

# 修 士 学 位 論 文

## 雷雲を想定した強制により生じる 巨大惑星表層大気の数値計算

北海道大学 理学院 宇宙理学専攻  
惑星宇宙グループ 地球流体力学研究室  
学籍番号：15S2015

鈴木 綾馬

2021 年 1 月 29 日

北海道大学大学院理学院修士課程

要旨

ddd

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	巨大惑星表層流の特徴	1
1.2	先行研究	2
1.2.1	Showman et al. (2007)	3
1.2.2	Brueshaber et al. (2019)	3
1.3	研究目的	3
第2章	モデルと手法	4
2.1	支配方程式系	4
2.2	実験手法・実験設定	4
第3章	実験結果	5
第4章	考察	6
第5章	結論	7
付録 A		7

謝辞	7
参考文献	7

# 第1章 はじめに

## 1.1 巨大惑星表層流の特徴

巨大惑星<sup>\*1</sup>表層の大気には図1のような風速分布が存在することが知られている (Showman et al., 2009). 風速分布の特徴として, 巨大ガス惑星 (木星, 土星) では赤道域で幅の広い西風とバンド構造に対応した中緯度域の縞状構造, 一方, 巨大氷惑星では赤道域の幅の広い東風が見られ, 縞状構造は見られないといった特徴がある.

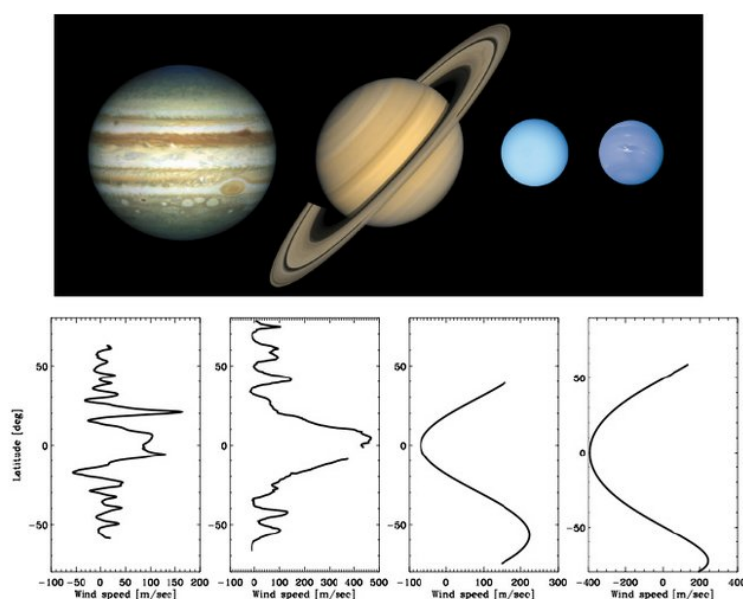


図 1: 上段: 木星, 土星, 天王星, 海王星の可視光領域画像. 下段: 縦軸が緯度, 横軸がクラウドトラッキングによって得られた東西平均した東西風速分布. 巨大ガス惑星 (木星, 土星) は赤道域で幅の広い西風と東西に約 20 個のジェットが交互に形成しているのに対し, 巨大氷惑星 (天王星, 海王星) は赤道域で幅の広い東風を含め 3 つのジェットを形成している (Showman et al., 2009).

<sup>\*1</sup>ここで, 巨大惑星とは組成の主体が水素やヘリウムといったガスである巨大ガス惑星 (木星, 土星) とそれに比べ, 水やメタンを多く含む巨大氷惑星 (天王星, 海王星) の総称として用いる.

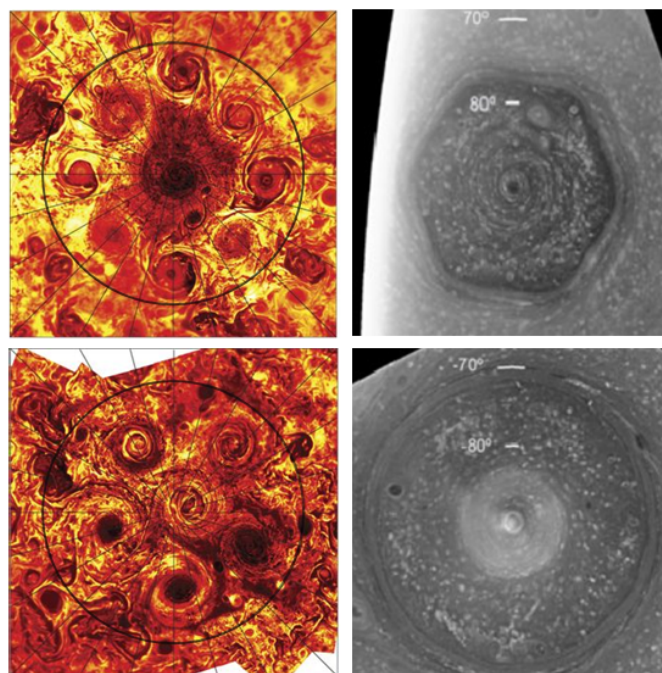


図 2: 左は Juno による木星観測 (波長:  $5\mu\text{m}$ ). 黒の等緯度線は  $80^\circ$  (Adriani et al., 2018). 右は Cassini による土星観測 (波長:  $750\text{ nm}$ ) (Antuñano et al., 2015). 上は北極域, 下は南極域である.

