

月面探査に向けたテラメカニックス研究の現状

Studies of Terramechanics for Lunar Surface Exploration

金 森 洋 史 (かなもり ひろし)

清水建設㈱ 主任研究員

青 木 滋 (あおき しげる)

清水建設㈱ 主任研究員

1. はじめに

近年、わが国を始めとして多くの国が月探査に着目している。その目的は国によって様々であるが、わが国に関しては、本年（2009年）6月に決定された「宇宙基本計画」に則り、科学探査、月資源利用の可能性検討ならびに有人活動への対応などを目的として、月探査を推進する運びとなった¹⁾。これに先立ち、2007年9月に打ち上げられた月周回探査衛星「かぐや」からは、既に月に関する多くのデータが取得されている。独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、この次段階として、2015年ごろに月面に着陸し、ローバ（月面車）などを使ったさらに詳細な探査を行うことを検討している²⁾。

このような月面における探査活動を行う場合、そこで使われる機器類は月面の特性に適したものでなければならない。例えば、ローバは月面上を確実に走れなければならないし、掘削ツールは月面を目標どおりに掘れなければならない。このような機器類の最適設計を行うためには、テラメカニックス的な観点からの検討が不可欠であり、2000年ごろからこれに関する研究が進められている。本報は、その研究概要の一部を紹介するものである。

2. テラメカニックスとルナメカニックス

「テラメカニックス」は、土と機械の相互作用に関する種々の問題を取り扱う分野であり、具体的には以下の課題に関する検討が含まれている³⁾。

- ① 農業機械と土の間の諸問題
- ② 特殊車両の走行に関する諸問題
- ③ 建設機械と土の間の諸問題
- ④ 地盤特性の評価・判定法
- ⑤ テラメカニックスにおける環境問題
- ⑥ 各種作業機械の開発・メカトロニクス化

国内では1980年に設立された「テラメカニックス研究会」（現会長：高橋弘 東北大学大学院教授）などにおいて活発な議論がなされている。また国際的には、The International Society for Terrain-Vehicle Systems (ISTVS) が主体となり、3年毎の世界大会やその間の地域別会議などが開催されている⁴⁾。

本来は地上の問題としての検討が進められてきた「テラメカニックス」であるが、2000年頃にわが国の宇宙関連機関（当時：宇宙開発事業団、航空宇宙技術研究所、

および宇宙科学研究所、現在：JAXA）が、ローバを使った本格的な月探査の検討を開始したことから、月面に関するテラメカニックスの研究が着目されるようになった。特に、月面着陸時の衝撃評価、ローバの走行性確保、鉱物探査のための掘削や試料採取機器の開発、さらには将来の月面建設機械の開発などにおいては、これまでのメカトロニクスの検討だけでは対応できず、テラメカニックスの導入が不可欠となっている。

このような背景から、前出のテラメカニックス研究会では、2001年に「月面におけるテラメカニックス検討委員会」を設立し、月の土や地盤ならびに様々な探査機器の特性に関連した研究を推進している。なお、テラメカニックスの「テラ」は、本来は「地球」を指す用語であることから、「月面におけるテラメカニックス」は、「月」を意味する「ルナ」を用い、通常は「ルナメカニックス」と呼ばれている。ただしこれは造語であり、正式な技術用語として認められたものではない。

3. 月面環境について

3.1 月面環境

まず、月面の特徴的な環境を紹介すると、以下のようになる⁵⁾。

- ① 大気が無い。そのため薄明とはならず、日照と陰影のコントラストが強い。
- ② 表面重力が地上の約 1/6 である。
- ③ 月の 1 日が地球の約 29 日に相等する。
- ④ 上記①と③の影響により、月面温度が -170°C ～ 120°C （赤道付近）と大きく変化する。
- ⑤ 太陽風や銀河宇宙線が降り注ぐ。
- ⑥ 地球では燃え尽きてしまうような微小な隕石も月面に到達する。
- ⑦ 月面は、厚さ数 m ～ 数十 m のレゴリスと呼ばれる岩石の破碎物で覆われている。

