

THE PHYSICS OF PROTOPLANETESIMAL DUST AGGLOMERATES. II. LOW-VELOCITY COLLISION PROPERTIES

DOREEN LANGKOWSKI,
JENS TEISER
AND
JÜRGEN BLUM

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 675: 764-776, 2008

神戸大学 町井 渚
衝突研究会第8回論文紹介セミナー(2009.06.23)

序論

<ダストのサイズ>

- 星周降着円盤の観測(Kessler-Silacci et al. 2006, Przygodda et al. 2003)
 - 赤外スペクトルと吸収効率の観測と理論の比較
 - 0.1-6 μm
- 始源的隕石(Kerridge 1993)
 - type-3のコンドライトのマトリックスの測定
 - 0.05-10 μm
- 彗星の測定(Harker et al. 2005, Keller et al. 2005, Hörz et al. 2006)
 - スターダストミッションで捕獲したサンプルの観察
 - ティープインパクトでのエジェクタサイズの観測
 - 0.1- 100-1000 μm

→標準的な初期の粒子サイズはサブミクロン

<ダスタグリゲイトの衝突速度>

衝突を引き起こす運動:

ブラウン運動、重力によるドリフト運動、ガス乱流(Weidenschilling & Cuzzi 1993)

<フラクタル次元(D_f)>

$$m \propto s^{D_f}$$

m : アグリゲイト質量, s : アグリゲイトサイズ

<衝突速度が遅い場合>

- ダスト粒子はhit and stickの振る舞いを示した(Poppe et al. 2000, Blum & Wurm 2000, Dominik & Tielens 1997)
- ダスタグリゲイトはvan der Waals力によってくっついた(Heim et al. 1999)
- ブラウン運動が支配的な成長: $D_f \approx 1.4-1.5$ (Blum et al. 2000, Paszun & Dominik 2006)
- ドリフト運動やガス乱流による成長: $D_f \approx 1.8-1.9$ (Blum et al. 1998, Wurm & Blum 1998)

ダスタグリゲイトの質量が増加

↓

大きさの異なるアグリゲイトの相対衝突速度が増加(Weidenschilling & Cuzzi 1993)

↓

衝突時に圧密が起こる(Dominik & Tielens 1997, Blum & Wurm 2000)

<ダスタグリゲイトの体積充填率>

$$\text{体積充填率: } \phi = 1 - p = \rho / \rho_0$$

p : 空隙率, ρ : アグリゲイトの密度, ρ_0 : 粒子密度

- 衝突速度 ≈ 50 m/sのとき
ダスタグリゲイトの充填率: $\phi \leq 0.20-0.33$
- 衝突速度 ≤ 1 m/sあたり
ルーズなダスタグリゲイトの最大充填率は $\phi = 0.07-0.15$ (Blum & schröpfer 2004, Blum et al. 2006)

<フラクタルダスタグリゲイト>

理論(Dominik & Tielens 1997)

実験(Blum & Wurm 2000)

~ 1 m/s以上ではダスト凝集体はくっつかず、衝突ではね返ったり、壊れる

<フラクタルではないダスタグリゲイト>

プロジェクトイル: cmサイズ

ターゲット: 10 cmサイズ

Wurm et al. (2005a, 2005b)

- 高空隙率ターゲット($\phi = 0.12-0.26$)のとき
衝突速度 $= 16.5-37.5$ m/sではくっつかなかった
ターゲットにクレーターができた \Rightarrow mass loss
- 圧密したターゲット($\phi = 0.34$)のとき
衝突速度 ≥ 13 m/s \rightarrow mass gain

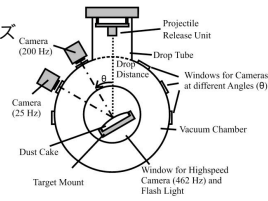
1 m/sあたりでの高空隙率ダスタグリゲイトの衝突の振る舞いはよくわかっていない

目的

1. どのような物理条件で高空隙率ダスタグリゲイトがくっつくのか?
2. 高空隙率ダスタ凝集体同士ではどのような衝突結果が起こりうるのか?
3. 衝突結果において、プロジェクトイルの影響は何か?(例えば、質量、速度、衝突角、局所的な曲率半径、空隙率)
4. 原始微惑星のようなフラクタルでないダスタ凝集体同士の衝突での付着効率はどのくらいか?
5. くっつかない衝突ではね返り係数はどのくらいか?

