

小型軽量火山探査ロボットに搭載するスター型車輪の開発と砂利フィールドにおける性能評価

Development of Star-shaped Wheel with Light-weight Mobile Volcano Exploration Robot and Evaluation of Performance on 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.)

The surfaces of volcanoes are covered with loose soil and gravel. Because of the weakness of the ground, the wheels of mobile robots can slip and get stuck. To avoid this problem and enhance the traveling performance, we developed a star-shaped wheel. In this paper, the star-shaped wheel is described in detail and its traveling performance is evaluated. To verify the effectiveness of the star-shaped wheel, we carried out slope-climbing test using a two-wheeled robot equipped with lugged/star-shaped wheels and compared their traveling performances. The experimental results confirmed that the star-shaped wheel has a higher traveling performance than the lugged wheel in gravel field.

Key Words : Wheeled Robot, Mobile Robot, Uneven terrain, pumice, gravel

1 諸言

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震の影響により、我が国では活火山の噴火の危険性が高まっており、現在、火山噴火に備えた対策が急務の課題となっている。火山噴火に伴う災害として、火砕流や土石流が懸念される。それらによる人的被害を最小限にするためには、火山灰の堆積量をモニタリングし、火砕流や土石流の発生時期や発生規模を正確に予測する必要がある。

しかしながら、火山噴火の際には、火山周辺に人が立ち入ることは危険であり、人が直接火山灰の堆積量を計測することはできない。そこで、我々の研究グループでは、地表面に堆積した火山灰を、人に代わって監視することを目標とし、図1に示すシナリオを提案している。このシナリオでは、火山が噴火した際、まず、小型の無人ヘリコプタを用いて火口付近までロボットを輸送し、空中から投下する。次に、火口付近から麓に向かってロボットを走行させながら、火山灰の堆積量を計測する。上記シナリオを達成するため、筆者らは、小型軽量火山探査ロボット GeoStar の開発に取り組んでいる [1]。このロボットの概観を図2に示す。GeoStar は、二輪の車輪を向かい合わせた対向二輪型移動ロボットであり、前面に取り付けられたカメラによって、火山環境の視覚的情報を取得できる。

広範囲にわたる火山灰の堆積量を迅速に観測するために、この移動ロボットには高い走行性能が要求される。しかしながら、火山の表面は細かな砂や砂利で覆われた軟弱地盤であるため、走行が困難となることが懸念される。そこで、本研究では、火山環境において高い走破性を有する車輪の開発を目指した。本稿では、まず、火山環境に適した車輪の開発について述べる。次に、火山表面を模擬した屋内実験フィールドにおいて走行実験を行い、開発した車輪の有有用性について検証する。

2 スター型車輪の開発

2.1 スター型車輪の提案

軟弱地盤を走行する車輪型移動ロボットには、走行性能の向上を目的として、一般的に車輪の表面に「ラグ」と呼ばれる突起が取り付けられている。ラグが土壌を押し分けようとするとき、土壌から抵抗 (Bulldozing resistance) を受



Fig. 1 Volcano exploration scenario using a multicopter and a mobile robot



Fig. 2 Mobile volcano exploration robot, GeoStar

ける。車輪型移動ロボットは、この抵抗から反力を得ることによって、大きな推進力を得ることができる。須藤らは、小型軽量移動ロボットを用いた走行実験を行い、砂上においては、ラグを取り付けることでロボットの走行性能が向上することを報告した [2]。しかしながら、火山の表面は細かな砂に加えて、砂利にも覆われている。このような環境では、ラグが砂利に乗り上がることで土壌が崩れるため、ラグによって大きな推進力を得ることはできない [3]。そこで、GeoStar の車輪開発は、以下の方針で行うこととした。

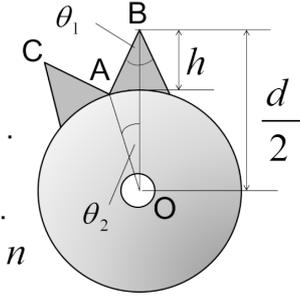


Fig. 3 Model of the star-shaped wheel

- 突起による推進力，および車輪と土壌の間のせん断力により，推進力を得る．
- 車輪の表面形状を工夫し，土壌の崩壊を防ぐ．

上記の開発方針に基づくと，ラグを斜めに取り付けることが適切であると考えられる．ラグを斜めにする事で，ラグを土壌に押し付けるように走行することができ，せん断力を得ることができる．また，ラグを土壌に押し付けることで，土壌の崩壊を防ぐこともできる．しかしながら，車輪が逆回転する場合，上記の車輪は土壌を掘り起こしてしまうため，走行性能が低下する恐れがある．そこで，突起が三角形となった，スター型車輪を提案した．この車輪のモデルを図3に示す．本研究では，提案したスター型車輪を実際に製作し，走行性能を評価することとした．

