

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

土井 久代* 宮本 岳史* 鈴木 淳一**
中橋 順一*** 陳 権# 伴 巧##

Alteration of Turned Wheel's Surface Condition and Effectiveness of Lubrication against Flange Climb Derailment

Hisayo DOI Takefumi MIYAMOTO Junichi SUZUMURA
Junichi NAKAHASHI Hua CHEN Takumi BAN

There have occurred a number of flange climb derailments on sharp curves such as those of turnouts in a relatively short running distance after wheel turning. It indicates that the alteration of turned wheel's surface condition might be related to induction of flange climbing. Through several experiments and numerical simulations, the authors have investigated the relationship between running safety of vehicle and wheel's surface condition especially in terms of friction between wheel and rail. Furthermore, lubrication just after the wheel turning has been proposed as a countermeasure against flange climb derailments and its effectiveness and persistence have been evaluated.

キーワード：走行安全性，車輪削正，乗り上がり脱線，摩擦係数，急曲線，塗油

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
に起因した脱線事故では、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、本研究は2008年2月に東日本旅客鉄道株式会
社（以下、JR東日本と記す）の尾久駅構内において発生
した脱線事故²⁾に端を発している。そのため、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

2000年に発生した日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突
事故の原因調査³⁾やそれに関連する研究⁴⁾では、乗り
上がり脱線に関わる車輪・レール間の問題について、特
に摩擦係数の上昇に着目している。また、既往の研究⁵⁾、
⁶⁾では、汚れ等を取り除いた清浄度の高い車輪表面の摩
擦係数が増大することが示されている。これらの知見を
踏まえ、尾久駅構内での側線用8番分岐器通過の脱線事
故を検証し、削正直後の車輪フランジの表面形状・粗さ

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室
** 材料技術研究部 潤滑材料研究室
*** 車両構造技術研究部 車両運動研究室
鉄道力学研究部 軌道力学研究室
材料技術研究部 摩擦材料研究室

特集：車両技術

の変化を走行試験により調べた。また、車輪の表面粗さと摩擦係数の関係について、環境の温湿度にも注目して室内試験を行った。

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¹⁾をJR東日本の車両センター構内線で実施し、車輪の表面形状と表面粗さについて調べた。本走行試験では、車輪削正時のバイトの送り速度の違いによる表面形状への影響についても調べるため、0.5, 1.0, 1.5mm/revの3つのバイトの送り速度を設定した。

曲線部の通過回数にともなう先頭軸外軌側車輪フランジ直線部の表面形状の変化を図1に示す。図1はバイトの送り速度が1.5mm/revの場合の例である。図1より、削正直後に見られる車輪表面の削正痕は、5回程度の曲線走行により一旦摩滅して平滑化し、その後荒れてくることがわかった。図1の表面形状を算術平均粗さで評価した結果を図2に示す。図2ではバイトの送り速度毎にデータを示した。この表面粗さの評価からも、5回程度の走行で表面粗さは一旦小さくなり、再び増大することがわかる。また、この傾向はバイト送り速度に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

車輪やレールの表面粗さや環境の温湿度が摩擦係数に及ぼす影響を、直径30mmの円筒試験輪を用いた転がり摩擦試験により検証した⁷⁾。車輪に相当する試験輪は車輪材を用いて製作し、その表面の粗さの条件として、平滑な場合（算術平均粗さ Ra0.17 μ m）と粗い場合（Ra18.9 μ m）の2つを設定した。レールに相当する試験輪はレール材から製作し、その表面粗さRaは0.60 μ mとした。その他の主な試験条件は、試験輪の回転速度200rpm、試験輪間の垂直荷重195N、すべり率0.3%である。

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3に示す。ここで、「等価摩擦係数」とは、あるすべり率における接線力と垂直荷重の比を意味する。相対湿度を変化させた場合（図3(a)）、平滑な表面で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った。一方、粗い表面では相対湿度による影響はなかった。図3(b)に示す温度の影響については、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なかった。また、図3(a)、図3(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った。

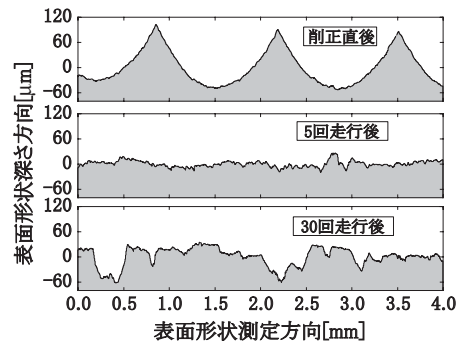


図1 曲線の通過回数と車輪フランジ直線部の表面形状 (バイト送り速度1.5mm/revの場合)

