

非弾性回転球殻熱対流の高解像度長時間積分～木星型惑星大気縞状構造の成因の解明を目指して

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*¹, 佐々木 洋平*², 石岡 圭一*³

*¹ 京都大学数理解析研究所, *² 摂南大学理工学部 (兼) 基礎理工学機構, *³ 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満足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。

我々は非弾性回転球殻熱対流の全球高解像度長時間シミュレーションを開始した。現在得られている解では幅広い強い赤道順行ジェットと中高緯度の弱い縞状構造ジェットが生成されている。しかしながら運動エネルギーはまだ増加しており、統計的平衡状態に達していないことが示唆される。引き続き時間積分を遂行し、縞状構造の遷移や性質を観察していかねばならない。

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えることで、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てきた。平成29年度までに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。

平成30年度には開発したスペクトル変換ライブラリを用いた非弾性回転球殻対流モデルを構築し、比較ベンチマーク論文(Jones et al. 2011 [5])での設定に従った高解像度計算を実行し、モデルが十分な精度で正しく解を得られていることを確認した。

3. 全球数値シミュレーション

本年度は、開発した非弾性回転球殻対流モデルを本格的に運用し、高解像度の全球数値シミュレーションを開始した。ターゲットはGastine et al. (2014)のcase5である。この設定は、これまでにおこなわれてきている非弾性回転球殻対流計算のなかでも高解像度での自転角速度が最も速い場合であるが、Gastineらは経度方向に8回対称性を仮定しており、全球領域で流れ場がどのようになるかは知られていない。

方程式系に現われる無次元数であるプラントル数 $Pr = \nu / \kappa$ を0.1、エクマン数 $Ek = \nu / (\Omega D^2)$ を 3×10^{-6} 、球殻の内径外径比 $\chi = r_i / r_o$ を0.85、修正レイリー数 $Ra = g \Delta S / (C_p \Omega^2 D)$ を0.116とした。熱境界条件は、エントロピー固定である。力学的境界条件は両端で自由すべり条件である。解像度は経度、緯度、動径方向の格子点数がそれぞれ2048、1024、193点、球面調和関数682次および動径方向のチェビシェフ多項式は192次まで計算している。超粘性係数 $d(l)$ は球面調和関数の全波数 l の関数として、 $d(l) = \{1 + \alpha [(l-1)/(l_{max}-1)]^\beta\}$ と与えている。Gastineらは $\alpha=22$ 、 $\beta=3$ を選んでいるが、

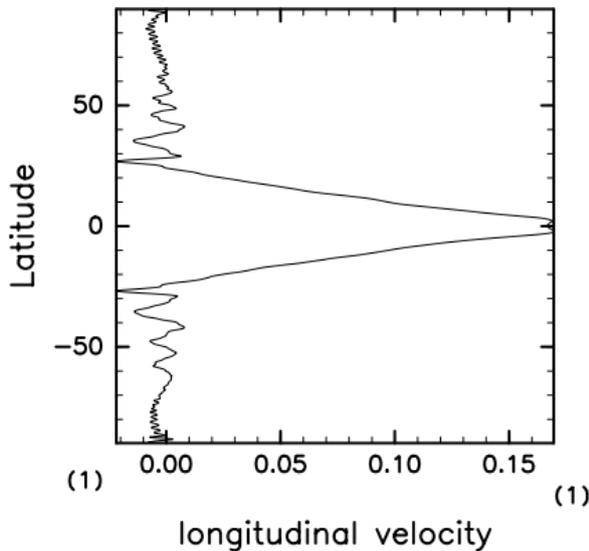


図 1：表面平均東西流の緯度分布

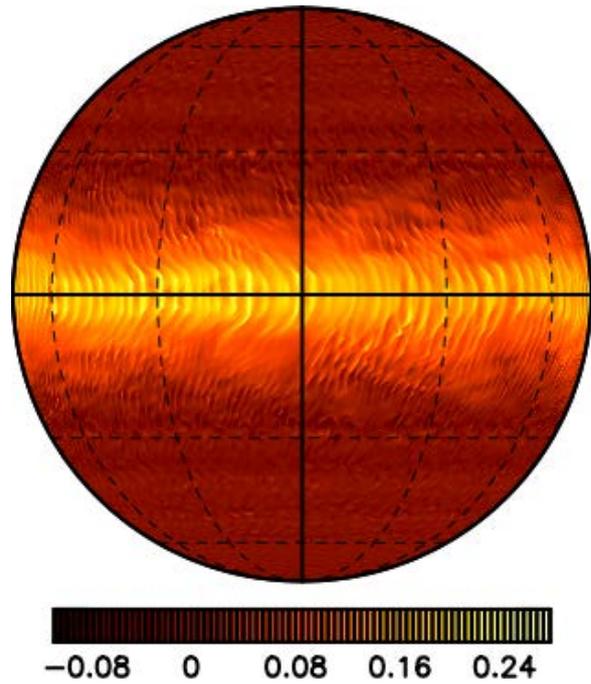


図 1：東西風の表面での分布

われわれは対流の急激な発達を避けるために $\beta=1$ と低波数側での粘性散逸を強めている。

初期に回転系での静止状態に一点温度擾乱を加え、10000無次元時間(約1600回転)まで時間積分した。地球シミュレータ(ES3)の128ノード(512core)を用いて実時間170日を要した。

