

車輪／レール間クリープ力試験装置 「クリープテスタ」の開発

土井 久代* 宮本 岳史* 西山 幸夫**
大江 晋太郎*** 蒲地 秀矢#

New Experimental Device to Investigate Creep Force between Wheel and Rail

Hisayo DOI Takefumi MIYAMOTO Yukio NISHIYAMA
Shintaro OHE Hideya KAMACHI

The authors have produced a new experimental device to investigate creep forces between wheel and rail. The device as termed “Creep Tester” is applicable to existing rails, and the wheel of the Creep Tester is capable of rolling on the existing rail while altering longitudinal creepage generated by a mechanism specific to the device. The Creep Tester is also equipped with a mechanism to set some yaw angles of the wheel to induce lateral creepage. In addition to some other features: i.e. a short measuring time, setting of some range of normal force, the device is advantageous to investigate what parameters affect on the creep force characteristics.

キーワード：クリープ力，接線力，すべり率，試験装置，転がり接触，摩擦係数

1. はじめに

鉄道車両の走行には、車両を前進させるための駆動力や走行を停止するための制動力が必要であり、これらを車輪とレールの間で伝達する役割を担っているのがクリープ力と呼ばれる接線力である。車輪がレール上を転がる際のわずかなすべりによって発生するクリープ力はまた、車両の不安定な振動である蛇行動や、振動乗り心地、曲線通過性能、車輪フランジの乗り上がり脱線などに大きな影響を及ぼす。例えば、曲線通過中の車両の台車前位軸では、クリープ力の特にレール長手成分（縦クリープ力）が、内外軌で向きが異なることとその大きさが車両の曲線通過性能に効いてくる。枕木方向成分（横クリープ力）は、その方向と大きさによっては車輪を脱線させる方向に作用する。以上のように、クリープ力は鉄道車両の運動特性に非常に大きく関わってくる。したがって、鉄道車両の運動を把握するためには、車輪とレールの間で作用するクリープ力の特性をよりよく知ることが重要であり、どのような因子がクリープ力の特性に影響するのかを認識する必要がある。故に、クリープ力の研究はこれまでも理論または実験の両側面から、多くの研究がなされてきている^{1), 2)}。

転がり接触によって生じるクリープ力の実験的研究は、回転試験機を用いた研究が最も一般的である。簡易なものでは、車輪とレールを円盤状の輪で模した2円筒の転がり接触試験機、大がかりなものでは、実物の車輪（または1対の車輪を有する輪軸）と実物のレールの断面形状をもった軌条輪から構成される回転試験機などを用いた実験がある。回転試験機では、クリープ力を特徴づける接触する2つの試験輪の間のすべりを比較的容易に設定・制御できる点が利点となる。しかしながら、回転試験機を用いた実験は実験室内で行われるものであり、実際のレールの表面状態（例えば、表面粗さや油の付着状況など）とは異なる。また、2つの試験輪は1回転毎に同一の箇所接触するために、摩擦や摩耗によって時々刻々と接触状態が変化してしまう。レール上を走行する実物の車両を用いる場合もあるが、接触面の状態、介在物、実験環境などの状態を制御することが難しく、車輪とレールの間で生じるすべりを微小なものから大きな領域まで制御・設定することが困難である。

そこで、模型の車輪（ここではこれを「測定車輪」と呼ぶ）を実物のレール上で転がしながら接触面に作用する接線力を変化させて、すべり率とクリープ力の関係、すなわち、クリープ力の飽和特性を調べることのできる試験装置「クリープテスタ³⁾」を開発した。この装置を用いると、車輪／レール間のすべりを微小な領域から大きな領域まで1回の測定動作で変化させることができる。そして、クリープ力の特性に関わってくるさまざまな条

