

堆積岩に対する斜め衝突クレーター形成実験

紫垣 沙央(神戸大), 大村 知美(神戸大), 田口 英理根(防衛大), 鈴木 絢子(JAXA), 黒澤 耕介(千葉工大), 長谷川 直(JAXA), 平井 隆之(JAXA), 中村 昭子(神戸大), 門野 敏彦(産業医科大), 荒川 政彦(神戸大), 杉田 精司(東大)

背景

惑星上のクレーターは衝突により形成されると考えられており、この衝突クレーターの情報を調べることで、衝突の履歴、衝突体の性質などの情報を得ることが可能である。衝突が起こる際、衝突軌道は惑星表面に対し垂直であるとは限らないため、衝突角度がクレーターに与える影響を理解することは重要である。また、近年の観測技術の向上により、強度支配域で形成される小さなクレーターも発見されるようになったため、強度支配域におけるななめ衝突の研究も必要と考えられる。本研究では、衝突角度と形成クレーターの関係性に関する知見を得るため、堆積岩に対する高速度ななめ衝突の実験を行った。

実験方法

標的には堆積岩ブロック(密度:2.24g/cm³, 引張強度:4.6MPa)を使用し、衝突点の調整が困難な衝突角度の小さい実験と衝突エネルギーが最も大きくなる垂直衝突の実験には大きな標的 30×15×10(cm³)を、それ以外の実験には小さな標的 15×15×10(cm³)を用いた。弾丸には直径 3.2 mm のステンレス球(直径:3.2mm, 質量:0.133g, 密度:7.8g/cm³)を用いた。実験には宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使用した。真空チャンバー内に標的を設置し、標的を傾けることで衝突角度 θ を変化させた。ここで、 θ は標的表面と弾丸の衝突方向が成す入射角($\theta \leq 90^\circ$)である。衝突速度はおよそ 5.5 km/s で、 θ を 5°, 10°, 20°, 30°, 45°, 90° と変化させ 6 種類の衝突角度で実験を行った。衝突時の様子はハイスピードカメラで記録した。

結果と考察

Fig. 1. には、衝突時の角度・衝突速度・標的の大小を示した表と、衝突後のクレーターの様子を記している。衝突後、形成されたクレーターの弾丸軌道方向の長さ D_L とそれに垂直な方向のクレーター幅 D_T 、またクレーター体積、クレーター深さを測定し、そこから衝突角度とクレーター体積、クレーター深さ、

クレーター幅、クレーター縦横比との関係についてそれぞれ考察を行った。また、堆積岩への正面衝突実験から導き出されたスケーリングと本実験の結果を比較し、スケーリング則の適用についても考察を行った。

1.クレーター体積と衝突角度について(Fig. 2.)

本実験の結果では、衝突角度が 90° に近づくにつれクレーター体積が増加した。ベキ乗でフィッティングすると、クレーター体積は $\sin\theta$ の 1.78 乗で表されることがわかった。本実験と同様にななめ衝突を行った実験として **Burchell & Whitehorn (2003)** が挙げられ、彼らは本実験と同様の速度で異なる標的(花崗岩)へのななめ衝突実験を行っている。本実験の結果をこの先行研究における結果と比較すると、ベキ乗の値は異なるものの、衝突角度が 90° に近づくにつれ掘削された体積が増加する傾向は標的によらず共通であることがわかった。

2.クレーター深さと衝突角度について(Fig. 3.)

本実験の結果では、衝突角度が 90° に近づくにつれクレーター深さが増加した。ベキ乗でフィッティングすると、クレーター体積は $\sin\theta$ の 0.82 乗で表されることがわかった。この結果も **Burchell** らの結果と比較すると、衝突角度によるクレーター深さの増加傾向も標的によらず共通であることがわかった。

3.クレーター幅と衝突角度について(Fig. 4.)

本実験の結果では、衝突角度が 90° に近づくにつれクレーター幅が増加した。ベキ乗でフィッティングすると、クレーター幅は $\sin\theta$ の 0.62 乗で表されることがわかった。この結果も **Burchell** らの結果と比較すると、衝突角度によるクレーター幅の増加傾向も標的によらず共通であることがわかった。

4.クレーター縦横比と衝突角度について(Fig. 5.)

