

軟弱砂利フィールドを対象とした 車輪型軽量移動ロボットの斜面走行性能に関する研究

Research for slope traversability of
a small-sized wheeled mobile robot on loose gravel field

高橋 悠輔, 学 須藤 真琢, 正 永谷 圭司, 正 吉田 和哉 (東北大)

Yusuke TAKAHASHI (Tohoku Univ.), yusuke@astro.mech.tohoku.ac.jp
Masataku SUTOH, Keiji NAGATANI, Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

When a volcano erupts, it is very dangerous to approach. However, if we use a rover, we can approach there. But there are loose sand field and loose gravel field in volcano. So the main challenge when developing a rover is traversability. To avoid slippage and increase the wheel's drawbar pull, the wheels of the rover typically have lugs, i.e., grousers. Experimental verification for traversability of a lugged wheeled rover has been done on loose sand field. But it has not been done on loose gravel field. Therefore, we conducted experiments on the traversability in loose sand field and loose gravel field using a two-wheeled testbed. And we evaluated the results of the experiments.

Key Words : Wheel, Mobile Robot, Loose sand, Loose gravel

1 諸言

火山が噴火した際、近づくのは非常に危険である。このような危険な場所に近づく手段として、火山探査ロボットの利用が検討されている。

地上を走行する火山探査ロボットを開発する際に課題となるのが走行性能である。火山は、軟弱な火山灰で覆われている場所や大小さまざまな砂利や岩石で覆われている場所が存在するため、走行性能の高いロボットの開発が必要だと考えられる。また、可搬性を向上させるために、できるだけ軽量のロボットであることも必要である [1]。

軟弱土壌を走行する車輪型移動ロボットは、走行性能を向上させるため、一般に、車輪の表面に "ラグ" と呼ばれる突起が取り付けられる。走行性能へのラグの効果については、Bekker や Wong らによって体系化されたテラメカニクス [2] に基づき、軟弱砂利フィールドを対象とした実験的検証が行われてきた [3]。しかし、火山には軟弱砂利フィールドだけではなく、軟弱砂利フィールドも存在する。軟弱砂利フィールドを対象とした実験的検証については、農業用トラクタの車輪の力学的特性を数値的に検証した例 [4] があるが、ラグ車輪による走行性能への効果については触れられていない。

そこで本研究では、軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の走行性能を評価することを目的とした。本稿では、まず、軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の斜面直登実験の結果と、軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の斜面直登実験の結果を示す。次に、軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の走行性能と軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の走行性能を比較し、粒径の違いが軟弱土壌の走行性能に与える影響を考察する。

2 軟弱フィールドにおけるラグ車輪の走行性能

軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の走行性能と軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の走行性能を比較するため、軟弱砂利フィールドと軟弱砂利フィールドにおいて、同じ実験条件のもとでラグ車輪を用いた斜面直登実験を行った。まず、走行性能を評価するために用いる指標について説明する。次に、実験で用いた車輪型軽量移動ロボットのテストベッドと、実験条件について説明する。最後に、軟弱砂利フィールドと軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の斜面直登実験の結果を示し、ラグ車輪の走行性能について考察する。

2.1 走行性能評価指標

軟弱フィールドにおけるラグ車輪の走行性能を評価する指標として、スリップ率を用いた。車輪の角速度を ω 、車輪半径を r とし、車体速度を V とすると、スリップ率 s は

$$s = \frac{r\omega - V}{r\omega} = 1 - \frac{V}{r\omega} \quad (1)$$

のように定義される [2]。車輪がスリップすることなく走行している場合、車体速度 V は車輪の接線速度 $r\omega$ と等しくなるため、スリップ率は 0 となる。一方で、車輪がスリップして車体速度 V が 0 となるとき、スリップ率は 1 となる。したがって、スリップ率が小さいほど、走行性能は良いと言える。

2.2 車輪型軽量移動ロボットのテストベッド

実験を行うために製作した車輪型軽量移動ロボットのテストベッドを図.1 に示す。また、表.1 には、このロボットの諸元を示す。

このロボットは 1 つの DC モータによって駆動する前後 2 輪移動ロボットであり、並進方向のみ走行可能である。口

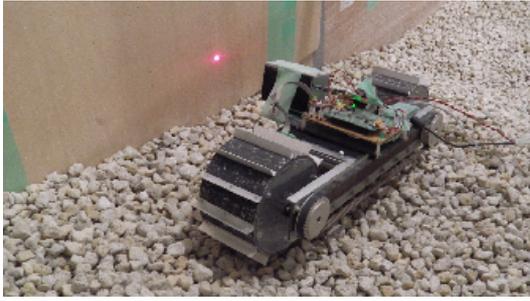
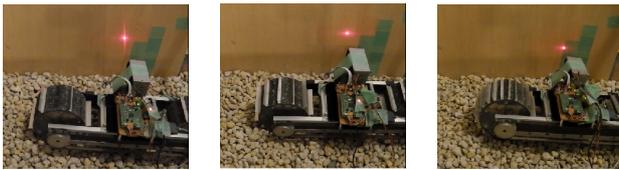


