

第29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) 月極域投てき移動ミッション「SHAKE」
副題(自由記入)
学校名 芝浦工業大学

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

本ミッションは、月極域に存在する可能性の示唆されている水氷が閉じ込められたマイクロコールドトラップを探索することを目的としている。JAXAの計画する月極域探査機LUPEXローバに搭載する小型ローバと、小型ローバの最適な移動とし投てき移動手法を確立することでLUPEXローバの負担を軽減し、リスクの分散を図った。投てき移動手法を用いることで、小型ローバが必要とする探査対象領域までの片道分のエネルギーを削減できる。小型ローバは面型移動機構を採用することで月極域の過酷な走行環境にも対応できる。

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

本ミッションは、月に水氷が存在する可能性をローバによる直接探査によって明らかにすることを目的としている。月の中でも特に、極域の日が当たらない永久影と呼ばれる領域には、水氷が存在すると示唆されてきた。これまでは大型のクレータ内部の永久影が探査対象として候補に挙がっていたが、近年の研究によってマイクロコールドトラップと呼ばれる氷が堆積した層の存在が明らかとなってきた。そこで本ミッションでは、月極域探査を計画しているLUPEXローバにマイクロコールドトラップ探査用の小型ローバを搭載することを検討した。さらに投てき移動手法を小型ローバに採用する面型移動機構と組み合わせることで、広範囲に渡った観測・探査を実現する。

(b) 重要性・技術的、社会的意義等

NASAの計画するアルテミス計画では、有人火星探査を行う過程で月面の利用が重要視されている。さらに月面基地構想も進んでいることから、月面において持続的な活動を行うための資源・技術の確立が求められている。特に水資源を現地で調達することができれば、生活用水への利用やエネルギーへの変換ができるなど多くの利点が存在する。これまでの探査で月面の永久影には水氷の可能性が示唆されてきたが、水酸基を含むものを水氷と定義しているため利用可能な状態で存在しているかまでは定かではない。そのため、月面の水氷の状態を確認し、利用可能であれば月全体での水氷の総量はどの程^oあるかを明らかにする必要がある。

4. ミッションの具体的な内容

(a) システム
 (地上局やミッション機器等を含む全体の構成・機能・軌道・データ取得を含む運用手順等、必要に応じて図表添付のこと)

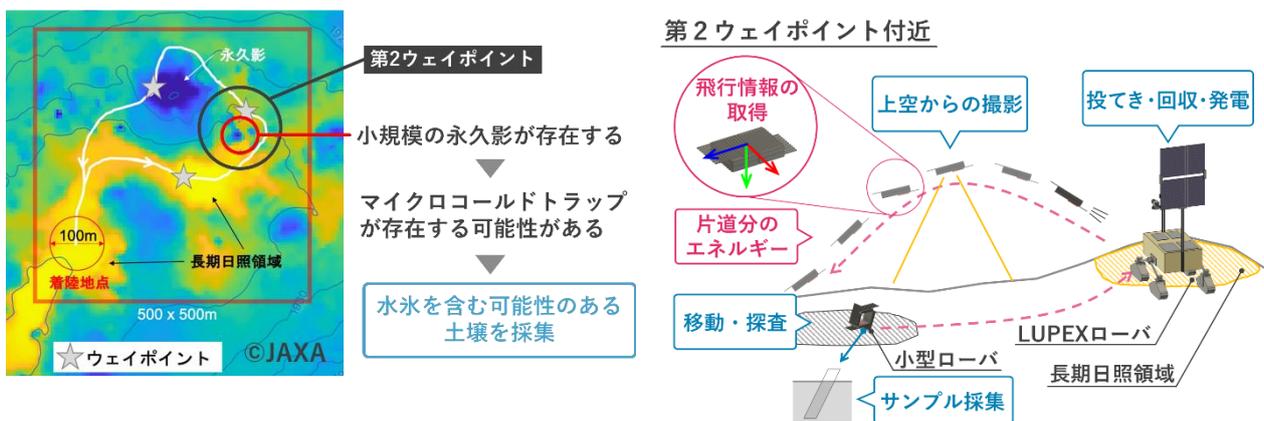
本ミッションの対象となる探査範囲を図1(a)に示す。LUPEX ローバによる月極域探査計画では、月の南極域で長期日照領域と永久影が存在する 500m×500m 四方の範囲を対象としている。本ミッションではその中でも第2ウェイポイントと呼ばれる地点に着目した。その理由は長期日照領域が近くにあり、小規模の永久影が存在するからである。これまでの研究によって、比較的小さな永久影であってもマイクロコールドトラップが存在する可能性が示唆されているため、第2ウェイポイント付近を探査範囲として選定した。

ミッション全体の流れを図1(b)に示す。まず LUPEX ローバは第2ウェイポイントの長期日照領域付近に接近する。LUPEX ローバはソーラー発電によって電力を確保しているため、十分な電力量を確保できる位置で滞在する。そして、到着した地点から永久影めがけて小型ローバを投てきする。永久影に到着したローバは、周囲を探査しながら LUPEX ローバの滞在する場所へと帰還する。そして小型ローバを回収し、再投てきを行うことで繰り返しの探査が実現できる。

