

低温条件下における車輪／レールの粘着試験

陳 樺* 井戸 達哉*

Adhesion Test of Wheel / Rail under Low Temperature Conditions

Hua CHEN Tatsuya IDO

In cold regions, there is concern that decrease in adhesion coefficient of wheel/rail due to cold rainwater affects acceleration/deceleration performance of railway vehicle. We conducted an adhesion test using a twin disc rolling contact machine to clarify the characteristics of adhesion coefficient in low temperature environment. The test was carried out with three different parameters: surface roughness and temperature of two discs, and the water temperature intervened in the discs. As a result, when the surface roughness is small under low temperature, the adhesion coefficient is small, so that the possibility of causing slipping/sliding is high during the acceleration/deceleration operations. On the other hand, it is found that there is a tendency of increase in the adhesion coefficient (called a re-adhesion phenomenon) as the slip ratio increases due to the slipping/sliding. This is thought to be due to the frictional heat generated at the contact part between the wheel and the rail.

キーワード：車輪／レール，粘着，表面粗さ，温度，水潤滑

1. はじめに

寒冷地域において，秋季や冬季の早朝時間帯，または降雨時の車輪の空転・滑走の発生頻度が温暖な地域と比較して多いことが知られている。これは，車輪とレールが低温であること，さらに車輪とレール間に介在する水膜（結露，雨）の温度が低いことで，車輪とレール間の粘着係数が低くなって，温暖な地域より空転・滑走を引き起こし易いことが原因であると考えられる。

既報¹⁾²⁾³⁾では，車輪とレール間に水を介在させる場合の水温変化に伴う粘着係数の変化を報告している。これによると，混合潤滑理論を適用した数値解析により，車輪とレール間に介在する水の温度が低くなると粘着係数が低くなる傾向が示されている。また，2円筒を用いた車輪／レールの模擬粘着試験では，試験輪間に異なる温度の水を噴射すると，接線力係数の最大値（粘着係数に相当）が温度の変化に応じて変化し，その傾向は数値解析と一致することが示された。さらに，降雨時には車輪とレール間に入り込む水の温度によって，形成される水膜の厚さが異なるという解析結果もある。水膜が厚いと，車輪とレールの真実接触面積（固体同士の接触面積）が小さくなり，粘着係数が低くなると考えられる。その結果，空転・滑走が発生し易くなる。

車輪の空転・滑走対策として，従来から砂撒き⁴⁾やアルミナ粒子の噴射⁵⁾⁶⁾が実施されている。列車が通過する際に車輪によって粉砕される微小粒子を車輪とレール間に噛み込ませて粘着力を増加させる効果がある。一

方，新幹線車両には増粘着研摩子⁷⁾⁸⁾も利用されている。これは，車輪踏面の汚れ（粉塵，油，酸化膜）を除去するとともに，車輪の表面粗さを増大させる機能を持つ。加えて研摩子ブロックから脱落する微小粒子を車輪とレール間に噛み込ませて粘着力を増加させる効果が期待できる。車輪の表面粗さが粘着力に及ぼす影響についても過去に研究されており，大山ら⁹⁾や陳ら¹⁰⁾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。

以上より，水潤滑条件下における車輪とレール間の粘着係数は，水の温度と車輪とレールの表面粗さに依存して変化すると考えられる。そこで本研究では，寒冷地域における空転・滑走対策に資する知見を得ることを目的とし，特に低温・雨天条件下の粘着係数の特性を把握するために，2円筒転がり接触試験機を用いて車輪・レール輪・水の温度を変化させる粘着試験を実施した。なお，水潤滑において表面粗さの影響が大きいことが報告⁹⁾¹⁰⁾されているため，様々な表面粗さの条件も設定して試験を実施した。以下，粘着試験により得られた結果とこれにより得られた新たな知見を報告する。

