



—No. 15

比重の実験

木村 龍治*

1. はじめに

英国マンチェスター大学の構内に、第1図に示すような異様な彫像がある。裸の男性が風呂から立ち上がった姿である。アルキメデスが「アルキメデスの原理」を発見した瞬間を表しているそうである。「アルキメデスの原理」とは、「水中にある物体には、その物体が押しつけた水に働く重力と同じ大きさの上向きの力が働く」性質をいう。その力を浮力という。

浮力は中学校の理科で学習するが、理解しにくい概念のようである。浮力を発生させる原因が物体と水の境界に働く水圧であることは、中学校の教科書にも書いてあるが、なぜ、押しつけた水に働く重力と同じ大きさになるのであろうか。それを理解するには、重力場に置かれた水の圧力が静水圧平衡になっていることを知る必要がある。第2図は静水圧平衡の説明図である。水中にある水の一部を囲んで、閉じた領域を作る。その中にある水に働く下向きの重力は、領域の境界に働く水圧の合力と等しい。なぜなら、もしも、2つの力が等しくなければ、その領域に力が働いて、上下方向の運動が発生するからである。その領域が静止しているということは、2つの力が釣り合っていることを意味する。このような水圧を静水圧平衡という。領域を堅い殻で囲み、中の水を吸いだしてしまっても、殻の境界の水圧の合力は、吸い出す前と変わらない。従って、その合力は、吸い出した水の重さに等しい。それが浮力の原理に他ならない。

大気も重力場にあるので、大気圧も静水圧の状態にある。気体なのに「水圧」というのはおかしいので、気象学では、静水圧平衡の代わりに「静力学平衡」と



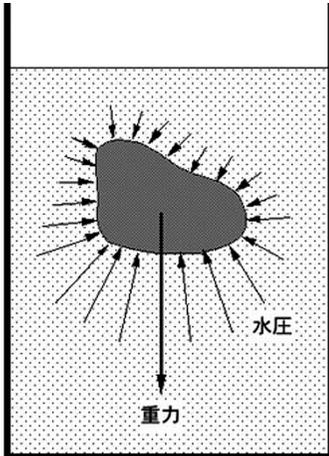
第1図 マンチェスター大学の構内にあるアルキメデスの彫像。

いうことが多い。英語では、大気に対しても hydrostatic balance というが、直訳すれば、静水圧平衡ということになる。

気象学では、まれに、「負の浮力」というような言葉を使うことがある。下向きの浮力という意味である。アルキメデスの原理に従えば、浮力は常に上向きで、下向きになることはない。「浮力」の定義が異なるのである。真の浮力（上向き）と、その領域の重力（下向き）の合力を浮力と定義すれば、重力のほうが大きい場合、真の浮力と重力の合力は下向きになる。その状態を「負の浮力」という。負の浮力が働くと、その領域は落下する。もちろん、重力のほうが小さい場合は、その領域は浮き上がる。このような定義は紛らわしいので、真の浮力と区別して、「相対浮力」と

* Ryuji KIMURA, 放送大学。

© 2012 日本気象学会



第2図 水を囲む領域（濃い影の部分）の境界には、境界面に垂直に水圧がかかっている。圧力の方向を矢印で示してある。水圧の合力は、その領域の水に働く重力とつりあっている。

呼ぼうという意見があるそうである（藤部編集長からのコメント）。

このような浮力の性質のため、比重が1より小さい物体が水の中にあれば浮き上がり、比重が1より大きい物体は沈む。しかし、その原理が成り立たない場合がある。

2. ピンポン玉を水に沈める実験

ピンポン玉に直径5mmほどの穴をあけ、そこから水を注入して、内部を水で満たしたピンポン玉を作る。空中の重量は34gほどあるが、水中に入れると、浮力の影響を受けて、約0.9gの重量になる。比重は1より大きい。

このピンポン玉を水深約20cmの水槽に入れて、水面で手を離すと、約2秒で底まで落下する。ところが、ピンポン玉を水中に入れる前に、水をスプーンでかき混ぜて、第3図に示すような渦巻きを作っておき、その中心部にピンポン玉を落下させる。その結果を第4図に示す。確かに、ゆっくり落下していくが、落下速度が極端に遅いことが分かる。あたかも、比重が1に近づいた感じなのである。なぜ、このような現象が起こるのであろうか(後注1)。

