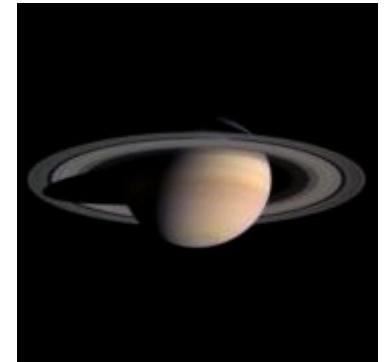
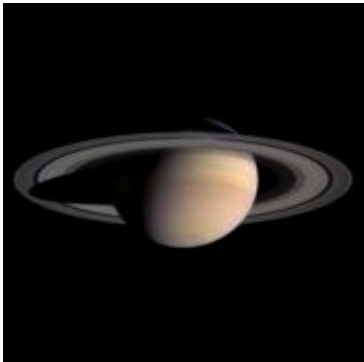


多孔質模擬天体内部の圧力減衰率測定実験

神戸大学理学研究科

D1 瀬藤真人



★背景

- 太陽系の小天体には空隙率の高いものが多いとされる。
- 天体の形成や進化の過程を知るためには、衝突現象の解明は不可欠である。

そこで、多孔質の模擬天体を用いた室内実験が小天体の衝突物性を知る上で重要な位置付けとなる。

衝突現象が主に起こっている領域はメインベルト（ $\sim 5\text{km/s}$ ）やカイパーベルト（ $\sim 1\text{km/s}$ ）である。



(JAXA/ISAS)



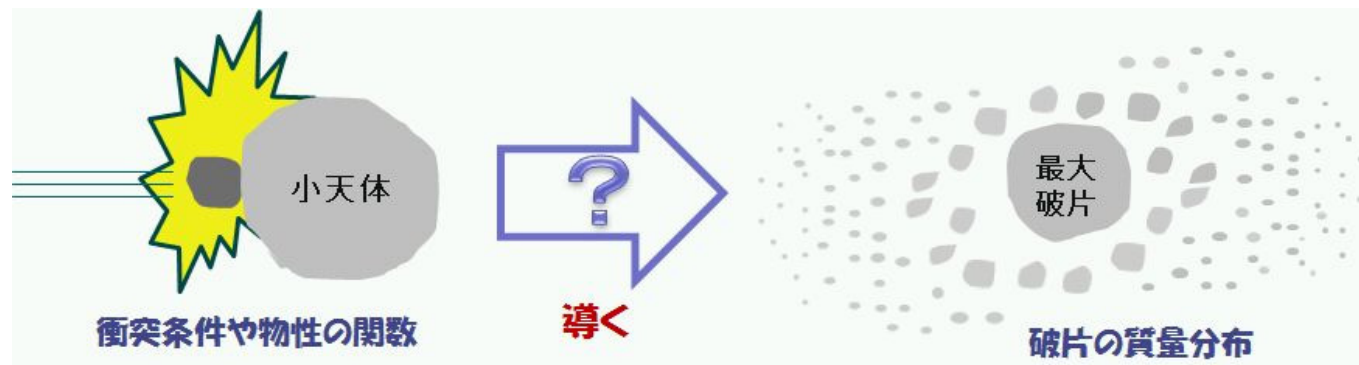
(APL/NASA)

★背景

衝突現象解明のための手法

- 衝突素課程を解明
(破壊や再集積がどういう法則で起こるのか?)
- 衝突現象などを数値シミュレーションで再現
(現在の天体の諸情報と一致するか?)

そのために、衝突破壊実験を行い、
衝突のエネルギーと衝突後の最大破片を求め、
衝突現象を支配する**法則**を探し求めている。



★過去の衝突破壊実験

「衝突破壊強度は基本的に、物質の静的強度に依存するが、空隙も重要な役割を果たすはずだ」と考えられてきた。

過去の高空隙率体を用いた実験では、
Love et al. (1993) や Michikami et al. (2007) らが、
ガラスビーズを焼結させた試料を用いている。

Love et al. (1993) は、弾丸速度 6km/s という高速度衝突実験を行い、
高空隙率の焼結体は、圧縮強度は低いが衝突破壊強度は高い
(衝突破壊強度は $S^{0.45} \times \phi^{-3.6}$ に比例する) という結果を得た。

S : 静的圧縮強度 ϕ : 1 - (空隙率)

