

レーザー変位計を用いたその場計測による衝突クレーター形成過程 の物理的解明

山本 聡 (国立環境研究所)、長谷川直 (JAXA)、鈴木絢子 (JAXA)、松永恒雄 (国立環境研究所)

Direct observation of crater growth by profilometer

Satoru Yamamoto (National Institute of Environmental Studies), Sunao Hasegawa (JAXA),
Ayako I Suzuki (JAXA), Tsuneo Matsunaga (National Institute of Environmental Studies)

1. はじめに

過去に行われてきた衝突クレーター形成実験では、主に実験後に測定されたクレーターの最終形状について統計的に解釈するという方法が用いられてきた。一方、衝突クレーター形成の物理素過程に対する理解への研究は乏しいのが現状である。その為、例えば、従来の統計的手法に基づくスケーリング則において、弾丸の衝突速度依存性や標的物性依存性などがよく分かっていない[1, 2]。この問題を解決するには、クレーターの最終形状ではなく衝突掘削によって生じる物質の流動（掘削流）のその場観測を行い、その物理的解釈に基づいてスケーリング則を再考することが必要である。

そこで我々は、掘削流の挙動について調べるための新しい非接触測定法の開発を行ってきた。この方法は、従来のアプローチと違って高速ビデオカメラを使わず、超高速レーザー変位計を衝突点近傍にまで接近させて「その場」観測を行うことで、衝突直後の掘削流の時間発展の様子を高空間および高時間分解能かつ非接触で定量測定するものである。本報告では、この新しい手法を使った掘削流の時間発展についての衝突速度依存性に対する実験結果について報告する。

2. 測定手法と実験条件について

宇宙航空研究開発機構の大学共同利用施設である超高速衝突実験施設に設置されている縦型二段式軽ガス銃を用いて実験を行った。この縦型銃は弾丸を最大約 7-8km/s まで加速することができ、大きさ $\Phi 150\text{cm} \times 200\text{cm}$ の真空チャンバーに垂直に設置されていることから、重力支配域を模擬した粉体標的に対する高速衝突実験を行うのに適している。弾丸はポリカーボネイト（質量 0.06g、直径 4.76mm）を使用。ターゲットとして、内径 60cm の容器にいれられた乾燥珪砂 5 号（平均粒径約 510 μm 、バルク密度 1.56 g/cm³）を使用した。また平成 28 年度は小型ガス銃を使って数 100m/s の低速衝突実験も実施した。衝突実験は全て真空条件 10Pa 以下で実施した。昨年度および今年度実施した実験について、クレーターのリム直径と衝突速度について図 1 にまとめた。これより、最終クレーターについては、低速高速データが一定の直線（青線）に乗ることが分かる。またこの直線の冪指数は 0.42 であり、従来の標準スケーリング則の冪指数の 0.40 と調和的であることが分かった。

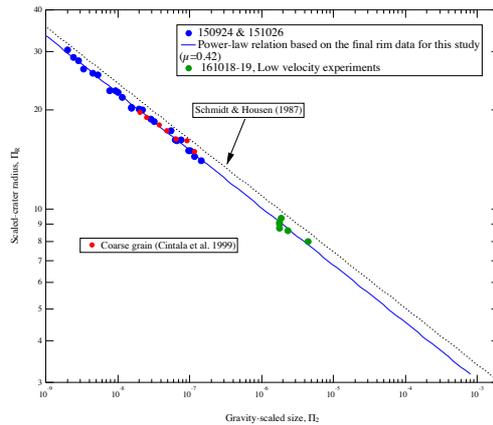


図 1：形成されたクレーターのリム直径に対する無次元クレーター直径と無次元重力サイズの関係。

図 2 にレーザー変位計による掘削過程のその場観測手法の概要図を示す[3]。この方法では、縦型銃により加速された弾丸を粉体標的に垂直衝突させ、衝突によって形成される掘削領域の形状を、レーザー変位計を用いて測定する。このレーザー変位計（Keyence 超高速インラインプロファイル測定器）は数 10cm 領域での一次元プロフィールを 1~2 kHz のサンプリングレートで連続取得することが出来るため、高速ビデオカメラを使う事無く、掘削過程の時間発展を非接触で測定できる。また、レーザー変位計は標的の上面から 30cm に垂直に設置されていることにより、放出物に視界を遮られない位置関係になっている。このレーザー変位計により掘削領域の形状を各時間において測定し、衝突前の表面における掘削領域の直径 D_{ap} を、衝突からの時間 t の関数として測定する。

