

石膏への弾丸貫入とクレーター形成のフラッシュ X線による可視化実験

保井みなみ¹, 荒川政彦¹, 長谷川直², 藤田幸浩³, 門野敏彦⁴

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

小惑星の密度は低く、多孔質である [e.g., 1]. そのため、小惑星表面に見られる衝突クレーターは、空隙率の影響を大きく受けていると考えられている [e.g., 2]. 従って、多孔質小惑星上の衝突クレーター形成過程の理解には、多孔質物質のクレーター形成における物理素過程を知る必要がある。本研究では、物理素過程として、標的内部構造の変化に着目する。クレーター形成における標的内部構造の変化については、これまで数値計算がほとんどであった [e.g., 3]. 室内実験の研究が少ない理由は、クレーター成長が数十 μs 以内で終了する瞬間的な現象であること、また岩石内部の観察を可視光で行うことが極めて困難であったためである。

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。フラッシュ X 線は、可視光でとらえられない試料内部の高速現象を静止画像として得ることが可能である。このフラッシュ X 線を用いたクレーター形成実験を行い、クレーター形成中の弾丸貫入とクレーター孔の拡大を観察し、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。サイズは直径 34mm、高さ 65mm の小標的と、直径 64mm、高さ 70mm の大標的とし、両試料共にアクリルパイプで側面を覆った。小標的は、衝突破片の飛翔を抑えるため、標的周囲をさらに大きなアクリル筒で覆った。弾丸は、直径 1.6, 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て、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。フラッシュ X 線装置の印加電圧は 300kV である。X 線撮影のために、標的下部に 2 枚のイメージングプレートを設置した。X 線撮影のタイミングにはピエゾゲージを用い、弾丸が標的前方に設置したゲージを通過してからの経過時間を設定することで、同標的・同衝突条件で衝突後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

3.1. X線画像

得られた X 線画像を時間毎に並べたものを図 1 に示す。本研究では、エネルギー密度 Q によって 2 つのクレーター形成モードに分けることができた。エネルギー密度とは、弾丸の運動エネルギーを標的の質量で割った値である。エネルギー密度 Q が小さい場合 (6500J/kg 以下 : 図 1a), 半球型のクレーターが形成され、周囲に圧密層 (黒い層) が見られた。また、弾丸は円盤型に変形 (Al 球, Ny 球), もしくは数個に分裂した (s.s. 球)。実験後は Al 球のみ回収できた。エネルギー密度 Q が大きい場合 (9000J/kg 以上 : 図 1b), 弾丸は変形・分裂し、標的には半球型クレーターが形成された後に、分裂した弾丸が標的内を個々に進行して、クレーター孔の先端にピットが形成された。その後、標的は破壊した。次に、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及び直径である。それぞれの結果について、次の章で説明する。

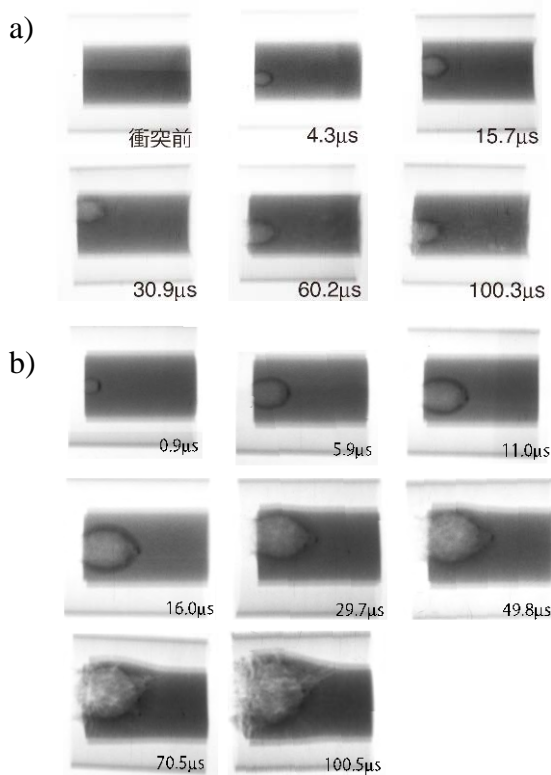


図 1: 実験で得られた X 線画像. 右下の数字は衝突後の時間を示す. a)はエネルギー密度 Q が小さい場合, b)はエネルギー密度 Q が大きい場合

3.2. クレーター深さ

クレーター深さ d と時間の関係を図 2 に示す. クレーター深さ d の時間変化は, エネルギー密度 Q の大きさによって異なることがわかった. エネルギー密度 Q が小さい場合, クレーターの深さ d は時間と共に増加し, $20\mu\text{s}$ で一定になった, つまり深さの成長が停止した. 一方, エネルギー密度 Q が大きい場合, $20\mu\text{s}$ で成長が停止するまではエネルギー密度 Q が小さい場合と同様の振る舞いであるが, その後 $60\mu\text{s}$ で再び増加した. これは, 分裂した弾丸が標的の内を個々に進行し, クレーター孔の先端に細長いピットを形成したためである. ここで, クレーターの深さが停止する時間を, クレーター成長停止時間 t_s と呼ぶことにする. 本研究では, t_s は弾丸の種類のみ依存し, s.s.弾丸と Al 弾丸は $20\mu\text{s}$, Ny 弾丸は $10\mu\text{s}$ 以下となった.

