

Effect to the Driving Performance of Wheel Shape of Small Two-Wheeled Lunar Exploration Rover

Shinnosuke TERAMOTO*, Kimitaka WATANABE*,
Koki MATSUO*, Kazuto TANAKA* and Masataka KAWAGUCHI*

(Received December 9, 2022)

Lunar exploration has become more active in recent years. It has been reported that lunar resources are economically beneficial due to the presence of rare resources such as helium-3. It has become necessary to use small wheeled robots for lunar exploration since there are many hazards involved in the lunar surface environment. The lunar surface is formed by soft ground with deposits of fine particles called regolith. Therefore, one of the exploration challenges for a small lunar exploration rover is getting stuck. Previous studies have shown the effect to the driving performance in silicon sand of wheel shape of small four-wheeled lunar rover. It has been reported that triangular wheels are most suitable for driving on soft ground. A very small two-wheeled lunar rover can be used to reduce the cost of preliminary surveys of dangerous areas such as pits. Therefore, it is necessary to clarify the effect of wheel shape on a small two-wheeled lunar rover. In this study, we clarified the optimal wheel shape for a small two-wheeled lunar rover that can drive on the soft ground by evaluating the driving performance of four types of wheel shapes. As a result of these tests, the triangular wheels have the best driving performance and succeeded in climbing silicon sand with low power consumption.

Key words : space exploration, small lunar rover, regolith, wheeled type, driving performance

キーワード : 宇宙開発, 小型月面探査機, レゴリス, 車輪形状, 走行性能

二輪小型月面探査機の走行性能に及ぼす車輪形状の影響

寺本 慎之介, 渡辺 公貴, 松尾 昂輝, 田中 和人, 川口 正隆

1. 緒言

近年, 宇宙開発が再び注目を集めている. 月に関しては月の極域での氷の存在が報告されている^{1,2)}. また, 月面で水を電気分解することでエネルギー源としての水素を取り出す研究も行われ³⁾, 月資源開発が経済的に有益であると報告されている^{4,5)}. さらに最近では中国が月面サンプルリターンを成功させ, 地球上で希少なエネルギー源であるヘリウム3が月では取り出しやすい形で存在していることを発見し

た⁶⁾. NASA ではアポロ計画より始まり月面探査機の開発が盛んに行われてきた⁷⁾. さらに月面基地を拠点とした中・長期的な宇宙探査計画実現のために月面でエネルギーを貯蔵・供給する ISRU (In-Situ Resource Utilisation) 計画^{8,9)}や, 月を起点として火星を探索するアルテミス計画¹⁰⁾などが進められている. 月の厳しい環境での有人資源探査は多くの危険を伴い, 莫大な費用も必要となる. このようなことから無人で月面の資源調査を行うため月面の厳しい環境

*Department of Biomedical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone & FAX: +81-774-65-6408, E-mail: kiwatanabe@mail.doshisha.ac.jp

下でも走破できる車輪型月面探査機が必要である。月面探査機においては中型と小型に分類することができる。中型の月面探査機では移動距離が大きく、1台に多くの機器を搭載することができるため広範囲で様々なデータを取得することができる。その一方、国家機関を主導とした莫大な費用をかけた計画になってしまう。小型の月面探査機では開発費用、輸送費用を抑えて、民間企業や大学などが主体となり洞窟や縦孔などの調査を行うことができる。また小型かつ軽量であるため月面に1台の探査機を送り込むのではなく多数の探査機を1度に送り込むことが可能となる。これにより小型でも広域の探査が実現し、1台が故障した場合でも他で補完が可能となる。

本研究では月面探査機の中でも2~3 kg以下の二輪小型月面探査機について取り扱っていく。月面は、地球上の固い路面とは違い厚さが数 cm から数十 m のレゴリスという微粒子が堆積した軟弱な不整地である^{11,12)}。レゴリスの主成分は流星物質の衝突破片や、宇宙風化によって砕けた岩石などからなるガラス状の粒や氷の粒である¹³⁾。二輪小型月面探査機の課題の一つとして、軟弱地盤上を走行する際に発生するスタック現象が挙げられる。スタック現象とは車輪の回転により路面を掘ってしまい走行できなくなる現象であり、軟弱地盤上を走行する際の路面から得られる反力が小さいことが原因と考えられている¹⁴⁾。また、過去の研究では登坂の際にスタック現象が発生し20°以上の登坂が困難であると報告されている¹⁵⁾。月面のクレータや小さな凹凸でも小型月面探査機にとっては、大きな障害となるためスタック現象を起こさずに走行できることが非常に重要である。さらに、月面では太陽光発電を主流としているが、小型月面探査機では太陽光パネルの搭載可能面積が少なくなってしまう。つまりエネルギーの供給が困難であることから低消費電力での走行も必要である。近年では、二輪小型月面探査機においてFig. 1に示すような円柱状に多数のリブをつけた車輪が多く採用されておりDEM解析なども行われている¹⁶⁾。しかし、実際に月面を走行した例はなく軟弱地盤上でスタック現象を起こさずに20°以上を登坂できるかは明らかになっていない。

