

宇宙探査と地盤工学

第4章 レゴリスの土質力学

Mechanics of planetary regolith

松島 亘志 (まつしま たかし)

筑波大学システム情報系 教授

e-mail: tmatsumi@kz.tsukuba.ac.jp

小林 泰三 (こばやし たいぞう)

立命館大学理工学部 教授

キーワード：土質力学，レゴリス，アポロ計画，マイクロメカニクス

1. はじめに

講座3章では、固体天体の表層を覆うレゴリス層の形成過程、化学組成や鉱物組成について、現在まで明らかとなっている知見が紹介された。本章では、人類がそのようなレゴリス層上で様々な活動（資材調達やインフラ建設など）を行う際に必要となるレゴリスの土質力学的特性について述べる。

我々が通常学ぶ「土質力学」は、地球上の地盤材料に関するものであるが、その材料特性の多くは「地盤が固体粒子の集合体である」ことに由来する。また、他の天体で行う活動の多くも、地球での活動に準ずるものが多いことから、基本的な「土質力学」の枠組みは、そのまま他天体にも適用できる。米国のアポロ計画で、月から持ち帰られたレゴリスサンプルに対して行われた検討は、まさにその当時の土質力学の教科書的検討であり、土粒子物性（粒子密度、粒度分布や粒子形状）の計測、バルク物性（間隙水が存在しないため、乾燥密度、あるいは最大・最小間隙比のみ）、各種要素試験（1次元圧密試験、三軸圧縮試験、ただしサンプルが希少であるため超小型の試験装置が用いられた）などが行われた。次節ではそれらのエッセンスを紹介する。

一方で、レゴリスの土質力学では、通常の土質力学の枠組みから外れた検討も必要になる。例えば、低重力、高真空中、熱的挙動、レゴリスからの建設資材創成などは、通常の土質力学の範疇から外れた検討事項

である。また、そもそも未知の天体でレゴリスサンプルがなく、通常の要素試験等が実施できない条件でいかに土質力学的特性を評価するか、という大問題もある。（月面でもサンプルは限られた場所でしか採取されていない。）これらについての最近の試みを3節で紹介する。

2. 月レゴリスの土質特性：アポロ計画での成果

探査機を用いた本格的な月探査は、ソビエト連邦のルナ計画（1959～1976）が米国のレインジャー計画（1961～1965）を先行する形で始まった。その後、米国はアポロ計画（1961～1972）を本格化し、二国間で熾烈な宇宙開発競争が繰り上げられた。その間、米国からは、月を周回観測するルナ・オービター計画（1966～1967）やアポロ有人探査に向けたサーベイヤー計画（1966～1968）を加えて、計27機の探査機（うち、無人着陸5機、有人着陸6機）が月に向けて打ち上げられた。一方のソ連は、ルナ計画を中心に、月を対象としたゾンデ4～8号（1968～1970）を含めて計29機（うち、無人着陸8機）の打ち上げに成功した。

これらの長期的かつ壮大な月探査計画によって、月の謎に迫る多くの科学的成果がもたらされたことは言うまでもないが、一方で、土質力学に関する調査・研究が精力的に行われていたことはあまり知られていない。これらの土質力学的成果は、当時の月探査の成果の集大成としてまとめられた Lunar Sourcebook¹⁾ (1991)

に大部を割いて集録されている。本節では、主に同書に基づいて、アポロ・ルナ時代に明らかにされた月レゴリスの土質特性を概説する。

2.1 月レゴリスの粒子特性

写真-1²⁾は、アポロ 12 号 (1969) で月面に降り立った宇宙飛行士が、先行して着陸していた無人探査機サーベイヤー 3 号 (1967) の脚部を撮影したものである。着陸時に 2 度程ホッピングした形跡が明瞭に残っており、月面表面はパウダー状の非常に細かい土粒子で覆われていることがうかがえる。

写真-2³⁾は、アポロ 11 号 (1969) が持ち帰った試料 (1mm ふりい残留分) の拡大写真である。月レゴリスには、母岩の破碎によって生成した粒子の他に、月面に噴き出したマグマが冷却されてガラス化した球体粒子 (火山ガラス) や、隕石や微粒子の衝突によって溶融し、それが急冷されてできた粒子 (衝突ガラス)、溶融した成分が周囲の土と結合した粒子 (アグルチネート) などが含まれる。この写真からも分かるように、いびつなものから真球に近いものまで混在しており、粒子形状は不定形で変化に富む。粒子形状を示す指標の平均値として、長短度 (Elongation) : 1.35, 丸み度 (Roundness) : 0.21~0.22, 比表面積 (Specific surface area) : 0.5 m²/g などが報告されている¹⁾。

地球に持ち帰られた試料を対象に、土粒子の密度試験も数多く行われた。特徴的なのは、月レゴリスは、地上の土に比べて比重が大きいということである。比重は、試料や試験法によって 2.3~3.2 の範囲にばらつくが、多くが 3.0 前後の値を示し、Lunar Sourcebook¹⁾で



写真-1 アポロ 12 号宇宙飛行士が撮影したサーベイヤー 3 号の着陸機パッド²⁾

は 3.1 を代表値とすることが報告されている。これは、月の玄武岩の鉄含有量が多いためである (講座 3 章を参照)。

月レゴリスの粒径は、平均粒径が 70 μm (中央値は 40~130 μm) と非常に細かく、大半が 1mm 以下で、全体の 10~20% は 20 μm 以下の粒子で構成されている¹⁾。採取地点によってばらつくが、平均的には、粗粒砂 (2.0~4.75 mm) : 2%, 中粒砂 (0.425~2.0 mm) : 14%, 細粒砂 (0.074~0.425 mm) : 33%, シルト (0.074 mm 以下) : 51% の粒度を持つ^{1,4)}。図-1 は、回収サンプルの粒度分布の例を示す。ここに Fig や Table 番号は文献 1) のもの、各サンプル番号は NASA の統一試料番号である。この分布形については 3 節で詳述する。

