

# 車輪上昇量を勘案した乗り上がり脱線評価手法

中橋 順一\* 三宮 大輝\*\* 福村 将彦\*

Evaluation Method of the Flange Climb Derailment Considering the Wheel Rise

Junichi NAKAHASHI Daiki SANNOMIYA Masahiko FUKUMURA

In order to propose a new evaluation method complementing the traditional method by the derailment coefficient, the wheel rise measuring method by a two-dimensional laser sensor was developed, and the relationship between the derailment coefficient and the wheel rise was investigated using the results of wheel / rail contact analysis, simulation and running tests. As a result it was found out that the derailment coefficients obtained by filtering correspond to the change of the wheel rise; based on this result, the relationship between the derailment coefficient and the wheel rise was clarified. Further, an evaluation method of flange climb derailment using that relationship was proposed.

キーワード：乗り上がり脱線，脱線係数，車輪上昇量，車輪／レール接触解析，移動平均処理

## 1. はじめに

新しい台車構造の車両が製造された際や、営業速度向上を行う場合には、鉄道事業者において現車での走行試験を実施し、乗り上がり脱線や軌道部材の損傷などに対する走行安全性を評価している。この評価は、1993年に運輸省（当時）が監修した「在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説」<sup>1)</sup>に則り、ひずみゲージを貼り付けた輪重・横圧（以下、PQとする）測定用輪軸を用いて車輪／レール間の作用力を直接測定するPQ測定により行われている。PQ測定では横圧と輪重の比で表される脱線係数を指標として、これがNadalの式を基に算出される目安値以下であれば「安全」と評価している。しかし、この脱線係数の目安値は、摩擦係数を0.3と仮定し、さらに安全率を見込んで決定されていることから、大きな余裕を持っていると考えられる。また、本線走行試験においてこの目安値を超過する脱線係数が観測されるケースがあるが、実際に脱線に至るケースはほとんどない。

近年のPQ測定では新連続法<sup>2)</sup>が用いられることが多いが、この手法では脱線係数の絶対値だけでなく、脱線係数の目安値超過継続時間（以下、継続時間とする）を用いた評価も行っている。しかしながら、在来線など比較的低速の場合はこの継続時間が長くなることもあり、鉄道総研所内の急曲線低速走行試験においても脱線係数が目安値を超過し、継続時間が十分に長い状態にも関わらず、乗り上がりに至らないケースが確認<sup>3)</sup>されている。一方で、欧州規格であるEN（European Norm）では、実測した脱線係数に対してローパスフィルタや走行距離に

応じた移動平均などの処理を施して走行安全性を評価<sup>4)</sup>しており、乗り上がり脱線評価で使用する周波数帯が日本と異なる。

脱線係数の目安値は乗り上がりに至る限界を評価しており、それを下回ることによって安全性を担保しているが、その他に乗り上がり現象を検出する方法としては、直接的に車輪／レール間の上下方向の相対変位（以下、車輪上昇量とする）を測定することが有効である。車輪上昇量測定では、軽量かつ応答性の良い次元レーザセンサにより、軸箱体とレール頭頂面との距離を測定する方法が多く用いられ、鉄道総研所内試験線（以下、所内試験線とする）での走行試験<sup>5)</sup>や、JR東日本での構内線走行試験<sup>6)</sup>で実績がある。しかし、この測定法では、曲線半径やフランジ遊間などにより、まくらぎ方向の位置にずれが生じることから、急曲線においてレーザ光がレール頭頂面から外れる可能性があることや、車輪を避けてレーザ光をレール頭頂面に当てる必要があることから、取り付け治具が大きくなるなどの課題がある。

そこで本件では、従来の走行安全性評価手法を補完する新しい評価手法を提案することを目的として、脱線係数に加えて車輪上昇量を用いることを検討した。このため、軌道線形などの影響を受けにくい新しい車輪上昇量測定手法を開発した。また、数値解析結果や走行試験データを用いて車輪上昇量を勘案した乗り上がり脱線に対する評価手法について検討を行った。

