

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800273

研究課題名（和文）巨大惑星の深部流体運動とダイナモ作用

研究課題名（英文）Deep convection and dynamo action of giant planet.

研究代表者

佐々木 洋平（SASAKI, Youhei）

京都大学・スーパーグローバルコース数学系ユニット・特定助教

研究者番号：70583459

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：ガス惑星・氷惑星の深部大気・中心核など、流体層が系のスケールハイトよりも大きな場合を念頭においた回転球殻中の圧縮性流体の対流運動、およびこれに伴うダイナモ作用に関する数値モデルの開発を行なった。開発された数値モデルを用いた回転球殻対流の線型安定性解析を広い範囲で調べ、臨界構造を明らかにした。上層に安定成層領域が存在する場合の貫入運動について調べ、表層で観測される磁場の強度と貫入距離に関するスケーリング則を提唱した。

研究成果の概要（英文）：Numerical model for MHD in rotating spherical shells is developed. Linear stability analysis of compressible % thermal convection in rotating spherical shells using this numerical model is performed with the anelastic approximation. At large compressibility, the location of convection column is close to the outer boundary, and the convective motion occurs near the outer boundary. This feature is highly depends radical thermal diffusivity. Numerical experiments of magneto-hydrodynamic dynamo in a rotating spherical shell with a strongly stable outer layer are performed. The proposed theoretical expression of propagation distance of the Alfvén waves suggests that the numerically obtained fields permit the complete propagation of the Alfvén waves across the stable layer.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：木星型惑星 ダイナモ作用 数値モデル

## 1. 研究開始当初の背景

近年の計算機性能の向上により、回転球殻内の対流運動とそれに伴う磁場生成維持機構(ダイナモ作用)の直接数値計算が精力的に行なわれるようになった。これら研究では、地球中心核の様に対流層の鉛直スケールがスケールハイトよりも十分小さい場合を考えており、流体を非圧縮流体としたブシネスク方程式系が用いられている。しかしながら、ガス惑星や氷惑星などの巨大惑星の深部大気・中心核の運動を考える際には、運動の鉛直スケールがスケールハイトの数倍から十数倍に及ぶため、流体の圧縮性を考慮する必要がある。

これまでにも、流体の圧縮性を陽に扱った数値的研究は幾つか報告されているものの、これらの研究ではブシネスク系との比較がほとんど行なわれておらず、計算されているパラメータも限定的である。さらに、理想気体の状態方程式に基づく方程式系が用いられており、近年の高圧実験技術の進歩により明らかになりつつある高温高圧下の物性が反映されておらず、巨大惑星の深部大気および中心核の状況を捉えているとは言い難い。

また、近年の天文観測技術の発達により太陽系外の惑星系が多数発見される様になった。現在観測されている太陽系外の惑星の多くは木星型惑星であり、これら天体の深部流体運動・中心核の流れとダイナモ作用を考える際にも圧縮性流体を考慮する必要がある。

## 2. 研究の目的

- ① 三次元回転球殻ブシネスク対流モデルを特定の状態方程式に依存しない形で非弾性系へ拡張することで、巨大惑星の内部領域/中心核の数値モデルを構築する。併せて既存の数値モデルの高速化/並列化作業を進め、大規模計算を実施するための基盤を整備する。
- ② ①で拡張したモデルを用いて圧縮性回転球殻対流問題を数値的に計算し、圧縮性、系の回転角速度、球殻の厚さなどのパラメータ依存性を調べる。線形安定性解析および有限振幅時間発展計算を併せて行ない、これまで得られたブシネスク系での知見と相互に比較することで、断片的な知見しか得られていない圧縮性流体の回転球殻対

流運動を系統的に整理し理解することを目指す。

- ③ ②の知見を元に磁気流体ダイナモ問題を数値的に計算する。特に自動的に磁場が生成維持されるパラメータ空間を明確にするとともに、回転の効果を強くしていった場合の漸近則を求める事を目指す。また、高圧実験で得られている幾つかの(実験的)状態方程式を用いることで、圧縮性と電気伝導度の深さ方向の依存性を詳細に調べることを目標とする。