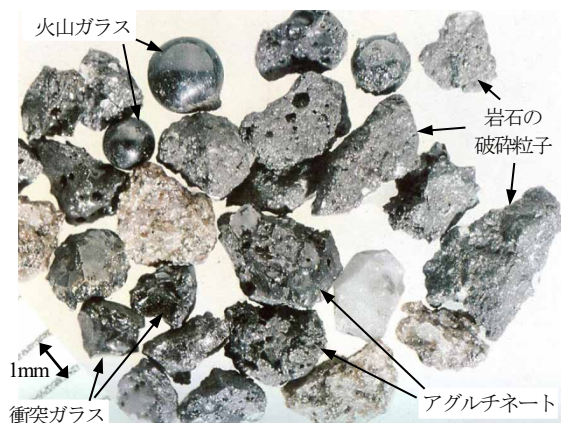


写真-2 地球に持ち帰られた月レゴリスの拡大写真³⁾

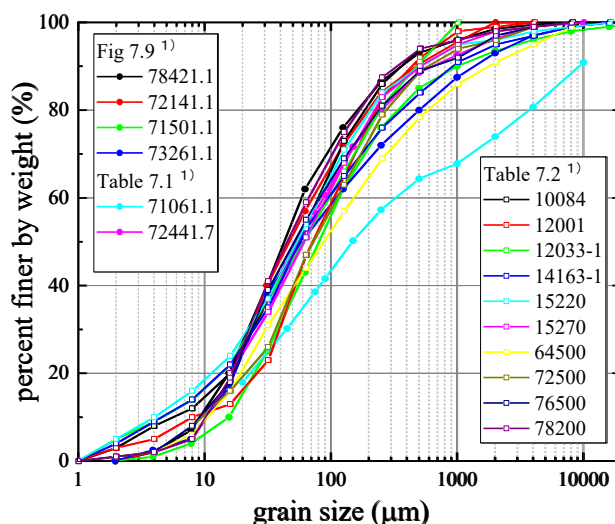


図-1 月レゴリスの粒度分布の例

2.2 月レゴリスの堆積物性

月面は、大部分がレゴリスで覆われており、深いところでは深さ 10~20m まで堆積している (講座 3 章を

参照)。これもアポロ・ルナ計画で明らかになった成果のひとつであるが、当時、その堆積条件の調査も重要視された。様々な方法によってかさ密度の推定・計測が行われたが、特にアポロ計画で採取したコアサンプルは、かさ密度推定の確度向上と深さ方向分布の解明に大きく貢献した。コア採取は、宇宙飛行士による打ち込み式のサンプラー（Drive core tube：アポロ 11～17号）と電動ドリルを用いた回転式サンプラー（Rotary drill core tube：アポロ 15～17号）で行われた。その結果、月レゴリスのかさ密度は、地表面からわずか数十 cm までの間に、ゆるい状態から非常に密な状態に急変することが分かった。この急激な変化は、度重なる隕石等の衝突によるものと考えられている。すなわち、隕石衝突の衝撃によって地表面は扇動されて疎に、それ以後は揺さぶり効果によって密になったと推測されている。コアサンプル等の分析の結果、クレーターの外側領域における、かさ密度 ρ (g/cm^3) と深さ z (cm) の関係として、次式¹⁾が提案されている（図-2）。

$$\rho = 1.92 \frac{z + 12.2}{z + 18} \quad \text{あるいは} \quad \rho = 1.39z^{0.056} \quad (1)$$

また、アポロ 14 号（1971）と 15 号（1971）で持ち帰られた月レゴリスについて、各試料わずか 1g（1mm ふるい通過分）で最小・最大密度試験が実施された。その結果、試料の比重や粒度、粒子形状などの違いによる影響を大きく受け、最小密度は $0.87 \sim 1.10 \text{ g/cm}^3$ 、最大密度は $1.51 \sim 1.89 \text{ g/cm}^3$ の範囲にばらついた⁵⁾。最

小および最大密度をそれぞれ 1.15 g/cm^3 （最大間隙比 1.7）、 1.82 g/cm^3 （最大間隙比 0.7）、比重を 3.1 と仮定すると、深さ毎のかさ密度、相対密度、間隙比の最良推定値は表-1 のようになる。

表-1 月レゴリスの堆積特性（クレーター外の領域）

深さ (cm)	かさ密度 (g/cm^3)	相対密度 (%)	間隙比 (%)
0 ~ 15	1.50 ± 0.05	65 ± 3	1.07 ± 0.07
0 ~ 30	1.58 ± 0.05	74 ± 3	0.96 ± 0.07
30 ~ 60	1.74 ± 0.05	92 ± 3	0.78 ± 0.07
0 ~ 60	1.66 ± 0.05	83 ± 3	0.87 ± 0.07

2.3 月レゴリスの力学特性

月レゴリスの要素力学特性に関しては、主に圧縮性とせん断強度について詳しい調査が行われた。Carrier ら⁶⁾ (1972) および Jaffe⁷⁾ (1973) は、アポロ 12 号 (1969) が持ち帰った月レゴリスを対象に、圧縮試験とせん断試験を実施した。Carrier らは、高真空状態で帰還・保管されていた月レゴリス 200 g を用いて、真空チャンバー内で試験を実施した。一方、Jaffe は、わずか 1.3 g（サーベイヤー 3 号のバケットに残っていた試料）を対象に、図-3(a)に示す超小型試験装置（供試体サイズは直径 5 mm、厚さ 5 mm）を用いて実施した。いずれも一面せん断試験を行う装置であり、その垂直応力载荷機能を利用して一次元圧縮試験（オドメータ試験）を実施している。ソ連の Leonovich ら⁸⁾ (1977) も、ルナ 16 号 (1970) と 20 号 (1972) が持ち帰った月レゴリスを対象に、一次元圧縮試験（供試体容積： 6 cm^3 ）を行っている。

