

フラッシュ X 線による衝突破片の速度-質量分布の計測

長野 巧¹、荒川政彦¹、保井みなみ¹、堀川和洋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

原始太陽系星雲では、微惑星同士の衝突破壊・再集積により惑星が成長していたと考えられている。この微惑星の集積による惑星成長のタイムスケールは、微惑星の衝突破壊強度の影響を受けていたと言われており、惑星成長を研究する上で衝突破壊強度は重要である。また、多数の天体が衝突進化した結果である小惑星帯のサイズ頻度分布は、衝突天体の衝突破壊メカニズムの変化により特徴的な分布を持つことが分かっている。そこで今まで、衝突破壊強度に関する室内実験、数値シミュレーション、理論等の研究が数多く行われてきている。

衝突破壊強度は、衝突時に発生する標的の最大破片により調べることができる。これまでの研究から、衝突破壊強度は、標的に与えられた単位質量あたりの運動エネルギー (Q : エネルギー密度) により記述されることになっており、最大破片が標的質量の半分になる時のエネルギー密度として定義されている。この値を通常は Q^* と書く。一方、衝突破壊強度 (Q_D^*) は、標的のスケールに依存して変化すると言われており、数 100m より小さな標的では主に物質強度や空隙率によりその強度が決まっていることが分かっている。一方、数 100m よりも大きな標的では、衝突破壊そのものよりも破壊後の破片の再集積が最大破片の大きさを決めるため、標的が持つ位置エネルギーが衝突破壊強度を決めることになる。そのため衝突破壊強度が物質強度により決まる時、その時の衝突破壊は強度支配域にあると言い Q_s^* (Shattering strength) と記述する。また、衝突破壊強度が標的の位置エネルギーにより決まる時、その時の衝突破壊は重力支配

域にあると言い Q_D^* (Dispersion strength) と記述する。これまで Q_D^* はその性質から数値シミュレーションにより研究が行われてきた。しかしながら、その結果求めた Q_D^* は研究毎に 1 桁以上大きく異なっている。

Jutzi (2015) は衝突破壊・再集積の数値シミュレーションにより Q_D^* を調べたが、その時に標的の強度、空隙、摩擦が及ぼす Q_D^* への影響を系統的に研究した。その結果、標的の空隙や摩擦は Q_D^* に対して比較的大きな影響を及ぼすが、強度はほとんど Q_D^* には影響しないことを見つけた。重力支配域の最大破片は破片の速度分布によりほぼ決まるので、彼の結果は、標的の摩擦や空隙は破片の速度分布に影響を及ぼすが、強度はそれほどでもないことを示唆している。従って、これまでの数値シミュレーション間の Q_D^* の相違は用いている力学モデルの差異による可能性が高い。このように重力支配域の衝突破壊強度は、位置エネルギーに加えて標的の物性にも依存していることが分かってきた。そこで我々のグループでは衝突破壊時の破片の速度分布を実験的に調べることで、重力支配域の衝突破壊強度に対する物性依存性を明らかにすることを目指している。

我々はこれまで、凍結粘土や多孔質石膏の標的を用いた実験を行うことで、破片速度分布に対する空隙や強度の影響を調べてきた。破片速度分布は 1990 年代から実験的に調べられてきたが、高速カメラの撮影画像を用いた研究が主であったこともあり、標的の内部から発生した破片の観測が不十分であった。また、カタストロフィック破砕を受けた多量の小破片の観測などを行うことはできなかった。そこで我々は試料内に組み込んだ複数の鉄球

トレーサーをフラッシュ X 線により可視化する観測手法を開発し、トレーサー粒子の 3 次元速度ベクトルを調べることで標的全体の質量-速度分布を再構築する手法を確立した。そしてこの手法により凍結粘土と多孔質石膏の質量-速度分布を様々なエネルギー密度で求め、速度分布に対する空隙と強度の影響を明らかにしてきた。本研究ではこれまでの研究の延長上として、試料の摩擦が速度分布に与える影響を調べることにした。そのために脆性破壊強度と空隙を持たない延性的な試料を用いて実験を行った。

