

紙飛行機のエレベーターの折り曲げによる飛行の変化

Paper Planes' Flights Depend on their Elevators' Condition

千葉県立船橋高等学校理数科 3 年

堂脇大志 田中瑞希

はじめに

同じ紙飛行機を複数機作ると、それぞれの微妙な折れ曲がりによる差異が出てくる。これが結果として、飛行距離や滞空時間、軌道といった飛行に大きな影響をもたらす。本研究では機体の後方部分を意図的に曲げて、一見同じように見える機体でどこまで・どのように飛行の仕方が変わるのかを研究した。

目的

紙飛行機の後方部分（以下エレベーターⁱと呼ぶ）を変化させたときの飛行の変化を調べる。また、その結果を応用することによって意図的な折り曲げによって飛行距離、滞空時間を伸ばすことができるかを検討する。

方法

紙飛行機については、使用する発射機との相性・作成手順などを総合的に判断し、図 1 のような形のものを用了。なお紙については飛行中の変形を考慮して厚紙（コクヨ KJ-M15A4-50）とした。精密な実験にするため、紙飛行機の作成過程はすべてマニュアル化し、万力を利用するなど人の手が直接触れることのないようにした。

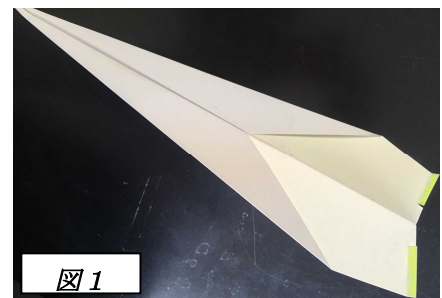


図 1

変化させるのはエレベーターの折り曲げる角度・深さ・幅である（図 2 参照）。エレベーターの角度については、金属板 2 枚を用いてはさみ、固定する手法をとった。エレベーターは飛行中に空気抵抗により力を受け、変形することが考えられる。当初は少量のボンドⁱⁱを用いて固定したが、その後の予備実験において、必要ないと判断したため、本研究にある実験においては使用していない。

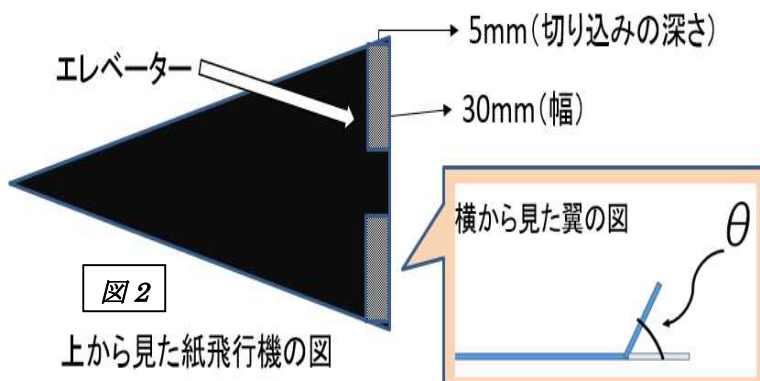


図 2

上から見た紙飛行機の図

実験では、自作の発射機（図 3）を用いて紙飛行機を発射した。発射機は、実験の信頼性を高めるため、直流電源で駆動するモーターを使用した。これによって速度を同じ条件にして実験ができる。なお本研究ではすべての実験で発射角 15° ・速さ

ⁱ 実際の旅客機などでは水平尾翼部分に制御可能な昇降舵（エレベーター）があり、紙飛行機では一枚翼であるが、相対的な位置・働きが似ていたため、このように呼ぶこととした。

