

# 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

谷本 啓\* 陳 樺\*

**Influence of Surface Roughness and Temperature  
on the Adhesion of Wheel and Rail in Wet Conditions**

Hiraku TANIMOTO Hua CHEN

The series of tests to measure the traction coefficient between wheel and rail with a twin disc rolling contact machine were carried out by varying surface roughness and temperature of wheel and rail rigs, as well as the temperatures of sprayed water, for the purpose of obtaining the fundamental knowledge how to prevent occurrence of wheel slip in driving and wheel slide in braking. The results show that the traction coefficient has the maximal value in the range of 1 to 3  $\mu\text{m}$  of root mean square roughnesses under any temperature conditions, and its value increases up to 0.4 with the increasing temperature.

キーワード：車輪／レール，粘着，表面粗さ，温度，湿潤

## 1. はじめに

本研究の目的は，雨天時の空転・滑走対策に寄与する影響因子に関して，基礎的な知見を得ることである。そのために粘着力に及ぼす影響の大きい，車輪・レールの表面粗さと，車輪・レール・水の温度とに着目してそれらの影響を実験的に調べた。

降雨時には車輪とレールの間に入り込む水によって粘着力が低下し，空転・滑走が発生しやすい状況になる<sup>1)</sup>。滑走対策として使用されている増粘着研摩子<sup>2)</sup>は，車輪踏面の汚れ（粉塵，油，酸化膜）を除去する，研摩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，さらに車輪表面の粗さを大きくするといった機能を持つ。この車輪の表面粗さについては，粘着力に及ぼす影響が過去に研究されており，大山ら<sup>3)</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。

また温度については，過去にChenら<sup>4) 5)</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，乾燥時に比べて湿潤時に粘着力が減少するメカニズムについて言及している研究には，車輪鋼・レール鋼と水との化学反応により発生するペースト状の微量の酸化鉄が潤滑効果を発揮して粘着力を低下させるというもの<sup>6) 7)</sup>や，車輪の回転によって巻き込まれる水の流体力学的作用，つまり流体膜の形成で粘着

力が減少すると述べる報告<sup>4)</sup>がある。前者のメカニズムは初列車，濃霧時または雨の降り始めに起こりやすいとされる粘着力低下の現象<sup>8)</sup>に説得力を与えるものであり，後者は高速走行時に粘着力が低下する現象<sup>9)</sup>をよく説明できる。いずれも合理的なメカニズムであり，車輪・レールの界面ではこれらが複合的に発生している可能性もある。

この二つの現象は，境界潤滑と弾性流体潤滑の現象の特徴をよくあらわしている。境界潤滑とは，境界膜（液体分子が固体表面に物理吸着および化学吸着すること起因する膜）を介する潤滑で，弾性流体潤滑は弾性変形した固体接触面が流体膜（固体間隙間の液体の流れを伴う膜）を介して潤滑する状態である。境界潤滑は，物理的・化学的な要因が絡む複雑な現象であり，水と金属が関係する境界潤滑の知見<sup>10)</sup>は非常に乏しい。これは，水を潤滑剤として金属同士をしゅう動させる状況が実用上はほとんど存在しないためである。一方で，トラクション伝達機構の流体膜挙動を調べる手段として，この20年で分子動力学シミュレーションを活用する方法<sup>11) 12)</sup>が確立されつつあるが，いずれの報告でも高効率のトラクションフルードを用いた流体潤滑での計算であり，界面の物理に不明な点が多い車輪・レールと水の関係にこれを適用することは現状では難しい。

そこで本研究では，境界膜と流体膜の形成に直接影響を及ぼす表面粗さと温度とにあらためて着目して，室内試験機を用いた実験を行なった。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する実験を

\* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

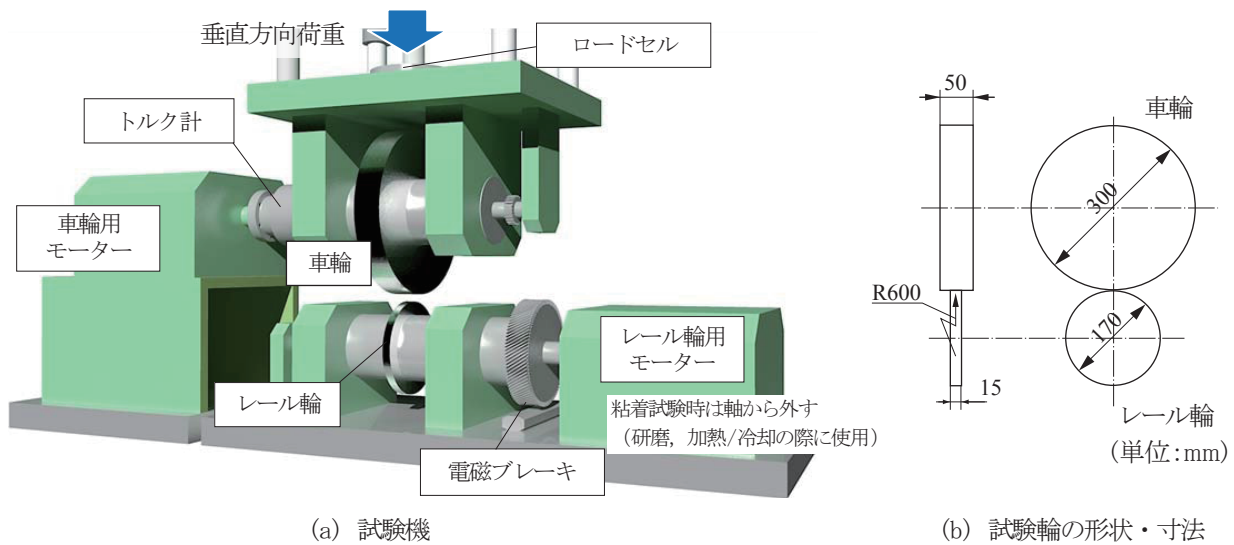


図1 2円筒転がり接触試験機

おこなった。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、以下で報告する。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験手順

試験には、2円筒転がり接触試験機（図1）を用いた。この試験機には車輪とレールを模擬した試験輪が取り付けられており、この試験輪の転動面の表面粗さと、試験輪の温度と散水の水温とを複数通り（2.3節で詳述）に変化させて試験を行った。

試験の手順は以下の通りである。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、粗さの測定を行い、試験輪の温度の調整（加熱または冷却、常温の場合は調整なし）と散水温度を調整する。なお、試験室内の温度は空調設備により常温を保った。温度の調整後、試験機を運転させ粘着試験を行った。続く試験でも同一の試験輪を使用するため、粘着試験終了後に試験輪の表面についた接触痕を研磨紙で削り取った。ただし、複数回に及ぶ試験の途中で試験輪の交換を一回行なっているため、この一連の試験では二組の試験輪を使用した。

### 2.2 試験機

試験機には、鉄道総研にて開発された2円筒転がり接触試験機を使用した。装置の構成は図1(a)の通りで、試験輪（車輪・レール輪）、試験輪を駆動するモーター（車輪用・レール輪用）、レール輪軸に付属する電磁ブレーキ、鉛直方向の荷重負荷用の油圧装置、および回転速度や荷重等の計測機器から成る。試験輪の形状および寸法を図1(b)に示す。試験輪の材料は、車輪が車輪

鋼SSW-Q1R、レール輪は普通レール鋼であり、車輪は材料ブロックから、レール輪は60kgレールから切り出している。試験機には車輪とレール輪の接触部に水を噴射できるように、散水装置を取り付けてある。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で散水温度を調節した。なお、散水ノズルの噴射口は円形でその直径は1.2mm、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。

### 2.3 試験条件

本試験用に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負荷し、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

