

3712 車輪転がり摩擦係数測定装置の開発

正 [機] ○飯田 浩平 (鉄道総研) 正 [機] 前橋 栄一 (鉄道総研) 西山 幸夫 (鉄道総研)

正 [機] 葛田 理仁 (鉄道総研) 田中 雄大 (テス)

Development of Instrument for Measuring Coefficient of Rolling Friction of Wheels

Kohei IIDA, Railway Technical Research Institute. 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Eiichi MAEBASHI, Railway Technical Research Institute

Yukio NISHIYAMA, Railway Technical Research Institute

Masahito KUZUTA, Railway Technical Research Institute

Yusuke TANAKA, TESS Co., Ltd.

We have developed a instrument for measuring coefficient of friction on wheels, moving on wheel tread with small creepage, which is called "Mobile μ -tester." The instrument is constructed with support system and measuring unit, which is driven by flexible rack, pinion and a pulse motor. The measuring unit carries a measuring roller, which is driven by timing belt and pulse motor. Controlling above two motors then it is able to obtain small creepage condition. Meanwhile, coefficient of friction is calculated from normal force, which is supplied by a spring, and friction force measured by load cells. At first, we have measured coefficient of friction on real wheels under non-dismantling condition. Then, we have obtained rough characteristics of creep force. Finally, we have captured the effect of lubricant on coefficient of friction.

Keywords: railway, measurement, rolling contact, coefficient of friction, wheel/rail interface, tribology, lubrication

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。摩擦係数が低い場合には滑走によるブレーキ距離が延伸する一方、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、平成12年に発生した列車脱線衝突事故の調査²⁾を受け開発した車輪動摩擦係数測定装置「 μ テスト³⁾⁴⁾」や、測定方法をより簡便にした「 μ テストライト⁴⁾」を用いて測定が行われるようになってきた。

「レールトリボメータ」は下面にベアリング球を配した鋼製ブロックをレール頭頂面上に設置し、それをレール長手方向に引っ張る際の引張力（接線力）と鋼製ブロックの自重（法線力）との比から摩擦係数を求める装置である。また、「 μ テスト」および「 μ テストライト」は接触面を球面形状としたローラをばね力で車輪表面に押し付け、そのローラのボス部に巻かれたひも（ケーブル）を引っ張り、ローラを車輪表面上の一点をすべり回転させたときのトルク（接点換算接線力）と押付力（法線力）との比から摩擦係数を求める装置である。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摩擦係数（接線力係数）を測定する装置として「クリープテスト⁵⁾」がある。この装置は直径60mmの球形の接触面をもつ測定車輪をばね力でレール頭頂面に押し付け、測定車輪の両側に取り付けられた巻胴にばねと直列につけられたワイヤーを巻

き付けることにより、測定中に連続的にすべり率・接線力を変化させつつ接線力を測定し、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（クリープ力）を測定することができる。

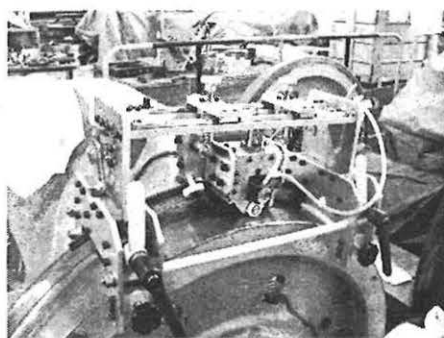
「クリープテスト」は実物レールを使いつつ、車輪／レール間のクリープ特性を実験室レベルで精緻に測定することができる。「 μ テスト」は現場での測定を重視し、車輪表面の摩擦係数を簡便に測定することができるが、車輪表面上の一点をすべり回転するため、測定値としての妥当性を確保するには多点（5～6点）測定する必要がある。また、車輪表面付着物の影響が出にくいという特性があった。

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摩擦係数を測定する、車輪転がり摩擦係数測定装置（「移動式 μ テスト」と呼ぶ）を開発した⁶⁾。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。

