

# 実験的アプローチによる軟弱地盤走行ロボットのための 駆動力発生モデルの検討

池田礼子<sup>1</sup>, 佐藤佳祐<sup>1</sup>, 永谷圭司<sup>2</sup>, 吉田 和哉<sup>2</sup>

## New Traction Force Model for Wheeled Mobile Robots on Loose Soil based on an Experimental Approach

Ayako IKEDA<sup>3</sup>, Keisuke SATO, Keiji NAGATANI, and Kazuya YOSHIDA

<sup>3</sup> Tohoku University, Aoba 6-6-01, Sendai, 980-8579, Japan

While planetary rovers explore on surfaces of moon or Mars, they face a wheel slippage problem due to sandy and loose ground. To predict behavior of the rovers on loose soil, it is very important to estimate traction force of the wheels. Therefore, some wheel-models of normal stress distribution on loose soil were proposed based on "terramechanics", which can derive traction force. However, our experimental results (we directly measured normal stress distribution by pressure sensors which are attached on the wheel) showed that the distribution range is much smaller than the conventional models. Consequently, the estimated result of traction force that uses such conventional models is doubtful. Therefore, to estimate traction force correctly, we use directly measured normal stress distribution using pressure sensors in this research. Based on actual sensor data, we performed estimation of one value of a soil parameter which is very difficult to measure. Using the value, we succeeded in estimating a traction force better than other conventional methods. In this paper, we propose a new approach of traction force estimation and show a result of the estimation to validate the approach.

*Key Words* :Wheeled Robots, Planetary Rover, Terramechanics

### 1 はじめに

近年, 月や火星などの惑星探査において車輪型移動ロボット(以下, ローバーと呼ぶ)の活躍が期待されている. しかし, 月や惑星の表面上は主に砂で覆われているため, ローバーの車輪には, スリップやスタック(車輪が空転してしまい動けなくなる状態)が生じてしまい, 走行が不能となる恐れがある. このような環境で, ローバーが安全に走行するためには, 車輪に働く駆動力を推定し, 軟弱地盤を走行するローバーの挙動や斜面登板性能などを事前に予測することが非常に重要である [1].

駆動力の推定には, 走行中の車輪下部に発生する垂直応力とせん断応力を推定することが必要である. 車輪の力学解析を目的とした研究では, これらの応力分布の推定にテラメカニクスと呼ばれる土壌と機械間の相互力学に基づいて構築された車輪の力学モデルが一般的に用いられる. このモデルは, 1960 年台に M.G.Bekker によって基礎が構築され [2], J.Wong や A.R.Reece らによって, モデルの修正や様々な土壌モデルへの適用が行われた [3]. しかし, このモデルでは, 車輪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としており, さらに様々な土壌パラメータが既知であるとして構築されているため, 実環境において精度良く応力分布を推定し, 正確に駆動力を求めることは困難である. そこで, この力学モデルに基づいて, 土壌パラメータをオンラインで取得する研究 [4] [5] や応力分布を直接取得する研究 [6] などが行われている

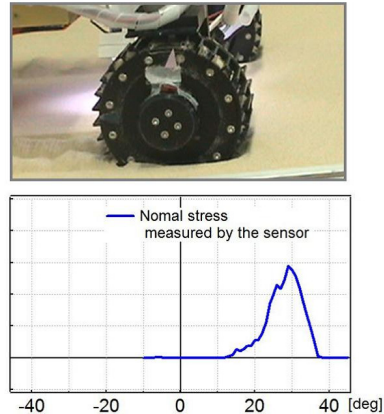


Fig. 1: Distribution range of normal stress

が, これらの研究は大掛かりな設備を必要とするため, 惑星探査を目的とした小型のローバーへの適用は非常に困難である.

