

# 石英ガラスへの超高速衝突により生じる球面応力波と損傷進展機構

○長野幹雄 (JAXA, 首都大学東京大学院システムデザイン研究科),  
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),  
北菌幸一 (首都大学東京), 佐藤英一 (JAXA 宇宙科学研究所)

## Damage Propagation Mechanism and Spherical Stress Waves in Silica Glass Plate Subjected to Hypervelocity Impact

Mikio Nagano (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency/  
Graduate School 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),  
Koichi Kitazono (Tokyo Metropolitan University),  
Eiichi Sato (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

### Abstract

With the development of spacecraft, the brittle materials like ceramics and glass have been used for significant components especially in optical and thermal systems. However, they are vulnerable to damage by hypervelocity impact of space debris and micrometeoroids. Against a backdrop of increasing number of space debris, impact-damage evaluation on brittle materials become a growing concern. In this study, a series of hypervelocity impact experiments has been conducted to evaluate internal damage propagation mechanism in a fused-silica-glass plate target by impacting a stainless steel projectile with 1-mm diameter in the velocity range around 2 km/s. Damage propagation behavior was observed from two directions simultaneously by means of in-situ shadowgraph coupled with an ultra-high-speed video camera. The observation concentrates on propagation behavior of internal failure. This propagation is affected by the longitudinal and transversal waves, the reflection of the spherical stress waves on the back surface of target. The failure propagates rapidly two times by the reflected waves: first rapid propagation was caused by tensile stress induced by the reflected longitudinal wave, the secondary rapid propagation was caused by shear-compression mixture stress induced by the reflected transversal wave, which was generated by mode conversion of the longitudinal wave.

Key Words: Silica Glass, Hypervelocity Impact, Stress Waves, Local Stress, Crack Propagation

### 1. 緒言

宇宙機の高機能化に伴う構造材料の多様化により、無機系材料を利用する動きが活発になっている。

一方で無機系材料を宇宙機へ活用するにあたって、スペースデブリやマイクロメテオロイドとの衝突による宇宙機の破壊という偶発的事象が問題となっている。特に、デブリ環境は近年の宇宙開発の進展に伴い悪化の一途を辿っており、地上から把握・追跡が不可能な微小デブリとの超高速衝突は、無機系材料にとり致命的な事象であるため、超高速衝突時の損傷評価が強く要求される。

これまでも無機系材料を含め、宇宙機部材への微小飛翔体の超高速衝突試験が実施されており、事後観察による損傷規模の定量評価における基礎となった<sup>(1)</sup>。

一方で、透明脆性材料に対する損傷進展挙動を実時間観察する研究も行われてきた。これにより、脆性の無機系材料に対する超高速衝突時の損傷評価には応力波や損傷進展挙動を実時間観察することが有効だと示された<sup>(2)</sup>。しかしながら、宇宙機に適用されるような薄板に対する衝突では、裏面から損傷や応力波が受ける影響を考慮した解析が必要となる。

著者らは、デブリ超高速衝突時の薄板脆性材料に生じる三次元損傷の生成・進展メカニズム解明に主眼を置き、石英ガラス薄板を対象とした微小デブリの超高速衝突模擬試験とその実時間観察を試みてきた。既往の研究では、衝突下で発生する多様な損傷を、衝突エネルギーと板厚をパラメータとして分類することに成功し、さらにこれらの損傷の多くが試験体裏面や側面

で反射した応力波の影響を受けることが示唆される結果を得た<sup>(3)(4)</sup>。この時の多様な損傷を整理した模式図を Fig. 1 に示す。進展の流れとして、まず衝突による中心孔 (Central Pit) およびその直下の円錐状亀裂 (Cone Crack)、さらに高強度の圧縮応力により剥離した貝殻状損傷 (Conchoidal Failure) からなる中心のクレータ (Crater) が生じ、次いで衝突面上には円弧状の孤立亀裂 (Lateral Crack) が生じる。この孤立亀裂と内部を円盤状に進展していく内部損傷 (Internal Failure) が重畳し、表面直下に鱗状損傷 (Random Conchoidal Failure) が形成される。さらに高エネルギー衝突時には、衝突中心から放射状亀裂 (Radial Crack) が進展する。Fig. 2 には各損傷が生じる試験体の板厚と衝突時の飛翔体運動エネルギーの条件を示している。上記研究により、薄板に特有の裏面からの効果を十分に考慮する必要性が示された。

