

スポーク車輪を有する軟弱地盤移動ロボットの構築と走行性能の評価

Development of mobile robot with spoked wheels and its performance evaluation on loose soil

○石川 大樹, 正 永谷 圭司, 砂長 麻美, 須藤 真琢, 正 吉田 和哉 (東北大)

○Daiki ISHIKAWA (Tohoku University), d-ishikawa@astro.mech.tohoku.ac.jp,
Keiji NAGATANI (Tohoku University), keiji@astro.mech.tohoku.ac.jp,
Asami SUNAGA, Masataku SUTOH, Kazuya YOSHIDA (Tohoku University)

Mobile robots play an important part in planetary or volcano exploration. However, their fields are covered with loose soil. Therefore, wheels of the robots may slip and, in the worst case scenario, they get stuck into the weak soil. To deal with this problem, spoked wheels that have long spokes radially may have a good performance to traverse on such loose soil. In this study, we developed a mobile robot with spoked wheels and conducted experiments using the robot with different spoke parameters in various environments. In this paper, we first explain the mobile robot with spoked wheels and the experiments using the robot. Furthermore, we introduce an improved version of the robot with spoked wheels on the basis of the evaluation in the experiments.

Key Words :Loose soil, Planetary rover, Spoke rover

1 緒言

近年, 宇宙や生命の起源を解明するため, 月や惑星の地表を詳細に探査可能な月・惑星探査ロボットの活躍が期待されている. 一方, 噴火や震災時に, 移動ロボットは, レスキュー隊員に代わって探査ミッションを行うことも期待されている. しかしながら, 月や火山, 震災被災地の土壌は, 細かい砂や岩石, 瓦礫等で覆われた不整地であるため, 車輪を有する移動ロボットはスリップやスタックに陥り, ミッションを続行できなくなる恐れがある.

一方, 長いスポークが放射状に配置されたスポーク車輪を有する移動ロボットは, 単純な機構のため, 軽量化, 小型化が容易であり, 不整地走行性能にもすぐれた機構であることが実証されている [1-3]. この機構は, 軟弱地盤を走行する際, 長いスポークを地面に突き刺しながら走行するため, 土壌を崩さず走行できると考えられる. しかしながら, スポーク車輪移動ロボットの軟弱地盤における走行性能について報告した研究は少なく, その特性に関する詳細なデータは得られていない.

そこで本研究では, 軟弱地盤を走行するスポーク車輪移動ロボットを構築し, 様々な環境で実験を行うことで, 環境や車輪のパラメータが走行性能に与える影響を評価した. 本稿では, まず, スポーク車輪移動ロボットの構築について説明する. 次に, 屋内テストフィールドと実環境における走行実験の結果を元に, スポーク車輪の走行性能について考察する. 最後に, 考察に基づき改良したスポーク車輪ローバの走行性能について報告する.

2 スポーク車輪移動ロボットの構築

本研究では, 本体とスポーク車輪部分から構成される対向二輪移動ロボットを開発した. 図 1 に示すように, 車輪部分は簡単に取り換えられるため, 複数種類のスポーク車輪の比較実験を容易に行うことができる. スポーク車輪のカバーは, スポーク取付角度 θ が 0 deg, 22.5 deg, 45 deg となるように 3 種類製作した. スポークはこのカバーに対し, 図 2 に示すように, 片側 16 本まで配置できるようになっている. なお, 本実験では, スポーク形状は, 断面が 1.0 cm 四方の角棒を用い, 図 2 に示すように, 車輪直径を 40 cm に統一した.

