

透明材料への超高速衝突による動的破壊の実時間撮影

IN SITU IMAGING OF DYNAMIC FRACTURE INDUCED BY A HYPERVELOCITY IMPACT ON TRANSPARENT MATERIAL

○森口開理 (法政大・院), 川合伸明 (熊本大・IPPS), 座間俊右 (法政大・院),
長谷川直 (ISAS/JAXA), 新井和吉 (法政大), 佐藤英一 (ISAS/JAXA)

MORIGUCHI Kairi^a, KAWAI Nobuaki^b, ZAMA Syunsuke^a,
HASEGAWA Sunao^c, ARAI Kazuyoshi^a, SATO Eiichi^c

^aDepartment of Mechanical Engineering, Hosei University, 3-7-2 Kajino, Koganei, Tokyo 184-8584, Japan

^bInstitute of Pulsed Power Science, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto 860-8555, Japan

^cInstitute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara,
Kanagawa 252-5210, Japan

Abstract

Hypervelocity impact experiments were performed on transparent material using two-stage light gas gun. In order to observe the damage propagation process in the impact-axial direction, a technique called Edge on Impact (EOI) was used. The propagation behavior of the stress wave and damage by EOI was observed using an ultra high-speed video camera. The effect of the stress wave on the impact damage in a transparent material was experimentally analyzed, and the damage mechanism subjected to a hypervelocity impact was discussed.

Key Words : *Hypervelocity impact, In-situ observation, Transparent material.*

1. 諸論

惑星形成過程の天体衝突問題や宇宙空間を超高速飛翔するスペースデブリと宇宙機との衝突問題など超高速衝突現象は宇宙理工学の分野と密接に関わる重要な現象である。そのような背景から、現在に至るまで数多くの超高速衝突実験が行われてきている。しかし、それらの実験、特に超高速衝突破壊現象に関する研究において、天体衝突問題ではクレーター形状や破片形状およびその分布状態の評価、デブリ問題では構造体の損傷形状を予測する損傷予測式やデブリシールドの貫通限界曲線の構築など、超高速衝突後の損傷形状評価を中心とした研究が多くを占めている[1, 2]。そのような状況を踏まえ、本研究では超高速衝突破壊進展機構の理解を目指し、超高速ビデオカメラを用いることによる超高速衝突損傷進展過程の直接観測を試みた。可視光による観測となるため、試験体内部の損傷状況を観測できる様に透明材料を対象とし、また、実際に超高速衝突問題と関連し得る材料という観点から脆性材料として石英ガラス[3]、高分子材料としてポリカーボネート[4]を選定して研究を進めた。その結果、各材料における基本的な損傷形態および各損傷形態の形成過程を観測・把握することに成功した。

2. 実験方法

(1) 石英ガラス

超高速衝突実験は、ISAS/JAXA に設置されている二段式軽ガス銃[5]を用いて行った。Fig.1 にその二段式軽ガス銃の外観写真を示す。本装置の発射管口径は7 mm であるが、サボと呼ばれる Nylon 66 製の装弾筒を使用することにより、直径0.1~3.2 mm の球形飛翔体を単体で~7 km/s の速度で射出することが可能である。Fig.2 にその模式図を示す。

本研究で用いた飛翔体は、直径3.2 mm の A5052 球である。衝突ターゲットである密度2200 kg/m³ の石英ガラスの形状は、60 mm×60 mm の単層板であり、板厚として15 mm を用意した。Edge on impact (EOI) では衝突面が60×15 mm の面である。衝突速度は、2.9~3.2 km/s である。損傷過程の実時間撮影には超高速ビデオカメラ HPV-1, HPV-X (島津製作所) を用いた。撮影速度はそれぞれ500,000~1,000,000 fps (frame per second) とし、撮影枚数は100~256枚、撮影角度は飛翔体弾道軸に対して垂直な90°方向からの撮影を行った。なお、照明にはフラッシュランプを用い、反射光を用いて撮影を行った。Fig.3 に実験配置図を示す[6]。



Fig.1 Two-stage light-gas gun at ISAS/JAXA.