2. 試験内容

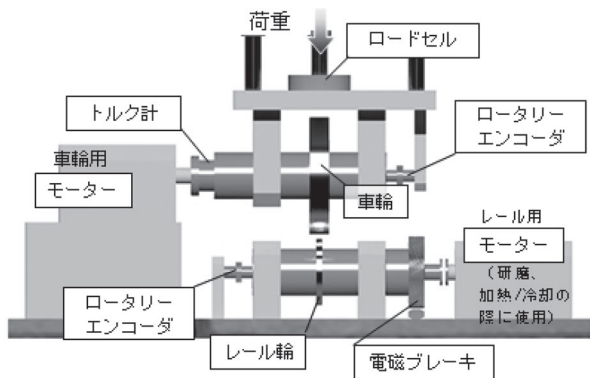
2.1 試験装置

粘着試験は，2円筒転がり接触試験機（図1）を用いて行われた。この試験機には車輪とレールを模擬する二つの試験輪（車輪，レール輪）が取り付けられており，試験輪の転動面の表面粗さと，試験輪の温度と噴水の水温を変化させて試験を実施した。

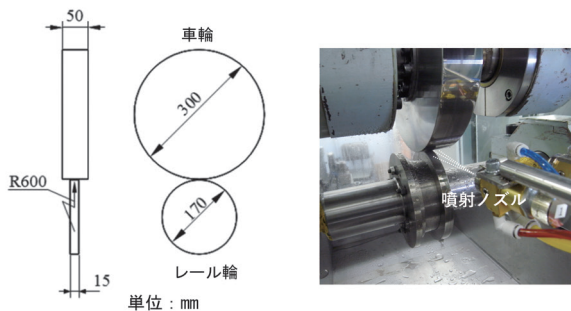
試験機の構成は図1(a)に示す通り，試験輪（車輪，

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

レール輪), 試験輪を駆動するモーター (車輪用, レール輪用), レール輪側の軸に付随する電磁ブレーキ, 鉛直方向の荷重を負荷する油圧装置, および回転速度や荷重, 軸トルク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, レール輪が普通レール鋼である。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製作した。なお, 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, 図1 (c) に示す噴水装置を取り付けてある。この噴水装置は, 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により所定の噴水温度条件下の試験が行える。噴水ノズルの噴射口は円形でその直径は 1.2mm, ノズル先端から車輪とレール輪の接触部までの距離は 170mm である。



(a) 2円筒転がり接触試験機



(b) 試験輪の形状および寸法 (c) 水噴射システム

図1 試験機の概況

2.2 試験手順

試験の手順は図2に示す通りである。まず, 車輪とレール輪の転動面に研磨紙を用いて所定の粗さをつけ, 粗さ測定器 (小坂研究所製, 型番 aE1200) により表面粗さの測定を行う。次に, 試験輪の温度と噴水温度の調整 (冷却, 常温) を行う。試験室内の温度は空調設備により常温 (15~25℃) を維持する。試験輪の温度は温度ハイテスタ (日置電機製, 3442), 噴水温度はデジタ

ル温度計 (サーモプロ製) を用いて測定する。温度を調整した後に試験輪を回転させて試験を開始する。なお, 再現試験を実施する場合は同一の試験輪を使用するため, 試験終了後に試験輪の表面に形成された接触痕を研磨紙で削り取り, 次の試験のために表面粗さをつける。

2.3 試験方法

本試験において, 設定した試験輪速度と試験荷重の制御パターンを図3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, 粘着力を介してレール輪を従動させる。所定の速度まで試験輪を加速させた後, 噴水を開始し, 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に抵抗を与える。ブレーキ作動によって所定のすべり率 (速度差/平均速度) になると, 試験機は自動停止して試験が終了

