

月探査ローバーの砂上走行を想定した走行性能の評価モデル

九州大学大学院

学○藤原洋一郎・正 安福規之
正 大嶺 聖・正 小林泰三

1. はじめに

近年、米国、中国、インドを始め、各国で月探査への関心が高まってきている。そして将来の月探査ミッションに向けて、月地表面の広域探査を可能とするローバー（探査車）の研究が様々な研究機関で進められている。ローバーの研究においてはロボティクスの研究は当然ながら、地盤-車両系のテラメカニクス研究も重要な鍵を握る。しかしそのメカニズムは複雑であり、特に砂質土の不正地地盤に関しては未解明な点も少なくない。さらに月面は地上の1/6の重力、高真空状態、地表を覆う特殊な土（レゴリス）などの特殊な環境を持ち、車輪の走破性についても未知な部分も多い。著者ら¹⁾は以前より月面の特殊な環境条件が土-機械相互作用、土-構造物相互作用に与える影響の研究を続けている。本報では、砂質土地盤と剛体車輪の相互作用問題において、走行性能を評価するための新たなモデルを提案し、模型車輪実験を用いて検証を行う。

2. 砂上走行のモデル化

車輪の走行力学では車輪に働く力として、進行方向に働く駆動力と進行方向とは逆向きにかかる走行抵抗の二つの力があり、その釣り合いにより車輪の走行状態が変化すると考えられている。そしてその走行状態を評価する指標として、スリップ率*i*が用いられている。

$$i = (\omega r - V) / \omega r$$

ここに、*r*: 車輪半径、 ω : 車輪回転速度、*V*: 車輪走行速度とする。滑りが一切無い場合は、単位時間当たりの車輪の回転量と走行距離が等しく ($\omega r = V$) となり、*i*=0 となる。一方、滑りが発生し完全にスタックしてしまった場合は、車輪の走行速度が0となり、*i*=1 となる。

沈下が全く無い車輪の走行では、車輪が得られる駆動力の上限はクーロンの摩擦則より $W \tan \phi$ (*W*: 車輪荷重、 ϕ : 摩擦角) となる。そして走行抵抗として車輪に牽引力 *F* がかかることを想定すると、車輪と床の間にせん断力 $T (=F)$ が働き、 $T < W \tan \phi$ の条件で走行可 (*i*=0)、 $T > W \tan \phi$ の条件で走行不可 (*i*=1) となる。このように「滑る、滑らない」に現象が分かれることをスティックスリップ現象²⁾と呼ばれている (図1)。砂上などの沈下を伴う車輪の走行を考えた場合、滑りは

車輪の周面だけに起こる現象ではなくなる。車輪が沈下することにより車輪下部前面には受動土圧が働き、地盤内では滑り破壊が起こることで車輪のスリップ率に影響を与えられられる。砂上で車輪を走行させた結果、*T* と $W \tan \phi$ の関係によってはスリップ率 *i* が $0 < i < 1$ の値を持つことが確認されている。そこで沈下を伴う走行において、図2に示すように「滑る、滑らない」の境界線が範囲を持ち、その範囲内にスリップ率 *i* が $0 < i < 1$ と分布していると仮定した。

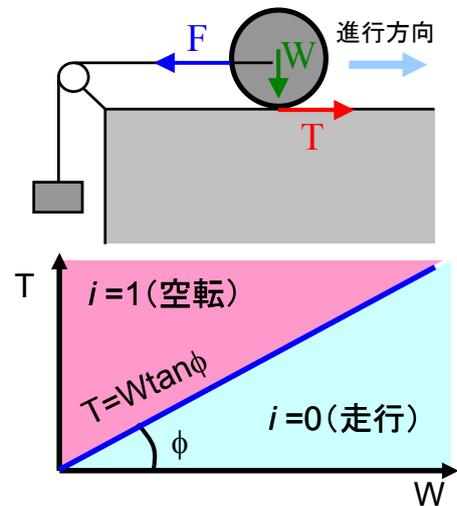


図1. 無沈下走行イメージ、*W*-*T* 関係

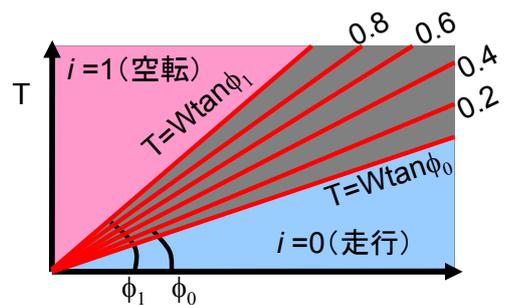


図2. スリップ率分布イメージ

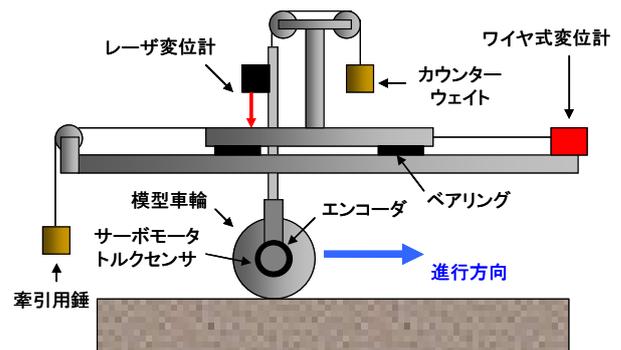


図3. 牽引を伴う車輪走行実験イメージ

3. 牽引を伴う車輪走行実験

スリップ率分布を調べるため、**図 3** に示すような牽引を伴う車輪の走行実験を行った。車輪にはサーボモータより駆動力が負荷され、3.0r.p.m. の回転制御下で自走を行う。模型車輪は直径 150mm、幅 80mm の円柱型とし、車輪周面はエッジング加工を施して十分に粗い面とした。車輪荷重はカウンターウェイトにより $W=7.5, 5.0, 2.5\text{kgf}$ に調整し、車輪にかかる牽引力は $F=0.25, 0.5, 0.75\text{kgf}$ に設定した。車輪とフレームやシャフト等の連結部には、前進や沈下に影響を及ぼさないようにガイドレールやボールスプライン等を使用している。計測

