

# 岩塊上の衝突クレーター：側面がスポールする衝突条件

○門野敏彦<sup>1</sup>, 中村昭子<sup>2</sup>, 末次 竜<sup>3</sup>, 白水誠弥<sup>1</sup>, 高津一誠<sup>1</sup>, 張 大暁<sup>1</sup>, 小川晃輝<sup>2</sup>, 野村啓太<sup>2</sup>, 長足友哉<sup>4</sup>, 村上祐一<sup>2</sup>, 山崎祐太郎<sup>2</sup>, 塩本純平<sup>2</sup>, 岡本尚也<sup>5</sup>, 川合伸明<sup>6</sup>, 田中 茂<sup>7</sup>

1 産業医科大, 2 神戸大, 3 大島高専, 4 東北大, 5 千葉工大, 6 防衛大, 7 熊本大

## 1. はじめに

小惑星表面の岩塊上には、岩塊の端付近にありながら円形のクレーターも見つかっている(1)。室内衝突実験からは標的上面の端付近に衝突すると標的の側面がスポレーションすることが知られているが(2)、どれくらい端(側面)から近いところに衝突すると側面のスポレーションが起こるのか定量的に調べられていない。そこで、衝突実験を行い側面のスポレーションが起こる条件を調べた。

## 2. 衝突実験と結果

宇宙科学研究所の横型二段式水素銃を用いて、円柱形の石膏および立方体の玄武岩標的に対して、標的上面の端からの距離を変えて衝突実験を行った。図1は、横軸が衝突点と端までの最短距離  $L_{\min}$ 、縦軸が側面のスポレーションの高さ  $h$  である。両軸とも、上面にできたクレーターの半径  $R_t$  で規格化されている。過去の石膏および玄武岩に対する衝突実験の結果(2-4)も合わせてプロットしてある。 $h/R_t > 0$  であれば側面のスポレーションが起こったことを示している。石膏、玄武岩どちらの場合も  $L_{\min}/R_t$  が 2-2.5 よりも小さいと側面スポレーションが起こることがわかった。

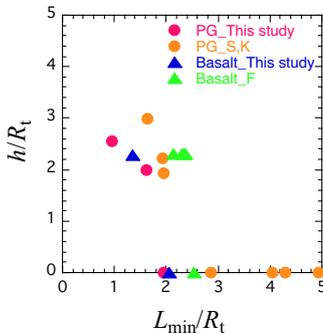


図1. 衝突点と標的端までの最短距離と側面スポレーションの高さ

## 3. 考察

### 3-1 モデル

衝突実験で得られた側面のスポレーションが起こる条件を参考文献(4-6)のモデルを使って考察した。このモデルは衝突点直下の深さ  $d_b$  から発した応力波  $\sigma_{rr}$  が自由表面に角度  $\alpha$  で入射するとき反射波  $|\sigma_{rr}'| = f(\alpha) \sigma_{rr}$  または  $\tau = g(\alpha) \sigma_{rr}$  がある閾値  $\sigma_c$  を越えていけばスポレーションが起こるというものである (つまり  $\sigma_c \leq \sup\{f(\alpha), g(\alpha)\} \sigma_{rr} = A(\alpha) \sigma_{rr}$  のときにスポレーションが起こる)。応力波の減衰を  $\sigma_{rr} = kx^{-n}$  とすれば ( $x$  は  $d_b$  からの距離,  $n$  と  $k$  は定数), 標的上面のクレーターリムでは  $\sigma_c = A(\alpha_{\text{rim}}) k(R_t^2 + d_b^2)^{-n/2}$  ( $\alpha_{\text{rim}}$  はリムでの応力波の入射角),

側面のスポレーションが起こる条件は  $\sigma_c \leq A(0) k L_{\min}^{-n}$  となる。よって,

$$L_{\min}/R_t \leq (A(\alpha_{\text{rim}}))^{-1/n} (1 + (d_b/R_t)^2)^{1/2} \equiv \eta \quad (1)$$

が側面スポレーションの条件となる。

### 3-2 爆発実験と結果

この式を検証する際に問題になるのは衝突の場合  $d_b$  をどのように定義するかである。この不定性を避けるため、 $d_b$  を明確に定義できる爆発実験を行い、このモデルで側面のスポレーションが起こる条件が説明できるかどうかを検証した。

爆発実験は熊本大・パルスパワー科学研究所(現産業ナノマテリアル研究所)で行った。標的として円柱形の石膏(密度 1.09 g/cm<sup>3</sup>, 空隙率 53±2%, 引張強度 2-3 MPa)を用いた。標的上面(平面の部分)に直径 2 cm 弱の円筒形の孔を穿ち、円柱形に成型した SEP 爆薬(エネルギー密度 4158 J/g) 1 または 3 g を孔に埋め込み爆破した。爆薬の直径は 1.6 cm, 長さは爆薬量によって異なる。図2は爆発実験の場合の  $L_{\min}/R_t$  に対する  $h/R_t$  である。この場合も  $L_{\min}/R_t < 2-2.5$  の時に側面のスポレーションが起こっていることが分かる。

それぞれの実験条件から式(1)の  $\eta$  を求めると、 $\eta$  はほぼ一定  $2.04 \pm 0.06$  となった。また、 $\eta$  と  $L_{\min}/R_t$  を比較したところ、実際に  $L_{\min}/R_t < \eta$  の場合には側面のスポレーションが必ず起こっていた。したがって、スポレーションは応力波の反射波がある一定以上の大きさの場合に起こるといふモデルの妥当性が示された。このモデルは、スポレーションは応力波の減衰と自由表面への入射角度に依存すること、距離が近ければ入射角度が大きいところまでスポレーションが起こり、距離が遠くても入射角度が小さければスポレーションは起こることを示している。距離が遠い場合には、入射角度が小さくてもより広い範囲での破壊が起こりクレーターの体積が大きくなるということが示唆される。

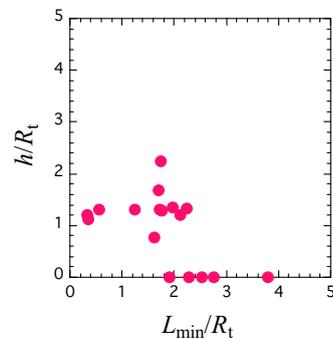


図2. 爆発点と標的端までの最短距離と側面スポレーションの高さ

#### 4. まとめ

岩塊上面への衝突によって岩塊側面のスポレーションが起こる条件を調べた。衝突点から岩塊側面までの距離がクレーターの直径程度より離れていれば通常の丸いクレーターが生成されるが、それよりも端に近ければ側面のスポレーションが起こることがわかった。これによって探査で得られた画像から岩塊の履歴について議論できるだろう（たとえば端に近いところに丸いクレーターがある場合には、その岩塊がより大きな時に衝突が起こり丸いクレーターが生成されたが、その後何らかの理由によりクレーター付近にクラックが生じて岩塊が破壊された、など）。

（本研究の詳細は参考文献(7)を見てください）

#### 参考文献

- (1) e.g., Ballouz et al., 2020 Nature 587, 205–209.
- (2) Kadono et al., 2018 PSS 163, 77-82.
- (3) Fujiwara et al., 1977 Icarus 31, 277-288.
- (4) Suzuki et al., 2018 Icarus 301, 1-8.
- (5) Fujiwara, 1980 Icarus 41, 356-364.
- (6) Fujiwara, 1991 Icarus 89, 384-391.
- (7) Kadono et al., 2023 PSS 236 105763

