

高空隙ターゲットで得られた キャビティサイズスケーリング則の彗星表面への応用

○岡本 尚也¹, 中村 昭子¹, 長谷川 直²
¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙科学研究所

近年の探査計画や地上観測装置の発展により小天体は空隙率, ϕ が高いことが知られている。特に彗星の空隙率は非常に高く、86%を持つ天体も存在していることが分かってきた。これらの天体表面にはクレーターが観測されている。その形成メカニズムとしては昇華による表面の崩壊や衝突による表面の掘削が考えられる。月などに形成される一般的な衝突クレーターとは違って非常に浅く見えるクレーターが彗星上に存在しており、前者のメカニズムが支持される傾向がある。本研究では後者のメカニズムに着目する。空隙率の高い標的にはどのような衝突条件でどのようなクレーター形状が形成されるかについて分かっていることは少なく、これを解決するには高空隙率標的に適用できるスケーリング則の構築が必要となる。

これまで空隙率 30-98%を持つ標的(石膏、ガラスビーズ焼結体、軽石、発泡スチロール)を使った高速衝突実験が行われ、クレーターの直径や深さが調べられている。それぞれの物質にできるクレーター直径や深さが空隙率の違いによって変わることは分かっているが、これら物質間の違いの比較は十分に行われていない。そこで我々はこれまで行ってきた空隙率 94%, 87%を持つガラスビーズ焼結体を用いた高速衝突実験のデータと様々な先行研究のデータを用いることで幅広い範囲の空隙率を持つ標的にできるキャビティサイズ(弾丸貫入深さ、最大径、深さ)のスケーリング解析を行った。

初期発生動圧が弾丸の引っ張り強度の 20 倍程度を超えると大きなキャビティを持つ太短いカブ型のトラックが形成される。このカブ型のキャビティをクレーターとみなし、このカブの深さ(BD)と最大径(D_{\max})を従来の強度支配域のクレータースケーリング則(Suzuki et al., 2012; Housen and Holsapple 2003)を用いて整理した。カブの深さについては、空隙率 40%までの標的ではこのスケーリング則は機能しベキ乗則の関係がみられるが、標的空隙率が 50%ではうまく機能していないようで、87, 94%にもなると全く機能しなかった。そこで、弾丸密度(ρ_t)/標的密度(ρ_p)とカブの深さ/弾丸直径(d_p)の関係をみたところ、両者にはベキ乗関係がみられ、以下のスケーリング則が得られた(ただし適用は、空隙率 50%以上かつ衝突速度, v_0 は 1.22–7.17km/s の範囲)。

$$\frac{BD}{d_p} = 10^{0.35 \pm 0.04} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0.81 \pm 0.04}$$

最大径については、空隙率ごとにクレータースケーリング則が機能しベキ乗則の関係が見られ、以下のように整理することができた(適用は標的空隙率が $\sim 30\%$ 以上)。

$$\frac{D_{\max}}{d_p} = 10^a \left(\frac{Y_c}{\rho_t v_0^2} \right)^{-\frac{\mu}{2}} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{0.4}$$

$$a(\phi) = (0.12 \pm 0.22) - (0.0092 \pm 0.0034)\phi,$$

$$\mu(\phi) = (0.67 \pm 0.02) - (0.0017 \pm 0.0003)\phi$$

ここで、 Y_c は標的の圧縮強度を表す。

得られた最大径のスケーリング則を Deep impact (DI)計画で生成された DI クレーターへ適用したところ、Tempel 1 彗星の表面の圧縮強度は 590_{-330}^{+1010} Pa と見積もられた。これは従来推定されていた 1-10 kPa という値と同じかそれより小さい値である。

