

車輪削正後の表面状態と走行安全性に関する研究

土井 久代* 宮本 岳史 鈴木 淳一
 柿嶋 秀史 伴 巧 陳 樺 (鉄道総研)
 片折 暁伸 (JR 東日本)

A Study on Relationship between Wheel's Surface Condition and Running Safety of Vehicle

Hisayo DOI*, Takefumi MIYAMOTO, Jyunichi SUZUMURA,
 Hideshi KAKISHIMA, Takumi BAN, Hua CHEN, (Railway Technical Research Institute)
 Akinobu KATAORI, (East Japan Railway Company)

There have occurred a number of flange climb derailments on turnout's sharp curves at low speeds in a relatively short running distance after wheel turning. It indicates that the alteration of turned wheel's surface condition might be related to increase of flange climbing. This paper presents investigations a relationship between running safety of vehicle and wheel's surface condition especially in terms of friction. Furthermore, a certain measure against flange climb derailments on sharp curves at low speeds is evaluated.

キーワード：走行安全性，車輪削正，車輪フランジ乗り上がり，摩擦係数，分岐器，急曲線，低速
 (Running safety, wheel turning, flange climbing, coefficient of friction, turnout, sharp curve, low speed)

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する低速時の脱線事故は、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散見されることから、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と推測される。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が、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・低速時の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、実験や調査を行った。また、削正直後のフランジ塗油による対策の有効性の検証を種々の手法を用いて実施した。

なお、本研究は JR 東日本管内の尾久駅構内で 2008 年 2

月に発生した脱線事故⁽¹⁾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 100.701m 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⁽²⁾やそれに関連する研究⁽³⁾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では摩擦係数が増大することを示している。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⁽⁴⁾を JR 東日本の車両センター構内線で実施し、車輪の表面形状と粗さについて調べた。走行試験では、車輪削正時のバイトの送り速度について、0.5, 1.0, 1.5mm/rev の 3 条件を設定した。

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(バイトの送り速度 1.5mm/rev の場合)。図 1 より、削正直後に見られた削正痕は 5 回程度の曲線走行により摩擦して一旦平滑化し、その後、荒れてくること分かった。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分かる。また、この傾向はバイト送り速度によらないことも分かった。

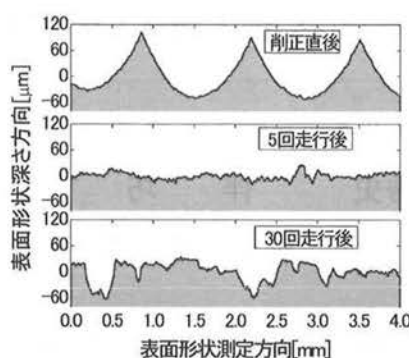


図 1 曲線の通過回数と車輪フランジ直線部の表面形状 (バイト送り速度 1.5mm/rev)

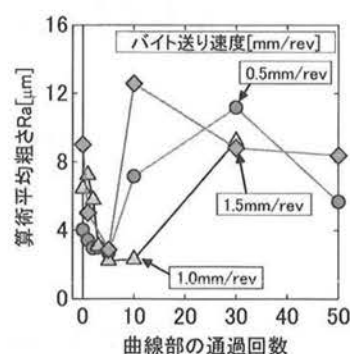


図 2 車輪フランジ直線部の算術平均粗さの変化

〈2・2〉表面粗さや温湿度が摩擦係数に及ぼす影響 車輪・レール周辺環境条件のうち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、その表面の粗さは、平滑な場合(算術平均粗さ $Ra0.17\mu m$)と粗い場合($Ra18.9\mu m$)の 2 条件設定した。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 $0.60\mu m$ である。その他の試験条件は、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%とした。

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(本稿では、あるすべり率における接線力と垂直荷重の比を、「等価摩擦係数」と記す)。図 3(a)の相対湿度を変化させた場合、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にあること、粗い表面では相対湿度による影響は見られないことが分かった。図 3(b)の温度の影響については、試験条件の温度と等価摩擦係数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くなっていた。

〈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の場合であることを示した。また、既往の研究^{(5),(6)}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、摩擦係数は増加すると考えられている。以上から推察して、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 低速時

