

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15207

研究課題名（和文）探査機開発の基盤となる月火星環境における「地盤-機械相互作用モデル」の構築

研究課題名（英文）Terrain-machine interaction models in lunar and Martian environment for basis of space probe development

研究代表者

須藤 真琢（Sutoh, Masataku）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙探査イノベーションハブ・研究開発員

研究者番号：80712851

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実機実験及び数値シミュレーションによる解析を通して、月や火星の地盤で探査機（探査車や着陸機）に生じる力や沈下の関係を表現するモデルを構築した。探査車の走行挙動に関して、車輪のけん引力と滑りや沈下の関係を表現するモデルを導出するとともに、この関数のパラメータが圧力環境に依存せず、地盤固有の値であることを確認した。着陸機の着地挙動に関して、構築した脚に生じる反力と沈下の関係を表すモデルを用いることで、任意の衝突速度と沈下量に対して脚の反力を推定することが可能となった。本研究によって、月火星環境における探査車や着陸機の動作挙動の解明につながる知見が得られたと考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、「月や火星特有の環境が地盤と機械の相互作用に及ぼす影響」という問いの解明に寄与するものである。特に真空中の地盤における機械の挙動を学術的観点から扱った報告例は少なく、本研究で構築した数理モデルは、当該分野において先駆的なものである。また、現在、農業機械や建設機械の自動・自律化に関する研究が盛んに行われている一方で、月や火星の地盤で生じる現象は十分に解明されておらず、地上技術を宇宙開発に応用するためのボトルネックとなっている。本研究から得られた知見やモデルは、このボトルネックの解消に貢献し、地上技術の宇宙開発への応用を推進するとともに、地上技術の発展につながるものであると考える。

研究成果の概要（英文）：In this research, the terrain-machine interaction models in the lunar and Martian environment were developed. These models express the relationship between force and sinkage for rovers and landers. Regarding the motion behaviors of rovers, the drawbar pull was modeled as a function of the slippage. As it was found that the parameters of the function are almost constant regardless of the atmospheric pressure, it was concluded that the pressure does not have significant impact on the motion behaviors of the rovers. Regarding the motion behaviors of landers, using the models developed, the force acting on their landing legs can be estimated for given landing speed and sinkage. These findings contribute to enhance the understanding of the motion behaviors of the rovers and landers on the lunar and Martian surfaces.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：月惑星探査 探査車 着陸機 テラメカニクス レゴリス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球や月の起源と進化、生命が誕生した環境の解明などを目的とし、現在、国内外の宇宙機関で、探査機(探査車や着陸機)を用いた月や火星の地表面探査が計画されている。月や火星は、低重力かつ大気が希薄な真空環境であり、その表面は細かな砂(レゴリス)で覆われた軟弱地盤である。探査機の設計や運用を進めるためには、このような月や火星特有の環境下の地盤で、探査車の車輪が生み出すけん引力と滑りや沈下の関係、及び着陸機の脚(着陸脚)に働く反力と滑りや沈下の関係(以下、これらを「地盤と機械の相互作用」と呼ぶ)に関する理解が重要である。

この地盤と機械の相互作用に関して、研究開始当初、1Gかつ1気圧下の地上実験からそのメカニズムの解析を目指した様々な研究が報告されていた。一方、月や火星特有の低重力や真空がその相互作用に及ぼす影響については、1960年代のアポロ計画における月着陸船開発の際に実験データが取得されていたが、学術的観点から詳細に解析されておらず未解明の部分が多く残されていた。今後の月惑星探査に向けて、「月や火星特有の環境が地盤と機械の相互作用に及ぼす影響」という問いに学術的観点から取り組むことが重要であり、そのような環境における地盤と機械の相互作用を表現するモデルの構築が急務の課題であると考えた。

2. 研究の目的

上述の背景から、本研究では、月や火星の真空における地盤で探査車の車輪や着陸機の脚に生じる力と沈下や滑りの関係を解析し、その関係を表す数理モデルを構築することを目的とする。従来宇宙工学は、ロケットや人工衛星を主な対象として、地球周回軌道に代表される、地面が存在しない宇宙を扱う学問として発展してきた。近年、月や火星の探査機に関する研究が増えつつある一方で、「月や火星特有の環境における地盤と機械の相互作用」という根底の理解が欠如している。本研究では、この根底理解を深めることで、宇宙工学が他天体を扱う学問に拡張するための基盤を形成する。

