

石英ガラスへのデブリの超高速衝突に伴う 損傷生成及び進展挙動の定量的評価

○長野幹雄（首都大学東京システムデザイン学部），川合伸明（熊本大学パルスパワー科学研究所），
長谷川直（JAXA 宇宙科学研究所），佐藤英一（JAXA 宇宙科学研究所）

Quantitative Evaluation of Damage Generation and Propagation Behavior on Fused Silica Glass Subjected to Hypervelocity Impact of Space Debris

Mikio. Nagano (Dept. of System Design, Tokyo Metropolitan University),
Nobuaki. Kawai (Institute of Pulsed Power Science, Kumamoto University),
Sunao. Hasegawa (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency),
Eiichi. Sato (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

Abstract

Hypervelocity Impact experiments and simulations in Fused Silica Glass has conducted to evaluate damage propagation behavior on surface of glass quantitatively. Random conchoidal failure on surface from impact point is formed as lateral cracks by first surface wave, and propagated by backside reflection wave at several steps with internal failure. The Lateral crack nearby edge of specimen is generated by the interaction of edge reflection wave (surface wave) and backside reflection wave. The Lateral crack generation can be based on Griffith crack and stress concentration. The direction of Conchoidal failure propagation by stress waves can be considered to relate to the maximum principal stress.

Key Words: Hypervelocity impact, Fused silica glass, Stress wave, Reflection, Interaction.

1. 緒言

昨今の宇宙利用の拡大が人類の生活をより豊かにしてきた一方，故障や耐用年数を超えるなどで運用を終了した衛星，また様々な原因で破損した衛星などはスペースデブリと呼ばれる大きささまざまな宇宙のゴミが急増している．これらは，数 km/s オーダー以上の飛翔速度で地球周回軌道上を漂い続けている．また太陽系外から飛来する微小隕石は宇宙探査機などの軌道周辺を数十 km/s という超高速で飛翔している．以上のような飛翔体のうち特に微小なものに対しては，トラッキングや宇宙機側での回避行動が行えず，運用中の宇宙機との超高速衝突事故は宇宙開発における課題である．

我々は宇宙空間における利用頻度が増加しつつあるものの，衝撃破壊に敏感な脆性材料⁽¹⁾に対し，微小な球形飛翔体による超高速衝突時の損傷形態や損傷進展挙動に関して評価することを目的とし，超高速衝突試験を実施してきた．当初は窒化珪素セラミックスに対してのクレータ深さ及び貫通限界曲線の構築などを行い，金星観測衛星「あかつき」用セラミックスラスターの耐デブリ特性調査として大きな成果を上げた⁽²⁾．

さらに衝突時の材料内部では複数の損傷が重畳していたため，損傷進展挙動も含めた損傷進展の可視化を行う必要性も示唆された．そこで続く研究の標的には宇宙での利用実績もある透明脆性材料として石英ガラスを選定し，超高速カメラによる損傷進展挙動の実時間撮影を行った．これによると，石英ガラスへの超高速衝突(Normal Impact)による損傷は Fig. 1 に示すような 6 形態に

分類される．特に損傷は衝突エネルギーレベルの上昇に伴い内部のものが顕在化し，さらに時間履歴的にも表面側から内部へと遷移することが分かった⁽³⁾．とりわけ表面付近で発生する Internal failure, Conchoidal failure, Lateral crack に関しては，衝突後数 μ 秒というごく短時間で生成することから，詳細な生成メカニズムの特定には至っていない．

本研究では，石英ガラスを対象としたデブリの超高速衝突模擬試験に対し，損傷進展挙動の実時間観察と衝突シミュレーションによる応力波伝播解析を併用した実験を行う．以上により衝突初期の表面近傍に生じる損傷の生成及び進展のメカニズムについての定量的な評価を行い，脆性材料の応力波による損傷の基本を理解することを目的とする．

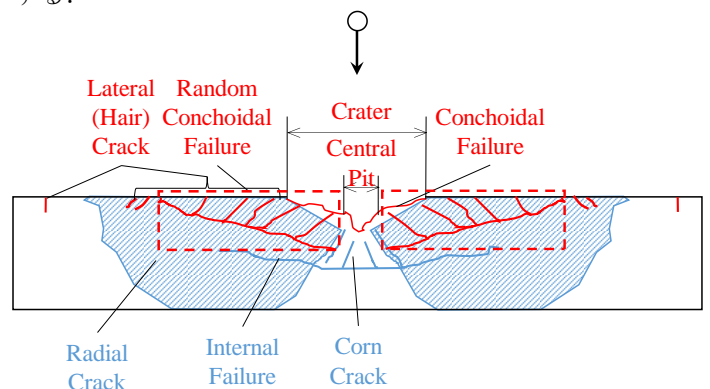


Fig.1 Schematic of damage morphologies of Fused Silica Glass with Hypervelocity Impact.

