

Review : ダスト (アグリゲイト) 間相互作用に関する実験

平成 18 年 2 月 9 日和田 浩二

目次

1	JKR 理論および Dominik and Tielens (1995,96,97) の粒子間相互作用	2
2	モノマーの F_c, F_{roll} の計測 : Heim et al. (1999)	4
2.1	F_c の測定	4
2.2	F_{roll} の測定	4
3	モノマーの付着 (限界) 速度: v_c の計測	5
3.1	Dahneke (1975)	5
3.2	Poppe et al. (2000)	6
3.2.1	SiO ₂ 球	6
3.2.2	Irregularly shaped grain	7
4	Blum and Wurm (2000): F_{roll} の計測、アグリゲイトの平面への衝突	8
4.1	結果	9
4.1.1	1G 実験 : F_{roll} の推定	9
4.1.2	μ G 実験 : アグリゲイトの付着・変形の衝突速度依存性	9
4.2	議論	10
4.2.1	F_{roll} 、変形・圧縮の衝突速度	10
4.2.2	E_{br} 、付着・反発の衝突速度	11
5	各実験から得られる γ, ξ_{crit} の値	13

1 JKR 理論および Dominik and Tielens (1995,96,97) の粒子間相互作用

半径 R_1, R_2 、ヤング率 E_1, E_2 、ポアソン比 ν_1, ν_2 の 2 つの弾性球が、表面エネルギー γ のもとで接触している。

外力なしで弾性力と付着力が釣り合っている時の接触面 (円) の半径は、

$$a_0 = \left(\frac{9\pi\gamma R^2}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで、 R, E^* はそれぞれ 2 球の換算半径および換算修正ヤング率：

$$\frac{1}{R} \equiv \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad \frac{1}{E^*} \equiv \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

静かに (準静的に) 球を引き離すのに必要な力は

$$F_c = 3\pi\gamma R \quad (\text{ちなみに DMT 理論では } 4\pi\gamma R) \quad (3)$$

また釣り合っている時の球の中心間の接近変位は

$$\delta_0 = \frac{a_0^2}{3R} = \frac{F_c}{E^* a_0} \quad (4)$$

接触円の半径 a と 2 球間に働く力 F の関係は、 $\hat{a} = \frac{a}{a_0}$ として

$$\frac{F}{F_c} = 4 \left(\hat{a}^3 - \hat{a}^{\frac{3}{2}} \right). \quad (5)$$

接触面上の垂直圧力分布は、接触面の中心からの距離を r として

$$p(r, a) = 6 \frac{F_c}{\pi a_0^2} \hat{a} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 2 \frac{F_c}{\pi a_0^2} \hat{a}^{-\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

可逆的に転がる限界距離を ξ_{crit} として

$$\text{不可逆な転がりの開始に必要な力： } F_{roll} = 6\pi\gamma\xi_{crit} \quad (7)$$

$$\text{距離 } \frac{\pi}{2}R_1 \text{ を転がるエネルギー： } E_{roll} = 6\pi^2\gamma R\xi_{crit} \quad (8)$$

音波の励起・散逸を考慮した、付着エネルギー (跳ね返るのに必要なエネルギー) は、

$$E_{st} = 0.4F_c\delta_c = 9.6 \frac{\gamma^{\frac{5}{3}} R^{\frac{4}{3}}}{E^{*\frac{2}{3}}} \quad (9)$$

釣り合いの状態から引き剥がすのに必要なエネルギーは

$$E_{br} = 1.8F_c\delta_c = 43 \frac{\gamma^{\frac{5}{3}} R^{\frac{4}{3}}}{E^{*\frac{2}{3}}} \quad (10)$$

付着できる最大衝突速度は

$$v_c = \sqrt{\frac{2}{\mu} E_{\text{stick}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{m_1/2}} \times 0.4 F_c \delta_c = 1.07 \frac{\gamma^{5/6}}{E^{*1/3} R^{5/6} \rho^{1/2}} = 1.07 \left(\frac{\gamma}{E^* R} \right)^{5/6} \sqrt{\frac{E^*}{\rho}} \quad (\leftarrow \text{同一球として。}\rho \text{ は密度。})$$

アグリゲイト衝突の付着・変形・破壊条件は以下のとおり。

TABLE I
The Outcomes of Aggregate Collisions after Dominik
and Tielens (1997)

Case	Energy	Collisional outcome
(1)	$E_{\text{im}} < 5 \cdot E_{\text{roll}}$	Sticking without restructuring
(2)	$E_{\text{im}} \approx 5 \cdot E_{\text{roll}}$	First visible restructuring
(3)	$E_{\text{im}} \approx 1 \cdot n_k \cdot E_{\text{roll}}$	Maximum compression
(4)	$E_{\text{im}} \approx 3 \cdot n_k \cdot E_{\text{br}}$	Loss of one monomer
(5)	$E_{\text{im}} > 10 \cdot n_k \cdot E_{\text{br}}$	Catastrophic disruption

Note. Here, E_{im} , E_{roll} , E_{br} , and n_k denote the impact energy, the energy for rolling over a quarter of the particle circumference, the break-up energy, and the number of contacts in an aggregate, respectively.

