

湿潤状態における車輪／レール間の粘着力に及ぼす 輪重の影響

陳 権* 名村 明* 石田 誠** 中原 綱光***

Effect of Axle Load on Adhesion Coefficient between Wheel and Rail under Wet Conditions

Hua CHEN Akira NAMURA Makoto ISHIDA Tsunamitsu NAKAHARA

This paper describes the effect of axle load (contact pressure) on adhesion characteristics in response to running speed and surface roughness under wet conditions, investigated by the mixed lubrication analysis considering Elasto-Hydrodynamic Lubrication (EHL) and rough surface contact based on Greenwood-Williamson's (G-W) stochastic model for Gaussian distribution in roughness heights, as well as laboratory experiments with a twin-disc rolling contact machine. The numerical calculation results indicate that the adhesion coefficient increases with an increase in the contact pressure when surface roughness (the standard deviation of surface asperities height) is lesser. In contrast, the adhesion coefficient decreases with an increase in the contact pressure when surface roughness is larger. The reversal phenomenon in the effect of contact pressure on the adhesion characteristics in response to surface roughness is considered to relate the loads supported by asperities contact (Wc) and water lubrication film (Wh), respectively. Generally, the friction coefficient between asperities contact is much greater than that of water lubrication film, therefore, the adhesion coefficient is dominated almost by the ratio of asperities contact load to total load (Wc/W). In the past researches concerning adhesion in railway system, the experimental results obtained by Ohyama [1] also indicated a similar behavior of the adhesion coefficient in response to contact pressure. Hence, it is confident there is a critical value of surface roughness to change the relationship of adhesion coefficient with contact pressure. Furthermore, higher running speed creates a larger critical value of surface roughness than that in lower running speed.

キーワード：車輪，レール，湿潤，粘着係数，輪重，走行速度，表面粗さ

1. はじめに

車輪とレール間の粘着係数は、鉄道車両の走行安定性や安全性に関わる重要なファクターの一つである。通常、晴天下では車両走行に必要な粘着力が容易に得られるが、降雨・降雪のような湿潤時には車輪とレール間に水膜が形成され、水の潤滑作用により、粘着力は低下することが多い。粘着力が低いと、加速時に空転、制動時に滑走を引き起す恐れがあるため、湿潤条件下では、空転や滑走現象を抑制するための増粘着対策が講じられることとなる。一方、増粘着手段を検討するにあたって、湿潤時の粘着係数の低下メカニズムを解明することが重要であると考えられる。

これまで、湿潤時の粘着係数の低下メカニズムに関す

る実験や理論的な研究が幾つか報告されていた。大山ら^{1~3)}は、室内高速回転接触試験機を用いて、回転速度や接触荷重、表面粗さ、水温による粘着係数の変化を調べた。また、弾性流体潤滑理論を適用して、車輪とレール間に介在する水膜の厚さと粘着係数の関係を求めた。著者ら^{4~6)}は、弾性流体潤滑理論と表面粗さを考慮した接触理論（混合潤滑理論）を適用して、粘着係数に与える回転速度、表面粗さおよび水温の影響を解析した。また、室内2円筒転がり接触試験機を用いて、粘着係数に及ぼす回転速度、表面粗さおよび水温の影響を調べて理論解析結果の確認を行った。その結果、回転速度や表面粗さ、水温の影響が顕著であることを明らかにし、著者らの理論解析結果と大山らの研究結果とは傾向が一致することを確認した。

一方、近年高速新幹線車両の軽量化が図られる中、粘着力に及ぼす輪重の影響も重要になってきたと考えられる。輪重によって変化する接触荷重が粘着係数に及ぼす影響については、大山ら¹⁾の室内試験では、回転速度と

