

テラメカニクスに基づく月・惑星探査ローバーの登坂性能解析

東北大学大学院 三輪章子, 石上玄也, 永谷圭司, 吉田和哉

Terramechanics-Based Analysis on Climbing Ability of a Lunar/Planetary Exploration Rover

Tohoku University Akiko Miwa, Genya Ishigami, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida

Abstract This paper presents climbing ability of a lunar/planetary exploration rover from the viewpoint of terramechanics. A mathematical model is developed to analyze the mechanics of traction forces (*Drawbar Pull*) generated by wheels and their theoretical limits called *Trafficability limit* and *Mobility limit*. The analysis reveals that the climbing ability will be increased if the mass center of the rover stays closer to the front wheels when the slope is steeper than the mobility limit. These theories have been verified by numerical simulations and hardware experiments using a test bed.

Keywords: Terramechanics, Planetary Exploration Rover, Climbing Ability

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ーの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[1]. 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.

ローバーに求められる能力の一つとして, 登坂能力がある. 例に挙げたNASAのミッションにおいて, ローバーはクレーターからの脱出や丘陵地帯での走行などのタスクを要求された. しかし登坂途中において, 一部の車輪が砂状の土壌にはまり込んでスタックしてしまい, ミッションの中断を余儀なくされた. 幸いにして無事に走行を再開することができたが, 場合によってはミッションの失敗へとつながる危機的状況であったといえる. このような状況を回避するためには, ローバーの登坂性能の解析やその向上といった研究が非常に重要となる. そこで本研究ではローバーの登坂性能に着目し, テラメカニクスの観点から登坂限界に至るメカニズムの解明を試みることにした. 登坂限界を決定付ける要因を特定し, 登坂限界に至るまでの挙動を解析することにより, 登坂能力の向上が望める.

テラメカニクスとは土壌力学に基づく車輪の力学解析であり, 1960年頃より研究が始められた[2]. 月や惑星など探査対象天体の地表は一般に軟弱で凹凸のある不整地である. それに対して探査ローバーの車輪は, 厳しい環境に耐えるため金属性などの硬い車輪となっ

ている. このため, 惑星探査ローバーの挙動を解析し制御するためには, 軟弱な土壌と硬い車輪との相互作用に基づいて力の発生メカニズムを考察する必要がある. 著者らの研究グループでは, これまでに, テラメカニクスに基づく車輪の力学モデルの構築および, それを用いたローバー動力学シミュレーションの開発を行ってきた[3][8][9].

本稿は, まずはじめにこれまでに構築してきたテラメカニクスモデルについて説明する. 次にテラメカニクスモデルを用いて登坂のメカニズムを解析するとともに, 登坂限界を決定付ける要因を明らかにし, ローバーテストベッドを用いた登坂実験および動力学シミュレーションによって理論を実証する.

2 車輪力学モデル

本節では, [8][9]において提案した, テラメカニクスに基づく車輪力学モデルについて述べる. ただしモデル化する車輪は土壌との接触面が平滑であるとする.

2.1 滑り率

まず初めに, 車輪の走行状態を表す指標として滑り率を定義する. 軟弱地盤上の車輪に生じる滑りは駆動力などの車輪に加わる力を大きく左右する, 重要なパラメータである. 滑り率 s は式(1)によって定義され, 車輪並進速度 v_w と車輪周速度 $r\omega$ の差を表す無次元化した量である.

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

ただし $-1 < s < 1$ とする. ここで r は車輪半径, ω は車輪角速度である.

2.2 駆動力: F_x , 地面垂直抗力: F_z

図1は, 軟弱地盤水平面上を走行する硬い車輪のモデル図である. 車輪は角速度 ω で等速回転し, $+x$ 方向に進んでいるとする. ここで θ_f, θ_r はそれぞれ車

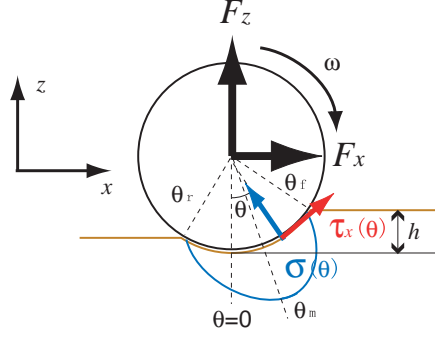


図 1: Wheel-soil contact model on a horizontal plane
 輪の進入角，離脱角と呼ばれ，車輪が地面との接触を開始する角度および離れる角度を示している．なお鉛直下向き方向を $\theta = 0$ とする．

