

半球規模地球流体力学の実験的研究

三村和男

1. はじめに

気象学（地球流体力学）に関連した流体実験の意義のひとつは、大気現象を実験室で再現し、その現象の原因と結果の論理の道筋を明らかにすることである。回転水槽実験は中緯度対流圏大気の大規模運動のアナロジーであることと、広いパラメタ空間の中で大気現象を捉えることに注目して行われて来た¹⁾。

しかしながら、未だ低緯度から高緯度までを考慮した（ β 効果が曲率を持つ）回転水槽実験の報告はない。そこで我々はこの新しい回転水槽実験の開発を行っている。一般的な平底の回転水槽実験では β 効果を再現できない。そこで流体層の厚みを変化させることによって生じる地形性 β 効果を惑星 β 効果に翻訳して実験を行っている。今回は平底の実験も行い流れの様子を比較した。

2. 実験装置および原理

順圧を仮定すると、水槽の底を放物面状の形状にすることで、地球の β 効果（planetary β ）とほぼ同じ β 効果（laboratory β ）を回転水槽内に作ることが出来る事が確認されている（Fig. 1）²⁾。我々の装置はこの水槽に、半径方向に温度差（傾圧性）を持たせ偏西風を自励させた。これにより順圧条件は厳密には満たさなくなるが、緯度帯が限られたチャンネルモデルにおいては β 効果は残ることが先行研究で知られている^{3, 4, 5)}。我々の装置はさらに緯度帯を広げ、北半球全体の β 効果を残すことを狙っている。

Fig. 2は実験装置の縦断面図である。動作流体層の半径は14cm、冷却棒の半径は0.75cmである。冷却棒と温水槽の中はそれぞれ恒温装置で一定温度の冷水と温水を循環させた。動作流体は水を用いた。ナイロンパウダーと水深2cmに設けられた側壁のスリットを通過した蛍光灯の光によって可視化を行い、回転台と共に回転するカメラで撮影した。

受理日2008年11月10日

記録画像から PIV 処理により速度場を求めた。撮影時間は回転台が300周（300日, 1 周 1 日と換算）するのに要する時間に統一した。また, 3 時の方向の子午面温度分布を知る為に熱電対格子を設置した。熱電対の束を半径方向に 3 か所直線状に並べて立て, 冷却棒側は鉛直方向に 3 点, 動作流体層中部は鉛直方向に 4 点, 加熱壁側は鉛直方向に 5 点設置し, 合計12点の温度を測定できるようにした。

温水槽と冷却棒の温度差は 5℃とし, 回転速度は 7 通り (1, 3, 5, 7, 10, 15, 20rpm) の条件を階段状に上昇させる実験と, 下降させる実験を行った。放物底を用いた実験 (β 面水槽実験) と平面底を用いた実験 (f 面水槽実験) を比較した。また各々について熱電対を用いた場合と用いない場合の実験を行った。回転数 7 通り, 上昇と下降の 2 通り, 水槽の底形状 2 通り, 熱電対の有無の 2 通りの合計56通りの実験を行った (Tab. 1)。

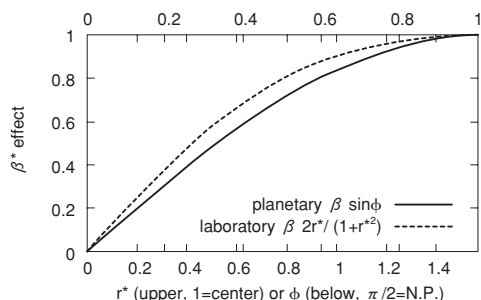


Fig. 1 球面バロトロピックモデルの惑星 β 効果 (planetary β) と順圧条件での回転水槽実験の地形性 β 効果 (laboratory β) の比較²⁾。縦軸は無次元化されたベータ効果の大きさ, 横軸は無次元化された余緯度を表す。

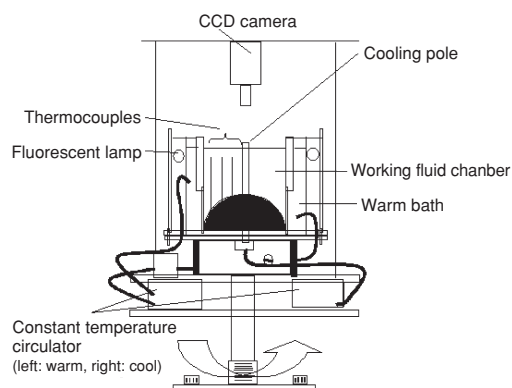


Fig. 2 実験装置概略図

Tab. 1 実験条件の組合せ

	熱電対あり	熱電対なし
放物底 (β 面)	回転速度上昇	回転速度上昇
	回転速度下降	回転速度下降
平面底 (f 面)	回転速度上昇	回転速度上昇
	回転速度下降	回転速度下降

