

1217 各種軌道狂いが乗り上がり脱線に与える影響の評価

Evaluation of Effects on Flange-Climb Derailment by Track Irregularities

正 [土] ○大澤 純一郎 (鉄道総研) 正 [土] 村松 浩成 (前鉄道総研)

正 [土] 西垣 拓也 (鉄道総研) 正 [土] 古川 敦 (鉄道総研)

Junichiro OSAWA, Railway Technical Research Institute. 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Hironari MURAMATSU, Formerly Railway Technical Research Institute.

Takuya NISHIGAKI, Railway Technical Research Institute.

Atsusi Furukawa, Railway Technical Research Institute.

We use Q/P estimation equations to evaluate quantitative influence of various factors for flange-climb derailment. In these equations, many factors which influences the cause of derailments are considered to estimate accurate wheel loads, lateral forces and so on. Nevertheless it is too complex to use for usual track maintenance works, we extract influential factors for derailment with parametric studies. The results show that, twists and alignments influence causes of derailments more than another category of track irregularities, and that imbalance between right and left-side wheel loads and primary suspension stiffness influence more another category of rolling stock. Then we propose the simple linear equation that will be useful to track maintenance works.

Keyword: flange-climb derailment, Q/P estimation equation, track irregularities

1. 研究の目的

乗り上がり脱線防止のため、2000年3月に発生した営団地下鉄日比谷線脱線事故以降、本線の脱線防止ガード設置基準を明確化するなどの対策が施されている。しかし、近年開発された軽量ボルスタレス車両の運転所構内や側線での脱線は、日比谷線事故以降も年に1、2件発生している。日比谷線事故報告書で提示された輪重横圧推定式¹⁾²⁾は、曲線諸元と車両諸元を入力して推定脱線係数比を算出し、走行安全性の評価をしている。また筆者らは、上記諸元に加え、軌道狂いを考慮した輪重横圧推定式を提案した³⁾。これには、乗り上がり脱線に対する安全性に基づく軌道状態評価が可能という長所がある反面、軌道管理の実務が煩雑になるなどの短所もある。

本論文では、輪重横圧推定式の長所を生かしつつ短所を補うため、各種因子が脱線に及ぼす影響を定量的に評価し、影響の大きな因子のみを変数とする簡略評価式を提案するとともに、その精度について検討した結果を報告する。

2. 乗り上がり脱線に影響する因子の抽出

2.1 因子抽出の方法

乗り上がり脱線には、車両側、軌道側の様々な因子が複雑に影響する。車両側では左右静止輪重比や軸ばね定数、枕ばね定数等で、軌道側では曲線半径、カント、軌道狂い等である。ここでは、各因子が乗り上がり脱線に及ぼす影響度を評価するために、各因子をパラメータとした推定脱線係数比の感度分析を行った。計算に用いたパラメータは、以下の通りである。

①線形 (曲線半径 R, カント C)

R=100, R=160 (各 R とも C=0, 10, 20) 【運転所構内を想定】

R=200, R=400 (各 R とも C=0, 50, 100) 【本線を想定】

②軌道狂い

Fig.1 に示す運転所構内で測定した、軌道狂い波形 (以下「基準狂い」と示す。) と、比較のための3種類、計4種類

の波形を用いた。各波形とも推定脱線係数比が最小となる地点は車両諸元等によって異なるが、ここでは③で述べる基準車種の条件で推定脱線係数比が最小となる地点の狂いの組み合わせ (10m 弦正矢通り、水準、軌間、平面性) を各波形毎に求め、これにより推定脱線係数比を算出した。

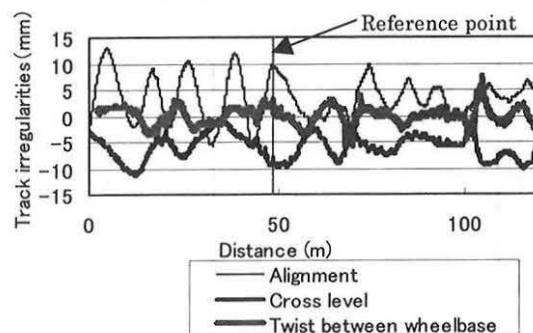


Fig.1 Reference track irregularities

③車両条件

a) 車両諸元

J R 化以降設計された通勤電車1種を基準車種とし、比較のため、別の2車種と国鉄時代に設計された通勤電車1車種、計4車種の諸元を用いた。車両諸元を Table 1 に示す。