* 鉄道力学研究部（車両力学）
** 研究開発推進室（設計・試作）
*** 車両制御技術研究部（駆動制御）
ジェイアール総研情報システム

特集：鉄道力学

件下における試験を簡便に行うことが可能である。なお、回転試験機に対するクリープテストの短所としては、高速度の試験には対応できないことが挙げられる。

本報告では、この装置の仕組みと測定原理、得られたクリープ力特性について述べる。

2. 「クリープテスト」の機構と測定原理

開発したクリープ力試験装置（以下、クリープテストと記す）を、1mの長さで切断した実物の50Nレール上に取り付けた様子を図1に示す。クリープテストは側面の幅が1m弱、総重量が26kgfの可搬式の試験装置である（表1）。

クリープ力または接線力は、一般に、車輪とレール間に生じる相対的なすべりの大きさを表すすべり率で特徴づけることができると考えられている（ここで接線力とは車輪とレールの接触面上に作用する力であり、すべり率が小さい場合、特にクリープ力と呼ぶことが多い）。また、すべり率の増加にともない、接線力 F と法線力 N の比 F/N は、動摩擦係数 μ に飽和していく。したがって、クリープテストによる実験で設定・測定する重要なパラメータは、接線力と法線力、ならびに、すべり率（より正確には、縦すべり率 s_x ）を算出するために必要な車輪のレール長手方向の移動速度 V_c （これを台車速度と呼ぶ）と接触面における車輪の周速度 V_w （これを車輪速度と呼ぶ）である。クリープテストでは接線力を、そのレール長手方向成分である縦接線力 F_x と枕木方向成分の横接線力 F_y に分けて測定する。これらの力と法線力は、図2に示した箇所で、それぞれひずみ式のロードセルを用いて測定を行う。また、台車速度と車輪速度は、ロータリエンコーダの出力を用いた仕組みにより測定・演算し、小さなすべり率を検出することを可能としている。

2.1 接線力とすべり率を与える機構

クリープテストの最も特徴的な機構は、測定車輪に縦

接線力を与える「縦接線力負荷機構」である。この仕組みにより、測定車輪とレール間のすべりと縦接線力の大きさを変化させることができる。縦接線力負荷機構は、主として、測定車輪の両側に付随している巻胴と、巻胴に巻き付けられるワイヤ、そしてワイヤに接続しているばねから構成されている。この機構を用いたクリープテストの測定原理は、以下の通りである（図3）。

まず、クリープテストの台車に法線力負荷機構（図2(b), 第2.3節）を用いて上下方向の負荷をかける。その状態で、ボールねじを介しモータによって台車を駆動する。台車には測定車輪の軸箱体が取り付けられており、台車の移動にともなって測定車輪も図3の向きに転がり始める。はじめ、測定車輪はほぼ負荷のない状態で転がるが、台車が左側に移動するにつれてワイヤが巻胴に少しずつ巻き込まれていく。すると、ワイヤが巻き込まれる長さに比例してばねによる力 F_s がしだいに増加する。縦接線力 F_x は $F_x=(r/R)F_s$ と表されるので、これはすなわち縦接線力が徐々に負荷されることを意味する（ここで、 R は測定車輪の半径、 r は巻胴の半径である）。それと同時に、測定車輪とレールの間の縦方向の相対的な速度差（縦すべり）も大きくなる。そして最終的に、測定車輪はレールの上を転がらずに完全にすべった状態となる。以上の仕組みにより、クリープテストでは、測定車輪の転がりをはじめから完全にすべった状態までの1回の測定動作によって、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対するクリープ力を測定することができる。1回の測定動作は数秒であり、測定を簡便に繰り返し行える。

クリープテストはまた、一定の車輪アタック角 ψ_w （レールに対する測定車輪の相対ヨー角）を設定することが可能である。この機能により一定の横すべり率を与えることができるため、縦接線力と横接線力の関係を調べられる。この機構も、クリープテストの大きな特徴の一つである。表1に示すように、車輪アタック角は4つの条件設定が可能である。

