

湿潤条件下の車輪とレール間の粘着係数に 影響を及ぼす因子

陳 権* 伴 巧** 石田 誠*** 中原 綱光#

Influential Factors on Adhesion between Wheel and Rail under Wet Conditions

Hua CHEN Takumi BAN Makoto ISHIDA Tsunamitsu NAKAHARA

Study on the adhesion of wheel/rail system includes a lot of research fields such as tribology, rolling contact mechanics, material science, structural dynamics, heat transfer and others. The authors focused on several parameters which play very important roles in affecting the adhesion coefficient of wheel/rail interface. Those parameters, which include running speed, water temperature, wheel load and surface roughness of wheel and rail, have great influence on hydro-lubricate behavior of water film formed at wheel/rail interface from the tribological point of view. This paper describes the relation between those parameters and their influence on the adhesion coefficient by means of both theoretical and experimental approaches. Numerical analysis was based on the Mix-lubrication theory, and a laboratory experiment was conducted with a twin-disc rolling contact machine. The numerical solutions and the experimental results indicated that the effects of running speed, water temperature and surface roughness of wheel/rail interface on the adhesion coefficient were significant.

キーワード：車輪，レール，湿潤，粘着係数，走行速度，表面粗さ，水温

1. はじめに

レール面が乾燥状態の場合には、新幹線車両の高速走行は特に問題視されないが、雨や雪などで表面がぬれると、車輪とレール間に介在する水膜の厚さが車両走行速度の増加に伴って大きくなるため、水の潤滑作用により粘着力は低下することが多い。その結果、加速時の空転や制動時の滑走現象などが発生する事例が多く見受けられる。このようなトラブルは、ダイヤの乱れやブレーキ距離の延伸などに繋がるだけでなく、レールと車輪の接触面に空転傷または滑走傷が形成され、車両走行時の騒音や振動が大きくなって乗り心地が悪化する恐れもある。車輪とレールの表面にできた傷を取り除くために臨時に車輪踏面削正などの保守作業を行っているが、表面の損傷が重大な場合は、車輪あるいはレールを交換する場合もあり、その結果、メンテナンスコストが増加する。日本国内での車輪使用状況に関する過去のアンケート調査によると、臨時に車輪削正するに至った様々な理由のうち、ほぼ75%は車輪フラットによって占められている¹⁾。安全・安定輸送、車両の乗り心地の確保および保守経費の削減のため、湿潤条件下の粘着力に影響を及ぼす

要因を見出し、それに基づいて粘着力の改善法を考えることは、鉄道事業者から求められる重要度の高い基礎的な研究課題と言える。

粘着問題の研究には、営業線での実車試験や室内模型試験、数値シミュレーションなどのアプローチが考えられる。過去に内田ら²⁾は200系新幹線車両を利用して先頭軸に取り付けた散水ノズルによる湿潤条件下の粘着試験、今西ら³⁾は1/5スケールの模型すべり粘着台車および実験軌道による湿潤条件下の粘着試験、Zhangら⁴⁾は実車と同様の寸法および形状の試験輪を用いた湿潤条件下の室内粘着試験を行った。また、大山⁵⁾は室内高速回転接触試験機を用いて湿潤条件下の粘着試験を実施したうえ、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調べた。

本論文では、上記した従来の研究を踏まえたうえで、粘着対策を講じることを目的として、車輪とレール間に介在する水膜の潤滑作用に着目し、湿潤条件下の粘着係数に影響を及ぼす因子を明らかにするために実施した理論解析と実験的な研究の内容と結果を報告する。

2. 理論解析

2.1 数値モデルと解析方法

図1に車輪とレール間に水膜が介在する場合の接触状態を示す。固体（金属）同士が直接接触する部分と水膜

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室
** 材料技術研究部 摩擦材料研究室
*** 鉄道力学研究部
元 東京工業大学