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 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．

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

ここで b は車輪幅である．

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

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

$\sigma(\theta)$ は図 1 に示すような分布を持ち，次式で表される．

$$\sigma(\theta) = \begin{cases} \sigma_m \left(\frac{\cos \theta - \cos \theta_f}{\cos \theta_m - \cos \theta_f} \right)^n & (\theta_m \leq \theta < \theta_f) \\ \sigma_m \left(\frac{\cos \{ \theta_f - \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} (\theta_f - \theta_m) \} - \cos \theta_f}{\cos \theta_m - \cos \theta_f} \right)^n & (\theta_r < \theta \leq \theta_m) \end{cases} \quad (4)$$

ここで， θ_m は応力最大発生角であり，

$$\theta_m = (a_0 + a_1 s) \theta_f \quad (5)$$

によって与えられる． a_0, a_1 は定数であり，それぞれ一般的な値は実験から $a_0 \approx 0.4, 0 \leq a_1 \leq 0.3$ と言われている [4]．式 (5) に滑り率 s が含まれるため，駆動力は滑り率の関数となる．また θ_m において発生する垂直応力 σ_m は最大垂直応力となり，以下の関係式が成り立つ．

$$\sigma_m = (k_c/b + k_\phi) [r(\cos \theta_m - \cos \theta_f)]^n \quad (6)$$

k_c, k_ϕ, n はそれぞれ土壌に依存する係数である．

車輪に発生するせん断応力 τ_x は，以下の式によって導かれる [5]．

$$\tau_x(\theta) = (c + \sigma(\theta) \tan \phi) [1 - e^{-j_x(\theta)/k_x}] \quad (7)$$

ここで， $j_x(\theta)$ は土壌変形量と呼ばれ，

$$j_x(\theta) = r[\theta_f - \theta - (1 - s)(\sin \theta_f - \sin \theta)] \quad (8)$$

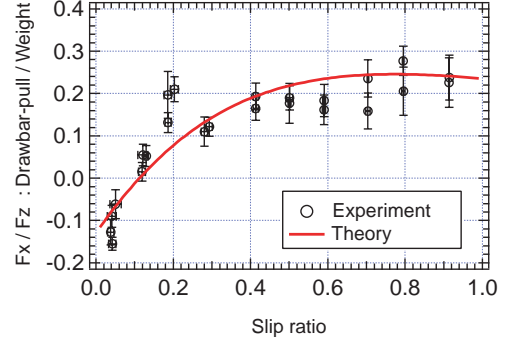


図 2: Experimental result : Slip ratio vs. Drawbar pull coefficient

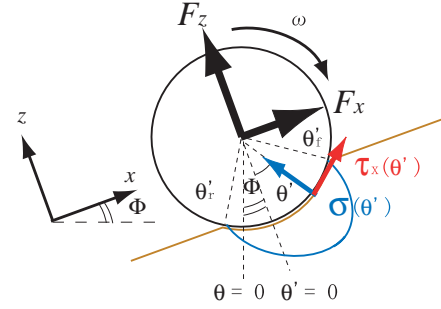


図 3: Wheel-soil contact model on a slope

によって計算される量である．また k_x は Shear Displacement と呼ばれる変形係数であり，走行する車輪の表面形状に依存する係数である．さらに c, ϕ は土壌固有の値であり，それぞれ土壌粘着力，土壌の内部摩擦角と呼ばれる．

著者らは本モデルに関して実証実験を繰り返し，月レゴリスシミュラント (月模擬砂) や川砂などの土壌パラメータおよび，パドルやスパイクといった車輪形状に関するパラメータの同定を行ってきた [8]．図 2 に実験結果の一例を示す．グラフは土壌パラメータおよび車輪形状を一定としたときの滑り率に対する駆動力係数 (駆動力/地面垂直抗力) を表しており，実験結果が理論曲線とよく一致していることがわかる．よって本モデルの妥当性は十分に示されていると言える．

