手作り実験あれこれ——教育の現場から(3)*

谷田 好通**

Hand-made Experiments in a Lecture Room (3)

Yoshimichi TANIDA

15. マリオットの瓶

これはいろいろなところで紹介されておりますので、ご存知の方も多いかと思いますが、学生にトリチェリの定理を考えさせるのに手頃なものです。

少し大きめの透明なペットボトルを用意します。図 22 のように、蓋にストローを通してセメダインで固定し、ボトルの底に近いところに錐で小さなあなを開けます。蓋はプラスチック製ならば、簡単にあなが開けられます。ボトルに水を入れ、ストロー付きの蓋で栓をします。水を入れるときは、あなは爪ようじなどで栓をしておきます。このとき、ストローの下端が水の中に入るようにして下さい。栓を抜いてあなから水を流出させると、ボトル内の水位 (H) が低下してゆきます。トリチェリの定理によると、あなからの水の流出速度は $\sqrt{2gH}$ (g : 重力の加速度) であって、水位 H が下がれば減少するはずですが、ところが、水はいつまでたっても (水面がストローの下端に達するまで)、同じ速度で流出し続けます。何故でしょうというわけです。

図 22 マリオットの瓶

答えはいたって簡単です。観察すると、水の流出とともにストローから空気がボトルの中に入ってゆくのがわかります。このときストローの中は空気で満たされており、ストロー先端 (水位 H') での圧力は大気圧になっているはずですが、したがって、トリチェリの式では H ではなく H' (ストロー先端から測ったあなの深さ) を使わねばならないことがわかります。水面がストロー先端に達するまでは H' は一定ですので、あなから出る水の速度は一定に保たれることになります。このとき、瓶の中の空気は水柱で ($H - H'$) の大きさだけ負圧になっています。

マリオットの瓶は、家畜等の水飲み場で一定流量の水を供給するのに使われたりするというのですが、 H' を調節すれば適当な量の水を一定に供給することができるので、いろいろ応用できるのではないのでしょうか。

16. 吹いても吸いつく円盤

大小の二つの円盤とストローを用意します。大きい円盤は食料保存用プラスチック容器の蓋など (直径 8 cm もあればよいでしょう) でややしっかりしたもの、小さい円盤は薄くて軽いプラスチックシートを直径 5 cm 位の円に切り取って作ります。

図 23 に示すように、大きい円盤の中心にあなを開け、

図 23 吹いても落ちない!

* 原稿受付 1997 年 1 月 7 日

** 東海大学工学部

そこにストローを接着剤で固定すればでき上がりです。そこで、ストローが垂直になるように持ち、小円盤を下から軽く大円盤にあてます（中心をほぼ合せる）。まず、ストローから空気を吸い込むと、当然（？）小円盤は大円盤に吸いついて、手を離しても落下しません。次に、ストローから息を強く吹きながら小円盤から手を離すと、小円盤は吹き飛ばされると思いきや、この場合も大円盤に吸いついて落ちません。吹くのを止めると、小円盤はすぐ落下します。息を吸っても吹いても小円盤は吸いつくというわけです。何故でしょう。

これはベルヌーイの定理で説明することができます（図参照）。息を吹く場合、円盤間の隙間を通る流れは、放射状に流速を減少しながら流れて、隙間出口で大気圧の状態になって流出します。したがって、隙間の中の流速は出口での流速よりも大きく、その分だけ圧力は大気圧よりも低くなっています。小円盤の下面には大気圧が働いていますから、小円盤は大円盤に吸いつけられることになります。

厳密には現象はもっと複雑で、ストローから吹きでた噴流が小円盤にあたって、それを落とそうとする力が生じているはずですが、したがって、その衝突力よりも上述の圧力による力の方が大きい場合に小円盤が吸いつくわけですから、大円盤に開けたあなの大きさと小円盤の直径との兼ね合いが重要になります。図の場合、あなの直径が約2 mm、小円盤の直径が約5 cm でしたが、いろいろと試みて下さい。

