

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

#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 東北大学・理・地球物理, (³ 東京大学, (⁴ 北海道大学, (⁵ 東北大学・理)

Comparison of Titan's atmospheric escape processes by Saturn and Solar winds using 3D magnetohydrodynamic simulations

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

(¹Tokyo University of Science, (²Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, (³The University of Tokyo, (⁴Hokkaido University, (⁵Graduate School of Science, Tohoku University)

Titan is the only body in our solar system with an abundant atmosphere of 1 atm pressure on the surface. Titan's atmosphere is nitrogen-dominated (nitrogen: 94%, methane: 5%, hydrogen: 1% Magee et al., 2009), like the atmospheric composition of past Earth just before biotic oxygen began to increase. Therefore, the evolutionary process of Titan's atmosphere is essential for elucidating the atmospheric evolution of the past Earth. 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 EUV in the upper atmosphere (Micheal et al., 2005), which is important for elucidating atmospheric evolution. Titan is located in Saturn's magnetosphere in almost all orbital phases and is blown by mainly the O⁺ and H⁺ in the magnetospheric plasma (Saturn wind). However, solar wind protons H⁺ should significantly affect the atmosphere when the magnetosphere shrinks as the solar wind dynamic pressure increases, and Titan moves out of Saturn's magnetosphere (Bertucci et al., 2008). Since the global extent of non-thermal escape by the external plasma flows, the Saturn and solar winds are difficult to study only with spacecraft observations, numerical simulations have been used in comparison with observations (Modolo et al., 2008; Strobel, 2009; Gu et al., 2019). However, the previous studies did not treat the non-thermal escape for hydrogen and also not the Saturn and solar winds by the same method, thus the differences in the escape rates for the two external plasma flows were not fully discussed.

In this study, we simulated the global non-thermal escape of nitrogen and hydrogen, which are the main components of the atmosphere, using a 3D multi-component ion magnetohydrodynamic simulation developed by Terada et al. (2009), and evaluated the escape rate by the Saturn wind in comparison with that by the solar wind for the first time.

The non-thermal atmospheric escape was simulated under the Saturn wind conditions of O⁺:0.2[cm⁻³] density, 120 [km/s] velocity, 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 3.6×10^{23} [/s] for nitrogen-associated ions and 9.9×10^{23} [/s] for hydrogen-associated ions. On the other hand, under solar wind conditions with a density of 0.35 [cm⁻³], a velocity of 360[km/s], and 0.5[nT] magnetic flux density (Bertucci et al., 2015), it resulted in 1.4×10^{23} [/s] for the nitrogen-associated ions and 9.1×10^{24} [/s] for the hydrogen-associated ions. These results indicate that the Saturn wind suppresses the escape of the hydrogen-associated ions and enhances that of nitrogen-associated ions compared to the solar wind. This suggests that Saturn and solar winds control the abundance of hydrogen in Titan's atmosphere. The Saturn wind promotes a more hydrogen-rich reduced atmospheric composition, and the solar wind promotes oxidation. The quantitative evaluation of the escape rates for each ion species and the escape mechanisms still need to be evaluated, which we investigate in detail in the future. In this presentation, we report the current status of the above.

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、酸素が増え始める直前の初期地球の窒素大気のと類似している(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EUVによるもの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磁気圏プラズマ中の主にO⁺やH⁺(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の全容を解明するには、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、水素について非熱的散逸の取り扱いがなく、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評価を初めて行った。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]、速度120[km/s]、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: 3.6×10^{23} [/s]、水素系イオン: 9.9×10^{23} [/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: 1.4×10^{23} [/s]、水素系イオン: 9.1×10^{24} [/s] となった。これらの結果から、土星風は太陽風に比べて水素系イオンの散逸を抑制し、窒素系イオンの散逸を促進させることがわかった。これは土星風と太陽風がタイタン大気の水素の存在率を制御することを示唆しており、土星風はより水素が豊富な還元型の大気組成を促進し、太陽風は酸化を促進する働きがあると考えられる。本研究ではタイタン大気的主要成分である窒素、水素について非熱的散逸の合計散逸率を推定したが、今後は、各イオン種の散逸率の定量評価や散逸のメカニズムについて精査していく予定である。本発表では、上記の現状を報告する。