

車輪とレール間のクリープ力

土井 久代

鉄道力学研究部(車両力学 副主任研究員)



どい ひさよ

クリープ力とは？

鉄道車両がレールの上を走って前に進んでいくとき、通常、車輪はレール上を転がりながら走行します。それでは車輪自ら加速しながら進むとき、車輪の回転数とその回転半径から計算できる車輪の走行距離と、実際に車輪がレール上を進む距離とは一致するのでしょうか？答えは「否」で、車輪が回る距離は実際にレール上を進む距離よりも長くなっています。つまり、車輪はレール上をすべりながら転がって走っていることとなります。ただし、ここでの「すべり」は車輪がレール上を転がっているときにそのようなすべりが発生しているとは見受けられないほど小さなものです。

鋼を材料とする車輪とレールは、接触しているときそれぞれ弾性変形し、ある面—ここではこれを接触面と呼びます—を形成します。転がっている車輪の接触面は車輪表面上を時々刻々と移動し、その移動にともなって、接触面内には車輪とレールの材料が互にくっつきあいながらその接触面に平行な方向（進行方向または転がり方向）に弾性変形した状態にある領域（粘着領域）と互いの材料がもはやくっつき合う力を失って接触しながらも相対的にすべった状態にある領域（すべり領域）が生成されます（図1）。接触面がこのような状態にある微小な転がりすべりのことをクリープといい、この微小すべりによって接触面内に生じる作用力をクリープ力と呼びます。クリープ力はすべり率、またはクリープ率とも

呼ぶ量 $\Delta V/V$ でその特性を特徴づけることができます（ここで ΔV は、車輪の回転半径 r と回転角速度 ω とから得られる速度 $r\omega$ と車輪がレールの長手方向に進む速度 V との差を表します）。すべり率とクリープ力の関係を接触面内の粘着・すべり領域の関係とあわせて模式的に示すと図2のようになります。車輪とレールの接触面内に働く力は接線力ともいい、この接線力のうち車輪とレールの間のすべりが小さいものを特にクリープ力と呼んでいます。接触面内のすべりが十分に大きくなると接線力はある値に飽和し、そのときの力はいわゆる摩擦力となります（これは完全にすべっている状態について議論するクーロン摩擦力です）。この摩擦力と接触面に垂直に作用する力、すなわち法線力 N との比は摩擦係数 μ となります。その意味で、クリープ力と法線力の比はあるすべりの状態における摩擦係数であると考えられるので、その比を等価摩擦係数または有効（実効的な）摩擦係数と呼ぶこともあります。

車両の運動とクリープ力

車輪とレールの間に作用するクリープ力は、鉄道車両がレール上を走って止まるときの制動力や、車両を前進させるための駆動力を伝達する役割を担っています。その一方で、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します。

例として、曲線を通る車輪に作用するクリープ力についてみてみましょう。図3 (a) に、曲線を走行している輪軸を上側から見た模式図を示します。外軌側、内軌側それぞれのクリープ力は、図中の青い矢印のように車輪に作用します。ここで、輪軸