Table1 Vehicle specification

Vehicle type	Reference	Type-A	Type-B	Type-C
Hight of center-of-gravity (m)	1.37	1.44	1.20	1.33
Static wheel loads (kN)	67.8	71.0	63.7	70.9
Carbody connection sysytem	Air spring bolsterless	Air spring	Air spring	Swing hanger
Primary suspension stiffness/axlebox (MN/m)	1.392	1.100	0.700	0.840
Secondary suspension stiffness/bogieside (MN/m)	0.294	0.380	0.330	1.060

b) 外軌側静止輪重比 (γ)

$\gamma = 1.0, 0.85, 0.75$ の3とおりとする。

④速度 10km/h

2.2 車両側の因子

推定脱線係数比では、車両側の因子として、外軌側車輪の静止輪重比 γ 、軸ばね定数、枕ばね定数を取り上げて、推定脱線係数比に対する感度分析を行った。なお、基準条件は、以下のとおりである。

- | | | |
|---|--|--------------|
| { | <ul style="list-style-type: none"> ・軌道狂い：基準狂い ・車種：基準車種 ・外軌側静止輪重比：$\gamma = 1$ ・線形条件：$R = 100, C = 0$ | } \dots 基準条件 |
|---|--|--------------|

まず、推定脱線係数比と静止輪重比との関係を求めた結果を Fig.2 に示す。図は、4 種類の軌道狂いについて解析した結果である。軌道狂いの種類にかかわらず、静止輪重比 0.1 あたり推定脱線係数比は約 0.2 変化することがわかる。

Fig.3 に、各車種の軸ばね定数を 1 倍～3 倍まで変化させた場合の推定脱線係数比を車種別に示す。また Fig.4 に、枕ばね定数について同様な計算を行った結果を示す。

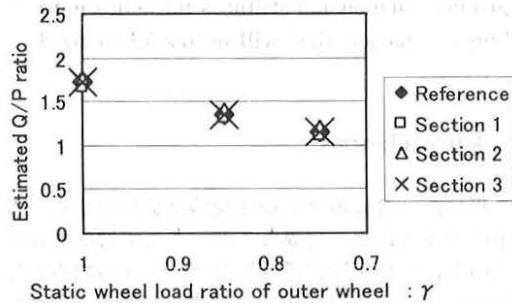


Fig.2 Relationship between estimated Q/P ratio and γ

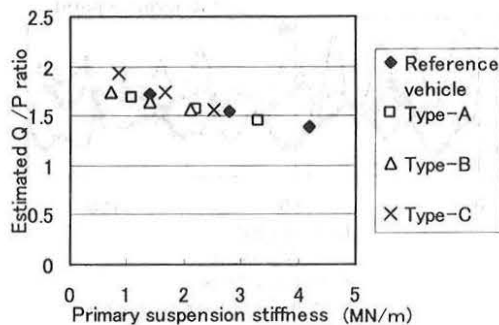


Fig.3 Relationship between estimated Q/P ratio and primary suspension stiffness

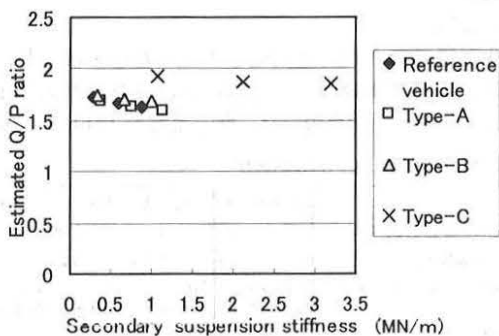


Fig.4 Relationship between estimated Q/P ratio and secondary suspension stiffness

Fig.3 と Fig.4 から、軸ばね、枕ばねともに、ばね定数が大きくなると推定脱線係数比が小さくなる傾向にあることがわかる。軸ばね (Fig.3) と枕ばね (Fig.4) を比較した場合、前者の傾きの方が大きいことから、乗り上がり脱線に及ぼす影響は軸ばね定数の方が大きいといえる。

