

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420084

研究課題名(和文)磁場印加デバイス内の疑似低重力場における月レゴリスの力学試験

研究課題名(英文)Frictional shear test of granular media in pseudo low-gravity field using a magnetic device

研究代表者

尾崎 伸吾(Ozaki, Shingo)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20408727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：将来の月面探査においては、探査船の着陸、探査ローバーの走行、月面地盤の穿孔・掘削など、レゴリスを対象としたオペレーションが多数見込まれる。このようなオペレーションの技術的ネックポイントの一つに、レゴリス-機械系の接触・摩擦・変形現象の把握が挙げられる。そこで本研究では、レゴリスの接触・摩擦・変形現象に関するパラメータの新しい測定方法として、『低重力環境下を模擬した室内力学試験法』を提案し、その有効性を実証した。具体的には、磁場印加デバイスを摩擦試験装置に組み込むことで、磁性体の性質を利用して疑似的に低重力場を再現した空間を準備し、その場での摩擦せん断試験を行う方法である。

研究成果の概要(英文)：The rational treatment of the frictional interaction between lunar soil and a mechanical system is one of the several technical issues encountered during lunar operations. Therefore, it has become essential to come up with a method to evaluate frictional interaction on lunar surface environment, which is characterized by soft ground, low gravity, and high vacuum. In this study, first a test apparatus was developed to perform the rotational shear test of granular media. Then, a magnetic field device was combined with the friction test apparatus to investigate the effect of gravity on frictional interaction. Using the developed test apparatus, the test was performed under a pseudo low-gravity condition. This enabled the investigation of variations in frictional torque between the granular media and various solid surfaces, with respect to the time elapsed, under the pseudo low-gravity conditions.

研究分野：材料力学

キーワード：設計工学 トライボロジー テラメカニクス 計算力学

### 1. 研究開始当初の背景

将来の月面探査においては、探査船の着陸、探査ローバーの走行、月面地盤の穿孔・掘削など、月面土壌（レゴリス）を対象としたオペレーションが多数見込まれる。このようなオペレーションの技術的ネックポイントの一つに、月レゴリス-機械系の接触・摩擦・変形現象の把握が挙げられる。これは、「超過圧密・軟弱表層」や「低重力・高真空」に代表されるよう、月面は地上とは異なる環境下に置かれており、これらの影響をどのように予測・評価するのが、月面機器の作業性能などに大きく係るためである。

しかしながら、月面環境下を想定したレゴリス-機械系の力学的相互作用に関する研究としては、軟弱地盤とローバーの相互作用についての研究がいくつか報告がなされているが、相似則を用いた地球環境下での実験や重力場の維持が難しい微小重力実験装置を用いた低重力下での実験、真空チャンバーを利用した実験、重力加速度の相似則を採用した数値シミュレーション解析に留まっている。このため、レゴリス-機械系の力学的相互作用に及ぼす高真空環境の影響はある程度明らかになっているが、低重力環境に関しては未解明な点が残されていると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、数値シミュレーション解析での利用を想定した、月レゴリスの接触・摩擦・変形現象に関するパラメータの新しい測定方法として、『低重力環境下を模擬した室内力学試験法』を提案する。具体的には、磁場印加デバイスを摩擦試験装置に組み込むことで、重力に抗する磁力を発生させた空間、すなわち磁性体の性質を利用して疑似的に低重力場を再現した空間を準備し、その場での摩擦せん断試験を可能とする方法である。

本研究では、まず、供給電流量と低重力効果について、磁場印加デバイスのキャリブレーションを実施する。また、粒状体を用いて回転せん断試験を行い、接触表面性状が粒状体のすべり挙動に及ぼす影響を検証する。その後、磁場印加デバイスを回転せん断試験装置に組み込んで回転せん断試験を実施し、低重力効果が粒状体の摩擦相互作用に関するパラメータに及ぼす影響について検証を行う。供試体として透磁率が明確で形状が均一な、 $\phi 1.5$  クロム鋼球および  $\phi 3.0$  クロム鋼球を用いる。最終的に、本試験の解析モデルを作成し、個別要素法汎用ソフト EDEM を用いて回転せん断試験の解析を行い、試験結果の妥当性の確認および摩擦相互作用に及ぼす低重力効果の影響の検討を実施する。

