

室内実験における半球規模地球対流圏の再現

Rotating Dishpan Laboratory Experiment with both Baroclinicity and Planetary Beta Effect

松島和宏, 東海大地環, 〒259-1292 神奈川県北金目 117, E-mail:5ated003@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp
 三村和男, 東海大教養, 〒259-1292 神奈川県北金目 117, E-mail:mimura@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp
 Kazuhiro Matushima, Graduate school of earth and environmental science, Tokai University, 117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292, Japan
 Kazuo Mimura, Department of Resources and environment, School of Humanities and Culture, Tokai University, 117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, Japan

We make a new proposal that a laboratory experimental device is able to simulate semi spherical atmospheric circulation, in which both the baroclinic and beta effects are essential. To evolve the beta effect, we set the bottom shape of the parabola. To evolve the high latitude interaction, cold bar with very small diameter is settled into center of the cylinder. Because it is not self evident that these effects appear on same time in laboratory experiments, we confirmed these effect by laboratory experimental results. Our devise successfully simulates both the thermal wind balance and stationary Rossby wave-like phenomenon by measuring temperature and velocity in the water.

1. はじめに

天気予報に対する興味から中緯度帯対流圏における大気循環についての研究が数多く行われてきた。観測、流体力学を基にした理論、室内実験、コンピュータ・シミュレーション等から得られた知見は今日の天気予報の精度向上に還元されている。

この過程において作られた傾圧不安定理論は、準地衡風予報モデルにおける成功のみならず、回転水槽実験による検証という確かな基盤を伴い、大気循環の理解の基礎となっている⁽¹⁾。回転水槽実験の長所としては

1. 取り入れられる力学的要素が少ない為、単純化して考えることができる。
2. 模型とは言え、現実の流体中に起こる自然現象である。ことがあげられる。

伝統的なアニュラス型回転水槽実験⁽²⁾の欠点は、惑星ベータ効果が含まれないことである。地球は球形をしている為、コリオリ力が緯度によって異なる($f=2 \sin \phi$)。これが原因となりロスビー波を始めとする中立波動が伝播する。中立波動には幾つかの物理量を輸送する機能がある。地球流体は水平方向に繋がっている為、傾圧性によって生じた擾乱が中立波動によって伝播し影響することは考える。これらの現象を室内実験における実際の流体で検証できれば、その結果から多くの知見を得ることができると考えられる。

前回⁽³⁾では速度場は瞬間場のみであったが、今回は装置の改良により一定時間内であれば連続計測を行えるようになったので、その結果を報告する。

2. 実験装置および原理

Fig.1 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 8mm である。冷却棒と温水槽の中はそれぞれ恒温装置による一定温度の冷水と温水を循環させ、半径方向に温度差をつける。動作流体には主に水を用いる。ナイロンパウダーと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する。内部の温度分布を計測する為に、動作流体内部に 12ch の熱電対を設置した。熱電対線を底から挿入し、光源を回転台に載せることで、カメラに映る影を無くし、動画の連続 PIV 処理が可能になった。

本実験では惑星ベータ効果を水深変化による地形性ベータ効果で置き換える。傾圧場において地形性ベータ効果と惑星ベータ効果が等価であるという理論的証明はまだない。しかし、先行研

