

# 空隙の大きな小天体の衝突進化に 関する実験的研究

○岡本 尚也<sup>1</sup>, 中村 昭子<sup>1</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構 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,  $\phi$  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(Consolmagno et al., 2008)。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衝突による表面の掘削や彗星上の表面活動(昇華や衝突後の粘性緩和)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(深さ/直径比 $\sim 0.2$ )とは違って非常に浅く見えるクレーター(深さ/直径比 $\leq 0.1$ )が彗星上に存在しており(Thomas et al., 2007)、後者のメカニズムが支持される傾向がある。本研究では前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に加え(Okamoto et al., 2013)、新たに用意した石膏標的( $\phi \sim 50%$ )、軽石標的( $\phi \sim 75%$ )への高速衝突実験から得たデータ、そして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 倍程度を超えると図 1(a)に示すような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(Okamoto et al., 2013)。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。図 1(b)にカブの深さと最大径の位置を表す。

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(適用は標的の空隙率が $\sim 32%$ 以上)。

$$\frac{D_{\max}}{d_p} = H_{Ds}(f) \left( \frac{Y_c}{\rho_t v_0^2} \right)^{-\mu/2} \left( \frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{-0.4}, \quad (1)$$

$$H_{Ds}(f) = (0.15 \pm 0.06)(1 - f)^{-1.4 \pm 0.6}, \quad (2)$$

$$\mu(f) = (0.53 \pm 0.09) + (0.15 \pm 0.18)f. \quad (3)$$

ここで、 $d_p$ ,  $Y_c$ ,  $\rho_t$ ,  $v_0$ ,  $\rho_p$  はそれぞれ弾丸直径、標的の圧縮強度、標的密度、衝突速度、弾丸密度を表す。 $H_{Ds}$ ,  $\mu$  はそれぞれスケーリング定数であり、充填率  $f$  の関数で表した。スケーリング定数、 $\mu$  は理論的には $1/3$ と $2/3$ の間の値を取るとされているが、本実験から得られた経験式(3)はこの範

囲におおよそおさまっている。

カブの深さについても同様に整理したところ、以下のような結果を得た。

$$\frac{BD}{d_p} = H_{ds}(f) \left( \frac{Y_c}{\rho_t v_0^2} \right)^{-\mu/2} \left( \frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{-0.4} \quad (4)$$

$$H_{ds}(f) = (0.48 \pm 0.20) f^{-0.95 \pm 0.21} \quad (5)$$

$$\mu(f) = (-0.01 \pm 0.07) + (0.76 \pm 0.20) f \quad (6)$$

ここで、 $H_{ds}$  はスケーリング定数を表す。空隙率の高い標的では $\mu$ の値が小さくなり、理論的な値の範囲から外れている。そこで、弾丸密度/標的密度とカブの深さ/弾丸直径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、標的空隙率~32%以上かつ衝突速度は 1.22–7.20 km/s の範囲)。

$$\frac{BD}{d_p} = 10^{0.46 \pm 0.03} \left( \frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0.72 \pm 0.03} \quad (7)$$

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、9P/Tempel 1 彗星(空隙率は 76%)の表面の圧縮強度は $10^1 - 10^3$  Pa と見積もられた。これまで $10^3 - 10^4$  Pa よりは小さいことが推定されていたが(Richardson and Melosh, 2013)、その値をより制限することができた。

また、C 型小惑星が Tempel1 彗星へ衝突する場合を考えた。図 2 は、我々が得たスケーリング則から見積もられるカブの深さ(=クレーター深さ)/最大径を示したグラフである。Tempel1 彗星表面上の圧縮強度は 500 Pa を仮定している。図中で、式(4) –(6)を用いたクレーター深さの計算結果が赤線で表され、式(7)を用いた結果が青線で表されている。最大径の計算は式(1) –(3)を用いている。青線と赤線の深さ/直径比の違いは 2 倍程度であった。また、衝突速度が 4–12 km/s の間では、深さ/直径比が劇的に変化することなく、およそ 0.1–0.3 の間の値をとることがわかった。すなわち実験で見られるような深さ/直径比の大きなクレーターは形成されない結果となった。これは、天体の表面強度が非常に弱い場合、スケーリング則から計算される最大径が大きくなる一方で、深さは最大径ほどは大きくなれないためである。ここでの天体表面強度は 500Pa を仮定したが、より表面強度が小さければ、深さ/直径比はさらに小さくなる。すなわち、衝突のみで浅く見えるクレーターが形成されることが示唆された。