Fig. 1: Two-wheeled rover testbed



(a) 6 lugs (b) 12 lugs (c) 24 lugs

Fig. 2: Wheels with different number of lugs

ボットの車輪表面には 120 番のサンドペーパーが巻かれており、その上からラグが等間隔に取り付けられている。ラグにはアルミアングルを使用した。ラグは 1 本ずつ着脱可能であるため、実験の目的に応じて様々な形状のラグを取り付けることができる。本研究では、高さが 15mm、幅が 100mm の平らなラグを使用した。

2.3 実験条件

斜面走行実験に用いた軟弱砂フィールドの様子と軟弱砂利フィールドの様子をそれぞれ図.3, 図.4 に示す。

軟弱砂フィールドの大きさは、長さ 2[m]、幅 1[m]、深さ 0.15[m] であり、土壌密度が $1.45[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、安息角が $38[^\circ]$ 、粒径が $106 \sim 300[\mu\text{m}]$ の豊浦標準砂が敷き詰められている。この実験フィールドは、図.3 のように油圧ジャッキで持ち上げることで、実験に応じて斜面の角度を変えることができる。テストベッドの並進移動速度を測定するため、自己位置推定装置 [5] を用いた。この装置は、レーザを地面に反射させることでオンラインで自己位置を推定するものである。本実験においても、レーザを地面に反射させることでオンラインで自己位置を推定し、スリップ率を算出した。

Table 1: Specification of the test bed

Size [mm]	L580 × W190 × H180
Mass [kg]	3.8
Wheel size [mm]	$\phi 180 \times W100$
Lug height [mm]	15

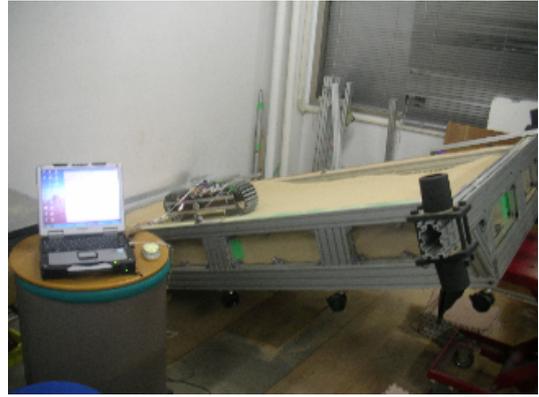


Fig. 3: Loose sand field[3]



Fig. 4: Loose gravel field

一方、軟弱砂利フィールドの大きさは、長さ 3[m]、幅 0.9[m]、深さは浅いところで 0.2[m] であり、土壌密度が $0.34[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、安息角がおよそ $40[^\circ]$ 、粒径が $10 \sim 40[\text{mm}]$ の軽石が敷き詰められている。この実験フィールドは、軟弱砂フィールドのときのように油圧ジャッキで持ち上げることができないため、スコップを用いて斜面を作成した。ロボットの並進移動速度は、一定の距離を走行した時間をストップウォッチで計測することで求めた。ここで、軟弱砂フィールドで用いた自己位置推定装置を使用しなかったのは、軟弱砂利フィールドの表面の凹凸が激しく、正確な自己位置推定ができなかったためである。側面の壁にレーザを照射させることも試みたが、ロボットのロール運動が大きく、正確な自己位置推定は困難であった。

軟弱砂フィールドにおけるラグ車輪の走行性能と軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の走行性能を比較するため、それぞれのフィールドにおいて斜度が $0[^\circ]$ 、 $8[^\circ]$ 、 $16[^\circ]$ の斜面を作成し、斜面直登実験を行った。実験では、それぞれの斜度において、ラグが 6 本、12 本、24 本の 3 種類の車輪 (図.2 参照) を用いてロボットを走行させた。ロボットを走行させる前には、スコップを用いて土壌を耕し、フィールド内の土壌が均一になるようにした。また、それぞれの条件について 3 回ずつ繰り返した。なお、ロボットの車輪

