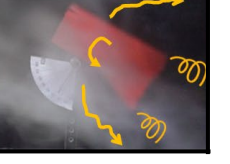
トンボ：半円の例

| 迎角  | 翼端角度                                                                                |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 0度                                                                                  | 上45度                                                                                | 上90度                                                                                | 下45度                                                                                 | 下90度                                                                                  |
| 0度  |  |  |  |  |  |
| 10度 |  |  |  |  |  |
| 20度 |  |  |  |  |  |
| 30度 |  |  |  |  |  |

タカ：楕円の例

| 迎角  | 翼端角度                                                                               |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 0度                                                                                 | 上45度                                                                               | 上90度                                                                               | 下45度                                                                                | 下90度                                                                                 |
| 0度  |   |   |   |   |   |
| 10度 |   |   |   |   |   |
| 20度 |   |   |   |   |   |
| 30度 |  |  |  |  |  |

トビウオ：扇形の例

| 迎角  | 翼端角度                                                                                |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|     | 0度                                                                                  | 上45度                                                                                | 上90度                                                                                | 下45度                                                                                 | 下90度                                                                                  |
| 0度  |  |  |  |  |  |
| 10度 |  |  |  |  |  |
| 20度 |  |  |  |  |  |
| 30度 |  |  |  |  |  |



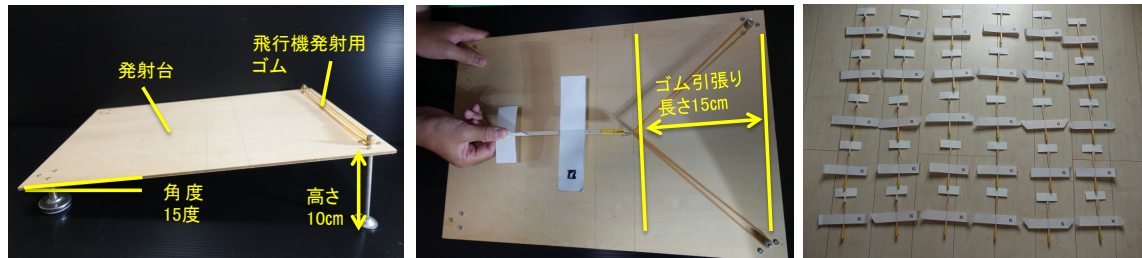
### (3) 実験3 紙飛行機の飛距離対決 (検証実験)

