

軟弱斜面横断時における車輪の二次元応力分布の計測

比嘉 翔弥^{*1}, 永谷 圭司^{*1}, 吉田 和哉^{*1}

Measurement for 2-dimensional Stress Distribution of Wheels Traversing Loose Soil Slopes

Shoya HIGA^{*1}, Keiji NAGATANI^{*1} and Kazuya YOSHIDA^{*1}

^{*1} Department of Aerospace Engineering, Tohoku University
Aoba 6-6-01, Sendai, 983-0852, 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 typical models assumed that the stress distribution is uniform across the width of the wheel. However, when a rover traverses sandy slopes, the actual stress distribution isn't expected uniformly. Therefore, in this research, we measured 2-dimensional stress distributions of a wheel traversing over soft soil. Finally, we intend to use this data to build a 2-dimensional stress distribution model for a wheels on loose soil. In this paper, we report the experimental results of 2-dimensional stress distribution of wheels while it traverses on loose soil slopes.

Key Words : Planetary Rover, 2-dimensional Stress Distribution, Terramechanics

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計画されている。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, 2004年に火星に送り込まれた米国NASA/JPLの Mars Exploration Rover (Spirit) は, 2009年, 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。2010年には, 砂地からの脱出を断念し, その後は静止観測に切り替わることとなった。

以上に示すように, 車輪のスリップは, 月・惑星表面で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⁽¹⁾⁽²⁾, J.Y.WongやA.R.Reeceらにより, けん引力モデルの構築及び改良がなされてきた⁽³⁾。

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, 車輪幅方向に同一の応力が発生すると仮定して扱われており, 実際の応力分布形状を再現できていないのが現状である^{(4)~(6)}。そこで, 著者らは, 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, 現在までに, 平坦な軟弱土壌において, 車輪の二次元応力分布を計測した⁽⁷⁾。

一方, 今後の月や火星での移動探査では, よりチャレンジな地形(例えば, クレータ内部のような急斜面)での探査も求められると予想される。著者らの研究グループでは, 軟弱斜面横断時のローバーの不整地走破性について, 斜面方向へ車体を傾けることにより, ローバーの経路追従性が向上することを, 実験的・解析的に明らかにしてきた⁽⁸⁾。しかしながら, 実際に車輪下部に働く応力分布については, 明らかになっていない。

^{*1} 東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻
(〒983-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)
{shoya, keiji, yoshida}@astro.mech.tohoku.ac.jp

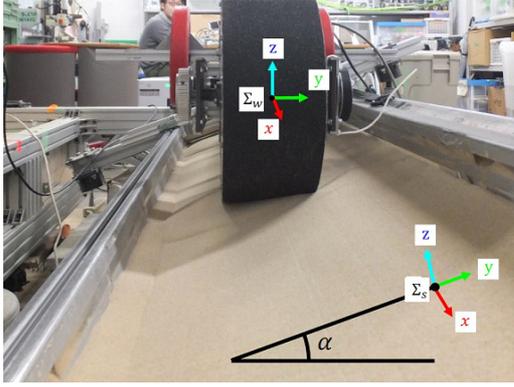


Fig. 1 Coordinate system on a lateral slope

そこで、本研究では、軟弱斜面横断時に車輪下部に発生する応力分布を明らかにすることで、本研究グループが提案した、軟弱斜面横断時における車輪の力学モデルについて検証することを目指す。

本稿では、まず、軟弱斜面横断時に車輪に働く力の関係について説明し、軟弱斜面横断時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、軟弱斜面における車輪の二次元応力分布計測実験について述べる。

2. テラメカニクスに基づいた車輪の走行力学

斜面横断時における車輪の走行力学モデルは、Inotsume らによって、車輪の接地角度を考慮した力学が提案されている⁽⁸⁾。本章では、Inotsume らが提案したモデルに基づいて、斜面横断時に車輪に働く力について紹介する。

