

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14824

研究課題名（和文）微小重力下での高速衝突におけるクレーター形成過程の解明

研究課題名（英文）Investigation of the crater formation process in high-velocity impacts under low gravity

研究代表者

岡本 尚也（Okamoto, Takaya）

千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員

研究者番号：80756130

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、0.04–0.07Gの模擬低重力下で秒速数キロメートルの超高速衝突実験を低コストで行える落下装置を開発した。本装置を用いて、様々な粒状物質に対して低重力下での超高速衝突実験を行った結果、粒径が数100 μm の標的試料ではクレーター形成において重力の影響が支配的であるのに対し、粒径が40 μm の標的試料では固着力の影響が支配的となることが明らかとなった。重力と固着力の影響が逆転する領域を実験的に観察し、重力支配領域から強度支配領域へ遷移する条件を求めた。本研究によって、小惑星表面の微小重力下での衝突現象の詳細な理解につながることを期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、開発された落下装置により低重力下で高速衝突実験を容易に繰り返し行うことが可能となった。これにより低重力環境でのクレーター形成の基礎的な情報が次々と得られ、地上重力下のクレーター形成との比較を通してクレーター形成過程についての理解がより一層深まることが期待される。また、地上実験データと直接探査で得られたデータを組み合わせることで、小天体および太陽系の形成過程の研究が進展することが期待される。加えて、地球とは異なる重力環境下での粒子層のふるまいの理解は、探査機の着陸ミッションや将来的な宇宙インフラの整備などにおいても知見を与えるような進展を展望できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a drop device, which enables us to conduct hypervelocity impact experiments at several kilometers per second under simulated low-gravity conditions of 0.04–0.07G at a low cost. Using this device, we performed hypervelocity impact experiments on various granular materials under low-gravity conditions. The results indicated that for target samples with particle sizes of several hundred micrometers, the effect of gravity is dominant in crater formation, whereas for target samples with particle sizes of 40 micrometers, the effect of cohesion is dominant. We experimentally observed the region where the effect of gravity and cohesion reverses and determined the conditions for the transition from gravity-dominated to strength-dominated regimes. This study is expected to contribute to a detailed understanding of collision phenomena under microgravity conditions on the surfaces of asteroids.

研究分野：惑星科学

キーワード：小天体 微小重力 衝突実験 クレーター

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の探査計画により小天体表面の詳細な画像が得られている (NEAR Shoemaker, Hayabusa, Rosseta, Hayabusa2, OSIRIS-Rex) . それら小天体の表面重力は地上重力(1G)に比べ非常に小さい . Hayabusa2 計画では, 2018 年 6 月に小惑星 Ryugu に探査機が到着し天体表面の詳細画像を取得し天体直径の 1/4 ほどの非常に大きなクレーターが見つかった . また 2019 年には 2 kg の銅製の弾丸を秒速 2 km で同天体に衝突させ, 生成されたクレーターサイズや放出物の観測を行った . どうしてそのような大きなクレーターが天体破壊されずに形成されたのか, また小惑星への高速衝突実験から表層物性を明らかにしたいがどうやって得られたデータを正確に解釈できるかについて, 理解は混沌としている . その原因の一つとして小天体上は地上重力よりも非常に小さな重力環境にあり, そのような重力下での実験的な研究並びに実験データに基づいた理論研究が精力的に進んでいないことが挙げられる .

小天体の表面重力は地上重力よりも小さく, このような重力下では地上重力では無視できるほどのレゴリス粒子間固着力が有意に働くことが, 理論計算により示されている (Sheeres et al., 2010) . すなわち, 微小重力下では粉体物質の振る舞いが地上重力下とは異なる可能性が予見されている . これまで地上重力下での粉体・礫層への衝突実験は盛んに行われてきたが, 微小重力下で粒子群の振る舞いを系統的に調べることはなされていなかった .

