

尾久駅構内で発生した低速乗り上がり脱線の原因究明および対策の検証



2008年2月尾久駅構内において、車輪削正後間もないE531系電車が、側線用8番分岐器を走行中に乗り上がり脱線を起こした。事故後の調査では車両や軌道に異常は確認されなかった。このため、削正した車輪が脱線に何らかの影響をおよぼしているものと考え、脱線原因究明のための走行試験を実施した。その結果、削正直後の車輪がフランジに塗油しない状態で同じ急曲線を繰返し走行すると、車輪フランジがレール上方に乗り上がっていく量が、繰返し走行により増加する現象を確認した。これは、車輪とレール間の摩擦係数が増加したことによるものと考えられる。また、車輪削正直後でない場合とフランジに塗油を行った場合や一般的な8番分岐器では繰返し走行しても乗り上がりが発生しないことを確認した。さらに、車輪削正の条件を変えても摩擦係数の増加に差がないことを確認した。

●キーワード：乗り上がり脱線、車輪削正、側線用8番分岐器、摩擦係数、車輪上昇量

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。当社における低速乗り上がり脱線は、昭和62年以降十数件の発生があり、すべて構内の分岐器や急曲線で発生している。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な走行距離で発生している。この事実から、車輪削正と乗り上がり脱線についても、何らかの因果関係があると思われる。しかし、これまでの試験では、車輪削正の影響をとらえることができなかった。

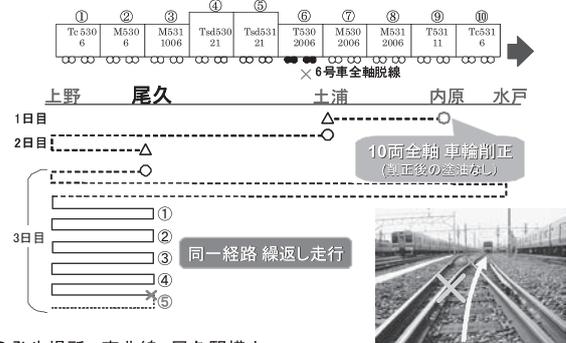
本研究では、この脱線事故の原因究明および対策の検証試験を実施し、車輪削正後に側線用8番分岐器のような急曲線部を繰返し走行すると、車輪フランジとレール間の摩擦係数が増大し乗り上がり脱線に至る可能性のある現象をとらえることができた。

また、車輪削正後にフランジへ塗油した場合、車輪削正直後でない場合、側線用8番分岐器以外の一般的な8番分岐器の場合、車輪削正の方法を変更した場合について走行試験を行い、対策の検証をした。

2. 尾久駅構内脱線事故概要

●発生日時：2008年2月23日 15:15頃

●車両：T530-2006(E531系10両編成6号車)



●発生場所：東北線 尾久駅構内
(側線用8番分岐器 分岐側 リード曲線中央部付近)

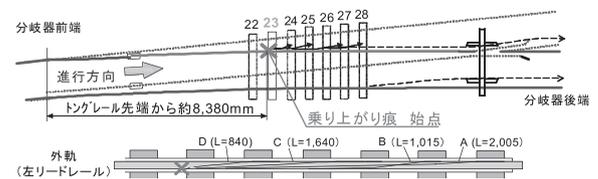


図1 脱線事故概況

図1に脱線事故概況を示す。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(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乗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返し走行しており、

事故は5往復目に当該分岐器を通過中に発生した。この編成の車両は、事故発生の日前に10両すべて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。