## 3. 研究の方法

- ① 非弾性系の定式化と数値コードの実装:  
ガス惑星・氷惑星の内部運動の定式化とその数値コードの実装を行なう。モデル開発は、結果を常にブシネスク系と比較することで物理的な理解を深めつつ進めるため、非弾性流体モデル、圧縮性理想気体モデルと段階的に開発する。
- ② 臨界対流の構造の把握:  
①で構築した数値コードを用いて線形固有値解析により臨界構造を把握する。系の自転角速度、球殻の厚さ、静的安定度、熱・力学的境界条件を変えて、これまでより広いパラメータ領域について臨界モードを求め、物理的解釈を行なうことで理解を深める。
- ③ 非弾性系の有限振幅対流計算:  
回転球殻中の非弾性流体の有限振幅対流計算を、パラメータおよび境界条件を変えて遂行し、パラメータ空間上での流体運動のカタログを作成する。系の圧縮性の影響を徐々に強くすることによって、ブシネスク系から非弾性系へと連続的に対流構造を変化させて、結果の物理的解釈を行なう。
- ④ 非弾性系の磁気流体ダイナモ計算:  
回転球殻中の非弾性磁気流体のダイナモ計算をパラメータおよび境界条件を変えて遂行する。ブシネスク系から非弾性系へと連続的に対流構造を変化させつつ、深さ方向の電気伝導度の変化の磁場生成に与える影響を詳細に調べ、自励的な磁場の生成維持が成立する臨界パラメータを特定することを目指す。

#### 4. 研究成果

- ① 既存のブシネスク系による球殻対流の数値モデルを非弾性系に拡張した。
- ② 系の自転角速度, 球殻の厚さ, 静的安定度を変えた線型安定性解析を遂行した。また, 臨界対流の構造が熱拡散係数, ひいては基本場の構造に強く依存しており, 近年得られている非弾性対流の描像が特定の基本場の場合に限定されることを示した。
- ③ 木星型惑星の表層大気構造を念頭に, 薄い回転球殻中の対流による表層縞状構造の形成について, 高解像度の全球長時間積分を遂行した。これまで幾つかの研究で得られてきた縞状構造は過渡的な状況であり, 観測に比するほどの長時間は維持されないことを示した。
- ④ 球殻外側に安定成層領域が存在する場合を想定した非弾性 MHD ダイナモ計算を遂行し, 磁気擾乱が Alfvén 波として安定成層に貫入することを示し, 貫入距離のスケールリング則を提唱した。

#### 5. 主な発表論文

[雑誌論文 (計 8 件)]

- ① Takehiro, S.-I., Sasaki, Y., 2017: Penetration of steady fluid motions into an outer stable layer excited by MHD thermal convection in rotating spherical shells, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, doi: 10.1016/j.pepi.2017.03.001 (査読有)
- ② 竹広真一, 佐々木洋平, 石岡圭一, 2016: 木星型惑星大気の縞状構造の成因の研究. 平成 27 (2015) 年度地球シミュレータ利用報告書, pp.125129. (非査読)
- ③ Matsui, H., Heien, E., Aubert, J., Aurnou, J.M., Avery, M., Brown, B., Buffett, B.A., Busse, F.H., Christensen, U.R., Davies, C.J., Featherstone, N., Gastine, T., Glatzmaier, G.A., Gubbins, D., Guermond, J.-L., Hayashi, Y.-Y., Hollerbach, R., Hwang, R.J., Jackson, A., Jones, C.A., Jiang, W., Kellogg, L.H., Kuang, W., Landeau, M., Marti, P.H., Olson, P., Ribeiro, A., Sasaki, Y.,

