

乗り上がり脱線事故撲滅に向けた研究開発



JR東日本研究開発センター 安全研究所 大野 潔

世界で初めて鉄道が登場した1825年から180年近く、日本に鉄道が開通した1872年から130年も経った現在でも脱線（特に複数の要因が重なって起こると想定される乗り上がり脱線）は発生しています。脱線は、その被害が人命に直結する可能性が大きいため、撲滅しなければなりません。従来から脱線係数を主とした走行安全性の評価方法が確立していますが、より現実に即した評価方法やその発生メカニズムの解明のためにJR東日本で取り組んでいる研究開発の一部について紹介します。

1 はじめに

脱線事故の防止は、その被害が人命に直結する可能性が大きいため、鉄道事業者にとって非常に重要な課題の一つです。

脱線には、踏み切りでの自動車との衝突、落石との衝突、地震によるレール間（軌間）の拡大、車軸折損、列車のスピードオーバー等によるもののように原因が明確に特定できるもののほか、2000年3月に発生した地下鉄日比谷線中目黒駅付近での事故のように原因が一つに特定できず、車両と軌道の複数の要因が重なって起きたと想定されるものがあります。

前者については、特定の原因の対策を実施すればよいのですが、後者については原因そのものがいまだ解明されていない部分があり、その解明のために各種の調査研究等が必要な状況です。

2 脱線の形態

複数の要因が重なって発生すると想定される脱線は、その発生形態により次の3種類に分けられます。

乗り上がり脱線

アタック角（車輪とレールのなす角度、図1参照）がプラスの状態（進行方向で車輪のフランジがレールに乗り上がろうとする状況）で、車輪・レール間に横方向の力が発生し、車輪がレールを乗り上げて起こる脱線

すべり上がり脱線

アタック角がマイナスの状態、車輪がレールから離

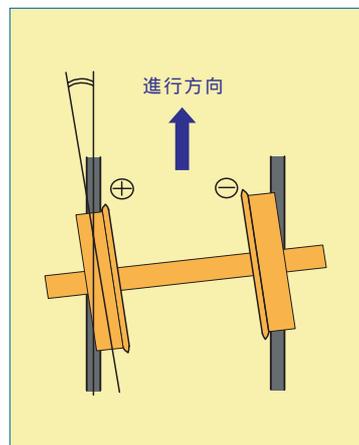


図1：アタック角（ ）

れる方向を向いているにも関わらず、それを越える大きな左右方向の力が働くことにより車輪がレールをすべり上げて起こる脱線

飛び上がり脱線

急激な左右方向の力により、車輪がレールに衝突して起こる脱線

以上の中で、最も起こる可能性が高いのが乗り上がり脱線で、前述の日比谷線で発生した事故もそれに該当します。そこで、ここでは乗り上がり脱線について述べることにします。

乗り上がり脱線は、図2の印部のように最初に車輪のフランジがレールの肩部（ゲージコーナ部）に接触し（ ）次いでフランジがレールに乗り上がり始め（ ）最終的に乗り上がりになります（ ）。

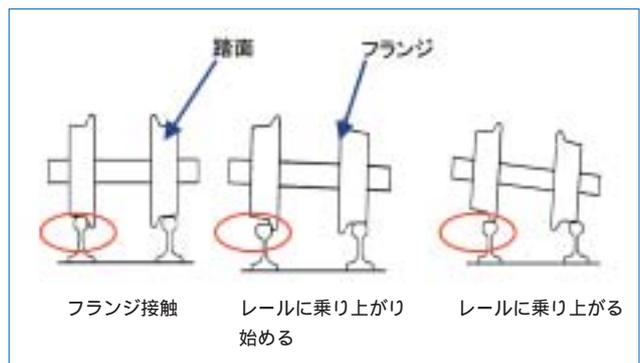


図2：乗り上がり脱線に至る過程

3 乗り上がり脱線の評価(走行安全性の評価)方法

3.1 車輪とレールの接触点に働く力

鉄道車両はレールの上を車輪が走行していますが、そのときの車輪とレールの接触点に働く力の様子を図3に示します。

車輪とレールの接触点に働く力 F は、垂直成分 P (輪重) と水平成分 Q (横圧) に分けられます。また、接触点の接線方向の力 fy を左右クリープ力といい、後述しますが乗り上がり脱線に影響があると考えられています。なお、図3は車輪のフランジがレールと接触している状態を示しますが、このときは接触角はフランジ角 となります。

