

# ポリカーボネイトへの球形飛翔体の 超高速貫入過程における飛翔体損傷の影響

○黒田 祐馬(東大・院), 川合 伸明(熊大・パルス研)  
長谷川 直(ISAS/JAXA), 佐藤 英一(ISAS/JAXA)

## Abstract

Hypervelocity impact experiments of spherical projectiles were performed on polycarbonate target using a two-stage light-gas gun to observe penetration depth and the behavior of penetration. They were observed using ultra-high-speed video cameras and penetration depth was normalized by equation of penetration. We also calculated drag coefficient  $C_d$  of projectile, found that  $C_d$  was about 1.0 when the projectile keep its original form. On the other hand,  $C_d$  was about 2.0 when projectile fractured by the impact. We imply that penetration depth was fitted well by equation of penetration when  $C_d$  can be regarded constant without depend on projectile material.

Key Words : Hypervelocity Impact, Spherical Projectile, Penetration, Drag Coefficient

## 1. 緒言

近年, 多くの宇宙探査や人工衛星による宇宙科学研究, 宇宙利用が行われているが, それらの発展に伴いスペースデブリ(宇宙ゴミ)が増加している. 宇宙空間には大小様々なスペースデブリが存在し, 低軌道上では7, 8 km/sの超高速で周回しており, 他の宇宙機との超高速衝突が問題視されている.

我々は宇宙構造材料に対する超高速衝突による損傷進展過程の解明を目的とし, 球形飛翔体の超高速衝突実験を行った. 損傷進展過程の直接観察を行うため, 透明材料であるポリカーボネイトをターゲットとして選定し, 超高速ビデオカメラによる実時間観察を試みた.

超高速衝突によって宇宙構造材料は飛翔体貫入による損傷を受ける. これに関する従来研究として主にターゲットの損傷予測式が構築されており, 飛翔体の貫入深さは飛翔体の直径, 密度, 衝突速度に依存している<sup>1)</sup>. つまり一般に, 飛翔体のもつ運動エネルギーが大きいほど貫入深さは大きくなる.

しかし研究過程において, 飛翔体の速度を大きくした際, 貫入深さの著しい減少が確認された. これは衝突により飛翔体が破壊し, 投影面積の増加により貫入抵抗が増加したためだと考えられる. ポリカーボネイトは衝突インピーダンスが小さく, 飛翔体損傷が貫入深さに対して大きく影響を与えたと考えられる.

本研究では球形飛翔体を用いた場合の, 飛翔体損傷を考慮したポリカーボネイトへの貫入深さの一般化を目的とし, 超高速衝突実験を行った.

## 2. 実験条件

超高速衝突実験は ISAS/JAXA 所有の二段式軽ガス銃を用いて行った. ターゲットにはポリカーボネイト板  $80 \times 80 \times 30 \text{ mm}^3$  を用い,  $80 \times 30 \text{ mm}^2$  の

面を衝突面とする Edge on Impact と呼ばれる手法を用いた. 飛翔体には直径 3.2 mm の WC, SUS (SUS304),  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Glass (Soda-lime glass), Al (A5052)球を用いた. 衝突速度はそれぞれの飛翔体で 1 ~ 7 km/s とし, 衝突による飛翔体貫入過程を高速ビデオカメラを用いて撮影した. 実験終了後, 得られた動画をもとに連続画像を取得し, 飛翔体貫入深さ及び貫入挙動を測定した.

## 3. 実験結果

Fig.1 に  $\text{ZrO}_2$  球を 2.9 km/s で衝突させた際の動画から得られた連続画像を示す. 飛翔体は衝突後, ターゲット内を貫入していき, 衝突から 40  $\mu\text{s}$  が経過したとき, 飛翔体貫入の停止が確認された. このときの画像から得られた最終的な貫入深さは 39.9 mm であった. 得られた貫入深さ  $P_c$  は以下に示す貫入方程式<sup>1)</sup>を用いて規格化された.

$$P_c = C \times d_p \times \rho_p^{0.73} \times v_p^{0.67} \quad (C \text{ は定数}) \quad (1)$$

Fig.2 に貫入方程式により規格化貫入深さと衝突速度の関係を示す. 式(1)より, 一般に, 衝突速度が大きいほど, 貫入深さも大きくなる. しかし Fig.2 に示すように, WC,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Glass では衝突速度が 3 ~ 4 km/s 前後で貫入深さが著しく減少していることがわかる.

