

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

鉄道力学研究部 車両力学
副主任研究員 土井 久代

1. はじめに

急曲線や分岐器通過における車輪フランジ乗り上がり起因した脱線事故はその原因として、軌道の不整や輪重のアンバランスなどが考えられる。また、その乗り上がり脱線が車輪削正から比較的短距離走行後に発生しているという事象が見られる¹⁾ことから、車輪削正とその後の走行による車輪表面状態の変化も、車輪フランジ乗り上がり何らかの影響を及ぼしている可能性がある。特に、車輪表面状態の変化による車輪・レール間の摩擦係数の上昇は、乗り上がり脱線の発生に大きな影響を及ぼす要素の一つであると考えられる。しかしながら、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、温湿度といった周囲の環境など、様々な因子が絡むため、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ないのが現状である。

本研究では、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、車輪フランジ部の表面状態に着目し、削正後の表面形状・粗さの変化や営業車両の車輪表面状態について、試験や調査を行った。また、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、その有効性を種々の手法により検証した。なお、本研究で行った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 100.7m のリード曲線を有する 50kgN レール側線用 8 番分岐器(T50N 片 8-201、以下、側線用 8 番分岐器と記す)の対向通過を対象とした。

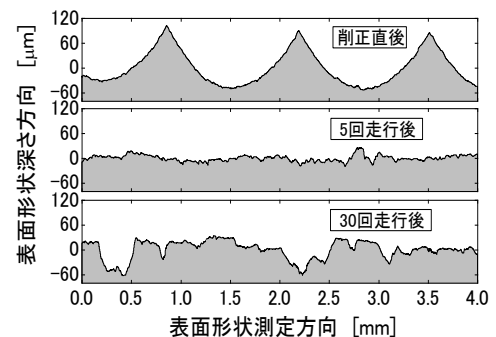
2. 車輪フランジの表面状態と乗り上がり

2.1 削正直後の車輪による急曲線繰り返し走行試験

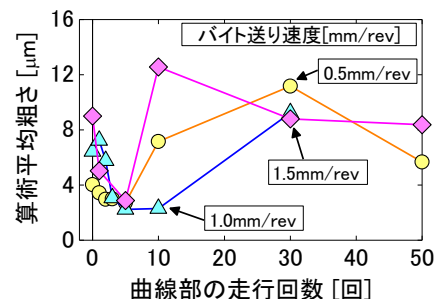
削正直後の車輪を用いて急曲線(曲線半径 200m、円曲線長 100m)を繰り返し走行する試験を JR 東日本と共同で実施し、車輪表面の変化を調べた。車輪フランジ直線部の表面形状と表面粗さの変化を図 1 に示す。車輪削正直後は削正痕を示す凹凸が大きいですが、5 回程度の曲線走行により削正痕は摩擦して一旦平滑化し、その後は荒れてくるのがわかった。この傾向は、設定した車輪削正速度(バイト送り速度)にはよらないこともわかった。

2.2 表面粗さや温湿度が摩擦係数に及ぼす影響

車輪・レール周辺の環境条件のうち温湿度が摩擦係数に及ぼす影響を、円筒試験輪を用いた転がり摩擦試験により検証した²⁾。試験は、車輪に相当する試験輪に 2 パターンの表面粗さを設定し、試験輪表面へ塗油を行わない条件で実施した。相対湿度または温度と等価摩擦係数(すべり率 0.3%時)の関係を図 2 に示す。概して、平滑な表面(算術平均粗さ 0.17 μm)の方が粗い表面(18.9 μm)より大きな等価摩擦係数となった。また、平滑な表面では相対湿度が



(a) 表面形状の変化(バイト送り速度 1.5mm/rev)



(b) 表面粗さの変化

図 1 急曲線の繰り返し走行にともなう車輪フランジ直線部の表面形状と表面粗さの変化

低くなると等価摩擦係数が増大する傾向が見られた。一方、温度と等価摩擦係数の相関は、本試験条件下では見られなかった。

2.3 車輪表面状態と摩擦係数

上記により、車輪削正後からの表面形状の変化を明らかにした。そして、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た。さらに既往の研究^{3),4)}により、材料の表面が清浄な場合や金属素地同士の接触の場合、摩擦係数は増加すると考えられる。以上から推察して、車輪が走行して削正痕が摩滅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・レール間の真実接触面積の増加、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等が重畳することにより、摩擦係数が大きくなる可能性があると考えられる。

