

## 石灰岩標的において衝突角度がクレーターサイズに及ぼす影響 Effect of incident angle on crater dimensions with limestone targets

鈴木 絢子<sup>1\*</sup>, 木内 真人<sup>2</sup>, 河本 泰成<sup>2</sup>, 松本 恵里<sup>2</sup>, 門野 敏彦<sup>3</sup>, 中村 昭子<sup>2</sup>, 長谷川 直<sup>4</sup>, 黒澤 耕介<sup>4</sup>, 荒川 政彦<sup>2</sup>, 杉田 精司<sup>5</sup>  
 Ayako Suzuki<sup>1\*</sup>, Masato Kiuchi<sup>2</sup>, Yasunari Komoto<sup>2</sup>, Eri Matsumoto<sup>2</sup>, Toshihiko Kadono<sup>3</sup>, Akiko Nakamura<sup>2</sup>, Sunao Hasegawa<sup>4</sup>,  
 Kosuke Kurosawa<sup>4</sup>, Masahiko Arakawa<sup>2</sup>, Seiji Sugita<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 惑星科学研究センター, 神戸大学, <sup>2</sup> 神戸大学, <sup>3</sup> 産業医科大学, <sup>4</sup> 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究所, <sup>5</sup> 東京大学

<sup>1</sup>CPS, Kobe Univ., <sup>2</sup>Kobe Univ., <sup>3</sup>Univ. Occupational and Environmental Health, <sup>4</sup>ISAS / JAXA, <sup>5</sup>Univ. Tokyo

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るが、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。衝突角度の影響は、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と考えられるが、衝突銃自身の構造やシンプルな系で物理を理解する目的などから、特に強度支配域での斜め衝突実験は研究例が少ない。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て、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、地球上でも強度支配域と考えられるクレーターがたくさん見ついている。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/cm<sup>3</sup>, 約 17% である (Suzuki et al. 2012)。衝突速度は約 2.5 km/s で一定とし、標的への入射角度を水平から  $\theta = 5, 10, 20, 30, 45, 90^\circ$  (垂直衝突) の 6 種類に変化させた。

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 (進行方向とそれに垂直方向) をノギスを用いて計測した。また、デジタルマイクロスコブ (キーエンス, VHX-1000) を用いてクレーターの立体図を起し、クレーターの体積と深さを得た。

衝突角度が  $90^\circ$  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、 $45^\circ$  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。体積に着目してみると、 $\sin \theta$  のべきの値は、花崗岩にアルミニウム弾丸を衝突させた場合 (Gault and Wedekind 1978;  $1.80 \pm 0.16$ ) と近い。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  $1.11 \pm 0.11$  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  $15^\circ$ , Burchell and Whitehorn 2003 の  $5^\circ$  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、減少に伴って小さくなったためであると考えられる。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の直径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とし、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  $90^\circ$  でほぼ一定で、 $0.16 \pm 0.01$  となった。 $\theta = 5, 10^\circ$  では小さい値となった。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。