

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：13401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760376

研究課題名(和文)月面探査における地盤調査システムの開発と月・惑星地盤工学の創成

研究課題名(英文)Development of soil mechanics investigation system for lunar surface explorations

研究代表者

小林 泰三(Kobayashi, Taizo)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10380578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：我が国の将来の月探査計画において、月面(レゴリス)の地盤調査を行うための計測装置「月面地盤調査装置(LSM)」の搭載が検討されている。本研究では、その基本的要素技術となる小口径のボアホール削孔技術、孔壁を利用した孔内せん断摩擦試験技術、孔内弾性波探査技術について試作ツールを開発するとともに、模型実験や数値シミュレーションを実施して、各技術の適用性を検証した。当該研究期間には、これらを統合したプロトタイプシステムの構築には至らなかったが、今後、開発したツールを統合化することで、月面での効率的な地盤調査が可能になると考えている。

研究成果の概要(英文)：Soil mechanics study plays a key role in the future lunar/planetary surface explorations relating to various soil-related problems including lunar module landing, mobile robot locomotion and earth-moving. Lunar soil mechanics investigation system (LSM) is proposed as a candidate instrument for Japan's future lunar landing program. The LSM is configured to perform four types of measurement in a borehole; 1)1-m borehole preparation and measurement while drilling, 2)borehole optical sensing, 3)borehole shear testing, and 4)vertical seismic profiling. In this study, we developed prototypes of drilling augers, borehole shear testing probes and reverse vertical seismic profiling (RVSP) system and demonstrated a series of model experiments with a Japanese lunar soil simulant (FJS-1). The test results showed that the proposed methods have a potential to be reliable tools.

研究分野：地盤工学

キーワード：月探査 地盤調査 掘削 せん断試験 弾性波探査 レゴリス

1. 研究開始当初の背景

21世紀をまたいだ今、国際宇宙ステーションの完成を経て、人類の活動領域を月や惑星にまで拡大しようとする計画が世界で本格化してきている。これまでの軌道上の探査と異なり、月や火星などの表面に着陸する探査では、探査機の着陸や探査車両の走行、観測機器の設置、基地建设・資源利用のための地盤の掘削や整地など、地盤に関連する作業が多く見込まれる。月や惑星の表層には「レゴリス」と呼ばれる細かい土粒子が厚く堆積していることが知られているが、その土粒子の特異性や低重力・高真空条件により、地盤系探査ミッションにレゴリスがどのような影響を及ぼすのか不明な点が多く残っている。レゴリス-探査ロボット/観測機器との相互作用問題は、機器の設計や運用、ミッションの成否に関わる重要な検討項目であり、米国や欧州、中国等を中心に、月・惑星地盤の力学に関する研究が急速に活発化してきている。

研究代表者らは、これまでに、レゴリスを人工的に再現した模擬土等を利用した地上研究を進めてきたが、月面の条件や環境を完全に再現することは難しく、地上研究のみでは限界があることを認識しており、原位置(月面)における地盤調査の早期実現が必要であるという考えに至った。宇宙航空研究開発機構(JAXA)はこれに理解を示し、次期月探査計画(SELENE-2計画)において、「月面地盤調査装置」の搭載に向けた検討が進められることになった。地上では様々な地盤調査技術が開発・実用化されているが、月面では宇宙機として厳しい制約条件があり、地上装置をそのまま利用することはできない。月面における地盤調査を早期に実現するためには、何をどのように計測するのかを十分に検討した上で、その計測を実現する調査ツールの基本技術の確立し、さらにプロトタイプ機による地上実証検証が求められている。

2. 研究の目的

研究代表者らは、近い将来の月探査ミッションへの搭載に向けて、レゴリスのかさ密度、変形・強度特性、地質・地層構造を計測するための地盤調査システム(LSM: Lunar Soil Mechanics Investigation System)を提案している。LSMは、着陸船に搭載され、月面に1m程度のボアホールを削孔し、その孔内において過去にない直接的な地盤内観測・計測を行おうとするものである(図-1)。本研究では、着目する地盤力学特性を取得するための基本要素技術として、以下の3項目について検討する。

