

2014年度前期 第2回衝突勉強会
テーマ：ダストの付着成長

2014/06/27

Free collisions in a microgravity many-particle experiment – II:

The collision dynamics of dust-coated chondrules

E. Beitz, C. Güttler, R. Weidling, J. Blum

Icarus 218 (2012) 701–706

神戸大学大学院 理学研究科

M2 原田竣也

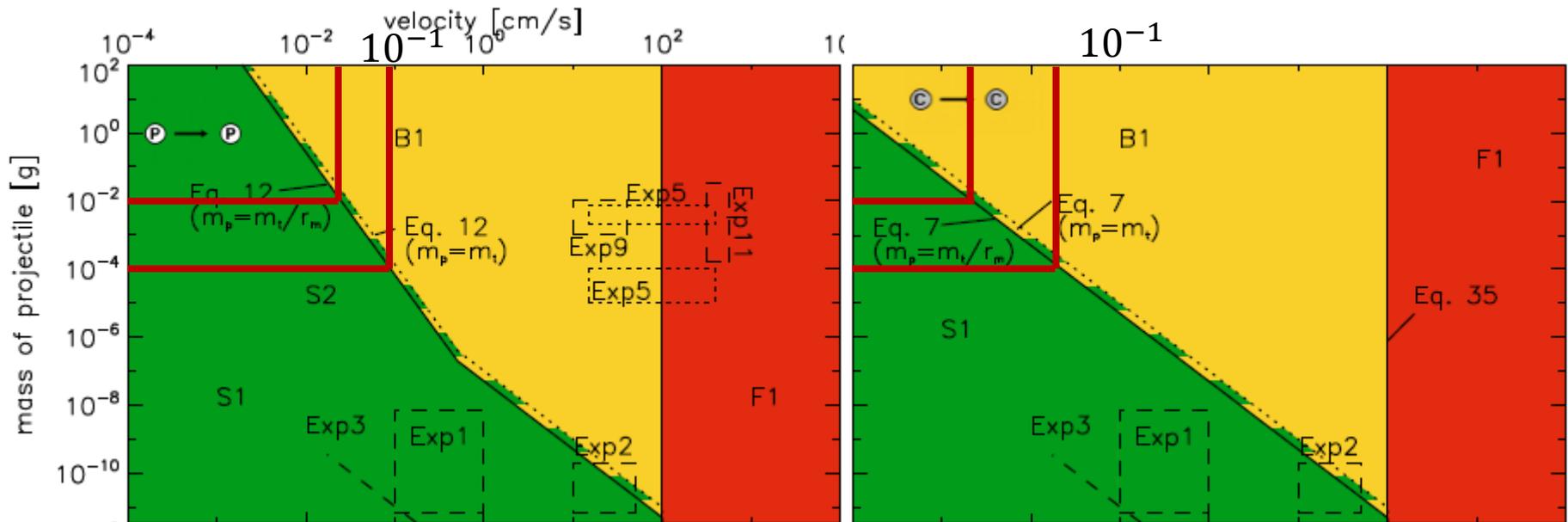
はじめに

- 隕石中のコンドリュール
 - 原始太陽系星雲内で早い時期に形成
 - 普遍的に存在し、微惑星の形成に強く関与
- コンドリュールの周りはダスト層に覆われており(Metzler et al., 1992), 星雲内でのダスト粒子の集積を記録している可能性
 - ダスト層がコンドリュールの衝突現象や、微惑星形成に影響
- コンドリュールの形成仮定は議論中
 - ダスト凝集体の全てがコンドリュールになったわけではなく、二つが共存していたと考えられる

先行研究

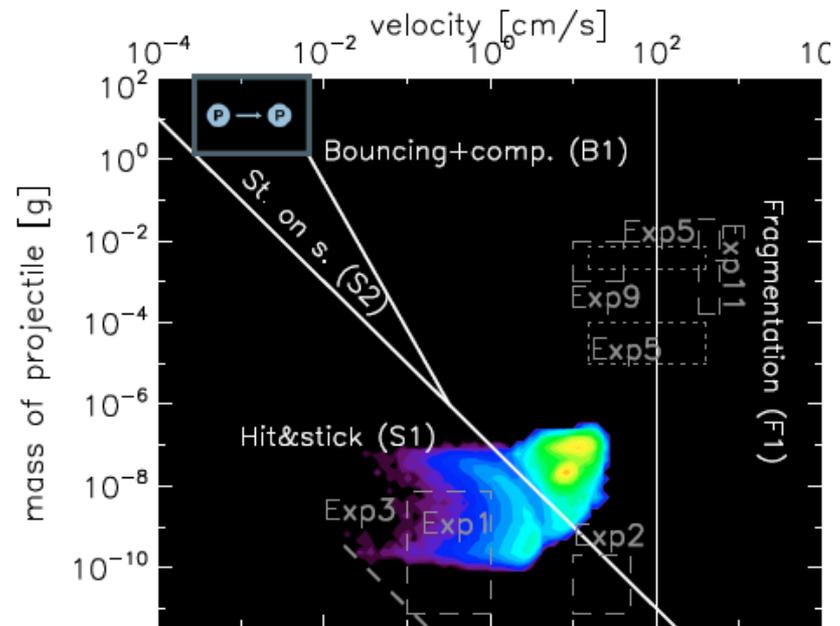
- mmサイズ粒子の付着速度 → 非常に速度が小さく理解されていない
- **Güttler et al. (2010)** – ダスト凝集体の衝突実験結果から, 付着・反発・破碎とダストの質量・空隙率・衝突速度の関係を示す
 - mmサイズでは1 mm/s 程度以下で付着