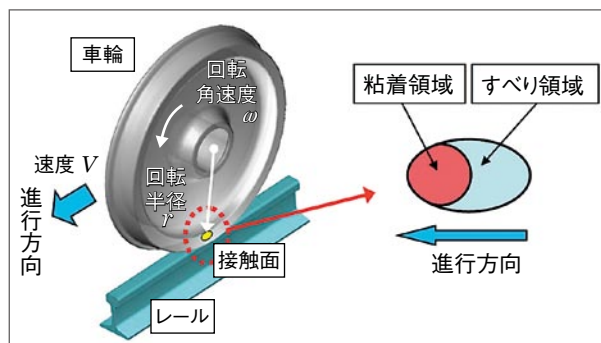


図1 車輪踏面で接触している場合の接触面と粘着・すべり領域

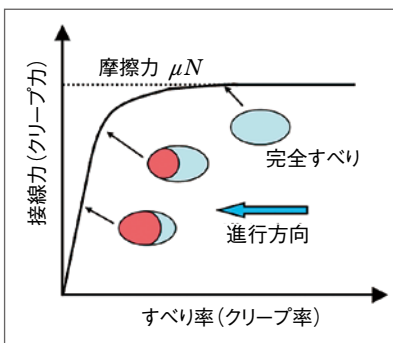


図2 接触面内のすべりとクリープ力の関係

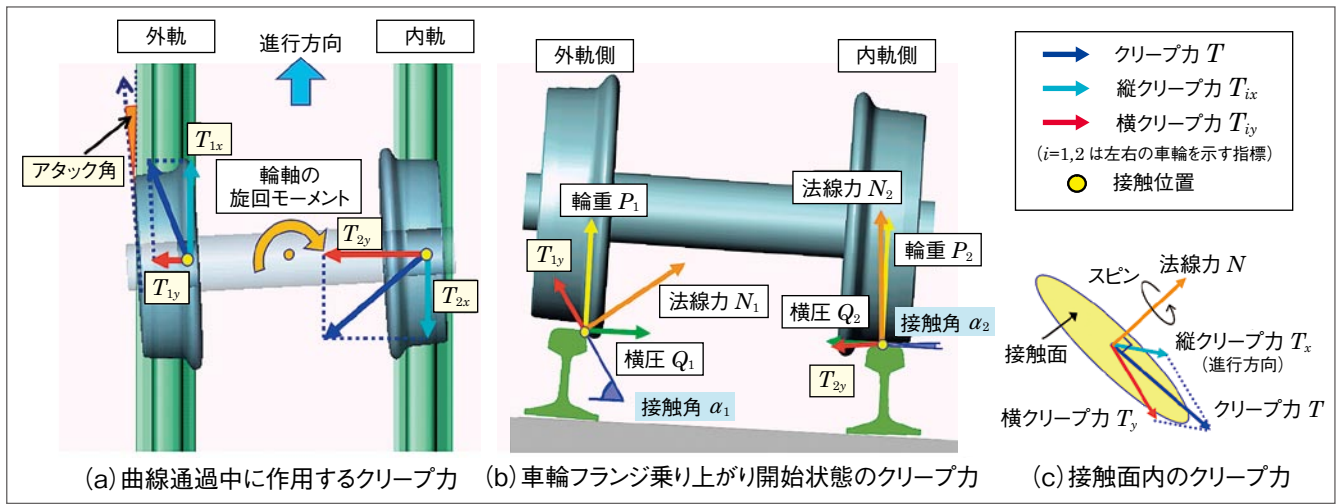


図3 輪軸に作用するクリープ力

の運動を把握し易くするために、図3 (c) のようにクリープ力を車両の進行方向（レール長手方向）の成分である縦クリープ力とそれに垂直な方向（まくらぎ方向）の成分である横クリープ力に分けて考えてみます（また、図にあるように、接触面内の法線軸回りの回転すべりをスピンと呼びます）。曲線を走行する一対の車輪は、その接触位置における回転半径が左右で異なるため、縦方向に比較的大きなすべりが生じます。そこで縦クリープ力 T_{1x} 、 T_{2x} に注目すると、外軌側または内軌側車輪の縦クリープ力はそれぞれ進行方向とそれと反対方向に働きます。そしてこれら内外軌の縦クリープ力によって、輪軸には図3 (a) に示す方向に回転モーメントが働き、曲線をうまく通過することが可能になります。したがって、縦クリープ力は輪軸の旋回性能に重要な役割を担っていることがわかります。

つぎに、曲線通過中の車輪フランジがレールに乗り上がるとうとする時のクリープ力について考えてみましょう。この場合には、横クリープ力が大きな役割を果たします。図3 (b) に、車輪フランジのレール乗り上がりを開始する状態での横クリープ力 T_{1y} 、 T_{2y} を示します。車輪フランジ乗り上がり開始状態にあるとき、輪軸はアタック角（レールに対する輪軸の旋回角のこと、輪軸ヨー角とも呼びます）をもった状態で転走しています。車輪踏面部で接触している内軌側の横クリープ力 T_{2y} は図のように外軌側方向へ働き、外軌側車輪の車輪フランジをレールゲージコーナに押し付けます。そしてその結果、接触面内の法線力 N_1 が増加し、外軌側の横クリープ力 T_{1y} が大きくなります。また図からわかるように、車輪フランジ部の横クリープ力 T_{1y} は車輪をレールに沿って乗り上げらせる方向に作用します。車輪とレールの間の摩擦係数が大きくなると、内外軌の横クリープ力はともに大きくなるので、脱線に至る可能性が高くなります。逆にいえば、内軌レールの頭頂面あるいは車輪フランジ接触部の摩擦係数を小さくすることで大きな