2. 実験方法

2-1 試験材料

本研究では株式会社ミトリカ製の合成石英ガラス板材を試験片として用いた。試験片の寸法は $60 \times 60 \times 15 \text{ mm}^3$ と $80 \times 80 \times 15 \text{ mm}^3$ とし、それぞれ $60 \times 60 \text{ mm}^2$ 、 $80 \times 80 \text{ mm}^2$ の面を衝突面とした。また衝突面には測定のために 10 mm 四方のグリッドを描いた。

2-2 超高速衝突試験とシミュレーション

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。飛翔体には直径 1.0 mm のステンレス鋼(SUS304)球を用い、衝突速度は約 $1 \sim 5 \text{ km/s}$ の範囲とした。これにより実際のデブリのうち最も衝突頻度の高い 0.1 mm オーダーのものとの衝突をエネルギー条件で模擬した。実時間撮影には株式会社島津製作所製高速度カメラ「HPV-X」及び「HPV-1」の二台を用いた。試験片の前方 45° 方向と横方向、及び上下方向と横方向の、二パターンの二方向撮影を適宜使い分けることで、衝突による損傷進展挙動の立体情報も含めた撮影を行った。

また、数値解析にはハイドロコードをベースとした数値計算ソフトの ANSYS AUTODYN®を用い、三次元衝突シミュレーションを実行した。脆性材料をモデルとした解析のため、ソルバーには Lagrange 法を適用し、状態方程式には Mie-Gruneisen 型の多項式を、構成方程式には Jonson-Holmquist モデルを使用した。また計算メッシュは 0.2 mm 間隔とした。シミュレーション結果は材料内部の応力状態を表すコンタとして可視化した。この時の座標軸の定義としては、ターゲットの衝突面から板厚方向を X 軸、衝突面上の横方向を Y 軸、縦方向を Z 軸とした。

3. 結果と考察

3.1. 損傷生成及び進展と応力波について

Fig. 2 には、 4.1 km/s で飛翔体を衝突させた際の、 45° 方向からの実時間撮影による連続写真とシミュレーションとの比較を示す。シミュレーションは右側の狭い範囲が Z-X 断面図であり、左側の広い範囲が衝突面の衝突点を中心とした左半面である。コンタは Z 軸方向応力を $\pm 80 \text{ MPa}$ の範囲とし、正值を引張として表示した。衝突後最初に Crater 損傷を示す濃い影が生じ、次いで 3.5 km/s 程度で伝播する表面波とともに微小な Lateral Crack が連続的に生じている。これに合わせ、シミュレーションにおいて Z 軸方向へ引張強度を持った領域が通過していくことも確認できる。したがって、Fig. 3 に示すプロセスが表すように、衝突後の圧縮及び引張の波に次いで、剪断成分を持つ解放波が表面を伝播することで、引張と剪断の両方向応力が表面に負荷され、微小亀裂が生じたと考えられる。