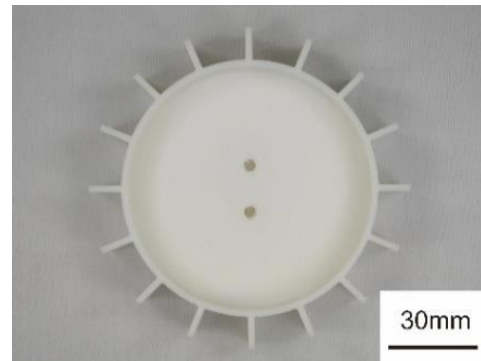


Fig. 1. Cylindrical rib wheel.

また、渡辺らが発表した四輪小型月面探査機における多角形車輪の影響¹⁷⁾では、地上で軟弱地盤上を走行する低圧タイヤの原理を応用した走行形態が開発されている。その研究では円柱、三角柱、四角柱、八角柱の車輪形状を扱っており、車輪と地盤の接触角度と接地面積の影響から三角柱車輪が最も軟弱地盤の走行に適しているとしている。さらに小型化した二輪小型月面探査機における多角形の影響は評価されていない。二輪と四輪では軟弱地盤上において異なる走行形態であると考えられる。

以上のことから、本研究では車輪の形状に着目し、軟弱地盤上における二輪小型月面探査機の走行性能に及ぼす多角形車輪の影響を評価することを目的として、円柱車輪、円柱リブ車輪、三角柱車輪、四角柱車輪の4種類の車輪形状を用いて走行性能評価を行った。

2. 実験方法

2.1 二輪小型月面探査機の作製

本研究では3DCAD (Fusion360, Autodesk) を用いて図面を作製し、3Dプリンタ (X-Plus, QIDI TECH) で作製した。本研究では車輪形状に着目し、軟弱地盤上での走行性能に及ぼす車輪形状の影響を評価するため、材料は4種類のすべての車輪形状において3Dプリンタで作製が容易なPLA (Pxmation) を使用した。車輪の動力にはDCギアードモータ (6V, 10RPM, uxcell Japan) を二つ使用した。左右に車輪を取り付け、前後方向の安定のため本体後方にスタビライザを取り付け三点支持とした。本体の寸法は高さが100 mm、幅が134 mm、長さが185 mmで、走行の際に本体が接地しないように車高を最大で43 mm、最小で18 mmに設計した。質量は鉛を搭載す

ることで 400 g に統一した。モータシャフトと車輪の結合では摩耗を防ぐための治具を作製し、治具と車輪をボルトとナットを用いて固定した。作製した二輪小型月面探査機を Fig. 2 に示す。Fig. 2 では基準となる円柱車輪を装着している。

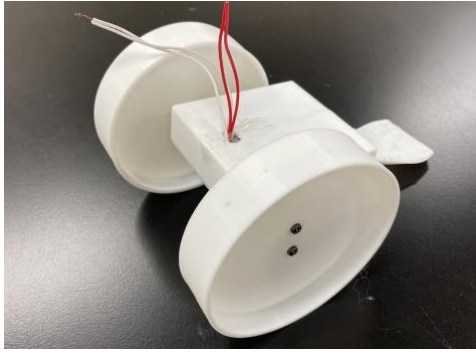


Fig. 2. Two-wheeled lunar exploration rover.

2.2 車輪の作製

本研究では車輪形状が軟弱地盤上での走行性能に及ぼす影響を評価するため、同一の本体を使用しすべての車輪において厚さを 2 mm とし、車輪の可動域が 100 mm の円に収まるように設計した。基準となる車輪を円柱車輪として、近年多く採用されている円柱リブ車輪ではリブの長さや車輪の大きさを実際に月面での利用が検討されている車輪形状の比率と同等に設定している。また三角柱車輪と四角柱車輪では基準となる円柱車輪に内接する正多角形を採用している。車輪についても二輪小型月面探査機本体と同じく、軟弱地盤上での走行性能に及ぼす車輪形状の影響を評価するため 3DCAD を用いて図面を作製し、3D プリンタで作製が容易な PLA を使用し作製した。3DCAD で作製した 4 種類の車輪形状の図面を Fig. 3～Fig. 6 に示す。

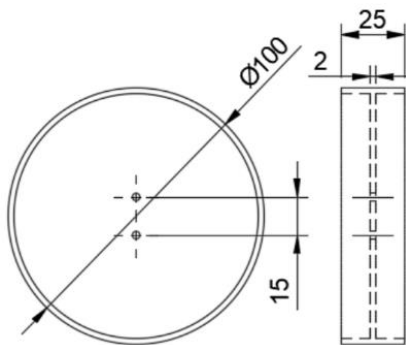


Fig. 3. Drawing of cylindrical wheel.

