

海水の運動の学習におけるモデル実験の研究

—西岸強化の実験・観察—

木下 温

高等学校理科，地学の「海水の運動」の中で，「環流などの海洋における循環」の学習においては，地球の自転効果が重要である。ここでは，身近な道具を用いた実験を行い，地球の自転効果の緯度別変化を与えたときの西岸強化流を回転系から観察し，環流の形成や西岸強化についての理解を深める方法を検討したので，報告する。

[キーワード] 高等学校理科 地学 転向力 β 効果 環流 西岸強化流

1 はじめに

高等学校理科の「地学」の海洋分野では，「海水の運動」について，「海流，風浪とうねり，潮汐などの運動と，環流などの海洋における循環を扱う」^{*1)}。いずれも，身近な道具でモデル実験を行う場面が限定されるため，実験を伴わない授業展開が多いと聞く。特に「環流などの海洋における循環」の中で「西岸強化」については，大変興味深い現象であるにもかかわらず，教科書においては，図1のような「地球の自転効果にともなう転向力によってもたらされる現象」^{*2)}という説明と模式図があるだけで，生徒に実感を伴った理解を図らせることが困難である。このため，説明の他に，実験・観察を体験することによって，理解を深める工夫が求められている。西岸強化の実験は，偏西風波動の実験^{*3)}と回転台を用いた実験装置や回転系から現象を観察する工夫など，共通点が多い。一方，西岸強化の実験は，動画等で多数紹介されている偏西風波動の実験と比べると，得られる情報が乏しい。また，①地球の自転にともなう転向力の緯度別変化や海洋表層への風の摩擦応力の影響を，どのようにモデル化して実験装置に組み込むのか，②特殊な装置を用いずに回転系の現象をどのように観察・記録するのかなど，実験を実施する上での課題も大きい。以下で，これらの課題を解決する方法を検討する。

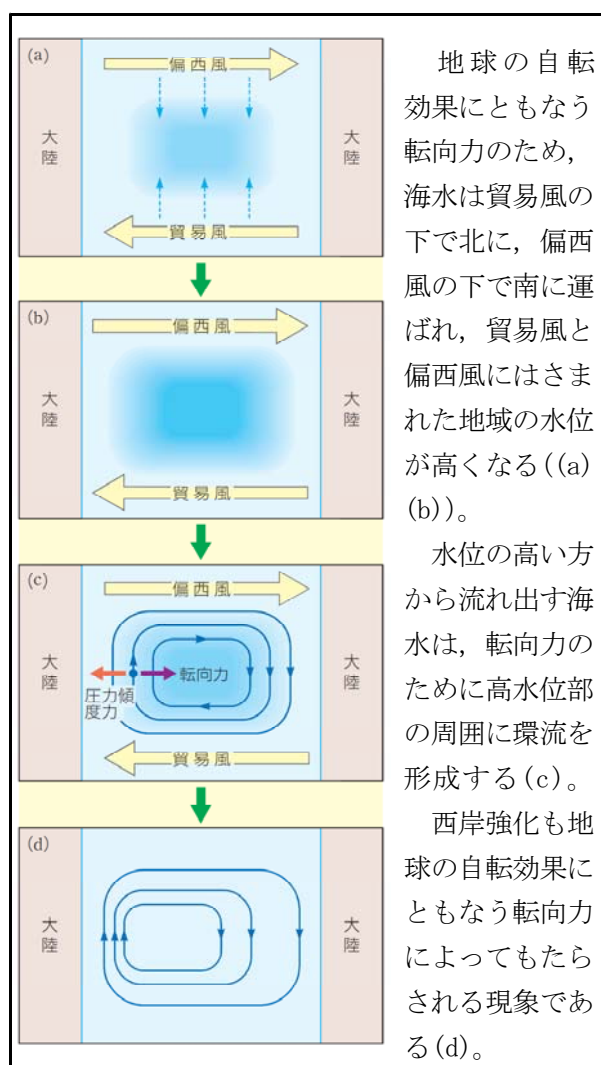


図1 北半球における環流の形成と西岸強化についての説明と模式図^{*2)}

2 実験・観察に用いる装置

本実験では、①回転台（直径30cmのケーキ回転台+TAMIYA 6速ギヤボックスHE+電池ボックス）、②アクリル容器（縦×横×高さ：20cm×20cm×15cm）、③傾斜底（スチロール+アクリル板）④P C内蔵用小型冷却ファン（低速回転2500RPM）⑤モバイルバッテリー（UNIVERSAL POWERBANK）、⑥iPhone（Apple）、⑦携帯電話用小型三脚、⑧染料（マーブリング、アルミ粉）、⑨作業流体（水）、⑩AppleTV（Apple）、⑪AirMac Express（Apple）、⑫モニター（液晶TV）をそれぞれ用いた（図2（a）～（d））。

