

平成15年度日本惑星科学会最優秀発表賞受賞論文

地球型惑星の大気形成における巨大天体衝突の影響

玄田 英典¹, 阿部 豊²,

1. 巨大天体衝突と大気散逸

地球型惑星形成の現代的描像においては、まず初めに、微惑星の集積によって火星サイズの原始惑星が地球型惑星形成領域に数十個形成される[1]。その後、これら火星サイズの原始惑星は互いに衝突を繰り返し(以降、巨大天体衝突と呼ぶ)、現在の地球型惑星が形成される[2, 3]。したがって、地球型惑星、特に地球と金星は、その形成過程末期に、複数回の巨大天体衝突を経験したと考えられている。以降、巨大天体衝突が起こる時期のことを巨大天体衝突ステージと呼ぶことにする。

巨大天体衝突が起こると、それまで原始惑星が保持していた大気は失われてしまうのだろうか？もし、すべて失われてしまうのならば、現在の地球型惑星の大気(海)は、最後の巨大天体衝突の後に作られたことになる。一方、巨大天体衝突で少なくとも一部の大気(海)が生き残るならば、巨大天体衝突以前に原始惑星が獲得した大気(海)が、地球型惑星の大気の起源に影響を及ぼしているはずである。特に、原始惑星が獲得した大気には、ネビュラガスを起源とする大量の太陽組成の希ガスが含まれている。したがって、巨大天体衝突による大気散逸の問題は、大気・海の起源と直結していること、そして、大気組成(特に希ガス)に大きな影響を及ぼすことから、重要な問題の一つであると考えられる。

一般的に、特に欧米では、ひとたび巨大天体衝突が起こると、それまで惑星が保持していた大気・海はすべて失われてしまうと、漠然と考えられてきた。巨大

天体衝突による大気散逸に関する研究は少ないが、Ahrensらの研究結果[4, 5]も、それを支持する結論を導き出している。したがって、地球型惑星の大気・海は、巨大天体衝突ステージの後のイベントで作られたと考えられるようになった。特に、隕石重爆撃期に衝突したと考えられる隕石や彗星に含まれる揮発性元素が、大気・海の起源として有力視されてきた(レイトベニア起源の大気・海と呼ばれる)。そして、当然のことだが、巨大天体衝突ステージ以前に惑星が獲得した大気は、あまり重要視されなくなった。

2. 過去の研究の問題点と我々の研究

巨大天体衝突による大気散逸のメカニズムは2つ考えられる。1つは、衝突によって惑星内部に生じた衝撃波が、惑星内部を伝播し、惑星表面を全球的に激しく外側に運動させ、大気を吹き飛ばすというメカニズムである(図1)。衝突地点付近の大気は、衝突地点付近から高速放出されるイジェクタによって、一般的には剥ぎ取られると考えられているが、惑星全体の大気量と比べるとそれほど多くない。したがって、惑星表面の全球的な運動による大気散逸が重要となってくる。大気が直接、地面の運動によって力学的に押し出されることから、力学的散逸と呼ぶことにする。2つ目の大気散逸のメカニズムとしては、巨大天体衝突によって非常に高温となった惑星表層からの大気の熱的散逸である。高温大気(特に、分子量の小さい水素)は、惑星重力に束縛されず、熱的に散逸する可能性がある。Ahrensらの研究[4, 5]は力学的散逸に注目したも

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻(受賞時)
東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻(現在)
2. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

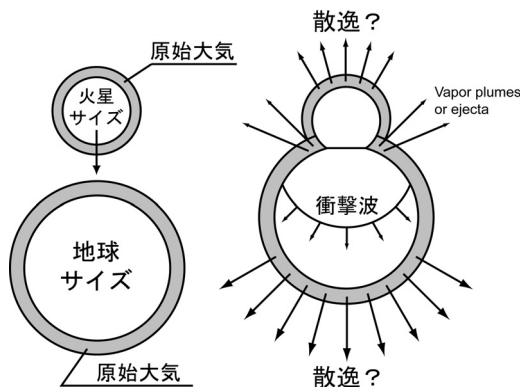


図1：力学的散逸の模式図。惑星内部に衝撃波が形成され、その衝撃波が惑星表面に達すると、惑星表面は激しく外側に運動する。この全球的な地面の運動によって惑星大気が散逸する可能性がある。

