

# テラメカニクスに基づく車輪型移動ロボットの走行力学解析 (2. 走行軌跡のシミュレーション)

## Terramechanics-Based Analysis on Locomotion Mechanics of Wheeled Mobile Robots (Part 2. Motion Trajectory Simulation)

石上 玄也, 三輪 章子, 吉田 和哉 (東北大)

Genya ISHIGAMI, Akiko MIWA, Kazuya YOSHIDA  
Tohoku University, {ishigami, miwa, yoshida}@astro.mech.tohoku.ac.jp

Planetary exploration rovers are expected to travel on loose soil such as sand, or regolith using metallic hard wheels. The soil mechanics, called “terramechanics,” plays an important role to determine the traction forces on each wheel. Wheel-soil traction models are developed for horizontal and inclined surfaces. The motion trajectory of a rover is simulated using the wheel-soil traction models and a dynamics model of an articulated chassis including the rocker-link suspension system. The simulated motion is compared to experimental results, confirming a good agreement. Different motion trajectories are obtained with different steering angles when a rover traverses a slope.

**Key Words** : Wheel-soil mechanics, Terramechanics, Dynamics simulation, Steering angle, Slope traversal

### 1 緒言

近年, 太陽系起源の解明や地球外生命の可能性を調査することを目的とし, 惑星の探査が盛んに行なわれている. また月については, 科学ミッションに加えて資源探査や利用の可能性も議論されている. 月や惑星の探査を行なう際に重要となるテクノロジの1つに, 移動探査ロボット(ローバー)による地表面の直接探査が挙げられる. 最新のローバーによる惑星探査として, 2004年1月より活動を続けているNASAのSpirit, Opportunityと呼ばれる2台のローバーによる火星探査が, 目覚ましい成果をあげている. 同ミッションにおいて, ローバーはかつて火星に水が存在したことを裏付ける重大な発見をし, ローバーが果たす役割の大きさが実証された.

ローバーがミッションを達成するためには高い走行性能が必要となる. 走行性能には, 登坂能力や段差乗り越え能力などに加え, 転倒や障害物との衝突を回避するための走行安定性, および経路追従性能などが考えられる. また, 惑星地表は一般に軟弱で凹凸のある不整地である. 対して惑星探査ローバーの車輪は, 探査対象天体の厳しい環境に耐えるため一般に金属性などの硬い車輪となっている. 軟弱地盤上を走行するロボットの運動を解析し制御するためには, 土壌と車輪との相互作用に基づいて牽引力の発生メカニズムを考察する必要がある. このような土壌力学に基づく力学解析の分野はテラメカニクスと呼ばれ, 1960年頃より研究が始められた[1]. 著者らはテラメカニクスに基づいたローバーの走行力学解析を進め, これまでに水平面上を走行する車輪についての力学モデル構築を行ってきた[2].

本研究では, 構築した力学モデルに基づく動力学シミュレーションによりローバーの走行挙動解析を行なうことを目的とする. シミュレーション結果とローバーテストベッドを用いた走行実験結果を比較し, シミュレーションの有効性を検証する. また, 斜面上を走行する車輪へと力学モデルを拡張し, 斜面を横断する際に, ステアリング角の違いによって走行軌跡にどのような違いが生じるかについてシミュレーションにより解析する.

### 2 水平面上を走行する車輪の力学

水平面上を走行する車輪の力学モデルについて述べる. 車輪座標系を図1に示す. 座標系は車輪の縦方向を $x$ , 横方向を $y$ , 地面垂直上向きを $z$ とした右手系であり, 車輪の旋回(ヨー回転)にともなって回転するが, 車輪の転動(ピッチ回転)にともなっては変動しないものとする. ここで,  $v$ は車輪並進速度であり,

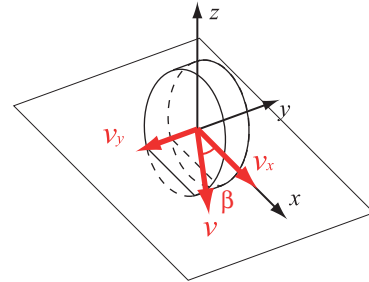


Fig. 1 Wheel coordinate system on a horizontal plane

$v_x, v_y$  はそれぞれその  $x$  軸方向成分,  $y$  軸方向成分である.