### 3. 研究の方法

図1に作製した試験装置の外観を示す。試験の性質上、境界の影響を排除する、且つ磁場の影響を供試体である粒状体が均一に受ける

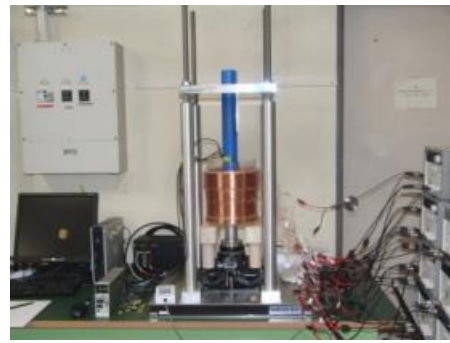


Fig.1 Rotational shear test apparatus.

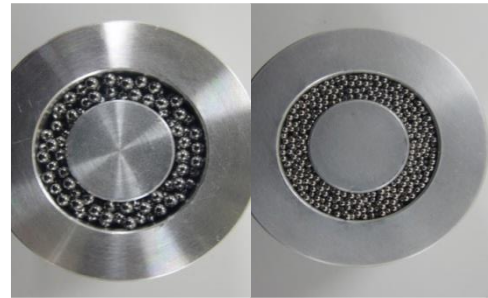


Fig.2 Test particles (chrome steel ball).

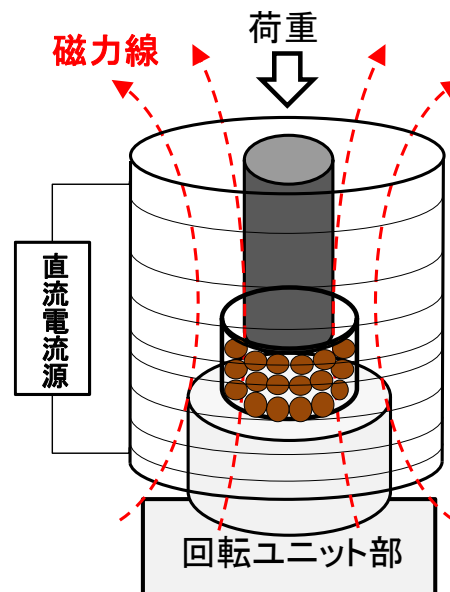


Fig.3 Schematic diagram of magnetic field device.

必要があるため、試験装置の機構としては、回転せん断型を採用した（図2参照）。そして円環型治具を段付きねじり棒の先端に取り付けることで、接触面を円環状にして試験を行った。円環型治具を採用したのは、接触面の半径方向に対するせん断応力の応力分布を極力均一にするためである。荷重条件はウェイト、またはカウンターウェイトを取り付けることによって変更することが可能である。本研究では、接触荷重は10.0 N、18.3 N および 34.5 N の3種類を準備した。また、クロム鋼球との接触表面は、平面治具および凹凸面治具を使うことで接触条件の変更を可能にした。

なお、摩擦トルクはひずみゲージを用いて測定し、校正値はキャリブレーションにより求めた。ここに、磁場がひずみを電気信号に変換するひずみゲージに影響を与えないようにするため、抗磁性用ひずみゲージ（KFN-2-350-C9-11J3M3, KYOWA）を採用した。また本試験では、段付きねじり棒のせん断応力を測定するため、ひずみゲージの結線法は4ゲージ法を採用し、ブリッジボックス（DB-350A）に組み込んだ。なお、間隙比の調整は、円環の溝に粒状体を投入し揺動させ密な状態にすることにより対応した。

クロム鋼球に作用する重力に抗する力を発生させるため、図3に示すように磁場印加デバイスを実験装置に組み込む。ここに、磁場印加デバイスはアクリル円筒表面に巻かれたコイル形状をしており、直流電源を流すことでコイル内に磁界を発生させることができる。したがって、そのコイル内部にクロム鋼球やレゴリスシミュラントといった磁性粒状体を設置すれば、その粒状体は磁場の影響を受け、疑似的な低重力状態となる。このように、コイル内部の所定の位置における低重力効果を利用して摩擦せん断試験を行うことが磁場印加デバイスの目的である。さらに、本装置は供給電流量を変えることで低重力の程度を変えることができ、またコイルの向きを上下反転させることにより高重力側での試験も行うことができる。なお、試験装置の他ユニットは非磁性体の素材（ナイロンやアルミ合金）を採用しており、磁場の影響を受けたり乱したりはしない。