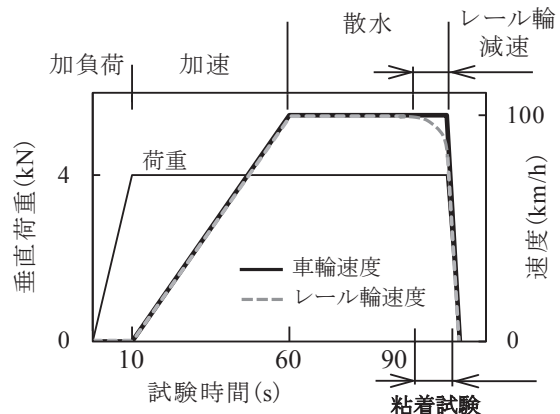


図2 粘着試験時の荷重・速度制御

る。ブレーキ作動によって所定のすべり率（[車輪速度 - レール輪速度] / 車輪・レール輪平均速度）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（接線力 / 垂直荷重）とを得る。なお、各値の計測周波数は 200 Hz である。

試験機の運転条件を表 1 に示す。垂直荷重の 4 kN は、通勤車両や新幹線車両の輪重を想定し、直径 860 mm の車輪円弧踏面と頭頂部半径 600 mm のレールとのヘルツ接触圧力が 800 MPa 程度となることを考慮したものである。試験速度の 100 km/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しない程度の 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。

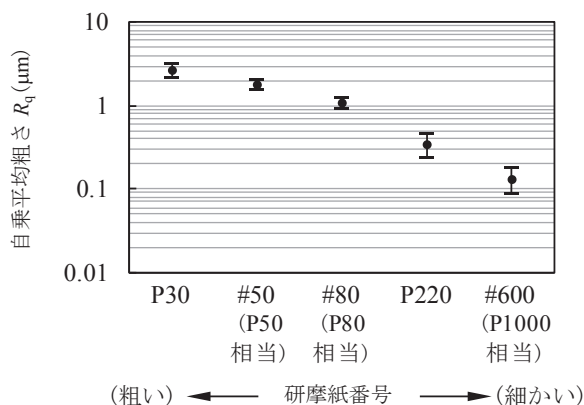
表面粗さを付与する際には、本試験のために本試験機用に製作した治具を用いた。両試験輪ともに周速 3km/h、押付け荷重 78N で、試験輪の回転方向に均一に研磨筋が残るように粗さを付与した。接触面を複数通りの粗さに仕上げるために、粒度の異なる研磨紙を使用した。それら研磨紙の粒度別の粗さを図 3 に示す。図は縦軸に自乗平均粗さ

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l f(x)^2 dx} \quad (1)$$

( $l$ : 評価長さ 4 mm,  $x$ : 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、粗さを付けた直後に両試験輪ごとで測定し

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



(粗い) ← 研磨紙番号 → (細かい)

図 3 粘着試験前の試験輪の粗さ

た 2 箇所の粗さを、研磨紙の粒度が同じ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が主ではあるが、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

$$\sigma = \sqrt{R_{qw}^2 + R_{qr}^2} \quad (2)$$

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 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するが、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、その際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おこなった。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によって試験輪を冷やした。

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

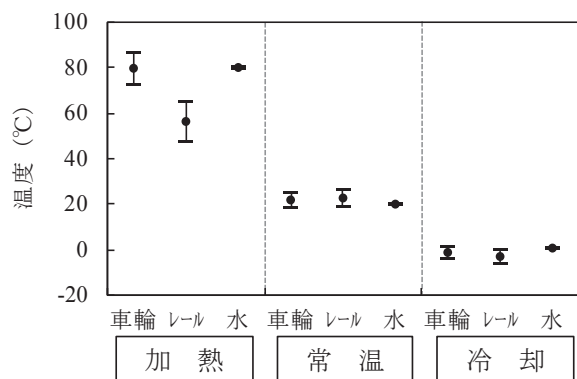


図 4 粘着試験前の試験輪温度と水温

### 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

特集：鉄道力学

の移動平均したもからそれらを算出した。このようなすべり率-トラクション係数の結果から、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(3.3節)する。図6から分かることは以下の通りである。

