

# 石英ガラスの超高速衝突による損傷評価

○ 座間 俊右(法政大・学) 森口 開理(法政大・院) 浦澤 俊介(法政大・院)  
堀江 孝佑(法政大・学) 新井 和吉(法政大) 長谷川 直(ISAS/JAXA)  
川合 伸明(ISAS/JAXA) 佐藤 英一(ISAS/JAXA)

## 1. 結論

近年の宇宙開発の発展に伴い、宇宙機から発生する人工的なゴミであるスペースデブリの増加が問題となっている。スペースデブリは秒速数 km と超高速で飛翔しているため、宇宙機との衝突により重大な損傷を引き起こす可能性がある。そのため、宇宙機用構造材料における衝突が重要な課題である。

従来のスペースデブリ衝突の研究は、宇宙機の主な構造材である金属材料に焦点をあてて行われてきた。しかし、金属材料の他に、宇宙機には光学的部品や窓材としてガラス、耐熱材としてセラミックス等も使用されている。ガラス、セラミックスは脆性材料であるため、金属材料に比べて、衝突による損傷の影響が大きいと考えられる。そのため、脆性材料の超高速衝突による損傷を明確にする必要がある。

本研究では、脆性材料の超高速衝突挙動の理解を目的に、最も基本的な光学材料であり、脆性材料でもあるガラスの損傷を調べることにした。ガラスは透明材なので、内部の損傷まで観察することができる。実際に宇宙空間で窓材に使用されている石英ガラスを使用し、ガラスの超高速衝突による損傷評価を行う。

## 2. 実験方法

実験は ISAS/JAXA 所有の二段式軽ガス銃と法政大学の一段式軽ガス銃を用いて行った。二段式では 3~7 km/s、一段式では約 1 km/s の衝突速度で実験を行った。飛翔体はスペースデブリを模擬した直径 0.5 mm の A1050, SUS304, Pt の 3 種類の金属球を使用した。ターゲットである石英ガラスの形状は 80 mm × 80 mm で、板厚  $t$  は 5, 10, 15 mm の 3 種類を用いた。

JAXA の二段式軽ガス銃の実験では、損傷過程の実時間観察のために高速度ビデオカメラ(柵島津製作所製, HPV-1)を用いた。撮影速度は  $1\mu\text{s}/\text{フレーム}$  とし、撮影角度は弾道軸に対して、 $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  の 3 通りで行った。一段式軽ガス銃では、高速度ビデオカメラ((株) Photron, FASTCAM SA5)を用いた。撮影速度は  $420\text{ms}/\text{フレーム}$  とし、撮影角度は  $90^\circ$  のみで行った。ターゲットの石英ガラス表面には 10 mm 間隔でグリッド線を引き、撮影画像上での損傷伝播解析や事後観察に利用した。実験後の観察には光学顕微鏡を用いて、損傷形状の測定を行った。

## 3. 実験結果と考察

衝突試験の結果、衝突エネルギーや板厚によって損傷形態に変化がみられた。石英ガラスの損傷形態は Crater, Conchoidal crack, Lateral crack, Internal crack, Radial crack<sup>1)</sup> の組み合わせにより、4 つのパターンに分類できた。実験で得られた 4 つの分類例を図 1 に示す。

図 1 は衝突面の写真であり、示している破線の円は、Crater の範囲を表している。この円の内側は衝突により、円錐形に窪んでいる。図 1(a), (b), (d) は飛翔体を SUS304, 衝突速度を約 7 km/s にし、板厚のみをそれぞれ 15 mm, 10 mm, 5 mm と変化させた。衝突エネルギーは 12.2 J である。図 1(c) は飛翔体を Pt, 速度を約 4.5 km/s, 板厚を 10 mm にした時の図である。衝突エネルギーは 14.5 J である。

図 1(a), (b), (c) では、衝突面が薄く剥離するような損傷である Conchoidal crack が見られた。Crater の外側にはほぼ円形に広がっており、貝殻状の模様をしている。

次に、図 1(b), (c), (d) の場合では、衝突点を中心とした連続した損傷に加え、それとは異なる不連続な位置に損傷が生じている。これは、Lateral crack といい、板厚方向に損傷している。この損傷は衝突点から同心円状に発生しており、Conchoidal crack よりもさらに外側に生じている。

図 1(c) では、(b) の損傷に加えて、衝突点から放射状に破壊が進展する Radial crack がみられた。これは、内部での損傷であり、板厚方向に細長く亀裂が進展している。Radial crack は、実験で観察された損傷の中で、最も広範囲に損傷が広がっている。

図 1(d) では、(c) でみられた Conchoidal crack に代わり、Internal crack が生じている。Conchoidal crack と違い、表面で剥離せずに内部のみ破壊されており、衝突面には損傷がない。これは、グリッド線が Internal crack の表面に残っていることから確認することができる。

衝突によって、生じうる損傷の概略を図 2 に示す。図 2 は衝突面を真横から見た図である。Crater, Conchoidal crack は衝突面が損傷している。Lateral crack は板厚方向に亀裂が進展し、Internal crack, Radial crack は内部で損傷している。

