

## 月面地盤の強度定数の評価・推定法に関する一提案

九州大学工学部 学 黒木悠輔  
九州大学大学院 F 落合英俊 正 小林泰三  
宇宙航空研究開発機構 青木 滋

### 1. はじめに

現在、我が国では JAXA (宇宙航空研究開発機構) を中心として、月面基地と月資源の開発を最終目的とした月探査計画が進められている。月の内部構造探査や月面基地の建設など将来の月面活動にとって、月面地盤の土質力学的な特性を把握・予想することは重要な課題となる。JAXA では、近未来的なプロジェクトとして無人探査ロボットによる月面軟着陸計画を進めているが、ロケットへの搭載装置の省約から、従来の原位置地盤調査機器の搭載・実施は困難である。そこで、本研究では、月面探査ロボットによる土壌のサンプリングや排土作業に着目し、その土 - 機械系の相互作用の応答から地盤の強度定数を推定する手法を提案する。

### 2. 月面土壌の特性

月面はレゴリスと呼ばれる非常に細かい砂質土に覆われており、その環境は、高真空、微小重力、大きい昼夜温度差などの点で地上のそれとは大きく異なっている。ここでは、まず、レゴリスの物理化学的特性を模擬して作られた砂 (月面模擬土) を用いて基礎的な土質試験を行った。

図-1 に、本研究で用いた月面模擬土と米国がアポロ計画で持ち帰った実際の月面土壌の顕微鏡写真を示す。月面模擬土の物理特性は、土粒子密度  $\rho_s = 2.91 \text{g/cm}^3$ 、最大間隙比  $e_{\max} = 0.911$ 、最小間隙比  $e_{\min} = 0.437$ 、平均粒径  $D_{50} = 0.12 \text{mm}$ 、均等係数  $U_c = 8.89$ 、曲率係数  $U_c' = 0.87$  である。さらに、気乾燥状態 (圧密排気条件) で月面模擬土の三軸圧縮試験を行った結果、表-1 に示す強度定数  $c'$ 、 $\phi$  を得た。ただし、本試験は気乾燥砂の圧密排気条件によるものであり、得られた強度定数は、ピーク状態のものである。表からわかるように、内部摩擦角  $\phi$  は、相対密度  $D_r = 50 \sim 90 \%$  において  $39 \sim 46 \text{deg}$  を示し、粘着力  $c$  については、乾燥砂であるにもかかわらず確認され、特に  $D_r = 90 \%$  の密詰めになると顕在化した。ここでみられた粘着力は、図-1 の顕微鏡写真からもわかるように、月面模擬土の土粒子の外形が粗いことから土粒子間のインターロッキング効果 (噛み合わせ効果) によるものであると考えられる。

以上の結果から、月面土壌の強度定数の推定法を提案するにあたっては、砂質土にもかかわらず、内部摩擦角と同時に粘着力も考慮する必要があることが示唆される。

### 3. 月面地盤の $c, \phi$ 推定法の一提案

冒頭にも述べたとおり、月面では既往の原位置調査法をそのまま実施することは困難である。そこで本研究では、月面探査に用いられる作業機械ロボットと土の相互作用の応答から強度定数  $c, \phi$  を推定する方法を提案する。すなわち、機械の土に対する作用を原位置試験として捉え、土の応答 (抵抗力や摩擦力) からその境界値問題を逆解析することによって地盤の強度定数を求めようとするものである。ここでは、月面探査時において予想される土壌採取や排土・押土等の切削作業に着目し、その際、機械に作用する土の抵抗力 (以下、切削抵抗力と呼ぶ) を計測することより、 $c$  と  $\phi$  の推定を可能にするアイデアを提案する。

ここで提案する推定のアイデアの概要は次の通りである。ただし、本論文では、基礎的な研究として、フラットな平刃が地盤表層を水平方向に移動して押土するようなシンプルな切削問題を考える。まず、地盤の ( $c, \phi$ ) および切削刃幅や切削深さなどの切削条件を入力すると、その刃に作用する土の抵抗力  $F$  を算出する解析モデルを構築する。すなわち、ここでの解析は、抵抗力  $F$  を与える境界値問題として  $F = f(c, \phi)$  とする関数として見なすことができる。ただし、この関数自体は、切削条件によって個別に異なるものとなることに注意が必要である。探査時には  $F$  が計測されるが、これを既知量としても、上述の関数一つからは ( $c, \phi$ ) の両者を推定することができない。そこで、平刃の傾斜角を変えた切削を行うことで別の関数を準備し、異なる二つの切削抵抗力から二つの関数を連立して解くことによって  $c$  と  $\phi$  の両者の同定を可能にする。