本研究では、昨年度の研究において進展機構が明らかになった表面の孤立亀裂に続き、材料内部で断続的な進展挙動を見せた三次元の内部損傷の進展機構を解明することを目的とする。

### 2. 実験方法

本実験は ISAS / JAXA の超高速衝突実験施設が保有する二段式軽ガス銃を用いて実施した。飛翔体の速度計測には三組のレーザーダイオードを用いた。測定精度は ± 0.005 km/s 程度である。また、この速度計測システムは後述の撮影方法における超高速カメラシステムのトリガーとしても用いた。

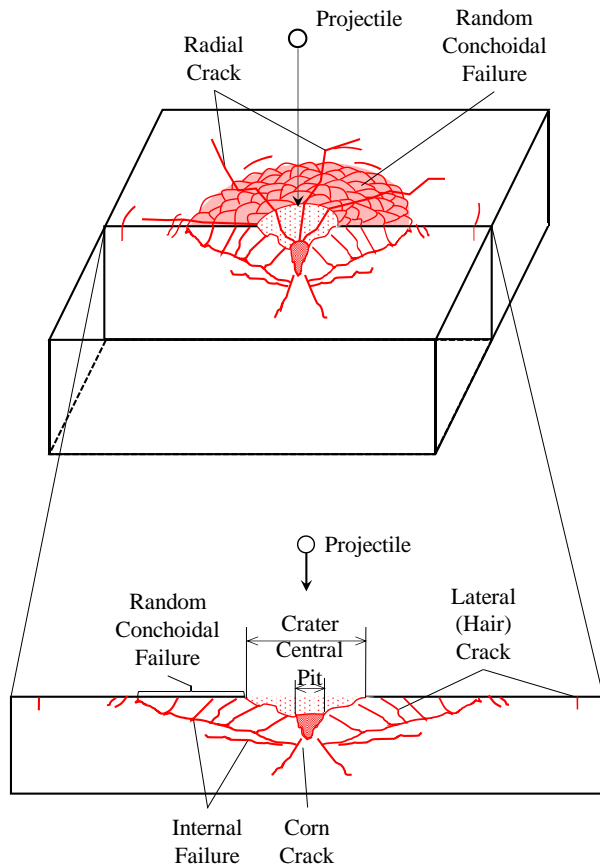


Fig. 1 Schematic diagram of damage morphologies induced by hypervelocity impact of a small projectile on a fused silica glass plate.

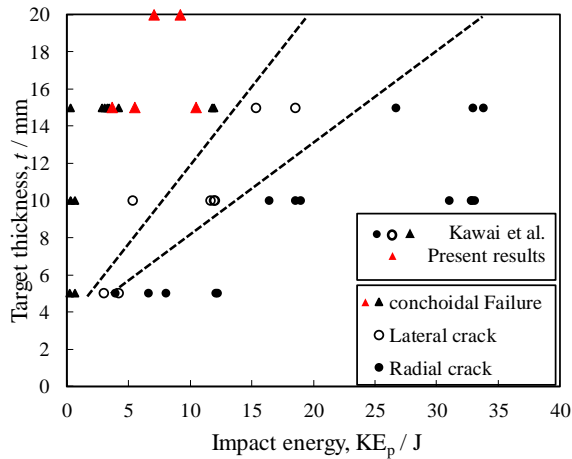


Fig. 2 Damage morphologies against target thickness and impact energy.

Table 1 には本試験で使用した飛翔体及び試験体の各物性値を示した. 試験体には ES グレードの合成石英ガラス板材 (信越石英(株)製), 飛翔体には直径 1.0 mm のステンレス鋼球を用いた. 各材料内の各応力波速度を表す縦波音速  $C_L$ , および横波音速  $C_T$  は以下の式により算出した.

$$C_L = \sqrt{\left(\frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} + 2G\right)}, C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

試験体の衝突面には, 撮影画像の空間スケールとして 10 mm 間隔の格子状マーカラインを描いた.