図1は得られた球殻表面の平均帯状流分布、図2は東西風の表面分布を示している。赤道付近に南北幅±30度の強い順行ジェットが生成されている。中高緯度は弱い

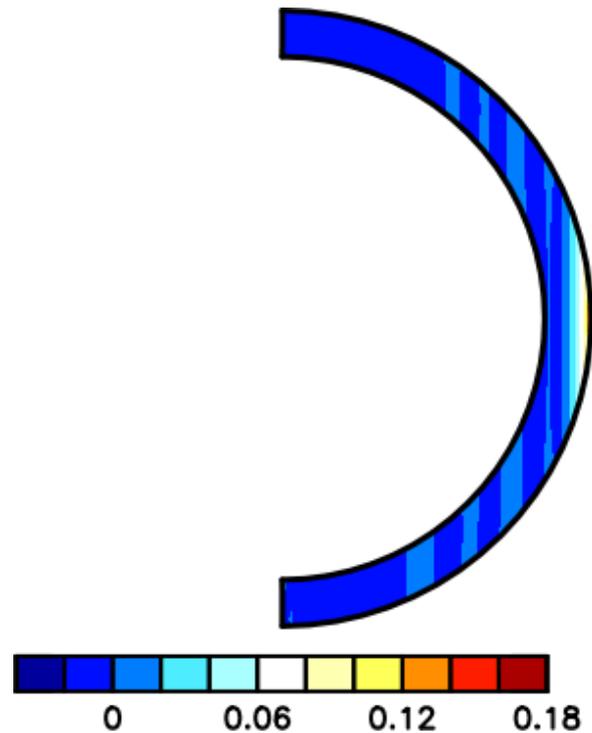


図 3：子午面断面での平均東西風

ながらも縞状構造が生成されているのがわかる。図2は東西風の表面分布を表している。赤道付近のジェットの高さに比べて中高緯度の縞状構造は弱くかすかに判別できる程度である。Gastine et al. (2014) の結果では中高緯度の縞状ジェットの振幅が相対的により大きくなっている。この差異は超粘性パラメータの違いによるかもしれない。

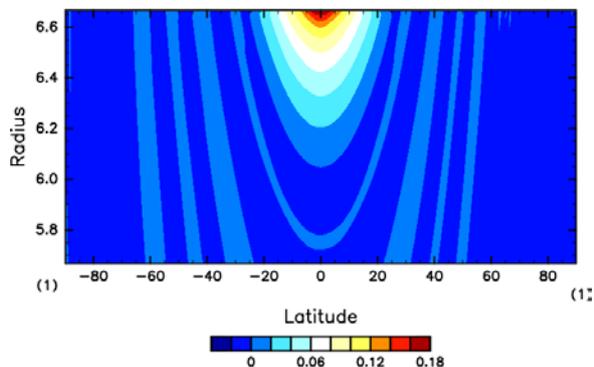


図4：子午面断面での平均東西風。図3の投影法を変えたもの

図3と図4は平均東西風の子午面断面を示している。東西風が自転軸方向に様な分布となるテイラーブラウドマンの定理に従っていることがわかる。

図5は赤道断面での動径速度分布、図6は子午面断面での東西平均エントロピー分布である。わかりにくいですが表面付近に振幅が強い擾乱が存在している。図7は図6のエントロピー分布を緯度動径座標で表示したものである。表面付近に擾乱が存在していることが確認できる。したがって対流運動は球殻全体にわたっておらず、ごく表面付近で生じていることがわかる。このことと、先の平均東西風の子午面分布より、表面での対流運動により