#### 2.1 スリップ率: $s$ , スリップ角: $\beta$

まずはじめに, 車輪の走行状態を表す変数としてスリップ率およびスリップ角を定義する. これらの変数は, 駆動力などの車輪が発生する力に影響を及ぼす重要な量である.

スリップ率  $s$  は式(1)によって定義され, 車輪並進速度  $v_x$  と車輪周速度  $r\omega$  の差を表す無次元化量である.

$$s = \begin{cases} (r\omega - v_x)/r\omega & (v_x < r\omega : \text{driving}) \\ (r\omega - v_x)/v_x & (v_x > r\omega : \text{breaking}) \end{cases} \quad (1)$$

ただし  $-1 < s < 1$  とする. ここで  $r$  は車輪半径,  $\omega$  は車輪回転角速度である.

また, スリップ角  $\beta$  は車輪の進行方向と  $x$  軸のなす角であり, 車輪が横滑りしている度合いを示す.  $\beta$  は  $v_x$  と  $v_y$  によって式(2)により定義される.

$$\beta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x} \quad (2)$$

#### 2.2 駆動力: $F_x$ , 地面垂直抗力: $F_z$

図2は, 水平な軟弱地盤上を走行する硬い車輪のモデル図である. 車輪は角速度  $\omega$  で等速回転し,  $+x$  方向に進んでいるとする. ここで  $\theta_f, \theta_r$  はそれぞれ車輪の進入角, 離脱角と呼ばれ, 車輪が地面との接触を開始する角度および離れる角度を示している. なお鉛直下向き方向を  $\theta = 0$  とする. 車輪の駆動力である  $F_x$  は, 地面から車輪に加わる垂直応力  $\sigma(\theta)$  および  $x$

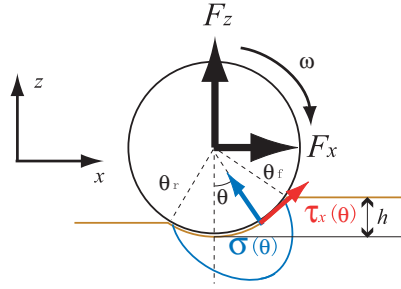


Fig. 2 Wheel model on a horizontal plane (Driving force and Vertical force)

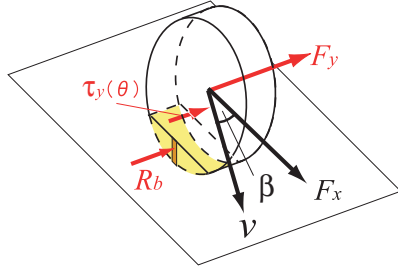


Fig. 3 Wheel model on a horizontal plane (Side force)

軸方向のせん断応力  $\tau_x(\theta)$  の  $x$  軸方向成分を、接地領域について積分することにより求められる。

$$F_x = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau_x(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta \} d\theta \quad (3)$$

ここで  $b$  は車輪幅である。また  $\sigma(\theta)$  は図 2 に示すような分布を持ち、 $\tau_x(\theta)$  とともにスリップ率の関数でもある。一般に、軟弱地盤上の硬い車輪はスリップ率が大きいほど高い駆動力を発揮する。

地面垂直方向に受ける力  $F_z$  は、 $F_x$  と同様  $\sigma(\theta)$  および  $\tau_x(\theta)$  の  $z$  軸方向成分の積分によって得られる。

$$F_z = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau_x(\theta) \sin \theta + \sigma(\theta) \cos \theta \} d\theta \quad (4)$$

### 2.3 サイドフォース: $F_y$

地面上を横滑りしながら進行する車輪のモデルを図 3 に示す。このような車輪には、スリップ角に応じた車輪横方向の力(サイドフォース)  $F_y$  が生じる。 $F_y$  は車輪底部において発生する  $y$  軸方向のせん断応力  $\tau_y(\theta)$  を積分して得られる力 ( $F_u$ ) と、地面に沈下している車輪側面が土壌を押しつけることによって発生する単位面積あたりの力  $R_b$  を面積分して得られる力 ( $F_s$ ) の合力となる。サイドフォースはスリップ角が増すほど増大し、スリップ率が増すほど減少する傾向を示す[2]。

$$\begin{aligned} F_y &= F_u + F_s \\ &= rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \tau_y(\theta) d\theta + \int_{\theta_r}^{\theta_f} R_b(r - h \cos \theta) d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