本試験機構では、大きな低重力効果を確保するためには大きな電流を流す必要があるが、大電流をエナメル線に流すと発熱して抵抗値が上がるため、大電流を流すことは困難を伴う。この問題の解決手段として、デバイスにはコイルを冷却する機構を加えた。超伝導の分野では、液体窒素や液体ヘリウムを使った研究が数多くなされており、医療機器等に応用されている。この超伝導に関する研究を参照し、液体窒素でコイル型電磁石を冷却することでコイルに大電流を流し、大きな低重力効果を確保できると考えられる。以上を踏まえ、コイル型電磁石の製作に取り組んだ。

製作するコイル型電磁石については、まず、大電流に耐えられるよう、アクリル円筒に巻くエナメル線の径を1.0mmとした。そして、製作するコイル型電磁石はプロトタイプの電磁石の半径方向およびz軸方向それぞれに対する磁場分布の特性を維持させるため、コイルのz軸方向対するエナメル線の巻き方は多層とした。ただし、アクリルに巻きつけるエナメル線は、コイルの上から4層、2層、1層および2層とした。実際に製作したコイルを図4に示す。

次に、液体窒素の中にコイルを入れる方法について説明する。コイルを効率的に冷やすため、2層の段違いのアクリル円環土台を用意し、内側にコイルを、そして外側にコイルに

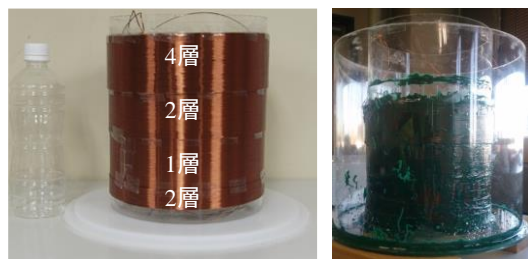


Fig.4 Developed magnetic device (coil).



Fig.5 Calibration of low-gravity effect and the amount of direct current.

使用したものより大きいアクリル円筒を取り付ける構造にした。このコイルとアクリル円筒の間に出来た溝（空間）に液体窒素を投入することでコイルを冷却することができる。また、このユニットが液体窒素に耐えられるよう、コイルとエナメル線、ならびにアクリル円筒同士の接着は極低温耐性のある接着剤を使用した。完成したコイル型電磁石のユニットを図4（右）に示す。

以上の手順で製作したコイル型電磁石を用いて低重力環境での摩擦試験を実施した。ここに、電源には最大60A流すことができる大容量直流電源を使用した。

#### 4. 研究成果

図5にクロム鋼球における磁場印加デバイスの供給電流量と低重力効果のキャリブレーションの様子を示す。キャリブレーションは作製した摩擦せん断試験装置の一部を流用し、測定はばねばかりを使用した（図5参照）。以下にキャリブレーションの方法を示す。

- ①磁場印加デバイスを試験台の中央に設置する。
- ②粒状体をおおよそ0.15gになるようにセロテープでまとめてばねばかりに取り付け、ばねばかりで粒状体の重量を測定する。
- ③試験装置上部の滑車に糸をかけ、先端にばねばかりを取り付け、磁場印加デバイスの中に垂らす。このとき、ばねばかりに取り付けられた粒状体が、磁場印加デバイスの中心かつ磁束密度の勾配が一定の位置になければならないことに留意しなければならない。

- ④ 磁場印加デバイスに液体窒素を投入する。
- ⑤ 大容量直流電源のスイッチを入れ、供給電流量を徐々にあげていき、各電流値に対して、そのときのばねばかりの値を読み取る。
- ⑥ 測定が終了した後、直流電源のスイッチを切り、ばねばかりから粒状体を取り外し、使用したセロテープの重量を測定する。

