

もぐら型月面掘削ロボットの基礎検討

Basic examen by mole-type moon excavation robot

工藤 拓*, 吉田和哉**

Hiraku Kudo*, Kazuya Yoshida**

*東北大学, **東北大学

*Tohoku University, **Tohoku University

キーワード： 月面ロボット (moon robot), 掘削 (excavation), 振動 (vibration),
レゴリス (regolith), もぐら (mole), 尺取虫 (inch worm)

連絡先： 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01 東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻
自動制御学研究室 工藤 拓, Tel.: (022)217-6992, Fax.: (022)217-6992,

E-mail: kudou@astro.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

1960 年代から始まったアポロ時代に月探査は飛躍的に進歩したが, 近年, 日本では再び月開発に注目している.

月表面は, 主にレゴリスと呼ばれる細かい砂で覆われており, アポロ時代に宇宙飛行士によるコアサンプリング採集が行なわれたが, せいぜい 3m 程度までしか掘削調査されていない. これから 21 世紀の月探査としては 3m より以深の掘削調査が求められる.

月の Science を大きく二つに分けて考えると, ひとつは月振計等を複数配置し, 月の全体像を明らかにするアプローチが挙げられる. 一方で, ローカルな月の詳細像を描いてゆくアプローチも興味深い. 典型的なサンプル地域の詳細データを得ることは, 2003 年打ち上げ予定の SELENE-1 で実施される予定になっている.

本研究では, ランダー(月着陸船)によるピンポイント着陸とローバー(月面探査車)によるローカルな広がりを持った移動探査のシナリオを前提とし, それを更に情報豊かなものとするために, 鉛直(地下)方向への探査に道を拓く可能性のあ

る可搬式のデバイス = もぐらロボットについて考察する.

2. 掘削技術によって広がる科学探査の可能性

月面掘削技術がもたらすであろう科学的意義を整理すると以下ようになる.

- 地下の情報, 垂直方向への変化を知ることができる.
 - レゴリスの層序, 層ごとの組成の違いを明らかにし, クレーターの生成順序などを知ることができる.
 - 太陽風付加元素や宇宙線の影響の深さ方向への分布を知ることができる.
 - 極域における氷探査で, 直接氷の存在を確かめることができる.
- センサを地下に, 任意の深さで設置することができる.
 - 地震計を用いて月の地下構造を知る. 特にローバーを用いることにより, ローカ

ルな地下構造を知ることができる。

- 地下の熱流量を計測し、熱源の推定を行う。これにより地殻の化学組成等の情報を得ることができる。

現在ペネトレーターは、センサを地下に設置するために有力な手段であると考えられているが、打ち込みの際に非常に大きな衝撃が作用し微妙なセンサを扱いにくい。また、打ち込み点の正確な制御が困難であるなどの欠点がある。これらの欠点を克服できるという観点でも、ローバーによって搬送・位置決め・設置が可能ならもぐらロボットがもたらす可能性は極めて大きい。

3. 月面掘削ロボットのコンセプト

一般にボーリングやコアサンプリング方式は、掘削深度よりも長い円管資材が必要となるため、着陸重量やペイロードの大きさが限られているミッションでは採用することは難しく、より深く掘るために、より多くの資材を持ち込むという発想は賢明ではない。

そこで、もし「もぐら」のように短い体で前進掘削できる装置が実現できれば、という可能性を考えてみよう。自力で前進掘削が行える装置が開発できれば、その装置の大きさと掘削深度は原理的に無関係であり、エネルギーと状況が許す限りどんどん深く掘り進んでゆくことができよう。そこで本研究では月面地下掘削探査を可能とするようなもぐら型ロボットを検討し、実現可能なプロトタイプを開発することを最終的なゴールと考えている。これまでにはもぐら型ロボットのコンセプトを検討し、部分要素モデルを試作し、基礎実験を実施した。

Fig.1 に月面掘削ロボットのコンセプトを示す。同ロボットは科学的に興味深い地点にローバーによってセットされる。掘削のための電力は月表面上に展開される太陽電池によって発電し、有線によって地中のもぐらロボットに伝えられるものとする。ローバーは太陽電池の展開や掘削初期のロボットを支援する役割も担う。ロボット自身が下層へ向かって前進掘削を開始したら、ローバーの支援は不要となる。ロボットには表1に示すような各種センサを搭載することが考えられる。これらのセンサを使って各層で撮像や検層を行ないそ

