

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

車輪削正後の 乗り上がり脱線を防止する

急曲線や分岐器を低速で走行する鉄道車両の乗り上がり脱線について、車輪削正からの走行距離が短い場合に脱線が発生しているケースが少なからずあります。そこで、車輪削正後の表面状態が急曲線での車輪フランジ乗り上がり脱線に与える影響に関して、特に車輪・レール間の表面状態に着目し、各種の試験や調査を行いました。また、車輪削正に関わる乗り上がり脱線防止対策としての削正直後のフランジ塗油について、検証した結果を紹介します。



土井 久代

Hisayo Doi

鉄道力学研究部
車両力学研究室
副主任研究員

【専門分野】車両運動力学、走行安全性評価

はじめに

車輪が転がりながらレールに乗り上がり、行って行く形態の脱線を、乗り上がり脱線と呼びます。乗り上がり脱線が発生する原因としては、軌道の不整や輪重のアンバランス、車輪・レール間に作用する大きな摩擦力などが考えられます。また、乗り上がり脱線は、車輪削正（※参照）から比較的短い走行距離で発生しているケースも少なからず見られます¹⁾。したがって、車輪削正とその後の走行による車輪表面状態の変化も、車輪の乗り上がりに何らかの影響を及ぼしていると考えられます。特に、車輪表面状態の変化の過程で、車輪フランジとレール間の摩擦係数が上昇することが、車輪フランジのレールへの乗り上がりに大きく影響してい

ると考えられます。しかし、摩擦係数には車輪・レール双方の表面状態や材料特性、接触状態、油や汚れなどの介在物、天候や温湿度といった周囲の環境など、様々な因子が絡みます。そのため、車輪削正に関わるフランジ接触部の摩擦係数上昇のメカニズムは未だ十分に解明されていません。

そこで、車輪削正後の表面状態が急曲線における車輪フランジ乗り上がり脱線に与える影響について、車輪フランジ部の表面状態に着目し、削正後の表面形状・粗さの変化を捉える試験や営業車の車輪表面状態の調査を行いました。また、削正直後のフランジ塗油による乗り上がり脱線防止効果を検証しました。ここで紹介する走行試験や車両運動シミュレーションは、主として、構造的な平面性変位と半径が約100mのリード曲線を持つ、50kgNレール側線用8番分岐器（以下、側線用8番分岐器）を低速で通過するケースを対象としています。

なお、試験や調査の一部は、東日本旅客鉄道株式会社の協力の下で実施されたものです。

※ 車輪削正

車輪の製造時やメンテナンス時に、踏面、フランジ、リム部など車輪各部を、旋盤により切削して成形することを車輪削正と呼びます。本稿では、車両の走行によって生じた摩耗や表層に損傷が生じた車輪を、車両に取り付けたままの状態（在姿状態）で切削を行う、在姿旋盤によって削正された車輪について扱います（図1）。