LUPEX ローバ、投てきシステム、小型ローバそれぞれの役割を以下にまとめる。

LUPEX ローバ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 投てきシステム、小型ローバへの電力供給 ・ 小型ローバが採集したサンプルの解析
投てきシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・ 小型ローバが移動する際に必要となるエネルギーを片道分削減 ・ 目的地までの移動 ・ 投てきによる月の飛行、姿勢、重量、着地の際の衝撃の取得 ・ 小型ローバの回収と複数回の投てき ・ 投てき移動手法の確立
小型ローバ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低高°からの永久影撮影 ・ 複数回投てきによる飛行データの精°向上、永久影画像データ取得 ・ マイクロコールドトラップからのサンプル採集 ・ 面型移動機構の確立

本ミッションの「SHAKE」という名前は、鮭の母川回帰という特性からなぞらえて名付けられた。鮭は河川で卵から孵化し、その後は海で生活をする。そして産卵期になると故郷の河川に戻ってくる特性がある。これを母川回帰という。LUPEX ローバから投てきした小型ローバが探査を終えて再LUPEX ローバの元へ帰還する様子が鮭の特性と類似しているところから「SHAKE」と命名した。



(a) ミッションの対象範囲

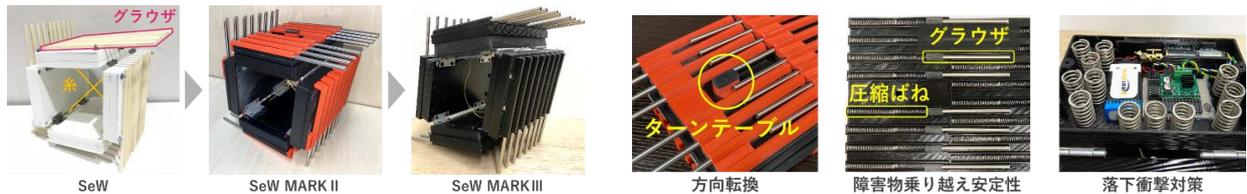
(b) ミッション全体の流れ

図1 ミッションの全体像

(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

図2に小型ローバの改良の流れを示す。面型移動機構を有するSeWはMARKⅡ、MARKⅢと改良を重ねた。SeW MARKⅡではこれまで直進のみの移動だったものがターンテーブルによって自由に移動方向を変えられるようになった。また、グラウザ内部に圧縮ばねを取り付けることによって、グラウザの長さが変わり、障害物乗り越え安定性が向上した。さらにSeW MARKⅢでは、落下衝撃耐性を考慮し、筐体内部にばねを配置した。実際に硬い地盤と柔らかい地盤を用いて衝撃耐性を調べる実験を行ったところ、柔らかい地盤では破損は見られず、硬い地盤では筐体に若干の亀裂が入る程で収まった。今回は試作のため3Dプリンタで製作したグラウザカバーを用いていたが、材料の選定などを行うことによって、より衝撃耐性のある小型ローバになる。

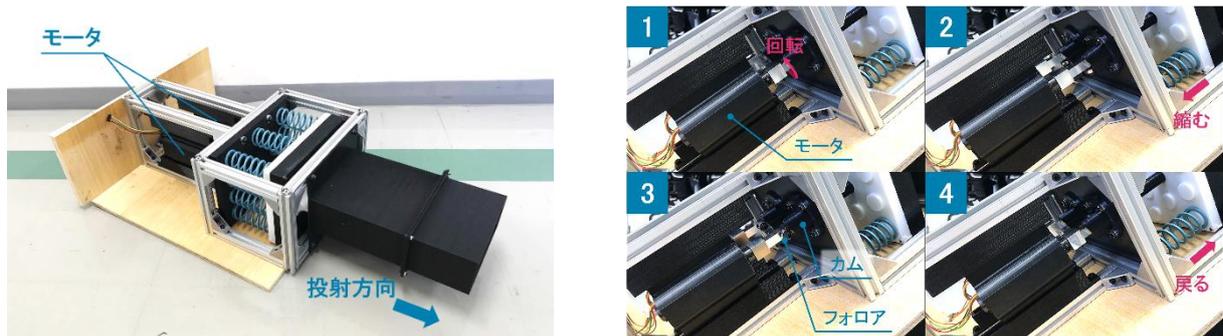
図3(a)に提案するばね式投てき機を示す。この投てき機では二つのモータの回転する力を、カム機構を介してばねを伸縮させる方向の力に変え、ばねの弾性力によって上述の小型ローバを投てきする(図3(b))。



(a) SeW の改良の流れ

(b) SeW の課題解決する要素

図2 小型ローバの改良点



(a) ばね式投てき機

(b) カム機構によるばねの伸縮

図3 ばね式投てき機と機構の様子

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

本ミッションでは、投てき移動手法と小型ローバによる面型移動機構というこれまでにない移動手法を用いている点が独創的なアイデアといえる。さらに、LUPEX ローバが長期日照領域付近に滞在している間に永久影の探査を行えるため、LUPEX ローバの負担軽減や十分な電力供給が実現できる。

