

# 湿潤状態における車輪とレールの粘着係数の数値解析と模型走行車両による実験調査

○ 王 宇 (東京大学)      [機] 林 世彬 (東京大学)      [機] 須田 義大 (東京大学)

## Numerical analysis of the adhesion coefficient of wheels and rails in wet condition and experimental survey using a scale vehicle

○Yu Wang, (University of Tokyo)      Shihpin Lin, (University of Tokyo)  
Yoshihiro Suda, (University of Tokyo)

The contact between wheel and the rail of railway vehicles has a strong influence on the running safety. But when the rail is in wet condition, the adhesive characteristics deteriorate, which poses a serious safety risk to the operation of vehicle. In addition, the vehicle depends on this adhesive force to drive or to brake the wheels, so it is necessary to consider the influence of the deterioration of the adhesive characteristics in the control process. In this paper, the adhesive characteristics of wheel and rail are examined by numerical analysis and experiment validation, in order to understand the maximum adhesive force provided by the contact between the wheel and rail under wet conditions.

**キーワード** : 楕円接触混合熱弾性流体潤滑理論, 粘着特性, 接線力係数, 模型実験

**Key Words** : Elliptical mixed thermal elasto-hydrodynamic lubrication theory, adhesive characteristics, traction coefficient, scale model experiment

### 1. 序論

鉄道は日本にとって主たる交通機関であり、国民の易しい暮らしに支える事業の中に不可欠な存在でもいえる。しかし、今日の日本は高齢少子化問題に直面し、都市圏の高利用率に対して、過疎地域における鉄道の利用率が低いことも指摘されてきた。こうした背景の中に、次世代型の軌道交通システムに対する関心が高まっている。地方都市圏にバリアフリーに対応した低床路面電車車両 (LRT, Low floor transit) の導入や施設の改良など各地で進められているところである。LRT は道路空間、鉄道敷等の既存インフラも有効活用し、高い速達性、定時性、輸送力を持ち、人や環境に優しい公共交通システムである。

在来線の多くの路線特に地下鉄の運転条件とは相違し、都市内に走る LRT の運転環境は殆ど屋外であり、周囲環境または悪天候に曝されるので、レールが降雨、降雪、落ち葉など様々な介在物に汚染されやすいことがある。こういった介在物が車輪・レールの接触領域に入ってしまうと、車輪とレールが形成される薄膜によって分離させ、粘着特性が通常の乾燥状態のは変わってくるので、車両のダイナミクスにも影響を与える。特に車輪の縦クリープ力は車

両の駆動制動力に直結し、これが不足すれば空転、過大であれば滑走の原因となり、車両は所望の加速、減速で走行することが出来ない恐れがある。

この問題の解決に向けて、本来歯車などの多くの産業における広く応用されている弾性流体潤滑 (EHL, Elasto-Hydrodynamic lubrication) 理論が大山氏<sup>1)</sup>によって車輪・レールの接触問題に活用され、トライボロジーと鉄道接触力学分野における学際的な課題として研究者と鉄道従事者の方々に重視されてきた。大山氏は大型転動試験装置により水潤滑状態で高速転がり接触下試験輪の粘着実験も行い、EHL 理論の車輪とレールの粘着問題の応用と実験検証両方に多大の成果をあげた。その後、陳ら<sup>2)</sup>はこの研究をさらに発展させ、基礎モデルの上で、荷重、表面粗さと温度など因子の影響も数値解析と転動試験装置により解き明かし、車輪とレールの粘着問題の理解を深めた。近年では、呉ら<sup>3)</sup>は大荷重と高速走行の特性を有する高速鉄道車両が対象とし、表面突起接触粒子の接触圧力計算式を導入し、熱と液体のレオロジー特性も考慮した混合弾性流体潤滑理論により車輪・レールの高速転がり接触三次元 EHL 数値計算を行ったほか、転動試験機により接線力係数の計測も行った。