- (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

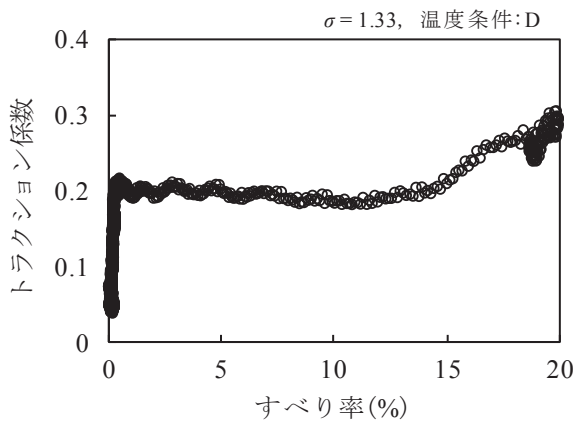


図5 試験結果の例

3.2 膜厚比

本試験のようにヘルツ接触域に流体が介在する場合、流体の流れを伴う液膜が接触面に発生することがある。液膜の厚さは、弾性流体潤滑(Elastohydrodynamic Lubrication, EHL)理論<sup>13)</sup>から推定することができる。EHL理論とは、二固体面の弾性方程式、Navier-Stokes方程式および流体粘度の状態式を連立することで定まる液膜形状と圧力分布に関する理論である。しかし、接触面間に層流の液体があるという条件のもとでEHL理論は成立するため、EHL理論自体から理論の限界(膜破断)を求めることはできない。そこで、Johnsonら<sup>14)</sup>は最小膜厚 $h$ (平滑な二面から求まるEHL膜厚)と合成粗さ $\sigma$ の比、膜厚比 $A=h/\sigma$ 、を用いて理論式と実験からEHL膜に及ぼす粗さの影響を検討している。その結果によると、接触面は $A < 1$ でほとんど常に接触、 $A > 3$ ではEHLを介してほとんど常に分離している。Johnsonらの研究はトラクションの伝達を考慮したものではないが、トラクション伝達機構に関しては、 $A$ とトラクション係数との関係を村木と木村<sup>15)</sup>が報告している。彼らは粗さの変化に対するトラクション係数の変化を調べておりそれによると、 $A$ を40程度から減少させていったところ、 $A$ が1~2程度の領域になるとトラクション係数(本報がいう粘着係数)が最大となり、摩耗量が急激に増大したことが報告されている。彼らが実験に使用した流体は鉱油であるが、二固体接触と $A$ の関係はほぼ幾何学に支配されるため、介在する流体が水であっても同様の関係が生じるものと考えられる。

上記の通り、膜厚比 $A$ を算出することは現象理解の参考になるため、本試験についても $A$ を求めて結果の整理を試みる。まずは、各温度条件の流体の最小膜厚を見積もる必要がある。そこで、Hamrock-Dowson<sup>16)</sup>の式と、BettとCappi<sup>17)</sup>の水の粘度に関する報告から、最小膜厚

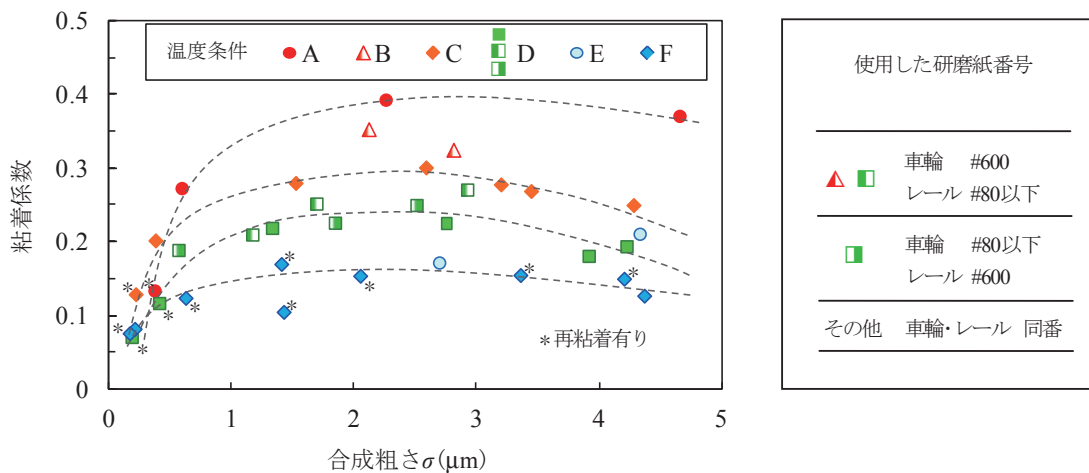


図6 合成粗さに対する粘着係数

を見積もった。試験輪の寸法・形状および本試験条件を用いて算出した結果を表3に示す。表には計算に使用した水温、大気圧粘度および粘度圧力係数も併せて示す。水温が試験条件とわずかに異なるのは、文献17)中に示されている値から本試験の条件の水温と最も近い温度を参照したためである。