円盤内の予測衝突速度はcm/s程度(Weidenschilling and Cuzzi 1993)



先行研究

- **Weidling et al. (2012) (Paper1)** – ダスト凝集体(mmサイズ)同士の衝突実験を**Thornton and Ning (1998)**の付着モデルと比較
 - ~1 mm/s で付着し, 計算でも示される
- **Zsom et al. (2010)** –モデル計算を**Güttler et al.**に適用
 - ダスト凝集体が成長すると反発が支配的に→**成長を阻害**
- 共存すると考えられるコンドリュールとダスト凝集体とは？
- コンドリュールリムを持った粒子の場合は？

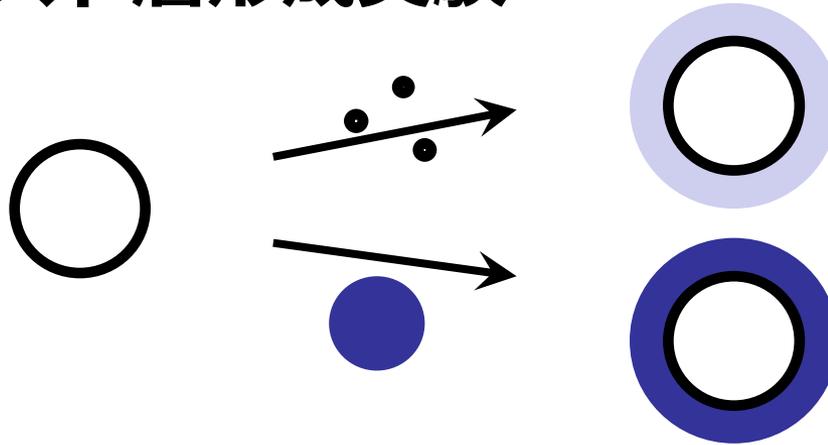


研究の概要と目的

- **コンドリュールのダスト層やダスト凝集体の衝突の影響を調べるため、mmサイズの粒子同士の低速度衝突実験を行う**
 - これまで例の少ないmmサイズ粒子同士の衝突実験を行い、衝突による付着速度を求める
 - 原始太陽系円盤内で共存していたと考えられるダスト凝集体とコンドリュールの衝突現象を実験的に調べる
 - コンドライト隕石に見られる、コンドリュールリムを模擬したmmサイズの試料を作成し、その衝突への影響を調べる
 - 結果を衝突モデルと比較し、モデルの妥当性を調べる