この方法では、衝突点から一方向に対してのみ測定がなされるため、 D_{ap} の決定においてはクレーター形状の軸対称性が仮定される。この場合、弾丸着弾点の中心位置の決定が重要である。そこで、毎回 shot を行う前に標的の表面に上方からレーザー光を当て、レーザースポット中央に弾丸を手動で設置し、レーザー変位計を使って着弾予想点を決定した。この決定においては、shot 毎に測定した着弾中心測定値について平均値をとり、そのばらつきを D_{ap} の決定時の誤差として取り扱った。また、レーザープロフィールのサンプリングレートは 2 kHz とした。一方、サンプリングレート間隔内における標的の表面に着弾した正確な時間を知ることは難しい。そこで、衝突による擾乱がプロフィールデータの中で確認された最初の時間を $t=0.25$ ms とし、さらに時間に対する不定性（つまり誤差）を ± 0.25 ms とした。

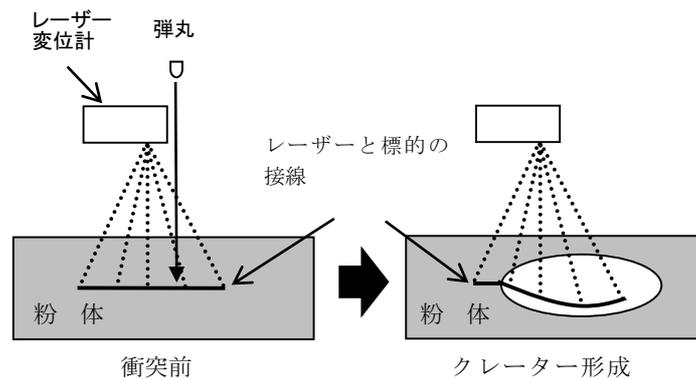


図 2：レーザー変位計によるその場観測手法の概要図。

3. 結果

3. 1. 掘削キャビティーのプロファイル測定

図3に衝突速度 232 m/s の場合におけるプロファイルの断続的時間発展の様子を示す。図中の各数字は衝突からの時間である。これより、衝突による掘削領域（キャビティ）が時間とともに広がり、また放出物カーテンが横方向に広がり、最終的にクレーターリムが形成される様子が捉えられているのが分かる。

次に、この図から衝突前の高さ（図中の水平破線）で決定したキャビティ直径 D_{ap} を各時間に対して決定する。図4に D_{ap} と衝突からの時間 t についてプロットした。これより衝突直後から $t \sim 0.03$ s くらいまで、 D_{ap} は t に対してほぼべき乗則で増加しているのが見て取れる。一方 $t \sim 0.03$ s 以降では D_{ap} の成長率が時間とともに減衰し、 $t \sim 0.1-0.2$ s 以降では D_{ap} は変化せず時間に対して一定となっている。これは $t \sim 0.1-0.2$ s 内でキャビティの拡大成長が終了したことを意味する。つまり過渡クレーター形成は約 0.1-0.2 s 後に終了したことを意味するが、これはクレーター形成典型時間[1] $T_{tp} = (D/g)^{0.5} \sim 0.1-0.2$ s と調和的な結果となっている。その後、[2]で報告されているクレーター壁面の崩壊による D_{ap} の顕著な増加は見られなかった。これは今回使用している標的が[2]などで使用されているガラスビーズと違って、内部摩擦角が大きい事によるものと考えられる。

本手法により、様々な衝突速度 (0.14~6.1km/s) に対してデータ取得を行い、それぞれの時間発展データを取得した。様々な衝突速度に対する結果について図5で比較を行った。これより、衝突速度が高くなると、同じ時間における D_{ap} は増加するが、時間発展における初期段階のべき乗則による増加パターンと後半段階の増加率が減衰するパターンに違いは見られなかった。いずれの場合も過渡クレーター形成は約 0.1-0.2 s 後に終了するようである。一方、衝突速度が高くなると、全体的な傾向が上にシフトしていることが分かる。

