

乗り上がり脱線に対する安全性の余裕度評価法の検討

石田 弘明¹ 土井 久代² 宮本 岳史³

Study on Assessment Method of Safety against Flange Climb Derailment

Hiroaki ISHIDA¹, Hisayo DOI², Takefumi MIYAMOTO³

The results of safety assessment against flange climb derailment depend on the frequency component of the measured data in the field tests. Therefore we investigate the relation between the data of derailment quotient to which the filter processing are applied with various cutoff frequencies and the values of wheel rise. We also confirm that the vertical displacement of the wheel caused by flange climbing is relative to the running distance when a vehicle runs on sharp curves at low speed.

キーワード：鉄道, 乗り上がり脱線, 走行安全性, 脱線係数, 走行試験

Keywords : Railway, Flange Climb Derailment, Running Safety, Derailment Quotient, Field Test

1. はじめに

我が国では、新しい構造の車両、新しい軌道が作られた場合や既設線で速度向上を行う場合、営業線で実際に車両を走行させ、車輪/レール間に作用する輪重、横圧を測定して脱線に対する安全性を評価してきた。現在、国の定める標準ではないが、運輸省（2001年より国土交通省）が監修した在来線運転速度向上試験マニュアル・解説⁽¹⁾に則り、各鉄道会社がこのような走行試験による評価を行っている。その際、横圧を輪重で除した脱線係数を指標として用い、測定された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断している。

近年は計測技術の進歩により高周波の輪重・横圧変動が測定できるようになる一方、列車の速度向上が進み、短時間の横圧著大値や輪重抜けが発生して、目安値を超える脱線係数の値が観測されるようになった。しかし、短時間の脱線係数著大値が発生しても即座に脱線する訳ではないことから、現在は、脱線係数超過時間⁽²⁾が 15 ms を超えなければ安全と判断している。また、日比谷線脱線事故後に行われている急曲線部での低速走行試験では、輪重・横圧測定値に遮断周波数 5 Hz のローパスフィルタ処理を施し、緩やかに変動する成分を読み取り評価に用いることとした⁽³⁾。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が、例えば欧州では、測定値に遮断周波数 20 Hz のローパスフィルタ処理を施し、脱線係数の走行距離 2 m 毎の移動平均値（以下、2 m 移動平均と記す）を算出して可否の判断を行っている⁽⁴⁾。

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訳ではない。したがって、評価に適用する測定値には目的に応じた処理が必要であり、走行安全性評価に最適な測定値の周波数成分等を明らかにすることが重要になる。そこで本研究では、公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研と記す）が 2013 年 9 月に実施した鉄道総研構内線での急曲線低速走行試験データを用いて、実測値にフィルタリングや移動平均処理を行ったデータの特徴を把握した。

本報告には、脱線・非脱線を的確に区別できる測定値の波形処理方法を調べることに主眼を置いてデータの処理と整理を行った結果を記す。

2. 走行試験の概要

2.1 車両条件

(1) 試験車両 走行試験に用いられた車両を図 1 に示す。試験車両は在来線通勤形車両である（フランジ角度 65° の修正円弧踏面車輪：脱線係数の目安値 0.95、ボルスタレス台車）。試験の際には、この車両をモーターカーで牽引して走行した。試験車両の静止輪重と静止輪重のアンバランス（以下、アンバランスと記す）は以下の通りであった。

・第 1 軸：A 側（左）33.5 kN, B 側（右）34.7 kN

・・・アンバランス - 1.8 %

・第 2 軸：A 側（左）36.5 kN, B 側（右）30.9 kN

・・・アンバランス 8.3 %

走行試験時には、B 側（右）が曲線の外軌側となり、アンバランスの正負は、左右の平均値に対し外軌側車輪の輪重

1 明星大学理工学部総合理工学科機械工学系 教授 機械力学

2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 車両運動力学

3 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 車両運動力学



図1 試験車両

が小さいときに正の値で表している。

(2) 車両側の試験条件 車輪の乗り上がりが発生させるため、台車の軸ばねライナー調整と空気ばねの高さ調整によりアンバランスを設定した。本報告に示したのは、次の2条件での走行試験結果である。

・第1軸の静止輪重のアンバランス：20%，40%

走行速度は10 km/h, 20 km/h, 30 km/h の3条件とした。

2.2 軌道条件

(1) 走行区間 試験車両を走行させた鉄道総研構内試験線の概略図を図2に示す。レールはJIS50kgNレールで、曲線部には、内軌に脱線防止ガードが取り付けられている。

以下では、試験線の本線から副本線へと分岐する地点を0mとして走行区間のキロ程（試験車両の走行距離）を表す。

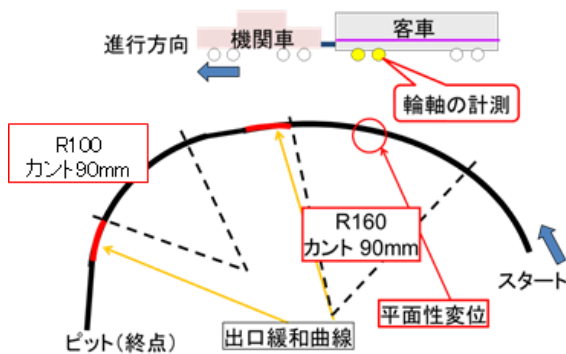


図2 試験車両の走行区間

(2) 軌道側の試験条件 試験軌道には、大小の角折れや平面性変位（軌道のねじれ）、段目違い（レール継目の上下、左右のずれ）が設定されている。本研究では、以下の4か所における輪重、横圧、脱線係数と外軌側の車輪上昇量の変化を解析した。

