

FF 模型機の研究

～飛行時間とアスペクト比の関係～

The research of Free Flight Model Airplane

～Relation of between the time to flight and Aspect ratio～

黒田 悠馬 田村 紘大 藤井 孝紀

KURODA Yuma , TAMURA Kodai , FUJII Koki

I 概要

機体の飛行時間にアスペクト比はどう影響するのかを調べるために、アスペクト比の違う機体を紙材で9種類作って飛行時間の差を調べてみると、アスペクト比6.0が最も長時間飛行することがわかった。アスペクト比6.0～9.0にかけての低下に比べて、アスペクト比9.0以降の飛行時間が急激に低下しているのは紙材の強度に問題があるためと考え、アルミ材でアスペクト比5.0と9.0の機体を作成して実験をした。結果はアスペクト比9.0の方がアスペクト比5.0よりも飛行時間が長かった。このことから主翼の強度が高ければ、アスペクト比の大きな機体の方が長時間飛行することができるということがわかった。

II 研究目的

紙飛行機の飛行距離のギネス記録に挑戦する動画をインターネットで見つけたときに、動画と同じように長く紙飛行機を飛ばすのに必要な条件は何なのかを知りたくなったからこの研究を行うことにした。

最初は折り紙だけで作るタイプの紙飛行機で実験することを試みたが、このタイプだと機体ごとに主翼の形状の差をつけることが難しいことに気づいたため、私たちの研究ではFF模型機を用いて実験することにした。

FF模型機とは、コントロール装置を持たずに自由飛行する模型飛行機のこと、飛行中多少バランスを崩しても、立て直すことができる。「FF」とは、「Free Flight」の略である。機体の重心、水平尾翼容積比などの機体安定における主要なデータは、すでに具体的な数値として検証されている。

- ・重心 前から30%
- ・水平尾翼容積比 1.5～2.0

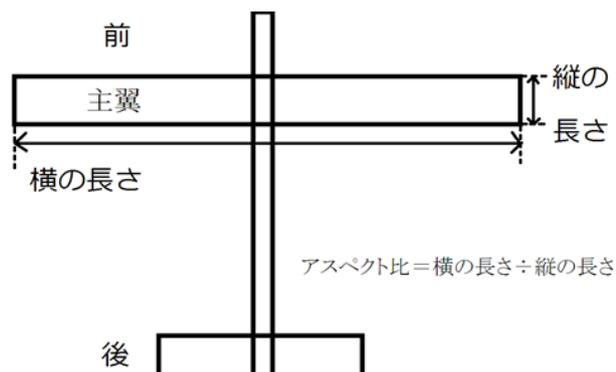
[水平尾翼容積比=(水平尾翼面積/主翼面積)×後モーメントアーム]

先行研究を調べ進めていくうちに、FF模型機のアスペクト比についての詳しい研究が行われていないことを知ったため、私たちはアスペクト比を変えることによって飛行時間にどう影響するか、ということに重点を置いて研究することにした。

アスペクト比とは、主翼の横の長さとの縦の長さの比のことであり、このアスペクト比が主翼の形状を決める。

III 研究方法

人の手で機体を飛ばすと、射出時の推力の大きさや発射角度を一定に制御することができず、正確な実験を



アスペクト比=主翼の横の長さ：主翼の縦の長さ
(=主翼の横の長さ÷主翼の縦の長さ)

例) 横16cm、縦4cmの主翼のアスペクト比

$$\rightarrow 16 \div 4 = 4$$

行えないため、レールを発射台として利用した。写真1のように、機体の先端にゴムを引っ掛けて、パチンコのようにして射出する。

私たちの製作した機体の中には、横に大きく旋回する機体もあり、飛行距離を正確に計測することが難しかったため、飛行時間を計測することにした。発射台上で機体から手を離れた瞬間に計測を始め、機体が床に着地した瞬間に計測を終了した。(床を滑走しても飛行時間に関係はないものとした)

機体の材料は主翼や尾翼などの各パーツは厚さ 0.6mm の厚紙で製作し、機体の軸はパルサ板で製作した。主翼の形状は長方形とし、主翼の面積は 64cm^2 で統一したままアスペクト比のみを変化させて実験を行う。機体の重心は基準の機体（市販品：ホワイトウイングス レーサースカイカブ 3）と同じ場所になるように製作した。(写真2)