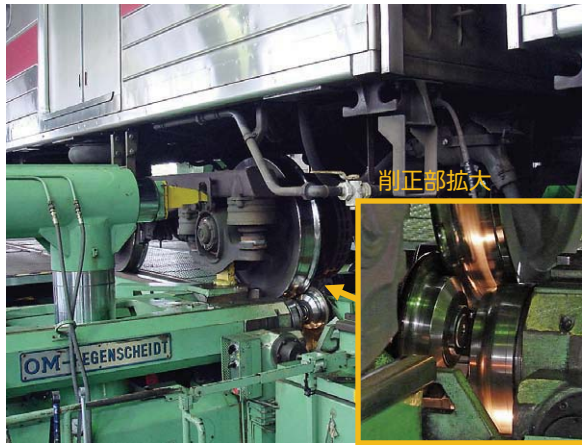


図1 在姿状態での車輪削正の様子

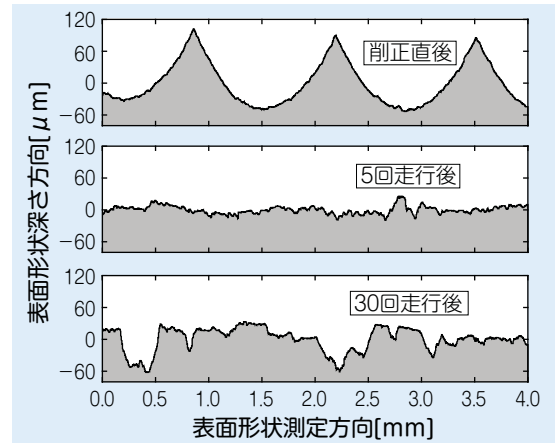


図3 曲線の通過回数と車輪フランジ直線部の表面形状(バイト送り速度1.5mm/回転の場合)

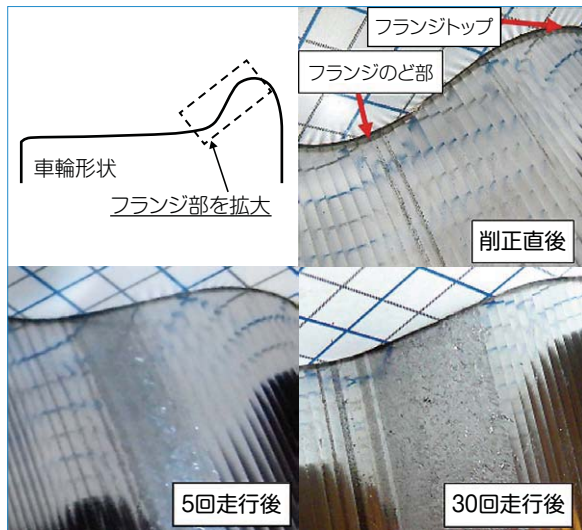


図2 曲線の通過回数と車輪フランジ表面様相の変化

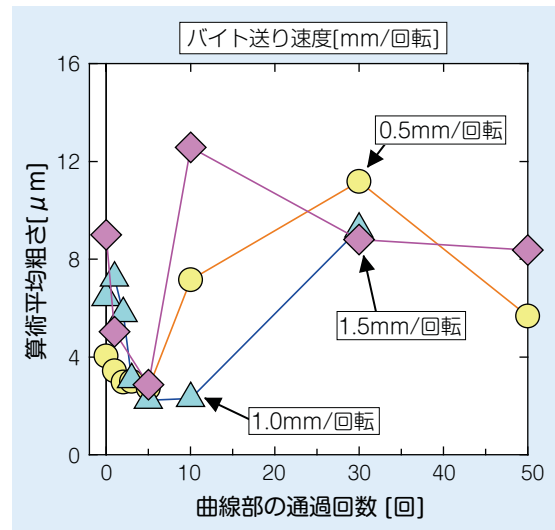


図4 車輪フランジ直線部の算術平均粗さの変化

車輪の表面状態と摩擦係数

(1) 車輪削正による表面形状と繰り返し走行による変化

車輪削正後の車輪表面の形状や粗さの変化について調べるため、半径200mmの曲線を繰り返し走行する試験を行いました。繰り返し走行にともなう、車輪フランジの表面の様子を図2に、フランジ直線部の表面形状の変化を図3に示します。車輪旋盤には、バイトと呼ばれる刃がついており、車輪削正時には車軸の方向にバイトを送りながら動かして、車輪表面を削っていきます。図3には、そのバイト送り速度が、車輪1回転当たり1.5mmの場合を示しました。図で灰色に塗りつぶされている部分が、車輪の部分です。

車輪削正直後の表面には、山と谷が明確に分かれたバイトによる削正痕が

見られます。この削正痕は5回程度の曲線走行により一旦摩滅しますが、その後の繰り返し走行によって、表面が荒れてくるのがわかりました。

図3の表面形状を算術平均粗さと呼ばれる、表面粗さの指標で評価したところ、図4のようになりました。この表面粗さの評価においても、5回程度の走行で表面粗さは一旦小さくなり、その後は大きくなる傾向があることがわかります。バイト送り速度が変わると、削正直後の表面形状も変わるため、走行試験ではバイト送り速度を3条件設定しましたが、設定した条件下では、上記の傾向に特に違いはありませんでした。

