

ペーパープレーンの飛行距離と形状の関係

2513 熊崎 雄大 2515 佐々木 凌空 2529 林 樹

要旨

遠くへの移動を可能にしてきた航空機に興味があり、航空機がより長い距離を飛ぶにはどのような条件が必要か研究することにした。形状を容易に変更しやすいペーパープレーンと、一定の初速度を与えるカタパルトを用いて、航空機の形状が、飛行距離に与える影響を調べると、主翼の迎角と後退角、尾翼の伏角、翼面積、重心の位置が、飛行距離に関係する条件だと分かった。

1. 目的

ペーパープレーンをより遠く飛ばすために必要な条件を明らかにするため、飛行距離と形状の関係を研究する。

2. 実験器具

(1) ペーパープレーン

工作用紙、割り箸、クリップ、ビニールテープ、両面テープ

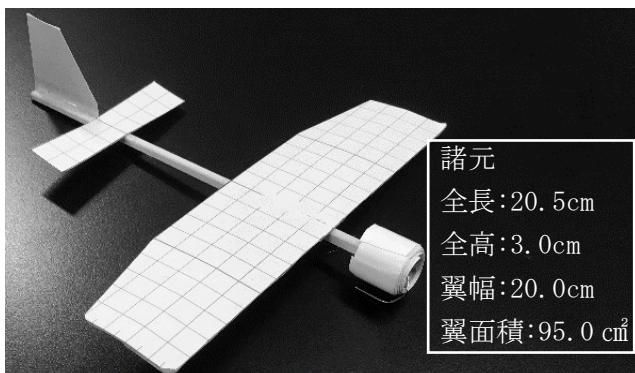


図1 ペーパープレーン

(2) カタパルト(発射台)

竹定規、木材、テープ、割り箸、輪ゴム

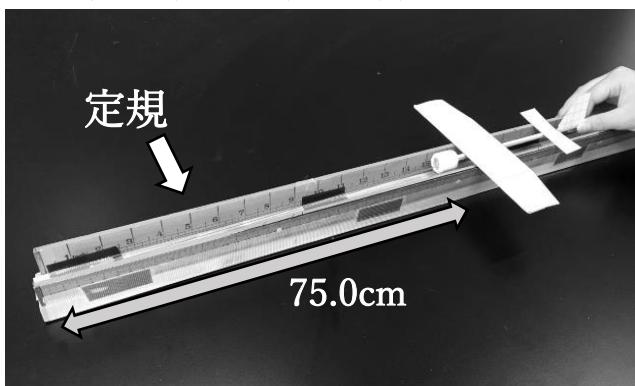


図2 カタパルト…飛行機の発射台

(3) メジャー(飛行距離計測)

(4) カメラ(飛行軌道の撮影)

3. 用語および理論

- ・飛行機には次の4つの分力が作用する。

揚力

機体が進行方向の垂直・上向きに作用する力

重力

機体に下向きに作用する力

推力

機体を進行方向に作用する力(推力エンジン)

抗力

機体の進行と逆方向に作用する力(空気抵抗)



図3 機体に作用する力

※今回の研究について、ペーパープレーンに推進エンジン等を取り付けることは不可能であるため、推力は考慮しない。また、実験は無風の室内で行うため、どの機体にも同様の抗力が作用するものとする。

