

軟弱地盤走行のための月面探査ローバ用走行系検証

飯塚 浩二郎 (信州大学 ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点, iizuka@shinshu-u.ac.jp)

久保田 孝 (宇宙航空研究開発機構, kubota@jaxa.isas.jp)

Study on locomotion systems of lunar exploration rover on loose soil

Kojiro Iizuka (International Young Researchers Empowerment Center, Shinshu University, Japan)

Takashi Kubota (Japan Aerospace Exploration Agency, Japan)

要約

月表面において、クレータや崖などは地殻が露出していると考えられるため月の起源を探ることができ科学的関心が非常に高く、将来のローバミッションではこのような険しい地形の移動探査が要求されている。そのため、次世代のローバには走行性能の向上とともに、走行性能の正確な予測、自律性の向上などが求められる。月の表面には軟弱で滑りやすいレゴリスが堆積しており、走行に伴う路面の変形により生じる反力が小さく、車輪の回転により路面を掘ってしまい走行できなくなる現象、スタックも発生しやすい。そこで、本論文では月表面上に多く堆積する“軟弱地盤上における探査ローバの走行”に焦点を当て、地盤と走行系（車輪、弾性柔軟車輪、クローラなど）の間に発生する相互作用力（地盤の締め固め効果やスリップ率にて表現）を実験的に求め、軟弱地盤走行に有効な走行系の検証を行う。

キーワード

月面探査ロボット, 締め固め効果, 車輪, 軟弱地盤, ラグの軌道

1. はじめに

現在の宇宙科学、宇宙開発において月面探査が再び注目を集めている (National Aeronautics and Space Administration, 2012; European Space Agency, 2012)。月の探査は過去、Appollo 計画 (The Apollo Program, 2012) や Lunar (Soviet Lunar Missions, 2012) 計画において、探査機やロボット (ローバ) により実現されてきた。しかしながら、これらは宇宙への一歩を踏み出すための探査であり、直接その探査の重要性を問われる時代ではなかったと言える。しかしながら、昨今、宇宙探査の必要性、そして月の探査の重要性が具体的になってきた。月に関しては、月起源の解決、月の資源探査、月へのインフラ確立などが目的となる。このような背景の中で、本論文では月探査、月開発への重要な役割を果たすであろう自律移動型ロボットの開発に着目し、具体的に有効となる走行システム系について検討していく。

月表面において、クレータや崖などは地殻が露出していると考えられるため月の起源を探ることができ科学的関心が非常に高く、将来のローバミッションではこのような険しい地形の移動探査が要求されている。また、月面を移動するローバには広範囲を効率的に探査することも求められている。月表面は夜間、摂氏-170度と非常に低温となるため、ローバ搭載機器が永久故障となる可能性が高く、活動期間は昼間の15日間のみ限定されると考えられ、月探査ミッションにおいては探査の効率への要求が顕著となる。月は地球との距離が大きいいため、ローバと地球上のオペレータ間の通信には数秒、数分もの時間遅れを伴う。また、月の裏面 (地球から直接見ることができない部分) においては特別に配した衛星などを利用しない限り通信することはできない。このため地上から

の遠隔操作による探査は極端に効率が悪く、また不測の事態に対する対応が不可能であるために、危険性の高い地形の探査を行なうことは特に困難となる。次世代のローバには走行性能の向上とともに、走行性能の正確な予測、自律性の向上などが求められる (久保田, 2003)。

