

ペーパープレーンの飛行距離と形状の関係

3514 熊崎 雄大 3517 佐々木 凌空 3527 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られ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要素だと分かった。また、追加実験を行ったところ、翼面積の縮小に伴い飛行距離がより長くなることが分かった。

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

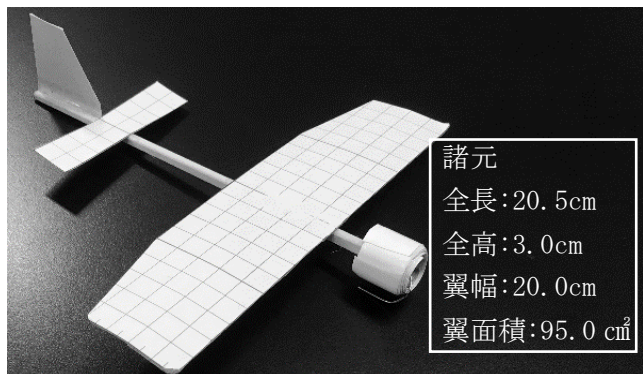


図1 ペーパープレーン

(2) カタパルト(発射台)

竹定規、木材、テープ、割り箸、輪ゴム

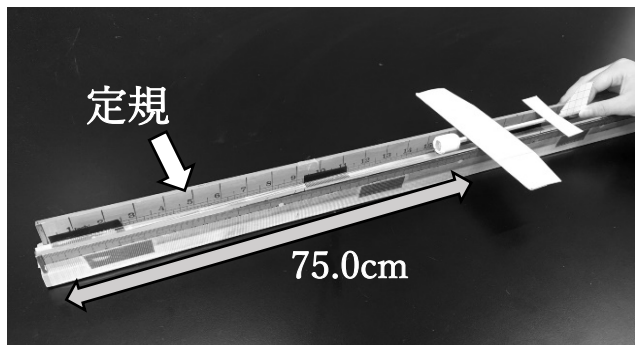


図2 カタパルト…飛行機の発射台

(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

機体に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)



※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。

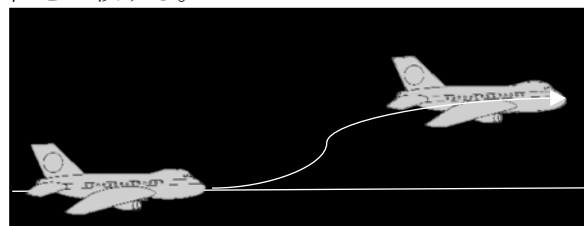


図4 基準線と実際の軌道の例

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。

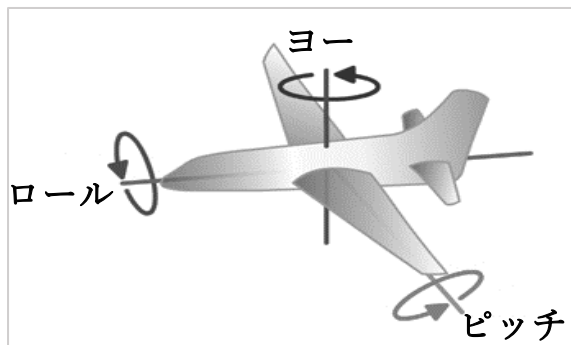


図5 ロール、ピッチ、ヨー

後退角とは、翼の後退の度合いを示す角度のことである。

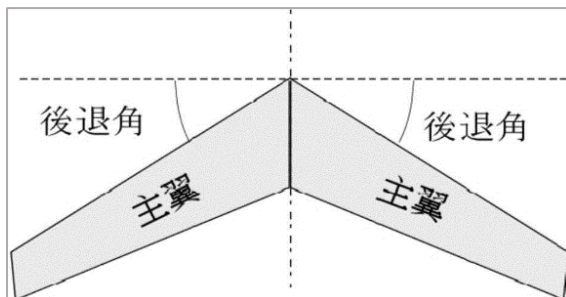


図6 後退角について

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。

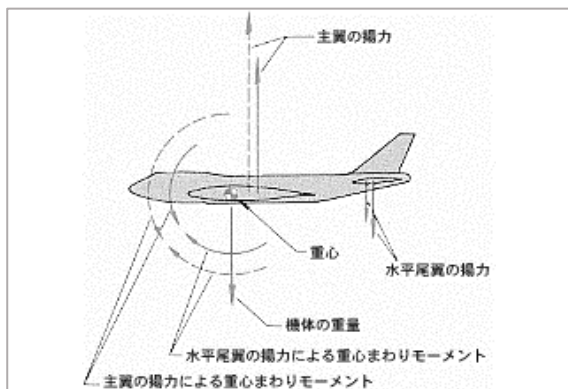


図7 モーメントの釣り合い

・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 :揚力係数 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示される。

