

無人月面探査に向けた地盤の力学的試験方法の検討

青木 滋 金森 洋史
(技術研究所) (技術研究所)

Lunar Soil Mechanics Investigation on Robotic Exploration

by Shigeru Aoki and Hiroshi Kanamori

Abstract

Geotechnical properties of lunar soil were investigated in Apollo era. Especially, returned regolith allowed us to learn physical properties of soil particles in detail. Meanwhile, mechanical properties of undisturbed lunar soil include uncertainty, because they were nothing but estimation from soil models. Designing and analyzing excavation machine, locomotion system or landing gear for human lunar exploration using direct measured mechanical properties could reduce machine weight and achieve economical performance on the Moon. We propose in-situ direct measurement method to obtain precise mechanical properties. Laboratory model of the measurement system has been tested in the simulated lunar environment. Results of the tests suggested that the proposed method would properly work for measuring in-situ mechanical properties of lunar soil, and some of the fundamental information for designing final (flight) model were obtained.

概要

アポロ計画によって月から持ち帰られたサンプルを用いて、地上において月砂の基本的な物理特性が精密に計測された。一方、月面では貫入試験等の“その場”試験は実施されたものの、得られた地盤の力学特性は推定値のみであったことから、今後の有人月探査で計画される機器等の設計パラメータとしては不十分と考えられた。そこで筆者らは、これら月面機器の設計に資する地盤の力学的モデルを構築するために、月面で地盤特性を直接計測する計画を提案し、計測機器のプロトタイプを開発すると共に、模擬月砂を用いた室内実験を行って計測機器の機能と性能を確認した。その結果、提案した機器の計測機構によって地盤特性の取得が可能であることを確認すると共に、本格的な宇宙機搭載用機器の設計に有効な情報を取得した。

§ 1. はじめに

JAXA (宇宙航空研究開発機構) および NASA (米国航空宇宙局) を含めた 14 カ国の宇宙機関が協力し、2011 年に月惑星探査のロードマップを発表した¹⁾。このロードマップでは、月への有人着陸探査が計画されており、そこでは大型の着陸機、表面移動機器および本格的な資源探査機器等が運用されることになっている。すでに地上では、JAXA 等においてこれらの宇宙機器の検討が始められているが、機器設計に必要な地盤特性に関する情報が十分に得られていないという課題に直面している。そのため、本格的な有人探査を始める前に、無人探査を行って月の地盤調査を行うことが望まれている。

1960 年代後半から 70 年代にかけて実施されたアポロ計画では、月面着陸機や月面設置機器を適正に

設計することを目的に、全ての着陸探査において Soil Mechanics ((土質力学) 実験が実施された²⁾。アポロ計画において調べられた土質力学特性には、地球に持ち帰られたサンプル(リターンサンプル)から得られたデータと、“その場”(月面)試験で得られたデータがある。リターンサンプルについては、地上の計測機器を用いて複数の専門家が直接計測することができるため、粒子比重、かさ密度および相対密度等の砂の基本的な物理量を精密に取得することができた。一方、月面では乱さない状態の地盤に対して貫入試験が実施され、その力学的特性が計測された(表-1 参照)。しかし、これらの貫入試験はインデックス試験と呼ばれるもので、仮定したモデルに計測結果を当てはめることによって、内部摩擦角や粘着力などの力学的なパラメータを推定する手法と

なっている。即ち、アポロ計画で得られた月面地盤の力学的特性は「推定値」に止まっており、近年の機器の設計や解析に用いられるデジタルモデルの構築には不十分と考えられる。

そこで筆者らは、「①月面地盤の力学特性を”その場”で直接計測し、②計測した力学特性を基に月面地盤の力学的モデルを構築することで、③月面機器の設計／解析に適用する事を可能とする月面地盤調査計画について検討し、JAXA への提案活動を行っている。

本報では、月面地盤の力学的特性を”その場”で直接計測する機器の試作機の開発と、その機能と性能評価した実験の概要を報告する。

表-1 アポロで推定された地盤強度定数²⁾

推定根拠	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 φ (degree)
アポロ 11 号 機器の貫入	0.75-2.1	37-45
アポロ 12 号 機器の貫入	0.56-0.75	38-44
アポロ 14 号 土質用トレンチ 車輪の轍	0.03-0.1 NA	35-45 37-47
アポロ 15 号 貫入試験等	1.0	50
アポロ 16 号 貫入試験 station4	0.6	46.5
貫入試験 station10.1	0.37	49.5
貫入試験 station10.2	0.25-0.60	47-50
ボアホール	1.3	46.5
アポロ 17 号 ボアホール	1.1-1.8	30-50
月面車	0.17	35
アポロ総合推定値	0.1-1.0	30-50

§ 2. 地盤力学特性の直接計測方法

地盤の力学特性計測には、孔内せん断摩擦試験を採用した。この試験方法は、ドリル孔(ボアホール)を用いることが特徴で、“その場”で地盤を乱すことなくせん断試験を実施できるため、地盤の力学的特性の直接取得に最も適していると考えられる。その手順は以下の通りとなる。

