



ISSN 1349-1121  
JAXA-RM-05-003

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

月の模擬土壌を用いた斜面走行試験装置の開発

若林 幸子、松本甲太郎

2006年 2 月

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency

# 月の模擬土壌を用いた斜面走行試験装置の開発\*

若林 幸子\*<sup>1</sup>, 松本 甲太郎\*<sup>1</sup>

Development of Slope Mobility Testbed using Simulated Lunar Soil\*

Sachiko Wakabayashi\*<sup>1</sup>, Kohtarō Matsumoto\*<sup>1</sup>

## Abstract

A lunar vehicle mobility testbed was developed, primarily for the purpose of evaluating slope mobility. This testbed is equipped with a sandbox containing simulated lunar soil, which is mechanically tilted to a forty-degree angle. It is also equipped with a soil smoother, comprising a plow and a leveler, to adjust and maintain the soil's bulk density and thus realize identical soil conditions for multiple experiments.

**Keywords:** lunar vehicle, slope mobility, test apparatus, simulated lunar soil

## 概 要

月面車の斜面登坂能力を評価する斜面走行試験装置を整備した。土壌に模擬レゴリスを使用し、機構上は40度まで傾斜が可能である。均し機を備えることで土壌かさ密度の垂直分布の調整と再現性の高い整地が可能となり、走行性能推定に必要な基礎データの取得が可能となった。

### 1. はじめに

月面車の走行系の検討においては、月面環境下での走行性能を地上で評価する手法の確立が重要課題の一つである。月面を想定した走行評価の場合、理想的には地上の6分の1の重力下の真空中で走行試験を行なうべきであるが、現実にはこの条件下で地上試験を行なうことは難しい。例えば、月面車自体の重力補償はある程度可能であるが、土壌の重力補償は困難であるため、土壌と走行系の相互作用を厳密に模擬できない。そこで、何らかの手法で月面での走行性能を推定することになる。推定方法としては、土壌自体の機械的性質の違いを評価するための6分の1G飛行試験や真空試験、あるいは相似則に基づく小型モデルによる地上試験等が試みられている<sup>3),4)</sup>。こうした手法を併用することで、地上環境で得られた走行性能から月面での走行性能を推定することがある程度可能となると予想される。

砂を使った走行試験においては、実験条件が明確で再現性が高い試験方法を用いてデータを取得することが重要となる。月面の土壌の特徴である、表層のかさ密度の低い土壌を再現性よく模擬することも必要である。

今回、特に登坂性能の評価に用いるための斜面走行試験装置を整備した。この報告では、斜面走行試験装置の設計、実験例、及び土壌模擬についてまとめる。

### 2. 斜面走行試験装置概要

斜面走行試験装置(図1、2)は、比較的小型(1m四方程度以下)の月面車を想定し、特に斜面登坂能力の評価用装置として整備した。重力や真空の影響を加味して月面上での走行性能を推定する前段階として、模擬土壌を使った実機サイズの地上走行性能データの取得を行なうことを目的としている。表1に概略仕様をまとめる。

\* 平成18年1月30日 受付 (received 30 January 2006)

\* 1 総合技術研究本部宇宙先進技術研究グループ (Advanced Space Technology Research Group, Institute of Space Technology and Aeronautics)

表1 斜面走行試験装置仕様

外枠シールド部	4000×5000×3000mm、帯電防止処理
走行面有効寸法	2000×1500mm
土壌深さ	100mm程度
模擬土壌	清水建設製月土壌シミュラント
最大傾斜角	40度、電動式傾斜駆動
傾斜角の計測	デジタル傾斜計及びエンコーダ
土壌整地機能	均し機により走行面全面を整地
地質保持機能	レゴリス内部水分除去用ヒータ、窒素封入保持機構
気圧環境	1気圧
湿気環境	乾燥空気（湿度制御）
重力環境	1G
位置計測用画像センサ	サイヴァース社製赤外光マーカ式3次元位置計測センサ



図1 斜面走行試験装置外観（完成時、全景）



図2 斜面走行試験装置外観（完成時、上面）

### 3. 斜面走行試験装置詳細

斜面走行試験装置の構成は、(1) 外枠シールド、(2) 走行面、(3) 傾斜機構、(4) 均し機、(5) 画像センサ、の5つに分けられる。以下、各項目の詳細を説明する。

#### (1) 外枠シールド

砂の飛散を防ぐため、試験装置はL5×W4×H3mのシールドで覆われている（図1，3）。シールドには静電防止シートを使い、前後2箇所に入り口が設けられている。シールドの外枠は重量物持ち上げ用の簡易クレーンの移動機構を兼ねており、走行面の一端（下降側）で100kg程度以下の重量物を移動可能である。また、砂の乾燥状態を保つため、シールド内側には湿気調整用のエアコンを備える。