- ・R160 平面性変位設定区間：14 m 平面性変位 40 mm
 - ・R160 段目違い設定区間：段違い 4 mm, 目違い 3 mm
 - ・R160 出口緩和曲線：C90, カント逓減倍率 400 倍
 - ・R100 出口緩和曲線：C90, カント逓減倍率 400 倍
- （軌道のねじれ：14 m 平面性変位 35 mm 相当）

2.3 測定項目

測定項目は34項目と多岐にわたるが、本研究では、主に走行距離、時間と第1軸の輪重、横圧、横圧・輪重比（脱線係数）、車輪上昇量の値の変化に注目し、これらのデータを使用した。なお、車輪上昇量 z (z_{w1ave}) は、脱線に対する余裕度を直接的に把握することができる図3に示す車輪踏面中心とレール頭頂面中心との間の上下相対変位である。

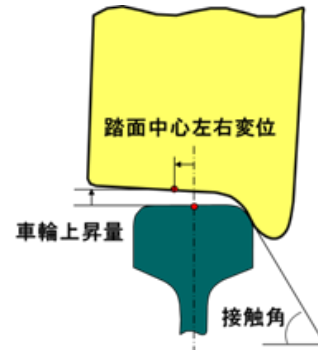


図3 車輪上昇量の定義

3. 走行試験データの処理

3.1 データの処理内容

第1軸の内軌側（左）及び外軌側（右）の輪重 P_{IL} , P_{IR} , 横圧 Q_{IL} , Q_{IR} , 横圧輪重比 $QbyP_{IL}((Q/P)_{IL})$, $QbyP_{IR}((Q/P)_{IR})$ について、各試番の走行開始から停止までのデータにローパスフィルタ処理と移動平均処理を施した。元の生データは、サンプリング周波数1 kHzでAD変換したデジタルデータである。

欧州規格EN⁽⁴⁾では、脱線係数の連続測定値を遮断周波数20Hzのローパスフィルタに通し、さらにウィンドウ長さが走行距離2 m、ステップ0.5 mの移動平均値を算出することとしている。そこで本研究では、これらを参考に以下の5種類の処理を行った。

・ローパスフィルタ処理：

遮断周波数：20 Hz, 10 Hz, 5 Hz の3種類

・移動平均処理：

ウィンドウ長さ：2 m, 1 m の2種類

ただし、後述するソフトウェアの基本処理機能を使用したため、ステップ0.5 mでウィンドウを移動した移動平均値ではなく、1ポイント（1サンプルデータ）ずつ移動した走行距離2 mまたは1 mの間の平均値を順次算出した。言い換えれば、データのサンプリング周波数が1 kHzであるから、平均をとるウィンドウをステップ1 msで移動したことになる。上記の処理を行った試番は、

- ・アンバランス20%の条件の35試番
 - ・アンバランス40%の条件の26試番
- の合計61試番である。

3・2 データの処理方法

走行試験データの解析には、Oscope Standard ver.2, FIR フィルタオプション付き（株式会社小野測器製）を使用した。具体的なローパスフィルタ処理，移動平均処理の方法を以下に記す。

(1) ローパスフィルタ処理 測定値の高周波成分を除去するため，FIR（Finite Impulse Response：有限インパルス応答）形のローパスフィルタを使用した。レベルは，遮断周波数以上の成分を最大限にカットするため，設定可能な最小値である -100 dB に設定した。すなわち，遮断周波数 5 Hz の場合には，5 Hz から上限のナイキスト周波数（サンプリング周波数の半分の周波数）500 Hz までの周波数成分について，その振幅を 10^{-5} 倍に減じている。

(2) 移動平均処理 平均をとるウインドウ長さは，平均化回数の欄にポイント数（平均を計算するデータの個数）を入力して設定する。したがって，走行距離 2 m または 1 m の移動平均値は，走行速度に応じたサンプリングデータの個数をあらかじめ計算しておき，その値を用いて計算した。サンプリング周波数 1 kHz の場合の走行速度と走行距離に対応したポイント数の計算値を表 1 に示す。

本解析では時系列データ $f(t)$ に対して，ある点 a_i を中心に N 個のデータの平均値 A_i を計算する「中心化移動平均」を行った（図 4）。

3・3 処理後のデータの解析

(1) 処理データの切り出し ローパスフィルタ処理，移動平均処理を施したデータのうち，特に輪軸の挙動に注

表 1 走行速度と走行距離に対応したポイント数

| | | | |
|-------------|------|------|------|
| 走行速度 (km/h) | 10 | 20 | 30 |
| 走行速度 (m/s) | 2.78 | 5.56 | 8.33 |
| 走行距離 1 m | 360 | 180 | 120 |
| 走行距離 2 m | 720 | 360 | 240 |

