

衝突実験による粗粒なターゲットへのクレーター形成メカニズムの解明

巽瑛理、杉田精司（東京大学）

はじめに：小惑星は惑星形成初期だけでなく、現在に至るまで小惑星帯から物質（水や有機物）を輸送し、地球の環境を大きく変化させる役割を担っていると考えられている[e.g., 1,2]。特に小さな小惑星は Yarkovsky 効果によって動径方向に移動し、巨大惑星との軌道共鳴帯に入ることによって小惑星帯から取り除かれる[3]。D<10km の小さな小惑星にはラブルパイル天体が多く存在すると考えられており[4]、ラブルパイル天体のクレーター掘削による質量損失レートは小惑星帯からの物質輸送効率を支配している可能性があるため、ラブルパイル天体のクレーター掘削メカニズムの理解は非常に重要である。しかし、ラブルパイル天体の表面は比較的大きな岩塊で構成されており、表面岩塊を破壊することによるクレーター掘削効率の低下（鎧効果）はこれまで評価されていなかった。さらに、Itokawa, Ryugu, Bennu といった数 100 m – 1 km サイズの小惑星もラブルパイル天体である可能性が高く、表面のクレーター年代を推定するためには大きな粒子で構成された標的でのクレーター則の構築が必要である。本研究では、実験によりラブルパイル天体表面でのクレーター掘削効率低下のメカニズム解明およびクレーター則の構築を目的とした。

室内衝突実験：宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて、玄武岩小石（~10, 18 mm）とパミス小石（~7, 9, 16 mm）で構成された粗粒な標的にポリカーボネート弾丸（4.6 mm）を衝突させ、クレーター形成実験を行った。速度範囲は、高速度領域 1 - 6 km/s である。このとき、インパクターサイズは構成粒子よりも小さいものを使用し、インパクターが最初に

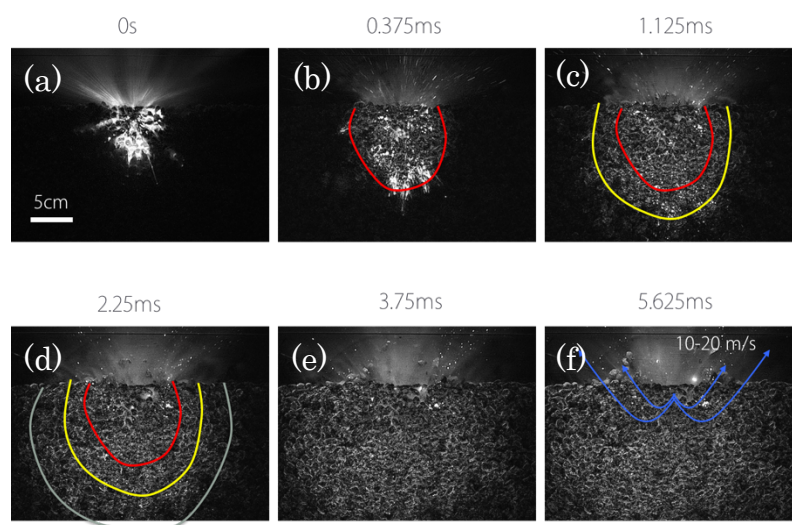


図 1 Quater-space 実験。標的粒子：パミス~9 mm、インパクター：PC φ4.6mm、衝突速度：4.3 km/s。

衝突粒子の一つに衝突するような条件にした。クレーター直径と深さをレーザー変位計（Keyence 製 LJ-V）で計測した。また、Quarter-space 実験を行い、高速カメラ（NAC 製 Q1v）で撮影しクレーター形成断面を観察した。

衝突断面観察：Quarter-space 実験により、衝突断面の観察を行い、岩塊の鎧効果を可視化した。衝突直後には、インパクターと標的粒子の対一衝突による高圧発生から、強い衝突閃光が観察された（図 1(a)）。瞬間的に衝突点近傍の粒子が破壊し、圧力波が伝わる（図 1(b-d)）。その後、非常にゆっくりとした速度で破壊を経験していない粒子が動くことがわかった（図 1(e, f)）。つまり鎧効果を伴うクレーター掘削は、衝突初期の構成粒子の破壊フェーズと後期の粉体流動的な掘削フェーズに分けられると考えられた。標的粒子径は衝突破壊過程に大きな影響を及ぼすが、掘削過程は砂と同様の振る舞いをしており、最終的には慣性と摩擦のつり合いによりクレーター形成は止まるものと考えられた。

