

フラッシュ X 線を用いた衝突圧密に関する実験的研究

保井みなみ¹, 荒川政彦¹, 辻堂さやか¹, 長谷川直²

1. 神戸大学 2. ISAS/JAXA

1. はじめに

空隙率の高い氷衛星や小惑星表面には、多孔質天体特有のクレーターが見られる。それは“圧縮型クレーター”と呼ばれ、月や水星等で見られるような“非圧縮型クレーター”とは異なり、リムの高まりがなく、天体直径に対してクレーター半径が大きいのが特徴である。このような“圧縮型クレーター”は、衝突点直下で衝突圧力によって表面物質が破砕されて圧縮することで形成したと考えられており、そのためにクレーター周囲には衝突圧密による高密度層（圧密層）が形成される [1, 2]。しかし、圧縮型クレーターの成長過程における衝突点下の物質の掘削、移動、圧密メカニズムについては詳しく調べられていない。

そこで本研究では、多孔質小天体上の“圧縮型クレーター”の形成メカニズムを明らかにするため、フラッシュ X 線を用いた多孔質物質のクレーター形成実験を行った。今回は、圧縮型クレーターの「圧密層の形成」に着目し、クレーター形成中の圧密層密度の時間変化を調べ、圧密層の形成機構に関して議論した。

2. 実験方法

標的には平均粒径 $0.5\mu\text{m}$ のアモルファスシリカビーズを用いた。そのビーズを一辺 6.2cm 、深さ 10cm の直方体プラスチック容器に入れ、ビーズのふきこぼれを防ぐために、表面をティッシュで覆った。バルク空隙率は約 73%である。弾丸は、直径 3.2mm のナイロン球を用いた。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 $1.9, 3.9, 6.4\text{km/s}$ とした。

フラッシュ X 線は 3 台設置した。そのため、1 回の実験で得られる画像は 3 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 3 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た。

衝突の様子は高速度ビデオカメラで撮影した。撮影速度は $10\mu\text{s}$ 、露出時間は 500ns とした。

3. 実験結果

3.1. X 線画像，カメラ画像，回収試料

実験の一例を紹介する。図 1 は、衝突速度 3.9km/s の時の高速度ビデオカメラ画像である。弾丸は左から衝突する。衝突直後 (0.25ms) には高速度でエジェクタが衝突点から放射状に噴出し、その後カーテン状にある程度の塊でエジェクタが飛び出す様子 (1ms) がわかる。

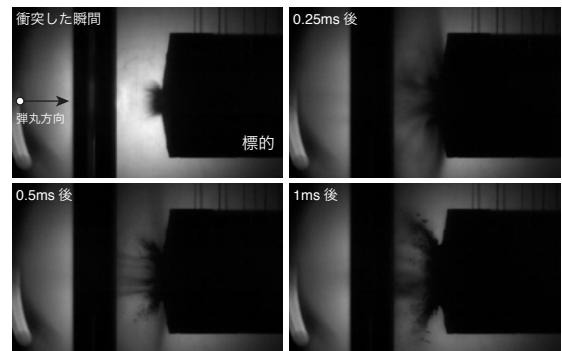


図 1 高速度ビデオカメラの画像

図 2 は回収した試料とフラッシュ X 線の画像である。実験は図 1 と同じである。フラッシュ X 線画像から、時間と共にクレーター直径、深さ共に成長し、クレーター壁面には周囲よりも密度の高い層（周囲より色が濃い薄い層。圧密層と呼ぶ）が形成されているのが観察された。また、回収した試料表面には、弾丸直径の約 10 倍の直径をもつクレーターがみられた。フラッ

シュ X 線画像 (99.8 μ s 後) よりも直径が大きいことから、衝突後 100 μ s が経過してもクレーターの成長は止まっていないことがわかった。

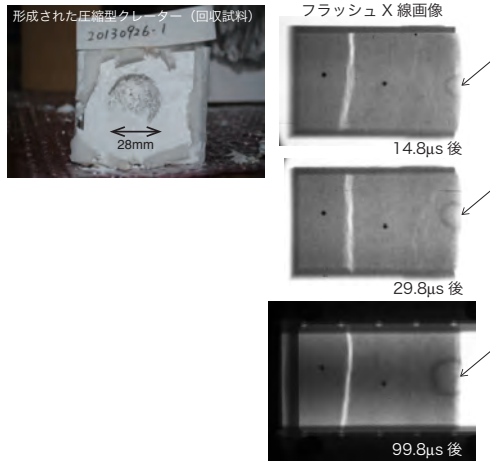


図 2 回収試料 (左) とフラッシュ X 線画像 (右). 矢印で示したのがクレーターである。

次に、圧密層の密度が周囲に比べてどの程度上昇しているかを検証するため、フラッシュ X 線画像を用いて密度解析を行った。

3.2. 密度解析手法の確立

最初に、圧密層を含めたクレーター周囲の密度分布を求めるため、フラッシュ X 線の入射強度を用いた密度解析手法を確立する。

フラッシュ X 線の入射強度 I_0 と標的密度 ρ_b の関係は、Lambert-Beer の法則から以下のように表記される。

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho d) = I_0 \exp(-\mu_m \rho_s) \cdots (1)$$