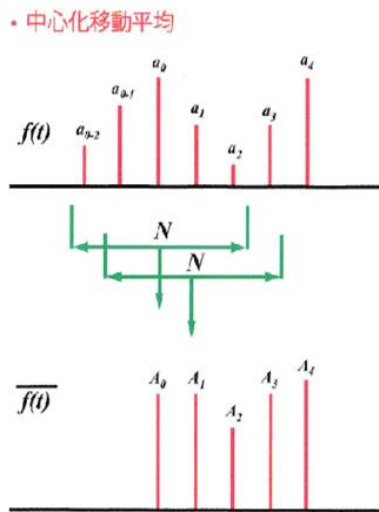


図 4 中心化移動平均処理

目した 4 箇所を切り出して解析した。切り出した区間は以下の通りである。

- R160 平面性変位設定区間：キロ程 248 m～262 m
- R160 段目違い設定区間：キロ程 280 m～290 m
- R160 出口緩和曲線：車輪上昇量 z_{w1ave} が 10 mm に達した地点から 2 m 手前まで
- R100 出口緩和曲線：車輪上昇量 z_{w1ave} が 10 mm に達した地点から 2 m 手前まで

R160 及び R100 の出口緩和曲線で，車輪上昇量 z_{w1ave} が 10 mm に達した地点から 2 m 手前までのデータを切り出したのは，これまでの走行安全性評価法と同じように脱線係数の最大値を読み取るためである。走行試験で使用した修正円弧踏面車輪と 50 kgN レールの組み合わせでは，車輪上昇量が 8～9 mm に達したときに脱線係数は最大となり，その後さらに車輪が上昇しても，接触角が小さくなるため，逆に脱線係数の値は減少していく（図 5）。したがって，車輪上昇量が 10 mm に達するまでの間に脱線係数の最大値を読み取り，さらにその後の車輪上昇量最大値を読み取って，両者の関係を調べることとした。

(2) 切り出したデータの解析 測定値の処理方法と走行安全性評価結果との関係を把握するため，次の①～③の解析を行った。

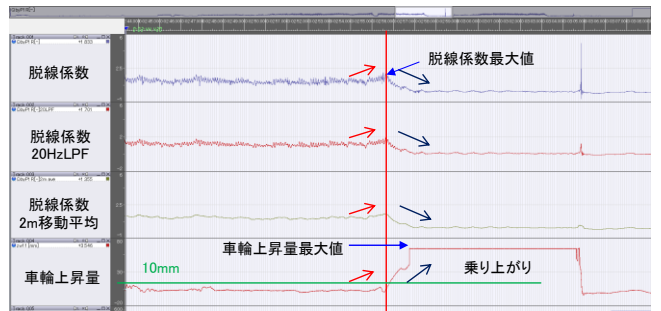


図 5 脱線係数の波形例（R160 出口緩和曲線）

- ① 処理波形の比較：第 1 軸外軌側の脱線係数 $(QP)_{IR}$ の生データ，フィルタ処理後のデータ，移動平均処理後のデータと車輪上昇量 z_{w1ave} の生データを時系列波形にして並べ，車輪上昇量の変化を的確に表す測定値を波形レベルで把握した。
- ② 脱線係数最大値と車輪上昇量最大値：第 1 軸外軌側の脱線係数 $(QP)_{IR}$ の生データ，フィルタ処理後のデータ，移動平均処理後のデータについて各々最大値を読み取り，そのときの車輪上昇量 z_{w1ave} の最大値との関係を調べた。その際，車輪／レール間摩擦係数の違いを考慮するため，第 1 軸内軌側の横圧輪重比 $(QP)_{IL}$ の平均値をあわせて算出した。
- ③ 車輪上昇量と上昇時間及び走行距離：移動平均処理を行う場合の適切なウインドウ長さを検討するため，車輪が上昇を開始してから上昇量が最大となるまでの時間と走行距離を読み取った。なお，アンバランス 20% の 35 試番は，

車輪上昇量が小さいため車輪上昇量 2 mm を開始点とし、アンバランス 40 % の 26 試番は、円曲線中で常に外軌側の車輪が 2 mm 以上上昇していたため車輪上昇量 5 mm を開始点とした。

4. 解析結果

この章では、測定値の処理方法による違いを処理波形、脱線係数最大値と車輪上昇量最大値の関係から把握するとともに、車輪上昇量と上昇時間及び走行距離の関係を解析した結果について述べる。なお、アンバランス、走行速度、測定箇所や内軌側横圧加重比の異なるデータを解析したため、車輪の乗り上がりに影響を及ぼすと考えられる試験条件の組み合わせが多岐にわたる。そこで以下では、各解析の結果を、軌道条件の異なる測定箇所別にまとめ、代表的な例のみを示すこととした。また、各図には、測定箇所を平面性変位 (R160 平面性変位設定区間)、段目違い (R160 段目違い設定区間)、R160 出口緩和 (R160 出口緩和曲線)、R100 出口緩和 (R100 出口緩和曲線) のように略記した。

4.1 処理波形の比較

図 6～図 8 に、第 1 軸外軌側の脱線係数 $(Q/P)_{1R}$ の生データ、遮断周波数 20 Hz、10 Hz、5 Hz のローパスフィルタ処理後のデータ、ウィンドウ長さ 1 m と 2 m の移動平均処理後のデータと車輪上昇量 z_{wave} の生データの時系列波形を並べて示す。図 6 が R160 平面性変位、アンバランス 40%、30km/h、図 7 が R100 出口緩和、アンバランス 40%、10km/h、図 8 が段目違い、アンバランス 20%、30km/h での測定波形である。