Tab. 2 実験装置大きさと動作流体の物性値

冷却棒半径	a	0.75 cm
対流槽半径	b	14 cm
内外壁間隔	D (b-a)	13.25 cm
水深 (平面底)	d1	28 cm
平均水深 (放物底)	d2	16 cm
膨張率 (水, 20℃)	α	$0.21 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
動粘性係数 (水, 20℃)	ν	$1.0038 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
重力加速度	g	9.8 m/s^2
加熱部冷却部温度差	ΔT	5 K
回転速度	Ω	0.10 - 2.1 rad/s (1 - 20 rpm)

また回転水槽実験で使われるテラー数 (Ta) と熱ロスビー数 (Θ) は

$$\Theta = \frac{gd a \Delta T}{\Omega^2 D^2}, Ta = \frac{4\Omega^2 D^4}{v^2} \frac{D}{d}$$

であり、我々の実験の値 (Tab. 2) を代入すると、放物底の場合は $9.4 \leq \Theta \leq 2.1 \times 10^{-2}$, $1.0 \times 10^7 \leq Ta \leq 4.5 \times 10^9$ となり、平面底の場合は $1.6 \times 10^1 \leq \Theta \leq 3.7 \times 10^{-2}$, $5.8 \times 10^6 \leq Ta \leq 2.6 \times 10^9$ となる。

3. 結果

撮影した映像に PIV 解析を行い、300日分の水平面内の速度の時系列データを得た。また熱電対データから子午面内の温度の時系列データを得た。

全ての実験条件において反時計回りの流れ (西風) となった。また、1 rpm ではどの実験でも、共通した軸対象の流線が見られた。また、回転数速度が増えるにつれ流線の形が変形していく傾向は、8通りの実験方法に共通して見られる。同時に、回転速度が大きくなるにつれ蛇行の振幅が大きくなり、東西波数が増えていく傾向も共通している。軸対象の流れが回転速度の小さい時に見られ、回転速度の大きい時に蛇行した流れ (波動レジーム) が見られる傾向は、過去の回転水槽実験¹⁾と一致している。

放物底実験と平底実験を比較することで、水槽の底の形状の流れに対する影響を見ることが出来る。3 rpm または 5 rpm より回転速度が大きくなると、平面底では8の字状 (東西波数2) の流れが目立つが、放物底ではそのような流れは見られない。このことは渦位保存の要請による蛇行の抑制効果の結果と推測できる。10rpm 以上では平面底、放物底ともに蛇行が複雑になる。平面底では閉じた流線が目立ち、渦の直径が大きい、放物底では閉じた流線はあまり目立たず、平面底に比べ渦の直径はかなり小さくなっている。これらのことから、放物底の有無によって流線の形 (蛇行の程度) を変わることが確認できた。

熱電対有り実験と無し実験の比較を行うことで、熱電対の流れに対する影響を見ることが出来る。回転数が同じであれば、流線の形はほぼ同じであり、蛇行のパターン (流線の形) については熱電対にほとんど関係しないことがわかった。

回転速度の上昇実験と下降実験を比較することで履歴の影響を見ることが出来る。放物底実験では、同じ回転速度に注目した時に流線の形はおおよそ同じであるが、平底実験の3 rpm については履歴によって流線の形が大きく異なっている。上昇実験では8の時状 (東西波数2) の流線であるのに対し、下降実験では軸対象もしくは東西波数1の流線の形を取っている。これらのことから、履歴の影響が強く出の場合と弱く出の場合があるようである。平面底実験の方が放物底実験に比べ履歴の影響が表れやすいことが推測できる。

次に実験の結果生じる流れの場のロスビー数 (Ro) がそれぞれの実験でどのように違うかを見た (Fig. 3)。なお Ro は次のように求めた。

$$Ro \equiv \frac{U}{fL}, \text{ where } U = \iiint \sqrt{u^2 + v^2} dt dx dy$$

なお, u は接線方向速度, v は半径方向速度, x は接線方向, y は半径方向, f はコリオリパラメータ (2Ω), L は水槽半径である。Fig. 3から全ての実験において回転速度の上昇とともにロスビー数が小さくなることがわかった。3 rpm ないし 5 rpm からロスビー数の大きいグループと小さいグループに別れた。ロスビー数の大きいグループには放物底を用いた実験が属し, ロスビー数の小さいグループには平面底を用いた実験が属している。また 7 rpm より回転速度が大きくなると, 熱電対の有無 (β , T.C., up と β , up) や回転速度上昇実験と回転速度下降実験 (β , T.C., up と β , T.C., down) の Ro の差に比べ, 平面底と放物底 (β , T.C., up と f , T.C., up) の Ro の差の方が大きいことがわかった。