(1)削孔技術

月面の深度方向へのアクセスは、地盤調査のみならず、鉱物や科学探査等においても強く求められる技術であるが、これを無人機で



図-1 月面地盤調査装置の搭載イメージ

実施する技術は我が国では開発途上の段階にある。ここでは、宇宙機としての厳しい制約条件の中で、削孔効率を最大にする条件の解明と、それを可能にする削孔ツール(ビット、オーガー等)を開発する。

(2)孔内試験技術

削孔したボアホール内で、地盤(孔壁)の変形・強度特性を把握するための試験ゾンデを開発する。提案する試験法は、地上で用いられている孔内水平載荷試験および孔内せん断摩擦試験を基本原理とするものである(図-2)。地上では、ゾンデの拡張を流体圧で制御する試験装置が実用化されているが、月面では、装置の小型化に加え、制御・計測を機械的に行う技術が求められる。ここでは、小型モータによって制御・計測が行える月面用のプロトタイプ試験機を開発を行い、室内模型実験によってその妥当性や機能特性を評価する。

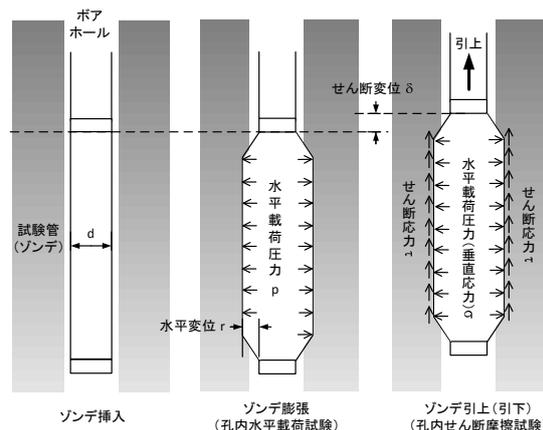


図-2 孔内試験の概念図

(3)弾性波探査技術

LSMでは、孔内で発生させた弾性波を着陸船脚に設置した受振器で計測し、波の到達速度を解析することによって地質構造を可視化する逆VSP探査技術を提案する(図-3)。月でのVSP地震波探査では、地上での探査と異なり、(a)受振器の数と配置に制限がある、(b)掘削孔が浅い、(c)振動の減衰が激しくエネ

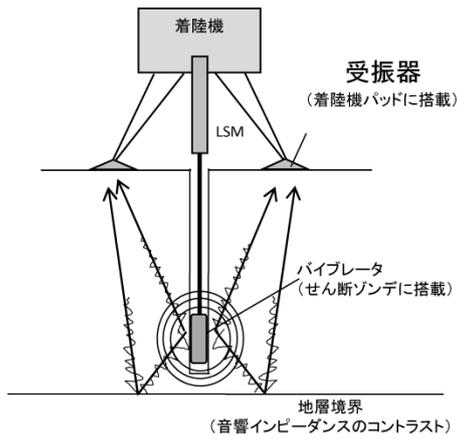


図-3 逆 VSP 探査の概念図

ルギーが届きにくい、といった欠点が挙げられる。一方、利点としては、ノイズが少ないことから小さい震源でも探査可能、構造が比較的単純であること、などが挙げられる。本研究では、想定される制約条件を想定した波動シミュレーションや室内模型実験によって、月面における逆 VSP 探査法の実現可能性のフィージビリティ検討を行う。

3. 研究の方法

本研究では、上述した 3 項目の要素技術の確立に向けて、以下に示す機器開発と地上実証実験等を行った。

(1) 削孔技術

本研究では、図-4 に示すドリル削孔装置^①を用い、オーガーやドリルビットを取り換えて削孔時の掘進力やトルクを計測した。この装置は、昇降用のモータと回転用のモータが取り付けられており、チャックで把持したツールの昇降及び回転運動が可能となっている。また、ドリル削孔時の掘進力と回転トルクは、チャック上部に取り付けられた 6 軸力覚センサによって計測される。

