

Microgravity experiment on the collisional behavior of saturnian ring particles

Daniel Heißelmann, Jürgen Blum, Helen J. Fraser, Kristin Wolling

Icarus, Volume 206, Issue 2, April 2010, Pages 424-430

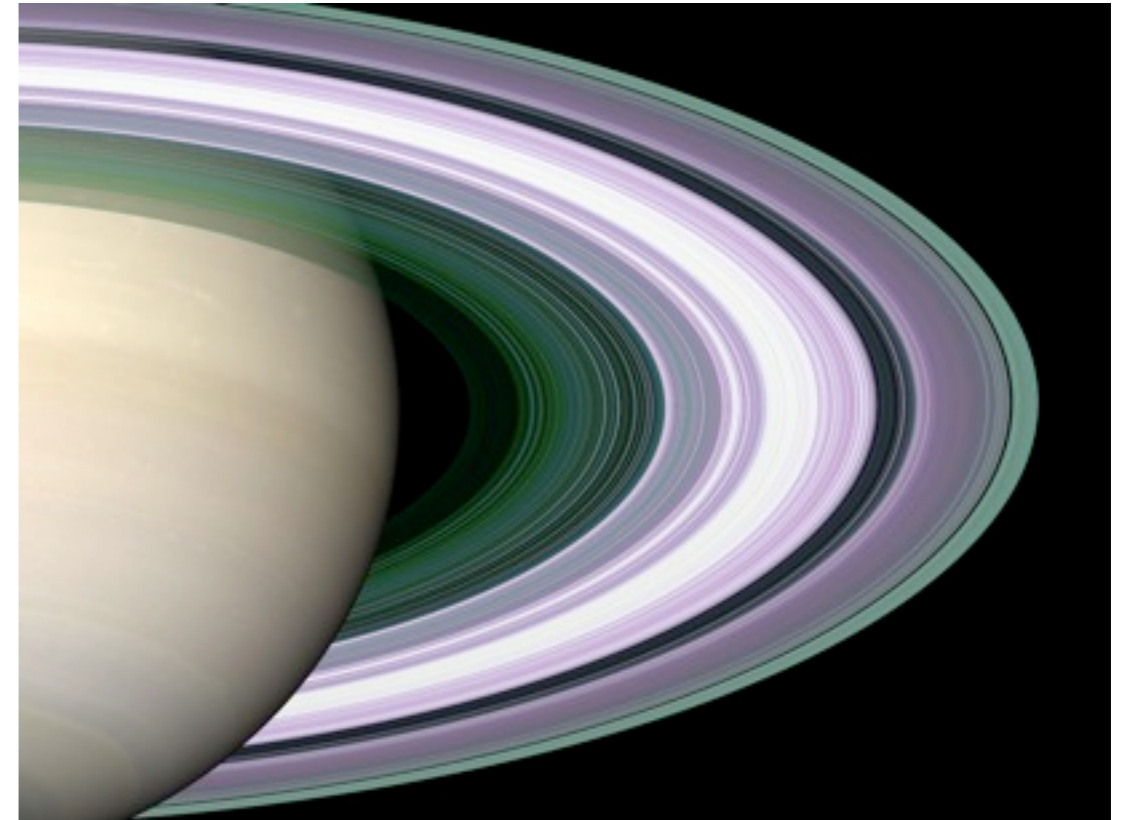
名古屋大大学 地球環境科学専攻 M1 藤田幸浩

1. Introduction

・土星の環

メインリング

（無数の粒子で構成されている
大部分が氷を主成分とする粒子
(1~10 cm)



NASA/JPL/Space Science Institute

環がもつ特徴的な構造は衛星
や小型衛星による摂動が関係



軌道が乱されることで離心率や
リングの厚さが増加

この乱れを中和するために低速度 ($\sim 0.5\text{cm/s}$) の
非弾性衝突が頻繁に起こり、k.e が散逸する

➡ 再び軌道が円形化され、厚さは制限される

土星の環の進化には氷粒子の衝突が大きく関係

2. Experimental setup

<Parabolic-flight experiment>

氷球の二体衝突を低速度で行う

微小重力

- 重力加速度 - $0.01G_0$ 程度
- 継続時間 - 22 s

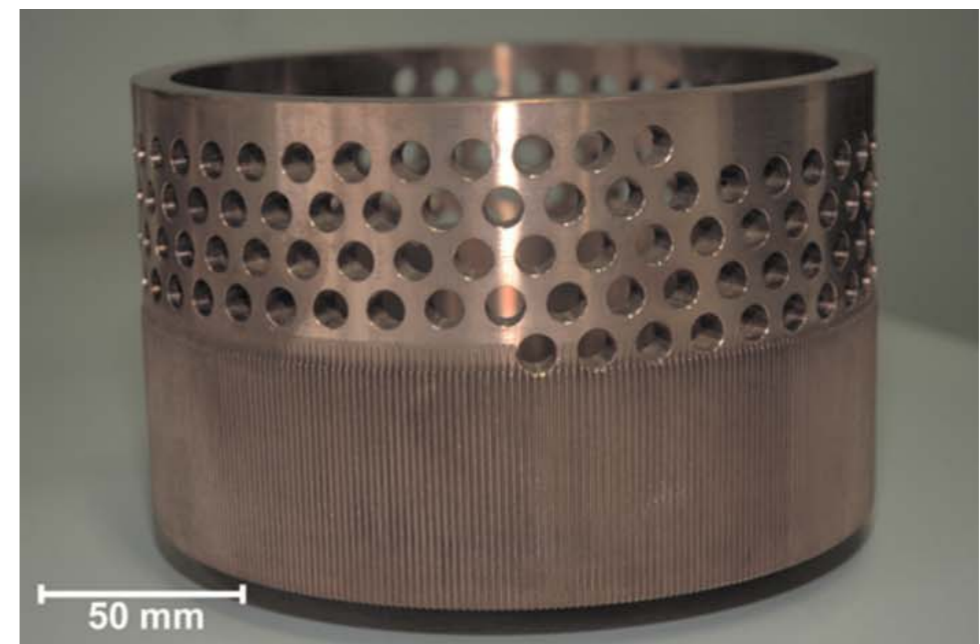
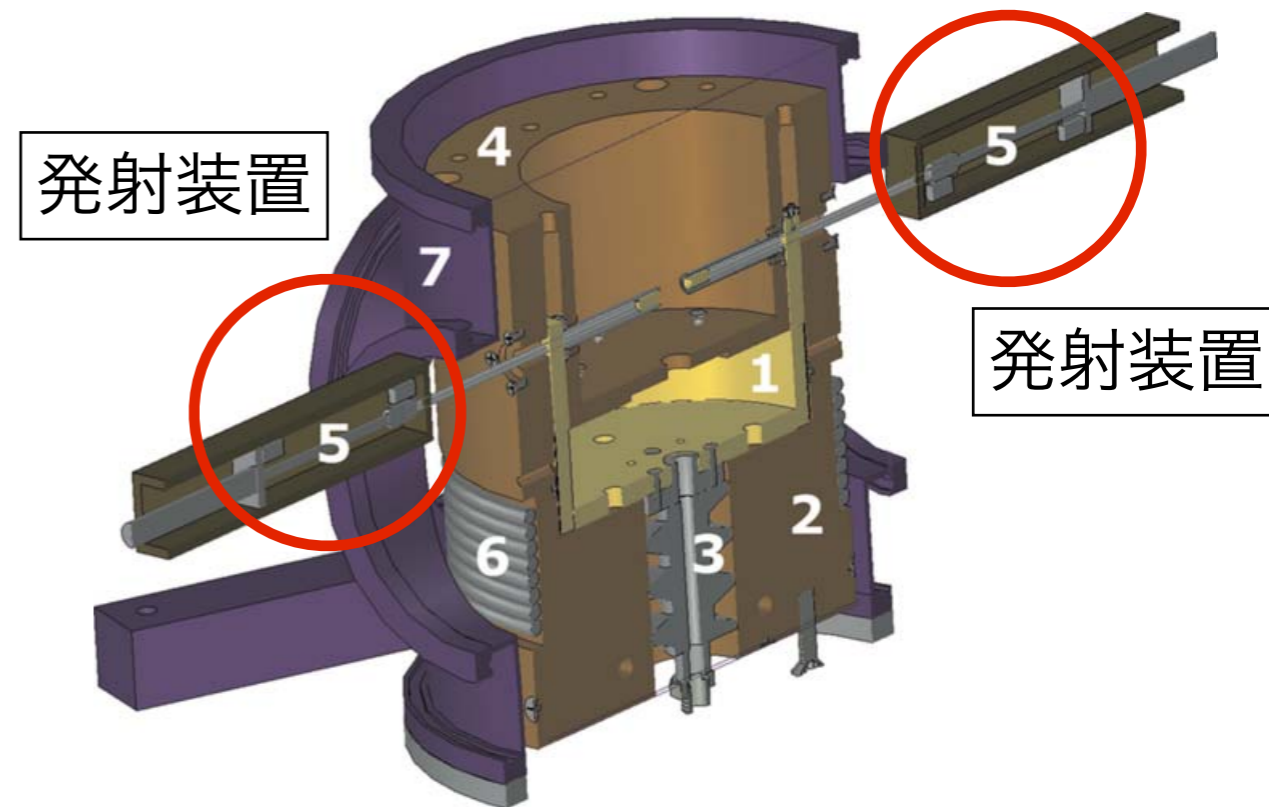
※ G_0 : 地上での重力加速度

