

フラッシュ X 線を用いた衝突破壊時の多孔質試料の内部粒子速度の観測

保井みなみ¹⁾、荒川政彦¹⁾、中村誠人¹⁾、長野巧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

微惑星から惑星への衝突集積過程やその痕跡を記録する小惑星帯における小惑星のサイズ頻度分布の衝突進化過程を研究する上で、衝突破壊強度 (Q^*) は最も重要な物理量である [1, 2]。天体同士が高速で衝突すると衝突条件によっては、天体は粉々に破砕される。この時、標的となる天体 (二体衝突の場合、相対的にサイズが大きな天体を標的天体と呼ぶ) が、元の質量の 1/2 以下になるような衝突破壊をカタストロフィック破壊と呼ぶ [1, 2]。衝突条件は、エネルギー密度 Q という衝突する二体の天体の運動エネルギーをその二体の合計質量で割った値で表されるが、衝突破壊強度はカタストロフィック破壊が開始する時のエネルギー密度として定義される。この衝突破壊強度は、数 m 以下のスケールの衝突では標的の結合強度により決まるため、様々な模擬微惑星や模擬小惑星を用いた実験的研究によって求められている。その結果、結晶質の岩石等の標的では、静的な力学強度と衝突破壊強度には比例関係があることが分かっている。また、多孔質標的では、静的な力学強度だけでなく空隙率が衝突破壊強度を決める重要な要素となっており、空隙により力学強度が低下しても、その空隙が衝突エネルギーを効果的に吸収する場合、衝突破壊強度は大きくなることが分かっている。

一方、100m 以上の天体では自己重力が有意に働くため、衝突破壊により粉々になった破片は、ラブルパイル天体として再集積する。そのため、衝突破壊後の破片サイズ分布がカタストロフィック破壊を示していたとしても、その破片が再集積することで、元の質量の 1/2 よりも大きな天体として再構築されることがあり得る。このような破片の再集積を考慮した衝突破壊強度を Q_d^* (添字 d は、dispersion を意味する) と記述し、物質強度により決まる衝突破壊強度 (Q_s^* : 添字 s は、shattering を意味する) と区別して考える。以後は、 Q_d^* を重力支配域の衝突破壊強度、 Q_s^* を強度支配域の衝突破壊強度と呼ぶ。

これまで Q_d^* の研究は、自己重力を導入する必要があることから、もっぱら数値シミュレーションで行われてきた。しかしながら、その計算結果は計算手法や研究グループごとに異なり、一桁以上のばらつきが見られていた。Jutzi[3]は、天体の物性を考慮した衝突破壊・再集積の数値シミュレーションを行い、 Q_d^* に対する結合強度、摩擦力、空隙率の影響を調べた。その結果、彼は摩擦力や空隙率が Q_d^* に対して大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

そして、 Q_d^* へ影響が出る理由は、衝突破片の速度分布がこの2つの要素で大きく変化することであることを指摘した。これまでの数値計算から求めた Q_d^* のばらつきが、それぞれのモデルが導入しているエネルギー散逸メカニズムに原因があるとするならば、室内実験で特定のメカニズムによりエネルギー散逸が起こる標的を用いて破片速度分布を詳細に調べることで、散逸メカニズム毎の寄与を明らかにすることができる。

このような背景のもと、昨年度から我々のグループではフラッシュ X 線を用いた衝突破片の内部粒子速度分布の計測を開始した。本研究では、破片速度分布を決めるエネルギー散逸メカニズムとして結合強度と空隙圧縮を選択し、それぞれの影響を調べることができる試料を準備した。昨年度は、含水率が異なる凍結粘土を用いることで、内部粒子速度分布に対する結合強度の影響を調べた。その結果、2～3 倍程度の結合強度の差は、内部粒子速度分布には影響を及ぼさないことが分かった。そこで今年度は、空隙の圧縮が及ぼす内部粒子速度分布への影響を調べるため、多孔質石膏と乾燥粘土を標的として衝突破壊実験を行い、その時の様子をフラッシュ X 線で観測して内部粒子速度分布を調べた。

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 $2-5 \text{ km s}^{-1}$ ($Q: 10^3-2 \times 10^4 \text{ J kg}^{-1}$) 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を示し、最大破片は元の標的質量の 10% 以下となった。標的試料には直径 6 cm の多孔質石膏球と乾燥粘土球を用いた。多孔質石膏球の密度は 1.1 g/cm^3 で、空隙率は約 50% であり、その引張強度は約 2.5 MPa であった。乾燥粘土球の密度は 1.6 g/cm^3 であり、空隙率は多孔質石膏とほぼ同じ約 50% であったが、引張強度はずっと小さく約 0.3 MPa であった。この2種類の標的では、空隙率はほぼ同じであるが引張強度は 10 倍ほど異なる。昨年同様、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。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に記録した。なお、撮影のタイミングは、衝突後の $50 \mu\text{s}-2 \text{ ms}$ で変化させた。内部粒子速度分布は、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、衝突角度と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 10 Pa 以下に真空引きしている。

