

宇宙機構造用透明材料の超高速衝突損傷形態

○森口 開理(法政大・学) 川合 伸明(ISAS/JAXA) 鶴井 健司(法政大・院)
長谷川 直(ISAS/JAXA) 新井 和吉(法政大) 佐藤 英一(ISAS/JAXA)

1. 緒論

人類の宇宙活動の副産物として生じるスペースデブリ(宇宙ゴミ)の問題が深刻になっている。宇宙空間を秒速数 km で飛行しているデブリとの衝突は、宇宙機に重大な損傷を引き起こす可能性があり、宇宙機開発におけるスペースデブリ対策の重要性は高まっている。

しかし、これまでの宇宙機用構造材料に関する超高速衝突破壊の研究は、そのほとんどが主構造材料である金属材料に対してである。宇宙機の進歩に伴って、構造材として多種多様な材料が用いられるようになり、様々な材料に対しての超高速衝突破壊特性の理解が必要となってきた。実際、国際宇宙ステーションのハッチ窓には石英ガラス、その防御カバーとしてポリカーボネートが使用されている。この材料についても、スペースデブリ衝突による損傷を十分に検討する必要があるが、超高速衝突という特殊条件での破壊試験が必要なことから、その実験数は限られており、結果として超高速衝突破壊機構は未だ十分に理解されているとは言い難い。

そこで、本研究では石英ガラスやポリカーボネートに対して超高速衝突破壊実験を行い、その破壊過程を高速ビデオカメラで撮影し、光学顕微鏡による損傷形態の事後観察結果と組み合わせることにより、石英ガラスとポリカーボネートの超高速衝突損傷形態について調査した。石英ガラスやポリカーボネートは透明材であることから、高速ビデオカメラを用いた撮影を併用することで内部のクラック進展の素過程を観察することができる。さらに非晶質であるため結晶粒界が破壊進展に及ぼす影響を無視することができ、理想的な非金属材料の破壊現象を調査することができる。

2. 実験方法

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。実験装置の外観を図 1(a) に示す。損傷過程の実時間観察には高速ビデオカメラ HPV-1 (島津製作所製) を用いた。撮影速度は 100 万コマ/秒とした。破壊進展過程の 3 次元的理解を得るために、飛翔体弾道軸に対して、カメラの撮影角度を 45°, 90°, 135° とする 3 通りの実験をそれぞれ行った。実験配置図を図 1(b) に示す。

本研究には、直径 0.5 mm~3.2 mm のアルミニウム、アルミナ、SUS304、プラチナの球形飛翔体を用いた。衝突ターゲットである石英ガラスとポリカーボネートの形状は衝突面が 80 mm × 80 mm で、板厚は 5 mm~30 mm とした。試料表面には破壊進展過程の解析に利用する目的で、10 mm 間隔のグリッド

を描いた。サボに飛翔体を挿入した様子を図 2(a) に示す。治具にターゲットを固定した様子を図 2(b) に示す。衝突速度は約 5~7 km/s とした。

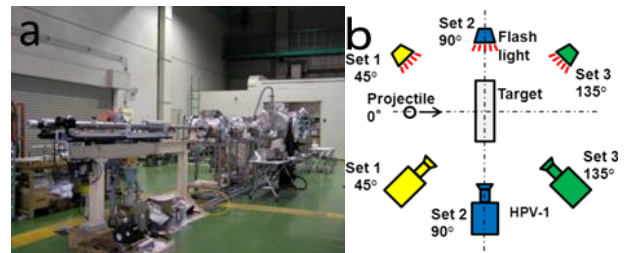


Fig. 1 (a) A two-stage light gas gun
(b) Experimental set up

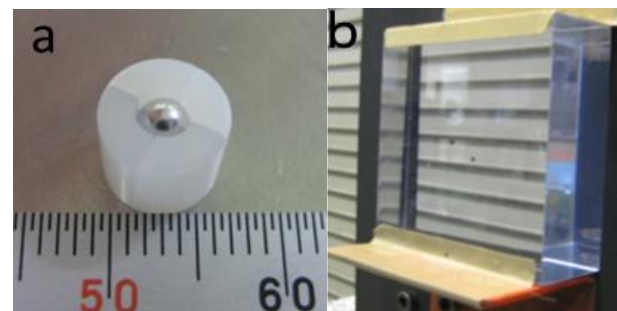


Fig. 2 Experimental tools
(a) A projectile in a sabot (b) A target on a jig

3. 実験結果および考察

3-1. 石英ガラスの超高速衝突損傷形態

直径 0.5 mm の SUS304 球を約 7 km/s で板厚 5, 10, 15 mm の石英ガラスに衝突させた。それぞれの衝突条件における衝突面の様子を図 3 (a), (b), (c) にそれぞれ示す。図 3 に示すように飛翔体の材質、直径、衝突速度を同じにすることで、衝突エネルギーを一定に保ち、ターゲットの板厚を変化させると損傷形態に変化がみられた。

