

第33回衛星設計コンテスト

アイデアの部 ミッション概要書(3ページ以内)

1. 作品情報・応募者情報

作品名(20文字以内)

月面掘削・整地ローバ「Beetron-1」

副題(自由記入)

二層三枚羽根車輪を有する小型月面ローバによる月面整地および掘削の有効性評価

学校名

同志社大学大学院、同志社大学

2. ミッションの概要(プレスリリース等で使用するので、200字程度でわかりやすく表現して下さい。)

本ローバは、将来の月面探査活動に向けたインフラ整備を担う「プレカーサーミッション」として位置づけられる。有人拠点建設に向け、初期の離着陸場整備や地盤形成を目的とし、独自開発の「二層三枚羽根車輪」により、高斜度の走行と効率的な整地・掘削を可能とする。これにより、後続の探査機や大型機材の安全な着陸・設置を支援することが期待される。

3. ミッションの目的と意義(目的・重要性・技術的/社会的意義等)

(a) 目的

本ミッションの目的は、将来的な有人月面拠点構築および持続的な探査活動に向けた初期の地盤整備と離着陸場の整備を実現することである。現在、高精度な着陸技術や居住モジュールの研究は進展しているが、それらを活用するために必要な範囲の整地・掘削作業を担う技術は未だ十分に確立されていない。そこで、小型かつ多機能な月面掘削・整地ローバを開発し、現状と将来の探査活動とのギャップを埋めることを目指す。本研究では、上記目的達成の第一歩として、約1/4モデルの実験機を作製し、ローバの走行性能および掘削・整地性能を評価する。

(b) 重要性・技術的・社会的意義等

技術的意義として、本研究で開発するローバは、低重力や不整地といった特殊環境下でも安定した移動性能を実現し、従来探査機の課題を補完する新しいアプローチとなる。特に二層三枚羽根車輪の採用により、高斜度地形での走行と同時に整地・掘削を行える点が特徴である。

社会的意義として、本技術は将来の有人月面基地建設や資源採掘インフラ構築に向けた基盤技術として期待される。安全な着陸地点の確保や初期整地作業の自動化・効率化は持続可能な月面活動に不可欠であり、その信頼性向上は宇宙開発全体の発展に寄与する。

さらに、本研究で提案する車輪構造は、月面に限らず地球上の軟弱地盤(農地・湿地・砂地)での作業ロボットへの応用も見込まれる。こうした波及効果により、宇宙開発技術を地球上の産業や社会課題の解決に活かす可能性も期待される。

4. ミッションの具体的な内容

(a) システム

まず、月周回衛星による事前観測により、比較的平坦で障害物の少ないエリアを着陸候補地点として選定する。将来的な居住を見据える場合は、水氷の存在が期待される南極域は有力な候補地と考えられる。次に、月着陸機にピンポイント着陸技術[1]を適用し、本ローバを目標着陸地点へ輸送する。

着陸後、ローバを展開し、以下の流れで整地作業を実施する：

① 目標整地地点への走行：

ローバは2層構造の高走破型車輪を用いて軟弱地盤上を走行しながら、目標整地地点まで移動する。

- ② 障害物の除去：
中小の岩石や小石を、前方に搭載されたショベルにより掘削・除去する。
- ③ 掘削と運搬：
後部のスコップ機構を用いて、地表の凹凸箇所から土壤を掘削・運搬し、凹部を埋めて全体の均質化を図る。
- ④ 表面整地：
最終段階として、整地ブレードにより全体の表面を平滑化し、均質で滑らかな整地面を仕上げる。

これらの作業により、10~20 m 四方の離着陸可能な平坦地を形成し、後続の着陸機や機材展開に向けた自律的な地盤整備を実現する。

(b) 具体的な実現方法、もしくは実現のために必要な課題・開発すべき項目

本ミッションの実現には、月面の軟弱地盤に対応した高い走行性能と、掘削・整地作業を効率的に行える多機能ローバの開発が不可欠である。月面環境は極めて過酷であり、特に軟弱地盤による車輪の沈み込み（スタック現象）が走行性能の大きな制約となっている。また、クレーターの縁などでは最大 30°に達する高斜度地形も存在するため、こうした環境下での移動を可能とする走行形態が求められる。

これまでに、ラグを取り付けた円形車輪が提案されてきたが、登坂性能は最大で 20°程度にとどまつておらず[2]、30°を超える高傾斜地での走行を想定・実現した事例はなかった。すなわち、従来設計では 20°が限界とされてきた。

そこで本研究では、車輪の構造設計を中心据え、走行性能と整地性能を両立させる「二層三枚羽根車輪」を新たに提案する（図 1）。この車輪は、複数の羽根を二層に分けて配置することで、走行時の上下振動を抑制しつつ、軟弱地盤における高い推進力と安定性を実現することを目的としている。

さらに、本ローバには掘削用のショベルやスコップ、整地用ブレードを搭載し、車輪の高い走行性能を活かしつつ、地表の障害物除去や土壤の掘削・運搬、凹凸の補填といった多様な作業を同時に実施可能な設計としている（図 2）。

