

# 高速度衝突閃光：多孔質メテオロイドの場合

柳澤正久、青井宏樹、海老名良祐、高橋悠太、竹市真理子、山下広大（電気通信大学）  
長谷川直（ISAS/JAXA）

数 km/s という高速度で弾丸が衝突すると閃光を発する（衝突閃光）。弾丸が緻密な場合と多孔質な場合とで閃光強度に差があるだろうか。この差が大きければ月面衝突閃光の明るさからメテオロイドの衝突エネルギー（衝突体の運動エネルギー）を推定する際に、実験室での衝突閃光の測定結果（弾丸は緻密）をそのまま適用できないことになる。この問題を明らかにするために室内実験を行った。閃光は最初のパルスと、それに次ぐ衝突蒸気雲からのものに分けることができる。今回は、パルス期間の閃光放射エネルギーが、衝突エネルギーの何%になるかを、衝突体の空隙率を変化させて実験を行い計測した。多孔質の方がこの割合は約1桁大きいことが分かった。

## 1. 背景と目的

衝突閃光のエネルギーが、衝突エネルギーの何%になるかは、発光効率 (Luminous efficiency) と呼ばれ、主に室内実験により研究されてきた [1, 2]。それらの値は、獅子座流星体の月面衝突閃光について推定された発光効率 (0.2% [3, 4]) よりも一桁以上小さい。この違いの理由としては、月面閃光 (数 10 km/s) と室内実験 (数 km/s) での衝突速度の差が考えられる。一方、実験で用いられる弾丸が緻密な物質でできているのに対し、流星体が多孔質であることも影響しているかも知れない [5]。

これまで多孔質弾丸による高速衝突実験が行われたことはない。発射時の大きな加速で、弾丸が破壊あるいは圧密されてしまうからである。柳澤と池上 [5] は、弾丸より十分小さな多孔質標的への衝突は、多孔質弾丸の平面への衝突と等価であるとし、微小多孔質標的を使った衝突実験で衝突閃光を測定することを提案した。

我々は、この提案に基づいて実験を行い、微小標的が緻密な場合と多孔質な場合とで閃光の強度や時間変化に違いがあるかどうかを調べた。衝突閃光は、最初のパルス状の閃光とそれに次ぐ蒸気雲からの閃光に分けることができる。今回は、2010 年度に行われた実験について、パルス状の閃光強度について報告する。

## 2. 実験方法

ISAS/JAXA の新二段式軽ガス銃で、直径 7 mm のナイロン 66 球を 6 km/s ( $\pm 5\%$ ) で発射し、微小標的に衝突させる。標的材質には弾丸と同じナイロン 66 を採用した。緻密標的は丸棒あるいはシートを加工して作った。一方、多孔質標的は糸を解して得られたナイロン繊維 (太さ 15  $\mu\text{m}$ ) をホルダーに詰め

250-260  $^{\circ}\text{C}$  で 5 分間加熱して製作した。空隙率は 5-76 % である。標的の形状は直径 0.6-1.1 mm、高さ 0.5-1.2 mm の円柱である。

弾丸は微小標的に衝突後、後方の検証板 (ウィットネスプレート) に衝突する (図 1)。検証板にできた貫通孔の位置から弾道を求め、微小標的が弾丸のどこに衝突したかを見積もる (正面衝突したか、かすったか)。

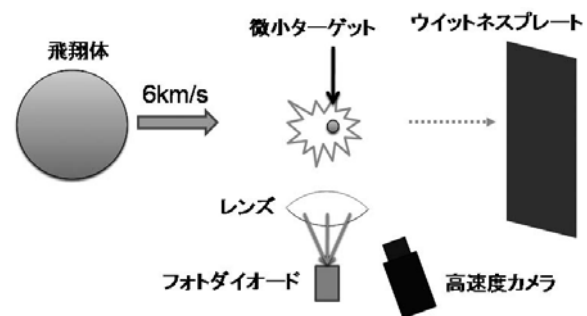


図 1. 実験方法. 左から飛んできた弾丸が静止している微小標的に衝突し閃光を発する。

衝突閃光の観測には、高速度カメラや近赤外線フォトダイオードも用いたが、今回は以下の測定器のデータを解析した。

- ・フォトメーター1 (PIN PD) : PIN Si フォトダイオード (浜フォト S3071) とアンプ (浜フォト C8366) からなる。感度波長範囲は 400-1100 nm であり、フィルターは使っていない。焦点距離 55mm (F1.8) のレンズを付け、視野は微小標的の周辺直径約 8 cm の範囲に限定されている。遮断周波数は 10 MHz 以上である。

- ・フォトメーター2 (APD-1) : Si アバランシェ・フォトダイオード (浜フォト S3551-13)。感度波長範囲は 400-900 nm であり、フィルターは使っていない。レンズは使わず広い範囲の光を測定する。遮断周波数は 10 MHz 以上である。

- ・フォトメーター3 (APD-2) : 同上、ただし (浜フォト S3551-05)。波長範囲は 500-1000 nm。

### 3. 結果と考察

14回のshotについてデータが得られた。上記の3つの測定器から得られた信号の一例(shot943)を図2に示す。縦軸は光強度に比例している(フォトメーター1以外は、信号はマイナスにでる)。衝突の $\pm 5 \mu\text{s}$ を表示するよう時間軸を拡大している。最初のパルスとそれに次ぐ蒸気雲からの発光を区別することができる。

