

初期地球大気からの流体力学的散逸の数値モデリング Numerical modeling of hydrodynamic escape from early Earth atmosphere

梅本 隆史¹, 倉本 圭^{1*}

UMEMOTO, Takafumi¹, KURAMOTO, Kiyoshi^{1*}

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

¹Department of CosmoSciences, Graduate School of Sciences, Hokkaido University

酸素発生以前の初期地球大気の組成は水素の宇宙空間への散逸に伴って還元的なものから酸化的なものに変化していったと考えられており、その変化の速さは初期地球が生命前駆物質の合成に適した表層環境であったか議論する上で、また初期地球で起こった気候変動を理解する上でも重要である。旧来の理解では、若い太陽の強い太陽 EUV 放射が惑星の上層大気を加熱膨張することによって駆動される流体力学的散逸によって水素の散逸は急速に進んだと考えられていた。

これに対し、最近 Tian et al. (2005, 以下 T05) は初期地球大気からの水素分子の流体力学的散逸を数値的に調べ、従来の見積りよりも散逸率が小さく、そのため還元的な表層環境が長期間保持された可能性があると主張した。しかし、T05 の計算には質量保存を満たしていないという致命的な問題がある。

本研究では、まず T05 の再計算を行い、彼らが用いた Lax-Friedrichs 法による流体力学的散逸計算の妥当性について検討した。その結果、この流体力学的散逸計算は強い数値拡散によって質量保存を満たすことができず、エネルギー保存式も解いた場合、数値拡散の寄与を減らし質量保存を満たすほど、散逸率が上昇することが分かった。これは、T05 が散逸率を過小評価していることを意味する。

そこで、本研究では質量保存を満たす CIP 法と CIP-CSL2 法を用い、水素分子一成分、球対称一次元を仮定した時間発展非粘性流体方程式の数値モデルを新たに構築し、T05 と同様の条件を与えて、流体力学的散逸の物理的性質や計算結果を比較した。その結果、下端数密度が $n_0 = 5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 以上かつ現在の 5 倍以上の強さの太陽 EUV 放射を与えた場合、流体力学的散逸はエネルギー律速の性質を持ち、同じパラメータ設定における T05 の計算結果の 5-10 倍の散逸率を得た。一方、下部数密度や太陽 EUV 放射を小さくして大気へのエネルギー付与を小さくすると、散逸率は T05 よりもむしろ小さくなる。これは、新たな計算モデルでは上部境界から外向きに流出する熱伝導フラックスへのエネルギー分配が重要になるため、T05 では彼らの求めた温度分布から判断すると外向きの熱伝導フラックスが 0 となるように境界条件を置いたと思われる。

太古代後期に期待される太陽 EUV 放射が現在の 2.5 倍、地球内部からの水素脱ガス率が現在の 5 倍の条件を与えた場合、散逸率と脱ガス率が釣り合う下端水素分子数密度を新たな計算結果をもとに求めると、初期地球大気中の水素分子濃度は約 7% と推定され、T05 が提唱したような極めて高い水素混合率は実現されないと考えられる。また、恒星観測から太陽 EUV の強度は、太古代初期には現在の数倍以上あり、これが徐々に減衰してきたとみられることを考慮すると、散逸率と脱ガス率の釣り合う水素混合率は太古代を通じて上昇した可能性がある。水素混合率の上昇は、CO₂ に乏しい大気を形成したかもしれない。このような大気の気候は不安定になりやすいと考えられ、これは地質学的に確認されている約 22 億年前の全球凍結現象の発生と関連する可能性がある。

キーワード: 流体力学的散逸

Keywords: Hydrodynamic escape