

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¹、梅田隆行²

(1:東京大学大学院理学系研究科、2: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) や太陽風に曝されており、上層待機の散逸、特に電離大気の散逸 (イオン散逸) が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からは、同時期の太古火星が全球的な固有磁場を保持していた可能性が示唆されており、太古火星の電離圏・磁気圏環境やイオン散逸過程は現在から大きく異なっていた可能性がある。本研究は、太古火星における固有磁場の有無や強度がイオン散逸に対して与える影響や、それに伴う同時期に起きたとされる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。

本年度は、前年度まで用いてきたグローバル多成分 MHD (磁気流体力学) モデル REPPU-Planets (Terada et al., JGR, 2009; Sakata et al., 2020) に加え、新たに開発したグローバル多流体 MHD モデルによる数値シミュレーションに基づいた検証を行った。多流体 MHD 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形になっている。多成分 MHD モデルと比較して運動方程式とエネルギー方程式がイオン種ごとに独立していることによって、異なるイオン種間、特に太陽風イオンと惑星イオンとの間の運動の違いを区別して記述することが可能となっている。電離圏で重要となる物理過程 (光電離、電荷交換、電子衝突電離、化学反応、衝突) は REPPU-Planets に準拠して実装している。また、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組み入れた電子の圧力方程式も実装して電子温度について独立して解いている。計算グリッドとしてはほぼ一様なグリッドと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 グリッドを採用した。計算領域は高度 100 km から 40 惑星半径までに設定し、動径方向には 80 分割、水平方向には Cubed sphere グリッドの 6 つの面ごとに分割して MPI による並列化を行った。

研究成果

昨年度から行ってきた REPPU-Planets によるシミュレーションに基づいた研究成果についての査読付き論文を発表した[1]。固有磁場によるイオン散逸への影響は惑星表面での固有磁場による磁気圧 (P_{dipole}) と太陽風動圧 (P_{dyn}) の比が 0.1 となる前後で異なることや、電離

圏アウトフローが主な散逸過程である分子イオンの散逸率に対する影響が特に大きいことを明らかにした。また、多流体 MHD モデルを用いて Sakata et al. (2022, JGR)と同様の太陽 XUV・太陽風条件のもとで固有磁場強度の異なる 6 ケースの計算を行った。その際、多流体 MHD シミュレーションおよび多成分 MHD シミュレーションを同条件下で行い、固有磁場の影響が多流体化によってどのように変化するか検証した。全ての固有磁場ケースにおいて分子イオン (O_2^+ , CO_2^+) の散逸率が増加しており、多成分 MHD のもとでは過小評価されていた電離圏アウトフローが多流体化によってより正確に評価できるようになったことが示された。一方で O^+ の散逸率には固有磁場強度によって異なる影響が見られた。固有磁場が無い・弱いケースでは、多流体化によって太陽風電場による加速が考慮されるようになったことによってイオンピックアップ散逸が抑制され散逸率がわずかに減少した。しかし固有磁場が強いケースでは主な散逸過程が電離圏アウトフローになり、分子イオンと同様に O^+ の散逸率が多成分 MHD シミュレーション時と比較して増加した。現在、これらの成果についての論文を執筆中である。

成果発表

[査読付き論文]

1. Sakata, R., Seki, K., Sakai, S., Terada, N., Shinagawa, H., & Tanaka, T. (2022). Multispecies MHD study of ion escape at ancient Mars: Effects of an intrinsic magnetic field and solar XUV radiation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030427. <https://doi.org/10.1029/2022JA030427>

[学会口頭発表]

1. 坂田遼弥, 関華奈子, 堺正太郎, 寺田直樹, 品川裕之, Effects of an intrinsic magnetic field on ion escape from Mars based on newly developed multifluid MHD model simulations, Symposium on Planetary Sciences, 2023 年 2 月, 0221-AM6
2. 坂田遼弥, 関華奈子, 堺正太郎, 寺田直樹, 品川裕之, Multifluid MHD simulation of the effects of a dipole field on ion escape at ancient Mars, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2022 年秋学会, 2022 年 11 月, R009-22
3. 坂田遼弥, 関華奈子, 堺正太郎, 寺田直樹, 品川裕之, 田中高史, 多成分 MHD による太古火星におけるイオン散逸の研究: 固有磁場と太陽 XUV 放射の影響, 日本惑星科学会 2022 年秋季講演会, 2022 年 9 月, SA-07-05
4. 坂田遼弥, 関華奈子, 堺正太郎, 寺田直樹, 品川裕之, Simulations of ion escape at ancient Mars based on a new multifluid MHD model with the cubed sphere, 日本地球惑星科学連合大会, 2022 年 5 月, PEM16-12