

月・惑星探査ローバの走行性予測に向けた基礎的研究

立命館大学大学院 学生会員 ○田中宏輝 中瀬翔吾 非会員 山田晃愛
立命館大学 正会員 小林泰三

1. はじめに

近年、月や火星を目指す宇宙探査計画が活発化しており、広域探査に向けた探査ローバの開発が各国で進められている。月・惑星表面は「レゴリス」と呼ばれる細粒土が堆積しており、安定した走行性を確保できる探査ローバを設計・運用するには、走行性を予測するモデルやシミュレーション技術の構築が不可欠となる。軟弱地盤上を走行する車両と地盤の相互作用に関する研究分野は「テラメカニクス」と呼ばれ、Bekker¹⁾や Wong and Reece²⁾らによって車輪や履帯の走行性を評価・予測する力学モデルが体系化された。近年、これらの古典モデルを探査ローバへ適用する研究が見られるが^(例えば 3), 4)、探査ローバのように車輪が小さく、低重力下（低荷重）で砂質地盤上を走行する環境・条件への適用性については不明な点が多い。本研究では、4種類の砂質地盤上で小型の剛性車輪の走行実験を行い、車輪荷重、スリップ率、沈下量、トルク、けん引力など、走行性に関する諸特性の関連性を調べた。

2. 車輪走行実験装置による単輪走行実験

実験に用いた車輪走行実験装置を図-1に示す。車輪は直径 200mm、幅 100mm のアルミ製円筒車輪とし、表面にはスリップ防止のために粗目のサンドペーパーを貼付した(図(a))。車輪は、内蔵した駆動モータによって回転し、実験架台に設置した前進モータ（フィードスクリュ）によって前進（けん引）する。半径 r の剛性車輪が角速度 ω で回転しながら速度 V で前進しているとき、スリップ率 i は次式で与えられる。

$$i = 1 - \frac{V}{r\omega} \quad (1)$$

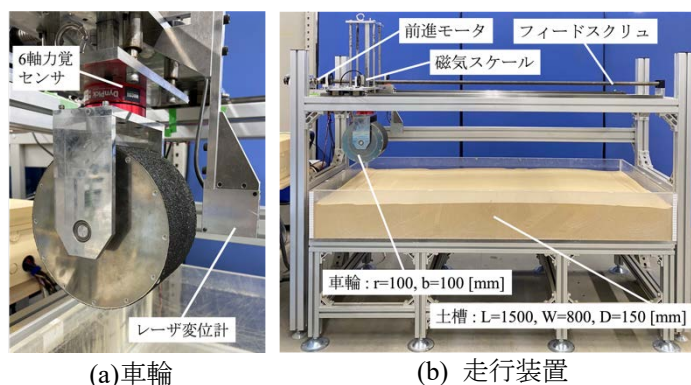


図-1 単輪の走行実験装置

本実験では、前進速度を $V = 15 \text{ mm/s}$ で固定し、車輪の角速度を $\omega = 0.15 \sim 0.75 \text{ rad/s}$ の範囲で変化させて、 $i = 0.1 \sim 0.8$ の定常走行を実現した。車輪は鉛直方向に自由に運動する機構とし、おもりやカウンターウェイトを用いて車輪荷重 W を変化させて実験を行った ($W = 25 \sim 100 \text{ N}$)。モデル地盤には豊浦砂（相対密度 $D_r = 70\%$ ，含水比 $w = 0.8\%$ ），山砂（締固め度 $D_c = 50\%$ ， $w = 8.4\%$ ），川砂（ $D_c = 60\%$ ， $w = 5.6\%$ ），まさ土（ $D_c = 70\%$ ， $w = 9.3\%$ ）の4種類の砂質試料を用いた。

