

# 焼結体への衝突クレーター実験結果の小惑星クレーターへの適用

羽倉祥雄, 中村昭子, 鈴木絢子, 三軒一義 (神戸大学)

## 概要

本研究では空隙を持つ標的に対して衝突実験を行い, Holsapple(1993) のクレータースケールリング則のパラメタがどのように決定されるかを調べた。  
更に, 得られたパラメタを用いて実際の小惑星253Mathilde のクレーターに当てはめてインパクターの大きさを見積もった。その結果, Mathildeの強度にも依るが, Mathilde 上のクレーターを形成したインパクターの直径は概ね 10m~1km であると見積もった。

## I. はじめに

衝突クレーターの直径や深さを決めるパラメタ:

- 衝突速度(U),
- インパクターの半径(a), 密度( $\delta$ ),
- 母天体の密度( $\rho$ ), 強度(Y), 重力加速度(g),

Y と g の両方の項が入った**統合スケールリング則** (Holsapple, 1993) は以下のよう  
に書かれる。

$$\pi_v = K_1 \left\{ \pi_2 \left( \frac{\rho}{\delta} \right)^{\frac{(6v-2-\mu)}{3\mu}} + \left[ K_2 \pi_3 \left( \frac{\rho}{\delta} \right)^{\frac{(6v-2)}{3\mu}} \right]^{\frac{2+\mu}{2}} \right\}^{-\frac{3\mu}{2+\mu}}$$

$\pi_v$ : クレーターとインパクターの質量比  
 $V$ : クレーターの体積  
 $m$ : インパクターの質量  
 $\mu, v$ : 物質固有の定数  
 $K_1, K_2$ : 未知の数  
 $\pi_v = \frac{\rho V}{m} \quad \pi_2 = \frac{ga}{U^2} \quad \pi_3 = \frac{Y}{\rho U^2}$

$\pi_2$ が支配的 ~ 重力支配域  
 $\pi_3$ が支配的 ~ 強度支配域

$\mu, v$ : Dry / Wet soil, Soft / Hard rock など空隙のない物質については求められている。

### 本研究の目的:

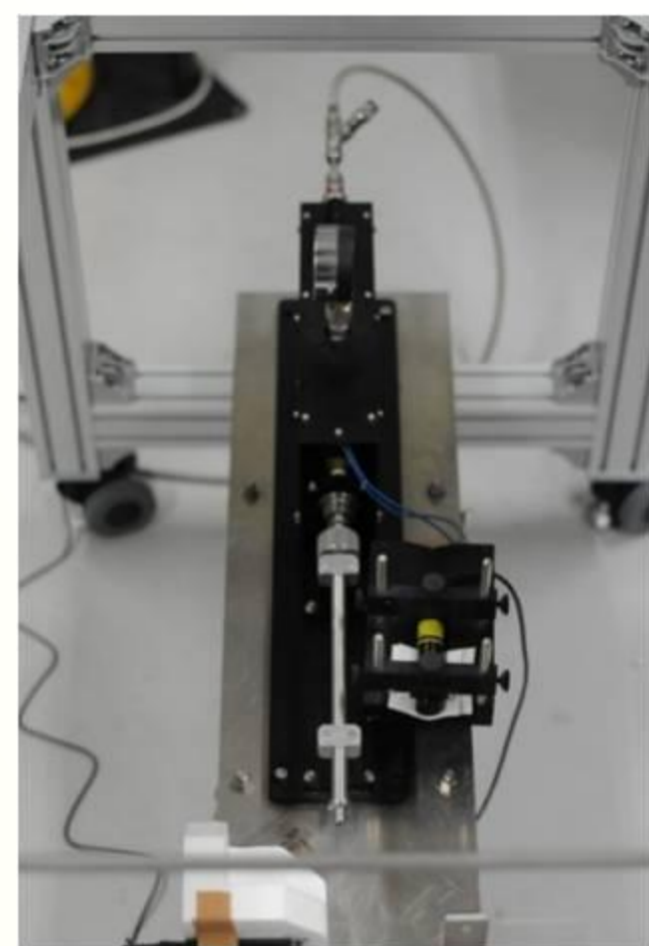
空隙を持った標的を用いて  $\mu, v, K_1, K_2$  の値を実験的に求める。

