

35. 月面探査ローバに最適なトレッド形状の検討

呉工業高等専門学校専攻科 ○大知 剛
 呉工業高等専門学校 重松尚久
 呉工業高等専門学校専攻科 下岡幸司

1.はじめに

現在、我が国の宇宙開発において、月周軌道からの月の観測を目的としたプロジェクトが推進されており、それに次ぐミッションとして無人探査機による月面調査が検討されている。月面は、重力の違いや粉塵のような細かい砂（レゴリス）で覆われているなど地上とは全く異なる条件を有する環境のため無人探査機の開発が必要不可欠である。月面地盤などの軟弱地盤での車両の運動特性は地盤の変形に大きく影響される。従って、車両の運動特性は機械工学的なアプローチだけではなく、機械と地盤との相互作用（テラメカニクス）という観点からの検討が重要である¹⁾。そこで、本研究では、試料砂にシミュラントと呼ばれる模擬月面砂を用い、平板牽引試験を行い、トレッドの高さやトレッドピッチなどの平板状態やトレッドの取り付け角度が地盤に及ぼす影響を調べ、車輪形状の最適化を行った。

2.供試地盤

今回の実験で使用したシミュラントは月面のレゴリスを模した擬似月面砂であり、実際のレゴリスと化学成分、粒度分布、比重、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ がほぼ一致するように作られたものである²⁾。シミュラントの土質性状は、土粒子密度 2.93g/cm^3 、均等係数 $U_c=57.81$ 、曲率係数 $U_c'=1.46$ である。この試料砂を土槽全体に約 50mm ずつ 3 層に分けて地盤を作成した。各層ごと平坦に整地したのち、各層の下に 10mm 程度の網目の装置を置き、次の層を作成した後、その装置を引き上げることで緩詰め均一な地盤の作成を行った。上記の方法で作成した地盤密度（乾燥密度）は 1.63g/cm^3 であった。

3.実験装置および実験方法

平板牽引試験の実験装置は、試料砂をいれた $4,000 \times 2,500 \times 1,000\text{mm}$ の土槽、3 種類のトレッドピッ

チ ($19, 24, 29\text{mm}$)、2 種類のトレッド高さ ($12, 21\text{mm}$)、平板、ウインチ、変位計、ロードセル、メモライザから成る。図-1 に平板概略図と平板の諸元を示す。図-2 に平板牽引試験の実験装置を示す。実験は平板をウインチでつなぎ、トレッドピッチ 3 種類とトレッド高さ 2 種類の組み合わせで平板を 6 種類に変化させ、牽引試験を行った。有効牽引力は平板と牽引装置との間にロードセルを介して測定した。また、それぞれの平板を平均垂直応力 p を $0.98, 1.96, 2.94, 3.92, 4.90\text{Pa}$ に変化させて実験を行った。また、牽引距離をスリップ量と定義して、 150mm を牽引した。また、その中で最適なトレッドピッチとトレッド高さの比で取り付け角度を $20^\circ \sim 40^\circ$ を 5° ずつ変化させ計 13 種類に変えて実験を行った。