2.3 登坂時の力学モデル

次に，車輪力学モデルに登坂時の車輪について拡張することを考える．車輪進行方向と地面が成す角度を Φ とすると，駆動力 F_x 及び地面垂直抗力 F_z は，図 3 に示した地面垂直下方向を $\theta' = 0$ とする $\theta' (= \theta - \Phi)$ 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．よって斜面上の車輪に働く F_x および F_z は式 (9)(10) となる．

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

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

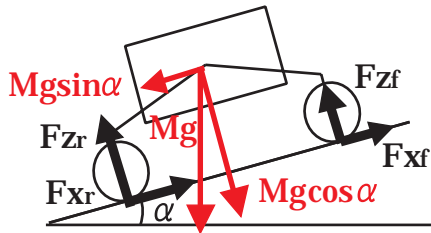


図 4: A rover model on a slope

3 登坂時の挙動

前節で示した土壌と車輪の力学 (テラメカニクス) によれば、ローバーが発揮できる駆動力は車輪の滑り率、沈下量、土壌のパラメータ、及び車輪形状によって決定される。よってそれらのパラメータが同定できれば、様々な状況下のローバーの挙動について解析することが可能である。本稿では特に登坂時のローバーの挙動について詳しく考察する。なお、考察対象は4輪ローバーとする。

3.1 登坂限界へ至るメカニズム

斜度 α の斜面を走行するローバーを側面からみたモデルを図 4 に示す。斜面は一様であり、登坂は最大傾斜方向に行なわれるものとする。このときローバーに生じる力は左右対称であるため、以降車輪を前後のみで考える平面 2 輪モデルとする。ローバーには斜度に応じて $Mg \sin \alpha$ が牽引負荷として生じるが、前後輪の駆動力 F_{xf} , F_{xr} の合計がこれより大きくなることにより、登坂を行なうことが可能となる。このとき前輪より後輪に多くの荷重がかかるため、後輪がより深く沈下し、発生する駆動力は前輪に比べて大きくなる。

$$F_{xr} > F_{xf} \quad (11)$$

また、斜度が増大するにつれて牽引負荷も増大していく。テラメカニクスの観点から車輪は滑り率を増すことにより駆動力を増加させることができるが (図 2)、やがて限界に達する。すなわち

$$Mg \sin \alpha = F_{xr_{max}} + F_{xf_{max}} \quad (12)$$

となる角度が登坂限界角度であるといえる。

以上のことをテラメカニクスに基づく模式的な理論曲線図で表すと図 5 のようになる。土壌パラメータと車輪形状に変化がない場合、駆動力は滑り率と沈下量すなわち地面垂直抗力の大きさによって決まる。地面垂直抗力が大きいほど、同じ滑り率でも発揮できる駆動力は大きくなる。

斜度が小さい状態では牽引負荷も小さいためあまり滑らずに登坂するが、斜度が大きい状態では増大した負荷に対抗するため車輪の滑りは大きくなると考えられる。また後輪により多くの荷重がかかり、発揮する駆動力の差が前後で拡大していく。最終的に前後輪の駆動力が滑り率に対してほぼ飽和した状態となるため、その和以上の牽引負荷がかかる斜面はどんなに車輪が滑っても登ることができず、この状態が登坂限界となる。

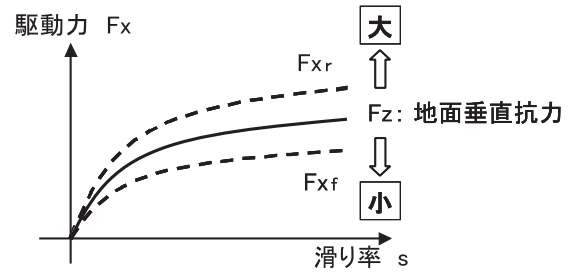


図 5: Theoretical model : Slip ratio vs. Drawbar pull

3.2 登坂限界決定要因

登坂時において前輪と後輪に加わる地面垂直抗力に差が生じ、結果として前輪が十分に駆動力を発揮できないことや、後輪が負荷に耐えられず停止してしまうなどの現象が起こることが予想される [6]。これらの登坂限界を決定付ける現象 (登坂限界決定要因) には大きく分けて以下の 2 つのタイプがあると考えられる。

