

層構造試料を用いた衝突破壊実験 ：デジタル画像相関法による衝突破片速度分布の計測法の開発

石田紗那¹, 荒川政彦², 保井みなみ², 白井慶², 堀川和洋²

¹ 神戸大学理学部, ² 神戸大学大学院理学研究科

1. 背景・目的

微惑星は衝突破壊と重力による破片の再集積過程を経て、徐々に成長したと考えられている。そうした初期進化過程での衝突破壊現象を理解するために、最大破片質量が元の標的質量の半分になるときのエネルギー密度として定義される衝突破壊強度 Q_d^* が用いられてきた。この Q_d^* は、サイズが100mを超える天体では、重力による破片の再集積で決まるといわれており、重力支配域の衝突破壊強度 Q_d^* と呼ばれている [1]。この Q_d^* は、これまで数値シミュレーションのみで推定されてきたが、その先行研究で示される Q_d^* は数値シミュレーション毎に大きく異なるため室内実験による検証が必要である。室内実験で検証するためには、衝突破壊で発生するすべての破片に関して質量-速度分布を決める必要がある。高速カメラを用いた破片を追跡する手法では、標的表面から放出する破片しか計測できないので、これまで室内実験による検証は難しかった。そこで本研究では半球への衝突実験を行い、その半球の断面をデジタル画像相関法(DIC)により解析して標的内部の粒子速度分布を求めることを試みた。

また近年の小惑星探査で、C型小惑星リュウグウは水質変成を経た母天体の破片が再集積したラブルパイル天体だと考えられている [2]。リュウグウの母天体のような微惑星は内部構造が熱進化していると考えられ、氷を含む微惑星は水質変成したコアと表層に多孔質のマントルの層構造をもつとされている。このような熱進化した氷微惑星における内部構造の及ぼす影響を検討するために層構造試料の実験が必要である。

以上のことから本研究では、衝突破片に関する質量-速度分布を決定する手法を確立するため、層構造試料での衝突実験とDICを用いた解析を行った。

2. 実験方法・解析方法

衝突実験は神戸大学の横型二段式軽ガス銃を用いて行なった。弾丸は直径4.7mmのポリカーボネート球を用いた。衝突速度は $2.6\text{-}4.0\text{ km s}^{-1}$ ($=10^3 - 6 \times 10^3\text{ J kg}^{-1}$)で変化させた。本研究では、氷を含む微惑星が熱進化した水質変成コアと多孔質マントルを持つ層構造を模擬するため粘土コア・砂石膏マントルの層構造試料を用いた。そして層構造との比較のため均質多孔質構造試料として砂石膏多孔質試料を用いた。層構造試料のマントルには石英砂と石膏を質量比2:1で混合したものを、コアにはベントナイトと 25°C で 10^5 ct (10^4 Pas)のシリコンオイルを質量比3:1で混合したものを、コア直径は30mm、マントル直径は60mmで球と半球標的を作成した。マントル部分の空隙率は38%である。均質構造試料は、質量比2:1の砂石膏を用いて作成し、直径60mmの半球標的である。DIC法による解析のため、半球標的の表面にはスプレ

ーを用いてランダムな点をつけた。衝突の様子は $10\text{-}20 \times 10^4\text{fps}$ の高速カメラを用いて観察した。

3.結果

層構造試料への実験では、コア及びマントルともに細かく破壊されるが、カタストロフィック破壊時の最大破片はマントル部分の破片となることが分かった。またコアは塑性変形を伴う延性破壊が起こり、マントルの破壊は引っ張り脆性破壊であることが確認できた。最大破片との関係から衝突破壊強度(図 1)を求めると 226 J kg^{-1} となり、均質試料と比較して1桁小さくなった。

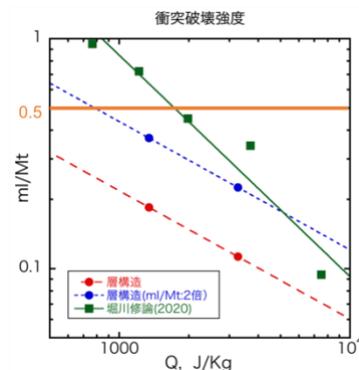


図 1.規格化最大破片質量 m_1/M_t とエネルギー密度 Q の関係。

DIC 法を用いて衝突から 1ms 後までの撮像データの解析を行った(図 2)。その結果、標的構造に関係なく、標的内部の粒子速度は反対点付近が最も遅く、弾丸の進行方向と同じ向きに動くことが分かった。また、衝突点近傍は、弾丸の進行方向と逆向きに高速で運動することがわかった。また層構造標的においては衝突点近傍のコア部分も高速で運動し、その結果コアが潰れていく様子が確認できた。均質試料内部の解析では、衝突点から同心円状に伝播する応力が観察された。

層構造試料内部の粒子速度分布においては、コア・マントルの境界部分で変位量のギャップが生じること及び衝突点近傍のコア・マントル境界からは反射波が確認された。本研究で行った DIC 法の解析による粒子速度分布の結果は、目視追跡による同じ試料領域の破片速度分布の結果とほぼ一致したので、標的内部の破片速度分布の解析に DIC 法が十分に役立つと確認できた。

【参考文献】

- [1] K. Holsapple, K. Giblin, K. Housen, A. Nakamura, E. Ryan (2002). Asteroids III, 443-462
- [2] S. Sugita et al. (2019). Science 364, 268-272

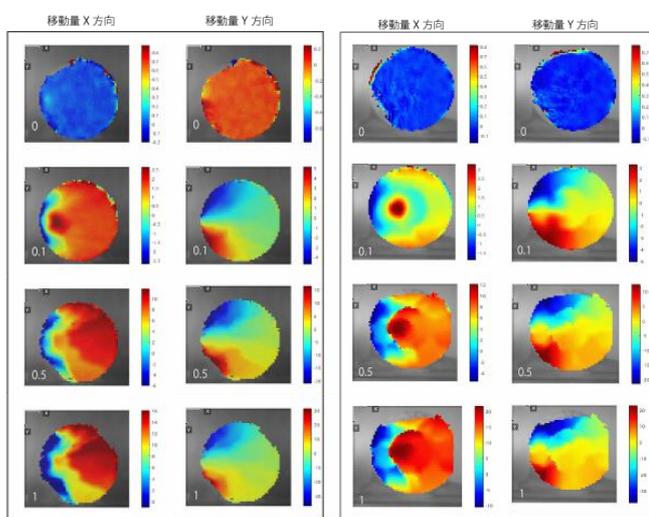


図 2.衝突速度 4 km s^{-1} における DIC 解析結果。左図が均質構造,右図は層構造。

下の数字はそれぞれ時間経過(ms 後)を示す。衝突後約 1ms での変位スケールは xy 方向とも最大約 $\pm 6\text{ mm}$ 。