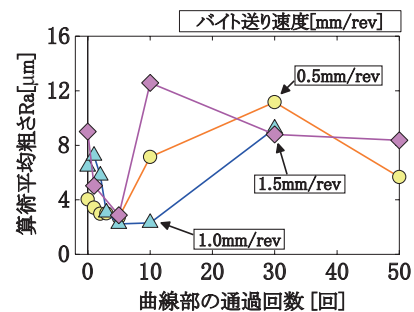
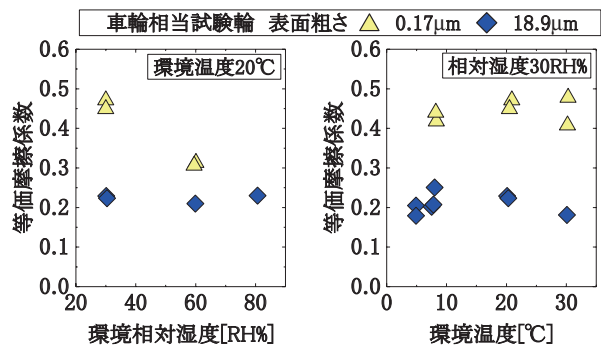


図2 車輪フランジ直線部の算術平均粗さの変化



(a) 環境相対湿度変化 (b) 環境温度変化
図3 等価摩擦係数と表面粗さ・環境の温湿度の関係

2.3 表面状態と摩擦係数について

2.1節では車輪削正後からの表面形状の変化を明らかにした。2.2節では、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た。さらに既往の研究^{5), 6)}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。

3. フランジ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がりに対してどのように影響するかを評価するため、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⁸⁾。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。

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4に示す。図4(a)は内外軌の摩擦係数が同じ場合、図4(b)は内軌側の摩擦係数は一定の0.5、外軌側は0.2~0.7の間で変化させた場合の結果である。外軌側摩擦係数が0.5以上になると外軌側車輪の上昇量最大値は大きくなる傾向にあった。一方、外軌側摩擦係数が0.5より小さいと、車輪上昇量は2mm以下となった。特に図4(b)の結果より、内軌側の摩擦係数がある程度大きくなって、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フランジ直線部への塗油が考えられる。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⁹⁾。

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。

3.2.1 油の付着持続性

車輪削正直後に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、車輪削正直後のフランジ直線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5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ていた。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程度の値に収束した。

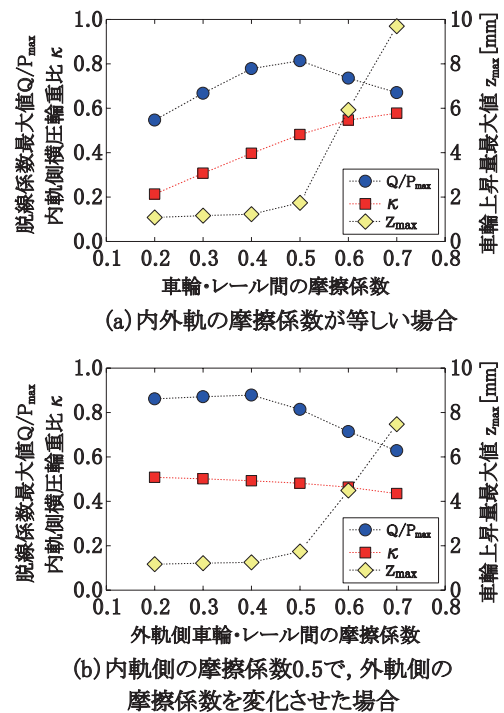


図4 シミュレーションによる車輪・レール間の摩擦係数の走行安全性への影響評価

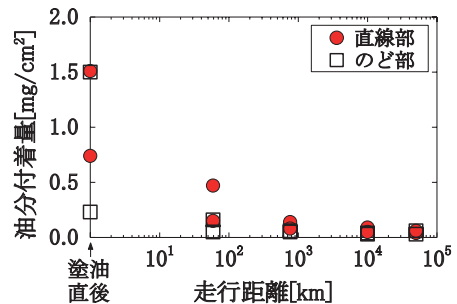


図5 走行距離と油分付着量の関係 (営業車両, 路線A)