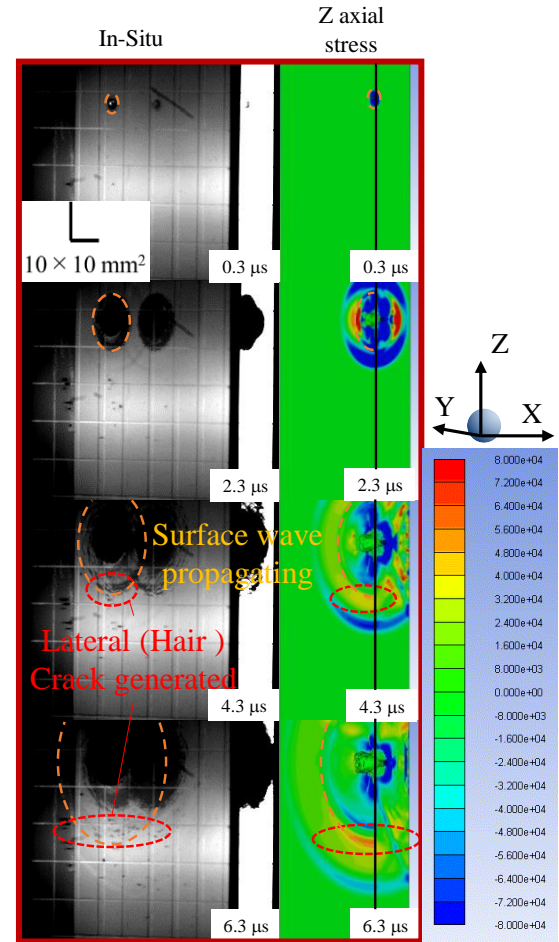


Fig. 2 In-Situ observation pictures with Stainless-Steel projectile impacted at 4.12 km/s .

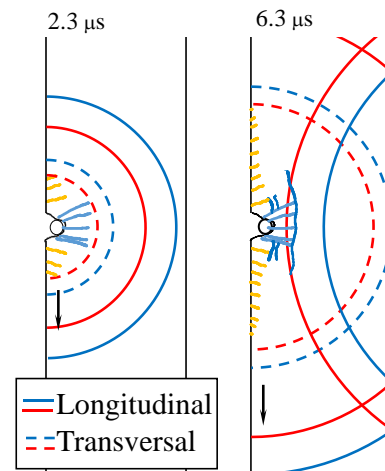


Fig. 3 Inducing process of primary lateral crack.

次いで Fig. 4 には 1.6 km/s で飛翔体を衝突させた際の実時間撮影による連続写真とシミュレーションとの比較を示す。シミュレーション画像は X-Y 断面図を表しており、コンタは $0 \sim 60 \text{ MPa}$ で引張応力を示している。Edge 近傍の Lateral Crack が衝突後 $8.5 \sim 10.5 \mu\text{s}$ 間で突然導入されており、これとほぼ同時、同位置において Y 軸方向への引張強度増大も確認できる。これは応力波同士の干渉

によるものと考えられ、タイミングを考慮すれば、Fig. 5 に示すように、表面を伝播した解放波と、入射角をもって裏面反射した縦波がモード変換によって横波に変化、低速化したものとの干渉によるものだと考えられる。

最後に Fig. 6 には 3.4 km/s で飛翔体を衝突させた際の実時間撮影による連続写真とシミュレーションの比較を示す。コンタは X 軸方向応力を取り、範囲等は Fig. 2 と同様である。Fig. 2 でも確認された微小な Lateral Crack 生成ののち、中心付近の Internal Failure は $1.0 \mu\text{s}$ 程度の進展とその停止を二回繰り返し、最終的に微小 Lateral Crack が確認された最大半径付近まで進展し、不規則な Conchoidal Failure となった。これに対し、応力波は X 軸方向に引張及び圧縮成分を持ったものが、表面に対し交互に到達していることが確認できる。したがって Fig. 7 に示すように、入射角によるモード変換の有無が及ぼす表面への応力波到達時間差が複数回の進展と停止を引き起こしていると考えられる。

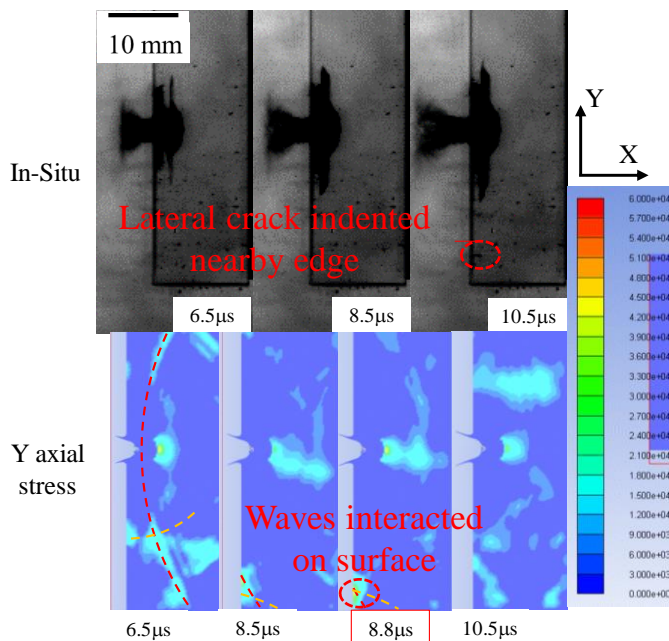


Fig. 4 In-Situ observation pictures with Stainless-Steel projectile impacted at 1.6 km/s.

