

斜め衝突蒸気雲の空力相互作用を伴う下流方向への運動メカニズム

*羽村 太雅¹⁾, 黒澤 耕介²⁾, 門野 敏彦³⁾, 長谷川 直²⁾, 杉田 精司¹⁾

1. 東京大学大学院 新領域創成科学研究科, 2. ISAS/JAXA, 3. 産業医科大

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

1. 背景と目的

38億年以前の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ことが月面の地質記録から明らかにされた(e.g., BVSP, 1981)。特に大多数は地表面に斜めに衝突するため(Shoemaker, 1962)、斜め衝突は良く調べられてきた(e.g., Schultz and Gault, 1990; Pierazzo and Melosh, 2000)。

斜め衝突の場合、衝突点を中心に半球状に膨張する成分と、衝突方向下流側に飛び出す成分からなる衝突蒸気雲を生じる(Schultz, 1996)。特に下流方向に飛び出す成分は、蒸気の他に、衝突天体の固体もしくは溶融した破片を含み(Sugita and Schultz, 2003b)、惑星大気のスケールハイトよりも小さな場合は周辺大気中を水平に高速で飛行する(e.g., Pierazzo and Melosh, 2000)。

衝突蒸気雲と周辺大気との相互作用は、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, C₂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たと考えられている。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、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大局的な運動を調べることで、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。ポリカーボネイトは、同じく重合炭化水素であり炭素質隕石中に多く見られる不溶性有機物の類似物質として採用した。銅は衝撃インピーダンスが高いため、今回の実験条件程度の衝突速度でも、海面への天然の隕石衝突時に達成される高衝撃圧力が実現され、天然の衝突の場合と同程度部分蒸発する。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

AI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 $\mu\text{s}/\text{frame}$ の撮影速度で同時観測した。弾丸は水平に飛行するため、標的は斜め30度傾けて設置し、それに伴いカメラも同様に傾けて撮影した。実験装置の概念図を図1に示す。

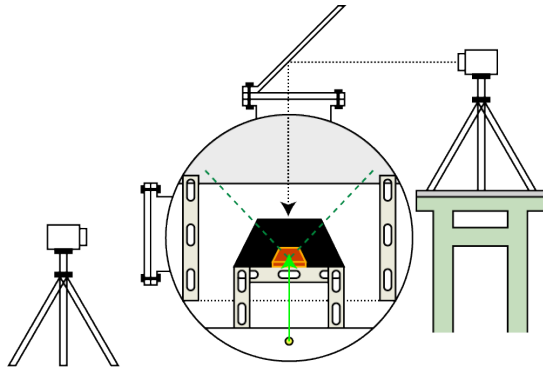


図1. 衝突方向上流側から見た実験系の概念図。傾いた銅塊標的に衝突した弾丸は水平方向に拡がりながら飛行し、衝突点下流に設置したAI板に達する。

3. 結果

実験結果を以下に示す。

側方からの観測結果を図2に示す。蒸気雲は地面に対して水平に飛行していくがわかった。また、蒸気雲が標的面から放出された直後に標的面を回り込む様子が観測される。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。また、画像から蒸気雲先端の到達距離を計測した。

一方、蒸気雲を上から観測したところ、衝突点を中心とした、拡がり角一定の扇状に拡がることわかった。検証板には

多数の衝突痕が形成されており、蒸気雲中に凝縮相の存在が確認された。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 $\sim 2^\circ$)程度しか拡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を図3に示した。クレーターは中心部分に集中し、半値幅 ~ 19 cmで減衰する。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° であることがわかった。また、拡がり角の衝突速度依存性は見られなかった。

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。

本研究の実験条件下では、周辺大気中の衝突蒸気雲の流れ場のレイノルズ数は $> 10^4$ と見積もることができる。したがって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、蒸気雲が質点のように振る舞うのであれば重心の運動方程式は以下のように表すことができると期待される。