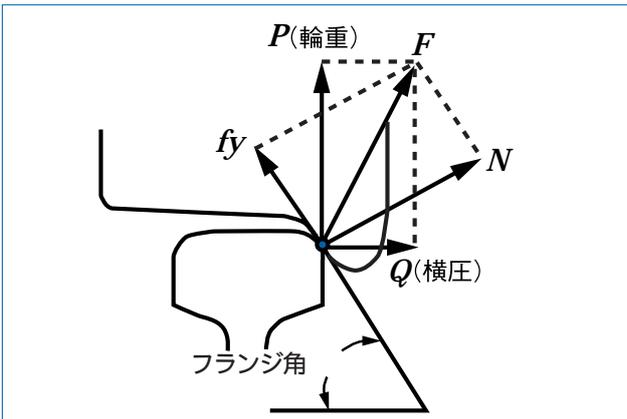


図3：車輪とレールの接触点に働く力

3.2 現在の評価方法

図3より、車輪とレールの接触点に働く力が釣り合っていると、 P 、 Q を使って、

$$P \sin \alpha - Q \cos \alpha = fy$$

$$P \cos \alpha + Q \sin \alpha = N \quad (N \text{ は接触点の法線方向の力})$$

が成り立ち、これらより

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha - fy/N}{1 + (fy/N) \tan \alpha}$$

となります。この Q/P を「脱線係数」といいますが、この Q/P は fy が大きいほど小さくなります。つまり、フランジで接触して釣り合っていることが脱線に対する限界と考えると、 fy が大きいほどより小さな Q/P で限界に近付くことになります。また、アタック角が増加すると fy は増加していきませんが、摩擦力を超えることはないと言われていいますので、 fy の最大値を摩擦力 μN (μ は摩擦係数) に置きかえると、 Q/P の最小値は、

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha}$$

となります。この式が脱線の限界値を示す「ナダルの式」と言われるものです。

輪重 (P) と横圧 (Q) は比較的簡単に測定できることから、従来から脱線係数が走行安全性の評価の指標とし

て扱われてきました。

図4にナダルの式による脱線係数の限界値 (限界脱線係数) を示します。摩擦係数 μ が小さいほど、また、フランジ角 α が大きいほど脱線係数の限界値は大きくなり、安全サイドになります。現在では、表1のように摩擦係数を0.3と仮定し、余裕を15%みて (限界脱線係数の0.85倍) 基本踏面 (フランジ角 60°) では0.8、修正円弧踏面 (フランジ角 65°) では0.95を目安値として走行安全性の評価を行っています。ただし、この値が15msec以上持続している場合を評価の対象としています。

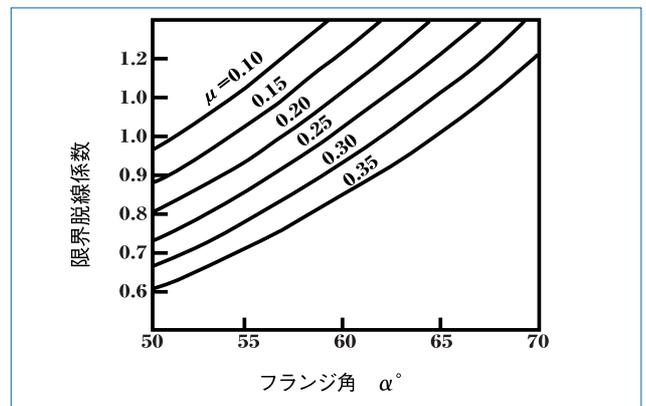


図4：ナダルの式による脱線係数の限界値

表1：フランジ角と脱線係数の目安値

	フランジ角	限界脱線係数 (摩擦係数を0.3と仮定)	脱線係数の目安値 (0.85 × 限界脱線係数)
基本踏面	60°	0.94	0.8
修正円弧踏面	65°	1.12	0.95

現在実施している走行安全性の評価は、輪重及び横圧が測定できる「PQ軸」という測定専用の輪軸を現車に装備して、脱線係数 (Q/P) を求めて前述の目安値と比較して行っています。脱線係数は、輪重と横圧の比であるため、図5のように輪重が大きいほど、また、横圧が小さいほど小さくなり、より安全になります。

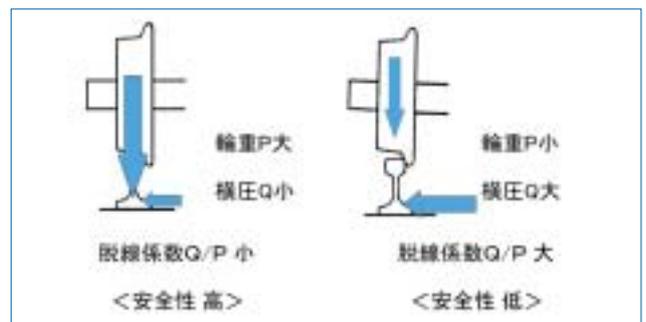


図5：脱線係数と走行安全性

なお、速度向上試験で行う走行安全性の判定では、脱線係数のほかに軌道破壊につながる著大輪重、著大横圧や静止輪重に対する輪重抜け割合も考慮しています。

3.3 新たな評価方法の研究

以上のように、現在では脱線係数によって走行安全性の評価を行っていますが、脱線に関する評価、特に乗り上がりに関する評価がすべて脱線係数で説明されるわけではありません。