* 鉄道力学研究部（軌道力学）

** 軌道技術研究部

*** 東京工業大学

特集：鉄道力学

表面粗さの大きさによって輪重と粘着係数の関係が異なる傾向を示したが、そのメカニズムについて、特に検討されなかった。そこで、著者らはまず、混合潤滑理論を適用して、様々な回転速度と表面粗さの条件下における粘着係数と輪重の関係を解析し、最後に室内2円筒転がり接触試験機を用いて、理論解析で得られた結果を確認した。

本論文では、湿潤時の車輪とレール間の粘着係数に及ぼす輪重の影響について実施した理論解析と実験的な研究の結果を報告する。

2. 理論解析

2.1 数値モデルと解析方法

図1に車輪とレール間の接触モデルを示す。図1(a)は全体の接触状態、(b)は粗さ面突起部の接触の様子を示すものである。また、 w_c を粗さ面微小突起部で支持する荷重、 w_h を水膜で支持する荷重、 w を全体の接触荷重(輪重に相当するもの)と定義する。

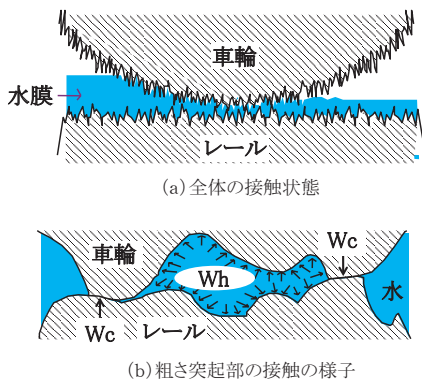


図1 車輪とレールの接触解析モデル

粘着係数 μ は、図1に示すパラメータを用いて式(1)より求められる。

$$\mu = \frac{\mu_c w_c + \mu_h w_h}{w} \quad (1)$$

ここで、 μ_c ：境界摩擦係数、 μ_h ：水膜のせん断係数である。

数値解析に関しては、弾性流体潤滑理論とGreenwood-Williamson (G-W)の粗さ面接触モデル(粗さ突起部の高さはガウス分布と仮定される)を適用して、ニュートン・ラプソン反復法により計算を行った。数値計算の流れは図2に示す通り、まず車輪とレール間に介在する水膜の厚さを求め、それから粗さ突起部同士の接触によって支持する荷重 w_c と水膜で支持する荷重 w_h をそれぞれ求めた。全荷重 w と $w_c + w_h$ の釣り合いが取れば、水膜のせん断係数と固体同士接触時の境界摩擦係数を用い

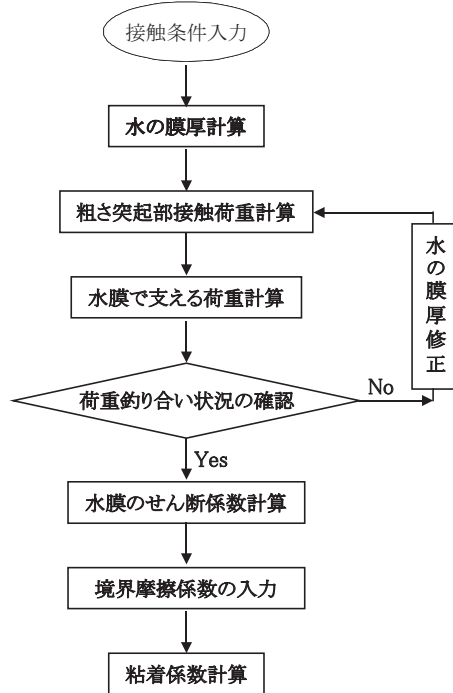


図2 粘着係数の計算フロー

て粘着係数を求めるが、釣り合いが取れない場合は、水膜の厚さを調整し、反復計算を行った。

2.2 数値解析結果

本解析は、なるべく高速車両の走行速度や車輪/レールの接触状況に近い条件を用いて、粘着係数と輪重(以下、輪重を最大ヘルツ接触圧力に置き換えて図に表す)の関係性を求めた。また、車輪とレールの表面粗さについて、新品や繰り返し走行後の接触面、車輪転削およびレール削正直後の接触面を想定して、 $0.3 \sim 1.5\mu\text{m}$ の幅広い値を用いた。