17. 水道で見るいろいろな流れの現象

水道の水を利用した流れの可視化はいろいろあります。

水道の蛇口をゆっくり開けると、水が滑らかに透き通って見えるように流出し、下に行くにしたがって次第に細くなります（図24（左））。このとき流れは層流状態です。1次元的に考えて、連続の式とベルヌーイの定理よりその形状を求めるのは、学生にとってよい演習問題で

図24 蛇口からでる層流と乱流

しょう。蛇口の下に十分空間があって水を十分下まで落下させることができるときには、流れが乱れてきて乱流状態になりますから、流れの遷移を説明することもできます。図24（右）のように蛇口より水を勢いよく出すと、流れは乱れて透き通って見えなくなります。このとき流れは乱流になっています。

また、図25のように、水道水を流しの底に当てますと、水の薄い層の放射状流れが作られ、それがある半径のところで急にジャンプしてやや厚い層の流れになります。前者が射流、後者が常流で、それぞれ超音速流、亜音速流に相当し、その境のジャンプ（跳水）が衝撃波に相当します。この現象を利用して、超音速流れを調べるための水槽が浅底水槽です¹⁷⁾。

このように水道を利用して、ほとんど道具なしでもいろいろの現象が観察されますが、コアンダ効果も簡単に視ることができます。ここで述べる実験は誠に簡単なもので、用意するものは円筒状の物体だけです。円筒状の物体としては、第3項で用いたトクホンチールのプラスチック容器（直径約3.8 cm）や塩化ビニール管などが便利でしょう。図26に示すように、円筒を水平におき、その表面にそうように水を注ぐと、水は円筒に触れて横に

図25 水の衝撃波（跳水）

図26 コアンダ効果

広がりますが、その後真っ直ぐに落下するのではなく、円筒表面を回り込んで90°近く曲げられ、水平方向に流出します。これがコアング効果と呼ばれるものです。円筒などに沿って噴流が流れると、表面近くの境界層内が負圧になり、外側の大気圧によって水が円筒表面に押しつけられるわけです。円筒の代りに糸で吊るしたピンポン玉などを使うと、負圧によって流水の方に引き寄せられるのがわかります。このコアング効果は、流体素子など、いろいろなところで利用されています¹⁸⁾。

これらの実験は、教室などで水道が利用できない場合には、薬缶や水筒から水を注いでも行うことができます。

18. 粘性を見る

流体の粘性を測定する機器に、回転円筒粘度計があります(図27)¹⁹⁾。この原理に似せて、粘性効果を目で見る簡単な装置を作ってみました。

図28がそれで、缶詰の空き缶の上下の底を取り去り、2本の糸で棒(箸など)に吊るしただけのものです。缶をひねって離すと、缶は回転振動します。空気中で振動させると、次第に振動振幅が減少しますが、振動はかなり長く続きます。一方、図のように水をいれた容器(学生

図27 回転円筒粘度計

図28 粘性を見る

が横から見るときには、透明なプラスチック容器がよいでしょう)に缶を浸けて振動させると、振動はすぐ減衰して止ってしまいます。

これなども、空気と水の粘性の違いがわかっている、成る程といった感じです。

19. 翼端渦

飛行機が飛んでいるときには、翼には揚力が発生しています。これは、翼の上面には負圧、下面には正圧が生じているからです。したがって、翼の長さが有限の場合、その圧力差によって、翼の先端では翼の下面から上面に巻き込むような流れが生じ、翼の下流に流れ方向に軸をもつ長い渦が形成されます。これが、翼端渦あるいは随伴渦と呼ばれるもので、飛行機雲を作ったり、ジャンボ機のような大型機では非常に大きくて強い渦が生じて危険をもたらしたりします。

翼端渦も簡単な方法で見ることができます。図29のように、厚紙で作った翼の先端の後縁付近に、毛糸などをほぐした軽くて柔らかい糸をセロテープなどで付けます。私の場合、翼は手にもって扱いやすい大きさの約10cm×5cm、糸の長さは5cm位にしました。そうして、翼に扇風機やヘアドライヤーで風をあててやります。迎え角が小さいときには糸は真っ直ぐになびいていますが、迎え角を次第に大きくしてゆくと糸がくるくると回転しはじめます。これより翼端渦が生じていることがわかります。糸の付ける位置によってはうまくゆかないことがありますので、そのときにはいろいろと試してください。

図29 翼端渦

図30 渡り鳥の編隊飛行

この翼端渦によって翼の下流外側では吹上げるような流れが生じるので、その中に入ると上昇気流を受けながら楽に飛ぶことができるわけで、渡り鳥はそれを利用するためにV字型の編隊飛行をすると考えられています(図30²⁰⁾).