3 走行実験

前章で紹介したテストベッドを用いて, 筆者らの所属する研

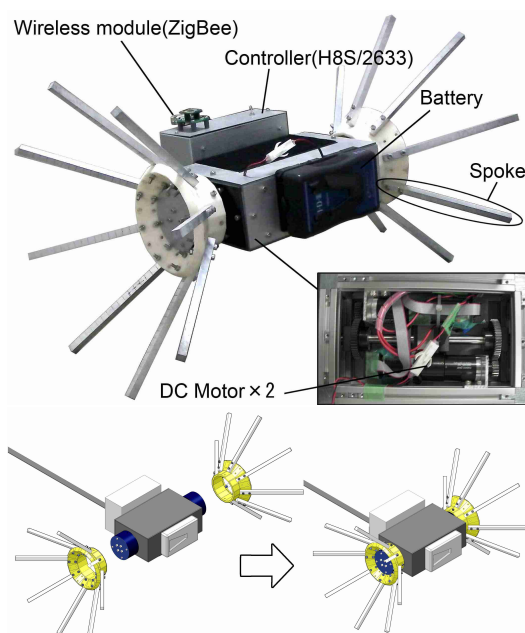


Fig. 1 Mobile robot with spoked wheels

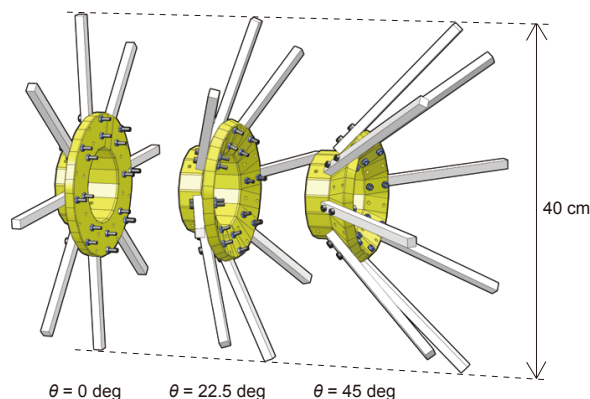


Fig. 2 Spoked wheels

研究室が有する、豊浦標準砂（以下、豊浦砂）フィールドと軽石フィールド、また、実環境として、海岸（宮城県閑上海岸）と火山地域（長野県小浅間山）で走行実験を行った。走行性能の評価には、車輪が空転する割合を表すスリップ率を用いることとした。なお、豊浦砂フィールドと海岸は月面環境の想定、軽石フィールドは火山地域の想定である。

3.1 スリップ率を用いた走行性能の評価方法

スポーク車輪を有する移動ロボットの理想的な走行は、入砂したスポークが静止し、スポークの最下点を中心に、車軸中心が回転するものと考えられる。このとき、スポークにより土壌に加わる外力は、土壌の剪断強度による摩擦力とつり合う。従って、スリップは、土壌に加わる外力の方が、土壌の剪断強度による摩擦力より大きくなったときに生じると考えられる。

本研究では、スポーク先端を結ぶ最外周が無限多角形（円）を描くようにスポークが配置され、車輪が空転せず走行したときをテストベッドの目標速度の基準とし、登坂時における、スリップ率 s を次式のように定義した。なお、スポーク最外周が成す円の半径を r 、ローバーの重心並進速度を v_x 、車輪回転角速度を ω とした。

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

式 (1) から、スリップ率 s が大きいほど車輪の空転する割合が増し、走行性能が悪くなると言える。なお、本研究では、一定時間を走行するローバーの重心の並進距離を測定し、スリップ率 s を算出することとした。

3.2 スポークの取付角度が走行性能に及ぼす影響

スポーク取付角度 θ が走行性能に及ぼす影響を評価するため、豊浦砂フィールドにおいて、スポーク取付角度 θ を、0 deg, 22.5 deg, 45 deg と変更し、スリップ率 s の測定実験を行った。なお、登坂斜度 α を 0 deg, 10 deg, 20 deg, 質量 m を 7 kg, 8 kg, 9 kg, 10 kg, スポーク本数 N を 8 本とし、ローバーの目標速度 $r\omega = 7.83$ cm/s の下、式 (1) からスリップ率 s を算出した。

3.2.1 実験結果

図 3 (a), (b), (c) に豊浦砂フィールドでの走行実験における登坂斜度 α とスリップ率 s の関係を各質量 m , 各スポーク取付角度 θ ごとに示した。

グラフから、スポークの取付角度 θ が小さい方が、高斜度においてスリップ率 s が軽減されていることが分かる。

3.2.2 考察

スポーク取付角度 θ が大きくなる際に、走行性能が低下する原因として、走行抵抗の増加と土壌の剪断強度の低下、の二種類が考えられる。

まず前者について述べる。スポーク取付角度 θ の大きい車輪は、車軸方向にスポークが傾いているため、スポーク取付角度 θ の小さい車輪と比較して、土壌から受ける走行抵抗が大きいと考えられる。走行抵抗が大きいと、一定速度で走行するために必要とする力が大きくなるため、土壌に加わる外力が増加し、スリップ率 s が増大したと考えられる。

