

脱線係数と車輪上昇量に基づく 低速走行時の乗り上がり脱線の走行安全性評価

土井 久代* 石田 弘明** 宮本 岳史***

Running Safety Assessment for Flange climbing at Low Speeds based on Derailment Quotient and Wheel Rise

Hisayo DOI Hiroaki ISHIDA Takefumi MIYAMOTO

We propose an assessment quantity for running safety, when vehicles run on sharp curves at low speed. Using measured data obtained from running tests on a test track with several types of artificial track irregularities such as track twist and rail misalignment etc., which can induce flange climb derailment, we investigate the relationship between the derailment quotient and wheel rise on the side of high rail. It shows that the filtered derailment quotient is similar to the wheel rise trend. As a result, the proposed assessment quantity is expressed as the cumulative value of the derailment quotient while the derailment quotient exceeds its target maximum value.

キーワード：フランジ乗り上がり，脱線係数，車輪上昇量，走行試験，低速，急曲線，軌道変位

1. はじめに

現在，乗り上がり脱線に対する走行安全性の評価は，車輪・レール間の作用力である横圧 Q と輪重 P の比である脱線係数 Q/P を指標とし，その最大値が評価基準の値（以下，「目安値」と記す。）を超えなければ安全であると判定している。この評価は，基本的に走行試験を実施し，それらの作用力を測定することでやっている¹⁾。

走行安全性の評価に際して，脱線係数が目安値を超過する場合があるが，直ちに脱線に結びつくとは限らないことも多い。例えば，それが高周波輪重変動に起因した著大脱線係数と判断できる場合は，脱線係数が目安値を超過しても目安値超過時間が 15ms を超えなければ安全と判定している²⁾。欧米でも走行試験による走行安全性評価を行っており，同じく脱線係数を指標として用いている。その内，欧州規格 EN14363³⁾ では，測定値にローパスフィルタ処理（以下，「LPF」と記す。）を施した値を算出して走行安全性の判断を行っている。近年，センサーや計測器の性能が向上し，より高い周波数の成分を含むデジタルデータが得られるようになったが，脱線の評価という観点からは，必ずしも指標値の高周波変動成分まで必要なわけではなく，評価の目的に応じたデータ処理方法の検討が肝要となる。

このデータの処理方法に関して，著者らは過去の研究⁴⁾において，急曲線低速走行時のデータを用い，脱線・非脱線を的確に区別できる脱線係数測定値の波形処理方法

を調べた。その結果，車輪上昇量との関係性から，脱線係数評価における LPF 処理は妥当であると考えられるものの，急曲線低速走行の場合，脱線せずに走行していても，試行したフィルタ処理だけでは，脱線係数は目安値を超過し，危険と判定されることを確認した。

そこで本研究では，脱線係数の値と関係した新たな走行安全性の評価指標として，「脱線係数の距離累積値」を提案する。これは，脱線係数の時系列履歴を考慮した指標であり，この指標の導入により，従来の評価手法に比べて，乗り上がり脱線に対する安全余裕度をより精度よく評価できる可能性がある。急曲線低速走行試験で得られた脱線係数と車輪上昇量の関係性から，在来線の車輪フランジ乗り上がり脱線に対する走行安全性を対象に，この指標を用いた評価方法を検討した。

2. 研究の概要

走行安全性評価指標として現行の脱線係数を基本とした指標を考え，安全が確保されることを前提に，新たな指標と評価手法を検討した。提案する指標「脱線係数の距離累積値」は，脱線係数が限界脱線係数の値を継続して超えている間の「脱線係数×走行距離」の総和で表す。このような指標を提案したのは，脱線係数の値が限界脱線係数に達していれば車輪フランジの直線部がレールと接触している可能性が高いことに加え，車輪上昇時はその状態が長時間継続すると考えられるためである。ここでは，鉄道総合技術研究所が実施した急曲線低速走行試験のデータを元に，以下の分析と検討を行った。

