

月・惑星探査ローバーの砂地登坂における力学解析

吉田和哉 渡辺敏暢* 水野昇幸 石上玄也 (東北大, *現コマツ)

Terramechanics-Based Analysis of a Lunar/Planetary Rover for Slope Climbing

Kazuya Yoshida, Toshinobu Watanabe, Noriyuki Mizuno
Genya Ishigami(Tohoku Univ.)

Abstract— This paper presents analysis of traction mechanics and control of a lunar/planetary rover based on the models obtained from terramechanics. A case study has been conducted for a rover test bed to negotiate a slope of loose soil, such as regolith that covers most of lunar surface. The tire traction force is modeled as a function of the vertical load and slip ratio of the wheel. Bekker's terramechanic formulae are employed to derive an improved practical model that calculates net traction force, referred to as Drawbar Pull, with a reasonable precision.

Key Words: Terramechanics, Traction Control, Drawbar Pull, Slip Margin, Traction Margin

1. まえがき

月・惑星探査において、科学的な移動探査を実現するキーテクノロジーとして、移動ロボット（特に車輪走行ローバー）の重要性・有用性が認識されている¹⁾²⁾。特に、険しい環境で自在な移動を可能とするために、ローバーの走破性能を向上させることが技術課題の1つとなっており、多くの研究が進められている。

ローバー走行性能を明らかにするために、土と車輪の力学（テラメカニクス）に基づいた研究が精力的に行われている。たとえば、Iagnemmaら³⁾は、ローバー搭載センサにより、踏破中の土質パラメータ（内部摩擦角、粘着力）をリアルタイムで同定する手法を提案している。また、Grandら⁴⁾は、土壌の流動を考慮したシミュレーションモデルを構築している。

筆者らは、特に土壌と車輪に間に生じるすべりに注目して、車輪駆動力をモデル化する研究を進めている⁵⁾⁶⁾。このような、すべりに注目した走行モデルは、ローバーの登坂能力の評価に応用することができる。特に月面は、レゴリスと呼ばれる非常に細かな砂で覆われており、斜面登坂においては、車輪にすべりが生じやすくなる。すべりが増大し空転を生じると車輪は土壌の中に沈んでいってしまい（動的沈下）、ローバーが前進も後進もできない状態（スタック）に陥ってしまう。

本稿では、流動的な土壌の上で車輪がスタックするメカニズムを明らかにし、すべり率を状態変数として、動的沈下量や有効駆動力などを定量的に評価する。また、4輪を有するローバーテストベッドを用いて斜面登坂実験を行い、これら結果にもとづいて最大登坂角を決定づける要因を明らかにする。

2. 走行力学モデル

2.1 すべり率

本研究では、すべりの程度および走行の状態を評価するために、すべり率と呼ばれる概念を用いる。車輪のすべり率は以下のように定義される。

$$s = \begin{cases} (r\dot{\theta}_w - v_w)/r\dot{\theta}_w & (r\dot{\theta}_w > v_w : \text{駆動時}) \\ (r\dot{\theta}_w - v_w)/v_w & (r\dot{\theta}_w < v_w : \text{制動時}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、

r : 車輪半径

θ_w : 車輪回転角 ($\dot{\theta}_w = \omega$)

$r\dot{\theta}_w$: 車輪円周速度

v_w : 車輪並進速度

である。すべり率は $-1 \leq s \leq 1$ の範囲において定義されるものとする。

2.2 土と車輪の力学

Fig.1 は、流動性のある地面に接している車輪の一般的なモデルであり、以下のような基礎方程式が成り立つことが知られている⁷⁾⁸⁾。

$$\tau(\theta) = (c + \sigma(\theta) \tan \phi) \times (1 - \exp[-\frac{r}{k}\{\theta_f - \theta - (1-s)(\sin \theta_f - \sin \theta)\}]) \quad (2)$$