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

月の水資源を解明することによって、月面基地構想や月面滞在を現実的なものとなる。月での持続的な探査が可能となれば、火星有人探査への足掛かりとなることはもちろん、衛星や惑星の成り立ち解明につながる。また、投てき移動システムと小型ローバを用いた探査手法を確立することで、今後計画される惑星直接探査の一つの選択肢となる。

以上

第 29 回衛星設計コンテスト アイデアの部 解析書

月極域投てき移動ミッション「SHAKE」

芝浦工業大学

修士 1 年 佐々木 航平, 村中 優里子, 上野 佑理

学部 1 年 相良 健太

指導教員 飯塚 浩二郎

1. 背景

NASA は 2024 年に有人月面着陸, 2030 年代に有人火星着陸を目指すアルテミス計画を発表した. それに伴って月面で持続的な活動を行うために必要な資源・技術への需要が高まっている[1]. 中でも水資源の十分な確保ができれば, 持続的な探査が可能であり, 月面基地構想などの可能性も飛躍的に向上する. 近年の月探査によって, 永久に日の当たらない永久影と呼ばれる領域に, 水氷が存在する可能性があることがわかってきている[2]. 月の極域には永久影が多く存在するため, 直接的な探査を行うことによって水氷の存在を確認することができる. したがって, 本研究では月極域の永久影における水氷の存在について焦点を当てる.

月極域の永久影の中でも, 「マイクロコールドトラップ」と呼ばれる氷が堆積する小さな領域の存在が示唆されている[3]. マイクロコールドトラップは直径 1 cm から 1km の大きさで, 永久影に広く分布している可能性がある. 比較的小さな永久影でもマイクロコールドトラップは存在する可能性があるため, 探査におけるリスクを軽減することができる. これまでは間接的な探査やシミュレーションなどでその存在が確認されてきたため, 直接的な探査を行う必要がある.

JAXA は月に存在する水の量や分布, 状態を明らかにするため, 月極域探査ミッション LUPEX を計画している[4]. このミッションではマイクロコールドトラップの探査は計画されておらず, 南極域の永久影を探査対象としている. 水氷の確認以外に移動, 越夜, 掘削などの重力天体表面探査に関する技術獲得もミッションに含まれる. そして, それらの作業を行うのが図 1 に示す月極域探査ローバ(以降 LUPEX ローバと呼ぶ)である. LUPEX ローバには深さ 1.5m 程^o を掘削できるオーガが用いられており,

試料採集を行うことで水氷の確認をする. 最適な試料採集地点の選定から試料採集・分析の一連の探査を LUPEX ローバが担っているため, 月極域探査ミッションにおける LUPEX ローバの負担が大きい. また, 月極域は昼夜の温^o 差が激しく, 最大斜^o 30^o 程^o の山岳地帯となっているため過酷な環境といえる[5]. このような環境下では LUPEX ローバが走行不能になり, ミッションが十分に行えない可能性がある. そこで, LUPEX ローバ以外にも小型ローバを採用し, 機能を分担して負担を軽減することを検討する.

小型ローバを用いる利点は比較的 low コストで運用が可能な点, 機能に応じて複数運用できるためミッション全体のリスクを分散できる点などが挙げられる. 一方で, 移動距離が限られてしまう欠点が存在する. この欠点を解決するため小型ローバに合った移動手段として, 投てきシステムを用いた移動手法を提案する.

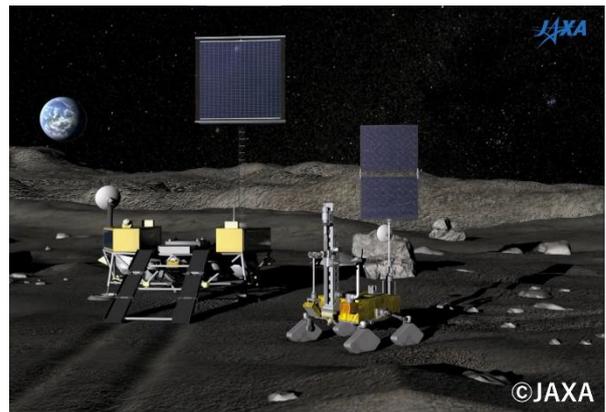


図 1.1 月極域探査機:LUPEX ローバ[6]

2. 目的

本ミッションで提案する小型ローバは, マイクロコールドトラップを対象としたサンプル採集を目的とする. また, この探査を行うための移動手段として投てきシステムを用いた移動手法を提案する.

3. ミッション概要

3.1. ミッションの対象範囲

図 2 に月極域探査ミッションにおける探査範囲と本ミッションの探査範囲を示す。月極域探査ミッションでは長期日照領域と永久影が存在する 500m×500m 四方の範囲を対象としている。三つ設けられた星印はウェイポイントと呼ばれる地点であり、環境・地質が特徴的な地点である。本ミッションではこの対象範囲内でさらに第2ウェイポイントを対象とする。

第2ウェイポイントは、長期日照領域に近く小規模の永久影が存在する範囲となっている。そのため、比較的安定して電力を確保した上で、永久影を探査することが可能であると考えられる。

