

衝突雷発生可能性の検証に向けた粉体への衝突実験

黒澤耕介¹, 佐藤雅彦², 大野遼¹, 新原隆史³,
中澤風音⁴, 奥住聡⁴, 村主崇行⁵, 長谷川直⁶

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ² 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, ³ 東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻システム俯瞰学講座, ⁴ 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系, ⁵ 理化学研究所 計算科学研究機構, ⁶ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

1. 衝突雷(しょうとつらい)とは

火山噴火の際に噴煙中で放電が起こる現象は「火山雷(かざんらい)」として度々観測されている[e.g., Genareau et al., 2015]. 火山雷は噴火によって大気中に放出された岩石微粒子同士の衝突時に電荷分離が生じ, 最終的に絶縁破壊電場を超えて電流が発生する過程であると考えられている. 放電路周辺の大気と岩石微粒子が加熱され, 自発光を生じる様が火山雷として観測される. 天体衝突時には粉碎された岩石微粒子が上空へ放出されるので火山雷と同様の放電現象が起こると期待される. 我々は現時点では仮想的なこの過程を「衝突雷」と名付け, その発生可能性を示すことを目指している. 衝突雷の惑星科学的における潜在的な重要性については2017年度の集録にまとめたので, ご興味を持たれた方はそちらを参照してほしい.

2. 昨年度までの成果

これまでの実験から, (1) 室内実験の時空間スケールでは想像するような大規模な放電構造は形成されない(2017年度), (2) 暗闇中で粉体への衝突実験を実施すると, 自発光を放つ光点が多数形成される(2017年度), (3) 光点の光は~2000 Kの灰色放射由来(2018年度), (5) 実験後には標的たらい中及びチャンバの床に, 一度熔融してその後固化したような凝集組織が残り回収可能(2018, 2019年度), (6) 放出物カーテンに観察される網目状パターンは放出の最初期段階ですでに開始していること(2019年度)がわかってきた.

今年度は網目状パターンの形成及び成長過程のモデル化, 残留磁化を用いた小スケールでの電荷分離発生の有無の検証を目指し研究を行った.

3. 放出物カーテンに観察される網目状パターン形成過程

上で述べたように昨年度の衝突実験で放出物カーテンの網目状パターンは放出物カーテン形成の極初期の段階ですでに開始しており、その後は幾何学的に膨張して次第に明確に視認できるようになる、ということがわかってきた。これはKadono et al. (2020)の推察を実証したものである。我々は非弾性衝突を扱えるN体計算コードREBOUND [Rein and Liu, 2012]を用いて粒子集団のパターン形成過程を調査することにした。問題を簡略化するため、2次元デカルト座標に粒子を配置し、初期にランダム速度を加え時間進化を解いた[岩澤, 2019; 中澤, 2020]。放出物カーテンの幾何学的な膨張を模擬して、x方向に粒子同士が遠ざかる膨張速度を導入すると、室内衝突実験で観察されるような網目状パターンの「凍結」を再現できることがわかった。クラスタ解析を実施し、パターンを構成する特徴的な粒子数の抽出も実施した。

続いて掘削流中のパターン形成過程を記述する物理モデルの構築を試みた。すでに複数粒子から構成されているクラスタ同士は完全合体すると仮定し、合体成長方程式を解くと、上記のN体計算結果をクラスタ解析して求めた特徴的な粒子数の時間変化を再現できることがわかった。この結果は論文としてまとめ、国際誌に投稿済みである[Nakazawa et al., submitted]。上記のN体計算では粒子の相対衝突速度分布、衝突周波数といった情報を抽出することも可能であり、将来的には電荷分離モデルを実装し、掘削流中での電荷分離度を求めることを計画している。

4. 粉体層への衝突実験

先に述べたように室内スケールの衝突実験では想像するような大規模放電構造は観察されなかった。これは電荷分離が起きていたとしても充電時間が足りず、大規模な電流発生に至らなかったと考えられる。しかし、電荷分離が起きていたならば実験後の試料に残留磁化として記録されている可能性がある。先述のように実験後の粉体試料に形成されたクレータの内外及びチャンバ床には凝集組織が残されることがわかっている。この試料の残留磁化を計測できれば、掘削流中での電荷分離の有無を探ることができるであろう。しかし、凝集組織がそもそもどのように形成されているのか?については不明であった。そこで今年度は凝集組織の形成過程を直接撮像することを試みた。

4.1 実験条件

宇宙科学研究所の超高速衝突実験施設に設置された縦型二段式水素ガス銃を用いて 2 種類の密度の粉体層への衝突実験を実施した。用いた試料はジルコンビーズ(真密度~4 g/cc)とガラスビーズ(真密度~2 g/cc)である。中心粒径は 50 μm である。粉体をたらいに満たし標的とした。弾丸には直径 2 mm のアルミニウム球を用いた。衝突速度は 3.3 - 5.4 km s^{-1} の範囲で変化させた。実験チャンバは<10 Pa になるまで減圧した後、弾丸を試料に衝突させた。

