

飛行機はなぜ飛べるか

工学院大学 金野 祥久

1. 飛行機と翼

この記事を読んでいる方の中に、飛行機を知らない人はいないでしょう。翼がついていて、空を飛ぶ乗り物です。

いま「翼」という漢字を使いました。皆さんの多くはこの字を「つばさ」と訓読みで読んだと思いますが、飛行機の専門家や空気の流れの専門家はこの字を「よく」と音読みで読むことが多いです。飛行機の胴体から横に伸びている大きな左右一対の翼を「主翼」と呼びます。また、胴体の後部にあつて縦に伸びている翼を「垂直尾翼」、横に伸びている左右一対の小さな翼を「水平尾翼」と呼びます。世の中の多くの飛行機は、これら5枚の翼を使って空を飛びます。

エアバス社の大型ジェット旅客機A380-800の最大離陸重量は560トンもあります。そんなに重いのに、A380-800はなぜ空を飛ぶことができるのでしょうか？この記事では、飛行機がどうして空を飛ぶことができるのかを解説します。

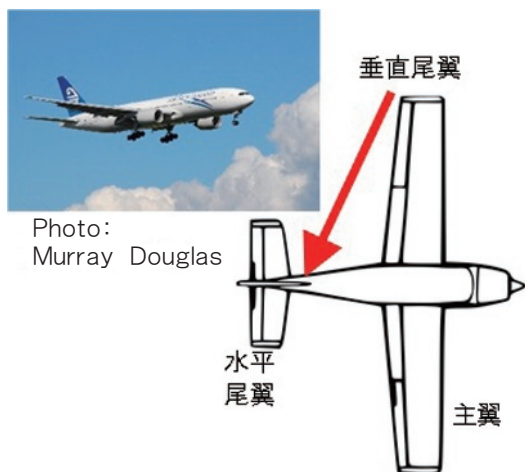


図1. 飛行機と翼

2. 翼のはたらきと形

まずは翼の説明をしましょう。飛行機はなぜ空を飛ぶことができるのか？それは飛行機が飛んでいるとき、主翼がまわりの空気から、その飛行機の重量以上の力を上向きに受けているからです。

翼を流れの中に置くと、まわりの空気から力を受けますが、その力は流れに対して直角に近い方向を向いています。翼がまわりの空気から受ける力の、流れに直角な成分のことを「揚力」と呼びますが、飛行機の場合は主翼にはたらく揚力が上向きで、かつ、とても大きいので、飛行機の重い重量を空中に浮かばせることができます。



© Meggar, CC BY-SA 3.0

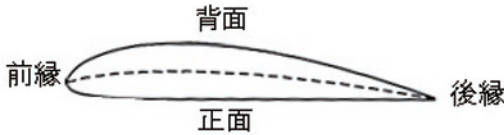


図2. 翼

では垂直尾翼や水平尾翼は何をしているのでしょうか。これにも揚力に関係しています。垂直尾翼は、たとえば右に曲がりたいたときに、飛行機の尾部を左側に押すことで機体の向きを右向きに変えるはたらきをします。左に曲がりたいたときはその逆で、尾部を右側に押すことで機体の向きを左向きに変えます。このとき横に押す力を生み出すのが、垂直尾翼にはたらく揚力です。同じように水平尾翼は、その翼にはたらく揚力を使って

機体を上向きにしたり、下向きにしたりするためのものです。

ところで、飛行機は空気の中を進んでいきますが、飛行機に乗っている人からは空気が前から後ろに向かって動いているように見えます。これ以降の説明では飛行機に乗っている人の視点に立って、翼が固定されていて、そこに流れがぶつかってくるような状況を考えます。

さて、ではどうして翼は、流れの中で流れに直角な向きの力を受けるのでしょうか。これが分からないと、飛行機がなぜ空を飛べるのかが分かったことになりませんね。このあと説明しますが、その前に翼はどんな形をしているのかを見ておきましょう。

図2は小型飛行機の主翼の付け根のところを撮影したもので、翼の断面の形がよく分かります。翼は上流側の端(前縁と呼びます)が丸く、下流側の端(後縁と呼びます)が尖っている形状をしています。そして揚力を発生したい方向、この図では上の方がふくらんでいますが、下の方はあまりふくらんでおらず、ほぼまっすぐです。翼によっては下の方がへこんでいるものもあります。このため、翼の上下の真ん中を結んだ線を描くと、その線は上向きに反っています。

なお、翼の反ってふくらんでいる方の面を「背面」、膨らんでいないほうの面を「正面」と呼びます。空飛ぶスーパーヒーローは背中を上にして飛びますよね。飛行機の主翼も同じで、上が背中、下が正面です。

3. 揚力まつわる誤解

皆さんは「飛行機がなぜ空を飛べるのかは、実はよく分かっていないんだ」などと主張する書籍やウェブサイトにしたことはありませんか？

いま筆者が検索サイトで「飛行機 仕組み」と入力すると、検索の追加キーワードとして「わかっていない」が提案されます。そこで提案どおりに「飛行機 仕組み わかつ

ていない」で検索してみると、たとえば「飛行機はなぜ飛ぶのか実は科学でまだ解明されていない」とか「飛行機が飛ぶ理由はわかっていないというのは本当か？」などのウェブサイトが見つかります。世の中には飛行機が飛ぶ仕組みはまだ解明されていないと思っている人が多数いるようです。



