

変動惑星圏シミュレーション

1加藤雄人、1寺田直樹、2藤原均、1寺田香織、1,3川面洋平、1堺正太郎

1黒田剛史、4梅田隆行、5永井享、1相澤紗絵、1中村勇貴、1齋藤幸碩、1磯野航

1 東北大学 大学院理学研究科、2 成蹊大学 理工学部、3 東北大学 学際科学フロンティア研究所

4 名古屋大学 宇宙地球環境研究所、5 名古屋大学 情報基盤センター

本研究は、惑星大気・プラズマ環境におけるマイクロ秒～数十億年スケールの時間変動、及びその蓄積によって生じる惑星圏システムの多様性を明らかにすべく、本研究グループが現有する(a)惑星形成場、(b)惑星圏長期変動（数千万年～数十億年）、(c)惑星圏中期変動（数分～数十年）、(d)惑星圏短期変動（マイクロ秒～秒）の数値シミュレーションコードを適用・拡充発展させ、惑星大気・プラズマの変動と進化に係る統合的知見を得ることを目的とする。

2022年度は、(a)(b)(c)(d)の各課題において以下の成果を挙げた。

(a) 惑星形成場シミュレーション

惑星の固有磁場の起源として考えられているダイナモ過程に関するシミュレーション研究を、数値ダイナモ MHD コードを用いて実施した。特に、磁極反転期にみられる対流構造とエネルギー輸送過程について詳細に調べた。解析にあたっては、外核中で形成される対流および磁場構造の赤道対称性について着目した。前年度までの研究成果として得られていた、逆転に伴う赤道反対称流のエネルギー増加には、エネルギー方程式の移流項を介した対称流からのエネルギー変換が最も大きな役割を果たす結果について追解析を行い、複数の逆転イベントに共通してみられる特徴であることを明らかとした。

(b) 降着円盤の局所乱流シミュレーション

降着円盤ではプラズマが磁気回転不安定性 (MRI) によって駆動される乱流状態にあるが、その特性には未解明な点が多い。本シミュレーションでは、磁場が円盤の回転軸にほぼ垂直な状況において、乱流を構成する揺動のうち Alfvén 的（横波的）成分と圧縮的（縦波的）成分の比を求めた。

その結果、Alfvén 的揺動と圧縮的揺動はほぼ 1 対 2 になることが分かった。この結果は、太陽風のような Alfvén 的乱流が支配的な系のアナロジーを降着円盤に使うことはできないことを示唆している。次に、一般的な磁場形状を持つ降着円盤においても同様の解析を行うために、超高解像度な電磁流体力学シミュレーションが行える擬スペクトル法コードを開発した。このコードを用いて史上最高解像度の磁気回転乱流計算に成功した。また、降着円盤の局所座標系である shearing box において Integrating Factor 法を使うためのアルゴリズムを開発した。

(c) 惑星圏長期変動シミュレーション

惑星大気の進化において大気の宇宙散逸が果たす役割を定量的に評価すべく、系外惑星を含む地球類似惑星の流体力学的散逸モデルと熱圏・外圏 DSMC モデルを用いて速進および遅進流体力学的散逸による大気散逸率を調査した。その結果、 $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ 大気においても放射活性分子の放射冷却過程によって大幅に流体力学的散逸の効率が低下することを示した。また、多成分 MHD シミュレーションを用いて、弱い固有磁場を持つ火星型惑星における分子イオン散逸率への惑星間空間磁場 (IMF) の回転の影響を調査した。その結果、固有磁場と平行な IMF から 45° ずれると分子イオン散逸率が急激に増加し、その後反平行 IMF になるまで緩やかに散逸率は増加することを示した結果を纏めた。太陽活動が活発で激しく IMF が変動することが予想されるため、太古の火星ではこの影響がより顕著に現れる可能性がある。太古の火星における大気圏-水圏結合モデルに全球河川モデルと全球氷河モデルを組み込み、表層環境が温暖半乾

燥から寒冷氷結へ約 10 万年で移行し、現在の火星に残る流水地形をよりよく説明できることを示した結果を纏めるとともに、新たな火星古気候進化シナリオを提示した。

(d) 惑星圏短期変動シミュレーション

惑星電磁圏において生じる高周波のプラズマ波動による粒子加速・加熱過程の定量的理解を目的として計算機実験を実施した。特に、磁気赤道におけるコーラス放射の発生過程に対する低周波地磁気脈動の影響について、テスト粒子計算により明らかとした。

成果発表:

論文(いずれも査読付)

