

# 惑星探査ローバーの軟弱斜面横断シミュレータの開発\*

榎本 裕次郎<sup>\*1</sup>, 猪爪 宏彰<sup>\*1</sup>, 須藤 真琢<sup>\*1</sup>, 永谷 圭司<sup>\*2</sup>, 吉田 和哉<sup>\*2</sup>

## Development of Planetary Rover Simulator in case of Traversing Loose Soil

Yujiro EMOTO<sup>\*1</sup>, Hiroaki INOTSUME, Masataku SUTOH,  
Keiji NAGATANI and Kazuya YOSHIDA

<sup>\*1</sup> Tohoku University  
6-6-01, Aoba-ku, Sendai, 980-8579

Planetary rovers that explore surface of the Moon or Mars easily slip in both longitudinal and lateral directions because it is covered with fine-grained sand. Particularly, when rovers traverse lateral slopes, the side slip occurs significantly. In the worst case, the rovers may deviate significantly on the slopes, and there is a possibility that fails to planetary exploration. To mitigate the slippage problems, we have confirmed in our previous research that the side slip of a rover is able to be reduced by changing the attitude of the rover. In order to study further the traversal behavior of a rover, in this research, we developed a dynamics simulator that includes a wheel-soil interaction model based on terramechanics on slope. To validate the simulator, we conducted numerical simulations for slope-traversing scenarios and compared the results with those of experiments. According to the comparison, the simulation results qualitatively match the tendencies of experimental results in the most cases and thus verify the usefulness of the simulator.

**Key Words** : Planetary Rover, Simulator, Loose Soil

### 1. はじめに

近年、月ではリモートセンシングにより、永久影のあるクレータ内部において氷の存在が明らかにされ<sup>(1)</sup>、NASAによる火星の探査では、クレータ壁面に水の流れていた痕跡が発見された<sup>(2)</sup>。これらの成果を踏まえ、将来、月や惑星における資源調査や生命の起源を解明する調査には、地表面を走行する月・惑星探査移動ロボット(ローバー)による、クレータ内部やその周辺の近接探査が期待されている。しかし、月や火星の表面は、レゴリスという非常に細かい砂で覆われた軟弱土壌であるため、車輪の進行方向および横方向には容易に滑りが発生し、円滑な探査の妨げとなる。そのためローバーには、このような軟弱土壌における高い走行性能が求められる。

上記問題を解決するためには、滑りのメカニズムの解明が重要となる。滑りのメカニズムを扱う学問として、車両と土壌の相互作用を力学的に扱うテラメカニクスがある。これは、オフロード車や農業機械を対象に発展し、近年では惑星探査ローバーへの応用が行われている。この学問は、これまで、Bekkerによって大局的にまとめられ<sup>(3)</sup>、WongやReeceらによって改良、拡張が行われてきた<sup>(4)</sup>。筆者の研究グループにおいても、これまで、惑星探査ローバーを対象としたテラメカニクスの研究を進めており、我々は、惑星探査ローバーが軟弱斜面を横断する際の車輪接地角度を考慮した車輪力学モデルを提案し、姿勢変化により斜面下方向の滑りを低減できることを示した<sup>(5)</sup>。しかしながら、これまでの研究において、様々な環境に変化させて繰り返し実験を行うことは難しく、そのため、ローバーの姿勢変化を考慮した走行解析はできなかった。一方で、更なる走行解析の研究の発展には、月や火星での走行を想定し、異なる重力場や凹凸のある広域環境での実験が必要である。そこで、仮想空間において環境を再現できるシミュレータの導入が有効であると考えられる。

\* 原稿受付 2013年7月1日

<sup>\*1</sup> 東北大学 (〒980-8579 仙台市青葉区6-6-01)

<sup>\*2</sup> 正員, 東北大学 (〒980-8579 仙台市青葉区6-6-01)