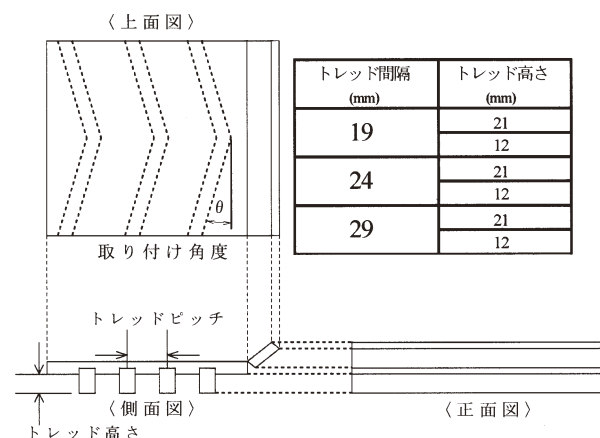


図-1 平板の概略図と平板の諸元

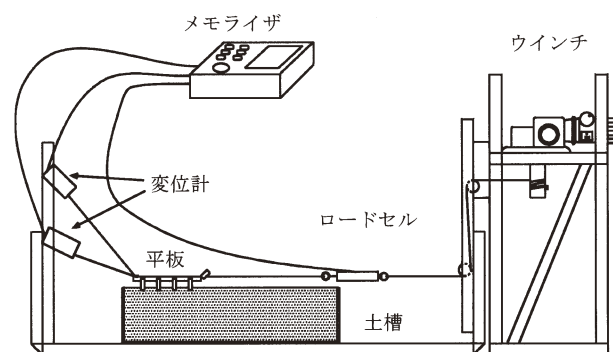


図-2 平板牽引試験装置

4.実験結果と考察

4.1 せん断抵抗

緩く堆積した砂質土、練り返した軟弱な粘土、および正規圧密粘土で構成される地盤上で、様々な接地圧 p の下で標準履帯モデルを牽引したときの、せん断抵抗 τ と履帯のスリップ量 j の関係は、一般的に Janosi-Hanamoto の関係式³⁾ (1) が用いられる。

$$\tau = (m_c + m_f \cdot p) \{1 - \exp(-a \cdot j)\} \quad (1)$$

- p : 平均垂直応力 (kPa) , j : スリップ量 (cm)
 m_c : 地盤と平板との間の付着力 (kPa)
 m_f : 地盤と平板との間の摩擦係数
 a : 形状変形係数 (1/cm) , τ : せん断抵抗 (kPa)

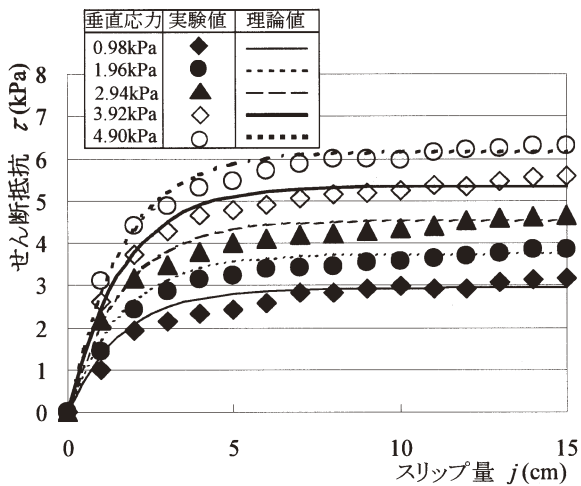


図-3 スリップ量とせん断抵抗の関係

図-3 にスリップ量とせん断抵抗の関係 ($T_P = 29\text{mm}$, $T_H = 21\text{mm}$) を示す。スリップ量の増加に伴いせん断抵抗は収束することが分かる。

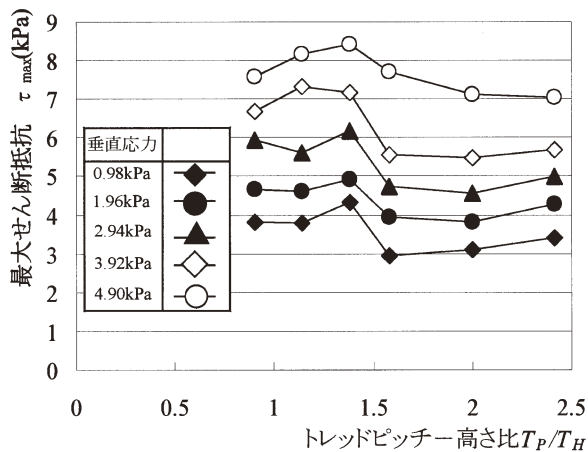


図-4 最大せん断抵抗と T_P/T_H の関係

図-4 に最大せん断抵抗とトレッドピッチトレッド高さ比の関係を示す。ここでせん断抵抗 τ が最大のときのトレッドピッチトレッド高さ比 T_P/T_H を最適トレッドピッチトレッド高さ比 $T_P/T_H(\text{opt})$ と定義すると、1.38 付近であることが分かった。さらに T_P/T_H が 1.5 付近から最大せん断抵抗が低下しているのが分かる。