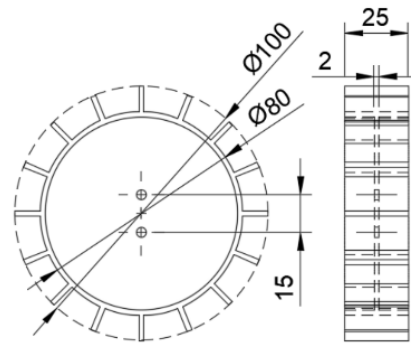


Fig. 4. Drawing of cylindrical rib wheel.

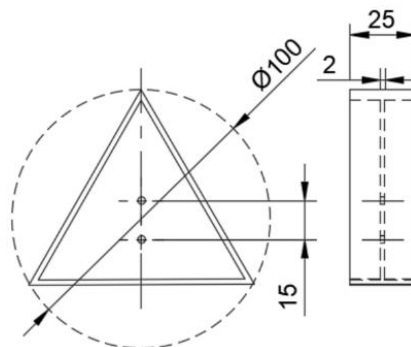


Fig. 5. Drawing of triangular prism wheel.

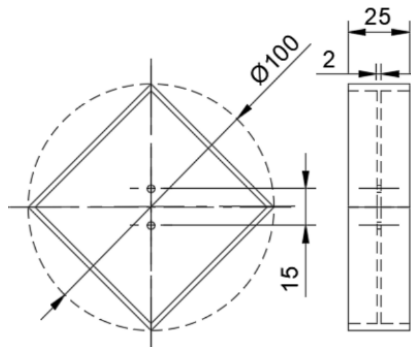


Fig. 6. Drawing of prismatic wheel.

2.3 走行試験場

走行試験は Fig. 7 に示す走行試験場を用いて行った。走行試験場は、幅 450 mm、長さ 1820 mm、高さ 308 mm とし、最前面には、走行の様子を確認するため透明のアクリル板を使用している。走行試験場には、地球上の軟弱地盤であり、地球上でのレゴリスシミュラントの代用として実際に使用されている粒子径が 0.3～0.8 mm の珪砂 5 号（竹折磁業所）と 0.2～0.3 mm の珪砂 6 号（竹折

礫業所) を 1 : 1 の割合で混合したものを 100 kg 敷き詰めた。傾斜についてはリフトテーブルを用いて傾斜をつけた。傾斜をつけた際の角度の計測はデジタル角度計 (MonotaRO) を用いて、走行試験場の傾斜角度ではなく、300 mm の走行コース上の砂地の表面の 6 点において測定を行い、平均値が $\pm 1^\circ$ 以内になるように走行コース内を整備した。二輪小型月面探査機の本体上部から出ている安定化電源との配線コードは走行試験場の中心に支柱を立てることで本体の上部から配線コードを吊るす手法を採用し、走行試験の際に配線コードの影響を受けないように設計している。



Fig. 7. Driving test course.

2.4 走行試験

走行試験は、走行試験場内で走行距離 300 mm を測り、走行時間、300 mm 走行時の消費電力量、スリップ率の三つのパラメータで評価を行った。3 種類の車輪形状により小型月面探査機の全重量が異なってくるため、走行性能に及ぼす車輪形状の影響を評価するため本体内部に鉛を搭載することですべての車輪の全質量を 400 g に統一した。電源には直流安定化電源 (PMX18-5A, KIKUSUI) を用い、電圧を 6 V に設定した。走行時間の測定には、ストップウォッチ (CITIZEN) を用い、走行コースの横に定規を置き、300 mm のスタート地点を小型月面探査機の本体が通過した時点で時間の計測を始め、小型月面探査機の本体がゴール地点を通過した時点で計測を終了し、走行時間を測定した。消費電力量の測定には、パワーメータ (PW3335, HIOKI) を用い、ストップウォッチと同様のタイミングでスイッチを押すことで測定した。パワーメータと PC を接続することで 0.5 s ごとの電圧、電流、消費電力の計測値を出力し監視した。走行試験時の

概略図を Fig. 8 に示す。走行試験場の傾斜は、 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° と 7 段階に変更し各角度で 5 回ずつ走行試験を行った。また、走行時の車輪の回転数は二輪小型月面探査機の走行時の動画を撮影し、回転数を測定した。車輪形状ごとの小型月面探査機の移動速度は、走行コースの走行時間と距離から算出した。また、スリップ率 λ は次式によって算出した。

$$\lambda = \begin{cases} 1 - \frac{V_\omega}{r\omega} : \text{Driving}(r\omega \geq V_\omega) & (1) \\ 1 - \frac{r\omega}{V_\omega} : \text{Braking}(V_\omega \geq r\omega) & (2) \end{cases}$$