Email: y-emoto@astro.mech.tohoku.ac.jp

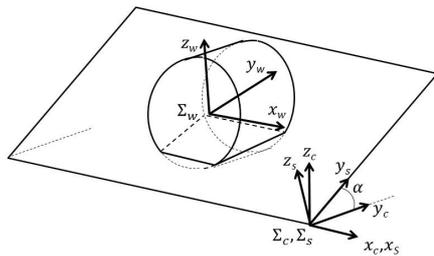


Fig. 1 Wheel coordinate system on lateral slope

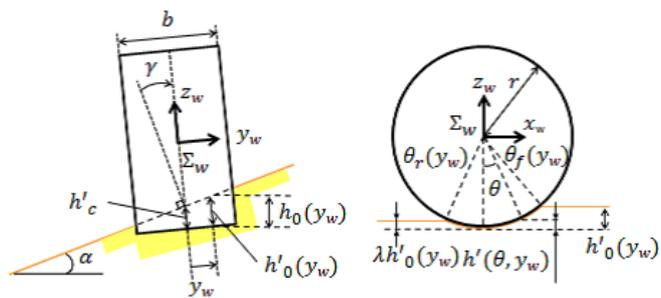


Fig. 2 Sinkage of a tilted wheel on slope

これまで我々の研究グループにおいて開発されてきた斜面横断シミュレータは、ローバーが斜面に対して垂直に接地した状態を想定しており、ローバーの姿勢変化を考慮した走行解析はできなかった<sup>(6)</sup>。ここで、姿勢変化を考慮した走行解析をするにあたり、まずは、一様な斜面を想定した斜面横断シミュレータを開発し、検証する必要がある。そこで、本研究では、一様な斜面における、ローバーの姿勢変化を考慮したシミュレータの開発を行い、さらに、実機実験の結果との比較によるシミュレータの妥当性の検証を行った。

## 2. テラメカニクスに基づく斜面横断時の車輪の走行力学

本章では、斜面におけるローバーの接地ロール角が斜面垂直状態と異なる際の、テラメカニクスに基づいた車輪力学モデルを説明する。

### 2.1 座標系の定義

図1に示すように、車輪が斜面に対して接地し、沈下している状態を仮定する。ここで、車輪は図2(左)に示すように $\gamma$ だけ傾いて斜面に接地しているものとする。まず、世界座標系 $\Sigma_c$ を定義する。次に、この世界座標系 $\Sigma_c$ を $x_c$ 軸反時計回りに $\alpha$ だけ回転させた座標系を斜面座標系 $\Sigma_s$ と定義する。また、車輪座標系 $\Sigma_w$ は車輪中心に原点を持ち、斜面座標系 $\Sigma_s$ を $x_s$ 軸時計回りに $\gamma$ だけ回転させた座標系と定義する。

### 2.2 斜面横断時の車輪の沈下量

次に、図2(左)のように、半径 $r$ の車輪が斜面に対して $\gamma$ だけ傾いた状態で接地した場合の沈下量をモデル化する。座標系は $\Sigma_w$ を用い、車輪の中央を通る $z_w$ 軸上の沈下量を中央沈下量 $h'_c$ と定義する。このとき、 $z_w$ 軸から車輪幅領域内で $y_w$ 進んだ位置での総沈下量 $h'_0(y_w)$ は次の式で表される。

$$h'_0(y_w) = y_w \tan \gamma + h'_c \quad (1)$$

ここで、 $\alpha' = \alpha - \gamma$ とすると、世界座標系の $z_c$ 軸に沿った沈下量 $h_0$ は次式で表される。

$$h_0 = h'_0 \cos \alpha' (1 + \tan \alpha' \tan \alpha) \quad (2)$$

次に、車輪中央から $y$ の位置における車輪の断面は図2(右)のように表され、車輪接地領域内の角度 $\theta$ における沈下量は、幾何学的に次式で与えられる。

$$h(\theta, y_w) = r(\cos \theta - \cos \theta_f(y_w)) \quad (3)$$

また、進入角 $\theta_f(y_w)$ と離脱角 $\theta_r(y_w)$ は次式で与えられる。

$$\theta_f(y_w) = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h'_0(y_w)}{r} \right) \quad (4)$$

$$\theta_r(y_w) = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{\lambda h'_0(y_w)}{r} \right) \quad (5)$$