20. 渦輪

渦輪は、流体力学の最も基礎的な現象の一つとして多くの研究がなされており、綺麗な可視化写真も紹介されています(図31²¹⁾). また、古くからタバコ好きの手(口?)なぐさみとして、唇を丸めてタバコの煙で渦輪を作ることが行われており、巧い人は二つ続けてだして渦輪の追越しなどを演じることもできます。

そのような高尚なやりかたでなく、手軽に、またタバコがのめない人でもできる方法は沢山あると思いますが、その一つをご紹介します。これは、たまたま呼吸の研究で脈動流発生装置を作った際に考えついたものです。

市販の風呂釜洗浄器があります。これはプラスチック製の蛇腹の容器の中に洗剤が入っているものですが、その蛇腹容器を利用しました。図32がそれで、蓋が2重になっていますので中蓋を取り去り、火をつけたタバコか線香を中に吊るして煙を充満させます。外蓋の口が丁度ベルマウス状になっていますが、容器の底を軽く叩くとその口から渦輪が放出されます。簡単な装置で手でもってやりますので、一発目はかなり綺麗な渦輪がでますが、二発続けてだすことはなかなか難しいようです。

そうこうしておりましたら、最近NHKテレビの“おれは日本のガリレオだ”という番組で、米村伝治郎氏が四角い紙箱(大小様々)の一つの面に円形のあなを開け、箱の中に煙(たきぎ等の)を入れて箱を叩くと、綺麗な渦輪が作られるという実験をしておられるのを見ました。そこで、手頃な空き箱にあなをあけ、中に線香をいれて試してみましたら、簡単に渦輪を作ることができました。このとき、渦輪は水平方向にだしても上向きにだしてもかまいません。空き箱を使う方法は、簡単でなかなかよいと思いました。

21. ガリレーの落下実験は本当?

ガリレオ・ガリレーのピサの斜塔での有名な落下実験があります。二つの物体を同時に落とすと、物体の大きさや重さに関係なく、同時に地面に到達したというものです。その実験では、短時間で落下してしまいますので、傾斜した床面でゆっくり落下させて重力の加速度を測定することも考えられています。

さて、そこで二つのピンポン玉を用意します。その一つには錐で小さなあなを開け、そこから水を一杯に注入し、栓をしておきます。水が洩らないように栓にボンドなどを塗って、しっかりあなを塞いでください。水でなく砂などでもよいでしょう。

まず、二つのピンポン玉を鉛直に自由落下させて見ま

図31 渦輪

図32 渦輪を作ろう

す(床にスポンジでもひいて下さい)。ピンポン玉は両方ともほとんど同時に着地します。確かに、ガリレーの結果の通りです。次に、図33のように、30°位に傾斜した板(下端にスポンジ付きのストッパーをつける)の上で、ピンポン玉を同じ高さから同時に転がしてやります。そうすると、水の入った重いピンポン玉の方が大きな速度で落下してゆきます。なんと、ガリレーの結果と矛盾?!

と言うと大げさですが、これはピンポン玉が回転しながら落下した結果であって、ニュートンの運動の法則に矛盾するものではありません。もし床面との間に摩擦もなく回転もしないで落下することができれば、同じ速度

図 33 ガリレーの嘘?

