

地球型惑星大気流出に関する研究: IMF 回転の影響及び熱圏大気組成の違いによる影響

Atmospheric escape from terrestrial planets: Effects of IMF rotation and variations in thermospheric composition

研究代表者：堺 正太郎 (慶應義塾大学環境情報学部)

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：計算条件の助言及び結果に関する議論

研究目的 (Research Objective):

イオン流出などの非熱的散逸は、火星においては酸素や炭素といった重元素の流出に重要な役割を果たす。その中でも、惑星固有磁場がイオン流出に顕著に影響を与えることが、近年の研究で明らかになってきた。現在の火星には固有磁場は存在しないが、過去の火星には存在していたと考えられている (Acuña et al., 1999)。赤道表面で 100 nT という弱い固有磁場を仮定した場合、重イオン流出は約 25%増加する (Sakai et al., 2018)。一方で、固有磁場強度も流出率を決定する重要な要因であり、最新の多流体モデルを用いた研究では、固有磁場の大きさに応じて流出率が減少するものの、ある磁場強度を境に増加に転じる可能性が示唆されている (Sakata et al., 2024)。また、惑星間空間磁場 (IMF) の向きの違いによっても流出率及び流出機構が変化し、固有磁場の向きが IMF と平行である場合は大気を保持できる傾向にあることが明らかとなった (Sakai et al., 2021, 2023) が、IMF が固有磁場の向きと反平行から平行に戻るときの変化が大気流出に与える影響に関する研究は行われていない。

一方、太陽 X 線及び極端紫外線 (XUV) 放射照度の変化も大気流出機構に影響を及ぼすことが示唆されている (e.g., Terada et al., 2009; Ramstad & Barabash, 2021)。XUV 放射照度は、太陽フレア時に急激に変化するだけでなく、恒星の進化に伴っても変化することが知られている。近年、系外惑星系の発見が相次いでおり、XUV 放射照度の違いは、それらの研究において重要なパラメーターとなる。様々な恒星型のスペクトルが観測的に明らかにされつつあることから、恒星スペクトルの違いが惑星大気進化に与える影響を包括的に研究することが可能となった。しかし、これまでに恒星スペクトルの違いが熱圏組成やそれに付随する大気進化へ及ぼす影響に着目した研究はほとんどなく、その必要性は高まっている。

そこで本研究では、XUV を含む恒星スペクトルの違いが、熱圏大気組成及び大気流出機構に与える影響を調査する。本課題では、比較的 XUV 照度の弱い HD85512 系及び GJ581 系を対象とし、これらを現在火星および、HD85512 と同程度の XUV 強度 (約 10 倍の XUV) を持つ火星 (XUV10 火星) と比較する。なお、IMF の回転に関する研究報告はここでは割愛する。

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) モデル (REPPU-Planets) を用いて数値計算を行う。REPPU-Planets は、もともと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のモデリングに対応するよう改良された (Tanaka, 1998; Terada et al., 2009a; 2009b). Sakai et al. (2018) では非磁化惑星のモデリングコードに固有磁場を導入することで、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あり、14 イオン種の連続の式を解いている。本研究では CO_2^+ , O_2^+ , NO^+ , CO^+ , N_2^+ , O^+ , N^+ , C^+ , He^+ , H_2^+ , H^+ , Ar^+ の物理量を計算対象とする。

入力パラメータとして、まず熱圏大気モデルには、火星系および系外惑星系において XUV スペクトルを考慮した Nakayama et al. (2022) のモデルによって得られた熱圏大気分布を用いる。恒星風パラメータについては、純粋に XUV スペクトルの違いが流出率に与える影響を調査するため、現在の火星系のものを適用し、密度 3 cm^{-3} , 速度 400 km/s , 温度 10^5 K , 磁場 2.5 nT とする。この条件は火星, XUV10 火星, HD85512 系及び GJ581 系に適用される。惑星は火星型を採用し、それぞれの系において現在の火星軌道と同等の恒星放射を受ける軌道に惑星を配置する。具体的には、太陽系火星及び XUV10 火星は 1.524 au , HD85512 系では 0.622 au , GJ581 系では 0.174 au である。プラズマ温度については、中性大気・イオン・電子の温度が等価であると仮定する。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, 熱伝導度については Terada et al. (2009a and references therein) の値を使用する。

本研究では、半径方向に対して並列化を行い、MPI を用いてシミュレーションを実施した。メッシュ構成としては、半径方向に 336 グリッド、緯度・経度方向に 1922 グリッド用いて計算を行った。

研究成果 (Accomplishments) :

XUV スペクトルの違いがイオン流出率に与える影響について、一次元熱圏モデルと三次元多成分一流体 MHD モデル (REPPU-Planets) の 2 つの数値モデルを用いて調査した。本研究では、太陽スペクトル、波長 91 nm 未満の XUV が 10 倍された太陽スペクトル、そして比較的活動性の低い低質量星である HD85512 および GJ581 のスペクトルを用いた。火星サイズの惑星を、現在の太陽系における火星と同じ放射量を受ける軌道に配置した。その上で各ケース間でイオン流出率の比較を行った。

