

第3 1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) 月探査ミッション「LCSE」
副題 (自由記入) スクリュウを搭載したローバーによる月面クレーター探査
学校名 慶應義塾大学

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。)

近年、嫦娥5号が月からのサンプルリターンに成功するなど月探査の機運が高まってきている。その中私たちは、月面クレーター内部を探査することで隕石の採集などから重要なデータを得られると考えた。しかし、地形によるリスクが高いことなどからこれまで探査は行われていない。そこで私たちは滑落などのリスクを抑え、様々な場面に対応可能なローバーとして、アルキメデスのスクリュウを用いた機体を考案した。これを用いて地質調査とサンプルリターンを行う。

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、今まで探査されてこなかった月面クレーター内部を安全に探査可能とするアルキメデスのスクリュウを用いた技術を確立すること、さらにクレーター内部のサンプルを採取して地球に持ち帰ることを目的とする。
(b) 重要性・技術的、社会的意義等 隕石、あるいは小惑星には太陽系初期の物質や生命の起源に関する物質など多くの貴重な情報が存在すると考えられるため、その調査は大きな意味を持つ。しかしながら、地球では大気圏や風化といった、隕石の物性を変化させてしまう要因が多く、加えて大気圏突入時に燃え尽きてしまう小さな隕石もあるため、調査が難しい。そこで本ミッションでは、そういった要因の少ない月面クレーターを調査することにより、より多くより多様な隕石に関する有益なデータを得ることができると考える。そして本ミッションの成功は、今後の宇宙関連の研究、あるいは生物学といった様々なジャンルの研究を進める大きな助けになると予想される。 さらに、アルキメデスのスクリュウを用いたローバーの開発が成功すれば、今後クレーターを安全に探査することができるほか、エウロパなど水中を探査する際にも応用可能な技術となり得るという意義もある。

4. ミッションの具体的な内容

(a) システム 本ミッションの流れを以下に示す。なお、図1の様なサンプル採取をする子機と主に月上空を周回して子機の運搬・回収を行う親機を用いてミッションを実行する。図1の左右のスクリュウをつなぐ部分は油圧シリンダを用いて距離を変えることができるように設計する。また図1についているスクリュウは図2の様な爪を出した形にも変形できるようにする。

