

月・惑星掘削探査ロボットのプロトタイプ開発

Development of a Robot Prototype for Excavation and Exploration of the Moon and Planet

○ Noriyuki Mizuno, Kazuya Yoshida

○ 水野 昇幸, 吉田 和哉

東北大学

Tohoku University

キーワード : 掘削(Excavation), モグラ(Mole), 土と機械の相互作用(Terramechanics), レゴリス(Regolith)

連絡先 : 〒980-8579宮城県仙台市青葉区青葉荒巻字01 東北大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻
吉田研究室, Tel.:(022)217-6993, E-mail:mizuno@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

アポロ計画において, 月面のレゴリス層の掘削サンプリングデータは, 30年たった今でも重要な科学的, 工学的データとみなされている. しかし, この計画における掘削作業は, 人力である等の拘束条件から, まだ不十分な部分も多い. 無人で掘削作業を続け, 地中奥深くまで探査の可能な自律ロボットなら, さらに重要なデータを収集できると期待される.

また, 現在日本では, 2004年に打ち上げ予定の「SELENE」計画, 検討中だが, 軟着陸を主な目的とした「SELENE-B」ミッションと大型月面探査プロジェクトが計画されている.

本論文では, この軟着陸後のミッション候補として, 月面掘削ロボットを用いての月面上及び月内部の直接探査を提案し, 当研究室で開発中の月面掘削ロボットプロトタイプ

「MOGURA2001」の紹介を行う.

2. 月面掘削

科学ミッションとして月面掘削を行うことによる利点を下に述べる.

- 地下の情報及び, 垂直方向の変化に係わる情報が得られる.
- 温度などの安定な地下に任意の深さでセンサーを設置することができる.

地下の情報を得ることにより, レゴリス層の組成からクレーターの生成順序を知ることや太陽風不加工元素・宇宙線の影響の深さ方向への分布を知ることができる. 後者は, アポロ計画によるものと異なる場所, 地層でのデータと比較できるという点で非常に価値のあるものである. また, 月の極域には氷の存在が

示唆されているが、実際には氷はレゴリス中数十cm程度の部分に存在していると考えられており、レゴリスを掘削することによって、月の氷を直接探査することが可能となる。

センサーを地下に配置することで、安定な状態で適切な深さに地震計を配置し、精細な地下状態を知ること役立つ。また、レゴリスは熱伝導率が低いので地下においては温度が一定に保たれていると考えられる。このことから、地下に熱流量計を置くことにより熱源の推定を行うことができる。

本研究では、月・惑星掘削探査のためのロボットの開発を目的とし、サンプル採集及び調査、月面地盤に適した無人の自律的な掘削技術の取得を目指す。

3. MOGURA2001の概要

Fig. 1にMOGURA2001の概観を記す。

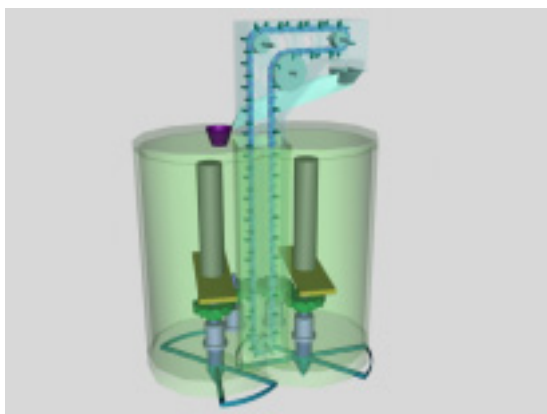


Fig. 1 MOGURA2001の概観

MOGURA2001は、大きく分けて掘削部と掘削で生じる切り屑を輸送する部分の2つからなる。掘削部は、その下部に取り付けられた切刃を用いて鉛直下方に掘削を行う。輸送部は掘削部に収納され、生じた掘削屑をコンベアによって上方に運ぶ役割を担う。ロボットの掘削推進力は重力によるものとし、前進力を高

めるためにロボット内部に振動器(バイブレータ)を持つ可能性も検討し、拡張性の高い内部に余裕のある構造とする。なお、このプロトタイプ段階では、あえて小型化は追求せず、強度やメンテナンス性を重視した。

