

TTT-月地中探査機支援システム-

芝浦工業大学 システム理工学部 機械制御システム学科

学部 2 年 上野佑理, 濱田阿依

学部 1 年 湯浅日和

芝浦工業大学 システム理工学部 生命科学科

学部 2 年 諸岡雅也

指導教員 飯塚浩二郎

1. 背景

現在の月の地中部にはいまだ解明されていない謎が多くある。2017年,月周回衛星 SELENE(かぐや)(図 1)からのデータを分析することにより,月の火山地域に数十kmにも及ぶ巨大な地下空洞が存在することがわかった[1]。また,月は地球に近い成り立ちを持ち,大気や地殻変動がないため,その進化・形成の痕跡が残っている。地球や太陽系の誕生と進化を解明するために月は重要な探査対象であるといえる。特に,月の内部を調査することでこれらの謎の解明に近づくと考えられる。

しかし,月表面に存在するレゴリスは最低温度 -170°C ,最高温度 110°C ,更には放射線が地球上の約 300 倍といった環境にさらされている[2]。そのため,表面のレゴリスは月地中部の地質調査に適しているとは言えない。月地中部の地質を調査するためには,地中にロボットを送り込む必要があると考えた。

現在,地中探査ロボットは多く開発されているが,レゴリスを掘削すること,および地中での活動において課題が多くある。例えば,レゴリスの性質上,月表面から 10~20 cm 以深において急激に密度が上昇し,レゴリスが固くなるため,通常のドリルでは掘り続けることが困難である。そのため,開発されているロボットの中で実際に運用されているものは多くはない。



Fig.1 SELENE [1]

2. 目的

本グループは月地中内部を探査するロボットを支援するための掘削システムを考案する。このシステムが掘削することで,月地中への道を確保し,探査ロボットを地中に送り込むことが可能になる。また,探査ロボットに掘削機能を搭載する必要がなくなり,調査機能に特化させられる(図 2)。

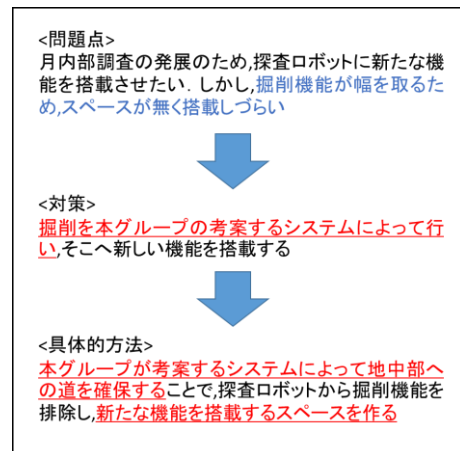


Fig.2 Approach of this study

3. TTT 月地中探査ロボット支援システム案

本グループは地中への道を確保することで、地中探査ロボットを支援するという独創的なシステムを考案する。

3.1. 掘削機構について

本グループは月地中を掘削するにあたり、井戸を掘る際に利用される道具「スイコ」に着目した。「スイコ」とは、細長いパイプの先端内に逆止弁を取り付けたものである。地中にパイプを差し込むと、逆止弁が開き、内部に泥水が入り込む。パイプを引き抜く際に逆止弁が泥水の重みで閉じるため、地中から泥水を取り除ける仕組みとなっている(図 3)。

この仕組みを利用し、月面を掘削する機構を考えた。また、レゴリスの中にただの筒を潜り込ませるのは困難なので、スイコの筒の外側に右ねじの凹凸をつけて、モータで回転させることで地中に潜り込ませるとする。

次にこの掘削機構のシーケンスについて述べる。まず、モータで回転させたスイコを地中に差し込みスイコ内にレゴリスを入れる。モータを逆回転させて、スイコを引き上げると、逆止弁によりレゴリスが流出することなく取り除ける(図 4)。図 5 の点 A の部分をスライダークランク機構ごと回転させて、スイコを外側に用意した壁にあてる。そして壁にあたった際に、節 c を回転させると節 a がスイコを押し、スイコが壁を支点として傾き、スイコ上部の穴からレゴリスが流れ出る(図 6)。