湿潤状態における車輪・レールの粘着特性に関する走行研究は主に大荷重、高速走行の車両と想定したが、本研究に研究対象である LRT 車両は軽量とより低速で運行するため、従来の研究に得られた結論がこのような対象に対して適用するかどうかは疑問がある。そして、実験検証においては、従来の研究にほとんどより安定な計測が可能である室内転動試験装置が用いられたが、その利点の反面は転動試験装置にレール輪と車輪の接触特性が実車輪とレールの接触特性と相違する欠点である。

従って、本研究では鉄道車両運行の際に車輪・レールの粘着力を十分に利用するように、潤滑状態で車輪・レール間の粘着特性に関する幾つかの要因と接線力の関係を注目し、車両の走行速度と荷重など因子が粘着特性に与える影響を数値解析により定量的に調べ、さらに模型実験により数値モデルの妥当性を検証する。

## 2. 楕円接触混合熱弾性流体潤滑理論

### 2.1 基礎方程式

車輪とレールの粘着問題に導入されたのは、大山らの先駆的な取組みに繋がっていた。車輪とレールは表面粗さが大きくて無視できない特徴があるので、混合弾性流体潤滑によって捉えられなくてはならないとの指摘もなされてきた。また、車輪とレールの接触圧力がより大きいことが分かり、温度の効果が流体粘度に影響を与えるので並びに考慮する必要がある。上述の考えを踏まえ、本研究では最先端の楕円接触混合熱弾性流体潤滑理論によって車輪とレールの粘着問題を取り扱う方針である。

この理論は流体圧力分布と潤滑流体膜厚を求める理論であり、流体圧力と液膜の関係を表すレイノルズ方程式、接触体の間の平均間隔を表す膜厚方程式と荷重釣り合い式 3 つの方程式が含まれる。

表面粗さの影響を考慮したレイノルズ方程式は Patir ら<sup>4)</sup>の平均流れモデルから次のように導出されている。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \phi_x \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \phi_y \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p_f}{\partial y} \right) - u_m \frac{\partial(\rho \bar{h}_T)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は流体の密度、 $\eta$ は流体の粘度、 $h$ は膜厚、 $p_f$ は流体圧力、 $u_m$ は接触体の平均速度、 $\bar{h}_T$ は接触表面の平均間隔である。表面粗さがガウス分布に従う場合  $\bar{h}_T$  と膜厚  $h$  の関係式が式(2)に示される。また、 $\phi_x$  と  $\phi_y$  は圧力流量係数と定義される。圧力流量係数は平滑な面の圧力流れに対する粗さ面の平均圧力流れの比であり、表面微小突起の存在により圧力流れがどの程度阻害或いは促進されるかを表す。Patir らのシミュレーションによりフィッティングされた  $\phi_x$  と  $\phi_y$  は式(3)で定める。

$$\bar{h}_T = \frac{h}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{h}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( \frac{-h^2}{2\sigma^2} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\operatorname{erf}(\bullet)$  はガウスエラー関数であり、

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \text{ の形を有する。}$$

$$\phi_y \left( \frac{h}{\sigma}, \frac{1}{\gamma} \right) = \phi_x \left( \frac{h}{\sigma}, \gamma \right) = \begin{cases} 1 - C_\phi e^{-k_\phi \frac{h}{\sigma}}, & \gamma \leq 1 \\ 1 + C_\phi \cdot \left( \frac{h}{\sigma} \right)^{-k_\phi}, & \gamma > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)において  $\gamma$  が接触体表面性状を表現する粗さ方向性パラメータといい、表面微小凹凸の山や谷が滑り方向に直角に並ぶ場合がゼロ、平行な場合が無限大、つまり表面粗さが流速方向と一致すると流体の流動が促進させ、逆に不一致すると阻害させる作用がある。また、 $C_\phi$  と  $k_\phi$  が圧力流量パラメータと呼び、 $\gamma$  との関係が文献<sup>2)</sup>を参考されたい。