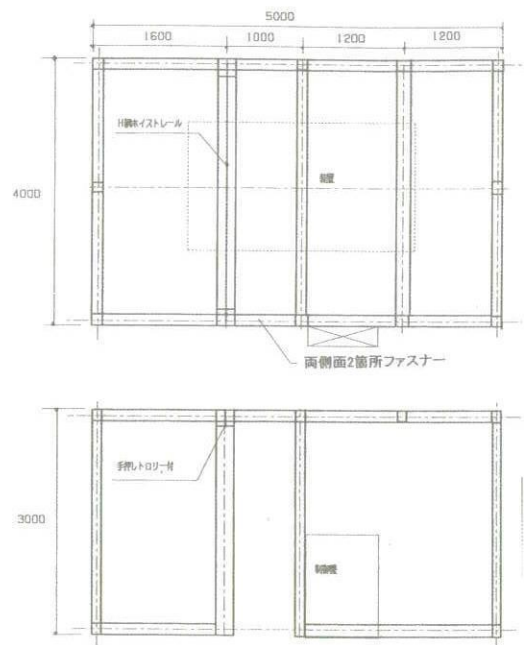


図3 外枠シールド

## (2) 走行面

走行面は1.5m×2m×0.2mの箱型であり、地上1m程度に設置されている(図2, 4)。走行面内部の底面には、砂の加熱乾燥用ヒータが網目状に設置されている(図2)。砂は深さ20cmまで積載可能だが、傾斜時の安定性と実験車両サイズを考慮し、通常は10cm程度の深さで使用している。

砂は、月表面の土壌(月レゴリス)を模擬するため、清水建設製月土壌シミュラントを使用している。月土壌シミュラントは玄武岩質溶岩を材料とし、粒径、粒子比重、内部摩擦角といった機械的性質が模擬されており、化学組成についても概略模擬がなされている。土壌の模擬特性については5章でまとめる。

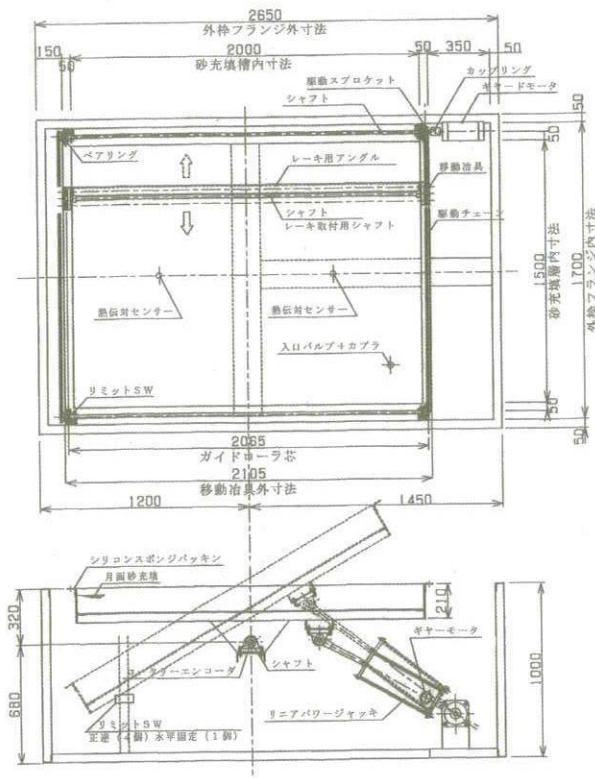


図4 走行面形状と傾斜機構

## (3) 傾斜機構

走行面の下には、傾斜機構が設置されている(図2, 4)。モータ駆動により、機構上は最大40度まで走行面を傾斜可能である。ただし、30度以上では砂の崩落が起きるため、砂を入れた状態での実質的な使用傾斜角は30度以下となる。傾斜角は、デジタル式の傾斜計で確認する。

## (4) 均し機

模擬土壌は、走行で締め固まるだけでなく、放置するだけで徐々に締め固まる。そのため、実験前に土壌を均一に耕し平らに均す必要があるが、人間の手で再現性の高い整地を行なうことは非常に困難である。そこで、自動で耕しと均しを行なう均し機を考案することで実験の再現性の確保を実現した。均し機導入後は導入前に人力で均した場合に比べ車輪の滑り率が大きく増加するなど実験結果にかなりの違いが確認されており、このことから、土壌を使う実験における初期条件の設定には注意が必要である。

均し機は走行面の長辺に沿って取り付けられており、短辺に沿ってモータ駆動により移動する(図5)。構成としては、耕しのための櫛状の鋤部(図6)、鋤部の後方に取り付けられる平板を使った均し部(図7)、及び上下位置調整部(図8)の3部分から構成される。以下、各部の詳細を説明する。



図5 均し機全景(均し動作途中)



