B 101 軟弱地盤上における低圧車輪のけん引力評価

Drawbar Pull Evaluation of Low-Pressure Wheel on Deformable Terrain

○正 成田 伸一郎, 正 大槻 真嗣, 若林幸子, 正 西田 信一郎 (JAXA/JSPEC)

Shin-ichiro NARITA, Masatsugu OTSUKI, Sachiko WAKABAYASHI, Shin-ichiro NISHIDA
JAXA/Lunar and Planetary Exploration Program Group, 3-1-1, Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210

Abstract: JAXA is developing a mobile rover to lunar surface exploration or base construction as a follow-on KAGUYA. Because the lunar surface is covered by regolith, implying an irregular and rough terrain, the rover has difficulty in mobility. Therefore a new low-pressure wheel is recommended for high mobility performance and low power consumption. A low-pressure wheel can change its contact shape and pressure distribution to account for terrain. In this paper, the procedure for the evaluation of drawbar pull calculated by shear stress on the deformable terrain is presented. This procedure is valuable for analyzing the interaction between a low-pressure wheel and the deformable terrain.

Key Words: Lunar Exploration Rover, Low-Pressure Wheel, Normal Stress Measurement, Drawbar Pull.

1. 緒言

「かぐや」に続く月探査として、月面探査に向けた月着陸探査の検討が進められている[1]。月面上はレゴリスと呼ばれる軟弱地盤で覆われていることが良く知られている。これに加えて将来の拠点構築ミッションでは、極域やクレータ内域等が探査対象であり、こうした場合は急勾配の傾斜面や切り立った崖など比較的剛性の高い不整地面を走行しなければならない可能性も高い。探査ローバはこうした環境下でミッションを確実に達成するために、不整地形形状に合わせて接地面積を拡大し、進行方向への推進力となる路面との摩擦力を確保する走行系を備える必要がある[2]。図1に月面探査ローバの想像図を示す。

月面上は高真空、放射線、日照・日陰時の温度差が大きい、といった極限環境であり、確実な走行を実現する走行機構の検討が進められている[3]。月面上の不整地に代表されるような軟弱地盤に対して車輪の走行性能評価を行うためには、その特性を把握することが必要であり、車輪のモデル化や軟弱地盤上での検討が進められている[4]。低圧車輪では弾性ばねを転動中心から車輪の半径方向に一様に配置した弾性車輪の原理的試作車輪において検討がある[5]。この車輪は転動時の回転トルク伝達特性が低いことや、月面上の1/6 [G]重力環境では接地面圧力が小さくなり、路面への力伝達に伴う非線形な大変形特性を有することが課題である。また、微小重力環境を考慮した接地面圧力の計測や、その特性を試験・評価する必要がある。

著者等は月面探査ローバの低圧車輪における性能評価を行うことを目的として、低圧車輪の特性計測技術の開発とモデル化手法の確立を行っている。低圧車輪の例として、これまでに原理的試作車輪の回転トルク伝達特性を改善するように、車輪中央に剛体リムを置き、ここから半径方向に弾性ばねを配置した弾性車輪を試作した。また、この車輪が軟弱地盤上を走行する際の接地面圧計測装置を開発し、剛性車輪と低圧車輪の2つの車輪について実際に計測を行い、テラメカニクスから軟弱地盤上における低圧車輪の走行モデルを構築し、比較検討を行った[6]。また動力学解析ツールの開発を行い、非線形特性を有する低圧車輪の走行性能評価を行っている[7]。これに続き本研究では車輪が軟弱地盤上を走行する際の垂直応力の解析・計測結果からせん断応力を算出し、駆動力の評価を行った。本稿ではこの評価結果について報告する。

2. 車輪試験機の概要

2-1 車輪支持台および車輪駆動装置

試作車輪を用いた走行試験の実験図を以下の図2に示す。試験機は試作車輪駆動用のアクチュエータ、車輪自重キャンセル機構、走行方向と垂直に車輪に負荷を与える荷重機構、および剛性地盤で構成される。車輪駆動用アクチュエータは外部にモータドライバとコントローラを持ち、ロータリエンコーダの回転情報により任意の速度に制御可能である。また、実験機には剛性地盤上に圧力センサが取り付けられており、その上を車輪が走行する際に接地面圧力とその圧力分布を求めることが可能である。車輪の特性パラメータと荷重、および走行条件は解析時と同一値で構成されている。

