

太古火星の電離大気散逸に対し太陽 XUV 放射、太陽風および惑星固有磁場が与える影響

代表研究者：坂田遼弥¹

共同研究者：関華奈子²、三好由純³

(1:東北大学大学院理学研究科、2:東京大学大学院理学系研究科、3:名古屋大学宇宙地球環境研究所)

研究の概要

太古火星は当時の太陽からの強力な X 線・極端紫外線放射 (XUV 放射) や太陽風に曝することで上層電離大気の散逸 (イオン散逸) が非常に活発に起きていたと推測されている。一方で現在の火星表面に残る地殻磁場の分布は太古火星が全球的な固有磁場を保持していた可能性を示唆しており、太古火星の電離圏・磁気圏環境やイオン散逸過程に大きな影響を与えていた可能性がある。本研究課題は、XUV 放射・太陽風・固有磁場など現在とは大きく異なっていた各種パラメータがイオン散逸に対して与える影響を検証し、同時期に起きたとされる大気喪失および気候変動への影響について評価することを目的としている。

本研究課題で用いるのは 3 次元グローバル多流体 MHD モデル MAESTRO (Sakata et al., 2024) を用いた数値シミュレーションである。このモデルでは磁場の誘導方程式に加えてイオン種ごとの連続の式・運動方程式・エネルギー方程式を解くことでイオン種ごとの運動、特に太陽風起源のイオンと惑星起源のイオンの運動を区別して検証することを可能としている。また電離圏で重要な物理過程 (光電離、電荷交換、電子衝突電離、化学反応、衝突) を実装しているほか、光電子による加熱や CO₂ 大気との非弾性衝突による冷却を考慮した電子の圧力方程式によってより現実に近い電離圏構造の再現が可能となっている。水平方向のグリッドとしては同一の局所座標系を持つ 6 つの面で構成されている Cubed sphere グリッドを、動径方向には高度 100 km から 40 惑星半径までの非一様なグリッドを採用している。スーパーコンピュータ「不老」上での計算にあたっては MPI を用いて 480 コア (動径方向 80 分割、水平方向 6 分割) による並列計算を実施した。

研究成果

本年度は 3 次元グローバル多流体 MHD モデル MAESTRO の実装の詳細および太古火星の固有磁場がイオン散逸に与えた影響についての検証をまとめた査読付き主著論文 (Sakata et al. 2024) を出版したほか、さらに強い固有磁場を持つ太古火星を想定したシミュレーションにむけての数値モデルの改良に主に取り組んだ。強い固有磁場を想定した MHD シミュレーションにおいて問題となるアルヴェーン速度の増大に伴う時間刻み幅の制限を緩

和するため、ボリス修正 (Boris, 1970; Gombosi et al., 2002)とよばれる方程式系の修正を MAESTRO に実装した。ボリス修正実装の検証として、計算量が比較的少ない多成分 MHD シミュレーションを用いて赤道表面での強度が 10000 nT となる双極子磁場を想定した計算を行った。その結果、ボリス修正を適用しなかったケースと比較して準平衡状態に達するまでに必要な計算時間を約半分にまで抑えることができた。一方でボリス修正を適用したケースでは、電離圏からのアウトフローが弱くなり分子イオンの散逸率が約 45%減少する副作用が生じた。結果に影響を与えうる要因を検証したところ、計算スキームに含まれる数値粘性がボリス修正からの影響を受けたことによってアウトフローの強度が変化している可能性が明らかになった。以上の研究成果については国際学会である American Geophysical Union Fall Meeting 2024 にて発表を行った。これらの成果を踏まえて、MAESTRO の数値スキームの高精度化による数値粘性の減少によってボリス修正による副作用を抑制することを目指しており、使用する数値スキームの検討およびテスト計算を進めている。

成果発表

[査読付き論文]

1. Sakata, R., Seki, K., Terada, N., Sakai, S., & Shinagawa, H. (2024). Effects of an Intrinsic Magnetic Field on Ion Escape From Ancient Mars Based on MAESTRO Multifluid MHD Simulations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129(5). 2024 年 5 月 2 日. <https://doi.org/10.1029/2023JA032320>

[学会口頭発表]

1. R. Sakata, K. Seki, N. Terada, S. Sakai, H. Shinagawa, Global MHD simulation of ion escape from strongly magnetized Mars, American Geophysical Union Fall Meeting 2024, 2024 年 12 月 9 日, P11F-3031.