3.1 掘削部の概要

Fig. 2に掘削部の全体図を記す。



Fig. 2 掘削部の全体図

掘削の際に切刃を用いる場合、その回転反力の保持という大きな問題がある。切刃が回転する際に、地面の反力により切刃が固定されて本体部が回転するというものである。過去に製作したシステムにおいては、掘削体を上部と下部に分け、下部掘削体の先端に切刃を設けそれを回転させるために、上部で坑道の内側を外側に強く押すことで掘削部本体の保持を試みた。しかし、坑道内部がせん断力により滑り出す、坑道の直径が広がるなどの問題により十分な反力を維持できなかった。

ここで、本論文で紹介するロボットでは、地下鉄工事で用いられるシールドマシンを2台横に並べて掘削を行う方法(ドット工法と呼ばれる)をヒントに、2つの切刃を同期して逆回転させることで反力をキャンセルするアイデアを用いる。切刃には歯車を用い、機構的に一

定の位相角を保ったまま逆方向に回転し，回転の際に干渉しない形状とする．なお，切削切刃については，「スポーク型」(Fig. 3参照)と「小刀型」(Fig. 4参照)と名付ける2つのタイプを思索する．異なる切刃の特性を検討するため，切刃部分は着脱・交換の容易な構造とする．

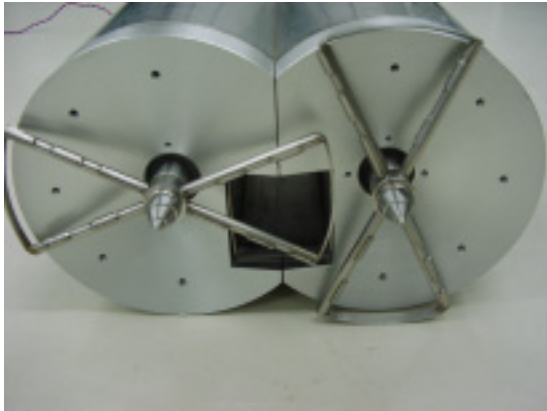


Fig. 3 スポーク型切刃



Fig. 4 小刀型切刃

ロボットの本体の断面は，2つの回転切刃がスweepする領域からはみ出さないように製作する．また，コンベアの取り付け用として，ロボットの中心を貫通するように，コンベア取り付け用の空間(50mm×50mm)を確保する．ロボット本体内に，回転切刃用のモータを内蔵する．必要に応じて振動器を内蔵し，

Table 1 掘削部の仕様

外形状	全高	300mm
	断面形状	直径160mmの2つの円を中心距離110cmに配置
	最大幅	270mm
	最小幅	160mm
自重	8.3kg	
駆動モータ (2個用いる)	マクソン社DCモータRE25	
	定格	18[V], 20[W]
	トルク定数	16.1[mNm/A]
	停動トルク	218[mNm]
	最大連続トルク	24.2[mNm]
	公称電圧時最大出力	55.6[W]
	減速ギア	1181:1

掘削推進力を高める．

駆動モータとしては，掘削抵抗の大きさを考慮して，20Wのモータを2個使用する．このモータは，切刃の回転軸に直結させる．なお，掘削速度は必要としないので，トルク重視の減速ギアを選択する．

以上のコンセプトに従い，Table. 1に掘削部の仕様を示す．

3.2 輸送部の概要

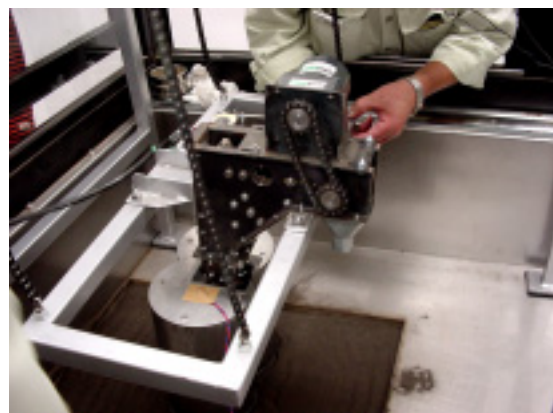


Fig. 5 輸送部の概観

Fig. 5に輸送部の全体図を示す。

掘削部が掘削作業を続ける場合、掘削面に生じる「掘削屑」が掘削面に残留し、掘削部が潜入する空間を確保できないという問題が存在する。また、掘削部の側方に掘削屑を押し固めながら進もうとする案は、月面上のレゴリスが非常に高い相対密度(90%以上)を持つという理由により困難が予想される。そのため、掘削屑を掘削孔の上方まで移送し、排除することが掘削システムに求められる。