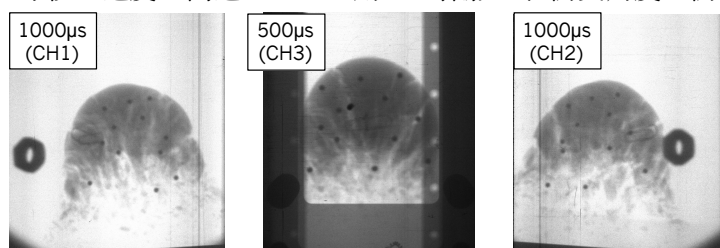


図1：フラッシュ X 線写真。 3km/s で多孔質石膏に衝突。

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 1 に示す。この実験は、多孔質石膏の試料に 9,000 J/kg のエネルギー密度を与えたものである。CH3 で撮影された衝突後 500 μ s の画像から、衝突点を中心に試料が細粒化しており、さらに放射状に太いクラックが試料全体に渡って数本発生していることがわかる。マーカーである鉄球も初期位置から大きく移動していることが確認できる。1,000 μ s 後の写真から、衝突半球で試料は完全に破碎し、衝突点中心に放射

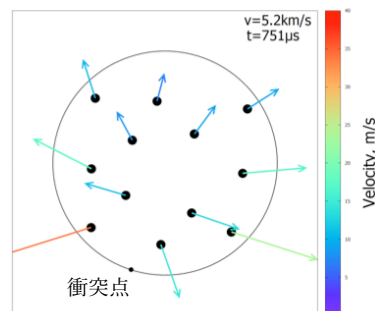


図 2: 多孔質石膏の内部粒子速度分布, 衝突速度 5.2km/s.

状に高速度で微小破片が飛散していることがわかる。また、衝突点から遠方の半球は、縦割れクラックが試料内部を分断しているが、かなり大きな破片も残っており、その破片中にあるマーカーは初期位置からあまり移動していないように見える。一方、衝突点近傍では、マーカーが周囲の破片と分離しているが、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。従って、衝突点近傍以外では、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。多孔質石膏は、昨年度使用した凍結粘土と比べて衝突点近傍でのクレーターの成長が抑制されており、さらに、衝突点遠方での縦割れの程度も比較的緩やかであった。一方、乾燥粘土は、破碎の程度は多孔質石膏と大差ないが、多孔質石膏や凍結粘土で見られた衝突点から放射状に伸びる縦割れの発達は見られなかった。乾燥粘土の破碎は、ランダムに発生・成長するクラックに起因するようである。

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 2)。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。

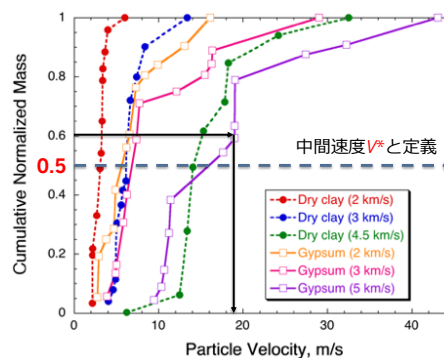


図 3: 多孔質石膏の積算質量と内部粒子速度の関係, 衝突速度 5.2km/s.

図3は、多孔質石膏及び乾燥粘土に関して、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、25,000 J/kgの実験では、総破片質量の60%が約20 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粒子速度は、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。多孔質石膏試料では、エネルギー密度を2倍にすると内部粒子速度は1.5程度変化している。また、種類の異なる乾燥粘土試料でも、同じエネルギー密度では、ほぼ同じ内部粒子速度を持つことが分かった。一方、両試料とも空隙率は50%程度であるが、昨年行った凍結試料（空隙率<数%）と比べてかなり内部粒子速度が小さく、空隙率の影響が大きいことがわかる。

本研究では、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となるときの粒子速度を中間速度 V^* と定義している。従って、衝突破片は 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。図4にこれまで行った凍結粘土、乾燥粘土、多孔質石膏におけるエネルギー密度と V^* の関係を示す。この図から V^* は、空隙率の大きい場合は空隙率を持たない試料と比べて V^* が半分以下になることがわかる。また、多孔質石膏と乾燥粘土のような多孔質試料では、引張強度がかなり異なるにも関わらず V^* とエネルギー密度の関係がほぼ一致することがわかった。

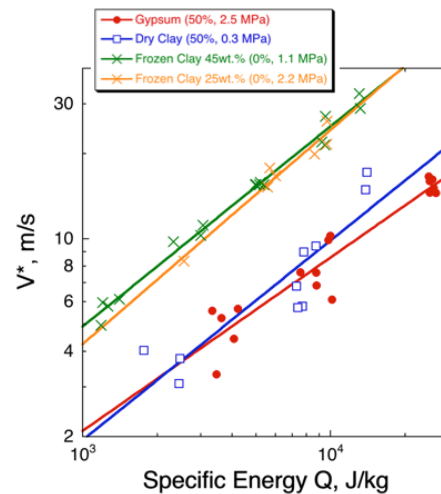


図4：中間速度 V^* とエネルギー密度 Q の関係。

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] Jutzi, M., 2015. SPH calculations of asteroid disruptions: The role of pressure dependent failure models. *Planetary and Space Science* 107, 3–9.