

FF機の主翼のディンプルの効果

The Effect of Dimple Pattern on Free Flight Aircraft

大藤 桜子 眞砂 亮太 佐藤 理湖 岸 達也
Sakurako Oto, Ryota Masago, Riko Sato, Tatsuya Kishi

1 要旨・概要

ディンプルとは、物体の表面に施された窪みのことであり、物体が飛行するときに空気抵抗を軽減させる効果をもつ。例えばゴルフボールの窪みがその類いである。

我々は、ディンプルが飛行機の主翼にも応用できないかと考え、コントロール装置を持たずに自由飛行する模型飛行機であるフリーフライト機〔以下 FF 機とする〕の主翼にディンプルをつけ、飛行実験を行った。その結果、飛行時間が増加することが分かった。

2 研究目的

本校の先輩の黒田ら(2016)の研究はケント紙を用いた FF 機の主翼のアスペクト比と飛行時間の関係について調べていた。この研究では主翼の面積を固定し細長い形状にする、いわゆるアスペクト比を大きくすると飛行時間が増加すると結論付けている。通常、飛行機は揚力を力として飛行し、この揚力は飛行時に主翼の上面と下面の圧力に差があるために発生する。圧力は主翼の上面よりも下面のほうが大きい、翼の先端は翼の下面から上面に向かう気流(翼端渦)が発生すると圧力の差が小さくなり揚力が小さくなる。その結果、飛行時間が減少してしまう。したがって翼端渦が発生する面積を小さくすることで飛行時間を増加させることができるということであった。しかしアスペクト比が大きくなりすぎると、ケント紙では主翼の形状が維持できなくなってしまいそれが抵抗となり飛行時間が減少するため主翼の強度が課題として挙げられていた。

初め我々は機体の主翼の強度を上げるために素材をアルミ板にしてアスペクト比と飛行時間の関係について調べる実験を行っていた。しかしアルミ板にすることで機体の重量が大きくなりすぎてしまい、機体は滑空せず飛行時の軌道は斜方投射の形を描いていた。

次に主翼の素材を変えるのではなく、主翼にディンプルを施すことでその効果を応用できるのではないかと考えた。ディンプルは鈍頭物体であるゴルフボールに見られ、空気抵抗を軽減する効果があることが知られている。そこで流線型物体の代表格である飛行機にも、ディンプルを施し物体表面の空気の流れを変えることで空気抵抗を軽減させる効果があるのではないかと考えた。従ってディンプルを施した機体を用いて飛行時間を測定する実験を行うことにした。

よって本研究の目的は、主翼にディンプルを用いることで飛行時間が長くなるのかを確かめることである。

3 研究方法

(実験機材)

- ・小型のカッティングマシン：主翼にディンプルを開けるのに使用
「Silhouette CAMEO」
パソコンからマシンにカットデザインを送信でき、作成したデザイン通りに紙やフィルムをカットすることができる。
株式会社グラフテックが販売している。
- ・送風機：実験 3 の風洞実験に使用
「ミナトポータブル送排風機 ダクトファン MDF - 251A」(フレキシブルダクト付属)
室内・地下室・坑道・溶接等を行う場所において、付属のフレキシブルダクトと接続して使用することで、強制排気を行うことができる。
株式会社ミナト電機工業が販売している。
- ・スモークマシン：実験 3 の風洞実験に使用
「Z - 400 小型スモークマシーン」
液体を高温で気化させてスモークにすることができる。
有限会社プライムシステムが販売している。
- ・風速センサ：実験 3 の風洞実験に使用
「気象・風速センサ PS - 2174」
風速以外にも気温、相対湿度、気圧などを測定することができる。
株式会社島津理化が販売している。

〈作成した機体について〉

株式会社あおぞらが企画・発売している、「ホワイトウイングス レーサースカイカブ 3」(設計：二宮康明氏)の型紙を参考に型を作った。既製品には部品が9つあるが、我々の研究では主翼、水平尾翼、垂直尾翼の3つの部品を機体に用いた。