・ 氷球試料

- 蒸留水を型に入れて冷却
- サイズ - 15 [mm]
- 六方晶氷

・ 観察

- 高速度ビデオカメラで記録 : 107 fps
- ビームスプリッター付き



2. Experimental setup

<Parabolic-flight experiment>

氷球の二体衝突を低速度で行う

微小重力

- 重力加速度 - $0.01G_0$ 程度
- 継続時間 - 22 s

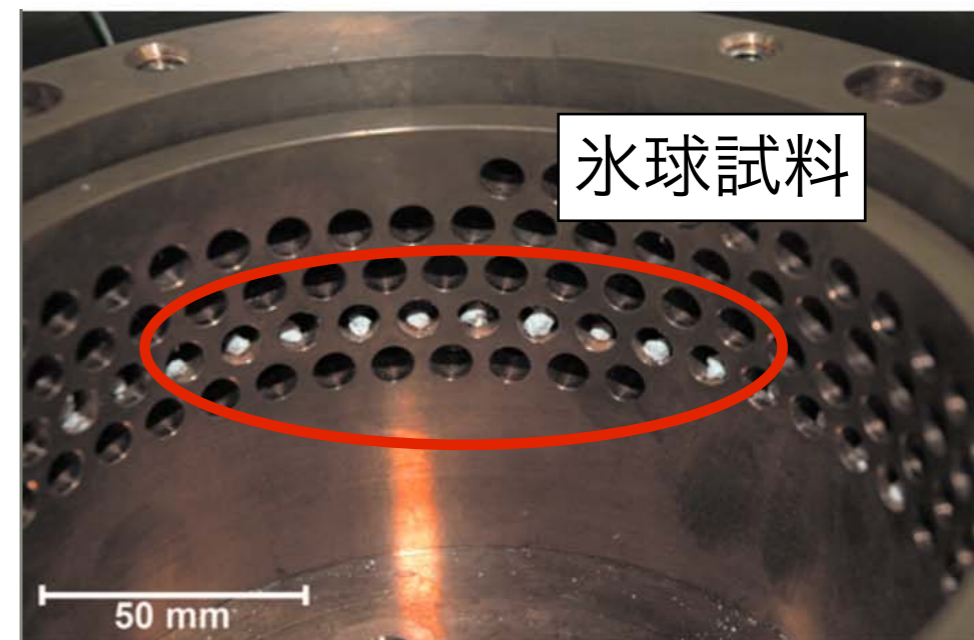
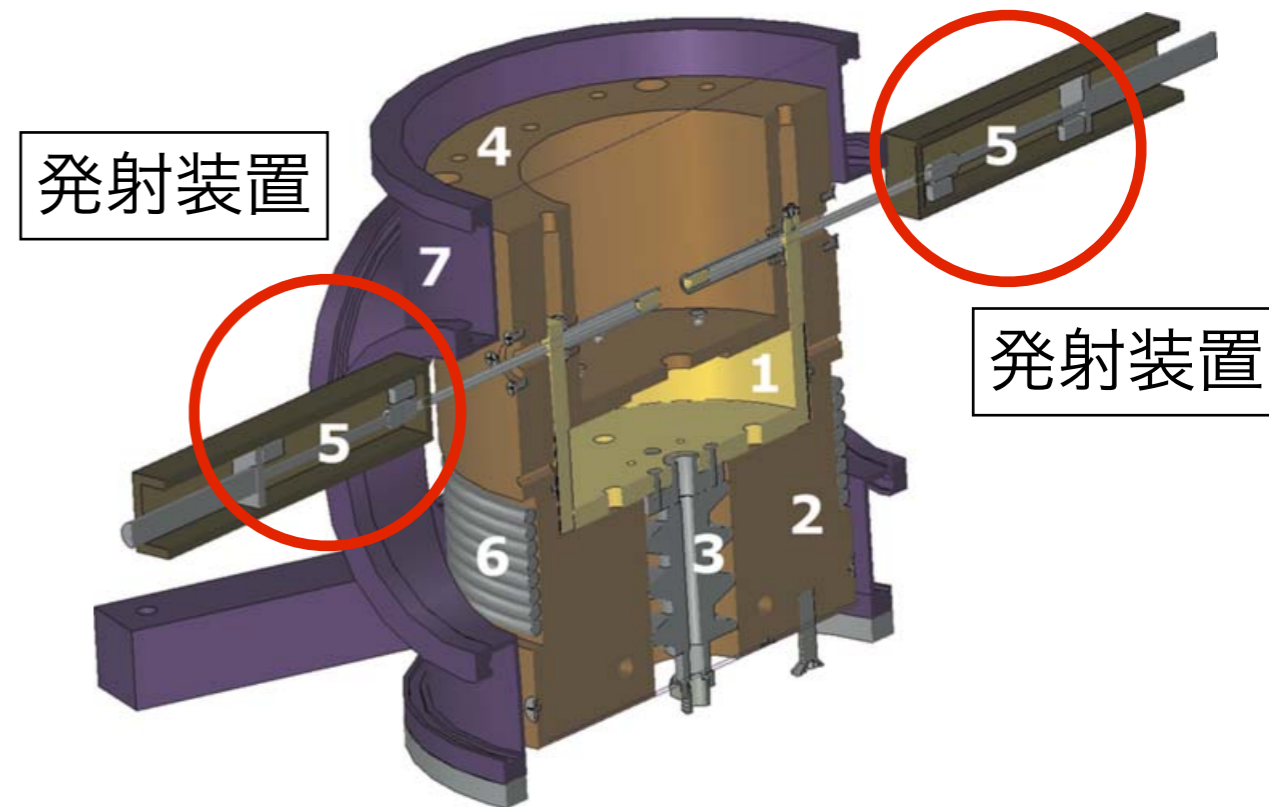
※ G_0 : 地上での重力加速度

