

気象学習におけるモデル実験の研究

—小型無線カメラを用いた実験・観察の展開—

木下 温

高等学校理科，地学Ⅰ・地学Ⅱの「大気・海洋」分野の中で，「大気の運動」の学習においては，地球の自転効果が本質的である。ここでは，回転系から自分の目で直接観察する手法を用いて，大気分野の典型的な諸現象をモデル化し，身近な道具を流用した実験・観察を通じて体感的に学習し，定性的ではあるが，気象現象の力学的側面の本質的な理解を深める指導方法を検討・報告する。

[キーワード] 高等学校理科 転向力 遠心力 高気圧 低気圧 偏西風波動

はじめに

高等学校理科，地学Ⅰ・地学Ⅱの「大気・海洋」分野の学習において，「大気の運動」は，「放射」と並んで理解が困難な題材が多く，生徒たちの評判は芳しくない。教える側も，地学選択者の志向と物理（力学）の知識が要求されるという現実から，意図的に本質的な説明を省いた授業展開が一般的であることが多いようである。しかし，この単元は，それほど難解で，興味が湧かない題材ばかりではなく，むしろ，普段は当たり前と感じている，丸い形をした地球の自転を回転系から見ると，静止系（慣性系）から見ている姿とはあまりにも異なり，とても奇妙で興味深いことに気付かされる。この面白さは，雪結晶や岩石・鉱物の美しさに感嘆する感覚とは異質のものであるが，まぎれもなく，地球科学の魅力として，生徒たちと共有できるものであると信ずる。これらの魅力については，既に木村(1985)の中で生き生きと詳述され，高校地学への啓蒙・普及を待つだけであった。また，大学教育では酒井(1997)において，独創的で興味深く，研究と教育とが一体化した実験の在り方が示されており，非常に参考になる。

以下に「大気の運動」において，4つの題材を例にあげて，身近な材料ですぐに実行で

きる実験例を，回転系から見ることによって，その教育効果の有効性を確認・検討していきたい。

1 実験・観測に用いる基本装置

本実験は，全て回転系での観察である。回転台としては，①専用回転台，②LPプレーヤー，③電動ろくろ，④モーター+TV回転台等が考えられ，何れも多少の工夫を施せば，十分実用的になる。今回は③を用いて実験を行った。また，回転系から観測する“目”が必須となる。可能な限り小型の実験装置（可

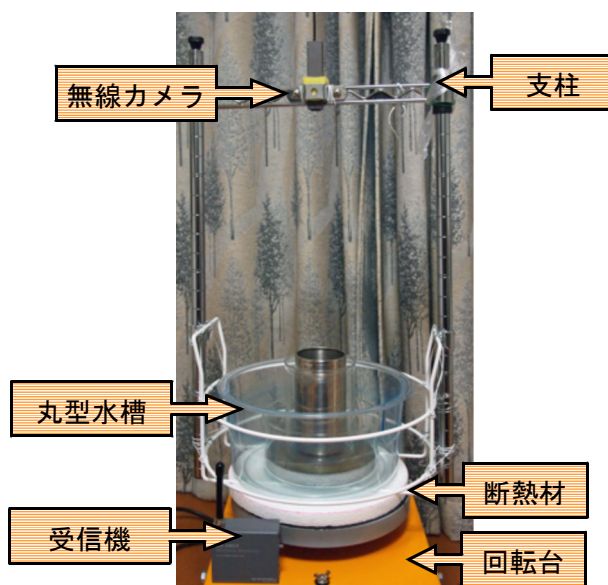


図1 回転台と無線カメラ・受信機

搬式)の構築が望ましく、高価ではあるが、小型の無線カメラ(RF SYSTEM lab)を用いることにした。このカメラは質量55gと軽量で、バッテリーで連続作動(約60分)し、画像を無線送信でき、高感度撮影にも対応しており、本実験に理想的である。受信機をモニターに接続して、実験を行った(図1)。

