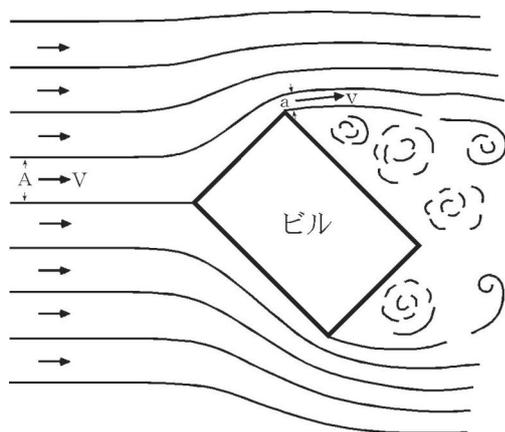


ビル風と飛行機



ビルの回りの空気の流れ



工学博士 西尾 宣明
元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

無から有は生じない

与太郎 大家さん。こないだ久しぶりに東京に行って来たんですけど、風が強い日で驚きましたね。あれは高層ビルの下だからとくに強くなるんですかね。あれ、「ビル風」って言うんでしょう？ ビル風ってどうして強くなるんですか？

大家 えらい！ 与太郎さんのいいところはそうやって何でも理屈を知りたがることです。子供のような心をずっと持っているということですね。

普通の人には「ビルの周りにはビル風が吹いて風が強くなるものだ」というぐあいに納得するだけで、理屈までは知ろうともしない。

それはともかく、ビル風の理屈は難しそうでも実はとても簡単なんですよ。

与太郎 ええ?! 本当ですか？ 専門の学者さんかなんかが「ビルがあると風が3倍ぐらいに速くなる」なんて言っているのを前に新聞で見たような気がするんですけど、そんなことは我々素人にはわからないですよ。

大家 速さが何倍になるかは条件によっても違います。計算でわかることもあれば実験しなければわからない場合もあります。その辺になると素人には無理ですが、元の理屈はそんなに難しいものではないんですよ。

簡単に言えば、基本は無から有は生じないということです。これなら誰でもわかるでしょう？

与太郎 そう言われてもまだ狐につままれているような気分ですがね。

大家 無から有は生じないというのは私たちが住む世界の一番基本になる原理であり、法則です。宝くじを当てたり、株で大儲けした人は無から有を生じたと思うかもしれませんが、世の中全体を見れば、儲けた人がいれば損をした人もいて、お金の総額は変わらない。

与太郎 それはわかるけど、ビル風とどんな関係があるんですか？

大家 ああ、話が少しそれましたね。物理の言葉で難しく言えば質量保存の法則というものです。遠くからビルに向かって、空気が一定の速さで近づいて来るのを想像して下さい。

与太郎 空気が近づいてくる？ それって風が吹いてるってことじゃあないですか？

大家 その通りです。空気が動くのを風とも言います。

与太郎 それじゃあ初めっから風って言えばいいのに。

大家 まあ、文句を言わずに先まで聞いて下さい。

その空気がビルという邪魔者のそばに来ると、当然回り道をして通り抜けます。空気が動く経路は大体この図のようになります。ビルに近いほど、ビルの影響で経路

は大きく曲げられます。この際関係はありませんが、ビルの風下側には空気が不規則な渦を作って淀みます。

ほら、ビルの周りで風が強くなるのはこの図を見ただけでわかるでしょう？

与太郎 ええ？ これでわかるんですか？ ほんとですか？

大家 ほら。ビルの遠くの、たとえばAという面積を速さVで動いていた空気はビルの脇ではaという狭い面積を通り抜けなければなりません。単位時間にAを通る空気の量はaを通る量と同じ筈ですから、aではVよりも速くしなければなりません。その速さをvとすれば、それがどんな大きさになるか、与太郎さんにも計算ができるでしょう？

与太郎 あれ？ Aとかaっていうのは空気の通り道の幅だから面積とは違うんじゃないですか？

大家 えらい！ よく気がつきましたね。じつはこれに高さを掛けなければ面積にならないわけですが、この場合、気流は水平で高さは変わらないものと考えられます。そこで、単位の高さ、たとえば1メートルの高さを考えればいいわけです。このAやaには高さ1が掛けられていると考えて下さい。