2-2 試作車輪

本試験機で車輪特性を検出する試作車輪の主仕様を表1に示す。この試作車輪は金属低圧走行機構の例として作成した。車輪は主に3つの部分から構成される。中央に剛体リムを置き、ここから半径方向に弾性板ばねを等間隔に配置する。板

図1 月面探査ローバの想像図

図2 車輪実験設備

表 1 試作車輪の主仕様

Characteristics	Value	Unit
Overall Diameter	370.0	mm
Overall Width	80.0	mm
Rim Diameter	280.0	mm
Rim Width	65.0	mm
Spring Constant	0.726	N/mm
Wheel Mass	1.216	kg

図 3 面圧計測車輪の概要

ばねは車輪横軸方向にそれぞれ 2 つ固定され、車輪横ばね剛性やステアリング特性を向上させている。

2-3 面圧計測装置

これまでの研究では接地面圧計測のために、剛性地盤上に圧力センサを貼り付ける必要があり、車輪はこの上を走行する基礎的試験に留まっていた。そこで軟弱地盤上における接地面圧計測のために、センサを車輪表面に貼り付けることとした。次に、低圧車輪の接地面圧を計測するための増幅回路を構成し、電源、無線モジュールを車輪に搭載可能な設計として、新規に開発を行った。

面圧計測車輪は走行路面との車輪接地面の間にセンサを持ち、前節で検討を行った面圧計測装置を搭載する。面圧計測装置は転動中心における慣性モーメントを一定とするために、車輪転動軸中心付近に設置する。図 3 に面圧計測装置と面圧計測車輪の外観を示す。面圧計測車輪は低圧部の走行性能評価のため、車輪径の等しい低圧車輪と剛性車輪で構成する。センサの設置位置は面圧計測装置の AD 変換 I/F から 8 点とし、低圧車輪の表面ベルトにおける板ばね直下とそれ以外の隙間直下を考慮して、車輪円周方向に 2 行、幅方向に 4 列とした。サンプリング周波数はこれまでの計測実績と同じ 20Hz とした。

3. テラメカニクスに基づく走行力学

3-1 座標系

低圧車輪における車輪座標系を図 4 に示す。車輪の進行方向を x 、車輪転動軸を y 、鉛直上向きを z とする。車輪の転動速度を ω 、車輪の並進方向の移動速度を v_x とする[8]。

3-2 低圧車輪の有効半径

剛性車輪が軟弱地盤上を走行する際は、車輪の半径は転動や垂直荷重によって変化しない。このとき車輪の転動に伴う有効半径は一定であるが、軟弱地盤上を低圧車輪が走行する場合は、接地面からの応力で車輪が変形するため、有効半径を一定とすることが出来ない。車輪と地盤の両方が変形するため、問題は複雑になる。

車輪は入射角 θ_f と離脱角 θ_r の間でほぼ線形な形状を取り、その他の部分では円弧形状となる。低圧車輪が剛性面上を走行する際、車輪の有効半径 $R_{(\theta)}$ は以下のように表される[9]。ここで R_u は車輪変形前の半径、 ζ 、 β は車輪の剛性、減衰率、車輪形状、車輪転動速度に依存する係数であり、実験的に得られる。

図 4 軟弱地盤上における低圧車輪の座標系

$$R_{(\theta)} = \begin{cases} R_u - R_u \left(1 - \frac{1 - \delta/R_u}{\cos \theta} \right) & \theta_r < \theta \leq \theta_f \\ R_u - R_u \left(1 - \frac{1 - \delta/R_u}{\cos \theta_f} \right) e^{-\beta(\sqrt{1+\zeta^2} + \zeta)(\theta - \theta_f)} & \theta_f < \theta \leq \pi \\ R_u - R_u \left(1 - \frac{1 - \delta/R_u}{\cos \theta_f} \right) e^{-\beta(\sqrt{1+\zeta^2} + \zeta)(\theta - \theta_r)} & \pi < \theta \leq 2\pi + \theta_r \end{cases} \quad (1)$$