これらの機能の融合により、本ミッションで求められる 10~20 m 四方の離着陸場および居住スペースの平坦化を、効率的かつ確実に遂行できるローバの実現を目指す。

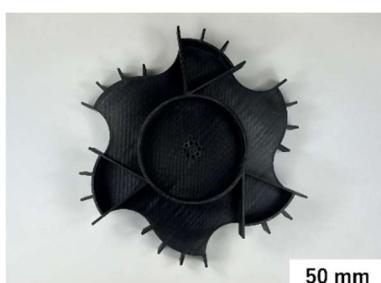


図 1 二層三枚羽根車輪



図 2 ローバ外観図

[1] S. Ueda, T. Ito, and S. Sakai, “A study on guidance technique for precise lunar landing,” in Proc. 26th Int. Symp. Space Flight Dynamics (ISSFD), Matsuyama, Japan, 2017, Paper ISTS-2017-D-053/ISSFD-2017-053.

[2] K. Yoshida, G. Ishigami, A. Miwa, and K. Nagatani, “Terramechanics-based analysis and traction control of a lunar/planetary rover,” in Field and Service Robotics: Recent Advances in Research and Applications, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, pp. 225–234.

5. 主張したい独創性や社会的効果

(a) 主張したい本ミッションの独創性

本ミッションにおける最大の独創性は、高い走行性能と整地性能を両立する新規構造「二層三枚羽根車輪」の開発にある。筆者らはこれまでに、湾曲した羽根を 120°間隔で配置した三枚羽根車輪（図 3(a)）を開発し（特許出願中[3]），軟弱地盤や傾斜 30°の斜面においても高い登坂性能を実証してきた。この車輪は、特許として登録されている円形車輪に湾曲ラグを取り付けた例[4]と比較しても、より高い走行性能を示している。

一方で、三枚羽根車輪には、走行中の接地部の変化により車軸が大きく上下動するという欠点があ

り（図 4），この振動は整地作業時におけるブレードの安定性を損なう要因となっていた。整地作業では、車体の振動を抑制し、地表とブレードの相対高さを一定に保つことが求められるため、より安定した走行を可能とする車輪構造が必要であった。

この課題を解決するため、本研究では羽根を上下 2 層に分け、各層に 3 枚ずつ配置し、それぞれに 60° の位相差を持たせた「二層三枚羽根車輪」（特許出願中、未公開）を新たに設計した（図 3(b)）。この構造により、側面から見ると 6 枚の羽根が等間隔に配置された形状となり、常時いずれかの羽根が接地することで上下振動の大幅な低減が期待される。また、羽根間隔を適切に維持することで、従来の三枚羽根車輪が有する高い走行性能も保持している。

さらに、従来設計では剛性や耐久性に課題が残ることが懸念されたため、車輪内部に支持構造を追加し、層間の連結部を強化するなどの設計改良を施し、全体として十分な構造的安定性を確保した（図 3(c)）。

このように、低振動性と高い走行性能を同時に実現し、掘削・整地作業の効率化を支援可能な本車輪構造は高い新規性を有しており、月面の過酷な地形条件に適応したローバの機動性向上に大きく寄与する点が、本ミッションの独創的特徴である。



図 3 車輪模式図



図 4 車輪回転によって生じる上下振動

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

【得られる成果】

- ・軟弱地盤および高斜度地形に対応可能な、高い走行性能を有する車輪の実証
- ・車輪の上下振動抑制技術による安定走行と作業効率向上
- ・掘削・整地機構と連携した多機能ローバシステムの構築

【波及効果】

- ・有人月面基地建設や資源採掘などの宇宙探査インフラ整備に貢献
- ・火星や他天体の探査ローバ、さらには地球上の軟弱地盤作業（農業・建設など）への技術展開
- ・宇宙技術の地上産業・社会課題解決への応用促進

【対象となる受け取り手】

- ・宇宙開発機関（JAXA, NASA, ESA など）および宇宙関連企業
- ・学術研究機関や大学の宇宙工学、ロボティクス研究者
- ・地上産業の建設機械メーカー、農業機械メーカー

[3] 渡辺公貴, et al., “車輪並びに当該車輪を備えた移動体,” 特開 2024-110814, 2024-08-16.

[4] 大槻真嗣, イッサ エー ディー ネスナス, ”ホイール及びホイールシステム,” 特開 2017-88170, 2017-05-25.

以上

第33回衛星設計コンテスト アイデアの部 解析書

月面掘削・整地ローバ「Beetron-1」

二層三枚羽根車輪を有する小型月面ローバによる月面整地および掘削の有効性評価

同志社大学大学院, 同志社大学

[M2] 原口泰知, 濱島優太 [M1] 森裕人, 野山剛志 [B4] 北村颯真, 木本耀介
[指導教授] 渡辺公貴

1. はじめに

2013年に中国の嫦娥3号が月面への軟着陸に成功して以来[1], 月面探査は世界的に加速している。2023年にはインドのチャンドラヤーン3号が月の南極付近に着陸し[2], 2024年には日本の小型月着陸実証機 SLIM が高精度着陸技術の実証に成功した[3]。これらの探査は、月や地球の起源解明といった科学的目的に加え、資源利用や人類の活動領域拡大といった実用的価値の獲得も目指している。

