

傾圧不安定実験において発生するロスビー波

三村和男*

1. はじめに

惑星流体の大循環の特性を系統的に調査するため、大循環室内実験モデルの作成し、そこに生じた流れについて研究を行っている⁽¹⁾。我々の回転水槽は、北半球規模の傾圧性と惑星 β 効果のみを表現するという単純化されたものである。

今までの実験では、系の回転角速度が大きくなるにつれ、軸対称偏西風から、蛇行する偏西風に遷移し、さらに蛇行の波数が大きくなる傾向がある。ここまでは、伝統的なアニュラス型回転水槽実験と同じ傾向であるが、我々の水槽では、発生した蛇行偏西風はアニュラス型とは異なって、その位相が西進するところが特徴である。系の回転角速度が大きくなるにつれ、東西波数が増加し、その西進速度は小さくなるという傾向が見られる⁽²⁾。

本研究では、この西進する蛇行はロスビー波であるという仮説を立て、このロスビー波発生メカニズムについて考察する。

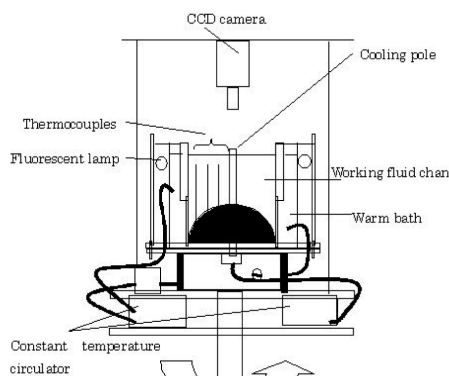


Fig. 1 Experimental apparatus

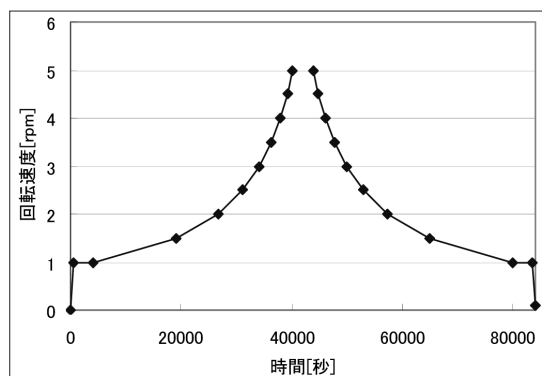


Fig. 2 angular velocity change of turn table

受理日2011年11月23日

*教養学部人間環境学科自然環境課程教授

2. 室内実験モデル・実験方法

実験装置の概観を Fig. 1に示す。我々の回転水槽の形状は、従来のアニュラス型とは違って、放物底を持つ半径 $R = 140\text{mm}$ の円筒型である。そして外壁下部から加熱し、円筒中心軸に位置する冷却棒で冷却するという方法で、水槽外壁を赤道、冷却棒を北極と見立てて、北半球規模の差分加熱と惑星 β 効果を実現しようとしている。動作流体（水）の動きを水面下 2cm のスリット光とトレーサーで可視化し、ビデオカメラで撮影する。撮影された動画を PIV 解析し、速度場を求める。

実験条件として、加熱部・冷却部温度差は 5°C に固定し、系の回転角速度を連続的に極めてゆっくりと変化させ、準静的のプロセスで様々な回転角速度における流れ場の遷移を調査する。

回転角速度の加速率が回転周期で無次元化された系で一定となるように、回転速度を (1) 式のように変化させた。

$$\Omega = \frac{\Omega_{\max}}{\Omega_{\max}/\Omega_{\min} - t/t_{\max}(\Omega_{\max}/\Omega_{\min} - 1)} \quad (1)$$

