

乗り上がり脱線に関する研究



飯島 仁* 山下 祐史* 大野 潔*

脱線に関する研究は、脱線事故の原因究明及びその対策という形で昔から実施され、現在の管理基準等に反映している。また2000年3月に発生した地下鉄日比谷線での脱線衝突事故の対策として、推定脱線係数比という新しい指標が提案され、脱線に影響する因子やメカニズムがかなり研究されている。ここでは、この推定脱線係数比に影響する因子ごとに過去の試験等の結果より、台車形式やフランジ塗油など、それぞれの因子がどの程度影響しているか、乗り上がり脱線防止に効果のある因子は何かを明確にした。

●キーワード：推定脱線係数、限界脱線係数、アタック角、輪重、横圧、軌道変位

1 はじめに

脱線事故の研究は、昭和38年に発生した鶴見駅構内での脱線衝突事故を契機に、主に貨車の脱線について研究が行われ、各種の基準値の設定や対策が実施された。しかし、ここ数十年は、ボルスタレス台車や各種の軸箱支持方式の車両、軽量車両の登場など新しい車両の導入と並行して、構内等の急曲線で旅客車の脱線が発生するようになった。

2000年3月に発生した地下鉄日比谷線の脱線事故後、運輸省(現国土交通省)に設置された事故調査検討会において、急曲線部における低速走行時の乗り上がり脱線に関して、現車試験等により乗り上がり脱線メカニズムに関する検討が行われ、新たな評価手法として「推定脱線係数比」が提案された。この推定脱線係数比は、軌道や車両の条件から脱線係数を推定し限界脱線係数との比をとったもので、脱線に影響する因子を表している。この脱線に影響する因子を、過去の走行試験結果等から解析し、低速走行時の乗り上がり脱線防止について検討を行った。

2 乗り上がり脱線の評価方法

2.1 車輪とレール間に働く力

鉄道車両はレールの上を車輪が走行しているが、そのときの車輪とレールの接触点に働く力の様子を図1に示す。

車輪とレールの接触点に働く力 F は、垂直成分 P (輪重)

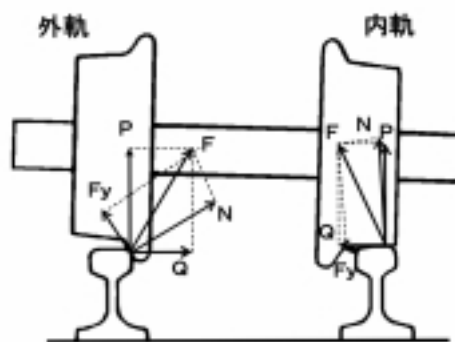


図1 車輪とレールの接触点に働く力

と水平成分 Q (横圧)に分けられる。また、接触点の接線方向の力 F_y (左右クリープ力)、法線方向の力 N (法線力)にも分けられる。曲線通過時は、輪軸は外軌側に偏倚して、外軌側の車輪はレールとフランジ接触するようになり、横圧が発生する。内軌側車輪の横圧輪重比(κ)および左右クリープ力法線力比(F_y/N)は、曲線半径がさらに小さくなり、あるところまでいくと上昇が止まる、これを飽和状態といい、この時の κ 又は F_y/N が内軌側接触面での摩擦係数に相当すると言われる。外軌側の接触点に働く力で、乗り上がりに対する脱線の限界値を考え、内軌側の接触点に働く力が、横圧に大きく影響する。

2.2 推定脱線係数比

急曲線を低速で走行する車両の乗り上がり脱線に対する因子には、車両側では静止輪重アンバランスや軸ばね、枕ばねの硬さなど、線路側では曲線半径、カント、軌道変位などがあげられ、その他、走行速度や車輪とレール間の摩

擦係数にも大きく影響される。日比谷線脱線事故調査検討会の報告では、急曲線部における低速走行時の乗り上がり脱線に関して、線路・車両について、脱線に対する余裕度や各種の安全対策の効果の評価のため、新たな評価手法として「推定脱線係数比」が提案された。

$$\text{推定脱線係数比} = \frac{\text{限界脱線係数}}{\text{推定脱線係数}} \quad \text{----- (1)}$$

推定脱線係数比は式(1)で求まり、この式の限界脱線係数とは、車輪がレールから浮き上がり始めるときの脱線係数で、これ以上の脱線係数にならなければ脱線しない値と言われている。また、推定脱線係数とは、実際に車両が走行する際に発生すると考えられる脱線係数を計算式から推定した値である。この推定脱線係数比が安全率を含めて1.2以上であれば、安全とされている。