密度・圧力・温度の関係式は(4)のように表され、粘度・圧力・温度の関係式は Roelands<sup>5)</sup>に提案された式を用いる。

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + \frac{0.6 p_f}{1 + 1.7 p_f} + D_0 (T - T_0) \right] \quad (4)$$

$$\eta = \eta_0 \exp \{ [\ln(\eta_0) + 9.67] \left[ (1 + 5.1 \times 10^{-9} p_f)^{0.68} \left( \frac{T - 138}{T_0 - 138} \right)^{-1.1} - 1 \right] \} \quad (5)$$

ここで、 $\rho_0$ は解析温度で大気圧下の流体の密度、 $\eta_0$ は大気圧下の流体の粘度、 $T_0$ は環境温度である。

そして、接触体の間に形成される膜厚は弾性力学の知識によって式(6)に導出される。

$$h(x, y) = h_0 + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + \frac{2}{\pi E'} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p_f(x', y') + p_c(x', y')}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}} dx' dy' \quad (6)$$

ここで、 $h_0$ は流体の中心部膜厚、 $R_x$  と  $R_y$  は接触体  $x$  と  $y$  方向における等価半径である。

最後、総荷重が流体圧力と微小突起粒子接触圧力の和で釣り合う式は(7)のようになる。式の中の  $w_0$  が総荷重である。

$$w_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [p_f(x', y') + p_c(x', y')] dx' dy' \quad (7)$$

### 2.2 微小突起粒子接触数値モデル

本研究に微小突起粒子接触数値モデルが ZMC モデル<sup>6)</sup>を採用した。ZMC モデルにおいては表面粗さを有する二つの曲面形状の物体の接触が剛性滑らかな平面と曲面の接触に等価される。曲率半径が  $R_c$  である球状微小突起粒子が物体の表面にガウス分布に従うので、ある粒子と等価される平面と接触しているものの、平面と接触していない粒子もある。弾性曲面が剛性平面に押し付けられると、粒子の頂部に弾性変形が発生し、粒子の高さが元の  $z$  から  $d$  になる。粒子の変形値  $w_c$  によって、弾性変形と塑性変形の度合いが変わり、全ての微小突起粒子単体の圧力が統計的に集めることによって、巨視的な固体接触圧力を計算できる。微小突起粒子接触圧力が式に表される。(図1参照)



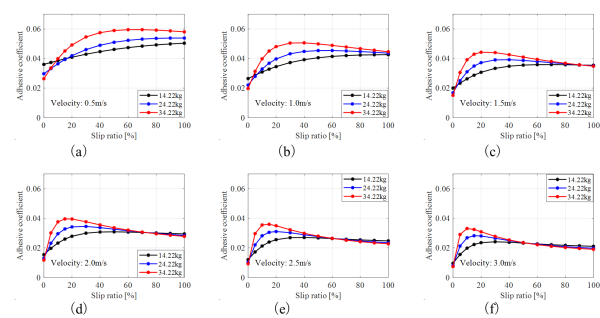


図2 接線力係数と荷重の関係図

各速度条件下の接線力係数と速度の関係を図3に示している。図により、速度が接線力係数に与える影響が顕著であり、同じ滑り率において速度の増加に伴い、接線力係数が小さくなる傾向が見られる。また、高速或いは重荷重条件に滑り率の増大に伴い、粘着係数が低い滑り領域に一旦急増し、そして緩やかに減少する傾向も示される。

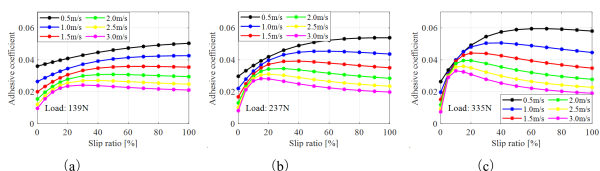


図3 接線力係数と速度の関係図

#### 4. 模型実験

本研究に構築された実験システムの概観を図4に示す。実験システムは駆動装置、実験線路、実験車両と計測系から構成されている。実験線に装備されている駆動モータが実験車両の動力源とされ、駆動速度が0.3m/sから4.0m/sまで連続的に設定することが可能である。9kg レール上に模型車両を駆動モータにより引っ張られ、走行中の車輪に働く接線力と鉛直力をリアルタイムで計測する。

