

月探査ローバーを想定した走行性能評価モデル

九州大学大学院 (学) ○藤原 洋一郎 (正) 落合 英俊
(正) 小林 泰三 (正) 安福 規之
宇宙航空研究開発機構 若林 幸子

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－走行系の力学に関する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^{1), 2)}。本報では、月面模擬土を敷いた傾斜変化可能な土槽を用い、車輪の走破性に及ぼす登坂の影響を調べる試験を行った。その結果を受けて車輪の走行性能の評価法について検討した。

2. 登坂を伴う車輪走行模型実験

図1に車輪走行装置の写真とイメージを示す。模型車輪のスケールは、直径15 cm、幅8 cmとし、車輪周面はエッジング加工を施し十分に粗い面とした。車輪はサーボモータによって駆動され、今回は回転速度制御を行い1.83 r.p.m.で実験を行った。車輪の駆動により、走行装置全体がガイドレール上に沿って、水平に移動可能な機構となっている。装置とガイドレールの間にはベアリングを使用し、摩擦が走行に影響しないよう配慮してある。車輪は上下には自由に動き、車輪を支える軸はアームの一端と連結されている。また接地荷重はアームの両端の車輪の重量と接地荷重調整用の錘のバランスで調整される。これにより接地荷重を1.67, 2.5, 5, 7.5kgfとする。土槽は幅150cm、長さ200cm、深さ約20cmである。土槽は車輪走行装置を水平に保ったまま最大40度まで傾斜でき、今回は0, 5, 10, 15度に設定した。また本実験で使用した試料は月面土（ルナレゴリス）を模擬した月面模擬土(FJS-1)²⁾である。月面模擬土は月面土の粒度、土粒子密度、強度定数等の力学性質が模擬されているだけでなく、化学組成に関しても模擬されている。計測項目として、回転トルク、回転量、沈下量、車輪水平移動量、映像データが挙げられる。



3. 走行性能評価モデル

月面で月探査ローバーによる確実な探査を行う上で、車輪の空転（スタック）が生じることは非常に問題となる。そのため、空転を抑えて走行を続けるための走行条件の設定が重要となってくる。前述したように月面環境は低重力など特殊な環境を有しているため、事前に地上での走行性能評価法を確立し、月面の環境条件に適用させていく必要があると考える。車輪の走行性能を評価するにあたり、車輪の滑りを表す指標として滑り率 i を用いる。 i は次式で

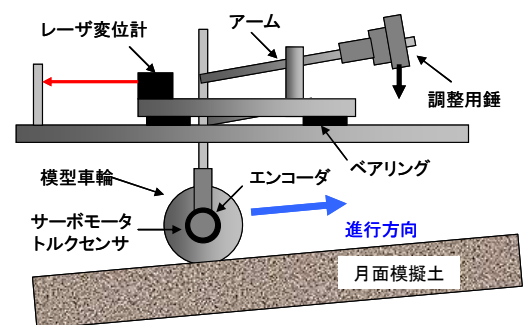


図 1. 車輪走行装置の写真、イメージ

キーワード 車輪, 月面模擬土, すべり率, 走行性能, 斜面

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 ウェスト 2 号館 1108-2 地盤工学研究室 TEL 092-802-3378

$$i = 1 - (v/R\omega)$$

ここで、 v : 車輪走行速度、 R : 車輪半径、 ω : 車輪の回転速度とする。滑り無し状態で $i=0$ となり、完全に滑る状態が $i=1$ となる。

図2にイメージを示す様に、車輪に対して進行方向に一次元的な力の釣り合いに着目する。まず進行方向に働く力として、車輪と地盤の接地部分に働く摩擦力が考えられる。これは計測データであるトルク T より $F = T/r$ として求められ、この F を駆動力とする。また車輪の走行方向と逆向きに働く力として三つの成分が考えられる。1) 車輪に沈下が生じた場合、車輪前面と土との設置面に発生する受動土圧が発生する。ここでランキンの土圧理論より

$$R_1 = P_p = \gamma S^2 K_a / 2$$

ここで γ : 土の単位体積重量、 S : 沈下量、 K_a : 受動土圧係数とする。2) 車輪荷重を W とし、角度 θ の登坂を考えた場合、車輪荷重の斜面と水平方向成分がそのまま後方への力となり

$$R_2 = W \sin \theta$$

3) 牽引があった場合、牽引抵抗 R_3 が考えられる。各成分の合計を $R = R_1 + R_2 + R_3$ とし、進行抵抗とする。

$F > R$ は車輪の走行可能を示す。また $F < R$ となった時点で、車輪が地面より進行方向の力 F を得ても、車輪は走行不能に陥り、 $i=1$ と考えられる。これより $F > R$ の範囲に i が分布することが予想される。

