

# 粉体流中のダストアグリゲイト成長実験

○長足友哉<sup>1</sup>, 大村知美<sup>1</sup>, 木内真人<sup>1</sup>, 中村昭子<sup>1</sup>, 和田浩二<sup>2</sup>, 長谷川直<sup>3</sup>

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

本研究の目的：

微惑星の形成に関して、原始惑星系円盤内においてダスト同士の衝突速度は数十メートル毎秒に達し、凝集性の高い氷粒子の場合は成長可能とされるが、その一方で、凝集性の低いシリケート粒子の場合、アグリゲイトの衝突破壊が起きるとされる[1]。従来のダストアグリゲイト付着成長実験で用いられたのは、 $\text{sub-}\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ の粒子を地球重力下で数百マイクロン程度のふるいで作ったアグリゲイト[2]で、地上でかろうじて取り扱うことが可能な強度を持ち、数値シミュレーションで予想されるようなダストアグリゲイト構造とは非常に異なる[3]。一方、室内実験と数値シミュレーション両方で、自由落下する粉体流でアグリゲイトが形成することが示されている[4, 5]。またその数値シミュレーションでは粒子間相対速度が小さくなっていき、形成するアグリゲイトの平均接触数が4程度になることが調べられている。そこで、本研究では、アグリゲイト形成の理解のため、付着力を測定した粒子で粉体流実験を行ない、アグリゲイトの形成条件を調べ、アグリゲイトのサイズや形状に対する、粒子形状の影響を調べる。また今後は、粉体流二本を用いてアグリゲイトーアグリゲイト衝突実験を行い、原始惑星系円盤内のダストアグリゲイト付着成長条件の研究を行ない、特に、シミュレーションでは直接扱うのが難しい、不規則形状粒子からなるアグリゲイト成長条件を、球粒子の場合と比較する予定である。

実験手法：

粉体流実験では、漏斗の口を電磁石でせき止めて粒子を入れたものを真空チャンバー内に設置して、真空引きし、その後、電磁石により塞ぎ止められていた漏斗口を開くことで、粒子が流れ始め、粉体流が作られる。この実験のセットアップを図1に示す。この粉体流を宇宙研のチャンバーでは、デジタルカメラおよび高速度カメラを落下させて撮影し、神戸大のチャンバーでは、高さを固定した高速度カメラで撮影し、解析を行なった。

付着力測定は、ガラス平板に付着させた粒子に遠心力をかけていき、粒子が平板から離れたとき、遠心力がその粒子の付着力につりあったとして付着力を求める。粒子が平板から離れる回転数は、回転前後で同じ場所を光学顕微鏡により撮影して各粒子がどの回転数まで平板上に存在するか確かめた。この測定の概略図を図2に示す。これらの実験は、粒子に球形のガラスビーズ  $50\mu\text{m}$  と  $100\mu\text{m}$ 、不規則形状のアルミナ  $77\mu\text{m}$ 、海砂  $73\mu\text{m}$  を用い、大気圧下で行なった。

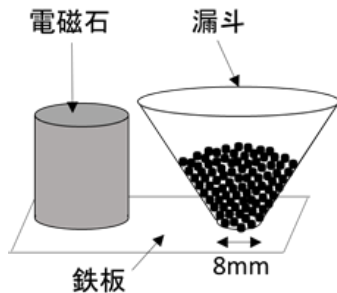


図 1：粉体流実験のセットアップ

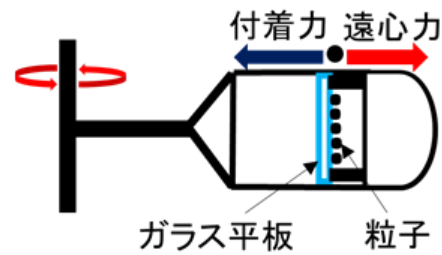


図 2：付着力測定の概略図

実験結果：

付着力測定結果では、球形ガラスビーズ  $50\ \mu\text{m}$  は、JKR 理論[6]による理論値の数%の値を示すものが多く、一方で、球形のガラスビーズ  $100\ \mu\text{m}$  や不規則形状のアルミナ  $77\ \mu\text{m}$ 、海砂  $73\ \mu\text{m}$  は粒子によってばらつきがあり、理論値の数%の値を示す粒子が多かった。また、付着力を測定した各粒子について、各粒子タイプで測定値と理論値の比が小さい順に並べたときの  $25\sim 75\%$  を採用して、各粒子タイプの実効的表面エネルギーの上限と下限とした。