ⁱⁱ 用いたボンドの量は極めて小さく、それぞれの紙の質量の誤差を考慮すると無視できるものとした。

10m/sⁱⁱⁱに固定している。

測定したのは飛距離（メジャーを使用）と滞空時間（レコーダーの録音からの波形分析で得る）であり、実験 1 では動画解析をして軌道も調べた。

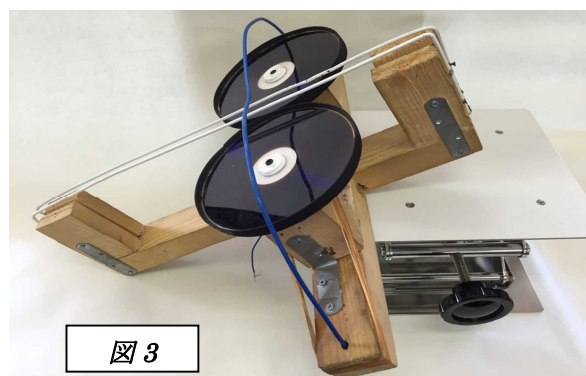


図 3

実験 1

結果

エレベーターの折り曲げ角(θ)と飛行の大まかな関係を調べた。折り曲げ角を -90° から 90° までの 30° ごとに設定し、7 種類の紙飛行機を作成した。1 条件当たり 6 回実験を行った（同じ紙飛行機を 2 機作成し、それぞれ 3 回飛ばした）。

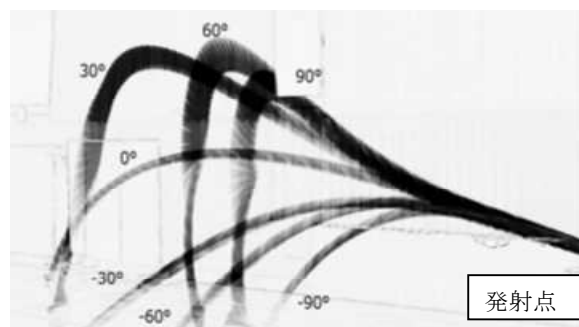


図 4 それぞれの条件における代表的な軌道

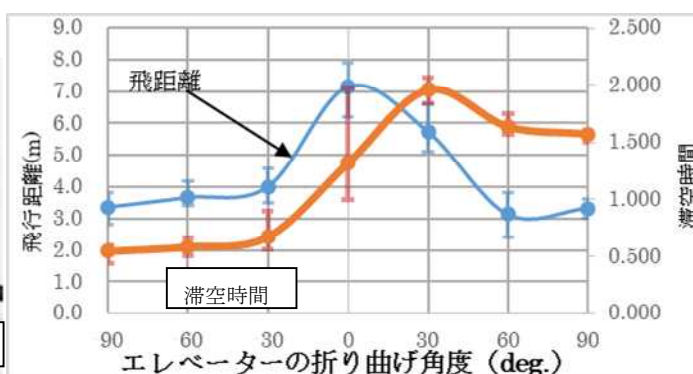


図 5 エレベーターの折り曲げ角と飛距離・滞空時間の関係

- $\theta > 0^\circ$ の機体は、機首が上を向き高く飛んだ。
- $\theta < 0^\circ$ の機体は、すぐに機首が下を向き着陸した。
- 全ての機体において軌道が途中まで一緒である。

考察

飛行中、エレベーターには空気があたり、その反動で鉛直方向の力が発生する（図 6）。この力により紙飛行機の回転運動が起こる。

$\theta > 0^\circ$ の機体は、鉛直下向きの力が発生する為、機首が上を向く回転運動をし、高度が上昇する。しかし、それに伴う高度の上昇・減速によって飛距離は伸びなかった。