そこで, 筆者らは, 駆動力をオンラインで推定することを目指し, センサを内蔵したホイールを用いて転動中の車輪接地面に加わる垂直応力分布の取得を行ってきた [7]. この実験の結果, 図 1 に示すように, 粘性の非常に低い土壌(上記実験では豊浦砂)においても, 垂直応力の発生範囲がみかけの車輪が接地する範囲とは大きく異なることが分かった. 車輪力学モデルにおける垂直応力は, 路面とのみかけの接地面積全体で発生していると仮定して導出されているため, 実際に車輪下部に発生する垂直応力分布を表現することができていなかった可能性が高い. さらに, せん断応力は垂直応力により求まるため, このモデルを利用した過去のローバーの駆動力推定

<sup>1</sup> 学生員, 東北大学 (〒 980-8579, 仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-1)

<sup>2</sup> 正員, 東北大学

の研究において、正確な駆動力の推定ができていなかったと考える．そこで、本研究では、新たな駆動力発生モデルの構築を目指し、走行中のローバーの車輪に発生する垂直応力分布を圧力センサにより直接取得し、駆動力の推定を行った．本研究の特徴は、直接測定した垂直応力分布を用いることにより、これまで事前に測定する必要があった土壌パラメータをいくつか必要としない点、ならびに正確な駆動力の推定がオンラインで可能となる点である．

本稿では、従来の車輪力学モデルについて述べた後、本研究で開発した応力分布測定ホイールをローバーテストベッドに搭載し、垂直応力分布を直接測定した実験について述べる．さらに計測した垂直応力分布より駆動力を推定する手法の提案とその推定結果について示す．

## 2 軟弱地盤上における車輪の駆動力

本章では、車輪に発生する駆動力と応力の関係について説明し、応力分布モデルについて述べる．ここで、駆動力の推定に用いられる垂直応力分布モデルは、多くの研究によって様々なモデルが提案されているが、本稿では、その基礎となっている Bekker が提案した垂直応力分布モデル [8] について述べる．さらに、本研究が提案する駆動力の推定に必要な要素について明らかにする．

### 2.1 車輪に作用する力

図 2 は、軟弱地盤上を走行する車輪のモデル図である．テラメカニクスにおいて、走行中に車輪には垂直応力  $\sigma$  とせん断応力  $\tau$  が存在する．ここで、図中の  $\theta_f$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_m$  はそれぞれ、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を表す．なお鉛直下きを  $\theta_0 = 0$  とする．

車輪の駆動力  $F_x$  は、地面から車輪の接地面に加わる垂直応力  $\sigma$  および  $x$  方向のせん断応力  $\tau_x$  の水平方向成分を、接地領域について積分することにより求められ、式 (1) で表される．さらに、地面垂直方向に受ける垂直抗力  $F_z$  は、 $F_x$  と同様に  $\sigma$  と  $\tau_x$  の垂直方向成分の積分によって得られ、式 (2) で表される．なお、 $r$  は車輪半径、 $b$  は車輪幅である．

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

$$F_z = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{\tau_x(\theta) \sin \theta + \sigma(\theta) \cos \theta\} d\theta \quad (2)$$

### 2.2 Bekker の垂直応力分布モデル

Bekker の垂直応力分布モデルでは、応力が最大となる際の角度  $\theta_m$  を境に、前方  $\sigma_m$  と後方  $\sigma_r$  に分けて以下のように定式化される．

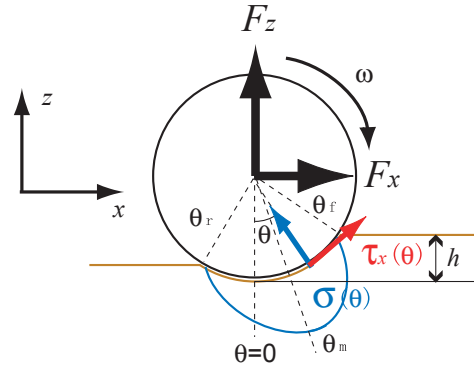


Fig. 2: Wheel-soil contact model on loose soil

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

$$\sigma_r(\theta) = \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \left[ r(\cos \{ \theta_f - \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} (\theta_f - \theta_m) \} - \cos \theta_f) \right]^n \quad (4)$$

ここで、 $k_c$ ,  $k_\phi$ ,  $n$  はそれぞれ土壌に依存する係数であり土壌固有のパラメータである．また、 $\theta_f$ ,  $\theta_m$ ,  $\theta_r$  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 (5)-(7) で表される．