空隙率 40(±2)%の粉体及び焼結体標的に対して  
衝突クレーター形成実験を行った。

## II. 実験

### ○ 実験条件

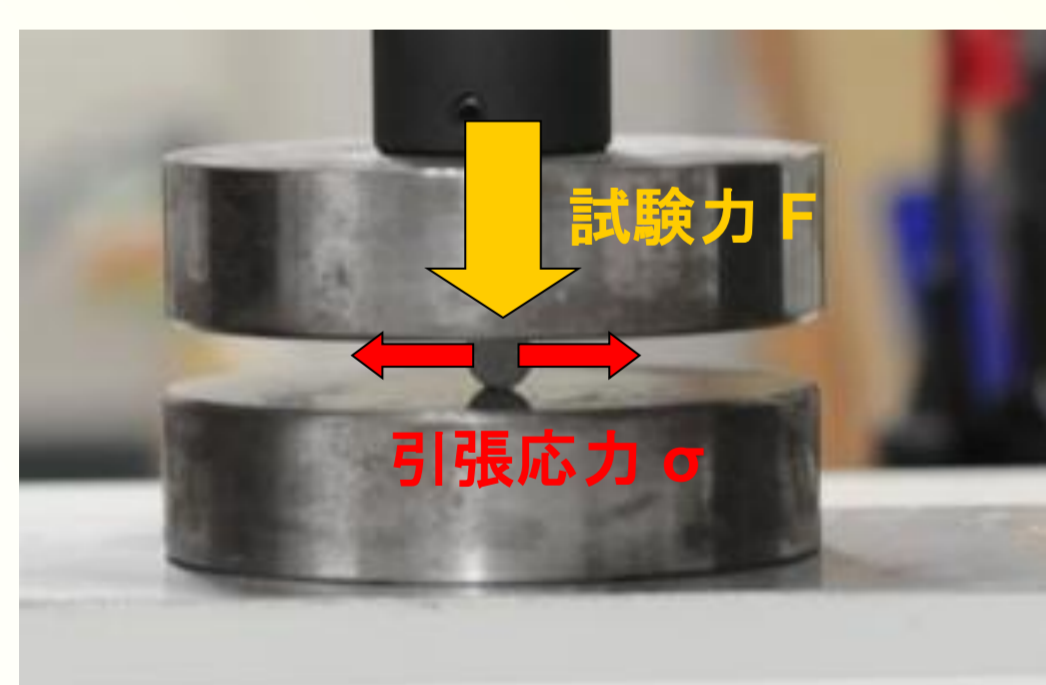
- 銃:**  
- 小型ガス銃 (神戸大 右写真)
- 速度:**  
- 240 (±17) m/s
- 弾丸:**  
- 直径 1/8 inch, 質量 0.042 g, ソーダガラス球
- 標的:** (強度のみ異なるものを5種類—空隙率はどれも40(±2)%)  
- 粒径 50  $\mu$ m ガラスビーズ粉体  
- 同粉体の焼結体 (4種類)  
(560°C, 580°C, 600°C, 630°C: 焼結時間 4 時間)  
直径 10 cm, 高さ 6 cm 円柱形



### ○ 標的強度

#### ガラスビーズ焼結体

- ブラジリアンテストにより引張強度を測定 (⇒ 剪断強度に変換)