これまで, 微小重力実験は巨大な落下塔か放物飛行 (parabolic flight) で行われてきた . これらの方法では火薬銃を用いて秒速数百メートルまで弾丸を加速させることが可能である . しかし, 小惑星帯の平均的な相対衝突速度は秒速数 km であり, このような衝突速度での実験はこれらの方法では困難である . また, 放物飛行は 1 回の飛行に 30 万円程度と非常にコストがかかる . 近年, 宇宙科学創成センターの落下塔では 1 落下 3 万円と安価で利用できるものもでてきたが, 実験を行うカプセルサイズが小さく (50x80cm), 観測に必要な十分なスペースが無い .

2. 研究の目的

このように, 低重力天体のクレーター形成過程を理解するには, 実際に室内で低重力下での衝突実験を行い, どのパラメータがクレーター形成にどのような影響を与えるかといった基礎データを取得することが必要となる . そこで本研究では低重力環境における衝突科学の推進を行うため, 低コストかつ系統的に低重力下での秒速数 km の衝突速度での高速衝突実験が行える実験システムを開発する . 開発された実験システムを利用してパラメータスタディを通じ, 実験に基づいた低重力下でのクレーター形成過程の解明を推し進める .

3. 研究の方法

(1) 模擬低重力環境での高速衝突実験システムの構築

まず, 低重力下での高速衝突実験を実現するために, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (JAXA/ISAS) の縦型二段式軽ガス銃の真空チャンバー内に簡易な組み立て式の落下装置を構築した . 高さ 2 m の真空チャンバーの天井付近に標的容器を電磁石で固定し, 電磁石のスイッチを切ることで容器を落下させる . 落下装置にはボールベアリングとレールを用いることで標的容器が鉛直方向に滑らかに落下するよう設計した . この落下装置を用いて落下中に弾丸を衝突させることで, 模擬低重力下での高速衝突実験を実現する (図 1 参照) .

(2) 低重力下でのクレーター形成実験

小天体表面のような微小重力環境下ではレゴリス層の固着力(強度)の影響が重力の影響を卓越する条件が存在する可能性がある . そこで, 異なる物性を持つ粉体試料に対して 1G および模擬低重力下で高速度衝突実験を行い, 固着力がクレーター直径に与える影響を調べた .

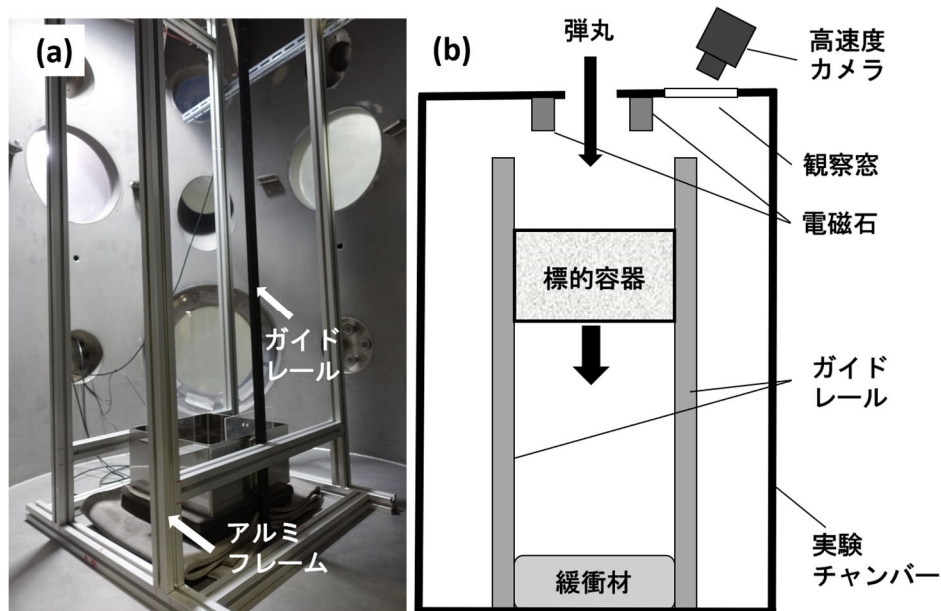


図 1：低重力実験装置のセットアップ (a)実験チャンバー内に組み立てた落下システムの写真（チャンバーのサイズは直径 1.5 m, 高さ 2 m） (b)落下システムの概略図

