

「平成19年度最優秀発表賞受賞論文」

合体成長過程におけるダスト圧縮過程の数値計算とその定式化

陶山 徹¹，和田 浩二¹，田中 秀和¹

(要旨) 微惑星形成の初期条件として，ダスト進化は重要である．ダストは衝突合体をくりかえしながら，成長していく．ダスト同士が衝突合体する際，衝突圧縮によってダストの内部構造や密度が変化すると考えられる．ダストの構造や密度の変化は，ダストの強度やガス抵抗の断面積に影響を及ぼす．本研究では，ダスト衝突の N 体計算を行い，その圧縮過程について調べ，原始惑星系円盤内でのダスト密度進化を定式化した．その結果， 10^{-4}g/cm^3 という非常に低い密度を持つ巨大ダストの形成が示唆された．

1. ダスト構造進化の重要性

宇宙に漂う非常に小さなダスト，この小さなダストが集まって微惑星がつくられ，さらに，微惑星が集積することで我々が住む地球をはじめとする惑星ができたと考えられている．しかし，特にダストから微惑星が形成される過程にはいまだ多くの問題がのこされている．それは以下に述べる理由によるものであるが，問題解決の鍵となるのはダストの構造進化過程であり，これを明らかにする試みが本研究である．

微惑星の形成は大まかには次のように考えられている．星間ガスが収縮し，恒星が作られる際，そのまわりにはガスとサブミクロンサイズのダストからなる原始惑星系円盤が形成される．原始惑星系円盤の中で，ダストは衝突合体をくりかえしながら成長していく[1, 2, 3]．成長したダストは円盤赤道面へ沈澱し，密度の高いダスト層を形成する．このダスト層の重力不安定によって，あるいはダスト同士のさらなる衝突合体によって，微惑星が形成されるだろうと考えられている．しかし，この二つの説(重力不安定説と衝突合体説)はどちらも問題をかかえている．重力不安定説の問題点は，円盤内の種々の不安定によって駆動される乱流によって，ダスト層がかき乱され，重力不安定が生じるほど充分濃くならないかもしれない点である[4]．この点を明らかにするためには，乱流中でのダストのふるまいを知る必要がある．ダストが乱流中でのよう

に運動するかは，ダストがガスからどのような力を受けるかに依存している．この力はダストの断面積によって大きく変わる．一方，衝突合体説の問題点は，衝突破壊によって成長が阻害されるかもしれない点である．衝突破壊を考える上で重要なのは，ダストの強度である．上の二つの問題を考える上で重要なダストの断面積と強度はその内部構造に依存している．そのため，ダストの内部構造は，微惑星形成を考える上で非常に重要な因子である．

ダストは小さなダストの衝突合体によって成長するため，小さなダストの集合体となっている．以下では，「ダスト」とは微粒子の集合体であるとする．小さなダストはすきまだらけの「ふわふわ」な構造をしている．しかし，ダストは衝突合体によって成長するにつれ圧縮されるであろうから，大きなダストはふわふわな構造を保つことができないと考えられる．そのような圧縮が起これば，ダストの断面積が小さくなり，ダストが受けるガス抵抗力も弱くなる．それにより，ダストの運動も変わるだろう．にもかかわらず，円盤内のダスト進化に関するこれまでの研究においては，ダストの構造はコンパクトであると仮定され，その内部構造進化については考えられていなかった[1, 2, 3]．

ダストの構造進化を調べる際，ダストを構成する粒子の運動を直接解くのは有用な方法である．しかし，このような方法で内部構造を調べる場合，小さなダストだけを調べても，その構造の違いを見分けるのは難しい．そのため，大きなダストの内部構造を調べる必