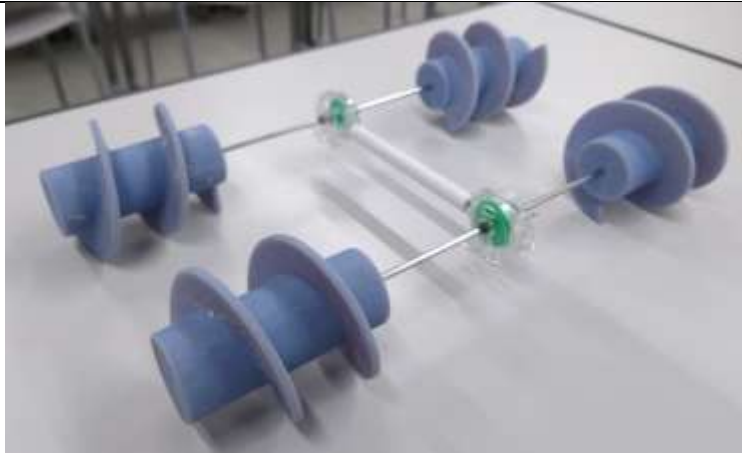


図1 子機の概形

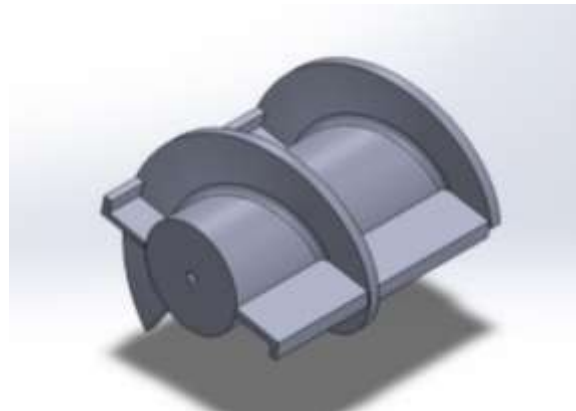


図2 爪を出したスクリュー

ミッションの流れは以下の様になる。

- ①親機が子機を月面のクレーター内に向かって投下する
- ②子機が逆噴射し、クレーター内に着陸する
- ③地中に潜る。なおその際、着陸時の逆噴射によって作られた穴があればそれを利用する。
- ④サンプル採取地点まで地中を移動する。
- ⑤スクリューを用いてサンプルを粉砕、または削り、爪を用いてサンプルを採取する。この後、④と⑤の工程を何回か繰り返す。
- ⑥子機が回収されるクレーターの外の地点まで、地中を移動する。
- ⑦親機が子機を回収する。

なお、子機の月面での工程において、③の着陸時に作成された穴が不十分であったり、④や⑤の月面探査の途中に機体が地中から出てしまったりした場合は、スクリューを動作させ砂を移動させる際に発生する沈み込む力を利用し、機体を砂の中に潜らせる。

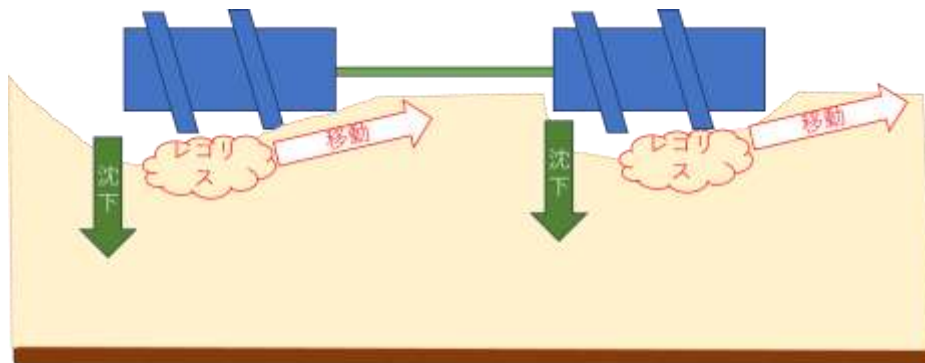


図3 機体の沈む様子

(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

まず、本ミッション実現のために開発しなければならないものは図1で示したスクリューを用いて進むローバーとなる。このローバーのスクリューは移動のためだけではなく、レゴリスの中にもぐる、サンプルの採取・削りだしを行うといった目的でも用いる。よって、図2のような出し入れ可能なかぎ爪の開発が必要となる。また摩擦を軽減するためにスクリュー部以外の箇所をできるだけ小さくする必要もある他、光学カメラに頼れないことから周りの環境を知ることができるセンサーも必要となる。

次に、サンプルを削って採取する際に地球上の砕氷船のようにサンプルの上に乗ってスクリューを回転させても重さが足りず、空転してしまう可能性が高い。このため左右のスクリューの距離を変え、挟み込みながらサンプルを削る必要が出てくる。よってこれに必要な力を作ることができ、かつなるべく小さな油圧シリンダの開発が必要となる。

さらに、今回のミッションでは時間削減などのために上記の子機ローバーを親機が上空からクレーターに向かって投げ入れる必要がある。その際の投げ入れる精度や子機に登載しなければいけない逆噴射用のスラスタも本ミッションを実現する上での課題となってくる。

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

我々が主張したい独創性は、アルキメデスのスクリューを用いてレゴリスの中を走行するという従来のローバーにはない移動方法の採用にある。

スクリューを砂に絡ませることにより、砂との接触面が増えて摩擦が増えることや、羽根がスパイクの様な役割をしてくれることが期待できるため、斜面での滑落を起こしにくいと考えられる。この点において、従来のキャタピラやタイヤを採用したローバーより安全な探査が可能であると考えられる。

また、スクリューを採用することで砂の中に潜って走行することが可能になると考えられるが、この移動方法は宇宙分野での利用例はないことから、この点も本ミッションの独創性の一つとして挙げられる。