それで、さっきの問題はどうなりますか？

与太郎 うーん。動く空気の量は面積に速さを掛ければいいのか？

あっ、そうか。A×V=a×vだから、 $v=(A÷a)×V$ だ。もし、Aがaの3倍だったら空気の速さも3倍になるっていうわけだ。

大家 お見事、お見事。空気が突然どこかに消えてしまったり、どこからか生まれたりすることはない。つまり無から有は生じないというごく当たり前のことが、物理ではものすごく大事なことなんです。

与太郎 ああ分った！ これって川の流れとおんなじですね。川幅が狭くなれば流れは急になりますね。

大家 その通りです。川の場合は深さも関係するから一寸複雑ですが、理屈は同じことです。

もう一つの「無から有は生じない」—ベルヌーイの法則

与太郎 ビル風のことはよくわかりました。大家さんがなぜ風と言わずに「空気が動く」と言ったのかも納得しました。でも、それだけで物理の色々なことがわかるわけではないでしょう？

大家 確かにそうです。質量保存の法則だけでは不十分ですね。そこで、もう一つの保存則が重要になってき

ます。それはエネルギー保存の法則というものです。

与太郎 エネルギーっていうのは電気で言えば電力って言うんだっけ？

大家 ああ、与太さんは電気工事の資格を持ってるんですね。でも、電力は単位時間あたりのエネルギーで、一寸違いますね。

与太郎 いけねえ。電力はワット(W)で、これに時間を掛けたワットアワー(Wh)が電力量、つまり電気のエネルギーってわけだ。

大家 そうそう。その電気でモーターを回して電車を走らせると電気のエネルギーは電車の運動のエネルギーに変わる。しかし、レールと車輪の摩擦で運動のエネルギーの一部は熱エネルギーになってしまう。空気の抵抗も空気の運動エネルギーや熱エネルギーになって電車の運動エネルギーを消耗させる。

しかし、電車の正味の運動エネルギーと、摩擦などで無駄になるエネルギーを全部足したものは入力した電気エネルギーと同じ量になります。つまり、エネルギーの形は変わっても、エネルギーの量が増えたり減ったりすることはありません。エネルギーの保存というのはまあそういうことですね。

与太郎 考えてみれば当たり前みたいですね。でも、その当たり前が大事ってわけですね。

ところで、それとビル風とどんな関係があるんですか？

大家 さっきの図の風の通路、Aとaをもう一度考えてみましょう。質量保存の法則で、単位時間に通過する空気の質量はどちらでも同じでしたね。その質量をMと書くことにしましょう。ところで、その空気が持っている運動エネルギーがどんな大きさか、与太さん、わかるでしょう？

与太郎 運動エネルギーって高校の物理で習いましたよね。たしか、〔質量〕×〔速度の二乗〕÷2でしたよね。そうするとAでは $M×V^2÷2$ 、aでは $M×v^2÷2$ ですね。

大家 そう。よく覚えていましたね。その通りです。

そうすると、Aとaで空気の運動エネルギーはどんな大きさになりますか？

与太郎 質量はどっちも同じで、速度がVからvに変わる。vがVの3倍とすれば——ええっ!？ ビルの脇では運動エネルギーが9倍に増えることになりますね。エネルギー保存の法則から言ったら、これはおかしいんじゃないですか？

大家 そうですね。運動エネルギーを増やす元になる、別のエネルギー源がなくては辻褃が合いません。そのエ

エネルギー源が圧力です。Aのところの圧力、これを p_1 としましょうか。その圧力がaのところでの圧力 p_2 に減った分だけ空気が加速されて運動エネルギーがふえます。つまり、圧力はエネルギーその物なのです。

与太郎 でも、運動エネルギーが9倍にもふえたらずいぶん圧力が下がって、エレベーターで高く上がったときみたいに耳がキーンというんじゃないですか？ 実際にはそんなでもないと思うんだけど――。

大家 その疑問はもっともです。しかし、運動エネルギーを圧力に換算するとそれほど大きなものではないんですね。

さっきの運動エネルギーの式を空気の単位体積、つまり 1m^3 あたりの量で表せば、Mの代りに空気の密度 ρ を使って、 $\text{エネルギー} = \rho \times V^2 \div 2$ と表すことが出来ます。