図6 均し機鋤部

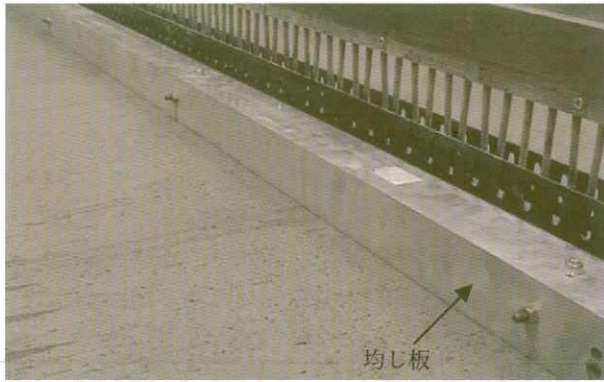


図7 均し機均し部

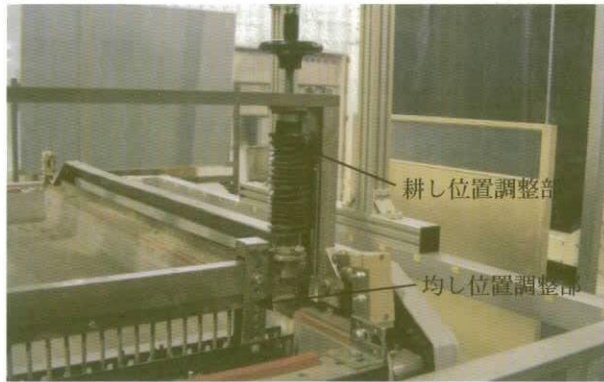


図8 均し機の上下位置調整部



図9 均し完了時の走行面

#### (4-1) 鋤部

鋤部には40mm間隔で丸棒が櫛状に取り付けられ、砂を掻いて低速で動作する(図6)。本来は耕運機のように下から掘り返すことが理想ではあるが、粒径の小さい月土壌シミュラントでは飛散の問題があり、走行面を完全密閉することが困難なため、鋤方式とした。

土壌実験では一般に標準砂が用いられることが多く、締め固めが必ずしも問題にならないこともあり、効果的な耕し/均し方法は必ずしも確立していない。他に用いられる耕し方法としては、土壌に網を沈めて引き上げる

方法(網目が細かいと引き上げにかなりの力を要する)、耕運機を低速で使用する方法、等が使われている。

#### (4-2) 均し部

均し部は、L字型の取り外し可能な均し板からなり、鋤部の進行方向後方にねじ止めする(図7)。均し板の下端は鋤部の丸棒先端より上方に位置し、鋤が通り過ぎた土壌表面を均一に均す。車輪が掘った穴など砂が不足する部分は均しで埋めきれない場合があるため、均し前に走行面の砂をスコップ等である程度均一化しておく必要がある。また、均し板の設置高さが砂表面より低過ぎる場合は、砂を多く掻き過ぎて砂が浅くなることもあるため、均し板の上下位置には注意が必要である。

#### (4-3) 上下位置調整部

均し機には上下位置調整部が設けられており、丸棒先端位置を手動で調整して土壌の耕し深さを変化させることが可能である(図8)。

上下位置調整部は、耕し位置調整部と均し位置調整部からなる。耕し位置調整部は、上部のハンドルでボールねじを回すことにより均し機全体を上下させ、鋤部の上下位置を適正にする。均し位置調整部は、鋤部に対する均し部の取り付け位置を調整してねじ止めする構成となっており、鋤部と均し板の上下位置関係を5mm間隔で調整可能である。

以上の均し機を用いて均しを繰り返す際に、土壌の密度が目標密度以下になった場合は土壌を硬くする作業が必要となる。土壌を硬くするために通常用いられる方法としては、適度な重量の板を短時間置く方法(時間は経験値)、ローラーで固める方法(均一に転がす方法が課題)等が挙げられる。

図9に均し完了時の走行面を示す。均し機の導入により、走行面を再現性よく均一に整地することが可能となり、実験データの信頼性が高まった。

#### (5) 画像センサ

走行時の滑り等を評価するために、実際の走行距離を測定する外界センサとして、サイヴァース社製の赤外光マーカ式3次元位置計測センサを取り付けた(図10)。マーカの3次元位置をステレオ計測で求めるものであり、複数マーカを使用して走行時の位置姿勢の取得が可能となる。本体サイズは500mm×80mm×30mmで、基線長40cmである。

画像センサは走行面外枠に取り付けた治具により走行面上方に固定される。走行面に固定されているため、傾

斜時も走行面との相対位置姿勢が水平時と同じになる。精度は計測距離に依存するが、距離50cmで0.6mm、距離1mで2.5mm程度である。走行面上方1m程度に固定した場合のセンサの計測領域は走行面表面で約1m×2mであるが、計測範囲の端では精度が若干下がる。データはUSBインターフェースによりPCで取得可能であり、計測周期は30Hzである。ドライバ以外に開発用APIが提供されている。



図10 画像センサ

#### 4. 走行実験例

月面車の走行時の滑り率を評価する実験を想定し（図11）、実験の流れと得られるデータの一例を示す。走行系としての評価には滑り率以外の要素の評価も不可欠であるが、ここでは実験装置の使用例という位置付けから、滑り率の取得についてのみ示す。実験に用いた月面車は、車輪がモータ駆動され、エンコーダによるモータ回転角の実時間取得が可能なることを前提としている。



図11 斜面走行実験の様子（クローラ車の場合）

#### (1) 土壌の準備

均し機で土壌を均す。均し回数（1回、または往復で2回、等）は土壌のかさ密度等の要求から適宜決定する。走行斜度に傾けた状態で均すのが望ましいが、斜度20度以上で均すと地盤が崩落しやすいため、斜度20度以下で均すのが適当である。

均し後、土壌の初期密度を測定するため、ベーンせん断試験機（図12）で数点のせん断トルクを計測し平均を取る。深さ方向にも数点計測するのが望ましい。厳密には、ベーンせん断試験は粘土地盤を想定した試験法であり、また測定可能なのは鉛直方向のせん断トルクであって走行に関わる水平方向のせん断トルクとは異なるが、代用されることが多い。計測結果を基に、ベーンせん断トルクとかさ密度の関係を求めた図13により、およその初期密度が求められる。（土壌の初期密度分布については5章にまとめる。）