最も顕著な熱圏膨張は XUV10 火星および HD85512 系で見られ、次いで GJ581 系が続く。現在火星は最もコンパクトな熱圏構造を示した。これらの違いは主に熱圏温度に起因しており、XUV10 火星および HD85512 系で最も高く、現在の火星で最

も低かった。これらの熱圏プロファイルを入力とし、電離圏および誘導磁気圏の計算を実施した。HD85512 系は最も膨張した電離圏および誘導磁気圏を保持し、XUV10 火星がこれに続いた。一方で、GJ581 系と現在の火星はよりコンパクトな構造を示し、とりわけ現在の火星が最も小さかった。すべての系において、高度約 300 km 以下の下部電離圏では O_2^+ が主要イオン種であった。この高度より上では、主要イオン種は O_2^+ から O^+ 、さらに高高度では H^+ へと遷移し、上部電離圏では水素イオンが支配的となった。

O_2^+ 、 O^+ 、 C^+ 、 N^+ のイオン流出率は、尾部領域におけるイオンフラックスを積分することで評価した (図 1)。現在の火星では O_2^+ の流出が支配的である一方、他の 3 つの恒星系では O^+ の流出が最も顕著であった。これは、強化された XUV 照射により O_2^+ の解離が促進され、 O^+ の生成および流出が容易になるためである。微量イオン種の中では、 C^+ と N^+ は HD85512 系で最も高い流出率を示し、次いで XUV10 火星が続いた。現在の火星はこれらの種について 2 番目に低い流出率を示し、最も低いのは GJ581 系であった。これらの傾向は、外圏底付近における C^+ および N^+ 前駆物質の密度の違いを反映しており、熱圏温度に強く依存している。特に HD85512 系は、主に 91 nm 未満の比較的長波長帯の XUV の寄与により上層大気が加熱され、最も高い熱圏温度を維持している。

多くの系において、 C^+ の流出率は N^+ よりも低い、HD85512 系ではこの関係が逆転する。この逆転は、高度約 1000 km 以上でイオンが尾部方向の速度を獲得する領域において、 C^+ の密度が N^+ よりも高いことに起因する。HD85512 系における C^+ の生成が増大するのは、光化学過程、熱圏密度および温度、さらには力学過程を含む複数のプロセスの組み合わせによって生じている可能性がある。また、流出フラックスの形状は「クリオネ」に類似しており、子午面方向および赤道面近傍に沿った広がり特徴とする。これら 2 つの主要なイオン流出チャンネルは、それぞれ磁気中性面付近での質量負荷に関連するものと、磁気赤道付近で繰り返し現れるフラックスロープのような構造に対応している。総じて、上部電離圏の構造およびこれら 2 つの主要な流出チャンネルが、尾部領域におけるイオン流出の振る舞いを決定する上で重要な役割を果たしている。

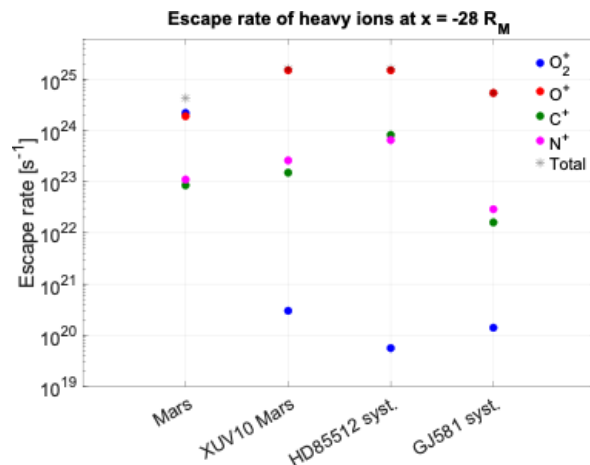


Fig.1 各恒星系でのイオン流出率 (Sakai et al., 2026)

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Sakai, S., Nakayama, A., Seki, K., Terada, N., Shinagawa, H., Sakata, R., Leblanc, F., Brain, D. A., & Tanaka, T. (2026). Effects of stellar XUV spectra on atmospheric escape from a Mars-like planet orbiting inactive low-mass stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 546(4), stag156, doi:10.1093/mnras/stag156.

(口頭)

1. S. Sakai, A. Nakayama, K. Seki, N. Terada, H. Shinagawa, R. Sakata, F. Leblanc, D. Brain, and T. Tanaka, Effects of stellar XUV spectra on atmospheric escape from a Mars-like planet orbiting inactive low-mass stars, American Geophysical Union Annual Meeting 2025, P41A-06, New Orleans, LA, USA, December 2025.