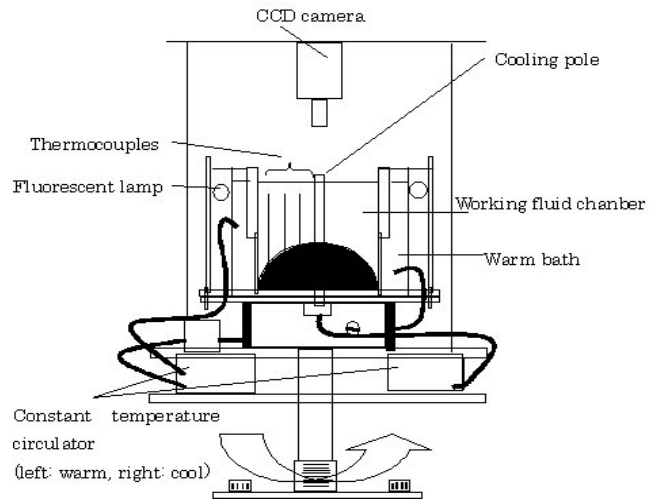


Fig. 1 Experimental device

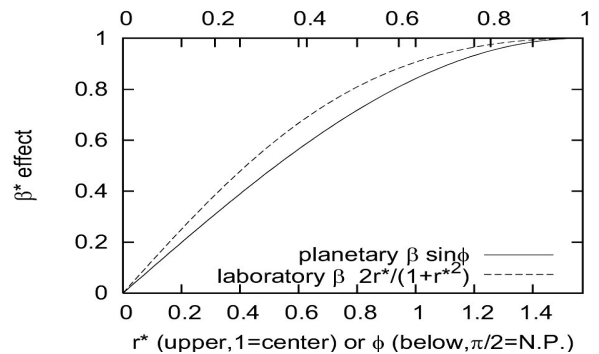


Fig. 2 compare with planetary beta with laboratory (topography) beta⁽⁷⁾

Tab.1 Experimental condition table

Rotating velocity (rpm)	0.5	1	3	5	7	15	20
Method							
Sin. Up							
Sin. Down							
Con. down	×						×

Table show rotating velocity vs. method (:observed, × : non observed)

究⁽⁴⁾⁽⁵⁾などからある程度の効果が本実験でも生じていると考えている。水槽の底は放物面の傾斜を持ち、水槽中心で最も浅く(水深14cm)、側壁に付近で最も深くなる(水深28cm)ようにした。この形状を有する場合の順圧時における地形性ベータ効果と、球面パロトロピックモデルの惑星ベータ効果との比較がFig.2であり、良い近似を与えている。^{(5), (7)}

温水、冷水は恒温装置により0.1℃制御でそれぞれ18℃、13℃とし温度差5℃を維持する。初期条件の統一を考え17日の動作流体を注入し、下部に比べ上部が暖かい事を確認してから回転台を回す。実験結果の変動幅を見るため、回転台の回し方を3通りと回転速度を7通りに変え、実験を行って結果を見た(Tab.1)。また図や表中に登場する略語の意味は下記ようにする。

up[上昇]: 静止状態から目標回転速度まで加速し流れの観察を行う(西風が自然に生じるのを待つ)

down[下降]: 静止状態から目標回転速度+5rpm加速し、その後目標回転速度に減速させる(西風を強制によって作る)。

sin.[単一]: 1度の実験で1通りの回転速度の実験を行う。

con.[連続]: 1度の実験で複数の回転速度の実験を行う。

Snap[瞬間]: 瞬間の速度場

3. 結果

Fig.3. は撮影した映像にPIV解析を行い、さらに時間平均して得られた速度分布である。中心が冷却棒であり外側が側壁に相当する。時間平均幅は回転台の1周を1日と考え、1ヶ月程度とした(1部異なる)。1rpmでは同心円状の流れになっている点が3通りの回し方で共通した。また、外側で流速が遅く中心付近で速いことも共通した特長である。15rpmでは、1rpmに比べて蛇行している点が共通である。また、接線方向に流速の強弱が見られる点も共通である。一方、15rpmの場合は1rpmに比べて、実験方法による違いが、蛇行の位置や流速の強弱の接線方向分布に表れている。なお、蛇行の程度が回転速度と共に大きくなる傾向は、実験方法によらず共通で、前回の報告⁽³⁾とも一致する。

Fig.4. はFig.3.の速度分布を領域(接線方向と半径方向)に平均して求めた、時間領域平均接線方向流速の回転速度依存性である。回転台の回転速度(Ω)が3rpmを超えたあたりから、接線方向流速が回転速度と共に減少していく様子が示されている。

Fig.5.は動作流体内の半径方向温度差である。熱電対は中心側で鉛直方向3点、側壁側で鉛直5点、中心側と側壁側の間で鉛直4点測定している。半径方向温度差は、側壁側と中心側の中層の温度計測結果を時間平均して求めた。なお、時間平均期間は流速計測時間と同じにした。Snapを除き、7rpmあたりから再び温度差が減少していった。

