

# Ultra-high-speed imaging of impact ejecta

(衝突放出物の超高速撮像計測)

Takaya Okamoto, Kosuke Kurosawa, Takafumi Matsui

Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma,  
Narashino, Chiba 275-0016, Japan.

## ABSTRACT

An important feature of impacts in the solar system is the fate of crater ejecta. Ejection velocities of ejecta at the earliest stages of crater growth are not understood in previous experimental and theoretical studies. In this study, we performed a series of impact experiments to investigate ejection velocity from near the impact point via ultra-high-speed imaging observation with the frame rate of 100-200 ns/frame. These frame rates are shorter than the characteristic time of projectile penetration under the experimental condition. A polycarbonate sphere was impacted onto a polycarbonate plate at 1.75 to 7.18 km/s. Impact angles were 45 and 90 degrees from the horizontal. We measured some examples of the ejection velocities for both vertical impacts and oblique impacts. We found that the ejection velocity reached 0.87 times the impact velocity for a vertical impact, while it was 1.36 times the impact velocity for an oblique impact. Although these results were not the maximum ejection velocities of the ejecta, it is revealed that the maximum ejection velocities were faster than the velocities obtained here.

## 高速衝突放出物研究の意義

衝突放出物とは衝突によって掘削された物質が標的表面から飛び出したものである。放出される物質は衝突点近傍のものほど速い速度で飛び出すことがわかっている(e.g. Housen et al., 1983, Hermalyn and Shultz, 2011)。この衝突放出物の速度や質量を調べることは惑星科学では重要となる。例えば、クレーター周辺には放出物が堆積物として存在している。放出物の飛び出す位置や飛び出す角度、速度がわかれば、どれほど遠方まで飛ばされるかがわかる。テクタイトは地球上の天然ガラスで円形や水滴の形状をしていて溶融、蒸発を経験した跡が観察されている。これらが分布している領域から数百キロほど離れた場所に衝突クレーターが存在しており、衝突で形成されたと考えられている(Vickery 1993)。しかしそのような離れた位置に溶融物質が運ばれるかどうかということについては詳しくわかっていない。また、火星への天体衝突によって生じた非常に高速の放出物が火星衛星の Phobos の表面に混ざっている可能性が指摘されている(Ramsley and Head 2013)。JAXA は 2022 年度に火星衛星へ探査機を送りそこからのサンプルリターンを計画している。火星衛星表面から火星物質を得るにはどれだけのサンプルを持って帰る必要が

あるのかを検討しなければならない。そのためには天体衝突によって火星からどれだけの質量の物質が衛星表面に到達できるかを知っていなければならない。このように放出物がどこまで遠くに到達できるかどうかを知るには、衝突によってどれほど速い速度の放出物ができるのかが重要となる。

## 先行研究と本研究

これまで放出物の質量分布や速度分布の実験的な研究はいくつか行われている。Yamamoto et al., 2005 では砂標的に毎秒 250m の衝突速度で弾丸を衝突させた。標的周囲にアルミ箔を配置することで、そのアルミ箔を突き破るか否かによって放出物速度の下限を決めることができた。これによれば、確認された放出物の最も速い速度は 173 m/s で衝突速度のおよそ 0.7 倍であった。また、衝突速度の 0.5 倍よりも速い放出物の質量は弾丸質量のおよそ千分の一であった。