圧縮特性については、試験方法や初期間隙比が異なっていたこともあり、米ソ間のデータにやや異なる傾向が認められるが、圧縮指数 C_c は、ゆる詰めで 0.3、密詰めで 0.05（取り得る範囲：0.01～0.11）で代表できるとされている¹⁾。その他、先行圧密応力や静止土圧係数なども検討されたようであるが、推定の域をはず、不明点も多い。月レゴリスの圧縮特性を表-2¹⁾に示す。

強度特性については、前述した Carrier らや Jaffe の一面せん断試験に加え、Scott⁹⁾ (1987) による超小型の三軸圧縮試験（図-3(b)）や、Leonovich ら⁸⁾ (1977) による直接せん断試験（供試体容積： 6 cm^3 ）が行われ

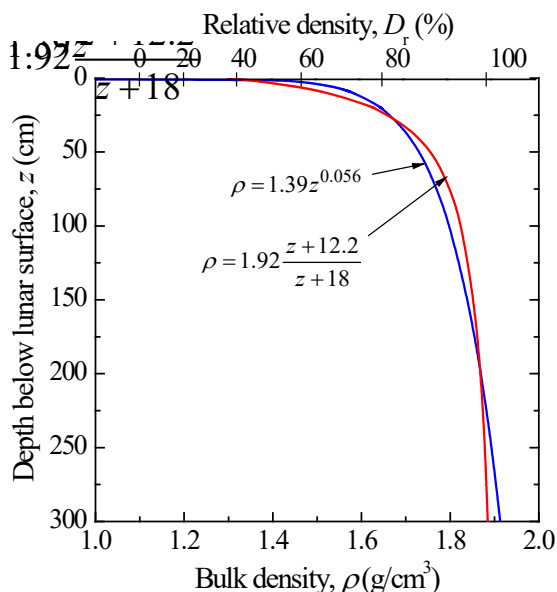
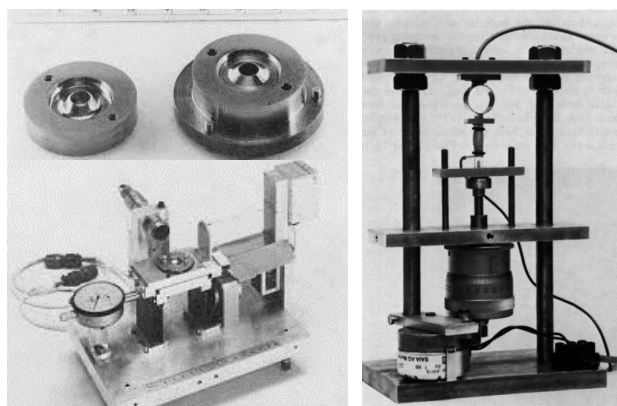


図-2 深さ方向のかさ密度変化

た。各試験で得られた粘着力と内部摩擦角を表-3 に示す。50° を超える内部摩擦角が計測されたケースも見られ、摩擦性の高い材料であることがうかがえるが、条件によって取り得る範囲も広い。試料の乱れや供試体サイズが極端に小さいこと、1/6G 環境の月面で想定される土被り圧よりかなり大きな拘束圧条件で試験されていることなどの問題もあり、これらのデータの信頼性は必ずしも高くないことが指摘されている。

一方、アポロ計画 (14, 15, 16 号) では、宇宙飛行士によるコーン貫入試験が行われた¹⁰⁾。ソ連もルナ 17 号と 21 号が展開した無人月面探査車 (ルノホート 1 号, 2 号) によって、コーン貫入試験機とベーンせん断試験機を合体させた試験ツールで原位置多点計測を行った。これらの試験結果は、古典的支持力理論に基づいて粘着力と内部摩擦角に関連付けられた。ここに述べた強度試験の他、宇宙飛行士の足跡解析、探査機のレゴリス-機械系相互作用の解析、シミュラントを用いた模擬試験など、様々な観点からも検討が行われ、それらを総合して表-4 に示す強度定数の最良推定値が提案された。



(a) Jaffe (1973) の試験装置

(b) Scott (1973) の試験装置

図-3 超小型の圧縮・せん断試験装置

表-2 月レゴリスの圧縮特性

特性	代表値	範囲
圧縮指数 C_c	緩詰め: 0.3 密詰め: 0.05	緩詰め: NA 密詰め: 0.01-0.11
膨張指数 C_s	0.003	0-0.013
先行圧密応力	不明	
静止土圧係数 K_0	正規圧密: 0.45 過圧密: 不明 締固め: 0.7	正規圧密: 0.4 ~ 0.5 過圧密: 不明 締固め: NA

表-3 月レゴリスを用いた室内強度試験の結果

研究者	初期間隙比	垂直応力 (*拘束圧) (kPa)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (deg)
Carrier, et al.	0.55 ~ 0.71	31.2 ~ 67.5	0 ~ 0.7	28 ~ 35
Jaffe	0.66 ~ 2.12	0.03 ~ 31.0	0.1 ~ 3.1	13 ~ 56
Scott	0.69 ~ 0.87	26* ~ 55*	0 ~ 1.0	51 ~ 59
Leonovich, et al.	不明		3.9 ~ 5.9	20 ~ 25

表-4 月レゴリスの強度特性 (クレーター外の領域)

