

球弾丸斜め衝突時に発生するジェットの超高速撮像計測

黒澤耕介¹, 長岡洋一², 千秋博紀¹, 和田浩二¹, 長谷川直³, 杉田精司⁴, 松井孝典¹

¹千葉工業大学惑星探査研究センター, ²東京大学宇宙線研究所, ³ISAS/JAXA, ⁴東京大学大学院理学系研究科

まとめ: 球弾丸の接触・圧縮段階で生じる超高速ジェットの発生過程を 100 ns/frame の時間分解能で撮像し, 世界で初めて衝突速度と Shock impedance の関数として系統的なデータ・セットを得た. 実験結果とジェットの理論モデルを比較した. ジェットの標準理論はジェット速度を過大評価していること, 衝撃圧縮から断熱解放までの粒子速度変化を記述する熱力学モデルでジェット速度をよく再現できることがわかった.

はじめに: 二枚の薄い平板を斜め衝突させると, 衝突速度よりも数倍速い速度で飛び出す超高速成分があることは“Impact jetting 現象”として 1950 年代から知られている[e.g., 1]. 局所的にエネルギーが集中するため, 遅い衝突速度であっても熔融や蒸発の相変化が引き起こされうることから, 惑星科学でも 70 年代からその重要性が認識されており[e.g., 2]. コンドリュールの起源[e.g., 2, 3], 衝突ガラスの起源[4]を説明する機構として注目されている. 惑星形成末期に発生する巨大衝突のような巨視的視点からも地球-月系[5], 冥王星-カロン系[6, 7]でジェットの発生が重要な役割を果たしたと考えられている.

惑星科学への応用を考える際には平板衝突でなく, 球が平板に貫入していく状況でのジェット発生について理解する必要がある. ジェットが発生する領域を切り取って二次元問題に単純化しても, 球衝突の場合は時間依存・非対称の流れ場を形成し問題が複雑になるため, 十分に理解されているとはいえない[4, 8]. この研究の遅れは球が衝突する際のジェット発生過程について室内実験はおろか数値実験においてすら十分なデータが揃っておらず妥当性を検証できないことが原因であろう. 室内実験の場合は主に計測器の空間/時間分解能不足でジェット速度を議論できる精度のデータが数点しか存在しないこと, 数値実験の場合は極めて高い空間解像度が要求されるため, 近年まで数値的に解くことができなかったことによる[8]. 昨年, 球の垂直衝突に限って数値モデルが報告されたが, 平板衝突をもとにした標準理論の予測値と数値的に求めたジェット速度は一致しないとの結果であった[8].

この状況は室内実験で球衝突の精度のよいデータ・セットを得ることができれば, 一気に解決することが期待できる.

実験条件: 千葉工業大学惑星探査研究センターに設置された二段式水素ガス銃を用いて斜め衝突実験を行った. 以下に実験条件をまとめる. 弾丸には直径 4.8 mm のポリカーボネイトを用いた. 標的にはショックインピーダンスの影響を調べるため 3 種類, 銅, アルミ, ポリカーボネイト(5 cm x 5 cm x 2 cmt)の板を用いた. 衝突速度は 2.8-7.2 km/s の範囲で変化させた. 衝突角度は天然の衝突の最頻値である 45 度に固定した. 比較のためアルミ板に対して垂直衝突実験も実施した. 実験前にはチャンバを排気し, 実験は ~100 Pa の真空中で行った. チャンバ側面から高速ビデオカメラで衝突の前後を捉えた. カメラの撮像速度は 100 ns/frame, 露光時間は 50 ns とした. この撮像速度は今回の実験条件における弾丸貫入特徴時間の ~1/10 となっており, ジェットの発生を捉えることを狙った. ジェットの発生とカメラのデータ取得のタイミングをあわせるため, 自律計算機を使ったトリガシステム[9]を構築した. カメラと同軸方向からストロボ光を入射させ, 散乱光像を取得した. これは衝突前の弾丸の健全性を確認することと, 既知の弾丸速度及び弾丸サイズを用いて像のピクセル-実距離変換を高精度で行うためである.

解析手順: ジェット発生前後のフレームから弾がカメラの視野に入ってくる前のフレームを引き算し, 自発光を抽出した. Image J を使用し閾値を決めて二値化することで, 各時刻におけるジェットの先端位置を決定し, 時間の関数として求めた. 閾値は孤立ノイズ(1 ピクセルのノイズ)が消える値として設定した. 時間の関数として先端位置をプロットすると, その傾きがジェット速度を表す. 解析していく上で衝突後 ~1 μ s 以内に減速を受けることがわかったので, ほぼ直線として近似できる衝突後 500 ns までの 5 点の測定結果を一次関数で fitting してジェット速度を求めた.

