

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

A Study to Prevent the Wheel-Climb Derailment
on the Low Speed Ranges



飯島 仁*



吉田 尚**



鈴木 宏輔*



安田 陽一*

The wheel-climb derailment is considered to be profoundly influenced by the friction coefficient between the wheel flange and the rail. However, the coefficient is so variously changed by the surface condition of a wheel and a rail, the atmospheric condition and the wheel passing frequency on the rail, and it is also deemed to be so hard to directly measure the coefficient that the process of the derailment have not been made clear yet. The wheel-climb derailments were really actualized by the authors using a practical EMUs which equipped with newly lathed wheels. On the cause of the experiments, the EMUs were repeatedly operated on the sharp curve track and such value as the derailment-coefficient, the attack angle of the wheel to the rail and the wheel lift-up value from the rail was continuously measured under the critical wheel-climb condition. The results of the experiments were reported in the paper.

●キーワード：乗り上がり脱線、車輪削正、等価摩擦係数、限界脱線係数

1. はじめに

2008年2月にJR東日本尾久駅構内の側線用8番分岐器リード部で脱線事故が発生した¹⁾。再現試験の結果、車輪を削正してから間もない車両が、急曲線部や分岐器のリード部を繰り返し走行することで、乗り上がりが発生し、車輪削正が乗り上がり脱線に影響することが判明した。これは、車輪・レール双方の表面が摩耗し、表面の不純物が剥落することで金属面同士が接触し、摩擦係数を増大させ限界脱線係数が低下することが主因²⁾と考えたが、この調査の過程で正確な摩擦係数を把握することはできなかった。

しかし、車輪削正後の車両が急曲線部を走行したときの限界脱線係数を把握するためには、摩擦係数がどの程度まで大きくなるか明らかにしなくてはならない。そこで、本研究では、このような摩擦係数が増大する条件を再現し、その時の摩擦係数を把握することを目的に、休止中の軌道を急曲線の実験線として整備し、実車による実験を行った。その結果、車輪削正後の車両が繰り返し走行すると、接触面に多量の金属摩耗粉が発生して凝着摩耗³⁾の状態が発生、車輪に連続的な乗り上がり現象が発生した。その時の輪重、横圧、フランジ角度等を測定することで車輪フランジとレール間の摩擦係数の最大値とその時の限界脱線係数を求めることができた。

2. 乗り上がり脱線の要因

これまでの研究で判明している、乗り上がり脱線の要因について解説する。

2.1 輪重と横圧

車輪とレール間に働く力のうち垂直の成分が輪重（記号でP）、横方向の成分が横圧（記号でQ）、横圧と輪重の比が脱線係数で、脱線に対する安全性の評価に用い、脱線係数が大きくなり限界脱線係数（2.2参照）を超えると脱線に対し危険な状態と評価する。（図1）

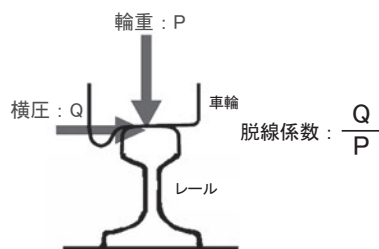


図1 輪重と横圧

2.1.1 輪重が小さくなる要因

(1) 静止輪重アンバランスが生ずる要因

静止輪重アンバランスとは、車両が静止状態での左右の輪重比のことをいう。車体は図2に示すように軸ばねや空気ばねに支えられており、各ばねの高さ調整やばね定数のばらつき、車体や台車のねじれなどにより、ばねに作用する力が左右で均等にならずアンバランスが生じる。

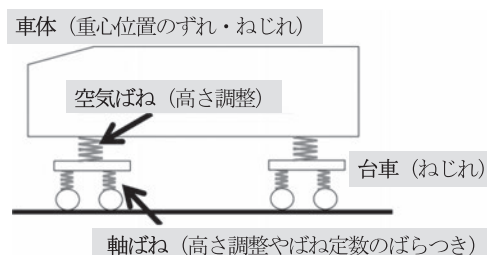


図2 静止輪重アンバランスの要因

(2) 軌道のねじれやカントによる輪重減少メカニズム

緩和曲線や平面性変位のように軌道のねじれがある場所を走行する場合、車輪4輪にかかる輪重バランスが変化し、図3のようにレールの高さが低くなっている箇所の輪重が減少する。このような箇所では空気ばねの給排気動作によりさらに輪重が減少する可能性がある。