1. 月面ドリルによる準備削孔

専用の削孔装置を用いてボアホールを削孔する。

2. 地盤力学試験

ボアホールに孔内せん断試験装置を挿入し、水平載荷試験ならびに孔内せん断試験を行う。

2.1 月面ドリルによる準備削孔

月面ドリルによる削孔は、それに続く孔内せん断摩擦試験用のボアホールの作製が目的である。削孔には、ビット先端で発生する掘削ズリを地上に排出する機構が必要となるが、月面は極高真空(大気圧力: 1×10^{-8} Pa以下)であるため、地上で一般的に行なわれるスラリ循環掘削(発生する掘削ズリを泥水化させ、ロッドを経由して地上に排出する削孔方法)の適用は不可能である。また、月面の低重力環境(地上の1/6)により、貫入に必要な反力を確保し難いこと、ならびに適正な孔内試験を行なうために、孔壁を極力乱さないことなどが装置を設計する上で重要な条件となる。さらに、真空環境下における掘削のためにビットが過熱し易いことや、小電力化および軽量化についても考慮が必要である。

これらの条件を総合的に判断した結果、本システムでは、オーガ(スクリー型ドリル)を用いてレゴリス(隕石の衝突等によって破碎した岩石の堆積物: 月の表面を覆っている物質)を地上に排出する方法を採用した。オーガは、掘削ズリ排出用のスクリー部と先端の超硬ビットで構成され、回転／掘進により削孔・排土が行われる。また削孔中には、削孔反力、回転トルクおよび挿入深度が計測されるようになっている。これらの削孔情報は、自動削孔のフィードバック制御および安全性確認等に利用される。

2.2 地盤力学試験

地盤力学試験では、月面ドリルを用いて削孔したボアホールに計測管(ゾンデ)を挿入し、水平載荷試験およびせん断摩擦試験を行う(図-1参照)。ゾンデは、ボアホール内で半径方向に膨張して孔壁を加圧する機構を持ち、その応力の計測と制御が可能な筒状の計測器となっている。

水平載荷試験プロセスでは、ゾンデで孔壁を加圧することにより、その圧力と壁面の変位から地盤の変形係数(E)および降伏圧力を求める。せん断摩擦試験プロセスでは、孔壁にゾンデを所定の荷重で押付けた状態で引き上げることにより、レゴリス内にせん断すべりを生じさせ、引上げ力(せん断力)と変位の関係から地盤の強度定数[粘着力(c)および内部摩擦角(φ)]を求める。水平載荷試験とせん断摩擦試験は、それぞれ別目的の試験であるが、提案する方法では同一のゾンデによって両者の試験を行うことができる。本報では、後者の孔内せん断摩擦試験に関する室内実験の結果を報告する。

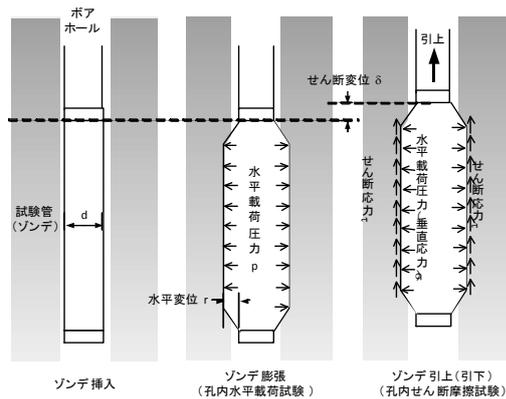


図-1 地盤力学特性の計測(概念図)

せん断摩擦試験の手順は下記の通りである。

- ①ソンドをボアホールに挿入
- ②所定の荷重による水平載荷を開始
- ③水平載荷重を一定に制御
- ④所定の速度でソンドを引上げ
- ⑤所定の引上げ量で停止

②～⑤の手順を、複数の水平載荷重レベルで繰り返すことで、複数の[水平載荷力, 引上げ力]の関係が得られる。なお、水平載荷力および引上げ力は載荷板の接地面積で除し、それぞれ垂直応力およびせん断応力として表される。

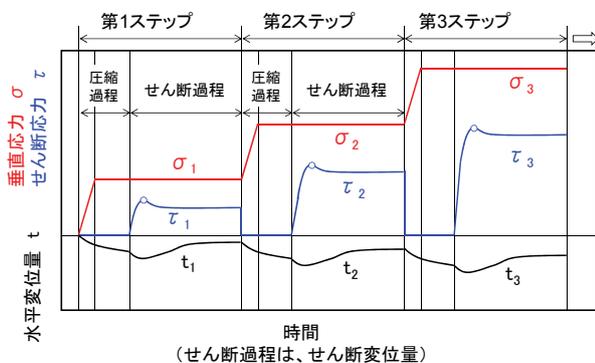


図-2 せん断摩擦試験のデータイメージ

本試験は、定圧一面せん断試験に相当しており、せん断応力(τ)と水平変位量(t)の経時変化は図-2のように表すことができる。さらに、せん断応力(τ)の最大値(定圧せん断強さ(τ_f))を、各載荷段階におけるその時の垂直応力(σ)に対してプロットすると、その近似直線の切片と勾配から強度定数(c_d, ϕ_d)が求められる(図-3参照)。なお、垂直応力とせん断応力の関係は次式で表される。

