

# 軟弱土壌における車輪の二次元応力分布の計測\*

比嘉 翔弥<sup>\*1</sup>, 須藤 真琢<sup>\*1</sup>, 永谷 圭司<sup>\*2</sup>, 吉田 和哉<sup>\*2</sup>

## Measurement of 2-Dimensional Stress Distribution of Wheels on Loose Soil

Shoya HIGA<sup>\*1</sup>, Masataku SUTOH<sup>\*1</sup>, Keiji NAGATANI<sup>\*2</sup> and Kazuya YOSHIDA<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Aerospace Engineering, Tohoku University  
6-6-01 Aramaki-Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

On the Moon or Mars, common exploration targets for mobile robots (rovers) are covered in loose soil, which can cause slippage. To reduce the risk of wheel slippage, analysis of the mechanics of contact interaction between the soil and wheel is important. Various normal stress distribution models have been proposed until now, but most models assume that the stress distribution is uniform across the width of the wheel that for the sake of ease. This assumption is inaccurate. Therefore, in this research, we measured 2-dimensional normal stress distributions of a wheel traversing over soft soil, with 10 data points across the width of the wheel. In addition, the curved surfaces of each 2-dimensional normal stress distribution have clear relationships to the wheel's center of gravity at each time of measurement. Finally, we intend to use this data to build a 2-dimensional stress distribution model for a wheels on soft sand. In this paper, we report the results of a 2-dimensional stress distribution experiment and the relationship between the stress distributions and wheel's center of gravity.

**Key Words** : Lunar/Planetary Exploration Rover, Terramechanics, Loose soil, Normal Stress Distribution

### 1. はじめに

近年、主要先進国において、月・惑星移動探査ロボット（ローバー）を用いた惑星探査が実行されている。ローバーの探査対象である月や火星などの地表面は、細かな砂で覆われた軟弱土壌であり、車輪のスリップが容易に引き起こされる。車輪がスリップすると、目標経路への追従を困難にするだけでなく、最悪の場合、ローバーの車輪が土壌に埋まって身動きが取れなくなる。実際に、2004年に火星に送り込まれた、米国 NASA/JPL の Mars Exploration Rover A (Spirit) は、砂地を通過しようとした際に、車輪が砂に埋もれ、身動きが取れなくなった。

以上に示すように、車輪のスリップは、惑星表面上の探査ミッションにおいて、深刻な問題であると言える。このような問題は、事前に回避することが望ましく、そのためには、土壌と走行機械の接触相互作用に関する力学（テラメカニクス）に基づいた車輪の走行解析が重要となる。テラメカニクスは、1960年代に M.G.Bekker が基礎的な車輪の力学モデルを構築し<sup>(1)(2)</sup>、J.Y.Wong や A.R.Reece らにより牽引力モデルの構築及び改良がなされてきた<sup>(3)</sup>。軟弱土壌上で車輪が回転すると、車輪と土壌の間に垂直応力が発生し、同位置にせん断応力が発生する。発生した垂直応力およびせん断応力から駆動力が導けるため、車輪にかかる垂直応力分布を求めることは極めて重要である。そこで、これまで車輪円周方向の応力分布モデルの提案が行われてきたが、その多くは、簡単のため、車輪幅方向に同一の応力が発生すると仮定して扱われるものが多く、実際の応力分布形状をモデル化した例はほとんどない。そこで、本研究では、従来の車輪円周方向の応力分布に加え、幅方向の応力分布も計測し、「軟弱土壌における車輪の二次元応力分布モデルの構築」を目指すこととした。