(2) 表面粗さや温湿度が摩擦係数に及ぼす影響

車輪やレール表面の粗さは、車輪・レール間の摩擦係数にどのように影響

するのでしょうか。また、環境の温湿度による影響はどのようなものでしょうか。それらを評価するため、直径30mmの円筒試験輪を用いた2円筒転がり接触試験を室内にて行いました²⁾。接触させる2つの試験輪は、それぞれ実際の車輪とレールに使われている材料で作られたものです。

表面粗さ・環境の温湿度と、すべり率0.3%における等価摩擦係数の関係を図5に示します。ここでは、等価摩擦係数とは、2つの物体がある相対的な速度差(すべり率)をもって接触している場合の、2物体の接触面内に働く力(接線力 T)とその面の法線方向に働く力(法線力 N)の比(T/N)を指します。つまり、あるすべり率における動摩擦係数に相当する量を、等価摩擦係数と呼びます。



図5 等価摩擦係数と表面粗さ・環境の温湿度の関係

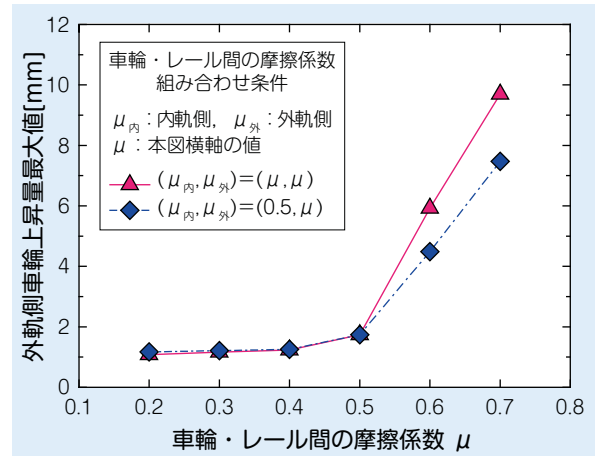


図6 車輪・レール間の摩擦係数と車輪上昇量の関係 (車両運動シミュレーション)

相対湿度を変化させた(図5(a))では、平滑な表面を示す▲は相対湿度が小さくなると等価摩擦係数が大きくなる傾向がありました。一方、粗い表面を示す◆は相対湿度による影響は見られませんでした。図5(b)に示す温度については、設定した条件における温度と等価摩擦係数の間に明確な相関は見られませんでした。また、図5(a)、図5(b)のいずれにおいても、等価摩擦係数は表面が平滑な場合の方が大きいことがわかりました。

(3) 表面状態と摩擦係数

上記(1)では、車輪削正後からの表面形状の変化を明らかにしました。(2)では、環境の温湿度条件によっては、摩擦係数が大きくなる可能性があること、またそれは表面が平滑な場合であることを示しました。さらに、摩擦に関わる既往の研究^{3,4)}によると、材料の表面が清浄な場合や金属素地同士の接触の場合、摩擦係数が大きくなると考えられます。以上を鑑みると、車輪が走行して削正痕が摩擦しつつあるときの材料の金属素地の露出や、平滑化による車輪・レール間の実質的な接触面積の増加、また短い時間間隔での繰り返し接触による表面の汚れの除去といった条件が重なり合うことにより、摩擦係数が大きくなる可能性があると考えられます。

フランジ塗油による乗り上がり脱線防止効果

(1) 車輪・レール間の摩擦係数と車輪フランジ乗り上がり

車輪・レール間の摩擦係数が車輪フランジの乗り上がりと車両の走行安全性にどのように影響するかを調べるため、側線8番分岐器を通過する1車両の車両運動シミュレーションを実施しました⁵⁾。ここで、車輪とレールは新品形状で、車両の走行速度は20km/hです。