実験方法

標的にはシリコンオイルとベントナイトを混ぜて作成したオイル粘土球と同じベントナイトの乾燥粘土球を比較のために用いた。乾燥粘土球の直径は 60mm、密度は 1.64g/cm³、空隙率は約 40%であった。オイル粘土球の直径は 65mm、密度は 1.78g/cm³、空隙率は~0%であった。それぞれの球標的には、球の中心を通る断面（トレーサー面）に直径 3mm の鉄球を 12 個、規則正しく配置している（図 1）。衝突実験では、このトレーサー面内に向けて弾丸を衝突させた。

衝突破壊実験は ISAS/JAXA と神戸大学の二段式水素ガス銃を用いて行った。弾丸はポリカーボネート球とし、JAXA では直径 7mm、神戸大学は直径 4.7mm のものを用いた。衝突速度は、2-4.5 km/s としたが、その時のエネルギー密度は 1.6x10³-1.4x10⁴J/kg であった。JAXA で

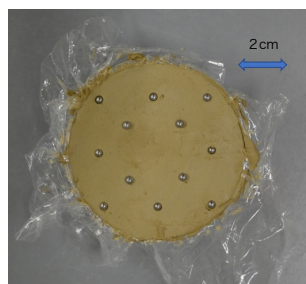


図 1：トレーサー粒子の配置

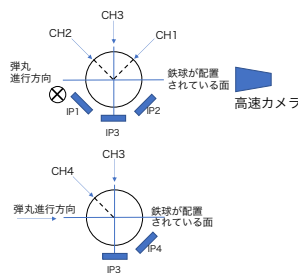


図 2：フラッシュ X 線の配置

はフラッシュ X 線による観測を行い、神戸大学では主に強度支配域での衝突破壊強度の測定を行った。フラッシュ X 線の撮影では 2 本のフラッシュ X 線 (300keV) を同時に照射することで鉄球トレーサーの位置を 3 次元的に決定した。X 線の照射タイミングは、弾丸の衝突時間から 250μs から 1000μs で変化させた。フラッシュ X 線を 4 本使える時には、2 本ずつ二度の照射を行ってトレーサーの 3 次元位置を異なる 2 つの時間で決定してトレーサーの速度ベクトルを決めた。図 2 に X 線の照射方向と標的のトレーサー面の関係を示す。なお、照射した X 線は対向する位置に設置したイメージングプレート (IP) により受光して X 線の吸収イメージを撮影した。

実験結果

強度支配域の衝突破壊強度は、衝突後の最大破片を計測してエネルギー密度との関係を調べ得ることで決定した。図 3 にオイル粘土と乾燥粘土の規格化最大破片質量とエネルギー密度の関係を示す。比較のためにこれまで行ってきた凍結粘土と多孔質石膏の結果も加えてある。乾燥粘土の衝突破片は平らな破断面で覆われており、岩石試料のように脆性破壊により生じたと思われる。一方、オイル粘土の破片には平らな破断面は見られず、試料

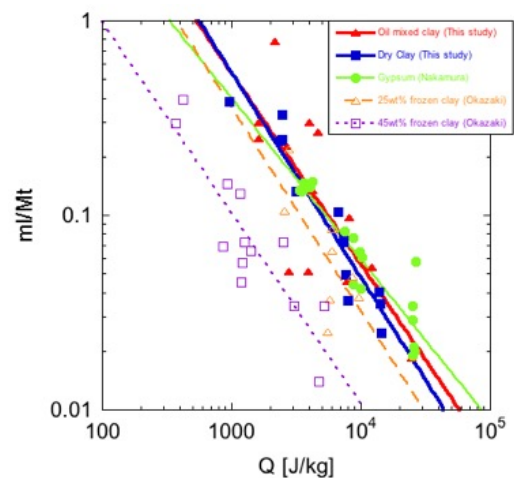


図 3：規格化最大破片質量とエネルギー密度の関係

が伸びて引きちぎられたような構造が見える。また、破片が飛び散って回収箱に衝突して変形した様子も見られた。このように破壊形態に大きな違いが見られたが2つの標的では衝突破壊強度はほぼ同じとなった。乾燥粘土の Q_s^* は 1092J/kg、オイル粘土の Q_s^* は 1071J/kg と求まった。これらの値は先行研究の多孔質石膏の Q_s^* とも類似している。乾燥粘土と多孔質石膏は 40~50%の空隙率を持つことから、この空隙が原因で Q_s^* が近い値を持つのかかもしれない。一方、オイル粘土は延性的な性質を示すので Q_s^* が多孔質石膏や乾燥粘土に近い値を持つのは偶然と思われる。

