

テラメカニクスに基づく月・惑星探査ローバーの走行性確保に関する検討

九州大学 学生会員 竹中 慶

九州大学大学院 正会員 小林泰三 安福規之 ハザリカ・ヘマンタ 大嶺 聖

1. はじめに

我が国の月探査機「かぐや」や小惑星探査機「はやぶさ」の活躍に見られるように、近年、月・惑星探査計画が世界中で活発化している。将来の月・惑星探査計画に向けて、月・惑星に着陸する技術や、月・惑星表面を移動して探査する無人口ボットの研究開発が世界各国で活発に行われている。探査ローバーなど月・惑星の表層を移動する技術は、表層を覆う土(レゴリス)の力学挙動にかかわる問題であり、地盤力学やテラメカニクス¹⁾(地盤と車両間の相互作用を扱う学術分野)の貢献が期待されるようになった。

本研究では、テラメカニクスに基づいて車輪に作用する力関係を整理し、走行性との関連性について述べるとともに、砂質不整地における探査車両の走行性を確保/向上させるための走行制御法を検討する。さらに本報では、提案する走行制御法の妥当性を検証するために試作した6輪型の試作ローバーを紹介する。

2. 車輪に作用する応力と力

沈下を許す水平地盤上を剛性車輪が走行する場合、車輪は地盤から走行抵抗 R を受け、走行を維持するためにトルク M が必要となり、進行方向に駆動力 T が発生する。走行抵抗 R と駆動力 T は、作用・反作用の関係にあり、両者が釣り合うことで車輪は一定速度で前進する。その他、車輪の荷重 W が鉛直方向に作用する。一方、地盤側の接地圧として車輪下に応力分布が生じることとなり、接地圧の水平方向成分の合力が駆動力 T に、鉛直成分の合力が車輪荷重 W に等しくなる(図-1)。

車輪の最下点から θ の角をなす点における接地圧の接線方向成分と法線方向成分をそれぞれ $\sigma(\theta)$ 、 $\tau(\theta)$ とすると、 T 、 W 、 M はそれぞれ以下のように表わされる¹⁾。

$$T = Br \int_{-\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta \} d\theta \tag{1}$$

$$W = Br \int_{-\theta_r}^{\theta_f} \{ \sigma(\theta) \cos \theta + \tau(\theta) \sin \theta \} d\theta \tag{2}$$

$$M = Br^2 \int_{-\theta_r}^{\theta_f} \tau(\theta) d\theta \tag{3}$$

ここに、 B : 車輪幅、 r : 車輪半径、 θ_f : 車輪と地盤の前方接触角、 θ_r : 車輪と地盤の後方離脱角である。

また、車輪最下点から θ_a の角をなす点 A に接地圧の合力 P が作用すると考え、合力 P を接線方向成分 S と法線方向成分 N 、および水平成分 T と鉛直成分 W に分解すると、これらの力関係はそれぞれ次式で表わされるようになる。

$$S = N \tan \delta \tag{4}$$

$$T = W \tan \eta \tag{5}$$

ここに、 δ : 車輪 - 地盤間の摩擦角、 η : $\delta - \theta_a$ である。

式(5)から、 η は、 T と W を結び付ける見かけの摩擦角ということができる。著者らの既往の研究²⁾により、 η はスリップ率 i (走行性を示す指標で $0 \leq i \leq 1$ の範囲を取る。空転して車輪が前進しない場合に $i = 1$ 、スリップせず走行する場合に $i = 0$ を与える) に依存し、 η が大きくなるほど i が大きくなる(走行性が悪化する)ことが分かっている。すなわち、 η の小さい条件ほど駆動力 T は小さくなり、走行性が向上するといえる。

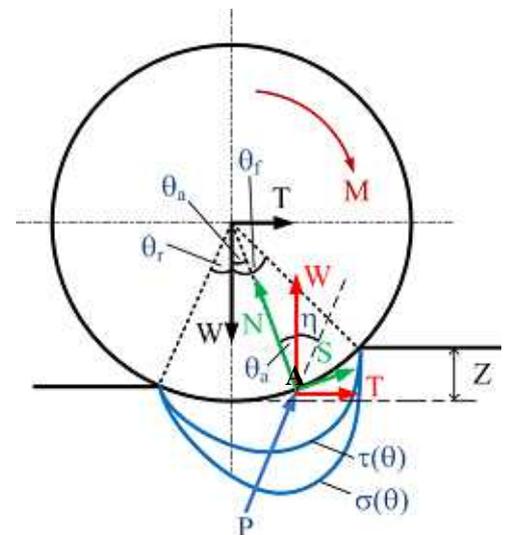


図-1 車輪に作用する応力と力の関係

3. 多輪システムとしての走行性

探査ローバーは複数の車輪で構成されるが、走行性は車両の系全体で一義的に与えられるものであるため、各車輪のスリップ率も同一の値をとることになる。また、それぞれの車輪荷重や沈下量が異なっても、系として連動しているため各車輪に作用する駆動力 T はすべて等しくなると考えられる。車輪の位置が固定されている場合には、地盤表層の凹凸性状により各車輪の荷重分担にばらつきが発生する。荷重集中が生じる車輪には大きな走行抵抗が発生し、全体系の駆動力の増加に繋がり、結果として車両の走行性の悪化を招くことになると考えられる。そこで本研究では、凹凸のある不整地においても各車輪に常に同一の荷重が分配されるような制御機構を持つ探査ローバーのモデル機を試作し、走行性の改善効果を検討することにした。