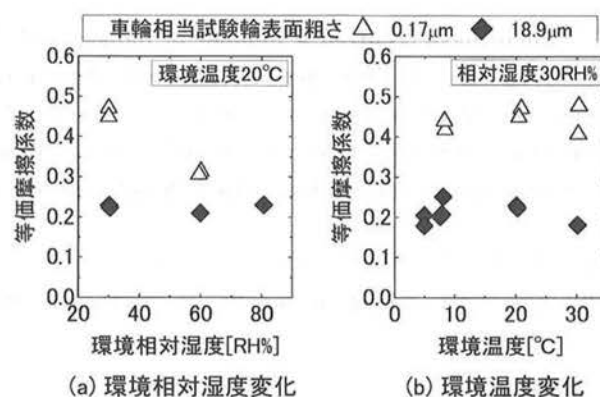


図 3 等価摩擦係数と表面粗さ・環境の温湿度の関係

の急曲線部乗り上がり脱線防止のため、車輪・レール間の摩擦係数の増加を抑制することが一つの対策として考えられる。そこで、摩擦係数の脱線係数や車輪上昇量への影響について、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⁽⁹⁾。

車輪・レール間の摩擦係数を内軌側は 0.5 一定、外軌側は 0.2~0.7 の間で変化させた条件下の先頭軸の計算結果を図 4 に示す。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。本結果から、外軌側の摩擦係数を抑制すれば内軌側の摩擦係数がある程度大きくなっても、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 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⁽⁸⁾。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に、営業車両の削正後の走行距離と車輪フランジ部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。調査時点で、路線 A では全車両を対象に、車輪削正直後のフランジ塗油を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 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度の値に収束することが分かった。

(2) 分岐器繰り返し走行試験による塗油の効果と持続性の確認 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 $15\text{km}/\text{h}$ 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、 $0.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 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）。

試験車両が通過する分岐器のうち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、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 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、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。なお試験では、適宜レール洗浄（レールに付着した油分の除去）と車輪フランジ部の油分採取を実施した。

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、レール洗浄後直後の走行や測定日が変わると値が多少減少するという傾向があり、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 $0.2\sim 0.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度の油分が残存していた。

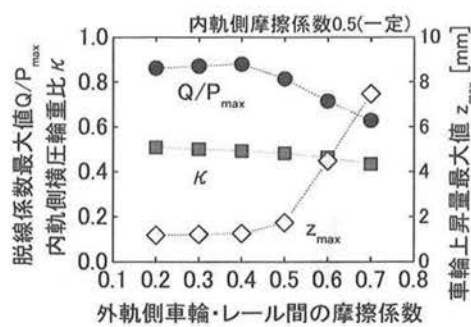


図4 摩擦係数の影響評価
(リード曲線部の値, 走行速度 $20\text{km}/\text{h}$)

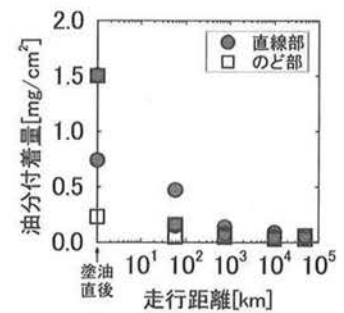
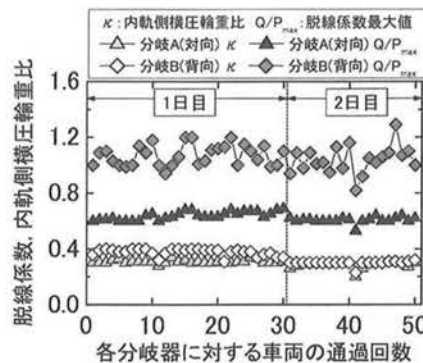
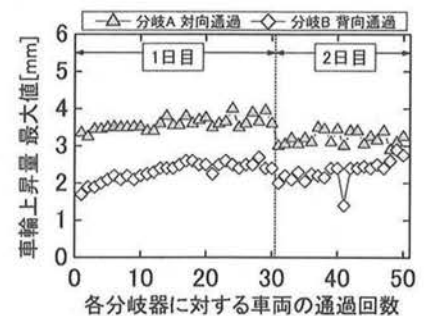