我々は既に、流れの場が軸対称偏西風から東西波数 1 の西進ロスビー波レジームに遷移するあたりで、傾圧不安定波動と思われる東進波動を発見している（2010年度日本気象学会秋季大会での報告）。しかし、残念なことに、その東西波数は 1 でなく 2 であった。波数が 2 であれば、波数が 2 から 1 へ変化するメカニズムも説明しなければならなくなる。あるいは、そこで発見された波数 2 の東進波動は、温度場計測のための熱電対格子の影響である可能性が有る。

従って今回は、あえて熱電対格子を取り除いて再実験を行った。なお、今回の実験では $\Omega_{\max} = 5\text{rpm}$, $\Omega_{\min} = 1\text{rpm}$, $t_{\max} = 36000\text{s}$ である。回転台の回転角速度の変化が Fig. 2 に示してある。 $\Omega = 0\text{rpm}$ から始め、10分かけて $\Omega = 1.0\text{rpm}$ まで上昇させる。 $\Omega = 1.0\text{rpm}$ を 1 時間維持した後に $\Omega_{\max} = 5\text{rpm}$ へ向けて 10 時間かけてゆっくり加速する。 $\Omega_{\max} = 5\text{rpm}$ に到達したら、その回転速度を 1 時間維持した後に、 $\Omega_{\min} = 1\text{rpm}$ へ向けて再び 10 時間かけてゆっくり減速する。 $\Omega_{\min} = 1\text{rpm}$ に達したら、1 時間同じ回転速度を維持する。その後回転台は 10 分かけて $\Omega = 0$ に達し、停止する。

3. 結果

3.1 帯状平均場の全体像

Fig. 3は、帯状平均（実験水槽では接線方向平均）した、西風（実験水槽では接線方向速度）の 10 時間にわたる時間発展を示しており、Fig. 4は、同じく帯状平均した南風の時間発展である。偏西風ジェットは北緯 60° 付近に存在し、約 6mm/s の大きさである。平均子午面循環に相当する、平均南風は、ほぼ全量域で極向き流れとなり、その大きさは約 0.05mm/s で、

