

様々な標的へのナイロン，Al 球の高速度衝突による閃光

柳澤正久（電気通信大学）、田中孝治、相馬央令子（宇宙研）

塩田一路（サレジオ高専）、小林正和（東海大）、濱谷尋可（工学院大）

秒速数 km での高速度衝突における閃光は、最初のスパイク光と、それに次ぐジェットイング雲の発光に分けることができる。本研究では、6~7 km/s でのナイロン 66 または Al 球の、CFRP、Al、Cu、ガラスのブロックへの衝突における閃光を Si フォトダイオードで測定し、スパイク光について解析を行った。Al 球→CFRP ではスパイク光が見られなかった。また、ナイロン球衝突でのスパイク光強度は、はっきりした標的材質依存性を示さなかった。

1. 背景と目的

Jean and Rollins (1970)は、直径 3 mm の Ti 球の Cd 平板への 3.5 km/s 正面衝突における閃光を、継続時間 1 μ s 以下のスパイク光とそれに次ぐ数 μ s のテイル光に分類した [1]。前者はジェットイング [2]の開始時に表面に顔を出した高温領域から、後者はジェットイングで放出されたガスから発していると解釈された。一方、柳澤、他(2012)は、直径 7 mm のナイロン 66 球のナイロン 66 ブロックへの 7 km/s 正面衝突を超高速度カメラで撮影し、貫入しつつあるナイロン球が強く光っていることを発見した [3]。この発光は観測されたスパイク光に対応している。ナイロン球後側の衝撃波通過前の部分も光っていることから、衝撃波通過後の高温高圧領域から発せられた光が半透明のナイロンを通して観測されたものと解釈された。弾丸が

透明あるいは半透明な場合には、Jean and Rollins (1970)が考えた以外のスパイク光の原因があることになる。

スパイク光が衝撃波通過後の高温高圧領域から発せられた光であるならば、スパイク光強度は衝突速度や標的の物性に依存することが考えられる。本研究では、スペース・デブリ・バンパーへの適用が考えられる CFRP (炭素繊維強化プラスチック) への衝突実験 [4]、および高速度衝突時のマイクロ波放射測定のための Cu、Al、ガラスへの衝突実験 [5]において衝突閃光を観測し、スパイク光の材質依存性を調べる。

2. 実験方法

宇宙研/JAXA の新二段式軽ガス銃を用いた。実験パラメータを表 1 に示す。

表 1. 実験パラメータ

Shot #	衝突速度 [km/s]	弾丸 (注 1)	標的		衝突角度 [°] (注 2)	標的面と視線のなす角 [°]	真空度 [Pa]
			素材	厚さ [mm]			
2211	6.399	ナイロン	CFRP	3	30	6	9.70
2212	6.091	Al	CFRP	3	30	6	5.50
2213	6.436	ナイロン	CFRP	3	90	11	6.40
2214	6.106	Al	CFRP	3	90	16	5.80
2215	6.302	ナイロン	CFRP	3	60	14	6.50
2216	6.124	Al	CFRP	3	60	15	8.50
2217	6.411	ナイロン	CFRP	3	120	15	0.01
2218	6.065	Al	CFRP	3	120	15	5.30
2219	6.358	ナイロン	Cu	3	60	15	7.40
2220	6.717	ナイロン	Al	25	90	12	5.80
2221	6.686	ナイロン	Al	10	90	12	5.60
2222	6.486	ナイロン	ガラス	20	90	12	10.10
2223	6.638	ナイロン	Al	50	90	12	9.80
2224	6.628	ナイロン	Al	2	90	12	5.80
2225	6.652	Al	Al	30	90	12	7.30
2226	6.686	ナイロン	ガラス	19	90	14	3.40

