

# CME 時における火星大気流出機構に関する研究 : UV 放射照度及び固有磁場強度による比較

Atmospheric escape from the Martian atmosphere at the CME event:  
Comparison of EUV irradiances and intensity of intrinsic magnetic field

**研究代表者 :** 堺 正太郎 (東北大学大学院理学研究科)  
shotaro@pat.gp.tohoku.ac.jp

**研究分担者 :** 関 華奈子 (東京大学大学院理学系研究科)  
k.seki@eps.s.u-tokyo.ac.jp  
担当 : 大気流出機構に関する議論, 観測との比較

## 研究目的 (Research Objective):

惑星の固有磁場や太陽風パラメータ, X 線及び極端紫外線 (XUV) 放射照度は大気流出を考える上で非常に重要な物理量である. 固有磁場強度は太陽風と地球型惑星間の相互作用に影響を与え (e.g., Seki et al., 2001), 流出機構自体を変えてしまう可能性がある. 火星は, 約 40 億年前は温暖湿潤な機構であったが, その後大気や水が失われ, 現在では薄い大気を残すのみとなった. つまり, 火星は過去から現在までに大規模な大気流出を経験した. 近年の研究では, 火星の誕生後約 5 億年以内にほとんどの大気を失ったことが提案された (Lammer et al., 2013). 大気流出の主要機構の一つに, 周辺磁場の影響及び XUV 放射照度に関連した超高層大気からのイオン流出が挙げられる. 太古の火星には, 現在の火星地殻に残留磁化が存在していることから, 全球的な固有磁場が存在していた可能性が考えられている. また, 過去太陽からの XUV 放射照度は現在のものよりも高かったと考えられている (e.g., Tu et al., 2015). 固有磁場や XUV 放射照度が大気流出機構へ与える影響を調査することは, 火星が過去から現在までに起こった気候変動の理解へとつながるのである. 更に, XUV 放射照度の高い恒星は近年発見が相次いでいるハビタブルゾーンを持つ系外惑星系にも多く見られ, 本研究は恒星系全体の理解へとつながるものである.

Sakai et al. (2021) では, 火星赤道表面で 100 nT の固有磁場の下, 太陽風パラメータの一つである惑星間空間磁場 (IMF) の向きが大気流出機構・流出率にどのような影響を与えるか調査した. すると, 固有磁場に平行な北向き IMF の時にはパークースパイラル型や反平行な南向き IMF の時と比べて一桁程度小さくなることが明らかとなった. これは非磁化火星でのイオン流出率よりも小さい値であり, このことから北向き IMF は大気流出が抑制されることが示された. 一方で, パークースパイラル型や南向き IMF では流出率がほとんど変わらなかった. 先行研究では北向き, パークースパイラル型, 南向き IMF の 3 ケースのみ調査されたが, 流出率が增大する決定的な要因はよくわかっていない. そこで本研究では, 北向き IMF から南向き IMF に至るまでにどのような条件で流出率が增大するのかを IMF を回転させることで調

査を行う。これは、コロナ質量放出 (CME) 時に起こる IMF の変動に似ていることから、CME 時の大気流出応答の理解につながる研究である。また、高 XUV 環境下である系外惑星系 (赤色矮星・M 型星) のハビタブルゾーン内に火星型惑星が存在すると仮定した時の大気流出についても調査を行う。

### 計算手法 (Computational Aspects):

本研究では 3 次元多成分一流体電磁流体力学 (MHD) シミュレーションを行う。用いたコードは、もともとは非磁化惑星のモデリング用に構築され (Tanaka, 1993), その後、地球磁気圏や惑星電離圏モデリング用に改良された (Tanaka, 1998; Terada et al., 2009a; 2009b). Sakai et al. (2018) では非磁化惑星モデリング用に固有磁場を加えることで、大気流出機構の違いを明らかにした。本コードは 8 つの変数から成る MHD 方程式を、Total Variation Diminishing (TVD) スキームを用いて解いている。また、本モデルは電離圏から磁気圏までを包括的に解くことが可能で、14 イオン種の連続の式を解いている。本研究では 10 種の中性大気モデル ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{H}$ ) を入力として与えることで、超高層大気中での主要なイオン ( $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{H}_2^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ) の物理量を計算する。入力で用いられる中性大気モデルは現代の火星では Sakai et al. (2021) で用いられたものを、M 型星周りの系外惑星では M 型星の XUV スペクトルを考慮した Nakayama et al. (in prep.) によって得られた大気モデルを用いる。イオン - 中性大気の反応率, 解離再結合率, 光電離率, 電子衝突による電離率, イオン - 中性大気・電子 - 中性大気の衝突周波数, 電子衝突によるエネルギー消失率, 熱伝導度は Terada et al. (2009a and references therein) のものを使用した。

