

# 石膏球の衝突破壊実験：複数回衝突が衝突破壊条件に与える影響

保井みなみ（神戸大学大学院理学研究科）

**はじめに：**太陽系の天体はその進化過程において、他天体との衝突を多数回にわたり経験したと考えられている。そのため、天体表面下または内部にわたり、多数のクラックが存在すると思われる。事前衝突を受けた天体の衝突破壊強度は、事前衝突を経験していない天体と比べて小さくなるため、その後の衝突進化に大きな変化をもたらすと考えられる。本研究ではこれまで、多結晶氷の複数回衝突破壊実験を行い、氷天体の衝突破壊条件に対する事前衝突の影響を明らかにした (1)。特に、元の標的質量で規格化した最大破片質量は 1 個の標的に与えられたエネルギー密度の積算値で決まり、そこから推定される衝突破壊強度  $\Sigma Q^*$  は 77.6J/kg となり、1 回衝突の衝突破壊強度とほぼ一致することがわかった (2)。

今回は、対象天体を岩石微惑星、小惑星とする。これらの天体は多孔質であると考えられているため、模擬物質として石膏を用いて複数回衝突破壊実験を行い、衝突破壊条件に対する複数回衝突の影響を調べた。特に今回は、標的の破壊に対して衝突回数、衝突面、衝突速度の依存性を定量的に明らかにすることを目的とした。

**実験方法：**衝突速度範囲を変化させるため、200m/s 以下の低速度と 3.3km/s の高速度の実験を行った。速度領域の違いで、標的サイズ、弾丸の種類を変えている。標的は空隙率 51~58% の石膏球を用いた。直径は 7cm (低速度) または 12cm (高速度) である。弾丸は、低速度では標的と同じ石膏球を用いた。空隙率は 53~57%、直径は 2.5cm である。高速度では直径 4.7mm のポリカーボネイト球を用いた。

衝突実験は、神戸大学に設置された横型一段式 He ガス銃 (低速度) 及び横型二段式水素ガス銃 (高速度) を用いて行った。低速度では衝突速度を 71~167m/s とした。また、衝突の様子は高速度カメラで撮影した。撮影速度は 4,000~200,000fps、露出時間 3~50 $\mu$ s とした。

**実験条件：**今回は 1 個の標的に与える各衝突回のエネルギー密度  $Q_j$  ( $j$  は衝突回) は同じにし、 $Q_j$  の大きさを変えることで衝突回数を変化させた。また衝突面は毎回異なる面に衝突させるか、毎回同じ面に衝突させるかの 2 パターンとした。

今回の実験では、特に低速度で標的と弾丸の質量比が無視できない大きさであるため、重心系のエネルギー密度を用いた。定義は以下に示される。

$$Q_j = \frac{1}{2} \mu V_i^2, \quad \mu = \frac{m_p M_t}{m_p + M_t}$$

$m_p$  は弾丸質量、 $M_t$  は標的質量、 $V_i$  は衝突速度である。

## 実験結果：

### ① 衝突回数が異なる場合

低速度で異なる面衝突のみを考える。衝突回数 ( $Q_j$  が異なる) が異なる場合、最大破片質量と細粒破片個数は共に、積算エネルギー密度で決まることが分かった。細粒破片個数が積算エネルギー密度で決まる結果は、氷とは異なる (1)。これは、細粒破片が発生する場所が異なるからと推測した。つまり、氷の場合は衝突点付近で発生し、石膏の場合は標的内部から発生すると考えた。

また、 $Q_j$  が 100J/kg 以下になると、標的が破壊するまでに必要な衝突回数が、予想 (1 回衝突の衝突破壊強度と複数回衝突の積算エネルギー密度が一致すると破壊すると仮定し、衝突回数を予想) よりかなり多くなることがわかった。その結果を図 1 に示す。本研究の 1 回衝突または 2 回衝突は先行研究とほぼ一致しているが、15 回衝突だけは元の半分以下になるまでの回数がかかなり多く、最終の最大破片質量は先行研究より大きくなることがわかった。これは最初の数回は標的表面が圧密されるのみで、標的内部にクラックが生成されず、衝突破壊にほとんど影響を与えていないためと考えられる。そこで最後の 5 回の衝突のみを考慮した結果 (緑の◇)、先行研究とほぼ一致した。