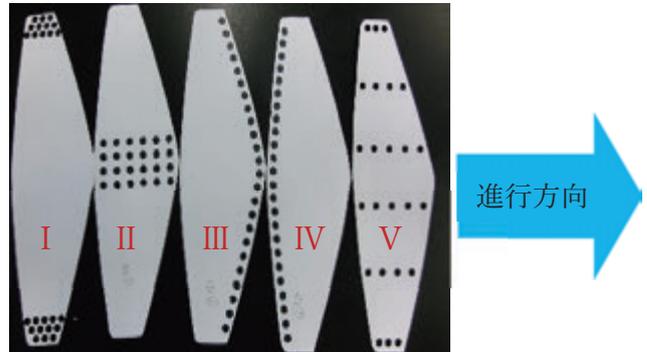
紙の厚さが異なる4種類のケント紙(157, 210, 233, 260g/m²)を主翼、水平・垂直尾翼に用いる。

またディンプルとする穴の大きさは直径4mm、数は24個に統一した。

作成した機体の主翼の種類は以下の通りである。

(図①)

- I 翼端 : 翼端渦の軽減を図るため
- II 翼中央 : I 翼端との比較
- III 翼前部 : 空を切るときの翼の抵抗を減らすため
- IV 翼後部 : III 翼前部との比較
- V 翼縦 : 全面にディンプルを施すことは不可能だったため



図① ディンプルのパターン

〈機体作成における準備物〉

ケント紙(4種類: 157, 210, 233, 260g/m²), バルサ材(厚さ2mm), カッティングマシン, ダブルクリップ, ボンド, テープのり, はさみ, カッター

〈機体の作成方法〉

①ケント紙に主翼、水平尾翼、垂直尾翼を書き写し、切り取り部品を作る。(図②)

1つの機体に主翼2枚、水平・垂直尾翼は1枚ずつ用意する。

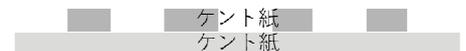
2枚の主翼をテープのりではり合わせる。またディンプル付きの機体に用いる主翼の1枚はカッティングマシンで穴をあけておき、穴を開けていない主翼と貼り合わせてディンプルを作成した。(図③)

②バルサ材をカッターで切り取り機体の軸を作成する。

③①で作成した翼を軸に貼り付ける。この時、ダブルクリップで軸を挟み、主翼と水平尾翼は軸と水平に、垂直尾翼は軸と垂直になるように固定してボンドを乾かす。



図② FF機の部品



図③ ディンプル付きの主翼

〈機体〉

全長: 239mm 翼幅: 180mm 全高: 55mm

〈機体の重心〉

紙の厚さが233g/m²、260g/m²のディンプル無し機体と翼後部の機体の重心の位置を比較したところ重心の位置は同じであった。またディンプルをつけたことにより変化した機体の重量は総重量の1.3%未満であった。ゆえに機体の重量によって飛行時間は変化しないといえる。

予備実験：本実験で使用する機体の製作に用いる紙の厚さと機体を発射させる角度を選定する。

〈準備物〉

斜面(図④)、分度器、ばねばかり、輪ゴム、ストップウォッチ、カメラ、ラジオペンチ

〈実験設備〉

翼に用いるケント紙の厚さは157, 210, 233, 260g/m²の4種類で1種類の用紙につき3機ずつ、計12機のFF機を実験に使用する。

発射角度を10°, 20°, 30°, 40°に変化させ、各機体5回ずつ飛行時間の計測を行った。また、飛行時間にばらつきがみられるものは適宜試行回数を増やした。



図④ 発射台

〈方法〉

- ①斜面の先端に輪ゴムを固定する。
 - ②ゴムを引っ張り、ばねばかりが 5.9N を示す位置に印をつける。
 - ③FF 機に輪ゴムを引っかけて、斜面につけた印の部分まで軸の後ろ側をラジオペンチで引っ張り、静かに機体を発射させる。
 - ④機体を静かに発射させた時から機体が着地するまでの時間をストップウォッチで測定する。
 - ⑤試行が終わるまで①～④を繰り返す。
- *カメラを 2 台設置し、発射台の真横からと発射台の前側から機体の飛行している様子を記録する。

〈結果〉

発射角度 10° の時は紙の厚さ 233g/m² の機体のみ飛行時間のばらつきが小さく、発射角度 20°、30° の時は紙の厚さ 233g/m²、260g/m² の機体で飛行時間のばらつきが小さかった。(グラフ①～④参照)