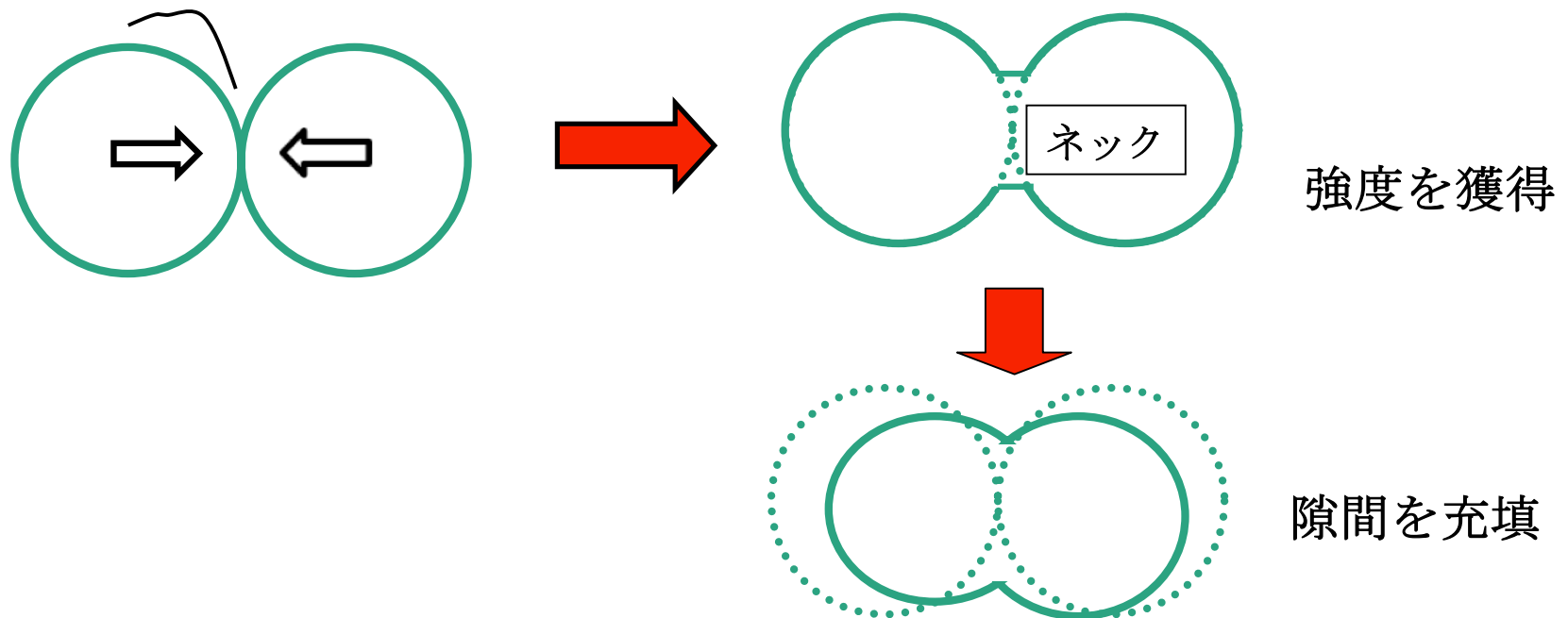
空隙率と圧縮強度が連動する4種類のターゲットの高速衝突のみ

⇒空隙率を固定したターゲットで衝突破壊強度を求める

★試料

SiO₂を含むソーダ石灰ガラスビーズの焼結体
粒径：～50 μ m、軟化点：734℃、密度：2.5g/cm³

焼結・・・粉体を軟化点以下の温度で加熱し、
粒子同士を結合させること



冷凍庫の氷がくっつくのも焼結の一種

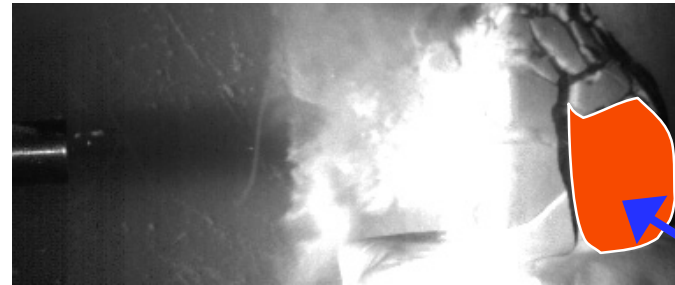
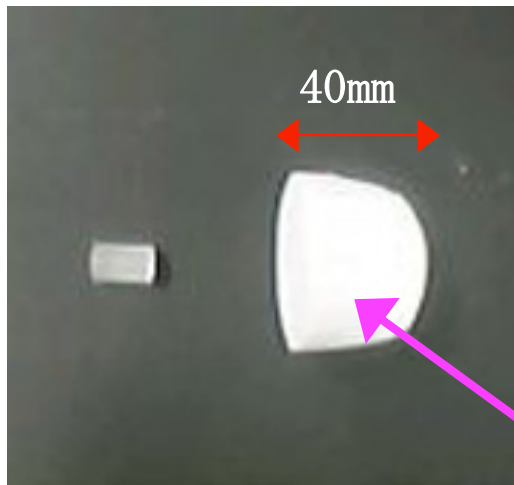
★衝突破壊実験

ヘリウムガス銃による低速度衝突破壊実験

弾丸：ポリカーボネイト円柱 質量 $m = 1.4\text{g}$ 直径 = 10mm

衝突速度： $v = 10 \sim 100\text{m/s}$

標的：Group 1-A, 1-B (ガラスビーズ焼結体 おわん型)
質量 $M_t = 50\text{g}$



元の target 質量 M_t

最大破片の質量 M_L

壊れにくさ = $\frac{M_L}{M_t} = 0.5$ となる時のエネルギー密度を Q^* とする

$$\text{エネルギー密度} = \frac{1}{2} mv^2 \frac{1}{M_t} \text{ (J/kg)}$$

★中速度衝突破壊実験

Projectiles : ガラス球 質量 $m = 0.04\text{g}$ 直径 = 3.2mm

衝突速度 : $v = 190 \sim 270\text{m/s}$

Targets : Group 1-C (ガラスビーズ焼結体・円柱)
直径 : 高さ = $48 : 24\text{mm}$ 、 $10 : 15\text{mm}$