旅客車で一般に用いられている軸ばね定数は 0.7～1.5MN/mm、枕ばね定数は 0.2～1.0MN/mm の範囲にある。このうち後者については、Fig.4 から、1.0MN/mm までの範囲では、推定脱線係数比はほとんど変化しないことがわかる。車種による差異は、車体支持方式の異なる車種 C を考慮しても概して小さい。よって、乗り上がり脱線に対する安全性を簡易に評価する際は、軸ばね定数のみを変数としても大局は見失わないものと考えられる。

2.3 軌道側の因子

推定脱線係数比は、軌道側の因子として、曲線半径、カントの曲線諸元、及び軌間、通り、平面性の各軌道狂いをパラメータとしている。これらの狂いは、例えば通り狂いの場合、横圧には前軸位置の狂いが影響し、遠心力による輪重・輪軸横圧には車体中心の狂いが影響する。これら各種・各位置の軌道狂いをパラメータにして、感度分析を行った結果を Fig.5～8 に示す。ここで、軌道狂いの感度を定量的に比較するため、各狂いの単位変化量あたりの推定脱線係数比変化量 (絶対値) を求め、比較した。結果を Table2 及び 3 に示す。

①曲線半径と通り狂い

Fig.5 に、推定脱線係数比と曲線半径との関係を示す。図から、曲線半径と推定脱線係数比との関係は直線近似が可能であり、Table3 よりその傾きはカントによって 20% 程度のばらつきがあるもの約 0.45/100m とみなせる。

Fig.6 に、推定脱線係数比と通り狂いとの関係を示す。図から、通り狂いと推定脱線係数比との関係も直線近似が可能である。前軸位置と車体中心位置では、前者の影響が大きく、かつ前者の傾きは 0.095/10mm である。

②カント及び平面性狂い

Fig.7 に、推定脱線係数比とカントの関係を示す。同図から、両者の関係は直線近似で表され、その傾きは曲線半径

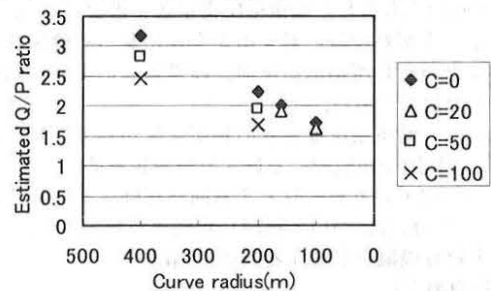


Fig.5 Relationship between estimated Q/P ratio and Curve radius

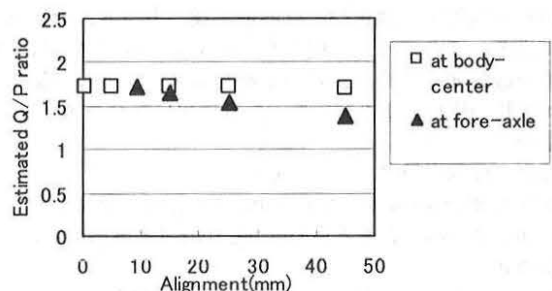


Fig.6 Relationship between estimated Q/P ratio and alignment

によって若干異なるものの、0.050/10mm 程度である。

Fig.8 に、推定脱線係数比と平面性狂いの関係を示す。軸距平面性狂い、台車間平面性狂いとも推定脱線係数比との関係は直線近似で表される。2つの平面性狂いを比較した場合、軸距平面性狂いの方が傾きは大きく、推定脱線係数比に与える影響は大きい。台車間平面性狂いは、カント運減倍率 400 倍の場合で 35mm であり、カントが小さい運転所構内ではさらに小さくなると考えられることから、軸距平面性狂いのみを用いれば、軌道状態の大まかな評価は可能と考えられる。