さらには過去にクレーター内部の探査は行われていないため、ミッションの独自性の一つとなっている。

(b) 得られる成果・波及効果・対象となる受け取り手

本ミッションで得られた試料は地球やほかの方法では得られないサンプルであることから太陽系や生命の起源などに関する研究を大きく進める試料となる可能性が高い。

また、スクリューを採用することでローバーが従来の動きに加えて、地面を垂直に掘っていく、あるいは水中を移動するといった多様な移動手段を取ることが可能となる。従来のローバーでは探査場所に応じて適する機種を用意しなければならなかったのに対し、今回のローバーはこれ一つで多くの環境に対応可能であるため、この点について優れていると考えられる。これにより、スクリューの採用は今回の月探査だけでなく、エウロパ等水のある場所など今後様々な探査でも有効に活用できるアイデアであると考えられる。

以上

第3 1回衛星設計コンテスト アイデアの部 解析書

月探査ミッション 「LGSE」 スクリュウを搭載したローバーによる月面クレーター探査

慶應義塾大学
松田聖梢, 青野誠大

1. 背景

2020年、はやぶさ2がリュウグウからのサンプルリターンに成功した。これは太陽系の歴史を解明するための重要な手掛かりとなっており、今も研究が進んでいる。そこで我々は新しいサンプルを手に入れることができればさらに研究が進むと考え、それには隕石がサンプルとして最適なのではないかと考えた。

隕石からはこれまでの研究から太陽系や、生命の起源につながる研究が進められており今後さらなる解明が期待される。しかし現在の研究対象は地球に落ちてきたものである。そのため大気圏突入時による加熱や落下後の地球環境による風化などによって性質が変わってしまうことや、十分な大きさがないと突入時に焼失してしまうことが多い。そこで、私たちは月で隕石を採取することでこれらの問題を解決できると考えた。

月には大気などが存在しないため地球で起こった風化などによる変質が考えられないことから、地球よりも良質な隕石の採取が期待できる。また大気圏による消失がないため地球で今まで採取できなかった小さい隕石など新しいサンプルを採取できる他、隕石数も地球よりも多く、さらにクレーターが残っていることから探しやすいと考えられる。

近年、嫦娥5号が月からのサンプルリターンを成功させた事例や、失敗してしまったが宇宙ベンチャーアイスペースが月面探査を試みた事例などから、国や企業関係なく月面探査と開発の機運が高まってきているといえる。しかし安

全性などの問題からまだクレーター内にローバーが入って探査が行われたことはない。

そこで我々は安全にクレーター内を探査することのできるローバーを開発し、それを用いた探査を提案する。

2. 目的

本ミッションでは、主に以下二つの目的を設定する。

一つ目は、月面上クレーター内部のサンプルを採取、そしてリターンの達成である。隕石の成分分析は、太陽系の歴史や生命の起源などを研究する分野において大きな意味を持つ。しかしながら参考文献2によると、地球上でのサンプル採取は環境による劣化等の影響が出やすいとされている。また、地球から遠い小惑星でのサンプル採取は、コストも時間もかかる上に、ミッション失敗のリスクも大きく、これも困難を極める。そこで、それらのリスクが比較的小さい月でサンプル採取技術を確立することで、分野のさらなる発展に貢献することを目指す。

二つ目は、アルキメデスのスクリュウを用いた、新形態のローバーの提案である。月面での探査、特にクレーター内部の探査についてローバーにとって特に大きな問題の一つは、傾斜の大きい地形などによる滑落の危険である。ローバーの姿勢が大きく崩れ、あるいはその機体ごと地面に打ち付けられる可能性のある滑落は探査の計画に致命的な影響を与えるため、ローバーの姿勢制御の難しさは宇宙探査を難しくする要因の一つといえる。そこで、アルキメデスのスクリュウを用い

た設計をとることで、そのようなリスクを回避し、より効率的な探査を行うことを可能とすることを目指す。

3. ミッション概要

本ミッションは月のクレーター内部を探査するため移動距離がとても長いものになることが予想される。このため本ミッションでは親機と子機の2種類を用いて進行することとなる。親機は、主に月の上空から子機を投下すること、子機が探査している間月上空を周回すること、探査終了後タッチダウンを行い子機を回収し再び地球に送り届けること、の三つが主な役割となる。一方子機は図1の様な形状となり、実際にクレーター内部を走行し、サンプルを採取することが役割となる。