(1) 走行試験データを用いた脱線係数の累積値と車輪上昇量の相関分析

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

** 明星大学（現 運輸安全委員会）

*** 鉄道力学研究部 車両力学研究室（現 明星大学）

データにLPF処理と移動平均処理を施した上で、脱線係数が目安値を超えた後の時系列履歴を考慮した指標値である脱線係数の時間または距離ベースの目安値超過累積値を算出し、車輪上昇量との相関を分析する。

(2) 提案指標に基づく走行安全性評価方法の検討

(1)の分析結果に基づき、乗り上がり脱線に対する走行安全性評価方法を検討する。具体的には、安全性が確保できるような、4.3.2項に詳述する脱線係数の距離累積値の限度値を探る。

なお、本稿で取り上げる評価手法には著大横圧等による軌道破壊に関する評価を含まない。また、検討に用いるデータは車両がカント超過状態で走行したときのものであることから、実際の適用場面としては速度向上試験の際に併せて実施される急曲線低速走行試験に該当する。

3. 走行試験

3.1 車両条件

試験に用いた車両は、ボルスタレス台車（軸距2.1m）に修正円弧踏面車輪（フランジの角度65度、高さ27mm）を組み込んだ、在来線通勤形の付随車（台車中心間距離13.8m）である。動力車でこの付随車を牽引して走行した。試験方向先頭軸の静止軸重は68.2kNであった。

外軌側車輪の乗り上がりを発生させるため、台車の軸ばねライナーと空気ばねの高さを調整し、内軌側に比べて外軌側の輪重が小さくなるように先頭軸の静止輪重のアンバランス（以下、「アンバランス」と記す。）を設定した。アンバランス量は20%、40%の2条件とした。走行速度は10km/h、20km/h、30km/hの3条件とした。

3.2 軌道条件

試験線の概要を図1に示す。軌間は1067mm、レールはJIS50kgNレールである。曲線部には、内軌側に脱線防止ガードが取り付けられており、外軌側車輪がレール頭頂面に乗り上げても脱線しない。

試験線には、半径160mおよび半径100mの2つの曲線（それぞれ、「R160」、「R100」と記す。）がある。これらの曲線のカントは90mm、スラックは10mm、カント逓減倍率は400倍である。更にR160の円曲線区間には、平面性変位（軌道面のねじれ）、段目違い（レール継目部の上下および左右方向のずれ）、および角折れ（レール継目部の水平方向の折れ角）の各軌道変位を設定した。これらの軌道変位設定区間と、R160およびR100の出口側緩和と曲線部を合わせた計5箇所を対象に、脱線係数と外軌側車輪上昇量の変化を調べた。これら注目区間の詳細を以下の①～⑤に示す。

- ① 平面性変位：R160内、14m平面性変位40mm
- ② 段目違い：R160内、段違い4mm、目違い3mm

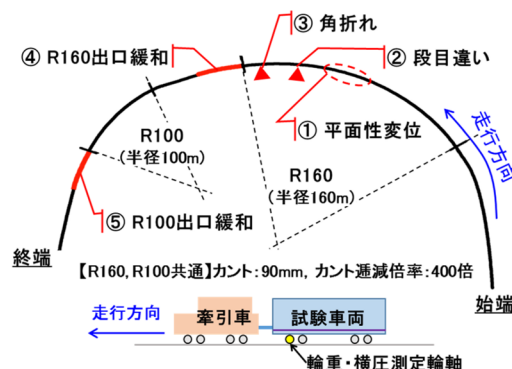


図1 試験線の概要（線形、軌道変位の設定箇所）

- ③ 角折れ：R160内、角折れ60mm
- ④ R160出口緩和：カント逓減倍率400倍
- ⑤ R100出口緩和：カント逓減倍率400倍

3.3 測定項目・方法

走行試験では、横圧 Q 、輪重 P 、横圧輪重比 Q/P 、外軌側車輪上昇量 z_w を測定した。ここでは主に、走行距離（走行速度より換算）、時間、先頭軸の脱線係数 Q/P および z_w の値の変化に注目して解析した。 Q と P は新連続式輪重横圧測定法によって、 z_w はレーザ変位計を用いて測定し、サンプリング周波数を1kHzとした。