## 2. 車輪上昇量測定手法

本件での車輪上昇量測定は、装置を車両限界内に設置した状態でフランジ高さ相当（約30mm）の上昇量を評価できる測定レンジと、PQ測定と併用して評価するこ

\* 車両構造技術研究部 車両運動研究室

\*\* 車両構造技術研究部 車両運動研究室

（現 西日本旅客鉄道株式会社）

特集：車両技術

とから、1kHz 程度の高速サンプリングが必要となる。

選定した二次元レーザセンサは、ライン状にレーザ光を照射することで対象物の断面形状を測定できるものである。スポットレーザよりも広範囲の測定が可能であり、まくらぎ方向の位置のずれに対応できる。また、照射距離が 100mm を超える製品が開発され、装置を車両限界内に収めることが可能である。

図 1 に二次元レーザセンサの取り付け状態を示す。代表的な軸箱支持装置である「軸はり方式」の軸はり部にロール方向の角度を持たせた状態で取り付け、レール断面をフィールドコーナ側（以下、FC 側とする）から測定する方式とした。レーザ光照射位置の前後方向距離は車輪／レールの接触位置から 300mm 程度離れているため、レール断面形状を広範囲で測定可能となった。また、このとき軸箱体に対して変位量が少ない車輪リム面も含めた断面を測定することで、車輪／レール間の上下方向の相対変位を測定できる。車輪リム面から軸受中心までの距離が 230mm である対象台車において、取り付け高さや角度を検証した結果、センサを軸箱体に対して 40° 傾けた状態で取り付けることで、レール中心より軌間内側 20mm 程度までのレール断面形状の測定が可能となった。また、センサで得られる断面形状は 40° 傾いたセンサ座標系であることから、専用コントローラで断面データを取得後、測定プログラム上で車輪／レール座標系に座標変換を行うこととした。

図 2 に車輪／レール座標系において、車輪が上昇した場合の断面データのイメージを示す。これは進行方向右側の測定データを表している。車輪リム面は、走行中ほとんど動かないが、レール断面は、曲線外軌では横軸プラス側に、車輪が上昇すると縦軸マイナス側に、それぞれ車輪リム面から離れる方向に移動することになる。

本線上では左右両方向の曲線を測定する必要があることから、左右両側の軸はり部に取り付けた 2 つのセンサによる同時測定を可能とした。断面データのサンプリング周波数は、装置の仕様では最大 1kHz までの測定が可能であるが、ここでは、レール断面 10 サンプルごとに各座標の中央値 2 点を平均した値を用いて断面形状を決

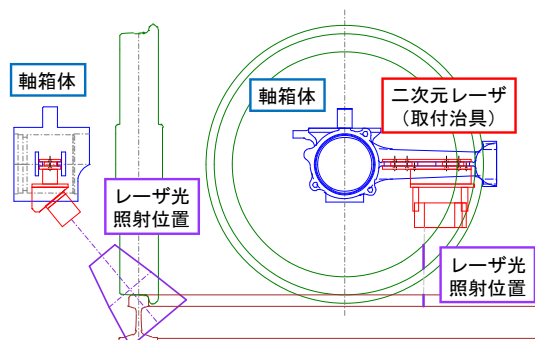


図 1 二次元レーザセンサの取り付け状態

定する平均化処理を行うこととした。これにより実際のサンプリング周波数は 100Hz となるが、在来線での最高速度 130km/h の場合には 0.36m の距離に相当することから十分な分解能であると判断した。また、車輪上昇量は、直線で停止した時のレール断面（図 2 の赤線）を基準とし、レール中央部（レール FC 側から 32.5mm の点）の上下方向の移動量により求めることとした。

