

地球型惑星大気流出機構に関する研究：系外惑星への応用

Atmospheric escape from a terrestrial planet: Application to exoplanets

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, 2023)。

一方で、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、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を行う。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 系と XUV が比較的強い Barnard 星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、まず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、HD85512 系及び GJ581 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。一方で Barnard 星系ではより過酷な恒星風条件 (密度 $\sim 70 \text{ cm}^{-3}$ 、速度 $\sim 600 \text{ km/s}$ 、磁場 $\sim 15 \text{ nT}$) を用いて、惑星もハビタブルゾーン内の 0.089 au に配置し計算を実施する。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 (560 グリッド Barnard 星系)、緯度・経度方向に 1922 グリッド用いている。

研究成果 (Accomplishments) :

まず、現在火星の恒星風パラメータを用いた 3 つの惑星で比較を行う。恒星スペクトルに関しては、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。主成分はすべての惑星系において高度 200 km 以下では CO_2 、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惑星系で 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 O_2^+ で高度が上昇すると O^+ へ変わった。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 O_2^+ 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、 O_2^+ の流出率は4桁以上低くなった。これは現在金星とよく似た構造で、XUVが大きい分 O_2^+ が解離されたことに起因すると考えられる。また、系外惑星系では C^+ や N^+ の流出率も増加しており、大気流出さらには大気進化において重要な役割を果たしていることが示唆された。

次により過酷な恒星風環境に曝されているBarnard星系についてである。恒星に比較的近い場所に惑星が存在しているため、加熱により大気が非常に膨らみ、またCを主成分とする大気が形成された。 C^+ の流出がHD85512系やGJ581系と比べると増加し、この系では炭素の流出が支配的であることがわかった。計算結果のより詳細な解釈については、恒星スペクトルの強度差や恒星-惑星間距離等、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) :

(口頭)

1. 堺正太郎, 中山陽史, 関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之, 坂田遼弥, F. Leblanc, D. Brain, 田中高史, Effects of stellar XUV spectra on atmospheric escape from a Mars-like planet orbiting inactive low-mass stars, 第154回地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋季年会, R009-18, 東北大学, 宮城県仙台市, 2023年9月27日.
2. 堺正太郎, 中山陽史, 関華奈子, 寺田直樹, 品川裕之, 坂田遼弥, F. Leblanc, D. Brain, 田中高史, 恒星 XUV スペクトルが及ぼす火星型惑星からの大気散逸への影響, 日本天文学会2023年秋季年会, Z417a, 名古屋大学, 愛知県名古屋市, 2023年9月21日.