

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2020

課題番号：18KK0108

研究課題名（和文）微小重力環境下における流体や粉粒体との相互作用の理解

研究課題名（英文）Understanding the interaction with fluids and granular materials in microgravity environment

研究代表者

大槻 真嗣 (Otsuki, Masatsugu)

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・准教授

研究者番号：50348827

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：低重力環境の粉粒体/流体との相互作用の基本データ取得のために、海外機関(DLR)と協力の下、ドイツの落下棟施設(ZARM)を利用して、計10回の落下塔試験を行った。3回は着陸パッドのような円盤が珪砂8号に約0.5m/sで垂直に衝突した場合、4回は微小重力天体からレゴリスを採取する機構の一つである筒状のコアラー機構を5m/s程度で同じく粉粒体へ貫入させた場合である。これらにより、反力推定モデルの応答評価を行うためのデータを獲得した。残りの3回はベアタンクを模擬した容器に液体を封入し、着陸機を想定した速度変化を加えた動作を容器にさせ、スロッシング荷重の計測とCFD検証に用いる応答結果を取得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果は、一つは、真空と微小重力環境を合わせた複合的に異なる環境での粉粒体運動への影響評価を行い、得られた単純な反力推定モデルは、テラメカニクス分野でも過去にないものと予想され、従来モデルとの違いによるメカニズムの再認識にも貢献できると考えられる。次に、球形タンクに閉じ込められた液体が表面張力優位になることを想定し、その状態へ着陸を模擬した衝撃加速度を与えた際の流体重心位置の変化とタンクへの反力を観測した。これは、0Gから着陸衝撃、そして微小重力加速度に戻るといった小惑星探査特有の加速度遷移を受けた流体の運動であり、稀な条件で流体の運動が観測されたことの価値は計り知れない。

研究成果の概要（英文）：In order to obtain basic data of interaction between granular matter and fluid in low gravity environment, 10 drop tower tests were performed with the drop tower facility (ZARM) in Germany in cooperation with DLR. In 3 times, when a disk such as a landing pad impacts perpendicularly to silica sand No.8 at approximately 0.5 m/s, and in 4 times, when a corer mechanism which is one of the mechanisms for collecting samples from celestial body under microgravity is penetrated into granular matter at about 5 m/s. Through these experiments, we obtained the data for the validation of the model estimating the reaction force from granular matter. In the remaining 3 times, liquid was enclosed in a container simulating a bare tank, and the operation with speed change on the assumption of a planetary lander was applied to a container, and the results for the measurement of sloshing load and CFD verification were obtained.

研究分野：機械力学制御

キーワード：テラメカニクス レゴリス 粉粒体 ダイナミクス 微小重力環境

1. 研究開始当初の背景

今日までに月や火星、小惑星等の地球以外の天体へ向けて 100 機以上の着陸探査機が打ち上げられており、近年では、はやぶさ 2、OSIRISREX、OMOTENASHI 等で惑星探査が行われる予定である。惑星表面の重力環境は、無重力 (0G) から地球重力 (1G) の間で存在し、その環境に長期間置かれたレゴリス (惑星表面に堆積する砂) といった粉粒体および着陸探査機内の燃料等の流体の運動は、1G 環境下での運動と異なる。例えば、粒子表面の凹凸が大きな砂は重力依存性が小さく、珪砂のような丸い形状の粒子が集まった砂では重力値によるその特性 (極限支持力、粘着力等) の変化の大きいことがパラボリックフライト (PF) を利用した実験により確かめられている。また、月 (1/6G) や火星 (1/3G) といった、比較的地球重力に近い環境では相似則による粉粒体や流体の運動の予測は可能だが、微小重力環境では、相似則の適用が難しいだけでなく作用する複数の力のバランスが変わることで運動も大きく変化することが理論上わかっている。例えば、流体ではボンド数が 1 より小さくなると、重力より表面張力が強く作用することになる。