Trafficability 限界

土壌と車輪形状の関係によって生じる限界、すなわちテラメカニクスの限界のことを意味する。例として「前輪の押し付けが弱く十分な駆動力を発揮できない」や「土壌が崩れてしまって登れない」といった現象が考えられる。

Mobility 限界

ローバーの性能に起因する限界を意味する。例として「後輪にかかる負荷が大きすぎてモータが停止する」などの現象が考えられる。

3.3 重心移動による登坂限界の向上

前項で述べた限界は、重心を前方に移動させることで向上させることが可能ではないかと考えられる。重心を前方に置くことで、登坂状態においても前後の車輪に加わる荷重を平均化することができる。その結果重心が中心にある場合よりも前輪の押し付け力が増加し、かつ後輪の負荷が減少するため、登坂限界の向上が期待できる。

4 ローバーテストベッドを用いた登坂実験

月レゴリスシミュラントを敷き詰めた角度可変の実験台を用いてローバーの走行実験を行なった。なお、本実験は宇宙航空研究開発機構の施設において行なわれた。

4.1 実験概要

実験の概観を図 6 に示す。実験台の走行可能面積は $2 \text{ [m]} \times 1.5 \text{ [m]}$ 、土壌深さは約 0.1 [m] である。装置上部には位置計測用画像センサが設置され、ローバーの移動軌跡データを取得できる。また、自動均し機により常に同じ土壌状態で実験を行なうことが可能となっている。

4.2 ローバーテストベッド

本実験ではテストベッドとして本研究室で開発された 4 輪ローバーを用いた [7]。ローバーは駆動用モーター

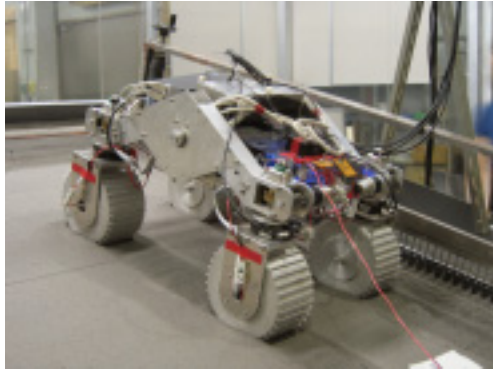


図 6: A slope climbing experiment of a 4-wheel rover on Regolith Simulant

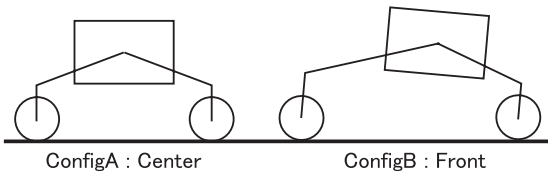


図 7: Rover configuration

タとステアリングモータをそれぞれ 4 つずつ持ち、独立で制御できる．実験中、車輪の回転速度はモータのエンコーダ値を用いて一定に制御される．また本実験ではステアリングを常に 0 [deg] とした．ローバーの各脚には 6 軸力覚センサが組み込まれており、各車輪に加わる駆動力および地面垂直抗力が計測可能である．またローバーの脚の長さは可変であり、図 7 に示すように重心位置を移動させることができる．

4.3 実験条件

実験は水平面 ($\alpha = 0$ [deg]) から始め、登坂限界を迎えるまで徐々に斜度を増して行なわれた．また重心移動が登坂性能に及ぼす効果について調べるため、図 7 に示した 2 パターンのローバー形状について実験を行った．

駆動用モータのシステムとして、無制限に電流を流すことのできるものと電流制限を設けたものの 2 通りを用意した．後者の電流制限システムは Mobility 限界の一種であり、車輪に加わる負荷が増し 2 [A] 以上の電流を要求されたときに、回路保護のため一時的に電源を OFF にする．