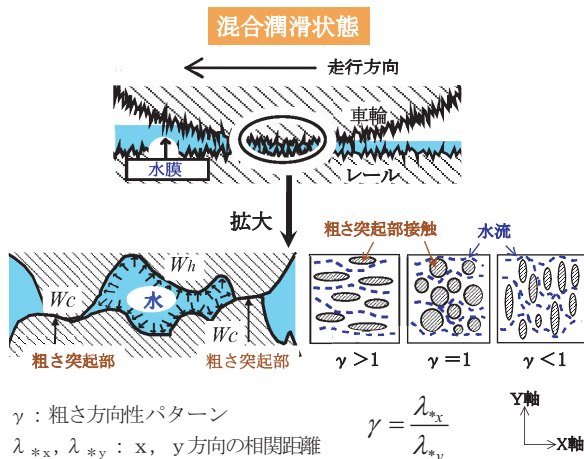


図1 水膜が介在する場合の接触状態

を介して接触する部分が混在しているため、通常は「混合潤滑状態」と呼ばれている。本研究は、図1に示す混合潤滑モデルに基づき、弾性流体潤滑理論と粗さ接触理論を適用して湿潤条件下の車輪とレール間の粘着係数を解析した。

図中、 W_c は粗さ突起部同士の接触によって支持する荷重、 W_h は水膜で支持する荷重である。粘着係数 μ は、以下の式から求められる。

$$\mu = \frac{\mu_c W_c + \mu_h W_h}{W} \quad (1)$$

ここで、 μ_c は固体（金属）接触部の境界摩擦係数、 μ_h は水膜のせん断係数、 W は輪重である。式中のパラメータのうち、輪重 W と境界摩擦係数 μ_c 以外を数値解析法により求めることになる。一方、境界摩擦係数 μ_c は実験で求めることが多い。

数値解析法に関しては、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、筆者らの示した支配方程式⁶⁾を用いてニュートン・ラプソン反復法により数値計算を実施した。計算の流れは、以下の通りである。

- ①初期条件を入力
- ②車輪とレール間に介在する水膜の厚さを求める
- ③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 をそれぞれ求める
- ④輪重 W と $W_c + W_h$ の釣り合いが取れば、水膜のせん断係数 μ_h を求めて、⑤へ進む。釣り合いが取れない場合は、水膜の厚さを調整し、③に戻って反復計算を行う。
- ⑤境界摩擦係数 μ_c を入力
- ⑥式(1)により粘着係数を求める

2.2 数値解析結果

解析条件を表1に示す。これは高速車両の走行速度や車輪とレールの接触状況に近い基本条件であり、諸影響

表1 解析条件

車輪（半径）	X軸方向：0.43m, Y軸方向：∞
レール頭頂面（曲率半径）	軸方向：∞, Y軸方向：0.6m
ヤング率	2.06×10^{11} Pa
ポアソン比	0.3
接触圧力	750 MPa
走行速度	300 km/h
すべり率	0.2%
水温	20 °C
表面粗さ (Rq)	$0.44 \mu\text{m}$
粗さ方向性パターン (γ)	1
境界摩擦係数 (μ_c)	0.45

因子と粘着係数の関係を調べる際には、基本条件の一部を変更して数値計算を行った。

図2に、列車の走行速度と粘着係数の関係、および接触中心部の水膜厚さを示す。走行速度の増加に伴って粘着係数が低くなる傾向が見られる。その原因は、図に示すように、走行速度の増加に伴って車輪とレール間に介在する水膜が厚くなり、水膜が破れ難くなるためである。水膜は厚くなると車輪とレールの固体（金属）同士の接触面積が小さくなり、水膜の潤滑作用により粘着係数が低くなると考えられる。

