

クレーター形態から推測する固体天体の力学強度： 層構造標的のクレータースケーリング則の構築

* 柿木玲亜¹, 荒川政彦¹, 保井みなみ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

研究背景 衝突クレーターの形態は多様である。特に、中央にピットと呼ばれる深い穴が見られるクレーターは、同心円型クレーターと呼ばれている。例として、はやぶさ2 探査機により小惑星リュウグウ上に形成された SCI クレーターでは、底の中央にピットが確認された[1]。このピットは、リュウグウ表層の結合強度を持たないレゴリス層下に、強度の大きいレゴリス層および基盤岩層の存在を示している。また、火星表面では、地下に氷の層が確認された地域で同心円型クレーターが形成されている[2]。以上より、表面層地下の基盤層の力学強度は、クレーター形態に影響を及ぼす。

一方で、近年の探査機が取得した高解像度の天体画像から、天体表面の詳細な3D 地形が明らかになりつつある。これにより、小クレーターのみならず、衝突励起振動による天体表面の流動化の痕跡が確認されている。これは、小惑星イトカワやエロスでも見られる小惑星上の地形変化を引き起こす主要な原因の一つである。レゴリスで覆われた基盤を持つ小惑星上の衝突励起振動の数値計算により、硬い基盤岩上のレゴリスは衝突励起振動によって流動化しやすいことが知られている[3]。したがって、クレーター形成に伴う固体天体表層の流動化の程度は、基盤層強度に依存する可能性が高い。

レゴリスや表土に覆われた固体天体の基盤層の力学強度の推定は、その天体表層での衝突励起振動を理解する上で重要である。しかし、従来のリモートセンシングでは、基盤層の構造はわかっても力学強度の評価はできなかった。固体天体の詳細な3D 表面地形が得られるようになり、同心円型クレーターの形態が、基盤層の力学強度を推定する手がかりとなり得る。本研究では、クレーター形態から基盤層の力学強度を推定する手法の開発を目標とし、レゴリスや表土に覆われた固体天体表層を模擬した2 層構造標的へのクレーター形成実験を行った。そして、クレーターサイズやその形態、

クレーター形成過程に対して各層の厚さや強度が与える影響を調べた。

実験手法 神戸大の縦型一段式軽ガス銃および宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いた衝突実験、および自由落下による衝突実験を行った。標的の基盤層には、砂・石膏混合物(強度 20.4-364kPa)またはモルタル(強度 1.5MPa[4])を用いた。それを覆う表面層として、粒径 100 μ m の石英砂もしくは強度 440Pa の砂・石膏混合物を用いた(層厚 0~100mm)。弾丸は直径 4.7mm のポリカーボネイト球または直径 1,2,10mm のアルミ球であり、衝突速度は 4.1m/s~6km/s とした。実験は標的の真横と真上から可視光高速カメラで撮影した。一部実験では赤外高速カメラを用いて標的の真上からの撮影も行った。

結果 一定強度の基盤層を用いた実験において、軽ガス銃を用いたクレーター形成実験では、クレーター形態は粒子層厚の減少につれて、お椀型(B タイプ)から平底型(F タイプ)、同心円型(C タイプ)へと変化した。自由落下実験では、C タイプクレーターは形成されなかった。縦型二段式軽ガス銃を用いた実験において、F タイプと C タイプの境界となる弾丸直径で規格化した表面層厚さは、基盤層強度の増加に伴い減少したが、F タイプと B タイプの境界は、基盤層強度に依存しなかった。また、表面層が石英砂の場合、ランジェントクレーターは F タイプ、最終クレーターは B タイプとなるようなクレーター (FB タイプ) が確認された。FB タイプクレーターが見られる規格化表面層厚さの範囲は、基盤層強度に依存しなかった。B タイプクレーターと比較すると、全ての衝突速度領域において、C, F タイプクレーターにおいて表面層に形成されるクレーターサイズは、表面層の厚さの減少に伴い減少した。基盤層に形成されるピットは、表面層厚さの増加に伴い減少した。

衝突速度一定条件では、基盤層強度を変

化させても、クレーターリム半径と平底半径は変化しなかった。しかしながら、ピット半径は表面層厚さと基盤層強度の増加に伴い減少した。すなわち、クレーターリム半径と平底半径は粒子層厚にのみ依存し、ピット半径は粒子層厚・基盤層強度の両方に依存した。