次に後者について述べる。スポークが土壌に入砂する際、入砂する近傍の土壌を耕し、土壌の剪断強度を低下させると考えられる。スポーク取付角度 θ が大きいと、スポークが入砂する範囲が大きくなるため、より広範囲の剪断強度を低下させると考えられる。そのため、次に刺さるスポークは、剪断強度の低い土壌に入砂することとなり、十分な牽引力を得られないため、スリップ率 s が増大すると考えられる。

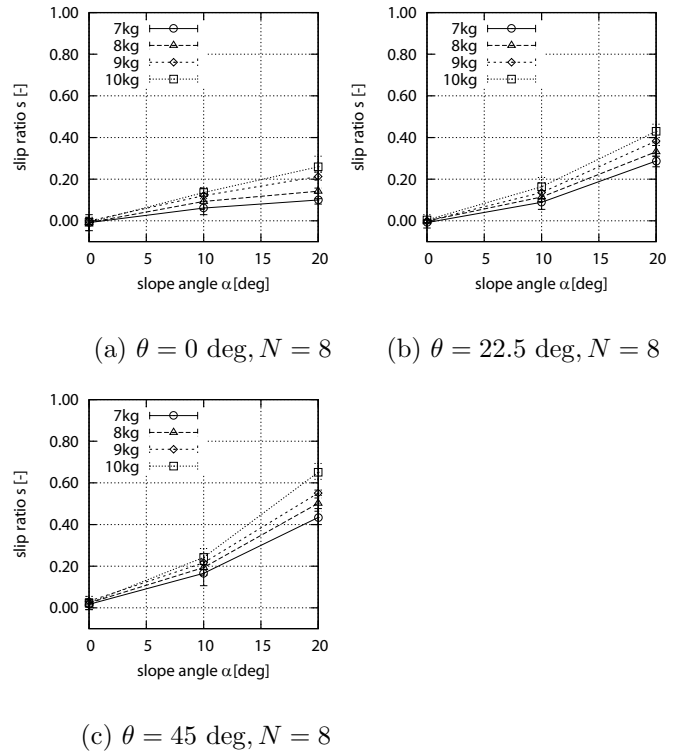


Fig. 3 Experimental result: comparison among different spoke angles on Toyoura Field

また、登坂斜度 α が大きくなると、土壌に加わる外力の、走行方向と逆向き成分が大きくなる。さらに、剪断破断面上の垂直応力（土圧に起因）も小さくなり、土壌の剪断強度が低下する。このため、土壌に加わる外力が、剪断強度による摩擦力より大きくなり、スリップ率 s が増加したと考えられる。

3.3 スポークの本数が走行性能に及ぼす影響

次に、スポーク本数 N が走行性能に及ぼす影響を評価するため、豊浦砂フィールドにおいて、スポーク本数 N を、8 本, 16 本と変更し、スリップ率 s の測定実験を行った。なお、登坂斜度 α を 0 deg, 10 deg, 20 deg, 質量 m を 8 kg, 9 kg, 10 kg, スポーク取付角度 θ を 0 deg とし、3.2 節と同様に、スリップ率 s を算出した。

3.3.1 実験結果

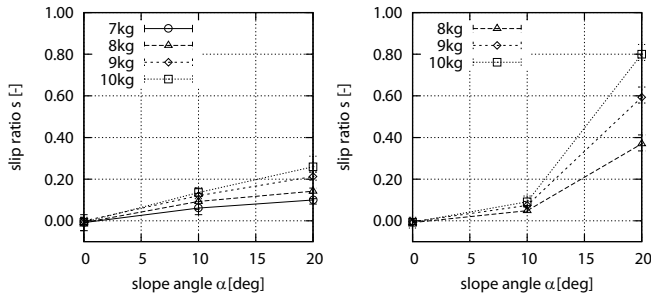
図 4 (a),(b) は、登坂斜度 α とスリップ率 s の関係を各質量 m 毎に示したものである。なお、図 4 (a) は図 3 (a) と同様のグラフである。

スポーク本数 N を増加させると、低斜度においてスリップ率 s , 質量依存性の軽減が見られ、走行性能が向上したことが分かる。一方高斜度においては、スリップ率 s と質量依存性が増加し、走行性能が低下した。

