

クレーターエジェクタ速度のスケール則に関する実験的研究

Impact experiments on a granular layer: an implication for crater scaling laws and the artificial Hayabusa 2 SCI crater

辻堂 さやか^{1*}, 鈴木 絢子², 荒川 政彦¹, 保井 みなみ³Sayaka Tsujido^{1*}, Ayako Suzuki², Masahiko Arakawa¹, Minami Yasui³¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 惑星科学研究センター, ³ 神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Center for Planetary Science, ³Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

・はじめに

小天体表面での衝突クレーター形成に伴う放出物の速度分布を理解することは、小惑星のレゴリス形成や表層の衝突進化、微惑星の衝突集積過程を考える上で重要である。太陽系の小天体表層は様々な物性を持つと考えられる。すなわち、表層の空隙率、強度、密度等は、その形成進化過程により大きく変化する。したがって、小天体の衝突クレーター形成過程を明らかにするためには、強度、空隙率を系統的に変化させた標的におけるクレーター形成定数が必要である。

本研究では、空隙率を40~90%の間で変化した粒子層に対するクレーター形成実験を行い、クレータースケール則に対する空隙率の影響を調べた。そのために、各空隙率において、弾丸密度、衝突速度を変化させた実験を行い、クレーターサイズ、エジェクタ速度分布、エジェクタ形状等の特徴を調べた。一方、この様な広いパラメーター範囲における実験結果は「はやぶさ2」に搭載予定の小型衝突装置 (Small Carry-on Impactor) によって形成されるクレーターから、小惑星表層の物性を明らかにするためにも重要である。エジェクタカーテンの形やその速度分布から表面物質の強度や空隙率、さらには層構造等を明らかにすることが可能となる。

・実験方法

クレーター形成実験には神戸大学の縦型軽ガス銃を用いた。弾丸加速ガスがエジェクタカーテンへ与える影響を排除するため、専用のサボストッパーを開発した。このサボストッパーにより、標的を入れたチャンバーへの加速ガスの侵入をほぼ完全に防ぐことができた。

標的粒子には、直径100 μmまたは500 μmのガラスビーズ球、直径1.3mmの粒状パーライト、あるいはそれを粉砕した直径100 μm程度の不定形パーライトの4種類を用いた。直径約30cm、深さ約11cmのステンレス製容器に粒子を入れ、標的粒子層を準備した。直径100 μmのガラスビーズ、直径500 μmのガラスビーズ、直径1.3mmのパーライトの空隙率はそれぞれ、37.6%、41.4%、96.7%、粉砕したパーライトの空隙率は84.9~88.4%である。標的を入れるチャンバー内の圧力は、 $<10^3$ Paもしくは大気圧とした。また、弾丸には、密度の異なる鉄、ジルコニア、アルミナ、ガラス、ナイロンの5種類を用いた。弾丸はどれも直径(2r)3mmの球である。衝突速度(v_i)は、25~217m/sとした。

エジェクタ速度分布のスケール則を求めめるため、放出された個々の標的粒子の軌跡を計測する実験を行った。粒子層に直径500 μmのガラスビーズ、弾丸にアルミナ球を用い、高速デジタルビデオカメラ (NAC, MEMRECAM HX73) を使用して、標的粒子放出の様子を撮影した。撮影はエジェクタカーテンの片側のみを拡大して、撮影速度10000コマ/秒で行った。取得したビデオから約30個の粒子の軌跡を追い、それぞれの粒子の放出速度と放出位置の関係を求めた。

次に、クレーターサイズのスケール則とエジェクタカーテンの形状を調べる実験を行った。直径100 μmのガラスビーズ層に密度の異なる5種類の弾丸を一定速度で撃ち込み、弾丸密度によるクレーターサイズの違い、またエジェクタカーテンの角度の変化を観察した。さらに、パーライトを用いた高空隙率層に対しても同様の実験を行い、クレーターの直径、深さを計測した。

・結果

個々の粒子の放出速度・位置計測により、衝突点に近いところから飛び出した粒子ほど放出速度が大きく、放出速度 v_0 と放出位置 x_0 に関して $v_0/v_i=0.66(x_0/r)^{-1.6}$ という関係を求めることができた。また、放出位置によらず、放出角度はほぼ一定(40°)となることがわかった。

一方、クレーターサイズに関して、 $[R*(t/m)^{1/3}]/[(t/p)^{0.03}]=1.9*[gr/(v_i^2)]^{-0.17}$ という関係が明らかになった(R:クレーター直径, t :粒子層密度, p :弾丸密度, m :弾丸質量, g :重力加速度)。この式の係数からガラスビーズ粒子層に対してカップリングパラメーター($C=r_0 v_i \mu^{-1}$)の2つの変数、 $\mu=0.40$, $\beta=0.36$ を決めることができた。

さらに破砕パーライト>80%の高空隙率粒子層では、空隙率が大きい程、クレーター直径は徐々に小さくなり、クレーター深さは大幅に大きくなることがわかった。また、空隙率83~88%の間でincompressiveクレーターからcompressiveクレーターへの形態変化を発見した。