(a) ベーンせん断試験機



(b) ベーンせん断試験の様子

図12 ベーンせん断試験

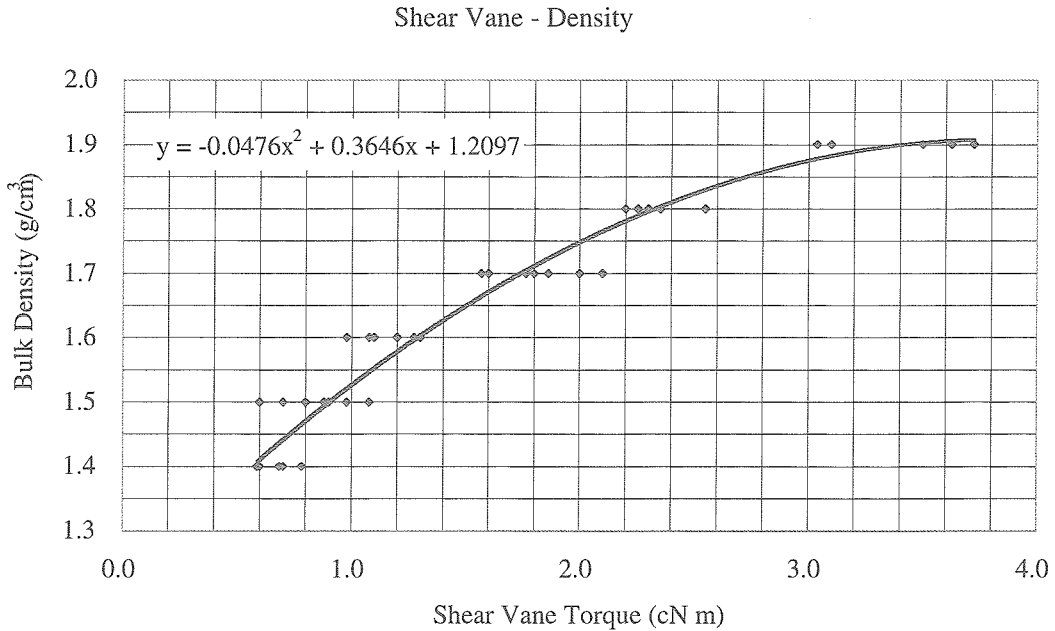


図13 ベーンせん断トルクとかさ密度の関係

## (2) 画像センサ用マーカの取り付け

画像センサ用の発光マーカを月面車に取り付ける。マーカは最低3個を3次元的に配置することで、月面車の位置情報だけでなく姿勢情報も取得できる。月面車の位置・姿勢によらず、カメラから常時見える位置に取り付けることが望ましい。画像センサにより、マーカの3次元位置座標を計測順に取得する。

## (3) 走行実験

月面車を走行させ、車輪モータのエンコーダ出力と画像センサ出力を同期して取得する。一度の均し面で複数レーンの走行を行なうことが可能だが、接地の影響の伝播を避けるため（履帯の場合、概ね履帯幅と同等の深さで半減し、伝播範囲は45度との見積もりがある）、少なくとも車輪幅（履帯幅）以上の間隔を空けることが必要と考えられる。走行後、轍のベーンせん断値を取得することで、締め固め効果がある程度推定できる。

## (4) 滑り率の計算

車輪モータのエンコーダ出力から計算した走行距離と画像センサによる実際の移動距離をもとに、以下の式から滑り率を求める。滑り率の値は、滑り無しの状態が0、完全に滑る状態が1となる。

$$i = (r\dot{\theta} - \dot{x}) / r\dot{\theta}$$

ここで、

- $i$  : 滑り率
- $r$  : 車輪径 (mm)

$\dot{\theta}$  : 車輪回転速度 (rad/sec)

$\dot{x}$  : 車輪の実際の移動速度 (mm/sec)

である。

滑り率計算結果例として図14のようなグラフが得られる。走行開始時は柔らかい模擬土壌の上で滑るため滑り率は大きいですが、車輪が徐々に土壌を締め固めるにつれ滑り率が低下する様子を読み取れる。こうして得られた滑り率が要求水準に見合うかどうかの判定は、ミッション要求や検討段階により異なり、個別に規定されることとなる。

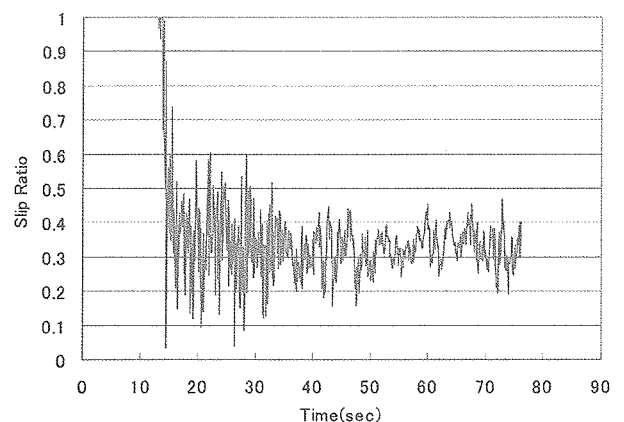


図14 滑り率計算結果例

## 5. 土壌模擬

ここでは、月土壌（月レゴリス）と模擬土壌（模擬レゴリスである月土壌シミュラント）の基本的な特性についてまとめる。真空かつ重力が6分の1である実際の月土壌の挙動を地上の模擬土壌と比較するためには、真空試験等の実験が別途必要となる。