$$\tau_f = \sigma \tan \phi_d + c_d \quad (1)$$

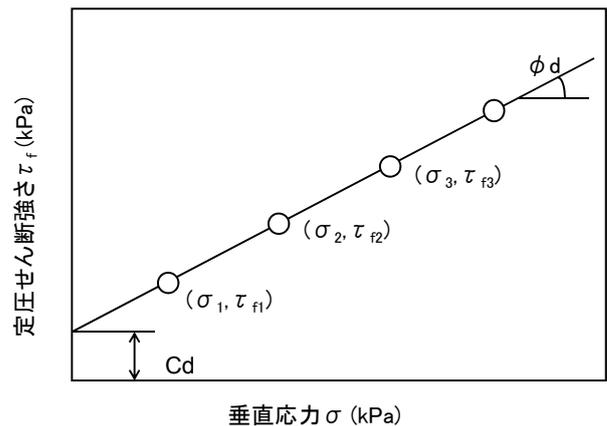


図-3 地盤の強度定数

§ 3. 実験用試作機の概要

3.1 装置仕様

提案機器の基本的な機能と性能を確認すると共に、宇宙機搭載用機器の設計に必要なデータを取得する事を目的に、試作機による実験を行った。特に削孔時には掘削に伴う反力の発生や、エネルギー消費等が実機製作における課題となる可能性があることから、実験を行い、そのデータを機器設計に活用する計画とした。表-2に実験装置の仕様を示す。

表-2 試作実験装置の仕様

項目	仕様
掘削深さ	最大：400 mm
掘進速度	最大：10 mm/sec
掘進力	最大：50 N
回転速度	最大：2.0 r/sec
回転トルク	最大：1.9 Nm
土槽深さ	450 mm
土層直径	200 mm

実験用試作機は、月面用ドリル部、真空チャンバ部および地盤力学計測装置から構成される。以下にその概要を述べる。

3.2 月面用ドリル部

3.2.1 ドリル駆動部

月面用ドリル試作機を図-4および写真-1に示す。駆動部は、オーガを昇降させる昇降機構部(掘進動作)とオーガを回転させる回転機構部から構成される。昇降機構部は、ガイドレールに取り付けられた昇降部に6軸力センサ、回転機構部およびオーガが組み付けられ、これを台形駆動ネジで駆動することにより昇降できるようになっている。6軸力センサは、掘削時の掘進力および回転トルクの計測に用いられる。

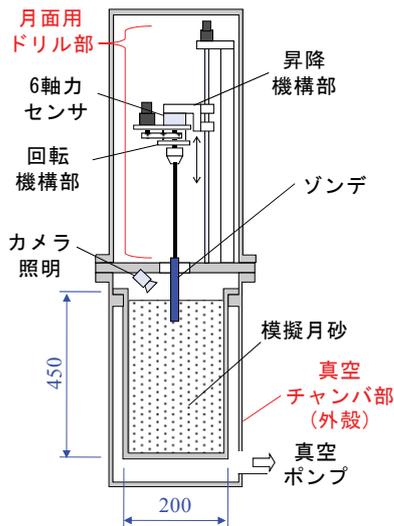


図-4 月面用ドリル試作機概略図

ラを内部に設置し、ディスプレイを通して掘削状態を目視確認できるようになっている(図-4参照)。



写真-2 ドリルビットとオーガ



写真-1 月面用ドリル駆動部および土槽

3.2.2 オーガドリル

掘削に用いたオーガとドリルビットを写真-2に示す。オーガは、外径25mm/ピッチ10mmのらせんとした。これは、アポロ計画で用いられたドリルの外径が25mmであったことから³⁾、比較のために同等の外径を採用した。また、ドリルビットの外周掘削径は30mmと、オーガより若干大きい直径とした。これは、オーガの外周と掘削後のボアホール壁面との摩擦の影響を少なくするためである。

3.2.3 真空チャンバ部

真空実験時の装置全体を写真-3に示す。また、真空チャンバ土槽部分の詳細を図-5に示す。

真空チャンバの内部には、前述したドリル機構部および模擬月砂が詰められた土槽が配置され、外部PCからのコマンドで掘削および計測ができるようになっている。また、掘削状態確認のためLEDライトとカメ



写真-3 月面ドリル用真空チャンバ

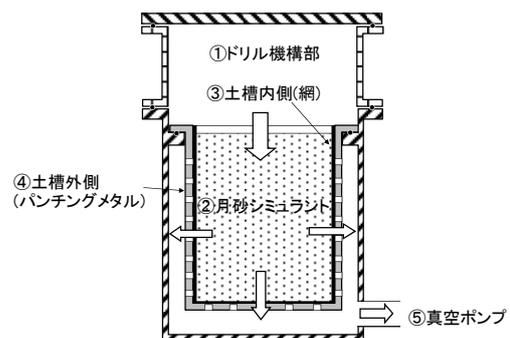


図-5 真空チャンバ部土層部詳細

チャンバの内部構造は図-5のように上下に分かれており、チャンバ下部の外側の筒が真空ポンプに接続され、その内部に土槽が設置される。土槽は、構造材のパンチングメタル(図中④)と模擬月砂の流出を防止するためのステンレスメッシュ(図中③)の二重構造となっていて、メッシュ(開き:150 μ m)を通して模擬月砂内部の空気を排気する仕組みとなっている(図中矢印は、空気の流れを表す)。一般に真空環境下で土槽を用いた実験を行う場合、土槽表面