ここで、車輪の半径 r すべての車輪において 4 種類の車輪の可動域である 100 mm に設定した。また角速度を ω 、車輪の移動速度 V_ω とする。(1)式が、駆動時におけるスリップ率を表し、(2)式が制動時のスリップ率を表す。

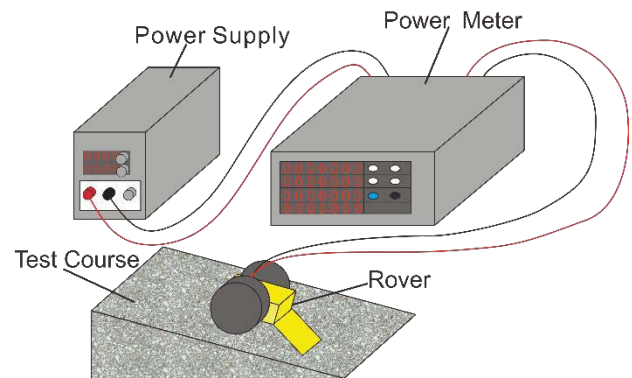


Fig. 8. Experimental method for driving test.

2.5 掻き出し量測定

二輪小型月面探査機の走行において急傾斜では回転数が多くなり、300 mm 走行後の車輪の後方に Fig. 9 に示すような山形の轍が二つ形成されることが確認されている。Fig. 9 では実際に 3D スキャナを用いて作製した 3D モデルを示す。二輪小型月面探査機では軟弱地盤上を登坂する際には砂を掻き、推進力を得ていると考えられる。このようなことから急傾斜登坂後の車輪の轍を計測することで各車輪形状の走行性能に及ぼす砂の掻き出し量の影響を評価するため走行後の掻き出し量の測定を行った。走行後の掻き出し量測定では 3D スキャナ (Artec Eva, Artec 3D) を使用し、300 mm 走行後の車輪後方の山形の

轍の3Dモデルを作製した。3DCAD (Fusion360, Autodesk) で轍の3Dモデルを読み込み、任意の轍の断面を作製した。Fig.9に示すように走行後の車輪後方に堆積している山形の轍の断面を計測し平らな面から上方に堆積している砂の部分を轍量Aとして面積を測定した。300mm走行後の山形の轍の3Dモデルから一掻きごとの轍量である掻き出し量Vを(3)式によって算出した。掻き出し量の算出は三角柱車輪の20°、25°、30°、四角柱車輪の20°、25°で行った。

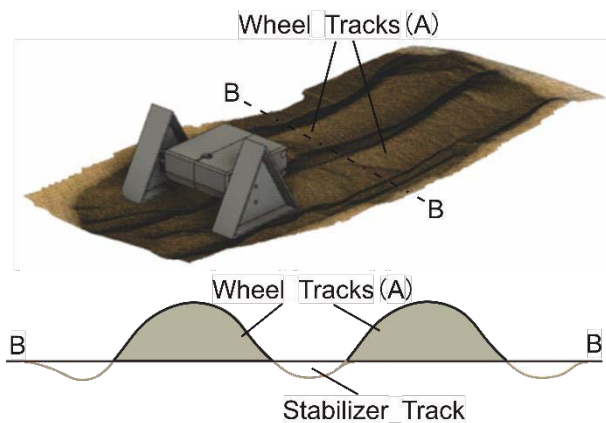


Fig. 9. Measuring method of wheel tracks.