次に β 効果が鉛直方向にどれくらい浸透する可能性があるかを調べるために, ロスビー高度 (Rossby Hight, γ) の値を求めた (Fig. 4)。ただしロスビー高度 γ は次式で定義される。

$$\gamma \equiv \frac{fL}{N} = \frac{Lf}{\sqrt{ga \frac{\Delta T}{\Delta z}}}$$

ここで f はコリオリパラメータ (2Ω), L は水槽半径, N は浮力振動数, g は重力加速度, a は体積膨張率, $\Delta T / \Delta z$ は鉛直温度差である。なお $\Delta T / \Delta z$ は動作流体層中部に設置された熱電対の最上層部と最下層部の温度記録から求めた。Fig. 4より, ロスビー高度は実験水槽の動作流体層の厚みよりも十分に大きいことがわかった。

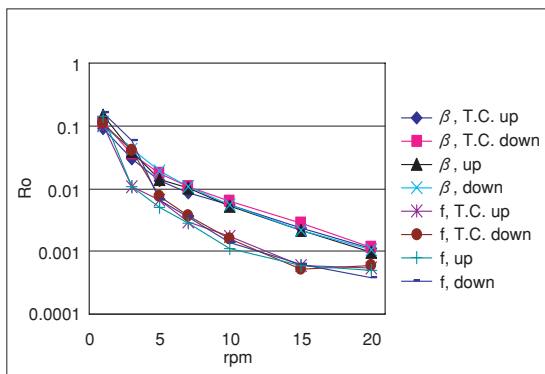


Fig. 3 縦軸に実験値から得られたロスビー数 (Ro), 横軸に回転速度 (rpm) をとりプロットしたもの。縦軸は対数軸にしている。 β は放物底, f は平面底, T.C. は熱電対, up は回転数上昇, down は回転数下降実験をそれぞれ示す。

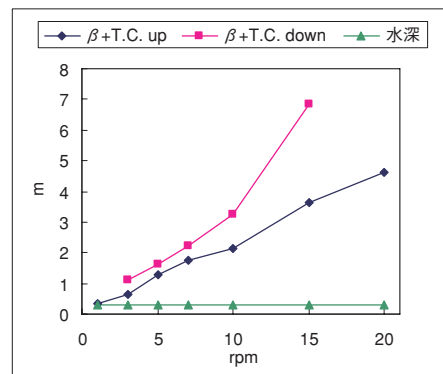


Fig. 4 放物底あり熱電対あり回転速度上昇実験 ($\beta + \text{T.C. up}$) と放物底あり熱電対あり回転数下降実験 ($\beta + \text{T.C. down}$) の Rossby Hight の値を回転速度ごとにプロットしたもの。水深は実験水槽の水深を示している。

4. 考察

Fig. 3では放物底と平面底の差が明確に現れた。このことから、放物底実験は平面底実験に比べ、ロスビー数を最大で約1桁ほど大きくさせる働きがあることがわかる。また、これにより放物底は平底に比べ、実験水槽内の偏西風を維持する働きがあることがわかった。これらことは、放物底を用いることで半径方向に渦位の勾配が作られ、渦位保存の要請により半径方向の蛇行が抑制された結果であると考えられる。これは理論的に予想される β 効果の特徴の1つである。Fig. 4より、動作流体中に結果として生じる鉛直安定性は、適度に小さく、水槽底の形状によって生じる地形性 β 効果は十分に水槽上部にまで浸透する可能性があることが確かめられた。履歴性や熱電対の流れに対する影響は放物底の有無に比べれば小さいが、無いわけではない。この評価については引き続き調査を行う。

以上のことから、ロスビー数（平均流速）は β 面水槽の方がf面水槽に比べ大きい。f面水槽では流線の閉じた大きな渦が作られ安い（渦成分が目立つ）のに対し、 β 面水槽では帯状流が作られやすい（直流成分が目立つ）ことがわかった。

放物底を用いた回転水槽実験で β 効果が作られていれば、 β 効果を復元力としたロスビー波（惑星波）が形成されうる。次は実験水槽内にどのようなロスビー波が作られているか調べたい。

参考文献

- 1) 菊地, 瓜生, 北林, 『実験気象学入門』, 東京堂出版, 1989, pp. 101-102.
- 2) 三村和男, 『極渦反転実験』, 京都大学 数理解析研究所講究録 886, 1994, pp. 161-172
- 3) M. E. Bastin, P. L. Read, "Experiments on the structure of baroclinic waves and zonal jets in an instability heated, rotating, cylinder of fluid", *Physic of fluid*, 1998, vol. 10, No. 2, pp. 374-389
- 4) K. Tamaki, K. Ukaji, "An Experimental Study of Wave Dispersion in a Differential Heated Rotating Fluid Annulus with a Radially Sloping Bottom", *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2003, Vol. 81, No. 5, pp. 951-962
- 5) T. Tajima, T. Nakamura, "Experiments to study the beta-effect in atmospheric dynamics", *Experiments in Fluid*, 2005, vol. 39, pp. 621-627
- 6) Mimura, K., "Polar Vortex Reversal Experiment in a Rotating Shallow water", *Tohoku Geophysical Journal*, Vol. 36, No. 12, pp. 207-212