ここで、本モグラ型掘削ロボットシステムでは、掘削屑を積極的に捕獲し、地表面に輸送、排除するシステムを「輸送部」として付加する。このシステムには、掘削屑を確実に捕獲、上部まで移送をし、掘削孔の外側でリリースするという機能を要求する。

このロボットシステムには、バケットタイプの移送システムを採用する。これは、密閉されたケースの内部に一定の間隔でバケットを取り付けたチェーンを通してあり、このバケットで掘削屑を上方まで移送するものである。

掘削器の仕様や求められる要求を考え、次のようなコンセプトを定める。

- 基本構造は、垂直水平一体型のチェーン式バケットコンベアとする。
- 小型軽量である。
- 搬送量は少量でも掘削量を上回るものとする。
- 搬送能力はバケットの取り付けピッチとバケットの送り速度で調節する。

この中で、小型軽量化の部分に関しては、今回のモデルに関しては機能と性能を確認し、一般市場で調達できるパーツを利用し、低コスト、短期間で製作するという方を重視した。こ

Table 2 輸送部の仕様

材質	バケット	SUS 304-2B
	その他	SS
主チェーン	JISローラーチェーン予備 番号 35(ピッチ 9.525mm)	
バケット容量	0.5cc/1ヶ	
バケット取り付けピッチ	47.6mm(5ピッチ) × 2(左右)	
搬送能力	約67cc/min	
駆動モータ	オリエンタルモータ製 インダクションモータ 形式:41K25GN-A/4GN50K 単相25W Red:1/50	
自重	約8.8kg	
付属品	実験用掘削機及び コンベヤ吊り下げ装置	

こで特に重視することは、搬送速度を適切に調整し、掘削した屑を確実に運ぶことである。

このコンセプトを基に、Table. 2に輸送部の仕様を示す。なお、この輸送部の設計、製作に際しては、粉体や流体の移送に関して経験と実績を持つエステック株式会社の全面的な協力を得た。

4. 実験

今回製作した「MOGURA2001」の掘削性能を評価するため、宇宙開発事業団筑波宇宙センター月利用研究センター内の実験室において掘削実験を行った。掘削の土壌には、月レゴリス・シュミラントを用いた。

この実験は、掘削部と輸送部の2つを結合し、全体をFig. 6に示すウェイトコントローラによって吊り下げた状態で行った。

また、実験器具全体のイメージをFig. 7に記す。

このウェイトコントローラは、輸送部上部からチェーンを伸ばし、自由滑車を介してカ

ウンターウェイトにつなげるという方式をとる．このウェイトを調整することによって掘削時の鉛直方向の荷重を調整することが可能である．

掘削切刃としては，スポーク型と小刀型のそれぞれを用いた．ウェイトコントローラの荷重を調整して，掘削面にかかる鉛直方向の静荷重を4.1kg～19.1kgまでの範囲で8通りに変化させた．また，切刃回転モータに加える電圧も5Vと10Vの2通りに設定した．いずれの実験においても，コンベヤは最大運搬能力を発揮できる状態とする．