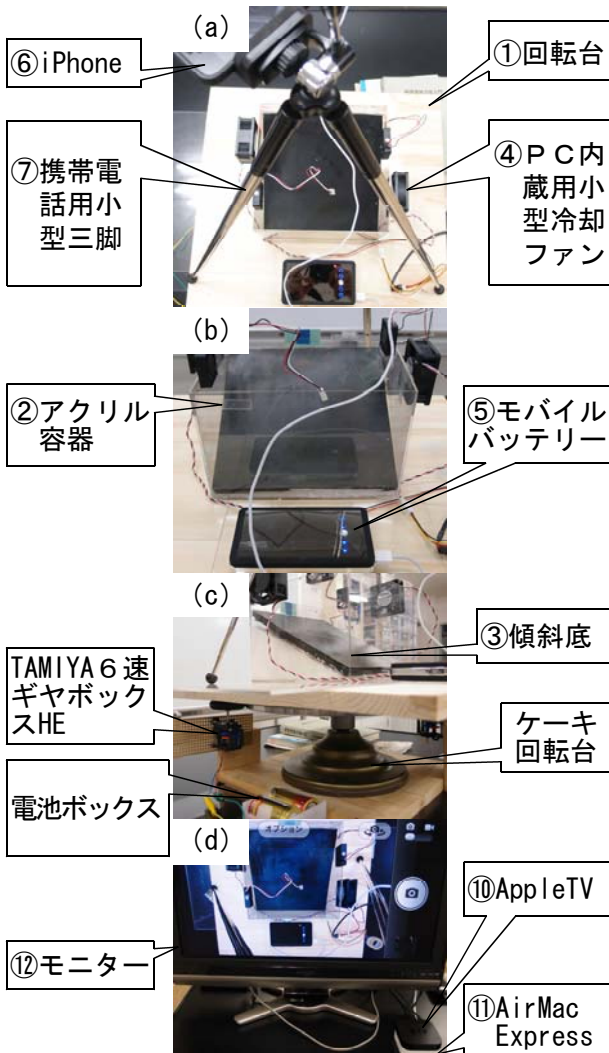


図2 実験・観察に用いる装置において、回転台などを(a)上面、(b)正面、(c)側面からそれぞれ示した写真と、(d)モニターなどを正面から示した写真

3 実験・観察の方法

この実験では、作業流体（水）を入れたアクリル容器を太平洋に、P C内蔵用小型冷却ファンから水面に送る風を、低緯度側の貿易風（東風）と高緯度側の偏西風（西風）にそれぞれ見立てて、回転台に載せる。また、地球が球である効果（ β 効果）は、容器の底を傾斜底にして、水深の深い方を低緯度側（図3（a）の緯度 θ_1 の水柱1）、水深の浅い方を高緯度側（図3（b）の緯度 θ_2 の水柱2）にそれぞれ対応させることで表される^{*4)}。なお、 h を水柱の高さ、 f をコリオリ因子、 ζ を相対渦度とにおいて、ポテンシャル渦度の保存則^{*4)}の成立を仮定すると、 $\frac{d}{dt}(\frac{f+\zeta}{h})=0$ が成立する。ここでコリオリ因子 f は、 Ω を地球の自転角速度、 θ を緯度として、 $f=2\Omega\sin\theta$ で表す。ある位置の相対渦度を持たない（ $\zeta=0$ ）高さ h_0 の水柱のコリオリ因子 f を、 $f=f_0$ とすると、ポテンシャル渦度の保存則より、 $\frac{f+\zeta}{h}=\frac{f_0}{h_0}$ が成り立つ。よって、この水柱がある位置から南北方向に移動するとき相対渦度は $\zeta=f_0(\frac{h}{h_0}-\frac{f}{f_0})$ より、ある位置から北（南）へ移動すると、 $\frac{f}{f_0}>1$ （ $\frac{f}{f_0}<1$ ）となる。従って、この水柱の高さが一定 $\frac{h}{h_0}=1$ のとき、北（南）へ移動すると水柱には、高（低）気圧性の相対渦度 $\zeta<0$ （ $\zeta>0$ ）が生じる。このことから、回転台で実験するとき、 f は一定（ $\frac{f}{f_0}=1$ ）なため、上と同様の相対渦度を生じさせるには、コリオリ因子の緯度別変化に対応させて、高緯度側で水柱の高さを小さく（ $\frac{h}{h_0}<1$ ）、低緯度側で水柱の高さを大きく（ $\frac{h}{h_0}>1$ ）変化させる必要がある。以上のように、前記①の課題に対して、現象のモデル化を図り実験装置に組み込むことができた（図3（a）、（b））。さらに、回転台に小型三脚で固定したiphoneを設置して、AirPlayミラーリング機能によって、動画信号をAirMac Expressを介して無線LANでAppleTVに送り、モニターに出力しながら記録する。このように前記②の課題に対しても、iphoneと関連製品を組み合わせることで、身近な道具を用いた回転系からの観察・記録・演示が可能となった。