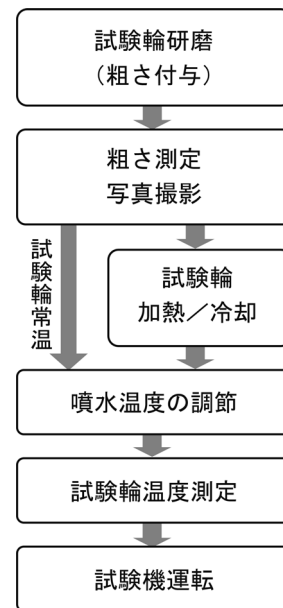


図2 試験の流れ

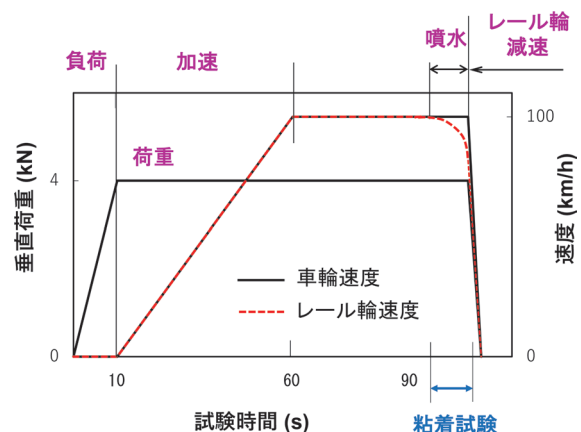


図3 粘着試験時の荷重・速度制御

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）を得る。なお、各計測値のサンプリング周波数は200Hzである。

2.4 試験条件

試験機の運転条件を表1に示す。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60kgレール（頭頂部曲率半径600mm）の最大ヘルツ接触圧力に相当する接触圧力となるように決定したものである。試験速度の100km/hは、本試験機で運転可能な最高速度であり、実車速度287km/hに相当する。最大のすべり率は、営業線における実車両走行時の空転・滑走検知の実態を参考とし、試験輪の踏面に損傷を与えない程度として20%とし、噴水量・噴水速度はタンク容量の制限を考慮した上での最大・最大速度である。

表1 試験条件

| | |
|-------------------|-----------------|
| 荷重 (最大ヘルツ接触圧力) | 4kN (780MPa) |
| 速度 | 100km/h |
| すべり率 | 0 → 20% |
| 噴水量 | 600mL/min |
| ノズル出口での噴水速度 | 8.4m/s |

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。接触面を計画どおりの粗さに仕上げのために粒度の異なる複数の研磨紙を使用した。研磨紙の粒度と仕上げた試験輪の表面粗さの関係を図4に示す。縦軸は、式(1)の自乗平均平方根粗さ R_q を取っており、これは表面粗さの標準偏差に相当する。

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

ここで、 l は評価長さ4mm、 x は測定位置、 $f(x)$ は形状曲線である。図中のプロットは、すべての試験において、同じ粒度の研磨紙を用いて粗さを付けた直後に試験輪ごとに測定した2箇所を平均した値を示している。エラーバーは最大値と最小値を表す。

本試験では、両試験輪に同じ粒度の研磨紙を使用した試験を主としたが、異なる粒度の研磨紙を用いた試験も行っている。図5は、研磨紙P30と#600（P1000相当）で仕上げた試験輪の表面写真である。研磨紙の番号が大きいほど表面粗さは小さい。なお、試験結果は式(2)に示す車輪とレール輪の試験前の自乗平均平方根粗さ R_{qw}

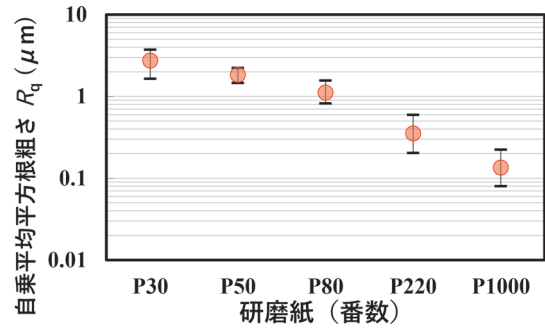
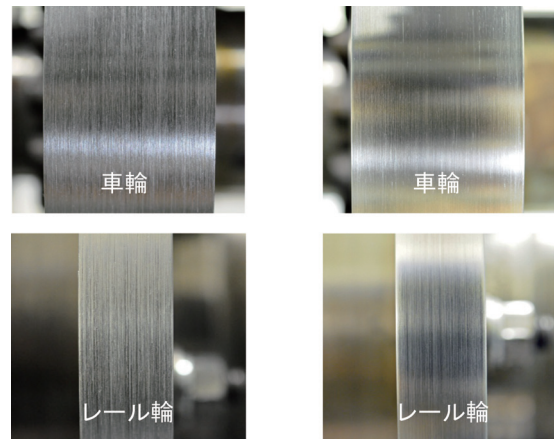