写真1 発射台

写真2 重心の取り方

各アスペクト比の主翼の横の長さとは縦の長さは下の表のとおりである。

各アスペクト比の主翼の横の長さ、縦の長さ[単位：cm]

アスペクト比	主翼の横の長さ	主翼の縦の長さ
2.0	11.3	5.7
3.0	13.9	4.6
4.0	16.0	4.0
5.0	18.0	3.6
6.0	19.6	3.3
7.0	21.1	3.0
8.0	22.6	2.8
9.0	24.0	2.7
10.0	25.3	2.5

IV 実験

1. 予備実験 1

アスペクト比 4.0 と 6.0 をそれぞれ 3 機ずつ製作して飛ばした。それぞれ 3 回ずつ記録をとった。ゴムを伸ばす長さは 45cm で、発射角度は 15° にして飛ばした。

○予備実験 1 の結果 単位：[秒]

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
アスペクト比 6.0 1	2.32	2.38	2.03	2.24
2	2.18	2.47	2.69	2.45
3	2.35	2.47	2.62	2.48
アスペクト比 4.0 1	2.56	2.20	2.29	2.35
2	2.75	2.58	2.34	2.56
3	2.37	2.39	2.26	2.34

アスペクト比 6.0 の平均・・・2.39 秒 アスペクト比 4.0 の平均・・・2.42 秒

○予備実験 1 の考察

アスペクト比 4.0 と 6.0 では飛行時間に大きな差は見られなかった。理由として、アスペクト比の変える幅が小さかったことや、ゴムによる推力が小さかったことなどが考えられた。そこで、今度はアスペクト比の差を大きくし、さらにゴムを伸ばす長さも長くして再実験することにした。

2. 予備実験 2

アスペクト比 2.0 と 8.0 を 3 機ずつ製作して飛ばした。それぞれ 3 回ずつ記録をとった。発射角度は予備実験 1 と同じ 15°のままで、ゴムを伸ばす長さを 65cm に変更して実験をした。(予備実験 1 と同じ 45cm では飛行時間の差が見づらくなると判断したため。)

○予備実験 2 の結果 単位：[秒]

	1 回目	2 回目	3 回目	平均
アスペクト比 2.0 1	1.34	1.15	1.28	1.26
2	1.09	1.29	1.22	1.20
3	1.28	0.90	1.12	1.10
アスペクト比 8.0 1	3.91	3.76	3.78	3.82
2	0.99	1.23	—	1.11
3	2.30	2.11	1.78	2.06

アスペクト比 2.0 の平均・・・1.19 秒 アスペクト比 8.0 の平均・・・2.48 秒

(アスペクト比 8.0 の 3 回目の記録がないのは、機体が途中で壊れてしまったためである。)

○予備実験 2 から

アスペクト比 2.0 は全機 1 秒程度で軸が回転して墜落してしまい飛ばなかった。これは主翼の横の長さの違いに原因があると考えられる。

アスペクト比が小さくなると、主翼の横の長さが短くなり、その分より機体の軸が回転しやすくなる。(フィギュアスケートの選手が速く回転するために腕を縮めるのと同じイメージ) つまりアスペクト比が小さい機体ほど軸が安定した状態で飛行できないため、飛行時間が短くなることが考えられる。

逆に、アスペクト比が大きい機体は、主翼の横の長さが長くなった分、軸が回転しにくくなり、安定した飛行ができるため、飛行時間が長くなると考えられる。

3. 本実験 1

予備実験 1 と 2 ではゴムによる推力の大きさが異なっており、また、実験したアスペクト比の種類が少なかったため、条件をそろえて本実験をすることにした。

製作したアスペクト比は、2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 である。より多くの実験データを取るために、各種4機ずつ製作し、1機につき3回ずつ飛ばして記録をとった。ゴムによる推力の大きさは5.6Nで、発射角度は15°に統一して飛ばした。機体の質量は11.9gだった。

