

# 超高速衝突損傷進展過程の実時間可視化計測

川合伸明<sup>1</sup>, 長野幹雄<sup>2,3</sup>, 長谷川直<sup>3</sup>, 佐藤英一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>熊大パルス研, <sup>2</sup>首都大SD, <sup>3</sup>ISAS/JAXA

## 1. 緒言

宇宙空間を超高速で飛翔しているスペースデブリと宇宙機との衝突や、惑星形成・進化過程における天体衝突など、超高速衝突現象は宇宙理工学の分野において重要な事象の一つである。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た。その中で、超高速衝突に伴って生じる損傷・破壊に関する研究では、クレーター形状や破片形状の評価、損傷予測式や貫通限界曲線の構築といった衝突現象後の損傷形態・形状評価を中心とした研究が、実験的にも理論的にも数多く行われている。その一方、実時間観測に基づいた高速衝突破壊進展挙動そのものの検証は、前者と比較し圧倒的に少数であり、今後も多くの実験的検証が必要である。そのような状況を踏まえ、我々の研究グループでは、石英ガラスやポリカーボネートといった透明材料を試験材料として用いることにより、可視光による高速衝突損傷進展過程の直接観測を行ってきた<sup>(1-3)</sup>。その中で、超高速衝突現象をシャドウグラフ法により高速度撮影することにより、応力波、クレーター、スポール損傷などの発生・進展挙動の可視化に成功してきた。一方、シャドウグラフ法では損傷が影絵として撮影されるため、損傷構造に関する情報が少ないという欠点も有している。また、シャドウグラフ法による応力波の可視化は屈折率の空間変化率に依存するため、変化率が急峻となる圧縮応力波面の形状を可視化することはできるが、波面がなだらかとなる希薄波の伝播過程や、応力場そのものの分布状況を可視化することは困難である。そこで本研究では、ターゲットからの散乱光による高速度撮影を行うことにより、損傷組織・構造の可視化を試みると共に、偏光シャドウグラフ法による衝突ターゲット内部に生じる応力場変化の撮影を試みた。

## 2. 実験方法

超高速衝突実験は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所（ISAS）に設置されている二段式軽ガス銃を用いて行った<sup>(4)</sup>。衝突体には、直径3.2 mmのアルミナ（ $Al_2O_3$ ）セラミックス球を用いた。衝突体の速度は、弾道軸上に一定間隔で配置された3本のレーザーを横切るタイミングを計測することにより求められる。衝突ターゲットには耐衝撃透明材料として幅広く用いられているポリカーボネートを使用した。ターゲットの形状は80×80×30 mmの板状であり、衝突体を80×80 mmの面に対して垂直に衝突させた。Fig. 1に散乱光撮影および偏光シャドウグラフ撮影の実験配置図を示す。散乱光撮影（Fig. 1 (a)）においては、2台の超高速ビデオカメラを使用した。1台の撮影角度を弾道軸に対して90°とし、弾道軸方向における衝突体の貫入挙動、応力波面伝播および損傷進展挙動の撮像に用いた。もう1台のカメラは、面内方向における損傷の形成・進展を可視化するため、ターゲット後方の弾道軸上に配置した。速度計測システムと連動したディレイパルスにより同時に撮影トリガーをかけることにより、2台のカメラ間の撮影同期をとった。散乱光撮影のため、撮影照明となる2台のフラッシュランプを、各カメラの撮影軸から外れた位置に配置した。