$$V = \frac{300A}{nm} \quad (3)$$

ここで300mm走行後の轍量をA、走行時の回転数をn、多角形車輪の頂点の数をmとする。

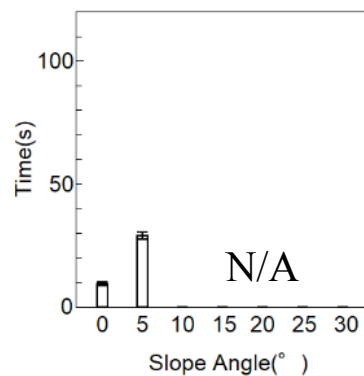
3. 結果および考察

3.1 走行試験結果

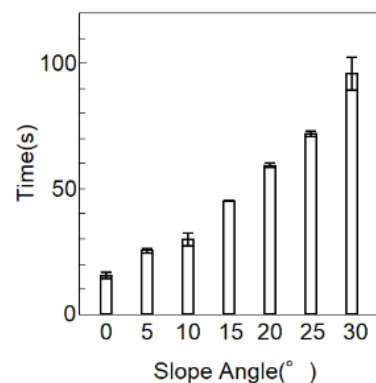
7段階の傾斜における走行試験を行った結果、円柱車輪は0°を走行することができなかった。円柱リブ車輪は5°までの登坂に成功したが10°ではその場で路面を掘り進めてしまいスタック現象が起り登坂できなかった。三角柱車輪は30°までの登坂に成功した。20°以降では本体が地面についたり離れたりしている状態で走行していた。30°では傾斜が急なあまり最初はその場で砂を掻き後方に砂が堆積すると登坂し始めるという走行であった。登坂し始めるまでに10sほどを要していた。四角柱車輪では25°までの登坂に成功した。30°ではスタック現象だけでなく後方のスタビライザの部分に砂が堆積してしまい登坂できなくなっていた。

3.2 走行時間測定結果

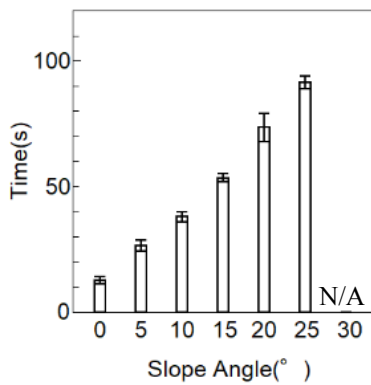
Fig.10に走行時間の測定結果を示す。測定不可となった斜度にはN/Aと記載している。円柱リブ車輪は0°から5°で206.9%と急激に増加している。5°以降は登坂できなかったものの0°においては4種類の車輪の中で最も小さく9.39sという値を示した。三角柱車輪と四角柱車輪では角度が5°上がるごとに10%から60%の増加率で緩やかに増加していた。三角柱車輪と四角柱車輪を比較したところ、0°では四角形車輪の方が2.763s小さい値を示している。しかし、5°では走行時間に大きな差は見られない。10°以降において傾斜が5°上がるごとに三角柱車輪と四角柱車輪の差が8.12s, 8.29s, 14.31s, 19.45sと徐々に増加していくことがわかる。



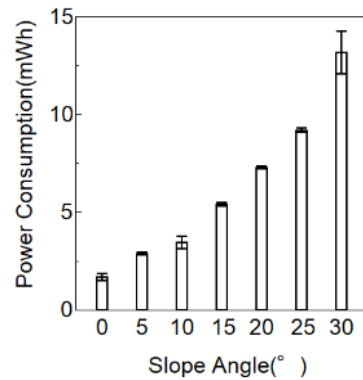
(a). Cylindrical rib wheel



(b). Triangular prism wheel



(c) Prismatic wheel.

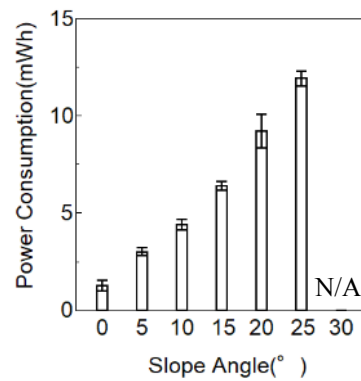


(b). Triangular prism wheel

Fig. 10. Driving time for the test course
(N = 5, mean ± S. D).

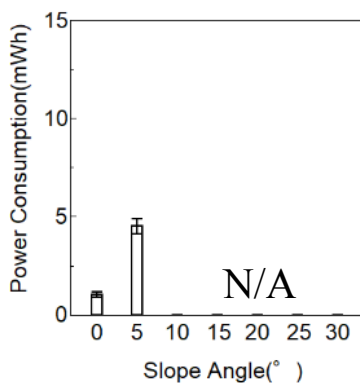
3.3 消費電力量測定結果

Fig. 11 に消費電力量の結果を示す。測定不可となった斜度には N/A と記載している。円柱リブ車輪は 0° から 5° で 338.9% と急激に増加している。0° においては 4 種類の車輪の中で最も小さい 1.06 mWh を示した。三角柱車輪と四角柱車輪では 0° から 5° の間では、三角柱車輪、四角柱車輪ともに 72.2%, 137.3% と急激に増加した。しかし 5° 以降では角度が 5° 上がるごとに 20% から 50% の増加率で緩やかに増加していた。三角柱車輪と四角柱車輪を比較したところ、15° までは消費電力量に大きな差は見られないが、20° 以降において傾斜が 5° 上がるごとに三角柱車輪と四角柱車輪の差が 1.928 mWh, 2.742 mWh と徐々に増加していくことがわかる。



(c) Prismatic wheel

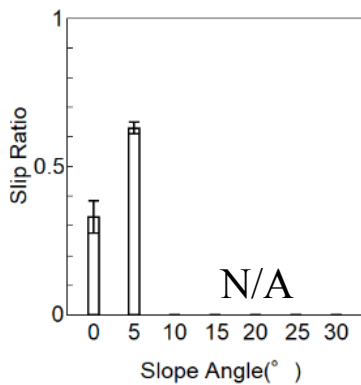
Fig. 11. Power consumption
(N = 5, mean ± S. D).