月の重力は地球の6分の1であり、Sojourner (NASA/JPL (Mars Pathfinder, 2012) が探査を行なった火星の2分の1である。そのため車輪の接地荷重は小さく、車輪と路面の摩擦により発生する駆動力は小さくなる。また月の表面には軟弱で滑りやすいレゴリスが堆積しているため、走行に伴う路面の変形により生じる反力が小さく、車輪の回転により路面を掘ってしまい走行できなくなる現象、スタックも発生しやすい。月面に堆積しているレゴリスは火星表面よりも厚く、また緩いと予測され、月は火星以上にローバの走行性能を必要とする環境といえる。直接移動探査ロボットが月面上を走行する際に、重要な要素として、走行システムと地面との相互作用が挙げられる。従来の探査ローバでは、“スタック”という問題を回避できなかった。アポロ計画において月面に送られた月面探査車LRV (The Apollo Program, 2012) は、月面上でスタックし宇宙飛行士の手によりスタックから脱出させた。一方、近年行われた火星探査ローバMER (NASA/JPL, 2012) は、火星表面上の軟弱地盤で車輪が沈下し、脱出するのに一ヶ月以上も要した。このような“スタック”を回避するために地盤と走行系の研究 (室, 1993; Yon et al., 1986; Iagnemma et al., 2004; Hamano and Yoshida, 2001; Ishigami et al., 2006) は多々行われてはいるが、軟弱地盤の非線形な特性上、論理ベースというよりも実験的ベースで遂行されてきた。したがって有効な車輪形状を創出するには多くの実験が必要であり、まだまだ未解決の部分も多い。そこで、本論文では月表面上に多く堆積する“軟弱地盤上における探査ローバの走行”に焦点を当て、地盤と走行系 (車輪、弾性柔軟車輪、クローラなど) の間に発生する相互作用力 (地盤の締め固め効果やス

リップ率にて表現)を実験的に求め、軟弱地盤走行に有効な走行系の検証を行う。特に、地盤と走行系の接地状態の違いによる効果や車輪の表面に搭載されている“ラグ”(フィンのような形状のもの)のせん断効果や軌道により発揮される走行性について実験的検証していく。

2. 月面探査計画と求められるローバについて

月の探査が世界中の宇宙機関で注目されている中、宇宙航空研究開発機構(JAXA: Japan Aerospace eXploration Agency)は、2007年に月周回探査を行なうSELENEミッションを打ち上げた(JAXA, 2012)。そして、その後継ミッションとして2013年以降に直接移動ロボットによる表面探査を行なうSELENE-2ミッション(図1参照)などが計画されている(久保田, 2003)。月の表面を効率よく柔軟に移動するには、さまざまな問題がある。月の表面はレゴリスと呼ばれる軟弱地盤で覆われ、また、その上に岩や砂が散乱している。このような環境下では移動探査ロボットは、すべり現象やスタック現象を引き起こし、予想できない問題が生じると考えられる。このような環境下で求められる性能は、①レゴリス上を高い走行性能で走破できるシステム、②岩や砂利などの段差乗り越えシステム、③走行軌道を詳細に予測できるシステム、である。本論文では①に焦点をあて、次節にて述べる走行系と軟弱地盤との間に起こる相互作用力を実験的に把握し、有効な走行系の検証を行う。



図1: SELENE-2計画(JAXA)

3. 走行系の検証

3.1 走行系

本論文では、月面のような軟弱地盤を走行する上で、地盤との接地面積の違いがある円形剛体車輪、低圧タイヤ、クローラタイプについて焦点を当てる。これら走行系は実際にあらゆる機関で検討されているものである。

3.1.1 円形剛体車輪

一般的に多く用いられている宇宙探査ローバ用の走行系の多くは、円形形状の剛体車輪を用いている(図2参照)。円形形状である車輪は、その回転運動から得られた摩擦力により前進する。宇宙環境に対応するために金属性の剛体車輪が用いられているが、軟弱地盤上を走行する際、沈下現象は避けられない。そのため図に示すMERも火星上でスタックを起



図2: 火星探査ローバ、Mars Exploration Rover (NASA/JPL)

こしている。沈下してしまう原因は、円形形状である車輪は軟弱地盤に対して縦長の応力を与えてしまうことがあげられる。これは車輪下部の砂を破壊し沈下しやすいことを意味している。その一方で高い回転効率や単純な機構、制御のしやすさの観点から剛体車輪の必要性は高い。

3.1.2 低圧タイヤ

地上で不整地上を走行する際、ゴムタイヤの内部空気圧を下げ、地面との接地面積を増加させた低圧タイヤが用いられる(MsWing, 2012)(図3参照)。接地面積を増加させることにより摩擦力の増加、不整地に対する接地圧の低下を実現でき、高い走行性能を持つ。しかしながら、整地面走行においては接地面積が大きいことにより大きい走行抵抗が働いてしまう。



図3: 低圧タイヤを搭載した走行系(車イス)(MsWing)

3.1.3 クローラタイプ

履帯を用いた走行系としてクローラ型を挙げる(Chiba Institute of Technology, 2012)(図4参照)。クローラ型は地盤との接地面積が大きいことから摩擦力を確保しやすいため不整地に対して高い走行性能を持つ。また砂漠などの軟弱地盤上においても高い走行性能を示す。しかしながら、機構の複雑さ、高い消費電力を要してしまうという問題点もある。

