

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

⁴梅田隆行、⁵永井享、¹相澤紗絵、¹中村勇貴、¹解良拓海、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。

2020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て、エネルギー方程式の赤道対称・反対称成分を解析するルーチンを開発しシミュレーションコードに組み込んで計算を行った。初期条件としては Sreenivasan et al. (2014)を参考にパラメータを設定した。その結果、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ことを示した。

(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。

(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、地球類似惑星の熱圏・外圏 DSMC モデルと流体力学的散逸モデルを用いて遅進および速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、放射活性分子の放射冷却過程によって従来よりも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。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。

(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、磁気赤道で発生したコーラス放射が磁力線に沿って伝搬する過程において、ピッチ角の小さい共鳴電子を全て捕捉しピッチ角を大きく変化させるという特異な非線形効果が現れる様相を、テスト粒子計算により明らかとした。2021年度は計算結果に基づき、共鳴粒子の速度空間上での振る舞いに関する理論の詳細な検討を進めた。

成果発表:

- (1) Kawazura, Y., CALLIOPE: Pseudospectral shearing magnetohydrodynamics code with a pencil decomposition, *The Astrophysical Journal*, Vol 928, 113, doi:10.3847/1538-4357/ac4f63, 2022.
- (2) Kamada, A., T. Kuroda, Y. Kasaba, N. Terada, and H. Nakagawa, Global climate and river transport simulations of early Mars around the Noachian and Hesperian boundary, *Icarus*, 368, 114618, doi:10.1016/j.icarus.2021.114618, 2021.
- (3) 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, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 127, e2022JA030312, doi:10.1029/2022JA030312, 2022.
- (4) 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, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 127, e2021JA029914, doi:10.1029/2021JA029914, 2022.
- (5) Zhang, X.-J., A. G. Demekhov, Y. Katoh, D. Nunn, X. Tao, D. Mourenas, Y. Omura, A. V. Artemyev, V. Angelopoulos (2021), Fine structure of chorus wave packets: Comparison between observations and wave generation models, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 126, e2021JA029330, doi:10.1029/2021JA029330.
- (6) Nakamura, Y., N. Terada, H. Nakagawa, S. Sakai, S. Hiruba, R. Kataoka, K. Murase and F. Leblanc, Modeling of SEP induced auroral emission at Mars: Contribution of precipitating protons and effects of crustal fields, EGU 2021 meeting, Online, April, 2021.
- (7) Ishizawa, G., Y. Katoh, M. Kitahara, Evaluation of nonlinear effects in the pitch angle scattering process of energetic electrons into the loss cone by coherent whistler-mode waves, URSI GASS 2021, Rome and online, 28 August - 4 September 2021.
- (8) Terada, N., K. Terada, S. Sakai, R. Sakata, and K. Seki, DSMC and MHD simulations of atmospheric escape from a terrestrial planet, 5th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2021), Online, 27 September, 2021. (招待講演)
- (9) Sakai, S., K. Seki, N. Terada, H. Shinagawa, R. Sakata, T. Tanaka, and Y. Ebihara, Impact of the CME-like IMF rotation on ion escape mechanisms from a Mars-like planet under weak intrinsic magnetic field condition, AGU Fall Meeting, SM15A-1955, New Orleans, LA, USA / Online, 13 December 2021.
- (10) Nakamura, Y., N. Terada, F. Leblanc, A. Rahmati, H. Nakagawa, S. Sakai, S. Hiruba, R. Kataoka, and K. Murase, Modeling of SEP induced auroral emission: Contribution of MeV protons, AGU Fall meeting 2021, December, 2021.
- (11) Takumi Kera, Hiroaki Matsui, Masaki Matsushima, and Yuto Katoh, The generation mechanism of the equatorially antisymmetric flow associated with dipole reversal in geodynamo simulation, AGU Fall Meeting 2021, New Orleans & Online, 13-17 December 2021.
- (12) 堺正太郎, 関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之, 坂田遼弥, 田中高史, 海老原祐輔, Ion escape mechanism from a Mars-like planet under weak intrinsic magnetic field conditions: Dependence of

- IMF clock angle, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, PCG18-05, オンライン, 2021 年 6 月 3 日.
- (13) Nakamura, Y., N. Terada, F. Leblanc, H. Nakagawa, S. Sakai, S. Hiruba, R. Kataoka, and K. Murase, Modeling of diffuse auroral emissions at Mars: Contribution of precipitating protons and mirror effects of crustal fields, JpGU meeting 2021, online, June, 2021.
- (14) Nakamura, Y., N. Terada, F. Leblanc, H. Nakagawa, S. Sakai, S. Hiruba, R. Kataoka, and K. Murase, Impacts of solar energetic particles at Mars: Global diffuse aurora and atmospheric chemistry, JpGU meeting 2021, Online, June, 2021. (招待講演)
- (15) Terada, N., K. Terada, H. Fujiwara, and M. Ikoma, DSMC simulations of slow hydrodynamic escape from Earth-like and Mars-like planets, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, オンライン, 2021 年 6 月 3 日.
- (16) 解良拓海, 松井宏晃, 松島政貴, 加藤雄人, 極性反転を伴う地球ダイナモモデルにおける磁場や速度の各赤道対称成分の間でのエネルギー輸送の解析, 第 150 回 地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, オンライン, 11 月 1 日-4 日, 2021 年.
- (17) 磯野航, 加藤雄人, 川面洋平, 熊本篤志, 地球内部磁気圏における Toroidal mode ULF wave による高エネルギー電子のフラックス増強のシミュレーション研究, 第 150 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会および講演会, オンライン, 11 月 1 日-4 日, 2021 年.
- (18) Nakamura, Y., N. Terada, F. Leblanc, A. Rahmati, R. Kataoka, K. Murase, H. Nakagawa, S. Sakai, and S. Hiruba, Modeling of SEP-induced auroral emission: Global diffuse aurora on Mars and polar-glow aurora on Earth, The 12th Symposium on Polar Science, Online, November, 2021. (招待講演)
- (19) 寺田直樹, 月惑星圏探査と基盤ソフトウェア開発, 惑星科学と情報基盤シンポジウム, オンライン, 2021 年 11 月 9 日.
- (20) Nakamura, Y., N. Terada, F. Leblanc, H. Nakagawa, S. Sakai, S. Hiruba, R. Kataoka, and K. Murase, Impacts of solar energetic particles on planetary atmospheres: Auroral emissions and changes in atmospheric chemical composition, Symposium on Planetary Science 2022, Online, Japan, February, 2022. (招待講演)
- (21) 堺正太郎, 関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之, 坂田遼弥, 田中高史, 海老原祐輔, Enhanced ion escape rate during the CME-like rotation under weak intrinsic magnetic field conditions on a Mars-like planet, 第 23 回惑星圏研究会, 0209-AM3, オンライン, 2022 年 2 月 9 日.
- (22) 寺田直樹, 惑星大気流出と太陽系惑星ミッション, 太陽研連シンポジウム, オンライン, 2022 年 2 月 14 日. (招待講演)
- (23) 寺田直樹, 惑星大気散逸・進化シミュレーションの現状と今後の展望, 太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望, オンライン, 2022 年 3 月 29 日. (招待講演)