これまでの解析や実測の経験から、瞬時の脱線係数の変化が車輪の上昇に対応しないが分かっている。そこで、生データを含む 6 種類の脱線係数の波形のうち、車輪の上昇、下降とほぼ同じ周期で値が変化しているものを見出し、車輪上昇量波形の変化の様子を的確に表す測定値の処理方法を把握する。波形を比較した結果は以下の通りであった。

- ・平面性変位 (図 6)：車輪上昇量の変化とほぼ同じ周期で変動をしていたのは、10 Hz のローパスフィルタ処理または 1 m 移動平均処理を施した波形であった。この傾向は他の試番やアンバランス 20 % の場合も同じであった。

- ・出口緩和 (図 7)：車輪上昇量の変化の様子と良く似た変動をしていたのは、0 ms～400 ms の間は 10 Hz のローパスフィルタ処理、400 ms～800 ms の間は 1 m 移動平均処理を施した波形であった。R100 出口緩和では、他の試番やアンバランス 20 % の場合も同じ傾向であった。また、R160 出口緩和と段目違い設定箇所では、10 Hz のローパスフィルタ処理を施した波形が車輪上昇量の変化とほぼ同じ周期で変動していた。

- ・段目違い (図 8)：脱線係数の生データには、650 ms 付近の段目違い設定箇所ですべて瞬間的な脱線係数の著大値が測定されているが、車輪はほとんど上昇していない。むしろ継目の段違いの影響で車輪が下降している。車輪上昇量の変化の様子と良く似た変動をしていたのは、10 Hz のローパスフィルタ処理を施した波形であった。

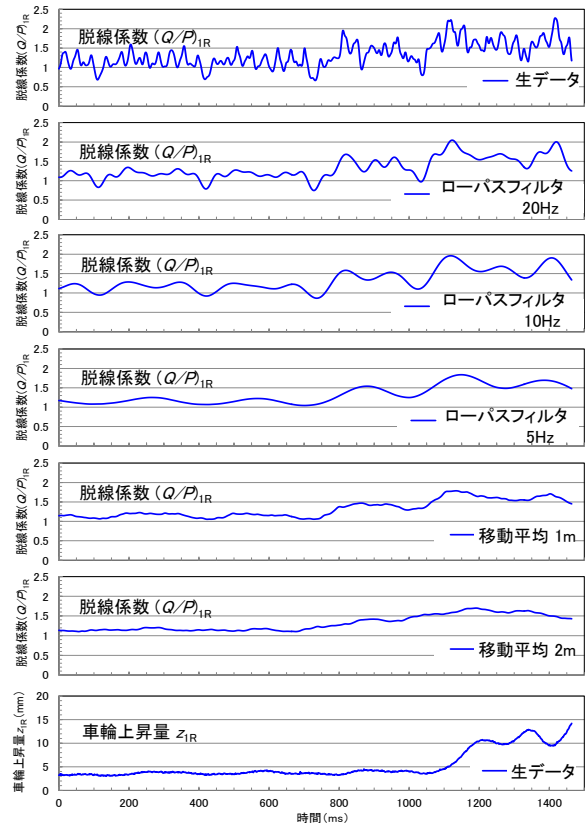


図 6 脱線係数と車輪上昇量の波形例
(平面性変位, 40 %, 30 km/h)

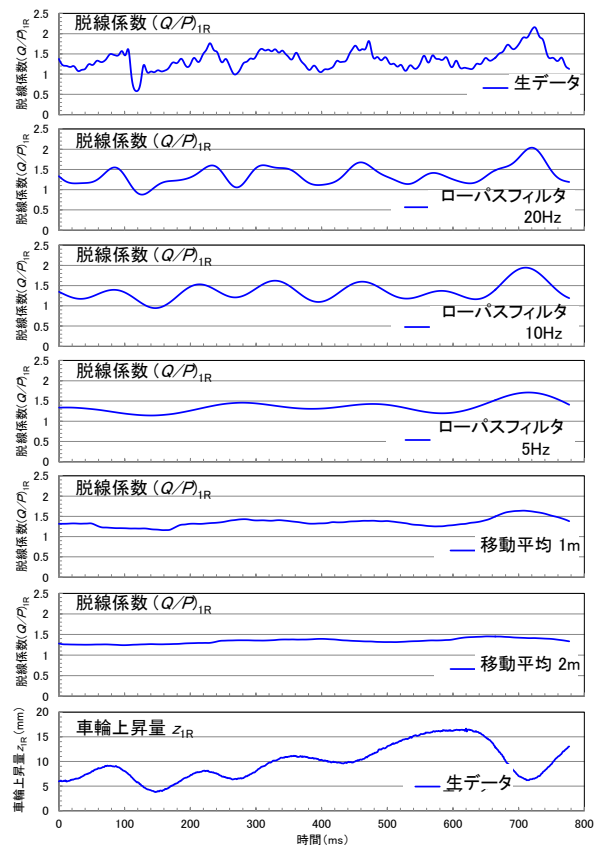


図 7 脱線係数と車輪上昇量の波形例
(R100 出口緩和, 40 %, 10 km/h)

