

# 斜め衝突による下流方向高速放出物の質量と大気存在下における運動

\*羽村 太雅<sup>1)</sup>, 杉田 精司<sup>1)</sup>, 黒澤 耕介<sup>2)</sup>, 長谷川 直<sup>3)</sup>, 門野 敏彦<sup>4)</sup>

1. 東大 新領域, 2. 千葉工大, 3. ISAS/JAXA, 4. 産業医科大

*E-mail: tiger@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp*

## 1. 背景と目的

地球史初期には、地球や月を始めとする固体惑星表面に多数の天体衝突が発生していたと考えられている(e.g., BVSP, 1981)。特に大多数を占める斜め衝突 (Shoemaker, 1962)は、良く調べられてきた(e.g., Schultz and Gault, 1990; Pierazzo and Melosh, 2000)。

斜め衝突に伴い、衝突点から下流水平方向には蒸気と凝縮層の混合物が高速で放出される(Sugita and Schultz, 2003b)。周辺大気と下流飛行成分の相互作用は、金星のクレーター周辺に見られる地形(Sugita and Schultz, 2002)、大気剥ぎ取り(e.g., Shuvalov, 2009)、CN, C<sub>2</sub>を始めとする反応性の高い炭素化合物の生成(Sugita and Schultz, 2003a, 2009)など、惑星科学上の諸問題において重要な役割を果たしうると考えられる。しかし、下流方向へ飛行する衝突蒸気雲は破片やガスの混合した混相流であり、周辺大気による破碎やアブレーション、周辺大気分子と破片蒸気の混合や化学反応など、多数の物理・化学過程が絡み合う複雑な啓である。相互作用の生成物量の指標のひとつである蒸気雲の質量や相互作用しうる周辺大気の質量など、基本的な物理量でさえあまり理解されていない。そこで本研究では気体中での斜め高速度衝突実験を行い、下流に飛行する蒸気雲の運動を単純な運動モデルで記述し、その質量を推定し、相互作用しうる大気の質量を算出した。

## 2. 高速衝突実験

実験には宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いた。実験条件を以下に示す。衝突速度、角度は4.1-6.9 km/s、水平から30度とした。周辺大気圧は窒素雰囲気30 hPaで一定とした。弾丸、標的にはそれぞれ直径7 mmのポリカーボネイト球と2×10×10 cm の銅塊を用いた。扇形に広がる蒸気雲のカメラ視野外における広がり角を計測するため、衝突点の670 mm後方には厚さ1.2 mmのAl板を設置した。発生した蒸気雲の様子は上方と側面から2台の高速度カメラを用いて1-2 μs/frameの撮影速度で同時観測した。黒体放射と、C<sub>2</sub>, CNの分子発光バンドに対応する波長域のバンドパスフィルタを通して2台のカメラでマルチバンド撮像観測を行った。

## 3. 結果

側方からの観測の結果、衝突点を中心として半球状に膨張する成分は、C<sub>2</sub>分子発光の波長域でのみ強く観測されることから、弾丸蒸気由来の発光と考えられる。衝突点から下流側へは、蒸気雲が地面に対して水平に飛行していく様子が確認された。蒸気雲が標的の面から放出された直後には、標的の面を回り込む様子が観測された。これは破片の直線的な運動ではなく、ガスの膨張が側面から観測した際の蒸気雲の形状を支配していることを示唆し

ている。下流方向成分はどの波長域でも一体となって運動する様子が確認されることから、この成分の運動は重心系の運動で代表させて良いと考えられる。また、画像から蒸気雲先端の到達距離を計測した。検証板には多数の衝突痕が形成された。これは蒸気雲中の凝縮相の存在が示唆される。衝突痕に覆われた面密度を計測すると、鉛直方向には25 mm(衝突点からの見込み角 $\sim 2^\circ$ )程度しか広がっていないのに対して、水平方向には広く分布している様子が観察された。検証板上に形成された衝突痕の水平方向の分布は、中心から15~20 cm程度で面積密度が半減する様子が観察された。したがって、衝突点から検証板までの距離と検証板上の衝突痕の水平分布から、蒸気雲の拡がり角は約30度であることがわかった。

#### 4. 議論

以下では、実験結果をもとに蒸気雲の重心運動に対する簡単な力学モデルを構築し、下流方向に飛行する蒸気雲の質量と、相互作用しうる周辺大気の質量を推定する。

本研究の高レイノルズ数領域では蒸気雲の運動は速度の2乗に比例する慣性抵抗で支配される。重心の運動方程式は以下のように表せると期待される。

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_a S C_D v^2 \quad (1)$$

ここで $m$ ,  $v$ ,  $\rho_a$ ,  $S$ ,  $C_D$ はそれぞれ蒸気雲質量、速度、周辺大気密度、蒸気雲断面積、抵抗係数である。断面積 $S$ は蒸気雲の先端の各点が進行方向に対して垂直となる円弧の長さ ( $d \times 2\theta$ ,

検証板に形成された衝突痕の拡がり角度 $\theta=30^\circ$ ,先端の移動距離 $d(t)$ と蒸気雲の厚み $h(t)$ の積として近似した。

蒸気雲先端速度の時間変化は、 $m/C_D$ を唯一のフリーパラメタとして解くことができる。 $m/C_D$ が時間変化しないと仮定して蒸気雲の運動方程式を解くと、蒸気雲位置の時間変化をよく再現できた。 $C_D=1$  (Landau and Lifshitz, 1987)と仮定すると、得られた $m/C_D$ の値( $\sim 0.01$  弾丸質量)は下流方向へ運動する蒸気雲の質量を意味する。また、破片表面の温度が1000 K程度まで低下して蒸発がなくなるまでの間に掃引される周辺大気の質量は、蒸気雲質量の2~10倍となると算出された。この結果は、微小質量の弾丸破片が大質量の大気と素早く化学反応可能で、これまで考えられていたより大質量の衝突由来の下流方向高速飛行成分も大気と効率良く相互作用しうること、地球型惑星・衛星上の地質記録から見積もられた斜め衝突速度の見積もりが小さくなる(スケールリング則が変化する)可能性を示唆している。

#### 参考文献

- [1] Basaltic Volcanism Study Project. (1981) Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets, Lunar and Planetary Inst. 1049. [2] Shoemaker 1962. [3] Sugita and Schultz (2003b) JGR, 108. [4] Pierazzo and Melosh, (2000) MAPS, 35, 117. [5] Sugita and Schultz (2002) Icarus, 155, 265. [6] Shuvalov (2009) MAPS, 44, 1096. [7] Sugita and Schultz (2003a) JGR, 108, 5051. [8] Sugita and Schultz (2009) GRL, 36, L20204. [9] Landau and Lifshitz (1987) Fluid Mechanics.