横クリープ力の発生を抑え、脱線を抑制することができます。

以上の例からも、車輪とレールの間に作用するクリープ力の特性を把握することは、車両の運動を理解する上でとても重要であることがわかりいただけると思います。

クリープ力の理論と車両運動解析

ここまで述べてきたように、クリープ力は車両の運動特性に大きな影響を与えます。クリープ力の理論的な研究は、現在では、縦・横のすべりやスピンの混在した3次元的な非線形特性を扱う Kalker の理論によって大成されたといわれています。今日における鉄道車両の運動解析では、Kalker のクリープ力理論の中でも特に単純化非線形理論の高速計算アルゴリズム FASTSIM¹⁾ によるクリープ力の計算が一般的に用いられています。

車輪とレール間に生じる接触面の形状と接触面内の圧力分布は Hertz の接触理論にしたがう、との仮定の下にクリープ力の算出を行う FASTSIM では、Hertz の接触理論により得られる接触形状（楕円）の長短径比、接触面内に作用する縦すべり率、横すべり率およびスピン（ここで、これらのすべりパラメータは接触楕円の中心における値であると仮定します）、そして摩擦係数といったパラメータがクリープ力の計算に必要なになります。

実際の車両運動解析において、FASTSIM に与える接触楕円の長短径比やすべりパラメータをあらかじめ知るためには、車輪とレールがどこでどのように接触しているかを考える必要があります。この車輪とレールの接触位置を求める問題は幾何的に扱うのが一般的であり、接触幾何問題と呼ばれています。車輪とレールの接触位置は、車輪やレールの断面形状、車輪踏面中心位置での車輪半径、レールの軌間、軌道の線形（曲線など）、車輪のレールに対する相対的な位置関係といった様々な情報を用いて求めることとなります。この問題は3次元の非線形な問題である上、車輪やレールが摩擦

したときの形状や、車輪とレールが複数の位置で接触することがある場合などを扱う必要もあるため、解を得ることがとても難しい問題です。それゆえ、車輪とレールの接触幾何問題は車両運動解析において一つの重要な分野となっています。

図4にクリープ力を算出するにあたっての全体像を示します。図4にあるように様々な入力情報を基にしてクリープ力を求めます。そして、その結果を輪軸の運動方程式に外力として与え、車両の運動解析を行うこととなります。

クリープ力を測定する

クリープ力は理論的には上記のような方法で求められますが、実際の車輪とレールの間のクリープ力はどのように測定できるのでしょうか。何度か述べてきたように、クリープ力は接触面内のすべりにより生じるものなので、接触面に発生するクリープ力とそこでのすべり率を測定できればクリープ力の特徴を知ることができます。しかし、輪軸の運動に伴って転がる車輪の接触位置は時々刻々と変化し、そこでのクリープ力を逐一測定することは容易ではありません。そこで考えられる一つの方法としては、クリープ力や接触位置などを直接測定するのではなく、輪軸の姿勢などの測定結果を車輪とレールの接触幾何に適用して接触位置を特定し、その情報を用いてクリープ力やすべり率の実験値を間接的に得る方法があります。

車両の走行安全性を確認する試験などでは、通常、輪重 P （車輪上下方向の力）と横圧 Q （左右方向の力）といった車輪に作用する力を測定します。また、輪軸のアタック角や軌道に対する相対的な左右変位がわかると、接触幾何計算から車輪とレールの間の接触角等の情報を得ることができます。接触幾何計算により得られる情報を用いると、輪重 P や横圧 Q の作用する方向と接触面内に作用するクリープ力の方角を関係づけることができるので、クリープ力の実験値を間接的に得ることができます。例えば、乗り上がり脱線開始状