3. 研究の方法

上記の目的達成のため本研究では、(A)月や火星の特有環境を模擬する実験装置の開発、(B)走行実験による地盤と車輪の相互作用モデルの構築、(C)着地実験による地盤と着陸脚の相互作用モデルの構築に取り組んだ。以下、各要素研究の研究方法を記す。

(A) 月や火星の特有環境を模擬する実験装置の開発

月や火星の圧力環境や地盤を模擬するための試験装置を構築した。この試験装置では、無色透明なアクリル製の真空チャンバの中に砂槽を固定し、砂槽に車輪の走行や着陸脚の着地を模擬する試験装置を取り付けて試験を行う。チャンバ内部の圧力は、真空ポンプや真空計を用いて調整する。また、月や火星の地盤で生じる現象を忠実に再現するために、砂槽には月や火星のレゴリスの機械的特性を模擬した砂(模擬砂)を敷き詰めた。また、実験では比較のために、粒径が均一で標準的な砂である珪砂を敷き詰めた砂槽も使用した。真空チャンバの外部側面にはカメラを取り付け、このカメラを用いて車輪や着陸脚の挙動を観察した。

(B) 走行実験による地盤と車輪の相互作用モデルの構築

(A)にて整備した真空チャンバ内の砂槽で、探査車の車輪を用いて走行実験を行うことによって、車輪が生み出すけん引力と滑りや沈下の関係を調べた。図1に本研究で使用した車輪の直進走行を模擬する試験装置の概観を示す。この試験装置では、真空チャンバの外部から指令を送ることで、車輪の走行や砂の均しを繰り返すことが可能である。そのため、真空環境で様々な条件において再現性の高い実験を行うことができる。この試験装置を用いて、異なる砂を敷き詰めた複数の砂槽で車輪の走行速度やけん引負荷を変化させて走行実験を実施した。実験ではレーザ距離計を用いて車輪の滑りや沈下量を計測し、走行の様子をカメラで観察した。大気中及び真空中において車輪を走行させることで、圧力が車輪の走行挙動に及ぼす影響を評価した。さらに、個別要素法に基づき地盤を多数の粒子でモデル化し、その地盤上で車輪を走行させる数値シミュレータを開発した。このシミュレータにより、地盤と車輪の間で生じる現象を解析した。

(C) 着地実験による地盤と着陸脚の相互作用モデルの構築

(B)同様に、真空チャンバ内の砂槽で着陸脚を用いた着地実験を行うことによって、脚に生じる反力と滑りや沈下の関係を調べた。図2に本研究で使用した脚の着地を模擬する試験装置の概観を示す。この試験装置では、脚を垂直落下、あるいは水平方向に移動させながら落下させることで、脚の着地の様子を模擬した。脚の衝突速度や横滑り速度を変化させて実験を行い、着地時に脚に働く反力や沈下をセンサで計測するとともに、ハイスピードカメラを用いて脚の着地に伴う砂の飛散の様子を観察した。加えて図3に示すように、個別要素法に基づき軟弱地盤において脚を着地させる数値シミュレータを開発し、地盤と脚の間で生じる現象を解析した。