・ 氷球試料

- 蒸留水を型に入れて冷却
- サイズ - 15 [mm]
- 六方晶氷

・ 観察

- 高速度ビデオカメラで記録 : 107 fps
- ビームスプリッター付き



2. Experimental setup

< Drop-tower experiment >

ガラスビーズの低速度多体衝突
微小重力

(重力加速度 - $10^{-5} G_0$ 程度
継続時間 - 9 s

- ・ 試料：ガラスビーズ (10mm) ※ 1set - 50個

試料を両端にセット



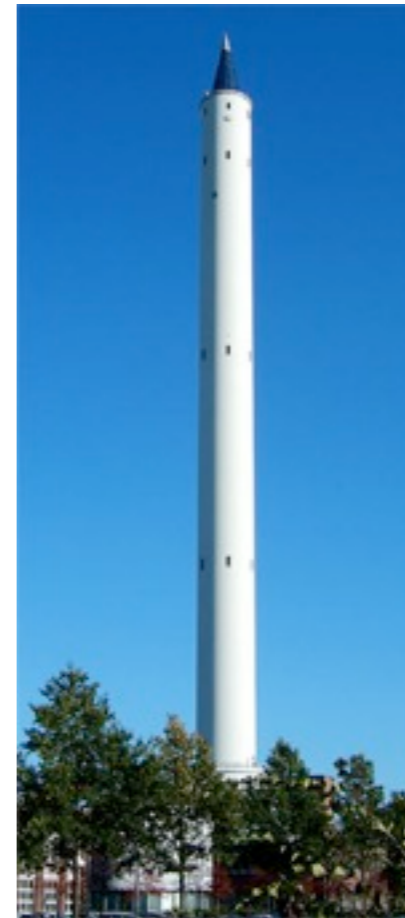
長方形のチャンバーに注入 (~ 10 cm/s)