このスイコの詳しい形状については、第 4 章で述べる。

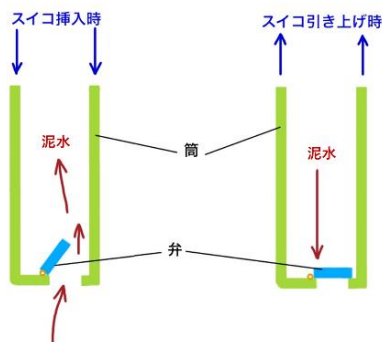


Fig.3 Function of Suiko [3]

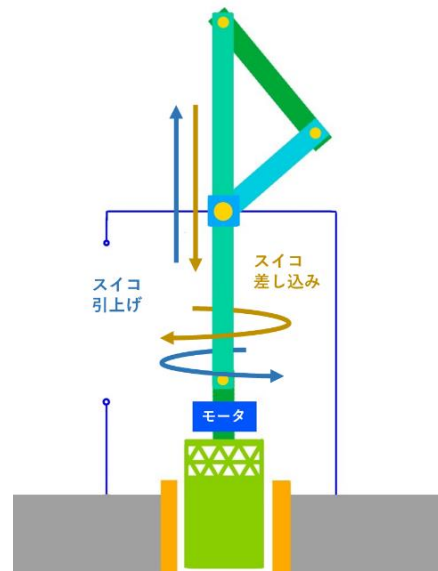


Fig.4 Method of digging a regolith①

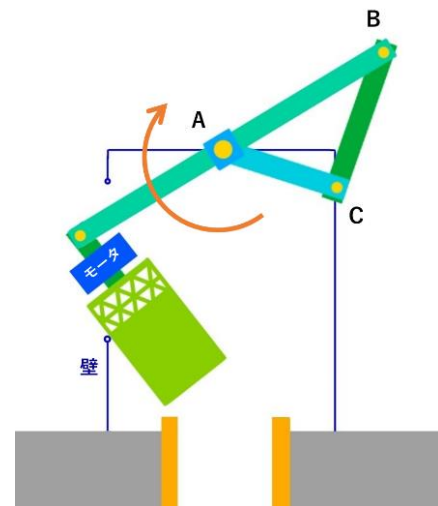


Fig.5 Method of digging a regolith②

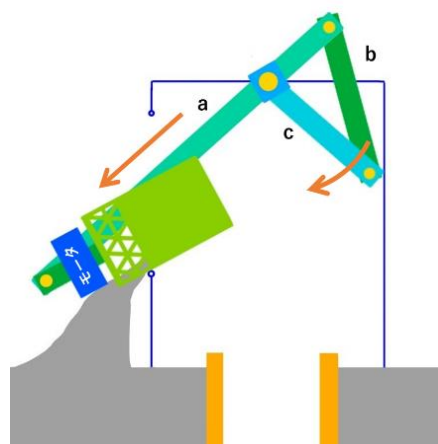


Fig.6 Method of digging a regolith③

3.2 掘削を支援する崩壊防止システムについて

本来「スイコ」は井戸を掘るため、主に泥水で使用される。また、一般的なボーリング調査においても、循環水を地中に埋めたロッドに流し、泥水とともに土を掘り出す。掘削時の孔壁の安定や、崩壊防止のために水は欠かせない[4]。しかし月面において十分な水を用意することはできない。また宇宙に大量の液体を持って行くことは重量面などから不可能である。

本グループはスイコを使用する際に、掘削した穴の崩壊を防ぐためにスイコと連動する「壁」についても考案した。

以下に、この壁を作る機構について述べる。壁を作るシステムが大規模であると、月への運搬、および月面上での運用において実用的ではない。そのため本グループは機構自体をコンパクトにすることを重点的に考え、壁の機構を考案した。

本グループが機構のモデルとしたものは折りたたみ式のポップコーン容器である。そこから取り入れた機構とは、初めは一層分の高さしか無いが、最長まで伸ばすと元の何倍もの高さになるという点である（図7）。