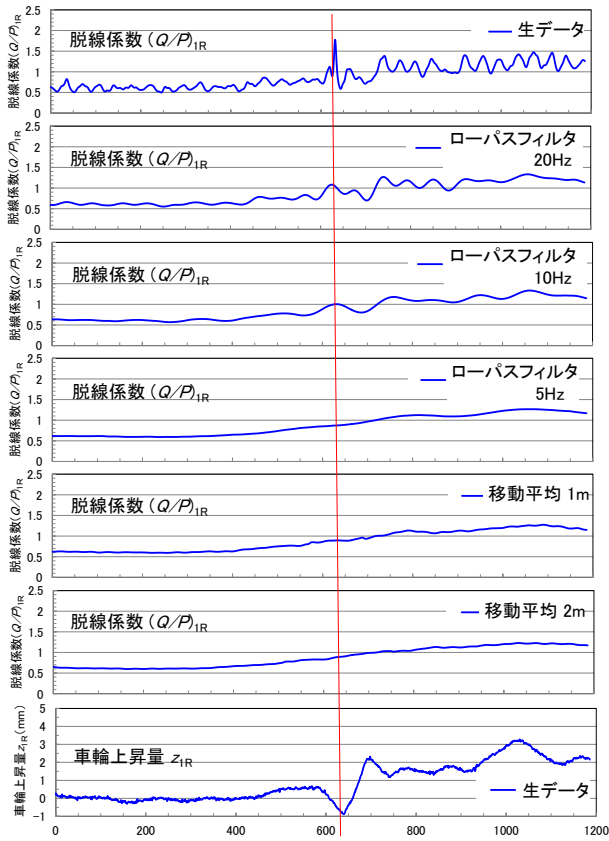


図 8 脱線係数と車輪上昇量の波形例
(段目違い, 20%, 30 km/h)

理のみでは難しく、走行条件に応じて目安値を引き上げるか、別の指標を併用する必要があることを改めて確認した。

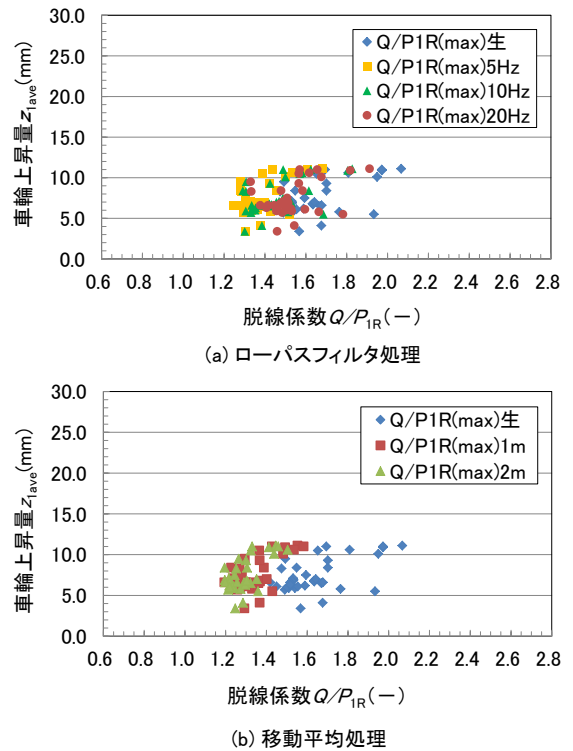


図 9 脱線係数最大値と車輪上昇量最大値の関係
(平面性変位, 20%)

4.2 脱線係数最大値と車輪上昇量最大値の関係

第 1 軸外軌側の脱線係数 $(Q/P)_{1R}$ の生データ、ローパスフィルタ処理後のデータ、移動平均処理後のデータについて各々最大値を読みとり、そのときの車輪上昇量 z_{w1ave} の最大値との関係を調べた。代表例として、R160 平面性変位設定区間の結果を図 9、図 10 に示す。走行速度や内軌側横圧輪重比 $\kappa=(Q/P)_{1L}$ 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プロットしている。図 9 がアンバランス 20%、図 10 がアンバランス 40%の試験結果であり、各図の(a)がローパスフィルタ処理後の値の比較、(b)が移動平均処理後の値の比較である。車輪上昇量が 27 mm 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。図より以下のことが分かる。

- ・遮断周波数 5 Hz のローパスフィルタ処理と 1 m 移動平均処理を施した脱線係数の最大値がほぼ同じ値になった。
- ・脱線係数最大値の読み値がもっとも小さくなったのは 2 m 移動平均値であった。
- ・アンバランス 20%の試番では車輪フランジがレール頭頂面に乗り上がることはなかったが、ローパスフィルタ処理や移動平均処理を行ったデータでも脱線係数が目安値 0.95 を超えた。