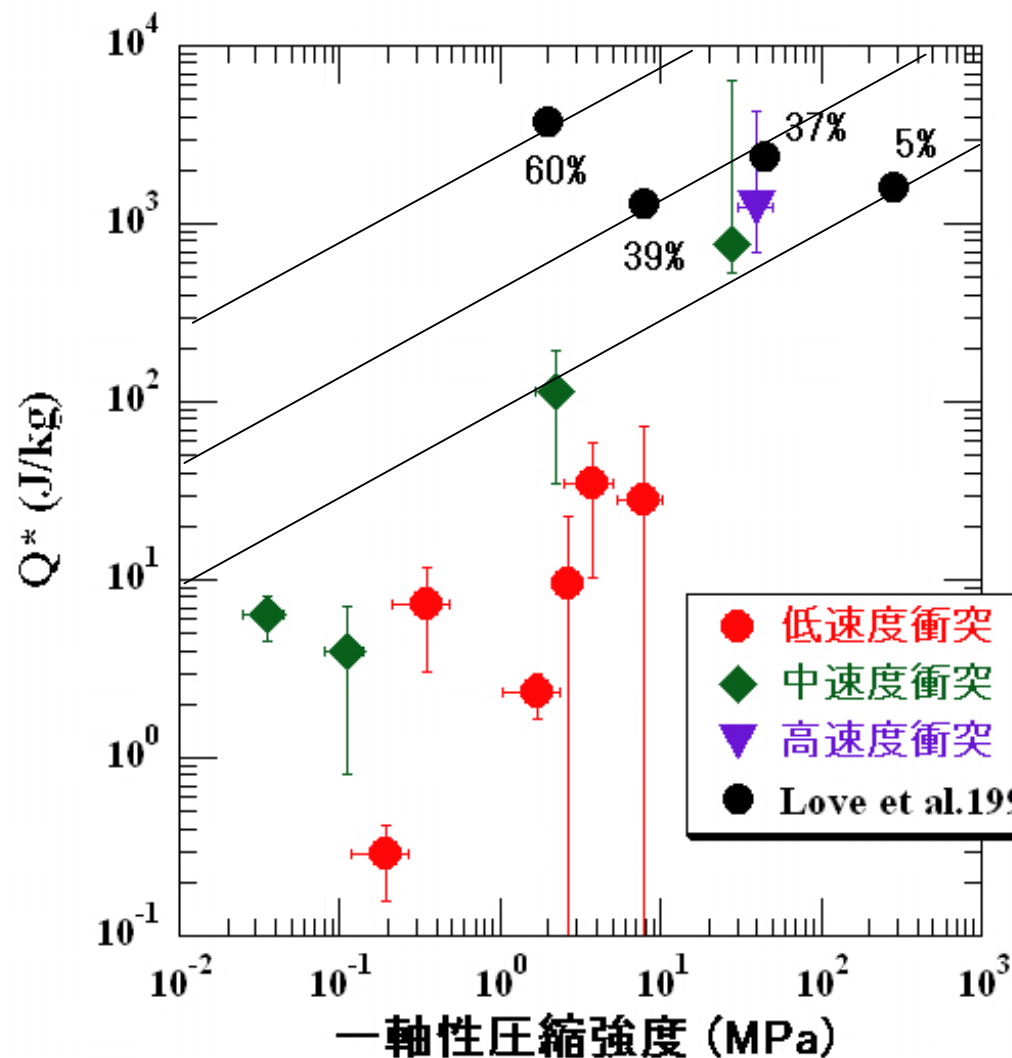
★高速度衝突破壊実験

Projectiles : ナイロン球 質量 $m = 0.21\text{g}$ 直径 = 7mm

衝突速度 : $v = 2120 \sim 3280\text{m/s}$

Targets : Group 2 (ガラスビーズ焼結体・球) 直径 = 60mm

全ての実験を比較



低速実験での Q^* は
圧縮強度のほぼ1乗に比例

空隙率40%

空隙率9%

ガラスビーズを様々な条件で焼結させた模擬天体に、
3種類の速度領域で衝突破壊実験を行った。

衝突破壊強度 (Q^*) は圧縮強度の**1乗に比例した**。
(Love et al.1993では**0.45乗**を用いている)