〈考察〉

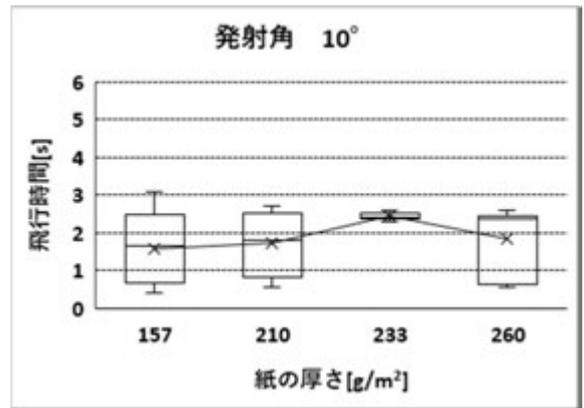
紙の厚さ 157g/m²、210g/m² の機体は用いた紙の厚さが薄すぎるために、主翼が機体を発射させたときの揚力の大きさに耐えられず形状が変化していた。そのためどの発射角度においても飛行は安定せず、飛行時間のばらつきが大きくなった。(図⑤)

一方、紙の厚さ 233g/m²、260g/m² の機体は 157g/m²、210g/m² に比べて紙の厚さが厚いため発射時に主翼の形状が変化することなく飛行を始めることができた。そのため発射角度 20°、30°、40° のときの飛行時間のばらつきが小さかったと考えられる。しかし、発射角度 10° のときは紙の厚さ 260g/m² のみ 157g/m²、210g/m² と同様に飛行時間のばらつきが大きくなっている。これは、ゴムを手動で引きのばしているため、その際に向き及び弾性力の微妙な誤差が生じたことが原因であると考えられる。

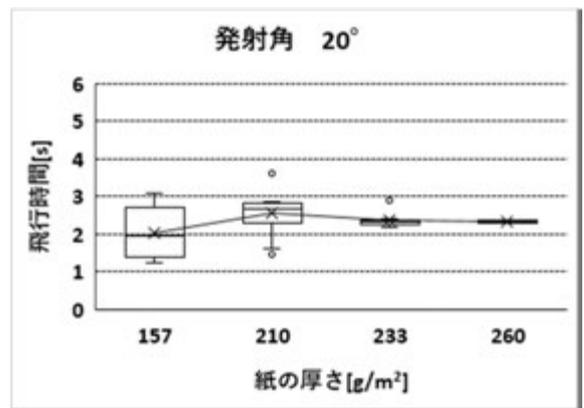
これらの理由により、本実験では紙の厚さ 233g/m²、260g/m² を用いて機体を作成した。発射角度は 20°、30°、40° で実験を行う予定だったが、新型コロナウイルスの影響で実験を行うことのできる期間が短くなり、発射角度 20° のみ飛行時間を測定した。



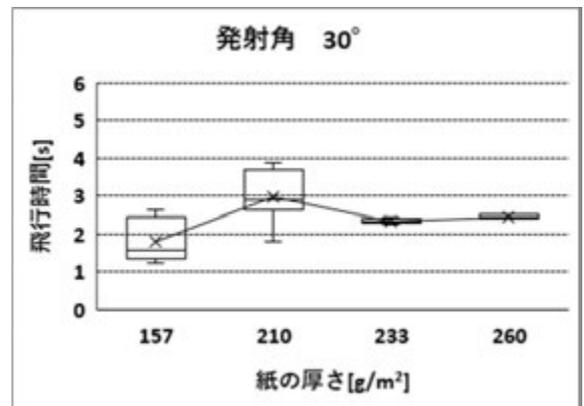
図⑤ 発射時の主翼の変形の様子



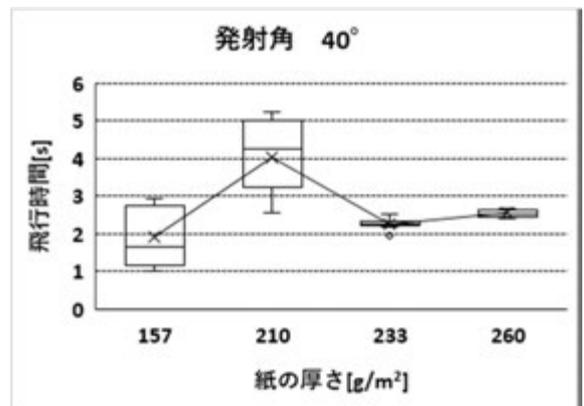
グラフ① 発射角 10° の紙の厚さと飛行時



グラフ② 発射角 20° の紙の厚さと飛行時



グラフ③ 発射角 30° の紙の厚さと飛行時



グラフ④ 発射角 40° の紙の厚さと飛行時

本実験：主翼にディンプルをつけた機体の飛行時間を測定する。

〈準備物〉

斜面、分度器、ばねばかり、輪ゴム、ストップウォッチ、カメラ、ラジオペンチ

〈実験設備〉

翼に用いるケント紙は 233 g/m²、260 g/m²の 2 種類。主翼には翼端、翼中央、翼前部、翼後部、翼縦の 5 パターンのディンプルを施し、機体 1 パターンにつき 4 機ずつ、計機の FF 機を実験に使用する。