また, 超高速衝突時の現象を視覚的に理解するために, 超高速ビデオカメラによる実時間撮影を行った. 使用したカメラは「HPV-X」及び「HPV-1」(株島津製作所)である. 各カメラの解像度はそれぞれ 400×250 pixel, 312×260 pixel であり, それぞれのフレームレートは 2 Mfps, 1 Mfps とした. 撮影手法については, 衝突時の現象を立体的に捉えるため, Fig. 4 に示す表面側 45°撮影併用法を適用した. この撮影セットアップにより衝突面上での損傷の広がりや内部への深さの両情報を得ることができるため, 損傷の立体形状も含め, その進展過程を把握することが可能である.

また本研究では, 損傷進展過程と応力状態とを比較するために ANSYS Autodyn®を用いた三次元数値解析を併用した. 試験体が脆性の等方弾性体であるため, ソルバには Lagrange 法を適用した. ガラスについては脆性固体の状態方程式として, Mie-Gruneisen 型の多項式を, 構成則には Johnson-Holmquist モデルを適用した. ステンレス鋼に対しては状態方程式に Shock モデルを, 構成則には Steinberg-Guinan モデルを適用し, 衝撃圧が Hugoniot 弾性限界を超えた後, ある程度の偏差応力を残しつつ流体的に振舞うよう定義した. シミュレーション結果は応力状態を示すコンタとして表示し, その時間変化から応力波の伝播挙動を可視化, 評価した.

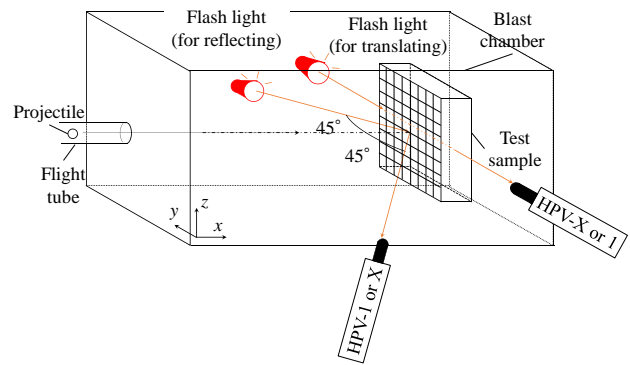


Fig. 4 Schematic of two-directional *in-situ* observation setup for hypervelocity impact experiments.

Table 1 Mechanical properties of target and projectile materials.

	Materials	Density	Young's moduls	Shear moduls	poisson ratio	Elastic wave speed	
		$\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	$E$ [GPa]	$G$ [GPa]	$\nu$	$C_L$ [km/s]	$C_T$ [km/s]
Target	Fused silica glass (SiO <sub>2</sub> )	2.2	70	30	0.17	5.9	3.7
Projectile	Stainless steel (SUS304)	8.03	197	73.7	0.3	5.7	3.0

Table 3 Conditions and summary of hypervelocity impact experiments.

Shot No.	Experimental conditions		Shot results		
	Impact velocity, $v_p$ [km/s]	Target size [mm <sup>3</sup> ]	Fracture type	Crater diameter, $d_c$ [mm]	Surface spall diameter, $d_s$ [mm]
3735	1.33	80×80×15	Conchoidal Failure	9.1	23.0
3737	2.25		Conchoidal Failure	14.8	36.9
3738	1.62		Conchoidal Failure	16.1	30.0
4059	1.84	80×80×20	Conchoidal Failure	14.0	31.4
4060	2.11		Conchoidal Failure	21.1	39.1

### 3. 実験結果と考察

Table 2 には実験の実施条件と結果を示す．二種の板厚の試験体に対し，内部損傷の進展過程を明瞭化するために，Fig. 1 の分類における内部損傷と孤立亀裂を分離して発生させるエネルギー条件を満たすような衝突条件を設定した．Fig. 2 に示される通り，本実験条件で得られた損傷形態は従前の分類に従っていることが確認できる．Table 3 には事後観察で計測された，衝突面上でのクレータ及び鱗状損傷を含む剥離損傷全体の直径も示した．

