

R009-21

A 会場 : 11/25 AM1 (9:15-10:45)

10:15~10:30:00

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

#高田 亮馬¹⁾, 木村 智樹¹⁾, 堺 正太郎²⁾, 前田 優樹³⁾, 中田 英太郎⁴⁾, 草野 百合¹⁾, 寺田 直樹⁵⁾

⁽¹⁾ 東京理科大学, ⁽²⁾ 慶應義塾大学, ⁽³⁾ 東京大学, ⁽⁴⁾ 北海道大学, ⁽⁵⁾ 東北大学

Comparison of Titan's atmospheric escape processes driven by the Kronian and solar winds using 3D magnetohydrodynamic simulations

#Ryoma Takada¹⁾, Tomoki Kimura¹⁾, Shotaro Sakai²⁾, Yuki Maeda³⁾, Eitaro Nakada⁴⁾, Yuri Kusano¹⁾, Naoki Terada⁵⁾

⁽¹⁾Tokyo University of Science, ⁽²⁾Keio University, ⁽³⁾The University of Tokyo, ⁽⁴⁾Hokkaido University, ⁽⁵⁾Tohoku University

Titan is the only body in our solar system moons with an abundant atmosphere, maintaining a pressure of 1 atm at its surface. Titan's atmospheric composition resembles that of the early Earth's nitrogen-rich atmosphere before the rise of oxygen produced by life (nitrogen: 94%, methane: 5%, hydrogen: 1%; Magee et al., 2009). Therefore, understanding the evolutionary processes of Titan's atmosphere is essential for elucidating the atmospheric evolution of early Earth. In the upper atmosphere, the energy deposition to the atmosphere by Saturn's magnetospheric plasma precipitation, responsible for the non-thermal atmospheric ion pickup and sputtering, is likely more dominant than the solar EUV (Micheal et al., 2005), which is important for elucidating atmospheric evolution.

Titan is typically located within Saturn's magnetosphere, where it is exposed to plasma composed of O^+ and H^+ ions originating from Enceladus' subsurface ocean (hereafter, we refer to the plasma as the Kronian wind). However, solar wind protons should significantly affect Titan's atmosphere when Saturn's magnetosphere shrinks as the solar wind dynamic pressure increases, and Titan moves out of the magnetosphere (Bertucci et al., 2008). Because spacecraft in-situ observations are insufficient to capture the global extent of non-thermal escape driven by the external plasma flows, such as the Saturn and solar winds, numerical simulations have been employed alongside observations to understand it (Modolo et al., 2008; Strobel, 2009; Gu et al., 2019). However, previous studies have not sufficiently addressed non-thermal escape processes for hydrogen, which is the abundant atmospheric component in the upper atmosphere. Furthermore, because the Kronian and solar winds have not been treated with the same method, there is no discussion of the differences in escape rates for the two external plasma flows. Therefore, the differential impact of the Kronian and solar winds on Titan's atmospheric evolution remains unresolved.

In this study, we employed 3D multi-component ion magnetohydrodynamic (MHD) simulations (Terada et al., 2009) to model the non-thermal escape of nitrogen and hydrogen globally, the primary constituents of Titan's atmosphere, and to compare escape rates induced by the solar and Kronian winds for the first time. The non-thermal atmospheric escape was simulated under the Kronian wind conditions of O^+ :0.2[cm^{-3}] density, H^+ :0.1[cm^{-3}] density, 120 [km/s] velocity and 7.0 [nT] magnetic flux density (Sittler et al., 2009), resulting in an escape rate of 4.2×10^{23} [/s] for nitrogen-associated ions and 5.2×10^{24} [/s] for hydrogen-associated ions. Under the solar wind conditions of density: 0.35 [cm^{-3}], velocity: 360 [km/s], magnetic field strength: 0.5 [nT] (Bertucci et al., 2015), the escape rates were estimated to be 2.3×10^{23} [/s] for nitrogen-associated ions and 2.0×10^{24} [/s] for hydrogen-associated ions. These results suggest that the Kronian wind is more effective than the solar wind in driving the escape for both nitrogen and hydrogen. An investigation of the spatial structure of escape revealed that this difference in escape rate is due to the structure of the external plasma flow near Titan. In the case of the Kronian wind, the ion escape region expanded in altitude because of no bow shock formation due to its low velocity, while in the case of the solar wind, the bow shock was formed, which made the escape region shrink toward lower altitudes compared to that of the Kronian wind. Therefore, the escape rate under Saturn wind conditions is considered to exceed that under solar wind conditions.