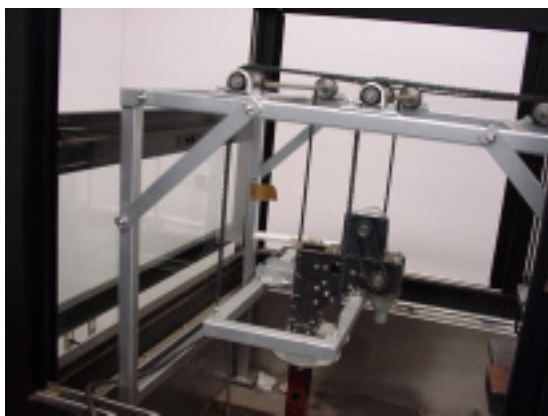


Fig. 6 ウェイトコントローラ

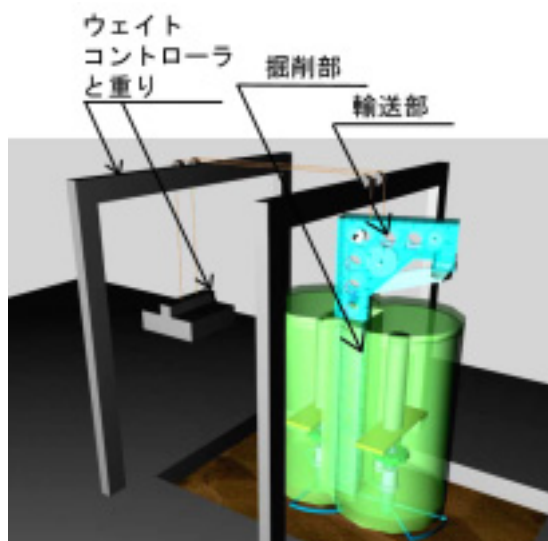


Fig. 7 実験イメージ図

以上の設定の下で，計13通りの掘削実験を行い，掘削体の沈下量を2分ごと，掘削土壌の回収量を1分ごと，また，切刃回転モータの消費電力の時間推移を100msごと計測した．

Fig. 8に，掘削体がおよそ10cm沈下した時の状態を示す．

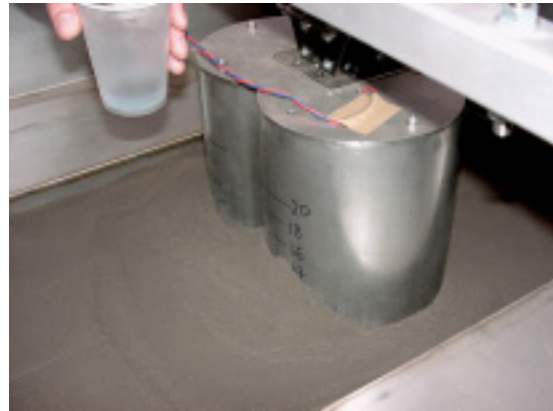


Fig. 8 10cmほど潜った状態

回収したシュミラントは，Fig. 8のように手動で回収した．また，沈下量は図にある掘削部に描いた線での計測ではシュミラントの盛り上がりにより正確な計測は不可能であったので，掘削部の蓋の鉛直下方への移動距離を用いて計測した．

5. 結果・考察

今回の実験で得られたデータをTable. 5.にまとめる．

掘削面荷重と書かれた値は，システム全体の重量から，カウンターウェイトに設置したウェイトの重量を引いた値で，掘削面に加わる垂直荷重を表す．掘削面圧力は，その値を掘削部の断面積(361.5cm^2)で割った値である．

また，掘削性能実験において，最終沈下量が記載されていないが，この値は1～2mm程度の小さい値であり，計測限界以下のため測定不可能と判断した．

Table3 掘削実験結果

実験番号	切刃タイプ スポーク型	回転切刃 電圧[V]	掘削面荷重 [kg]	掘削面圧力 [kPa]	最終沈下量 [mm]	最終回収 土量[g]	実験継続 時間[min]
A1	スポーク型	5	4.1	1.11	29	3	10
A2	スポーク型	5	7.1	1.92	57	367	30
A3	スポーク型	10	7.1	1.92	56	322	20
B1	小刀型	5	4.1	1.11	37	3	10
B2	小刀型	5	7.1	1.92	75	316	30
B3	小刀型	10	7.1	1.92	109	1294	140
A4	スポーク型	10	9.95	2.70	126	3671	120
鉛直深さ4.1125mmにおける掘削性能実験							
C1	スポーク型	10	5.3	1.44	計測限界 以下のため 測定不可と 判断	11	4
C2	スポーク型	10	7.1	1.92		30	4
C3	スポーク型	10	12.0	3.25		85	4
C4	スポーク型	10	14.4	3.90		110	4
C5	スポーク型	10	16.2	4.39		110	4
C6	スポーク型	10	19.1	5.18		136	4

この実験では、最終的に12cm以上の沈下、3.5kg以上の土の回収を行うことができた。(S4の実験より)

実験における掘削の挙動の様子を以下に記す。

- 掘削初期の時点では、掘削体の沈下量に比べて回収土量が非常に小さい。
- 掘削直後は沈下量が大きく、掘削の進行とともに沈下速度が小さくなる。
- 沈下量100mm以降は、沈下速度はほぼ一定となる。
- 回収土量は、ほぼ一定の割合を維持する。

5.1 掘削初期の挙動

掘削初期においては、土壌を周囲に押しのけて沈下していく様子が見られた。ある程度沈下し、押しのける限界に到達すると、排出による前進が支配的になると考えられる。

実際に、それぞれの沈下量において回収量の時間平均を取り、沈下した体積と比較して回収効率を求めると、掘削初期では20%以下、約10cm潜った状態では60～80%の回収率を示している。(Fig. 9を参照)