のであった。Ahrens [4] の研究は、大気がすべて散逸するために必要な地面の速度を解析的に見積もった研究で、大気的全散逸の条件は、地面速度1.6~2.8km/sと見積もられている。また、Chen and Ahrens [5] の研究は、1次元球対称の地面の運動に対する大気の運動を数値計算した研究である。いずれの研究も、巨大天体衝突で（ほとんど）すべての大気が失われるという結論を導き出している。しかし、これら過去の研究は、以下の点で間違った結論を導き出している。まず、Ahrens [4] の見積もりには理論的な間違いがあり、大気がすべて散逸する地面の速度を見積もったつもりが、実は、大気が散逸し始める条件を見積もってしまっている。そしてChen and Ahrens [5] は、後述するように計算した初期条件が少なすぎること、最終的な大気の散逸量を過大評価してしまっている。

そこで、我々は、1次元球対称のモデルを用いて、惑星表面の運動と大気の散逸量の関係を系統的に調べ、最終的に巨大天体衝突によって失われる大気の散逸量を再評価した[6]。その結果、大気が散逸する割合（以降、散逸率と呼ぶ）は、大気の種類によらず、惑星の脱出速度で規格化した地面の速度だけで決まることがわかった（図2）。また、Ahrens [4] が見積もった大気的全散逸の条件（地面速度1.6~2.8km/s）は、大気が散逸し始める条件でしかないことがわかった。ま

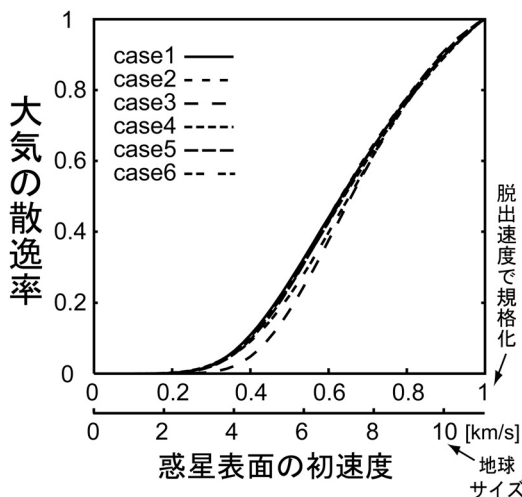


図2：全球的にある速度で惑星表面が運動した時に散逸する大気の割合を示す。さまざまな大気の初期条件で計算した結果である。case1から4は、現在の地球大気を模擬している。その中で、case2と3は、低比熱比の場合で（それぞれ1.3と1.1）、衝撃波の通過に伴う気体分子の解離と電離を模擬した。case3は、等温的な上層大気を模擬した。case5は高温(1500K)、高圧(100bar)の水蒸気大気、case6は高温(2300K)、高圧(100bar)の水素大気を模擬した。詳しい計算条件については、Genda and Abe (2003)[6]を参照のこと。

た、すべての大気を散逸させるためには、地面が惑星の脱出速度を超えなければならないことがわかった。

では、実際に巨大天体衝突が起こった時に想定される地面の速度は、どれくらいになるのだろうか？月の起源として有力なジャイアントインパクト説との関連から、SPH (smoothed particle hydrodynamics) と呼ばれる流体コードを用いた巨大天体衝突の直接計算がいくつかなされている。それらの結果によると、地球サイズの天体に火星サイズの天体が、脱出速度で衝突した場合、地球サイズの天体側の地面では最大6km/s程度 [7]、惑星表面の平均速度は4-5km/s程度 [8] となることがわかっていて。この地面の速度と我々の結果から、1回の巨大天体衝突で、10~30%の大気が散逸し、相当量(70~90%)の大気が生き残ることがわかる。この結果は、明らかに過去の研究[5]と異なっている。Chen and Ahrens [5] は地面速度8km/sにおける大気の運動を数値計算し、ほとんどすべての大気が

