

車輪上移動型摩擦係数測定装置の開発

鉄道力学研究部 車両力学

副主任研究員 飯田浩平

1. はじめに

車輪／レール間の摩擦係数を把握することは、車両の走行安全性を確保する上で重要である。摩擦係数が小さい場合には滑走によりブレーキ距離が延伸するおそれが増す一方、摩擦係数が大きい場合には急曲線において乗り上がり脱線が起きる原因の一つになる。レール表面の摩擦係数は「レールトリボメータ」¹⁾を始め、複数の測定器によって従来から測定されてきており、また、車輪表面の摩擦係数については、車輪摩擦係数測定装置「 μ テスタ」シリーズ²⁾を用いて測定している。これらの装置はどれも完全すべり状態での動摩擦係数を測定する装置である。

一方、微小すべり条件下での接線力係数（以降、「等価摩擦係数」と記す）を測定する装置として「クリープテスタ」³⁾がある。この装置は実レールに直径 60mm の模擬車輪を押し付け、測定中に連続的にすべり率・接線力を変化させることで、すべりがほとんどない状態から大きくすべる状態までの幅広いすべり率における接線力特性を測定することができる。

クリープテスタは実物レールを使いつつ、車輪／レール間のクリープ力特性を実験室レベルで精緻に測定することができる。 μ テスタは現場での測定を重視し、車輪フランジや踏面の摩擦係数を簡便に測定することができるが、車輪表面上の一点ですべり回転するため、測定値としての妥当性を確保するには多点（5～6点）測定する必要がある。また、車輪表面付着物の影響が出にくいという特性があった。

上記の事情を踏まえ、現場での測定を重視しつつ、車輪踏面上を移動しながら前後方向の等価摩擦係数を測定する、車輪上移動型摩擦係数測定装置（以降、「移動式 μ テスタ」と記す）を開発した⁴⁾。本装置は在姿状態の車輪（両抱きの制輪子をもつ車輪や小径車輪を除く）の等価摩擦係数を一定のすべり率で測定することができる。本報告では装置の構成と測定結果の一例を紹介する。

2. 移動式 μ テスタの構造と測定原理

2.1 概要

移動式 μ テスタを実物の輪軸に取り付けた様子を図1に示す。最近の旅客車両で見られる、片押し踏面ブレーキの台車では車輪の台車端側半分の周辺がアクセスしやすく空いており、その部分に本装置を取り付けることができる。本装置は、車輪中立点付近を車輪円周方向に一定すべり率をもって小型車輪（測定ローラ）を転がしながら等価摩擦係数を測定する。この測定方式により、微小すべり条件下での車輪の等価摩擦係数を測定できるとともに、一回の測定で比較的安定した測定値を得ることができる。



図1 移動式 μ テスタ

2.2 構造

移動式 μ テスタの概略図を図2に示す。本装置は大きく分けて固定治具部と本体測定部からなる。フレキシブルラックが車輪フランジ外縁（外周）に沿うように固定治具部により本体測定部を取り付ける。本体測定部には、車輪フランジ外縁に固定されたフレキシブルラックとピニオンにより測定ユニットが車輪円周に沿って走行するように取り付けられている。測定ユニットにはパルスモータとタイミングベルトにより駆動される測定ローラが取り付けられており、測定ユニットの移動速度と測定ローラの周速差で微小すべり条件を実現させている。なお、測定ローラは直径20mmで μ テスタのものと同形状である。移動式 μ テスタは μ テスタと同様、車輪円周方向の測定位置が変わる際の重力の影響による測定ローラ法線力の変化をなくすために測定部の自重キャンセル機構を有している。そして、法線力はばねによる押付力で与え、その値は測定部上部に配したロードセルで測定している。また、測定ローラを装架した台車は上部のピンを支点として揺動可能なように取り付けられ、接線力測定用ロードセルにばねで押し付けて固定している。これらの機構により、測定値に対する外乱（摩擦抵抗）要因は、法線力に対してはリニアガイドの摩擦力のみ、接線力に対してはピンを支持している玉軸受の転がり摩擦力のみである。