4. 走行試験データの処理

4.1 データ処理の概要

過去の研究⁴⁾により、脱線係数の値が車輪上昇量の変化とほぼ同じ周期で変動するのは遮断周波数10HzのLPF処理または1m移動平均処理を施した波形である場合が多いことがわかった。また、アンバランス20%のとき、車輪上昇量が2mm（乗り上がり開始）から7mm（車輪フランジが脱線防止機能を維持している範囲内の車輪上昇量）に至る走行距離は2.1m以上であり、欧州規格³⁾で用いている脱線係数の2m移動平均を採用しても、走行安全性の評価に問題を生じることはないと考えられることがわかった。そこで、ここでは、脱線係数 Q/P の測定波形に遮断周波数20HzのLPF処理を施した後、走行距離2mのウィンドウを1ポイント（1サンプルデータ）ずつ移動して平均値を算出する「20HzLPF・2m移動平均」処理を行うこととした。この処理を行った試番（走行数）は計61試番で、その内、アンバランス20%の条件が35試番、40%の条件が26試番である。

4.2 データのローパスフィルタ処理

走行試験データは、まず測定値の高周波成分を除去するため、有限インパルス応答形のLPF処理（遮断周波数20Hz）を行った。続いて行う移動平均処理は、時系列デー

タに対してある点を中心に N 個のデータの平均値を計算する「中心化移動平均」を採用した。ここでは、走行速度を参照して 2m に対応する移動平均処理を実施した。

4.3 フィルタ処理後のデータの解析

前節のフィルタ処理を施したデータのうち、3.2 節に示した 5 箇所の区間のデータを対象に以下の解析を行った。

4.3.1 脱線係数最大値と車輪上昇量最大値

20HzLPF・2m 移動平均処理後の脱線係数の最大値と車輪上昇量の最大値を読み取った (図 2)。修正円弧踏面車輪と 50kgN レールの組み合わせでは、車輪とレールの接触位置がフランジ直線部の範囲内である車輪上昇量が 8 ~ 9mm に達したとき脱線係数が最大となる。その後さらに車輪が上昇すると、車輪はフランジ直線部を越えてフランジ先端でレールと接触するため接触角が減少し、脱線係数が減少する (図 3)。したがって、脱線係数最大値は車輪上昇量が 10mm に達するまでの間の値を、車輪上昇量最大値はさらにその後の値を読み取った。

4.3.2 脱線係数の距離累積値の算出

注目する 5 箇所の脱線係数の距離累積値 (以下、「距離累積値」と記す。) を算出した。これは、2 章に示したとおり、脱線係数が限界脱線係数の値を継続して超えている間の「脱線係数×走行距離」の総和で表す。限界脱線係数 $(Q/P)_{cr}$ は、式 (1) に示す Nadal の式¹⁾ を用いて計算することができ、車輪フランジ角度 $\alpha = 65[\text{deg.}]$ 、摩擦係数 $\mu = 0.3$ のとき、 $(Q/P)_{cr} = 1.12$ となる。さらに、 $(Q/P)_{cr}$ に安全率に相当する係数 $K = 0.85$ を乗じて得られる目安値は 0.95 となる。

$$(Q/P)_{cr} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha} \quad (1)$$

α : フランジ角度, μ : 車輪・レール間の摩擦係数

なお、 $(Q/P)_{cr}$ は式 (1) から明らかとなっており、 μ によって変化する。提案指標である距離累積値の算出では、その実用性や従来の評価法 (目安値を用いた判定) との継続性を考慮し、ここでは、目安値 0.95 を継続して超えている間の脱線係数に対して距離累積値を算出する。距離累積値の具体的な算出手順を以下に記す。