図3に、走行速度300km/hと設定した場合の数値解析で得られた粘着係数と最大ヘルツ接触圧力(以下、接触圧力と記す)の関係性を示す。接触圧力の大小にかかわらず、表面粗さの減少に従って粘着係数の低下が見られるが、接触圧力の増加に伴い、表面粗さによって粘着挙動は異なることが示された。表面粗さが小さい($0.4\mu\text{m}$ 以下)場合は、接触圧力の増加に伴って粘着係数も上昇し、表面粗さが大きい($1.0\mu\text{m}$ 以上)場合は、接触圧力の増加に伴って粘着係数は低下する傾向が示された。一方、表面粗さが中間値($0.5 \sim 0.8\mu\text{m}$)の場合は、粘着係数は接触圧力の増加に伴って一旦上昇し、次第に低下する方向に転じる傾向が示された。

図4に、図3と同じ計算条件下の車輪とレール間に介在する水膜の厚さの計算結果を示す。表面粗さの大小にかかわらず、接触圧力の増加に伴って車輪とレールの接触中心部の水膜の厚さが小さくなる傾向が示された。ま

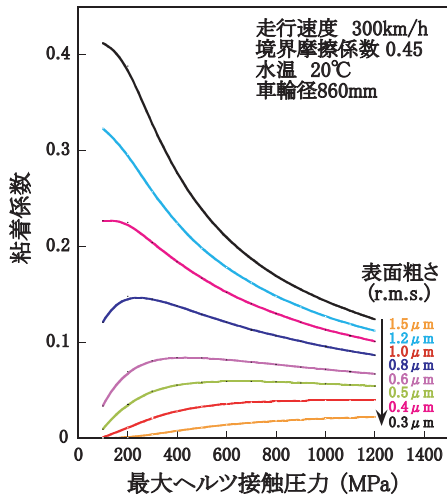


図3 粘着係数に及ぼす接触圧力と表面粗さの影響

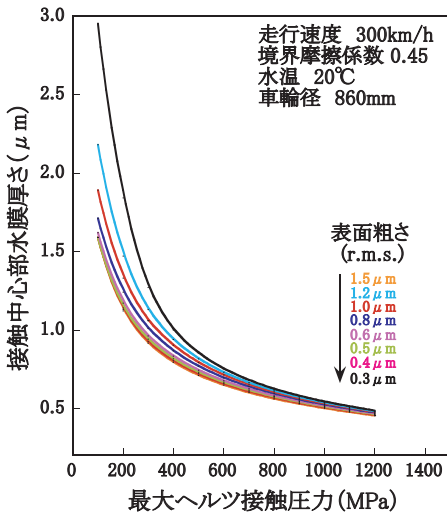


図4 水膜の厚さに及ぼす接触圧力と表面粗さの影響

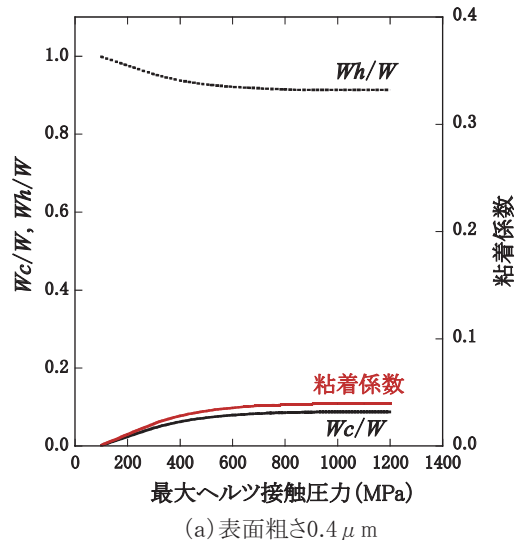
た、接触圧力が小さい場合は、水膜の厚さに対する表面粗さの影響が大きく見られるが、接触圧力の増加に伴ってその影響が殆どなくなった。

