

## 飛行機が飛ぶわけ 紙飛行機を上手く飛ばす科学（１）

（本原稿はM S Nジャーナルに掲載されたものです）

東京大学大学院航空宇宙工学専攻 教授  
鈴木真二

7月3日、10日掲載記事では翼がなぜ揚力を作るかということを出発点とした。飛行機が飛べるのは揚力のおかげばかりではない。紙飛行機をとばした時のことを思い出してほしい。なかなか思うように飛ばない紙飛行機も、なにかの拍子ですばらしく飛んだことがあったに違いない。上手く飛ばすにはそれなりの科学的裏づけが必要なのである。

### 紙飛行機の達人に会う

仕事から飛行機に関係するいろいろな方にお会いする機会がある。折り紙飛行機作家の戸田拓夫さんもそのお一人である。あるテレビ局が3メートルの巨大折り紙飛行機を飛ばすという企画を立てた時に、スペースシャトルのような見事な立体折り紙飛行機（図1）を折り上げたのが戸田さんである。



図1 スペースプレーン型の巨大折り紙飛行機（折り紙ヒコーキ博物館）

精密鑄造会社の専務取締役という忙しい仕事のかたわら、戸田さんは折り紙飛行機の普及に尽力され、2001年の3月には在住の福山市に「紙ヒコーキ博物館」もオープンしている。

戸田さんが紙飛行機にのめりこんだきっかけがおもしろい。大学時代に折り紙飛行機の本を手にした戸田さんはさっそく本を見て折り紙飛行機を作って飛ばす。これがまったく飛ばない。たまたま本の著者のお住まいが下宿の近くであったので、直接指導を仰ぎに向かったそうである。

その本「飛ぶ本」の著者、中村栄志氏は「そりゃあ君、飛行機の後ろを調節しないと飛ぶわけないよ。」と言われたそうである。戸田さんは「それなら、本に書いておいてほしいよな」と不満を持ったのだが、そのとき渡された紙で200機ほど創作したのが折り紙飛行機に魅せられたきっかけだそうである。

「後ろを調節する」とは何であろうか？これが今回のキーワードである。

### 良く飛ぶ飛行機の条件

自重を支える揚力が得られることが飛行の第一条件であるが、これだけでは飛べない。同じ紙飛行機でも後ろを調節するだけで良く飛ぶようになるということは、何かほかの条件があるということだ。

翼には揚力が発生する。それは前回紹介したように、翼の表面に作用する空気の圧力を足し合わせたものである。つまり揚力は分布力である。この揚力が一点に作用すると考えることができ、その点を揚力の作用点と呼ぶ。折り紙飛行機のような平板翼ではこの作用点は図2のように決まる空力中心にほぼ一致する。

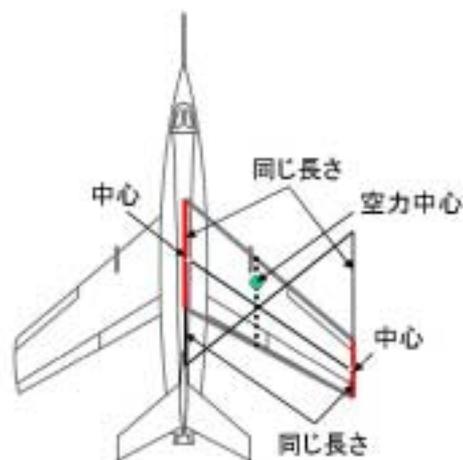


図2 右主翼の空力中心。空力中心は上のように作図した点線の前から1/4にある

重力も分布力であり、重力が一点に作用する点を重心という。こちらは簡単である。指の先で支えてバランスの取れる点である。コンパスの先を使えばさらに正確に求められる。揚力は自重を支える大きさが必要で、両者がバランスせねばならない。そこで、揚力の作