まず、脱線係数の 20HzLPF・2m 移動平均値を用いて、図 2 に示すような脱線係数の時間累積値 (以下、「時間累積値」と記す。) を算出する。時間累積値は、脱線係数が目安値である 0.95 以上となった時点から 0.95 未満となるまでの間について、脱線係数の時系列データを時間 t で積分した値である (式 (2)、図 2)。

$$[\text{時間累積値}] = \int_{t_0}^{t_1} (Q/P) dt \quad (2)$$

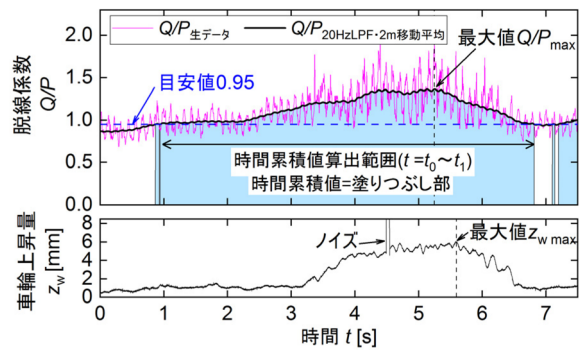


図 2 脱線係数と車輪上昇量の最大値の抽出と脱線係数の時間累積値

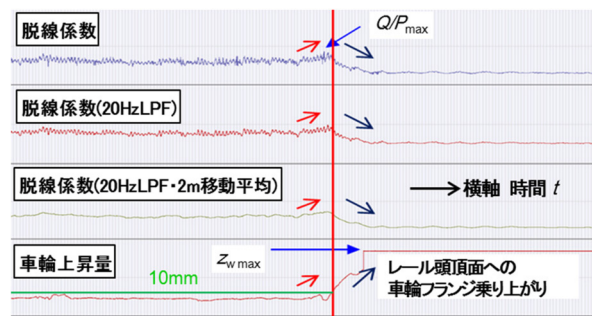


図 3 車輪フランジ乗り上がりの場合の脱線係数と車輪上昇量の時系列波形例 (R160 出口緩和)

ここではサンプリング間隔 $\Delta t = 1[\text{ms}]$ のデジタル (離散) データを使用し、次の①~⑤の手順で、離散データに対する時間累積値 $\sum_t Q/P$ (単位 s) を算出した。

- ① Q/P が 0.95 以上であるかどうかを判別する。
- ② Q/P が 0.95 以上であれば、その値を書き出す。
- ③ Q/P が 0.95 未満であれば、0 を書き出して①に戻る。
- ④ 書き出した Q/P の値をチェックし、 $Q/P \neq 0$ のとき、1 ステップ前の値に Q/P の値を加算して $\sum Q/P$ を計算する。 $Q/P = 0$ のときは、 $\sum Q/P$ を 0 にリセットする。
- ⑤ $\sum Q/P$ にサンプリング間隔 Δt を掛け、その値 $\sum Q/P \times \Delta t = \sum_t Q/P$ を書き出す。

次に、求めた時間累積値に走行速度 $v[\text{m/s}]$ を乗じて、距離累積値 $\sum_x Q/P$ (単位 m) を算出する (式 (3))。解析したデータは、軌道変位設定区間・試番毎に走行速度がほぼ一定であったため、式 (3) の最右辺において走行速度は時間に依存しないものとした。式 (3) の距離累積値を離散データに対して書き下すと、式 (4) となる。