現在、アメリカ主導のアルテミス計画[4]が進行しており、将来的には月面での持続可能な探査活動や有人居住の実現が期待されている。2040～2050年には1000人規模の月面都市建設構想も掲げられており、日本もこれに参画している。日本では、月南極域探査を目的とした LUPEX 計画[5]、有人与圧ローバ[6]や月面居住モジュール[7]の研究、さらに国土交通省主導による「宇宙建設革新プロジェクト」での大型月面重機の開発[7]が進められている。

これらの研究は、月面の中長期的な人類活動を支える基盤整備を目的としている。しかし、大型機材の導入に先立ち、小規模な実証実験や安全な離着陸地点の整備、初期の掘削・整地作業といった段階的準備が不可欠である。このように、現状と将来ビジョンの間にはギャップが存在し、その橋渡しとなる技術の開発が求められている。

そこで本研究では、月面初期段階の掘削・整地作業を担う、小型かつ多機能な掘削・整地ローバを提案する。

2. ローバの走行方式と課題

月面ローバの走行方式には、ホッピング型、クローラ型、車輪型がある。ホッピング型は低重力環境を利

用してバネなどの張力により跳躍移動を行う方式であるが、整地や掘削などの地表作業には向きである。クローラ型は地上の重機に広く用いられ、接地面積が大きく安定性に優れる一方、構造が複雑で、スプロケットと履帯の間にレゴリスが噛み込む故障リスクやエネルギー効率の低さといった課題を抱える。

車輪型は構造が比較的単純でエネルギー効率にも優れ、制御性が高いことから、月面探査ローバに最も適しているとされる。しかし、「スタック現象」という重大な課題がある。アポロ計画で使用された Lunar Roving Vehicle (LRV) は円形ワイヤメッシュホイールを採用していたが、軟弱地盤でスタックし、宇宙飛行士が脱出作業を行ったことが知られている。また、ソ連の Lunokhod 1 もクレーター周辺の軟弱地盤でスタックしたとされる。したがって、スタックを回避し高い走行性能をもつ車輪の開発が求められている。

これまでにもラグ付き車輪[8-10]などが開発されてきたが、登坂性能は最大で 20°程度にとどまり、30°を超える高斜度での登坂を実現した報告はない。すなわち、従来設計では 20°が登坂限界とされてきた。

しかし、月面にはこれを上回る傾斜も存在する。先行研究によれば、35°を超える傾斜は極めて限定的であり、32～35°の傾斜は主として最近形成された大規模クレーター内壁などに限られると報告されている[11]。したがって、30°の傾斜面を登坂可能であれば、月面の大部分の地形で走行可能であり、実用上十分な性能を有するといえる。さらに、30°登坂を実現できることは、地盤から十分な反力を確保できる構造設計がなされていることを示す明確な指標ともなる。

3. 目的

本研究は、月面探査初期段階における掘削・整地作業の課題を解決するため、小型かつ多機能な掘削・整地ローバの開発を目的とする。特に、既存の車輪型ローバが抱える「スタック現象」や「高傾斜地での走行困難」を克服するため、整地性能と走行性能を両立する二層三枚羽根車輪を提案する。

本車輪は、月面の低重力かつ不整地環境においても安定した推進力を発揮し、初期整地・掘削作業の効率化と安全性の向上に寄与する。技術的意義として、特殊環境下でも高い移動性能を維持できるローバ機構の確立は、従来探査機の限界を補完する新たなアプローチである。

社会的意義としては、有人月面基地建設や資源採掘インフラ構築に先立つ基盤技術となる点が挙げられる。安全な着陸地点の確保や初期整地作業の自動化は、持続可能な月面活動の実現に不可欠であり、その信頼性は宇宙開発全体の発展に直結する。さらに、提案する車輪構造は、地球上の軟弱地盤（例：農地・湿地・砂地）における作業ロボットへの応用も期待される。これにより、宇宙開発技術を地上の産業・社会課題の解決へと還元する可能性がある。

4. ミッションの概要

本研究で提案する月面掘削・整地ローバは、将来的な有人拠点建設に向け、初期の離着陸場整備および地盤形成を目的として運用される。具体的には、月周回衛星により選定された平坦で障害物の少ないエリアを整地・掘削し、以降の探査機や大型機材の安全な離着陸・設置を支援する基盤を構築することを主なミッションとする。

本ローバは、月着陸機のピンポイント着陸機能[3]を活用し、目標整地地点近傍に投入される。その候補地としては、人類の生存に必要不可欠な水氷の存在が期待される南極域が有力と考えられる。

着陸後はローバを展開し、小石等の障害物除去やレゴリスの運搬、表面整地を行うことで、後続の大型探査機や居住モジュール導入に先立つ準備作業を担う。このように、本ローバは今後の有人・無人探査のためのインフラ的役割を担う「プレカーサーミッション」と位置づけられる。

また、将来的な再整地や他地点への移動を想定し、最大 30°の傾斜面を登坂可能な走行性能を設計要件とした。これは高斜度地形へのアクセスだけでなく、走行時に地面から大きな推進力を得ることで、掘削力およびレゴリス運搬効率の向上にも寄与する。

