

回転球面上における強制 2 次元乱流の漸近状態

Long-time asymptotic states of the forced two-dimensional barotropic incompressible flow on a rotating sphere

小布施 祈織 [1]; 竹広 真一 [2]; 山田 道夫 [3]

Kiori Obuse[1]; Shin-ichi Takehiro[2]; Michio Yamada[3]

[1] 京大・理・数理解析; [2] 京大・数理研; [3] 京大・数理研

[1] RIMS, Kyoto Univ.; [2] Research Inst. for Mathematical Sci., Kyoto Univ.; [3] RIMS, Kyoto Univ.

地球惑星科学で用いられる数理モデルは、そのモデル自身の性質が明らかでないことが多い。ここでは多くの大気モデルを考える上で基礎となる回転球面上の順圧 2 次元非圧縮流体の運動について、長時間後の漸近状態を議論する。この場合、強制力を伴わないときの漸近状態については、Yoden and Yamada (1993) や Takehiro, Hayashi and Yamada (2007) において、極域の強い西向きジェットの発生とスケールリング則が見出されている。強制力を伴うときの漸近状態については、Nozawa and Yoden (1997) において全緯度にまたがる東西ジェットの縞々構造または極域のみの西向きジェットの発生が指摘されている。しかしながら彼らの行った数値計算の積分時間が、漸近状態の判断に充分であるかは疑問が残る。

ここでは Nozawa and Yoden の計算を再検討し、履歴を伴う小規模なランダム強制力によって駆動される場合について、長時間後の漸近状態を数値的に議論する。時間積分は初期場をゼロとし、回転角速度および与える強制力の波数を変えた 15 種類で行った。流れ場の時間発展の初期段階では Nozawa and Yoden (1997) の結果を再現し、多数本の東向きジェットと西向きジェットが南北に交互に並ぶ帯状構造、あるいは、両極付近に集中した西向きジェットを伴う構造が現れる。しかし、さらに時間積分を進めると (Nozawa and Yoden の 100 倍から 500 倍)、全ての計算において、上記の帯状構造の実現後、さらに、エネルギーが殆ど増加せず流れのスペクトル成分分布が殆ど変化しない段階を経た後、急激なジェットの融合・消滅が観察された。その結果、いずれの場合も最終的に少数本 (2 本または 3 本) の東西ジェットが形成されることが見出された。

従来、東西ジェットが比較的長時間安定に存在している状況でのエネルギー値の停滞がしばしば、流れの漸近状態への到達の目安として用いられてきた。しかしながら本研究の計算結果は、いったんエネルギー値の停滞状態が見られても、さらに時間積分を進めると再びエネルギーの増加を伴うジェットの融合・消滅が起きることを示している。従ってエネルギー値の停滞は漸近状態の目安として必ずしも十分ではない。

上記の 15 種類の数値計算では、長時間後の漸近状態として、12 種類で 2 本のジェットが得られた。しかし回転角速度と強制力の波数が共に大きい 3 種類の場合には、3 本のジェットが非常に長い時間安定に維持されることが見出された。この状態に、人為的にいくつかの摂動を与えてもジェットの本数は 3 本のまま維持されたが、より小さな波数の強制力を与えた場合はジェットの本数が 2 本へと減少した。この結果は、長時間後の漸近状態におけるジェットの本数は与える強制力の強さと波数に依存することを示唆している。

本計算で得られた漸近状態では、Rhines 波数は、流れの代表的な全波数 (2 または 3) よりも大きな値になっている。履歴のない強制力の場合について、Huang et al. (2001) らはエネルギー逆カスケードが Rhines 波数よりも小さな波数にまで進むことを指摘しているが、本計算は、強制力が履歴を持つ場合についても逆カスケードが同様の性質をもつこと、すなわち、回転球面上の強制順圧 2 次元乱流におけるエネルギー逆カスケードは Rhines 波数を超えて進むことを示している。またこのことは、回転球面上の非圧縮性強制順圧 2 次元流は、長時間後の漸近状態を考えるとき、木星などに見られる多数本の東西ジェットをもつ惑星大気運動のモデルとしては適当でないことを示唆している。

なお、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。