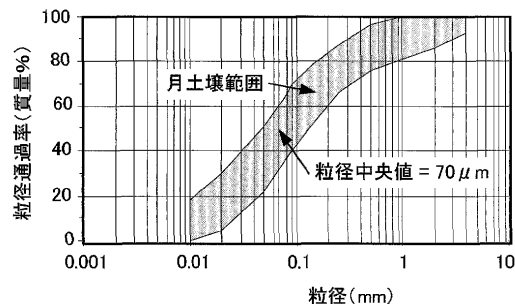
月面活動に使われる機器類は、上記のような環境でも十分な機能を発揮できることが求められる。

3.2 月の地盤と土の特徴

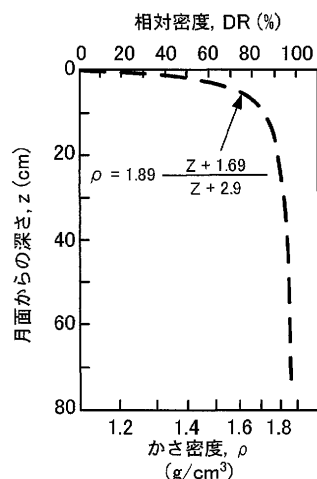
前述のように月面はレゴリスで覆われている。レゴリスは隕石の衝突によって月表層の岩石が破碎され堆積したものである。その鉱物組成は月の「海」と呼ばれる地域と「高地」と呼ばれる地域で異なっている。一般的な傾向として、海には単斜輝石を多く含む玄武岩、高地には斜長石を多く含むハンレイ岩が多い。

表—1 月表土の機械的性質

単位容積質量 (g/cm^3)		粒子比重	せん断特性
最少	最大		
1.45	1.79	平均: 3.1 (2.3 - 3.2)	粘着力 c : 0.1 - 1 kPa 内部摩擦角 ϕ : 30 - 50 °



図—1 月表土の代表的な粒度



図—2 月地盤の深さ方向かさ密度

レゴリスの大部分は粒径 1 cm 以下の「土」であり、現実的にはその特性がテラメカニクスに大きく関係する。月表土の主な機械的性質を表—1 に、代表的な粒度を図—1 に、また月地盤の深さ方向のかさ密度を図—2 に示す⁶⁾。

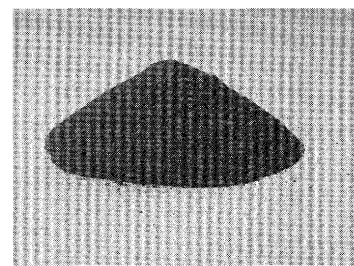
これらの図表から明らかなように、月の表土は非常に細かい成分を含んでおり、砂質シルトに近いものとなっており、それが月表面の浅い層にゆるく堆積している。しかしそのかさ密度は深さ方向に急激に増大し、深さ 50 cm 程度ではほぼ最大密度に達する。さらに、見かけの粘着力を持っていることから流動性は悪く、締め固めることによって鉛直に掘削することも可能と考えられている。

4. これまでの主な研究

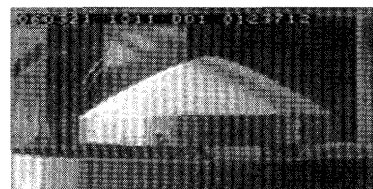
4.1 月の土の特性に関する研究

(1) 模擬月土の開発

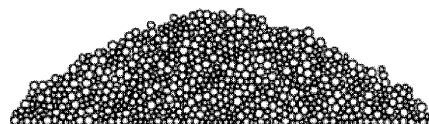
月面活動で使われる様々な機器類を開発するためには、月面を模擬した実験やそれに基づく解析が必要となる。そのために、月の表土を模擬した材料（模擬月土：ルナ



写真—1 模擬月土の外観



写真—2 月面重力環境で作製した砂パイル



図—3 安息角の DEM 解析モデル

ソイルシミュラント) が開発されている⁷⁾。月面の特殊な環境によってのみ作られる性質などもあり、地上では完全には模擬できない性質もあるが、テラメカニクスの検討には十分適用できるものである。表—1 ならびに図—1 に示した月表土の性質をほぼ模擬した材料となっている。模擬月土の外観を写真—1 に示す。