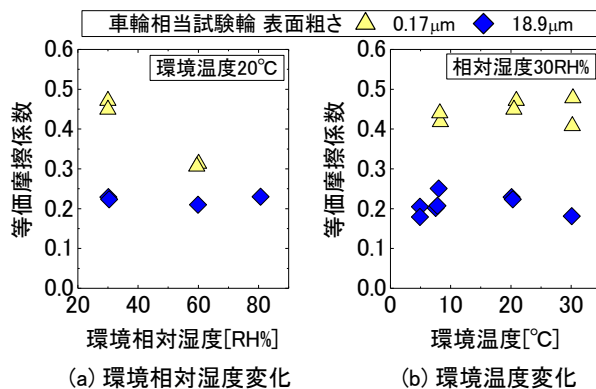


図2 等価摩擦係数と表面粗さ・環境の温湿度の関係

3. 車輪フランジ部塗油による乗り上がり脱線防止効果の検証

3.1 車輪・レール間の摩擦係数の影響評価

車輪・レール間の摩擦係数が車輪フランジ乗り上げに与える影響を評価するため、一車両の側線8番分岐器対向通過の車両運動シミュレーションを実施した⁵⁾。ここで、車輪とレールは新品形状とし、車両の走行速度は20km/hとした。

内軌側の摩擦係数は0.5一定、外軌側は0.2~0.7の間で変化させた場合の、リード曲線部における先頭軸車輪の外軌側脱線係数および車輪上昇量の最大値、ならびに内軌側横圧輪重比の計算結果を図3に示す。外軌側摩擦係数が0.5を超えると外軌側車輪の上昇量最大値は大きくなる傾向にあり、摩擦係数が0.5より小さいと車輪上昇量は2mm以下となった。この結果から、内軌側の摩擦係数が0.5のようにある程度大きな場合でも、外軌側の摩擦係数の上昇を抑制すれば乗り上がり脱線に至る可能性は非常に小さいと考えられる。

3.2 車輪フランジ部塗油の効果の持続性

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車輪フランジ直線部への塗油が挙げられる。車輪削正直後に塗油を行った車輪を用い、側線用8番分岐器の繰り返し走行試験を実施した⁶⁾。その結果、塗油を行わ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た。しかしながら、走行にともなう車輪フランジとレールゲージコーナの接触により、車輪フランジ部に付着した油が何らかの理由で減少し所望の効果が得られないことも想定される。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検証するため、営業車の車輪調査と試験車による走行試験を実施した。

(1)油の付着持続性 車輪削正直後に車輪フランジ部に塗布し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ランジ部の油分付着量の関係を調べた。調査対象車両は、一部区間で車上塗油が実施されている路線Aを走行する車両とした。なお本調査の時期は、車輪削正直後の車輪フランジ部への塗油作業を全車両対象に開始して間もない時期であった。

調査結果を図4に示す。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た。そして、走行

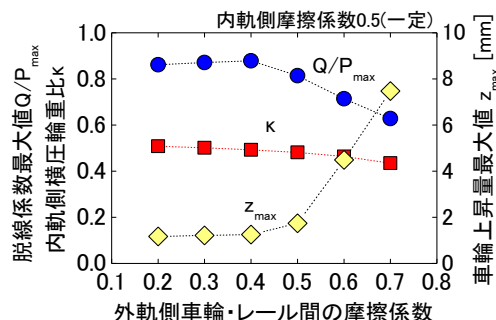


図3 分岐器走行シミュレーションによる摩擦係数の走行安全性への影響評価

距離がおよそ 1,000km 以上になると油分付着量は約 0.1mg/cm² 程度の値に収束した。

(2) 分岐器繰り返し走行試験による確認 車輪削正直後の塗油による効果の持続性を検証するため、車輪削正直後の塗油を模擬した状態で側線用 8 番分岐器を走行速度 15km/h にて繰り返し走行する試験を、鉄道総研構内にて実施した。試験走行開始前、試験車両の全ての車輪フランジ部には、0.5mg/cm² 相当の油を塗布した。試験区間の延長は約 207m で、試験走行 1 行程の間に車両は 5 箇所分岐器を通過する(戻り走行時の通過は通過回数に入れない)。また本試験では、レール洗浄(レールに付着した油分の除去)を、図 5 に示すタイミングで 10 回毎に実施した。

