

軟弱地盤での大幅な走行性能向上を目指した 大径車輪型ロボットの開発とフィールド実験

Development of a Large-diameter Wheeled Robot to Traverse on Loose-soil Slopes and Field Experiments

伊藤 毅, 須藤 真琢, 正 永谷 圭司, 正 吉田 和哉 (東北大)

Tsuyoshi ITO (Tohoku Univ.), ito@astro.mech.tohoku.ac.jp
Masataku SUTOH, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

Terrain of planets, such as Mars and the moon, is mostly covered with loose soil, boulders and rocks, whose features are basically unknown. So, planetary rovers are required high mobility performance to traverse not only over sands but also over boulders and rocks. According to our past researches, we understood that large diameter wheels and large lugs were effective to produce such high mobility performance on rough and weak terrains. So, In this research, we developed two-wheeled robots which have large diameter wheels and large lugs. We examined it's mobility performance on variety of fields such as volcano and coast. Our experimental result indicates that there is a close connection between the rover's mobility performance and the soil density, and our developed robots have high mobility performance to traverse over sands, boulders and rocks.

Key Words : Loose-soil, Mobile Robot

1 緒言

現在, 各国の宇宙開発機関において, 月や惑星の探査およびその利用について議論されている [1]. 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では, SELENE-2 (SELenological and ENgineering Explorer -2) 計画において, 月面の詳細な調査・データ収集を行う目的で, 無人移動探査ロボット (ローバー) による地表面の探査, 岩石などのサンプリングが計画されている [2].

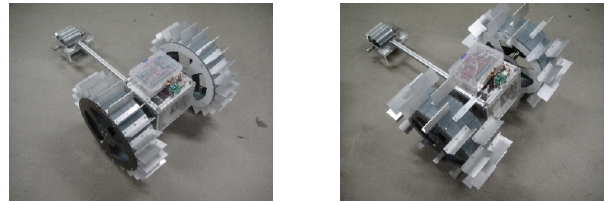
月面探査においてローバーによる地表面の探査は, 衛星では不可能な直接的な探査等, 非常に重大な役割を担っている. しかしながら, 月などの天体の表面は細かな砂に覆われており, ローバーでの探査を進めていく上で車輪のスリップによる探査の停滞や失敗が懸念される. そこで, スリップの発生条件やスリップの大きさなどを検証するために, 月面環境の理解および月面環境を模擬した事前の地上実験が必要不可欠となる.

これまでに行われてきた月面や惑星の地表面を想定した車輪走行実験では, 豊浦標準砂やレゴリスシミュラント (月模擬砂) など, 粒子の細かい砂のみで構成された軟弱地盤をテストフィールドとして用いる場合が多かった [3]. 更に, 再現性が高い実験環境が必要となることから, フィールドを平らに均した上で, 斜面走行実験のための斜面の構築を行うものが多かった [3][4]. しかし, 月面や火星表面には, 砂だけでなく, 大小様々な砂利等も存在している. また対象とする環境は平らな地形だけでなく, 傾斜も所々に存在している. 砂利地と砂地では車輪走行の難易度が異なることが予想され, 車輪型惑星探査ローバーを用いて探査するためには, 砂地だけでなく, 砂利地における低スリップ走行を実現する高い走行性能が求められる.

そこで, 本研究では, 砂地だけでなく, 砂利地への対応も視野に入れた車輪型移動ロボットを開発し, そのロボットを用いて, 火山や海岸といった多様なフィールドで走行実験を行うこととした. 本稿では開発したロボットの紹介, その走行性能の評価, 走行実験から得られた知見を紹介する.

2 対向二輪型移動ロボット

車輪型惑星探査ローバーの低スリップ走行を実現させるための方法の一つとして, 車輪表面形状の工夫が挙げられる



(a) TypeA

(b) TypeB

Fig. 1 Large diameter wheel robot

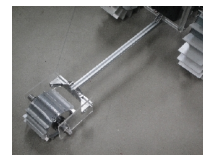


Fig. 2 Stabilizer

が, 加えて車輪径, および車輪幅も重要な要素となる [3]. 大径の車輪を有した移動ロボットの研究は, これまでにも行われてきたが [5], 搭載するラグの長さ, 本数, および配置方法にまで着目した研究は少ない. そこで, 本研究では「大径車輪」, および「大型ラグ」に着目したロボットを開発した. Fig. 1 に開発したロボットの概観を, また Table 1 に同ロボットのパラメータを示す.

