

高解像度 LES によって得られた火星大気境界層における循環構造

The circulation structure in the Martian atmospheric boundary layer obtained by high resolution LES

*村橋 究理基¹、西澤 誠也²、石渡 正樹¹、小高 正嗣¹、中島 健介³、竹広 真一⁴、杉山 耕一郎⁵、高橋 芳幸⁶、林 祥介⁶

*Kuriki Murahashi¹, Seiya Nishizawa², Masaki Ishiwatari¹, Masatsugu Odaka¹, Kensuke Nakajima³, Shin-ichi Takehiro⁴, Ko-ichiro Sugiyama⁵, Yoshiyuki O. Takahashi⁶, Yoshi-Yuki Hayashi⁶

1. 北海道大学、2. 理化学研究所 計算科学研究機構、3. 九州大学、4. 京都大学 数理解析研究所、5. 松江工業高等専門学校、6. 神戸大学 / 惑星科学研究センター

1. Hokkaido University, 2. RIKEN Advanced Institute for Computational Science, 3. Kyushu University, 4. Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, 5. National Institute of Technology, Matsue College, 6. Kobe University / CPS

1. はじめに

火星大気には大気境界層中の風により地面から巻き上げられたダストが存在し、大気の大気温度構造などに大きな影響を与えている (Montabone et al., 2005). 多くの大気大循環モデル (GCM) を用いた研究においては、火星大気境界層内のサブグリッドスケールの風によるダスト巻き上げが重要であると考えられており、その過程をパラメータ化して表現している。パラメータ化の妥当性の検証は、計算で得られるダストの光学的深さや温度分布が観測結果と整合的であるか否かで検討されている。

ダスト巻き上げ過程のパラメータ化に関して、大気境界層における循環場の微細構造と直接比較することにより検証することが望ましいが、そのような検討はこれまでされてこなかった。そのためラージエディーション (LES) を用いた調査が行われている。Fenton and Michaels (2010) はモデルの水平解像度を 100 m として、初期に与える水平風の分布を変えた LES 実験を行った。地表面摩擦速度を求めた結果、初期の水平風分布によってはダストの巻き上げが十分起こることが示された。しかし彼らの計算解像度は粗く、ダストデビルのような数十 m スケールの現象が与える影響は考慮できていない。これに対して Nishizawa et al. (2016) は計算解像度を等方 100 m から 5 m まで変えた LES 実験を行うことで、計算解像度依存性について調べた。初期に水平に一樣な静止大気を設定した。等方格子による解像度 5 m の計算は、これまで行われた火星 LES 計算の中で格段に解像度の高いものである。彼らはモデル高度 62.5 m における渦度と鉛直風について調べた。その結果、鉛直風の空間分布について、細く強い上昇流を境界に持つセル状構造の存在が示された。またモデル内で生じる渦の強度や半径の計算解像度依存性について調べ、高解像度計算の方がより強く、小スケールの渦まで表現されることを示した。以上の先行研究においては、ダスト巻き上げに関わる地表面付近の様子については調べられていない。

本研究では、ダスト巻き上げを決定づける地表面応力が循環場の構造とどのような対応を持つか理解することを目指し、地表面付近の循環場及び地表面応力場について調査を行う。本発表では地表面付近であるモデル最下層に注目して調べた結果を示す。

2. 使用データ

解析に使用するものは、Nishizawa et al. (2016) で計算されたデータである。これは、RIKEN/AICS で開発された SCALE-LES ver.3 を使用して得られたものである。計算で用いた各パラメータ値は、火星を想定して設定されている。計算領域のサイズは 19.2 km × 19.2 km × 21 km、解像度は 100 m から 5 m の間で数種類用いられている。加熱・冷却率及び地表温度については、Odaka et al. (2001) による一次元モデルで得られた結果を外部から与える。水平境界条件は周期境界である。初期条件は、Odaka et al. (2001) の 0:00 (地方時) における鉛直温度

分布に微少な温位擾乱を加えた静止大気である。上記データの内、解像度 5 m のものは、解像度 10 m で 14:00 (地方時) まで計算した結果を初期値として、1 時間分計算して得られたものである。本研究では計算解像度 5 m の 14:30 におけるデータを用いた。Nishizawa et al. (2016) と同様、モデルに組み込まれている同一のスキームを用いて、地表面応力を求めた。