Schaeffer, N., Simitev, R.D., Sheyko, A., Silva, L., Stanley, S., Takahashi, F., Takehiro, S.-I., Wicht, J., Willis, A.P., 2016: Performance benchmarks for a next generation numerical dynamo model, *Geochemistry, Geophysics, Geosystem*, doi: 10.1002/2015GC006159 (査読有)

- ④ 竹広真一, 佐々木洋平, 石岡圭一, 2014: 木星型惑星大気の縞状構造の成因の研究. 平成 26 (2014) 年度地球シミュレータ利用報告書 (非査読)
- ⑤ Marti, P., Schaeffer, N., Hollerbach, R., Cebon, D., Nore, C., Luddens, F., Guermond, J.-L., Aubert, J., Takehiro, S., Sasaki, Y., Hayashi, Y.-Y., Simitev, R., Busse, F., Vantieghem, S., Jackson, A., 2014: Full sphere hydrodynamic and dynamo benchmarks, *Geophysical Journal International*, 197, 119-134, doi: 10.1093/gji/ggt518 (査読有)
- ⑥ Takehiro, S., Sasaki, Y., Hayashi, Y.-Y., Yamada, M., 2013: Differential Rotation and Angular Momentum Transport Caused by Thermal Convection in a Rotating Spherical Shell, *Progress in Physics of the Sun and Stars*, 479, 285-294 (査読有)
- ⑦ 佐々木 洋平, 竹広 真一, 中島健介, 林祥介, 2013: 回転球殻内の非弾性流体熱対流の線形安定性, *ながれ (日本流体力学会学会誌)*, 32, 469-472 (査読有)
- ⑧ Jackson, A., Sheyko, A., Marti, P., Tilgner, A., Cebon, D., Vantieghem, S., Simitev, R., Busse, F., Zhan, X., Schubert, G., Takehiro, S., Sasaki, Y., Hayashi, Y.-Y., Ribeiro, A., Nore, C., Guermond, J.-L., 2013: A spherical shell numerical dynamo benchmark with pseudo-vacuum magnetic boundary conditions, *Geophysical Journal International*, 196, 712723, doi: 10.1093/gji/ggt425 (査読有)

[学会発表 (計 8 件)]

- ① Takehiro, S., Sasaki, Y., Ishioka, K., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., 2017: Mean zonal flows induced by Boussinesq thermal convection in rotating spherical shells as an application to the gas giant planets. WTK Aquaplanet Workshop, 21st January 2017, National Astronomical Observatory of Japan.
- ② Takehiro S., Takahashi, Y. O., Sugiyama, K., Odaka, M., Ishiwatari, M., Hori-nouchi, T., Sasaki, Y., Ishioka, K., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., 2017: GFD-Dennou Club DCMODEL project. WTK Aquaplanet Workshop, 24th January 2017, CPS, Kobe University.
- ③ 佐々木洋平, 竹広真一, 石渡正樹, 山田道夫 2016: 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, 2016 年日本流体力学会年会
- ④ 竹広真一, 佐々木洋平 2016: 回転球殻中の磁気対流により引き起こされる平均帯状流の外側安定成層への貫入. 2016 年日本流体力学会年会
- ⑤ Sasaki, Y., Takehiro, S., Ishiwatari, M., Yamada, M., 2016: Critical mode of anelastic thermal convection in a rotating spherical shell depends on radial distribution of thermal diffusivity, SEDI The 15th Symposium, Nantes, France.
- ⑥ Takehiro, S., Sasaki, Y., 2016: Penetration of mean zonal flows into an outer stable layer excited by MHD thermal convection in rotating spherical shells, SEDI The 15th Symposium, Nantes, France.
- ⑦ 竹広真一, 佐々木洋平, 2016: 回転球殻中の磁気対流により引き起こされる平均帯状流の外側安定成層への貫入. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 講演セッション (講演番号: MIS10-P05)
- ⑧ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2016: 高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞状構造への力学的境界条件の影響. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会
- ⑨ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2016: 高速回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層縞状構造の消滅, 2016 年日本天文学会春季大会, 2016 年 3 月 15 日, 首都大学東京 (講演番号 Z322b)
- ⑩ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2016: 高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞状構造への力学的境界条件の影響. 惑星大気研究会「水惑星」 2016 年 3 月 10 日, 神戸大学惑星科学研究センター
- ⑪ 竹広真一, 佐々木洋平, 石岡圭一, 2016: 高速回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層縞状構造への力学的境界条件の影響, 平成 27 年度地球シミュレータ利用報告会, 2016 年 3 月 11 日 (金), コクヨホール
- ⑫ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2016: 高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞状構造への力学的境界条件の影響. 2016 年春季気象学会
- ⑬ Sasaki and Takehiro, S.-I. 2015: Penetration of magneto-hydrodynamic disturbances into a strongly stable outer layer caused by MHD dynamo in a rotating spherical shell, Japan SEDI symposium 2015.
- ⑭ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2015: 高速回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層縞状構造の消滅. 2015 年日本流体力学会年会, 東工大岡山キャンパス
- ⑮ 佐々木洋平, 竹広真一, 2015: 回転球殻ダイナモにより引き起こされる磁気流体擾乱の強い安定成層への貫入. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会.
- ⑯ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2015: 高速に回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層縞状構造の消滅. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会.
- ⑰ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2015: 高速に回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層縞状構造