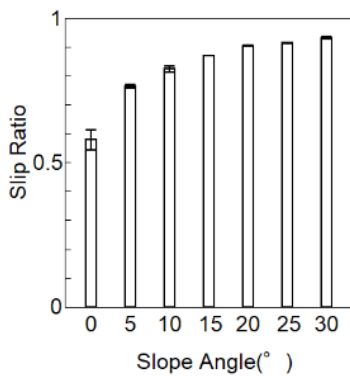
(a). Cylindrical rib wheel

3.4 スリップ率測定結果

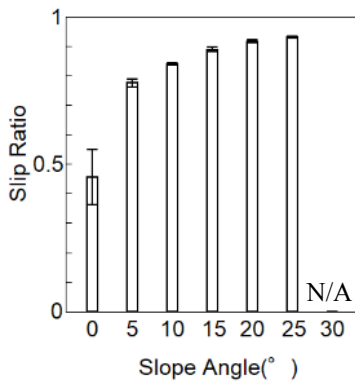
Fig. 12 にスリップ率の結果を示す。測定不可となった斜度には N/A と記載している。円柱リブ車輪は 5° までしか登坂できないが 0° と 5° においては最も小さいスリップ率の値を示している。三角柱車輪と四角柱車輪ではどちらも傾斜が大きくなるにつれて、スリップ率も徐々に大きくなっていく。三角柱車輪と四角柱車輪ともに 20° 以降は 0.90 を超える値を示している。スリップ率が大きくなり 1 に近づいても、時間をかければ登坂可能であるということがわかる。



(a). Cylindrical rib wheel



(b). Triangular prism wheel



(c) Prismatic wheel.

Fig. 12. Slip ratio
(N = 5, mean ± S. D).

3.5 掻き出し量測定結果

Table 1 に掻き出し量の測定結果を示す. 表に示すように傾斜が 5° 大きくなるにつれて掻き出し量は三角柱車輪では, 57.6%, 33.0%, 四角柱車輪では, 62% も大きくなっている. 四角柱車輪と三角柱車輪では 20°, 25° の両方において三角柱車輪が大きく, 差は 20° では 355.0 mm³, 25° では 319.8 mm³ となった.

3.6 各車輪における走行性能の考察

上記の結果より 4 種類の車輪形状の中で唯一 30° を登坂できたこと, かつ 30° 以外の傾斜でも低消費電力で走行できたことを考慮すると, 三角柱車輪が最も性能が良いといえる. 5° 以降の傾斜においては常に三角柱車輪が最も走行性能がよく, その次に四角柱車輪となり円柱車輪は 0° で走行不可, 円柱リブ車輪は 10° 以降は走行不可となった. 円柱車輪と円柱ラグ車輪が急斜面を走行できなかった要因としては, 車軸から路面との接地点までの距離が常に一定になっていることにあると考えられる. 三角形車輪と四角形車輪ではこの距離が常に変化しているためその場で路面を掘り進めることでスタック現象を回避していると考えられる. 今回の走行試験の結果となった要因として地盤を掻く際の路面と車輪の接地面積の大きさと推進力を得る際の路面との接触角が影響していると考えられる. 軟弱地盤上を走行する際には接地面積を大きくすることが推進力を得るために有効であると報告されている¹⁸⁾. 接地面積を大きくすることで接地圧力を軽減することができ, 軟弱地盤上に沈下しづらくなる. さらに広い範囲で路面に圧力を加えることで, 軟弱地盤に収縮現象を生じさせ月面探査機に有効な推進力を得ることができる. 本研究における三角柱車輪と四角柱車輪では, 三角柱車輪の最大接触面積は 2165.1 mm² 四角柱車輪の最大接触面積は 1767.8 mm² となっている. このように三角柱車輪は四角柱車輪よりも接地面積が大きいため走行性能が良いと考えられる.