本実験の結果では、衝突角度が 90° に近づくにつれクレーターの楕円率が 1 に近づく、すなわち円形に近いクレーターが形成されるようになった。この結果も **Burchell** らの結果と比較すると、衝突角度が 90° に近づくにつれてクレーター形状が円形に近づく傾向は共通であった。ただし、**Burchell** らの結果では衝突角度が 10° 以上の全てのクレーターにおいて縦横比が 0.9 を上回りほぼ円形となっていたのに対し、本実験の結果は衝突角度の増加に従って徐々に円形のクレーターに近づいていくという点で異なっていた。この違いの原因としては、標的に用いた物質の種類、強度の違い等が考えられる。

5.規格化クレーター直径と規格化強度の関係について(Fig. 6.)

本実験でのクレーター幅 D_T をクレーター直径、また標的表面に対し垂直方向の

速度 $v \sin\theta$ を衝突速度とみなし、規格化クレーター直径 Π_D と規格化強度 Π_3 を求めた。本実験の結果からは、 $\Pi_{Dr}=0.71\Pi_3^{-0.30}$ という結果が得られた。本実験と同じ堆積岩への正面衝突を行った Suzuki et al. (2012) の結果と本実験の結果を比較すると、これらの結果はよく一致する。従って、ななめ衝突のときのクレーター幅は、速度の垂直成分を用いて計算したスケーリング則に従うことがわかった。

まとめ

衝突角度が小さい、すなわちよりななめな衝突であるほど、クレーターの体積・深さ・幅は小さくなり、楕円度は大きくなる傾向が見られた。また、速度の垂直成分を用いると、クレーター幅は正面衝突と同じスケーリング則に従うことがわかった。標的の異なる先行研究と比較すると、衝突角度に従った楕円度の変化の仕方に違いが見られた。ただし、今回行った実験のみではおそらくデータ点が十分ではないため、さらなる実験が必要だと考えられる。

