

月面走行用車輪機構の 真空中における走行性能検証を行う実験装置の構築

伊藤毅（東北大学） 永谷 圭司（東北大学） 吉田 和哉（東北大学）

Development of Experimental Device for Performance Evaluation of Moon Wheels in Vacuum Environment

T.ITO (Tohoku Univ.), K.NAGATANI (Tohoku Univ.), K.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. To perform the tests, we developed a vacuum chamber and mobile robot to examine the mobility performance in a vacuum environment. Our experimental result indicates that the mobility decreases in the vacuum environment in comparison with the mobility in an atmosphere, and we should consider it for development of lunar rovers in the design phase.

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として、大きく分けて「大気圧」「土壌」「重力」の3つが挙げられる。まず「大気圧」に関して、地球上には大気が存在するが、月面は真空環境である。次に「土壌」に関して、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。最後に「重力」に関して、月面の重力は地球の重力の約6分の1である。

地上実験を行うに当たり、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、また低重力は航空機[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る。

本研究ではこの中でも特に真空環境に着目し、大気が存在が走行する車輪に与える影響について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を検証した結果、大気中と真空中で走行性能に差はほとんど

生じなかったという結論を得た。しかし、「真空」という、構築するために長時間を要する実験環境のため、取得できたデータ数は少なく、大まかな傾向の把握のみに止まった。そこで、本研究では、短時間で真空環境を構築するための小型の真空チャンバを製作し、この中で車輪のスリップ率と駆動力を測定するための実験装置を開発した。本稿では、製作したこの装置ならびに、この装置を用いた実験を通じて得られた知見を紹介する。

2 実験装置の構築

2.1 二輪型移動ロボット

真空チャンバ内のテストフィールド上を走行するロボットとして二輪の車輪を前後に搭載した装置を製作した。車輪表面にラグを取り付けたロボットA、そのラグ長さおよび車輪径を拡大したロボットB、またラグの影響を無視するために、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ロボットCの3種類をロボットとして用いた。各ロボットのパラメータをTable1に示す。

走行実験時、ロボットには、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Fig. 1に示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から得られた速度情報を用いて、PI制御でモータの速度制御を行う。また、ZigBeeを用いた無線シリアル通信（ZIG-100B：ベストテクノロジー社製）により密閉された実験環境における遠隔操作を可能とした。

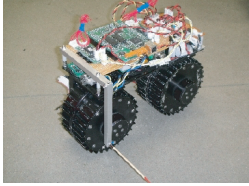
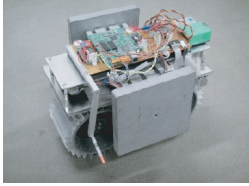
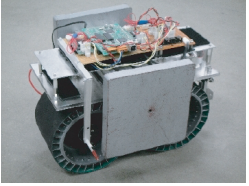
2.2 アクリルチャンバ

実験環境を真空に保つため、Fig. 2に示すような、アクリルチャンバを製作した。

アクリルチャンバを設計する上で重要な点として、チャンバの「寸法」が挙げられる。実験を効率よく行い、且つ正確な実験結果を得るため、「真空環境構築に要する時間の短縮」および「移動ロボット走行距離の延長」を両立する設計が要求される。前者の実現にはチャンバの寸法縮小が求められ、対して後者の実現にはチャンバの寸法拡大が

Table 1: Wheel Parameters of Robot

	Robot A	Robot B	Robot 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			
----------	---	--	---