ここで  $h$  は車輪沈下量を意味する(図 2)。

## 3 動力学シミュレーション

第 2 節で示した土壌と車輪の力学(テラメカニクス)を考慮した動力学シミュレーションを行ない、ローバーの挙動を解析した。シミュレーションには MATLAB ツールボックス SpaceDyn を用いた[3]。

### 3.1 ローバーモデル

シミュレーションは、著者らが開発した 4 輪ローバー(図 4) [4] について行なった。ローバーの動力学モデルを図 5 に示す。



Fig. 4 Rover test bed

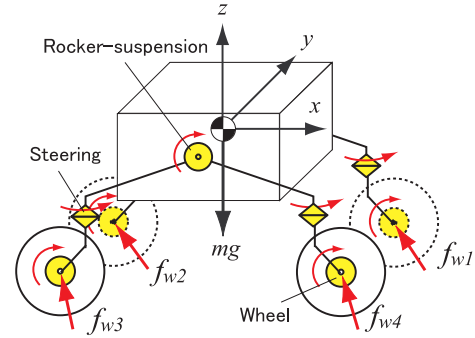


Fig. 5 Dynamics model of the rover

ローバーの本体部(ベース)にベース座標系をとり、進行方向を  $x$ 、車体垂直方向上向きを  $z$  とする右手系とする。ベースの姿勢は基準座標系からみたベース座標系のオイラー角表現で表される。

ローバーは開リンク構造の多リンク剛体系であり、ベースおよび 10 個のリンクから構成される。関節はベース左右に配置されたロッカーサスペンション機構と呼ばれる関節が 2 つ、各車輪取り付け部のステアリング関節が 4 つ、車輪回転が 4 つの計 10 関節あり、全てそれぞれ 1 自由度の回転関節である。ロッカーサスペンション機構は差動リンクの働きを持ち、左右のリンクの関節角度を  $\theta_{rc1}$ 、 $\theta_{rc2}$  とすると式(6)の関係が成り立つ。

$$\theta_{rc1} = -\theta_{rc2} \quad (6)$$

また慣性座標系からみたベース本体の  $y$  軸周り回転角 ( $\theta_y^i$ ) は、左右のリンク回転角を平均したものとなる。

$$\theta_y^i = \frac{\theta_{rc1}^i + \theta_{rc2}^i}{2} \quad (7)$$

ここで  $\theta^i$  は慣性座標からみた回転角を意味する。

ローバーに作用する力として、重力、各関節に働くトルク、および地面から各車輪が受ける力を考える。この各車輪が受ける力  $f_w$  を式(3)-(5)により与える。ロッカーサスペンション関節には式(6)(7)を満たすようなトルクが生じる。また以下に示す走行実験では、ステアリング角および車輪角速度が常に一定となるよう制御されている。よってシミュレーションにおいても、指定された状態を保つためのトルクが各関節に発生しているものとする。

ローバー全体の運動方程式は式(8)となる。

$$\mathbf{H} \begin{bmatrix} \dot{v}_0 \\ \dot{\omega}_0 \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_0 \\ \mathbf{T}_0 \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_e \quad (8)$$

ここで、式中の記号の意味は以下のとおりである。

$\mathbf{H}$  : ローバー全体の慣性行列

$v_0$  : ベース速度

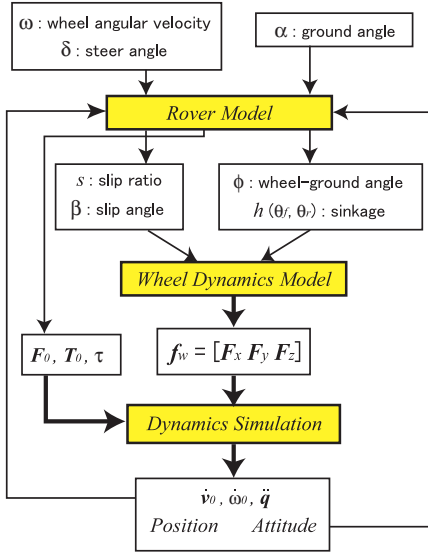


Fig. 6 Flow chart of the dynamics simulation

$\omega_0$  : ベース角速度

$\dot{q}$  : 各関節の角速度

$C$  : 速度非線形項 + 重力項

$F_0$  : ベースに作用する外力 (ここでは 0 とする)

