

The Effect of Eccentric Drive of Circular Wheels on the Running Performance of a Small Two-Wheeled Lunar Rover

Soraki AKIYAMA*, Kimitaka WATANABE*, Tomoki HORIGUCHI*, Kazuto TANAKA* and Masataka KAWAGUCHI*

(Received December 9, 2022)

In the past, various studies on the Moon have been conducted around the world. Nowadays, more lunar exploration is required to discover where, how much and what form of resources such as oxides, helium-3 and water-ice are located on the Moon. The existence of a rover traveling on the Moon's surface will be important for such exploration. There is a need for a small, lightweight rover that can withstand the harsh lunar environment of low gravity, severe temperature differences, radiation, high vacuum and soft ground due to deposition of particulate regolith, while also achieving at low cost. In order to improve the running performance of the rover on soft ground of the lunar surface, a running test was conducted at a test site. This study proposes a small rover that incorporates eccentric drive of the wheels. The wheels are commonly used circular wheels with lugs. By eccentrically positioning the axles of the wheels, which are said to have a limit to the angle of climbing, the rover was able to climb a steep slope with low power consumption.

Key words : space exploration, small lunar rover, soft ground, wheel, testing

キーワード : 宇宙探査, 小型月面探査機, 軟弱地盤, 車輪, 試験

二輪小型月面探査機の走行性能に及ぼす円形車輪の偏心駆動の影響

秋山 空輝, 渡辺 公貴, 堀口 智輝, 田中 和人, 川口 正隆

1. はじめに

20世紀半ばの旧ソビエト連邦とアメリカの冷戦を機に、国家の威信をかけて軍事的優位性を保持するため、有人宇宙飛行に向けた両国間の競争が盛んに行われた。ソ連は1957年に人工衛星スプートニクを打ち上げ、1961年にはボストーク1号に乗ったユーリ・ガガーリンが人類史上初の有人宇宙飛行を成し遂げた。対してアメリカは、マーキュリー計画やジェミニ計画、アポロ計画を経て、1969年にアポロ11号を打ち上げた。この着陸船イーグルに乗っていたニール・アームストロングとバズ・オルドリンは初の月

面着陸を果たした。その後も宇宙開発は世界中で大きく進歩した。なかでも月面探査は各国で大きく注目を浴び続けている。月には酸化物¹⁾や貴重な資源である³He²⁾が存在しており、1990年代にはアメリカの月探査衛星クレメンタイン³⁾やルナ・プロスペクター⁴⁾の調査によって月極域内で水氷の存在が示唆された。このことから、燃料となる水素や飲料となる水、呼吸に必要な酸素の現地調達が期待されており、インフラ構築を最終的な目標として、アメリカを主導に日本を入れた20か国によってアルテミス計画が進められている。現段階で月周回衛星かぐや⁵⁾

*Department of Biomedical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone & FAX: +81-774-65-6467, E-mail: kiwatana@mail.doshisha.ac.jp

をはじめ、多くの月面探査が行われてきたが、氷等の詳しい分布や量については未解明となっており、さらなる探査が求められている。

月面探査における課題は大きく分けて二つある。一つ目はコスト面での課題である。月面探査には探査機等の開発費のみならず月への輸送費など多額の費用がかかるため、低コスト化の実現に向けて、探査機および各種センサー等の小型軽量化は重要な要素となってくる。これによって開発コストやペイロードの削減につながり、個体数を増やした群探査や他の探査機との相乗りが可能、大型に比べて試作に取りかかりやすいといった利点が生まれる。また探査能力においては、小さな車体を活かし、月面に存在するクレーター内部や縦孔をはじめ、狭い空間での探査が可能である。対して大型探査機は費用がかかるものの、人を乗せることや多くの物資を運ぶことが可能であり、小型に比べて長距離移動も期待できる。そこで本研究では小型の利点を採用し、約 450 g の探査機を作製した。二つ目は環境面での課題である。月面は地球に比べて約 6 分の 1 の重力や過酷な温度差、放射線、高真空、加えて隕石等の衝突によって生成された微粒子レゴリス⁶⁾の堆積といった厳しい環境となっている。特に低重力とレゴリスの堆積が探査機の走行性能に大きく影響を及ぼす。低重力下では地面との摩擦減少により駆動力を得ることが難しく、レゴリスの堆積によって軟弱地盤が形成されていることで、地盤を掘削し、スタックと呼ばれる前進不能の状態に陥りやすい⁸⁾といった課題が挙げられる。これらの課題に対して、車輪型^{9,10)}やクローラ型^{11,12)}、ホッピング型^{13,14)}などの様々な探査機が研究されている。本研究では、惑星探査に用いられることが多く、高い回転効率や単純な機構、制御のしやすさ⁸⁾などの観点から、車輪型を採用した。車輪型は走行に伴う軟弱地盤の変形により生じる反力が小さく、車輪の回転によって地盤を掘ってしまいスタックに陥りやすい¹⁵⁾ことが主な課題である。また、砂もしくは模擬レゴリスを直登する場合、傾斜角度 20° 前後が限界¹⁶⁾ともいわれている。過去に、車軸位置を偏心させた車輪機構を用いることで、段差を乗り越えるための必要最小限の水平方向力が低減し、乗り越