新たなスケーリング則の構築：発表者らのこれまで研究により、高速度域 (>4 km/s) では砂と同程度のクレーター体積になるが、低速度域では砂にできるクレーター体積に比べて 10 倍以上も小さくなるという報告がなされているが、クレーター則構築には至っていなかった[5, 6]。クレーター形成効率の低下は構成粒子を破壊し散逸するエネルギーがクレーター掘削のエネルギーに比べて無視できないためだと考えられた。観察結果を踏まえ、衝突破壊過程と掘削過程に分離し、衝突時に瞬間的なインパクターと標的粒子の運動量交換、掘削過程は運動量保存的な流れ（つまり砂の重力則と同じようなメカニズム）を仮定し、従来の π スケーリング[7]を拡張した粗粒な標的に対する新しいクレーター則を構築した。新し

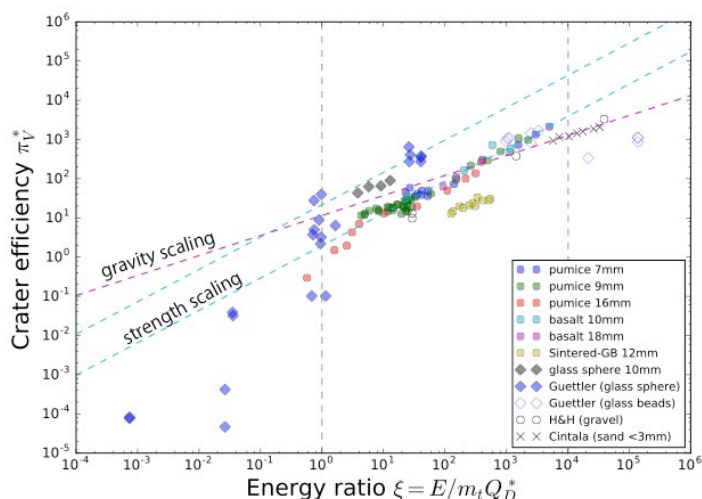


図 2 破壊強度 (Q_D^*) による新しいスケーリングパラメータによる実験結果の整理。衝突エネルギーと標的構成粒子破壊エネルギーの比が比較的小さいときにはこのスケーリングによりクレーターサイズを評価できる。衝突エネルギーが大きいたときには重力則に従う。

いクレーター則は重力則と破壊強度則の線形結合で表され、衝突エネルギーが低いときには破壊強度速が、衝突エネルギーが大きいときには重力則に従う。これにより、標的粒子とインパクトサイズ比と衝突速度に応じて、クレーターサイズを見積もることができた(図2)。球形のガラスビーズ標的、角ばった砂や小石標的がサイズが違っていてもそれぞれ一つの線上に乗っていることがわかる。しかし、非常に脆い物質である焼結ガラスビーズの小石標的の場合には、このスケーリングからずれることが分かり、今後の検討課題である。

議論：Itokawa 表面の小さなクレーターの欠乏は鎧効果により小さなインパクトに起因するクレーター形成が妨げられていることを示す可能性がある。また、小さなラブルパイル小惑星のクレーター掘削効率は表面の粒子径によって大きく変わる可能性がある。しかし、強度則で予想されるクレーターサイズと比較すると数倍以上も大きく形成されるため、ラブルパイル小惑星は一枚岩小惑星と比較すると非常に早い速度で質量を失っていくと考えられる。小さな小惑星にラブルパイル天体が多いとすると高い質量損失レートとYarkovsky 効果によって、地球型天体に大きな物質フラックスをもたらしているかもしれない。新しいスケーリングにおいて、後期の掘削仮定では標的粒子は粉体流的に流線に沿って動いていると考えられるが、より定量的に脱出速度を超えるクレーター掘削体積を見積もるためには、イジェクタ速度計測実験が必要である。

参考文献：[1] Alvarez et al., Science 208, No. 4448 (1980) [2] Morbidelli et al., MPS 35, pp. 1309-1320 (2000) [3] Bottke et al., Asteroids III, pp.395-408 (2002) [4] Pravec and Harris, Icarus 148, pp. 12-20 (2000) [5] Tatsumi and Sugita, 46th LPSC, #1909 [6] 巽ほか, 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, (2015) [7] Holsapple, Annu. Rev. EPS 21, pp.333-373 (1993)