Fig.4 Two-stage light-gas gun installed at Hosei University.

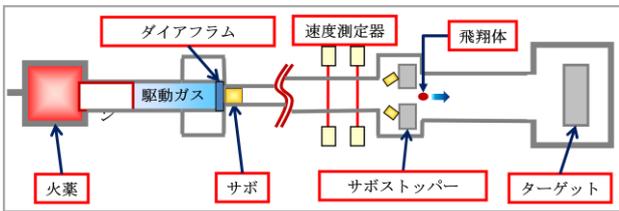


Fig.2 Pattern diagram of the two-stage light-gas gun at ISAS/JAXA.

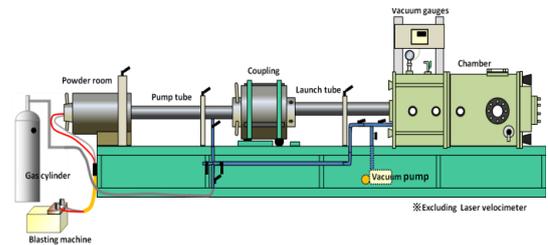


Fig.5 Schematic of the two-stage light-gas gun at Hosei University.

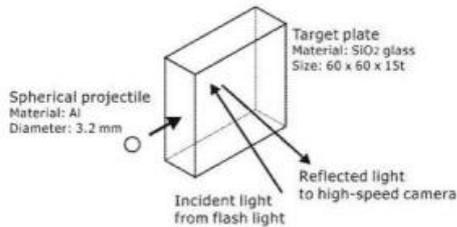


Fig.3 Experimental set up at Edge on Impact test (EOI).

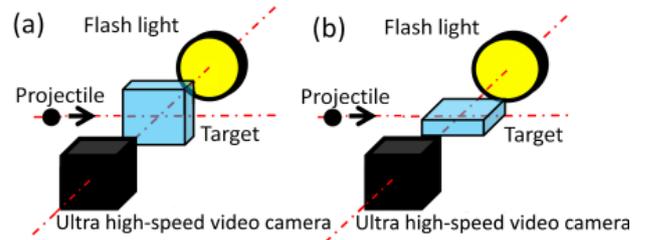


Fig.6 Experimental setup of vertical and horizontal setting.

(2) ポリカーボネート

超高速衝突実験には ISAS/JAXA から本年度移設された二段式軽ガス銃を用いた。Fig.4 にその銃の外観写真を示す。本装置の発射管口径は 7 mm であり、直径 7 mm の球形飛翔体を単体で ~4 km/s の速度で射出することが可能である。その模式図を Fig.5 に示す。本研究で用いた飛翔体は、直径 7 mm の Nylon66 球であり、衝突ターゲットであるポリカーボネートは 80×80×30 mm の積層板を使用した。EOI では衝突面が 80×30 mm の面で、衝突速度は 3.3 ~ 3.7 km/s である。損傷過程の実時間撮影には HPV-X を用いた。撮影速度は 2,000,000, 5,000,000 fps とし、撮影枚数はそれぞれ 128, 256 枚、撮影角度は飛翔体弾道軸に対して垂直な 90°方向からの撮影を行った。なお、照明にはフラッシュランプを用い、バックライト方式で撮影を行った。超高速ビデオカメラに対し、試験体を縦置きおよび横置きに設置し、各撮影条件に対して衝突試験を行うことにより、試験体の上面と側面からのそれぞれの連続写真を得た。Fig.6 に実験配置図を示す。

