

# 湿潤時の車輪・レール間の粘着力に及ぼす表面粗さと温度の影響

鉄道力学研究部 軌道力学研究室

主任研究員 陳 樺

## 1. はじめに

降雨時には車輪とレールの間に水膜が形成されるため、粘着力は低下し、空転・滑走が発生しやすくなる。滑走対策として使用されている増粘着研磨子は、車輪踏面の汚れを除去する、研磨子ブロックから脱落する微粒子を車輪・レール間に噛み込ませて粘着力を増加させる、車輪の表面粗さを大きくする、などの機能を持つ。車輪の表面粗さと粘着力の関係に関する大山ら<sup>1)</sup>の報告によると、表面粗さが大きいほど粘着力が大きくなるとされている。また、温度と粘着力の関係については、筆者ら<sup>2) 3)</sup>が散水温度を変化させた研究結果を報告している。その実験結果と計算結果によると、高温であるほど粘着力は大きくなる。一方で従来の研究は、表面粗さ一定の条件下における温度と粘着力の関係、または温度一定の条件下における表面粗さと粘着力の関係を調べたものであり、表面粗さ、温度（水温、車輪温度、レール温度）と粘着力の相互関係はどのようなになっているかについては、まだ明らかになっていない。

そこで本研究では、粘着力に影響を及ぼす表面粗さと温度に改めて着目して、室内試験装置を用いた粘着実験を行った。表面粗さについては過去の報告よりも広範に、また温度については車輪、レールおよび水の温度を変化させて粘着力を測定した。その結果、湿潤状態での粘着現象について新たな知見を得たので、以下に報告する。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験装置

鉄道総研にて開発した2円筒転がり接触試験機を使用した。装置の構成は図1の通りである。車輪の直径は300mmで、転動面は平らである。一方、レール輪の直径は170mmで、転動面には曲率半径600mmを有す。車輪は車輪鋼SSW-Q1Rの材料ブロックから、レール輪は60kgレールから切り出している。試験輪の接触部に水を噴射できるよう、試験機には散水装置も取り付けられている。この散水装置は、圧縮空気を利用してタンク内に入れた水を噴射する機構になっており、タンク内の水温を調節することが可能である。散水ノズルの噴射口は直径1.2mmの円形で、ノズル先端から両試験輪の接触部までの距離は170mmである。

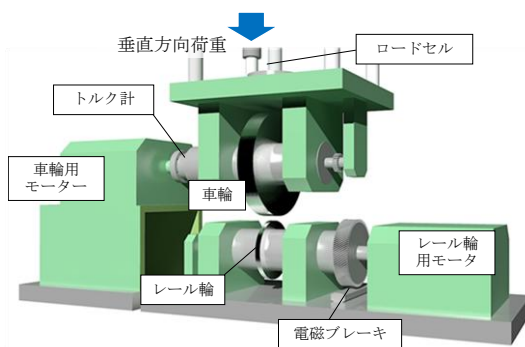


図1 2円筒転がり接触試験機

試験機には散水装置も取り付けられている。この散水装置は、圧縮空気を利用してタンク内に入れた水を噴射する機構になっており、タンク内の水温を調節することが可能である。散水ノズルの噴射口は直径1.2mmの円形で、ノズル先端から両試験輪の接触部までの距離は170mmである。

### 2.2 試験手順

試験輪の転動面の表面粗さと、試験輪の温度とタンク内の水温とを複数通りに変化させて実験を行った。試験手順として、まず車輪とレール輪の転動面に研磨紙を用いて粗さをつける。その後、表面粗さを測定し、試験輪の温度調整（加熱または冷却）と散水温度の調整を行う。試験室内の温度は空調設備により常温を保っている。温度の調整後、粘着実験を行った。