4.2 せん断抵抗と沈下量の関係

一般に、牽引力は図-5 に示すように、スリップ量の増大とともにトレッド底面およびトレッド両側面に滑り線が成長し、その滑り線上にせん断抵抗を発生せしめる土の進行性破壊により発生する⁴⁾。牽引による沈下に際し、重要となってくるのが平板に取り付けられたトレッドが牽引されることで地盤に描く土の進行性破壊による滑り線である。この滑り線がトレッドピッチトレッド高さ比によって次のトレッドに届くか届くまでの途中で終わってしまうかで牽引力や滑り沈下量に影響を与える。トレッドピッチトレッド高さ比が 1.38 以降の 3 点はいずれもトレッド高さに対しトレッドピッチが広いいため滑り線が途中で終了してしまっただと考えられる。今回はこの実験より得られた 1.38 を最適トレッドピッチトレッド高さ比とした。

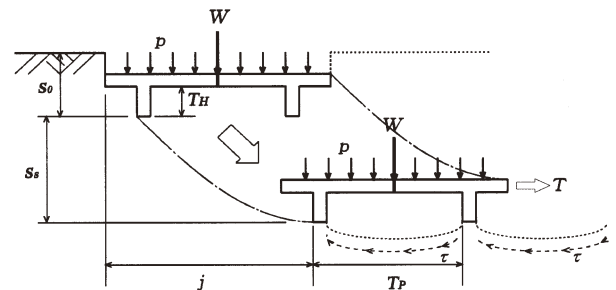


図-5 滑り線と有効牽引力の発生機構

4.3 滑り沈下量 車両が走行する場合、静的沈下に加え、この滑り沈下が生じる。滑り沈下量 s_s とスリップ量 j_s は車両の走行性能を左右する重要な因子の一つであり、接地圧により異なる。滑り沈下量 s_s とスリップ量 j_s の間には一般に滑り沈下量を予測する式としての Muro の関係式⁴⁾ (2) が用いられる。

$$s_s = c_0 \cdot p^{c_1} \cdot j_s^{c_2} \quad (2)$$

c_0, c_1, c_2 : 地盤-車輪係数 , j_s : スリップ量 (cm)
 p : 平均垂直応力 (N/cm^2) , s_s : 滑り沈下量 (cm)

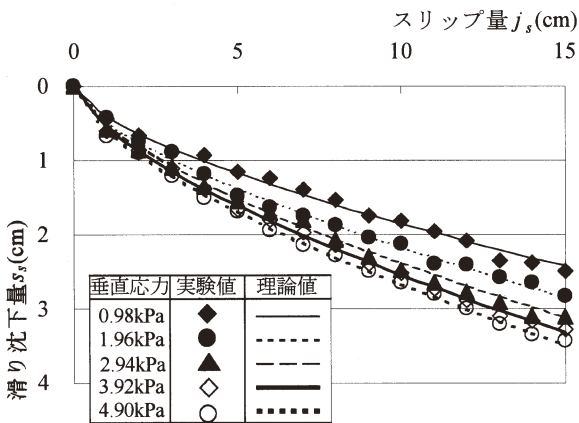


図-6 スリップ量と滑り沈下量の関係

図-6 にスリップ量と滑り沈下量の関係 ($T_p = 20\text{mm}$, $T_H = 21\text{mm}$) を示す。スリップ量の増加に伴い、滑り沈下量も増加し、やがて収束する傾向がある。

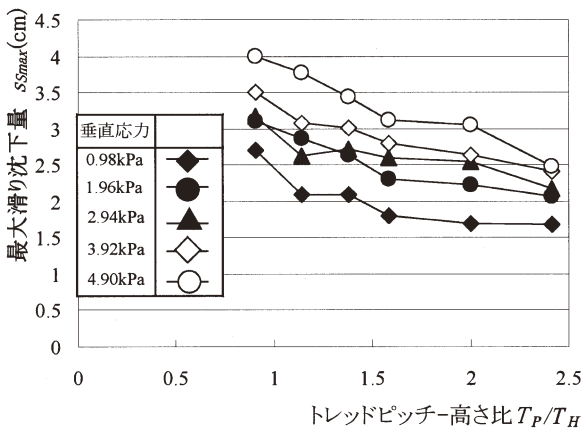


図-7 最大滑り沈下量と T_p/T_H の関係

図-7 に最大滑り沈下量とトレッドピッチ・トレッド高さ比の関係を示す。トレッドピッチが狭く、トレッド高さが高い平板形状であるほうが沈下量が大きくなる傾向が見られた。

