

粉体への衝突実験で見られるランパート風地形の形成過程

鈴木 絢子¹, 門野 敏彦², 中村 昭子³, 荒川 政彦³, 和田浩二⁴, 山本聡⁵

¹惑星科学研究センター, ²大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ³神戸大学,
⁴千葉工業大学・惑星探査研究センター, ⁵国立環境研究所・環境計測研究センター

太陽系内に存在する固体天体上に普遍的に存在する衝突クレーターの周囲には、様々な地形のエジェクタが観察される。それらは、衝突した天体の速度や物性、衝突された天体の地表・地下や大気などの条件が異なるために多様性を示すと考えられている。多様なエジェクタ地形の形成過程を解明することで、固体天体の過去の環境や衝突条件を制約することができるかもしれない。

衝突条件を様々に変化させてできる地形を調べた研究は、これまでも行われてきた。Schultz, (1992) では、衝突速度2~4km/s, チャンバー内圧力0.02~1barの範囲で実験を行い、少なくとも4種類のエジェクタパターンを確認した。ランパート風の同心円リッジパターンは、0.06~0.3barで観察された。大気中をエジェクタカーテンが進行するときに、カーテンの内側への大気の流れによって渦ができ、その渦が堆積したエジェクタと相互作用することでリッジができると結論づけた。しかしリッジの形成について十分に詳しく観察されていないため、我々は本実験を企画した。

実験には神戸大学にある縦打ちのガス銃を用いた。弾丸はアルミニウム円柱で、直径10mm, 高さ10mmである。標的は中心直径が100 μ mのガラスビーズを直径28cm・深さ10cmの金属製のたらいに詰めたもので、バルク密度は1.5g/cm³である。衝突速度を自由落下(数m/s)~100m/s, チャンバー内圧力を0.005~1barに変化させて実験を行った。クレーター形成の様子は高速度ビデオカメラを用いて5000fpsで撮影した。実験後、クレーターの中心を通るような垂直レーザーシートを照射し、デジタルカメラで斜めから写真を撮影して、クレーターの直径と深さ、リムの高さを測定した。

結果、衝突速度とチャンバー内圧力を変化させると、少なくとも2種類のパターンが現れることがわかった：同心円状の1本以上リッジが卓越したConcentric Ridges (CR)パターンと、放射状の畝と溝の繰り返しが顕著なRadial Lineations

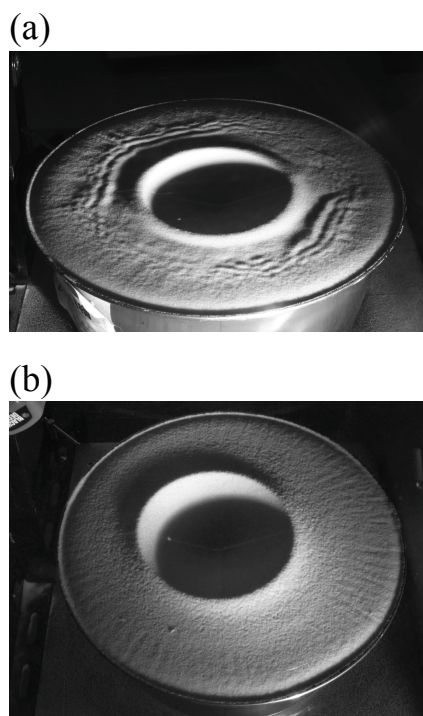


図1：実験室で観察された典型的なエジェクタ地形。
(a) CRパターン。チャンバー内圧力1 bar. (b) RLパターン。チャンバー内圧力0.005 bar. どちらも衝突速度は約50 m/s.

(RL)パターンである(図1)。ただし、CRパターンでも、放射状の畝と溝の繰り返しは同心円リッジの外側に観察される。CRパターンは、火星のランパートクレーターのエジェクタ地形と非常によく似ている。衝突速度が一定の場合、チャンバー内圧力が高いとCRパターンとなり、圧力が下がるに従って徐々に同心円リッジは微かになり、RLパターンへと変化する。一定圧力の場合も、高速ではCRパターンが現れ、特に同心円のリッジは花びら状に波打っているが、低速になると同心円リッジは徐々に正円に近づき、数m/sではRLパターンとなる。

我々は特にCRパターンの形成過程に注目した。同心円リッジの半径(複数ある場合は一番内側)をクレーター半径で規格化した値は、チャン

パー内圧力に依らないこともわかった。さらに、高速度ビデオカメラの映像でクレーター形成過程を詳しく観察したところ、リムが何らかの要因で崩され、崩壊した部分が地面を這う流れとなって、先端にリッジを作っていることがわかった。