表1 クリープテストの主な仕様

| | |
|-------------|--|
| 大きさ | 780 mm × 230 mm × 360 mm |
| 総重量 | 26 kgf |
| 測定車輪 | 直径：60 mm 断面形状：半径30 mmの円弧 材質：C105U (ISO), 焼入加工 |
| 巻胴 | 直径：40 mm |
| 台車速度 設定値 | 10, 20, 30, 40 mm/s |
| 法線力 設定値 | 約30～300 N |
| 縦接線力 負荷可能値 | 0～300 N |
| 車輪アタック角 設定値 | 0, 0.3, 0.6, 1.0° |
| ロータリエンコーダ | 測定車輪：3600 pulse/rot 台車：400 pulse/rot (ボールねじピッチ2mm/rot) |

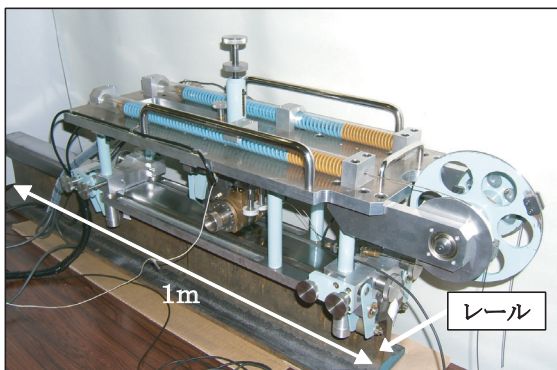


図1 切断した実物のレール上にクリープテストを設置した様子

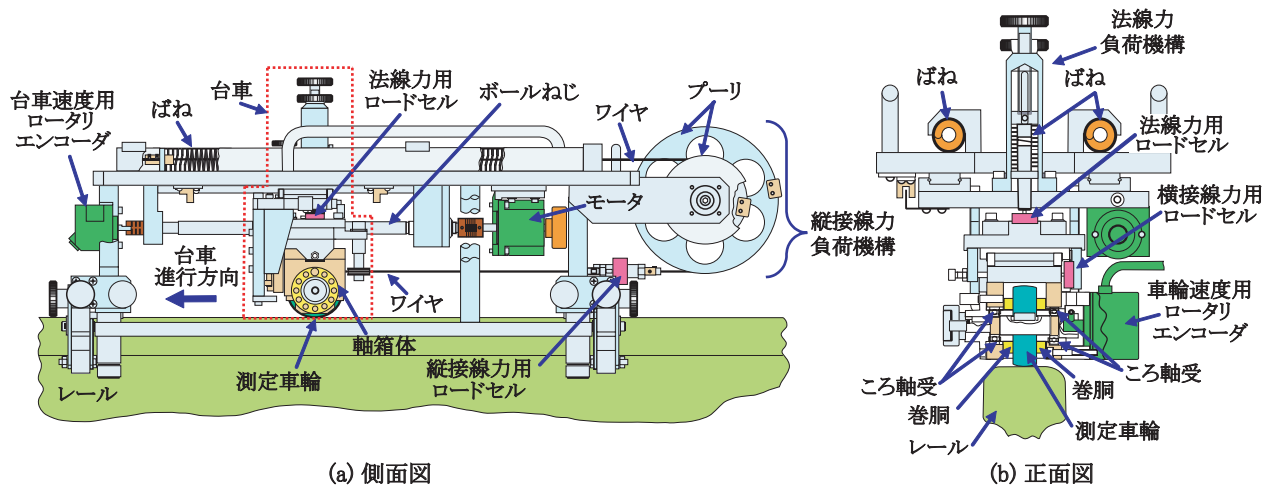


図2 クリープテストの主な機構

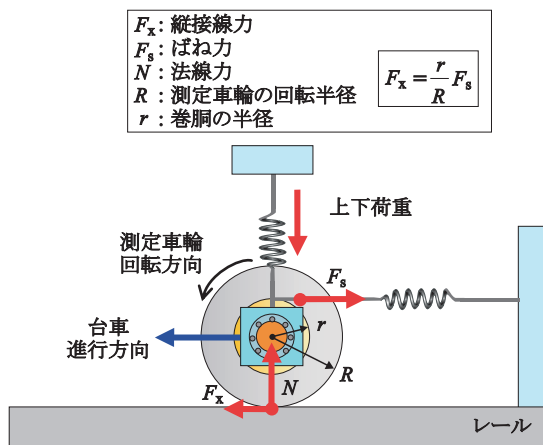


図3 クリープテストの縦接線力機構の原理

2.2 すべり率と測定車輪・台車速度の演算

クリープ力特性をよりよく調べるためには、クリープ力が飽和に至るまでの小さなすべり率を検出しなければならない。クリープテストでは、測定動作の間に変化する縦すべり率 s_x を、車輪速度 V_w と台車速度 V_c から算出する。車輪アタック角が 0° である場合、この縦すべり率 s_x は、 $s_x = 2(V_c - V_w) / (V_c + V_w)$ で与えられる。したがって、小さなすべり率を得るためには、車輪速度と台車速度を精度よく計測する必要がある。クリープテストでは、車輪速度と台車速度の測定を、ロータリエンコーダの出力と高速度の基準クロックを用いた方法により行う。

駆動モータにより台車が移動すると、台車に接続されているボールねじの軸端に取り付けたロータリエンコーダと測定車輪軸に取り付けたロータリエンコーダがそれぞれパルスを発する。これらのエンコーダパルスの1波長分に対応する台車の移動距離および車輪の回転距離は、ロータリエンコーダの性能値とボールねじのピッチ、または車輪の回転半径から予め算出できる。したがって、あとはエンコーダパルス1波長に対応する時間