## 2.3 試験条件

設定した試験輪速度と試験荷重の制御パターンを図2に示す。車輪とレール輪を接触させ垂直荷重を付加した後、車輪をモーターで駆動し、トラクションによってレール輪を従動させる。一定速度まで試験輪を加速させた後、散水を開始し、レール輪軸に接続した電磁ブレーキにより制動方向のトルクを徐々に付加し、すべり率が連続的に増加するようにレール輪を減速させる。所定のすべり率になると、試験機は自動停止し試験が終了する。このブレーキ作動時に計測した垂直荷重、車輪トルクおよび両試験輪の回転速度からすべり率とトラクション係数とを得る。なお、各値の計測周波数は200Hzである。表1に試験機の運転条件を示す。垂直荷重の4kNは、通勤車両や新幹線車両の輪重を想定し、直径860mmの車輪円弧踏面と頭頂部半径600mmのレールとのヘルツ接触圧力が800MPa程度となることを考慮したものである。試験速度の100km/hは、本試験機で運転可能な最高速度である。最大のすべり率は試験輪を大きく損傷させない程度の20%とし、散水量・散水速度はタンク容量を考慮した上での最大量・最大速度である。

表面粗さを付与する際には、本試験機用に製作した治具を用いた。両試験輪ともに研磨紙を当てて周速3km/h、押付け荷重78Nで、試験輪の回転方向に均一に研磨筋が残るように粗さを付与した。本試験では、接触面を複数通りの粗さに仕上げるために、粒度の異なる研磨紙を使用した。研磨紙の粒度は、図3に示すように番号で識別し、番号が小さいほうは粒度が大きく、仕上げた表面が粗い。図3は縦軸に自乗平均粗さ(1:評価長さ4mm, x:測定方向, f(x):形状曲線)をとっており、これは表面粗さの標準偏差に相当する。図3のプロットは、粗さを付与した直後に各試験輪の2箇所所で測定した粗さを、すべての試験について平均した値を示している。エラーバーは標準偏差を表す。また本試験では、車輪とレール輪とで同粒度の研磨紙を使用した試験とは別に、車輪とレール輪とで異なる粒度の研磨紙を用いた試験も行っている。なお、試験結果の整理には、車輪とレールの研磨後の自乗平均粗さを $R_{qw}$ ,  $R_{qr}$ としたときの合成粗さを使用した。

温度に関しては、車輪、レール輪および水について加熱・常温・冷却の条件を表2

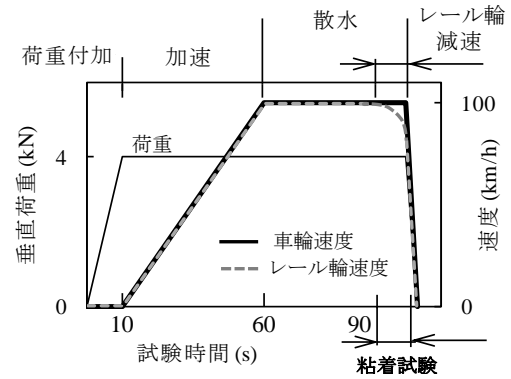


図2 粘着試験時の荷重・速度制御

表1 試験条件

垂直荷重 (最大ヘルツ圧)	4 kN (780 MPa)
速度	100 km/h
すべり率	0 → 20 %
散水量	10 ml/s
ノズル出口の 散水速度	8.4 m/s

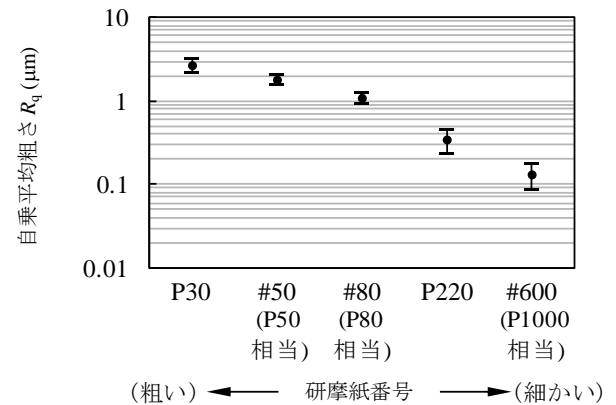


図3 粘着試験前の試験輪の粗さ

表2 温度条件

条件記号	A	B	C	D	E	F
試験数	4	2	7	12	2	9
車輪	加熱	加熱	常温	常温	常温	冷却
レール	加熱	常温	常温	常温	常温	冷却
水	加熱	冷却	加熱	常温	冷却	冷却