3. 結果

地表面応力の強度頻度分布に調べた結果、頻度は 0.03 Pa 付近に向けて急激に減少し、0.046 Pa までは緩やかに減少する。Greeley and Iversen (1985) の風洞実験で得られたダストを巻き上げる閾値である 0.03 Pa 以上の応力を持つ領域が、計算格子 1500 万点中、数十点程度存在している。

応力の空間分布と循環構造の対応関係について調べるため、モデル最下層 (高度 2.5 m) における風速分布を調べた。その結果、水平スケール十数 m の細い上昇流領域が束になって網目状の構造が見られた。この上昇流領域は Nishizawa et al. (2016) で示されたようなセル状構造の境界に対応していると考えられる。またセル状構造は地表面に近づくほど水平スケールが小さいことがわかった。これらの上昇流領域は水平風収束域と一致している。また上昇流領域に沿って、数十から数百 m の水平スケールを持つ渦度が大きい領域が存在している。強い応力を示す場所の分布は水平風の絶対値の空間分布によく対応していることがわかった。

現在、14:30 以外の他の時刻や解像度についても解析中である。その結果から地表面応力の強い場所における循環場の構造を調べることによって、応力場と循環場の対応関係に関する理解を得る予定である。

キーワード：火星、大気境界層、高解像度ラージエディシミュレーション、乾燥対流、地表面応力、ダスト巻き上げ

Keywords: Mars, Atmospheric Boundary Layer, High Resolution Large Eddy Simulation, Dry Convection, Surface Stress, Dust Lifting

大気海洋海氷結合モデルを用いた水惑星の気候に対する海洋大循環の影響の数値的研究

A numerical study on the impact of ocean general circulation on aquaplanet climate with a coupled atmosphere-ocean-sea ice model

*河合 佑太^{1,2}、高橋 芳幸^{1,6}、石渡 正樹⁵、西澤 誠也²、竹広 真一⁴、中島 健介³、富田 浩史²、林 祥介^{1,6}

*Yuta Kawai^{1,2}, Yoshiyuki O. Takahashi^{1,6}, Masaki Ishiwatari⁵, Seiya Nishizawa², Shin-ichi Takehiro⁴, Kensuke Nakajima³, Hirofumi Tomita², Yoshi-Yuki Hayashi^{1,6}

1. 神戸大学理学研究科、2. 理化学研究所計算科学研究機構、3. 九州大学、4. 京都大学、5. 北海道大学、6. 惑星科学研究センター

1. Kobe Univ., 2. RIKEN AICS., 3. Kyusyu Univ., 4. Kyoto Univ., 5. Hokkaido Univ., 6. CPS

1. はじめに

近年次々と発見される系外惑星では多様な気候が実現されていると考えられ、その構造の理解のために惑星気候の数値シミュレーションが盛んに行われている。我々の研究グループでも、系外惑星の気候決定に対する大気大循環の役割の理解を深めるために、大気大循環モデルを用いて、惑星表面が水で覆われた惑星(水惑星)の気候探索を進めてきた(Ishiwatari et al., 1998; Ishiwatari et al., 2007; 以後 INTH98, INTH07 と書く)。そこでは、大気大循環の役割に焦点を当てたため、海洋大循環は全く考慮されなかった。しかし、海洋大循環による熱輸送もまた惑星の気候決定に対して重要な影響を与えるであろう。近年の計算科学の発展は大気海洋海氷結合モデルの長時間積分を可能にし、水惑星の気候研究においても海洋大循環を陽に考慮した研究がなされ始めている(例: Marshall et al., 2007; Rose et al., 2015)。彼らの先駆的研究により、水惑星結合系の気候の太陽定数依存性、自転角速度依存性などが明らかになりつつある。しかし、水惑星結合系の太陽定数依存性の探索一つとっても、暴走温室までを含めた気候レジーム図の作成、海洋塩分や鉛直渦拡散係数等が現在地球と大きく異なる場合での振る舞いの掌握などは依然としてなされていない。