速度条件の異なる実験では、
衝突破壊強度の**絶対値が異なった**。



異なる速度条件のもとでも成立するスケージングが必要

Mizutani et al. 1990

無次元衝突応力 (PI)

$$PI = (L_p / L_t)^b (P_0 / Y)$$

L_p : プロジェクトイルサイズ

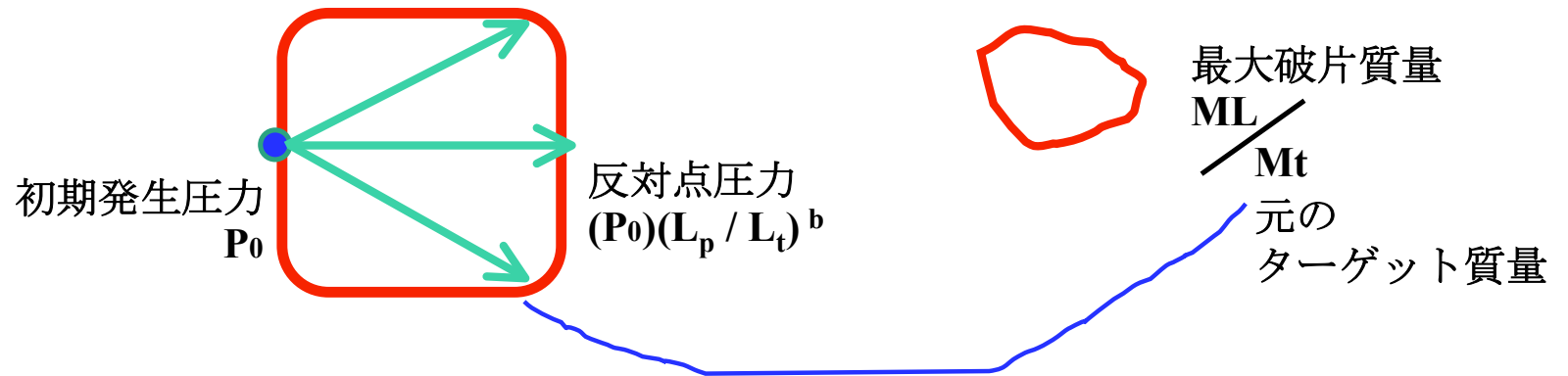
L_t : ターゲットサイズ

P_0 : 初期発生圧力

Y : ターゲット強度

b : 圧力減衰率

衝突の反対側に伝わる圧力を求め、ターゲットの強度との比をとって、最大破片との関係と比較する。



密な物質（玄武岩やパイロフィライト）では、PIスケールリングがうまくいっている (Takagi et al.1984)