から曝気すると、土中の空気が急激に膨張・拡散するいわゆる沸騰現象を発生し、土槽を大きく破壊してしまう場合がある。本装置は、このような模擬月砂の沸騰現象を抑えるために考案された方法を採用したものである。

このようにするとチャンバ上部(図中①)の空気は模擬月砂を経由して排出されるため、模擬月砂の圧力〔土壌内圧力〕はチャンバ上部の圧力と同等あるいはそれ以下となる。土壌内部に圧力のばらつきや勾配が発生することも考えられることから、本検討では土壌内圧力の最大値としてチャンバ上部の圧力を採用した。

3.3 地盤力学計測装置

3.3.1 ゾンデ

前述のように、ゾンデは膨張する機能を持ち、孔壁との圧力を計測しながら制御する必要がある。月面での使用を想定した場合、地上のような流体圧力を利用した膨張は困難なため、機械的な拡張機能(以降、膨張機構)として設計・試作した。

図-6にゾンデ断面図を示す。ゾンデの膨張機構(写真-4参照)は電動モータの回転力を半径方向の膨張力へ変換する機構となっている。孔壁に押しつける部分の幾何学的条件は、

(a) 載荷板が孔壁に平行

(b) 載荷板の位置が回転軸の軸方向に不動

の2点となり、これらを実現するために、以下の機構を考案した。まず、①モータの回転を③リードネジ右と④リードネジ左に伝達し、⑥ナット右と⑦ナット左を用いて⑤ユニバーサルジョイントを中心とした対象の直動動作(モータの回転軸上)に変換する機構とした。次に、モータ軸上を対象に直動する⑥ナット右と⑦ナット左に平行リンクを取付け、その先端に⑧載荷板を取付けた。試作機ではゾンデの直径を30mmとし、半径方向に40%以上膨張するように設計した。前述のようにドリルビットの外周掘削径も30mmであるが、それで掘削した孔の径は、掘削面での砂粒子同士の咬み合いなどによって実際には30mm以上となる。また、ゾンデの膨張機構を最大限有効に利用することも考え、ゾンデの直径をドリルビット径と同等に設定した。

一方、押付け圧力の計測は、以下のように行われる。まず、ゾンデの⑤載荷板に加えられる圧力は、リンクを通して⑥ナット右、⑦ナット左に伝達される。その力の方向は⑤ユニバーサルジョイントを中心として外側に向かう力となる。この力は③リードネジ右と④リードネジ左に伝えられ、⑤ユニバーサルジョイントを回転軸方向に引っ張る力となる。こ

の時、⑤ユニバーサルジョイントを回転方向および回転軸圧縮方向に拘束する機構にすると、④リードネジ左は⑧可動板に力を伝え、⑨ロードセルで力を計測することができる。試作機では、100kPaまでの押付け圧力の計測を可能とした。

一方、モータのエンコーダで得た回転情報から、③リードネジ右と④リードネジ左の位置を計算し、リンクの幾何学的条件より⑨ロードセルの計測結果を⑧載荷板の半径方向の力に変換することができる。この機構を用いて載荷板の膨張半径を制御することで、孔壁への圧力の制御を行った。

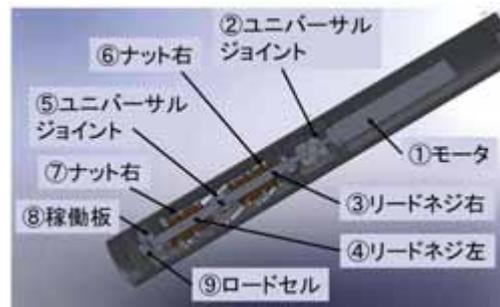


図-6 ゾンデ断面図



写真-4 ゾンデの収縮と膨張(内部機構)



写真-5 地盤力学計測装置

3.3.2 せん断力計測部

ボアホールへのゾンデ挿入、引上げおよびせん断力の計測は、上記のボアホール掘削装置のオーガ部分をゾンデに付け替えて地盤力学計測装置とすることで達成した(写真-5参照)。昇降機構でゾンデ

をボアホールへ挿入し、指定した位置で停止する。その後、ゾンデを制御し指定した垂直応力に達した時点で、引上げる。その時のせん断応力は6軸力センサで計測した引上げ力から算出される。

3.4 模擬月砂

3.4.1 模擬月砂基本特性

月面は岩石の破砕堆積物(レゴリス)で覆われていて、その大部分を占める物質が、いわゆる「砂」と定義される細かい粒子成分である。模擬月砂は、この月面の細かい粒子の部分の部分を模擬した材料として開発された⁴⁾。

図-7に国内で開発された模擬月砂(FJS-1)の粒度を示す。FJS-1の最大粒径は2mmで、全体の50%の質量が通過するふるいの寸法(粒径中央値)は70~75 μm となっている。図中の実線は、アポロサンプルで計測された粒度の上限下限値で、FJS-1の粒度は、この範囲に収まるように製造されている。また、表-3に粒子の基本特性として、かさ密度(単位容積質量)の最小値と最大値および粒子比重を示す。