かりにVが 5m/s 、つまり風速5メートル毎秒で、ビルの脇ではそれが3倍の 15m/s になったとします。空気の密度はおおよそ 1.2kg/m^3 ですから、aを通る空気の運動エネルギーは $1.2 \times 15^2 \div 2 = 135 \text{kgm}^2/\text{s}^2/\text{m}^2$ という値になります。細かい説明は省略しますが、これは1平方メートルあたり135ニュートン (135N/m^2) という圧力の単位になります。Aでの運動エネルギーも同じように計算すると、 $1.2 \times 5^2 \div 2 = 15\text{N/m}^2$ です。つまり、運動エネルギーはAとaの間で 120N/m^2 だけ増加する計算になり、その分だけ圧力が減少しないとエネルギー保存の法則が成り立たないことになります。

ところで 1N/m^2 は1パスカルとも呼ばれ、その100倍の100パスカルを1ヘクトパスカルと呼んでいます。これは気象予報などでおなじみの単位です。

与太郎さん、120パスカル (120N/m^2) をヘクトパスカルで表したらどんな大きさになりますか？

与太郎 えーと、100パスカルが1ヘクトパスカルだから、120パスカルはその1.2ヘクトパスカルっていうことになりますね。

大家 では大気圧は何ヘクトパスカルですか？

与太郎 高気圧だと例えば1015ヘクトパスカルなんかで、低気圧のときは1010ヘクトパスカル位のことが多いですね。いや、台風なんかだと950ヘクトパスカルなんていうこともありますね。

大家 ほら、お天気の中では気圧が何十ヘクトパスカルも変動しています。それでも、耳がきーんと言ったりはしませんね。それに比べれば、ビル風による圧力の変動などは問題にならないと言えます。

与太郎 ふーん。でも、それだったらエネルギー保存の

法則はあまり重要じゃないことになりませんか？

大家 この場合は確かにそうだけれども、飛行機を飛ばしたり、野球でカーブを投げたりするときにはとても重要になってきます。

この、流体が持つ圧力と運動エネルギー、それに位置のエネルギーを加えたものの間のエネルギー保存の法則が、ベルヌーイの法則というものです。

位置のエネルギーというのは高いところにある物体は低いところの物体よりも大きなエネルギーを持つということです。ほら、ダムの水を落として勢いをつけ――つまり運動エネルギーに変えて発電機を回すでしょう。そういう能力のことです。

与太郎 じゃあ、ビル風の場合はどうなんですか？

大家 風は大体水平に近いし、空気の密度も低いので位置のエネルギーは無視できますね。飛行機などでも同じです。密度の大きい液体ではこれが重要になるということです。水の場合、空気の800倍以上の密度ですからね。

飛行機の場合

与太郎 ビル風は5メートルの風が3倍になって運動エネルギーが9倍になっても、圧力はいくらかも変わらないってことでしたよね。飛行機には何か別のからくりがあるんですか？

大家 からくりと言え、飛行機ではビル風を翼の上側だけに起こさせることですね。上側の流れを速くしてやれば、その分下側よりも圧力が下がって、全体として翼には上に持ち上げられるような力が働きます。その力の分、機体や人や荷物を支えて空に浮かすことが出来るわけです。

与太郎 でも、 v がVの3倍になっても大したことがないのに――飛行機では何十倍にもなるんですか？

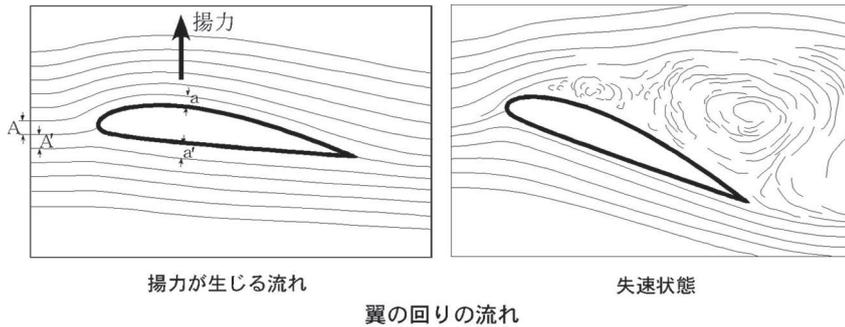
大家 いや、せいぜい1.5倍と言ったところですね。しかし、元々の速さが違うとそれが大きく効いてきます。飛行機ではVが毎秒100メートル以上もありますからね。

ちなみに秒速100メートルは時速にしたらいくらになりますか？

与太郎 えーと、1時間は六六三十六で3600秒だから時速360キロですね。そんなに速い飛行機じゃないですね。

大家 その100メートルが1.5倍の150メートル毎秒になったとしたら、運動エネルギーはどの位増えますか？

与太郎 150の二乗から100の二乗を引いてと――12500！ すごく大きい数字だな。これに空気の密度



翼の回りの流れ

(1.2) を掛けて2で割る——と。7500パスカル (N/m^2) だ!

