

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、
4梅田隆行、5永井享、1相澤紗絵、1西田有輝

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。

2019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、熱対流が駆動するダイナモにより形成される磁場の構造について、外核の境界条件を温度固定とした場合と熱流量固定とした場合の違いに着目して解析を行った。その結果、初期条件として与えるレイリー数について、熱流量固定とした境界条件ではダイナモが発生し得るパラメータ範囲が狭くなること、ダイポール成分が卓越するパラメータ範囲も同様に限定的となることを明らかとした。この傾向は、内核の大きさが現在よりも小さい初期地球環境を模擬した計算において特に顕著であることが示された。

(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 1 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。

(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、地球類似惑星大気のフルパーティクル DSMC モデルを用いて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、従来の流体モデルによる見積りでは外圏底付近における断熱冷却効果が過大評価されており、その為に DSMC モデルと比べて数倍程度小さな散逸率となることを明らかにした。また、多成分 MHD シミュレーションを用いて、太古の火星における分子イオン散逸率への固有磁場強度の影響を調査した。その結果、太陽風動圧よりも弱い固有磁場が存在する場合は固有磁場強度に応じてカuspからの分子イオン散逸率が上昇するのに対して、動圧よりも強い固有磁場が存在する場合は分子イオンの散逸経路が変化して散逸率が大きく減少することを示した。さらに、太古の火星における大気圏-水圏結合モデルを用いて、二酸化炭素と水素分子による温室効果によって、当時の火星は冷涼・湿潤な気候をもちうることを示し、現在の火星に残る流水地形を形成できることを明らかにした。

(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、テスト粒子計算を実施することにより明らかとした。また、コーラス放射の発生過程を再現するシミュレーション結果から明らかとなった波動の振幅とスペクトル特性との関連について、NASAのTHEMIS衛星により観測されたコーラス放射の統計解析結果との比較を行い、観測結果を矛盾なく説明できることを示した。

成果発表:

- (1) Kitahara, M., and Y. Katoh, Anomalous Trapping of Low Pitch Angle Electrons by Coherent Whistler Mode Waves, *Journal of Geophysical Research - Space Physics*, Vol. 124, pp.5568-5583, doi:10.1029/2019JA026493, 2019. [謝辞記載あり]
- (2) Shue, J. - H., Y. Nariyuki, Y. Katoh, S. Saito, Y. Kasahara, Y.-K. Hsieh, S. Matsuda, and Y. Goto, A systematic study in characteristics of lower band rising - tone chorus elements, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 124, 9003 - 9016. doi:10.1029/2019JA027368, 2019.
- (3) Sakata, R., K. Seki, S. Sakai, N. Terada, H. Shinagawa, and T. Tanaka, Effects of an intrinsic magnetic field on ion loss from ancient Mars based on multispecies MHD simulations, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 125, e2019JA026945, doi:10.1029/2019JA026945, 2020.
- (4) Kamada, A., T. Kuroda, Y. Kasaba, N. Terada, H. Nakagawa, and K. Toriumi, A coupled atmosphere-hydrosphere global climate model of early Mars: A 'cool and wet' scenario for the formation of water channels, *Icarus*, Vol. 338, 113567, doi:10.1016/j.icarus.2019.113567, 2020.
- (5) Katoh, Y., Theory and computer simulations on whistler-mode chorus emissions and related wave-particle interactions in planetary magnetospheres, 2019 URSI-Japan Radio Science Meeting, Tokyo, 2019年9月 [招待講演]
- (6) Katoh, Y. and Y. Omura, Simulation study of the whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere, 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Hefei, China, 2019年11月 [招待講演]
- (7) Katoh, Y., K. Fukazawa, T. Nanri, and Y. Miyake, Cross-reference simulations by scalable communication library for the study of wave-particle interactions in planetary magnetospheres, 日本地球惑星科学連合2019年大会, 千葉, 2019年5月
- (8) 西田 有輝, 加藤 雄人, 松井 宏晃, 松島 政貴, 熊本 篤志, Dependence of the dipole component dominancy on the Rayleigh number and inner core size in geodynamo simulations, 日本地球惑星科学連合2019年大会, 千葉, 2019年5月.
- (9) 寺田 直樹, 寺田 香織, 藤原 均, 遅進流体力学的散逸の DSMC シミュレーション, STE シミュレーション研究会: 計算プラズマ物理の新潮流, 広島, 2019年9月
- (10) Terada, K., N. Terada, and H. Fujiwara, DSMC simulation of slow hydrodynamic escape from Earth-like exoplanets, Planet2/RESCEU Symposium 2019, From Protoplanetary Disks through Planetary System Architecture to Planetary Atmospheres and Habitability, Okinawa, 2019年10月
- (11) 西田 有輝, 加藤 雄人, 松井 宏晃, 松島 政貴, 熊本 篤志, 異なる内核半径における地球ダイナモに対する温度勾配に関する境界条件の効果について, SGEPS 2019, 熊本, 2019年10月.
- (12) Katoh, Y., L. Chen, ULF wave modulation of the whistler-mode chorus generation in the inner magnetosphere, 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 熊本, 2019年10月.
- (13) Kawazura, Y., A. A. Schekochihin, M. A. Barnes, W. Dorland, S. A. Balbus, Alfvénic vs compressive fluctuations in turbulence driven by MRI, Arcetri 2019 Workshop on Plasma Astrophysics, Florence, Italy, 2019年10月
- (14) Katoh, Y. and L. Chen, Modulation of the whistler-mode chorus generation by ULF waves in

the inner magnetosphere, American Geophysical Union 2019 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2019 年 12 月

(15) Katoh, Y., K. Fukazawa, T. Nanri, Y. Miyake, Cross-Reference Simulation by Code-To-Code Adapter (CoToCoA) Library for the Study of Planetary Magnetospheres, High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPC Asia 2020), Fukuoka, Japan, 2020 年 1 月

(16) 川面洋平, A. A. Schekochihin, M. A. Barnes, W. Dorland, S. A. Balbus, MRI 乱流における Alfvén 的揺動と圧縮的揺動の散逸比, 日本物理学会第 75 回年次大会, 名古屋, 2020 年 3 月