3-3 低圧車輪のすべり率

車輪のすべり率 s は車両の移動に対して車輪が空転する割合であり、車両並進速度 v_x と車輪回転速度 ω を用いて以下のように定義される[10]。

$$s = \begin{cases} \frac{(r\omega - v_x)}{v_x} & (r\omega > v_x : \text{車輪駆動時}) \\ \frac{r\omega}{(r\omega - v_x)} & (r\omega < v_x : \text{車輪制動時}) \end{cases} \quad (2)$$

3-4 低圧車輪の垂直応力とせん断応力

車輪に発生する力は車輪と土壌において生じる応力を車輪接地面で積分することによって計算できる。この車輪接地範囲は入射角と離脱角によって定義される。

軟弱地盤上を車輪が転動すると、図 5 に示すように車輪の接地面における法線方向に垂直応力が生じる。以下の表記においては、垂直応力の最大値を発生する最大応力発生角である θ_m によって車輪前方と後方に分割して考える。また軟弱地盤と低圧車輪は車輪半径が一定となる領域を挟んで 3 つの接地面圧の定式が存在するため、以下のように定義する。

$$\sigma(R_{(\theta)}) = \begin{cases} \sigma_f(R_f) \\ \sigma_r(R_c) \\ \sigma_r(R_r) \end{cases} \quad (3)$$

θ_m の定義方法はいくつかの報告例があるが、最も一般的な以下のものを用いる。

$$\theta_m = (a_0 + a_1 s)(\theta_f - \theta_c) + \theta_c \quad (4)$$

a_0 、 a_1 は定数である。土壌における平板貫入試験の式によ

図 5 軟弱地盤上を走行する低圧車輪の定常状態

図6 垂直応力とせん断応力分布

り垂直応力分布のモデル式は以下になる。

$$\sigma(R_{(\theta)}) = \begin{cases} \sigma_f(R_f) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right) \left[R_{f(\theta)} (\cos \theta - \cos \theta_f)\right]^n \\ \sigma_r(R_r) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right) \left[R_{r(\theta)} \left(\cos \left\{\theta_f - \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} (\theta_f - \theta_m)\right\} - \cos \theta_f\right)\right]^n \\ \sigma_c(R_c) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right) \left[R_{c(\theta)} \left(\cos \left\{\theta_f - \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} (\theta_f - \theta_m)\right\} - \cos \theta_f\right)\right]^n \end{cases} \quad (5)$$

剛性車輪の軟弱地盤上におけるせん断時の応力-変位線曲線は以下の式によって定義される[11]。ここで $\tau_{\max}$ は変位-せん断応力曲線の最大値である。

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= c + \sigma \tan \phi \\ \tau &= \tau_{\max} \left[1 - e^{-j/k}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

j は土壌の変形量 (せん断変位量), k は変形係数で時定数と走行する車輪の形状に依存する。また c, ϕ は土壌固有の値であり、それぞれ土壌粘着力、土壌内部摩擦角と呼ばれる。式 (5) によって垂直応力は算出されているので、車輪座標系における x 方向のせん断応力 $\tau(\theta)$ は以下のように定義される。

$$\tau(\theta) = c + \sigma(\theta) \tan \phi \left[1 - e^{-j(\theta)/k}\right] \quad (7)$$

ここで、 x 方向の土壌変形量 $j(\theta)$ の導出は、すべり速度 $v_j(\theta)$ をもとに計算される。すべり速度は、車輪円周方向速度と車輪並進速度の円周接線方向速度の差として与えられる。

$$v_j(\theta) = r\omega - v \cos \theta = r\omega [1 - (1-s) \cos \theta] \quad (8)$$