4. 走行システムと地盤との相互作用

4.1 相互間に働く作用について

月面上探査において、前述した3種類の走行系は、共通事項を持つ。一つは、軟弱地盤を走行し、その地盤と接地して

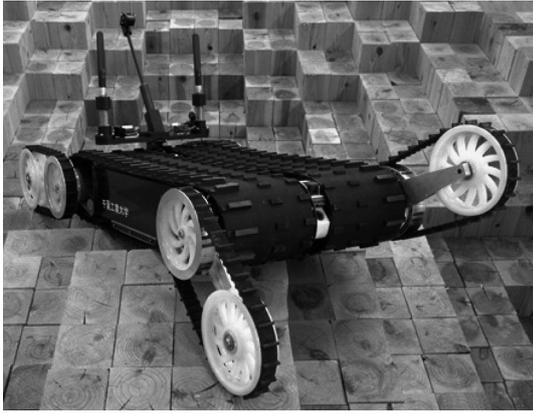
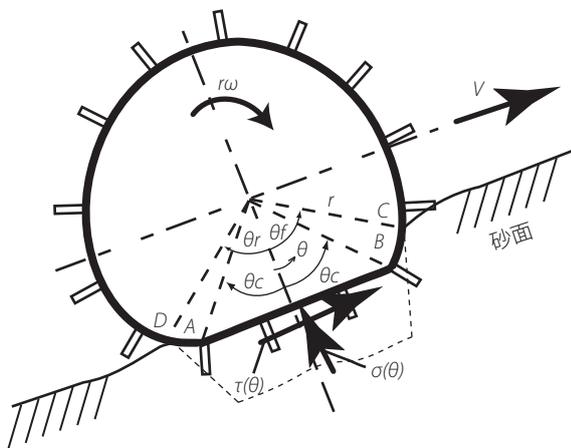


図4:クローラ型ロボット、Quince (千葉工業大学、東北大学)

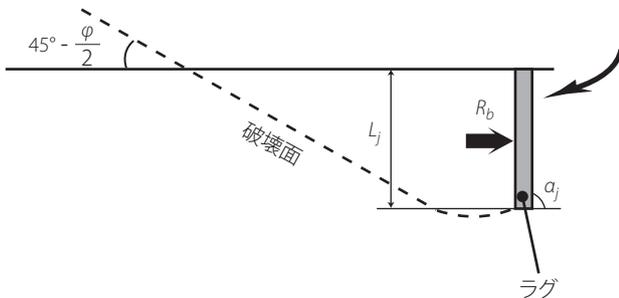
受動圧力 R_b は、ラグが砂中で移動する際、ラグの長さ分回転軌道を持って与えられる圧力である。砂中での物理現象であるために、車輪の沈下量によりラグに与えられる反力が変わってくる。また、スリップ率 λ は車輪の半径 r 、角速度 ω 、車輪の移動速度 V_w を用いて次式で定義される。

$$\lambda = \begin{cases} 1 - \frac{V_w}{r\omega} : \text{Driving } (r\omega \geq V_w) \\ 1 - \frac{r\omega}{V_w} : \text{Braking } (V_w \geq r\omega) \end{cases} \quad (2)$$

土中のラグが移動した場合に、ラグには受動圧力が作用する。牽引力は、車輪にかかる牽引負荷に対応するためにスリップしながら増加する。しかしながら、斜面走行においては、牽引負荷が増加すると(2)式に表される車輪のスリップ現象が見れる。



(a) 相互作用モデル



(b) ラグモデル

図5: 弾性車輪と軟弱地盤の相互作用モデル

いること。もう一つは、地盤より反力を得て走行することである。図5に荷重により歪んだ円形車輪モデルを示す。このモデルではラグを用いた時の走行系と砂との相互作用を示すことができる。軟弱地盤を走行する上でもっとも重要な駆動力 F の式は下記に示すようにスリップ率 λ 、せん断応力 τ 、法線応力 σ 、回転角度 θ の関数となる。

