

月面模擬環境を利用した月面車両の走行挙動予測手法

○田中 克明^{1,2}, 竹花 佳祐^{1,3}, 鈴木 大輔¹, 松広 航^{1,2}, 日高 萌子¹

¹株式会社 amulapo, ²早稲田大学理工学術院総合研究所, ³東北大学大学院工学研究科

責任著者：田中 克明 contact@amulapo-inc.com

キーワード：月面模擬環境，デジタル・アナログツイン，テラメカニクス，シミュレーション，鳥取砂丘

1. はじめに

近年、アルテミス計画をはじめとして月探査や月面基地に関する様々なミッションが予定されており、研究や開発が進められている[1]。株式会社 amulapo では、月面開発を加速させる手段としてメタバースを用いたデジタルツイン環境や鳥取砂丘を利用したアナログツインとなる月面模擬環境の開発を進めている（図1）[2]。本発表では、月面模擬環境を利用した月面車両の走行挙動予測手法の検討状況について紹介する。

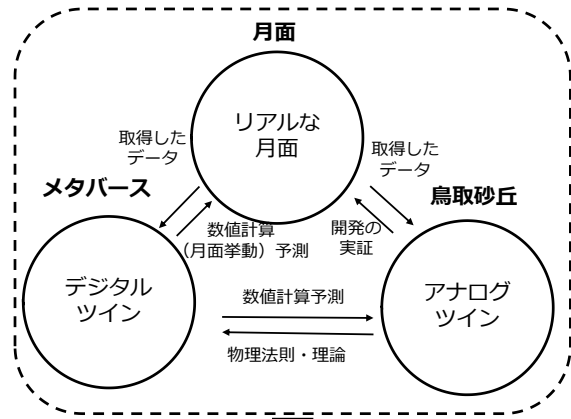


図1. デジタル・アナログツイン構想

2. 月面模擬実証フィールド「ルナテラス」

鳥取砂丘に月面模擬となる実証フィールド「ルナテラス」が2023年7月に誕生した（図2）。鳥取大学乾燥地研究センターの敷地内に位置し、約0.5[ha]の面積を有する。月面環境を想定した実証実験を行うための平面ゾーン、斜面ゾーン（5度～20度程度）、自由設計ゾーン（利用者が自由に掘削・造成可能）から構成される[3]。

鳥取県では鳥取砂丘月面化プロジェクトとして、砂丘月面デジタル化を進めている。ドローンを用いた3次元計測（図3）や、土壌の力学特性、化学特性の調査を進めており、データが公開されている。



図2. 鳥取砂丘月面模擬実証フィールド



図3. 鳥取砂丘月面模擬実証フィールド点群データ

3. テラメカニクスを利用した力学挙動の予測

月・惑星探査の車両の力学挙動の予測には、地盤と機械の相互問題を取り扱う学問分野であるテラメカニクスが用いられることが多い[4]。本研究でもテラメカニクスによる力学挙動の予測を行うことを目指す。

ルナテラスの周辺の砂を用いて密度試験及び粒度試験を行った結果、土粒子密度： $2.69[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、最小密度： $1.37[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、最大密度： $1.67[\text{g}/\text{cm}^3]$ という結果を得た。また、周辺の砂を用いて現場密度試験で相対密度（ D_r ）を求めた結果、おおよそルナテラスは D_r が 0.3 であることが分かった。せん断試験を行い、 $D_r=0.3$ での粘着力： $1.0[\text{kN}/\text{m}^2]$ 、せん断抵抗角： $32.7[\text{deg}]$ であった。

今後はこれらの土壌の力学特性をテラメカニクスの力学モデル上のパラメータとして導入することで、「ルナテラス」上での車両の力学挙動を予測する。また、今後は力学予測をした結果と、実際にローバーを走行させたデータとを比較し、予測精度について考察する。

4. 月面での力学挙動の予測

月面での力学挙動の予測には、力学的相似則の考え方を適応させる。宇宙航空研究開発機構（JAXA）とトヨタ自動車株式会社（トヨタ）が開発する有人圧ローバー“Luna Cruiser”では、慣性力と重力とが支配的であると仮定し、フルード数に着目した力学的相似則から月面上でのタイヤの牽引係数を予測する検討がされている[5]。本研究でもフルード数に着目した力学的相似則により、月面での力学挙動を予測することを検討している。

5. 月面のデータを用いた月面での力学挙動予測のためのシミュレーターの開発

月面での力学挙動の予想には、月面のデータが必要である。NASA が所有する月周回無人衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO は高解像度（ $50\text{cm}/\text{pixel}$ ）の画像を取得しており、また高度計 Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) から取得した月面の数値標高モデル（DEM）を用いることで、月面の幾何学的特性を把握可能である。月の土壌に関する力学特性はアポロ計画時代に取得したデータを用いることが可能であり、Lunar Sourcebook に記載のデータを参照値として用いる。本シミュレーターでは、月面の3次元情報によるマップを作成し、走行試験等によって得られるパラメータ補正されたテラメカニクスによる力学挙動モデルを力学的相似則による力学挙動予測と月面での土壌特性データとを組合わせて計算させることで、月面での走行シミュレーションを構築予定である。

参考文献

- 1) 国際宇宙探査協働グループ ISECG, ”国際宇宙探査ロードマップ”, 補正版 2020 年 8 月最新月面探査シナリオ, 2020.
- 2) 田中克明, 他, ”鳥取砂丘を利用した月面実証フィールド構想”, 第 67 回宇宙科学連合講演会論文集, 2023.
- 3) 鳥取県商工労働部産業未来創造課, “鳥取砂丘月面実証フィールド「ルナテラス」をご利用ください!”. <https://www.pref.tottori.lg.jp/311792.htm>, 2023.
- 4) 金森洋史, “月・惑星探査のテラメカニクス”, 日本ロボット学会誌 Vol.21 No.5, pp480-483, 2003.
- 5) 浜辺勉他, ”月面車両のためのタイヤ性能の力学的相似則に関する研究（第一報：取り組みの全体概要）”, 宇宙科学連合講演会論文集, 2021.