これからも、表面が近い場合には土壌を周囲に押しのける効果のほうが大きいくことがわかる。

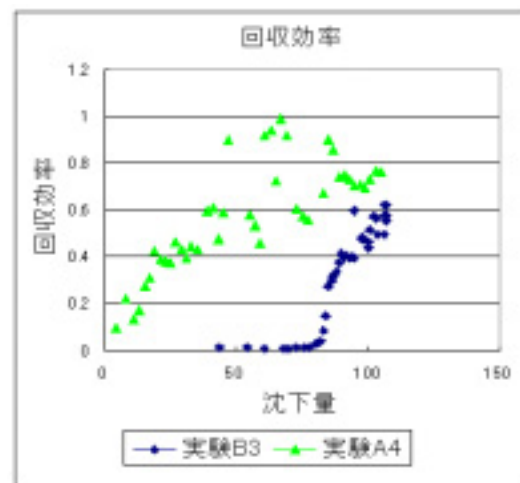


Fig. 9 沈下量と回収効率

5.2 沈下速度の減少

今回の全実験において、沈下量が増すにつれ、沈下速度の減少が見られた。(Fig. 10, Fig. 11) これは掘削体が潜った部分に加わる土圧の影響で、沈下量分自重がキャンセルされているからと考え、検証を試みる。

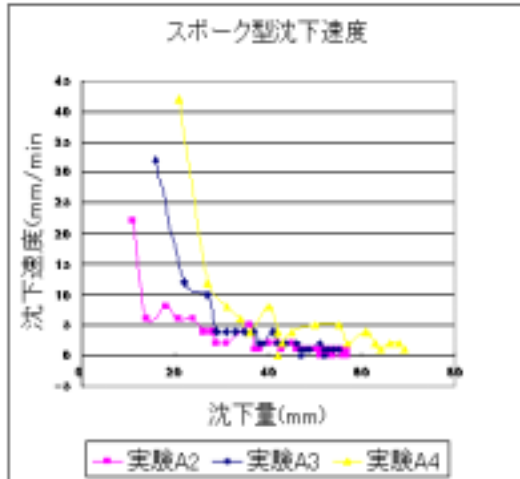


Fig. 10 沈下量と沈下速度(スポーク型)

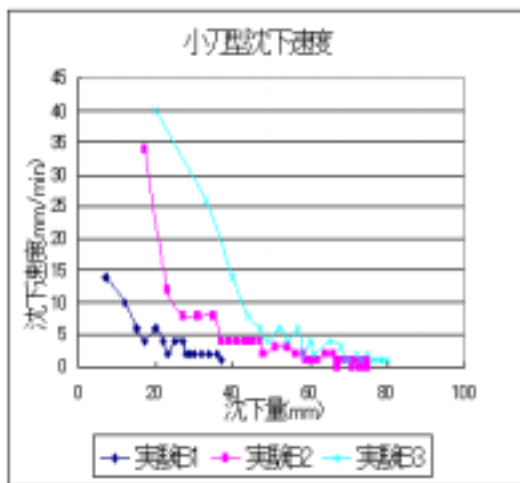


Fig. 11 沈下量と沈下速度(小刀型)

土圧計算に用いられるクーロンの公式を用いて土圧を求める。土の単位体積重量を γ 、表面からの深さを h 、土圧係数を K とする。土圧 P_A は、

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma h^2 K$$

これよりMOGURA2001側面全体に加わる力から鉛直上方向への摩擦力 F_n を求める。MOGURA2001の周囲の長さを R 、沈下量を H とし、砂の摩擦係数を σ とおくと F_n は、

$$F_n = \int_0^H P_A R \sigma dh = \frac{1}{6} R \sigma \gamma K H^3$$

この式を用いて沈下量10cmにおける鉛直上方向の摩擦力を求めると、0.5[N]という結果が得られた。

この値は、掘削面荷重の40～100[N]と比較すると、影響は小さいものと考えられる。なお、この理論に基づき、実験A4の条件における掘削限界を計算すると、約55cmと算出される。この点については、長時間の掘削実験を行い、実際に検証する必要がある。

5.3 ブレードによる比較

スポーク型と小刀型のブレードにおいて、掘削初期における特徴的な挙動の差としては、小刀型においては沈下量が大きく(Fig. 12)、スポーク型では回収量が大きい(Fig. 13)という結果が見られた。