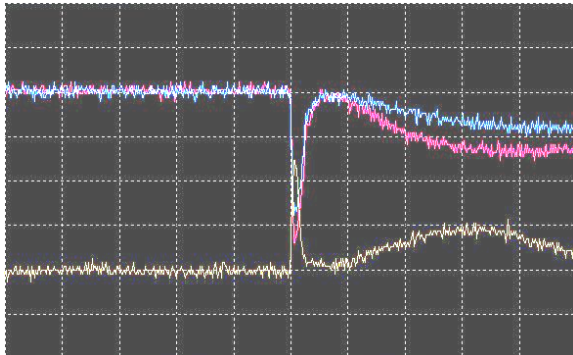


図2. 下の黄色線がフォトメーター1の波形、上の赤線と青線がそれぞれフォトメーター2, 3の波形. 衝突の $\pm 5 \mu\text{s}$ の波形.

パルス部分の継続時間は約 $0.2 \mu\text{s}$ で、微小標的のサイズ $1 \text{ mm}$ を $6 \text{ km/s}$ の弾丸が通過する時間 $0.18 \mu\text{s}$ にほぼ等しい。この期間の強度を時間積分し、閃光エネルギー[J]に換算した。衝突エネルギー $((1/2) \times (\text{微小標的質量}) \times (\text{衝突速度})^2)$ で規格化した閃光エネルギーを、標的の空隙率との関係として図3(a)に示す。白抜きのプロットは、衝突の瞬間、測定器から衝突点が見えないことを表している( $\phi 7 \text{ mm}$  ナイロン球の陰になっている)。データのバラつきは大きいですが、空隙率の増加とともに閃光強度も増加している。図3(b)には、規格化した閃光エネルギーと入射角の関係を示した。入射角は、 $\phi 7 \text{ mm}$  ナイロン球に微小標的が衝突したと考えた時、球上で衝突点に立てた法線から測った微小標的の入射角である。閃光強度の入射角依存性は見られない。

#### 参考文献

[1] Eichhorn, G., Analysis of the hypervelocity impact process from impact flash measurements, *Planet. Space Sci.*, **24**, 771-781, 1976. [2] Kadono, T. and A. Fujiwara, Observation of expanding vapor cloud generated by hypervelocity impact, *J. Geophys. Res.*, **101**, 26097-26109, 1996.

[3] Bellot Rubio, L. R., J. L. Ortiz, and P. V. Sada, Luminous efficiency in hypervelocity impacts from the 1999 Lunar Leonids, *Astrophys. J.*, **542**, L65-L68, 2000. [4] Bellot Rubio, L. R., J. L. Ortiz, and P. V. Sada, Observation and interpretation of meteoroid impact flashes on the moon, *Earth, Moon and Planets*, **82-83**, 575-598, 2000. [5] 柳澤正久, 池上裕美, 多孔質衝突体による衝突閃光実験の提案, スペース・プラズマ研究会(平成18年度)、宇宙航空研究開発機構、宇宙科学研究本部、68-71、2007.

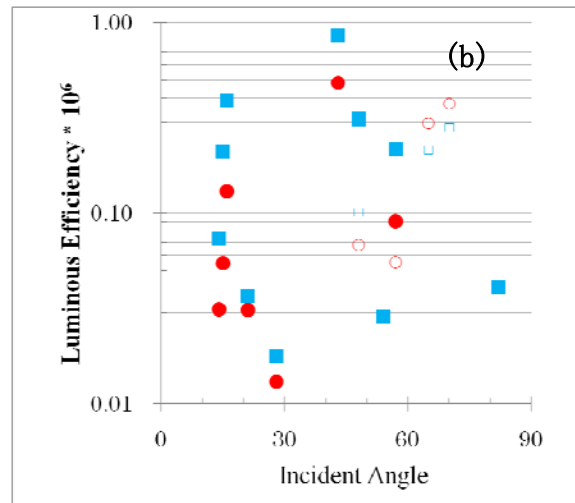
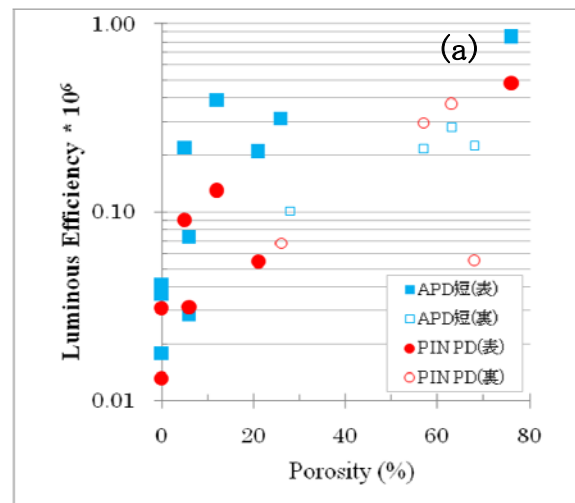


図3. 縦軸は規格化した発光強度の $10^6$ 倍. (a)微小標的の空隙率との関係、(b)は微小標的の入射角との関係. APD短(青)はフォトメーター2(APD-1), PIN PD(赤)はフォトメーター1(PIN PD). 幾何学的位置関係が、センサーから衝突点が見える場合は表(塗潰し), 見えない場合は裏(白抜き).

謝辞: 本研究は科研費(19540443)およびISAS/JAXAスペースプラズマ共同研究設備の支援を得て行われた。