

福井大学大学院 学生員 ○中車 恭明  
 同上 正会員 小林 泰三

1. 研究の背景及び目的

近年、世界各国において月・惑星探査が活発化してきている。月や惑星に着陸して広域を探索するための移動ロボットが重要な役割を果たすことになるが、機構のシンプルさやエネルギー効率の点から車輪型ローバーがよく採用されることが多い。

月・惑星における低重力下の軟弱地盤では、車輪に滑りが生じる可能性が高く、開発フェーズにおけるロボット設計の最適化や性能評価、運用フェーズにおける経路計画や自律走行支援を行う上で、探査ローバーの走行性を予測するシミュレーション技術が求められている。そこで本研究では、シミュレータ開発の基礎理論となる車輪のスリップ率予測モデル（テラメカニクスモデル）を提案する。

2. 単輪応力分布モデル

本研究では、車輪と地盤の接地領域に垂直応力 $\sigma$ とせん断応力 $\tau$ が図1に示すように作用すると仮定する。すなわち垂直応力 $\sigma$ は入射角 $\theta_f$ から離脱角 $\theta_r$ にかけて直線的に分布し、角度 $\theta_m$ の点で最大値を取る三角形分布をなすと仮定する。また、せん断応力 $\tau$ については Coulomb の破壊式に基づいて算出するが、車輪下では同式で算出される最大せん断応力に定数  $m$ （モビライズ率と呼ぶ）を乗じた値が作用すると考えた。

車輪の力学的釣り合いから、上述した接地応力の鉛直成分の合力  $P_v$  は車輪荷重  $W$  に等しくなり、水平成分合力  $P_h$  は車輪を前進させるための駆動力  $T$  となる（図2）。

3. スリップ率の予測

本研究では、スリップ率  $i$  を予測するモデルを提案する。スリップ率とは走行性を示す指標であり、次式で表す。

$$i = 1 - \frac{V}{r\omega} \tag{1}$$

図2に示すように、角度 $\theta_p$ の点に接地応力の合力が作用しているとき、車輪の走行トルク  $Q$  の釣り合いから式(2)が成立し、更に三角関数の公式に基づいて整理することで $\theta_p$ に関する式(3)を得る。

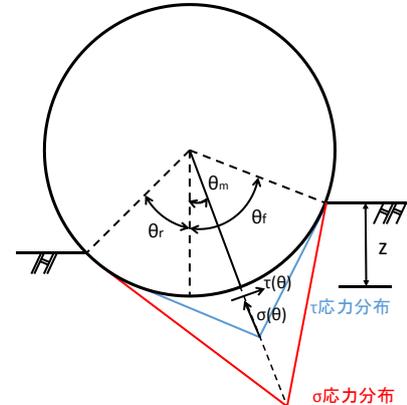


図1 車輪下に作用する応力分布

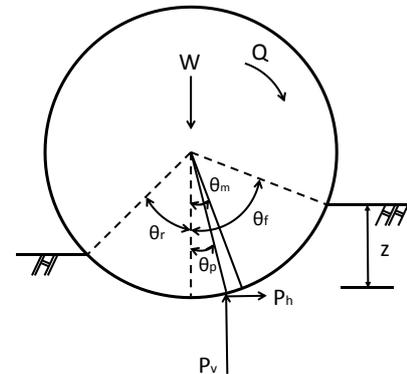


図2 車輪に作用する力の関係

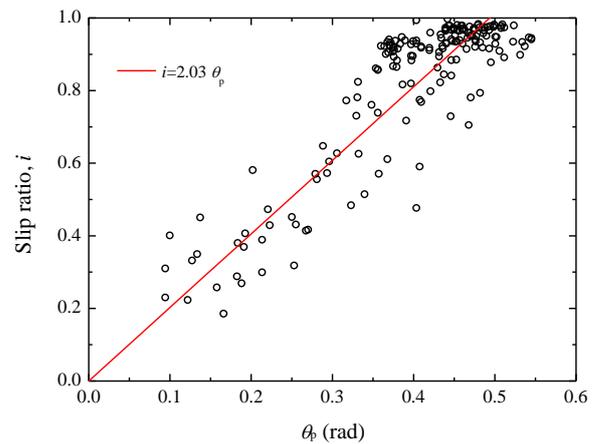


図3  $\theta_p$  と  $i$  の関係

$$Q = r(W \sin \theta_p + T \cos \theta_p) \tag{2}$$

$$\theta_p = \sin^{-1} \left( \frac{Q}{r\sqrt{W^2 + T^2}} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{T}{\sqrt{W^2 + T^2}} \right) \tag{3}$$

過去の車輪走行実験のデータ<sup>1)</sup>を分析すると、式(3)により求められた $\theta_p$ とスリップ率 $i$ には、図3のような関係があることが分かり、次式で近似的に表現できる。

$$i = 2.03\theta_p \quad (4)$$

#### 4. 解析手法

ここでは、車輪条件（半径 $r$ 、車輪幅 $b$ 、車輪荷重 $W$ ）と走行条件（沈下量 $z$ 、走行トルク $Q$ ）、地盤条件（粘着力 $c$ 、内部摩擦角 $\phi$ 、スリップパラメータ $a, b$ ）が与えられた場合にスリップ率 $i$ を数値的に計算するためのフローを説明する。