用点に重心が来るように折り紙飛行機を折ることにする。しかし、この機体は飛ばない。

### 「やじろべえ」はなぜ戻る

重心と揚力の作用点が一致する飛行機は何がいけないのか？この機体には安定性が無い。正確には迎角に関する静安定が無いという。

例えば「やじろべえ」を考えてみよう。「やじろべえ」は重りの重さと支点からの距離をかけたモーメントが左右でバランスすれば釣り合う。ただバランスするだけならば、シーソーのように腕が真っ直ぐでも良いはずである。しかし、腕が真っ直ぐな「やじろべえ」は面白くない。

「やじろべえ」は傾けても戻り、振動を続けるから玩具になる。腕が真っ直ぐな「やじろべえ」は傾けても、その位置で止まってしまい戻らない。なぜ「やじろべえ」は戻るのか？

これは、実は、なかなか難問である。東大生でも直ぐに答えられる者は少ない。腕を下に曲げた「やじろべえ」を傾けると、図3のようになる。注意深く見ると、左の重りは下に動くと支点に近づくが、右の重りは上に動いて支点から遠ざかる。つまり、モーメントのバランスが崩れ、傾きを元にもどす力（復元力）が作用する。

腕を上にした「やじろべえ」はもちろん不安定でひっくり返る。

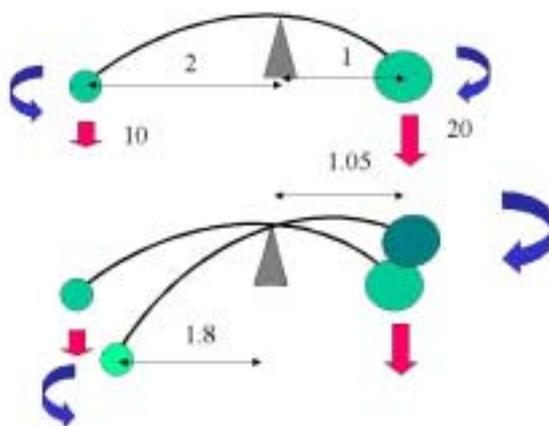


図3 「やじろべえ」は傾いても元に戻る力が自動的に発生する

### 飛行機を安定化させるためには

小難しい説明をしなくても、紙飛行機をうまく飛ばすコツはみんなが知っている。図4の

ように重心を少し前にすれば良い。実は、こうすることで「やじろべえ」のように飛行機を安定にできる。



図4 良く飛ぶ紙飛行機の重心と空力中心の位置関係

「やじろべえ」のように機体が傾いた場合を考える。飛行機には支点はないが、投げ出した瞬間や、風が吹いたときなど、釣り合い状態からずれる。図5のように機体の姿勢が先端を上げた方向にずれる場合を考える。機体の姿勢がずれても重力は同じであるが、揚力は変化する。揚力は迎え角（進行方向と翼のなす角）によって変化するので、機体が頭あげ姿勢になった場合、揚力は大きくなる。



図5 頭を上げた紙飛行機は増加する揚力によってもとにもどる力が発生する

増加した揚力は復元力となり、重心を中心として頭を下げるモーメントを作る。つまり、紙飛行機は釣り合い状態に自動的に戻る。機体が頭下げ姿勢になった場合は逆になる。紙飛行機は釣り合い状態からずれたとしても、「やじろべえ」のように自動的に元にもどる。つまり、安定した飛行が可能になる。

#### 機体の後を調整する必要性

ここでようやく、戸田さんが指南をうけたという「機体の後ろの調節」に話をすすめることができる。重心を揚力の作用点より前にすれば飛行が安定化されることはすでに説明した。しかし、このままでは重心と揚力の作用点がずれて、モーメントがアンバランスになってしまう。揚力の作用点を移動させずに、モーメントのバランスをとる方法が、「機体の後ろの調節」なのである。