4. 6輪モデルローバーの試作

本研究では、図-2 に示すようなモデルローバーを試作した。本モデルローバーは、前後方向に約 300 mm、左右方向に約 500 mm の間隔で合計 6 個の剛性車輪が配置されており、各車輪に取り付けられたステッピングモータによって、さらに車輪に連結されたリアアクチュエータ（可動距離幅：200 mm）によってそれぞれ回転と上下運動が車輪毎に独立して行えるようになっている。車輪の半径は 75 mm、幅は 80 mm であり、車両全体質量は約 42 kg である。また、車輪とリアアクチュエータ間にロードセルが配置されており、各車輪に作用する荷重が個別に計測できるようになっている。本研究では、走行に応じて時々刻々と変化する車輪荷重が常に平均分配されるような制御システムの実装を試みた。つまり、走行中の地盤の凹凸に応じて車輪が上下して常に車両重量を 6 等分する荷重が各車輪に作用する仕組みとなっており、地盤表層の凹凸等による一部の車輪への荷重集中とそれに起因する走行性悪化を回避することができるようになる。現在、制御実装の最終調整を行っている状況にあり、早々に砂場等の野外不整地を利用した実走実験を行う予定である（講演時に実験結果を報告したいと考えている）。

5. おわりに

本研究では、月・惑星探査における探査ローバーの走行性向上を目指して、地盤と車輪の力学的相互作用を整理した上で、そのメカニズムの考察に基づいた“すべりにくい探査ローバー”のモデル機を試作した。本報では、走行制御法の第一案として車輪荷重の平均分配化を目指した取り組みを紹介したが、本モデル機はさらに複雑で高度な制御の実装も可能である。今後は、地上における実走実験を進めるとともに、様々な制御法の実装を試み、効果の高い走行制御法の確立に取り組んでいきたいと考えている。数多くの移動ロボットの機器開発が進められる中、土の力学に基づいたアプローチはごく限られているのが現状である。本研究が、我が国の月・惑星探査計画の技術向上の一助となれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 室 達郎：テラメカニクス，技報堂出版，1993.
- 2) 小林泰三，他：砂上を走行する剛性車輪のスリップ率評価，テラメカニクス，29号，pp. 23-28, 2009.

【謝辞】本研究で試作したモデルローバーは、平成 21～22 年度・科学研究費補助金・若手研究 B「月面探査ローバーの走行性評価と走行最適化制御」(代表：小林泰三)の助成のもと、永谷圭司氏・砂長麻美氏(東北大学大学院・航空宇宙工学専攻)、小柳栄次氏(千葉工業大学・未来ロボット技術研究センター)、石上玄也氏(宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所)らの協力を得て作製したものである。ここに記して深謝する。

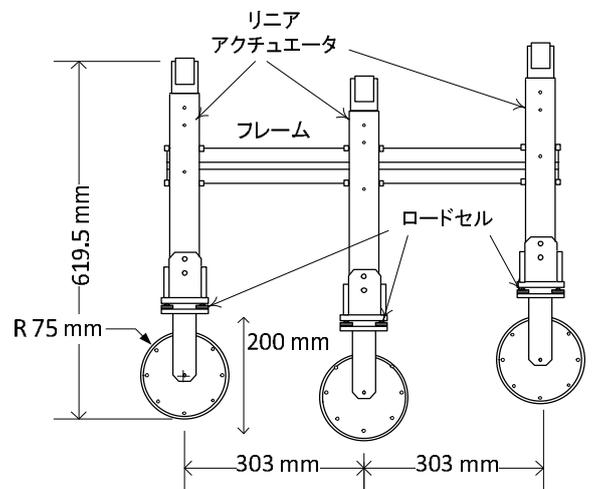


図-2 6輪モデルローバーの概念図(側面図)

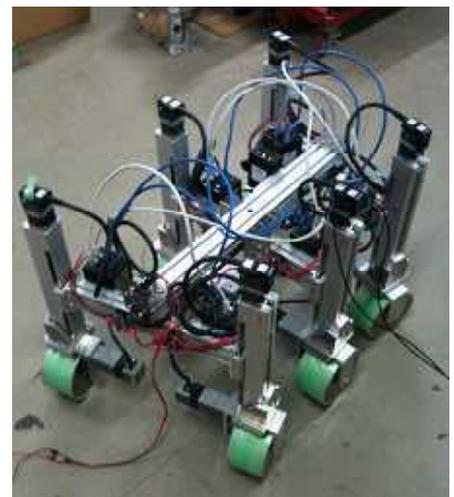


図-2 試作した6輪モデルローバー