2 地球自転の緯度別変化(β 効果)の実験

大気の運動において、地球の水平面に対する、自転効果が緯度によって異なる(β 効果)ことが本質的である(図2)。

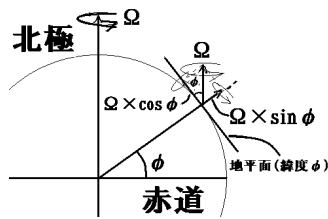


図2 自転効果の緯度別変化

しかし、この図を描いて説明しても、理解は困難である。そこで、 β 効果を体感して学ぶ実験方法を2つ紹介したい。1つは、角運動量保存則を実験に使う車輪を用いる方法である(図3)。

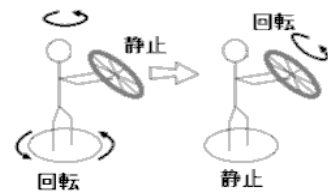


図3 自転効果の緯度別変化の実験

これは、様々な角度で傾けた車輪を持った人が、丸椅子上で回転し、静止したときの、車輪の回転を見ることで β 効果を体感できる実験である。また、角運動量の保存則は、次に扱う転向力の理解に不可欠なので一石二鳥の実験でもある。もう1つは、視線方向に自由に回転できる、小型無線カメラを地球儀に設置して、地球儀を反時計回りに 2π [rad]回転させた時の映像をモニターで見る実験である(図4)。北極点では、時計回りに 2π [rad]回転して見えるが、赤道では静止(全く回転しない)、緯度30度では時計回りに、 π [rad]回転して見えるので、 β 効果の成立は、一目瞭然であり、自然に理解できる。

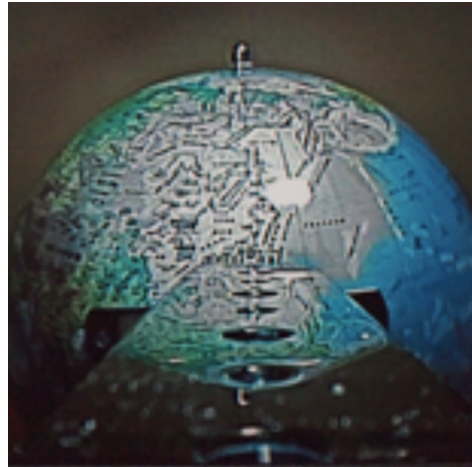


図4 緯度30度の上空から小型無線カメラで見た映像

3 転向力の実験(慣性振動の実験)

大気・海洋の水平方向の運動において、転向力の影響は極めて大きい。しかし、転向力のメカニズムの説明は難しく、教科書等の図を基に「北半球では進行方向の右にそれる」という結果を、数学の定理のように用いて高・低気圧の説明を行うことが多い。

一般的に行われる、平板を回転させる実験を実際に行うと、回転数にもよるが、物体の軌跡は右にそれるだけに留まらず、螺旋を描くことが多い。理論的には、転向力だけが物体に作用していれば慣性振動するはずであり、疑問が生じるが、生徒は気



図5 中華鍋を用いた実験

がつかないことが多い。この理由は、回転による遠心力の効果が残っているためなのである。我々は、遠心力と引力の合力（重力）と垂直抗力がバランスした回転“放物面”（ジオイド面）を“水平面”と錯覚している。この錯覚から、「転向力なる見かけの力が生じる」という、説明によって、転向力の定性的に正しい理解を得ることができる。

さらに、このことを実験でも確かめてみることができる。中華鍋は、回転放物面を持っておりこれを活用する。中華鍋を回転台上で回転させ、白い塗料をつけたビー玉を転がす（図5上）。次に回転台の回転数を調整して、回転系でビー玉が静止して見えるようにする（図5中）。このとき、ビー玉に働く力はバランスし、遠心力は消えている。このときのビー玉を動かすと、ビー玉には転向力しか作用せず、理論どおり、円軌道（慣性振動）を描く（図5下）。天文分野で扱うフーコーの振り子を用いて、回転系で振子の振動面を観察することも楽しい実験である。