Fig.3 に  $\text{ZrO}_2$  球を 3.8 km/s で衝突させた際の動画から得られた連続画像を示す. 飛翔体は衝突後, ターゲット内を貫入していくが, 衝突から 4  $\mu\text{s}$  が経過したとき, 飛翔体の先端形状が変化し, 飛翔体が破壊したことが確認された. 破壊した飛翔体は破片となり, それらが時間経過に伴いターゲット内を貫入していく. 衝突から 25  $\mu\text{s}$  が経過したとき飛翔体貫入の停止が確認され, 最終的な貫入深さは 23.6 mm であった. このように衝突速度の増加に伴い, 飛翔体破壊が生じた際, 投影面積が

増加し、貫入抵抗が増加することで貫入深さは減少すると考えられる。これは脆性材料に特徴的な現象であると考えられる。

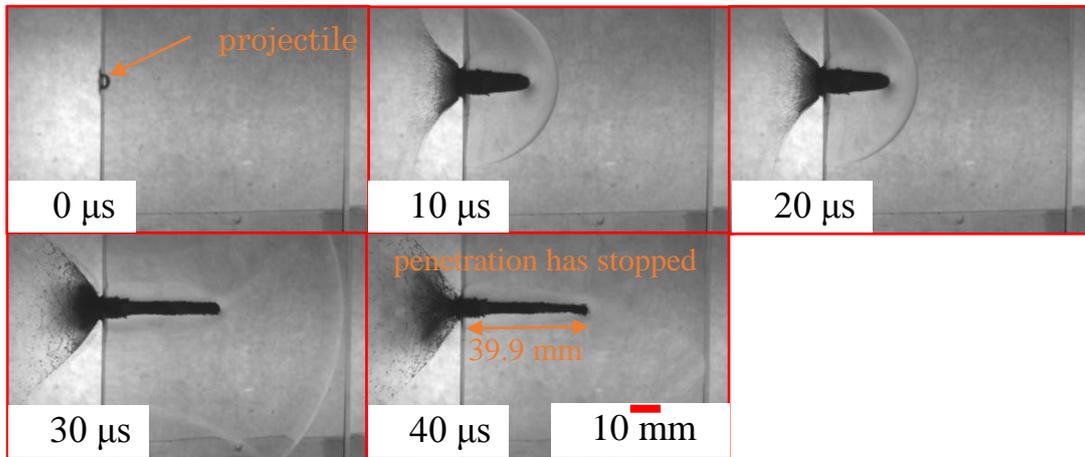


Fig.1 Successive pictures of an impact of a  $ZrO_2$  projectile, at 2.9 km/s.

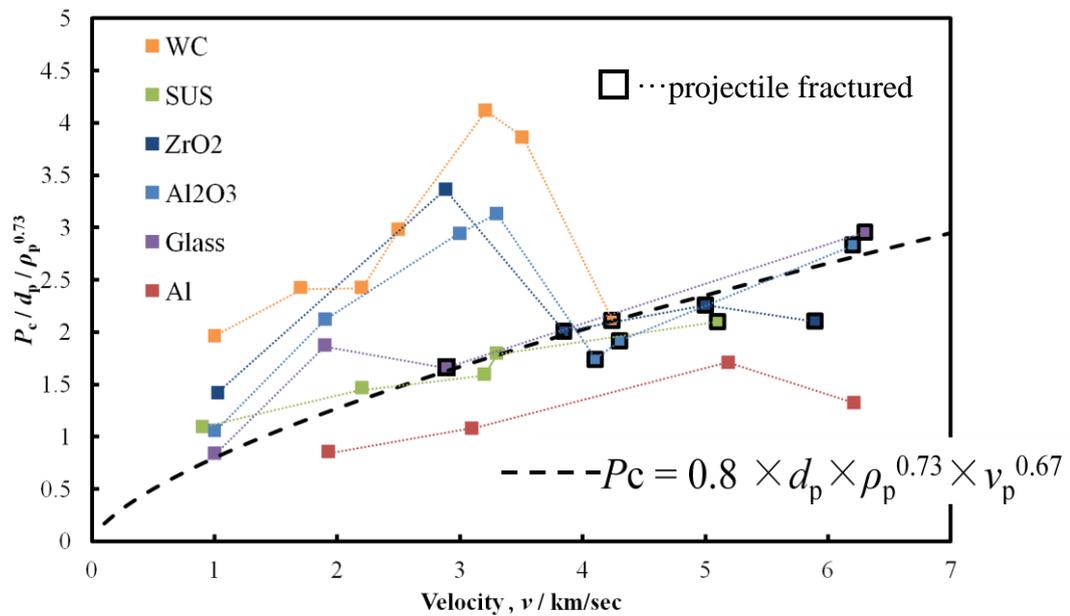


Fig.2 Relationship between normalized penetration depth and impact.