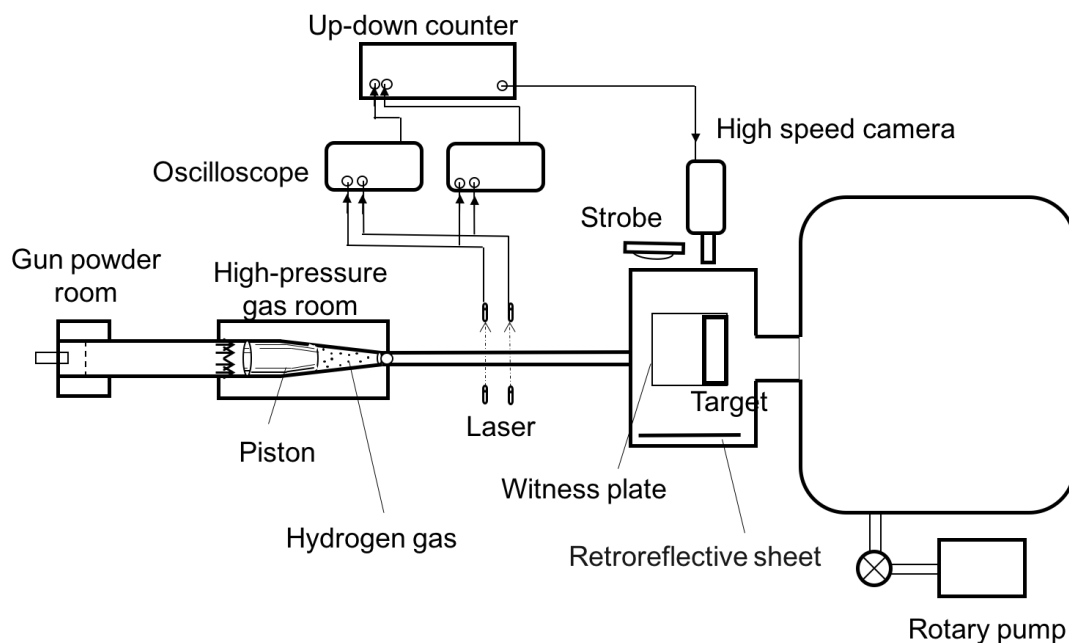
一方、Hermalyn and Shultz (2011) や Tsujido et al. (2015) では衝突速度 1.5–6.9km/s で弾丸を砂標的に衝突させ、個々の粒子を観測し、放出物の速度分布を測定している。彼らの実験で測られたのは衝突点から弾丸半径よりも大きい位置から飛び出す粒子の速度を測ったものであり、衝突点直下付近から放出される極めて速い放出物は直接撮

像できていない．そのような位置から飛び出す物質の速度を計測するには高解像度かつ高い時間分解能で撮像する必要がある．そこで我々は高速度ビデオカメラ HPV-X (島津製作所)を用いて実験を行い，衝突点近傍から放出される物質の速度計測を行った．このカメラは最速 100 ns/frame で観測可能であり，弾丸が標的に貫入していく様子まで分解された画像を取得できる．なお，本実験では質量については計測していない．

## 実験条件

弾丸には直径 4.8 mm のポリカーボネイト球を用い，標的にはポリカーボネイト板 (50x50x20 mm<sup>3</sup>) を用いた．衝突速度は 1.75-7.18 km/s の範囲で行い，実験は全て千葉工業大学の二段式軽ガス銃を用いて行った．衝突角度は 90 度（正面衝突）と 45 度で行った．チャンバー内は 100 Pa 以下になるまで減圧した．撮像間隔は 100 ns または 200 ns で観察した．この時間間隔は弾丸の直径を衝突速度で割った値よりも小さく，弾丸の貫入が観察できるほど時間が分解されている．図 1 に実験配置図を示す(Kurosawa et al., 2015)．標的の下には厚さ 0.1 mm の SUS 板をウィットネスプレートとして配置した．高速度カメラへのトリガーにはアップダウンカウンタ(Physics

Applications Inc., UDC-100) を用いている(Kondo and Yasuo 1987). これにより, 加速された弾丸が 2 本のレーザーを通ったときに, 弾丸速度をその場でコンピューターが計算し, 弾丸がちょうど標的に到達する最適なタイミングの信号を高速度カメラに自動で送ることができる. 高速度カメラ側にストロボを設置し, その反対側に再帰性反射シートを配置して散乱光で撮影を行った。ポリカーボネートの融点は約 420 K であり, 衝突速度数キロメートルの場合には千数百ケルビンまで温度は上昇するので衝突点近傍の衝撃を受けた物質は強度を失い流体的にふるまっていると考えられる. 本実験ではこの強度を失ったであろう領域からでてくる速度について計測を行っている.

