

低重力環境下における 粉粒体の流動特性の測定に成功

Hourglass ミッション⁽¹⁾：様々な天体の重力環境を再現し月や惑星の砂を降らせる実験

本研究のポイント

- ・国際宇宙ステーションきぼうモジュールの人工重力発生装置⁽²⁾を利用することにより、様々な天体を想定した重力条件下で8種類の砂の流動実験を実施
- ・長時間の安定した人工重力環境下(0.063G~2.0G)で粉粒体の振る舞いの測定およびその解析は世界初
- ・これまで確認されたことがなかった、低重力下においても砂の流動速度は重力の大きさの平方根に比例すること、並びに重力が減少すると砂の「かさ密度」が低下することを示唆した

【研究概要】

横浜国立大学工学研究院 尾崎 伸吾教授、慶應義塾大学理工学部 石上 玄也准教授、JAXA 宇宙科学研究所 大槻 真嗣准教授らの研究グループは、国際宇宙ステーションきぼうモジュールの細胞培養実験装置を活用することで様々な低重力環境を再現し、各種粉粒体（砂やレゴリス模擬土）の流動特性の測定に成功しました。長時間の安定した人工重力環境下(0.063G~2.0G)での粉粒体の流動挙動の測定およびその解析は世界初の成果です。また実験結果に基づき、いくつかの砂の流動特性はよく知られた物理法則に定量的に従い、低重力では重力の大きさの平方根(\sqrt{G})に比例することを明らかにしました。加えて、測定結果の回帰分析により、砂の「かさ密度」は重力とともに減少することも示唆しました。得られた成果は、将来の宇宙探査機の開発や各種ミッションの検討に利用可能です。本研究成果は、Nature のパートナー誌であり、NASA からもサポートを受けている「npj Microgravity」(8月8日(英国時間)付 online 上)に掲載されます。

【発表者】

- <横浜国立大学> 尾崎 伸吾、渡部 雄太郎、西野 巧留
- <慶應義塾大学> 石上 玄也、小嶋 洋至、早田 圭之介、中尾 悠希
- <JAXA> 大槻 真嗣、須藤 真琢
- <東京大学> 宮本 英昭
- <千葉工業大学> 和田 浩二
- <東京農工大学> 前田 孝雄
- <立命館大学> 小林 泰三

【研究成果】

国際宇宙ステーション(International Space Station: ISS) きぼうモジュールに設置されているターンテーブル型の細胞培養実験装置により生成された遠心力を利用することにより、安定した人工重力環境を再現した。その環境下で、アルミナビーズや東北硅砂などの地球砂に加え、将来の探査活動先として想定される月、火星および火星衛星フォボスのレゴリス模擬土などの粉粒体が封入された砂時計型の試験体を活用した流動実験を行った。その結果、様々な天体を想定した重力条件下で8種類の粉粒体の流動特性の測定に成功した。また、自然重力環境と人工重力環境の両方で流動挙動の数値シミュレーションを実施した。シミュレーション結果により、人工重力条件下での流動特性は自然重力条件下でのそれと一致していることも確認した。

他方、流動速度の測定結果の回帰分析により、流動速度の重力依存性はよく知られたBeverloo則⁽³⁾に低重力条件下でも従うことを明らかにした。また、これまで仮説の域にとどまっていた低重力条件下での流動速度は、砂の種類によっては重力の大きさの平方根(\sqrt{G})に比例することを実証した(図1)。さらに、回帰分析の結果から、砂のかさ密度が重力とともに減少することを示唆する結果を得た。これらの結果は、将来の宇宙探査機の開発や各種ミッションの検討の際に不可欠となる低重力条件下における天体表層条件の設定指針となり得る。