F 、 R を用いて滑り率 i を求める走行性能評価モデルの構築を検討する。ここで土圧による進行抵抗 R_1 を求めるため地盤の土圧係数を求める必要がある。今回は走行実験を先に行ったため、実験結果より実験値として土圧係数を求めることができる。すなわち $i=1$ に達した時、 $R_1 = F - R_2$ ($R_3 = 0$) より、 $R_1 = 0.011S^2$ と求めることができる。図3に F 、 R の差を F で無次元化した $(F-R)/F$ と i の関係を示す。これより R に対し十分に F が得られている場合は、 i を低く抑えて走行が可能であるといえる。そして傾斜角度や車輪の沈下量の増加の影響で R が増加し、 $(F-R)/F$ の値が減少するに従い、滑り率 i は増加していく。そして $(F-R)/F$ が 0 となる場合、つまり $F=R$ となった場合に、 $i=1$ となり走行が不能に陥るとわかる。この関係の近似式を図3中に示す。ここにトルク、沈下量、傾斜角度等の条件より発生する滑り率 i を予測することのできる一つの関係性を確認することができた。今後は、 R の土圧成分 R_1 を土の強度定数、かさ密度等から理論的に求める方法を検討し、重力や回転速度、車輪径等を変化させた場合における $(F-R)/F-i$ の関係の妥当性を追及していきたい。

4. まとめ

将来、月探査ローバーによる確実な探査を行う上で、地盤-走行系の相関関係を把握することが重要となる。そこで著者らは月面環境での適用を見据えて、まず模擬地盤上で模型車輪を走行させる実験を行い、地上での走行性能評価法の確立を試みた。実験より得られた結果から、車輪進行方向に働く力 F 、後方に働く力 R を求め、力の釣り合いと走行の際に生じる滑り率 i との関係を調べた。その結果 $(F-R)/F$ と i の間に一定の関係性を見出すことができ、一つのモデルの形を確認することができた。

参考文献 1) 陶山ら：月面を想定した低重力場の支持力-相似則によるモデリング，平成18年度土木学会西部支部研究発表会，土木学会，pp415~416, 2007. 2) 藤原ら：月探査ローバーを想定した車輪の走行性能評価，平成19年度土木学会西部支部研究発表会，土木学会，pp554~553, 2008 3) T. Kobayashi, et.al : Load-settlement Characteristics of Japanese Lunar Soil Simulant in Partial Gravity, *Space Resources Roundtable VIII* (Abstract), pp.37-38, 2006.

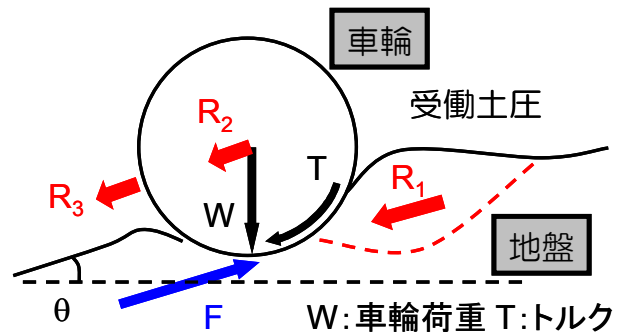


図2. 車輪の力の釣り合いイメージ

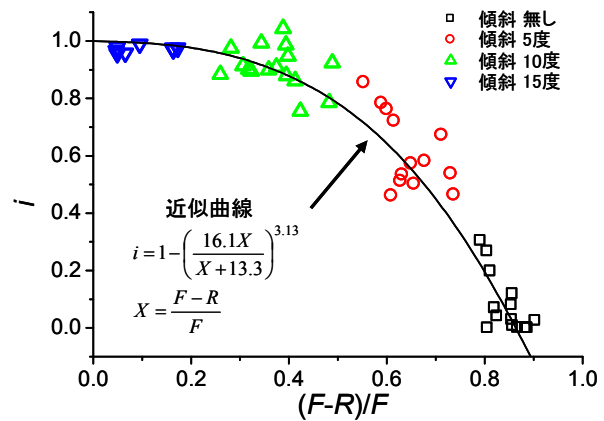


図3. F 、 R 、 i による走行性能評価モデル