$$F = f[\lambda, \tau, \sigma, \theta, R_b] \quad (1)$$

ここで、 R_b は車輪表面に搭載したラグが砂から受ける圧力を示す(図5(b)、 L_j はラグの長さ、 ϕ は摩擦角を示す)。この

4.2 接地面積と接地圧の関係

図6に接地面積と接地圧力の関係図を示す。地盤との接地面積は円形車輪と比べて、低圧タイヤやクローラ型が大きい。したがって、走行地盤(砂)との接地圧力は走行系の重量が同等ならクローラ型のように接地面積が大きい走行系を採用することで低くすることができる。接地圧力を小さくできると軟弱地盤に沈下しづらくなり、走行系のスタックも起きづらくなる。したがって、低圧タイヤやクローラ型はスタックの可能性が低い走行系であると言える。また、月面上に多く堆積しているレゴリスは軟弱地盤であるために、圧力が加わると収縮現象が起きる。この収縮現象が起きると砂の密度分布が上昇し、圧力が加わった箇所において“締め固め”と呼ばれる効果が起きる。この締め固め効果は接地圧力がクローラ型のように低くても、締め固め効果は十分に起きる。上記で述べた走行系において、車輪と砂の接地面積を考慮すると、クローラ型が最も広い範囲で地盤に対して圧力をかけられるため締め固め効果も大きいと言え、砂中にラグが進入した際、継続して締め固められた地盤から反力が得られると考えられる。つまり、走行系と砂との接地部において、広い範囲で砂に“締め固め効果”を引き起こさせることがローバに有効な推力を生み出す。

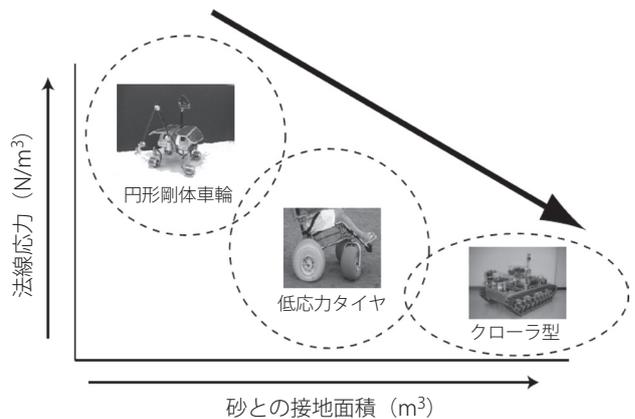


図6: 軟弱地盤上に働く走行系の接地面積と応力の関係

4.3 ラグと地盤の関係

軟弱地盤を走行する際、車輪表面から得られる推進力（摩擦力や法線応力）は小さい。車輪の牽引荷荷が増加すると、車輪は前進しにくくなる。したがって、軟弱地盤では車輪表面上に搭載されているフィンのような形状をした“ラグの存在”が重要となってくる。また、図7に円形車輪とクローラに装着しているラグの軌道を示している。円形車輪の場合（図7(a)）、砂の進入時に下方向にラグが挿入され、砂はせん断され車輪下部へ移動する。そして、車輪の進行方向に対して逆方向に砂の移動がおき、ラグは垂直段階（垂直貫入状態）を越えてから砂を砂表面上へ押し出す。車輪の推進に必要な前進方向への力はラグが砂の中に侵入してから垂直レベルまでの間となる。一方、クローラ型のラグ軌道（図7(b)）は、砂に侵入してから履帯が砂に接地している間、進行方向とは逆向きの平行軌道となる。これは、走行系が進行方向へ接地している距離分、推進力を得ていることを示す。つまり、“ラグの軌道”が軟弱地盤上走行に重要な要素と言える。