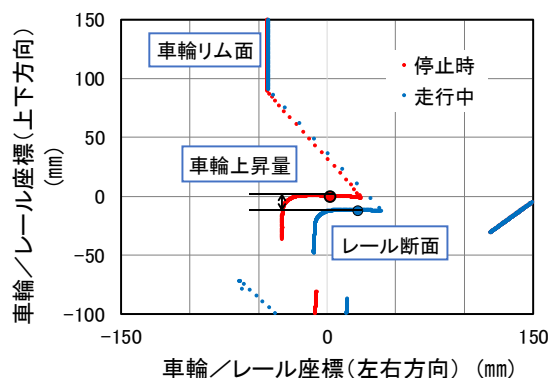


図 2 車輪が上昇した場合の断面データのイメージ

### 3. 乗り上がり脱線評価手法の検討

車輪がレールに乗り上がる条件における車輪上昇量と脱線係数の関係性について検討するために、設計形状の車輪踏面形状とレール断面形状による二次元の車輪／レール接触幾何解析<sup>7)</sup>の結果から両者の関係性を求めた。図 3 に車輪踏面形状に修正円弧踏面、レール断面形状に JIS50kgN レール（以下、50N レールとする）を用いた場合の二次元接触幾何解析結果を示す。通常の場合の車輪／レール接触幾何解析では車輪／レール間の相対左右変位に対して接触角（図 3(a)）や車輪上昇量（図 3(b)）の関係を求めるが、この相対左右変位の増加に伴い、輪軸が外軌側に移動し、レール上に乗り上がりに至るまでの接触状態を表現している。この接触角を Nadal の式に代入することで、車輪が上昇する過程における Nadal の式での力の釣り合いが成り立つ脱線係数（以下、Nadal の式による脱線係数とする）が決まり、これと車輪上昇量との相関を求めることができる。

図 4 に摩擦係数  $\mu$  を  $\mu = 0.1, 0.3, 0.5$  とした場合の Nadal の式による脱線係数と車輪上昇量の相関図を示す。車輪とレールの条件は図 3 と同じ組み合わせとした。摩擦係数によって限界脱線係数の大きさは異なるが、限界脱線係数に至る車輪上昇量はいずれも 1mm 程度であった。また、限界脱線係数に達すると、Nadal の式による脱線係数はほぼ一定の状態のまま車輪上昇量が増加することがわかる。

脱線係数と車輪上昇量の関係は、車輪踏面形状やレール断面形状、スラックなど軌道変位の条件によって変化

することから、ここではレール断面を、所内試験線の半径100mの円曲線中におけるレール断面形状(図5、以下、摩耗レールとする)に変更して接触幾何解析を行った。摩耗レールは急曲線中のレールであることから外軌ゲージコーナの摩耗が大きい傾向であった。また、接触幾何解析では所内試験線の軌間変位を考慮してスラックを12mmとした。

図6に摩耗レール条件でのNadalの式による脱線係数と車輪上昇量の相関図を示す。限界脱線係数での車輪上昇量は3.3~11.9mmの範囲であり、設計形状同士の組み合わせとは差異が認められたことから、車輪上昇量単独で走行安全性を判断することは難しいが、車輪上昇過程での脱線係数と車輪上昇量の関係は同様の傾向を示している。そこで、脱線係数と併せて車輪上昇量を測定し、両者の相関図における傾向を確認することによって、乗り上がり脱線の評価する方法について検討した。相関図での脱線係数と車輪上昇量の関係は、車輪/レール接触状態から、以下の3つの領域に大別される。

(1) 領域①

車輪フランジ直線部でレールと接触するまでの領域であり、車輪踏面部で接触していることから接触角はフランジ角度より小さい。また車輪上昇量も小さい。

(2) 領域②

車輪フランジ直線部とレールが接触している領域であり、車輪が上昇しても接触角はフランジ角度と等しいことから、限界脱線係数もほぼ一定で推移する。

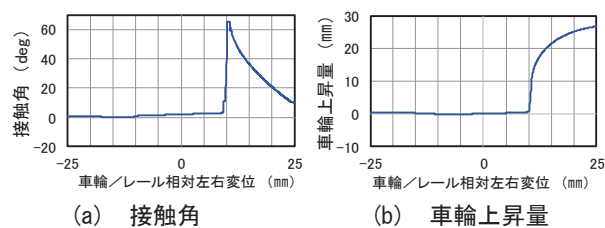


図3 二次元接触解析結果(修正円弧踏面と50Nレール)

