

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03723

研究課題名(和文) 微小重力実験による小天体レゴリス上のクレータースケール則の構築

研究課題名(英文) Development of a crater scale law on a small body regolith by microgravity experiments

研究代表者

中村 昭子 (Nakamura, Akiko)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40260012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：模擬低重力衝突実験装置を開発して高速度衝突クレータ実験を行った。付着性の低い数百マイクロサイズのシリカサンド標的のクレーター直径は、低重力下で1G下より大きくなり、重力加速度への依存性が先行研究で示されていた値と調和的であると示した。付着性が強い数十マイクロサイズの微粒子標的では、1G下と低重力下でクレーター直径に大きな違いが見られなかった、すなわち、クレーター形成における「粒子間力支配」を確認した。一方、小惑星レゴリスと同等と考えられる隕石粉のマイクロな粒子形状や粒子間付着力を測定し、レゴリス模擬物として実験に用いられるシリカサンド等より粗く付着力が小さいことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

はやぶさ2が探査した小惑星リュウグウや、これからMMXによって探査される火星衛星フォボスは、岩塊や砂状のレゴリスで表面が覆われている。これらの天体表層は、地上に比べて数桁も重力加速度が小さい。しかし、微小重力の天体表面ではレゴリス粒子同士の付着性が無視できない可能性がある。本研究は、模擬低重力下でクレータ実験を行うシステムを開発し、クレーターの大きさについてレゴリスの付着性がどのように影響するかを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：We develop a drop tower for the target container of cratering experiment and performed impact cratering experiments under simulated low-gravity conditions. The crater diameters of silica sand targets of several hundred microns in size were larger under low gravity than under 1 G, indicating that the dependence on the gravitational acceleration is consistent with the values shown in previous studies. For the strongly adherent, several tens of microns size particle targets, there was no significant difference in crater diameters under 1 G and under low gravity, i.e., the "inter-particle force dominated regime" in crater formation was confirmed. On the other hand, we measured microscopic particle shape and inter-particle cohesive forces of meteorite powder, which is considered to be equivalent to asteroid regolith, and showed that it is coarser and has smaller cohesive forces than silica sand and other materials used in cratering experiments as simulated regolith.

研究分野：惑星科学

キーワード：低重力 クレーター レゴリス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

天体表面のクレーターは、その頻度分布から表面の年代を推定したり、天体表面の強度や流動性を論じたりすることができる重要な情報である。情報の解読に必須となるのがスケール則である。スケール則は、クレーター直径や深さと、衝突天体パラメータ(衝突速度・サイズ・密度等)および天体表面パラメータ(重力加速度・密度・破壊強度等)の関係式である。クレーターサイズおよびクレーター形成を支配する物理量を、それぞれ無次元化し、それら無次元量の関係を実験データをもとに定式化することにより、天体上のクレーターに適用できるスケール則を得る。

月・火星表面のクレーターは、表面物質の放出が重力加速度により妨げられることにより(「重力支配」)または、衝突で発生した衝撃波・応力波によって連続体が破壊される範囲として(「破壊強度支配」)そのサイズが決定される。従来、レゴリスに形成されるクレーターのサイズは、「重力支配」のスケール則で考えられてきた。一方、微小重力下である小天体表面のレゴリスにクレーターが形成される場合には、レゴリス粒子間力が重力に対して優勢な、従来の「重力支配」でも「破壊強度支配」でもない、「粒子間力支配」の条件があると考えられる。

クレーター形成における「粒子間力」の効果を直接調べるために、1G よりも小さな模擬重力下でのクレーター形成実験を行うことが考えられる。1G 未満で行われたクレーター実験はほとんどない。一方、申請者らは定荷重バネを用いて低重力下(地球重力の0.25 - 1倍)で、レゴリス模擬粒子標的に対する低速度(1 - 5 m/s)衝突実験を行い、重力加速度の減少とともに、クレーターサイズが大きくなることを確認した。

2. 研究の目的

(1) 1G より小さな模擬重力下で、小惑星帯の衝突速度であるキロメートル毎秒の衝突速度のクレーター形成実験を行うためのシステムを開発し、レゴリスに形成されるクレーターの「重力支配」と「粒子間力支配」の遷移条件を明らかにする。