深さ (cm)	粘着力 c (kPa)		内部摩擦角 ϕ (deg)	
	平均	範囲	平均	範囲
0 ~ 15	0.52	0.44 ~ 0.62	42	41 ~ 43
0 ~ 30	0.90	0.74 ~ 1.1	46	44 ~ 47
30 ~ 60	3.0	2.4 ~ 3.8	54	52 ~ 55
0 ~ 60	1.6	1.3 ~ 1.9	49	48 ~ 51

3. レゴリスのマイクロメカニクス

前節で紹介した知見は、主に月面からの回収サンプルの土質試験によって得られたものであり、これと地球の土を比較することで、月レゴリスの特徴をあぶり出すことができる。また、最新の数値解析を利用することで、粒子物性からバルク物性を予測することも可能になりつつある。さらに、講座3章で紹介されたレゴリス層の形成過程についての知見を合わせると、将来的にはサンプルのない他の天体のレゴリス物性を予測することも可能となると考えられる。本節では、そのようなポスト・アポロの試みについて紹介する。

3.1 レゴリスの粒度分布

講座3章で紹介されたように、月レゴリスは大小様々な隕石の衝突によって母岩が粉碎されて形成されたと考えられている。惑星科学の分野では、小惑星の粒度分布、クレーターのサイズ分布など、様々な物体の大きさの分布を表すのに、大きいものから小さいものへの累積個数を両対数軸で表現することがよく行われる。これは、それらの分布の多くが「べき分布」と呼ばれる以下の分布に従うことが示されているためである。

$$N_{cum}(r) = Ar^{-\alpha} \quad (2)$$

ここに $N_{cum}(r)$ は半径 r の物体の逆順累積個数、 α は分布のべき（両対数グラフでは右下がりの直線の傾き）、 A は比例定数である^{注1)}。べき分布は、フラクタル分布とも呼ばれ、どのスケールでサンプリングしてもその分布形は変わらないという特徴がある。例えばクレーター分布で言えば、 1km^2 の領域の写真も 1m^2 の領域の写真も同じように見える、ということである。これはその形成メカニズムに特性長さが存在しないことを意味しているが、逆に言えば、分布がどこかのスケールで折れ曲がっていれば、そこに特性長さを規定する何らかのメカニズムが存在すると考えることができる。

図-1 に示した月レゴリスの粒度分布をこの形に書き直したものを図-4 に示す。ここに、凡例の試料番号の後の（ ）の中は、試料中に含まれるアグルチネート粒子の割合を示している。この傾き α を調べると、およそ3~4の値をとり、アグルチネート含有率が高いほど大きな値を取ることがわかる（図-5）。アグルチネートは隕石衝突により生成され、地層が古いほどその含有率が高いことがわかっている。月の全球の地層年代はクレーター密度等から推定されており、従ってこの地層年代から粒度分布をおおまかに推定できることがわかる。

なお、式(2)を r で微分して確率密度関数を求め、粒子を球形と仮定して粒子重量に変換し、地盤工学で一般的に用いられる、小さい粒子から大きい粒子への累積重量分率を求めると、以下ようになる。

$$W_{cum} = \begin{cases} \frac{r^{3-\alpha} - r_{min}^{3-\alpha}}{r_{max}^{3-\alpha} - r_{min}^{3-\alpha}} & (\alpha \neq 3) \\ \frac{\ln r - \ln r_{min}}{\ln r_{max} - \ln r_{min}} & (\alpha = 3) \end{cases} \quad (3)$$

従って、 W_{cum} を横軸 r について対数のグラフで書くと、累積粒子数のべき $\alpha = 3$ の時に直線、 $\alpha > 3$ で上に凸（より細かい粒子が多い）、 $\alpha < 3$ で下に凸（より粗い粒子が多い）となる。図-1 を見直すと、分布の多くの部分で上に凸（ $\alpha > 3$ ）となっていることがわかる。一方、地球上の多くの地盤は河川で流される時に分級されるため、非常に狭い粒度分布となるが、まさ土など一部の風化残積土は、幅広い下に凸部分の多い（ $\alpha < 3$ ）分布となることが知られている。また、小惑星イト

カワの回収試料は2 ないしは2.8 程度になることが調べられており¹¹⁾、これは岩石を高速衝突破壊させたときの破片の粒度分布のべき2.5 に近い¹²⁾。このことから、イトカワのレゴリスは少数回の隕石衝突によって形成されていると考えられ、一方、月レゴリスの場合は、数十億年の間の多数の衝突イベントにより、べきが大きくなっている（つまり小さい粒子の割合が多い）可能性が考えられる。