一方、粉体流の漏斗口付近での水平方向の粒子速度を、高さ固定の高速度カメラの画像から、粒子の動きを解析して算出した。ここで、JKR 理論と数値シミュレーションからもたらされた同じ大きさのアグリゲイト同士の衝突の場合の成長限界速度  $v_{cr}$ [7] と上記の実効的表面エネルギーの上限値と下限値を用いて各粒子タイプからなるアグリゲイトの成長限界速度の上限と下限を求めた。この結果から、図 3 に示すように、ガラスビーズ  $50\ \mu\text{m}$  は成長限界速度以下のものが比較的多く、アグリゲイト形成の可能性を示すが、ガラスビーズ  $100\ \mu\text{m}$  やアルミナ  $77\ \mu\text{m}$ 、海砂  $73\ \mu\text{m}$  は成長限界速度を下回る粒子速度のものが少なく、アグリゲイトを形成しにくいと考えられる。

そこで、大気圧のときの漏斗口からの高さ  $0.9\ \text{m}$  での各粒子の粉体流の様子を示した図 4 で、ガラスビーズ  $50\ \mu\text{m}$  とガラスビーズ  $100\ \mu\text{m}$  の比較をすると、上記の推測に一致して、ガラスビーズ  $50\ \mu\text{m}$  はアグリゲイトが形成したが、ガラスビーズ  $100\ \mu\text{m}$  ではアグリゲイトが形成しない状態のままとなった。同様にアルミナ  $77\ \mu\text{m}$ 、海砂  $73\ \mu\text{m}$  の粉体流の様子を比較すると、上記の推測に反して、どちらもアグリゲイトを形成することが分かった。このことは今回測定された付着力や粒子速度では説明ができないが、不規則形状粒子の方が付着限界速度は大きいことを示した過去研究[8]があり、この結果もまた、そのことを示唆していると考えられる。

最後に、形成したアグリゲイトのアスペクト比を図 5 に示す。先行研究ではその値が  $1\sim 3$  の間であるとしているが、本研究でもほとんどのアグリゲイトが  $1\sim 3$  の範囲のアスペクト比をもち、傾向は一致する。また、本研究では先行研究よりも漏斗口を大きくしており、より大きいアグリゲイトが形成することがわかった。さらに、各粒子の比較をすると、ガラス

ビーズ  $50\ \mu\text{m}$  のアグリゲイトは幅が  $4\ \text{mm}$  程度で比較的揃っている一方で、不規則形状粒子のアルミナ  $77\ \mu\text{m}$ 、海砂  $73\ \mu\text{m}$  のアグリゲイトは幅がより大きく、ばらけており、アグリゲイト形状に対しても粒子形状の影響があることが示唆される。

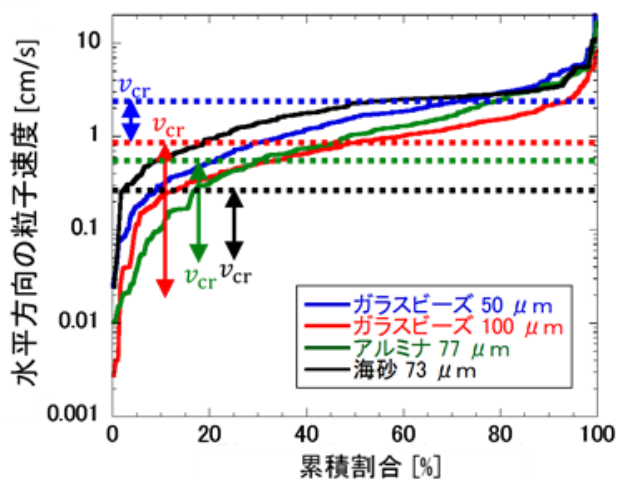


図 3 : 漏斗口付近での粉体流中の水平方向の粒子速度 vs 累積割合  
(矢印は各粒子の成長限界速度の範囲、点線は各粒子の成長限界速度の上限)