急曲線低速走行においてフランジ直線部がレールと接触しながら走行することを許容するには、脱線係数の波形処

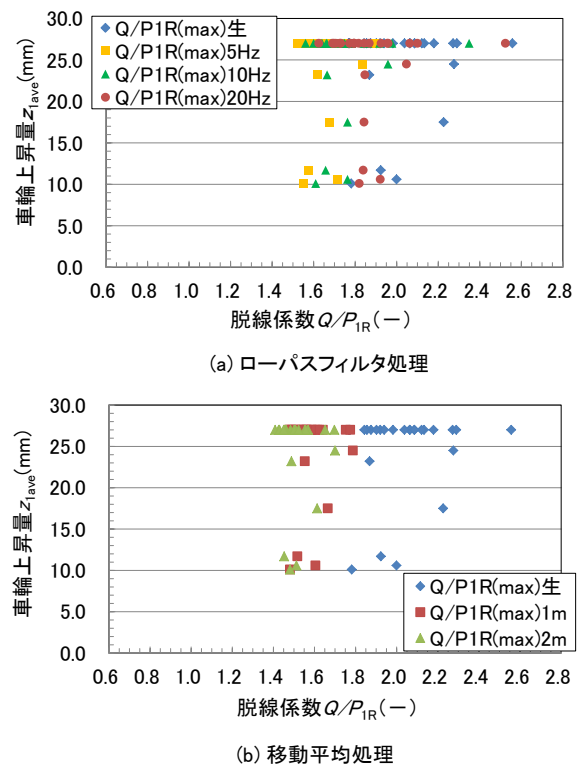


図 10 脱線係数最大値と車輪上昇量最大値の関係
(平面性変位, 40%)

4-3 車輪上昇量と上昇時間及び走行距離の関係

過去の事故調査事例や走行試験の経験からは、アタック角が大きいときに車輪フランジがレール頭頂面に乗り上がる間の走行距離は概ね車輪半回転（約 1.5 m）に相当するとされている。欧州規格 EN では、ORE・B55 及び C138 委員会⁶⁾が行った脱線走行試験の結果から「乗り上がり要する走行距離は 2 m である。」との結論を得て、脱線係数の 2 m 移動平均値により走行安全性を評価することとしている。また、運輸安全委員会の鉄道事故調査報告書より得られたフランジの乗り上がり開始からフランジトップ走行に至るまでの時間は最短で 340 ms との報告もある⁶⁾。

脱線係数の瞬間的な著大値が車輪上昇と必ずしも対応しないことは前章までに述べた通りであるが、測定値のフィルタリングや移動平均処理を行うには、遮断周波数、あるいはウインドウ長さの根拠として、車輪が上昇を開始してからフランジがレール頭頂面に乗り上がるまでに要する時間または走行距離を把握しておく必要がある。そこで、鉄道総研脱線走行試験データを用いて、R160 平面性変位設定区間、R160 出口緩和曲線、R100 出口緩和曲線の 3 箇所以下

の値を読み取った。
 ・アンバランス 20 % の 35 試番：
 車輪上昇量 2 mm の時点から上昇量が最大となるまでの時間 Δt (s) と上昇量 Δz (mm)
 走行距離 Δx (m) = 上昇時間 Δt (s) × 走行速度 v (m/s)
 平均車輪上昇速度 (mm/s) = 上昇量 Δz (mm) / 時間 Δt (s)

・アンバランス 40 % の 26 試番：
 車輪上昇量 5 mm の時点から上昇量が最大となるまでの時間 Δt (s) と上昇量 Δz (mm)
 走行距離 Δx (m) = 上昇時間 Δt (s) × 走行速度 v (m/s)
 平均車輪上昇速度 (mm/s) = 上昇量 Δz (mm) / 時間 Δt (s)

上記の整理結果を図 11～図 13 に示す。内軌側横圧輪重比 $\kappa = (Q/P)_{IL}$ 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プロットした。各図の(a)が上昇時間 Δt (s) と上昇量 Δz (mm) の関係、(b)が走行距離 Δx (m) と上昇量 Δz (mm) の関係、(c)が走行速度 V (km/h) と平均車輪上昇速度 $\Delta z / \Delta t$ (mm/s) の関係である。図 11 に R160 平面性変位設定区間、図 12 に R160 出口緩和曲線、図 13 に R100 出口緩和曲線での測定結果を示した。図中の数式はアンバランス 20 % のデータを通る回帰直線で近似した方程式、 R^2 は次式(1)により計算した決定係数を表す。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

ここで、 y_i は実測値、 \bar{y} はその平均値、 f_i は回帰式による推定値である。

特にアンバランス 40 % の試験データはばらつきが大きいですが、図より、以下のことが分かる。

・アンバランス 20 % より 40 % のときの方が、同じ上昇量 Δz だけ車輪が上昇するのに要する時間 Δt 及び走行距離 Δx

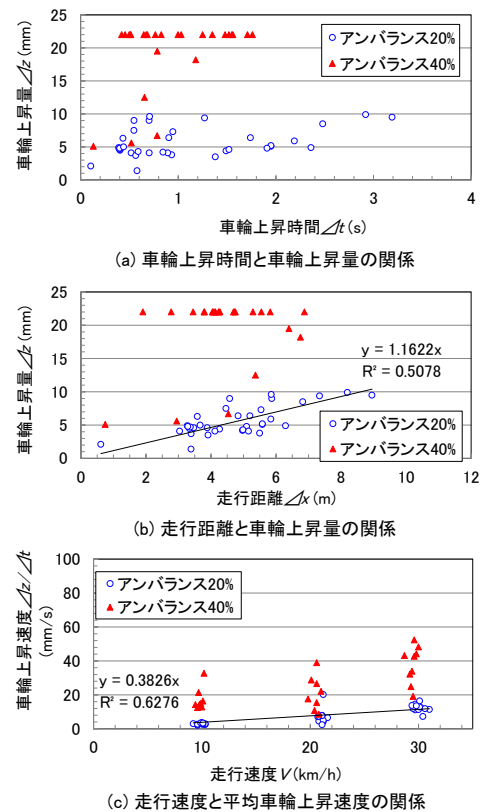


図 11 車輪上昇量と上昇時間及び走行距離の関係 (平面性変位)