2.1 座標系の定義 図1に、斜度 α の軟弱斜面を横断している二輪ローバー試験機を示す。車輪は、斜面に対して、 γ だけ傾いているものとする。ここで、斜面を横断する向きに x 軸、斜面山側の方向を y 軸、斜面に対して垂直上向き方向に z 軸をとる斜面座標系を Σ_s とし、車輪の目標進行方向に x 軸、車輪軸方向に y 軸、車輪に対して垂直上向きに z 軸を取る右手座標系を Σ_w とする。 Σ_w を γ だけ傾けることにより、軟弱斜面に対してエッジを立てて接地する車輪の座標系を表現する。

2.2 車輪-土壌間に作用する力 軟弱斜面において、車輪を斜面側に傾けて接地する場合、車輪が回転すると、車輪-土壌間に $F_j (j = x, y, z)$ の力が作用する。この力は、車輪下部に作用する力 F_{jb} と車輪側面に作用する力 F_{js} から構成される。以下に、関係式を示す。

$$F_j = F_{jb} + F_{js} \quad (1)$$

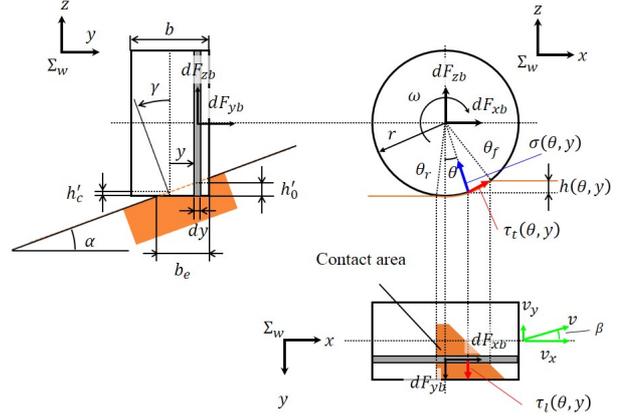


Fig. 2 Forces acting on a sliced wheel element

本稿では、車輪下部に作用する力についてのみ説明し、車輪側面に作用する力についての説明は割愛する。

2.3 車輪下部に作用する力 軟弱土壌上で車輪が回転すると、垂直応力 σ 、円周方向のせん断応力 τ_t および車軸方向のせん断応力 τ_l が発生する。

車輪下部に働く力の微小要素は、図2に示すように、厚さ dy の微小円盤に見立てると、 $dF_{jb} (j = x, y, z)$ で表現することができ、幾何的な関係から以下の式で表現できる。

$$dF_{xb}(y) = r dy \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau_t(\theta, y) \cos \theta - \sigma(\theta, y) \sin \theta \} d\theta \quad (2)$$

$$dF_{yb}(y) = r dy \int_{\theta_r}^{\theta_f} \tau_l(\theta, y) d\theta \quad (3)$$

$$dF_{zb}(y) = r dy \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau_t(\theta, y) \cos \theta + \sigma(\theta, y) \sin \theta \} d\theta \quad (4)$$

ここで、 r は車輪半径を表し、 θ は、鉛直下向きを基準に、車輪が土壌と接触する角度である。また、 θ_f 、 θ_r はそれぞれ土壌への進入角、土壌からの離脱角である。上式の微小円盤に働く力は、次式に示すように、それぞれ車軸方向に積分することにより、各軸に働く力を表すことができる。

$$F_{jb} = \int_{-b/2}^{b/2} dF_{jb}(y) \quad (5)$$

2.4 斜面上での車輪の沈下量 車輪の z 軸上の沈下量を中央沈下量 h'_c とすると、 z 軸から y だけ離れた位置での沈下量 h'_0 は、車輪径が y 軸方向に一様であると仮定すると、幾何的に y の関数として以下のように表現できる。

$$h'_0(y) = y \tan \gamma + h'_c \quad (6)$$

次に、車輪中心から y だけ離れた位置での車輪の切断面を考える。この切断面において、接地領域における

任意の角度 θ での沈下量 $h(\theta, y)$ は、幾何的に次式で得られる。

$$h(\theta, y) = r(\cos \theta - \cos \theta_f(y)) \quad (7)$$

なお、車輪の土壌への進入角 $\theta_f(y)$ および離脱角 $\theta_r(y)$ は、 $h'_0(y)$ を用いて以下のように表される。

$$\theta_f(y) = \cos^{-1} \left(1 - \frac{h'_0(y)}{r} \right) \quad (8)$$

$$\theta_r(y) = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\lambda h'_0(y)}{r} \right) \quad (9)$$

