伊藤毅(東北大学)永谷圭司(東北大学)吉田和哉(東北大学)

Comparing the Mobility performance of Wheel on Weak Soil in the Atmosphere and in Vacuum Environment.

*Tsuyoshi ITO (Tohoku Univ.), Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.), Kazuya YOSHIDA (Tohoku Univ.)

Abstract— A lunar rover is a key technology for surface explorations on the moon for geologic survey and water discovery. To succeed in rover missions, we have to carry out evaluation tests for the rovers on the earth before deployment of the rover on the moon. In this research, we aim to investigate how the vacuum level effects to the rover's mobility for evaluation tests on the earth. We use a vacuum chamber to examine the mobility performance in a vacuum environment. We confirmed that our experimental result indicates that the mobility decreases in the vacuum environment in comparison with the mobility in an atmosphere.

Key Words: Mobility performance, Vacuum environment, Weak soil

1. 緒言

現在,各国の宇宙開発機関において,月や惑星の探査 およびその利用について議論されている[1].宇宙航空研 究開発機構(JAXA)では,SELENE-2(SELenological and ENgineering Explorer -2)計画において,月面の 詳細な調査・データ収集を行う目的で,無人移動探査 ロボット(ローバー)による地表面の探査,岩石など のサンプリングが計画されている[2].

月面探査においてローバーによる地表面の探査は,衛 星では不可能な直接的な探査等,非常に重大な役割を 担っている.しかしながら,月などの天体の表面は細 かな砂に覆われており,ローバーでの探査を進めてい く上で車輪のスリップによる探査の停滞や失敗が懸念 される.そこで,スリップの発生条件やスリップの大 きさなどを検証するために,月面環境の理解および月 面環境を模擬した事前の地上実験が必要不可欠となる.

地球環境と月面環境の違いは大きく分けて3つある. 1つ目は大気の有無であり,地球上には大気が存在す るが,月面は真空環境である.2つ目は土壌であり,月 表面は「レゴリス」と呼ばれる砂に覆われている.レ ゴリスは細かいパウダー上の粒子で,踏み込んだ部分 には,くっきりと足跡が残るほどの凝着力がある.こ のような砂は地球上には存在しない.3つ目は重力で あり,月面の重力は地球の重力の約6分の1である.

地上実験を行うために,真空環境は真空チャンバを 用いることで,土壌の違いは「レゴリスシミュラント」 と呼ばれるレゴリスの力学的性質を模擬した砂を代用 することで,また重力6分の1は航空機[3]や落下塔 の半自由落下によって模擬することが可能である.し かしながら重力環境の模擬は,莫大なコストや時間と いった実験に対する制限が懸念され,多量のデータ取 得が困難となる.

本研究ではこの中でも特に真空環境に着目し,大気の存在が走行する車輪に与える影響につい検証することを目的とした.これまでに黒田ら[4]によって真空中での車輪型月面探査ローバーの走行性能の研究が行わ

れ,大気中と真空中において車体速度を変化させたと きの走行性能の検証した結果,大気中と真空中で走行 性能に差は生じなかった.そこで,本研究では月面土 壌を走行する車輪の駆動力について,車輪形状を変化 させながら大気中および真空中での走行実験を行い,2 種類の環境における走行性能の比較・考察を行った.

2. 走行性能評価指針

軟弱地盤における車輪の走行性能を評価する上で「ス リップ率」並びに「牽引力」は重要な指標となる.

スリップ率は車輪の滑りを示す割合であり,スリッ プ率 s はテストベッドの実際の移動並進速度 v,車輪 回転速度 rω を用いて式(1)のように表される[5].ま た牽引力は走行中のテストベッドが進行方向に引張る 力を示すものである.

$$s = \begin{cases} \frac{r\omega - v_x}{r\omega} & (r\omega > v_x : driving) \\ \frac{r\omega - v_x}{v_x} & (r\omega < v_x : breaking) \end{cases}$$
(1)

走行性能を評価するためには,牽引力に対するスリッ プ率を求める必要がある.