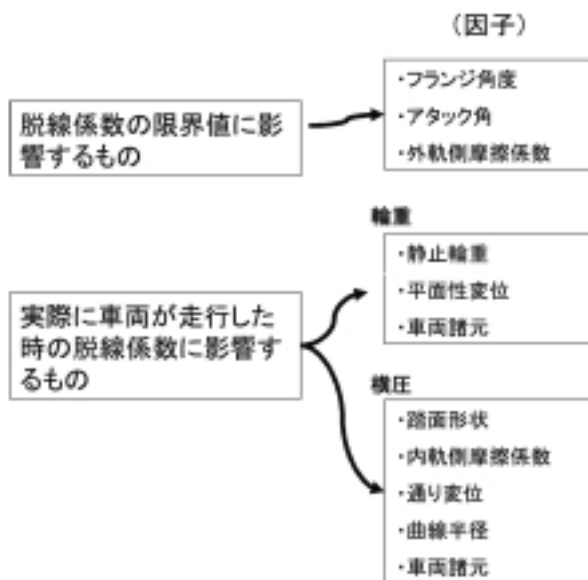


図2 脱線に影響する因子

乗り上がり脱線を考える上で、脱線係数の限界値に影響するものと、実際に車両が走行した時に発生する脱線係数に影響するものに分けて表したものを図2に示す。以下主な因子について説明する。

2.3 脱線係数の限界値に影響するもの

脱線係数の限界値は、図1に示した外軌(図の左)側車輪のフランジ接触による力のつりあいより求められ、車輪に横方向の力が加わり、さらに大きな力が働くと、車輪が上昇し、車輪とレールの接触点はフランジとなる。さらに横

方向の力が大きくなると乗り上がり脱線となる。フランジ角度(α)の点で車輪とレールが接触し、つりあった条件を表わしたものが、式(2)の「ナダル」の式である。

$$\left(\frac{Q}{P}\right) = \frac{\tan \alpha - \mu_e}{cr + \mu_e \tan \alpha} \quad \text{----- (2)}$$

式(1)の限界脱線係数は、フランジ角度と摩擦係数によって求まる。 μ_e は等価摩擦係数(クリープ力の飽和特性を考慮し補正した摩擦係数)で、アタック角が小さく、クリープ力が飽和していない場合限界脱線係数は大きくなるので、飽和特性を考慮してアタック角により補正すると、アタック角と等価摩擦係数の関係は図3のようになる。

