

小規模衝突による傾斜地形緩和に関する実験的研究

大村 知美, 滝澤 真太, 桂木洋光

名古屋大学大学院環境学研究科

はじめに

天体上では浅く、はっきりしないクレーター等、形成後に緩和を受けた地形が観測されている。地形緩和を引き起こすメカニズムは複数考えられているが、本研究では微小隕石衝突による地形緩和に着目した。衝突による斜面の緩和は[1]で理論的にモデル化されている。このモデルでは、一回の衝突による斜面の緩和量を、エジェクタ環重心位置がクレーター中心位置に対して斜面下方向に移動した距離 W をもとに定量化している。 W は形成されるクレーター半径 R と斜面の傾斜角 θ の関数として以下のように表される：

$$W \sim R \tan \theta \quad (1).$$

ただしこのモデルではキャビティ崩壊の影響や衝突角度の影響は考慮されていない。本研究では[1]にならない、衝突前後での重心の勾配方向への移動を緩和の指標とし、[2]で行われた傾斜粉体層への低速度衝突実験のデータより、傾斜角と衝突条件が緩和の効率に及ぼす影響を調べた。

実験

標的には直径 0.1–0.3 mm の豊浦珪砂(安息角 34°)を用いた。標的容器の傾斜角 θ は $0^\circ \leq \theta \leq 34^\circ$ で変化させ、衝突角 ϕ は標的の斜面上方向から測定して $10^\circ \leq \phi \leq 170^\circ$ で変化させた。ただし解析には $50^\circ \leq \phi \leq 130^\circ$ のデータのみ用いた。弾丸には直径 6 mm の、質量が 0.12 g, 0.25 g, 0.4 g のものを用いた。衝突速度は 7–97 m/s で実験を行った。実験は大気中で行っている。クレーターの三次元プロフィールはレーザー変位計で測定した。

$\theta=20^\circ$ 程度から、傾斜角が大きくなるほど、クレーターは崩壊の影響によって斜面方向に長細く、また浅くなった。エジェクタが斜面下方向に偏って堆積する様子も見られた。

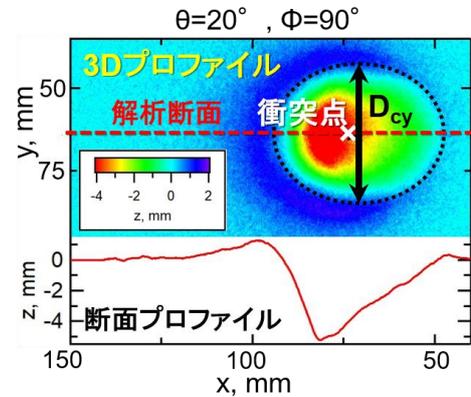


図 1：実験で得た 3D プロファイルと解析した断面プロフィールの例。

解析手法

クレータープロフィールのうち、弾丸軌道を含む断面のみについて解析を行った(図 1)。2 次元プロフィールにおける、エジェクタ堆積及びクレーターの崩壊の非等方性による重心移動を考えた。 $\theta=0^\circ$, $\phi=90^\circ$ の実験で得られたプロフィールをクレーター短径(D_{cy})のスケールリング則[2]に従って拡大縮小し、凹部分を抜き出したものを基準面として、基準面より高い部分は正の、低い部分は負の質量を持つとして重心を求め、斜面下方向を正として衝突点からの重心移動距離 Δx を求めた。

解析結果

解析結果の例を図 2 に示す。 $\theta=0^\circ$, $\phi=90^\circ$ の場合は衝突点に対し等方的に堆積したエジェクタの重心を求めることになり、計算された重心位置と衝突点の位置はほぼ一致する。傾斜角が大きくなるとクレーターの崩壊の効果で衝突後の重心は斜面下方向に移動した。

$\phi=90^\circ$ の場合の、クレーター短径で規格化した重心移動距離と傾斜角の関係を図 3 に示す。重心の移動距離は傾斜角 θ の増加と共に増加し、 θ が安息角に近づくにつれ重心移動距離は非線形的に、(1)式で表されるよりも急な増加を示した。これがキャビティ崩壊の影響であると考えられる。衝突角依存性については、 ϕ が小さい場合に重心移動距離は負の方に大きくなり、 ϕ