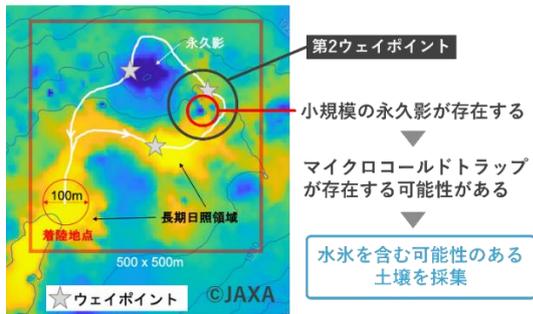


図 3.1 月極域ミッションにおける探査範囲(左)[7]と本ミッションの探査範囲(右)

3.2. ミッションの内容

本ミッションの一連の流れを図 3 に示す。まず LUPEX ロボが第 2 ウェイポイントの長期日照領域付近に接近する。これは、ソーラー発電による電力確保を最大限活用するためである。長期日照領域付近に到達した LUPEX ロボは、小型ロボを小規模の永久影めがけて 20.0 m の投てきを行う。永久影に着地した小型ロボは、周囲を探索しながら LUPEX ロボの元へと帰還する。そして LUPEX ロボは帰還した小型ロボを回収し、長期日照領域内で移動をし、再投てきを行う。

投てき移動手法を用いることで、目的地となる永久影へ小型ロボが移動する際に必要なエネルギーを片道分削減することができる。また、月を飛行する際の姿勢や重力、着地した際の衝撃に関する情報を取得することができる。一方、小型ロボは投てきによって月面を低高°で飛行することができる。これにより、上空から永久影を撮影することができる。また、マイクロコールドトラップから水氷の成分を含む可能性のあるサンプルを採集するこ

とができる。複数回投てきできるシステムにすることで、飛行や着地の際に取得できる情報の精°向上や、より多くの永久影画像データ取得などが見込まれる。

さらに図 3.3 に投てき距離と移動軌跡を示す。小型ロボを投てきする小規模の永久影には月面の安息角である 30° の斜面が存在すると仮定し、投てき高さなどの計算を行った。

第2ウェイポイント付近

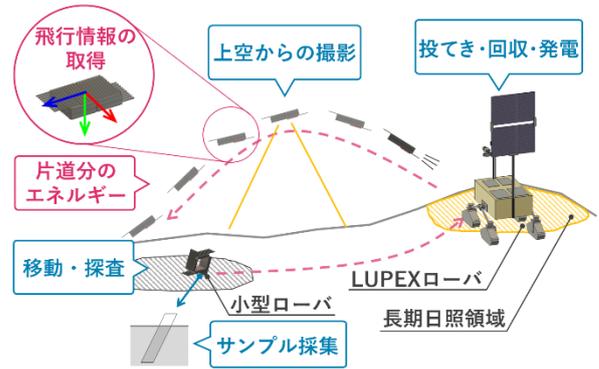


図 3.2 ミッション全体の流れ

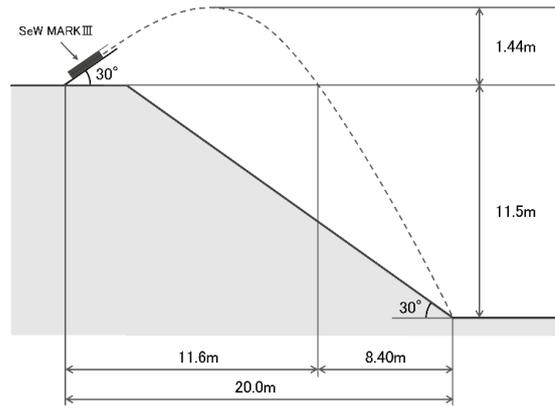


図 3.3 投てき距離と移動軌跡

3.3. 「SHAKE」の名前の由来

鮭には河川で卵から孵化し、その後川から海に降り、産卵期になると故郷の河川に帰ってくる母川回帰という特性がある[8]。本ミッションの、投てきした小型ロボが探査を終えて投てき地点まで戻ってくる様子を、鮭の母川回帰という特性になぞらえて SHAKE とした。

4. 小型ロボの提案

4.1. 月面探査ローバーSeW-の紹介

本研究グループは第 26 回衛星設計コンテスト アイデアの部において、月面探査ローバーSeW-というタイトルで小型探査ロボの提案を行った。図 4.1 に提案した小型ロボ SeW を示す。SeW は月面の軟弱地盤において、安息角 30° の急斜面を登坂することを目的として開

発された。SeWの特徴として面による移動、地盤からの支持力を得るためグラウザ、繊維材料を用いた駆動力の伝達などが挙げられる。面による移動では接地面が増大することで地盤の崩壊を防ぐ。またグラウザが軟弱地盤に杭のように刺さることで地盤からの支持力を得ることができ、急斜面での滑り落ちを回避する。そして駆動力の伝達に繊維材料を用いることで機構の単純化と面による移動手法を確立した。

SeWの走行性能を検証するために、月面の軟弱地盤を模擬した環境で斜°を付けた走行試験を行った。月面模擬環境には珪砂5号を使用し、最大斜°30°まで検証を行った。図4.2は斜°30°の走行の様子である。動き出しは斜面下方向に若干滑る現象が確認されたが、その後は滑ることなく登坂することが確認できた。したがって、面型移動機構は軟弱地盤の斜面登坂において有効性が確認された。