引張強度  $\sigma = \frac{2F}{\pi dh}$

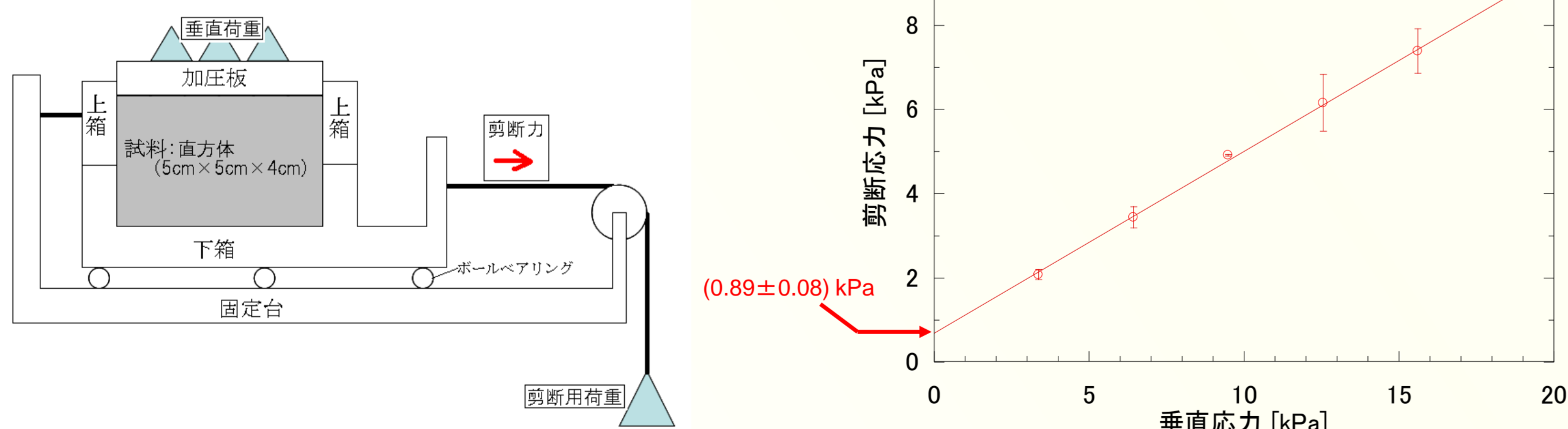
引張強度 ⇒ 剪断強度  
1.75 ± 0.086 倍  
(Hiraoka (2008))

### 粉体

- 自作の装置を以て剪断強度を測定

異なる垂直荷重毎の剪断力を測定。右のグラフはその剪断力と垂直荷重の関係を示したもの。グラフ中の y 切片(剪断荷重0)がその物質の剪断強度を表す。

剪断強度測定器 概略図



各標的の剪断強度

焼結温度 / 焼結時間	630°C/4h	600°C/4h	580°C/4h	560°C/4h	粒径50 $\mu$ m 粉体
剪断強度 [kPa]	841 ± 240	102 ± 13	66 ± 5.6	11.3 (上限値)	0.89 ± 0.08