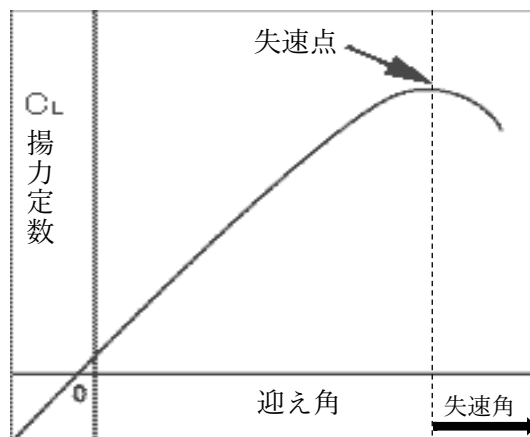


図8 迎え角と揚力定数の関係

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:翼に迎え角を加える】

〈仮説〉主翼に迎え角、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、主翼、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。

【実験5:面積の正確な数値を分析する】

〈仮説〉面積を変えることで失速点までの距離が変わる。

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, 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〕
<i>P-1A</i>	10.2	9.2	11.9	10.4
<i>P-1B</i>	3.4	3.8	3.9	3.7
<i>P-1C</i>	4.2	4.8	4.5	4.5
<i>P-1D</i>	3.5	3.4	3.3	3.4

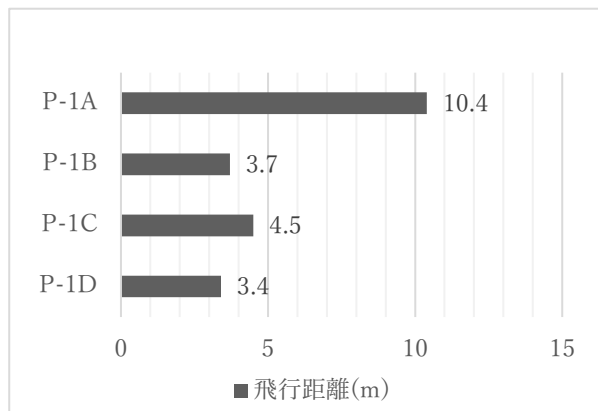


図9 実験1の飛行距離比較

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〕
<i>P-1A</i>	10.5	10.3	10.1	10.3
<i>P-2A</i>	8.0	7.9	8.2	8.0
<i>P-2B</i>	3.7	3.7	3.9	3.8