図4.1 SeW (Selene Walker)



図4.2 斜°30°の軟弱地盤走行(珪砂5号)

4.2. 本ミッションに適応した小型ローバの開発

本ミッションで使用する小型ローバには、斜面登坂性能が検証された面型移動機構を採用する。斜面登坂性能に優れているSeWだが、探査を行う上では多くの欠点が存在する。最大の欠点は方向転換ができない点である。SeWは四つの面を備えている構造上、前進か後退しかできない。さらに、石などの障害物を乗り越える際にグラウザが接触するとバランスを崩して転倒してしまう。また、投てき移動手法を用いるため、着地の際に大きな衝撃が加わることが想定される。そのため落下衝撃耐性につい

でも検討しなければならない。これらの課題を踏まえ、本ミッションに適応した小型ローバの開発を行った。

4.3. 方向転換と障害物の乗り越え安定性の検討

図4.3にSeW MARK IIを示す。SeW MARK IIでは方向転換と障害物の乗り越え安定性の課題を解決した。

方向転換を行うために、ターンテーブルの開発、実装を行った。図4.4中央にターンテーブルを取り付けた面を示す。接地するターンテーブルの面以外のグラウザが地面と接触しないようにSeWの姿勢を維持することで方向転換を可能とする。図4.4はターンテーブルが機能するか動作確認を行った様子である。木材の板を剛体面と仮定して動作させると方向転換できることが確認された。

障害物の乗り越え安定性の課題解決のため、グラウザを格納する面に圧縮ばねを取り付けた。図4.5にグラウザを格納する面の内部構造を示す。グラウザが障害物に接触すると、ばねが圧縮されて障害物の高さだけグラウザが面の内部に格納される。そのため、障害物の形状に合わせてグラウザが変化するため安定性が向上する。また木材の板を障害物に見立てて検証を行ったところ、グラウザの長さが変化することが確認できた。

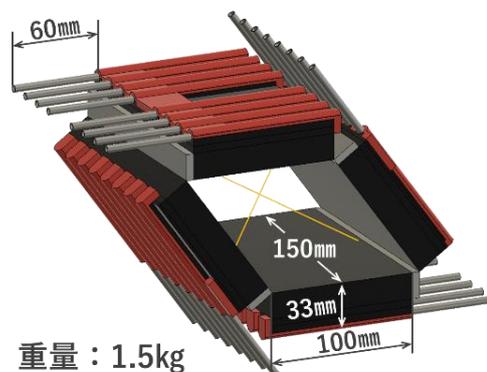
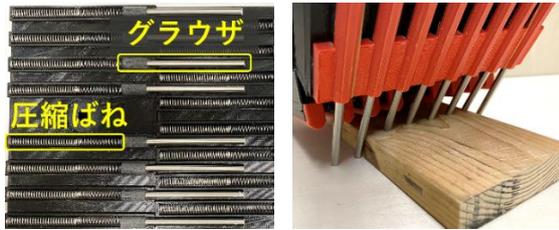


図4.3 小型ローバ SeW MARK II



図4.4 ターンテーブルの動作確認の様子



(a)グラウザ内部構造 (b)障害物乗り越え
図 4.5 グラウザの改良点

4.4. 落下衝撃耐性の検討

図 4.6 に落下の衝撃対策を施した SeW MARKIII を示す。SeW MARKIII を製作するにあたり、衝撃対策として以下の 2 点を検討した。

- ① 衝撃が直撃するグラウザ面の改良
- ② 落下点との衝突時間を長くする

グラウザ面の改良については、グラウザ面を構成するパーツの一体化を検討した(図 4.7)。SeW MARK II のグラウザ面は二つのパーツから構成され、はめ合わせるように面部分を形成していた。そこで波のような形状の一体化したグラウザ面を製作することで強く 向上を図った。

次に落下点との衝突時間を長くすることについては、衝撃力の式より検討を行った。衝突する物体の質量を m 、落下点での速[°] を v 、衝突時間を Δt とすると衝撃力 F は式(4.1)で表される。

$$F = \frac{mv}{\Delta t} \quad (4.1)$$

式(4.1)より、衝撃力は衝突時間に大きく依存し、衝突時間が長ければ長いほど衝撃力が小さくなるのがわかる。そのため、SeW MARKIII ではばねを用いて衝突時間を長くする対策を講じた。図 4.8 にばねを取り付けた面内部の様子を示す。モータや回路、バッテリー以外の空間を最大限活用するため、外径 15 mm、自由長 25 mm、ばね定数 7.24N/mm のばねを 12 個配置した。グラウザ面と本体は最大で 5 mm 収縮するように設計しており、その分ばねが圧縮されることで衝突時間を長くすることができる。

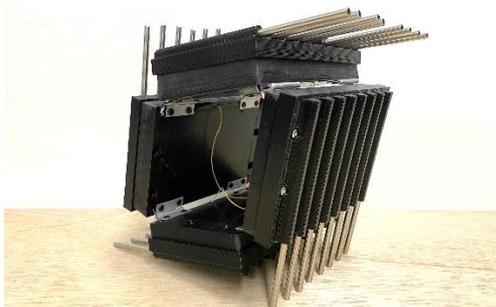
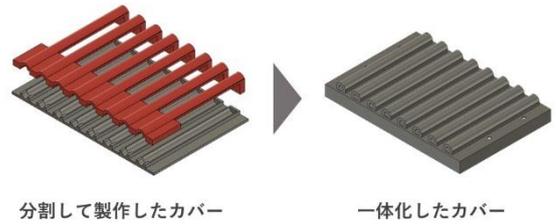