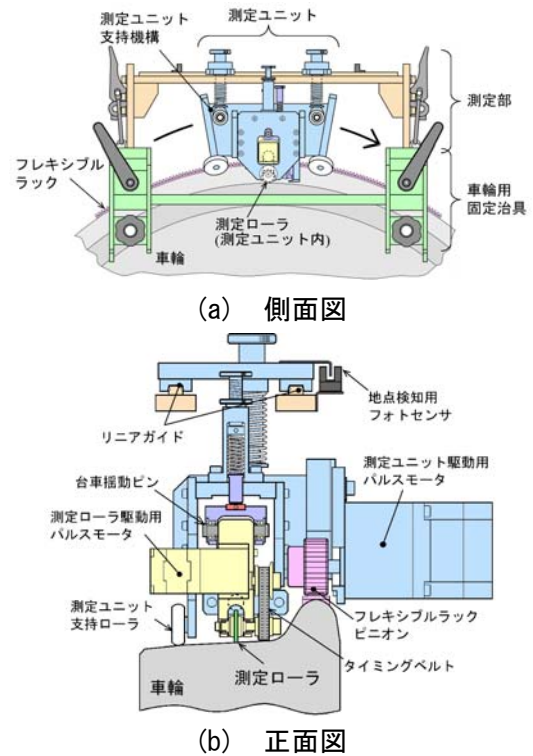


図2 移動式 μ テスタの概略図

上部のピンを支点として揺動可能なように取り付けられ、接線力測定用ロードセルにばねで押し付けて固定している。これらの機構により、測定値に対する外乱（摩擦抵抗）要因は、法線力に対してはリニアガイドの摩擦力のみ、接線力に対してはピンを支持している玉軸受の転がり摩擦力のみである。

2.3 測定原理

移動式 μ テスタの測定原理を図3に示す。本装置の特徴は微小すべりの与え方と摩擦力（接線力）の測定法にある。微小すべりについては以下のように与える。

2つのパルスモータによって測定ユニットのフレキシブルラックのかみ合いピッチ円上移動速度 V (mm/sec)と測定ローラの回転速度 ω (rad/sec)を与える。測定点における車輪面物質速度 V_m と測定ローラ物質速度 V_r はそれぞれ $V_m = (R_1/R_2)V$ 、 $V_r = r\omega$ となる。そして測定時のすべり率 S は、 $S = 2(V_r - V_m)/(V_r + V_m)$ で与えられる。一方、摩擦力（接線力） F_f については、この原理より、 $F_f = (L_1/L_2)F_m$ となり、等価摩擦係数 μ は法線力用ロードセルで測定する法線力 W から $\mu = F_f/W$ となる。本装置では測定ユニットの加速中と減速中を除いた定常状態時の出力を平均処理し等価摩擦係数測定結果としている。なお、加速中と減速中のすべり率は変化するが、定常状態時ではすべり率一定となる。本装置の主な諸元を表1に示す。表1中、大きさと重量は制御装置を除いた本体の諸元である。