さらに、小型・軽量設計により 1 回の打ち上げで複数機の同時輸送が可能であり、故障時のリスク分散と、複数機による協調制御による作業効率向上が期待される。例えば、広域整地や複数箇所の同時掘削など、多様なタスクへの柔軟な対応が可能となる。

加えて、本研究では図 1 に示すように、掘削・整地ローバに加えてソーラーパネルタワーを搭載した発電専用ローバを同時に投入する構想を立てている。発電ローバは、掘削・整地ローバとともに移動しながら逐次エネルギーを供給する。掘削・充電を繰り返すサイクル運用により、長期かつ安定的な整地作業を継続でき、持続的な月面インフラ構築に寄与することが期待される。

本ローバの最大の特徴は、走行と同時に掘削・整地を行える「二層三枚羽根車輪」の搭載である。この車輪により、複雑な装置を用いることなく、少ない電力で効率的に障害物除去と整地を実現できるため、質量・体積・電力制約の厳しい月面ミッションにおいても高い作業効率が期待される。

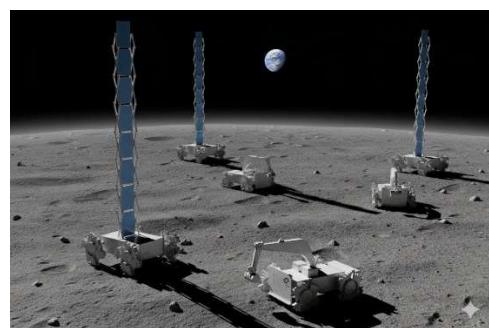


図 1 ミッションの構想

5. システム構成と設計概要

5.1 提案車輪の構造

本研究では、高い走行性能と整地性能を両立するため、新たに「二層三枚羽根車輪」（特許出願中、未公開）を提案する（図 2(a,b)）。本車輪は、従来開発した三枚羽根車輪（図 2(c)）の構造を発展させたものであり、2 つの三枚羽根車輪を並列に配置し、それぞれの羽根を 60° の位相差で配置した構成となっている。

これにより、車輪を側面から見た際には羽根が6枚等間隔に配置された形状となり、上下振動を抑制できる設計としている(図3)。

従来、我々は走行性能の向上を目的として、円形車輪に代わる「三枚羽根車輪」の開発を行ってきた[12]。この車輪は、湾曲した羽根を車輪の回転方向と逆向きに反らせることで、地面から高い推進力を得られることが確認されている。また、羽根を円周上に等間隔(120°間隔)で配置することで、各羽根が先行する羽根によって形成されたくぼみを避け、より遠方の安定した地盤にアプローチできる構造を実現している(図4)。これらの特徴により、三枚羽根車輪は30°の斜面登坂が可能であることを実証しており、特許として登録されている円形車輪に湾曲ラグを取り付けた例[13]と比較しても、より高い走行性能を示す。

一方で、三枚羽根車輪は車軸と接地面との距離が周期的に変化するため、整地作業には不向きであるという課題があった(図3)。本研究で提案する二層三枚羽根車輪では、この課題を克服するために羽根の総数を増加させつつ、三枚羽根車輪が有する「遠方の土壤へのアプローチ性」を保持することに留意した。単純に1層に6枚の羽根を配置すると円形車輪に近い構造となり、スタッツする可能性がある。そこで、2層に分けてそれぞれの層に3枚ずつ羽根を配置することで、羽根間隔を確保しながら振動を抑制する構造とした(図2(a))。さらに、単に車輪を二重に重ねただけでは走行時の負荷に対する剛性が不十分となる懸念があったため、車輪全体の構造を見直し、内部の支持構造や接続部の強化を行うことで、十分な耐久性と剛性を確保した(図2(b))。

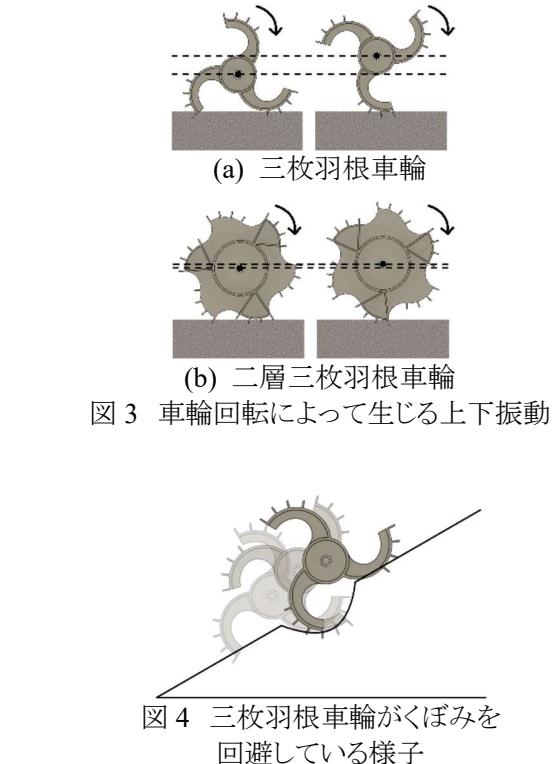
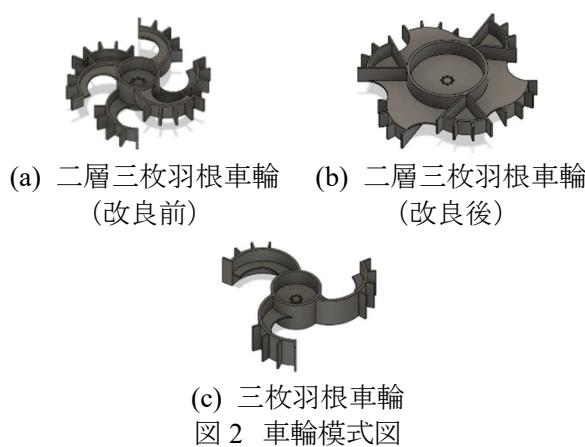