開発したロボットは, 二輪の車輪を向かい合わせに搭載した対向二輪型のものである. タイプ B はタイプ A の車輪に搭載されたラグの配置を一本置きに左右へと移動し, 車輪幅の拡大による安定性, および走行性能の向上を狙った作りとなっている. タイプ A, タイプ B 共に Fig. 2 に示す, スタビライザーと呼ばれる装置が取り付けられている. スタビライザーは, 走行時の車体部分の回転を抑える役割に加え, 斜面走行時のバランスを向上させ転倒を防止する役割を持つ.

MPU には, マイクロコンピュータの H8S/2633 を使用しており, モータに搭載されたエンコーダから得られた速度情報を用いて, PI 制御でモータの速度制御を行う. また, ZigBee を用いた無線シリアル通信 (ZIG-100B: ベス

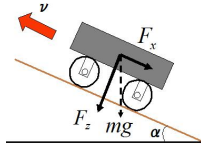


Fig. 3 Slope climbing test

トテクノロジー社製)により遠隔操作を可能とした。

3 走行性能評価指針

惑星探査において、探査ローバーには、不整地を走行することが要求されるため、登坂能力が非常に重要であると考えられる。そこで、本研究における走行実験では「登坂斜度」並びに「スリップ率」に着目した。Fig. 3 に示すように、ロボットは登坂の際、斜面と水平方向に重力により生じる力 F_x を受ける。傾斜角度 α が大きくなるにつれて F_x も大きくなり、その結果登坂も困難になる。

スリップ率は車輪の滑りを示す割合であり、スリップ率 s はロボットの実際の移動並進速度 v_x 、車輪回転速度 $r\omega$ を用いて式 (1) のように表される [6]。

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

本研究では、「登坂斜度」に対する「スリップ率」を求めることでロボットの走行性能を評価することとした。

4 テストフィールド

走行実験を行うに当たり、「砂・砂利混合フィールド」、「屋外砂フィールド」、「屋内砂フィールド」、「屋内砂利フィールド」の4種類の異なった地形をテストフィールドとして用いた。

「砂・砂利混合フィールド」として、長野県と群馬県の県境に位置する「小浅間山」(Fig. 4) を利用した。浅間山は活火山であり、火山灰や砂と砂利が混合した軟弱地盤で構成されている。砂利は、大きさ約 2cm 四方の軽石が大部分を占め、火山灰や砂上に乗っている。

「屋外砂フィールド」として、宮城県南東部に位置する「閑上海岸」(Fig. 5) を利用した。海岸の砂浜は、粒径が細かい砂のみで構成されており、微量ながら水分を含んでいるため凝着力が高い。更に、様々な傾斜角度の丘が点在する。

「屋内砂フィールド」は、豊浦標準砂を敷き詰めた、Fig. 6 に示す、約 1(w)×2(l)×0.15(h) [m] の屋内フィールドである。このフィールドは油圧ジャッキによって 20[deg] までの任意の傾きに設定することができる。

「屋内砂利フィールド」は、園芸用の砂利を敷き詰めた、Fig. 7 に示す、約 1(w)×3(l)×1.5(h) [m] のフィールドであ



Fig. 4 Mt. Koasama



Fig. 5 Yuriage coast



Fig. 6 Sand field



Fig. 7 Gravelly field

り、大きさ約 2cm 四方の軽石で構成されている。このフィールドでは、砂利の堆積方法を変えることで、任意の斜度を形成することができる。

各フィールドにおける、実験を行った傾斜角度を Table 2 に示す。

5 実験結果

開発したロボットを用い、4章で紹介したフィールドにおいて走行実験を行った。実験の様子を Fig.8 に示す。

5.1 砂・砂利混合フィールドにおける実験結果

砂・砂利混合フィールドにおいて、タイプ A は、一定の深さまでラグを突き刺すため砂利を崩しながら走行した。この時、スリック部分が砂利を崩す過程で車輪がスリップし、結果としてスリップ率 0.8 という高スリップ走行となった。一方、タイプ B は、タイプ A と同様に、一定の深さまでラグを突き刺すため砂利を崩しながら走行するが、見かけの車輪幅拡大などによる影響のためスリップ率 0.3~0.4 という、タイプ A と比較し低スリップ走行を実現した。