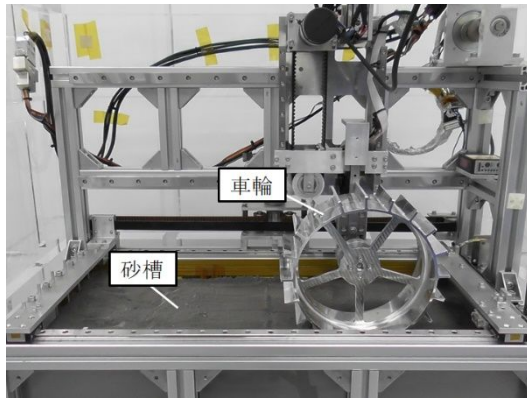


図 1：車輪の走行を模擬する試験装置

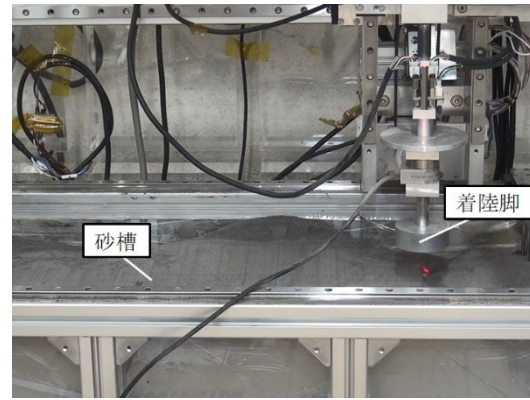


図 2：着陸脚の着地を模擬する試験装置

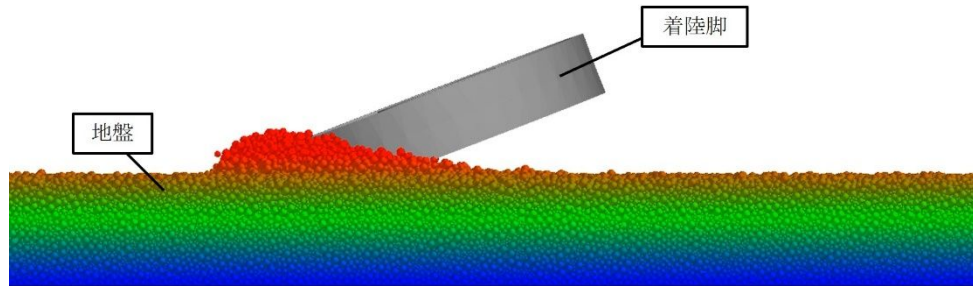


図 3：着陸脚の着地に関する数値シミュレーション解析の様子

4．研究成果

以下に、各要素研究から得られた研究成果を記す。

(A) 月や火星の特有環境を模擬する実験装置の開発

構築した試験装置では、真空チャンバの内部に月や火星の模擬砂や珪砂等の試料を敷き詰めた状態で、火星の気圧に相当する数百 Pa オーダーの圧力環境を構築できることを確認した。また、この到達圧力環境における試験の有効性を検証するために、筆者らの研究グループが所有する高真空を構築可能な別の真空チャンバを用いて、後述の試験に関する比較実験を行った。高真空における実験と本研究で構築した真空チャンバを用いた実験の比較から、本研究が対象とする探査機の動作挙動に関して同様の傾向が見られることを確認している。

(B) 走行実験による地盤と車輪の相互作用モデルの構築

図 1 に示す車輪の走行試験装置を用いて、真空チャンバ内の砂槽で車輪の走行速度やけん引負荷を変化させた実験を行い、月や火星特有の環境で探査車の車輪が生み出すけん引力と滑りや沈下の関係を表すモデルを構築した。図 4 に、火星模擬砂における車輪の走行試験の結果を示す。図 4 (a) に示す実験データに基づき、車輪の滑りとけん引力の関係を指数関数でモデル化した。また図 4 (b) に示すように、車輪の沈下量は、滑りを変数とした線形関数でモデル化される。さらに、大気中と真空中における車輪の走行実験の比較から、けん引力と滑りや沈下の関係を表現する関数のパラメータが、圧力環境に依存せず、地盤固有の値として一意に決まることを確認した。異なる砂を敷き詰めた複数の砂槽における実験からも同様の傾向を確認しており、圧力の違いが車輪の走行挙動に及ぼす影響が僅かであることが明らかとなった。