$150 \times 150 \times 15$ mm³

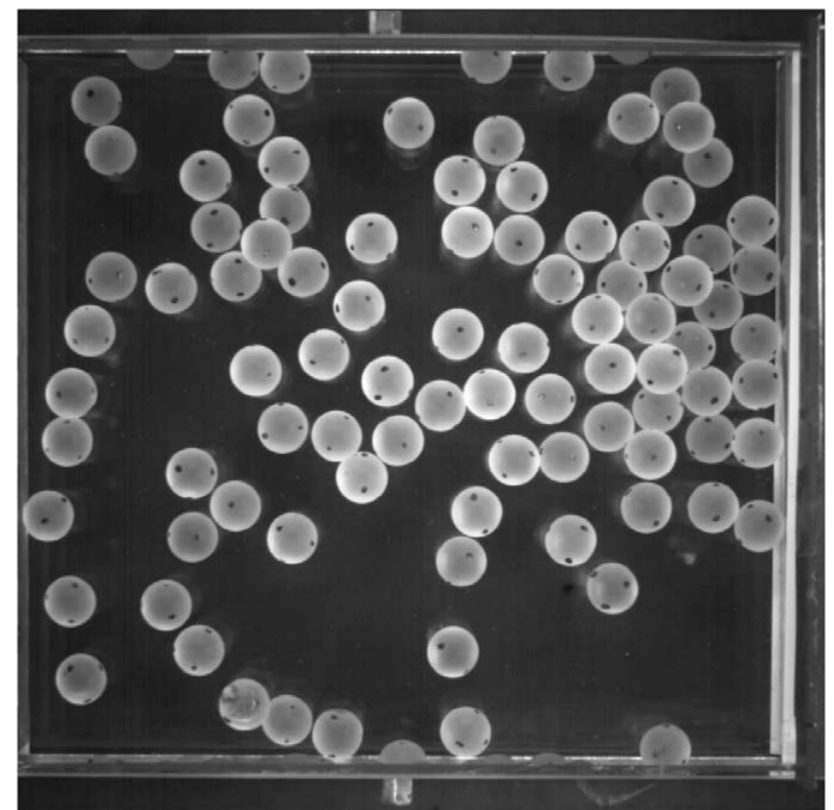
- ・ 観察

高速度ビデオカメラで記録：115 fps

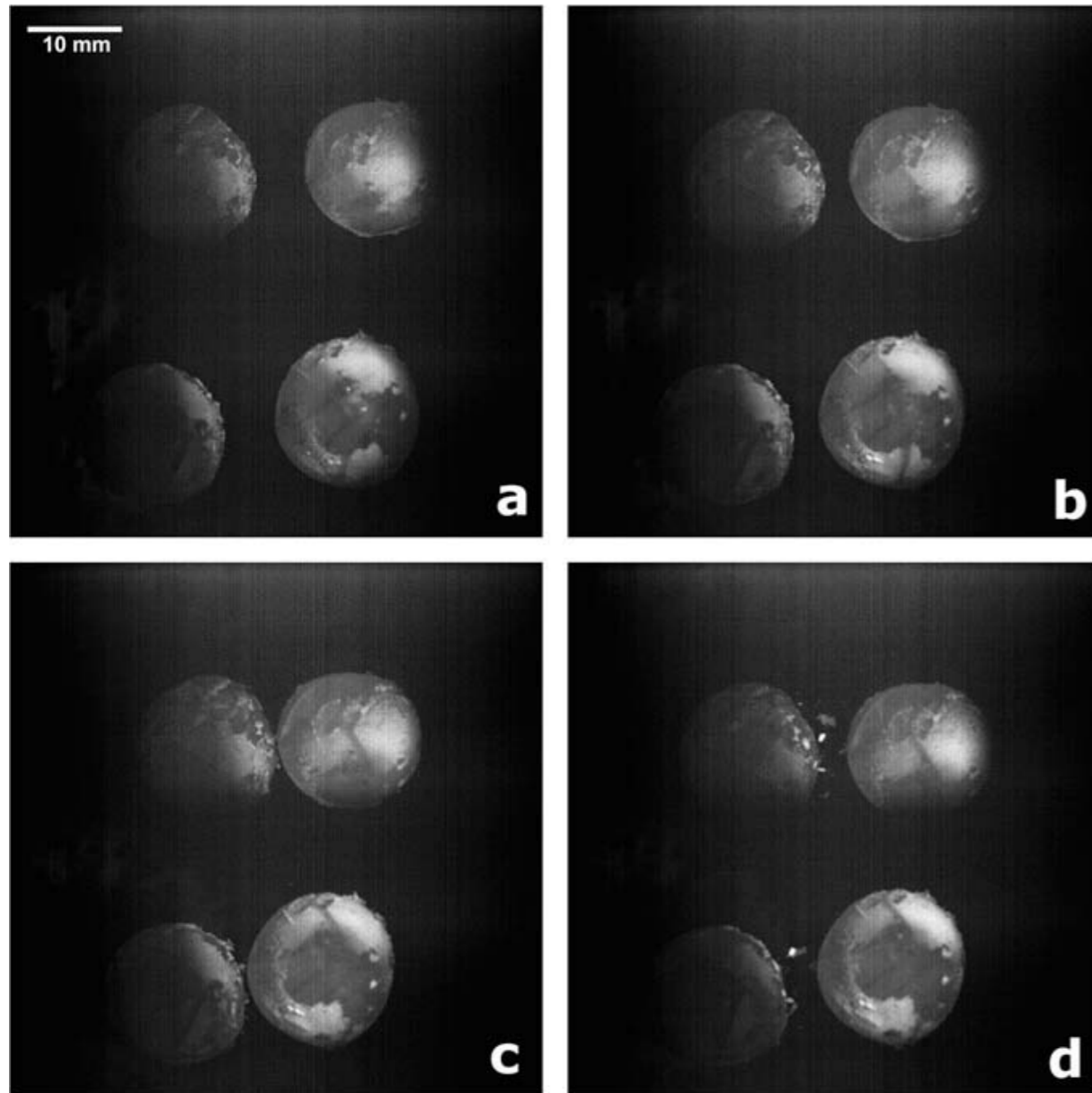
※他に2つのカメラで概観を撮影



Bremen
Drop tower



3. Results <Parabolic-flight experiment>



上下画像間の角度差：48.8°

ビームスプリッターで捉えた2組の画像から三次元のサンプル座標を生成

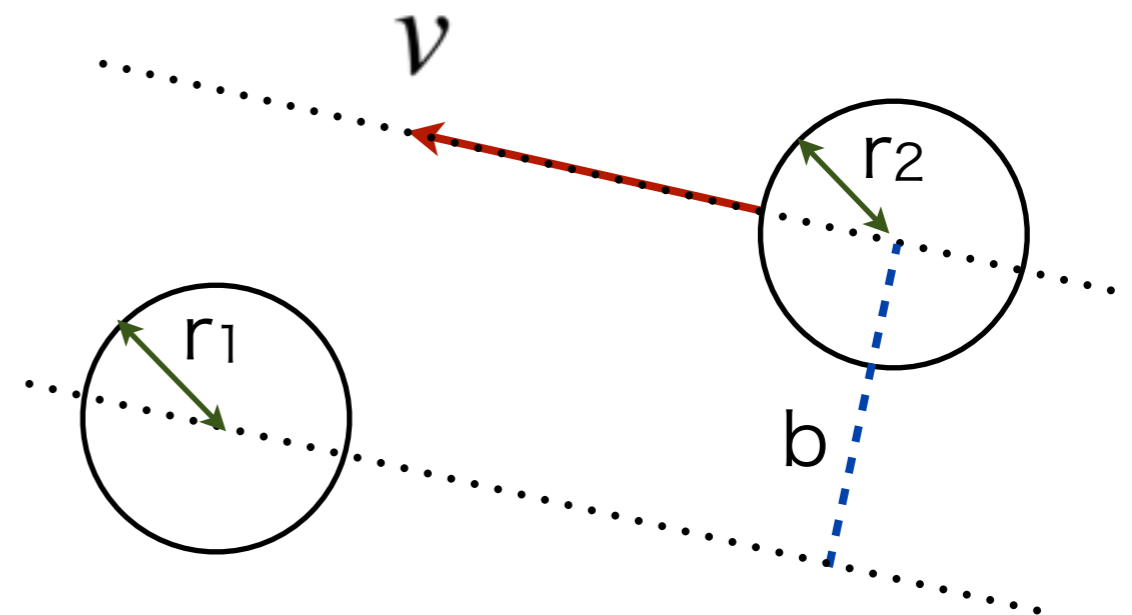


衝突前、衝突後の速度： v v'