Dominik and Tielens (1995,96,97) で使用されている物性値は以下のとおり。

MATERIAL PARAMETERS

Material	γ^a (ergs cm ⁻²)	\mathcal{E} (dyn cm ⁻²)	G (dyn cm ⁻²)	ν	ρ (g cm ⁻³)	σ (Å)	b (Å)	References
Quartz	25 ^b	5.4(11)	2.3(11)	0.17	2.6	3.44	1.84	1, 2, 3
Polystyrene	12	3.4(10)	2.1(11)	0.5	1.04	3.00	2.00	2, 4
Graphite	75	1.0(11)	3.8(10)	0.32	2.2	3.40	1.54	3, 5, 6
Iron	3000	2.1(12)	8.3(11)	0.27	7.7	2.24	2.24	2, 3, 7
Ice	370 ^c	7.0(10)	2.8(10)	0.25	1.0	3.36	3.36	2, 3

^a Surface energy per surface.

^b Measured for micron-sized particles.

^c Estimated from H-bonding.

REFERENCES.—(1) Kendall, Alford, & Birchall 1987; (2) Physics Vadecum (Anderson 1981); (3) Israelachvili 1992; (4) Kendall & Padgett 1987; (5) Brocklehurst 1977; (6) Zisman 1963; (7) Easterling & Thölen 1972.

また、 $\xi_{\text{crit}} = 0.1$ or 0.2 nm と仮定。

2 モノマーの F_c, F_{roll} の計測 : Heim et al. (1999)

小さい SiO_2 球粒子 (半径 $0.5 \sim 0.95 \sim 2.5 \mu\text{m}$) の F_c, F_{roll} を実測。

- $F_c \rightarrow$ JKR(DMT) 理論の確認。 $\gamma = 14 \text{ mJ/m}^2$ for SiO_2 球
- $F_{roll} \rightarrow$ D&T の回転抵抗の評価。 $\xi_{crit} = 3.2 \text{ nm}$ for 半径 $0.95 \mu\text{m}$ SiO_2 球

2.1 F_c の測定

• SiO_2 球粒子 (半径 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$) を原子間力顕微鏡 (AFM) の針先とスライドに各々接着し、球同士を接触。引き離すのに要する力を測定。

- 離す速度 = $0.5 \mu\text{m/s}$ 。
- 室温。気圧 = $10^2 \sim 10^5 \text{ Pa}$ 。湿度 = 10-40%。これらの影響なし。また力履歴に依らない。

結果 :

$$F_c [\text{N}] = 0.176 \pm 0.004_{(\text{stat})} \pm 0.026_{(\text{syst})} R [\text{m}]$$

よって、 $F_c = 3\pi\gamma R$ (JKR 理論) or $4\pi\gamma R$ (DMT 理論) を用いて

$$\gamma_{\text{SiO}_2} = \begin{cases} 18.6 \pm 0.4_{(\text{stat})} \pm 2.8_{(\text{syst})} \text{ mJ/m}^2 & (\text{by JKR 理論}) \\ 14.0 \pm 0.3_{(\text{stat})} \pm 2.1_{(\text{syst})} \text{ mJ/m}^2 & (\text{by DMT 理論}) \end{cases}$$

Kendall et al.(1987) の $\gamma = 25 \text{ mJ/m}^2$ とコンパラだが少し小さい。

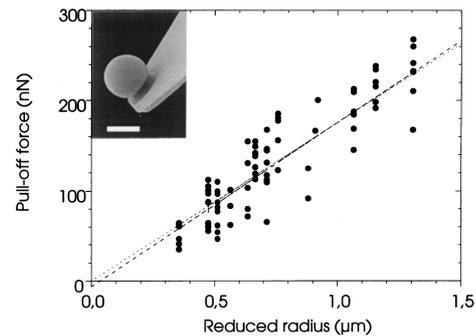


FIG. 1. Pull-off force versus reduced particle radius obtained from direct force measurements between silica microspheres. Each data point (solid circles) is an average value from seven adhesion measurements obtained with one pair of microspheres. The dashed line represents the best linear regression fit and gives a pull-off force of -6 nN at vanishing particle radius. The best linear fit to the data points through the origin of the diagram has a slope of 0.176 N/m (dotted line). The inset shows a SEM image of a silica microsphere glued to the end of an AFM cantilever. The scale bar indicates $3 \mu\text{m}$.

2.2 F_{roll} の測定

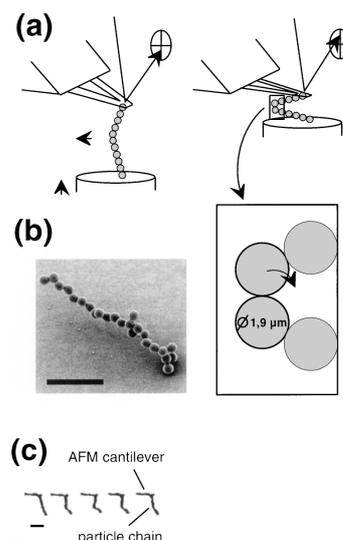
• SiO_2 球粒子 (半径 $0.95 \mu\text{m}$) 5 ~ 20 個で鎖状構造作り、AFM の針先で周期的に曲げ (振幅 4 or $8 \mu\text{m}$, 振動数 0.1 or 1 Hz)、最大屈曲時の力を測定 (鎖長は考慮)。