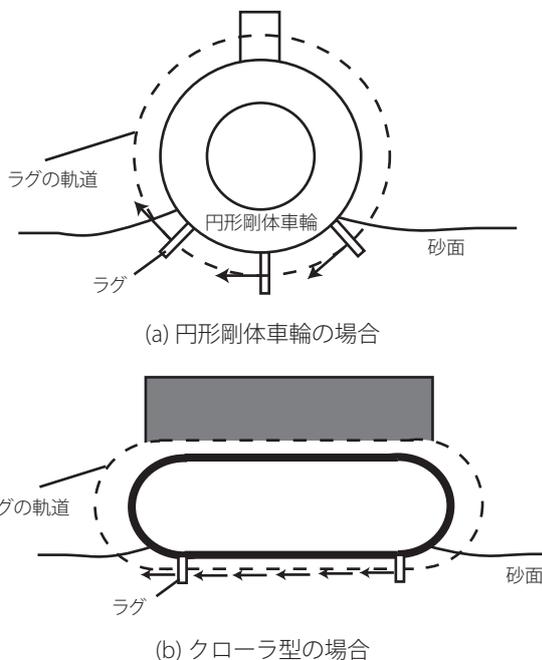


図7：走行系に搭載されているラグの軌道

5. 走行実験

5.1 実験内容

3.4章において、走行系と地盤との間に発生する相互作用について記述してきた。そこで円形の剛体車輪、五角形車輪、弾性車輪を用いて以下の実験を行う。

5.1.1 ラグの効果についての検証

走行系が軟弱地盤上を走行する際、ラグの効果はラグと軟弱地盤とのモデルから考えることができる。実際に、ラグの長さを変えた車輪（ラグ無車輪も含む、図8参照）を利用して走行実験を行ない、ラグの有効性について検証する。実験ではラグ有無の効果を検証（図8下）すること及びラグの長さ



図8：ラグを搭載した円形剛体車輪と実験条件

に対する効果を検証するため、軟弱地盤上に単輪を走行させる実験を行う。

5.1.2 締め固め効果

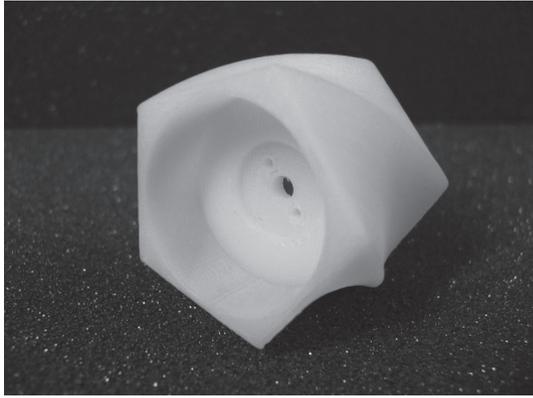
3章で述べた締め固め効果の有効性について実験的検証を行なう。本論文では、接地面積が違う2車輪を用意し、走行性能を把握する。使用車輪を図9に示す。図9(a)に示す車輪は五角形形状をしており、接地面積を一時的に増加させて面で砂をとらえることができる（図9(b)）。そのときに円形状車輪と比べ、その効果について確認する。

5.1.3 ラグの軌道

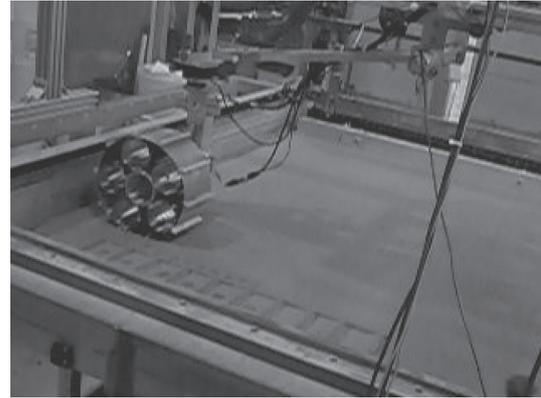
円形車輪とクローラ型の回転時におけるラグの軌道は異なる。そこでこのラグの軌道がどのように走行に影響するのかを走行実験にて確認する。図10に本実験で使用する車輪を示す。この実験で利用する車輪は、ラグが一定な円軌道を持つ円形剛体車輪と、表面形状を変化させてクローラ型のように接地面に対して平行に接地面積を変形できる弾性車輪を用いる。弾性車輪は、材料の弾性特性を利用した車輪である。実際に弾性車輪が砂上を走行すると、荷重により変形し、車輪底辺部は142 mmとなり、地面と平行に接地することができる。地面と平行に接地する部分を作ることによりラグの楕円軌道を実現させる。