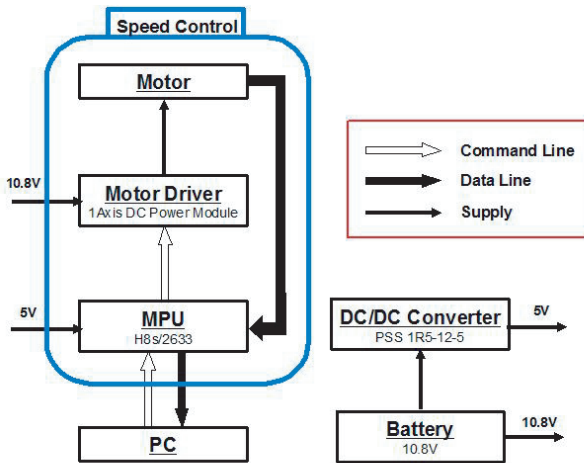


Fig. 1: System Diagram

求められる．そこで，以下に示す要求仕様を満たすようにチャンバのサイズを決定した．

移動ロボットは前後二輪式であり，車輪径は110～144[mm]，全長は約300[mm]，高さは250[mm]である．また，このロボットが速度1.0[cm/s]で走行する場合，定常状態に至るまでに約5.0[s]要すると仮定し更に，正確な実験結果を得るために必要な走行距離を，車輪一回転分以上（300～450[mm]）と仮定した．以上を満たすように，チャンバの内径を400[mm]，全長を1010[mm]とし，内部に長さ825[mm]の引き出しを収納する設計とした．引き出し部分にはテストフィールドとなるレゴリスシミュラントを，底面から高さ130[mm]まで敷き詰めた．

また，圧力計を取り付け，チャンバ内の圧力を1,000～150,000[Pa]まで測定可能とした．

2.3 真空ポンプ

真空ポンプ選定の基準として，真空環境構築に要する時間を「1.0[h]以内」と制限し，アクリルチャンバの寸法から計算した結果，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を使用することとした．アクリルチャンバと接続する際，防塵用のフィルタを中継することで，空気吸引時に，テストフィールドの砂がポンプ内に侵入することを防ぐ設計とした．



Fig. 2: Acrylic chamber



Fig. 3: Pulley

2.4 牽引装置

本研究では，牽引負荷をかけるために，Fig. 3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．牽引装置はアクリルチャンバの引き出し部前面に取り付け可能で，水糸の先端に取り付けたS字フックで移動ロボットに装着する．実験では，アクリルチャンバを密閉した上で真空環境を構築するため，牽引装置はチャンバ内のスペースに収まるように設計した．走行実験概略図をFig. 4に示す．牽引装置に定滑車を用いることで，ロボット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ロボットの走行可能距離を延長することを可能にした．重りは交換可能であり，ロボットの移動時，重りがロボットを引く力がロボットの牽引力 F_x となる．

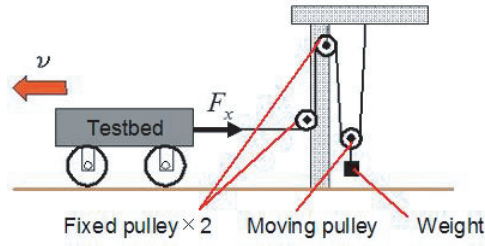


Fig. 4: Experiment concept

3 車輪走行実験

3.1 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 はロボットの実際の移動並進速度 v_x ，車輪回転速度 $r\omega$ 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ロボットが進行方向に引張る力を示すものである。

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

走行性能の評価は、牽引力に対するスリップ率を求めることで行う。

3.2 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ロボット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ロボットを設置する。
2. 牽引装置に重りを設置し、ロボットに装着する。
3. チャンバを密閉し、真空ポンプを起動させチャンバ内の圧力が1,000[Pa]に到達するまで約50[min]，空気を抜く（真空中での実験時のみ）
4. ロボットを走行させ、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。
5. チャンバ内の圧力が大気圧と等しくなるまで空気を戻す（真空中での実験時のみ）