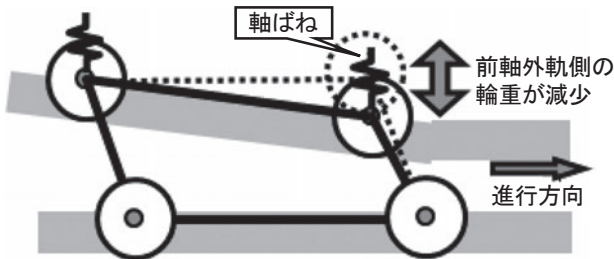


図3 軌道のねじれによる輪重減少

また、図4のように、大きなカントの箇所を低速で走行する場合、車体が内軌側に傾き外軌側の輪重が減少する。

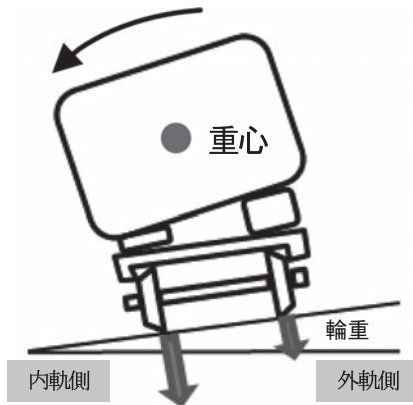


図4 カントによる輪重減少

静止輪重アンバランスにより輪重が軽い部位は、軌道のねじれやカントにより、さらに輪重が小さくなり脱線に対し不利となる。

2.1.2 横圧が大きくなる要因

(1) 輪軸による横圧発生メカニズム

1輪軸で考えた場合の横圧発生メカニズムを図5に示す。曲線では外軌側の車輪はレールに対してアタック角が生じる。アタック角は曲線半径が小さくなると大きくなり、輪軸は外軌側に移動しフランジにより横移動を押さえられるので、内軌側の車輪とレール間で横方向にすべりを生じながら走行する。この横すべりによって、摩擦力が発生し、この摩擦力を横クリープ力という。内軌側の車輪とレール間の摩擦係数が大きくなると、横クリープ力も大きくなる。この摩擦係数は列車の頻度や温度、湿度など環境条件によって変化し、列車頻度が多く、晴れて乾燥した条件で大きくなる。⁴⁾

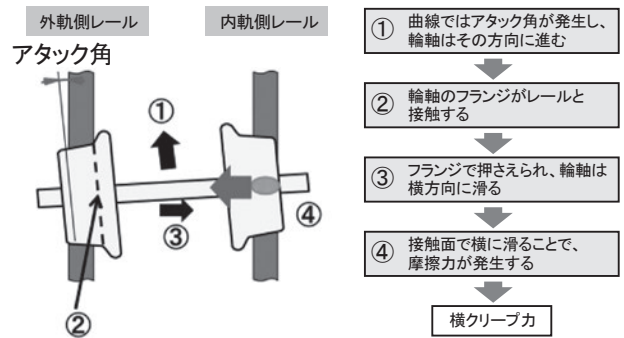


図5 輪軸による横圧発生メカニズム

(2) 台車による横圧発生メカニズム

1台車で考えた場合の横圧発生メカニズムを図6に示す。曲線では前項の「内軌側の横クリープ力①」のほかに台車が回転することで、空気ばねの前後支持剛性による「台車の旋回抵抗②」とメカニズムは把握できていないが、進行方向2軸目の車輪が内軌側に寄ることで、左右の車輪径差ができず、そのため車輪は前後に滑りながら走行するので、前後にすべる際の摩擦力である「縦クリープ力③」が働き、②③により台車に旋回モーメントが働き、これらの力が進行1軸目の外軌側に横圧⑤として作用する。台車の旋回モーメントは、急曲線での車体と台車との相対角度の増加や2軸目の車輪とレール間の摩擦係数の影響で変化する。なお、軌道変位によっても横圧は変化する可能性がある。