ここで、

$\sigma(\theta)$: 車輪に加わる垂直応力

$\tau(\theta)$: 車輪に加わるせん断応力

c : 土の粘着力

ϕ : 土の内部摩擦角

b : 車輪幅

k : share displacement

車輪に作用する力は、 σ と τ をそれぞれ車輪の進入角 θ_f から離脱角 θ_r の接地領域において積分すること

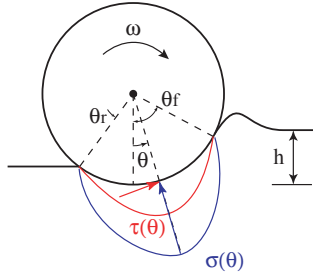


Fig.1 A tire model on deformable soil

により求まる．垂直荷重とつりあう垂直抗力 W は以下の式で求めることができる．

$$W = rb \left\{ \int_{\theta_r}^{\theta_f} \sigma(\theta) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_r}^{\theta_f} \tau(\theta) \sin \theta d\theta \right\} \quad (3)$$

また，Drawbar Pull と呼ばれる有効駆動力 DP は，

$$DP = rb \left\{ \int_{\theta_r}^{\theta_f} \tau(\theta) \cos \theta d\theta - \int_{\theta_r}^{\theta_f} \sigma(\theta) \sin \theta d\theta \right\} \quad (4)$$

となり，さらに車軸の駆動トルク T は，

$$T = r^2 b \left\{ \int_{\theta_r}^{\theta_f} \tau(\theta) d\theta \right\} \quad (5)$$

で記述することができる．

2.3 垂直応力分布

前述の式は車輪に加わる垂直応力分布 $\sigma(\theta)$ によって求められるが， $\sigma(\theta)$ を決定することは比較的複雑である．この応力分布モデルに関しては，Wong⁷⁾ に示されるようにいくつかのモデルが知られているが，筆者らは実験値をより詳しく表現できる以下のモデルを提案する．

$$\sigma(\theta) = \sigma_{max} \left(\frac{\cos \theta - \cos \theta_f}{\cos \theta_m - \cos \theta_f} \right)^n \quad (6)$$

ここで， θ_m は最大応力発生角であり，その角度での垂直応力を σ_{max} とすると以下の関係式が成り立つ．

$$\theta_m = c_1 s \theta_f \quad (7)$$

$$\sigma_{max} = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) (r)^n (\cos \theta_m - \cos \theta_f)^n \quad (8)$$

2.4 静的沈下および動的沈下

土の上に置かれた平板に加わる静的な圧力 p は，Bekker⁸⁾ により以下のように定式化されている．

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) h_s^n \quad (9)$$

ここで h_s は静的沈下量である．式 (9) を車輪のモデルに応用することで次式を得る．

$$W = \int_{-\theta_s}^{\theta_s} \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) (r (\cos \theta - \cos \theta_s))^n r b d\theta \quad (10)$$

$$h_s = r(1 - \cos \theta_s) \quad (11)$$

一方，車輪は回転とともに動的に沈下するが，すべり率一定の場合には，動的沈下量 h_k が一定値に収束することが知られている．

$$h_k = c_2 s \quad (12)$$

静的沈下量および動的沈下量が求まると，車輪進入角 θ_f は以下の式で求めることができる．

$$\theta_f = \cos^{-1} \left(1 - \frac{h_s + h_k}{r} \right) \quad (13)$$

さらに，車輪離脱角 θ_r は，

$$\theta_r = c_3 \theta_f \quad (14)$$

となる．ここで c_3 は回復定数である．

2.5 有効駆動力 DP (Drawbar Pull) の算出法

有効駆動力 DP を求めるプロセスを以下に示す．

1. 垂直荷重 W とすべり率 s を入力する．
2. 式 (10) から θ_s を計算し，式 (11) から h_s を求める．
3. 式 (12) により h_k を求め， θ_f ， θ_r をそれぞれ式 (13)，式 (14) から算出する．
4. θ_m は式 (7) によって求められ，式 (8) から σ_{max} が決定される．
5. 垂直応力分布 $\sigma(\theta)$ が式 (6) によって求められる．
6. 式 (2) から $\tau(\theta)$ が決定する．
7. 最終的に， $\sigma(\theta)$ と $\tau(\theta)$ を式 (4) に代入し，DP が求められる

