

3710 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

○片折 暁伸 正 [機] 土井 賢一 飯島 仁 桃崎 秀二 (東日本旅客鉄道株式会社)

松本 重夫 (東日本トランスポートエック株式会社)

The influence of the rail/wheel contact point on friction coefficient

○Akinobu KATAORI, Kenichi DOI, Hitoshi IJIMA, Shuji MOMOSAKI (East Japan Railway Company)

Shigeo MATSUMOTO (East Japan Transport Technology Co. Ltd.)

The JR East has experienced several wheel-climb derailments on the switch, which was provided on the steep curvature. On the investigations, the railway found that the almost of these derailments were caused by the EMUs that installed a newly lathed wheel. It is said that the high friction coefficient μ is presumably observed on the newly lathed wheel treads, however, the relationship between μ and the condition of the wheel tread has not made clear yet. To investigate the details, the experimental EMUs installed with newly lathed wheels were repeatedly operated on the steep curvature switch. As the results, the authors found that the tread of the wheel was gradually roughened according to the increase of the running distance of the EMUs, and that the pre-wheel climbed derailment accompanied with fairly wheel climb-up phenomena was observed.

Keywords: coefficient of friction, derailment, wheel turning, repeated running

1. はじめに

2008年2月、車輪削正後間もないE531系電車が尾久駅構内の側線用8番分岐器で脱線した。当社における低速のり上がり脱線は、昭和62年以降十数件の発生があり、これらは全て構内の側線用分岐器や急曲線上で発生している。これらの脱線の主な原因は、軌道の状態や車両の輪重アンバランスと考えられているが、その約9割が車輪削正後、わずかに走行しただけで発生している。これらの状況から、車輪削正がのり上がり脱線に何らかの影響を及ぼしていると推定される。しかし、これまでの研究では車輪の削正が脱線に及ぼす影響を明らかにすることはできなかった。

本研究では削正直後の車輪と脱線との関連を調べるために、この状態の車輪を装架した車両を側線用分岐器を反復して通過させる実験を実施した。その結果、走行を重ねるに従って車輪路面の荒損が進捗し、ある場面で車輪が脱線の前駆現象が起きて車輪が上昇することを確認した。

2. 尾久駅構内脱線事故概況

2008年2月23日、試運転列車(E531系電車10両編成)が、側線用8番分岐器¹⁾(東北線尾久駅構内着発線)の分岐側を対向方向(線路が分かれていく方向)に走行中、6号車(T530・付随車)の全軸が、リード曲線(曲線半径約100m)中央部付近でレール上にのり上がり外側に脱線した。この列車は、訓練運転のため、尾久駅から上野駅間を同一経路で繰り返し走行しており、事故は5往復目に分岐器を通過中に発生した。この編成の車両は、事故発生の3日前に10両全軸の車輪削正を実施しており、事故発生までの間に約400km走行していた。

2.1 車両

E531系は通勤・近郊タイプの交直流電車で最高運転速度130km/h、台車は空気ばね、ボルスタレス台車、ヨーダンパ付き、軸箱支持は軸はり方式、軸ダンパ付き、車輪は修正円弧踏面でフランジ角度は65度である。事故後の調査では、脱線した車両の台車に異常は無く、輪重バランスは基準値である10%以内であった。

2.2 軌道

脱線痕開始地点は側線用8番分岐器のリード部の最も曲線半径が小さく、かつ構造上の平面性変位が最大となる箇所であったが、軌道変位は整備基準値を超過する箇所はなかった。

また当社において過去、側線用8番分岐器での脱線はすべて背向方向(線路が合流する方向)で発生しており、トングレールから基本レールへ走行の際、約2度の入射角と構造上の平面性変位が原因の一つであると考えられたため背向方向に対しては脱線防止ガードが設置されていたが、今回の対向方向からの脱線箇所の付近には脱線防止ガードは設置していなかった。

3. 試験方法

走行試験は、のり上がり脱線現象を再現させるため、事故時とほぼ同じ条件で実施した再現試験と、その結果を踏まえて車両の条件を変更して実施した検証試験の2つを実施した。再現試験では事故時とほぼ同じ条件となるようE531系電車10両編成の全軸の車輪削正を行うとともにフランジ塗油を施さない供試車両を使用し、尾久駅構内の脱

