

フラッシュ X 線によるダストアグリゲイト からなる粉体流の観測

○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

原始惑星系円盤での微惑星形成過程において、自己重力が効かないサブミクロンサイズのダストが衝突付着成長して形成できるダストアグリゲイトの限界サイズが重要なため、室内実験 [1,2] や数値計算 [3] による研究が行われている。先行研究の室内実験は、ふるいで成形した数百ミクロンサイズのアグリゲイトを微小重力下の容器内で相互衝突させた。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、室内実験では衝突で跳ね返りを起こることがある一方、数値計算では原始惑星系円盤の環境で跳ね返りは起こらず、アグリゲイトの配位数が 6 を越える場合にのみ起こるとされる [4]。原因として、室内実験での容器とアグリゲイト間の衝突がアグリゲイト表層を過剰に圧密している可能性がある。そこで、我々は自由落下粉体流に形成するクラスター間衝突実験を構想した。粉体流内における粒子付着力による粒子間衝突でのエネルギー損失が原因でクラスターが形成するとされる [5,6,7,8]。昨年度までの共同利用実験でのフラッシュ X 線撮像に基づき、メジアン径 45 μm のガラスビーズ・パウダーからなるクラスターの充填率は $\sim 2\text{-}6$ の配位数に相当し、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した [8]。また、メジアン径 45 μm のガラスビーズからなるクラスター間衝突を実現し、9 cm/s の衝突で完全合体することを確認した。今後のサブミクロンサイズのダストからなるアグリゲイト粉体流のクラスター間衝突の準備として、今年度はダストアグリゲイトの付着力測定とそのクラスターのフラッシュ X 線撮像を行った。

実験手法

実験に用いたダストは直径 0.1-1 μm (メジアン径 0.5 μm) のシリカ球で、それをふるいでふるうことでアグリゲイトに成形した。ふるいのメッシュサイズによりアグリゲイトサイズは調整でき、付着力の測定には数十ミクロンサイズ、粉体流実験には数百ミクロンサイズのアグリゲイトを使用した。ダストアグリゲイトの付着力は遠心法 [7,9,10] により測定した。概略図を図 1 に示すように、平板に付着した粒子に遠心力を加え、各粒子が平板から離れる遠心力から付着力を決定する。測定は大気圧下・湿度 30-40% で

行った。一方、ダストアグリゲイト粉体流に形成するクラスターをフラッシュ X 線撮像し、その充填率を推定した。クラスター通過前後の X 線強度比は次のように書ける [8] :

$$\frac{I(x, z)}{I_0(x, z)} = e^{-\kappa \Sigma(x, z)}$$

$$\Sigma(x, z) = \int_{-l(x, z)/2}^{l(x, z)/2} \rho_p \varphi(x, y, z) dy$$

$$l(x, z) = 2\sqrt{w(z)^2 - x^2}$$

ここで、 $I(x, z)$ はクラスター通過後の X 線強度、 $I_0(x, z)$ はクラスター通過前の X 線強度、 κ は物質による質量吸収係数 (較正実験により $\sim 0.024 \text{ m}^2/\text{kg}$)、 $\Sigma(x, z)$ は柱密度、 ρ_p は粒子の質量密度 2650 kg/m^3 、 $2w(z)$ は流れ (クラスター) の幅である。簡単のため、図 2 に示すようにクラスターが軸対称で、充填率一様と仮定し、 x 方向の X 線強度プロファイルに対して、残差が最小となるクラスターの幅と充填率を決定した。

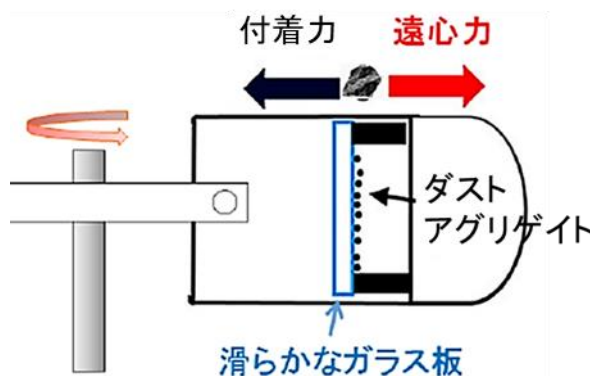


図 1 : ダストアグリゲイトの付着力測定の概略図

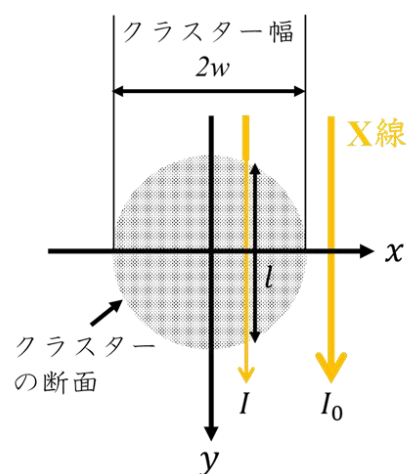


図 2 : クラスターのフラッシュ X 線による充填率測定

実験結果

今回測定されたダストアグリゲイトの付着力と、メジアン径 $45 \mu\text{m}$ のシリカサンドの付着力分布 [10] を比較すると、シリカサンドの付着力は粒子形状 (表面粗さと円形度) に依存して数桁に及ぶ分布を持つ一方、アグリゲイトの付着力分布はモノマーのサイズ範囲程度に狭く、モノマー粒子に対して JKR 理論 [11] で予測される付着力の数倍