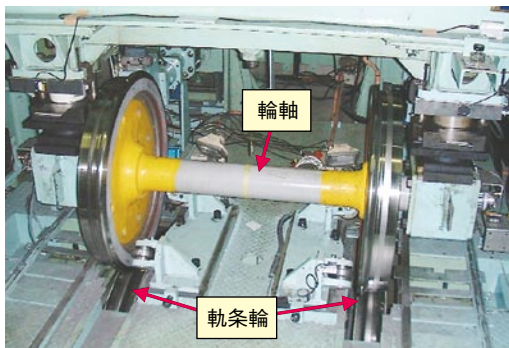


図5 クリープ力試験装置による実験の様子

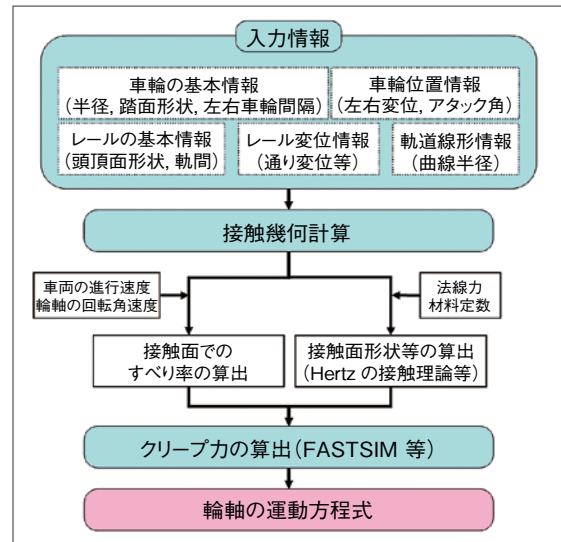


図4 車両運動解析におけるクリープ力算出の流れ

態での横クリープ力の場合、図3(b)から推察されるように、輪重と横圧、そして車輪とレールの接触角がわかると、横クリープ力が求められます。また、輪軸の回転角速度を測定し、それと接触位置における車輪半径(回転半径)を用いれば、接触点位置における車輪の速度がわかるので、すべり率を求めることができます。ただし、クリープ力を発生させるすべりは非常に微小であるため、輪軸の回転角速度の測定には、高い精度が必要となってくることに留意する必要があります。

以下では、鉄道総研が所有しているクリープ力を測定するための実験装置についてご紹介します。

クリープ力試験装置

クリープ力試験装置の概要を図5と図6に示します。このような室内試験装置を用いることの利点は、走行試験に比べて輪軸のアタック角や左右変位といったものを明確に測定したり設定したりすることが簡便であり、またクリープ力の特徴に関わってくると考えられる車輪とレールの間の不純物(例えば潤滑材)などの因子による影響を、走行試験の場合よりも比較的把握・管理しやすい環境で実験を行えるという点にあります。クリープ力試験装置では、通常のレールの代わりに軌条輪と呼ばれるローラを回転させ、

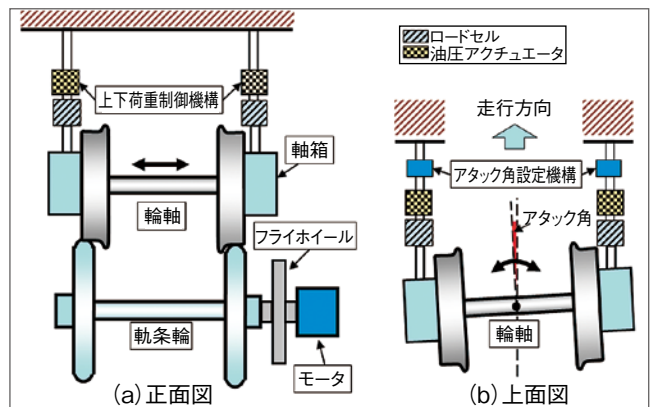
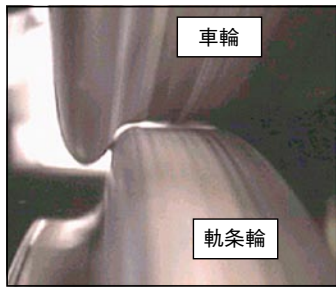