散逸するという数値計算を得て、巨大天体衝突による地面速度6km/s [7]を引用し、ほとんどすべての大気が散逸すると結論付けたが、実際には地面速度6km/sの数値計算は行っていない。その結果、彼らは大気の散逸量を過大評価しており、我々の結論と異なった。

また、我々は、インパクトである火星サイズの原始惑星の大気散逸率や、火星サイズ同士の衝突による大気散逸率も見積もった。その結果、いずれの場合も相当量(50~70%)の大気が残ることがわかった。したがって、巨大天体衝突ですべての大気が力学的に散逸するという過去の研究、および思い込みは間違っていて、むしろ相当量の大気が残残り、さらにインパクトの大気も相当量持ち込まれるということがわかった。

3. 巨大天体衝突直後の熱的散逸

巨大天体衝突によって解放されるエネルギーは極めて大きく、惑星全体が高温となる。特に、惑星表層は、衝突地点および衝突天体から吹き飛ばされた大量の物質が再集積することによって選択的に極めて高温(5000~10,000K)となる。この時、力学的に散逸しなかった原始大気が惑星表層に存在していたならば、再集積してきた物質は、原始大気に突入し、部分的に蒸発する。また蒸発しなかった物質は、惑星表面に衝突して、大量の物質が大気中に放出され、大気と相互作用する。最終的に、惑星表層には、再集積してきた物体および惑星表面から蒸発したケイ酸塩ガスと、力学的に散逸しなかった原始大気との高温(5000~10,000K)の混合大気が形成されると考えられる。一般的に高温大気は、惑星重力にバウンドされており、ハイドロダイナミックエスケープを経験する可能性がある。ハイドロダイナミックエスケープは、ジーンズエスケープや非熱的散逸よりも散逸規模が大きいことが知られている。

そこで、まず、解析的な手法を用いて、この混合大気がハイドロダイナミックエスケープを起こすかどうか見積もってみた[9]。その結果、ケイ酸塩ガスや、

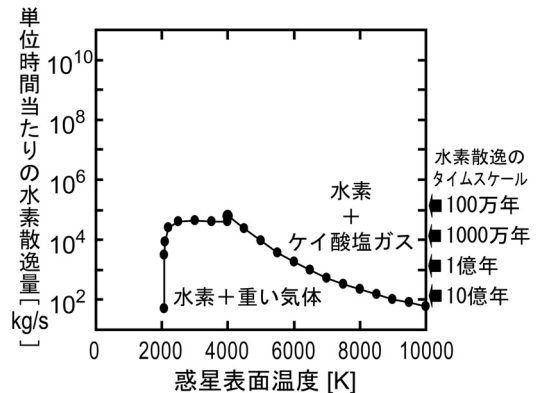


図3：2成分大気からの水素散逸のタイムスケール。高温領域では、水素とケイ酸塩(30g/mol)の混合大気の場合について、低温領域では、水素と重い気体(18g/mol)の混合大気の場合について、それぞれ数値計算を行った結果である。水素散逸のタイムスケールが100万年以上かかることがわかる。

水素以外の分子量の大きい気体(例えばH₂OやCO₂)は、5000~10,000K程度の温度では、惑星重力に束縛されていることがわかった。一方、混合大気中に含まれるもっとも分子量の小さい水素は、このような高温状態では、惑星重力に束縛されておらず、ハイドロダイナミックエスケープが起こることがわかった。そこで、問題となってくるのは、原始大気とケイ酸塩ガスの混合大気から、水素ガスが選択的に散逸するかどうかである。もし、水素の大規模散逸が起こったならば、水素以外の気体も、水素に引きずられて散逸する可能性がある。そこで、これら混合大気からの水素散逸を模擬した数値計算を行い、水素散逸のタイムスケールを求めた。

その結果(図3)、惑星表面が高温(4000K以上)の時は、大量に蒸発したケイ酸塩ガスが水素の散逸を抑制することがわかった。これは、惑星重力に束縛されているケイ酸塩ガス分子が散逸しようとしている水素分子と衝突することによって水素の散逸速度が抑制されてしまうのが原因である。また、惑星表層が冷却していき、低温(2000~4000K)になると、今度は、原始大気中に含まれる水素以外の分子量が大きな気体(例えばH₂OやCO₂)が水素散逸を抑制し始める。