We estimated the non-thermal escape rates for nitrogen- and hydrogen-based ions, which are the major components of Titan's atmosphere, by determining their sums, respectively. In future work, we plan to quantitatively evaluate the escape rates and investigate the underlying mechanisms for each ion species individually. In this presentation, we report the current status of our study.

土星の衛星タイタンは、太陽系惑星の衛星の中で唯一豊富な表面で1気圧の大気を持つ。タイタン大気の組成は、生命起源の酸素が増え始める直前の初期地球の窒素大気と類似している(窒素:94%、メタン:5%、水素:1% Magee et al., 2009)。タイタン大気の進化過程を明らかにできれば、初期地球の大気進化の解明に寄与すると考えられる。特にイオンピックアップやスパッタリング等によって駆動される非熱的散逸過程は、大気粒子へのエネルギー付与率が太陽のEUV照射よりも上層大気で優位であることが示唆されている(Micheal et al., 2005)ため、大気進化解明の上で重要である。

タイタンは通常土星磁気圏内に位置し、エンセラダスの内部海起源の O^+ や H^+ で構成されるプラズマ(以下、土星風)に吹き付けられている。しかし太陽風動圧が強くなると磁気圏が縮小し、タイタンが土星磁気圏界面の外に出て(Bertucci et al., 2008)、大気は太陽風 H^+ の影響を大きく受けるはずである。土星風や太陽風といった外部プラズマ流による非熱的散逸への影響を解明するには、断片的な探査機観測では困難であるため、数値シミュレーションによる再現が観測と併用

されてきた (Modolo et al., 2008; Strobel, 2009; Gu et al., 2019)。しかし先行研究では、タイタン上層大気で豊富な水素について非熱的散逸の取り扱いがない。また、土星風と太陽風を同じ手法で扱っていないため、2つの外部プラズマ流に対する散逸率の相違点等は議論はなされていない。そのため、土星風と太陽風による大気進化の違い等については未解明である。

そこで本研究は、3次元多成分イオン MHD シミュレーション (Terada et al., 2009) を用いて、大気の主成分である窒素と水素について非熱的散逸を全球的に模擬し、太陽風と土星風による散逸率の比較を初めて行った。カッシーニのその場観測データをもとに、土星風条件を O^+ : 密度 $0.2[cm^{-3}]$ 、 H^+ : 密度 $0.1[cm^{-3}]$ 、速度 $120[km/s]$ 、磁場強度 $7.0[nT]$ (Sittler et al., 2010) として散逸率を見積もった結果、散逸率が、窒素系イオン: $4.2 \times 10^{23}[s]$ 、水素系イオン: $5.2 \times 10^{24}[s]$ であった。一方、太陽風条件を密度 $0.35[cm^{-3}]$ 、速度 $360[km/s]$ 、磁場強度 $0.5[nT]$ (Bertucci et al., 2015) として、散逸率を見積もった結果、窒素系イオン: $2.3 \times 10^{23}[s]$ 、水素系イオン: $2.0 \times 10^{24}[s]$ となった。これらの結果から、土星風は窒素、水素の両方において太陽風よりも散逸を促進する働きがあるとわかった。散逸の空間構造を調査した結果、この散逸率の違いは、タイタン付近の外部プラズマ流の構造に起因している事がわかった。土星風の場合、速度が遅いためにバウショックが形成されずイオンの散逸領域が拡大した一方、太陽風はバウショックが形成され、土星風に比べて散逸領域が低高度にむかって縮小した。このため、土星風による散逸率が、太陽風による散逸率を上回る結果になったと考えられる。

本研究ではタイタン大気の主要成分である窒素系イオン、水素系イオンについてそれぞれ総和を求めて非熱的散逸率を推定したが、今後は、イオン種ごとに分けて散逸率の定量評価や散逸メカニズムを議論する予定である。本発表では、上記の現状を報告する。