4. 研究成果

(1) 模擬低重力環境での高速衝突実験システムの構築

本落下装置開発により，重力加速度が 0.04-0.07 G での高速衝突実験が可能となった(図 1 参照)．また，容器の落下開始(電磁石をオフにしたとき)から低重力状態が安定するまでには 0.4 s 程度要することがわかった．低重力状態が安定してから容器が落下し終わるまでの時間は，約 0.3 s であり，この時間が低重力継続時間となることがわかった．標的容器を落下させる際の電磁石の信号をトリガーにして，パルスジェネレーターで適切な遅延時間を設定することで，この低重力継続時間の初期に弾丸を標的に衝突させることが可能となった．

(2) 低重力下でのクレーター形成実験

標的試料には一般的な砂（粒径： $\sim 425 \mu\text{m}$ ），微小ガラスビーズ（粒径： $\sim 44 \mu\text{m}$ ）アルミナ粒子（粒径： $\sim 40 \mu\text{m}$ ），ガラスビーズ（粒径： $\sim 220 \mu\text{m}$ ）の 4 種類を用いた．直径 1 mm のガラス球弾丸を秒速 1.2 km で低重力下および 1 G 下で衝突させ，チャンバー上部に固定した高速度カメラからクレーター直径の形成過程を観察した．実験はすべて真空下（約 500 Pa）で行った．高速度カメラで撮影した低重力下でのクレーター画像の一例を図 2 に示す．

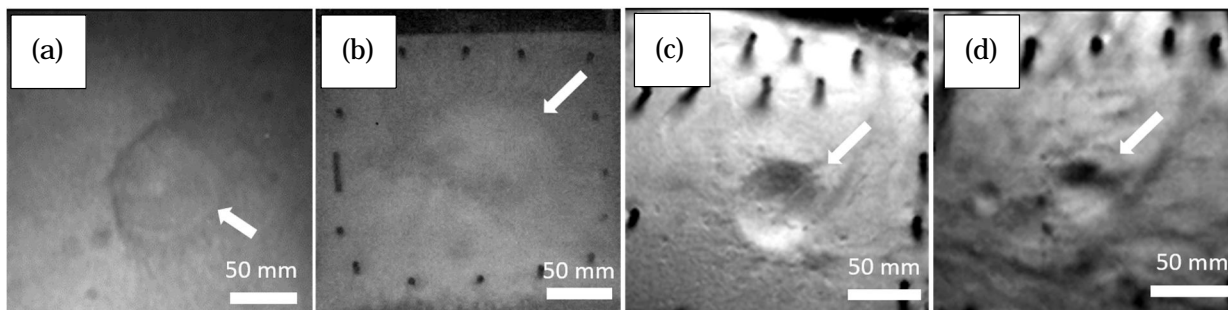


図 2：高速度カメラで撮影した低重力下でのクレーター画像の一例(矢印はクレーターリムを示す) (a)砂標的に形成されたクレーター (b)ガラスビーズ標的に形成されたクレーター (c)微小ガラスビーズ標的に形成されたクレーター (d)アルミナ標的に形成されたクレーター

図3に形成されたクレーターの直径と重力加速度の関係を示す。砂やガラスビーズ標的では、重力が小さい方がクレーター直径が明らかに大きくなっていることがわかる。一方、微小ガラスビーズやアルミナ標的では、クレーター直径に対する重力の影響があまり見られない。粒状物質が標的の場合は地球上では「重力に逆らって」クレーターが形成される(重力支配域)のが一般的である。そのため砂やガラスビーズ標的の実験結果では従来通りクレーター直径に重力の影響が見られた。しかし、粒径が細かい粒子(微小ガラスビーズとアルミナ)の標的で重力の影響が小さいのは、粒子層の固着力が影響しているからだと考えられる。粒径が小さい粒子層の方が固着力が強くなることが知られており、これらの標的の低重力下では「固着力に打ち勝つように」