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

$$\theta_r = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{\kappa h}{r} \right) \quad (6)$$

$$\theta_m = (a_0 + a_1 s) \theta_f \quad (7)$$

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が利用される．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  $\omega$ 、車輪半径  $r$  を用いて、

$$s = 1 - v_x / r\omega \quad (8)$$

と表される．

以上のように、Bekker が示した垂直応力分布モデルでは、力の発生範囲を表す  $\theta_f$ ,  $\theta_r$  を、沈み込み量  $h$  を用いて幾何学的に求められており、これはみかけで車輪が路面に接地している範囲を表している．また、 $\theta_m$  については、経験的に求められた値  $a_0$ ,  $a_1$  が利用される．

### 2.3 せん断応力分布モデル

車輪に発生するせん断応力  $\tau_x$  は、Janosi, Hamamoto らによって、次のように定式化された [9] ．

$$\tau_x(\theta) = \tau_{max}(\theta)[1 - e^{-j_x(\theta)/k_x}] \quad (9)$$

$$\tau_{max}(\theta) = c + \sigma(\theta) \tan \phi \quad (10)$$

ここで  $j_x$  は土壌変形量と呼ばれ、

$$j_x(\theta) = r[\theta_f - \theta - (1 - s)(\sin \theta_f - \sin \theta)] \quad (11)$$

によって計算される．また  $c$ 、 $\phi$  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量である．

#### 2.4 駆動力の推定に必要な要素

以上に述べてきた垂直応力、およびせん断応力の分布モデルによると、各土壌パラメータ、スリップ率、沈下量が同時に分かれば、駆動力を推定することができる．しかしながら、Bekker の垂直応力分布モデルでは、応力分布の発角度が車輪と土壌の接地角度であるとの仮定に基づいている．1章で述べたように、筆者らの行った実験によると、垂直応力の分布範囲は従来考えられていたよりはるかに小さくなるため、Bekker の垂直応力分布モデルは成り立たない．また仮に  $\theta_f$ 、 $\theta_r$  が正しく求めたとしても、 $\theta_m$  を決定するための  $a_0$ 、 $a_1$  を正確に仮定しなければ、垂直応力の分布が正しく求まらず、そのためにせん断応力も正しく求まらない．

そこで本研究では、垂直応力の分布を、本研究で開発した圧力センサを内蔵したホイールを用いて取得することとする．取得した垂直応力により、式(10)-(11) からせん断応力分布  $\tau_x(\theta)$  の推定が可能となり、駆動力を求めることができる．ここで、せん断応力分布  $\tau_x(\theta)$  の推定には、土壌パラメータ  $c$ 、 $\phi$ 、 $k_x$ 、スリップ率  $s$  が必要であるが、土壌パラメータ  $c$ 、 $\phi$  は土壌が既知であれば、土壌試験を行うことにより求めることが可能である．またスリップ率  $s$  は、筆者らが開発したビジュアルオドメトリを用いてオンラインで推定する [10]．土壌パラメータ  $k_x$  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が、 $k_x$  のパラメータの推定方法については、4.2節で述べる．したがって、垂直応力分布  $\sigma(\theta)$  を直接測定することにより、せん断応力分布  $\tau_x(\theta)$  と駆動力  $F_x$  の推定が可能となる．

### 3 垂直応力分布測定実験

本実験では、測定した垂直応力分布より駆動力を推定するために、応力分布測定ホイール (BFSA-Wheel) をローバートストベッドに搭載し、走行中のローバートの車輪の垂直応力分布を測定した．本章では、垂直応力分布測定実験の方法と測定結果について述べる．

