

粉体流に形成するダストクラスター間衝突の観測

○長足友哉¹, 中村昭子¹, 長谷川直², 和田浩二³

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構 ³千葉工業大学惑星探査研究センター

目的：

原始惑星系円盤におけるサブミクロンサイズのダストがキロメートルサイズの微惑星へと成長する過程において、ダストアグリゲイトが衝突付着成長できる限界サイズが重要であることから、数値計算（Wada et al., 2009 等）や室内実験（Kothe et al., 2013 等）による研究が行われている。室内実験の主な手法としては、容器内で複数の数百ミクロンサイズのアグリゲイトを微小重力下で相互衝突させるというものがある。室内実験と数値計算で成長限界衝突速度はおおよそ一致するが、これらの室内実験では、ダストアグリゲイト間衝突の結果として「跳ね返り」を観測することがある一方、数値計算において、この「跳ね返り」は原始惑星系円盤環境では起こらず、ダストアグリゲイトの配位数が 6 を越える場合のみ起こるとされている（Wada et al., 2011）。その原因の一つとして、上記の室内実験では容器とアグリゲイトの間の衝突が原因で、ダストアグリゲイトの表層が内部よりも一層圧密され、跳ね返りが起こりやすくなっている可能性がある。そこで、この難点を回避できる手法として、自由落下粉体流に形成するダストクラスター間衝突実験を構想した。大気圧下および減圧下で自由落下する球形粒子の流れにクラスターが形成し、クラスター化には粒子の付着力が寄与することが知られている（Royer et al., 2009; Waitukaitis et al., 2011; Nagaashi et al., 2018）。昨年度までの共同利用実験によるフラッシュ X 線撮像により、メジアン径 45 μm のガラスビーズからなるクラスターの充填率が ~ 0.3 であることを確認している。これは ~ 2 -6 の配位数に相当し、数値計算のダストアグリゲイトとの比較から、このダストクラスター間衝突では跳ね返りが起こらないと予測される。今年度の実験では、ダストクラスター間衝突実験を実現し、衝突プロセスを観測することを目的とする。

実験手法：

真空チャンバーの上部に粉体流発生機構とデジタルカメラを設置し、粉体流を発生させた後、デジタルカメラがシャフトに沿って落下しながら粉体流を撮像する。粉体流発生機構としては、左右で異なる傾斜を持つ 6×6 mm サイズのノズルから二本の粉体流を発生させる。これにより、粉体流は互いに水平方向に速度をもつため、ダストクラスター同士を衝突させることが可能である。使用したデジタルカメラのフレームレートは 960 fps で、空間分解能は 32 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。粒子としては上記のガラスビーズを使用し、0.1 気圧で実験を行った。実験のセットアップと実験に使用した粒子の電子顕微鏡画像を図 1 に示す。