(注 1) 球形、直径と質量は、ナイロン 66 では 7 mm, 0.218 g、Al では 3 mm, 0.047 g である。

(注 2) 衝突角度は、標的表面と弾道のなす角である。

衝突閃光の測定には、以下のコンポーネントから成るフォトメータを使用した；(1) PIN Si フォトダイオード(浜松フォトニクス S3071、感度波長範囲は 320-1060 nm)；(2) アンプ(浜松フォトニクス C8366)；(3) レンズ(焦点距離 55 mm、F1.8、または焦点距離 8 mm、F1.4、共にフィルターなし)。遮断周波数は 40 MHz である。前者のレンズでの視野は衝突点を中心とした直径約 8 cm の範囲であり、後者のレンズではこれより広い。いずれの場合でもスパイク光を発生する領域は視野からはみ出すことはない。なお、標的表面を真横より少し上側から見る方向から観測した(表 1 参照)。

衝突の様子は、高速度カメラ HPV-X(島津)を用いて 2 μs/コマ(shot2226 のみは 100 μs/コマ)で撮像した。カメラは、衝突面を真横から見る位置に設置された。

3. 結果

閃光の光度[W]を求める際、閃光は 4πステラジアンに等方的に放射されると仮定した。また、フォトダイオードの感度は波長にかかわらず 0.6 A/W であると近似した。

弾丸質量や速度が違う実験の結果を比較するために、時間と光度を次のように規格化した。

$$\tau = \frac{t}{t_0} \quad (t_0 = \frac{d}{v_0 \sin \theta}) \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{P}{P_0} \quad (P_0 = \frac{1}{2}mv_0^2) \quad (2)$$

ここで、 t は衝突後の時間、 d は弾丸直径、 v_0 は衝突速度、 θ は衝突角度である。また、 P は光度、 m は弾丸質量である。

ナイロン球を CFRP に衝突させた場合について、 Π を τ の関数として図 1 に黒線で示す。また、参考のためにナイロン球をナイロンブロックに衝突させた場合の結果を緑線で示す(3例とも 6.99 km/s の正面衝突)[3]。図 2 にはナイロン球を無機材質である Cu、Al、ガラスに衝突させた場合を黄色、青、赤色の線で示す。また、図 3 には Al 球を CFRP および Al に衝突させた場合を示す。時刻の 0 点は光り始めをオシロスコープのデータ上で目で見て判断した。

図 1、2 では、 $\tau=0 \sim 0.6$ にスパイク光が

見られる。その後光度が増加している場合があるが、これはジェッティングによる発光である。今回は詳しく調べないが、実験チェンバー内の真空度が高い時にこの光の立ち上がりが急峻なようである。一方、弾丸が Al の場合の図 3 では Al 標的の場合を除き、はっきりしたスパイク光が見られない。

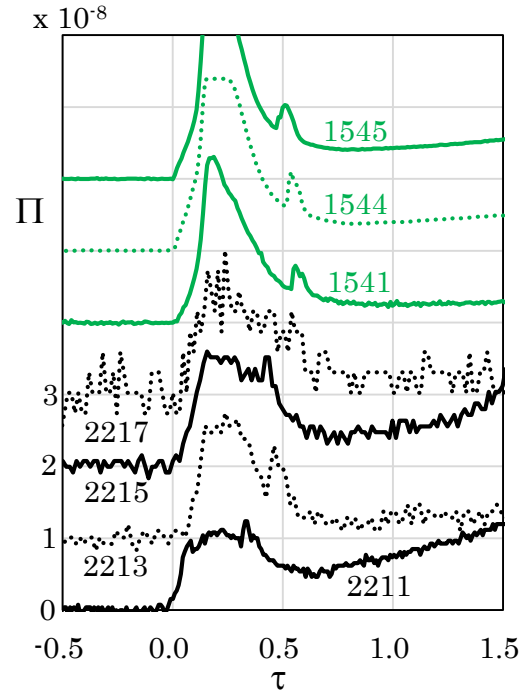


図 1. ナイロン球の衝突について、規格化した光度を、規格化した時間の関数として示す。規格化時間の 1 は略 1 μs である。黒線、緑線はそれぞれ CFRP 標的、ナイロン標的に対応する。実線と点線には特に意味がない。数字はショット番号である。2211 以外では Π に下駄をはかせてプロットしている。