$T_0$  : ベースに作用する外トルク (ここでは 0 とする)

$\tau$  : 各関節のトルク

$J^T$  : ヤコビ行列

$F_e$  : 各車輪に作用する力  
 $(= [f_{\omega 1}^T \ f_{\omega 2}^T \ f_{\omega 3}^T \ f_{\omega 4}^T]^T)$

### 3.2 シミュレーションの流れ

シミュレーションの流れを図 6 に示す。

ステアリング角を  $\delta$  で表し,  $\delta$  および車輪角速度  $\omega$  は一定とする. 各時刻におけるローバーの状態からスリップ率  $s$ , スリップ角  $\beta$ , 沈下量  $h(\theta_f, \theta_r)$ , 水平面と車輪  $x$  軸が成す角  $\phi$  (傾斜面の場合, 次節参照) を算出する. 第 2 節で示した車輪力学モデルを用い地面から車輪に働く力  $f_w$  を求め, ローバーモデルから得られる力  $F_0, T_0, \tau$  とともに式(8)に代入し, 次の時刻におけるローバーの状態を得る.

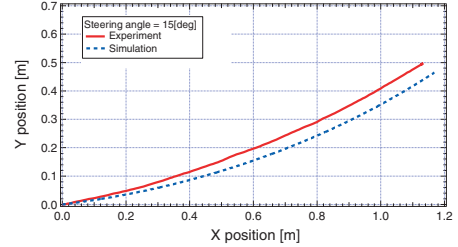
シミュレーション条件を表 1 に示す. なお,  $\delta_f, \delta_r$  はそれぞれ前 2 輪のステアリング角度, 後 2 輪のステアリング角度を意味する.

Table 1 Condition of the simulation

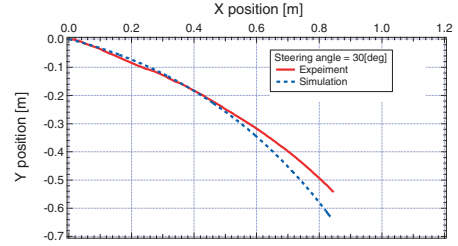
車輪角速度 [rpm]	12(全車輪)
ステアリング角 [deg]	(a) $\delta_f = 15, \delta_r = 0$ (b) $\delta_f = -30, \delta_r = 0$
時間 [sec]	7

### 3.3 シミュレーション結果 - 水平面における走行軌跡

シミュレーションおよびテストベッドを用いた走行実験から得られた走行軌跡を図 7 に比較する. ここで, 走行軌跡は基準座標系から見たローバー重心の移動軌跡とした. なお, 走行実験は JAXA (宇宙航空研究開発機構) の月面ローバー走行試験装置を利用して行った. 図 7 (a) が前 2 輪のステアリング角度が 15 [deg] のときの走行軌跡であり, (b) が 30 [deg] のときのものである. シミュレーション結果と実験結果は概ね一致しており, シミュレーションの有効性が確認されたといえる.



(a) Steering angle = 15 [deg]



(b) Steering angle = -30 [deg]