え性能が向上する¹⁷⁾ことが報告されている。また、今年度内に月へ打ち上げ予定の超小型月面探査機 SORA-Q¹⁸⁾についても、両輪の回転軸を偏心させた機構を採用しており、断続的に車体を接地させながら登坂を可能にしている。そこで本研究では、走行中に車体が接地しない設計を施し、一般的に用いられているラグ付き円形車輪の車軸位置を偏心させることで、低消費電力量で登坂可能な小型の探査機を提案する。

2. 小型月面探査機の設計および試験方法

2.1 二輪小型月面探査機の作製

小型探査機および 4 種類の車輪の設計を行った。材料には、PLA 樹脂 (白 1.75 mm 径, 1 kg, Creality 3D) を使用し、3D プリンター (X-Plus, QIDI TECH) によって積層造形した。駆動用のモータには、両軸モータ (6 V 18 rpm, JGY-370, Tangxiaonei) を使用した。車輪については、一般的に使用されているラグ付き円形車輪 (以下、円形車輪と呼ぶ) を基準として、円形車輪の車軸位置を 10 mm 偏心させた偏心車輪 (以下、偏心車輪と呼ぶ)、偏心車輪の最大旋回半径に合わせてラグを伸ばした円形車輪 (以下、円形車輪-長ラグと呼ぶ) およびラグの長さは変更せず内径を大きくした円形車輪 (以下、円形車輪-大内径と呼ぶ) の 4 種類を作製した。円形車輪を取り付けた探査機の全体サイズは、長さ 256 mm、幅 200 mm、高さ 168 mm となっており、走行中に車体が接地しない設計を施した。Fig. 1 に小型探査機の図面、Fig. 2 に各車輪の図面を示す。また、Fig. 3 に小型探査機の外観を示す。

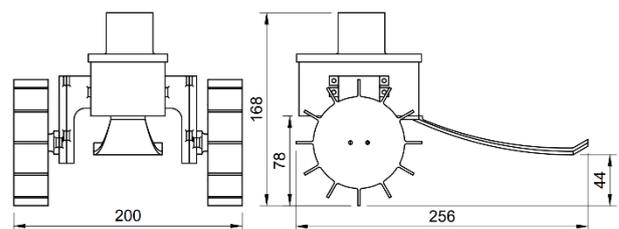
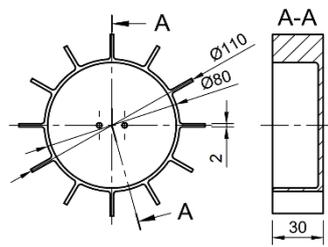
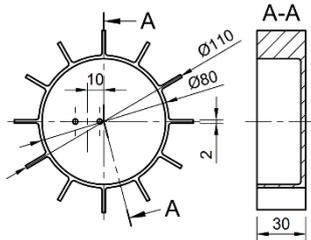


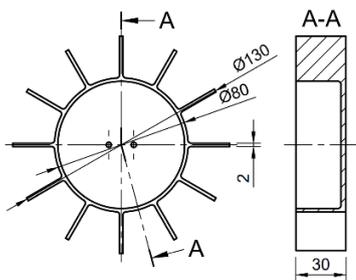
Fig. 1. Blueprint of small rover.



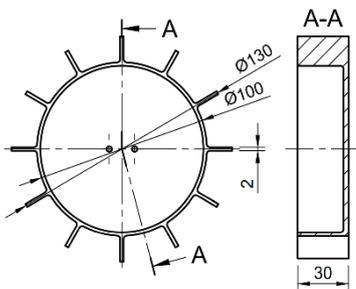
(a). Circular wheel.



(b). Eccentric wheel.



(c). Circular wheel with long lugs.



(d). Circular wheel with large inner diameter.

Fig. 2. Blueprints of wheels.

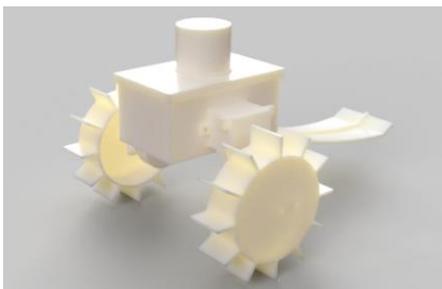


Fig. 3. Appearance of rover.

