

# レーザー変位計によるクレーター形成過程の衝突速度依存性

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)

## Impact velocity dependence of crater growth measured by profilometer

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

### 1. はじめに

我々はこれまでレーザー変位計を用いたその場観測手法の開発を行ってきた[1]。また、その手法を用いて、衝突速度 1-6 km/s の条件下でクレーター形成実験を行い、掘削領域直径の時間発展増加率についての速度依存性について調べてきた。その結果、衝突速度が約 1-6km/s の範囲において、スケールリング則の重要パラメータの一つである  $\mu$  値に、顕著な衝突速度依存性があることを明らかにした[2] (以下では[2]を Paper I と呼ぶ)。これは  $\pi$ スケールリングの基本仮定である点源近似が、実際の衝突クレーター形成においては厳密に成り立っていないことを意味する[3]。一方、衝突速度依存性を考慮したスケールリング則の定式化を含めた再考察を行うには、1km/s 以下の低速度領域における  $\mu$  の衝突速度依存性についても明らかにすることが重要である。そこで平成 29 年度においては、一段式ガス銃を使用して約 0.1-0.6 km/s における掘削領域直径の時間発展増加率について、レーザー変位計による測定を行い、 $\mu$  値の速度依存性について調べた。

### 2. 衝突クレーター実験とレーザー変位計によるその場観測

本測定では、縦型二段式軽ガス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。弾丸はポリカーボネイド球 (質量 0.064g、直径 4.7 mm) を使用。ターゲットとして、Paper I の場合と同じ、乾燥珪砂 5 号 (東北珪砂データ: 平均粒径約 510 $\mu$ m、バルク密度 1490~1620kg/m<sup>3</sup>、安息角 35°) を使用した。この砂を内径 60cm、深さ 22cm の容器に入れ、垂直方向からレーザー変位計による測定を行った。真空条件は全て 4 Pa 以下で行った。

図 1 に本手法におけるその場観測手法の概要図を示す。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; 1~2kHz)を用いて、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  $D_p$  を、衝突からの時間  $t$  の関数として測定する。レーザー変位計の測定範囲は弾丸衝突点から一同径方向に対してのみにセットされているため、 $D_p$  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、着弾点の中心位置の決定が重要となるが、低速衝突の場合は高速衝突の場合と異なり、衝突直後のキャビティ形状の両リムが、レーザー変位計によるプロファイルとして測定される。そこで、衝突直後のプロファイルデータを使って、着弾中心点を推定した。レーザープロファイルのサンプリングレートは 2kHz とし、標的表面のプロファイルデータに何らかの擾乱が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  $\pm 0.25$ ms とした。

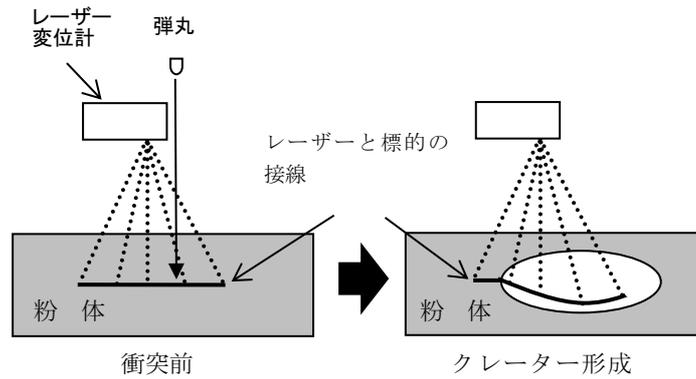


図 1：レーザー変位計によるその場観測手法の概要図。

### 3. 結果

#### 3.1. 掘削キャビティのプロファイルと直径成長の時間発展

図 2 に衝突速度 219 m/s におけるプロファイル例を示す。この図より、衝突直後から 2 コマ目内のキャビティリムの両側が捉えられているのが分かる。つまり、リム位置から弾丸着弾中心点の推定が行える。またこの図より、衝突直後 2, 3 コマ目ではキャビティの底がお碗型ではなく、中央が盛り上がったプロファイル構造になっているのが分かる。これは弾丸の後面が映っているものと思われる（衝突速度が 600m/s 以下では、弾丸は壊れずに球形を保ったまま残っている場合が多い）。その為、弾丸の存在によりクレーターキャビティの深さ方向の正確な推定が難しい事が分かった。

図 3 に、 $D_{ap}$  の時間発展についてプロットした。また、[4] で提案されている掘削流モデルを使ったフィッティング結果も黒線でプロットした。この図より、初期段階はべき乗則で増加するが、 $t=0.01s$  以降で段階的に冪からずれ、概ね  $t=0.1s$  後に過渡クレーターが形成されていることがわかる。なお、圧縮段階の典型的な時間は衝突速度 200m/s で約  $0.00015s (=0.15 \text{ ms})$  と見積もられる。その為、最初の一点目のデータは圧縮段階に相当すると考えられる。一方、二点目以降のデータ点では掘削流が発展した段階に相当すると考えられる。