[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2009-12.2~4. 東京]

線した分岐器を2日間にわたり15往復繰り返し走行した。試験箇所は脱線した当該分岐器である側線用8番分岐器(試験区間に2組存在)とし、同一経路を2日間に渡り15往復走行(本稿では、「繰り返し走行」と表記)させ、速度は10~20km/hで行った。なお、初日は試番1~8を行い、翌日に試番9~15を実施した。

測定項目は、当該6号車の先頭軸にPQ輪軸を装着し、車上側からの輪重・横圧測定を行った。また地上側からは、車輪がのり上がる挙動を捉えるため、分岐器内の脱線箇所付近である外軌側のリードレール中央部付近にレーザー変位計とCCDカメラを設置した。レーザー変位計は、図1に示すとおりレール底部に固定し、各試番においてレール頭頂面から車輪踏面までの距離(本稿では、車輪上昇量と称する)を測定することとした。

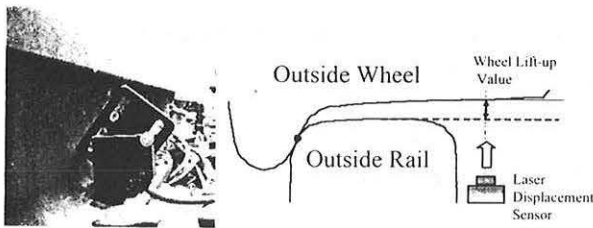


Fig.1 Method to measure Wheel Lift-up Value

4. 走行試験結果と考察

4.1 再現試験結果

走行試験で得られた、脱線箇所付近での輪重・横圧測定結果(車上測定)を図2に示す。図2中の上3段に曲線外側のレール(以下「外軌」とする)の横圧、輪重、横圧輪重比(=脱線係数)を、下3段に曲線内側のレール(以下「内軌」とする)の横圧、輪重、横圧輪重比を示す。

外軌側横圧は、図中に矢印で示すように脱線箇所の手前で最大となっている。外軌側横圧は、内軌側横圧・台車旋回抵抗・遠心力(低速の場合遠心力は無視できる)の和である。

内軌側横圧は転向横圧と言われ、曲線半径が小さくなると大きくなる。台車旋回抵抗はヨーダンパや空気ばね前後支持剛性等により発生し、分岐器中ではトンブレールの直線からリード部の曲線へ走行する際、台車の旋回角度が変化するため、台車旋回抵抗は増加する。

外軌側輪重は、トンブレールで一旦増加し、その後リード部で、構造上の平面性変位のため平均輪重程度まで減少し、横圧の最大値とほぼ同じ箇所で最小となっている。その結果、この横圧最大、輪重最小の箇所で脱線係数が最大となっている。

各試番の先頭軸外軌側の車輪上昇量、および脱線係数、内軌側横圧輪重比、輪重減少率の最大値を図3に示す。脱線係数、内軌側横圧輪重比は繰り返し走行回数に関係なくほぼ一定であり、輪重減少率は試番ごとに変動が見られたものの最大でも10%未満で、当該分岐器における走行安全性の目安値(34%)に比べて小さい値であった。しかし車輪上昇量は脱線係数に変化がないにもかかわらず、走行回数を重ねるごとに増加し、最終試番15では最大約9mmに達し、10両全ての先頭軸で大きな値が観測された。そのときの車輪上昇の状況を図4に示す。また外軌側の車輪フランジおよびレールの状況を図5、図6に示す。車輪フランジは走行に伴い接触部の表面の荒れが発生し、車輪上昇量の増加に伴い荒れている部分がフランジ先端側に拡大した。

外軌側レールは車輪と同様に荒れが顕著となり金属粉が大量に発生した。

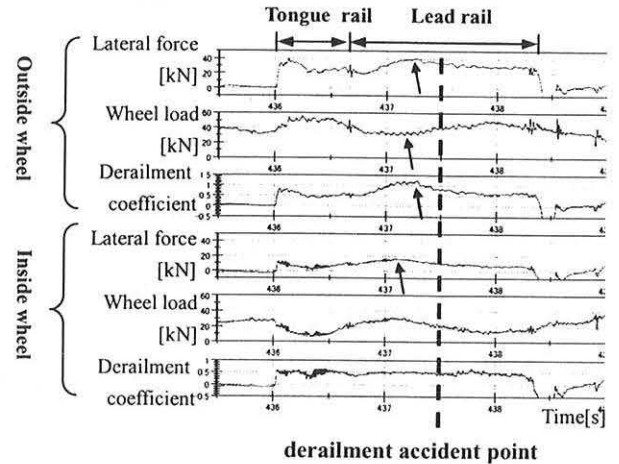


Fig.2 Measurement result of Wheel,rail contact forces near the derailment accident point