2.2 スター型車輪の幾何学

スター型車輪の突起先端角度を決定するため，スター型車輪の幾何学について述べる．はじめに，図3において，車輪直径を d [mm]，突起高さを h [mm]，突起本数を n [本]，突起先端角度を θ_1 [deg]， $\angle AOB$ を θ_2 [deg] と定める．ここで，頂点 B を有する突起と，頂点 C を有する突起は，点 A で接しているように，隣り合う突起は隙間なく並べられている．このとき，突起先端角度 θ_1 は，以下のように幾何学的に求めることができる．

$$\frac{d/2 - h}{\sin(\theta_1/2)} = \frac{d/2}{\sin\{180 - (\theta_1/2 + \theta_2)\}}$$

$$\theta_1 = 2 \tan^{-1} \left\{ \frac{(d - 2h) \sin \theta_2}{(d - 2h)(1 - \cos \theta_2) + 2h} \right\} \quad (1)$$

ここで，

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \frac{360}{n}$$

である．式(1)を用いることで，車輪直径 d ，突起高さ h ，突起本数 n が与えられた場合，スター型車輪の突起先端角度 θ_1 を決定することができる．

2.3 スター型車輪の設計・製作

本研究では，車輪直径 d を 360mm，突起高さ h を 60mm，突起本数 n を 16 本とした．上記の値を式(1)に代入し，突起先端角度 θ_1 を算出したところ，およそ 41deg となった．また，ロボットの筐体は，ヘリコプタからの落下時の衝撃や，走行時の振動に耐えることが可能な形状・材質である必要がある．そこで，車輪の材質には，厚さ 30mm のポリエチレンフォームを使用することとした．本研究では，これらの設計指針をもとに，スター型車輪を製作した．

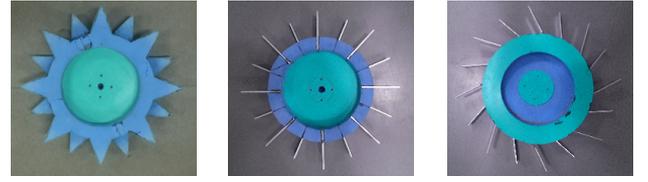


Fig. 4 Wheels with various geometries

3 走行性能評価

3.1 走行性能評価指標

GeoStar を用いて，砂利フィールドにおける斜面直登実験を行い，スター型車輪の走行性能を評価する．本研究では，走行性能の評価指標に，スリップ率を用いた．スリップ率 s は，車輪の角速度 ω [rad/s]，車輪半径 r [m]，車体速度 V [m/s] を用いて，

$$s = \frac{r\omega - V}{r\omega} = 1 - \frac{V}{r\omega} \quad (2)$$

と定義される[4]．ここで，車輪半径 r は，車輪中心とラグ先端の距離と定義する．例えば，車体速度 V が車輪の接線速度 $r\omega$ に等しい時，スリップ率は $s = 0$ となる．このとき，車輪にスリップは生じない．一方で，車体速度 V が 0 の時，スリップ率は $s = 1$ となる．このとき，車輪が回転しているにも関わらず，スリップが生じているために，ロボットは全く進むことができない．したがって，スリップ率 s が小さいほど，走行性能が良いと言える．

3.2 実験装置

製作したスター型車輪を図4(a)に示す．また，比較のため，図4(b)に示すラグ車輪，および図4(c)に示す斜めラグ車輪も製作した．斜めラグ車輪は，車輪が右回転する場合と左回転する場合で，走行性能が異なると考えられる．そこで，本研究では，図4(c)において，右回転の場合を Type.A，左回転の場合を Type.B として定義することとした．

表1には，実験に用いた GeoStar の諸元を示す．なお，重りを用いることで，ロボットの重量は，2.0kg となるように調節した．

3.3 実験フィールド

走行実験には，図5に示す砂利フィールドを用いた．このフィールドには，火山表面を模擬するため，軽石が敷き詰められている．この軽石の粒径は 10mm ~ 40mm であり，かさ密度は 0.33g/cm³ である．なお，このフィールドは，長さが 3m，幅が 0.9m，土壌の深さが 0.2m となっている．

Table 1 Specification of the GeoStar

Size [mm]	L620 × W245 × H360
Mass [kg]	1.4
Wheel size [mm]	φ360 × W60
Protrusion height [mm]	60
Number of lugs	16
Wheel speed [rpm]	4.0