- ・今回の実験では、飛行距離の他に、機体の軌道に着目する。図4のように、水平を比較の基準として、ペーパープレーンの鉛直の変位を比較する。

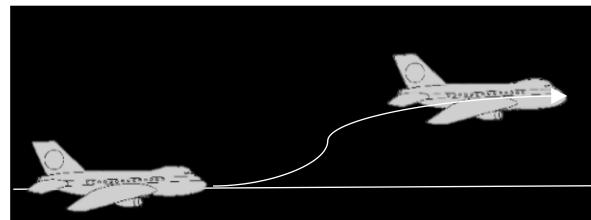


図4 基準線と実際の軌道の例

- ・飛ぶ機の前後軸を中心とした回転をロール、左右軸を中心とした回転をピッチ、上下軸を中心とした回転をヨーと呼ぶ。

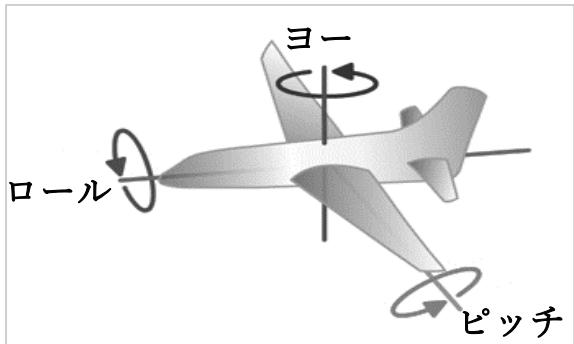


図5 ロール、ピッチ、ヨー

- ・後退角とは、翼の後退の度合いを示す角度のことである。

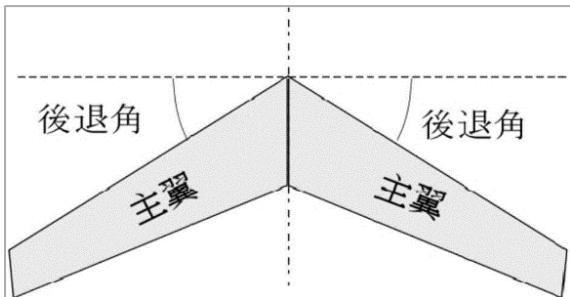


図6 後退角について

- ・ピッチを一定にするためには、重力、主翼に作用する揚力、尾翼に作用する揚力の3つのモーメントが釣り合う必要がある。

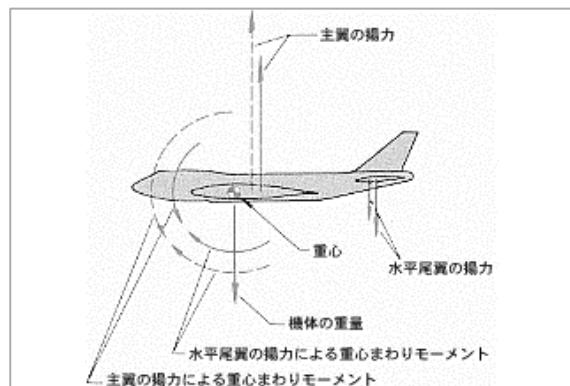


図7 モーメントの釣り合い

- ・揚力の大きさは、速度の2乗に比例する。揚力と速度の関係には、次の式が用いられる。以後、揚力関係式と記す。

$$L = \frac{1}{2} \rho S v^2 C_L$$

[L:揚力 S:翼面積 C_L :揚力定数 v:速度 ρ :密度]

- ・主翼の迎角と揚力定数(C_L)の関係は以下のように示される。

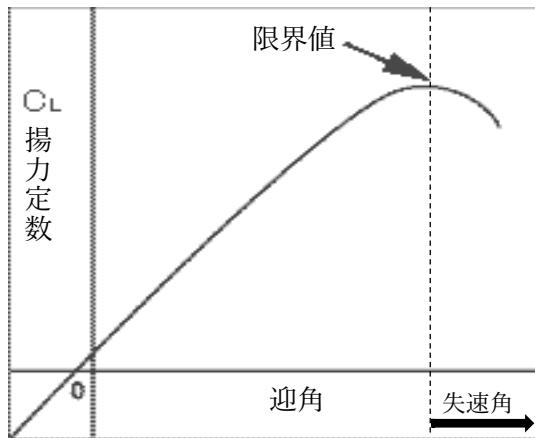


図8 迎角と揚力定数の関係

迎角が一定の角度(失速角)を超えると、揚力定数が急激に減少する。揚力関係式より、揚力は揚力定数に伴って減少するため、速度も同様に小さくなり、失速する。

4. 実験の過程および仮説

【実験1：翼に迎角を加える】

〈仮説〉主翼に迎角、尾翼に伏角を加えることで、翼に加わる揚力が大きくなり、揚力と重力が等しくなるため、水平を保ち、長距離の飛行ができる。

【実験2：翼の重心を変える】

〈仮説〉機体前方に重心をとることで、重力、主尾翼に作用する揚力の3つのモーメントが釣り合うため、水平を保ち、長距離飛行できる。

【実験3：翼の面積を変える】

〈仮説〉揚力関係式より、揚力は翼面積に比例する。主翼の翼面積を大きくすることで、主翼に作用する揚力がより大きくなり、重力と揚力が等しくなるため、水平に近い軌道になり、長距離飛行できる。