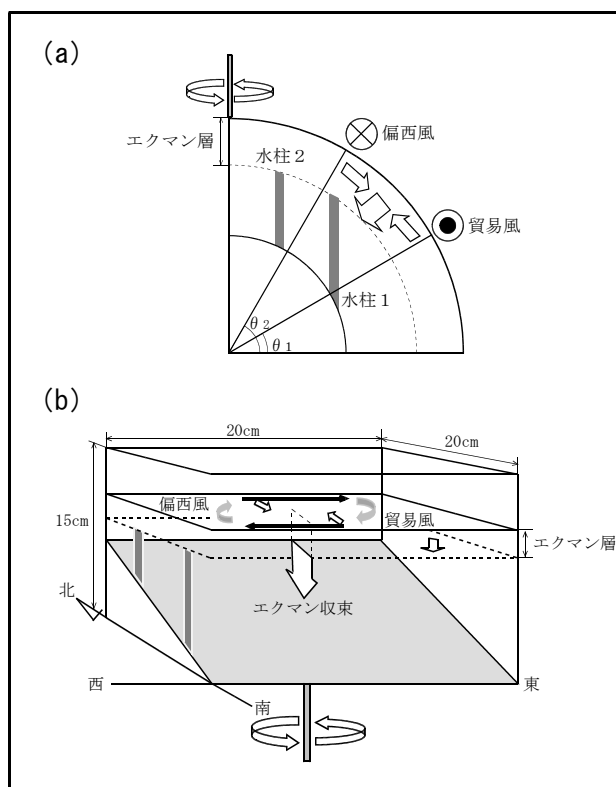


図3 実験・観察において、(a)太平洋をモデル化した模式図と、(b)モデル化した条件を組み込んだ実験容器の模式図

実験・観察は、次の手順で実施した。

- ①傾斜底を付けたアクリル容器に、水深が約3cm～12cmになるように水を満たす。
- ②モバイルバッテリーから電源を供給したファンを容器に付けて、水面付近（厚さ約1mm）が約0.5～1 RPM（毎分約0.5～1回転）で循環するように、水面に加えた染料の動きを見ながら、ファンの位置や向きを調整する。
- ③iPhoneを固定した三脚と容器を回転台に載せて、回転中心、画角を調整する。AppleTVをモニター、AirMacExpressと接続し、AirPlayミラーリング機能の確立を確認する。
- ④iPhoneのカメラで動画の記録を開始し、静止しているときの染料の分布や動きを観察する。次に回転台を反時計回りに約3～5 RPM（毎分約3～5回転）で約20分間回転させる。
- ⑤約20分後、染料（マーズリンク）を入れて、モニター上で、容器の左側（西側）と右側（東側）の流線の様子のちがいを観察する。

4 実験の結果

①回転台が静止しているとき

ファンによって発生させた西風と東風の摩擦応力により、エクマン層は容器の中央に収束して、東西方向にほぼ対称な時計回りの循環が生じた（図4）。

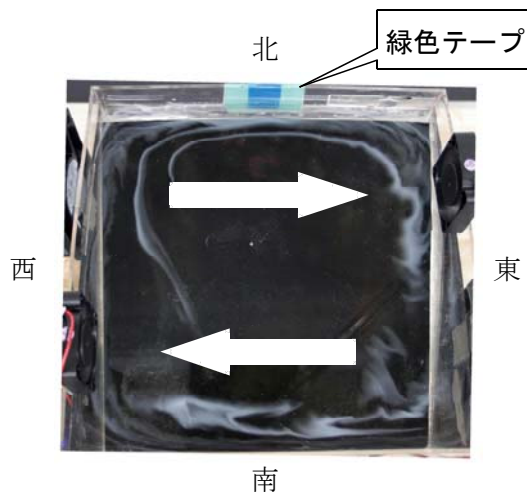


図4 回転台が静止しているときの循環の様子。図中の緑色テープの向きは北向きを、2本の白矢印は、ファンによる西風と東風をそれぞれ示す。

②回転台を約4 RPMで20分間回転させたとき

染料を容器の中央からやや南側に幅広く入れて、流線の様子を観察すると、①の結果と大きく異なった。西側の壁に近い狭い範囲で北向きの強い流れ（西岸強化流）がある一方、西側の狭い範囲を除いた大部分では、弱い南向きの流れとなり、東西方向に著しい非対称な時計回りの循環が生じ、西岸強化の様子が観察された（図5(a)～(e)）。観察結果は、次のように解釈できる。風によるエクマン収束がエクマン層の沈降を引き起こすが、このとき、水柱はその高さを一定に保ったまま、コリオリ因子の小さい南側に移動してポテンシャル渦度を保存させることができる。よって、西側を除く大部分で南向きの弱い流れとなるため、海水を北向きに戻す必要がある。この北向きの流れは、水柱の高さを減少させて強い負の相対渦度 ζ を作り出し、西側に幅の狭い強い北向きの流れが生じることになる。

