

## 後期重爆撃期の天体衝突による地球大気の流れ力学的な大気散逸数値モデルの開発

#名和 樹生<sup>1)</sup>, 木村 智樹<sup>1)</sup>, 吉田 辰哉<sup>2)</sup>, 寺田 直樹<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 東京理科大, <sup>2)</sup> 東北大・理・地球物理

## Development of a numerical model for atmospheric hydrodynamic escape in early Earth driven by celestial impacts

#Tatsuki Nawa<sup>1)</sup>, Tomoki Kimura<sup>1)</sup>, Tatsuya Yoshida<sup>2)</sup>, Naoki Terada<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Tokyo University of Science, <sup>2)</sup> Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

The primordial atmosphere of early Earth was likely formed from hydrogen-based solar nebula gas and water vapor and carbon dioxide ejected from the Earth's interior by celestial collisions and other events. The atmospheric gases were lost by hydrodynamic escape from the early Earth (Yoshida et al., 2020). About 3.8 billion years ago, when life emerged, the Earth was in the middle of or just after the Late Heavy Bombardment Period (LHBP) with frequent celestial impact events. Although many studies addressed atmospheric escape due to a single large-scale impact event during LHBP (Shuvalov et al., 2013), there has been no study for atmospheric escape due to frequent and small celestial impact events. Therefore, the total contribution of the celestial impacts to early Earth's atmospheric escape has yet to be quantified. In this study, we combined a numerical model of hydrodynamic escape due to solar X-ray - Ultraviolet (XUV) heating proposed by Yoshida et al. (2021) with our newly developed model for the atmospheric heating by small-scale frequent celestial impact events as an energy source, with which we assess the effect of celestial impact events on the Earth's atmospheric environment when life began. Based on the impact flux distribution measurement for the diameter of craters formed in the lunar Nectaris basin (Marchi et al., 2012) and the scaling law between the crater and impactor diameters (Morbidelli et al., 2018), we obtained a relation between the impactor diameter and impact flux during the late heavy bombardment. With the obtained impactor diameter-flux relation and an analytical model for the kinetic energy of an impactor entering the atmosphere (Collins et al., 2005), we derived the altitude distribution of the atmospheric heating rate by the impactors during celestial impact events over about 200 million years. As a result, the frequent and small celestial impacts during the late heavy bombardment were found to be a heating rate of  $\sim 10^{(-10)}[\text{J}/\text{m}^3/\text{s}]$  at altitudes of 0-500 [km]. Also, the instantaneous heating rate for a single small impact was  $\sim 10^3[\text{J}/\text{m}^3/\text{s}]$  at altitudes of 0-500 [km]. This is comparable to atmospheric heating rates of  $\sim 10^{(-8)} - 10^{(-11)}[\text{J}/\text{m}^3/\text{s}]$  at altitudes of 1000 - 190000 [km] due to the XUV heating during the same period. We are implementing this impactor heating rate model in the hydrodynamic escape model of Yoshida et al. (2021). The current status will be presented in this presentation.

原始地球大気は水素を主成分とする太陽系星間ガスと、天体衝突などで地球内部から噴き出した水蒸気や二酸化炭素が主体のガスで形成されていると考えられ、それらは特に初期地球では流体力学的散逸によって失われるとされている (Yoshida et al., 2020)。生命の誕生した約 38 億年前は後期重爆撃期の最中、もしくは直後であり、天体衝突が盛んであったと考えられる。一度の大規模な天体衝突イベントが引き起こす大気散逸を扱った研究は多くあるが (Shuvalov et al., 2013)、特定の期間の間頻繁に起こった天体衝突イベントを介した大気加熱による流体力学的な大気散逸を扱った数値シミュレーションは先例がなく、初期地球大気散逸に対する天体衝突の影響の全容は解明されていない。そこで本研究では、先行研究 (Yoshida et al., 2021) で提案された、太陽極端紫外光 (XUV) 加熱に伴う流体力学的な大気散逸の数値モデルに、新たなエネルギー源として小規模な天体衝突の際に大気に供給された熱エネルギーモデルを組み込むことによって、天体衝突による流体力学的な大気散逸シミュレーションを行う。これにより、生命誕生時の地球大気環境において、天体衝突の及ぼす影響を評価する。まず、月のネクタリス盆地に形成されたクレーターの直径に対する衝突フラックス分布 (Marchi et al., 2012) と、クレーター直径と衝突天体の直径のスケーリング則 (Morbidelli et al., 2018) により、後期重爆撃期における衝突天体の直径とフラックスの関係式を求めた。そして天体の大気突入時の直径や運動エネルギー変化を記述した解析モデル (Collins et al, 2005)、に、得られた直径-フラックスの関係式を組み込むことで、約 2 億年の間の天体衝突の際に、大気に供給される加熱率の高度分布を導出した。その結果、後期重爆撃期の天体衝突は、高度 0-500[km] で  $\sim 10^{(-10)}[\text{J}/\text{m}^3/\text{s}]$  の加熱率をもつことが分かった。これは同時期の、高度 1000-190000[km] における、太陽 XUV による大気加熱率  $10^{(-8)} - 10^{(-11)}[\text{J}/\text{m}^3/\text{s}]$  と同程度である。また、1 回の小天体衝突による瞬間的な加熱率は  $\sim 10^3[\text{J}/\text{m}^3/\text{s}]$  であり、太陽 XUV と比較して非常に高い加熱率である。この天体衝突熱源モデルを、Yoshida et al. (2021) のモデルに新たに組み込み、衝突加熱の効果を初めて入れた流体力学的な大気散逸のシミュレーションを行う予定である。本発表ではその結果を報告する。