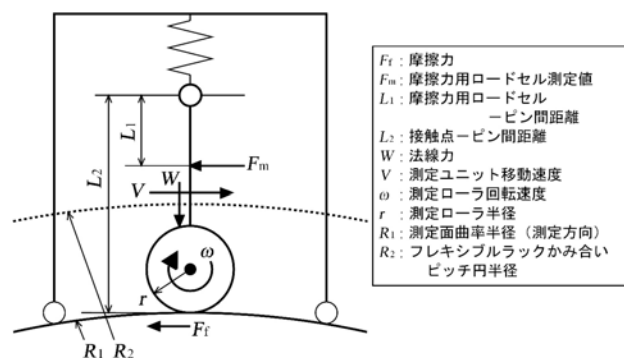


図3 移動式 μ テスタの測定原理図

3. 移動式 μ テスタによる等価摩擦係数測定実験

3.1 測定時の時系列波形

鉄道総研所有の試験車両の車輪を測定した。試験車両は輪重が約 40kN で、測定した日の 4 日前まで所内の走行試験に使用され、試験後は車庫内に留置されていたものである。車輪半径は 426mm、車輪踏面形状は修正円弧踏面から走行試験によりわずかに摩耗した形状でフランジ高さは 27.2mm であった。この車輪に対して、法線力 14N、すべり率を約 +5% (5.082%) として本装置を用いて等価摩擦係数を求めた際の時系列波形を図 4 に示す。なお、すべり率に関しては測定ローラが測定ユニットよりも速い空転すべり側を正としている。動作開始と同時に記録を開始しており、最初の約 0.7 秒は加速中のデータである。図 4 より、動作開始時に摩擦力が負の値となっているが、これは初速度が測定ローラの方が測定ユニットよりも遅く、測定ローラが滑走すべり側となっているためである。また摩擦力が負から正に移行する際に摩擦力 0 の状態が一定時間継続しているが、これは測定ローラを駆動しているタイミングベルトのバックラッシュやベルト自体の張り具合の影響であると考えられる。また時刻 3 秒後以降急激に等価摩擦係数が大きくなっているように見えるが、これは測定ユニットが停止する直前に部品の干渉により押付力が抜けてしまったことによる測定エラーである。本装置による測定では、一定すべり率の定常状態における等価摩擦係数に注目するため、図 4 中に示した範囲でデータを平均し等価摩擦係数測定値としている。

3.2 試験車両の車輪等価摩擦係数測定

前節と同じ車輪の等価摩擦係数を、すべり率を変えて測定した結果を図 5 に示す。

図 5 より、すべり率が大きくなるに従い等価摩擦係数も大きくなるが、すべり率約 5% ではほぼ一定値に達する様子がわかる。なお、この測定では車輪踏面上の同じ位置ですべり率を小さい方から順に大きくしながら測定を繰り返した。図 5 に示したように、測定回数は合計 6 回で、目視では車輪表面の変化は見られなかったが、すべり率 5% を超えた領域でもわずかに摩擦係数が大きくなっているのは、同一箇所を測定することによる、

表 1 移動式 μ テスタの主な諸元

大きさ	620mm×330mm×310mm
重量	約 12.5kg
測定ユニットの設定速度	10~100mm/sec
測定ローラ	直径:20mm 断面形状:半径 10mm 材質:SK4、高周波焼入
測定ローラの設定周速	10~100mm/sec
測定長	約 80mm
設定可能法線力	約 4~20N
設定すべり率	上記設定速度差による
測定可能接線力	0~20N

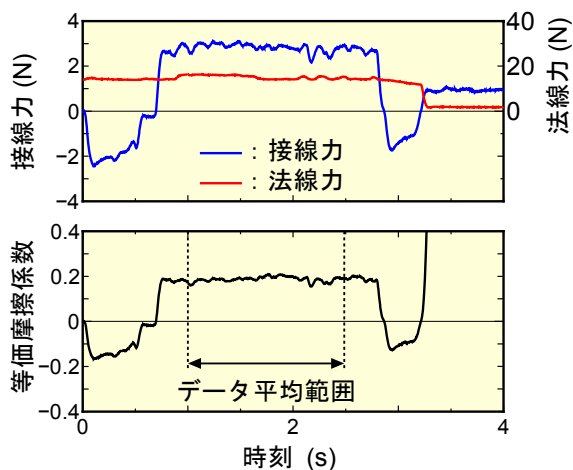


図 4 移動式 μ テスタによる測定の時系列波形

また時刻 3 秒後以降急激に等価摩擦係数が大きくなっているように見えるが、これは測定ユニットが停止する直前に部品の干渉により押付力が抜けてしまったことによる測定エラーである。本装置による測定では、一定すべり率の定常状態における等価摩擦係数に注目するため、図 4 中に示した範囲でデータを平均し等価摩擦係数測定値としている。

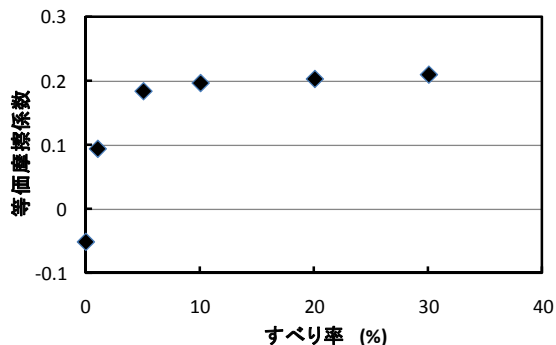


図 5 各すべり率における等価摩擦係数測定結果

表面性状の変化が影響していると考えられる。なお、すべり率がほぼ 0%の時に摩擦係数が負の値となっているが、これは駆動開始時の滑走すべりやタイミングベルトのバックラッシュ等の影響で測定データが安定していない影響であると考えられ、この領域の測定精度向上は今後の課題である。