なお、タイプ A, B 共に、石の上に乗りに上げた際にも、ほぼスリップすることなく走行する、という能力を確認した。

5.2 屋外砂フィールドにおける実験結果

屋外砂フィールドにおいて、タイプ A は角度 20[deg] の傾斜で、タイプ B は角度 20[deg]、および 30[deg] の傾斜で走行実験を行った。

傾斜角度 20[deg] 時、タイプ A のスリップ率は 0.2 という結果となった。砂を崩さず、特に大きくスリップすることなく、安定した走行を行った。

傾斜角度 20[deg] 時、タイプ B のスリップ率 0.1 という結果となった。砂を崩さず、ほとんどスリップすることなく、安定した走行を行った。ラグ間隔の拡大や見かけの車

Table 1 Parameters of Robot

Wheel diameter [mm]	420
Number of lugs [-]	24
Lug length [mm]	50
Wheel width [mm]	185
Body box size [mm]	w:200 / l:210 / h:160
Mass [kg]	14.6

Table 2 Parameters of Fields

フィールド	傾斜角度 [deg]
砂・砂利混合フィールド	20
屋外砂フィールド	20 / 30
屋内砂フィールド	0 / 10 / 20
屋内砂利フィールド	20 / 30 / 40

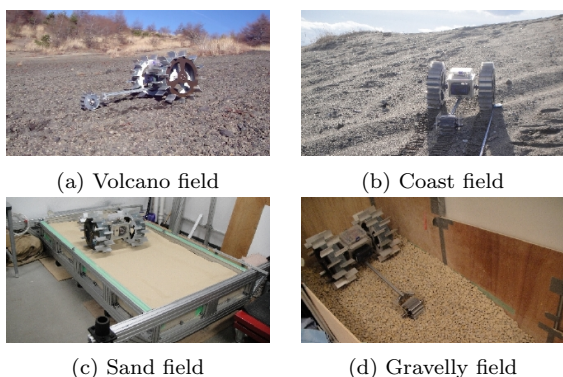


Fig. 8 Result of Field experiment



Fig. 9 El-Dorado-II

6 考察

各フィールドにおける走行実験で得られた、傾斜角度 20[deg]での平均スリップ率、および各フィールドの土壤密度を Table 3 に示す。土壤密度は、走行実験を行ったフィールドの砂や砂利を、一定体積詰めた箱の質量を測定することで算出した。

6.1 四輪型テストベッドでの実験結果との比較

まず、筆者が所属する研究室において過去に行った四輪型テストベッドの走行性能評価との比較を行う。この四輪型テストベッドとして、本研究室所有の El-Dorado-II を用いた。概観を Fig. 9 に、パラメータを Table 4 に示す。El-Dorado-II に搭載された車輪のラグ取り付け方は、本研究で開発したタイプ B と同様、一本置きに左右へと移動して取り付けるという方法である。El-Dorado-II の車輪一輪あたりにかかる自重は、約 5[kg] である。一方、本研究で開発したロボットも、車輪二輪とスタビライザーの三点で自重を支えているため、車輪一輪あたりにかかる自重は、同じく約 5[kg] と考えられる。

テストフィールドとして、「屋外砂フィールド」、および「屋内砂フィールド」を用いた。「屋外砂フィールド」での走行実験の様子を Fig. 10(a) に、「屋内砂フィールド」での走行実験の様子を Fig. 10(b) に示す。

「屋外砂フィールド」では角度 20[deg] の傾斜を走行させた結果、スリップ率は 0.6~0.8 という高スリップ走行となった。走行距離の延長に従い、ラグとラグの間に砂が挟まり、ラグの効果が発揮できなかったことが、高スリップ走行の原因であると考えられる。

続いて、「屋内砂フィールド」では、傾斜角度の増加に従い、スリップ率も増加し、角度 12[deg] の傾斜で 0.75、角度 16[deg] の傾斜でスリップ率 0.87 と、高スリップ走行になるという結果となった。

Table 3 に示した走行実験結果と比較し、本研究で開発したロボットの方が走行性能が圧倒的に高いということが分かった。

El-Dorado-II と比較し、本研究で開発したロボットの方が走行性能が高い理由について考察する。

最も大きな理由として、「ラグの長さ」が考えられる。El-Dorado-II のラグ長さは 10[mm] であり、車輪径に対するラグの長さの割合はわずか 5.6% である。対して本研究で開発した口