4 高気圧・低気圧の実験

コップに水を入れてスプーンで攪拌すると、スプーンを回す向きが時計回り・反時計回りのどちらでも、渦の中心が凹み、中心部分の「気圧」が低くなって、「低気圧」が出現する。教科書には、「北半球の高気圧は時計回りの渦、低気圧は反時計回りの渦」であると記されている。しかし、この実験ではどちらに回しても低気圧しかできない。それでは、実験で高気圧を出現させるためにはどのようにしたらよいのだろうか？

これは、授業でもしばしば受ける質問である。この質問に対する明快な説明は、やはり慣性系ではなく、回転系から渦を見ることによって可能となる。例えば、回転台の上に、水を入れた透明な丸型水槽をのせて、小型カメラを用いて、回転系から観察してみよう。回転させる前に、丸型水槽の底4箇所に絵の具で印を付けてから、

反時計回り（図6）または時計回り（図8）に回転させる。底付近の水は、初めのうちは、水槽の回転速度より遅く回転するため、絵の具は、水槽の壁に向かって、外向きに、それぞれ右（図6）または左（図8）にそれて進み、軌跡はそれぞれ時計回り（図6）または反時計回り（図8）に発散する。この状態は、北半球（図6）または南半球（図8）の高気圧が出現していることに対応する。

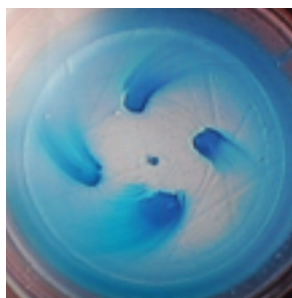


図6 北半球の高気圧
（時計回りに発散）

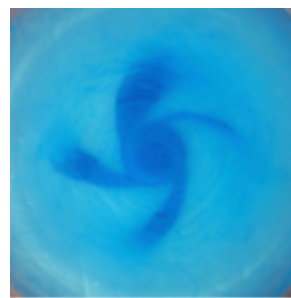


図7 北半球の低気圧
（反時計回りに収束）

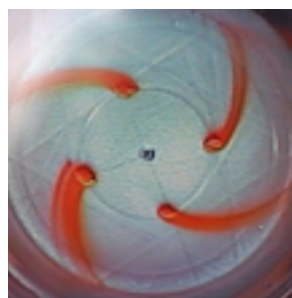


図8 南半球の高気圧
（反時計回りに発散）

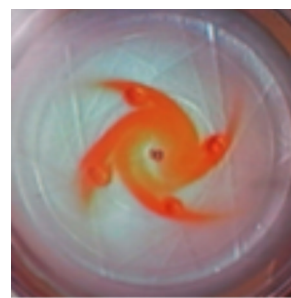


図9 南半球の低気圧
（時計回りに収束）



図10 高気圧性の渦
（境界層で発散）

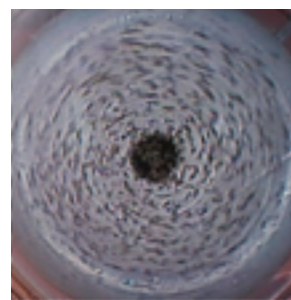


図11 低気圧性の渦
（境界層で収束）

しばらくすると、水槽の水は水槽と同じ回転速度で回転（準剛体回転）するようになる。これは、回転系の観察者から見ると、無風状態であることを意味する。このとき、水面の真ん中は凹んでいるが、無風状態ということは、気圧

差（圧力勾配）がゼロであるから、水中のどこでも等圧である。慣性系から見たとき、この水面上の斜面は、水面の凹みと平行な面になり、これを地球上ではジオイド面とよぶ。先にも述べたが、日常、我々はジオイド面を水平面と錯覚している。このジオイド面を基準にして、回転台の回転数を変化させて、回転させたときの水槽の水について考える。もし、水槽の水が回転台の回転速度より遅く回転した場合、「ジオイド面の傾斜＜水面」の傾斜となるので、見かけ上、気圧が高くなっていることが分かる。