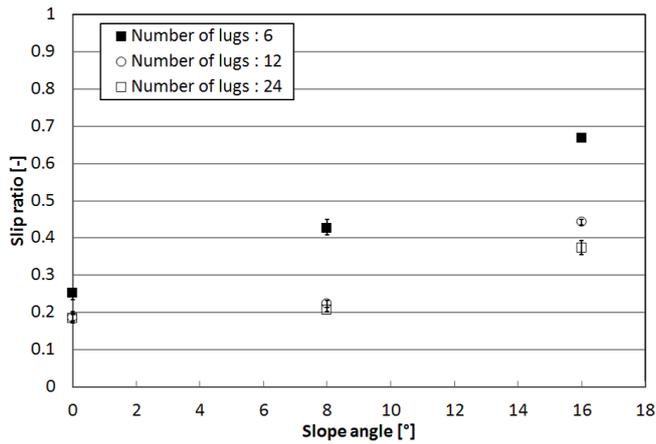


Fig. 5: Slope angle vs. slip ratio in loose sand field

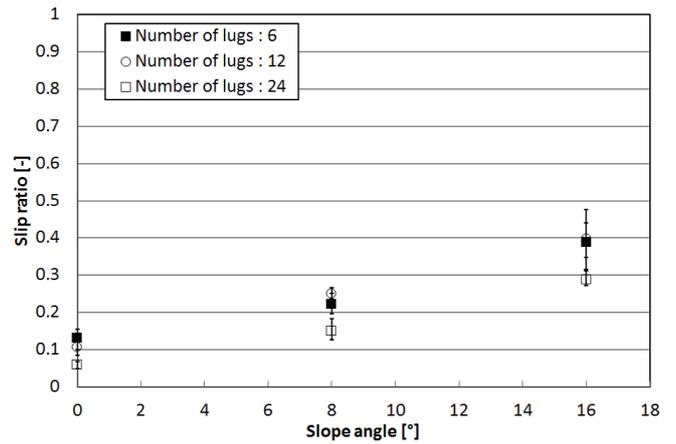


Fig. 6: Slope angle vs. slip ratio in loose gravel field

の回転数は 2.5[rpm] で一定に制御した。また、スリップ率の算出にはラグの高さを含めた車輪径を用いた。

2.4 実験の結果と考察

軟弱砂フィールドにおけるラグ車輪の斜面直登実験の結果を図.5に、軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の斜面直登実験の結果を図.6に示す。

図.5を見ると、いずれの斜度においてもラグ本数が24本の方がスリップ率が小さいことが分かる。特に、斜度が16[°]のときでは、ラグが6本の車輪ではスリップ率が0.67であったが、ラグを24本に増やすことで、スリップ率を0.37まで下げることができた。軟弱砂フィールドにおけるラグ車輪は、ラグを土壌内部に貫入させ、回転とともに土壌を押し上げることで推進力を得ている(図.7(a)参照)[6]。すなわち、ラグ本数を増やすことで、土壌を押し上げる力を大きくすることができる。この結果、図.5では、ラグ本数が24本の方がスリップ率が小さくなったと考えられる。

一方、図.6を見ると、いずれの斜度においてもラグ本数が24本の方がスリップ率が小さいことが分かる。特に、斜度が16[°]のとき、ラグ本数を12本から24本に増やすことで、スリップ率を0.40から0.29に下げることができた。軟弱砂利フィールドにおける推進力については正確には分かっていない。そこで、砂利の粒径は砂の粒径に比べて極めて大きい点に注目し、ラグ先端が粒子の上に乗る上がるのではないかと考えた(図.7(b)参照)。つまり、軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪は、ラグ先端と砂利の粒子の間にせん断応力を発生させることで推進力を得られると考えられる。このとき、ラグの本数が少ない場合には、少ない粒子でラグを支えなければならないので、ラグを支えている砂利が崩壊しやすくなる。逆に、ラグの本数が多い場合には、多くの粒子によってラグが支えられているの