上式から土壌変形量 $j(\theta)$ は以下のように表すことが出来る。

$$\begin{aligned} j(\theta) &= \int v_j(\theta) dt = \int_0^\theta r\omega [1 - (1-s) \cos \theta] \frac{1}{\omega} d\theta \\ &= r[\theta_f - \theta - (1-s)(\sin \theta_f - \sin \theta)] \end{aligned} \quad (9)$$

低圧車輪の垂直応力とせん断応力分布を図6に示す。

3-5 低圧車輪の駆動力

前節における垂直応力とせん断応力を用いて、車輪の入射角から離脱角まで積分することにより車輪に生じる駆動力を以下のように算出する。

$$F_x = R(\theta) b \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{\tau(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta\} d\theta \quad (10)$$

低圧車輪の駆動力の算出における幾何的關係を図7に示す。

4. 軟弱地盤上における走行実験

4-1 すべり率の算出

走行実験および解析における実験条件を表2示す。走行時のテレメトリ履歴から剛性、低圧の両車輪ともほとんどすべりを生じていないことが分かる。これは、過去の実験結果とも類似しており、試作車輪の半径が 0.185 [m] と大きいことか

図7 駆動力と垂直抗力の関係

表2 走行実験および理論計算の条件

Characteristics	Value	Unit
Wheel Type	Rigid/Low	-
Velocity	20/50	mm/sec
Load	20	N
Terrain	Regolith Stimulant	-
Slope Angle	0	deg

ら、この車輪では剛性、低圧に限らずすべり率が小さいといえる。

4-2 垂直応力の比較検討

垂直応力の表示に際して、車輪接地面の表面における座標系を定義する。この座標系は車輪表面から鉛直下向き方向に圧力を、また車輪中心から鉛直下向きに横軸の原点をとり、車輪の回転角度を表している。接地面圧力は単位面積あたりの力で表す。低圧車輪では車輪が地盤への沈下に伴って変形をおこすため、この変形後の車輪表面からの垂直応力と定義する。

面圧計測装置を用いて計測を行った結果と、第3章において示した低圧車輪のテラメカニクス走行力学モデルを用いて理論計算を行った結果を図8に示す。接地面圧力の目安として、座標軸の1桁あたりは 10 [kPa] の接地面圧である。これまでに月面上を走行するための最適な接地面圧は 10 [kPa] 以下が望ましい。剛性車輪では、低速域における計測で 10 [kPa] を超過した接地面圧となるものの、それ例外の計測条件では接地面圧が 10 [kPa] 以内に収まる結果となっている。理論計算において、算出に用いた定数の値を表3に示す。

低圧車輪では、入射角、離脱角、最大角の定義から車輪形状が一定となる前方の角度と入射角の間で最大圧力点を持つ。また、車輪径が一定となる領域に関しては、離脱角に近づくに従って接地面圧が減少する領域に含まれる。理論計算では車輪の接地面積とその接地面圧に関して、剛性車輪では面積が狭く面圧は大きくなるのに対して、低圧車輪では接地面積が広く、また面圧は小さくなっていることがわかる。また、すべりを生じていないことから車輪の転動速度が変更となっても沈下量に変化せず、従って接地面圧の圧力分布も速度により変化しない結果となった。

計測では事前に実施した剛性地盤上での基礎計測と比較して、軟弱地盤では接地面積が広く、接地面圧が小さくなることが分かった。また、軟弱地盤上での計測では剛性車輪と比較して低圧車輪の方が、接地面積が広く、接地面圧が小さ

図8 垂直応力の理論値と計測値

表3 理論計算のパラメータ

Characteristics	Value	Unit
a_0	0.4	-
a_l	0.15	-
b	0.08	mm
c_0	0.015	-
k_c	1.37×10^3	N/m^{n+1}
$k_{c\phi}$	8.14×10^5	N/m^{n+2}
n	1.0	-
R_u	0.185	m
s	0.0-1.0	-
W	20	N
ξ	6.75	-
β	0.1175	-