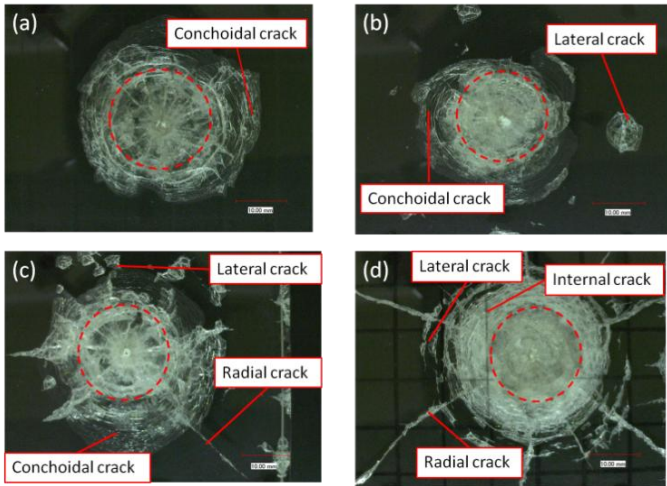


Fig. 1 Damage structure of SiO<sub>2</sub> glass subjected to hypervelocity impact

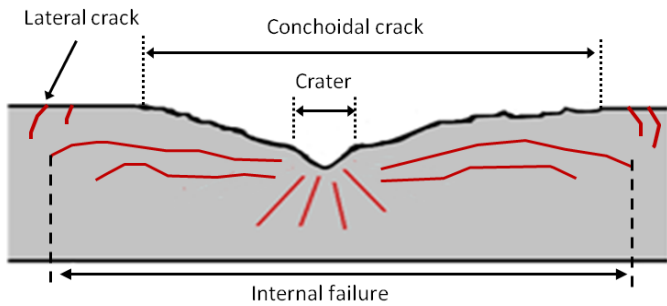


Fig. 2 Schematic diagram of various cracks

衝突後のターゲットの Crater の直径, 深さを光学顕微鏡を用いて測定を行った. 本実験で得られた実験値と過去に Burt 等によって求められた経験式<sup>2)</sup>との比較を行った. Crater の直径の比較を図 3, 深さの比較を図 4 にそれぞれ示す. 図 3, 図 4 のプロットは実験で得られたデータを用い, 直線は経験式<sup>2)</sup>を示している. 図 3 に用いた経験式を式(1)に, 図 4 の経験式を式(2)に示す.

$$D = 9.656\rho_p^{0.373}d_p^{1.183}V^{0.915}\cos\theta^{0.545} \quad (1)$$

$$P = 0.266\rho_p^{0.595}d_p^{1.05}V^{0.995}\cos\theta^{0.496} \quad (2)$$

ここで  $D$  は Crater の直径 (cm),  $P$  は Crater の深さ (cm),  $\rho_p$  は飛翔体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $d_p$  は飛翔体直径 (cm),  $V$  は衝突速度 (km/s),  $\theta$  は衝突角度としている. この 2 つの経験式は, 直径 22.5 cm, 厚さ 15 mm の円形の石英ガラスなど, 今回行った実験より大きなサイズを使用して求められている. 飛翔体の直径は 0.4 mm で, Al, SUS, ナイロンなど様々な飛翔体を使用している. 速度は 0.5 km/s 刻みで, 2.5 km/s から 7.0 km/s の速度域で行われた. 本実験では, 経験式を求めた実験とは形状や板厚が異なり, 速度域も 1.0 km/s から 7.0 km/s までと増やした

状況で行った. 本条件において, Burt 等の経験式が適応されるか比較を行った.

式(1)と実験で得られた Crater の直径を比較したところ, 一致はしなかった. そこで, Crater から連続的に損傷が生じている Conchoidal crack と Internal crack の 2 つを含めて Crater 直径として計算したところ, 図 3 のように, 経験式と実験値がほぼ一致した. これは, 式(1)では, 衝突点から連続的な損傷範囲をすべて Crater とみなしているためと考えられる. 図 4 の経験式と実験値も比較すると, ほぼ一致しているように見える. 形状, 板厚を変え, 速度域を拡張しても, 石英ガラスの Crater の損傷範囲は, この経験式に適用できることが明らかになった.

衝突速度の増加に伴い, 損傷の範囲だけでなく, 損傷形態にも変化が見られた. 飛翔体の密度も考慮し, 衝突エネルギーで損傷形態をまとめたものを図 5 に示す.