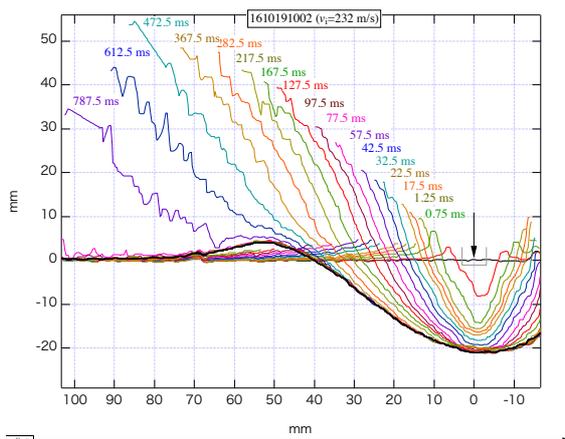


図3：プロファイルのスナップショット例(衝突速度 232 m/s)。図中の各数字は各色に対応したプロファイルの衝突からの時間を示している。黒の水平破線が衝突前の標的の表面の高さ。横軸 0mm の矢印が弾丸着弾点の中心点。

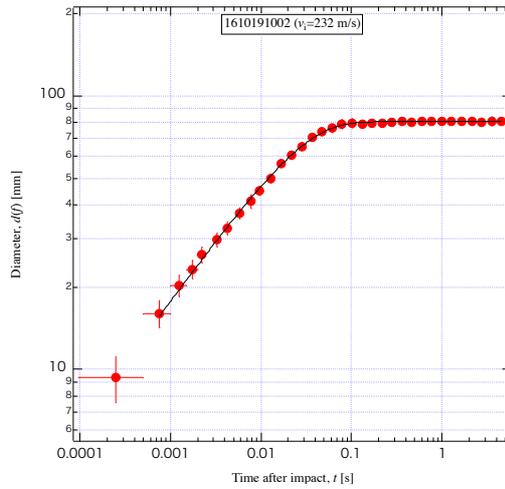


図 4：プロフィールについて衝突前の表面高さで測定したキャビティー直径 D_{ap} の時間発展。黒線は式(1)によるフィッティング結果。

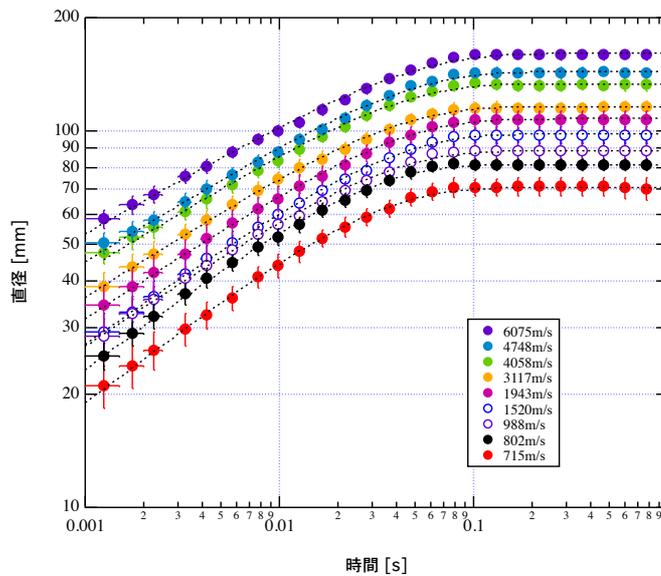


図 5：様々な速度での D_{ap} の時間発展の比較。黒点線は式(1)によるフィッティング結果。

3. 2. クレーターキャビティーの時間発展における衝突速度依存性

観測された時間発展のパターン（初期段階はべき乗則で増加し、その後増加率が減衰するパターン）を説明するために、[4]ではZモデルを基にした次のような掘削流モデル式が提案されている：

$$D_{ap}(t) = A(1 - e^{-\beta t})^\gamma \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 $\gamma = 1/(Z + 1)$ と定義されており Z は掘削流速度場の距離に対する減衰率、 β は掘削流速度場の時間に対する減衰率（単位は時間の逆数）、 A は過渡クレーターの直径に相当する。この掘削流モデル式を使うことで、初期段階の冪指数（ γ ）と後半段階の減衰率（ β ）を定量化できる。そこで、この式より、全実験結果についてそれぞれ γ および β を決定し、衝突速度との関係を調べた。