くなることが分かった。これは理論計算と同様に、低圧車輪では車輪自体が変形することにより車輪の沈下を考慮して、垂直応力を生じさせている車輪の垂直荷重を軟弱地盤が広く受け止めることと一致する。また、理論値に比べ計測値の接地面圧は一樣に大きい値となっているが、剛性、低圧とも車輪の入射角と離脱角の間に最大応力角を持ち、その前後でなだらかな分布をとる傾向は一致している。また車輪の転動速度が大きくなると、接地面圧力分布が小さくなる結果となった。これは理論計算の結果とは必ずしも一致しないが、これまでの他計測装置を用いた実験でも確認されており、すべりを生じていなくても速度と接地面圧力が反比例することが現象として予想される。

また解析と計測から得られた車輪のけん引力を図9に示す。剛性車輪ではすべり率が0の場合、地盤の変形量が小さいためせん断応力よりも垂直応力が大きいことが予想される。そのため、せん断応力と垂直応力の水平方向成分を積分して求める駆動力は負となる。しかし低圧車輪では、地盤との接地面には車輪変形により垂直応力の水平成分は0となる。そのためせん断力は小さいながらも方範囲にわたる接地面積により積分され、駆動力はすべり率が0でも正となる。剛性・低圧車輪ともすべり率の増加に伴って駆動力が増加するが、全ての範囲において低圧車輪の駆動力が剛性車輪のそれよりも大きいことが分かる。また、すべり率が小さい条件での計測値を理論値と比較してみると低圧車輪が剛性車輪より

図9 けん引力の理論値と計測値

も大きい駆動力を持つことが分かる。

5. 結言

本研究では、低圧車輪の走行性能の評価とその改善を目指し、軟弱地盤上における垂直応力の計測、および駆動力の評価を行った。その結果以下の成果・知見を得た。今後の課題と合わせて記述する。

- (1) 計測された垂直応力と理論計算値を比較した結果、低圧車輪は剛性車輪と比べて、接地面圧力の最大値が小さく、また広範囲に渡って地盤との垂直応力が生じていることが分かった。
- (2) 計測と解析から得られた垂直応力からせん断応力を算出し、車輪の駆動力を求めた。その結果、低圧車輪は剛性車輪と比べて、全てのすべり率の範囲で駆動力が大きく、剛性車輪よりも高い走行性能を有することが分かった。
- (3) 今後は車輪転動の複数環境（キャンバ角、スリップ角、斜面走行）での計測を行い、低圧車輪の走行性能の評価を引き続き実施すると共に、低圧車輪のコーナリングや制駆動特性といった実運用に即した車輪特性や動的走行性能評価を実施する。

6. 参考文献

- [1] 橋本, 田中, 星野, 大槻: 月着陸探査ミッション SELENE-2, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 2010
- [2] 西田, 星野, 松本: JAXAの月探査技術の研究開発状況, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 2009
- [3] 若林, 佐藤, 松本: クローラ型月面走行系の設計と走行評価, テラメカニクス第26号, 2006
- [4] 吉村, 山川, 渡辺: 砂地走行用タイヤモデルの構築, テラメカニクス第28号, 2008
- [5] 若林, 河野, 西田: 月面低圧走行系の検討, テラメカニクス第29号, 2009
- [6] 成田, 大槻, 若林, 西田: 軟弱地盤上における低圧車輪の走行性能評価, 第19回スペースエンジニアリングコンファレンス, 2011
- [7] 成田, 大槻, 若林, 西田: 非線形特性を有する月探査ローバ用走行機構の検討, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 2010
- [8] 自動車技術会: 自動車技術ハンドブック 基礎・理論編, 自動車技術会, 2004
- [9] Chan, B. J., and Sandu, C., Off-Road Vehicle Mobility and Energy Efficiency Prediction, Proceeding of 9th APISTVS International Conference, 2010
- [10] G. Bekker., Theory of Land Locomotion, The University of Michigan Press, 1956.
- [11] Janosi, Z., and Hanamoto, B., The analytical determination drawbar pull as a function of slip for tracked vehicle, Proceeding of 1st ISTVS International Conference, 1961.