

**要旨:** 斜め衝突時の超高速下流方向成分の起源を明らかにするため、斜め衝突の超高速撮像計測を行った。その結果、下流方向成分は弾丸貫入中に Impact jetting によって放出されていることが決定的になった。

#### はじめに:

固体惑星/衛星の表面を支配する地形は衝突クレータである。この傷跡は太陽系の歴史が激しい天体衝突の歴史であったことを物語る。衝突天体がランダムに飛来すると仮定すると、衝突角度分布は  $45^\circ$  を中心とする釣り鐘分布になる [Shoemaker, 1962]。斜め衝突時の生成されるクレータの大きさは室内実験によって調べられ、任意の衝突条件に対して、ある程度予測が可能である [e.g., Schimidt & Housen, 1987]。これは衝突クレータ生成過程においては遠方場近似が効き、初期の非軸対称性は均されてしまうからである。一方、斜め衝突後の衝突体の挙動は、垂直衝突のそれとは著しく異なる。室内実験で斜め天体衝突の模擬実験を行うと、衝突点から半球状に広がる成分(以下、半球膨張成分と呼ぶ)と衝突方向の下流側に、衝突速度と同等の速度で飛び去る弾丸由来成分が観測される [e.g., Schultz & Gault, 1990; Sugita & Schultz, 2003a] (以下、下流方向成分と呼ぶ)。高速で飛び去る衝突天体は惑星大気と激しく相互作用することが予想され、惑星科学上の様々な興味深い事件との関連が指摘されている。例えば (1) Multiple Tsunguska events の発生 [Schultz & Gault, 1990], (2) 金星クレータ周辺の "Run-out flow" の起源 [Sugita & Schultz, 2002], (3) 強力な熱輻射の発生 [Sugita & Schultz, 2003b], (4) 大規模な惑星大気散逸 [Shuvalov, 2009], (5) 生命前駆物質の合成 [Kurosawa et al., 2013], (6) 星間塵の生成などが挙げられる。特に近年の斜め衝突実験では、下流方向成分の初速度は衝突速度の  $\sim 2$  倍に及ぶことも報告されている [Hamura et al., 2012]。このような超高速成分の存在は、上記の諸問題のこれまでの理解を大きく変え得る。例えば天体衝突による惑星大気散逸問題では、惑星の脱出速度が散逸の閾値を与える。従って、大質量で低速度の半球膨張成分よりも小質量で高速度の下流方向成分が、効率よく惑星大気散逸に寄与し得る。また、周辺大気か

ら受ける空力加熱の熱流束の大きさは速度の 3 乗に比例するため、下流方向成分は従来考えられてきたよりも激しい空力加熱を受けることになる。しかし、このような下流方向成分の加速機構は明らかになっておらず、この現象が実験室特有のものか、天然の衝突現象でも起こり得るものか、結論が出ていなかった。本研究ではこの問題に決着をつけるため、PERC の新型二段式水素ガス銃を用いて斜め衝突実験を行った。着弾時の弾丸を超高速撮像し、超高速成分の生成機構を探った。

#### 斜め衝突の超高速撮像計測:

今回は衝突点で何が起こるかを明確にするため真空条件下 ( $< 100$  Pa) で斜め衝突実験を行った。以下に実験条件をまとめる。衝突角度は天体衝突の最頻値である  $45^\circ$  に固定し、衝突速度を  $4.4$ - $6.8$  km/s まで変化させた。弾丸、及び標的にはポリカーボネイト球 ( $4.6$  mm  $\phi$ ), 銅板 ( $10$  cm  $\times$   $5$  cm  $\times$   $2$  cmt) を用いた。撮像速度は  $100$  ns/frame で行った。コマあたり撮像時間は、この実験条件での弾丸の接触・圧縮段階の特徴時間に比べて十分短く ( $\sim 1/10$ )、弾丸の衝撃圧縮を直接観察することが可能である。カメラ自体を  $45^\circ$  傾け、さらにあおりを加えることで、衝突面(銅標的面)を斜め上から見下ろす視点となるように調整した。

#### 実験結果:

$100$  ns/frame の撮像結果によって着弾直後に弾丸の下部からは自発光を放つ成分が放出されることがわかった。この段階(着弾後  $\sim 0.4$   $\mu$ s) では弾丸の後端が無傷で残っている。これは弾丸の後端には衝撃波が到達しておらず、衝突の情報が弾丸全体には行き渡っていないことを意味する。超高速成分は、弾丸-標的の接触面から弾丸貫入中に放出されていることが明らかとなった。Image J を用いて画像処理を施し、下流方向成分の速度を計測した。まだデータは少ないが、衝突速度の増加に従って、Jetting 速度と衝突速度の比が小さくなる傾向にあること、この速度領域では下流方向成分の速度は、衝突速度の  $2$ - $3$  倍に及ぶこと、放出後の速度は一定であることがわかった。