3.3.2 考察

低斜度において、スポークの本数が多い場合、より多くのスポークで土壌から牽引力を得ることができるため、一本一本のスポークが土壌に加える外力が小さくなる。また、すぐに次のスポークに回転の動作が移り、牽引力を得ることができる。その結果、走行性能が向上したと考えられる。

一方、高斜度においては、スポークの本数が多い場合に、スポーク同士の間隔が狭いため、剪断強度が低下した土壌にス



(a) $\theta = 0$ deg, $N = 8$ (b) $\theta = 0$ deg, $N = 16$

Fig. 4 Experimental result: comparison among different the number of spokes on Toyoura Field

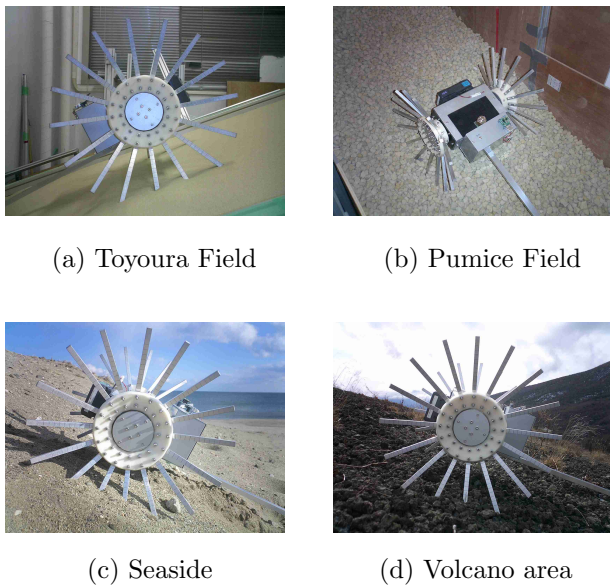


Fig. 5 Experimental fields

ポークが次々に刺さると考えられる。その結果、土壌の剪断強度の低下を招き、スポークがつり合うために必要な牽引力を土壌から得ることができず、走行性能が低下したと考えられる。

また、車体重量が増加すると、土壌に加わる外力が増加する。このため、土壌に加わる外力が土壌の剪断強度による摩擦力より大きくなると考えられる。これにより、高斜度では、スポークがつり合うための十分な牽引力を土壌から得ることが更に困難となり、質量による影響が大きくなったと考えられる。

3.4 環境が走行性能に及ぼす影響

次に、環境の変化が走行性能に及ぼす影響を評価するため、豊浦砂フィールド、軽石フィールド、海岸（関上海岸）、火山地域（小浅間山）において、スポーク取付角度 θ を、 0 deg, 22.5 deg, 45 deg と変更し、スリップ率 s の測定実験を行った。なお、登坂斜度 α を 20 deg, 質量 m を 8 kg, スポーク本数 N を 16 本とし、3.2 節と同様に、スリップ率 s を算出した。

3.4.1 実験結果

図 6 に各環境におけるスポーク取付角度 θ とスリップ率 s の関係を示す。すべての環境で、スポーク取付角度 θ が小さい方が走行性能が向上する傾向があることが分かる。しかしながら、その傾向は、粒径の小さい粒子で構成された豊浦砂フィールドや海岸（関上海岸）よりも、粒径の大きな粒子で構成された軽石

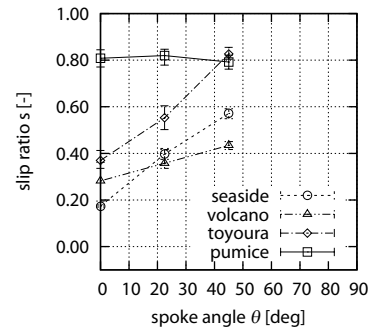


Fig. 6 Experimental result on four fields

フィールドや火山地域（小浅間山）の方が小さいことが分かる。

また、本実験では、軽石フィールドで走行性能が著しく低下したことが分かる。さらに、実環境の方が走行性能が向上したことが分かる。

3.4.2 考察

スポーク取付角度 θ の影響が、粒径の大きな粒子で構成されたフィールドで小さくなった理由は、粒径が大きな粒子で構成された土壌では、スポーク取付角度 θ が小さくても、広範囲の土壌を耕し、土壌の剪断強度を低下させると考えられる。従って、スポーク取付角度 θ が小さい場合も、走行性能が低下したと考えられる。