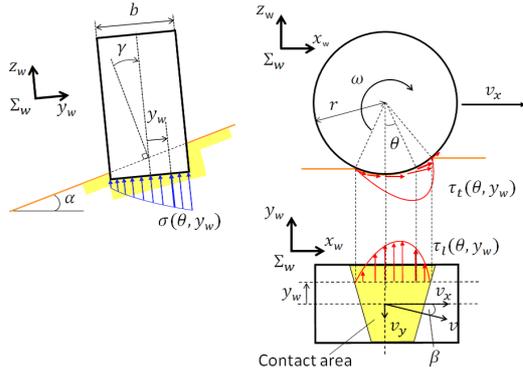


Fig. 3 Normal and shear stresses beneath a wheel and forces acting on a center of wheel



Fig. 4 El-Dorado II

ここで、 $\lambda$  は離脱角係数を示し、車輪前方と後方の土壌の体積比で与えられる<sup>(7)</sup>。これは、 $\lambda \geq 0$  で定義され、土壌の性質や車輪表面形状に依存する。

### 2.3 車輪に働く力

軟弱土壌を走行する車輪には、図3に示すように、任意の位置  $(\theta, y_w)$  において、垂直応力  $\sigma(\theta, y_w)$ 、および、円周方向せん断応力  $\tau_t$ 、横方向せん断応力  $\tau_l$  が働くと考えられる。車輪が土壌から受ける力  $F_i$  ( $i = x, y, z$ ) は、これらの応力の各成分を車輪の円周方向、および、幅方向に積分することによって得られ、次式で与えられる。

$$F_x = r \int_{-b/2}^{b/2} \left\{ \int_{\theta_r(y_w)}^{\theta_f(y_w)} \{ \tau_t(\theta, y_w) \cos \theta - \sigma(\theta, y_w) \sin \theta \} d\theta \right\} dy_w \quad (6)$$

$$F_y = r \int_{-b/2}^{b/2} \left\{ \int_{\theta_r(y_w)}^{\theta_f(y_w)} \tau_l(\theta, y_w) d\theta \right\} dy_w \quad (7)$$

$$F_z = r \int_{-b/2}^{b/2} \left\{ \int_{\theta_r(y_w)}^{\theta_f(y_w)} \{ \tau_t(\theta, y_w) \sin \theta + \sigma(\theta, y_w) \cos \theta \} d\theta \right\} dy_w \quad (8)$$

ここで、 $b$  は車輪幅を表している。

また、車輪が土壌から受けるトルクは次式で与えられる。

$$T = r^2 \int_{-b/2}^{b/2} \left( \int_{\theta_r(y_w)}^{\theta_f(y_w)} \tau_t d\theta \right) dy_w \quad (9)$$

## 3. 軟弱斜面横断シミュレータの構築

本章では、2章で説明した車輪力学モデルを用いて、走行解析をするために開発した軟弱斜面横断シミュレータについて述べる。

### 3.1 ローバーテストベッド

本研究において、開発したシミュレータの妥当性を検証するために、実機実験の結果とシミュレーション結果を比較する必要がある。そこで、実機実験に用いた図4に示すローバーを、テストベッドモデルとして適用した。本テストベッドは四輪型ローバーであり、本体と車輪取付け部が手動のスライダにより、ローバーの姿勢を変化させることが可能である。表1にテストベッドの仕様を示す。ここで、 $L_u$ 、 $L_d$  は図5に示すようにローバーの重心から車輪までの長さを示し、ローバーの中心に重心があると仮定している。また、本体にはジャイロセンサと加速度センサを組み合わせた姿勢センサが取り付けられており、これにより、ローバーの姿勢が取得できる。