図3 車輪回転によって生じる上下振動

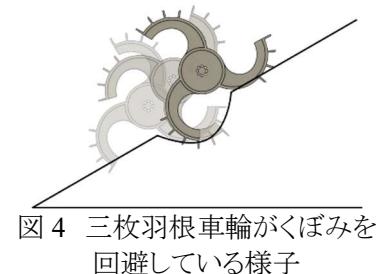


図4 三枚羽根車輪がくぼみを回避している様子

5.2 ローバの設計

本研究では、ローバの性能評価を目的として、図5に示す縮小モデルのローバを作製した。サイズは、ホイールベース 265 mm, トレッド 310 mm, 高さ 180 mm(車輪装着時)であり、質量は 2 kg である。この質量は、既存ローバの質量[14]を参考に、上記サイズのローバが地球上で 10~15 kg 程度になることを想定し、月面重力(1/6 g)を考慮して設定したものである。機体前方には整地ブレードおよびショベル、後方にはスコップを装着可能とし、走行と同時に土壤処理を行うことができる構成とした。

機体の設計には Fusion 360(Autodesk)を用い、造形には RAISE3D Pro 3(RAISE3D)を使用した。材料には ABS 樹脂(RAISE3D)を採用し、積層造形法によって試作を行った。実験条件を統一するため、各車輪を装着した際の機体質量を錘によって調整し、すべて同一質量とした。

駆動系にはサーボモータ(Dynamixel XM430-W210-R, ROBOTIS)を4基搭載し、独立4輪駆動方式を採用することで、高い旋回性能と走行性能を両立した。制御には Spresense (SONY)、Spresense 拡張ボード (SONY)、および DYNAMIXEL Shield (ROBOTIS)を組み合わせ、低消費電力かつ高応答性の制御システムを構築した。



図 5 ローバ外観図

6. 実験方法

本実験では、月レゴリスを模擬したレゴリスシミュレント(FJS-1, 清水建設)を使用した。走行試験には、図 6(a)に示す全長 2000 mm, 幅 1000 mm, 高さ 400 mm の試験場[15]を用いた。試験場の傾斜角度は 0 ~ 30° の範囲で任意に設定できる。図 6(b)に示すように、作製したローバを試験場上で走行させ、各条件下での走行性能を評価した。図 7 に本研究で使用した車輪を示す。車輪の最外径は 180 mm, 幅は 40 mm に統一し、長さ 10 mm, 厚さ 2 mm のラグを取り付けた。車輪の製作方法は「5.2 ローバの設計」に準ずる。

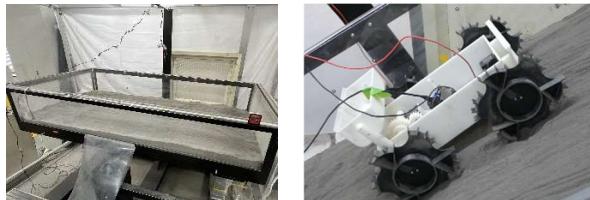
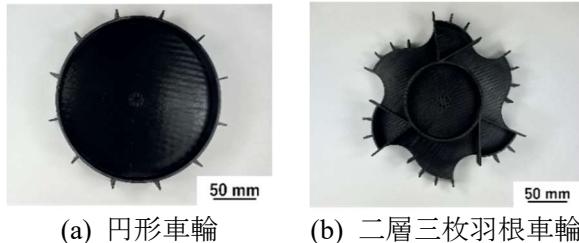
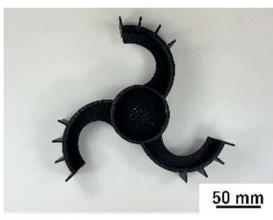


図 6 走行試験



(a) 円形車輪 (b) 二層三枚羽根車輪



(c) 三枚羽根車輪

図 7 車輪外観図

6.1 斜面登坂試験

本試験では、車輪の斜面走行性能および荷重運搬下での走行性能を評価した。評価対象は円形車輪および二層三枚羽根車輪であり、いずれの試験においても走行距離を 1000 mm とした。