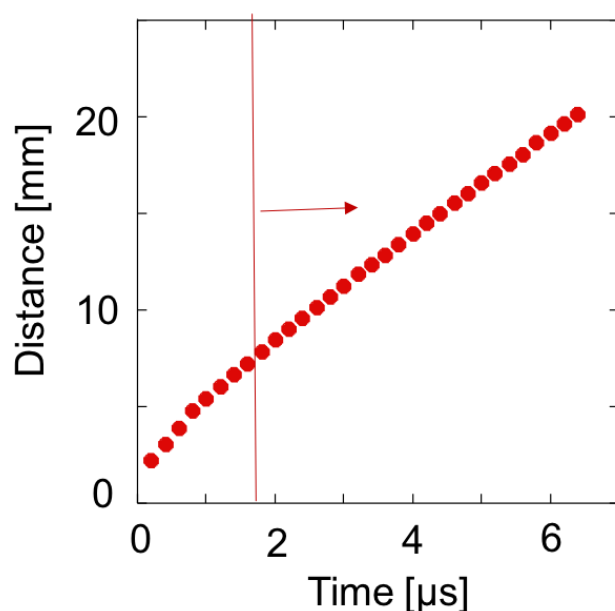


**Figure 1.** Schematic illustration of the experimental system placed at the Planetary Exploration Research Center of Chiba Institute of Technology.

### 標的中の圧縮波伝播速度

ポリカーボネイト標的は内部が透明なため圧縮波の伝播の観察が可能である。その速度を計測した。図2は衝突からの時間と衝突点から表面を伝わる圧縮波の位置の関係を表したものである。衝突点近傍では最も速度が速く、遠方に行くと一定速度となっていることがわかる。衝突点から弾丸直径の2倍ほど離れた位置（グラフの矢印より右）から決定した衝撃波速度は  $2.67 \pm 0.01$  km/s であった。ポリカーボネイトのバルク音速は 2.662 km/s であり (Trunin et al., 2001), ここで求めた圧縮波速度とほぼ一致している。衝突点から数弾丸半径

の範囲は衝撃波によって強く圧縮されるが，衝突点遠方では衝撃波が減衰して音波として圧縮波が伝わっていく様子の一部始終を捉えたものと言える．計測した圧縮波の速度は標的物質のバルク音速とほぼ一致しており，我々の速度計測の妥当性を補強するものである．



**Figure 2.** The relation between time after the impact and position of the compression wave traveling in the target's surface. The impact velocity and angle for this shot were 5.01 km/s, 90 degrees, respectively. Using the data of right side of the red vertical line, we obtained a wave velocity as  $2.67 \pm 0.01$  km/s, which is close to the sound velocity of polycarbonate.

### 放出物の観察

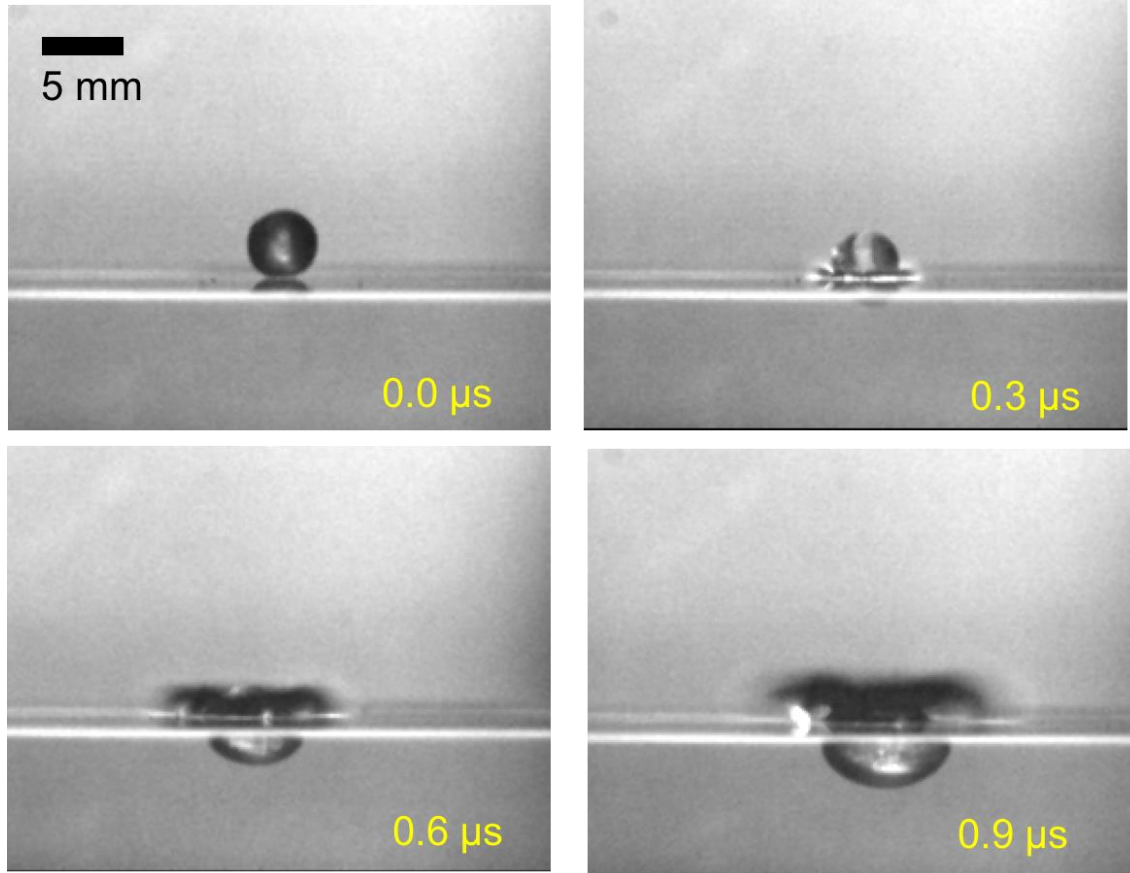
図 3 は衝突直後の画像である．衝突後  $0.3 \mu\text{s}$  で物質が放出していることがわかる．またジェットとそれに続く放出物カーテンの成長している様子が見られる．ジェットは衝突直後の最初に発生する高速