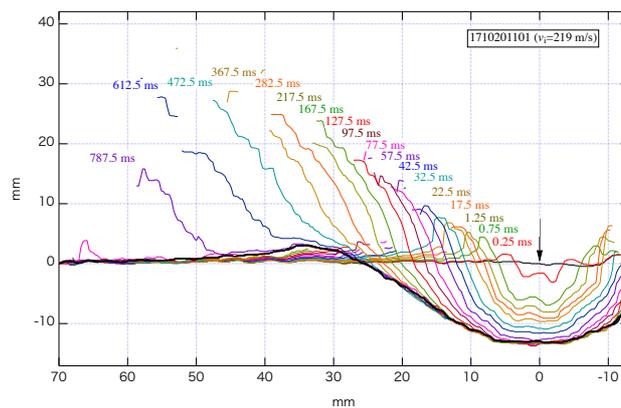


図 2：プロファイルの時間発展の様子 (Shot 21; 実験番号 1710201101, 219m/s)。黒の水平線は衝突前の標的表面のプロファイル。矢印が着弾点中心点。数字は各色のプロファイルの衝突からの時間。

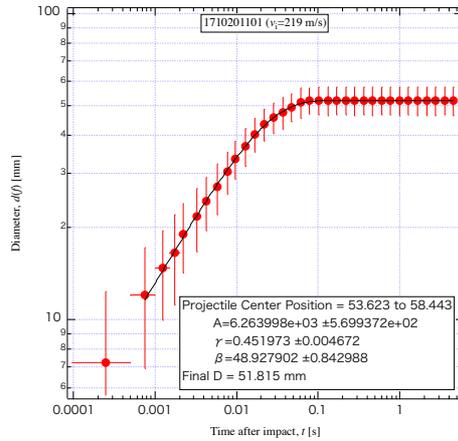


図3：掘削キャビティー直径の時間発展（Shot 21;実験番号 1710201101, 219m/s）。[4]で提案されている掘削流モデル式による回帰結果を黒線で示す。

図4に様々な衝突速度における  $D_{ap}$  の時間発展について比較を行った。また高速衝突のデータとして Paper I より 859m/s 以上のデータもプロットした。この図より、今回のデータは Paper I のデータ同様、初期段階はべき乗則で増加するが、 $t=0.01s$  以降で段階的に冪からずれているのがわかる。また比較として標準スケーリング則 ( $\mu=0.4$ ) に相当する冪指数 0.286 の傾きを黒線で示した。これらの黒線と比較すると、衝突速度が速い場合 ( $>1$  km/s)、冪の傾きは黒線の傾きと同じまたは浅い分布を示すのに対し、今回測定を行った 0.6 km/s 以下の低速衝突では、いずれも黒線よりも急勾配である事がわかった。これは 1km/s 以下においても、Paper I の結果と同じ衝突速度依存性を示すことを意味する。一方、この図から砂のバルク音速付近 ( $\sim 300m/s$ ) 前後で、系統的な違いがあるのかどうかといった判別は難しい。

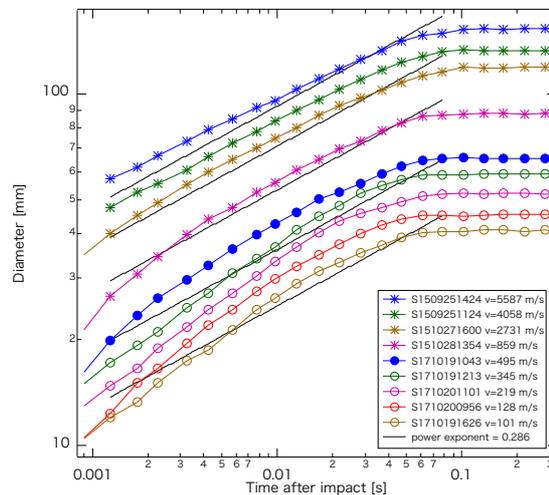


図4：掘削キャビティーの時間発展の比較。859m/s 以上のデータは Paper I から引用。4 本の黒線は目安としての冪指数 0.286 ( $\mu=0.4$ [5]に相当) の傾き (絶対値はそれぞれオフセットしている)。

### 3.2. 冪指数の速度依存性

図5に掘削流モデルより求めた  $\gamma$  と衝突速度  $v_i$  の関係についてプロットした。低速衝突の場合は、高速衝突の場合と比べて、初期段階のキャビティーのスケールが小さいことから誤差がどうしても大きくなる為、 $\gamma$  値はフィッティング範囲に依存するといった問題があることが分かった。例えば、図5より、2 コ

マ目以降をフィット範囲とした場合（図5左）と5コマ目以降をフィット範囲とした場合（図5右）で、 $\gamma$ 値は異なっている。しかし、いずれの場合も今回取得した $\gamma$ 値は、1km/s以上の高速衝突における $\gamma$ よりも大きい。つまり、1km/s以下の $\gamma$ は、1km/s以上の $\gamma$ よりも大きい値を取ると言える。また、今回取得した低速領域のデータは、高速衝突のトレンドを低速側に補外した場合と概ね一致する。一方で、砂の音速（ $\sim 300\text{m/s}$ ）の前後で、 $\gamma$ の分布に違いがあるかどうかについては、本データからだけではよく分からない。