低重力効果の結果を図6に示す。ここに、グラフの縦軸および横軸は、それぞれ低重力効果の大きさおよび供給電流量である。また、グラフ内の赤および青のプロット点は、それぞれ  $\phi 1.5$  クロム鋼球および  $\phi 3.0$  クロム鋼球のキャリブレーションの結果を示している。このグラフから、 $\phi 1.5$  クロム鋼球および  $\phi 3.0$  クロム鋼球ともに30Aで約0.75Gの低重力状態になっていることがわかる。これは、透磁率が同じ材料であるため、当然の結果といえる。また、低重力効果と供給電流量の関係は線形ではないが、これは磁場印加デバイスを製作する際の製作精度によるものだと考えられる。

以上のことを踏まえ、摩擦せん断試験時の供給電流量は0Aおよび30Aの2種類とし、それに対応する重力場は1.0Gおよび0.75Gとする。

次に、表面性状による粒状体のすべりの挙動の違いについて本試験装置で検証した。供試体としてクロム鋼球を採用し、接触条件は平面および凹凸面の2種類を採用している。試験結果はグラフからピーク強度を読み取り Mohr-Coulomb の破壊規準で整理し、内部摩擦角、すなわち試験結果の近似直線の傾きで検討を行う。比較検討をするに当たり、粒状体と平面の静止摩擦試験を実施した。図7にそれぞれ  $\phi 1.5$  クロム鋼球の試験結果を示す。本グラフより、表面性状が平面のとき、ピーク強度は静止摩擦試験の試験結果と同程度であり、表面性状が凹凸面のとき、ピーク強度は静止摩擦試験結果を上回ることが確認できる。これにより、表面が平坦な場合は接触界面で滑り、表面にテクスチャが施されている場合は粒状体内で内部滑りが起こることがわかる。したがって、接触面での界面滑りの挙動を見たい場合は平面、粒状体内での内部滑りの挙動を見たい場合はテクスチャ面を接触面に採用すれば良いことが確認できる。

以上のことを踏まえて、磁場印加デバイスを使用して実施した低重力環境における回転せん断試験を実施した。ここに、供試材料は  $\phi 1.5$  鋼球および  $\phi 3.0$  鋼球である。また接触面の形態は、平面と凹凸面の2種類である。図8および図9にそれぞれ  $\phi 1.5$  クロム鋼球および  $\phi 3.0$  クロム鋼球の回転せん断試験の結果のグラフを示す。まず、接触面が平面のとき、両方のグラフを見てみると、界面すべりに及ぼす重力の影響はほとんど見られない。他方、接触面が凹凸面のときも、両方のグラフから、内部すべりに及ぼす重力の影響は平面のときと同様に確認できない。なお、図7～図9のグラフから確認できるように、垂直応力とせん断応力の関係は Coulomb の

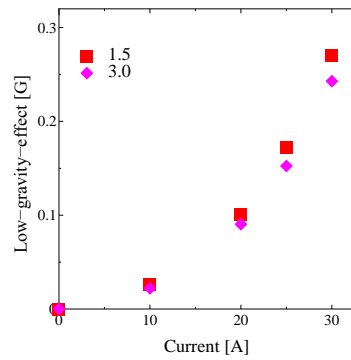


Fig.6 Calibration result.

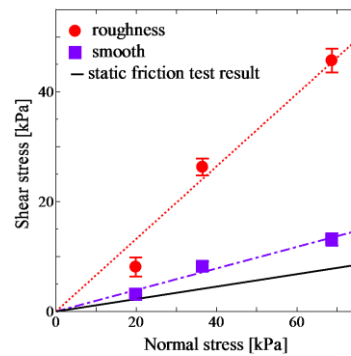


Fig.7 Relation between normal stress and shear stress of  $\phi 1.5$  chrome steel ball (1.0G).

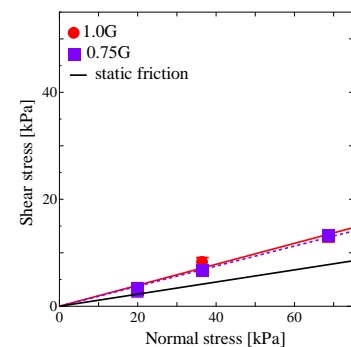


Fig.8 Relation between normal stress and shear stress of  $\phi 1.5$  chrome steel ball (smooth surface).