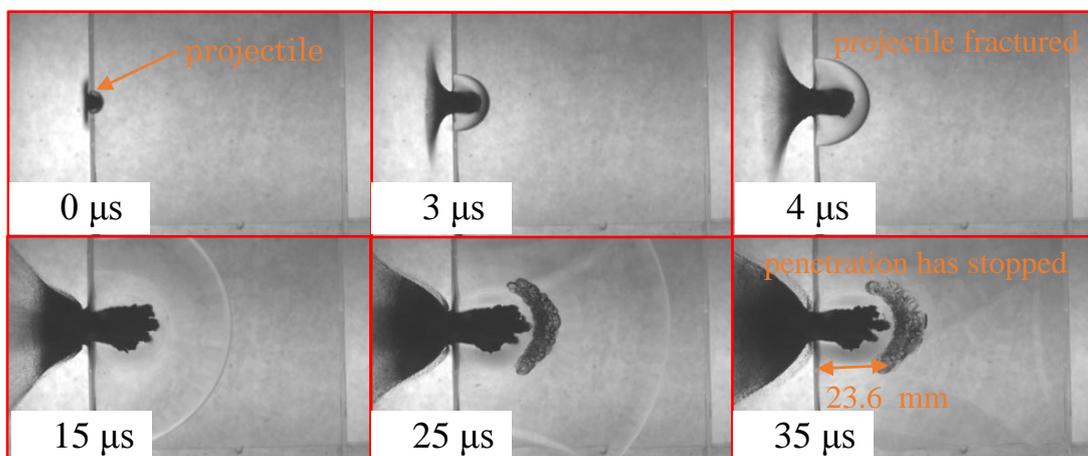


Fig.3 Successive pictures of an impact of a  $ZrO_2$  projectile, at 3.8/ km/s.

#### 4. 考察

保井らは多孔質石こうへの超高速衝突実験を行い、飛翔体の抵抗係数  $C_d$  を求めている<sup>2)</sup>。超音速において、飛翔体の減速を表す運動方程式は以下の式で表される。

$$dv/dt = -\alpha v^2 \quad (\alpha = \pi C_d \rho_t r_p^2 / 2m_p) \quad (2)$$

ここで  $v$  :は貫入速度、 $\rho_t$  はターゲット密度、 $r_p$  は飛翔体半径、 $m_p$  は飛翔体質量、 $v_i$  は衝突速度、 $t$  は衝突からの時間である。式(2)を積分することにより時刻  $t$  における貫入深さ  $d(t)$  を求めることができ、以下の式で表される。

$$d(t) = 1/\alpha \times \ln(v_i \alpha t + 1) \quad (3)$$

保井らは超高速衝突実験によって得られた X 線画像から飛翔体の貫入挙動を測定し、それに対し式(3)をフィッティングすることで  $C_d$  の値を求めた。SUS 球を 2 km/s で衝突させたとき、 $C_d = 0.9$ 、6 km/s で衝突させたとき、 $C_d = 2.3 \sim 3.5$  となっており、衝突速度の増加により抵抗係数は 2 ~ 4 倍大きくなっている。保井らはこれを飛翔体の変形や破壊によるものと示唆している。

本研究においても同様にして抵抗係数を求めた。Fig. 4 に  $ZrO_2$  球を 2.9 km/s、3.8 km/s で衝突させた際の貫入挙動 (実線)、及びそれらに対し式(3)をフィッティングした結果 (破線) を示す。これらの実験条件に対する  $C_d$  を求めると 2.9 km/s では 0.9、3.8 km/s では 1.8 となり、飛翔体破壊に伴い  $C_d$  が約 2 倍大きくなった。Table 1 にすべての実験条件に対して  $C_d$  を求めた結果をまとめる。Table 1 より脆性材料における  $C_d$  は飛翔体破壊前後で大きく変化し、飛翔体破壊前で  $C_d \approx 1.0$ 、飛翔体破壊後で  $C_d \approx 2.0$  となることが明らかになった。また、延性材料における  $C_d$  は衝突速度に伴い徐々に増加していることがわかる。これは延性材料の変形によるものと考えられる。SUS 球が破壊した際の  $C_d$  は約 2.1 であり、これは脆性材料を用いた際の値とよく一致した。Al は衝突により融点に達すると考えられ、他の飛翔体材料よりも  $C_d$  が大きくなっている。