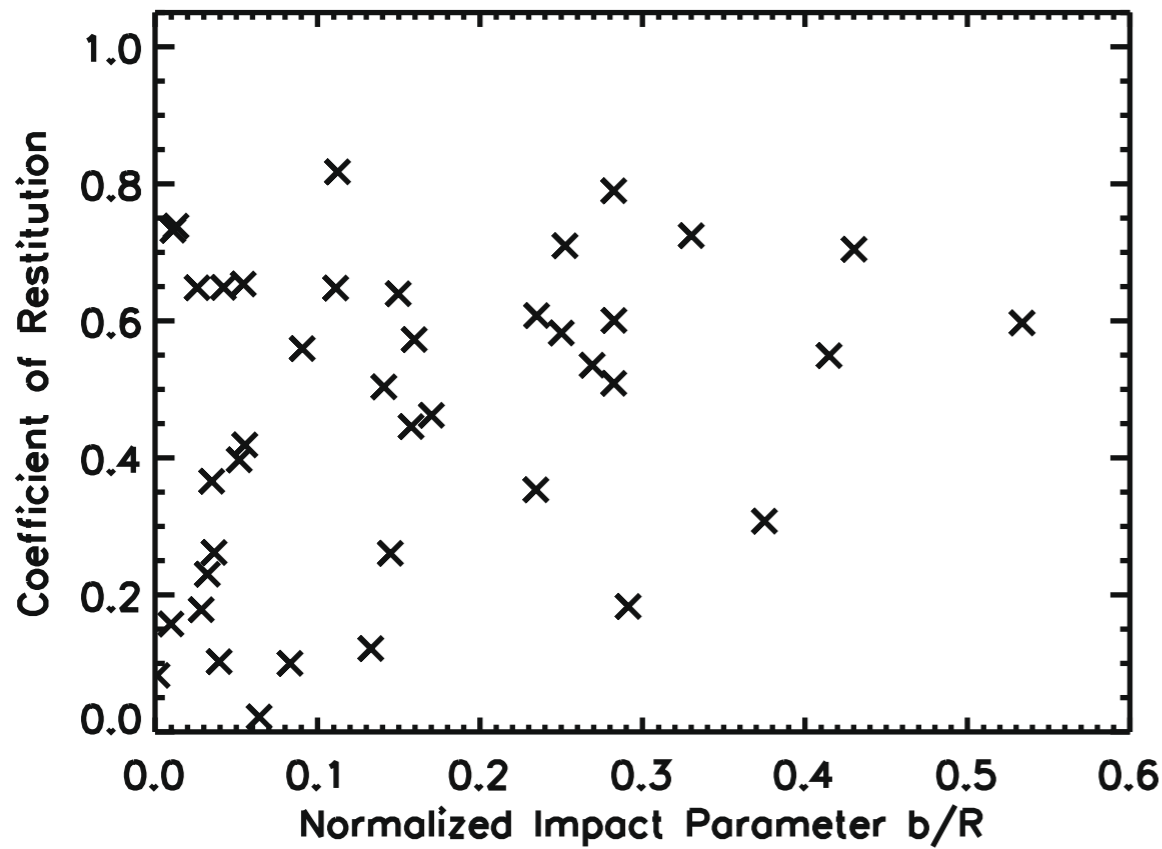
→ 反発係数： ϵ

衝突パラメーター： $\frac{b}{R}$

$$R = r_1 + r_2$$



3. Results <Parabolic-flight experiment>

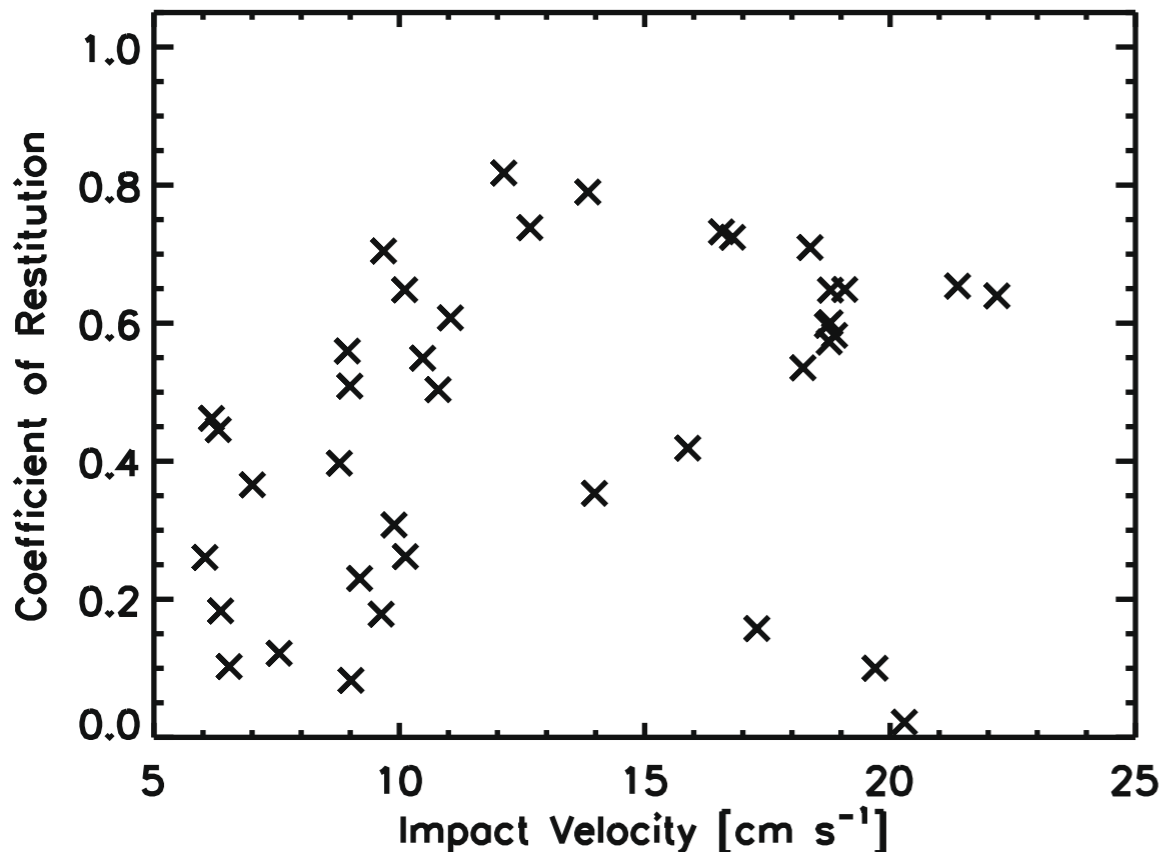


- 衝突パラメーターと反発係数の関係
(相関係数)

$$r_{b/R} = \frac{\sum_{i=0}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}) \left(\frac{b_i}{R_i} - \bar{\frac{b}{R}} \right)}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^n \left(\frac{b_i}{R_i} - \bar{\frac{b}{R}} \right)^2}}$$

→ $r_{b/R}^2 = 0.10$

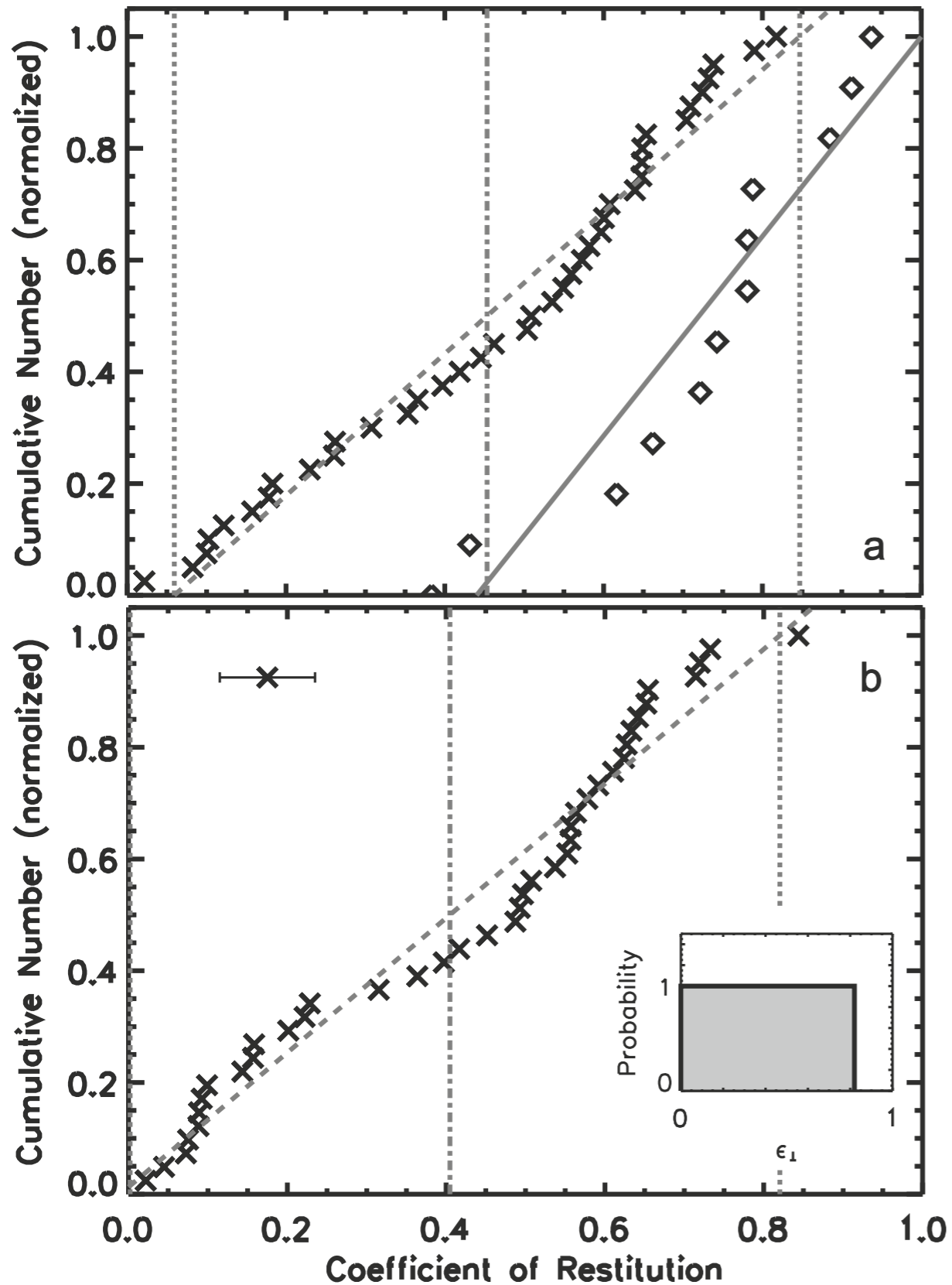
線形的な相関はあまり見られない



← 衝突速度と反発係数の関係

→ 同様に線形的な相関はあまり見られない

3. Results <Parabolic-flight experiment>



・ 反発係数の積算個数分布

← 反発係数 ε の積算個数分布

傾きが一定： ε は均一な分布をとる

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon} = 0.45 \\ \varepsilon = 0.06 \sim 0.84 \end{cases}$$

← 反発係数 ε_{\perp} の積算個数分布

$$\varepsilon_{\perp} = 0.0 \sim 0.82$$

ε_{\perp}				ε_{\parallel}			
$\bar{\varepsilon}_{\perp}$	$\sigma_{\varepsilon_{\perp}}$	$\sigma_{\varepsilon_{\perp}}$	$\Delta\varepsilon_{\perp}$	$\bar{\varepsilon}_{\parallel}$	$\sigma_{\varepsilon_{\parallel}}$	$\sigma_{\varepsilon_{\parallel}}$	$\Delta\varepsilon_{\parallel}$
0.41	0.04	0.24	0.06	1.08	0.19	1.11	0.38

$\bar{\varepsilon}_{\perp}, \bar{\varepsilon}_{\parallel}$: mean normal/ tangential coefficient of restitution.