結果 :

$$F_{roll} = 8.5 \pm 0.3_{(\text{stat})} \pm 1.3_{(\text{syst})} \times 10^{-10} \text{ N}$$

$F_{roll} = 6\pi\gamma\xi_{crit}$ および $\gamma = 14 \text{ mJ/m}^2$ を用いると、

$$\xi_{crit} = \frac{F_{roll}}{6\pi\gamma} = 3.2 \text{ nm} \quad \left(\gg 0.2 \text{ nm (D\&T)} \right) \\ \left(< a_0 = 14 \text{ nm (JKR)} \right)$$



最大屈曲時の力で良いか？

ξ_{crit} は何で決まるのか？
物性？粒径？

FIG. 2. Principles of rolling-friction force measurements with particle chains (a). SEM image of a typical microsphere aggregate precursor (b). Sequence of optical microscope images taken every 2.5 s during one bending-and-stretching cycle of a microsphere chain (c). The forced up-and-down motion of the lower end of the aggregate stems from a piezoelectric stage which is not visible in the images. The scale bars in (b) and (c) indicate $10 \mu\text{m}$.

3 モノマーの付着 (限界) 速度: v_c の計測

ミクロンサイズの粒子を滑らかな SiO_2 平面へ衝突させ、反発係数 e を測定したり、付着速度 v_c を測定。とくに Popee et al. (2000) から、

- $v_c = 0.92 \text{ [m/s]} \left(\frac{R_1}{1\mu\text{m}} \right)^{-0.52}$

(半径 $0.6 \mu\text{m}$ SiO_2 球 : 1.2 m/s、半径 $0.25 \mu\text{m}$ SiO_2 球 : 1.9 m/s)

3.1 Dahneke (1975)

1.27 μm の Polystyrene 球を SiO_2 平面へ衝突させ、反発係数を測定。

速度を下げていくと、反発係数減少。付着力 (分子間力) によるポテンシャルエネルギー分 (E) の散逸で説明 (Dahneke, 1971)。

$$e = \sqrt{e_0^2 - \frac{E}{\frac{1}{2}mv_i^2} (1 - e_0^2)}$$

ここで e_0 は E が効かない速度領域での反発係数。ただし、図のようにフィッティングすると、van der Waals 力から計算される E より遥に大きい E となってしまう:

$$E_{fit} = 450 \times E_{\text{van der Waals}}$$

また、 $e = 0$ に外挿し付着速度 v_c を求めると、

$$v_{c,1.27\mu\text{m, poly.}} = 1.2\text{m/s}$$

D&T の v_c の式に代入すると $\gamma_{\text{poly.}} = 260 \text{ mJ/m}^2$

ちなみに、Chokshi et al. (1993) では、 $e = \sqrt{\frac{E_i - E_{st}}{E_i}}$ として、 γ をパラメーターに Dahneke (1975) のデータにフィットさせ、

$$\gamma_{\text{poly.}} = 340 \text{ mJ/m}^2$$

を得ている。D&T で使用される $\gamma_{\text{poly.}} = 12 \text{ mJ/m}^2$ より遥に大きい。

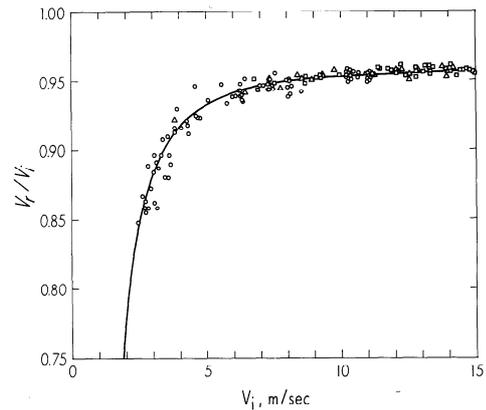


FIG. 6. Ratio of V_r/V_i vs V_i for 1.27 μm PSL spheres bouncing on a polished quartz target. The curve is given by the simple theory [1] fitted to the data.

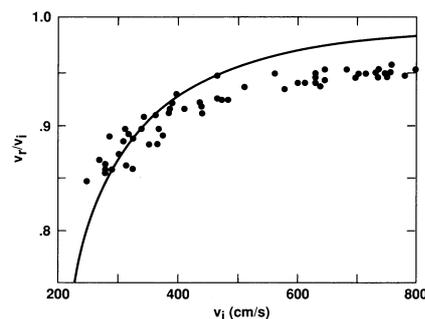


FIG. 9.—Velocity upon reflection, v_r , as a function of the incident velocity, v_i . Dots are the data measured for micron-sized polystyrene spheres bouncing on a quartz slab. The line presents our best fit to this data.