物質のことで弾丸と標的の両方の物質を含むことが知られている (e.g. Vickery 1993, Johnson et al., 2014, Kurosawa et al., 2015). 一方, 掘削された標的物質が飛び出してきたものを放出物 (イジェクタ) と呼ぶ. 近年 iSALE shock physics code を用いた高解像度の計算が先行して行われ, 衝突直後のジェット発生と放出物カーテンの成長過程が詳しく調べられている (Johnson et al., 2014a). 両者に明確な境界はなく, 衝突速度の 2-3 倍の速度を持つジェットから標的由来の放出物へと放出速度と角度が連続的に遷移することが示されている. 我々は超高速撮像計測によって, このジェットと標的由来のイジェクタの連続的遷移を実験的にも観察できることを示した.

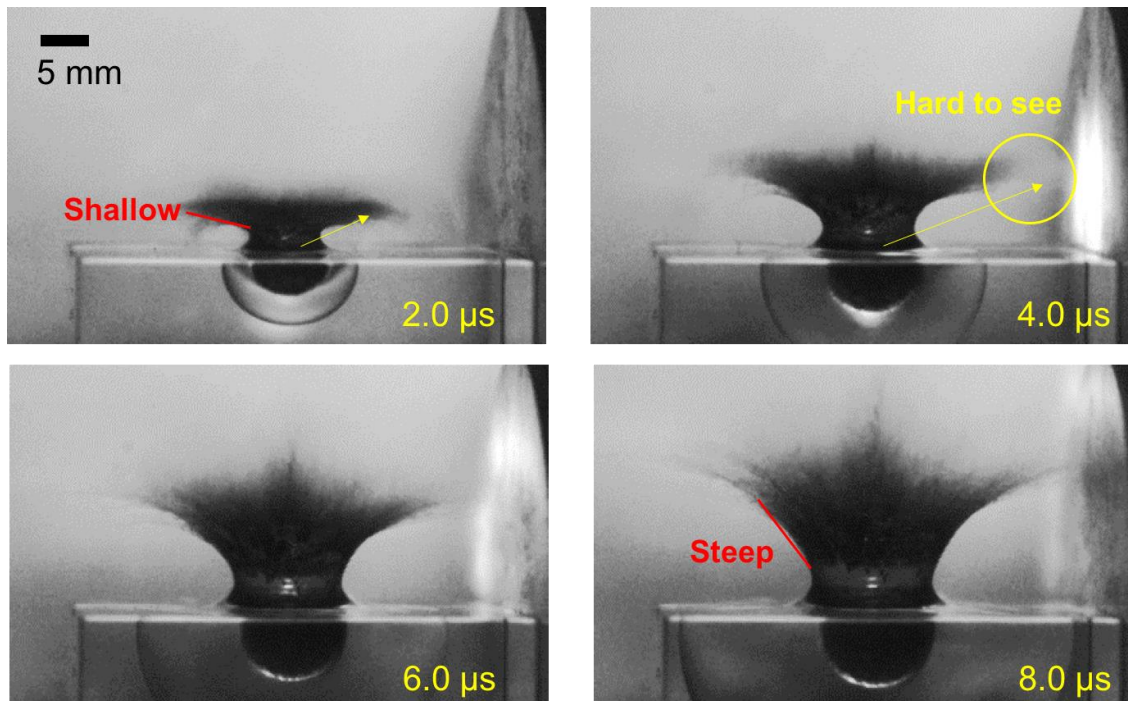
図 4 は衝突後  $2\ \mu\text{s}$  ごとの画像である. 放出角度は, 始めは小さいが次第に大きくなっている. また, 衝突後に低角度で飛び出した物質は量が少ないため時間が経つにつれて光学的に薄くなり, このカメラでは観察することができなくなっている. 画像から視線方向の速度を含まない高速度物質の速度を計測するには放出物カーテンの先端を測る必要があるが, 図 4 で見る限り, どこを測るかを決めるのは難しい. そこで図 5 に示すように, 容易に計測可能な特徴のある放出物についての速度を測った. 衝突後  $8\ \mu\text{s}$  では粒子形状をした放



