

多成分イオン磁気流体力学シミュレーションに基づく土星衛星 タイタンと地球に普遍的な非熱的大気散逸過程の解明

Non-thermal atmospheric escape process universal for Earth and Titan simulated with a multi-ion component magnetohydrodynamic model

研究代表者：木村智樹 (東京理科大学理学部第一部物理学科)

研究分担者：

堺正太郎 (慶応大学 SFC)
担当：計算条件やコード改変助言
高田亮馬 (東京理科大学理学研究科)
担当：タイタンの計算
草野百合 (東京理科大学理学研究科)
担当：地球の計算

研究目的 (Research Objective):

<研究の背景>

タイタンは、液体炭化水素の海洋と、1 気圧の濃密な窒素大気をもつ土星衛星である。大気組成は窒素 97%、メタン 2%、水素 1%で、生命誕生直前の無酸素の地球大気の組成に類似しており、多環性芳香族等の生命前駆物質の生成も発見されている (Lopez-Puertas et al., 2013)。タイタンの大気進化を解明し、地球にも普遍的な過程を見出すことができれば、生命誕生前後の地球の大気や生命環境の進化を明らかにできる可能性がある。タイタンは、太陽風や土星磁気圏プラズマに吹きさらされ、大気粒子がイオンピックアップ等で宇宙空間へ非熱的に散逸している。同散逸の解明は、大気進化を理解するうえで重要な課題の 1 つである。探査機その場観測や数値シミュレーションにより、タイタン大気散逸率が推定されてきた (e.g., Michael et al., 2005) が、空間領域が限定的で、全球的な時空間変動は未解明である。

<現在までの成果>

そこで本研究は、3 次元の多成分イオン磁気流体力学 (MHD) シミュレーション (Terada et al., 2009) を導入し、タイタン大気の大気散逸の全球的な時空間構造の解明に取り組んできた。上層大気の主成分である窒素と水素の中性大気密度分布を入力として、初めて大気化学反応を解きつつ、太陽風中における大気起源イオンの散逸を模擬した。その結果、窒素系イオンは、太陽風動圧を静穏 (4×10^{-4} から 0.3 nPa) まで 720 倍変化させたところ、散逸率は 10-25 倍となり、有意な太陽風依存性が見えた。一方、水素系イオンは同様の動圧範囲では、おおよそ横ばいだった。上層大気の高度プロファイル変動を精査すると、以下のことがわかった。

- 水素大気は外圏底（高度 1700km）よりも高高度に、高密度（ $<10^6/\text{cc}$ ）で広く分布している。そのため、太陽風の変動に関係なく、外圏底よりも高高度において一定量のイオンピックアップの領域が広く保たれていた。
- 窒素大気は外圏底の下に高密度（ $<10^{12}/\text{cc}$ ）で分布している。高い太陽風動圧では外圏底以下に太陽風磁場が侵入し、より多くの窒素イオンをピックアップしていた。

この結果は、水素と窒素が異なる太陽風依存性で散逸しつづけ、大気中の水素の存在率に相当する「大気の還元力」が太陽の進化と共に長期変動してきたことを示唆する。大気の還元力は生命活動や生命前駆物質生成のエネルギー源になるため、もし地球でタイタンと同様の過程があった場合、大気進化が生命の発生や進化に影響した可能性がある。

これらの成果は、研究代表者の指導学生により学会（徳重、木村、堺他、日本地球惑星科学連合学会、2022）で報告された後、修士論文として発表された（徳重、修士論文、東京理科大学、指導教員木村、2024）。

＜本申請の研究目的＞

本研究では、太陽風による大気散逸を扱ってきたが、実際の環境ではタイタンは土星磁気圏内に滞留している時間が長く、土星磁気圏プラズマ（以下、土星風）が吹き付けることによる大気散逸が有意に発生しうる。土星風は、氷衛星エンセラダスの内部海起源の酸素や水素等の水系プラズマが主成分である。太陽風と全く異なる組成の土星風によるタイタン大気散逸は全くの未解明である。本申請の研究では、多成分 MHD を用いて、土星風によるタイタン大気散逸の時空間変動の解明に取り組む。また、タイタンの太陽風・土星風大気散逸の解明と並行して、同じ多成分 MHD を用いて、過去の地球大気散逸を模擬し、タイタンの散逸と比較し、過去地球と現在のタイタンに普遍的な大気散逸過程を見出す。

計算手法 (Computational Aspects):

1922 点の球面グリッドを 720 層設け、90-360 コアを用いた MPI による並列計算で、Terada et al. (2009) で提案された 1 流体多成分イオンコードを解いた。天体の半径を R とすると、計算範囲は天体から最大 $600R$ の空間を計算した。各天体について以下の計算を行った。

- タイタン：土星風を想定した酸素イオンで構成されるプラズマ流をタイタンに吹き付け、水素・窒素大気起源のイオン散逸を模擬した。徳重（修士論文、2024）と同様の解析を行い、散逸率や散逸メカニズムを精査し、太陽風による大気散逸との違いや普遍性を整理した。

- **地球：**まず計算が技術的に容易でタイタンと近い条件である、無磁化の地球を仮に想定し、大気散逸を模擬した。約 45-46 億年前の地球を想定した膨張大気（高太陽光フラックス下で加熱された大気）や現代の大気を想定した中性大気分布を設定し、大気散逸を解いた。徳重（修士論文，2024）と同様の解析を行い、散逸率や散逸メカニズムを精査し、タイタンとの違いや普遍性を整理した。