シミュレーションによって得られた、分岐器内のリード曲線部における先頭軸外軌側の車輪上昇量最大値を図6に示します。内外軌の摩擦係数の組み合わせを2条件設定して、摩擦係数の影響を調べました。一方は図中の▲で、内外軌の摩擦係数が同じ条件です。もう一方は図中の◆で、内軌側の摩擦係数を0.5に固定して外軌側を0.2~0.7の間で変化させた条件です。外軌側の摩擦係数が0.5を超えると、外軌側車輪の上昇量最大値は急激に大きくなる傾向にありました。一方、外軌側摩擦係数が0.5以下だと、車輪上昇量は2mm未満となりました。内軌側の摩擦係数は、輪軸を外軌側へ押し出す方向に働く、車輪・レール間の接線力に関わってくるため、その大きさも車輪乗り上がり重要な要素となります。しかし、◆の値からわかるように、内軌側の摩擦係数が0.5と、あ

る程度大きくなっても、外軌側の摩擦係数の上昇を抑えれば、乗り上がり脱線に至る可能性は非常に小さくなると考えられます。

(2) 車輪フランジ部塗油の効果とその持続性

車輪がレールに乗り上がる過程では、車輪のフランジ部がレールと接触します。そこで、車輪・レール間の摩擦係数の増加を抑制するための実用的な方策のひとつとして、車輪削正直後のフランジ直線部への塗油が考えられます。なぜなら、油の摩擦係数は0.1前後だからです。そこで、車輪削正直後に塗油を行った車輪を用いて、側線用8番分岐器の繰り返し走行試験を実施したところ、塗油しない場合に比べて車輪の上昇が抑えられることを確認しました⁶⁾。

しかし、車輪フランジとレールが繰り返し接触することにより、車輪フランジ部に付着した油が、車輪の摩擦とともに剥がれていくなど、何らかの理由で減少し、期待する効果が得られないことも考えられます。そこで、車輪削正後の走行距離が比較的短い場合の油分の付着状態を確認するため、営業車の車輪調査と試験車による走行試験を実施しました。

油の付着持続性

車輪削正直後にフランジ部に塗った油の付着持続性について把握するため、営業車両の削正後の走行距離と車輪フ

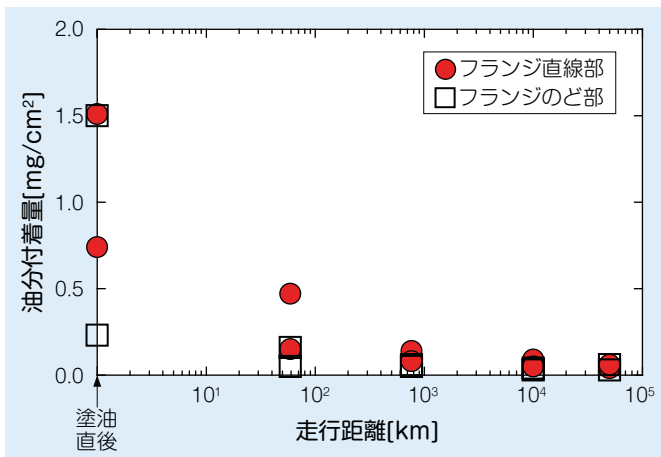


図7 車輪削正直後にフランジ部に塗油した車輪の走行距離と油分付着量の関係

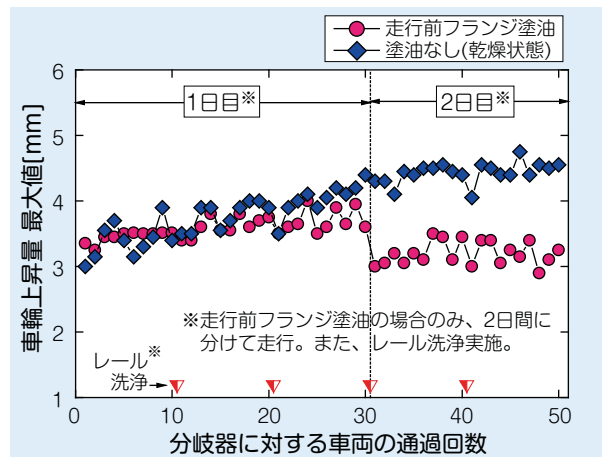


図8 分岐器の繰り返し通過にともなう車輪上昇量の変化

ランジ部の油分付着量の関係を調べました。調査対象としたのは、一部区間で車上塗油が実施されている路線を走行する車両です。

調査結果を図7に示します。油分付着量は削正後、約60km走行するまでの間に急速に減少しました。そして、走行距離がおよそ1,000km以上になると油分付着量は約0.1mg/cm²に収束することがわかりました。