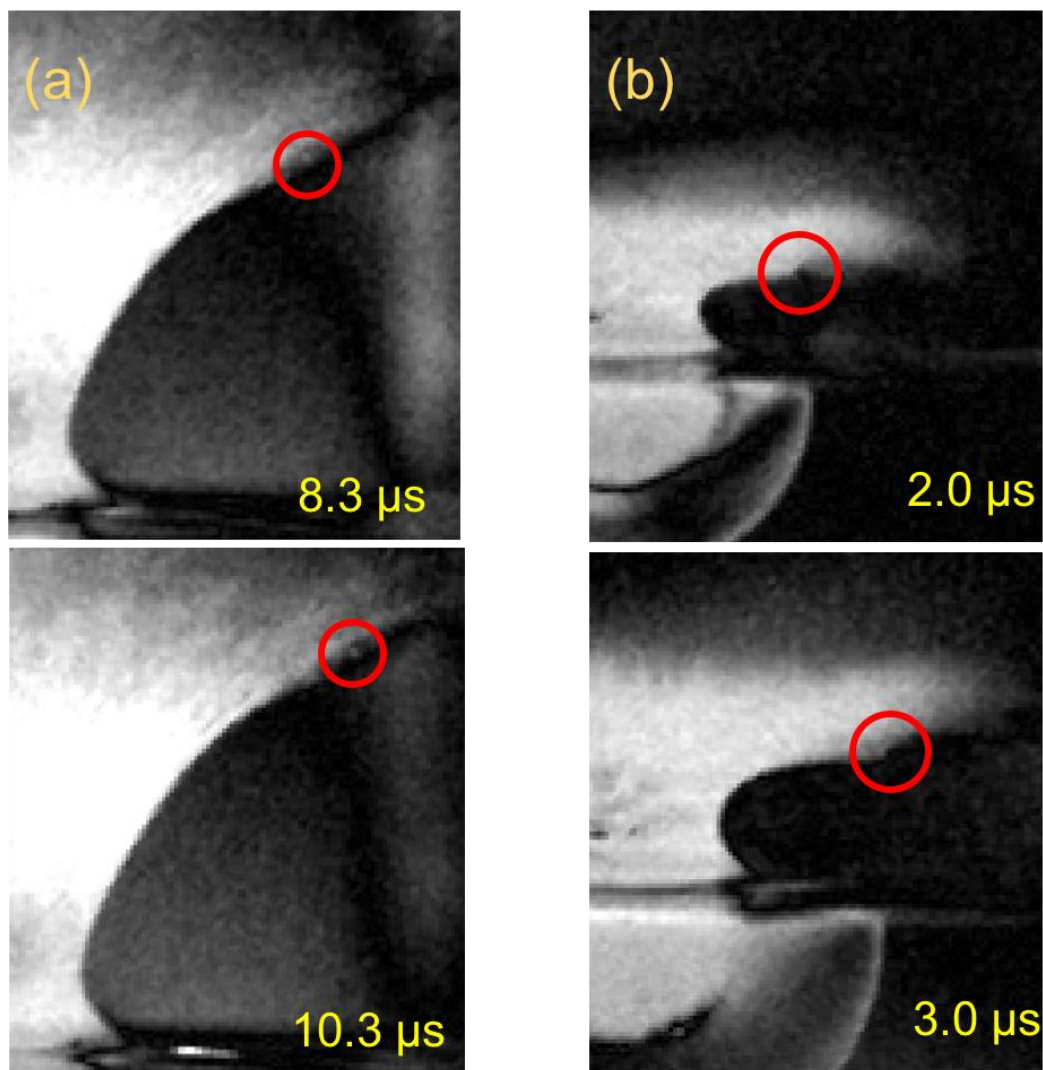
出物が見られた．この放出速度を図 2 で示したグラフのように位置と時間の関係から求めると  $2.31 \pm 0.01$  km/s の速度を持っており，衝突速度の 0.54 倍であった．また放出角度は 45 度であった．衝突後 2  $\mu$ s では放出物カーテンが折れ曲がっている場所が観察された．この原因についてはわかっていないが，速度計測が可能な場所である．この場所の放出物速度は  $3.75 \pm 0.03$  km/s であり衝突速度の 0.87 倍であった．また放出角度は 29 度であり，浅い角度で放出されていることがわかった．ここでは放出物の最大速度を求めることはできなかったが，少なくともこれらの速度より速い速度で放出される放出物が存在することがわかった．



