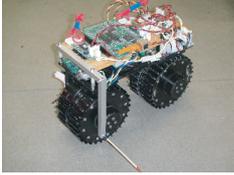


Table 1 Wheel Parameters of Testbed

	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			

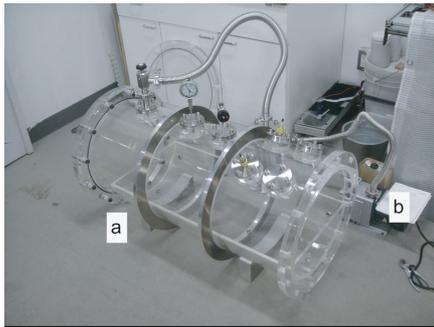


Fig.1 a:Chamber , b:Pomp



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、

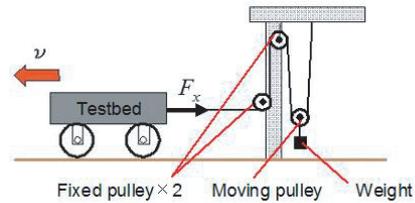


Fig.3 Experiment concept

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

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.4 Experiment environment

パ内の圧力が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、“100000Pa”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

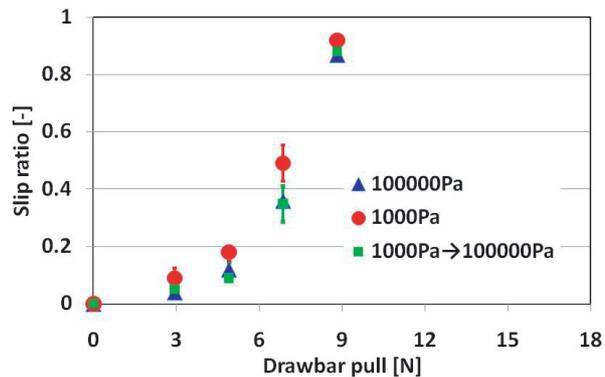


Fig.5 Drawbar pull - Slip ratio (Test)

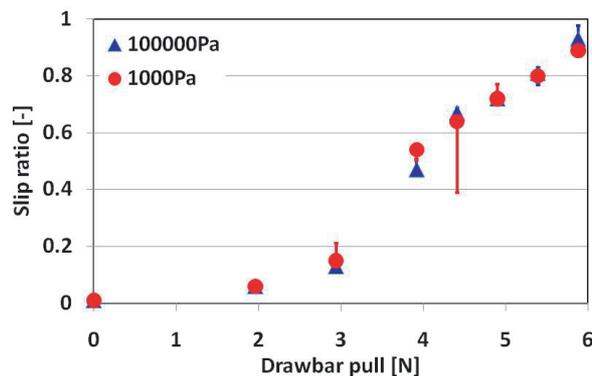


Fig.6 Drawbar pull - Slip ratio (Testbed A)

におけるスリップ率より大きいいため、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。

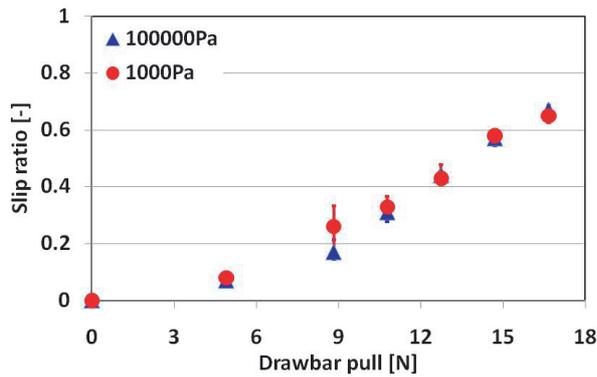


Fig.7 Drawbar pull - Slip ratio (Testbed B)

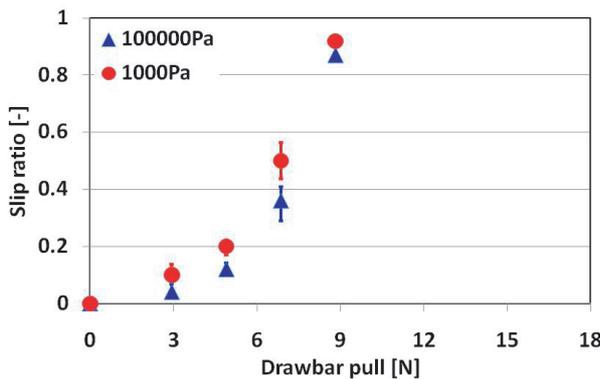


Fig.8 Drawbar pull - Slip ratio (Testbed C)

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、砂粒子同士がそのまま接触する [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。

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。