3.3 表面付着物の等価摩擦係数に及ぼす影響

表面付着物の等価摩擦係数に及ぼす影響を調べることを目的として、周囲環境や測定面をほぼ一定に保つために今回は実験室内で検定用のレール（長さ約 1m）に本装置を設置して、塗油していない条件と、塗油した条件で測定を行った。塗油に使用した油は車塗油装置で使用されている RCS-T である。塗油量は 0.1、0.5、1.0 mg/cm² の 3 条件とし、すべり率は約 5%、10% の 2 条件とした。それぞれ塗油前に一度測定し（塗油していない条件）、その後に塗油を行い塗油条件での測定を行った。測定時の室温は 22～24℃、相対湿度は 44～60%であった。測定結果を図 6 に示す。塗油量 0mg/cm² は塗油していない条件である。なお、それぞれの塗油条件について複数回測定を行っている。図 6 より、塗油した場合には明らかに塗油しない場合よりも、等価摩擦係数が小さくなっていることがわかり、0.1mg/cm² の量で塗油されていれば本装置で等価摩擦係数の低下を捉えられることがわかる。さらに、0.1～1.0mg/cm² の条件でいずれも約 0.15 とその値に大きな違いは見られなかったことから、0.1mg/cm² の量で塗油されていれば潤滑剤の効果が十分に現れているといえる。なお、塗油していない条件で等価摩擦係数測定値がばらついてはいるが、塗油していない条件における等価摩擦係数のばらつきの原因を明らかにすることは今後の課題である。

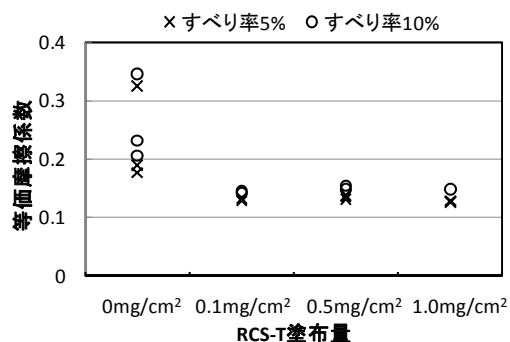


図 6 潤滑剤塗布量の影響

4. まとめ

在姿状態の車輪踏面上を微小な一定すべり率で移動しながら等価摩擦係数を測定することができる車輪上移動型摩擦係数測定装置「移動式μテスト」を開発し、その測定原理や機構について示した。また、すべり率を変えながら測定することで等価摩擦係数の飽和特性（クリープ力特性）を得られることも示した。さらに、本装置により比較的平滑な金属表面の塗油量の影響を調査した結果、塗油量 0.1mg/cm² から 1.0mg/cm² では同等の等価摩擦係数になることを示した。このように本装置では、微小な車輪表面の油付着に対応した等価摩擦係数を適確に測定することができる。

今後の課題としては、さらにすべり率が小さい領域でも安定したデータを得られるようにする測定手順の確定やシステムの改善が挙げられ、並行してデータの蓄積を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 大野薫, 伴巧: レールトリボメータの改良と車輪・レール間の粘着状態の評価, 鉄道技術研究所速報, 1987.3.
- 2) 前橋栄一, 飯田浩平, 西山幸夫: 車輪およびレールの摩擦係数測定装置μテストの開発, 鉄道総研報告, 20 卷 11 号, pp.23-28, 2006.11.
- 3) 土井久代, 宮本岳史, 西山幸夫, 大江晋太郎, 蒲池秀矢: 車輪/レール間のクリープ力特性把握のための小型実験装置の開発, 日本機械学会第 17 回交通・物流部門大会講演論文集, pp.207-210, 2008.12.
- 4) 飯田浩平, 西山幸夫, 前橋栄一: 摩擦評価量測定装置及び方法, 特第 4377805 号, 2009.12.