3. 土と車輪の力学パラメータの同定

前述の車輪力学モデルの検証，および力学パラメータの同定を行うため車輪 1 輪を用いた実験を行った．

実験装置の概要を Fig.2 に示す．多様なすべり状態での走行を表現させるため，車輪は任意の速度で回転・並進することができる．本実験装置では車輪の回転速度，並進速度，沈下量を計測することができ，さらに F/T センサにより，車輪に加わる垂直方向と水平方向の力を計測する．実験に用いた車輪は直径 0.18[m]，アルミ製であり，車輪の表面には進行方向と直行する向きに高さ 0.01[m] のフィンを備えている．

以下に，乾燥砂を用いた実験の結果を示す．Fig.3 は，2 種類の平板による静的沈下量を計測した結果を示している．この結果から式 (9) における k_c ， k_ϕ ， n が同定される．また，Fig.4 は異なるすべり率における車輪の沈下量の履歴を示している．すべり率が一定のとき動的沈下量は定常値に収束し，最大沈下量はすべり率に比例することがわかる．この結果をもとに，式 (12) における c_2 が同定できる．さらに Fig.5 では，垂直荷重を変化させたときのすべり率と有効駆動力との関係を示している．実験結果は比較的散在しているが理論曲線と一致していることが分かる．

本実験から同定された乾燥砂と月レゴリスシミュラントの諸パラメータを以下に示す．

	乾燥砂	シミュラント	
c	0.005	0.005	$[\text{N}/\text{m}^2]$
ϕ	27.5	37.5	$[\text{deg}]$
r	0.09	0.09	$[\text{m}]$
b	0.1	0.1	$[\text{m}]$
k	0.012	0.049	$[\text{m}]$
k_c	85×10^3	85×10^3	$[\text{N}/\text{m}^{n+1}]$
k_ϕ	45×10^4	45×10^4	$[\text{N}/\text{m}^{n+1}]$
n	1.38	1.38	
c_1	0.5	0.5	
c_2	0.025	0.025	$[\text{m}]$
c_3	1.1	1.1	

なお、シミュラントに関する詳細パラメータは現在同定中であるが、内部摩擦角 ϕ と share displacement k において、特に顕著な違いが見られる。

4. ローバーによる登坂実験

当研究室で開発した4輪ローバーを用いて、月レゴリスシミュラントで構成された斜面の登坂実験を行った。ローバーの詳細については別項を参照いただきたい⁹⁾ 各車輪は Fig.2 で示した実験装置に用いた車輪と同一のものである。実験は航空宇宙技術研究所において行われた。実験の概観を Fig.6 に示す。登坂実験装置は幅 1.5[m]、長さ 2.0[m] の直方体形状の台に深さ約 10[cm] のシミュラントが敷き詰められている。この台を傾けることにより、傾斜 30 度までの登坂実験をおこなうことができる。

車輪の回転速度はモータに取り付けられたエンコーダで計測し、ローバーの並進速度は画像センサによって計測される。これら両者の値からすべり率を計算する。一例として、車輪の回転速度、ローバー並進速度およびすべり率の時間履歴を Fig.7 に示す。この実験において、車輪は一定速度制御を行った。ローバーは静止状態から加速し、一定速度に収束している。走行開始時はすべり率が 1 となっているが、徐々に減少し、定常状態では約 0.3 となっている。

定常状態のすべり率を有効駆動力曲線上にプロットしたものを Fig.8 に示す。この例では、実験における定常すべり率は 0.3 であるが、有効駆動力の理論曲線より、すべり率をさらに増大させることにより、駆動力も増大できることが読み取れる。そこで、最大駆動力を得るまですべり率の余裕を *slip margin* と定義することにする。同時に、現在の駆動力から最大駆動力までの余裕を *traction margin* と定義する。これらの量は、すべり率をモニターしながら車輪回転速度や駆動トルクを制御する際の有力な指標となる。

なお、有効駆動力のピークを超えてすべり率を増大させると、駆動力はかえって減少し、車輪の動的沈下量は増大する一方なので、ローバーがスタックしてしまう危険性が高くなる。