$$\int_{x_0}^{x_1} (Q/P) = \int_{t_0}^{t_1} (Q/P) v dt \quad (3)$$

$$= v \int_{t_0}^{t_1} (Q/P) dt$$

$$\sum_x Q/P = v \sum_t Q/P \times \Delta t \quad (4)$$

5. 解析結果

5.1 測定波形例

5箇所注目区間で測定された脱線係数と車輪上昇量の時系列波形例を図4に示す。脱線係数と車輪上昇量を比較した結果は以下のとおりであった。

- (1) 図4の(a)～(e)のいずれにおいても、脱線係数の20HzLPF・2m移動平均値は、生データに含まれる高周波成分が除去され、車輪上昇量の増減に対応する形で変化した。
- (2) 図4(a)(平面性変位), 図4(e)(R100出口緩和)では、特に、脱線係数の20HzLPF・2m移動平均値が増加して1.3程度になると車輪が上昇を開始し、その値は車輪の上昇とともに減少した。
- (3) 図4(b)(段目違い)ではレール継目部において脱線係数著大値が発生した。脱線係数は目安値0.95を大きく超えたが、 $z_w \leq 5[\text{mm}]$ であり、20HzLPF・2m移動平均値では段目違いの影響による瞬時の著大値が消えた。ただし、アンバランスを設定した急曲線低速走行であるため、脱線係数の20HzLPF・2m移動平均値もその最大値は目安値を上回った。
- (4) 図4(c)(角折れ)では段目違い部ほど衝撃的ではないが、角折れ部において短時間の脱線係数著大値が発生した。脱線係数が最大値をとるときに車輪上昇量はむしろ減少し、段目違いと同様、脱線係数が最大値となった後、時間的に少し遅れて車輪が上昇した。脱線係数は目安値0.95を超えたが、 $z_w \leq 2[\text{mm}]$ であった。また、20HzLPF・2m移動平均値の波形では角折れの影響による瞬時の著大値が消えた。

以上、いずれの条件を見ても、例えば目安値0.95を超えた後、脱線係数の生データの増減の様子が車輪上昇量の変化と対応しているわけではなく、むしろ、高周波の変動を除いた20HzLPF・2m移動平均値の変化と対応していることを確認した。

5.2 脱線係数最大値と車輪上昇量最大値の関係

脱線係数 Q/P の生データおよび20HzLPF・2m移動平均の最大値を読み取り、そのときの車輪上昇量の最大値 $z_{w\max}$ との関係を調べた結果を図5に示す。走行速度や、脱線係数の増加に影響する内軌側横圧輪重比 κ の値による車輪上昇量の差異が顕著でなかったため、これらの条件が異なる試験のデータをまとめて一つの図に示した。なお、 κ は全試番において0.22～0.47の範囲にあった。

脱線係数と車輪上昇量の最大値の読み取り方は、4.3.1項に記したとおりである。段目違いではアンバランス20%のみ、その他の箇所ではアンバランス20%と40%の結果を示した。車輪上昇量が27mmとなっているデータは、車輪フランジがレール頭頂面に乗り上がったことを表している。図5より、以下のことがわかる。

- (1) いずれの箇所でも、脱線係数の20HzLPF・2m移動平均値は生データの持つ高周波成分が除去され、最大値が生データより小さくなる。
- (2) 角折れ設定区間でアンバランス20%のときには、20HzLPF・2m移動平均値の最大値が目安値0.95を下回った。 $z_{w\max} \leq 3.2[\text{mm}]$ であり、乗り上がり脱線が発生する危険性はないと判断できる。
- (3) 上記(2)の条件以外では、20HzLPF・2m移動平均値の最大値が0.95を上回った。

以上より、段目違いや角折れに起因して発生する短時間の著大な脱線係数は車輪上昇との相関が低く、20HzLPF・2m移動平均処理により、その高周波変動を除去することで車輪が上昇しないことを脱線係数の値から判断できる。角折れ設定区間でアンバランス20%という現実的な条件では、車輪上昇量が小さく、波形処理後の脱線係数で走行安全上の問題がないことを確認できた。しかしながら、急曲線低速走行というフランジ直線部がレールと接触しながら走行している状態のデータで解析したため、脱線係数の波形処理のみでは殆どの箇所目安値0.95を超え、脱線係数の読み値だけで車輪上

