

第 21 回衛星設計コンテスト アイデアの部 ミッション解析書 月面砂掘削機「月面潜行体 1 号」

立命館大学 理工学研究科 建設保全工学研究室
修士課程 2 年 中島翔太
指導教員 建山和由, 横山隆明

1. はじめに

宇宙開発の初期において、月は最大の目標であった。特に米ソの冷戦期では、人類初の有人月面着陸を目指し技術開発が進められた。そして、アポロ 11 号において人類初の有人月面探査が実現し、17 号まで計 5 回実行された。しかし、両国の国家目標で無くなった月探査は停滞期を迎える。

その後、久しく月は探査されなかったが、アポロ 17 号の着陸後 22 年経った 1994 年に、NASA の小型月探査衛星クレメンティンが極軌道に投入され、71 日間、軌道上から月面を観測した。この観測で、月の南極地方のクレータ内に永久影地域があることが判明し、月面での水の存在を示唆するデータが得られた。月の水の存在は、宇宙探査の目標として再び月が脚光を浴びる契機となり、SELENE に代表される各国の月探査が次々に行われ、現在でも LRO, GRAIL などの観測衛星による月探査が続けられている。

このような月探査の状況を考えると、現在の月軌道上からのリモートセンシングによる探査の次の段階として、無人探査機の月面着陸による直接探査やサンプルリターンへと進むと考えられ、その後、月面に人類が再び立つ日もそう遠くないうちに実現すると思われる。

しかし、月探査は科学的、工学的な要望

が高いのにも関わらず、未だに解決策が見いだせていない事柄がある。それが月面掘削技術である。

アポロ計画では、宇宙飛行士による月面下のドリル探査が行われたが、月面環境下でドリルによる掘削を行うには様々な困難が伴い、数カ所の月面下 1m 程の情報しか未だ得られていないのが現状であった。また、ロボットによる掘削についても様々な方法が提案されてはいるが、その掘削システム全体での重量は軽量化に努めたとして 10kg 以上になると考えられ、その他の科学探査の優先度を考えると簡単には実際の技術実証ミッションとして採用されない状況に陥ってしまっている。

月面掘削技術の確立は、今後訪ずれる月面開発の時代に極めて有用なだけでなく、月面下の砂の堆積状況を知ることでクレータ年代学への寄与や、深さ方向への熱分布の解析による月の起源問題への寄与、またまもなく本格的に始まると考えられる、月面直接探査による科学探査においても有用な技術となると考えられる。

本研究においては、今までに無いアイデアを用い、小型軽量でエネルギー消費も少ない新しい月面掘削方法について提案し、その実現性について検討を行う。

2. 月面地盤について

アポロ計画に代表されるこれまでの月探査から、月面はレゴリスと言われる細かい砂で覆われていることが分かっている。レゴリスの粒径は、地球上の分類で言えばシルト（粘土を乾かしたもの）から細砂にあたり、地球上の一般的な砂より細かく、イメージとしては小麦粉などの粉に近い。アポロ計画による月面土壌サンプルにおける、通過重量百分率を図1に示す¹。

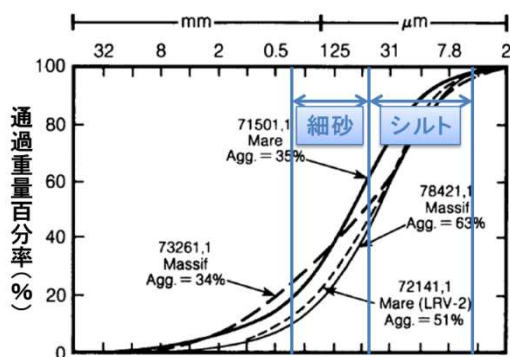


図 1 月面土壌サンプルにおける通過重量百分率¹

また、サンプルリターン資料の分析から、地球上の砂と違い粒子の表面には鋭角の凸凹が多数存在すると分かった。その結果、地球上では水分が無いと発生しない砂の粘着力が、水分が存在しない月面上のでも発生すると報告されている。

また、レゴリス粒子の中には、隕石や微小流星体の衝突により融解した粒子が多数結合していると考えられており、アグルチネイトという形態を示す物も多数存在している。そのアグルチネイトを壊さずにそのまま採取することができれば、月面クレータの形成などの月の科学に新しい情報をもたらすものと期待されている²。

