

令和 5 年 8 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20399

研究課題名（和文）月面の土壌粒子資源を活用するための垂直振動粉体ポンプシステム

研究課題名（英文）Vibration Pumping System for Utilization of Lunar Regolith Particles

研究代表者

安達 眞聡（Adachi, Masato）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：90908386

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、長期月面探査を実現するために不可欠な月土壌粒子のハンドリング技術として、垂直振動粉体ポンプシステムに着目し、非球形粒子である月土壌に対する搬送性能についての調査を行った。各振動条件が粒径の異なる粒子に対する搬送性能に及ぼす影響や、球形ガラス粒子と非球形月土壌粒子の搬送特性の違いについて明らかにした。比較的搬送が難しい月土壌粒子の搬送性能を向上させるために、複数のパイプを用いた新しい実験装置を開発し、搬送性能の向上に成功した。さらに月面環境下における本装置の性能について、個別要素法を利用したシミュレーションを行うことで、重力加速度が搬送性能に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

先行研究では球形ガラス粒子の搬送について調査が行われてきたのに対し、本研究では非球形粒子の搬送特性を実験的に明らかにするだけでなく、その搬送性能を向上させる手法・条件についても見出すことが出来た。また、これまでの研究では数100 μ m程度の粒子の搬送しか確認できていなかったが、本研究では1mm以上の粒子についても搬送可能であることを実証し、装置の応用範囲拡大という意味でも重要な知見が得られた。さらに、月面の低重力環境下ではその搬送性能が向上するというシミュレーションの結果も得た。本研究の成果は、将来の宇宙探査ミッションでの実装のみならず、地上の様々な粉体関連産業への応用等についても期待される。

研究成果の概要（英文）：This research serves to investigate a transport performance of a granular vibration pumping system against irregular-shaped lunar regolith particles. A new experimental setup of the system allowed us to tune up the vibration parameters respectively and to reveal effects of the parameters on the transport performance of the regolith particles with different diameters. Transport experiments using spherical glass beads within the same diameter ranges were also conducted, and the results show the difference of dynamic transport properties between spherical and irregular-shaped particles. The lunar regolith transport is relatively difficult due to the low flowability. Thus, we developed the new granular vibration pumping system employing double oscillating pipes, which improved the transport performance against the regolith. Moreover, we performed a numerical calculation to investigate effects of the lower gravitational acceleration of the Moon on the transport performance.

研究分野：精密工学，宇宙探査技術

キーワード：月探査 月土壌 粉体ハンドリング 振動搬送

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) NASA によると長期月面探査の実現には、物資の搬送リスク・コストの観点から、現地資源である月レゴリス土壌を活用する In-Situ Resource Utilization (ISRU) が不可欠であり、その成否の鍵を握るのが過酷な宇宙環境下において不具合なく稼働する信頼性の高い粉体ハンドリング技術の確立である。これまでに開発されてきた機械式・流体式技術には、下記のような課題が残されている。

- ・ レゴリスは機器に付着し易く、機械駆動部隙間から侵入して機器の故障を誘発
- ・ 装置の複雑化、巨大化、消費電力、発熱量といった観点での宇宙環境上での制約
- ・ 宇宙環境上での長期的な生成・管理・使用が困難な液体・気体の使用

(2) 研究代表者らは、宇宙環境との相性が良い静電気・磁気・振動式の粉体ハンドリング技術開発に取り組んできたが、その中でも ISRU の基礎プロセスの1つである粉体の垂直搬送を長期的に実施する技術として、下記のような特徴を持つ垂直振動粉体ポンプシステムを開発した。

- ・ レゴリスと接触する箇所について機械的駆動部が無いため故障しづらく、制御が簡単
- ・ 装置をシンプルかつ小型化でき、液体・気体が不要
- ・ 加振法の高度化により著しい低消費電力・低発熱化