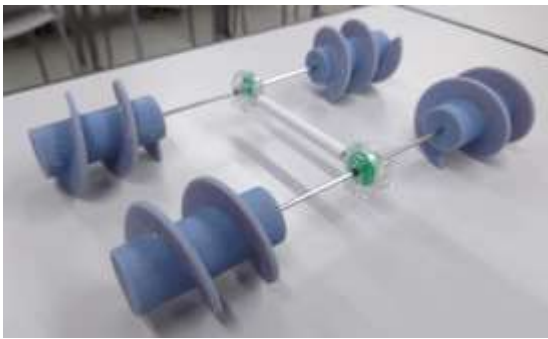


図1 スクリューの概形

以下に月上空に到着後のミッションの大きな流れを示す。

- ①親機が子機を月面のクレーター内に向かって投下する
- ②子機が逆噴射し、クレーター内に着陸する
- ③地中に潜る。
- ④サンプル採取地点まで地中を移動する。
- ⑤サンプルを粉碎または削り、採取する。
- ⑥④と⑤の工程を何回か繰り返す。
- ⑦子機が回収されるクレーターの外の地点まで、地中を移動する。
- ⑧親機が子機を回収する。

4. スクリューの性能評価と子機の詳細

4.1 スクリューの原理

今回使用するスクリューはアルキメディアン

スクリューを前後左右に合計4つ取り付けて砂を運ぶ力を利用して進んでいく。スクリューの向きは次の図2のように左右逆巻きになるように取り付け、設計を行う。これによって、左右のスクリューを逆回転に動作させると前後方向に機体が移動し、同じ方向に回転させると横方向に移動する。このため月面では回転方向を変更しながら進むこととなる。



図2 スクリューの向き

4.2 子機の形状

子機の形としては、図1のようなものを用いる。

図1のように動力としてタイヤの代わりにアルキメデスのスクリューを用いたローバーを用いる。これによって普通のタイヤを用いたローバーよりもレゴリスとの接触面積が増え、滑落しにくくすることが可能となる。またこのローバーを用いれば図3のように砂の中を潜って進行することが可能となる。これによりさらに滑落の危険性を抑えて安全に斜面を走行することが可能となる。

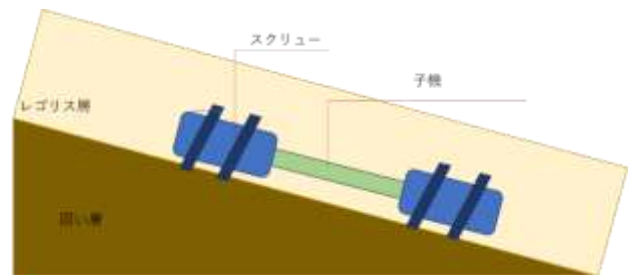


図3 砂の中の様子

さらに、図1のスクリューを図4の様な爪を出し入れすることができるように改良することで砂中に潜ることやサンプル採取が可能となる。

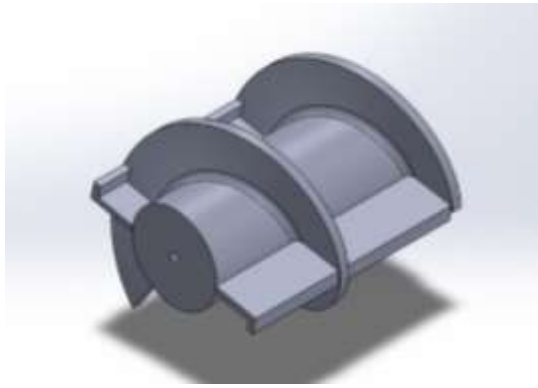


図4 爪を出したスクリュー

モーターや原子力電池などの機器は図5のようにスクリューの中に入れるか、スクリューとつなげるようにして設置する。このように省スペースを行うことでローバーが砂から受ける抵抗をなるべく小さくして、潜りやすく進みやすい形状とすることが可能となる。



図5 スクリューの概形

左右のスクリューをつなぐ部分は油圧シリンダを用いて左右のスクリューの距離を変更できるように設計する。この油圧シリンダはサンプルを削るときにも用いるため、相応の力が出るものを用いる必要がある。