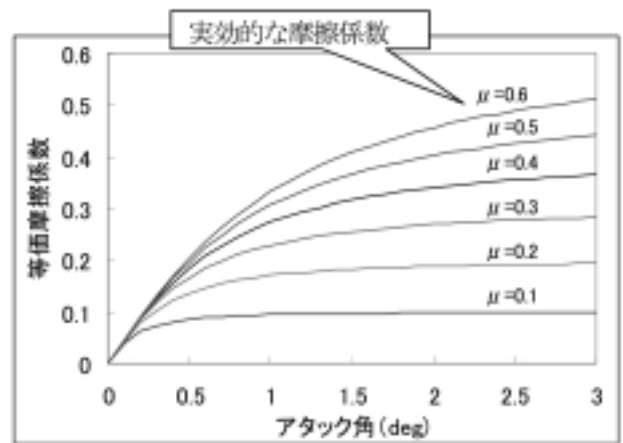


図3 アタック角と等価摩擦係数

脱線係数の限界値を考える場合、限界脱線係数の考え方の様に、クリープ力の飽和特性を考えると、影響する因子は、フランジ角度、外軌側の摩擦係数、アタック角である。

2.3.1 フランジ角度

図4に式(2)のナダルの式によって計算した限界脱線係数を示す。摩擦係数が小さいほど、フランジ角度が大きいほど限界脱線係数が大きくなり、安全性が向上する。現在

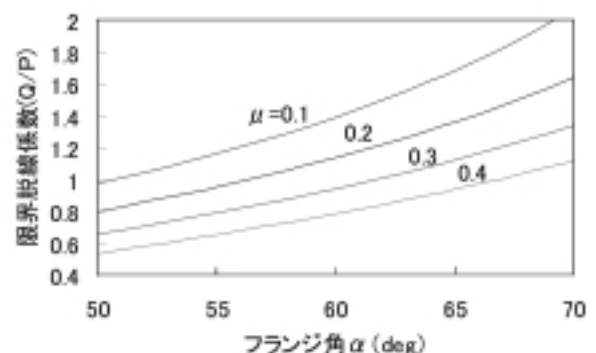


図4 フランジ角度と限界脱線係数

はフランジ角度60度の基本踏面から、フランジ角度65度の修正円弧踏面になっている。

2.3.2 アタック角

限界脱線係数は、アタック角が大きくなりクリープ力が飽和した時が一番小さくなる。図3のアタック角と等価摩擦係数のグラフからもアタック角が限界脱線係数に影響することがわかる。アタック角は曲線半径や軌道変位のほか軸箱支持剛性や台車の旋回抵抗など台車の仕様によっても変化する。

2.3.3 外軌側の車輪とレール間の摩擦係数

外軌側の車輪(フランジ)とレールの摩擦係数は、フランジへの塗油や天候、列車頻度により変化するが、摩擦係数が大きくなるメカニズムは解明されていない。

2.4 脱線係数に影響するもの

脱線係数を悪くするのは、輪重の減少と横圧の増加である、輪重の減少に影響する因子と、横圧の増加に影響する因子をそれぞれ分けて説明する。

2.4.1 輪重の減少に影響する因子

輪重の減少に影響する因子は、静止輪重比、軌道の平面性変位、軸ばね定数などである。旅客車の静止輪重比は現在15%以下に管理されている。図5に示す緩和曲線のように、軌道に平面性変位があると、輪重の減少が発生する。この輪重の減少は車両の軸ばね定数や空気ばねの特性によっても変化する。

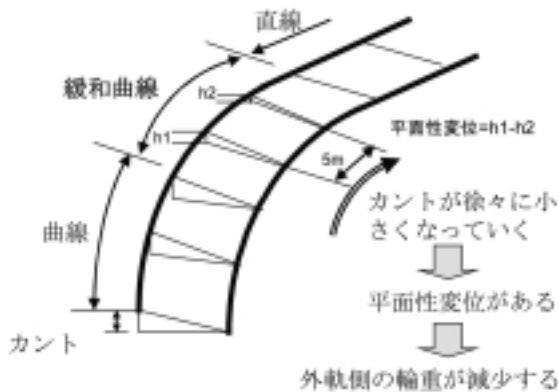


図5 平面性変位

2.4.2 横圧の増加に影響する因子

横圧の増加に影響する因子は、車輪の踏面形状、内軌側車輪とレールの摩擦係数、軌道の通り変位、曲線半径、車両諸元などである。

3 乗り上がり脱線に関する研究

前項は、乗り上がり脱線に影響する因子について述べたが、実際に車両が走行した時の値はどうか、走行試験等の測定結果をもとに説明する。

ここ10年間の乗り上がり脱線に関する弊社の研究を図6に示す。その間実施した主な走行試験は図7のアタック角測定、図8の電車区構内走行試験、図9の台車試験装置による試験である。