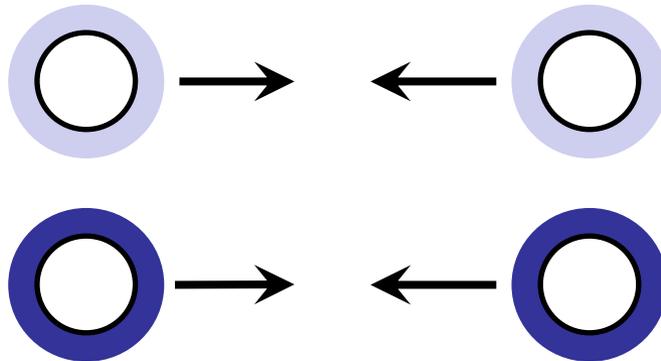
実験方法

ダスト層形成実験

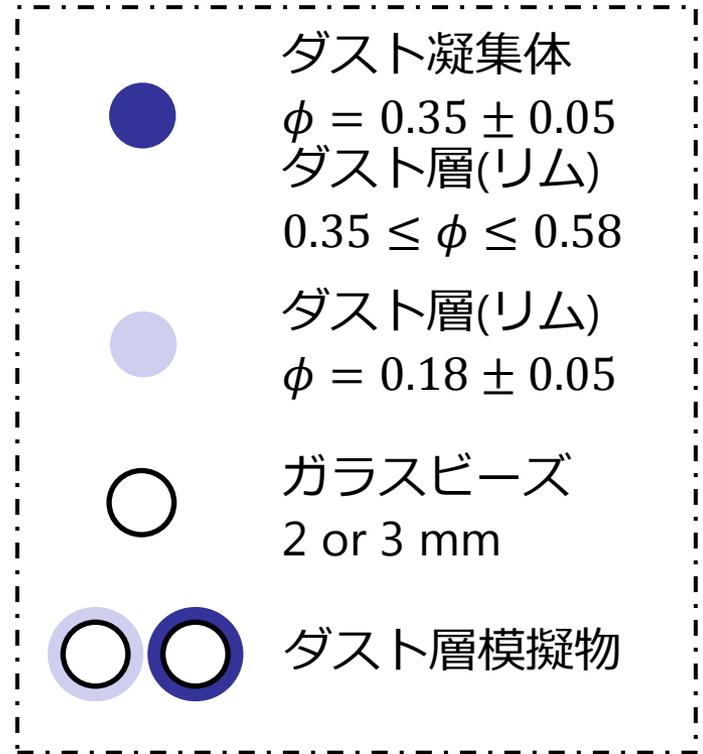
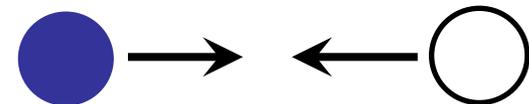


複数粒子衝突実験

粒子直径が2 mmあるいは3 mmをそれぞれ



ダスト凝集体とガラスビーズ

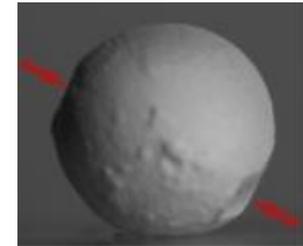
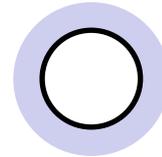


実験方法 - ダスト層形成実験

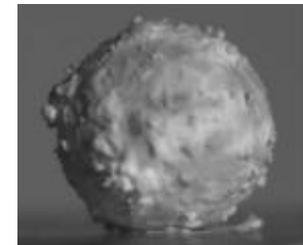
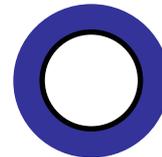
- コンドリユールとその周囲のダスト層を模擬
 - ガラスビーズ(2-3 mm)の周囲にダストをコーティングする
 - ダストはいずれも単分散のSiO₂粒子(1.5 μm)

- ① 漏斗の下からSiO₂粒子を含むガスを送り、
浮遊しているガラスビーズに付着させる
コーティング時間: 60-120 s

リム充填率 : $\phi = 0.18 \pm 0.05$

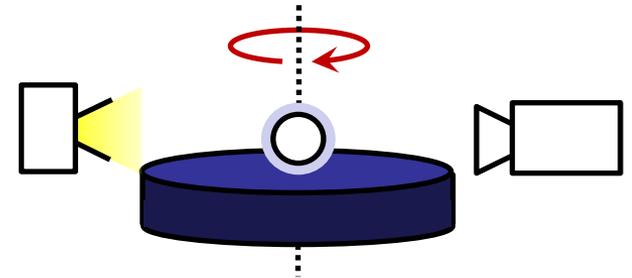


- ② ガラスビーズとダスト凝集体を入れた容器を
ある時間振動させ、低速衝突させる
リム充填率 : $0.35 \leq \phi \leq 0.58$



リムの性質

- リムの体積は、回転盤上の試料を撮影
粒子の最大・最小径を計測し、楕円盤の
積み重ねとして体積を計算



○ $\phi = 0.18 \pm 0.05$

コーティング時間のリムは1秒間に $0.6 \mu\text{m}$ 厚くなる
実験にはコーティング時間60-90 s, リム厚さ約 $50 \mu\text{m}$ を使用

○ $0.35 \leq \phi \leq 0.58$

表面が凸凹し、正確に体積を測定できない

➤ ダスト凝集体の充填率: 0.35 (Weidling et al., 2012)

➤ 凝集体の圧縮の最大充填率: 0.58 (Güttler et al., 2009)

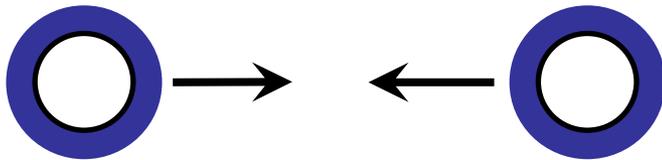
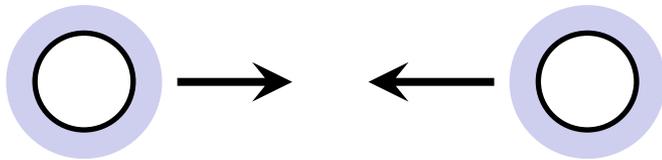
} これらの間の
充填率とする