崩壊防止システムは最外の壁をモータにより回転させ、内側の壁から地面に入っていく。最外の壁は図8が用いられている。以降内側の壁には図9が用いられ、側面上部に突起があり、内側には溝が存在する。これらの突起と溝がはまることで壁が連動し、最外の壁を回転させることですべての壁が回転する。最外の壁を回転させると、図10のようにまず一番内側の壁が土に潜り込んでいく。その後壁が溝の一番下まで下がると、突起が溝にぶつかり、引っ張られ、その外側の壁が下がって行く。またこの時、引っ張られるまで外側の壁が落ちないように内壁の下部に可動式の突起が存在している。これに加え、溝に土が入り、壁が伸長しなくなることを防ぐために、溝に上下に可動式のフタを設置した。突起が下がることで可動式のフタが押されて開いていく（図11）。

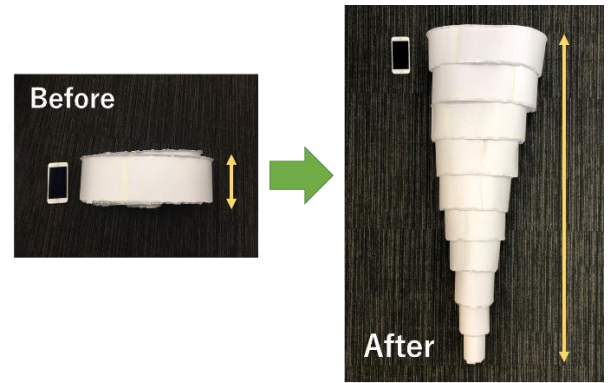


Fig.7 Characteristics of wall mechanism

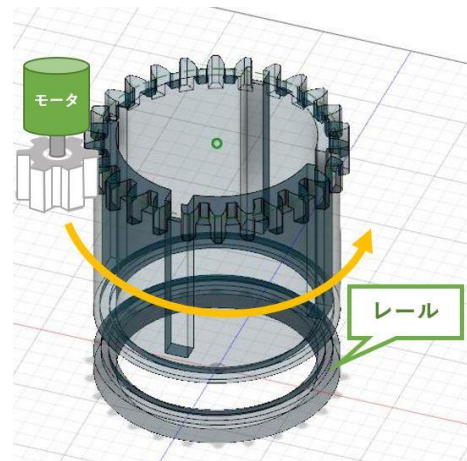


Fig.8 The first wall

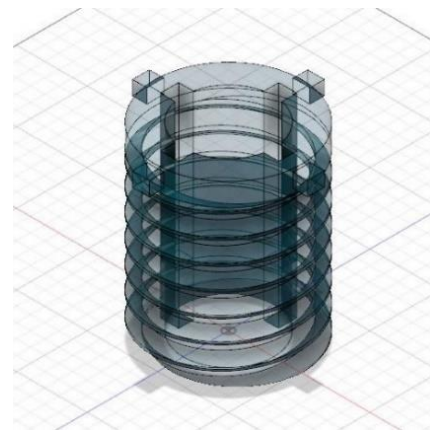


Fig.9 The second wall and following ones

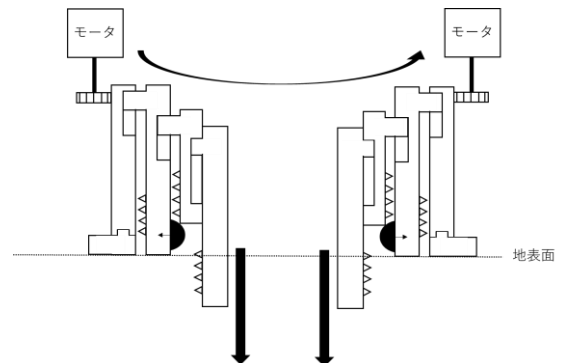


Fig.10 Function of the wall

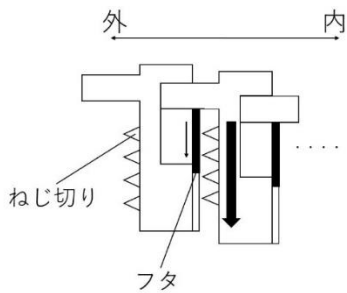


Fig.11 Function of the cover

4. 実験

本グループは掘削機構と崩壊防止システムの形状を決定するために、様々な実験を行った。

4.1 スイコの弁の形状についての実験

4.1.1 実験目的

井戸で一般的に用いられるスイコの弁は円状であるが、月面のレゴリスにおいてもその形状の弁が機能するかを確認する必要がある。今回珪砂5号を用い、月面を模擬した環境を用意した。円柱の容器を用意し、底面を円状に切り、プラスチックの弁を取り付けた。弁が完全に砂に埋まり、かつ数cm潜ることを考え、7cm砂に潜らせ静かに引き上げる。引き上げた際に弁の隙間から漏れる砂がなくなった後、残った砂の量を計測する。