【実験4：主翼の後退角を変える】

〈仮説〉翼の後退角は機体のローリングを抑えることが可能で、後退角が大きいほど、機体は水平な姿勢を保ち、長距離飛行できる。

5. 実験方法、結果、考察

【実験 1】

実験の手順

- (1) 主翼に迎角を加える操作を操作 I, 尾翼に伏角を加える操作を操作 II とする。主翼の迎角, 尾翼の伏角は失速角とならず, 流線形となるように曲げる。

今回の実験は, 翼に迎え角を加えることによる飛行距離の変化について調べるために, 正確な迎角・伏角は測定しない。以下の 4 種の機体を作る。

P-1A…操作 I と操作 II を行う

P-1B…操作 I のみを行う

P-1C…操作 II のみを行う

P-1D…どの操作も行わない

- (2) カタパルトを用いて P-1A, P-1B, P-1C, P-1D を飛ばす。

- (3) 飛行距離を計測する。

結果

表 1 実験 1 の飛行距離

	1回目 [m]	2回目 [m]	3回目 [m]	平均 [m]
P-1A	10.2	9.2	11.9	10.4
P-1B	3.4	3.8	3.9	3.7
P-1C	4.2	4.8	4.5	4.5
P-1D	3.5	3.4	3.3	3.4

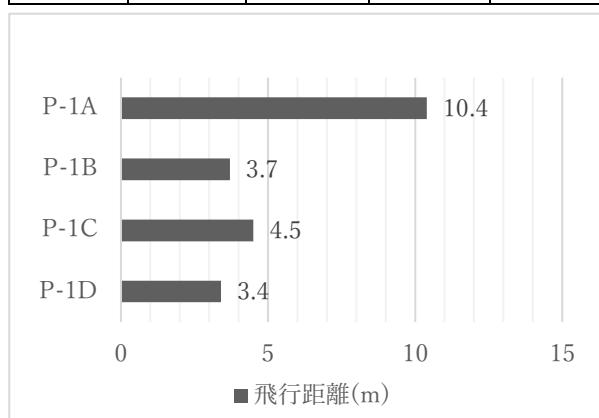


図 9 実験 1 の飛行距離比較

考察

主翼に迎角, 尾翼に伏角を加えたことで, 空気の流れが変わったことにより揚力が大きくなり, 機体に作用する重力に対して揚力が釣り合う関係になると同時に重力の作用を打ち消して機体の水平飛行が保たれたため, 飛行距離が最も長くなった。

【実験 2】

実験の手順

- (1) 機体の質量は変えず, 機体前方に巻くビニールテープの量を変えて, 以下の 3 種の機体を作る。

P-1A…重心が翼の中央から 1.0cm 前方

P-2A…重心が翼の中央

P-2B…重心が翼の中央から 1.0cm 後方

- (2) カタパルトを用いて P-1A, P-2A, P-2B を飛ばす。

- (3) 飛行距離を計測する。

- (4) カメラで機体の軌道を撮影する。

結果

表 2 実験 2 の飛行距離

	1回目 [m]	2回目 [m]	3回目 [m]	平均 [m]
P-1A	10.5	10.3	10.1	10.3
P-2A	8.0	7.9	8.2	8.0
P-2B	3.7	3.7	3.9	3.8