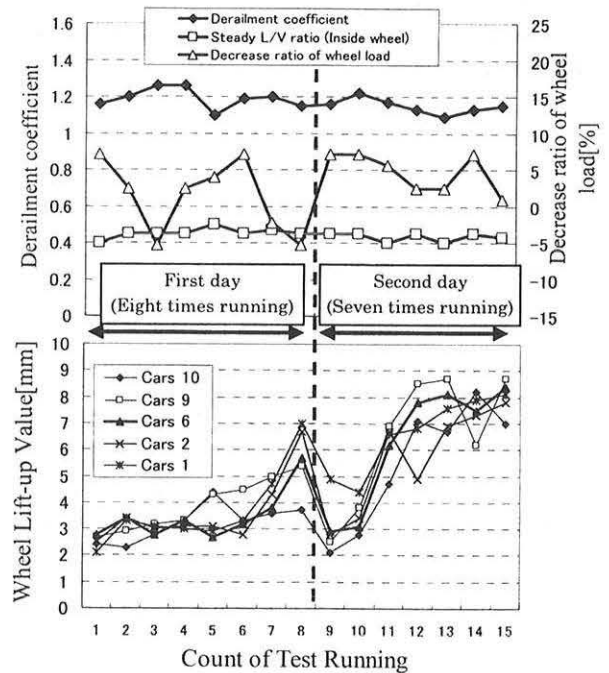


Fig.3 Measurement result of Wheel,rail contact forces, Wheel Lift-up Value near the derailment accident

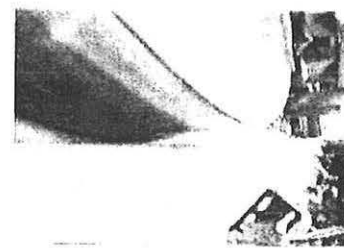


Fig.4 Wheel climb-up phenomena (Cars 6, 15th Test)



Fig.5 The state of Wheel flange (Cars 6)