5.2 実験装置について

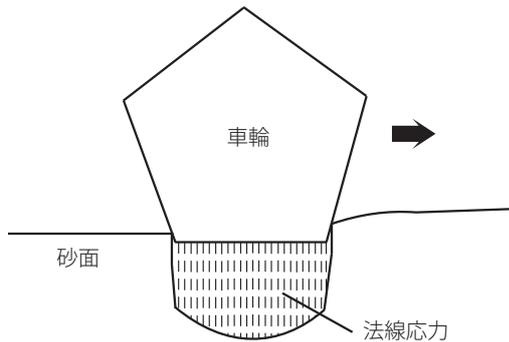
前節の5.1.1と5.1.3の評価を行うためにスリップ率(式2)を用いる。図11(a)に示す単輪試験機を用いることでスリップ率測定を行うことができる。図11(b)にその構成を示す。実



(a) 5角形車輪

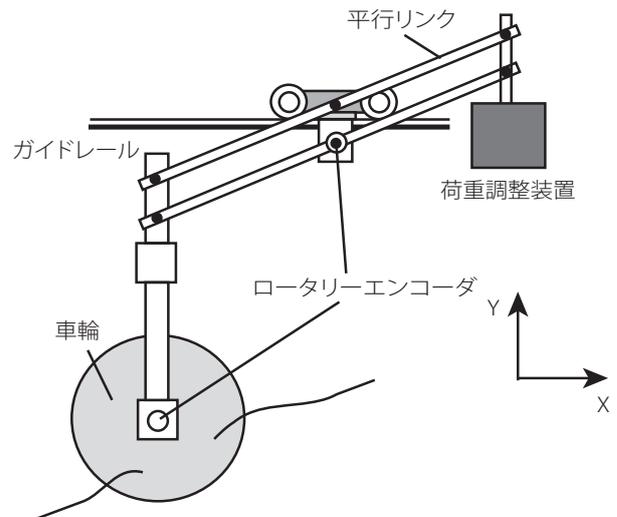


(a) 実験装置の外観



(b) 5角形車輪と軟弱地盤の間に働く法線応力

図9：締め固め効果を生み出すための車輪



(b) 実験装置の構成

図11：スリップ率を測定するための単輪を用いた走行実験装置

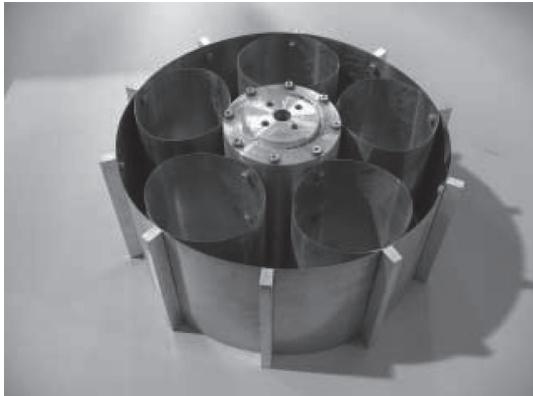


図10：ラグの楕円軌道を持つ弾性車輪

験システムは、車輪供試体、車輪駆動系、接地荷重調整装置、走行ガイド部、斜面装置および計測センサから構成されており、水平移動距離はレール上を移動する差動トランスを設けて、出力される電圧値を換算し求める。また、月面模擬地形装置は0～20 degまでの範囲で地形を傾けることができる。地形装置内部には軟弱な砂が深さ30 cm程度に敷き詰められている。走行性能の評価は、地質により違いが生じるため、月惑星表面に厚く堆積したレゴリスを模擬した月土壌シミュラントを実験で用いた。月土壌シミュラントは、粒子比重：2.83、最小密度：1.39 g/cm³、粘着力：5.0 kPa、内部摩擦角：36.7 degの特性を有する非常に細かい砂である。実験用パラメータを表1に示す。

表1：実験パラメータ

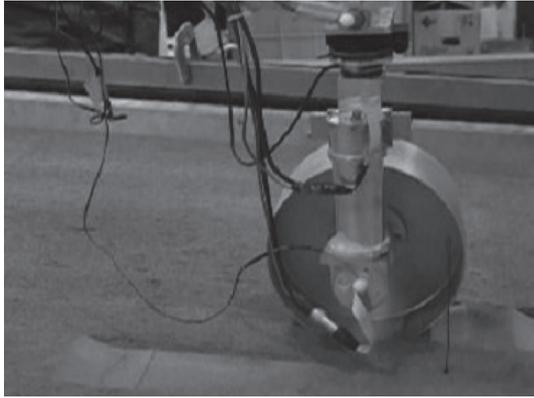
パラメータ	値	単位
荷重	2.0	kg
速度	0.1	m/s
斜度	0, 5, 20	deg
ラグ長	0, 5, 10, 20	mm