μ_m は質量吸収係数、 I は距離 d 進んだ後の X 線強度である。また、 ρ_s は面密度であり $\rho_s = \rho d$ と表される。式(1)から、フラッシュ X 線画像の X 線吸収強度を調べることで、標的内部の特定位置の密度 ρ を求めることが可能である。しかし、その計算にはシリカビーズの質量吸収係数 μ_m を求めることが必要となる。そこで、厚み d を変えた試料を用いて、X 線の吸収強度 I と面密度 ρ_s の関係を調べ、質量吸収係数 μ_m を求めた。

標的は、弾丸の発射方向から見てひし形になるよう設置したため、上部方向のフラッシュ X 線装置で撮影された画像を用いると、様々な厚

み d の X 線吸収強度 I を調べることができる (図 3a)。標的密度 ρ は一定なので、厚み d が変化すると面密度 ρ_s が変化する。X 線吸収強度 I は Image J ソフトを用いて、gray value として得ることができる。

上部方向のフラッシュ X 線画像を用いて、面密度 ρ_s と吸収強度 I (入射強度 I_0 で規格化) の関係を求めたのが図 3b である。ここで、 I_0 は、フラッシュ X 線画像上の何も物が存在しない領域の強度から求めた。ここで、 $\rho_s = 0$ (物が存在しない) では $\ln(I/I_0)$ は 0 にならないといけないのだが、図 3b ではオフセットが生じている。これは、試料設置治具用に用いたアクリル板やチャンバー中の浮遊物などの吸収が原因で、実験毎でオフセット値は異なる。そこで、オフセットは無視し、グラフの傾きから質量吸収係数 μ_m を求め、0.12 となることがわかった。

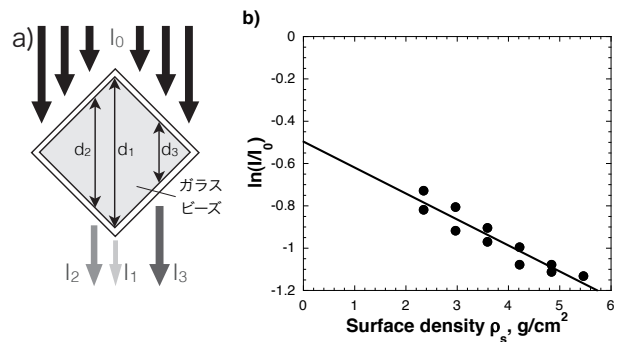


図 3 a) 上部方向からの X 線照射の様子。厚み d_i が異なると吸収強度 I_i も異なる。b) シリカビーズの面密度と強度比の関係。

次に、標的表面からある深さでのクレーター周囲の密度分布を求める。今回は、フラッシュ X 線画像毎で圧密していない部分 (非圧密部、図 4a) の吸収強度と求め、その値が実際の標的密度 ρ_b から式(1)を用いて求めた吸収強度と一致するように全体の吸収強度 I を補正し、求めたい密度と標的密度 ρ_b との比として密度分布を計算した。

標的のある深さにおける標的の断面図を図 4a に示す。X 線は上から入射する。この図から、標的内部は圧密層、クレーター、非圧密部の 3 つの部分で構成されることがわかる。今回は、

図 4a の x 方向で①圧密層と非圧密部、② 3つの領域、③非圧密部のみ、の3つの領域で異なる計算手法を用いて、各部分の厚みを考慮した計算を行った。各領域での面密度 ρ_{si} は以下の通りである。

$$\textcircled{1} \quad \rho_{s1} = (L - y)\rho_b + y\rho_{\text{comp}} \quad \cdots(2)$$

$$\textcircled{2} \quad \rho_{s2} = (L - y)\rho_b + (y - y')\rho_{\text{comp}} \quad \cdots(3)$$