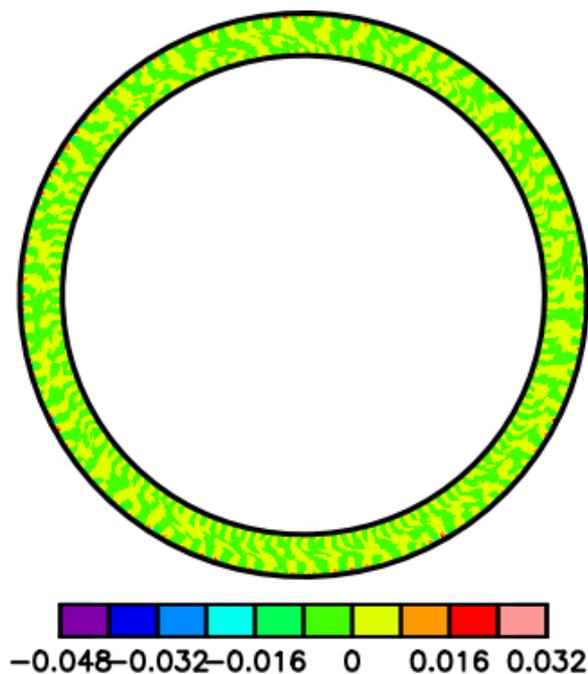


図5：赤道断面での動径速度分布

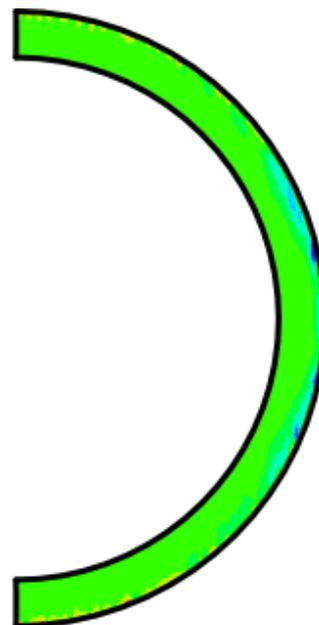


図6：子午面断面での東西平均エントロピー分布

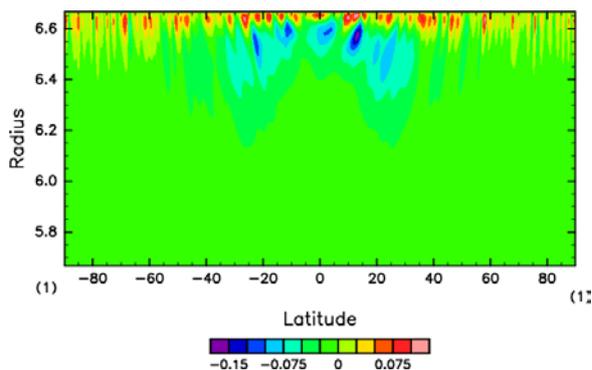


図7：子午面断面での東西平均エントロピー分布。図4の投影法を変えたもの。

生成された東西風がテイラーブラウドマンの定理に従って自転軸方向に深く伸びていることが示唆される。

4. まとめ

以上、非弾性回転球殻対流の高解像度全球数値シミュレーションの長時間計算の現状を報告した。ブシネスク系での研究から、まだ積分時間が十分でないことが示唆される。実際運動エネルギーはまだ増加し続けており、統計的平衡状態に達していない。超粘性パラメータをGastineらのものと同じにしつつ、引き続き時間積分を行い、流れ場の遷移、特に中高緯度の縞状構造の様子を観察していく必要がある。

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 (ES3) 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--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)

Long-time Numerical Integration of Highly Resolved Anelastic Rotating Spherical Convection to Elucidate the Origin of Banded Structure Observed in Jovian Type Planetary Atmospheres

Project Representative

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

Authors

Shin-ichi Takehiro *¹, Youhei Sasaki *², Keiichi Ishioka *³

*¹ Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, *² Department of Architecture/Institute of Fundamental Sciences, Faculty of Science and Engineering, Setsunan University, *³ 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.

We started to perform highly resolved numerical simulation of anelastic rotating spherical convection with full spherical domain. The broad and strong equatorial prograde jet emerges. The weak but alternating zonal jets are also generated in mid and high latitudes. However, kinetic energy does not saturate but still increases, meaning that the system does not reach statistically steady state. It is necessary to continue the time integration and to observe the transition and characteristics of banded structures.

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 researches 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.

Further, we developed an anelastic rotating spherical convection model using the improved spectral transform library. The model was validated by performing benchmark numerical calculations proposed by Jones et al. (2011) [5].

3. Numerical simulation with full spherical domain

We started to perform highly resolved numerical simulation of anelastic rotating spherical convection with full spherical domain. The numerical setup follows the case5 of Gastine et al. (2014) [2], which is one of the highest resolution and most rapid rotation cases performed so far. However, Gastine et al. do not treat full spherical domain but assumed eight-fold symmetry in the longitudinal direction.