なお、粉粒体の挙動を物理学として扱う粉体物理・粒状体力学の分野においても、粉粒体の流動挙動の実験および理論的研究が古くから多く行われてきた。粉粒体の流動は、重力による自由流動性と圧力の作用のもとに起こる圧力流動性の二つに分けることができるが、既報の研究は、いずれも1G場におかれた粉粒体を前提とするものであった。一方、本研究では、これまで前提としていた重力場を変化させたときの自由流動性を調べようとするものであり、長期かつ安定的な可変重力場でそれを実験的に解明した例は他に見当たらない。そのため本研究は、宇宙探査への応用だけでなく、粉粒体を扱う物理学分野においても貴重なデータを提供するものと考えられる。

【実験手法】

ISS きぼうモジュールに設置されているターンテーブル型の細胞培養実験装置を活用した。粉粒体が真空状態で封入された砂時計型の実験装置(Hourglass box)をターンテーブルに90度ごとに4つ搭載し、回転速度を制御することで遠心力を発生させた(図2)。これより、ISS内の微小重力環境下で遠心力が付加された粉粒体は人工的な低重力環境下に置かれることになる。その状態を保ったまま、砂時計型の試験体を遠心力方向に対して繰り返し反転させた(ひっくり返した)。様々な重力レベルに対応するようにターンテーブルの回転速度を制御したうえで、粉粒体が人工重力方向に流動落下する様子をカメラで撮影した(図3)。

試料としては、アルミナビーズや東北硅砂などの地球砂に加え、将来の探査活動先として想定される月、火星および火星衛星フォボスのレゴリス模擬土などの計8種類を選定し、低

重力環境下でのそれぞれの流動特性を測定した。一度に搭載できる Hourglass box は 4 つであるため、実験は 2 セット実施した。

測定結果の回帰分析には、粉粒体の質量流速に関する著名な法則である Beverloo 則を採用した。

【数値シミュレーションによる実験条件の検証】

実験結果を正しく解釈するために、自然重力と人工重力環境下での流動挙動の違いについて数値シミュレーションを実施した。解析には粉体工学分野や土質力学分野で実績のある個別要素法⁽⁴⁾を利用した。自然重力および人工重力環境下におけるアルミナビーズの解析結果を図 4 に示している。解析の結果、粉体の流動速度に関連する排出口上部の堆積状態は、自然重力環境と人工重力環境とで良い一致が確認できた。他方、人工重力環境下では、粒子が一旦排出されると無重力状態（ISS では微小重力）となり等速運動を示すのに対し、自然重力環境下では等加速度運動を示す。そのため、底面到達時の速度には両者で差異が見られた。加えて、人工重力環境では、回転系から慣性系への移行に伴い、粒子は落下中にコリオリ力の影響を受ける。しかしながら、本実験装置の落下距離の範囲では、これらの影響は重力条件が及ぼす流速に対するそれよりも小さいことが確認できた。このような数値シミュレーションによる検証により、本実験は自然重力における粒状流の重力依存性を十分に再現できていることが確認できた。

実験や数値シミュレーションの動画：<https://osf.io/3zcm2/>.

【社会的な背景】

地球外の固体天体の表層は細かい砂（レゴリス）で覆われている。レゴリスの流動特性の重力依存特性を研究することは、宇宙探査に不可欠な着陸機やローバーの設計・開発、ひいては各種ミッションの事前検証において重要な意味を持つ。従前より、これらの検討には数値シミュレーションが活用されているが、各種力学モデルのパラメータや初期条件の確かさは研究者の推定に依存しているのが現状である。

低重力環境における砂の振る舞いを観測するために、これまでも航空機によるパラボリックフライトや落下塔が利用されている。しかしながら、これらの方法では安定した長時間の低重力環境の再現は難しく、レゴリスの流動挙動の重力依存性を検証するための十分な測定結果を得ることは困難であった。そのような状況の下、ISS きぼうモジュール内の細胞培養装置による制御された人工重力環境下での試験が効果的であるとの考えの下、Hourglass ミッションが実施された。本論文は、そのミッションの成果の一部をまとめたものである。