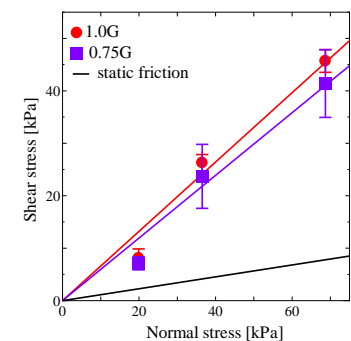


Fig.9 Relation between normal stress and shear stress of  $\phi 1.5$  chrome steel ball (rough surface).

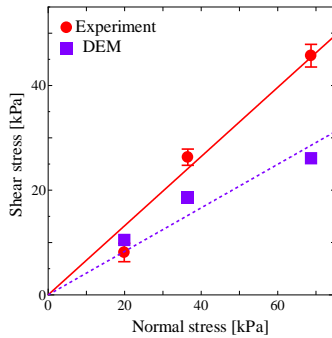


Fig.10 Comparison between the test result and analysis result.

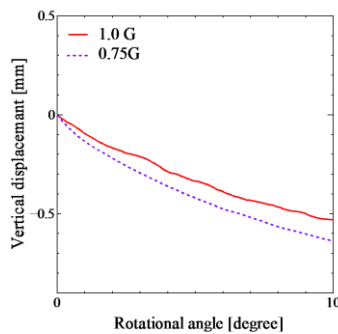


Fig.11 Comparison between vertical displacement of 1.0G and 0.75G.

摩擦則または Mohr-Coulomb の破壊規準に従う。

次に、試験結果との比較・検討を行うため、個別要素法を用いて、回転せん断試験の試験モデルの解析を行った。

図 10 に解析結果と試験結果の比較を示す。比較は試験誤差が小さい、且つ内部すべりが支配的に起こる  $\phi 1.5$  クロム鋼球と凹凸の試験条件で行った。このグラフを見ると、高応力状態では試験結果よりも解析結果の方が小さくなるが、オーダーは一致していることが確認できる。また、解析結果も試験結果同様、垂直応力およびせん断応力は線形関係を示している。加えて、重力の影響を粒状体の体積変化の観点から検討するため、試験時の回転角に対する円環治具の鉛直方向の変位を解析で求めた。図 11 に解析結果を示す。解析は重力の影響が出やすいと推定される 10N の試験条件で行った。このグラフから、重力条件を変更しても、体積変化の違いは確認できなかった。

以上をまとめると、本研究では、磁場印加デバイスを組み込んだ粒状体の回転型の摩擦せん断試験と解析による試験結果の検証を行った。その結果、まず、キャリブレーションによって 0.75 G の疑似重力場を磁場印加デバイスで実現できることが確認できた。次に、磁場印加デバイスを利用した低重力環境下での回転せん断試験を実施し、摩擦相互作用に及ぼす重力の影響が本研究での重力範囲では確認できないことがわかった。また、

個別要素法で回転せん断試験の解析モデルを作成し、解析を行うことで、数値解析からも、重力の影響はないことが確認できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

1. 小林泰三, 尾崎伸吾, 青木 滋: 月極域探査ミッション: 月面における地盤調査装置の開発, 宇宙科学技術連合講演会 2015, Vol.59, 1D17, pp.1-4, かがしま県民交流センター.
2. 三間直紀, 諸澤 俊太郎, 西本昇平, 尾崎伸吾, 山梨裕希: 磁場印加デバイスを用いた疑似低重力場における粒状体の摩擦せん断試験と個別要素法解析, MOVIC 2015, A113, pp.1-4, 栃木県総合文化センター.
3. Morosawa, S., Nishimoto, S., Ozaki, S., Yamanashi, Y.: Frictional shear test of granular media in pseudo low-gravity field using a magnetic device, Proceedings of the 18th International Conference of the ISTVS 2014, pp.1-6, Seoul.
4. 諸澤 俊太郎, 西本昇平, 尾崎伸吾, 山梨裕希: 磁場印加デバイスを用いた疑似低重力場における粒状体の摩擦せん断試験, MOVIC 2013, A10, pp.1-7, 九州産業大学.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.ozakilab.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 伸吾 (Shingo Ozaki)  
横浜国立大学・工学研究院・准教授  
研究者番号：20408727

(2) 研究分担者

山梨 裕希 (Yuki Yamanashi)  
横浜国立大学・工学研究院・准教授  
研究者番号：70467059