③軌間狂い

推定脱線係数比に対する影響は、0.017/10mm と、他の軌道狂いと比較して小さい結果であった。

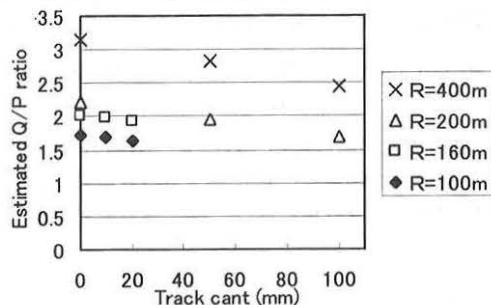


Fig.7 Relationship between estimated Q/P ratio and track cant

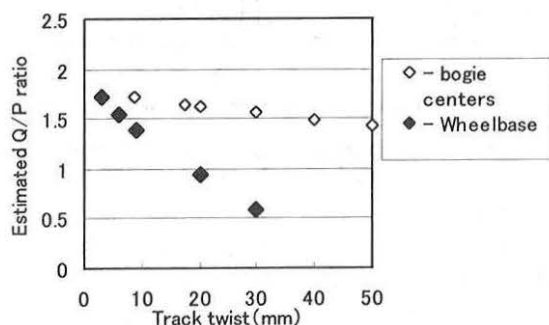


Fig.8 Relationship between estimated Q/P ratio and twist

Table2 Estimated Q/P ratio change by track irregularities

Track irregularity	Influence*	Remarks
Gauge	0.017	
Alignment at fore-axle	0.095	
Alignment at body-center	0.003	
Track twist between wheelbase	0.42	Type-A vehicle: 0.31, Type-B: 0.25, Type-C: 0.37
Track twist between bogie centers	0.073	Type-A vehicle: 0.070, Type-B: 0.068, Type-C: 0.19

Influence*: Estimated Q/P ratio change by track irregularity at 10mm

Table3 Estimated Q/P ratio change by main details of curvature

Main details of curvature	Influence**	Remarks
Radius	0.48 /100m	C20: 0.48, C50: 0.44, C100: 0.39
Track cant	0.045 /10mm	R160: 0.050, R200: 0.055, R400: 0.071

Influence**: Estimated Q/P ratio change by main details of curvature at optional range

2.4 感度分析のまとめ

前節までの解析により、推定脱線係数比と車両・軌道の各因子との関係は、他のパラメータを固定した場合は、ほぼ直線近似で表されることがわかった。このうち、一般に用い

られる車両諸元と、一般に存在する軌道狂いの範囲では、静止輪重比、軸ばね定数、前軸位置通り狂い、軸距平面性狂い、他の因子と比較して推定脱線係数比に与える影響が大きいといえる。

3. 軌道狂い限度値の算出と分析

3.1 軌道狂い限度値の算出

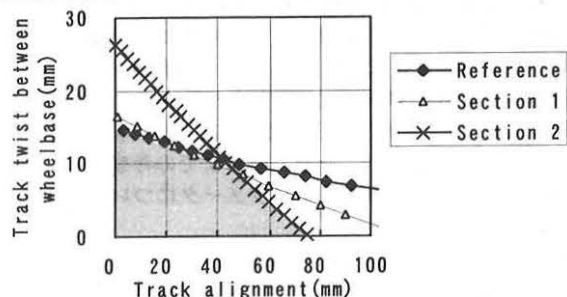
2.3 節で、推定脱線係数比に与える影響の大きな軌道狂いとして前軸通り狂いと軸距平面性狂いとを抽出した。本章では、軌道狂いの大きさと乗り上がり脱線に対する安全性との関係を定量的に評価するために、この2種類の軌道狂いの限度値を算出することを試みた。具体的には、推定脱線係数比=1.2 となる通り狂い、軸距平面性狂いの組み合わせを算出し、これを軌道狂いの限度値とした。

結果の一例を Fig.9(1)に示す。軌道狂い波形が異なると、推定脱線係数比=1.2 となる通り狂い、軸距平面性狂いの組み合わせは異なるが、いずれの場合も両者の関係は直線近似で表されることがわかる。同図の灰色の領域では推定脱線係数比が 1.2 以上となり、車輪が乗り上がりを開始する可能性がある。