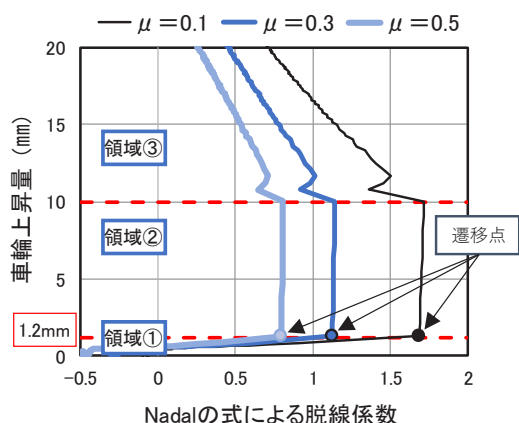


図4 Nadalの式による脱線係数と車輪上昇量の相関図

(3) 領域③

車輪フランジ先端部でレールと接触する領域であり、フランジ先端の円弧(R=14mm)で接触するため、接触角の減少に伴い、限界脱線係数は小さくなる。

摩擦係数が一定の場合、車輪が上昇して乗り上がり脱線に至る過程では、いずれの条件においても領域①から領域②を経て領域③に遷移すると考えられる。このとき、領域①から領域②へ移る点を遷移点として定義し、この遷移点を確認することができれば、車輪/レールの接触条件や摩擦係数によらず、地点ごとの限界脱線係数を評価できる可能性があると考えられる。また、脱線係数が従来手法の目安値を超過するような大きな値であっても、車輪上昇量が上向き(脱線係数一定で車輪が上昇)の変化を示さない領域①の範囲であれば、当該地点における限界脱線係数以下であると考えられることから、乗り上がり脱線に対しては「安全」と判断できる可能性がある。

一方で、乗り上がり脱線とは異なる脱線形態である「滑り上がり脱線」や「跳び上がり脱線」のように左右クリープ力以上の力が加わる場合や衝撃的に強い左右力が働く場合は、Nadalの式による釣り合いが成り立たないことから、この手法では評価できないと考えられる。これらの脱線形態の可能性がある場合は、脱線係数の継続時間や横圧の作用時間など従来手法による評価を併せて行う必要があると考えられる。

