

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610135

研究課題名(和文)微小重力衝突現象シミュレーターの開発

研究課題名(英文)Development of a Low Gravity Simulator for Impact Phenomena

研究代表者

荒川 政彦(Arakawa, Masahiko)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10222738

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、小惑星表面を構成するレゴリス、ボルダの粉粒体的性質を微小重力下で実験するための「微小重力衝突現象シミュレーター」の開発を検討した。そのために、粉粒体の流動により発生する抵抗力の計測方法と衝突振動とクレーター掘削過程の観測方法の開発を1Gで行った。その結果、ではインパクトによる衝突加速度の計測が有効であり、では加速度計による衝突振動の計測とイジェクタ粒子の速度分布の計測が有効であることがわかった。また、と の開発を通して、粉粒体の1G下での動的性質を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文):We studied the feasibility of development of a Low Gravity Simulator for Impact Phenomena (LoGSIP) in the laboratory; the LoGSIP would be used for the study on the physical properties of granular matters under the low gravity condition simulating a regolith layer of asteroid surface. Then, we developed the method to measure the dynamical resistance force generated from granular matters using the impactor equipped with an accelerometer, and more we developed the method to measure the impact vibration and the excavation process during the crater formation process using the accelerometers set on a target surface and a high speed photography. As a result of these developments, we obtained the basic dynamical properties of granular matters at 1G, and assessed the feasibility of the implementation of these methods to the LoGSIP.

研究分野：惑星科学

キーワード：微小重力 衝突励起振動 貫入抵抗 レゴリス層 クレーター 衝突実験 加速度計 粉粒体

## 1. 研究開始当初の背景

小惑星や微惑星等の小天体表面の地形・地質構造の形成過程を明らかにするためには、微小重力下における粉粒体の動力学を研究する必要がある。近年行われた惑星探査の結果、小惑星表面は普遍的にレゴリスやボルダー等の岩石粒子によって覆われていることが明らかになった。そして、小惑星エロスやイトカワの観測から、岩石の粉粒体が隕石衝突による衝突振動で流動し、表面地形が刻々と変動していることが仮説として提案されている。しかしながら、この仮説を実証するために必要な衝突振動の実験や微小重力下での粉粒体の動力学実験は希であり、系統的な実験が望まれていた。

また、天体表面のクレーター形成には、その重力が重要な役割を果たしており、クレーターサイズやその放出物の速度分布も重力の影響を受けていると言われている。これまでクレーター形成に対する重力加速度の影響を調べるために、遠心機を用いた高加速度場での衝突実験がおこなわれており、この結果が微小重力へと外挿されてきた。一方、微小重力下では、高加速度場では無視できた粒子間の付着力が重要な要素となることが指摘されており、微小重力下での実験が望まれていた。しかしながら、実際の微小重力下での実験は非常に少なく、さらに、地球重力下においてさえクレーター放出物の速度分布の実験は例は少なく、提案された指摘の実証はずっと困難な状況が続いている。

微小重力実験には大規模な落下塔や縦孔、もしくは航空機によるパラボリックフライト、さらには宇宙ステーションを用いる必要があり、マシントイムの確保は難しく、さらに費用面から言っても敷居が高く実験の進展を阻害してきた。しかしながら、衝突現象のような短時間で主要な物理過程が完了する現象では、0.1 秒程度でも微小重力を維持できれば十分に実験が可能である。そして 0.1 秒なら実験室内にも設置可能な小型の落下塔で再現可能である。そこで、短時間計測に特化した「微小重力シミュレーター」の開発を目指すことにした。

## 2. 研究の目的

本研究では、小惑星表面を構成するレゴリス、ボルダーの粉粒体的性質を微小重力下で実験するための「微小重力シミュレーター」の開発を検討する。この微小重力シミュレーターは、1/100 気圧以下の減圧環境で、地球重力加速度の 1/10 以下を 0.1 秒以上再現することを目指す。この性能は、微小重力下において、(1) 粉粒体の流動により発生する抵抗力の計測と (2) 衝突クレーターの形成過程の観測に必要である。そして(2)の実験は、衝突クレーターの形成とその過程で最も重要な物理過程である衝突振動の伝播及びクレー