3. 実験結果および考察

(1) 石英ガラス

EOI 試験の衝突時の画像を Fig. 7 に示す。衝突速度は 3.02 km/s で、衝突時から 9 μs までの破壊進展過程を示している。衝突により生じた応力波が試験片を伝播している様子が見える。試験片表面に描いたグリッドが消失していないことから、この損傷が表面ではなく、内部で進展していることが理解できる。また、損傷領域の前方に、応力波が 2 種類伝播している様子が観察された。それぞれの波の速度を解析した結果、第 1 波が 5.45 km/s、第 2 波が 3.80 km/s となった。これらの速度は、石英ガラスの縦波音速 5.90 km/s、横波音速 3.75 km/s とほぼ等しい値であることから、本実験で観察された 2 種類の応力波は、それぞれ疎密波と、せん断波であると推測される。この実験での応力波の進展距離と時間の関係を Fig. 8 に示す。中心部の損傷領域は第 2 波の進展に伴い形成されていく様子が観察されたことから、横波によって伝播するせん断応力により損傷が誘起されていると考えられる。

第 1 波と第 2 波の干渉によって、試験片内部にスポールのような破壊が生じていることが明らかになった。この破壊の様子を Fig. 9 に示す。Fig. 9 は衝突後の 12 μ s から 14 μ s までの破壊進展過程を示している。(a),(b) は共に同じ進展過程を表しており、(b) は推測される応力波の様子を破線で示している。12 μ s では、衝突点から連続した損傷が続いているが、応力波が重なる 13 μ s には不連続な損傷が誘起されている。14 μ s になると、多くの不連続な損傷が材料内部で発生していることが確認できる。Fig. 8 からも、第 1 波の反射と第 2 波の応力波が 13 μ s で重なり合っていることが分かる。このことから、第 1 波の縦波の反射が、第 2 波の横波の進行と重畳することで、応力が突発的に増幅し、スポールのような破壊が生じていると考えられる。

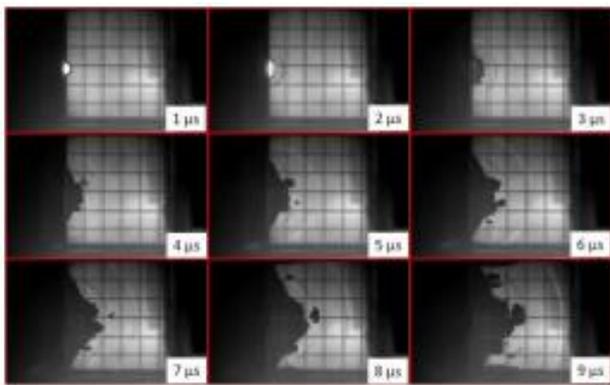


Fig.7 Successive picture of shock wave propagation and failure propagation on SiO₂ glass plate after impact of an A5052 projectile accelerated up to 3 km/s.

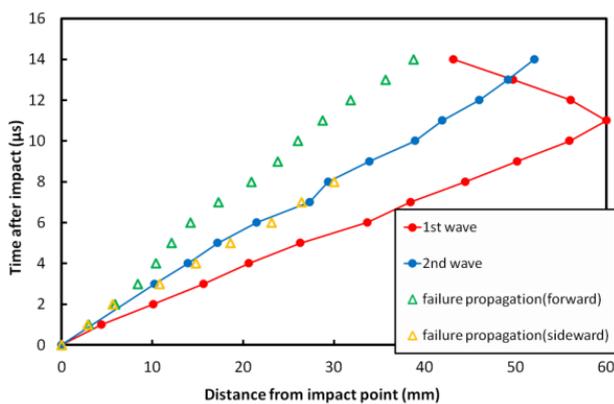


Fig.8 Time evolution of stress wave and damage propagation.

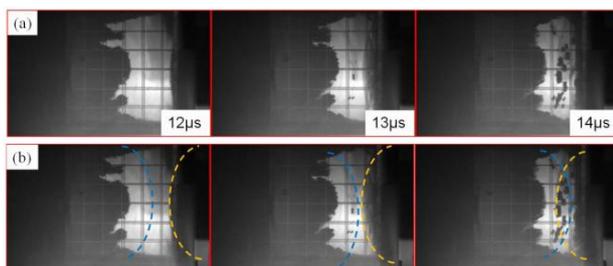


Fig.9 Initiation and growth of damage like spall on SiO₂ glass plate.