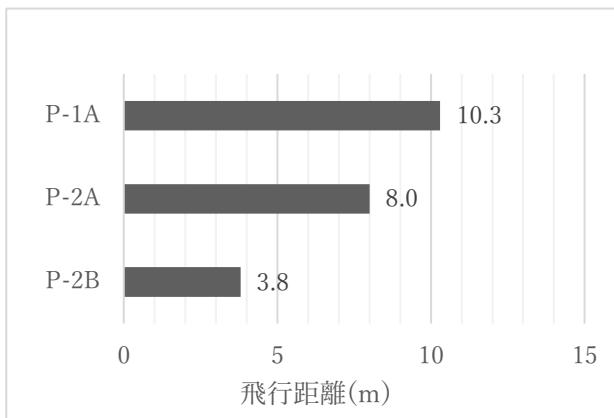


図 10 実験 2 の飛行距離比較

軌道



図 11 P-1A

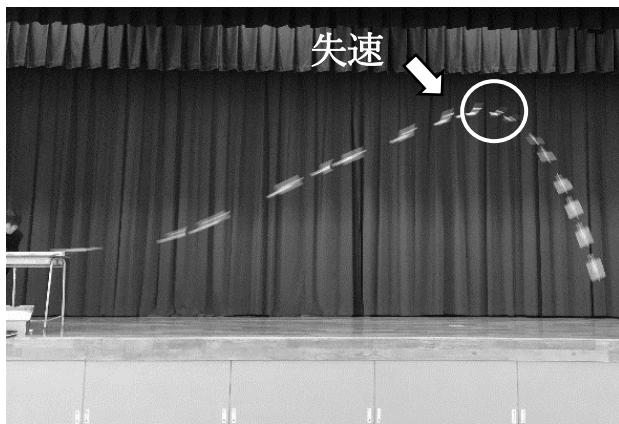


図 12 P-2A

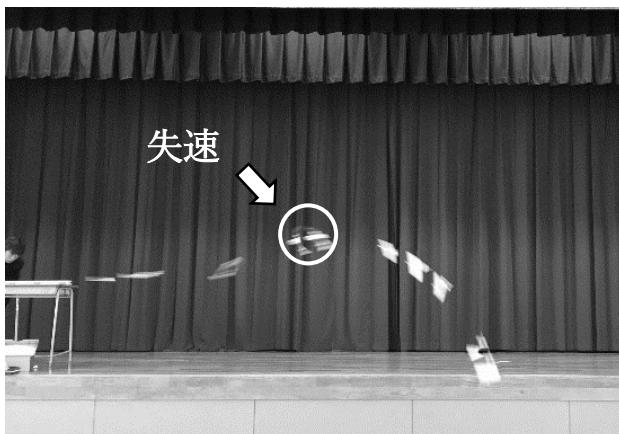


図 13 P-2B

考察

重心が翼前方にない機体は、重力、主尾翼に作用する3つの力のモーメントが釣り合わないため、飛行時間の経過とともにピッチが上向きに傾く。それに伴い迎角はより大きくなり、失速角となる。

しかし、重心が翼前方にあることにより、重心と揚力の作用点との距離がより近くなり、重力、主翼と尾翼に作用する揚力の3つの力のモーメントが釣り合ったため、迎角の増加が抑えられ、失速することなく、機体の水平が

保たれたまま最も長い距離を飛行した。

【実験 3】

実験の手順

- (1) *P-1A* の主翼を翼面積の基準とする、以下の2種の機体を作る。

P-3A…主翼面積が基準の1.5倍

P-3C…主翼面積が基準の0.67倍

(=1/1.5倍)

- (2) カタパルトを用いて *P-3A*, *P-1A*, *P-3C* を飛ばす。

- (3) 飛行距離を測定する。

- (4) カメラで機体の軌道を撮影する。

結果

表 3 実験 3 の飛行距離

	1回目 [m]	2回目 [m]	3回目 [m]	平均 [m]
<i>P-3A</i>	3.3	3.7	3.2	3.4
<i>P-1A</i>	12.9	14.5	12.0	12.9
<i>P-3C</i>	8.4	10.3	9.1	9.3

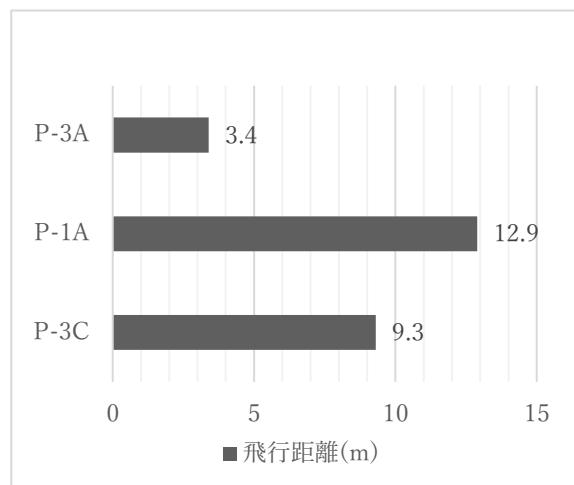


図 14 実験 3 の飛行距離比較

軌道



図 15 P-3A



図 16 P-1A



図 17 P-3C

考察

主翼面積が大きい機体は、揚力が過度に作用しピッチが上向きに傾くことで、迎角がより大きくなって失速角へと変わったため、機体は失速し長い距離を飛行できなかった。一方で、翼面積が小さい機体は、主翼にはたらく揚力が小さくなり、機体の迎角が失速角へと変化しなかったため、失速することなく、翼面積が大きい機体より長い距離を飛行した。