1. 北海道大学低温研究所

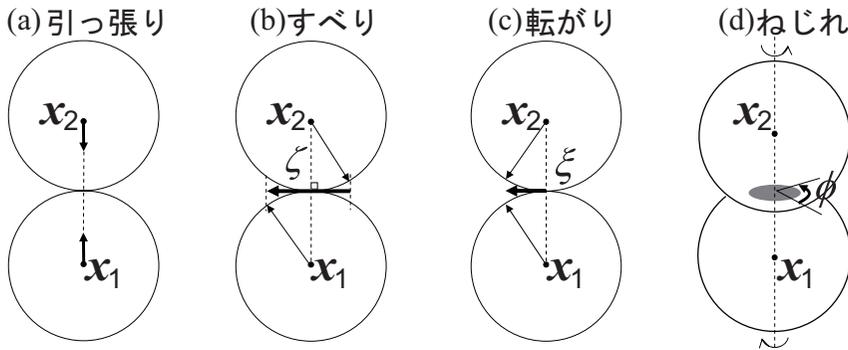


図1：4種類の粒子間相互作用の模式図。粒子の相対運動は引っ張り、すべり、転がり、ねじれによって記述される。

要があるが、これには、多数の構成粒子を扱う大規模な計算を要する。これまでは、そのような大規模な計算を行うことは困難であったが、近年のコンピュータ性能の向上によって、ダスト衝突の大規模な数値計算が可能となりつつある[5, 6, 8]。Dominik & Tielens [5]とWada et al. [6]は2次元のダスト衝突シミュレーションを行い、衝突によって、ダストがどのように圧縮され破壊されるかを調べ、室内実験[7]とも調和的な結果を得た。これらの先行研究の結果、氷ダストの場合、衝突速度が数十m/sを越えると、衝突破壊が起こり、成長が阻害されることがわかった。シリケートダストの場合、この速度は数m/s程度であった。円盤内でのダストの衝突速度は最大20-50m/s程度になる。そのため、氷ダストにおいては、衝突合体による微惑星形成が可能かもしれない。さらに、Wada et al. [8]は3次元のダスト衝突シミュレーションを行い、衝突に対するダストの「圧力」を導入することで、数値計算結果を記述できる圧縮モデルを構築した。これらの先行研究によって、ダストの衝突過程が明らかになってきている。しかし、彼らのシミュレーションでは、一回の衝突のみがあつかわれている。実際の原始惑星系円盤の中では、ダストは多数回の衝突を経て、成長していくと考えられる。そのため、多数回の衝突合体によってダストが成長していく過程で、その内部構造がどのように進化していくかを調べる必要がある。

本研究では、氷ダストの多数回連続衝突のシミュレーションを行い、ダストの成長過程におけるダスト構造(密度)進化を調べた。これらの数値計算結果は、Wada et al. [8]で構築された圧縮モデルでよく説明される。さらに、解析結果を発展させ、成長していくダ

ストの密度進化を定式化した。その結果、非常に密度の低いダストが作られることが明らかになってきたのである。

2. 数値計算法

本研究では、Wada et al. [8]と同様の N 体計算を用いたダスト衝突計算を繰り返すことによって、ダスト成長過程を模擬し、その構造進化を調べる。ダストは多数個の粒子から構成される。各粒子は半径が $0.1 \mu\text{m}$ の球形の氷粒子であり、表面エネルギーを持つ弾性体としてあつかう。シミュレーションでは、個々の粒子の運動方程式を解き、その運動を追う。粒子間の相互作用モデルは先行研究[5, 8]と同様のモデルもちいた。

接触粒子の運動には4つの自由度がある。それは、引っ張り、すべり、転がり、ねじれである(図1)。接線方向の各変位には、弾性臨界変位が想定され、変位が臨界変位を越えると、非弾性運動となって、エネルギーが散逸する。先行研究[5, 6, 8]により、ダストは主に転がりによる非弾性変形によって圧縮されることがわかっている。 $(\pi/2)r_1$ の距離を転がるのに必要な転がりエネルギーは、

$$E_{\text{roll}} = 6\pi^2 \gamma r_1 \xi_{\text{crit}} \quad (1)$$

と与えられる。ここで、 r_1 は粒子の半径であり、 γ は表面エネルギー、 ξ_{crit} は転がり臨界変位である。 ξ_{crit} には $2\text{-}30\text{\AA}$ と不定性があるが[9]、 $\xi_{\text{crit}} = 8\text{\AA}$ だとすると、氷粒子の場合、 $E_{\text{roll}} = 4.7 \times 10^{-16}\text{J}$ となる。ダストを圧縮するには、少なくとも E_{roll} 程度のエネルギーが必要