### (1) 月土壌の基本特性<sup>1)</sup>

月レゴリスは、大小の流星物体や帯電粒子の衝突により堆積したものである。月のほぼ全表面を覆っており、5つの基本要素（結晶質岩片、鉱物片、角礫岩、岩さい集塊岩、ガラス）から成る。基本要素の割合は場所と原岩及び原岩が経た地質プロセスに依存するが、地球の物質との違いとしては、鉱物の種類が極端に少ないこと、度重なる流星物体の衝突のため月面のどこでも同質のシルト質砂となっていることが挙げられる。従って、月レゴリスの特性はばらつきが比較的少なく定義しやすい。以下、主な基本特性について簡単にまとめる。

#### ・粒度分布

月土壌の大部分は、シルト質砂から砂質シルトまでの比較的狭い粒度区分に属している。中央粒径は40~130 $\mu\text{m}$ （平均70 $\mu\text{m}$ ）であり、おおまかに10~20%が20 $\mu\text{m}$ より細かい。細かいちりが静電気であらゆるものに付着するため、月面では機材等の保守が重要となる。

#### ・粒子形状

月土壌は球形から角張ったものまで様々だが、一般に多少細長く角ばっている。細長いために塊を作りやすく、また物理的性質に異方性がある。粒子の表面は不規則なくぼみなどがあり、それが圧縮性やせん断強さに影響している。

#### ・比重

地上の土壌の多くは比重2.7である。過去のサンプルを使った計測では月土壌の比重は2.3から3.2以上までの範囲に渡っているが、一般的な科学や工学の解析には3.1が推奨されている。ただし、月土壌には表面の凹形状や内部の空隙が存在するため、細かく砕くと比重は増大するなど、月土壌の多孔性が比重に大きく影響している。

#### ・かさ密度

かさ密度 $\rho$ とは単位土壌体積を占める土壌質量であり、通常 $\text{g}/\text{cm}^3$ で表される。月土壌の基本量であり、支持荷重や斜面の安定性、地震波速度、熱伝導、電気抵抗、放射線の到達深さ等に影響する。多孔性 $n$ を総体積に占める空隙体積と定義すると以下の関係がある。

$$\rho = G \rho_w (1-n)$$

上で $G$ は比重、 $\rho_w$ は水の比重であり、多孔性 $n$ は少数で表される。さらに便宜上、空隙比 $e$ を以下で定義しておく。

$$e = n / (1-n)$$

過去の研究によるかさ密度の平均的な値は、深さ0~15cmで1.45~1.55、深さ0~30cmで1.53~1.63、深さ30~60cmで1.69~1.79、深さ0~60cmで1.61~1.71とされている。月土壌の深さ方向には不均一があり、局所的にはかなりの深さまでかさ密度が低い場所も存在している。

#### ・相対密度

かさ密度は粒子の充填度合いにより変化する。月土壌のような粒状土壌の充填率は相対密度 $D$ で表されるのが普通であり以下で定義される。

$$D = \frac{\rho_{\max} / \rho - (\rho - \rho_{\min})}{(\rho_{\max} - \rho_{\min})} \times 100\%$$

かさ密度 $\rho$ が最小の時 $D$ は0%、最大の時100%となる。かさ密度が同じでも相対密度の異なる土壌は、異なる挙動を示す。推定値としては、深さ0~15cmで65%、深さ0~30cmで74%、深さ30~60cmで92%、深さ0~60cmで83%とされ、全体に非常に高く、機械的に圧縮して作る場合よりも高い。

#### ・圧縮性

土壌にかかる応力が低い場合、あるいは初期密度が低い場合は、粒子の滑りや向きの変化で圧縮が起こる。一方、高い応力がかかる場合、あるいは初期密度が高い場合は、粒子の変形や破損も生じる。圧縮性は垂直応力 $\sigma_v$ と空隙比 $e$ の関係として表現され、過去の月土壌のサンプルから圧縮指数 $C_c$  ( $= -\Delta e / (\Delta \log \sigma_v)$ ) が推定されている。玄武岩質シミュラントと比べると、月土壌はアグルチネートなど不規則でもろい粒子を含むため、いくらか圧縮性が高いとされている。従って、粒子表面や粒子内の多孔性も月土壌の圧縮性に影響することになる。応力が減ると土壌はいくらか膨張し、同じ応力が再度加えられると、土壌はほぼ同じ空隙比まで再圧縮する。土壌に過去に加わった最大圧力も重要であり、これを越えた圧力が加わると、太陽風ガスを含んだもろい粒子の破損によりガスの放出が起こる。垂直応力 $\sigma_v$ に対する水平応力 $\sigma_h$ の割合として定義される水平応力係数 $K_0$  ( $= \sigma_h / \sigma_v$ ) については、月土壌では計測されていないが、応力が過去の最大圧力に等しい場合は、0.4~0.5程度と推定されている。

#### ・せん断強さ

せん断強さ $\tau$  (kPa) は、応力に無関係の粘着力 $c$  (kPa) と、垂直応力 $\sigma_v$  (kPa) に比例する摩擦（摩擦



角 $\phi$ )からなり、Mohr-Coulombの公式に従う。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