$$\textcircled{3} \quad \rho_{s3} = L\rho_b' \quad \cdots(4)$$

ここで、 y はある x での非圧密部の長さ、 y' は圧密層の長さ、 L は試料の奥行き方向の長さ(62mm)、 ρ_b は標的密度(0.6g/cm³)、 ρ_{comp} は圧密層の密度、 ρ_b' は非圧密部の密度である。 y と y' は、図 4a でクレーターのみの円とクレーターと圧密層(フラッシュ X 線画像から計測)を含めた円の座標を考え、試料左端の x を 0 として計算する。また、 ρ_b' は本来 ρ_b と一致すべき値であるが、吸収強度の補正を行い、非圧密部の密度が全体的に ρ_b と一致するかを確認するため、敢えて別のパラメータとして扱う。式(1)~(4)を用いて、1 と 2 の領域では圧密層の密度 ρ_{comp} 、3 の領域では非圧密部の密度 ρ_b' を計算した。また、クレーター内部の密度は 0 とし、圧密層の左右の厚みの違いは考慮するが、奥行き方向は一定とした。

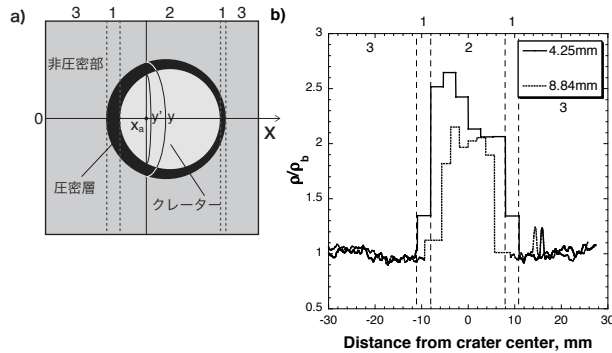


図 4 a) ある表面深さにおける標的の断面図。

b) 密度比計算の一例。

計算の一例が図 4b である。試料は図 1, 2 と同じで、衝突後 29.8 μ s の結果である。今回は、試料表面からの深さが約 4.2mm と約 8.7mm の 2 ヶ所で計算した。また、1 と 2 の領域は、 x 方向のある長さ間の平均値を計算した。このグラフから、領域 3 は密度比が約 1 となり、標的密

度と全体的にはほぼ一致していることがわかる。一方、領域 1 と 2 は共に圧密層密度であるが、領域 1 の方が小さいことがわかる。これは、領域 1 内の x 方向の密度分布が無視できないほど大きく、そのため密度の小さい圧密層の端部の影響だと思われる。そのため、今後は領域 2 で計算した圧密層の密度を用いて議論する。

3.3. 圧密層密度の時間変化

試料表面からの深さと衝突速度を一定とした場合の、圧密層密度比の時間変化を示したのが図 5 である。

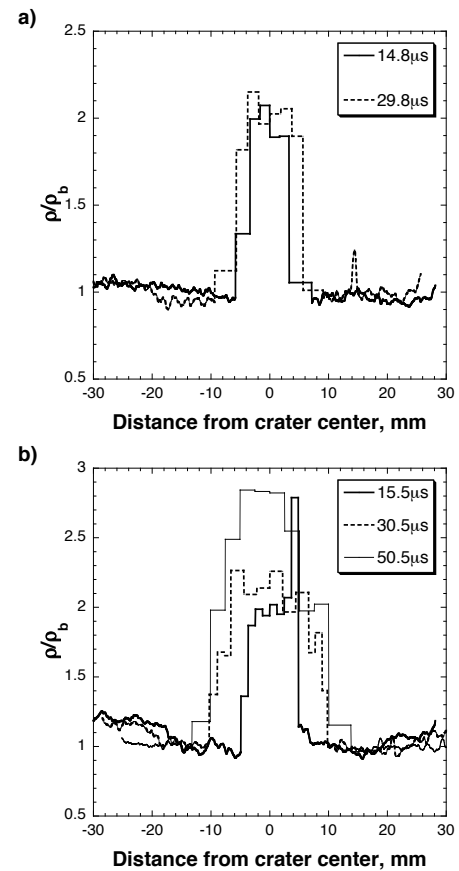


図 5 深さ 8.8mm 圧密層密度比の時間変化。a) 3.9km/s, b) 6.4km/s.

衝突速度が 3.9km/s の場合、時間による圧密層の密度比 $\rho_{\text{comp}}/\rho_b$ に変化は見られなかった。一方、6.4km/s の場合、時間が経過するほど圧密層の密度比が上昇する傾向が見られた。この傾向は深さ 4.2mm でも見られた。

3.4. 圧密層の密度上昇メカニズム

圧密層の密度は何によって決まるのか. その疑問に答えるため, モデルを用いて計算した圧密層の厚さから密度を求め, 実験値と比較する.

