

# 惑星大気大循環モデル DCPAM の鉛直並列化～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<sup>\*1</sup>, 佐々木 洋平<sup>\*2</sup>, 石岡 圭一<sup>\*3</sup>

\*1 京都大学数理解析研究所, \*2 北海道情報大学情報メディア学部, \*3 京都大学大学院理学研究科

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] (以下 HA2007) 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った。最近ではブシネスク系であった HA2007 を拡張して、動径方向の密度変化を考慮した非弾性系モデルを用いた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], 2022 [4]). しかしながら、これらの研究の多くはせいぜい 1 粘性緩和時間程度しか時間積分を行っておらず、統計的定常状態に達するに十分かが疑問であった。

そこでわれわれは、薄い回転球殻内のブシネスク流体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を吟味してきた。その結果、中高緯度の交互ジェットが融合して縞状構造が消滅し、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 (Takehiro et al., 2024 [5]). 今年度は同じような縞状ジェットの振舞いが非弾性系でも観察されるかを調べるために Heimpel et al. (2022) [4] の追試を行い、現在さらなる長時間積分を遂行して

いる。

一方で「浅い大気層」のモデルでは、下面境界に導入される抵抗則を工夫することにより赤道加速状態を生成できることが示されている (Schneider & Liu 2009 [6]). しかしながら、木星大気の状態と比較して、下面境界が浅すぎ、しかも導入されている下面抵抗は人為的な印象が拭えない。そこで、「深いモデル」の数値実験と並行して、「浅いモデル」により木星型惑星大気のジェットの特徴を捉えることも目指すことにした。その目的のために、従来の研究よりも下面境界を深くする計算を可能にすべく、今年度は浅いモデルである惑星大気大循環モデル DCPAM [7] に鉛直方向の並列化を実装することを目指した。

## 2. 「浅いモデル」の高並列化

惑星大気大循環モデル DCPAM [7] は回転球面上のシグマ座標系プリミティブ方程式系に基礎をおく。流体力学計算には水平方向に球面調和関数を用いたスペクトル法を採用している。非線形項の評価には変換法を用い、実空間での計算を行っている。

従来用いていた球面調和関数変換ライブラリ (ISPACK1, ISPACK2) では実空間の緯度方向のみ並列化されていたため、並列化効率が上がらなかった。これに対して、今回導入した ISPACK3 [8] は波数空間も MPI 分割を行い、並列化率を高めたものである。さらに同ライブラリはルジャンドル関数の計算スキームに工夫がなされており、世界最速の球面調和関数変換ライブラリのひとつである。加えて、鉛直格子および水平波数成分を分割し、MPI による並列計算を実装した (SPMODEL library [9]). スペクトル空間での計算においては、緯度・鉛直方向および水平波数・鉛直方向に変数を分割した。一方で実空間での物理過程の計算においては、水緯度・経度方向に変数を分割し直して並列計算を行うように実装した。

## 3. ベンチマーク計算

Held and Suarez (1994) [10] のベンチマーク設定を用いて鉛直並列化の効果を確かめる実験を行った。解像度は 経度, 緯度, および鉛直格子点数がそれぞれ 1024, 512, および 32, 水平全波数 341 までの三角波数切断である。時間ステップ 5 分で積分時間 1 日にかかる計算時間を様々な MPI 並列数及び鉛直並列数について

で測定した。初期設定にかかる時間は取り除いてある。

図 1 は CPU ノード (Intel Fortran) における結果である。旧モデルではそもそも計算速度が遅く、しかも並列数をあげても速度が向上しない状況であった。これに比較して、今回の改造によって計算速度が 1 桁以上上がっており、加えて並列数に応じての計算速度の向上がはっきりとある。鉛直方向分割をしない場合 (黒実線) には、緯度格子分割の限界のために 64 並列までしか実行できない。しかし鉛直方向に分割することにより、この限界を伸ばすことができ、鉛直 4 分割の場合には 256 並列まで (赤破線)、鉛直 16 分割の場合には 1024 並列まで (青点線) 並列計算が可能となり、計算効率をさらに上げることができている。