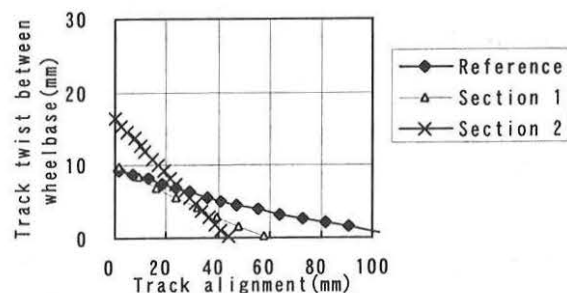
上記条件で、外軌側静止輪重比のみを 1.0→0.85 とした場合の軌道狂い限度値の組み合わせを Fig.9(2)に示す。静止輪重比が小さくなることで、軌道狂い限度値が厳しくなることがわかる。

このように、推定脱線係数比 1.2 となる際の通り狂い、軸距平面性狂いとの関係は直線近似でき、その傾きや切片が、他の条件の組み合わせによって変化することがわかった。よって、各条件毎に傾きと切片を算出すれば、線区の条件に応じた合理的な軌道狂い管理が可能となる。

現在多くの鉄道事業者の軌道整備実施基準では、通り狂い、平面性狂いに対し独立の基準値を規定している。この場合、両者の著大値が単独で存在する場合は、基準値を超過しても走行安全性におよぼす影響は小さいが、基準値以内の値であっても、両者が同じ地点で発生すれば、走行安全性が低下することがある。これに対し、通り狂いと軸距平面性狂いの組み合わせが Fig.9 (1) の灰色の領域に含まれるか否かを判定すれば、走行安全性を考慮した、より合理的な軌道状態評価が可能になるものと考えている。



(1) R=160m, C=0, $\gamma=1$



(2) R=160m, C=0, $\gamma=0.85$

Fig.9 Relationship between estimated Q/P ratio and twist

3.2 軌道狂い限度値と他因子との関係

本節では 3.1 節で得られた軸距平面性狂いと通り狂いの限度値と、車両側、軌道側の各因子との関係について検討する。具体的には、JR の 4 級線の通り狂い整備基準値が 30mm であることから、これを 30mm で固定した場合の平面性狂い限度値と静止輪重比及びカントとの関係を求めた。なお、解析は $R=100$ に固定し、Fig.10 では $C=0$ を固定で γ を変数に、Fig.11 では $\gamma=1$ に固定し、 C を変数とした。両図から、通り狂い限度値を固定した場合、静止輪重比、カントと平面性狂い限度値との関係は直線近似できることがわかる。

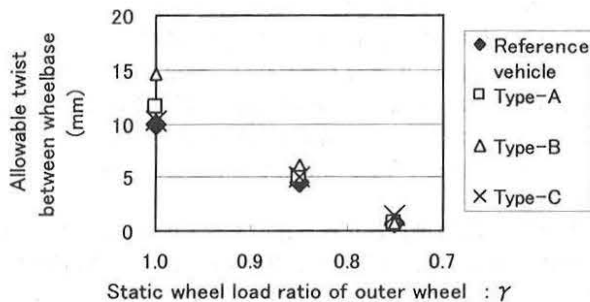


Fig.10 Relationship between allowable twist and γ

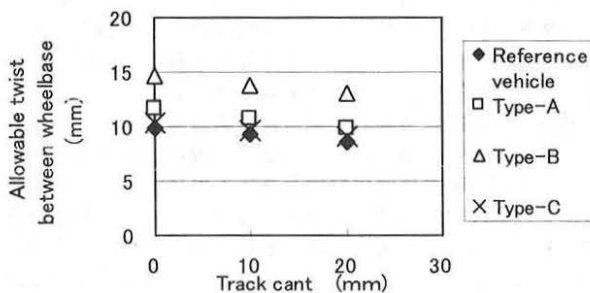


Fig.11 Relationship between allowable twist and track cant

4. 推定脱線係数比の簡略化とその精度

3 章で示した軌道狂い限度値は、実際に輪重横圧推定式と限界脱線係数推定式を用いて、推定脱線係数比 1.2 となる軌道狂いを詳細に解析して得られたものである（以下「解析解」という）。しかし、このような計算は、軌道管理の実務面からは煩雑である。一方、前章までの考察から、推定脱線係数比とこれを構成するパラメータについて以下の事項がわかっている。

