

# 1.5層浅水系における加熱冷却が生成する赤道スーパーローテーション

## Equatorial superrotation due to heating and cooling in a 1-1/2 layer shallow water system.

\*藤林 凜<sup>1</sup>、樫村 博基<sup>1</sup>、高橋 芳幸<sup>1</sup>、林 祥介<sup>1</sup>

\*Rin Fujibayashi<sup>1</sup>, Hiroki Kashimura<sup>1</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi<sup>1</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>1</sup>

1. 神戸大学・大学院理学研究科 惑星学専攻

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University

金星やタイタン、潮汐固定された系外惑星では赤道で自転方向に風が吹いている。このような東西風はスーパーローテーションと呼ばれる。Showman and Polvani (2010) は活動的な上層と静止した下層から成る1.5層浅水系を用いて下層から上層への惑星運動量の移流を適切に表現することで、赤道で加熱と冷却が与えられるときに赤道スーパーローテーションが生じることを示した。しかし、彼らは摩擦時定数  $\tau_{\text{drag}} = 5$ 日、放射時定数  $\tau_{\text{rad}} = 5$ 日で地球の惑星パラメータに対する結果しか示していない。本研究では、Showman and Polvani (2010) で提示されたモデルにおいて、広いパラメータ範囲でも赤道スーパーローテーションが生成されるかどうかを確かめるため、摩擦時定数を  $0.1 \text{日} \leq \tau_{\text{drag}} \leq \infty$ の範囲で変化させたパラメータスイープ実験を行った。

実験の結果、全ての場合において赤道でスーパーローテーションが生じた。また、摩擦時定数が大きくなるにつれて、赤道上の東西平均東西風速度 $\bar{u}$ は大きくなった。その摩擦時定数依存性は、 $\tau_{\text{drag}} \leq 1$ 日のときは $\bar{u} \propto \tau_{\text{drag}}^2$ であったが、 $1 \text{日} < \tau_{\text{drag}}$ のときは $\tau_{\text{drag}}$ が増加するにつれて $\bar{u}$ の増加率は小さくなった。

運動量収支解析の結果、すべての場合で赤道において、運動量フラックスの収束による東向き加速は、質量強制に伴う運動量変化による西向き加速によってほとんど打ち消されていた。よって赤道スーパーローテーションの生成・維持には下層から上層への惑星運動量の移流を表す項Rによる加速が重要であることがわかる。もし項Rによる加速が摩擦時定数に依存しなければ、項Rとレイリー摩擦項の釣り合いから $\bar{u} \propto \tau_{\text{drag}}^1$ を予期する。しかし、実際には、赤道における東西平均した東西風と摩擦時定数の関係はこの比例関係にはなっていない。

摩擦時定数が小さいとき ( $\tau_{\text{drag}} \leq 1$ 日)、層厚擾乱による圧力傾度力と(速度の擾乱成分による)摩擦力の釣り合いが卓越し、摩擦時定数に比例して速度擾乱も大きくなる。一方で、項Rの大きさは速度擾乱の大きさに比例するため、結果として $\bar{u}$ は $\tau_{\text{drag}}^2$ に比例していると考えられる。摩擦時定数が大きく、 $1 \text{日} < \tau_{\text{drag}} \leq 50$ 日の範囲ときは、摩擦時定数が大きくなるにつれて加熱領域における西風擾乱が大きくなっていくが、東風擾乱の大きさはほとんど変化しなかった。これに伴い、項Rによる加速が小さくなるため、摩擦時定数が大きくなるにつれて $\bar{u}$ の増加率が小さくなったと考えられる。摩擦時定数が非常に大きいとき ( $\tau_{\text{drag}} > 50$ 日)には解は定常状態には達せず、Matsuno-Gillパターンの解とも類似していなかった。また何らかの不安定が生じており、このときの赤道スーパーローテーションの生成・維持に影響している可能性がある。

キーワード：スーパーローテーション

Keywords: superrotation

# Equatorial superrotation due to heating and cooling in a 1-1/2 layer shallow water system.

\*Rin Fujibayashi<sup>1</sup>, Hiroki Kashimura<sup>1</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi<sup>1</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>1</sup>

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University

On Venus, Titan and tidally locked exoplanets, a wind blows at the equator in the direction of their planetary rotation. Such zonal wind is called “superrotation”. Showman and Polvani (2010) showed that equatorial superrotation can be generated in the presence of heating and cooling in a 1-1/2 layer shallow-water model that consists of an active upper layer and a deep, quiescent lower layer and includes vertical advection of planetary momentum from the lower layer to the upper layer. They showed a result with a time constant for drag  $\tau_{\text{drag}} = 5$  days, a radiative time constant  $\tau_{\text{rad}} = 5$  days, and Earth-like values for other planetary parameters; however parametric dependence of the superrotation was not explored. In this study, we perform parameter experiments in which the drag time constant is varied from 0.1 days to infinity.

In our numerical experiments, equatorial superrotation is generated in all cases, and the equatorial zonal-mean zonal flow  $\bar{u}$  becomes faster as the drag time constant increases. The increasing rate of  $\bar{u}$  with respect to  $\tau_{\text{drag}}$  is  $\bar{u} \propto \tau_{\text{drag}}^2$  when  $\tau_{\text{drag}} \leq 1$  day; whereas that decreases as  $\tau_{\text{drag}}$  increases when  $\tau_{\text{drag}} > 1$  day.

Momentum balance analyses reveal that an eastward acceleration by the meridional flux convergence of the zonal eddy momentum is nearly canceled by a westward acceleration due to forcing to the mass. This means that the acceleration caused by the planetary momentum advection from the lower layer to the upper layer, expressed by the term R, is important for generation and maintenance of the superrotation. If the acceleration does not depend on the drag time constant, then it is expected that  $\bar{u} \propto \tau_{\text{drag}}^1$  from the balance between the term R and the Rayleigh friction due to the zonal-mean zonal flow. However, our numerical results show that the relationship between the equatorial zonal-mean zonal flow and the drag time constant is not in the simple proportional relationship.

When the drag time constant is short as  $\tau_{\text{drag}} \leq 1$  day, the balance between the pressure gradient due to height disturbances and the friction by flow disturbances is dominant. Therefore, the magnitude of the flow disturbances increases in proportional to the drag time constant. In addition, the term R is in proportional to the magnitude of the flow disturbances. Hence,  $\bar{u}$  seems to be in proportional to  $\tau_{\text{drag}}^2$ . On the other hand, when the drag time constant is long as  $1 < \tau_{\text{drag}} \leq 50$  days, the westerly flow in the heating region ( $Q > 0$ ) grows as  $\tau_{\text{drag}}$  increases but easterly flow there hardly changes (in our numerical results). As a result, the term R decreases and the increasing rate of  $\bar{u}$  decreases as the drag time constant increases. Finally, when the drag time constant is very long as  $\tau_{\text{drag}} > 50$  days, numerical solutions do not achieve steady states and are not similar to the Matsuno-Gill pattern. In addition, an instability occurs, which may affect the generation and maintenance of the equatorial superrotation.

Keywords: superrotation