また、軽石フィールドで走行性能が著しく低下した要因に、軽石フィールドは密度が小さく、また、鉛直下方向の土壌の圧力勾配も小さいため、土壌の剪断強度が小さいこと、さらに、軽石の隙間にスポークが落ちる鉛直方向のスリップで、満足に走行できなかったことが考えられる。

次に、実環境で屋内フィールドよりも走行性能が向上した理由を考察する。関上海岸では、水分により土壌の粘着力が大きかったために、土壌の剪断強度が強く、走行性能が高かったと考えられる。月面土壌を構成するレゴリスの粘着力 (0.52 kPa) は、豊浦砂の粘着力 (0 kPa) よりも大きいことが知られているため [4]、豊浦砂フィールドよりも、月面土壌において、高い走行性能を発揮できると考えられる。一方、小浅間山では、軽石層直下の火山灰の層で牽引力を得ることができたため、走行性能が向上したと考えられる。

このように高斜度の土壌でも、土壌の剪断強度が大きい場合、スポーク本数 N が大きくても、十分な走行性能を発揮できると分かる。

4 改良型スポーク車輪の構築

3.3 節で示したように、走行性能を上げるためにスポークを多く配置したとき、土壌から十分な牽引力を得ることが困難な高斜度では、逆効果となることが分かった。その原因は、スポーク同士の間隔の狭さであると考察した。これを検証するため、本研究では、簡易牽引装置による検証実験を行うと共に、検証に基づき考案した改良型スポーク車輪を構築し、走行実験を行った。

4.1 簡易牽引装置によるスポーク牽引実験

本研究で構築したスポーク車輪移動ロボットに用いたスポークと同様のスポークを水平に引き、その力を測定できる 20 cm 四方の簡易牽引装置を製作し、豊浦砂フィールドにおいてスポークの牽引実験を行った。

用いたスポークの条件は以下の四種類である。

- (A) 一本のスポーク
- (B) 牽引方向（縦方向）に近距離（ 2.5 cm）で並んだ二本のスポーク

- (C) 牽引方向と垂直方向（横方向）に近距離（2.5 cm）で並んだ二本のスポーク
- (D) 牽引方向と垂直方向（横方向）に十分離して（10.0 cm）並んだ二本のスポーク

この四種類の条件で、フォースゲージにより各々 3 回ずつ測定し、力の最初のピークを水平引張りにおける最大牽引力と考え、その平均値を表 1 に示す。

この結果から、本来ならば、スポークが 2 本になると、1 本のスポークの 2 倍の牽引力になると考えられるが、スポーク同士が非常に近い距離に配置された場合、スポークの本数に相当する牽引力を十分得られないことが分かる。

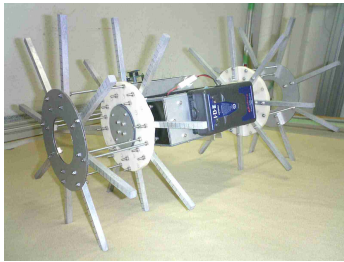


Fig. 7 Mobile robot with new spoked wheels

4.2 改良型車輪の構築と走行実験

4.1 節の考察から、土壌の剪断強度の低下の連鎖を防ぐために、図 7 に示す改良型スポーク車輪を有するテストベッドを構築した。

この車輪は、図 7 に示すように、片側に 2 枚のスポーク車輪を取り付けた。用いたスポーク車輪のスポーク取付角度 θ は 0 deg、スポークの本数は 8 本である。2 枚の車輪は、一定間隔離れており、2 枚の車輪が重なる方向（真横）から見たとき、16 本の車輪と同様な配置とした。このような配置にすることで、スポーク本数 8 本の車輪とスポーク本数 16 本の車輪の両方の長所を生かせる車輪機構を目指した。