実験

プロジェクトイル：ミリメートルサイズ
 ターゲット：滑らかな表面 } 2.5 cm
 型どった表面 }
 場所：微小重力落下塔(at Bremen)
 衝突速度：~0.1~3m/s
 衝突角：ランダム
 自由落下時間：4.74s

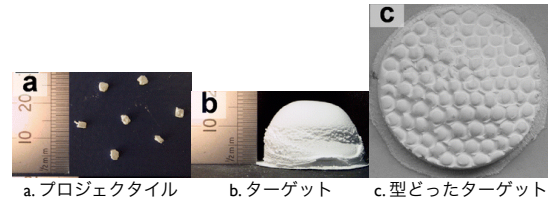


撮影条件

	カメラ1	カメラ2	カメラ3
フレーム速度 (fps)	462	220	25
解像度 (pixels)	1k × 1k	256 × 256	720 × 576
視野 (mm ²)	30 × 30	56 × 56	52 × 41

試料

	球形シリカ	不規則形ダイヤモンド	不規則形シリカ
密度 (kg/m ³)	2000	3520	2600
粒子半径 (μm)	0.76 ± 0.03	0.75 ± 0.25	~0.05-5
凝集体の充填率	0.15 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.07 ± 0.03

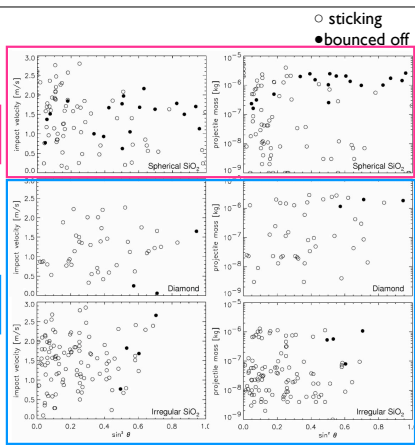


a. プロジェクトイル b. ターゲット c. 型どったターゲット

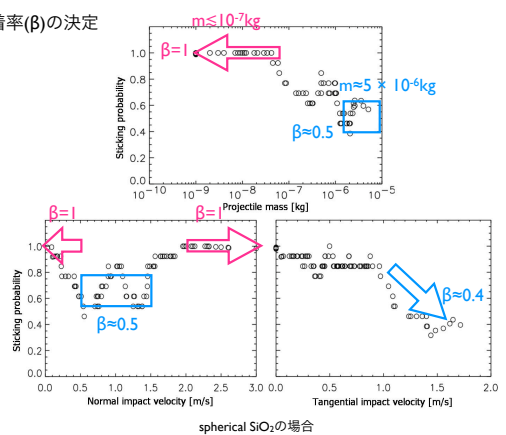
結果1. 付着率

spherical SiO₂:
 衝突速度が~1-2 m/s
 ではくっつかない

Diamond,
 irregular SiO₂:
 ほとんどくっつく
 =付着率に近い

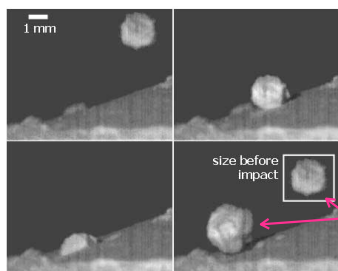


付着率(β)の決定



結果2. 衝突による質量移動

くっつかない衝突ではね返り



衝突前後でプロジェクトイルサイズが変化

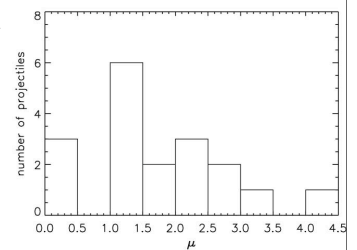
球形シリカプロジェクトイル vs 球形シリカターゲット

プロジェクトイルの質量比分布

衝突前後のプロジェクトイルの質量比μは

$$\mu = \frac{m'}{m}$$

で表される。
m, m'はそれぞれ衝突前、衝突後のプロジェクトイル質量。



プロジェクトイルの質量比はだいたいμ=1-4
平均質量比μ̄=2.1

→くっつかない衝突ではターゲットはmass lossする

結果3. はね返り係数