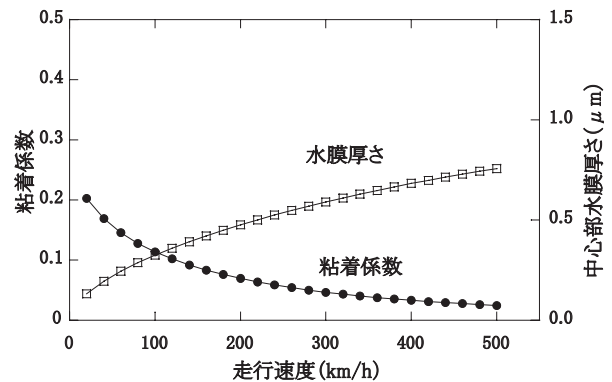


図2 粘着係数に及ぼす走行速度の影響

図3に、車輪とレール間に介在している水膜の温度と粘着係数の関係、および接触中心部の水膜厚さを示す。水膜の温度が上昇すると粘着係数が高くなる傾向が示されている。一般的に、同じ走行条件において水膜の温度が上昇すると水の粘性が低くなるので、水膜が薄くなる傾向がある。水膜が薄くなると粗さ突起部で破れ易く、

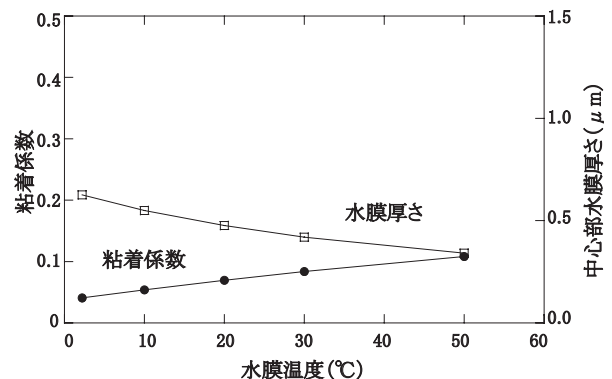


図3 粘着係数に及ぼす水膜温度の影響

固体（金属）同士の接触面積が大きくなるので、粘着係数が高くなると考えられる。

図4に、輪重（輪重をヘルツ最大接触圧力に置き換えて図に表す）と粘着係数の関係、および接触中心部の水膜厚さを示す。見掛け上、輪重は粘着係数に与える影響は殆どないが、縦軸の粘着係数の目盛りを拡大して見ると、輪重が小さい範囲では、粘着係数が輪重の増加に伴って高くなり、輪重がある値を超えた後に粘着係数が低くなる方向へ転換する傾向が認められる。この現象を明らかにするために、表面粗さを変えて接触圧力と粘着係数の関係を再度調べた。計算結果の一例として、図5に表面粗さが異なる場合の粘着挙動を示す。図より表面粗さの大きさによって接触圧力と粘着係数の関係は変わることが明らかになった。また、粘着係数は主に固体（金属）同士の接触で支持する荷重 (W_c/W) に依存することもわかった。なお、ここに示していないが、表面粗さ以外、速度によって接触圧力と粘着係数の関係も変わることも確認された⁷⁾。接触圧力と粘着係数の関係は、一定の傾向を示すわけではなく、走行速度や表面粗さにも影響されることが数値解析結果から明らかになった。

図6に、表面粗さと粘着係数の関係、および接触中心部の水膜厚さを示す。表面粗さが大きくなると粘着係数が顕著に高くなる傾向が現れた。一方、水膜厚さはそれほど大きな変化が見られなかった。表面粗さが大きくなると水膜は粗さ突起部で破れ易く、固体（金属）同士の接触面積が大きくなるので、粘着係数が高くなると考えられる。

図7に、粗さ方向性パターンと粘着係数の関係、および接触中心部の水膜厚さを示す。表面粗さのみならず、粗さ方向性パターンの影響も顕著であることが認められる。レール長手方向あるいは車輪回転方向の粗さ方向性