2.2 走行試験場

走行試験場を Fig. 4 に示す. 長さ 1820 mm, 幅 450 mm, 高さ 308 mm となっており, 走行中の様子を真横から確認するために前面にアクリル板を取り付けた. 砂については, 粒子径が 0.3 ~ 0.8 mm の珪砂 5 号 (竹折 礫業所) と 0.2 ~ 0.3 mm の珪砂 6 号 (竹折 礫業所) を 1 : 1 の割合で配合したものを 100 kg 用いており, 一般的に地上において月面探査機の走行試験に使用される軟弱地盤を再現した.



Fig. 4. Running test site.

2.3 走行試験

走行試験の概要図を Fig. 5 に示す. 走行時間と消費電力量にて走行性能を評価した. 走行距離は 500 mm, 傾斜角度は 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° とした. 角度の調整には, リフトテーブル (LT-H250-8, をくだ屋技研) を用いた. 角度の測定にはデジタル角度計 (MonotaRO) を使用し, 走行コース内の任意の 9 点における角度平均値を目標値とする角度 $\pm 1^\circ$ となるように設定した. 出力電圧は 6 V に設定し, 電源には直流安定化電源 (Power Supply, PMX18-5A, KIKUSUI) を用いた. 走行時間の測定には, ストップウォッチ (CITIZEN) を使用し, 消費電力量の測定には, 電力計 (Power Meter, PW3335, HIOKI) を使用した. 試験場に 1000 mm 定規を設置し, 車体が始点を通過し始めた瞬間に測定を開始し, 車体が終点である 500 mm 地点を通過し始めたところで測定を終了した. 電力計による測定間隔は 0.1 s とした. 各車輪を取り付けた際の車体質量については, 全て $450 \text{ g} \pm 3\%$ 以内に設定した.

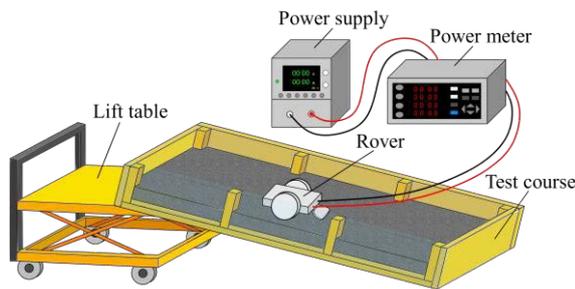


Fig. 5. Overview of running test.

2.4 走行軌跡の描画

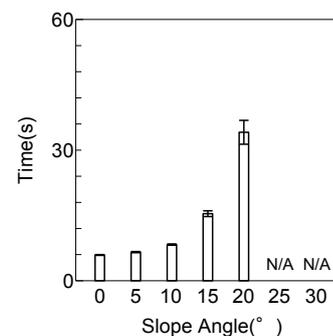
ImageJ (Wayne Rasband) を用いて、走行中の軌跡をプロットした。基準点は、黒色のテープを貼り付けた探査機上部の円筒の中心とした。傾斜角度については、円形車輪と円形車輪-長ラグが走行不能となった 25° とし、走行コース内の任意の 9 点における角度平均値を $25^\circ \pm 1^\circ$ となるように設定した。走行距離は 500 mm とした。また、走破した偏心車輪と円形車輪-大内径については、傾斜角度 25° にて車体が十分に沈下した状態からスタートさせ、走行中の軌跡をプロットした。こちらについては走行距離を 300 mm とし、走行コース内の任意の 6 点における角度平均値を $25^\circ \pm 1^\circ$ となるように設定した。

3. 試験結果および考察

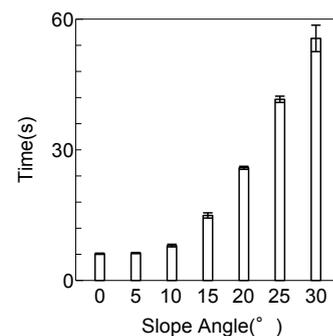
3.1 走行試験結果

Fig. 6, Fig. 7 に各傾斜角度における各車輪の走行時間および消費電力量の結果を示す。円形車輪および円形車輪-長ラグは 25° 以降登坂不能となった。また、円形車輪-大内径は 30° にて登坂不能となった。これらに対して、偏心車輪は 30° においても登坂可能という結果が得られた。ここで、偏心車輪を基準に他の車輪と各評価項目にて比較をしていく。はじめに、円形車輪と偏心車輪を比較する。走行時間については傾斜角度 5° および 20° にて有意差が見られ、それぞれ 5%, 24% 短い。消費電力量については傾斜角度 0° および 20° にて有意差が見られ、傾斜角度 0° においては 8% 高く、傾斜角度 20° においては 34% 低い。したがって、偏心車輪は円形車輪に比べて走行時間が短く、急勾配において消費電力量が低いことから登坂性能が高いといえる。続いて偏心