実験結果: ジェット速度を衝突速度で規格化し, 衝突速度の関数として整理した結果(1) 今回の実験条件ではジェット速度比が 2.5-4 の範囲に入ること, (2) 衝突速度が増加するとジェット速度比が減少すること, (3) 標的のショックインピーダンスが高いほどジェット速度比が大きくなることがわかった. なおジェット速度比の誤差棒は速度を求める際

の fitting error 及び衝突速度の ± 0.05 km/s の不定性を反映している。なお、前節の解析手順で述べたジェットの先端位置を測定するための二値化の閾値を二倍程度変えてもジェット速度比は誤差の範囲で重なることを述べておく。十分に時間が経つとジェットは部分的に気化し気相が膨張し広がった構造を持つと予想されるが、500 ns の時間スケールでは十分に膨張することができず、一つの固まりとして飛行していることを示唆するものである。

標準理論モデルとの比較: 得られたデータセットを用いてこれまで用いられてきたジェットの標準理論[e.g., 1, 2, 4, 5, 8, 10]の妥当性を評価した。ここでは弾丸と標的のショックインピーダンスの違いを評価するために Sugita & Schultz (1999)によって改良されたモデル[10]を用いた。なおこのモデルでは、0 から 1 の間の係数 f を含み、平板同士の衝突では $f=1$ で室内実験及び数値実験の結果を再現できると言われている[1, 11]。これまでの惑星科学分野のジェットに関する研究では、球弾丸衝突の場合も $f=1$ であると仮定されてきた[4, 5, 10]。ジェット速度比の実験データと標準理論による予測値を比較したところ(1)標準理論($f=1$)はジェット速度比の速度依存性は概ね再現するものの、定量的には過大評価してしまうこと、(2) $f \sim 0.5$ とすると実験結果をうまく再現できること、がわかった。

粒子速度モデル: 標準理論でも $f \sim 0.5$ とすれば、実験結果を再現できることがわかったが、天然の衝突現象に適用するにはこのような経験的な定数を含まないモデルが必要である。そこで熱力学的な観点から、ジェットとして放出される物質がどのように加速されるのかを Miller (1998)[12]に習って考察した。接触点固定座標系から見ると、未圧縮の物質はまず衝撃波面に突入する。これは熱力学的には Hugoniot 曲線上にジャンプすることに対応する。その後は淀み点まで、断熱圧縮を受ける。接触点固定座標系ではこの時点で速度が 0 になる。ジェットが発生する条件では、衝撃波面が離脱し、弾丸と標的の接触面の間には自由表面ができていたため、衝撃圧縮からさらなる断熱圧縮を受けた物質は自由表面の方向へ加速され、最終的に放出される。衝撃圧縮後の断熱圧縮、希薄波による加速、自由表面からの放出は断熱過程であるため、断熱変化におけるリーマン不変量[e.g., 13]を計算することで粒子速度の変化量を計算することができる。断熱変化であることを

考慮すると、衝撃波面で得た粒子速度は自由表面から放出される直前の粒子速度に等しいはずである。放出に伴い、密度が標準状態まで急激に減少するが、このときの粒子速度は放出前のおよそ二倍となる。このことは自由表面における波の干渉の結果としても理解できる。ここでは速度ベクトルの大きさについて言及したが、その向きは自由表面方向に向かって変化していることを注意しておく。計算された粒子速度をに接触点移動速度を可算すると実験系でみたジェット速度となり、実験結果と直接比較できる。その結果(1)実験定数 f なしで、同一物質の衝突であるポリカーボネイト平板への衝突時に発生するジェット速度を再現できること(2)銅、アルミ標的の場合は標準理論の予測値に比べて標的由来のジェット速度が低く見積もられること、(3)弾丸由来のジェット速度と標的由来のそれを平均化すると実験結果をうまく再現できること、がわかった[14]。このような速度の平均化はショックインピーダンスの異なる物質同士が斜めに衝突する際には必然的に発生してしまう速度シアに誘起された Kelvin-Helmholtz 不安定などによって説明できる可能性がある[12]。

References: [1] Walsh, J. M. et al. (1953), *Journal of Applied Physics*, **24**, 349–359. [2] Kieffer, S.W., (1977), *Impact and Explosion Cratering*. Pergamon Press, pp. 751–769. [3] Johnson B. C. et al. (2014b), *LPS XXXV*, **1471**. [4] Vickery, A. (1993), *Icarus*, **105**, 441–453. [5] Melosh, H. J. and C. P. Sonett (1986), *Origin of the Moon*, 621–642. [6] McKinnon, W. B. (1989a), *ApJ*, **344**, L41–L44. [7] McKinnon, W. B., (1989b), *GRL*, **16**, 1237–1240. [8] Johnson B. C. et al. (2014a), *Icarus*, **238**, 13–22. [9] Kondo, K. and H. Yasuo (1987), *RSI*, **58** 1755–1757. [10] Sugita, S. and P. H. Schultz (1999), *JGR*, **104**, E12, 30825–30845. [11] Harlow, F. H. and W. E. Pracht (1966), *Physics of Fluids*, **9**, 1951–1959. [12] Miller, G. (1998), *Icarus*, **134**, 163–175. [13] Melosh, H. J. (1989). *Impact cratering: A geologic process*, Oxford University Press, New York. [14] Kurosawa et al., In revision.

※図はスライドを参照して頂きたい。