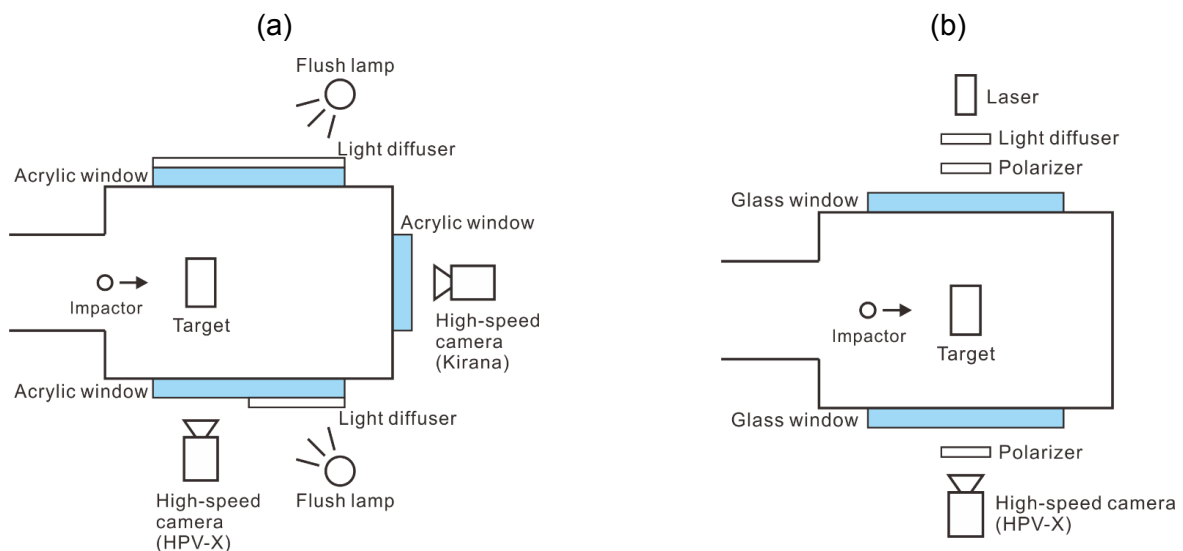


Figure 1. Schematics of experimental configuration for (a) the scattered light imaging and (b) the cross-polarized shadowgraph.

偏光シャドウグラフ撮影 (Fig. 1 (b)) では、高速度カメラおよび光源それぞれの前に偏光板を設置した。光弾性効果を利用して応力場を可視化するため、偏光板の偏光軸が互いに直行するよう配置した<sup>(5)</sup>。光源にはパルスレーザー、CAVILUX® (Cavitar Ltd.) を用いた。レーザーの波長は640 nmでありパルス幅は150 nsである。レーザーの照射タイミングは高速度カメラの露光タイミングと同期されている。本研究で用いた超高速度ビデオカメラはHPV-X (Shimadzu Corp.) およびKirana (Specialised Imaging Ltd.) であり、撮影速度は500 ns/frameとした。

### 3. 結果と考察

Fig. 2に、アルミナ球が4.99 km/sで衝突した際の散乱光撮影画像を示す。側面画像、背面画像ともに倍率は同じである。背面画像中心部に見られる十字の線は、弾道軸上にターゲットを設置する際のガイドラインとしてターゲット裏面に書かれたものである。従来のシャドウグラフ法の影絵イメージと異なり、損傷の表面形状が明瞭に可視化されていることが分かる。ターゲット側面からの撮影画像では、貫入損傷の進展、応力波面の伝播、スポール損傷の形成などの様子が確認できる。貫入損傷先端の形状に着目すると、球形状は維持しておらず、細かな凹凸を持った形状となっていることがわかる。同様の特徴は、衝突後13.0  $\mu$ sにおける背面画像でも確認することができる。この損傷形状は衝突直後から現れていることから、アルミナ球が衝突直後に破壊され、その破片の塊が崩壊しながらポリカーボネート内部へ貫入しているのだと推測される。次に応力波面の伝播挙動に着目すると、衝突により生じた球面応力波がターゲット内部へ伝播し、ターゲット裏面において希薄波として反射している様子が確認できる。衝突後15.5  $\mu$ sにおける側面画像からも明らかとなり、裏面からの反射希薄波によりポリカーボネート内部にスポール損傷が形成される。その後、反射希薄波の伝播に伴いスポール損傷は更に成長していく。また、衝突後20.5  $\mu$ sの側面画像に見られるとおり、成長したスポール破面から新たな応力波のようなものが発生・伝播していることが確認できる。これは、スポール損傷が成長していく中で、ポリカーボネート内部に自由表面が形成されたことにより、スポール損傷発展に寄与していた引張応力が解放され、その応力解放情報が伝播したのではと考えている。裏面画像からスポール損傷の発生・進展の様子に着目すると、側面画像においてスポール損傷の発生が確認され始めた衝突後15.5  $\mu$ sにおいて、明確なスポール破面の形成は確認できないものの、スポール領域における何らかの組

