

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、今田晋亮¹

(1:東京大学大学院理学系研究科)

研究目的・手法・内容

約 40~35 億年前の太古火星では厚い大気の喪失に伴う温室効果の消失によって大規模な気候変動が起きたと考えられている。当時の太陽は現在よりも強力な X 線・極端紫外線放射 (XUV 放射) や太陽風を発していたため、太古火星では上層大気の加熱や電離による電離大気の散逸 (イオン散逸) が活発に起きていたと推測される。一方で、現在の火星地表面の残留磁場の分布から太古火星が全球的な固有磁場を保持していたことが示唆されており、太古火星の電離圏・磁気圏環境やイオン散逸過程は現在とは大きく異なっていた可能性がある。本研究では、グローバル多成分磁気流体力学 (MHD) シミュレーションに基づいて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について検証した。

研究手法・内容

本研究ではグローバル多成分 MHD モデル REPPU-Planets (Terada et al., 2009, JGR; Sakata et al., 2020, JGR) による数値シミュレーションに基づいて検証を行った。このモデルは電離圏から磁気圏までを包括的に解くグローバルモデルであり、計算領域が広大であることから計算領域の分割と Message Passing Interface (MPI) による並列化を行っている。

先行研究 (Sakata et al., 2020, JGR) では約 45 億年前に相当する非常に強い太陽風・太陽 XUV 条件下において固有磁場の影響を検証した。本研究ではより弱い約 35 億年のコロナ質量放出イベント時の太陽風・太陽 XUV 条件で同様の検証を行い、固有磁場がイオン散逸に与える影響が太陽風や太陽 XUV 放射の条件によってどのように変化するかを調べた。具体的には、密度 700 cm^{-3} 、速度 1400 km s^{-1} 、惑星間磁場強度 20 nT の太陽風を仮定したほか、現在の 50 倍または 10 倍の太陽 XUV 放射を仮定した。太陽風・太陽 XUV 条件を固定したうえで双極子磁場の強度が異なる複数のケースをそれぞれ計算し、結果を比較した。

研究成果

本研究および先行研究 (Sakata et al., 2020, JGR) における O^+ 、 O_2^+ 、 CO_2^+ それぞれのイオンの散逸率と固有磁場強度の関係をまとめたところ、赤道表面での固有磁場による磁気圧 (P_B)

と太陽風動圧 (P_{dyn})の比 $P_{\text{B}}/P_{\text{dyn}}$ によって散逸率の振る舞いが異なることが明らかになった。 $P_{\text{B}}/P_{\text{dyn}}$ が 0.1 より小さい場合では、固有磁場強度とともに分子イオン (O_2^+ , CO_2^+)の散逸率が最大で 8 倍まで上昇した一方で、 O^+ の散逸率にはほとんど変化が見られなかった。このとき、固有磁場と惑星間空間磁場との間の磁気リコネクションによって形成された「開いた磁力線」(磁力線の一端が惑星電離圏に、もう一端が惑星間空間に繋がった磁力線)を通じて電離圏からのイオン流出が促進されることで分子イオンの散逸率が上昇したと考えられる。 $P_{\text{B}}/P_{\text{dyn}}$ が 0.1 より大きい場合では O^+ , O_2^+ , CO_2^+ いずれのイオンでも散逸率が 1 桁以上減少した。固有磁場が強くなることで磁気圏界面が押し上げられ、電離圏からのイオン流出やイオンピックアップがより惑星から離れた位置で起こるようになったためだと考えられる。いずれの場合においても固有磁場の影響は電離圏からのイオン流出が主な散逸過程となる分子イオンで顕著だった。電離圏のイオン流出は主に高緯度領域から発生していた。磁気圏界面に対する実効的な太陽風動圧は太陽天頂角とともに減少する一方で、双極子磁場の強度は緯度とともに増加する。そのため赤道表面での圧力比である $P_{\text{B}}/P_{\text{dyn}}$ が 1 以下であっても、電離圏イオン流出が起きている高緯度領域(緯度 60~70 度付近)では実効的な太陽風動圧と固有磁場の磁気圧との圧力の釣り合いが取れる強度に達していた。このことから、電離圏からのイオン流出が発生する高緯度領域における太陽風と固有磁場の圧力バランスが固有磁場の影響を決定づける要素であることが明らかになった。これらの研究成果をまとめた学術論文が現在査読中である。

成果発表

[学会発表]

1. Sakata, R., Seki, K., Sakai, S., Terada, N., Shinagawa, H., & Tanaka, T., Roles of an intrinsic magnetic field and solar conditions in ion escape at Mars and its implications for habitability, Symposium on Planetary Sciences, オンライン, 2022 年 2 月、口頭
2. Sakata, R., Seki, K., Sakai, S., Terada, N., Shinagawa, H., & Tanaka, T., Ion escape from ancient Mars during CME-like events: Dependence on the planetary intrinsic magnetic field and the solar conditions, American Geophysical Union Fall Meeting 2021, オンライン, 2021 年 12 月、ポスター
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, 太古火星におけるイオン散逸の固有磁場強度依存性, 日本惑星科学会 2021 年秋季講演会、オンライン、2021 年 9 月、O13-05、口頭