Table 3 Slope angle - Slip ratio

フィールド	密度 [g/cm ³]	スリップ率 [-]
砂・砂利混合フィールド	1.18	0.3-0.4
屋外砂フィールド	1.29	0.1
屋内砂フィールド	1.45	0.3
屋内砂利フィールド	0.34	0.7

輪幅拡大による影響のため、タイプ A と比較し低スリップ走行を実現した。

一方、傾斜角度 30[deg] 時、タイプ B のスリップ率は 0.3~0.4 と、傾斜角度 20[deg] 時と比較し高スリップ率となったが、安定した走行を行った。ただし、傾斜角度 20[deg] 時と比較して、砂を崩しながらの走行となった。このことがスリップ率増加の原因であると考えられる。

また、走行中ラグが根元まで土壤に突き刺さっていない箇所が存在した。この現象から、表面から深い部分ではラグが突き刺さらない程、土壤が堅くなっている箇所が存在すると考えられる。

タイプ A とタイプ B の明確な走行性能の差から、屋内砂フィールド、および屋内砂利フィールドではタイプ B のみを用いた走行実験を行うこととした。

5.3 屋内砂フィールドにおける実験結果

屋内砂フィールドにおいて、傾斜角度 0[deg] 時、車輪は一切スリップせず（スリップ率 0）、安定した走行を行った。

一方、傾斜角度 10[deg] 時、スリップ率は 0.1 という結果となった。特に大きくスリップすることなく、安定した走行を行った。

更に、傾斜角度 20[deg] 時、スリップ率は 0.3 という結果となったが、ここでも特に大きくスリップすることなく、安定した走行を行った。砂・砂利混合フィールドにおける実験時には、石の上に乗るという現象が発生したため、車輪沈下量に変動があったが、砂フィールドにおいて、車輪沈下量は常に一定の値を示した。

5.4 屋内砂利フィールドにおける実験結果

屋内砂利フィールドにおいて、傾斜角度 20[deg] 時、スリップ率は 0.7 という結果となった。ラグが掻くことにより砂利を崩しながら前進したが、崩した結果として、見かけの傾斜角度が増加したため、走行が困難となり、最終的に高スリップ走行となったと考えられる。

一方、傾斜角度 30[deg] 時、および 40[deg] 時、スリップ率は 0.8 という結果となった。傾斜角度 20[deg] 時の結果と同様に、ラグが掻くことにより砂利を崩しながら前進したが、崩した結果として見かけの傾斜角度が増加し、その後更に、傾斜角度が 27[deg] となるまで砂利を崩した。この現象は、ロボットが登坂出来る角度まで砂利を崩そうとした末に発生したものと考えられる。40[deg] 時には、この現象は更に顕著なものとなった。



(a) Coast field (b) Sand field

Fig. 10 Overview of El-Dorado-II experiment

ボットのラグ長さは 50[mm] であり、車輪径に対するラグの長さの割合は 15.6 % である。ラグ一本の面積の拡大により、「土壌を押しつける (Bulldoze)」機能 [7] がより効果的に発揮されることとなる。その結果として、走行性能が圧倒的に向上したと考えられる。

次いで、「車輪径」が考えられる。El-Dorado-II のラグを含めない車輪直径は 180[mm] である。対して本研究で開発したロボットのラグを含めない車輪直径は 320[mm] である。軟弱地盤上を車輪で走行する際、車輪が土壌へ沈下することで走行抵抗が増加し、走行性能が低下する。車輪径を拡大するということは、車輪の接地面積を拡大し、接地圧を分散させることと同義である。車輪の沈下が小さくなった結果、走行性能は向上する [3]。

6.2 タイプ A とタイプ B の比較

タイプ A と比較し、タイプ B の方が走行性能が高い理由について考察する。両者は「ラグの取り付け方」のみが異なる。

タイプ B の走行性能が高い第一の理由として、「車輪幅の拡大」が挙げられる。タイプ B のスリック部（ラグが取り付けられていない部分）の幅はタイプ A のそれと等しいが、ラグが左右に突出する形で取り付けられているため、その見かけの車輪幅はタイプ A の約 1.85 倍となる。前述の通り、車輪の接地圧が低下することで、走行性能が向上したと考えられる。