【今後の展開】

大小様々な固体天体への安全な着陸とそこでの各種ミッションにおいては、表面の環境

条件、特に地球と異なる重力環境下でのレゴリスの力学的特性の推定が重要になる。そのため、着陸探査機とレゴリスの相互作用の予測のために必要な力学モデルやパラメータセットは非常に価値が高い。本研究で得られた砂の流動特性やかさ密度の重力依存性の結果は、これらの決定や予測に資すると考えられる。

例えば、本研究で得られた成果を基に、将来の探査目標となる天体の素性の良い地盤初期状態を設定可能になると考えられる。これにより、レゴリスが置かれている重力の大きさに強く依存する着陸機の地盤反力やローバーの走行能力の数値解析の精度向上に寄与し得る。また、これまで多水準のパラメトリックスタディを進めることで最悪ケースを想定してきたやり方から脱却し、より効率的な検討も可能となる。

【参考図】

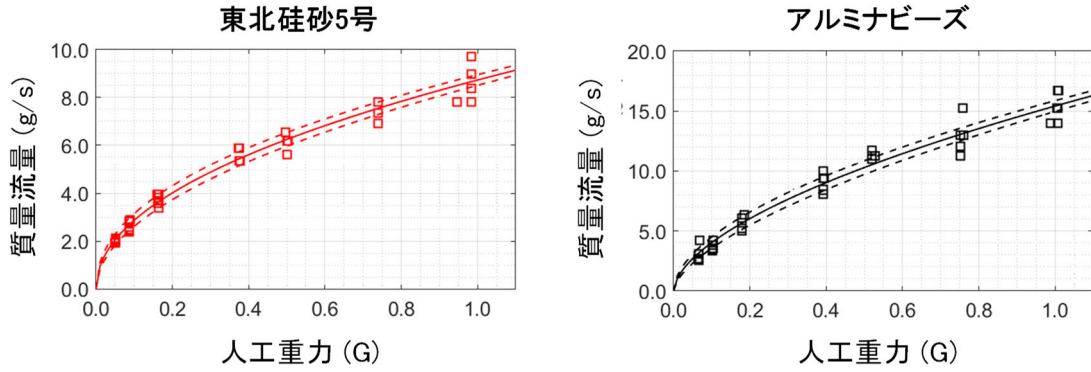
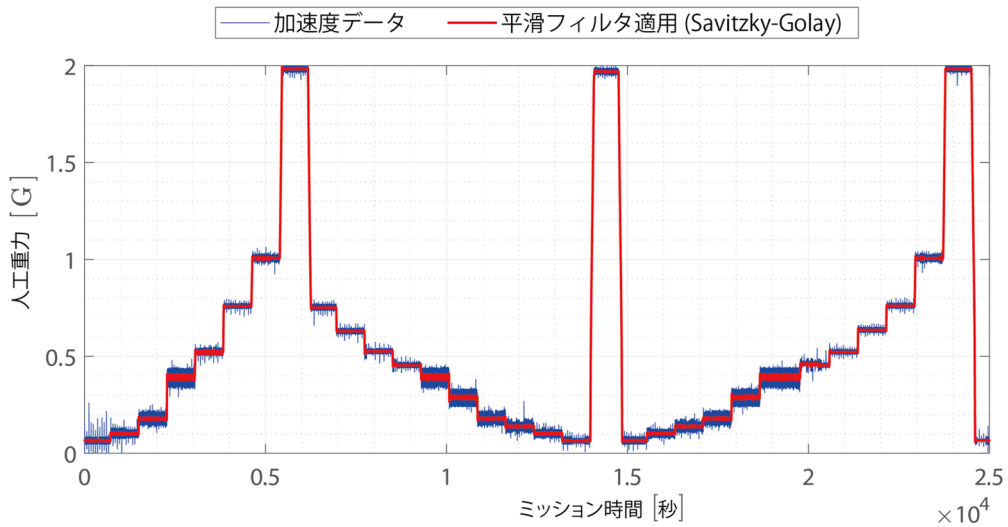
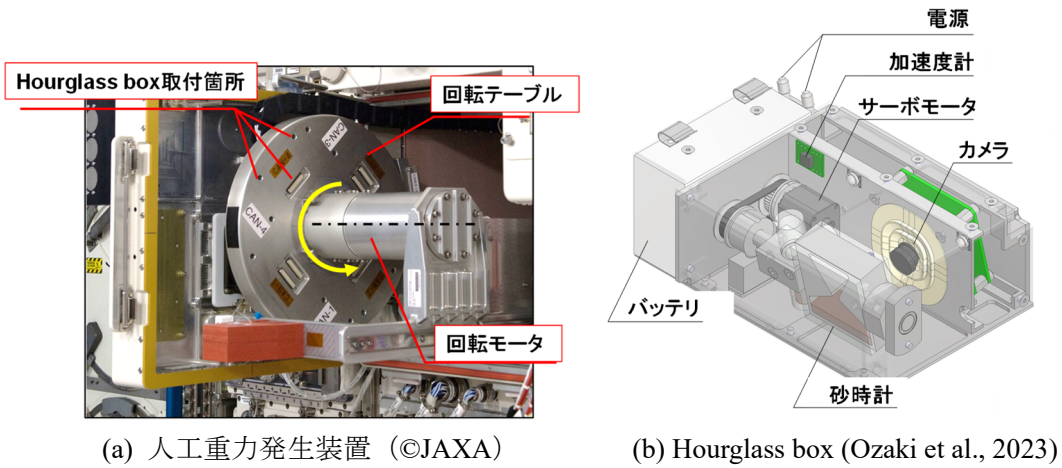