本文では、押土切削による土の破壊の境界値問題を Coulomb の土楔理論 (極限平衡法) を用いてモデリングした。図-2 に示すように直線すべり面を想定し、地表面・切削刃・すべり面に囲まれた土の楔について力の釣り合いを解く

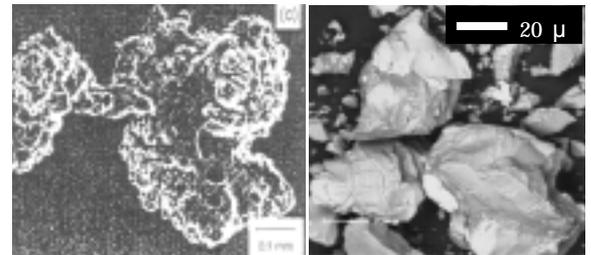


図-1 月面土壌(左)、月面模擬土壌(右)顕微鏡写真

表-1 月面模擬土壌の  
三軸圧縮試験結果

相対密度 (%)	$c$ (kPa)	$\phi$ (deg)
50	9.8	39
70	9.8	41
90	15.7	46

ことで切削抵抗力を次のように定式化することができる。

$$P = aHK_a + cHK_c + \frac{\gamma}{2}H^2K_\gamma + qHK_q \quad (1)$$

ここで、 $a$  : 土と鋼材の付着力(kN/m<sup>2</sup>)、 $c$  : 粘着力(kN/m<sup>2</sup>)、 $H$  : 地盤内の刃の長さ(m)、 $\gamma$  : 土の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $q$  : 土被り圧(kN/m<sup>2</sup>)、 $K_a, K_c, K_\gamma, K_q$  : 付着力、粘着力、自重、土被り圧に対する切削力係数である。

図-3 は、切削刃の傾斜角を $\theta = 90, 60 \text{ deg}$ とする切削刃(kN/m<sup>2</sup>)を用いたときの $\phi$ と $K_a, K_c, K_\gamma, K_q$ の関係である。この図をもとに、任意の強度定数、切削条件(ただし $\theta = 90, 60 \text{ deg}$ )における切削抵抗力を直ちに推定できる可能性がある。さらに、式(1)において、地表面の切削であることから土被り圧 $q = 0$ とし、山口<sup>1)</sup>が理論的に導出した関係 $\alpha = \cot\phi \tan\delta$ 、また、Potyondy<sup>2)</sup>が実験的に求めた経験式 $\delta = 0.55\phi$ を用いると、式(1)は簡略化され、それを $c$ について解くと次式ようになる。

$$c = \frac{P}{H} \frac{1}{K_c} - \frac{\gamma}{2} \frac{H}{K_c} \frac{K_\gamma}{K_c} \quad (2)$$

$$K_c = \frac{\sin\theta \sin(\rho + \phi)}{\sin(\theta + \rho + 1.55\phi)} [\cot\phi \tan 0.55\phi \cdot \{1 - \cot\theta \cot(\rho + \phi)\} + \{1 + \cot\rho \cdot \cot(\rho + \phi)\}]$$

$$K_\gamma = \frac{\sin^2\theta \sin(\rho + \phi)}{\sin(\theta + \rho + 1.55\phi)} (\cot\theta + \cot\rho)$$

切削時には、その条件として、 $H$ および $\theta$ が既知であり、切削の結果として $P$ が計測される。月面土の自重 $\gamma$ に関しては、土の締めり方によって多少変動するものの、地上においては $\gamma = 17 \sim 19 \text{ kN/m}^3$  (月面模擬土)であることが知られている<sup>3)</sup>。ここで、その変動の及ぼす影響が小さいことを仮定して、平均である $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ とすると、式(2)から、任意の $\phi$ に対してそのときに発揮される切削抵抗力 $P$ を満足するような $c$ が求められる。すなわち、 $P$ を満足する( $c, \phi$ )の組み合わせが求まることになる。また、一方で、異なる傾斜角を有する刃で切削を行った場合、前出とは異なる $P$ とそれを満足する別の( $c, \phi$ )の組み合わせが求まることになる。例えば、 $H = 0.06 \text{ m}$ で $\theta = 90$ と $60 \text{ deg}$ のそれぞれの傾斜角で切削を行ったとし、切削抵抗力としてそれぞれ $P_{90} = 9.19, P_{60} = 2.14 \text{ kN/m}$ を得たとする。これらの切削抵抗力をそれぞれ満足するような( $c, \phi$ )の組み合わせを図示すると図-4のようになり、 $P_{90}, P_{60}$ の曲線は、( $c, \phi$ ) = (10 kN/m<sup>2</sup>, 40 deg)の点で交差する。この交点はその地盤の持つ強度定数の組み合わせであることは明らかである。