**Figure 3.** Examples of high-speed images at an earlier stage of material ejection. The impact velocity of this shot was 4.28 km/s.



**Figure 4.** Examples of high-speed images at a later stage of material ejection. The images were obtained from the same shot shown in Figure 3.

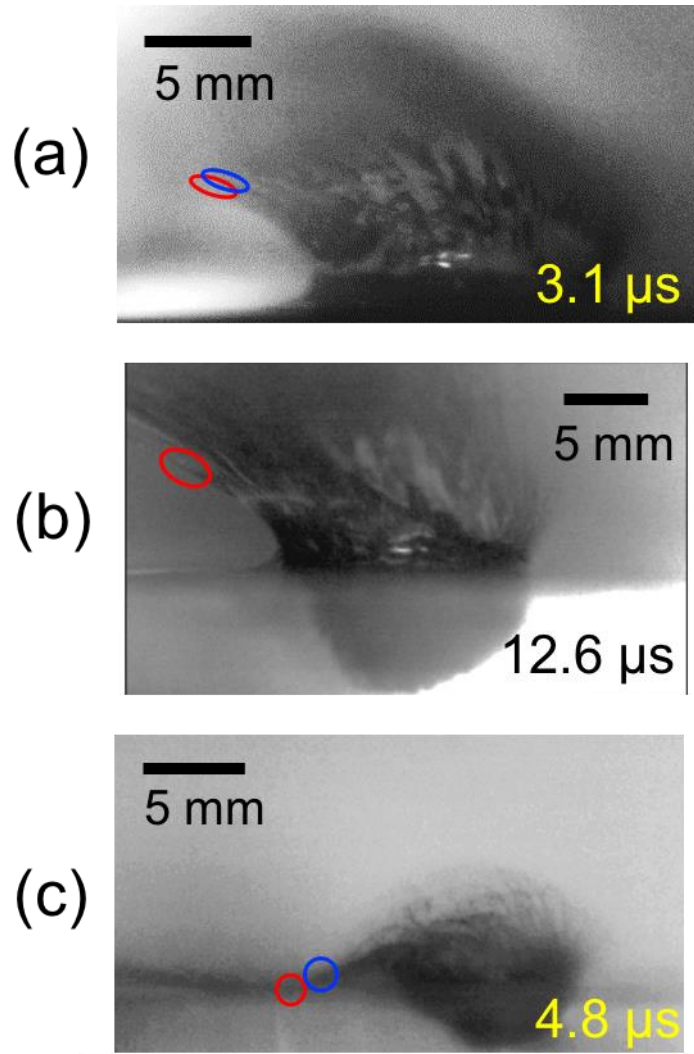


**Figure 5.** Examples of velocity measurement by using a tracing of a moving material. (a) The images after 8  $\mu\text{s}$  from the impact. A fragment of ejected material is shown in the red circle. (b) The images after 2  $\mu\text{s}$  from the impact. There is a kink in the ejecta curtain as shown in the red circle.