図2 E531系電車の台車の特徴



(a) 側線用8番分岐器 (b) 一般的な8番分岐器

図3 側線用8番分岐器と一般的な8番分岐器の特徴

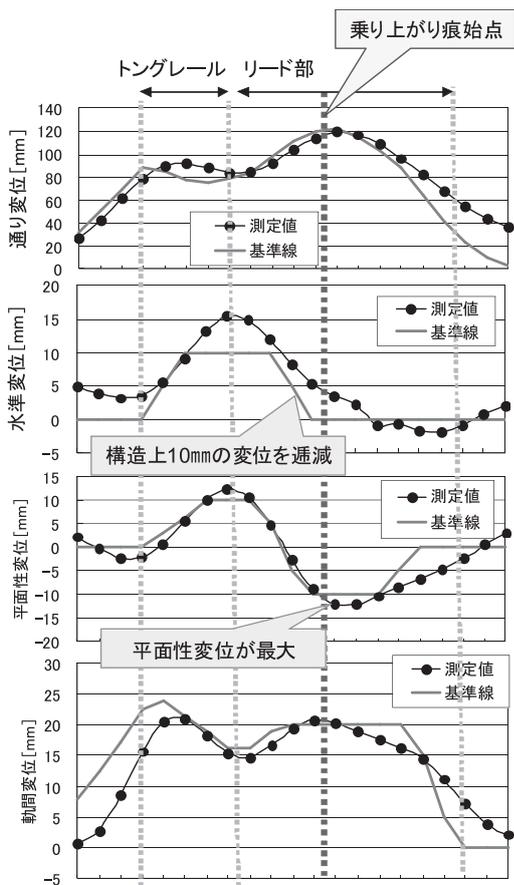


図4 軌道変位測定結果

事故車両のE531系電車の台車の特徴を図2に示す。E531系は通勤・近郊タイプの交直流電車で最高運転速度130 km/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。

側線用8番分岐器と一般的な8番分岐器の特徴を図3に示す。側線用8番分岐器はリード部の曲線半径が約100mと小さい。また、トングレールが直線で基本レールより10mm高くなっており、リード部でこの高低差を逃減しているため、構造上の平面性変位（軌道のねじれ）を有している。そのため一般的な8番分岐器よりアタック角（車輪の向いている方向とレール前後方向との角度）、横圧および輪重減少が大きくなりやすく、構造上脱線に対し不利な面がある。過去にあった側線用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、トングレールから基本レールへ走行の際、2度の入射角と10mmの構造上の平面性変位があったことが原因の一つであり、この部分には現在脱線防止ガードが設置されている。今回のように対向方向での脱線は初めてである。

軌道変位測定の結果を図4に示す。図中の基準線は、構造上の軌道変位を表している。今回軌道変位は整備基準値を超過する箇所は無かったが、乗り上がり痕開始地点は、リード部の最も曲線半径が小さく、かつ平面性変位が最大となる箇所であった。

3. 走行試験(再現試験)

3.1 走行試験概要

走行試験は、乗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となるようE531系電車10両編成の全軸の車輪を削正し、尾久駅構内の脱線した分岐器を2日間にわたり15往復繰り返し走行した。

測定は、輪重、横圧、アタック角測定のほか、車輪上昇量を測定するレーザー変位計およびCCDカメラを脱線箇所付近に設置し、乗り上がり脱線の前兆をとらえることを試みた。車輪上昇量の測定方法を図5に示す。

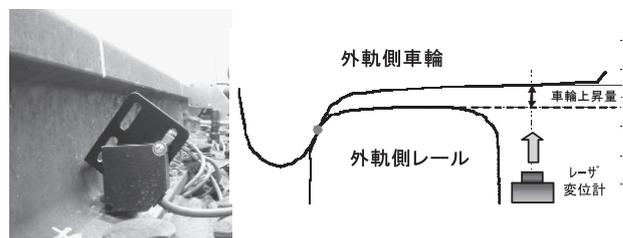


図5 車輪上昇量測定方法

3.2 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6に示す。図6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、図中に矢印で示した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などにより発生し、分岐器中ではトング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、トングレールで一旦増加し、その後リード部で、図4に示される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も最小となっている。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7に示す。脱線係数、内軌側横圧輪重比は繰返し走行回数に関係なくほぼ一定であり、輪重減少率は最大でも10%未満で、走行安全性の目安値（34%）に比べて小さい値であった。車輪上昇量は脱線係数に変化がないにも関わらず、走行回数を重ねるごとに増加し、最終試番15では約9mmに達し、10両すべての先頭軸で発生した。そのときの車輪上昇の状況を図8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9、図10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。