のように組み合わせた。加熱・常温・冷却の温度は図4に示す通りである。温度調節の際に温度を測定したが、すべての試験時についてその温度を平均した値を図にプロットしている。エラーバーは標準偏差を表す。なお、試験輪の加熱にはガスバーナーを用いたが、車輪とレール輪の転動面の金属組織に熱影響を与えないようにするため、各試験輪をモーターで回転させながら試験輪側面にバーナーの炎を当てて加熱を行った。また、冷却にはビーズ状のドライアイスを用い、試験輪を回転させながら転動面にそのドライアイス押し当てることで試験輪を冷やした。

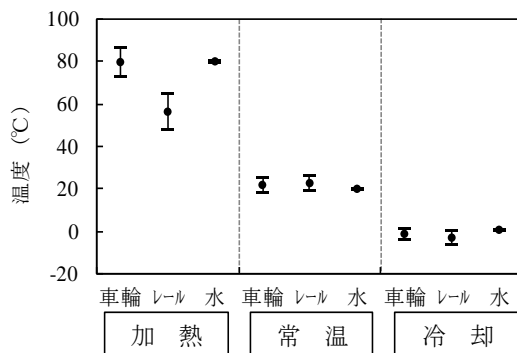


図4 粘着試験前の試験輪温度と水温

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 粘着係数に及ぼす粗さと温度の影響

図5に試験結果の例を示す。横軸はすべり率、縦軸はトラクション係数であり、速度・荷重の計測値を20点の移動平均によりを算出した。すべり率-トラクション係数の測定結果において、すべり率が0~1%程度で極大となるときのトラクション係数の値を本報では「粘着係数」と呼ぶこととする。実車両においては、この粘着係数が大きいほど、空転・滑走を起こさずに車輪に負荷できるトルクを大きくできる。すべての試験について、粘着係数を合成粗さ $\sigma$ で整理したものを図6に示す。A・C・D・Fの温度条件については変化の傾向を破線で示した。\*付の再粘着に関しては後述する。図6から分かることは以下の通りである。

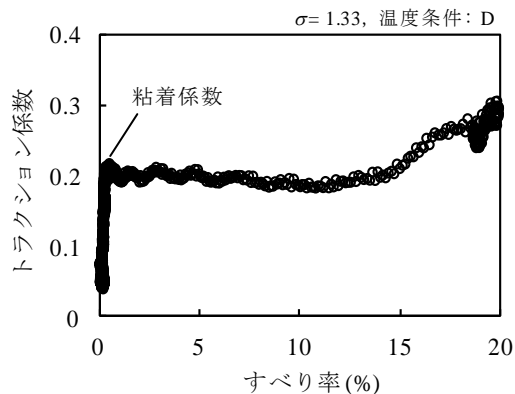


図5 試験結果の例

(1) 合成粗さが1~3 $\mu\text{m}$ 程度で粘着係数が極大もしくはほぼ一定となる。  
 (2) 粘着係数が極大もしくはほぼ一定となる領域では、試験輪が高温であるほど粘着係数大きい。  
 (3) 合成粗さが1 $\mu\text{m}$ 程度以下では、合成粗さが小さくなるに従い粘着係数が減少し、温度の影響が小さくなる。