本研究では、半径方向に対して並列化を行っており、MPI を用いてシミュレーションを行った。また本コードは、半径方向に 336 グリッド、緯度・経度方向に 1922 グリッド用いている。恒星風パラメータは、現在の火星系では密度  $3 \text{ cm}^{-3}$ , 速度  $400 \text{ km/s}$ , 温度  $10^5 \text{ K}$ , 磁場  $2.5 \text{ nT}$  を、M 型星周り仮定する。

### 研究成果 (Accomplishments) :

現在の火星における研究では、非磁化惑星と赤道表面で  $100 \text{ nT}$  の固有磁場を持つ磁化惑星とで比較を行う。北向き IMF からスタートし、12 時間で IMF が半周する条件で計算を行う。磁化惑星においては北向き IMF での定常状態は Sakai et al. (2021) で得られたものを用いる。まず非磁化惑星では、IMF が回転する間に流出率はほとんど変化しなかった。残留磁場を考慮していないため、大気が磁場の回転に影響することがほとんどないと考えられる。一方で磁化惑星の場合、北向き IMF から南向き IMF までの間に流出率が 30 倍程度になることが明らかとなった。特に、IMF 時角が  $45^\circ$  を超えると急激に流出率が増大し、時角  $60^\circ$  を超えるとイオン流出率は緩やかに上昇する。

ここからは IMF 時角  $45^\circ$  を超えると流出率が增大する理由を考察する. 北向き IMF では, 磁気圏ローブ領域での磁気再結合が大気流出を担っていた (Sakai et al., 2021). IMF の時角が徐々に変わるにつれて磁気再結合点が磁気圏ローブ領域から磁気圏フランク領域へと移動すると, 磁気圏内の電流量が増えることから磁気再結合の量が増え, 流出率の増大につながる事がわかった.

次に, M 型星周りのハビタブルゾーン内に存在する火星型惑星 (非磁化) における研究成果については, 現在計算結果の鋭意解析中であるが, 現在の火星で流出の大部分に寄与する分子イオンよりも原子イオンの流出が卓越しそうであることが分かりつつある. 今後の展開として, まず現在火星においては, ここまで磁場と IMF との相互作用が大気流出に与えるについて調査をしてきたが, 惑星の自転に伴う影響は評価できていないので, 共回転電場を考慮して研究を行っていきたい. また系外惑星系研究においては, M 型星の解析を進めつつ, 様々な恒星系 (XUV 環境下) で計算を行っていく予定である.

## 公表状況 (Publications) :

### (口頭)

1. 堺正太郎, 関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之, 坂田遼弥, 田中高史, 海老原祐輔,  
Enhanced ion escape rate during the CME-like IMF rotation under weak intrinsic magnetic field conditions on a Mars-like planet, 第 23 回惑星圏研究会, 00209-AM3, オンライン, 2022 年 2 月 (口頭).
2. Sakai, S., K. Seki, N. Terada, H. Shinagawa, R. Sakata, T. Tanaka, and Y. Ebihara,  
Impact of the CME-like IMF rotation on ion escape mechanisms from a Mars-like planet under weak intrinsic magnetic field conditions, American Geophysical Union Fall Meeting 2021, SM15A-1955, New Orleans, LA, USA / Online, December 2021 (poster).
3. 堺正太郎, 関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之, 坂田遼弥, 田中高史, 海老原祐輔, Ion escape mechanism from a Mars-like planet under weak intrinsic magnetic field conditions: Dependence of IMF clock angle, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, PCG18-05, オンライン, 2021 年 6 月 (口頭).