5.1.2の締め固め効果を確認する実験では、5角形車輪を用いて走行前と走行後の砂のせん断強度を測定する。走行には単輪試験機を用い、測定にはベンセン断試験器と呼ばれる砂の強度を測定する測定器を用いる。

6. 実験結果

6.1 ラグの効果について

図12に斜度5度のときのラグ有無車輪による走行状態を示す。ラグ無車輪(図12(a))のときはその場で滑りが発生し、



(a) ラグ無円形剛体車輪



(b) ラグ有円形剛体車輪

図12：実験用車輪(ラグの効果について検証するための車輪)

全く動くことができなかつた(初期状態からスリップ率が1.0状態となった)。一方、ラグ有車輪(図12(b))の場合、スムーズに走行することができた。このことから、ラグの存在は非常に重要であるといえる。

図13にラグの長さを変えたときの実験結果を示す。ラグが長いことで、高い走行性能を発揮している。ラグの長さが20

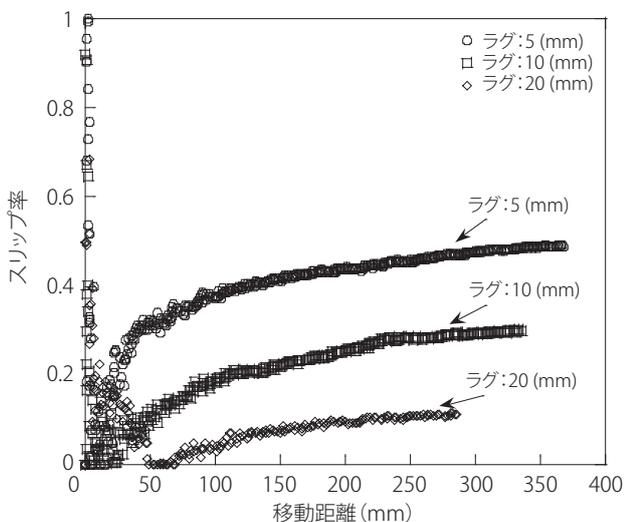


図13：ラグの長さを変えた車輪を用いた時のスリップ率 (3 kg, 10 deg, 0.1 m/s)

mmのときは、5 mmと10 mmのラグと比べてスリップ率が低いことから高い走行性能を示している。これは式(1)のラグの受動圧力項が主の推進力であることを表す結果となった。

6.2 締め固め効果

表2に走行前と走行後の砂のせん断強度を示す。接地面積を増加させた5角形車輪は円形車輪と比べ、砂のせん断強度は走行後に上昇していることがわかる。通常、走行後はラグが挿入された後なので、砂は破壊状態になるはずだが、せん断強度が上昇したということは広い範囲で締め固め効果が起きていると考えられる。

表2：車輪の走行前後における軟弱地盤のせん断強度

車輪	走行前 (cNm)	走行後 (cNm)	傾向
円形剛体車輪	0.43	0.30	下降
5角形車輪	0.40	0.53	上昇

6.3 ラグの軌道

図14にラグの軌道を変えたときの実験結果を示す。クローラ型と同様なラグの軌道を描く弾性車輪は、円軌道を持つ円形車輪と比べて低いスリップ率となり、高い走行性能を示している。円形車輪の場合、走行後に車輪後部に砂がたまる。これはラグにより砂がかき出されたものである。このことよりラグの軌道が円軌道となると砂をほってしまう効果があると考えられる。一方、クローラ型の場合、後方に砂がたまる現象は見られるものの、接地状態が円形車輪と比べ、進行方向に対して長い場合、砂がかき出させることなく砂に圧縮を与えながら推進力を得ることができている。このことよりラグの軌道は進行方向に対して平行軌道を取ることが有効