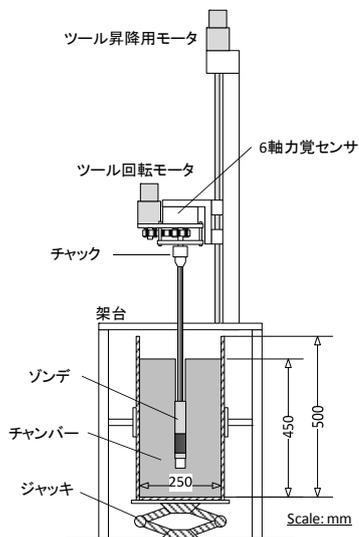


図-4 ドリル削孔及び孔内試験装置

削孔を行う土質試料には、アポロ計画で地球に持ち帰られた月レゴリスを人工的に再現・模擬したレゴリスシミュラント (FJS-1^②) を用いた。ここに、FJS-1 は、地上の玄武岩、チタン鉄鉱、橄欖 (かんらん) 石などの主原料をジョークラッシャーやインパクトクラッシャーなどで粉碎し、後に月面土に模擬するよう化学組成成分と粒度の配合調整を行ったものである。

また、削孔実験では、削孔に及ぼす真空度の影響を調べるために、気中の常圧条件に加え、真空チャンバを用いて地盤内の気圧を減圧させた条件下での実験も行った。

(2) 孔内せん断摩擦試験技術

本研究では、月面仕様として、孔壁加圧面の制御や圧力計測を機械的メカニズムによって実現する孔内小型ゾンデを開発するとともに、上述したドリル削孔装置を利用した室内模型実験を行った。

開発した試験機は、予め削孔したボアホールの孔壁にゾンデの載荷面 (表面にはサンドペーパーを貼付) を圧着した状態で、それを引き上げる (あるいは押し込む) ことによって孔壁にせん断破壊を生じさせ、引き上げ力 (せん断力) と変位の関係から地盤の強度定数 (粘着力 c' と内部摩擦角 ϕ') 等を求めるものである。本研究では、別途土質試験によって得られた強度定数と比較し、開発した試験機の妥当性を検証した。

(3) 弾性波探査技術

本研究では、月面で想定される機器の設置条件の下、波動シミュレーションによって逆 VSP 探査法の実現可能性を評価した。ここでは、図-5 に示すように、受振器を着陸船の脚 (4 箇所) と掘削装置に設置し、深度 1m 以浅を対象に 0.1m 間隔で発振することとした。また地質構造には、アポロで実施された弾性波探査で推定された地質構造を参考にして、水平 2 層構造を仮定し、表層の低速度層の厚さを 10 m とした。これらの探査パラメータと地質モデルに対して、有限差分法 (FDTD) による波動シミュレーションを実施した。

また、本研究では、月レゴリスシミュラント (FJS-1) を敷き詰めたドラム缶を用いた逆 VSP 探査の実証模型実験も行った。震源と受振器間の距離が近く、低周波数の震源を用いた場合には、波の初動差を読み取るこ