回転数依存性をまとめると、0から回転速度を大きくしていくと、回転速度と共に接線方向流速と半径方向温度差が増加している。そして接線方向速度は3rpm、半径方向温度差は7rpmを境に接線方向流速と半径方向温度差は回転速度と共に減少していく。この対応は温度風の関係性を連想させる。本実験で生じている流れが地球大気のように地衡風系に準じているか否かを見るために温度風係数の理論値と実験値を比較した。

デカルト座標(x, y, z)において静力学平衡、地衡風及び液体の状態方程式は

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\rho = \rho_0 \{1 - \beta(T - T_0)\} \quad (3)$$

となる。なお、p: 圧力、g: 重力加速度、ρ: 密度帯状、f: コリ

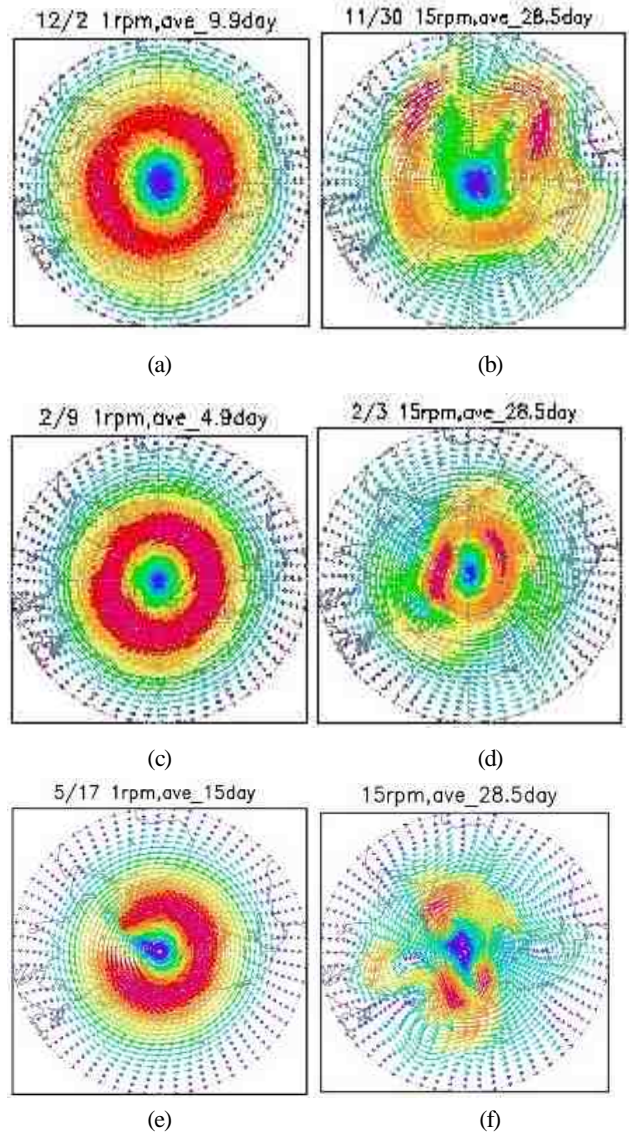


Fig.3. Observed time averaged velocities ((a): Sin. up 1rpm, (b): Sin. up 15rpm, (c): Sin. down 1rpm, (d): Sin. down 15rpm, (e): Cont. down 1rpm, (f): Cont. down 15rpm, Warm color is consistent with fast velocity.)

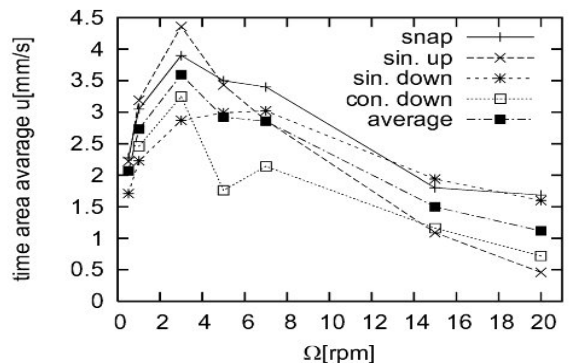


Fig. 4 azimuthal u averaged by arc and time

オリパラメータ(2), v :速度、 β :膨張率である。(1)、(3)を用いて(2)の左辺を変形すれば

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\beta}{1 - \beta(T - T_0)} \left(u \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{g}{f} \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

$$\cong \beta (1 + \beta(T - T_0)) \left(u \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{g}{f} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