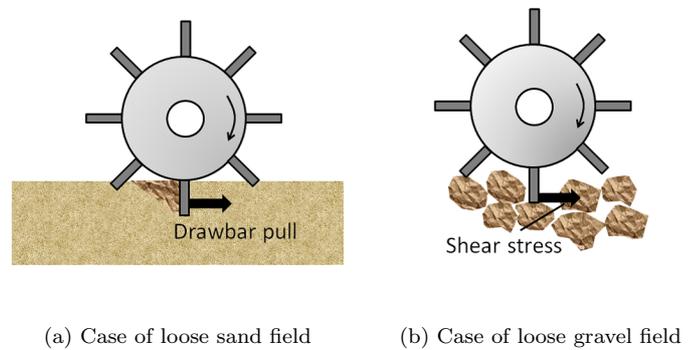


Fig. 7: Behavior of a lug in loose soil

で、ラグを支えている砂利が崩壊しにくくなる。この結果、ラグ本数の多い24本のラグ車輪の方が、スリップ率が小さくなったと考えられる。

図.5と図.6を比較すると、いずれのラグ本数においても軟弱砂利フィールドのほうがスリップ率の誤差が大きいことが分かる。図.5において斜度が16[°]のとき、ラグ本数が12本の車輪では、スリップ率は小さいときで0.43、大きいときでは0.45であった。一方で、図.6において斜度が16[°]のとき、ラグ本数が12本の車輪では、スリップ率は小さいときで0.32、大きいときでは0.48にもなった。軟弱砂フィールドで使用された土壌は粒径が極めて小さいので、土壌は均一に分布している。そのため、スリップ率に誤差が生じにくいと考えられる。一方、軟弱砂利フィールドで使用された土壌は粒径が極めて大きいので、安定した粒子と不安定な粒子がフィールド上に不均一に存在すると考えられる。ここで、ラグ先端が安定した粒子の上に乗ると、大きなせん断応力を得ることができるが、ラグ先端が不安定な粒子の上に乗ると、ラグを支えている砂利全体が崩壊するため、せん断応力を得ることはできない。つまり、走行開始から終了までに、どの程度のスリップが

生じるかということは実験開始時の土壌の状態によって変化するため、スリップ率の誤差が大きくなったと考えられる。実際にロボットの挙動を観察すると、ある時の実験では、ロボットが10mmから30mmほど滑り落ちる現象が多く見られたが、次の実験ではロボットが滑り落ちる現象がまったく見られないことがあった。このことから、軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の走行性能は、土壌の状態によって大きく変わるといえる。

他にも、同じラグ本数で比較すると、軟弱砂利フィールドより軟弱砂利フィールドの方がスリップ率が小さいことが分かる。また、軟弱砂利フィールドでは、ラグ本数を6本から12本に増やしたときにスリップ率が大きく低下する一方で、軟弱砂利フィールドでは、ラグ本数を12本から24本に増やしたときにスリップ率が大きく低下するという違いが見られる。さらに、軟弱砂利フィールドでは、斜度が大きくなるほどラグ本数が6本のときのスリップ率とラグ本数が24本のときのスリップ率の差が大きくなるが、軟弱砂利フィールドでは、軟弱砂利フィールドの場合と比べて差はそれほど大きくなる。フィールドの違いによるこれらの傾向については、今後検証する必要がある。

3 結言

軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の走行性能を評価することを目的とし、車輪型軽量移動ロボットのテストベッドを用いて、軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の斜面直登実験と、軟弱砂利フィールドにおけるラグ車輪の斜面直登実験を行った。その結果、軟弱砂利フィールドでは、ラグ本数を増やすことでスリップ率が減少することが分かった。これは、ラグが土壌を押し上げる力が大きくなったためであると考えられる。また、軟弱砂利フィールドでは、ラグ本数を増やすことでスリップ率が減少することが分かった。これは、ラグを支える粒子の数が増加し、砂利が崩壊しにくくなったためであると考えられる。さらに、軟弱砂利フィールドでの実験結果と軟弱砂利フィールドでの実験結果を比較・考察した。特に、軟弱砂利フィールドの方がスリップ率の誤差が大きい理由について考察した結果、軟弱砂利フィールドでは粒子が均一に存在しているためにスリップ率の誤差は小さくなるが、軟弱砂利フィールドでは、安定な粒子と不安定な粒子が不均一に存在しているために、スリップ率の誤差が大きくなることが分かった。

参考文献

- [1] 野寄敬博, 高橋悠輔, 山内元貴, 永谷圭司, 吉田和哉: "広域屋外環境の探査を目的とした超小型移動ロボットの開発とフィールド実験", 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 論文集 2011.

- [2] J. Y. Wong, *Theory of ground vehicles*, Wiley-Interscience, 2001.
- [3] 須藤真琢, 永谷圭司, 吉田和哉: "軟弱地盤における車輪型移動ロボットの走行性能に車輪表面形状が及ぼす影響の評価" 日本機械学会 「運動と振動の制御」シンポジウム 講演論文集 2011.
- [4] 佐藤邦夫, 田尻功郎: "砂利路面におけるタイヤ特性の計測-タイヤに作用する力と計測システムの安定性に関する考察-" 農業機械学会誌 68(1): 51~60, 2006.
- [5] I. Nagai, K. Watanabe, K. Nagatani, and K. Yoshida, "Noncontact position estimation device with optical sensor and laser sources for mobile robots traversing slippery terrains", *Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp.3422-3427.
- [6] 杉山昇: "建設機械と砂の諸問題" 鹿島出版 1982.