

気象学習におけるモデル実験の研究

—地形による強制ロスビー波の実験・観察—

木下 温

高等学校理科，地学Ⅰ・地学Ⅱの「大気の大循環」の学習においては，球である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，回転系における地球の自転効果の緯度別変化を与えたときの，地形による強制ロスビー波を観察し，気象現象の力学的側面の本質的な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 偏西風波動 β 効果 ロスビー波

1 はじめに

高等学校理科の「大気・海洋」分野の学習において，「大気の運動」は，理解の困難な題材が多く，机上の学習の他に，実感を伴う実験・観察を体験することによって，理解を深める方法が求められている。新学習指導要領においても，地球の大気と海洋に関する探究活動として「偏西風波動の実験や高層天気図や地上天気図，気象衛星画像等を用いて偏西風の波動の様子，高気圧や低気圧及び前線の移動と発達等について探求させること」^{※1)}が例示されており，実験・観察・観測データの解析を組み合わせた学習がますます重視されている。偏西風波動の実験では，回転水槽を用いて温度傾度と地球の自転効果を与えたとき，ある限界を超えると傾圧不安定波が発現することを観察するのが一般的であり，教科書の説明にも，「偏西風波動は，低緯度と高緯度の温度差や地形の影響を受けて複雑に変化する。」^{※2)}とあるだけである。実際の上空の風を高層天気図（500hPa）を用いて調べると，確かに中緯度上空には波数8の偏西風波動が見られるが，回転水槽実験の結果と比較すると，実験で観察される軸対称な波動とはやや異なっている（図1）。また，今年のように厳冬が続く場合，シベリア高気圧が発達し，アリューシャン低気圧が平年よりも南下して発達する気圧配置が続く特徴が知られている。^{※3)}

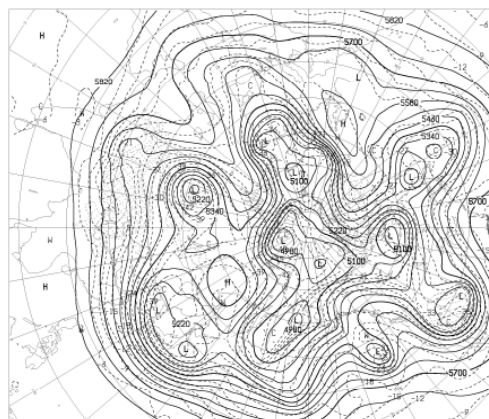


図1 500hPa等圧面における高度分布
(2011年1月1日)^{※2)}

このような気圧配置のときの典型的な高層天気図（500hPa）を見ると，ユーラシア大陸と北米大陸の東部で偏西風が大きく蛇行して，3波数型パターンとなっている（図2）。2つの図を比べると，偏西風が極側から蛇行する位置と大山脈の位置との対応が教科書の記述にある「地形の影響」であることがわかる。では，この「地形の影響」を観察するモデル実験を行うことはできないだろうか。まず，観測データを追加し，詳細な解析を行った。

