

衝突閃光の測光

柳澤正久、石博勇介、田中慎一郎、青井宏樹、中村一貴、畑中祐介（電気通信大学）
長谷川直、大坪貴文（ISAS/JAXA）

弾丸が平面に数 km/s という高速度で衝突すると閃光を発する（衝突閃光）。衝突エネルギー、すなわち弾丸の運動エネルギーの何%が閃光の放射エネルギーになるかを発光効率と呼ぶ。弾丸が緻密な場合と多孔質な場合で、発光効率に差があるだろうか。この問題を明らかにするために室内実験を行った。データ数は十分とは言えないが、多孔質の方が発光効率は大きいようである。

1. 背景と目的

発光効率が分かると、流星体や小惑星破片が月面に衝突する際に発する閃光（月面衝突閃光）の観測から衝突エネルギーを見積もることができる。観測数が増せば、どの程度のエネルギーの衝突がどの位の頻度で起きているかを知ることができ、月面活動での安全性を確保する上で重要なデータとなる。

どの流星群に属する流星体かが推察できる場合には、月面への衝突速度が分かることからその質量が計算でき、母彗星からどのようにして流星体が放出されるかを研究する際の貴重なデータとなる。また、発光効率がどのようなメカニズムで決まるかは、衝突科学にとっても興味深い問題である。

獅子座流星体の月面への衝突による閃光の観測からは、発光効率が 0.2% と見積もられている [1, 2]。この値は室内実験で得られた効率 [3, 4] よりも一桁以上大きい。この違いの理由としては、まず月面閃光（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、流星体は多孔質と考えられることから、緻密 vs 多孔質という弾丸物質の物性の違いが原因である可能性も指摘されている [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。

本研究では、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発光効率に違いがあるかどうかを調べる。

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 球を約 6 km/s で発射し、

微小標的に衝突させる。標的材質は、緻密な標的も多孔質の標的も共に作り易いものであることが必要である。また、できるだけ実験のパラメーター数を減らして、解析、考察がやり易いようにしたい。本実験では、弾丸の材質と同じナイロン 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 μm ）をホルダーに詰め 250 $^{\circ}\text{C}$ で 1 分間加熱して製作した。空隙率は約 50 % である。標的の形状はどちらも直径約 1 mm、高さ約 1 mm の円柱である。

自作の持具に張られた太さ 15 μm のナイロン 66 繊維に、できるだけ微量の接着剤（セメダイン・スーパー X2 クリア）で標的を接着した。標的の姿勢（円柱の対称軸の方向）は任意である。

弾丸は微小標的に衝突後、後方のウィットネス・プレートまたはウィットネス・ブロックに衝突する（図 1）。プレートにできた貫通孔あるいはブロックに生じたクレーターの位置から弾道を正確に求め、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）。

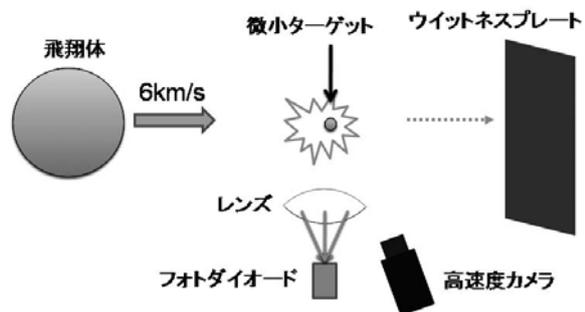


図 1. 実験方法. 左から飛んできた弾丸が静止している微小標的に衝突し閃光を発する。

衝突閃光は次のような機器で測定した。

- ・高速度カメラ（島津 HPV1）： 10^6 frame/s（各フレームの露光時間は 0.5 μs ）で衝突蒸気雲（自発光している）が広がっていく様子をモノクロで 102 frame 撮影する。画像解析により、明るさの時間変化を 1 μs 毎に得る。

・高速度カラーカメラ(E2)：フレーム間隔は最短でも 33 μ s (6 km/s の弾丸は 20 cm 進む)なので、衝突閃光は 1、2 フレームに写るだけであるが、色情報を得ることができる。

・フォトメーターV(PM_V)：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 320-1060 nm であり、フィルターは使っていない。レンズで視野を微小標的の周辺直径約 8 cm の範囲に限定している。遮断周波数は 10 MHz 以上である。閃光の時間変化を高い時間分解能で測定する。

・フォトメーターIR(PM_IR)：InGaAs フォトダイオード(浜フォト G5852-01)とアンプ(自作)からなる。感度波長範囲は 1000-2000 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近赤外線を測定する。遮断周波数は 100 kHz 程度。

・分光器(Ocean Optics USB4000)：焦点距離 11 mm、開口数 0.25 のレンズで集めた光を石英光ファイバー経由で分光器に導入する。感度域は 200-1100 nm。微小標的への衝突による閃光のスペクトルは光量不足のために得られていないが、後方のウィットネス・ブロックに衝突した際の閃光スペクトルが得られた。

これら以外に、家庭用ビデオカメラ、デジタル一眼レフカメラによる撮影を補助的に行った。

3. 結果と考察

7 回の shot について、高速度カメラ(HPV1)および2つのフォトメーターによって得られた発光効率を表 1 に示す。HPV1 と PM_V の感度波長範囲はほぼ同じと考えられるが、1 桁以上の違いがある場合がある。視野の違いや HPV1 画像で一部の画素が飽和しているのが原因かも知れない。にもかかわらず、全体としては多孔質微小ターゲットの場合の方が発光効率は大きいようである。

PM_IR による発光効率は可視光での値に比べて明らかに大きい。この値は、発光効率を計算する際に赤外線まで含めた Kadono and Fujiwara [4]の結果に近く、放射エネル

ギーの大部分を赤外線が占めていることを示唆している。

微小標的衝突後の弾丸が Al, Fe, Cu のウィットネス・ブロックに衝突した際の閃光スペクトルには C₂ ラジカルバンドが顕著に表れている。微小標的への衝突の閃光スペクトルでも C₂ バンドが卓越しているのかも知れない。

表 1. 各方法により得られた発光効率

| Shot | HPV1 | PM_V | PM_IR | 備考 |
|------|---------|---------|---------|-----|
| 352 | 2.8E-05 | --- | 1.9E-04 | 多孔質 |
| 353 | 2.5E-05 | 2.1E-06 | | 多孔質 |
| 354 | 6.6E-06 | 5.5E-07 | 1.3E-04 | 多孔質 |
| 355 | --- | 3.7E-09 | 9.0E-06 | 緻密 |
| 359 | 1.9E-08 | 3.6E-08 | | 緻密 |
| 360 | 2.2E-09 | 1.7E-08 | | 緻密 |
| 362 | 1.2E-07 | 4.6E-08 | | 緻密 |

参考文献

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