試験車両が通過する 5 つの分岐器の内、試験方向に対して対向通過である分岐器に特に注目した。繰り返し走行にともなう先頭軸の内軌側横圧輪重比と外軌側の脱線係数、車輪上昇量の変化を図 5 に示す。ここで、内軌側横圧輪重比はリード曲線内の平均値であり、脱線係数と車輪上昇量は分岐器全体における最大値で評価した。内軌側横圧輪重比や分岐器通過中の車輪上昇量最大値は、レール洗浄直後の走行や測定日が変わって繰り返し走行の間隔が開くと、これらの値が減少した。また車輪上昇量は、各測定日の初回から 5 回程度までの内に徐々に増加する傾向があった。しかしながら全体的には、内軌側横圧輪重比、脱線係数、車輪上昇量ともにほとんど値は変わらず、乗り上がり脱線に至るような現象は確認されなかった。試験走行 1 行程で通過する分岐器数を考慮すると、全試験走行の間に奇数位車輪は 150 回、偶数位車輪は 100 回外軌側となり、車輪フランジがレールゲージコーナに接触した。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た。また、車輪フランジ部への塗油を行わない条件下での試験もあわせて実施したところ、車両の通過回数にともない車輪上昇量が増加する傾向が見られた。以上より、試験で設定した短距離の繰り返し走行の範囲において、車輪削正後の車輪フランジ塗油による車輪の上昇抑制効果は持続することを確認した。

4. 定常的な車輪フランジの表面状態

車輪フランジへの塗油は、分岐器通過または急曲線通過時の乗り上がり脱線に対して効果があること、車輪フランジ・レールゲージコーナ間の繰り返し接触状況下においても比較的短距離の走行時には有効であることを上記で示した。また営業車の調査により、車輪フランジに塗布した油は走行とともに急速に減少することがわかった。これらの結果を踏まえ、車輪表面の油分付着量や表面粗さなどがある程度落ち着き、定常的な表面状態となっていると考えられる削正後からの走行距離が 1 万 km 以上の車輪フランジを調べた。

4.1 営業車両の定常的な油分付着量

3 つの営業路線において、車輪フランジ部の油分付着量を調査した結果を図 6 に示す。本調査で検出した油分は、車輪削正直後に塗布した油だけではなく、車両に搭載された塗油装置による曲線レールゲージコーナへの塗油(これを、「車上塗油」と呼ぶ)の油も含有していると考えられ、油分の付着量は路線によって様相が異なってくるのがわかった。また、図 6(a)は図 4 と同じ路線 A の結果であるが、図 4 の長距離走行後の油分は 0.1mg/cm² 程度に収束しているのに対し、図 6 では平均的な油量が図 4 に比べて増加していた。図 4 は削正直後の塗油作業がはじまって間もない時期の結果であり、その 4 ヶ月後以降に調査した図 6(a)では、

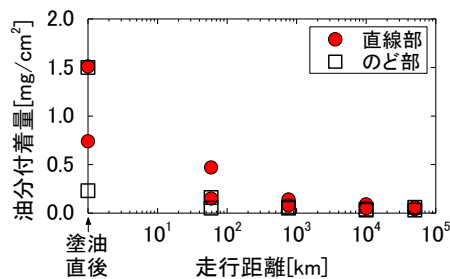


図 4 走行距離と油分付着量の関係 (営業車両, 路線A)

