

タギシュ・レイク模擬物の衝突実験：キャビティー成長の観察

塩本純平*1、榛沢悠樹*1、中村昭子*1、長谷川直*2

*1 神戸大学大学院理学研究所 *2 JAXA 宇宙科学研究所

背景

天体の衝突現象は太陽系天体の形成及び進化に大きく影響する非常に重要な物理現象である。衝突破壊の様子は標的となる物質の空隙率や強度によって異なる。多孔質標的（空隙率 $\phi=40\sim60\%$ ）として石膏などがこれまでの衝突破壊実験で用いられている。我々はフォボスシミュラント（以下、UTPS-TB）^[1]を用いてこれら多孔質標的との比較を行ってきた。

UTPS-TB はタギシュ・レイク隕石を鉱物組成的に模擬した、様々な大きさや組成の物質が含まれる不均質混合物である。我々の研究ではこの UTPS-TB と、粉末状 (<1 mm) の UTPS-TB に水を加え 3 MPa の圧力をかけ乾燥させたシミュラント（以下、WCS）の二種類の標的をタギシュ・レイク模擬物として衝突実験に用いた。UTPS-TB、WCS の密度はそれぞれ $1.43\pm 0.04\text{ g/cm}^3$ 、 $1.59\text{w}\pm 0.06\text{ g/cm}^3$ であった。模擬物の組成がタギシュ・レイク隕石と同じだと仮定すると、空隙率は 46% と 40% に相当する。また、引張強度と圧縮強度を UTPS-TB は直径 20 mm、高さ 6-21 mm の円柱、WCS は直径 20 mm、高さ 15-23 mm の円柱について荷重速度 0.001 mm/s で測定した。その結果、引張強度は $0.222\pm 0.087\text{ MPa}$ と $0.13\pm 0.04\text{ MPa}$ 、圧縮強度は $1.11\pm 0.31\text{ MPa}$ と $0.46\pm 0.20\text{ MPa}$ であった^[1]。物性値に関してまとめると、密度（空隙率）と圧縮強度は WCS の方がタギシュ・レイク隕石（ $\rho=1.6\text{ g/cm}^3$ ^[2]、 $Y_c=0.25\text{-}0.70\text{ MPa}$ ^[3]、 ρ :密度、 Y_c :圧縮強度）により近い値を示していた。

これまでの衝突実験で、UTPS-TB と WCS の衝突破壊強度 Q^* （最大破片質量割合 m_i/M_i が 0.5 となる時のエネルギー密度 Q ）及び標的の破片速度（標的の重心系を考慮した、標的の衝突面の端の速度）を測定した。UTPS-TB の Q^* は 990 J/kg で、普通コンドライトや炭素質コンドライト（CV、具体的には Allende）^[4]と同程度であった。強度が小さい割に Q^* が比較的大きいのは、空隙率が大きいためであると考えられる。一方で WCS は UTPS-TB よりも強度が小さいため、 Q^* は 240 J/kg であった。また、破片速度は WCS より UTPS-TB の方が速く、普通コンドライト模擬物（ $\rho=1.94\text{ g/cm}^3$ 、 $Y_t=0.57\text{-}1.15\text{ MPa}$ 、 Y_t :引張強度）^[5] < UTPS-TB < 石膏（ $\rho=1.10\text{ g/cm}^3$ 、 $Y_t=2.52\text{ MPa}$ ）^[5]となる。これは、密度が小さく強度が大きいほど破片速度も大きくなるという先行研究^[6]と調和的である。

以上のように、これまでは二種類のサンプルに関して破壊後の様子に注目してきたが、今回はタギシュ・レイク隕石とは異なる炭素質コンドライト模擬物（以下 GB）を加え、破壊以前のキャビティー成長の様子についての観察を行った。GB は $1.5\ \mu\text{m}$ で不規則形

状のシリカ粒子（マトリックス模擬物）と直径 220 μm のガラスビーズ（コンドリュール模擬物）に水とフライアッシュを接着剤として加え圧縮後、乾燥させて作成したものである。なお、ガラスビーズを全体の体積の 15 % の割合で作成したものを GB15、40 % の割合で作成したものを GB40 とした。

実験

実験は JAXA 宇宙研の二段式軽ガス銃を用いて行った。実験条件は下の表 1 に記してある。各実験にて、2 枚の X 線画像を異なるタイミング（UTPS-TB, WCS : 50 ~ 500 μs 、GB : 40 ~ 3000 μs ）で撮影した。

表 1 実験条件

標的	形状	弾丸(いずれも1/8インチサイズ)	衝突速度(km/s)
UTPS-TB	直方体	ナイロン球	0.9~6.0
WCS	円柱形	ナイロン球またはアルミニウム球	
GB	円錐台	アルミニウム球またはステンレス球	約4.5