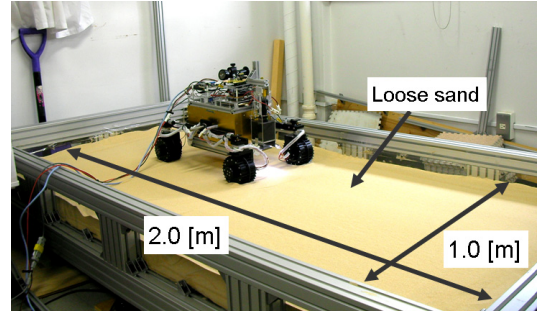


Fig. 3: An overview of the experimental field

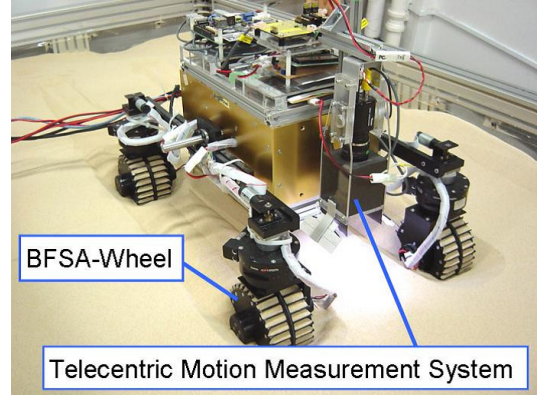


Fig. 4: An overview of the rover

#### 3.1 実験概要および実験方法

前述に示す通り、スリップ率と応力分布および駆動力には密接な関係がある．そこで、本実験では図3に示すような砂を敷き詰めた  $1 [m] \times 2 [m]$ 、土壌深さ約  $0.15 [m]$  のフィールドを傾けて、ローバートを傾斜方向に登板させることにより、ローバートが走行する際の車輪のスリップ率を変える．なお、本実験フィールドは、約  $20$  度までの任意の斜度に設定することが可能である．テストベッドには、図4に示す本研究室が開発した4輪駆動のローバートを用いる．

斜面登板時のローバートのスリップ率は、筆者らが開発したビジュアルオドメトリ (テレセントリック運動計測システム) をローバートに搭載することで、オンラインの推定を行う．本センサは、砂上用移動ロボットのために開発されたもので、ビジュアルオドメトリにより車体速度を計測し、車輪速度はエンコーダより取得することで、式(8)を用いてスリップ率を推定することが可能となる．

#### 3.2 応力分布測定ホイール (BFSA-Wheel)

本実験で使用する応力分布測定ホイール (BFSA-Wheel : Wheel with Build-in Force Sensor Array) を図5に示す．応力分布測定ホイールは車輪表面に圧力センサが取り付けられており、転動している車輪下部に加わる垂直応力を直接測定することが可能である．また車輪内部には、センサ用回路、マイコン、通信モジュール、バッテリーが格納され、マイコン

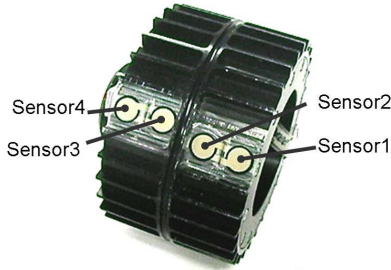


Fig. 5: Sensors array on the wheel

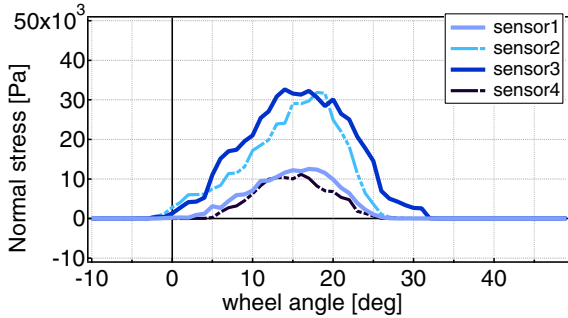


Fig. 6: Experimental result of a normal stress distribution

で獲得したセンサ情報を無線通信でPCに送信することが可能である。

車輪表面には車輪回転方向に6度ずつ左右交互にパドルが付いており、図5に示すように4つの圧力センサが車輪幅方向に並べて取り付けられている。車輪幅方向にセンサを並べることで、車輪に発生する幅方向の応力分布を測定することができる。本実験では、応力分布ホイールを、ローバーの右前輪(図4)に取り付け、垂直応力分布の測定を行った。

### 3.3 実験条件

一般に惑星探査ローバーは、地上との通信遅れのため安全性を考慮して10 [mm/s]程度の低速に設定される。そこで本研究でも車輪回転速度を10.4 [mm/s]とし、路面斜度0度から8度までの2度刻みでそれぞれにおいて3回ずつ応力分布測定を行った。対象とする土壌は、豊浦標準砂と呼ばれる砂を使用した。この豊浦標準砂は、粒形が均一であり、粘着力がほとんど無い。つまり土壌パラメータ  $c \approx 0$  となることが特徴である。

### 3.4 実験結果

実験によって4つのセンサから得られた応力分布の一例を図6に示す。なお、各センサの値は、3回の測定の平均値である。全ての測定結果において、sensor2の値は最も内側のsensor1の値より大きく、sensor3の値は最も外側のsensor4より大きくなる傾向が見られた。これは、ローバーが走行中、車輪には、車輪幅方向に均一に応力がかかっているのでは

