

恒星フレアが金星型惑星からの電離大気散逸に与える影響

The effect of stellar flare on ion escape from Venus-like planets

研究代表者：西岡 知輝（東京大学理学系研究科）

研究分担者：関 華奈子（東京大学）

担当：指導教員

研究目的 (Research Objective):

系外惑星の大気保持の可能性を評価するうえで、活発な恒星環境下でのイオン散逸の定量的理解は不可欠である。特に、M 型星のハビタブルゾーン内に位置する系外惑星は、頻繁かつ強烈な恒星フレアによる極端紫外線 (XUV) 放射の時間変動に曝される。金星型大気では、熱圏・電離圏で生成された非熱的酸素原子が外気圏に輸送されてコロナを形成し、恒星放射による電離と恒星風電場による加速を経て O^+ イオンとして散逸する。しかし、従来のイオン散逸モデルは、時間変動しない非熱的酸素分布を前提としており (e.g., Nishioka+, 2023)、フレアによる外気圏の時間変動がイオン散逸に与える影響は未解明である。本研究では、フレアに対するコロナの時間依存応答を取り入れたシミュレーションフレームワークを構築し、フレアのエネルギー・頻度がイオン散逸率および大気寿命に与える影響を定量的に評価することを目的とした。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究では、1 次元非静水圧熱圏・電離圏モデル、時間依存モンテカルロ外気圏モデル、および多成分・多流体 MHD モデル MAESTRO を結合した数値計算フレームワークを構築した。

熱圏・電離圏モデルは本研究で新規開発した 1 次元非静水圧流体モデルであり、光化学反応 (CO_2 、 O 、 O_2 、 CO 、 N_2 を含む金星型大気組成)、15 μm CO_2 放射冷却、XUV 加熱、分子拡散・乱流拡散を考慮する。フレアの時間変動する XUV 放射には、2017 年 9 月 6 日の X9.3 クラス太陽フレアの FISM2 データを使用し、フレアエネルギー $10^{32} \sim 10^{33}$ erg の範囲でスケールしたパラメータスタディを実施した。

外気圏モデルでは、時間変動する熱圏・電離圏を背景大気として入力し、モンテカルロ法により O_2^+ の解離性再結合に起源を持つ非熱的酸素原子の生成・輸送を時間発展的に計算した。生成された原子の軌道は $CO_2 \cdot O \cdot CO \cdot N_2$ との弾性衝突を考慮しながら追跡され、コロナ密度の時間プロファイルを得た (Fig. 1)。

恒星風-電離圏相互作用の計算には、Cubed-sphere グリッドを用いた 3 次元グローバル多成分・多流体 MHD モデル MAESTRO (Sakata et al., 2024) を使用した。時間変動する非熱的酸素コロナ分布を入力とし、フレア発生前後での O^+ 散逸率の時間変化を追跡した。

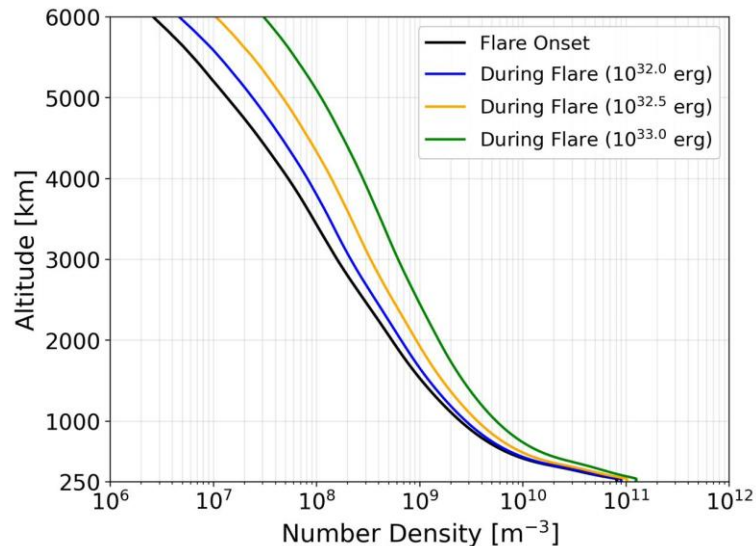


Fig. 1 フレアエネルギー別の非熱的酸素コロナ密度高度プロファイル。フレア発生前（黒）とフレア最盛期（青・橙・緑）の比較。フレアエネルギーの増大に伴い高高度でのコロナ密度が顕著に増加する。