## V. まとめ

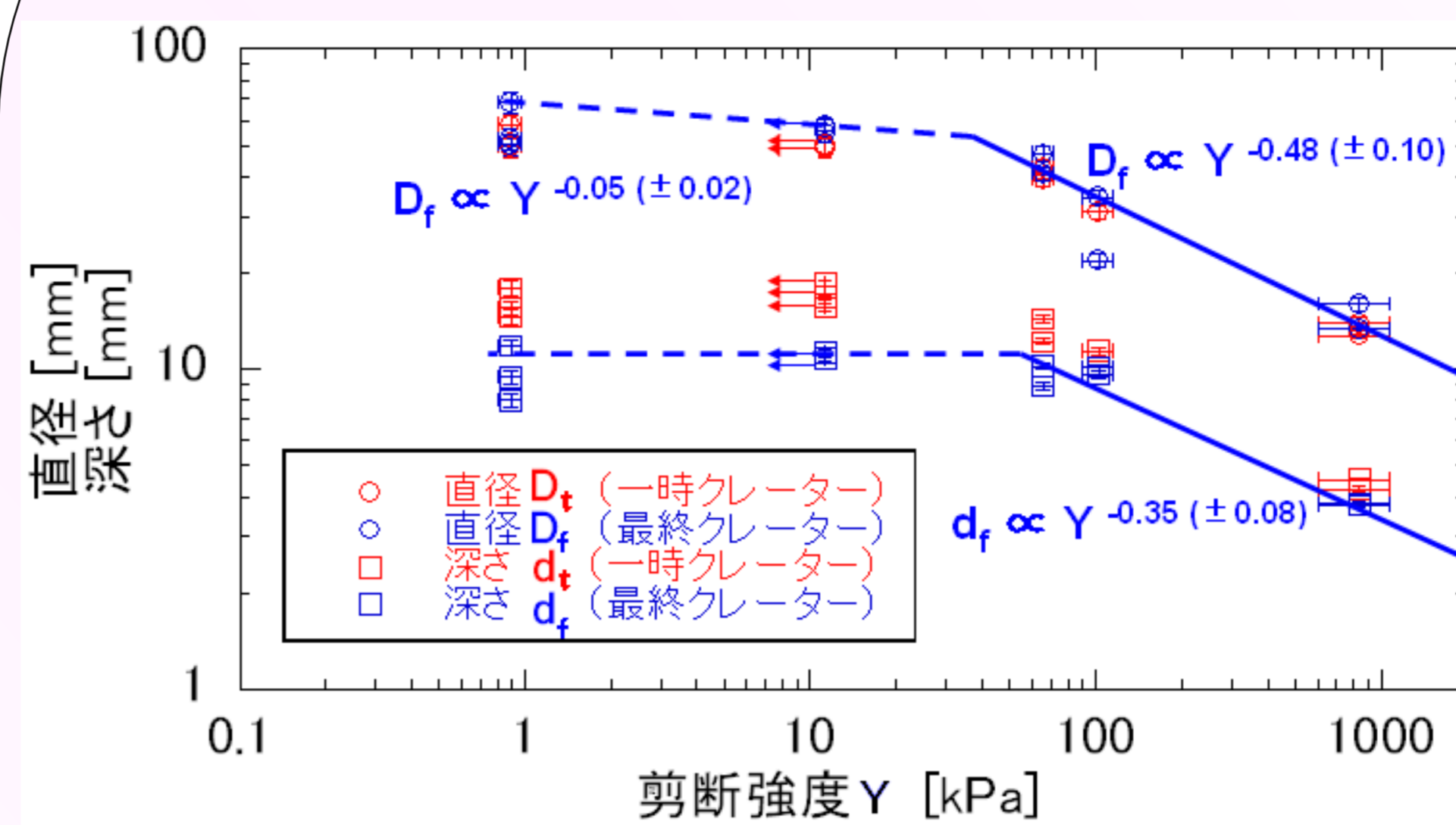
- 本研究では, 空隙を持った標的に対して衝突実験を行い, Holsapple(1993) のスケールリング則への fitting を行った。
- 本研究で決定したパラメタを用いて, スケールリング則を小惑星253Mathilde のクレーターに適用すると, 各クレーターを形成したインパクターは強度毎に異なり, 以下の表のようになると考えられる。

母天体の引張強度 [MPa]	0.3	3	30
インパクターの直径 [m]	6.5 ~ 1050	15 ~ 1100	40 ~ 1650

- 253Mathilde のクレーターを形成したインパクターのサイズ分布のべきは, 強度を 0.3~3 MPa の間とすると, メインベルト小惑星のサイズ分布のべきに一致する。