最終的に、いかなる温度領域においても、水素の散逸のタイムスケールが100年以上かかることがわかった。一方、惑星表層は長くとも数万年で冷却してしまうため、事実上、水素および原始大気の散逸は起こらないことがわかった。

4. 巨大天体衝突ステージ直後の大気

1回の巨大天体衝突で、力学的散逸においては相当量の大气が生き残り、熱的には大規模な散逸は起こらないことがわかった。次に、我々は、1回の巨大天体衝突で失われる大気散逸率の結果を用いて、火星サイズの原始惑星が、複数回の巨大天体衝突を繰り返し、最終的に地球サイズの天体に成長するまでに生き残る大気量を見積もった。その結果、最終的に生き残る大気量は、火星サイズの原始惑星が持つ大気量の2~3倍程度となることがわかった(図4)。以上のことから、巨大天体衝突ステージ以前に火星サイズの原始惑星が

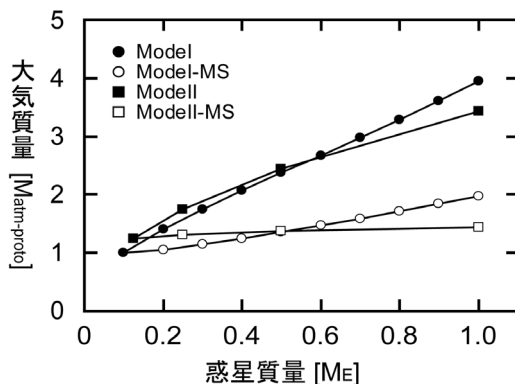


図4：巨大天体衝突を繰り返して惑星が地球サイズにまで成長する間に生き残る大気質量。惑星質量は地球質量で規格化。大気質量は火星サイズの原始惑星が持つ大気質量で規格化した。2種類の巨大天体衝突のパターンを考えた。火星サイズの原始惑星が1個づつ9回衝突する場合(ModelとModel-MS)と、最初に8個あった原始惑星が、2個づつペアで衝突し、最終的に3回の巨大天体衝突を経験する場合(ModellとModell-MS)について計算を行った。Model-MSとModell-MSは、衝突地点付近の大気散逸を考慮した場合の結果である。いずれの計算条件においても、巨大天体衝突で惑星本体が成長すると共に大気量も徐々に増加しているのがわかる。

獲得した原始大気が、巨大天体衝突で失われずに生き残り、地球型惑星の大気の起源として重要な役割をもっているということがわかった。

巨大天体衝突ステージ以前に原始惑星が獲得した大気が生き残るという上記の結論は、現在の地球型惑星の大気組成や同位体比と調和的であろうか?少なくとも、次のような問題がある。それは、地球も金星も(火星も)同じような大気が作られてしまう点である¹。さらに、原始惑星は、ネビュラ中で形成した可能性が高く、ネビュラガスを重力的に捕獲しているはずである。したがって、巨大天体衝突ステージ後に生き残った大気には、ネビュラを起源とする太陽組成の希ガスが多く含まれている。そのような大気は、現在の地球大気とは明らかに異なり、希ガスが過剰となってしまう。一方、現在の金星大気は、地球大気と比べて10~100倍程度の希ガス(Ar, Kr, Xe)を持っており、その組成が太陽組成に近いことが知られている。また、火星サイズの原始惑星が重力的に獲得するネビュラガスの量は、現在の金星大気の希ガス量を説明するのに多すぎもなく少なすぎもない。したがって、力学的散逸で、原始大気が生き残るという我々の結論は金星大気にとっては多くの点で都合がよいが、地球大気にとっては必ずしも都合が良くない。

地球と金星の大気組成が違ったものになる理由として、原始惑星表面での海の有無があるかもしれない。太陽放射の大きさを考えると、大気中に水蒸気が存在していれば、地球軌道付近では原始惑星表面に海が形成されるが、金星軌道より内側では海が形成されない。原始惑星表面に海が存在すると、巨大天体衝突時に海の全蒸発が起こるために、大気が散逸し、水蒸気だけが残る可能性がある。このことによって金星と地球で原始大気組成が違ったものになる可能性がある。

