

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 (Gierasch et al. (2000), 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がわかった。Brueshaber et al. (2019) は緯度 60° より高緯度の極域を計算し、極渦が形成されることがわかった。また、極渦の数や大きさ、低気圧性・高気圧性といった特徴は 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ことがわかった。

しかし、どちらの先行研究も領域計算であり、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。また、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う。計算の結果、全球計算でも Showman (2007) で得られた帯状構造と Brueshaber et al. (2019) で得られた渦構造が形成するという結果が得られた。また、帯状構造や極渦は質量強制の正負の割合や、空間的大きさを変更しても変わらないことがわかった。また、極渦の特徴は Burger 数の値に依存することがわかった。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。しかし、今回の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 倍大きくなることがわかった。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。

Title : Numerical simulation of giant planet surface flows produced by forcing that represents thunderstorm

It is known that the surface of giant planets have the banded structure consisting of jets with a wide latitude in the equatorial region, jets with a narrow latitude in the mid-latitude region, and the vortex structure in the polar region. Large-scale structures such as bands and polar vortices can be formed from small-scale turbulence in the atmosphere due to the inverse energy cascade effect (Vallis (2017)). Thunderstorms are considered to be a candidate for causing such small-scale turbulence (Gierasch et al. (2000), Ingersoll et al. (2000)). Showman (2007) and Brueshaber et al. (2019) calculated shallow water experiment with mass forcing that represents thunderstorm in a part of the sphere. Showman (2007) calculated the area of latitude $0^\circ - 70^\circ$ and longitude $0^\circ - 120^\circ$. Their results showed the formation of the zonal banded structure. Brueshaber et al. (2019) calculated the polar region at latitudes higher than 60° and the polar vortices were formed. In addition, their calculation results showed that features such as the number and size of polar vortices, cyclones and anticyclones largely depend on the value of the Burger number (dimensionless number written by the ratio of the deformation radius to the planetary radius).

However, both previous studies are area calculations, and it is necessary to perform global calculations and confirm their results. This is because the calculated jet and vortex structures may change due to momentum transport from outside the computational domain, which was not considered in the previous studies. The purpose of this study is to investigate whether the jet and polar vortex structures seen on giant planets are formed by the mass forcing that represents thunderstorm. Then, compare my results with the results of previous studies and consider the validity of the results obtained by domain calculation.

This study used Hierarchical Spectral Models for GFD (SPMODEL; Takehiro et al. (2006), Takehiro et al. (2013)). The equation system is a 1.5-layer shallow water system with mass forcing that represents thunderstorm, and calculate the global region. The results of the calculations showed that the banded structure obtained by Showman (2007) and the polar vortex structure obtained by Brueshaber et al. (2019) were formed. It was also found that the structure does not change even if the positive / negative ratio of mass forcing and the spatial size are changed. The characteristics of the polar vortex were found to depend on the value of the Burger number: when the Burger number is small, relatively 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). However, my calculation results show that the zonal wind speed of the equatorial jet is about 10 times larger than that of Showman (2007). The result suggests that the polar reion or opposite hemisphere, which are not considered in Showman (2007), may 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>.
- P. J. Gierasch, A. P. Ingersoll, D. Banfield, S. P. Ewald, P. Helfenstein, A. Simon-Miller, A. Vasavada, H. H. Breneman, D. A. Senske, and G. I. Team.
Observation of moist convection in jupiter’s atmosphere.
Nature, 403(6770):628–630, Feb. 2000.
doi: 10.1038/35001017.
URL <https://doi.org/10.1038/35001017>.
- 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.
Spmode: 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>.