

衝突破壊強度の標的サイズ効果

高沢 晋、中村 昭子、三軒 一義（神戸大）

1. 衝突破壊強度 Q^*

衝突カスケードが起こったときのデブリ円盤内の天体のサイズ分布を

$$n(m) dm \propto m^{-\alpha} dm \quad (m: \text{天体質量}) \quad (1)$$

とおくと、そのサイズ分布のべき α は

$$\alpha = \frac{11 + 3p}{6 + 3p} \quad (2)$$

と書けるとされている (Kobayashi and Tanaka, 2010)。

ここで p は衝突破壊強度 Q^* のサイズ依存性のべきである。

$$Q^* \propto m^p \quad (3)$$

Q^* のサイズ依存性は過去にシミュレーションで主に調べられている (図 1)。それによると、標的サイズの小さい強度支配域では標的サイズが小さくなるにつれて衝突破壊強度 Q^* は大きくなっており、このことは実際に衝突実験によっても確かめられている (Housen and Holsapple, 1999)。しかし、実験によって確かめられたのは cm サイズの標的までで、この傾向がそれ以下のサイズにまでそのまま外挿できるかどうかは明らかではない。本研究は、cm ~ mm サイズの標的を用いた衝突破壊実験を行い、衝突破壊強度 Q^* の標的サイズ依存性をより小さなスケールにまで外挿することができるのかどうかを確かめ、デブリ円盤での塵のサイズ分布を推測することを目的としている。

2. 衝突破壊実験

実験は標的サイズの違いによって大きく①~③に分けられる。弾丸一標的質量比 (M_P/M_T) と衝突速度 (V_i) が同じくらいの領域で実験することにより、標的サイズの変化による Q^* の違いを検証できる (表 1)。標的にはパイロフィライトの立方体を用い、弾丸には直径 15mm、高さ 20mm のアルミニウム円柱 (実験①) や直径 3.2mm のガラス球 (実験②)、直径 1mm のアルミニウム球 (実験③) を使用している。実験①は火薬銃 (神戸大)、実験②③は小型軽ガス銃 (神戸大) を使用している。

表 1. 実験条件

	平均標的サイズ [mm]	M_P / M_T	V_i [m/s]
実験①	32.8	0.04 ~ 0.5	170 ~ 390
実験②	4.4	0.04 ~ 0.7	240
実験③	1.6	0.04 ~ 0.5	210

3. 結果

エネルギー密度 Q と最大破片質量割合 m_L/M_T をプロットしたのが図 2。これを見ると、標的サイズが小さくなるにつれて衝突破壊強度 Q^* ($m_L/M_T = 0.5$ となるとき) は増していくことがわかる。また、cm サイズのパイロフィライトを標的に用いた過去の衝突破壊実験 (Takagi et al., 1985) の結果と本研究の実験①の結果はほぼ一致している。Takagi et al., 1984 と本研究とは M_P/M_T 比も V_i も違う。このことから、衝突破壊強度 Q^* は標的サイズに大きく依存すると言える。そして衝突破壊強度 Q^* は標的サイズに対して、ある一定のべき (-0.506) で変化することがわかり、衝突破壊強度 Q^* のサイズ依存性は約 1mm くらいまでは外挿できそうである。このべきの値を用いると、式(3)より衝突カスケードが起こったときのデブリ円盤内の天体のサイズ分布は、

$$n(a) da \propto a^{-3.73} da \quad (a: \text{天体サイズ})$$

となる。この値は Tanaka et al., 1996 で見積もられた、破壊過程がサイズに依存しない、すなわち $p = 0$ のときよりも少し傾きが急である。