Fig. 5 Gravel field

3.4 実験方法

図4に示す車輪を GeoStar に搭載し、砂利フィールドにおいて斜面直登実験を行うことで、それぞれの車輪の走行性能評価を行った。実験では、ロボットが一定の距離を走行する際の時間を、ストップウォッチで計測することで速度を算出し、式(2)からスリップ率を算出した。なお、車輪の回転数は、4.0rpm で一定になるよう制御した。また、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となるようにした。本研究では、フィールドの斜度が 10deg, 15deg, 20deg において走行実験を行い、それぞれの条件について、3回ずつ繰り返した。

3.5 砂利フィールドにおける走行実験の結果と考察

GeoStar を用いた走行実験の結果を図6、および図7にそれぞれ示す。図6より、斜度が 10deg, 15deg においては、斜めラグ車輪 (Type.A)、およびスター型車輪の方が、ラグ車輪よりもスリップ率が小さく、高い走行性能を有することが分かる。このときの走行状態を観察すると、図8(a)~(c)に示すように、ラグ車輪は、ラグが土壌に深く刺さり、土壌を崩しながら走行しているのに対し、斜めラグ車輪 (Type.A)、およびスター型車輪は、突起が土壌にあまり刺さらず、ほとんど土壌を崩すことなく走行していた。このような違いから、斜度が 10deg, 15deg においては、斜めラグ車輪 (Type.A)、およびスター型車輪の方が、高い走行性能を有したと考えられる。一方で、斜度が 20deg においては、ラグ車輪、斜めラグ車輪 (Type.A)、およびスター型車輪のスリップ率はほぼ等しいため、走行性能はほぼ等しいと言える。このときの走行状態を観察すると、いずれの車輪も土壌を崩しながら走行していた。これは、斜度が大きくなると、土壌が崩れやすくなるためであると考えられる。

図6より、スター型車輪と斜めラグ車輪 (Type.A) を比較すると、いずれの斜度においてもスリップ率はほぼ等しいことから、それぞれの車輪の走行性能は、ほぼ等しいと考えられる。一方で、図7を見ると、スター型車輪は、斜めラグ車輪 (Type.B) と比べてスリップ率が小さく、最も高い走行性能を有していることが分かる。走行状態を観察すると、図8(d)に示すように、斜めラグ車輪 (Type.B) は、ラグが土壌に深く刺さり、土壌を崩しながら走行しているのに対し、スター型車輪は、突起が土壌にあまり刺さらず、ほとんど土壌を崩すことなく走行していた。このような違いから、スター型車輪が最も高い走行性能を有したと考えられる。

続いて、砂利フィールドにおいて、土壌のかさ密度の大きさが走行性能に与える影響について考察する。ラグが土壌を押しつけることで、ロボットは大きな推進力を得るこ

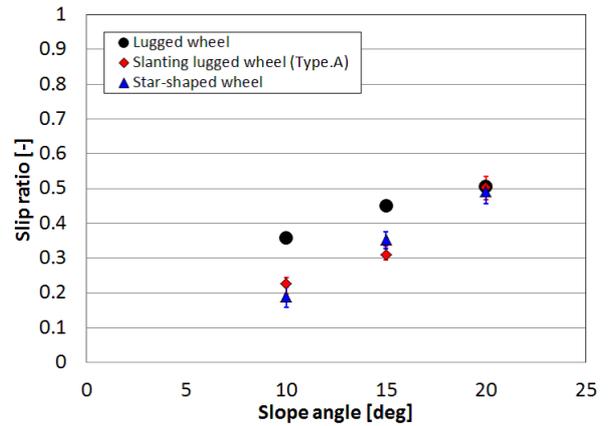


Fig. 6 Performance of slope-climbing ; Lugged wheel, Slanting lugged wheel (Type.A), Star-shaped wheel

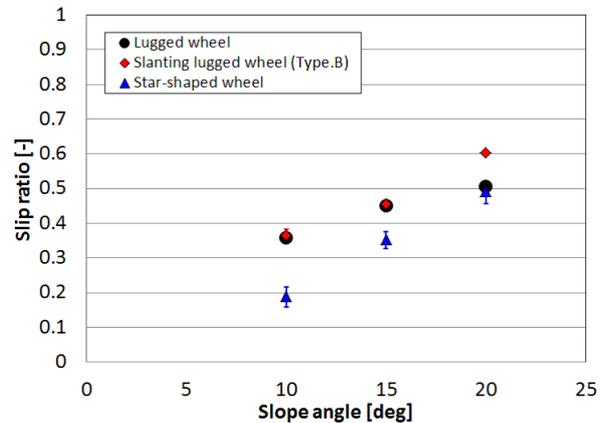


Fig. 7 Performance of slope-climbing ; Lugged wheel, Slanting lugged wheel (Type.B), Star-shaped wheel

