

# 木星型惑星大気の縞状構造の成因を探るための非弾性回転球殻熱対流モデルの開発と大規模並列化

課題責任者

竹広 真一 京都大学 数理解析研究所

著者

竹広 真一 京都大学 数理解析研究所

佐々木 洋平 京都大学 大学院理学研究科数学教室

石岡 圭一 京都大学 大学院理学研究科地球惑星科学専攻

木星型惑星（木星・土星）表層大気の力学的な特色である縞状パターンはこれまでに多くの大気科学研究者の関心を引いてきたが、現在のところ、これらの特徴を矛盾なく整合的に説明できる十分な力学的描像と理解は得られてはいない。本研究では、地球シミュレータの豊富な計算資源を利用することにより、全球規模から微細規模対流までにわたる空間スケールを統一的にあつかう大規模数値計算を実行し、従来の数値モデルでは表現できなかった微細規模の対流や乱流の構造を解像し、木星型惑星大気に見られる表面流の大規模構造の力学的成因を解明することを目指している。

そのために我々は深さ方向の密度成層を考慮した非弾性系モデルを地球シミュレータに導入し、大規模並列化を行った。スペクトル変換ライブラリを緯度方向に加えて動径方向にも MPI 並列を可能にすべく改良した。その結果、これまで緯度方向格子点数によって制限されていた並列処理の限界を伸ばすことに成功し、大規模並列計算が可能となった。

キーワード：木星, 土星, 縞状構造, 赤道順行流

## 1. はじめに

木星と土星の表層の流れは、赤道周辺の幅の広い順行ジェットと中高緯度で交互に現われる互いに逆向きの幅の狭いジェットが特徴的である。この表層のジェットが深部領域の対流によって生成されているのか、表層の流体運動の結果なのかは未だに明らかになっていない。伝統的な知見では、流体層の厚さが惑星半径に比して十分小さい「浅い」モデル、すなわち、鉛直方向の静水圧近似の仮定の下で深部からの熱流と太陽加熱によって大気の運動が駆動されるモデルでは、中高緯度の交互に表われる幅の狭いジェットは再現されるものの、赤道域のジェットは必ずしも順行方向とはならない。一方で、流体層の厚さが惑星半径に匹敵する「深いモデル」、すなわち高速回転する球殻中の熱対流モデルでは、赤道域の順行するジェットは容易に生成されるものの、中高緯度の交互に表われるジェットの生成が困難である、と考えられていた。

このような状況において、これまでに考えられていた深いモデルよりも薄い球殻領域内の深部対流運動を考慮することで、赤道域の順行流と中高緯度の交互に現われる狭いジェットが共存する状態を数値的に再現できることを主張したのが Heimpel and Aurnou (2007) [1] である。この研究をきっかけとして、薄い回転球殻内の熱対流の研究が活発に行われるようになり、最近では動径方向の密度変化を考慮した非弾性系モデルの高解像度数値計算によりジェット形成問題の研究が行われてきている (e.g. Gastine et al. 2014 [2], Heimpel et al. 2015 [3])。

しかしながら、これらの研究では経度方向の対称性を

仮定したいわゆるセクター領域の計算であり、全球ではなく一部の領域の流体運動しか解いていない。このような領域の制限は流れ場全体の構造に影響を与えている可能性がある。例えば、2次元乱流的なエネルギーの逆カスケードが十分に作用し、互い違いの縞状ジェットが生成されないかもしれない。また、生成される帯状流が不安定となって縞状ジェットが壊されてしまうかもしれない。加えて統計的定常状態に達するのに十分な長時間積分が行われているかが疑問であった。