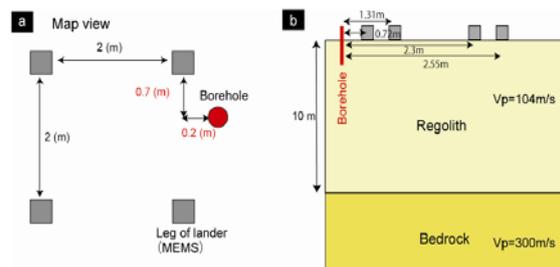


図-5 シミュレーション条件

が難しくなるため、震源にスイープ波（時間とともに周波数が変化する波形）を利用して、信頼できる結果が得られるかを調べるために行ったものである。

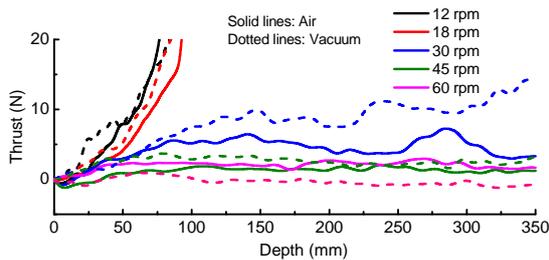
4. 研究成果

(1)削孔技術

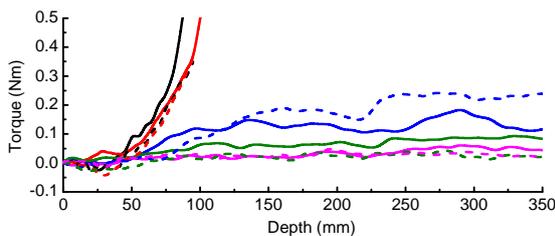
実験結果の一例として、外径 25 mm、ピッチ 10 mm の一条スクリーオーガーを用いて行った削孔実験結果を図-6 に示す。対象地盤は、かさ密度を 1.90 g/cm^3 に調整した FJS-1 であり、気中の大気圧条件に加え、 $6.67 \sim 22.7 \text{ Pa}$ の減圧条件下でも実験を実施した。なお、同図には、掘進速度を 2.0 mm/s に固定した上で、オーガーの回転速度を $12 \sim 60 \text{ rpm}$ に変化させた場合の結果を示している。回転速度が 12 rpm のとき、スクリーウの山の軸方向移動速度と掘進速度が一致する（木ネジのように回転した分だけ掘進する）。

同図(a)と(b)は、削孔にともなう掘進力（鉛直押しつけ力）と回転トルクをそれぞれ表わしたものである。この図より、ピッチに沿う回転速度程度（ $12 \sim 18 \text{ rpm}$ ）では、掘進力や回転トルクが二次関数的に上昇し、チョーキングが発生して掘進が困難となる一方で、回転速度が大きいほどこれらの負荷が小さくなる事が分かる。なお、各回転速度において、気中／真空条件で差異は見られるものの、実験誤差と見なされるもので、今回の減圧条件下では真空度の有意な影響は認められない結果となった。また、異なる形状を有するビットでも実験を行ったが、レゴリスのような砂質地盤では大きく影響しないことが分かった。

本実験で用いた試料のように、固結していない粒状体を削孔する場合は、スクリーウのピッチに対して十分な回転速度を保つこと



(a) 削孔深度と掘進力（鉛直力）の関係



(b) 削孔深度と回転トルクの関係

図-6 削孔実験結果の一例

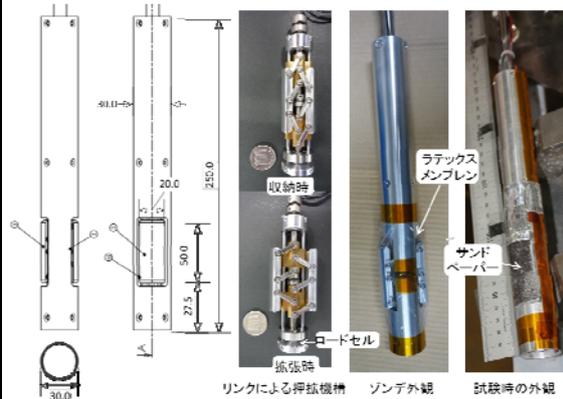
(外径 : 25 mm, ピッチ : 10 mm, $\rho_t = 1.90 \text{ g/cm}^3$)

が重要である。このことは、過度な掘進力の発生を抑制し、ビットと土間の摩擦低減に寄与するだけでなく、ビットで掘削したズリを効率的に排出するためにも重要である。ただし、回転数を上昇させると消費電力が増大する。本研究では、チョーキング発生条件を少し上回る回転数のときに消費電力が最小値（最適値）を取ることが明らかになった（それ以上では消費電力は回転数に比例して増大する）。

