

紙飛行機を上手く飛ばす科学（２） 飛行機が飛ぶわけ

（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

前回の折り紙飛行機はうまく飛んだでしょうか？私も子供と作って飛ばした。恥ずかしながら熱中したのは大人の私であった。今回はペーパークラフトの紙飛行機の秘密をさぐってみたい。

ペーパークラフト飛行機の不思議

紙を切り取り、貼り付けて機体を作るのがペーパークラフト飛行機（図１）である。二宮康明さんをはじめ多くの方が作品を公開してくださっているので、まずはそうした機体を作って飛ばすのが早道である。作り方も精密になり、飛ばすのも遊びというよりは立派な競技となっている。



図１ ペーパークラフト飛行機「White wings レーサー 5 2 0」 設計：二宮康明博士

手で投げるにせよ、ゴムのカタパルトを利用するにせよ、上空に投げ上げ、高度を取り、そのあとゆっくり旋回させて滞空飛行時間を競う。風に乗れば見えなくなるまで飛ぶこともある。ペーパークラフト飛行機も飛行の原理は本物の飛行機と同じである。前回の説明のように、重心と翼、特に尾翼の調整のツボを押さえておけば大体は飛ぶようになる。ただ、良く飛ぶ紙飛行機を分析してみると、本物の飛行機とは大きく異なる点がある。重心の位置である。

機体の重心は飛行機の命である。ジャンボジェットのような大きな機体でも、重心が定まった位置に収まるように燃料や乗客や荷物の配置を管理しバランスさせている。アメリカで小さなコミュタ機に乗ったとき、パイロットから座る位置を前方に移すように命じられたことがある。それほどパイロットは重心に気を配っている。その重心位置が紙飛行機

と実機で大きな差がある。紙飛行機の重心は実機よりもかなり後方に位置する。なにか理由があるはずである。

重心位置はなぜ重要か

ペーパークラフト飛行機はほとんどが主翼と尾翼を持つオーソドックスな形をしている。本物の飛行機とこの点は同じである。重心の役割を前回より、もう少し詳しく見てみよう。

簡単のために、主翼と尾翼が長方形平板の紙飛行機を考える。揚力は主翼、尾翼とも前縁から翼の4分の1にある。揚力は面積に比例するので、主翼の揚力は尾翼よりも大きくなる。それぞれの揚力が重心でバランスするように図2のように重心を決める。

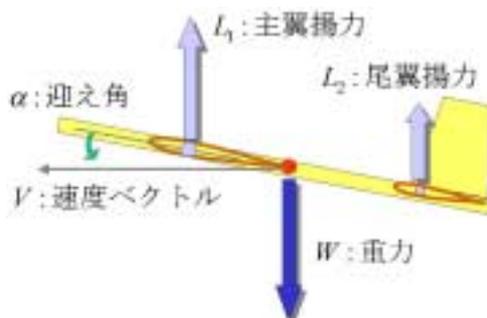


図2 主翼揚力と尾翼揚力で重力とバランスする「シーソー」型

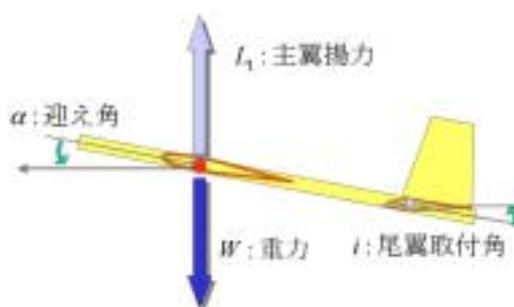


図3 主翼揚力のみで重力とバランスする「やじろべえ」型

ただし、図2のようなバランスは、前回話題とした「シーソー」タイプのバランスで、「やじろべえ」タイプではない。つまり、自然に元に戻る復元力がない。復元力を与えるには重心を前に移動させればよかった。図3のように主翼の揚力の位置に重心がある場合を考える。このとき、重力と主翼の揚力は同じ位置に作用するので、それだけでバランスが取れる。つまり、尾翼には揚力があってはいけなくなる。

尾翼の揚力を0にするにはどうしたらよいか、揚力は流れと翼の作る角（迎え角）に比例するから、尾翼の迎え角を0にすればよい。図3のように、尾翼を傾けて、取り付けるのである。このとき、尾翼の揚力は0であるが、機体の姿勢がくずれ、迎え角が変化した場合には、尾翼に揚力が発生する。尾翼の揚力は、機体の姿勢を釣り合い位置に戻す復元力として作用する。

