

堆積岩への斜め衝突クレーター形成実験

鈴木絢子^{1,2}, 木内真人², 河本泰成², 松本恵里², 門野敏彦³,
中村昭子², 長谷川直⁴, 黒澤耕介⁴, 荒川政彦², 杉田精司⁵

¹惑星科学研究センター, ²神戸大学, ³産業医科大学,

⁴宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁵東京大学

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、標的には一辺 15 cm の立方体に加工した石灰岩を用いた。標的石灰岩の引っ張り強度、密度、空隙率は、それぞれ 4.6 MPa, 2.24 g/cm³, 約 17% である (Suzuki et al., 2012)。衝突速度は約 2.5 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、 $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の 6 種類に変化させ、合計 7 ショットを行った。

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、デジタルマイクロスコープ (キーエンス, VHX-1000) 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。

衝突角度が 90° のときは、中心にピットを持つクレーターが形成されたが、 45° 以下では顕著なピットは見られなかった。できたクレーターの直径 (進行・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。それぞれ $\theta = 90^\circ$ での値で規格化すると、直径 (進行・垂直方向)、深さ、体積は、 $(\sin \theta)^{(0.54 \pm 0.01)}$, $(\sin \theta)^{(0.49 \pm 0.01)}$, $(\sin \theta)^{(0.66 \pm 0.02)}$, $(\sin \theta)^{(1.61 \pm 0.09)}$ 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) と近い値を示す事がわかった。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。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。

クレーターの進行方向直径を垂直方向直径で規格化した値は、垂直から $\theta = 5^\circ$ に至るまで 1.11 ± 0.11 とほぼ一定で、進行・垂直直径比が1からずれ始める角度は Gault and Wedekind (1978) の 15° 、Burchell and Whitehorn (2003) の 5° よりさらに小さくなった。これは、ナイロン弾丸は破壊されやすく弾丸の “impact decapitation” (e.g., Burchell and Whitehorn, 2003) が起こらず、進行方向の直径も垂直方向と同様に θ 減少に伴って小さくなったためである可能性が考えられる。ただし、 $\theta = 5^\circ$ でできたクレーターでは、下流方向のリム付近が盛り上がり、クラックが入ったものはがれなかったと考えられる部分も観察された。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。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。