算出した最小膜厚から膜厚比  $A$  を求めて、これを横軸にとり粘着係数との関係を整理した結果が図7である。この図では、右端の3つのプロットを除き、 $A$  が3以下である。ゆえにこの3点を除く試験では、EHL膜を形成しないものであり、しかも  $A$  が1以下の試験についてはEHLの作用がほとんどないような固体同士の直接接合もしくは境界膜を挟んだ接触が起きていると考えられる。

この考察は、3.1節に示した結果(3)と符合する。「合成粗さが1  $\mu\text{m}$  程度以下の領域」は、図7では膜厚比  $A$  がおよそ1以上の領域に相当する。この領域では  $A$  が大きくなるほど流体膜の発生しやすい領域であるため、 $\sigma$  が小さくなるほど流体膜の影響が大きく現れることで粘着係数が小さくなる、と説明できる。一方、3.1節の結果(1)である「粘着係数が極大もしくはほぼ一定」となった原因はこの考察だけでは説明できないものの、加工材の表面粗さと摩擦力に関する報告<sup>18)</sup>にあるように粗さが大きくなるほど表面凹部に流体がトラップされやすくなり、粘着係数が低下した可能性はある。

表3 最小膜厚と、その計算に使用した粘度および粘度圧力係数

水温 °C	大気圧粘度 mPa · s	粘度圧力係数 $\times 10^{10} \text{ Pa}^{-1}$	最小膜厚 $\mu\text{m}$
2.2	1.66	3.9	1.3
20	1.02	6.5	1.2
75	0.38	6.1	0.6

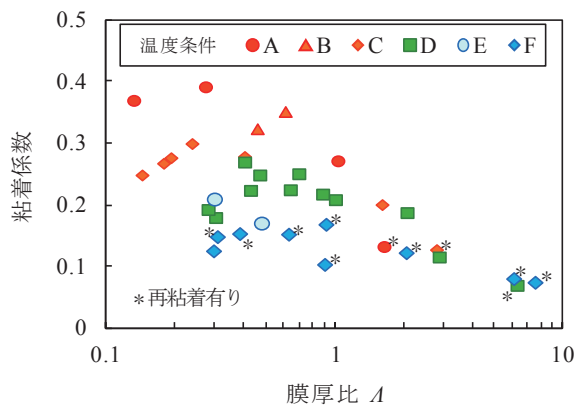


図7 膜厚比に対する粘着係数

ただし、上記の考察は実寸法・実形状の車輪とレールで起こる現象を直接説明できるものではなく、あくまでも本試験機による試験結果に関する考察であることに注意を要する。例えば、車輪径 860 mm, 60 kg レール, 輪重 6 t, 速度 100 km/h として Hamrock-Dowson の式を用いて水温 2.2 °C での平滑面間の膜厚を計算すると 0.21  $\mu\text{m}$  であり、本試験の表面粗さに対して膜厚比は 1/6 程度まで小さくなる。よって、実際の現象解明には手法の検討も含めてさらなる研究を必要とする。

### 3.3 再粘着

試験時に再粘着する挙動を示した試験結果の例を図8に示す。図6および図7のマーカー側部に\*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 13 ~ 20 % においてばらついており、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。一般的に、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>19)</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、トラクションの増加(図8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、レール輪は実際のレールとは異なり接触域の温度が上昇しやすいため、この再粘着現象は本試験機に特有な現象である可能性はある。