Fig. 7 Comparison of motion trajectories

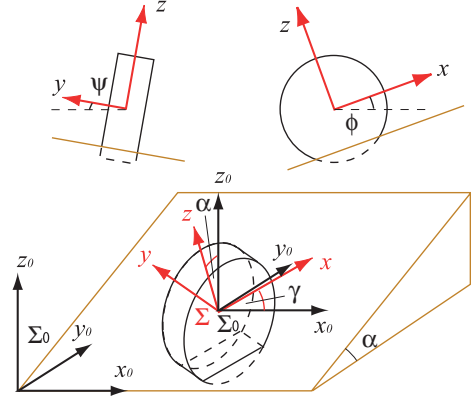


Fig. 8 Wheel coordinate system on a slope

## 4 斜面上を走行するローバーのシミュレーション

### 4.1 斜面上を走行する車輪の力学

第 2 節で述べた車輪力学モデルを斜面上を走行する車輪に拡張することを考える. 斜面は角度  $\alpha$  の一様斜面とし, 基準座標系  $\Sigma_0$  を, 斜面平行 (横断) 方向を  $x_0$  軸, 最大傾斜方向を  $y_0$  軸, 鉛直上方向を  $z_0$  軸となるように設定する (図 8). 斜面上の車輪座標系  $\Sigma$  を水平面上の車輪と同様に設定すると,  $\Sigma_0$  から  $\Sigma$  への回転変換は  $x_0$  軸周りに  $\alpha$ ,  $z$  軸周りに  $\gamma$  回転させることによって行なわれる.  $\gamma$  は斜面横断方向に対して車輪の置かれている角度を表す. このとき  $x$  軸および  $y$  軸が水平面と成す角は  $\alpha, \gamma$  によって一意に決まり, それぞれ  $\phi, \psi$  と表す.

駆動力:  $F_x$ , 地面垂直抗力:  $F_z$

駆動力  $F_x$  および地面垂直抗力  $F_z$  は,  $\theta$  に代わり  $\theta'$  を用いることにより水平面上の車輪と同様に求めることができる. 図 9 に示すように,  $\theta'$  は斜面法線下方向を  $\theta' = 0$  とし,  $\theta' = \theta - \phi$  である. このとき, 応力分布は  $\phi, \psi$  には影響を受けないものとする.

以上より, 斜面上の車輪に働く  $F_x$  および  $F_z$  は式(9), (10)によって求められる.

$$F_x = rb \int_{\theta'_r}^{\theta'_f} \{ \tau_x(\theta') \cos \theta' - \sigma(\theta') \sin \theta' \} d\theta' \quad (9)$$

$$F_z = rb \int_{\theta'_r}^{\theta'_f} \{ \tau_x(\theta') \sin \theta' + \sigma(\theta') \cos \theta' \} d\theta' \quad (10)$$

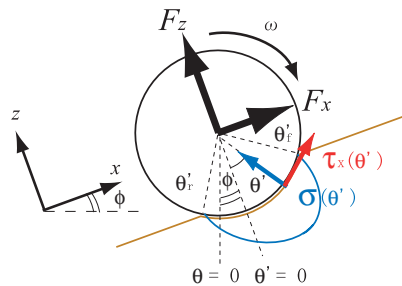


Fig. 9 Wheel model on a slope (Driving force and Vertical force)

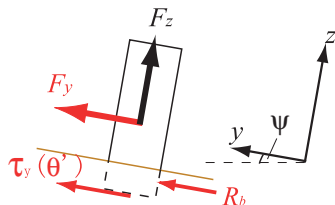


Fig. 10 Wheel model on a slope (Side force)

サイドフォース:  $F_y$

斜面上の車輪におけるサイドフォースは、駆動力および地面垂直抗力と同様  $\theta$  に代わり  $\theta'$  を用いることにより水平面上と同じ式で表すことができる。なお、図 10 に示すように  $R_b$  は  $y$  軸に平行に働くとする。

$$F_y = rb \int_{\theta'_r}^{\theta'_f} \tau_y(\theta') d\theta' + \int_{\theta'_r}^{\theta'_f} R_b(r - h \cos \theta') d\theta' \quad (11)$$

#### 4.2 シミュレーション条件

斜面を横断するローバーのシミュレーションを行ない、地面斜度やステアリング角に応じてローバーの挙動がどのように変化するかについて解析した。シミュレーションの条件を表 2 に示す。なお、ローバーは  $x_0$  軸方向すなわち斜面平行方向へ走行を開始するものとした。

Table 2 Condition of the slope simulation

車輪角速度 [rpm]	12(全車輪)
ステアリング角 [deg]	(A) $\delta_f = 0, \delta_r = 0$ (B) $\delta_f = 15, \delta_r = 0$ (C) $\delta_f = 15, \delta_r = 15$
地面斜度 [deg]	10
時間 [sec]	7