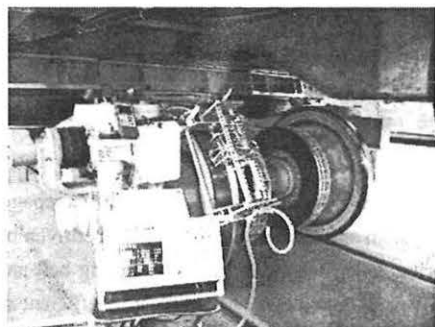
2. 「移動式 μ テスト」の構造と測定原理

2.1 基本動作

「移動式 μ テスト」を実物の輪軸に取り付けた様子を図1に示す。図1(a)が装置本体を見やすくするために輪軸単体に取り付けた様子で、図1(b)が鉄道総研所内にある試験車両の輪軸に取り付けた様子である。図1(b)の様に、最近の旅客車両で良く見られる、片押しの踏面ブレーキの台車は車輪の約半分が露出しており、その部分に本装置を取り付けることができる。本装置では、車輪中



(a) Mobile μ -tester on wheelset



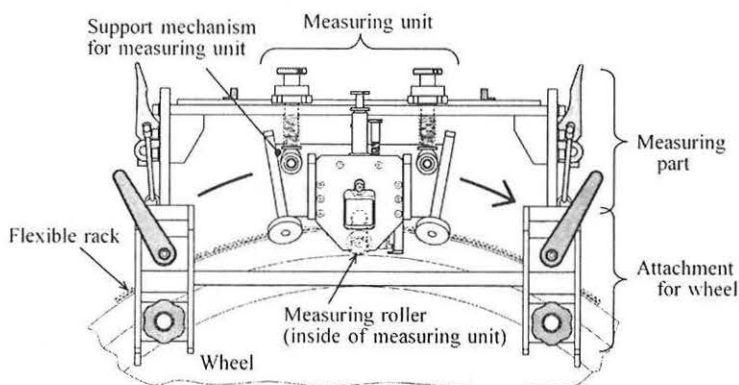
(b) Main system and controller at real-wheelset

Fig. 1 Mobile μ -tester on wheelset

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摩擦係数を測定することができるとともに、一回の測定で妥当性のある測定値を得ることができる。

2.2 構造

「移動式 μ テスト」の概略図を図2に示す。本装置は大きく分けて取付用治具部と本体測定部からなり、本体測定部には、測定ユニットが車輪フランジ頂点に固定されたフレキシブルラックとピニオンにより車輪円周方向に移動可能に取り付けられている。なお、フレキシブルラックは取付用治具部により固定されるため、車輪フランジ部に何らかの加工をする必要はない。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（直径20mm、「 μ テスト」の測定ローラと同形状）が取り付けられており、測定ユニットの移動速度



(a) Side view

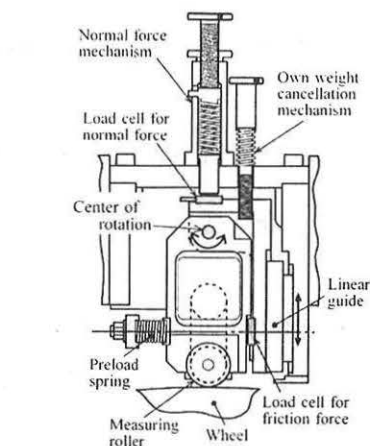


Fig.3 Schematic drawing of measuring mechanism

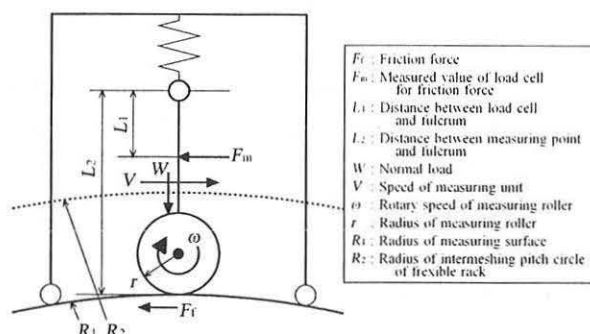
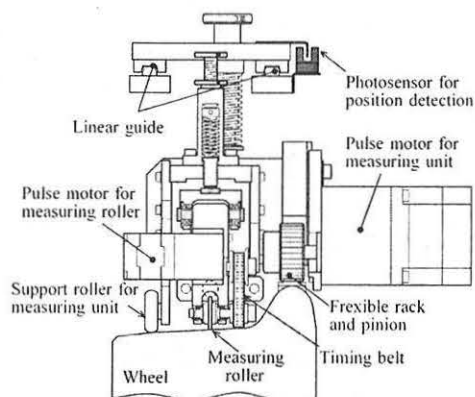