のデータは無線によって(あるいは掘削開始点までは有線も可)、ランダーもしくはローバに送信される。

レゴリス層深部における砂の充填率は85~95%と言われており¹⁾、先端の尖った掘削体を押しつけても生じた削土を周りの壁に押しつけて前進することは困難である。そのため生じた削土をロボット内部を通過させることによって後方へ搬出する方法が有利であると考えられる。そこで、本研究で考える月面掘削ロボットでは削土が体内を通過するようにさせることによって後ろへレゴリスを押し出す方法を採用する。

ロボットの前進メカニズムを Fig.2 に示す。ロボットは保持機構と押し出し機構を備えた尺取虫式移動形態をとることにする。

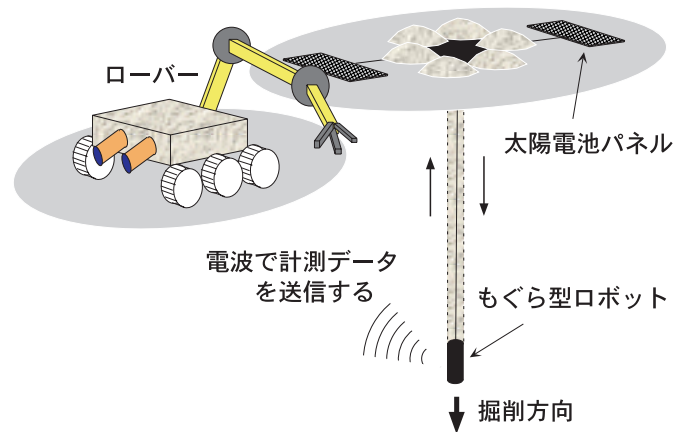


Fig. 1 月面掘削ロボットのコンセプト

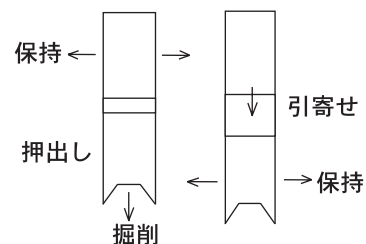


Fig. 2 前進のメカニズム

Table 1 掘削による成果の大きい探査項目

垂直方向への探査例

| 探査項目 & 成果 | 検出機器 | 測定方法 |
|--|---------------------------|---|
| 地層の厚さ計測 - 飛散レゴリス量の推定 - 層序の決定 | 分光 または マルチバンドカメラ | 垂直に掘削し、カメラで組織などを観察しながら層序観察、深さを計測する。 |
| 太陽風・宇宙線計測 - 宇宙線の到達強度・頻度 - 太陽風の化学組成変遷 | シンチレーションカウンタなど 質量分析計など | 垂直に掘削し、宇宙線や太陽風組成の測定を行う。深さ方向へ多地点で観測を行う。 |
| 氷探査 - 存在確認 - 垂直分布観察（量推定） | 分光器など 加熱装置 | 数十 cm 程度掘削し、レゴリスを加熱し分光器などで氷の有無・化学組成などを観察。深さ・水平方向へ多地点観測ができれば量の推定も行うことができる。 |

地下にセンサ類を設置する探査例

| 探査項目 & 成果 | 検出機器 | 測定方法 |
|---------------------------------|--------------|--|
| 地下構造探査 - 月深部構造 - クレータ地下構造 | 地震計 | 地下に計測器を設置し、天然または人工的な地震波を観測する。 |
| 熱流量探査 - 地下熱源 - レゴリス熱伝導率 | 熱流量計 | 地下の熱的に安定な地点に計測装置を設置し、その場における熱流量計測、時間変化を観測。 |
| 自然 γ 線計測 - 岩石化学組成測定 | シンチレーションカウンタ | 地下の低温で熱的に安定な地点に計測装置を設置し、その場で自然 γ 線（崩壊性元素からの γ 線）を計測。 |