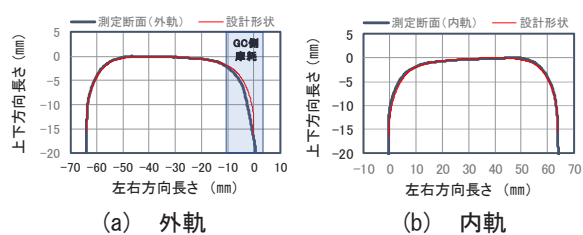


図5 摩耗レール断面形状

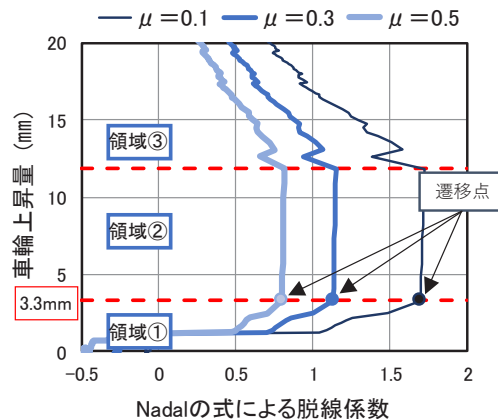


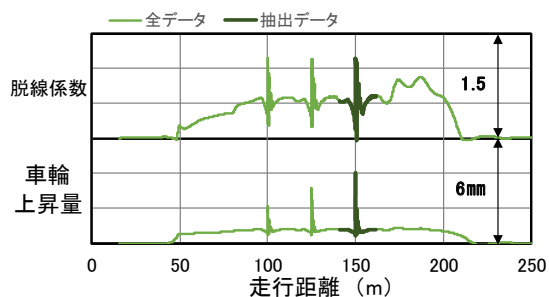
図6 Nadalの式による脱線係数と車輪上昇量の相関図

#### 4. 数値解析結果を用いた評価手法の検証

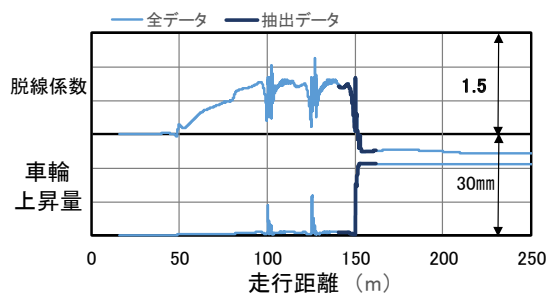
3章では理想的な条件として、車輪／レールの幾何学的接触状態のもとで、Nadalの式による脱線係数と車輪上昇量の関係性を整理し、乗り上がり脱線評価手法を提案したが、現車で走行中に測定される脱線係数は常時変化している。そこで、乗り上がりが発生する条件として、急曲線での大きな角折れを模擬した通り変位における車両運動解析を行い、評価手法の妥当性を検証した。

解析対象曲線は半径160m、カント90mmであり、円曲線中に25m間隔で角折れを模擬した3パターンの通り変位(30mm, 40mm, 50mm)を与えた。車両側では車体質量を18500kg、速度をV=30km/h、静止輪重アンバランスを20%とし、車輪／レール間の摩擦係数 $\mu$ を変化させた。図7(a)、図7(b)に $\mu = 0.3$ および0.5とした場合の解析対象曲線での脱線係数、車輪上昇量の波形例を示す。乗り上がり量に明確な差異が認められた角折れ変位50mm(走行距離150m付近)に着目すると、 $\mu = 0.5$ の場合には車輪上昇量が27mmに達し、レール上に乗り上がったが、 $\mu = 0.3$ の場合は車輪上昇量の最大値は約4mmであった。

図8に上述の50mm角折れ近傍(走行距離150m付近)の抽出データでの脱線係数と車輪上昇量の相関図を示す。脱線係数の変動や摩擦係数によらず3章の相関と同じ傾向を示し、いずれも遷移点を越えて領域②に至っていることから、乗り上がり脱線に対する評価は、「危険」とであると判断できる。したがって、数値解析結果では、横圧や脱線係数が急激に変動する場合であっても、提案