図 4.6 落下衝撃対策を施した SeW MARKIII



分割して製作したカバー 一体化したカバー
図 4.7 グラウザ面の改良



図 4.8 ばねを取り付けた面内部

4.5. 落下衝撃耐性実験

前節で衝突時間について検討したが、衝突時間は衝突する地盤に左右される。硬い地盤ほど衝突時間は短く、柔らかい地盤ほど長くなる。今回着陸する領域の地盤状態は不明なため、実験的に落下衝撃耐性を確認した。

硬い地盤には木材の板を用い、柔らかい地盤には 110 mm 堆積した珪砂 5 号を用いた。また、SeW MARKIII を約 2m の高さから自由落下させることで、月面上での衝突を簡易的に再現した。各地盤において 5 回ずつ落下させ、筐体の破損具合を確認した。

図 4.9 に硬い地盤と柔らかい地盤に衝突したときの様子を示す。破損具合については柔らかい地盤では見られず硬い地盤では面に亀裂が入っていることが確認された。

硬い地盤において、破損具合が亀裂程[°] に収まっている要因として、SeW MARKIII の筐体全体が衝撃吸収の機能を果たしていることが考えられる。着地の際ぴったりと閉じていた面が衝突した瞬間に開き、ひし形のような形状になった。これにより、衝突の際のエネルギーを分散することができ、衝撃の緩和につながった。



図 4.9 硬い地盤(左)と柔らかい地盤(右)への衝突

4.6. サンプル採集の概要

サンプル採集を行うためにグラウザに着目した。面型移動機構では、軟弱地盤にグラウザが突き刺さるように前進する。そのため、この突き刺さる動作をサンプル採集に応用することができないか検討した。図 4.10 にグラウザによるサンプル採集の一連の流れを示す。このサンプル採集では、地盤下部の土圧が高いことを利用して先端部分のパーツを埋め込み、糸を巻き取ることでグラウザ内部にサンプルを格納している。

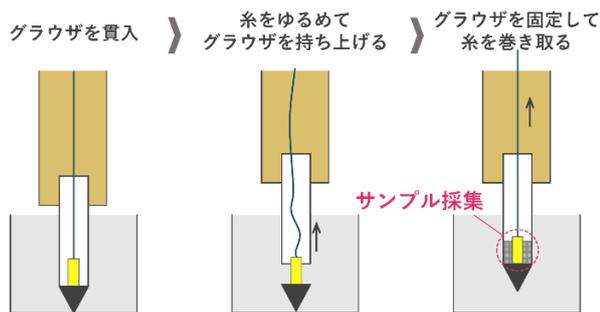


図 4.10 サンプル採集の一連の流れ

4.7. サンプル採集実験

グラウザを用いたサンプル採集機構の動作と採取量を確認するためにサンプル採集実験を行った。図 4.11 に実験に用いた採集器具を示す。今回は内径 7 mm のアクリルパイプをグラウザに見立てて用いることで視覚的に機構の動作を確認した。

表 4.1 に実験条件を示す。採集の対象は軟弱地盤を想定し珪砂 5 号を用いた。本実験では金属パーツ長さ、グラウザの持ち上げ量を変えてそれぞれ 5 回ずつ採集を行い、採集した珪砂 5 号の体積を計測する。

実験結果を図 4.12 に示す。金属パーツ長さ 30 mm のときはほぼ採取できていないのに対して 10 mm, 20 mm の場合は一定のグラウザ持ち上げ量に達すると採取量が急激に増加している。これは、グラウザから金属パーツが完全に出た方が採取量は多いことを示している。今回の実験結果から、平均採取量が最も多くばらつきも少ない、グラウザ持ち上げ量 30 mm, 金属パーツ長さ 20 mm のときがサンプル採集に適していると言える。

