

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）

1. 背景と目的

高速度衝突における閃光は、一つのメカニズムですべてが説明できるような単純なものではない。室内実験においては、ジェットインク雲や衝突蒸気雲からの放射以外に、弾丸直径を衝突速度で割った時間にほぼ等しい継続時間をもつスパイクが衝突の瞬間に観測されることがある[1-7]。観測カメラの時間分解能が不十分なため月面衝突閃光[8]など自然界の衝突についてスパイクが観測されたという報告はないが、将来はその有無や強度から衝突現象について有意義な情報が得られる可能性がある[9, 10]。将来の観測に備えスパイク光の原因を突き止めておく必要がある。

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。

衝突閃光の測光は主に以下に示すコンポーネントから成るフォトメータで行った。(a) 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); (b) アンプ(浜松フォトニクス C8366); (c) レンズ(焦点距離 55 mm、F1.8 開放、フィルタなし)。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 11 cm の範囲に限定されている。また、衝突面から測って約 17 度の方向から測光を行った。

衝突の様子は、超高速カメラ nac ULTRA Neo[11]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上記の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 μ s 経過してから撮像された。

また、分光ストリークカメラによる観測も行った。図 1 に示すように、スペクトルを時間の関数として観測できる。視野は標的位置で約 30 cm である。

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 shot1545 について結果を述べる。衝突速度は 6.99 km/s であった。衝突閃光スペクトルの時間変化を図 1 に示す。衝突の瞬間、継続時間が 1 μ s 以下の連続スペクトルに近いスパイクが観測され、いったん強度が落ちた後、 C_2 や CN によるバンドスペクトルが現れる。これはジェットインク雲からの放射であろう。

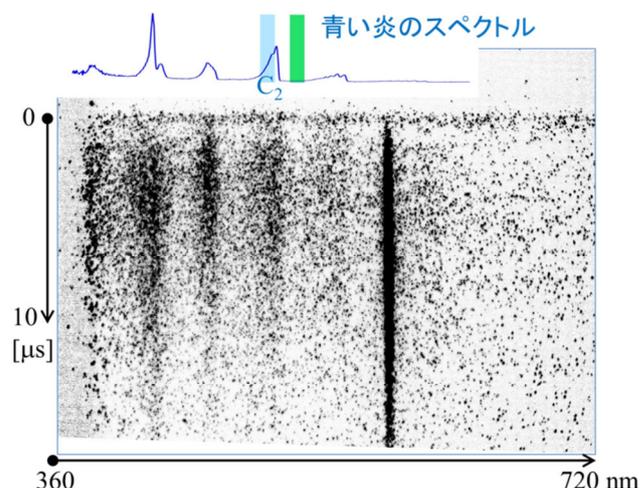


図 1. 衝突閃光スペクトルの時間変化(shot1545). 色の濃い部分で強度が強い. 上の挿絵は、 C_2 バンドの波長を示すためのボタン・バーナーのスペクトルである. 青と緑の縦帯はフィルタ付フォトメータの観測波長域である(本論文では述べない).

スパイク光の部分を拡大して表示したのが図 2 である。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 9 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による信号の遅延は <20 ns、つまり半フレーム以下であろう。

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たが、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。

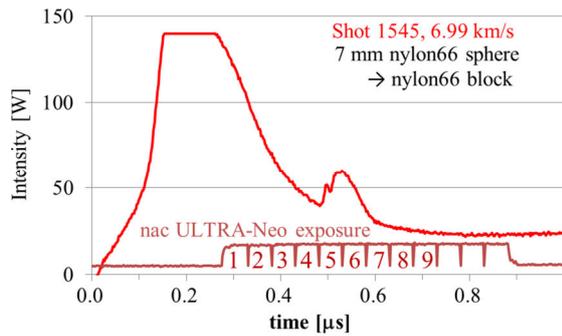


図 2. スパイク光強度(光源での明るさ)の時間変化。下側は超高速カメラのモニタ信号で 12 フレームの露光のタイミングを示す。

図 2 の 0.55 μs 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。原因は不明だが興味深い現象である。