この技術は、振動するパイプを粉体層に垂直挿入することで、その中を粉体が液体の毛細管現象のように上昇する仕組みを利用した新しい粉体搬送手法である(図1)。これまでの研究では、特定の粒径を持つ球形ガラス粒子(粒径: 数100 μm)について実験的調査が行われ、その上昇現象の粉体力学モデルが提唱されてきたが、レゴリスのような幅広い粒度分布や非球形形状を持つ不均一な粉体の搬送特性については不明な点が多い。また、宇宙特有の環境条件が垂直搬送時の粉体動特性に及ぼす影響については理解されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、長期月面探査を実現するために不可欠な月レゴリス粒子のハンドリング技術として、萌芽的技術である垂直振動粉体ポンプシステムに着目し、その非球形粒子に対する搬送性能について基礎特性を明らかにすることである。具体的には、実験とシミュレーションを組み合わせた手法により、月レゴリスのような自然に存在する不均一粉体の機械的性質や宇宙特有の環境条件が搬送性能と搬送中の粉体動特性に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 振幅や周波数等の各振動条件を個別に調整可能な実験装置を作成し、それを用いて粉体の搬送試験を行う(図2)。また、搬送途中の粉体挙動撮影装置や、撮影動画の画像解析ソフトウェアを開発し、粉体挙動の時間的変化について解析を行う(図1)。ここでは、月レゴリスの粒度分布範囲内で様々な粒径を持つ球形ガラス粒子を準備し、各振動条件が粒径が異なるガラス粒子の搬送性能に及ぼす影響について評価を行う。

(2) 月レゴリスの機械的性質を模擬した月レゴリスシミュラントを使用して実験を行う。それらを粒径毎に分級して、ガラス粒子を使用した実験と同様の粒径を持つシミュラント粒子を準備する。各粒径のシミュラントについて、振動条件の変化が各粒径粒子の搬送性能に及ぼす影響について評価を行う。

(3) 凝集性が高く、流動性が低いことから搬送が比較的難しいことが想定される月レゴリスシミュラントについて、その流動性を改善することで搬送性能を向上させる仕組みとして、これまでのような1本のパイプではなく、2本のパイプを利用した装置を開発し、その搬送特性について調査を行う(図2)。

(4) 低重力環境である月面環境を想定して、シミュレーションにより垂直振動粉体ポンプシステムの宇宙環境下における搬送性能について調査を行う。シミュレーション手法として粉体挙動解析手法である個別要素法を使用した計算を行う。地上重力環境と月面の1/6重力環境を考慮した計算を実施することで、重力加速度が搬送中の粉体挙動に及ぼす影響について調査する。

4. 研究成果

(1) ガラス粒子の搬送について、基本的には粒径が小さい程、搬送性能が向上することが確認できた。しかし、粒径が数10 μm 以下の小粒子粒子は凝集性が高くなり、その流動性が低くなるため途中で搬送が止まってしまう、それ以上持ち上げることができなくなった。また、これまでの研究では数100 μm 程度の粒子の搬送しか確認できていなかったが、本研究では1mm以上の粒子についても1m以上の高さまで搬送可能であることを実証した。装置の適用範囲を拡大する意

味でも重要な知見が得られた。さらに、どの粒径の粒子に対しても、振動周波数や振幅を大きく設定した場合に搬送性能が向上することが確認できた。これは、振動加速度が大きくなり、粒子を持ち上げる力が増加したためと考えられる。ただし、特定の粒子については周波数が大きくなり過ぎると搬送性能が低下することも確認でき、最適な周波数が存在することも示唆された。本成果に関連する内容として、2023 年度粉体工学会春期研究発表会および 34th International Symposium on Space Technology and Science において発表を行った。

(2) 各粒径に分類した月レゴリスシミュラントの搬送性能について調査を行ったところ、同様の粒径を持つガラス粒子の搬送と比較して搬送性能が低下することが確認された。特に、月レゴリスシミュラントの場合は、ある程度の高さまでは搬送可能なものの途中で搬送が停止してしまうことが多かった。これは非球形の形状を持つことで流動性が低く、連続的にパイプ入口まで粒子が供給されなくなるためだと考えられる。また、振動条件の影響について、ガラス粒子と同様に振動周波数や振幅が増加するほど搬送性能が向上することが確認できた。本成果に関連する内容として、33rd International Symposium on Space Technology and Science において発表を行った。

(3) 流動性が低く、搬送が比較的難しい月レゴリスシミュラントの搬送性能を向上させるために、2 本のパイプを使用した新しい垂直振動粉体ポンプシステムを開発し、その搬送試験を行ったところ、2 本のパイプを使用した場合に、ガラス粒子と同様に 1m 以上の高さまで月レゴリスシミュラントを搬送することに成功した。これは、近くに設置した 2 本のパイプの振動が、その周囲の粉体層の流動性を互いに向上させ、パイプ入口に粒子が流れ込みやすくなったためと考えられる。先行研究の殆どが球形ガラス粒子の搬送について調査を行ってきたのに対し、本研究では非球形粒子の搬送特性を実験的に明らかにするだけでなく、その搬送性能を向上させる手法・条件についても見出すことが出来た。本成果に関連する内容として、34th International Symposium on Space Technology and Science において発表を行った。