図 34 基本パターン (一部を拡大)

(a)

(c)

(b)

(d)

(e)

図 35 干渉縞のいろいろ

で落下するはずですが、ところが、回転する場合、慣性の回転半径が小さい方が回転しやすく、速く落下します。回転半径は、質量が回転の中心に対して分布する平均的な半径とでもいえるもので、球（中実）、円柱（中実）、球殻、円筒殻の順に大きくなるので、水の入ったピンポン玉の方が速く落下するというわけです。

22. 干渉縞

濡れた路面に落ちたエンジンオイルの油膜を見ると縞模様が見られます。また、薄い絹織物などを2重にして透かして見ると縞模様が見えます。前者は光の波の干渉縞、後者はモアレ縞と呼ばれる干渉縞で、流れの可視化や物体の形状測定などに広く使われております²²⁾。

OHP フィルムを使って、図 34 のようなパターンを用意します。製図に使うスクリーン（あみ）などを使うと便利ですが、線の間隔(波長)が多少異なるものをコピー機で作っておきます。

それらのパターンを重ね合わせると、図 35 のように色々な干渉縞を作ることができます。OHP を用いると

多くの学生に示すことができます。

(a)波長の異なる平行波による干渉:

- ・僅かに異なる周波数をもつ音のビート等。
- ・一枚をゆっくりと線に垂直方向にずらしてゆくと、干渉縞は速い速度で移動する。ジェットエンジンの特定周波数騒音は、動翼と静翼が作る圧力の干渉縞がこのように翼列の周方向に超音速で伝播することによって生ずる干渉騒音である。

(b)同一波長の平行波の交差:

レーザ流速計における交差光の干渉縞等。

(c)円形波の干渉(1):

2点から放射された同一波長の波の干渉。

(波長がやや不均一なので干渉縞が歪んでいる)

(d)円形波の干渉(2):

2点から放射された異なる波長の波の干渉。

(e)平行波と円形波の干渉

23. むすび

少々手作り実験から話がそれますが、一昨年暮れの御用納めの日の朝9時半頃、たまたま大学(平塚市)の6階の自室で北の空を眺めておりましたら、薄雲がかかった空に綺麗な円形の青空が3個ほどほぼ等間隔に直線状に並んでいるのを見つけました。これは面白いということで、写真を撮るべく準備をしているごく僅かの間に消滅してしまいました。そこで、一応スケッチして(図36)、後で木村龍治先生(東大海洋研)に見てもらいましたら、これは山岳波によるものらしいが、雲の列ができるのが普通で、このように青空が列になっているのは珍しい、写真だったら気象学会誌(?)の口絵にだせたのだが、ということで残念に思ったものです。気象研究所の花房龍男氏にも伺ったところ、気象データから富士山の山岳波によるものであろう(同・清野氏の分析)とのことでした。これなどは“自然の手作り実験”とでも言えましょうか。

このような現象を観察できたことは非常に幸運であつたわけですが、その気がなければ“見れども視えず”ということになります。手作り実験の場合もそうで、注意

して見ているといろいろな現象が視えてきますし、また身のまわりのがらくたも宝の山になります。さらに、そのような素朴な観察から大きな成果が産みだされるかも知れません。そういう意味で、手作り実験は学生に対してのみならず教える側にも教育的効果があり、創造の世界への道を開くのに大いに役に立つのではないかと思います。少々独りで勝手に楽しんでいるようなところもありますが、最初に書きましたように少しでもお役に立てばよいかと願っております。

最後に、3回にわたって今まで“開発”した手作り実験を紹介する機会を与えていただいた編集委員会前委員長の大島裕子先生、いろいろとご面倒をおかけした幹事的小倉研治先生および委員の方々、およびご教示いただいた先生方に厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1)~12) は前々号, 13)~16) は前号参照。
- 17) 富田幸雄: 浅底水流による高速気流の研究(2), 日本機械学会論文集 21-101 (1955), 22.
- 18) 機械工学便覧: 日本機械学会編 A5 (流体工学), 66.
- 19) 谷口修, 堀込泰雄: 計測工学 (第2版), 189, 森北出版.
- 20) 東 昭: 生物・その素晴らしい動き, 109, 共立出版.
- 21) 山田日出夫: 流れの可視化ハンドブック (浅沼強編), 308, 朝倉書店.
- 22) 新版流れの可視化ハンドブック, 第8章, 朝倉書店.

本企画の本稿をお読みにになった会員の皆様には「試してみました…」などのご意見ご感想を編集委員会までお寄せくださることを期待しております。
(編集委員会)

図 36 山岳波による青空円盤列