

微惑星形成過程における粉体の役割

名古屋大学大学院環境学研究科 城野 信一¹

惑星形成の第一ステップである「微惑星の形成過程」はいまだ明らかになっていない。本論文では、なぜ微惑星形成過程を理解できていないのか、大きな問題点を二つ指摘する。数値シミュレーションの結果と室内実験の結果を紹介しつつ、それら二つの問題点の解決の可能性を議論する。

1 微惑星形成過程における問題点

惑星形成過程は、原始惑星系円盤と呼ばれるガス円盤の中でミクロンサイズの微粒子が凝集することで始まる。1キロメートル程度まで成長すると、その後は相互重力によって引っ張りあうことで衝突合体が進行する。この、相互重力が効く程度まで成長した段階の天体を「微惑星」と呼んでいる。

微惑星形成後の惑星形成過程についてはN体シミュレーションによりかなりのことが明らかになってきた。この段階については小久保氏の論文を参照されたい。一方で、微惑星それ自体の形成過程についてはいまだ明確になっていない。本論文では微惑星形成過程における問題点を議論する。

微惑星形成過程のシナリオは大きく分けて二つ存在する。一つは惑星形成の標準モデルとされている「京都モデル」[5]に含まれている「重力不安定シナリオ」である（道越さんの論文参照）。もう一つは微粒子が直接衝突合体を繰り返して1キロメートル程度まで成長したとする「合体成長シナリオ」である。それぞれに大きな問題点が存在する。

重力不安定シナリオは次の通りである。微粒子が原始惑星系円盤の中心面（太陽の中心を通り、ガス円盤を上下二等分する面）に太陽からの重力によって落下することで微粒子に富んだ層を形成する。層の密度が上昇すると、自己重力不安定が発生し、キロメートルサイズの塊に分裂する、というものである。ここで前提となっているのは、太陽からの重力によって微粒子もしくはその集合体が円盤中心面に落下できるということである。しかしここには二つ問題点がある。微粒子ははじめはブラウン運動によって衝突付着を繰り返す。こうして形成された微粒子集合体はフラクタルな構造になり、落下速度が非常に遅くなってしまふ。これを回避するためには何らかのプロセスにより微粒子集合体をコンパクトにしなければならない。

圧力勾配力が働くためケプラー回転速度よりも若干遅い回転速度でガス円盤は太陽の周りを回転する。一方で固体微粒子はケプラー速度で回転する。このため、仮に円盤中心面に微粒子が濃集したとすると、上下のガス層との間で速度差が生じることになる。このため乱流が発生し、濃集し

¹E-mail: sirono@eps.nagoya-u.ac.jp

た微粒子は巻き上がってしまう [9]. これがもう一つの問題点である. これを回避するためには乱流で巻き上げられない程度 (1m 程度) までは微粒子集合体が合体成長している必要がある. また, 微粒子集合体がフラクタルで高空隙率な構造を持っていると効率的に巻き上げられてしまう. やはり微粒子集合体はコンパクトな構造になる必要がある.

一方の合体成長シナリオにも問題点がある. 先ほどの速度差のため, 微粒子集合体は太陽方向に落下する. 1m 程度の大きさの集合体をもっとも落下速度が早くなり, 100 年程度で太陽まで落下してしまう. これを回避するためには, 微粒子集合体の合体成長が効率よく進行する必要がある.

以上をまとめると, 微惑星形成過程を明らかにするためには, 以下の二点を議論する必要があることがわかる. 1) 微粒子集合体は衝突したときに合体できるのか? 2) 微粒子集合体はコンパクトな構造になりうるか? 以下では連続体シミュレーションの結果と室内実験の結果を紹介し, この問題を考える上でのヒントを提供したいと思う.

2 連続体シミュレーション

ここでは Sirono (2004)[8] によって行われた連続体シミュレーションの結果を紹介する.

原始惑星系円盤に漂う微粒子のサイズは 1 ミクロン程度である. 一方で, 微粒子集合体のサイズとしては 1 メートル程度を考える必要がある. このため個々の微粒子の運動をダイレクトに解くのではなく, 微粒子集合体を連続体として取り扱い, 構成方程式に微粒子集合体の特性を反映させた. 個々の微粒子の運動をダイレクトに解く数値シミュレーションについては和田氏の論文を参照されたい.