登坂走行試験では、傾斜角度を 0 ~ 30°まで 10°刻みで設定し、各条件で 5 回の試行を実施した。走行時間はストップウォッチ、消費電力量はパワーメータ (PW3335, HIOKI) を用いて測定した。サンプリング周期は 5 Hz とした。

荷重運搬走行試験では、スコップに 500 g の重りを搭載した状態で、平坦面および低傾斜面 (0 ~ 20°, 10°刻み) を走行させた。この試験は、スコップを用いたレゴリス運搬を想定したものであり、整地・掘削地などの緩傾斜地形を対象とする。各条件で 5 回の試行を行い、登坂試験と同様に走行時間および消費電力量を測定した。

6.2 土壌整地試験

整地性能を評価するため、整地ブレードを用いた走行試験を平坦面 (傾斜角度 0°) で実施した。評価対象は円形車輪および二層三枚羽根車輪であり、走行距離は 1000 mm とした。整地ブレードの設置高さは、ローバがスタッカせずに 1000 mm の走行が可能で、かつブレードが土壌表面に最も近接する位置に設定した。

整地前後の土壌凹凸は、超音波距離センサ (HC-SR04) を用いて測定した。センサは試験場上面から地表までの距離を 50 mm 間隔で取得し、走行経路中央に沿って計測した。得られたデータから区間ごとの傾斜角度を算出し、その平均値を土壌凹凸の指標とした。整地前の初期条件として、平均傾斜角度 20° 以上の土壌状態を基準とした。各車輪について 5 回の試行を行った。

6.3 牽引力評価

牽引性能を比較するため、ローバにデジタルフォースゲージ (ZTA-DPU-50N, IMADA) を紐で接続し、前進走行によって発生する牽引力を測定した。評価対象は円形車輪および二層三枚羽根車輪である。ローバがそれ以上前進できなくなるまでに記録された

最大値を牽引力とした。試験は傾斜角度 0° の平坦面上で実施し、各車輪につき 5 回試行した。

6.4 振動評価

上下振動の評価を目的として、ローバ中央部に 6 軸 IMU (BMI270, Bosch Sensortec) を設置し、走行中の上下方向加速度を測定した。評価対象は円形車輪、二層三枚羽根車輪、および三枚羽根車輪の 3 種類である。傾斜角度 0° の平坦面上を各車輪装着時に走行させ、加速度データを取得して比較評価を行った。各条件で 5 回の試行を実施した。

7. 結果と考察

7.1 斜面登坂試験

図 8(a)に走行時間、図 8(b)に消費電力量の結果を示す。傾斜角度 0° および 10°においては、円形車輪と二層三枚羽根車輪の間に走行時間および消費電力量の大きな差は見られなかった。一方、傾斜角度 20° では、二層三枚羽根車輪の走行時間は円形車輪に比べて約 22% 短く、消費電力量も約 33% 低い値を示した。さらに、30° の傾斜では、円形車輪が約 100 mm 走行した時点で走行不能となったのに対し、二層三枚羽根車輪は 1000 mm の走行が可能であった。

次に、荷重の有無による影響について述べる。傾斜角度 0° および 10° では、両車輪ともに荷重の有無による走行時間の差は認められなかった。しかし、消費電力量は両車輪ともに荷重を搭載した場合に増加する傾向が見られた。傾斜角度 20° では、円形車輪の走行時間および消費電力量が大きく増加し、荷重を搭載した二層三枚羽根車輪と比較すると、走行時間で約 27%，消費電力量で約 35% の差が生じた。

円形車輪は、傾斜角度が大きくなるほどラグによる土壤の破壊とスリップが顕著となり、車輪前方にくぼみが形成される。車輪はこのくぼみに侵入し、さらにそのくぼみを拡大させながら走行するため、連続的な沈下が発生する。その結果、傾斜角度 20°, 30° では走行性能が著しく低下したと考えられる。また、荷重を搭載した場合には、土壤に対する鉛直荷重が増加し、沈下の進行を助長することで走行性能のさらなる悪化を招いたと考えられる。一方、二層三枚羽根車輪は三枚羽根車輪と同様に、羽根が車輪前方に