ここで、 λ は離脱角係数であり、 $\lambda \geq 0$ で定義されるが、土壌の性質や車輪表面形状、スリップ率によっては、 $\lambda \geq 1$ となることもあり得る。

2.5 垂直応力分布 回転する車輪表面に発生する垂直応力 σ は、車輪直下よりも前方部分に最大値 σ_m を持つことから、Reece は、最大応力発生角度 θ_m の前方 ($\theta_m < \theta \leq \theta_f$) と後方 ($\theta_r \leq \theta < \theta_m$) で領域を分け、次式で垂直応力分布を表現している。

$$\sigma(\theta) = \begin{cases} (ck'_c + \rho g b k'_\phi) \left(\frac{r}{l_w} \right)^n (\cos \theta - \cos \theta_f)^n & (\theta_m \leq \theta < \theta_f) \\ (ck'_c + \rho g b k'_\phi) \left(\frac{r}{l_w} \right)^n \times \left[\left(\cos \left\{ \theta_f - \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} (\theta_f - \theta_m) \right\} - \cos \theta_f \right) \right]^n & (\theta_r \leq \theta < \theta_m) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 c は土壌粘着力、 ρ は土壌密度、 k'_c, k'_ϕ はそれぞれ土壌固有のパラメータである。加えて、 l_w は $l_w = \min(l_c, b_e)$ という関数で表され、車輪と土壌の接触面の二次元の長さのうち短い方を採用する。 l_c は、接触面の全長を示し、 b_e は有効車輪幅である。

なお、式 (10) において、 θ_m より後方における垂直応力は、前方領域において θ_m からの相対角度が等しい位置に発生する垂直応力の値と等しくなると仮定している。最大応力発生角度 θ_m は、以下の実験式から求まる。

$$\theta_m = (a_0 + a_1 s) \theta_f \quad (11)$$

2.6 せん断応力分布 軟弱土壌上で車輪が回転すると、回転方向と逆向きにせん断応力が発生する。 (θ, y) の位置に発生するせん断応力は、以下の式で与えられる。

$$\tau(\theta, y) = (c + \sigma(\theta, y) \tan \phi) (1 - e^{-j(\theta)/k}) \quad (12)$$

ここで、 ϕ は土壌の内部摩擦角であり、 k 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。また、 $j(\theta)$ は、 θ の位置での土壌変形量であり、円周方向の

土壌変形量 $j_t(\theta)$ と車軸方向の土壌変形量 $j_l(\theta)$ の合成量として、次式で得られる。

$$j(\theta) = \sqrt{j_t(\theta)^2 + j_l(\theta)^2} \quad (13)$$

なお、円周方向の土壌変形量 $j_t(\theta)$ と車軸方向の土壌変形量 $j_l(\theta)$ は、それぞれ以下の式で求まる。

$$j_t(\theta, y) = r \{ (\theta_f - \theta) - (1-s)(\sin \theta_f - \sin \theta) \} \quad (14)$$

$$j_l(\theta, y) = -r(1-s)(\theta_f - \theta) \tan \beta \quad (15)$$

ここで、 s は、スリップ率（目標速度と実際の移動速度の比）であり、

$$s = 1 - \frac{v_x}{r\omega} \quad (0 \leq s \leq 1) \quad (16)$$

と定義される。

車輪円周方向のせん断応力 τ_t および接戦方向のせん断応力 τ_l は、それぞれ以下の式で与えられる。

$$\tau_t(\theta, y) = \frac{v_{jt}}{\sqrt{v_{jt}^2 + v_{jl}^2}} \cdot \tau(\theta, y) \quad (17)$$

$$\tau_l(\theta, y) = \frac{v_{jl}}{\sqrt{v_{jt}^2 + v_{jl}^2}} \cdot \tau(\theta, y) \quad (18)$$