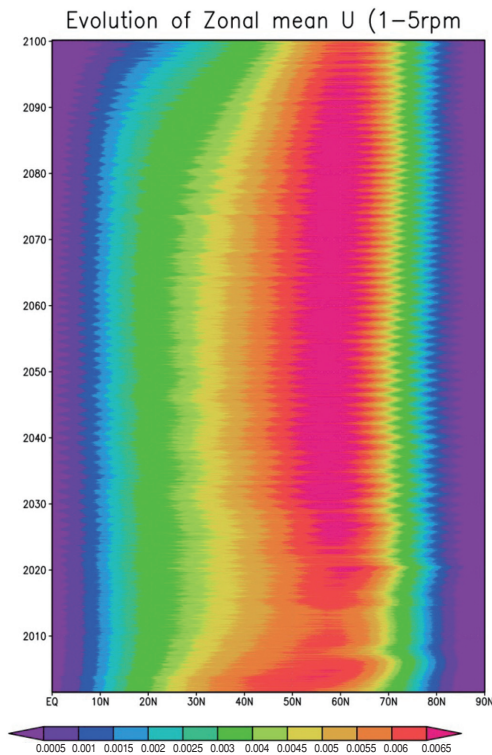


Fig. 3 Evolution of Zonal mean U

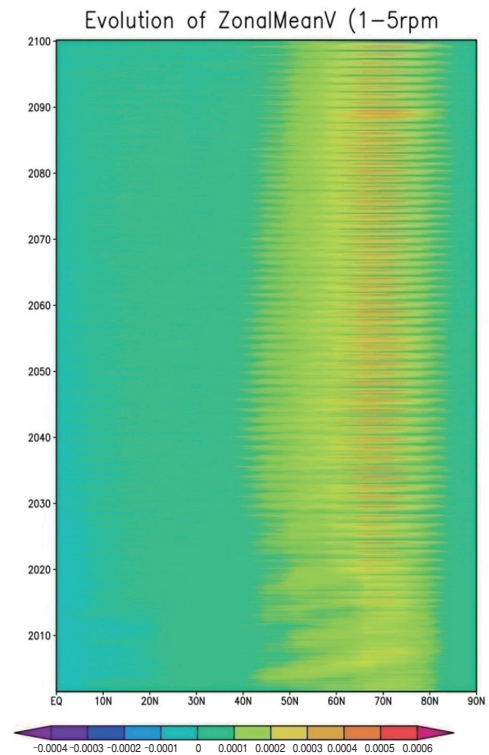


Fig. 4 Evolution of Zonal Mean V

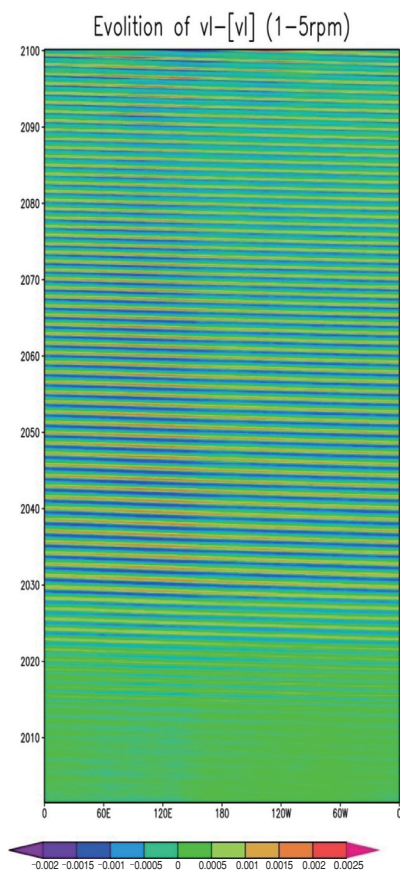
偏西風ジェットに比べて100分の1のオーダーである。

系の回転速度は、1 rpm から 5 rpm まで、5 倍にも増大しているにもかかわらず、2 rpm あたりを中心に、1.2rpm 付近から 3 rpm 付近まで、ほぼ一定の平均場が維持されている。そして、細かく見ると、全体で約75回の脈動があり、その周期はほぼ変わらず、平均周期は480秒であることが判る。系の回転周期を1日と定義すると、この脈動周期は、1 rpm では8日、5 rpm では40日にあたる。

3.2 偏差場の全体像

Fig. 5, Fig. 6は、各々、北緯45度（実験水槽では中心から半径が水槽半径の半分の位置）における、西風、南風の帯状平均からの偏差場（ u' , v' ）の傾度・時間断面図（Hovmöller Diagram）である。 u' , v' とともに、東西波数1の西進波動が顕著で、実時間軸で見て、周期はほぼ一定の約480sであることがわかる。北緯45度における緯度円の長さは、 $2\pi(R/2) \approx 440\text{mm}$ 、であるから、平均位相速度は、 $440 \times 75/36000 = 0.92\text{mm/s}$ 、すなわち、西向きに、約1 mm/sである。

上記、帯状平均場の場合と同様に、系の回転速度は、1 rpm から 5 rpm まで、5 倍にも増大しているにもかかわらず、全ステージにおいて、ほぼ一定の位相速度が維持されている。

Fig. 5 Hovmöller Diagram of u' at 45NFig. 6 Hovmöller Diagram of v' at 45N

3.3 ロスビー波の揺籃期

そこで、これが西進ロスビー波であると予想し、ロスビー波の起源を調べるため、実験開始直後の $\Omega = 1.04\text{rpm}$ から $\Omega = 1.05\text{rpm}$ にわたる、約6日間に注目し、緯度45度における、南風偏差 (v') の経度時間断面図 (HOVMÖLLER 図) を作成した (Fig. 7a)。なお、停滞成分を除去するため、この期間の時間平均値を差し引いてある。