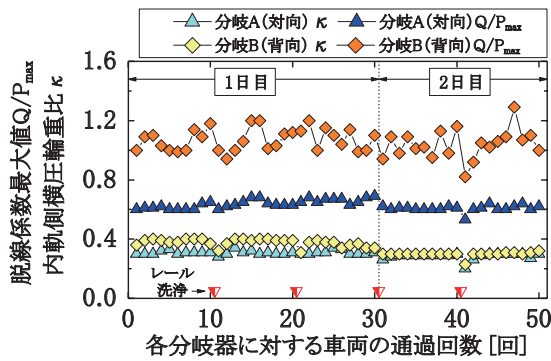
3.2.2 分岐器繰り返し走行試験による確認

車輪削正直後の塗油による効果の持続性を確認するため、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。

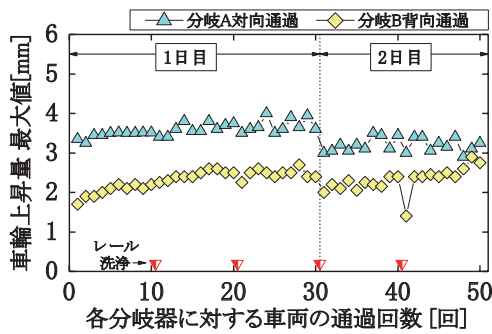
試験走行開始前、試験車両の全ての車輪フランジ部には、0.5mg/cm²相当の油を塗布した。試験区間は約207mで、1試験走行当たり車両は5箇所の分岐器を通過する(戻り走行時の通過は通過回数に入れない)。また本試験では、レール洗浄(レールに付着した油分の除去)を図6に示すタイミングで10回毎に実施した。

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Aと背向通過である分岐Bについて特に注目して試験結果をまとめた。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

特集：車両技術



(a) 脱線係数と内軌側横圧輪重比



(b) 車輪上昇量最大値

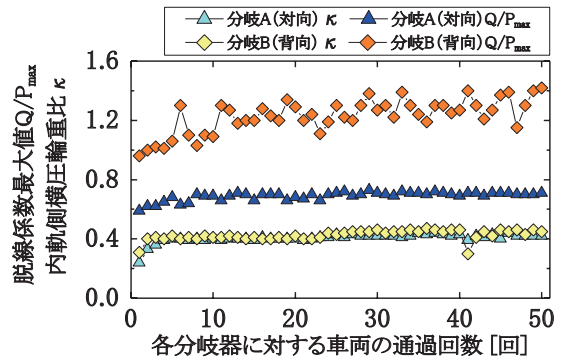
図6 分岐器の繰り返し通過にともなう脱線係数，横圧輪重比と車輪上昇量の変化（走行前塗油）

数，車輪上昇量の変化を図6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。

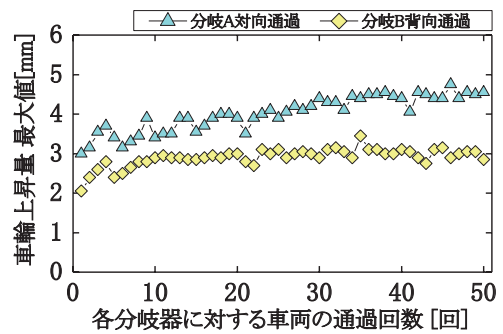
内軌側横圧輪重比や分岐器通過中の車輪上昇量最大値は，レール洗浄直後の走行や，測定日が変わり繰り返し走行の間隔があくと，値が多少減少した。また車輪上昇量は，各測定日の初回から数回程度までの内に徐々に増加する傾向があった。しかしながら全体的には，内軌側横圧輪重比，脱線係数，車輪上昇量ともにほとんど値は変わらず，乗り上がり脱線に至るような現象は確認されなかった。走行1行程で通過する分岐器数を考慮すると，奇数位車輪は150回，偶数位車輪は100回外軌側となり，車輪フランジがレールゲージコーナに接触した。この繰り返し接触回数後も車輪フランジには0.2～0.5mg/cm²程度の油分が残存していた。

走行前に塗油した場合の効果をより具体的に比較するため，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。結果を図7に示す。この場合，特に分岐Aにおいて，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。走行前に塗油を行った場合は，既述のように繰り返し走行による車輪上昇量の変化は少なかった。