(2) 月面重力環境下における土の特性に関する研究

月面における土の性質を把握する試みの一つとして、航空機を使用した月面重力環境において土の安息角を測定し、その解析的な考察を行った研究がある⁸⁾。地上と異なった重力環境で実験を行う場合、航空機が頻繁に使われる。これは、航空機が上昇下降を繰り返す飛行（パラボラ飛行）をすることによって、機内に様々な重力環境が作り出されることを利用したものである。ただし、所定の重力環境が得られる継続時間は、1 回のパラボラ飛行で約 20 秒である。

写真—2 は、月面重力環境において豊浦標準砂をホッパーから落下させて作製した砂パイルの状態を示したものである。また、図—3 はそれを 2 次元の DEM (Discrete Element Method: 個別要素法) でシミュレーションしたモデルである。この研究からは、砂の安息角は重力に影響されないことが確認されている。

4.2 月地盤の掘削に関する研究

(1) 表層掘削の検討

月面における探査では、浅い土層領域に地震計など各種の計測器を埋設する可能性があり、そのためには表層を掘削する必要がある。このような掘削に、どのような力が必要となるかに関する研究が行われている⁹⁾。

写真—3 は掘削実験に使用したロボットアームで、バックホウ方式で掘削を行うようになっている。アームの

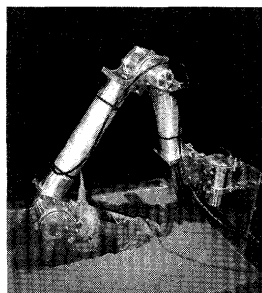


写真-3 掘削実験用ロボットアーム

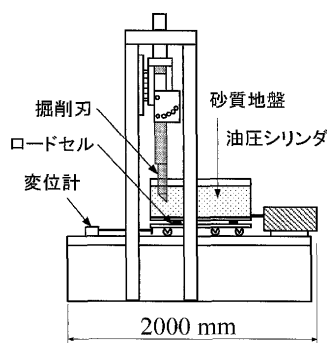


図-4 切削抵抗測定装置

根本部分に力トルクセンサが取り付けられており、掘削時にこの部分に加わる力とその方向を測定することにより、このアームが取り付けられたローバやランダの挙動や所要エネルギー等が推定される。今後は環境条件やバケット形状などを変えたデータ収集が行われる。

(2) 砂質地盤の切削抵抗

掘削刃による定常掘削の実験や解析から、掘削特性に及ぼす掘削深さや相対密度などの影響を捉え、所要掘削力の推定を行う研究も行われている¹⁰⁾。

実験装置は図-4に示すように、掘削刃、台車、油圧シリンダー、変位計などから構成されている。土槽内の豊浦標準砂や模擬月土に所定の深さに掘削刃を貫入させ、その状態で試料土槽を一定速度で水平移動させた場合の掘削力を測定した。

実験および解析の結果、掘削抵抗の推定には、掘削によって刃の全面に堆積する（盛り上がる）土を考慮する必要があること、相対密度が大きい場合の掘削抵抗は、豊浦標準砂と模擬月土とで大きく異なることなどが明らかになった。

4.3 ランダ（着陸機）の着陸衝撃に関する研究

ランダの着陸方法や脚の衝撃吸収機構等を決定するためには、着陸に対する月地盤の応答性を把握する必要がある。地盤中の空気が衝撃応答に大きく影響するため、JAXAでは真空チャンバ内に模擬月土を設置し、その表面に様々な重錘を落下させる実験を行った¹¹⁾。重錘の大きさならびに重量は、月面重力を考慮した相似則に従い、それぞれ実際に想定された値の1/6、1/216としている。写真-4に真空落下試験状況を示す。この実験から、地盤のかさ密度に応じた落下速度と衝撃加速度の関係が得られている。

