

多成分ハイドロダイナミックエスケープの数値計算：金星からの水散逸問題への適用

Numerical Study of Multi-Component Hydrodynamic Escape: Application to the Water Loss from Early 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。

金星大気の観測から、金星の表層には過去に海が存在したことが示唆されている (de Bergh et al., 1991)。またこの海は、太陽光度の上昇とともに金星が暴走温室状態に入ることによって全て蒸発・解離 ($H_2O \rightarrow H_2 + O$) したと考えられている。ここで問題となるのは、ハイドロダイナミックエスケープで直接散逸できない酸素の行方である。本研究では過去に提案されてきた、水素のハイドロダイナミックエスケープに伴う酸素の散逸の可能性について検討した。

大気下端での水素の数密度をパラメータに、水素と酸素が 1:1, 1:1.1, 1:1.5, 1:2 の状況で、それぞれの散逸フラックスを計算した。水素の方が酸素よりも常に散逸量が多いため、大気中の酸素の割合は必ず上昇する。一方、大気中の酸素の割合が増えると酸素の散逸フラックスは減少し、さらに酸素の割合が増えることになる。以上のことより、酸素は必ず大気中に溜まっていき、ハイドロダイナミックエスケープによって金星の酸素を全て散逸させることは非常に難しいことが示された。

一方で、大気中の酸素分圧が上がり過ぎると水解離の逆反応である水生成 ($H_2 + O \rightarrow H_2O$) が起きる可能性がある。今後は金星表層と大気の相互作用、非熱的散逸の効果、解離した水の逆反応などについてより詳細な研究が求められる。