そこでわれわれは、薄い回転球殻内の熱対流の全球領域数値計算をこれまでの研究よりも長時間の積分を実行し、得られる赤道域および中高緯度領域の帯状流分布に計算領域が影響するかを吟味してきた。その結果、セクター計算の場合には赤道順行ジェットと中高緯度の縞状ジェットが長時間維持されるのに対して、全球計算においては中高緯度の縞状構造が消滅し、赤道および各半球の中高緯度に1本ずつ、3本の順行ジェットしか存在しない状態となった (竹広他 2015 [4]) このことは、木星型惑星の縞状構造と赤道加速の成因を探るためには大規模高解像度かつ長時間計算が必要であることを示している。

## 2. モデル開発と大規模並列化

そこでわれわれは木星型惑星大気シミュレーション計算の高解像度長時間積分を行うためのスペクトル変換ライブラリの改良を行った。緯度方向に加えて動径方向にも MPI 並列化を行う実装テストを地球シミュレータ上にて行い、これまで緯度方向格子点数によって制限されていた並列処理の限界を伸ばすことに成功した。さらに、

深さ方向の密度成層を考慮した非弾性系モデルを開発し、改良したスペクトル変換ライブラリを用いて大規模並列化を行った。この実装には、動径微分と境界条件適用のために、動径方向に分割した変数を毎ステップ統合して処理する必要があったが、そのために必要なプロセス間通信時間はスペクトル計算に要する時間に比べて無視できる程度であったため、高い並列化効率を維持することができている。

図1はそのベンチマーク計算による計算速度を示したものである。従来の動径方向にMPI並列をしない場合(NPV=1)では256並列までは計算時間がほぼ並列数に比例して減少していくが、それ以上の並列数では計算時間が減少しなくなり、並列化による加速の限界となっていた。これに対して、動径方向並列数(NPV)を4,8,16,32と増加させるに連れて、より大きなMPI並列数でも計算速度を減少させることができるようになってきていることがわかる。

図2は非弾性回転球殻対流モデルの比較ベンチマーク(Jones et al. 2011 [5])での設定に従った高解像度計算結果

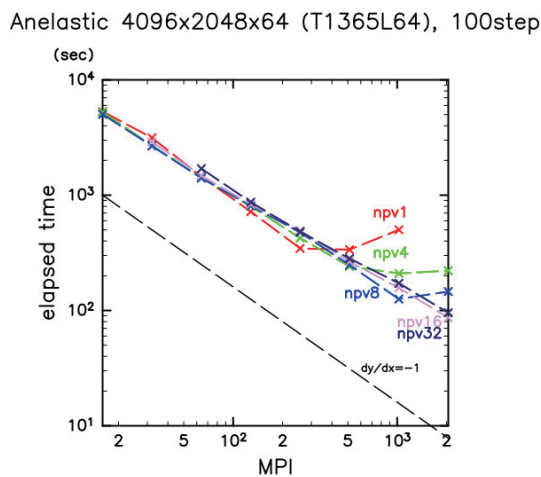


図1 非弾性球殻対流モデルの地球シミュレータにおけるベンチマーク。経度、緯度、動径格子点数はそれぞれ4096、2048、64。OpenMPによる4スレッド並列とMPIによるハイブリッド並列。横軸がMPI並列数、縦軸が100ステップ計算するのに要する経過時間。図中NPVに付された数字が動径方向並列数である。

を示している。赤道外側境界付近に局在した回転軸方向に伸びた対流セルが発生し、自転と同方向に伝播する解が得られている。このような対流パターンはベンチマーク論文と整合的であり、運動エネルギーの値も一致しており、モデルと並列計算の正当性がチェックされた。