従来、水膜の厚さが小さいほど、粗さ面微小突起部は水膜を破り易く、粘着係数が大きいと言われていたが、図3と図4の解析結果から、表面粗さが大きい場合には、必ずしも適用できるとは言えない。何故ならば、図4に示されている高接触圧力条件下の水膜の厚さは小さいにも関わらず、図3では、水膜の厚さが大きい場合の粘着係数に比べて高接触圧力条件下の粘着係数は小さい傾向が見られた。故に、従来の説明は表面粗さが大きい場合に適合しないことが示唆された。

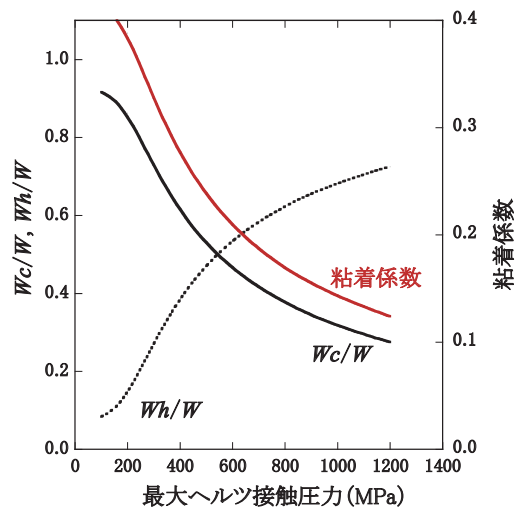
上述の現象のメカニズムをさらに理解するために、図3に示す計算条件から、表面粗さが0.4 μm と1.5 μm の場合を抽出して、接触圧力の変化による水膜と粗さ面微小突起部でのそれぞれの支持する荷重の割合を求めた。図5(a)は表面粗さが0.4 μm 、(b)は表面粗さが1.5 μm の計算結果である。表面粗さが小さい(0.4 μm)場合は、接

触圧力の増加に伴って水膜で分担する荷重 (w_h/w) は小さくなり、粗さ面微小突起部の分担荷重 (w_c/w) は大きくなる傾向が示された。一方、表面粗さが大きい(1.5 μm)場合は、その傾向は逆になっていることがわかった。図から、いずれの表面粗さ条件においても、接触圧力に対する粘着係数の変化は粗さ面微小突起部での分担荷重の変化傾向と一致しており、粗さ面微小突起部での分担荷重は粘着係数の支配的な要因になっていることがわかる。以上の解析結果は、走行速度が一定な条件下で求められたものである。

次に、走行速度によって粘着係数と接触圧力の関係がどのように変化するかを計算した。その結果を図6に示す。図6(a)は表面粗さが0.4 μm 、(b)は表面粗さが1.5 μm の計算結果である。表面粗さが小さい(0.4 μm)場合は、走行速度が低いと接触圧力の増加に伴って粗さ面微小突起部での分担荷重 (w_c/w) がわずかではあるが小さくなるため、粘着係数も低下する傾向が推定される(図6