まず、応力の接地領域を定めるために、車輪の沈下量 $z$ から幾何学的に車輪入射角 $\theta$ 及び車輪離脱角 $\theta$ を算出する。次いで最大応力点 $\theta_m$ とモビライズ率 $m$ を仮定した上で接地応力分布を算出し、その鉛直成分の積分値 $P_v$ とトルクを計算する。この $P_v$ が車輪荷重 $W$ と一致し、かつトルクが $Q$ と一致するまで $\theta_m$ と $m$ を変化させて繰り返し計算を行う（この時点で車輪・走行条件に応じた応力分布が決定されることになる）。

求められた応力分布の水平成分の積分値 $P_h = T$ を算出し、 $W$ とともに式(3)に代入し $\theta_p$ を求め、式(4)に代入すると最終的にスリップ率 $i$ が求められることになる。

#### 5. 解析結果及び考察

図4は、上記手法によって計算されたスリップ率の予測値と実験値<sup>1)</sup>を比較したものである。ここで、実験値は、豊浦砂（相対密度70%）に対して、車輪半径 $r = 75$  mm、車輪幅 $b = 80$  mmの剛性車輪を牽引負荷なしで走行させたときの任意時刻におけるスリップ率である。車輪荷重 $W$ は49.1~196.2 Nで変化させた条件での結果であり、この図から、車輪荷重条件によらず、実測値と解析予測値がある程度一致していることが分かる。

図5は、スリップ率の経時変化を示したものであり、走行開始後沈下が進行し、車輪荷重条件に応じてスリップ率が上昇しているトレンドも予測できていることが分かる。このことから、本研究で提案するスリップ率予測手法に妥当性があることが示唆される。

このようなスリップ率の予測は、過去にもWongとReece<sup>2)</sup>らが提案しているが、既往モデルは実験式を多用し、かつ計算が極めて複雑であるとともに、場合によっては沈下量に対して応力分布を過大評価する可能性があるなどの問題があった。一方、本モデルは、トルクの実測値を必要とするものの、計算フォローが明快かつシンプルなものとなっている。単輪の地盤-車輪系スリッ

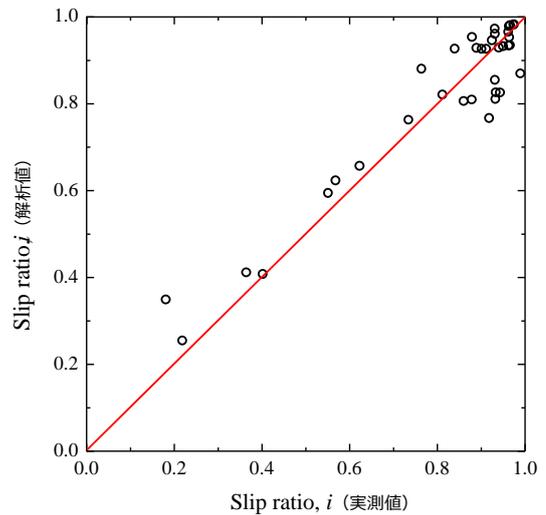


図4 実測値と解析値の比較

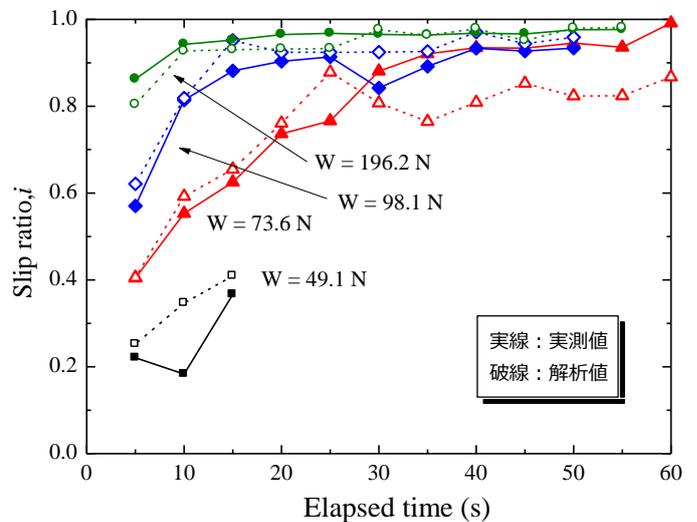


図5 解析結果

プ率予測モデルは、車両系の運動シミュレーションを行う基礎式となるが、本研究で提案するモデルは、力学的な合理性が高いものであるとともに計算コストも大きくなく優位性が高いものと期待できる。

#### 6. おわりに

本研究では、剛性車輪のスリップ率予測モデルを新たに提案し、過去の実験データと比較してその妥当性を確認することができた。今後は、この単輪モデルをマルチボディダイナミクス解析に組み込み、多輪から構成される車両システムの運動シミュレータ開発に取り組んでいきたいと考えている。

#### 【参考文献】

- 1) 藤原 洋一郎：月探査ローバーを想定したレゴリス-車輪系実験と走行評価モデル，九州大学大学院工学府修士論文，2009.
- 2) Wong J.Y., and Reece, A., : Prediction of Rigid Wheel Performance based on the Analysis of soil, Journal of Terramechanics, Vol.4, No.1, pp.81-98, 1967.