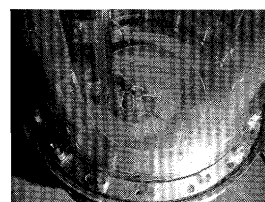


写真-4 真空落下試験状況

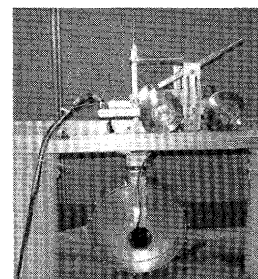


写真-5 車輪走行装置

4.4 ローバの走行に関する研究

(1) 車輪形状

アポロ計画当時に米国が使用した月面車は、全長310 cm、全幅183 cm、車両総重量700 kgの4輪（車輪径82 cm）で、各車輪に0.25馬力のモータが取り付けられたものであった。このような月面車においても砂地にはまって動けなくなることがあったと報告されている¹²⁾。

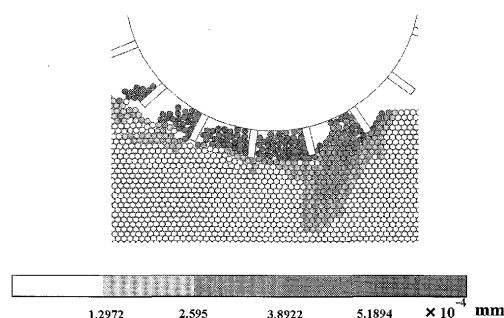
わが国の次期月探査はローバを使った無人探査が有力と考えられており、その実現に向けたローバ走行機構の開発研究が進められている。月面までの輸送機的能力から、次期月探査用のローバはアポロ計画で使われたローバの5～6分の1程度の規模になると予想される。月面のような不整地の砂地を走行する場合には、このような小型ローバは不利と考えられ、車輪形状等に関するより厳密な検討が必要となっている。

写真-5は、様々な形状の車輪の走行性能を測定する装置である。これを、模擬月土を敷き詰めた模擬地盤上に設置し、走行時の車輪トルクや牽引力、沈下量ならびに滑り率（車輪の径と回転数から求められる走行距離と、実際に進む距離との差から算出）等を測定することによって、走行性能に及ぼす車輪形状の影響を把握する検討がなされている¹³⁾。さらに月面重力ならびに真空環境の影響を考慮するために、相似則に基づく1/6スケールモデルと真空チャンバを用いた検討も行われている¹⁴⁾。

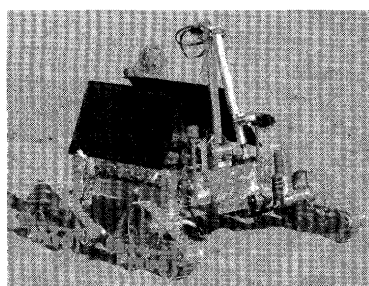
上記のような車輪の走行性能を様々な条件に対して推定するために、DEMを用いた検討が行われている¹⁵⁾。実験結果との照査から求めた解析パラメータを用い、月面を走行させた様々な形状の車輪の挙動が調べられている。図-5に、DEMモデルの一例を示す。

(2) クローラ（履帯）システムの検討

ローバの走行システムとして、必ずしも車輪方式のみが最適とは限らず、砂地斜面の登坂能力ではむしろクローラ方式が優れている場合も多い。一方、クローラ方式は車輪方式に比べて、車体の姿勢を一定に保ち難い、



図—5 DEMによる走行時の土粒子変位量推定



写真—6 4クローラシステム (JAXA 提供)

旋回時のエネルギー消費が大きい、部品点数が多く故障率が高い、質量が大きいなどの短所が指摘されてきた。

JAXA では、これらの短所を改善し、優れた走行性能を生かすことを目的に、クローラシステムに関する検討を行ってきている^{16),17)}。これらの検討では、クローラ方式と車輪方式の比較を行うと共に、メッシュ式のクローラを採用することによって部品点数や質量を減らし、さらにサスペンションを設けることによって車体の姿勢変化を小さく抑えるように工夫した4クローラシステムを開発し、その走行性能の評価を行っている。

