

〔連載〕流体力学への招待：日常生活に見られる流体现象

## 流体の圧力と揚力発生のおくみ

首都大学東京 システムデザイン学部

高木正平\*

### Fluid Pressure and Generation Mechanism of Lift Force

\*Shohei Takagi, Faculty of Systems Design, Tokyo Metropolitan University

\*E-mail for correspondence: pantaka@tmu.ac.jp

#### 1 はじめに

山に登ったとき息苦しくなった経験はありませんか。これは気圧が下がり空気中の酸素が平地より薄くなったためです。日本一高い富士山の海拔は3776 mですが、山頂では0.64 気圧まで下がります。世界最高峰のエベレストでは、およそ0.37 気圧であることから酸素の量も気圧に比例して少なくなるので、無酸素登頂が難しいのはこのためです。このように大気圧の正体は、空気の重さによるものなのです。いまでは子どもでも知っていることですが、その存在が認知されたのはいまから370年前の、ガリレオが地動説を唱えた頃にさかのぼります。

ある日ガリレオは井戸掘り職人から、なぜポンプの下に付いた吸い上げ管の中の水は10 m以上の高さまで汲み上げられないのかと聞かれ、答えに窮したと言われています。その様子を見ていた弟子のトリチェリは、一方が塞がった長さ1.2 m、断面積が1 cm<sup>2</sup>のガラス管に水銀を満たし、図1のように、水銀を入れた容器内にガラス管を倒立させるという公開実験を行いました。1644年のことです。すると水銀柱は、容器の水銀面から76 cmの高さで止まったのです。この実験からトリチェリは、高さ76 cmの水銀柱と大気圧が釣り合ったからだと考え、水銀の比重(13.6)から、大気圧は1 cm<sup>2</sup>当たり76×13.6=1033.6 gであると結論づけたのです。つまり地表面1 cm<sup>2</sup>から大気圏外までの空気の柱の重さは約1000 g=1 kgということになります。理工学分野では圧力の単位として1999年以前までは、トリチェリの名にちなんでトル (Torr, 1気圧は760 Torr) を用いていました。

さて、倒立したガラス管の上部の水銀がない空間は、現在の私たちは真空であることを知っていますが、当時は論争の的でした。というのは、人の手で真空を実現で

きていなかったこと、また何といてもアリストテレスの「自然は真空を嫌う」という考えが深く根ざしていたからです。ここでさっそうと登場したのがパスカルです。大気圧は空気の重みで生じているなら、高い山に行けば気圧は低くなるのではないかと推論しました。

病弱だったパスカルは、妹の夫ペリエに標高1464 mのピュイ・ド・ドームの山麓や中腹の他、山頂でトリチェリの水銀柱の実験を依頼しました。するとどうでしょう、パスカルが予想した通り水銀の高さは標高が高くなるにつれて低い値を示したのです。パスカルはさらにガラス管の形状や、ガラス管の傾きを変えても、圧力は物体表面に直角に作用するので水銀柱の高さは76 cmで不変であることを示し、真空とは『空気が存在しないこと』やパスカルの原理として知られた『圧力は空気や水の入った容器の到るところに伝わり、容器の表面に直角に作用する』など圧力の性質を明らかにしました。パスカルのこのような業績を讃えて、現在では圧力の単位として科学や工学の分野ではトルに代わりパスカル (Pa, 1 Torrは133.32 Paに対応) が用いられています。

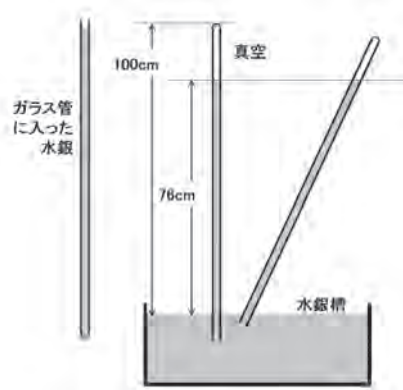


図1 トリチェリの大気圧実験。

さて、話をガリレオに戻しましょう。トリチェリの実験で水銀の代わりに水を用いたらどうなるでしょうか。大気圧によってガラス管内の液体を押し上げる力は水銀でも水でも同じことであり、水の比重は1ですから、水銀の高さ76 cmの13.6倍、すなわち約10 mになります。この水の高さこそ、ガリレオが井戸掘り職人から聞かれた高さだったのです。

繰り返しになりますが底辺が $1\text{ cm}^2$ で高さが10 mの水の柱の重さは1 kgです。大気の底に住んでいる私たちを含めてすべての物体表面には $1\text{ cm}^2$ 当たりおよそ1 kgの大気圧が作用していますが、日常生活でこのような圧力を体感しないのは体の内部も一気圧になっているからです。