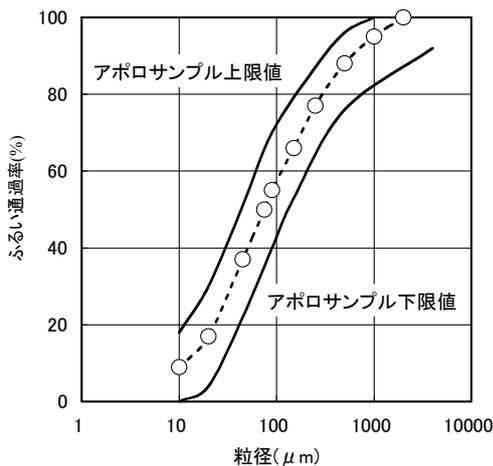


図-7 FJS-1の粒度

表-3 FJS-1の物理特性(粒子)

	単位容積質量 (g/cm ³)		粒子比重
	最小	最大	
アポロサンプル	1.45	1.79	平均3.1 (2.3~3.2以上)
FJS-1	1.40	2.0	2.94

FJS-1の全岩分析結果(化学組成)を表-4に示す。月の海の代表値とされるアポロ11号(高チタン)試料とアポロ12号(低チタン)試料の化学組成も比較のために併記する。地上の岩石から製造されるFJS-1は、月にはないFe₂O₃が多く含まれる。また、FJS-1はアポロサンプルよりNaに富み、アルカリ分を多く含む。

表-4 FJS-1の化学組成(wt%)

Element	A-11	A-12	FJS-1
SiO ₂	42.2	46.3	49.14
TiO ₂	7.8	3	1.91
Al ₂ O ₃	13.6	12.9	16.23
Cr ₂ O ₃	0.3	0.34	0
FeO	15.3	15.1	8.3
Fe ₂ O ₃	0	0	4.77
MnO	0.2	0.22	0.19
MgO	7.8	9.3	3.84
CaO	11.9	10.7	9.13
Na ₂ O	0.47	0.54	2.75
K ₂ O	0.16	0.31	1.01
P ₂ O ₅	0.05	0.4	0.44
S	0.12	-	0
H ₂ O	0	0	0.43
Total	99.9	99.11	98.14

3.4.2 月面深さとかさ密度の関係

アポロの地下サンプルの計測結果より図-8の深さとかさ密度の関係が導かれている²⁾。表面近傍のかさ密度は1.5 g/cm³程度で、砂としては緩い状態であることに對し、深さが増すにつれ急激に締め固められた密な状態に遷移する。今回の実験で用いた模擬月砂のかさ密度は1.7~1.9 kg/cm³で、月面無人探査の調査範囲と考えられる2m程度までの深さを想定している³⁾。

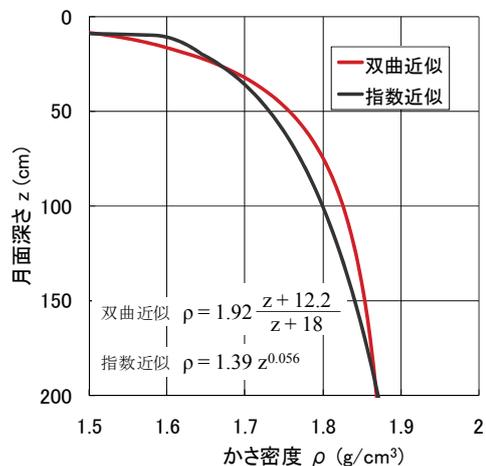


図-8 月面深さとレゴリスかさ密度の関係

3.4.3 模擬月砂内の圧力特性

地球の一般的な砂と比較して、細粒成分の比率が多い模擬月砂は、粒子間隙に空気を封じ込める性質が強いため、真空時の空気排出には時間を要することが予想された。実験環境を設定するために、前述した真空チャンバと土槽を用いてかさ密度1.75 g/cm³の模擬月砂を真空引きし、土壌内圧力を計測した。時系列のチャンバ圧力(真空ポンプ側雰囲気圧力)と土壌内圧

力を図-9に示す。排気条件は、本引き用真空ポンプ(油拡散ポンプ)を用いた場合と粗引きポンプ(油回転ポンプ)を用いた場合の2種類を設定した。

実験の結果、試作した真空装置では土壌内圧力25Pa以下を達成できる事が明らかになったため、本実験における真空環境条件では、土壌内圧力25Pa以下を目標とした。この圧力は、月の大気圧力である 1×10^{-8} Pa以下と比較して十分に低い値とは言えないが、地上においてこのレベルの土壌内圧力を達成した既往の研究例はない。また、大気圧に対して約1/4,000と非常に小さいことから、土壌間隙の空気が削孔時の砂粒子の運動に及ぼす影響に関しては、この圧力でも大気圧との違いを期待できると判断した。

表-5に実験環境を月面環境と比較して示す。

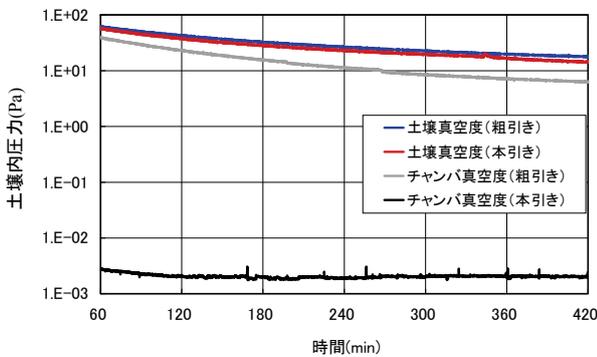


図-9 土壌内圧力(FJS-1: かさ密度 1.75 g/cm³)