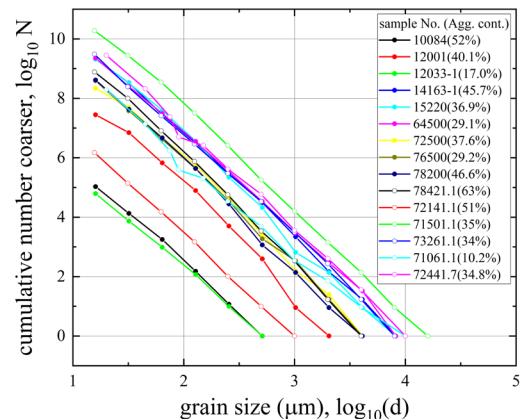


図-4 月レゴリスの粒度分布(図-1)を逆累積個数で表したもの

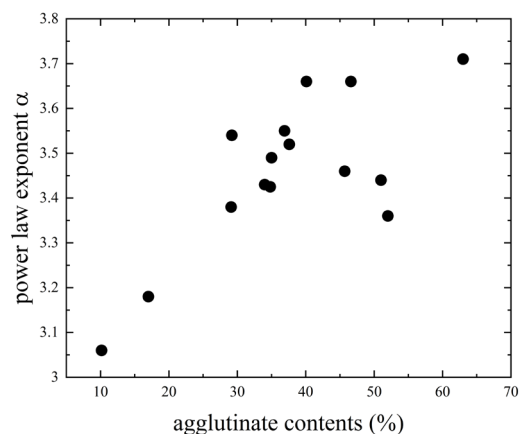


図-5 べき α とアグルチネート含有率の関係

3.2 レゴリスの粒子形状と内部摩擦角評価

粒子形状は、土の間隙比やせん断強度に影響を及ぼすことが知られているが、その理論的評価は未だに確立していない。Katagiri ら¹³⁾は、月面からの回収試料の3次元粒子形状を高精度のX線CTで取得し、それをそのままモデル化して個別要素法（DEM）解析を行うことで、レゴリスのせん断強度を数値的に評価している。図-6 は、CTによって取得した3次元粒子形状の例と、粒子形状および粒子内部のテクスチャから粒子を4種類に分類した割合を、既往の顕微鏡による分類

¹⁴⁾と比較した結果であるが、概略一致していることがわかる。図-7は、粒子形状をモデル化した個別要素法による単純せん断試験のスナップショットの例、図-8および図-9は、異なる初期間隙比の試料に対して、シミュレーションにより得られた応力ひずみ関係およびダイラテンシー関係を示している。更に、図-10はこれらの解析より得られた初期間隙比-内部摩擦角関係を示している。内部摩擦角は、初期間隙比に応じて32°~50°程度となっており、2.3節で紹介された範囲とおおむね一致している。また、ここではアグルチネート含有率 ag を変化させた解析も行っているが、他の粒子に比べて極端にいびつな形状を有するアグルチネートの含有率は、せん断強度の上昇よりも間隙比の範囲に強く影響する結果が得られている。このような結果は3.1節の議論と同様、地層年代からアグルチネート含有率を介して、レゴリスの間隙比やせん断強度を数値的に予測することが可能となる可能性を示している。

隕石によって衝突破砕して形成された粒子は非常に尖っており、月面の場合には風化作用はそれほど大きくないことから、そのままの形状が保存されていると考えられる。一方、地球や火星などの場合は、水や大気的作用で粒子が移動し、その際に粒子同士がこすれて丸くなる(図-11)。このメカニズムを定式化できれば、外的作用の大きさ(例えば風速)などから、未知の天体の粒子形状を予測することが可能となるかもしれない。また、感度はそれほど高くはないものの、天体表面の地形の凹凸から安息角を求め、そこからレゴリスのせん断強度を概算する試みもなされている¹⁶⁾。