3.2 Poppe et al. (2000)

モノマーを上向きに射出し、平面ターゲットへ衝突

3.2.1 SiO₂ 球

半径 0.6 μm (質量 1.8×10^{-15} kg, 密度 2 g/cc)
 半径 0.25 μm (質量 1.3×10^{-15} kg, 密度 2 g/cc)

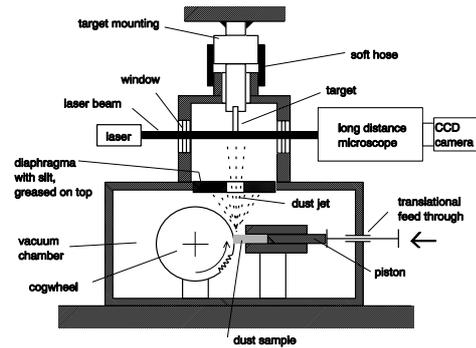


FIG. 1.—Schematic drawing of the experimental setup

- ・幾つかは疎水性被膜 (dimetyldimethoxysilane $(\text{CH}_3)_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_2$) \Rightarrow 水等の影響評価
- ・ターゲット: SiO₂ 平面、酸化シリコンウエハー (SiO₂, より滑らか)
- ・室温で乾燥

結果:

- ・衝突速度が大きいもの: リバウンド・引き戻しが見える 衝突荷電
- ・被膜の影響はほとんどなし。

衝突速度 v の関数として付着確率 $P(v)$ ($v \pm \Delta v$ の区間で付着した粒子数の割合)

付着速度 v_c を $P(v_c) = 0.5$ で定義し求める。

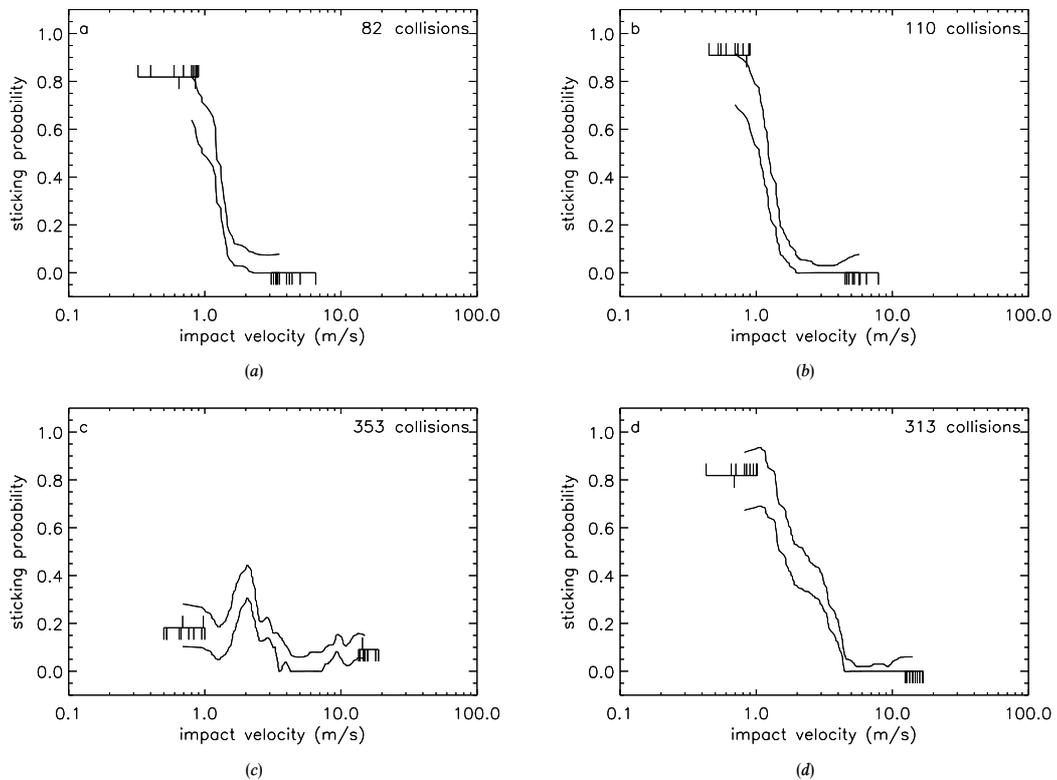


FIG. 6.—Sticking probability as a function of impact velocity for silica spheres of (a) 1.2 μm diameter impacting polished silica, (b) 1.2 μm diameter impacting a silicon wafer, (c) 0.5 μm diameter impacting polished silica, and (d) 0.5 μm diameter impacting the silicon wafer. The two solid lines in each plot denote the upper and lower 1σ uncertainty limit for the sticking probability. Additionally for the slowest and fastest collisions, the average values of the sticking probability is shown as a constant value with each single collision marked in the way introduced in Fig. 5.

$$v_c = \begin{cases} 1.1 - 1.3 \text{ m/s} & \text{for } R_1 = 0.6 \mu\text{m} \text{ onto SiO}_2 \text{ target, wafer} \\ 1.5 - 2.3 \text{ m/s} & \text{for } R_1 = 0.25 \mu\text{m} \text{ onto SiO}_2 \text{ wafer} \end{cases}$$

