

## 多成分ハイドロダイナミックエスケープの数値計算：金星大気の希ガス分別問題への適用

### Numerical Study of Multi-Component Hydrodynamic Escape: Application to the Fractionation of Noble Gases on Venus

# 佐々木 貴教 [1]; 阿部 豊 [2]

# Takanori Sasaki[1]; Yutaka Abe[2]

[1] 東大・理・地惑; [2] 東大・理・地球惑星科学

[1] Earth and Planetary Sci., Univ Tokyo; [2] Earth Planetary Sci., Univ. Tokyo

<http://noinoi.main.jp/>

惑星大気の捕獲と散逸の問題は、惑星の初期進化を考える上で非常に重要な問題である。そのためこれまで、捕獲した惑星大気の組成に関する研究や、巨大天体衝突に伴う大気の散逸に関する研究、太陽の EUV 加熱による大気の熱的散逸に関する研究など多くの研究が精力的になされてきた。このうち特に水素のハイドロダイナミックエスケープ、およびそれに引きずられる形でのより重い元素の散逸は、地球の初期大気問題、希ガス同位体分別問題、あるいは金星の水散逸問題などを解く上で重要な散逸過程である。実際に、ハイドロダイナミックエスケープによる大気散逸過程に伴い、地球・金星・火星の表層環境の違いが作られたことも示唆されている。さらに近年の系外惑星の大気観測に伴い、ホットジュピター・スーパーアースの大気散逸も重要な研究テーマになってきている。

しかし、ハイドロダイナミックエスケープの理論解を求めることは容易ではない。古くは 80 年代から解析的な手法による計算がなされてきたが、音速で特異点を取るため、音速を超える速度の解を正確に求めることができなかった。また、等温大気やポリトロップ大気を仮定しないと解析解が求まらないため、現実的な問題への適用は難しいのが現状であった。一方、数値計算による研究も Tian et al. (2005) などによりなされているが、大気成分が複数の場合についての数値計算は未だに実現されておらず、非常に限定的な問題しか扱えていない。

そこで本研究では、汎用的な計算コードを得ることを目的に、複数成分の大気のハイドロダイナミックエスケープを解くための計算コードを開発した。またそれを金星大気の問題に適用し、初期金星大気に関する新しい知見を得た。

複数種の大気成分間の相互作用を考慮した、多層流体 1 次元時間発展オイラー方程式を解いた。また太陽 EUV による大気加熱の効果を正確に求めるために、太陽 EUV は波長ごとに時間変化 (Ribas et al., 2005) を与え、その分配は大気成分の各高度での密度や幾何学的な体積、吸収断面積を考慮に入れて計算した。なお、多成分大気の散逸における基本的な考え方は、最も軽い  $H_2$  がハイドロダイナミックエスケープする際に他の重い分子を加速することで、他の分子と一緒に散逸させるというものである。

数値計算にはセミ・ラグランジュ法を用い、移流項は CIP 法 (Yabe et al., 2001) により、非移流項は差分法により解いた。CIP 法を用いることで、大きな密度変化を持つ系の流体方程式を滑らかに解くことができ、亜音速～遷音速～超音速まで安定に解を求めることができた。また、等温大気やポリトロップ大気の場合に解析解と一致することも確認された。これにより、初めて複数成分の大気のハイドロダイナミックエスケープを数値的に計算することが可能となった。

開発した数値計算コードを用いて多成分大気のハイドロダイナミックエスケープを計算することで、以下の金星大気問題の解決を図った。

金星大気において、Ne が少なく Ar の存在度が異常に大きいことが問題となっている (Zahnle, 1993)。この希ガス存在度を説明するためのアイデアとして、太陽組成大気から希ガスを捕獲した後に散逸によって軽い Ne のみを失ったというモデルが提案されている。そこで希ガスを散逸させるために必要な水素の散逸フラックスを見積もったところ、単純な質量分別で Ne/Ar の散逸量を適切に調節するのは難しいことがわかった。一方この Ne/Ar 分別について、CO の回転スペクトル線による大気の冷却効果を考慮することで、Ne のみが散逸可能な温度が自律的に実現される可能性が示唆されている (Zahnle & Kasting, 1986)。そこで本研究では、希ガスや CO を入れた多成分大気のハイドロダイナミックエスケープを、CO 冷却 (Tielens & Hollenbach, 1985) も考慮に入れて計算し、Ne/Ar 分別の可能性について検討した。

大気下端での CO の数密度をパラメータに、Ne と Ar のそれぞれの散逸フラックスを計算した。CO が水素と同程度の数密度で存在していれば、CO 冷却により Ne/Ar 分別が 1 桁分ほど可能であることが分かった。しかし、1 桁程度の分別では現在の金星の過剰な Ar 量は説明できず、結局原始大気からのハイドロダイナミックエスケープによって Ne と Ar の存在度を説明することは難しいことが示された。

さらに Ne/Ar 分別の程度を大きくする可能性として、 $H_2O$  冷却が考えられる。しかし  $H_2O$  冷却の効果を正確に計算することは容易ではない。そこで、簡単な近似を用いて  $H_2O$  冷却と CO 冷却の効率を比較した。その結果、 $H_2O$  冷却の方が CO 冷却よりも数倍程度大きな冷却率を持つことが示された。今後は  $H_2O$  冷却に関するより詳細な研究が求められる。