一方, 極域は Juno, Cassini といった探査機によって, 観測されている. 図 2 に示されているように木星では複数の低気圧性極渦 (惑星の自転と同じ向きの回転をしている極渦) が極のまわりを取り囲んでいる. 土星では単一の低気圧性極渦が支配している. 天王星, 海王星も Voyager2 号と地上観測から土星の低気圧性渦よりもサイズの大きい, 単一の低気圧性極渦が存在していることが示唆されている.

## 1.2 先行研究

巨大惑星の内部構造は地球型惑星の内部構造と大きく, 異なっており, 地球大気とのアナロジーで理解することは難しい. そのため, 数値計算を行い, 1.1 節で述べた特徴の再現を通して, 理解を試みてきた. 巨大惑星の大気モデリングについては大きく分けて主に 2 つの説が考えられている. 1 つは惑星内部の対流層と観測可能な雲が存在する大気上層部の大気の運動が直接つながっているとする「深いモデル」である. このモデルにおいては赤道域で, 強い西風ジェットは形成されるものの, 中高緯度域の縞状構造が発達しないという問題点がある. もう 1 つは, 惑星深部の対流と大気上層部の対流は独立しており, 深部からの強制はあるものの

深部の対流とは別のメカニズムで構造が形作られているという「浅いモデル」である。このモデルでは中高緯度の縞状構造が形成されるが、赤道での西風ジェットが形成しないという問題点がある。現在のところ決定的な議論は出来ていない。

### 1.2.1 Showman et al. (2007)

### 1.2.2 Brueshaber et al. (2019)

## 1.3 研究目的

## 第2章 モデルと手法

### 2.1 支配方程式系

本研究では球面上の1.5層浅水方程式系を用いる。これは [Showman \(2007\)](#) で用いられたモデルと同じである。このモデルにおいて上層と下層はそれぞれの層で密度一定であり、上層は活動的な層、下層は無限に深く静止したそうであると仮定する。上層に対する運動量方程式と質量保存の式は

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} + g'\nabla h + f\mathbf{k} \times \mathbf{u} = -D\mathbf{u}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial g'h}{\partial t} + \nabla \cdot (g'h\mathbf{u}) = \Sigma S_{storm} + S_{rad} - D_h. \quad (2)$$

ここで、 $D$  は数値粘性項、 $h$  は上層の厚さ、 $g'$  は低減重力加速度、 $S_{storm}$  は雷雲を模した質量強制項、 $S_{rad}$  は放射緩和項である。それぞれの強制項は

$$S_{storm} = s \cdot \exp \left[ -\frac{R^2}{R_{storm}^2} - \frac{(t - t_0)^2}{\tau_{storm}^2} \right], \quad (3)$$

$$S_{rad} = -\frac{\langle g'h \rangle - g'h_{eq}}{\tau_{mass}} - \frac{g'h - \langle g'h \rangle}{\tau_{APE}} \quad (4)$$

である。

### 2.2 実験手法・実験設定



## 第3章 実験結果

## 第4章 考察

# 第5章 結論

SSS

SSS

## 関連図書

- A. Adriani, A. Mura, G. Orton, C. Hansen, F. Altieri, M. L. Moriconi, J. Rogers, G. Eichstädt, T. Momary, A. P. Ingersoll, G. Filacchione, G. Sindoni, F. Tabataba-Vakili, B. M. Dinelli, F. Fabiano, S. J. Bolton, J. E. P. Connerney, S. K. Atreya, J. I. Lunine, F. Tosi, A. Migliorini, D. Grassi, G. Piccioni, R. Noschese, A. Cicchetti, C. Plainaki, A. Olivieri, M. E. O'Neill, D. Turrini, S. Stefani, R. Sordini, and M. Amoroso.  
Clusters of cyclones encircling jupiter's poles.  
*Nature*, 555(7695):216–219, Mar. 2018.  
doi: 10.1038/nature25491.  
URL <https://doi.org/10.1038/nature25491>.
- A. Antuñano, T. del Río-Gaztelurrutia, A. Sánchez-Lavega, and R. Hueso.  
Dynamics of saturn's polar regions.  
*Journal of Geophysical Research: Planets*, 120(2):155–176, Feb. 2015.  
doi: 10.1002/2014je004709.  
URL <https://doi.org/10.1002/2014je004709>.
- 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. 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>.
- A. P. Showman, J. Y.-K. Cho, and K. Menou.  
Atmospheric circulation of exoplanets, 2009.

- 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.