なお、スポーク車輪同士の幅は、2 章で構築したスポーク取付角度 θ が 45 deg のテストベッドと全幅が等しくなるよう設計した。

4.2.1 実験結果

前章と同様の実験を豊浦砂フィールドで行った結果を図 8 (c) に示す。

図 8 (a) と図 8 (c) を比較して、改良型車輪の方がスリップ率 s が軽減されたことが分かる。また、図 8 (b) と図 8 (c) を比較すると、高斜度における、スリップ率 s 、質量依存性共に、大きく軽減できたことが分かる。

4.2.2 考察

改良型スポーク車輪はスポーク本数が 8 本のスポーク車輪と比較して倍の車輪数でテストベッドを支えているため、重量を減らすことと同様の効果が得られたものと考えられる。そのため、剪断強度による摩擦力が土壌に加わる外力よりも相対的に大きくなり、走行性能が向上したと考えられる。

また、スポーク同士の間隔が離れていたため、土壌の剪断強度の低下の連鎖を防ぐことができ、高斜度においても、スポーク本数 N に相当する牽引力を十分発揮できたと考えられる。

5 結言

本研究では、軟弱地盤を走行するスポーク車輪移動ロボットの構築を行い、様々な環境でスポーク車輪のパラメータが走行性能に与える影響を評価した。その結果、スポークの取付角度は、小さい方が良いと分かった。また一度スポークを突き刺した周辺の土壌は崩れやすいため、この近傍にスポークを再び突き刺さないようにする工夫が必要であった。この考察から構築された改良型スポーク車輪移動ロボットは、高い走行性能を持

Table 1 Experimental result of traction

条件	(A)	(B)	(C)	(D)
力 [N]	17.1	23.8	22.7	35.9

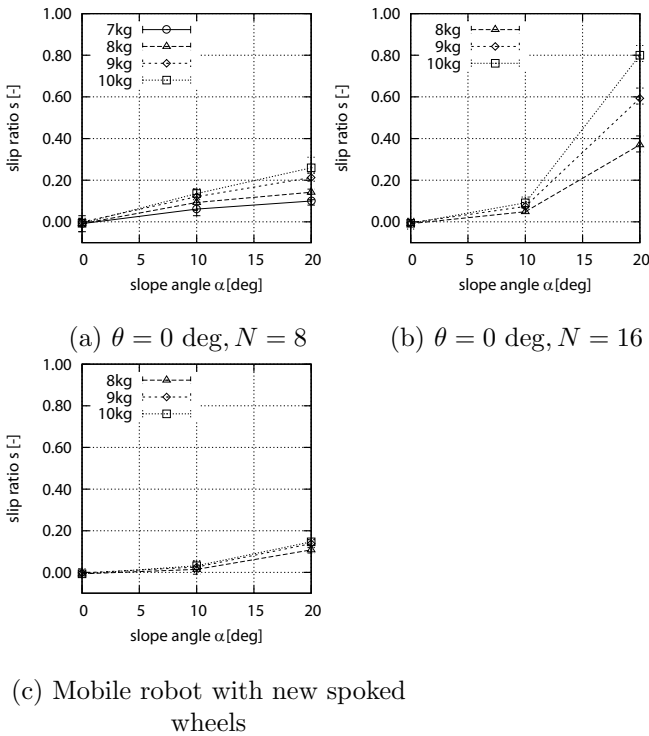


Fig. 8 Experimental result: comparison between old spoked wheels and new spoked wheel

つことが実証された。今後は、車輪径やスポーク形状が走行性能に与える影響や、消費電力を評価すると共に、移動ロボットやスポークを軽量化することが課題となる。

文献

- [1] A.C. Smith and M.D. Berkemeier: “The motion of a finitewidth rimless wheel in 3D”, *Proc. of the 1998 IEEE ICRA*, pp.2345-2350, 1998.
- [2] H.Kinoshita, A.Sunaga, T.Ito, S.Kiribayashi, K.Nagatani and K.Yoshida: “Development of Mechanical Expandable Wheels for a Small-sized Mobile Robot”, *Proc. of the SI2009*, pp.903-906, 2009.
- [3] M.Yamamoto, P.Gao and T.Ikeda: “Flexible Spoke Wheel Mobile Robot for the Wiring Task Under the Roof”, *Proc. of the 2009 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, p.2P1-E02,2009.
- [4] S.Wakabayashi and K.Matsumoto: “Development of Slope Mobility Testbed using Simulated Lunar Soil”, *JAXA Research and Development Memorandum*, 2006.