

フラッシュ X 線を用いた高空隙天体模擬体への 弾丸貫入のその場観察

岡本 尚也^[1], 中村 昭子^[1], 長谷川 直^[2], 黒澤 耕介^[2],
池崎 克俊^[3], 土山 明^[3]

- 1 神戸大学大学院理学研究科
- 2 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
- 3 大阪大学大学院理学研究科

はじめに

太陽系シナリオの中で始原始的な小天体のダストが起源は 2つが考えられる。一つはダストが微惑星の構成要素として集まった場合である。すなわち、ダストが星雲ガス内で合体・衝突を繰り返して成長し、天体の直接の材料物質となった場合である。もう一つは、始原始的な小天体が形成された後、その天体がダストを掃き集めた場合である。すなわちこれはガス円盤が晴れ上がりデブリ円盤内を運行する始原始的な小天体がダストを掃き集める場合である。この後者の場合にはダストは天体の表面構造・表面組成に影響を及ぼすと考えられる。さらに、その天体のオリジナルな物質以外の外来物質を含む可能性が考えられる。

NASAのスターダスト計画においてWild2彗星のダストを分析したところ、低温での生成物である有機物とともに、高温での生成物であるカンラン石、輝石などのケイ酸塩鉱物の両方が含まれていることが分かった[1]。このように原始太陽系星雲の太陽近傍で形成されたケイ酸塩鉱物のような高温物質が円盤外縁部まで運ばれ星間分子雲起源の有機物と混合したというプロセスが考えられている。すなわち太陽からの距離が違う場所で別々に生成されたものを同じ小天体が保持している可能性がある。

本研究の目的は、高い空隙率を持つ小天体にダストが侵入したとき、どのような物理過程が起こるのか、すなわちダストが侵入したときにそのトラックの形状はどうなるのか、貫入深さはどの程度なのか、弾丸の破壊は起こるのかを調べることにある。天体の空隙率と衝突速度によってどのように異なるのかに着目し、本研究では、高空隙率ターゲットに対して、高速度の衝突実験を行った。

実験方法

ターゲットは空隙率の異なる3種類の焼結体(fluffy94、fluffy87、fluffy80)を用意した。fluffy94とfluffy87はソーダライムホウケイ酸を組成とした中空ガラスビーズを焼結させて作った。一方、fluffy80の試料は低アルカリガラスを組成としたガラスビーズである。これ

らを焼結させて以下のような物理量を持つターゲットを得た。fluffy80の強度が低くなっている。これはfluffy80の強度測定に10kN用のロードセルを使い、これが弱い強度を測るのに適していなかったためだと考えられる。

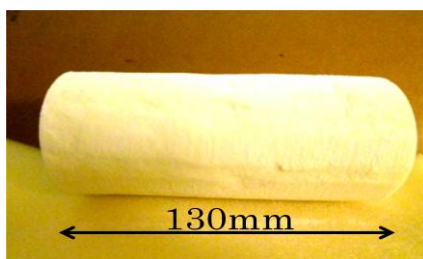


図 1 焼結後の fluffy94

表 1 ターゲットの物理量

ターゲット	バルク密度 [g/cm ³]	空隙率 [%]	圧縮強度 [MPa]
fluffy 94	0.14	94	0.57
fluffy 87	0.33	87	1.78
fluffy 80	0.51	80	0.064

実験は JAXA にある二段式軽ガス銃を使用した。ターゲットをチャンバーにセットし、ハイスピードカメラを用いバックライトで撮影を行った。

図 2 は弾丸方向からみた実験の配置図である。フラッシュ X 線を用いて弾丸がターゲットを通過している間の画像を得た。このフラッシュ X 線は斜め方向二か所から X 線を照射してイメージングプレートに像を写すもので、一回のショットで 2 枚の時間の異なる画像が得られる。