とから、平板が移動したときに、平板が土壌から受ける抵抗の大きさをそれぞれ測定した。実験では、粒径 10mm ~ 40mm, かさ密度 0.33g/cm^3 の軽石、および粒径 15mm ~ 25mm, かさ密度 0.57g/cm^3 の軽石を用いた。また、平板の幅は 2.5cm であり、平板の貫入量が 2cm, 4cm, 6cm において実験を行い、それぞれの条件について、6回ずつ繰り返した。この実験結果を図9に示す。この図より、かさ密度が大きい方が、平板が土壌から受ける抵抗の大きさが大きくなり、ロボットはより大きな推進力を得ることができると言える。浅間山の標高 2000m 地点における砂利のかさ密度は、粒径が 5mm ~ 45mm のとき、 0.80g/cm^3 であった。一方で、砂利フィールドのかさ密度は、粒径が 10mm ~ 40mm のとき、 0.33g/cm^3 であり、実際の火山環境よりもかさ密度が小さい。このため、走行実験に使用した砂利フィールドは、実際の火山環境よりも走行条件が厳しいと言える。したがって、実際の火山環境においては、図6、および図7の結果よりもスリップ率は小さくなり、さらに走行性能が向上すると考えられる。



(a) Lugged wheel



(b) Star-shaped wheel



(c) Slanting lugged wheel (Type.A)



(d) Slanting Lugged wheel (Type.B)

Fig. 8 Sinkage of wheels over slope with 15deg

4 結言

本研究では、火山環境において高い走破性を有する車輪の開発を目指し、火山環境の走行に最適と考えられるスター型車輪を開発した。さらに、ラグ車輪、スター型車輪、および斜めラグ車輪を GeoStar にそれぞれ搭載し、火山表面を模擬した屋内実験フィールドにおいて斜面直登実験を行うことで、スター型車輪の有用性について検証した。その結果、斜度がおおよそ 20deg よりも小さい場合には、斜めラグ車輪、およびスター型車輪の方が、ラグ車輪よりも高い走行性能を有することを確認した。一方で、斜度がおおよそ 20deg よりも大きい場合には、斜めラグ車輪、およびスター型車輪の走行性能は、ラグ車輪の走行性能とほとんど変わらなかった。また、車輪が逆回転する場合には、スター型車輪の走行性能は、斜めラグ車輪と比べて高い走行性能を有することが分かった。さらに、土壌のかさ密度が大きくなるほど、ロボットが得られる推進力が大きくなることから、実際の火山環境においては、さらに高い走行性能を有することが期待できる。今後は、実際の火山環境において走行実験を行い、スター型車輪の有用性を検証する予定である。

文献

- [1] 山内元貴, 秋山健, 高橋悠輔, 永谷圭司, 吉田和哉, 羽田靖史: “車輪型軽量火山探査ロボットの開発と遠隔操作試験” 第 13 回 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, pp.652-654 (2012-12).
- [2] 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 (2011-06).

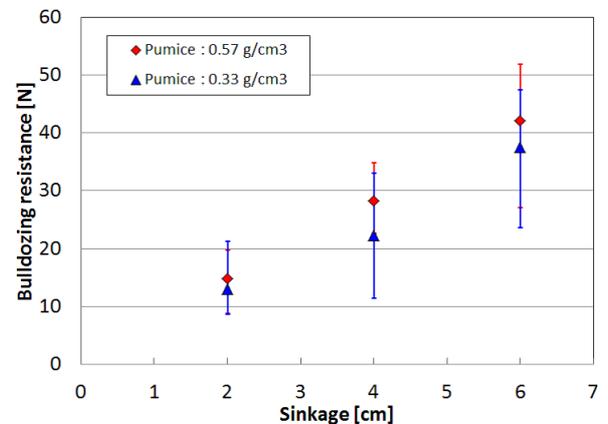


Fig. 9 Sinkage of the plate vs. bulldozing resistance on gravel

- [3] 高橋悠輔, 須藤真琢, 永谷圭司, 吉田和哉: “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” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECH2012, 1A2-I11 (2012-05).
- [4] J. Y. Wong, *Theory of ground vehicles*, Wiley-Interscience (2001).