

衝突雷発生可能性の検証に向けた種々の粉体への衝突実験

黒澤耕介¹, 中澤風音², 佐藤雅彦³, 奥住聡², 村主崇行⁴, 長谷川直⁵

¹千葉工業大学 惑星探査研究センター, ²東京工業大学 理学院 地球惑星科学系, ³東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, ⁴理化学研究所 計算科学研究機構, ⁵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

「火山雷(かざんらい)」は火山噴火の際に噴煙中で放電が起こる現象として知られている。火山雷は噴火に伴って大気中に放出された岩石微粒子同士の相互衝突によって徐々に電荷分離が生じ、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

我々は衝突雷の発生可能性を探るべく、2017年度より宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて粉体への衝突実験を開始した。過去の衝突実験との差異は自発光で衝突放出物を観測したことである。その結果、室内実験では期待される大規模な放電構造は形成されないことがわかってきた。これは室内実験の時空間スケールでは粒子同士の相互衝突による電荷分離で対局的な強電場を形成するための十分な時間を稼げないことが原因ではないか？と思われる。この考えが正しければ、室内実験結果は放電に至らない条件に対して制約を与えることになるだろう。

室内衝突実験では放出物カーテン中で粒子集団がクラスタを成し、次第にメッシュ状パターンを形成する現象がしばしば観察される。先行研究によれば、クラスタ化は粒子同士の非弾性衝突に起因[1]し、不均質化は放出の初期段階で進行する[2]ことが示唆されている。すなわち観察されるメッシュ状パターンから衝突粒子集団の相互衝突周波数や相対衝突速度分布の情報を引き出せると期待できる。これは天然衝突における電荷分離度と絶縁破壊に至るまでに必要な充電時間を見積もるための基礎データとなるだろう。そこで我々は種々の粉体を標的に用いて放出初期段階の詳細観察を実施することとした。それと平行して実験室内放出物カーテン中でも小規模電荷分離が起

きている可能性を探るべく、磁性鉱物を含む玄武岩砂を用いた衝突実験を実施し、回収した試料の残留磁化計測を試みることにした。

3. 粉体層への衝突実験

3.1 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種類の粉体層への衝突実験を実施した。2種の実験の目的は、(1)初期段階における放出物カーテンの詳細観察、(2)衝突後の試料の残留磁化計測、である。粉体をたらいに満たし標的とした。弾丸には直径 4.6 mm のポリカーボネイト球、もしくは直径 2 mm の石英ガラス球を用いた。ここで石英ガラスを用いたのは融点がプラスチックより高く、弾丸の熔融の影響がでにくいであろう、という期待による。なるべく大きな空間構造を持つ放出物カーテンを観察するため、衝突速度は実験施設の定常運転最高速度である $\sim 7 \text{ km s}^{-1}$ とした。実験チャンバは $< 10 \text{ Pa}$ になるまで減圧した後、弾丸を試料に衝突させた。

先行研究のモデルを実証するため、カーテン発生直後の詳細撮影を実施した。この実験では標的としてソーダライムガラスビーズ、ジルコンビーズ (中心粒径 $50 \mu\text{m}$) を用いた。撮影には $1 \mu\text{s/frame}$ で撮影可能な高速ビデオカメラ (Shimadzu, HPV-X) を用いた。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。

衝突後の回収試料の残留磁化計測も実施した。標的には玄武岩質砂 (月土壤シミュラント、清水建設) を用いた。この玄武岩質砂試料は月レゴリスと同様のサイズ分布を持つ試料であるが、ふるいで $300 \mu\text{m}$ 以下の粒径に選別し、 140 mT で交流消磁処理を施し標的として用いた。縦型衝突銃の実験チャンバ内に磁気シールド (パーマロイ製、 20 kg 、直径 32 cm 、長さ 100 cm) を設置し、その中に試料を設置した。衝突雷に由来する残留磁化を持つ試料があるとすれば、それは衝突の影響を強くうけた試料が堆積するたらい表面付近であろうと予測される。それは衝突の影響を強くうけた試料が堆積するたらい表面付近であろうと予測される。そこでクレータの内外にわけて、表面から数 mm 厚の粉体試料を回収した。回収した試料は高知大学に設置されている超電導磁力計を用いて計測予定であり、現状では結果が得られていない。本稿の以下では(1)の実験について報告する。