がわかれば速度を演算することができる。この時間は、周波数20MHzの基準クロックを用い、エンコーダパルス1波長分に刻まれる基準クロックのパルス数をカウントすることで計測する。この方法によって得られる精度は台車の設定速度に依存し、台車設定速度を10mm/sとした場合、その計測精度は $\pm 0.002\%$ である。

なお、車輪速度の演算で用いる車輪回転半径は、速度の測定精度に影響してくる。そこで、クリープテストによる実験では、事前に、測定車輪に上下方向の力を負荷した状態での回転半径を測定する作業を行っている。測定車輪から接線力機構をはずし、すべりのない状態で測定車輪を転がして回転半径を調べることで、より正確な車輪回転半径を車輪速度の算出に用いる。

2.3 法線力負荷機構

法線力負荷機構は、測定車輪とレールの間の接触面の垂直方向に作用する法線力をばね力により負荷するものである(図2(b))。この機構を用いると、実物の車輪とレールが接触している場合の最大ヘルツ圧に相当する条件を設定することができる。負荷量は表1に示す範囲内で与えられる。法線力を検出するためのロードセルは、台車の上に取り付けてあるので、測定すべき測定車輪/レール間の法線力は、ロードセルから得られる測定値に台車と測定車輪の自重を加えて算出する。

2.4 測定車輪

クリープテストで使用する基本的な測定車輪の仕様は、その接触面が縦・横の半径30mmの球面になっており、表面を焼き入れ処理している(表1)。また、表面粗さ(算術平均粗さ R_a) はおよそ $0.3\mu\text{m}$ である。測定車輪は交換することが可能なので、断面形状や材質、表面の加工など、実験の目的に応じたものを用いることができる。

特集：鉄道力学

3. クリープテストのシステム構成

クリープテストを用いた測定では、クリープテストの動作の監視や制御、測定データの集録、第2.2節に示した速度演算等の計測値の演算に、専用のソフトウェアプログラムや演算装置を用いる。クリープテストをとりまく機器のシステム構成を図4に示す。図4の制御や測定データの流れにしたがって、クリープテストによる測定を行う。