以下では実験結果の代表例として Shot No. 3738 について示す．Fig. 5 には内部損傷の衝突面内における進展挙動をプロットし，Fig. 6 には事後観察画像を，Fig. 7 には内部損傷の進展の様子を実時間撮影によって捉えたものを示す．Fig. 7 の各時刻における左側の画像は45°方向からの撮影結果で，撮影画像の手前側に見える白い格子が描かれた面が衝突面，奥側に見える黒い格子が描かれた面が試験体裏面に写った像である．また各時刻の右側の画像は側面からの撮影・解析結果であり，右側3/4の領域が試験体である．左側の黒い影および緑色の領域として映る部分がエジェクタとして放出された破片群である．座標定義はFig. 4 に従い，衝突点を原点とする．

内部損傷が進展する過程を大まかに見ていく．進展開始点として，深さ4 mm付近に3 μsでクレータの脇から成長し出している（側面図，点線円）．Fig. 5 によれば，この内部損傷は4.5 μsまでゆっくり成長した後に，4.5~6.0 μsで急速に進展し，6.0~6.5 μsで一度停滞し，6.5~7.5 μsで再度急速な進展を示す．7.5 μs以降は進展が止まった．Fig. 6 の側面図で観察できる亀裂の進展方向は，5~6 μsでは板厚(+x)方向へ曲面的に進展方向

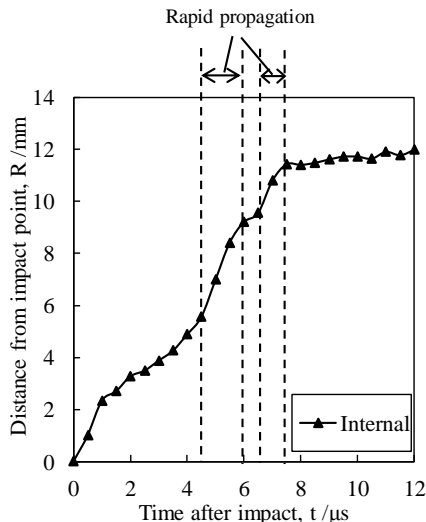


Fig. 5 Time profiles of damage fronts shift of internal failure of Shot No. 3738.

が変化し，6~7 μsでは衝突面(-x)方向へ鈍角に角度変化している．他の Shot においても同様の挙動が見られた．この現象は45°方向撮影画像において，表面での像と裏面での反射像の両者でも観測でき，6.7 μsにおいて円状の損傷領域が透明部と黒化部とに分かれているのが丁度角度変化が起こった損傷面であることを示している．

Fig. 6 の各側面図に示したコンタ図は数値解析結果で，弾道軸方向引張応力  $\sigma_{xx}$  を示している．側面図において，二回の内部損傷の再進展が確認されるタイミング（実時間4.5 μsと6.5 μs）の直前で，コンタ図においては応力波の通過が確認できる．特に一回目の進展開始（4.5 μs（未掲載））から進展方向変化（5.0 μs（横方向撮像））が起こるタイミングでは速度が約5.9 km/sの縦波応力波の通過（4.5 μs（未掲載，コンタ図））が，その後，二回目の鋭角的な進展角度変化（6.5 μs（未掲載，45°方向撮像））が起こる直前には速度が約3.7 km/sの横波応力波の通過（6 μs（コンタ図））がそれぞれ確認された．この横波応力波は，到達タイミングと数値解析結果から，裏面における縦波応力波の斜め反射時により生じたものと結論付けられる．

次に，新たに観察された，内部損傷における二回の進展方向の変化について検討する．

実時間観察画像及び数値解析結果から，損傷進展方向の二回の屈曲が生じるタイミングは，それぞれ縦波反射波が亀裂先端に到達した直後（Shot No. 3738では4.5 μs）及び，上述の縦波が大きな入射角を伴って裏面反射した際の横波反射波が亀裂先端に達した直後（Shot No. 3738では6.0 μs）であることが確認された．Fig. 7 に，この二回の屈曲時における亀裂と応力波の模式図をそれぞれ示す．

