

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400453

研究課題名(和文)異なる模擬重力下で行う粉粒体への衝突実験による小天体進化の研究

研究課題名(英文) Study on evolution of small bodies by impact experiments on granular media under different simulated gravity

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：小天体レゴリス層での衝突クレーター過程を理解するために、模擬低重力衝突実験装置を開発し、低速度衝突クレーター形成実験を、0.01-1 G の範囲で大気圧下と 10 Pa 以下で行った。クレーター直径は、重力加速度の約 -0.2 乗に比例することがわかった。また、粉粒体層の空隙率の重力依存性に関する経験則を得た。一方、重力が減ってもクレーター直径があまり大きくなり、粒子間力が卓越するところもあることも実験的に示した。一方で、衝突時の放出物量は、反発係数や摩擦係数といったエネルギー散逸をもたらす粒子間相互作用によらないことが数値シミュレーションで示された。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the impact cratering on the regolith layer of small bodies, we developed a simulated low gravity collision experiment device and conducted a low speed impact crater formation experiment in the range of 0.01 - 1 G at atmospheric pressure and below 10 Pa. It was found that the crater diameter is proportional to about -0.2 power of gravitational acceleration. We also gained an empirical relationship on the gravitational dependence of the porosity of the granular layer. On the other hand, we experimentally show the case where inter-particle force dominates gravity and even if the gravity decreases, the crater diameter does not become larger as expected. On the other hand, numerical simulation showed that the amount of ejecta from impact cratering does not depend on particle interactions, i.e. restitution coefficient and friction coefficient that lead to energy dissipation.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星 衝突 数値シミュレーション レゴリス

1. 研究開始当初の背景

微惑星の構造進化は未解明であり、進化の最終段階である小天体の構造から推測せざるを得ず、地上観測や小天体探査が精力的に行われている。その結果、はやぶさ探査機により調査された小惑星イトカワに代表されるように、小天体は粉粒体としての構造をもつことが明らかになってきた。イトカワは砂礫状物質が互いの重力で集まってできた天体とされている。ダストから微惑星を経て小天体に至る過程は、粉粒体天体の構造進化としてとらえることで統合理解が可能となると考えられる。

粉粒体の動力学については、工学と複雑系物理学にまたがって研究が進展しつつある。惑星科学においても、小惑星イトカワ探査以降、微小重力下での粉粒体の振る舞いに対する問題意識が高まってきた。しかし、衝突過程への粉粒体の物理特性と重力場の影響に着目した実験研究は、まだほとんど行われていない。近年実施されたシャトル弾道飛行中の微小重力極低速度衝突実験[1]では、実験条件がごく限られており重力の影響が議論されていない。また、落下棟(土岐、閉鎖)を用いて無重力下でガラスビーズ標的に対して行われた衝突実験[2]では、クレーター直径が従来の予想に反して1 G下の結果と同じになり、その原因は明らかにされていない。このように、衝突時に重力が粉粒体に及ぼす影響は分かかっておらず、重力場を変化させた実験が必要である。

2. 研究の目的

粉粒体に弾丸が衝突すると、粉粒体内部の応力鎖により、弾丸は流体とも固体とも異なる抵抗力を受けて減速される。弾丸によって、粉粒体内部には掘削流が励起され、これにより粉粒体が自由表面から放出される。掘削流は粉粒体間の摩擦力と重力によって減衰し、有限サイズのクレーターを形成する。

本研究では、クレーター直径が、重力加速度、弾丸パラメータ、衝突速度、真空度、粉粒体パラメータにどのように依存するかについて明らかにする。

3. 研究の方法

模擬低重力衝突実験装置を開発し、これを用いて、クレーター形成過程の重力加速度、弾丸パラメータ(密度、大きさ、構造)、衝突速度、真空度、粉粒体パラメータ(粒子間力)への依存性を実験的に調査する。また、実験結果の再現や素過程理解の促進のため、粒子法の一つである離散要素法(DEM)により、数値シミュレーションを行う。