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

ここで m , v , ρ_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。

$$h(t)=7+d(t) \times (\pi/90) [\text{mm}] \quad (2)$$

蒸気雲先端位置の時間変化は、 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 の時間変化を実験結果から推定することはできないが、 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いたところ、蒸気雲位置の時間変化をよく再現できた。本研究の実験条件下では C_D は蒸気雲の断面積や速度によってほぼ変化しない(e.g., Landau and Lifshitz, 2002)ため、 m/C_D 一定とは蒸気雲質量が一定で運動していることを示唆している。 $C_D=1$ と仮定すると、得られた m/C_D の値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質量は、蒸気雲質量の2~10倍となると算出された。現段階では詳細な化学過程を取り扱うことはできないものの、下流方向に飛行する高温蒸気雲の最終到達距離、天体と相互作用可能な惑星大気質量、周辺大気から蒸気雲全体が受ける加熱率、化学反応生成物の影響を受ける惑星表面積といった大局的な挙動は、単純な力学モデルで推定できる可能性を示していると考えられる。

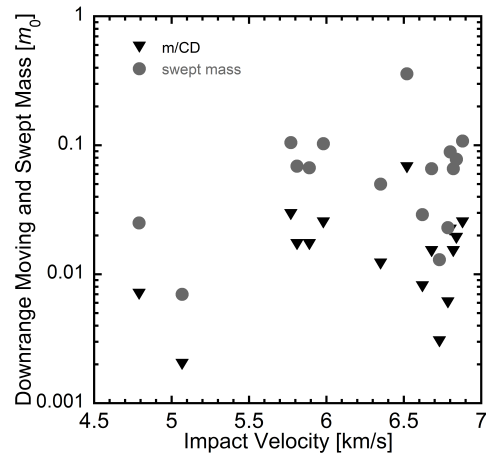


図4. 蒸気雲質量(▼)と、十分冷却するまで速度が低下する間に掃引される周辺大気質量(●)

5. まとめ

本研究では、斜め衝突によって生じる蒸気雲の大気中における運動を2台の高速カメラを用いて、下流方向に飛行する蒸気雲の運動を観測した。その結果、蒸気雲先端の移動距離は慣性抵抗によって支配される質量一定の質点の運動として記述可能であることを明らかにし、下流方向に飛行する蒸気雲質量を推定、掃引される周辺大気質量を算出した。

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.