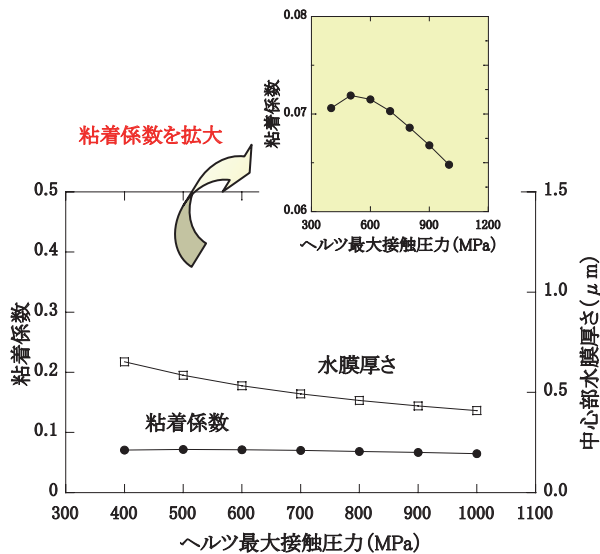


図4 粘着係数に及ぼす接触圧力の影響

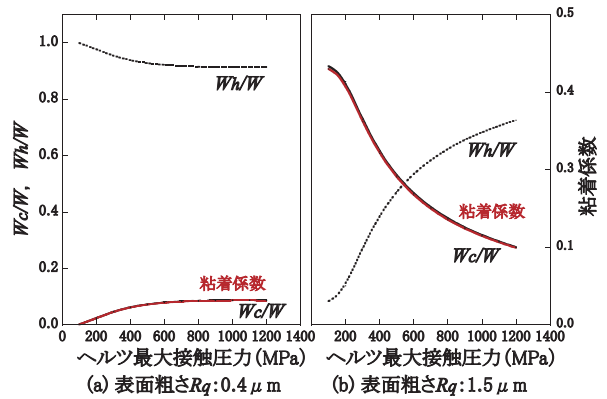


図5 表面粗さによる粘着係数と接触圧力の関係

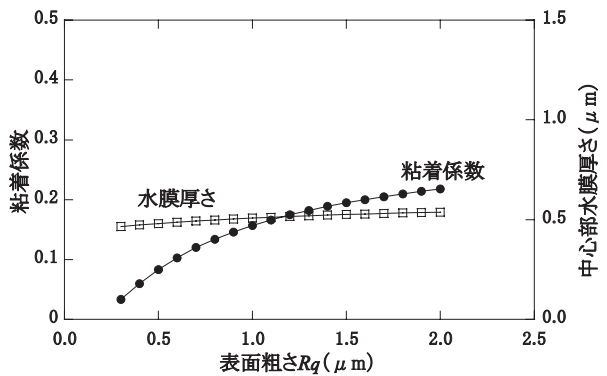


図6 粘着係数に及ぼす表面粗さの影響

パターン $\gamma > 1$ の場合に粘着係数が高く、それから $\gamma = 1$ 、 $\gamma < 1$ の順に低くなる傾向が示されている。

以上の数値解析結果から、粘着係数に及ぼす走行速度や水膜の温度、表面粗さ（大きさ、方向性パターン）の影響が大きいことがわかった。そして、輪重（ヘルツ最大接触圧力）の影響については少々複雑となり、走行速度や表面粗さにも依存することがわかった。図5から、粘着係数の大小は、主に固体（金属）同士の接触で支持する荷重 (W_c/W) に支配され、粘着係数に影響を与える全ての因子はこの支持荷重 (W_c/W) を通じて粘着係数の変化をもたらしていると言える。

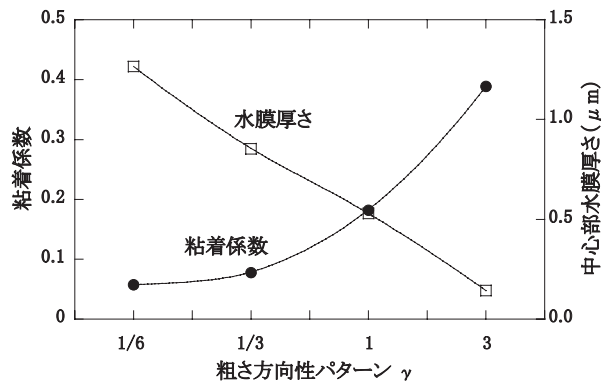


図7 粘着係数に及ぼす粗さ方向性パターンの影響

3. 実験による検証

上述の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検証実験を実施した。なお、以下の室内実験では、接触圧力を実車相当の表1の値としたので、得られた最大トラクション係数は、鉄道分野の粘着係数に相当すると考えられる。