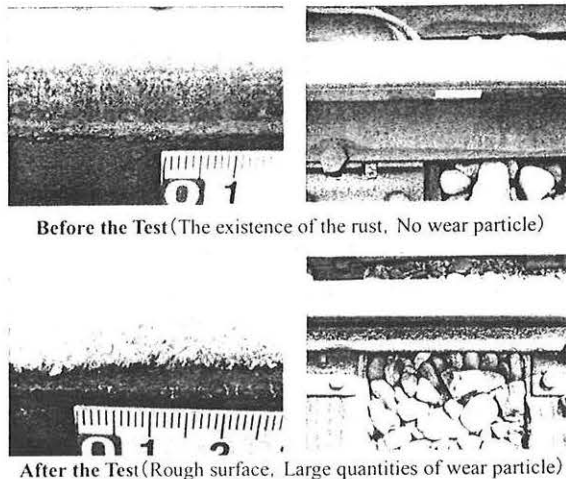


Fig.6 The state of rail surface

4.2 結果の考察

再現試験によって、車輪削正後の車両がフランジ塗油されない状態で急曲線箇所を繰り返し走行すると、徐々に車輪が上昇するという現象を確認することができた。側線用 8 番分岐器は、曲線半径が小さく、リード部に構造上の平面性変位があるため本線で使用される分岐器に比べ脱線係数が高くなりやすい。このような軌道条件の下で、さらに車輪削正の直後でフランジ部に塗油をしないといった車輪フランジとレールが潤滑されない状態で、曲線半径の小さい側線用 8 番分岐器を繰り返し走行することにより、車輪・レール接触部の双方の表面が摩耗し、表面の不純物が剥落し金属面同士が接触し、通常より摩擦係数が増大したと考えられる。永瀬らの研究によれば、レール・車輪間の摩擦係数は、直射日光の下で乾燥状態にあるレールにおいては現在広く用いられている 0.3 より高く 0.4 程度に達する可能性があるとして報告されている³⁾。摩擦係数が 0.4、フランジ角度 65 度におけるナダール限界は摩擦係数が 0.3 のときの 1.12 に対し 0.94 まで低下する。再現試験での外軌側脱線係数は最大 1.26、全試番の平均で 1.17 という高い値が観測されたこと、および脱線係数が全試番を通しほぼ一定であったにもかかわらず、車輪上昇量が増加したことから 2008 年 2 月に発生したのり上がり脱線事故の原因は、繰り返し走行により摩擦係数が現在広く用いられている 0.3 よりも増大したことで限界脱線係数が低下し、「脱線係数>限界脱線係数」の状態が車輪フランジがレールをのり上がりきるまで持続したためと推定される。

5. 検証実験

前項の結果から車輪削正直後での繰り返し走行による車輪とレールの表面状態の変化が摩擦係数に影響を及ぼすこ

とがわかったため、それを踏まえ車輪の削正の仕方が脱線の危険性に与える影響を調べるため、車輪の削正条件を変えた場合での摩擦係数の違いを繰り返し走行試験で車輪上昇量を測定することにより比較することを試みた。

5.1 実験条件

図 7 に示すように 205 系車両（付随車 2 両）を使用し、車輪削正機直後に急曲線（R=200m）を有する車両基地にて車輪削正直後に曲線部を繰り返し走行させ、前記の再現試験と同様に車輪上昇量などの測定を行った。曲線部でレールと接する部分であるフランジ部について、車輪削正のバイト送り速度は図 8 に示すように当社において通常行っている 1.0mm/回転に対し、細かく削正した場合の 0.5mm/回転、粗く削正した場合の 1.5mm/回転の 3 条件とした。

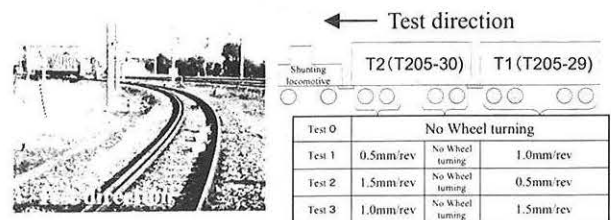


Fig.7 Experiment with influence of Wheel turning condition

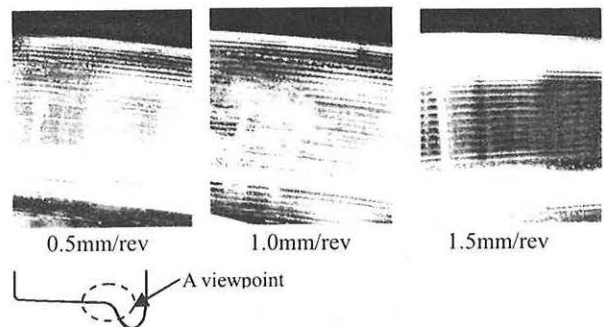
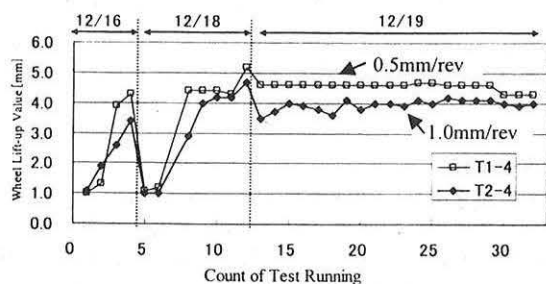


