

## 初期地球型惑星大気における流体力学的散逸と太陽フレアの影響

# 古橋 尚典 [1]; 寺田 香織 [2]; 佐々木 貴教 [3]; 関 華奈子 [4]; 市川 義則 [5]; 藤原 均 [6]; 寺田 直樹 [7]; 笠羽 康正 [8]  
[1] 東北大・理・地物; [2] 東北大・理・地物; [3] 東工大・理・地惑; [4] 名大STE研; [5] 東北大・理・地物; [6] 成蹊大・理工; [7] 東北大・理・地物; [8] 東北大・理

### Hydrodynamic escape of the early atmosphere of a terrestrial planet and the effect of solar flares

# Naomichi Furuhashi[1]; Kaori Terada[2]; Takanori Sasaki[3]; Kanako Seki[4]; Yoshinori Ichikawa[5]; Hitoshi Fujiwara[6]; Naoki Terada[7]; Yasumasa Kasaba[8]

[1] Planetary Physics, Tohoku Univ; [2] Geophys., Tohoku Univ.; [3] Earth and Planetary Sciences, Tokyo Tech; [4] STEL, Nagoya Univ.; [5] Geophysics, Tohoku Univ.; [6] Faculty of Science and Technology, Seikei University; [7] Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.; [8] Tohoku Univ.

There are very small H<sub>2</sub>O contents in the atmosphere and on the surface of contemporary terrestrial planets compared to the H<sub>2</sub>O contents in proto-atmosphere and in accreting materials during the late-stage accretion (late veneer). To remove this large H<sub>2</sub>O contents, massive escape to space and/or to underground is needed. Hydrodynamic escape is a mechanism that could cause a massive atmospheric escape. It is thought that it has influenced the evolution of planetary atmospheres. Solar flare is one of the candidates that exert a large influence on atmospheric escape. In Ichikawa et al. (2012), we investigated the influences of a solar flare on the structures of the Martian and Venusian thermospheres for the present day and the past (3.6 Gyr ago), where enhancement of the solar EUV radiation associated with a solar flare and its temporal heating of the upper atmospheres were considered. As a result, it was shown that the variation in the location of the upper boundary of atmosphere (exobase) is remarkable both at the present day and the past. Additionally, it is expected that solar flares have a larger energy and a higher frequency of occurrence in the past. Then, the influence of the solar flares for atmospheric escape may have been more significant than that considered in Ichikawa et al. (2012).

To consider the effect of solar flares, a model that is able to trace the time variation of the upper atmosphere is needed. Several numerical models have been developed to solve the hydrodynamic escape problem. However, they limited the bulk velocity of atmosphere to subsonic and could not trace the time variation. Recently, Tian et al. (2005) developed a numerical transonic hydrodynamic escape model that can trace the time variation. The model enabled to estimate a more realistic escape rate. Tian et al. (2008) developed a multi-component model that ignored time variation (limit the bulk velocity of atmosphere to subsonic), and applied it to the present Earth's thermosphere under extreme solar EUV conditions, and showed how the vertical structure of the Earth's thermosphere change responding to the change in the solar EUV radiation. Sasaki (2008) developed a transonic multi-component hydrodynamic escape model, and applied it to the problem for the water loss and the fractionation of noble gas from early Venus atmosphere.

In this study, we investigate the time variations of the atmospheric structure and atmospheric components under the influence of solar flares in early epoch. However, previous models have a difficulty in investigating their time variations. For example, the model of Tian et al. (2008) cannot trace time variation and that of Sasaki (2008) does not consider the effects of CO<sub>2</sub>-15 micrometer cooling and chemical reactions. So, in this study, we develop a numerical transonic hydrodynamic escape model to trace the time variations, and examine the influence of solar flares on the escape rate. In Ichikawa et al. (2012), it was shown that the altitude of the upper boundary of atmosphere (exobase) and the exobase temperature increase responding to the occurrence of a solar flare. Then, it was suggested that the escape rate of atmosphere also increases. Moreover, the effect of chemical reactions may influence significantly on the escape rate of O atoms. Additionally, when the intensity of the solar EUV radiation increases associated with a solar flare, the contents of O atoms would increase because CO<sub>2</sub> photodissociation would proceed more effectively. Then, the escape rate of O atoms is expected to increase. In this study, we investigate the influences of solar flares on the escape rate of O: (1) the increase of the escape rate, (2) variation of the atmospheric components and the resulting variation of the O atom escape rate.