【高気圧の出現】逆に、水槽の水が回転台の回転速度より、はやく回転した場合、ジオイド面の傾斜＜水面の傾斜となるので、見かけ上、気圧が低くなっていることも分かる。

【低気圧の出現】この状態は、回転台に急ブレーキをかけることで実現される。このとき、水槽の水は慣性で動き続けるため、水槽に対して反時計回り（図7）または時計回り（図9）に回転し、底付近の水は、水槽の中心に向かって螺旋を描いて収束することがわかる。茶殻をトレーサーとして観察すると、底付近（境界層）の水は高気圧で発散（図10）、低気圧で収束（図11）し、それぞれが下降流と上昇流を生み出すこともわかる。

以上の結果、先の質問に対する答えは「スプーンではなく、コップを回転させればよい」となる。

5 偏西風波動（ジェット気流）の実験

これはdishpan（洗い桶）実験と呼ばれ、教科書にも掲載されている古典的な実験である（図12）。パイレックスガラス製の二重同心円状の容器を内側に取り付けたアルミ製洗面器を回転台の上に置く（図13）。これら3層の領域の一番外側（赤領域）に水温40℃程度の湯、中間の領域（緑色領域）に水温20℃程度の水、一番内側の領域（青領域）に氷を入れ、底面は発泡スチロールで断熱する。

中間の領域には、側面を通して氷と湯の温度



図12 dishpan実験の模式図

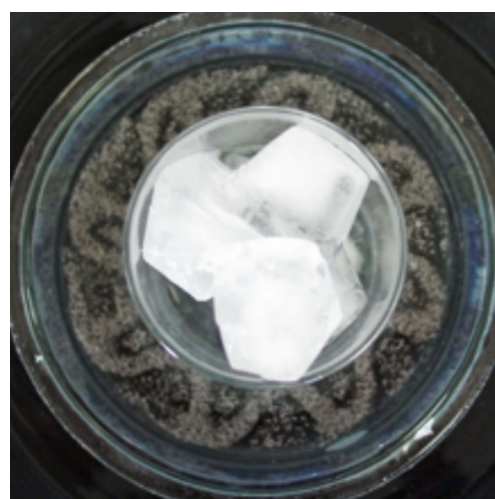


図13 内側の水温約2℃
外側の水温約40℃
回転数30rpm

差（温度傾度）が生じている。この領域にアルミ粉またはマーブリングを浮かべ、回転台を反時計回りに8～30rpmで回転させると、初めのうちは同心円状の流れ（ハドレーセル）が続くが、時間が経過すると不安定化し、流れが蛇行し始める。低気圧性と高気圧性の渦が交互に現われ、回転数と南北の温度傾度に応じて、3～8個の波形の模様が発現する（図13）。また、底面にコレステリック液晶を敷いて温度分布を可視化すると、波動に対応した、内（高緯度）側と外（低緯度）側の熱交換が同時に生じていることがわかる（図14, 15）。小型カメラを用