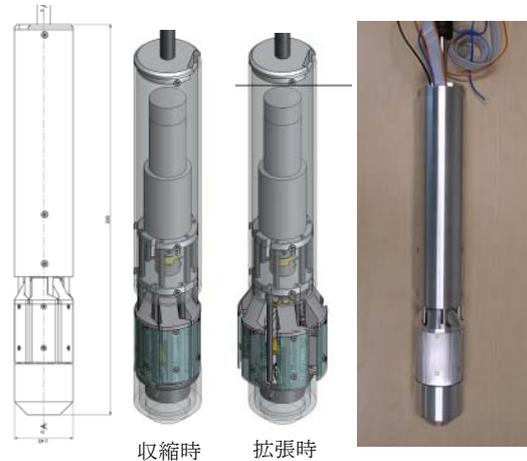
以上のように、今回の実験から、スクリーウやビットのデザイン以上に、掘進速度と回転速度の設定がキーパラメータになることが分かった。月面では、掘進力や回転トルク、電力などをモニタリングしながら安全な駆動パラメータ（掘進速度と回転速度）を調整制御することが肝要であると考えられる。

(2)孔内せん断摩擦試験技術

本研究では、月面における変形・強度試験装置のプロトタイプ機として、2種類のゾンデを開発した（図-7）。同図(a)は、対に配置された2枚の载荷ブレード（せん断面）を水平に押し広げる構造（二つ割り型：直径 30 mm）とするもので、同図(b)は、ゾンデ周囲を6等分した円弧ブレードが水平周方向に押し広げられる構造（6つ割り型：直径 45 mm）



(a) 二つ割り型ゾンデ



(a) 六つ割り型ゾンデ

図-7 試作開発した孔内試験装置

となっているものである。いずれも小型モータとロードセルを内蔵しており、載荷板の制御と載荷板に作用する水平荷重が計測できる仕組みとなっている。以下では、研究成果の一例として、二つ割り型ゾンデを用いた模型実証実験結果を報告する。