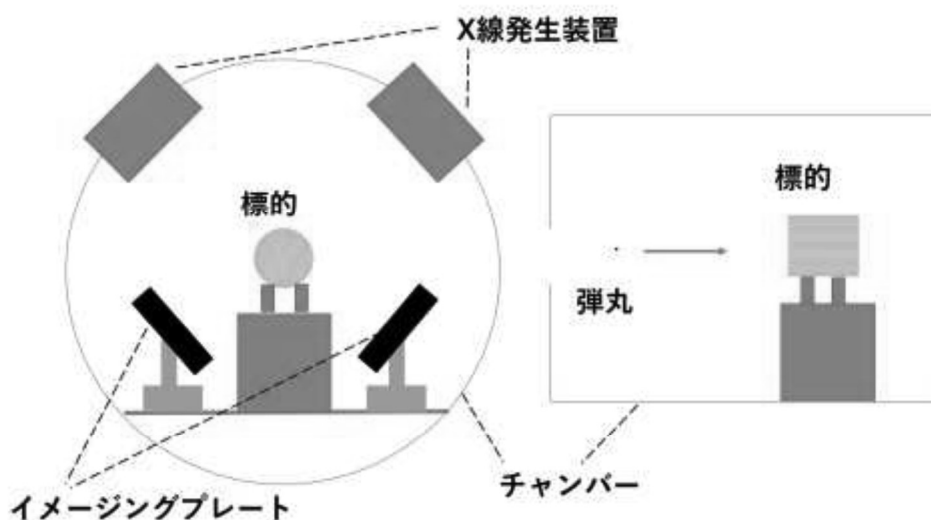


図 1 実験概略図

結果

キャビティの形状は弾丸密度によって異なっていた。図 2 にクレーターの深さ方向と直径方向の成長のグラフを示す。同一のサンプル（GB）であればアルミニウム弾丸よりステンレス弾丸の方が深い。これより、同時刻でのクレーター深さはタギシュ・レイク模擬物より GB の方が深い、これは弾丸密度によるものかもしれないと考えられる。サンプルごとの同時刻でのクレーター直径には、深さほどの差は見られない。同一のサンプルでも同時刻での直径は同程度で、こちらは弾丸種類による差は見られなかった。また、深

さ方向、直径方向二つの観点を合わせてみると、UTPS-TB と WCS はキャビティの成長速度に大きな差が見られないこともわかった。

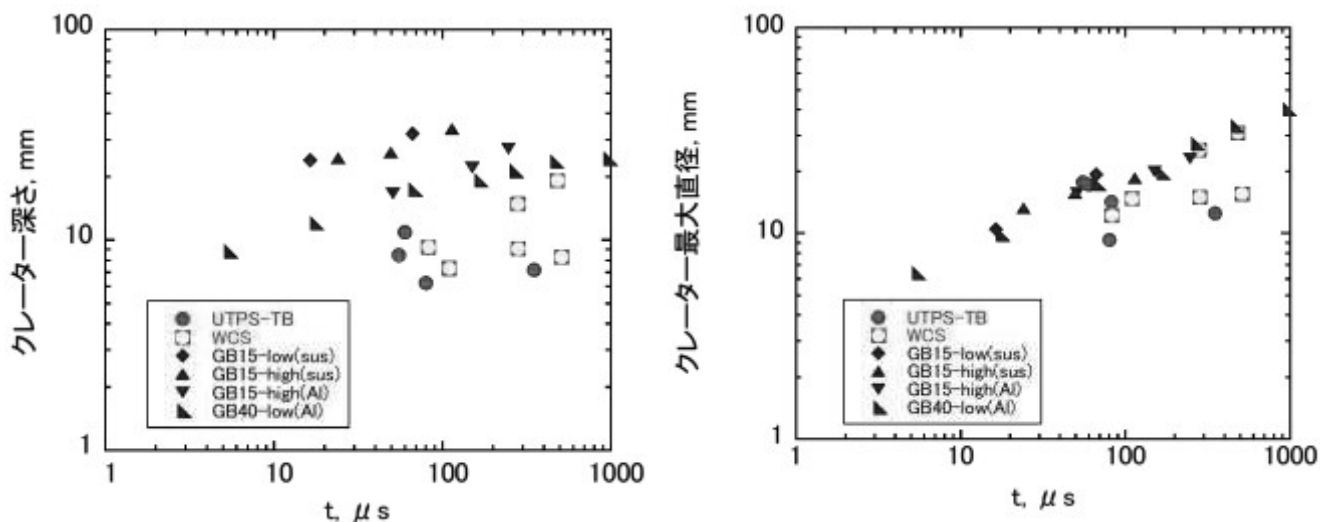


図2 クレーター成長時間 (a)深さ方向 (b)直径方向

WCS のみ最終クレーターのデータが取れた。これの最終直径と比較して、X線画像で取得した WCS のキャビティが成長段階かどうかを調べるために、WCS のクレーター直径についてのスケーリング則を考えた。横軸： $\pi_3 (= Y/\rho_p v_i^2)$ 、縦軸： $\pi_D/\pi_4^{0.11}$ ($\pi_D =$