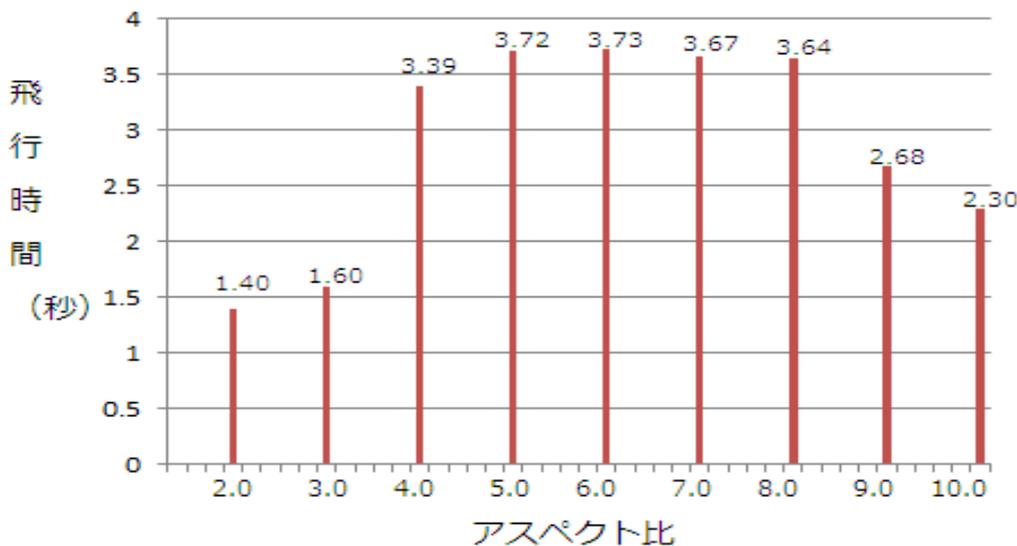
○本実験1の結果 単位[秒]

		1回目	2回目	3回目	平均
アスペクト比 2.0	1	1.84	1.51	1.38	1.58
	2	1.49	1.39	1.39	1.42
	3	1.25	1.18	1.36	1.26
	4	1.36	1.28	1.33	1.32
アスペクト比 3.0	1	2.36	1.57	1.90	1.94
	2	1.53	1.54	1.59	1.55
	3	1.33	1.50	1.33	1.39
	4	1.56	1.50	1.55	1.54
アスペクト比 4.0	1	3.60	3.22	3.05	3.29
	2	2.19	3.87	2.89	2.98
	3	3.37	3.29	3.23	3.30
	4	4.07	4.41	3.23	3.90
アスペクト比 5.0	1	3.38	3.66	3.88	3.64
	2	4.50	3.53	4.76	4.26
	3	3.48	3.31	2.96	3.25
	4	0.68	0.86	1.12	0.89
アスペクト比 6.0	1	3.25	3.33	3.23	3.27
	2	4.44	3.27	3.53	3.75
	3	4.09	4.09	3.60	3.93
	4	3.89	4.05	3.93	3.96
アスペクト比 7.0	1	4.28	3.75	3.52	3.85
	2	3.85	3.18	3.65	3.56
	3	3.99	4.05	3.84	3.96
	4	3.11	3.10	3.77	3.33
アスペクト比 8.0	1	3.35	3.50	3.47	3.44
	2	3.65	3.57	3.53	3.58
	3	3.91	3.76	3.78	3.82
	4	3.82	3.90	3.49	3.74
アスペクト比 9.0	1	2.38	2.88	2.80	2.69
	2	2.91	3.47	3.12	3.17
	3	1.97	1.97	2.15	2.03
	4	1.80	3.28	3.39	2.82

アスペクト比 10.0	1	2.55	3.29	2.48	2.77
	2	0.79	1.16	1.31	1.09
	3	2.73	2.26	2.49	2.49
	4	2.95	2.74	---	2.85

アスペクト比 5.0 の 4 機目とアスペクト比 10.0 の 2 機目は外れ値として平均値を求める計算に入れていない。はずれ値が出た原因は、機体を飛ばしてみてもはじめて気づくことができるほどの小さな複数の不備（重心のズレやパーツのサイズの相違など）があったことが原因であると考えられる。アスペクト比 10.0 の 4 機目の 3 回目のデータがないのは、途中で機体が破損してしまったためである。