\* 原稿受付 2013年7月1日

<sup>\*1</sup> 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01）

<sup>\*2</sup> 正員，東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01）

Email: shoya@astro.mech.tohoku.ac.jp

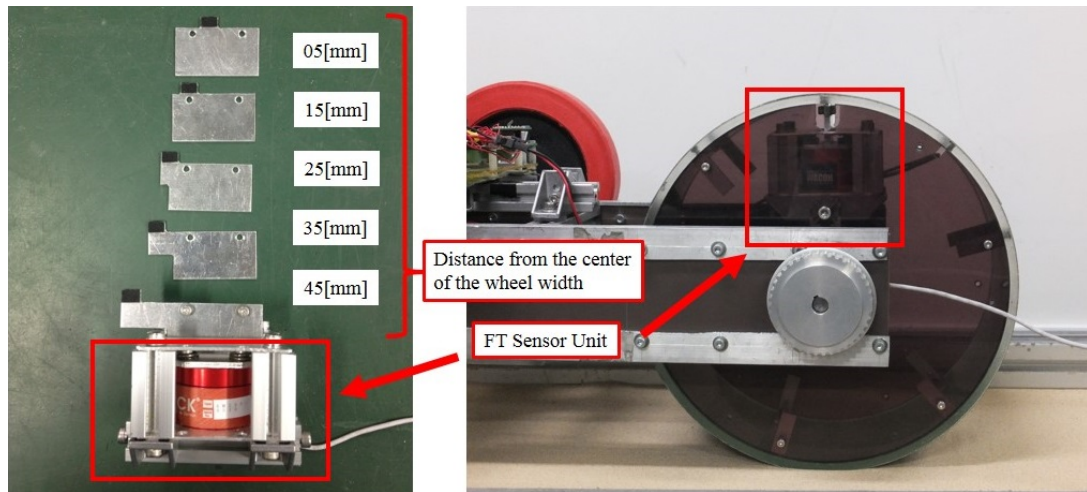


Fig. 1 FT Sensor Unit(FT Sensor + Contact Parts)

本稿では、軟弱土壌上で車輪が回転する際に働く力の関係について説明し、軟弱土壌における車輪の二次元応力分布形状を把握することを目的として行った、垂直応力分布計測実験およびその結果、考察について述べる。

## 2. 車輪に働く力の関係

まず、車輪に働く力の関係の基礎式として、Bekker による垂直抗力およびけん引力モデルを示す。軟弱土壌上における車輪の垂直抗力は、

$$F_z = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau(\theta) \sin \theta + \sigma(\theta) \cos \theta \} d\theta \quad (1)$$

で表され、けん引力は、

$$F_x = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta \} d\theta \quad (2)$$

で表される。これらは、垂直応力  $\sigma$  およびせん断応力  $\tau$  によって求められる。ここで、 $r, b$  はそれぞれ車輪半径、車輪幅を表し、 $\theta_f, \theta_r$  はそれぞれ、鉛直下向きを基準に、車輪が土壌と接触する角度、車輪が地面から離脱する角度を表す。

車輪に発生する応力分布が正確に計測できているか確認するためには、ローバー重量と垂直抗力  $F_z$  の釣り合いを確認するという手法がある。先行研究において、車輪に薄型の圧力センサを4つ貼り付け、垂直応力分布の計測を行った結果、車輪幅方向に対して応力分布は一樣ではないことが確認されているが、車輪幅方向の計測の解像度が低いために、車輪幅での平均値を用いている<sup>(4)</sup>。そこで、車輪幅方向の応力分布も考慮した垂直応力分布モデルを構築するため、車輪幅方向の応力の測定点を10箇所に増やし、車輪円周方向と車輪幅方向の両方を実験的に求めることとした。

## 3. 垂直応力分布計測実験

軟弱土壌における車輪の二次元応力分布モデルを構築するためには、車輪に生じる応力分布の詳細な形状を把握する必要がある。また、車体重心が車輪上部にない場合にも考慮する必要がある。そこで、車輪の二次元応力分布形状を把握するため垂直応力分布測定実験を行った。