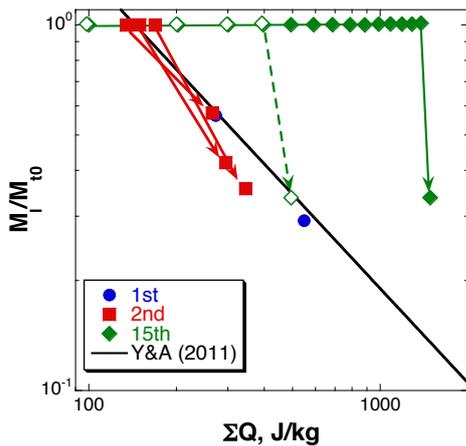


図 1：積算エネルギー密度と最大破片質量（最初の標的質量で規格化）の関係。色の違いは衝突回数の違いだが、緑の◇は最後の 5 回の衝突のみを考慮した 15 回衝突（緑の◆）の結果である。Y&A (2011) は 60~180m/s の石膏の 1 回衝突の先行結果 (3) を示す。

### ② 衝突面が異なる場合

低速度で異なる面衝突と同一面衝突を比較した結果、 $Q_j$ の大きさが結果が 2 パターン見られた。

$Q_j$ が 130~170J/kg の場合、衝突回数 (2 回)、最大破片質量は同じだが、細粒破片個数が同一面衝突の方が少なくなった。これは標的内部のクラック数密度が少なくなり、それに伴って細粒破片の発生場所が狭くなるためと考えられる。

$Q_j$ が約 100J/kg の場合、衝突回数が同一面衝突の方が少なかった (4 回)。これは①で示唆したように、最初は標的表面の圧密が主で、クラックが発生しないために衝突破壊にほとんど影響しないのだが、同一面衝突の場合は、その破壊に影響しないと思われる回数が異なる面衝突に比べて少ないと考えた。そこで図 1 と同じく、同一面衝突の最初の 1 回のみを除いた結果、異なる面衝突と同様に先行研究と規格化最大破片質量はほぼ一致した。

### ③ 衝突速度が異なる場合

高速度での複数回衝突は、低速度とは異なる様子が見られた。衝突回数を増加させるにつれて、最大破片質量は小さくなり、細粒破片は大きくなる傾向が見られた。これは低速度とは異なり弾丸が破壊されず、弾丸が標的を貫入し、衝突点付近を掘削する

ためである。そのため、標的は小さくなり、衝突点付近からも細粒破片が発生するためと考えた。

低速度の結果と高速度の結果を比較したのが図 2 である。1 回衝突では、低速度と高速度で、同じエネルギー密度でも規格化最大破片質量が高速度の方が大きくなるのがわかってきた。これは衝撃波の減衰の違いと圧密の効果が原因と考えられている。一方、複数回衝突の場合、高速度では 1 回衝突に比べて最大破片質量が極めて小さく、更に低速度の結果の延長線上にあることがわかった。これは複数回衝突によって、1 回衝突よりは各回のエネルギー密度が小さいが、圧密の効果も小さくなり、より効率的にクラックが生成するためと考えた。以上から複数回衝突では、最大破片質量つまり衝突破壊強度に対して、衝突速度の依存性がなくなることが示唆された。今後、高速度での複数回衝突実験のデータを増やし、検討する必要がある。

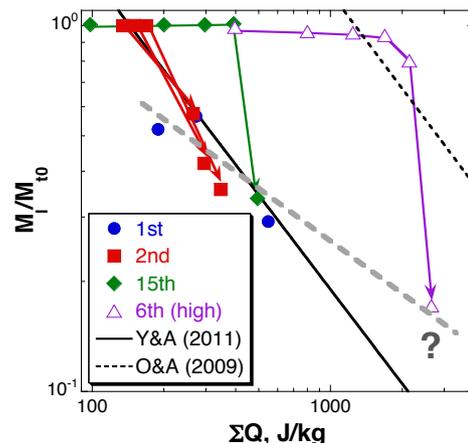


図 2：衝突速度依存性。色の違いは衝突回数の違い、黒塗りのデータは低速度域、白抜きデータは高速度の結果を示す。O&A (2009) は 3.4km/s の石膏の 1 回衝突の先行結果 (4) を示す。

### 【先行研究】

1. Yasui *et al.* (2014), *Icarus* **233**, 293-305.
2. Kato *et al.* (1995), *Icarus* **113**, 423-441.
3. Yasui & Arakawa (2011), *Icarus* **214**, 754-765.
4. Okamoto & Arakawa (2009), *Meteorit. Planet. Sci.* **44**, 1947-1954.