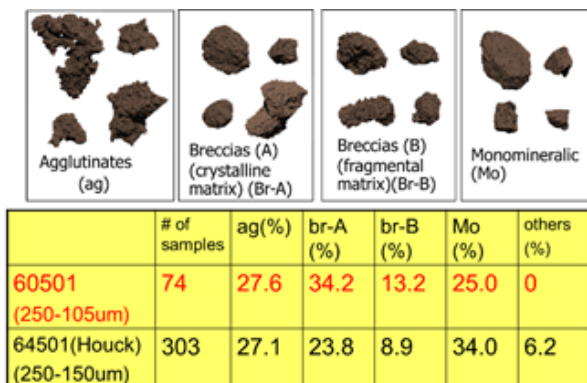


図-6 X線 μ CTにより得られた月レゴリスの3次元形状および粒子分類の比較¹³⁾

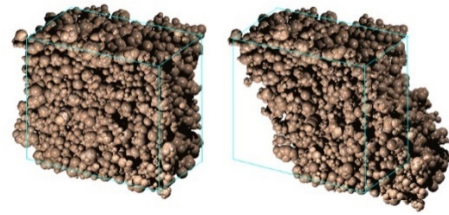


図-7 月レゴリスモデルの個別要素法単純せん断シミュレーション¹³⁾

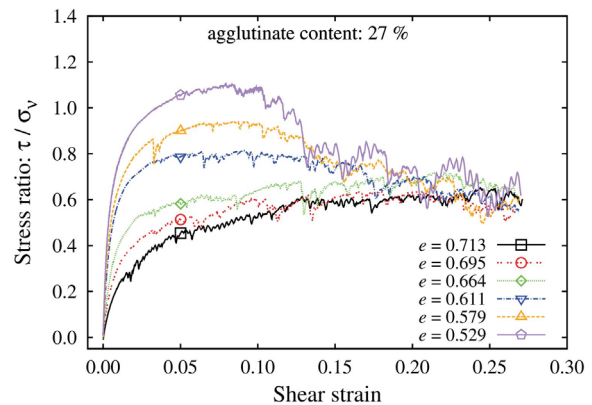


図-8 月レゴリスモデルの個別要素法単純せん断解析で得られた応力比-せん断ひずみ関係¹³⁾

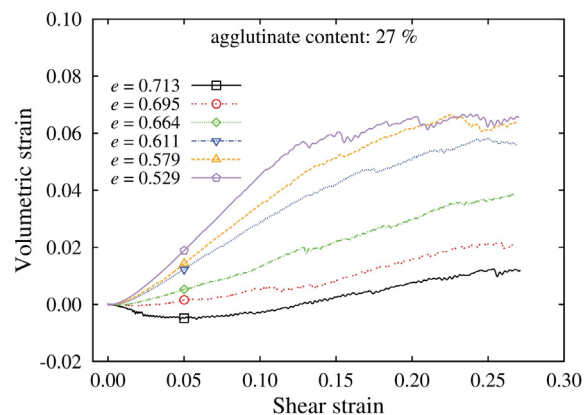


図-9 月レゴリスモデルの個別要素法単純せん断解析で得られたダイラテンシー関係¹³⁾

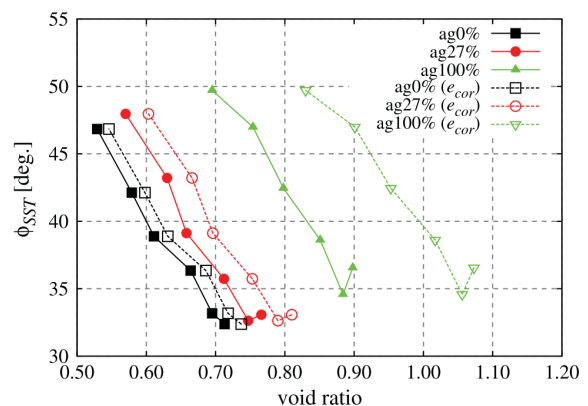


図-10 月レゴリスモデルの数値解析から求められた内部摩擦角と間隙比の関係。ここに e_{cor} は内部空隙を考慮して補正された間隙比¹³⁾

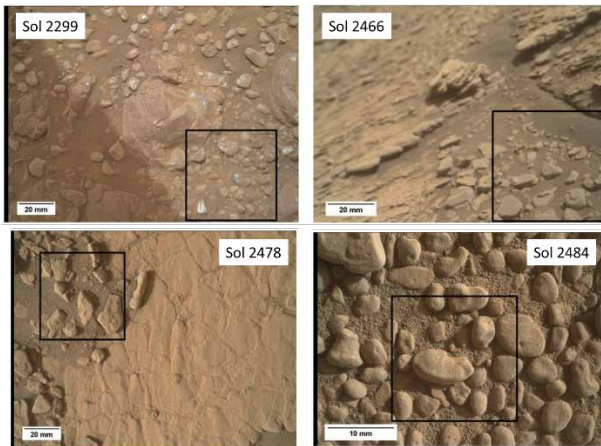


図-11 無人ローバーより撮影された火星表面の粒子画像の例¹⁵⁾

3.3 レゴリスの粘着力評価

月の表面は高真空状態であり、通常の水は存在できないため、粘土鉱物も存在しないと考えられている。また地球上の地盤で見られる、不飽和土が液架橋付着力により粘着性を有するメカニズムも存在しない。ところが、写真-1などの月面での足跡や物体痕跡、またボーリング孔が崩れない等の観察から、月レゴリスにはある程度の粘着力が存在していることが確認できる。これは主に、レゴリス粒子間に作用するファンデルワールス力および静電気力の作用だと考えられている。図-12は、固体粒子間に作用する付着力のおおよその大きさを、粒子が受ける重力と比較して示している¹⁷⁾。これによれば、液架橋付着力およびファンデルワールス力は粒子半径 R に、静電気力は R^2 に、重力は R^3 に比例し、粒径が小さくなるほど、重力に対してこれら付着力が卓越してくることがわかる。月レゴリスの平均粒径は前述の通り約 $70\mu\text{m}$ であることから、ファンデルワールス力および静電気力の力により、ボーリング孔が崩れないのはおかしいことではない。

図-13は、講座3章でも紹介された月レゴリスの模擬砂である FJS-1¹⁸⁾を用いて自立高さ試験（チューブ内の試料を徐々に上に押し出していく、崩れたときの高さを計測する試験）¹⁹⁾の様子であるが、乾燥状態にもかかわらず、やはり粘着力が発揮されていることがわかる。この自立高さを異なる間隙比の試料に対して、計測した結果を図-14に示す。ここでは、元々の FJS-1に加えて、ふるい分けによって作成した 0.1mm 以

下の試料の結果も示している。なお、 0.1mm 以上の試料では自立高さは 0 であった。

この自立高さを支配的な粒子間付着力であるファンデルワールス力から見積もってみる。粒径 D の 2 粒子間の接触点でのファンデルワールス力 f_{vdW} は、

$$f_{vdW} = \frac{AD}{24h^2} \quad (4)$$

ここに、 A は粒子を構成物質および間隙流体によって決まる Hamaker 定数であり、 h は粒子接触表面間の実質距離で、粒子表面の凹凸や清浄度によって変化する。バルクの粒状体としての粘着力 c は、粒子の平均配位数（粒子 1 個あたりの接触点数）を z_c と置くと、