Table 1 Specification of Two Wheel Rover

Size [mm]	L830 × W210 × H250
Mass [kg]	13.65
Wheel size [mm]	φ250 × W100

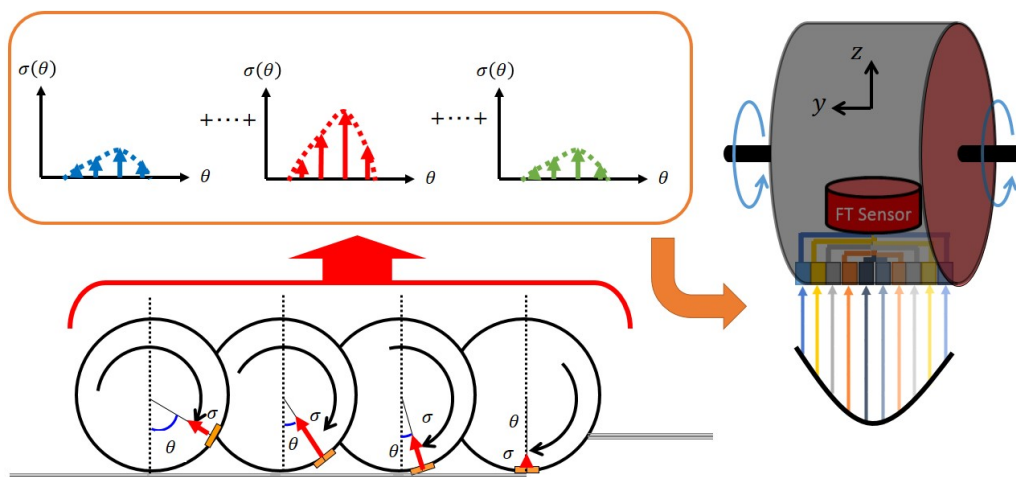


Fig. 2 Measurement Process

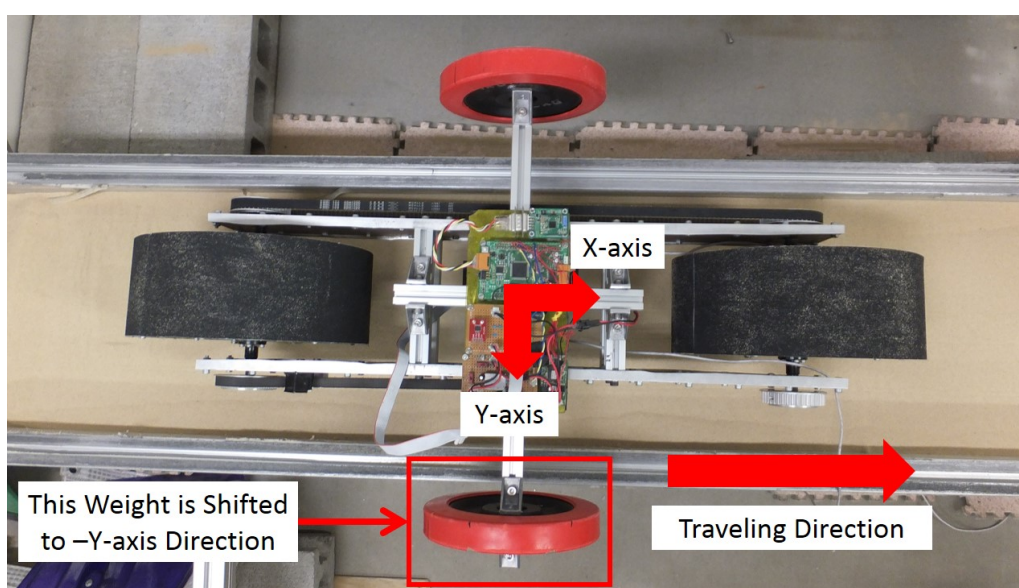


Fig. 3 Coordinate Representation of Two Wheel Rover

### 3.1 実験装置および実験環境

実験装置として、本研究グループが所有する二輪ローバーを用いることとした。Table.1 に、二輪ローバーの仕様を示す。二輪ローバーの前輪内に 6 軸力覚センサユニットを取り付けることで、車輪の回転角に対応した応力の計測が可能となる。

6 軸力覚センサユニットは、5 種類の接触部品と、6 軸力覚センサから構成される (Fig.1)。それぞれの接触部品の接触面積は、 $2.4[\text{mm}] \times 10.4[\text{mm}]$  である。これらの接触部品を付け替えて実験を行うことにより、車輪幅方向 10 箇所に応力分布の計測ができる。

実験環境には、長さ  $1.6[\text{m}] \times$  幅  $0.3[\text{m}]$  の砂場を使用した。この砂場に、豊浦標準砂と呼ばれる、粒径が均一で粘着力がほぼゼロの砂を平坦となるように敷き詰め、実験を行った。

### 3.2 実験内容

まず、予備実験として、車体重量を  $6.75[\text{kg}]$ ,  $9.45[\text{kg}]$ ,  $12.07[\text{kg}]$  と変えて二次元応力分布の計測を行い、二次元応力分布の鉛直成分と車体重量が釣り合うかどうかを検証した。その結果、それぞれ、84%, 81%, 95%の一致率を示した。このことから、車体重量が重い方が推定の精度が良くなることが分かったため、本実験では、車体重量を  $13.65[\text{kg}]$  とし、上記の実験を行うことで、重心位置が応力分布形状に与える影響について検証する。