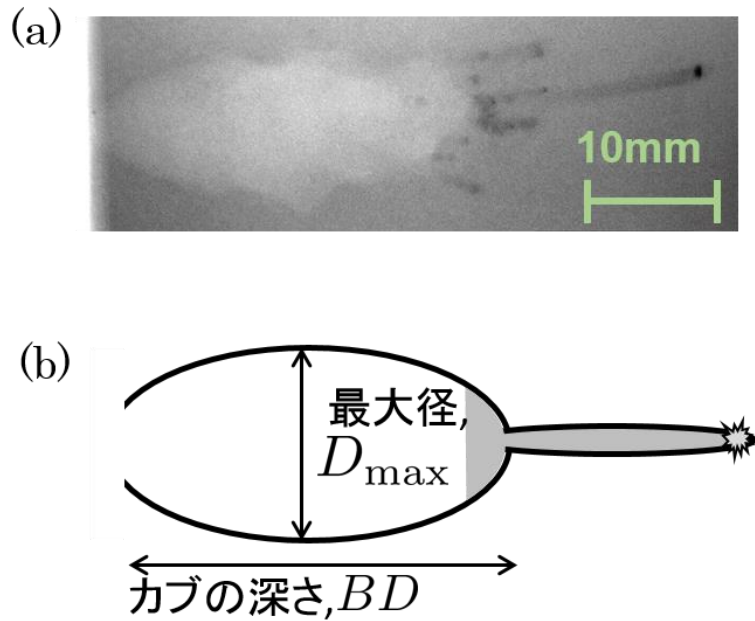


図 1 : (a)はチタン弾丸を空隙率 94%のガラスビーズ焼結体へ衝突速度 6.7km/s で衝突させたときに形成されたカブ型トラック形状を表す。(b)は図(a)のスケッチである。最大径とカブの深さを示している。

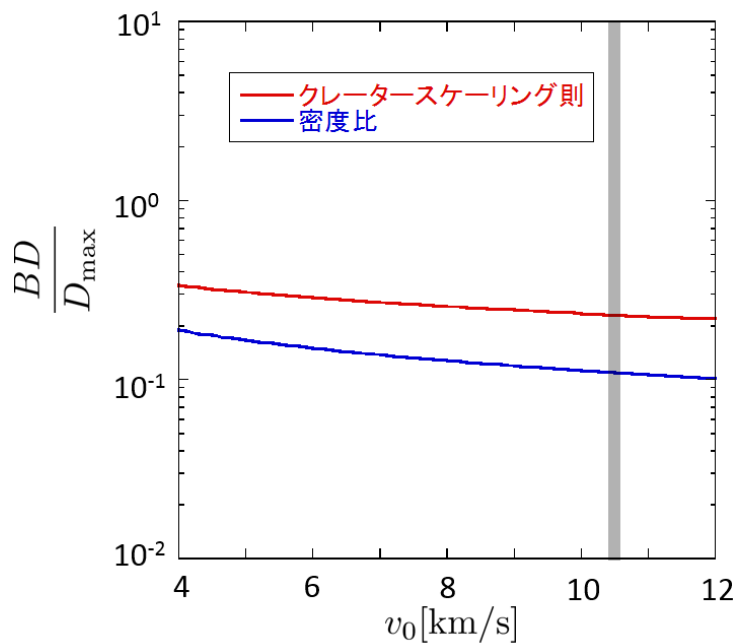


図 2 : Tempell1 彗星表面へ衝突速度  $v_0$  の C 型小惑星が衝突した場合のクレーター深さ/直径比。赤線は式(1)-(6)から求め(クレータースケーリング則から得られた関係式を使って深さを計算)、青線は式 (1)-(3), (7)から求めた(弾丸密度/標的密度と深さの関係から深さを計算)。典型的な短周期彗星が小惑星帯を通過するときの彗星と小惑星の相対衝突速度は 10.5km/s であり、灰色で表している(Vincent et al., 2014)。