表-5 実験環境

項目	実験環境	月面環境
温度	常温	-170~110°C*1
土壌内圧力*2	25 Pa ~大気圧	10 ⁻⁸ Pa 以下
重力	1 G	1/6 G
掘削対象	FJS-1*3	月レゴリス

*1:赤道付近の夜(最低)と昼(最高)の温度

*2:模擬月砂中および月レゴリス中の圧力

*3:国内で生産された模擬月砂の名称

§ 4. 実験結果

4.1 削孔実験

4.1.1 実験条件

削孔実験における、かさ密度、ステップ回転数および土壌内圧力の各条件を表-6に示す。かさ密度は1.75 g/cm³(地下50cm相当)および1.90 g/cm³(地下250cm相当)の2種類、土壌内圧力は常圧と25Pa以下の2種類を実施した。なお、掘進速度は共通で2.0mm/secに固定した。この掘進速度より、オーガピッチ10mmに沿って掘削する(木ネジのように掘

進する)場合のオーガ回転速度は0.2r/secとなる。実験では、0.2r/secを基準として5種類の回転速度を設定した。

表-6 削孔実験条件

実験	かさ密度 (g/cm ³) (相対密度(%))	ステップ 回転数 (r)	土壌内圧力 (Pa)
#1-1	1.75 (67%)	1.0	常圧
#1-2		1.5	
#1-3		2.5	
#1-4		3.75	
#1-5		5.0	
#1-6	1.75 (67%)	1.0	11.7
#1-7		1.5	14.7
#1-8		2.5	10.8
#1-9		3.75	5.33
#1-10		5.0	6.67
#1-11	1.90 (88%)	1.0	常圧
#1-12		1.5	
#1-13		2.5	
#1-14		3.75	
#1-15		5.0	
#1-16	1.90 (88%)	1.0	14.7
#1-17		1.5	17.3
#1-18		2.5	18.7
#1-19		3.75	22.7
#1-20		5.0	17.3

表中のステップ回転数は、オーガが1ピッチ掘進する間の回転数として、以下のように定義する。

$$S = Rp/v \quad (2)$$

ここで、S:ステップ回転数(r)、R:回転速度(r/sec)、p:ピッチ(m)、v:掘進速度(m/sec)

上記より、木ネジのように掘進する場合のステップ回転数はS=1.0となり、この値を最小として、Sを最大5.0まで5段階に設定した。

4.1.2 削孔実験結果

ステップ回転数と削孔トルクを関係を図-10に示す。

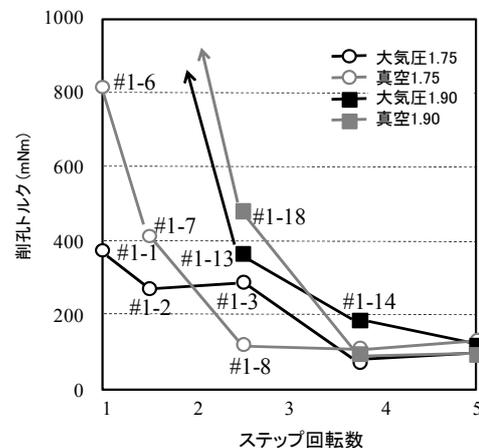


図-10 ステップ回転数と削孔トルクの関係

図-10より、ステップ回転数の増大に伴い、削孔トルクが減少する傾向が明らかになった。今回用いた直径25mm、ピッチ10mmのオーガにおいては、ステップ回転数を5とした場合に、環境条件(かさ密度および土壌内圧力)にかかわらず、比較的小さなトルクでの削孔が可能となった。この原因は、写真-6に示すように、ステップ回転数が大きい場合には掘削ズリをボアホールからより多く排出することが出来るためである。

掘削ズリを排出するための十分な回転速度が得られない場合は、ボアホール内でオーガが周囲の模擬月砂を圧縮し、それが掘削の抵抗となって掘進力ならびに削孔トルクが増大したと考えられる。例えば、写真-6の#1-16(表-6参照)はステップ回転数が1と小さく、ズリを円滑に排出することができない状況を示しており、この時の削孔には大きなトルクを必要とした。

掘削後のボアホールの状況を写真-7に示す。模擬月砂の掘削後は、このような自立する(孔壁が重力で崩れ、孔が埋まってしまうことがない)ボアホールを作製することができた。

アポロのドリル削孔等でも観察されているこの自立現象は、土質力学的には見かけの粘着力による効果と考えられている。この見かけの粘着力には、粒子の形状に起因する粒子同士のインターロッキング作用や、せん断破壊時に砂の体積が膨張するダレイタンシー現象等が影響している。



写真-6 掘削ズリ排出の比較(#1-16~1-20)



写真-7 掘削後のボアホール(深さ約40cm)

4.2 孔内せん断摩擦試験

4.2.1 実験条件

孔内せん断摩擦試験の実験条件を表-7に示す。かさ密度は 1.70 g/cm^3 (地下40cm相当)から 1.90 g/cm^3 (地下250cm相当)までの5種類、土壌内圧力は常圧のみとした。垂直応力については20~100kPaの範囲で5点の载荷を設定したが、かさ密度が小さい状態では、载荷によって地盤が破壊して計測できない状況が生じたため、応力範囲と载荷数をかさ密度ごとに調整した。