である。

本研究で行う多数回連続衝突では、各回の衝突の初期ダストとして、1つ前の回の衝突で得られたダストとそのコピーをもちいる。本研究では、比較的低速度 (<5m/s)の衝突のみを考えているので、破壊は起こらない。そのため、ダスト質量は衝突の度に2倍になっていく。ダスト衝突シミュレーションは粒子2個からなるダスト同士の衝突から始まり、最後に粒子16384個からなるダスト同士の衝突を行う(図2)。簡単のため、一連の衝突計算においては衝突速度は一定とした。また、衝突はすべて正面衝突とする。斜め衝突の場合、正面衝突の場合よりもダストは圧縮されにくいだろう[6]。したがって、本研究で得られるダスト密度は上限値と考えられる。

衝突後に得られるダストの構造は、各衝突におけるダストの向きによって大きく変わる。本研究で行ったシミュレーションでは、ダストの向きをランダムに選んだ30種類の連続衝突を行い、それらの平均値について議論する。

3. シミュレーション結果

図2に連続衝突によって得られたダストを図示している。上図は衝突速度が0.54m/sの場合の結果であり、下図は衝突速度が4.4m/sの場合の結果である。どちらも転がり臨界変位は2Åである。衝突速度が速いほど、よりコンパクトなダストが得られることがわかる。

ダストが衝突を繰り返すにつれ圧縮される過程を定量的に調べるために、ダストの密度を定義し、その変化を追った。我々は、ダストの大きさを表す特徴的な半径として、

$$r_c \equiv \sqrt{\frac{5}{3}} r_g \quad (2)$$

をもちいる。ここで r_g は回転半径であり、以下の式で与えられる。

$$r_g \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_M|^2}{N}} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{x}_i は i 番目の粒子の位置、 \mathbf{x}_M はダストの重心位置、 N はダストを構成する粒子の数である。さらに、ダストの体積 V を

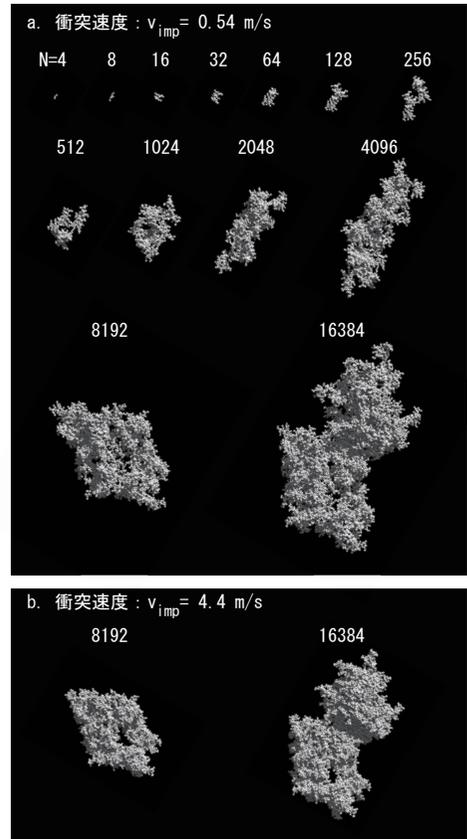


図2：一連の連続衝突によって得られたダストの例。転がり臨界変位は $\xi_{crit} = 2 \text{ \AA}$ とした。上図は $v_{imp} = 0.54 \text{ m/s}$ 、下図は $v_{imp} = 4.4 \text{ m/s}$ の衝突で得られたダストである。衝突速度が速い場合の方が、より圧縮されたダストが得られる。

$$V = \frac{4\pi}{3} r_c^3 \quad (4)$$

と定義(構成粒子間の空隙も含んでいることに注意)し、構成粒子1つの質量 m_1 をもちいて、ダストの密度 ρ を以下のように定義する。

$$\rho = \frac{m_1 N}{V} \quad (5)$$

様々な衝突速度 v_{imp} と転がり臨界変位 ξ_{crit} において衝突計算を行った結果、得られたダスト成長過程における密度進化を示したものが、図3である。シミュレーションでは、30種類の連続衝突を行っており、図に示している密度進化の線は、その30種類の連続衝突で得られた密度進化の平均値である。個々の連続衝突における密度の平均値からのズレは、2倍から3倍程度である。ダストの密度は成長とともに減少していることがわかる。以下では、ダストの密度進化過程を圧縮開