(a) 表面粗さ0.4 μm



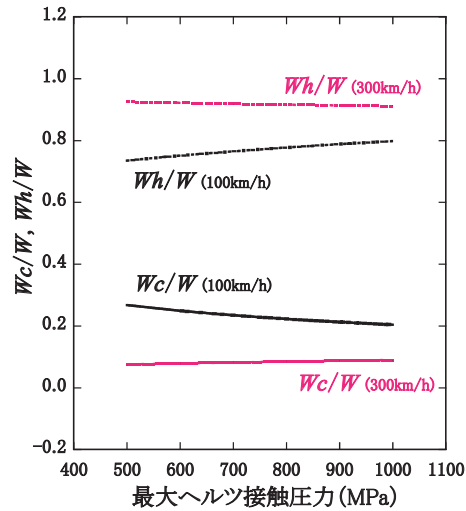
(b) 表面粗さ1.5 μm

図5 表面粗さによる分担荷重、粘着係数の変化

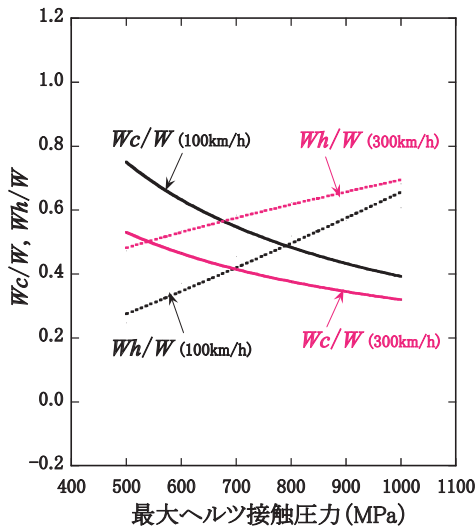
特集：鉄道力学

(a)。一方、表面粗さが大きい ($1.5\mu\text{m}$) 場合は、速度に依存せず粗さ面微小突起部での分担荷重 w_c/w が接触圧力の増加に伴って低下し、粘着係数も低下する傾向が推定される (図6 (b))。図6の結果から、粘着係数と接触圧力の関係に及ぼす走行速度の影響は、表面粗さの大きさに左右されることがわかった。

数値解析結果から、粘着係数は粗さ面微小突起部で支持する荷重の割合に依存し、接触圧力との関係は w_c/w と同じ傾向を示すことがわかった。走行速度や表面粗さによって水膜と粗さ面微小突起部の荷重分担率の傾向が異なる理由は、粗さ面微小突起部の接触剛性と水膜の剛性の大きさが表面粗さの大きさと走行速度によって変るためと考えられる。走行速度が高くなると、水膜が厚くなり、接触剛性も高くなるので、水膜の分担荷重が大きくなる。その結果、粗さ面微小突起部での分担荷重は減少し粘着係数の低下が見られる。



(a) 表面粗さ $0.4\mu\text{m}$



(b) 表面粗さ $1.5\mu\text{m}$

図6 走行速度による分担荷重の変化

3. 室内試験

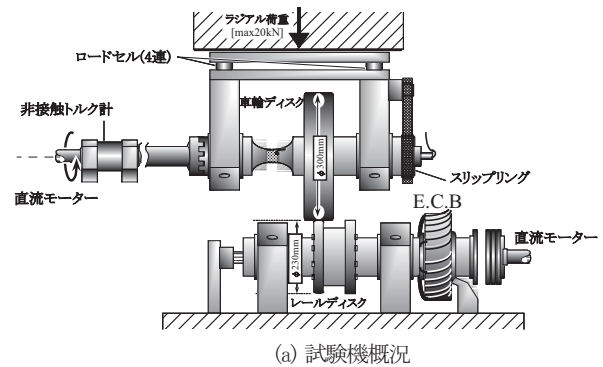
数値解析により、粘着係数に与える輪重の影響は走行速度や表面粗さによって変わることが明らかになった。解析結果の妥当性を確認するために、室内2円筒転がり接触試験機を用いて、接触荷重と最大トラクション係数の関係について調べた。この最大トラクション係数は、車輪/レール間の粘着係数に相当するものである。