表-7 孔内せん断摩擦試験条件

実験	かさ密度 (g/cm^3) (相対密度(%))	垂直応力 (kPa)	備考
#2-1	1.70 (59%)	20	
#2-2		30	
#2-3		40	
#2-4		50	地盤破壊
#2-5	1.75 (67%)	20	
#2-6		35	
#2-7		50	
#2-8		65	地盤破壊
#2-9	1.80 (74%)	20	
#2-10		35	
#2-11		50	
#2-12		65	
#2-13		80	地盤破壊
#2-14	1.85 (81%)	20	
#2-15		40	
#2-16		60	
#2-17		80	
#2-18		100	
#2-19	1.90 (88%)	20	
#2-20		40	
#2-21		60	
#2-22		80	
#2-23		100	

4.2.2 孔内せん断摩擦試験結果

孔壁への垂直応力とせん断応力の計測例を図-11および図-12に示す。各図は、全ての垂直応力レベルに対するせん断過程を1つのグラフにまとめて表しているため、横軸の経過時間は、各垂直応力レベル内でのみ連続している。なお、各々のせん断過程は約10秒程度であった。図-11は、かさ密度 1.75 g/cm^3 (相対密度67%)の中詰め地盤に対する結果を示しており、垂直応力65kPaで引き上げたときに地盤の破壊が発生し、応力が解放されている状況が示されている。一方図-12は、かさ密度 1.90 g/cm^3 (相対密度88%)の密詰め地盤について示しており、20~100kPaの垂直応力範囲で地盤が破壊することなくせん断すべりをしている状況が確認された。このようにして得られた応力履歴は図-2の垂直応力(σ)および、せん断応力(τ)に相当しているが、実際の地盤の応答には地盤の不均一性が原因と思われるノイズも含まれている。

図-13に、垂直応力とせん断応力の関係を示す。

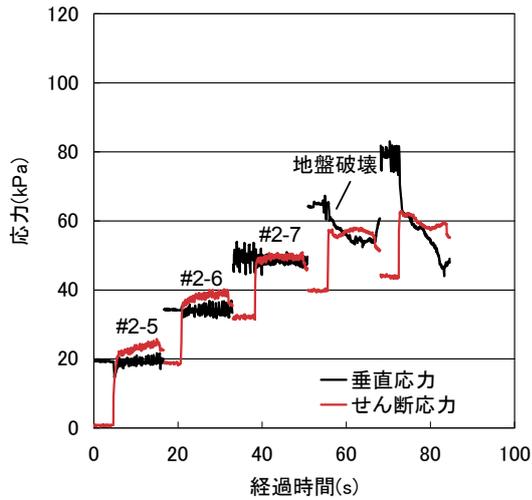


図-11 応力の時間履歴(かさ密度 1.75 g/cm³)

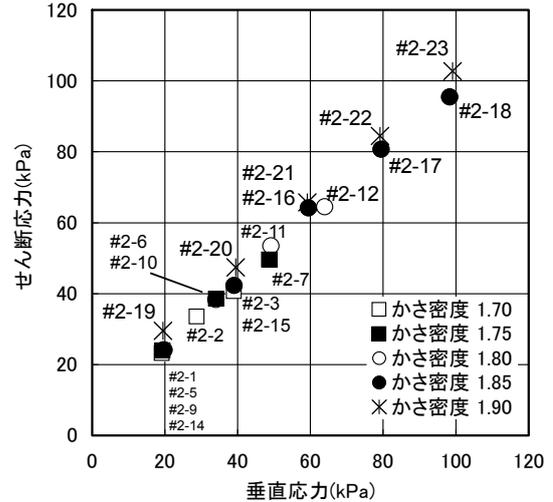


図-13 垂直応力とせん断応力の関係

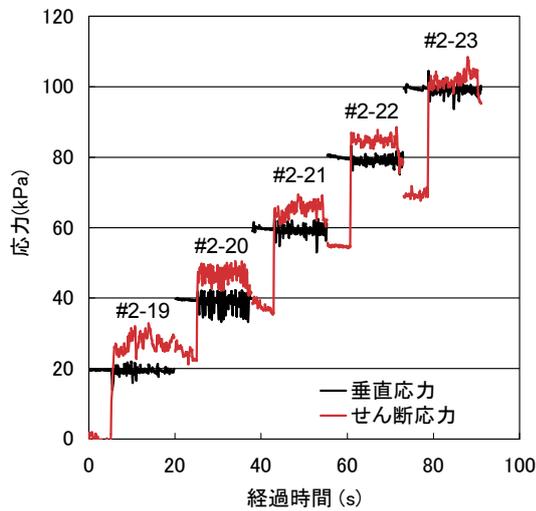


図-12 応力の時間履歴(かさ密度 1.90 g/cm³)