図 6 に γ と衝突速度 v_i の関係についてプロットした結果を示す。これより γ は顕著な衝突速度依存性を示し、速度が速くなると冪指数が小さくなっていることが分かる。また約 100m/s 領域の低速衝突の結果も

1km/s以上の高速衝突速度の結果と調和的なトレンドを示すことがわかった。

次に、図7に減衰率 β と v_i の関係についてプロットした。これより β も顕著な衝突速度依存性を示し、速度が速くなると冪指数が小さくなっている。また約100m/s領域の低速衝突の結果も同様の速度依存性と調和的なトレンドを示すことがわかる。[4]の解釈では、 β は掘削流の内部摩擦係数に関与する変数であり、標的物性値にのみ依存性と考えられていた。一方、本実験の結果により、 β 値は衝突速度依存性も示すと考えられる。これが本当だとすると、衝突速度が速いほど終段階における掘削流の速度減衰率が低いということを示す。

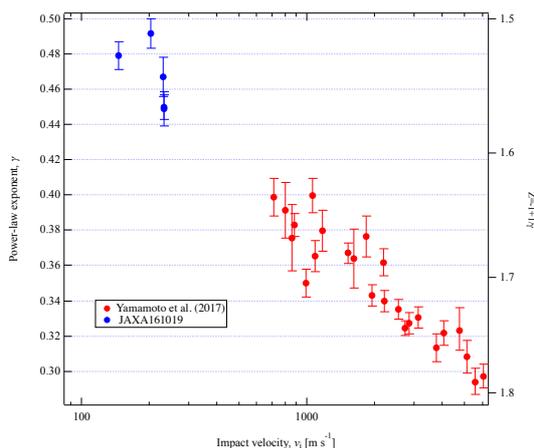


図6：冪指数 γ と衝突速度 v_i の関係。

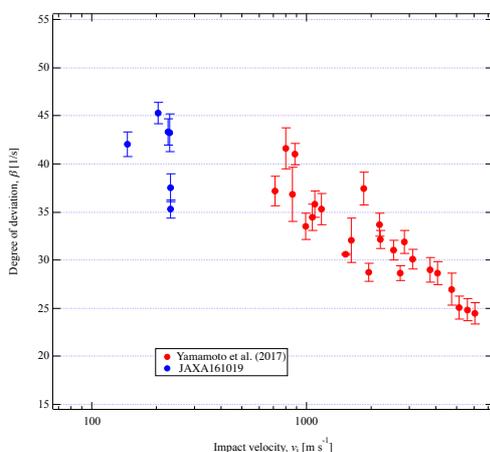


図7：減衰率 β と衝突速度 v_i の関係。

4. まとめと今後

衝突速度0.14～6.1 km/sの条件下で掘削領域の直径の時間発展について定量測定に成功した。また、掘削領域直径の時間発展増加率について、全速度範囲で衝突速度依存性を示す結果が得られた。今後データ解析を進めていくことで、この速度依存性の再現性や、その依存性がどの程度有意であるかについて明らかにしていく予定である。一方で、衝突スケーリング則の定式化を含めた考察を行うには、数100 m/s付近の現時点でデータが得られていない速度領域での傾向を知ることも重要である。そのため、今後は主に低速衝突を中心にデータ取得を行い、速度依存性に対する結果との関係についても明らかにする予定である。

参考文献

- [1] Melosh H. J., *Impact cratering*, Oxford Univ. Press, New York, 1989.
- [2] Yamamoto, S. et al., *Icarus*, 183, 215-224, 2006.
- [3] 山本聡 他, *遊星人*, 24, 3, 239, 2015.
- [4] Yamamoto et al., *Icarus*, 203, 310-319, 2009.