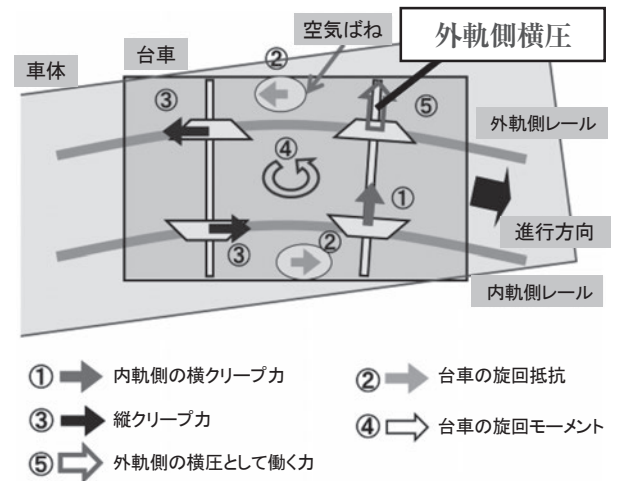


図6 台車による横圧発生メカニズム

2.2 限界脱線係数

乗り上がり脱線とは図7のような状態が継続し、車輪フランジがレールの上に乗り上がることで脱線することをいう。車輪とレールの間に働く力を、レール断面で表したものを図8に示す。「摩擦力 μN 」より「滑り下がる力 T 」が大きい場合には、図7の状態は継続せず滑り下がるので安全である。滑り下がらない状態が継続すると、乗り上がり脱線にいたる可能性が大きくなる。

「摩擦力 μN 」が「滑り下がる力 T 」より大きくなる ($T < \mu N$) と滑り下がりしなくなり、車輪の回転により乗り上がり脱線にいたる。 $T = \mu N$ のつり合い状態が脱線に対する限界値であり、横圧 Q と輪重 P の比で表すと式(1)のように表すことができ、この値が限界脱線係数である。このとき摩擦係数は図8のようにレール方向は考慮せずレール断面の平面で考えているので摩擦係数とは区別し等価摩擦係数 (以下「 μ_e 」) という) と表す。

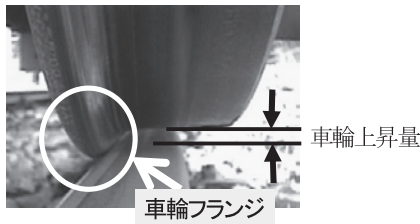


図7 乗り上がり開始状態

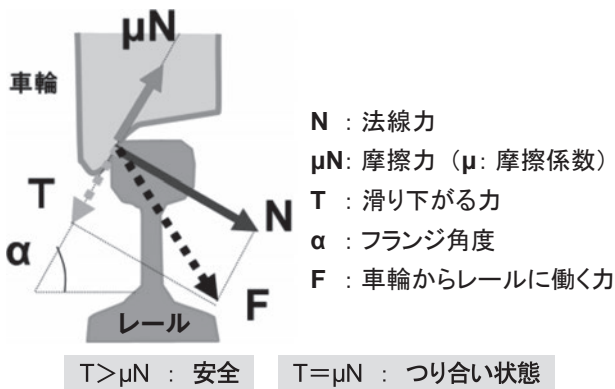


図8 車輪とレールの関係

限界脱線係数

$$\left(\frac{Q}{P}\right)_{cr} = \frac{\tan \alpha - \mu_e}{1 + \mu_e \tan \alpha} \quad \dots \dots (1)$$

3. 車輪フランジとレール間の摩擦係数把握

3.1 実験設備および実験方法

3.1.1 実験軌道

走行試験は、曲線半径100mおよび110mの実験用軌道(図9)を設置し、実験用車両(ボルスタレス台車、修正円弧踏面の標準的な通勤電車の付随車)を使用し、過去に乗り上がり脱線が発生した時期を参考に、比較的低湿度な気候となる1月から2月にかけて、15km/h以下の低速で実験車両を軌道モーターカーでけん引し、繰返し走行実験を実施した。(図9)

