

多流体シミュレーションによる火星の惑星イオン散逸過程の研究

Study on planetary ion escape from Mars based on multifluid simulations

研究代表者：坂田遼弥（東北大学理学研究科）

研究分担者：寺田直樹（東北大学理学研究科）

担当：議論

関華奈子（東京大学理学系研究科）

担当：議論

研究目的 (Research Objective):

太古の火星は温暖な気候を維持するのに十分な厚い大気を保持していたが、現在に至るまでに大気の大部分を喪失してしまっている。太古の火星は現在よりも強力な太陽 X 線・極端紫外線放射 (XUV 放射) に曝され上層大気の加熱・電離が活発に起きていたことから、宇宙空間への電離大気の散逸 (イオン散逸) が大気喪失の原因の一つとして着目されている。現在の火星では NASA の MAVEN など複数の周回探査機による観測や MHD シミュレーションをはじめとした数値計算によって、イオン散逸過程やそれを支配する要素についての研究が精力的になされている。しかし従来の研究では火星電離圏の主要成分である酸素イオン (O^+ , O_2^+ , CO_2^+) に焦点が当てられており、酸素イオンと近い質量電荷比を持っているために観測が困難である炭素や窒素を含むイオン (C^+ , N^+ , CO^+ , NO^+ , N_2^+ , HCO^+) の散逸過程に対する理解は進んでこなかった。本課題では新たに開発したグローバル多流体モデル MAESTRO (Sakata et al., 2024) を用いて、太古火星および現在火星における惑星イオンの散逸過程を検証する。本年度は特に酸素イオンだけでなく炭素や窒素を含むイオンの散逸過程について重点的に検証する。

計算手法 (Computational Aspects):

本課題ではグローバル多流体モデル MAESTRO (Sakata et al., 2024) を用いた数値シミュレーションに基づいて検証を行った。このモデルはイオン種ごとの連続の式・運動方程式・エネルギー方程式および磁場の誘導方程式を電離圏 (高度 100 km) から磁気圏 (惑星半径の 40 倍程度) までの幅広い領域で包括的に解くことが可能である。実際の計算においては、MPI と計算領域分割によって 480 コアによる並列計算を結果が準平衡状態に達するまで行った。また Sakata et al. (2024) において実装した 5 イオン種 (H^+ , O^+ , O_2^+ , CO_2^+ , 太陽風 H^+) に加えて、炭素・窒素を含むイオン種 (C^+ , N^+ , CO^+ , NO^+ , N_2^+ , HCO^+) を加えた全 11 イオン種が関与する光化学反応系および衝突過程を新たに実装した。

研究成果 (Accomplishments) :

本年度は、グローバル多流体 MHD モデル MAESTRO の実装および太古火星における固有磁場の影響を検証した主著論文 (Sakata et al. 2024) を出版したほか、先行モデルである BATS-R-US とのモデル間比較を行った。現在火星を想定した同一の中性大気・太陽風条件のもとでそれぞれ多成分 MHD シミュレーションを行った結果、バウショックなどのプラズマ境界の位置や昼側電離圏の密度プロファイルが両モデルでよく一致した。一方で夜側電離圏や尾部のアウトフローの構造には違いが見られ、BATS-R-US の方が 70% ほど高い O_2^+ 散逸率を示した。これらの差異は、グリッド構造や計算手法に起因する数値拡散の違いが極域昼夜境界近傍のイオンダイナミクスに影響を与えたことによって生じたと推測している。以上の比較検証の結果については国際共著論文 (Sun et al. 2024) として出版した。

また炭素および窒素を含むイオン種の散逸過程の検証として、現在火星における太陽条件および地殻磁場を想定した 11 イオン種多流体シミュレーションを行なった。イオン種を追加したことによる影響を見極めるため、比較対象として Sakata et al. (2024) と同じ 5 イオン種多流体シミュレーションも実施した。イオン種を追加したことによってバウショックや誘導磁気圏界面の位置など磁気圏のグローバルな構造にほとんど違いは見られなかった。また昼側電離圏の密度構造についても、両ケースに共通して含まれている 5 イオン種 (H^+ , O^+ , O_2^+ , CO_2^+ , 太陽風 H^+) への影響は小さかった。一方で夜側電離圏においては高度 200km 以下で NO^+ や HCO^+ の密度が O_2^+ と同程度になるなど、MAVEN による観測と整合的な結果が得られた。酸素イオンの散逸率はイオン種追加による影響をほとんど受けなかった一方で、炭素イオンの散逸率は特に C^+ の散逸が追加されたことによって約 3 倍に増加した。先行研究では考慮していなかった窒素イオンについても、散逸率が炭素イオンの半分程度であることも明らかにした。現在火星では光化学的散逸が卓越しておりイオン散逸の寄与は限られているが、強い XUV 放射や太陽風によってイオン散逸が卓越していた過去の火星においては大気進化に重要な影響を与えていたことが期待される。

公表状況 (Publications) :

(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), doi:10.1029/2023JA032320
2. Sun, W., Sakata, R., Ma, Y., Seki, K., Russell, C. T., Terada, N., Sakai, S., Shinagawa, H., Brain, D., & Toth, G. (2024). Comprehensive Comparison of Two Global Multi-Species MHD Models of Mars. *Earth and Space Science*, 11(10). doi:10.1029/2024EA003698

(口頭)

1. R. Sakata, W. Sun, Y. Ma, K. Seki, C. T. Russel, N. Terada, S. Sakai, H. Shinagawa, Comparative study of two global multispecies MHD models of Mars, 日本地球惑星科学連合 2024 年大会, 千葉, 2024 年 5 月
2. 坂田遼弥, 関華奈子, 寺田直樹, 堺正太郎, 品川裕之, 11-species multifluid simulation study of carbon and nitrogen ion escape at Mars, 惑星圏シンポジウム 2025, 仙台, 2025 年 3 月