4.1.2 実験結果

円柱の容器の体積から、理論上265gの砂が採取できるはずである。しかし、実際に実験を行ったところ、平均112gしか採取できなかった。これは弁が大きく砂が入りやすいが、その分弁が締めりにくく、砂が漏れやすいのではないかと考えられる。

4.1.3 改善案の検討

そこで、本グループはスイコの弁の面積を小さくすることで、引き上げるときに流れ落ちる量が少なくなると考えた。スイコの弁の形状を大幅に変更することなく、面積を小さくするために円状だったスイコの弁を半円状にした(図12)。そして、同じ条件下で実験を行った。

実験の結果、半円の際の砂の量は平均211gとなり、半円状の弁の方が採取できる砂の量が多いということがわかる(図13)。

このような結果になった理由として、半円状の弁の場合、全円の弁の場合に比べてスイコ内に砂が入りにくいですが、弁は締めやすいので、最終的に採取できる砂の量が多かったと考えられる。

したがって、弁の形状は半円状がふさわしいといえる。

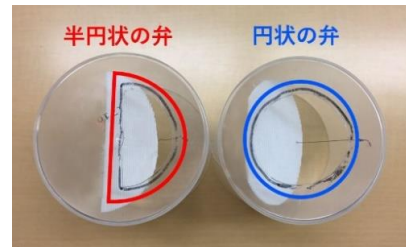


Fig.12 Valve shape of Suiko

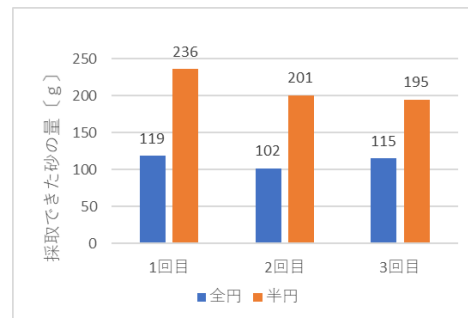


Fig.13 Amount of sand (shape)

4.2 スイコの弁の角度についての実験

4.2.1 実験目的

スイコを用いてより効率よく掘削させるため、弁の角度について検討を行った。まず弁が90°以上に開いている状態であると、弁が閉まらず砂が採取出来ないため、90°未満に設定する必要がある。ただ、前節の実験より、砂が入りやすいから良いというわけではない。したがって、本グループは45°であるとバランスがとれていて良いのではないかと考え、その前後の30°と60°と比較する。直径が等しい円柱の模型を用意し、ワイヤロープを用いて、それぞれの弁を3つの角度に設定した(図14)。弁が完全に砂に埋まり、かつ数cm潜ることを考え、掘削目標深度を7cmと設定し実験を行った。

