

地球型惑星大気流出機構に関する研究：系外惑星系の比較及び 共回転電場の影響

Atmospheric escape from a terrestrial planet: Comparison of exoplanetary system and the influence of corotational electric field

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：計算条件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)。さらに、固有磁場が存在する場合、惑星の自転によって生じる共回転電場も流出に影響を与える可能性があるが、その効果についての詳細な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と、固有磁場を持つ場合の共回転電場が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 系と、XUV が比較的強い Barnard 星系を対象とし、これらを太陽系火星および、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。また、共回転電場の影響をより明確に評価するため、現在の XUV 照度の 50 倍の条件下でのシミュレーションを実施する。

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、純粹に 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、中性大気・イオン・電子の温度が等価であると仮定するが、先行研究 (Johnstone et al., 2018) によると XUV 照度が 10 倍程度になると電子温度が 2 倍程度まで上昇する可能性がある。そのため、HD85512 系では高電子温度のケースについても計算を行う。一方、Barnard 星系ではより過酷な恒星風条件を設定し、密度を約 70 cm^{-3} , 速度を約 600 km/s , 磁場強度を約 15 nT とし、惑星をハビタブルゾーン内の 0.089 au に配置して計算を実施する。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, 熱伝導度については Terada et al. (2009a and references therein) の値を使用する。

共回転電場の影響を考慮する計算では、その影響を明確にするため、赤道付近での固有磁場強度を 2000 nT とし IMF コーンアングルを 4° に設定する。太陽風速度, 磁場強度, 温度については現在の火星の条件と同様のものを適用する。

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 (Barnard 星系では 560 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) :

まず、現在の火星の恒星風パラメータを用いて 5 つの惑星で比較を行った。恒星スペクトルに関して、波長 40 nm 以下では GJ581 が最も高く、続いて HD85512 及び XUV10 太陽、そして太陽の順となった。一方、波長 40 nm 以上では HD85512 と XUV10 太陽が最も強く、次いで太陽、GJ581 の順となった。この条件下において、熱圏大気の広がりには HD85512 系と XUV10 太陽系で最も大きく、次いで GJ581 系、最後に太陽系（火星）の順となった。主成分はすべての恒星系において高度 200 km 以下では CO_2 、高度 200 km 以上では O へと置き変わった。更に高高度では、HD85512 系では C や N が主成分となる傾向が見られた。これらの熱圏大気モデルを用いて、それぞれの恒星系に対し MHD 計算を実施し、HD85512 系については高電子温度条件 (HD85512 (High Te) 系) も加えて解析を行った。その結果、電離圏の広がりには熱圏大気の広がりと同様に HD85512 系と XUV10 太陽系で大きく、特に HD85512 (High Te) 系で最も広がることを確認された。次いで GJ581 系、太陽系（火星）の順となった。主成分は現在の火星と同様に、電離圏下部では O_2^+ が支配的であり、高度が上昇すると O^+ へと変化した。バウショックや磁気圏界面の位置も電離圏の広がりに対応し、HD85512 系と XUV10 太陽系で惑星から遠ざかる傾向が見られた。一方、GJ581 系と太陽系（火星）では大きな差はなかった。これらの結果をもとにイオン流出率を計算したところ、HD85512 (High Te) 系で最も高くなり、現在太陽系（火星）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。この結果は、現在金星と類似しており、XUV が高い環境では O_2^+ が解離されることが影響していると考えられる。さらに、XUV が高い恒星系では C^+ や N^+ の流出率も増加しており、大気流出および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。本研究に関しては現在論文を執筆中である。

次に、より過酷な恒星風環境に曝されている Barnard 星系について解析を行った。この系では惑星が恒星に比較的近い軌道を持つため、強い加熱によって大気が著しく膨張し、 C を主成分とする大気が形成された。その結果、 C^+ の流出が HD85512 系や GJ581 系と比べて大幅に増加し、この系では炭素の流出が支配的であることが明らかになった。現在、共同研究として他のモデル結果との比較を進めており、それらを含めたチーム論文を執筆中である。

共回転電場の影響を調べるための計算については、鋭意計算中であり、結果を解析し始めている段階である。

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. S. Sakai, Overview of atmospheric escape from terrestrial planets: Role of magnetic field and solar activity, IBS Conference on Planetary Science and Space Exploration 2024, Daejeon, South Korea, July 2024 (Invited paper).