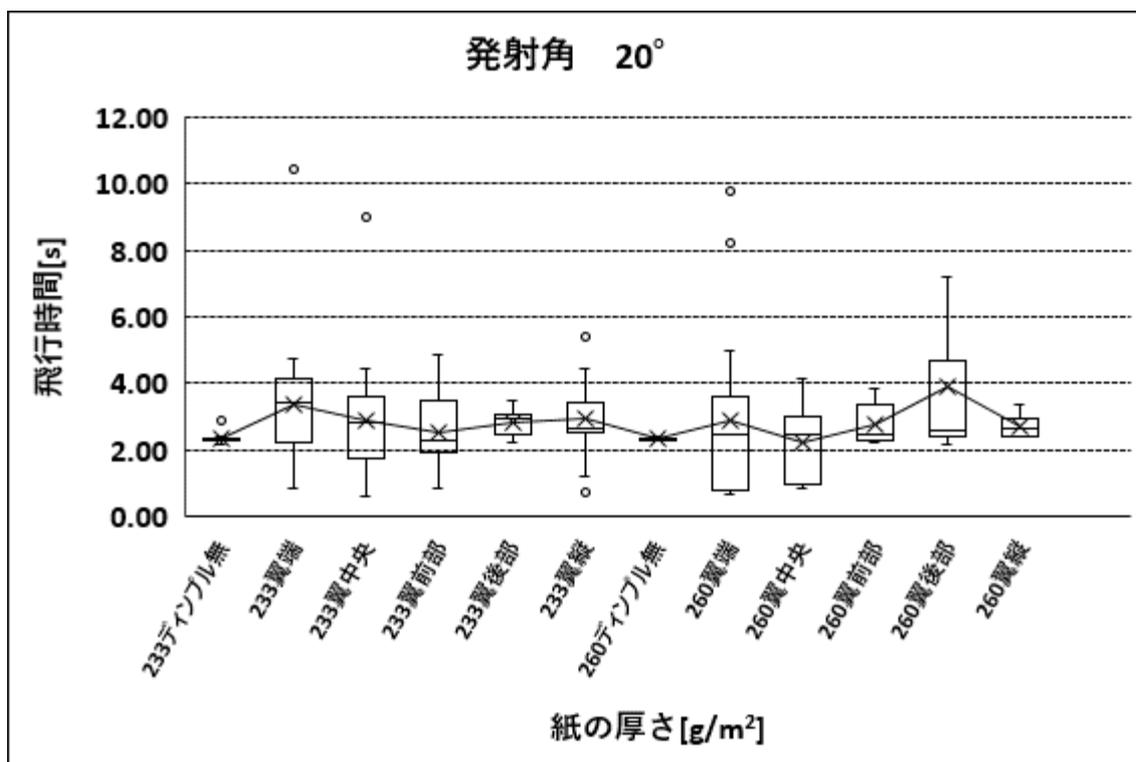
発射角度は 20°に設定し、各機体 5 回ずつ飛行時間の計測を行った。また、飛行時間にばらつきがみられるものは適宜試行回数を増やした。

〈方法〉

予備実験と同様に行った。

4 結果

紙の厚さ 260g/m²翼中央の機体の平均飛行時間のみ、ディンプルなしの紙の厚さ 260g/m²よりも平均飛行時間が減少していた。その他の機体ではすべてのパターンにおいて平均飛行時間がディンプルなしの機体よりも増加していた。特に紙の厚さ 233g/m²、260g/m²の機体では翼端・翼後部のパターンにおいて平均飛行時間の増加が顕著であった。翼端・翼後部の機体の平均飛行時間をディンプルなしの機体の平均飛行時間と比べると、233g/m²翼端は約 50%，233g/m²翼後部は約 40%，260g/m²翼端は約 20%，260 g/m²は約 60%増加していた。(グラフ⑤)



グラフ⑤ 発射角 20° のディンプルのパターンと飛行時間

5 考察

①翼端

ディンプルによって摩擦抵抗が大きくなった翼端部で下向きの動圧が生じ、機体周りの主翼におけるモーメントが釣りあった。

②翼後部

翼の後方にディンプルをつけたことで主翼の後方の重量が軽くなり、本来後ろにあった機体の重心が前にずれた。それによって機体が安定して飛行できるようになり平均飛行時間が増加した。