図-8は、せん断変位量（引上げ量）が2～3 mm に達した時点の載荷板に作用する垂直応力とせん断応力の関係図である。試験を行

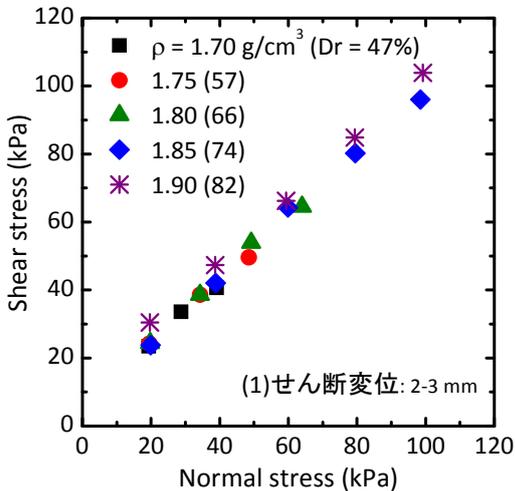


図-8 垂直応力とせん断応力の関係

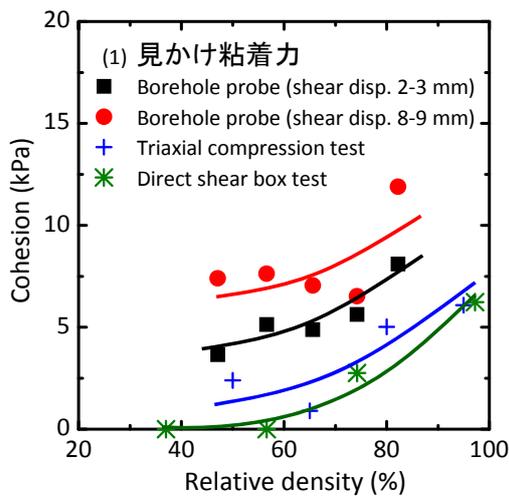


図-9 粘着力

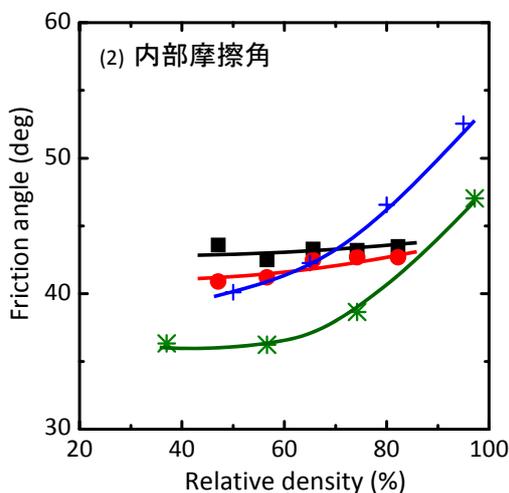


図-10 内部摩擦角

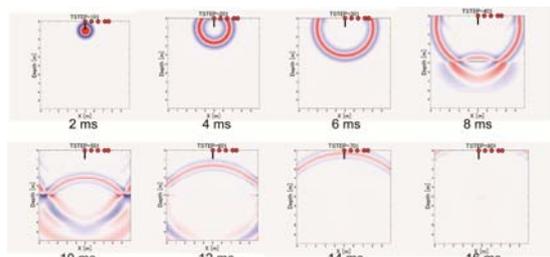
った土質試料は、かさ密度 $1.70\sim 1.90\text{ g/cm}^3$ の FJS-1 である。この図より、直線性の高い Coulomb 破壊線が得られており、摩擦試験として機能していることが分かる。さらにこの破壊線より求めた粘着力と内部摩擦角を図-9 及び図-10 にそれぞれ示す。同試料に対して別途実施した三軸試験や一面せん断試験結果に比べ、特に内部摩擦角に関しては、密度依存性が低いことが分かる。これは、ゾンデを連続して引き上げる試験プロセスを取ったために残留強度が発揮されたと考えれば、必然の結果と言えるものである。粘着力に関しては、他の室内試験に比べて高い値を与える傾向にある。これは、ゾンデの肩部分等に不要な抵抗力が生じていた可能性を示唆するものであり、今後、これらが発生しない機構を検討するか、あるいは不要分の補正を行うなどの処置が必要であると考えられる。このように、二つ割り型ゾンデでは、試験手順や機構にいくつかの改良点を残すものの、提案手法で目的に資する強度特性を把握できると考えている。

プロトタイプを試作を完了した六つ割り型ゾンデについては、現在、実験データの蓄積を行っている段階にあり、一定のデータがまとまり次第、論文等で公表する予定である。

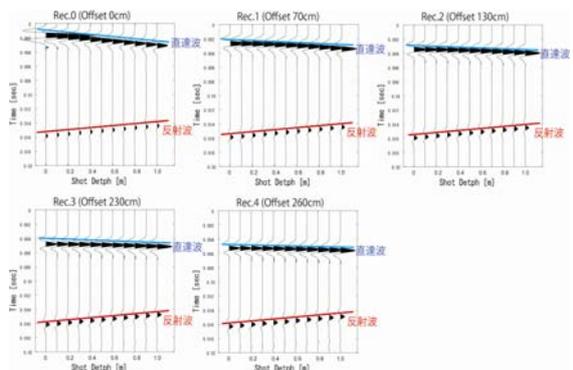
(3)弾性波探査技術

図-11 に波動シミュレーションの結果の一例を示す。同図(a)は、弾性波（P波）が震源から伝播していく様子を表したものであり、図(b)は、各受振点におけるショット記録である（レゴリス層厚を5 mとした場合の結果）。