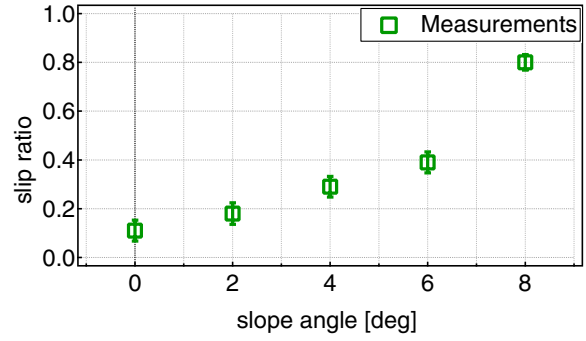


Fig. 7: Slope angle vs. Slip ratio measured by the telecentric camera system

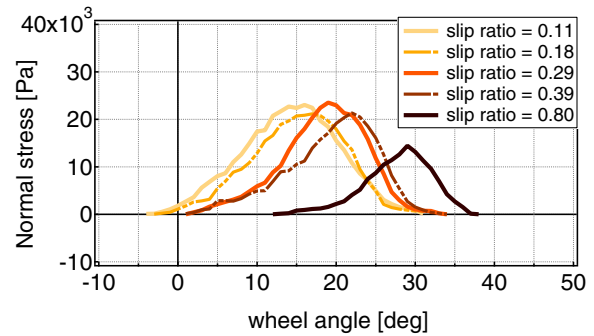


Fig. 8: Comparison of distribution: Normal stress

なく、主に中心部分に力がかかっていることを示している。したがって、駆動力推定には、4つのセンサ値を平均した垂直応力分布を用いることとした。

次に、各斜度に対するスリップ率の推定結果を図7に示す。この結果をもとに作成した垂直応力分布(sensor1-sensor4の平均値)とスリップ率の関係を表したグラフを図8に示す。このグラフより、スリップ率が増加するに従い、垂直応力分布が徐々に前方に移動していることがわかる。この現象は、豊浦標準砂の粘着力が低いため、車輪下の砂は圧縮されず、車輪のスリップが大きくなるに連れて沈下量が大きくなるためであると考えられる。さらに、垂直応力の発生範囲(平均約30度)は、実際に車輪と土壌が接地している範囲(平均70度程度)よりはるかに狭い範囲であることも確認した。

## 4 土壌パラメータの推定

駆動力の推定には、せん断応力モデルに用いる土壌パラメータ  $k_x$  が必要となる。本章では、土壌パラメータ  $k_x$  の推定方法について述べた後、実験で測定した垂直応力分布を用いて、 $k_x$  の推定を行った結果について述べる。

### 4.1 倍率係数 $M$ について

ローバーは走行時、車輪表面だけでなく、車輪表面についているパドルの部分でも本体荷重を支えて

いる．そのため，センサが取得した垂直応力の値は，実際車輪が発生する応力値より小さくなる可能性がある．ただし，応力分布の形は，大きな変化がないと予想される．そこで本研究では，実際の垂直応力分布を推定するため，センサで取得した垂直応力分布を拡大するための倍率係数  $M$  を導入することとした．倍率係数  $M$  の値は，スリップ率が変化すると車輪の沈み込みも変化することにより，パドルにかかる垂直応力が異なると予測されるため，一定値ではないと考えられる．そこで，倍率係数  $M$  は，各スリップ率に対し，各々計算することとした．

#### 4.2 土壌パラメータ $k_x$ の推定手法

せん断応力モデルにおける土壌パラメータ  $k_x$  は，正確な値を推定することが困難な係数である．そこで，本研究では，実験で測定した垂直応力分布より， $k_x$  を以下の手順で推定する．推定に用いる  $k_x$ ， $M$  以外の各パラメータの値については，表 1 に示す．