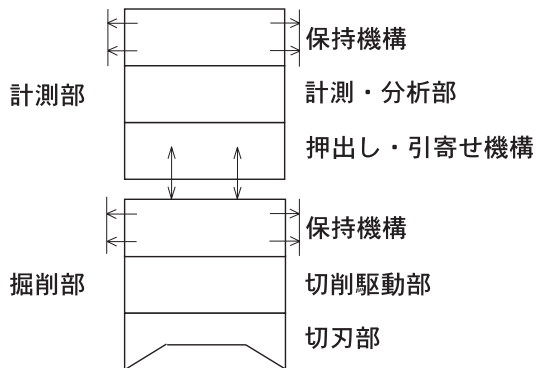


Fig. 3 月面掘削ロボットの構成

4. 月面掘削ロボットの構成

本研究で開発する月面掘削ロボットの構成模式図を Fig.3 に示す。ロボットは掘削部と計測部に分かれており、掘削部は切刃部、切削駆動部、保持機構からなる。また、計測部は押し出し・引寄せ機構、計測・分析機構からなる。

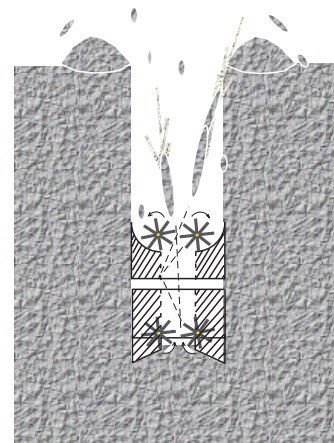


Fig. 4 フィン排土を行う場合の構成例

5. 砂の性質

砂は押しつけられると非常に固く締まるが、攪拌すると流体のように振る舞うという固体と流体の性質を兼ね備えている。そのため、もぐらロボットを単純に力まかせに押しつけるアプローチは賢明であるとは言えない。中心部に穴をあけた掘削体を振動させながら押しつけると、中心孔から砂が浮いてくる。深度が浅ければ「ありじごく」のようにからだ全体を振動させることによって自身が沈み込んでゆく状況を作り出すことができるが、深度が深い場合、削土を積極的に排出することにより切刃部分の圧力を下げた上で攪拌による流動化を行うことが効果的であろう。また、超音波振動を使うことも有効であろう。

Fig.4 に、フィンによって積極的な排土を行う場合のコンセプトを示す。

6. 掘削試験装置による実験

6.1 掘削試験装置

ロボットの切刃部、切削駆動部の基本的な力学を明らかにし予備データを取得するために Fig.5, 6 に示すような掘削試験装置を設計・製作した。

6.2 実験

掘削試験装置による実験結果を以下に要約する。掘削実験では、掘削試験装置の掘削面を深さ 30mm のところにセットし、切刃を回転させながら送り出し機構により掘削面を下方に押しつけ前進掘削を行なった。このとき装置に加わる力、トルク等を計測した。掘削面の違いによる掘削性能の差を評価するため、掘削面の傾斜角を(0°, 5°, 45°)の3通りに、また切刃の形状として(プレーン, イボ, のこぎり)の3通りを組み合わせる9通りの実験を行なった。

ここで「プレーン」とは切削面に特に凹凸を設けずに平坦な回転面を押しつけるものである。実用的にはダイヤモンド砥粒などを吹き付けたグラインダ面とすることが考えられる。

「イボ」とは、ダイヤモンドカッター等の複数の突起が回転面に突き出して取り付けられる様子を模擬したものである。ここでは高さ約 5mm のネジ頭で代用している。

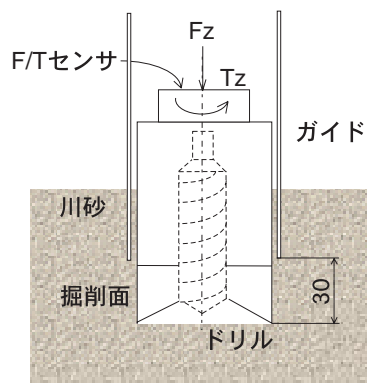


Fig. 5 掘削試験装置の概略図



Fig. 6 掘削面の写真

「のこぎり」とは、回転面にノコギリ形状のアルミ製のブレードを取り付けたものである。

また、今回の実験で使用した砂は市販されている川砂であり、その特性は以下の通りである。

| | |
|-------|-----------------------|
| 密度 | 2.6 g/cm ³ |
| 平均粒径 | 約 1 mm |
| 比密度 | 55~60 % |
| 内部摩擦角 | 約 30 deg |

