

学 位 論 文 題 名

Numerical Simulation of Growth of Dust Aggregates in Protoplanetary Disks: A New Model of Density Evolution

(原始惑星系円盤におけるダスト成長の数値計算：新たな密度進化モデル)

学位論文内容の要旨

若い恒星の周りにはガスとサブミクロンサイズのダスト（固体微粒子）からなる原始惑星系円盤が形成される。原始惑星系円盤内でダストは衝突合体を繰り返しながら成長し、大きなダストは円盤赤道面に沈殿し密なダスト層を形成する。このダスト層の重力分裂、または、合体成長によって微惑星が形成されると考えられている。これらの微惑星が互いに衝突し自己重力で合体していくことで、惑星が形成される。このような惑星形成過程において、ダストの成長は初期段階を左右する重要な過程である。

従来のダスト成長過程に関する多くの研究では、内部構造は考慮されず、密度一定の球と仮定されてきた。しかし、ダスト衝突の際、合体するかどうかは、ダストの内部構造に依存する。また、円盤ガス中のダストの運動はガス抵抗によって支配されているが、このガス抵抗はダストの断面積などの内部構造に依存している。さらには、原始惑星系円盤の温度構造やその放射スペクトルはダストの光学特性に大きく左右される。このダストの光学特性もやはりその内部構造に依存している。したがって、衝突・合体によりつくられるダストがどのような構造を持つかを定量的に明らかにすることがダスト成長過程の解明や原始惑星系円盤の観測において不可欠となっている。

近年、ダスト衝突についての理論的、実験的研究が行われ、ダストを構成する粒子間の相互作用の理解が進んできた。これによりダスト衝突を数値計算により再現することが可能になってきた。本研究では、数万体のサブミクロン粒子の集合体であるダストの大規模な衝突数値計算を行い、合体成長過程におけるダスト力学構造の進化過程を調べる。数値計算結果をもとにダストの密度や断面積などの進化を定式化し、原始惑星系円盤内でのダスト成長過程におけるダスト構造進化のモデルを構築する。本研究では、ダストを構成する粒子同士の相互作用をすべて計算することにより各粒子の運動方程式を解くという、いわゆる N 体計算を行う。この計算により、ダストの衝突合体の様子を直接見ることができる。ダスト衝突時における圧縮などによる構造進化については不明な点が多いため、このような直接的手法が有効である。

衝突エネルギーの小さい成長の初期段階では、衝突の際に付着するのみで圧縮が起こらない。このような合体成長が進行するとダスト内部の空隙率は非常に高くなり、密度の低い構造が作られる。しかし、ある程度成長して衝突エネルギーが大きくなると圧縮が徐々に起こり密度が高くなっていく。このような成長に伴う構造進化を明らかにするために、多数回の連続した衝突合体の N 体計算により数万対の大きさにまでダストを成長させ、その際の圧縮過程を調べた。成長していくダストの構造を特徴づける量としてダストの大きさと断面積に

注目した。これらダストの大きさまたは断面積を用いて 2 つの体積を定義し、それらより 2 種類の密度を定義した。これらの密度からダストの圧縮の程度を定量化した。

本研究では、衝突合体の数値計算において、簡単な正面衝突の計算とより現実的な斜め衝突の計算の 2 種類を行った。正面衝突の場合、これら 2 つの密度の両方で同様に衝突圧縮の様子が見られた。圧縮の結果得られたダストのフラクタル次元は 2.5 であり、Wada et al. (2008) で得られた値と同じであった。この二つの密度の進化を Wada et al. (2008) の圧縮モデルをもとに定式化することに成功した。これにより、ダストの大きさや断面積の進化が決定される。

斜め衝突の場合、ダストは引き伸ばされて細長い構造を持つ。斜め衝突でも得られたダストのフラクタル次元は 2.5 であった。大きさから求めた密度には圧縮の様子が見られなかった。一方、断面積から求めた密度では圧縮が見られた。断面積から求めた密度に、正面衝突の場合と同じモデルを適用し、その密度進化を定式化することに成功した。このように、ダストの運動を支配する上で重要である密度と断面積の進化を正面衝突と斜め衝突の両方において定式化することができた。この圧縮モデルによると、ダストは非常に圧縮されにくく結果的に低い密度を持つことになる。これはフラクタル次元が 2.5 と比較的小さな値を持つことが主要因である。

