

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) 宇宙航空研究開発機構

はじめに

微惑星の成長と進化において、微惑星同士の衝突は最も重要な物理素過程の一つである。衝突により発生する衝突破壊とその破片の再集積は、原始惑星の成長だけでなく、衛星や小惑星族の起源とも関連していると考えられており、衝突破壊現象の理解は重要である。衝突破壊強度は、衝突後の最大破片が元の標的質量の半分になる時に必要とされるエネルギー密度 Q^* ($= m v^2/2M$: 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。この Q^* は、サイズが 100m を超える天体では、物質強度よりも重力による破片の再集積で決まると言われており、重力支配域の衝突破壊強度 (Q_g^*) と呼ばれている。この Q_g^* は、これまで数値シミュレーションでのみで推定されてきたが、先行研究で示される Q_g^* は数値シミュレーション毎に大きく異なっているため室内実験による検証が必要であった[1]。重力支配域では天体の脱出速度が十分に大きいので、天体の脱出速度以下の速度しか持たない破片が数多く存在し、それらは再集積してラブルパイル天体を構成する。従って、室内実験の結果から破片速度を得ることができれば、再集積するラブルパイル天体の質量を推定することができる。しかしながら、破片速度分布に関する実験的研究は非常に少ない[2, 3]。さらに、その先行研究で求められた破片速度は、高速カメラにより撮影できる標的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の速度分布を計測する手法を確立させ、その内部速度分布から Q^* に制約を与えることを目的とした。

実験方法

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。弾丸は直径 7 mm のポリカーボネート球を用いた。衝突速度は $1.5 - 6.5 \text{ km s}^{-1}$ ($Q: 10^3 - 10^4 \text{ J kg}^{-1}$) で変化させた。その結果、ほとんどの実験で標的はカタストロフィック破壊し、最大破片は元の標的質量の 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)で混合して作成した。それぞれの含水率は、25 wt%、35 wt%、45 wt%である。粘土試料は $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ に冷却して、試料内の水は凍結させて用いた。含水率を変化させることで、凍結粘土の静的引張強度は 1.10 MPa から 2.24 MPa まで変化させた。試料内部の速度分布を測定するため、

標的内部には直径 3 mm の鉄球をトレーサー粒子として単一平面上に配置した (図 1)。このトレーサー粒子の運動を撮影するために 3 方向からフラッシュ X 線を照射して、その透過像をイメージングプレート (IP1, 2, 3) に記録した (図 2 (a), (b))。なお、撮影のタイミングは、衝突後の $50 \mu\text{s} - 20 \text{ms}$ で変化させた。内部速度分布は、トレーサー粒子の変位とその時の撮影時間から決定した。また、衝突の様子は 20 万コマ毎秒の速度で高速カメラを用いて撮影し、衝突点の反対点から放出される破片の速度を決定した。なお、実験用のチャンバー内は、衝突実験中は約 100 Pa まで真空引きしている。

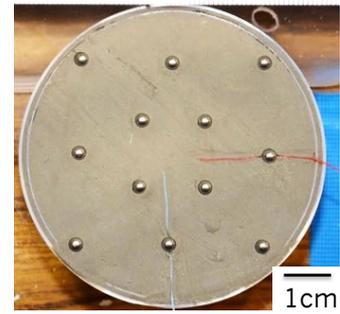


図 1 : 試料と鉄球マーカー

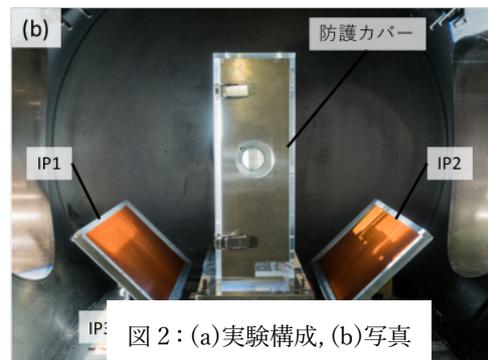
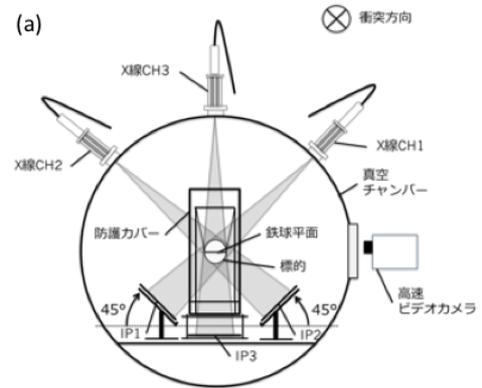


