

応力分布測定ホイールによる土壌パラメータの推定

Estimation of Soil Parameters Using a Wheel with Built-in Force Sensor Array

正 吉田 和哉, 正 永谷 圭司, 山名 克尚, 石上 玄也 (東北大学)

yamana@astro.mech.tohoku.ac.jp

Kazuuya YOSHIDA, Keiji NAGATANI, Katsuhisa YAMANA, Genya ISHIGAMI (Tohoku University)

Generally, wheels of a planetary rover slip easily and lose their traction on loose soil on the Moon or Mars. Hence, it is very important to keep traction for each wheel. Such interaction between a wheel and a soil is studied in the research area called “Terra-mechanics.” In the Terra-mechanics, the traction force is calculated with soil parameters that are estimated under ideal configuration. However, real environment does not have ideal configuration constantly. Therefore, it is difficult to estimate an accurate traction force online.

In this research, to estimate an accurate traction force, a wheel with built in force-sensors-array (BFSA) was developed. It acquires normal stress distribution online. By using such sensors, we performed measurement experiments in different slip ratio and different soils. Finally, one soil parameter which is difficult to estimate by way of conventional method was estimated by comparison between calculated traction forces (based on the BSFA wheel) and actual measured forces.

Key Words : Planetary rover, Terramechanics, Slip-ratio

1 はじめに

月や火星などの軟弱地盤上を走行する車輪型移動ロボット (以下、ローバーと呼ぶ) は、走行時に車輪と軟弱地盤との間にスリップが生ずるため、車輪が生ずる牽引力や走行経路を推定することが非常に困難である。そこで、筆者らの研究グループを含め、幾つかの研究グループにおいて、ローバーの走行性能向上を目的とした、車輪の力学解析に関する研究が行われている [1] [2]。

この研究分野では、土壌と機械の相互力学関係を取り扱う「テラメカニクス」の車輪走行力学モデルが用いられる。このモデルは、1960年代に M.G.Bekker によって基礎が構築され [3], J.Y.Wong や A.R.Reece らによって、モデルの修正や様々な土壌へのモデルの適用などの研究が進められた [4]。

この車輪走行力学モデルは、車輪の走行面が平坦であり、土壌が均一であるといった理想的な環境であることを前提条件としており、その上で、様々な土壌パラメータを用いている。しかしながら、実環境において、土壌のパラメータが既知であるということをも前提としたモデルベース的な手法で、駆動力の推定を行うことは困難である。そこで、オンラインで土壌パラメータの推定を行う研究が、近年、いくつか報告されている [5] [6]。ただし、これらの文献で述べられている手法は、大掛かりな設備を必要とするため、ローバーへの適用は、現実問題として非常に困難である。一方、応力分布を直接測定するといった研究は、O.Onafeko や Y.Nohse らによって行われている [7] [8]。これらの研究では、走行車輪下部の土壌状態の解析を目的としているため、直接測定した応力を用いた土壌パラメータの推定は行われていない。

本研究では、駆動力の推定を目指し、この推定において重要となる車輪接地面に加わる応力分布をオンラインで測定可能とするセンサ内蔵ホイールを製作した。さらに、このホイールを用いて、スリップ率と土壌を変えて応力分布測定実験を行った。この結果を用いて、通常的手法では取得困難とされてきた、せん断応力を求める際に必要とされるパラメータを推定する手法を提案する。

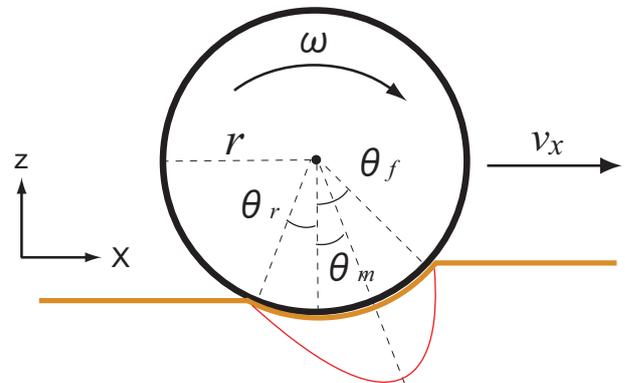


Fig. 1 An example of distribution of normal stress

2 駆動力モデルに用いられる土壌パラメータ

テラメカニクスにおける駆動力モデルでは、様々なパラメータが用いられる。本稿では、まず、この駆動力モデルならびに、応力分布モデル、せん断応力モデルについて述べ、推定すべきパラメータを整理する。