クレーター形成過程においては、層の空隙率が結果に影響を与えるので[3]、小天体表面のレゴリスの空隙率を推定するための基礎研究も行う。

(1) 模擬低重力衝突実験装置の開発

装置は、試料容器を定荷重バネでつるして一定の加速度で落下させるものである。力の大きさの異なるバネを用いることで、試料に作用する模擬重力を変化させる。

(2) クレーター直径の重力加速度依存性

開発した模擬低重力衝突実験装置を用いてクレーター形成実験を行い、クレーター直径の重力依存性を整理する。

(3) クレーター直径の真空度依存性

装置を宇宙科学研究所の縦型銃用の大型真空チャンバー内に設置することにより減圧下の実験を行い、大気圧下で行った実験の結果と比較する。

(4) クレーター形成過程における弾丸パラメータ(弾丸密度、サイズ、構造)および衝突速度依存性

1 G下の低速度衝突実験では、クレーター直径が衝突速度の0.5乗となることが実験的に示されている。これは、高速度の場合に、クレーター直径が弾丸速度の約1/3乗に比例することと異なるが、低速度衝突においても、弾丸密度が大きくなり標的密度の約5倍を超えると、クレーター直径が衝突速度の0.5乗に比例しないことが知られている。そこで、弾丸パラメータを変えた場合のクレーター形成過程について調べる。

(5) クレーター形成過程への標的粒子間力の影響

①粒子間力の無視できない試料を用いた実験ノミナルの実験は、1 Gにおいて粒子間力が無視できると考えられる粒径140 μm の不規則形状のシリカサンドと500 μm の球形ガラスビーズを用いて行う。これに対して、1 Gにおいても粒子間力が無視できない60 μm の不規則形状アルミナ粒子を用いて、低重力下での実験を行い、クレーター直径の重力依存性を検討する。

②数値シミュレーションによる粒子間力の影響の評価

数値シミュレーションで、粒子間力を変化させて、クレーター形成過程への影響を調べる。

(6) 粉粒体層の空隙率

①粉粒体層の空隙率の重力依存性

粉粒体間の固着力が粒子に作用する重力に比べて無視できなくなると粒子の構造が固着力に依存して疎になり、空隙率が大きくなる。これを実験および数値シミュレーションにより調べる。

②粉粒体層の空隙率の外力による変化

小天体上での粉粒体層の空隙率は、層に作用する重力や衝撃圧力などの外力により変化する

る。空隙率の減少、すなわち圧密過程が、粉粒体パラメタにどのように依存するかに関する基礎研究を行う。

4. 研究成果

(1) 模擬低重力衝突実験装置の開発

図1に、開発した装置の画像を示す。試料容器は電磁石で支えておき、スイッチにより電磁石への電流を遮断することにより落下タイミングを制御した。容器の落下加速度は、試料容器にとりつけた加速度計により測定するとともに、水平方向から撮像した高速カメラ画像によっても確認した。装置の上方には、高速カメラでクレーターの成長過程を観察するための鏡を取り付けた。直径8 mmの弾丸を、試料容器上方から電磁石を用いた開閉弁を通じて試料容器の落下開始前に自由落下させた。弾丸落下開始と試料容器落下開始の時刻を変えることにより、弾丸と試料容器の相対速度を変化させた。落下時の容器の振動を抑えるために、バネには防振材をとりつけ、また、試料容器は図にある金属容器を木製容器に取り替えることとした。試料容器の落下距離は70 cm以上である。本研究での衝突速度範囲では、クレーターの成長が試料容器落下中に終了することを確かめた。

定加重ばねを使って、0.25-1 Gの模擬重力を実現した。また、ばねを使わず自由落下させたときには、 0.014 ± 0.003 Gを達成した。弾丸が試料に衝突する速度は、衝突時の容器高さをカメラ画像によって測定し、弾丸と容器の落下距離から推定することが可能であることを確認した。衝突速度は、1-5 m/sであった。