Fig.4 Fundamental mechanism of Mobile μ -tester

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。測定部の概略図を図3に示す。「移動式 μ テスト」は「 μ テスト」と同様、車輪円周方向の比較的広い範囲に設置することができるため、測定部自重の法線力への影響をなくす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、その大きさは測定部上部に設け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。



(b) Front view

Fig.2 Schematic drawing of Mobile μ -tester

2.3 測定原理

「移動式 μ テスタ」の測定原理を図4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つのハ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 は次式で求まる。

$$V_m = \frac{R_1}{R_2} V \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$V_r = r\omega \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここでフレキシブルラックのかみ合いピッチ円半径 R_2 は測定面半径（車輪半径） R_1 とフランジ高さ（Miniprof等で測定）およびフレキシブルラックの底面からかみ合いピッチ線までの高さの和で求めることができる。そして測定時のすべり率 S は次式で求まる。

$$S = \frac{2(V_r - V_m)}{V_r + V_m} \quad \dots\dots\dots(3)$$

一方、摩擦力（接線力） F_f については、この原理より、接線力測定用ロードセルによる測定値 F_m 、支持点からロードセルまでの高さ L_1 および支持点から測定点までの高さ L_2 を用いて次式で求まる。

$$F_f = \frac{L_1}{L_2} F_m \quad \dots\dots\dots(4)$$

摩擦係数 μ は式(4)で求めた F_f と法線力用ロードセルで測定する法線力 W から

$$\mu = \frac{F_f}{W} \quad \dots\dots\dots(5)$$

となり、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測定値としている。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。なお、すべり率に関しては(3)式で計算される値であり、一方の物質速度が零の場合には、すべり率は200%と計算される。

3. 移動式 μ テスタによる摩擦係数測定実験

3.1 測定時の時系列波形

図1に示した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

Table 1 Specification of Mobile μ -tester

Size	620mm×330mm×310mm
Weight	about 12.5kg
Speed of measuring unit	10~100mm/sec
Measuring roller	Diameter:20mm Profile:10mm-radius arc Material:SK4 with induction hardening
Peripheral speed of measuring roller	10~100mm/sec
Measuring length	about 80mm
Setting of normal load	about 4~20N
Setting of creepage	0~200%
Friction force	0~20N

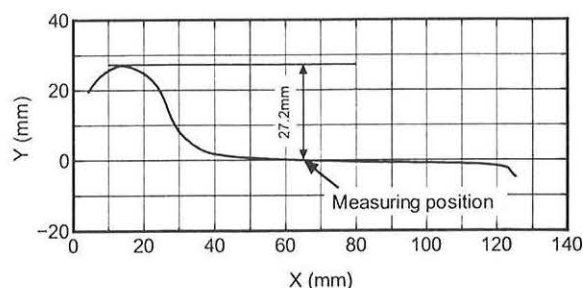


Fig. 5 Profile of test wheel

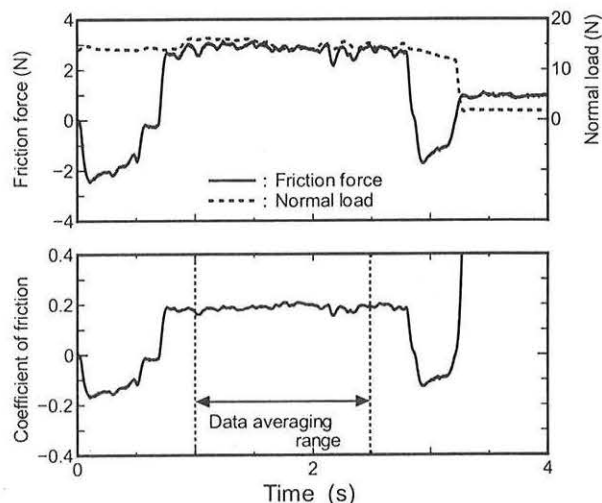


Fig. 6 Time series data obtained by Mobile μ -tester

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り、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（図5）でフランジ高さは27.2mmであった。この車輪に対して、押し付け荷重14N、すべり率を約+5%（5.082%）として本装置を用いて摩擦係数を求めた際の時系列波形を図6に示す。なお、すべり率に関しては測定ローラの速度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6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”の影響であると考えられる。また時刻3秒後以降急激に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摩擦係数に注目するため、図6中に示した範囲でデータを平均し測定値としている。