$\sigma_{\varepsilon_{\perp}}, \sigma_{\varepsilon_{\parallel}}$: error of mean normal/tangential coefficient of restitution.

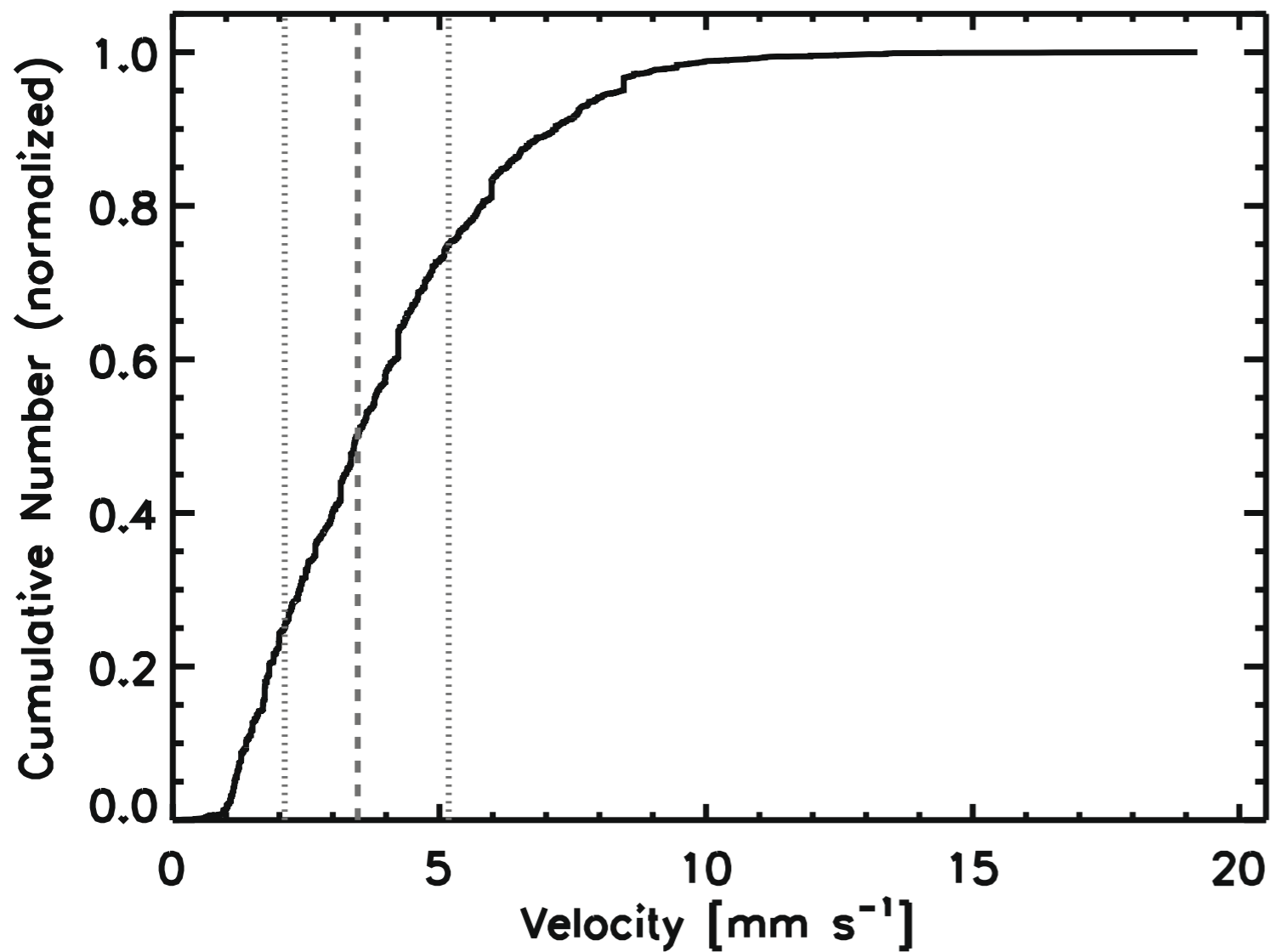
$\sigma_{\varepsilon_{\perp}}, \sigma_{\varepsilon_{\parallel}}$: standard deviation of individual measurements of normal/tangential coefficient of restitution from mean value.

$\Delta\varepsilon_{\perp}, \Delta\varepsilon_{\parallel}$: measurement uncertainty of individual measurement of normal/tangential coefficient of restitution.