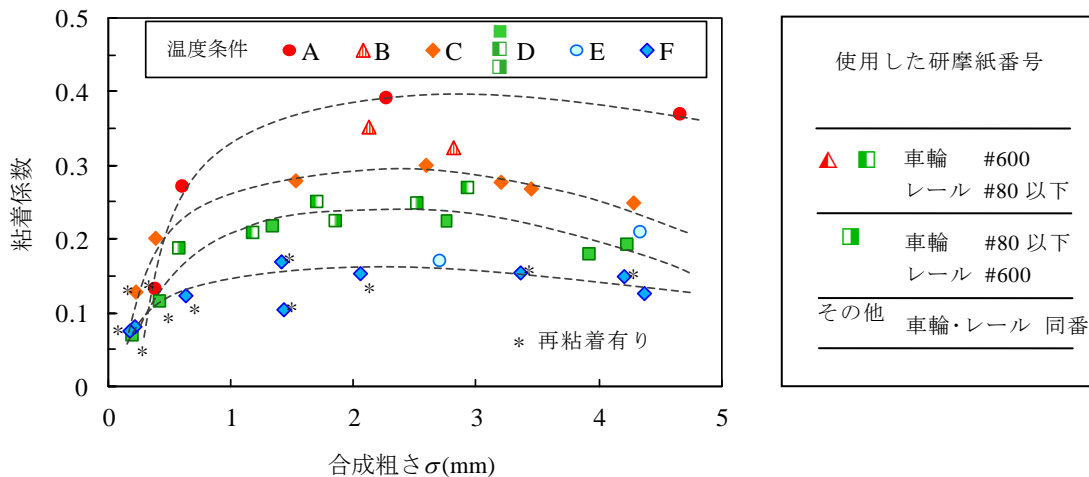


図6 合成粗さに対する粘着係数

### 3.2 再粘着現象

試験時に再粘着する挙動を示した試験結果の例を図7に示す。図6のマーカ側部に\*を付した点の結果を得た試験では、すべりの発生中に再粘着が発生した。再粘着発生時のすべり率は、温度条件A(使用した研磨紙は車輪#600・レール輪#600)の試験では5.8%と唯一極端に小さかったが、その他の試験ではすべり率13~20%において再粘着が生じており、温度や粗さの条件との関係は確認できなかった。

再粘着の原因は、すべり速度が増加することによる

接触面温度の上昇が原因と考えられる。一般に、すべり速度の増加に伴い摩擦面の温度は増加する。摩擦面温度の上昇により流体の粘性が小さくなると、流体膜や境界膜の減少や破断を引き起こし、固体接触部の凝着や塑性の増大を引き起こす<sup>4)</sup>。本試験において再粘着が発生した試験でも、同様の現象が発生し、トラクション係数の増加(図7のすべり率12%以降)後、すべり率を減少させるような急激な凝着が発生して再粘着が発生したものと推察されるが、現象の詳細は明らかでない。ただし、本試験では、試験機の仕様上、実際のレールとは異なり、レール輪は接触域の温度が上昇しやすいため、この再粘着現象は実際の車輪とレールの間で発生しているのかどうかについては、更なる検討が必要である。

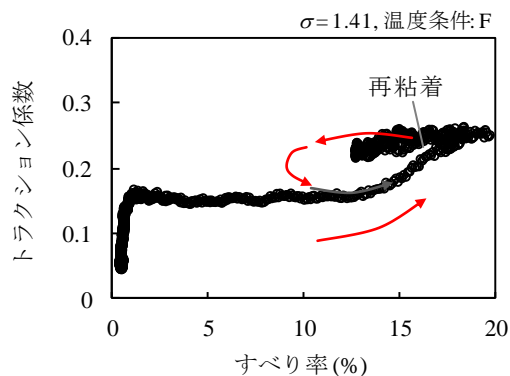


図7 再粘着を起こした例

### 4. まとめ

車輪・レールの粘着力に及ぼす表面粗さと接触温度の影響を調べた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 合成粗さ(車輪とレール輪の自乗平均粗さの自乗平均)が1~3 $\mu\text{m}$ 程度で粘着係数が極大もしくはほぼ一定となる。
- (2) 粘着係数が極大もしくはほぼ一定となる領域では、試験輪が高温であるほど粘着係数が大きい。
- (3) 合成粗さが1 $\mu\text{m}$ 程度以下では、合成粗さが小さくなるに従い粘着係数が減少し、温度の影響が小さくなる。
- (4) 一部の試験条件では、トラクション係数が急激に増大し再粘着が発生する。

### 参考文献

- 1) 大山忠夫, 丸山弘志 : 高速ころがり接触下のすべりと摩擦, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 48, No. 431, pp. 1005-1013, 1986.
- 2) Chen, H., Ban, T., Ishida, M., Nakahara, T. : Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact, Wear, Vol. 253, No. 1, pp. 75-81, 2002.
- 3) Chen, H., Ban, T., Ishida, M., Nakahara, T. : Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions, Wear, Vol. 265, No. 9, pp. 1504-1511, 2008.
- 4) 藤田公明, 小幡文雄, 山浦泉 : 2円筒試験による潤滑油の焼付き強さに関する研究, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 47, No. 423, pp. 1518-1529, 1981.