実験1と同じ形の尾翼の紙飛行機を実際に飛ばし、どれが一番よく飛ぶか対決した。

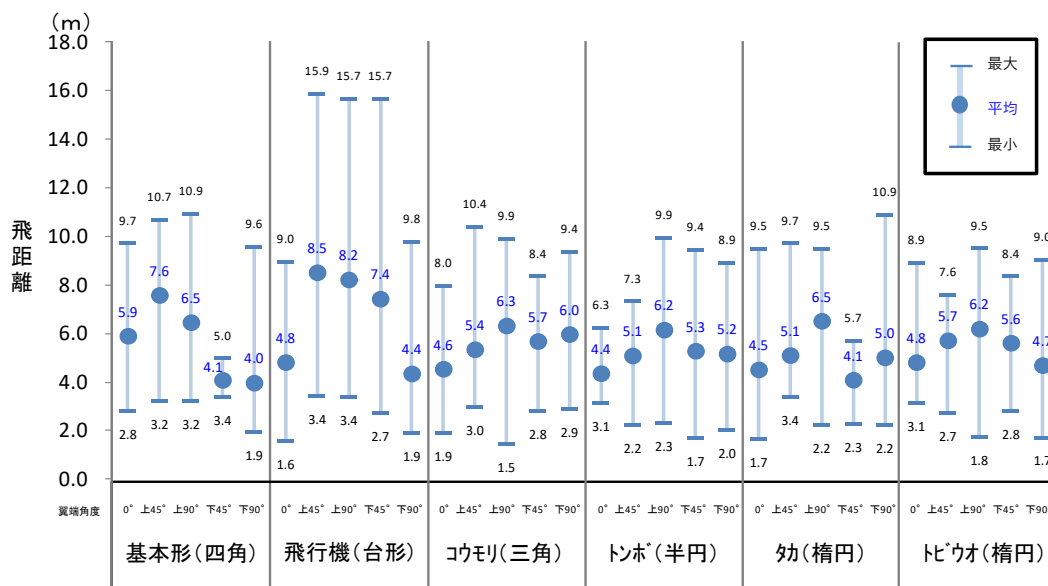
風の無い体育館で10回ずつ飛ばし、飛んだ距離を測る。

飛ばし方は、発射台を作り、なるべく飛ばし方を一定にした。

発射角度は15度、紙飛行機先端のフックにゴムを掛け15cm引張った所を発射位置とした。

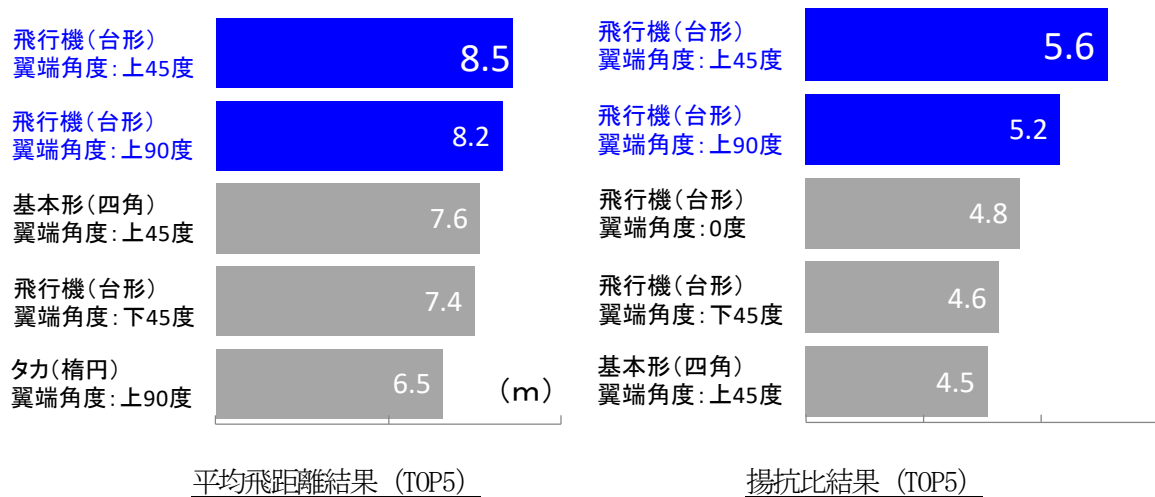


#### 飛距離対決結果



#### (分かったこと)

- 予想通り、台形の飛行機の翼端角度45度が一番よく飛んだ。
- 四角の基本形、台形の飛行機は翼端角度による飛距離のばらつきが大きかった。
- 下向きの翼端角度は発射の際に発射台のゴムと接触し、飛距離をロスすることがあったため、どの翼端形状でも低い結果となった。発射台の改良は次回の課題である。
- 四角の基本形、台形の飛行機以外の形状は、どの翼端角度でも飛距離に大きな差は出ず、安定して飛んだ。
- 翼端角度0度の飛行機はどの形状でも飛距離に大きな差が出なかった。
- 平均飛距離結果と揚抗比結果のTOP5を比較すると、全ての順序が同じにはならなかったが、TOP2までは同じ結果となった。



## 5 まとめ

- 翼端形状の違いによっても空気の流れが変わり、揚力と抗力に影響がでることが分かった。
- 揚抗比と風洞実験の結果から、翼端形状は四角の基本形や台形の飛行機のようなシンプルな形状の方が飛行特性がよいことが分かった。しかし、翼の角度（迎角）の変化による飛行性能のばらつきが大きいことから、機体の角度に応じた最適な翼端角度を決めることができれば、最大の飛行性能を得ることができるのではないかと思います。
- 飛行生物の形状をまねた翼端形状は、翼の角度（迎角）が変化しても飛行特性に大きな差が出ないことが分かった。このことから、飛行生物の翼端形状は、急激な飛行性能低下を招かない安定して飛べる翼端形状となっているのではないかと思います。
- 今回の研究では、翼端形状に着目し、飛行生物の翼端形状をまねた飛行機を作り、飛ぶ力にどんな影響があるか調査した。

これまで、様々な飛行生物の飛ぶ力の秘密について調査してきたが、まだまだ飛行生物には多くの飛ぶ秘密が隠されているのではないかと思います。これからもよく飛ぶ紙飛行機作りのヒントを得るため、飛行生物の飛ぶ力について研究を続けていきたい。

## 6 参考にした本

- 「二宮康明の紙飛行機集」 誠文堂新光社
- 「日本大百科全書(ニッポニカ)」 (小学館)
- 「航空機のひみつ (キッズペディア)」 (小学館)
- 「生物の形や能力を利用する学問 バイオミメティクス」 (東海大学出版部)
- 「航空を科学する 上巻」 東 昭 著 (酣燈社)
- 「カラー図解でわかる航空力学「超」入門」 中村寛治 著 (SBクリエイティブ)