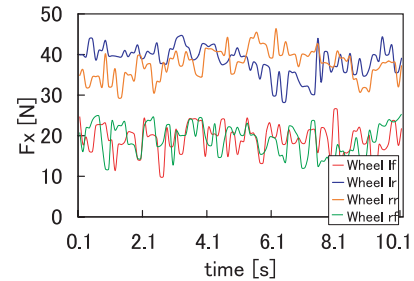
4.4 実験結果

各条件における登坂限界角度を表 1 に示す．本実験から以下の結果が得られた．

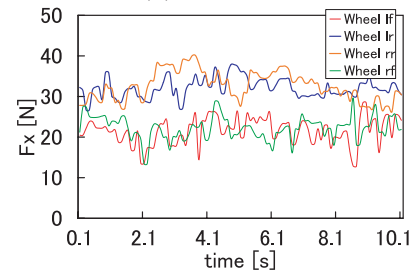
- 電流に制限がない場合、Config A(重心位置中心)、Config B(重心位置前方) の両条件におけるローバーの登坂限界に大きな違いは見られなかった．
- 電流に制限がある場合、重心位置を前方におくことによる登坂限界の向上がみられた．
- 電流に制限がある場合、登坂限界近い斜面では後輪が断続的に停止していた．
- どの条件においても斜度が増すにつれて車体並進速度が遅くなった(すなわち滑り率が増加した)．

表 1: Experimental results

	ローバー形状	電流制限	登坂限界角度
	Config A	なし	21 [deg]
	Config B	なし	21 [deg]
	Config A	あり	14 [deg]
	Config B	あり	19 [deg]



(a) Config A



(b) Config B

図 8: Time profile of drawbar pull

5 登坂性能解析

実験結果を用い、登坂モデルの妥当性の検証および、登坂限界に対する重心移動の効果について解析する．

5.1 登坂モデルの妥当性

実験の結果、電流に制限がなければローバーは重心位置を中心に置いたとき、前方に置いたときのどちらにおいても 21 [deg] が登坂限界であることが分かった．図 8 に斜度 21 [deg] における実験結果を示す．グラフは各車輪に生じた駆動力の時間変化を表しており、図中の車輪記号 lf, lr, rr, rf はそれぞれ左前方、左後方、右後方、右前方を意味している．

各グラフごとの駆動力の総和は (a), (b) とともに 110 ~ 115 [N] 程度である．式 (12) にローバーの質量 32.5 [kg] と斜度 21 [deg] を代入すると $Mg \sin \alpha = 114$ [N] となり、実験結果は理論式と一致する．また Config A よりも Config B の方が前後の駆動力の差が小さくなっており、地面垂直抗力の増減によって駆動力も増減することが確認された．以上の結果から登坂理論モデルの妥当性は実証されたといえる．

5.2 Trafficability 限界に関する重心移動効果

本実験において、電流制限がない場合は前後輪における荷重の差による登坂限界への影響は見られなかった．よって重心移動は Trafficability 限界に寄与しない

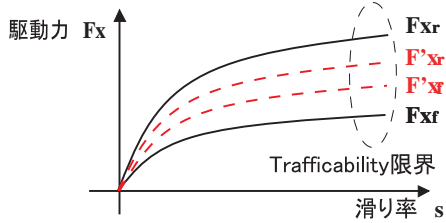
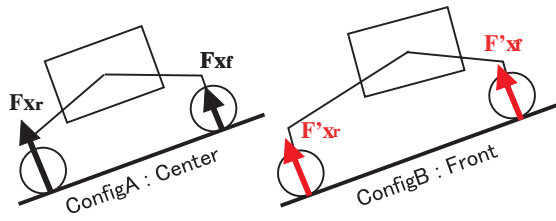


図 9: Trafficability limit on theoretical curves

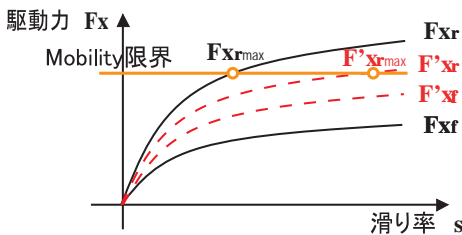


図 10: Mobility limit on theoretical curves

といえる．このことを理論曲線を用いて表すと図 9 のようになり，

$$F_{xr_{max}} + F_{xf_{max}} \simeq F'_{xr_{max}} + F'_{xf_{max}} \quad (13)$$

が成り立つと言える．すなわち，前輪にかかる地面垂直抗力が減少することにより駆動力も確かに減少するが，減少分とほぼ同程度後輪の駆動力が増すためローバーに働く駆動力の総和は変化しない．