Fig. 7a には、様々なシグナルが重なっているものと考えられ、最も目立っているのは東進シグナルであるが、東西波数は1ではなく、かなり多そうである。

従って、このデータに、 $\pm 15\text{s}$ の移動平均をかけるという Low Path フィルターを通した図が、Fig. 7b であり、この Low Path データを差し引くという方法で得られた、High Path データが Fig. 7c である。

Fig. 7b には、東西波数1のほぼ同じ振幅 (約 0.15mm/s) の、3種類の波動シグナルが重なっていることが読み取れる。すなわち、高速西進シグナルと東進シグナルの他に、6日分を通してみると、約8日で西向きに1周するパターンが見て取れる。

波数1の高速西進シグナルの位相速度は約1日で1周、すなわち $440/60 = -7.3\text{mm/s}$ 。

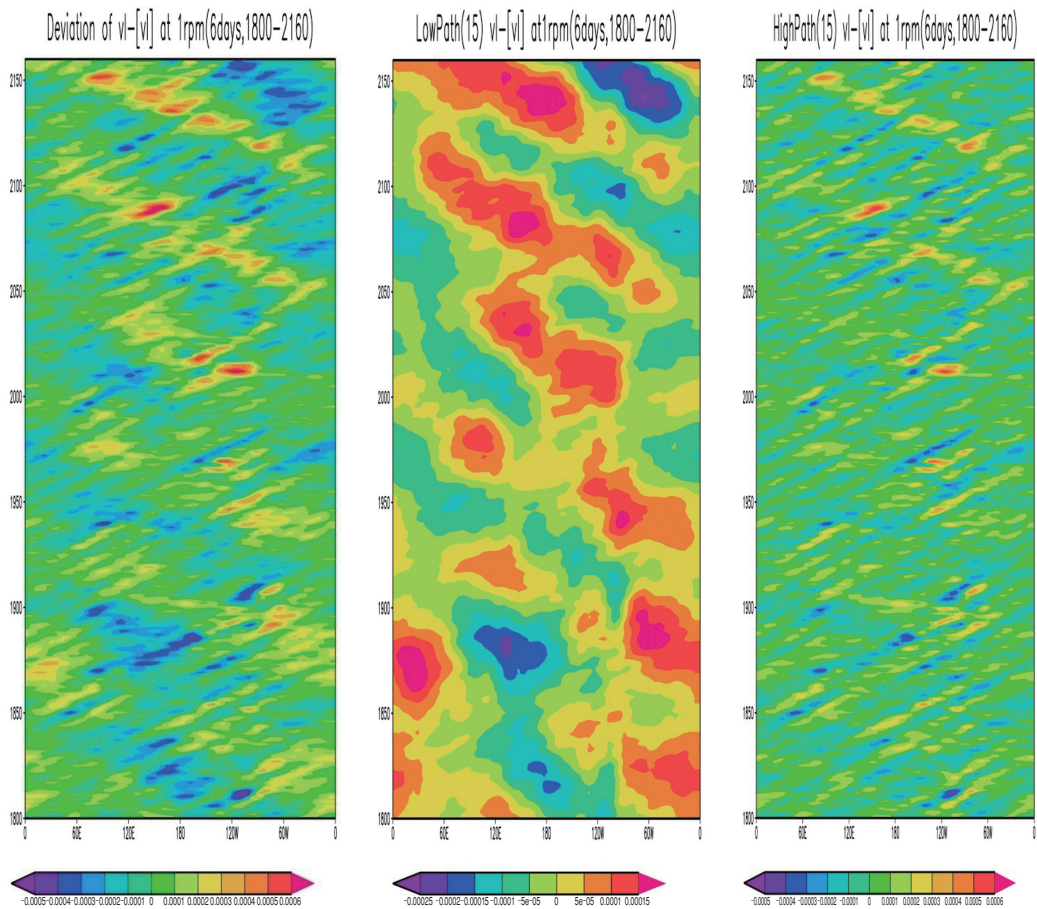


Fig. 7a Hovmoller Diagram

Fig. 7b Low Path Diagram

Fig. 7c High Path Diagram

波数1の東進シグナルの位相速度は約2日で1周，すなわち $440/60/2 = 3.7\text{mm/s}$ ，こうして初めて，探し求めていた東進波数1のシグナルが見つかった。この位相速度は，傾圧不安定理論のステアリング・レベルの流速（対流圏中層基本流速），すなわち，約 3mm/s にも近く，この東進シグナルを傾圧不安定波動とみなすことにする。

