

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

車両の走行安全性を評価する

走行安全性のうち、もっとも代表的なものが脱線に対する安全性です。車両の脱線に対する安全性は、走行試験を行って車輪とレール間に作用する力を測定し、脱線係数と呼ばれる指標を用いて評価します。半世紀以上にわたり適用され実績を積んできた評価法ですが、その方法や目安値は決して固定的なものではなく、走行実態を反映させるために、あるいは事故を契機として、少しずつ見直しが行われてきています。



石田 弘明
Hiroaki Ishida
鉄道力学研究部
部長
[専門分野]車両運動力学

はじめに

走行時の安全性に関する車両の運動性能のことを車両の走行安全性と呼んでいます。本稿では、特に脱線に対する安全性を取り上げ、その評価のために用いられている脱線係数について、過去の経緯を交えながら解説します。

走行安全性評価法の概要

どうやって評価する？

新しい線路や車両を作った時、既設線の列車運転速度を向上する時などには、営業を開始する前に必ず走行試験が行われます。計画通りに走れるかどうかを実際に確かめる訳ですが、単に「大丈夫でした。」というのではなく、測定を行い、そのデータをもとに安全性を評価します。測定値が予め定めた

目安値を超えていなければ、走行安全性に問題はないと判断されます。

なにを測定する？

走行試験では走行安全性評価のために、輪重と横圧(図1)を測定します。輪重と横圧を見ることで、軌道・車両が壊れないかどうかと、車両が脱線しないかどうかの両方を判断することができます。我が国では、走行する車両での輪重横圧測定が1950年代から行われるようになりました。その方法は、車輪にひずみゲージを貼り付け、走行中に発生するひずみを輪重、横圧に換算するというものです。

走行安全性の評価指標と目安値

脱線を考える際に必要となる、輪軸に働く力とモーメントを図1に、輪軸

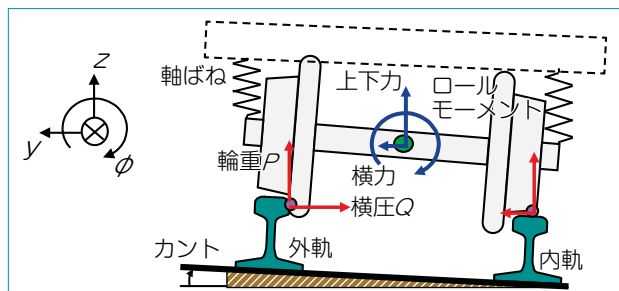


図1 輪軸に働く力とモーメント(曲線通過時の例)

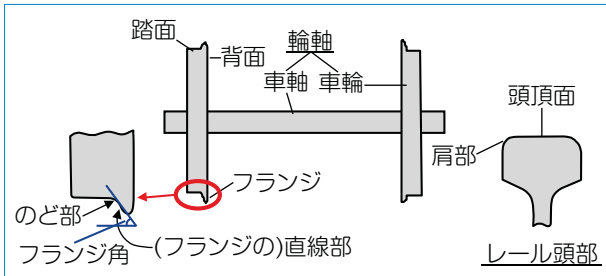


図2 輪軸とレールの各部の名称

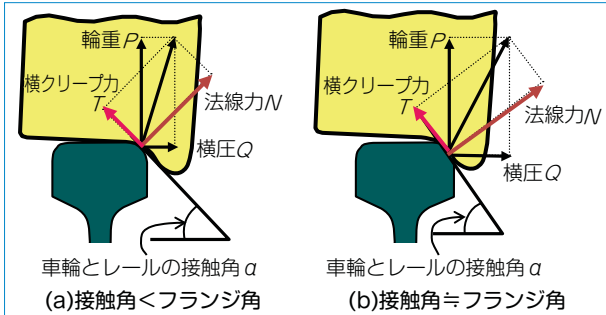


図3 車輪とレール間の作用力(乗り上がり脱線)

