

R009-22

A 会場 : 11/25 AM1 (9:15-10:45)

10:30~10:45:00

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

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

Non-thermal escape of hydrogen atmosphere on early Earth by a 3D multispecies MHD simulation

#Yuri Kusano¹⁾, Tomoki KIMURA¹⁾, Shotaro SAKAI²⁾, Tatsuya Yoshida³⁾, Yuki Maeda⁴⁾, Eitaro Nakada⁵⁾, Ryoma TAKADA¹⁾, Naoki TERADA³⁾

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

The presence of an atmosphere is crucial for a planet—such as Earth—to retain surface oceans. Part of Earth's primordial atmosphere, formed during its accretion, is believed to have originated from nebular gas composed mainly of hydrogen and helium. Over time, this atmosphere evolved to its present form as a result of the balance between the supply of gas from Earth's interior and atmospheric loss to space. Previous studies have used global numerical simulations to estimate the magnitude of thermal escape, which likely played a key role in the loss of hydrogen from the early atmosphere, while nonthermal escape mechanisms—such as ion pickup—have been considered negligible for the atmospheric escape (Tian et al., 2005; Johnson et al., 2013). In contrast, Lichtenegger et al. (2010) investigated the relationship between the exobase and the magnetopause from 4.4 billion years ago to the present and proposed that strong solar XUV radiation may have made the ancient atmosphere expand beyond the magnetopause. This suggests nonthermal escape could have been significant in the past. However, no quantitative evaluation of nonthermal escape rates from the early hydrogen-rich atmosphere has been conducted (Wang, Zhou, and Liu, 2022).

In this study, we assess the nonthermal escape of ionized atmospheric hydrogen using a multi-species ion MHD model (Terada et al., 2009). We assume a hydrogen-rich atmosphere simulating early Earth's composition (Yoshida and Kuramoto, 2021), which is heated by the solar XUV at a flux 100 times greater than today, extending at 1,000-185,000 km in altitude. The model distinguishes between atmospheric-origin and solar wind-origin hydrogen, enabling separate evaluations of their escape rates. We assume a non-magnetized Earth, as might occur during geomagnetic reversals, with solar wind parameters with a velocity of 1,800 km/s, density of 2100/cm³, and IMF strength of 7 nT. Under these conditions, atmospheric escape fluxes at 1000R_p downstream (where R_p is Earth's radius) were estimated as 3.5×10^{31} /s for H⁺ and 1.1×10^{31} /s for H₂⁺. These values correspond to 5-19% of the thermal escape rate of 2.4×10^{32} /s- 9.2×10^{32} /s estimated by Yoshida and Kuramoto (2021) at <30R_p. This indicates that a part of the atmosphere heated by thermal processes reaches higher altitudes, where it interacts with the solar wind and escapes via nonthermal mechanisms. Based on the ratio of nonthermal to thermal escape rates, 5-19% of hydrogen may have escaped through solar wind interactions, while the remaining 81-95% escaped thermally as neutral particles at altitudes greater than 30R_p. We are planning to evaluate the effects of IMF strength, XUV flux variation, and solar wind dynamic pressure on these escape ratios. In this presentation, we report the current progress on our study.

地球を含む惑星が表層に海洋を保持するためには、大気が存在が極めて重要である。集積時に形成された地球の初期大気の一部は、水素とヘリウムを主成分とする星雲ガス由来のものであったと考えられており、地球内部からのガス供給と、宇宙空間への散逸にその収支を制御されながら現代の大気へと進化してきた。先行研究では初期地球の水素大気で主要な役割を果たしたとされる熱的散逸の大きさを、数値シミュレーションを使って全球的に推定してきた。これとは対照的に、イオンピックアップ等の非熱的散逸は、影響が非常に小さく、無視できる程度であった可能性が指摘されている (Tian et al., 2005; Johnson et al., 2013)。一方 Lichtenegger et al. (2010) では、44 億年前から現代までの地球の外圏底と磁気圏界面の位置関係を調べ、強い太陽 XUV(X 線及び極紫外線) 放射によって過去の大気は膨張し、磁気圏界面の外側まで広がっていた可能性を示した。これにより、イオンピックアップ等の非熱的散逸が顕著に生じていた可能性が指摘されている。ただし、初期地球における水素大気の非熱的散逸率の定量化は、未だ行われていない (Wang, Zhou and Liu, 2022)。

そこで本研究は、現代の 100 倍の太陽 XUV フラックスを想定し、形成直後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 3×10^{12} /cm³) について、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評価した。本研究では、多成分イオンモデリングの利点を活かし、大気起源の水素と太陽風起源の水素を分離しつつ非熱的散逸率を評価した。初期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想定し、地球の固有磁場は無し、太陽風は速度 1800km/s、密度 2100/cm³、IMF 強度を 7nT に設定した。その結果太陽風下流 1000R_p、(R_p は地球の半径、地表を 1R_p とする。) での大気散逸率は H₂⁺ が 1.1×10^{31} /s、H⁺ が 3.5×10^{31} /s と推定された。これは、Yoshida and Kuramoto(2021) が 30R_p 以下の高度領域で推定した水素大気の熱的散逸率 (2.4×10^{32} /s- 9.2×10^{32} /s) の 5-19% に相当する。これは熱的散逸によって上昇してきた大気の一部が、高高度での太陽風との相互作用を受けさらに非熱的過程で散逸していることを示唆している。非熱的

散逸率と熱的散逸率の比率から、高度 $30R_p$ 以上では、5-19% が太陽風との相互作用を受けて非熱的に散逸し、残りの 81-95% が中性粒子のまま熱的に散逸していく可能性がある。今後は、これらの比率に対する IMF の影響と XUV フラックス、太陽風動圧による変化を評価する予定である。発表では、本研究の現状を報告する。