Fig.2 に二次元応力分布を取得するプロセスを示す。まず、Fig.3 に示すように、砂場に二輪ローバーを置き、車輪

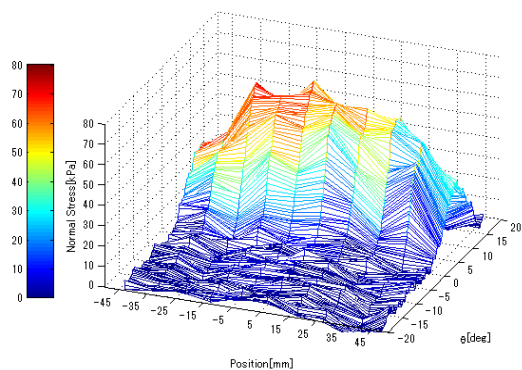


Fig. 4 2-Dimensional Stress Distribution  
If the Center of Gravity is Center

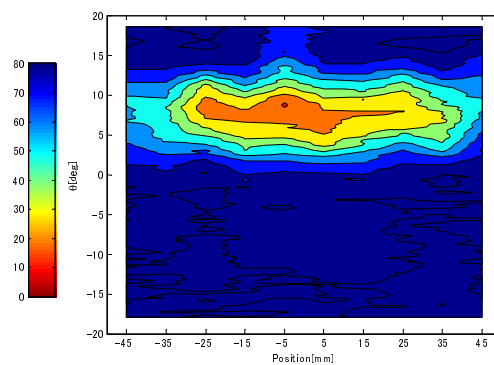


Fig. 5 Contour Line If the Center of Gravity is Center

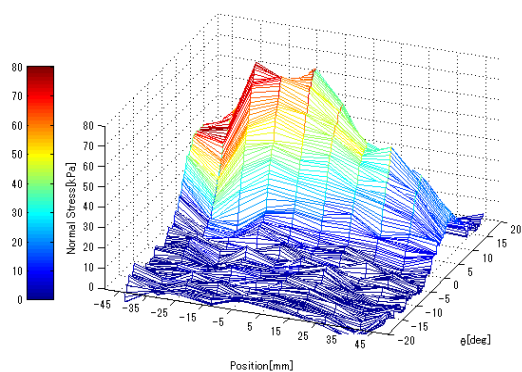


Fig. 6 2-Dimensional Stress Distribution  
If the Center of Gravity is Shifted  
10 mm to -Y axis direction

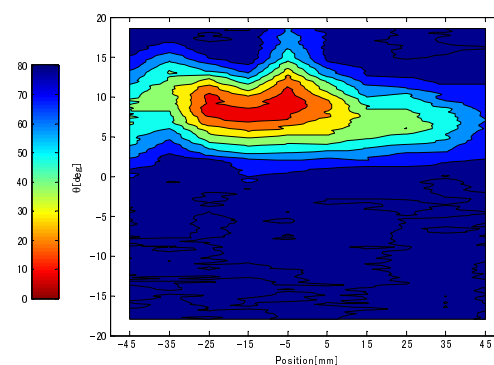


Fig. 7 Contour Line If the Center of Gravity is Shifted  
10 mm to -Y axis direction

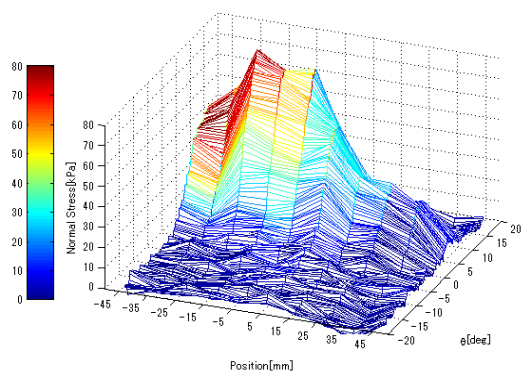


Fig. 8 2-Dimensional Stress Distribution  
If the Center of Gravity is Shifted  
20 mm to -Y axis direction

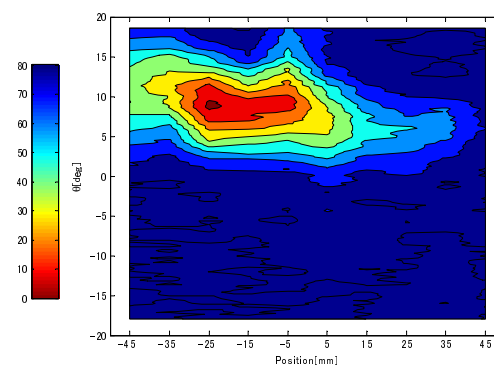


Fig. 9 Contour Line If the Center of Gravity is Shifted  
20 mm to -Y axis direction

