

# 透明材料への超高速衝突における応力伝播および損傷進展の 高速度可視化計測

○川合伸明（熊本大学 パルスパワー科学研究所）  
富崎竜司、淵野祥伍（熊本大学大学院 自然科学教育部）  
長谷川直（宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所）

## 1. はじめに

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[1-3]。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[4]。衝突体には、直径 3.2 mm のアルミニウム合金（A5052）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透明材料として幅広く用いられている PMMA（アクリル）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。散乱光撮影においては、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。偏光シャドウグラフ撮影では、光弾性効果を利用して応力場を可視化するため[5]、高速度カメラおよび光源それぞれの前に偏光板および 1/4 波長板を設置した。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ビデオカメラは、側面方向の撮影では HPV-X（Shimadzu Corp.）、背面方向の撮影では HPV-1（Specialised Imaging Ltd.）であり、撮影速度は HPV-X では 500 ns/frame、HPV-1 では 1 μs/frame とした。

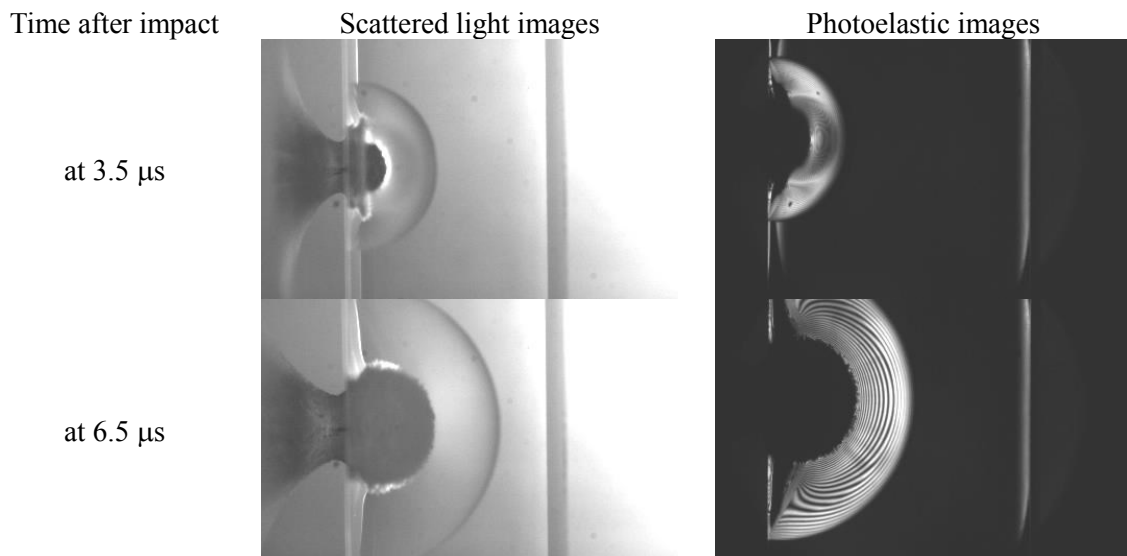


Figure 2. Selected high-speed images captured by means of scattered light imaging and cross-polarized shadowgraphy. Impact velocities are 3.63 km/s at the scattered light experiment and 3.59 km/s at the cross-polarized shadowgraph experiment.