月面のレゴリスやアグルチネイトは、月表面下10～20cmまでは地球上の1Gでは再現困難なほどの緩い状態で堆積しているが、

それ以下では急激に密度が上昇する。その堆積状況は、相対密度（最高密度を100%とした指標）で80%以上と、非常に締め固められた地盤であることが分かっている。アポロ計画による月面土壌サンプルにおける、砂の密度と相対密度を図2に示す¹。

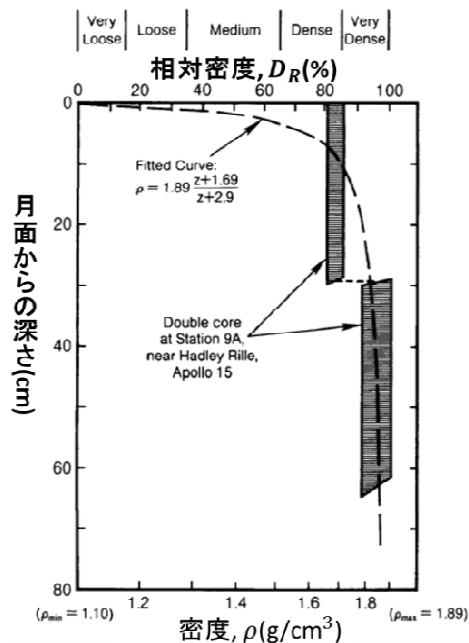


図 2 月面土壌サンプルにおける深さによる密度と相対密度¹

これらの情報はアポロ計画で得られたものであるが、同計画で月面下の探査が行われたのは数カ所に過ぎず、今後の探査において、さらに多くの箇所のデータを簡易に得られる方法の確立が望まれている。

3. 月面掘削における課題

地球上では、地盤の掘削技術が既に確立され工事現場等で日常的に行われており、前提として巨大なドリルを装備した掘削機を用い巨大なパワーを消費する。そして破壊した地盤に水を大量に用いることで、流動化させ掘削していくという方法が一般的である。この場合、巨大なドリルにより

発生する掘削抵抗に打ち勝つだけの反力が必要とされる為、掘削機の重量は宇宙探査の常識にはとても収まらないものになる。

従って、地球上での掘削技術をそのまま月面地盤へ応用しようとした場合、まず月面からの掘削反力を得る方法を検討しなければならない。このとき、地球上と同じように掘削機の重量を増加させ、その結果、掘削に必要な反力を得るという方法は、特にミッション重量に制限がある無人機による月探査の場合にはほぼ不可能である。そのため、掘削反力を小さくする為にドリルの径を小さくし、掘削システム全体を小型化する、という方向に進むと思われる。だがその小型化には限度があり、SELENE-Bの実験機重量が520kg、またその内のサイエンスミッション重量が50kgであったことを考えれば、掘削システム全体でおそらく10kg程度のものがリミットであろうと考えられる。しかし月表面20cm以下の、相対密度80%以上に締め固められている地盤からは、大きな掘削抵抗が発生すると予想される。このような状況を考慮すると、小型化した掘削システムでは、1/6Gの月面では地盤から十分な反力を得ることは難しく、掘削可能な深さも制限されることが予想される。

こういった背景から、「月面掘削ロボット」として地球上のシールドマシンを垂直に立てたような形態の月面掘削システムの研究が以前から行われている。しかし回転切刃を利用したシステムである為、ドリルの場合と同じように回転刃から発生する掘削抵抗は相当に大きく、掘削機自体が周囲の砂からその反力を取る為に強固にホルドされる必要があり、結果的に50~120cm

の掘削距離に留まっているのが現状である^{3,4}。

これらの状況を打開するためには、月面環境を十分に考慮し、小型で軽量な新たな掘削システムを構築することが必要となる。

4. 掘削機の構造と掘削システム

地盤の掘削の実現には、(1)砂を切削し、(2)すくい上げた砂を後方に運搬し、(3)運搬した砂を掘削の障害にならない程度の位置に排出する、といった3段階のプロセスが必要となる。小型軽量な掘削機においてこれらのプロセスを連続して行う為に、コマの回転から着想を得て、偏心モータによる遠心力に起因するジャイロスコープ効果を用いた自励的回転運動、そして章動及び歳差運動による振動輸送モードを利用した掘削システムを検討した。