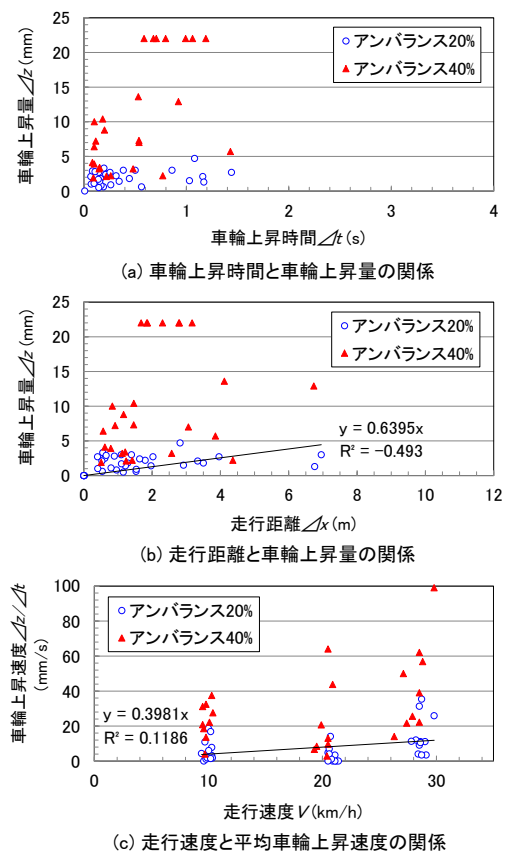


図 12 車輪上昇量と上昇時間及び走行距離の関係 (R160 出口緩和)

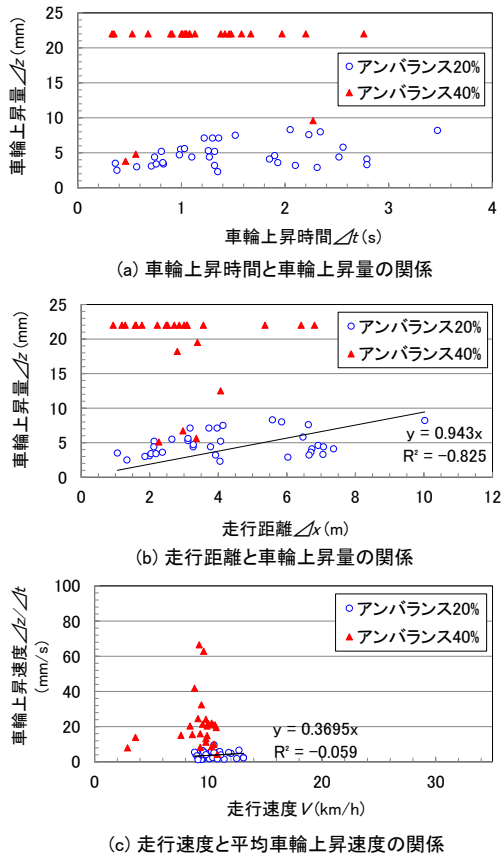


図 13 車輪上昇量と上昇時間及び走行距離の関係 (R100 出口緩和)

が短い傾向にあった。

・上記と同様の結果であるが、各図の(c)において、アンバランス 20%より 40%のときの方が走行速度 V に対応する平均車輪上昇速度 $\Delta z / \Delta t$ が高くなった。

2000 年の日比谷線脱線事故以降、20%を超える静止輪重のアンバランス（静止輪重比）が計測された場合には直ちに調整を行うこととしていることから⁷⁾、特にアンバランス 20%の条件での試験結果に注目すると、さらに次の事実が見えてくる。

・R100 出口緩和曲線では若干傾向が認められたものの、その他の 2 箇所では車輪上昇時間 Δt の増加とともに車輪上昇量 Δz が増える傾向は見られなかった。例えば、車輪上昇量 $\Delta z = 5 \text{ mm}$ （実際の車輪上昇量：7 mm）となる時間 Δt は、3 箇所の結果を総合すると 0.39 s～2.5 s と広い範囲にばらついた。

・R160 平面性変位設定区間と R100 出口緩和曲線では、走行距離 Δx の増加とともに車輪上昇量 Δz が増える傾向が見られた。このことは、走行速度 V と平均車輪上昇速度 $\Delta z / \Delta t$ の関係からも分かる。

・上記の関係を原点を通る近似直線で表したとき、その勾配がもっとも大きかったのは R160 平面性変位設定区間で、 $\Delta z \text{ (mm)} = 1.16 \times \Delta x \text{ (m)}$ となった。この式より、例えば、

車輪上昇量 $\Delta z = 5 \text{ mm}$ （実際の車輪上昇量：7 mm）となる走行距離 Δx を逆算すると、 $\Delta x = 4.3 \text{ m}$ となる。