本研究では、開発した結合モデルを用いて、INTH07 で調べられた水惑星の気候の太陽定数依存性の問題に海洋大循環の効果を導入し、水惑星の気候決定に対する海洋大循環の影響を考察することに焦点を当てる。また、先行研究ではなされなかった暴走温室までを含めた結合モデルによる気候レジーム図の作成を目指す。本発表では、INTH98 や INTH07 と同様の大气設定をした結合モデルによりここまで計算できるようになった、太陽定数増減実験の標準実験(太陽定数は現在地球の値)の結果を報告する。

2. 数値モデル

大気モデルは惑星大気大循環モデル DCPAM (<https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>)である。力学過程では三次元プリミティブ方程式系と水蒸気輸送がスペクトル法によって解かれる。また、INTH98 の水惑星灰色大気大循環の実験を再現するために、放射過程には Nakajima et al. (1992) の灰色大気放射スキーム、凝結過程には Manabe et al. (1965) の湿潤対流調節スキームと大規模凝結スキームを用いる。これらにより、大気モデルによって、風、温度、表面圧力、比湿の時間発展が計算される。大気モデルの解像度は水平格子間隔約 5 度・鉛直 26 層にとる。一方、海洋海氷モデルは東西平均二次元モデルである。海洋の力学過程では静力学ブジネスク方程式系がスペクトル法によって解かれる。モデルが解像できない中規模渦や対流による混合を表現するために、Gent and McWilliams (1990) や Marotzke (1991) のパラメタリゼーションを用いる。これらにより、

海洋モデルは流速・温度・塩分の時間発展を計算する。海氷モデルは Winton (2000) に基づく鉛直 3 層熱力学モデルであり、海氷の厚さと温度が計算される。以下の実験では、海洋モデルの解像度は南北格子間隔約 2.5 度・鉛直 60 層、海氷モデルの解像度は南北格子間隔約 2.5 度に設定する。最後に、三つのモデルはカップラー・ライブラリ(Arakawa et al., 2011) により結合されている。

3. 結果

初めに INTH98 に習って表面アルベドがゼロの場合の結果を記述する。初期に 280 K の等温大気・海洋を設定すると、結合系は数万年積分後に統計的平衡状態に達し、氷線緯度 50 度の部分凍結解を得る。我々の結果は、水惑星結合計算の先行研究である Marshall et al. (2007) が得た大気海洋大循環のパターンとよく似ているが、循環強度が弱いことが特徴である。次に、海洋の大きな熱慣性や海洋大循環の効果を検証するために、海の取り扱いを swamp ocean(熱容量ゼロ)や slab ocean(熱容量が有限)に変えた実験を行った。これらの実験結果の比較により、海洋大循環を考慮した場合には、中低緯度間の南北温度差は約 5 度減少し、赤道の海面温度が約 4 度低下することが分かった。一方で、氷線緯度や全球平均惑星表面温度は、海洋の取り扱いによらず、それぞれ約 50 度と約 283 K であった。次に、氷アルベドフィードバック存在下での海洋大循環の効果を検証するために、INTH07 と同様の氷アルベドフィードバック(263 K 以下の所で表面アルベドを 0.5, それ以外はゼロに設定)を導入した場合の結果を記述する。今回の太陽定数の設定では、swamp ocean 実験と比べて、slab ocean 実験や結合系を用いた実験では氷線緯度は約 10 度後退し、それと対応して全球平均惑星表面温度は約 5 度高くなった。このことは、Rose et al. (2015) が主張するように、氷アルベドフィードバックが存在するときに、海洋の熱慣性や海洋熱輸送が水惑星の気候決定に対してより重要な影響を与えることを示唆する。水惑星の気候決定に対する海洋大循環の役割の理解をさらに深めるために、今後は太陽定数を様々に変えたパラメータ実験を進める。

キーワード：大気海洋海水結合モデル、水惑星の気候、大気海洋熱輸送、氷アルベドフィードバック

Keywords: coupled atmosphere-ocean-sea ice model, aquaplanet climate, atmosphere and ocean heat transport, ice-albedo feedback