現代の地球型惑星大気や表層における水量は、原始大気や惑星集積末期に集積した物質に含まれていたと考えられる水量と比べて非常に少ない。この多量の水を消失させるには、大規模な宇宙空間への散逸および/もしくは地殻・マントルへの取り込みが必要となる。いくつかある散逸過程の中でも、惑星形成初期において、流体力学的散逸は大規模な大気散逸を引き起こすメカニズムであり、大気進化に大きな影響を与えたと考えられている。また、大気散逸に大きな影響を与える効果として太陽フレアがある。我々は Ichikawa et al. (2012) において、太陽フレアによって一時的に超高層大気を温める太陽 EUV 放射が増大することでどの程度、火星・金星の熱圏構造に影響があるのか、それぞれの惑星の現代~過去(36億年前)に渡って調べた。その結果、現代でも過去においても散逸を起こす大気上端において無視できない変動が起こることが示唆された。さらに太陽フレアは過去に向かうほどより大きなエネルギーを持ち、より高い頻度で発生したと考えられているため、Ichikawa et al. (2012) で考えられている以上に散逸に対して大きな変動があるかもしれない。

太陽フレアの影響を考慮するためには、時間的な変動を見ることが出来るモデルが必要である。しかし、流体力学的散逸についてこれまでに多くの研究が行われてきたが、その数値計算法は大気の運動速度を亜音速に制限しなければ

計算することができず、時間的な変動も見ることができなかった。最近になって時間変動を見ることが可能な単一組成大気に対する遷音速の流体力学的散逸を計算する数値計算モデルが Tian et al. (2005) によって開発されたことで、より現実的な散逸量を見積ることができるようになった。Tian et al. (2008) では、時間変動を考慮しない（大気の運動速度を亜音速に制限した）多成分大気モデルを現代の地球大気に適用し、EUV 放射の変化に対して地球熱圏の鉛直構造がどのように変化するかが示された。また、Sasaki (2008) では、遷音速多成分大気モデルが開発され、過去の金星大気における水の散逸と希ガス同位体比の問題が調べられた。

本研究では、太陽フレアによる初期惑星大気への影響が発生した後、フレアが起こる前の状態に戻るまでの大気構造の時間的な変動や大気組成の変動などを調査することを目的としている。しかしながら既存のモデルでは、これらの変動を調査することは困難であった。例えば、Tian et al. (2008) のモデルは時間変動を追うことができず、Sasaki (2008) のモデルでは主要な冷却効果や化学反応などの効果が考慮されていないなどの問題があった。そこで本研究では、上記二つの計算モデルを踏まえ、新しく大気的时间的な変動を追うことができる遷音速多成分流体力学的散逸モデルを開発し、太陽フレアによる散逸率の影響を調査する。Ichikawa et al. (2012) では太陽フレアの発生により大気上端（エグゾベース）の高度が上昇し、また、大気温度も上昇することが示唆されているため、流体力学的散逸による散逸量も増加することが見込まれる。また、化学反応の効果が O 原子の散逸量に大きな影響をもたらす可能性もある。太陽フレアの発生により EUV 放射強度が増大することで、CO<sub>2</sub> の光解離の効果が強まり O 原子の量が増え、結果的に O 原子の散逸量が増えることが予想される。本研究では、これらの太陽フレアによって発生すると考えられる散逸量に対する影響 (1) 散逸率の増大、(2) 大気組成の変動とその結果としての O 原子散逸率の変動を調べる。