ここで、 v_{jt} と v_{jl} は、それぞれ車輪円周方向および車軸方向の土壌滑り速度であり、以下の式から得ることができる。

$$v_{jt}(\theta) = r\omega \{ 1 - (1-s) \cos \theta \} \quad (19)$$

$$v_{jl}(\theta) = -r\omega(1-s) \tan \beta \quad (20)$$

3. 軟弱斜面における車輪の二次元応力分布の計測

軟弱斜面横断時において、斜面方向に車輪を傾けた場合、車輪両端の沈下量は異なる。そのため、平坦な軟弱土壌で車輪下部に発生する応力分布とは、分布形状が異なることが予想される。

そこで、本研究では、軟弱斜面において、車輪を斜面方向に傾け、車輪の z 軸が鉛直となる姿勢で斜面横断をした時の応力分布を計測した。

本章では、計測に用いた装置、環境、計測手順について説明し、実際に得られた応力分布形状について考察する。

3.1 計測装置 計測装置として FT センサユニットを使用する。FT センサユニットは、6 軸力覚センサ (FT センサ) と薄板で製作した 5 種類の接触部品から構成される (図 3)。5 種類の接触部品は、車輪中央からの距離が 00–10mm, 10–20mm, 20–30mm, 30–40mm, 40–50mm であり、それぞれの接触部品の接触面積は、2.4mm×10.4mm である。これらを使用する

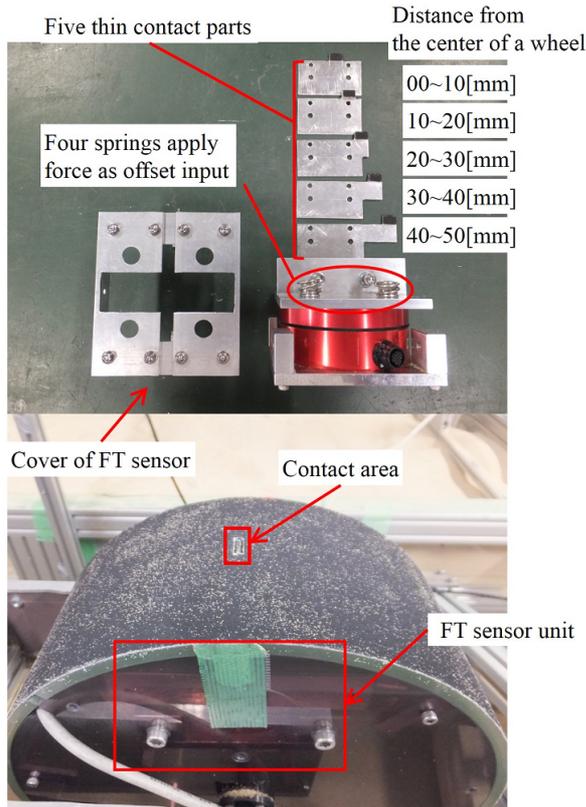


Fig. 3 FT Sensor Unit (FT Sensor + Contact Parts)

ことで、合計 10ヶ所の円周方向応力分布を計測することができる。また、6 軸力覚センサの不感帯の影響を考慮し、4 つのばねを用いて、予めオフセット力を与えることで、計測値が不感帯の範囲に入らないように工夫している。

この FT センサユニットを、本研究グループが所有する二輪ローバーの後輪部に取り付け、軟弱土壌上で走行させることにより、車輪の回転角に対応した応力の計測が可能となる。表 1 に、二輪ローバーの仕様を示す。

3.2 計測環境 図 4 に示すように、計測環境として、長さ 1.6m × 幅 0.3m の砂場を使用した。

Table 1 Specification of Two Wheel Rover

Size [mm]	L830 × W520 × H1190 (include 1m pole)
Mass [kg]	14.8
Wheel size [mm]	φ250 × W100

Table 2 Mechanical properties of Toyoura Standard Sand (JIS R 5201)

Bulk density ρ [g/cm ³]	Particle size [μm]	Cohesion c [kPa]	Internal friction angle ϕ [deg]
1.33 -1.49	106 -300	0.0	38.0