5. 最大登坂能力の検討

Fig.9 に示すように、登坂傾斜角 θ が増加するにしたがって、車体重量の斜面水平成分 $W \cos \theta$ は増加し牽引

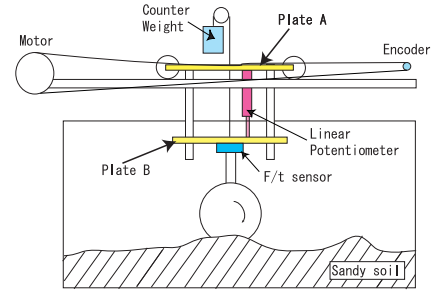


Fig.2 A schematic of the single wheel test bed

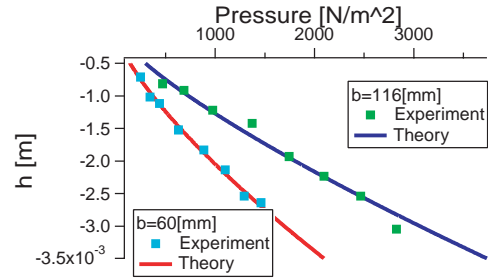


Fig.3 Static sinkage for different plate widths: theory and experimental plots

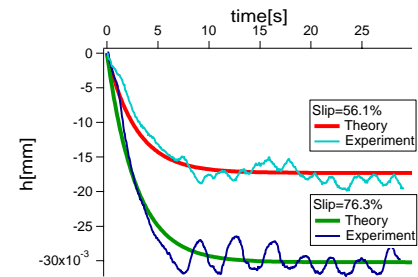


Fig.4 Time history of kinetic sinkage for different slip ratios: theory and experimental plots

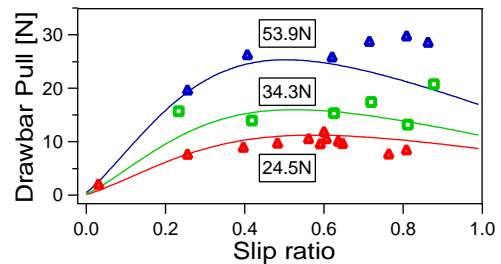


Fig.5 Drawbar Pull for different vertical loads: theory and experimental plots

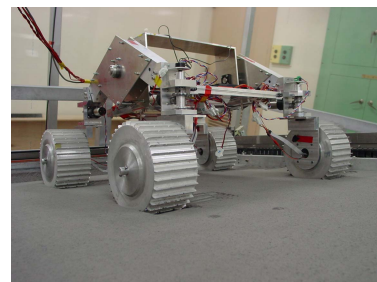


Fig.6 A slope climbing experiment of a 4-wheel drive rover test bed on Regolith Simulant