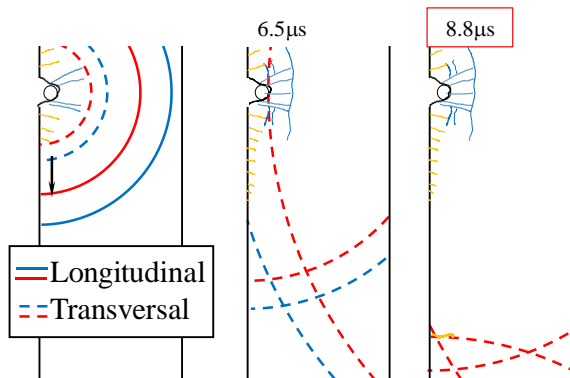


Fig. 5 Inducing process of lateral crack nearby edge.

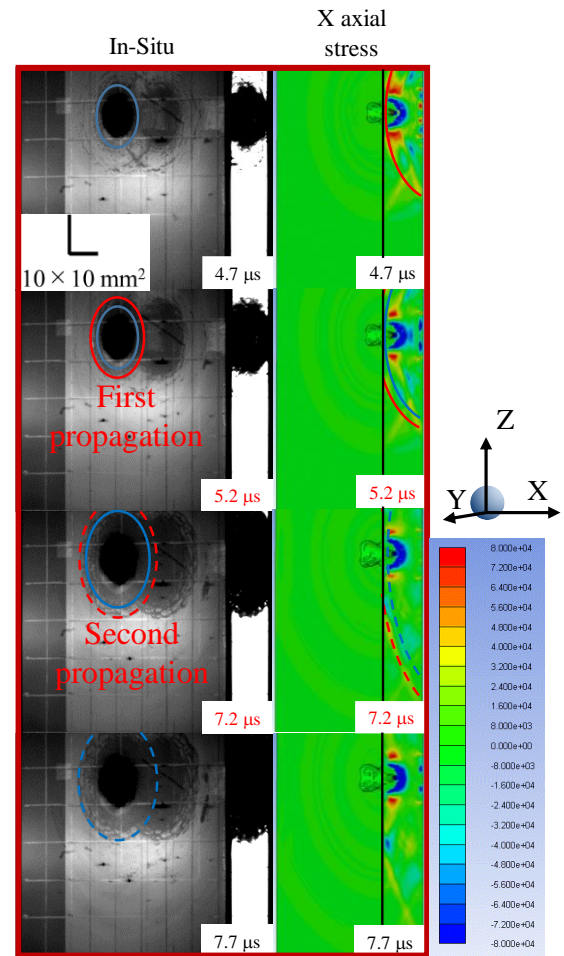


Fig. 6 In-Situ observation pictures with Stainless-Steel projectile impacted at 3.42 km/s.

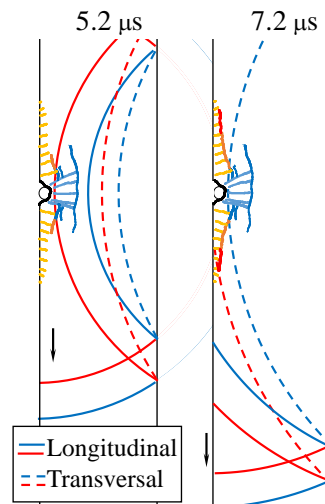


Fig. 7 Propagating process of random conchoidal failure.

3.2. 損傷生成及び進展時の応力状態について

以上の現象により損傷が生成および進展したポイントにおける応力状態を、AUTODYN による計算結果を元に考察した。

まず初期の表面波の通過や反射波の干渉により導入される微小 Lateral Crack について、衝突点から面内の半径方向応力を Z 軸応力として主応力状

態と方向は Fig.7 のように求められ、実時間画像上にプロットされる。

最大主応力はベクトル式の第三項であり、その時の主軸方向はおおむね Fig. 7 における Z 軸方向を示しているため、これは衝突面上を周方向に伝播する波に対し進行方向の応力に変換されたことを表している。

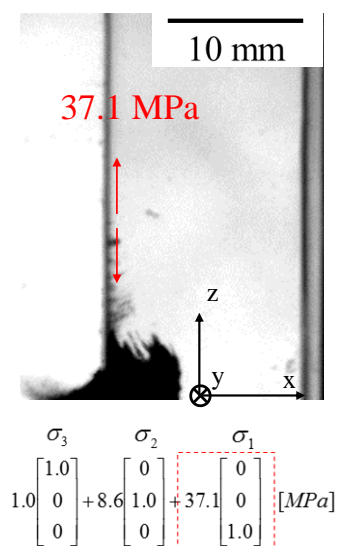


Fig. 7 Stress states for Lateral (Hair) crack of impact at 2.7 km/s.