## III. 実験結果

### ○ クレーターの直径, 深さと強度の関係



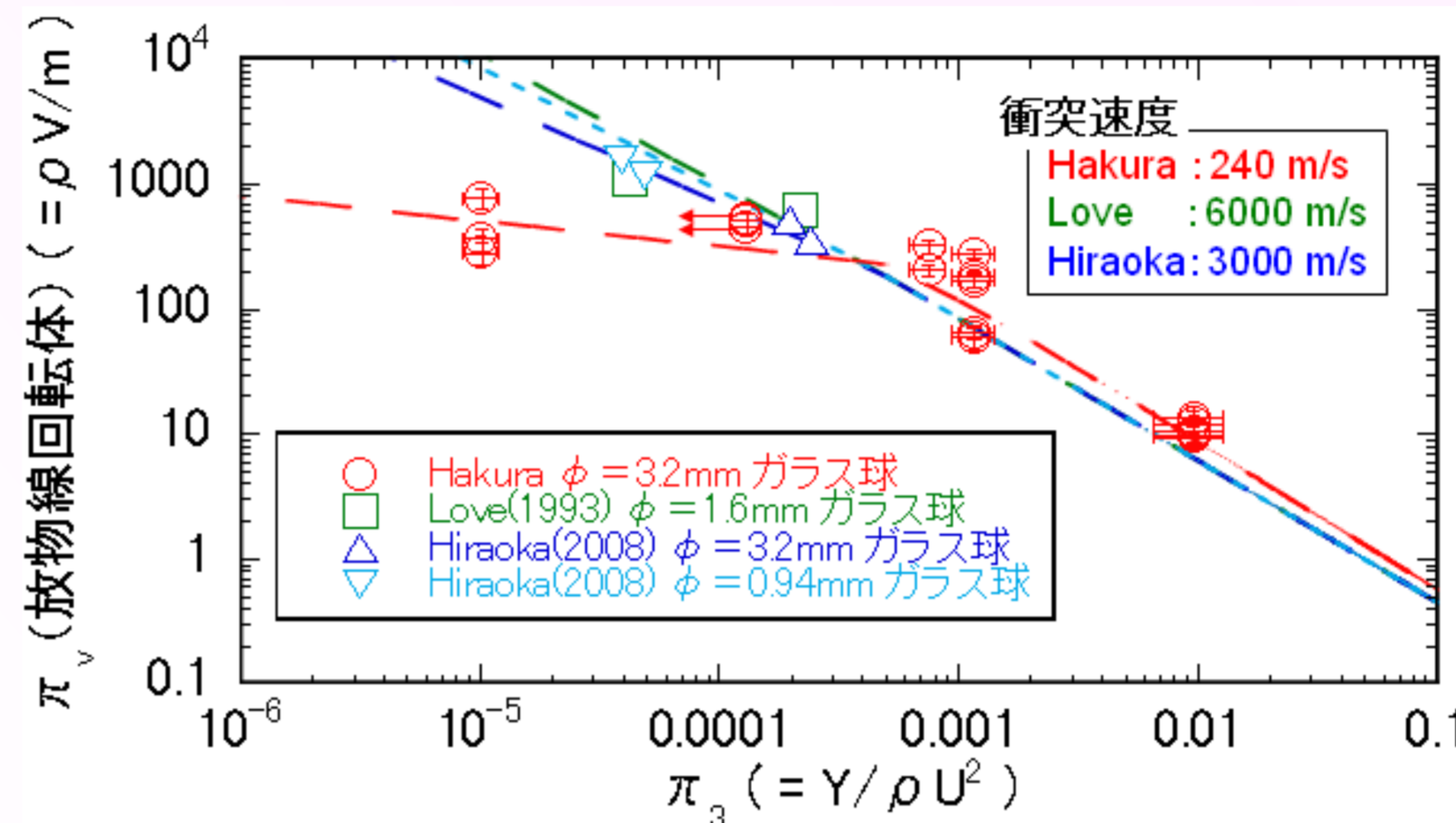
- 一時クレーターと最終クレーター  
Y ~ 10 kPa 以下では両者の差が大きい。

- 直径  
D<sub>t</sub>, D<sub>f</sub> に共に剪断強度の増加に従って減少するが, その減少度合いは Y ~ 25 kPa で大きく変化する。

- 深さ  
Y ~ 50 kPa 以下の領域ではばらつきで変化せず, それ以上の領域ではほぼ一様に減少する。

### ○ 統合スケールリングでの fitting

実験で得られたクレーターのサイズを用い, Holsapple(1993) のスケールリング則に fitting することによって以下の結果が得られた。



$\mu, v, K_1, K_2$  の値  
 $\mu: 0.85 (\pm 0.10)$   
 $v: -0.060 (\pm 0.165)$   
 $K_1: 0.0011$   
 $K_2: 0.032$

- これらの値を代入すると統合スケールリング則は左下のよう書ける。

(なお, 式中の  $\rho/\delta$  は式を見易くするためにそのまま表記したが, 本研究及び同載の先行研究では全て 0.6 の値を取る)

$$\pi_v = 0.0011 \left\{ \pi_2 \left( \frac{\rho}{\delta} \right)^{-1.26} + \left[ 0.032 \pi_3 \left( \frac{\rho}{\delta} \right)^{-0.92} \right]^{1.43} \right\}^{-0.89}$$