<nonstickingの場合>

運動エネルギーは完全にターゲットとプロジェクトイルに吸収されない

はね返り係数

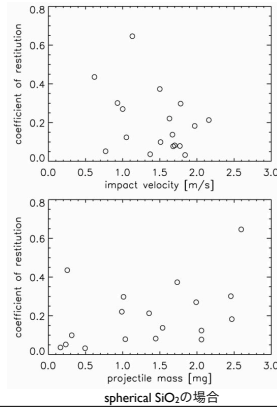
$$\epsilon = \frac{v'}{v}$$

v' : 衝突前の速度
 v : 衝突後の速度

$\epsilon < 0.1, \epsilon > 0.4$: データ点がばらつく
 → 衝突速度、プロジェクトイル質量によらない

平均値: $\bar{\epsilon} = 0.2$

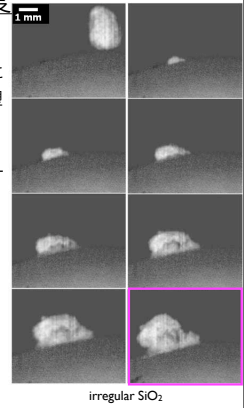
実効値: $(\bar{\epsilon}^2)^{1/2} = 0.16$



結果4. 準弾性反発と引張強度

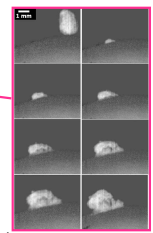
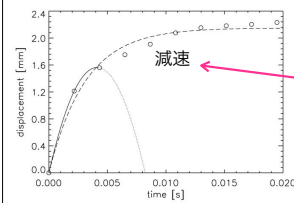
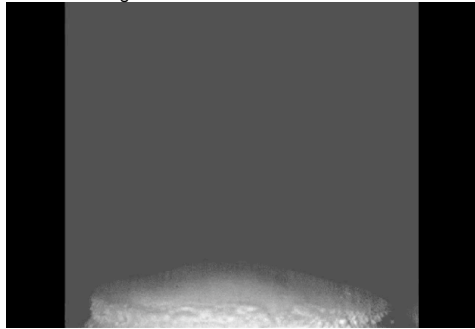
衝突後にプロジェクトイルがターゲットにくっついて、はじめはアグリゲイトの塑性変形には完全には使われない

衝突後プロジェクトイルははね返るがターゲットから抜け出せない
 → 粒子間の引きつけあいが強いため



irregular SiO₂

irregular SiO₂アグリゲイト同士の衝突



プロジェクトイルとターゲットの間の付着力 → 減速

<stickingのとき>

引張力 $T <$ 付着力

→ プロジェクトイルはターゲットにくっつく

<nonstickingのとき>

引張力 $T >$ 付着力

→ ターゲット物質がプロジェクトイルにくっつく

動的引張強度と静的引張強度の比較

放物線関数

$$l(t) = \frac{1}{2} a_0 t^2 + v_0 t$$

最初の3点をフィッティング

初期最大加速度 $a_0 = -185 \text{ m/s}^2$

リバウンド速度 $v_0 = 0.76 \text{ m/s}$

減衰指数関数

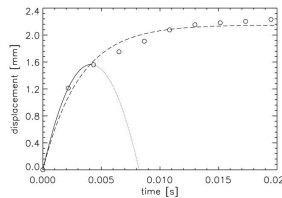
$$l(t) = l_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