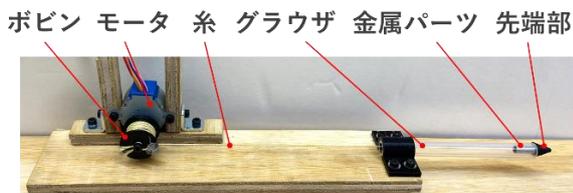


図 4.11 サンプル採集実験器具

Table 4.1 実験条件

実験パラメータ	値
金属パーツ長さ [mm]	0, 10, 20, 30
グラウザ持ち上げ量 [mm]	10, 20, 30
実験回数 [Times]	5

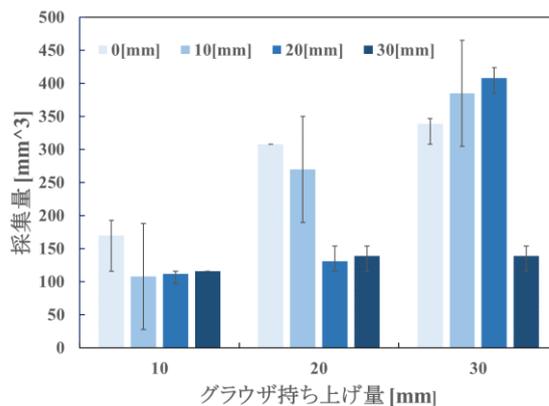


図 4.12 サンプル採集実験結果

5. 小型ローバ用投てき機の提案

5.1. 本ミッションの投てき機

図 5.1 に提案する投てき機（以下、ばね式投てき機と呼ぶ）を示す。また、ばね式投てき機の仕様を表 5.1 に示す。

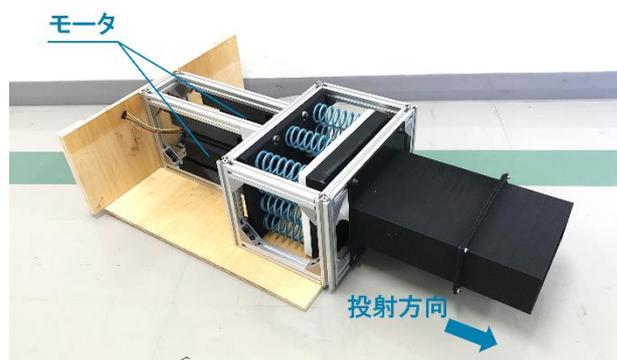


図 5.1 ばね式投てき機

表 5.1 ばね式投てき機仕様

質量 [kg]	7.80
サイズ [mm]	L767 × W600 × H188
ばね定数 [N/mm]	8.54
取り付け可能ばね個数	1~16

5.1.1. ばね式投てき機の機構

このばね式投てき機では図 5.2 に示すように、カム機構を用いて二つのモータの回転する力を、ばねを伸縮させる方向の力に変え、ばねの弾性力によって SeW MARKIII を投てきする。

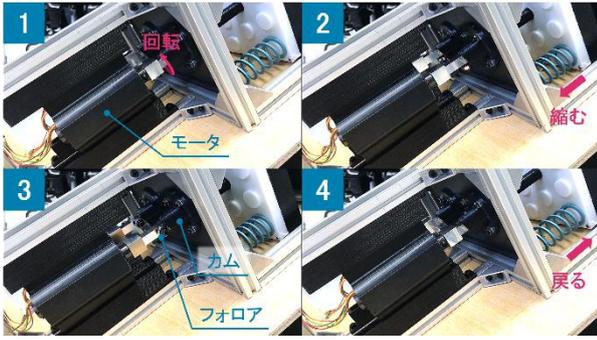


図 5.2 カム機構によるばねの伸縮

5.1.2. ばね式投てき機設計のための技術計算

月面で約 1.50 kg の SeW MARK III を投てき角 30° で 20.0 m 投てきする (図 3.3) ために、初速 v_0 、水平方向の飛距離を x とし、時間を t とおくと式 (5.1)、斜方投射の軌道の式 (5.2) より月面上で SeW MARK III を 4.33 m/s の初速 v_0 で投てきする必要がある。

$$x = v_0 \cos 30^\circ \cdot t \quad (5.1)$$

$$0 = \tan 30^\circ \cdot x - \frac{1.62}{2v_0^2 \cos^2 30^\circ} x^2 \quad (5.2)$$

したがって、この条件を満たすばねとばねの個数を以下のように決定した。

まず、投てき対象の質量と投射時に前後する部品の質量の合計を m とし、投てき機全体のばね定数を K 、投射時にばねが縮む長さを x_k とすると、投射時のエネルギーの式 (5.3) が成り立つ。ここで、ローバおよび投てき機は投射時に動かないものとする。さらに、位置エネルギーは微小であるため考慮しない。

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} K x_k^2 \quad (5.3)$$

本ミッションの投てき機においては、投射時にばねが縮む長さを 30.0 mm とし設計することとした。さらに、投てき時にかかる質量は SeW MARK III (1.50 kg) にモータや押し出す板の質量 (1.76 kg) を加えたものである。よって、式 (5.3) より投てきに必要な全体のばね定数 K は 67.9 N/mm である。

以上を踏まえ、本投てき機ではばね定数 k が 8.54 N/mm ばねを複数個用いることとした。式 (5.4) に示すように、このばねにおける投てき飛距離条件を満たす必要最低個数 n は 8 個である。

$$K = n \cdot k \quad (5.4)$$

5.2. ばね式投てき機実証実験

以上の計算をもとに設計したばね式投てき機を用い、投てき対象として約 1/3 の質量の SeW MARK III の模型を投てきする実験を行った。

5.2.1. 実験環境および実験条件

実験環境を図 5.3 に示す。ばね式投てき機の投射角 θ を 30° とし、投てき対象として質量 490 g の SeW MARK III と同じサイズの模型を用いた。また、ばねの個数は投てきに冗長性を持たせるため 10 個で投てきを行った。したがって、投てき機全体のばね定数は 85.4 N/mm である。このとき、ばねの弾性エネルギーがすべて投てき対象に伝わると仮定すると、式 (5.3)、式 (5.4) 及び式 (5.2) を変形し地球の重力に換算した式 (5.5) より、SeW MARK III の模型を 2.78 m 投てき可能であると考えられる。