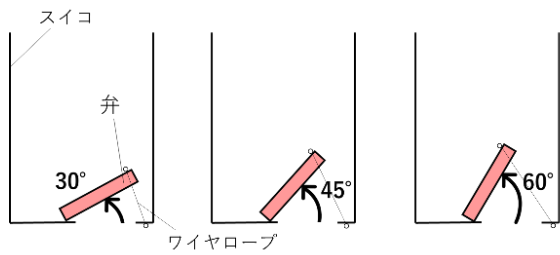


Fig.14 Valve angle

4.2.2 実験結果

30° の場合他2つに比べ砂の採取できる量に明確な差があった (図 15)。

45° と 60° の採取できた砂の量に明確な差が見られなかったため、掘削する速度について再検討を行った。

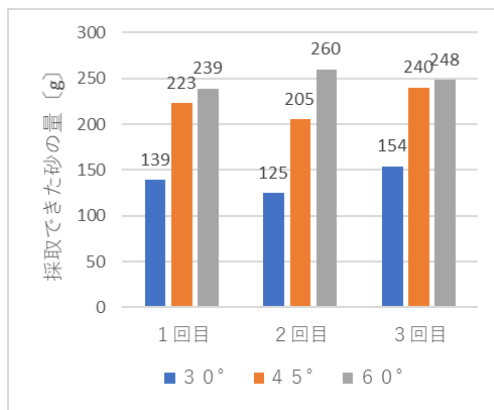


Fig.15 Amount of sand (angle)

4.2.3 再検討, 結果

上記と同条件で弁の角度が 45° と 60° のときの掘削に要する時間を計測した。結果、60° の方が掘削に要する時間が少ないことがわかる (図 16)。

したがって、スイコの弁の角度として 60° を採用する。

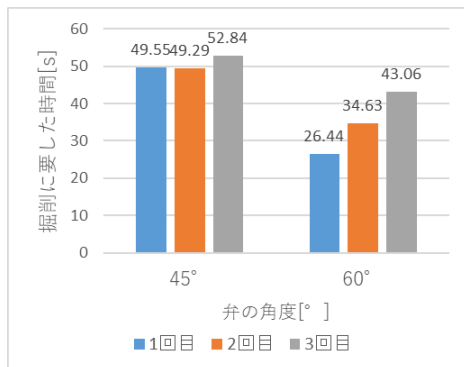


Fig.16 Drilling speed

4.3 スイコ底面の突起についての実験

4.3.1 実験目的

スイコがレゴリス層に食い込んで内部に潜りやすくするために、底面に突起をつける。この突起の形状を検討した。抵抗が少ないと考えられる針型、一方方向に掘りやすそうな直角三角形型、両方向に掘りやすそうな正三角形型の3種類を比べることにした (図 17)。突起をスイコの底に付け、それぞれ同じ力で回転させ、突起を含まないスイコから上 9 cm につけた目印まで潜らせる。目印にたどり着くまでにかかった回転数、潜りやすさを比較することで評価する。

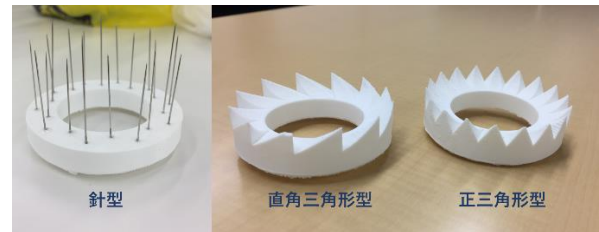


Fig.17 The protrusion at the bottom of Suiko (Three type)

4.3.2 実験結果

針型の場合、1 周目から針が折れる音があり、6 周目あたりで実験を中断した。刺さっていた針の半分が折れてしまった (図 18)。針そのものが折れていたため、折れた原因は針型を作る際の接着の弱さではないと判断した。したがって、針にかかる圧力が大きいため実用が難しいといえる。

直角三角形型の場合と、正三角形型の場合では、回転数にあまり差がなかったが、掘削時に砂から受ける圧力が正三角形型に比べ直角三角形型の方が高かったため、底面の突起にはより潜りやすい正三角形型を使用することにした。

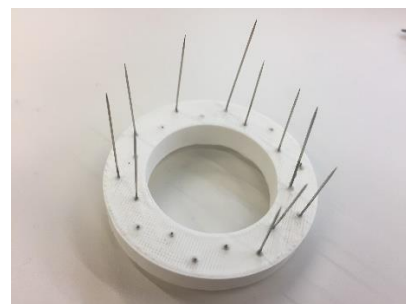


Fig.18 Broken protrusions

4.4. スイコ全体について

スイコの設計には主に 3DCAD (Fusion360) を用いた。スイコの外側に右ねじを切る際に、ねじの表面積が大きい方が、砂を押し上げる力が大きく働くため、砂の中に潜りやすいと考え、ピッチの大きいメートル台形ねじを選択した。また、砂を排出する穴の部分は強度の高い正三角形の網目状にし、組み立てやすいように半分に分割した。