一回目の屈曲時に縦波反射波が亀裂先端に到達したとすると（Fig. 7 (b)），入射角  $\gamma_1$  は試験体厚さ  $t$ ，亀裂深さ  $D_1$ ，亀裂進展距離  $R_1$  を用いて，式 (2) により記述される．

$$R_1 = t \tan \gamma_1 + (t - D_1) \tan \gamma_1 \quad (2)$$

$D_1$  は2.6~3.4 mmの範囲であった．この範囲では  $D_1$  は  $\gamma_1$  にほとんど影響せず，さらに  $R_1$  に対して，式 (2) による応力波入射角  $\gamma_1$  は実測された亀裂屈曲角  $\theta_1$  に対し良く一致していた．この結果，一回目の損傷進展は亀裂面垂直方向の引張応力負荷が支配的なモードI破壊だと結論付けられる．

次に二回目の屈曲については，横波反射波が亀裂先端に到達したとすると（Fig. 7 (c)）， $\theta_1$  方向に進む亀裂に対する入射角は  $\theta_1 - \gamma_3$  となる．ここで  $\gamma_3$  は式 (3)，(4) で与えられる．

$$\sin \gamma_2 = \frac{C_L}{C_T} \sin \gamma_3 \quad (3)$$

$$R_2 = t \tan \gamma_2 + (t - D_2) \tan \gamma_3 \quad (4)$$

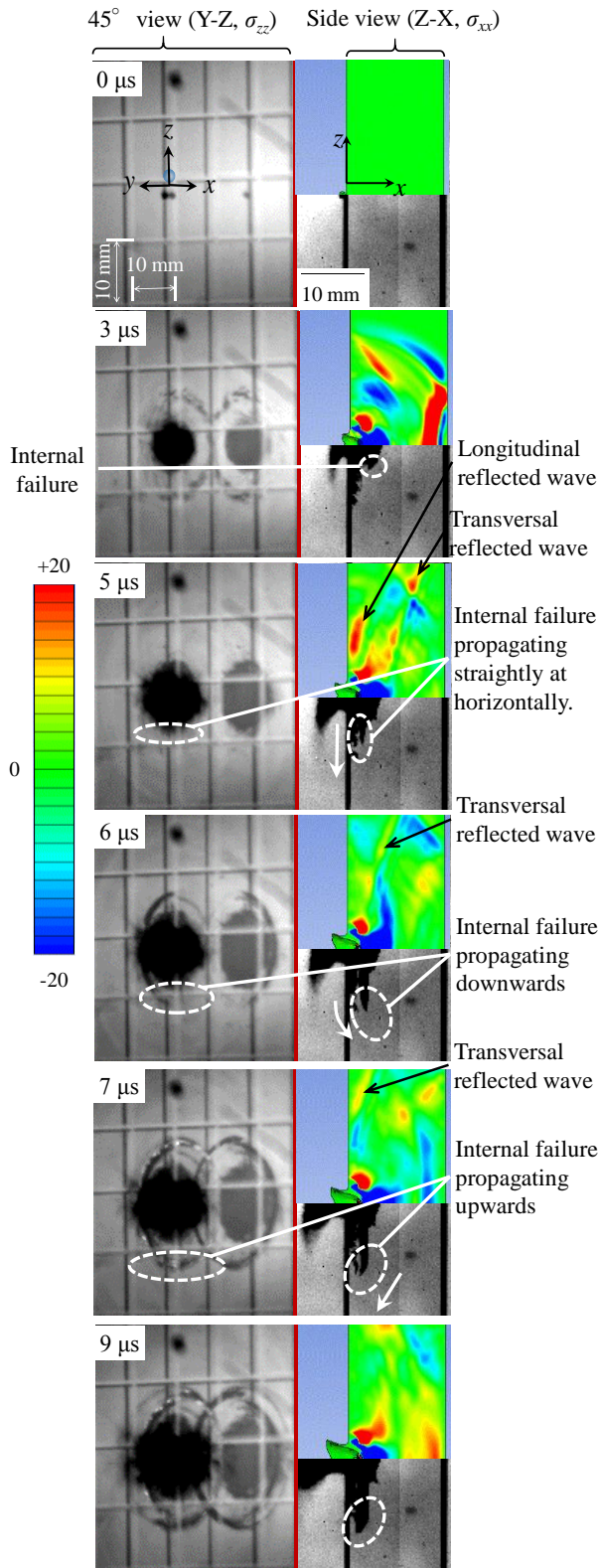


Fig. 6 Comparison between in-situ observations (lower half) and numerical results (upper half) at several timings of Shot No. 3783.