- いずれもコーティング時間による充填率の変化は無かった

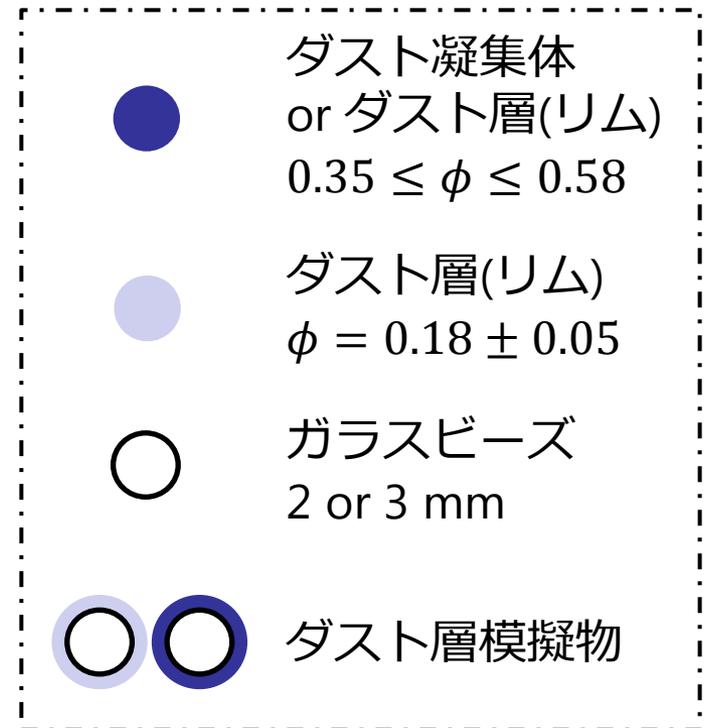
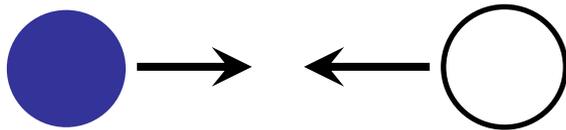
実験方法

• 複数粒子衝突実験

粒子直径が2 mmあるいは3 mmをそれぞれ



ダスト凝集体とガラスビーズ

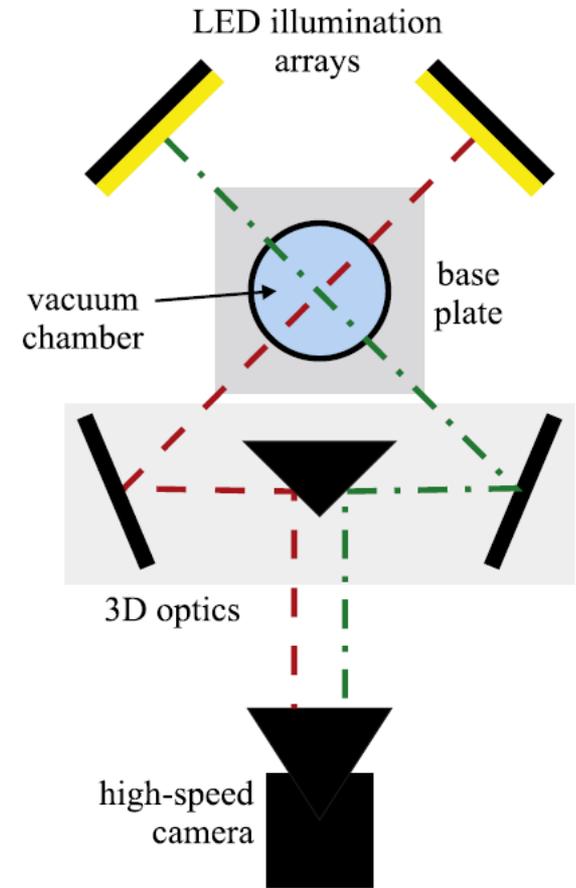
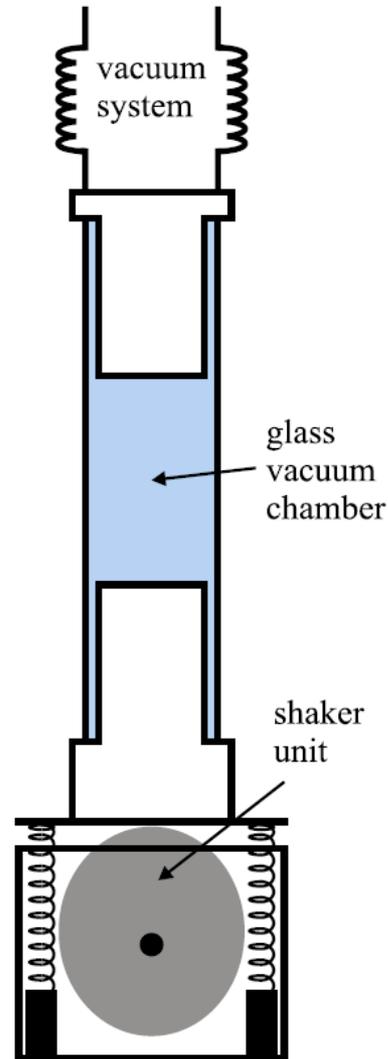
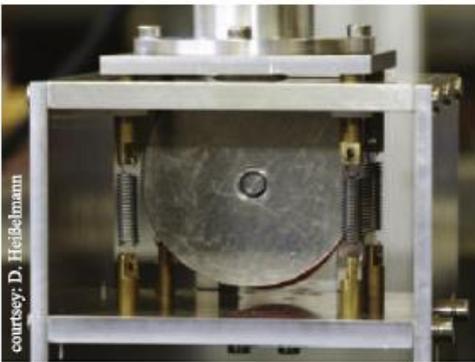