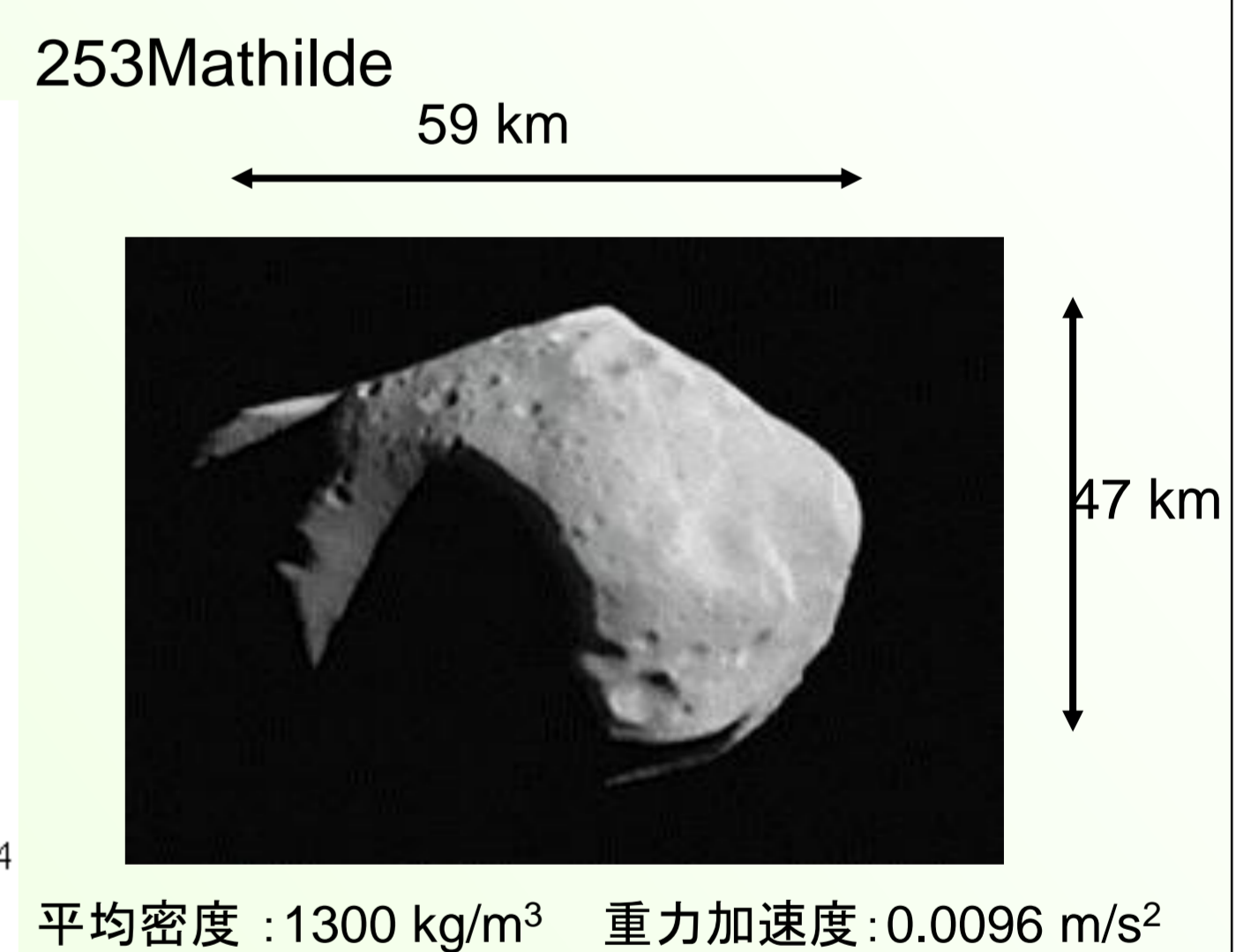
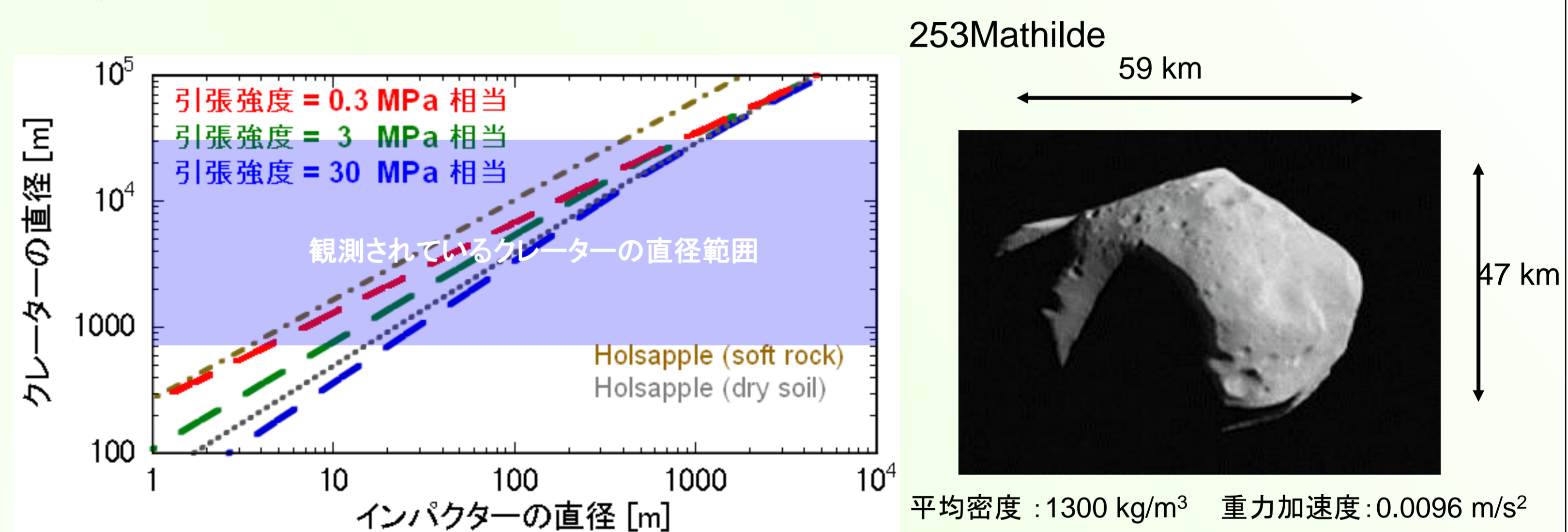
- 同載の先行研究は本研究のものと同衝突速度(U)と弾丸半径(a)のみ異なるものである。
- 本研究で得られた  $\mu, v, K_1, K_2$  の値は先行研究のものに適用しても矛盾はなかった。