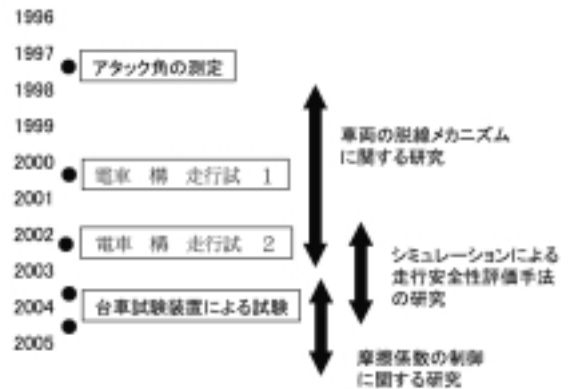


図6 乗り上がり脱線に関する研究



図7 アタック角測定装置による測定



図8 電車区構内走行試験でのPQ測定



図9 台車試験装置による試験

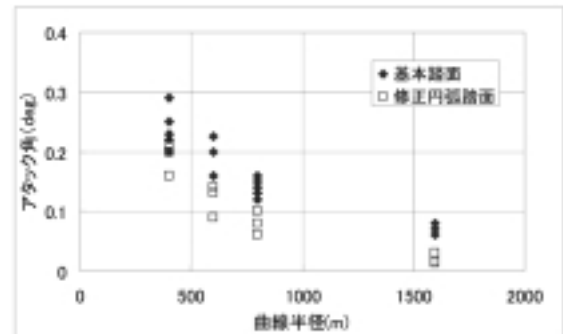


図12 踏面形状とアタック角

3.1 脱線係数の限界値に影響する因子

3.1.1 アタック角の影響

アタック角測定装置の開発(図7)を行い、台車構造及び踏面形状の差によるアタック角の測定を実施した。

アタック角は軸箱支持装置の種類(図11)、台車の構造、車輪踏面形状などにより変化し、ペダスタル方式の軸箱支持装置、ボルスタ付台車の167系と軸ばねゴム方式の軸箱支持装置、ボルスタレス台車の211系での曲線半径400mでのアタック角の測定結果を図10に示す。ボルスタレス台車のアタック角が大きい結果となった。なおアタック角の差は軸箱支持装置の違いによるものか、ボルスタの有無によるものかは不明である。

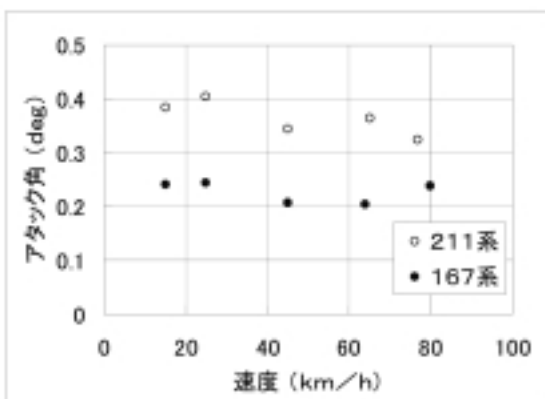


図10 台車構造とアタック角



ペダスタル方式
167系

軸ばねゴム方式
211系

図11 167系と211系の軸箱支持装置

また、車輪踏面形状による差を、ボルスタ付台車の485系を使用しアタック角の測定を実施した。基本踏面と修正円弧踏面によるアタック角の測定結果を図12に示す。修正円弧踏面のアタック角が小さい結果となった。

3.1.2 外軌側フランジ塗油の影響

台車試験装置による試験では、外軌側フランジに塗油した場合と、通常の乾燥状態を比較した。脱線に対する影響の大小として車輪上昇量で比較したものを図13に示す。フランジ塗油を行った場合、4 mm以上に車輪が上昇せず、乗り上がり脱線に効果があることがわかる。

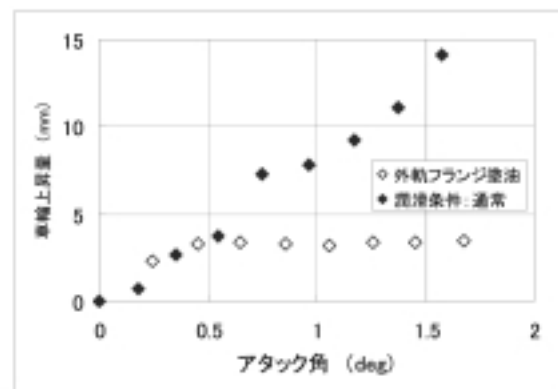


図13 フランジ塗油の影響

3.2 輪重減少に影響する因子

3.2.1 平面性変位による影響

205系による電車区構内走行試験において、平面性変位と平均輪重からの輪重減少率の関係を図14に示す。「2.4.1 輪重の減少に影響する因子」で説明した通り、平面性変位による輪重減少への影響が明確に見られる。