せん断強さは極限支持力や斜面安定性、走行性に影響するため、粘着力と摩擦角の推定が重要となる。過去のサンプル等から得られた推奨値は、深さ0~15cmでは粘着力0.52(kPa)で摩擦角42度、深さ0~30cmでは粘着力0.9(kPa)で摩擦角46度が挙げられている。粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\phi$ を用いて地盤支持力や最大推進力、最大抗力を算定することができる。

#### ・支持荷重

支持荷重は、極限支持力と許容支持力に分類される。極限支持力とは建造物等の転覆につながらない最大荷重であり、1mサイズの基礎・足場に対し月面では約6000kPaである。許容支持力とは、ある沈下量を超えない荷重である。例えば、幅0.5m以下の実験装置の沈下量を信頼係数95%で1cm以下とする許容支持力は2kPaとなる。

#### ・斜面安定性

斜面安定性の一般的な解析法として極限平衡法が挙げられる。月面の場合、水がないために解析が非常に容易になり、斜面崩壊に対する安全率FSは以下で表される。

$$FS = N (\rho \cdot g_m \cdot h) / c$$

ここで、 $\rho$ :密度、 $c$ :粘度、 $g_m$ :月面の重力加速度、 $h$ :斜面高さ、 $N$ :安定数であり、 $N$ は摩擦角 $\phi$ と斜面角度 $\beta$ の関数である。

人工の斜面は、掘削による斜面、固めた盛り土による斜面、堆積による斜面のいずれかに分類される。掘削の場合、安全率1.5として、深さ3mまでは垂直に掘削可能であり、深さ10mまでは斜度60度を維持し得る。盛り土をする場合は、もともと密度の非常に高い土壌を崩してから再度固めることになるが、本来の高密度まで固め戻すことができないため、掘削の場合よりも最大斜度は小さくなる。締め固め後の相対密度を65~75%と仮定すると、高さ10mの斜面を実現可能な斜度は45度となる。月土壌を単純に堆積させた場合は、相対密度が30~40%となり、高さ10mの堆積での安息角は約40度となる。

自然の斜面については多くが知られてはいないが、過去のサンプルから、少なくとも深さ70cmまでを考えた場合、斜面の土壌は平らなクレタ内よりも弱いことが分かっている。また、月面で斜面崩壊が起きてきたことが分かっている。いくつかのケースでは、崩壊した物質が数kmに渡り広がっている。これらは流星物体の衝突に伴う振動が原因と考えられるが、なぜ広範囲に広がることのできるのか

は分かっている。過去の研究では、斜面崩壊の原因は流星物体の衝突ではなくガスの発生による流動化だとする説や、物質の広がりには表層とその下の安定した地層の間で粒子が跳ね返ることに起因するとの説もある。また、安息角以下の斜面でも横運動は起きるとされ、流星物体の衝突だけでなく土壌クリープにも起因するとしている。いずれにしても、月の自然斜面の安定性についてはまだ分かっていないことが多い。

#### ・走行性

月土壌の走行性における主な制限要因は、速度と斜面登坂である。アポロの有人月面車LRV (Lunar Roving Vehicle) の速度は6~7km/hrであり、これは不整地走行と低重力による制約である。速度を上げるには、動力学特性を変える(車輪径を大きくする、ホイールベースを長くする、質量を大きくする、サスペンションを柔軟にする、等)か、道路を整備することになる。

LRVが登った最も急な傾斜は19~23度であった。LRVでは、月土壌の表面粗さやころがり抵抗に総エネルギーの15%が消費され、残りは機械的リンクや慣性、機器の使用に費やされたという。

#### (2) 模擬レゴリスの特性

斜面走行試験装置では、模擬レゴリスとして清水建設製月土壌シミュラント(FJS-1)を使用している。シミュラントは月土壌に近いと言われる玄武岩質溶岩を材料とし、破碎による粒度分布模擬、混合比の選定、機械的性質試験を繰り返して製造される。粒度分布の比較を図15に示す。化学的特性も概略で模擬されているが(図16)、ここでは機械的性質のみに着目する。