ター掘削過程に対する重力の影響を明らかにすることができる。

## 3. 研究の方法

本研究では、「微小重力シミュレーター」の開発に必要な基礎研究を行う。このシミュレーターでは、(1) 粉粒体の流動により発生する抵抗力の計測と (2) 衝突クレーターの形成過程における衝突振動の伝播とクレーター掘削過程の観測を行う予定であるが、これらの実験は地球重力場 (1G) においても例が少ない。そのため、シミュレーターで実現可能な実験条件と実験手法の検討を行うため 1G での実験を実施した。この 1G での実験は、将来行う微小重力下での実験と比較するための参照実験としても重要である。

### ① 粉粒体の流動により発生する抵抗力の計測

この実験は、ステンレス製の円柱インパクター (直径 2.6cm、高さ 4.4cm、質量 153g) を様々な種類の粉粒体に衝突貫入されることにより行った。衝突は自由落下により行い、衝突速度は 1.5m/s から 3.6m/s とした。インパクターの背面に加速度計を設置して、粉粒体貫入時の加速度を計測した。この加速度から、インパクターにかかる抵抗力とその時間変化を見積もった。インパクターを衝突させる粉粒体には、粒径 (0.5 $\mu$ m~1cm)、空隙率 (40~90%)、構成物 (ガラスビーズ、石英砂、赤玉、パーライト) の異なる 9 種類のものを用意した。

### ② 衝突振動の伝播過程

衝突振動の伝播過程は、衝突装置を用いたクレーター形成実験により調べた。衝突速度 100m/s 前後で、直径 10mm のポリカ弾丸、直径 3mm のアルミ球、もしくはステンレス球をガラスビーズ標的 (ビーズサイズ 200 $\mu$ m) に衝突させてクレーターを作った。標的表面に 3 個の加速度計を設置して、クレーター形成時に発生する衝突振動を計測した。特にこの実験では加速度計の位置を系統的に変化させることにより、衝突振動の距離減衰率を調べた。

### ③ クレーター掘削過程と放出物の速度分布

クレーターの掘削過程は、標的表面から放出される粒子の速度分布を計測することにより調べた。クレーター形成実験は②と同じ衝突装置を用いて行い、標的には粒径 500 $\mu$ m の石英砂を用いた。弾丸には直径 3mm の密度が異なる 9 種類の球 (1.1~11g/cm<sup>3</sup>) を用いて、放出物の速度分布に対する弾丸密度の影響を調べた。衝突速度は、100~200m/s である。放出物の観測のためには高速ビデオカメラを用いた。なお、撮影速度は 2000 コマ毎秒である。実験後にビデオの解析を行い、放出した石英砂粒の初期位置 (衝突点からの距離) と放出

速度、放出角度を計測した。

#### ④ 微小重力シミュレーターの開発

本研究では 2m 程度の高さを持つ落下装置を室内に設置することで、定常的に微小重力実験を行うための装置の開発・検討を行った。この装置の一部として、図1のような落下容器を作成した。この落下容器中で、目的とする粉粒体の抵抗力やクレーター形成過程への微小重力の影響を調べることが可能かどうかを実験①、②、③の結果から検討した。

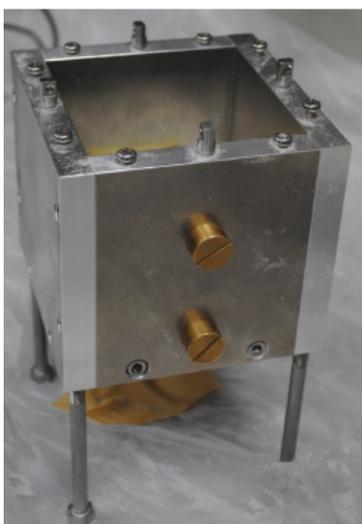


図1：落下容器

### 4. 研究成果

#### ① 粉粒体の流動により発生する抵抗力の計測

インパクターが粉粒体に衝突した時に記録された加速度の時間変化から、最大加速度と加速度の継続時間を計測した。その結果、最大加速度は、粉粒体の種類に関係なく衝突速度に比例することがわかった(図2)。ただし、その速度の比例定数は粉粒体の種類により異なる。最大加速度が次の式で表される衝突圧力で見積もられるとした時、その傾きは粉粒体のバルク音速を表すこととなり、今回の粉粒体では 60m/s から 130m/s のバルク音速が求められた。