図1 砂の流動速度の重力依存性 (回帰分析結果) (Ozaki et al., 2023)



(c) 人工重力の履歴 (月の重力: 0.17G、火星の重力: 0.38G、地球の重力: 1.0G)

図2 実験装置の概要 (Ozaki et al., 2023)

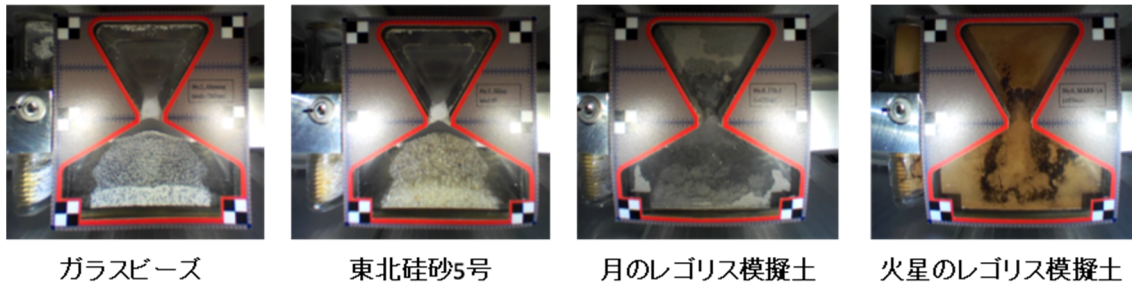


図3 流動終了時の粉粒体の様子 (0.063G) (©横国大/慶大/JAXA)