本研究では,軟弱地盤における大気が走行性能に及 ぼす影響を知るために,大気中と真空中という2種類 の実験環境で,車輪型テストベットを用いた車輪走行 実験を行い,その走行性能を比較した.

- 3. 車輪走行実験
- 3·1 実験装置

3.1.1 アクリルチャンバおよび真空ポンプ

走行性能に対する大気の影響検証を目的とした車輪 走行実験を行うため Fig. 1 に示すような,実験環境を 真空に保つためのアクリルチャンバおよびチャンバ内 に真空環境を作り出すための真空ポンプを用いた.

アクリルチャンバは内径 400[mm], 長さ 950[mm]の 円筒形をしており, 内部に長さ 825[mm]の引き出しを 収納している.引き出し部分にはテストフィールドと

Table 1 Wheel Parameters of Testbed

	Testbed A	Testbed B	Testbed C
Diameter [mm]	110.0	144.0	144.0
Lug length [mm]	5.0	14.0	0
Width [mm]	64.0	100.0	100.0
Mass [kg]	3.0	10.4	10.4
Overview			



 ${\bf Fig. 1}$ a:Chamber , b:Pomp



Fig.2 Pulley

なるレゴリスシミュラントを敷き詰めた.真空ポンプ は、アルバック機工株式会社製直結型油回転真空ポン プGHD-030を使用した.

3.1.2 牽引装置

本研究では,牽引力を測定するために,Fig. 2 に示 すような重りと定滑車2台,動滑車1台を用いた牽引 装置を製作した.走行実験概略図をFig. 3 に示す.牽 引装置に定滑車を用いることで,テストベッドに対し て垂直方向に働く力を水平方向に変換した.また,動滑 車を用い,仕事の原理を利用することで,テストフィー ルド上でのテストベッドの走行可能距離を延長した.こ の時,重りがテストベッドを引く力がテストベッドの 牽引力 F_x となる.

3.1.3 2輪型テストベッド

テストフィールド上を走行するテストベッドとして2 輪の車輪を搭載した装置を製作した.車輪表面にラグ を取り付けたテストベッドA,およびテストベッドB,



Fig.3 Experiment concept

またラグの代わりに車輪表面にレゴリスシミュラント と同じ粒径(荒さ)のサンドペーパーを貼付し摩擦特 性を有するようにしたテストベッドCの3種類をテス トベッドとして用いた.各テストベッドのパラメータ を Table1 に示す.

走行実験時,テストベッドには,常に指定した回転 速度で車輪を回転させることが要求されるため,この 要求を満たすシステムの構築を行った.MPUにはマイ クロコンピュータの H8S/2633 を使用しており,モー タに搭載されたエンコーダより,時々刻々とモータの 回転速度情報を MPU にフィードバックすることによ り,PI 制御を用いた速度制御を行った.

3·1.4 実験方法

本研究では,牽引する重りの重量を徐々に増加させていき,各牽引力におけるスリップ率を算出することでテストベッドの走行性能を評価した.実験方法を以下に示す.

- 1. チャンバ内のレゴリスシミュラントを均一になら した後テストベッドを設置する.
- 2. 牽引装置に重りを設置し、テストベッドに装着する.
- 3. チャンバを密閉し,真空ポンプを起動させチャン

Test field	Lunar soil simulant	
Atmospheric pressure [Pa]	101,300 / 1,000	
Moving distance [cm]	35	
Moving speed [cm/s]	1.0	
Traction weight [kg]	0~1.0 / 0~3.2 / 0~1.6	

 Table 2 Experiment condition



Fig.4 Experiment environment

バ内の圧力が 1,000[Pa] に到達するまで空気を抜く(真空中での実験時のみ)

4. テストベッドを走行させ,速度安定後,35[cm] 走 行する時間を計測し,スリップ率を算出する.

実験条件を Table2 に,実験の様子を Fig. 4 に示す. 各牽引力において3回ずつ実験を行い,得られたス リップ率の平均をとった.