高速ビデオカメラ(Shimadzu, HPV-X)を用い、光源にはカメラのシャッター開放と同期して発光する単色レーザー光源を用いた。光源波長に対応するバンドパスフィルタをカメラレンズに装着して撮影を行うことで、衝突後の自発光を排除し、放出物カーテンの初期構造を観察できるようにした。図 1 に実験装置の概略図を示す。

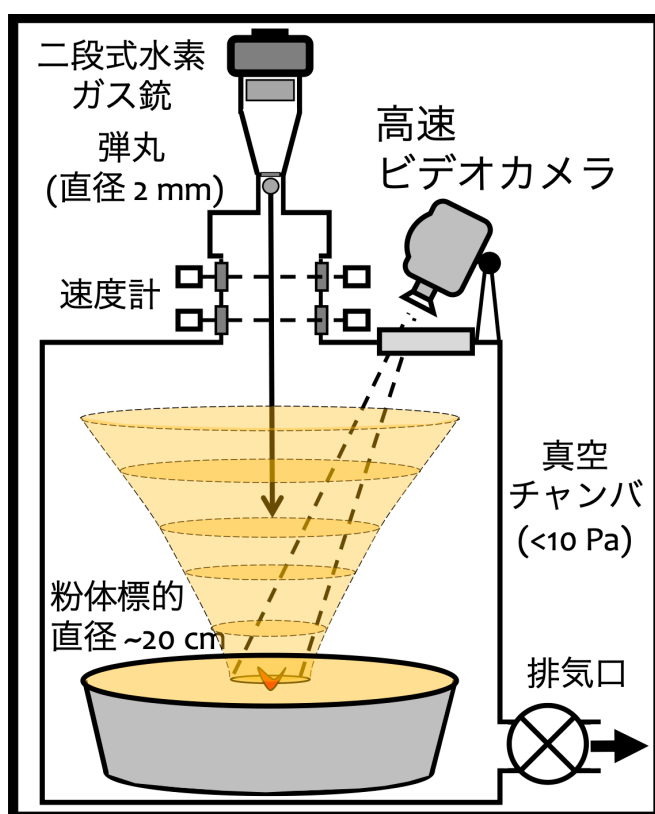


図 1. 実験装置概略図

4.2 実験結果

図 2 にジルコンビーズを用いた場合の高速撮像結果を示す。衝突直後に弾丸サイズの数倍程度の圧密層(熔融層かもしれない)が形成され、周辺からちぎれ飛んでいく様子がわかる。ジルコンビーズを標的に用いた場合、中心の圧密層はクレータ中心に残り

アルミニウム球 -> ジルコンビーズ, 衝突速度 = 5.4 km s^{-1}

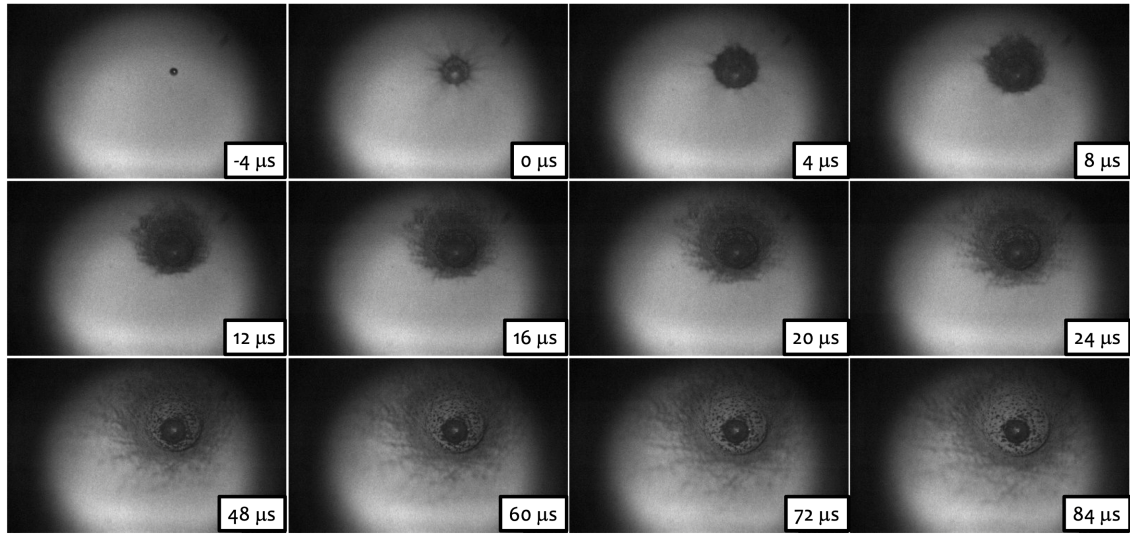


図 2. ジルコンビーズ標的のクレータ形成過程. 衝突後からの経過時間を図中に示した. -4 ms に映っている弾丸が直径 2 mm である.