4.4 トレッドの取り付け角度

最適なトレッド取り付け角度を求めるため、最大せん断抵抗 τ_{max} とトレッドピッチ・トレッド高さ比 T_p/T_H の関係から得られた結果より、トレッドピッチ・トレッド高さ比 T_p/T_H を 1.38 にした平板に、トレッドの取り付け角度を 20° から -40° まで 5° ずつ変化させた計 13 種類の平板を牽引した。

4.4.1 せん断抵抗 図-8 に最大せん断抵抗とトレッドの取り付け角度の関係を示す。これよりトレッドの取り付け角度 θ が -35° まで最大せん断抵抗が大きくなり、 -40° で少し減少しているのが分かる。これはトレッドが V 字の形になることで牽引すると土がトレッドの中心に集まり、土が締め固められたためだと考えられる。逆に逆 V 字の形である 20° に取り付けられた平板では土を左右に分けて牽引されるため抵抗が少なくなったと考えられる。

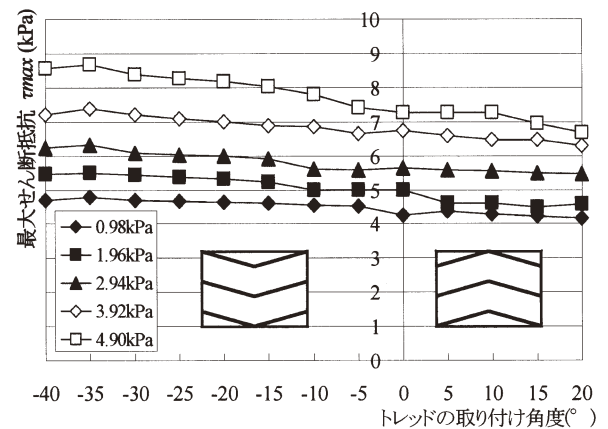


図-8 最大せん断抵抗とトレッドの取り付け角度の関係

4.4.2 滑り沈下量 図-9 に最大滑り沈下量とトレッドの取り付け角度の関係を示す。これよりトレッドの取り付け角度 θ が 20° に近づくにつれ、最大滑り沈下量が大きくなる傾向がある。逆に θ が -40° に近づくにつれ、滑り沈下量が小さくなる傾向がある。

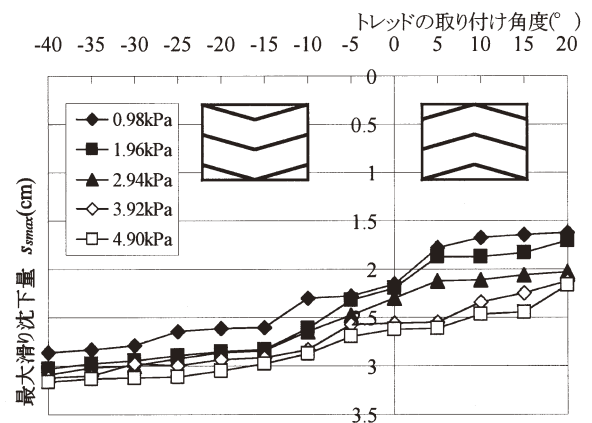


図-9 最大滑り沈下量とトレッドの取り付け角度の関係

4.4.3 牽引時の土の動き 図-10 に牽引時の土の動きのモデルを示す。トレッドが逆 V 字の形で牽引すると土を左右に分けて進み、その沈下量も角度をつけるほど沈下量は小さくなった。V 字型の形はトレッドの中心に土を集めながら牽引するため沈下量が大きくなっていったと考えられる。また、トレッドが V 字の形で牽引すると土がトレッドの中心に集まり、せん断抵抗が大きくなったと考えられる。