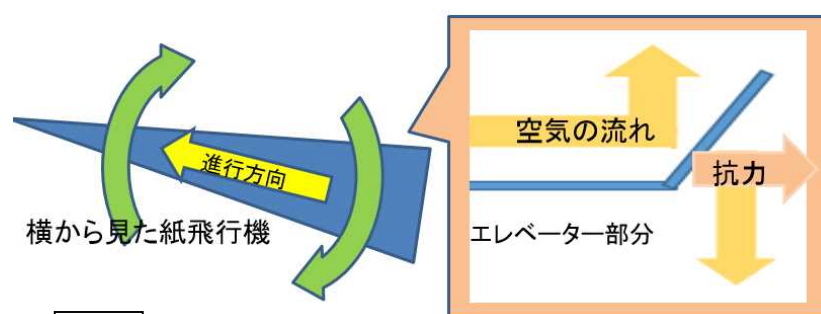


図 6

$\theta < 0^\circ$ の機体は、鉛直上向きの力が発生する為、機首が下を向く回転運動をし、そのまま着地したため飛距離が伸びなかった。

滞空時間は高度が上昇する機体で伸びる傾向があったが、 θ が大きくなるほどエレ

ⁱⁱⁱ 予備実験で人間が紙飛行機を発射するときの速度を測り、それに近い値であるため採用した。

ベーターが受ける空気抵抗が大きくなるため、ある程度 θ が大きくなるとそれ以上滞空時間が伸びることはなかった。

実験 2

実験 1 の結果から飛距離と滞空時間が最大となる機体条件を調べる為、折り曲げ角を $0^\circ \sim 45^\circ$ までの 15° おきに細分化して実験を行った。また、エレベーターの深さも飛行を変化させる要因となるため、5, 10, 15mm と変えた。1 条件あたり 9 回 (3 機を 3 回ずつ飛ばす) 行った。

本実験ではエレベーターの深さと角度の 2 条件を同時に変化させており、エレベーターがどれだけ折れ曲がっているかという指標が必要となる。そこでこれを正弦面積とし、以下のように定義する。

$$\text{正弦面積} = (\text{エレベーターの幅}) \times (\text{深さ}) \times (\text{折り曲げ角の正弦})$$

これは正面から見た見かけのエレベーターの面積を意味する。

結果

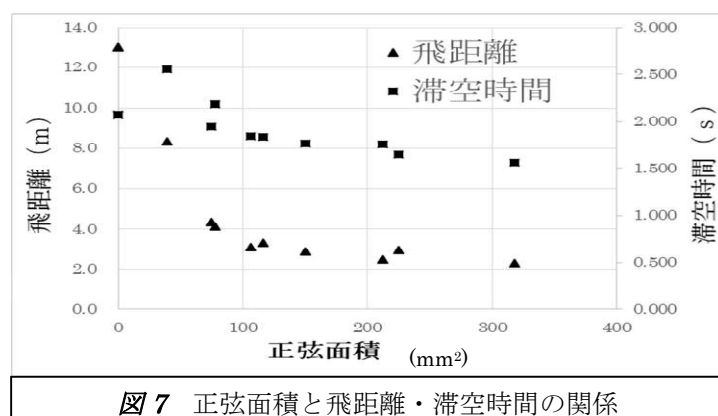


図 7 正弦面積と飛距離・滞空時間の関係

正弦面積と飛距離・滞空時間の関係は次のようになった。

このグラフから正弦面積が比較的小さい範囲において滞空時間や飛距離の変化が激しいことがわかる。

実験 3

実験 2 とそれに伴う予備実験の結果から、本実験においては正弦面積が同じであれば、それらの機体は同じような飛び方をする事が確かめられた。より詳細な結果を得るには、正弦面積を小さくする必要があるが、角度をこれ以上小さくするのは実用上不可能である。そこで今回は角度を最小実用角の 15° に固定し、深さを 2, 4, 6, 8mm, 幅を 10, 20, 30mm と変化させた。