始前と後に分けて見ていこう。

同じ質量の二つのダストを十分遅い速度(小さい衝突エネルギー)で衝突させると、ダストは圧縮されずに付着するのみである。そのように成長する過程は Ballistic Cluster-Cluster Aggregation, 略してBCCA とよばれる。BCCAによって作られたダスト(BCCAダスト)は非常にふわふわな構造を持つことが知られている[10, 11]。図3の破線は、BCCAダストの密度進化を示している。我々の衝突シミュレーションで作られるダストにおいても、ダストが小さいうちは衝突エネルギーが小さいため、その密度はBCCAと同じ線に沿って進化する。粒子数がある値より大きくなると、ダストの密度はBCCAダストより大きくなることわかる。このズレは圧縮の開始を意味している。

衝突エネルギー E_{imp} が転がりによる変形に要するエネルギー、すなわち、 E_{roll} 程度になったとき、圧縮が開始すると考えられる[5, 8, 12]。図3に $E_{imp} = 0.5E_{roll}$ となる点を密度進化の線上に図示している。係数0.5

は、図3のBCCAの曲線からはずれるところを再現するように決めた。粒子数がこの点に達すると、密度はBCCAからズレ出しており、 $E_{imp} \sim E_{roll}$ は圧縮開始を記述できていることがわかる。

圧縮開始後のダストの密度はBCCAの密度より大きくなる。しかし、圧縮しているといっても一定速度の衝突という条件のもとでは、成長とともにその密度は減少し続けている。次の節では、圧縮開始後においてどうしてこのように密度が減少していくのかを議論する。

4. 密度進化モデル

この節では、圧縮されるダストの密度進化モデルについて簡単に説明する(モデルの詳細は[13]を参照)。本研究では、密度進化モデルを構築するにあたり、Wada et al. [8] が導入したダスト圧力をもちいた。まずはそのダスト圧力の表式について述べる。Wada et

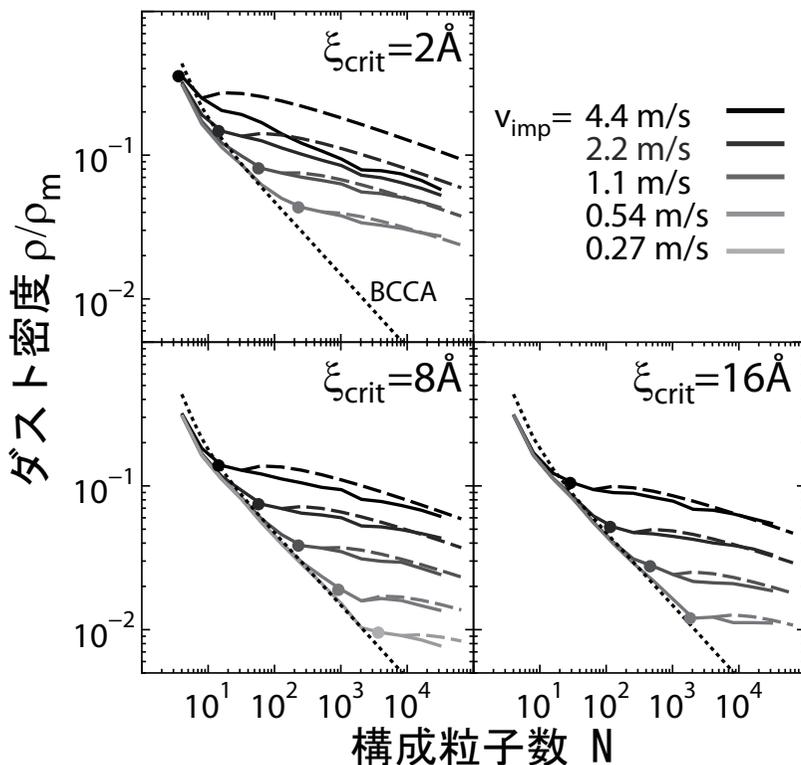


図3: ダスト成長過程における密度進化(構成粒子の物質密度 ρ_m で規格化してある)。実線は数値計算結果を、点線はBCCAの密度を示す。実線上にある点は、圧縮開始 ($E_{imp} = 0.5E_{roll}$) を示している。破線は式(9)を表している。高密度領域を除いて、式(9)は数値計算結果とよい一致を示す。