実験条件をTable2に、実験の様子をFig. 5に示す。

本実験では、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。

Table 2: Experiment condition

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



Fig. 5: Experiment environment

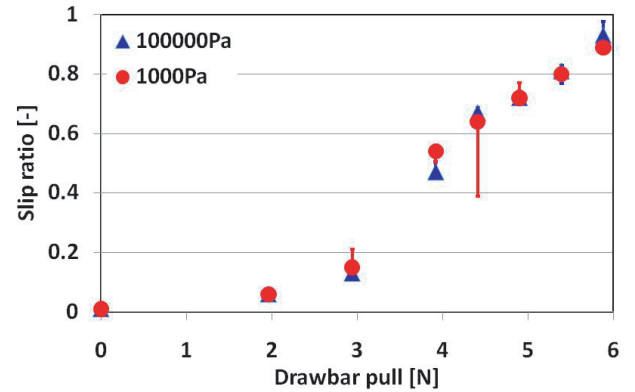


Fig. 6: Drawbar pull - Slip ratio (Robot A)

3.3 実験結果

3.3.1 ロボット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おけるそれより大きいため、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た。

3.3.2 ロボット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、ロボット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それより大きいため、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、ロボット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た。

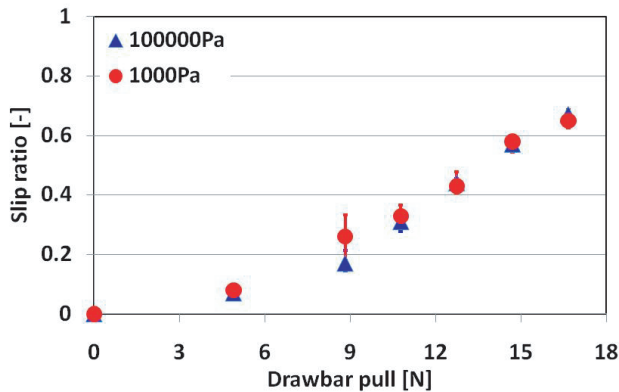


Fig. 7: Drawbar pull - Slip ratio (Robot B)

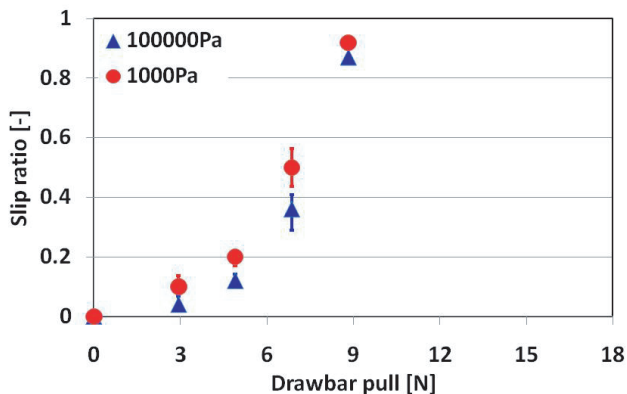


Fig. 8: Drawbar pull - Slip ratio (Robot C)

3.3.3 ロボット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、ロボットAおよびロボット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それより大きい、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。

3.4 実験に対する考察

走行実験より、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という結果を得た。これは「空気の潤滑が存在するため、大気中の砂の方がスリップ率が大きくなる」という事前予想に反する結果となった。以下に、その理由について考察する。

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、本実験より結論付けることができる[8]。

4 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、微小であるが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ことが分かった。真空中の方が大気中に比べ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べスリップ率が大きくなると考えられる。

また、アクリルチャンバ、および移動ロボットが低真空という実験環境に耐えることが可能であるという点、いかなる条件においても一貫した実験結果を得られているという点、更に、一回の実験が約1.0[h]で行えるなど実験時間が短縮され、短期間で多数のデータ取得が可能となったという点から、本研究で構築した実験装置の有用性を認めることができた。

今後の課題として、更なる実験時間の短縮のため、一度構築した真空環境を維持したまま実験を繰り返すシステムの開発が挙げられる。そこで、自動でテストフィールドを均一にならす装置、および移動ロボットを走行開始地点まで運搬する装置の開発が必要となる。

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。
- [8] 伊藤毅, 永谷圭司, 吉田和哉：“軟弱地盤を走行する車輪機構の大気中と真空中の走行性能比較”，2010。