これを100で割って、75ヘクトパスカル。強烈台風並みに気圧が下がるってことですな。

大家 そうなんです。ちなみに、パスカルの値を重力の加速度の9.8 (m/s^2) で割れば普段使っている重力単位のキログラム (kg重) に換算されます。つまり、7500パスカルは約750キログラム毎平方メートル (kg重/ m^2) です。これは翼の面積が1平方メートルあれば750キログラムの重さを持ち上げることが出来るということです。

与太郎 翼が10平方メートルなら7.5トンか。これなら飛行機が空を飛ぶのも不思議じゃないですね。

大家 ただ、離陸するときはそれほど大きな速度が出ていないから、もう少し余裕がなければなりません。最近の飛行機は離陸と着陸のときにスラップやフラップという物を出して、翼の面積をうんと大きくするように工夫されています。

与太郎 ところで、翼の上側だけにビル風を起こすのはどんな細工がされているんですか？

大家 そうそう、それが肝心なところですね。

翼の一般的な断面の形は図のように上側が膨らんで、下側はほぼ真直ぐになっています。そうすると上側の方が下側よりも流れの通路の幅が狭くなります。遠方での幅Aに対して翼の上での幅aは60から70%ぐらいになっています。その分、流れの速さは増えることになります。5割位ですね。下側はaユの幅がAユと変わらないか、むしろ少し増えるぐらいです。

与太郎 そうすると速さは減って圧力は増えるわけですね？ その分翼を押し上げる力が増える——。

大家 その通りです。翼を押し上げる力を専門用語では揚力といいます。ただし、これは翼の迎え角が小さくて下側の流れと上側の流れが翼の後縁で滑らかに合流する時の話で、迎え角が大きくなると上面の流れは翼から

剥がれてその下に渦が生じます。こうなると揚力は減少し、翼を後に押し返す抵抗力ばかりが増えて、飛行機は飛べなくなってしまいます。これが失速という現象です。

与太郎 ビルのように角張った物ではさっきの絵のように渦を巻く範囲が広いんですね。初めから失速してるようなもんだ。この渦に巻き込まれるのもまた嫌らしいんですね。

大家 その通りですね。

与太郎 台風のとかなんか、横殴りの風をよけるように傘を広げたときに風向きが変わって、傘がキノコになっちゃうなんていうのがテレビで映されたりするけど、あれなんかその渦のせいですかね。

大家 そうかも知れませんね。

ところで、翼に揚力が発生するのもビルの後に渦巻きができるのも、元はと言えば空気に粘りがあるというか、空気と物体あるいは空気同士の間摩擦が生じることが原因なんです。

与太郎 ふーん。良くわかんないけど、摩擦って大抵は悪い働きをするもんでしょ？

大家 そうですね。摩擦がなかったらビルの後に渦なんかできません。その代り野球のピッチャーはカーブを投げることができません。直球ばかりです。空気の抵抗がないからスピードは全然落ちませんがね。

同じ理由から飛行機の翼には揚力が生まれません。

与太郎 変化球のない野球なんてつまらないですよ。言うなれば摩擦は必要悪ってことですね。

大家 面白いことを言いますね。でも善とか悪で評価すべき物ではないと思います。自然の法則がそうになっているだけの話ですからね。

この、摩擦がカーブとどう係わっているかは『ガリレオのそれでも地球は回る』という本の「そよ風、北風、境界層」というお話の中書いてあるから読んでみてください。これにもまさにベルヌーイの法則が関係しているのです。

翼の場合に摩擦がどう働いているかを説明するのはボールの場合より一寸面倒になりますから、また機会があったらお話することにしますね。

与太郎 でも、無から有は生じないって言う当たり前のことがいろんな理屈の元になってるって言う話は勉強になりました。

大家 そう言ってくれてありがとう。