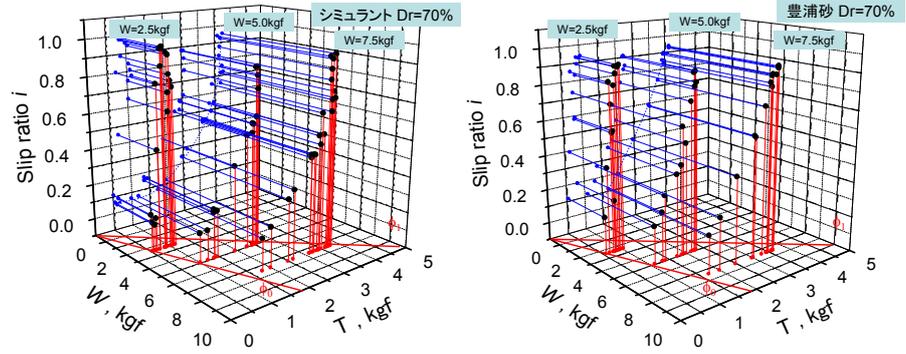


図 4. 両試料の W - T - i 関係

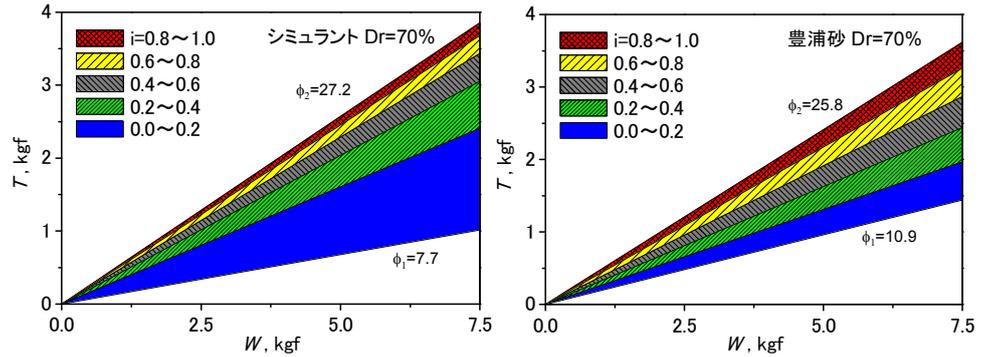


図 5. スリップ率分布モデル

項目として、回転トルク、回転量、沈下量、水平変位量とする。模型地盤には月面土の粒径や化学組成を模擬したシミュラント(FJS-1)と豊浦砂を用い、相対密度が $D_r=70\%$ となるように調整した。土層は内寸で長さ 600mm、幅 200mm、深さ 100mm である。**図 4** に得られた W - T - i 関係を示す。せん断力 T は計測トルクを車輪半径で除した値を用いている。このグラフからシミュラントでは T が増加に伴い i の増分が大きくなっているのに対し、豊浦砂では T に比例して i が増加している。これはシミュラントにおいて、ある程度スリップ率が上昇すると T に対する i の感度が上がり、僅かな走行抵抗の変化で走行不能に陥る危険性があることを示している。

4. スリップ率分布モデル

図 5 に車輪走行実験の結果より得られたスリップ率分布をグラデーションで表したモデルを示す。このモデルでは青から赤になるにつれてスリップ率が増加おり、同じせん断力 T なら車輪荷重 W が大きいほどスリップ率が抑えられることが分かる。このモデルにより、車輪荷重 W を大きく設定する程、すべり率 i の分布範囲が広がることで、走行抵抗による T の変化に対して走行を維持し易くなるメリットをよく説明することができる。将来の月面への輸送を想定する上で荷重の走行への影響は、月への輸送費用を検討するにあたり重要な項目となりうる。

今回は、スリップ率の評価を目的として研究を行い、結果としてスリップ率の分布モデルが得られたが、設計や制御に立ち返ってこのモデルを検討すると様々な有意性を見出すことができる。たとえばローバーの設計を行う際には、砂上での走行に有利となる車輪の単位荷重や個数の設定を行うための目安とすることができる。また走行制御の際には、各車輪の走行の健全性の確認を行うとともに、比較的健全性の高い車輪に対して駆動力を依存させる制御を行うことでエネルギーの節約につなげることなどが考えられる。

5. まとめ

著者らは、将来の月探査を想定して走行性能の指標であるスリップ率の評価を試みた結果、沈下を伴う砂上走行においてのスリップ率の分布モデルを得ることができた。このモデルにより、走行において車輪荷重が大きい程、走行状態を健全に維持し易いことが分かった。また設計、制御にこのモデルを応用することで、走行を有利に進めることができる可能性を見出した。

参考文献 1) 藤原洋一郎・落合英俊・小林泰三・安福規之・若林幸子, 月探査ローバーを想定した走行性能評価モデル, 第 63 回年次学術講演会, pp965-966, 2008 2) 上田皖亮・逸見正, スティック・スリップ運動に関する実験と解析, 信学技報 Technical Report of IEICE. Pp41-48, 1996