3. 渦巻きと水圧

第5図aは、この実験を単純化したモデルであ



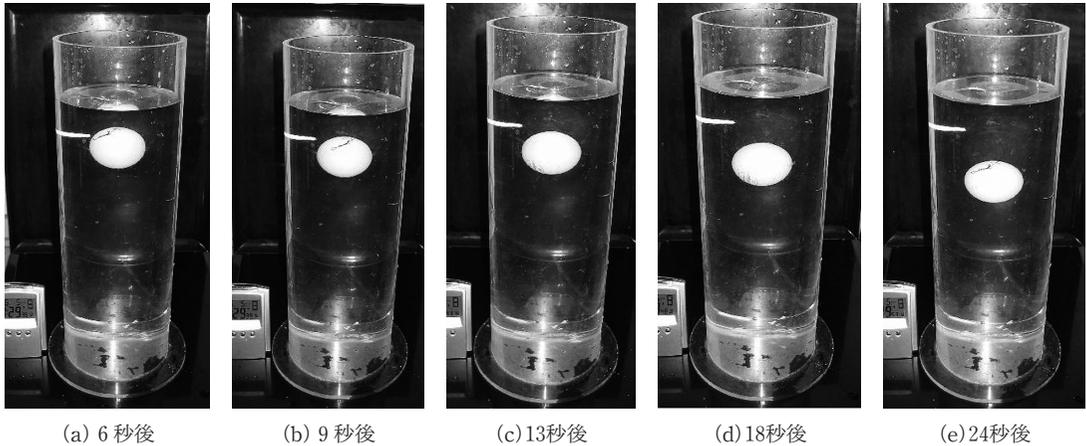
第3図 円筒形的水槽に渦巻きを作る。水面が凹んでいるので、渦巻きができていることが分かる。

る。円筒容器の中にできる渦巻きを剛体回転の渦巻きであるとする。すなわち、スプーンで渦巻きを作るのではなく、水槽を回転台の上に乗せて、高速回転させる状況を考える。この場合、水面は回転放物面になる。そこで、底面も、水面と同じ形状の回転放物面とする。また、ピンポン玉の代わりに、同じ回転放物面の形状をした円板が水中で落下することを考える。

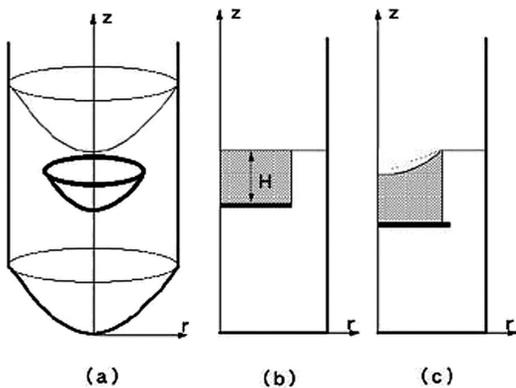
なぜ、底面を回転放物面にするかといえば、底面における水圧が半径によらず一定になるからである。また、円板が水中に固定されている場合は、回転放物面をした円板の上下の水圧も、半径によらず一定になる。第5図bは、縦軸に、底面からの高さを取って、第5図aと同じ絵を描いたものである。円板が平面のように描けるのがミソである。

さて、この円板の比重は1より大きいので、重力によって沈むわけだが、それに伴って、円板の上にある円柱状の水は引き延ばされることになる。すると、渦巻きが強化される(木村 2011参照)。その結果、水面はますます凹むことになる。それに伴って、円板上部の水圧は低下する。その様子を示したのが、第5図cである。

次に、円板の下側にある円柱状の水の変形について考えてみよう。円板が水を押すので、円板に押しつぶされるようにして、円柱状の水が広がる。その結果、渦巻きの回転は、押される前よりも弱くなる。それは、渦巻きの中心における水圧が押される前よりも高くなることを意味する。すなわち、円板が沈むと、円板の上部の水圧は低下し、円板の下部の水圧は高くな



第4図 あらかじめ水槽内の水に第3図に示すような渦巻きを作っておき、その中心部にピンポン玉を落下した後のピンポン玉の位置。写真の下の時間は、落下させてからの時間。



第5図 実験装置の単純化。ピンポン玉の代わりに回転放物面の板を考える。(a) 実験装置のモデル化。(b) 縦軸に底面からの高さを取ったときの図。(c) 円板が少し沈んだときの水面の変形。

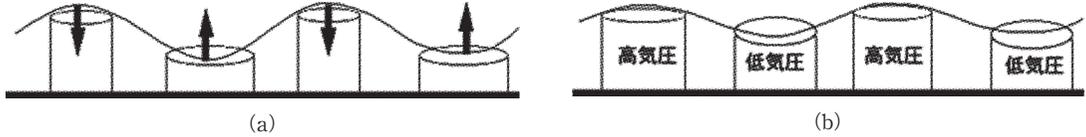
る。この水圧差は、円板を上側に押す力になる。その力が、円板を落下させるのを妨げるのである。

この実験で分かることは、回転している流体の柱は、引き伸ばされると、回転が速くなり、中心の圧力が低下する。逆に、押しつぶされると回転が遅くなり、中心の圧力が高くなる、という性質である。その結果として、浮力（上向きの水圧）が増し、ピンポン玉の比重が小さくなったような現象が生じたのである。