- 造の消滅. 2015 年 日本気象学会春季大会
- ⑱ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2014: 高速回転する薄い球殻中の対流により引き起こされる表層の帯状流, 日本気象学会 2014 年度秋季大会, 福岡国際会議場
- ⑲ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2014: 高速回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層の帯状流, 2014 年日本流体力学会年会, 2014 年 9 月 15 日, 東北大学川内北キャンパス
- ⑳ Sasaki, Y., Takehiro, S. 2014, Penetration of magneto-hydrodynamic disturbances into an outer strongly stable layer caused by MHD dynamo in a rotating spherical shell, The 14th symposium of SEDI, Study of the Earth's Deep Interior, at the Shonan Village Center, Kanagawa, Japan, from August 3 to 8
- ㉑ 佐々木洋平, 竹広真一, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介, 2014: 高速に回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層の帯状流, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 5 月 1 日 (木), 講演番号 PCG38-01
- ㉒ Takehiro, S., Sasaki, Y., Takahashi, Y. O., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., Kuramoto, K., 2013, Diversity of atmospheric circulations of synchronized rotating Jovian type planets. 5th Subaru International Conference: Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II, Dec. 8 to 12 2013, Sheraton Kona Resort & Spa Keauhou Bay, The Big island of Hawaii.
- ㉓ Sasaki, Y., Takehiro, S., Kuramoto, K., Hayashi, Y.-Y. 2013: Weak-field dynamo emerging in a rotating spherical shell with stress-free top and no-slip bottom boundaries, Mathematical analysis of magneto-hydrodynamical processes in stars, Sep. 26, 2013, Kansai Seminar House, Sakyo-ku, Kyoto, Japan.
- ㉔ 佐々木洋平, 竹広真一, 中島健介, 林祥介, 2013: 回転球殻内の非弾性流体熱対流の線型安定性, 2013 年日本流体力学会年会 2013 年 9 月 13 日, 東京農工大学
- ㉕ 竹広真一, 佐々木洋平, 林祥介, 山田道夫, 2013: 回転球殻内の熱対流による角運動量輸送と太陽差分回転について, 2013 年日本流体力学会年会 2013 年 9 月 13 日 東京農工大学
- ㉖ 佐々木洋平, 竹広真一, 中島健介, 林祥介, 2013: 恒星・ガス惑星・氷惑星内部を念頭においた非弾性球殻対流モデル, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 2013 年 5 月 20 日: 幕張メッセ国際会議場.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐々木 洋平 (SASAKI, Youhei)

京都大学・学際融合教育研究推進センター

スーパーグローバルコース数学系ユニット・特定助教

研究者番号 70583459