Fig.2 において、実験結果に対して式(1)をフィッティングすると、飛翔体が破壊した際の貫入深さ (図中黒棒) は式(1)で示される貫入方程式とよく一致するということがわかる。これらの飛翔体における  $C_d$  は飛翔体材料によらず約 2.0 とすることができ飛翔体損傷の程度が同じであるとき、すなわち、抵抗係数が一定であるとき、飛翔体の貫入深さは貫入方程式により一般化できると考えられる。したがって、抵抗係数によって貫入方程式を変化させることにより広い速度域における貫入深さは一般化できると示唆された。

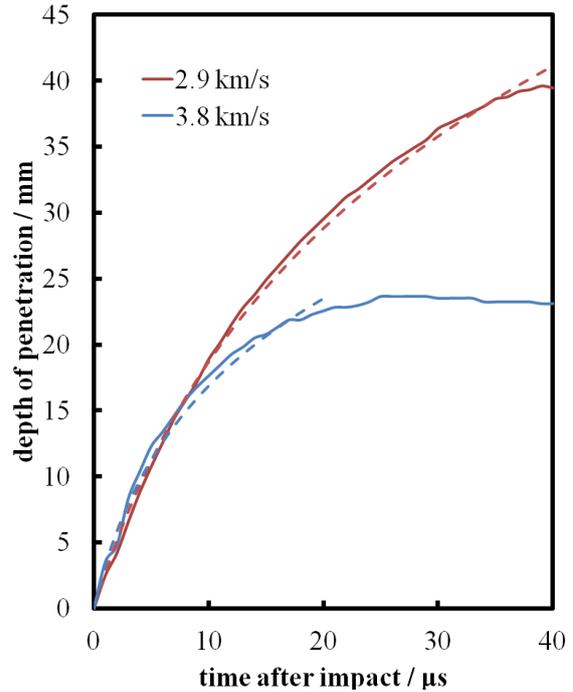


Fig.4 Penetration behavior of an impact of a  $ZrO_2$  projectile, at 2.9 km/s or 3.8 km/s

#### 5. 結論

ポリカーボネイトへの球形飛翔体超高速衝突実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 飛翔体損傷は貫入深さに影響を与える。これは飛翔体が破壊すると投影面積増加に伴い貫入抵抗が増加するため、貫入深さは減少すると考えられ、脆性材料に顕著である。
- (2) 抵抗係数  $C_d$  は飛翔体破壊前では約 1.0、破壊後では約 2.0 である。脆性材料では飛翔体破壊前後で  $C_d$  が大きく変化する。延性材料では衝突速度に伴い  $C_d$  は徐々に大きくなる
- (3) 飛翔体破壊後 ( $C_d \approx 2.0$ ) の貫入深さは貫入方程式によって表された。抵抗係数によって貫入方程式を変化させることで貫入深さを一般化できることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) N. Kawai et al, International Journal of Impact Engineering, 38 (2011), 542-545
- 2) M. Yasui et al, Icarus, 221 (2012) 646-657

Table 1 Projectile condition and drag coefficient for each experimental condition.

Projectile material	Impact velocity [km/s]	Projectile condition	Drag Coefficient
WC	1.0	original	0.8
	1.7	original	1.0
	2.2	split in some piece	1.1
	2.5	split in some piece	1.0
	3.2	split in some piece	1.0
	3.5	split in some piece	1.1
	4.2	fracture	2.2
SUS	0.9	original	1.4
	2.2	deformation	1.7
	2.3	deformation	1.7
	3.3	deformation	2.1
	5.1	fracture	2.2
ZrO <sub>2</sub>	1.0	original	0.9
	2.9	original	0.9
	3.8	fracture	1.8
	5.0	fracture	1.9
	5.9	fracture	2.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	original	1.3
	1.9	original	1.1
	3.0	original	0.9
	3.3	original	1.0
	4.1	fracture	1.7
	4.3	fracture	1.8
	6.2	fracture	2.2
glass	1.0	original	1.2
	1.9	original	1.1
	2.9	fracture	1.7
	6.3	fracture	2.0
Al	1.9	deformation	1.8
	3.1	fracture	2.4
	5.2	fracture	2.4
	6.2	fracture	2.4