尾翼の角度が決める飛び方

以上のことを逆にたどれば、尾翼の角度を決めると、バランスの取れる主翼の迎え角が決まることになる。バランスが取れて飛んでいる場合は、揚力と重力は釣り合わねばならない。一方、揚力は迎え角に比例し、また速度の自乗に比例するという関係がある。迎え角は、バランスの取れる値が定まるので、釣り合って飛べる飛行速度も一つに決まってしまうことになる。

尾翼の角度を大きくすると、バランスする迎え角が大きくなり、飛行速度が小さくなる。逆に尾翼の角度を小さくすると、飛行速度が大きくなる。つまり、尾翼の角度を変えることで速く飛行させたり、遅く飛行させたりすることができる。本物の飛行機は尾翼の後方の昇降舵（エレベータ）を操作することで飛行速度をコントロールしている。

また、紙飛行機のような滑空機の場合は、尾翼の角度は機体の経路角も支配する。すこし込み入ってくるが、もう少しお付き合い願いたい。

滑空中の機体の力のバランスは図4のようになる。水平線から降下してゆく角度は、揚力と抵抗の比（揚抗比）によって決まる。揚抗比を大きくすれば浅い角度で滑空できるので、遠くまで飛行できることになる。

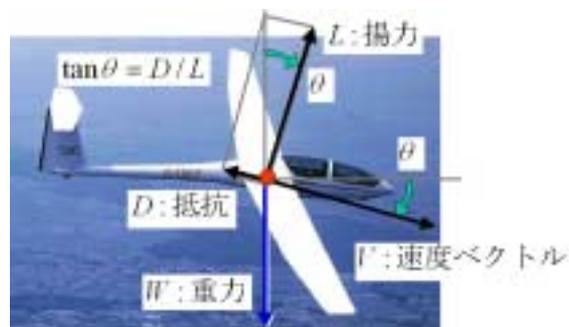


図4 揚力と抵抗の比（揚抗比）が降下角度を決める

グライダーが細長い翼を持つのは揚抗比を大きくしたいからだ。同一の機体では揚抗比は迎え角によっても変化する。飛行速度が大きくなると迎え角は小さくてすむので、抵抗に対して揚力は小さくなり揚抗比は小さくなる。逆に、飛行速度が小さくなると、大きな迎え角が要求され、揚力も増えるが、それ以上に抵抗が急激に増加し、揚抗比はやはり減少してゆく。揚抗比が最大になり、最も遠くまで飛べる速度と、迎え角がどこかに存在する。

紙飛行機では、試験飛行のときに尾翼の角度を変えて飛び方を調整する。実はこれは、最適な条件を捜しているのである。

後ろにある紙飛行機の重心位置

本物の飛行機の重心位置は、多少の幅はあるが、図3のように主翼の前縁の4分の1あたりにある。また、実際の機体では、主翼の断面は上に反った翼型をしている。こうした翼には頭を常に下げようとするモーメントが作用するので、尾翼はさらに傾きを増さねばならない。その結果、多くの飛行状態では尾翼は下向きの揚力を作って飛んでいることになる。ジャンボジェットの尾翼は上下逆さの翼型を採用している。つまり下に反った翼型で下向きに揚力を作っているのである。

このように、本物の機体は主翼の揚力を犠牲にしてまでも、機体のバランスと安定性の確保に務めている。

以上が、本物の飛行機の重心位置なのであるが、紙飛行機の重心位置を調べると、ほとんど主翼の後縁近くにある。本物の飛行機では想像もつかない位置である。

紙飛行機の重心が後方に位置する一つの原因は、尾翼に揚力を持たせようとするものである。図2まではいかなくとも尾翼も揚力を負担できれば、主翼の揚力は小さくてすむ。その結果、機体も軽くなり、抵抗も小さくなる。問題は安定性が減少し、本物の飛行機であれば操縦が難しくなることである。しかし、紙飛行機である。墜落も気にしない。

もう一つは、機体の投げ方に関係している。滞空時間をかせぐには、できる限り高く投げ上げることが秘訣である。投げ上げる時の飛行速度は、滑空時の釣り合い飛行速度よりもはるかに速い。つまり、機体のバランスは取れていないことになる。

投げ出した直後は飛行速度が大きく、釣り合い飛行状態に近づくために迎角を大きくしようとする。つまり、機体は次第に頭を上げる。重心が前にあり安定性の強い機体はこの傾

向が強いので、図5の左のように機体は急な宙返りをする。つまり、最高高度を上げることができない。重心が後ろのあれば、安定性は小さくなるが、頭を上げる力が小さいので、図5右のように機体は高くまで上昇できる。この図は研究室の大学院生、森田純一郎君がコンピュータシミュレーションによって計算してくれたものである。