図4にフラッシュ X 線で撮影された衝突破壊時の乾燥粘土球とシリコン粘土球の画像を示す。衝突速度が 1.8km/s と同じ場合でも乾燥粘土とオイル粘土では破壊の様子が大きく異なることが分かる。衝突点近傍のクレーター形成領域は衝突後 250 μ s から 300 μ s ではオイル粘土の方が倍程度広がっている。また、衝突後 800 μ s から 1ms では乾燥粘土では試料全体にクラックが広がっているのは確認できるが、標的は元の球形を維持しており、大半の破片はほとんど動いていない。一方、オイル粘土では標的は三日月状に変形しており、これは衝突点近傍から速度分布を持って試料が運動していることを意味する。また、反対点付近では反射波によりスポール破壊が起きていることも確認できる。このオイル粘土は、衝突点付近では圧縮応力により延性的な変形

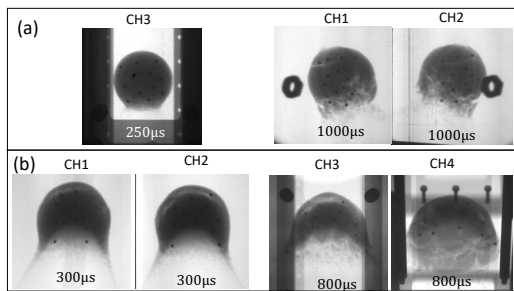


図4：フラッシュ X 線撮影画像。(a) 乾燥粘土、(b) オイル粘土。数字は衝突からの経過時間。CH1-4 はフラッシュ X 線のチャンネル。衝突速度は 1.8km/s。

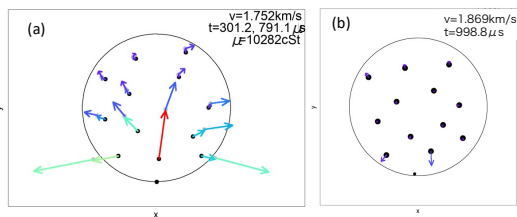


図5：トレーサー粒子の速度ベクトル。(a) オイル粘土、(b) 乾燥粘土。衝突速度は 1.8km/s。

を示すが、反対点付近では引っ張り応力により脆性的な引っ張り破壊を起こしている。この試料は引っ張り応力に対しては、低速変形においては大変形を伴う延性破壊を起こすことが知られていた。今回の研究から、高速変形ではスポール破壊のような脆性破壊を起こすことが分かったので、引っ張り応力に対する応答は、歪速度依存性が顕著であることが明らかになった。また、撮影した画像を見ると、このスポール破壊が最大破片を含む比較的大きな破片を生ずるメカニズムであることが分かる。これらの観察結果から、このオイル試料は引っ張りの歪速度が低速から高速に変化すると延性-脆性転移を起こすことが分かった。