Polycarbonate → Zircon beads, 6.4 km/s

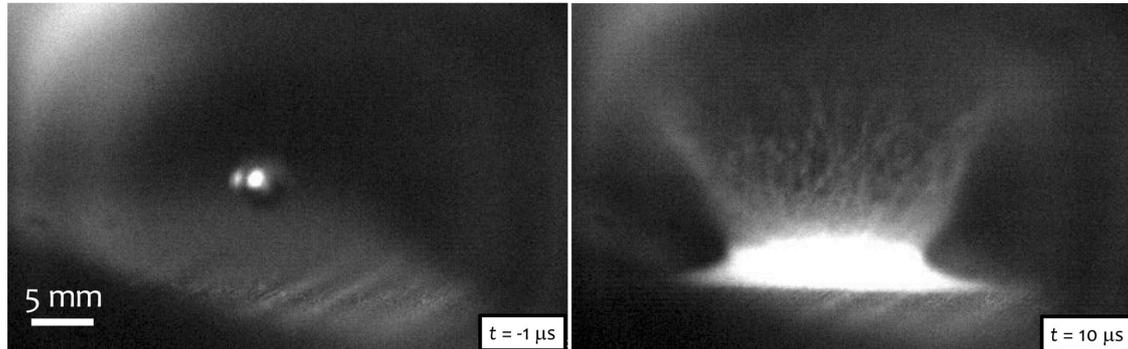


図 1. 単色レーザー光源を用いたクレータ形成実験の撮像例。衝突からの経過時刻とスケールを図中に示した。

3.2 実験結果

図 1 に高速ビデオカメラと単色レーザー光源による撮影例を示す。(Shot# 571, 6.4 km/s, ジルコンビーズ)を示す。今回はズームレンズを用い 110 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ の空間分解能で撮影を行った(左図)。単色照明のバンドパス撮像により、衝突後 10 μs でも自発光に妨げられることなく放出物カーテンを観察できている(右図)。この時刻ですでに放出物カーテン中にメッシュ状パターンが形成されていることがわかる。この結果は Kadono et al. (2020)で提案されたクラスタ形成モデルの予測を実証したものと見える。図 2 に高速ビデオカメラの最終フレーム(衝突後 $\sim 120 \mu\text{s}$)のガラスビーズ(左), ジルコンビーズ(右)標的の放出物カーテンの様相を示す。先行研究[1, 2]で観察された放出後期段階でのメッシュ状パターンと比較すると不明瞭ではあるが、メッシュ状パターンが成長しているのを確認した。パターンが不明瞭なのはこの観察時刻ではメッシュ状パターンを構成するクラスタが成長途中であり、クラスタ間を細かい粒子が満たしていると予想される。図 3 は図 2 のデータに画像処理を施してパターンを強調した放出物カーテンである。ここでは ImageJ ソフトウェアを用いて 2 次元フーリエ変換し、5–30 pixels のバンドパスフィルタをかけた。このような比較を行うとガラスビーズ標的と比較してジルコンビーズの方がパターンの成長が進んでいる様子がわかる。図 4 は図 3 の画像中の測線(黄色破線)に沿ったカウント値のプロファイルである。ジルコンビーズの方が明暗のコントラストが大きいことが定量的にわかる。メッシュ状パターンを作るクラスタ間の間隔はどちらの標的の場合も数 mm のようである。

4. 議論と今後の展望

今回単色レーザー光源を用いた放出物カーテンの詳細観察により、放出最初期から

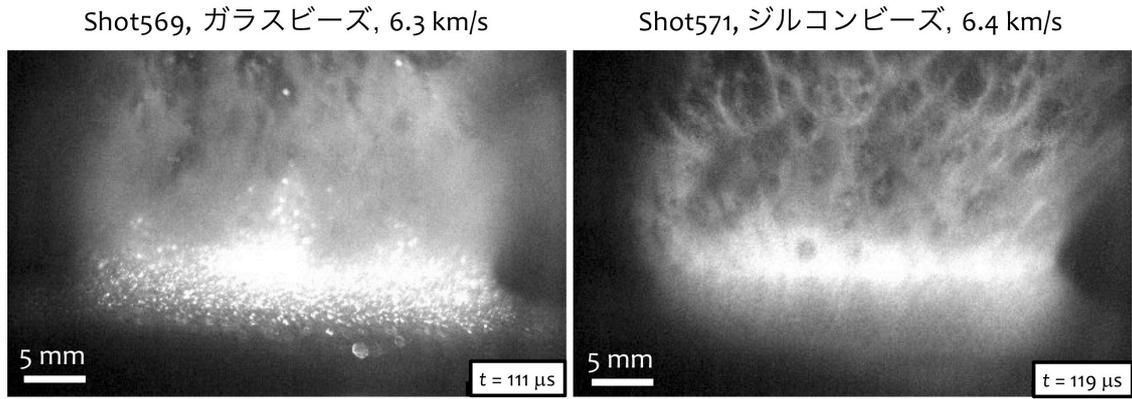


図 2. 衝突後 $\sim 120 \mu\text{s}$ の放出物カーテンの様子. (左)ガラスビーズ, (右)ジルコンビーズ.