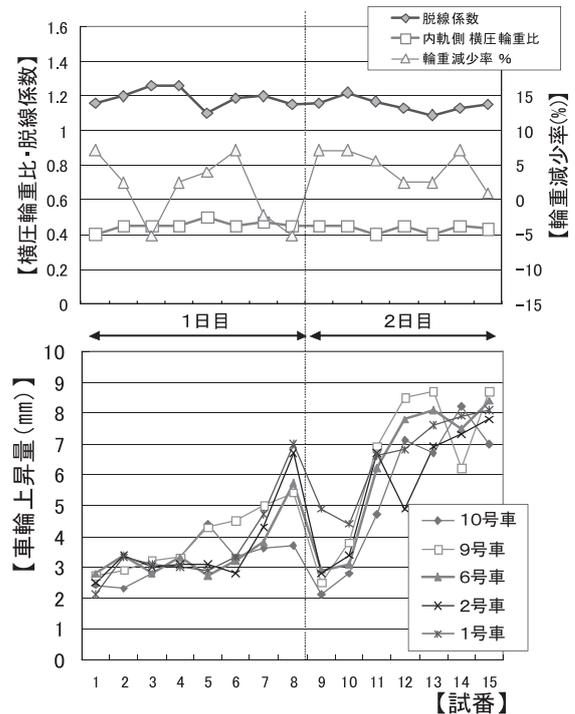


図7 走行試験結果



図8 車輪上昇の状況 (6号車、試番15)

車輪表面の状態

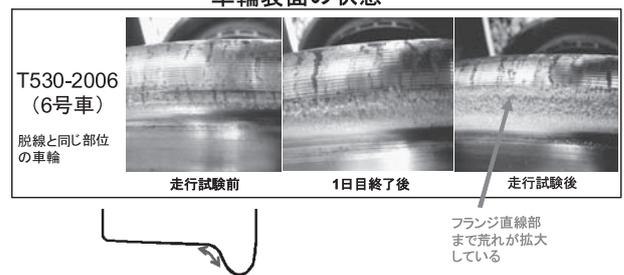


図9 車輪フランジの状況

レール表面 (外軌) の状態

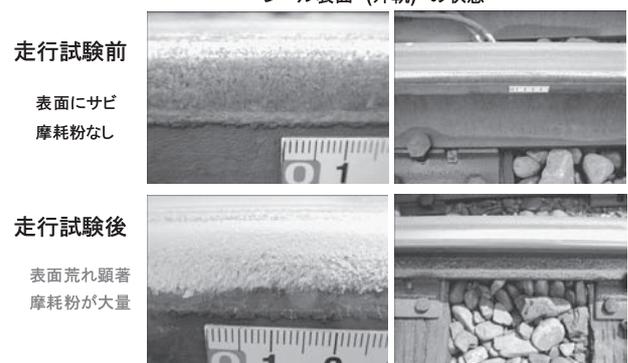


図10 レール表面の状況

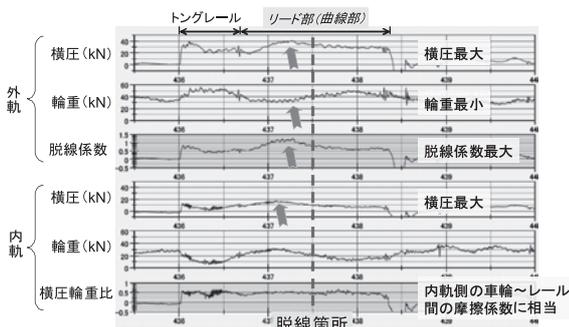


図6 脱線箇所付近での輪重・横圧測定結果

3.3 脱線原因の推定

再現試験の結果から、尾久駅構内のE531系脱線事故の推定原因を図11に示す。

側線用8番分岐器は、曲線半径が小さく、リード部の平面性変位があるため大きな脱線係数が発生しやすい条件であった。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か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。

式(1)は脱線係数に関するナダルの式である。乗り上がり脱線は、右辺の限界脱線係数(またはナダル限界)より車両が走行したときに発生する脱線係数が大きくなったとき危険と判断している。限界脱線係数は摩擦係数とフランジ角度により決まり、摩擦係数が大きくなると限界脱線係数は小さくなる。今回の脱線原因は、脱線係数(左辺)が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摩擦係数(右辺の等価摩擦係数)の増大により限界脱線係数が低下し、脱線係数>限界脱線係数となったため、乗り上がり脱線に至ったと推定する。