(a)  $\mu = 0.3$ の場合



(b)  $\mu = 0.5$ の場合

図7 解析対象曲線での脱線係数、車輪上昇量の波形例

した手法によって乗り上がり脱線の評価が可能であると考えられる。

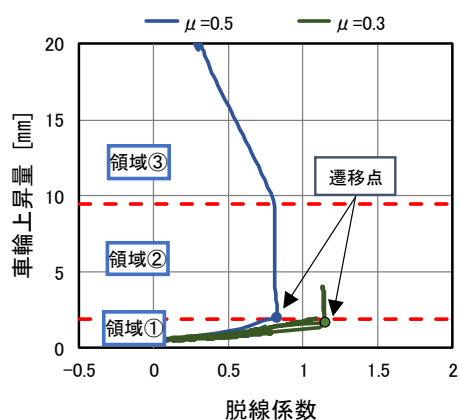


図8 50mm角折れ近傍の脱線係数と車輪上昇量の相関図

#### 5. 実測データによる評価手法の検証

提案した評価手法を所内試験線における脱線試験の測定データに適用し、その妥当性を検証した。同試験線副本線には半径R=160mとR=100mの2つの曲線(以下、R160、R100とする)があり、いずれもカント90mmである。レールは50Nレールで、ほぼ全線にわたって脱線防止ガードが敷設されている。また、R=160mの円曲線中(キロ程248m~262m)には14m間で40mmの平面性変位が設定されている。図9に乗り上がりが発生した例として、所内走行試験における脱線係数と車輪上昇量の測定波形を示す。第1軸に装備した軸重約70kNのPQ軸で測定される左右アンバランスを40%とし、速度30km/hで走行した結果である。脱線係数は、2つの曲線の大部分で走行安全上の目安値である0.95を超過しており、新連続法による脱線係数の継続時間も目安値の15msを超過していたことから、危険と判断される状態であった。また、R160円曲線中の平面性変位とR100の出口緩和曲線で車輪上昇量が増加し、乗り上がりが発生している。この走行における評価区間として4カ所を設定した。各区間における脱線係数と車輪上昇量の測定波形の特徴を以下に示す。

- 区間1：脱線係数は目安値を超過しているが、車輪の上昇はほとんど認められない
- 区間2：円曲線中の平面性変位によって車輪の乗り上がりが発生
- 区間3：R160の出口側緩和曲線で脱線係数が最大。車輪上昇は10mm程度
- 区間4：R100の出口側緩和曲線で乗り上がりが発生

まず、区間4の測定データに対して、提案した乗り上がり脱線評価手法を適用した。図10に区間4における脱線係数と車輪上昇量の関係を示す。図10(a)で測定波形を、図10(b)では両者の相関図を示している。ここで、車輪上昇量測定データに認められた明らかなノイズ成分(図9の454m付近)は除いて整理している。車輪が乗り上がる過程において、脱線係数が1.1~1.7の範囲で変動しており、図6および図8のような遷移点は明確ではない。一方で、脱線係数に認められる周波数約10Hzの変動成分は、車輪上昇量波形には認められないことから、この変動成分は乗り上がりに対する影響は少ないと考えられる。そこで、車輪上昇の遷移点を確認するために、脱線係数に対してフィルタ処理を行うこととした。

脱線係数に対するフィルタ処理に関して、国内では新連続法において跳び上がり脱線や高周波輪重変動などを考慮して遮断周波数100Hzでのローパスフィルタ処理が行われている。一方、欧州規格ENでは、脱線係数の連続測定値に対して遮断周波数20Hzのローパスフィルタ処理と0.5mステップで2m移動平均処理を行い、走行安全性を評価している。ここでは、時間軸と距離軸の

両方の処理方法について検討した。

検討するフィルタ条件は、時間軸での処理として遮断周波数20Hzおよび10Hzのローパスフィルタ処理(以下、LPF処理とする)と、距離軸での処理としてウィンドウ幅1mおよび2mの移動平均処理(以下、移動平均とする)の4条件で比較した。図11にフィルタ処理後の脱線係数と車輪上昇量の相関図を示す。図11(a)に示す時間軸のフィルタ処理の場合は、LPF10Hz(図11(a)赤線)においても脱線係数の変動のため、領域②への遷移点や上向きの変化が明確にならない。一方で、距離軸のフィルタ処理であるウィンドウ幅1mと2mの移動平均では、脱線係数1.4かつ車輪上昇量4.5mm付近において上向きの変化が明確になった。したがって、脱線係数の元データに距離軸の移動平均処理を施すことで遷移点や上向きの変化が明確になり、乗り上がり開始時の限界脱線係数を把握できる可能性がある。

ここで区間1~3についても同様の検討を行う。ここでは、4章の数値解析で車輪が10mm上昇する間の走行距離が約1mであったことから、ウィンドウ幅の小さい1m移動平均を適用した。図12に区間1~3における