3.1 速度演算器とステージコントローラ

速度演算器は、第2.2節で述べた基準クロックを内蔵した機器である。車輪と台車のロータリエンコーダからのパルスを受け、車輪速度と台車速度の演算に必要なロータリエンコーダパルス1波長分に対応する時間（基準クロックのパルス数）を計測（カウント）する。制御・計測パソコンはその計測値を受け取り、車輪速度と台車速度を演算する。

ステージコントローラはパソコンからの指令に基づき、クリープテストの駆動モータを制御・監視する。また、パソコンと通信しながら、駆動中のモータや台車の位置の状態監視も担う。駆動モータの緊急停止や測定開始位置への復帰はステージコントローラから直接行う。

3.2 制御・計測ソフトウェアと測定データの表示

クリープテストの制御やその状態の監視、ならびに測定データの取得・集録は、Windowsパソコン上で動作する専用のソフトウェアプログラムを用いる。また、このソフトウェアプログラムは、車輪・台車速度や縦すべり率の算出、電圧データの作用力への換算といった演算も担う。

図5は、パソコンのモニターに表示される本ソフトウェアプログラムの画面（ユーザインターフェース）である。この画面は主に、モータや台車位置の状態を示す部分、現在の作用力の値などをデジタル表示する部分、接線力・法線力を電圧データから換算するための値や車輪・台車速度と縦すべり率の算出に必要な車輪回転半径等のパラメータを入力する部分、そして測定結果をグラフで表示する部分に分かれている。法線力の設定はこの画面を確認しながら行う。

クリープテストの測定動作により得られたデータは本プログラムにより直ちに演算され、演算結果は画面にグラフで表示される。作用力や車輪・台車速度などを表示する時系列波形では、グラフ上でマウスを操作することにより、クリープ力特性を知るのに有効な範囲を選択することができる。時系列波形図の左側には、選択範囲のデータに対応したクリープ力特性図（縦すべり率に対する縦・横接線力と法線力の比）が描写され、1回の測定動作で得られるデータをその場で確認することが可能である。