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，車輪削正後のフランジ塗油による車輪の上



(a) 脱線係数と内軌側横圧輪重比



(b) 車輪上昇量最大値

図7 分岐器の繰り返し通過にともなう脱線係数，横圧輪重比と車輪上昇量の変化（塗油なし，乾燥状態）

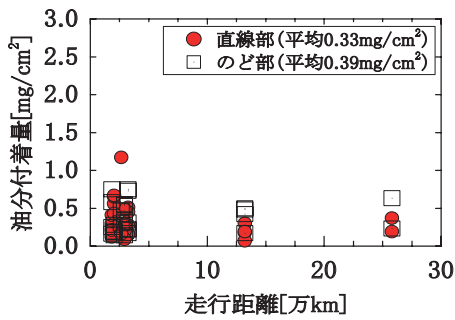
昇抑制効果は持続することを明らかにした。

4. 定常的な車輪フランジの表面状態

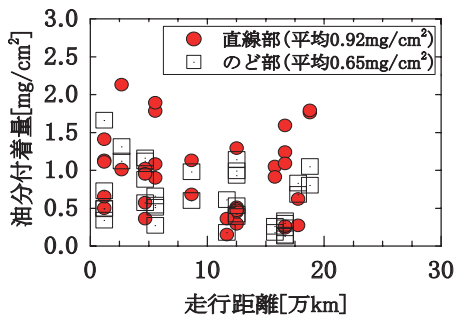
フランジ部の塗油は，分岐器通過または急曲線通過時の乗り上がり脱線に関して効果があること，車輪フランジ・レールゲージコーナ間の繰り返し接触状況下においても比較的短距離の走行時には有効であることを，前章で示した。また，営業車の調査により，フランジに塗布した油は走行とともに急速に減少することがわかった。これらの結果を踏まえ，車輪表面の油分付着量や表面粗さなどがある程度落ち着き，定常的な表面状態となると考えられる削正後からの走行距離が1万km以上の車輪フランジ部の表面状態を調べた。

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8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，車両に取り付けられている塗油装置等による油も含有していると考えられ，これより，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8(a)は図5と同じ路線Aの結果であるものの，図5では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8



(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8 営業車の定常的な車輪フランジ部油分付着量

では平均的な油量が図5に比べて増加していた。図5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結果である図8(a)では、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、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 車輪付着物の等価摩擦係数の評価

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。そのため、塗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部から採取した車輪付着物の分析および摩擦係数の測定を行った。

採取した車輪付着物には、質量比にして油分が1/4程度含まれていた。また、蛍光X線分光分析法により車輪付着物に含まれる固形物の元素分析を行ったところ、鉄が90%以上含まれていた。この鉄は主に車輪、レールならびに制輪子の摩耗粉に由来するものと考えられる。固形物の主成分である鉄の摩耗粉の粒径は最大で約6 μm であり、ほとんどの摩耗粉の粒径は1 μm 程度であった。

摩擦係数はクリープ力試験装置¹⁰⁾を用いた室内試験により評価した。本室内試験では油分付着量の条件を0.2mg/cm²または0.5mg/cm²とした。

結果を図9に示す。この結果から、少なくとも0.2mg/cm²程度の油量が車輪付着物内に存在していれば、等価摩擦係数は油と同程度であることがわかった。したがっ

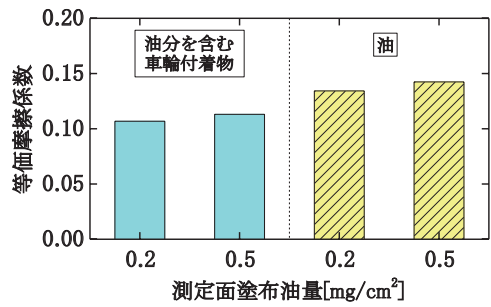


図9 車輪付着物の摩擦係数評価

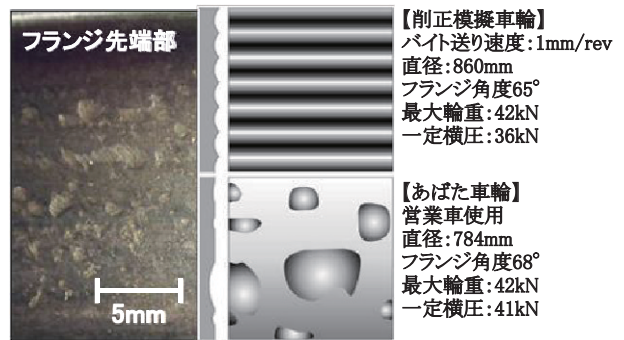


図10 あばた状のフランジ面(左写真)と供試車輪フランジ面模式図ならびに等価摩擦係数試験条件(右)