【実験 4】

実験の手順

- (1) 飛行機の翼面積を変えずに主翼の後退角

を変えることで以下の 3 種の機体を作る。

P-4A…後退角が 30°

P-4B…後退角が 45°

P-4C…後退角が 60°

- (2) カタパルトを用いて P-1A, P-4A, P-4B を試験飛行する (P-4C は主翼と尾翼が重なり対照実験とならなかったため今回の実験では使用しなかった)。
- (3) 飛行距離を測定する。
- (4) カメラで機体の軌道を撮影する。

結果

表 4 実験 4 の飛行距離

	1回目 [m]	2回目 [m]	3回目 [m]	平均 [m]
P-1A	10.2	9.2	11.9	10.4
P-4A	12.9	15.5	11.5	13.3
P-4B	4.6	5.0	3.5	4.4

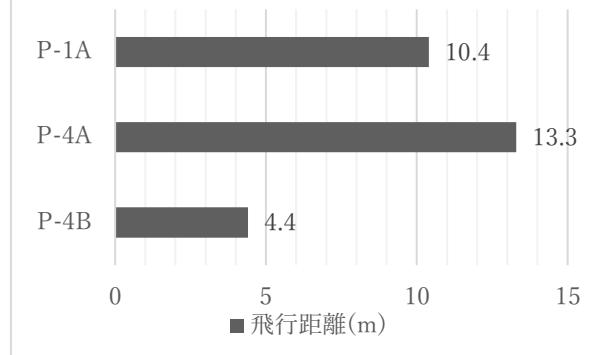


図 18 実験 4 の飛行距離比較

軌道



図 19 P-1A



図 20 P-4A



図 21 P-4B

考察

主翼に後退角を持たせることで、機体のロールの変化を抑え、水平状態を保つことができたため、機体は進行方向にまっすぐ進み、飛行距離が長くなった。しかし、後退角の大小変化によるロールへの影響は関係がないため、より大きい後退角をもつ機体であっても、ロールが安定するとは限らない。

また、今回の実験において、後退角を持たせることによるピッチへの影響はなかったため、主翼の後退角と揚力との関係はない。

6. 結論

- ペーパープレーンをより遠く飛ばすためには、機体が水平な姿勢を保ち、安定した軌道を飛ぶ必要がある。
- 安定した軌道を飛ぶためには、揚力と重力が釣り合うことが条件であり、揚力を生ませるためには、主翼に迎角、尾翼に伏角を加えればよい。
- 揚力は過不足ない状態でなければならぬ。揚力は主尾翼のそれぞれの迎角によって変化する。
- 迎角は主尾翼にそれぞれ作用する揚力と、重心に作用する3つの力のモーメントが釣り合うことで、機体のピッチの変化が抑えら

れた時、一定になります。

- 3つのモーメントが釣り合わず、ピッチが変化すると、揚力に伴い速度が小さくなり、失速の状態となる。
- 3つのモーメントが釣り合うためには、翼面積、重心の位置が影響する。
- 後退角は、機体のローリングを打ち消す働きがあるため、機体は真っ直ぐ進むが、ピッチとの関係はない。

ペーパープレーンをより遠く飛ばすために関係する条件は、主翼の迎角と後退角、尾翼の伏角、翼面積、重心の位置である。

7. 展望

後退角をもたせた機体は、ロールが安定したことであっすぐ飛行したが、後退角はピッチには影響しないため、後退角 30° と 45° で飛行距離に大きな差が出た理由が不透明であるので今後の研究ではその原因を明らかにする。ピッチは、尾翼によって変化するため、今後は尾翼の影響について研究を進める。

また後退角の大小変化がロールをより安定させることに影響しなかった理由を明らかにする。

さらに、今回結論付けられた、ペーパープレーンをより遠く飛ばすために必要な条件を数値化するために、より正確な実験を行う。

8. 参考文献

- ① <http://www.jal.com/ja/jiten/dict/p062.html>
- ② BLUE BACKS
紙ヒコーキで知る飛行の原理/小林昭夫
- ③ http://biokitekids.tobihiro.jp/jbc_mimiori_section7to8.htm
- ④ <https://kotobank.jp/word/%E5%BE%8C%E9%80%80%E8%A7%92-62665>
- ⑤ http://www.cfi-japan.com/study/html/to099/html-to035/017b-Lift_CL.htm
- ⑥ ブリタニカ国際大百科辞典
- ⑦ <https://www.touringmachine.com/Articles/aircraft/6/>