2.1 車輪に作用する力

テラメカニクスにおいて、走行中の車輪に作用する力には、垂直応力 σ とせん断応力 τ が存在する。車輪が転動している際に発生する応力分布例を図 1 に示す。図中の θ_f , θ_r , θ_m は、それぞれ、転動する車輪が接地する角度、車輪が地面から離脱する角度、応力が最大となる角度 (いずれも鉛直下向きをゼロ度とする) を表す。つまり、 θ_f から θ_r が上記の力を発生させる車輪の接地面となる。

駆動力 F_x は、応力の発生範囲における垂直応力 σ とせん断応力 τ の水平成分の差として考えられ、式 (1) のようにされる。なお、 r は車輪半径、 b は車輪幅を表す。

$$F_x = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau_x(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta \} d\theta \quad (1)$$

2.2 応力分布モデル

走行中、車輪には、図1のように車輪真下よりやや前方に応力が発生することが知られている。また、この応力の分布 σ は、対称とはならない。そこで、この分布は、応力が最大となる際の角度 θ_m を境に、前方 σ_f と後方 σ_r に分けて以下のように定式化される。

$$\sigma_f(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) [r(\cos \theta - \cos \theta_f)]^n \quad (2)$$

$$\sigma_r(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \cdot \left[r(\cos \{ \theta_f - \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} (\theta_f - \theta_m) \} - \cos \theta_f) \right]^n \quad (3)$$

ここで、 k_c はせん断応力モデルにおける土壌の粘着係数 c に依存する土壌変形係数である。 k_ϕ も同様に、内部摩擦角 ϕ に依存する土壌変形係数であり、 n は、土壌の性質に依存する指数係数である。また、 θ_f 、 θ_r 、 θ_m は、車輪の転動によって変化する状態量である。

この車輪状態量は、車輪の沈下量 h から幾何学的に見て推定を行うことができ、式(4)-(6)で表される。

$$\theta_f = \cos^{-1} \left(1 - \frac{h}{r} \right) \quad (4)$$

$$\theta_r = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\kappa h}{r} \right) \quad (5)$$

$$\theta_m = (a_0 + a_1 s) \theta_f \quad (6)$$

ただし、 a_0 、 a_1 は、土壌によって決まる定数であり、通常は、経験的に求められた値を利用する。また、 s は、スリップ率である。これは、車輪が地面に対して滑る割合を示し、車輪の並進速度 v_x と回転角速度 ω 、車輪半径 r を用いて、

$$s = 1 - v_x / r\omega \quad (7)$$

と表される。例えば、車輪が全くスリップしていない状態では、 $s = 0$ となり、逆に、車輪が空転して全く移動できない状態では、 $s = 1$ となる。

2.3 せん断応力

車輪が転動にすることによって、車輪表面にはせん断応力が発生する。このせん断応力は、Janosi, Hamamotoらによって、次式のように定式化された [9]。

$$\tau_x(\theta) = (c + \sigma(\theta) \tan \phi) [1 - e^{-j_x(\theta)/k_x}] \quad (8)$$

$$j_x(\theta) = r[\theta_f - \theta - (1 - s)(\sin \theta_f - \sin \theta)] \quad (9)$$

ここで、 c 、 ϕ は、それぞれ土壌の粘着係数と内部摩擦角と呼ばれる土壌に固有の値である。また、 k_x は、土壌と車輪表面の形状に依存する土壌変形係数である。

2.4 推定すべき土壌パラメータのまとめ

以上に述べてきた、応力分布モデル、せん断応力モデル用いられる土壌パラメータについてまとめると、表1のようになる。

せん断応力モデルにおける c 、 ϕ および応力分布モデルにおける k_c 、 k_ϕ 、 n は、それぞれ土壌固有のパラメータである。そのため、これらのパラメータは、土壌が既知であれば、土壌試験を行うことによって求めることが可能である。

一方、せん断応力モデルにおける k_x は、正確な値を推定することが困難である係数の一つである。また、応力分布

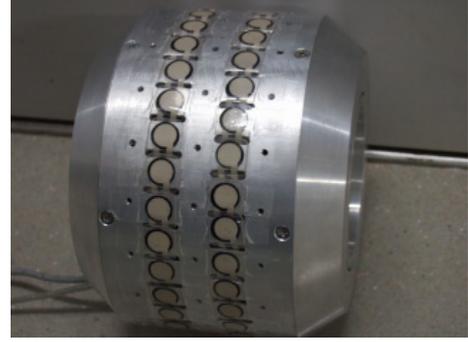


Fig. 2 An Overview of BFSA wheel



Fig. 3 An overview of the single wheel test bed

モデルにおける θ_f 、 θ_r 、 θ_m は、走行車輪の状態量であり、走行面が平坦で土壌が均一でなければ、正確に推定することは難しい。特に、 θ_m を求めるための a_0 、 a_1 という定数は、土壌によって異なる値となることが容易に想像できるが、これまでの研究では、経験的な値 ($a_0 = 0.4$, $0 < a_1 < 0.3$) を利用していた。