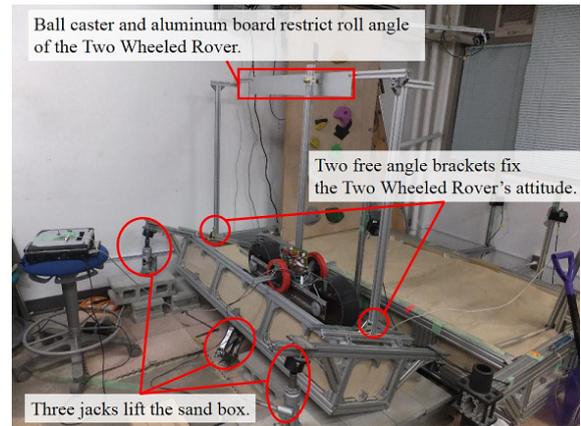


Fig. 4 Experimental Environment

この砂場は、3 つのジャッキで片側を持ち上げることにより、約 20deg までの傾斜角をもつ軟弱斜面を形成することができる。また、車輪の姿勢を一定にするために、二輪ローバーに長さ 1m の棒を固定し、その棒の先に取り付けたボールキャスターをアルミ板のガイドで支持している。スリップ角を考慮してアルミ板を斜めに取り付けることにより、常に二輪ローバーの姿勢を一定に保ちながら計測することが可能である。

本研究では、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敷き詰めて耕し、平坦になるように均した状態で計測を行う。

3.3 計測手順 本研究では、以下に示す手順により、軟弱斜面横断時における車輪の二次元応力分布の計測を行う。

- (1) 6 軸力覚センサに、接触部品を取り付け、図 3 下図に示すように、後輪内部に固定する。それぞれの接触部品ごとに、(2)–(8) の手順を繰り返す。
- (2) 3 つのジャッキを使用して、砂場を任意の斜度 α まで傾ける。
- (3) 車輪の姿勢角 γ だけアルミ板を斜面側へ傾ける。(今回は、 $\alpha = \gamma$ の条件で計測する。)
- (4) 土壌を耕し、斜面に平行になるように、治具を用いて均す。
- (5) 二輪ローバーを試走させ、スリップ角に沿うようにアルミ板の角度 (Yaw 角) を調整する。
- (6) 走行の前後で、二輪ローバーの姿勢が一定になるまで、(4)–(5) の手順を繰り返して調整する。
- (7) 二輪ローバーの姿勢が一様になる条件において、軟弱斜面上で二輪ローバーを走行させ、車輪回転角に応じた垂直応力の計測を行う。
- (8) 同一斜面で 3 回計測し、斜度を変更して同様に計測する。

