

論文内容の要旨

論文題目

Numerical Study of Multi-Component Hydrodynamic Escape: Application to the Early Venusian Atmosphere

(多成分ハイドロダイナミックエスケープの数値計算：初期金星大気への適用)

氏名 佐々木 貴教

研究の背景

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2つの問題に適用し、初期金星大気に関する新しい知見を得た。

数値計算

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ー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大気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。

金星大気問題への適用

開発した数値計算コードを用いて多成分大気の大気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2つの金星大気問題の解決を図った。

金星からの海の消失

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、水素の大気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結果を図1に示している。

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。

次に、大気中に残された酸素を取り除くプロセスとして、以下の二つの可能性を考えた。(1) 地表面の酸化による酸素の消費 (Lewis & Priin, 1984) : 地球海洋と等量程度の酸素を地表面の酸化によって消費するためには、現在の地球よりも大きな地表更新率を45億間にわたって続ける必要がある、実現するのは難しい。(2) イオン化した酸素の非熱的な散逸 (Kulikov et al., 2006) : 初期金星に磁場が無く、太陽の活動度が平均的な太陽型星よりも大きければ、地球海洋と等量程度の酸素を散逸できる可能性がある。

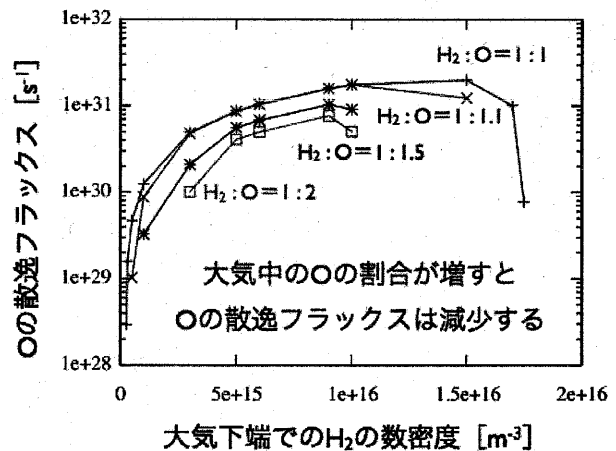


図1: Oの散逸フラックスの変化

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。

金星大気中の希ガス存在度の説明

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 (図2)、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水素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。

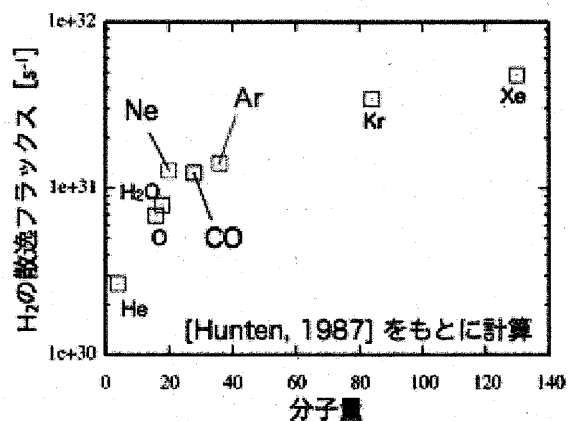


図2: 散逸に必要な水素フラックス

特徴的なケースについて、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結果を図2に示している。

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、H₂O 冷却が考えられる。しかし H₂O 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 H₂O 冷却と CO 冷却の効率を比較した。その結果、H₂O 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 H₂O 冷却に関するより詳細な研究が求められる。

参考文献

- C. de Bergh, B. Bézard, T. Owen, D. Crisp, J.-P. Maillard and B.L. Lutz, Deuterium on Venus: Observations from Earth, *Science* **251**, 547-549, 1991.
- D.M. Hunten, R.O. Pepin and J.C.G. Walker, Mass Fractionation in Hydrodynamic Escape, *Icarus* **69**, 532-549, 1987.
- Y.N. Kulikov et al., Atmospheric and Water Loss from Early Venus, *Planet. and Space Sci.* **54**, 1425-1444, 2006.
- J.S. Lewis and R.G. Prinn, *Planets and Their Atmospheres* (Academic Press, Sao Paulo), 1984.
- I. Ribas, E.F. Guinan, M. Gudel and M. Audard, Evolution of the Solar Activity over Time and Effects on Planetary Atmospheres I. High-Energy Irradiances (1-1700 Å), *ApJ* **622**, 680-694, 2005.
- F. Tian, O.B. Toon and A.A. Pavlov, Transonic Hydrodynamic Escape of Hydrogen from Extrasolar Planetary Atmosphere, *ApJ* **621**, 1049-1060, 2005.
- A.G.G.M. Tielens and D. Hollenbach, Photodissociation Regions. I. Basic Model, *ApJ* **291**, 722-746, 1985.
- T. Yabe, F. Xiao and T. Utsumi, The Constrained Interpolation Profile Method for Multiphase Analysis, *J. Comput. Phys.* **169**, 556-593, 2001.
- K.J. Zahnle and J.F. Kasting, Mass Fractionation during Transonic Escape and Implications for Loss of Water from Mars and Venus, *Icarus* **68**, 462-480, 1986.
- K. Zahnle, Planetary Noble Gases in: *Protostars and Planets III* (Univ. Arizona Press) 1305-1338, 1993.

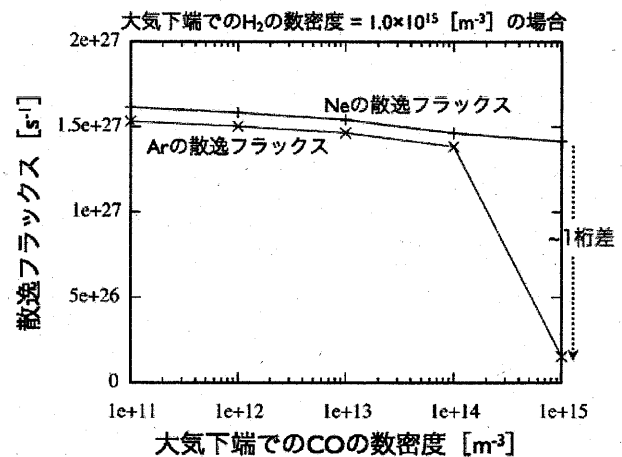


図2: Ne, Ar の散逸フラックスの変化