このような重力変化による影響を事前に確かめ、探査機や機器の設計へ反映させるためには地上試験が必要である。地球上では 1G 以上の環境は遠心力等を用いて再現できるが、1G 未満の環境は宇宙ステーション (ISS) まで打ち上げるか、落下棟や PF で実施するしか手段がない。ISS の利用はリソースの観点で難しい一方、落下棟を利用すれば安定したマイクロ G 環境を入手できるが、その重力環境を再現できる時間が一般的には数秒と限定的である。また、PF では数十ミリ G 程度の微小重力環境となり、航空機の操縦による角加速度の影響も受けることが予想されている。このように、地上試験では、様々な外的要因、前提条件づくりの難しさ、リソースの観点で微小重力環境下での粉粒体や流体の運動を調べるための十分な量の試験を正しいやり方で行えていない状況にあり、これは学術的な検討を行うための基本データが不足している状況にあると言える。

2. 研究の目的

前述のとおり、重力環境の違いにより妥当な機器設計と検証評価の機会が制限される状況を踏まえて、粉粒体や流体と機械の相互作用を力の観点で単純化した「ある程度」の精度を持って数値的に再現可能なダイナミクスモデルを構築できないのか？を根源的な問いとし、正しいやり方の微小重力試験と十分な量の基本データ取得と合わせて解決することが求められている。そこで、本研究では結果を専門家に広く展開することを前提として微小重力試験で多くの基本データを取得し、粉粒体/流体と機械の相互作用力を推定する手法の確立を目指す。特に、微小重力環境で粉粒体/流体の挙動を観察し、探査機への卓越した作用力による相互作用を単純モデル化することを目的とする。これに関して、微小重力実験結果を海外研究協力者と共同で解析し、モデルに関して相互に統一した見解を得ることが重要である。また、基本データと DEM や CFD の数値計算結果との比較により、それらの計算手法の妥当性を確認し、設計検証に使用できるソフトウェア環境を構築することも目的の範疇とする。

3. 研究の方法

本研究では、3 年の研究期間において、微小重力環境の粉粒体/流体と機械の相互作用を観測し、卓越した作用力を力の観点で単純化したモデルを構築する。また、実験で得られた基本データと DEM や CFD の数値計算結果との比較を進め、それら数値計算の妥当性を確認し、実験条件と

異なる条件での設計検証にも使用できるソフトウェア環境を構築する。

これらのために、まず試験方法を適切にすることから始める。第一に重力以外の外力を受けない環境で試験をすること、つまり、落下棟での試験を主とする必要がある、これは海外協力者との連携は必須となる。次に、惑星表面と異なり地球上の試験では、1G かそれ以上の高重力から微小重力への遷移が試験中に発生する。この遷移が発生する過程で、粉粒体へ作用する力は、重力に起因した摩擦力からわずかに粉粒体が持つ弾性力が卓越することによる跳躍現象が発生し、試験とその結果を阻害する。これは申請者らの実験ならびに DEM 計算等で確認されている。粒子径を大きくすればこの跳躍は発生しにくいことがわかっているが、粒径は全体としての挙動にも影響を及ぼすため、容易に変更できない。そこで、自然砂のように凹凸のある粉粒体を用いて、どこまで粒径を大きくすればその試験加速度環境で跳躍現象が抑えられるかを DEM 計算で確認した上で、試験条件を設定し、試験を実施し、さらに DEM の妥当性を検証する。その上で、円盤やリング状の機器を微小重力環境で粉粒体へ接触させ、加わる反力や粉粒体の飛翔状況を観察する。一方、衛星タンク内の流体では、重力が小さくなると表面張力が優位となることが良く知られており、加速度を受けた状態の流体と挙動が大きく異なる。小惑星への着陸探査では、無重力から小惑星への衝突、その後の微小重力環境となり、その流体運動の遷移、そして、発生する反力は現状予測された例は少ない。したがって、タンク内の減衰デバイスを設置しない状態での着陸模擬加速度（三角波のインパルスを入力）が印可される CFD 解析を行い、その結果に基づき、衝撃方向や初期条件、観測方向を定めた上で、落下試験を行う。これにより、CFD 解析の妥当性を得るだけでなく、実験結果と CFD 解析結果から求められる流体重心位置の移動履歴を求め、その履歴をフィッティングすることで、流体を1つもしくは2、3の剛体質点系の単純な運動に置き換え、設計検証に供する単純化モデルとする。