al. [8] では、様々な衝突速度でBCCA ダスト同士の1回の衝突計算を行い、衝突後に得られるダストの回転半径 r_g を求め、その衝突エネルギーに対する依存性を調べた。図4にその結果を図示している。衝突エネルギーが E_{roll} より小さい場合、圧縮は起こらず、回転半径は変化しない。衝突エネルギーが E_{roll} より大きい場合、衝突エネルギーの増加とともにダストの回転半径は減少する。この数値計算結果からダストの回転半径と衝突エネルギーの間の以下の関係式が求まる。

$$\frac{r_g}{r_1} = \left(\frac{E_{\text{imp}}}{0.15NE_{\text{roll}}} \right)^{-1/10} N^{1/2.5} \quad (6)$$

さらに、衝突エネルギーの増分 dE_{imp} と体積変化 dV の間には以下の関係式が成り立つと仮定する。

$$dE_{\text{imp}} = -PdV \quad (7)$$

この係数 P をダストの圧力と定義する。(4)式と(6)式から体積とエネルギーの関係がわかる。すると、(7)式より圧力の表式が、

$$P = -\frac{dE_{\text{imp}}}{dV} = 6.4 \frac{E_{\text{roll}}\rho_m}{m_1} \left(\frac{\rho}{\rho_m} \right)^{13/3} N^{2/3} \quad (8)$$

のように求まる。ここで、 ρ_m はダスト構成粒子の物質密度である。この圧力をもちいると、Wada et al. [8] の数値計算結果を説明できる(図4)。この圧力 P をもちいると、様々な衝突におけるダストの体積(密度)変化がわかる。

上で求めた圧力 P を本研究で行なった連続衝突に適用し、ダスト成長過程における密度進化モデルを構築した。(8)式をもちいて、(7)式を積分すると、ダスト密度に関する以下の微分方程式が得られる。

$$\frac{d \ln \rho}{d \ln M} = -\frac{1}{5} + 0.23 \left(\frac{M}{m_1} \right)^{-2/3} \left(\frac{\rho}{\rho_m} \right)^{-10/3} \frac{E_{\text{imp}}}{NE_{\text{roll}}} \quad (9)$$

ここで、 M ($\equiv m_1 N$) はダストの総質量である。(9)を導く際に、ダスト同士が付着した瞬間にできる空隙を圧縮するのにエネルギーを必要としないという仮定をした(導出の詳細は[13]を参照)。この式は、密度進化を記述する式である。右辺第二項は転がりによる圧縮を表している。一方、第一項は付着の瞬間にできる空隙によってダスト密度が減少する効果を表している。この方程式は、圧縮は転がりによってのみ起こると仮

定している。図3には、求めた(9)式と数値計算結果を図示した。(9)式は数値計算結果と良い一致を示している。しかし、 $\xi_{\text{crit}}=2\text{\AA}$ の場合に見られるような密度が高い領域では、(9)式と数値計算結果の間にズレが

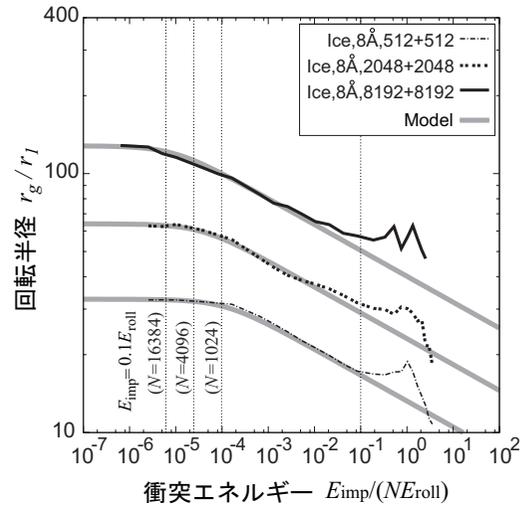


図4: Wada et al. [8] で得られた回転半径と衝突エネルギーの関係。 $\xi_{\text{crit}}=8\text{\AA}$ の氷ダスト同士の衝突の場合について示した ($N=1024, 4096, 16384$)。黒色の線は数値計算結果、灰色の線は圧力 P をもちいて得たモデルである。両者はダストの圧縮領域 ($E_{\text{imp}} \leq 0.1NE_{\text{roll}}$) でよい一致を示す。