図6はJR東日本で実施した側線用8番分岐器における現車走行試験で乗り上がりが発生したときの脱線係数、車輪上昇量（図7のように車輪踏面の基準位置からレール頭頂面までの鉛直距離をいいます）、フランジ接触時の左右クリープ力（計算値）の波形例を示します。これにより、脱線係数が大きいと乗り上がりが始まることは分かりますが、乗り上がりが発生した状態（図6の印部）では車輪上昇量は脱線係数との間には相関関係が見られず、左右クリープ力との間の相関が高くなっています。

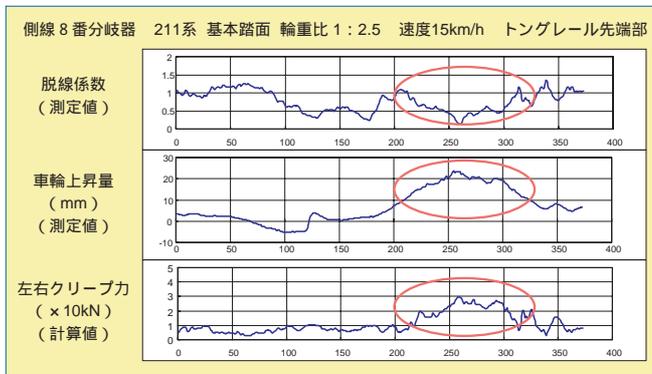


図6：脱線再現試験の波形例

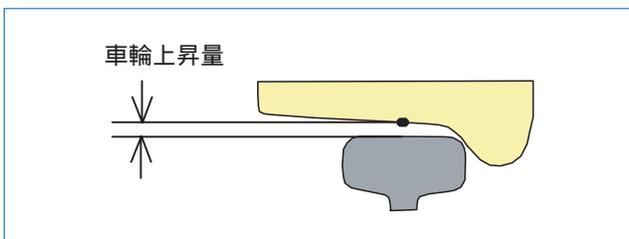


図7：車輪上昇量

また、図8は図6と同一の分岐器を速度を変えて何回か走行したときの左右クリープ力と車輪上昇量の関係を示したのですが、両者の相関は非常に高いものになっています。このため、より現実に合った評価方法や脱線の発生メカニズムの解明に左右クリープ力を考慮する必要があると考え、その研究を進めています。

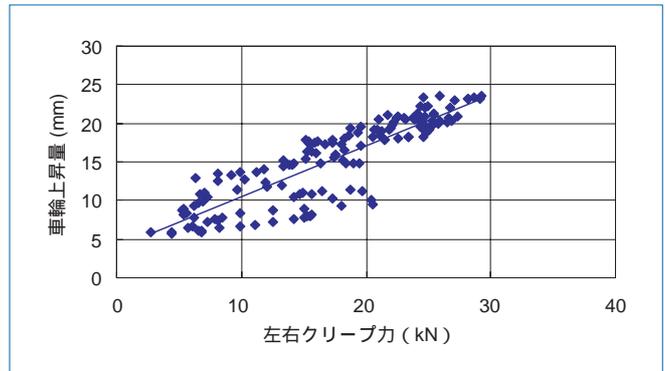


図8：左右クリープ力と車輪上昇率

そのためには、左右クリープ力を把握する必要がありますが、これまでは直接測定することはできませんでした。JR東日本ではこの左右クリープ力を車輪とレールの接触位置を測定することによって把握する方法を開発しました。その詳細は、本誌の29ページからの「脱線メカニズムの解明に向けた車軸・レール間接触位置連続測定装置の開発」に記述されています。

現在、その装置を活用して、左右クリープ力を把握することにより乗り上がり脱線に関する新たな評価方法等を検討しています。

4 乗り上がり脱線防止のための研究

3.2、3.3で述べた脱線係数や左右クリープ力の把握には、PQ測定軸やクリープ力測定装置が必要であるため、通常の走行時には把握できません。従って、日常の管理や設計時の諸元決定の際に乗り上がり脱線の危険性が排除できるようにする必要があります。