$R_1 = 0.25 \mu\text{m}$ onto SiO₂ target は $P < 0.5$ (平均 $P = 0.13$)。ただし P_{max} at $v = 1.9 \text{ m/s}$.
この2点 ($v_c = 1.2 \text{ m/s}$ for $R_1 = 0.6 \mu\text{m}$, $v_c = 1.9 \text{ m/s}$ for $R_1 = 0.25 \mu\text{m}$) から:

$$v_c = 0.92[\text{m/s}] \left(\frac{R_1}{1\mu\text{m}} \right)^{-0.52}$$

考察: v_c が JKR 理論より一桁大きいのはなぜか? \Rightarrow なぞ。

- γ の値の増大? No
 - ・ Heim et al. (1999) による測定では理論で扱った γ の値とほぼ同じ。
 - ・ 被膜の影響なし H₂O 層などによる γ の増大もなし。
- 表面凸凹 (surface asperity) の塑性変形? No
 - ・ より滑らかな wafer ターゲット: 半径 $0.6\mu\text{m}$ で差なし。半径 $0.25\mu\text{m}$ ではむしろ高付着率。
- 静電気 (衝突電離) の影響? No
 - ・ 衝突速度 $> 10 \text{ m/s}$ では効いてくる (Poppe et al., 2000) が、 $\lesssim \text{m/s}$ では効かないだろう。帯電荷数 $n = 1$ for $R_1 = 0.25\mu\text{m}$, $n = 10$ for $R_1 = 0.6\mu\text{m}$.
 - ・ 静電エネルギーによる散逸エネルギー量の見積もり

$R_1 = 1 \mu\text{m}$,
 $\gamma = 25 \text{ mJ/m}^2$,
 $\rho = 2.6 \text{ g/cc} \Rightarrow$
 $v_c = 0.02 \text{ m/s}$
また、 $R^{-5/6}$ の
依存性も異なる
から γ を求
めると 1400 ,
 1000 mJ/m^2

帯電荷数
 $n = \left(\frac{E_i}{10^{-15}\text{J}} \right)^{0.83}$
Poppe et al.
(2000)

$$E_{tot} = E_1 + E_2$$

ここで、 E_1, E_2 は¹

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(nq)^2}{z_0}, \quad E_2 = \frac{nqQ_A}{\epsilon_0} s$$

これらと、跳ね返った球の運動エネルギー

$$E_r = \frac{1}{2} m (ev_c)^2$$

を比較したのが table 2。結果として、 $E_r = (2.5 - 5) \times E_{tot}$ となり、静電気はあまり寄与しない。

粘性散逸は
効くか?

3.2.2 Irregularly shaped grain

talbe 3 参照。明瞭な v_c は見られず、比較的一定の付着確率のものも。測れたものについては球の場合より v_c は大きくなる傾向。

考察: いびつだと多数点で接触し、エネルギー散逸大きくなるだろう。

¹ $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (素電荷), $Q_A = 10^{-5} \text{ C/m}^2$ (ターゲット電荷面密度), $s < 40\mu\text{m}$ (ターゲットから離れる距離 = 測定限界距離), $z_0 = 0.4 \text{ nm}$ (接触表面間距離).

TABLE 2
MAXIMUM ENERGY LOSS E_{tot} INSIDE THE UNOBSERVABLE VOLUME CLOSE TO THE TARGET AND MINIMUM REBOUND ENERGY E_r RESULTING FROM NONSTICKING IMPACT AT CAPTURE VELOCITY

ENERGY	PARTICLE DIAMETER	
	1.2 μm (J)	0.5 μm (J)
E_1	5.8×10^{-17}	5.8×10^{-19}
E_2	7.0×10^{-17}	7.0×10^{-18}
E_{tot}	1.3×10^{-16}	7.6×10^{-18}
E_r	3.2×10^{-16}	3.8×10^{-17}

NOTE.— E_1 and E_2 specify the contributions to E_{tot} due to charge separation and escape in a homogeneous electrical field.

TABLE 3
CAPTURE VELOCITY AND STICKING PROBABILITY OF ALL COMBINATIONS OF DUST SAMPLES AND TARGETS

Panel ^a	Average Diameter (μm)	Diameter Range (μm)	Dust Sample	Target	Capture Velocity (m s^{-1})	Sticking Probability	Velocity Range (m s^{-1})
a.....	1.2	...	Silica spheres	Polished silica	1.1–1.3
b.....	1.2	...	Silica spheres	Silicon wafer	1.1–1.3
c.....	0.5	...	Silica spheres	Polished silica	...	0.13	0.5–18
d.....	0.5	...	Silica spheres	Silicon wafer	1.5–2.3
e.....	0.14	0.1–0.4	Diamond grains	Polished silica	...	0.79	1–23
f.....	1.5	1.3–1.9	Diamond grains	Polished silica	2.3–3.2
g.....	0.54	0.2–1.0	Enstatite grains	Polished silica	5–25	0.51	1–65
h.....	0.37	0.2–0.6	SiC grains	Polished silica	...	0.70	1.3–75
i.....	0.64	0.2–0.9	SiC grains	Polished silica	3.2–53	0.56	1.8–70
j.....	10–90	10–90	SiC whiskers	Polished silica	...	0.08	1–22

^a The letters in the first column correspond to those in Figs. 6 and 12.

4 Blum and Wurm (2000): F_{roll} の計測、アグリゲイトの平面への衝突

被膜 SiO_2 球 (半径 $0.95\mu\text{m}$) で構成されたアグリゲイトを 1G および μG 下で SiO_2 ターゲットへ衝突。

- 1G 実験 F_{roll} の推定
- μG 実験 付着・変形・破壊の境界衝突速度測定

実験のセットアップ

- モノマー: 有機被膜 SiO_2 球

$$R_1 = 0.95\mu\text{m}$$

$$m_0 = 7.2 \times 10^{-15} \text{ kg}$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{coat} = 19 \pm 6 \text{ mJ/m}^2$$

(Heim et al.