5 おわりに

身近な道具を用いた西岸強化の実験・観察を試みた。西岸強化や西岸強化流が、新しい「地学」の教科書でどのように記述されるのかは、現時点で不明であるが、偏西風波動の実験に劣らぬ、興味深く魅力的な教材であると再認識させられた。また、今回、流体実験の結果を回転系から観察・演示・記録させる身近な道具として検討した、iPhoneにAppleTVを組み合わせたシステムは大変有用であり、これまで使用してきた小型無線カメラ（RF SYSTEM製）にとって代わる可能性を秘めている。海洋分野以外に天体分野などで、異なる視点から現象を観察させる場面にも活用できないか、今後研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 文部科学省 高等学校学習指導要領解説理科編 pp.113 2009
- 2) 松田時彦・山崎貞治 編 高等学校地学Ⅱ pp.39 2004
- 3) 酒井敏 実験室の中の空と海(地球流体基礎実験集第2版)
- 4) Marshall, J. & Plumb, R.A Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics, Academic Press pp.249 2008

(きのした あつし 地学研究班)

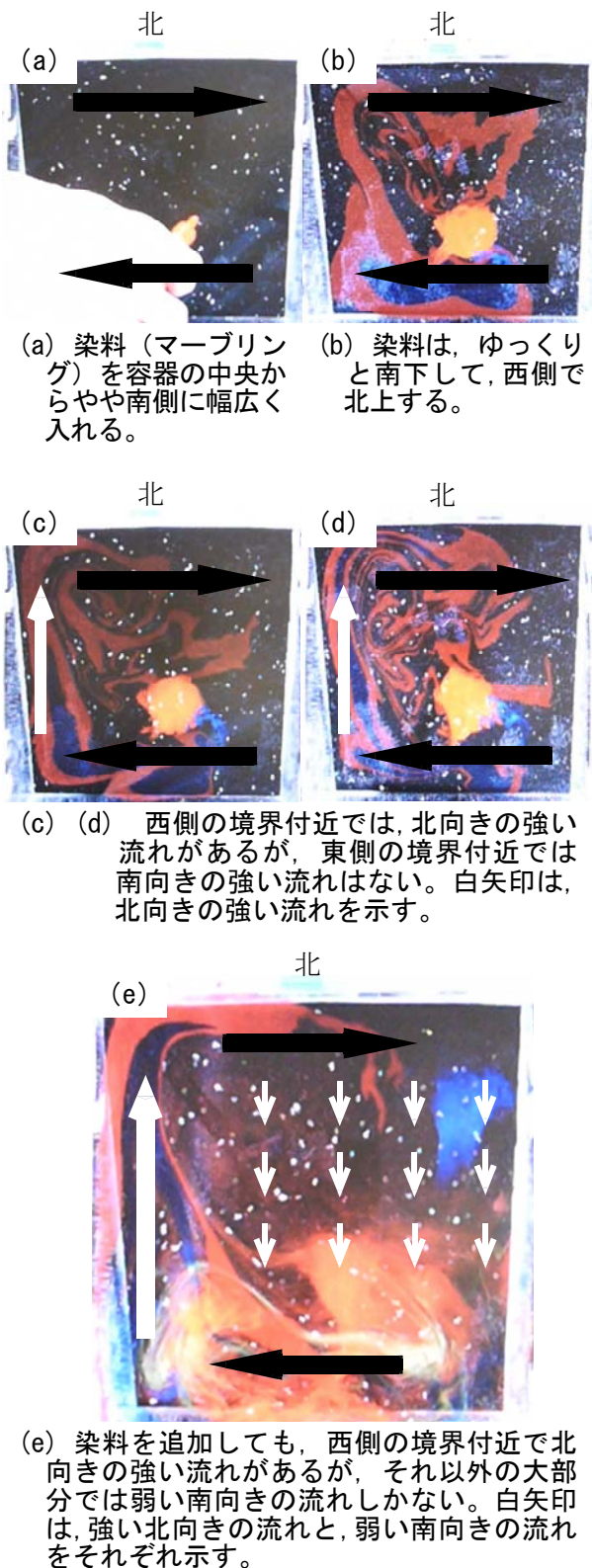


図5 回転台を約4RPMで20分間回転させた後、染料を入れて、循環の様子の変化を順に示した写真。(a)～(e)の黒矢印は、ファンによる西風と東風をそれぞれ示す。