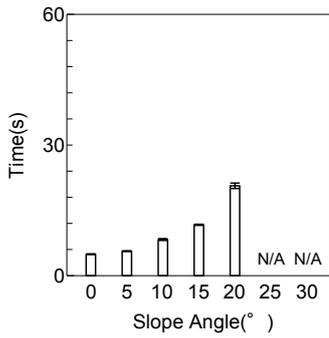
車輪と円形車輪-長ラグを比較する。走行時間については傾斜角度 $0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ において有意差が見られ、それぞれ 24%, 12%, 28%, 25% 長い。一方で、消費電力量は傾斜角度 $0^\circ \sim 20^\circ$ の五つの傾斜において有意差が見られ、傾斜角度 0° においては 8% 高く、傾斜角度 $5^\circ \sim 20^\circ$ においてはそれぞれ 14%, 36%, 12%, 16% 低い。したがって、傾斜角度 5° 以降において、偏心車輪は円形車輪-長ラグに比べて走行時間は長いものの、低消費電力量での走行を可能にしていることから登坂性能が高いといえる。最後に、偏心車輪と円形車輪-大内径を比較する。走行時間については傾斜角度 $0^\circ \sim 25^\circ$ の六つの傾斜において有意差が見られ、それぞれ 26%, 20%, 11%, 20%, 28%, 6% 長い。消費電力量については傾斜角度 $10^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ において有意差が見られ、傾斜角度 20° においては 10% 高く、傾斜角度 10° および 25° においてはそれぞれ 14%, 13% 低い。したがって、偏心車輪は円形車輪-大内径に比べて走行時間は長いものの、消費電力量が低い傾向にあり、唯一傾斜角度 30° を登坂可能なことから最も優れているといえる。



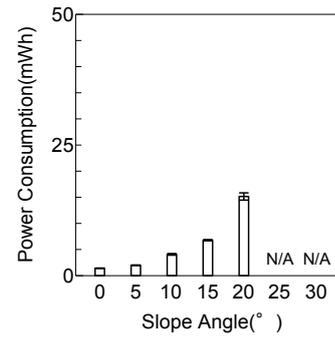
(a). Circular wheel.



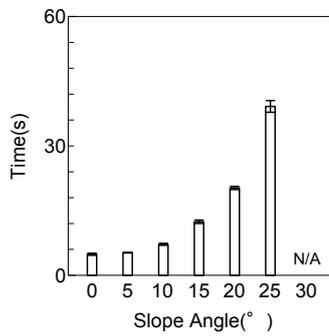
(b). Eccentric wheel.



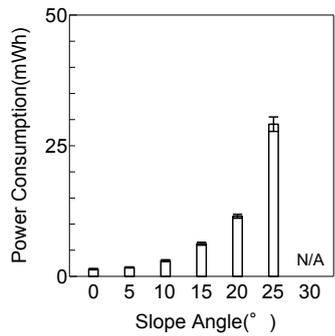
(c). Circular wheel with long lugs.



(c). Circular wheel with long lugs.



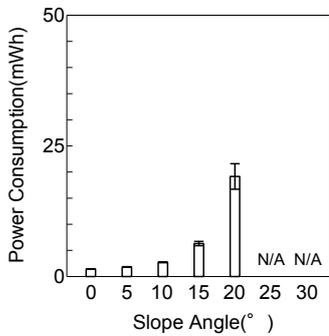
(d). Circular wheel with large inner diameter.



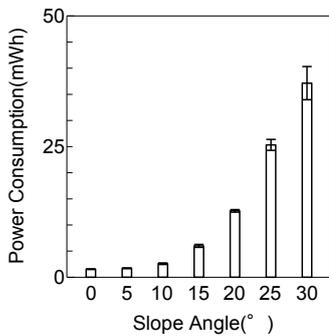
(d). Circular wheel with large inner diameter.

Fig. 6. Running time.
(N = 5, mean ± S.D.)

Fig. 7. Power consumption.
(N = 5, mean ± S.D.)



(a). Circular wheel.



(b). Eccentric wheel.

3.2 走行軌跡

Fig. 8 に各車輪における走行の軌跡を示す. 円形車輪および円形車輪-長ラグは途中でスタックに陥り, 偏心車輪および円形車輪-大内径は走破していることがわかる. また, 偏心車輪においては車体を上下させながら走行していることもわかる. ここで, 各車輪における走行軌跡の近似直線の傾きを Table 1 に示す. 偏心車輪と円形車輪においては, 円形車輪の直線の傾きが 18% 小さい値をとっており, より沈下が進んでいるといえる. また, 偏心車輪と円形車輪-長ラグにおいても, 円形車輪-長ラグの直線の傾きが 18% 小さい値をとっており, より沈下が進んでいるといえる. 偏心車輪と円形車輪-大内径においては有意差が見られなかった. ここで, 傾斜角度 25° の直線の傾きである 0.466 と各車輪における直線の傾きを比較すると, 全ての車輪において値が小さいことがわかる. したがって, 走破した偏心車輪および円形車輪-大内径においても 500 mm 以上の走行の場合, 最終的に深く沈下し, スタックの可能性があるというこ