3. Results <Drop-tower experiment>

- ・ビーズ速度の積算個数分布

実験時間のラスト1.5 s付近



連続画像間における全粒子の速度（絶対値）を計算

（ 平均の粒子速度 3.5 mm/s
50%の粒子 → 2 ~ 5 mm/s

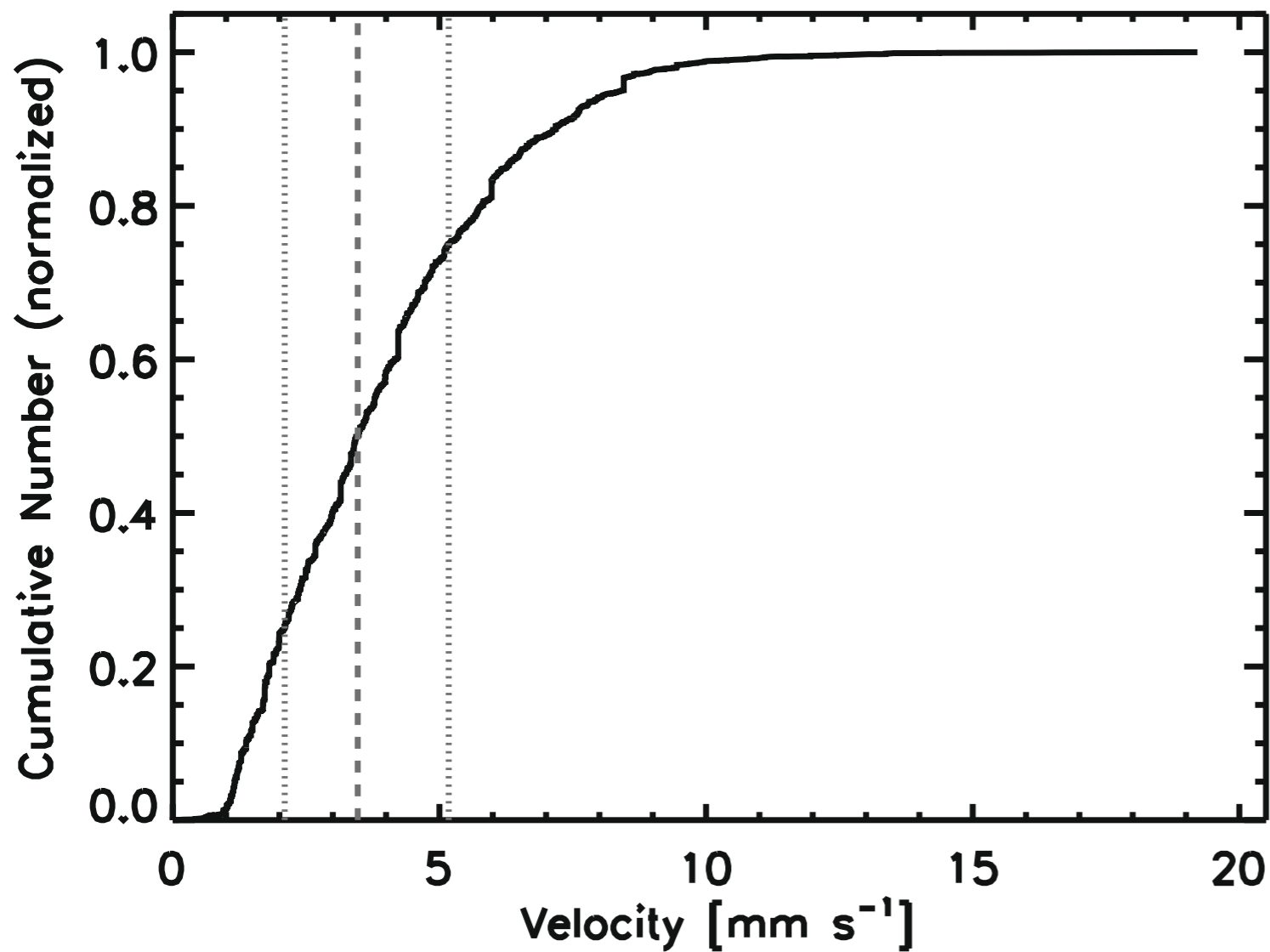
土星環内の衝突研究での
予想と近い

(Esposito, 2002)

3. Results <Drop-tower experiment>

- ・ビーズ速度の積算個数分布

実験時間のラスト1.5 s付近



連続画像間における全粒子の速度（絶対値）を計算

（ 平均の粒子速度 3.5 mm/s
50%の粒子 → 2 ~ 5 mm/s



土星環内の衝突研究での
予想と近い

(Esposito, 2002)

3. Results < Drop-tower experiment >

- 全体の平均粒子速度の減衰

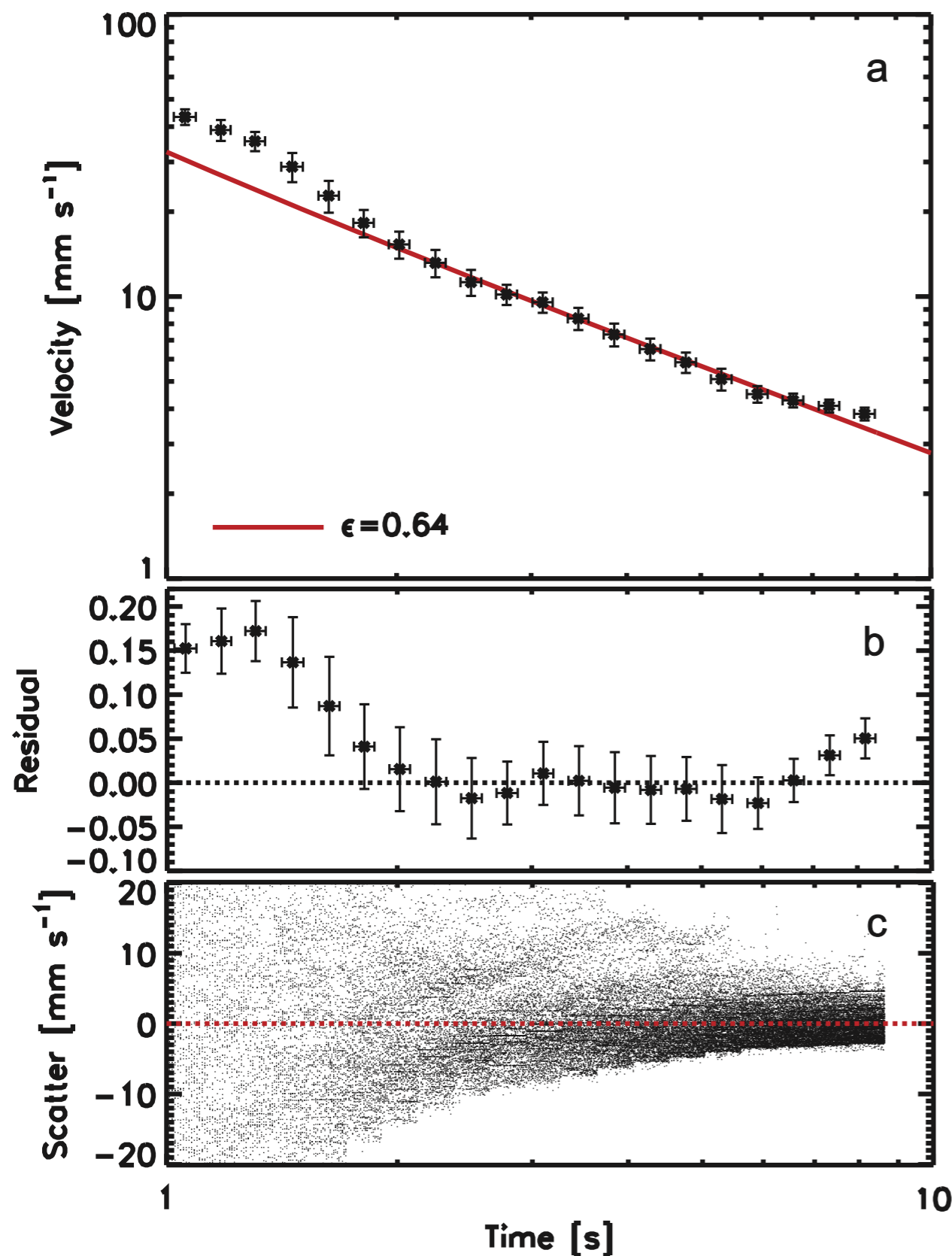
$$\epsilon(v) = \text{const}$$

Haff (1983)