$$c = \frac{f_{vdW} \cdot z_c}{\pi D^2} \quad (5)$$

と書ける。更に z_c と相対密度 D_r の間に線形関係があると仮定して

$$\frac{z_c - (z_c)_{\min}}{(z_c)_{\max} - (z_c)_{\min}} = D_r \quad (6)$$

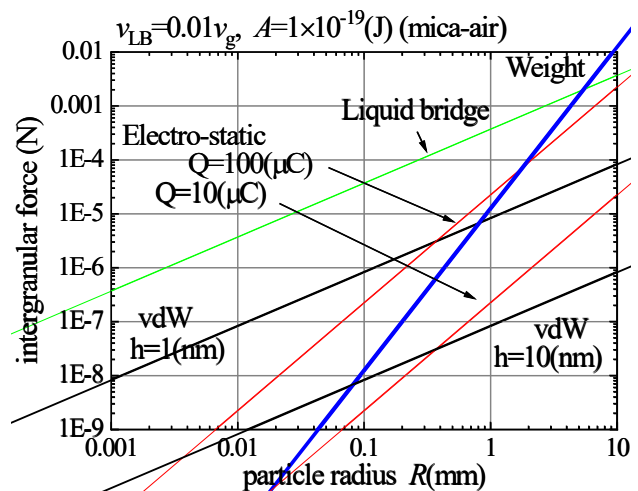


図-12 固体粒子に作用する付着力の大きさの概略

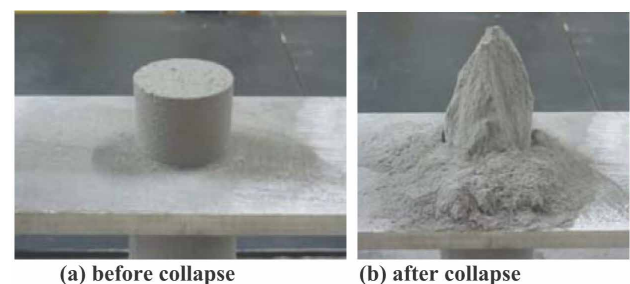


図-13 月面模擬砂 FJS-1 による自立高さ試験¹⁹⁾

ここに、 $(z_c)_{max}$ 、 $(z_c)_{min}$ はそれぞれその粒状体の最大および最小の平均配位数であり、isostatic 理論^{20,21)}により $(z_c)_{max} = 12$ 、 $(z_c)_{min} = 4$ とする。なお、相対密度を算出する際の最大・最小間隙比は、実験で得られた値を用いた¹⁹⁾。

上記の関係式より求めた粘着力と間隙比の関係を図-15に示す。ここで、Hamaker 定数はPerko ら²²⁾より $A=4.3 \times 10^{-20} \text{ J}$ 、 h は、 0.6 nm ²³⁾および 1.0 nm としている。

これより、密詰め試料においては、粒度分布および清浄度に応じて、 $c=100 \sim 500(\text{Pa})$ 程度の値を取る。これは、2.3節で紹介された値とおおよそ整合している。更に、これにRankine 土圧理論で用いられる自立高さ H_c

$$H_c = \frac{4c}{\gamma_t} \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (7)$$

を用いて H_c と間隙比の関係に変換したものを図-14に model の解として示した。ここで間隙比の関数としての単位体積重量 $\gamma_t(e)$ および内部摩擦角 $\phi(e)$ は、やはり用いた試料の実験値より求めた¹⁹⁾。オリジナル粒度および 0.1mm 以下成分のみのFJS-1の自立高さがある程度妥当に表していると言える。

高真空の月面上では、清浄度は地球上よりもずっと高いと考えられ²²⁾、そのため、粘着力の値も地球での実験よりも大きくなることに注意が必要である。また、この粘着力の値は、レゴリス表層数十 cm の深さ方向の間隙比分布に影響を及ぼすため、小型ローバーの走行性検証などには注意が必要である²⁴⁾。

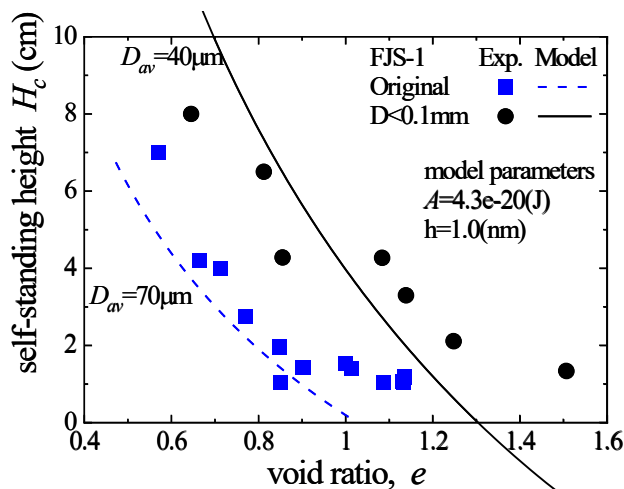


図-14 FJS-1 の自立高さ試験結果およびモデルカーブ¹⁹⁾

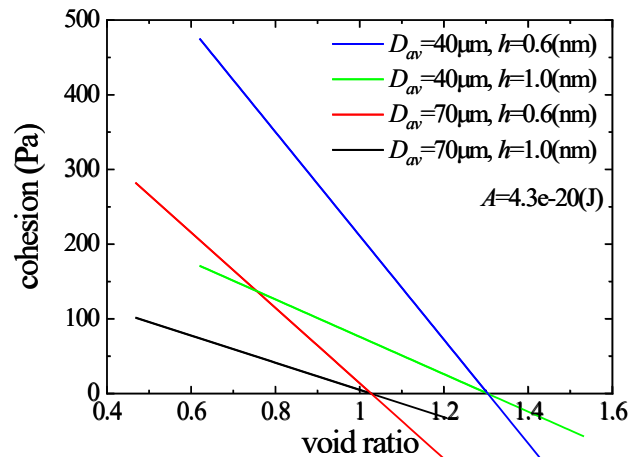


図-15 モデルから求められた月レゴリスの粘着力

4. おわりに

レゴリスは対象様々な鉱物片から構成されており、通常はその力学特性に及ぼす化学組成の影響は限定的である。すなわち、レゴリスの力学は基本的に粒状体力学に従うと考えて良い。ただし、本章の議論の多くは、アポロ計画での回収サンプルのデータに基づいており、それらは赤道地域で採取されたサンプルのみである。したがって、現在注目されている極地域の探査などにより、粘土鉱物など新しい科学的発見があるかもしれない。

また、本章で検討した土質力学パラメータを用いれば、講座の次章以降で述べられる月面での様々な地盤工学（掘削特性や土と機械の相互作用など）のための各種設計を行うことができる。ただし、レゴリスから焼成ブロックを作成するなどの操作では、レゴリスの熱融解流動特性など、化学組成の影響を強く受ける粉体化学工学的な知見が必要となる。

注 1) 文献によっては累積ではなく dN_{cum}/dr （いわゆるヒストグラム）の分布のべきを議論している場合もある。その場合のべきは、式(1)を微分するので、 $-(\alpha + 1)$ となる。