と同様に F_c 計測:

$$\gamma_{coat} = 1.35\gamma_{uncoat}$$

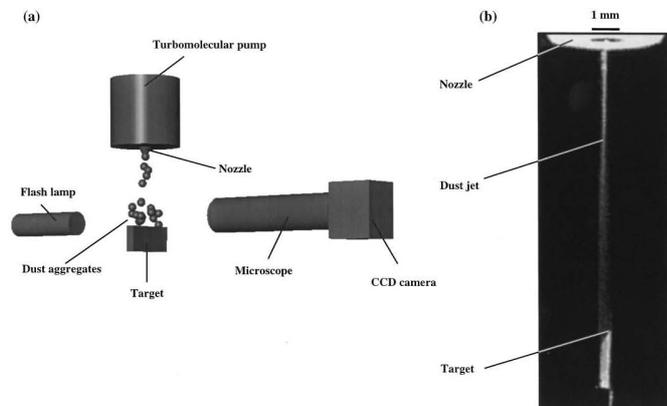


FIG. 1. (a) Sketch of the experimental setup for the laboratory as well as for the drop-tower experiments. (b) A video image from the dust jet emerging the nozzle and reaching the target is shown.

$R_1 = 0.5\mu\text{m}$ の SiO_2 球、 MgSiO_3 irregular 粒子 ($R_1 < 1.25\mu\text{m}$) も。

・アグリゲイト：

平均粒子数 60. $\iff m \lesssim 60m_0$, フラクタル次元 $D_f \approx 1.9$ (Wurm and Blum, 1998)

・ターゲット：

1G 実験 $10\mu\text{m}$ -thick steel foil

μG 実験 $\sim 1\mu\text{m}$ -thick Si_3N_4 (AFM の針先)

ターゲットと
ダストの物性
が異なる

4.1 結果

4.1.1 1G 実験： F_{roll} の推定

- ・衝突速度 $v \approx 2.5 - 7 \text{ cm/s}$ \rightarrow 変形なしで完全付着 (Wurm and Blum (1998) と調和的)
- ・ただし、重力による (転がり) 変形 F_{roll} を推定

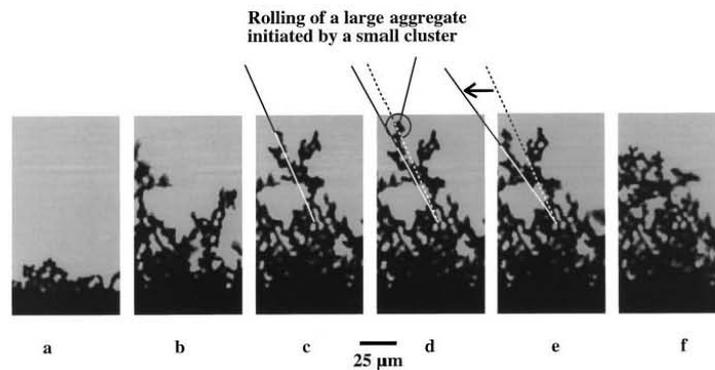


FIG. 3. Sequence of images from the laboratory experiments showing the temporal evolution of the aggregate layer. Due to gravitational restructuring, the porosity of the dust layer decreases with time. (c-e) show a slow restructuring event which was initiated by the addition of an impacting small cluster.

$$F_{roll} = mg \frac{R_{cm}}{R_1}$$

ここで、 m は折れた枝の全質量、 R_{cm} は回転軸から重心までの距離を水平投影した距離。さらに 2 次元投影であることを考慮して R_{cm} を $\sqrt{2}$ 倍修正。

結果：

$$F_{roll} = (5.0 \pm 2.5) \times 10^{-10} \text{ [N]}$$

$\gamma = 19 \text{ mJ/m}^2$
を用いると
 $\xi_{crit} = \frac{F_{roll}}{6\pi\gamma} = 1 \text{ nm}$

4.1.2 μG 実験：アグリゲイトの付着・変形の衝突速度依存性

- ・ $v > 1.9 \pm 0.3 \text{ m/s}$... ターゲットへの付着なし ($> 5 \text{ m/s}$ で fragmentation)
- ・ $1.9 \pm 0.3 \geq v \geq 1.2 \pm 0.2 \text{ m/s}$... sticking and removal

1.9 m/s 付近の
写真なし

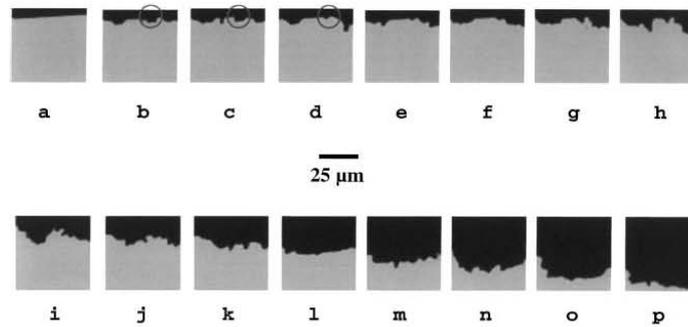


FIG. 5. Images from the drop tower experiments II. Dust agglomerates hit the $\approx 1\text{-}\mu\text{m}$ -thick target (which is shown in (a) before any sticking occurs) from below. (b–p) show a continuous series of images which were taken every 0.013 s. According to Fig. 2, the impact velocities for (b), (g), and (p) are $v = 1.4, 1.2,$ and 0.8 m s^{-1} , respectively. For $v \geq 1.2\text{ m s}^{-1}$, sticking and removal of particles are in approximate equilibrium (see circles in (b–d)), and for $v < 1.2\text{ m s}^{-1}$ the rapid formation of a compact dust agglomerate (shown in black) can be observed.