## 2 大気圧の力を体感する実験

$1\text{ cm}^2$ 当たりおよそ1 kgの力をおよぼしている大気圧ですが、その大きさを体験できる実験を紹介しましょう。準備するものは2 lの空のペットボトル1本です。実験の方法は簡単、注ぎ口を口に含んでペットボトル内の空気を吸い出すだけで、吸い終わったら蓋をします。どうでしょうか、結構大きな音を立てながら簡単にペットボトルが潰れたのではないのでしょうか？ 実は、大人ならひと呼吸で大気圧より0.2気圧程度の減圧まで作りだせるといいます。2 lのペットボトルを底面 $8\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 、高さ25 cmの直方体に見立てると、その表面積は約 $1000\text{ cm}^2$ になりますが、図2のように、ペットボトルがぺちゃんこになったのはペットボトルの全表面に0.2気圧、すなわち200 kgの圧力がかかったためです。この力は大人3人分の重さに対応しますから、ペットボトルをつぶすなら手より口の方がはるかに楽ですね。



図2 2 lの空のペットボトル（右）と吸引でつぶれたペットボトル（左）。

空きペットボトルの空気を吸い出してぺちゃんこにした実験では、ペットボトルの全表面 $1000\text{ cm}^2$ に作用した200 kgの力は口の吸引力だけで作り出しました。ペットボトルの空気は直接口で吸い出しましたが、ストローで吸引しても変わらないでしょう。本当に200 kgの力が吸引で作り出せるなら、体重が65 kgの大人なら3人を吊り上げることができるはずですが、これから男性3人を吊り上げる実験を行います。圧力の性質としてパスカルが指摘した『圧力は物体表面に直角に作用する』ことも合わせて確認してみましょう。

実験装置はペットボトル容器のように圧力で形状が変形しないように、少し堅牢に作る必要があります。そのために横と縦が25 cmで厚さ15 mmの正方形のアルミ板を2枚用意します。図3(a)のようにその間に直径24 cmで太さ4 mmのシリコンゴム製の輪（オーリング）を挟みます。上の板には大気圧計とストロー取り付け用の穴をあけ、2枚の板とオーリングの間の空気を吸い出せる仕組みになっています。板の内側の圧力は気圧計で読み取ることができ、吸い出した空気が逆流しないようストローと板の間にはコックを挟んでおきます。オーリングと2枚の板の間の空気を吸い出せば、パスカルの原理が示すように『ストロー内の圧力はオーリングと板に挟まれた容器の全ての空気に伝わる』ので、中の圧力は大気圧より低くなって2枚の板は大気に押されてくっつくはずですが、同時にオーリングも面積が小さくなる内側に押されますが、動かないように工夫しておきます。上板の四隅にはクレーンでつるせるよう丸いフックを、また下の板には人を乗せる踏み板を吊るせるようやはり四隅に丸いフックが取り付けられています。クレーンの下端には吊り下げ天秤を取り付けてあるので、どれだけ荷重がかかったか直接重さを計測できます。

図3(b)に実験の様子が分かるようにスケッチしました。実験開始に当たって、2枚のアルミ板は4個のネジでゆるく連結しておきます。こうすることで中の空気を

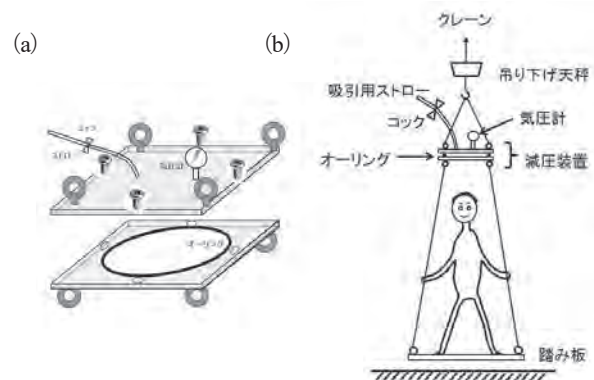


図3 (a) 減圧装置と (b) 踏み板を持つ吊り下げ装置。

吸い出しやすく、また下側のアルミ板の落下を防止できます。クレーンに取り付けた天秤は上側のアルミ板を吊り下げ、下側のアルミ板は人を載せる踏み板をチェーンで下げます。このような下準備を経て、いよいよ2枚のアルミ板からストローで空気を吸い出します。人の吸引力だけで圧力を下げます。どの程度下げることができるでしょうか。空きペットボトルと違って吸い出す空気は少量で済むので、少し練習してコツを習得すると0.5気圧程度までなら下げることができます。力一杯頑張っても0.43気圧まで下げることができました。