(C) 着地実験による地盤と着陸脚の相互作用モデルの構築

図 2 に示す着陸脚の着地を模擬する試験装置を用いた実験に基づき、脚に生じる反力と沈下の関係を表すモデルを構築した。図 5 に、異なる砂を敷き詰めた砂槽における脚の着地実験の結果を示す。図 5 (a) に示すように、珪砂では真空中と大気中において脚の沈下量の時間履歴はほぼ同一であった。一方、図 5 (b) に示すように、月模擬砂では、真空中で脚の沈下量が劇的に減少している。続いて図 6 に、異なる砂を敷き詰めた砂槽で脚が垂直落下した際の砂の飛散の様子を示す。実験では砂面上にラインレーザを照射することで、レーザを照射した面内の砂の飛散軌跡を可視化した。図 6 の画像は、このように得られた複数の連続撮影画像を重ね合わせたものである。図 6 より、珪砂では大気中と真空中で砂の飛散挙動に大きな差異は見られなかったが、月模擬砂ではその挙動に劇的な違いが見られた。このように、砂の形状の違いによって圧力が脚の着地挙動に及ぼす影響が大きく異なることを確認した。さらに、衝突速度を変化させて行った実験より、着地時の脚に働く反力と沈下量の関係を表す曲線形状は、速度に依存せずに同一であり、衝突速度に比例してその絶対値のみを変えて表現できることが明らかとなった。これにより、任意の衝突速度と沈下量に対して、脚の反力を容易に推定することが可能となった。

