

11. 月面探査ローバーの車輪形状の最適化

呉工業高等専門学校：○重松 尚久

愛媛大学工学部：室 達朗

呉工業高等専門学校専攻科：大知 剛

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 50 mm 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 10 mm 程度の網目の装置を置き、次の層を作成し、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 × 2,500 × 1,000 mm の土槽、3 種類のトレッドピッ

チ(19, 24, 29 mm)、2 種類のトレッド高さ(12, 21 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。前面の土砂が平板上にのり上がるのを防ぐため、平板の前端部がそり状になるよう鉄板を溶接し、ウインチとの接合箇所を設けた。平板の後端部には変位計のワイヤーを接合する箇所を設けた。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。また、トレッドの取り付け角度を 4 種類に変化させ、それを正方向と逆方向にそれぞれ牽引した。有効牽引力は平板と牽引装置との間にロードセル

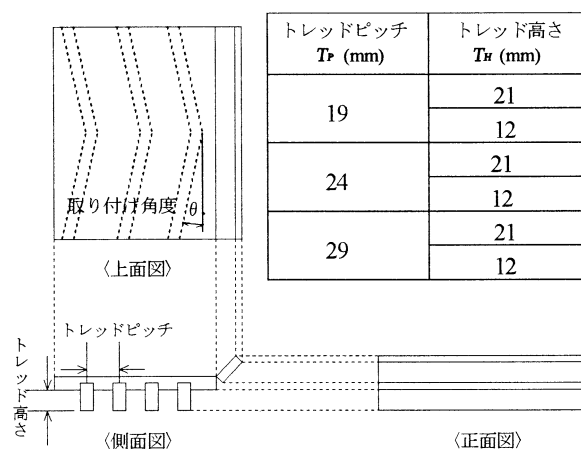


図-1 平板の概略図と平板の諸元

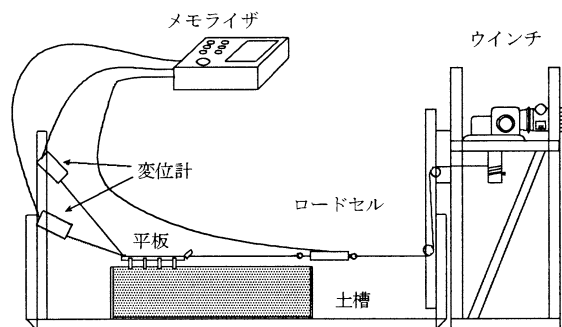


図-2 平板牽引試験装置

を介して測定した。また、それぞれの平板に 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5kg の 5 段階に分けたおもりをのせることで、平均垂直応力 p を 0.98, 1.96, 2.94, 3.92, 4.90 kPa 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、150 mm 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(5, 10, 15, 20°)を 4 種類に変化させ実験を行った。

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 にスリップ量とせん断抵抗の関係の一例として、トレッドピッチ $T_P = 29\text{mm}$, トレッド高さ $T_H = 12\text{mm}$ の形状の場合を示す。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。また、垂直応力が大きくなるほどせん断抵抗も増加することが分かる。なお、表-1 に地盤一車輪系定数を示す。図-4 におけるせん断抵抗とトレッドピッチートレッド高さ比の関係を示す。シミュラントでは最適トレッドピッチートレッド高さ比 T_P/T_H が 1.14 ($T_P=24\text{mm}$, $T_H=21\text{mm}$) ~ 1.38 ($T_P=29\text{mm}$, $T_H=21\text{mm}$) と明確な値を得る事ができた。垂直応力が大きい場合に傾向が顕著に現れることが分かる。さらに T_P/T_H が 1.5 付近からせん断抵抗が低下しているのが分かる。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ー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