一方速度は遅く効率が悪いことや、舗装された固い地面では進みにくくスクリューの消耗が激しいことなどデメリットとして挙げられる。このため地球上では現在流氷砕氷船ガリンコ号などで用いられており、過去にはロシアの戦車に用いられていたなどわずかに例があるが、現在動力としてはほとんど使用されていない。しかし月面上の未探査地域には効率よりも安全性の優先順位が上だと考えた。また月面には基本的にはレゴリスの層があるため地球と比べて進みやすいためこのようなローバーを選択した。

また、柔らかいレゴリスの層は30cmほどしかないため、スクリューや機体の高さは大きくて

も30cmにしなければならない。

スクリュー以外の子機に搭載する機器としてはカメラやGPSのような位置情報発信機、斜面の情報を得るためのジャイロスコップ、砂の中にもぐれているかどうかを確認するための荷重計などを考えている。

4.3 スクリューの性能評価

スクリューを用いたローバーの性能を確かめるために以下の様な実験を行った。

4.3.1 使用した機材

a 作成した図6の実験機 なお規格については図7の様に全長70mm, 高さ60mm, 軸の直径40mm, ピッチを15mmのものを用いた。

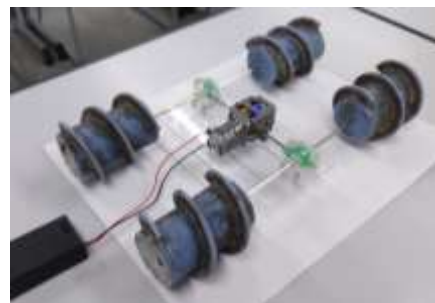


図6 実験機

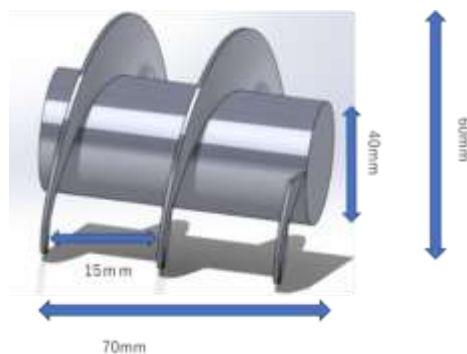


図7 スクリューの大きさ

b 図8の車輪型ローバー なお車輪の大きさはスクリューとほぼ同じ58mmのものを用いた。



図8 車輪型ローバー

c 豊浦砂

4.3.2 実験方法

実験 1 a ローバーを実際に作成し、走行可能であるかを豊浦砂の上や固い机の上を走行させて確かめた。また b のローバーと比較した。

実験 2 豊浦砂に下図 9 の様な角度をつけ砂の上で a と b を走行させ比較した。



図 9 実験 2 の様子

4.3.3 実験結果

結果 1

まず a のローバーを砂の上で走行させることに成功した。しかし推進力が小さく、モーターなどを載せているアクリル板と砂が接触した際に止まってしまうことがあった。

また、a のローバーは走行中に自然と砂に沈む様子が見られた。

また b との比較結果は次のようになった。

表 1 実験 1 によるローバー a と b の比較

	ローバー a	ローバー b
速度	0.67cm/s	8.6cm/s
凹凸がある時の速度差	ほぼない	大きい

結果 2

まず下った場合では表 2 のような結果が得られた。ただしローバー b の速度は走行距離が短く十分に測定できなかったため記載していない。このため静止のしやすさとしてモーターの回転を止めた後や機体を砂に設置した際の滑った距離も測定した。さらに傾斜を 45° 以上にすると、砂が自然に崩れてしまうため走行不可能となった。

表 2 実験 3.3 の下りの結果

角度	ローバー a	ローバー b
22°	1.1cm/s で走行可 滑りなし	止まると 1 から 2cm 滑る
26°	1.1cm/s で走行可 滑りなし	止まると 8cm 滑る 置くだけ でも 2cm 滑る
34°	1.8cm/s で走行可 ほぼ滑りなし	置くだけで 5cm 滑る

次に登りでは、 18° の坂ではどちらも進むことができなかった。 16° の坂では、b は進むことはできなかったが a は少しだけ進むことができた。この結果の進まなかった原因として b は車輪が空回りしてしまったためだったのに対し、a は砂が崩れて少なくなってしまい推進力を得られなくなってしまったためであった。