図3. 同時到着仮説

違いが横行しているため、間違った説明について調査した論文まであるくらいです。

ここでは代表的な間違いである「同時到着仮説」というものを紹介しましょう。翼の上流から流れてきた空気は、前縁付近で翼とぶつかったあと上下に分かれて流れ、翼の後縁でまた合流します。そして翼は背面の方がふくらんでいて、正面はあまりふくらんでいないので、背面側を通る方が遠回りです。そのため、翼の前縁で分かれた空気が翼の後縁に同時に到着するためには、翼の背面側を通る空気のほうが速く動く必要があります。

ここでちょっと話を変えて、ベルヌーイの定理というものを説明します。この定理によると、流れが速いところでは圧力が下がり、流れの遅いところでは圧力が上がる、ということが分かります。圧力とは空気から受ける力を、単位面積あたりで表したものです。

先ほどの「翼の背面側を通る空気のほうが速く動く必要がある」ということと、このベルヌーイの定理を組み合わせると、翼の背面側の圧力が正面側よりも下がるのが分かります。つまり上から下に押す力よりも、下から上に押す力のほうが強いわけです。これが原因で、翼は流れから上向きの力＝揚力を受けるんだ、と主張するのが、同時到着仮説です。

実はこの説は間違いなのですが、大変残念なことに、一部の専門家や専門書ですら、この同時到着仮説を使って揚力の発生原理を説明している場合があります。筆者も子どものころに、飛行機が空を飛ぶ理由としてこのような説明を読んだと記憶しています。

さて、この説のどこが間違いかを見ていきましょう。もしも同時到着仮説が正しいのなら、前縁から後縁までの距離が正面と背面とで同じだったら、その翼には揚力が発生しないはずですね。たとえば厚さが一定の板や、それを曲げただけのものを翼にしたら、その翼は揚力を受けないことになりますが、それは正しいでしょうか。

有人動力飛行は、ライト兄弟が1903年に世界ではじめて成功させました。このときに用いた飛行機をアメリカのスミソニアン博物館で見ることができ、また写真をスミソニアン博物館のウェブサイトで見ることができます。このときの飛行機「ライトフライヤー」の翼は布地をピンと張ったもので作られていて、厚みはほとんどありませんでした。そのような翼を使った飛行機で、ライト兄弟は世界初の有人動力飛行をなしたのです。同時到着仮説では、ライト兄弟の偉業を説明することができません。



図4. ライトフライヤーの翼

実際に実験してみると、翼の背面側の流れが正面側よりも速いのは事実です。ですがその速度差は同時到着仮説が想定するよりもずっと大きく、背面側の流れは正面側の流れが後縁に着くよりも前に後縁を通り過ぎます。また、薄い板を円弧状に曲げただけの翼にも揚力は発生します。一方で翼に作用する圧力を測定すると、ベルヌーイの定理を用いて計算した結果とよく一致します。ですのでベルヌーイの定理は間違っていないが、同時到着仮説は間違っていることが分かります。

4. 「翼が空気を下に押すから、飛行機は空を飛べる」説（正しいですが…）

もう一つ、世の中に出回っている説を紹介しましょう。流れの中で翼は空気を下に押すことで、上向きの力を得る、というものです。ベルヌーイの定理を否定し、「正しい」理由としてこの説明をしているウェブサイトを目にしたことがあります。

ベルヌーイの定理のことは置いておくとして、流れの中で翼は空気を下に押すから揚力を受けるというのは「正しい」です。これはニュートンの運動法則のひとつ「作用・反作用の法則」を指しています。物体Aが物体Bを押しているときには、物体Bは物体Aをまったく同じ力で逆向きに押している、ということを表す物理法則です。

ところで揚力とは、空気が翼を上向きに押す力でしたよね。ですので「翼が空気を下に押すから、飛行機は空を飛べる」という説明をかみくだいて言い直すと、「翼が空気を下に押すから、空気が翼を上向きに押す」ということになります。作用・反作用の法則そのものですね。ええ、まったくもって正しい説明です。でも、これって飛行機がなぜ空を飛べるのかの説明になっているのでしょうか。「どうして、翼は空気を下に押すの？ どうして上じゃなくて下に押すの？」と疑問に思いませんか。

図2のような形の翼は、たしかに空気を下向きに押すから揚力を受けるわけですが、この形だとどうして空気を上ではなくて下向きに押すのでしょうか。それが分かんなければ、飛行機がどうして空を飛べるのか、分かったとは言えないでしょう。

5. 揚力はなぜ発生するのか？「循環」を用いた説明

ここでは揚力の発生原理として、「循環」を用いた説明を紹介します。ひとつ前の節で述べたことですが、図2で示したような形の翼だとどうして空気は下向きに押されるのかを説明できれば、作用・反作用の法則で揚力を説明できます。そこで、翼が流れの中に置かれることで、流れがどのように変わるのかをしてみることにしましょう。