実験には研究室の学生3名に協力をお願いしました。まず筆者が踏み板に載ってクレーンで吊り上げてもらいました。2枚の板はくっついたままびくともしません。そこで今度は学生2名に乗ってもらいました。天秤は132.7kgを指していますがまだ大丈夫です。さらにもう1名に乗ってもらい、合計3人です。その時3人をクレーンで吊り上げたときの様子を図4に示しました。吊り下げ天秤は197.4kgを指していますが2枚のアルミ板は離れることなく大人3人を無事に吊り下げることができました。

一見マジックのように見えますが、一辺25cmの2枚のアルミ板には実際どれほどの圧力がかかったか、計算してみたら納得できるでしょう。四角のアルミ板に挟んだオーリングによって囲まれた円形部分の面積ができるだけ大きくなるようにしたら、面積は約407cm<sup>2</sup>で、A4版の紙の65%の広さです。実験時の大気圧はほぼ1気圧



図4 減圧装置に大人3人を吊り下げた様子。

圧、内圧は0.43気圧であったので0.57気圧の圧力差が生じたことになり、1cm<sup>2</sup>あたりおよそ0.57kgの圧力がかかったこととなります。結局2枚のアルミ板は上下から $407 \times 0.59 = 232$ kgで押し付けられたこととなります。結果として大人3人と機材を含めた197kgの荷重に十分耐えられたことが分かります。この実験から学んだことは、圧力の大きい方から小さい方に力が及ぶことで、パスカルの原理が示すようにその力の向きは物体表面に直角方向に作用していることも確認できました。もし板を広くしてオーリングの面積を2倍にすれば、大気圧からの差圧は半分で済むことも理解できます。また、アルミ板とオーリングを幾らでも大きくできて強度が保てれば、飛行機でも吊り下げることができるでしょう。

### 3 翼のふくらみと揚力の発生

飛行機は大気中を飛ぶことで自重を支える揚力を発生しています。この揚力の方向は、飛行している方向とは直角で、重力とは反対向きです。ですから、ヘリコプターの空中静止（ホバリング）のときのようなブレードを水平回転させ空気を真下に押し下げた反作用で自重を支える機構とは明らかに異なっています。このように揚力が発生するメカニズムを理解するためには、飛行の方向に対してそれとは直角の方向に浮き上がる力がどのように発生するか合理的に説明する必要があります。

従来から、流体速度と圧力の関係を結び付けたベルヌーイの定理より、「流れが加速されると圧力が低下し、その逆も正しい」などの性質を用いていますが、「翼上面の流れは下面より何故加速するか」に対して、説明は十分とは言えません。そこで、この問題を克服するために、従来とは逆の発想をします。すなわち「圧力が低下するので、流れが加速される」なら、前者の理由付けにはニュートン力学の第二法則を活用できて、揚力発生のしくみの説明はいとも簡単になります。

これまでペットボトルや2枚のアルミ板の中の空気を吸い出す実験を通して、圧力は物体表面に直角に作用することを学んだことから、飛行機の揚力の発生には圧力が関係しているらしいことをお気づきのことと思います。その通りで、空中を飛行している飛行機の翼の上面は、翼まわりの気圧より低い圧力を生み出せるよう、工夫が凝らしてあります。この工夫とは、翼のふくらみです。まずは翼にふくらみを持たせると圧力が減少することを確認してみましょう。

飛行機は静止した大気中を飛行しますが、飛行機に乗って空気の流れを観察すると、飛行機の前方向から後方向に向かって流れているように見えます。ですから静止した飛行機に飛行速度と同じ空気を流しても何ら違いはな



いはずです。ここでは飛行機の翼を静止させ、その周りに空気を流す実験を行います。

平らな板と膨らんだ板の2種類を用意します。いずれも表面の圧力が測れるように小さな穴を開けてビニール管をつなぎます。また水を入れたコップも用意しますが、透明な水より色のついたコーヒーの方が見易いです。

図5(a)は上面が平らな翼を想定しています。板のある位置に小さな穴をあけ、そこに細いビニールホースをつなぎ、水を入れたコップにビニールホースのもう一方の端を浸します。板に平行に穴に向かってストローから空気を吹き出します。もし穴の位置において圧力が大気圧より低くなれば水は吸い上げられ、逆に高くなればホース内の水は下がります。大人なら強く吹けばストローの出口で50 m/s (大型台風並みの気流速度)の風は作り出せますが、いくら強く吹いてもビニールホース内の水位に変化はありませんでした。では、図5(b)のように、板を凸にしたらどうでしょうか。今度は水は吸い上げられました。強く吹くほど水は高く吸い上げられます。また板を薄いアクリルのようなしなやかな材質で作って、ふくらみをさらに大きくすると水位はより高くなることも確認できました。