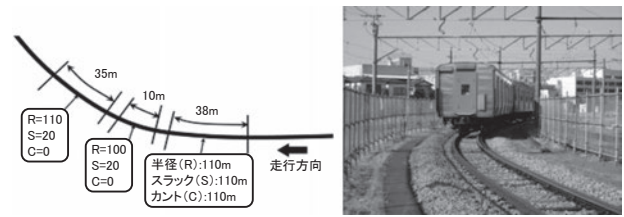


図9 実験用軌道と走行実験

3.1.2 測定項目

以下の項目について測定を行った。

- (1) 車上測定：輪重、横圧、前後接線力、アタック角の連続測定⁵⁾(以上は先頭台車2軸)、車輪上昇量(図7)(先頭軸のみ)
- (2) 地上測定：外気温度、湿度、レール温度測定
- (3) 接触面の状態観察：車輪およびレールの断面形状の測定、車輪およびレール表面の観察

3.1.3 条件設定

測定用輪軸2軸の車輪を削正し、削正直後の状態から実験を開始した。フランジの摩耗による角度の変化を最小とするため実験期間の中間で内外軌の車輪を振り替えた。また、曲線中で乗り上がり状態を再現するため、空気ばね高さ及び軸ばねライナー調整により20~50%の輪重アンバランスを意図的に付加し、脱線係数を大きくして、フランジ角度(α)が 65° 一定の箇所接触するようにした。

3.2 等価摩擦係数の算出

3.2.1 等価摩擦係数(μ_e)の理論式

限界脱線係数を求めるには、 μ_e の値を把握する必要がある。この μ_e はアタック角により変化すると考えられ、式(2)の様な理論式で表される⁶⁾、車輪とレール間の相対角度(アタック角)に対して図10の様な飽和特性を示し、アタック角が大きくなると μ_e は摩擦係数(動摩擦係数)に漸近するとされている。

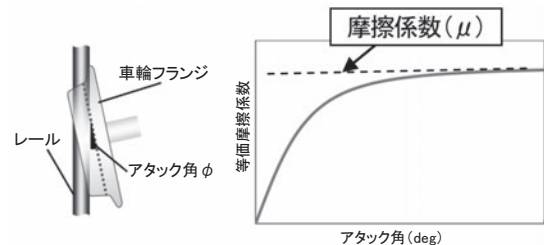


図10 アタック角に対する μ_e の飽和特性

等価摩擦係数の飽和特性を表す理論式

$$\mu_e = \mu \times \frac{\Phi K_{22} / N}{\{\mu^\beta + (\Phi K_{22} / N)^\beta\}^{1/\beta}} \quad \dots \dots (2)$$

Φ : アタック角、 μ : 外軌側フランジ部の摩擦係数、 N : 法線力
 β : 飽和特性を表す指数、 K_{22} : 横クリープ係数

3.2.2 等価摩擦係数の算出方法

図7のように車輪がレールに乗り上がった状態で走行している場合に、車輪上昇量がほぼ一定に推移している状態では、図8のつり合い状態を満足しているといえる。このとき、脱線係数は式(1)の限界脱線係数と一致したと考えられるので、その瞬間の輪重・横圧・フランジ角度を測定して、式(1)より μ_e を求めることとした。⁷⁾

3.2.3 測定結果

前項により求めた μ_e とアタック角の関係を図11に示す。 μ_e は気温、湿度等の環境や、繰返し走行回数などで大きく変化するためばらつきがある、アタック角が 1.0° での μ_e の最大値は0.42、アタック角が 1.2° での μ_e の最大値は0.44となった。また、 μ_e の最大値を通る曲線を引くと、飽和特性を示すと考えられる傾向があることを実験により確認できた。