また、土星の衛星 Hyperion はスポンジ状の特徴的な外観をしており、深さ/直径比は ~ 0.3 (White and Schenk 2011)と、月などの一般的な衝突クレーターの深さ/直径比 ~ 0.2 と比べて大きい。分光観測によれば Hyperion の表面の多くは水氷で覆われており、クレーター底に見られる暗い物質はナノフェーズ鉄、酸化鉄だけでなく脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素の存在を示している (Brad et al., 2012)。これらのクレーターは Hyperion 表面の昇華によってできたと考えられている (Howard et al., 2012)。

一方、C 型小惑星にもこれら脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素が存在している。またスケーリング則適用に必要な密度や強度といったパラメーター情報が手にいれられるため、C 型小惑星が Hyperion へ衝突する場合を考えた。図 1 は、我々が得たスケーリング則から見積もられる弾丸貫入深さ/最大径、カブの深さ(=クレーター深さ)/最大径を示したグラフである。衝突速度が 2 km/s の場合、弾丸貫入深さ/最大径を表す線とクレーター深さ/最大径を表す線の交点で深さ/直径比がおおよそ 0.3 となっている。これは衝突する C 型小惑星の一部がクレーターの底の暗い物質として見えることと、その衝突によって値の高い深さ/直径比 ~ 0.3 となることを意味している。すなわちこのような衝突条件では、クレーター底が周りより暗い理由と値の高い深さ/直径比の両者を同時に説明することができる。ただし、Hyperion 表層をこういったシナリオで説明できるかは、衝突条件のさらなる検討が必要である。一方、衝突速度が大きくなると、現在考えている天体強度の範囲内では弾丸貫入深さよりもクレーター深さの方が浅くなる。すなわち、弾丸が壊れずに生き残って地中に埋められることはなくなる。

典型的な短周期彗星が小惑星帯を通過するときの彗星と小惑星の相対衝突速度は 10.5km/s である (Vincent et al., 2014)。また Hyperion の密度は 544 kg/m^3 であり (Tohmas et al., 2007)、これも彗星の密度に近い値であるので、図 1 の右図は短周期彗星—小惑星間の衝突と読みかえることもできる。上記の推定から Tempel 1 彗星の強度はオーダーで 10^2 - 10^3 Pa であった。この場合、深さ/直径比は <0.1 となり非常に浅く見えるクレーターになっていることを示している。すなわち、昇華ではなく衝突でできたクレーターの可能性も考えられる結果となった。

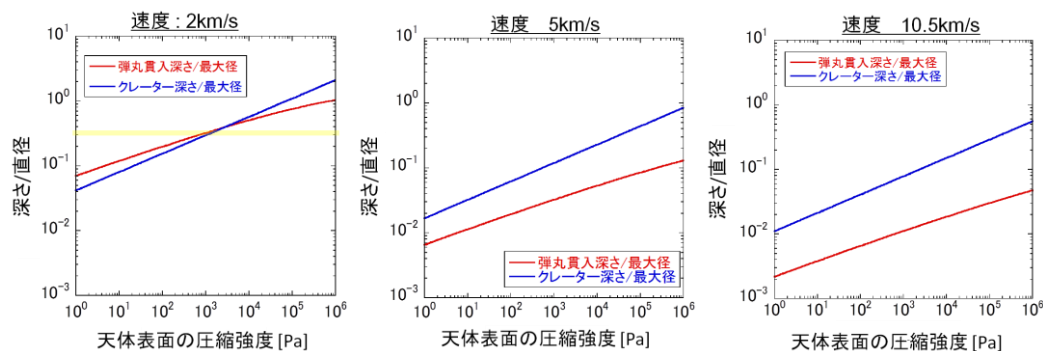


図 1 : Hyperion 表面の圧縮強度をパラメーターととったときの深さ/直径。赤線は最大径に対する弾丸貫入深さ、青線は最大径に対するカブの深さ(=クレーター深さ)を表す。左図、中央図、右図はそれぞれ衝突速度が 2km/s, 5km/s, 10.5km/s のときの結果に対応する。左図の黄色のラインは深さ/直径比 ~ 0.3 を表す。