そこで我々は、弾丸が大気中を進行する際に作る伴流が、リムを崩壊させて同心円リッジを作っているという仮説を立て、以下の3つの観点からその仮説を検証した：1) 弾丸が作る伴流は存在するか、2) 弾丸が作る伴流は、本実験の範囲内でガラスビーズを動かさうるか、3) できたクレーターのリムは実際に崩れているか。

弾丸が作る伴流を、線香の煙を用いて可視化した。直径15mmの穴をあけたポリスチレン板を設置し、板の上に線香を立てた。弾丸は穴をすり抜けて油粘土で受け止められるためエジェクタが視界を遮ることはない。高速度ビデオカメラの映像では、弾丸を後ろから追いかける渦状の流れが確認された(図2)。

弾丸が作る伴流が渦輪であるとみなし、Suzuki et al., (2007) で決めた渦輪がガラスビーズを動かさうる条件を用いて、伴流の渦輪がリムを崩すことのできるしきい値を求めた。Suzuki et al., (2007) では、流れの揚力と粒子の重力の比の無次元数(1)を使っているが、ターゲット層内の粒子間の固着力を考慮した無次元数(2)(羽倉, 2011) も用いた。渦輪の進行速度は衝突速度の半分程度とした。結果、渦輪がガラスビーズを動かさうるしきい値は、今回の実験の範囲内に現れることがわかった(図3)。

$$\theta_p = \frac{\rho_{\text{flow}} U_{\text{flow}}^2}{r \rho_{\text{particle}} g} \quad (1)$$

$$\theta_{p,c} = \frac{\rho_{\text{flow}} U_{\text{flow}}^2}{\frac{4}{3} r \rho_{\text{particle}} g + 18.9 (2r)^{-0.40}} \quad (2)$$

最後に、できたクレーターのリムが実際に崩れているか、リムの高さを測定した。クレーター半径で規格化したリムの高さは、チャンパー内圧力が上昇するにつれて低くなることがわかった。便宜的に 0.03 という値を決め、それより値が大きい地形を「崩壊度小」、小さい地形を「崩壊度大」と分類した。衝突速度とチャンパー内圧力で描いたグラフ上で、崩壊度が大きい地形は右上に、崩壊度が小さい地形は左下側にプロットされ、崩壊度の境界は、前段落で求めた渦輪がガラスビーズ

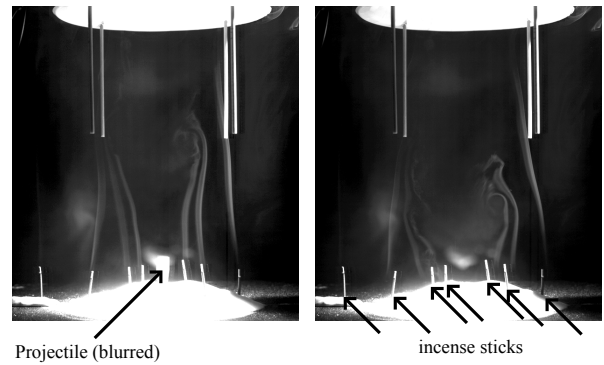


図2：線香の煙で可視化された、弾丸が作る伴流。

を動かさうるしきい値とよく一致することがわかった(図3)。

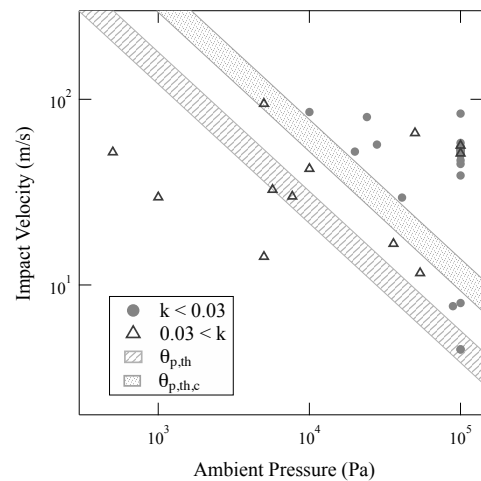


図3：リムの崩壊度と衝突条件の関係。 $\theta_{p,th}$ 、 $\theta_{p,th,c}$ は、渦輪がビーズを動かせるしきい値で、それぞれ固着力なし、ありの場合。

以上のことから、弾丸が大気中を進行する際に作る伴流がリムを崩すことは、今回実験室で観察された同心円リッジの形成過程として、十分あり得ることが確かめられた。弾丸の衝突速度がより早い場合や天体スケールへ外挿できるかについては今後の検討課題である。

Schultz, P. H., (1992), *JGR*, **97**, E7, 11623-11662.

Suzuki, A., et al., (2007), *GRL*, **34**, L05203.

羽倉祥雄, (2011), 修士論文。