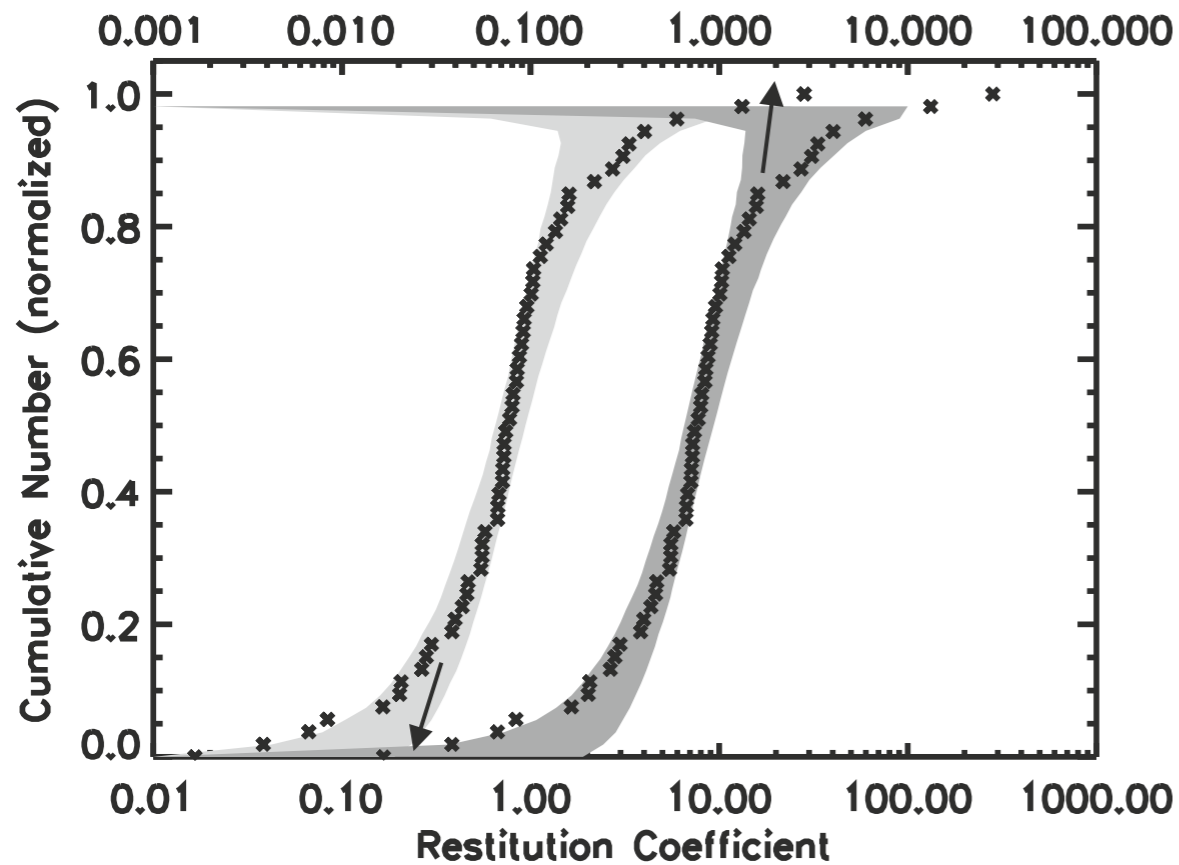
熱運動速度が0の粒子流における粒子速度（二乗平均平方根）の時間変化

$$v(t) = \frac{1}{\frac{1}{v_0} + (1 - \epsilon) \cdot n \cdot \sigma \cdot t}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_0 : \text{ビーズ注入時の速度} \\ n : \text{数密度} \\ \sigma = 4\pi r^2 : \text{断面積} \end{array} \right.$$



3. Results < Drop-tower experiment >

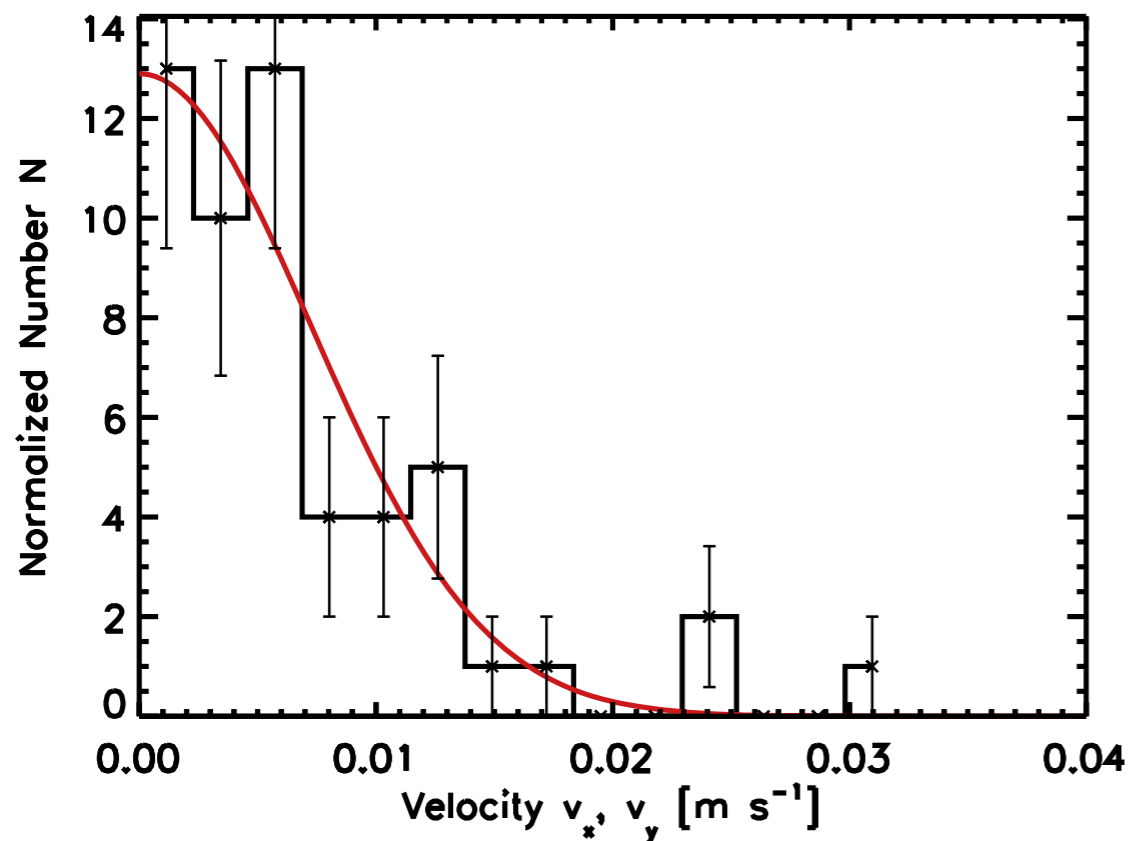


Maxwell-Boltzmann 速度分布を用いて
計算した反発係数の積算個数分布

※cmサイズのガラス球

(右 : $\epsilon = 0.77$ (一定)
左 : $\epsilon = 0.2 \sim 1.0$ (幅)

→ 非常に近い形



2体衝突の一次元速度の絶対値は
Maxwell-Boltzmann 速度分布と
フィットする

4. Conclusion

本研究では、微視的な氷物質個々の衝突を研究するために新たな2つの手法で実験を行った

<Parabolic-flight experiment>

- 相対速度 6cm/s 以上の2体衝突に適している $\frac{b}{R} = 0 \sim 0.5$
(near-central impact)
- 反発係数と衝突パラメーター、相対速度との相関はあまり見られなかった
- 反発係数： $\bar{\varepsilon} = 0.45$ 、 $\varepsilon = 0.06 \sim 0.84$

<Drop-tower experiment>

- 1cm/s より小さい相対速度での多体衝突を達成できた
- 速度の時間進化は $\varepsilon = 0.64$ としてHaff(1983)の式でフィッティングできた
- 得られたビーズの速度分布は予想される土星環の速度分布に近い