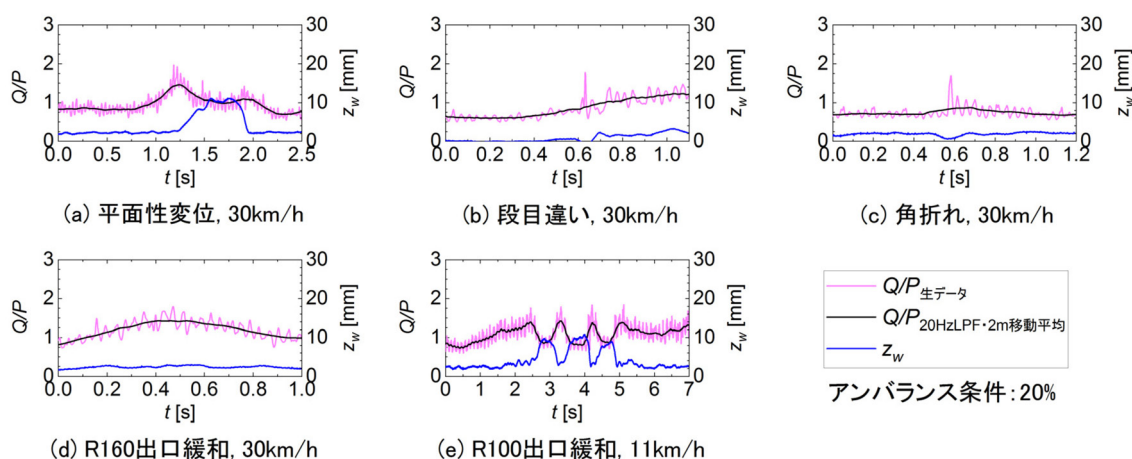


図4 曲線走行中の脱線係数と車輪上昇量の時系列波形例

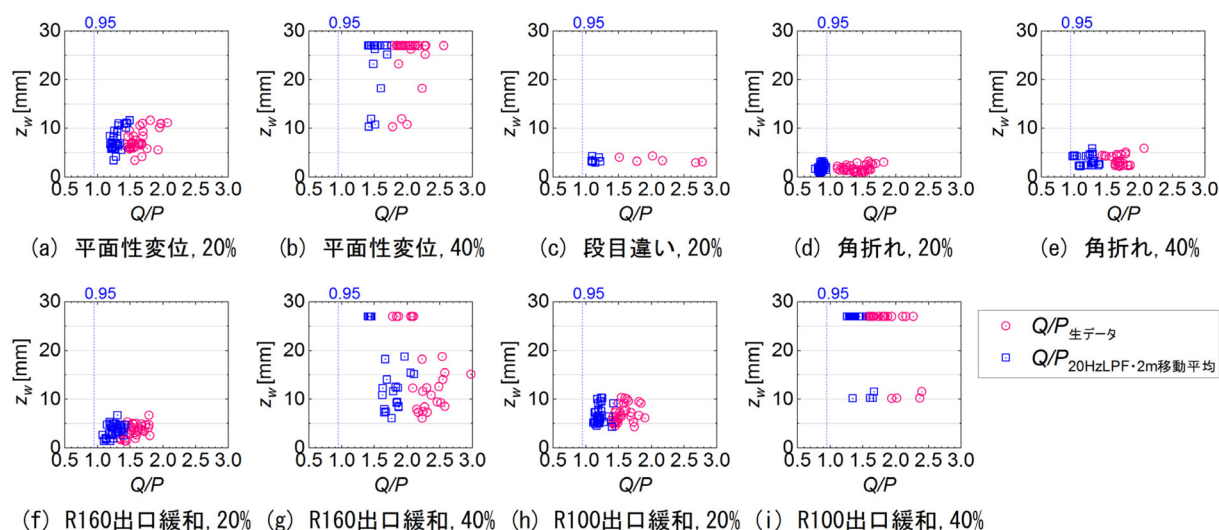


図5 脱線係数最大値と車輪上昇量最大値の関係

昇量が小さいことを評価するのは難しいことを改めて確認した。

5.3 脱線係数の時間累積値と車輪上昇量との関係

脱線係数の距離累積値を算出する前処理として、まず、時間累積値を求めた。図6に、R160 出口緩和における脱線係数 Q/P の生データ、20HzLPF・2m 移動平均値、時間累積値と車輪上昇量 z_w の生データの時系列波形例を示す。車輪フランジがレール頭頂面に乗り上がらなかったアンバランス 20% の条件の図6(a)では、時間の経過にしたがって時間累積値は増加するものの、4s 過ぎに車輪が下降すると脱線係数は目安値未満となり、時間累積値は一旦ゼロにリセットされる。アンバランスが40%で、乗り上がりが発生した図6(b)では、時間累積値が増えるとともに車輪上昇量も増加する傾向にあることがわかる。