Table 1 Specifications of the rover test bed  
(nominal configuration)

Size [mm]	L800 × W650 × H400
Mass [kg]	22.4
Wheel size [mm]	φ204 × W100
Tread [mm]	550
Wheel base [mm]	600
Center of gravity [mm]	$L_d = L_u = 275, L_h = 211$

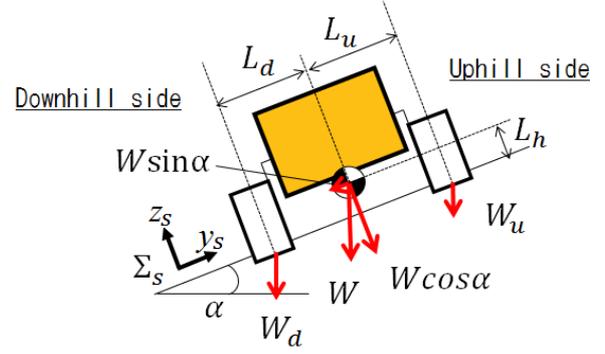


Fig. 5 Static rover model on a slope

Table 2 Parameter of motion equation

$H$	ローバーの慣性行列
$C$	速度非線形項
$G$	重力項
$v_0$	本体の並進速度
$\omega_0$	本体の角速度
$q$	各ジョイントの角度
$F_0 = [0, 0, 0]^T$	本体の重心に働く外力
$N_0 = [0, 0, 0]^T$	本体の重心に働く外部モーメント
$\tau$	各ジョイントに作用するトルク
$J$	ヤコビアン行列
$F_e = [f_{w1}, \dots, f_{wm}]$	各車輪の重心に働く外力
$N_e$	各車輪の重心に働く外部モーメント

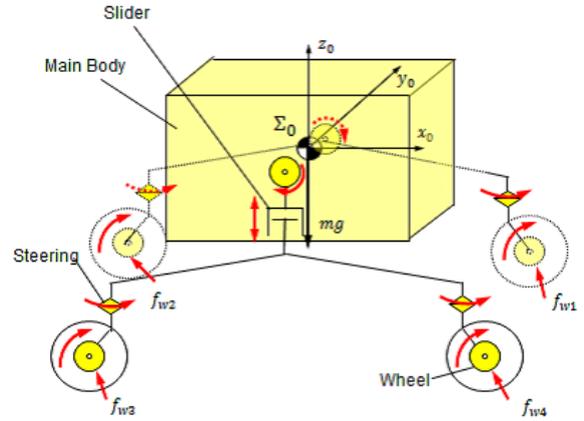


Fig. 6 Rover dynamics model

### 3.2 ローバーの力学モデル

図6にシミュレータで用いるローバーの車両力学モデルを示す。このモデルにおいて、ローバーは、関節を有するマルチボディシステムとしてモデル化され、それぞれのリンクは十分な剛体であるとした。

ローバーの運動方程式は次式で与えられる。

$$H \begin{bmatrix} \dot{v}_0 \\ \dot{\omega}_0 \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + C + G = \begin{bmatrix} F_0 \\ N_0 \\ \tau \end{bmatrix} + J^T \begin{bmatrix} F_e \\ N_e \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで、式(10)における各パラメータを表2に示す。式(10)はあらゆる車両に適用できる一般的な式であり、車両の走行状態は式(10)を連続的に解くことで、数値的に得られる。式(10)における $F_e$ と $N_e$ は2章で述べた車輪と土壌の力学モデルから求まる。なお、 $m$ は車輪数を表すため、本研究で用いたローバーテストベッドにおいては $m=4$ となる。

### 3.3 シミュレーション手順

本研究では、Open Dynamics Engine (ODE)<sup>(8)</sup>を利用し、式(10)に示した運動方程式により、ローバーの速度や姿勢等を求めることとした。