図5 走行距離と油分付着量の関係（営業車両, 路線 A）



(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横圧輪重比と車輪上昇量の変化（走行前塗油）

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低速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、走行とともに急激に減少することが分かった。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、車輪フランジ部の定常的な油分付着量を調査した結果を図 7 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ことが分かった。また、図 7(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 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度に収束しているのに対し、図 7 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、その後の結果である図 7(a)では、塗油された車輪が多く走ってレールに付着した油分が、車輪へ再付着したため、定常的な油分付着量が増加し

たと考えられる。

〈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摩擦係数を、クリープ力試験装置⁽¹⁰⁾を用いた室内実験により評価した。結果を図8に示す。図7の同一の走行距離における油分付着量の平均最低量は $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$ であり、少なくともこの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、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分かった。

〈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9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を用い、車輪表面を脱脂後、フランジ乗り上がり開始状態を模擬する室内試験を車輪/レール接触往復運動ユニット⁽⁶⁾を用いて実施した。表面に付着した油分を除去した上で試験を行った結果、輪重、横圧等の測定値から算出される等価摩擦係数は、あばた状のフランジ表面では削正痕をもつ車輪よりも小さな値となった。したがって、長距離走行後のあばた状となった車輪表面では、フランジ乗り上がりに至る可能性も低いと考えられる。

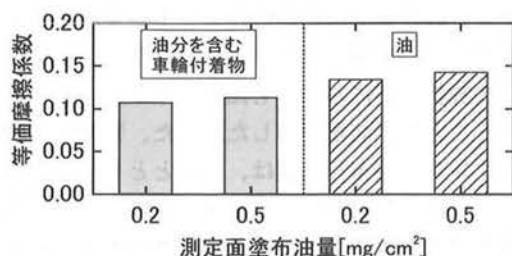


図8 車輪付着物の摩擦係数評価

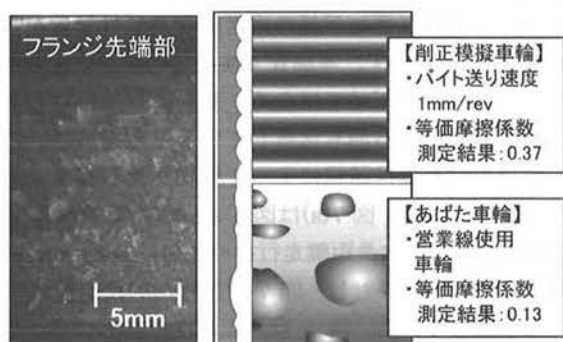


図9 あばた状のフランジ面(左写真)と供試車輪フランジ面模式図および摩擦係数実験値(右)

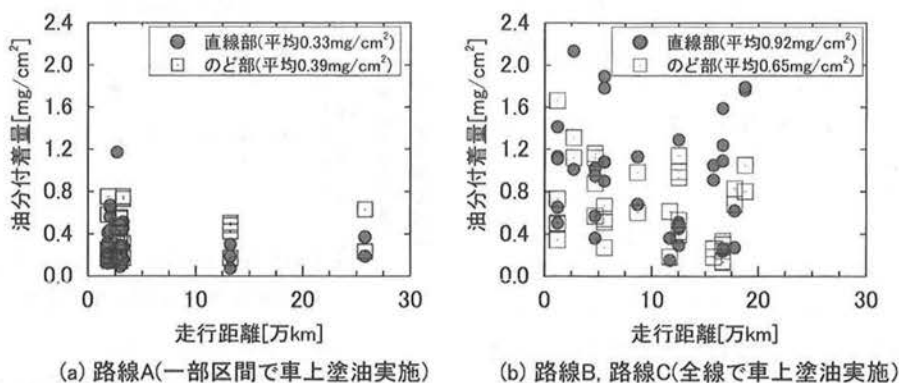


図7 営業車の定常的な車輪フランジ部油分付着量

5. まとめ

車輪削正後の表面状態に関わる急曲線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。そして、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、本調査の対象路線における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、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状況で変化すると考えられるため、路線毎に異なった状態にあった。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、今後必要に応じて油分付着量調査を実施していきたいと考えている。

文 献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 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)
- (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(予定) (2010)
- (8) 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)
- (9) 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)
- (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)