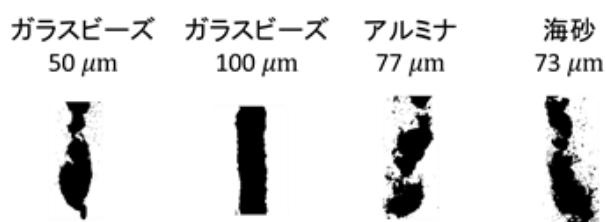


図 4 : 高さ  $0.9\ \text{m}$  での各粒子の粉体流の様子

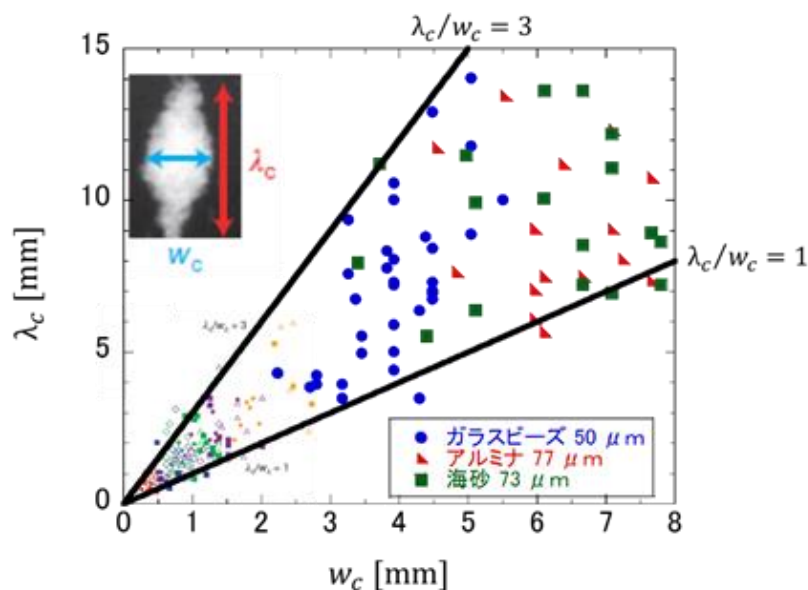


図5：アグリゲイトのサイズと形状

まとめ・今後の展望：

不規則形状のアルミナや海砂の方が、付着力が同程度のガラスビーズ $100\ \mu\text{m}$ よりアグリゲイトを作りやすい。これは今回測定された付着力では説明できないが、不規則形状粒子の方が、付着限界速度が大きいという過去研究がある。また、形成したアグリゲイトのアスペクト比は先行研究と一致し、より大きいアグリゲイトが形成したが、不規則形状粒子アグリゲイトは、球形粒子アグリゲイトよりもサイズにばらつきが大きい。以上のことは、アグリゲイト形成に対する粒子形状の効果を示唆するものと考えられる。今後はまず、フラッシュX線透過画像によりアグリゲイトのバルク密度を求め、粒子形状の影響をさらに議論する予定である。

#### 参考文献

- [1] Wada K. et al. (2009) *The Astrophysical Journal*, 702, 1490-1501.
- [2] Kelling T. et al. (2014) *The Astrophysical Journal*, 783, 111 (7 pages).
- [3] Wada K. et al. (2008) *The Astrophysical Journal*, 677, 1296-1308.
- [4] Royer J R. et al. (2009) *Nature* 459:1110-1113.
- [5] Waitukaitis S R. et al. (2011) *Physical Review E* 83, 051302 (12 pages).
- [6] Johnson K L. et al. (1971) *Surface Energy and the Contact of Elastic Solids*. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 324, 301-313.
- [7] Wada K. et al. (2013) *Astronomy & Astrophysics*, 559, A62 (8 pages).

[8] Poppe T. et al. (2000) *The Astrophysical Journal*, 533, 454-471.