本研究では、応力分布測定ホイールと力・トルクセンサを用いて土壌パラメータの推定を行うことを目指す。まず、応力分布を、ホイールに設置したセンサを用いて直接測定することで、 θ_f 、 θ_r 、 θ_m を取得する。これにより、駆動力モデルに用いられる推定困難なパラメータのうち、せん断応力のモデルに使用されるパラメータ k_x を除いて、全てのパラメータを求めることが可能となる。

3 垂直応力分布測定実験

3.1 実験環境

車輪に加わる応力分布を直接測定することが可能となれば、駆動力モデルに用いられる土壌パラメータを推定できることが期待できる。そこで本実験では、本研究グループにおいて開発した応力分布測定ホイール(図2)を用いて、応力分布の測定を行うこととした [10]。このホイールは、車輪表面に圧力センサを取り付けることで、車輪が転動している際にも、車輪に加わる応力を測定することができる。また、車輪内部に格納したマイコンにより、取得したセンサ情報を、接続された PC に送信することが可能である。

Table 1 Parameters for traction force model

	土壌固有	推定困難
せん断応力モデル	c, ϕ	k_x
垂直応力モデル	k_c, k_ϕ, n	$\theta_f, \theta_r, \theta_m$

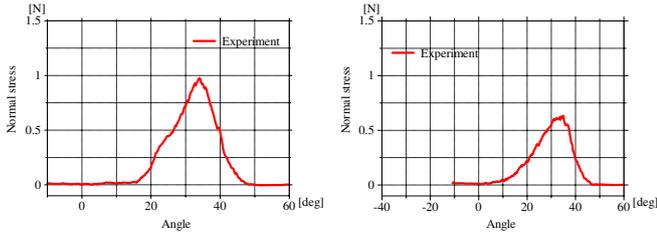


Fig. 4 Experimental result: (Regolith Simulant) Fig. 5 Experimental result: (Toyouura sand)

この応力分布測定ホイールを用いた実験には、一輪実験装置を利用することとした(図3)。この実験装置は、上部スライドガイドに車輪を取り付けたプレートを、ベルトコンベア方式で移動させることにより、車輪の並進速度を表現する。また、応力分布測定ホイール自身は、内蔵したモータに取り付けられたエンコーダにより車輪回転角速度を制御することが可能である。この二つのアクチュエータにより、車輪の並進速度および回転角速度を任意に制御することが可能となるため、スリップ率 s を任意に設定することが可能となった。また、車輪の取り付け部分には、力・トルクセンサを取り付け、車輪が生ずる駆動力の測定を行う。

3.2 対象とする土壌

本実験で対象とする土壌として、レゴリスシミュラント(清水建設社製:FJS-1)と呼ばれる月の砂を模擬した砂と、豊浦標準砂(豊浦砕石鋳業社製)と呼ばれる砂の2種類を用いて実験を行った。レゴリスは、アポロ計画時の飛行士の報告によると、踏み込んだ部分にはくっきりと足跡が残るほど粘着力があるとされている。レゴリスシミュラントも同様に、強い粘着力を持っているという特徴がある。一方、豊浦標準砂は、粒形が均一であり、レゴリスシミュラントとは対照的に粘着力がほとんど無いことが特徴として挙げられる。

3.3 実験条件

先述のように、車輪状態量 $\theta_f, \theta_r, \theta_m$ とスリップ率 s には、密接な関係がある。ゆえに、実験による $\theta_f, \theta_r, \theta_m$ の測定値も、スリップ率によって変化すると予想される。本研究では、測定した $\theta_f, \theta_r, \theta_m$ のスリップ率 s による変化を、近似曲線を用いて表すことで、正確な $\theta_f, \theta_r, \theta_m$ を獲得することを試みる。この獲得のため、本実験では、スリップ率 s を 0.2 から 0.8 まで 0.1 刻みで行うこととした。また、一般的に惑星探査ローバーは、速度が 10[mm/sec] 程度と非常に低速であることから、車輪回転速度を 8.7[mm/sec] と設定した。