- (1) Kawazura, Y., Calliope: Pseudospectral shearing magnetohydrodynamics code with a pencil decomposition, *Astrophys. J.*, 928, 113, doi:10.3847/1538-4357/ac4f63, 2022.
- (2) Kawazura, Y., Schekochihin, A. A., Barnes, M., Dorland, W., and Balbus, S., Energy partition between Alfvénic and compressive fluctuations in magnetorotational turbulence with near-azimuthal mean magnetic field, *J. Plasma Phys.*, 88, 905880311, doi:10.1017/S0022377822000460, 2022.
- (3) Kawazura, Y., Integrating Factor Runge-Kutta Method for Time-dependent Dissipation in Shearing Coordinates, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 91, 115002, doi:10.7566/JPSJ.91.115002, 2022.
- (4) Sakakura, K., K. Seki, S. Sakai, R. Sakata, H. Shinagawa, D. A. Brain, J. P. McFadden, J. S. Halekas, G. A. DiBraccio, B. M. Jakosky, N. Terada, and T. Tanaka, Formation mechanisms of the molecular ion polar plume and its contribution to ion escape from Mars, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 127, e2021JA029750, doi:10.1029/2021JA029750, 2022.
- (5) Sakata, R., K. Seki, S. Sakai, N. Terada, H. Shinagawa, and T. Tanaka, Multispecies MHD study of ion escape at ancient Mars: Effects of an intrinsic magnetic field and solar XUV radiation, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 127, e2022JA030427, doi:10.1029/2022JA030427, 2022.
- (6) Nakamura, Y., K. Terada, C. Tao, N. Terada, Y. Kasaba, F. Leblanc, H. Kita, A. Nakamizo, A. Yoshikawa, S. Ohtani, F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, G. Murakami, K. Yoshioka, T. Kimura, A. Yamazaki, and I. Yoshikawa, Effect of meteoric ions on ionospheric conductance at Jupiter, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 127, e2022JA030312, doi:10.1029/2022JA030312, 2022.
- (7) Nakamura, Y., N. Terada, F. Leblanc, A. Rahmati, H. Nakagawa, S. Sakai, S. Hiruba, R. Kataoka, and K. Murase, Modeling of diffuse auroral emission at Mars: Contribution of MeV protons, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 127, e2021JA029914, doi:10.1029/2021JA029914, 2022.
- (8) Yoshida, T., N. Terada, M. Ikoma, and K. Kuramoto, Less effective hydrodynamic escape of H₂-H₂O atmospheres on terrestrial planets orbiting pre-main sequence M dwarfs, *Astrophys. J.*, 934, 137(11pp), doi:10.3847/1538-4357/ac7be7, 2022.
- (9) Kamada, A., T. Kuroda, T. Kodama, Y. Kasaba, and N. Terada, Evolution of ice sheets on early Mars with subglacial river systems, *Icarus*, 385, 115117, doi:10.1016/j.icarus.2022.115117, 2022.
- (10) Kitahara, M., Matsuda, S., Katoh, Y., Kojima, H., Kasahara, Y., Miyoshi, Y., Nakamura, S., and Hikishima, M., A calibration method of short-time waveform signals passed through linear time-invariant systems: 1. Methodology and simple examples. *Radio Science*, 57, e2022RS007454, 2022.
- (11) Sakai, S., K. Seki, N. Terada, H. Shinagawa, R. Sakata, T. Tanaka, and Y. Ebihara, Enhanced ion escape rate during IMF rotation under weak intrinsic magnetic field conditions on a Mars-like planet, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 128, e2022JA030510, doi:10.1029/2022JA030510, 2023.

学会発表

- (1) Saito, K., Y. Katoh, T. Kimura, Y. Kawazura, M.

Kitahara, A. Kumamoto, Characteristics of dispersive Alfvén waves inferred from the newly developed magnetospheric plasma distribution model, AGU Fall Meeting 2022, Chicago & Online, 12-16 December 2022.

- (2) Matsui, H., Y. Nishida, M. Matsushima, A. Kumamoto and Y. Katoh, Magnetic Reynolds number range to sustain dipolar magnetic field in geodynamo simulations with different inner core sizes, AGU Fall Meeting 2022, Chicago & Online, 12-16 December 2022.
- (3) 齋藤幸碩, 加藤雄人, 木村智樹, 川面洋平, 熊本篤志, 速度分布関数の空間変化を考慮した磁気圏プラズマの沿磁力線数密度・圧力分布モデルの開発, JpGU 2022, 千葉, 3 June 2022.
- (4) 松井宏晃, 解良拓海, 松島政貴, 加藤 雄人, The role of inertia in the growth of equatorially antisymmetric flow during the polarity reversals in geodynamo model, JpGU 2022, 千葉, 22 May 2022.
- (5) 齋藤幸碩, 加藤雄人, 木村智樹, 川面洋平, 北原理弘, 熊本篤志, 磁気圏プラズマの沿磁力線分布モデルの開発と分散性 Alfvén 波の波動特性の研究, 第 152 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会, 相模原, 11 月 3 日-7 日, 2022 年.
- (6) 磯野航, 加藤雄人, 川面洋平, 熊本篤志, 内部磁気圏における ULF 波動の伝搬過程を解く MHD シミュレーションコードの開発, 第 152 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会, 相模原, 11 月 3 日-7 日, 2022 年.