

修 士 学 位 論 文

雷雲を想定した強制により生じる 巨大惑星表層流の数値計算

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	3
1.2.1	Showman et al. (2007)	3
1.2.2	Brueshaber et al. (2019)	4
1.3	研究目的	4
第2章	モデルと手法	5
2.1	支配方程式系	5
2.2	実験手法・実験設定	5
第3章	実験結果	6
第4章	考察	7
第5章	結論	8
付録 A		8

謝辭	8
参考文献	8

第1章 はじめに

1.1 巨大惑星表層流の特徴

巨大惑星^{*1}大気の大規模循環とバンド構造は1970年代にPioneer, Voyagerといった探査機によって、これらの惑星の高解像度画像が撮影されて以来、大きな謎となっている。巨大惑星表層の風速分布を図1に示す(Showman et al., 2009)。風速分布の大きな特徴として、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。

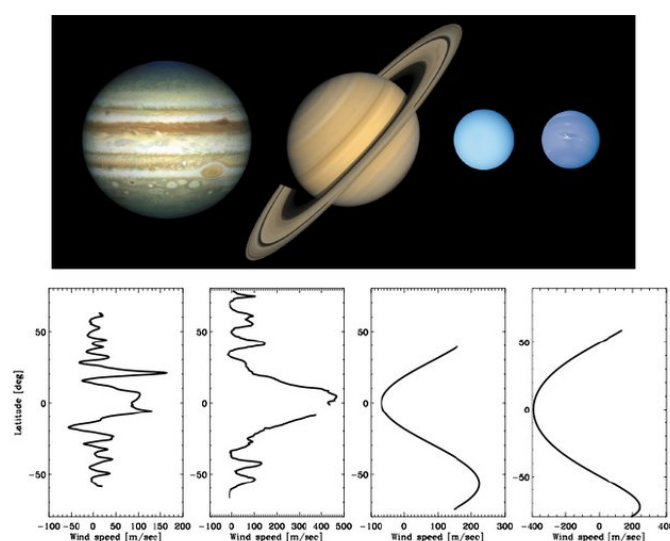


図 1: 上段: 木星, 土星, 天王星, 海王星の可視光領域画像. 下段: 縦軸が緯度, 横軸がクラウドトラッキングによって得られた東西平均した東西風速分布. 巨大ガス惑星(木星, 土星)は赤道域で幅の広い西風と中緯度で東風/西風ジェットが交互に約20個の縞状構造を形成しているのに対し, 巨大氷惑星(天王星, 海王星)は赤道域で幅の広い東風ジェットを含め3つのジェットを形成している(Showman et al., 2009).

^{*1}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。

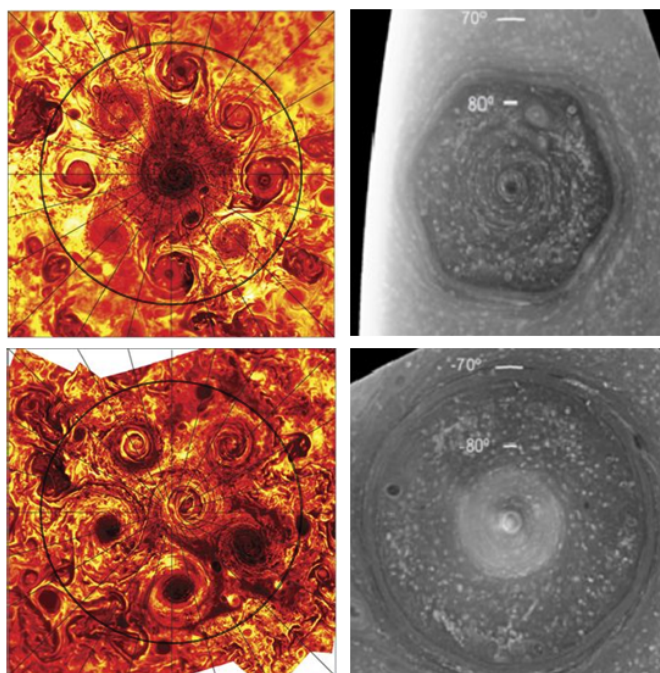


図 2: 左は Juno による木星観測 (波長: $5\mu\text{m}$). 黒の等緯度線は 80° (Adriani et al., 2018). 右は Cassini による土星観測 (波長: 750 nm) (Antuñano et al., 2015). 上は北極域, 下は南極域である.

一方, 極域の観測では低中緯度ではあまり見られない空間スケールの大きい低気圧性渦 (自転と同じ向きに回転する渦) が存在し, そのレジームが巨大惑星ごとに異なることが近年の Juno, Cassini といった探査機の観測によってわかっている. 図 2 に木星と土星の極域観測を示した. 木星では複数の低気圧性渦が極付近にある低気圧性渦を取り囲んでいることがわかっている. 北極域では極から約 0.5° 離れた位置に低気圧性渦があり, その渦の周りを 8 つの低気圧性渦が囲んでいる. それぞれの渦の半径は約 $2000 - 2300\text{ km}$ (緯度幅で $\sim 2^\circ$) である. 南極域では極から約 $1 \sim 2^\circ$ 離れた位置に低気圧性渦があり, その渦の周りを 5 つの低気圧性渦が囲んでいる. それぞれの渦の半径は北極域のものより大きく, 約 $2800 - 3500\text{ km}$ (緯度幅で $\sim 3^\circ$) である (Adriani et al., 2018). 複数の低気圧性渦が存在する木星に対し, 土星では半径約 2000 km (緯度幅で $\sim 2^\circ$) の単一の低気圧性渦が各極域を支配している. 天王星, 海王星も Voyager 2 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 (緯度幅で $\sim 10^\circ$) 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の観測が難しいこともあり、数値計算を行い、1.1節で述べた表層流の特徴の再現を通して、理解を試みてきた。しかし、巨大惑星の内部構造は内部熱源があることなど、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観測される表層流を理解することは難しい。特に、数値計算を行う際に問題になるのは表層流の主となるエネルギー源は何なのかということである。これについては大きく分けて、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「深いモデル」である。このモデルにおいては比較的、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 (Christensen, 2002)。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。このモデルでは比較的、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 (Scott and Polvani, 2007)。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)