提案された車輪力学モデルを用いたシミュレーション手順を以下に簡潔に示す。

1. 斜面角度 $\alpha$ と、各車輪角速度 $\omega_{wi}$ を入力する( $i=1, \dots, 4$ )。これらの値は実験と同じ条件で与えられる。
2. 式(6)～式(9)に示す車輪と土壌の接触力学モデルを用いて、各車輪に働く外力 $F_e$ と外部モーメント $N_e$ を求める。
3. 式(10)を解くことにより、ローバーの位置と姿勢、速度が得られる。
4. ステップ2に戻る。

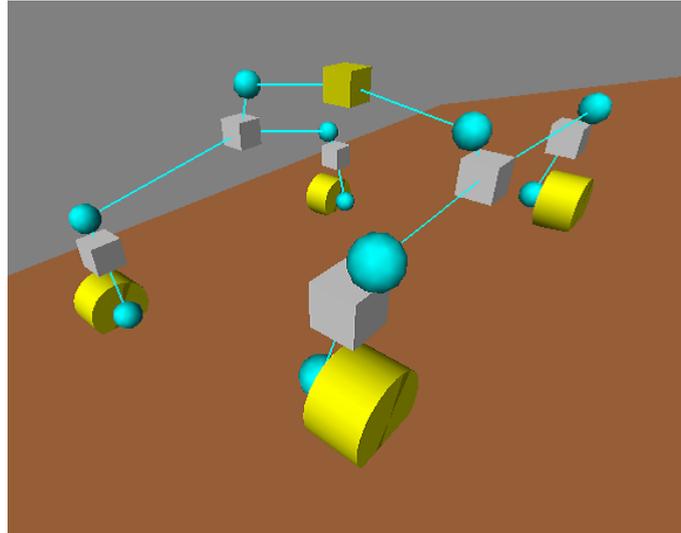


Fig. 7 Simulation (ODE)