3.3 横圧の増加に影響する因子

3.3.1 車輪踏面形状による影響

3.1.1のアタック角の測定時の外軌側の横圧について、

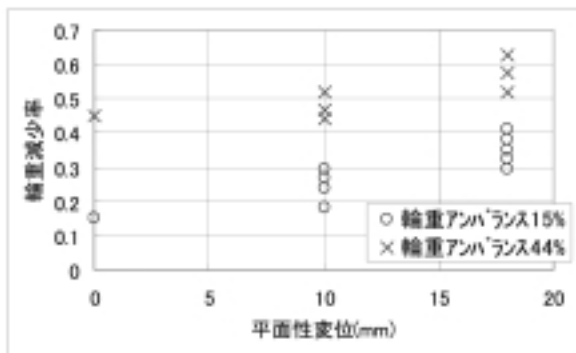


図14 平面性変位と輪重減少率

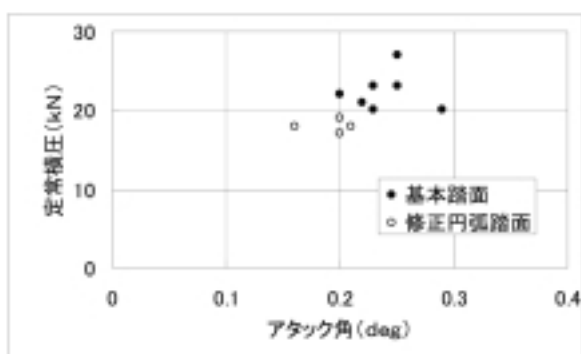


図15 踏面形状と横圧

485系による測定結果を図15に示す。曲線半径400mでの車輪踏面形状の違いによる横圧は、踏面形状の差から生じるアタック角の違いがあるので、アタック角が同じ場合は明確でないが、修正円弧踏面がやや小さい結果となった。

3.3.2 曲線半径による影響

曲線通過を模擬し台車試験装置(図16)でアタック角を変化させて試験を実施した。

台車試験装置によるアタック角と横圧の試験結果を図17に示す。潤滑条件が通常の時の曲線半径であるアタック角と横圧の関係で、曲線半径が小さく(アタック角が大きくなり、0.6度(半径200m相当)で横圧は一定になる。