$$P = \rho C_0 v_i$$

なお、 $P$ は衝突圧力(Pa)、 $\rho$ は標的密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_0$ はバルク音速(m/s)、 $v_i$ は衝突速度(m/s)とする。また、加速度の継続時間も粉粒体により大きく異なり、粒径  $100\mu\text{m}$  の石英砂では 20ms となり、粒径 3mm 程度の赤玉では 80ms となった。この継続時間は、粉粒体の見かけの粘性抵抗により変化すると考えられ、粘性抵抗の大きな  $100\mu\text{m}$  石英砂ではインパクターにかかる抵抗が大きくて直ぐに止まり、赤玉では、抵抗が小さいためにインパクターの減速が小さく長時間貫入が続いたと考えられる。

さらに詳しく加速度波形を見ると、ガラスビーズや石英砂ではインパクターが止まる寸前に加速度にオフセットが生じており、このオフセットはそれらの粒子層の摩擦強度を表すと考えられる。この摩擦強度は、7kPa から 16kPa となり粉粒体の動力学的性質を表す特徴的な指標と言える。

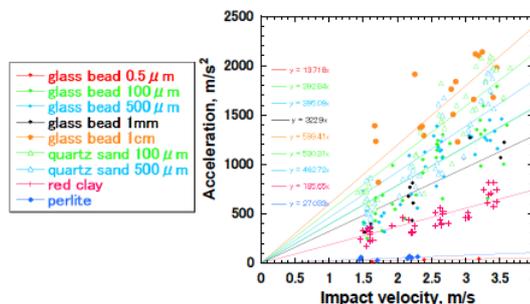


図2：インパクター衝突時の最大加速度、衝突速度及び標的に対する依存性

#### ② 衝突振動の伝播過程

衝突時に発生する加速度波形を計測したところ、衝突点からの距離により最大加速度が系統的に減少することがわかった。減衰は急激に起こり、クレーター半径の4倍以上離れたと最大加速度は1G以下となる。また、加速度波形はパルス波的であり、その継続時間は1ms以下であった。この継続時間は、クレーター形成時間  $(R/g)^{1/2} > 10\text{ms}$  では説明できず、また、弾丸を伝播する衝撃波の往復時間 ( $< 10\mu\text{s}$ ) でも説明できない。説明可能なメカニズムとしては、弾丸の貫入時間であり、簡単な抵抗則を用いた計算では時間のオーダーは合っている。

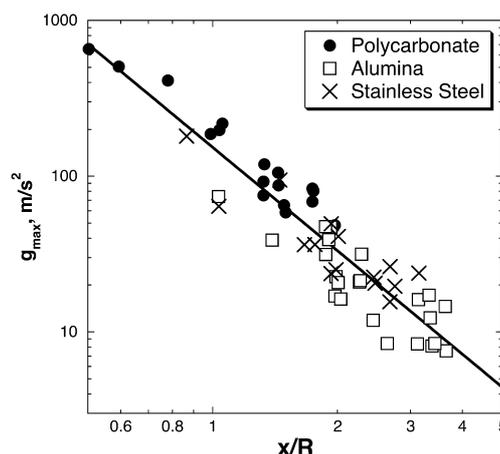


図3：クレーター形成時に発生する加速度の距離依存性。距離をクレーターサイズで規格化するとスケールングできる。

図3にクレーター半径で規格化した最大加速度の距離変化を示す。このように、異なる弾丸サイズ・種類及び衝突速度で行った実験でも、クレーター半径で規格化すると最大加速度は、ほぼ同じ直線で近似できることがわかった。今回の実験で得られた実験式は次の

ようになる。

$$g_{max} = 10^{2.2} \left(\frac{x}{R}\right)^{-2.2}$$

この結果、クレーター半径付近では、衝突条件に関係なく 20G ほどの加速度がかかっていることが明らかになった。この 20G と加速度の持続時間<1ms が、クレーター形成メカニズムとどのように関連しているのかを知るには、微小重力下で同様の実験を行う必要がある。

