

報告番号

※甲第 1775 号

# 主論文の要旨

題名

微惑星の衝突による地球の成長過程と  
内部構造の初期分化

~~Growth of the Earth by Planetesimal Impact and  
Formation of the Global Stratification of the Earth~~

氏名 川上紳一

# 主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

川上 紳一

微惑星の衝突による地球の成長、誕生して間もない頃起こった核、マントル地殻、大気、海洋の形成、そしてその後の45億年の進化がどのようなものであったかを統一的に理解するために、重要な問題をいくつか扱った。本研究で扱った問題は2つのグループに分けることができる。一つは原始太陽系星雲の微惑星系の初期状態を与え、原始太陽系星雲の進化をおいかけることによって、現在の惑星系に至る筋道を明らかにしようというもので、他の一つは現在の太陽系の姿から地球や惑星の歴史を過去にさかのぼるアプローチである。

地球や惑星の形成や進化を支配する要因にはいろいろあるが、なかでも固体-固体の衝突現象は最も重要なものである。地球や他の惑星は原始太陽系星雲のなかをケプラー運動していた多数の微惑星が衝突合体して形成されたと考えられており、地球の形成時に果たした役割は大きい。また形成から現在までの地球や惑星の進化に及ぼした影響も測り知れない。しかし、原始太陽系星雲でおこったとされる比較的低速度の衝突現象の研究はこれまでほとんど行われていなかった。我々は実験的に衝突現象を解明する目的で、低速度衝突銃を製作し、石英砂、氷、岩石、金属など惑星構成物質を標的として様々な条件下で実験を行った(第3章)。石英砂をもちいたクレーター形成実験の結果を解析することによって、衝突現象を記述する上で最も重要な”衝突の実効エネルギー”というパラメータを得た。これは衝突によって発生する衝撃波の圧力に弾丸の体積をかけたものでエネルギーの次元をもっている。衝突の実効エネルギーは、低速度の衝突では弾丸の運動量に比例し、高速度の衝突では弾丸の運動エネルギーに比例する。衝突の実効エネルギーを用いることによって、クレーターの形成や衝突現象の一般的なスケーリング則を導くことに成功した。これらのスケーリング則をもちいて微惑星の衝突による地球の成長過程や初期史を解

明する研究をおこなった。

第4章では、微惑星のケプラー運動と相互の衝突による微惑星のサイズ分布と速度分布の進化の研究の現状をまとめ、第3章のスケーリング則を用いて微惑星の成長のシミュレーションを行った。微惑星の衝突速度は、衝突によるランダム運動のエネルギーの散逸と重力散乱による増加に依存しており、速度分布とサイズ分布を同時に解く必要がある。Greenberg et al. (1978) や我々のシミュレーションによって、約 $10^4 \sim 10^5$ 年で最大の微惑星の直径が500kmにまで成長することが示された。しかし、これらのシミュレーションは最大の微惑星の直径が500km程度までしか扱うことができない。微惑星の集積過程の現状からすると、直径10kmの微惑星から現在の惑星のサイズに至るまでの微惑星の成長を一貫して扱うことは困難である。Safronov (1972) の研究によって、惑星の成長のタイムスケールはおよそ $10^6$ 年 $\sim 10^8$ 年と推定されているが、その後の研究は、地球や惑星の成長のタイムスケールにさらにきつい制約を与えるまでには至っていない。

第5章では、成長しつつある惑星の内部構造や温度分布の理論的推定を行った。これは微惑星の落下によって成長途上の惑星母天体の内部の温度分布を熱伝導方程式を解くことによって見積もろうというものである。従来の熱史のシミュレーションに、惑星半径の成長や微惑星の落下による表層の加熱を考慮し内部が融解すると核・マントルの分化が起こるとしている。時間とともに惑星のサイズが大きくなるのでこの問題はステファン問題の一つとみなすことができる。また微惑星が惑星母天体と衝突すると微惑星中の揮発性元素が原始大気として脱ガスすることも考慮した。成長途上の惑星表面に原始大気が存在することは、それが断熱効果を示すので、形成期の地球の内部温度を決定する上で重要である。このシミュレーションの結果、形成直後の地球の内部には直径4000kmの未分化な始源的物質からなる核があり、それを取り巻いて金属鉄の球

殻があり、表面から金属球殻までの深さには大きなマグマオーシャンが形成されることが分かった。しかし、地球の初期の温度分布や内部構造の形成過程は微惑星の衝突によって発生する原始大気の形成とそれから海洋がどのように形成されるかに依存しており、進化の筋道を一義的に決定できないという問題が残る。

第6章では初期の核、マントル分化後のマントルの化学進化をPb, Nd, Srの同位体や微量元素の存在度のデータをもとに、モデルシミュレーションを行って、マントル-地殻の物質移動サイクルについて考察した。また第7章では、始生代に安定化した大陸地殻の地質学的、地球化学的データを要約し、それをもとに大陸地殻の形成過程を第6章とは異なる視点から考察を加えた。第8章では、微惑星の衝突で発生した原始大気その後の進化を気候学的に追跡し地球の歴史の初期の大気・水圏の環境を考察した。第6～8章の研究は第2～5章の研究と相補的關係にあり、前者の研究で用いたモデルの制約条件として重要な役割を果たしている。