今後は、開発した非弾性回転球殻対流モデルを用いての大規模長時間数値計算を実行し、木星型惑星大気の縞状構造の成因に迫る予定である。

### 謝辞

本研究の数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータ(ES)を用いた。

### 文献

- [1] M. Heimpel and J. Aurnou, "Turbulent convection in rapidly rotating spherical shells: A model for equatorial and high latitude jets on Jupiter and Saturn", *Icarus*, 187, 540–557, April 2007.
- [2] T. Gastine, M. Heimpel and J. Wicht, "Zonal flow scaling in rapidly-rotating compressible convection", *Phys. Earth Planet. Inter.*, 232, 36–50, April 2014.
- [3] M. Heimpel, T. Gastine and J. Wicht, "Simulation of deep-seated zonal jets and shallow vortices in gas giant atmospheres", *Nature GeoSci.*, 9, 19–3, November 2015.
- [4] S. Takehiro, Y. Sasaki and K. Ishioka, "Disappearance of Surface Banded Structure Produced by Thermal Convection in Rapidly Rotating Thin Spherical Shells", *Annual Report of the Earth Simulator*, April 2014–March 2015, 128–129, November 2015.
- [5] C. A. Jones, P. Boronski, A. S. Brun, G. A. Glatzmaier, T. Gastine, M. Miesch and J. Wicht, "Anelastic convection-driven dynamo benchmarks", *Icarus*, 216, 120–135, August 2011.

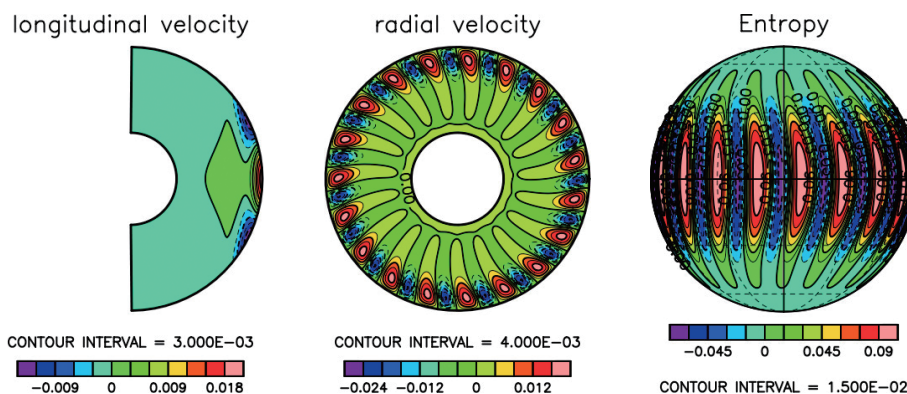


図2 非弾性回転球殻熱対流ベンチマーク計算(Jones et al. 2011)の追試。エクマン数 $10^{-3}$ 、レイリー数351806、プラントル数1、内外半径比0.35。経度、緯度、動径格子点数はそれぞれ1024、512、64。緯度方向32並列、動径方向8並列。

# Development of an Anelastic Rotating Spherical Convection Model and its Large-scale Parallelization for Solving Atmospheric Motions of Jovian Planets

Project Representative

Shin-ichi Takehiro      Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

Authors

Shin-ichi Takehiro      Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

Youhei Sasaki          Department of Mathematics, Graduate School of Science, Kyoto University

Keiichi Ishioka          Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

Banded structures and alternating zonal jets observed in the surface atmospheres of Jupiter and Saturn have attracted many researchers in planetary atmospheric sciences, however, their physical explanations and understandings are not satisfactory. In this study, we try to perform massive parallel numerical experiments treating both small scale convection and planetary scale flows simultaneously, and to illustrate dynamical origin of global scale structures of surface flows of Jovian planets.

For this purpose, we developed and parallelized an anelastic model of thermal convection in a rotating spherical shell considering basic radial density variation. The spectral transform library used in this model was improved to introduce MPI parallelization in the radial direction as well as in the latitudinal direction. As a result, we succeeded in increasing the number of parallel processes which had been limited by the number of latitudinal grid points, and more massive parallel numerical experiments became possible.

**Keywords:** Jupiter, Saturn, banded structure, equatorial prograde jet

## 1. Introduction

Surface flows of Jupiter and Saturn are characterized by broad prograde zonal jets around the equator (equatorial superrotation) and narrow alternating zonal jets in mid- and high-latitudes. "Shallow" models can produce narrow alternating jets in mid- and high-latitudes, while equatorial jets are not necessarily prograde. On the other hand, "deep" models can produce equatorial prograde flows easily, while it seems to be difficult to generate alternating jets in mid- and high-latitudes.