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 [12]。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 μs 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。

ここで、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ことに注意すべきである。光が内部で散乱されて全体が光っていると考えれば、衝撃波到達前から光っていることは説明できる。

参考文献

- [1] 柳澤正久, 他, 天体の衝突物理の解明VI, 北大低温科学研究所, 2010. 11. [2] 柳澤正久, 他, スペース・プラズマ研究会, 2011. 3. [3] 柳澤正久, 他, 日本地球惑星科学連合大会, 2011. [4] 柳澤正久, 他, 惑星科学会, 2011 秋. [5] 柳澤正久, 他, スペース・プラズマ研究会, 2012. 2. [6] Jean and Rollins, *AIAA J*, **8**, 1742-1748, 1970. [7] Ernst and Schultz, *Lunar and Planetary Science XXXVIII*, #2353, 2007. [8] Yanagisawa and Kisaichi, *ICARUS*, **159**, 31-38, 2002. [9] Yanagisawa et al., *Asteroids, Comets, Meteors*, #6289, 2012. [10] 柳澤正久, 他, 日本地球惑星科学連合大会, 2012. [11] <http://www.nacinc.jp/analysis/products/uhsc/ultraneo/> (2012. 3). [12] *LASL Shock Hugoniot Data*, edited by Marsh S. P., Univ. California Press, 430-431, 1980.

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。

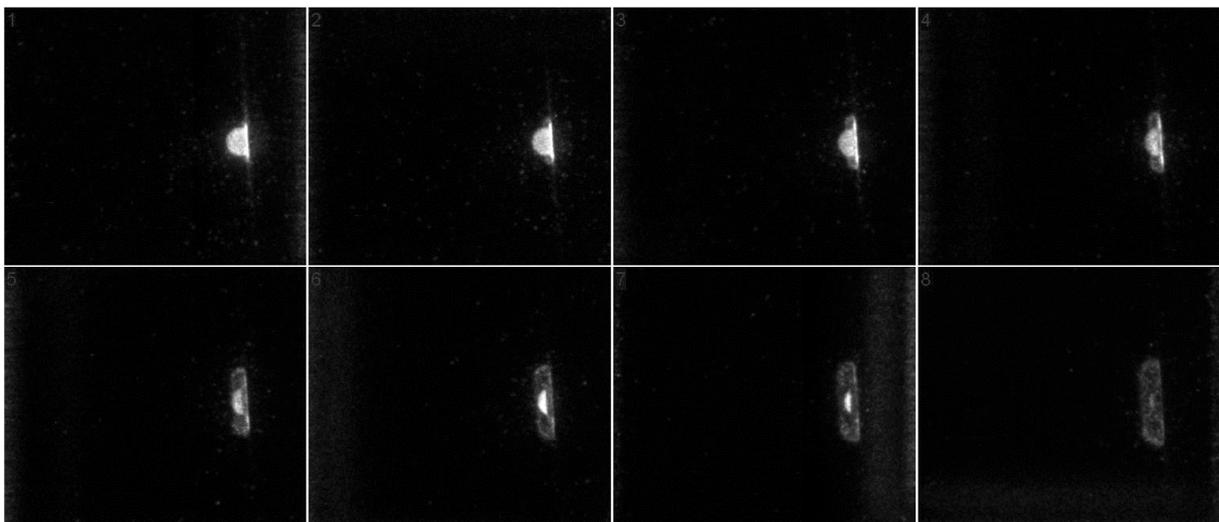


図 3. 超高速カメラ(nac ULTRA Neo)によって撮影された最初の 8 フレーム(shot1545)。左から右, 上から下の順で 50 ns 毎の画像である(露光時間も 50 ns)。弾丸の進行方向は左から右(6.99 km/s), その直径は 7 mm である。外部光は使っていない。標的であるナイロンブロックははっきりと写っていないが、右側にあり、カメラは衝突面に沿う方向(真横)から撮影している。衝突面はほぼ鉛直である。6 フレーム目で弾丸が一瞬明るくなっている(サブ・スパイク)。ジェットインク雲が広がっていく様子も捉えられている。