(2) ポリカーボネート

複層におけるスポールの積層界面に沿った進展挙動を定量的に評価するため、損傷進展速度を算出する必要がある。しかし、応力波の干渉とスポールの発生が重畳し、精細に測定することが困難なため、応力波の干渉とスポールの発生を分離することが可能なEOIを採用した。

直径 7 mm の Nylon66 球を 80×80×30 mm のポリカーボネート積層板側面に藤原銃を使用して 3.6 km/s で超高速衝突させた。Fig.10 に衝突後の試料の外観写真を示し、衝突により生じた衝撃波の干渉による試料内部の積層界面に沿ったクラックの発生・進展を超高速度ビデオカメラで実時間観察した。Fig.11 (a), (b) はクラック面、クラック側面における損傷過程の連続写真であり、衝突後 18.5 μ s, 16 μ s において反射衝撃波の干渉による試料内部での剥離クラック発生が観察された。Fig.12 にスポールの発生時刻を原点とした側面からの連続写真から得たクラックの発生から停止までの進展距離と速度の時間変化を示す。

本研究では、衝撃波の干渉を利用することによる材料内部でのクラック発生・進展過程の直接観察に成功しており、人工的に制御されたプレクラックからの破壊進展を対象としてきた既往の研究に対し、クラックの自発発生から進展に至る全ての挙動を明らかにすることが可能となる。

また、応力に対して屈折率変化の大きい高分子材料を用いて、衝撃波伝搬の様子を明瞭に捉えること、および弾道軸垂直方向の試験体厚さを適切に調整して、弾道軸垂直方向での衝撃波干渉を生じさせ、引張応力を誘起させることに成功しており、衝撃波伝搬とクラック生成・進展の様子を明確に分離し、撮影することに成功した。

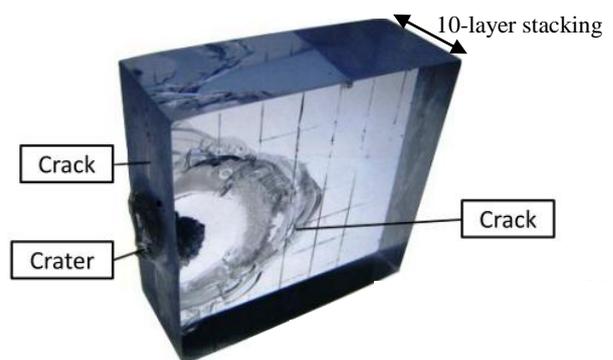


Fig.10 The appearance of sample after edge on impact test (Vertical setting).

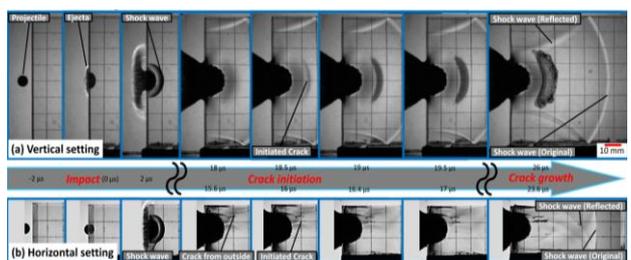


Fig.11 Successive pictures of shock wave propagation and crack initiation and propagation on Polycarbonate plate.

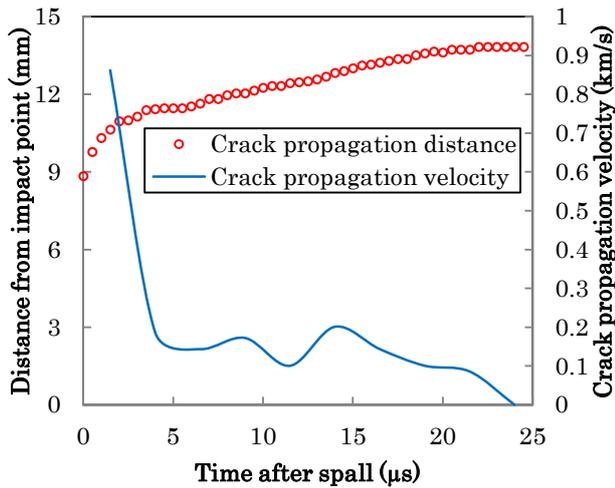


Fig.12 The crack propagation distance and velocity against time after spall during edge on impact test.