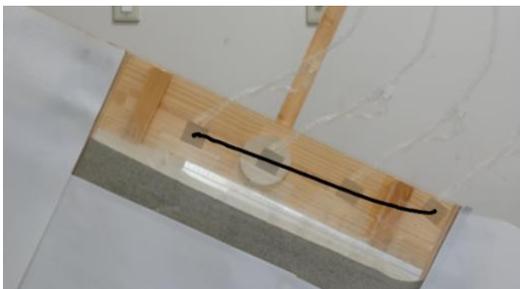
となる。ここで、偏心車輪および円形車輪-大内径にて、沈下状態からの走行の軌跡をプロットしたものを Fig. 9 に示す。また、走行軌跡の近似直線の傾きを Table 2 に示す。Fig. 9 より、偏心車輪は走破し、円形車輪-大内径は沈下状態のまま走行不能に陥っていることがわかる。近似直線の傾きについては、偏心車輪に比べて円形車輪-大内径が 73 % 小さい値をとっており、より沈下していることもわかる。また、偏心車輪における直線の傾きは傾斜角度 25° の直線の傾きである 0.466 に比べて 5 % 大きい値をとっている。したがって、沈下状態から這い上がるように走行しているといえる。



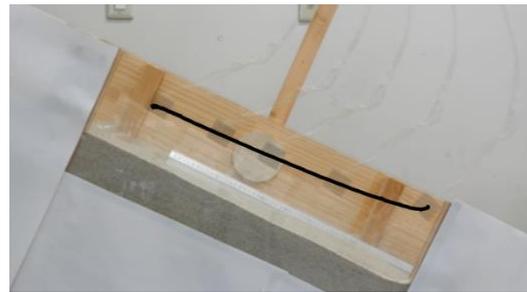
(a). Circular wheel.



(b). Eccentric wheel.



(c). Circular wheel with long lugs.



(d). Circular wheel with large inner diameter.

Fig. 8. Track of running.

Table 1. Inclination of an approximate straight line of the track. (N = 5)

	mean	S.D.
Circular wheel	0.352	0.010
Eccentric wheel	0.430	0.008
Circular wheel with long lugs	0.353	0.038
Circular wheel with large inner diameter	0.407	0.010



(a). Eccentric wheel.



(b). Circular wheel with large inner diameter.

Fig. 9. Track of running-Starting from a sinking state.

Table 2. Inclination of an approximate straight line of the track-Starting from a sinking state. (N = 5)

	mean	S.D.
Eccentric wheel	0.488	0.017
Circular wheel with large inner diameter	0.134	0.107

3.3 車輪にかかる応力の影響

Fig. 10 に円形車輪の接地面における応力分布の仮想モデルを示す。 r は車輪半径、 $\sigma(\theta)$ は垂直応力、 θ_1 は車輪前方が地盤と接触を開始する角度、 θ_M は最大応力が発生する角度、 σ_M は最大応力、 h は車輪前方の地盤の高さからの沈下量を表す。ここで、車輪において一般的に使用されている垂直応力の式¹⁹⁾を以下に示す。 θ の範囲は、 $\theta_M \leq \theta \leq \theta_1$ である。

$$\sigma(\theta) = (k_1 + k_2 b)(r/b)^n (\cos\theta - \cos\theta_1)^n \quad (1)$$

$$\theta_M = (c_1 + c_2 i)\theta_1 \quad (2)$$

k_1 , k_2 , n は地盤に関する係数、 b は車輪巾、 c_1 および c_2 は最大応力発生角定数、 i はスリップ率である。ここで、各車輪における最大応力の比較をしていく。本論文では、式 (1) より k_1 , k_2 , n , b は定数ということから、 $r(\cos\theta_M - \cos\theta_1)$ の因数にて $\theta = \theta_M$ での大きさの比較をする。また、本考察における式 (2) の最大応力発生角の算出においては、 $c_1 = 0.4$, $c_2 = 0.0$ とした。偏心車輪については回転角度によって半径が変化するため、 $r = 30$ mm, 50 mm をとる円周上の点が地盤と接触を開始する瞬間の 2 種類とした。Table 3 に $h = 10$ mm, 20 mm にて各車輪における $r(\cos\theta_M - \cos\theta_1)$ の値を示す。偏心車輪は $r = 30$ mm と $r = 50$ mm で値に差が見られ、 $h = 10$ mm では 3.95, $h = 20$ mm では 4.80 もの差があることがわかる。Fig. 11, Fig. 12 に $r = 30$ mm および $r = 50$ mm における偏心車輪の接地面における応力分布の仮想モデルを示す。これらに対し、他の車輪においては車輪半径が一定のため回転角度に関わらず $r(\cos\theta_M - \cos\theta_1)$ は一定となる。また、円形車輪-長ラグについては円形車輪と内径が等しいため同じ値となっている。このことから偏心