ナダルの式

$$\frac{Q}{P} > \frac{\tan \alpha - \mu e}{1 + \mu e \tan \alpha} \quad \dots(1)$$

Q : 横圧
P : 輪重
μe : 等価摩擦係数
α : フランジ角度

(=脱線係数) (限界脱線係数またはナダル限界)

- 削正直後の車輪が
- 潤滑(塗油)されていない状態で
- 急曲線部(側線用8番分岐器)
- 同一箇所を短時間に繰返し走行すると

※上記の条件下で
脱線係数一定、内軌側横圧輪重比一定、輪重減少率が小
にも関わらず
繰返し走行により車輪上昇量が増加したことは、
摩擦係数が増加したためであることは疑いない。

車輪・レール接触部双方の表面が急激に摩耗することにより、不純物が剥落し活性な金属面同士の接触が生じて通常よりも摩擦係数が増大し、限界脱線係数が低下、側線用8番分岐器を走行中に発生する大きな脱線係数に対し
脱線係数>限界脱線係数 となり、乗り上がり脱線した。

摩擦係数が増加したことが主原因

図11 脱線原因の推定

これを受け次の緊急対策を実施した。

- ① 車輪削正後フランジ塗油の実施対象車両の拡大

- ② 車輪削正直後の車両の使用制限(訓練運転など繰返し走行を行う車両に供しない)

4. 検証試験

対策などに関して、以下の項目を確認するために表1に示す検証試験を行った。

- ① 車輪削正直後でない場合
- ② フランジ部へ車輪削正後に塗油した場合(最小限の塗油とするため対象を付随車とする)
- ③ 側線用8番分岐器より曲線半径が大きく、構造上の平面性変位ない一般的な8番分岐器(曲線半径約120m)の場合
- ④ 車輪削正時の旋盤のバイト送り速度を変更した場合

表1 検証試験内容

試験番号	① 【削正直後でない】	② 【削正後塗油】	③ 【分岐器の違い】	④ 【削正条件の違い】
供試車両	E531系基本編成(10両)			205系付随車(2両) ※輪重バランスを設定
軌道条件	側線用8番分岐器		一般的な8番分岐器	円曲線(R=200m)
車輪削正	削正後5万km程度走行	全輪削正直後付随車フランジ塗油	全輪削正直後	削正直後(削正条件3通り)
走行速度	試験箇所付近:20km/h(一部10km/h)			
繰返し走行回数	30回			1条件あたり30~50回
測定項目	車輪上昇量、輪重、横圧、アタック角、CCDカメラ撮影(①~③)、レール・車輪の表面観察、車輪表面粗さ など			

上記①~③については、再現試験と同様にE531系10両編成を使用し、脱線箇所とは別の高萩駅構内の分岐器を使用して30回繰返し走行させ、車輪上昇量などの測定を行った。④については、図12に示すように205系車両(付随車2両)を使用して、車輪削正時のバイト送り速度を3パターン設定し、川越車両センター構内の急曲線(R=200m)を繰返し走行させ、車輪上昇量などの測定を行った。車輪削正のバイト送り速度は図13に示すように通常行っている1.0mm/回転、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。