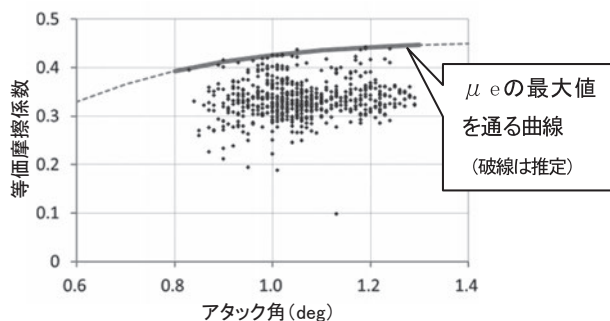


図11 等価摩擦係数測定結果

4. 限界脱線係数の算出

図11に示した μ_e の近似曲線により、限界脱線係数を求めると図12のような結果となった。参考として、従来からの目安値⁸⁾である0.95をグラフに示した。またアタック角に相当する曲線半径および分岐器はアタック角連続測定装置により測定した結果⁵⁾から求めたものである。

この結果から、車輪削正後に μ_e が大きくなった条件を考慮すると、半径150m以下の急曲線や8番分岐器のリード部では、従来からの目安値(0.95)より厳しい値となった。

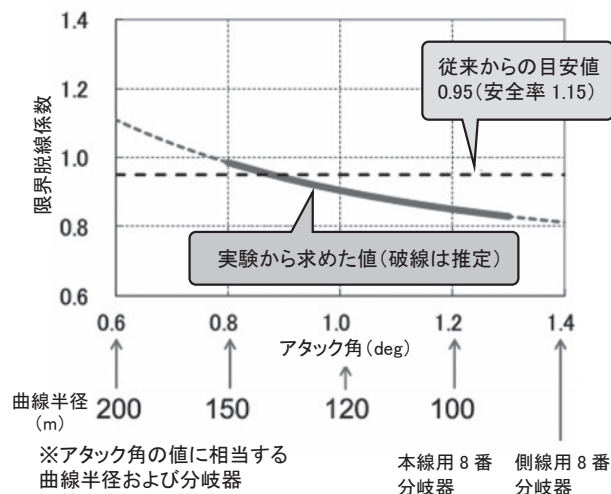


図12 限界脱線係数

5. 結論

乗り上がり脱線に深く関与するとされる車輪削正後の車両が急曲線を走行したときの車輪とレール間の摩擦係数について、実車両により半径100mと110m急曲線を走行させて乗り上がり状態を再現させ、その状態の下において μ_e の最大値を求めることができた。

また、車輪削正後に μ_e が大きくなった条件を考慮したときの、限界脱線係数を算出することができた。

車輪削正後の車両が走行する急曲線や分岐器では、これまでの目安値より限界脱線係数が小さくなり、限界脱線係数を超過する場合は、脱線防止ガードの設置やレールや車輪フランジに塗油するなど摩擦係数を下げる対策が必要であることが判明した。

参考文献

- 1) 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書、東北線尾久駅構内列車脱線事故(2008)
- 2) 片折暁伸、土井賢一、飯島仁、桃崎秀二、松本重夫：のり上がり脱線の根絶を目指して-第1報-、第16回鉄道技術連合シンポジウム、pp.729-732 (2009)
- 3) 中原綱光：凝着摩擦の基本メカニズムと摩擦の制御、第7回鉄道技術連合シンポジウム、pp.7-8 (2000)
- 4) 加藤 幸夫、片折 暁伸、米澤 秀剛、田村 大輔、飯島 仁、堀岡 健司：のり上がり脱線の根絶を目指して-第3報-第18回鉄道技術連合シンポジウム、pp.189-190 (2011)
- 5) 片折暁伸、土井賢一、飯島仁、桃崎秀二、堀岡健司：のり上がり脱線の根絶を目指して-第2報-、第17回鉄道技術連合シンポジウム、pp.621-624 (2010)
- 6) 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、事故調査検討会(2000)
- 7) 飯島仁、土井賢一、加藤幸夫、田村大輔、日沖由理香、堀岡健司：のり上がり脱線の根絶を目指して-第5報-、第19回鉄道技術連合シンポジウムpp.691-694 (2012)
- 8) 鉄道総合技術研究所：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説、pp.91、(1993)