生じるくぼみを回避しながら推進する構造を有している(図 4)ため、連続的な沈下が発生しにくい。この構造的特性により、高い走行性能を発揮できたと考えられる。

したがって、二層三枚羽根車輪は、従来の円形車輪が苦手とする高傾斜環境や荷重運搬時においても、安定した走行性能を発揮できる有効な構造であることが示唆される。

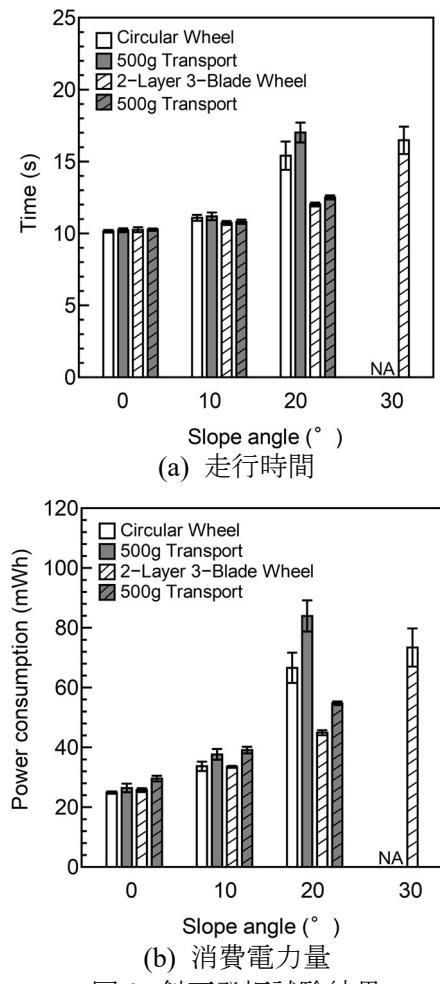


図 8 斜面登坂試験結果

7.2 土壤整地試験

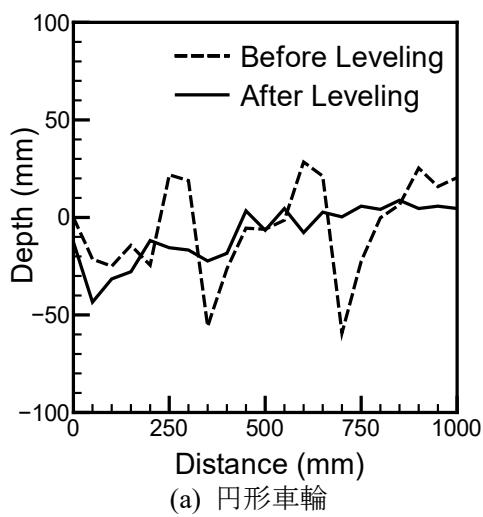
表 1 に整地後の土壤凹凸の平均傾斜角度を、図 9 に試験前後に測定した走行試験場上面から地表までの距離の分布を示す。測定開始地点を基準として 0 mm とした。整地後の平均傾斜角度は、円形車輪の方が二層三枚羽根車輪に比べてわずかに小さいが、両者の差は約 5% であり、平均傾斜角度に大きな差は認められなかった。したがって、二層三枚羽根車輪は円形車輪と同等の整地能力を発揮できている。

表 1 整地後の土壤凹凸の平均角度(単位: θ)

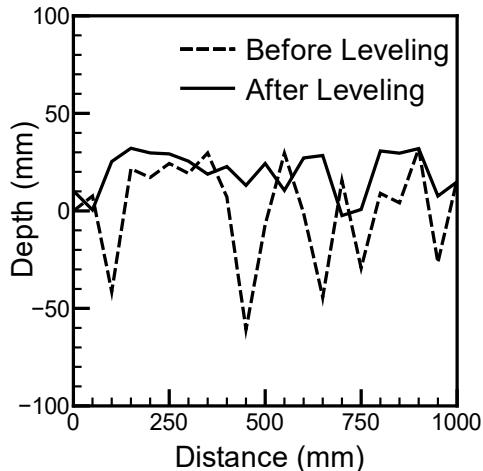
	Circular Wheel	2-Layer 3-Blade Wheel
mean (\pm S.D.)	10.04 (\pm 3.00)	10.54 (\pm 1.45)

表 2 牽引力の測定結果(単位:N)

	Circular Wheel	2-Layer 3-Blade Wheel
mean (\pm S.D.)	25.68 (\pm 0.36)	28.27 (\pm 0.77)



(a) 円形車輪



(b) 二層三枚羽根車輪
図 9 土壤整地試験結果

7.3 牽引力評価

表 2 に牽引力の測定結果を示す。牽引力は二層三枚羽根車輪の方が円形車輪よりも大きく、約 10% の向上が確認された。この結果は、二層三枚羽根車輪が低斜度環境においても土壤から十分な反力を得られる構造であることを示唆している。牽引力はローバの整地作業や物資運搬能力に直結する重要な指標であることから、二層三枚羽根車輪は、これらの作業を安定して実行するための有効な構造であると評価できる。

7.4 振動評価

図 10 に上下方向加速度の測定結果を示す。縦軸は z 方向(上下方向)の加速度、横軸は時間である。最も大きな振幅を示したのは三枚羽根車輪であり、次いで二層三枚羽根車輪、円形車輪の順で振幅が小さかった。この結果から、二層三枚羽根車輪は、三枚羽根車輪の振動抑制という設計目的を達成していることがわかる。振動の主な原因は車軸と接地面との距離が周期的に変化することであり、二層三枚羽根車輪では図 3 に示す構造によりこの変化を低減できているためである。一方で、円形車輪ほどの低振動は実現できていない。今後は、サスペンション機構を併用することで、二層三枚羽根車輪の走行性能を維持しつつ、さらに振動を低減できることが期待される。