図6 クリープ力試験装置の模式図



車輪上昇量約 3mm

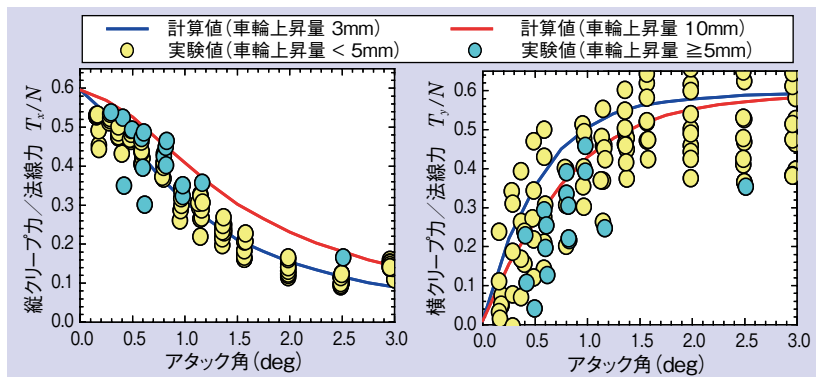


図7 クリープ力試験装置による乗り上がり脱線模擬試験の様子(左写真)とクリープ力特性の実験結果例(右)²⁾

その上に輪軸をのせて転走させることで、レールの上で輪軸が走っている状態を模擬します。この試験装置の特長は、実物の輪軸が使用できること、油圧アクチュエータを用いて軸箱の上下方向に作用する荷重を左右別々に与えられるので輪重のアンバランスといった条件を設定できること、アタック角は最大3°、走行速度は最大300km/hまで設定できること、などがあります。また、この試験装置は軌条輪を用いているため、特に、大きなアタック角がついている場合には、車輪の軌条輪回転方向への落ち込みによりクリープ力に影響を与える接触面の形状やスピニングがレールの場合と異なってきます。そこでこの試験装置では、軌条輪の直径を1600mmと大きくすることで、レール上での走行状態との違いを小さくするようにしています。その他、軌条輪の頭頂面形状は60kgレール形状であり、1/40のタイプレートを考慮しています。

図7に国土交通省の補助金を受けて実施した、低速走行時の乗り上がり脱線発生時のクリープ力特性の実験結果例を示します²⁾。この実験では左右の軸箱の上下に荷重を調整して図7の写真のようなフランジ乗り上がりの状態を模擬しました。そして、そのときに発生する輪重等の作用力と輪軸の左右変位・アタック角ならびに輪軸と軌条輪の回転角速度を測定することで得たフランジ接触部のクリープ力特性を、図7のグラフに示します。アタック角が大きくなると縦クリープ力が減少して輪軸の旋回性能が低下すること、同一のアタック角では車輪上昇量が多いほど横クリープ力と法線力の比が減少することなどがわかりました。この実験の結果は、乗り上がり脱線に対する安全性の評価に役立てられています。

クリープテスタ

クリープ力試験装置は軌条輪を用いた大型の実験装置ですが、実物のレールを用いてより簡易に、微小すべりから完全すべりまでのクリープ力特性を調べることのできる装置「クリープテスタ」を近年開発しました。

クリープテスタは図8のようにレールに装着し、直径60mmの測定輪に押し付け荷重と引張荷重を与えて測定を

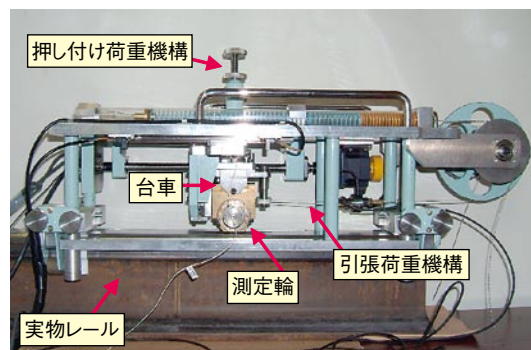


図8 クリープテスタの測定の様子

行います。測定輪を支持する台車をモータにより進行させると、ばねで負荷する引張荷重が徐々に大きくなり、それによって測定輪とレールの間のすべりが変化します。この仕組みにより、クリープテスタ1回の動作で、小さなすべり領域から大きなすべり領域までの測定を行うことができます。また、クリープテスタでは一定のアタック角を設定できるので、横方向のすべりを与えることもできます。この装置を用い、アタック角の違いによる縦クリープ力と横クリープ力の関係の変化などについて調べていく予定です。

おわりに

以上、車両の運動に大きく関わってくるクリープ力とその特性についてご紹介しました。今後も、接触面に働く法線力や高速度域を含めた走行速度によるクリープ力への影響、クリープ力の最大値に関係してくる車輪とレールの間の摩擦係数の調査、車軸の曲げなどを考慮した接触幾何計算の導入など、クリープ力にまつわる様々な事象についての研究を行い、より現実に即した車両の運動の把握やその解析の向上に努めていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) Kalker, J.J.: A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact, Vehicle System Dynamics, Vol.11, pp.1-13, 1982
- 2) 石田弘明ほか：急曲線低速走行時の乗り上がり脱線に対する安全性評価手法、鉄道総研報告, pp.5-10, Vol.18, No.8, 2004