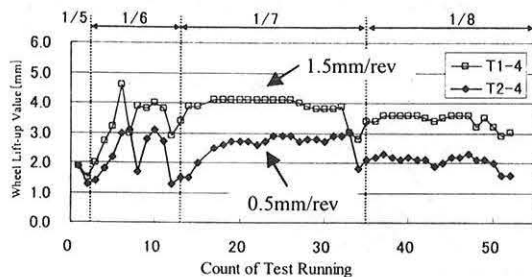
Fig.8 Surface after Wheel turning

5.2 実験結果

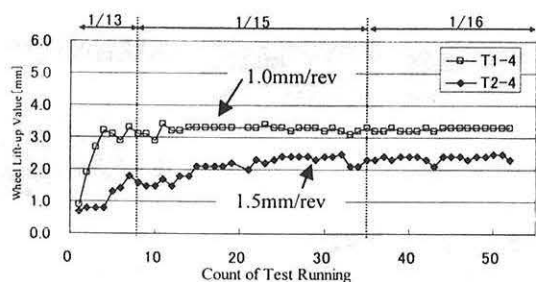
車輪削正のバイト送り速度条件を変更した場合の車輪上昇量測定結果を図 9 に示す。削正条件は 2 両の車両(T1,T2)に車両や実施時期の影響をキャンセルするため各条件を組み合わせて試験を行った。その結果、車輪上昇量は試験開始から数回の走行で増加し、日の変わり目で一旦落ち込むが、再び少しの走行で車輪上昇量が増加する様子が共通して見られた。しかし車輪削正条件の違いによる影響については、0.5mm/回転>1.0mm/回転、1.0mm/回転>1.5mm/回転、1.5mm/回転>0.5mm/回転という結果となり、全体を通してみるとバイト送り速度と車輪上昇量には明確な相関は見出せなかった。このことは伴らによる実物大試験機を用いた試験⁴⁾でも同様の結果が報告されており、車輪削正により金属表面を露出させることが摩擦係数を増加させる要因と考えられるものの、削正条件の違いが摩擦係数に及ぼす影響は小さいと考えられる。



a) Comparison of the Wheel turning speed
0.5mm/rev and 1.0mm/rev



b) Comparison of the Wheel turning speed
0.5mm/rev and 1.5mm/rev



c) Comparison of the Wheel turning speed
1.0mm/rev and 1.5mm/rev

Fig.9 Comparison of the Wheel turning speed

6. 結論

6.1 結論①

車輪削正直後の車両が乾燥した状態にある急曲線が付帯した分岐器レール上を低速で通過する際にのり上がり脱線が繰り返して発生したことに鑑み、同条件の下で現車を用いた走行実験を行った結果、以下のようなことが分かった。

(1) 前記の分岐器上を反復して走行するに従ってレールと車輪との接触面は次第に荒損し、レール付近に大量の摩耗粉が散乱する。

(2) この状態をさらに重ねていくと、接触面の荒損はさらに進捗し、ついには分岐器を背向で通過する際に外軌側リードレール付近で車輪が次第に上昇することを確認した。

(3) 実験の過程を通じて車両の速度、脱線係数及び内軌側横圧輪重比はほぼ一定に保たれていたことを踏まえれば、接触面がある程度にまで荒損した状態の下では車輪・レール間の摩擦係数は通常想定される値より大幅に高い値となったことは疑いがない。

6.2 結論②

前記結論の結果を踏まえ、車輪の削正方法が摩擦係数に及ぼす影響を調べるために、削正条件を変化させた車輪を用

いて前記と同様の実験を行った結果、以下に示すことがわかった。

(1) 車両が繰り返し走行を重ねるに従って、前記の結論①の(2)に記載したと同様の現象が発生することを確認した。

(2) 前記の現象は車輪の削正条件を変化させた全ての車輪でほぼ同様に現れた。

(3) これらの事実を踏まえれば、車輪の削正方法が摩擦係数に及ぼす影響は少ないと推定される。

7. 終わりに

本研究では車輪削正や繰り返し走行によって変化する車輪とレールの接触面の状態という一因子に対する摩擦係数の傾向を測定した。走行安全性に支配的な影響を及ぼす因子である摩擦係数については、どのような条件でどの程度の値をとるかといった定量的な把握については未解明な点が多く、これらの定量的な把握に向けた研究を今後進めていく予定である。

参考文献

- 1) 東北線尾久駅構内列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，運輸安全委員会，2008.11.28，RA2008-02
- 2) 日本工業規格，鉄道用分岐器類の線形，JIS E 1304，2001.6
- 3) 永瀬和彦，橋弘矩：低速域における乗り上がり脱線防止のための一提案，日本機械学会論文集（C編），74巻744号，pp8-17，2008.
- 4) 伴巧，柿嶋秀史，飯田浩平，前橋栄一，石田誠：転削車輪フランジ部の摩擦に関する研究，鉄道技術連合シンポジウム2004，pp431-pp434.