

# 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（東京大学先端科学技術研究センター）

**研究分担者：**関華奈子（東京大学先端科学技術研究センター）

担当：議論

寺田直樹（東北大学理学研究科）

担当：議論

## **研究目的 (Research Objective):**

太古の火星は厚い大気によって温暖な気候が維持されていたが、現在に至るまでにその大気の大部分を喪失してしまっている。その喪失過程の一つとして、電離大気が宇宙空間へ散逸する過程であるイオン散逸が着目されている。イオン散逸は、太陽からの X 線・極端紫外線放射 (XUV 放射) や太陽風、中性大気、惑星磁場など様々な要因から影響を受けている。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。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。実際の計算に

においては MPI と計算領域分割を用いて 480 コアによる並列計算によって準平衡状態に達するまで行った。

## 研究成果 (Accomplishments) :

本年度は主に、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。惑星間磁場(IMF)は Parker spiral を想定し、磁場の向きが異なる 2 通り(toward IMF, away IMF)、地殻磁場の位置(東経 180 度付近の強い地殻磁場領域の位置)が 4 通り(昼、夕方、夜、朝)の計 8 通りのシミュレーションを行った。その結果、IMF の向きおよび地殻磁場の位置によって磁気圏尾部における電流シートの傾き(magnetotail twist)や惑星イオンの流出フラックスが大きく変化することが明らかになった。惑星イオンの流出に対する影響を検証するため、イオンの流出経路を昼側電離圏から太陽風電場方向に流出する plume escape と、夜側電離圏から尾部方向に流出する tailward escape に分類した。その結果、plume escape による散逸率は太陽風電場が上向きになる+E 半球側で地殻磁場が電場の侵入を阻害するケースで減少することが明らかになった。一方で tailward escape は+E 半球および-E 半球に流出経路が分かれていたが、それらは複雑な IMF・地殻磁場依存性を示しており、IMF と地殻磁場との磁気リコネクションによる複雑な磁場構造の影響を受けていると考えられる。また、特に  $\text{NO}^+$  を中心にイオン種ごとに異なる依存性が現れており、イオン種ごとの流出メカニズムの差異を示唆している。これらの依存性については詳細な解析を進めている。

## 公表状況 (Publications) :

### (口頭)

1. 坂田遼弥, 関華奈子, 寺田直樹, 堺正太朗, 品川裕之, Carbon and nitrogen ion escape from Mars based on 11-species multifluid MHD simulation, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会, 千葉, 2025 年 5 月
2. 坂田遼弥, 関華奈子, 寺田直樹, 堺正太朗, 品川裕之, 多流体 MHD シミュレーションに基づいた現在火星における炭素・窒素イオンの散逸, 日本惑星科学会 2025 年秋季講演会, 東京, 2025 年 9 月
3. R. Sakata, K. Seki, N. Terada, S. Sakai, H. Shinagawa, Effects of a planetary magnetic field on ion escape from ancient Mars based on 3D global multifluid MHD simulations, AAPPS-DPP2025, 福岡, 2025 年 9 月
4. 坂田遼弥, 関華奈子, 寺田直樹, 堺正太朗, 品川裕之, Eleven-ion multifluid simulation study on the effects of crustal magnetic fields at Mars, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋学会, 2025 年 11 月
5. R. Sakata, K. Seki, N. Terada, S. Sakai, H. Shinagawa, Effects of Crustal Magnetic Fields

on Ion Escape from Mars Based on Eleven Ion Multifluid Simulations, American  
Geophysical Union Fall Meeting 2025, New Orleans, 2025 年 12 月