図3に傾いて回転するコマの様子を示す。

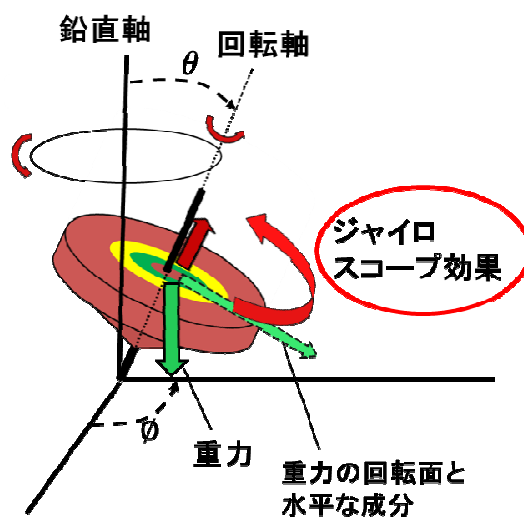


図3 コマ回転時の諸現象

よく知られているように、回転中のコマは鉛直軸に対し角度 θ で傾いたとしても倒れることなく回転を続ける。この現象をジ

ジャイロスコープ効果という。ジャイロスコープ効果とは、回転する物体に遠心力などの外力が働く際、その外力から回転方向に90度進める向きに力が加わる現象である。図3では、コマの回転面の放線方向に重力の分力が働き、ジャイロスコープ効果によって回転方向に90度の力が働く事でコマは倒れることなく回転運動を続ける。

このとき、章動成分である回転角 θ と歳差運動成分である ϕ の回転角速度 $\dot{\phi}$ を観測すると、コマはそれぞれの方向に微小な振動を伴った運動をしていることが知られている。図4に角度 θ 、図5に角速度 $\dot{\phi}$ の時間変化を示す⁵。

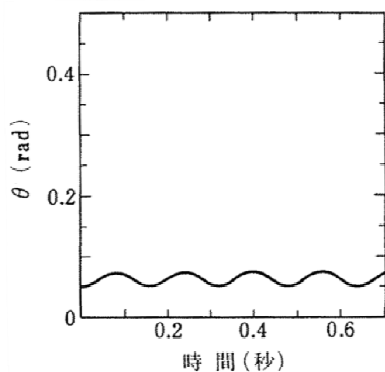


図4 角度 θ の時間変化

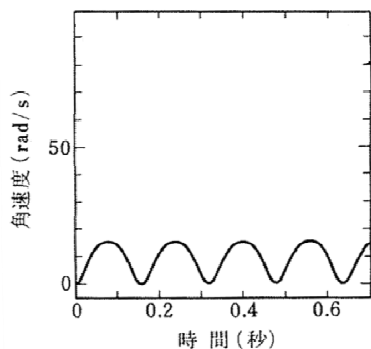


図5 角速度 $\dot{\phi}$ の時間変化

提案する掘削機では、コマに働く上記の2つの振動運動を利用し、掘削機に振動輸送を発生させ砂の輸送に利用する。

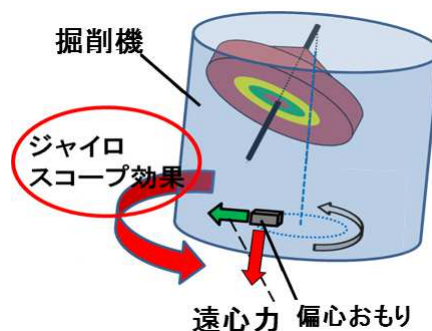


図6 コマの運動に見立てた掘削機

図6は、図3のコマを上下逆さまにし、掘削機の挙動をコマの運動に見立てたものである。掘削機に取り付けられた偏心モータによる遠心力が、コマの重力の分力に相当し、コマと同じようにジャイロスコープ効果が発生する。そのため掘削機自体が回転運動を始め、同時に発生する振動で振動輸送により砂を上方へ輸送する。このため、前述した地盤掘削の条件(1)及び(2)を満たすことになり、地盤の掘削が可能となる。