One of the research to overcome these difficulties is performed by Heimpel and Aurnou (2007) [1], proposing thermal convection in a rapidly rotating thin spherical shell model. They showed that the equatorial prograde zonal jets and alternating zonal jets in mid- and high-latitudes can be produced simultaneously when the Rayleigh number is sufficiently large and convection becomes active even inside the tangent cylinder. Successive studies for the zonal flow generation problem in thin rotating spherical shells have been performed, some of which deal with radial density contrast using anelastic systems. (e.g. Gastine et al. 2014 [2], Heimpel et al. 2015 [3]).

However, these studies assume longitudinal symmetry and calculate fluid motion only in a sector of the whole spherical shell. Such artificial limitation of the computational domain may influence the structure of the global flow field. For example, zonal flows may not develop efficiently due to the sufficient upward cascade of two-dimensional turbulence, or

stability of mean zonal flows may change with the domain size in the longitudinal direction. Moreover, their integration times seem to be insufficient for achieving statistically steady states. In order to clarify these points, we performed long time numerical experiment of thermal convection both in the one-eighth sector of the whole spherical shell and in the whole thin spherical shell domain, where the experimental setup is the same as that of Heimpel and Aurnou (2007). The results show that a strong equatorial prograde surface zonal jet and weak alternating banded zonal jets in mid- and high-latitudes appeared simultaneously in the 1/8 sector domain calculation, while in the whole domain calculation, banded zonal jets in mid- and high-latitudes disappeared and only three prograde jets (equatorial and high-latitudes jets) survived (Takehiro et al. 2015 [4]). This suggests that large-scale and high-resolution simulations with long integration time are necessary for investigating origin of the banded structure and equatorial superrotation.

## 2. Model development and parallelization

For this purpose, we improved the spectral transform library used for performing long-term integration of high-resolution simulations of Jovian and Saturnian atmospheric flows. MPI parallelization is introduced not only in the latitude direction but also in the radial direction. As a result, we succeeded in increasing the number of parallel processes which had been limited by the number of latitudinal grid points, and more

massive parallel numerical experiments became possible. Further, we developed an anelastic model of thermal convection in a rotating spherical shell considering basic radial density variation, and parallelized it using the improved spectral transform library. For the implementation, the model variables divided in the radial direction are needed to be gathered in order to calculate radial differentiation and to adapt radial boundary conditions in each time step, however, the model showed high parallelization performance because communication costs between the processes are negligible comparing with those for spectral transform.

Figure 1 shows the calculation speeds of the model for various extent of MPI parallelization under the benchmark setup (Jones et al. 2011 [5]). In the case with no parallelization in the radial direction (NPV=1), the elapsed time decreased in proportion to the number of MPI processes until 256 processes, which was the limit of efficient parallelization. In contrast, by increasing the processes for radial parallelization from 4 to 32, the elapsed time could be reduced for larger number of MPI processes.