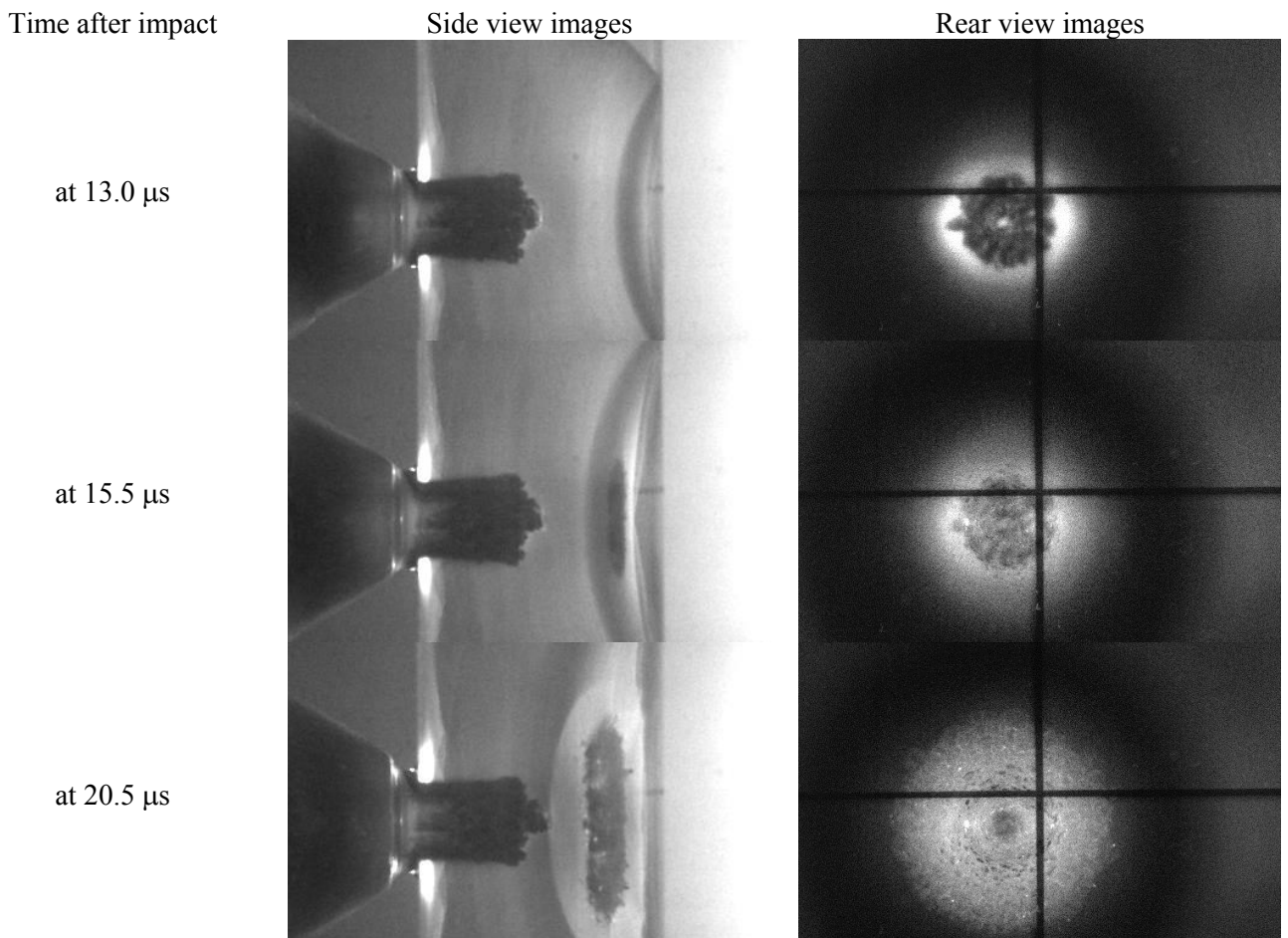


Figure 2. Damage evolution in the polycarbonate impacted by a 3.2-mm alumina ceramics sphere at 4.99 km/s simultaneously obtained in side view and rear view by the scattered light imaging.