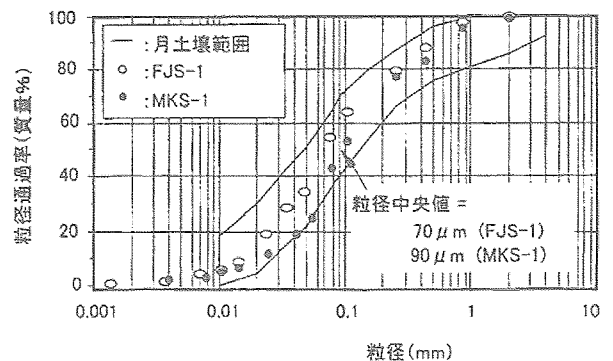


図15 粒度分布の比較

成分	月土壌		模擬月土壌			
	アポロ 11	アポロ 14	米国製		国産	
			MLS-1	JSC-1	FJS-1	MKS-1
SiO <sub>2</sub>	42.20	48.10	43.9	47.7	49.14	52.69
TiO <sub>2</sub>	7.80	1.70	6.3	1.6	1.91	1.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.60	17.40	13.7	15.0	16.23	15.91
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.30	0.23	-	0.0	0.00	0.00
FeO	15.30	10.40	13.4	7.4	8.30	7.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	2.6	3.4	4.77	4.78
MnO	0.20	0.14	0.2	0.2	0.19	0.22
MgO	7.80	9.40	6.7	9.0	3.84	5.41
CaO	11.90	10.70	10.1	10.4	9.13	9.36
Na <sub>2</sub> O	0.47	0.70	2.1	2.7	2.75	1.90
K <sub>2</sub> O	0.16	0.55	0.2	0.8	1.01	0.58
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.51	-	-	0.44	0.14
S	0.12	-	-	-	0.00	0.00
H <sub>2</sub> O	0.00	0.00	-	-	0.43	0.50
Total	99.90	99.83	99.2	98.2	98.14	100.00

図 16 化学組成の比較

表 2 に月レゴリスと模擬レゴリスの特性の代表値をまとめる。比較のため、土壌実験で多用される豊浦標準砂についても記す。粘着力  $c$  と内部摩擦角  $\phi$  は一面せん断試験などで求められ、粘着力  $c$  については後述するようにベーン剪断試験からも求められる。粘着力は粒子間の引力に起因し粒子が小さいほど（粘土等）顕著となり、内部摩擦は粒子間の機械的な相互作用に起因し粒子が大きいほど（砂等）顕著となる。月レゴリス表層のような、かさ密度の低い土壌をいかに締め固め、崩壊させずに必要な牽引力を得るかが走行系の課題である。

熱検討はこの報告のテーマからは外れるが、月面車に特有な条件として、温度差が激しいレゴリスと接することが挙げられる。図 17～19 に関連の特性値をまとめる。

表 2 月レゴリスと模擬レゴリス（月土壌シミュラント）の基本的特性値

	粒径 (mm)	かさ密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	比重	粘着力 $c$ (kPa)	内部摩擦角 $\phi$ (°)
月レゴリス	0.07 (中央値平均)	1.5 (1.45~1.79) (深さ 0~15cm)	3.1	0.52 (深さ 0~15cm)	42 (深さ 0~15cm)
模擬レゴリス	0.07 (中央値)	1.4~2.0	2.94	8	37.2
豊浦標準砂	0.106~0.300	—	2.63	0	36~40

温度 (°C)	大気中		温度 (°C)	真空中	
	大気中	真空中		大気中	真空中
-150	1.21 × 10 <sup>-4</sup>	1.00 × 10 <sup>-4</sup>	200	2.51 × 10 <sup>-4</sup>	2.53 × 10 <sup>-4</sup>
-140	1.29	1.10	250	2.59	2.62
-120	1.42	1.30	300	2.65	2.67
-100	1.52	1.45	350	2.70	2.72
-80	1.62	1.59	400	2.74	2.74
-60	1.70	1.69	450	2.78	2.80
-40	1.79	1.79	500	2.81	2.84
-20	1.88	1.90	550	2.83	2.86
0	1.98	2.00	600	2.86	2.88
20	2.06	2.08	650	2.87	2.91
50	2.14	2.15	700	2.90	2.93
100	2.29	2.30	750	2.91	2.95
150	2.42	2.43	800	2.93	2.97

図 17 月土壌シミュラントの比熱 (単位: Wh/K/g)

温度 (°C)	シミュラントかさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )		
	$\rho = 1.55$	$\rho = 1.65$	$\rho = 1.80$
25	1.98 × 10 <sup>-4</sup>	2.33 × 10 <sup>-4</sup>	3.49 × 10 <sup>-4</sup>
200	2.09	2.44	3.61
400	2.33	2.56	3.61
600	3.14	3.49	4.19
800	4.42	5.23	5.70
1000	9.07	11.4	16.3

図 18 月土壌シミュラントの熱伝導率 (単位: W/(cm · K))

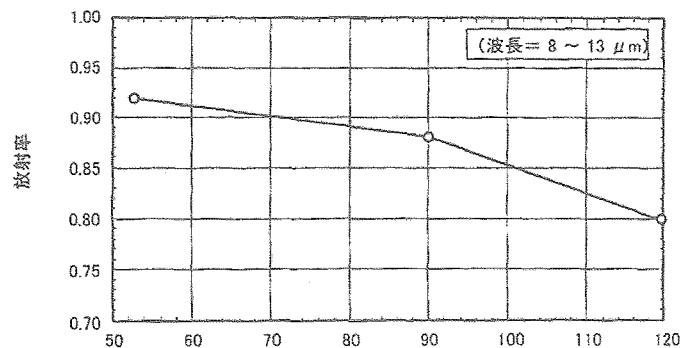


図 19 月土壌シミュラントの放射率

(2) 土壌の垂直密度分布

走行評価のためには、土壌表面を均一に均すだけでなく、かさ密度の垂直分布を調整し再現性を確保する必要がある。均し機の上下位置調整部はこの目的に使用する。ここでは、砂深さ8cmの場合に、均し機鋤部の上下位置を変化させて均し、土壌のかさ密度分布を測定すると共に月レゴリスのかさ密度分布と比較する。