となる。さらに、液体の膨張率は小さい($1 \gg \beta(T - T_0)$)とすれば

$$\frac{\partial u}{\partial z} \cong \beta \left(u \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{g}{f} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5)$$

の近似式を得る。それぞれに代表的な値を代入してスケーリングを行えば

$$\frac{\partial u}{\partial z} \cong - \frac{\beta g}{f} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (6)$$

の温度風関係式を得る。理論値(theory)としての温度風係数を $-f/g$ とし、実験値の温度風係数を $(u/z)/(T/y)$ とする。この回転速度依存性を見たものが Fig.6 である。なお u/z は底の流速を 0 とし、計測した上層の流速を使っている。この図より、回転速度と共に温度風係数が減少していく傾向はいずれの実験においても、理論値と一致する。またオーダー的にも理論と実験は近いと言える。

4. 考察

Fig4. 5. 6. から温度風関係がおおよそ満足されていることがわかった。したがって、本実験装置内で生じている流れは地衡風に準じたメカニズムによって作られていると考えられる。この立場から Fig3. を見てみると、15rpm では時間平均処理を行ったにも関わらず、蛇行が見られている。これは気象学で言われている定在波に相当するかもしれない。定在波は傾圧不安定波とは異なる原因で形成されることが知られている。その中には惑星ベータ効果もある。したがって、Fig3. で見られる蛇行は本実験装置がベータ効果を併せ持つがゆえに表れたものと考えられる。

今後は得られた実験結果を解析することでベータ効果の評価を行い、実験室における新たな大気大循環モデルを確立していきたい。

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, 松島, "傾圧性と惑星規模ベータ効果を併せ持つ室内実験", 日本流体力学会年会 2004 公演論文集, 2004, pp.518-519
- (3) Hide, R., "An experimental study of thermal convection in a rotating fluid", Phil. Trans Roy. Soc. London, 1958, A250, pp.221-478.
- (4) 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
- (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, No12, pp.207-212
- (7) 三村, "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

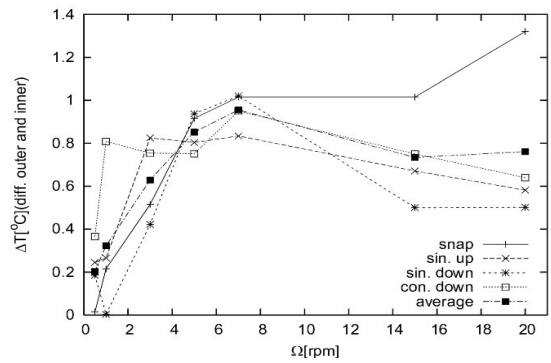


Fig. 5 Radial temperature difference in working fluid

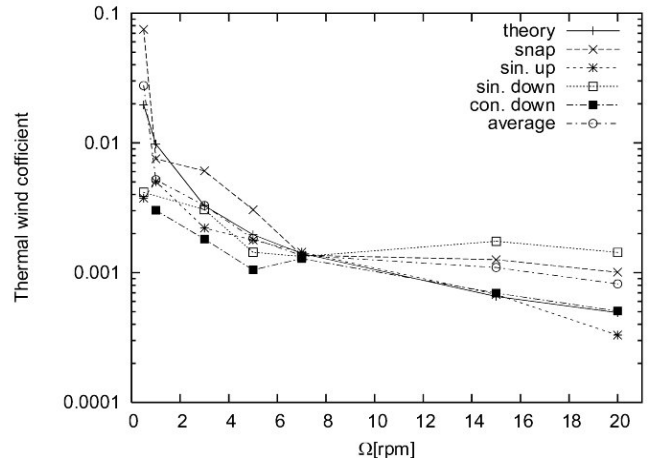


Fig. 6 rotation rate dependency of thermal wind coefficient