図12 川越車両センター構内での試験

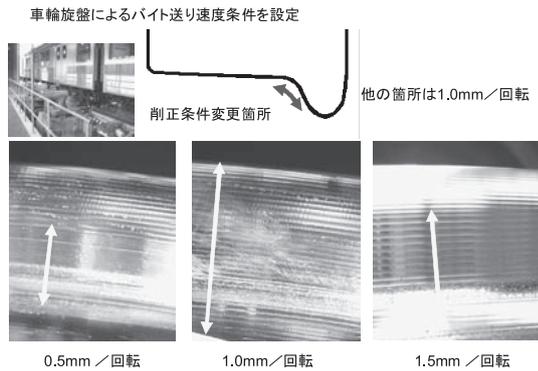


図13 車輪削正時のバイト送り速度条件

4.1 車輪削正直後でない場合

車輪削正後約5万km走行した車両での車輪上昇量測定結果を図14に示す。車輪削正直後でない車両では、繰返し走行に対し車輪上昇量の増加は小さい。走行試験後の車輪とレールの状態を図15に示す。車輪フランジの荒れは、図9に示す再現試験後と比較すると荒れの範囲は小さいが、レールの荒れや摩耗粉は再現試験と同じように多く発生し、車輪とレール間の摩擦係数は増大したと考えられる。しかし、車輪削正後5万km程度走行した車輪のフランジ角度は最大で70度となっており、摩擦係数が増大しても車輪上昇量の増加に至らなかったと考える。

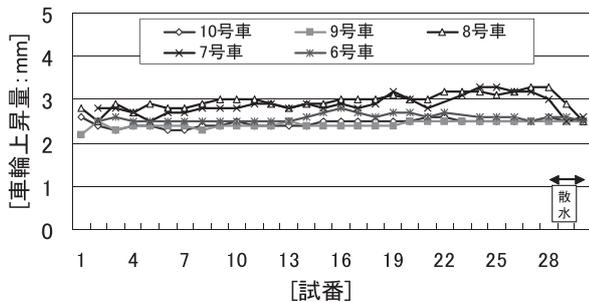


図14 検証試験①の結果

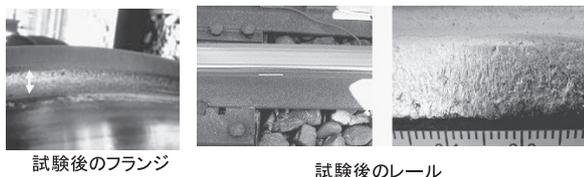


図15 検証試験①後の車輪とレールの状態

4.2 車輪削正後フランジに塗油した場合

車輪削正後、付随車のフランジに塗油した場合の車輪上昇量測定結果を図16に示す。繰返し走行に対し車輪上

昇量は増加していない。走行試験後の車輪とレールの状態を図17に示す。車輪フランジおよびレールの荒れは小さく、摩耗粉は少なかった。付随車のフランジに塗油した油が電動車にも付着し、摩耗を抑えるとともに、摩擦係数の増加を抑制したと考える。

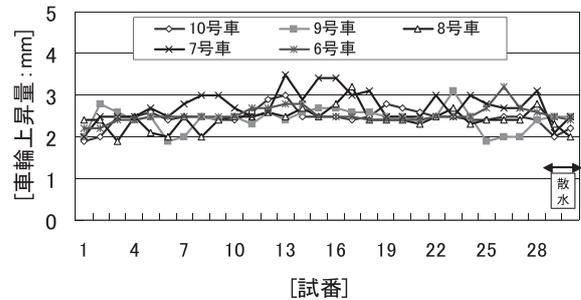


図16 検証試験②の結果

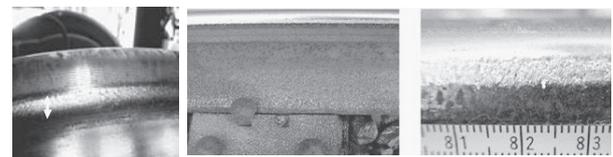


図17 検証試験②後の車輪とレールの状態

4.3 側線用8番分岐器以外の分岐器

一般的な8番分岐器での車輪上昇量測定結果を図18に示す。繰返し走行に対し車輪上昇量の増加は小さい。走行試験後の車輪とレールの状態を図19に示す。車輪フランジの荒れは、図9に示す再現試験後と比較すると荒れの範囲は小さいが、レールの荒れや摩耗粉は再現試験と同じように多く発生し、車輪とレール間の摩擦係数は増大したと考えられる。しかし、図3に示す軌道条件の違いにより、脱線係数が最大で1.0（側線用8番分岐器は最大1.26）、アタック角が1.0度（側線用8番分岐器は1.5度）と小さいことにより摩擦係数が増加しても脱線係数>限界脱線係数とならなかったと考える。