図-12(b)より、直達波（青線）と反射波（赤



(a) P波の伝播の様子



(b) 各受振点でのショット記録

図-11 波動シミュレーション結果の一例

線)の同定が容易かつ明確に行えることが分かる。同様のショット記録は、発振深度を変化させた場合にも得られている。着陸船脚を利用することを前提とした受振器及び発振器の配置条件であっても直達波と反射波が明確に現われ、これらの走時特性を使うことによって、以下に示す速度構造を推定できる可能性のあることが明らかとなった。

- ・発振点以浅：速度構造（直達波より）
- ・発振点～基盤：平均速度（反射波より）
- ・基盤以深：レゴリス～基盤の速度コントラスト（振幅情報より）
- ・レゴリス層厚：平均速度と反射波の走時あるいは直達波と反射波の交点の走時より

ドラム缶を利用した模型実験では、壁面からの反射波（ノイズ）が強く、安定した結果を得ることができなかった。そこで、ノイズの中に埋もれたシグナルを抽出するために、記録波形をワンバイト化（One-bit digitization）した上でパイロット波形との相互相関を計算した。その結果、直達波の初動を明瞭に抽出することができ、その走時曲線から、実験に用いた FJS-1 の P 波速度は、およそ 80 m/s であることが分かった。この結果は、アポロ計画で推定された P 波速度よりも少し遅いが、圧縮が進んでいないゆる詰め状態での測定であったので、最もらしい値が得られたと考えられる。

本研究では、模型実験やシミュレーションを通じて、LSM を構成する削孔技術、孔内試験技術、弾性波探査技術に関する各要素技術開発を行った。その結果、熱特性や耐振動特性など宇宙機としての成立性検証の課題は残すものの、試験機能の妥当性は確認できたと考えている。また、当初計画ではこれらを統合した調査システムを構築する予定であったが、要素技術の成熟度向上を優先したため、統合システム化には至らなかった。今後も引き続き研究開発を進めていく予定である。

<引用文献>

- ① 青木 滋、金森洋史、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、3A01、2009.
- ② H. Kanamori,他、Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan, Proceedings of 6th International Conference on Engineering, Construction and Operations in Space, ASCE, 462-468, 1998.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① H. Nakashima and T. Kobayashi, Effects of gravity on rigid rover wheel

sinkage and motion resistance assessed using two-dimensional discrete element method, Journal of Terramechanics, 査読有, Vol. 53, pp.37-45, 2014

- ② 青木 滋, 金森洋史, 小林泰三, 深川良一: 月惑星探査用その場土質試験装置の検討, テラメカニクス, 第 32 号, pp.95-100, 査読無, 2012.

[学会発表] (計 9 件)

- ① T. Kobayashi, S. Aoki, H. Kanamori, R. Fukagawa, S. Wakabayashi and T. Tsuji: Borehole geotechnical testing tool for lunar exploration, Proceedings of the ASCE Earth and Space Conference 2012, pp. 21- 30, April 15-18, Pasadena, California, (on CD-ROM), USA, 2012.
- ② T. Tsuji, T. Kobayashi, S. Aoki, H. Kanamori, T. Aizawa and T. Matsuoka: Elastic properties of lunar regolith from vertical seismic profiling, Proceedings of the ASCE Earth and Space Conference 2012, pp. 84-93, April 15-18, Pasadena, California, USA, (on CD-ROM), 2012, 4.
- ③ 小林泰三, 青木 滋, 金森洋史, 若林幸子, 深川良一, 辻 健: 次期月探査計画 (SELENE-2) に向けた月面地盤調査装置の開発, 第 47 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, 八戸, C-03, 117-118, 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 泰三 (Kobayashi, Taizo)
福井大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10380578

(2) 研究協力者

青木 滋 (AOKI, Shigeru)

(3) 研究協力者

金森 洋史 (KANAMORI, Hiroshi)

(4) 研究協力者

辻 健 (TSUJI, Takeshi)

(5) 研究協力者

若林 幸子 (WAKABAYASHI, Sachiko)

(6) 研究協力者

深川 良一 (FUKAGAWA, Ryoichi)

(7) 研究協力者

荻野 俊寛 (OGINO, Toshihiro)