1. 測定した垂直応力分布  $\sigma(\theta)$  より，式 (9)-(11) を用いてせん断応力分布  $\tau_x(\theta)$  を算出する．
2. 式 (1)-(2) と式 (12)-(13) に，手順 1 で求めた垂直応力分布  $\sigma(\theta)$ ，せん断応力分布  $\tau_x(\theta)$  を代入し，駆動力  $F'_x$ ，垂直抗力  $F'_z$  の推定値を算出する．
3. 駆動力の理論値  $F_x$  と垂直抗力の理論値  $F_z$  と推定した駆動力  $F'_x$ ，垂直抗力  $F'_z$  をそれぞれ比較し，誤差の 2 乗の合計を求める．
4. 土壌パラメータ  $k_x$  と倍率係数  $M$  を変化させ，手順 1～3 を繰り返す．計算した誤差の 2 乗の合計が最小となるものを，最終的な  $k_x$ ，倍率係数  $M$  とする．

ここで，手順 3 において，推定した駆動力  $F'_x$  と垂直抗力  $F'_z$  と比較する駆動力と垂直抗力の理論値  $F_x$ ， $F_z$  は，次式によって求めた値を用いる．図 9 に示すように，車輪質量を  $m$ ，走行路面の斜度を  $\alpha$ ，重力を  $g$  とした場合，水平方向と垂直方向の力のつり合いから，

$$F_x = mg \sin \alpha \quad (12)$$

$$F_z = mg \cos \alpha \quad (13)$$

として求める．

#### 4.3 土壌パラメータの推定結果

各スリップ率において，4.2 節で示した手法により土壌パラメータ  $k_x$  を推定した結果を表 2 に示す．この結果より，スリップ率が 0.8 の場合を除き， $k_x$  がほぼ一定の値となっていることがわかる．したがって，スリップ率が低い領域では，斜度 0 度のときに推定した  $k_x$  を定数として用いても，測定した垂直応力分布を用いた駆動力の推定が可能となる．

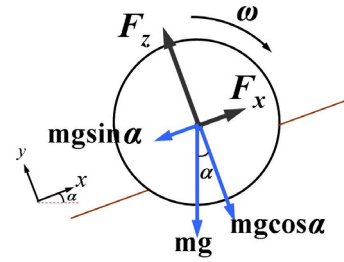


Fig. 9: Drawber pull and vertical force on the slope

Table 1: Wheel-soil interaction parameters and values

Parameters	Values	Description[Unit]
$r$	0.055	wheel radius [m]
$b$	0.064	wheel width [m]
$mg$	28.92	wheel weight [N]
$c$	0	cohesion stress [kPa]
$\phi$	38.0	friction angle [deg]

## 5 駆動力の推定

斜度 0 度のときの土壌パラメータ  $k_x$  を用いて駆動力の推定を行った．その方法と結果について述べる．

### 5.1 駆動力推定の流れ

駆動力推定の流れを以下に示す．

1. 斜度 0 度の場合において，4.2 節で述べた手法により土壌パラメータ  $k_x$  の推定を行う．
2. 各斜度の場合それぞれにおいて，測定した垂直応力分布  $\sigma(\theta)$  から，手順 1 で推定した土壌パラメータを用いて式 (9)-(11) でせん断応力分布  $\tau_x(\theta)$  算出し，式 (2) から垂直抗力  $F'_z$  を推定する．
3. 推定した垂直抗力  $F'_z$  と垂直抗力の理論値  $F'_z$  を比較し，誤差の 2 乗が最小となる倍率係数  $M$  を決定する．
4. 最後に，推定した土壌パラメータ  $k_x$  と  $M$  を用いて，式 (1) より駆動力  $F'_x$  を推定する．ここで倍率係数  $M$  は，各斜度で求めた値を用いる．

### 5.2 駆動力推定結果および考察

各スリップ率における駆動力の推定結果を図 10 に示す．グラフより，スリップ率 0.11～0.39 の範囲では，推定駆動力と理論駆動力がよく一致していることがわかる．しかしながら，スリップ率が 0.8 のとき，推定駆動力には大きな誤差が生じている．この誤差について以下のように考察する．ローバーの走行中，スリップ率が低い場合には，車輪が土壌を踏み固めながら進んでいくが，スリップ率が高くな

Table 2: Estimated result of  $k_x$

Slip ratio	Estimate : $k_x$ [m]
0.11	0.0072
0.18	0.0073
0.29	0.007
0.39	0.0066
0.8	0.0026