5. 議論と展望

我々の研究では、巨大天体衝突ステージにおいて、太陽系を取り巻いていたネビュラガスが完全に晴れて

1. この問題は、いかなる大気形成理論においても、常に付きまとう問題である。例えばレイトベニア起源の大気にしても、地球と金星で同じような組成の揮発性元素を含んだ隕石・彗星が衝突すれば、同じような大気が形成されてしまう。地球と金星で組成のまったくことなる隕石・彗星が衝突するという積極的なメカニズムはない。また、1970年代80年代の大気形成理論の主流であった微惑星の衝突脱ガス大気[10]、ネビュラ大気[11]にしても同様である。

いたということを前提としている。しかし、ネビュラガスが完全に晴れた時期には不確定性がある。定性的には、ネビュラガスが存在すると、巨大天体衝突による大気散逸は抑制される。簡単な見積もりでは、林モデルの約10%以上のガス密度(10^{-7}kg/m^3)が存在すると、大気の力学的散逸は抑制される。一方、ガス密度が10%よりもはるかに小さければ、その影響はほとんど無視でき、セクション2の結果が適用される。いずれにしても、相当量の大気が生き残ることとなる。むしろ、惑星本体の質量が巨大天体衝突で増加することによって、重力的に捕獲する大気量が増加するはずである。

巨大天体衝突ステージにネビュラガスが少しだけ残っていた方が、現在の地球型惑星の軌道を説明するのに都合がよいという研究もある[3]。一方で、惑星が地球サイズにまで成長した段階で、まわりにネビュラガスが存在すると、大量のネビュラガスを捕獲しすぎてしまう[11]。状況によっては、木星のような巨大ガス惑星になってしまう可能性もある[12]。この点では、ネビュラは完全に晴れていた方が都合がよい。いずれにしても、観測・理論によるネビュラガスの散逸時期に関するさらなる研究が必要である。

大気の起源と進化を考える上で、大気中の希ガス存在度や同位体比は、さまざまな制約条件を与えてくれる。地球大気の場合は、直接、サンプルが手に入るため、詳細に調べられている。一方、金星大気については、そのデータがかなり不確定である。KrとXeの存在量自体不確定性をかなり含んでおり、さらにその同位体比については信頼できる情報がない。金星大気の組成・同位体比を正確に測定することは、金星大気の起源と進化の研究を発展させるだけでなく、金星と地球の比較によって、地球大気の起源と進化についても多くの情報を与えてくれるはずである。

6. 謝辞

本稿執筆にあたり、有意義な査読意見をいただきま

した田中秀和博士に感謝します。

参考文献

- [1] Kokubo, E. and S. Ida, 1998, *Icarus* 131, 171.
- [2] Chambers, J. E. and G. W. Wetherill, 1998, *Icarus* 136, 304.
- [3] Kominami, J. and S. Ida, 2002, *Icarus* 157, 43.
- [4] Ahrens, T. J., 1993, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 21, 525.
- [5] Chen, G. Q. and T. J. Ahrens, 1997, *Phys. Earth Planet. Inter.* 100, 21.
- [6] Genda, H. and Y. Abe, 2003, *Icarus* 164, 149.
- [7] Cameron, A. G. W., 1992, *Lunar Planet. Sci. XXIII*, 199.
- [8] Asphaug, E. and C. Agnor, 2003, personal communication at Lunar and Planetary Science Conference, Houston, TX.
- [9] Genda, H. and Y. Abe, 2003, *Proc. 36th ISAS Lunar and Planet. Symp.*, 29.
- [10] Abe, Y. and T. Matsui, 1986, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 17th*, in *J. Geophys. Res.* 91, suppl., E291.
- [11] Hayashi, C. et al., 1979, *Earth Planet. Sci. Lett.* 43, 22.
- [12] Ikoma, M. et al., 2000, *Astrophys. J.* 537, 1013.