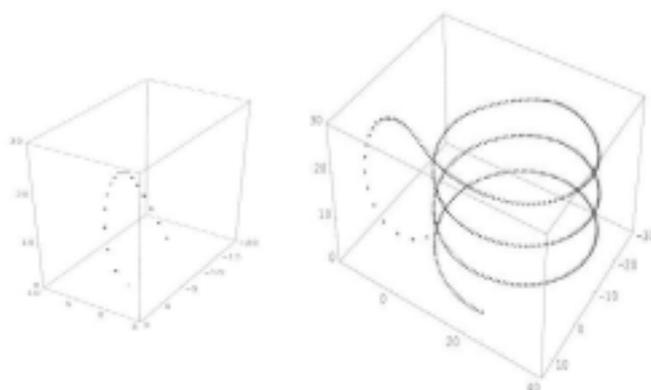


図5 コンピュータによる紙飛行機の飛行軌跡。重心を前にすると左のように急な宙返りをするが、重心を後ろにすると高く上昇し、長時間飛行する（計算と作図：森田純一郎君）

図5の右は、コンピュータで最適な飛ばし方を計算したものである。しかし競技では、風を読み、機体の「くせ」を頭に入れて瞬時に飛ばし方を決めなくてはならない。コンピュータでもかなわない職人芸である。

尾翼の形態あれこれ

尾翼はなにも、その名のように尾部になければならないわけではない。ライト兄弟が最初に動力飛行をおこなった1903年フライヤー号は、前方に水平舵があった。前にある尾翼(?)は、アヒルの「くちばし」のようだというのでカナードと呼ばれる。実は、カナード形態にすると、安定性を確保しつつ、カナードに揚力を持たせることができる。もっとも、フライヤー号は別な理由でカナードを採用し、機体自体には安定性がなかった。自転車のように常にバランスを取りながら飛行した。

カナード機はいろいろと作られてきているがフライヤー号に匹敵する偉大な機体は1986年に無給油無着陸で世界一周飛行を成し遂げたボイジャー(図6)であろう。軽量化と効率アップを極限まで突き詰めた形である。

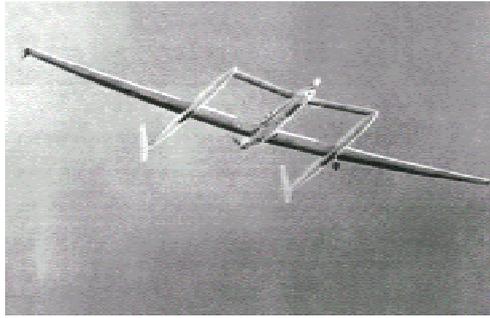


図6 1986年に無給油無着陸で世界一周したボイジャー。水平尾翼が前にある
(マルチメディア航空機図鑑)

飛行機の形は千差万別である。水平尾翼を無くしてしまった機体も存在する。厳密には尾翼が無いというよりも、主翼を後退させて、翼の先端部分に尾翼の役割を持たせている。これもいろいろな機体があるが、図7はNASAで計画されているブレンディッド・ウィング・ボディー機である。800人乗りの超大型旅客機をめざし、翼の中を2階の客室にするつもりであるという。

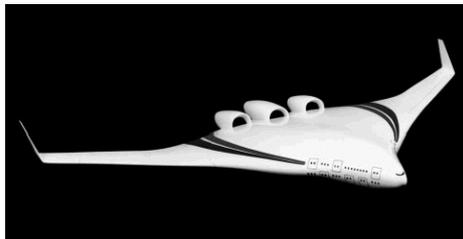


図7 尾翼の無い超大型旅客機の構想(資料:NASA)

いろいろな形がありえても、主翼と尾翼の配置が一般的であるのはそれなりの理由があるからだ。しかしペーパークラフト飛行機ならば自由に形を変えて飛ばすことができる。いろんな形をとばして、どんな飛び方をするのかを探ってみるのも紙飛行機の楽しみである。
(次回に続く)

参考資料

- 1) 鈴木真二、航空機の形を科学する1「尾翼」、航空情報、1999年10月号、酣燈社
- 2) 鈴木真二監修、西川渉、宮田豊昭、マルチメディア航空機図鑑、アスキー、1996.
- 3) ホワイトウィングスワールド：<http://www.whitewings.com/japan/>