これまでの「浅いモデル」の研究では初期に小スケールの乱流を与え、時間発展をみる自由減衰乱流実験 (Yoden and Yamada, 1993) や小規模な渦度強制を加える実験 (Scott and Polvani, 2007) が行われてきた。しかし、このような全球的かつ連続的な強制が巨大惑星に働いているとは考えにくい。擾乱を引き起こす現象として木星、土星で観測されている雷雲 (Gierasch et al. (2000), Porco (2005)) が考えられている。Showman (2007) はこの雷雲を想定した局所的かつ離散的な強制を与え、球面浅水実験を行った。彼らは緯度 $0 - 70^\circ$ 、経度 $0 - 120^\circ$ の範囲の領域を計算した。その結果、中緯度の変形半径が小さい場合 (< 2000 km) には図 3 のように赤道域で幅の広い東風ジェットが形成し、中緯度では渦が支配的になることがわかった。中緯度の変形半径が 4000 km より大きい場合には、弱い渦は伴うものの、ジェットが支配的になることがわかった。

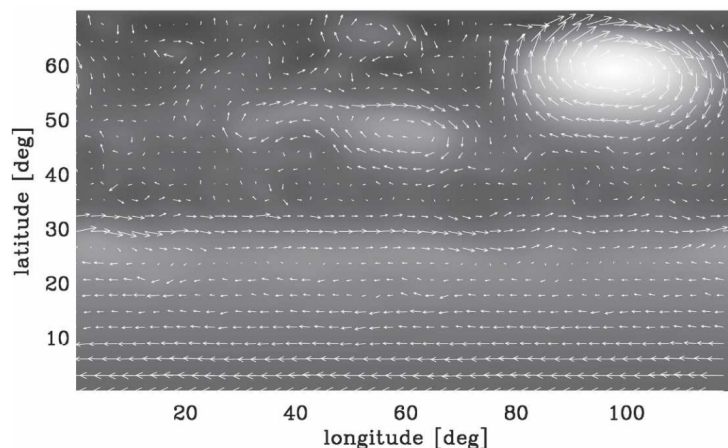


図 3: Showman (2007) のジオポテンシャルと速度ベクトルの計算結果 (4190 地球日, 中緯度の変形半径: $L_d \sim 1200$ km).

1.2.2 Brueshaber et al. (2019)

Brueshaber et al. (2019) は Showman (2007) の雷雲を想定した強制浅水実験を極域の一部の領域 (等緯度線で $\sim 60^\circ$ より高緯度) で計算し, 極渦とそのレジームに注目した. その結果, 図 4 に示すように Burger 数: $Bu = (L_d/a)^2$ と呼ばれる無次元量の値によって, 極渦のレジームが変化することがわかった.

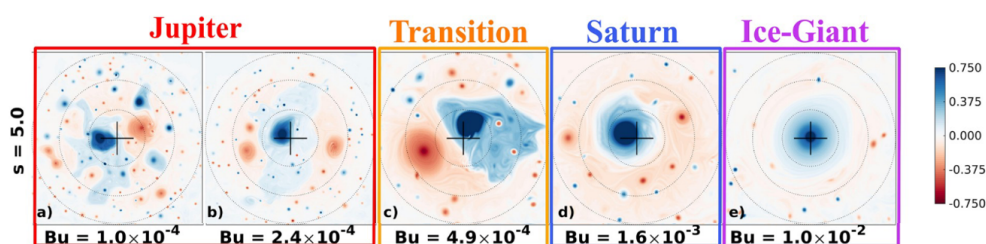


図 4: Brueshaber et al. (2019)

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>.
- U. R. Christensen.
Zonal flow driven by strongly supercritical convection in rotating spherical shells.
Journal of Fluid Mechanics, 470:115–133, Oct. 2002.
doi: 10.1017/s0022112002002008.
URL <https://doi.org/10.1017/s0022112002002008>.
- 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>.

C. C. Porco.

Cassini imaging science: Initial results on saturn's atmosphere.

Science, 307(5713):1243–1247, Feb. 2005.

doi: 10.1126/science.1107691.

URL <https://doi.org/10.1126/science.1107691>.

R. K. Scott and L. M. Polvani.

Forced-dissipative shallow-water turbulence on the sphere and the atmospheric circulation of the giant planets.

Journal of the Atmospheric Sciences, 64(9):3158–3176, Sept. 2007.

doi: 10.1175/jas4003.1.

URL <https://doi.org/10.1175/jas4003.1>.

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.

Spmmodel: 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.

S. Yoden and M. Yamada.

A numerical experiment on two-dimensional decaying turbulence on a rotating sphere.

Journal of the Atmospheric Sciences, 50(4):631–644, Feb. 1993.

doi: 10.1175/1520-0469(1993)050<0631:aneotd>2.0.co;2.

URL [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<0631:aneotd>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<0631:aneotd>2.0.co;2).