各アスペクト比の平均値を用いて、グラフ 1 を作成した。



グラフ 1 アスペクト比と飛行時間の関係

○本実験 1 の考察

グラフ 1 からアスペクト比 2.0、3.0 よりアスペクト比 4.0～8.0 の機体の飛行時間が長くなっており、これよりアスペクト比の大きな機体は飛行時間が短くなっていることが分かる。

アスペクト比 2.0、3.0 よりアスペクト比 4.0～8.0 の機体の飛行時間が長くなった原因は、主翼の形状による揚力の発生の違いにあると考えられる。通常は、図 1 のように翼の上の面では圧力が低く、翼の下の面では圧力が高くなっていることによって生まれる翼の上下の圧力の差によって揚力が発生する。しかし、図 2、3 のように、翼端では翼の下の面にある空気が翼の上側の面に回りこもうとする気流（翼端渦）が発生する。このことで翼の上下の圧力差が小さくなり揚力が生まれなくなる。このことから、写真 3、4 のように、アスペクト比が大きい機体の方が翼端の面積が小さくなり、揚力の発生しない無駄な面積が少なくなる。その結果、より大きな揚力を発生させることができる。つまりアスペクト比が大きい機体ほどよく飛ぶと考えられる。一般の飛行機の主翼の形状についても、図 4 のように主翼先端に近づくにつれ、面積が小さくなっている。これは揚力が生まれにくい無駄な部分が少ない効率のよい形状であるといえる。