板厚が 5 mm のように小さい場合、衝突点から放射状に面方向に進展する Radial crack が支配的に発現している様子が観察できた。これは板厚方向に破壊が進行することが十分にできないため衝突エネルギーが板厚方向に十分に消費されず、逃げ場を失った衝突エネルギーが面方向に Radial crack として解放されたと考えられる。また、内部を破壊が進行する Internal failure も観察された。これは損傷エリア内にも関わらず、表面に描かれたグリッドが消えていない箇所があることから表面の損傷ではなく、内部の損傷であると判断できる。

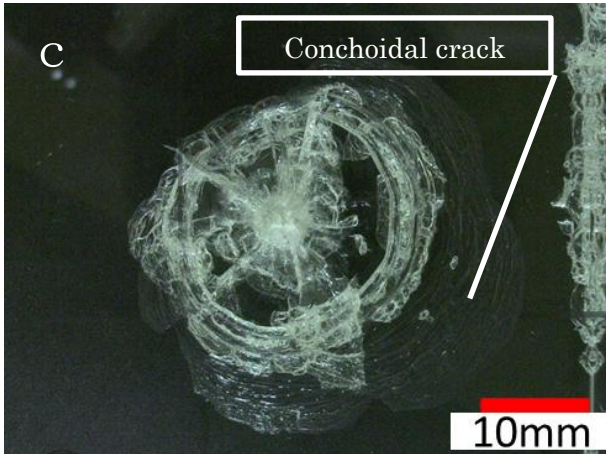
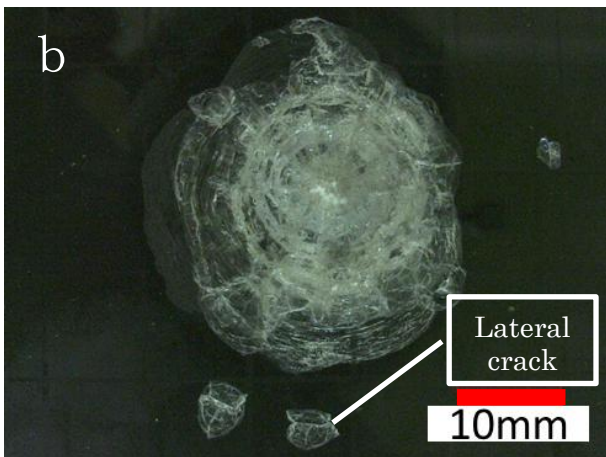
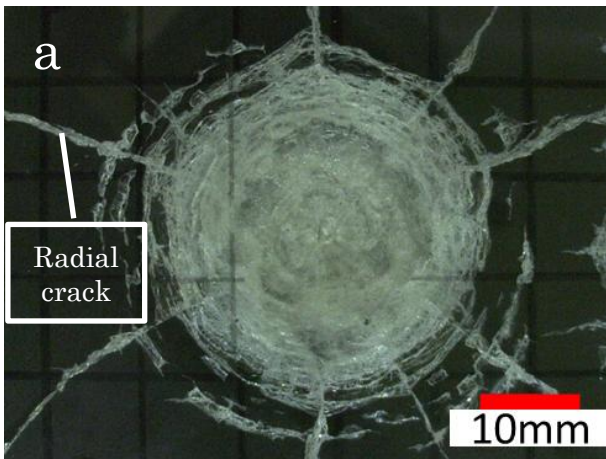


Fig. 3 Damage structure of SiO₂ glass in various thickness subjected hypervelocity impact (a) 5 mm (b) 10 mm (c) 15 mm

次に板厚が 10 mm の場合、衝突点から不連続な点で破壊する Lateral crack が顕著に観察された。これは衝突点から不連続に形成されているため、衝突点からのクラックが進展して生成されたものではないことがわかる。おそらく衝撃圧縮波がターゲットの衝突面と裏面からそれぞれ反射し、膨張波となり、それらが互いに干渉しあい、局所的に大きな引張応力が発生し、それがガラスの引張強度を超えた場合、クラックの核生成が起こり、破壊に至ったと考えられる。