写真—6 は JAXA が開発中の4クローラシステムの概観である。各クローラは独立操舵となっており、その場旋回や斜め走行などが可能となっている。また、岩などの乗り越え性能を確保するために、サスペンションリンク機構が採用されている。

5. ま と め

本報では、わが国の次期月探査において重要な技術に位置付けられる「テラメカニクス」に焦点を絞り、その研究の現状を紹介した。これに関連した多くの研究アプローチを紹介するために、各研究の詳細な内容や結果については割愛させていただいた。また、海外も含め本報では紹介しきれなかった研究も数多いので、ご興味のある方は参考文献等をご活用いただけると幸いである。

参 考 文 献

- 1) 宇宙開発戦略本部：「宇宙基本計画 ～日本の英知が宇宙を動かす～」, pp. 30～31, 2009.
- 2) JAXA ホームページ：月・惑星探査プログラムグループ, <http://www.jspec.jaxa.jp/enterprise/moon.html>
- 3) テラメカニクス研究会ホームページ：テラメカニクス研究会について http://www.soc.nii.ac.jp/jast/what's_terramec.htm
- 4) ISTVS ホームページ：Goal of the Society, <http://www.istvs.org/>
- 5) 古在由秀：「月と小惑星」, 現代天文学講座, 恒星社厚生閣, pp. 27～31, 1983.
- 6) Heiken, G. H., Vaniman, D. T. and French, B. M., eds.: *Lunar Sourcebook, A Users Guide to the Moon*, New York, Cambridge University Press, 1991.
- 7) 金森洋史・青木 滋・武田 弘・松井 快・宮原 啓・大竹真紀子：月の地域に対応した月土壌シミュラントの開発と性質, 第51回宇宙科学技術連合講演会, 2007.
- 8) Hiroshi Nakashima, Yasuyuki Shioji, Taizo Kobayashi and Shigeru Aoki: Numerical Analysis of Sand Flow under Low Gravity Condition, Proceedings of the Joint North America, Asia-Pacific ISTVS Conference and Annual Meeting of Japanese Society for Terramechanics, Fairbanks, Alaska, USA, June 23–26, 2007.
- 9) Makoto Ichikawa, Takeshi Sasaki, Nobuto Yoshioka and Haruaki Itagaki: DESIGN ANALYSIS FOR SMALL LUNAR ROVER, Proceedings of the 21st International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2000.
- 10) 渡邊一慶・片木聖樹・小林泰三・深川良一・金森洋史・佐々木健：平刃による砂質地盤掘削に関する実験的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会, 2001.
- 11) 青木 滋・宮原 啓：SELENE-Bにおけるテラメカニクス, テラメカニクス, 第24号, pp. 123～128, 2004.
- 12) David A. Kring: Lunar Mobility Review, http://www.lpi.usra.edu/science/kring/lunar_exploration/briefings/lunar_mobility_review.pdf
- 13) 金森洋史・横山隆明・藤井勇人・中嶋 洋・笈田 昭・建山和由：月面ローバの走行性に及ぼす車輪形状の影響に関する実験研究, テラメカニクス, 第23号, pp. 75～80, 2003.
- 14) 金森洋史・青木 滋：1/6 スケール車輪走行実験による月面ローバ走行性の評価, テラメカニクス, 第24号, pp. 129～134, 2004.
- 15) Hayato Fujii, Akira Oida, Hiroshi Nakashima, Juro Miyasaka, Masatoshi Momozu, Hiroshi Kanamori, Takaaki Yokoyama: Analysis of Interaction between Lunar Terrain and Treaded Wheel by Distinct Element Method, 14th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems Vicksburg, MS USA, October, 20–24, 2002.
- 16) 若林幸子・佐藤 等・松本甲太郎：クローラ型月面走行系の設計と走行評価, テラメカニクス, 第26号, pp. 9～14, 2006.
- 17) 若林幸子・西田信一郎・佐藤 等・松本甲太郎：4クローラ月面走行系の設計, テラメカニクス, 第27号, pp. 13～18, 2007.

(原稿受理 2009.7.8)