4. 研究成果

基本データ取得のためには外乱が少なく重力品質の良い長い時間の微小重力実験を行うことが必須であり、それを日本国内で行うことは難しいため、海外機関(DLR)と協力の下、ドイツの落下棟施設(ZARM)を利用した。2019年 ZARM で計 10 回の落下試験を行った。3回は着陸パッドのような円盤が硅砂 8 号に約 0.5m/s で垂直に衝突した場合、4回は微小重力天体からレゴリスを採取する機構の一つである筒状のコアラー機構を 5m/s 程度で同じく粉粒体へ貫入させた場合である。残りの3回はベアタンクを模擬した容器に液体を封入し、着陸機を想定した速度変化を加えた動作を容器にさせ、スロッシング荷重の計測と CFD 検証に用いる応答結果を取得した。その他、事前準備、後補足実験として、国内の落下塔施設を用い、短時間の微小重力実験を行った。

微小重力環境下におけるコアリング手法による粉粒体のサンプリング技術の研究項目では、レゴリスに覆われた微小重力下におけるコアリング手法による地表面下掘削を想定し、一定の射出力を持つ射出型コアラー機構があったときに、微小重力下における土壌の硬さと採取量の関係の評価を行うことを目的とした。コアリング時における機構や土壌の予測のためには、粉粒体と機構の相互作用を考慮できる解析が必要である。このため、SPH を用いた粉粒体の解析法を検討するとともに、地上試験および落下試験データを用いたコリレーションにより、土壌のモデル化方法を検討した。まず、地上での土壌への円柱貫入試験の実施と、対応する SPH 解析により、重力下での土壌物性値の取得を行った。次に、ZARM で落とすカプセルの中に真空チャンバおよび射出型コアラー機構を搭載し、落下中に土壌に向けてコアラーの射出を行った。その結果、コアラー貫入量と、砂の飛散状況(図1)が確認できた。

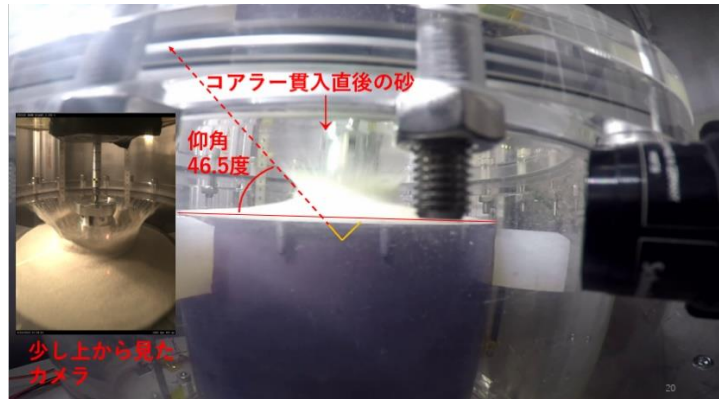


図1 落下塔試験実験におけるコアラー貫入時の砂飛散状況

落下塔実験に対応する SPH 解析結果を用いて、重力下で取得した土壌物性値を初期値としたコリレーションを行い、微小重力下における土壌物性値の物性値を同定した。これにより、SPH による機構と土壌の相互作用がシミュレートできるようになり、コアリング時におけるコアラーや土壌の挙動を予測することができた(図2)。