3.1 実験装置と試験方法

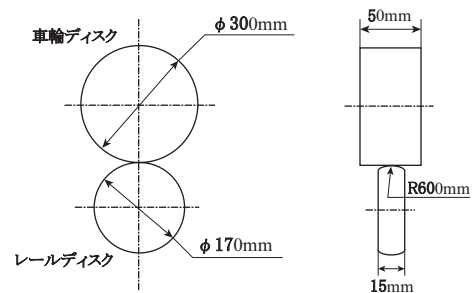
2円筒転がり接触試験機⁷⁾の概略およびそれに供する車輪とレールディスクの寸法と接触踏面の形状を図7に示す。車輪ディスクの接触踏面は平らであり、レールディスクの接触踏面は曲率半径 600mm が付いている円弧の形状を有するため、実の車輪とレール間で発生する接触圧力がラジアル荷重を調整することにより再現できるようになっている。車輪ディスクは実車輪と同種の材質ならびに製造法で作製されており、レールディスクは普通レール (JIS60kg) から切り出したものである。

水潤滑条件での実験は、散水制御装置により水圧 100kPa 、散水量 600ml/min の純水 (水道水による試験輪接触踏面の錆の生成を避けるため) を車輪とレールディスクの間に噴射して実施した。

試験条件に関しては、解析条件と同じにするのが好ましいことではあるが、試験機の性能 (最大速度 100km/h 、最大荷重 10kN) 上の制限もあるので、回転速度は 30km/h と 80km/h 、接触荷重は 2kN から 8kN までを変化させ



(a) 試験機概況



(b) 試験ディスクの寸法と形状

図7 2円筒転がり接触試験機

試験を行った。また、車輪とレールディスクの接触踏面は研磨紙#60（表面粗さRq：約1.5 μm ）と#600（表面粗さRq：約0.4 μm ）によって仕上げられて、純水の水温は約24 $^{\circ}\text{C}$ であった。

3.2 試験結果

図8は、回転速度が同じ場合の表面粗さ（#60, #600）による最大トラクション係数と接触圧力の関係を示すものである。図8（a）は回転速度30km/h、（b）は回転速度80km/hの試験結果である。回転速度が低い（30km/h）場合は、表面粗さの大きさに依存せず最大トラクション係数は接触圧力の増加に伴って小さくなる傾向が示された。また、回転速度が高い（80km/h）場合は、表面粗さが大きいと、最大トラクション係数が低下するが、表面粗さが小さくなると、最大トラクション係数が上昇する傾向が現れた。

図9は、表面粗さが同じ場合の回転速度（30km/h, 80km/h）による最大トラクション係数と接触圧力の関係を示すものである。図9（a）は研磨紙#60で仕上げた表面、（b）は研磨紙#600で仕上げた表面の試験結果である。表面粗さが大きい（#60）場合は、いずれの回転速度の条件においても最大トラクション係数は接触圧力の増加に伴って小さくなる傾向が示されたが、表面粗さが小さいと、低速（30km/h）の場合は最大トラクション係数が低下し、高速度（80km/h）の場合は最大トラクション係数が上昇する傾向が見られた。

上記の試験結果から、最大トラクション係数に及ぼす接触圧力の影響は、回転速度や表面粗さによって変わることがわかった。室内試験と数値解析の条件は異なるにも関わらず、両者の結果はほぼ同じ傾向を示すことが確認できた。