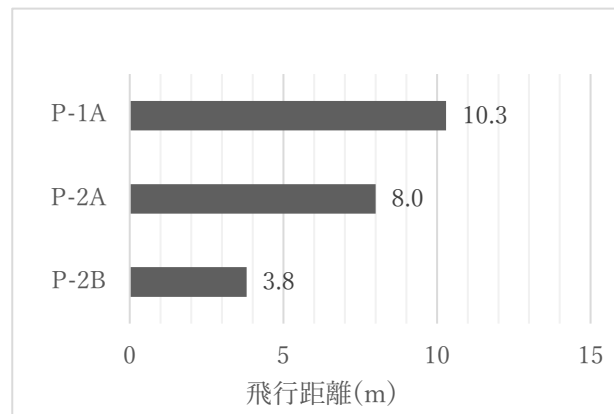


図10 実験2の飛行距離比較

軌道



図 11 P-1A

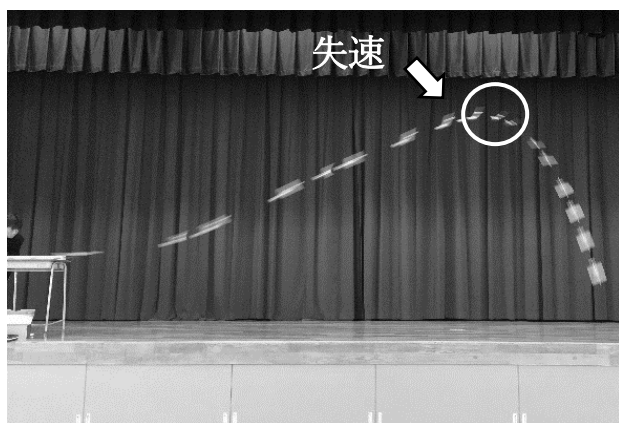


図 12 P-2A

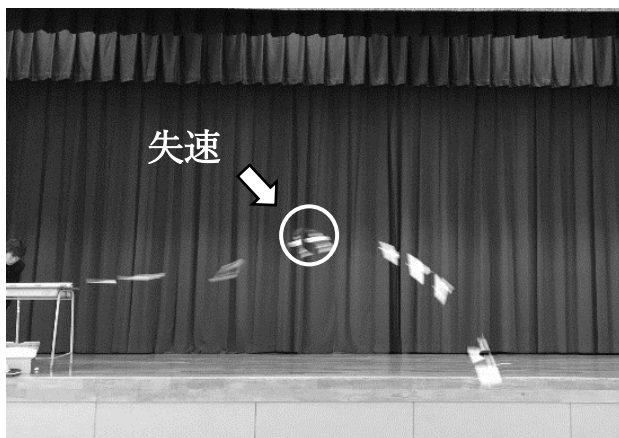


図 13 P-2B

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し、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〕
P-3A	3.3	3.7	3.2	3.4
P-1A	12.9	14.5	12.0	12.9
P-3C	8.4	10.3	9.1	9.3

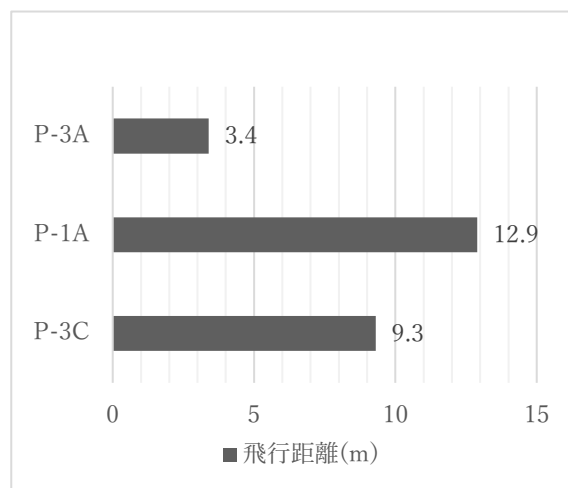


図 14 実験3の飛行距離比較

軌道

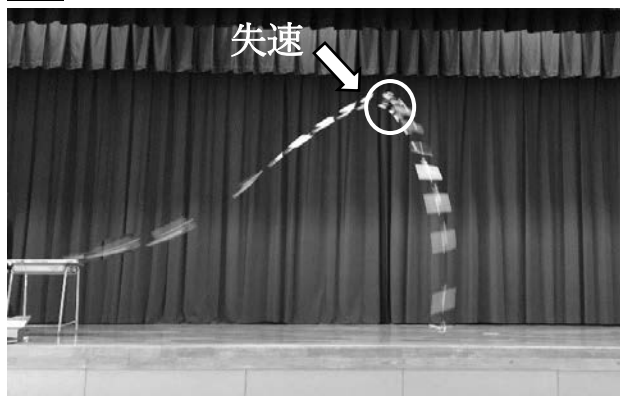


図 15 P-3A



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〕
<i>P-1A</i>	10.2	9.2	11.9	10.4
<i>P-4A</i>	12.9	15.5	11.5	13.3
<i>P-4B</i>	4.6	5.0	3.5	4.4