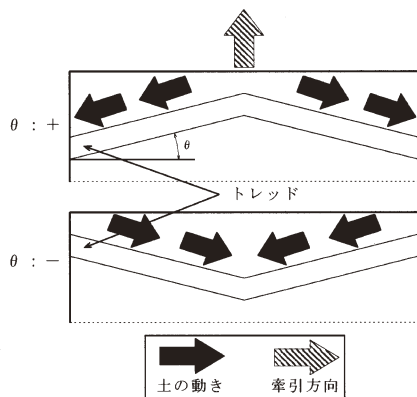


図-10 牽引時の土の動き

4.4.4 地盤-車輪系定数 表-1 に取り付け角度別の地盤-車輪系定数を示す。この数値を用いて、シミュレーション解析を行うことで、低応力下での車両の走行性能を求めると考える。

5. 結論

シミュラントを走行する最適な平板形状はトレッドピッチ-トレッド高さ比からトレッドの取り付け間隔とトレッドの高さの比は約 1.38、トレッドの取り付け角度は進行方向に対して逆 V 字型に取り付けた平板であることが分かった。また、トレッドの取り付け

角度は -35° から -40° でせん断抵抗が最大となったため、最適な取り付け角度はこの範囲内にあることが分かった。このトレッドピッチ-トレッド高さ比や取り付け角度を特定することにより、適用する地盤での牽引力が最大の点が分かると最適な施工機械のトレッドピッチやトレッド高さが分かり効率的な作業が可能になると考えられる。さらに、今回の実験は月面を想定し、乾燥したシミュラントで行ったが、今後、含水比を変化させた砂地盤において同様の実験を行うことで、土石流災害などの復旧用機械などに応用することが可能だと考えられる。また、地盤-車輪系定数を用い、シミュレーション解析を行うことで、低応力下での車両の挙動の検討を行いたい。

〈謝辞〉

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手(B)No.15760369 の補助を受けて行ったものです。

6. 参考文献

- (1) SELENE-B 検討チーム：月軟着陸実験計画 (SELENE-B) 提案書, (ISAS/NAL/NASDA), 12 章 pp.23, 2002.
- (2) 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, Vol.52, No.1, pp.10-12, 2004.
- (3) Z.Janosi, and B.Hanamoto：The analytical determination of drawbar-pull as a function of slip for tracked vehicles in deformation soils, Proc.of the 1st Int.Conf.of the I.S.T.V.S, 1961.
- (4) 室達朗：テラメカニクス-走行力学-, 技報堂出版, pp.31-74, 113-118, 1993.

表-1 取り付け角度別の地盤-車輪系定数

取り付け角度	m_c (kPa)	m_f	a (1/cm)	重相関係数	c_0	c_1	c_2	重相関係数
-40	3.323	0.821	0.056	0.972	2.348	0.203	0.443	0.982
-35	2.899	0.724	0.055	0.979	2.358	0.158	0.428	0.953
-30	3.102	0.772	0.049	0.988	2.898	0.217	0.472	0.977
-25	3.554	0.789	0.059	0.945	2.721	0.156	0.500	0.966
-20	3.596	0.766	0.055	0.981	2.972	0.149	0.393	0.961
-15	3.619	0.746	0.052	0.985	2.240	0.274	0.431	0.964
-10	3.412	0.752	0.055	0.983	2.249	0.220	0.457	0.958
-5	3.376	0.758	0.048	0.978	1.797	0.320	0.491	0.977
0	2.789	0.724	0.033	0.979	2.408	0.227	0.660	0.981
5	2.242	0.800	0.042	0.984	2.684	0.115	0.464	0.972
10	3.433	0.748	0.051	0.974	2.764	0.117	0.470	0.968
15	2.885	0.705	0.040	0.979	2.998	0.072	0.472	0.959
20	3.458	0.696	0.040	0.985	2.302	0.122	0.530	0.987