Table 2 掘削実験結果一覧

| 切刃タイプ | F_z [N] | T_z [Nm] | 速度 [mm/min] |
|---------|-----------|------------|-------------|
| 45度プレーン | 22 | 1.3 | 3.3 |
| 45度イボ | 176 | 2.1 | 3.3 |
| 45度のこぎり | 111 | 4.2 | 4.0 |
| 5度プレーン | 22 | 2.3 | 8.0 |
| 5度イボ | 44 | 1.9 | 6.7 |
| 5度のこぎり | 44 | 3.4 | 6.7 |
| 0度プレーン | 67 | 1.7 | 4.7 |
| 0度イボ | 35 | 1.3 | 5.0 |
| 0度のこぎり | 14 | 0.5 | 3.0 |

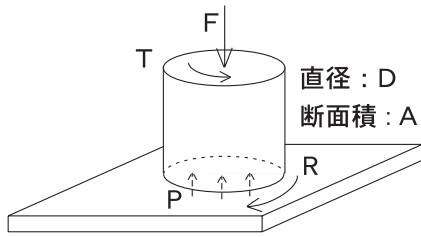


Fig. 7 掘削実験時の力学モデル

6.3 実験結果

深さ約 30mm での掘削において、いろいろな掘削面に対する力学的測定の結果を Table 2 に整理する。

回転体を地面に押しつけるという実験の様子を模式的に描くと、Fig.7 のようになる。ここで、掘削抵抗 R を以下のように定義する。

$$R = \mu AP \quad (1)$$

ここで、 A は掘削面の投影断面積、 μ は等価摩擦係数、 P は先端部の投影面圧であり、押し込み力 F を用いて

$$P = \frac{F}{A} \quad (2)$$

と書くことができる。一方、回転のための駆動トルクと掘削抵抗の関係は以下のように表される。

$$T = \frac{\pi}{16} \mu P D^3 \quad (3)$$

以上の諸式を摩擦係数について整理すると以下の式を得る。

$$\mu = \frac{4T}{FD} \quad (4)$$

なお以上の式で D は掘削回転体の直径である。

Table 2 に得られた F, T についての計測結果を用いて、切削面の摩擦係数を求め整理すると、Table 3, 4 のようになる。掘削面が平坦なプレーンタイプの場合でも、面に傾斜がつくと等価的な摩擦係数は大きくなる。また、面に突起やブレードなどを取り付ければ必然的に摩擦係数は大きくなる。

(1) 式は掘削抵抗は切刃の等価摩擦係数、投影断面積、面圧にそれぞれ比例することを示しており、抵抗を小さく掘削するためには、

- 摩擦抵抗が小さい切刃を設計する

Table 3 掘削面角度と摩擦係数の関係

| 掘削面タイプ | 摩擦係数 μ |
|---------|------------|
| 0°プレーン | 0.92 |
| 5°プレーン | 1.23 |
| 45°プレーン | 2.48 |

Table 4 掘削面タイプと摩擦係数の関係

| 掘削面タイプ | 摩擦係数 μ |
|--------|------------|
| 5°プレーン | 1.23 |
| 5°イボ | 2.46 |
| 5°のこぎり | 4.31 |

- 掘削体の直径を小さくする
- 切刃面の圧力を小さくする

の条件が必要となる。よって、力まかせに押し込む方式では圧力の上昇とともに掘削抵抗が増大し、掘削の継続が困難となることが予想される。

次に、Table 2 の中で比較的成績がよかった 5°プレーンについて、長時間回転させながら力まかせに押し込む実験を行った。掘削を開始した深さ 30mm からの増分深度の時間経過を Fig.8 に、またこのときの圧力および摩擦係数を Table 5 に示す。

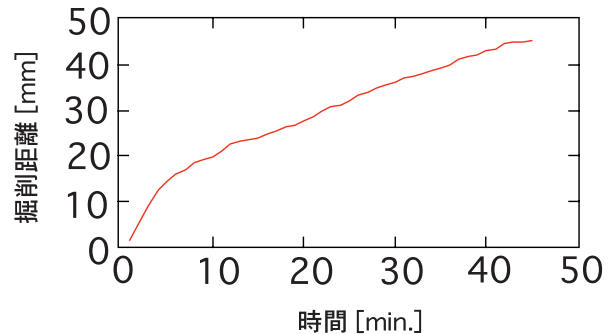


Fig. 8 長時間掘削の実験結果

グラフに示されるように 47 分間でおおよそ 50mm 前進掘削し、平均で 1mm 毎分が実現されているが、Table 5 より明らかなように深度 47mm では非常な高圧力となってしまう。一方、摩擦係数は圧力によらず一定値を示している。