屈曲時の亀裂進展距離  $R_2$  に対して、応力波入射角  $\theta_1 - \gamma_3$  がほぼ  $0^\circ$  に分布するのに対し、亀裂屈曲角  $\theta_2$  はおよそ  $50^\circ$  付近に分布した。純モード II 破壊における亀裂進展角については各理論により異なる値が提唱されるが、概ね  $70^\circ \sim 80^\circ$  とされている<sup>(5)</sup>、したがって、屈曲後

の損傷進展は横波応力波の通過に起因するモード II を主とした破壊であると考えられる。

特にこの時の亀裂進展において、Autodyn による解析結果より、亀裂面を拘束する方向に圧縮成分が存在していた。これにより、モード I 破壊が抑制されつつ、せん断力により亀裂が進展していると推測される。この圧縮を受けたモード II 破壊の詳細については、今後さらに検討を深めていく必要がある。

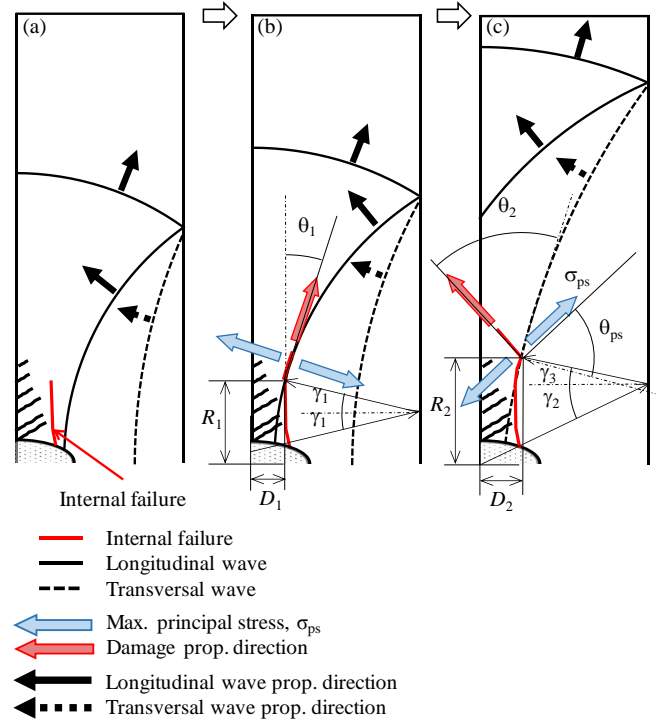


Fig. 7 Schematic of damage propagations by the reflected waves.

## 5. 結言

本研究では石英ガラス板材を研究対象に設定し、微小デブリ衝突を模擬した超高速衝突試験と実時間撮影を実施し、内部損傷の生成及び進展過程を評価した。内部損傷に関して、超高速衝突に伴い材料内部を伝播する裏面反射した球面応力波が、損傷先端を通過する際に生じる局所的な応力状態の変化により、次の二段階で断続的に進展する損傷進展機構が明らかとなった。まず始めに、裏面で反射してきた縦波が内部損傷先端に干渉することでモード I 破壊が生じる。次に、裏面反射時にモード変換し、横波となった応力波が内部損傷先端を通過することで、面外方向の圧縮の影響を受けた面内せん断によるモード II を主とした破壊が生じる。

## 参考文献

- (1) E. L. Christiansen, and R. R. Burt, International Journal of Impact Engineering, Vol.29 (2003), pp.153-166.
- (2) J. Kimberley, K. T. Ramesh, Procedia Engineering, Vol. 58 (2013), pp.678-683.
- (3) N. Kawai et al., Procedia Engineering, Vol.58 (2013), pp.702-708.
- (4) N. Kawai et al., Procedia Engineering, Vol.103 (2015), pp.287-293
- (5) H. Awaji, Strength of Ceramics Materials, Corona Publishing, (2001), pp.35-39.