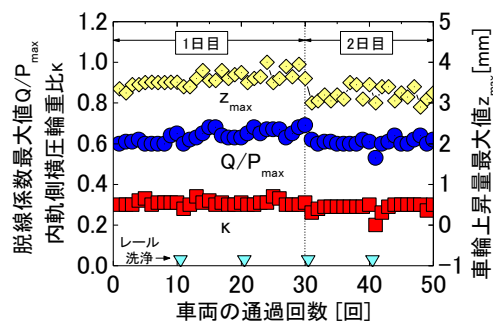


図 5 分岐器繰り返し走行試験結果 (走行前 車輪フランジ塗油)

塗油された車輪が多く走行してレールに付着した油分が車輪へ再付着したため、車輪フランジに定常的に付着している油分量が増加したものと考えられる。

4.2 定常的な車輪表面状態と等価摩擦係数

車輪に付着している油は、車輪やレールの摩耗粉などと混在した状態で存在しているため、油により期待される摩擦低減効果が得られているかは明らかではない。そこで、営業車の車輪フランジから採取した車輪付着物の摩擦係数の測定を室内実験により行った。その結果、車輪付着物中の摩耗粉等は油の摩擦低減効果を妨げないことがわかった (図 7)。

また、10,000km 以上走行した車輪の表面は、図 8 のようにあばた状となっている。そのような表面状態となっている営業車と表面に削正痕を模した車輪を用い、車輪表面を脱脂後、車輪フランジ乗り上がり開始状態を模擬する室内試験を実施した。測定した輪重、横圧等から等価摩擦係数を算出した結果、車輪フランジ表面があばた状となった車輪は、削正模擬車輪よりも等価摩擦係数が低かった。したがって、長距離走行後で車輪フランジ表面があばた状となった車輪は、乗り上がり脱線に至る可能性も低いと考えられる。

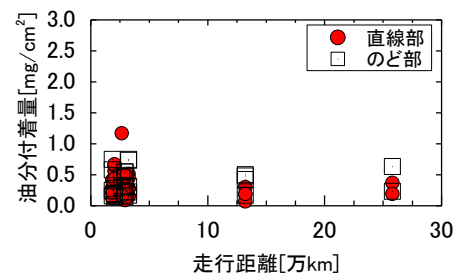
3. まとめ

車輪削正後の表面状態に関わる低速時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真実接触面の増加による摩擦係数や摩擦力の上昇があるものと推定される。車輪削正直後の塗油は、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ので、低速時の乗り上がり脱線の対策として有効であることを本研究で実証した。また、油の摩擦低減効果は、長距離走行後の定常的な油分付着量においても持続していると考えられる。

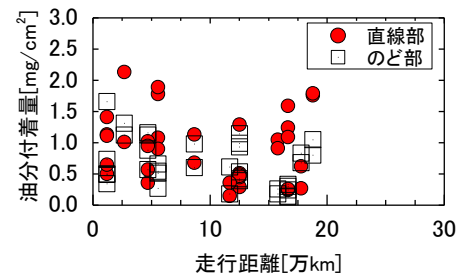
ただし、走行距離に対する油分付着量は、路線毎に異なった状態にあることがわかった。油分付着量は、車上塗油の運用や曲線・分岐器数など様々な路線状況で変化すると考えられ、かつ、油分は車輪・レール間の表面状態と作用力に直接影響を及ぼすことから、今後も必要に応じて油分付着量の調査を実施する計画である。

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—車輪とレールとの接触面の状態変化が摩擦係数に及ぼす影響」, 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 (繰り返し走行条件下における摩擦状態の変化)」, 鉄道力学論文集, Vol.13, pp.37-42, 2009.



(a) 路線A(一部区間で車上塗油実施)



(b) 路線B,路線C(全線で車上塗油実施)

図 6 営業車の定常的な車輪フランジ部の油分付着量

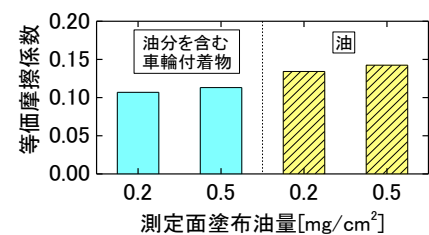


図 7 車輪付着物の摩擦係数評価



図 8 あばた状の車輪フランジ表面