次に、脱線係数の 20HzLPF・2m 移動平均値の時間累積値と車輪上昇量の最大値を、注目する5箇所について読み取った結果を図7に示す。なお、角折れ部・アンバランス 20% の場合は、図5(d)に示したように脱線係数の 20HzLPF・2m 移動平均値は 0.95 を超えなかったため、図7に記載しない。また、R100 出口緩和は試験線の終端付近ですぐに車両を停止する必要があり、R100 出口緩和での走行速度は全試番を通じて 9.0~13.1km/h の範囲にあった。図7より、以下のことがわかる。

- (1) 同じ箇所でも同一アンバランスの条件では、速度が高くなるほど時間累積値は減少した。アンバランス 20%、40% のどちらの場合も、概ね、走行速度毎にプロットデータが集中しており、時間累積値に及ぼす走行速度の影響が顕著であった。
- (2) 同じ箇所でも同一速度の条件では、アンバランス 20% のときよりも 40% のときの方が、時間累積値、車輪上昇量ともに大きい傾向にあった。

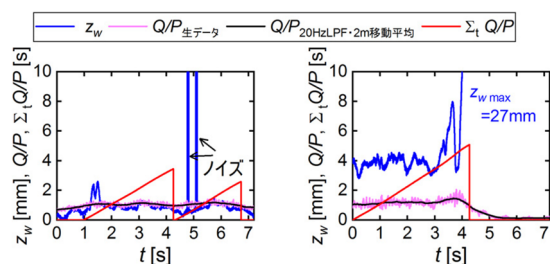


図6 R160 走行時の脱線係数の時間累積値と車輪上昇量の時系列波形例

- (3) 現実的な走行条件であるアンバランス 20% で見ると、 $z_{w, \max} \leq 13[\text{mm}]$ で車輪フランジがレール上に乗り上がることはなかったが、 $z_w > 10[\text{mm}]$ となる時間累積値は 0.8 ~ 6.6s と幅広い範囲にばらついた。

5.4 脱線係数の距離累積値と車輪上昇量との関係

前節に示した時間累積値を利用して距離累積値を算出した。距離累積値と車輪上昇量の最大値の関係を図8に示す。使用したデータはアンバランス 20% の 36 試番と 40% の 25 試番である。図8より、以下のことがわかる。

- (1) 距離累積値で整理すると、特に、平面性変位、段目違いおよび R160 出口緩和では、時間累積値のときのような走行速度による差異が明確でなくなった。
- (2) 平面性変位や R160 出口緩和では、距離累積値の増加とともに車輪上昇量が増加する傾向がみられた。
- (3) R100 出口緩和では距離累積値とすることで時間累積値よりもばらつきが小さくなり、ある程度固まったデータ群となった。ただし、車輪上昇量が 27mm に達したアンバランス 40% の方が、車輪上昇量が 11mm 以下の 20% のときよりも小さな距離累積値となった。

