

### 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

#草野 百合<sup>1)</sup>, 木村 智樹<sup>1)</sup>, 堺 正太郎<sup>2)</sup>, 吉田 辰哉<sup>2)</sup>, 前田 優樹<sup>3)</sup>, 中田 英太郎<sup>4)</sup>, 高田 亮馬<sup>1)</sup>, 寺田 直樹<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup> 理科大, (<sup>2)</sup> 東北大, (<sup>3)</sup> 東大, (<sup>4)</sup> 北大)

### Non-thermal escape of expanded hydrogen atmosphere on early Earth modeled by a 3D multispecies magnetohydrodynamic simulation

#Yuri Kusano<sup>1)</sup>, Tomoki Kimura<sup>1)</sup>, Shotaro Sakai<sup>2)</sup>, Tatsuya Yoshida<sup>2)</sup>, Yuki Maeda<sup>3)</sup>, Eitaro Nakada<sup>4)</sup>, Ryoma Takada<sup>1)</sup>, Naoki Terada<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup> Tokyo University of Science, (<sup>2)</sup> Tohoku University, (<sup>3)</sup> The University of Tokyo, (<sup>4)</sup> Hokkaido University)

The most important element for Earth and other planets to hold oceans on the surface is the atmosphere. The atmospheric evolution has been controlled by the supply of gas from Earth's crust and its escape into space. Non-thermal atmospheric escape, such as ion pickup, which is one of the major processes of atmospheric escape, depends on the planet's intrinsic magnetic field, the solar wind, and solar XUV flux. Quantitative evaluation and long-term variability of each process are important for understanding the atmospheric evolution, but there is a lack of in-situ observations of the escape regions of each planet, which is a major unsolved problem. Previous studies have estimated the non-thermal escape rates from the planetary atmospheres such as Mars and Venus, using the global numerical simulations. For example, the atmospheric escape simulation of past Mars have shown that when the XUV flux increases 100 times compared to the present day, the atmospheric temperature (Kulikov et al., 2007) and ion production rate increase, and the escape rate increases by  $10^{4-5}$  times (Terada et al., 2009). However, these studies are based on estimates of the composition of the present neutral atmosphere and are based on the assumption that the early Martian atmosphere was CO<sub>2</sub>-rich and dry with a low greenhouse effect as well as the present Mars. On the other hand, the early atmosphere likely had a hydrogen-dominant atmosphere (Yoshida and Kuramoto., 2021), which is different from the present. A similar problem remains unresolved on Earth.

Here we hypothesized a hydrogen atmosphere of the early Earth (Yoshida and Kuramoto., 2021, altitude range of 1000~185000km, the maximum density of  $3 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ ), assuming an XUV flux 100 times larger than present, and investigated the non-thermal escape rate of atmospheric ions using a 3D multispecies magnetohydrodynamic (MHD) model (Terada et al., 2009). We assume that the early earth was in a non-magnetized period, when the influence of the solar wind would be large, such as during geomagnetic reversals. We set the solar wind speed to 1800 km/s, density to 2100/cc, and IMF absolute value to 7nT. As a result, the atmospheric escape rate at  $200 R_p$  on the night side is found to be  $4.0 \times 10^{28}/\text{s}$  for H<sub>2</sub><sup>+</sup> and  $5.0 \times 10^{33}/\text{s}$  for H<sup>+</sup>. ( $R_p$  is the radius of the Earth 6380 km.) A bow shock was formed at about  $60 R_p$  on the dayside, and inside it, an expanded ionosphere was formed with the maximum plasma density of  $5.4 \times 10^6/\text{cc}$  due to the expanded atmosphere. The altitudes where the escape rates are large corresponds to the expanded ionosphere. The solar wind magnetic field penetrated into the expanding ionosphere on the dayside, and the magnetic flux density of the IMF was amplified by a factor of 300 to form an induced magnetosphere with a maximum magnetic flux density of 2000 nT. In addition, we estimated that the early hydrogen atmosphere (Yoshida and Kuramoto., 2021) depletes in 8.5 million years by this non-thermal escape rate. This results suggests that not only thermal escape but also nonthermal escape is significant for the early Earth atmospheric escape. We plan to investigate the dependence of atmospheric escape rate on the IMF, the solar XUV flux and solar wind dynamic pressure. We report the current status of our study in the presentation.

地球その他の惑星が表層に海洋を保持するために最も重要な要素は大気である。大気は、地殻からのガス供給と、宇宙空間への散逸にその収支を制御されながら進化してきた。宇宙空間への大気散逸の中でも主要なプロセスの1つである、イオンピックアップ等の非熱的散逸は、惑星の固有磁場、太陽風、太陽からの XUV フラックスに依存する。各過程の定量評価や長期変動の理解は進化の解明の上で重要だが、各惑星ともに散逸領域のその場観測等が不足しており、未解決の大問題である。先行研究では火星、金星などの惑星大気からの非熱的散逸率を、数値シミュレーションを使って全球的に推定している。例えば過去の火星を想定した大気のシミュレーションでは、XUV フラックスが現代と比較して 100 倍になると、大気の温度 (Kulikov et al., 2007) とイオン生成率が上昇し、散逸率も  $10^{4-5}$  倍増加する (Terada et al., 2009) ことが明らかになっている。しかしこれらの研究では現在の中性大気の組成をもとに推定されており、過去の火星大気も CO<sub>2</sub> 主体で温室効果が低く乾燥していたという仮定の元で成り立っている。一方、実際の過去の大気は現代と異なり水素が有意に含まれている組成であった可能性がある (Yoshida and Kuramoto., 2021)。地球においても同様の点が未解決のままである。そこで本研究は、現代の 100 倍の XUV フラックスを想定し、過去の地球における組成を反映した水素大気 (Yoshida and Kuramoto., 2021, 高度 1000~185000km, 最大密度  $3 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ ) を仮定し、多成分イオン MHD モデル (Terada et al., 2009) を使って大気起源イオンの非熱的散逸率を調べた。原始地球は地磁気反転時等で太陽風の影響が大きいと思われる非磁化の時代を仮定し、太陽風は速度 1800km/s, 密度 2100/cc, IMF 絶対値を 7nT に設定した。その結果夜側  $200R_p$  ( $R_p$  は地球の半径、地表を  $R_p$  とする。) での大気散逸率は H<sub>2</sub><sup>+</sup> が  $4.0 \times 10^{28}/\text{s}$ 、H<sup>+</sup> が  $5.0 \times 10^{33}/\text{s}$  という

結果が得られた。また昼側約  $60R_p$  でバウショックが形成され、その内側で高密度の（最大プラズマ密度  $\sim 5.4 \times 10^6/\text{cc}$ ）膨張した電離圏が形成された。散逸の大きい高度は膨張した電離圏に対応している。太陽風磁場が昼側の膨張電離圏に浸透・堆積し、IMF の磁束密度が 300 倍に増幅されて最大磁束密度 2000nT の誘導磁気圏が形成された。またこの非熱的な散逸率によって、初期の水素大気 (Yoshida and Kuramoto., 2021) は 850 万年で枯渇すると見積もられた。これは過去有意であると考えられていた熱的散逸 (Yoshida and Kuramoto., 2021) による枯渇時間の 50 分の 1 の時間である。つまり、過去の水素大気について、熱的散逸だけではなく非熱的散逸も無視できない可能性が示唆された。今後は、IMF の影響と XUV フラックス、太陽風動圧による変化を調べる予定である。発表では、本研究の現状を報告する。