4.1 乗り上がり脱線の要因

地下鉄日比谷線の脱線事故に関する事故調査検討会の報告¹⁾では、「輪重にアンバランスのある車両（アンバランスが20%以上と想定）が急曲線を速度約15km/h程度の低速で走行中に外軌側の車輪が浮き上がり、さらにそれがレール面上へ乗り上がったために脱線した」とされ、再発防止策として、

車両の静止輪重比の管理（管理値は10%を努力目標とする）

軌道の平面性の管理

レールの研削形状の適正化（急曲線部ではゲージコーナーの上側を斜めに削らないこと）

車輪フランジ角の変更（65°～70°を検討）
 推定脱線係数比が1.2未満の曲線には脱線防止ガード
 を設置

の5項目が上げられています。

なお、静止輪重比とは、車両がレベル線（水平線）で
 静止した状態での同一軸の左右の平均輪重に対する大き
 い輪重の比をいい、表2のように表されます。また、静
 止輪重比は輪重アンバランスともいい、平均輪重に対す
 る左右各輪重と平均輪重の差の率をいいます。

表2：輪重比の例

静止輪重（右）	静止輪重（左）	静止輪重比 （静止輪重アンバランス）
50 kN	50 kN	1.0（0%）
45 kN	55 kN	1.1（10%）
40 kN	60 kN	1.2（20%）

また、推定脱線係数比とは、3.2で述べた「限界脱線係
 数」と車両条件と軌道条件から計算で求めた「推定脱線
 係数」の比をいい、脱線に対する余裕度を表したもので、
 その値が1以上なら脱線しませんが、安全率を20%見込ん
 で1.2を基準としています。

JR東日本でも過去の現車走行試験やシミュレーション
 等から、車両の静止輪重比と軌道の通り変位や平面性変
 位の相互の状況と脱線の間接関係を研究してきました。

その結果、前述した日比谷線の事故に対する防止策に
 もありますが、乗り上がり脱線の要因と考えられる項目
 とその影響は、

車両関係では、

- ・ 輪重比（輪重アンバランス）
 曲線で外軌側の輪重小 脱線係数が大
- ・ 車輪フランジ角
 フランジ角大 限界脱線係数が大
- ・ 車輪表面の粗さ
 摩擦係数大 横圧の増大（脱線係数が大）、限界脱線係
 数が減少
- 軌道関係では、
- ・ 通り変位（継目折れ（レールの角折れ）も含む）
 車輪がレールに衝突 横圧の増大（脱線係数が大）
 ＊通り変位とは、軌道の水平方向の「ずれ」（曲線区間
 においては、設定された線形に対するずれ）をい
 います。
- ・ 平面性変位
 3点支持で輪重抜けが起こりやすい 脱線係数が大

＊平面性変位とは、軌道面の「ねじれ」、即ち軌道の一定
 距離離れた2点間の水準狂い（左右レール高さの
 差）の差をいいます。緩和曲線部ではカントが変化
 するため、構造的な平面性変位が存在します。

と把握でき、現在、各項目の状況の組合せにより脱線係
 数や左右クリープ力がどのようになるかを実験やシミュ
 レーションから求めて、適切な管理値や設計の諸元等に
 反映する研究を進めています。

4.2 走行シミュレーションによる状況把握

脱線現象のメカニズムの解明や走行安全性の評価を効
 率よく行うために、コンピュータによる車両の走行シ
 ミュレーションを活用しています。

現車試験のデータと比較して精度の高いモデルを構築
 しており、その結果の一例を図9に示します。

今後はより実態に合ったモデルに改良して更に精度の
 向上を目指し、現車試験に依存しなくても状況把握が可
 能なシミュレーションの構築を目指します。

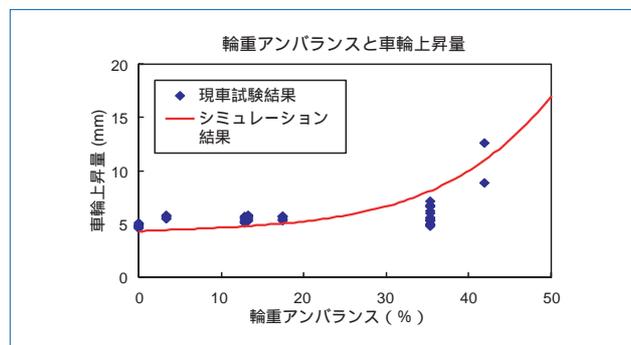


図9：現車試験結果とシミュレーション結果の比較一例

5 おわりに

乗り上がり脱線の原因はいまだ解明されていない部分
 がありますが、今までの知見や今後のシミュレーション
 を主体とした研究を実施することにより、乗り上がり脱
 線の発生を防止していきたいと考えています。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ
<http://www.mlit.go.jp/kisha/oldmot/kisha00/koho00/tetujiko22-6.html>