Figure 2 shows the results of follow-up numerical experiments

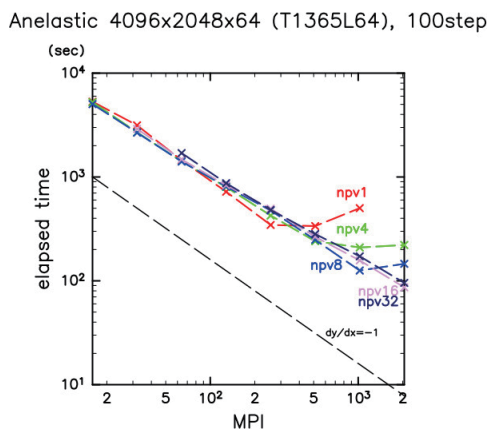
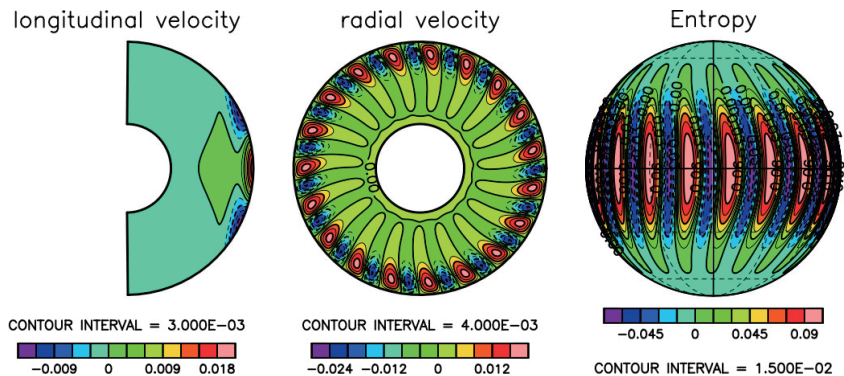


Fig. 1 Benchmark results of the anelastic spherical convection model on the Earth Simulator. The numbers of grid points in the longitudinal, latitudinal and radial directions are 4096, 2048, 64, respectively. Calculations are performed by OpenMP parallelization with 4 threads and MPI parallelization. The horizontal axis is the number of MPI processes, and the vertical axis is the elapsed time for 100 steps. The numerals with "NPV" in the figure indicate the number of processors for radial parallelization.

Fig. 2 A follow-up experiment of a benchmark calculation for anelastic spherical convection model (Jones et al. 2011 [5]). The Ekman, Rayleigh, Prandtl numbers and the radius ratio are  $10^{-3}$ , 351806, 1 and 0.35, respectively. The numbers of grid points in the longitudinal, latitudinal and radial directions are 1024, 512, 64, respectively. The numbers of processes for parallelization in the latitudinal and radial directions are 32 and 8, respectively.



performed with our model for the benchmark calculations proposed by Jones et al. 2011 [5]. Convection cells elongated in the axial direction attach around the equatorial outer boundary. The cells propagate in the prograde direction. The convection pattern is consistent with that of the benchmark paper, and the values of the total kinetic energy coincide each other. As a result, the model validity developed here was confirmed.

We will try to perform large-scale high-resolution numerical simulations of Jovian atmospheric motions using this anelastic rotating spherical convection model, and pursuit origin of banded structures of the atmospheres of Jovian planets.

### Acknowledgement

Numerical computations were carried out on the Earth Simulator (ES) at the Japan Agency for Marine Earth Science and Technology.

### References

- [1] M. Heimpel and J. Aurnou, "Turbulent convection in rapidly rotating spherical shells: A model for equatorial and high latitude jets on Jupiter and Saturn", *Icarus*, 187, 540–557, April 2007.
- [2] T. Gastine, M. Heimpel and J. Wicht, "Zonal flow scaling in rapidly-rotating compressible convection", *Phys. Earth Planet. Inter.*, 232, 36–50, April 2014.
- [3] M. Heimpel, T. Gastine and J. Wicht, "Simulation of deep-seated zonal jets and shallow vortices in gas giant atmospheres", *Nature GeoSci.*, 9, 19–23, November 2015.
- [4] S. Takehiro, Y. Sasaki and K. Ishioka, "Disappearance of Surface Banded Structure Produced by Thermal Convection in Rapidly Rotating Thin Spherical Shells", *Annual Report of the Earth Simulator*, April 2014–March 2015, 128–129, November 2015.
- [5] C. A. Jones, P. Boronski, A. S. Brun, G. A. Glatzmaier, T. Gastine, M. Miesch and J. Wicht, "Anelastic convection-driven dynamo benchmarks", *Icarus*, 216, 120–135, August 2011.