

フラッシュ X 線による石膏への弾丸貫入とクレーター形成過程の

その場観察

○ 荒川政彦（神戸大理）、保井みなみ（神戸大自然）、藤田幸浩（名大環境）、
長谷川直（ISAS/JAXA）、黒澤耕介（ISAS/JAXA）

1. はじめに

惑星や衛星の表面は、小天体の衝突によって形成したクレーターで覆われている。これらのクレーターの数密度やサイズ、形状などの観測値から、その惑星形成過程に関わる天体衝突の歴史や、天体固有の地質構造に関する情報を得ることができる。ただし、これらの情報を正しく読み解くには、クレーターの形成メカニズムを理解し、そのメカニズムに基づいた理論の構築が必須となる。クレーター形成中の岩石内部の構造変化については、その詳細な研究は今まで数値シミュレーションでしか行うことができなかった¹。室内実験では、クレーターの形成は数十 μs 以内で終了する瞬間的な現象であり、その短時間でクレーターを形成した岩石表面の変化を可視光で観察することは可能であるが、岩石内部の変化を観察することは極めて困難であったからである。

そこで本研究では、クレーター形成中の標的内部を観察するため、フラッシュ X 線を用いる事にした。フラッシュ X 線は、可視光では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出来る。フラッシュ X 線を組み合わせたクレーター形成実験を行い、弾丸が試料に衝突した後、数 μs 間隔で連続透過画像を撮影し、クレーター形成時の弾丸貫入とクレーター孔の拡大を観察した。

2. 実験方法

標的は直径 30mm、高さ 65mm のアクリルパイプに、石膏を流し込み、約 60°C の炉に入れて乾燥させた。衝突により破砕した試料の飛散を最小限にするため、標的周囲を直径、長さ共に 70mm のアクリルパイプで覆った。弾丸は直径 32mm のステンレス球を用いた。

実験は宇宙科学研究所の二段式水素ガス銃を用いて行った。衝突速度は 2.0km/s（低速度）と 5.4-5.9km/s（平均 5.7km/s、高速度）の二種類とした。フラッシュ X 線装置

は印加電圧 300kV で、2台用いた。X 線の撮像のため、標的の下部にイメージングプレートを設置した。また、撮影タイミングは、標的の前面にピエゾゲージを貼り付け、弾丸がゲージを突き抜ける時間をトリガーとし、ゲージからの経過時間を設定することで調整した。1回の実験で X 線画像は 2枚得られる。

3. 実験結果

3-1 破壊形態

同じ衝突速度で数回実験を行い、X 線の撮影タイミングをずらすことで、衝突時の 0 μs から約 150 μs まで約 10 μs 間隔で標的内部の観察に成功した。その画像を解析した結果、衝突速度が異なると、標的の破壊形態が変化することがわかった。低衝突（2.0km/s）の場合は、弾丸は石膏を破壊することなく貫通し、貫通孔周囲に 1mm 以下の圧密層を形成した。高速度衝突（5.4-5.9km/s）の場合は、弾丸は石膏を貫通することなく、石膏に空孔を形成した。空孔周囲には、1mm 以上の低速度の場合より厚い圧密層を形成した。高速度では衝突後 50 μs 以上になると、空孔が半球形から円錐形に変化した。さらに衝突時に変形・分裂した弾丸破片が標の後方へ散乱し、多数の細長い孔やクラックを形成する様子が見られた。最終的に標的は、カタストロフィック破壊を起こし、細かい破片が生成された。

3-2 貫入深さ

得られた X 線画像から、時間経過における弾丸の貫入距離を計測し、弾丸貫入の運動を支配する抵抗係数 (C_d) を調べた。ただし、弾丸が分裂した場合には、分裂した数個の弾丸の最先頭の位置だけを計測した。その結果を図 1 に示す。図上の D_p は弾丸直径（今回は 3.2mm）である。ここで、減速モデルの方程式は

$$z(t) = \ln(v_1 a t + 1) / \alpha \quad (1)$$

$$\alpha = C_d \rho_v \pi r^2 / 2m_p \quad (2)$$

である²。 v_i は衝突速度、 t は経過時間、 ρ は標的密度、 r は弾丸半径、 m_p は弾丸質量である。その結果、貫通（低速）の場合は C_d が約0.9となり、他の低密度標的（シリカゲル、ポリウレタンなど）で得られる値とほぼ一致した³。一方、空孔形成の場合は、15 μ sから50 μ s（領域②）までは貫入深さの時間変化がなくほぼ一定になったため、15 μ s前のデータを用いて C_d を計算した。 $r=1.6$ mmの球弾丸で計算した結果、 C_d が約22と貫通に比べて大きくなった。先行研究より、マッハ7の極超音速気流中において様々な形状、寸法の弾丸の抵抗係数を調べた結果、円盤形状の弾丸の抵抗係数が球形状の場合に比べて約2倍大きくなることが確認されている⁴。本研究の場合、固体中への貫入ではあるが、同様な形状効果が C_d に対してあらわれる可能性が高い。X線画像から高速度の場合は、弾丸が変形して球から円盤状に変化していることが確認されており、高速気流に関する先行研究と抵抗係数の変化の傾向が一致した。