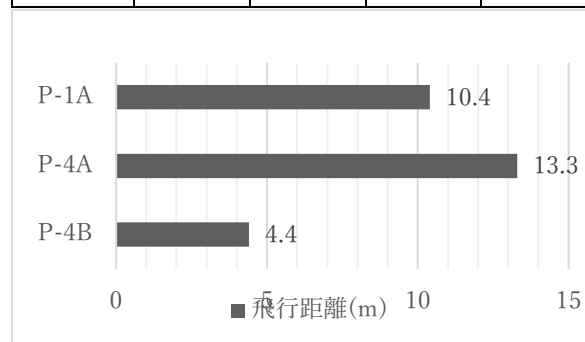


図 18 実験 4 の飛行距離比較

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。

実験 4 までの結論

- 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、揚力を発生させるためには、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ない。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、一定になりうる。

- 3 つのモーメントが釣り合わず、ピッチが変化すると、迎え角の増加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、重心の位置を適切に合わせなければならない。
- 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、ピッチには影響しない。

ペーパープレーンをより遠く飛ばすための要素は、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。

実験 4 までの考察を踏まえ、以下のように追加実験を行った。

【実験 5】

実験の手順

- (1) 以下の実験 1 ～ 4 の全ての条件を満たさない機体を作る。

P-1D…主翼面積 95.0 cm^2

主翼の縦横比 1:5

最尾部と重心の距離 14.25 cm

P-5A…主翼面積 67.2 cm^2

主翼の縦横比 1:5

最尾部と重心の距離 14.25 cm

P-5B…主翼面積 47.5 cm^2

主翼の縦横比 1:5

最尾部と重心の距離 14.25 cm

P-5C…主翼面積 23.8 cm^2

主翼の縦横比 1:5

最尾部と重心の距離 14.25 cm

- (2) カメラ、ストップウォッチ、1m ものさし、タコ糸、カタパルトを以下の図のように設置する。

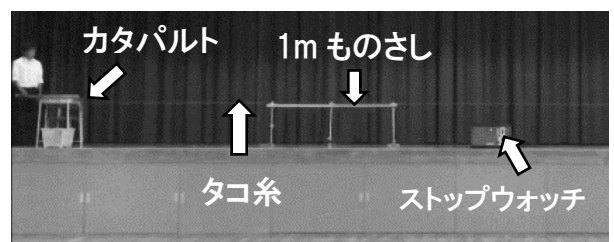


図 22 実験 5 の撮影の様子

- (3) 0.25 秒ごとにカメラで撮影する。
- (4) 撮影画像をもとに時間、移動距離、迎え角の変化を測定し記録する。

結果



図 23 *P-1D*

表 5 *P-1D* の時間, 距離, 迎え角の関係

時間 (s)	0.25	0.50	0.75	1.00
距離 (m)	2.22	2.03	1.49	0.95
速さ (m/s)	8.86	8.11	5.95	3.78
迎え角 (°)	7.5	23.5	33.0	32.0
時間 (s)	1.25	1.50	1.75	2.00
距離 (m)	0.84	0.76	1.08	1.41
速さ (m/s)	3.35	3.03	4.32	5.62
迎え角 (°)	0.0	-39.0	-47.5	-27.5

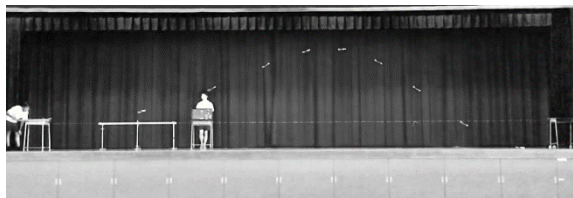


図 24 *P-5A*

表 6 *P-5A* の時間, 距離, 迎え角の関係

時間 (s)	0.25	0.50	0.75	1.00
距離 (m)	2.63	2.04	1.64	1.17
速さ (m/s)	10.52	8.16	6.56	4.68
迎え角 (°)	17.5	30.0	36.0	23.5
時間 (s)	1.25	1.50	1.75	2.00
距離 (m)	0.98	1.08	1.29	1.62
速さ (m/s)	3.92	4.32	5.16	6.48
迎え角 (°)	0.0	-23.5	-33.0	-29.0