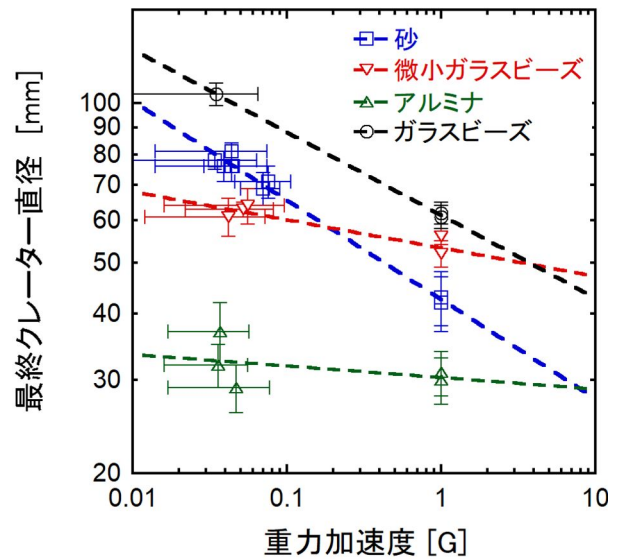


図3：最終クレーター直径と重力加速度の関係

クレーターが形成された(強度支配域)ことを実験結果は示唆している。乾燥した粒子層において、このように重力と固着力の影響が逆転する領域を実験的に観察したのは本研究が初めてとなる。地球よりも小さい重力環境を模擬し、かつ固着力の大きい標的試料を用いたことにより、このような実験結果を得ることが可能となった。

本稿では本研究の結果のエッセンスについて簡潔にまとめた。本研究の詳細な内容については、査読付き国際誌『ICARUS』にまとめ、2023年11月に出版されている(<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115685>)。