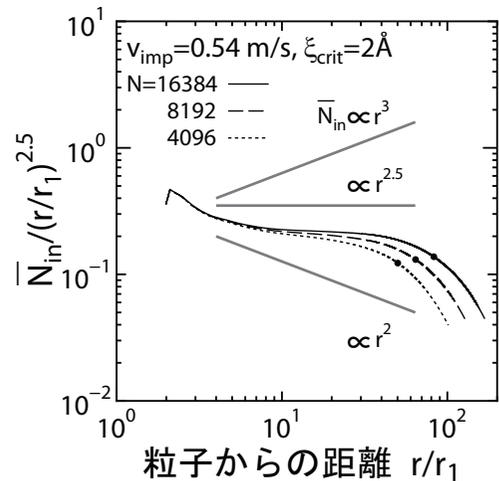


図5: 数値計算によって得られたダストのフラクタル次元。ある粒子からの距離 r に対して、その距離内にある粒子数 N_{in} をプロットしたものの、 N_{in} は $r^{2.5}$ で割って表示している。そのため、線の傾き $-0.5, 0, 0.5$ がそれぞれフラクタル次元 $2, 2.5, 3$ に対応する。 \bar{N}_{in} は全構成粒子それぞれを中心粒子として数えた N_{in} を平均したものである。線上の点は、ダストの回転半径のスケールを示している。回転半径より大きなスケールでは、端の効果を表れている。ダストが成長するにつれ、フラクタル次元が2.5に近づく。

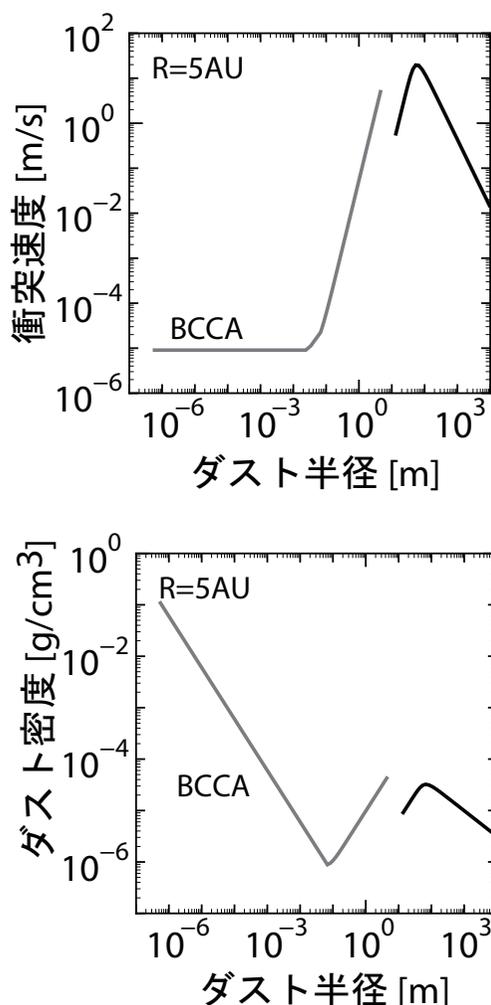


図6：円盤内の衝突速度(上図)と円盤内のダスト密度(下図)。
中心星からの距離は5AUであるとし、転がり臨界変位は
 $\xi_{\text{crit}}=8\text{\AA}$ とした。灰色の線は円盤上層での進化、黒線は赤道面での進化を表している。

見られる。これは、ダストが転がりのみで圧縮できる限界まで密度が高くなっており、圧縮は転がりによってのみ起こるとする仮定が破綻していることを示している。

得られたダストの内部構造を特徴づける量としてダストのフラクタル次元も調べた。ダストを構成する、ある粒子を中心とした半径 r の球の中にいくつ粒子が入っているかを数える。その粒子数 N_m と r の関係から、フラクタル次元を求めることができる。すなわち、ダストのフラクタル次元が d である場合、 $N_m \propto r^d$ となる。図5に N_m と r の関係を示した(縦軸は N_m を $r^{2.5}$ で