車輪は、車輪にかかる応力の断続的な変化が Fig. 8 (b) や Fig. 9 (a) に示している車体の上下挙動を生み出していると考えられる。Fig. 13 に偏心車輪を取り付けた車体の上下挙動を示す。この挙動により、常に一定の力で地盤を掘り続けるのではなく、断続的に地盤から反力を得ることで坂を這い上がり、沈下を防いでいると考えられる。他の車輪においては、車輪にかかる応力が一定のため、一定の力で連続的に地盤を掘り続けるかたちとなることで沈下が進み、最終的にスタックに陥っていると考えられる。

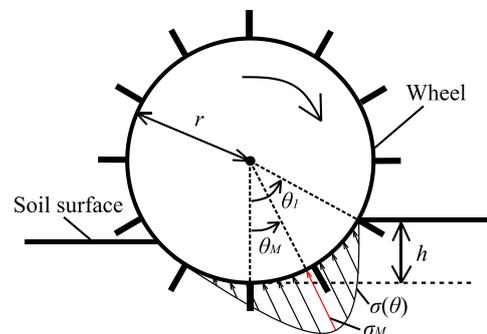


Fig. 10. Stress distribution hypothetical model for circular wheel.

Table 3. $r(\cos\theta_M - \cos\theta_1)$.

	$h = 10$ mm	$h = 20$ mm
Circular wheel	8.34	16.54
Eccentric wheel ($r = 30$)	6.92	13.78
Eccentric wheel ($r = 50$)	10.87	18.58
Circular wheel with long lugs	8.34	16.54
Circular wheel with large inner diameter	8.37	16.58

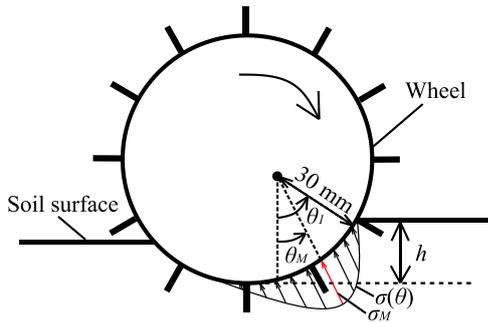


Fig. 11. Vertical stress distribution hypothetical model for eccentric wheel ($r = 30$ mm).

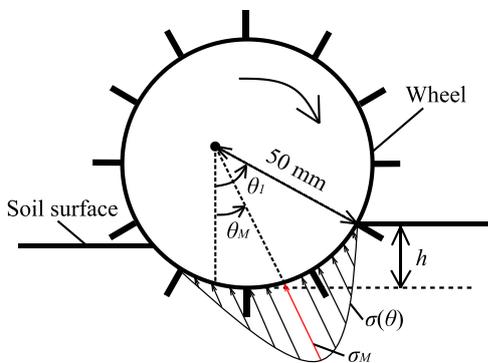


Fig. 12. Vertical stress distribution hypothetical model for eccentric wheel ($r = 50$ mm).

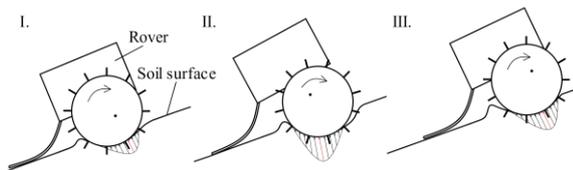


Fig. 13. Vertical behavior of body with eccentric wheels.

3.4 ラグ長さの影響

ここでは円形車輪-長ラグを基準に円形車輪と比較し、ラグの長さが走行性能に及ぼす影響について述べる。Fig. 6 および Fig. 7 より、走行時間については傾斜角度 0° 、 5° 、 15° 、 20° において有意差が見られ、それぞれ 17%、15%、24%、39% 短い値を示した。消費電力量については傾斜角度 5° 、 10° にて有意差が見られ、それぞれ 9%、50% 高い値を示した。したがって、円形車輪-長ラグは円形車輪に比べて走行時間は短いものの、緩勾配においては消費電力量が高い傾向にあることがわかる。これは、ラグの長さが走行性能に大きく影響を及ぼしているとい

える。過去に、軟弱地盤を走行する上で重要な駆動力において、ラグの受動圧力が主の推進力である⁸⁾と報告されている。また、ラグ面に作用する地盤の反力はラグの長さに依存する²⁰⁾こともいわれている。そのため、本研究においても長いラグを有する円形車輪-長ラグが円形車輪に比べて大きな推進力を得ていることで走行時間が短くなったと考えられる。その一方で、ラグが長いことで地盤からの受動圧力が大きくなり、走行中の電流値が高くなることで高消費電力量となりやすい側面もある。緩勾配においては各車輪ともに走行時間が短いためこの影響を大きく受けた結果となっている。