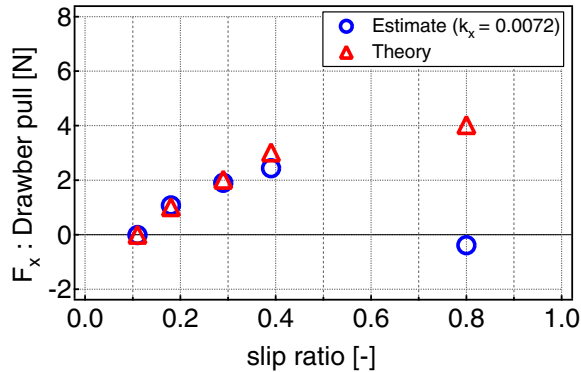


Fig. 10: Comparison of drawbar pull

ると、車輪は沈み土壌が崩れていく中をもがくように進んでいく様子が見られた。土壌パラメータ  $k_x$  は、変位 - せん断応力曲線の時定数に対応するとともに土壌と車輪の形状に依存する係数であるため、スリップ率が低い領域と高い領域では、土壌の状態が変化したことにより、一定の  $k_x$  を用いると、スリップ率の高い領域では大きな誤差が生じたと考えられる。

以上より、斜度0度の場合に推定した土壌パラメータ  $k_x$  を用いて、スリップ率の低い領域では、測定した垂直応力分布により駆動力を推定することが可能であることを示した。したがって、提案手法を用いると、ローバーが平らな路面を走行したときに推定した土壌パラメータ  $k_x$  で、スリップ率に対する垂直応力分布さえ分かれば、スリップ率が0.1~0.4程度の範囲の駆動力の推定が可能となる。これにより、ローバーの斜面登板性能について事前に予測することができる。

## 6 おわりに

本稿では、テラメカニクスにおける駆動力の推定に必要な応力分布モデルについて説明し、従来の垂直応力分布モデルの問題点について述べた。次に、この問題を解決するために、応力分布測定ホイールで直接測定した垂直応力の分布を駆動力推定に用いる方法を提案した。さらに、提案手法を検証するために、応力分布測定ホイールをローバーに搭載し、

実際に走行するローバーの垂直応力分布測定実験を行った。そして、測定した垂直応力分布より駆動力の推定を行なった結果、提案手法を用いて駆動力の推定が可能であることを示した。

本稿では、テラメカニクスにおいて標準となる土壌上での駆動力の推定結果について示したが、今後、様々な土壌、車輪径やローバーの重量を変えた場合について、提案手法の有効性について検証していく予定である。

## 参考文献

- [1] G.Ishigami, A.Miwa, K.Nagatani and K.Yoshida : "Terramechanics-Based Model for Steering Maneuver of Planetary Exploration Rovers on Loose Soil," *The Journal of Field Robotics*, vol. 24, Issue 3, pp. 233-250, 2007.
- [2] M.G.Bekker : "Off-The-Road Locomotion," Ann Arbor, MI, USA, *The University of Michigan Press*, 1960.
- [3] J.Y.Wong : "Theory of Ground Vehicles," John Wiley & Sons, 1978.
- [4] I.Shmulevich, D.Ronai, D.Wolf : "A New FieldSingle Wheel Tester," *Journal of Terramechanics*, vol. 3, pp. 133-141, 1996 .
- [5] K.Iagnemma, H.Shibly, S.Dubowsky : "On-line traction parameter estimation for planetary rovers," *Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3142-3147, 2002.
- [6] Y.Nohse, K.Hashiguchi, M.Ueno : "A Measurement of Basic Mechanical Quantities of Off-The-Road Traveling Performance," *journal of Terramechanics*, vol. 4, pp. 359-371, 1991.
- [7] 吉田和哉, 永谷圭司, 山名克尚, 石上玄也 : "応力分布測定ホイールを用いた土壌パラメータの推定," ロボティクス・メカトロニクス講演会' 08 講演論文, pp. 2P2-A19, 2008.
- [8] Bekker, G : "Introduction to Terrain-Vehicle Systems," Ann Arbor, MI, USA, *University of Michigan Press*, 1969.
- [9] Z.Janosi, B.Hamamoto : "The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicle," *Proc of the 1st Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems*, Torio, 1961.
- [10] 池田礼子, 永井伊作, 石上玄也, 永谷圭司, 吉田和哉 : "テレセントリックカメラを用いた車輪型砂上移動ロボットのオンラインスリップ推定," 第8回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会論文集, pp. 1F4-3, 2007.