$(\rho_t/m_p)^{\frac{1}{3}} \cdot D$, $\pi_4 = \rho_t/\rho_p$) (Y : 標的引張強度, ρ_p : 弾丸密度, v_i : 衝突速度, ρ_t : 標的密度,

m_p : 弾丸質量, D : クレーター直径)でグラフ化し、石膏^[7]とスケーリング則が似ていると

仮定すると X線画像取得時の WCS のクレーターの最大直径は最終クレーターの予想値の 0.6~0.8 倍であった。なお、縦軸の π_4 のべき指数は堆積岩^[8]に対するスケーリング則を参考に 0.11 を使用した。

タギシュ・レイク模擬物と GB のクレーター体積についても計算を行った。タギシュ・レイク模擬物はクレーターを軸対称と仮定して積分し、GB は半楕円体及び底面が円形になることを仮定してそれぞれ計算した。 $\pi_t (= v_i t/R_p)$ (t : 衝突からの時間, R_p : 弾丸半径)

を横軸、 $\pi_v = \rho_t V_{cr}(t)/m_p$ ($V_{cr}(t)$: クレーター体積)を縦軸としてグラフ化し、これらのサンプルを GB と同様の方法でクレーター体積を計算した石膏^[7]と比較すると、タギシュ・レイク模擬物と GB の π_v の値は、同じ π_t における石膏の π_v よりも成長がややしにくい傾向があるかもしれないことがわかった。

また、タギシュ・レイク模擬物、GB、石膏^[7]のクレーター深さ及び直径の成長につい

て、弾丸直径と標的/弾丸密度比によってそれぞれ以下のような式に整理した。

$$\left(\frac{d}{D_p}\right) \cdot \left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)^{0.95} = 10^{-0.45 \pm 0.06} \cdot \pi_t^{0.35 \pm 0.03}$$

$$\left(\frac{D_{Max}}{D_p}\right) \cdot \left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)^{0.19} = 10^{0.06 \pm 0.03} \cdot \pi_t^{0.26 \pm 0.01}$$

d : クレーター深さ, D_{Max} : クレーター最大直径, D_p : 弾丸直径

最大直径を整理した密度比のべき指数 0.19 は、WCS の最終直径のスケーリング則で求めた密度比のべき指数 0.22 と調和的であった。さらにこれら 2 式を組み合わせるとクレーター体積における密度比のべき指数 1.33 を導出し、体積についても同様に整理した。以下はその式である。

$$\left(\frac{V_{cr}(t)}{V_p}\right) \cdot \left(\frac{\rho_t}{\rho_p}\right)^{1.33} = 10^{-0.17 \pm 0.07} \cdot \pi_t^{0.73 \pm 0.04}$$

V_p : 弾丸体積

以上より今回の実験の結果をまとめると、①UTPS-TB と WCS のキャビティー成長速度に大きな差は見られない。②タギシュ・レイク模擬物、GB は石膏^[7]よりも成長がややしにくいかもしれない。③弾丸直径及び標的と弾丸の密度比を用いてサンプルごとのクレーター深さ及び最大直径の成長を無次元パラメーター間のべき乗則で整理し、それらの結果からクレーター体積についても整理した。空隙率や強度との関係について調べるために、クレーター深さや最大直径の成長でタギシュ・レイク模擬物と GB を比較すると弾丸が異なり、スケーリング則でタギシュ・レイク模擬物と石膏を比較するとタギシュ・レイク模擬物の最終クレーターのデータ数が不足する。そのため、今後は弾丸を考慮して実験・解析を行うことと、UTPS-TB と WCS のクレータリングの結果を取得しスケーリング則を考えて石膏との比較を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Miyamoto, H. et al. (2021), Earth, Planets and Space, accepted.
- [2] Hildebrand, A.R. et al. (2006), Meteorit. & Planet. Sci. 41, 407-431.
- [3] Brown, P.G. et al. (2002), Meteorit. & Planet. Sci. 37, 661-675.
- [4] Flynn, G.J. and Durda, D.D. (2004), Planet. Space Sci. 52, 1129-1140.
- [5] Yasui, M. and Arakawa, M (2011), Icarus, 214, 754-765.
- [6] Michikami, T. et al. (2007), Planet, Space Sci. 55, 70-88.
- [7] Yasui, M. et al. (2012), Icarus, 221, 646-657.
- [8] Suzuki, A. et al. (2012), J. Geophys. Res. 117, E08012