5. 試作機の作成と予備実験

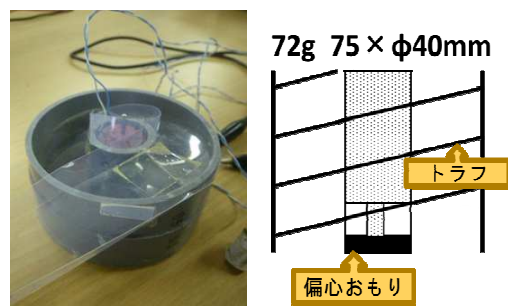


図7 掘削機の外観と構造

本論文で提案する掘削機の試作機を図7に示す。試作機は、径の異なる塩ビパイプ

2本と亚克力螺旋トラフ、モータによって構成されている。偏心モータは、内側の径の細いパイプ内に完全に内蔵される様設置し、2本のパイプ間にトラフを巻き付けた構造である。偏心モータは下向きに設置され、おもりはその先端に取り付けてある。試作機全体の外形は75mm、高さは40mmで、重さは72gであり小型軽量を実現している。

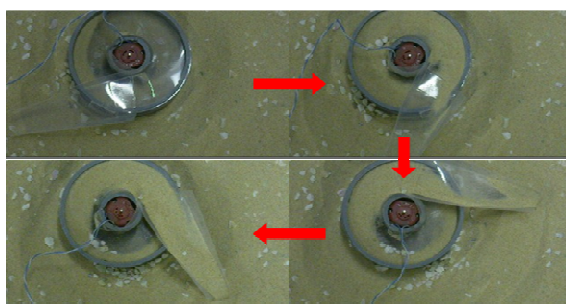


図8 予備実験の様子

豊浦標準砂を用いて予備実験を行った様子を図8に示す。偏心モータの回転によりジャイロスコープ効果が発生し、掘削機が反時計周りに回転すると同時に、発生した振動が螺旋状のトラフに伝わり、砂が時計回りに輸送される現象が観測された。掘削機自体が自励的に回転し、振動輸送(図9)によって砂が上方へ輸送される為、まるで掃除機のノズルに吸い込まれる様に砂が上方へ移動することで、掘削時のトルクは非常に小さい。

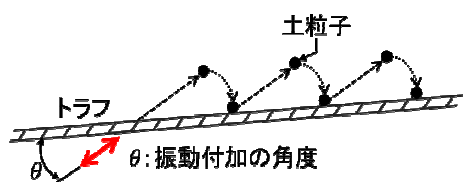


図9 振動輸送の原理

振動輸送は、重力方向に対して斜めにトラフを振動させたとき、その上の物体が飛

び上がったたり転がったりし前方へ輸送される現象である。振動輸送は簡単な機構である為、衝撃や温度変化にも強いと考えられ、月面上の様な厳しい環境においても適用性は高いと予想される。

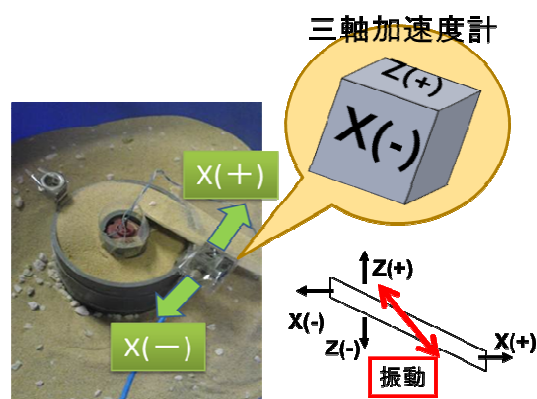


図10 加速度計を用いた振動計測実験の様子

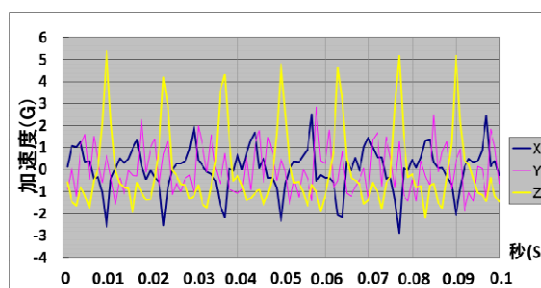


図11 トラフに生じる振動の波形

豊浦砂を掘削する際の振動の波形を、三軸加速度計で計測した結果を図11に示す。図10より、Z波が+方向に振動しているときX波が-方向に振動している。つまり鉛直方向と水平方向の振動が合わさり、砂がトラフを登っていく向きの振動輸送モードが生じていることが分かる。