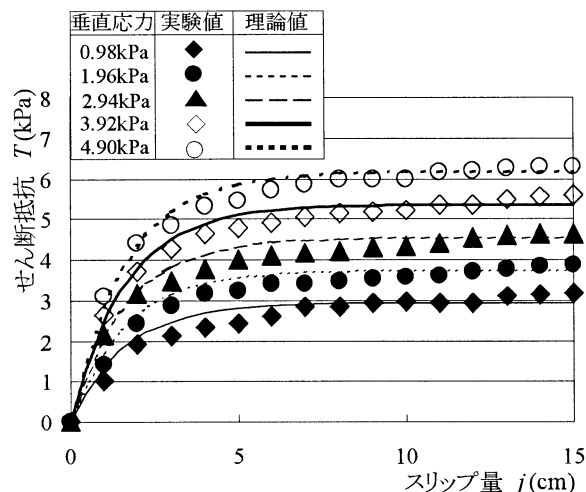


図-3 スリップ量とせん断抵抗の関係

表-1 地盤一車輪系定数

	m_c (kPa)	m_f	a (1/cm)	重相関係数 r
シミュラント	0.668	0.565	0.951	0.949

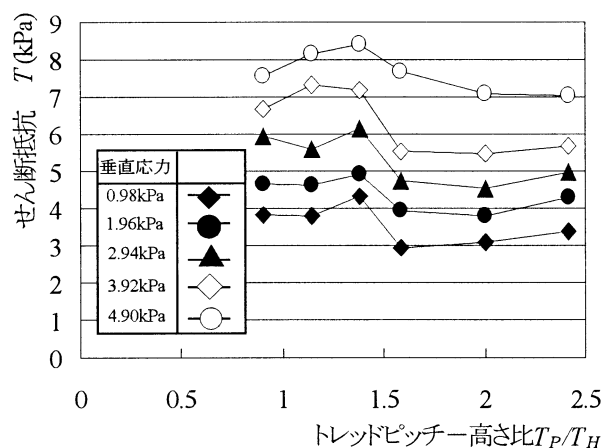


図-4 せん断抵抗と T_P/T_H の関係

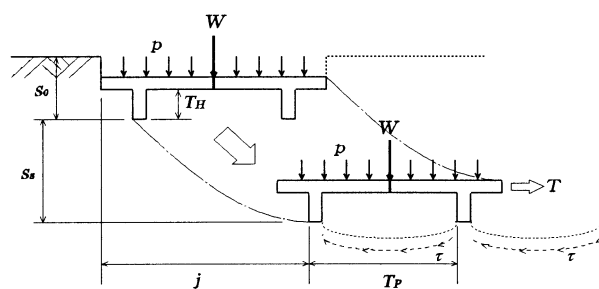


図-5 滑り線と有効牽引力の発生機構

与える。トレッドピッチ・トレッド高さ比が 1.38 以降の 3 点はいずれも高さ 12mm のトレッドであり、トレッド高さに対しトレッドピッチが広いため滑り線が途中で終了してしまったと考えられる。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。

4.2 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。

$$s_s = c_0 \cdot p^{c_1} \cdot j_s^{c_2} \tag{2}$$

c_0, c_1, c_2 : 地盤-車輪系定数 j_s : スリップ量 (cm)
 p : 平均垂直応力 (N/cm²), s_s : 滑り沈下量 (cm)

図-6 にスリップ量と滑り沈下量の関係の一例として、トレッドピッチ $T_p = 20\text{mm}$ 、トレッド高さ $T_H = 21\text{mm}$ の形状の場合を示す。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。なお、表-2 に地盤-車輪系定数を示す。図-7 にシミュラントにおける滑り沈下量とトレッドピッチ・トレ

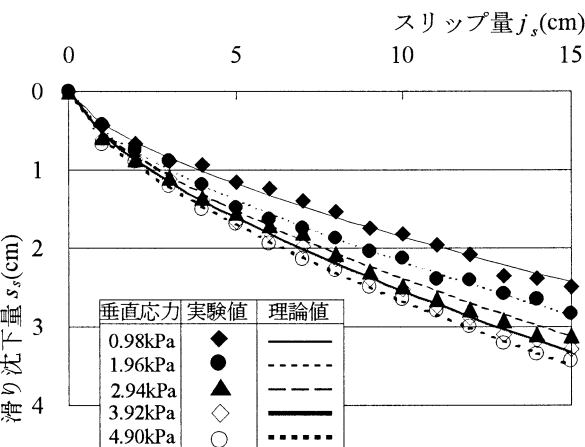


図-6 スリップ量と滑り沈下量の関係

表-2 地盤-車輪系定数

	c_0	c_1	c_2	重相関係数 r
シミュラント	0.079	0.436	0.959	0.983

* (cm^{1+2c₂-c₁}/N^{c₁})

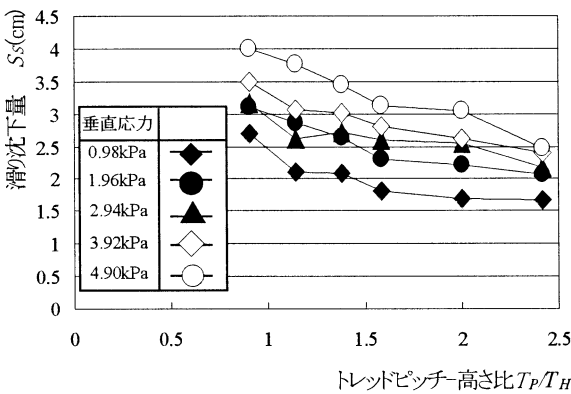


図-7 滑り沈下量と T_p/T_H の関係

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。

4.3 トレッドの取り付け角度

次に、トレッドピッチ・トレッド高さ比を 1.38 にした平板に、トレッドの取り付け角度を 5, 10, 15, 20° の 4 種類を正方向、逆方向に分けて計 8 種類に平板を変化させて牽引した。