図 2 : (a)実験構成, (b)写真

実験結果

フラッシュ X 線によって撮影された画像の例を図 3 に示す。この実験は、含水率 35% の試料に 5000 J/kg のエネルギー密度を与えたものである。衝突後 $50 \mu\text{s}$ には衝突点近傍にクレーターが形成されることがわかる。 $250 \mu\text{s}$ 後には縦割れを中心に多くのクラックが試料内部を分断し、マーカーである鉄球も初期位置から移動していることが確認できる。 $750 \mu\text{s}$ 後では、試料は完全に破片化しており、それぞれの破片がマーカーと伴にかなりの距離を移動していることが確認できる。大きなクラックが衝突方向に幾つか入っており、このクラックで試料内は大まかには幾つかのドメインに分割

● : 初期位置 ● : 衝突後 衝突後経過時間

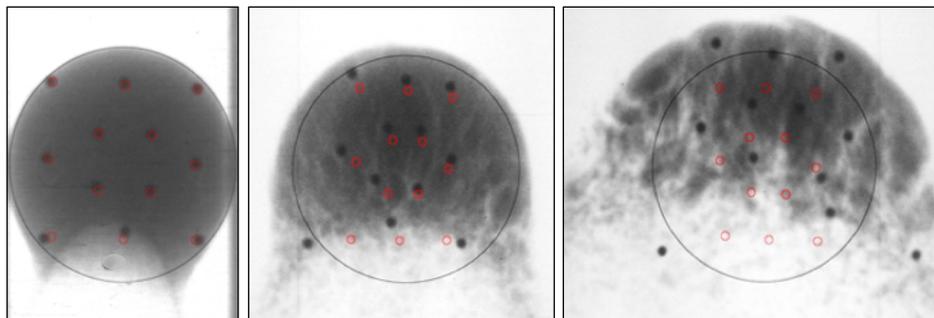


図 3 : フラッシュ X 線で撮影された衝突破壊過程、赤丸はマーカの初期位置、黒丸はそれぞれの衝突時間でのマーカー位置

されている。衝突点近傍では、マーカーが周囲の破片と分離しているように見えるが、それ以外ではマーカーは周囲の破片に取り囲まれたまま移動しているように見る。従って、マーカーの観測から試料破片の速度を求めることには大きな問題はないと思われる。

実験結果の解析から、トレーサー粒子の速度ベクトルは、衝突点近傍では弾丸の進行方向と逆向きになることがわかった（図4）。一方、衝突点から標的半径程度離れると弾丸の進行方向と同じ向きとなった。速度ベクトルは衝突点近傍で最大となり、最小となるのは衝突点から一番遠い反対点ではなく中心付近であった。そのため、標的内部の速度分布は衝突点からの距離だけではなく、標的表面からの距離も関係すると考えられる。なお、鉄球速度は Q の増加に伴って全体的に高速となる。反対点近傍のトレーサー粒子の速度ベクトルは、最大破片が小さい場合には、それぞれが方向と大きさの異なる速度ベクトルをもっていた。しかしながら、最大破片が大きな場合は、それぞれの速度ベクトルの向きと大きさが同じであった。これは、最大破片が小さい場合、反対点の破片が独立に動くことを示している。一方、最大破片が大きな場合、最大破片が幾つかのトレーサーを内包するため、それらが一緒に動いているように見えると考えられる。

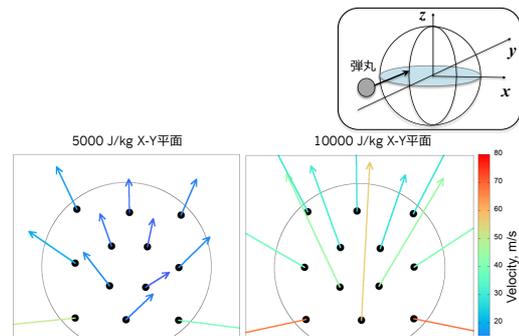


図4：解析されたマーカーの速度ベクトル

図5は、重心系での破片速度とその速度以下の速度を持つ破片質量の総和を表す図である。なお、破片質量と粒子速度の関係は、領域毎に最近傍の鉄球速度を割り振ることで決めており、破片質量は標的の初期質量で規格化している。例えば、10000 J/kg の凍結粘土の実験では、総破片質量の60%が約30 m/s以下であることがわかる。この結果から、鉄球トレーサーに代表される内部速度分布は、エネルギー密度の増加に伴い高速になることがわかった。同じ種類の凍土粘土試料では、エネルギー密度を2倍に変化させると内部速度分布も倍程度変化しているように見える。一方、種類の異なる多孔質石膏試料では、10000 J/kg のエネルギー密度を与えても、凍結粘土とは比較にならない程、破片速度が遅いことがわかった。

