

# 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。

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、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、双極子型磁場成分が卓越する条件を詳細に調べた。解析にあたっては、外核中で維持される磁場強度のスペクトルについて着目して、シミュレーション結果により得られた双極子成分と、非双極子成分の磁場パワースペクトルを外挿して予測される双極子成分の比を用いることにより、双極子成分の卓越性を示す手法を提案した。提案した手法をレイリー数の異なる計算結果に適用して、従来用いられてきた指標と併用することにより、双極子成分の卓越性を定量的かつ明瞭に判別することが可能であることを示した。

## (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。

## (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、地球類似惑星および火星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、従来の流体モデルでは外圏底付近の断熱冷却効果が過大評価されており、地球類似惑星では DSMC モデルは数倍程度大き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、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) 方向の影響を調査した。その結果、固有磁場と平行な IMF の場合、分子イオン散逸率がパークースパイラルや反平行磁場よりも大きく減少することを示した。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-水圏結合モデルに河川土砂モデルを組み込み、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。火星大気の長期進化を記述する光化学モデルを開発し、大気の酸化還元状態の変動時間スケールと CO 大気形成の可能性を示した。

## (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、テスト粒子計算を実施することにより明らかとした。非線形波動粒子相互作用の理論モデルとの比較に基づいて、電子のピッチ角に変化をもたらす個々の物理プロセスを考察してタイプ分けを行い、物理素過程の切り分けを行うことに成功した。その結果、理論研究の示す特異なピッチ角散乱過程は確かに生じる一方で、ピッチ角を著しく減少させる非線形過程も同時に進行して、結果的に高エネルギー電子の大気への降下量が増加して、観測と整合する結果となることを定量的に示した。

#### 成果発表:

- (1) 石澤元気, 加藤雄人, 北原理弘, 熊本篤志, 木村智樹, 川面洋平, Study of the Pitch Angle Scattering of Small Pitch Angle Electrons by Coherent Whistler-Mode Waves, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online, 2020年7月12-16日.
- (2) 解良拓海, 加藤雄人, 西田有輝, 松井宏晃, 磁極逆転の存在する数値ダイナモモデルに於ける速度及び磁場の赤道対称性の解析, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online, 2020年7月12-16日.
- (3) Kera, T., Y. Nishida, H. Matsui, and Y. Katoh, Investigation of equatorial symmetry of flow and magnetic field in reversal and non-reversal dynamo model, Study of the Earth's Deep Interior 2020 Online Streaming Platform, 1-31 October 2020.
- (4) 西田有輝, 加藤雄人, 松井宏晃, 松島政貴, 熊本篤志, Effects of thermal boundary conditions for cooling from the CMB on geodynamo with various Rayleigh numbers and inner core radii, 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, Online, 11月1日-4日, 2020年.
- (5) 解良拓海, 加藤雄人, 西田有輝, 熊本篤志, 松井宏晃, Study of the equatorial symmetry of flow and magnetic field in reversal and non-reversal dynamo models, 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, Online, 11月1日-4日, 2020年.
- (6) 石澤元気, 加藤雄人, 北原理弘, 熊本篤志, 木村智樹, 川面洋平, Study of the nonlinear scattering of energetic electrons into the loss cone by coherent whistler-mode waves, 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, Online, 11月1日-4日, 2020年.
- (7) Ishizawa, G., Y. Katoh, M. Kitahara, A. Kumamoto, T. Kimura, Y. Kawazura, Study of the dynamics of energetic electrons scattered into the loss cone by coherent whistler-mode waves, AGU Fall Meeting 2020, Online, 1-17 December 2020.
- (8) 川面洋平, A. Schekochihin, M. A. Barnes, W. Dorland, S. A. Balbus, MRI乱流におけるAlfven的揺動と圧縮的揺動の散逸比, 日本物理学会春期大会第75回年次大会, 2020年3月16~19日
- (9) 川面洋平, A. Schekochihin, M. Barnes, S. Balbus, W. Dorland, ほぼトロイダルな外部磁場を持つMRI乱流におけるAlfvenic揺動と圧縮性揺動の比, 高エネルギー宇宙物理学研究会2020, 2020年12月14, 17日
- (10) Sakai, S., K. Seki, N. Terada, H. Shinagawa, R. Sakata, T. Tanaka, and Y. Ebihara, Effects of the IMF direction on atmospheric escape from a Mars-like planet under weak intrinsic magnetic field conditions, Journal of Geophysical Research, Vol. 126, e2020JA028485, doi:10.1029/2020JA028485, 2021.
- (11) Koyama, S., N. Terada, H. Nakagawa, T. Kuroda, and Y. Sekine, Stability of Atmospheric Redox States of Early Mars Inferred from Time Response of the Regulation of H and O Losses, The Astrophysical Journal, Vol. 912, 135(11pp), doi:10.3847/1538-4357/abf0ac, 2021.
- (12) Aizawa, S., J. M. Raines, D. Delcourt, N. Terada, and N. André, MESSENGER observations of planetary ion characteristics in the vicinity of Kelvin-Helmholtz vortices at Mercury, Journal of Geophysical Research: Space Physics, Vol. 125, e2020JA027871, doi:10.1029/2020JA027871, 2020.

- (13) Aizawa, S., D. Delcourt, N. Terada, and N. André,  
Statistical study of non-adiabatic energization and  
transport in Kelvin-Helmholtz vortices at mercury,  
*Planetary and Space Science*, Vol. 193, 105079,  
doi:10.1016/j.pss.2020.105079, 2020.