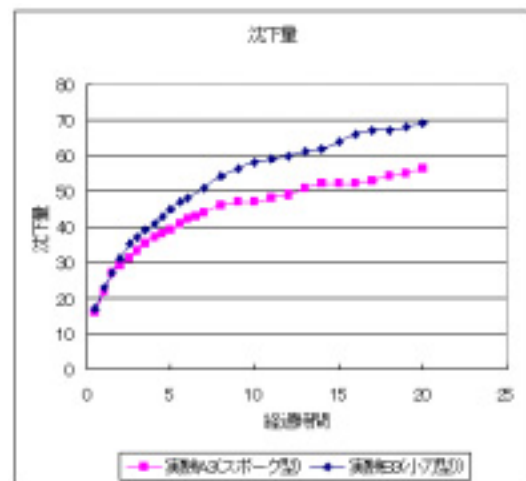


Fig. 12 切刃タイプによる沈下量変化

これは、小刀型のほうは土壌攪拌の効果は大きい、土を外側に押しのける効果も大き

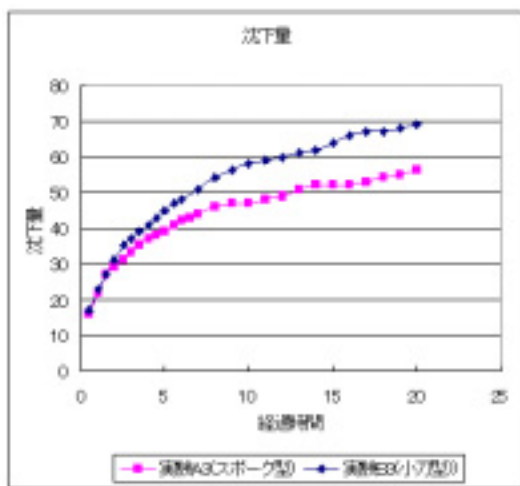


Fig. 13 切刃タイプによる回収土量変化

くなってしまう、回収孔に掘削屑を集積する効率が悪くという理由が考えられる。

また、モータにかかる電流値よりモータの回転トルクを比べると、小刀型のほうがトルク負荷が大きい様子が伺える。

6. これからの課題

今回得られたデータより、課題点が次のように得られた。

- 沈下量1mを目標とした掘削実験(長時間の掘削実験を行うことも念頭に入れて)
- システム全体が沈下したあとの掘削の続行に対する対処
- 全体の小型・軽量化(軽量化をしても十分な掘削面圧力を得る工夫が必要)

今回得られたデータから、理論的には50cm以上は潜れると予想され、目標を沈下量1mとして、次回実験を行う。

また、システム上部に回収した土を地上までに搬送する手段、ならびに完全に沈下した後も搬送部が駆動しつづけることが可能なアイデアが必要である。現在、蛇腹構造を用い

て完全に沈下した後も地上までの穴を確保して、潜りつづけることの可能なシステムを準備中である。(Fig. 14参照)

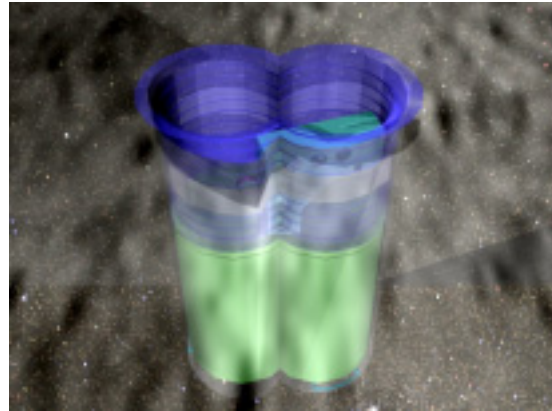


Fig. 14 蛇腹を用いたシステムのイメージ図

7. おわりに

本論文では、月面掘削ミッションならびに月面掘削システム「MOGURA2001」の紹介を行った。このシステムは、2つの切刃を逆回転することで反力のキャンセルを行うことで、安定した掘削を可能とする。また、輸送部により掘削屑を積極的に排出することで、システム全体の大きさよりも深く探査をすることができる。今後は、連続運転で1m以上の掘削を目標に実験を進める。

参考文献

- 1) 福岡 正巳編 『現場技術者のための土圧・土留計算法と実例』 近代図書株式会社 (1974)