

種々の粉体への衝突実験: 飛散の様相と凝集物の特性

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

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ³ 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, ² 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系, ⁴ 海洋研究開発機構 高知コアセンター, ⁵ 岡山理科大学 大学院 総合理学専攻, 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

「火山雷(かざんらい)」は火山噴火時に噴煙中で起こる雷放電現象として知られている。見た目の激しさからしばしば新聞, テレビ, ネットニュースなどに取り上げられている。雷放電の原因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微粒子が正負に帯電することであると考えられている。十分に帯電すると絶縁破壊を起こして電流が発生する。放電路の周りでは大気と岩石微粒子が急加熱され, 自発光を生じる。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, 放出物カーテンを形成する。放出物カーテンの中では岩石微粒子が相互衝突を起こしていることが想定されるので火山雷と同様の雷放電が起こると期待される。我々は現時点では未確認のこの過程を「衝突雷」と名付け, その発生可能性を示すことを目指し, 2017年度より研究を開始した。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。現在のところ衝突雷の発生を実証するには至っていないが, 種々の粉体を用いた衝突実験を実施し, 衝突雷の発生を確かめるための課題を明らかにすることができた。また従来とは異なる実験を多数実施させていただいたおかげで様々な派生研究テーマが生まれた。本稿では5年に渡って実施された共同利用研究課題「粉体衝突実験による衝突雷発生の実証」で得られた知見をまとめ, 今後の展望を述べる。

2. 実験方法

本共同利用研究課題遂行のために実施した実験の概要について述べる。宇宙科学研究所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使用し, 粉体標的への高速度垂直衝突実験を実施した。粉体を直径20 cmのたらいに満たし, 標的とした。我々は5年間の実験中でガラスビーズ, ステンレスビーズ, ジルコンビーズ, 月土壤シミュラント, 長石砂など種々の粉体を標的に用いた。弾丸には直径5 mmのポリカーボネイト球, 直径2 mmのアルミ球, 石英ガラス球などを用いた。直径2 mm球はナイロンスリットサポ[Kawai et al., 2010]を用いて加速した。実験前には標的を入れたチャンバを

<10 Paまで減圧した。その他大気圧の影響を調べるために若干陽圧(~1 kPa)にした実験も数発実施した。衝突速度は基本的には定常運転最高速度である 7 km s^{-1} としたが、一部低速度の実験も実施した。放出物飛散やクレータ形成の様子をチャンバ側面あるいは上部の覗き窓から高速ビデオカメラで観察した。種々の粉体を用いたこと以外は一般的によく行われている粉体衝突実験であろう。

3. 大規模衝突雷は実験室スケールでは発生しない。

我々は衝突雷の発生可能性を探るべく、2016年度より黒澤、奥住、村主の3名で検討を開始した。まずは雷放電が衝突実験で生じるのか否かを確かめるため、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行うことにした。過去の衝突実験との差異は、実験室で衝突雷が発生するのであれば、確実に発見できるように可視光、赤外光の多色撮像計測を実施したこと、可視光カメラでも自発光で放出物カーテン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。実験の詳細は2018年度の集録を参考にしていきたい。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微粒子がクラスタ化し、次第に格子状パターンを形成する現象が観察される。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[Kadono et al., 2015]し、クラスタ化は放出の極初期段階に進行する[Kadono et al., 2020]。室内衝突実験と平行して、放出物カーテンを記述する数値モデルの構築にも取り組んだ[岩澤, 2019; 中澤, 2020]。数値衝突計算コードiSALE 2D [Amsden et al., 1981; Ivanov et al., 1997; Wünnemann et al., 2006]を用いて室内衝突実験と同様の条件で衝突計算を実施し、放出物カーテンを構成している粒子群の放出位置、放出角度、放出速度、放出時刻のデータテーブルを作成した。このデータテーブルに乱数で生成したランダム速度を加えて、N体計算コードであるREBOUND[Rein & Liu, 2012]に読み込み、その後の進化を数値的に解いた。REBOUNDは粒子同士の重なりを許さない(Hard sphere)N体計算コードであるが、計算中で反発係数を与え非弾性衝突を扱えるようになっている。計算中の粒子群を平面に投影すると、実験室で生成した放出物カーテンに観られるのと類似の格子状のパターン形成が起きていることを確認できた[岩澤, 2019]。このことは数値計算で放出物カーテンを構成する粒子同士の相互衝突過程をある程度再現できていることを示唆する。さらにシリカ球をシリカ壁に衝突させた際の電荷移動を計測した

Poppe et al. (2000)で示された電荷移動の経験則をREBOUNDに実装し、微粒子の帯電量を求め、放出物カーテン中に生成され得る電場強度の変化を追跡した。この計算からは実験室内でも十分に絶縁破壊電場強度に達するという結果が得られ、上記の実験とは矛盾した。これは微粒子集団中の帯電量進化モデルが単純すぎることに起因していると考えられる。この数値モデルを用いて実験室内で絶縁破壊を起こさない条件を求めたところ、Poppeの経験式の<2%の電荷分離量でなければならないことがわかった。この差は帯電粒子同士が衝突した場合でも、無電荷粒子の場合と同じ電荷分離量を与えて計算していることが原因ではないか?と推測している。いずれにしても衝突雷の発生を検証するには微粒子集団中の電荷移動モデルを精緻化する必要があると課題が明確になった[岩澤, 2019].