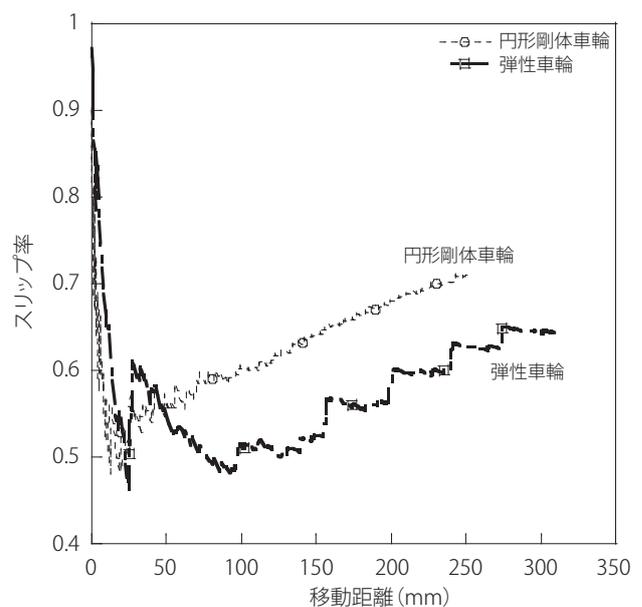


図14：ラグの軌道を変えた車輪(円形剛体車輪と弾性車輪)を用いた時のスリップ率 (2 kg, 20 deg, 0.1 m/s)

であると考えられる。

7. まとめ

本論文では、月面探査ローバの軟弱地盤上走行に焦点を当て、“締め固め効果”や“スリップ率”という評価を用いてその相互作用力を求めた。具体的には、円形車輪、五角形車輪、弾性車輪を用いて、地盤との接地状態の違いによる締め固め効果（砂のせん断強度）の測定やラグの運動軌道の効果について実験的検証を行なった。整理したものを以下に示す。

- ラグの必要性及び特徴
ラグ有無の車輪を用いた実験では、明らかにラグを搭載した車輪のほうが高い走行性能を示すものだった。また、ラグ長5、10、20 mmを持つ車輪（車輪径φ200 mm）を用いた走行実験から、一番長い20 mmのラグを搭載した車輪が高い走行性能を示し、より長いラグを使用することで高い走行性能を示すことがわかった。
- 締め固め効果の有効性
五角形車輪を用いた走行実験により、軟弱地盤走行では低応力かつ広範囲に応力を与えることが有効な手段であることがわかった。
- ラグの軌道
弾性車輪のような楕円軌道を持つラグの動きが高い走行性能を示す結果となった。これは推進方向に対して平行にラグを動かすことで有効であることを示した。

以上のことよりクローラ型のような走行系が地盤との接地面積を多く取ることができ、ラグの軌道も最適なものと言える。今後、軟弱地盤走行におけるクローラ型の弱点である複雑さや砂防止対策、高消費電力が解決されれば探査ローバとして採用されやすくなると考えられる。本研究では、このような対策を行なったクローラロボットの開発を行なっていく予定である。

引用文献

- Chiba Institute of Technology (2012). <http://www.furo.org/ja/robot/quince/index.html>.
- European Space Agency (2012). <http://www.esa.int/SPECIALS/SMART-1/>.
- Hamano, H., and Yoshida, K. (2001). Motion dynamics simulations and experiments of an exploration rover on natural terrain. *Proceedings of Astrodynamics and Flight Mechanics*, No. 11, 306-313.
- Iagnemma, K., Kang, S., Shibly, H., and Dubowsky, S. (2004). Online terrain parameter estimation for planetary rovers. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 20, No. 5, 921-927.
- Ishigami, G., Nagatani, K., and Yoshida, K. (2006). Path following control with slip compensation on loose soil for exploration rover. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- JAXA (2012). <http://www.isas.jaxa.jp>.
- 久保田孝 (2003). SELENE-Bローバの検討. 日本ロボット学

会誌, Vol. 21, No. 5, 494-497.

Mars Pathfinder (2012). http://www.nasa.gov/mission_pages/mars-pathfinder/.

MsWing (2012). <http://www.mswing.co.jp/>.

室達郎(1993). テラメカニクス-走行力学. 技報堂出版.

NASA/JPL (2012). <http://mars.jpl.nasa.gov/>.

National Aeronautics and Space Administration (2012). http://www.nasa.gov=mission_pages/exploration/main/index.html.

Soviet Lunar Missions (2012). <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/lunarussr.html>.

The Apollo Program (2012). <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo.html>.

Yon, R. N., Fattah, E. A., and Skidas, N. (1986). translation by Kitano, M., *Run Dynamics of Off-road Vehicles*. The Japanese Society for Study Technology Education.

(受稿：2012年5月29日 受理：2012年6月15日)