## IV. 小惑星クレーターへの適用

得られたスケールリング則を用いることにより, 小惑星上で観測されているクレーターを形成したインパクターのサイズを推測する。

今回, 253Mathilde 上のクレーターを形成したインパクターのサイズを見積もった。

- 253Mathilde の強度は, 炭素質コンドライトの引張強度が 0.3~30 MPa である (Tsuchiyama et al, 2009) ことから, その範囲で 3点—0.3, 3, 30 MPa—をピックアップした。
- 衝突速度は 6.07 km/s (Davis, 1999), インパクターの密度は母天体と等しい 1300 kg/m<sup>3</sup> と仮定した。



- 従来の Holsapple のスケールリングパラメタとは異なる結果が得られた。

- 強度の違いによるべきの変化が著しい。  
- どの強度のラインも緩やかに折れ曲がり(インパクターの直径 100~1000 m 辺り), クレーターの小さい領域では大きかった強度間のインパクターの直径の差が, クレーターが大きくなるにつれて次第になくなっていく。

次いで, クレーターサイズの個数分布 (O'Brien et al, 2005) から, 本研究で得られたスケールリング則を用いてインパクターの個数分布に変換した。

- 母天体の強度が大きいほど, べきの絶対値が大きくなる。そのべきの値を計算すると以下のようになる。

引張強度 [MPa]	0.3	3	30
べきの値	-1.22 ± 0.09	-1.42 ± 0.12	-1.65 ± 0.12

なお, 0.5~2 km の小惑星のサイズ分布のべきは -1.30 ± 0.05 であり (Terai et al, 2007), 今回得られたべきの値はその範囲を含んでいる。

