

# ナイロン-ナイロン衝突の超高速撮影

柳澤正久、海老名良祐、高橋悠太（電気通信大学）

黒澤耕介、長谷川直（宇宙研/JAXA）

杉田精司（東大）、松井孝典（千葉工大）

直径 7 mm のナイロン 66 球がナイロン 66 のブロックに数 km/s で衝突すると閃光を発する。閃光は最初のスパイク光と、それに次ぐジェットングあるいは衝突蒸気雲の発光と思われるものに分けることができる。スパイク光の正体を突き止めるために超高速カメラで 50 ns 毎の撮像を行った。その結果、半透明のナイロン球そのものが光っていることが確認できた。衝撃波圧縮を受けた高温部分（弾丸、標的物質が不透明なら外からは見えない）からの光が半透明のナイロン球を通して放射されるのがスパイク光の原因だと考えられる。

## 1. 背景と目的

衝突閃光強度の弾丸の空隙率への依存性を調べるために、平成 19 年度から 22 年度にかけて、様々な空隙率のナイロン 66 弾丸をナイロン 66 標的に衝突させるのと等価な実験を行った[1, 2]。閃光の時間変化を見ると、殆どの実験で最初にスパイク状の波形が観測された(図 1 参照)。スパイク幅は弾丸直径を衝突速度で割った時間にほぼ等しい。

衝突閃光の時間変化やスペクトルを観測することによって、月面への流星体の衝突など自然界での衝突について何らかの情報を得ることができる[e.g. 3]。現状では、自然界の衝突について、スペクトルや詳しい時間変化が分かるような観測は行われていない。スパイク光が観測されたという報告もない。しかし、将来の観測に備えスパイク光の原因を突き止めておくことは有意義であろう。

## 2. 実験方法

宇宙研/JAXA の新二段式軽ガス銃で、直径 7 mm のナイロン 66 球を 7 km/s で発射し、ナイロン 66 ブロックに衝突させる。ブロックは 80x80x40 mm の直方体で 80x80 mm の面の真中に垂直に衝突させる。

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、感度波長範囲は約 400-1100 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 開放、フィルターなし)。遮断周波数は約 40 MHz である。視野は衝突点を中心とした直径約 8 cm の範囲に限定されており、衝突面から測って約 17 度の方向から測光を行う。

衝突の様子は、超高速カメラ nac ULTRA Neo[4]で撮像された。最速 5 ns おきの画像

が 12 コマ(制約はあるが 24 コマ可能)取得できるが、今回紹介するデータは 50 ns おきに撮像されたものである。カメラは、衝突面を真横から見る位置に設置された。

撮像開始のトリガにはフォトメータの信号を使った。このカメラはトリガ前の画像を取得できないため、最初の画像は、フォトメータが閃光を検知し始めてから(おそらく弾丸が標的に接触してから)0.3  $\mu$ s 経過してから撮像された。

## 3. 結果

超高速カメラの最適な設定値を捜しながら、またトリガ方法を替えながら 6 回の shot を行った。スパイク光の原因を捉えているのは 5、6 回目の shot であるが、より分かり易い最後の shot 1545 について結果を述べる。衝突速度は 6.99 km/s であった。図 1 にフォトメータの出力電圧の時間変化を示す。

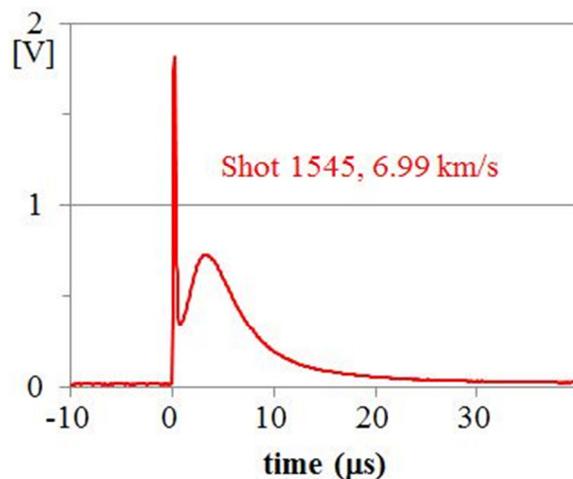


図 1. フォトメータ出力電圧の時間変化. 衝突閃光は最初のスパイク光と、それに次ぐジェットングあるいは衝突蒸気雲の発光と思われるものに分けることができる。

スパイク光の部分拡大して表示したのが図2である。出力電圧は最大値付近で飽和している。この図には、超高速カメラの露光のタイミングを示すモニタ信号も示す。図中の1から12はフレーム番号を表している。露光は50 ns おき、各フレームの露光時間も50 ns である。フォトメータ、超高速カメラとオシロスコープを繋ぐ同軸ケーブルは約4 ns/m の遅延をもつが、10 m もあるような長いケーブルは使っていないはずなので、図2に示した2つの信号の時間のずれは <20 ns、つまり半フレーム以下であろう。

