

地球型惑星大気流出機構に関する研究： 共回転電場及び EUV 放射照度による比較

Atmospheric escape from a terrestrial planet under intrinsic magnetic field conditions:
Comparisons of corotational electric field and EUV irradiances

研究代表者： 堺 正太郎（東北大学大学院理学研究科）
shotaro@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

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のような重い元素の流出にとって重要である。その中でも惑星固有磁場はイオン流出に顕著に影響を与えることが近年の研究から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ものの、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 25%程度増加する (Sakai et al., 2018) 一方で、固有磁場強度と太陽風動圧の関係も重要で、固有磁場による磁気圧が太陽風動圧の 10%程度より大きい場合には、流出率は相対的に減少することが明らかとなった (Sakata et al., 2020, 2022)。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 と平行時は大気を保持する傾向にあることが明らかとなった (Sakai et al., 2021)。

一方で、惑星の自転そのものが大気流出にどのような影響を与えるかについては依然明らかになっていない。固有磁場を持つ惑星は、惑星が自転することで共回転電場が生じる。磁化惑星は、共回転電場が太陽風対流電場を卓越する磁気圏領域にプラズマ圏を形成し、そのプラズマ圏内は惑星起源のイオンでほとんど満たされている。しかし、プラズマ圏の有無が大気流出機構及び大気流出率にどのような影響を及ぼすかについてはこれまで調査されてこなかった。

また、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する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著しく変化するだけでなく、恒星進化に伴っても変化することが知られており、近年発見が相次いでいる系外惑星系研究を行う際にも重要なパラメーターである。様々な恒星型のスペクトルが観測的に発見されたことから、恒星スペクトルの違いによる惑星大気進化への影響を網羅的に研究することが可能となった。しかし、これまで恒星スペクトルの違いが大気進化へ与える影響に着目した研究がなく、その機運は高まっている。

そこで本研究では、(1)共回転電場及びそれに伴うプラズマ圏の有無が大気流出機構

に与える影響の調査, (2) XUV を含む恒星スペクトルの違いが大気流出機構に与える影響の調査, の 2 つを行う. まず, 磁化惑星において共回転電場がある場合とない場合で比較を行い, どちらの場合で流出率が增大するのか, 流出に重要な物理機構はそれぞれ何かを明らかにする. 次に, 様々な恒星スペクトルでの流出率の比較を行う. 本課題では比較的 XUV 照度の弱い HD85512 系及び GJ581 系を用いて太陽系火星と比較を行う.

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) 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 (CO_2 , O_2 , NO , CO , N_2 , O , N , C , He , 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 (CO_2^+ , O_2^+ , NO^+ , CO^+ , N_2^+ , O^+ , N^+ , C^+ , He^+ , H_2^+ , H^+ , Ar^+) の物理量を計算する.

本研究で用いる入力パラメータは(1)及び(2)で異なるものを用いている. (1)では過去火星を想定し, XUV が現在の 50 倍, 固有磁場強度が赤道表面で 2000 nT を用いる. 熱圏大気モデルは Kulikov et al. (2007) から得られたものを用いる. 太陽風パラメータは密度 20 cm^{-3} , 速度 350 km/s, 温度 10^6 K , 磁場 5 nT を用いる. 一方で, (2) で用いられる熱圏大気モデルは火星系では Sakai et al. (2021) で用いられたものを, 系外惑星系ではそれぞれの XUV スペクトルを考慮した Nakayama et al. (2022) によって得られた熱圏大気モデルを用いる. 恒星風パラメータは, 純粋に XUV スペクトルの違いの流出率への影響を調査するために, 現在の火星系のものを用いる. 密度 3 cm^{-3} , 速度 400 km/s, 温度 10^5 K , 磁場 2.5 nT が火星及び系外惑星系に適応される. 惑星は火星型を適応し, 現在の火星軌道と同等の恒星放射となる軌道に惑星を配置した. その場合, 太陽系火星は 1.524 AU, HD85512 系では 0.622 AU, GJ581 系では 0.174 AU となる. 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.

研究成果 (Accomplishments) :

(1)に関してはサーバー専有時間や計算コストの影響から現在も鋭意計算中のため今回は割愛し、(2)に絞ってこれまでの成果を報告する。まず、それぞれの恒星スペクトルに関して、波長が 40 nm 以下では GJ581 が最も高く、HD85512, 太陽と続くが、波長 40 nm 以上では HD85512 が最も強く、太陽, GJ581 の順番となった。この条件下において、熱圏大気分布は HD85512 系で最も広がり、次いで GJ581 系, 太陽系 (火星) の順番となった。主成分はすべての恒星系において高度 200 km 以下では CO₂, 高度 200 km 以上では O に置き変わった。更に高高度になると HD85512 系では C が主成分となった。これらの熱圏大気モデルを用いてそれぞれの恒星系で MHD 計算を行った。電離圏の広がりには熱圏大気の広がりと同様に HD85512 系が最も広がり、次いで GJ581 系, 太陽系 (火星) という順番になった。主成分は現在火星と同様に電離圏下部では O₂⁺で高度が上昇すると O⁺に変わった。バウショックや磁気圏界面の位置も電離圏の広がりに呼応し、HD85512 系で最も惑星から遠くなった一方で、GJ581 系と太陽系 (火星) では大きな差はなかった。これらの結果を元に、イオン流出率を計算したところ、HD85512 系で最も流出率が高くなり、GJ581 系で最も低くなった。また、太陽系 (火星) では O₂⁺の流出率が最も高かったが、HD85512 系及び GJ581 系では O⁺が最も高くなり、O₂⁺の流出率は 4 桁以上低くなった。

計算結果の解釈については、恒星スペクトルの強度差等、様々な観点から現在解析中であり、論文化に向けて引き続き研究を行っていく。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Sakai, S., Seki, K., Terada, N., Shinagawa, H., Sakata, R., Tanaka, T., & Ebihara, Y. (2023). Enhanced ion escape rate during IMF rotation under weak intrinsic magnetic field conditions on a Mars-like planet. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 128, e2022030510, doi:10.1029/2022JA030510