3.1 実験装置と実験方法

図8に、2円筒転がり接触試験機の概況およびそれに供する車輪とレール輪の寸法と接触踏面の形状を示す。車輪の接触踏面は平らであり、レール輪の接触踏面は曲率半径600mmの円弧形状を有するため、試験荷重で実の車輪とレール間で発生する接触圧力（輪重に対応）が再現できるようになっている。車輪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、レール輪は普通レールから切り出したものである。

水潤滑条件下の実験は、散水制御装置により水圧100kPa、散水量600ml/minの水を車輪とレール輪の間に噴射して実施した。水温と粘着係数の関係を調べる実験では、水タンク内の水温を調整し、噴射ノズル部からの水の温度を測定し、水温条件とした。

実験に際しては、車輪およびレール輪の回転速度、接触荷重が初期設定値に達した後、図8(a)に示す水噴射システムにより、車輪とレール輪の間に水を噴射し、次いで電磁ブレーキにより負荷トルクを徐々に上げてすべ

り速度を大きくする。設定した最大すべり率を超えた時点で試験機は自動停止し、実験を終了する。

実験中の車輪およびレール輪の回転速度はロータリーエンコーダで検出され、すべりを与えた時に接触部で発生する接線力は車輪側の非接触トルク計で計測される。接線力とトルクの関係は以下になる。

$$T_w = F \cdot R_w - \dot{\omega}_w \cdot I_w \quad (2)$$

ここで、 F は接線力、 T_w 、 R_w 、 $\dot{\omega}_w$ と I_w はそれぞれ車輪側のトルク、車輪半径、角加速度および慣性モーメントである。

式(2)より、トラクション係数 μ は次の式によって算定される。

$$\mu = \frac{T_w + \dot{\omega}_w \cdot I_w}{R_w \cdot W} \quad (3)$$

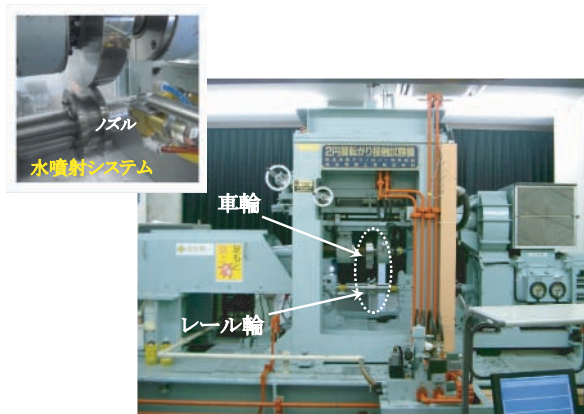
式中、 W は車輪とレール輪間の垂直方向の接触荷重である。なお、式(3)に基づいて求めた微小すべり領域での最大トラクション係数を粘着係数と見なす。

3.2 実験結果

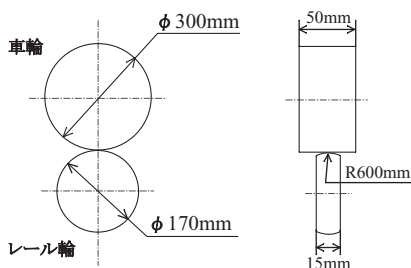
実験条件に関しては、高速車両を対象とした解析条件と同じにするのが望ましいが、試験機の仕様（例えば、最大回転速度100km/h）範囲内で可能な条件を設定した。実験条件を表2に示す。