波数1の低速西進シグナルの位相速度は約8日に1週，すなわち $-440/60/8 = -0.92\text{mm/s}$ 。

Fig. 7cには，波数5程度の東進シグナルが認められ，その位相速度は約1.5日で1周，すなわち $440/60/1.5 = 4.9\text{mm/s}$ ，振幅は平均約 0.3mm/s で最も強い。また，この位相速度は，傾圧不安定理論のステアリング・レベルの流速（対流圏中層基本流速）というよりは，北緯45度付近の表面流速に流されているように見受けられ，傾圧不安定波動とは別の何かのシグナルであると思われる。

4. 考察

一様流中のバロトロピック・ロスビー波の分散関係式は、局所平面近似した簡単理論によると、

$$c - U = \frac{\beta}{n^2 + \left(\frac{m\pi}{2}\right)^2}, \quad (2)$$

$$\beta \equiv \frac{R\Omega}{2} \frac{2\frac{r}{R}}{1 + \left(\frac{r}{R}\right)^2}$$

である、ただし、 c はロスビー波の位相速度 [m/s]、 U は基本場の西風 [m/s]、 Ω は：回転台の角速度 [rad/s]、 n は東西波数、 m は南北波数、 R は水槽半径 [m] である。(2) 式右辺に、実験装置の条件に合わせて、 $R=0.14\text{m}$ 、 $\Omega = 1\text{ rpm}$ とし、北緯45度を想定して $r/R=1/2$ を代入し、 $n=1$ 、 $m=0$ を代入したとき、その値は -5.9mm/s となり、 $n=1$ 、 $m=1$ を代入したとき、その値は -1.9mm/s となる。

一方、(2) 式左辺の U に、偏西風ジェット (6 mm/s) の半分を代入し、高速西進波動の位相速度 $c = -7.3\text{mm/s}$ 、を代入すると、 $c-U = -10.3\text{mm/s}$ が得られ、低速西進波動の位相速度 $c = -0.92\text{mm/s}$ 、を代入すると、 $c-U = -3.92\text{mm/s}$ が得られる。以上の結果を Table 1. にまとめた。定量的には良い一致とは言えないが、オーダーは合っていると言える。

Table 1. Comparison with theoretical and experimental phase velocity.

	Theory	Experiment
$c-[U]$ 高速西進	-5.9mm/s	-10.3 mm/s
$c-[U]$ 低速西進	-1.9mm/s	-3.92mm/s

結局、回転系における差分加熱により、東西波数1の傾圧不安定波動が励起され、この蛇行流が、放物底による β 効果を感じて、西進ロスビー波を作り出した可能性が高い。

4. まとめ

北半球規模の傾圧性と惑星 β 効果のみを表現するという単純化された惑星流体力学室内実験において、「基本場の傾圧性により励起された東西波数1の傾圧不安定波動が、同じ東西波数1の西進ロスビー波動の励起源となり、やがて、西進ロスビー波動は、南北構造を変質させながら、最も目立った偏西風蛇行の主役にのし上がっていく」という、「西進シグナルの揺籃期の様子」が明らかになった。

参考文献

- 1) K. Mimura, "Polar Vortex Reversal Experiment in a Rotating Shallow water", Tohoku Geophysical Journal, Vol. 36, No12, pp. 207-212
- 2) 松島和宏, 三村和男, "半球規模回転水槽で自発的に生じた西進波動について", 2010 年度日本気象学会秋季大会予稿集