アルミニウム球 -> ガラスビーズ, 衝突速度 = 4.8 km s^{-1}

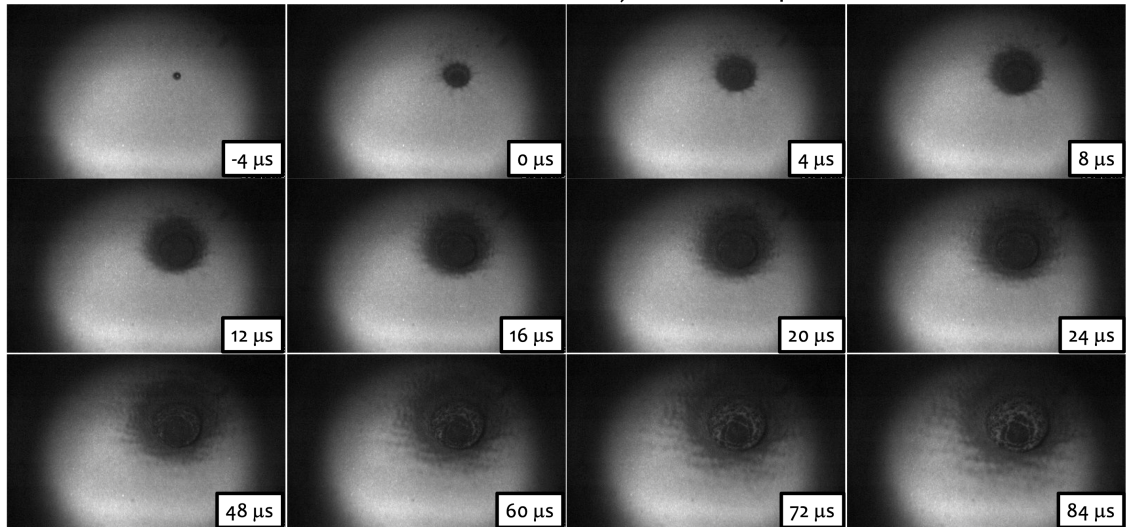


図 3. ガラスビーズ標的のクレータ形成過程. その他は図 2 と同様である.

続け, 実験後に回収可能である. 以下では「おわん形状組織」と呼ぶことにする. おわん形状組織は明らかに衝突直下点で形成されている. 図 3 にガラスビーズを用いた場合の高速撮像結果を示す. この場合, おわん形状組織が途中で分裂していく様子が観察された. 実験後には旧来の実験と同様に凝集組織を発見することができた.

5. 議論と今後の展望

ガラスビーズを用いた場合、きれいなおわん形状組織を回収することはできなかった。これはジルコンビーズに比べて真密度が小さいため衝撃波背面の粒子速度が大きくなるためであると推測される。いずれにしても凝集組織はやはり衝突爆心地近辺の物質であることが推定される。粒子間相互衝突が最も激しい衝突爆心地近辺物質を回収することができるため、電荷分離の検証に用いるには適している試料であると思われる。今後は磁性鉱物を含む斜長岩を砕いて粉体試料とする予定である。実験前に試料を消磁しておく。衝突後の凝集組織を回収し残留磁化を調べることで、掘削流中で電荷分離が起こるか否かに決着をつける予定である。

謝辞

本研究は宇宙科学研究所 超高速衝突実験施設の共同利用制度を利用して実施されました。

参考文献

- Genareau, K. et al. (2015), Lightning-induced volcanic spherules, *Geology* **43**, 319-322.
- Kadono, T. et al. (2015), Crater-ray formation by impact-induced ejecta particles, *Icarus* **250**, 215-221.
- Kadono, T. et al. (2020), Crater-ray formation through mutual collisions of hypervelocity-impact induced ejecta particles, *Icarus* **339**, 113590.
- Nakazawa, K. et al., Modeling early clustering of impact-induced ejecta particles based on laboratory and numerical experiments, submitted to *The Planetary Science Journal*.
- Rein, H. and Liu, S.-F. (2012), REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics, *Astronomy & Astrophysics* **537**, A128.
- 岩澤聖徳 (2019), 天体衝突に伴う雷発生の可能性の検証, 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 卒業論文.
- 中澤風音 (2020), 数値計算と室内実験による放出物カーテン内でのパターン形成のモデル化, 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系 卒業論文.