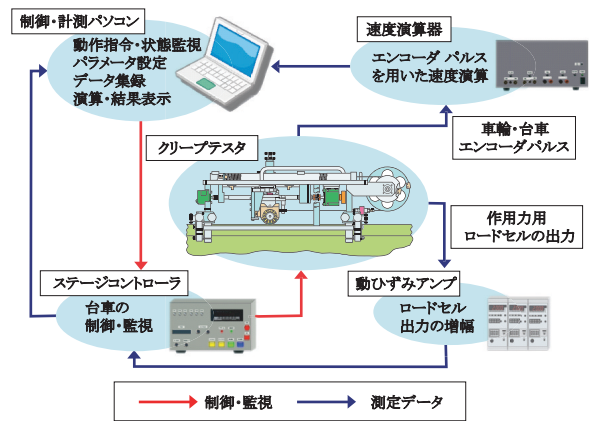


図4 クリープテストの制御・計測システム構成

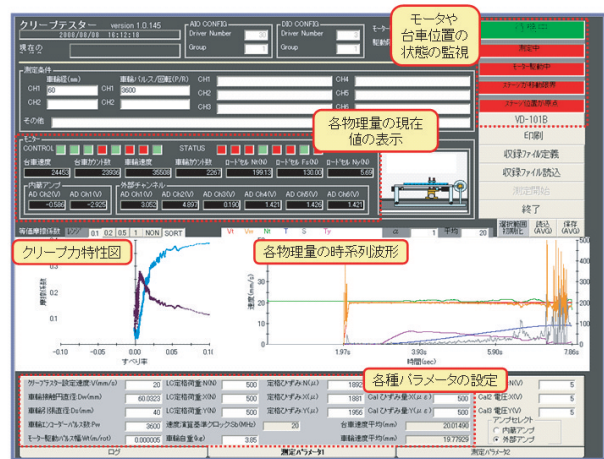


図5 パソコンモニターに表示されるクリープテスト専用制御・計測プログラムの画面

なお、集録したデータはASCII形式のファイルとして出力することができる。

4. クリープテストによるクリープ力特性実験

4.1 実験概要とその条件

表1に示した測定車輪を用い、クリープテストによるクリープ力特性実験を行った。まず、クリープテストの動作と測定データの関係について調べた。また、測定車輪とレール間の摩擦係数が明らかに異なる状態において、クリープテストがその違いを確実に捉えることができるか、基本性能の確認を行った。さらに、車輪アタック角の縦・横のクリープ力特性への影響を、車輪アタック角0.3°と0.6°の場合について調べた。

本実験では、基礎的な実験データを得るため、レールの表面を一定の粗さの紙やすりでレール長手方向に磨き、平らに整えたレールを使用した（表面粗さ R_a は、縦方向0.2 μm 、横方向0.5 μm 程度である）。この場合、測定車輪表面は球面でレール表面は平面なので、測定車輪とレール間の接触面は円形となる。法線力の設定は200N

とした。このときの最大ヘルツ圧は約820MPaである。これは、修正円弧踏面形状をもつ実物の車輪と50Nレール頭頂面形状のレールが、およそ40kNの輪重でレール頭頂面において接触するときの最大ヘルツ圧とほぼ等しい。台車の設定速度は20mm/sとした。

4.2 クリープテストの動作と時系列波形およびクリープ力特性図

車輪アタック角が 0.6° の場合に、クリープテストの1回の測定動作によって得られた時系列波形を図6(a)に示す。この図から、クリープテストの動作にともなう作用力（縦接線力 F_x 、横接線力 F_y 、法線力 N ）と縦すべり率 s_x ならびに台車速度 V_c ・車輪速度 V_w の様子を調べた。

はじめ、縦接線力はほぼ0であるが、時間の経過とともに、徐々に増加した。これは縦接線力負荷機構のばね力が増加していることを表している。アタック角に応じた一定の横すべり率のもとで作用する横接線力は、はじめは横接線力検出用のロードセルに触れないように設定しているため値は0である。しかしながら、クリープテストの動作の初期段階で急激に増加し、その後、減少に転じた。車輪速度ははじめ、台車速度とほぼ等しい速度で転がり、縦接線力がある程度大きくなると徐々に減速した。そして、車輪とレールの間には相対的な速度差、すなわち、縦すべりが生じた。

図6(a)の結果を、横軸に縦すべり率、縦軸に縦・横接線力と法線力の比 F_x/N 、 F_y/N をとって図にすると、図6(b)のようなクリープ力特性図が得られた。縦すべり率が大きくなると、縦接線力はある一定の値に飽和するまで増加し、その反対に横接線力は減少した。つまり、縦すべり率は縦接線力の大きさに影響するだけでなく、横接線力にも影響を及ぼすことがわかる。横すべり率が一定である状態で縦すべり率が増加すると、接線力の縦方向成分の大きさが増す一方で横方向成分の分担率が低くなり、その兼ね合いによって、縦接線力と横接線力の関係が決まってくるものと考えられる。