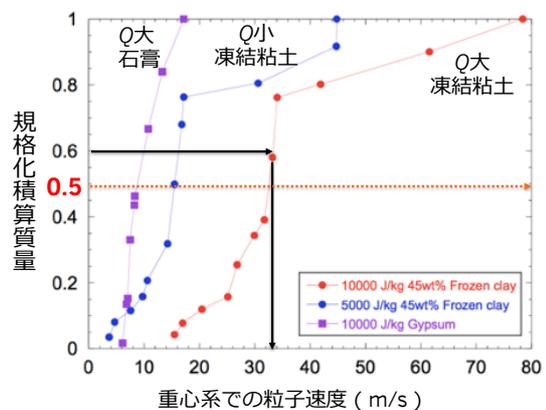


図5：破片の積算質量と速度の関係

このようにして求まる規格化積算質量と粒

子速度の関係において、規格化積算質量が 0.5 となるとき粒子速度を中間速度 V^* とする。このような定義より、 V^* 以下の速度で半分の質量が運動し、もう半分は V^* 以上で運動する。この V^* は、含水率によって変化しないが、空隙率によって変化することがわかった (図 6)。

また、この V^* と天体の脱出速度 V_e を比較することで、重力支配域における衝突破壊強度 Q^* を得ることができる。 V^* から求まる Q^* は、 V^* の物性依存性と同様で、含水率によって変化せず、空隙率によって変化する。空隙をもつ石膏の Q^* は空隙をもたない凍結粘土の 3 倍となった。この結果は、Jutzi (2015) [4] における SPH による数値計算の結果と整合的である (図 7)。

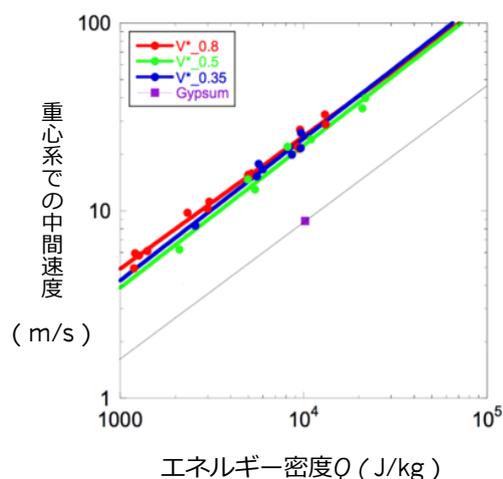


図 6: 中間速度とエネルギー密度の関係

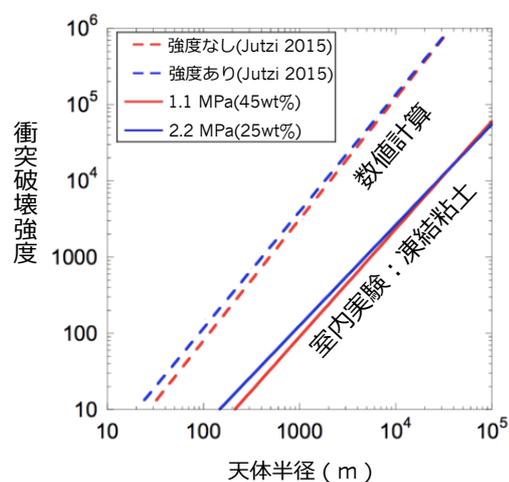


図 7: 衝突破壊強度と天体半径の関係

参考文献

- [1] Benz, W. and Asphaug, E. 1999 Catastrophic disruptions revisited. *Icarus* 142, 5–20.
- [2] Fujiwara A. and Tsukamoto. A. 1980. Experimental study on the velocity of fragments in collisional breakup. *Icarus* 44:142–153.
- [3] Nakamura A., Suguiyama K., and Fujiwara A. (1992) Velocity and spin of fragments from impact disruptions I. An experimental approach to a general law between mass and velocity. *Icarus*, 100, 127–135.
- [4] Martin Jutzi., 2015. SPH calculations of asteroid disruptions: The role of pressure dependent failure models. *Planetary and Space Science* 107 (2015) 3–9.