実験方法 - 複数粒子衝突実験

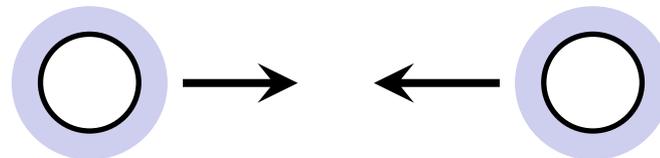
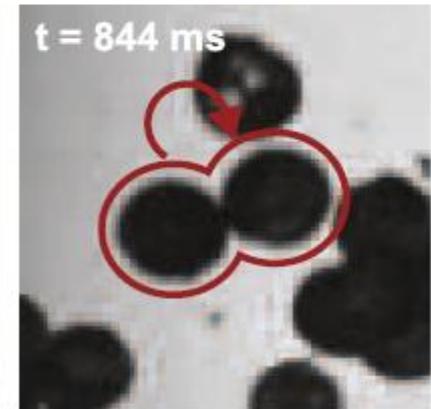
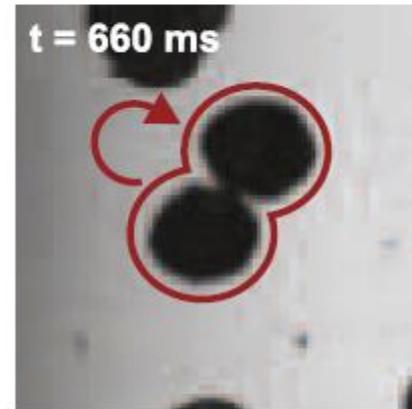
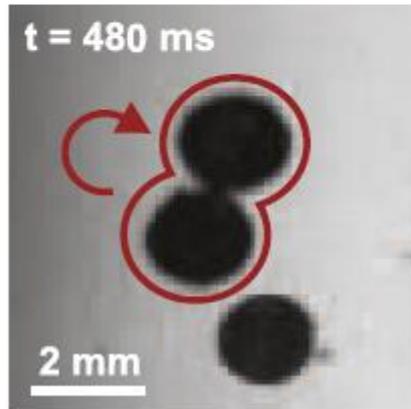
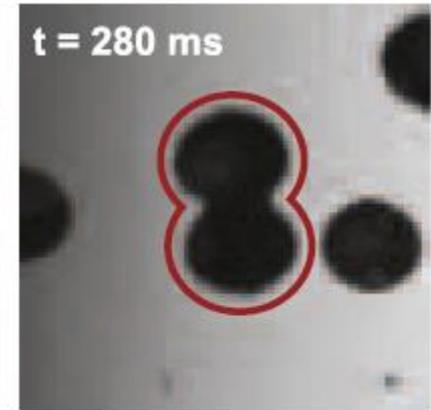
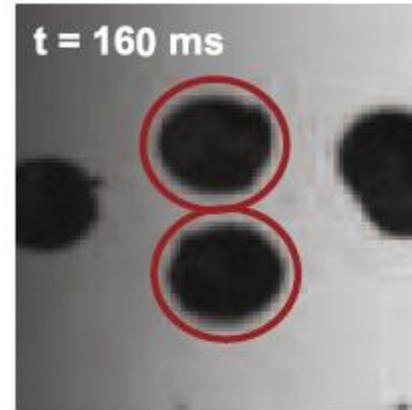
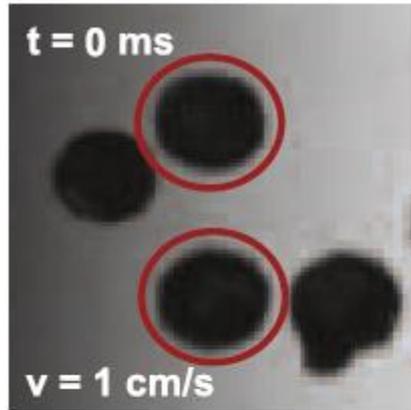
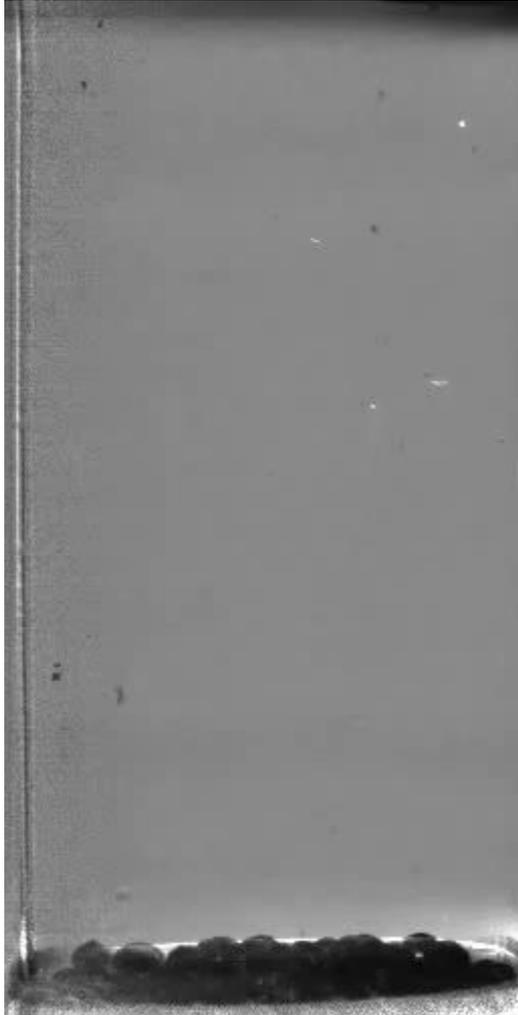
- ブレーメン落下塔
 - 高さ146 m, 9.3秒間無重力状態に
- 直径25 mmのガラスチューブ内に粒子を入れ, 無重力状態での衝突を観察
 - チューブ内は~0.1 Paに減圧
 - 高速ビデオカメラ, ビームスプリッタ使用
 - 底の偏心輪で振動を励起, 振幅1 mm
- ダスト層模擬物: 充填率・サイズごとの組み合わせで四度実験, 粒子数60-140個
- ガラスビーズ-ダスト凝集体(2 mm): 一回, 粒子数 40 : 95