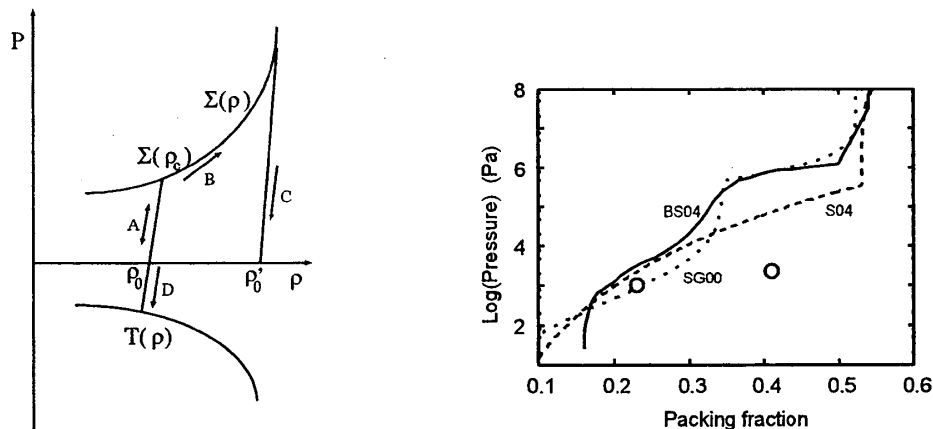


図 1: 左: 連続体シミュレーションに組み込んだ圧力-密度関係. 横軸は密度, 縦軸は圧力を示す. 右: 直径 0.76 ミクロンの SiO_2 微粒子の集合体の圧密曲線. 横軸は充填率, 縦軸はその密度まで圧密するのに必要な圧力を示す. BS04: 実験結果 [1]. SG00: Sirono & Greenberg (2000) におけるモデルを用いた計算結果. 充填率 0.33 で微粒子のころがり運動が抑制されるため圧力が上昇する. S04: 連続体シミュレーションで用いた圧密曲線. ○: 引っ張り強度の計測結果 [2]

連続体として見たときの微粒子集合体の特徴は次の二つである. 1) 顕著な圧縮性 2) 密度に依存した大きな強度変化. 図 1 右の実線はミクロンサイズの SiO_2 微粒子集合体に対して実験的に

計測された [1] 圧密曲線である。充填率が 0.15 から 0.5 まで変化するにともない、圧密するのに必要な圧力が 4 桁上昇していることがわかる。

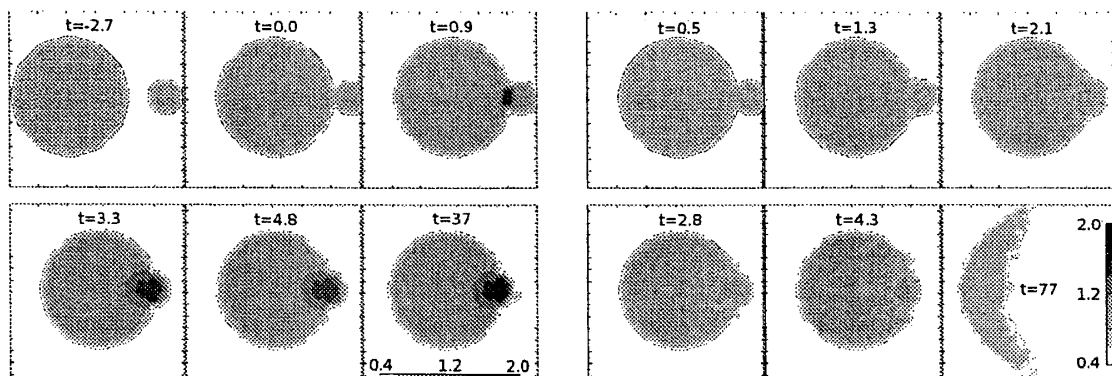


図 2: 連続体シミュレーションの結果. 濃淡は初期密度を 1 として規格化した密度分布を示す. 左: 圧密曲線 < 引っ張り強度の場合. 右から衝突した微粒子集合体は標的となった集合体と合体する. 衝突点近傍の密度は初期密度の倍程度まで増加する. 右: 圧密曲線 > 引っ張り強度の場合. 標的となった微粒子集合体は破壊してしまう.