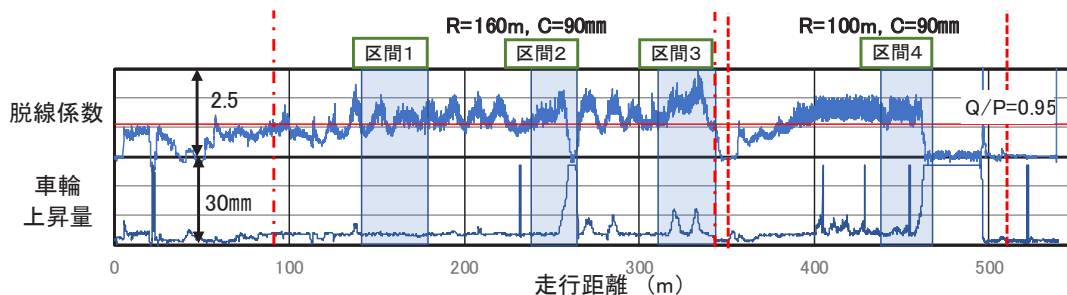
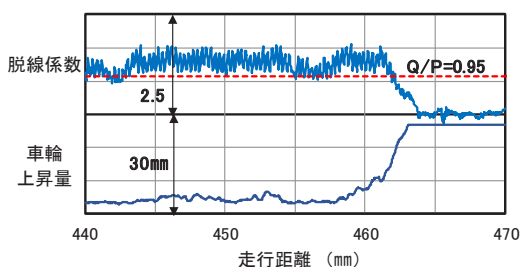
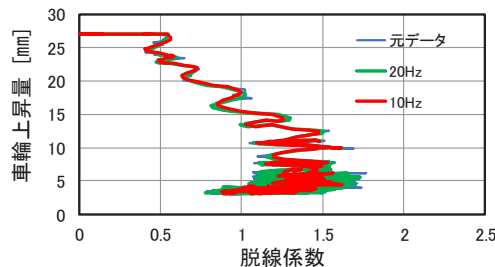


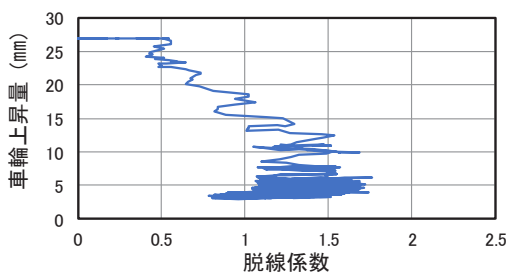
図9 所内走行試験における脱線係数と車輪上昇量の測定波形(輪重アンバランス40%, 速度30km/h)



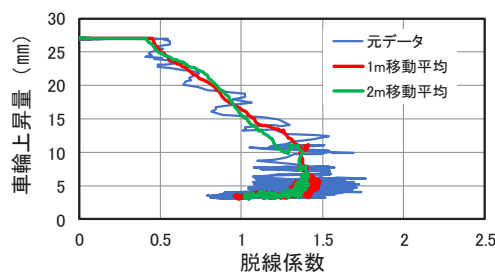
(a) 測定波形



(a) 時間軸



(b) 相関図



(b) 距離軸

図10 区間4における脱線係数と車輪上昇量の測定結果

図11 フィルタ処理後の脱線係数と車輪上昇量の相関

特集：車両技術

脱線係数と車輪上昇量の相関図を示す。区間1では領域②に向かう上向きの変化は認められず、測定データは領域①の範囲に収まっており、脱線係数は1.5以上であるものの走行安全性に問題はないと考えられる。一方、区間2では脱線係数1.7付近に、区間3では脱線係数1.6～2.0付近に領域②に至る上向きの変化が認められ「危険」と評価される。また、区間3では2カ所で車輪上昇が認められたが、限界脱線係数が異なる地点での乗り上がり状態を評価できていると考えられる。

以上の結果から、いずれの区間においても脱線係数の実測データに対して移動平均処理を行うことで、車輪が乗り上がる過程の領域区分や上向きの変化が明確になり、車輪とレールの形状や摩擦係数、軌間変位など軌道条件の影響を考慮しながら、乗り上がり脱線に対する安全性評価が可能であると考えられる。しかしながら、移動平均処理の方法については、様々な車両、軌道の条件での測定データを継続して蓄積しながら決定する必要がある。