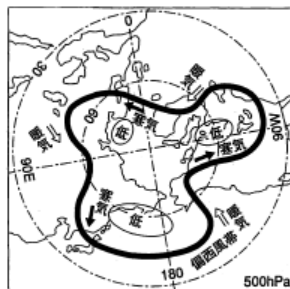


図2 500hPa等圧面における偏西風波動^{※3)}

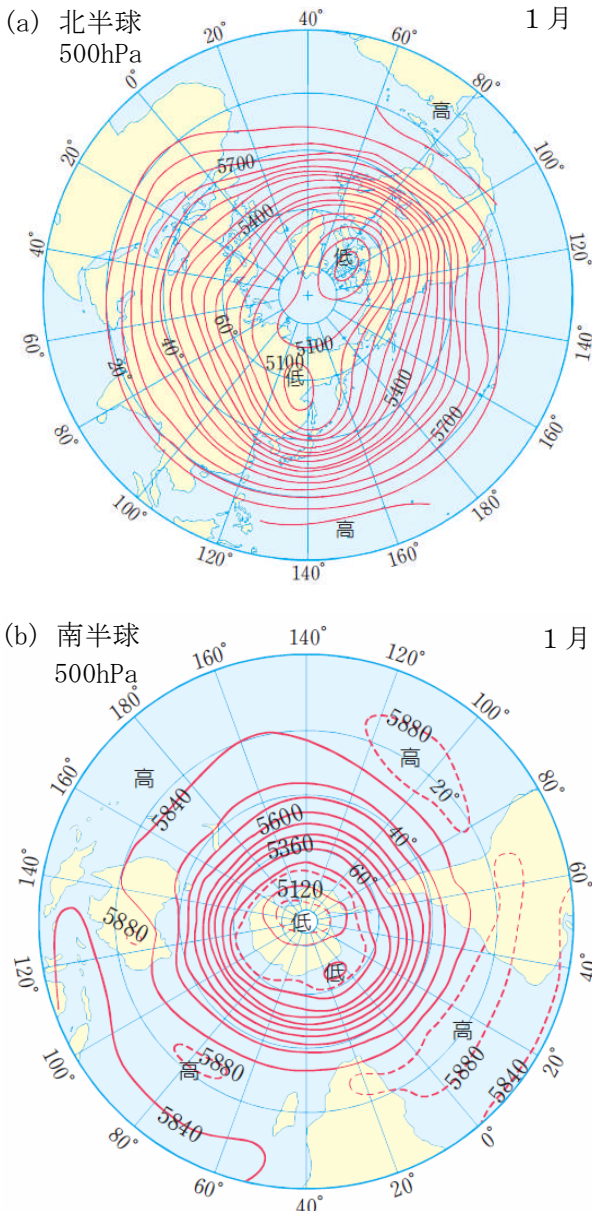


図3 500hPa等圧面における1ヶ月平均高度分布（1月）(a)北半球, (b)南半球^{※2)}

図3(a)は、北半球500hPa等圧面上の1月の月平均高度分布を、(b)は南半球500hPa等圧面上の1月の月平均高度分布を示す。(a)、(b)ともに図1とは異なり、平均化された結果、移動性高気圧や温帯低気圧などの西から東に移動する傾圧不安定波が打ち消しあって、ならされてはいるが、東西方向に一樣の流れにはなっていない。例えば、北半球ではユーラシア大陸と北米大陸と大西洋北部の東側で平均高度分布の等値線が大きく蛇行し、気圧の谷が認められる。

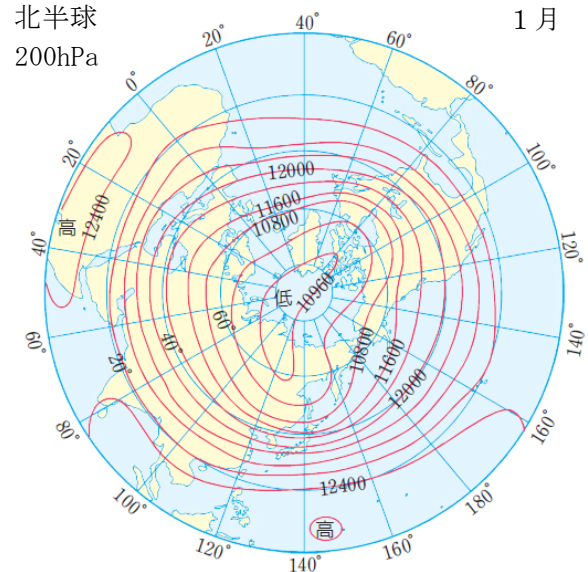


図4 北半球の200hPa等圧面における1ヶ月平均高度分布（1月）^{※2)}

一方、南半球は北半球と比べると、平均高度分布の等値線はのっぺりとして同心円に近いが、弱い蛇行も見られる。北半球の結果から、3カ所の蛇行が、それぞれヒマラヤ山脈、ロッキー山脈、グリーンランド台地と対応していることは容易にわかり、偏西風が大山脈などを吹き超えるとき、地形による効果で励起された波数2～3の超長波が、定常的に存在することが示唆される。

これらの特徴は、対流圏上部においても同様である（図4）。但し、南半球の中緯度（南緯60°付近）では、ほとんどが海洋であり、北半球の大山脈に匹敵する地形が皆無であるにもかかわらず、弱いながらも蛇行が見られる。これは、東西方向の温度差などの熱的な影響で発生する超長波も存在するからである。^{※5)}

このような傾圧不安定波よりも長波長の超長波をロスビー波と呼ぶ。ロスビー波は地球の自転に伴うコリオリ因子の緯度別変化（ β 効果）を復元力とすることがわかっている。ロスビー波の中で、地形の影響で強制的に励起され、ほぼ定常に存在するものを地形による定常な強制ロスビー波という。^{※6)}次に、このような地形による強制ロスビー波のモデル実験と観察の方法を検討する。