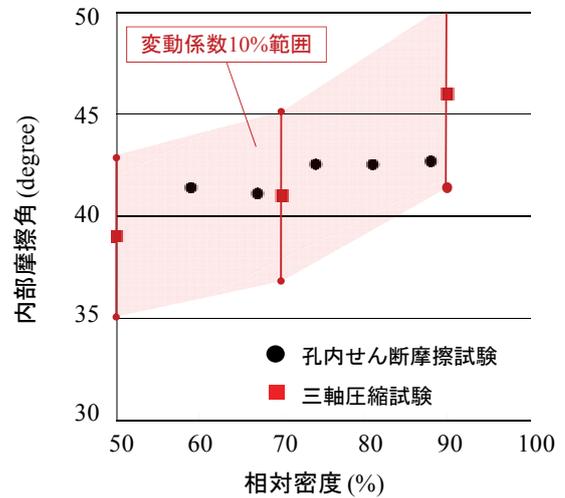


図-14 相対密度と内部摩擦角の関係

図-13 から求めた内部摩擦角 (ϕ_d) および粘着力 (c_d) を相対密度に対して表すと図-14 および図-15 のようになる。内部摩擦角は $41^\circ \sim 43^\circ$ に値が収まる結果となった。また、粘着力については、かさ密度 1.9 g/cm^3 (相対密度 88%) に関してのみ 11.3 kPa となった以外は $7 \sim 8 \text{ kPa}$ 程度であった。

従来の室内土質試験と比較するために、三軸圧縮試験による内部摩擦角と粘着力⁷⁾を同図内に示した。一般に内部摩擦角の変動係数は $10\% \sim 20\%$ 、粘着力は $20\% \sim 40\%$ とされている⁸⁾。これらを考慮して孔内せん断試験結果を三軸圧縮試験結果と比較すると、内部摩擦角はほぼ同等、粘着力は若干低い値となった。計測値の妥当性に関しては、さらなる検討を行う必要があるが、今回試作した試験装置は、地盤特性を取得できる基本的な機能と性能を有していることを確認した。

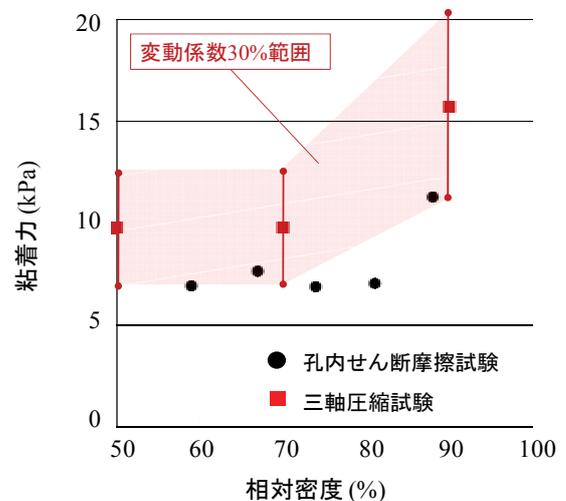


図-15 相対密度と粘着力の関係

せん断応力の応答は、一般的には図-2のようにせん断開始時にせん断応力の最大値が観測され、その後残留応力が観測されるが、今回の実験結果(図-11および図-12等)では、明確なせん断応力の最大値は観測されなかった。この要因としては、せん断速度が大きすぎたことおよび垂直応力の制御性能が低かったことが考えられる。乾燥砂に関しては、せん断速度はせん断応力の応答にほとんど影響しないことが知られているが、一般の一面せん断試験が重力による载荷方式であることに対し、本実験はモータによるアクティブな载荷方式であるため、载荷の制御性能とせん断速度の大きさによりピークが検出できなかった可能性が考えられる。今後、载荷制御性能の向上とせん断速度の調整について検討したい。

また、相対密度が小さい場合のせん断摩擦試験では、垂直応力によってせん断面の相対密度が大きくなることが考えられる。今後、垂直応力と相対密度の関係を明確にし、相対密度に対応した垂直応力レベルを決定したい。

参考文献

- 1) “The Global Exploration Roadmap”, International Space Exploration Coordination Group, September 2011
- 2) G. Heiken, D. Vaniman, B. M. French, “Lunar Sourcebook: A User’s Guide to the Moon”, Cambridge University Press, 1991
- 3) Y. Bar-Cohen, K. Zacny, “Drilling in Extreme Environment”, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaH, 2009
- 4) 青木, 金森, “月面活動に向けた基礎技術”, 第53回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2009, 1C11
- 5) 青木, 金森, “月面環境におけるドリル掘削”, 第54回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2010, 3A01
- 6) 青木, 金森, 小林, 深川, “月面における地盤調査方法の検討”, 第55回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2011, 2I06
- 7) 黒木, 落合, 小林, 青木, “月面地盤の強度定数の評価・推定法に関する一提案”, 土木学会西部支部研究発表会, 2005
- 8) 土木構造物荷重指針連合小委員会, “第9章 地盤作用”, http://www.jsce.or.jp/committee/st/kajuu/documents/guideline/2nd_jiban_ver2-2.pdf, 2003.

§ 5. 結論

月面で地盤の力学的特性を直接計測するための月面用ドリルおよびせん断摩擦試験装置を設計・試作し、実験を行ってそれらの機能と性能を評価した。その結果、提案した機器の計測機構によって地盤特性の取得が可能なことを確認すると共に、本格的な宇宙機搭載用機器の設計に有効な情報を取得した。

今後の課題として、载荷制御性能の向上ならびに、垂直応力と砂の相対密度の関係を明確にする必要のあることが明らかとなった。

謝辞

本研究開発の孔内せん断摩擦試験部分においては、福井大学小林准教授および立命館大学深川教授より、助言を承りました。ここに感謝の意を表します。