以上まとめると、1km/s以下における $\gamma$ は速度依存性を示し、これまで得られてきた高速衝突実験の結果と調和的であることが分かった。一方音速（約300m/s）前後で何かトレンドの違いがあるのかについては、本データの精度から決めることは難しいと思われる。

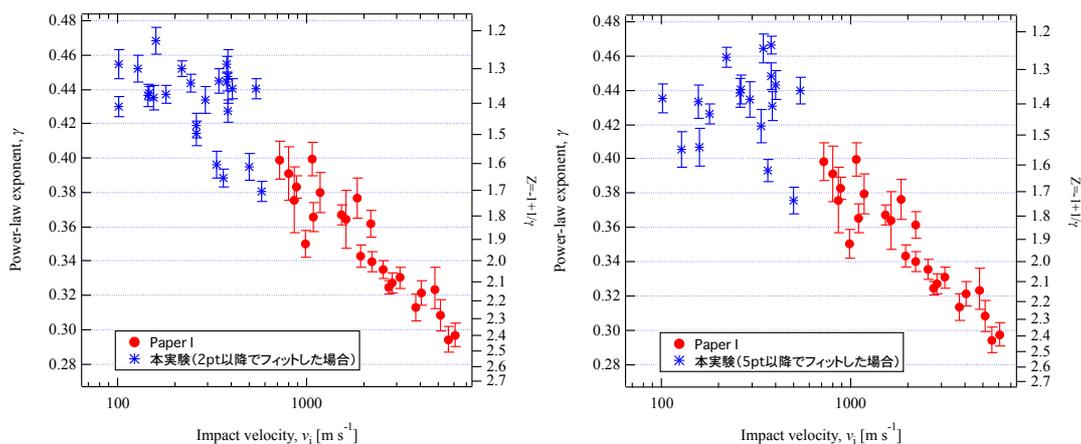


図5：冪指数 $\gamma$ と衝突速度の関係。(左)衝突直後から2データ目以降に対してフィットを行った場合。(右)衝突直後から5データ目以降に対してフィットを行った場合。

### 3.3 最終クレーターに対する $\pi$ スケーリング

図6に本実験で測定された最終クレーターリム径を $\pi$ スケーリングに応用した結果を示す。この図より、低速速度の結果は高速速度で得られているスケーリング関係式と非常に良い一致を示すことが分かる。つまり、我々の砂の実験結果を使ってスケーリング関係式を得ると、Paper Iで指摘しているように、 $\mu$ 値は約0.4となり、いわゆる標準スケーリング関係式[5]と調和的な結果になってしまう。この結果もPaper Iと同じである。

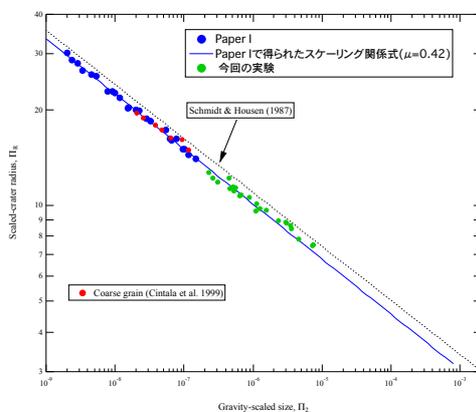


図6：無次元クレーター半径と無次元エネルギーの関係。緑丸が本実験の結果（最終クレーターリム直径）。比較のため[5]のスケーリング関係式（ $\mu=0.4$ ）および[6]の結果もプロットした。

#### 4. まとめと今後

低速衝突におけるプロファイルの測定を行い、掘削段階の衝突速度依存性について調べた。その結果、本実験データで得られる $\gamma$ は、明らかに 1km/s 以上の高速衝突における $\gamma$ よりも高い値を示し、これまで得られてきた高速衝突実験の衝突速度依存性のトレンドと調和的であることが分かった。一方砂の音速の前後で $\gamma$ のトレンドに顕著な違いは見られなかった。最後に最終クレーター形状を $\pi$ スケーリングにプロットすると、高速衝突の場合と同じトレンド上に来る事がわかった。今後は、音速前後のトレンドの違いを明らかにするために、測定精度の改良を行った上で低速衝突を中心にデータ取得を行う予定である。また、それらの結果を基に、スケーリング則に対して、速度依存性をどう反映させるかについての考察を進めていく予定である。

#### 参考文献

- [1] 山本 聡, 長谷川直, 鈴木絢子, 松永恒雄, 2015 遊星人, 24, 239.
- [2] Yamamoto, S. et al., 2017, JGR, 122, 1077.
- [3] 山本 聡, 長谷川直, 鈴木絢子, 松永恒雄, 2018, 遊星人, 27, in press.
- [4] Yamamoto, S. et al., 2009, Icarus, 203, 310.
- [5] Schmidt, R. M. and K. R. Housen, 1987, Int. J. Impact Eng. 5, 543.
- [6] Cintala, M. J. et al., 1999, MAPS, 34, 605.