6 結論（課題）

以上の実験より、ディンプルが付いていないものよりもディンプルを翼端・翼後部につけたものが長い時間飛行することが分かった。しかしその原因は明らかではないため、風洞を用いて機体の主翼付近を流れる空気の流れを可視化した。

〈準備物〉

風洞装置、スモークマシン、送風機、抵抗器、カメラ、照明、主翼、ネオジム磁石、設置台（木）、台（高さ調節）、風速センサ、セロハンテープ

〈方法〉

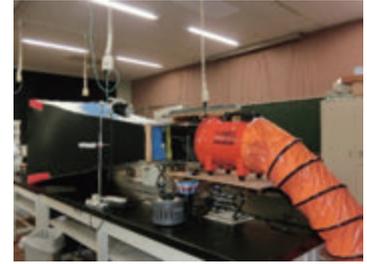
- ①風洞、送風機、スモークマシン、カメラ、照明、を設置する。（図⑥）
*実験時のFF機の初速に近い送風機で送る風の速度は5.0m/sに設定した。
- ②空気の流れを可視化したい主翼を図のように設置する。（図⑦）
- ③カメラで録画を開始し、スモークマシンで風洞内に煙を流す。

〈結果〉

主翼を通過した後のスモークの最大幅は以下の通りである。

- 0 ディンプル無し：4.2 cm
- I 翼端：2.0 cm
- IV 翼後部：3.6 cm

主翼を通過した後のスモークの最大幅が、ディンプル無し>翼後部>翼端部の順に小さくなった。また、風洞内部では空気の剥離が見られなかった。（図⑧～図⑩）



図⑥ 風洞装置



図⑦ 主翼の設置の様子



図⑧ I 翼端

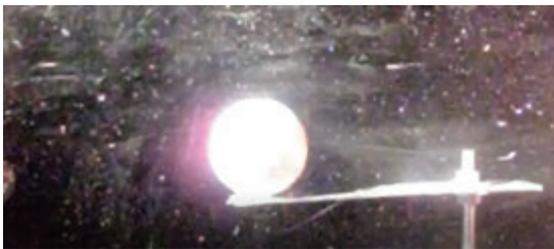


図⑨ IV 翼後部



図⑩ ディンプルなし

また、球体でも同様の実験を行った。ディンプルのあるゴルフボールとディンプルのないピンポン球では、球体を通じた後のスモークの最大幅が、ピンポン球>ゴルフボールの順に小さくなり、FF機の主翼と同様の結果が得られた（図⑪、⑫）。



図⑪ ゴルフボール



図⑫ ピンポン玉

〈考察〉

ディンプルによって、FF機の飛行時間に変化があり、ゴルフボールと同様の効果があるということが風洞実験で確認できたが、その効果の影響の程度までは言及することはできなかった。

摩擦抵抗が大きくなった翼端部で下向きの動圧が生じ、機体周りの主翼におけるモーメントが足りなかったと考えた。よって、翼端部にディンプルを施した機体において平均飛行時間が向上した。しかし、翼後部において飛行時間が向上した理由については分からなかった。

今後の課題としては以下の3つが挙げられる。

- ・機体によって個体差が大きいため、機体の数を増やし、試行回数、データ数を増やす必要がある。

- ・ディンプルの数を 24 個に固定した実験しか行っていないので、ディンプルの数を増やした場合の実験も行う必要がある。
- ・ディンプルの形を円形以外に変えて実験を行う。

7 参考文献

- ・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
- ・水平軸回転飛行物体の飛行性能の向上に関する研究
―風力発電機への応用を目指して― 福岡県立香住丘高校物理部
- ・FF 模型機の研究～飛行時間とアスペクト比の関係～
黒田悠馬 田村紘大 藤井孝紀 課題研究論文集 Vol.4
- ・FF 機の主翼の形状による飛行時間の違い 村上裕一 保田幸輝
課題研究論文集 Vol.6
- ・基礎から学ぶ流体力学 飯田明由 小川隆申 武居昌宏

8 謝辞

この研究にあたって熱心に指導して下さった佐藤哲也先生をはじめとした理科の先生方，実験場所として体育館を提供して下さった体育科の先生方，ならびに風洞装置を貸して下さったリアウイング班の皆様がこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。