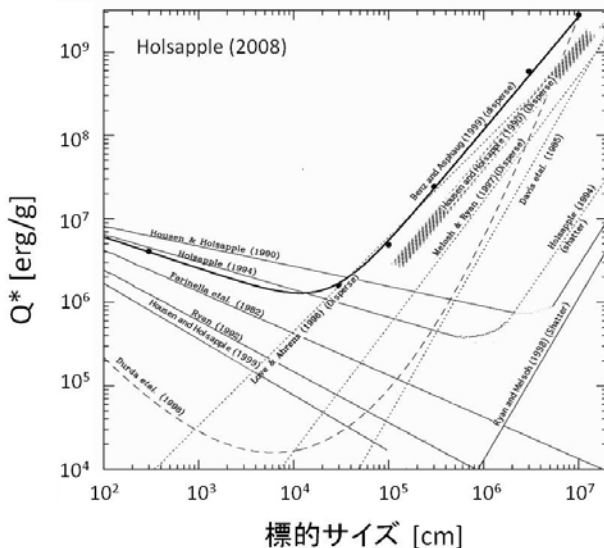


図 1. 衝突破壊強度 Q^* と標的サイズの関係

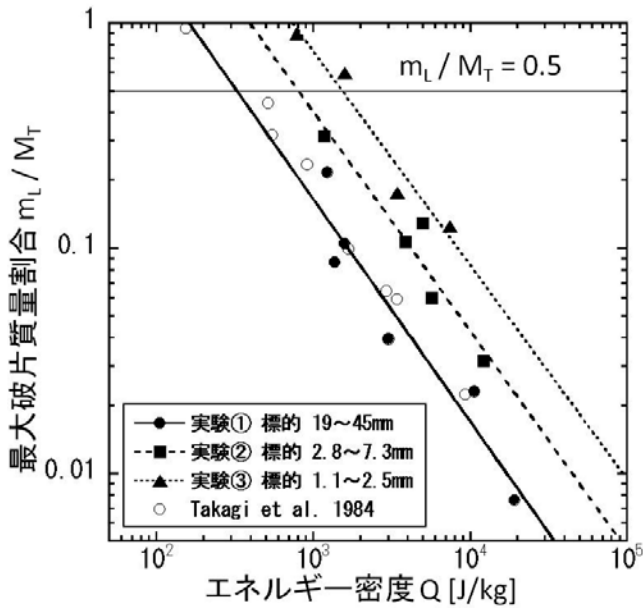


図 2. エネルギー密度 Q と最大破片質量割合 m_L/M_T

4. ワイブルパラメーター ϕ

衝突破壊強度 Q^* が標的サイズによって変化する原因を調べるため、ワイブル(1939)分布を考える。

応力 σ 以下で成長し始めるひびの数密度 n を

$$n(<\sigma) = k\sigma^\phi \quad (4)$$

とする。 k は定数、 ϕ はワイブルパラメーターである。

すると、ランダムに選んだ体積 V の中に σ 以下で成長し始めるひびを含む確率 P は

$$P = 1 - \exp\left[-(\sigma/\sigma_0)^\phi\right] \quad (5)$$

σ_0 は特性強度という引っ張り強度の平均値に相当するものであり、以下のように書ける

$$\sigma_0 = (kV)^{-1/\phi} \quad (6)$$

式(6)より、ワイブルパラメーター ϕ を求めれば引っ張り強度のサイズ依存性がわかる。

5. 圧裂引っ張り試験

圧裂引っ張り試験によってパイロフィライトのワイブルパラメーター ϕ を求める(Nakamura et al., 2007)。直径 $d = 10 \text{ mm}$ 、高さ $l = 5 \text{ mm}$ のパイロフィライト 17 個に対してそれぞれ引っ張り強度 σ を次式によって求めた

$$\sigma = \frac{2S}{\pi dl} \quad (S: \text{試験力}) \quad (7)$$

その結果を横軸 σ 、縦軸 P のグラフにプロットし、式(5)でフィッティングしたのが図 3。これにより、ワイブルパラメーター $\phi = 10.9$ となり、引っ張り強度のサイズ依存性は次のように求まる

$$\sigma_0 \propto V^{-1/\phi} \propto L_T^{-0.275} \quad (L_T: \text{標的サイズ})$$

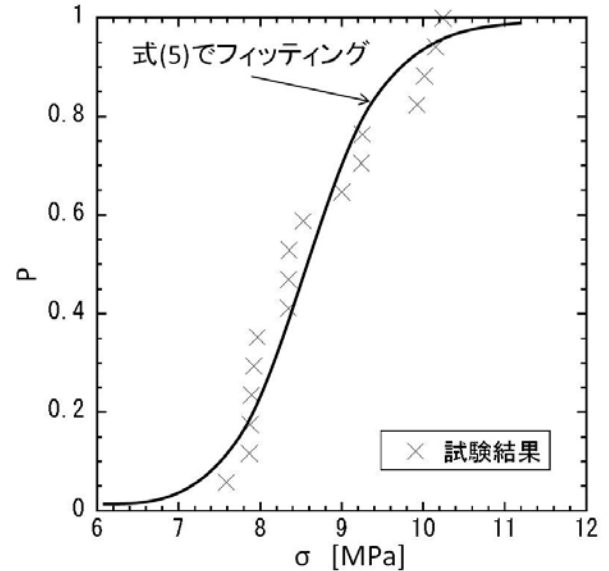


図 3. 圧裂引っ張り試験の結果

6. 衝突破壊強度と引っ張り強度のサイズ依存性

標的サイズに対する衝突破壊強度 Q^* のべき (-0.506) と引っ張り強度のべき (-0.275) は違うため、衝突破壊強度 Q^* のサイズ依存性を、ワイブルパラメーター ϕ による引っ張り強度のサイズ依存性で単純に説明することはできなかった。しかし、このような 2 つのべきの違いは、Housen and Holsapple (1999) でも同じように見られている。衝突破壊強度 Q^* と引っ張り強度は何かしらの相関があるように見える。

[参考文献]

- Housen, K. R. & Holsapple, K. A., 1999, *Icarus*, 142, 21
 Kobayashi, H. & Tanaka, H., 2010, *Icarus*, 206, 735
 Nakamura, A. M., Michel, P., & Setoh, M., 2007, *J. Geophys. Res.*, 112, E02001
 Takagi, Y., Mizutani, H., & Kawakami, S., 1984, *Icarus*, 59, 462
 Tanaka, H., Inaba, S., & Nakazawa, K., 1996, *Icarus*, 123, 450