Table 1. Amount of scraping by wheels [mm³]

| | triangular prism wheels | | | prismatic wheels | |
|--------------------|-------------------------|---------|----------|------------------|---------|
| | 20° | 25° | 30° | 20° | 25° |
| Amount of scraping | 5880.60 | 9266.22 | 12325.90 | 5525.57 | 8946.47 |

Fig. 13, Fig. 14 に三角柱車輪と四角柱車輪の走行形態を示す。三角柱車輪と四角柱車輪の車輪が最も深く潜り込んでいる状況における推進力 F_3 と F_4 を求めていく。すべての車輪形状において同一のモータを使用していることから、車輪が路面から受ける反力を R とし、三角柱車輪、四角柱車輪の路面との接触角を α , β とする。Fig. 13, Fig. 14 より車輪と路面との接触角の大小関係より(4)式が言える。

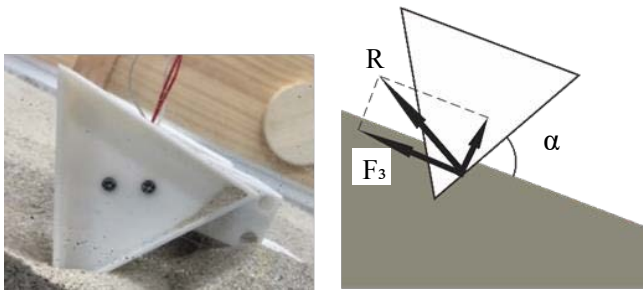


Fig. 13. Driving form of triangular prism wheel.

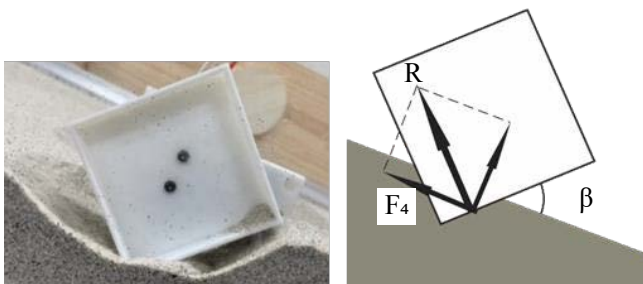


Fig. 14. Driving form of prismatic wheel.

$$\begin{aligned} F_3 &= R \sin \alpha \\ F_4 &= R \sin \beta \\ \alpha &> \beta \\ \therefore F_3 &> F_4 \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式より二輪小型月面探査機が走行する際の推進力となる、斜面と平行方向の力が四角柱車輪の方が小さくなっていることがわかる。三角柱車輪では接触角を大きく確保できることから、推進力を前方に伝えることができ、走行性能が良くなったと考えられる。

次に Table 1 の掻き出し量について考察していく。今回掻き出し量と走行性能を比較したところ掻き出し量が大い方が、走行性能も良くなるという結果となった。掻

き出し量において三角柱車輪と四角柱車輪を比較すると走行性能が良い三角柱車輪の方が大きな値を示している。また各車輪において角度が大きくなるごとに掻き出し量も大きくなっている。このような結果となった理由として、車輪の可動域の余白体積と斜面方向の力の大きさが関係していると考えられる。三角柱車輪の方が四角柱車輪より可動域の余白体積が大きい。3DCAD を用いて三角柱車輪と四角柱車輪の余白体積を計測したところ、 38386.6 mm^3 , 17837.4 mm^3 となり三角柱車輪の方が 115.2% も大きくなった。この車輪の可動域の余白体積は走行する際の予測掻き出し部分を表していると考えられる。そのため余白体積が多い三角柱車輪の方が予測掻き出し部分も大きくなり掻き出し量も大きくなったと考えられる。このようなことから四角柱車輪以降の多角形車輪では辺が多くなり、多角形が内接している円に近づくほど走行性能は悪くなると考えられる。斜度と掻き出し量の関係では斜度が大きくなるにつれて、掻き出し量も多くなっている。この結果には斜面方向の力の大きさが関係していると考えられる。斜度が大きくなるにつれて、車輪と砂の重力の斜面方向の成分は大きくなっていく、そのため斜度が大きくなると砂を掻き出す際の推進力に加えて重力の斜面方向の成分も加わるため斜度が大きくなると掻き出し量も大きくなると考えられる。

4. 結言

本研究では、月面環境下においても走行可能な二輪小型月面探査機の走行に最適な車輪形状を提案することを目的として研究を行った。円柱車輪、円柱リブ車輪、三角柱車輪、四角柱車輪の四つの車輪形状を用い、低消費電力で 20° を超える登坂を可能とする車輪形状を開発し、車輪形状による走行性能の違いを明らかにした。二輪小型月面探査機においては本研究で使用した 4 種類の車輪形状の中では、三角柱車輪を用いることで 30° までの登坂が可能であると明らかになった。軟弱地盤上の走行に多く採用されている円柱リブ車輪は平地での走行には良いが、急な斜面においては三角柱車輪や四角柱車輪のように車体が上下することなく、その場で路面を掘り進めてしまい走行できなかった。また、ほとんど平地のない月面上において円柱リブ型の車輪形状は適しておらず、推進力をより前

