

β 平面上の帯状流の安定性と乱れの効果

An effect of turbulence on the stability of a zonal flow on a beta plane

小布施 祈織^{1*}, 竹広 真一¹, 山田 道夫¹

Kiori Obuse^{1*}, Shin-ichi Takehiro¹, Michio Yamada¹

¹京都大学数理解析研究所

¹RIMS, Kyoto University

惑星上の大規模な流れは、惑星の自転の効果および流体の密度成層の効果により、2次元になっていると仮定して取り扱われることがある。その際に用いられるモデルの1つである回転球面上の2次元強制非圧縮性流体モデルでは、流れの時間発展の過程において東向きジェットと西向きのジェットが緯度方向に交互に多数本並ぶ縞状構造が形成されることが広く知られており(Nozawa and Yoden 1997, Huang and Robinson 1998),このことは、支配方程式内において回転効果と移流効果が釣り合う波数として定義されるRhines波数(Rhines 1975)を用いて説明されることが多い。しかしながらさらに長時間の積分を続けると、これらの東西ジェットは非常にゆっくりと融合・消滅を繰り返し、漸近状態として2本もしくは3本という少数本のジェットから成る構造が実現される(Huang et al. 2001, Obuse et al. 2009)。

この長時間積分(Obuse et al. 2009)では、比較的早い時刻において既に流れの代表的な波数はRhines波数を下回るが、時間積分を続けるとさらにエネルギーの逆カスケードが進み、漸近状態における流れの代表的な波数はRhines波数を大きく下回る。従って、この漸近状態の実現はRhinesの理論によっては説明することができない。さらに興味深いことに、Rhinesスケールよりも大きな南北スケールを持つ層流ジェットは線形安定になるため、上記のジェットの本数の減少は、層流ジェットの順圧不安定だけでは説明することができない。従って東西ジェットの融合・消滅には、その背景に存在する乱流の効果が本質的に重要であると考えられる。

そこで本研究では β 平面上において、背景の乱流の効果をモデル化した東西ジェットの性質を、弱非線形解析及び数値解析を用いて調べた。ここで用いた先行研究であるManfroi and Young (1999)は、 β 平面上で $\sin(mx)$ 型の南北方向の流れに東西方向の流れを重ねた基本流について、超臨界状態に現れる変動流を弱非線形解析によって調べている。彼らは得られた弱非線形方程式を用いてランダムな初期条件から数値実験を行い、多数本のジェットから成る縞状構造が速やかに形成された後、それらのジェットはゆっくりと融合・消滅を繰り返し、最終的には1つのジェットとなることを見出した。

本研究ではManfroi and Young (1999)の得た弱非線形方程式について、彼らの数値実験において現れた東西ジェットに対応する定常解を解析的に見出し、その線形安定性を解析的および数値的に調べた。その結果、パラメータ空間における定常解の存在領域が決定され、その領域内の定常解のすべてが線形不安定であることが見出された。さらに、その不安定性の時間発展を数値的に調べた結果、摂動を受けた定常ジェットは最終的に一様流になることが確かめられた。これはManfroi and Young (1999)の数値実験に見られるジェットの消滅と整合的である。このことは、東西ジェットの融合・消滅には、その背景に存在する乱流の効果が本質的に重要であることを示唆しており、前述の回転球面上におけるジェットの融合・消滅の機構を示唆している。

参考文献：

- T. Nozawa and S. Yoden, 1997 Phys. Fluids, 9 pp.2081-2093
H-P. Huang and W. A. Robinson, 1998 J. Atmos. Sci., 55 pp.611-632
P. B. Rhines, 1975 J. Fluid Mech., 69 pp.417-443
H-P. Huang, B. Galoerin., and S. Sukoriansky, 2001 Phys. Fluids, 13 pp.225-240
K. Obuse, S. Takehiro, and M. Yamada, 日本地球惑星科学連合2009年大会J170-012
A. J. Manfroi and W. R. Young, 1999 J. Atmos. Sci., 56 pp.784-800

キーワード:回転流体,順圧流,乱流,東西ジェット,ベータ効果

Keywords: rotating fluid, barotropic flow, turbulence, zonal jet, beta effect