を回転させて砂と車輪が接触する部分の応力を計測する。このとき、1箇所の計測につき、3回実験を繰り返す、平均値を採用する。同様にして、6軸力覚センサユニットの接触部品を取り替えて、車輪幅方向10箇所での円周方向の応力分布の計測を行い、10箇所それぞれの円周方向の応力分布を幅方向に重ね合わせるにより二次元応力分布を得る。

実験条件として、二輪ローバーの重心位置を中央の場合、進行方向に対して右側のおもりをY軸負方向に10mmずらした場合、20mmずらした場合のそれぞれ3条件で二次元応力分布の計測を行うこととした。

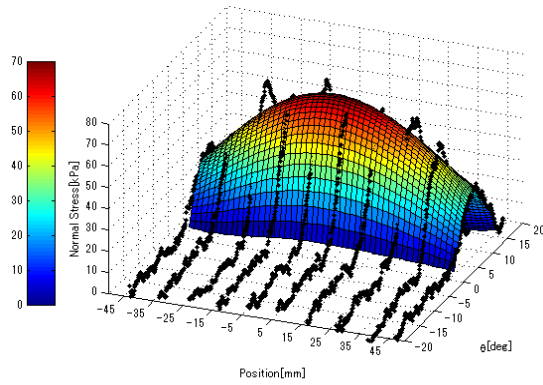


Fig. 10 Curve Fitting If the Center of Gravity is Center

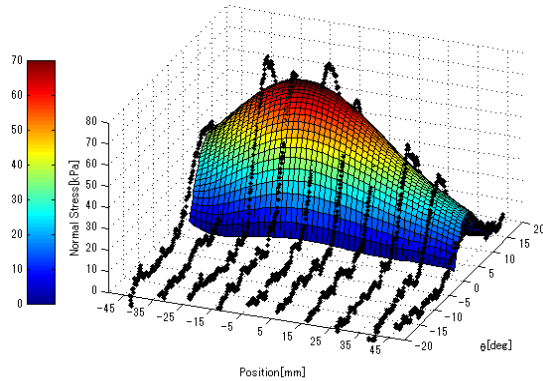


Fig. 11 Curve Fitting If the Center of Gravity is Shifted 10 mm to -Y axis direction

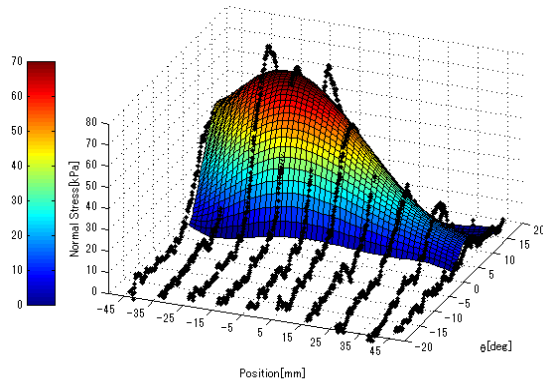


Fig. 12 Curve Fitting If the Center of Gravity is Shifted 20 mm to -Y axis direction

### 3.3 実験結果と考察

Fig.4,6,8 に、応力発生範囲を積分して得られた二次元応力分布を車輪底面から見た時のグラフを示す。グラフ中、横軸は車輪幅方向の測定位置、奥行方向の軸は鉛直下向きを基準とした車輪の角度、縦軸とカラーバーは垂直応力を示す。また、Fig.5,7,9 に、Fig.4,6,8 の等高線図を示す。これらのグラフ中、縦軸には鉛直下向きを基準とした車輪の角度、横軸に車輪幅方向の測定位置を示す。また、カラーバーに、垂直応力を示す。

Fig.4,5 より、重心が中央部にある場合は、車輪幅に対して中央近傍の応力値が高くなっていることが分かる。また、Fig.6,7,8,9 より、重心位置がずれることにより、重心のずれた方向に向かってピークの位置も移動していることが分かる。さらに、重心のずれが大きくなるにしたがって、応力値の高い領域が狭まっていることが分かる。

車輪幅方向での応力分布を比較すると、Fig.5 では、40[kPa] 以上の領域が中央付近 (-35mm~35mm) に広く分布していることが分かるが、Fig.7,9 では、重心がずれた方向に移動していることが分かる。さらに、車輪円周方向での応力分布を比較すると、Fig.5 では、約 2[deg]~14[deg] の間に応力の分布が見られ、Fig.7,9 では、それぞれ進行方向へ応力分布が移動していることが分かる。