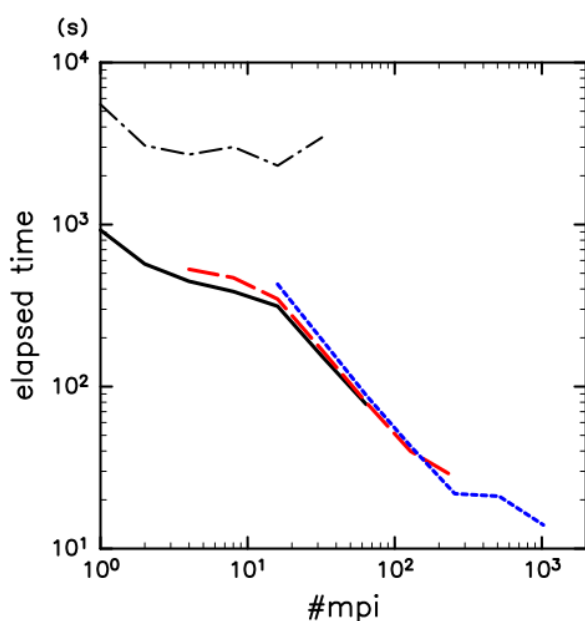


図 1. CPU ノード (Intel Fortran) でのベンチマーク計算結果。解像度 1024x512x32 (経度 x 緯度 x 鉛直) での Held and Suarez 実験の 1 日計算にかかる時間。横軸は MPI 並列数。黒実線、赤破線、青点線がそれぞれ鉛直分割数 1, 4, 16 の場合。黒一点破線は改造前のモデル計算結果。スレッド並列は行っていない。

#### 4. まとめ

以上、惑星大気大循環モデル DCPAM の高並列化を行った。この改造により「浅いモデル」による長時間高解像度計算が可能となった。今後は Schneider and Liu (2009) の数値実験を発展させて木星型惑星大気大循環の帯状流生成問題に取り組んでいく予定である。

#### 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 (ES4) 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] M. Heimpel, R. Yadav, N. Featherstone and J. Aurnou, "Polar and mid-latitude vortices and zonal flows on Jupiter and Saturn", *Icarus*, 379, 114942 (February 2022)
- [5] S. Takehiro, Y. Sasaki, K. Ishioka, T., Enomoto, K. Nakajima, and Y.-Y. Hayashi, "Asymptotic profiles of mean zonal flows generated by thermal convection of Boussinesq fluid in a rapidly rotating thin spherical shell", *Icarus*, 420, 116154 (May 2024)
- [6] T. Schneider and J. Liu, "Formation of Jets and Equatorial Superrotation on Jupiter", *J. Atmos. Sci.*, 66, 579-601 (March 2009)
- [7] Y. O. Takahashi, H. Kashimura, S. Takehiro, M. Ishiwatari, S. Noda, M. Odaka, T. Horinouchi, Y.-Y. Hayashi, DCPAM Development Group, "DCPAM: planetary atmosphere model", <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>, GFD Dennou Club (2018)
- [8] K. Ishioka, "ISPACK FORTRAN SUBROUTINE LIBRARY FOR SCIENTIFIC COMPUTING", <http://www.gfd-dennou.org/library/ispack/>, GFD Dennou Club (2022)
- [9] S. Takehiro, Y. SASAKI, K. Ishioka, M. Odaka, Y. O. Takahashi, K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y.-Y. Hayashi, SPMODEL Development Group, "Hierarchical Spectral Models for GFD (SPMODEL)", <http://www.gfd-dennou.org/library/spmodel/>, GFD Dennou Club (2013)
- [10] I. M. Held and M. J. Suarez, "A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models", *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 75, 1825-1830. (May 1994)