実験方法 - 複数粒子衝突実験

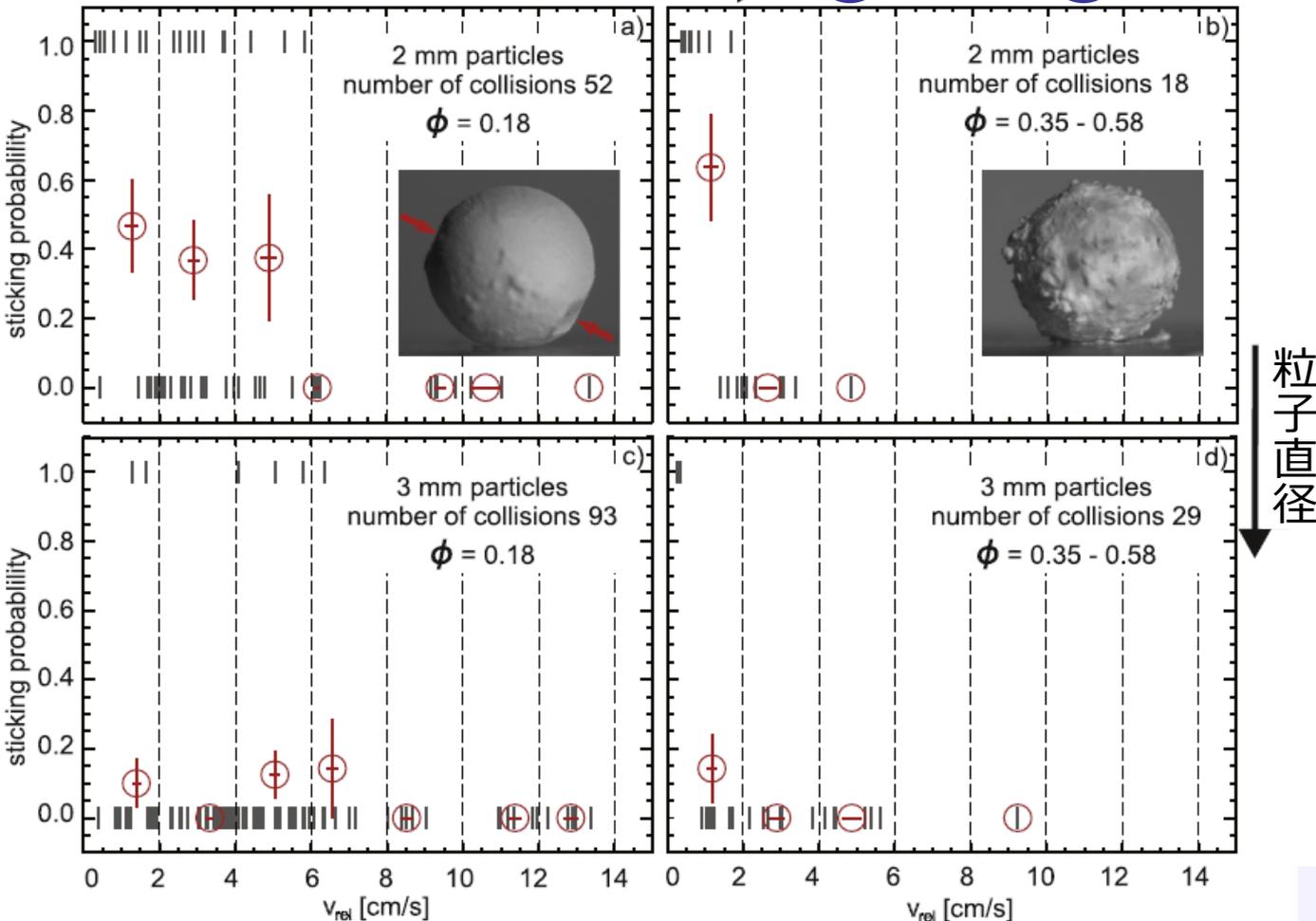


実験 - 複数粒子衝突実験



実験結果 - 付着率

- 衝突速度及び付着か反発のどちらが起きたかを調査



観測した衝突の