モデルでは圧密後, クレーター分の質量が全て圧密層に圧縮されたとし, エジェクタは無いと仮定する. 図5にクレーターの模式図を示す.

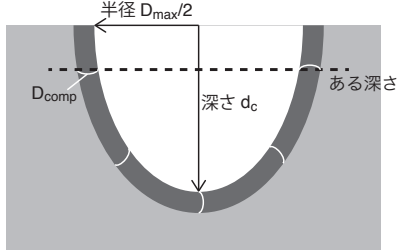


図5 モデルクレーターの模式図

圧密後は厚み D_{comp} , 密度 ρ_{comp} の円弧状に圧密層が形成すると仮定すると, 圧密層の質量が実験前にあったクレーター部分の質量と等しくなければならない. 圧密前のクレーター部分は, 半径 $(D_{\text{max}}/2 + D_{\text{comp}})$, 深さ $(d + D_{\text{comp}})$, 密度 ρ_b の半楕円体とする. また, D_{max} と d はクレーターの最大直径と深さ, D_{comp} は密度比を計測した深さ4.2mmと8.7mmでの圧密層の厚みを, フラッシュX線画像から計測する. この仮定の下で, 圧密層と標的の密度比 $\rho_{\text{comp}}/\rho_b$ を k とくと,

$$\frac{\rho_{\text{comp}}}{\rho_b} = k \sim \frac{d}{D_{\text{comp}}(1 + 4d/D_{\text{max}})} + 1 \quad \cdots (5)$$

と表される.

式(5)で計算した密度比と実測値との比較を示したのが図6である. 黒塗りが実測値, 白抜きが式(5)を用いた計算値である. このグラフから, ほとんどのデータは, 実測値と計算値が誤差の範囲内でほぼ一致することがわかった. 図1から, 標的からエジェクタが噴出しているが, 図6の結果から, エジェクタとして噴出する量は標的質量と比較すると無視できるほど微小であることがわかった.

一方, 標的表面からの深さが4.2mmで5.5 μ s後のデータは, 実測値の方が計測値より2倍近く大きくなった. このデータはクレーターの底

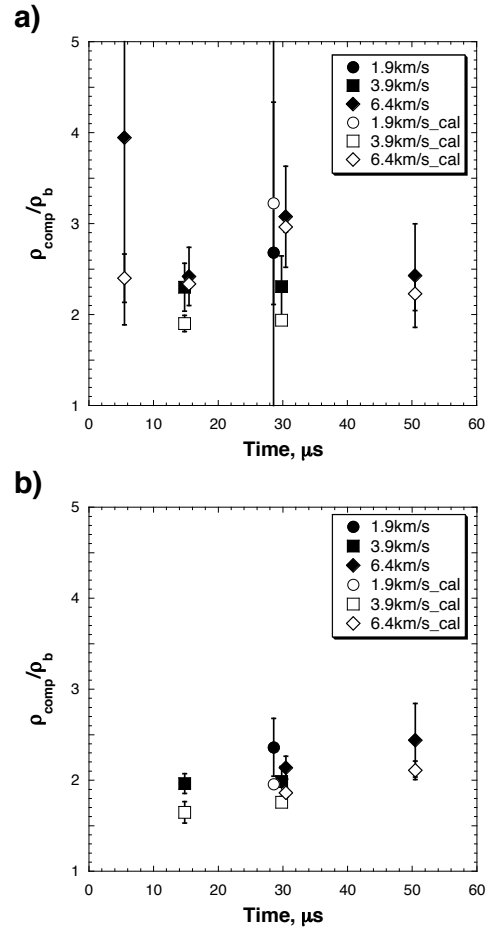


図6 圧密層と標的バルクの密度比 $\rho_{\text{comp}}/\rho_b$ の時間変化. a) 標的深さ4.2mm, b) 標的深さ8.8mm. 黒塗りは実測値, 白抜きは計算値.

のデータであり, クレーター底は圧密層が比較的厚いため, 密度比の計算値が低く見積もられたと思われる.

以上より, 圧密層の上昇メカニズムは, クレーター内に存在した標的物質のほとんどがクレーター周囲に圧密することで形成すると予測された. これは, Yasui *et al.* (2012)の推測とも一致した [3]. また, 図6から圧密後の密度比が2~2.5になることから, 最密充填率の30~45%まで圧密することがわかった.

【参考文献】

- [1] Housen & Holsapple (2003), *Icarus* **163**, 102-119.
- [2] Housen & Holsapple (2012), *Icarus* **219**, 297-306.
- [3] Yasui *et al.* (2012), *Icarus* **221**, 646-657.