3.2 試験車両の車輪摩擦係数測定

前節と同じ車輪を、すべり率を変えて摩擦係数を測定した結果を図7に示す。

図7より、すべり率が大きくなるに従い摩擦係数も大きくなり、すべり率約5%では既にほぼ飽和値に達して

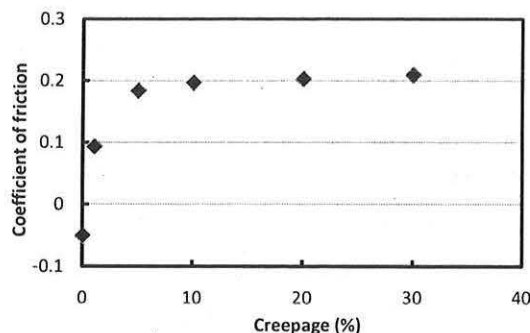


Fig. 7 Coefficient of friction obtained by Mobile μ -tester for various creepage

いる様子がわかる。なお、今回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 7 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、表面性状の変化が影響していると考えられる。またすべり率がほぼ 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 表面付着物の摩擦係数に及ぼす影響

表面付着物の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、塗油をした条件で測定を行った。塗油に使用した油は車上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/cm^2 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）、その後塗油を行い塗油条件での測定をおこなった。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 8 に示す。塗油量 0 mg/cm^2 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 8 より、塗油した場合には明らかに塗油しない場合よりも摩擦係数が小さくなっていることがわかり、0.1 mg/cm^2 の量で塗油されていれば本装置で油の影響をとらえられることがわかる。さらに、0.1~1.0 mg/cm^2 の条件でいずれも約 0.15 とその値に大きな違

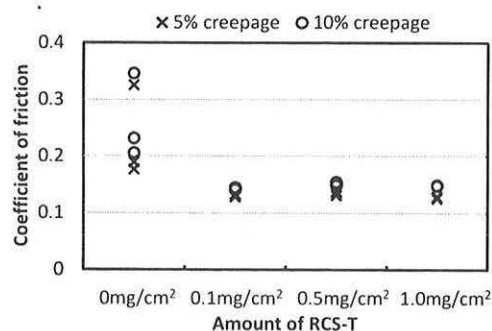


Fig. 8 Effect of lubrication on friction

いは見られなかったことから、0.1 mg/cm^2 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摩擦係数測定値がばらついているが、各塗油条件の測定の直前に塗油していない条件を測定し、それらのデータを併せて表示しているため、各回の検定レールの研磨・洗浄状態が一樣でないことが原因として考えられる。塗油していない条件における摩擦係数のばらつきの原因を明らかにすることも今後の課題である。

4. まとめ

在姿状態の車輪踏面上を一定すべり率で移動しながら摩擦係数を測定し、微小すべり条件下での摩擦係数や油脂等の車輪表面付着物が摩擦係数に及ぼす影響を調べることができる車輪転がり摩擦係数測定装置「移動式 μ テスタ」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簡易的な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、潤滑条件での測定から 0.1 mg/cm^2 の量で塗油されていれば本装置で油の影響をとらえることができ、1.0 mg/cm^2 と同等の摩擦係数が得られることを示した。

今後の課題としては、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) 運輸省鉄道事故検討会: 帝都高速度交通営団中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書, 2002.3.
- 3) 前橋栄一, 飯田浩平, 西山幸夫, 石田弘明: 車輪動摩擦係数測定装置「 μ テスタ」の開発, 日本機械学会第 12 回交通・物流部門大会講演論文集, pp.325-326, 2003.12.
- 4) 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 テスタの開発, 鉄道総研報告, 20 巻 11 号, pp.23-28, 2006.11.
- 5) 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.
- 6) 飯田浩平, 前橋栄一, 西山幸夫: 摩擦評価量測定装置及び方法, 特開 2006-153610, 2006.6.