

高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞帯状構造の消滅

佐々木 洋平 [1]; 石岡 圭一 [2]; 竹広 真一 [3]; 中島 健介 [4]; 石渡 正樹 [5]; 林 祥介 [6]

[1] 京大・数学; [2] 京大・理・地物; [3] 京大・数理研; [4] 九大・理・地惑; [5] 北大・理・宇宙; [6] 神戸大・理・地惑

Disappearance of surface banded structure produced by thermal convection in a rapidly rotating thin spherical shell

Youhei Sasaki[1]; Keiichi Ishioka[2]; Shin-ichi Takehiro[3]; Kensuke Nakajima[4]; Masaki Ishiwatari[5]; Yoshi-Yuki Hayashi[6]

[1] Dept. Mathematics, Kyoto Univ.; [2] Dept. of Earth and Planetary Sci., Grad. School of Sci., Kyoto Univ.; [3] Research Inst. Math. Sci., Kyoto Univ.; [4] Earth and Planetary Sciences, Kyushu University; [5] CosmoSciences, Hokkaido University; [6] Earth and Planetary Sciences, Kobe University

Surface flows of Jupiter and Saturn are characterized by the broad prograde zonal jets around the equator and the narrow alternating zonal jets in mid- and high-latitudes. Heimpel and Aurnou (2007, hereafter HA2007) proposed thermal convection in rapidly rotating thin spherical shell models and show that the equatorial prograde zonal jets and alternating zonal jets in mid- and high-latitudes can be produced simultaneously when the Rayleigh number is sufficiently large and convection becomes active even inside the tangent cylinder. However, they assume eight-fold symmetry in the longitudinal direction and calculate fluid motion only in the one-eighth sector of the whole spherical shell. Such artificial limitation of the computational domain may influence on the structure of the global flow field. For example, zonal flows may not develop efficiently due to the sufficient upward cascade of two-dimensional turbulence, or stability of mean zonal flows may change with the domain size in the longitudinal direction.

On these accounts, we performed long time numerical experiment of thermal convection in the whole thin spherical shell domain, where the experimental setup is same as that of HA2007. The result shows that the banded structure disappears and one broad eastward zonal jet appears in mid- and high- latitudes of each hemisphere, suggesting that the solution of HA2007 is not a statistically steady state but a transient state. However, it was not clear whether the difference between the characteristics of our results and HA2007 was due to the region of calculation area or the difference of the settings of hyperviscosity.

In this study, we carried out numerical experiments in which the calculation settings including hyperviscosity are unified, and the calculation area were set whole spherical shell or 1/8 sector area assuming 8 times symmetry in the longitude direction. We consider Boussinesq fluid in a spherical shell rotating with constant angular velocity. The non-dimensionalized governing equations consist of equations of continuity, motion, and temperature. The non-dimensional parameters appearing in the governing equations, the Prandtl number, the Ekman number, the modified Rayleigh number, and the radius ratio, are fixed to 0. 1, 3×10^{-6} , 0. 05, and 0. 85, respectively. The thermal boundary condition is fixed temperature. Free-slip condition is adopted at both boundaries.

When time integration was performed in the 1/8 sector area, a strong equatorial jet and a banded structure of mid- and high-latitudes emerged. This banded structure of mid- and high-latitudes are sustained for a long time without disappearing. On the other hand, in the calculation of the whole spherical shell, once a mid- and high-latitudes banded structures were formed, further progress of time integration accelerated the mid- and high-latitudes and the banded structures were disappeared. Therefore, whether the banded structures were maintained or disappeared depends on the calculation region, not the settings of hyperviscosity. For the disappearance of this banded structures, it is expected that the angular momentum transport by the component with the wavenumbers less than 8, which can not be expressed by 1/8 sector calculation, plays an important role.

木星と土星の表層の流れは、赤道周辺の幅の広い順行ジェットと中高緯度で交互に現われる互いに逆向きの幅の狭いジェットが特徴的である。Heimpel and Aurnou (2007, 以下 HA2007) は、これまでに考えられていた深いモデルよりも薄い球殻領域内の深部対流運動を考え、レイリー数が十分大きく内球接円筒での対流が活発な場合に、赤道域の順行流と中高緯度の交互に現われる狭いジェットが共存する状態を数値的に再現した。しかしながら、彼らの研究では経度方向に 8 回対称性を仮定しており、全球の 1/8 の領域の運動しか解いていない。このような領域の制限は流れ場全体の構造に影響を与えている可能性がある。例えば、2次元乱流的なエネルギーの逆カスケードが十分に作用し、互い違いの縞状ジェットが生成されないかもしれない。また、生成される帯状流が不安定となって縞状ジェットが壊されてしまうかもしれない。

このような問題意識のもとに、我々はこれまで薄い球殻対流の数値計算を全球で長時間行い、赤道域および中高緯度領域の帯状流が形成されるか否かを調べてきた。その結果、長時間積分後には縞状構造が消滅し、南北中高緯度に幅広の帯状流がそれぞれ 1 本ずつ出現する状態が得られた。このことは HA2007 の解は最終的な統計的平衡状態ではなく過渡的な状態であることを示唆している。しかしながら、HA2007 と我々の結果の特徴の相違が、計算領域を全球領域にしたためなの

か、あるいは超粘性拡散パラメータの違いによるものなのかが明らかでなかった。

そこで、本研究では超粘性拡散パラメータを含めた計算設定を統一し、計算領域を全球領域並びに経度方向に 8 回対称性を仮定した 1/8 セクター領域とした数値実験を行った。用いたモデルは回転する球殻中のブシネスク流体の方程式系で構成されている。方程式系に現われる無次元数であるプラントル数を 0.1, エクマン数を 3×10^{-6} , 球殻の内径外径比を 0.85, 修正レイリー数を 0.05 とした。熱境界条件は温度固定である。力学的境界条件は自由すべり条件である。初期には回転系での静止状態にランダムな温度擾乱を加えた。

1/8 セクター領域にて時間積分したところ強い赤道ジェットと中高緯度の縞状構造が出現した。この中高緯度の縞状構造は、消滅することなく長時間維持されつづけている。一方で全球領域計算では、中高緯度の縞状構造が一旦形成されるものの、さらに時間積分を進めると中高緯度が加速され縞状構造が消滅した。すなわち、縞状構造が維持されるか消滅してしまうかは、超粘性拡散設定ではなく計算領域に依存している。この縞状構造の消滅には、1/8 セクター計算では表現できない経度方向波数 8 未満の成分による角運動量輸送が重要な役割を果たしていると予想される。