4.3.4 考察

結果 1 からスクリュウは車輪の代わりの推進力として用いることは可能であると考えられる。しかし速度が大幅に低下することからピッチの広さやスクリュウの長さなどを変更してさらに推進力を得やすい形にすることが求められる。

結果 2 から a のローバーは坂道を下る際には滑りにくいことから b に比べて安全性がより確保できたと考えられる。また登りの際にも a のローバーでは砂が崩れずにスクリュウの周りに十分あれば上ることができることが分かった。このためスクリュウの形を改善することや砂の中を進むことができれば登りであっても十分走行可能と考えられる。

5 その他のミッション詳細

5.1 着地方法と探査ルート

時間短縮のために子機はクレーターの中心付近に着地し、サンプルを回収しながらクレーター外に向けて移動するルートをとる。クレーターの外の平坦な場所に到着したら、親機が月面に一時着陸し、子機を回収し、再び月上空へ離陸し、地球を目指すというルートをとる。

着陸方法は OMOTENASHI 衛星のサイズなどを参考にした。以下の図 10 のように着脱式の逆噴射用スラスターを取り付け、子機が親機から離

れた後これを用いながら減速して着地、その後スラスタを外すというような流れとなる。

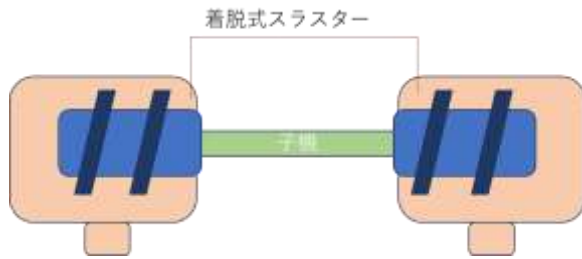


図 10 着陸時の模式図

5.2 地中にもぐる方法

クレーターの斜面を移動する際には滑落防止やレゴリスとの接触面積を増やすために子機は砂の中にもぐりながら移動することが望ましい。このため着陸後など機体が砂の上にある時には砂のなかにもぐる必要がある。

この方法として、実験の結果 1 で見られたスクリューを動かす際に自然と機体が沈んでいく力を利用する。この仕組みとしては、図 11 のようにスクリューを動かすと機体の下や周りの砂を後ろに運び、その反力を使って進む。このため機体の下の砂がなくなるため、沈んでいく。実験ではアクリル板に接触し、それ以上潜らなかったが、図 1 のようにアクリル板をなくした機体にする事で自然と潜ることができる機体となる。

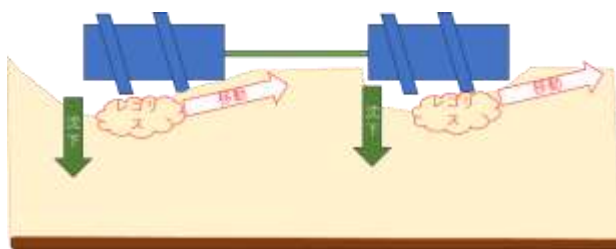


図 11 機体が沈む仕組み

5.3 サンプル採取方法

基本的なサンプル採取方法は次の図 12 のように出し入れ可能なスクリューの爪にひっかけて機体内に取り込む。ただしサンプルが大きく、機体内に入れることができない場合はサンプルを砕くまたは削り取る必要がある。