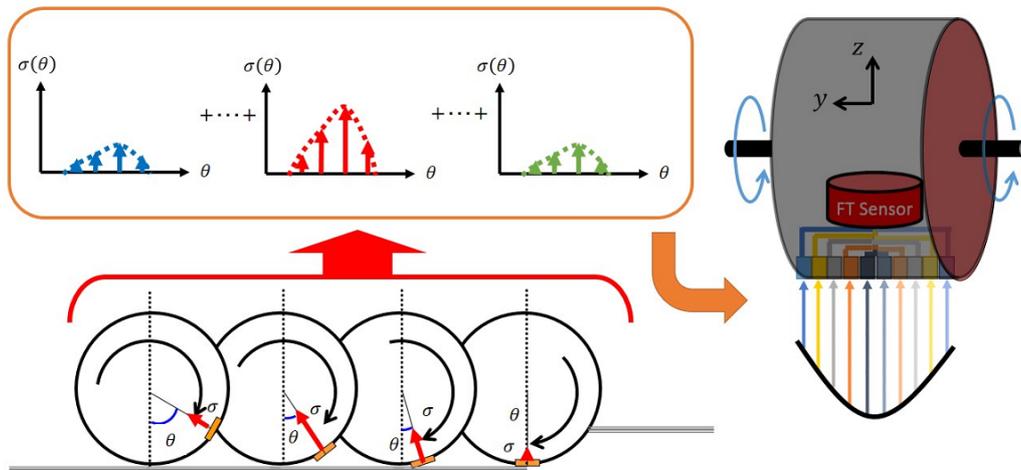


Fig. 5 Measurement Process

上記手順により、10ヶ所の円周方向の応力分布を計測し、それらを重ね合わせるにより、二次元応力分布を完成させることができる(図5)。

3.4 計測結果と考察 図6-(a)に平坦な軟弱土壌で走行したときの二次元応力分布の計測結果を、図6-(b),(c),(d)に、軟弱斜面をエッジを立てて横断走行した時の二次元応力分布の計測結果を示す。縦軸に車輪幅方向の位置、横軸に鉛直下向きを基準とした車輪の回転角、カラーバーは応力値を表している。なお、グラフの右方向 $+\theta$ が進行方向であり、グラフの上側が斜面の山側である。

これらの結果で共通して言えることは、応力分布が車輪下部($\theta = 0$)よりも前方に分布するという事である。以下、平坦な軟弱土壌を走行する場合の応力分布(図6-(a))と、軟弱斜面横断時の応力分布(図6-(b),(c),(d))について考察する。

平坦な軟弱土壌を走行する場合、車輪の土壌への進入角および離脱角は、それぞれ車輪幅全体にわたって一様であり、ほぼ車輪中央部に応力のピークが発生している。一方、軟弱斜面横断時の応力分布を見ると、離脱角は車輪幅全体にわたってほぼ等しいが、進入角は、斜面の山側と谷側で異なり、斜面側の一部に応力が発生し、応力のピークが、車輪中央部から斜面側に移動していることが分かる。この原因として考えられることは、軟弱斜面に対して車輪を傾ける、すなわち軟弱斜面にエッジを立てて走行する場合、斜面山側については、沈下量が大きくなるため、土壌への進入角が大きくなるが、斜面谷側は、接地しない部分も存在するため、土壌への進入角が小さくなるということが

挙げられる。

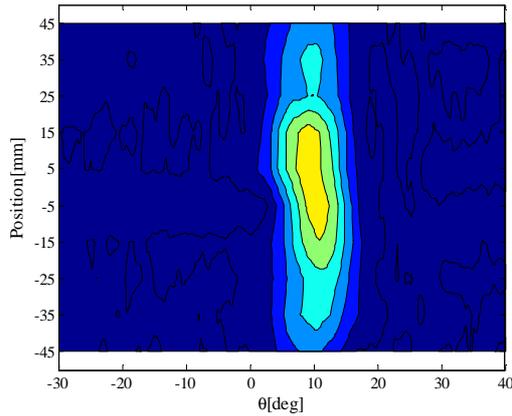
また、走行後の轍を観察すると、車輪走行後の土壌は、車輪によって、平坦にならされていることが確認できた。今回の計測条件では、スリップ率はほぼゼロであるため、車輪の回転によって、土壌が車輪後方へ運搬されなかったことが原因であると考えられる。

さらに、応力分布の発生領域について考察すると、静的な接地状態では、車輪の回転によって土壌が平坦に均されなため、離脱角は進入角と同様、斜面山側は大きく、斜面谷側は小さくなると考えられる。そのため、車輪全体にわたって沈下しない場合、応力が二等辺三角形のような分布形状となり、車輪全体にわたって沈下する場合は、等脚台形のような分布形状になると予想される。

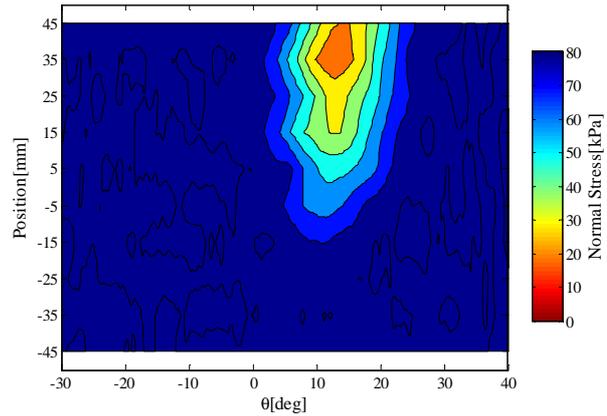
Inotsumeらの提案したモデルでは、軟弱斜面において車輪を斜面側に傾けて横断走行する場合、車輪と土壌の接触面の形状は、等脚台形になると仮定していたが、実際には、土壌からの離脱角は、車輪によって均されるため、車輪全体にわたって一様になることが明らかとなった。接触範囲の仮定は実際の接触範囲とは異なったものの、式(2),(3),(4),(5)には大きく影響はないため、Inotsumeらのモデルにより、車輪の軟弱斜面横断は正しく表現できると考えられる。

