

堆積岩への斜め衝突クレーター形成実験

辻堂さやか¹, 原田竣也¹, 藤田陽一², 鈴木絢子³, 長谷川直³, 黒澤耕⁴,
門野敏彦⁵, 中村昭子¹, 荒川政彦¹, 杉田精司⁶

¹神戸大学大学院 理学研究科, ²防衛大学校 理工学研究科,
³宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ⁴千葉工業大学 惑星探査研究センター,
⁵産業医科大学医学部, ⁶東京大学大学院新領域創成科学研究科

衝突クレーターは太陽系内の全ての固体天体上で普遍的に見られ、それらの多くは衝突角度が垂直以外の斜め衝突でできたと考えられている。衝突角度は、衝突速度や衝突する/される物体の密度や強度などと同様に衝突条件の重要なパラメータであり、クレーターのスケール則や二次クレーター形成において重要である。しかし、衝突実験装置の構造や設置方法による制約のため、またよりシンプルな系で物理を理解する目的のため、特に強度支配域での斜め衝突は実験例が少ない。一方で、近年の惑星探査技術の向上によって、より小さいサイズのクレーターまで観察可能になってきたことに加え、Carancas 衝突イベント(e.g., Tancredi et al., 2009) や Kamil クレーター(Folco et al., 2011) など地球上でもクレーター形成において強度が無視できないと考えられる条件のクレーターが次々と見つかりつつある。そこで我々は、強度支配域でのクレーターサイズや形状における衝突角度の影響を明らかにするため、石灰岩への斜め衝突実験を行った。

実験は宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所スペースプラズマ実験施設の二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸には直径 7 mm のナイロン球、標的には15 cm×15cm×10cm、30cm×15cm×10cmの2種類の直方体に加工した石灰岩を用いた。ナイロン球の密度は1.1 g/cm³ 標的石灰岩の密度は2.3 g/cm³である。衝突速度は約 5.0 km/s で一定とした。標的表面と衝突速度ベクトルの成す角を衝突角度 θ と定義し、 $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ (正面衝突) の6種類に変化させ、合計6ショット行った。

衝突の様子は高速デジタルビデオカメラで観察した。ショット後に標的上にできたクレーターの直径(弾丸進行方向、またそれに垂直方向)をノギスを用いて計測した。また、高精度3次元形状測定システム(COMS MAP-3D)を用いてクレーターの立体図を作成し、クレーターの体積と深さを得た。さらに、標的の後ろにアルミの検証板を設置することで、衝突後のエジェクタの垂直方向と水平方向の広がりを計測した。できたクレーターの直径(進行方向・垂直方向)、深さ、体積が衝突角度によってどのように変化するか調べた。 $\theta = 90^\circ$ での値で規格化すると、クレーター深さ直径比(深さ/平均直径)、体積はそれぞれ、 $(\sin \theta)^{0.15}$, $(\sin \theta)^{2.51}$ に比例することがわかった。

体積の角度依存性においては、 $\sin \theta$ のべきの値は花崗岩にアルミニウム弾丸を衝突させた結果 (Gault and Wedekind 1978; 1.80 ± 0.16) や、ナイロン球を石灰岩に衝突速度 $\sim 2.5\text{km/s}$ で衝突させた 2012年の実習結果 (鈴木 2012; 1.60 ± 0.07) より大きくなったが、これは衝突角度 $\theta = 5^\circ$ でのクレーター体積が1桁程小さいためで、 $\theta = 5^\circ$ の結果を外して決めたべきは 1.64 ± 0.15 であり、2012年の実習結果とほぼ一致する。強度支配域では、クレーターの体積は衝突のエネルギーのほぼ1乗(衝突速度のほぼ2乗)に比例することが知られている (Gault, 1973) ため、クレーター体積における衝突角度の影響は、衝突速度の垂直成分として考慮すれば良いという概念 (Gault and Wedekind, 1978; Chapman and McKinnon, 1986) を比較的再現した結果となった。衝突角度 $\theta = 5^\circ$ でできたクレーターは、下流方向に表面が盛り上がり、クラックが入ったもののがれなかったと考えられる部分が大部分を占めたために、体積が極端に小さくなったと考えられる。強度支配域のクレーターでは、スポール破片がクレーター直径や形状の決定に大きな役割を果たす。スポール破片がクレーター直径に及ぼす影響を排除するためにはショット数を増やす必要がある。

進行方向直径と垂直方向直径の平均値を平均直径し、クレーターの深さを平均直径で規格化した値は、 $\theta = 20^\circ$ から 90° でほぼ一定で、 0.16 ± 0.01 であり、一方 $\theta = 5, 10^\circ$ ではそれより小さい値となった。2012年の実習結果 (鈴木 2012) と良い整合性が見られた。直径・深さそれぞれの $\sin \theta$ 依存性を鑑みると、衝突角度が小さくなるにつれて直径より深さの方が小さくなりやすいことが効いている。これは、本実験で用いたナイロン弾丸の密度は石灰岩標的の約半分であり、弾丸が潜り込みにくい条件であったためと考えられる。

また、クレーター形状の進行方向のプロファイルから、クレーターの最深点は衝突角度が小さくなる程浅くなるとともに、弾丸侵入方向によっていく傾向が見られることがわかった。

衝突後の検証板から、エジェクタの垂直方向と水平方向の広がり角度を計測した結果、 $\theta \leq 10^\circ$ では垂直方向、水平方向ともにエジェクタの広がりほとんど見られないことがわかった。 $\theta = 5^\circ$ ではエジェクタはほとんど放出されず、弾丸が検証板を貫通した。 $\theta \geq 20^\circ$ では衝突角度が大きくなる程、エジェクタの広がり角度は垂直方向、水平方向ともに大きくなることがわかった。2012年の実習結果 (鈴木 2012; 衝突速度 $\sim 2.5\text{km/s}$) と比較すると、エジェクタの広がり角度は小さいことから、衝突速度が大きいと広がり角度が小さくなる傾向があることがわかった。