また、板厚が 15 mm のように比較的厚い場合、Lateral crack が生成されている様子は観察できなかった。これは衝突面と裏面で反射して干渉するまでの時間や距離が比較的長いため、その間に衝撃波の強度が減衰し、ガラスの引張強度を超えることがなかったためと考えられる。

一方、比較的板厚が厚い場合、すり鉢状に破壊が進展した Conchoidal crack が多くの試験片で観察された。板厚が薄い場合に比べ、様々な破壊モードが重畳することがないため、明確に観察することが可能となった。

図 4 に石英ガラスの超高速衝突損傷形態の模式図を示す。

先に述べた 4 種類の損傷に Jetting による Crater 形成、衝突点から衝突方向に円錐状に進展する Cone crack の 2 種類を加えた計 6 種類の損傷が重畳する複雑な損傷形態を有することがわかった。どの損傷が支配的に発現するかは実験条件に依存することもわかった。これまでの実験結果から各種高速衝突条件における損傷形態について大まかに把握することができた。しかし、超高速衝突により発生する材料内部の応力状態と各破壊モードの関係性はいまだ理解できていない。破壊過程を詳細に理解するためには数値シミュレーションを行う必要性があり、今後破壊進展時の応力解析を行っていく予定である。

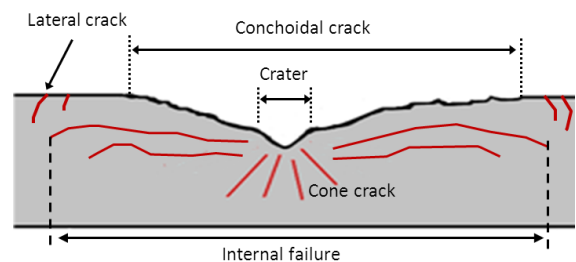


Fig. 4 Hypervelocity impact damage morphologies of Glass

3-2. ポリカーボネートの超高速衝突損傷形態

直径 3.2 mm のアルミナ球を板厚 30 mm のポリカーボネートに衝突させた場合の衝突面、裏面、側面の画像を図 5 (a), (b), (c) にそれぞれ示す。

衝突面に灰色の物体が放射状に付着している。これは衝突時に衝突点近傍のポリカーボネートが融点(約 240 °C)を超え、軟化してエジェクタとなり、衝突面に付着し、温度が低下することで固化したものだと考えられる。

また、ポリカーボネート中にボイドの形成が確認できた。これはポリカーボネートの熱分解もしくはポリカーボネート中に含有する水分が蒸発し、水蒸気となったものであると考えられる。