付着率(0 or 1)

2 km/s間隔での
付着確率の平均

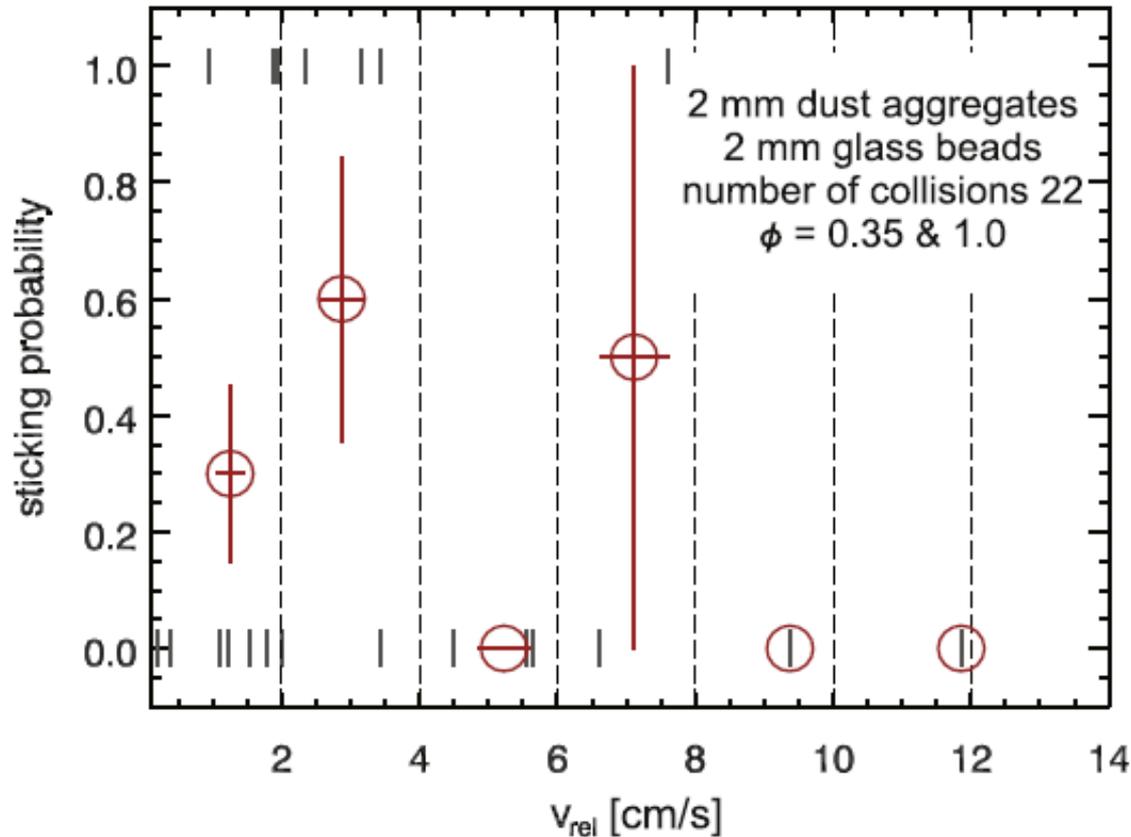
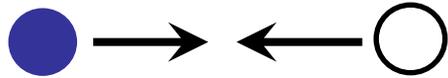
- ダスト層
模擬物同士