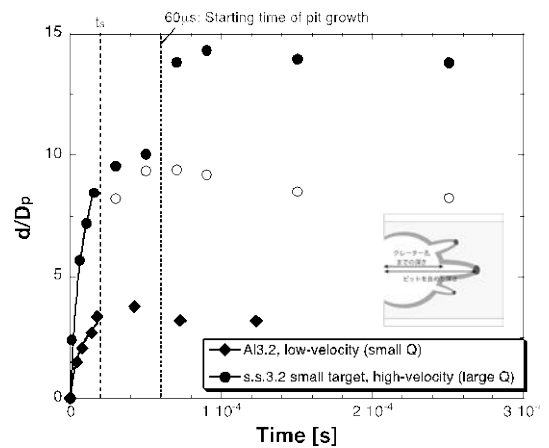


図 2: クレーター深さ d と時間の関係. エネルギー密度 Q が大きい場合, クレーター孔までの深さ (○) とピットを含めた深さ (●) を示す.

3.3. クレーター直径

クレーター直径と時間の関係を図 3 に示す. 今回は, クレーター孔の入口直径 D とクレーター内部の最大直径 D_{max} を測定した.

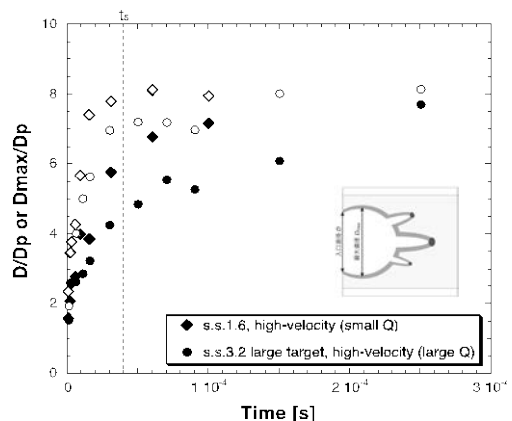


図 3: クレーター直径と時間の関係. 黒塗りのプロットが入口直径 D , 白塗りのプロットが最大直径 D_{max} である.

最大直径 D_{max} は, 最初は時間と共に増加し, 成長停止時間 t_s で一定になった, つまり最大直径の成長が停止した. これはクレーター深さ d の時間変化の振舞いと同じである. 一方, 入口直径 D は時間と共に増加し続けた. この増加は, エネルギー密度 Q が小さい場合はクレーター孔の入口周りが剥がれ始める (スポーリングの開始) ためであり, エネルギー密度 Q が大きい場合は標的が破壊するためである. クレーター

直径に関しては、エネルギー密度の大小による時間変化の違いは見られなかった。

4. 議論：弾丸の抵抗係数 C_d

時間 t とクレータース深さ 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、

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

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

と表され、 v_i は衝突速度、 ρ_t は標的密度、 r_p と m_p は弾丸半径及び質量である[4]。今回は、成長停止時間 t_s より前 (s.s.及び Al 弾丸は 20 μ s, Ny 弾丸は 5 μ s と推定) のデータを用いて計算した。式(1)を用いてフィッティングした結果を、図 2 に示している。各衝突条件による抵抗係数 C_d を表 1 に示す。計算の結果、抵抗係数 C_d は 2.3-3.9 となり、エアロジェル等の他の低密度物質の約 1 [e.g., 4] よりも 2~4 倍大きくなった。ここで、抵抗係数 C_d は弾丸形状に依存することがわかっている [5]。本実験では、衝突時に弾丸が変形、分裂することが確認された。つまり、式(2)の弾丸半径 r_p や質量 m_p が時間経過に伴って変化することを意味する。また、弾丸の貫入によって標的が圧密されるため、標的密度 ρ_t も変化すると考えられる。従って、これら 3 つのパラメータの初期値を用いて計算しているため、結果的に C_d が 1 よりも大きくなったと推測した。また、各衝突条件における抵抗係数 C_d の差異は、弾丸の変形量や分裂度合、標的の圧密度を示していると考えられる。しかし、定量的にそれらの程度を示すためには更なるデータの蓄積が必要である。

表 1：抵抗係数 C_d

弾丸		v_i [km/s]	Q [J/kg]	C_d
種類	直径 [mm]			
s.s.	1.6	5.9	4.97×10^3	3.51
Al	3.2	2.3	2.04×10^3	2.52
Ny	3.2	6.3	6.48×10^3	3.91
s.s.	3.2	5.8	3.83×10^4	2.33
Al	3.2	6.1	1.43×10^4	2.70

【参考論文】

- [1] Consolmagno *et al.* (2008), *Chemie der Erde* **68**, 1-29.
- [2] Housen & Holsapple (2003), *Icarus* **163**, 102-119.
- [3] Wünnemann *et al.* (2006), *Icarus* **180**, 514-527.
- [4] Niimi *et al.* (2011), *Icarus* **211**, 986-992.
- [5] 玉木&雛田 (1966), *生産研究* **18**, 19-21.

※本発表の具体的な内容は、

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