第二の理由として、「走行方法」が挙げられる。前述の通り、タイプ A がスリック部から横に突出しない形でラグが取り付けられているのに対し、タイプ B は一つ置きに左右へ突出する形で取り付けられている。走行時、一本目のラグが土壌に突き刺さった箇所から、二本目のラグはラグ一本分横にずれて土壌に突き刺さることとなり、一本目のラグの走行痕による影響を受けない。つまり、一本目のラグが土壌を崩したとしても、二本目のラグは未だ崩れていない土壌に突き刺さることとなる。その結果、走行性能が向上したと考えられる。一方、「砂・砂利混合フィールド」と比較し、「屋外砂フィールド」の方がタイプ A とタイプ B の

走行性能に大きな差が生じなかった原因は、「屋外砂フィールド」での走行の方が、一本目のラグが土壌を大きく崩さなかったためであると考えられる。

6.3 フィールドによる走行性能の違い

各フィールドでの、角度 20[deg] の傾斜における走行性能を比較した場合（タイプ B のみ）、「屋外砂フィールド」、「屋内砂フィールド」、「砂・砂利混合フィールド」、「屋内砂利フィールド」の順で走行性能が向上するという結果となった。

「屋外砂フィールド」では、砂が水分を含んでおり、土壌の粘性が高かったため、走行中にほとんど崩れることが無く、他のフィールドと比較し、走行性能が高い結果となったと考えられる。

「砂・砂利混合フィールド」、「屋内砂フィールド」、「屋内砂利フィールド」は Table 2 に示すように、それぞれのフィールドの密度の差から走行性能に差が生じたと考えられる。ラグが突き刺さる長さが各フィールドで等しいとした時、密度が大きいフィールドでは「押しつける (Bulldoze)」土壌の質量は大きくなる。その結果ラグの性能が効果的に発揮され、走行性能が向上すると考えられる。

7 まとめ

本章では、砂地だけでなく、砂利地への対応も視野に入れた車輪型移動ロボットの開発、およびそのロボットを用いた火山や海岸といった多様なフィールドにおける走行実験について述べた。

実験結果について考察した結果、角度 20[deg]、30[deg] という高角度の傾斜においても、砂を中心に構築されたフィールドならばスリップ率 0.1~0.4 という低スリップ率での走行が可能であることが確認できた。しかし、砂利のみで構築されたフィールドでは、スリップ率 0.7~0.8 という高スリップ率での走行となった。この実験結果から、車輪型移動ロボットの走行性能には、土壌の密度が密接に関係しているということが分かった。

また、筆者が所属する研究室が所有する四輪型テストベッドの走行性能と比較して、圧倒的に高い走行性能を持つことから、本研究で開発したロボットの有用性を確認することができた。

文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構：“JAXA シンポジウム概要報告 月で拓く新しい宇宙開発の可能性と日本”，宇宙航空研究開発機構広報部，2004。
- [2] SELENE-B 検討グループ：“月面探査ローバーの検討・技術課題”，2002。
- [3] 須藤真琢，遊佐淳也，永谷圭司，吉田和哉：“軟弱地盤における車輪機構の走行性能に車輪パラメータが及ぼす影響の評価”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010，2010。
- [4] 宇宙航空研究開発機構：“月の模擬土壌を用いた斜面走行試験装置の開発”，宇宙航空研究開発機構研究開発資料，JAXA-RM-05-003，2006。
- [5] ISSA A.D.Nesnas, Pablo-Abad Manterola, Jeffery Edlund and Joel Burdick：“The Axel Marsupial Rover for Challenging Terrain Sampling”，*IEEE Aerospace Conference*, 2009。
- [6] J.Y.Wong：“Theory of Ground Vehicles”，John Wiley & Sons，1978。
- [7] Genya Ishigami, Akiko Miwa, Keiji Nagatani and Kazuya Yoshida：“Terramechanics-based Model for Steering Maneuver of Planetary Exploration Rovers on Loose Soil”，*The Journal of Field Robotics*, vol.24, Issue 3, pp.233-250, 2007。

Table 4 Parameters of El-Dorado-II

Wheel diameter [mm]	200
Number of lugs [-]	72
Lug length [mm]	10
Wheel width [mm]	100
Body box size [mm]	w:560 / l:770 / h:440
Mass [kg]	21.0