4. 高気圧と低気圧

大気は、固体地球の上に積もって、地球と共に自転している。無風の状態では、大気は剛体回転を行っている。地表面はジオイド面なので、(海面高度であれば)地上気圧はどこでも等しい。ところが、現実の地上気圧の分布は、中・高緯度帯であれば、気圧がどこでも同じということはない。常に、低気圧や高気圧が存在している。それは、大気の厚さが凸凹していることを意味している。

大気を、第6図aに示すように、平面の上に積もった水と考えてみよう。但し、この図は、第5図cに対応するもので、剛体回転が平面になっている。初期に水面が凸凹している状態を考える(流れがないのに、なぜ、水面が凸凹しているか、という問題は、ここでは考えない)。盛り上がった部分は下がろうし、凹んだ部分は、盛り上がろうとする。普通であれば、水平面になってしまうはずであるが、大気が回転しているので、そうはならない。盛り上がった部分が下がろうとすると、渦巻きが押しつぶされて、渦巻きが弱くなる。それが高気圧に他ならない(第6図b)。高気圧が発生すると、渦巻きに働くコリオリの力が、渦巻きの内向き方向に働き、それ以上、大気柱が押しつぶされるのを妨げる。一方、水面の凹んだ部分が盛り上がろうとすると、大気の柱が引き伸ばされて、渦巻きが強化される。その渦巻きに働くコリオリの力は、外向き方向に働き、それ以上、大気柱が引き伸ばされるのを妨げる。その結果、長時間、大気の凸凹が維持されることになる。地上天気図に描かれた気圧の部分



第6図 高・低気圧の成因. (a) 無風状態で、水面が凸凹している. (b) 盛り上がった部分が下がるために、高気圧が発生する. 凹んだ部分は持ち上がろうとして、低気圧が発生する. その結果、水面が凸凹した状態が持続する.

が、急速に変化しないのは、気圧の分布が渦巻きを伴っているからなのである。あたかも、渦巻きに伴う気圧の分布がピンポン玉の落下を妨げるように、渦巻きに伴うコリオリの力が、水面が水平面になるのを妨げている。

5. 地衡風調節

何かの原因で、大気に凸凹ができると、第6図に示したような応答が生じて、高低気圧の渦巻きが発生する。この現象を地衡風調節という。地衡風調節の結果、地上天気図には、高低気圧の渦巻に伴う気圧の分布が現れる。

地上天気図をよく観察すると、高低気圧の大きさは、大体3000kmである（気象学では、このスケールの気圧分布を総観規模（synoptic scale）という）（後注2）。地衡風調節のプロセスを考えると、大気の凸凹が重力で水平になろうとする効果と、それに伴って発生するコリオリの力が水平になるのを妨げる効果のせめぎ合いが重要であることが分かる。そのせめぎ合いには、渦巻きのスケールが関係している。そのスケールは、重力の強さを代表する重力加速度の大きさ（ g で表す）、コリオリの力の大きさ（コリオリ・パラメーター $f (=2\Omega \sin\phi)$: Ω は地球の自転角速度、 ϕ は緯度) で表す)、大気の厚さ（ H で表す）が関与している。試しに、この3つの量を組みあわせて、長さの次元のある量を作ると、 $D = \sqrt{gH}/f$ が得られる。大雑把な見積もりとして、 $g \sim 10\text{m/s}^2$, $H \sim 10\text{km}$, $f \sim 10^{-4}\text{s}^{-1}$ を代入すると、 $\sqrt{10} \times 1000\text{km}$ となる。大体、3000km に近いことが分かるであろう。この長さをロスビーの変形半径という。

6. 比重の実験で学んだこと

- 1) 大気は静力学平衡の状態にある。
- 2) 無風の気圧は、地球上から見ると静止しているように見えるが、実は、地球の自転に伴って、剛体回転を行っている。空気柱が引き伸ばされると低気圧性の渦巻きが発生する。逆に、空気柱が押しつぶされると高気圧性の渦巻きが発生する。
- 3) 地上天気図に描かれる気圧配置は、剛体回転の状態にある大気柱が伸ばされたり、押しつぶされることによって発生する。厳密な地衡風であれば、(収束・発散を伴わないので) 渦管が伸縮することはない。現実の大気は、完全に地衡風平衡が成り立っていないので、低気圧や高気圧が生成したり消滅したりする。
- 4) このような仕組みで発生する渦巻きのスケールは、ロスビーの変形半径に近い。

後注

(後注1) この実験では、直径11cmのアクリル製の円筒容器を使用した。円筒形のペットボトルでも、同じ実験ができる。但し、ペットボトルを使用するときは、底の部分を切り取って、逆さまにして使う。口の部分を切り取った容器は、底面が凸凹していて、きれいな渦巻きができない。

(後注2) 3000km というのは大雑把な目安である。梅雨前線に沿った低気圧は直径1000km程度のものである。

参考文献

木村龍治, 2011: ホッケ柱. 天気, 58, 887-889.