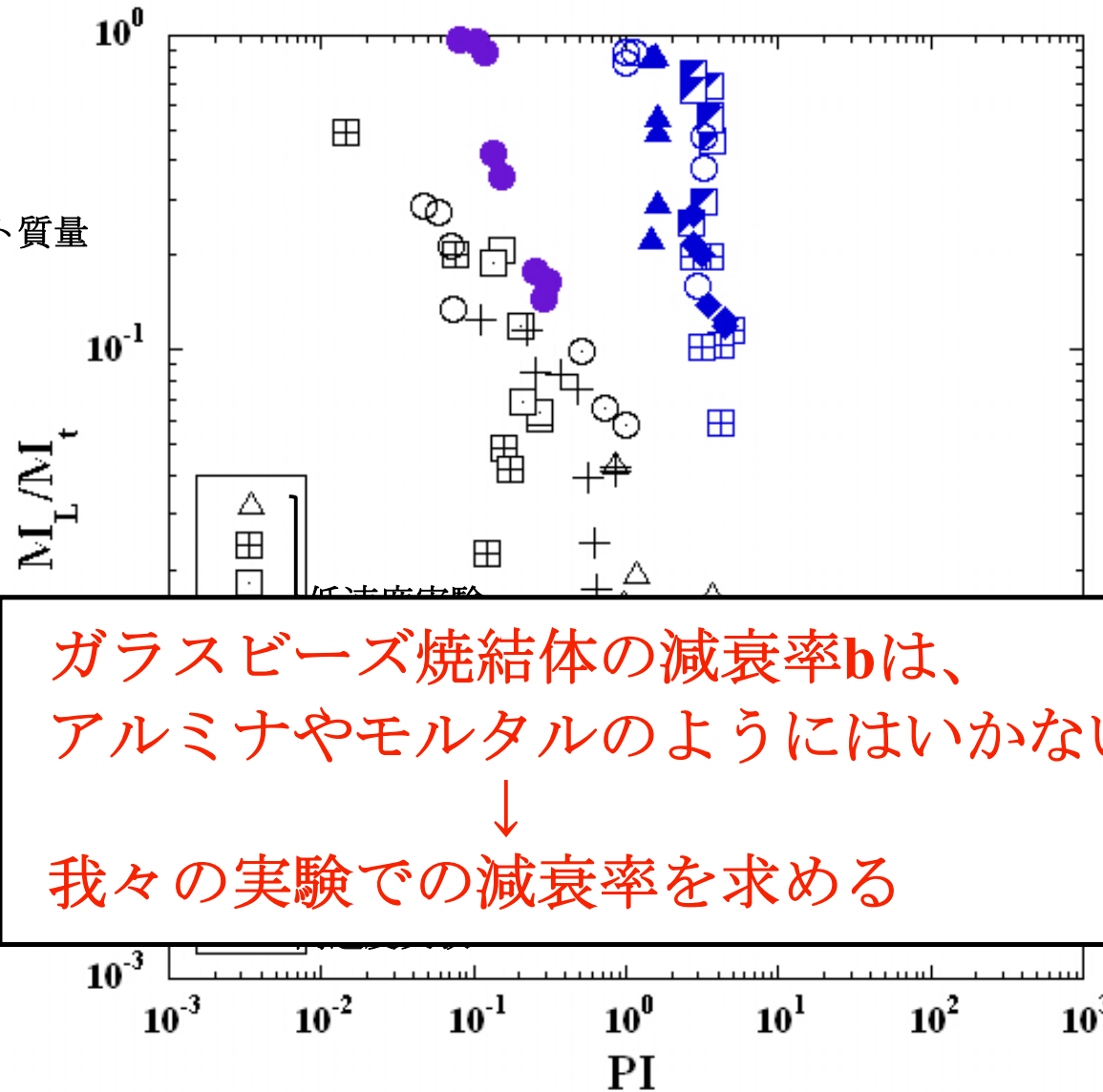
⇒多孔質物質ではどうか？

減衰率“b”に関する過去の研究

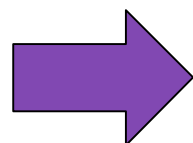
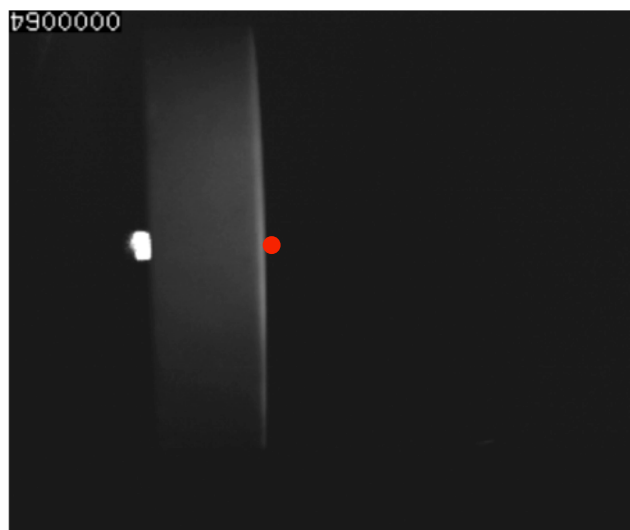
- 玄武岩に対する衝突実験 (Nakazawa et al. 2002)
速度：0.7–2.7 km/s (圧力ゲージで直接測定)
圧力減衰率：1.7~1.8
- 多孔質ターゲット (砂、モルタル、アルミナ)
(Yanagisawa and Itoi, 1994)
速度：3.7–7.3 km/s
圧力減衰率：およそ3 (alumina, mortar)、3< (砂)
68%, 27% 39%