### 3.4 車輪の二次元応力分布モデルの構築に向けた基礎検討

軟弱土壌における車輪の二次元応力分布モデルを構築するため、計測した車輪の二次元応力分布について線形最小二乗法による多項式近似を行った。車輪全体に対して応力分布の多項式近似を行えば、高次の多項式になることは明らかであるため、 $2\text{deg} < \theta < 16\text{deg}$  の範囲に限定して多項式近似することにより、3次の $\theta$ と5次の $y$ で構成される多項式で応力分布の近似を行った。式(3)に得られた近似式を示す。

$$f(\theta, y) = p_{00} + p_{10}\theta + p_{01}y + p_{20}\theta^2 + p_{11}\theta y + p_{02}y^2 + p_{30}\theta^3 + p_{21}\theta^2 y + p_{12}\theta y^2 + p_{03}y^3 \\ + p_{31}\theta^3 y + p_{22}\theta^2 y^2 + p_{13}\theta y^3 + p_{04}y^4 + p_{32}\theta^3 y^2 + p_{23}\theta^2 y^3 + p_{14}\theta y^4 + p_{05}y^5 \quad (3)$$

ここで、 $\theta$ は、2章で述べたとおり、鉛直下向きを基準に、車輪が土壌と接触する角度を表し、 $y$ は車輪中央からの位置である。

Fig.10,11,12に高周波成分をカットした元データのプロットならびに近似曲面を示す。元データよりも滑らかな曲面で応力分布を表示することにより、重心位置のずれによって応力分布のピーク位置がずれていることが視覚的に分かる。実際にそれぞれのピークを計算により求めると、重心位置が中央にある場合は、 $\theta = 6.8765[\text{deg}]$ 、 $y = -0.7299$ の位置に $\sigma_z = 67.6455[\text{kPa}]$ となり、-Y軸方向へおもりを10mm移動させた場合は、 $\theta = 7.8521[\text{deg}]$ 、 $y = -11.6838$ の位置に $\sigma_z = 69.8848[\text{kPa}]$ 、-Y軸方向へおもりを20mm移動させた場合は、 $\theta = 8.3302[\text{deg}]$ 、 $y = -17.8353$ の位置に $\sigma_z = 72.6701[\text{kPa}]$ となった。この結果より、重心位置がずれることにより、ピークの位置は重心のずれた方向および進行方向の前方へ移動することが分かる。さらに、ピークの値も大きくなることが分かる。

また、重心位置が中央からずれることにより、応力の勾配が大きくなっていることが分かる。この原因としては、重心がずれることにより、車輪の片側の沈下量が増大した箇所と減少した箇所が存在することになり、車輪の一部に応力が集中したからであると考えられる。

一方で、本近似式では、応力分布を推定するために18のパラメータを求める必要があるため、モデル化を行う上では、実用的でない。そこで、今後は、多項式近似ではなく、他の数式モデルによる応力分布の近似が必要になると考えられる。

## 4. お わ り に

本稿では、車輪の二次元応力分布モデルの構築に先立ち、車輪の二次元応力分布の計測実験について述べ、車輪幅方向の応力分布が一樣ではないことを明らかにした。

また、意図的に重心位置を変化させて二次元応力分布計測実験を行い、重心位置の影響による二次元応力分布形状の変化について検証した。その結果、重心がずれることにより、応力分布のピーク位置も重心のずれた方向へ移動し、応力分布が進行方向に移動する現象を確認した。

一方で、実験の際に二輪ローバーの重心がずれることにより、走行するにつれて重心のずれた方向に車輪が傾くことを目視により確認しているため、斜面横断時の車輪の応力分布も同様の現象が起こることが推測できる。また、重心位置がずれることにより、車輪の沈下量は一樣でなくなることから、今後は、二輪ローバーのロール回転を拘束して、斜面横断時の応力分布形状を明らかにする予定である。これらの計測結果を踏まえて、最終的に、車輪の二次元応力分布モデルの構築を目指す。

## 文 献

- (1) Bekker, M. G.: "OFF-THE-ROAD LOCOMOTION", The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1960
- (2) Bekker, M. G.: "Introduction to Terrain-Vehicle Systems", The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1969
- (3) Wong, J. Y.: "Theory of Ground Vehicle", John Wiley & Sons, 1978
- (4) Keiji Nagatani, Ayako Ikeda, Keisuke Sato and Kazuya Yoshida: "Accurate Estimation of Drawbar Pull of Wheeled Mobile Robots Traversing Sandy Terrain Using Built-in Force Sensor Array Wheel", Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, pp. 2373 - 2378