1) の特徴をとらえるため図 1 左に示すような圧力-密度関係を取り入れた. 集合体に圧力をかけると, はじめは弾性的に変形する (図 1 左の経路 A). 圧密曲線に到達すると, 以降はこの曲線にそって圧力, 密度が上昇する (図 1 左の経路 B). 徐荷すると, 弾的に膨張し圧縮前の密度とは別の密度となる (図 1 左の経路 C). 経路 A, B, C に囲まれた面積に相当するエネルギーが散逸することになる.

また, 引っ張り応力をかけると弾的に膨張し, 引っ張り強度に到達すると破壊が起こるとした (図 1 左の経路 D). ダメージパラメータ [3] を導入することで破壊を表現した. 剪断方向については, von Mises の降伏条件を用いた. 初期充填率は 0.2 とした. 力学的強度は本来はひずみ速度に依存するが, 簡単のためこの依存性は無いものとした.

以上の構成関係を組み込んで SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) シミュレーションを行った. 圧密曲線と引っ張り強度を変化させて結果の違いを見た. 圧密するのに必要な圧力 (圧密曲線) < 引っ張り強度の場合には合体が起こり (図 2 左), 逆の場合は破壊が進行する (図 2 右) ことがわかった. したがって, 合体が起こるためには圧密するのに必要な圧力が小さい必要がある. しかし, 合体が起こると衝突点近傍の密度は上昇してしまう. 密度が上昇するとその領域を圧密するのに必要な圧力が大きく上昇してしまう. このため, 引き続く衝突で合体し続けられるかどうかは明らかでない.

さらに, 実験的に計測されたデータは引っ張り強度 (図 1 右の○) が圧密曲線 (図 1 右の実線) よりも小さくなっている. より小さい充填率では引っ張り強度の方が大きくなる可能性もあるが, 地球の重力下での実験には限界があるため計測は困難であるのが現状である. 非常に空隙率の高い微粒子集合体の力学的強度の計測が望まれる.

3 室内衝突実験

前述の連続体シミュレーションにより、本論文冒頭で提示した問題点二つ（コンパクトな構造、合体成長の進行）を同時に満足させるのは簡単ではないことがわかってきた。そこで次に間隙流体の効果を実験的に観察した結果を報告する。

彗星核の探査によって得られた結果から、彗星核には多量（質量比で 20%程度）の有機物が含まれていると推定されている [4]。おそらく彗星核は惑星になれなかった微惑星の生き残りである。したがって微惑星の原材料となった微粒子にも多量の有機物が含まれていたであろう。この有機物の模擬物質を実験室で合成したところ、顕著な流動性があることが明らかとなった [6]（室温で 1000 ポアズ程度）。ここから、有機物（生命材料物質）は微粒子集合体の衝突合体において鍵となった可能性がある。そこで有機物の効果を検証する実験を行った。

粘性係数が既知であるシリコンオイル（アズワン（株）製）を 4 種類用意した。それぞれの粘性係数 η は 1, 10, 100, 1000 ポアズである。シリコンオイルの密度は 1 g cm^{-3} である。このシリコンオイルと平均粒径 100 ミクロンのガラスビーズ（密度 2.5 g cm^{-3} ）を様々な体積比 α （= ガラスビーズ体積/シリコンオイル体積）で混合し試料を作成した。

この試料を用いて 3 種類の実験を行った：1）付着力計測実験、2）低速衝突実験、3）高速衝突実験である。付着力計測実験においては、直径 2cm のアルミ棒を試料表面に接触させ、一定速度で引き離す際にかかる力を計測した。結果を図 4 左に示す。 $\alpha = 1.8$ で付着力が大きく低下することがわかった。同一サイズの球をランダムにパッキングし、隙間を有機物が充填すると $\alpha = 1.8$ となる。 $\alpha < 1.8$ となると試料表面にガラスビーズがむきだしとなり凹凸ができるため付着力が低下するものと考えられる。