研究成果（Accomplishments）：

フレアに対する熱圏・電離圏の時間応答を解析した結果、電離圏密度は XUV 増大により数分～数十分で迅速に応答する一方、熱圏の加熱・膨張には熱慣性のため約 2 時間を要することが確認された。この応答タイムスケールの差により、熱圏が膨張する前に電離圏 O_2^+ 密度のみが増大する「transient window」が形成され、解離性再結合による非熱的酸素の生成が一時的に増幅される。その結果、フレアエネルギー 10^{33} erg の場合にはコロナ有りの O^+ 散逸率がフレア前比で約 300% に達し、コロナなし（約 74%）と比較して顕著な増幅が生じることが示された。一方、コロナは高高度で恒星風の質量負荷を増やすことで電離圏上部への動圧到達を妨げ、分子イオン（ O_2^+ 、 CO_2^+ ）の散逸を抑制する効果も持ち、 O^+ 散逸の増幅と分子イオン散逸の抑制という双対的な役割を果たす。

フレアの繰り返し効果を定量化するため、フレア頻度と時間平均 O^+ 散逸率の関係を調査した (Fig. 2)。時間平均散逸率はフレア頻度 50 day^{-1} において定常状態比 $\times 1.94$ のピークに達し、それ以上の高頻度ではフレア間隔が短くなりコロナが十分に発達する時間がなくなるため散逸率が低下する特徴的な構造が現れた。コロナ・フレアの複合効果を考慮することで、従来の定常状態モデルに基づく大気寿命の推定が過大評価である可能性が示唆され、大気寿命が約 10 Gyr から約 1 Gyr へ短縮される可能性が示された。

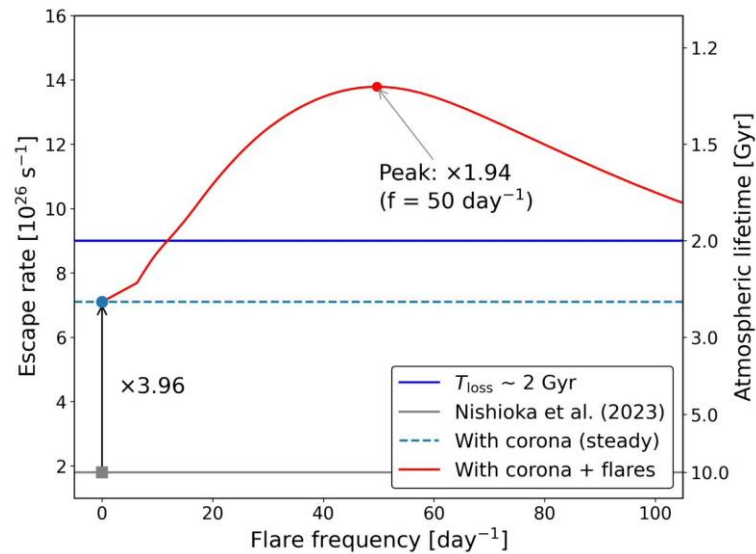


Fig. 2 フレア頻度と時間平均 O^+ 散逸率の関係および大気寿命への影響。コロナ＋フレアの複合効果（赤線）により、散逸率はフレア頻度 50 day^{-1} で定常状態比 $\times 1.94$ のピークに達し、大気寿命が約 10 Gyr から約 1 Gyr へ短縮される可能性を示す。

公表状況（Publications）：

（論文）

1. Nishioka, T., Seki, K., Sakata, R., Terada, N., Sakai, S., Shinagawa, H., & Nakayama, A. (2025). Effects of hot oxygen corona on ion escape from Venus-like planets. Submitted to *Journal of Geophysical Research: Space Physics*

（口頭）

1. 西岡 知輝、関 華奈子、坂田 遼弥、堺 正太郎、寺田 直樹、品川 裕之、中山 陽史、「Effects of the Hot Oxygen Corona on Ion Escape from Venus-like Planets」、JpGU 2025、幕張、2025 年 5 月
2. 西岡 知輝、関 華奈子、坂田 遼弥、堺 正太郎、寺田 直樹、品川 裕之、中山 陽史、「金星型惑星のイオン散逸に対する高温酸素コロナの影響」、日本惑星科学会、駒場、2025 年 9 月