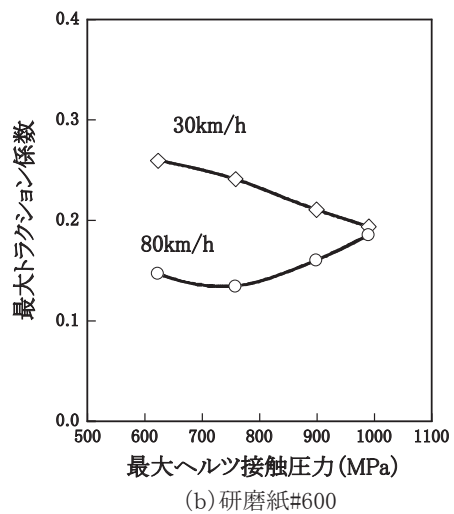
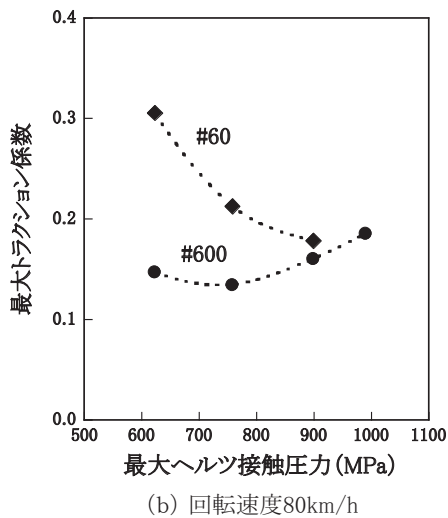
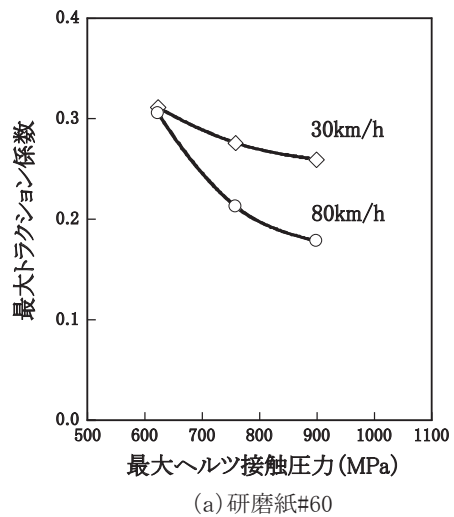
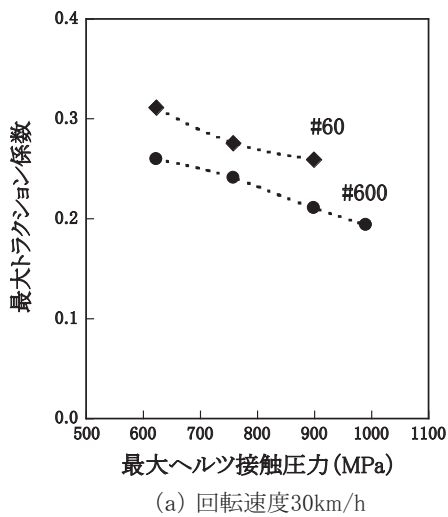


図8 表面粗さによる最大トラクション係数の変化

図9 回転速度による最大トラクション係数の変化

特集：鉄道力学

4. 考察

本研究における数値解析および室内実験の結果から、走行速度が低い場合は、表面粗さの大きさに依存せず、粘着係数が接触圧力の増加に従って低下するが、走行速度が高い場合は、表面粗さが大きいと、粘着係数が接触圧力の増加に伴って低下し、表面粗さが小さくなるに従って粘着係数が上昇する傾向に変わることがわかった。また、ある走行速度の条件下では表面粗さの閾値が存在し、表面粗さが閾値より小さい場合は、接触圧力の増加に伴って粘着係数が大きくなり、表面粗さが閾値より大きい場合は、接触圧力の増加に伴って粘着係数が小さくなることもわかった。

図10に、大山ら¹⁾が用いた高速回転試験機による室内試験結果を示す。研磨紙#80で仕上げた表面は、接触圧力490MPa(E線)より、接触圧力784MPa(F線)の条件下の最大トラクション係数が小さく、一方、研磨紙#600で仕上げた表面は、接触圧力490MPa(A線)より、接触圧力784MPa(B線)の条件下の最大トラクション係数が大きいことが示された。大山らと著者らは用いた試験機と試験条件が異なるため、得られた最大トラクション係数の値は異なるが、粘着係数と接触圧力の関係については、表面粗さに影響されることが明らかになった。

上記から、新幹線車両が高速で走行する場合は、車輪とレールの表面粗さが大きいと、輪重の軽減に伴って粘着係数が大きくなるが、表面粗さが小さい場合、輪重の軽減に伴って粘着係数が小さくなるので、空転や滑走現象が起き易い方向となると言える。それゆえ、高速車両