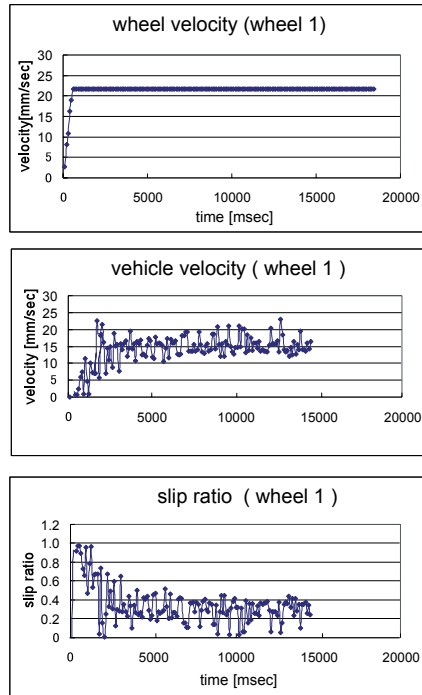


Fig.7 A typical raw data from the slope climbing experiment

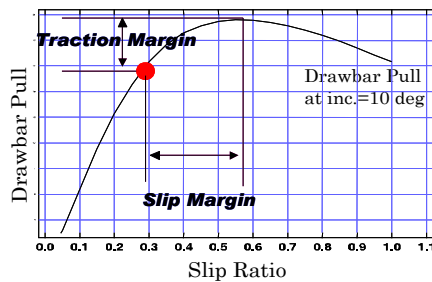


Fig.8 The definition of slip margin and traction margin

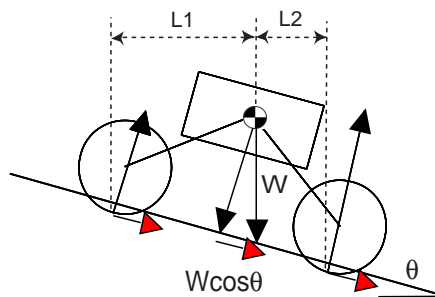


Fig.9 A model of a rover on a slope

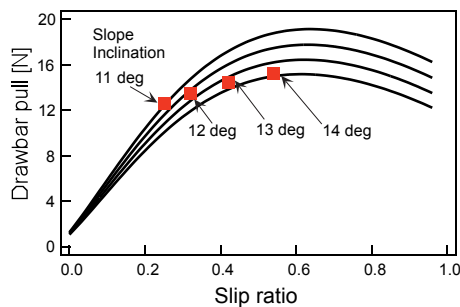


Fig.10 DP curves of the front wheel for different slope inclinations

負荷として加算される．また，斜面垂直成分の $W \sin \theta$ は減少し，この成分は L_1 と L_2 の逆比に応じて前輪と後輪に分配される．よって，前輪に加わる垂直荷重は平地走行時より小さくなり有効駆動力も減少してしまう．

Fig.10 に，登坂角度が 11 度から 14 度まで 1 度刻みのケースにおける前輪の有効駆動力曲線を示す．また登坂実験において得られた定常すべり率を同グラフ上にプロットした．同図より，登坂角度の増大とともにすべり率が増大し slip margin が減少していることがわかる．同時に，最大駆動力のピークも低くなってしまふ．特に，登坂角度が 14 度のケースでは，traction margin と slip margin がほぼ 0 に近づき，この角度が実験に用いたローバーの限界登坂角であるということを示している．

ローバーの登坂能力を向上させるためには，以下の方法が挙げられる．

1. Share displacement k と有効駆動力は反比例の関係にあるので， k を小さくするような車輪設計を行う．
2. 斜面傾斜に応じて Fig.9 に示される L_1, L_2 を同じく保ち，各車輪の負荷荷重を均等分配することができれば，DP 曲線の最大値の低下を最小限に抑えることができる．

6. あとがき

本稿では月・惑星探査ローバーを研究対象とし，車輪のすべり率に注目した走行メカニズムについて述べた．また土と車輪の力学関係について明らかにし，詳細な力学モデルを構築した．またローバーの登坂実験を行い，走行制御における traction margin と slip margin を定義し，ローバー登坂限界を明らかにするモデルを示した．

謝辞

ローバー登坂実験は航空宇宙技術研究所にて実施しました．関係各位に御礼申し上げます．

参考文献

- 1) <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/> (as of June 2003)
- 2) <http://mars.jpl.nasa.gov/missions/> (as of June 2003)
- 3) Iagnemma, K., Shibly, H., Dubowsky, S., "On-Line Traction Parameter Estimation for Planetary Rovers," *Proceedings of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3142–3147, 2002.
- 4) C.Grand, F.Ben Amar, P.Bidaud, "A Simulation System for Behaviour Evaluation of Off-road Mobile Robots," *4th International Conference on Climbing and Walking Robots*, Sept. 2001, Germany.
- 5) K. Yoshida, H. Hamano; "Motion Dynamics of a Rover With Slip-Based Traction Model," *Proc. 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3155-3160, 2002.
- 6) K. Yoshida, H. Hamano, T. Watanabe; "Slip-Based Traction Control of a Planetary Rover," *Experimental Robotics VIII, SATR 5*, pp.644–653, 2003.
- 7) Wong, J. Y., *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Sons, 1978, chapter 2.
- 8) Bekker, G., *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*, University of Michigan Press, 1969.
- 9) 吉田ほか，月・惑星探査ローバーテストベッド「The Dune Explorer」の開発，日本ロボット学会 第 21 回学術講演会，2003.