低速衝突実験では、試料から直径 1.5cm 程度の球を作成した。この球を厚さ 1cm 程度の混合物層に高さ 30cm から落下させることで低速衝突実験を行った。衝突速度は 242 cm s^{-1} である。標的の面を 30° 傾け、混合物球を落下させた。各 η , α で 10 回実験を行い、混合物球が衝突点近傍で運動を停止した場合の割合を付着確率とした。付着した場合の結果の一例を図 3 に示す。混合物球は衝突にともない変形（図 3a-c）し、回転して停止する（図 3d）。結果をまとめると図 4 中になる。 α が大きくなると付着確率が低下する。シリコンオイルの粘性が低い場合には、 $\alpha = 1.8$ で付着確率が大きく低下する。

さらに、混合物に対して秒速 90 m s^{-1} で直径 9mm のナイロン球を高速衝突させる実験を行った。衝突の際に放出されるイジェクタの質量を計測した。その結果、シリコンオイルを混合すると放出されるイジェクタの量は劇的に低下し、粘性係数が 10 ポアズよりも大きい場合にはイジェクタの質量が衝突付着したナイロン球の質量よりも小さくなることが明らかとなった（図 4 右）。

以上の実験から、原始惑星系円盤における微粒子に含まれていたであろう有機物と同程度の粘性係数の流体は衝突合体を促進することがわかる。さらに、ここで用いた試料の空隙率はほぼゼロである。有機物の流動性のため微粒子集合体は自発的にコンパクトな構造になることが期待される。したがって、有機物の存在は冒頭に提示した二つの問題点（コンパクトな構造、合体成長の進行）を両方同時に解決できる可能性がある。

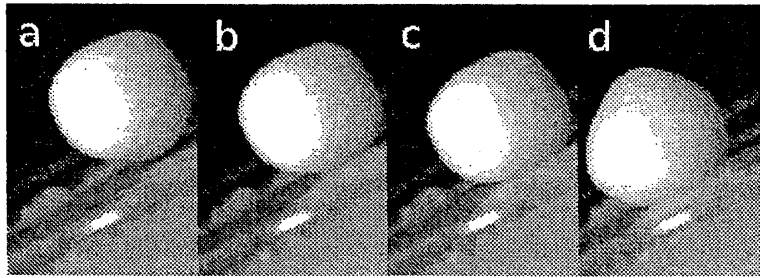


図 3: 低速衝突実験の結果の一例. $\eta = 100$ ポアズ, $\alpha = 1.3$ の場合. 左 (a) から右 (d) へ時間が進行する. 衝突にともない変形 (a-c) し, 回転して停止する (d). a-b, b-c の時間間隔は 0.5 ミリ秒. d はさらに 11 ミリ秒後.

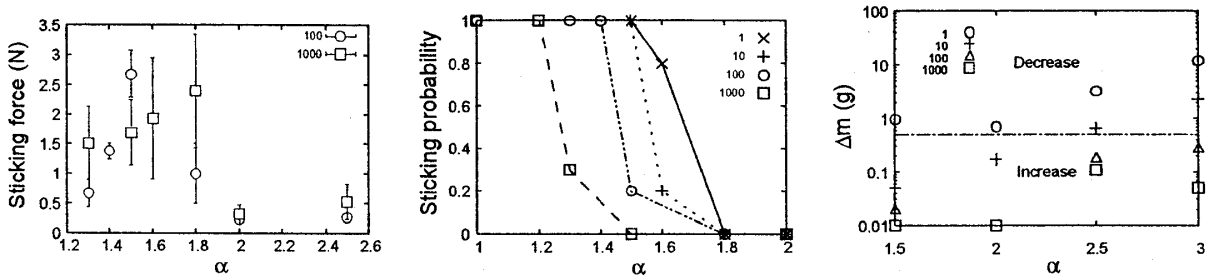


図 4: 左: 付着力計測実験の結果. 縦軸は付着力. \circ は 100 ポアズ, \square は 1000 ポアズのシリコンオイルを用いた結果. 5 回の実験の平均値を示す. エラーバーは標準偏差を示す. $\alpha = 1.8$ で急激に付着力は低下する. 中: 低速衝突実験の結果. 縦軸は付着確率. \times : 1 ポアズ, $+$: 10 ポアズ, \circ : 100 ポアズ, \square : 1000 ポアズのシリコンオイルをそれぞれ用いた結果. α が大きくなると付着確率が低下する. シリコンオイルの粘性が大きいほど, 低下する α は小さくなる. 右: 高速衝突実験の結果. 縦軸は放出されたイジェクタの質量. \circ : 1 ポアズ, $+$: 10 ポアズ, \triangle : 100 ポアズ, \square : 1000 ポアズのシリコンオイルを用いた結果. 実線は用いた弾丸の質量を示す. この実線よりも下であればターゲットの質量は増加したことになる.