さらに、衝突面の衝突点近傍が隆起している。これは飛翔体がターゲットの中にめり込むにつれてポリカーボネートが塑性流動し、塑性変形したと考えられる。

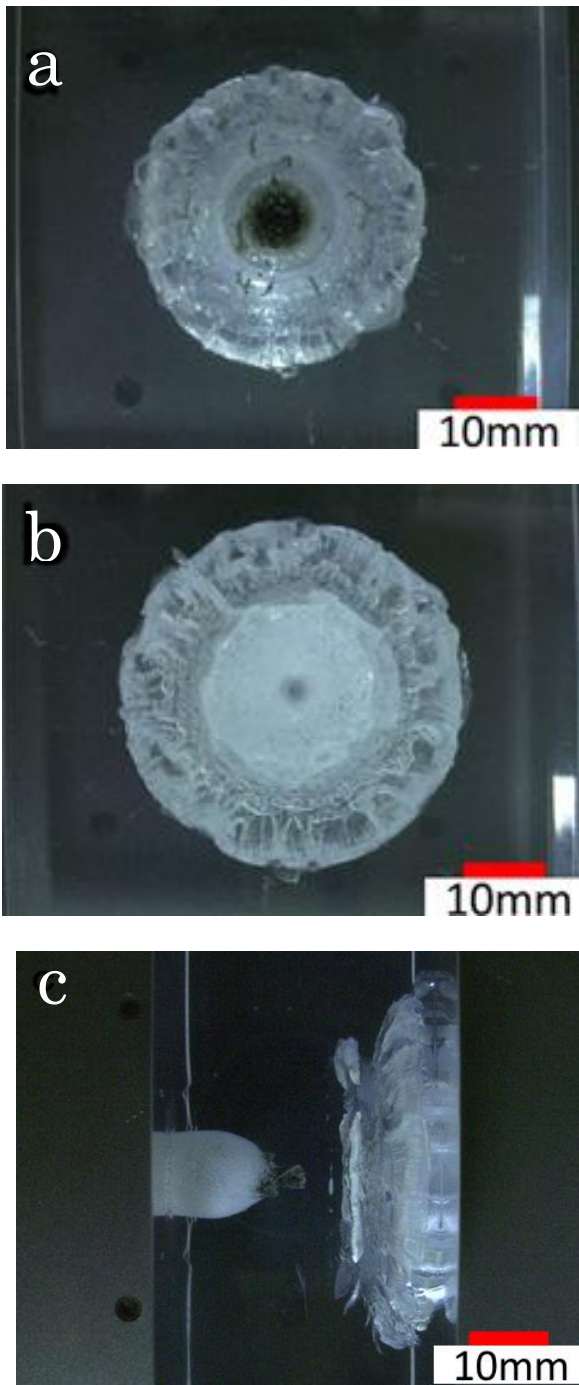


Fig.5 Damage structure in 30 mm thick polycarbonate target impacted by a Al_2O_3 -projectile at 7 km/s
(a) Impact face (b) Rear face (c) Side view

また、比較的衝突エネルギーが大きく、それに対する板厚の比が小さい条件の場合、スポールが発生した。本実験のようにスポールが発生した場合とそうでない場合が存在する理由として、以下の原因が考えられる。

本研究の実験速度域では、膨張波の干渉は必ず起こるが、衝撃波は物質中を広がるにつれて減衰し、板厚が大きいほどその減衰量は大きくなる。したがって、衝突エネルギーが小さく、それに対する板厚の比が大きい場合、発生する引張応力が材料のスポ

ール強度を超えず、スポールが発生しなかったと考えられる。一方、衝突エネルギーが大きく、それに対する板厚の比が小さい場合、膨張波が十分に減衰せず、スポールが発生したと考えられる。

SUS304 の 3.2 mm 球を板厚 30 mm のポリカーボネートに衝突させた場合、裏面がスポールにより一部剥離し、露出した面が黄色く変色した。これは衝撃圧縮により生成された高温・高圧ガスが抜け、それに接触したポリカーボネートが黄色く変色したと考えられる。

貫入終盤ではボイドは形成されなくなり、ポリカーボネートの損傷はチャー形成（炭化）のみとなった。これは貫入終盤時には衝突エネルギーがすでにあらゆる現象に消費され、ボイドを形成できるほど熱が生まれず、ポリカーボネートの温度が低下したためであると考えられる。ただし、アルミニウムの 3.2 mm 球を板厚 30 mm のポリカーボネートに衝突させた場合のみ、ボイド形成のみで炭化領域は側面からは観察できなかった。これは衝撃圧縮により、貫入中に飛翔体の温度が上昇し、やがて飛翔体の融点に達したことで貫入終盤にはすでに固体として存在しなかった可能性がある。

SUS304 の 1.0 mm 球を板厚 20 mm のポリカーボネートに衝突させた試験片の側面図と断面図を図 6 (a), (b) にそれぞれ示す。

光を照射すると、屈折率の異なる二つの境界が浮かび上がった。衝突軸に近い内側の領域は、熱によりポリカーボネートの温度が上昇し、ガラス転移点（約 150 °C）を一度超えた後、室温に戻ったために他の部分と分子配向が異なり、屈折率が変化したと考えられる。衝突軸から遠い外側の領域は、衝撃圧縮により他の部分より密度が増大しているために、屈折率が変化し視覚化したと考えられる。つまり、外側の領域はひずみが残留している領域であることが示唆される。

また、ポリカーボネート中に放射状に炭化領域が形成されているのが確認された。これは飛翔体にも大きな応力が発生するため、貫入中に粉碎し、その破片が放射状に貫入したと考えられる。飛翔体は SUS304 であるため、金属光沢を有しており、確認のために断面に光を照射し、ポリカーボネートと飛翔体との判別を行った。飛翔体とみられる物体が炭化層の端部に観察された。また、飛翔体が端部にあるにも関わらず、そこまでの経路が存在しないことから、飛翔体が通過した後に熱によりポリカーボネートがボイドを形成して回復したと推測される。

ポリカーボネートの超高速衝突損傷形態の模式図を図 7 に示す。

以上で得られたこれらの実験結果から、ポリカーボネートの超高速衝突損傷形態はクラックが進展して破壊に至る脆性的なクラック破壊ではなく、飛翔体が貫入および衝突により生じる衝撃波や熱による破壊であることが明らかとなった。

