

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、^{3,1}川面洋平、¹堺正太郎

¹黒田剛史、⁴梅田隆行、⁵堀田英之、⁶永井享、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 宇都宮大学 データサイエンス経営学部

⁴ 北海道大学 情報基盤センター、⁵ 名古屋大学 宇宙地球環境研究所、⁶ 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。

2024 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) 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、超高解像度の磁気流体力学シミュレーションを行った。2023 年度は降着円盤乱流の慣性領域を解像することに成功したが、本年度は長時間計算を行い、慣性領域が解像された状態では乱流のさまざまな特徴がどう変化するかを調査した。特に、 α と呼ばれる降着円盤の各運動輸送係数の計算を行った。過去の研究では、zero-net-flux と呼ばれる降着円盤の鉛直方向に平均磁束がない初期条件では、(1) α の値が数値解像度に対して収束しないこと、(2) 粘性係数と電気抵抗の比である磁気プラントル数 P_m が 1 以下のときには乱流がクエンチしてしまうことが知られていた。今年度の計算では、数値解像度を非常にあげると $P_m = 1$ でも乱流がクエンチしないことが分かった。つまり、(2)の知見は単にこれまでの数値解像度が不十分であったということを意味している。現在、長時間計算を更に進め(1)の解決に取り組んでいる。

(b) 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。前年度までに本研究が明らかとした、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逆転に伴う赤道反対称流のエネルギー増加に最も大きな役割を果たす結果について追加計算を行い、磁極反転期には北半球では東向き、南半球では西向きと、南北で異なる方向の対流構造が卓越することを明らかとした。

(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、酸化的炭素種を含む原始地球大気においても光化学的に安定な一酸化炭素が強力な放射冷却源として機能し、流体力学的散逸を著しく抑制することを明らかにした。加えて、水素の酸化により生成される水酸基ラジカルや水蒸気が放射冷却効果を促進することを示した。また、火星磁気圏グローバル MHD モデルのモデル比較を行い、我々が新規開発したモデル MAESTRO が磁気圏構造をよく再現することを示すとともに、数値スキームなどの違いがイオン流出率に与える影響を示唆した。汎用光化学モデル PROTEUS を用いて火星大気における H_2CO の生成率と炭素同位体比およびそれらの長期変遷を評価し、初期火星大気中で生命材料

分子の原料となる H_2CO が継続的に生成されていたことを示した。火星全球気候モデルに浅部地下への水輸送過程を組み込み、レゴリスの吸着係数の全球的なばらつきが地下水分布の不均一をもたらすことを示した。移動中心ビンスキームを導入した金星の雲微物理モデルを新たに開発し、従来よりも 6 倍高い計算効率で金星雲観測構造を再現することに成功した。

(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磁気流体波が高エネルギー電子に与える影響を理解することを目的として計算機実験を実施した。磁気流体波が分散性を示し運動論的 Alfvén 波の性質を持つ場合に着目して、テスト粒子解析を行い、波動による共鳴電子の捕捉過程とそれに続く高効率な電子加速過程の存在を明らかにした。また、磁気流体波が磁気圏内に作る磁場強度とプラズマ密度の空間構造が、ホイッスラーモード波動の導波管の役割を果たし得ることを光線追跡計算により明らかにした。以上の成果をそれぞれ論文にまとめ公表した。

成果発表:

論文(いずれも査読付)