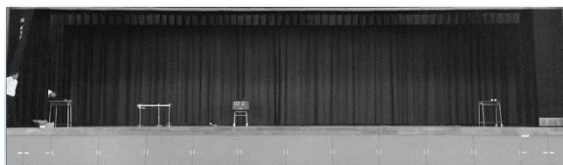


図 25 *P-5A*

表 7 *P-5B* の時間, 距離, 迎え角の関係

時間 (s)	0.25	0.50	0.75	1.00
距離 (m)	4.80	3.60	2.40	1.95
速さ (m/s)	19.2	14.4	13.4	9.60
迎え角 (°)	40.0	19.5	-16.5	-40.0

時間 (s)	1.25	1.50	1.75	2.00
距離 (m)	1.95	×	×	×
速さ (m/s)	7.80	×	×	×
迎え角 (°)	-30.5	0	0	0



図 26 *P-5C*

表 8 *P-5C* の時間, 距離, 迎え角の関係

時間 (s)	0.25	0.50	0.75	1.00
距離 (m)	2.35	4.70	×	×
速さ (m/s)	9.40	9.40	×	×
迎え角 (°)	40.0	-14.5	×	×
時間 (s)	1.25	1.50	1.75	2.00
距離 (m)	×	×	×	×
速さ (m/s)	×	×	×	×
迎え角 (°)	0	0	0	0

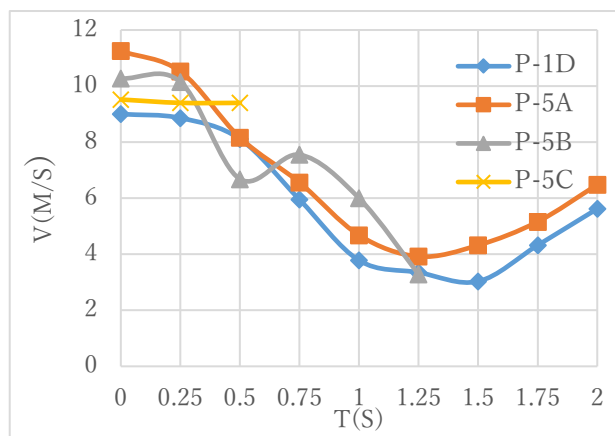


図 27 速さと時間の関係

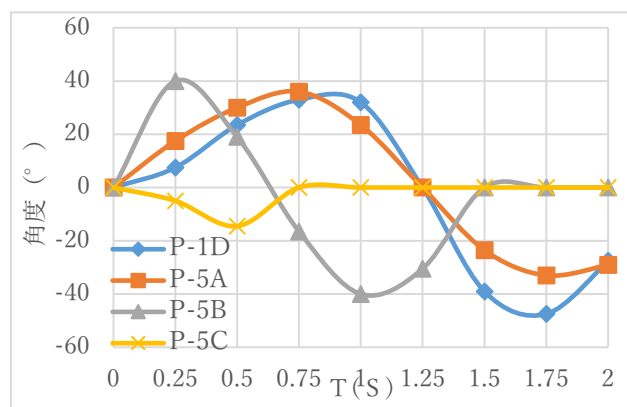


図 28 迎え角と時間の関係

表 9 水平移動距離と時間の関係

時間(s)	0.25	0.50	0.75	1.00
<i>P-1D</i> (m)	2.20	4.18	5.51	6.40
<i>P-5A</i> (m)	2.60	4.56	6.06	7.19
<i>P-5B</i> (m)	2.13	3.68	5.09	6.14
<i>P-5C</i> (m)	2.30	4.60	4.60	4.60
時間(s)	1.25	1.50	1.75	2.00
<i>P-1D</i> (m)	7.28	7.90	8.71	9.70
<i>P-5A</i> (m)	8.17	9.40	10.29	11.60
<i>P-5B</i> (m)	6.81	6.81	6.81	6.81
<i>P-5C</i> (m)	4.60	4.60	4.60	4.60