2 実験・観察に用いる装置と方法

本実験では,①回転台(電動ろくろ),②同心円筒容器(外径21cm,内径7cm),③自由樹脂(ダイセル化学工業製のFreePlastic),④マーブリング(顔料),⑤作業流体(水)を用いた(図5)。

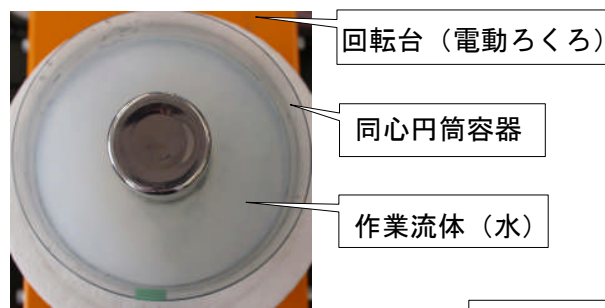


図5 実験・観察に用いる装置

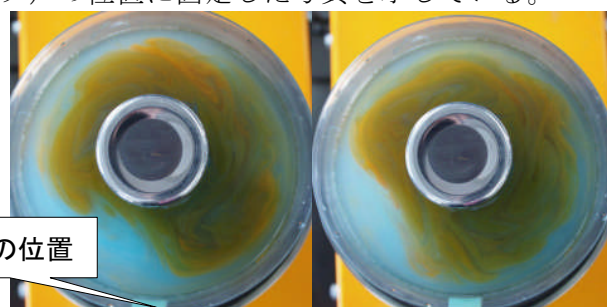
同心円筒容器の底面は,外型から内側にかけて自由樹脂を用いて底上げして,中心に近いほど水深が浅くなるように円筒壁に対して斜めに傾けている。これは,球である地球の自転効果の緯度別変化(β 効果)が現れるようにするためである。さらに,底面の一カ所を山脈に見立てた,幅の狭い盛り上がった突起をつくり,地形による効果も再現されるようにした(図6)。



図6 同心円筒容器の底面

回転台の上に作業流体を満たした同心円筒容器を置いて,反時計回りに30rpm(毎分30回転)に設定して回転させ,作業流体がスピニングし,容器とともに剛体回転するまで待つ。次に,作業流体を可視化するため,マーブリングを数滴,素早く注入し,回転台の回転数を18rpm(毎分18回転)に減じる。すると,作業流体はそれまでの剛体回転をしていたときの慣性によって,容器に対して反時計回りの運動を続けようとして,底面の,山脈に見立てた突起を超える西から東への流れが生じることになる。この流

れを観察すると,山脈に見立てた突起の下流側に低気圧性の渦が発生して,流れが曲がりはじめ,順次,高気圧性の渦と低気圧性の渦が交互に発生しながら蛇行する様子を明瞭に観察できる(図7)。なお,図7(a)~(f)では,山脈に見立てた突起はすべて,時計の6時(緑のテープ)の位置に固定した写真を示している。



(a) 回転数を減じてから5秒後

(b) 回転数を減じてから10秒後



(c) 回転数を減じてから15秒後

(d) 回転数を減じてから20秒後



(e) 回転数を減じてから25秒後

(f) 回転数を減じてから30秒後

図7 回転数を30rpmから18rpmに減じてから(a)5秒後,(b)10秒後,(c)15秒後,(d)20秒後,(e)25秒後,(f)30秒後の流れのようすをマーブリングで可視化。なお,山脈に見立てた突起の位置は緑のテープで示す。