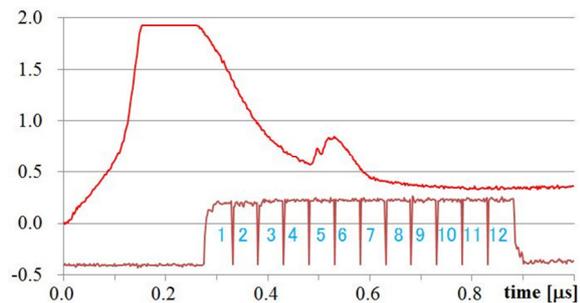


図2. スパイク光強度の時間変化. 衝突後1  $\mu\text{s}$  までのフォトメータ出力電圧[V]を示す. 下側は超高速カメラのモニタ信号(元の値を4で割り、更に0.4 V引いてある)で12フレームの露光のタイミングを示す.

超高速カメラの画像を図3に示す。第1フレームの撮像時には既にスパイク光のピークを過ぎているが、標的内に少し貫入しかけた弾丸が光っている様子が捉えられている。真横からの撮像なのではっきり分らないが、標的面の衝突点近傍も光っているようである。

図2の0.55  $\mu\text{s}$  時点には、フォトメータ信号に第2のピークがある。このピークはフォトメータのデータのみ取得できた他の2つのshotにも存在し、再現性のあるものである。図3では第6フレームに相当し、弾丸の背面が一瞬明るくなっているのが確認できる。

#### 4. 考察

1次元モデルでは、ナイロン同士が7 km/s で衝突した場合、衝撃波の伝播速度は8 km/s である[5]。衝撃波が直径7 mm の弾丸の背面まで達するのは弾丸と標的の接触後0.9  $\mu\text{s}$  後、つまり第12フレームの露光時である。衝撃波が通過し高温になった部分だけが光

って写るとすると、光る部分がナイロン球に広がっていく様子が超高速カメラで捉えられるはずであり、第1フレームからナイロン球全体が光っていることは説明できない。

しかし、ナイロン球は透明ではないが磨りガラスのように半透明である。光が内部で散乱されて全体が光っていると考えれば説明できる。Ernst and Schultz (2007) [6]は、直径約6 mm のガラス球とアルミニウム球を軽石の粉末に1.6~1.9 km/s で衝突させ、スパイク光が前者では観察され、後者では観測されないことを見出した。そして、スパイク光の原因を、衝撃波圧縮され高温になった弾丸と標的の接触面近傍が、透明な弾丸を通して見えるためだと考えた。今回の実験結果は、この考えを超高速カメラの映像ではっきり示したものと言える。

1次元衝撃波モデルでは、衝撃波が弾丸の背面に到達するのは、第12フレームに相当する時刻である。しかし、超高速カメラの画像では、背面の光が認められるのは第8フレームまでで、それ以後は、ナイロン球の速度から判断してその背面は標的面に貫入していないはずなのに写っていない。フォトメータ信号(図2)もかなり弱くなっている。この原因、および、第2ピークの原因を考えるには、弾丸が貫入し、衝撃波、希薄波が伝播する様子を2次元モデル(軸対象なので3次元は不要)で調べる必要がある。

#### 5. 結論

ナイロン-ナイロン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ングあるいは衝突蒸気雲の発光と思われるものに分けることができる。超高速カメラとフォトメータの同時観測により、スパイク光の原因が、衝撃波圧縮され高温になった部分(弾丸、標的物質が不透明なら外からは見えない)からの光が、半透明な弾丸を通して放射されたものであることが明らかになった。

#### 参考文献

- [1] Yanagisawa M., Ishigure Y., Tanaka S., Aoi H., and Hasegawa S., Luminous Flashes Generated in Highvelocity Laboratory Impact Experiments, *7th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society*, Hyderabad (India), PS03-09-14-A016, 2010.