結果

実験環境は実験 2 と統一し、得られたデータと図 7 を統合した (図 8, 9)。

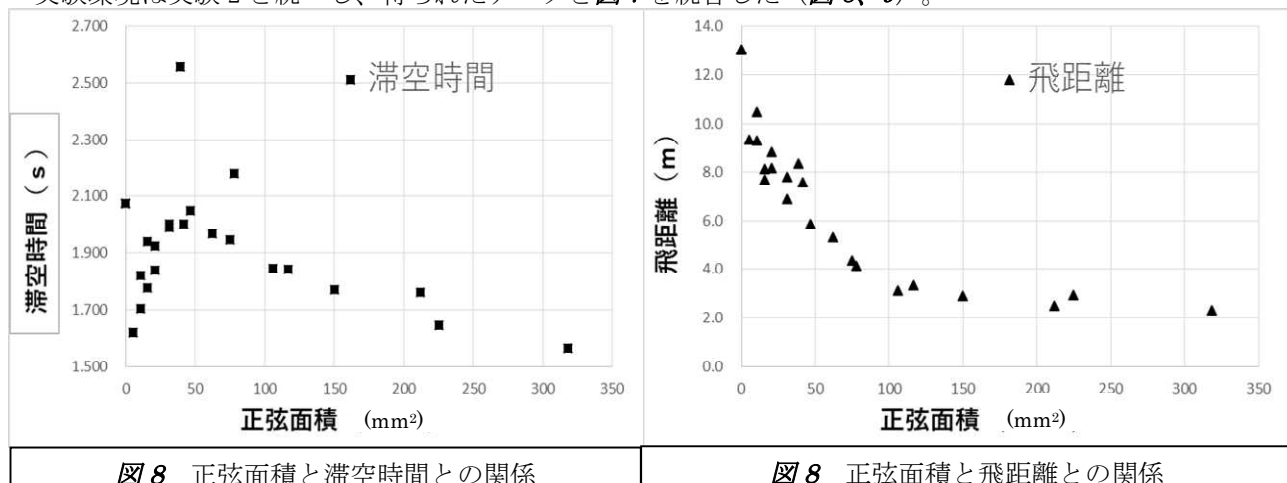


図 8 正弦面積と滞空時間との関係

図 8 正弦面積と飛距離との関係

考察

正弦面積が大きいとき、紙飛行機は上に飛ぶ・空気抵抗が大きいという要因から失速しやすい。紙飛行機が高く飛ばば滞空時間を延ばすことが出来るが、失速するこの限りではない。よって紙飛行機が失速しない範囲で正弦面積が大きいものが、長い滞空時間を記録した。

飛距離は正弦面積が大きいと紙飛行機の持つ水平方向の速度の多くが鉛直方向に変換されてしまうため、すべての機体で減少傾向にあった。

結論

今回の環境においては、エレベーターの折り曲げがないもので飛距離が最大となる。
エレベーターの折り曲げと滞空時間の変化の関係は次のとおりである。

1. 上に曲げる→機体が上昇

1-A. 上に少し曲げる（飛行中に上昇はするが、途中で失速しない程度の正弦面積にする）

→この条件内で正弦面積のより大きい機体がより長い滞空時間を示す

1-B. 上に大きく曲げる（1-A のときより正弦面積が大きくなるようにする）

→正弦面積が大きくなればなるほど緩やかではあるが滞空時間は減少傾向に転じる。

2. 下に曲げる→機体は下降

今後の課題

本研究の今後の大きな課題として、理論の一般化があげられる。今回の実験では、すべて 1 種類の紙飛行機のみでしか実験を行っていないため、正弦面積の値にかかわらず相対的に本実験と同じ傾向が出ることを確かめ、他の紙飛行機にも応用できるようにする必要がある。

今回は紙飛行機の作成過程のマニュアル化・万力の使用・作成時の軍手の着用などで品質を統一したが、個体差は小さいとは言えない。紙飛行機の作成過程にはさらなる工夫が要される。また、実験は無風の屋内で行ったが、上昇気流などが発生していた可能性もないとは言えないため、これらの改善による実験の信頼性の向上を図りたい。

参考文献

“Make a Fun Paper Plane Launcher” <https://www.guidecentr.al/make-a-fun-paper-planes-launcher>（2015 年 11 月にアクセス）