- 3·2 実験結果
- 3·2.1 実験方法の妥当性

実験方法の妥当性の証明として,大気中では空気が 存在している砂の粒子間に,真空中では砂が入りこんで いるか,つまりテストフィールドのかさ密度が変化して いるかを検証するために,以下の手順で実験を行った.

- 1. チャンバを密閉し,真空ポンプを起動させチャンバ 内の圧力が1,000[Pa] に到達するまで空気を抜く.
- 2. 再びチャンバ内に空気を戻し,チャンバ内の圧力 を大気圧と等しくする.
- 3. テストベッドを走行させ,速度安定後,35[cm]走 行する時間を計測し,スリップ率を算出する.

テストベッドには, ラグの影響を無視できるテスト ベッド C を用いた.もし手順1の時点でテストフィー ルドのかさ密度が変化しているならば, 手順2の時点 でもかさ密度は依然変化したままとなる.つまり, こ の妥当性証明実験の結果を,大気中における実験結果, および真空中における実験結果と比較し,真空中にお ける実験結果と異なっていれば,テストフィールドの かさ密度の変化は無く,実験方法の妥当性は証明され たことになる.

実験から得られた牽引力および移動並進速度より,式 (1)を用いて算出した,牽引力-スリップ率の関係を Fig. 5 に示す.

Fig. 5 を見ると, 妥当性証明実験の結果(グラフ 中,"1000Pa 100000Pa"と表記)は真空中の結果(グ ラフ中,"1000Pa"と表記)と異なり,大気中の結果(グ ラフ中,"10000Pa"と表記)と近いものとなった.こ の結果から,実験方法の妥当性は証明されたと言える.

3.2.2 テストベッド A を用いた実験結果

実験から得られた牽引力および移動並進速度より,式 (1)を用いて算出した,牽引力-スリップ率の関係を Fig. 6 に示す.

Fig. 6 を見ると,牽引力が0~3.92[N]の間では,微小であるが真空中におけるスリップ率の方が大気中に



Fig.5 Drawbar pull - Slip ratio (Test)





おけるスリップ率より大きいため,真空中における走 行性能の方が大気中における走行性能より劣る結果と 言える.

また牽引力が 4.41 ~ 5.88[N] の間では,両者のスリッ プ率はほぼ等しくなっている.

3.2.3 テストベッド B を用いた実験結果

実験から得られた牽引力および移動並進速度より,式 (1)を用いて算出した,牽引力-スリップ率の関係を Fig.7に示す.

Fig. 7を見ると,牽引力が0~10.78[N]の間では,テ ストベッドAを用いた実験結果と同様に,微小である が真空中におけるスリップ率の方が大気中におけるス リップ率より大きいため,真空中における走行性能の 方が大気中における走行性能より劣る結果と言える.

また牽引力が12.74~16.66[N]の間でも,テストベッドAを用いた実験結果と同様に,両者のスリップ率は ほぼ等しくなっている.

3·2.4 テストベッド C を用いた実験結果

実験から得られた牽引力および移動並進速度より,式 (1)を用いて算出した,牽引力-スリップ率の関係を Fig. 8 に示す.

Fig. 8を見ると, テストベッドA およびテストベッ ドBを用いた実験結果とは異なり,全ての牽引力に対 して,真空中におけるスリップ率の方が大気中におけ るスリップ率より大きい,即ち真空中における走行性能 の方が大気中における走行性能より劣る結果となった.







4. 考察

テストベッド A およびテストベッド B を用いた走行 実験の結果より, 牽引力が小さい時は真空中における スリップ率の方が大気中におけるスリップ率より大き くなり,また,牽引力が大きい時は両者のスリップ率 はほぼ等しくなるという結果を得た.