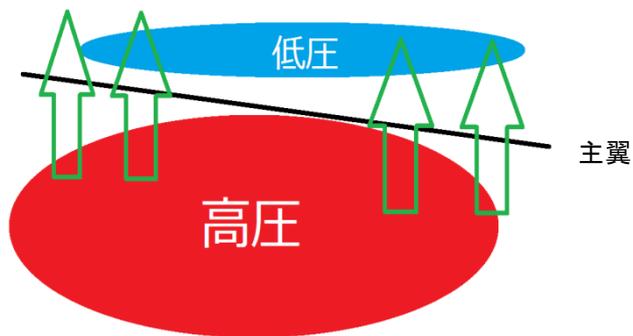


図1 飛行中の機体の主翼の様子（横から見た図。矢印は揚力を表す。）

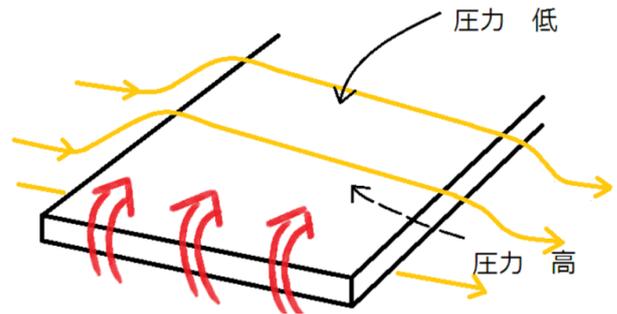


図2 翼端渦発生時の図

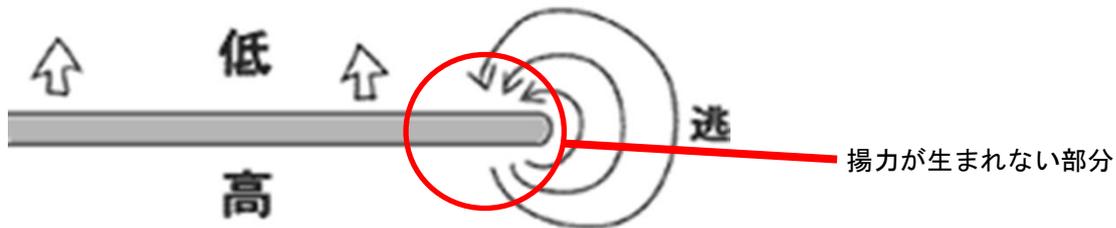


図3 主翼を後ろから見た図

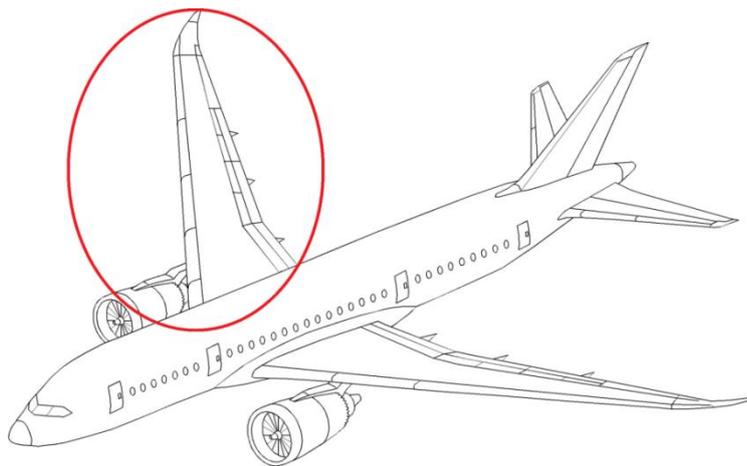


図4 一般の飛行機の図

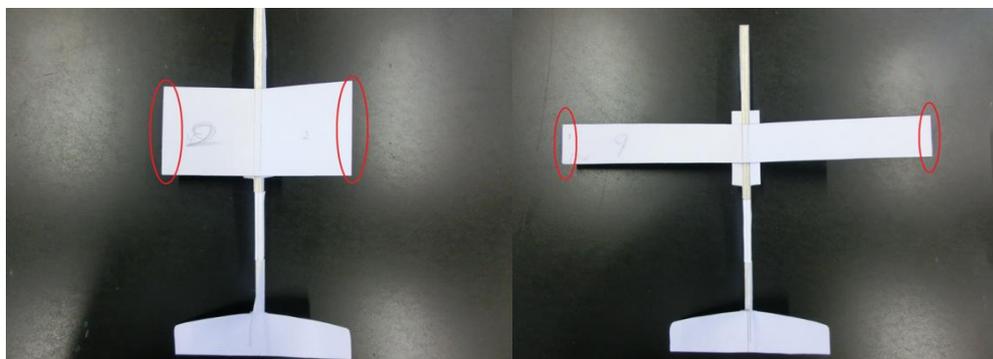


写真3 アスペクト比 2.0

写真4 アスペクト比 9.0

アスペクト比 9.0 以上の機体の飛行時間が短くなった原因は、写真 5、6 のようにアスペクト比 5.0 と違って、アスペクト比 9.0 の主翼の先端が自重に耐えられずにしなっていることが飛行時間に影響するかどうかを調べるために本実験 2 を行う。(写真 5、6 はそれぞれ機体の後方から撮影したもので、赤い直線は主翼の先端がしなっていることを視覚的に見られるようにするためのものである。)

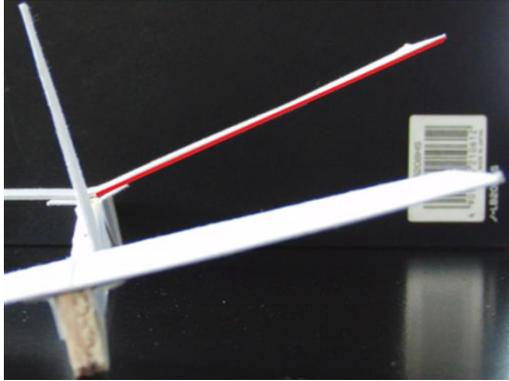


写真 5 アスペクト比 5.0

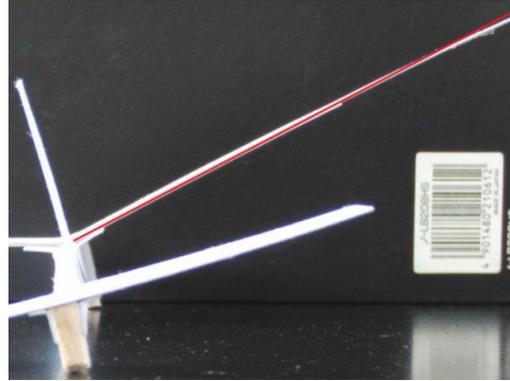


写真 6 アスペクト比 9.0

4. 本実験 2

機体の軸はこれまでと同じバルサ板を用い、主翼などの各パーツは厚さ 0.6mm のアルミ材を用いてアスペクト比 5.0 と 9.0 の機体を製作した。機体の質量は 30.3g だった。ゴムによる推力の大きさは 11N で、発射角度は 15° で飛ばした。(機体の質量が増加した分、より大きな推力が必要になると予想した。)