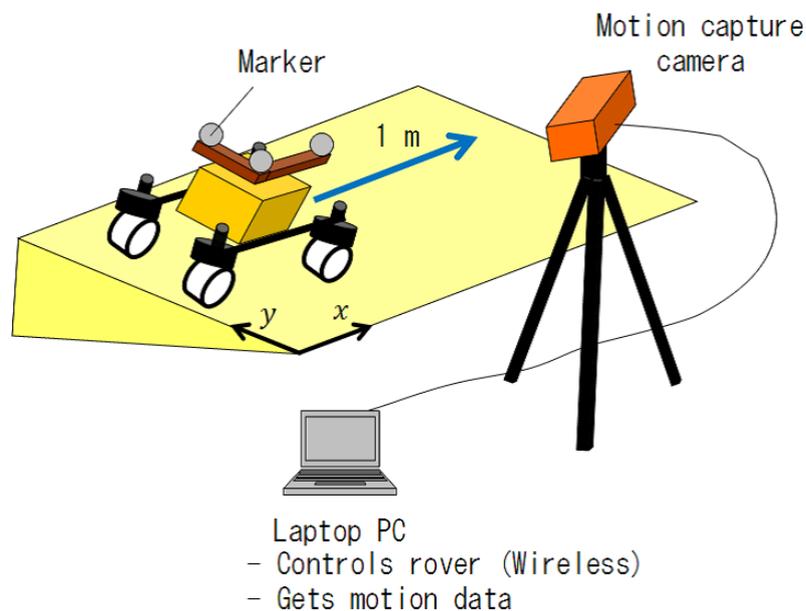


Fig. 8 Experiment setup

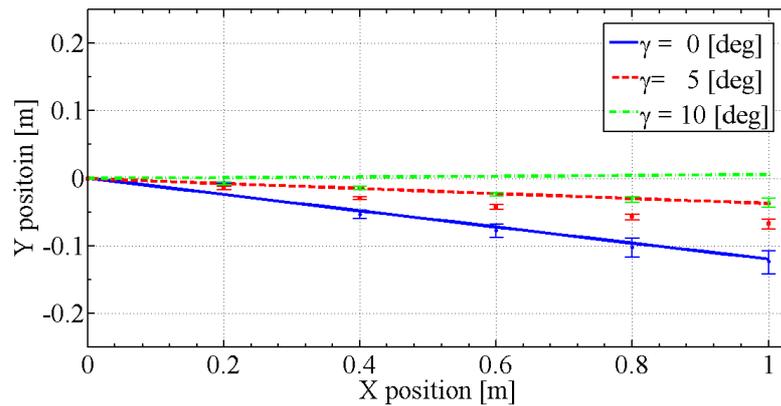
### 3.4 シミュレーション/実機実験条件

本研究では、結果の比較を行うため、実機実験とシミュレーションの条件を一致させた。このとき、斜面角度  $\alpha$  は 10[deg] と 15[deg] の二種類で、さらに、各斜面角度においてテストベッドの姿勢角度  $\gamma$  を 0 ~ 15[deg] と 5[deg] 刻みずつ変化させ、それぞれの条件で実験とシミュレーションを行った。テストベッドの目標車輪角速度  $\omega$  は 0.176[rad/s](車両速度約 18[mm/s]) と一定とし、斜面  $x$  軸方向に 1[m] ほどテストベッドを進行させた(ただし、姿勢角度  $\gamma$  が斜面角度  $\alpha$  より大きくなる場合の条件を除く)。なお、実機実験は各条件で 3 回繰り返し行った。

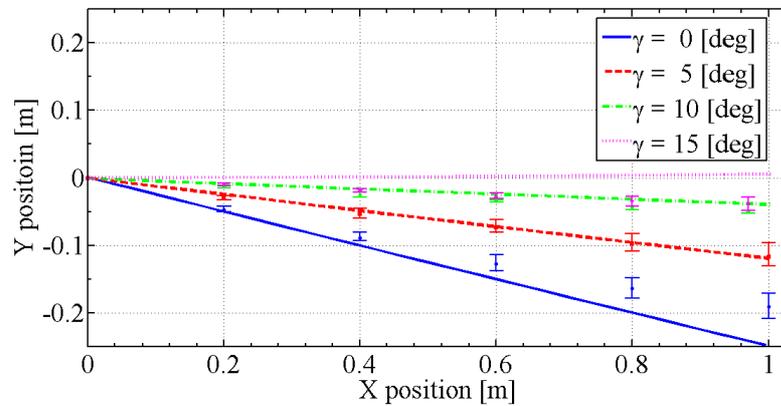
図 7 はシミュレーション中の様子を示している。その結果、ローバーの前進に伴い、斜面下方向に横滑りが発生していることを確認した。

## 4. シミュレーション結果と実機実験結果の比較検証

本章では、シミュレーション結果と実機実験結果を比較を行い、開発した軟弱斜面横断シミュレータの妥当性について述べる。



(a)  $\alpha = 10$  [deg]



(b)  $\alpha = 15$  [deg]

Fig. 9 Traversal paths in slope coordinate

#### 4.1 実機実験フィールド

実機実験には、図4に示すローバーを使用し、さらに、長さ2[m]×幅1[m]×深さ0.15[m]の容器に豊浦標準砂を敷き詰めた実験フィールドを用いた。豊浦標準砂は粒径が細かく、均一な乾燥砂であり、平坦になるように緩く敷き詰めて実験を行った。なお、この容器の片側を持ち上げることで斜面を形成した。

また、実機実験により得られるテストベッドの走行軌跡は、図8に示すように、モーションキャプチャーカメラ (Stereo Labeling Camera, Cyverse Corp.) を用いて計測した。テストベッドの車体上に、3個の反射マーカを設置し、モーションキャプチャーカメラにより取得したこれらの位置を結ぶベクトルを計算することで、斜面を走行するテストベッドの3次元位置、姿勢の取得を行った。なお、このカメラは、最大30[fps]の周期、約10[mm]の精度でマーカのトラッキングを行うことが可能である。