分岐器繰り返し走行試験による確認

鉄道総研構内で、車輪削正直後の塗油による効果の持続性を確認するための試験を実施しました。車輪削正直後の塗油を模擬した状態で側線用8番分岐器を速度15km/hで繰り返し走行する試験です。

試験走行開始前、試験車両の全ての車輪フランジ部に、0.5mg/cm²相当の油を塗布しました。試験区間は約207mで、1試験走行当たり車両は5箇所分岐器を通過します。戻り走行は回数に含みません。また本試験では、レールに付着した油分の除去のために、図8に示すタイミングで10回毎にレール洗浄をしました。

試験車両が通過する5つの分岐器の内、ある一つの分岐器を走行した時の車輪上昇量の最大値をまとめた結果が図8です。走行前にフランジ塗油した場合の車輪上昇量を●で示します。レール洗浄直後の走行や試験日が変わり、繰り返し走行の間隔があくと、多少減

少しました。また、各試験日の初回から数回程度までの内に徐々に増加する傾向があったものの、乗り上がり脱線に至るような現象は確認されませんでした。走行1行程で通過する分岐器数を考慮すると、各車輪は100～150回、車輪フランジがレールに接触しましたが、この繰り返し接触回数後も車輪フランジには0.2～0.5mg/cm²程度の油分が残存していました。

比較のために、フランジ部へ塗油しなかった条件を図8に◆で示します。走行する日によって温湿度等の条件が異なるため、一概には比較できませんが、走行にともなう車輪上昇量の変化に着目すると、塗油しない場合の方が、車輪上昇量がより増加する傾向がありました。

おわりに

車輪削正後の急曲線での乗り上がり脱線の背景には、車輪とレールが繰り返し接触して削正痕が摩滅しつつあるときの金属素地の露出と実質的な接触面の増加による車輪フランジ・レール間の摩擦係数の上昇があるものと推定されることを示しました。また、車輪削正直後のフランジ塗油は、削正からの走行距離が短く、車輪表面状態の変化が大きい時期の摩擦係数の上昇を確実に抑制できるため、乗り上がり脱線の対策として有効であることを示しました。

車輪表面の粗さや付着物といった車

輪の表面状態は、様々な条件によって変化します。例えば、車輪表面に付着する油分の量は、塗油の運用方法が違うため路線によって異なりますし、また、長距離走行後の車輪表面は、いくつもの窪みがある状態となります⁷⁾。車輪の表面状態は、車輪・レール間の作用力に直接影響を及ぼすことから、今後も車輪の表面状態に注目していきます。[RRR]

文献

- 1) 片折暁伸, 他: のり上がり脱線の根絶を目指して-第1報-, 第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.729-732, 2009
- 2) 山本大輔, 他: 車輪フランジ部の微小凹凸と接線力に関する基礎的研究, 日本機械学会第19回交通・物流部門大会講演論文集, pp.153-156, 2010
- 3) 伴巧, 他: 転削車輪フランジ部の摩擦に関する研究, 第11回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.431-434, 2001
- 4) 日本トライボロジー学会編: トライボロジーハンドブック, 養賢堂, p.351, 2001
- 5) 中橋順一, 他: 分岐器通過シミュレーションによる安全性の検討, 第16回鉄道総合技術連合シンポジウム講演論文集, pp.623-626, 2009
- 6) 桃崎秀二, 他: 車輪削正が低速乗り上がり脱線へ及ぼす影響に関する基礎試験, 鉄道力学論文集, Vol.13, pp.37-42, 2009
- 7) 土井久代, 他: 車輪削正後の車輪表面状態の変化と塗油による乗り上がり脱線防止効果, 鉄道総研報告, Vol.25, No.8, pp.29-34, 2011.8