

論文審査の結果の要旨

氏名 玄 田 英 典

地球型惑星形成の現代的描像においては、初めに火星サイズの巨大天体が数十個形成される。その後、天体は互いに衝突を繰り返し、現在の地球型惑星が形成されたと考えられるようになってきた。本論文では、惑星形成最終段階の巨大天体衝突によってそれまで惑星が保持していた原始大気が散逸するかどうかについて研究を行い、地球型惑星の大気形成における巨大天体衝突の影響を定量的に評価した。

本論文の第1部では、惑星内部に生じた衝突衝撃波が、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による、大気の力学的散逸を扱い、原始大気の散逸条件を明らかにした。さらに第2部では、力学的散逸が原始海の存在によって強くなることを示し、地球と金星の原始大気散逸の違いを説明した。第3部では、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熱的散逸の評価を行った。そして第4部では、地球型惑星の大気形成における巨大天体衝突の影響について議論を行った。

原始大気の力学的散逸は、有効な大気散逸過程であると考えられてきた。しかし過去の研究は、最終的な大気の散逸量を過大評価していた。本論文では、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。その結果、大気が散逸する割合は、惑星の脱出速度で規格化した地面の速度だけで決まり、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。実際に巨大天体衝突が起こった時の地面の速度から、1回の巨大天体衝突で、相当量(10~30%)の大気が生き残ることがわかった。さらに、巨大天体衝突ステージ以前に火星サイズの原始惑星が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、現在の地球型惑星の大気の起源として重要な役割を与えているということがわかった。

第2部では、これまでの研究では考慮されていない惑星表面の海の存在に注目をし、海が存在する状況で巨大天体衝突が起こった場合についての大気散逸を数値計算した。その結果、海が存在すると、海がない場合と比較して、大気の散逸する割合が増加することがわかった。そして、その増加率は、海と大

気の質量比のみに依存し、大気の種類や惑星の重力にほとんど依存しないことがわかった。海質量が大気質量の10倍（30倍）あった場合、幾度か巨大天体衝突を繰り返して、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は、海が存在しない場合の1/10 (1/100以下)となることがわかった。一方、海自体はほとんど散逸しないことがわかった。

海が存在すると大気の大規模散逸が起こる原因は、衝撃波の通過による海の水の全蒸発と水のユゴニオ特性にある。衝撃インピーダンスの高い岩石（地面）と低い大気の間でそれらの中間の衝撃波インピーダンスをもつ水が存在するため、通過してくる衝撃波の粒子速度が増加し、大気の散逸量が増加する。

太陽からの距離を考えた場合、現在の地球軌道付近に存在した原始惑星は、惑星表面に液体の水が存在していた可能性が高く、巨大天体衝突によって原始大気が大規模に散逸したと考えられる。一方、現在の金星軌道付近に存在した原始惑星は、暴走温室状態にあり、惑星表面に海が存在できないため、大量の原始大気が生き残る。

第3部では、力学的散逸で失われなかった原始大気の熱的散逸について研究を行った。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ことができるかどうかを数値計算し、水素散逸のタイムスケールを求めた。その結果、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、低温（2000~4000K）の時には重い気体が水素散逸を抑制し、水素の散逸のタイムスケールが100万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が起こらないことがわかった。

以上の巨大天体衝突による力学的散逸と熱的散逸の結果から、巨大天体衝突で、原始大気が生き残る金星については、現在の金星で観測されている太陽組成に近い重い希ガス（Ar, Kr, Xe）の存在パターンと存在量を説明することが可能であることがわかった。しかし、Neは2~3桁観測よりも過剰となる。また、地球に関しては、原始惑星に大気質量の10倍以上の海が存在していると、巨大天体衝突ステージで、原始大気中の希ガス量を現在の地球の量以下まで減少させることができることがわかった。

なお、本論文は阿部豊の共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析・考察を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。よって、博士（理学）を授与できると認める。