鋤部の先端を砂表面から10~50mmの範囲で変化させて均した場合のかさ密度分布を図20に示す。ペーン深さはペーンの羽根(長さh=2cm、直径d=2cm)の中央位置の深さで代表し、かさ密度は図13より計算した。(ペーン試験機自体の大きさの制約から、35mmまでの深さで計測を行なった。) 図20によると、均し深さを深くすれば、より深い土壌のかさ密度を下げられることが確認できる。一方、表層(ペーン深さ10mm)では、均し深さを深くしてもかさ密度はほぼ1.4で下げ止まる。このことから、現状の均し機で実現可能な表層のかさ密度は最小1.4程度となることが分かる。

図20の均し深さ50mmの場合の測定結果を表3に示す。粘着力cは下式により計算した。

$$c = M_{max} / (\pi (hd^2/2 + d^3/6))$$

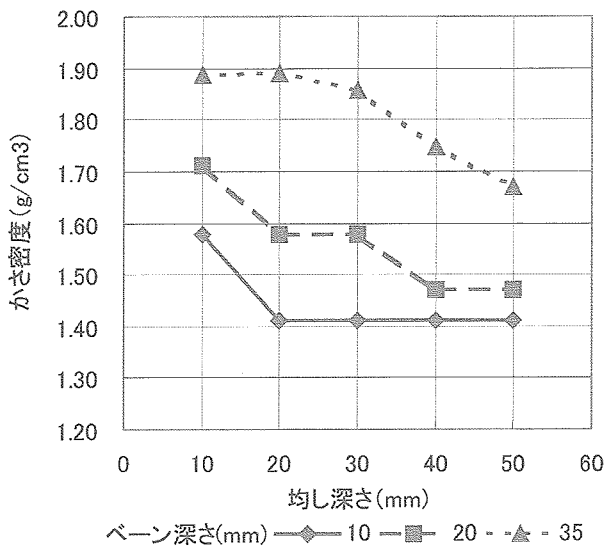


図20 土壌垂直密度分布計測結果

表3 模擬レゴリスの垂直分布(均し深さ50mmの場合)

測定深さ(cm)	1	2	3.5
最大剪断トルクMmax (cNm)	0.6	0.8	1.6
粘着力c (kPa)	0.36	0.48	0.96
かさ密度 (g/cm³)	1.41	1.47	1.67

図20をもとに、均し深さ別のかさ密度について月レゴリスとの比較を図21に示す。月面のかさ密度分布については、文献(1)を参考にした。

図21より、均しを深くすることで模擬レゴリスのかさ密度が月レゴリスのかさ密度の1割り増し程度となることが分かる。以上より、鋤部の高さの調整により、かさ密度をある程度調整することも可能であることが分かる。

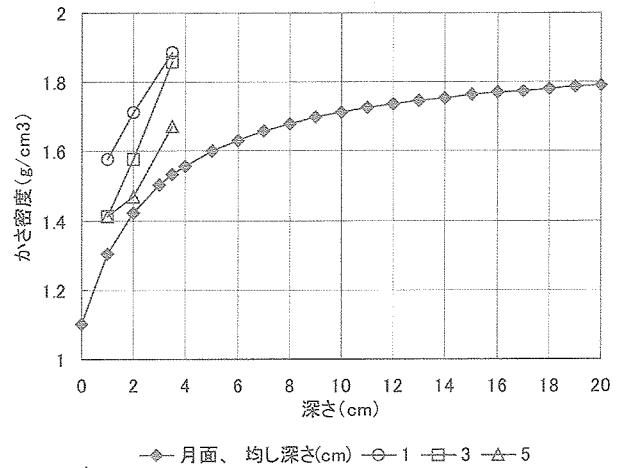


図21 土壌深さとかさ密度の関係

6. まとめ

月面車の登坂性能を評価するための斜面走行試験装置を整備した。月の模擬土壌を使用することで土壌の機械的性質を模擬し、さらに、均一な整地を実現する均し機を導入することで再現性の高い走行実験を行う環境が整った。この装置では、クローラや車輪を使った月面車の走行試験や一輪での走行実験を行なっている<sup>2),3)</sup>。今後は、砂の増量や均しの改良など試験装置の性能向上を継続し、別途行われている真空や重力の評価試験等と合わせ、月面での走行性能推定に役立てて行く予定である。

7. 参考文献

- 1) G. Heiken, D. Vaniman and B. French; The Lunar Sourcebook (1991), Cambridge University Press, Cambridge.
- 2) Sachiko Wakabayashi, Hitoshi Sato, Kohtarō Matsumoto; Design and Mobility Evaluation of a Crawler-type Lunar Vehicle, Tenth Biennial International Conference on Engineering, Construction and Operations in Challenging Environments (Earth and Space 2006), Houston, Texas, USA, March 5-8, 2006.

- 3) 金森洋史、飯島純一、若林幸子、黒田洋司; 月面小型ローバの走行システムに関する研究, 第3回宇宙科学シンポジウム (2003) pp.59-61.
- 4) H. Kanamori, S. Aoki, and H. Nakashima; Terramechanics of a Micro Lunar Rover, Ninth Biennial International Conference on Engineering, Construction and Operations in Challenging Environments (Earth and Space 2004), Houston, Texas, USA, March 7-10, 2004.
- 5) 室 達朗; テラメカニックスー走行力学一, (1993), 技報堂出版.



宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-05-003

---

発行 平成 18 年 2 月 10 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL:<http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株)フジブランド

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

---

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。