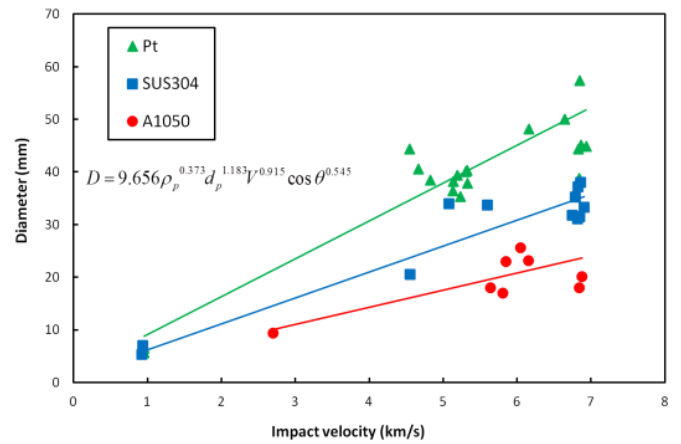


Fig. 3 Crater diameter of SiO<sub>2</sub> glass subjected to hypervelocity impact

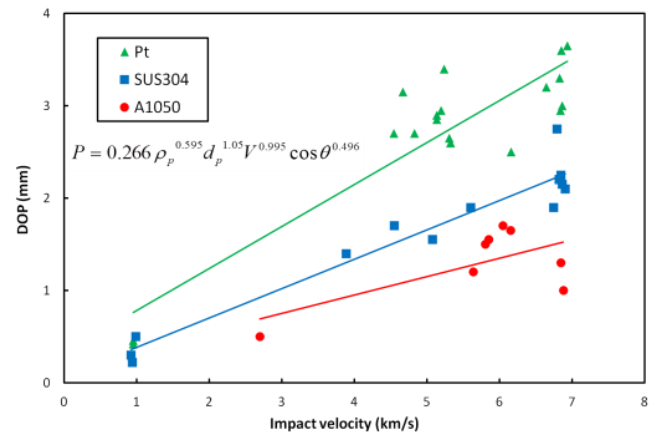


Fig. 4 Depth of penetration on SiO<sub>2</sub> glass subjected to hypervelocity impact

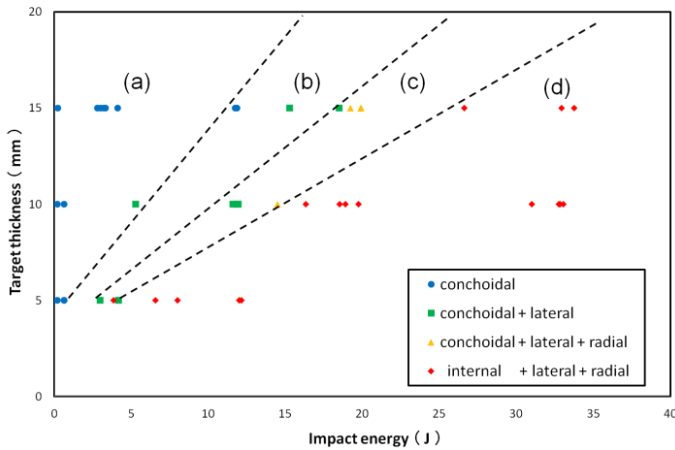


Fig.5 Fracture types of SiO<sub>2</sub> glass in various thickness subjected to hypervelocity impact

図5の破線は損傷形態の境界を示している。(a)～(d)は図2で説明した4つの損傷形態の例と一致している。衝突エネルギーが増えると損傷形態は(a)～(d)へと順に変化していく。

Conchoidal crackの領域では、衝突エネルギーが小さく、板厚が比較的大きいものが多い。これは板厚方向に十分な距離があるため、裏面から反射した膨張波のエネルギーが減衰される。そのため、衝突面からの反射で生じる膨張波による影響が相対的に大きくなり、剥離現象が起こると考えられる<sup>2)</sup>。

Lateral crackでは、衝撃圧縮波が衝突面や側面からそれぞれ反射して、膨張波となり、それらが互いに重畳し、ガラスの引張強度を超えた場合に発生すると考えられる。

内部損傷であるRadial crackとInternal crackは板厚が比較的小さく、衝突エネルギーが大きい場合によく見られる。また、Internal crackは、裏面からの膨張波の影響が大きいと考えられるため、Conchoidal crackの損傷よりも、破壊進展速度が速い。

損傷形態の変化に必要な衝突エネルギーは、板厚が厚くなるほど大きくなっている。同じ衝突エネルギーでも板厚の違いにより、損傷形態は異なることが明らかになった。

#### 4. 結論

本研究では、脆性材料の基本的な材料であるガラスを用いて、超高速損傷破壊の損傷特性を調べた。以下にその結果を示す。

1. 損傷形態はCrater, Conchoidal crack, Lateral crack, Internal crack, Radial crackの組み合わせにより4つに分類することができた。
2. 衝突速度が増加することで、衝突点から連続的につながっている損傷領域の範囲が大きくなった。

3. Burt等の経験式は、速度領域を広げた1.0km/sから7.0 km/sの範囲でも、適応されることが確認された。
4. 損傷形態は衝突エネルギーが増加するにつれて変化した。板厚が厚くなると、その変化に必要な衝突エネルギーも増加した。

#### 参考文献

- 1) Stephan Bless, Tiffany Chen, Impact damage in layered glass, International Journal of Fracture 162 (2010) 151-158
- 2) Richard R. Burt, Eric L. Christiansen, Hypervelocity Impact Testing of Transparent Spacecraft Materials, International Journal of Impact Engineering 29 (2003) 153-166