

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（東北大学理学研究科）
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。

<本研究の今までの成果>

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) を初めて導入し、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（ $<10^6/\text{cm}^{-3}$ ）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（ $<10^{12}/\text{cm}^{-3}$ ）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て、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。

<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):

グリッド数 1922 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。

- 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する。太陽風中での大気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する。
- 地球: 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、大気散逸を模擬する。過去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、大気散逸を解く。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する。

研究成果 (Accomplishments) :

<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する事ができた。太陽風中での大気散逸を模擬した。徳重（修士論文, 2024）と同様の解析を行い、散逸率を調査したところ、同じ動圧下においては土星風のほうが太陽風よりも3倍弱多く窒素大気起源イオンを散逸させていることがわかった。一方、水素大気起源イオンは同じ動圧下においては土星風のほうが太陽風よりも1/2程度少ない散逸量であることがわかった。これは、土星風による散逸のほうが還元性の高い水素を大気中に保持し、窒素等の還元性上昇にかかわらない元素はより散逸させることで、大気の還元力が非常に高くなる可能性を示唆する。しかし、比較対象の太陽風による水素大気散逸は、大気起源の水素と太陽風起源の水素の混合領域が広く分布しており、上記の1/2の比率の不定性が多いことが判明した。現在は、太陽風の計算に立ち戻り、太陽風起源と大気起源の水素を独立成分として分離しながら計算し解析する手法を開発中である。これにより、太陽風と土星風の散逸メカニズムの違い、地球との差異を精査していく予定である。これらの成果を高田、木村、堺、草野他として、日本地球惑星科学連合学会2024、地球電磁気・地球惑星圏学会総会2024等の国内学会で報告した。

<地球>

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。Yoshida et al. (2021)によって推定された過去の地球を想定した膨張水素大気（高太陽光フラックス下で加熱された大気）の分布を設定し、大気起源イオンの散逸を解いた。徳重（修士論文, 2024）と同様の解析を行い、散逸率を見積もったところ地球集積時の水素大気総量 10^{26}g を3.8億年で枯渇させる強力な散逸であることがわかった。この強力な散逸は、膨張した水素大気が60地球半径以上広がる巨大な電離圏を形成し、その中で太陽風によるピックアップが後半に発生していることに起因する。今後は、詳細な散逸過程の解析を行い、太陽風起源と水素大気起源のイオンの分離を試みて、還元力等の普遍的視座からタイタンとの比較を行う予定である。これらの成果を草野、木村、堺、高田他として、日本地球惑星科学連合学会2024、地球電磁気・地球惑星圏学会総会2024、惑星科学会総会2024等の国内学会で報告した。

公表状況 (Publications) :

(ポスター)

草野 百合、木村 智樹、堺 正太郎、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過去地球における膨張水素大気の新熱的散逸モデリング、日本地球惑

星科学連合 2024 年大会、幕張メッセ(ハイブリッド)、5 月、2024 年

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、日本惑星科学会 2024 年秋季講演会、九州大学医学部百年講堂、9 月、2024 年

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、地球電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会、国立極地研究所、11 月、2024 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散逸過程の比較、日本地球惑星科学連合 2024 大会、幕張メッセ、5 月、2024 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散逸過程の比較、地球電磁気・地球惑星圏学会 2024 年秋季年会、国立極地研究所、11 月、2024 年