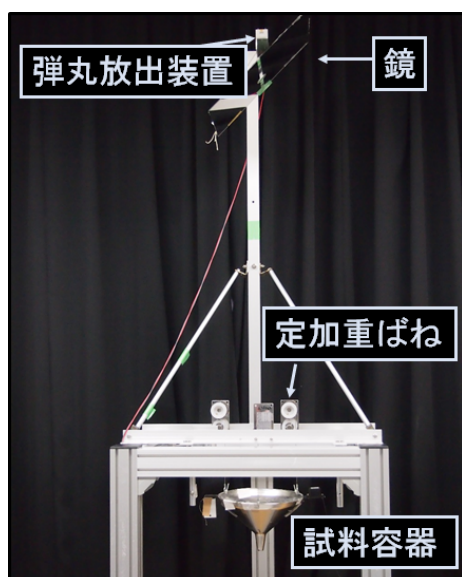


図1 模擬低重力下でのクレーター形成実験装置

(2) クレーターの直径の重力加速度依存性

図2に、直径8 mmのステンレス球弾丸を、シリカサンド標的に衝突させた結果を示す。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が確認された。クレーター直径 D が、重力加速度 g にべき乗で依存するとして ($D \propto g^{-\alpha}$)、 $\alpha = 0.21 \pm 0.01$ となった。このべき指数は、砂に対する低重力下 (0.07-1 G) および高重力下 (1-400 G) での高速衝突実験 (衝突速度 > 400 m/s) で得られている指数 0.17 に近い。ガラスビーズに対する衝突実験でも、 $\alpha = 0.18 \pm 0.01$ となり、このような重力加速度依存性が広い速度範囲でなりたつことが示された。

(3) クレーターの直径の真空度依存性

1 G 下では、減圧するにつれてクレーター直径が大きくなることが知られている。本研究で開発した装置を用いて、圧力数 Pa の真空チャンバー内でシリカサンド標的にクレーター形成実験を行い、クレーター直径と重力加速度の関係を調べた。クレーター直径は、1 気圧下よりも1割程度大きくなったが、べき指数は、 $\alpha = 0.18 \pm 0.01$ となり、1 気圧下での値に近いものとなることがわかった。

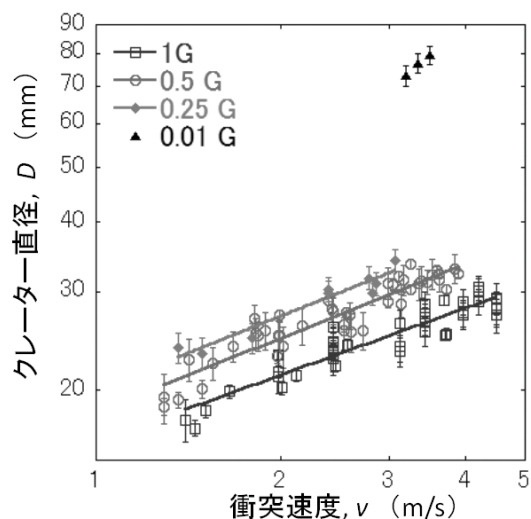


図2 クレーターの直径の重力依存性

(4) クレーター形成過程における弾丸パラメタ (弾丸密度、サイズ、構造) および衝突速度依存性

直径8 mmのガラス球弾丸を用いた1 Gでのシリカサンド標的にクレーターの直径は、過去研究と同様に衝突速度の0.5乗で大きくなることが確かめられた。

弾丸の運動エネルギーが、標的物質の掘削のエネルギーおよび標的の破壊のエネルギーに使われるとすると (エネルギースケリングが成り立つとすると)

$$\frac{1}{2}mv^2 = k_g D^4 \rho g + k_s D^3 Y, \quad (1)$$

ここで、 m : 弾丸質量、 v : 衝突速度、 ρ : 標的密

度、 P : 標的強度、 k_g , k_s : それぞれ定数である。もし、標的強度が小さく右辺第二項が無視できるなら、クレーター直径は、衝突速度の 0.5 乗に比例することとなる。1 G での弾丸密度とサイズを変えた実験も行ったところ、ステンレス球であっても弾丸サイズが大きくなると、クレーター直径の速度依存性が、0.5 乗に近づいた。密度が大きい弾丸は、標的へのものぐりこみが深くなるが、弾丸サイズが大きくなると浅くなり、弾丸の運動エネルギーが標的粒子に効率よく伝えられることにより、クレーター形成がエネルギースケール則に従うようになるのかもしれないと考えた。一方、数値シミュレーションでは、弾丸が多粒子からなる場合には放出破片量が弾丸の運動量で決まる一方、弾丸が小さな一粒子からなる場合には運動エネルギーで決まること明らかになってきた。シミュレーション結果と実験結果は、クレーター形成過程において粒子間相互作用によるエネルギー散逸がどのようなものであるかを理解することが重要であることを示している。