4 まとめと今後の展望

惑星形成の第一ステップである微惑星形成過程には二つの問題点がある. 1) 微粒子集合体はコンパクトな構造になるか? 2) 微粒子集合体の合体成長は可能か? 連続体シミュレーションの結果と室内実験の結果を紹介し, それぞれの問題点を解決する可能性について議論した. 粉体のマクロな特性を構成方程式に組みこんで連続体シミュレーションを行った結果, 引っ張りで破壊するために必要な応力よりも圧縮で圧密する応力の方が小さい場合に微粒子集合体の合体成長が起こることがわかった. しかし合体成長が起こったとしても, 衝突点近傍の密度は上昇してしまう. 密度上昇が進行すると, 合体成長が起こるために必要な条件が満たされなくなってしまう.

そこで微粒子に多量に含まれていたと考えられる有機物に着目した. 微粒子集合体の衝突において有機物は間隙流体として重要な役割を果たす可能性がある. 室内実験を行うことでこの可能性を検証した. その結果, 間隙流体は合体成長を大きく促進できることが明らかとなった.

この論文から, 惑星形成過程はそもそもその第一ステップの理解ができていないことを感じて頂

ければ筆者の目的は達成されたと思う。中でも粉体の変形を記述する構成方程式（湯さん、波多野さんの論文参照）は決定的に重要な要素となる。また、wet な系での衝突実験はそれほど例が無いと思われるので、まだまだやるべきことは多い。さらに、本論文で論じた惑星形成過程以外にも粉体の活躍する場は惑星科学に多数存在する。粉体を研究されているみなさんの惑星科学への参入をお待ちしています。

謝辞

本論文は 2007 年 12 月 25 日に京都大学基礎物理学研究所で行われた研究会「粉体物理の現状と展望」でなされた発表に基づいています。発表の機会を与えて頂いた早川尚男教授に感謝いたします。室内実験においては荒川政彦助教授の協力を頂きました。この研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究 B, 課題番号 1874023）によって援助されています。

参考文献

- [1] Blum, J. and Schrapler R. 2004. Structure and Mechanical properties of high-porosity macroscopic agglomerates formed by random ballistic deposition. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 115503.
- [2] Blum, J., Schrapler R., Davidsson, B. J. R. and Trigo-Rodriguez, J. M. 2006. The physics of protoplanetary dust agglomerates. I. Mechanical properties and relations to primitive bodies in the solar system. *Astrophys. J.*, **652**, 1768-1781.
- [3] Grady, D. Y., and Kipp, M. E. 1980. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* **17**, 147-157.
- [4] Greenberg, J. M. 1998. Making a comet nucleus. *Astron. Astrophys.* **330**, 375-380.
- [5] Hayashi, C., Nakazawa, K. and Nakagawa Y. 1985. Formation of the solar system. In *Protostars and Planets II* (D. C. Black and M. S. Matthews, Eds.) pp. 1100-1153. Univ. Arizona Press, Tuscon.
- [6] Kouchi, A., Kudo, T., Nakano, H., Arakawa, M., Watanabe, N., Sirono, S., Higa, M. and Maeno, N. 2002. Rapid growth of asteroids owing to very sticky interstellar organic grains. *Astrophys. J.*, **566**, L121-L124.
- [7] Sirono, S. and Greenberg, J. M. 2000. Do cometesimal collisions lead to rubble piles or bound aggregates? *Icarus*, **145**, 230-238.
- [8] Sirono, S. 2004. Conditions for collisional growth of a grain aggregate. *Icarus*, **167**, 431-452.

- [9] Weidenschilling, S. J., and Cuzzi J. N. 1993. Formation of planetesimals in the solar nebula. In *Protostars and Planets III* (E. H. Levy and J. I. Lunine, Eds.) pp. 1031-1060. Univ. Arizona Press, Tuscon.