減衰率-3乗と仮定して、PIスケーリング

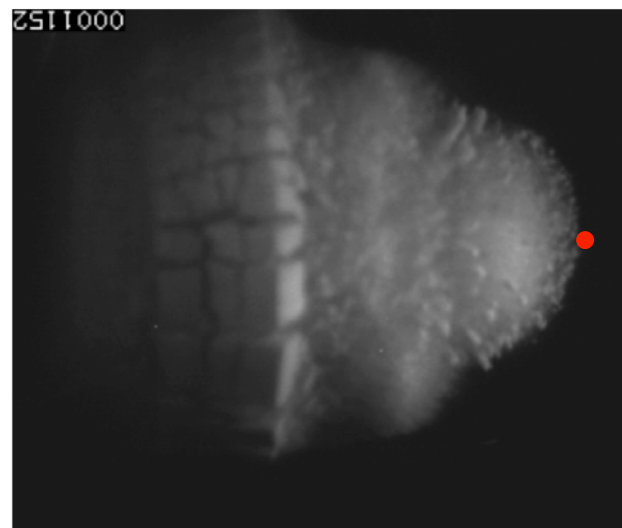
ML : 最大破片質量
Mt : 元のターゲット質量



円盤型ターゲットを用いた衝突実験で反対点破片速度を求める



1.09ms後



標的厚み
約26mm

• 反対点

$$P = \rho_t (C_t + S_t u_t) u_t$$

P : 圧力 ρ_t : ターゲット密度 C_t : ターゲット内の音速

S_t : 物質固有の値 u_t : 粒子速度

破片速度 = 2 × 粒子速度

粒子速度の減衰率を測れば、圧力の減衰率が求まる

★実験条件

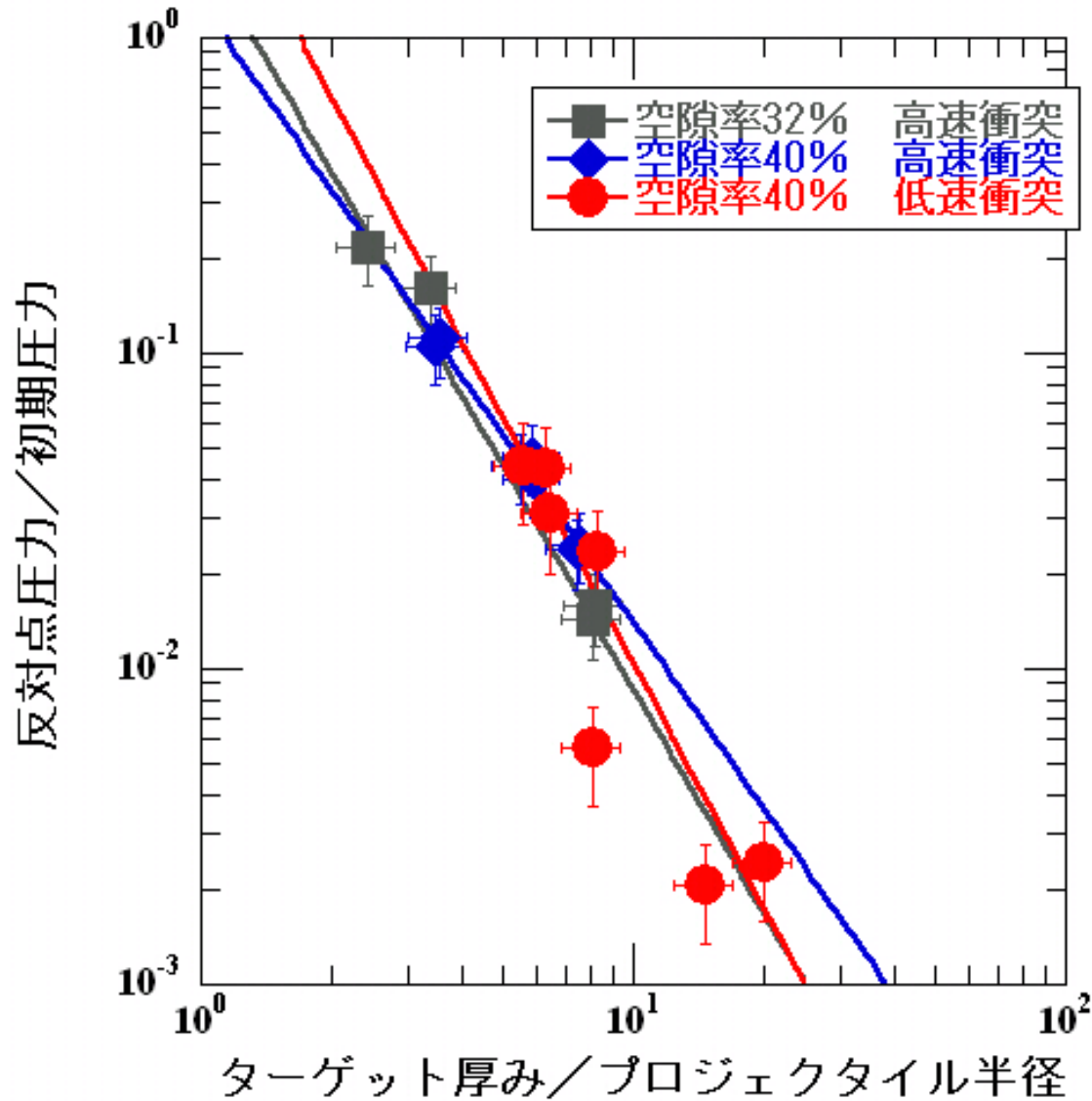
| | 実験回数 | 弾丸直径 (mm) | 弾丸質量 (g) | 標的厚み (mm) | 衝突速度 (m/s) | 圧縮強度 (MPa) | 空隙率 (%) |
|--------|------|-----------|----------|-------------|------------|------------|---------|
| 実験 I | 7発 | 3.2 | 0.04 | 10.0 ~ 32.1 | 190~ 270 | 2 | 37 ~ 41 |
| 実験 II | 7発 | 7 | 0.21 | 9.4 ~ 28.3 | 1700~ 2080 | 7 | 39 ~ 41 |
| 実験 III | 4発 | 7 | 0.21 | 8.5 ~ 28.5 | 1900~ 3390 | 41 | 30 ~ 32 |