#### Impact jetting

実験結果をもとに超高速自発光成分の起源

と、天然の衝突現象でも起こる現象か否かを考察する。弾丸の貫入中に標的との接触面から放出され、現象の中で最も強く加熱されていることから、超高速自発光成分は Impact jetting [e.g., Walsh et al., 1953]と呼ばれる現象で生成されたものであることが決定づけられたと言える。Impact jetting は、物質内を伝わる衝撃波速度が弾丸と衝突面の接触点の移動速度を超えた場合に、接触面の狭い空間から物質が吹き出す現象である [e.g., Melosh, 1989]。局所的にエネルギーが集中するため、極めて強い衝撃圧縮&加熱を受ける。先行研究では発光分光解析と Jetting 理論の比較から、斜め衝突で生成される自発光プラズマは Jetting によって生成されたものであることが指摘されていた [Sugita & Schultz, 1999]。理論的には Jetting 速度は衝突速度の数倍に及ぶ [e.g., Vickery, 1993]。

球形状弾丸の衝突時には、標的面への貫入中に、弾丸と標的面の接触点の移動速度が次第に遅くなるため(接触角が時々刻々変化するため)、貫入中のどこかのタイミングで Jetting が起こる。この現象は理想的にはサイズによらずに引き起こされる[Vickery, 1993]。従って、衝突速度よりも高速で飛び出す下流方向成分は天然の衝突現象でも起こり、最初に述べた惑星科学の諸問題に対して Impact jetting が重要な役割を果たしていた可能性が高い。これらの問題を考える上で、Impact jetting による超高速成分の生成は初期条件として重要であり、天然衝突現象に適用可能な Jetting 理論が必要である。球形状天体の衝突を取り扱える理論モデルは存在するが[e.g., Melosh & Sonett, 1986; Vickery, 1993]、室内実験によるデータを統一的に説明するには至っていない [Vickery, 1993; Sugita & Schultz, 1999]。これは Impact jetting に対する詳細な実験研究がほとんど存在しないことが理由としてあげられる。例えば、球形状弾丸の斜め衝突時の Jetting 速度は Schultz による非公表データの1点の他は衝突角度が不明である2点 [Gault et al., 1968]が存在するのみである。本研究で示したように、コントロールした条件での Impact jetting の生成過程の直接撮像が技術的には可能となってきた。今後は系統的なデータをとりため、それを元に実験結果を矛盾なく説明可能な理論モデルの構築を目指す予定である。

#### 参考文献:

1. Gault et al., *Shock Metamorphism of Natural Materials* (Eds. French B. M. and Short, N. M.), Baltimore, Mono, (1968).
2. Hamura et al., *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, **43**, 1888 (2012).
3. Kondo, K. & Yasuo, H., *Review of scientific instruments*, **58**, 1755, (1987).
4. Kurosawa, K. et al., *Orig Life Evol Biosph* **43**, 221–245 (2013).
5. Kurosawa, K. et al., *Earth and Planetary Science Letters* **337-338**, 68–76 (2012).
6. Kurosawa, K. et al., *J. Geophys. Res.* **117**, E04007 (2012).
7. Melosh, H. J. New York, Oxford University Press, 253, (1989).
8. Melosh, H. J. & Sonett, C. P., *Origin of the Moon* (Eds. Hartmann, W. K., Phillips, R. J., and Taylor, G. J.), 621–642 (1986).
9. Schmidt, R. M. & Housen, K. R., *International Journal of Impact Engineering* **5**, 543–560 (1987).
10. Schultz, P. H. & Gault, D. E., *Geological Society of America Special Papers* **247**, 239–262, Geological Society of America, (1990).
11. Shoemaker, E. M., Arizona. *The Moon Meteorites and Comets* -1, 301 (1963).
12. Shuvalov, V., *Meteoritics & Planetary Science* **44**, 1095–1105 (2010).
13. Sugita, S. & Schultz, P. H., *Icarus* **155**, 265–284 (2002).
14. Sugita, S. & Schultz, P. H., *J. Geophys. Res.* **108**, 5051 (2003).
15. Sugita, S. & Schultz, P. H., *J. Geophys. Res.* **108**, 5052 (2003).
16. Sugita, S. & Schultz, P. H., *J. Geophys. Res.* **104**, 30825 (1999).
17. Vickery, A., *Icarus* **105**, 441–453 (1993).
18. Walsh et al., *Journal of Applied Physics* **24**, 349–359 (1953).

※図はスライドを参照して頂きたい。