表2 実験条件

車輪（半径）	X軸方向：0.15 m, Y軸方向：∞
レール輪（半径）	X軸方向：0.085 m, Y軸方向：0.6 m
ヤング率	2.06×10^{11} Pa
ポアソン比	0.3
接触荷重 （接触圧力）	2 - 8 kN (3.5kN = 751 MPa)
回転速度	20 - 100 km/h
すべり率	0 - 10%
水温	5, 20, 50 °C
表面粗さ (R_q)	0.2 - 2.0 μ m
粗さ方向性パターン (γ)	< 1, = 1, > 1



(a) 2円筒転がり接触試験機概況



(b) 試験輪の寸法と形状

図8 2円筒転がり接触試験機

図9に、回転速度と水膜の温度が最大トラクション係数に及ぼす影響を示す。回転速度の増加に伴って最大トラクション係数（粘着係数に相当、以下はこの表記を省略）が低くなることが確認できた。この結果は、図2に示した数値解析結果と傾向が一致している。一方、図示した水膜の温度の影響に関する試験結果はばらつきがあるが、同じ回転速度の場合は、水膜の温度が上昇すると最大トラクション係数が高くなる傾向が確認できた。この結果は、図3に示した数値解析結果と傾向が一致している。

回転中に接触面の摩耗により表面粗さが変化したため、試験結果にばらつきが生じたと考えられるため、温水（50°C）と冷水（5°C）の条件で表面粗さによる最大トラ

クシオン係数の変化を調べた。その結果を図10に示す。温水と冷水のいずれの場合も、同じ回転速度の条件下で表面粗さが大きくなるほど、最大トラクション係数が高くなることが確認できた。

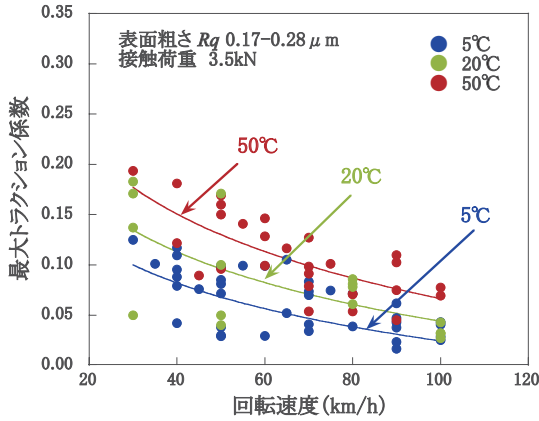


図9 水膜温度別の回転速度と最大トラクション係数の関係

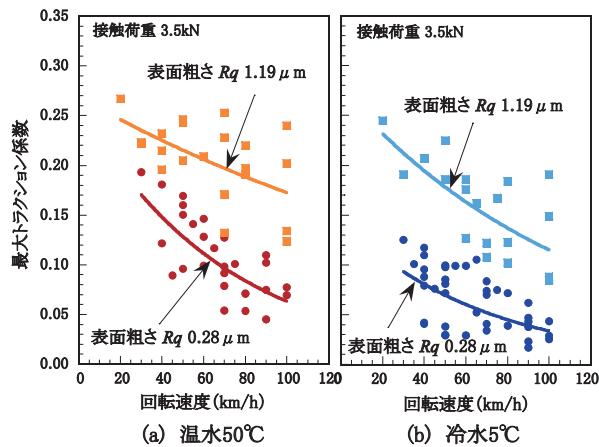


図10 水膜温度別の表面粗さ、回転速度と最大トラクション係数の関係

図11に、接触圧力が最大トラクション係数に及ぼす影響を示す。表面粗さと回転速度の2条件を組み合わせる実験を行った。図中の#60、#600は研磨紙の砥石粒子の大きさを表しており、番号の数値が小さいほど、仕上げた表面粗さが大きくなる。図から、最大トラクション係数に与える接触圧力の影響は、表面粗さと回転速度にも依存することがわかった。回転速度が低い場合(30km/h)は、いずれの表面粗さ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低くなる傾向が示されたが、回転速度が高い場合(80km/h)は、表面粗さが小さい(#600)と最大トラクション係数が接触圧力の増加に伴って最初は低くなり、ある接触圧力値のところから高くなる傾向に変わった。一方、表面粗さが大きい(#60)と最大トラクション係数が接触圧力の増加に伴って低くなる傾向が確認できた。