図4 試験輪の表面粗さ



(a) 研磨紙 P30

(b) 研磨紙 P1000

図5 研磨紙で仕上げた試験輪の表面写真

(車輪), R_{qr} (レール輪) を用いて算出した合成粗さ σ により整理した。

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

温度の条件は、表2に示すように低温（冷却）のほか、比較対象として室温（常温）での粘着試験も実施した。図6に、試験開始前の車輪、レール輪および噴水の温度を示す。すべての試験において温度調節の際に温度を測定しており、その温度を平均した値を図中にプロットしている。エラーバーは最大値と最小値を表す。試験輪の冷却には、図7に示す通り、ピーズ状のドライアイスを利用し、試験輪を回転させながら転動面にそのドライ

表2 温度の条件

| 記号 | D | E | F |
|-----|----|----|----|
| 試験数 | 12 | 2 | 9 |
| 車輪 | 常温 | 常温 | 冷却 |
| レール | 常温 | 常温 | 冷却 |
| 水 | 常温 | 冷却 | 冷却 |

常温: 15~25°C、冷却: -5~5°C

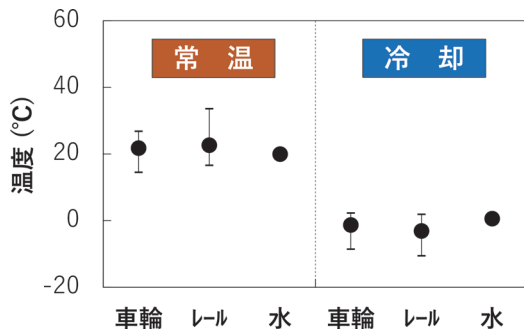


図6 粘着試験前の試験輪温度と水温

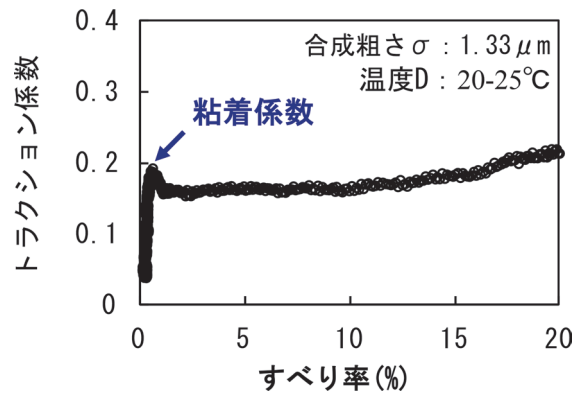


図8 試験結果の例

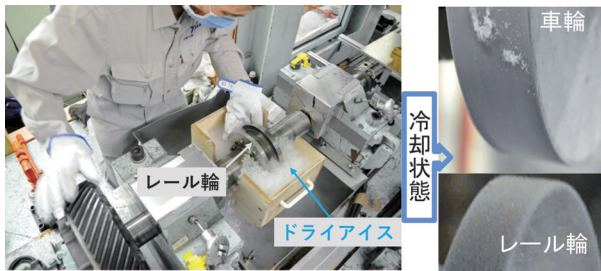


図7 試験輪の冷却

イスを押し当てることで冷却した。また低温水については、水タンクの中に氷を入れて温度を調整した。

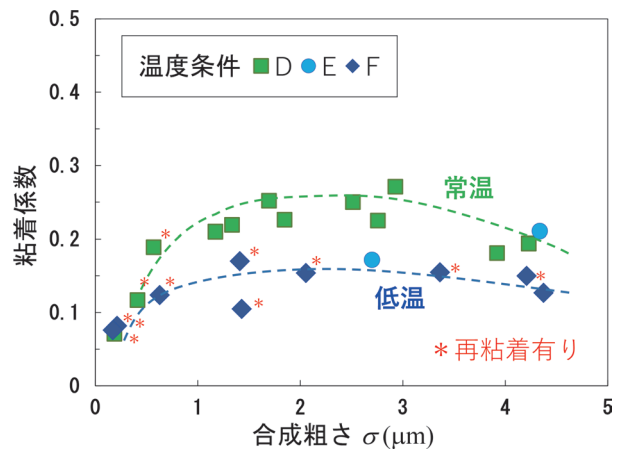


図9 粘着係数に対する温度の影響

3. 試験結果および考察

3.1 粘着係数に及ぼす粗さと温度の影響

図8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・荷重の計測値について20点の移動平均を行って算出した。同図に示すすべり率—トラクション係数の関係において、すべり率が0~1%において極大となっているトラクション係数の値を、鉄道分野では「粘着係数」と呼ぶ。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。