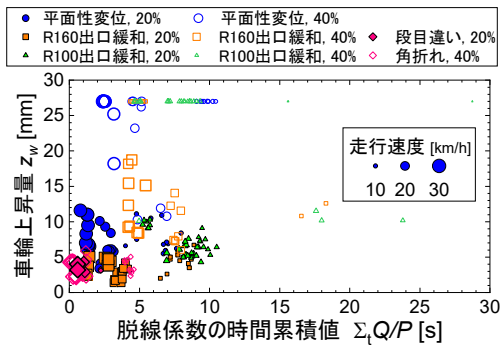


図7 脱線係数の時間累積値と車輪上昇量の最大値の関係

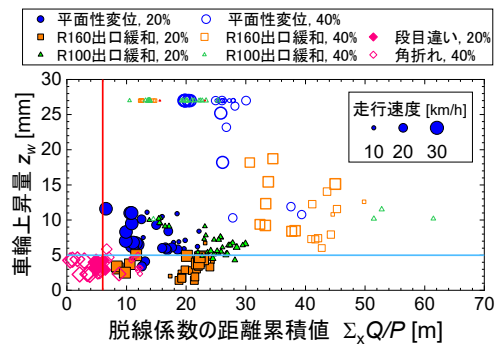


図8 脱線係数の距離累積値と車輪上昇量の最大値の関係

5.5 脱線係数の距離累積値の目安値の検討

4.3節に述べたとおり、修正円弧踏面の場合、車輪上昇量が10mmを超えるとフランジが脱線防止機能を失い始め、脱線係数の値が減少する。そこで、目安値設定の考え方として、図8において $z_w \leq 10[\text{mm}]$ となる距離累積値を参考に、さらに安全を見て、フランジ直線部がレールと接触している車輪上昇量5mm以下となる範囲で、距離累積値の目安値を定めることが考えられる。この考え方に基づき、今回使用した走行試験データから距離累積値の目安値を求めると6.0mとなる(図8の赤縦線)。以上より、次のような急曲線低速走行時の安全性評価手法案が得られる。

- ・ 脱線係数の20Hz・2m移動平均値を乗り越がり脱線に対する安全性評価に使用し、この値が目安値0.95未満であれば、安全と判断する。
- ・ 上記の値が目安値0.95超のときは、新たな指標として距離累積値を適用し、 $\Sigma_x Q/P = 6.0[\text{m}]$ 未満であれば、安全と判断する。

脱線係数の生データを用いた従来の方法で目安値0.95を超えた試番を、提案した方法により再評価すると、車輪フランジがレール上に乗り上がらなかったアンバランス20%の全35試番×4箇所(平面性変位、角折れ、R160出口緩和、R100出口緩和)+6試番(段目違い)=146データうち、37データが安全と判定される。

6. まとめ

車輪フランジ乗り上がり脱線に関して、厳しい軌道条件下で実施した急曲線低速域の走行試験データを用いて、在来線の走行試験への適用を想定したデータ処理と新たな走行安全性評価指標を検討した。その結果、静止輪重のアンバランスが20%の場合、遮断周波数20HzのLPF処理を施した上で2m移動平均処理を行った脱線係数は、車輪フランジ直線部で車輪がレールと接触している間の乗り上がり発生時の車輪上昇量の変化に対応

することがわかった。また、脱線係数の時系列履歴を考慮した新たな評価指標である脱線係数の距離累積値を用いると、LPF・移動平均処理後の値が目安値の0.95を超えた場合でも、脱線係数の距離累積値が6m未満であれば、車輪上昇量が5mmを超過しないとの結果を得た。

急曲線低速走行時に関しては、脱線係数の時系列履歴を考慮した提案指標(脱線係数の距離累積値)がその目安値を超過した場合、従来の評価手法⁵⁾の手順にならない、提案指標に引き続いて輪重減少率の評価をすればよい。また、速度向上試験において短時間の脱線係数著大値が発生した場合でも、脱線係数の距離累積値を導入することにより、従来よりも精度よく乗り越がり脱線に対する安全余裕度を比較・評価できる可能性がある。今回新たに提案した評価指標については、適用可能な軌道変位条件等を引き続き検討するとともに、中高速域の測定データへの適用可能性についても今後検討を進める。

文献

- 1) 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，鉄道総合技術研究所，1993
- 2) 石田弘明，松尾雅樹，藤岡健彦：鉄道車両用輪軸の高周波輪重変動下における走行安全性評価に関する研究，日本機械学会論文集C編，Vol.71，No.702，pp.454-461，2005
- 3) European Committee for Standardization (CEN)，EN 14363:2016：“Railway applications - Testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Running behavior and stationary tests”，BSI Standards Publication，p.60，2016.
- 4) 石田弘明，土井久代，宮本岳史：乗り越がり脱線に対する安全性の余裕度評価法の検討，明星大学理工学部研究紀要，No.52，pp.13-20，2016
- 5) 国土交通省鉄道局：「急曲線における低速走行時の脱線防止対策」の追加対策等について，通達，国鉄技第42号，2004