図6のように、翼の後縁に沿って爪を立てて「すじ」をつける。こうすると後縁がすこし持ちあがる。この部分に作用する空気力が機首を持ち上げるモーメントを作る。これで、重心と揚力の作用点がずれることによるアンバランスを打ち消すのである。もちろん、翼の後縁を立てると揚力の作用点もずれるが、立てた部分はわずかであるのでその影響は小さい。

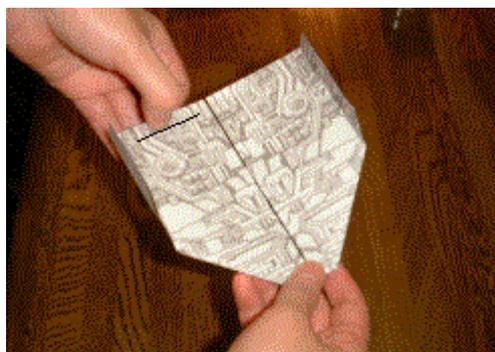


図6 機体の後ろの調節。爪で「すじ」をつけ後縁を上げる

折り紙飛行機では重心は折り方で決まってしまうので、「機体の後の調節」によって飛び方を調整する。後縁の上げが少ないと、大きなモーメントを打ち消せないで、小さな迎え角で釣り合う。この状態では、抵抗は小さく、飛行速度は速くなり、降下は深い。後ろの上げを大きくするとこの逆で、ゆっくり浅く飛ぶようになるが、上げを大きくしすぎると失速しやすくなる。なぜ、飛び方が変わるのかも説明の必要があるが、詳しくは次回以降としたい。

機体が左右に曲がってしまう場合も調整が必要である。前や後から見て、左右のバランスを取ったり、時には、垂直尾翼の後ろを左右に調整したりする。機体を水平に投げ出し、降下の様子を見て機体を調整する。いかに素早く上手に調整できるかが腕の見せ所である。

## 紙飛行機のだいごみ

紙飛行機も本当の飛行機も、飛行の原理は同じである。紙飛行機はパイロットが乗っていない分だけ、難しい面もある。パイロットの巧みな操縦で機体をたてなおすといったことができない。飛ばす前に、微妙な調整が必要なのもそのためである。機体が手を離れてしまうと、もう手のほどこしようがない。これが紙飛行機のだいごみでもある。

本物の飛行機との関係にも触れなくてはならない。本物の飛行機は水平尾翼によって「機体の後ろの調節」をしている。そして、水平尾翼の後ろにある昇降舵（しょうこうだ、英語ではエレベーター）の角度を変えながら飛行速度を制御している。もちろんエンジンの推力も調整する。こう書くと、前に尾翼のある飛行機はどうやって飛ぶのか？尾翼のない飛行機だってある、などいろんな疑問がわいてくる。

もうスペースが無くなってしまったが、揚力のことも気になる。折り紙飛行機でも「のり」で貼り付けて作る紙飛行機でも、翼はほとんどが平板で、本当の飛行機のような翼型をしていない。平板でなぜ揚力が発生するのか。これは前回のテーマに関係することであり、読者の方から質問も頂いている。このことも次回以降に考えたい。

今回、図4、6の写真に使用した機体は、戸田さんに教えていただいた「スカイウィング」と名付けられた折り紙飛行機である。真上に投げ上げ風にのせれば20秒以上飛ぶそうである。私も子供と一緒に作ってグラウンドで飛ばす。いつも最後は私自身が熱中してしまう。作り方は「折り紙ヒコーキのホームページ」にある。そこに行けば3メートルの巨大折り紙飛行機がどんな飛びかたをしたのかも分かるはずである。（次回に続く）

#### 参考資料

折り紙ヒコーキ ホームページ：<http://member.nifty.ne.jp/origami-plane/>

戸田拓夫、良く飛ぶ立体折り紙ヒコーキ、二見書房、1999.

飛行機が飛ぶわけ——「ベルヌーイの定理」説をめぐる論争を解く（1）（鈴木 真二：2001年7月3日）：