[2] 柳澤正久, 海老名良祐, 高橋悠太, 長谷川直, 高速度衝突閃光: 多孔質衝突体の場合Ⅲ, 惑星科学会, 相模女子大, 2011 年秋. [3] Yanagisawa M. and Kisaichi N., Lightcurves of 1999 Leonid impact flashes on the moon, *ICARUS*, **159**, 31-38, 2002. [4] <http://www.nacinc.jp/analysis/products/uhsu/ultraneo/> (2012 年 3 月 9 日時点). [5] LASL Shock Hugoniot Data, edited by Marsh S. P., Univ. California Press, 430-431, 1980. [6] Ernst C. M. and Schultz P. H., Temporal and Spatial Resolution of

the Early-Time Impact Flash: Implications for Light Source Distribution, *Lunar and Planetary Science XXXVIII*, #2353, 2007.

謝辞: 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。超高速カメラ nac ULTRA Neo による撮影は株式会社ナック イメージ テクノロジーの協力を得て行われた。

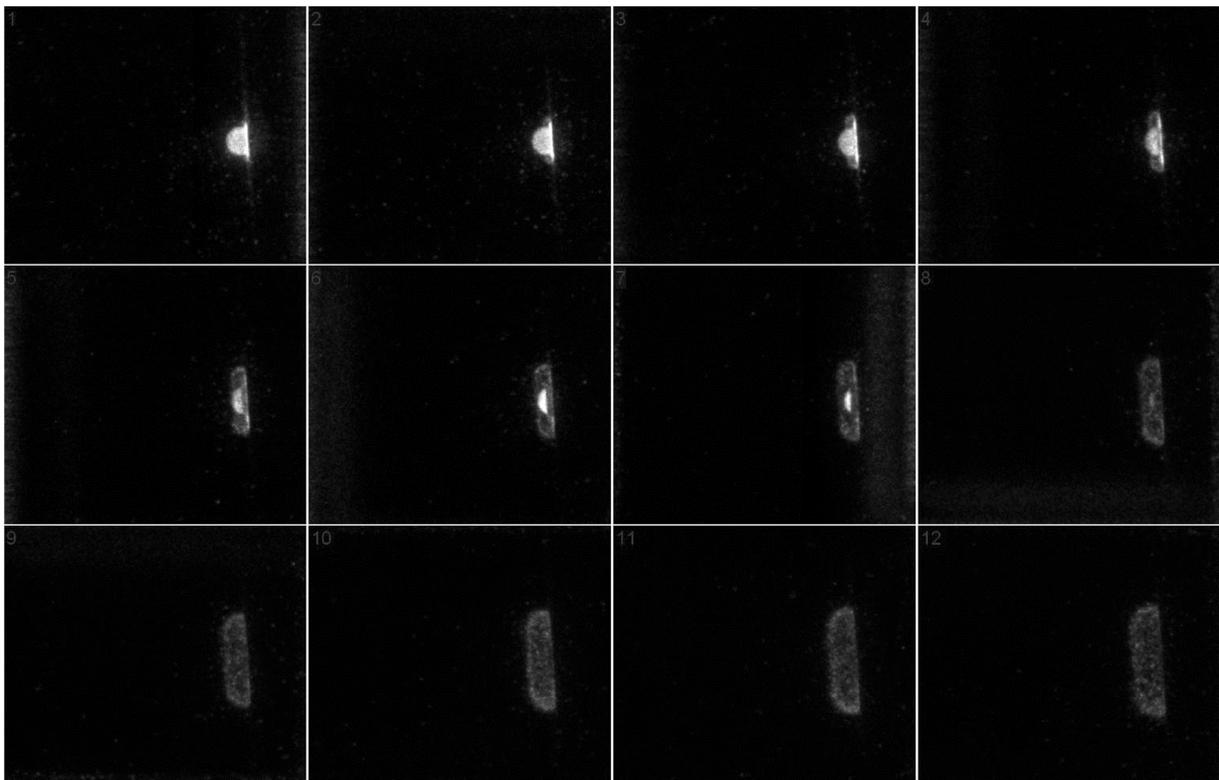


図 3. 超高速カメラ(nac ULTRA Neo)によって撮影された 12 フレーム(shot1545). 左から右, 上から下の順で 50 ns 毎の画像である(露光時間も 50 ns). フォトメータによる光強度変化に対応した露光のタイミングは図 2 に示されている. 弾丸の進行方向は左から右(6.99 km/s), その直径は 7 mm である. 外部光は使っていないので, 標的であるナイロンブロックははっきりと写っていないが, 右側にあり, カメラは衝突面に沿う方向(真横)から撮影している. 衝突面はほぼ鉛直であるがわずかに左に傾いている. 8 フレームまでは弾丸の背面が光っている. 蒸気雲あるいはジェットイングが広がっていく様子も捉えられている.