4.3.1 セン断抵抗 図-8 にせん断抵抗とトレッドの取り付け角度の関係を示す。図-8 よりトレッドの取り付け角度 θ が -20° に近づくにつれ、せん断抵抗が大きくなる傾向がある。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、土の逃げ場がなくなるためそれが直接、抵抗につながったと考えられる。逆に逆 V 字の形である 20° に取り付けした平板では土を左右に分けて牽引されるた

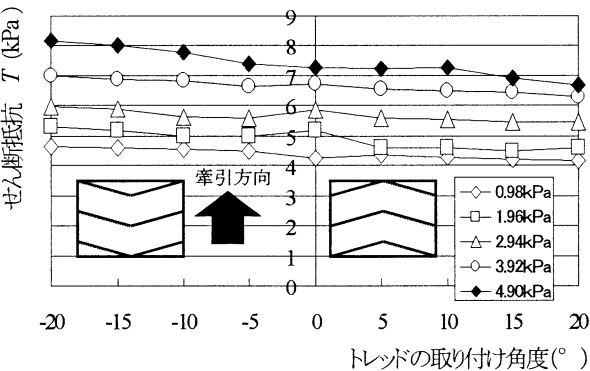


図-8 セン断抵抗とトレッドの
 取り付け角度の関係

め抵抗が少なくなったと考えられる。図-9 に牽引時の土の動きを示す。

4.3.2 滑り沈下量 図-10 に滑り沈下量とトレッドの取り付け角度の関係を示す。図-10 よりトレッドの取り付け角度 θ が 20° に近づくにつれ、滑り沈下量が大きくなる傾向がある。逆に θ が -20° に近づくにつれ、滑り沈下量が小さくなる傾向がある。これはトレッドが逆V字の形になることで牽引すると土を左右に分けて進むか、V字型の形のトレッドの中心に土を集めながら牽引されるため沈下量が大きくなっていったのではないかと考えられる (図-9 参照)。

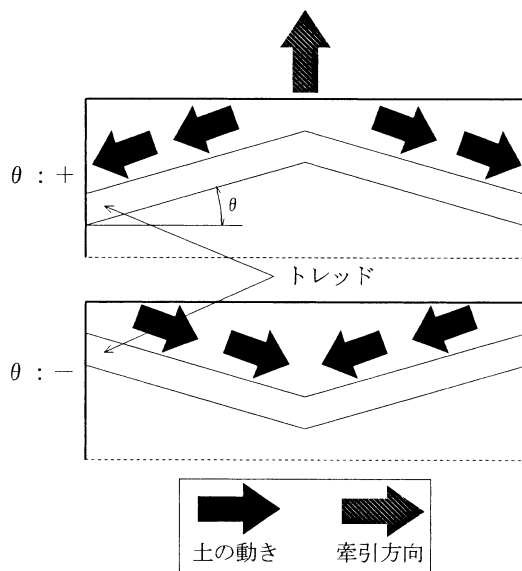


図-9 牽引時の土の動き

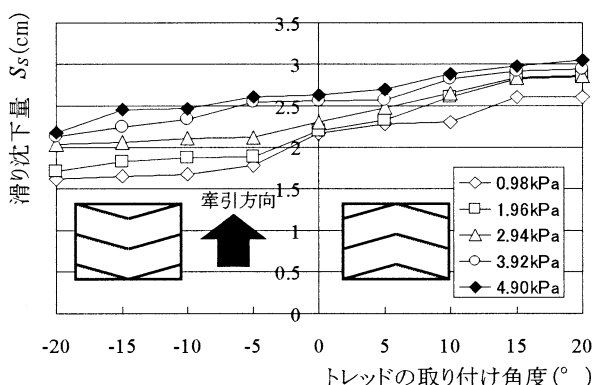


図-10 滑り沈下量とトレッドの取り付け角度の関係

5. 結論

平板牽引試験より得られたデータより、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。今回は 20° までしか変化させなかったが、最適な角度があるのではないかと考えられる。また、トレッド高さに対し、トレッドピッチが大きすぎると滑り線の関係上、せん断抵抗が減少することが考えられる。このトレッドピッチ・トレッド高さ比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、乾燥した砂質地盤で行ったが、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る。

なお、今回の実験は地上で行われているため、月面での重力や真空といった条件を考慮していない。月面での車両の挙動を模擬するためには、月面での重力を考慮する必要があるが、地上試験レベルで月面重力を考慮するのは難しいため、今後は相似則の概念を用いて本質を究明していく必要がある。

<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：テラメカニクスー走行力学ー, 技報堂出版, pp.31-74, 113-118, 1993.