3 実験・観察の結果の解釈

実験・観察の結果、回転台の回転数を減じると、山脈に見立てた突起を反時計周り（図7の緑のテープに対して左から右）に超える流れ（西風）が生じ、水柱は地形による効果のため強制的に上下に伸縮する。ここで、 h を水柱の高さ、 f をコリオリ因子、 ζ を相対渦度とおくと、ポテンシャル渦度の保存則^{※6)}より $\frac{d}{dt}\left(\frac{f+\zeta}{h}\right)=0$ が成立する。但し、 Ω を地球の自転角速度、 ϕ を緯度とすると、コリオリ因子は $f=2\Omega \sin \phi$ で表され、 β 平面近似すると $f=f_0+\beta y$ となる。^{※6)} このとき、突起の上流側では水柱が上下に縮む（ h が減少する）ため（図8(a)）、ポテンシャル渦度保存則より、高気圧性の渦が発生（ $\zeta<0$ ）し、流れが南に蛇行しはじめる（図8(b)のA~B）。突起の下流側では、流れの南下に伴って緯度 ϕ が減少（ $f<0$ ）し、水柱が上下に伸びる（ h が増加する）ため、ポテンシャル渦度保存則より、低気圧性の渦が発生（ $\zeta>0$ ）して、流れは低気圧性の曲率で蛇行し続ける（図8(b)のB~C）。この後、流れが北上に転じると、水柱が上下に縮み（ h が減少する）、コリオリ因子も増加する（ $f>0$ ）。ポテンシャル渦度保存則より、再び、高気圧性の渦が発生（ $\zeta<0$ ）する（図8(b)のC~F）。以上の結果、山脈を超える流れは、下流側で地形による β 効果のため、定常的なロスビー波となる^{※4)}。ロスビー波の波長は、定常状態の条件から、 $\lambda=2\pi\sqrt{\frac{U}{\beta}}$ となることが理論的にわかっている。また、 $\beta=\frac{f_0}{H}$ と書き直すと、 $\lambda\propto\sqrt{\frac{UH}{\Omega \sin \theta}}$ となる。^{※6)} 但し、 λ は定常ロスビー波の波長を、 U は山脈を越える流れの流速を、 H は平均水深を、 Ω は回転台の回転数を、 θ は容器の底面の傾斜角を、 β は $\beta=\frac{\partial f}{\partial y}$ を、それぞれ表すものとする。

図7の波長の変化を観察すると、回転数を減じてからの時間とともに、定常ロスビー波の波長は短くなる傾向が見られた。これは、時間とともに容器の底面摩擦によって U が減少したために、 λ も小さくなる結果と定性的に、よく一致していることがわかる。

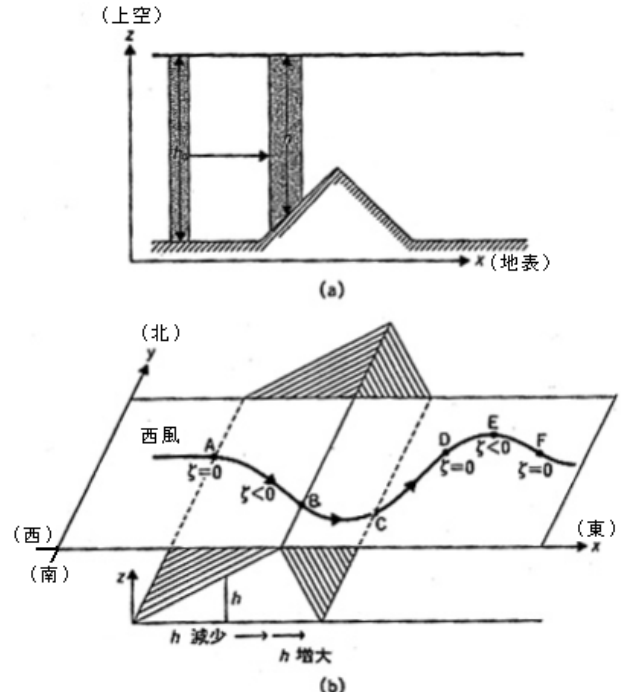


図8 山脈に見立てた突起を超えときの水柱の伸縮(a)と流れの蛇行の様子(b)^{※5)}

4 おわりに

回転台を用いた、地形による強制ロスビー波の実験方法を検討した。容器の底面を自由樹脂で整形する手間を除けば、実験の準備も簡単で結果も短時間に観察できる。水柱が伸縮しながらポテンシャル渦度保存則を忠実に満たすように蛇行し、流れが定常ロスビー波を形成する様子を観察するのは、理論的背景を知っていても面白い。また、底面の傾斜や山脈に見立てた突起の高さをを変えながら定常ロスビー波の波長を測定し、実際の気象現象と対比したりすることも、地学の大気と海洋の探究活動として、興味深いテーマになり得ると思う。

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.175 2009
- 2) 松田時彦・山崎貞治 編 高等学校地学Ⅱ pp.287 2004
- 3) NHK放送文化研究所 編 気象・災害ハンドブック pp.300 2005
- 4) 小倉義光 気象力学通論 東京大学出版会 pp.249 1978
- 5) 岸保勘三郎 大気科学講座4 東京大学出版会 pp.256 1982
- 6) Holton, J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology Academic Press pp.529 2004

(きのした あつし 地学研究班)