3.5 内径の大きさの影響

ここでは円形車輪-大内径を基準に円形車輪と比較し、内径の大きさが走行性能に及ぼす影響について述べる。Fig. 6 および Fig. 7 より、走行時間については傾斜角度 $0^\circ \sim 20^\circ$ の五つの傾斜において有意差が見られ、それぞれ 17%、20%、13%、19%、41% 短い値を示した。消費電力量については傾斜角度 10° および 20° にて有意差が見られ、傾斜角度 10° においては 10% 高い値を示し、傾斜角度 20° においては 40% 低い値を示した。したがって、円形車輪-大内径は円形車輪に比べて、走行時間は短く、緩勾配においては消費電力量が高い傾向にあり、急勾配においては消費電力量が低い傾向にあることがわかる。また、円形車輪が登坂不能となった傾斜角度 25° において、円形車輪-大内径は走破している。これは、内径の大きさが走行性能に大きく影響を及ぼしているといえる。大きな車輪を持つ車輪型探査機は接地面積が大きくなり、砂から得られる推進力を大きく取ることができる²¹⁾といわれている。本研究においても、仮に沈下量が 10 mm や 20 mm としたとき、円形車輪-大内径は円形車輪に比べて 11% 接地面積が大きい。したがって、円形車輪-大内径はより大きな推進力を獲得することができたと考えられる。一方で、内径が大きい分モータにかかるトルクが大きくなり、走行中の電流値が高くなることで高消費電力量となりやすい側面もある。こちらも 3.4 と同様に、緩勾配においては各車輪ともに走行時間が短い

ためこの影響を大きく受けた結果となっており、急勾配においては円形車輪の消費電力量が長時間走行によって上回ったと考えられる。

3.6 電流値の上昇

ここでは円形車輪と偏心車輪の電流値の上昇度合から性能推測の可能性について述べる。走行試験にて測定した電流波形の近似直線の傾きを電流上昇値と定義する。Table 4, Table 5 に各傾斜角度における円形車輪および偏心車輪の電流上昇値を示す。円形車輪は傾斜が急になるにつれて走行中の電流上昇値が大きくなっていることがわかる。対して偏心車輪は傾斜が急になるにつれて走行中の電流上昇値が小さくなっていることがわかる。これは、3.3 で述べた車輪における走行挙動の違いによるものと考えられる。円形車輪はスタックに陥るまで沈下が進行するのに対して、偏心車輪は沈下を防ぎながら坂を這い上がるように走行する。したがって、円形車輪は傾斜が急になるにつれて沈下量が増大し、それに伴って電流上昇値も大きくなっていくと考えられる。一方で、偏心車輪はある一定の沈下量に達するとその沈下量を維持し、電流上昇値は 0 A/s へ収束していくと考えられる。以上より、短距離走行において電流上昇値が増大傾向の場合、急勾配および長距離走行にてスタックに陥ることが推測できる。また、短距離走行において電流上昇値が収束傾向の場合、一定の沈下量を維持しながら走破することが推測できる。

Table 4. Current rise value of circular wheel at each angle of slope. [$\times 10^{-3} \text{ A/s}$] (N = 5)

	mean	S.D.
0°	-1.4	1.9
5°	0.8	0.9
10°	1.6	0.9
15°	1.8	1.4
20°	3.1	0.3

Table 5. Current rise value of eccentric wheel at each angle of slope. [$\times 10^{-3} \text{ A/s}$] (N = 5)

	mean	S.D.
0°	10.4	3.0
5°	9.2	2.0
10°	7.0	4.2
15°	2.9	1.3
20°	2.8	0.4
25°	1.6	0.2
30°	1.2	0.3

4. 結言

本研究では、月面の軟弱地盤における小型探査機の登坂性能向上を目的として、一般的なラグ付き円形車輪の車軸位置を偏心させた。円形車輪、偏心車輪に加えて、偏心車輪の最大旋回半径に合わせて作製した2種類の車輪を含む計4種類の車輪にて走行性能評価を行うことで得られた知見を以下に示す。

1. 一定の力で連続的に地盤を掘り続ける円形車輪および円形車輪-長ラグは傾斜角度 20° が登坂の限界となり、円形車輪-大内径は傾斜角度 25° が登坂の限界ということを確認した。
2. 車輪型は傾斜角度 20° 前後が登坂の限界といわれているが、偏心車輪は断続的に地盤から反力を得ることで坂を這い上がり、沈下を防ぎながら傾斜角度 30° を低消費電力量で登坂することが可能である。
3. ラグが長くなると地盤からの受動圧力が大きくなり、消費電力量は高くなるものの、より大きな推進力を得られる。
4. 車輪の内径が大きくなると、モータにかかる負荷が増大することで消費電力量は高くなるものの、接地面積が大きくなり、より大きな推進力を得られる。
5. 短距離走行において電流上昇値が増大傾向の場合、急勾配および長距離走行にてスタックに陥ることが推測でき、収束傾向の場合、一定の沈下量を維持しながら走破することが推測できる。