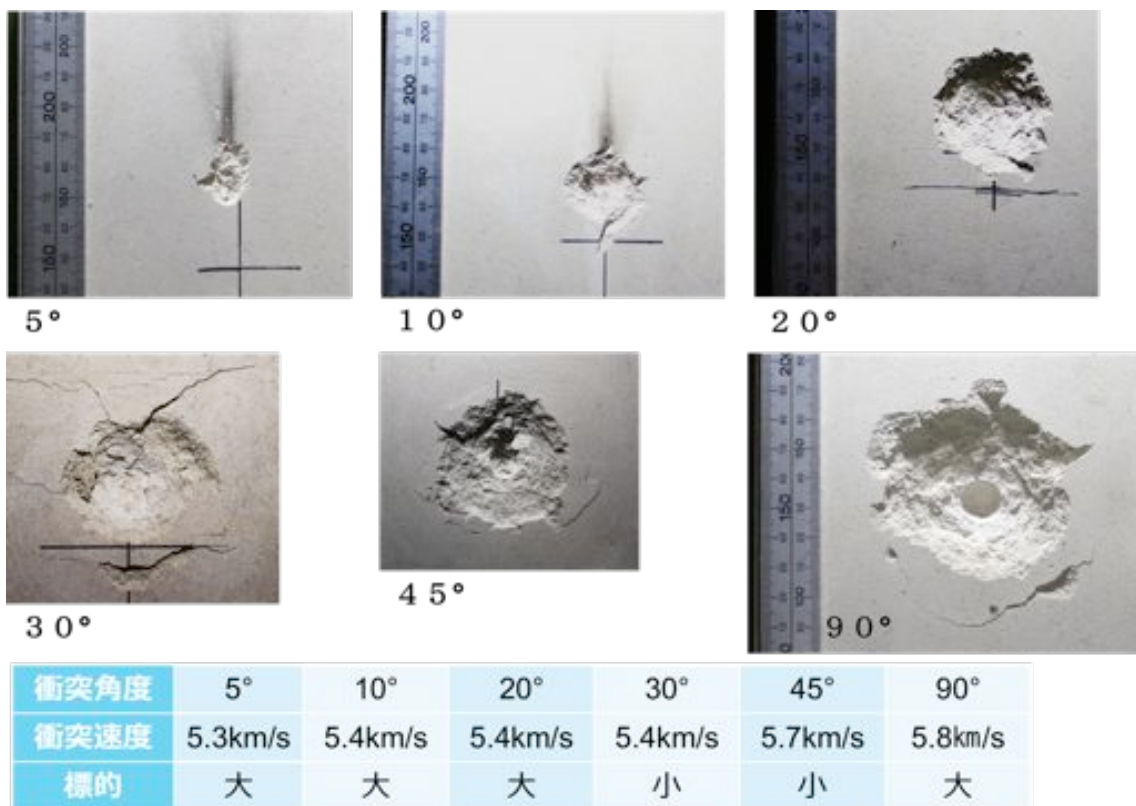


Fig. 1. 衝突条件と、形成されたクレーターの様子

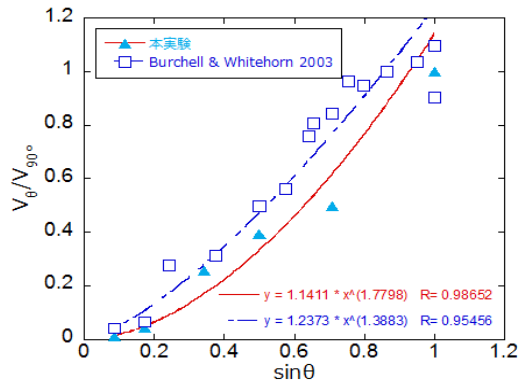


Fig. 2. クレーター体積と衝突角度
(θ : 衝突角度、 V : クレーター体積)

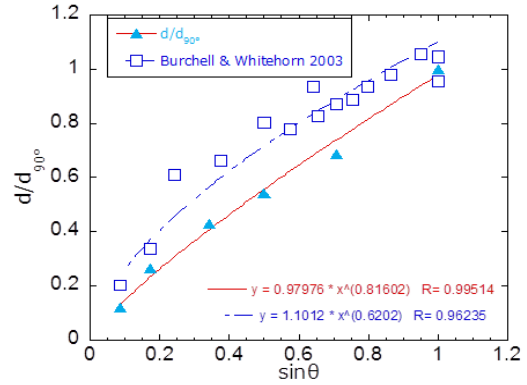


Fig. 3. クレーター深さと衝突角度
(d : クレーター深さ)

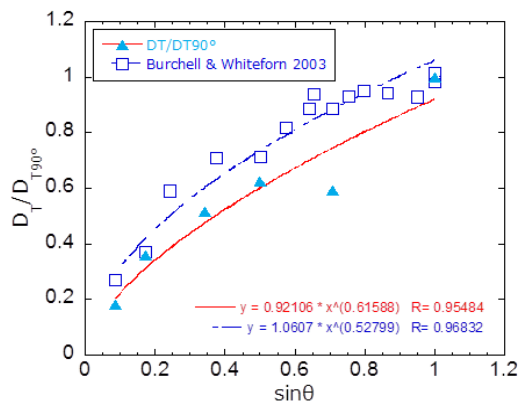


Fig. 4. クレーター幅と衝突角度
(D_T : クレーター幅)

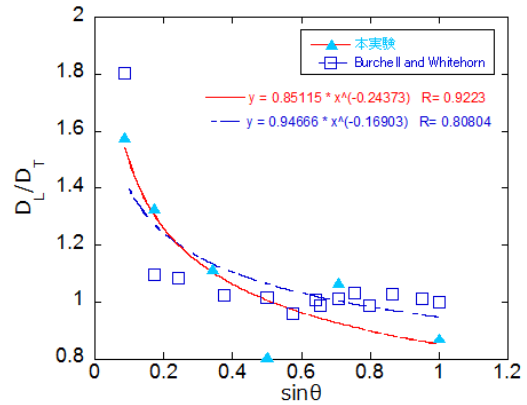


Fig. 5. クレーター縦横比と衝突角度
(D_L/D_T : クレーターの楕円率)

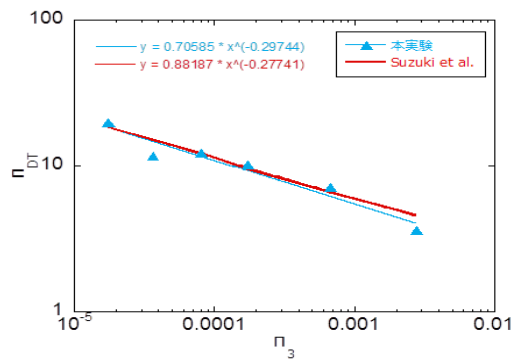


Fig. 6. 規格化クレーター直径と規格化強度

$$\Pi_D = \left(\frac{\rho_t}{m}\right)^{\frac{1}{3}} D \quad \text{規格化クレーター直径}$$

$$\Pi_3 = \frac{Y}{\rho_p v_i^2} \quad \text{規格化強度}$$