以上のことより、本論文で提案する掘削機において、自身の回転運動と振動輸送による砂の輸送が発生し、掘削の条件(1)および(2)を満たす掘削システムが、小型軽量なシステムで達成出来ることが示された。また、このシステムは偏心モータ1つしか用

いておらず、非常にシンプルな機構で、モータは装置内部に格納でき摺動部分はレゴリスから完全に隔離することができる為、信頼性も高い。さらに、アポロ時代にも行われた一般的な有人コアサンプリングと比較しても非常に軽量であり、砂と掘削機先端部に生じた空間部分にカメラを取り付け、途中で作業を中断して撮影し、さらに再開させられる特性も持つ。また、振動輸送の過程での分級も可能なので、砂の粒度分布が同時に行える可能性も考えられる。その他、例えば掘削機をそのまま埋めてしまい、月面地盤の熱流量の測定や地震計として利用出来ることなどが挙げられ、その際は小型軽量という利点を生かして、多地点での観測も可能になると考えられる。

6. 月面掘削ミッションの提案

提案する掘削機の最大の特徴は、小型かつ軽量で機構が簡単な点である。したがって、近い将来の月面探査における活用がまず期待される。無人探査ミッションでは探査機に搭載されたローバ等で計測地点まで運搬し、地点ごとの月の砂の特性等の計測を行う。

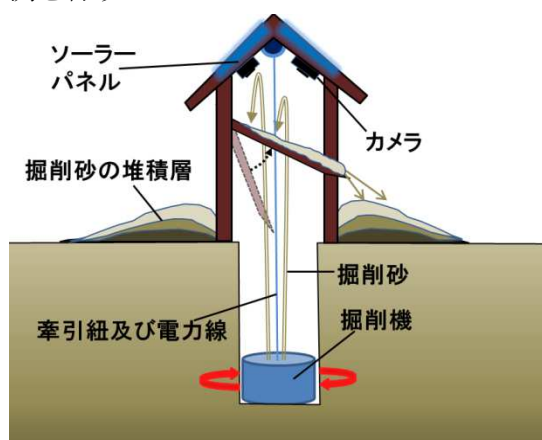


図 12 観測ミッション概念図

図 12 に観測ミッション概念図を示す。

掘削機上部に櫓状の支援機器を配置し、振動輸送で掘削機上部に達した砂を上方へ跳ね上げ、支援機器の途中にあるセンサーを通過したら、砂が再び落ちてくるのを受け止める跳ね上げ機構が作動するというシステムである。跳ね上げ機構は傾斜を持っているので、落ちてきた砂は掘削口周辺へと排出される。排出された砂は、支援機器上部のカメラでその詳細を観察することが出来る。櫓状の支援機器上部には太陽電池パネルが設置され、有線で結ばれた掘削機本体に電力を供給すると共に、掘削終了時にはウインチによって掘削機本体を回収する。掘削機本体は複数個用意され、例えば月面下の温度分布計測や、レゴリスの温度及び放射線遮蔽能力の測定などの際には、掘削終了後にそのまま掘削口底部に放置され観測を続ける事も可能である。この場合、櫓状の支援機器は1つだけであっても使い回しが可能である。

表 1 観測ミッション重量

掘削機	モータ	30g	117g
	アルミトラフ	20g	
	アルミパイプ (内)	17g	
	アルミパイプ (外)	50g	
櫓	カメラ	170g	3380g
	ソーラーパネル	330g	
	屋根	480g	
	支柱	2400g	
全体	3497g		

表 1 より、観測ミッション全体の合計重量は 10kg を大きく下回ると考えられる。

掘削機の重量は塩ビパイプ，トラフ共にアルミ素材を用いた場合を考え，櫓の屋根，支柱はサンドイッチパネルを適用した場合で検討した。

有人探査ミッションの場合は，図 13 に示すように宇宙飛行士が手軽にポケットなどから掘削機を出し，調べたい場所の砂地盤に放つことにより簡単に掘削，調査を行えるような方法を提案する．櫓状の支援機器を複数個用意できれば，同時に複数地点の観測も可能となる。

