手作り実験あれこれ——教育の現場から Part 2 (2)*

木村 龍治**

Hand-made Experiments in a Lecture Room Part 2 (2)

Ryuji KIMURA

4. 風の原理

野外では、無風の状態になることはまれです。地上付近では無風になることもあります。上空では、いつでも風が吹いています。しかし、風は目にみえないので、風の吹く様子を観察して、その原理を理解するというわけにはいきません。そこで、風の吹き方を教室で教えるとき、次のような実験を行います。

長さ 60 cm、高さ 15 cm、奥行き 2 cm 程度のアクリル樹脂の箱を発泡スチロールの板で 2 つに区切り、向かって右側に水、左側に牛乳を入れます (図 3(a))。深さは、どちらも同じになるようにします。但し、牛乳は密度が大きすぎるので、半分ほど水で薄めたものを使います。まず、右側に水を入れ、次に、左側に半分ほど牛乳を入れます。そうすると、発泡スチロールの防水が不完全であっても、水が実験の前に牛乳と混ざってしまうことがありません。最後に、水面の高さが水と同じになるまで牛乳の中に水を入れます。

このような状況は、夏の朝の海岸近くの大気の状態に似ています。日射によって地面が加熱されるので、地面付近の空気密度は小さくなります。一方、海面水温はほとんど変化しませんから、海上の空気は朝になっても、陸地の上ほど暖まりません。その結果、海岸線を挟んで、陸地の上には暖かい空気が、海面の上には冷たい空気が積もることになります。水は陸地の上でできた暖かい空気、牛乳は海上の冷たい空気、発泡スチロールの仕切り板は海岸の位置を表しています (水面の高さは、高さ 1 km の大気に対応します)。実際の大気中には仕切り板はありませんから、仕切り板を持ち上げて取り除きます。すると、容器の底に沿って、牛乳がくさびのような形になって右側の水の中に侵入する様子が見られます (図 3(b), (c))。これが、大気中の「海風」に対応します。一方、水面の近くでは、水が牛乳の領域に侵入します。気象学では、このような流れを「海風の反流」といいます。

なぜ、このような循環が生じるのでしょうか。牛乳の密度が水より大きいために、仕切り板を取る前は、どの深さでも、仕切り板の左側の圧力が右側の圧力より高く

なっています。この圧力に押されて、水全体が右側に押されるために、水側の水面が牛乳側の水面より高くなります。その結果、水面の近くで水が牛乳側に侵入するわけです。一方、容器の底近くでは、密度の違いによって牛乳側の圧力が高いので、牛乳が水側に侵入します。

この実験は、風が水平の圧力勾配によって発生することを教えてくれます。牛乳の先端部は、先がまるいくさび型になります。その先端部を「海風前線」といいます。一般に軽い流体の内部に重い流体が侵入する流れを「重力流」といいます。「海風前線」は重力流の一例です。「重力流」のもう一つの例は、積乱雲から地面に向けて重たい空気が落ちてくる場合です。このような場合の先端部は「突風前線 (ガストフロント)」といえます。図

図 3 水平の圧力勾配によって風が発生することを示す実験。容器の左側に水でうすめた牛乳、右側に水を入れ、仕切り板を取り除いたときの時間発展を示す。

* 原稿受付 1997年7月24日

** 正会員 東京大学 海洋研究所

図4 メルボルン市に押し寄せる砂嵐。重力波の先端がダストで可視されている。重力波は積乱雲から吹き出す冷気流によって作られる。

4は、オーストラリアのメルボルン市内に押し寄せてきた突風前線です。重力流の内部が砂埃で充満しているのので、先端部の形を見ることができます。この形は牛乳の先端部とよく似ています。

図3(d)は、牛乳の先端部が右側の壁にぶつかったところです。重力流は、ここで速度を失いますが、圧力が高くなるので、牛乳が盛り上がっています。この盛り上がりは、時間と共に水と牛乳の界面をゆっくり左側に伝わってきます。このような現象は「内部重力波」といいます。大気内部に密度の不連続な界面ができると、界面に沿って波が発生するのです。海面で見られる「うねり」のような波が大気内部でも発生するわけですが、大気は透明なので、普通は目にみえません。しかし、時には、その波が雲によって可視化されることがあります。図5(a)はロシア上空で撮った雲です。帯のような雲が一定の間隔で並んでいます。密度の界面を伝わる波の峰に雲が発生したためでしょう。図5(b)沖縄の近くの海上で撮影した雲です。同じような雲の列ですが、雲の長さが短いのが特徴です。風は波面に直角方向に吹いているはずです。雲の列の幅とおなじ幅の湿った空気が両側の乾いた空気と並んでいたために、湿った空気の幅だけ波が可視化されたと考えられます。

5. 定在波の実験

波の話が出たついでに面白い波の実験を紹介しましょう。ケンブリッジ大学で気象を研究されているマッキンタイア先生が来日した際、セミナーでデモ実験をしたいのだが、何とか工夫してもらえないか、といわれました。その実験とは、ビーカーに水を入れ、かなり速い振動数でビーカーのガラスを振動させてほしいといわれるのです。すると、内部に大きい波が発生する、というお話でした。そこで、手元にあったマッサージ器で、ビーカーをたたいてみたのです。すると、先生の预言通りに大き

(a)

(b)

図5 大気中の波動の峰に雲が発生して、波が可視化されている。
(a)は陸上、(b)は海上の例。

図6 共鳴によってビーカー内に水面波を発生させる実験装置。マッサージ用のバイブレーターでビーカーの側面を振動させる。

な定在波が発生しました。

図6は実験装置です。5リットル用のビーカー(直径18

cm, 高さ 27 cm) に半分ほど水を入れ, 側面に市販の肩こり用バイブレーターを固定して, ビーカーを叩きます。バイブレーターの振動数は, 電圧によって変化します。そこで, 電源をスライダックにつなぎました。電源電圧の調節によって振動数を微妙にコントロールするようにしたのです。