参考文献

- Carrier, W. D., Olhoeft, G. R., and Mendel, W.: Physical properties of the lunar surface, Lunar Sourcebook, Chapter 9, Cambridge University Press, 1991.,
<https://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/>
(参照 2021.3.10)

- 2) NASA Apollo 12 Image Library: AS12-48-7110
<<https://www.hq.nasa.gov/alsj/a12/AS12-48-7110HR.jpg>> (参照 2021.3.10)
- 3) NASA Lunar Sample Compendium
<<https://www.lpi.usra.edu/lunar/samples/atlas/compendium/10085.pdf>> (参照 2021.3.10)
- 4) Carrier, W. D.: Particle size distribution of lunar soil, *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.*, ASCE, 129(10), pp. 956-959, 2003.
- 5) Carrier, W. D., Mitchell, J. K., Mahmood, A.: The relative density of lunar soil, *Proc. of 4th Lunar Science Conf.*, pp. 2403-2411, 1973.
- 6) Carrier, W. D., Bromwell, L. G., Martin R. T.: Strength and compressibility of returned lunar soil, *Proc. of 3th Lunar Science Conf.*, pp. 3223-3234, 1972.
- 7) Jaffé, L. D.: Shear strength of lunar soil from oceanus procellarum, *The moon*, 8, pp.58-72, 1973.
- 8) Leonovich, A. K., Gromov, V. V., Dmitriyev, A. D., Penetrigov, V. N., Semenov, P. S., Shavarev, V. V.: The main peculiarities of the processes of the deformation and destruction of lunar soil, *The Soviet-Am. Conf. on Cosmochem. of the Moon and Planet, Part 2*, pp. 735-744, 1977.
- 9) Scott, R. F.: Failure, *Géotechnique* 37(4), pp.423-466, 1987.
- 10) Mitchell J. K., Bromwell, L. G., Carrier, W. D., Costes, N. C., Houston, W. N., Scott, R. F.: Soil-mechanics experiment, Chapter 7 of Apollo 15 Preliminary Science Report, NASA SP-289, pp. 7-1 – 7-28, 1972.
- 11) Tsuchiyama, A., Uesugi, M., Matsushima, T., Michikami, T., Kadono, T., Nakamura, T., Uesugi, K., Nakano, T., Sandford, S.A., Noguchi, R., Matsumoto, T., Matsuno, J., Nagano, T., Imai, Y., Takeuchi, A., Suzuki, Y., Ogami, T., Katagiri, J., Ebihara, M., Ireland, T.R., Kitajima, F., Nagao, K., Naraoka, H., Noguchi, T., Okazaki, R., Yurimoto, H., Zolensky, M.E., Mukai, T., Abe, M., Yada, T., Fujimura, A., Yoshikawa, M., Kawaguchi, J., Three-Dimensional Structure of Hayabusa Samples: Origin and Evolution of Itokawa Regolith, *Science*, 333(6046), 1125-1128, 2011. (doi: 10.1126/science.1207807)
- 12) Turcotte, D.L., Fractals in geology and geophysics. *Pure and applied Geophysics*, 131(1), pp.171-196, 1989.
- 13) Katagiri, J., Matsushima, T., Yamada, Y., Tsuchiyama, A., Nakano, T., Uesugi, K., Ohtake, M., Saiki, K., Investigation of 3D grain shape characteristics of lunar soil retrieved in Apollo 16 using image-based discrete-element modeling, *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE., 28(4), 04014092, DOI:10.1061/(ASCE) AS.1943-5525.0000421, 2014.
- 14) Houck, K. J., Petrologic variations in Apollo 16 surface soils. *J. Geophys. Res.*, 87(S01), A197 – A209, 1982.
- 15) 齊藤恵理, 森本竜紀, 松島亘志, 火星探査機キュリオシティが取得した画像データを用いた火星表層土の粒子物性解析, *Geo-Kanto2019: 地盤工学会関東支部発表会*.
- 16) 成瀬元. 火星のローブ状地形の成因— 土石流堆積物逆解析による予察的検討 — *地学雑誌*, 125 (1) 163–170, 2016. doi:10.5026/jgeography.125.163
- 17) 粉体工学会編, 粉体工学便覧-第2版-, 日刊工業新聞社, 1998.
- 18) Kanamori, H., Udagawa, S., Yoshida, T., Matsumoto, S., and Takagi, K., Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan, *Proc., Space'98*, ASCE, Reston, Va., 462–468, 1998.
- 19) Matsushima, T., Ishikawa, T., Particle Grading Effect on Mechanical Properties of Lunar Soil Simulant FJS-1, *Proc. Earth and Space 2014*, ASCE, 60-68, doi: 10.1061/9780784479179.008, 2014.
- 20) Guyon, E., Roux, S., Hansen, A., Bideau, D., Troadec, J.-P., Crapo, H., Non-local and non-linear problems in the mechanics of disordered systems: application to granular media and rigidity problems, *Rep. Prog. Phys.* 53, 373-419, 1990.
- 21) Ouaguenouni, Sofiane, and J-N. Roux, Compaction of well-coordinated lubricated granular pilings. *EPL (Europhysics Letters)* 32.5, 449, 1995.
- 22) Perko, H.A., Nelson, J.D., Sadeh, W.Z., Surface cleanliness effect on lunar shear strength, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 371-383, 2001.
- 23) Walton, O.R., Adhesion of lunar dust, NASA/CR-2007-214685, 2007.
- 24) 森川みどり, 松島亘志, 模擬砂を用いた月面表層地盤の深さ方向密度特性の推定, 第53回地盤工学研究発表会, 2018.

(原稿受理 2021.4.1)