### 斜め衝突で放出される物質の速度

衝突角度を 45 度にして、衝突速度 7.18 km/s, 3.64 km/s, 1.76 km/s で実験を行い放出速度の計測を行った。正面衝突のときとは異なり、放出物は非対称に広がっている。始めに高速のジェットが飛び出し、

その後、標的由来と思われる放出物が下流方向に向かって放出されている様子が観察された。図 6 にスナップショット画像を示す。放出物の速度を求めたところ、衝突速度の 1.36 倍と衝突速度を超える放出物も観察された。計測可能な放出物を計測しているため、これらの速度よりも速い速度で放出されている放出物も存在している。斜め衝突においては衝突速度程度かそれよりも速い放出物があると考えられる。



**Figure 6.** The snapshots for oblique impacts at different impact velocities. The impact angles are 45 degrees. The circles show the ejecta of which we measured the velocities. (a) The impact velocity,  $v_i$  of 7.18 km/s. The ejection velocities were  $8.03 \pm 0.25$  km/s ( $1.12 v_i$ ) for red, and  $5.60 \pm 0.08$  km/s ( $0.78 v_i$ ) for blue. (b) The impact velocity of 3.64 km/s. The ejection velocity was  $1.51 \pm 0.11$  km/s ( $0.41 v_i$ ). (c) The impact velocity of 1.76 km/s. The ejection velocities were  $2.39 \pm 0.01$  km/s ( $1.36 v_i$ ) for red, and  $2.16 \pm 0.01$  km/s ( $1.23 v_i$ ) for blue.

まとめ

高速で放出された物質は、特異な地質試料であるテクタイトの生成や火星衛星表面上に火星物質が輸送されるかどうかといったことと関連が深く、高速衝突で標的物質がどれほどまで加速されるかを調べることは惑星科学において重要である。そこで千葉工業大学に設置された二段式軽ガス銃を用いて、”ポリカーボネイト弾丸 – ポリカーボネイト板標的”の衝突実験を行い、衝突点近傍から生成される放出物の速度計測を行った。正面衝突では衝突速度の 0.87 倍の速度を持った放出物が観察される一方、斜め 45 度衝突では衝突速度の 1.36 倍の速度をもつ放出物まで観察された。今回測定された速度は特徴のある容易に計測可能な放出物の速度であり、最も速い放出物はそれ以上の速度を持っていると考えられる。すなわち衝突速度と同程度、斜め衝突の場合はそれ以上の速度を持った放出物が存在すると考えられる。

## 参考文献

Hermalyn, B., Schultz, P.H., Time-resolved studies of hypervelocity vertical impacts into porous particulate targets: Effects of projectile density on early-time coupling and crater growth, *Icarus*, 216 (1) (2011), pp. 269–279.

Housen, K.R., et al., Crater ejecta scaling laws – Fundamental forms based on dimensional analysis, *J. Geophys. Res.*, 88, (1983), pp. 2485–2499.

Johnson, B.C., et al., Jetting during vertical impacts of spherical projectiles, *Icarus*, 238, (2014), p.p. 13-22.

Kondo, K., Yasuo, H., Self-adjustable pre-event pulse generator for shock wave experiments, *Rev. Sci. Instrum.*, 58, (1987), p.p. 1755–1757.

Kurosawa, K., et al., Dynamics of hypervelocity jetting during oblique impacts of spherical projectiles investigated via ultrafast imaging, *J. Geophys. Res. Planets*, 120, (2015), p.p.1237–1251,

Ramsley, K.R., Head III J.W., Mars impact ejecta in the regolith of Phobos: Bulk concentration and distribution, *Planetary and Space Science*, 87, (2013), p.p. 115-129.

Trunin, R. F., et al., Experimental Data on Shock Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter, (2001), Russian Federal Nuclear Center, Sarov.

Tsujido, S., et al., Ejecta velocity distribution of impact craters formed on quartz sand: Effect of projectile density on crater scaling law, *Icarus*, 262, (2015), p.p. 79-92.

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

Yamamoto, S. et al., Velocity distributions of high-velocity ejecta from regolith targets, *Icarus*, 178(1), (2005), p.p. 264-273.