(2) 粒子間力支配のときのスケール則を明らかにする、すなわち、レゴリス粒子の物理特性を理解し、これとクレーターサイズの関係性を調べる。

3. 研究の方法

(1) 宇宙航空研究開発機構(JAXA)施設内にある縦型式二段銃の真空チャンバー内に、模擬低重力衝突実験装置を組み立て、高速度衝突クレーター実験を行った。高さ2メートルの真空チャンバー内に組み立て式の枠を置き、レールをとりつけてボールベアリングを用いて標的容器を鉛直に落下させる装置を取り付けた。落下させる前の標的容器は電磁石を用いてチャンバー天井付近に保持し、電磁石を切る信号をトリガーとして用いて弾丸を発射させた。容器に固定した加速度計で加速度を測定し、クレーター形成過程はチャンバーの上窓からの高速度カメラ画像で確認した。

弾丸には、直径1 mmのガラス球および4.8 mmのポリカーボネイト球の二種類を用いた。低重力実験の標的には粒径約400 μm のシリカサンド、約40 μm のガラスビーズとアルミナ粒子の3種類を用いた。これに加えて、参照用として粒径220 μm のガラスビーズ標的を用いた地上重力下の高速度衝突実験結果データも得た。低重力実験では、粉体標的を入れた容器はレールに沿って落下させ、容器にとりつけた加速度計で落下加速度を測定した。500 Paに減圧した真空チャンバー内で、模擬重力0.04 ~ 0.07 G、衝突速度1.2 km/sで実験を行った。

(2) クレーター実験に用いたシリカサンド、ガラスビーズ、アルミナ粒子について、それらの層の摩擦係数、強度、空隙率を測定し、これらとクレーター直径の関係性を調べた。また、シリカサンドやガラスビーズと、小惑星レゴリスを再現する隕石の粉砕片の形状や付着力を比較し、シリカサンド等の模擬粒子がどれほど小惑星レゴリスを模擬しているかについて調べた。

4. 研究成果

(1) 低重力下では1G下よりもクレーター形成時間が長く、クレーター直径が大きくなることが確認できた。シリカサンド標的のクレーター直径は、低重力下で1G下より大きくなり、重力加速度への依存性も先行研究で示されていた値と調和的な結果が得られた。一方で、シリカサンドに比べて付着性が強い粒径40 μm のガラスビーズ標的とアルミナ粒子標的では、1G下と低重力下でクレーター直径に大きな違いが見られなかった、すなわち、クレーター形成における「粒子間力支配」が確認された。

(2) レゴリス模擬物として実験に用いられる球形のガラスビーズ、不規則形状のシリカサンドとアルミナ粒子の付着力を遠心加速法によって測定する手法を確立し、研究協力者を筆頭著者として国際誌に発表した[1]。隕石粉とシリカサンドの形状を光学顕微鏡で捉えた粒子の二次元断面の軸比や円形度で比べたところ、互いによく似た値を示すことがわかった。一方、共焦点レーザー顕微鏡で高さ分解能 10 nm で粒子表面を測定したところ、図 1 に示すように、表面粗さが大きく異なり、隕石粒子すなわち小惑星レゴリスのほうが衝突実験に用いられている粒子よりもマイクロなスケールでは粗いことがわかった。粒子間付着力も隕石粒子のほうが同程度の大きさのシリカサンドやガラスビーズより小さいことがわかった[2]。このことがクレーター形成にどのように影響するかについては今後検討が必要である。

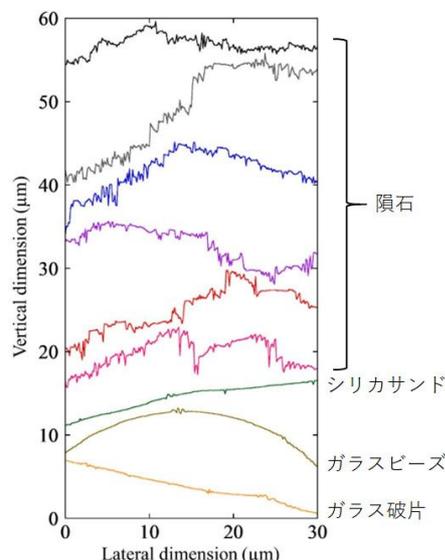


図 1 レゴリス模擬粒子表面の粗さ (文献 [2]の図を改変)