割ったもの)ことに注意)。ダストが成長して圧縮されるにつれ、線が平らになっており、フラクタル次元が2.5に近づいていることがわかる。この小さいフラクタル次元の値が、圧縮開始後のダスト密度の減少の原因である。式(9)の第一項の $-1/5$ という値はフラクタル次元が2.5であることから導かれる(詳細は [13] を参照)。Wada et al. [8] では1回の衝突の結果得られたダストのフラクタル次元が求められており、その値も2.5であった。このことは、本研究で連続衝突の結果得られたダストの内部構造が、Wada et al. [8] で得られたダストと同様であることを意味している。この類似性のため、Wada et al. [8] で得られた圧力を用いたモデルによって、本研究の数値計算結果を説明することができたのである。

5. 原始惑星系円盤内での密度進化

最後に、原始惑星系円盤内でのダスト密度の進化について議論する。ダストは円盤ガスの中を運動しているとき、ガス抵抗力和中心星からの重力を受ける。この場合、ダストの衝突速度はダストの質量と断面積の比に依存する。この依存性を考慮に入れて、(9)式を解くと、円盤内でのダスト密度の進化を求めることができる。典型的な円盤モデル[14, 15, 16]をもちいると、ダストが成長するにつれ衝突速度およびダスト密度が変化の様子は図6ようになる。灰色の線は円盤上層での進化を、黒線は円盤赤道面での進化を示している。図6は、中心星から5AU離れた領域におけるダストの進化を表している。この領域では温度が低いため($\sim 50\text{K}$)、氷は昇華せずに固体として存在する。

円盤上層にある小さなダストは、質量も衝突速度も小さいため、衝突エネルギーが小さい(図6 灰色の線)。そのため、圧縮せずに密度が減少し続ける。ダストが成長するにつれ、衝突速度は変わらないが質量が増すため衝突エネルギーが大きくなり、それが E_{roll} を越えると圧縮が始まる。圧縮開始後は、成長するにつれて密度が増加している。これはひとたび圧縮によって密度が増加すると、ダストの衝突速度が大きくなり、より一層圧縮が進んでいくためである。このようにして、ダストの密度と衝突速度はともに増加していく。成長した大きなダストは赤道面に沈殿する。沈殿したダストの密度と速度は、図6の黒線にしたがって、

進化していく。赤道面では、衝突速度が最大値を持つ。そのため、密度も最大値を持つ。衝突速度の最大値は20m/s程度と見積もられ、このとき、ダストは圧縮されているものの、その密度は 10^{-4} g/cm³程度にすぎない(空気より軽い)。このように、我々のモデルによると、衝突による圧縮では非常に密度の低いダストが得られ、超低密度氷天体の形成が示唆される。

以上の見積もりは氷ダストに関するものであるが、シリケートダストにおいてもシリケートの物性値をもちいることで同様に密度進化を知ることができる。シリケートダストの表面エネルギーは氷ダストよりも小さいため、より圧縮されやすい。しかし、シリケートダストの破壊速度は数m/s程度であり、衝突速度の最大値より小さい。そのため、衝突破壊によって成長が阻害されると考えられる。一方、氷ダストの破壊速度は数十m/s程度であり、衝突破壊に阻害されずに成長することが可能といえよう。本研究で得られた超低密度ダストの存在は、ダストの衝突過程やその運動に大きな影響を与えると考えられる。この影響については今後調べていく必要がある。

6. 今後の展望

本研究では、ダストの圧縮過程について調べるため、ダスト衝突の数値計算を行った。さらに、Wada et al. [8]で得られた圧力をもちい、ダスト成長過程における密度進化モデルを構築した。しかし、実際の原始惑星系円盤内のダスト進化を明らかにするには、以下に述べるようなダスト密度を変えうる現象について調べる必要がある。