専門的になりますが、ポテンシャル理論という流れの解析方法を使います。翼の表面を小さな線分に分割して、それぞれの線分の真ん中から空気が全方向に湧き出すか、または全方向から吸い込むような仮想的な点を置きます。この湧き出しまたは吸い込みの強さをそれぞれの線分で調整すると、翼表面のすべての部分で、空気が翼の表面に沿って流れるようにすることができます。

この計算はコンピュータを使えば一瞬で解ける程度のかんたんなものです。ですがこれだけだと、翼後縁での流れが不自然になります。つまり翼正面を流れてきた空気が、後縁で急に角度を変えて翼背面側に回り込み、その後は翼背面を逆流するような流れが計算結果として出るので。これは不自然だけでなく物理法則にも反します。空気の流れが急に向きを変えるのなら、その場所では空気に無限に大きな力がかかっていることになります。もしほんとうにそんな力がかかっているなら、翼が壊れてしまうことでしょう。

流れが急に向きを変えないのであれば、翼後縁では翼正面の流れと翼背面の流れとが合流し、そのまま平行に下流に流れていくはず。翼後縁でのこのような条件をクッタの条件と呼びます。

クッタの条件を満たすような流れ場を、湧き出しと吸い込みとの組み合わせだけで作ることはできません。このため、翼の表面を分割した線分の中央、湧き出しまたは吸い込みが置かれている場所に、さらに「循環」をおきます。循環とは空気を回転させる作用で、今回の場合はすべての線分に同じ強さの循環をおきます。そして、翼表面のすべての部分で空気が翼の表面に沿って流れ、かつ、翼後縁でクッタの条件を満たすように湧き出しまたは吸い込みと循環の強さを調整します。

この計算も、コンピュータを使えば一瞬でできます。そして翼では循環を考えてはじめて、翼に沿った自然な流れを作ることができます。つまり翼はその形に沿って空気を流すことで、循環と同じように空気を回転させる作用を生み出しているということです。そして循環があることにより空気は下向きに押され、翼は空気から上向きに押されます。

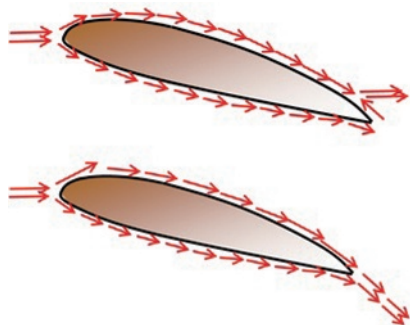


図5. ポテンシャル理論による翼まわりの流れ(上)循環なし(下)循環あり

6. ほんとうに「循環」なんてあるの？ 束縛渦と出発渦

翼はその形に沿って空気を流すことにより、空気を回転させる作用を生み出し、それによって揚力を生み出す、ということを説明してきました。空気を回転させるので、翼には渦がくっついている、と考えることもできます。この渦のことを束縛渦と呼びます。とは言っても束縛渦は本物の渦ではなく、渦のような作用、という意味です。翼はほんとうにそんな作用をしているのでしょうか？ どうやって確かめたらよいでしょうか。

流れの回転度合いを渦度と呼びますが、渦度の合計は常に一定であるという定理があります。ラグランジュの渦定理と呼ばれます。翼が静止しているときは、揚力も発生しませんから束縛渦がないはずですね。動いて揚力が発生したら、束縛渦が生まれているはずですが、でも渦度の合計は一定ですから、翼が静止している状態から動き

始めるとき、束縛渦とは逆向きの渦がどこかにできるはずですよ。

厚紙かプラスチックの板を曲げて、図2のような翼の形を作ります。ボールか何かに水を溜めて、水面上で翼を静止状態から急に動かすと、翼が



図6. 束縛渦と出発渦

あった場所に渦が発生します。渦を見やすくするために、水面に小麦粉などの粉を浮かべてもいいでしょう。筆者が実験するときには白い容器に水を溜めて、粉末コショウの粉を浮かべて行います。ご家庭で再現できるので、ぜひ試してみてください。

このように、翼が動き始めるときに出発地点に発生する渦を出発渦と呼びます。この出発渦が、翼が渦としての作用を持っている証拠のひとつで、循環によって揚力が説明できることを示しています。

飛行機はなぜ空を飛べるのか、その一端でもつかんでいただけたでしょうか？ ここで説明した内容を理論的背景も含めて正しく論じるには、少なくとも大学2年生以上のレベルの知識が必要になります。この記事を読んでくださった皆さんが、空気や水の流れの面白さを感じ取り、もっと高いレベルの学習をしたいと思ってくれたらうれしいです。

著者紹介 金野 祥久(こんの あきひさ)



工学院大学工学部 教授
 専門は流体工学、水海工学
 流体力学の講義内容をYouTubeに掲載して学生に受講させています。ご興味があればどうぞ。