クレーター実験に用いた粒子の平行平板型せん断試験を行ったところ、球形のガラスビーズに比べて不規則形状のシリカサンドおよびアルミナとでは、摩擦係数 (friction) が大きい点は他の研究とも調和的であった。一方、測定から見積もられた強度 (cohesion) は、クレーター実験結果から付着性が見られなかったシリカサンドと、「粒子間力支配」がみられた 40 μm のガラスビーズとアルミナ粒子と同程度であった。これは、平行平板型試験から強度 (cohesion) すなわち粉体層の上載荷重がゼロのときのせん断強度を見積もることの困難を示している。レゴリスに形成されるクレーターの「重力支配」と「粒子間力支配」の遷移条件を定量的に表すための強度指標の決定が課題であることが明らかになった。

(3) 本研究開始時に得ていた、低重力下 (地球重力の 0.25 - 1 倍) での模擬レゴリス標的 (ガラスビーズ層、および、シリカサンド層) への低速度 (1 - 5 m/s) 衝突実験結果を、従来のクレータースケール則で用いられている無次元パラメータで整理した。その結果、大気圧が 100 Pa より大きいときは、大気存在がクレーター直径の重力依存性に与える影響が無視できないことを示した。さらに、クレーター直径に対する雰囲気ガス圧力の効果を考慮するための追加の無次元パラメータを、従来から用いられているクレーター直径のスケールリング則に加えて用いることにより、大気圧下で行った実験結果を整理できることを示した。これにより、減圧下での中高速度衝突実験結果をもとに得られてきた重力支配域でのクレーター直径のスケールリング則が、申請者らの研究によって得られた低速度衝突の実験結果についても成り立つことを示した。これらの結果は、研究協力者を筆頭とする査読付論文として国際誌に発表した[3]。

引用文献

- [1] Nagaashi, Y., Omura, T., Kiuchi, M., Nakamura, A. M., Wada, K., Hasegawa, S. Laboratory experiments on agglomeration of particles in a granular stream. *Progress in Earth and Planetary Science* 5, 1-14.
- [2] Nagaashi, Y., Aoki, T., Nakamura, A.M. Cohesion of regolith: Measurements of meteorite powders. *Icarus* 360, 114357.
- [3] Kiuchi, M., Nakamura, A. M., Wada, K. Experimental study on gravitational and atmospheric effects on crater size formed by low velocity impacts into granular media. *J. Geophys. Res: Planets* 124, 1379-1392.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kuroda D., Geem J., Akitaya H., Jin S., Takahashi J., Takahashi K., Naito H., Makino K., Sekiguchi T., Bach Y. P., Seo J., Sato S., Sasago H., Kawabata K. S., Kawakami A., Tozuka M., Watanabe M., Takagi S., Kuramoto K., Yoshikawa M., Hasegawa S., Ishiguro M.	4. 巻 911
2. 論文標題 Implications of High Polarization Degree for the Surface State of Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L24 ~ L24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abee25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hasegawa Sunao, Marsset Michael, DeMeo Francesca E., Bus Schelte J., Geem Jooyeon, Ishiguro Masateru, Im Myungshin, Kuroda Daisuke, Vernazza Pierre	4. 巻 916
2. 論文標題 Discovery of Two TNO-like Bodies in the Asteroid Belt	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L6 ~ L6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac0f05	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
1. 著者名 Honda Rie, Arakawa Masahiko, Shimaki Yuri, Shirai Kei, Yokota Yasuhiro, Kadono Toshihiko, Wada Koji, et al.	4. 巻 366
2. 論文標題 Resurfacing processes on asteroid (162173) Ryugu caused by an artificial impact of Hayabusa2's Small Carry-on Impactor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114530 ~ 114530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114530	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 -
1. 著者名 Nagaashi Yuuya, Aoki Takanobu, Nakamura Akiko M.	4. 巻 360
2. 論文標題 Cohesion of regolith: Measurements of meteorite powders	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 114357 ~ 114357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114357	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 -

1. 著者名 Arakawa, M., Saiki, T., Wada, K., Ogawa, K., Kadono, T., Shirai, K., Sawada, H., Ishibashi, K., Honda, R., Sakatani, N., Iijima, Y., Okamoto, C., Yano, H., Takagi, Y., Hayakawa, M., Michel, P., Jutzi, M., Shimaki, Y., Kimura, S., Mimasu, Y., Toda, T., Imamura, H., Nakazawa, S., Hayakawa, H., Sugita, S., et al.	4. 巻 368
2. 論文標題 An artificial impact on the asteroid 162173 Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 67-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaz1701	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