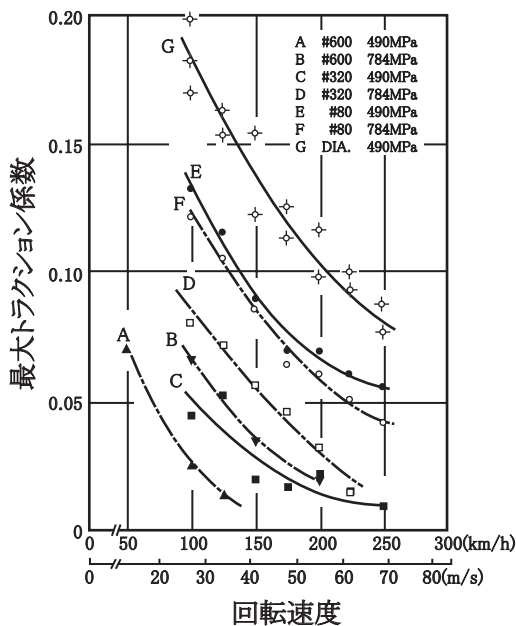


図10 最大トラクション係数と回転速度、接触圧力、表面粗さの関係¹⁾

の車輪とレールの接触面粗さをある程度に維持させることが、空転と滑走の予防策になると考えられる。

5. まとめ

車輪とレール間に水膜が介在する場合の輪重による粘着係数の変化を調べるために、実際の車輪とレールの接触条件における粘着係数を混合潤滑理論を適用して求めた。また、理論解析で得られた結果を確認するために、室内2円筒転がり接触試験機を用いて実験を行った。その結果を以下の通りまとめる。

- (1) 粘着係数と輪重の関係は、走行速度や表面粗さに影響される。
- (2) 高速走行の場合は、表面粗さによって粘着係数と輪重の関係が変わる。表面粗さが大きいと、輪重の増加に伴って粘着係数が小さくなるが、表面粗さが小さくなると、粘着係数が上昇する傾向に変わる。
- (3) ある走行速度の条件では、粘着係数の挙動を変える表面粗さの閾値が存在する。表面粗さが閾値より小さい場合は、粘着係数は輪重の増加に伴って大きくなり、表面粗さが閾値より大きい場合は、粘着係数は輪重の増加に伴って小さくなる。

文献

- 1) 大山忠夫, 陳樺, 石田誠: “鉄道のレールと車輪間のEHL”, トライボロジスト, Vol.49, No.4, pp.316-322, 2004
- 2) 大山忠夫: 鉄道総研報告, Vol.1, No.2, 1987年10月
- 3) 大山忠夫, 大矢光伸: 車輪/レール間の粘着力に及ぼす表面性状の影響(水潤滑状態に対するEHL理論の適用とあらし突起の接触について), 日本機械学会論文集(C編), Vol.52, No.475, pp.1037~1046, 1986
- 4) H.Chen, T.Ban, M.Ishida, T.Nakahara: Adhesion between Rail/Wheel under Water Lubricated Contact, Wear, 253, pp.75~81, 2002.
- 5) H. Chen, T. Ban, M. Ishida, T. Nakahara: “Effect of water temperature on the adhesion force between rail and wheel”, Pro. Instn. Mech. Engrs, Part J: J. Engineering Tribology, 220 (J7), pp.571-579, 2006.
- 6) H. Chen, T. Ban, M. Ishida, T. Nakahara: “Experimental investigation of influence factors on adhesion between rail and wheel under wet conditions”, Wear, 253, pp.75~81, 2006.
- 7) 伴巧, 本卓也, 石田誠: 高精度転がり接触試験機高の試作と一二の実験結果, 鉄道技術連合シンポジウム, pp.301~302, 1998