弾丸にはチタン、アルミニウム、玄武岩、ステンレスを用いた。衝突速度は2-7km/sで行い。ハイスピードカメラ画像のコマ間隔は2-8 μ sで撮影した。

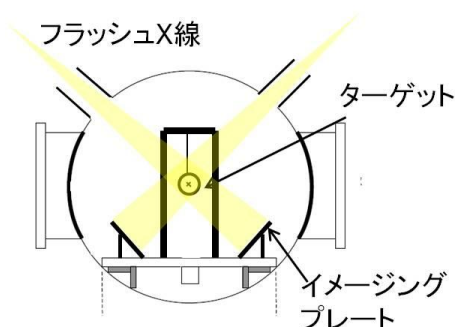


図 2 弾丸方向からみた図

結果と議論

大阪大学の CT 撮像装置を用いて X 線透過画像を取得した。図 3 は fluffy94 の結果である。トラックで明るい色のところはキャビティーになっていて、暗くなっているところは周りよりも密度が高くなっている。トラックの形状は 2.6km/s と 4.0km/s のものは細長いニンジン型だが、6.7km/s は始めに大きなカブ型のキャビティーがあり尾が伸びているトラックになっている。また衝突速度が増すとともに弾丸の貫入が短くなっている。

終端粒子をみると2.6kmのもののは元の弾丸のサイズのまま、4.0、6.7kmのものは摩耗の跡がみられる。トラック形状は弾丸の種類を変えても、ターゲットがfluffy87のとき同じようにニンジン型とカブ型が形成された。fluffy80ではカブ型のみ観察された。低密度のエアロジェルへの貫入実験でもこのような傾向がみられる[2]。

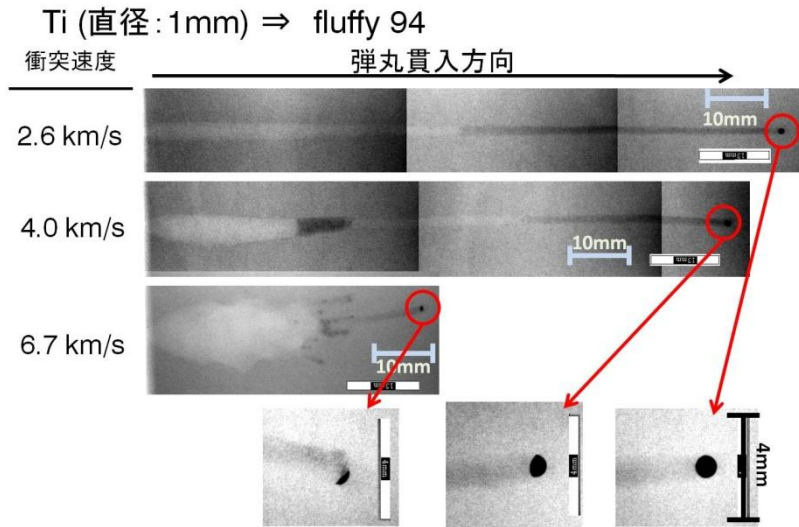


図 3 X線透過画像。チタンを fluffy94 に衝突させた画像

図4は、fluffy87へチタン弾丸を衝突速度1.8km/sでうったときのフラッシュX線画像である。上の図が衝突から10 μ s、下の図が衝突から30 μ s後の画像である。衝突速度は1.8km/sであり、この速度では弾丸は壊れずに貫入している。玄武岩弾丸はこの画像を用いて抵抗係数を決定した。速度が速いところでは式(1)の運動方程式に従うとする[3]。

$$m_p \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_d \rho_t S v^2 \quad (1)$$

C_d が抵抗係数、 ρ_t がターゲットの密度、 S が弾丸の断面積を表す。fluffy80,87,94への異なるショットから抵抗係数は 1.2 ± 0.4 と決定した。

次に貫入深さを予測できる減速モデルを考えた。弾丸がターゲットにぶつかったその衝突点で破壊が起こり小破片になると考える。その破片がそれぞれターゲットの中を貫入し、最大破片の貫入深さがトラックの深さとなるとする。最大破片の質量の推定は終端粒子の画像で元の形の一部を残しているものから決定した。

破片がターゲットを貫入するときの運動方程式は式(2)に従うとする[3]。

$$m_p \frac{dv}{dt} = -\left(\frac{1}{2} C_d \rho_t S v^2, SY_c \right) \quad (2)$$