本衝突条件の数値解析や偏光撮影を行うことで、試料内部の応力場を評価し、クラック発生・進展時の各瞬間における応力場を求めることができ、モード I 破壊靱性値を評価することができる。特に、クラック発生直後の微小クラックの破壊靱性評価は、他の手法では実施することができないものである。

破壊力学的なクラックの臨界進展速度は(1)式で表される[7].

$$\dot{A}_{\max} \approx 0.38 \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 0.38V_L \quad (1)$$

ここで、 A はクラック長(m)、 E は弾性係数(Pa)、 ρ は密度(kg/m^3)、 V_L は弾性体中の縦波の速度である。ポリカーボネート中の縦波の音速が 1.4 km/s であるため、破壊力学的なクラックの臨界進展速度は(1)式より 0.5 km/s となる。

この臨界速度で言及しているクラックは材料内のある点が起点となりクラックが伝播するものである。一方本実験結果のうち特に 5 μs 以前の現象は、波の干渉によってある面全体が一度に剥離する面破壊であり、剥離面が内側から連続的に進展・成長したかどうかは明言できない。

しかし、5 μs 以降における徐々に損傷・成長した領域においては、5 μs までに瞬間的に形成された剥離領域が外側に連続的に進展・成長したと考えられるため、上述のクラック臨界進展速度と意味合いが等しくなる可能性がある。本実験結果では 5 μs 以降における臨界進展速度は 0.2 km/s であった。

4. 結論

超高速衝突により、脆性材料および高分子材料に生じる損傷進展過程を調査するため、透明材料である石英ガラス、ポリカーボネートに対して超高速衝突実験を実施し、損傷進展過程の高速度実時間観測を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 石英ガラス内部の衝突軸方向への損傷は、横波であるせん断波の伝播によって誘起される様子を明示した
- 2) 石英ガラス内部において、縦波である疎密波の反射波と横波であるせん断波の干渉によりスポールに似た損傷が発現する様子が観察された
- 3) ポリカーボネート中の破壊力学的亀裂臨界進展速度と比較し、予亀裂のない積層界面における超高ひずみ速度域でのモード I 亀裂臨界進展速度は異なる値を示した

ここまでの議論も含め、超高速衝突にともなう損傷挙動は未だ経験則による表現や定性的な理解に留まっているケースが殆どである。超高速衝突損傷機構の本質的な理解を深めるために、材料内部の損傷進展の様子が観測できる透明材料を用いた実験は非常に効果的であると考えている。今後も超高速衝突破壊機構の解明を目指し、実時間観測、事後観察、数値計算などを効果的に組み合わせ、透明材料に対する超高速衝突試験を継続していく予定である。

謝辞

本研究は宇宙科学研究所・スペースプラズマ共同研究設備の二段式軽ガス銃及び法政大学へ今年度移設された二段式軽ガス銃を使用させて頂きました。また、一部の実験において株式会社島津製作所の援助を受けて行われました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) B.G.Cour-Palais, *Int.J. Impact Eng.* **23**, pp.137-168(1999).
- 2) N. Kawai et al., *Int. J. Impact Eng.* **38**, pp.542-545(2011).
- 3) N. Kawai et al., *Proc. Engineer.* **58**, pp.702-708 (2013).
- 4) 森口 他, 平成 24 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.101-104 (2013).
- 5) N. Kawai et al., *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 115105 (2010).
- 6) 川合 他, 第 54 回高圧討論会講演要旨集, pp. 172 (2013)
- 7) Roberts et al, *Engineering*, **178**, pp.820-821 (1954)