### 3. 実験結果

Fig. 2 に、衝突速度 3.62 km/s の条件で撮影された散乱光側面画像および、衝突速度 3.59 km/s の条件で撮影された偏光シャドウグラフ画像の、衝突現象初期における比較を示す。散乱光画像では、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。また、偏光シャドウグラフ画像においては、透過光強度は応力複屈折に依存するため、衝突により伝播していく応力場の形状が可視化されていることがわかる。まず散乱光画像に着目すると、本衝突条件では Al 球衝突体が衝突後変形・破壊し、半球状のクレータを作りながら PMMA ターゲットに貫入していることが分かる（衝突後 3.5  $\mu$ s）。また、そのクレータを取り囲むように、衝突面側から細かな針状のクラックからなる損傷領域が形成されていく様子も確認できる（衝突後 6.5  $\mu$ s）。この損傷形成の過程を、偏光シャドウグラフ画像と比較していくと、衝突により生じた応力波の伝播領域において、貫入損傷の周囲に伝播する応力波とは異なる応力場が存在し（衝突後 3.5  $\mu$ s）、その応力場に沿って上述の特微的な損傷領域が進展していることが分かる（衝突後 6.5  $\mu$ s）。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。塑性変形領域と弾性変形領域との境界には大きなひずみ不整合による応力が生じると考えられ、その応力を解放させる形で、境界面に沿って特微的なクラック損傷が進展していったのではと推測される。

Fig. 3 には、Fig. 2 で示した散乱光撮影実験において、更に時間が経過した際に生じた損傷形成の様子を、同時に撮影した背面画像とともに示している。時間の経過と共に、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 11.5  $\mu$ s における側面画像からも明らかとなっており、裏面からの反射希薄波により PMMA 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。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 11.5  $\mu$ s において、スポール領域に細かなウロコ状の破面を持った損傷領域が形成されている様子が確認できる。このことから、この細かな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と結論付けられる。

Time after impact

Side view images

Rear view images

at 11.5  $\mu$ s

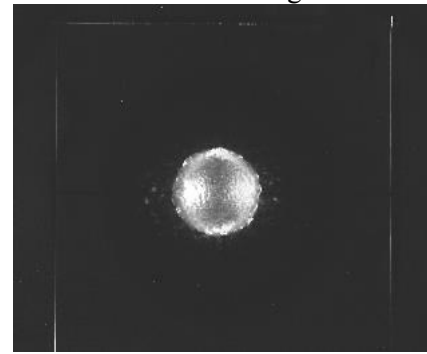
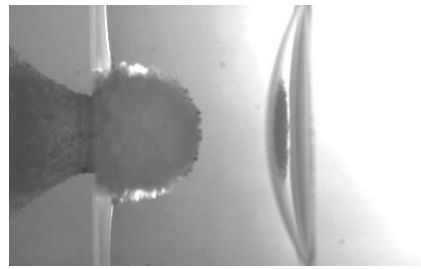


Figure 3. Damage evolution in the PMMA target impacted by a 3.2-mm aluminum-alloy sphere at 3.63 km/s simultaneously obtained in side view and rear view by the scattered light imaging.

#### 4. まとめ

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、PMMA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す。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す。

#### 参考文献

- [1] Kawai, N., Zama, S., Takemoto, W., Moriguchi, K., Arai, K., Hasegawa, S., and Sato, E., "Stress Wave and Damage Propagation in Transparent Materials Subjected to Hypervelocity Impact", *Procedia Engineering*, Vol. 103 (2015), pp. 287-293.
- [2] Kawai, N., Kuroda, Y., Nagano, M., Hasegawa, S., and Sato, E., "Stress-wave Propagation and Damage Formation Associated with Hypervelocity Penetration into Polycarbonate", *Procedia Engineering*, Vol. 204 (2017), pp. 255-261.
- [3] 長野幹雄, 川合伸明, 長谷川直, 北菌幸一, 佐藤英一 "微小デブリの超高速衝突を受けた石英ガラス板における球面応力波による三次元内部損傷の進展挙動", *日本機械学会論文集*, Vol. 84, No. 863 (2018), 18-00012.
- [4] Kawai, N., Tsurui, K., Hasegawa, S., and Sato, E., "Single Microparticle Launching Method Using Two-stage Light-gas Gun for Simulating Hypervelocity Impacts of Micrometeoroids and Space Debris", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 81 (2010), 115105.
- [5] Lamberson, L., Eliasson, V., and Rosakis, E.J., "In Situ Optical Investigation of Hypervelocity Impact Induced Dynamic Fracture", *Experimental Mechanics*, Vol. 52 (2012), pp. 161-170.