スパイク光は $\tau = 0 \sim 0.5$ に起きていると仮定して、この期間で光度を時間積分しスパイク光のエネルギー E を求めた。Al 球を CFRP に衝突させた場合にはスパイク光は観測されなかったが、この場合にも機械的に計算した。次式に従って弾丸の運動エネルギーで規格化し、衝突速度および真空度との関係調べた(図 4、5、[3]のデータを含む)。

$$\eta = \frac{E}{\frac{1}{2}mv_0^2} \quad (3)$$

これらのパラメータとのはっきりした関係は見出せない。弾丸がナイロンの場合には

Al の場合の数倍大きいですが、標的の材質には依存しないようである。

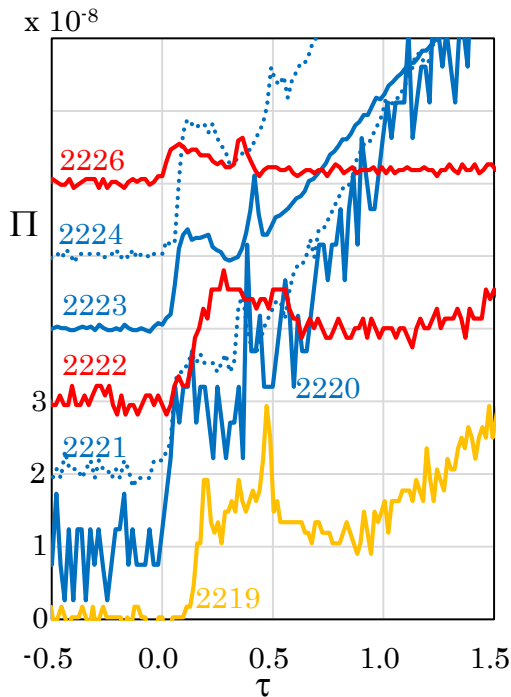


図 2. ナイロン球を無機材質の標的に衝突させた場合の光度の時間変化. 黄色, 青, 赤の線はそれぞれ Cu, Al, ガラスの標的の結果を示す. 詳細は図 1 参照.

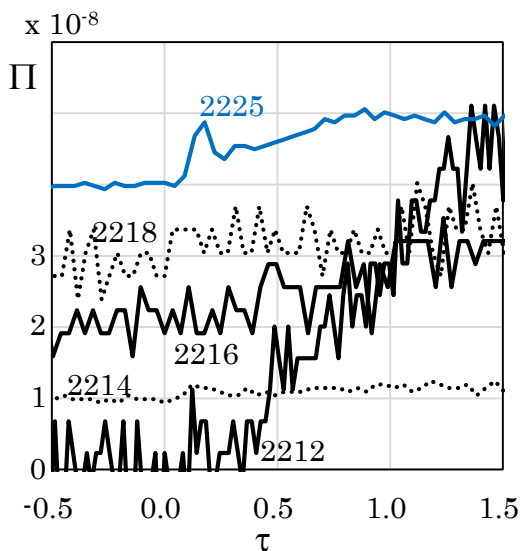


図 3. Al 球を CFRP (黒線) および Al (青線) に衝突させた場合の光度の時間変化. 詳細は図 1 参照.

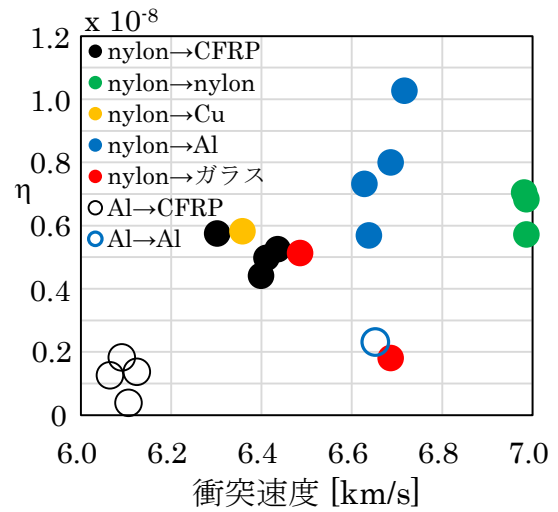


図 4. 規格化したスパイク光エネルギー η と衝突速度の関係.