写真 7、写真 8 から、アスペクト比 5.0 だけでなく、アスペクト比 9.0 でも主翼の先端にゆがみは見られない。

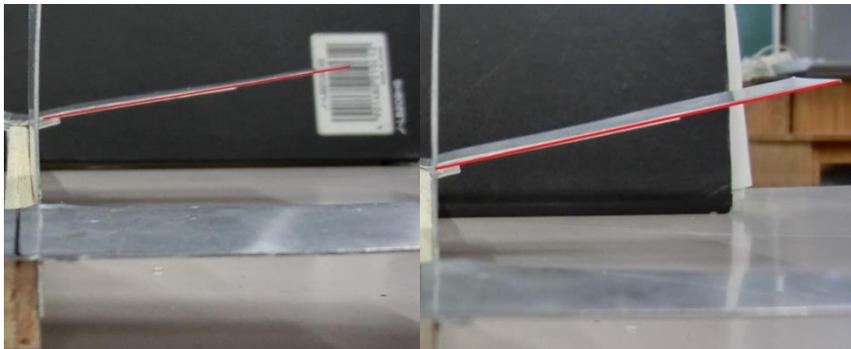


写真 7 アスペクト比 5.0

写真 8 アスペクト比 9.0

○本実験 2 の結果

- ・アスペクト比 5.0・・・1.90 秒 (紙材の場合 3.72 秒)
- ・アスペクト比 9.0・・・2.48 秒 (紙材の場合 2.68 秒)

紙材のときはアスペクト比 5.0 の方がアスペクト比 9.0 よりもよく飛んでいた。しかし、アルミ材ではアスペクト比 9.0 の方がアスペクト比 5.0 よりもよく飛んでいる。

アルミ材の機体の質量は紙材の機体の 3 倍程度あり、アルミ材の機体が紙材のときほど飛んでいないのは推力がまだまだ足りなかったことが原因である。

○本実験 2 の考察

紙より強度が強いアルミ材では、アスペクト比 9.0 のほうがアスペクト比 5.0 よりよく飛んだことから、主翼の強度が十分な場合、アスペクト比が大きいほうがよく飛ぶということが考えられる。

主翼の材質によって長時間飛行させることができるアスペクト比に上限があり、長時間飛行させるのに最適なアスペクト比は、主翼の強度によって異なることが考えられる。

V まとめ

主翼のアスペクト比が大きいほど、揚力を無駄なく発生させることができるため、長時間飛行させることができるということがわかった。

主翼の強度が弱いと、アスペクト比を大きくしたとき主翼の先端がしなる。そのため、飛行中に機体と同じ形状を保てなくなり、飛行時間が短くなることが考えられる。

以上のことから、機体が長時間飛行するために最適なアスペクト比は主翼の強度によって変化し、今回用いた紙材では、アスペクト比 6.0 が最適であるということがわかる。

VI 今後の課題

航空力学を学んで翼端渦などの現象の理解を深める。風洞実験を行って主翼の周りの空気の動きを観察し、今回の私たちの実験をさらに発展して考察する。

手作業で機体を製作したことで実験データをうまく取れなかったことが何度もあったため、3D プリンターといった機械を利用して正確に機体を製作して実験を行う。

アルミ材にも長時間飛行するために最適なアスペクト比が存在することが考えられる。同様に紙材とアルミ材以外の材質にも、それぞれに最適なアスペクト比が存在すると考えられるので、上記のことを行った上で本実験 1 と同様の実験を様々な材質で行うことを今後の課題とする。

VII 参考文献

- ・高性能紙飛行機: その設計・製作・飛行技術のすべて 二宮 康明(著)
- ・紙ヒコーキで知る飛行の原理—身近に学ぶ航空力学 小林 昭夫(著)

VIII 謝辞

御指導いただいた川西陽子先生をはじめとした理科の先生方と、実験場所として学校の体育館を提供してくださった体育科の先生方に厚く御礼申し上げます。