図-2は、走行距離が 200mm～1000mm の間に計測された正規化沈下量 z/r ，トルク Q ，けん引力 F のそれぞれの平均値とスリップ率 i の関係を示したものである（紙面スペースの都合上、ここではまさ土で得られた結果のみ抜粋して掲載する）。この図から、スリップ率が増大すると正規化沈下量、トルク、けん引力がいずれも大きくなるこ

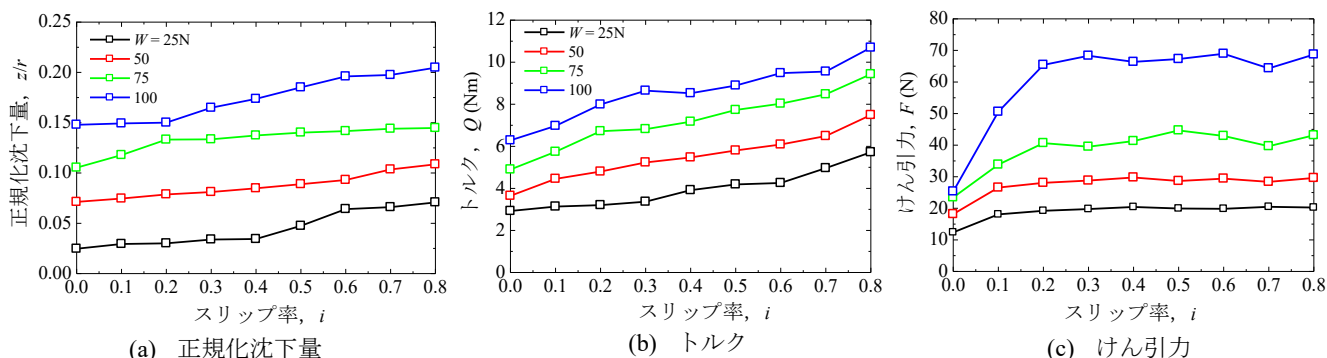


図-2 走行実験の結果の一例（まさ土）

キーワード：月・惑星探査，探査ローバ，テラメカニクス，走行性，砂質地盤

連絡先：〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 立命館大学 地盤システム工学研究室 TEL：077-599-4183

とが分かる．正規化沈下量とトルクについては，スリップ率の変化に対して直線的に増加する傾向がある．一方，けん引力は，スリップ率の増加に伴って大きくなるものの， $i = 0.1 \sim 0.3$ の辺りから“頭打ち”する傾向がみられる．これらの傾向はまさ土以外のモデル地盤でも見られた．

図-3 は，各モデル地盤について，スリップ率，正規化沈下量，トルクを 3 次元直交座標系にプロットしたものである．正規化沈下量とトルクがスリップ率の変化に対して直線的に増加する傾向にあることを述べたが， $(i, z/r, Q)$ の 3 次元空間で整理すると，プロットがひとつの平面に乗ってくることが伺える．このことは， $i, z/r, Q$ の 3 つの走行パラメータが，平面を表す次式で関連づけられることを意味する．

$$a \cdot i + b \cdot (z/r) + c \cdot Q + d = 0 \tag{2}$$

ここに， a, b, c, d ：平面の勾配と切片を決定するパラメータである．各モデル地盤のプロットについて，最小二乗法による平面近似で得られたパラメータを表-1に示す．

前述した Wong and Reece は，スリップ率 i に応じて車輪に作用する応力分布が変化する (i が大きくなると接地圧が最大となる位置が車輪前方にシフトする) ことを実験的に明らかにした上で，接地圧が最大となる位置と i の関係式 (実験式) を提案した．Wong and Reece のモデルでは，この実験式と，別途载荷試験によって得られる荷重-沈下関係式に基づいて車輪に作用する応力分布を推定し，それらを積分することでトルクやけん引力を求める．その詳細は省略するが，古典モデルは計算過程が複雑なうえ，2 つの実験式に依存するところが多い．特に，上述した実験式を求めるには車輪に作用する応力分布を知る必要があり，車輪や地盤条件に応じた実験式を得ることは実質的には困難である．一方，式(2)の平面方程式は， $i, z/r, Q$ を関連づける式として極めてシンプルであり，比較的簡単な走行実験でパラメータを同定することもできる． $i, z/r, Q$ の 3 つうち 2 つが分かれば残りの一つを推定することができるようになる点でも有用性がある．