- ① 低速度ほど
- ② 小粒子ほど
- ③ 低充填率ほど

付着しやすい

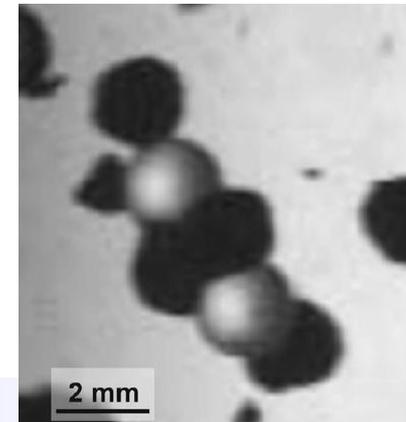
実験結果 - 付着率

- ガラスビーズとダスト凝集体衝突実験の付着率



観測した衝突の付着率(0 or 1)
2 km/s間隔での付着確率の平均

- こちらでも低速度ほど付着しやすい
- 同じ物同士の付着は見られなかった



実験結果 - 集合体の形成

- ダスト層模擬物実験後，一部粒子が一つの**集合体**を形成

- 集合体への粒子の衝突

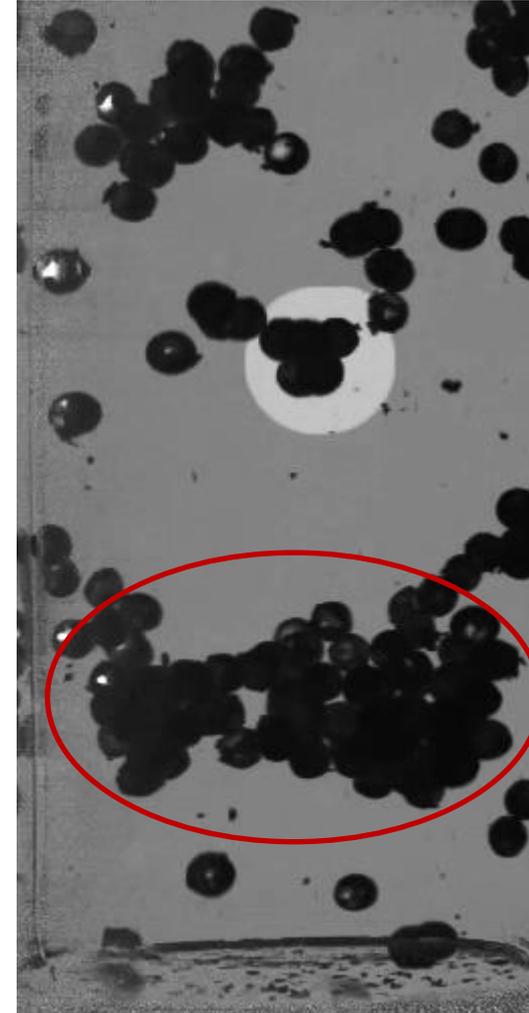
- ▶ 粒子ごとの衝突よりも
**付着効率が高められて
いるように見える**

- ▶ 突出した粒子に衝突し
集合体粒子の位置が
変わるため？



2.7 cm/sで衝突

- 集合体は約2 cm，60-70個の模擬粒子からなる
- 集合体の形成はガラスビーズとダスト凝集体との衝突実験でも見られる



付着モデルとの比較

- Thornton and Ning (1998)のモデルの付着速度 v_{stick}

$$v_{\text{stick}} = \alpha r^{-5/6} \rho^{-1/2}$$

- $r = 0.5 \text{ mm}$, $\rho = 70 \text{ kg/m}^3$ のダスト凝集体同士の衝突実験の場合 (Weidling et al., 2012)
 - 付着確率50%の時 $v_{\text{stick}} = 1.8 \text{ mm/s}$ → 妥当な結果
- 今回の条件 $r = 1 \text{ mm}$, $\rho = 250 \text{ kg/m}^3$ で計算すると, Weidling et al. と比べて1/3.4 小さい値となる
 - 今回のダスト層模擬物：モデル式 $v_{\text{stick}} = 0.5 \text{ mm/s}$
実験では $v_{\text{stick}} \approx 1 \text{ cm/s}$
- **モデルは不適合**, ダストへの貫入の塑性変形を加える必要がある

ダストの成長

- 今回の付着速度はmmサイズ粒子に強く関係する.
- 原始太陽系円盤の, 1 AUでのダスト凝集体同士の相対速度
 - 高密度 : 半径1 cmの粒子は1 cm/s 以下(Desch 2007)
 - 最小質量 : mmサイズの粒子は 1 cm/s のオーダー
(Weidenschilling 1977; Andrews and Williams 2007)
- cmサイズの**集合体形成は妥当**とみられる
- 新たなエネルギー散逸の効果 (粒子の位置の変化) → **さらなる成長**
- ガスよりもダストの比率が高い領域でコンドリュールが形成
(Alexander et al., 2008) され, このような領域では相対速度が減少し,
さらに成長する

まとめ

- ガラスビーズ, ダスト層を持つガラスビーズ, ダスト凝集体を衝突させた結果, 衝突速度約**8 cm/s以下で粒子間の付着**が見られた
 - ガラスビーズ同士やダスト凝集体同士の先行研究より**速い**
- ガラスビーズの慣性と, ダストの可変性の良い組み合わせ
 - **衝突エネルギーをうまく散逸**させ, 接触面を増やす
- cmサイズの集合体が形成され, これは原始太陽系円盤での実験がダストで覆われたコンドリュールで行われたことを示す
- ダスト凝集体だけでは付着が生じず, **コンドリュールは微惑星形成において鍵**となりうる
- どのように集合体が安定し, 粒子サイズやダストの組成, 熱史といったパラメータがどう影響してるかを調べていく