砕く方法は油圧シリンダを用い、左右のスク

リューの距離を変え、サンプルを挟み込む。その後、砕氷船や粉碎機などと同じようにスクリューを回転させながら粉碎や削り取りを行う。

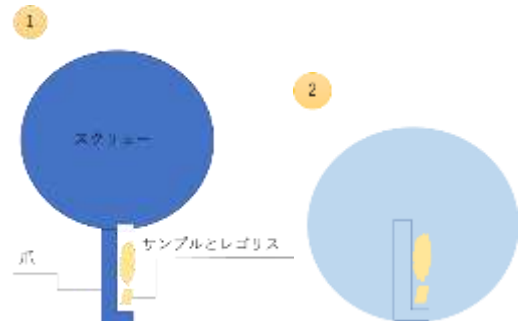


図 12 サンプル採取方法

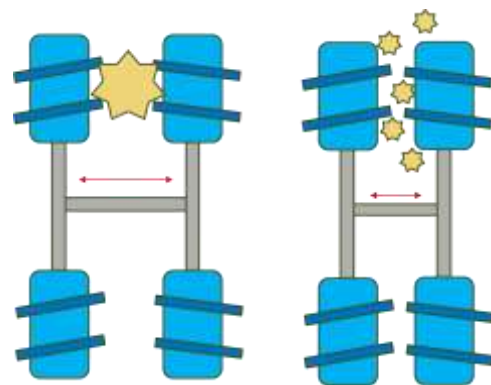


図 13 サンプルの砕き方

5.4 位置と姿勢情報

子機内にジャイロセンサーを複数搭載することで、ローバーの姿勢感知を行う。また速度なども計測し、自分の位置を予測しながら、ミッションを行っていく。

また、機体の姿勢や位置などの情報について母機と子機の間で通信を行う必要があるが、本ミッションでは子機がレゴリス下に潜っている状態が続くことから、レゴリスを隔てた安全な通信を確立する必要がある。レゴリスに鉄成分が含まれていることから、これによる電波の減衰は大きいと予想されるため、それをふまえた技術が要求される。これは 5.7 にて後述する。

具体的な親機と子機間での連携として、まずは予測された子機の位置にずれがないかの確認と修正が必要となる。また子機が地球と連絡するための中継器として親機を用いることも考えている。サンプル採取後、親機も月に着陸し、子機を回収する。

5.5 電力の確保と耐寒、耐熱方法

本ミッションで用いる子機の電力を得る方法としては、原子力電池をメイン動力として用いることを考えている。この理由として子機は砂の中を潜って移動することが多くなるが、この時に太陽光が期待できないためである。

また、本ミッションでは子機の移動距離が長く、移動速度自体も遅い機体を用いるため、長期間の探査が必要になることから気温の低い夜を超えなければならない。このため激しい寒暖差を乗り越えるための方法が必要となる。

まず初めに耐寒方法のために原子力電池による発熱を利用する。機体の温度を上昇させることで夜を超えられるようにする。

次にレゴリスの断熱性能も用いることができる。参考文献4と5によるとレゴリスには月面基地の断熱材に使用する計画もあるほど高い断熱性が確認されている。本ミッションは砂の中を移動するためこの恩恵を大きく受けることができる。このため夜間でも保温しやすく、昼間でも断熱性や直射日光を避けられることから機体温度の上昇を抑えることができると考えられる。

次にほかのミッションでも使われている保温フィルムも用いる。ここで仮に機体の温度が上がりすぎた時の対応もできるようにする必要があるが、月極域探査ミッション LUPEX で用いられるローバーのように保温フィルムを開閉可能にすることは、砂が入り込むことで故障や破損のリスクが高い。そのため保温フィルムには放射率可変ラジエータ SRD もしくは参考文献6と7に記載のあった温度変化によって熱の伝導性をスイッチする材料を用いる。

5.6 サンプルリターンする理由

本ミッションは地球へのサンプルリターンを目指すミッションとなっている。この理由として、一つ目は子機に解析装置を積むことができないためである。前述したとおり子機はなるべく小さくしたいことや電力に制限があることなどから最小限の性能しかもつことができない。

このため子機で解析を行うよりも設備の整った地球で解析するほうが望ましい。

2つめの理由としては、親機で子機を回収したのちに解析する方法も現実性が低いためである。本ミッションで得られるサンプルの大きさは非常に小さく粒の数は多いと考えられる。また隕石由来のものと、もともと月にあったレゴリスの2種類が混ざってしまっていることも予想できる。このため解析には高い精度と多くの時間が要求されると考えられ、これを親機で実現させるのは難しい。

この2つの理由から地球に戻ってくることによるデメリットよりもメリットのほうが大きいと考えサンプルリターンを行う。

5.7 懸念点、改善点、前提となる技術

本ミッションでは、主に五つの改善点や前提となる技術がある。

一つ目は子機の改善である。実験4.3の結果1からローバーaでは速度が遅かった。このためスクリュウの形状をより効率的に移動できるようにピッチや大きさ、羽根の角度などの改良が必要になる。また子機の形状においても移動する際の抵抗を減らすために流線形にするなどの工夫が必要となる。