#### 4.3 シミュレーション結果 - 斜面における走行軌跡

各ステアリング角パターンにおける基準座標系からみたベースの重心軌跡を図 12 に示す。また、ローバーの挙動をCGを用いて可視化したものを図 12 に示す。

斜面を横断するとき、ステアリングを前後とも切っていない (A) のローバーは斜面下方に横滑りした。前 2 輪のみ 15 [deg] のステアリング角をもつ (B) は、走行開始直後に僅かに降坂するものの、徐々に旋回しやがて登坂に転じた。全ての車輪のステアリング角を 15 [deg] とした (C) は、ベースの向きを斜面に平行としたまま直線状に緩やかに登坂した。また、ステアリング角パターン (A) よりも (B), (C) の方が走行距離が短くなった。これは (B), (C) において斜面を登るための力を発揮する際に車輪のスリップ率が増加し、その結果としてベース速度が減少したためと考えられる。

以上より、地面斜度およびステアリング角に応じてローバーの

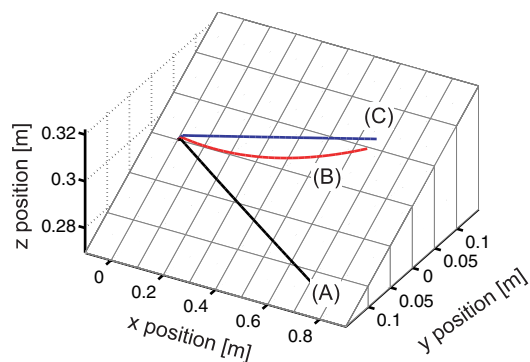


Fig. 11 Comparison of motion trajectories on slope

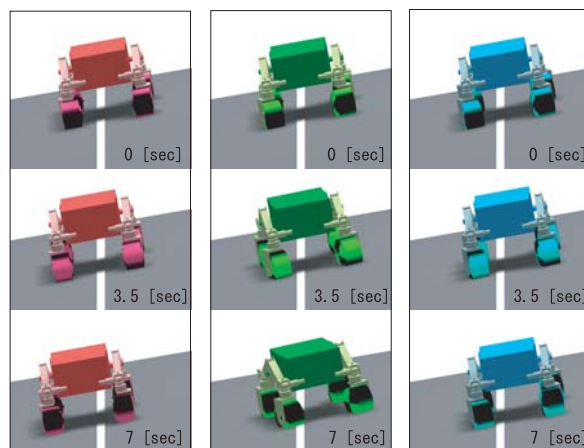


Fig. 12 Rover's behaviour on slope

挙動は大きく異なることが確認された。ローバーが安全に自律走行を行なうためには、経路追従性能が重要となる。ある角度の斜面を横断するとき、斜度とステアリング角の関係が十分に解明されていないとローバーが予期せぬ軌跡を描くことが予想される。そのような事態を回避するためには、ここで示したように、シミュレーションによる事前の挙動解析が有効であるといえる。

## 5 結言

本研究では、これまでに構築してきた水平な軟弱地盤上を走行する車輪の力学モデルに基づき、ローバーの挙動を解析し、走行軌跡を求める動力学シミュレーションを行なった。シミュレーションの結果およびテストベッドを用いた走行実験結果は概ね一致し、提案したシミュレーションの有効性が示された。

また、力学モデルを斜面上を走行する車輪へ拡張し、斜面におけるローバーの挙動解析シミュレーションを行なった。地面斜度およびステアリング角に応じてローバーの挙動は大きく異なり、シミュレーションによってローバーの走行軌跡を事前評価することの重要性を示した。

## 文献

- [1] Bekker, G.: Introduction to Terrain-Vehicle Systems, University of Michigan Press, 1969.
- [2] Yoshida, K., and Ishigami, G.: "Steering Characteristics of a Rigid Wheel for Exploration on Loose Soil," Proc of the 2004 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2004
- [3] <http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/spacedyn>
- [4] 吉田和哉ほか: "月探査ローバーテストベッドLunar Rover Prototypeの開発," 日本ロボット学会, 第21回学術講演会, 2003