今後の課題として、飛翔体の形状や材質、板厚など各種パラメータを変化させ、ポリカーボネートの超高速衝突損傷形態やその大きさにどう影響するか調査する必要がある。

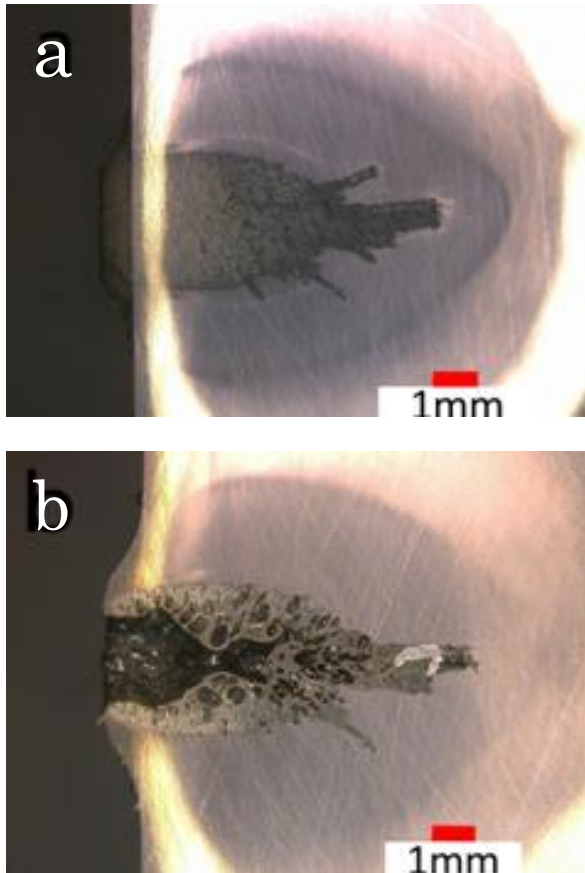


Fig.6 Damage structure in 20 mm thick polycarbonate target impacted by a SUS304-projectile at 7 km/s
(a) Side view (b) Cross section

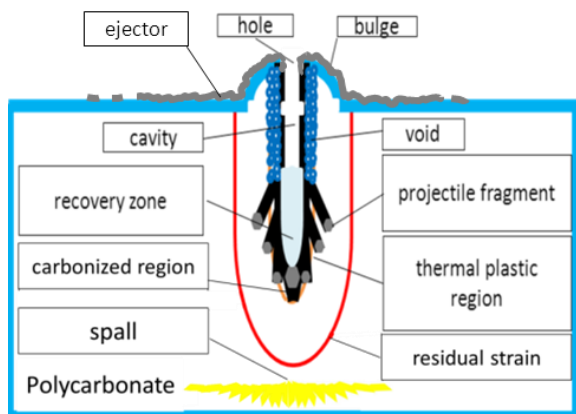


Fig.7 Hypervelocity impact damage morphologies of Polycarbonate

4. 結論

1. ガラスの超高速衝突損傷形態は主に脆性的なクラック破壊で、ジェットイングによるクレーター形成や応力波の干渉によるクラックの核生成など様々な現象が重畳する複雑な損傷形態を有していた
2. PC の超高速衝突破壊機構は脆性的なクラック破壊ではなく、主に飛翔体の貫入、衝撃圧縮により生成した熱による破壊、膨張波の干渉によるスポール破壊で定義づけられる
3. 飛翔体の密度や直径、ターゲットの板厚により損傷形態やその大きさが大きく変化することがわかった

参考文献

- 1) A. Dorogoy, D. Rittel, A. Brill, Experimentation and modeling of inclined ballistic impact in thick polycarbonate plates, International Journal of Impact Engineering 38 (2011) 804-814
- 2) 水谷仁, クレーターの科学, (1980), 102, 東京大学出版会
- 3) J. H. Choi, C. H. Lee, S. N. Chang, S. K. Moon, Long-rod impact phenomena: Role of wave interaction on crack propagation, International Journal of Impact Engineering 17 (1995) 195-204
- 4) J. C. F. Millett, N. K. Bourne, Shock and release of polycarbonate under one-dimensional strain, Journal of Materials Science 41 (2006) 1683-1690
- 5) Richard R. Burt, Eric L. Christansen Hypervelocity impact testing of transparent spacecraft materials, International Journal of Impact Engineering 29 (2003) 153-166
- 6) Manabu Yokoo, Nobuaki Kawai, Kazutaka G. Nakamura, and Ken-ichi Kondo, Ultrahigh-pressure scales for gold and platinum at pressures up to 550 GPa, Physical Review B 80 (2009) 104114 1-9
- 7) Nobuaki Kawai, Kazutaka G. Nakamura, and Ken-ichi Kondo, High-pressure phase transition of mullite under shock compression, Journal of Applied Physics 96 (2004) 8 4126-4130