このように、異なる傾斜角による切削を行い、それぞれの切削抵抗力の組み合わせから $c, \phi$ を簡便にかつ同時に求められる可能性のあることが示された。上記推定法においては、土の自重に関して $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ という仮定のもとに計算を行ったが、 $\gamma = 17 \sim 19 \text{ kN/m}^3$ の範囲では、( $c, \phi$ )の推定値は微々たる誤差しか認められなかったことを付記しておく。本論文では、土の切削機構のモデリングとして極限平衡法を用いたが、今後さらに整合性のあるモデル、解析手法での理論構築を行うとともに、既知データや実測データを入力すると直ちに $c, \phi$ が推定できるようなアルゴリズムの開発を行っていく予定である。

4. おわりに

月面土壌は、特に締まった状態においてインターロッキング効果が発揮されると予想され、強度定数としては、 $\phi$ と同時に見かけの $c$ についても考慮する必要があることが判明した。本論文では、それをふまえた上で、月面探査時のロボットによる土の切削抵抗力から強度定数 $c$ と $\phi$ を同時に推定するためのアイデアを提案した。今後は実験を行い、提案する推定法の適用性について検討していく予定である。

<参考文献>

- 1)山口 柏樹 : 8章 8.5 粘性土の土圧, 土質力学 (全改訂), 技報堂, pp.237-238, 1984
- 2)Potyondy, J. G : Skin friction between various soils and construction materials, *Geotechnique* Vol.12, No.4, pp339-353, 1976
- 3)小林 泰三 : 地盤-剛体系の相互作用およびそれに伴う周辺地盤の変形機構に関する研究, 博士学位論文, 2000

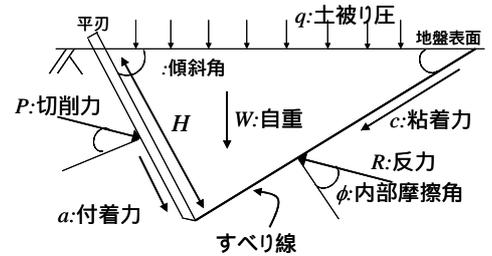


図-2 切削時の土の破壊のモデリング

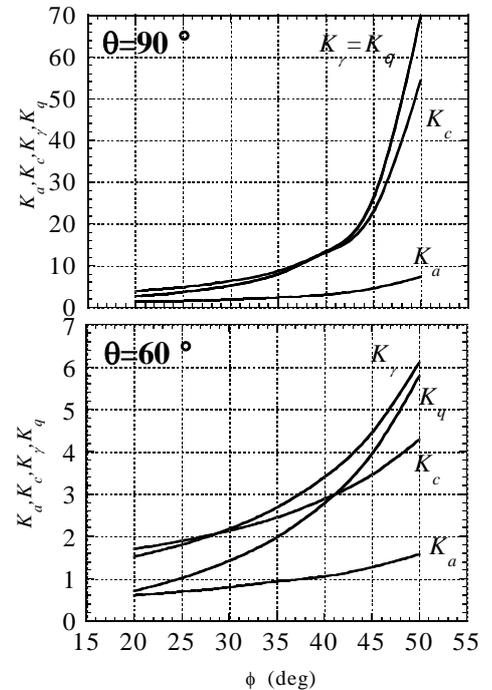


図-3 切削力係数との関係

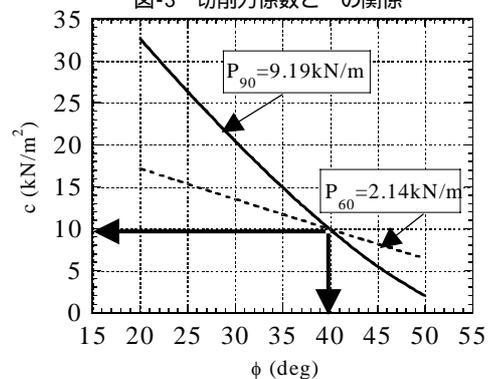


図-4 c, phiを推定するための概念図