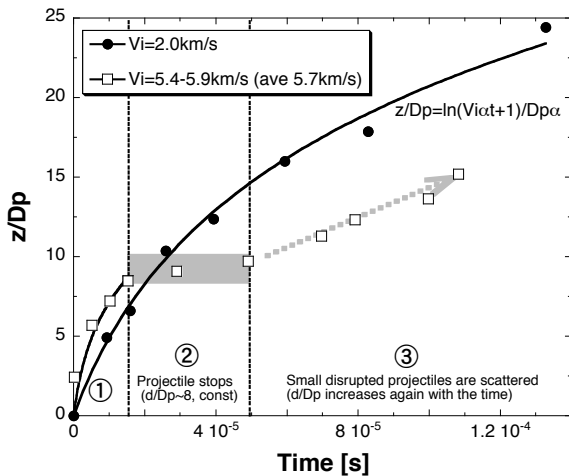


図1 貫入深さ z の時間変化

また、X線画像と図1を比べたところ、空孔形成の場合、50 μ s以降（領域③）は数個の分裂弾丸の散乱に伴う形状変化が見られたことから、後方から飛んできた分裂弾丸の更なる貫入によって、再び貫入深さが時間と共に増加したと考えられる。ただし、複雑な弾丸貫入メカニズム（弾丸分裂、標的破壊、圧密等）が生じると考えられるため、式1での解析は難しい。

3-3 空孔形成

次に、高速度衝突の場合の空孔の衝突面直径 d と孔内の最大直径 d_{max} の時間変化を調べた。その結果を図2に示

す。図中の①～③は、図1の領域と一致させている。 d_{comp} は圧密層の厚さを示す。図の破線は、石膏の音速を示す。衝突直後は、空孔は音速で拡大しているが、その拡大速度が時間と共に減少していることが

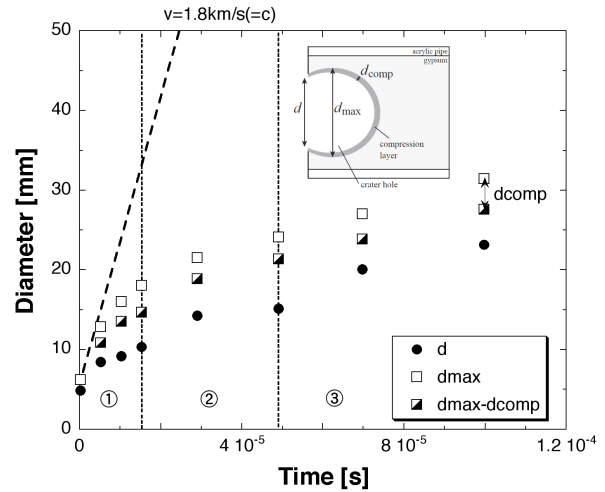


図2 衝突面上の空孔直径 d および空孔内部の最大直径 d_{max} の時間変化

わかる。また、②の領域では貫入深さはほぼ変化せず停止しており、さらに圧密層もほぼ3mmと一定となるため、直径方向のみが拡大していることがわかる。③の領域では、標的を覆っているアクリルパイプが破壊され飛散しているため、衝突破片の飛翔による空孔の拡大と考えられる。このグラフから計算した空孔の拡大に伴う破片の飛翔速度は約120-150m/sであることがわかった。

4. まとめ

フラッシュX線を用いた高速衝突実験を行い、石膏標的への弾丸貫入やクレーター形成を観察した。その結果、低速度の場合は弾丸の破壊を伴わない弾丸貫入、高速度の場合は弾丸の破壊を伴う空孔形成が確認された。また、得られたX線画像を用いて、弾丸の貫入深さおよび空孔の最大径を計測した。弾丸の貫入深さの時間変化から抵抗係数を調べたところ、低速度の場合は約0.9となり、高速度は約22で低速度に比べて約2倍大きくなった。

参考文献：(1) Senft and Stewart (2007), JGR 112, E11002. (2) Trucano and Grady (1995), Int. J. Impact Eng. 17, 861-872. (3) Niimi et al. (2011), Icarus 211, 986-992. (4) 玉木・雛田(1966), 生産研究 18, 219-221.