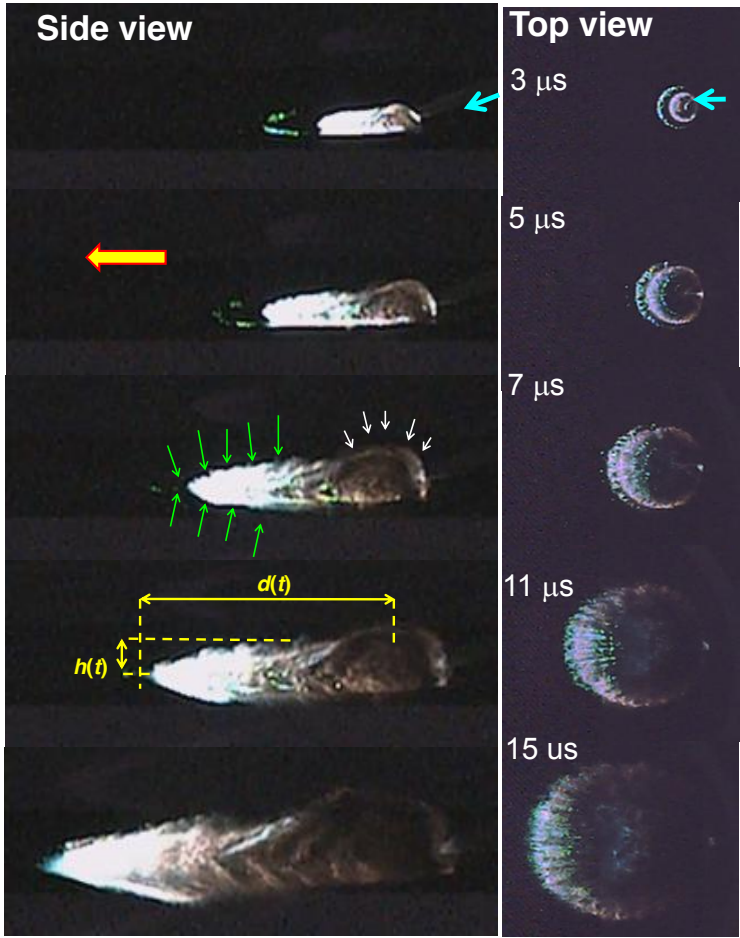


図 2. 高速撮像観測により得られた蒸気雲の運動の様子。左の列が側面からの観測、右の列が上方からの観測結果である。衝突速度はそれぞれ 6.6 km/s, 6.9 km/s。衝突方向および蒸気雲の進行方向は青と黄色の矢印で示した。緑と白の矢印で囲まれた部分がそれぞれ下流方向に飛行する成分と、衝突点を中心に半球膨張する成分である。

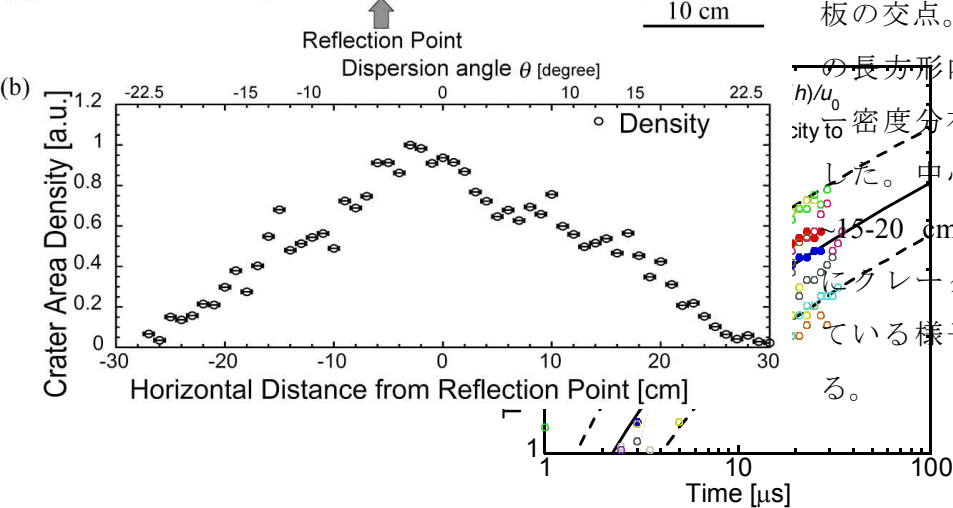
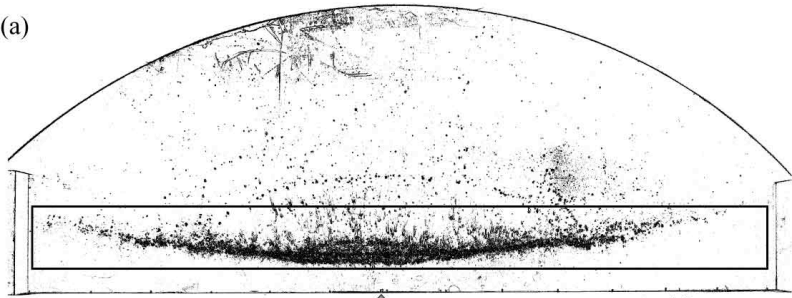


図 3. (a) 検証板上に形成されたクレーター(衝突速度 6.79 km/s)。Reflection point は、弾丸の反射した軌跡と検証板の交点。(b) 図(a)中の長方形内のクレータ密度分布をプロットした。中心から左右に 15-20 cm (~15°) の範囲にクレーターが密集している様子が観測される。

Thickness [projectile diameter]