・車輪上昇量 $\Delta z = 5 \text{ mm}$ （実際の車輪上昇量：7 mm）となる走行距離 Δx の最小値は、R160 平面性変位設定区間で $\Delta x = 3.3 \text{ m}$ 、R100 出口緩和曲線で $\Delta x = 2.1 \text{ m}$ であった。

在来線の曲線部を旅客車両が速度 30 km/h 以下で走行した場合、車輪上昇量は時間よりも走行距離にほぼ比例すること、フランジが乗り上がりを開始してからレール頭頂面に乗るまでの走行距離は、アンバランス 20%未満、カント逡減倍率が 400 倍以上、14 m 平面性変位が 40 mm 以下であれば、2 m より長いということが確認できた。

5. まとめ

鉄道総研構内線で行われた脱線走行試験データを用いて、脱線係数の実測値にローパスフィルタ処理や移動平均処理を施したデータの特徴を把握した。これらの処理後の値と車輪上昇量との関係を解析した結果は以下の通りであった。

- (1) 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、10 Hz のローパスフィルタ処理または 1 m 移動平均処理を施した波形である場合が多かった。
- (2) 遮断周波数 5 Hz のローパスフィルタ処理と 1 m 移動平均処理を施した脱線係数の最大値がほぼ同じ値になった。
- (3) 遮断周波数 20 Hz、10 Hz、5 Hz のローパスフィルタ処理、ウィンドウ長さ 1 m と 2 m の移動平均処理のうち、脱線係数最大値の読み値がもっとも小さくなったのは 2 m 移動平均値であった。
- (4) アンバランス 20%の試番では車輪フランジがレール頭頂面に乗り上がることはなかったが、ローパスフィルタ処理や移動平均処理を行ったデータでも脱線係数が目安値 0.95 を超える場合が多かった。
- (5) アンバランス 20%の場合、車輪上昇量は時間よりも走行距離にほぼ比例した。その関係を原点を通る近似直線で表したとき、直線の勾配がもっとも大きかったのは R160 平面性変位設定区間で、 $\Delta z \text{ (mm)} = 1.16 \times \Delta x \text{ (m)}$ となった。
- (6) アンバランス 20%のとき、車輪上昇量 $\Delta z = 5 \text{ mm}$ （実際の車輪上昇量：7 mm）となる走行距離 Δx の最小値は、R160 平面性変位設定区間で $\Delta x = 3.3 \text{ m}$ 、R100 出口緩和曲線で $\Delta x = 2.1 \text{ m}$ であり、2 m より長いことが確認できた。

上記の結果は、円曲線中に 14 m 平面性変位 40 mm の軌道不整がある R160、C90、カント逡減倍率 400 倍の曲線と R100、C90、カント逡減倍率 400 倍の曲線を速度 30 km/h 以下で走行したときの実測データから得られたものである。

本研究で使用した走行試験データの範囲内では、車輪上昇量と走行距離との間に関係が認められたことから、脱線係数の移動平均値、なかでも車輪上昇量の変動に対応してほぼ同じ周期で増減する脱線係数の 1 m 移動平均値が、乗り上がり脱線に対する安全性の評価指標として適していると考えられる。

また、アンバランス 20 % のとき、車輪上昇量 2 mm (乗り上がり開始) から 7 mm (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 2.1 m 以上であったので、欧州規格 EN で用いている脱線係数の 2 m 移動平均値を採用しても、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。

6. おわりに

本検討で、車輪上昇量を脱線係数の値から推定するには実測値に遮断周波数 10 Hz のローパスフィルタ処理や 1 m の移動平均処理を施すとよいことが分かった。ただし、急曲線低速走行試験の場合、脱線せずに走行していても、そのようなデータ処理だけでは、脱線係数最大値が現在適用されている目安値を超過し危険と判定されることを改めて確認した。

今後は引き続き、脱線が起きやすい目違いや角折れのある箇所での検討を進めるとともに、走行実態をよりの確に表現できる余裕度評価法を確立するため、脱線係数の時間や距離での積分値など、新しい指標と車輪上昇量の関係を詳細に調査する必要があると考えられる。

本研究は、公益財団法人鉄道総合技術研究所との共同研究として実施した。また、実測データの処理と整理にあたり、卒業研究として取り組んでくれた明星大学学生諸君の多大なる協力を得た。この場を借りて関係各位に深く感謝の意を表す。

参考文献

- (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.705, PP.100-107(2005)
- (3) 石田弘明: 「急曲線低速走行試験における安全性評価手法」, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.5-10(2005)
- (4) CEN: "Railway applications", EN14363, EUROPIAN STANDARD, p.64, (2005)
- (5) ORE: "Permissible maximum values for the Y- and Q- forces and derailment criteria", Question C138, Report No.9 (Final report) (1986)
- (6) 坂本正哉, 林世彬, 須田義大, 影山真佐富, 古賀進一郎, 国見 敬, 川鍋 哲也: 「実台車実験による高速検知型脱線予兆検知システムの検証」, J-Rail2014 講演論文集, S7-1-3(2014)
- (7) 運輸省 (国土交通省), 「急曲線における低速走行時の脱線防止対策について」の運用について, 鉄保第 149 号, 鉄施第 154 号(2000)