### ③ クレーター掘削過程と放出物の速度分布

石英砂標的（粒径 500 μm）への衝突実験を行い、衝突時に発生する放出物粒子の速度、放出角度、放出位置を弾丸の種類を変えて系統的に調べた。放出物粒子の計測結果は、放出位置と速度の関係、放出位置と放出角度の関係に整理して、既存のクレーター掘削モデル（Z モデル）やクレータースケール則との比較を行った。図 4 にクレーター半径で規格化した放出物位置と放出速度の関係を示す。なお、放出速度 ( $v_0$ ) はクレーター半径 ( $R$ ) と重力加速度 ( $g$ ) で決まる代表速度 ( $v_{cr}=(gR)^{1/2}$ ) で規格化している。この結果から、衝突条件に関わりなくクレーター半径の位置での規格化放出速度が 0.7 程度であることがわかる。また、速度の距離依存性は、衝突弾丸の密度により系統的に変化するよう見える。密度の大きいものは依存性が緩やかで、密度が小さいものは依存性が急である。一方、放出角度に関してはそのようなはっきりした密度依存性はなく、35° から 45° でばらついているよう見える。

検討の結果、今回の実験結果は、弾丸の潜り込みを考慮した修正 Z モデルを用いると説明が可能であることがわかった。すなわち、今回の結果は、弾丸毎に潜り混みの深さが異なるため、見かけの粒子速度の距離減衰率や点源（Z モデルの流線の始点）の深度が変化していることを示していると思われる。

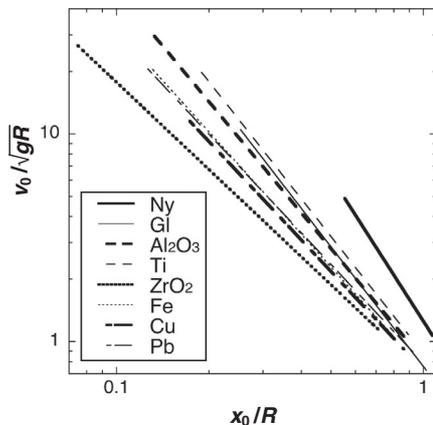


図 4：クレーター放出物の放出速度と放出位置の関係。弾丸により異なる関係を持つ。

### ④ 微小重力シミュレーターの開発 粉粒体の流動により発生する抵抗力の計測

は、今回の地上実験の手法をそのまま微小重力シミュレーターに実装可能であることがわかった。一方、衝突クレーターの形成過程の観測は、地上実験と同様な装置を実装することは難しい。今回の地上実験の結果、クレーター半径の 5 倍以上の容器を使用し、2000 コマ毎秒以上の高速カメラでの観測が必要であることがわかった。今後、この条件を微小重力シミュレーターの開発に反映して行く予定である。

### 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 6 件）

- ① Tsujido, S., Arakawa, M., Suzuki, A. I., and Yasui, M., Ejecta velocity distribution of impact craters formed on quartz sand: Effect of projectile density on crater scaling law, *Icarus* 262, 79–92, 2015.  
doi:10.1016/j.icarus.2015.08.035  
(査読有)
- ② Yasui, M., Matsumoto, E., and Arakawa, M., Experimental study on impact-induced seismic wave propagation through granular materials, *Icarus* 260, 320–331, 2015.  
doi:10.1016/j.icarus.2015.07.032  
(査読有)
- ③ Leliwa-Kopystynski, J. and Arakawa, M., Impacts experiments onto heterogeneous targets simulating impact breccia: Implications for impact strength of asteroids and formation of the asteroid families, *Icarus* 235, 147–155, 2014.  
doi:10.1016/j.icarus.2014.03.012  
(査読有)
- ④ Yasui, M., Hayama, R., and Arakawa, M., Impact strength of small icy bodies that experienced multiple collisions, *Icarus* 233, 293–305, 2014.  
doi:10.1016/j.icarus.2014.02.008  
(査読有)
- ⑤ 荒川政彦, 保井みなみ, 寫生有理, “太陽系における高速度衝突現象と惑星の起源と進化”, 日本高圧力学会学会誌「高圧力の科学と技術」, vol. 24, No. 1, 13–20, 2014年2月  
doi.org/10.4131/jshpreview.24.13  
(査読有)
- ⑥ Suzuki, A., Nakamura, A. M., Kadono, T., Wada, K., Yamamoto, S., and Arakawa, M., A formation mechanism for concentric ridges in

ejecta surrounding impact craters in a layer of fine glass beads, *Icarus* 225, 298-307, 2013.  
doi:10.1016/j.icarus.2013.03.027  
(査読有)

