

# 強度支配域におけるクレーター形成過程のフラッシュ X 線を用いた可視化実験

保井みなみ<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>, 藤田幸浩<sup>3</sup>, 門野敏彦<sup>4</sup>

1. 神戸大学 2. ISAS/JAXA 3. 名古屋大学 4. 産業医科大学

## 1. はじめに

多孔質の小惑星表面に見られるクレーターは、その空隙率の影響を受けている [1]。また、小惑星の重力は非常に小さい。よって、そのような小惑星上の衝突クレーター形成過程の理解には、多孔質物質で強度支配域のクレーター形成の物理素過程を知る必要がある。本研究では、内部構造の変化に着目する。クレーター形成における内部構造の変化は、室内実験ではほとんど調べられていない。なぜなら、強度支配域におけるクレーター成長時間が数十  $\mu\text{s}$  と非常に短く、また岩石内部の観察を可視光で行うことは不可能なためである。

そこで本研究では、フラッシュ X 線を用いて、クレーター形成中の内部構造変化の可視化を試みた。そして、クレーター形成中の弾丸貫入と孔の拡大を観察し、クレーターサイズの時間変化を調べた。

## 2. 実験方法

標的には空隙率 50%の石膏を用いた。標的サイズは直径 34mm, 高さ 65mm の小標的と直径 64mm, 高さ 70mm の大標的を用意した。弾丸は、直径 1.6mm 及び 3.2mm のステンレス球 (s.s.), 直径 3.2mm のアルミニウム球 (Al) とナイロン球 (Ny) を用いた。直径 3.2mm の s.s.弾丸のみ小試料と大試料を用い、他は全て小試料とした。実験は、宇宙科学研究所の二段式水素ガス銃を使用した。衝突速度は 1.9-2.4km/s (低速), 5.6-6.4km/s (高速) とした。

フラッシュ X 線は 2 台設置した。そのため、1 回の実験で得られる画像は 2 枚である。X 線撮影のタイミングにはピエゾゲージを用い、標的前方に設置したゲージを弾丸が通過してからの経過時間を設定することで、同標的・同衝突条件で衝突からの経過時間が異なる標的内部画像を得ることに初めて成功した。

## 3. 実験結果

得られた X 線画像を時間毎に並べたものを図 1 に示す。

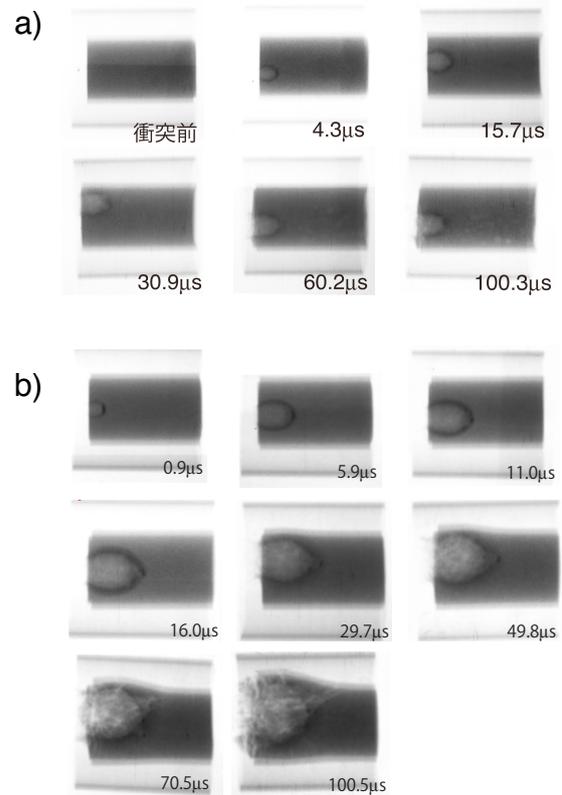


図 1 : X 線画像。 a)は半球型, b)は破壊型

弾丸の運動エネルギーが小さい場合 (400J 以下: 図 1a), 半球型のクレーターが形成され、周囲に圧密層が見られた。(半球型)。運動エネルギーが大きい場合 (850J 以上: 図 1b), 半球型クレーターの形成後に、孔先端から分裂した弾丸が飛び出してピットを形成し、最終的に試料は破壊した (破壊型)。また、両方共に弾丸が変形、分裂した。これらの X 線画像を用いて、クレーターサイズの時間変化を計測した。計測したのはクレーターの深さ  $d$  (図 2:  $D_p$  は弾丸直径), 入口直径  $D$ , クレーター内側の最大直径  $D_{\max}$  である。その結果、パラメータ全てが時間と共に増加したが、s.s.及び Al 弾丸の場合は 20 $\mu\text{s}$ , Ny 弾丸の場合は 10 $\mu\text{s}$  以内で、深さ  $d$  と最大直径  $D_{\max}$  の増加が停止することが分

かった。この時間を、クレーター成長停止時間  $t_s$  と呼ぶ。入口直径  $D$  はイジェクタの噴出、スポーリング領域の形成により増加し続けることが分かった。また破壊型の場合、ピットの成長によって深さ  $d$  が  $60\mu\text{s}$  以降に再び増加することが分かった。