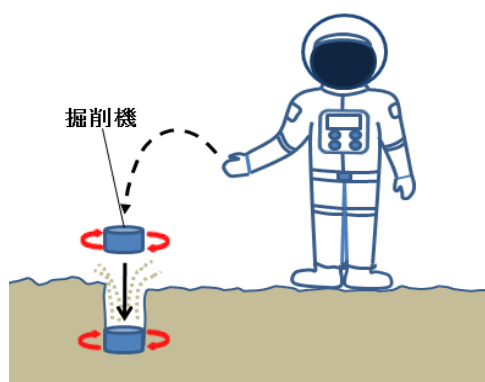


図 13 宇宙飛行士が掘削機を用いるイメージ

さらに，この掘削機の特徴から，他の惑星や小惑星での利用も充分可能である。

7. 実現に向けた課題・必要な開発

今回提案する掘削システムを実現させる為には，以下の課題が残されている。

①レゴリスに適したトラフの材質選定と振動輸送時の最適な振動数・振幅の検討

掘削機の試作機ではトラフはアクリルを使用しているが，実際の月のレゴリスを効果的に輸送できる材質および振動数の組み合わせを検討する必要がある．そのため，模擬月の砂を使用した振動輸送実験を，図 14 に示すような直線型振動輸送トラフを用

いて行う．その際ファンクションジェネレータ等で振動数を変化させ，模擬月の砂の輸送に適した振幅と振動数，またトラフの材質を明らかにする必要がある。



図 14 直線型振動輸送トラフ

②砂の排出システムの開発

本掘削機は，前述した掘削に必要な 3 つのプロセスのうち(1)及び(2)は満たしているが，(3) 運搬した砂を掘削の障害にならない程度の位置に排出する，というプロセスはまだ実現出来ていない．このため，ミッション提案に示したように，砂を上方に跳ね上げ，その砂を受け止め適切な位置に排出する支援機器の開発が必要である．砂を上方に跳ね上げる機構については，小型軽量かつエネルギー消費が少ない方法を模索する必要があるが，排出支援機器については既存の装置を組み合わせることで実現できると考えられる。

③1/6G相似則を用いた月面での挙動の推定

実用化に向けては，地球上における掘削機の実験結果から月面上での挙動を推定する必要がある．そのため，1/6Gの相似則を算定し月面上の環境を考慮に入れ，さらなる課題や改善点を見出しより効果的な掘削機へと近づけることが重要である。

④温度変動に対応する為の素材の選定

温度変動に対応する為，掘削機の材質は

非常に重要であると考えられる。試作機は作成の簡便さを考えて塩ビ及びアクリル等で作られているが、実際は金属で作られるべきであると考えられる。摺動部分となるモータはレゴリスから完全に隔離される構造になっているので、レゴリスの摺動部分への進入による不具合は極力避ける事が可能であると予想される。しかし反対に、密閉された空間に配置されたモータの放熱の問題が出てくる可能性もあり、今後の課題として取り組んでいく必要がある。

⁵ 安井久一著, “こまはなぜ倒れないか”, 共立出版

8. 将来の展望

月を掘削するという作業は、締固まった地盤を崩す、崩した地盤を運ぶ、運んだ砂を適切な位置に捨てる、といったいわゆる地球上の土木工事の基本的な作業によって構成されている。そのため、本提案を実現させるための試行錯誤からは、将来的な月面開発技術の指針を得ることができ、得られた技術的成果は今後増加してゆくと考えられる。月や他の惑星、及び小惑星の地盤に関連する直接探査技術の核となることが望まれる。

<参考文献>

¹ Grant H. Heiken, David T. Vaniman, Bevan M. French, “Lunar Sourcebook”, Cambridge University Press (1991)

² 片桐, 松島, 山田: “アポロ 16 号で採取された月面砂(No.60501)の 3 次元粒子形状評価”, 第 44 回地盤工学研究発表会(2009)

³ 吉田, 工藤, 川勝, 横山, 園山,: “モグラ型月面掘削ロボットの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 00 講演論文集, 1P1-07-019(2000)

⁴ 渡辺, 下田, 久保田, 中谷: “月面レゴリス層探査のための前進埋没型ロボットとその地中推進手法”, ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会, 1J36(2002)