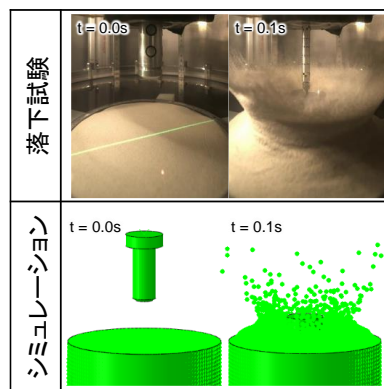


図2：落下塔におけるコアリング試験と SPH によるシミュレーション

次に、相似則を元に縮小したタンクを CFD の検証に足り得る検証試験を実施した。図3に実験装置の外観を示す。液体を封入したアクリル容器を昇降ステージに搭載しており、着陸を想定した加速度だけでなく、斜面への着陸に伴う探査機の姿勢変動を想定した回転を与えられる設計となっている。図4、図5に鉛直方向に加速度を印加したケースの実験結果と、回転ケースの実験結果を示す。それに対応する CFD 解析の同時刻の比較を対応させる。外力の印加により水柱が立ち上がり、内壁をつたって容器内を循環する特徴的な挙動を捉えることができた。また CFD はその大変形を十分に表現できており、これを持って探査機相当の荷重を評価するに足る結果と判断した。次に探査機相当である直径 1.1m の燃料タンクを対象とし、CFD 解析から着陸時のスロッシング荷重の評価を行った。内部艀装がないベアタンクでは、水柱がタンク上面を叩く 10⁰N オーダのスロッシング荷重が示唆された。これは液相と気相の循環により生じる現象であるため、適切な箇所に穴の開いたバッフルを設けることや、重力が小さいフェーズでの気相の移動を阻害するスポンジ機構によりスロッシング荷重の低減だけでなく、速やかな減衰につながることを示している。