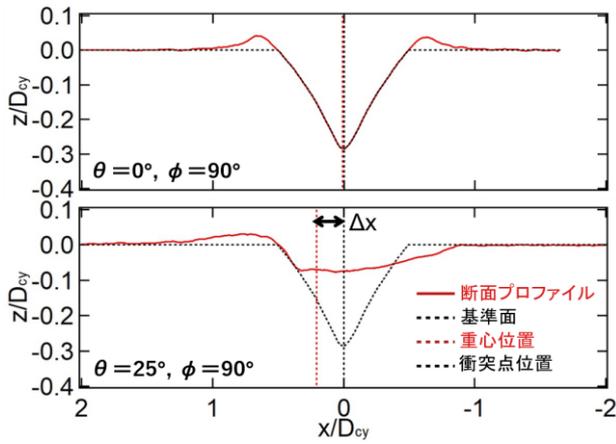


図2：解析結果の例。図の左側が斜面下方向に対応する。

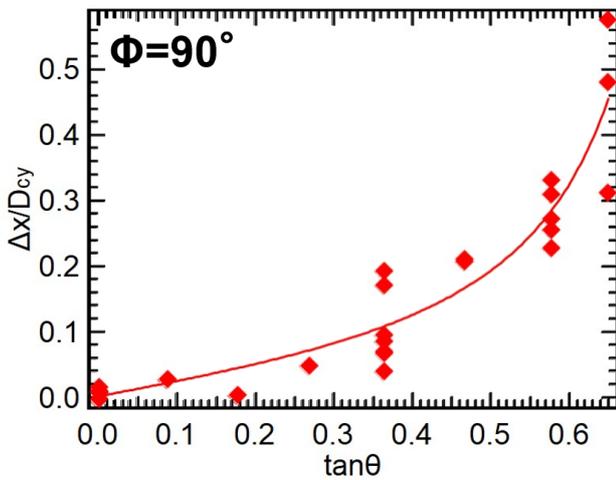


図3：重心移動距離と傾斜角の関係。曲線は式(2)でのfitting。

が大きくなるほど重心移動距離は正の方向に変化していく傾向があったが、傾斜角依存性ほどはっきりとした傾向は見られなかった。

重心移動距離の定式化

土砂崩れ等のモデル[3]を参考に、重心移動距離の $\tan\theta$ 依存性を次の式で近似した：

$$\frac{\Delta x}{D_{cy}} = a \left(\frac{\tan\theta}{1 - \left(\frac{\tan\theta}{b}\right)^2} \right) + c \quad (2).$$

a, b, c はどれも定数である。全ての定数を自由パラメータにして $\phi = 90^\circ$ の結果の fitting を行うと、 $a=0.232 \pm 0.048$, $b=0.795 \pm 0.042$, $c=0.001 \pm 0.019$ が得られた。衝突角 ϕ が異なる場合についても a と b の値を固定して fitting を行うと、 c の値は ϕ と共に増加した。各定数の意味合いについては以下のように考えられる。

(i) a の値： $\theta \rightarrow 0$ で(2)式は以下のように表され、 a は θ が小さい領域における重心移動距離の $\tan\theta$ 依存性を

表す係数であることがわかる：

$$\frac{\Delta x}{D_{cy}} = a \tan\theta + c \quad (3).$$

一方で、(1)式を変形すると

$$\frac{W}{2R} \sim 0.5 \tan\theta \quad (4)$$

となり、(3)(4)式は似た形をしていることがわかる。このことから、 θ が小さい領域における重心移動は[1]のモデルで考えられるようなエジェクタ堆積の効果によると解釈できる。天体上での地形緩和の場合、大半の時間は θ が小さい状況での緩和であると考えられるので、[1]のモデルを天体上に応用することに大きな問題はないことが示唆される。

(ii) b の値： $\tan\theta = b$ のとき(2)式の値は発散する。重心移動が粉体の崩壊する現象と考えると θ の値は砂の安息角程度になるのが自然である。 $b=0.795 \div \tan 40^\circ$ であり、この θ の値は安息角 34° よりも多少大きい、ある種の摩擦角であると考えることができる。もしくは解析を中心の断面のみで行ったことが b の値に影響しているかもしれない。

(iii) c の値： c は $\tan\theta = 0$ のときの切片の値であり、 $\phi = 90^\circ$ で $c \approx 0$ 、 $\phi \neq 90^\circ$ では $c \neq 0$ となる。これは $\theta = 0$ のときの重心移動距離、つまり重心移動距離の衝突角依存性を反映する値である。

まとめ

実験データの解析より、斜面への斜め衝突によるクレーター形成で起こる重心移動を調べた。重心移動距離の傾斜角依存性は(2)式で近似することができた。また天体上での地形緩和を考える際には、[1]のモデルが有用であることが実験的に示唆された。

References: [1]Soderblom (1970), JGR **75**, 2655. [2]Takizawa & Katsuragi (2020), Icarus **335**, 113409. [3] Roering et al. (1999), Water Resour. Res. **35**, 853.