すべての試験結果から整理した粘着係数と合成粗さ σ の関係を図9に示す。なお、常温D（試験輪&水：常温）と低温E（試験輪：常温，水：低温）・F（試験輪&水：低温）の条件については変化の傾向を破線で示している。*付は再粘着が見られたものを示し、これに関しては後述（3.2節）する。図9から分かることは、以下の通りである。

- (1) 合成粗さが1~3mm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、試験輪と水の温度が高い方が粘着係数は大きい。
- (3) 合成粗さが1mm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。

3.2 再粘着現象

低温条件下における粘着試験において、特に表面粗さが小さい場合には、すべり率の増大とともにトラクション係数は増加し、最大トラクション係数（粘着係数に相当）に達する時点から減少に転じる傾向が見られた。また、さらにすべり率が增大するとトラクション係数は再び増加する傾向となるが、ある点からすべり率が小さくなくてもトラクション係数が下がらない現象が見られた。この現象は、「再粘着」と呼ばれる。再粘着現象が発生した試験結果の例を図10に示す。再粘着の挙動を示す結果については、図9に*を付した。再粘着が発生した時のすべり率は、13~20%内ではらついており、温度や表面粗さとの相関は確認できなかった。

再粘着現象の発生は、すべり率の増大、すなわちすべり速度の増大による摩擦熱の発生に伴う接触面と水の温度上昇が原因と考えられる。一般的に、すべり速度が増大すると摩擦面の温度は高くなる。温度上昇によって水の粘度が低下し、流体膜や境界膜の減少、破断、さらに固体接触部の凝着や塑性変形、あるいは局所的な溶着が

引き起こされた結果、摩擦力が増加して再粘着が発生したものと推察される¹¹⁾。試験機の仕様上、レール輪は短時間に車輪と繰り返し接触することで接触域の温度が実際のレールより上昇しやすいため、本試験における再粘着の発生は2円筒転がり接触試験機に特有な現象である可能性が考えられる。一方、営業線で走行する試験車両においても、再粘着現象が起きたという報告¹²⁾¹³⁾があるため、今後は、室内基礎試験の結果と実車との関連性について確認する必要がある。

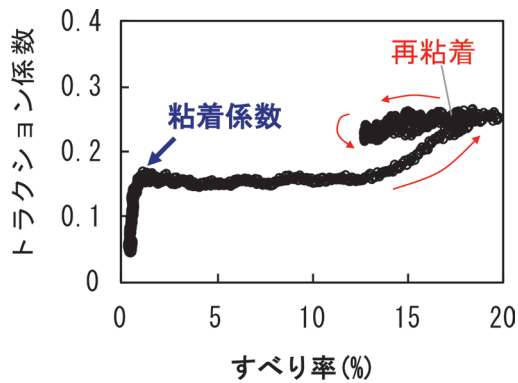
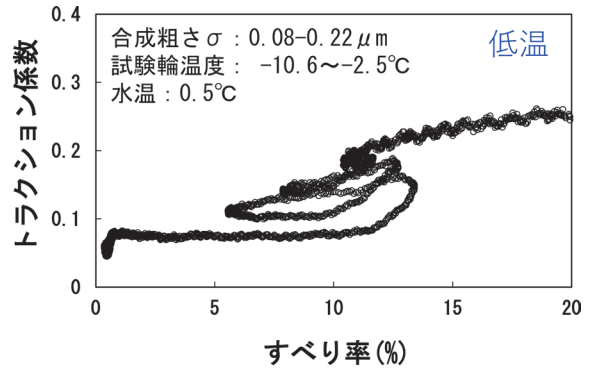