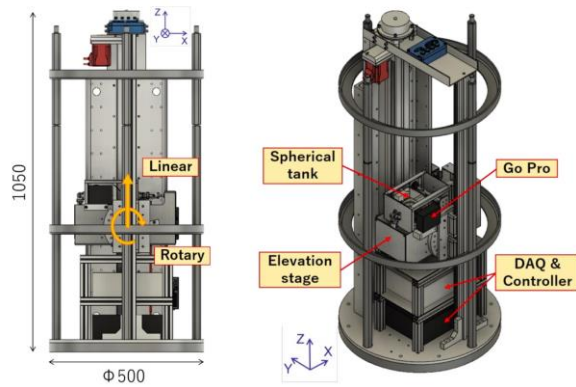


図 3 : CFD 解析検証を目的とした落下塔実験装置

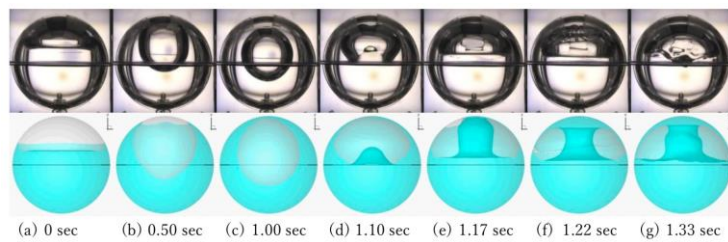


図 4 : 落下塔試験結果（上）と CFD 解析の比較（下）：平面への着陸を想定した鉛直加速度ケースの場合

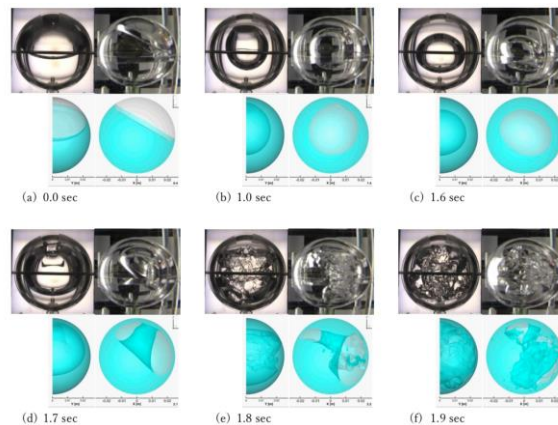


図 5 : 落下塔試験結果（上）と CFD 解析の比較（下）：斜面への着陸を想定した回転ケースの場合

最後に、将来の着陸探査機的设计を確実にするための着陸ダイナミクスに影響する卓越した作用力を力の観点で単純化したモデルを獲得することを目標とし、微小重力環境での着陸パッド衝突試験(図 6 左)を実施した。結果として、大気や 1G 環境での結果の違いが示され、数値計算で重力の違いを再現するための基本データとなる応答結果(図 6 右)を示すことができた。

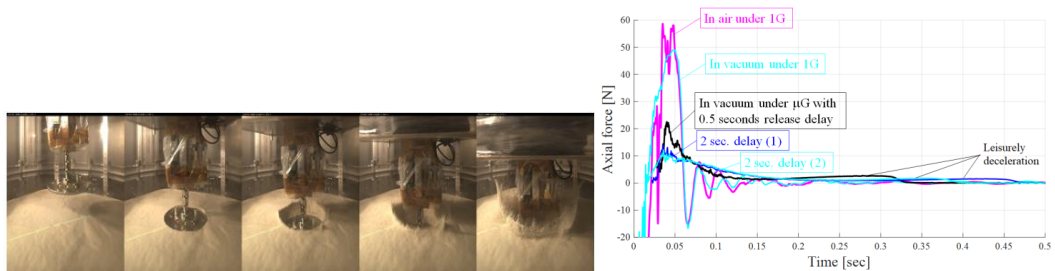


図 6 着陸パッドの微小重力での衝突試験の様子

左：パッド衝突時の高速撮像画像，右：重力，衝突タイミングの違いによる反力履歴の違い

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 大槻真嗣, 前田孝雄
2. 発表標題 微小重環境における粉粒体と機械の相互作用に関する実験的検討
3. 学会等名 第16回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2019)講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤泰貴, 三野りりあ, 宮下朋之
2. 発表標題 月・惑星探査用サンプリング装置のための粉体へのコアラ-貫入解析
3. 学会等名 第35回宇宙構造・材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Anii, Takehiro Himeno, Yasunori Sakuma, Toshinori Watanabe, Mitsuhsa Baba, Masatsugu Otsuki, Yutaka Umemura
2. 発表標題 Dynamics of Low-Gravity Sloshing in Spherical Tanks during Touchdown Phases of Landers
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬場満久, 大槻真嗣, 前田孝雄
2. 発表標題 落下塔を用いた探査機が天体接触時に飛散する砂の飛散挙動評価手法の構築
3. 学会等名 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田孝雄, 馬場満久, 兄井啓太郎, 大槻真嗣, 姫野武洋
2. 発表標題 微小重力天体着陸機における燃料スロッシング動力学解析のためのメカニカルモデル化
3. 学会等名 第16回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2019)講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Anii, Takehiro Himeno, Mitsuhsa Baba, Toshinori Watanabe, Masatsugu Otsuki, Yutaka Umemura
2. 発表標題 Research on Propellant SLOSH Dynamics of a Martian Moon Lander
3. 学会等名 Space propulsion 2020+1 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Kato, Yasutaka Satou, Kent Yoshikawa, Masatsugu Otsuki, Hirofumi Sawada, Takeshi Kuratomi, Nana Hidaka
2. 発表標題 Subsurface Sampling Robot for Time-limited Asteroid Exploration
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020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	馬場 満久 (Baba Mitsuhsa) (10773715)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (82645)	

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	澤田 弘崇 (Sawalda Hirotaka) (70392842)	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・研究開発員 (82645)	
研究分担者	加藤 裕基 (Kato Hiroki) (70538587)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (82645)	
研究分担者	佐藤 泰貴 (Satou Yasutaka) (70726760)	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・助教 (82645)	

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	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	ZARM	