次に、掘削面を往復運動させた場合、掘削面と回転周波数を変えて力まかせに押し込む実験を行った。その実験結果を Table 6 に示すここでは、

Table 5 掘削実験における先端圧力と摩擦係数の変化

| 掘削深度 [mm] | 圧力 [Pa] | 摩擦係数 μ |
|-----------|---------|------------|
| 0 | 1846 | 1.23 |
| 10 | 2772 | 1.23 |
| 20 | 2772 | 1.23 |
| 30 | 2772 | 1.23 |
| 40 | 3692 | 1.23 |
| 45 | 9267 | 1.23 |

掘削面回転周波数を 1Hz, 2Hz, 10Hz の 3 通りに変化させた。Table 6 では、いずれの掘削面の場合についても回転周波数が大きいほど摩擦係数が小さくなることを示している。

以上の結果から、より深く掘り進むためには掘削面を一定方向回転させるのではなく、ある程度高い周波数で回転させて押し込む方法が良い方策であると言える。

7. 熱環境に関する基礎検討

レゴリスはきわめて熱伝導率が低いため、掘削抵抗にともない切刃で熱が発生すると、熱がこもり高温となる可能性がある。そのため、予備的な熱解析を行っている。

8. おわりに

本稿では、ローバーによって搬送が可能で任意地点に設置され掘削探査を行うことができる「もぐら型ロボット」のコンセプトを検討した。

まず、月 Science の観点から掘削探査がもたらす科学的意義を明らかにした。月面掘削ロボットのコンセプトを検討し、尺取り虫的に前進掘削するもぐら型ロボットの構想を示した。さらにその構想を実現するための研究開発の第一歩として、掘削試験装置を製作し実験により掘削力学に関する基礎的データを取得した。保持機構、排出機構に関する試作はまだであり、今後引き続き設計・製作を進めてゆく予定である。また、川砂に替わりレゴリスシミュラント（模擬月砂）を用いた実験も行いたい。

部分要素の試作・実験評価によって知見を積み上げてゆき、最終的には全てをインテグレートしたプロトタイプを開発したいと考えている。目標仕様としては、直径 5cm 以下、質量 5kg 以下、設置・展開時にローバー側に必要となるインターフェース機構 1kg 以下、必要電力 3~5W で、固い岩盤に突き当たるまで掘り進むことのできる掘削ロボットを目指している。

参考文献

- 1) G. H. Heiken, G. T. Vaniman, and B. M. French: Lunar Sourcebook, a User's Guide to the Moon, Cambridge University Press, (1991)

Table 6 掘削面と回転周波数と摩擦係数の関係

| 角度 [度] | 切刃 | 周波数 [Hz] | 摩擦係数 |
|--------|------|----------|-------|
| 45 | プレーン | 1 | 0.349 |
| 45 | イボ | 1 | 0.578 |
| 45 | のこぎり | 1 | 0.628 |
| 5 | プレーン | 1 | 0.341 |
| 5 | イボ | 1 | 0.415 |
| 5 | のこぎり | 1 | 0.480 |
| 0 | プレーン | 1 | 0.290 |
| 0 | イボ | 1 | 0.389 |
| 0 | のこぎり | 1 | 0.464 |

Table 7 掘削面の回転周波数と摩擦係数の関係

| 角度 [度] | 切刃 | 周波数 [Hz] | 摩擦係数 |
|--------|------|----------|-------|
| 0 | プレーン | 2 | 0.252 |
| 0 | イボ | 2 | 0.266 |
| 0 | のこぎり | 2 | 0.400 |

Table 8 掘削面の回転周波数と摩擦係数の関係

| 角度 [度] | 切刃 | 周波数 [Hz] | 摩擦係数 |
|--------|------|----------|--------|
| 45 | プレーン | 10 | 0.0432 |
| 45 | イボ | 10 | 0.0439 |
| 45 | のこぎり | 10 | 0.0660 |
| 5 | プレーン | 10 | 0.0422 |
| 5 | イボ | 10 | 0.0431 |
| 5 | のこぎり | 10 | 0.0520 |
| 0 | プレーン | 10 | 0.0436 |
| 0 | イボ | 10 | 0.0397 |
| 0 | のこぎり | 10 | 0.0513 |