以上より、設計して組み立てたスイコの断面図が図 19, その CAD データを用いて 3D プリンタで印刷し、組み立てたものが図 20 である。

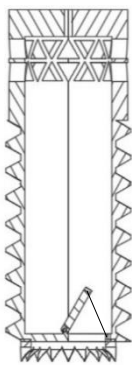


Fig.19 Cross section of Suiko

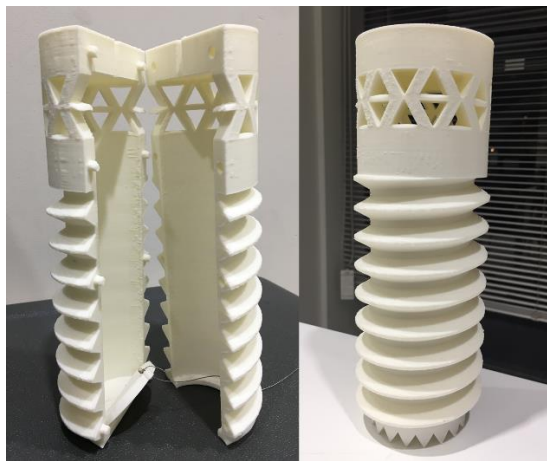


Fig.20 Suiko

4.5 崩壊防止システムについて

本グループは崩壊防止システムの具体的な設置方法について、挙動の確認のために簡単に 3 段の崩落防止システムを作成し検討した。作成上の都合で 2/5 スケールになってしまったが、実験上は問題ないと本グループは判断した。

4.5.1 モータについて

まず、崩壊防止システムは回転させてレゴリスに潜らせるので、そのためのモータの設置について検討した。モータが 1 個であると回転に偏りが生じてしまうのではないかと考えモータを 2 個使用することにした (図 21)。

また、安定化電源を 11V に設定し、歯車をつけた状態で、モータのトルクを測定したところ、0.531Nm であった。この条件下で地中に 12cm 潜らせた壁が稼働した。すなわち、重力が 1/6 である月面上では、さらに潜ることができるのではないかと考えられる。

加えて、壁をすべて地上に置いた状態でモータを稼働させたところ、潜らせるためには一番内側の壁に荷重を加える必要があった。



Fig.21 Placement of two motors and walls

5. 結言

月面環境下において地中探査ロボットを支援するために、地中への道を確保するシステムを考案した。これを利用することで、探査ロボットに掘削機能を搭載する必要がなくなり、その分調査機能に特化したロボットやその他の機能を搭載したロボットを地中へと送り込むことが可能になるというものである。そして、本グループは様々な実験を行い、それをもとに掘削機構の設計と、掘った穴を補強する壁の機構を考案した。

今後の課題としては、崩壊防止システムについて、壁の寸法が探査ロボットの寸法に影響してしまうため、より最適な寸法を検討する必要がある。また、壁を低加重でスムーズにレゴリスに潜らせ

るように、機構をさらに検討する必要があると考えられる。加えて、現在のシステムでは、月面上で組み立てる際に人もしくはロボットの手が必要である。これを全自動で設置できるよう検討したい。

近年、月の地中で様々な発見がされた。本グループのシステムを利用することで、さらなる発見が得られ、月の謎の解明につながることを願う。

6. 参考文献

- [1]. JAXA ホームページ
http://www.jaxa.jp/projects/sat/selene/index_j.html (2018年6月11日閲覧)
- [2]. JAXA ホームページ
http://www.jaxa.jp/countdown/f13/special/moon_j.html (2018年6月24日閲覧)
- [3]. 上総掘りのページ
http://hw001.spaaqs.ne.jp/kutsuzawas/kutsuzawas/kazusabori_1.html (2018年6月18日閲覧)
- [4]. ニッケンキソホームページ 標準貫入試験
http://www.nikken-kiso.co.jp/geo_03.html
(2018年6月18日閲覧)