よってこの数値と方向から、破壊モードはモード I と考えられ、可視光波長以下の長さ 400 nm 程度の微小欠陥のような存在を仮定し、Si の原子直径 0.14 nm 程度の曲率半径を持つ先端への応力集中を計算した際以下のように求められ、この結果は約 10 [GPa] というガラスの原子結合強度とオーダーで良い一致をする。

$$\sigma_0 = 2 \times 37.1 \text{ [MPa]} \sqrt{\frac{400 \text{ [nm]}}{0.14 \text{ [nm]}}} = 4.0 \text{ [GPa]}$$

他の結果においても同様の傾向が確認されており、初期の表面波によって衝突点から半径方向に向けて広がる損傷生成においては、Griffith Crack のような微小欠陥への応力集中が損傷発生の基準と関連していると考えられる。

次に、Internal Failure に由来し Lateral Crack との接続も含む複数回の進展について、損傷が進展したときの損傷先端の応力状態から、主応力状態を算出し、た. その方向に基づく最大主応力方向と実時間撮影画像上へのプロットを Fig. 8 に示す。

Fig. 7 の場合と同様に応力波面に対して考えると、これらの損傷進展に関しては進展角度の変化からおおむね混合モード破壊によるものと考えられる。

以上の考察から、ガラスのような等方的な脆性材料に関しては、最大主応力におおよそ直交する方向に損傷が進展することが考察される。

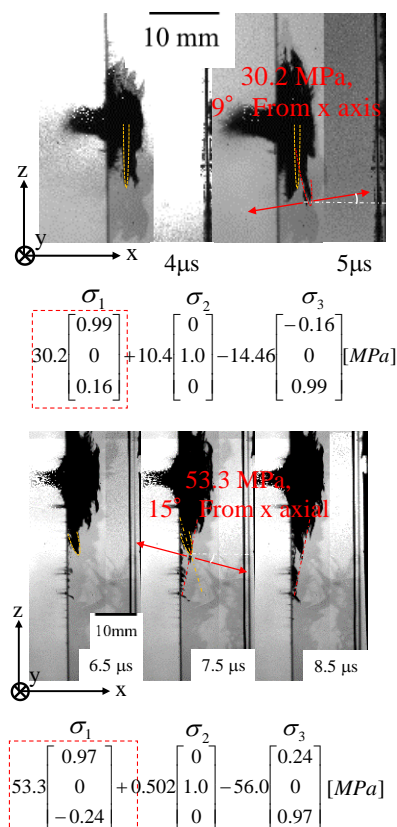


Fig. 8 Stress states for Crack propagation from internal failure of impact at 2.1 km/s and 3.4 km/s.

5. 結論

石英ガラスへの超高速衝突現象の実時間観察及びシミュレーションによる計算から、表面上の損傷生成及び進展に関して以下の知見を得た。

- 表面損傷は、表面波の通過による生成と、各面からの反射波同士の干渉による生成に分かれる。
- 損傷進展について、裏面反射波の複数回の到達により進展と停止を繰り返し、最終的に表面波による Lateral Crack と連結することで表面上の大規模な Conchoidal Failure を形成する。
- 石英ガラスの応力波による損傷は最大主応力と直交する方向への進展が示された。
- 表面損傷生成時の応力状態は、Griffith Crack への応力集中を考慮してガラスの理想強度に近く、損傷の生成基準との関連が考えられる。

参考文献

- (1) 松尾哲也, 森島克成, 井上涼平, 野中吉紀. 「金星探査機 (PLANET-C) 向け 500N セラミックスラスターの開発」. 三菱重工技, 2008; VOL.45 NO.4.
- (2) N. Kawai et al. : Int. J. Impact Eng., **38** (2011), 542-545.
- (3) Kawai, N., Tsurui, K., Moriguchi, K., Hasegawa, S., & Sato, E. (2013). Damage evolution in SiO₂ glass subjected to hypervelocity impact : Procedia Engineering. **58**, 702-708.