3.4 実験結果

実験によって得られた応力分布の一例を図4(レゴリスシミュラント)、図5(豊浦標準砂)に示す。この結果から、図1のように、応力は車輪真下よりもやや前方で発生していることが確認された。また、豊浦標準砂における応力分布とレゴリスシミュラントにおける応力分布の形状に、大きな違いは見られなかった。

3.5 レゴリスシミュラント上での実験の考察

次に、レゴリスシミュラント上での実験に対する考察を行う。図4に示すように、応力の発生し始めるときの角度

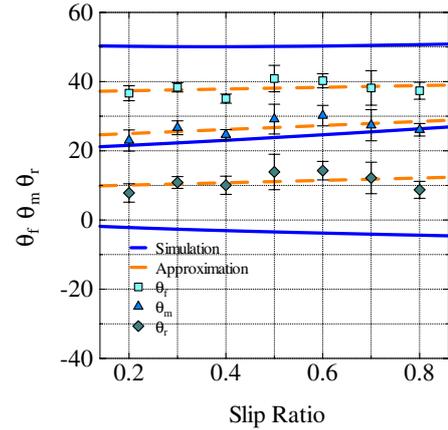


Fig. 6 Result of wheel state quantity determination

θ_f 、発生し終わるときの角度 θ_r 、応力が最大となるときの角度 θ_m のプロットした結果を図6に示す。

図6より、 $\theta_f, \theta_r, \theta_m$ は、それぞれスリップ率の変化によらず常にほぼ一定となっていることがわかる。加えて、 θ_f と θ_r の間隔が常に約 30[deg] と一定になっている。これは、レゴリスシミュラント上を走行する車輪に加わる応力分布が、車輪のスリップに関わらず一定となっていることを示している。この現象は、レゴリスシミュラントの粘着力が強く、車輪のスリップによる沈下の違いが、ほとんど生じないためと推察される。

次に、式(4)-(6)を用いて幾何学的に求めた $\theta_f, \theta_r, \theta_m$ (実線)と判定結果との比較を行うと、幾何学的に求めた θ_f は、実験結果から判定したものよりはるかに大きいということがわかる。これは、走行車輪における有効な応力は、車輪接地面全体にわたって発生するのではなく、接地面よりも狭い範囲で発生していることを示している。

さらに、テラメカニクスにおいて走行車輪の沈下量は、一次線形で表されていることから、判定結果の直線近似を行った。その結果、グラフにおいて破線で示される直線が得られた。それぞれの直線は、式(10)-(12)で表され、この式を用いることで、スリップ率 s のみで推定することが可能となる。

$$\theta_f = 2.50s + 37.0 \quad (10)$$

$$\theta_r = 3.40s + 9.40 \quad (11)$$

$$\theta_m = 5.82s + 23.8 \quad (12)$$

最後に、 $\theta_f, \theta_r, \theta_m$ の推定式を用いて駆動力モデルから計算した駆動力と、実験において、力・トルクセンサを用いて測定した駆動力の誤差の二乗が最小となる k_x を求めた結果、

$$k_x = 0.003 \quad (13)$$

と推定された。

3.6 豊浦標準砂上での実験の考察

レゴリスシミュラントの場合と同様に、豊浦標準砂ので、 $\theta_f, \theta_r, \theta_m$ の判定を行った結果を図7に示す。

図7より、スリップ率が増加するに伴って、 $\theta_f, \theta_r, \theta_m$ が増加する傾向が見られる。また、応力の発生範囲は、レゴリスシミュラントの場合と同様に約 30[deg] となった。こ

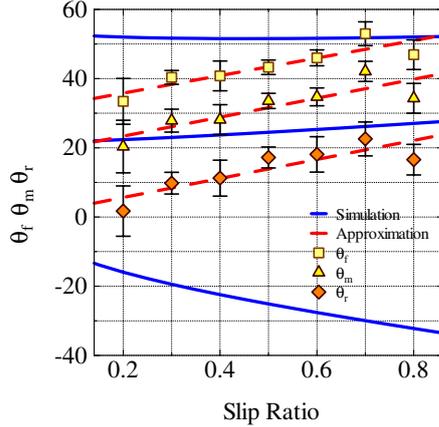


Fig. 7 result of wheel state quantity determination

れは、スリップ率が増えると、応力分布が前方に移動することを示している。この現象は、豊浦標準砂の粘着力が非常に弱く、車輪のスリップが大きくなるにつれて沈下が進むためと推察される。