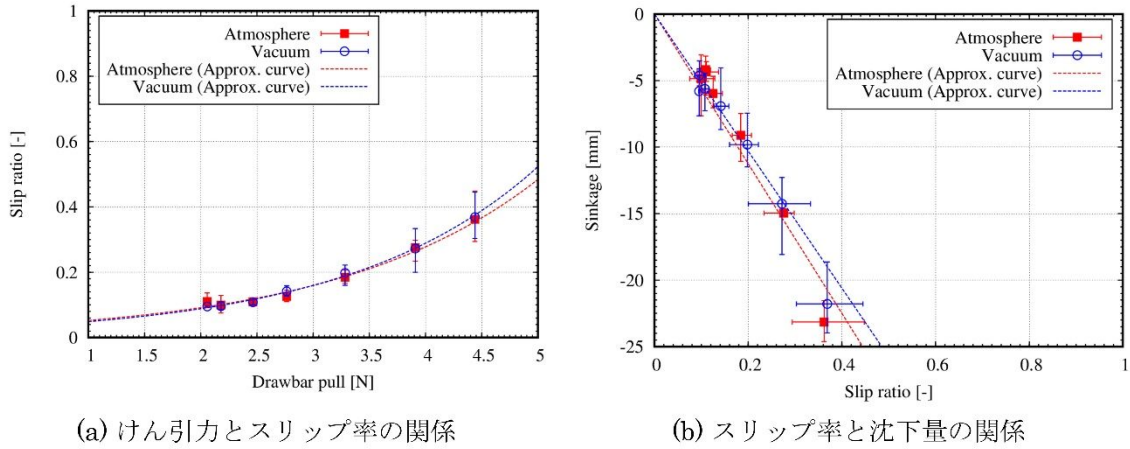


図 4：火星模擬砂における車輪の走行試験の結果

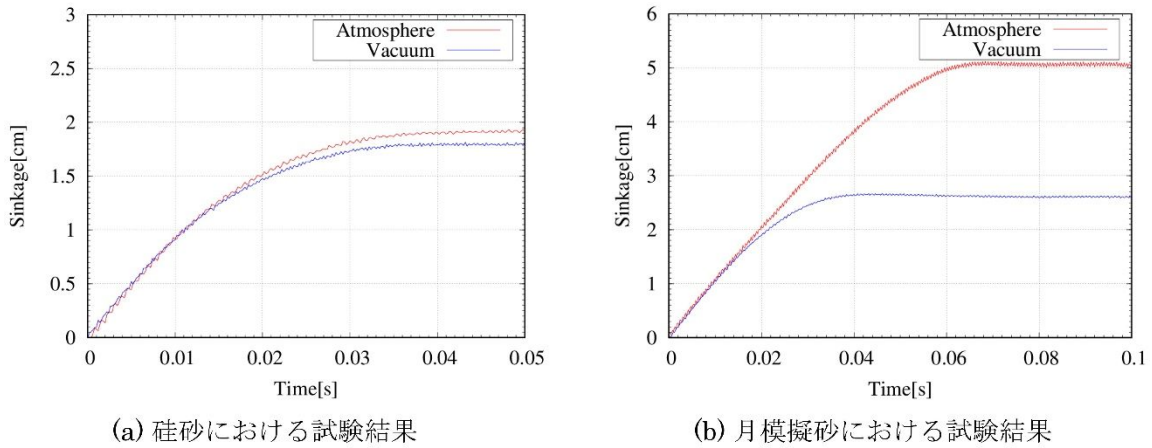


図 5：大気中及び真空中における着陸脚の垂直落下試験の結果

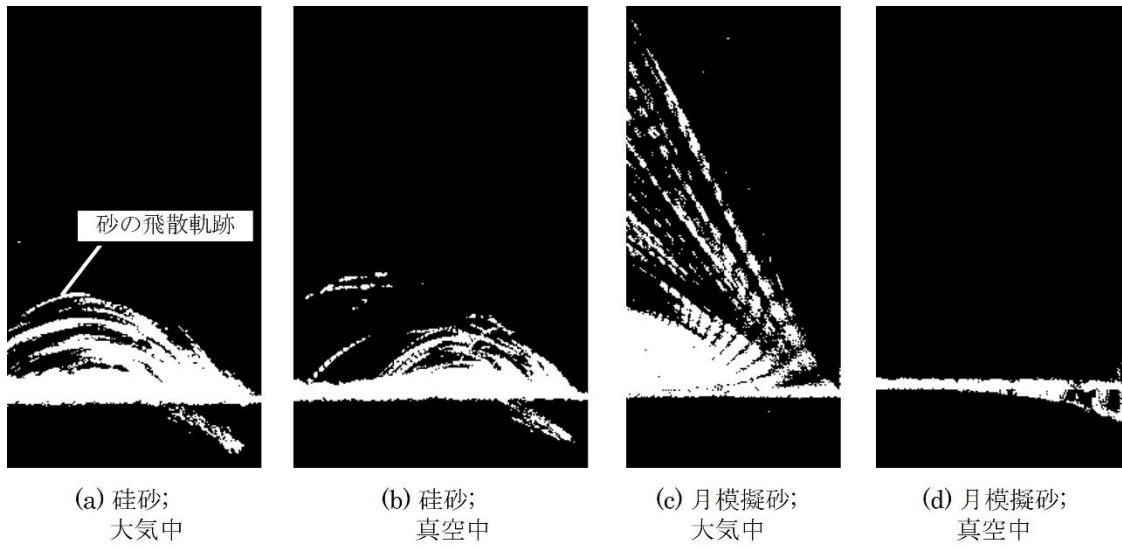


図 6：着陸脚の着地時における砂の飛散の様子

以上により、本研究では、真空中における地盤と探査車の車輪及び着陸機の脚に生じる力や沈下の関係を表現するモデルを構築した。これは、月惑星探査機的设计開発や制御に関する重要な成果であり、今後の月惑星探査及び宇宙利用に幅広く貢献することが期待される。車輪の走行挙動及び着陸機の着地挙動に関わる研究成果は、学术论文及び国際学会でそれぞれ発表した。

今後の研究では、本研究で開発した個別要素法に基づいた車輪や着陸機の動作挙動に関する数値シミュレーションを発展させることで、月や火星の低重力環境における探査機の挙動を解析可能な手法を構築する。また、本研究では探査車の車輪や着陸機の脚単体を対象に解析を行ったが、今後は、探査機システム全体の動力学を考慮した手法として発展させる。数値シミュレーションの完成度を向上させることで、将来の月惑星探査プロジェクトに広く活用することを目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masataku Sutoh	4. 巻 95
2. 論文標題 Traveling performance analysis of planetary rovers using a repeatable test system in vacuum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Terramechanics	6. 最初と最後の頁 15 ~ 24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jterra.2021.02.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 須藤真琢
2. 発表標題 真空における車輪の走行試験装置の開発および走行特性評価
3. 学会等名 第40回テラメカニクス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榊枝裕太、須藤真琢、大槻真嗣、河村隆
2. 発表標題 宇宙探査機の着陸挙動に地盤や速度が及ぼす影響の評価
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masataku Sutoh, Yuta Sakakieda, Masatsugu Otsuki, Taizo Kobayashi
2. 発表標題 Surface sliding behavior analysis of space probes in simulated extraterrestrial environments
3. 学会等名 Proceedings of the 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------