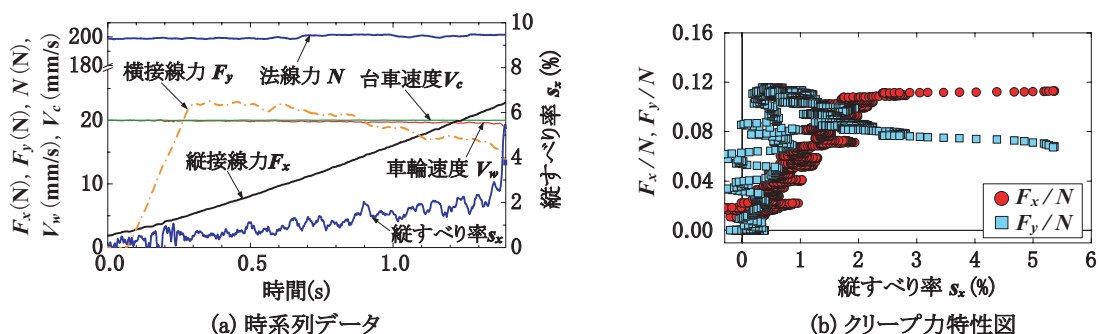


図6 クリープテストの測定データ例（レール表面状態：グリス系レール油、車輪アタック角 0.6° ）

4.3 潤滑物が介在した場合のクリープ力特性

車輪アタック角を 0° とし、レールの表面にグリス系のレール油を塗布した場合（塗油状態）と何も塗布しない場合（乾燥状態）の比較を行った。クリープテストの測定動作を20回試行して得られたクリープ力特性図を図7に示す。ここで示した値は、20回試行して得た測定データを平均化処理したものである。

図7(a)と(b)を比較すると、接線力と法線力の比 F_x/N は、双方とも、縦すべり率が非常に小さな領域で、ある値に飽和することがわかった（ここではこの値を飽和摩擦係数と呼ぶ）。しかしながら、飽和摩擦係数は図7(a)と(b)で明らかに異なるものが得られた。油を塗ったとき飽和摩擦係数は約0.12であるが、乾燥状態の場合はそれよりも大きい約0.4となった。また、乾燥状態の場合は、塗油状態に比べて測定データのばらつきが大きかった。接線力は、接触面内の温度や周囲の湿度などの影響を受けると考えられており、その点において、乾燥状態の場合は塗油状態の場合より不安定な状態であるため、測定データのばらつきが大きくなったものと考えられる。

以上より、測定車輪とレールの表面に潤滑物が介在した場合、潤滑物がクリープ力に及ぼす影響をクリープテストによる測定で捉えられることがわかった。

4.4 車輪アタック角と縦・横クリープ力の特性

レールの表面に第4.3節で用いたものと同じグリス系のレール油を塗布し、湿度などの影響に依存しにくく安定した測定値が得られる状態において、車輪アタック角のクリープ力特性への影響を調べた。車輪アタック角は 0.3° または 0.6° とした。測定結果を図8に示す。前節と同様に、ここで示した値は、測定を20回試行して得たデータを平均化処理したものである。

図8より、縦すべり率が十分に大きくなると、車輪アタック角の大きさによらず、縦接線力と法線力の比 F_x/N は0.12程度に飽和した。また、第4.2節に述べたのと同様に、縦接線力が増加すると横接線力が減少するという傾向は、車輪アタック角によらず観測された。しかしながら、 F_x/N が飽和値に至るまでの、 F_x/N の縦すべり率に