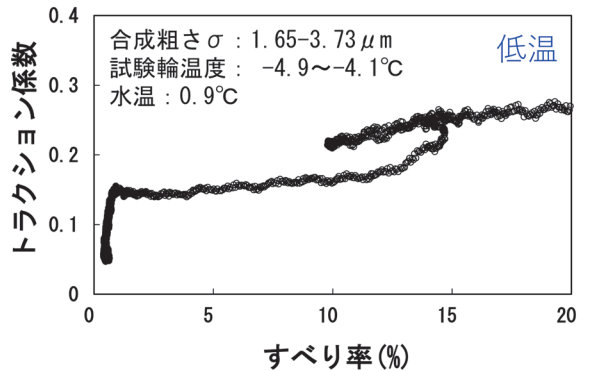
図10 再粘着現象の例

図11に、低温における表面粗さの大小による再粘着の発生状況の比較を示す。表面粗さが小さい場合は、微小すべり領域での粘着係数が低く、再粘着が発生し易い傾向(図11(a))が示されている。一方、表面粗さが大きい場合は、微小すべり領域での粘着係数が高く、再粘着が比較的発生しにくい傾向(図11(b))が示されている。再粘着が発生するすべり率領域については、表面粗さの大小には依存せず13~20%の範囲内に存在することがわかる。また、常温における表面粗さの大小による再粘着の発生状況の比較を図12に示す。表面粗さが小さい場合は、図12(a)のように低温条件下の試験結果と大きく変わらないが、表面粗さが大きい場合は、微小すべり領域での粘着係数が顕著に高くなり、再粘着が発生しない挙動(図12(b))が示されている。

本試験の結果から、表面粗さに対して相対的に介在する水膜の厚さ、すなわち膜厚比(試験輪の合成粗さに対する水膜厚さの比)が再粘着の発生しやすさに影響していると推察される。表面粗さに対して水膜が薄い場合(図11(b)、図12(b))の接触状態は境界潤滑(ほぼ固体接触)に近く、摩擦熱によって水膜が薄くなっても接触状態に大きな影響はない。一方、表面粗さに対して水膜が厚い場合(図11(a)、図12(a))は、接触状態は混合潤滑(水の荷重分担分が比較的多い)に近くなり、摩擦熱によって水膜が薄くなると接触状態に大きな変化をもたらすと考えられる。さらに、図12(a)より図11(a)、図12(b)より図11(b)の方が再粘着しやすいの