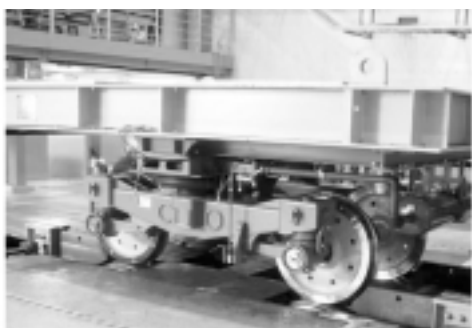


図16 台車試験装置での試験状況

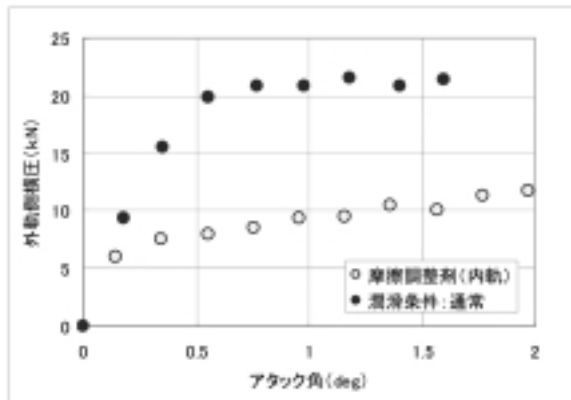


図17 台車試験装置による試験結果

3.3.3 内軌側の車輪とレールの摩擦係数による影響

図17の摩擦調整剤(内軌)のグラフは、台車試験装置を使用し内軌側に摩擦調整剤を使用した時の効果を確認したもので、通常状態と比較すると横圧の低減効果が見られる。

3.3.4 軌道変位(通り変位)による影響

図18は205系による構内走行試験の結果で、曲線半径200mでの通り変位による横圧の変化はわかるが、顕著な差は見られなかった。

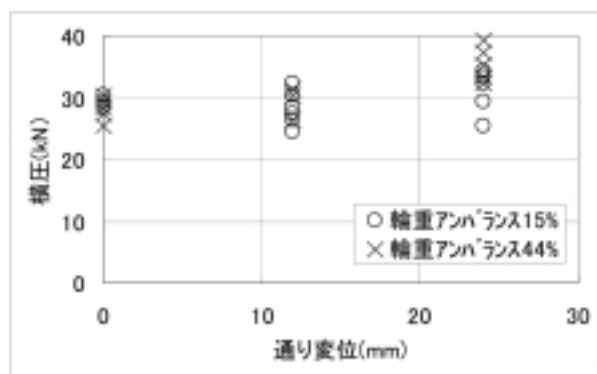


図18 通り変位と横圧

3.4 まとめ

過去の走行試験等の結果から、台車構造によるアタック角の違い、外軌側フランジ塗油、内軌側の車輪とレールの摩擦係数は、条件の差が脱線防止に対し大きく影響する因子である。また、踏面形状の差はそれほど明確な差は見られなかった。

4 シミュレーションによる評価

前項は現車試験等による結果からそれぞれの因子につ

いて影響度を表したが、軸ばね定数を変更した場合どのように変化するかなど、ある特定の因子だけ変更した場合の影響や、摩擦係数を大きくするといった、現車試験では設定不可能な条件での評価をする場合、シミュレーションが有効である。

図19は摩擦係数を大きな値に仮定し、厳しい条件でシミュレーションを実施し、乗り上がり脱線に対する限度を輪重アンバランスと平面性変位、曲線半径で表したもので、輪重アンバランスと平面性変位には相関があるといえる。

実際の乗り上がり脱線は、23、24で説明した各因子が競合発生する、車両の輪重アンバランスと軌道の平面性変位の関係の様に、相関がある場合、それぞれ独立して管理値や限度値を決定するのではなく、相関を考慮して、乗り上がり脱線に対し余裕の少ない厳しい条件の箇所や車両に絞って対策を実施することが可能となる。

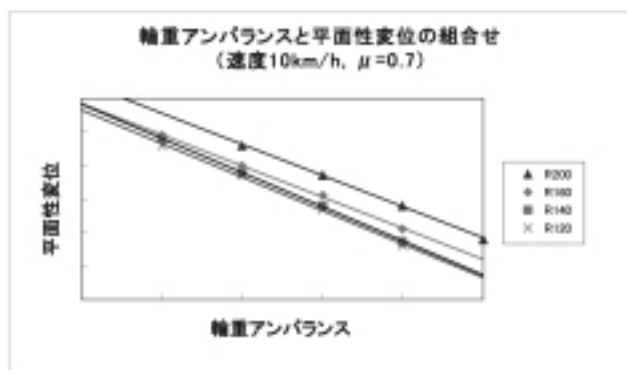


図19 シミュレーションによる評価

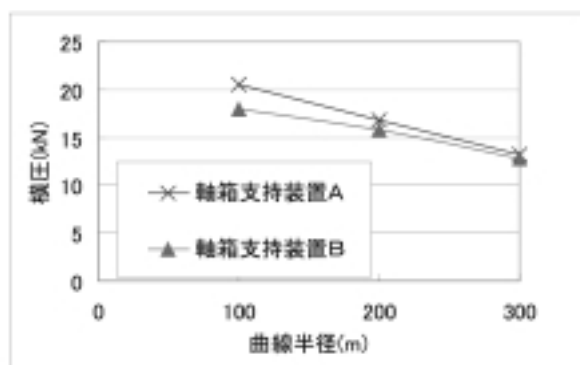


図20 軸箱支持装置と横圧

また、3.11で説明した167系と211系の例のように、違う車両で比較した場合、結果の差が何の影響なのか明確にできないが、シミュレーションでは図20に示すように軸箱支持剛性のみを変化させた時の差を明確に比較することが

可能であり、最も良い車両諸元を見出すことができる。

5 おわりに

乗り上がり脱線防止の対策として、摩擦調整剤による内軌側摩擦係数の低減、フランジ塗油による外軌側フランジの摩擦係数の低減は、導入効果が期待できるが、今後は、脱線防止対策として導入するにはどのように管理することが必要か、またアタック角が現在より小さくなる台車(最も良い軸箱支持剛性や操舵台車など)の研究など、乗り上がり脱線の防止に取り組んでいる。

参考文献

- 1) 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軸に関する調査報告書、2000.10
- 2) 急曲線における低速域での乗り上がり脱線等の防止に関する検討会報告書、国土交通省、2004.3