回転球殻内の非弾性熱対流の臨界モードに対する熱拡散係数の動径分布の影響

Effects of radial distribution of thermal diffusivity on critical modes of anelastic thermal convection in rotating spherical shells

*佐々木 洋平¹、竹広 真一³、石渡 正樹²、山田 道夫³

*Youhei SASAKI¹, Shin-ichi Takehiro³, Masaki Ishiwatari², Michio Yamada³

1. 京都大学大学院理学研究科数学教室、2. 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻、3. 京都大学数理解析研究所
1. Department of Mathematics, Kyoto University, 2. Department of CosmoSciences, Graduate school of Science, Hokkaido University, 3. Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

Linear stability analysis of anelastic thermal convection in a rotating spherical shell with thermal diffusivities varying in the radial direction is performed. The structures of critical convection are obtained in the cases of four different radial distributions of thermal diffusivity; (1) κ is constant, (2) κT_0 is constant, (3) $\kappa \rho_0$ is constant, and (4) $\kappa \rho_0 T_0$ is constant, where κ is the thermal diffusivity, T_0 is the temperature of basic state, and ρ_0 is the density of basic state, respectively. The ratio of inner and outer radii, the Prandtl number, the polytrope index, and the density ratio are 0.35, 1, 2, and 5, respectively. The value of the Ekman number is 10^{-3} or 10^{-5} . In the case of (1), where the setup is same as that of the anelastic dynamo benchmark (Jones et al., 2011), the structure of critical convection is concentrated near the outer boundary of the spherical shell around the equator. However, in the cases of (2), (3) and (4), the convection columns attach the inner boundary of the spherical shell.

A rapidly rotating annulus model for anelastic systems is developed by assuming that convection structure is uniform in the axial direction taking into account the strong effect of Coriolis force. The annulus model well explains the characteristics of critical convection obtained numerically, such as critical azimuthal wavenumber, frequency, Rayleigh number, and the cylindrically radial location of convection columns.

The radial distribution of thermal diffusivity is important for convection structure, because it determines the distribution of radial basic entropy gradient which is crucial for location of convection columns.

キーワード：臨界対流、非弾性流体、木星型惑星

Keywords: Critical convection, Anelastic fluid, Jovian planets

Numerical simulation of circumplanetary disk formation for estimating the disk size and surface density

*波々伯部 広隆¹、町田 正博²

*Hiroataka Hohokabe¹, Masahiro Machida²

1. 九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻、2. 九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University

Circumplanetary disks are possible targets for future observations and include some information on planet formation. Numerical simulation is useful to predict such observations.

To investigate the structure of circumplanetary disk and its environment, extremely high resolution is required. Hence we parallelize a three-dimensional hydrodynamic simulation code of static mesh refinement method. The parallelized code enables us to compute 10 times higher spatial resolution than previous studies. When 15 times Hill radius is adopted as the computational domain in the radial direction, the finest spatial resolution is 10^{-3} of the Hill radius which is comparable to the present Jovian radius. The resolution is sufficient to investigate circumplanetary disk structure.

We perform a numerical simulation of circumplanetary disk formation around a planet embedded in protoplanetary disk. We consider a local rotating Cartesian coordinate. The coordinate is rotating around a star with Keplerian angular velocity and curvature is neglected. Basic equations of inviscid fluid hydrodynamic without self-gravity are solved. Some symmetric boundary conditions are imposed to accelerate the calculation, in which rotational, periodic, and mirror symmetries are imposed as radial, azimuthal and vertical directions respectively. The other side boundaries in the radial direction and in the vertical direction of computational domain are connected to unperturbed flow.

In this resolution, the angular momentum of the initial condition can not be neglected. Then a artificial retrograde circumplanetary disk forms potentially and the disk is not dissipative even in long time integration. To avoid the problem, we introduce sink cells around protoplanet. Finally, a prograde disk is formed.

Acknowledgement: The computation was carried out using the computer facilities at Research Institute for Information Technology, Kyushu University.

キーワード：周惑星円盤、流体力学、数値シミュレーション

Keywords: circumplanetary disk, hydrodynamics, numerical simulation