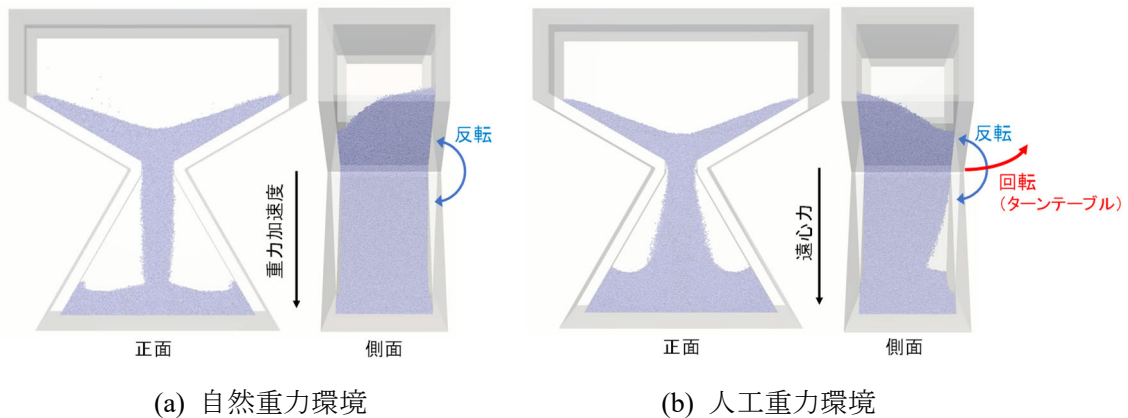


図4 個別要素法を用いた低重力環境での流動シミュレーション (0.1G) (Ozaki et al., 2023)

【掲載論文】

題目： Granular flow experiment using artificial gravity generator at International Space Station
 著者： S. Ozaki*, G. Ishigami*, M. Otsuki*, H. Miyamoto, K. Wada, Y. Watanabe, T. Nishino, H. Kojima, K. Soda, Y. Nakao, M. Sutoh, T. Maeda, and T. Kobayashi
 (*corresponding authors)

雑誌： npj Microgravity

掲載日時： 2023年8月8日 (英国時間)

DOI: 10.1038/s41526-023-00308-w

実験や数値シミュレーションの動画： <https://osf.io/3zcm2/>.

【用語解説】

(1) Hourglass ミッション

国際宇宙ステーションきぼうモジュールの人工重力発生装置上に実験装置 (Hourglass box) を搭載し、低重力が砂の特性 (例えば、粒子自体の挙動、粒子群が示す相互作用力等) に及ぼす影響を調査するミッション。

URL: <https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/science/70485.html>

(2) 人工重力発生装置

きぼうモジュール内細胞培養装置 (CBEF: Cell Biology Experiment Facility)。

URL: <https://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/cbef/>

(3) Beverloo 則

Beverloo らによって提案された、サイロや砂時計などの排出口から流れ出る粉粒体の質量流量（単位時間当たりの質量）を記述した法則。 *J. Chem. Eng. Sci.* **15**, 260–296 (1961).

(4) 個別要素法

分析対象物を個別の粒子の集合体としてモデル化し、粒子同士または粒子と固体間の接触と滑りを考慮して、各時刻におけるそれらの運動を分析する数値解析手法。

【本件に関するお問い合わせ先】

（研究内容に関すること）

横浜国立大学 大学院工学研究院

教授 尾崎 伸吾（おざき しんご）

E-mail: ozaki-shingo-xd@ynu.ac.jp

TEL: 045-339-3881

慶應義塾大学 理工学部

准教授 石上 玄也（いしがみ げんや）

E-mail: ishigami@mech.keio.ac.jp

JAXA 宇宙科学研究所

准教授 大槻 真嗣（おおつき まさつぐ）

E-mail: otsuki.masatsugu@jaxa.jp

（報道・広報に関すること）

横浜国立大学 総務企画部リレーション推進課

TEL: 045-339-3027

E-mail: press@ynu.ac.jp

慶應義塾広報室

TEL: 03-5427-1541

E-mail: m-pr@adst.keio.ac.jp

関連 WEB リリース :

JAXA 宇宙科学研究所 (ISAS) WEB リリース

URL:<https://www.isas.jaxa.jp/topics/003454.html>

JAXA 有人宇宙技術部門 WEB リリース

URL:<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/pickout/73669.html>