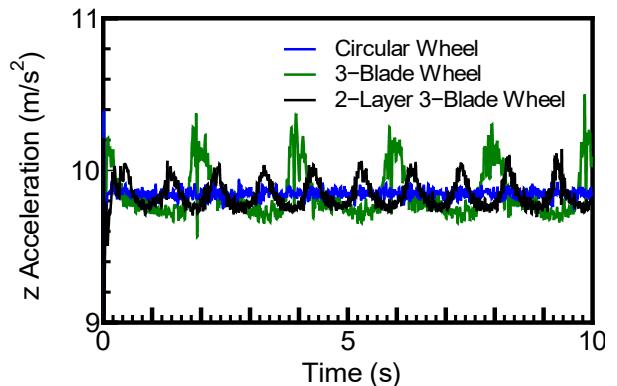


図 10 振動評価の結果

8. 結論

本研究では、月面探査初期における掘削・整地作業の実現を目的として、小型かつ多機能なローバを開発し、スタック現象や高斜度地形での走行困難の克服を目指した二層三枚羽根車輪を提案・評価した。

斜面登坂試験や牽引力評価の結果、従来の円形車輪より優れた性能を示し、整地中の上下振動も抑制されたことから、本車輪は軟弱かつ傾斜のある地形でも安定した走行・作業を可能にする有効な手段

であると結論づけられる。

一方、本研究は車輪構造の評価に焦点を当てたものであり、ローバ全体の月面実用化には多くの課題が残されている。例えば、ショベルやスコップ、整地ブレードの設計最適化や評価、長期間の月面環境模擬試験、自律・遠隔制御、複数台の協調作業などである。今後は、車輪を含むローバシステム全体の最適化と実証試験を進めることで、月面における掘削・整地作業の自動化に貢献していきたい。

参考文献

- [1] C. Li, J. Liu, X. Ren, W. Zuo, X. Tan, W. Wen, H. Li, L. Mu, Y. Su, H. Zhang, J. Yan, and Z. Ouyang, "The Chang'e 3 mission overview," *Space Sci. Rev.*, vol. 190, pp. 85–101, 2015.
- [2] N. J. Kanu, E. Gupta, and G. C. Verma, "An insight into India's Moon mission–Chandrayan-3: The first nation to land on the southernmost polar region of the Moon," *Planet. Space Sci.*, vol. 242, Art. no. 105864, 2024.
- [3] S. Ueda, T. Ito, and S. Sakai, "A study on guidance technique for precise lunar landing," in Proc. 26th Int. Symp. Space Flight Dynamics (ISSFD), Matsuyama, Japan, 2017, Paper ISTS-2017-D-053/ISSFD-2017-053.
- [4] M. Smith, D. Craig, N. Herrmann, E. Mahoney, J. Krezel, N. McIntyre, and K. Goodliff, "The Artemis Program: An overview of NASA's activities to return humans to the Moon," in Proc. IEEE Aerospace Conf., Big Sky, MT, USA, Mar. 7–14, 2020, doi: 10.1109/AERO47225.2020.9172323.
- [5] 文部科学省, “資料 60-1-1 月極域探査機（LUPEX）について,” 2024 年 4 月 24 日 . https://www.mext.go.jp/content/20240424-mxt_uchukai01-000035587_1.pdf
- [6] 文部科学省, “資料 86-3 与圧ローバによる月面探査の実施取り決めへの署名について,” 2024 年 4 月 23 日 . https://www.mext.go.jp/content/20240423-mxt_uchukai01-000035589_5.pdf
- [7] 国土交通省, ”国土交通省における宇宙建設革新プロジェクトの取組,”第 2 回月面建設技術シンポジウム, 2024 年 3 月 22 日. https://robot-jsce.jp/wp-content/uploads/2024/04/program_240322_yano_data.pdf
- [8] K. Iizuka, T. Sasaki, S. Suzuki, T. Kawamura, and T. Kubota, "Study on grouser mechanism to directly detect sinkage of wheel during traversing loose soil for lunar exploration rovers," *ROBOMECH J.*, vol. 1, Art. no. 15, 2014, doi: 10.1186/s40648-014-0015-0.
- [9] 池田礼子, 佐藤佳祐, 永谷圭司, 吉田和哉, “実験的アプローチによる軟弱地盤走行ロボットのための駆動力発生モデルの検討,”ロボティクスシンポジア講演論文集, p. 356-361, 2009.
- [10] K. Yoshida, G. Ishigami, A. Miwa, and K. Nagatani, "Terramechanics-based analysis and traction control of a lunar/planetary rover," in *Field and Service Robotics: Recent Advances in Research and Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 225–234, 2006.
- [11] M. A. Kreslavsky, J. W. Haed, "The steepest slopes on the Moon from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) Data: Spatial Distribution and Correlation with Geologic Features," *Icarus*, vol. 273, pp. 329-336, 2016.
- [12] 渡辺公貴, et al., “車輪並びに当該車輪を備えた移動体,” 特開 2024-110814, 2024-08-16.
- [13] 大槻真嗣, イッサ エー ディー ネスナス, ”ホイール及びホイールシステム,” 特開 2017-88170, 2017-05-25.
- [14] Lunar Outpost, "Advanced Robotics for Space Exploration and Infrastructure," Accessed: Oct. 13. 2025. <https://www.lunaroutpost.com/rovers>
- [15] K. Watanabe, T. Horiguchi, and K. Tanaka, "Effect of soil type on running performance of small lunar rover," *Aerospace*, vol. 12, no. 1, Art. no. 24, 2024. doi: 10.3390/aerospace120100