[学会発表] (計 20 件)

- ① 松榮一真, 荒川政彦, 保井みなみ, 辻堂さやか, 高野翔太, 長谷川直, 密度の異なる弾丸を用いた高速度クレーター形成実験: 衝突励起地震の弾丸物質依存性, 日本惑星科学会 2015 年度秋季講演会, 東京工業大学 (東京都目黒区), 2015 年 10 月 14 日-10 月 16 日
- ② Matsue, K., Arakawa, M., Yasui, M., Matsumoto, E., Tsujido, S., Takano, S., and Hasegawa, S., Experimental study on propagation process of impact-induced seismic wave in quartz sand simulating asteroid regolith layer, IAU XXIX General Assembly, Honolulu, HI, USA, August 3-14, 2015.
- ③ 辻堂さやか, 荒川政彦, 鈴木絢子, 保井みなみ, 松榮一真, 高野翔太, 長谷川直, 衝突クレーター形成に伴うイジェクタ速度分布に関する実験的研究, 日本地球惑星科学連合大会 2015 年大会, 幕張メッセ (千葉県千葉市), 2015 年 5 月 24 日-5 月 28 日
- ④ 松榮一真, 高野翔太, 荒川政彦, 保井みなみ, 多孔質石膏標的に対する斜め衝突破壊実験, 日本地球惑星科学連合大会 2015 年大会, 幕張メッセ (千葉県千葉市), 2015 年 5 月 24 日-5 月 28 日
- ⑤ 辻堂さやか, 保井みなみ, 荒川政彦, 松榮一真, 高野翔太, 長谷川直, 高速度域におけるクレーターエジェクタ速度のスケール則に関する実験的研究, 日本惑星科学会 2014 年秋季講演会, 東北大学片平キャンパスさくらホール (宮城県仙台市), 2014 年 9 月 24-26 日
- ⑥ 松榮一真, 荒川政彦, 保井みなみ, 松本恵里, 辻堂さやか, 高野翔太, 小林直樹, 長谷川直, 粉粒体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究 II, 日本惑星科学会 2014 年秋季講演会, 東北大学片平キャンパスさくらホール (宮城県仙台市), 2014 年 9 月 24-26 日
- ⑦ Yasui, M., Matsumoto, E., Arakawa, M., Matsue, K., and Kobayashi, N., Experimental study on the impact-induced seismic wave propagating through granular materials: Implications for a future asteroid mission, ACM2014, Helsinki, Finland, June 30 - July 4, 2014.
- ⑧ Tsujido, S., Arakawa, M., Suzuki, A. I., and Yasui, M., Experimental study on the ejecta-velocity

distributions caused by low-velocity impacts on quartz sand, ACM2014, Helsinki, Finland, June 30 - July 4, 2014.

- ⑨ 松本恵里, 保井みなみ, 荒川政彦, 粉粒体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市), 2014 年 4 月 28 日-5 月 2 日
- ⑩ 辻堂さやか, 荒川政彦, 和田浩二, 鈴木絢子, 石英砂上への衝突クレーター形成実験: エジェクタの速度分布に対する弾丸密度依存性, 日本地球惑星科学連合大会 2014 年大会, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市), 2014 年 4 月 28 日-5 月 2 日
- ⑪ 松榮一真, 荒川政彦, 保井みなみ, 砂を伝播する衝突励起応力の減衰過程に関する実験的研究, 日本地球惑星科学連合大会 2014 年大会, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市), 2014 年 4 月 28 日-5 月 2 日
- ⑫ 松本恵里, 荒川政彦, 保井みなみ, 小林直樹, 砂への低速度衝突による衝突励起地震の観測, 日本惑星科学会 2013 年度秋季講演会, 石垣市民会館 (沖縄県石垣市), 2013 年 11 月 20-22 日
- ⑬ 辻堂さやか, 荒川政彦, 和田浩二, 鈴木絢子, クレーターエジェクタの速度分布に関する実験的研究: Wada's method の応用, 日本惑星科学会 2013 年度秋季講演会, 石垣市民会館 (沖縄県石垣市), 2013 年 11 月 20-22 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://eps1.sakura.ne.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

荒川 政彦 (ARAKAWA, Masahiko)  
神戸大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 10222738