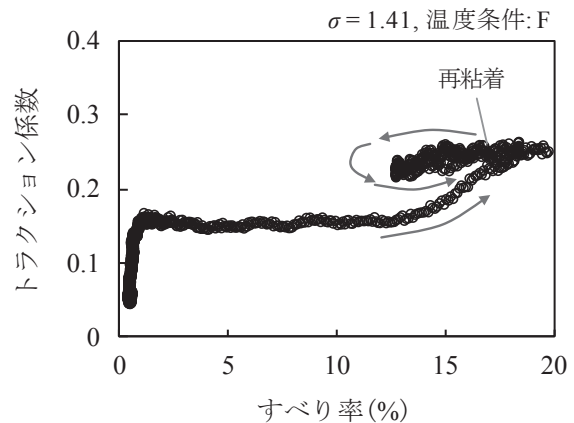


図8 再粘着を起こした例

## 特集：鉄道力学

## 4. まとめ

車輪・レールの粘着力に及ぼす表面粗さと温度の影響を調べるため、2円筒転がり接触試験機を用いて試験を行なった。試験では、垂直荷重を4 kN、速度を100 km/hとして、試験輪の表面粗さを自乗平均粗さでおよそ0.1 μmから3 μmまで、また試験輪と散水の温度を最大で80℃程度、最小で0℃まで変化させ、それらを組み合わせた複数の条件で試験を行なった。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 μm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 μm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する再粘着が発生する

## 文献

- 1) Nagase, K. : Study of adhesion between the rails and running wheels on main lines, *Proc. Inst. Mech. Engrs. Part F*, Vol.203, No.16, pp.33-43, 1989.
- 2) 丸山弘志, 大山忠夫 : 高速鉄道車両のスキッド防止, 日本機械学会論文集, Vol.44, No.388, pp.4342-4350, 1978
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Beargley, T. M., McEwen, I. J., Pritchard, C. : Wheel/Rail adhesion – The influence of railhead debris, *Wear*, Vol.33, No.1, pp.141-152, 1975.
- 7) Beargley, T. M., Pritchard, C. : Wheel/Rail adhesion – The overriding influence of water, *Wear*, Vol.35, No.2, pp.299-313, 1975.
- 8) Jenks, C. W. : Improvement methods for increasing wheel/rail adhesion in the presence of natural contaminants, *Transit Cooperative Research Program, Research Results Digest*, No.17, 1997.
- 9) 丸山弘志, 白井誠造, 大山忠夫 : 高速鉄道車両の粘着と制御, 潤滑, Vol.25, No.1, pp.9-14, 1980
- 10) 内館道正, 岩渕明, 清水友治, 劉海波 : 水潤滑環境下でのステンレス鋼のトライボロジー特性に関する研究, トライボロジスト, Vol.49, No.2, pp.173-180, 2003
- 11) Cui, S. T., Cummings, P. T., Cochran, H. D. : Molecular dynamics simulation of the rheological and dynamical properties of a model alkane fluid under confinement, *J. Chem. Phys.*, Vol.111, No.3, pp.1273-1280, 1999.
- 12) Endou, A., Onodera, T., Nara, S., Suzuki, A., Koyama, M., Tsuboi, H., Hatakeyama, N., Takaba, H., Del Carpio C., Kubo, M., Miyamoto, A. : Theoretical study of dynamic behavior of diphenyldisulphide molecule on Fe surface: Novel ultra-accelerated quantum chemical molecular dynamics approach, *Tribol. Online*, Vol.3, No.5, pp.280-284, 2008.
- 13) Dowson, D., Higginson, G. R., : A numerical solution to the elasto - hydrodynamic problem, *J. Mech. Engr.Sci.*, Vol.1, No.1, pp.6-15, 1959.
- 14) Johnson, K., Greenwood, J., Poon, S.: A simple theory of asperity contact in elasto-hydro-dynamic lubrication, *Wear*, Vol.19, No.1, pp91-108, 1972.
- 15) 村木正芳, 木村好次 : 潤滑油のトラクション特性に関する研究 (第1報), 潤滑, Vol.28, No.1, pp.67-74, 1981
- 16) Hamrock, B., Dowson, D. : *Ball bearing lubrication*, John Wiley & Sons, 1981.
- 17) Bett, K., Cappi, J. : Effect of pressure on the viscosity of water, *Nature*, Vol.207, pp.620-621, 1965.
- 18) 片岡征二 : 塑性加工における工具と材料の表面テクスチャ, トライボロジスト, Vol.48, No.9, pp.728-733, 2003
- 19) 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