程度の付着力をもっていた。これはダストアグリゲイトの付着力がそのサイズに依存せず、何個のモノマーが接触して付着しているかに依存するモデルと調和的である [12]。

一方、フラッシュ X 線撮像で得られたダストアグリゲイトからなる 3 つのクラスターの充填率と幅はそれぞれ 0.10 ± 0.01 、 5.8 ± 0.6 mm であった。流出前のダストアグリゲイト層の充填率はおよそ 0.14 であり、粉体流中でわずかに充填率が減少している。一方、ダストアグリゲイト自身の充填率は 0.37 程度とされる [13] ため、ダストアグリゲイト内の空隙を無視し、クラスターにおけるダストアグリゲイト間の空隙だけを考慮した場合の充填率は 0.27 程度と推測される。この値はメジアン径 $45 \mu\text{m}$ のガラスビーズのクラスターの 0.34 よりも小さく、同サイズのガラスパウダーのクラスターの 0.21 よりも大きい [8]。また、クラスターの幅はガラスビーズ $5.0 \text{ mm} <$ ダストアグリゲイト $5.8 \text{ mm} <$ ガラスパウダー 7.4 mm [8] であった。数値計算 [6] によると、球形粒子からなる粉体流クラスターのサイズは粒子付着力に依存するとされるが、測定付着力はガラスビーズ $0.56 \mu\text{N}$ [10] $>$ アグリゲイト $0.33 \mu\text{N}$ $>$ ガラスパウダー $0.097 \mu\text{N}$ [10] で逆の傾向である。一方、それぞれの粒子の二次元の短軸と長軸の比は中央比で、ガラスビーズ $0.99 >$ ダストアグリゲイト $0.79 >$ ガラスパウダー 0.58 であり、クラスター形成に対し、今回の粒子の付着力の違い以上に粒子形状の違いが影響している可能性がある。

今後、ガラスパウダーよりも丸い珪砂からなる粉体流のフラッシュ X 線観測を行うことで粒子形状効果の検証と、ダストアグリゲイトを用いた粉体流中に形成するアグリゲイトクラスター同士の衝突実験を行い、カメラとフラッシュ X 線によりその衝突過程の観測と衝突での充填率進化を推定する。

まとめ

サブミクロンサイズのダストからなるアグリゲイトの付着力の測定とダストアグリゲイトからなるクラスターのフラッシュ X 線観測に基づく充填率推定を行った。ダストアグリゲイトの付着力はそのサイズによらず、モノマーの付着力とダストアグリゲイト間のモノマー接触数で議論できる可能性がある。

ダストアグリゲイトクラスターの全体の充填率は ~ 0.1 で、ダストアグリゲイト自体の充填率に基づき、ダストアグリゲイト間の空隙だけを考慮したときの充填率は ~ 0.27 と推定される。これは $45 \mu\text{m}$ サイズのガラスビーズ・パウダーのクラスターの中間の値である。また、ダストアグリゲイトクラスターの幅 $\sim 6 \text{ mm}$ もそれらのクラスターの中間の値であったが、これは、付着力が大きいほど大きいクラスターができるという数値計算での結果とは逆の傾向である。このことは粒子の付着力だけでなく、粒子形状がクラスター形成に大きく影響することを示唆している。

参考文献

- [1] J. Brisset, D. Heißelmann, S. Kothe, R. Weidling, and J. Blum, *Astron Astrophys* **593**, A3 (2016).
- [2] S. Kothe, J. Blum, R. Weidling, and C. Güttler, *Icarus* **225**, 75-85 (2013).
- [3] K. Wada, H. Tanaka, T. Suyama, H. Kimura, and T. Yamamoto, *Astrophys J* **702**, 1490 (2009).
- [4] K. Wada, H. Tanaka, T. Suyama, H. Kimura, and T. Yamamoto, *Astrophys J* **737**, 36 (2011).
- [5] J. R. Royer, D. J. Evans, L. Oyarte, Q. Guo, E. Kapit, M. E. Möbius, S. R. Waitukaitis, and H. M. Jaeger, *Nature* **459**, 1110–1113 (2009).
- [6] S. R. Waitukaitis, H. F. Grütjen, J. R. Royer, and H. M. Jaeger, *Phys Rev E* **83**, 051302 (2011).
- [7] Y. Nagaashi, T. Omura, M. Kiuchi, A. M. Nakamura, K. Wada, and S. Hasegawa, *Prog Earth Planet Sci* **5**, 52 (2018).
- [8] Y. Nagaashi, A. M. Nakamura, S. Hasegawa, and K. Wada, *Phys Rev E* **103**, 032903 (2021).
- [9] H. Krupp, *Adv Colloid Interf Sci* **1**, 111–239 (1967).
- [10] Y. Nagaashi, T. Aoki, and A. M. Nakamura, *Icarus* **360**, 114357 (2021).
- [11] K. L. Johnson, K. Kendall, and A. Roberts, *Proc. R. Soc. A* **324**, 301-313 (1971).
- [12] S. Arakawa, *Mon Notices Royal Astron Soc* **496**, 2786-2789 (2020).
- [13] R. Weidling, C. Güttler, and J. Blum, *Icarus* **218**, 688-700.