$l_0 = 2.2 \times 10^{-3} \text{ m}, \tau = 3.1 \times 10^{-3} \text{ s}$

すべての点をフィッティング

初期加速度 $a_0 = -227 \text{ m/s}^2$

初期速度 $v_0 = 0.71 \text{ m/s}$



粒子断面積 $A = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$,

はね返ったアグリゲイト質量

$m = 1.7 \times 10^{-6} \text{ kg}$ を用いて

引張強度の下限値: $T \geq ma_0/A$

放物線関数: $T \geq 210 \text{ N/m}^2$

減衰指数関数: $T \geq 260 \text{ N/m}^2$

||

静的引張強度: $T = 300 \text{ N/m}^2$

結果5. 貫入

<stickingの場合>

貫入深さ d_i は衝突エネルギーが大きくなるにつれて深くなる

ターゲットにプロジェクトイルが貫入
 = プロジェクトイルはターゲットの圧縮強度に打ち勝つ

衝突エネルギーのしきい値 E_{min} を求めると

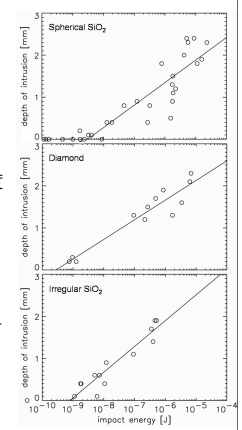
$$d_i = x \log \left(\frac{E_{kin}}{E_{min}} \right)$$

E_{kin} : 運動エネルギー

spherical SiO₂: $E_{min} = 3.1 \times 10^{-9} \text{ J}$

diamond: $E_{min} = 2.8 \times 10^{-10} \text{ J}$

irregular SiO₂: $E_{min} = 8.0 \times 10^{-10} \text{ J}$



最小衝突圧力 P_{min} は $P_{min}=E_{min}/V$ より

	P_{min} (Pa)	静的圧縮強度(Pa)
spherical SiO ₂	940	500
diamond	100	200
irregular SiO ₂	150	200

ターゲットの静的圧縮強度に近い値



貫入し始めは圧縮強度と同程度の衝突圧力が必要

結果6. 局所的な表面曲率

型どったターゲットへの衝突の場合

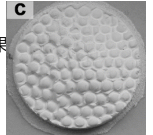
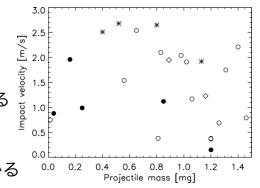
付着率は表面の凹凸のためにかなり減る

<プロジェクトイルの破壊>

- 捕獲されたプロジェクトイルにぶつかる
- 凹凸面にぶつかる

<プロジェクトイルの付着>

- 凹面にプロジェクトイルがぶつかるときのみ



型どったターゲットへの衝突で最もあり得る衝突結果
→はね返り(56%)

まとめ

1. 同じような質量分布、衝突速度、衝突角の場合
2. ターゲットの充填率が衝突結果に大きな影響を与える
 $\Phi \leq 0.1$: いつもくっつく
 $\Phi \geq 0.15$: 充填率の増加とともに減少する
3. $\Phi \geq 0.15$ のダストアグリゲイトは直径 1 mm より大きいプロジェクトイルだけがくっつく
4. くっつかない場合、プロジェクトイルの運動エネルギーの多くは衝突時に消費される
5. 計算によって求めた irregular SiO₂ の動的引張強度 $T \geq 260$ は静的圧縮強度とよい一致を示した
6. クレータリングに必要な衝突エネルギーのしきい値は $E_{min} \approx 3 \times 10^{-10} - 3 \times 10^{-9}$ J
7. 衝突破砕はフラットで高空隙率なターゲットへの衝突ではほとんどみられない

結論

- サブミリメートルサイズのダストアグリゲイトは衝突速度や衝突角に関わらず、いつもより大きなダストアグリゲイトにくっつく
- ミリメートルサイズのダストアグリゲイトの場合、付着はより速い速度と小さな衝突角のときに制限される
- したがって、太陽系星雲でのランダム衝突の場合、ミリメートルサイズのダストアグリゲイトとセンチメートルから10数センチメートルサイズの天体の衝突付着率は1以下である
- さらに、ターゲットの衝突点の曲率半径がプロジェクトイル半径と同じくらいのときは nonsticking しやすい
- nonsticking 衝突は大きな天体から小さな天体への物質移動を導く

<原始惑星ダストの今後の成長モデル>

ダストアグリゲイトのサイズや衝突速度だけではなく、圧密や表面の曲率半径、個々の衝突角などの衝突史も考慮すべき