図 7 (a), (b) は, この実験で得られた定在波です。中心部の水面が盛り上がった状態では, 波の頂きは尖り, しかも細かくくだけています。逆に, 中央部が凹んだときは, まるい窪みになり, 半周期ずれた波の形が異なっていることがわかります。これは, 波の振幅が大きいため非線形効果が顕著に現れたためです。図 7 (a), (b) の 2 つの写真の時間間隔は 1 秒ですから, 周期 2 秒の定在波です。このような定在波は, 一度発生すると決して消えることはありません。振動するビーカーの壁からエネルギーをもらっているはずですが, 励起する振動数は 50 Hz, 励起された波の振動数は 0.5 Hz ですから, なんと振動数が 100 倍も違うのです。どうして, このような低周波の波が発生するか, という問題がマッキンタイア先生のセミナーの内容ですが, このような現象は, 既に, 1960 年代の初めに知られていたそうです。メカニズムに興味をお持ちの方は, Lindholm et al. (1962)³⁾, Mahony and Smith (1972)⁴⁾, Huntley (1972)⁵⁾, Huntley (1977) を参照してください。キーポイントは, ビーカーの壁の自由振動 (ベルモードという) の周期よりわずかに高い振動数で壁を叩くことです。すると, 励起する振動の振幅が微小であるにもかかわらず, 大きな定在波が発生するのです。実験条件によっては, 定在波ではなく, 壁に最大振幅をもって, ビーカーの縁をぐるぐるまわる進行波が発生することもあります (図 7 (c))。その場合の回転方向は, 偶然に決まるようで, 右まわりも左まわりの波も発生します。

6. 風波の実験

海面の波は風によって励起されるので, 風波 (wind wave) といいます。風が吹き始めたときは, まず, 「さざなみ」が発生します。風が吹き続けると波の振幅が次第に大きくなり, 波長も長くなって, 「風浪 (ふうろう)」に変化します。時化 (しけ) とは風浪が発達した状態です。このような風波の発達には, 3 つの条件に支配されます。それは, 1) 風速, 2) 風の吹く持続時間, 3) 風域の先端部からの距離 (吹送距離) です。実際の海では, 吹送距離が大きいので大きな波になるまで発達できますが, 実験水槽は大きさが限られているので, 風の力で大きな波になるまで風波を発達させるのは難しい問題です。まして, 教室の中で大きな波を作るのは非常に困難ですが, 以前に, NHK テレビの学校放送で波の話をしたとき, この実験を試みてみました。

図 8 に実験装置の概念図を示します。直径 1 m のアクリル円筒と直径 80 cm のアクリル円筒を用いて, 円筒形

図 7 図 6 の実験容器内に発生した水面波。(a)と(b)は 1 秒間隔で定在波の半周期を示す。(c)は進行波。ビーカーの側壁に沿って回転する。

図 8 風波の発生装置。容器は外径 1 m, ふたは空気を逃がすために密閉しない。

の水槽を作りました。その中に半分ほど水を入れ、スポンジの板でふたをします。但し、ふたの一部に穴をあけ、そこから、電気掃除機の風の吹き出し口を差し入れて、水面の上に風を吹かせます。風は円筒容器内をぐるぐるまわりますから、吹送距離が無限大になったような状態が実現できるわけです。

風を吹かせてからしばらくは「さざ波」が見られるだけです。次第に波が発達して、図9(a)に示すような規則的な風浪になります。この波は、風の吹く方向に円筒容器内をぐるぐる回ります。その内に、波の波長が大きくなり、ついには、大きな波が一つだけまわるようになります(図9(b))。波頭が碎けて、時化した海面の波とよく似た形になります。大きな波が円筒容器をぐるぐるまわる様子は、あたかも嵐を容器の中に閉じこめてしまったような印象を与え、「コップの中の嵐」という言葉を思い出さざるを得ません。

この実験の物理を考えると、実際の海と違った側面があります。風の吹く領域が容器のふたと波面にはさまれているので、水面の凹凸が大きくなると、風速がその影響を受けて変化することです。波頭の近くでは、容器のふたと水面までの間隔が狭くなるので風速が速くなります。大きな波になるのは、このような風速と波との力学的な相互作用が重要であるような気がします。これは流体力学の問題として面白いと思うのですが、残念ながら、まだ、十分考察を深めていません。

参 考 文 献

- 1)～2)は前号参照。
- 3) U. S. Lindholm et al., J. Aerospace Sci., 29 (1962) 1052.
- 4) J. J. Mahony and R. Smith, J. Fluid Mech., 53 (1972) 193-207.
- 5) I. Huntley, J. Fluid Mech., 53 (1972) 209-216.

(次号へつづく)

(a)

(b)

図9 図8の実験容器内に発生した風波。(a)と(b)は時間経過を示す。波長は、時間と共に長くなる。(b)では孤立波が1つだけ発生している。

講座—教育シリーズ「手作り実験あれこれ」は新しい企画としてご好評を頂いております。お読みになってご自分で試された方、オリジナルな手作り実験を考案された方は、編集委員会までご一報下さい。また、どんな感想でも歓迎いたします。どしどしお寄せ下さい。

(編集委員会)

口絵 1 可視化情報学会の位置と未来への可能性

(口絵 1 可視化情報学会会長 加藤洋治 (東京大学)) (本文 1 頁参照)

口絵 2 大気中の波動の峰に発生している雲 (海上の例)

(口絵 2 東京大学海洋研究所 木村龍治) (本文 22 頁参照)