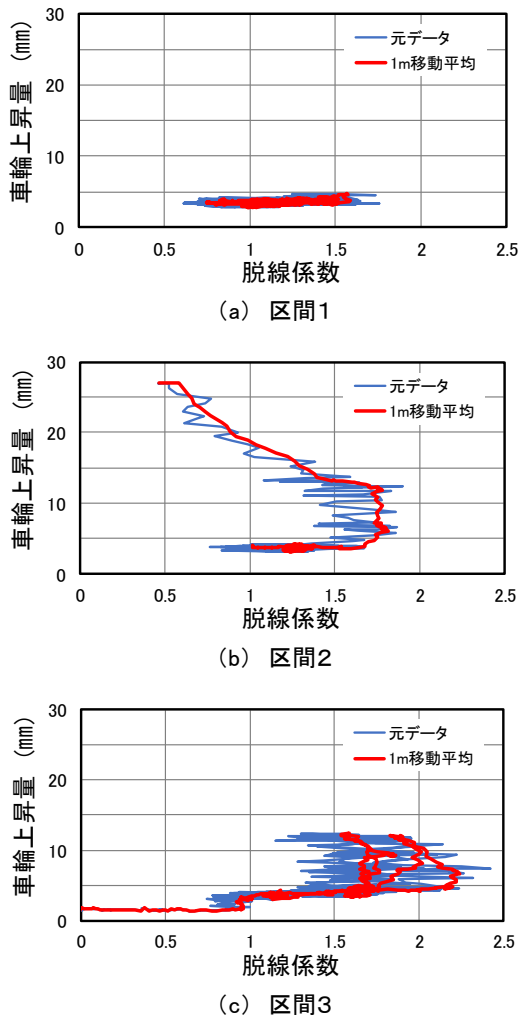


図12 脱線係数と車輪上昇量の相関図

6. おわりに

従来からの脱線係数を用いた評価手法を補完することを目的として、車輪/レール接触幾何解析結果から、車輪上昇量を勘案した乗り上がり脱線評価手法を提案し、合わせて、二次元レーザセンサを用いた車輪上昇量測定手法を開発した。数値解析結果や走行試験結果を用いて乗り上がりが発生する条件での脱線係数と車輪上昇量との関係について調査した。

その結果、連続的に測定された脱線係数にフィルタ処理を行うことで、車輪上昇量の変化に対応するデータが得られることがわかった。また、乗り上がりに至るまでの脱線係数と車輪上昇量の関係性を明らかにし、脱線係数と車輪上昇量を併せて評価することで、乗り上がり開始の限界脱線係数を把握できる可能性があることを確認した。最後に、この関係性を用いた乗り上がり脱線評価手法を提案した。

なお、本件で提案した評価手法は、数値解析や所内線など限られたデータを用いて検証した結果であることから、今後は信頼性の高い乗り上がり脱線の評価手法として提案することを目指して、さらに様々な車両や軌道の条件での測定データを継続して蓄積していく予定である。

文献

- 1) 鉄道総研編，運輸省鉄道局監修，在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説，研友社，1993
- 2) 石田 他：鉄道車両の新しい輪重，横圧，脱線係数連続測定法（測定装置の開発），日本機械学会論文集 C 編，Vol.63, No.614, pp.97-103, 1997
- 3) 土井：車輪上昇量と脱線係数の関係に基づく乗り上がり脱線の走行安全性評価の研究，日本機械学会第26回交通・物流部門大会，2017
- 4) CEN：“Railway applications,” EN14363, EUROPIAN STANDARD, p.64, 2005.
- 5) 飯田 他：空気ばねパンクを考慮した車両走行シミュレーションモデルの構築，鉄道総研報告，Vol.30, No.4, pp.35-40, 2016
- 6) 飯島 他：構内線における低速乗り上がり脱線のメカニズム究明と安全性評価に関する研究，JR EAST Technical Review, No.49, pp.25-28, 2014
- 7) 足立 他：車輪とレールの摩耗を考慮した接触状態解析手法の開発，鉄道総研報告，Vol20, No.6, pp.17-22, 2006