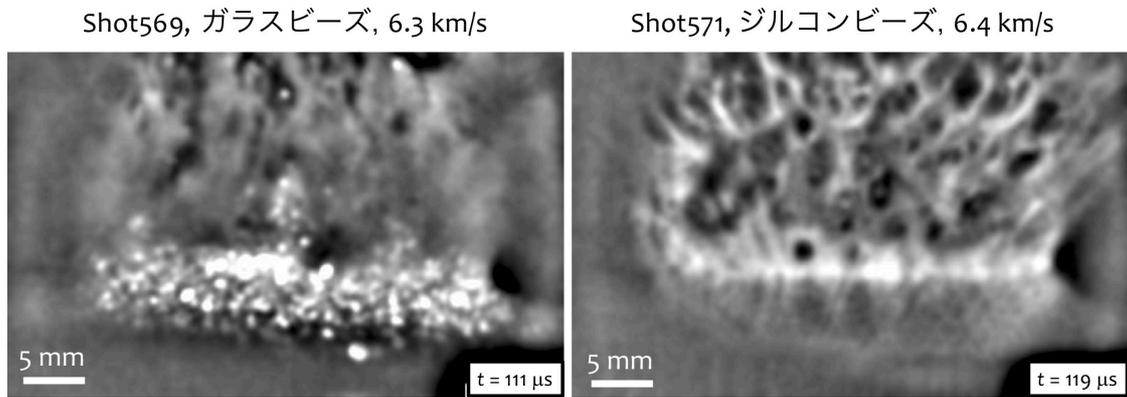


図 3. 図 2 のデータの画像処理例.

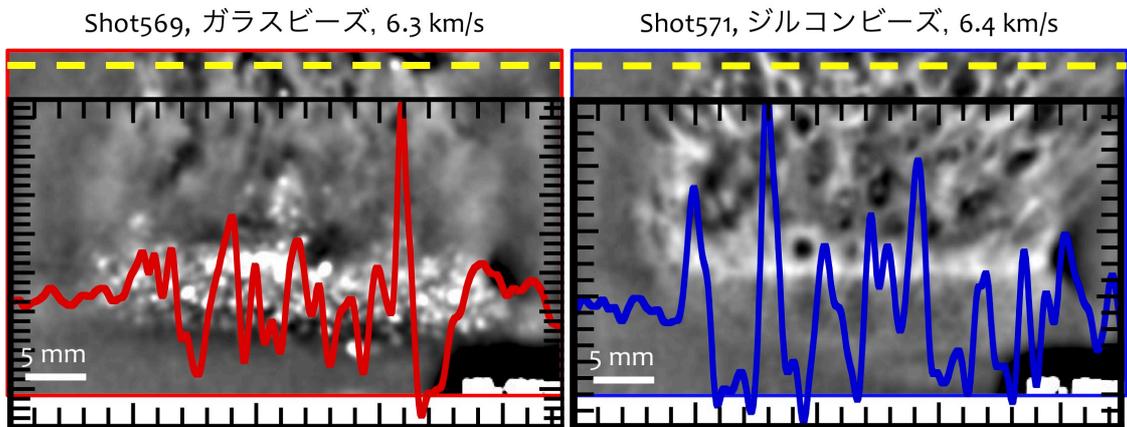


図 4. 図 3 の測線(黄色破線)に沿ったカウント値のプロファイル.

パターン形成が起こっていることを実証し、物質の違いによりメッシュ状パターンが変化することを確認した。現在、実験とは独立に剛体球を扱える N 体計算コード「REBOUND」を用いて、数値実験を開始している[3, 4]。反発係数や粒子の初期速度分布を変化させると、粒子集団が形成するメッシュ状パターンが変化することを確認している。数値計算中では粒子同士の衝突周波数や速度分布の変化を詳細に解析できる。実験で観察されたメッシュ状パターンと数値実験結果を比較し、電荷分離を記述する基本的なパラメータを制約していく予定である。

参考文献

1. Kadono, T. et al. (2015), Crater-ray formation by impact-induced ejecta particles, *Icarus* 250, 215-221.
2. Kadono, T. et al. (2020), Crater-ray formation through mutual collisions of hypervelocity-impact induced ejecta particles, *Icarus* 339, 113590.
3. 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.
4. 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.