議論と応用 C、F タイプクレーターでは、上層の無次元クレーター半径 π_{Rc} と、同じ衝突条件下で均質的に形成される無次元クレーター半径 $\pi_{R\infty}$ の比は、規格化表面層厚さの減少に伴い減少した。また、B タイプクレーターの場合は1に近い値となった(図1)。この関係は以下の式で表される。

$$\frac{\pi_{Rc}}{\pi_{R\infty}} = 1 - C_1 \exp\left(-\frac{T/d_\infty}{\lambda_1}\right) \quad (1)$$

表面層厚 T は、同じ衝突条件下で均質的に形成されるクレーター深さ d_∞ で規格化されている。表面層が石英砂の場合、 $C_1=0.77 \pm 0.039$, $\lambda_1=0.51 \pm 0.030$ である。

無次元ピット半径 π_{Rpit} と、同じ衝突条件下で表面層を持たない場合に形成される無次元ピット半径 π_{R0} の比は、規格化表面層厚さの増加に伴い減少し、本実験の結果は以下の式で表される(図2)。

$$\frac{\pi_{Rpit}}{\pi_{R0}} = \exp\left(-\frac{T/d_\infty}{\lambda_2}\right) \quad (2)$$

表面層が石英砂の場合、 $\lambda_2 = 1.57^{+0.17}_{-0.14}$ であった。表面層が強度を持つモルタルの場合[4]と比較すると、本実験で得られたピット半径の減少率は小さく、この減少率は表面層の強度に依存していることがわかった。

(1), (2)式を組み合わせることにより、C タイプクレーターにおいてクレーター半径 R_c とピット半径 R_{pit} の比と基盤層強度に関して、以下の関係を得た。

$$\frac{R_{pit}}{R_c} \propto Y^{-\frac{\mu}{2}} \quad (3)$$

この関係を用いて月のC タイプクレーター底の基盤層強度を求めた(図3a)。岩石質弾丸(密度 2800 kg/m^3)が、衝突速度 15 km/s で衝突したと仮定すると、基盤層強度は約 3 MPa と推定できる(図3b)。この値は、岩石よりやや小さく、メガレゴリス層の強度

を示していると考えられる。

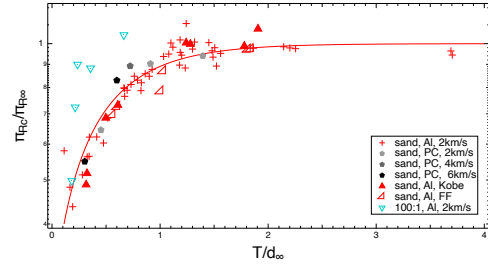


図3 表面層に形成される無次元クレーター半径と、規格化表面層厚さの関係

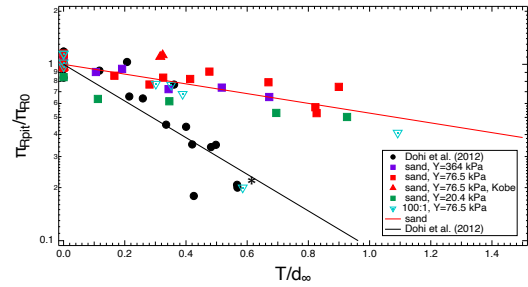


図1 基盤層に形成される無次元ピット半径と、規格化表面層厚さの関係

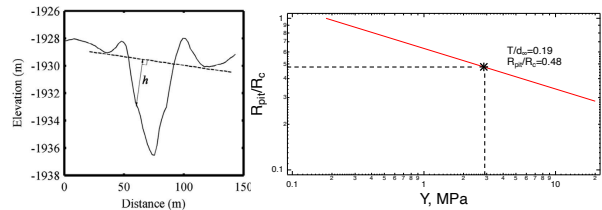


図2 (a)月の同心円クレーター(23.455°E, 0.697°N)の断面図[5]と、(b)ピット/クレーター半径比と基盤層強度の関係

- [1] Arakawa et al. (2020) *Science*, 368, 67-71. [2] Bramson et al. (2015) *GRL*, 42, 6566–6574. [3] Richardson Jr. et al. (2005) *Icarus*, 179, 325-349. [4] Dohi et al. (2012) *Icarus*, 218, 751-759, [5] Di et al. (2016) *Icarus*, 267, 12-23