図12に、表面粗さが最大トラクション係数に及ぼす影

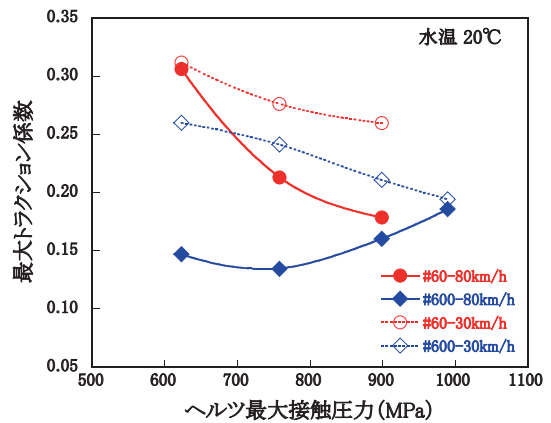


図11 表面粗さ、回転速度別の接触圧力と最大トラクション係数の関係

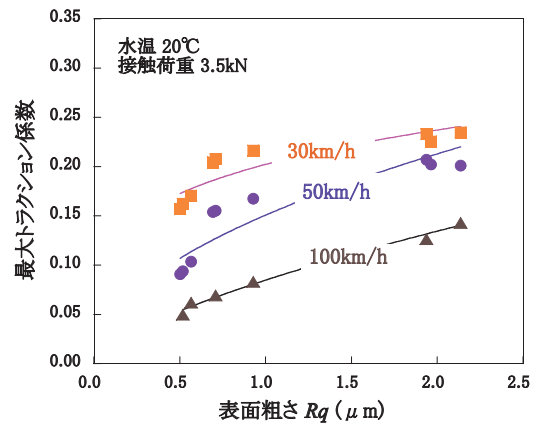


図12 回転速度別の表面粗さと最大トラクション係数の関係

響を示す。表面粗さが大きくなると最大トラクション係数も高くなることが確認できた。この結果は、図6に示した数値解析結果と傾向が一致している。

図13に、粗さ方向性パターンが最大トラクション係数に及ぼす影響を示す。図7に示した数値解析結果と異なり、レール長手方向あるいは車輪回転方向の粗

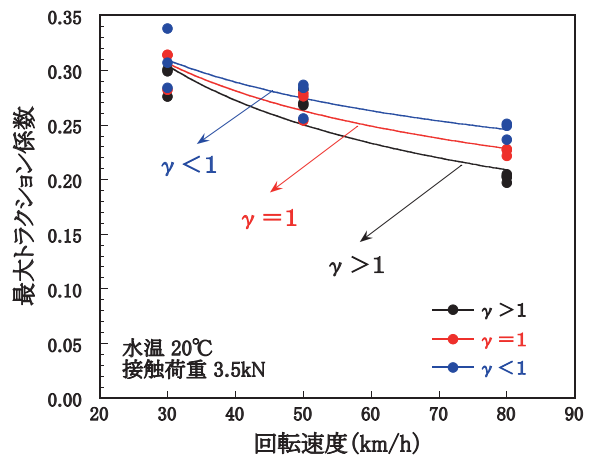


図13 粗さ方向性パターン別の回転速度と最大トラクション係数の関係

さ方向性パターン $\gamma > 1$ の場合に粘着係数が低く、それから $\gamma = 1$ 、 $\gamma < 1$ の順に高くなる傾向が得られた。その原因は、以下による考えられる。数値解析モデルはレール横方向への圧力変化がないことを仮定しているため、横方向への水の流出は無いことになる。一方、実験中にはレール輪の横方向への水の流失があるので、理論解析の接触条件と異なっている。今後は、数値解析モデルを実車輪とレールの接触状態に近づけるように改良する必要がある。