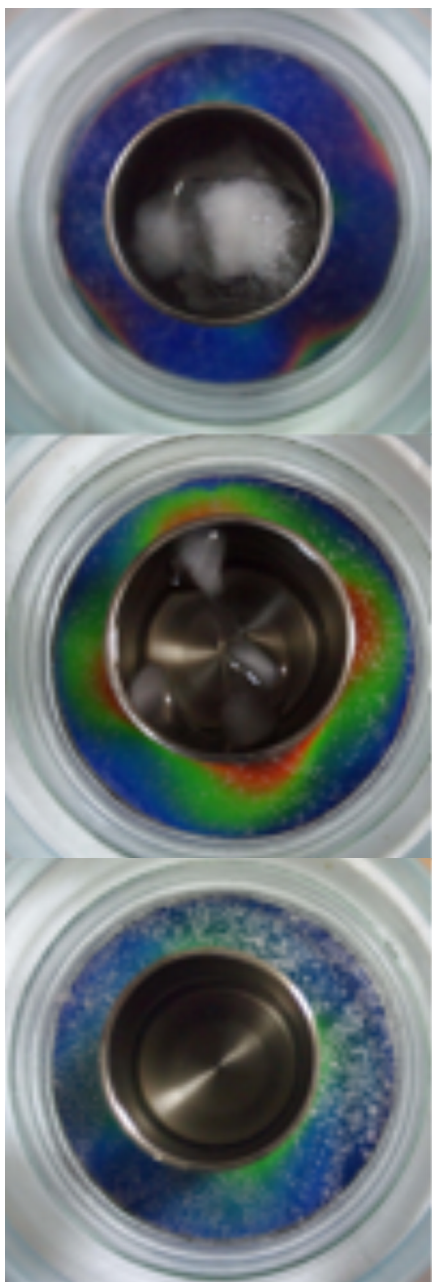


図14 コレステリックシートで可視化
回転数10rpm, 内側の水温約2℃
外側の水温約40℃
上→中→下の順に変化

いて、回転系から観察すると、波自体もゆっくりと反時計回り（西→東）に移動していることもわかる。この流れは、高層天気図が示す、実際のジェット気流が南北に蛇行しながら流れている様子に大変良く似ており、印象的である。このように、dishpan実験を中核にすえて、大気大循環と南北の熱交換機能、トラフ・リッジ

と温帯低気圧・移動性高気圧，風（地衡風），天気予報等を一連の流れの中で学習することにより，総観規模での大気の諸現象が統一的に理解することができ，大変効果的である。

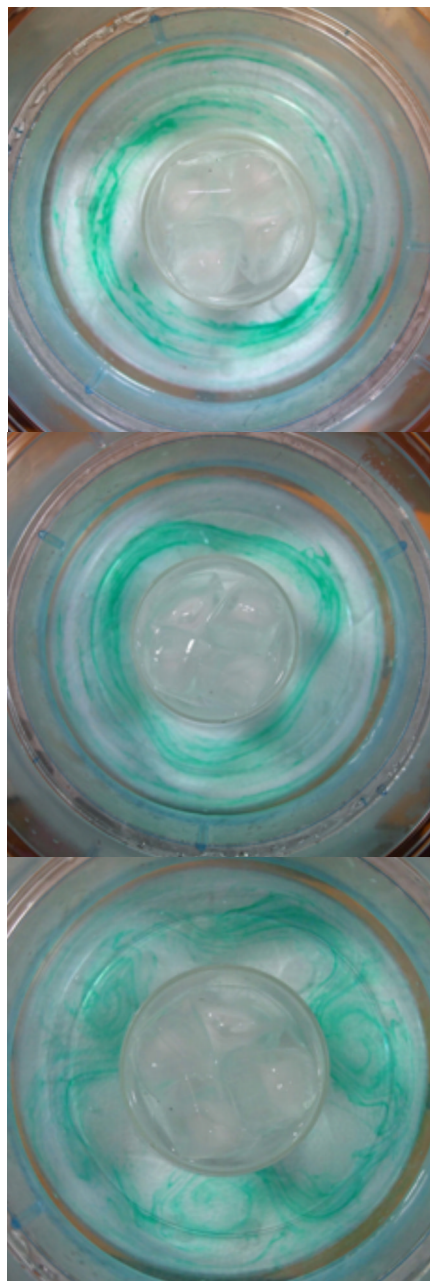


図15 マーブリングを用いて可視化
回転数10rpm, 内側の水温約2℃
外側の水温約40℃
上→中→下の順に変化

おわりに

本研究は、北海道札幌北高等学校において、SSH（スーパーサイエンスハイスクール）研究指定校当時から実施してきた実験・実習を、道研フリープランを活用して再検討・追加したものである。理科教育センター・地学研究班の諸先生からは、懇切丁寧な援助・有益な助言をいただいた。心から感謝申しあげる。

参考文献

- 1) 木村竜治(1985):改訂版 流れの科学, 東海大学出版会
- 2) 酒井敏(1997):実験室の中の空と海(地球流体基礎実験集第2版) (http://dennou-k.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/index.htm)
- 3) Marshall, J. & Plumb, R. A(2008):Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics, Academic Press.

(きのした あつし 北海道札幌北高等学校)