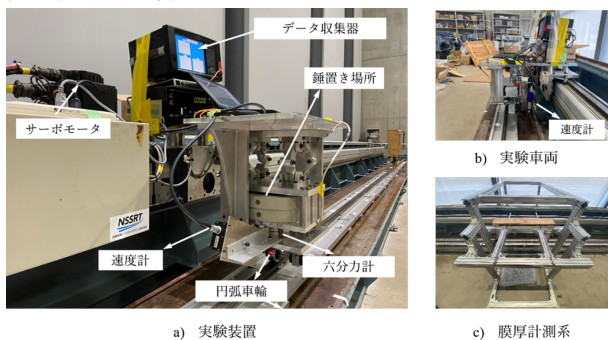


図4 実験システムの概観

図5に実験結果および数値解析結果のうち滑り率がゼロである部分を示している。左右の線図を比較的にみると、各条件における接線力係数の値が合わないものの、線図の相互関係と変化傾向がほぼ一致することが分かる。具体的に言うと、接線力係数と荷重と速度とも負の関係が現われる。実験結果と数値解析結果における接線力係数の絶対値が合わない理由は、まず、数値解析はあくまでも実物理現象の理想化モデルである。数値解析の中に、色々な仮定条件を与えていた。ほかにも速度の変動、六分力計無負荷出

力電圧の変動、荷重の変動など上記の理由になる可能性もある。従って、走行状態が乱れる車両模型実験の結果は安定走行が可能である転動試験装置の結果より劣ることが予見できる。要するに、実験の結果に現れた接線力係数と荷重および速度の関係が数値解析の理論結果と一致すれば、本研究に作成された接線力係数数値計算プログラムを信用できると考えられる。

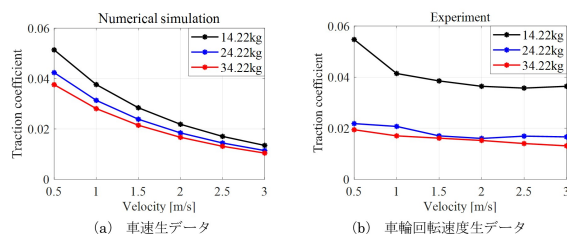


図5 接線力係数と荷重の関係図

#### 5. 結論

本稿では湿潤時における車輪・レールの粘着特性を着目し、数値解析モデルの構築を行った。接線力係数の計算式から説明しはじまり、その式においての流体圧力、固体接触圧力と液膜分布の求め方を述べた。本研究に従来基礎の理論モデルを基にして、楕円接触混合熱弾性流体潤滑理論へ拡張した。無次元化、そして離散化されたレイノルズ方程式、膜厚方程式、荷重釣り合い式、表面粗さ微小突起粒子接触計算式と流体のエネルギー方程式などを連立し、ニュートンラプソン法反復計算アルゴリズムにより流体圧力、固体接触圧力と液膜分布を算出した。特に接触力係数と荷重と速度など因子の関係を解明した。

#### 参考文献

- 1) 大山忠夫: 高速鉄道車両の車輪とレール間の粘着力およびばす接触条件の影響と粘着力向上に関する研究, 日本・東北大学博士論文, 1986.
- 2) 陳樺: 高速・湿潤時の車輪/レールの粘着力特性に関する研究, 日本・東京工業大学博士論文, 2006.
- 3) B. Wu, Z. Wen, T. Wu, and X. Jin, Analysis on thermal effect on high-speed wheel/rail adhesion under interfacial contamination using a three-dimensional model with surface roughness, *Wear*, vol. 366–367, pp. 95–104, 2016.
- 4) N. Patir, Effect of surface roughness orientation on the central film thickness in EHD contacts, *Proc. Inst. Mech. Engl. Part I*, vol. 185, pp. 15–21, 1970.
- 5) C. A. Roelands, Correlational aspects of the viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils, *Dr. thesis*, Tech. Hogesch. te Delt, 1966.