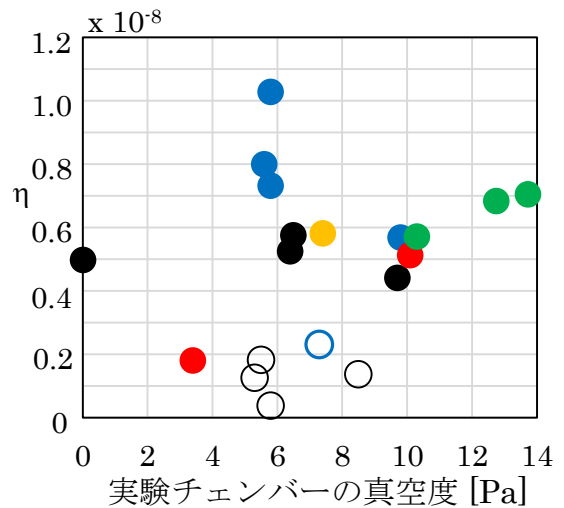


図 5. 規格化したスパイク光エネルギー η と実験チャンバー内の真空度の関係.

4. 考察

ナイロン球の衝突ではスパイク光がはっきりしており、Al 球の場合には殆どないことは、半透明のナイロン球を通して出てくる光の寄与が大きいことを示唆している[3]。一方、Al 球を Al 標的に衝突させた場合にはスパイク光が弱いながらも見られるのに対し (shot 2225)、CFRP 標的の場合にはスパイク光が観測されなかったが、その原因は分からない。

スパイク光エネルギーが実験チャンバー内の真空度に依存しないのは、衝突で放出されたガスが発光の原因ではないことを示している。本実験では、チャンバー内残存気体の平均自由行程は弾丸サイズと同程度である。ガスが原因なら真空度との関係が見られてもよさそうである。実際、スパイク光の後のジェットングによるものと思われる光度の上昇は真空度と関係があるようである。

スパイク光エネルギーが衝突速度にも標的材質にもはっきりした依存性を示さないのは不思議である。単純に考えれば、衝突による物質の温度上昇はこれらのパラメータと関係するはずである。そして温度が高ければより強い閃光が期待される。ナイロンの相転移や電離などにより最高温度に限界があるのかも知れない。つまり衝突エネルギーが光放射とは関係ないものに費やされてしまうのかも知れない。一方、スパイク光エネルギーの源泉は 1 次元的な衝撃波圧縮ではなく、シアアー(shear)による加熱なのかもしれない。

ポリカーボネイト球の高速衝突では、ナイロン球の場合のような強いスパイク光は観測されないという情報もある[6]。ナイロン球が特殊なメカニズムによって発光している可能性もあり、今後、ナイロン以外のプラスチックを使った実験が必須であろう。

参考文献

[1] Jean, B. and Rollins, T. L., Radiation from Hypervelocity Impact Generated Plasma, *AIAA Journal*, **8**, 1742-1748, 1970.

[2] Vickery, A. M., The Theory of Jetting: Application to the Origin of Tektites, *Icarus*, **105**, 441-453, 1993.

[3] 柳澤正久, 海老名良祐, 高橋悠太, 黒澤耕介, 長谷川直, 杉田精司, 松井孝典, ナイロン-ナイロン衝突の超高速撮影, スペース・プラズマ研究会(平成 23 年度), 2012 年 2 月 27-28 日.

[4] 濱谷尋可, 桑折仁, 塩田一路, 田中孝治, 矢ヶ崎隆義, デブリシールド開発のための超高速斜め衝突現象におけるイジェクターの挙動に関する基礎研究, スペース・プラズマ研究会(平成 25 年度), 2014 年 2 月 27-28 日.

[5] 小林正和, 田中真, 牧謙一郎, 相馬央令子, 田中孝治, 超高速衝突に伴う電氣的現象に関する基礎研究, スペース・プラズマ研究会(平成 25 年度), 2014 年 2 月 27-28 日.

[6] 黒澤耕介, 情報提供, 2014.

謝辞

実験ではスペースプラズマ実験室の長谷川直氏、鈴木絢子氏、田端誠氏に大変お世話になった。本研究は宇宙研/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。