3. おわりに

本研究では砂質地盤を対象に，小型の剛性車輪による定常走行実験を実施し，スリップ率，沈下量，トルクがシンプルな平面方程式で関連づけられることを明らかにした．著者らは，この平面方程式を用いることにより，車輪の走行予測モデルの合理化と計算コストの削減が同時に実現できると考えている．今後は，実験による検証を深化させるとともに，提案式を用いた探査ローバの走行シミュレーション技術の構築に向けた検討を行ってきたい．

参考文献

[1] Bekker, M. G., Theory of Land Locomotion: The mechanics of vehicle mobility, The University of Michigan Press, 1956., [2] Wong, J. Y., and Reece, A., Prediction of Rigid Wheel Performance based on the Analysis of Soil-Wheel Stresses, *Journal of Terramechanics*, 4(1), pp.81-98, 1967., [3] K.Iagnemma and S.Dubowsky, Traction Control of Wheeled Robotics Vehicles with Application to Planetary robot, *Int. Jour. of Robotics Res*, 23(10), 2004., [4] G. Ishigami, et. al., Terramechanics-based model for steering maneuver of planetary exploration rovers on loose soil, *Jour. Of Field Robotics*, 24(3), pp.233-250, 2007.

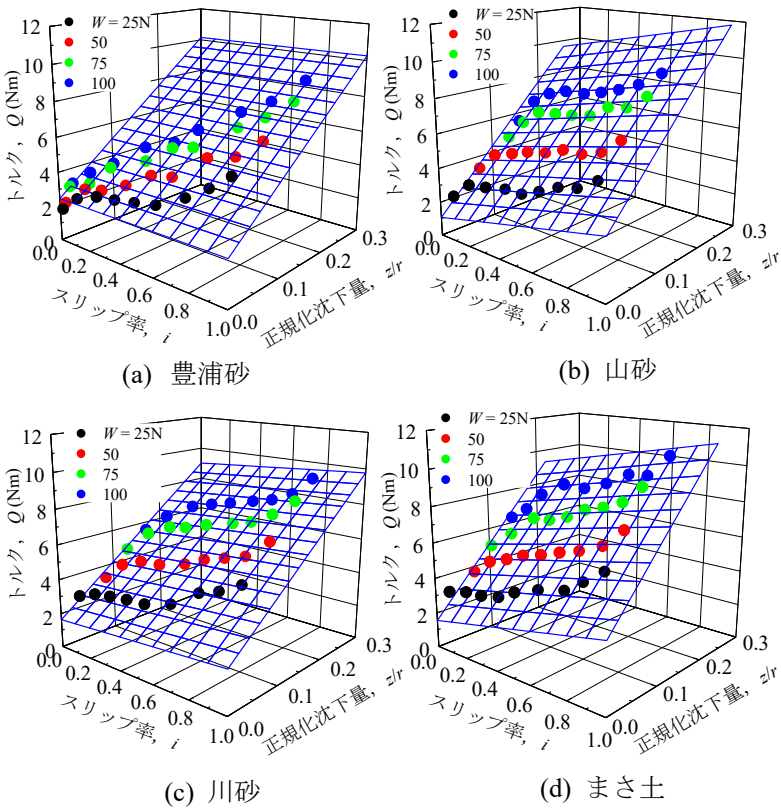


図-3 スリップ率，沈下量，トルクの近似平面

表-1 平面パラメータ

土質	a	b	c	d
豊浦砂	0.10	25.7	1.00	2.47
山砂	0.76	24.6	1.00	1.64
川砂	2.36	32.9	1.00	1.80
まさ土	2.24	35.2	1.00	1.55