#### 4.2 実機実験/シミュレーション結果

実機実験とシミュレーションの結果をまとめたグラフを図9に示す。図9(a)には斜面角度 $\alpha = 10$ [deg]、図9(b)には斜面角度 $\alpha = 15$ [deg]の場合の姿勢角度変化による走行軌跡を示す。図9において、エラーバーは3回の実機実験の結果を示し、実線はシミュレーションにより得られた結果を示している。なお、このグラフは斜面座標系 $\Sigma_s$ を適用し、横軸をx軸、縦軸をy軸としている。

図9(a)より、斜面角度 $\alpha = 10$ [deg]の場合、姿勢角度が $\gamma = 0$ [deg]のとき、シミュレーションの走行軌跡はエラーバーの範囲内に収まっているということがわかる。しかし、姿勢角度が $\gamma = 5$ [deg]のとき、シミュレーション

結果の走行軌跡は実験結果より横滑りが小さくなっている。また、姿勢角度が  $\gamma = 10[\text{deg}]$  で車体が水平となっているとき、実機実験の結果においては横滑りが生じているのに対し、シミュレーション結果においては横滑りせずに直進している。

同様に、図 9(b) より、斜面角度  $\alpha = 15[\text{deg}]$  の場合、姿勢角度が  $\gamma = 5, 10[\text{deg}]$  のとき、シミュレーションの走行軌跡はエラーバーの範囲内に収まっているということがわかる。しかし、姿勢角度が  $\gamma = 15[\text{deg}]$  のとき、車体は水平となり、実機実験においては横滑りが生じているのに対して、シミュレーション結果においては横滑りせず、直進している。

これらより、実機実験とシミュレーションの結果は様々な条件において、ほぼ一致することがわかった。しかし、車体が水平となる、姿勢角度と斜面角度が等しい  $\gamma = \alpha$  の場合、両グラフとも実機実験においては横滑りが生じているのに対して、シミュレーションにおいては横滑りせず直進する結果となっている。この最も大きな要因として、実機実験において生じた、車輪を支えている砂が崩れる現象が挙げられる。これによりローバーに横滑りが生じたと考えられる。

## 5. お わ り に

本稿では、惑星探査ローバーの軟弱斜面横断シミュレータの開発と評価を行った。実機実験と同様のローバーモデルを用いて、シミュレーションを行い、結果を比較したところ、斜面横断に伴い、ローバーが斜面下方向に滑りが生じていることから、軟弱斜面走行における物理現象を再現できているといえる。これより、定性的に合う軟弱斜面横断シミュレータが開発できたといえる。

今後の研究課題としては、シミュレータの精度を向上させることに加え、本シミュレータを用いてステアリングの影響の評価や、惑星探査ローバーが活動する月・火星重力環境下でのシミュレーションを行うことが挙げられる。

## 文 献

- (1) NASA, Retrieved May 5, 2013, from [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/LRO/news/crater-ice.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/news/crater-ice.html).
- (2) NASA, Retrieved May 5, 2013, from <http://science.nasa.gov/missions/mars-global-surveyor/>.
- (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," 3rd edition, John Wiley & Sons, 2001.
- (5) H. Inotsume, M. Sutoh, K. Nagaoka, K. Nagatani, and K. Yoshida, "Slope Traversability Analysis of Reconfigurable Planetary Rovers", 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4470-4476 (2012-10)
- (6) G. Ishigami, A. Miwa, and K. Yoshida, "STEERING TRAJECTORY ANALYSIS OF PLANETARY EXPLORATION ROVERS BASED ON ALL-WHEEL DYNAMICS MODEL", The 8th Int. symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space SP-603,(2005),1-8
- (7) G. Ishigami, A. Miwa, K. Nagatani, and K. 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
- (8) ODE *Open Dynamics Engine*, Retrieved Jan 31, 2013, from <http://www.ode.org/>.