

フラッシュ X 線を用いた衝突破壊現象の観測

○岡崎 昌志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/JAXA

はじめに

惑星等の太陽系天体の形成過程において衝突現象は重要な物理素過程である。特に、衝突破壊とそれに伴う破片の再集積は、衛星や小惑星族の起源と関連していると考えられている。そのため、これらの天体の形成過程を明らかにするためにも、衝突破壊への理解が必要不可欠である。

衝突時の天体の壊れやすさを表す指標である衝突破壊強度は、衝突後の最大破片質量が元の標的質量の半分となる時のエネルギー密度 Q^* ($= m_b v_{imp}^2 / 2M_t$: 単位質量あたりに与えられる運動エネルギー) として定義される。特に、重力支配域での衝突破壊強度 Q_0^* は、Jutzi (2015) による数値計算から天体の構成物質の物性 (摩擦、結合力、空隙) に依存することがわかった。そこで本研究では、数値計算モデルの検証と改良のため、数値計算と比較可能なデータを取得することを目的として室内実験を行った。

重力支配域では脱出速度以下の速度を持つ破片の再集積により最大破片質量が決まるため、 Q_0^* は破片の速度により決めることができる。しかしながら、破片速度に関する研究は少なく、破片速度の計測は高速カメラで撮影できる表面付近の破片に限定されてきた。そこで本研究では、高速カメラでは測定不可能な標的内部を含めた初期速度分布の測定手法を確立し、初期速度分布から Q_0^* を求めた。

実験手法

衝突破壊実験は、宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用いて行なった。弾丸には直径 7mm のポリカーボネート球を用いた。衝突速度は 1.5-6.5 km/s ($Q: 10^3-10^4$ J/kg) で変化させ、カタストロフィック破壊させた。今回の実験では、最大破片は標的質量の 10% 程度となった。標的試料には含水率が異なる直径 6cm の凍結粘土球を用いた。粘土試料はベントナイトと水を 3 通りの質量比 (100:35, 100:50, 100:80) で混合し作成した。粘土球は十分に冷却して凍結させた。内部速度測定のため、標的内部には直径 3mm の鉄球をトレーサー粒子として同一平面上に配置し、衝突直後に 3 方向からフラッシュ X 線を照射して、その透過像を撮影した。その照射時間は $50 \mu s-2ms$ で変化させた。X 線撮像によって得られる鉄球の変位と照射時間から内部速度を決定した。また、衝突時の様子は高速カメラを用いて撮影して反対点速度を決定した。衝突後の破片サイズ分布は、宇宙科学研究所における実験では破片の融解によって測定できないため、神戸大学の低温室内で横型二段式軽ガス銃を用いて同様の衝突破壊実験を行い測定し、衝突破壊強度を決めた。なお、全ての実験でチャンバー内は $\sim 100Pa$ まで真空引きしている。

実験結果

鉄球の変位から求まる内部速度は数 10m/s であった。(図 1) また、本実験で用いた凍結粘土球の反対点速度は石膏と玄武岩の中間で、含水率が高いほど速くなる。(図 2) 衝

突破壊強度は含水率が高くなるほど小さくなる。(図3)

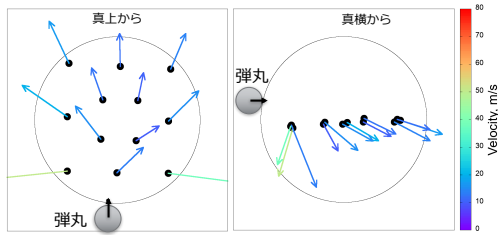


図 1. 重心系における鉄球の速度ベクトル

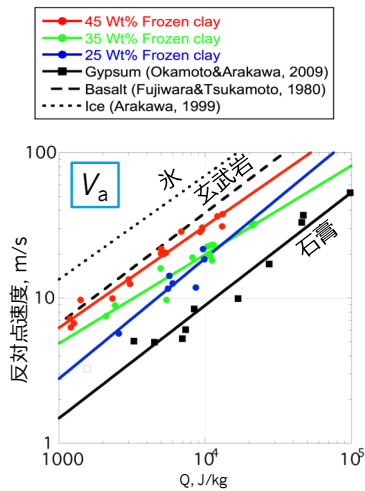


図 2. 反対点速度

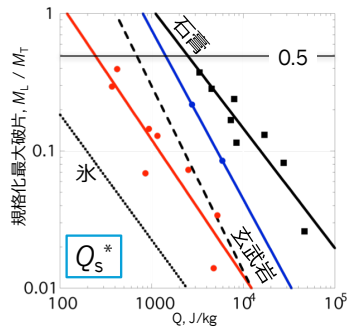


図 3. 突破壊強度

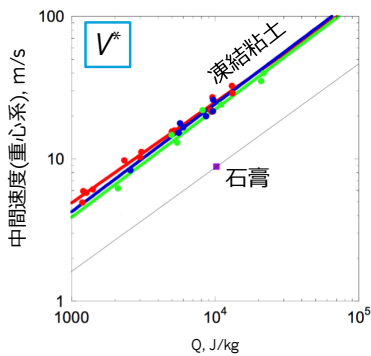


図 4. 中間速度

内部速度測定はチャンバーが常温での実験で行ったため凍結粘土の衝突後の破片は融解して回収できなかった。そのため、内部速度と破片質量の関係は鉄球速度を近傍領域の質量と対応させることで求めた。規格化積算質量が 0.5 となるときの重心系における内部速度を中間速度 V^* と定義する。この中間速度は、 V^* 以下で半分が運動し、残りの半分が V^* 以上の速度で運動することを表す。この中間速度は含水率に依存しないが空隙率によって変化することがわかった。(図4)

中間速度と天体の脱出速度の比較から求まる重力支配域での衝突破壊強度は以下の通りとなる。(図5)

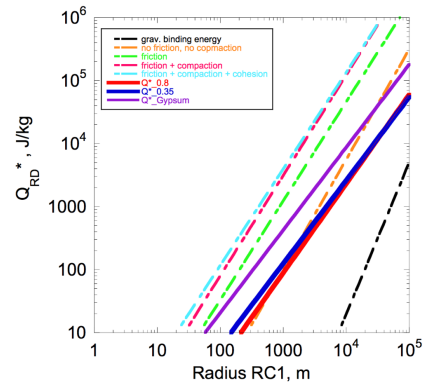


図 5. 中間速度から求まる衝突破壊強度

Jutzi (2015)において天体を構成する物質の物性が衝突破壊強度に影響することがわかった。しかし、本実験で用いた凍結粘土試料の反対点速度 V_a 、衝突破壊強度 Q_s^* は含水率によって変化するが、中間速度 V^* は含水率に依存しないことがわかった。そのため、中間速度と脱出速度の比較から求まる重力支配域での衝突破壊強度 Q_0^* は含水率に依存しないことがわかった。