(1) 影響度の大きいパラメータの抽出

2 章の検討の結果、車両諸元では静止輪重比と軸ばね定数、軌道側条件では曲線半径、カント、軸距平面性狂いおよび通り狂いが、推定脱線係数比に対する感度が高く、かつ他の条件を固定した場合、各々の因子と推定脱線係数比との関係は線形の式で表される。

(2) 推定脱線係数比 1.2 となる軌道狂いの組み合わせ

3 章の検討の結果、推定脱線係数比 1.2 となる通り狂いと軸距平面性狂いとの関係は、他の条件を固定した場合、線形の式で表される。

これらの結果を用いて、推定脱線係数比=1.2 となる軸距平面性狂いを、曲線諸元、通り狂い、静止輪重比、軸ばね定数から求める簡略式を算出した。具体的には、Fig.9 で求めた平面性狂い、通り狂い限度値の組み合わせ、およびそ

の際の車両諸元、曲線諸元を変数とし、これらの関係を簡略化された式で表す。ここでは、輪重推定式の物理的な意味から、“軸ばね定数×平面性狂い”を目的変数、静止輪重比、カント、曲線半径、通り狂いと説明変数とする重回帰分析（サンプル数 600）を行い、線形回帰式を求めた（式(1)）。寄与率は、0.79 であった。残差の分布を Fig.12 示す。図から、簡略式による平面性狂いの限度値は 90% の確率で解析解の $\pm 6\text{mm}$ の範囲にあり、近似式としてはほぼ妥当な結果といえる。

式(1)によって、曲線半径、カント、静止輪重比、軸ばね定数の 4 つが既知の場合の、通り狂いと平面性狂いの限度値の組み合わせを容易に算出できるほか、通り狂い、平面性狂いの実測結果を用いて、その線区の推定脱線係数比が 1.2 を下回るかどうかの判定が容易となると考えている。

$$TWa = \frac{61.62\gamma - 0.11C + 0.034R - 0.28AL - 42.46}{K} \quad \dots (1)$$

TWa : 軸距許容平面性狂い [mm], K : 軸ばね定数 [MN/m]

γ : 外軌側静止輪重比, C : カント (設計値) [mm]

R : 曲線半径 (設計値) [mm], AL : 通り狂い [mm]

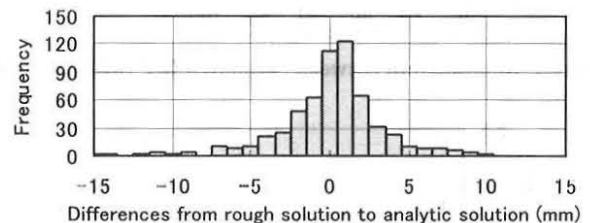


Fig.12 Histogram of differences between rough and analytic solution about "TWa"

5. 結論

本研究において得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 車両諸元のうち、推定脱線係数比に及ぼす影響が大きいのは、静止輪重比と軸ばね定数である。また、この両者と推定脱線係数比との関係は、他の条件を固定した場合、線形の式となる。
- (2) 軌道側条件のうち、推定脱線係数比に及ぼす影響が大きいのは、曲線半径、カント、前軸位置通り狂いおよび軸距平面性狂いである。これらの変数と推定脱線係数比との関係は、他の条件を固定した場合、線形の式となる。
- (3) 推定脱線係数比=1.2 となる通り狂いと軸距平面性狂いとの関係は、他の条件を固定した場合、線形の式となる。
- (4) 以上の関係を用いて、推定脱線係数比=1.2 となる場合の、6 種の変数の関係を示す簡略評価式を求めた。この式によって、曲線諸元、車両諸元が定められた場合の軌道狂いの限度値や、軌道狂い検測結果の評価が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 運輸省鉄道事故調査委員会：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，2000.10.26
- 2) 内田他：輪重横圧推定式による乗り上がり脱線に対する安全性評価，鉄道総研報告，Vol. 15, No.4, 2001.4
- 3) 大澤他：軌道狂いを考慮した輪重横圧推定式の走行試験による検証，第 58 回土木学会年次学術講演会，IV-058, 2003.9