(5) クレーター形成過程への粒子間力の影響

①粒子間力の無視できない試料を用いた実験
ノミナル実験のシリカサンドやガラスビーズを試料容器にゆるみ充填すると、空隙率は約 40%となるのに対し、粒径 60 μm のアルミナ粒子では空隙率はおよそ 60%となる。このことは、アルミナ粒子間力が重力に比べて無視できないことを示している。粒子層の空隙率が大きいと、クレーターの形が変わってしまう(深さが大きくなる)ので、アルミナ粒子層に加重をかけ、あらかじめ空隙率を 42%に調整した。試料容器を自由落下させ、重力加速度 0.014 G で、ステンレス弾丸でのデータを取得した。クレーター直径は、ほとんど大きくなり、シリカサンドやガラスビーズで見られたクレーター直径と重力加速度の間のべき乗則がこの場合は適用できないことがわかった。すなわち、アルミナ粒子層では、粒子間力が重力に比べて無視できず、粒子間力が無視できる場合の重力依存性が成り立たないことが示された。

②数値シミュレーションによる粒子間力の影響の評価

粉体層における衝突によって生じる放出物(イジェクタ)量は、反発係数や摩擦係数といったエネルギー散逸をもたらす粒子間相互作用によらないことが明らかになりつつあり、重力の影響にフォーカスしたパラメータスタディがより重要であることが示唆された。

(6) 粉粒体層の空隙率

①粉粒体層の空隙率の重力依存性

1 G 下での粒子層の空隙率と、粒子間力と粒子にかかる重力の比 (Bond number) の関係を、数ミクロンから数 100 ミクロンの粒子について整理したところ、図 3 の曲線に示すような

経験則が得られた。この経験則により、重力を変化させると、空隙率が変化することが予測される。

数値シミュレーションでは、多数の粒子を箱の中に自由落下させることで衝突標的となる粉体層を低重力下のもとで形成した。重力の違いによって空隙率の違う標的粉体層を構築することができた。さらに、重力を変化させると空隙率が変化する様子が再現された。この結果は粉体層ターゲットにおける初期条件の重要性を示唆するものである。

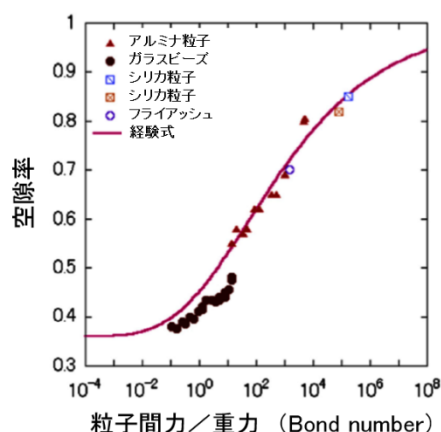


図 3 Bond number と粒子層空隙率の関係 (発表論文⑤の図を改変)

②外力による粉粒体層の空隙率の変化

サイズ分布の異なる 3 種類のシリカサンド、3 種類のアルミナ、1 種類のフライアッシュをそれぞれ構成粒子とする、初期空隙率が 50-80%の層に遠心加速装置による高重力を印加し、土圧による空隙率の変化を測定した。ピストンによる加圧による圧密も行い、遠心加速装置による結果と矛盾しないことを確かめた。加圧による空隙率減少率と、球粒子を仮定した場合の粒子間のすべり摩擦力の関係を調べたところ、図 4 に示すように、すべり摩擦力が大きい粉体ほど、空隙率減少率が小さいという定性的な傾向が確認された。一方、模擬レゴリス層の構造が壊れないぎりぎりの土圧(降伏強度と呼ぶ)を実験的に決定し、粒子間に働く力の理論値との比較を行った。その結果、降伏強度が、転がり摩擦力とすべり摩擦力の理論値から制限できる可能性を示した。

参考文献

- [1] Colwell and Taylor 1999. Icarus 138, 241-248; Colwell 2003. Icarus 164, 188-196; Colwell et al. 2009. Icarus 195, 908-917.
- [2] Takagi et al. 2005. 36th LPSC abst. pp.1627. Takagi et al. 2007. 38th LPSC abst. pp. 1634.
- [3] Wada and Nakamura 2012. Asteroids, Comets, Meteors abst. pp.6185.