まず,牽引力が大きい時に両者のスリップ率がほぼ 等しくなる理由を考察する.牽引力が小さい時に比べ, 大きい時はスリップ率も大きくなるため,砂に対する 車輪の沈下量は大きくなり,車輪は地中のより深い箇 所,つまり砂同士の隙間が小さく密な箇所を走行する ことになる.この箇所は,地表面に近い箇所と比較し 圧縮されていることで砂の粒子間に存在する空気の量 が少ないと考えられるため,真空にすることの影響が 少ない箇所であると言える.このため,真空中におけ るスリップ率が大気中のそれとほぼ等しくなるという 結果になったと考えられる.このことはテストベッド Cを用いた走行実験の結果からも言える.テストベッ ドCはラグを搭載していないため, テストベッドAお よびテストベッド B に比べ砂に対する車輪の沈下量が 小さい,つまり真空にすることの影響が大きい地表面 付近を走行していたことになる.その結果,全ての牽 引力に対して,真空中におけるスリップ率の方が大気 中におけるスリップ率より大きくなったと考えられる。

次に,真空中,地表面付近で砂に起こる現象について考察する.真空中では水分が存在できないため,砂 粒子表面の水膜等も存在せず,砂粒子同士が生のままで接触する[6]ことになる.通常,大気中では,砂粒子 同士の接触部には、その部分を囲むように「接触水分」 と呼ばれる水分が付着している.この部分では水の表 面張力によって粒子を引きつける接触圧力が働き、こ の圧力によって摩擦抵抗が生じ、砂に粘着力が存在し ているような効果となる[7].この効果により、砂粒子 の動きが妨げられ、テストフィールドが全体的に崩れ にくくなる.その結果、大気中の方が真空中よりスリッ プ率が小さくなると結論付けることができる.

5. 結言

本稿では,レゴリスシミュラントをテストフィール ドとして利用し,大気中および真空中において車輪走 行実験を行うための装置,実験方法および実験結果に ついて述べた.

実験結果について考察した結果,まずラグ車輪の場 合,一定の牽引力までは,微小であるが真空中におけ るスリップ率の方が大気中におけるスリップ率より大 きくなることが分かった.加えて,その牽引力以上の牽 引力では,真空中と大気中でスリップ率に差が無いと いうことが分かった.またラグ無し車輪ではいかなる 牽引力に対しても真空中におけるスリップ率の方が大 気中におけるスリップ率より大きくなることが分かっ た.この結果から,地中のより深い箇所,つまり砂同 士の隙間が小さく密な箇所は,真空にすることの影響 が少ない箇所であると言える.

真空中の方が大気中に比ベスリップ率が大きくなる 原因として,砂粒子間の摩擦抵抗を生み出す「接触水 分」の有無が考えられる.真空中ではこの「接触水分」 が存在しないため,砂粒子間に摩擦抵抗が無く,テス トフィールドが全体的に崩れやすくなり,その結果大 気中に比ベスリップ率が大きくなると考えられる.

参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構: "JAXA シンポジウム概要報告 月で拓く新しい宇宙開発の可能性と日本",宇宙航空 研究開発機構広報部,2004.
- [2] SELENE-B 検討グループ: "月面探査ローバーの検討・ 技術課題", 2002.
- [3] Taizo Kobayashi, Yoichiro Fujiwara, Junya Yamakawa, Noriyuki Yasufuku and Kiyoshi Omine: "Mobility Performance of A Rigid Wheel in Low Gravity Environment", Journal of Terramechanics, The International Society for Terrain-Vehicle Systems, Elsevier, 2009.
- [4] 黒田洋司,手島哲平,佐藤理則,久保田孝:"車輪型月面 探査ローバの走破性能 - 真空実験報告",日本機械学会ロ ボティクス・メカトロニクス講演会 2005,1P1-S-055, 2005.
- [5] J.Y.Wong: "Theory of Ground Vehicles", John Wiley & Sons, 1978.
- [6] 深川良一: "惑星探査・開発における地盤工学の貢献", 土と基礎, 52(1), pp.10-12, 2004.
- [7] 平井利一: "新版 土質工学をかじる -建設技術者の常識 としての土質力学-",理工図書,2010.