4. 放出物カーテン中の自己組織化

先に述べたように室内実験の時間スケールでは電荷分離が十分に起こらず、想像するような大規模な放電は発生しないことが確かめられた。惑星スケールでは大規模衝突雷が起こるのかどうかを調べるには放出物カーテンを構成する粒子群の相互衝突と電荷移動について理解する必要がある。先に述べたように電荷移動モデルについては再考が必要であることが確かめられ、将来の課題となった。我々は放出物カーテンが作り出す格子状パターンから粒子の相互衝突現象を理解するために別の衝突実験を実施した。この実験ではKadono et al. (2020)で提案された放出物カーテンの自己組織化モデルを検証することを目的とした。このモデルは粒子同士の非弾性衝突は掘削流発生直後が最も激しく、その後は幾何学的膨張によってパターン成長が凍結されるというものである。このモデルが正しければ放出物カーテンの発生直後からパターン成長が起こることになるが、高速度衝突実験では自発光によって衝突直後の物質放出過程を詳細に観察することは不可能であった。我々はこの問題を解決すべく、単色レーザー光源とその波長に対応するバンドパスフィルターを用いて放出物カーテンの発生直後を観察することに成功した[Nakazawa et al., 2021]. Kadono et al. (2020)の予言どおり、発生直後の放出物カーテンにすでに格子状パターンが形成していることを確認した。実験の詳細は2020年度の集録及びNakazawa et al. (2021)に記述している。

続いてREBOUNDを用いたモデル化も実施した [中澤, 2020; Nakazawa et al., 2021]. 放出物カーテンの初期段階における、粒子同士の非弾性衝突による自己組織化の物理過程を抽出するため、岩澤 (2019)のモデルをさらに単純化した。2次元に配置した粒子群に初期ランダム速度を加え、更に1軸方向の膨張速度を追加した計算を行うと格子状パターン形成とパターン成長の凍結を再現できた。また格子状パターンの明瞭さは反

発係数の大きさに依存することも確かめられた。パターン化の程度を定量的に解析するためクラスタ解析の手法を導入し、クラスタサイズの時間変化を求めた。この手法は放出物カーテンの粗密度を定量的に解析することを可能にする。さらにクラスタサイズの時間変化を記述する解析解を導出した。クラスタ同士の衝突時にはクラスタを構成する粒子群中で無数の非弾性衝突が起こるため、完全合体を仮定することで解析的に解くことができるのである。導出した解析解はREBOUNDの計算結果をよく再現することを確認した。これらによって放出物カーテン中の非弾性衝突によって生じる自己組織化の過程が明らかとなった。計算の詳細はNakazawa et al. (2021)にまとめられている。REBOUNDの計算結果を解析すれば、粒子間の相互衝突速度分布、衝突周波数も得ることができる。これらと精緻化した電荷分離モデルを組み合わせれば、惑星スケールにおける衝突雷の発生可能性を数値的に検証できると考えている。

5. 粉体への衝突で形成される凝集物の特徴

室内衝突実験の結果に戻る。実験室では大規模な放電の発生は確認できなかったものの、掘削流とほぼ同じ速度で移動する無数の「光点」が発生することが明らかとなった。これが小規模の絶縁破壊放電によるものである可能性を調べるために光点の発光分光計測を行った。絶縁破壊放電由来であれば、高エネルギー密度状態でなければ発生しない残留空気由来の発光輝線やイオンの輝線が観測される、と期待したが、NaやCaの共鳴発光輝線を除いて2000 K程度の灰色放射であることがわかった。この結果は、自発光は単純に衝撃加熱によるものであることを示唆している。衝突雷とは話題が変わるが、我々は光点群は放出物カーテンの内側からの照明光源、掘削流の追跡粒子としても利用できる可能性があることを提案している。また光点は高速ビデオカメラの粗い解像度で観察してもわかる程度には出発粒子に比べて大きくなっており、不定形であった。実験後に粉体試料を回収すると、そのような形状をした凝集物が回収された。このことから光点物質は実験後に回収可能であることがわかった。上記内容は2019年度の集録にまとめられている。