Time after impact

Shadowgraph images

Cross-polarized images

at 11.0  $\mu\text{s}$

at 17.5  $\mu\text{s}$

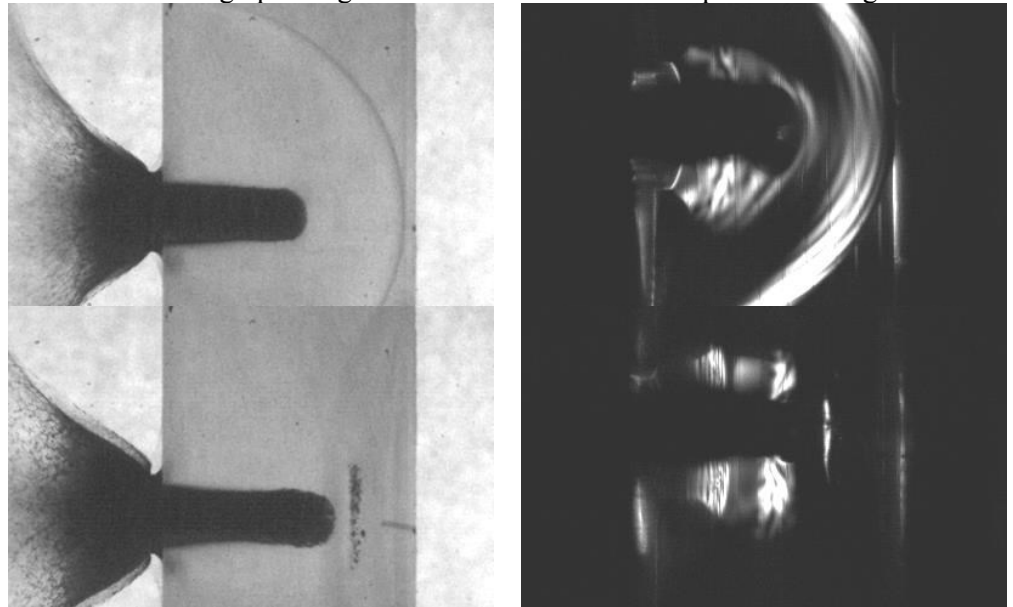


Figure 3. Selected high-speed images captured by means of normal shadowgraphy and cross-polarized shadowgraphy. Impact velocities are 3.71 km/s at the shadowgraph experiment and 3.66 km/s at the cross-polarized shadowgraph experiment.

織構造変化により、衝突後13.0  $\mu\text{s}$ の画像であった明瞭であった貫入損傷のイメージが不明瞭になっていることが分かる。その後、衝突後20.5  $\mu\text{s}$ においては、スポール領域にウロコ状の破面を持った損傷領域がスポール領域全体に渡って形成されている様子が確認できる。このウロコ状の損傷組織が形成・発達するタイミングと、側面画像で確認されたスポール損傷からの応力波伝播のタイミングが一致することから、このウロコ状の損傷組織がスポール破壊により形成された破断面に対応しているのではと考えられる。

Fig. 3 に衝突速度3.66 km/sの条件で撮影された偏光シャドウグラフ画像を示す。比較対象として衝突速度3.71 km/sの条件で撮影された通常のシャドウグラフ画像も合わせて示す。偏光シャドウグラフ画像における透過光強度は応力複屈折に依存するため、応力場の形状を可視化することができる。衝突後11.0  $\mu\text{s}$ の画像において、通常のシャドウグラフ画像では応力破面の形状のみが可視化されているのに対して、偏光シャドウグラフ画像では、応力波が球面状の応力パルスとして伝播している様子が確認できる。また、貫入損傷の周囲に応力場が存在していることも分かる。この貫入損傷周りの応力場は、衝突体の貫入過程で生じた塑性流動に伴う残留応力に起因するものと推測される。裏面での応力波反射の後、Fig.2同様にスポール破面が形成される様子が衝突後17.5  $\mu\text{s}$ におけるシャドウグラフ画像で確認できる。同時刻の偏光シャドウグラフ画像と比較すると、スポール形成のタイミングと希薄波のtrailing edgeがスポール形成箇所へ到達するタイミングと一致していることが分かる。スポール形成のメカニズムは希薄波同士の干渉により生じる急激な引張応力によると理解されている<sup>(6)</sup>。本撮影では、裏面で反射した希薄波と干渉したと考えられる応力波を可視化することには成功していない。その原因として、撮影光学系のアライメントが完全でないことが考えられ、可視化技術のさらなる向上が必要である。今後は、異なる厚みのターゲットを用いた実験を行い、意図的にスポール形成のタイミング・場所を変化させた場合での結果を比較していくことにより、スポール損傷形成と応力場の関係性を評価していこうと考えている。

#### 4. 結言

本研究では、偏光シャドウグラフ撮影や2方向散乱光撮影により、ポリカーボネート内部に形成される超高速衝突損傷の進展過程や応力波伝播過程の可視化を試みた。その結果、散乱光撮影では、損傷形状だけでなく損傷組織も含めた3次元時間発展の情報を取得することに成功した。また、偏光シャドウグラフ撮影により、衝突誘起による応力場の時間変化過程の描像を得られることが示された。これらの情報は、超高速衝突損傷の形成プロセスの解明に寄与するだけでなく、数値シミュレーション画像との直接比較による衝突損傷材料モデルの検証にも大きく役立つものである。今後は、衝突条件を変化させていくことに加え、他の透明材料においても同様の実験を試みていく予定である。

#### 謝辞

本研究はJSPS科研費JP18K04561の助成を受けたものである。本研究における超高速衝突実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所超高速衝突実験共同利用施設において実施されたものである。

## 参考文献

- (1) N. Kawai et al., *Procedia Eng.* **103**, 287 (2015).
- (2) N. Kawai et al., *Procedia Eng.* **204**, 255 (2017).
- (3) 長野 他, *日本機械学会論文集* **84**, 18-00012 (2018).
- (4) N. Kawai et al., *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 11505 (2010).
- (5) E. Strassburger et al., *Proc. 23<sup>rd</sup> International Symposium on Ballistics*, p. 1381 (2007).
- (6) D. A. Shocky et al., *J. Appl. Phys.* **46**, 3766 (1975).