まず、ダスト密度を減少させる現象として、斜め衝突が考えられる。本研究で構築したモデルは正面衝突による数値計算結果のみをもとにしているが、実際の衝突では、ぎりぎりあたるような斜め衝突が多く起こる。現在、斜め衝突の計算を行い、その解析を行っている。斜め衝突の場合、ダスト同士が引き伸ばされ、正面衝突と比べ、圧縮が進行しにくい傾向がみられている。また、本研究で行ったような、数m/s以下の衝突では、正面衝突と同様に破壊は起こらなかった。

一方、ダスト密度を増加させる現象として、サイズの異なるダスト同士の衝突やガス抵抗による圧縮が考えられる。サイズの異なるダスト同士の衝突の際には、

大きなダストの間に小さなダストが入り込み、密度が増加することが考えられる。また、ダストが円盤ガス内を運動する際に受けるガス抵抗力によって、ダストは圧縮がされるかもしれない。この効果は、ダストが運動している間、常に作用し続けるので、ダストの密度を大きく変える可能性がある。特に本研究で得られた密度の低いダストは、ガス抵抗によって効率的に圧縮されるかもしれない。現在観測されている小天体の密度は本研究で得られたような超低密度ではない。これは、上で述べたような圧縮過程によって、ダスト密度が増加したためかもしれない。または、自己重力や微惑星形成後の小天体同士の高速度衝突などの圧縮過程によって天体の密度が上昇したのかもしれない。

本研究では、圧縮についてのみ調べたが、ダスト成長を考える上では、破壊も重要である。先行研究[5, 6, 8]によって、BCCAの破壊速度が得られているが、その他の構造を持つダストの破壊速度は得られていない。本研究の連続衝突で得られた様々なダストの破壊速度がどのような値を持つかを調べる必要がある。連続衝突で得られたダストは、BCCAダストに比べると、コンパクトであるため、強度が大きく壊れにくいことが予想される。

また、温度の高い円盤内側では、ダストの焼結も重要になるだろう。Sirono [17]によって、焼結によりネックが太くなったダストを壁に衝突させる計算が行われている。その結果によると、焼結の進んだダストは大きい強度を持つため、圧縮されにくいことが分かっている。そのため、焼結の効果を考えると、本研究で得られた超低密度ダストよりもさらに密度の低いダストがつくられると予想される。このような強い構造を持つダストの密度がダスト同士の衝突合体によってどのように進化していくかを調べる必要がある。

これらの様々な問題を乗り越えながら、ダスト成長過程を明らかにしていきたいと考えている。

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城野信一博士に感謝します。

参考文献

- [1] Safronov, V. S. 1969, Evolution of the Proto-planetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets (NASA TTF-677; Moscow: Nauka)
- [2] Weidenschilling, S. J. 1980, *Icarus*, 44, 172
- [3] Nakagawa, Y. et al. 1981, *Icarus*, 45, 517
- [4] Weidenschilling, S. J., & Cuzzi, J. N. 1993, in *Protostars and Planets III*, ed. E. H. Levy & J. I. Lunine (Tucson: University of Arizona Press), 1031
- [5] Dominik, C., & Tielens, A., 1997, *ApJ*, 480, 647
- [6] Wada, K. et al. 2007, *ApJ*, 661, 320
- [7] Blum, J., & Wurm, G. 2000, *Icarus*, 143, 138
- [8] Wada, K. et al. 2008, *ApJ*, 677, 1296
- [9] Heim, L.-O. et al. 1999, *Phys. Rev. Lett.*, 83, 3328
- [10] Mukai, T. et al. 1992, *A&A*, 262, 315
- [11] Krause, M., & Blum, J., 2004, *Phys. Rev. Lett.*, 93, 021103
- [12] Blum, J. 2004, in *ASP Conf. Ser. 309, Astrophysics of Dust*, ed. A. N. Witt, G. C. Clayton, & B. T. Draine (San Francisco: ASP), 369
- [13] Suyama, T. et al. 2008, *ApJ* 684, 1310
- [14] Adachi, I. et al. 1976, *Prog. Theor. Phys.*, 56, 1756
- [15] Hayashi, C. 1981, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 70, 35
- [16] Kusaka, T. et al. 1970, *Prog. Theor. Phys.*, 44, 1580
- [17] Sirono, S. 1999, *A&A*, 347, 720.