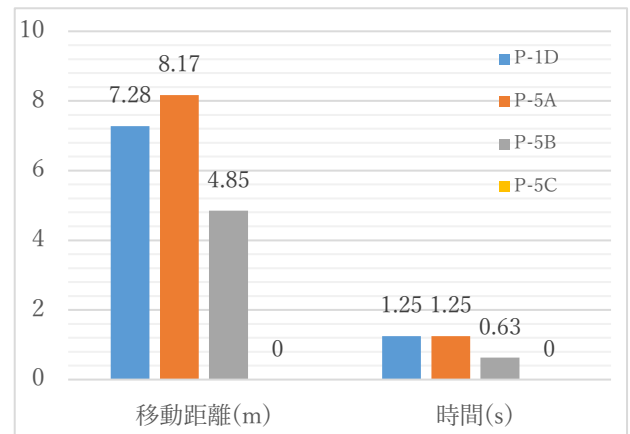


図 31 機体ごとの移動距離、時間の比較
P-5A が最も長距離飛行した。つまり、翼面積 67.2 cm² で最も長距離飛行するということが分かった。

考察

翼面積を変えても、失速点に達するまでの時間は変わらない。またこの実験では、翼面積 67.2 cm² が最も長距離飛行したので、この実験で用いた 4 つの翼面積のうち最も正確な値に近い。

7. 展望

後退角をもつ機体は、ローリングが安定したことでまっすぐに飛行するようになったが、後退角はピッチには影響しないため、後退角が飛行距離に影響した理由が不透明である。今後の研究では原因を明らかにする。

ペーパープレーンをより遠く飛ばすための要素を数値化するために、実験回数を増やしより正確な実験を行う。

8. 参考文献

- ① JAL 航空実用事典
<http://www.jal.com/ja/jiten/dict/p062>
- ② BLUE BACKS
紙ヒコーキで知る飛行の原理/小林昭夫
- ③ 航空学校に行く人のための航空留学・飛行機免許の情報サイトを目指して
http://www.cfijapan.com/study/html/to099/html-to035/017b-Lift_CL.htm
- ④ ブリタニカ国際大百科辞典
- ⑤ Touring Machine Company
<https://www.touringmachine.com/Articles/aircraft/6/>

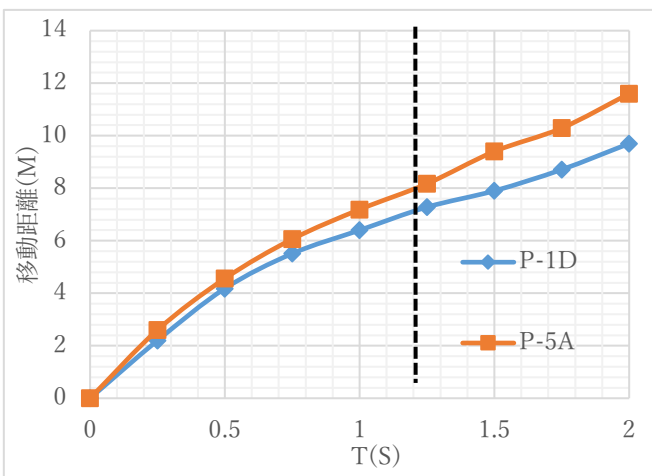


図 29 水平移動距離と時間の関係

上図において、*P-5B*、*P-5C* の 2 種の機体は、失速点が観察できなかったため、比較対象にならなかった。

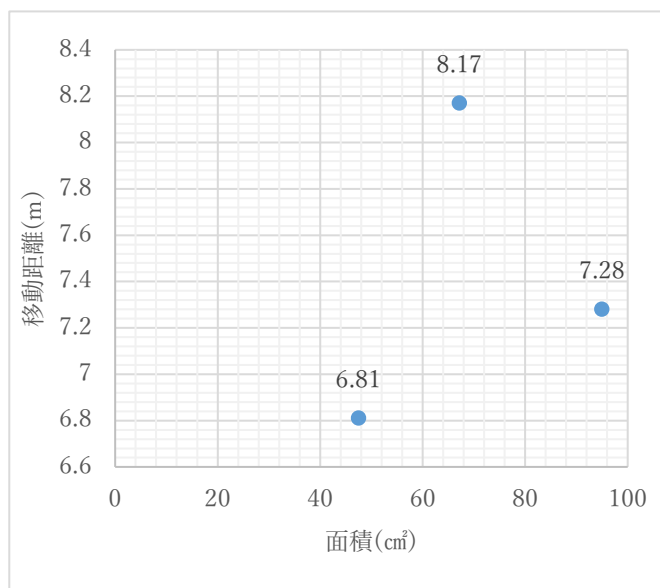


図 30 翼面積と水平移動距離の関係