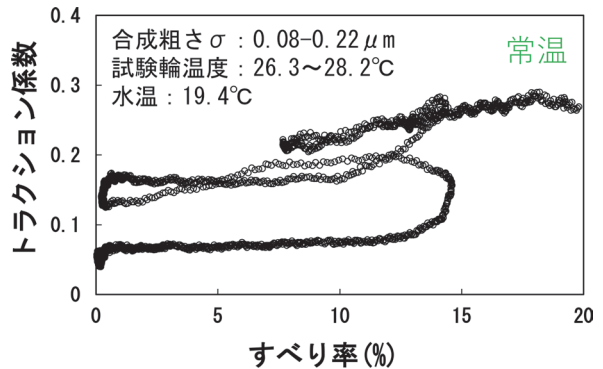


(a) 試験条件：低温，表面粗さ小

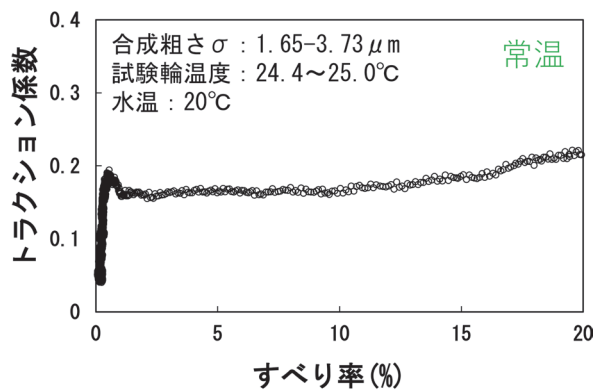


(b) 試験条件：低温，表面粗さ大

図11 低温条件において発生する再粘着現象



(a) 試験条件：常温，表面粗さ小



(b) 試験条件：常温，表面粗さ大

図12 常温条件において発生する再粘着現象

は、表面粗さが同等でも、低温条件下で元々の水膜が厚いほうが摩擦熱の影響が顕著に表れるためと考えられる。

4. まとめ

低温・噴水条件下における車輪／レールの粘着挙動を調べるため、2円筒転がり接触試験機を用いて粘着試験を行った。試験では、垂直荷重を4kN、速度を100km/hとして、試験輪の合成表面粗さを自乗平均平方根粗さでおよそ0.1mmから3mmまで、また試験輪と噴水の温度を0℃付近と比較対象の常温で試験を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 常温と低温条件下の試験結果を比較すると、低温のほうが粘着係数が低い。
- (2) 温度条件によらず、表面粗さの増大によって粘着係数が増加し、合成粗さが1～3mm程度で極大もしくはほぼ一定となる。
- (3) 常温条件よりも低温条件で再粘着現象が発生しやすい。
- (4) 表面粗さが小さい場合に再粘着現象が発生しやすい。

以上の結果より、寒冷地域においては、雨天や結露によって粘着係数が低下し、空転・滑走が発生しやすいが、車輪やレールの表面粗さの増大によって粘着係数が増加し、空転・滑走の抑制に効果があると推定される。また、寒冷地域では再粘着現象が発生しやすいと考えられるため、加速力低下やブレーキ距離延伸の防止に再粘着現象を利用するような制御方法が有効である可能性が示唆された。一方で、現車と本研究で用いた2円筒試験機では、再粘着現象の発生メカニズムが異なる可能性が考えられるため、両者のメカニズムの相違について今後検討する必要がある。

謝 辞

本研究における室内試験の実施にあたり、札幌市交通局谷本啓氏（元公益財団法人鉄道総合研技術研究所鉄道力学研究部軌道力学研究室）には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) H. Chen, T. Ban, M. Ishida, T. Nakahara, "Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact," *Wear*, Vol.253, No.1, pp.75-81, 2002.
- 2) H. Chen, T. Ban, M. Ishida, T. Nakahara, "Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions," *Wear*, Vol.265, No.9, pp.1504-1511, 2008.
- 3) H. Chen, H. Tanimoto, "Experimental observation of temperature and surface roughness effects on wheel/rail adhesion in wet conditions," *International Journal of Rail Transportation*, Vol.6, No.2, pp.101-112, 2018.
- 4) 砂撒き装置：<https://ja.wikipedia.org/wiki/>（参照日：2021年6月17日）
- 5) 大野薫：増粘着材噴射装置（セラジェット）—その1—, *RRR*, Vol.63, No.1, pp.36-37, 2006
- 6) 大野薫：増粘着材噴射装置（セラジェット）—その2—, *RRR*, Vol.63, No.2, pp.34-35, 2006
- 7) 大山忠夫, 中野敏, 夏井由郎：高押付力型増粘着研磨子による水潤滑時の粘着力向上, 鉄道技術研究報告, No.1346（車両編第321号）, 1987
- 8) 大山忠夫：増粘着研磨子, *RRR*, Vol.64, No.5, pp.38-39, 2007
- 9) 大山忠夫：高速鉄道車両の車輪とレール間の粘着力におよぼす接触条件の影響と粘着力向上に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.1, No.2, pp.1-77, 1987
- 10) 陳樺, 伴巧, 石田誠, 中原綱光：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, 鉄道総研報告, Vol.26, No.2, pp.45-50, 2012
- 11) 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
- 12) 渡邊朝紀：高速時の粘着力を確保する技術, *RRR*, Vol.61, No.1, pp.10-14, 2004
- 13) T. Watanabe, "Anti-slip Readhesion Control with Presumed Adhesion Force - Method of Presuming Adhesion Force and Running Test Results of High-speed Shinkansen Train -," *QR of RTRI*, Vol.41, No.1, pp.32-36, 2000.