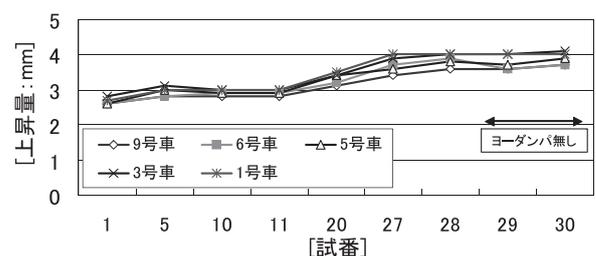


図18 検証試験③の結果



【本線用8番分岐器】【車輪削正直後フランジ塗油なし】

表面荒れ発生
摩耗粉発生



摩擦増大の兆候
アタック角最大1.0°
(側線用8番走行時
最大1.5°)

図19 検証試験③後の車輪とレールの状態

4.4 車輪削正のバイト送り速度を変更した場合

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20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る結果、車輪上昇量は1.0mm/回転>0.5mm/回転、1.5mm/回転>0.5mm/回転、1.0mm/回転>1.5mm/回転と順序が循環する結果となり、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。このことから、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、削正条件の違いによる影響は見出せなかった。

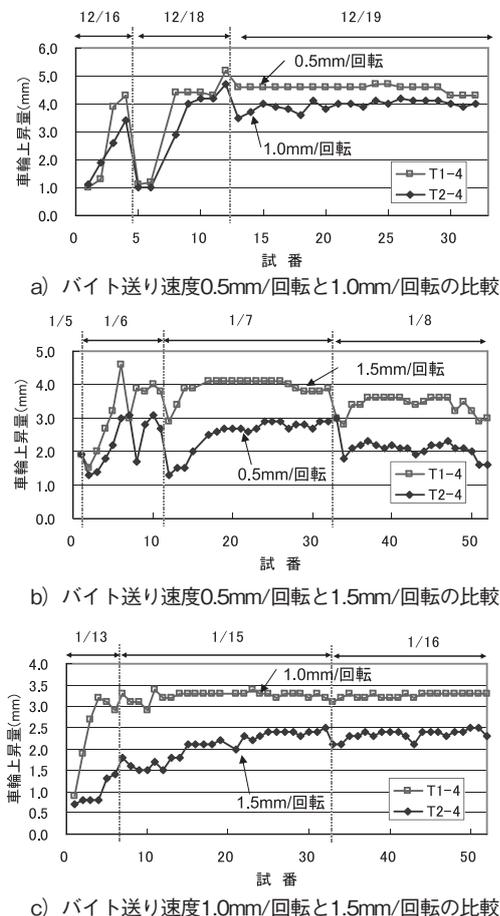


図20 検証試験④の結果

4.5 検証試験のまとめ

検証試験の結果から、以下のことが確認できた。

- ① 車輪削正から5万km程度走行した車輪は、フランジ角度が変化し、限界脱線係数が大きい。
- ② 車輪削正後にフランジ塗油した場合、摩擦係数の増大が抑制され、付随車のみ塗油でも乗り上がり脱線防止に効果がある。
- ③ 一般的な8番分岐器は、曲線半径が大きい分アタック角や横圧が小さくなり、発生する脱線係数が小さいので車輪上昇を抑制できる。
- ④ 車輪削正のバイト送り条件による脱線に対する影響に差はない。

検証試験の結果を受け、3.3項で実施した緊急対策を以下のように変更した。

- ① 車輪削正後は付随車台車のみ、フランジに塗油を行うこととした。
- ② 訓練運転など繰返し走行を行う場合は、付随車台車のフランジに塗油を行うこととした。

5. おわりに

車輪削正直後の脱線防止対策としてフランジ部への塗油は、効果があることを確認した。塗布した油の効果が継続する期間については現在調査を行っている。

また、車輪削正およびフランジ部やレールゲージコーナ部の急激な摩耗が、車輪とレール間の摩擦係数を増大させていることを現車試験により確認した。

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、どのような条件でいくつにな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) 鉄道事故調査報告書、東北線尾久駅構内列車脱線事故：運輸安全委員会、2008.11.28
- 2) 帝都高速度交通営団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：事故調査検討会、2000.10
- 3) 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、J-Rail2004