ここで Y_c はターゲットの圧縮強度を表す。

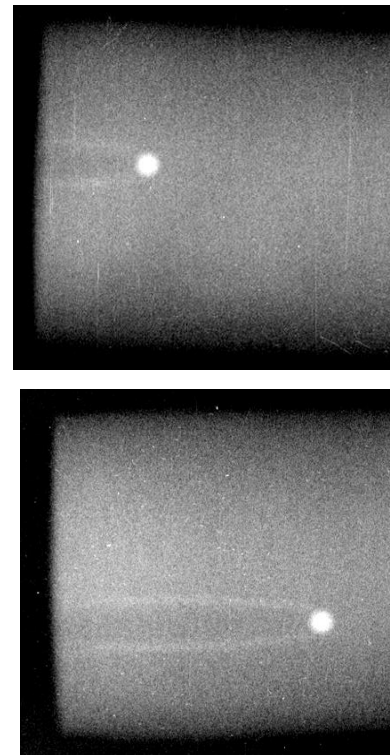


図 4 フラッシュ X線画像

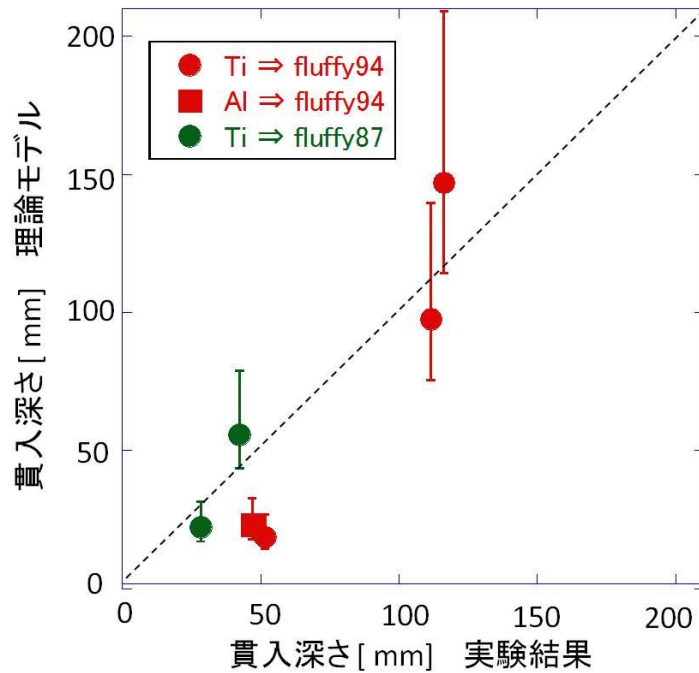


図 5 貫入深さの実験結果と理論モデルの比較。
 プロットは最大破片の質量を推定できるもの。

図5は以上の理論モデルで計算を行った貫入深さと実験結果の貫入深さを比較したグラフである。点線は理論モデルと実験結果の貫入深さが等しいところを表す。グラフより、実験結果と理論モデルの貫入深さは同程度となっている。エラーバーは抵抗係数のエラーの値の違いからくるものである。貫入深さが長いものは大きく効いてくる。

まとめ

高空隙率のターゲット（80%、87%、94%）を作成し高速衝突実験を行い、X線透過画像を用いてトラックの形状を解析した。衝突速度が大きいとき、太短いカブ型が形成され、衝突速度が小さいときは細長いニンジン型が観察された。また同じ衝突速度でも空隙率が小さくなるとニンジン型ではなくカブ型となった。フラッシュX線の画像から抵抗係数を 1.2 ± 0.4 と決定した。この抵抗係数を用いて貫入深さを予測する理論モデルを考えたところ、ほぼこのモデルで終端粒子サイズの大きい場合のトラック長さを説明できる。

参考文献

- [1] D. Brownlee. et al., Science 314, pp. 1711–1716, 2006.
- [2] F. Horz. et al., Science 314, pp. 1716–1719, 2006
- [3] R. Niimi. et al., Icarus 211, pp. 986–992, 2011.