The Prandtl number $Pr = \nu/\kappa$ is set to 0.1, the Ekman number $Ek = \nu/(\Omega D^2)$ is 3×10^{-6} , the radius ratio of the inner and outer radii $\chi = r_i/r_o$ is 0.85, the modified Rayleigh number $Ra = g_0 \Delta S / (C_p \Omega^2 D)$ is 0.116. The thermal and mechanical boundary conditions are fixed entropy and free-slip at the top and bottom of the shell. The numbers of the grid points in the longitudinal, latitudinal and

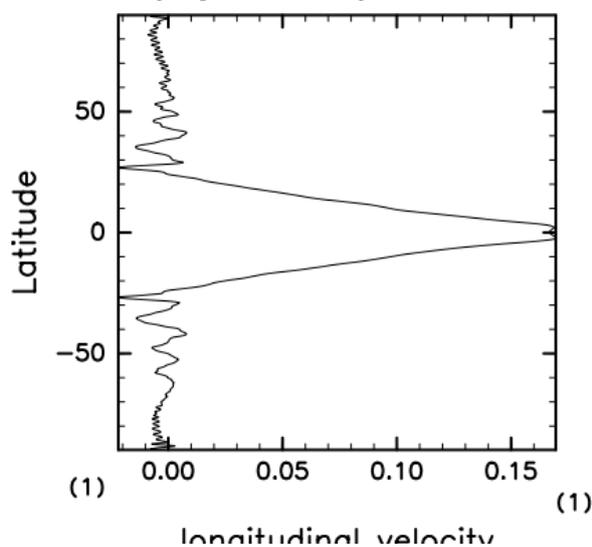


Fig. 1: Latitudinal distribution of mean zonal flows

radial directions are 2048, 1024, and 193, respectively. The spherical harmonics and the Chebychev polynomials in the radial direction are calculated up to 682 and 192 order, respectively. Hyper-viscosity and thermal diffusivity are given as a function of the total wave number of the spherical harmonics l as $d(l) = \{1 + \alpha[(l-1)/(l_{max}-1)]^\beta\}$. Gastine et al. set $\alpha=22$, $\beta=3$, whereas we set $\beta=1$ in order to suppress abrupt growth of the convective activities with lower horizontal wavenumbers.

Starting with a pointwise entropy disturbance, we performed time integration until 10000 non-dimensional time (about 1600 rotation). It took about 170 days with 128 nodes (512 cores) of the Earth Simulator (ES3).

Figure 1 shows latitudinal distribution of the surface mean zonal flows, and Figure 2 is the surface longitudinal velocity. The broad and strong equatorial prograde jet emerges. The weak but alternating zonal jets are also generated in mid and high latitudes. Their amplitudes are far small compared to that of the equatorial jet. In the solution of Gastine et al. (2014), the strength of banded jets are small but comparable to the equatorial jet. This difference may be caused by the difference of the value of hyper-viscosity.

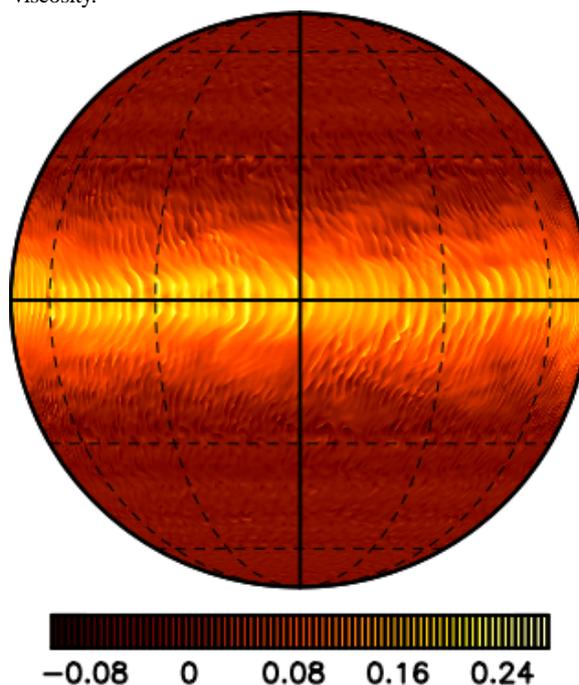


Fig. 2: Surface longitudinal velocity

4. Summary

We reported the result of long-time numerical simulation of anelastic rotating spherical convection with full spherical domain in the present stage. Our previous studies with Boussinesq system suggest that time integration period is not sufficiently long. Actually, kinetic energy does not steady but still increases, meaning that the system does not reach statistically steady state.

It is necessary to continue the time integration with fitting the value of the hyper-viscosity, and observe the transition and characteristics of banded structures.

Acknowledgement

Numerical computation was carried out on the Earth Simulator (ES3) 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)