5.3 Mobility 限界に関する重心移動効果

電流を制限されたことによるモータの一時的な停止は Mobility 限界を意味する．車輪に加わる地面垂直抗力が増し大きな駆動力を発生させる場合，それに比例して回転抵抗も増加する．モータが回転抵抗に打ち勝つトルクを出すためには大電流が必要となるため，ある一定以上の電流が流せないようなシステムであった場合，その制限はすなわち駆動力への制限となる．Mobility 限界を理論曲線上に表したものが図 10 である．この図から明らかに式 (14) が成り立つ．

$$F_{xr_{max}} + F_{xf_{max}} < F'_{xr_{max}} + F'_{xf_{max}} \quad (14)$$

よって重心移動を用いて前後の回転抵抗を平均化させることにより，Mobility 限界へ達した際の駆動力の総和を大きくすることが可能となる．すなわち重心移動は Mobility 限界に起因する登坂性能の向上に有効であるといえる．

6 動力学シミュレーション

本研究室で開発した動力学シミュレーション [9] を用い，実験時のローバーの挙動について解析した．本

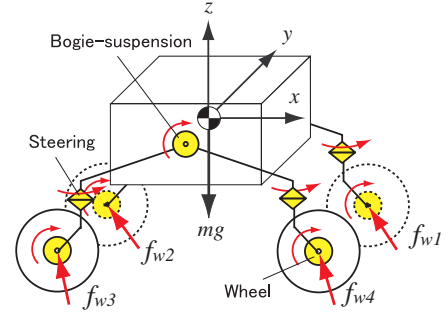


図 11: Dynamics model of the rover

シミュレーションは，ローバーの車輪に生じる力を第 2 節で示したテラメカニクスモデルにより求めている．したがってシミュレーション結果と実験結果を比較検討することにより，テラメカニクスモデルの妥当性が定量的に評価できる．

6.1 ローバー動力学モデル

ローバーの動力学モデルを図 11 に示す．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．ベースの姿勢は慣性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，ベース及び 10 個のリンクから成る．関節はベース左右に配置されたロッカーススペンション機構と呼ばれる関節が 2 つ，各脚のステアリング関節が 4 つ，車輪関節が 4 つの計 10 関節あり，全て 1 自由度の回転関節である．

ローバー全体の運動方程式は式 (15) となる．

$$H \begin{bmatrix} \dot{v}_0 \\ \dot{\omega}_0 \\ \dot{q} \end{bmatrix} + C = \begin{bmatrix} F_0 \\ T_0 \\ \tau \end{bmatrix} + J^T F_e \quad (15)$$

ここで，

H : ローバー全体の慣性項

\dot{v}_0 : ベース加速度

$\dot{\omega}_0$: ベース角加速度

\dot{q} : 各関節の角加速度

C : 速度非線形項+重力項

F_0 : ベースに作用する力

T_0 : ベースに作用するトルク

τ : 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
($= [f_{w1}^T \ f_{w2}^T \ f_{w3}^T \ f_{w4}^T]^T$)

である．ローバーに作用する力として，重力，各関節に働くトルク，及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 (9)(10) により与える．