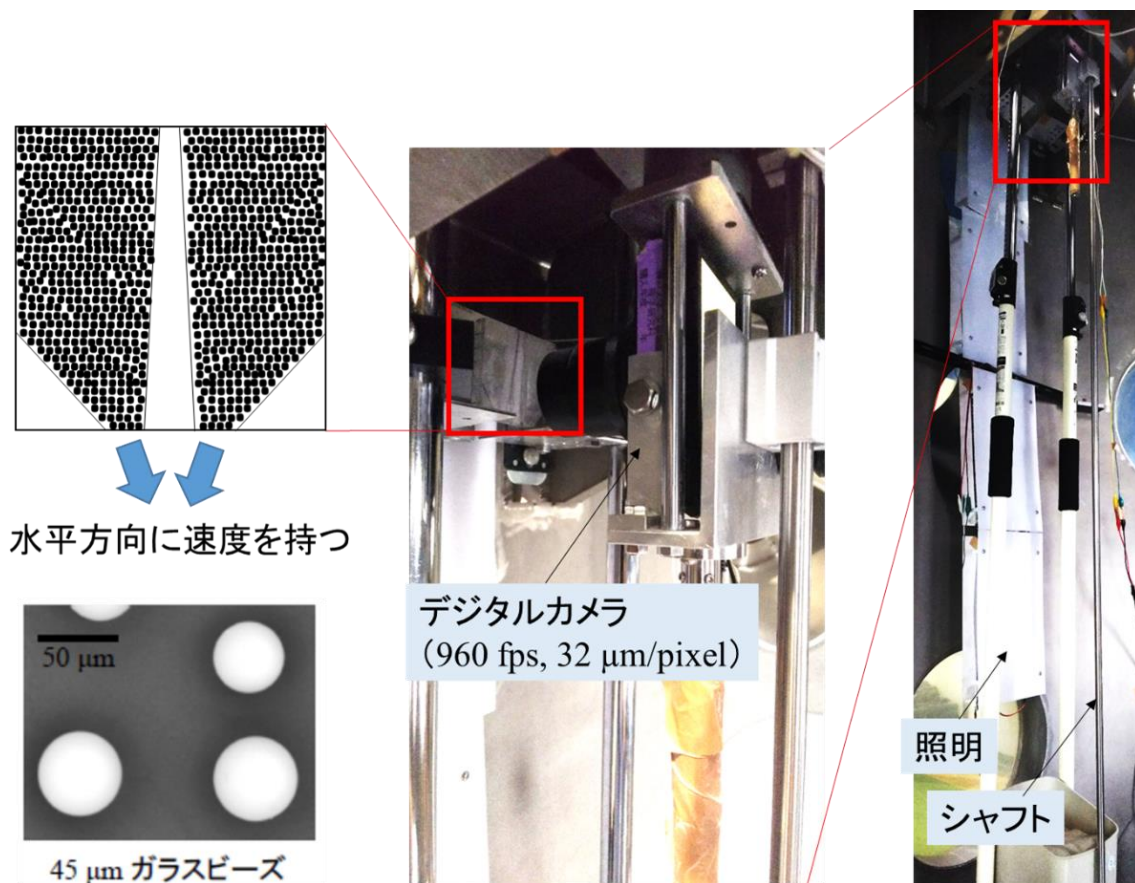


図 1 : ダストクラスター間衝突の実験セットアップと使用した粒子

実験結果：

今回、3 mm サイズのダストクラスター間の衝突速度 $\sim 9\text{ cm/s}$ を実現し、その衝突過程を撮像した。観測可能だった衝突後 0.06 秒の間ではクラスターの特徴点間距離の変化は落ち着く傾向で、「跳ね返り」は確認されず、完全合体することから、少なくともこの衝突速度でダストクラスターは「破壊」しないことを確認した (図 2)。

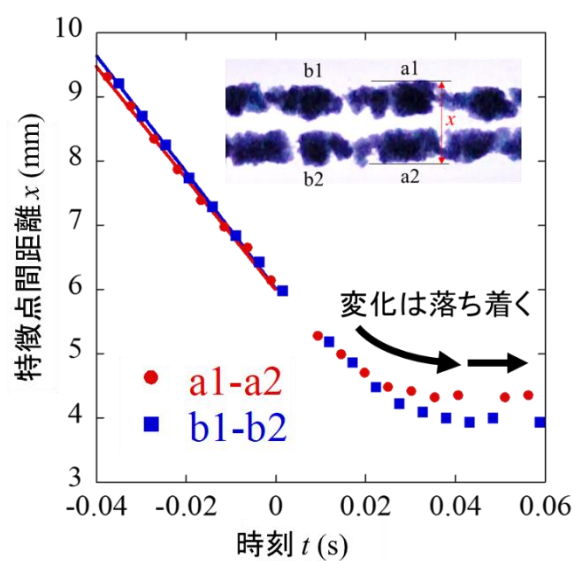


図 2 : ダストクラスターの特徴点間距離の時間変化

一方、本研究で用いたガラスビーズの付着力は、大気圧下で遠心加速法により測定され、 $\sim 0.5 \mu\text{N}$ であった (Nagaashi et al., 2018)。この付着力をもつ直径 $45 \mu\text{m}$ の滑らかな表面を持つガラス球からなるダストアグリゲイト間衝突の場合に数値計算により予想される完全合体限界衝突速度 (Wada et al., 2009) を図 3 に示す。この値は衝突角度に依存するため、正面衝突の場合を青の直線で、平均衝突の場合を赤の直線で示す。本実験の衝突条件を星印で示しており、ダストクラスターはダストアグリゲイトの数値計算の予想よりも何らかの理由で「付着成長」しやすい可能性があることがわかった。

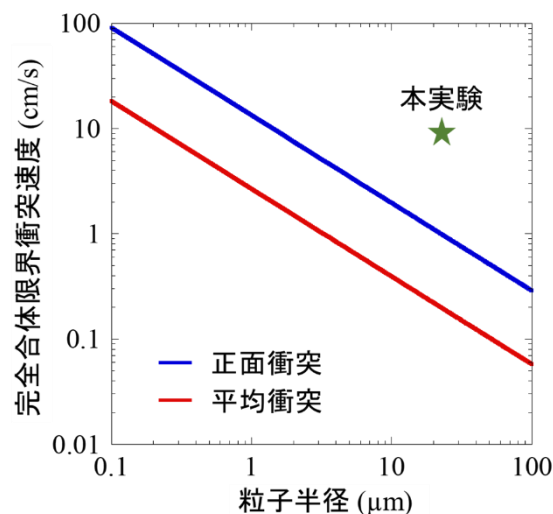


図 3 : 数値計算によるダストアグリゲイトの完全合体限界衝突速度

また、衝突前後でのダストクラスターの体積変化はデジタルカメラ画像で確認されなかった。完全合体しているため、ダストクラスターを構成する粒子数の増減はないので、このことは衝突前後でダストクラスターの充填率に検出可能な変化がなかったことを意味する。

以上の実験結果を踏まえ、今後の展望として、様々な組成・粒径・形状の粒子を用いた粉体流中に形成するクラスター間の異なる衝突速度の実験を行い、そのようなパラメタが衝突結果に与える影響を調べる。また、フラッシュ X 線撮像により、衝突後のクラスターの空隙率推定を行うことが挙げられる。

まとめ：

自由落下粉体流に形成するダストクラスター間衝突実験を実現した。粉体流とともに落下させるデジタルカメラによる撮像で、クラスター間衝突過程の観察が可能である。今回実現したクラスター間衝突速度は 9 cm/s 程度であった。数値計算によるダストアグリゲイトの完全合体限界衝突速度は、この衝突速度における「破壊」を予想するものの、ダストクラスターは、衝突後の 0.06 秒の間ではクラスター間の「跳ね返り」は起こらず完全合体した。何らかの原因で、ダストクラスターは付着成長しやすい可能性がある。今後、パラメタを変えて自由落下粉体流に形成するダストクラスター間衝突実験を行い、また、フラッシュ X 線撮像により、衝突後のダストクラスターの充填率を推定する。