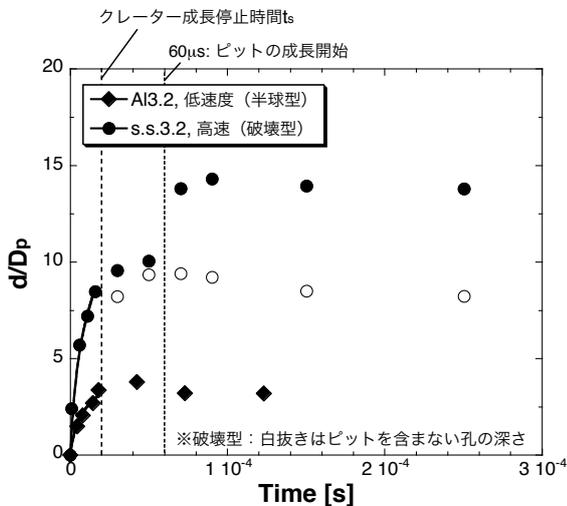


図 2: クレーター深さと時間の関係

## 4. 議論

### 4.1. 弾丸の抵抗係数 $C_d$

時間  $t$  とクレーター深さ  $d$  の関係から、弾丸の抵抗係数  $C_d$  を調べた。弾丸の減速モデルの方程式は、

$$d(t) = \ln(v_t \alpha t + 1) / \alpha, \quad (1)$$

$$\alpha = \pi C_d \rho_t r_p^2 / 2m_p, \quad (2)$$

と表され、 $v_t$  は衝突速度、 $\rho_t$  は標的の密度、 $r_p$  と  $m_p$  は弾丸半径及び質量である[2]。今回は、 $t_s$  以前 (s.s. 及び Al 弾丸は  $20\mu\text{s}$ 、Ny 弾丸は  $5\mu\text{s}$  と仮定) のデータを用いて計算した。そのモデル結果は図 2 に示している。計算の結果、 $C_d$  は 2.3-3.9 となった。 $C_d$  は弾丸形状に依存し[2]、弾丸が変形せずに貫通する場合は  $C_d$  が約 1 となることが分かっている[3]。従って、変形や分裂による弾丸の形状変化によって  $C_d$  が 1 より大きくなったと推測した。

### 4.2. クレータースケーリング則

本研究結果を、一時クレーターの体積と時間の関係を示したクレータースケーリング則に応用した。そのスケージング則は、

$$\frac{\rho_t V_{cr}(t)}{m_p} = K_2 \left( \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{\frac{3\nu}{1+\mu}-1} \left( \frac{v_t t}{r_p} \right)^{\frac{3\mu}{1+\mu}}, \quad (3)$$

と表され、 $V_{cr}$  がクレーター体積 (今回は長軸半径  $d$ 、短軸半径  $D_{max}/2$  の半楕円体と仮定)、 $\rho_p$  は弾丸密度、 $K_2$  は定数、 $\nu$  と  $\mu$  はスケージングパラメータである[4]。また  $v_t t / r_p$  は  $\pi t$  と表記される。その結果を図 3 に示す。図 3 から、各衝突条件の  $t_s$  で傾きが変化し、 $t_s$  以前の全てのデータは  $\rho_t V_{cr}(t) / m_p = 0.27 \pi t^{1.1}$  で表されることが分かった。また、この経験式からスケージングパラメータ  $\mu$  を計算すると 0.58 となり、先行研究の石膏の値 (0.5) と近くなり[5]。砂の値 (0.41) より大きくなった[4]。さらに、空隙率が大きくなるほど  $\mu$  は小さくなるという先行研究[4]の解釈とは、矛盾した結果となった。

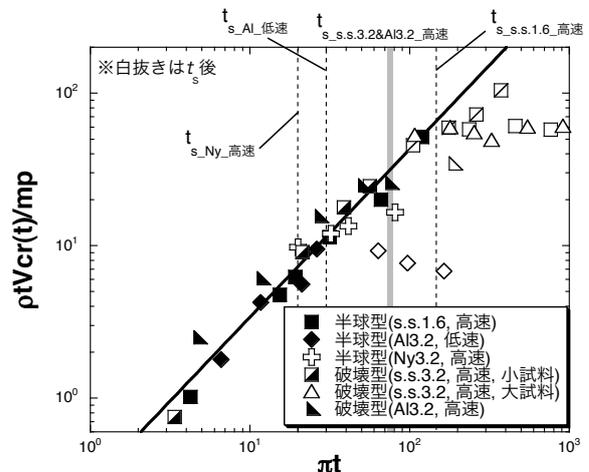


図 3: クレーター体積と時間の関係。縦線は各衝突条件での  $t_s$  を用いた  $\pi t$  を示す。

### 【参考論文】

- [1] Housen & Holsapple (2003), *Icarus* **163**, 102-119.
- [2] Niimi et al. (2011), *Icarus* **211**, 986-992.
- [3] 玉木&雛田 (1966), *生産研究* **18**, 19-21.
- [4] Schmidt & Housen (1987), *Int. J. Impact Eng.* **5**, 543-560.
- [5] Yasui & Arakawa, *Icarus* **214**, 754-765.

※本発表の詳細は、

Yasui et al. (2012), *Icarus* **221**, 646-657  
の論文を参照して頂きたい。