撮影画像のトレーサー粒子の位置を解析すると各粒子の速度ベクトルを得ることができる。図5は各トレーサー粒子の速度ベクトルを表すものであり、オイル粘土の場合は衝突

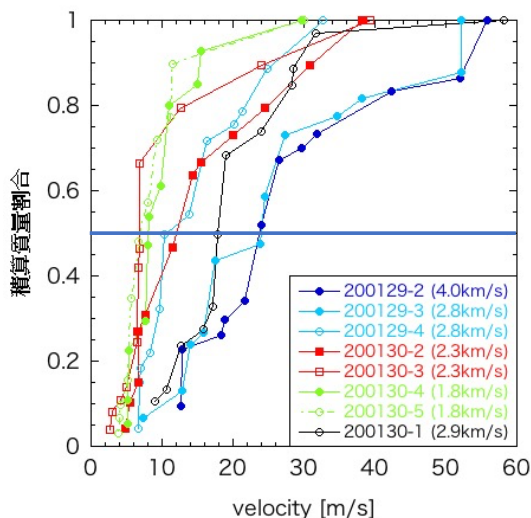


図6：規格化積算質量と破片速度の関係。

点近傍から離れるにつれて速度が遅くなることが分かる。一方、乾燥粘土球ではエネルギー密度はオイル粘土球とほぼ同じであるにもかかわらず、ほとんどトレーサー粒子は動いていないことが分かる。このように乾燥粘土球とオイル粘土球では Q_s^* がほとんど同じであるが、トレーサー粒子の速度分布には大きな違いがある。

このトレーサー粒子の速度分布を用いて、標的の全衝突破片の速度を求めることを試みる。その時、速度分布は衝突点とその反対点を結ぶ直線（衝突軸）に対して軸対称であると仮定する。また、トレーサー面を軸方向と角度方向に区切って 216 に細分割し、分割した各要素は最近接のトレーサー粒子の速度で運動すると仮定する。この各要素について衝突軸を中心に 180°回転して体積を計算し、その体積に密度をかけることで質量を計算する。このようにして質量-速度関係を求めた。

図 6 はオイル粘土標的に関して、ある速度よりも飛翔速度が遅い質量の積算値を示したものである。ただし、速度は重心系での速度

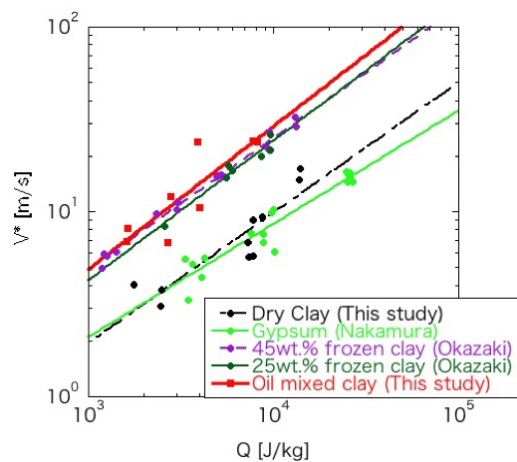


図 7：中間速度とエネルギー密度の関係

を示している。この図から衝突速度が速くなると積算分布の傾きが緩くなることがわかる。ここで積算質量が標的質量の半分になる時の速度を中間速度 (v^*) と定義して各実験での v^* を求めた。その結果、 v^* は 9m/s から 24m/s と衝突速度と共に大きくなっていることが分かった。従ってこの v^* は破片速度の代表値の一つと考えることができる。図 7 にエネルギー密度と中間速度の関係を示す。乾燥粘土は先行研究の多孔質石膏と似た値を持ち、オイル粘土と較べてかなり v^* が小さくなる。一方、オイル粘土は先行研究の凍結粘土と似た値を持ち、多孔質石膏よりも v^* はずっと大きい。中間速度の定義から、 v^* よりも遅い破片の速度は標的質量の半分となるので、この中間速度と標的天体の脱出速度を比較することで重力支配域の衝突破壊強度 Q_D^* の概算値を計算することができる。この計算から、 v^* が大きな標的では Q_D^* が小さく、 v^* が小さな標的では Q_D^* は大きくなることが分かる。つまり、オイル粘土と乾燥粘土は、 Q_s^* がほぼ一緒であるにもかかわらず、 Q_D^* はオイル粘土の方が乾燥粘土よりもかなり小さくなる。ところでオイル粘土の v^* は、凍結粘土の v^* とほぼ一緒に見える。両者は空隙を持たない点では一致しているが、引っ張り強度や摩擦は、その物性値が大きく異なる。それにも関わらず v^* が近い値を持つということは、標的がカタストロフィック破壊するような激しい破壊では、破片速度分布には摩擦や引っ張り強度はあまり影響しないことを示しているのかもしれない。

参考文献：Jutzi, M. (2015) Planetary and space science, 107, 3-9.