研究成果（Accomplishments）：

<タイタン>

土星風条件は O^+ 密度 0.2 cm^{-3} 、 H^+ 密度 0.1 cm^{-3} 、速度 120 km/s 、磁場 7.0 nT 、太陽風条件は密度 0.35 cm^{-3} 、速度 360 km/s 、磁場 0.5 nT とした。その結果、散逸率は土星風で窒素系イオン $4.1 \times 10^{23}/s$ 、水素系イオン $8.3 \times 10^{24}/s$ 、太陽風で窒素系イオン $2.2 \times 10^{23}/s$ 、水素系イオン $2.7 \times 10^{24}/s$ となり、土星風は太陽風より窒素で 1.9 倍、水素で 3.1 倍強く散逸を促進した。さらに水素散逸は窒素に比べ、太陽風で約 12 倍、土星風で約 20 倍大きかった。これは、土星風ではバウショックが形成されず、 $SZA=90^\circ$ 付近で水素散逸領域が高度 $1500\text{--}12000 \text{ km}$ まで広がる一方、太陽風では $1500\text{--}8000 \text{ km}$ に制限されるため、土星風のほうがより散逸するためである。窒素についても、太陽風より強磁場の土星風では磁場が低高度まで侵入し、 2000 km 以下で散逸フラックスが太陽風の 2 倍以上となった。得られた散逸率や先行研究の熱的散逸との比較などから、過去地球とは異なりタイタンは数億-数十億年以上のタイムスケールで安定に大気が保持され、還元的組成を長期維持してきた可能性が示された。これらの成果は、東京理科大学の修士論文としてまとめられ、**Takada, Kimura** et al. (in prep.) として Journal of Geophysical Research への投稿に向けて準備中である。

<地球>

非磁化地球を仮定し、太陽風速度 $450\text{--}3600 \text{ km/s}$ 、密度 $700\text{--}4200 \text{ cm}^{-3}$ 、IMF $7\text{--}70 \text{ nT}$ の条件を与えた結果、バウショックは $110\text{--}230$ 地球半径、誘導磁気圏界面は約 136 地球半径に形成され、内部では磁場が最大約 1300 nT まで増幅された。標準条件での非熱的散逸率は H_2^+ が $0.081\text{--}2.1 \times 10^{31}/s$ 、 H^+ が $0.11\text{--}3.1 \times 10^{31}/s$ 、合計 $0.27\text{--}9.1 \times 10^{31}/s$ で、現代地球の水素散逸率上限 $1.8 \times 10^{27}/s$ より約 4 桁大きい。またこれは、過去地球における熱的散逸率 $2.4\text{--}9.2 \times 10^{32}/s$ の約 $0.29\text{--}30\%$ に相当する量である。これにより、初期地球では熱的散逸が主だが、その一部が高高度で電離し、太陽風によりさらに非熱的に加速・散逸したことを示した。過去地球の還元的な初期水素大気は 5 億年程度で散逸されたという先行研究を加味すると、本研究では、地球はタイタンと異なり非熱的・熱的散逸の共存が大気総量に対して有意な散逸となり、還元大気が早期に枯渇したことが示唆された。これらの成果は、東京理科大学の修士論文としてまとめられ、**Kusano, Kimura** et al. (in prep.) として Journal of Geophysical Research への投稿に向けて準備中である。

公表状況 (Publications) :

(論文)

草野 百合、3次元多成分イオン電磁流体力学シミュレーションによる過去地球における膨張水素大気の非熱的散逸モデリング、修士論文、東京理科大学理学研究科、3月、2026年

高田 亮馬、3次元磁気流体力学シミュレーションを用いた土星風及び太陽風によるタイタン大気散逸過程の比較、修士論文、東京理科大学理学研究科、3月、2026年

Yuri Kusano, Tomoki Kimura, Shotaro Sakai, Tatsuya Yoshida, Yuki Maeda, Eitaro Nakada, Ryoma Takada, Naoki Terada, Non-thermal Escape of Hydrogen Atmosphere on Early Earth modeled by a 3D Multispecies MHD Simulation, in preparation, to be submitted to Journal of Geophysical Research.

Ryoma Takada, Tomoki Kimura, Shotaro Sakai, Yuki Maeda, Eitaro Nakada, Yuri Kusano, Minami Tokushige, Naoki Terada, Comparison of Titan's atmospheric escape processes driven by the Saturn and solar winds using 3D magnetohydrodynamic simulations, in preparation, to be submitted to Journal of Geophysical Research.

(口頭)

草野 百合、木村 智樹、堺 正太朗、吉田 辰哉、前田 優樹、中田 英太郎、高田 亮馬、徳重 みなみ、寺田 直樹、3次元多成分イオン磁気流体力学シミュレーションによる初期地球における膨張水素大気の非熱的散逸モデリング、地球電磁気・地球惑星圏学会 2025年秋季年会、神戸大学、11月25日、2025年

高田 亮馬、木村 智樹、堺 正太朗、前田 優樹、中田 英太郎、草野 百合、徳重 みなみ、寺田直樹、3次元磁気流体力学シミュレーションを用いた土星風及び太陽風によるタイタン大気の非熱的散逸過程の比較、地球電磁気・地球惑星圏学会 2025年秋季年会、神戸大学、11月25日、2025年

(ポスター)

草野 百合、木村 智樹、堺 正太朗、吉田 辰哉、前田 優樹、中田 英太郎、高田 亮馬、徳重 みなみ、寺田 直樹、3次元多成分イオン電磁流体力学シミュレーションによる初期地球における膨張水素大気の非熱的散逸モデリング、日本惑星科学会秋季講演会、P-073、東京大学、9月3-5日、2025年