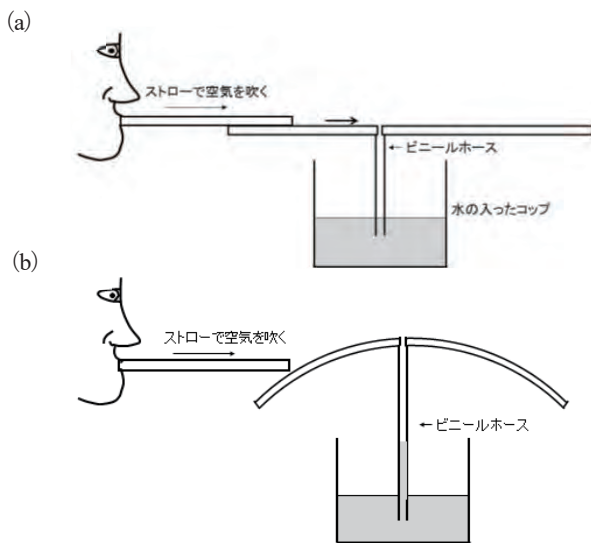


図5 (a) 平らな板と、(b) 膨らんだ板に沿って空気を吹き付けることで、翼のふくらみの効果を調べる実験。

#### 4 揚力発生のしくみ

図5の実験結果をまとめると、翼の形状としてその下面は平らでも良いが、上面を凸にふくらませることで圧力が低くなり、その結果として、翼の下面から上面に向う揚力が発生することがわかりました。

ではなぜ翼にふくらみを持たせると圧力が低くなる

のでしょうか。理由は簡単です。自転車に乗ってカーブを回る際、カーブの外側に飛ばされそうになった経験はありませんか。空気の場合も同じです。空気が翼のふくらんだ表面に沿って流れると表面と直角方向に遠心力が発生します。自転車では遠心力を打ち消すために無意識に体を内側に倒してカーブを回りますが、空気の場合には翼表面の圧力が低くなって遠心力を打ち消し、空気はそのふくらみを滑らかに回り込むことができるのです。ニュートンの第二法則から遠心力は空気の速度の二乗に比例し、ふくらみの半径(翼のふくらみの一部を円の一部とみなした時の円の半径を指す)に逆比例するので、ふくらみが大きいほど圧力の減少が大きくなりますが、一方翼から遠ざかるにつれて翼のふくらみの影響は徐々に減少して遠心力が小さくなり、翼から十分離れると大気圧になります。このように揚力の正体は、翼を回りこむ空気の遠心力によるもので、この力と釣り合うように翼表面の圧力が減少するためだったのです。以上まとめると、圧力は翼表面に直角に作用するので、ふくらみが大きい翼上面の圧力の鉛直方向の成分とふくらみの小さい下面の圧力の鉛直方向の成分との差圧が揚力となります。

また、飛行速度が2倍になれば、揚力は4倍となることは広く知られていますが、この速度と揚力の関係は、遠心力が空気の速度の二乗に比例することと見事に一致しています。この一致は『揚力は遠心力との釣り合いから発生している』というこれまでの説明が妥当であることを裏付けています。遠心力の発生を作用とすれば、圧力減少はその反作用とみなすこともできるでしょう。このように揚力の発生は『翼の上面にふくらみを持たせると遠心力で上面の圧力が低くなるため』と結論付けできます。ふくらんだ翼の上面で周りより圧力が低くなると、圧力の高い上流から流れが加速されることになり、翼下面の流れより上面の流れの方が速くなります。この説明の順序は、ベルヌーイの定理を用いた従来の説明と全く逆であることが分かります。

最後に、実際飛行している旅客機を例に主翼上下面の圧力差は平均するとどの程度の大きさか計算してみましょう。就航中のエアバス社の飛行機 A380 の最大離陸重量は560トン(560,000 kg)です。左右の主翼面積の合計は巡航時845 m<sup>2</sup>ですから、1 m<sup>2</sup>あたりに換算すると660 kgで、日本人の大人ならおよそ10人に相当しますから、やはり大きな揚力が発生していることを実感できます。

#### 謝辞

執筆に当たり、首都大学東京の浅井雅人教授から数々の有意義な助言を頂き、感謝申し上げます。