

レゴリス層における衝突イジェクタの放出過程に関する実験的研究

○松榮 一真¹, 荒川 政彦¹, 小川 和律¹, 保井 みなみ¹, 岡崎 昌志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

はじめに

はやぶさ2に搭載されている小型搭載型衝突装置(SCI)により形成される人工クレーターは、小惑星サンプル採取や小惑星 Ryugu の内部物質の観測に利用される予定である。一方、クレーター形成に伴うイジェクタの放出速度分布は、小惑星 Ryugu の表層構造に依存する。そのため、イジェクタの観測結果から Ryugu の表層構造を推定するためには、衝突クレーターの形成に関わるスケーリング則の確立が必要である。Hermalyn and Schultz (2011) は、1mm の Ottawa sand に対してクレーター形成実験を行い、個別粒子追跡法(PTV)を用いてイジェクタの速度分布を計測した。しかしながら、衝突速度と弾丸密度の両方を同時に変化させているため、イジェクタ速度分布へのそれぞれの影響を見積もることはできなかった。Tsujiido et al. (2015) は、500 μ m の石英砂標的上で低速度のクレーター形成実験を行い、弾丸密度によるイジェクタ速度分布の違いを詳細に調べた。彼らは、標的の一粒子毎に放出軌道を詳細に追跡し、イジェクタ速度分布を計測したが、その衝突速度は 200m/s に限られており、さらに高速度におけるイジェクタ速度分布のスケール則を詳細に調べる必要がある。そこで、我々は、Tsujiido et al. で用いた石英砂標的を用いて、高速度において系統的に弾丸物質を変化させたクレーター形成実験を行ってきた。今年度は、新型縦型二段式軽ガス銃におけるサボ分離技術の確立を行うと共に、衝突速度 \sim 5.0km/s においてクレーター形成実験を行い、クレーターサイズとイジェクタ速度分布の計測を行った。

実験方法

クレーター形成実験は、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸には、直径 4.7mm のポリカーボネート球と、直径 2mm の密度の異なる弾丸 (2.5-14.9g/cm³) を用いた。これらの弾丸を、速度 \sim 5.0km/s で衝突させた。標的試料には直径 500 μ m (バルク密度は 1.48g/cm³) の石英砂を用いた。直径 60cm のタライ容器にすりきりいっぱい石英砂標的を準備し、加速ガスの影響を除去する風除け箱の中に設置した。そして、標的試料に対し垂直方向に弾丸を衝突させた。なお、チャンバー内は 10Pa 以下に真空引きをしている。また、クレーター形成の様子を高速ビデオカメラで真横から撮影した。この撮影した動画から、イジェクタカーテンの中で識別可能な個別粒子の軌跡を追跡した。そこで、イジェクタが弾

道軌道で放出されていると仮定し、各イジェクタ粒子の放出速度、放出角度、放出位置を決定した。高速カメラの撮影速度を 5,000fps と 10,000fps と設定し、比較的高速で放出されるイジェクタも計測した。さらに、衝突実験後に 2 次元レーザー変位計を用いてクレータープロファイルを取得し、そのサイズを計測した。

実験結果

衝突実験で失敗は少なかったため、速度 $\sim 5.0\text{km/s}$ におけるサボ分離技術は、ほぼ確立したと言える。しかし、タングステンカーバイド($\delta=14.9\text{g/cm}^3$)は3度実験をしたが、サボが標的に直接衝突することや弾丸の軌道が斜めになるなど失敗が多かった。そのため、直径 2mm の弾丸において、密度が非常に大きい弾丸を用いる際のサボ分離技術の確立には、さらなる検討が必要である。

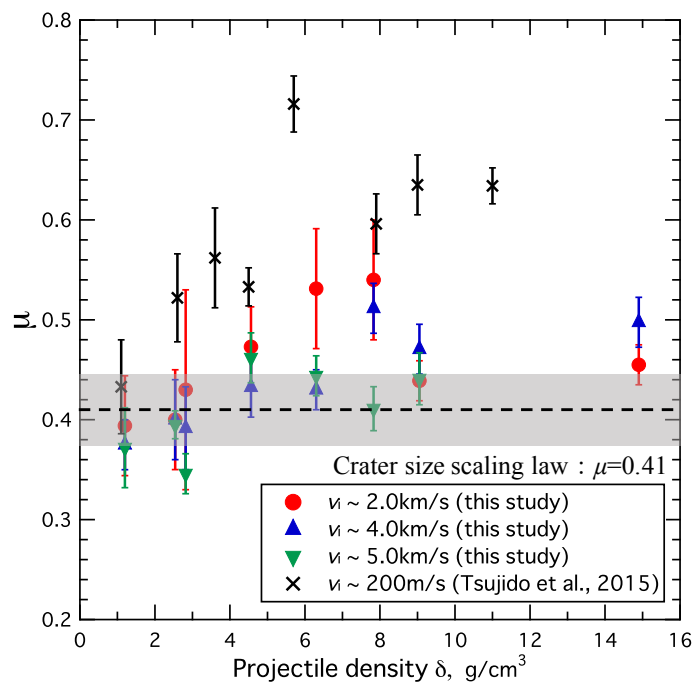


Fig.1 弾丸密度 δ とパラメータ μ の関係

イジェクタ速度分布は、弾丸の半径で規格化した距離を用いて、 $v_e/v_i = k(x/r_p)^{-1/\mu}$ と提案されている(Housen and Holsapple, 2011)。 v_e はイジェクタ放出速度、 v_i は衝突速度、 x は放出位置、 r_p は弾丸半径、 k, μ は定数である。本研究の結果を整理すると、各データにオフセットが見られた。すなわち、同じ規格化距離では、弾丸密度が大きいと規格化放出速度が大きくなる結果になった。弾丸密度が異なり衝突速度が同じ場合、形成されるクレーターサイズは、密度が大きい方が大きくなる。そのため弾丸サイズで規格化した距離を用いた場合、