- $1.2 \pm 0.2\text{ m/s} \geq v \dots$ 付着確率=1、Compaction
- $0.65^{+0.15}_{-0.10} \geq v \geq 0.2^{+0.07}_{-0.05}\text{ m/s} \dots$ 表面凸凹。変形開始。
- $0.2^{+0.07}_{-0.05}\text{ m/s} \geq v \dots$ 変形せずに付着成長

アグリゲイト
同士の衝突？

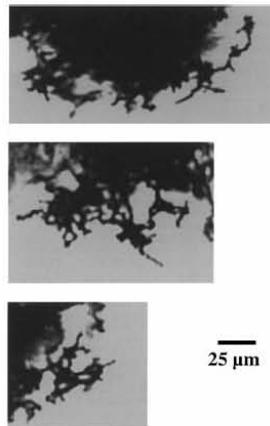


FIG. 6. Images from the drop tower experiments III. Here, the final growth phase in which the agglomerates “hit and stick” to the target with $v < 0.2\text{ m s}^{-1}$, thus forming a porous rim, is shown.

他の粒子では付着速度は...

- サイズが小さいと付着速度大。
- 形状が凸凹だと付着速度大きい
(Poppe et al. (2000) に調和的).

TABLE II
Comparison of the Critical Velocity below which Compact Agglomeration Starts for Three Different Dust Samples

Sample material	Grain size a_0 (μm)	Grain shape	Threshold velocity (m s^{-1})
SiO_2 (coated)	0.95	Spherical	1.2 ± 0.2
SiO_2 (uncoated)	0.50	Spherical	$3.1 \dots 3.9$
MgSiO_3	< 1.25	Irregular	$1.6 \dots 2.8$

$R^{-5/6}$ 依存
とすると
 $R_1 = 0.95\mu\text{m}$
に比べ 1.7 倍、
即ち 2.1m/s。
これより若干
大きい。

4.2 議論

4.2.1 F_{roll} 、変形・圧縮の衝突速度

- Heim et al. (1999) $F_{roll} = (8.5 \pm 1.6) \times 10^{-10}\text{ N}$ for uncoated SiO_2 球 ($R_1 = 0.95\mu\text{m}$)
($\gamma_{uncoated} = 14\text{ mJ/m}^2, \xi_{crit} = 3.2\text{ nm}$)

$\gamma_{coated} = (1.35 \pm 0.23) \times \gamma_{uncoated}$ ならば、

$$F_{roll,coated} = (1.35 \pm 0.23) \times F_{roll,uncoated} = (11.5 \pm 4.1) \times 10^{-10} \text{ N}$$

のはず。実測値 $(5.0 \pm 2.5) \times 10^{-10} \text{ N}$ とは 1σ 内で一致。

以下の解析には $F_{roll} = (11.5 \pm 4.1) \times 10^{-10} \text{ N}$ を使う

$$(\iff \gamma = 19 \text{ mJ/m}^2, \xi_{crit} = 3.2 \text{ nm})$$

小さくなるのは逆センス？

Onset of restructuring

- D&T '97 $E_{im} = 5E_{roll} = \frac{5}{2}F_{roll}\pi R_1$
- $m \simeq 60m_0$
- $F_{roll} = (11.5 \pm 4.1) \times 10^{-10} \text{ N}$

↓ 理論的に予測される変形開始衝突速度は (ただし F_{roll} は実験値を使用)、

$$v_{restr,theo} = \sqrt{\frac{2 \times 5E_{roll}}{m}} = 0.20 \pm 0.04 \text{ m/s}$$

これは、測定値 $v_{restr,meas} = 0.20^{+0.07}_{-0.05} \text{ m/s}$ によく一致。

$\gamma = 25 \text{ mJ/m}^2$,
 $\xi_{crit} = 0.1 \text{ nm}$
(D&T) を使う
と $E_{roll} = 7 \times 10^{-17} \text{ J}$. これから
 $v_{rest,DT} = 0.04 \text{ m/s}$.

Total compaction

- D&T '97 $E_{im} = n_k E_{roll} = n_k \frac{1}{2} F_{roll} \pi R_1$
- $F_{roll} = (11.5 \pm 4.1) \times 10^{-10} \text{ N}$
- $n_k \simeq \frac{m}{m_0} \iff D_f \simeq 1.9$ だから

↓ 理論的に予測される最大圧縮衝突速度は (ただし F_{roll} は実験値を使用)、

$$v_{compr,theo} = \sqrt{\frac{2}{m} \frac{m}{m_0} E_{roll}} = \sqrt{\frac{2E_{roll}}{m_0}} = 0.69 \pm 0.12 \text{ m/s}$$

これは、測定値 $v_{compr,meas} = 0.65^{+0.15}_{-0.10} \text{ m/s}$ によく一致。

$\gamma = 25 \text{ mJ/m}^2$,
 $\xi_{crit} = 0.1 \text{ nm}$
(D&T) を使う
と $v_{compr,DT} = 0.14 \text{ m/s}$.