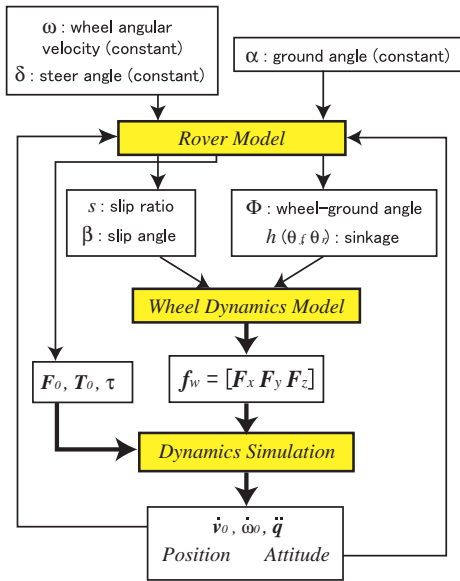


図 12: Flow chart of the simulation

6.2 シミュレーションの流れ

シミュレーションの流れを図 12 に示す．車輪角速度 ω ，ステアリング角 δ ，及び地面斜度 α は一定とする．各時刻におけるローバーの状態から滑り率 s ，スリップ角 β ，沈下量 $h(\theta_f, \theta_r)$ ，水平面と車輪 x 軸が成す角 Φ 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, τ とともに式 (15) に代入し，次の時刻におけるローバーの状態を得る．この繰り返しにより，理論モデルに基づく各時刻のローバーに働く力やローバーの軌跡などを得ることができる．

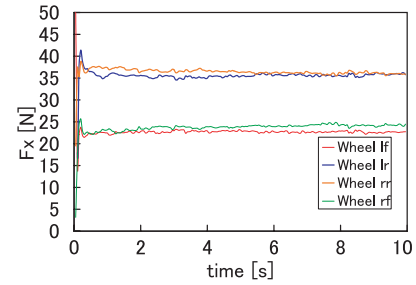
なおシミュレーション条件（各車輪回転速度，地面斜度など）は全て実験と同じとした．

6.3 シミュレーション結果

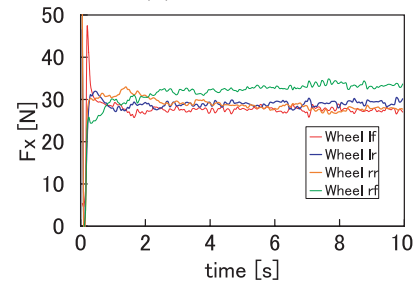
図 13 に斜度 21 [deg] におけるシミュレーション結果を示す．これらの結果は図 8 に示した実験結果と対応している．実験結果と同様に各グラフの駆動力総和は 115 [N] 程度となった．また Config B よりも Config A において前後の駆動力に差が生じている．これらの結果から，テラメカニクスに基づく本シミュレーションはローバーに加わる駆動力として妥当な値を算出しており，式 (9)(10) の妥当性が実証された．ただし定量的に実験結果と比較すると，全体的にシミュレーションの方が前後の駆動力差が小さくなっており，シミュレーションに用いたパラメータの見直し等が必要であると考えられる．

7 結言

本稿では，車輪型ローバーの登坂性能についてテラメカニクスの観点から考察した．登坂時の車輪に生じる力のモデルを構築し，登坂限界を決定付ける 2 つの要因 (Trafficability 限界, Mobility 限界) を明らかにした．さらに，登坂限界に関する重心移動の効果につい



(a) Config A



(b) Config B

図 13: Time profile of drawbar pull (Simulation)

て検討した．モデルの妥当性は，ローバーテストベッドを用いた登坂実験と動力学シミュレーションによって実証された．また実験結果より，重心移動が Mobility 限界の向上に有効であることが確認された．

謝辞

ローバー登坂実験は宇宙航空研究開発機構の施設において実施しました．関係各位に深く御礼申し上げます．

参考文献

- [1] <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/>
- [2] Bekker, G.: Introduction to Terrain-Vehicle Systems, University of Michigan Press, 1969.
- [3] 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
- [4] Wong, J. Y., Reece, A. R. : “Prediction of Rigid Wheel Performance Based on the Analysis of Soil-Wheel Stresses Part I, Performance of Driven Rigid Wheels,” Journal of Terramechanics, vol.4, 1967
- [5] Janosi, Z., and Hanamoto, B. : “The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicle”, Proc, 1st Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems, Torino, 1961
- [6] 吉田 和哉ほか：“月・惑星探査ローバーの砂地登坂における力学解析,” 日本ロボット学会, 第 21 回学術講演会, 2003
- [7] 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
- [8] 石上玄也, 水内健祐, 吉田和哉：“テラメカニクスに基づく車輪型移動ロボットの走行性能解析 (1. 月模擬砂上でのタイヤ力学解析)” 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2005
- [9] 石上玄也, 三輪章子, 吉田和哉：“テラメカニクスに基づく車輪型移動ロボットの走行性能解析 (2. 走行軌跡シミュレーション)” 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2005