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、湿潤条件下の粘着係数に及ぼす走行速度や表面粗さ、水膜の温度の影響が大きいことがわかった。走行速度が増加すると粘着係数が低くなる。一方、表面粗さが大きくなる、または水膜の温度が上昇すると粘着係数が高くなる傾向にある。粘着係数は、主に水膜の厚さや固体（金属）同士の接触で支持する荷重 (W_c/W) に支配される。水膜が薄いと、水膜が粗さ突起部で破れ易く、固体（金属）同士の接触面積が大きくなって支持する荷重 (W_c/W) も大きくなり、結果的に粘着係数が高くなる。

輪重（ヘルツ最大接触圧力）の影響に関しては、走行速度と表面粗さに依存する。走行速度が高い場合（図11、80km/h）は、表面粗さが大きい（図11、#60）と粘着係数が輪重の増加に伴って低くなる。表面粗さが小さい（図11、#600）と粘着係数が輪重の増加に伴って最初は低くなり、それから高くなる傾向に変わる。一方、走行速度が低い場合（図11、30km/h）は、表面粗さの大きさに依存せず、粘着係数が輪重の増加に伴って低くなる傾向にある。図11の結果から、ある走行速度の条件において、輪重と粘着係数の関係が変わる表面粗さの閾値が存在することがわかった。表面粗さが閾値より小さい場合は、輪重の増加に伴って粘着係数が高くなり、表面粗さが閾値より大きい場合は、輪重の増加に伴って粘着係数が低くなる。この現象は、大山⁵⁾の高速回転試験機による室内試験結果にも現れている。

表面粗さパターンに関しては、数値解析と検証実験の結果は一致していないため、今後の課題として引き続き解明する必要がある。

上記から、新幹線車両が高速で走行する場合の粘着係数の向上策の方向として、車輪とレールの表面粗さを大きくすること、または介在する水膜の温度を上昇させることであると考えられる。

5. まとめ

本研究では、混合潤滑モデルに基づいた理論解析と2円筒転がり接触試験を用いた実験の両方から、湿潤条件下の粘着係数に及ぼす影響因子ならびにそれぞれの影響度合いを調べた。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 走行速度の増加に伴って粘着係数が低くなり、一方、水膜の温度の上昇、または表面粗さの増大は粘着係数を高くする効果がある。
- (2) 輪重（ヘルツ最大接触圧力）の影響に関しては、走行速度と表面粗さに依存する。ある走行速度の条件において、輪重と粘着係数の関係が変わ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、輪重の増加に伴って粘着係数が高くなり、表面粗さが閾値より大きい場合は、輪重の増加に伴って粘着係数が低くなる。
- (3) 粗さパターンの影響について、理論解析結果と実験結果は一致していなかったため、今後の課題として、さらに調査する必要がある。
- (4) 走行速度、水膜の温度および表面粗さは粘着係数に及ぼす影響度合いが大きいことが明らかになったので、今後、増粘着対策として活用できると考えられる。

文献

- 1) 日本鉄道車輛工業会：我が国における最近の車輪使用状況、車両技術、No.197, p.122, 1992
- 2) 内田清五、小原孝則：粘着力有効利用による新幹線高速化のためのブレーキ制御、鉄道総研報告、Vol.7, No.3, pp.41-48, 1993
- 3) 今西学、永瀬和彦：レール湿潤状態における鉄道車両のレール・車輪間の粘着に関する研究、平成9年度鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail）, pp.107-110, 1997
- 4) W. Zhang, J. Z. Chen, X. J. Wu & X. S. Jin: "Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig", Wear, vol.253, pp.82-88, 2002.
- 5) 大山忠夫：高速鉄道車両の車輪とレール間の粘着力に及ぼす接触条件の影響と粘着力に関する研究、鉄道総研報告、Vol.1, No.2, p.32, 1987
- 6) 陳樺、石田誠、伴巧：表面粗さ突起部形状を考慮した粘着力解析、鉄道総研報告、Vol.18, No.8, pp.35-40, 2004
- 7) 陳樺、名村明、石田誠：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、鉄道総研報告、Vol.24, No.4, pp.27-32, 2010