∴ D&T 理論的枠組み + Heim et al. の $F_{roll} \implies v_{restr}, v_{compr}$ が理論値と実験値一致。

4.2.2 E_{br} 、付着・反発の衝突速度

- D&T '97 $E_{im} = 3...10 \times n_k E_{br}$

Loss of one monomer ~ Catastrophic breakup

- $n_k = \frac{m}{m_0}$

もし、 $\gamma = 25 \text{ mJ/m}^2$ を用いると、 $E_{br} = 2.4 \times 10^{17} \text{ J}$ となり、

$$v_{st,DT} = \sqrt{2 \times (3 \dots 10) \times \frac{1}{m_0} E_{br}} = 0.14 \dots 0.26 \text{ m/s}$$

しかしながら実測値は、

$$v_{st,meas} = 1.2 \pm 0.2 \dots 1.9 \pm 0.3 \text{ m/s}$$

で一桁以上違う。

実験的に推定される E_{br}

Poppe et al. (2000) の実験より、 $v_c \approx 0.92 [\text{m/s}] \left(\frac{R_1}{1 \mu\text{m}} \right)^{-0.52}$ 。これから、 $R_1 = 0.95 \mu\text{m}$ の SiO_2 球の E_{br} を求める (Poppe et al. では被膜の影響なし。また球-球衝突への換算を考慮。) と、

$$E_{br} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{4}{3}} v_c^2 = 1.3 \times 10^{-15} \text{ J}$$

これを用いて $v_{st,theo}$ を計算すると、

$$v_{st,theo} = \sqrt{2 \times (3 \dots 10) \times \frac{1}{m_0} E_{br}} = 1.0 \dots 1.9 \text{ m/s}$$

これは、実測値

$$v_{st,meas} = 1.2 \pm 0.2 \dots 1.9 \pm 0.3 \text{ m/s}$$

とよく一致。

\therefore D&T 理論的枠組み + Poppe et al. の E_{br} (or v_c) $\implies v_{st}$ が理論値と実験値一致。

ターゲットとダストで物性値が異なる影響は？
1.9 m/s は Catastrophic breakup の速度か？

これは E_{st} では？

$v_{st,meas}$ から逆に $E_{br} \approx 1.3 \times 10^{-15} \text{ J}$ 。これから γ を計算すると $\gamma_{coated} = 275 \text{ mJ/m}^2$

TABLE III

Comparison between Experimental and Model Values for the Threshold Velocities of the Collisional Outcome Cases from Table I

Case	Energy	Experimental velocity (m s^{-1})	Model velocity (m s^{-1}) with new data for E_{roll} and E_{br}^a	Model velocity (m s^{-1}) with old data for E_{roll} and E_{br}^b
(2)	$E_{im} \approx 5 \cdot E_{roll}$	$0.20^{+0.07c}_{-0.05}$	0.20 ± 0.04^c	0.047^c
(3)	$E_{im} \approx 1 \cdot n_k \cdot E_{roll}$	$0.65^{+0.15}_{-0.10}$	0.69 ± 0.12	0.16
(4)	$E_{im} \approx 3 \cdot n_k \cdot E_{br}$	1.2 ± 0.2	1.0	0.14
(5)	$E_{im} > 10 \cdot n_k \cdot E_{br}$	1.9 ± 0.3	1.9	0.26

^a $E_{roll} = 1.7 \times 10^{-15} \text{ J}$ from Heim et al. (1999). $E_{br} = 1.3 \times 10^{-15} \text{ J}$ from Poppe et al. (1999a,b).

^b $E_{roll} = 9.5 \times 10^{-17} \text{ J}$ from Dominik and Tielens (1995). $E_{br} = 2.4 \times 10^{-17} \text{ J}$ from Chokshi et al. (1993) and Dominik and Tielens (1997).

^c Valid for $m = 60m_0$.

5 各実験から得られる γ , ξ_{crit} の値

	γ [mJ/m ²]	ξ_{crit} [nm]	導出方法
Dominik & Tielens (1997)	$\gamma_{SiO_2} = 25$ $\gamma_{poly.} = 12$	0.1 or 0.2	γ は Kendall et al.(1987) より。 ξ_{crit} は仮定。 Kendall & Padgett (1987)?
Heim et al. (1999)	$\gamma_{SiO_2} = 14$	3.2	F_c, F_{roll} の測定。
Dahneke (1975)	$\gamma_{poly.} = 260$ $\gamma_{poly.} = 340$		v_c の推定値 ($e = 0$) から e に fitting by Chokshi et al. (1993)
Poppe et al. (2000)	$\gamma_{SiO_2} = 1000 - 1400$ 275 677		v_c の測定値から v_c の測定値から E_{br} を求め算出 v_c の測定値から E_{st} を求め算出
Blum & Wurm (2000)	$\gamma_{SiO_2,coated} = 19$ ($\gamma_{SiO_2,coated} = 19$) $\gamma_{SiO_2,coated} = 275$	1.0 3.2	F_c, F_{roll} の測定。 v_{restr}, v_{compr} の測定値から。 v_{st} の測定値から。