それぞれの実験を、標的の厚みを変えながら行った。



0000000

衝突点からの距離と圧力減衰率



粒子速度の実測値から
圧力を計算で求め、
距離に対する減衰率を調べ
た。

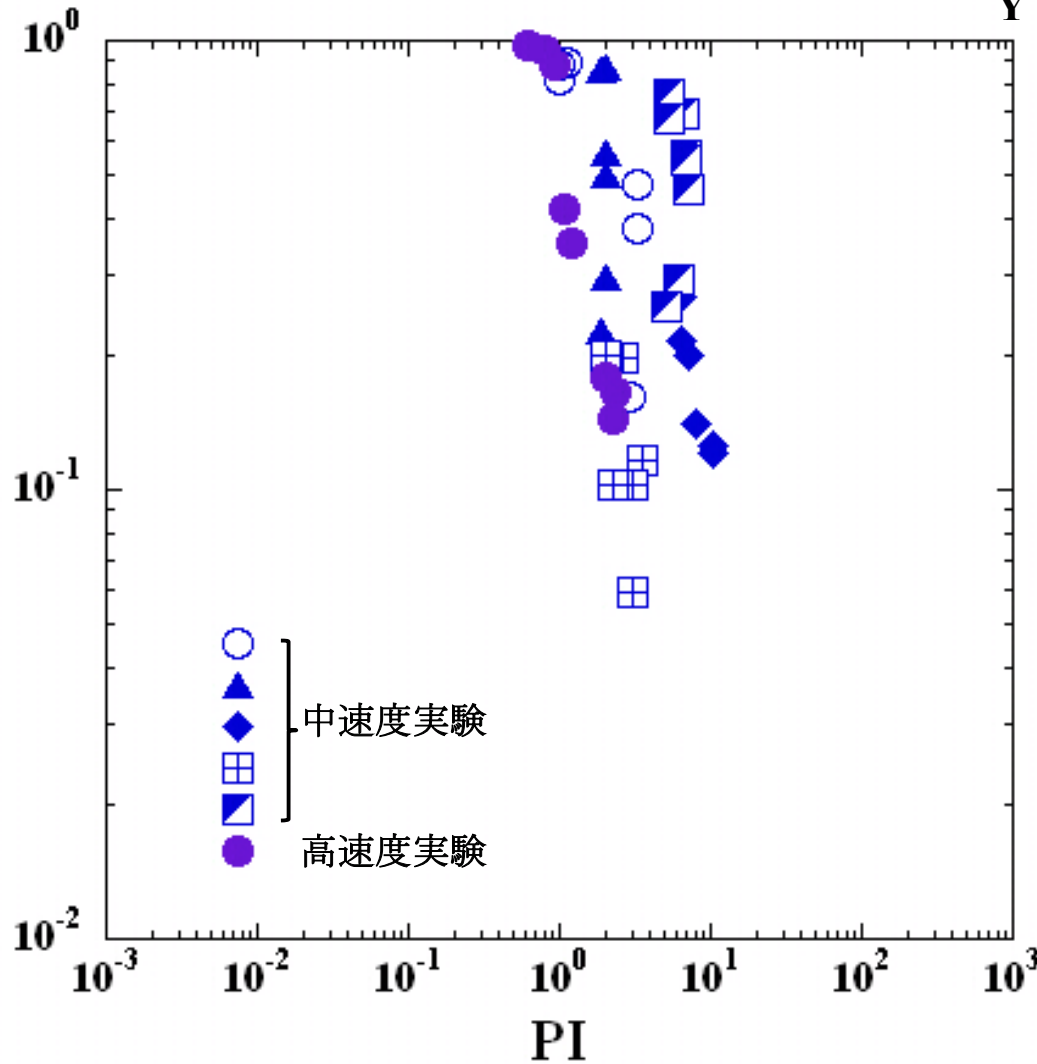
- -2.56 ± 0.52
- ◆ -1.96 ± 0.10
- -2.35 ± 0.24

無次元衝突応力 (PI)

$$PI = (L_p / L_t)^b (P_0 / Y)$$

L_p : プロジェクトイルサイズ
 L_t : ターゲットサイズ
 P_0 : 初期発生圧力
 Y : ターゲット強度

最大破片質量 / 元のターゲット質量



M_L : 最大破片質量
 M_t : 元のターゲット質量

減衰率はそれぞれ

中速 . . . -2.6

高速 . . . -2.0 とした。

★まとめと今後

- 多孔質焼結体の衝突圧力減衰率を測定した結果、実験条件による差は見られず、いずれも圧力は距離のおよそ2乗に比例して減衰した。
- 中・高速衝突の圧力減衰率に実験結果を用いてPIスケーリングを行った結果、全ての実験結果がスケーリングできた。
 - ⇒PIを用いることで、多孔質小天体に対してもうまくスケーリングが出来るようになるかも知れない。
- ★ガラスビーズ粉体での圧力減衰率などから、粒子の結合の有無と減衰率の関係を調べ、内部構造が衝突現象に及ぼす影響を詳細に調べて行く。