特集：鉄道力学

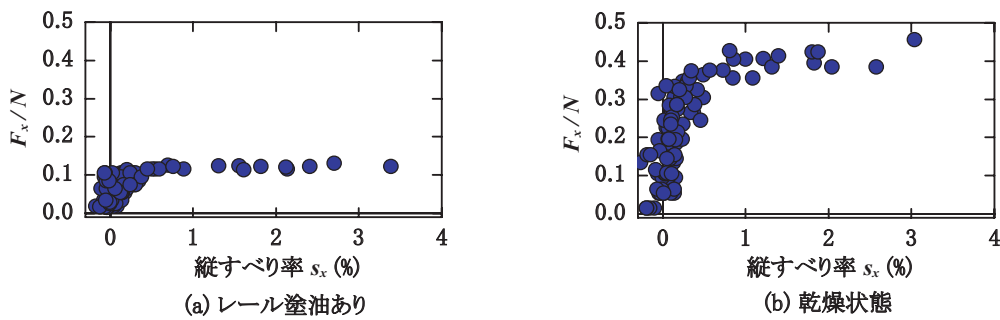


図7 潤滑物が介在する場合としない場合のクリープ力特性の比較（車輪アタック角 0° ）

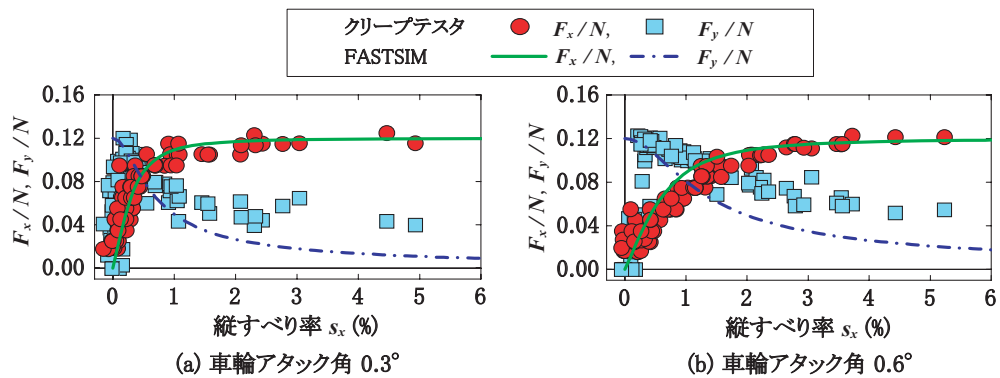


図8 車輪アタック角による影響 — 実験値（クリープテスト）と理論計算値（FASTSIM）の比較 —

対する増加の割合は、車輪アタック角が 0.6° の場合に比べて 0.3° の方が大きかった。つまり、 0.3° の方がより小さい縦すべり率で飽和値に達する、という結果が得られた。

図8には、クリープテストによる実験値とともに、車両運動シミュレーションなどでよく利用されている、カルカーの単純化クリープ力理論に基づくクリープ力計算アルゴリズムFASTSIM¹⁾によって求めた理論計算値も併せて示した。FASTSIMの計算で用いた動摩擦係数 μ の値は0.12とした。本実験は、レール油をレール表面に塗布した流体潤滑状態であること、測定車輪が定常的には転がらず加速度をもって転がること、また、接触面のスティック・スリップの影響も測定結果に含まれることなど、FASTSIMの前提とは多少異なる点がある。しかしながら、特に縦接線力については、実験値は理論計算値と比較的によく一致した。

5. まとめ

実物のレール上で測定車輪とレール間の接線力を徐々に増加させ、そのときのすべり率を演算することでクリープ力特性を求めることのできる小型のクリープ力試験装置「クリープテスト」を開発した。そしてその測定原理や機構について示した。また、クリープテストを用いると、レール表面の潤滑物の介在や、縦接線力と横接

線力の関係、車輪アタック角の違いによる縦・横接線力の変化について調べられることを確認した。

今後は、簡便にクリープ力特性試験を行うことのできる本試験装置を用い、レールの表面状態（乾燥状態、潤滑油の種類、表面粗さなど）や法線力、測定車輪の断面形状や接触面形状などが、どのようにクリープ力の特性に影響するのか基礎的なデータを収集し、様々な条件下におけるクリープ力の特性を把握していく計画である。

文献

- 1) Kalker,J.J., A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact, Vehicle System Dynamics, 11(1), 1982.
- 2) 土井, 宮本, 前橋, 石田: 実物輪軸によるクリープ力特性試験 (第一報), 第11回交通・物流部門大会講演論文集, pp.447-450, 2002
- 3) 宮本, 大江: クリープ力測定装置及び方法, 特許登録番号: 第4065831号
- 4) Johnson,K.L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- 5) Kalker,J.J., Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact, Kluwer, Dordrecht, 1990.
- 6) Iwnicki,S., Handbook of Railway Vehicle Dynamics, CRC Press, North Wales, pp.85-141, 2006.