2021年度には光点の発生機構を調べる実験を行った。単色レーザー光源とバンドパスフィルタを用いて、形成中のクレータを上空から観察した。我々は衝突直下点で弾丸サイズの2倍程度の大きさを持つおわん状の組織が形成され、その後におわんがちぎれ飛んでいく様を明らかにした。衝突直下点で急激に圧密され加熱された物質が四散し、光点として観測されていたのである。粉体への高速度衝突実験の実験後には標的表面や実験チャンバの床面に凝集組織が残されていることが多いが、これらは衝突直下点で生成されていた可能性が高い。さらに標的粉体の密度、衝突速度の条件によっては

おわんそのものがそのまま残され、実験後に回収可能であることも見出した。この手法では空隙や粒界が存在する複雑系に衝撃波が伝播した後の物質を無飛散で回収できる。我々はおわん形状組織の微細構造観察から天然物質中の衝撃波伝播過程の詳細を明らかにできる可能性があることを提案している。

実験後の凝集組織の残留磁化計測から衝突直下点における電荷分離の有無を調べることができる可能性があった。そこで我々は磁性鉱物を含む月土壤シミュラント（ふるいで300 μm 以下に分けた）を消磁した上で、地球磁場を遮断する磁気シールド中に設置し、衝突実験を実施した。実験後にクレータを含む標的表面2-3 mmに含まれる粒子を回収し、ナイロンメッシュでふるい、衝突の影響で出発試料よりも大きくなっている >300 μm の粒子を抽出した。この試料を東京大学に設置された超電導量子干渉磁束計 (SQUID)で分析した。残念ながら有意に残留磁化を持つ粒子を発見するには至っていないが、今後実験数を増やしてさらなる検証を行う予定である。

6. まとめ

衝突雷の発生可能性を調べるため宇宙科学研究所の縦型二段式水素ガス銃を用いて種々の粉体への衝突実験を実施した。室内実験スケールでは大規模な放電構造が形成されることは無いことがわかった。また室内衝突実験と数値計算から単純な電荷分離モデルを用いただけでは放出物カーテン中の電場強度を過大評価してしまうことが明らかとなった。放出物カーテンに観られる格子状パターンからカーテンを構成する粒子集団の相互衝突の様相を記述する数値モデル、解析モデルを構築した。これらとより精緻化した電荷分離モデルを組み合わせることでより惑星スケールで衝突雷が発生するかどうかを検討できるようになる見通しを得た。

粉体への高速度衝突時にしばしば観察されてきた光点と凝集物の発生過程を明らかにした。これらは惑星科学の高速度衝突研究に複数の派生研究課題をもたらした。

謝辞

iSALEの開発者であるGareth Collins, Kai Wünnemann, H. Jay Melosh, B. Ivanov, D. Elbeshausen, Tom Davisonの各氏, REBOUNDの開発者であるHanno Rein氏に感謝致します。5年にわたり、本研究課題を支援して下さった宇宙科学研究所の共同利用制度に感謝致します。挑戦的研究課題にも関わらず採択して頂けたおかげで、本課題だけでなく複数の研究テーマが創出されました。その過程で2名の東京工業大学の学生が卒業論文の一節を執筆することができました。共同利用実験において実験補助をしていた寫生有理氏, 木内真人氏に感謝致します。最後に本研究課題の構想段階で議論させ

ていただいた故 村主崇行氏に御礼申し上げます。

参考文献

- Amsden, A., Ruppel, H., and Hirt, C. (1980), SALE: A simplified ALE computer program for fluid flow at all speeds, *Los Alamos National Laboratories Report*, LA-8095:101p.
- Ivanov, B. A., Deniem, D. and Neukum, G. (1997), Implementation of dynamic strength models into 2-D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering, *Int. J. Impact Eng.* **20**, 411–430.
- Kawai, N. et al. (2010), Single microparticle launching method using two-stage light gas gun for simulating hypervelocity impacts of micrometeoroids and space debris, *Review of Scientific Instruments*, **81**, 115105.
- 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. (2021), Modeling early clustering of impact-induced ejecta particles based on laboratory and numerical experiments, *The Planetary Science Journal*, **2**, 237.
- Poppe, T., Blum, J., and Henning, T. (2000), Experiments on collisional grain charging of micron-sized preplanetary dust, *The Astrophysical Journal*, **533**, 472-480.
- Rein H. & Liu, S. F. (2012), REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics, *Astronomy & Astrophysics*, **537**, A128.
- Wünnemann, K., Collins, G. S., and Melosh, H. J. (2006), A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets, *Icarus*, **180**, 514–527.
- 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.