次に、式(4)-(6)を用いて幾何学的に求めた θ_f , θ_r , θ_m (実線)と判定結果との比較を行うと、両者は大きく異なっている。特に、 θ_r においては違いが顕著であり、スリップ率が増加するに従って差が広がっている。これは、スリップ率が増加するにつれて車輪接地面が広がるが、応力の発生範囲は一定であり、さらに、スリップ率の増加と共に前方へと推移するためであると考えられる。

レゴリスシミュラントの場合と同様、 θ_f , θ_r , θ_m の直線近似を行った結果、以下の式が得られた(図7の破線)。

$$\theta_f = 25.3s + 30.7 \quad (14)$$

$$\theta_r = 27.5s + 0.13 \quad (15)$$

$$\theta_m = 27.5s + 17.9 \quad (16)$$

最後に、 θ_f , θ_r , θ_m の近似直線式を用いて駆動力モデルから計算した駆動力と、実験において、力・トルクセンサを用いて測定した駆動力の誤差の二乗が最小となる k_x を求めた結果、

$$k_x = 0.0056 \quad (17)$$

と推定された。

3.7 実験のまとめ

本実験では、応力分布測定ホイールを用いて、様々なスリップ率における応力分布の測定を行った。また、実験結果から車輪状態量 θ_f , θ_r , θ_m の判定を行った。この過程で、従来の車輪沈下量から幾何学的にのみ推定した θ_f , θ_r , θ_m との比較により、実際の走行車輪における応力の発生範囲は、車輪接地面全体ではなく、一部であることが明らかとなった。さらに、実験結果より判定した θ_f , θ_r , θ_m の近似直線を駆動力モデルに適用して算出した駆動力と、力・トルクセンサにより実測した駆動力との比較により k_x の推定を行った。この推定した k_x は、実験結果に基づいた土壌パラメータを用いて算出されたものであるため、正確に推定することが可能となったと言える。

4 おわりに

本稿では、テラメカニクスにおける駆動力モデルで用いられる土壌パラメータについて説明し、応力分布測定ホイールを用いた土壌パラメータの推定について述べた。また、実際に応力分布測定ホイールを用いて実験を行い、得られた結果を用いて土壌パラメータの推定を行った。ここで推定した値は、従来の車輪接地面から幾何学的に求めた車輪状態量を用いた手法と比較し、実験から得られたものであるため、従来の手法と比較して信憑性が高いといえる。

文献

- [1] Lauro Ojeda, Daniel Cruz, Giulio Reina, and Johann Borenstein. Current-based slippage detection and odometry correction for mobile robots and planetary rovers. *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 22, No. 2, pp. 366–378, 2006.
- [2] Genya Ishigami, Akiko Miwa, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida. Terramechanics-based model for steering maneuver of planetary exploration rovers on loose soil. *Journal of Field Robotics*, Vol. 24, No. 3, pp. 233–250, 2007.
- [3] M. G. Bekker. *Off-The-Road Locomotion*. Ann Arbor, MI, USA, The University of Michigan Press, 1960.
- [4] J. Y. Wong. *Theory of Ground Vehicles*. John Wiley & Sons, 1978.
- [5] I. Shmulevich, D. Ronai, and D. Wolf. A new field single wheel tester. *Journal of Terramechanics*, Vol. 3, pp. 133–141, 1996.
- [6] K. Iagnemma, H. Shibly, and S. Dubowsky. On-line traction parameter estimation for planetary rovers. In *Proceedings of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA '05)*, pp. 3142–3147, Washington, DC, USA, 2002.
- [7] O. Onafeko. Soil stresses and deformations beneath rigid wheels. *Journal of Terramechanics*, Vol. 4, pp. 59–80, 1967.
- [8] Y. Nohse, K. Hashiguchi, and M. Ueno. A measurement of basic mechanical quantities of off-the-road traveling performance. *Journal of Terramechanics*, Vol. 28, pp. 371–382, 1991.
- [9] Z. Janosi and B. Hanamoto. A self-contained robot ‘yamabico’. In *Proc. of 1st Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems*, 1961.
- [10] 永谷圭司, 山名克尚, 石上玄也, 吉田和哉. 地盤走行ローバーのスリップ率オンライン推定 - 土壌圧力を測定する圧力センサ内蔵型ホイールの開発 -. 第24回日本ロボット学会学術講演会 論文集, p. 1J31, 2006.