図 5.3 実験環境

$$x = \frac{2v_0^2 \cos^2 30^\circ \cdot \tan 30^\circ}{9.81} \quad (5.5)$$

本実験では同条件で 5 回投てきを行い、投てき機から投てき対象が最初に着地した点までの距離を投てき飛距離とし評価を行った。

5.2.2. 実験結果および考察

表 5.2 に実験結果を示す。

Table 5.2 投てき実証実験結果

回数 [Times]	1	2	3	4	5	平均
飛距離 [m]	1.02	1.10	1.35	1.11	1.23	1.16

実験での飛距離平均は理論値の飛距離の 41.7% であった。このような実験値と理論値の差が生じた理由としては、投射時に投てき機に伝わる反動やばねが自然長に戻る際に部品と投てき機の間を生じる摩擦、二つのモータの同期精 θ が挙げられる。特に、投射時に投てき機に伝わる反動については、投射時に投てき機が

後方に動くという現象が確認されており、投射時の反動が大きなエネルギー損失となっていると考えられる。

ここで、本実験において投射時のエネルギー損失がどのくらいあったかを求める。まず、実験結果の平均飛距離より本実験の投射初速度は、式 (5.5) より 3.62 m/s である。ここで、エネルギー損失 E_{loss} を考慮してエネルギー保存則の式を立てると式 (5.6) のようになる。よって、本実験では 23.7 J のエネルギー損失があったことがわかる。

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + E_{loss} = \frac{1}{2}Kx_k^2 \quad (5.6)$$

5.3. ばね式投てき機の今後の課題

ばね式投てき機の実証実験によって、投てき機として小型ローバを投てきすることが可能なことが確認できた。しかし、投射時におけるエネルギー損失が大きくなり、これを小さくしていくことが課題となる。そのため改善点として、現時点では以下の二つを考えている。

① カムとフォロア間に働く摩擦の軽減

作製したばね式投てき機のカム部品は 3D プリンタで作られており、フォロアとカム間に大きな力が加わったときにカムが削れる現象が確認された。したがって、カム部品の材質を変更し、カムとフォロア間に働く摩擦の軽減を目指す。

② 投てき機の反動軽減

投てき機の質量がより大きくなれば、この反動は小さくなる。したがって、LUPEX ローバ (350 kg) に投てき機を搭載した場合の反動は小さいと考えられる。

6. 結言

本グループでは、JAXA の提案する月極域探査において、長期日照領域付近に存在する永久影を探査するミッションを計画した。LUPEX ローバのミッションでの負担を軽減し、リスクを分散させるために小型ローバの運用が適している。また、小型ローバを目的地まで効率的に運搬するために、投てき移動手法を提案した。

小型ローバ SeW MARK III においては高い走破性を持つ面型移動機構を採用し、サンプル採取機能、投てき移動による衝撃耐性を証明することができた。今後は、飛行

情報の取得や飛行時の上空からの撮影機能を追加し、小型ローバとしてさらなる有意性のあるものにしていきたい。また、投てき移動機構については、今回の実験を通して実際の小型ローバを投てき可能であることを示した。今後は、投てき時のエネルギー損失の軽減に努め、最小減のばね定数で効率よく投てき可能な投てき機を目指す。本プロジェクトで提案する小型ローバの運用が、月探査の新たな選択肢として確立されるよう研究を続けていく。

参考文献

- [1] JAXA, 宇宙科学研究所, 日本のアルテミス計画参加に向けた理学的・工学的検討, https://www.isas.jaxa.jp/home/rikou/kokusaitansa/documents/artemis/artemis_rikou_ver0.46.pdf, (参照日 2021 年 6 月 30 日)。
- [2] 文部科学省, 月着陸探査活動の JAXA における検討状況について, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/071/shiryo/_icsFiles/afiedfile/2019/07/09/1418751_4.pdf, (参照日 2021 年 6 月 15 日)。
- [3] Hayne, P. O., Aharonson, O., Schörghofer, N., "Micro cold traps on the Moon", *Nature Astronomy*, Volume 5, (2021), pp. 169–175.
- [4] JAXA, 月極域探査ミッション, <https://www.exploration.jaxa.jp/program/lunarpolar/>, (参照日 2021 年 6 月 15 日)。
- [5] 文部科学省, 国際協力による月探査計画への参画に向けて, https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afiedfile/2019/08/29/1420708_2_1.pdf, (参照日 2021 年 6 月 24 日)。
- [6] Jaxasgm - JAXA 相模原チャンネル, 月極域探査機(LUPEX)【オンライン特別公開 #26】, <https://www.youtube.com/watch?v=mLb2OcuDro4>, 動画内より引用, (参照日 2021 年 6 月 28 日)。
- [7] JAXA, 月極域ミッション, 調査の流れ, https://www.exploration.jaxa.jp/assets/img/program//lunarpolar/pic_04.png, (参照日 2021 年 6 月 24 日)。
- [8] AQUOS5., 鮭はなぜ生まれた川に帰ってくるのか?, <https://www.aquas5.com/knowledge/30/001789.php>, (参照日 2021 年 6 月 30 日)。