参考文献

- 1) C. Schwandt, J. A. Hamilton, D. J. Fray and I. A. Crawford, “The Production of Oxygen and Metal from Lunar Regolith”, *Planetary and Space Science*, **74**[1], 49-56 (2012).
- 2) W. Fa and Y. Q. Jin, “Quantitative Estimation of Helium-3 Spatial Distribution in the Lunar Regolith Layer”, *Icarus*, **190**[1], 15-23 (2007).
- 3) 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**[5292], 1495-1498 (1996).
- 4) A. B. Binder, “Lunar Prospector: Overview”, *Science*, **281**[5382], 1475-1476 (1998).
- 5) J. Haruyama, M. Ohtake, T. Matsunaga, T. Morota, C. Honda, Y. Yokota, C. M. Pieters, S. Hara, K. Hioki, K. Saiki, H. Miyamoto, A. Iwasaki, M. Abe, Y. Ogawa, H. Takeda, M. Shirao, A. Yamaji and J. L. Josset, “Lack of Exposed Ice Inside Lunar South Pole Shackleton Crater”, *Science*, **322**[5903], 938-939 (2008).
- 6) S. K. Noble, L. P. Keller and C. M. Pieters, “Evidence of Space Weathering in Regolith Breccias I: Lunar Regolith Breccias”, *Meteoritics & Planetary Science*, **40**[3], 397-408 (2005).
- 7) W. Fa and M. A. Wieczorek, “Regolith Thickness over the Lunar Nearside: Results from Earth-based 70-cm Arcibo Radar Observations”, *Icarus*, **218**[2], 771-787 (2012).
- 8) 飯塚浩二郎, 久保田孝, “軟弱地盤走行のための月面探査ローバ用走行系検証”, *科学・技術研究*, **1**[1], 49-55 (2012).
- 9) V. Asnani, D. Delap and C. Creager, “The Development of Wheels for the Lunar Roving Vehicle”, *Journal of Terramechanics*, **46**[3], 89-103 (2009).
- 10) D. Fujiwara, N. Tsujikawa, T. Oshima and K. Iizuka, “Analysis of a Resistance Force for the Locked-wheel of Push-pull Locomotion Rovers Using Large Subsidence”, *Journal of Terramechanics*, **94**, 1-12 (2021).
- 11) 妻木俊道, 本田瑛彦, 加藤裕基, 藤岡紘, “4 クローラ型不整地踏破ロボットの開発ー可変構造型の検討と中間試作機による踏破性能の評価ー”, *日本ロボット学会誌*, **34**[7], 422-431 (2016).
- 12) 山田泰之, 東良一, 遠藤玄, 中村太郎, “不整地を高速移動可能なはね付きクローラの登坂性能検証”, *日本ロボット学会誌*, **35**[2], 153-159 (2017).
- 13) 吉光徹雄, 久保田孝, 中谷一郎, 足立忠司, 斎藤浩明, “小天体探査ホッピングローバの無重力実験”, *日本航空宇宙学会論文集*, **48**[555], 103-110 (2000).
- 14) 吉光徹雄, 久保田孝, “小惑星探査ローバ MINERVA-II による工学実験”, *日本ロボット学会誌*, **38**[8], 754-761 (2020).
- 15) 飯塚浩二郎, 佐藤理則, 黒田洋司, 久保田孝, “月惑星探査ローバの車輪形状を考慮した走行性能検討”, *日本機械学会論文集 (C 編)*, **72**[724], 3842-3847 (2006).
- 16) 吉田和哉, “月惑星探査ロボットの研究開発における課題ー走行力学の観点からの考察ー”, *日本ロボット学会誌*, **27**[5], 506-509 (2009).
- 17) 西川康博, 鈴木悠矢, “偏心車軸を特徴とした車輪機構の段差乗り越え性能”, *設計工学*, **52**[3], 173-184 (2016).
- 18) 渡辺公貴, 米田陽亮, “ローバー”, *特開 2021-49795* (2021).
- 19) J. Y. Wong and A. R. Reece, “Prediction of Rigid Wheel Performance Based on the Analysis of Soil-Wheel Stresses Part I. Performance of Driven Rigid Wheels”, *Journal of Terramechanics*, **4**[1], 81-98 (1967).
- 20) 王秀崙, 田中孝, 山崎稔, “ラグ車輪と土との相互作用に関する研究 (第2報)ーラグ車輪に作用する土の反力ー”, *農業機械学会誌*, **51**[5], 11-18 (1989).
- 21) 飯塚浩二郎, 國井康晴, 久保田孝, “弾性特性を考慮した軟弱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)”, *日本機械学会論文集 (C 編)*, **74**[748], 136-141 (2008).