以上で得られた圧縮モデルを用いることで、与えられた衝突速度に対してダストの密度と断面積がどのように変化するかが記述される。このモデルを原始惑星系円盤へ応用することにより、円盤内の密度と断面積の進化を知ることができる。その結果、ダストは非常に低い密度になることがわかった。例えば、100m 程度の大きさの天体でも 10^{-5} g/cm^3 という非常に低い密度を持つ。このような極めて低い密度は、フラクタル次元が 2.5 であることによっても説明される。天体が成長して 100km サイズになれば重力の効果による圧縮が起これ密度が増加するであろう。また、ダストは円盤ガス中を運動しているので長時間にわたってガス抵抗を受け続ける。この抵抗力によってダストがより小さな段階で準静的に圧縮されることも考えられる。

我々の圧縮モデルから予測される超低密度のダストは大きな断面積を持ち、強いガス抵抗力を受ける。そのようなダストの運動は従来考えられてきたコンパクトなダストとは大きく異なる。そのため、このような違いを考慮し、微惑星形成過程を再検討し直す必要があるであろう。また、このような低密度ダストの光学特性は不明な点が多いが、明らかにになれば原始惑星系円盤の観測から超低密度ダストの存在を同定することが可能となるだろう。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	田 中 秀 和
副 査	教 授	山 本 哲 生
副 査	教 授	小 笹 隆 司
副 査	講 師	末 廣 一 彦

学 位 論 文 題 名

Numerical Simulation of Growth of Dust Aggregates in Protoplanetary Disks: A New Model of Density Evolution

(原始惑星系円盤におけるダスト成長の数値計算：新たな密度進化モデル)

近年、若い恒星のまわりにつくられるガス円盤（原始惑星系円盤）は惑星形成の現場として注目され、その天文観測が盛んに行われている。惑星形成の理論によると、惑星はガス円盤に質量で1%程度の割合で含まれるシリケートや氷でできたサブミクロンの固体微粒子（ダスト）を原材料とし、それらが衝突合体を繰り返して成長していくことでつくられたと考えられている。また、天文観測から、ガス円盤内でのダストの成長や移動する様子、または結晶化の様子などが明らかにされている。これらより、最近の惑星形成の理論的・観測的研究においてガス円盤に含まれるダストは重要な研究対象となっている。しかしながら、成長していくダストがどのような力学的または光学的性質をもっているかについての情報はまったく欠落しており、その方面での研究が急務となっている。

申請者が行った研究「Numerical Simulation of Growth of Dust Aggregates in Protoplanetary Disks: A New Model of Density Evolution」は、惑星形成現場において微粒子より合体を繰り返し集合体として成長するダストの力学構造進化について大規模数値計算によって調べ、理論的に研究したものである。本研究では、ガス中での合体成長過程を考える上で重要であるダストの内部密度や幾何学的断面積に注目して、成長するダストが衝突の際どの程度圧縮されるかを定量的に明らかにし、ダストの質量の関数として内部密度を与えているという世界的に類を見ない成果を出した。さらに、その結果、メータサイズにまで成長した段階では 10^{-5} g/cm^3 という極めて低密度になる可能性を示唆した。合体成長により圧縮せずこのような低密度・高空隙率をもつことは従来全く予想もされておらず、この結果は惑星形成過程の初期段階の描像や原始惑星系円盤の天文観測結果の解釈を大きく変える可能性を含んでいる。

これらの結果の一部はすでに国際査読論文雑誌 *Astrophysical Journal*, vol 684, pp. 1310-1322 (2008) に掲載され発表されている。また、2007年日本惑星科学会秋季講演会では最優秀発表賞も受賞しているなど惑星科学の分野においてすでに高く評価されている。

予備審査および公聴会には、それぞれ審査担当者の他に20名程度の教員、研究員、院生が参加し、この参加者から申請者の発表に対して多くの質問・意見などが出された。申請者はそれらすべて質問に対して適切な説明と回答を行い、議論を深めた。

以上の申請者による学位論文の内容と公聴会での受け答えより、申請者が博士課程の学位取得の基準を高いレベルでクリアしているということで、審査員全員の意見は一致した。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。