方に伝えることができる三角柱車輪が最も走行に適している。また、今後の研究としてより月面の環境を模擬するためにも6分の1の質量での走行試験やレゴリスと珪砂の挙動の違いなども考慮して研究を進めていく必要があると考える。

参考文献

- 1) S. Nozette, C. L. Lichtenberg, P. Spudis, R. Bonner, W. Ort, E. Malaret, M. Robinson and E. M. Shoemaker, "The Clementine Bistatic Radar Experiment", *SCIENCE*, **274**, 1495-1498 (1996).
- 2) V. Carruba and A. Coradini, "Lunar Cold Traps: Effects of Double Shielding", *Icarus*, **142**, 402-413 (1999).
- 3) L. Schluter, A. Cowley, Y. Penneec and M. Roux, "Gas Purification for Oxygen Extraction from Lunar Regolith", *Acta Astronautica*, **179**, 371-381 (2012).
- 4) A. Sommariva, L. Gori, B. Chizzolini and M. Pianorsi, "The Economics of Moon Mining", *Acta Astronautica*, **170**, 712-718 (2020).
- 5) 長友信人, "月とは何か? -宇宙マクロエンジニアリング計画の動機に関する研究-", *MACRO REVIEW*, **11**[2], 75-82 (1999).
- 6) A. Li, X. Chen, L. Song, G. Chen, W. Xu, J. Huo, M. Gao, M. Li, L. Zhang, B. Yao, M. Ji, Y. Zhang, S. Zhao, W. Yao, Y. Liu, J. Q. Wang, H. Bai, Z. Zou, M. Yang and W. Wang, "Taking Advantage of Glass : Capturing and Retaining the Helium Gas on the Moon", *Material Futures*, **1**, 1-7 (2022).
- 7) A. Austin, B. Sherwood, J. Elliott, A. Colaprete, K. Zacny, P. Metzger, M. Sims, H. Schmittf, S. Magnus, T. Fong, M. Smith, R. P. Casillas, A. S. Howe, G. Voecks, M. Vaquero and V. Vendiola, "Robotic Lunar Surface Operations 2", *Acta Astronautica*, **176**, 424-437 (2020).
- 8) M. F. Palos, P. Serra, S. Fereres, K. Stephenson and R. G. Cinca, "Lunar ISRU Energy Storage and Electricity Generation", *Acta Astronautica*, **170**, 412-420 (2020).
- 9) A. Ellery, "Sustainable In-situ Resource Utilization on the Moon", *Planetary and Space Science*, **184**, 1-13 (2020).
- 10) K. L. Ferrone, A. B. Taylor and H. Helvajian, "In-situ Resource Utilization of Structural Material from Planetary Regolith", *Science Direct*, **69**, 2268-2282 (2022).
- 11) X. Hou, T. Ding, T. Chen, Y. Liu, M. Li, Z. Deng, "Constitutive Properties of Irregularly Shaped Lunar Soil Simulant Particles", *Powder Technology*, **346**, 137-149 (2019).
- 12) E. N. Slyuta, "Physical and Mechanical Properties of the Lunar Soil", *Solar System Research*, **48**[5], 330-353 (2014).
- 13) J. J. Bellucci, A. A. Nemchin, M. Grange, K. L. Robinson, G. Collins, M. J. Whitehouse, J. F. Snape, M. D. Norman and D. A. Kring, "Terrestrial-like Zircon in a Clast from an Apollo 14 Breccia", *Earth and Planetary Science Letters*, **510**, 173-185 (2019).
- 14) 水上憲明, 吉光徹雄, 久保田孝, "動的沈下を考慮に入れたテラメカニクスに基づく車輪モデルの提案", 日本機械学会, **78**[788], 84-93 (2012).
- 15) 吉田和哉, "月惑星探査ロボットの研究開発における課題-走行力学の観点からの考察-", 日本ロボット学会, **27**[5], 26-29 (2009).
- 16) H. Nakashima, H. Fujii, A. Oida, M. Momozu, H. Kanamori, S. Aoki, T. Yokoyama, H. Shimizu, J. Miyasaka and K. Ohdoi, "Discrete Element Method Analysis of Single Wheel Performance for a Small Lunar Rover on Sloped Terrain", *Journal of Terramechanics*, **47**, 307-321 (2010).
- 17) 渡辺公貴, 永江尚也, 富樫一宇, 川口正隆, 田中和人, "小型月面探査ローバーの走行性能に及ぼす車輪形状の影響", ハリス理化学研究報告, **62**[3], 181-188 (2021).
- 18) 飯塚浩二郎, 國井康晴, 久保田孝, "弾性特性を考慮した軟弱砂地盤走行のための月面探査車輪型ロボットの車輪形状検討(車輪と軟弱地盤の相互作用を考慮した弾性車輪の効果)", 日本機械学会, **74**[748], 136-141 (2008).