二つ目は、本機に適した掘削技術である。具体的には、本ローバーが回収できる程度の小さなサイズまで対象となる隕石の岩を砕く、あるいは削る技術となる。今回方法を提案できたが、今後実験と改良を重ねる必要がある。

三つ目は、機体の温度調整技術である。5.5で述べたものに類する可変の熱伝導調整が可能な材料等を用いることが考えられるが、これについてはSRDなどの研究開発が必要である。

四つ目は、レゴリスを隔てた子機と母機の間における安定した通信技術である。子機はレゴリス内に潜って移動することが多く、その間にも通信を行う必要があることから、レゴリスを隔てたとしても安全性の高い通信が確立できるような技術を確立しておく必要がある。この際、レゴリスに含まれる鉄成分によって電波が

減衰する点や、それによる必要電力が増加する点などが考慮すべき事項である。

五つ目に、防砂技術である。子機は砂内での移動を基本的に想定しているため、機体内に砂が入り込んで機器が故障してしまうリスクが生じてしまう。そこでこのような事態を避けるため、機体の各所に防砂処理を入念に施すことが必須であり、このための技術を事前に確立しておく必要がある。

6. ミッションのその後

本ミッションで用いたローバーの最も大きな特徴は、スクリュウ機構を用いていたことでローバーの運用に柔軟性が生まれたという点にある。これは従来のローバーにはない移動方法であり、ここに新たな開発の余地があると考えられる。スクリュウ機構により今後可能となると考えられる運用として、以下が例として挙げられる。

- 1) 地面に対して穴を掘り進めるという動作が可能となる。
- 2) スクリューによる水中移動が可能となる。

従来のローバーでは探査場所の環境に応じてそれに適した機種を用意しなければならなかったのに対し、スクリュウ機構を用いたローバーは本機1つで多様な移動手段をとることができるため、汎用性が高いと言える。またこれにより探査の幅が拡張されることで、より多様な調査が可能となることも大きなメリットの一つである。

7. 納言

本ミッションではいまだ人類が探査したことがなく、重要なサンプルがあると考えられる月のクレーターへの探査方法を提案した。本ミッションをきっかけにして太陽系や生命に関する研究が進むことやスクリュウを用いることで探査可能な領域が広がることを期待している。

参考文献

1. Ernie Wright. “The Moon's Clavius Crater” .

NASA. 2020年10月26日更新.

<https://svs.gsfc.nasa.gov/4868> , (参照 : 2023/07/01)

2. Laura E. Jenkins 他. “Winchcombe: An example of rapid terrestrial alteration of a CM chondrite”. Wiley Online Library. 2020年6月13日更新.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/maps.13949> , (参照 : 2023/07/01)
3. 高山鉄章 播田安弘. “流水観光船ガリニコ号2”. 日本舶用機関学会誌. 1998年. 第33巻, 8号, p584-p590
4. Rachel Kaufman. “月の砂の謎、ナノ粒子モデルで解明?”. NATIONAL GEOGRAPHIC. 2012年6月22日更新.
<https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/6277/> , (参照 : 2023/07/01)
5. “「嫦娥4号」の最新成果 月の土壌が月面基地の断熱材に使用可能”. 科学技術振興機構. 2022年9月8日更新.
https://spc.jst.go.jp/news/220902/topic_4_03.html , (参照 : 2023/07/01)
6. Nobuaki Terakado 他. “Dynamic control of heat flow using a spin-chain ladder cuprate film and an ionic liquid”. Scientific reports .2020年8月3日更新
<https://www.eng.tohoku.ac.jp/news/news7/department-id,1682.html> , (参照 : 2023/07/01)
7. Yusaku Nishimura 他. “Electronic and Lattice Thermal Conductivity Switching by 3D-2D Crystal Structure Transition in Nonequilibrium (Pb_{1-x}Sn_x)Se”. Wiley Online Library. 2022年3月25日更新.
<https://www.titech.ac.jp/news/2022/063782> , (参照 : 2023/07/01)
8. 菊池 隼仁. “世界最小の月着陸機 OMOTENASHI ” . 宇宙科学研究所. 2021 .
https://www.isas.jaxa.jp/feature/eq_om/eq_om_04.html , (参照 : 2023/9/28)