4. おわりに

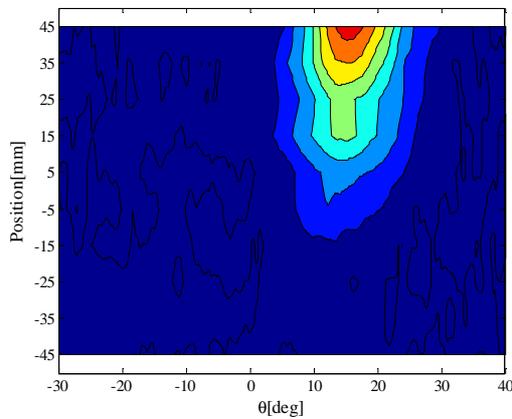
本稿では、軟弱斜面横断時における車輪の力学モデルについて紹介し、実際に、エッジを立てて軟弱斜面を走行する際の二次元応力分布の計測を行い、その計測結果を示した。



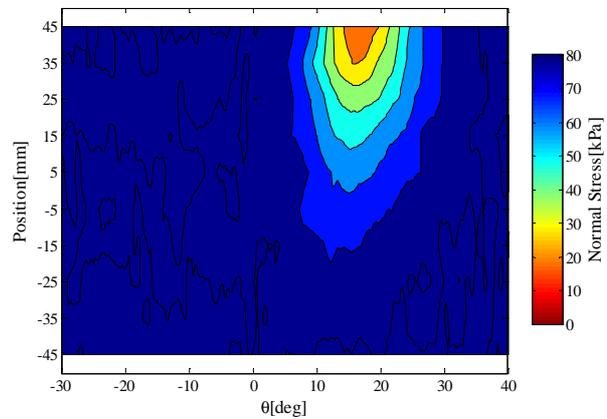
(a) Slope angle $\alpha = 0$ [deg]



(b) Slope angle $\alpha = 10$ [deg]



(c) Slope angle $\alpha = 15$ [deg]



(d) Slope angle $\alpha = 20$ [deg]

Fig. 6 Measuring Result

計測結果より、軟弱斜面横断時において、車輪下部に発生する応力分布は、車輪中央部から斜面側に応力のピークが移動した分布形状になることを明らかにした。また、今回の計測結果より、Inotsumeらのモデルは、概ね正しいという事を実験的に示した。

今後は、軟弱斜面直登時における車輪の二次元応力分布計測を行い、Bekker, Wong, Reeceらによって提案された応力分布モデルの改良を目指す。

参考文献

- (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) 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, Volume 24, Issue 3, pp. 233-250 (2007-03)
- (5) 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
- (6) 佐藤佳祐, 永谷圭司, 吉田和哉, "応力測定に基づいた車輪型砂上移動ロボットの登坂能力に関する研究", 第15回ロボティクスシンポジウム 予稿集, pp.158-163 (2010-03)
- (7) 比嘉翔弥, 須藤真琢, 永谷圭司, 吉田和哉, "軟弱土壌における車輪の二次元応力分布の計測", 日本機械学会 第13回「運動と振動の制御シンポジウム」MOVIC2013, (2013-08), A12
- (8) Hiroaki Inotsume, Masataku Sutoh, Kenji Nagaoka, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida, "Modeling Analysis and Control of Actively Reconfigurable Planetary Rover for Traversing Slopes Covered with Loose Soil", Journal of Field Robotics, Volume 30, Issue 6, pp.1-22 (2013-09)