本研究により容易に繰り返し模擬低重力下での高速衝突実験によるクレータ形成実験が可能となり、低重力下でのクレーター形成に対するデータ取得と理解が得られはじめた。上記論文はクレーター直径についてまとめたものである。一方で、クレーター深さやクレーター形状、ならびに、衝突で生成される放出物の放出角度や放出速度に対して重力がどのような効果を与えるかについてはまだ理解が進んでいない。今後は模擬低重力下でのクレーター形成過程の断面的な観察が可能な計測システムの開発を行い、その形成過程の観察を行うことに加え、数値衝突シミュレーションとの比較をするなどして、より微小重力下でのクレータ形成過程を包括的に調べていく。また、本研究は探査で得られるデータと組み合わせることで、小天体および太陽系の形成過程の研究が進展することが期待される。さらに、地球への小天体の衝突を回避する手段として、宇宙機を小天体に衝突させることで小天体の軌道を変化させる方法がある。この点においても重力が衝突現象に与える影響の理解が不可欠である。加えて、本研究は地球とは異なる重力環境下での粒子層のふるまいについての理解も得られるテーマでもあり、探査機の着陸ミッションや将来的な宇宙インフラの整備などにおいても知見を与えるような進展を展望している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kiuchi Masato, Okamoto Takaya, Nagaashi Yuuya, Yamaguchi Yukari, Hasegawa Sunao, Nakamura Akiko M.	4. 巻 404
2. 論文標題 Impact experiments on granular materials under low gravity: Effects of cohesive strength, internal friction, and porosity of particle layers on crater size	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115685 ~ 115685
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.icarus.2023.115685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 木内 真人, 岡本 尚也, 長足 友哉, 山口 祐香理, 長谷川 直, 中村 昭子
2. 発表標題 低重力下で形成される衝突クレーターの断面的な計測システムの開発
3. 学会等名 令和五年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Masato Kiuchi, Takaya Okamoto, Yuuya Nagaashi, Yukari Yamaguchi, Sunao Hasegawa, Akiko M. Nakamura
2. 発表標題 Cross-sectional observation of crater formation process under low-gravity by quarter-space method, JpGU Meeting 2023
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木内真人, 岡本尚也, 長足友哉, 山口祐香理, 長谷川直, 中村昭子
2. 発表標題 低重力下での粉体標的への高速度衝突実験：クレーター形成過程の断面的な観察
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2023 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木内真人, 岡本尚也, 長足友哉, 山口祐香理, 長谷川直, 中村昭子
2. 発表標題 低重力下でのクレーター形成過程の断面的な観察
3. 学会等名 天体の衝突物理の解明 (XIX)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masato Kiuchi, Takaya Okamoto, Yuuya Nagaashi, Yukari Yamaguchi, Sunao Hasegawa, Akiko M. Nakamura
2. 発表標題 Cross-sectional observation of craters formed by high-velocity impacts under low-gravity
3. 学会等名 Hypervelocity Impact Society 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 木内 真人, 岡本 尚也, 長足 友哉, 長谷川 直, 中村 昭子
2. 発表標題 クォータースペース法を用いた低重力下での高速度クレーター形成実験
3. 学会等名 令和4年度「天体の衝突物理の解明(XVIII)」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木内 真人, 岡本 尚也, 長足 友哉, 山口 祐香理, 長谷川 直, 中村 昭子
2. 発表標題 低重力下での高速度クレーター形成実験
3. 学会等名 令和四年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木内 真人, 岡本 尚也, 長足 友哉, 山口 祐香理, 長谷川 直, 中村 昭子
2. 発表標題 クォータースペース法による低重力下でのクレーター形成過程の観察
3. 学会等名 日本惑星科学会2022年度秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kiuchi, M., Okamoto, T., Nagaashi, Y., Hasegawa, S., Nakamura, A. M.
2. 発表標題 High-velocity impact experiments in reduced gravity: The effect of cohesive strength of particle layers
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木内真人, 岡本尚也, 長足友哉, 長谷川直, 中村昭子
2. 発表標題 模擬低重力下での高速度衝突クレーター形成実験
3. 学会等名 天体の衝突物理の解明 (XVII) ~ 小天体進化における圧密過程の役割 ~
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木内真人, 岡本尚也, 長足友哉, 長谷川直, 中村昭子
2. 発表標題 微小重力下での高速度衝突クレーター形成実験III
3. 学会等名 令和3年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木内 真人, 岡本 尚也, 長足 友哉, 中村 昭子
2. 発表標題 微小重力下での高速度衝突クレーター形成実験II
3. 学会等名 令和二年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiuchi, M., Okamoto, T., Nagaashi, Y., Hasegawa, S., Nakamura, A. M.
2. 発表標題 High-velocity impact experiments in reduced gravity: The effect of cohesive strength of particle layers
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiuchi, M., Okamoto, T., Hasegawa, S., Nakamura, A. M.
2. 発表標題 Experimental study of high-velocity impacts into granular material in reduced gravity
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木内 真人, 岡本 尚也, 長足 友哉, 長谷川 直, 中村 昭子
2. 発表標題 低重力下での高速度衝突クレーター形成実験
3. 学会等名 令和2年度 天体の衝突物理の解明(XVI)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木内 真人, 岡本 尚也, 長足 友哉, 長谷川 直, 中村 昭子
2. 発表標題 簡易的な落下装置を用いた高速度クレーター形成実験: クレーターサイズの重力依存性
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年度秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木内真人, 岡本尚也, 中村昭子
2. 発表標題 微小重力下での高速度衝突クレーター形成実験
3. 学会等名 令和元年度 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	木内 真人 (Kiuchi Masato)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------