

題目: 雷雲を想定した強制により生じる巨大惑星表層流の数値計算

## 要旨

巨大惑星表層には、赤道域における緯度幅の広いジェットや中緯度域における緯度幅の狭いジェットから成る帯状構造、極域における渦構造が存在することが知られている。帯状構造や極渦のような大規模構造はエネルギーの逆カスケード効果 (Vallis (2017)) によって、大気中の小規模乱流から形成される可能性がある。このような小規模乱流を引き起こす候補として、雷雲が考えられる (例えば, Ingersoll et al. (2000)). Showman (2007), Brueshaber et al. (2019) はこの雷雲を想定した質量強制を加えた浅水実験を球面の一部の領域で行った。Showman (2007) は緯度  $0^\circ - 70^\circ$ , 経度  $0^\circ - 120^\circ$  の領域を計算した結果、帯状構造が形成されることを示した。Brueshaber et al. (2019) は緯度  $60^\circ$  より高緯度の極域を計算し、極渦が形成されることを示した。そして、極渦の数や大きさ、渦度の符号といった特徴は Burger 数 (変形半径と惑星半径の比で書かれる無次元量) の値に強く依存する結果を得た。

しかし, Showman (2007), Brueshaber et al. (2019) はどちらも領域計算であった。そのため、全球計算を行い、彼らの結果を確かめる必要がある。なぜなら、先行研究では考慮されていない計算領域外からの運動量輸送などにより、計算で得られたジェットや渦の構造が変化する可能性があるからである。本研究の目的は雷雲を想定して与えた質量強制による数値実験を全球で行い、雷雲による強制により、巨大惑星で見られる帯状構造と極渦が形成されるのかを調べることである。加えて、それらの構造を先行研究で得られた結果と比較し、領域計算で得られた結果の妥当性を調べる。

本研究は地球流体電脳倶楽部の階層的地球スペクトルモデル集 (SPMODEL; Takehiro et al. (2006), Takehiro et al. (2013)) を用い、雷雲を想定した質量強制を加えた 1.5 層浅水系全球計算を行った。標準実験の結果、帯状構造と渦構造が形成した。質量強制の正負の割合や、空間的大きさを変更した実験を行ったが、帯状構造や極渦の構造はほとんど変化しなかった。また、極渦の特徴は Burger 数の値に強く依存する結果を得た。Burger 数が小さい場合、木星で観測されるような比較的小さな複数の渦が形成し、Burger 数が大きくなるにつれて、土星、天王星、海王星で観測されている単一の低気圧性渦が形成する。これらの結果は、Showman (2007), Brueshaber et al. (2019) で得られた結果と整合的である。ただし、標準実験で得られた計算結果では赤道域でのジェットの風速が Showman (2007) の結果に比べて、約 10 倍大きい。この結果は Showman (2007) では考慮されていない極域あるいは反対半球の存在がジェットの強度に影響を与える可能性を示唆しているかもしれない。

---

Title : Numerical experiments of giant planet surface flows produced by forcings representing thunderstorms

It is known that the surfaces of giant planets have the banded structure consisting of equatorial jets with wide latitudinal widths, mid-latitude jets with a narrow latitudinal widths, and the vortex structure in the polar regions. Large-scale structures such as bands and polar vortices can be formed from small-scale turbulence in the atmospheres due to the inverse cascade effect (Vallis 2017). Thunderstorms are considered to be a candidate for causing such small-scale turbulence (e.g. Ingersoll et al., 2000). Showman (2007) and Brueshaber et al. (2019) restricted the computational domain to a part of the sphere and calculated in the framework of the shallow water equations with the mass forcing representing thunderstorms. Showman (2007) restricted the computational domain to the latitude range of  $0^\circ - 70^\circ$  and the longitude range of  $0^\circ - 120^\circ$ , and the results showed the formation of the banded structures. Brueshaber et al. (2019) found the polar vortex structures were formed in the computational domain from latitude  $60^\circ$  to high latitude. In addition, their results showed that the number and size of polar vortices, the sign of vorticity significantly depend on the value of Burger number (dimensionless number written by a ratio of deformation radius to planetary radius).

However, their computational domain is only a part of the sphere. It is necessary to confirm their results by calculating on the global domain. Since the structure of jets and vortices may change due to momentum transport from outside the restricted computational domain. The purpose of this study is to perform whether the jet and polar vortex structures seen on giant planets are formed by the mass forcing representing thunderstorms. Then, compare the global calculation results with the results of previous studies and consider the validity of the results obtained by domain calculation.

The model of this study uses the Hierarchical Spectral Models for GFD (SP-MODEL; Takehiro et al. 2006, Takehiro et al. 2013). The used equations are a 1.5-layer shallow water equations with the mass forcing representing thunderstorms.

In the standard experimental results, the banded structure and the polar vortex structure were formed. It was also found that the structures remained almost unchanged even if the positive / negative ratio of the mass forcing and the spatial size were varied. The characteristics of the polar vortex were found to depend on the value of Burger number: when the Burger number is small, small multiple vortices are formed, as observed Jupiter, and as the Burger number increases, a single cyclonic vortex is formed, observed on Saturn, Uranus, and Neptune. These results are consistent with the results of Showman (2007) and Brueshaber et al.

(2019). Moreover, the results of the standard experiment show that the zonal wind speed of the equatorial jet is about 10 times larger than that of Showman (2007). The result possibly suggests that the existence of polar regions and/or opposite hemisphere, which was not considered in Showman (2007), affect the strength of the jet.

## 関連図書

- S. R. Brueshaber, K. M. Sayanagi, and T. E. Dowling.  
 Dynamical regimes of giant planet polar vortices.  
*Icarus*, 323:46–61, May 2019.  
 doi: 10.1016/j.icarus.2019.02.001.  
 URL <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.02.001>.
- A. P. Ingersoll, P. J. Gierasch, D. Banfield, A. R. Vasavada, and G. I. Team.  
 Moist convection as an energy source for the large-scale motions in jupiter’s atmosphere.  
*Nature*, 403(6770):630–632, Feb. 2000.  
 doi: 10.1038/35001021.  
 URL <https://doi.org/10.1038/35001021>.
- A. P. Showman.  
 Numerical simulations of forced shallow-water turbulence: Effects of moist convection on the large-scale circulation of jupiter and saturn.  
*Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(9):3132–3157, Sept. 2007.  
 doi: 10.1175/jas4007.1.  
 URL <https://doi.org/10.1175/jas4007.1>.
- S. Takehiro, M. Odaka, K. Ishioka, M. Ishiwatari, and Y.-Y. Hayashi.  
 Spmodel: A series of hierarchical spectral models for geophysical fluid dynamics.  
<http://www.nagare.or.jp/mm/2006/spmodel/>, 2006.
- S. Takehiro, Y. SASAKI, K. Ishioka, M. Odaka, Y. O. Takahashi, K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y.-Y. Hayashi, and S. D. Group.  
 Hierarchical spectral models for gfd (spmodel).  
<http://www.gfd-dennou.org/library/spmodel/>, 2013.
- G. K. Vallis.  
*Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics*.  
 Cambridge University Press, 2017.  
 doi: 10.1017/9781107588417.  
 URL <https://doi.org/10.1017/9781107588417>.