(4) 個別要素法を使用したシミュレーションについて、まず実験条件を可能な限り再現した計算条件を設定することで、地上の実験結果と定性的に一致する計算結果が得られることを確認した。次に低重力環境下を想定したシミュレーションを行ったところ、地上条件と比較してより高く粒子を搬送可能であるという結果を得た。また、月面の低重力環境下では地上では搬送不可能である弱い振動条件（低振幅・低周波数）であっても搬送可能となるという結果も得た。これは、月面で利用するにあたって、垂直振動粉体ポンプシステム加振部の小型化・軽量化・低消費エネルギー化が可能となることを示唆しており、技術的制限が厳しい宇宙環境下での利用を考えると大きな利点となり得る。本成果に関連する内容として、34th International Symposium on Space Technology and Science において発表を行った。

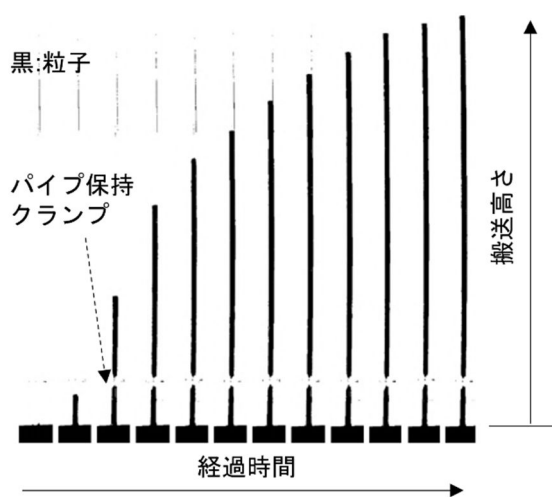


図1 垂直振動粉体ポンプシステムにおける粉体搬送の様子。パイプを粉体層に挿入し、上下方向に振動させることでパイプ内を粒子が上昇していく。上昇挙動を撮影し、その画像解析を行うことで搬送性能について評価を行う。

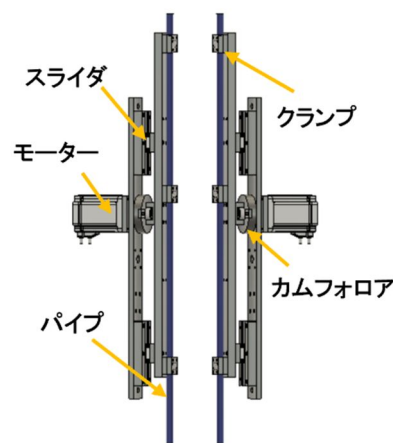


図2 2本のパイプを使用した垂直振動粉体ポンプシステムの実験装置。1本のパイプの振動がもう1本のパイプ入口周囲の粉体の流動性を向上させることが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Dorota Budzyn, Eoin Tuohy, Natan Garrivier, Timon Schild, Aidan Cowley, Reuben Cruise, Masato Adachi, Hossein Zare-Behtash, Andrea Cammarano
2. 発表標題 Lunar Dust: Its Impact on Hardware and Mitigation Technologies
3. 学会等名 46th Aerospace Mechanisms Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenta Shirote, Naoya Hatano, Tomoko Hirayama, Hiroshi Kanamori, Kohsuke Tanaka, Masato Adachi
2. 発表標題 Granular Vibration Pumping System for Transporting Lunar Regolith
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masato Adachi, Patricia Sophie Schneider, Matthias Sperl
2. 発表標題 Dynamical Properties of Granular Vibration Pumping for ISRU
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 城出健太, 安達真聡
2. 発表標題 月レゴリスを資源活用するための垂直振動粉体ポンプシステム
3. 学会等名 第16回宇宙ユニットシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安達真聡
2. 発表標題 垂直振動粉体ポンプシステムによる粉体の上昇挙動特性
3. 学会等名 2022年度 粉体工学会春期研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 城出健太, 波多野直也, 安達真聡
2. 発表標題 垂直振動粉体ポンプシステムによる粉体の粒径が上昇挙動に及ぼす影響
3. 学会等名 2023年度 粉体工学会春期研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 粉粒体搬送装置	発明者 安達真聡, 城出健太	権利者 国立大学法人京都大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-55473	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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

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		
ドイツ	ドイツ航空宇宙センター		