1. 著者名 Hasegawa, S., Hiroi, T., Ohtsuka, K., Ishiguro, M., Kuroda, D., Ito, T., Sasaki, S.	4. 巻 71
2. 論文標題 Q-type asteroids: Possibility of non-fresh weathered surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103 (13 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz088	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

1. 著者名 Nagaashi, Y., Omura, T., Kiuchi, M., Nakamura, A. M., Wada, K., Hasegawa, S.	4. 巻 5
2. 論文標題 Laboratory experiments on agglomeration of particles in a granular stream	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 52 (14 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-018-0205-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kiuchi M., Nakamura A. M., Wada K.	4. 巻 124
2. 論文標題 Experimental Study on Gravitational and Atmospheric Effects on Crater Size Formed by Low Velocity Impacts Into Granular Media	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 1379-1392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JE005628	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 -

1. 著者名 Hasegawa, S., Kuroda, D., Kitazato, K., et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Physical properties of near-Earth asteroids with a low delta-v: Survey of target candidates for the Hayabusa2 mission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114 (29 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy119	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14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Nakamura, A. M., Nakahata, J., Nagaashi, Y.
2. 発表標題 Laboratory penetration experiments conducted at low effective gravity II
3. 学会等名 JpGU - AGU joint meeting 2020 virtual (国際学会)
4. 発表年 2020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 JpGU - AGU joint meeting 2020 virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nagaashi, Y., Aoki, T., Nakamura, A. M.
2. 発表標題 Cohesive force measurements of meteorite powders
3. 学会等名 The 52nd Lunar and Planetary Science Conference (LPSC), virtual (国際学会)
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 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 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長足 友哉、青木隆修、中村昭子
2. 発表標題 レゴリス粒子の固着力：粒子の形状と塑性変形の効果
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
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 天体の衝突物理の解明 (XVI)/第12回スペースガード研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiuchi, M., Nakamura, A. M., Wada, K.
2. 発表標題 Experimental study on gravitational effects on crater size formed by low-velocity impacts into granular media
3. 学会等名 JpGU2019, Makuhari Messe, May. 26-30, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakamura, A. M., Morizono, K., Nagaashi, Y.
2. 発表標題 Laboratory impact penetration experiments conducted at simulated reduced gravity
3. 学会等名 JpGU2019, Makuhari Messe, May. 26-30, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木内真人, 中村昭子, 岡本尚也
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, JAXA宇宙科学研究所, 3月2-3日, 2019. (書面発表)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒川政彦, 佐伯孝尚, 門野敏彦, 高木靖彦, 和田浩二, 他
2. 発表標題 はやぶさ2 SCIによる小惑星リュウグウ上での衝突実験
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年度秋季講演会, 京都産業大学神山ホール, 2019年10月7日-9日
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田浩二, 石橋高, 木村宏, 荒川政彦, 澤田弘崇, 他
2. 発表標題 SCIクレータから放出されたイジェクタ粒子のサイズ推定
3. 学会等名 第15回衝突研究会: 天体の衝突物理の解明 (XV) ~小惑星の表層進化~, 千葉工業大学 東京スカイツリータウンキャンパス, 11月27-29日, 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiuchi, M., Nakamura, A. M., Wada, K.
2. 発表標題 Experimental study of low velocity impact onto granular media under reduced gravities: Effects of density ratio of the projectile to the target
3. 学会等名 JpGU2018 (EE session) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森園佳奈, 中村昭子
2. 発表標題 小天体レゴリスへのインパクトの貫入深さ
3. 学会等名 第14回衝突研究会研究集会 天体の衝突物理の解明 (XIV) ~ 探査機はやぶさの成果と挑戦: 初号機から2号機へ~
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木内真人, 中村昭子, 和田浩二
2. 発表標題 粉体層への低速度衝突で形成されるクレーターサイズの重力依存性
3. 学会等名 第14回衝突研究会研究集会 天体の衝突物理の解明 (XIV) ~ 探査機はやぶさの成果と挑戦: 初号機から2号機へ~
4. 発表年 2018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 分 担 者	和田 浩二 (Wada Koji) (10396856)	千葉工業大学・惑星探査研究センター・主席研究員 (32503)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	長谷川 直 (Hasegawa Sunao) (10399553)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任研究開発員 (82645)	

	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)		
研究協力者	長足 友哉 (Nagaashi Yuuya)		
研究協力者	岡本 尚也 (Okamoto Takaya)		

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