て、車輪付着物中の摩耗粉等は油の摩擦低減効果を妨げず、摩耗粉と混在した状態にあっても車輪フランジ乗り上がり防止する効果があるものと考えられる。

なお、図8に示す営業車の油分付着量において、図8(a)の走行距離13万km時のフランジ直線部における油分付着量は平均でおよそ0.2mg/cm²であり、他の走行距離の場合よりも平均的な油分付着量が少なかった。言い換えると、図8の調査対象路線では、同一の走行距離における平均的な油分付着量は0.2mg/cm²以上であり、20~30万km程度の走行時にも、図9の結果から油の効果は持続していると考えられる。

4.3 定常的なフランジ表面状態の等価摩擦係数

長距離走行後の車輪フランジ面には、図10(左写真)のようなあばた(痘痕)状の表面が形成されている。そのような表面状態となった営業車の一車輪(これを「あばた車輪」と呼ぶ)を用い、車輪表面に油がない状態でのフランジ乗り上がり時における等価摩擦係数を推定する室内試験を実施した(図10右)。本試験には、車輪/レール接触往復運動ユニット⁵⁾を用いた。比較のため、車輪表面に削正痕を施した車輪(これを「削正模擬車輪」と呼ぶ)も用いた。

乾燥状態で試験を行った結果、それぞれの供試車輪のフランジ角度、ならびにアタック角、輪重、横圧の測定値から算出される等価摩擦係数は、あばた車輪の場合0.13、削正模擬車輪の場合0.37であった。表面の油脂を

特集：車両技術

除去し、乾燥状態という条件にも関わらず、あばた車輪の等価摩擦係数は潤滑状態並に低い値であった。あばた車輪では、材料の降伏もなく、あばたという窪みの存在により真実接触面積が小さいために、等価摩擦係数が小さかったと考えられる。一方、削正模擬車輪では、車輪フランジ乗り上がりの過程で削正痕が除去される状態にあった。削正痕の山部でせん断応力が集中して材料が降伏し、降伏後の表面で真実接触面積が増えたこと、ならびに新たな金属素地が露出したことで、あばた車輪に比べて等価摩擦係数が大きくなったものと推定される。

以上より、長距離走行後のあばた状となった車輪表面では、たとえ表面に油分が残存していなくても、フランジ乗り上がりに至る可能性は低いと考えられる。

5. 結論

急曲線での車輪フランジ乗り上がり脱線に関して、車輪削正後の車輪表面状態が走行安全性に及ぼす影響や削正直後のフランジ塗油の効果およびその持続性を調査・検証した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 車輪削正後の表面状態に関わる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。
- (2) 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ため、乗り上がり脱線の対策として有効である。
- (3) 長距離走行後の車輪フランジ部には一定量以上の油分が定常的に付着していること、その付着油に混在する鉄摩耗粉等は、油の摩擦係数低減効果を妨げないことがわかった。したがって、油の摩擦低減効果は、本調査の対象路線における長距離走行後においても持続していると考えられる。

なお、車輪に付着している油分量は車上塗油の運用や曲線・分岐器数など様々な状況で変化すると考えられるため、路線毎に異なる状態にあった。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、今後にも必要に応じて油分付着量の調査を実施していく計画である。

謝辞

本研究の一部は、東日本旅客鉄道株式会社の土井賢一氏、飯島仁氏、片折暁伸氏、桃崎秀二氏と共同で実施した。また本件の実施にあたり、現地試験・調査にご協力いただいた東日本旅客鉄道株式会社の方々に、心より感謝の意を表する。

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) 運輸安全委員会:「東北線尾久駅構内列車脱線事故」, 鉄道事故調査報告書, RA2008-02, 2008
- 3) 運輸省事故調査検討会:「日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書」, 2000
- 4) 石田弘明, 他:「急曲線低速走行時の乗り上がり脱線に対する安全性評価指標」, 鉄道総研報告, Vol.18, No.8, pp.5-10, 2004
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 土井久代, 他:「車輪/レール間クリープ力試験装置「クリープテスタ」の開発」, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, pp.45-50, 2009