- (1) Sakata, R., K. Seki, N. Terada, S. Sakai, and H. Shinagawa, Effects of an intrinsic magnetic field on ion escape from ancient Mars based on MAESTRO multifluid MHD simulations, J. Geophys. Res.: Space Physics, 129, e2023JA032320, doi:10.1029/2023JA032320, May 2024.
- (2) Kawazura, Y. and Kimura, S. S., Inertial range of magnetorotational turbulence, Science Advances 10, eadp4965, doi:10.1126/sciadv.adp4965, August 2024.
- (3) Tachi, K. and Y. Katoh, Formation of a magnetic duct by the compressional component of ULF oscillation: a ray tracing study of whistler-mode wave propagation, Earth Planets Space, 76, 166, doi:10.1186/s40623-024-02109-1, December 2024.
- (4) Kobayashi, M., A. Kamada, T. Kuroda, H. Kurokawa, S. Aoki, H. Nakagawa, and N. Terada, Large water inventory in highly adsorptive regolith simulated by a Mars global climate model, J. Geophys. Res.: Planets, 130, e2024JE008697, doi:10.1029/2024JE008697, February 2025.
- (5) Saito, K., Y. Katoh, Y. Kawazura, and A. Kumamoto, Nonlinear dynamics and auroral acceleration processes of electrons driven by kinetic Alfvén waves in the magnetosphere, J. Geophys. Res.: Space Physics, 130, e2024JA033469, doi:10.1029/2024JA033469, March 2025.

学会発表

- (1) Tachi, K., and Y. Katoh, Propagation of whistler-mode waves in the magnetic duct caused by the compressional component of ULF wave oscillation, EGU General Assembly, Vienna, 14-19 April, 2024.
- (2) Katoh, Y., P. S. Rosendahl, Y. Ogawa, Y. Hiraki, and H. Tadokoro, Role of the mirror force on the collision rate due to relativistic electron precipitation, EGU General Assembly, Vienna, 14-19 April, 2024.
- (3) Katoh, Y., Properties of the generation and propagation of whistler-mode chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere, ISSS-15 & IPELS-16, Garching, Germany, 1-9 August, 2024. (Invited)
- (4) Saito, K., Y. Katoh, Y. Kawazura, and A. Kumamoto, Test particle simulation for electrons accelerated by kinetic Alfvén waves and precipitating into the ionosphere, ISSS-15 & IPELS-16, Garching, Germany, 1-9 August, 2024.
- (5) Isono, K., A. Yoshikawa, Y. Katoh, Y. Kawazura, and A. Kumamoto, Curvilinear magnetic fields and ULF waves: A local frame approach to linear MHD waves analysis, ISSS-15 & IPELS-16, Garching, Germany, 1-9 August, 2024.
- (6) Isono, K., A. Yoshikawa, Y. Katoh, Y. Kawazura, and A. Kumamoto, Local frame approach to analyze the structure of magnetic field lines in the Earth's magnetosphere, AGU Fall Meeting 2024, Washington D. C., 9-13 December 2024.

- (7) Saito, K., Y. Katoh, Y. Kawazura, A. Kumamoto,
Theoretical and numerical study of the nonlinear
motion of electrons accelerated by kinetic Alfvén
waves in the magnetosphere, ITER International
School 2024, 9-13 December 2024.
- (8) 齋藤 幸碩, 加藤 雄人, 川面 洋平, 熊本 篤志,
地球磁気圏における kinetic Alfvén wave による
効率的な電子加速過程の理論・数値的検討, 地球
電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会, 立川,
23-27 November 2024.
- (9) 坂田 遼弥, 関 華奈子, 寺田 直樹, 堺 正太郎,
品川 裕之, Cubed sphere 格子を用いた 3 次元グロ
ーバル多流体モデルによる火星のイオン散逸過
程の研究, 名古屋大学宇宙地球環境研究所研究
集会「STE シミュレーション研究会：次世代太
陽地球惑星系探査に向けて」, 仙台, 23-25
December, 2024.
- (10) 川村 峻介, 三宅 洋平, 寺田 直樹, 二次元火星
上層大気 DSMC シミュレーションにおける動的
負荷分散法の検討, 名古屋大学宇宙地球環境研
究所研究集会「STE シミュレーション研究会：
次世代太陽地球惑星系探査に向けて」, 仙台,
23-25 December, 2024.
- (11) 寺田 直樹, セミディスクリート中心スキームを
用いた MHD および多流体 MHD コードの高次精
度化, 名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会
「STE シミュレーション研究会：次世代太陽地
球惑星系探査に向けて」, 仙台, 23-25 December,
2024.