弾丸密度が大きいと規格化距離が大きいところまでイジェクタが放出される。そのためオフセットが生じて見える。そこで、弾丸密度項を考慮した速度分布、 $v_e/v_i = k' [x/r_p (\rho/\delta)^v]^{-1/\mu}$ とクレーターサイズ R を用いたエジェクタ速度分布スケール則 $v_e/\sqrt{gR} = a(x/R)^{-1/\mu}$ で結果を整理した。 ρ は標的密度、 δ は弾丸密度、 R がクレーターサイズで k, a が定数である。この結果、衝突点遠方では全てのデータがほぼ一致していることが分かった。一方、衝突点近傍ではデータは、ばらついていて、Fig.1 に、弾丸密度とパラメータ μ の関係を示す。低速度での衝突実験の結果より μ の値が小さくなり、弾丸密度による変化が小さくなることがわかった。さらに、クレーターサイズスケール則から算出された μ の値(-0.41)とほぼ近い値になることがわかった。このことから、クレーターサイズとイジェクタ速度分布、それぞれのスケール則で用いられている μ は同じ値で良いことを確認することができた。

さらに、衝突点遠方($x/R > 0.3$)で求めたエジェクタ粒子の平均放出角度 θ_{ave} とパラメータ μ の関係を調べた。これらの関係は、クレーター掘削流のモデルである Z モデルを用いて説明することが可能だと考えられている(Maxwell, 1977)。しかし、本研究で得た結果は、衝突点を

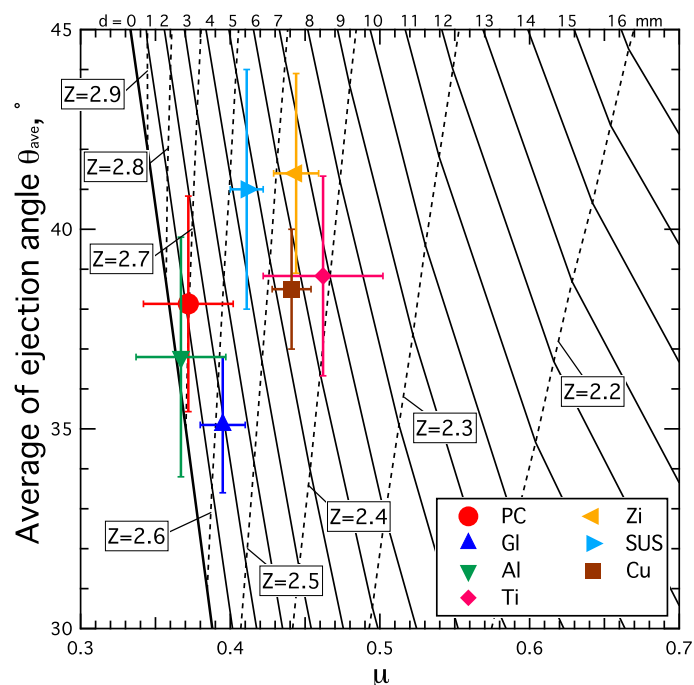


Fig.2 パラメータ μ と平均放出角度 θ_{ave} の関係

点源とした Z モデルを用いて説明することができないことがわかった。そこで、Tsujido et al., (2015)によって提唱されている点源深さを变化させた Z モデルで本研究の結果を整理し直した結果が Fig.2 である。実線が点源深さを 0~16mm と変化させ、破線が Z を 2.2~3.0 に变化させた結果を表している。密度が大きいほど深さ d が大きくなり、衝突時の弾丸の潜り込みが影響していることが考えられる。この結果から、衝突速度 5km/s の実験では、点源の特徴的深さは弾丸サイズの 4 倍程度で、Z は 2.3~2.7 を取ることがわかった。

参考文献

1. Hermalyn, B., Schultz, P. H. 2011. Time-Resolved Studies of Hypervelocity Vertical Impacts into Porous Particulate Targets: Effects of Projectile Density on Early-Time Coupling and Crater Growth. *Icarus*, 216(1), 269-279.
2. Housen, K.R., Holsapple, K.A., 2011. Ejecta from impact craters. *Icarus* 211, 856–875.
3. Maxwell, D. E., 1977. Simple Z model of cratering, ejection, and the overturned flap. In *Impact and Explosion Cratering* (D. J. Roddy, R. O. Pepin and R. B. Merrill, eds.), p. 1003-1008. Pergamon, N. Y.
4. Tsujido, et al., 2015. Ejecta velocity distribution of impact craters formed on quartz sand: Effect of projectile density on crater scaling law. *Icarus* 26, 79 -92.