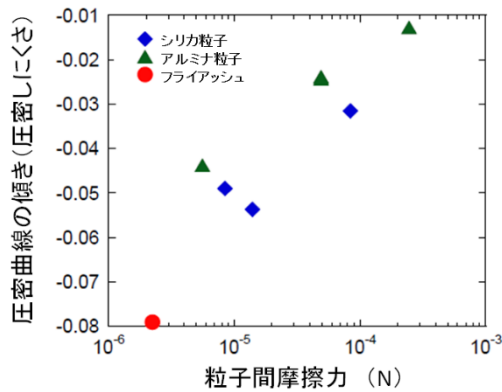


図4 粒子層の圧密しにくさと粒子間摩擦力の関係 (発表論文①の図を改変)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 26 件)

①Omura, T., Kiuchi, M., Guettler, C., Nakamura, A. M., Centrifugal Experiments with Simulated Regolith: Effect of Gravity, Size Distribution, and Particle Shape on Porosity. Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan 14, Pk17-21, 2016. 査読有. https://www.jstage.jst.go.jp/article/tas/tj/14/ists30/14_Pk_17/_article

②Arakawa, M., Wada, K., Saiki, T., 他 19 名, Scientific Objectives of Small Carry-on Impactor (SCI) and Deployable Camera 3 Digital (DCAM3-D): Observation of an Ejecta Curtain and a Crater Formed on the Surface of Ryugu by an Artificial High-Velocity Impact. Space Science Review Online First, 2016. 査読有. DOI: 10.1007/s11214-016-0290-z

③ Kimura, H., Wada, K., Senshu, H. Kobayashi, H., Cohesion of Amorphous Silica Spheres: Toward a Better Understanding of The Coagulation Growth of Silicate Dust Aggregates. Astrophys. J. 812, 67, 12 pp., 2015. 査読有. DOI: 10.1088/0004-637X/812/1/67

④和田浩二, 離散要素法による衝突の数値シミュレーションの歩み. 遊星人 24, 201-213. 査読有. <https://www.wakusei.jp/book/pp/2015/2015-3/2015-3-201.pdf>

⑤ Kiuchi, M., Nakamura, A. M., Corrigendum to “Relationship between regolith particle size and porosity on small bodies”. Icarus 248, 221, 2015. 査読有.

DOI: 10.1016/j.icarus.2014.10.039

Kiuchi, M., Nakamura, A. M., Relationship between regolith particle size and porosity on small bodies. Icarus 239, 291-293, 2014. 査読有.

DOI: 10.1016/j.icarus.2014.05.029

[学会発表] (計 30 件)

①大村知美, 中村昭子, 室内実験によるレゴリス最表層密度進化の研究, 日本惑星科学会 2016 秋季講演会, ノートルダム清心女子大学カリタスホール (岡山県・岡山市), 2016 年 9 月 14(12-14) 日.

②木内真人, 中村昭子, 和田浩二, 模擬低重力下における低速度クレーター形成実験: 微小重力下クレーターサイズに対するレゴリス粒子固着力の影響の推定, 日本惑星科学会 2016 秋季講演会, ノートルダム清心女子大学カリタスホール (岡山県・岡山市), 2016 年 9 月 14(12-14) 日.

③Kiuchi, M., Nakamura, A. M., The origin of Itokawa dimples and a comparison with the surface structure of Phobos, 日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会, 幕張メッセ (千葉県・千葉市), 2016 年 5 月 22-26 日.

[その他]

<http://www.lab.kobe-u.ac.jp/sci-prb/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 昭子 (NAKAMURA AKIKO)
神戸大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 40260012

(2) 研究分担者

和田 浩二 (WADA KOJI)
千葉工業大学・惑星探査研究センター・主席研究員・副所長代行
研究者番号: 10396856

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

木内 真人 (KIUCHI MASATO)
神戸大学・大学院理学研究科・大学院生

大村 知美 (OMURA TOMOMI)
神戸大学・大学院理学研究科・大学院生

Guettler, Carsten (GUETTLER CARSTEN)
神戸大学・大学院理学研究科・学振外国人特別研究員 (平成 25 年 6 月まで)