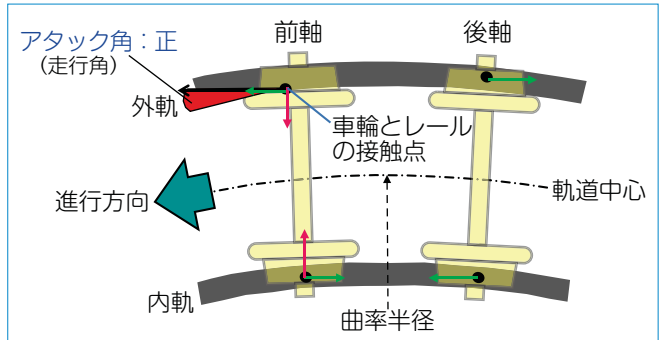


図4 曲線通過時の外軌側車輪のアタック角

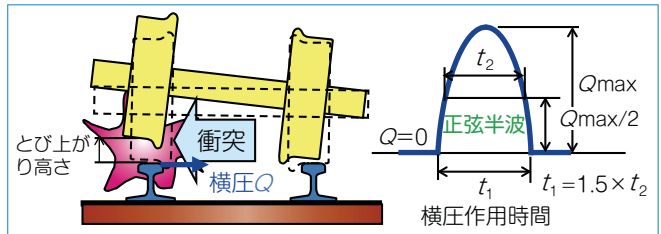


図5 とび上がり脱線と横圧作用時間 t_1

とレールの各部の名称を図2に示します。図1はレールに垂直な鉛直断面内の成分を表しており、車輪とレールの間には輪重と横圧が、輪軸重心には輪軸の慣性力や軸ばねを介して輪軸に加わる力とモーメントが作用します。

走行安全性を測る脱線係数とは？

実際に発生しやすい脱線は、乗り上がり脱線と呼ばれるものです。これは車輪がフランジの直線部でレールに接触したまま回転し、自分でレール肩部をよじ登っていく現象です。図3中の横クリープ力 T は転走する車輪とレールとの間に発生する接線力で、車輪とレール間の摩擦係数 μ (以下、単に摩擦係数と記します) が大きい時、アタック角(図4)が大きい時に増大しますが、摩擦力 μN を超えることはありません。図3を参照すると、次の関係が成り立っていることが分かります。

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

輪軸の慣性力が無視できる程度にゆるやかな速度で車輪がレールをよじ登り、式(1)の接触角 α がほぼフランジ角に一致してつり合った状態(図3(b))を、乗り上がり脱線の始まる脱線限界と考えることができます。そこで、この Q/P を特に脱線係数と呼び、走行安

全性の評価指標として用いています。

許容できる脱線係数の値は？

T/N の最大値は摩擦係数 μ で、 $T/N = \mu$ の時、式(1)は次のようになります。

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha} \dots\dots\dots(2)$$

α = フランジ角60度、 $\mu = 0.3$ とすると式(2)の値は0.94、 $\mu = 0.25$ では1.03になります。摩擦係数などの変化を考慮して、経験上妥当な値として1.2程度の安全率を見込み、許容できる脱線係数の値は0.8とされました。

東海道新幹線に関する研究・第1冊¹⁾に、1958年に行った模型車輪による実験結果を踏まえて、松平博士が次のように記しています。

- 脱線の起きる時の脱線係数の値は、普通の場合1.0以上と考えられている。
- 走行角1度以上で脱線係数の限界値はほぼ一定となり、乾燥状態の時に約1.1で、摩擦係数の実測値0.25を入れて式(2)により計算した値と一致する。
- 従来使用されている脱線係数の安全限界値0.8は、定常的な横圧が作用する場合には概ね妥当な値である。
- 短時間に作用する瞬間的な横圧に対しては、当然脱線係数は大きくなる。1950年代後半の走行試験結果報告

などからも、当時、すでに脱線係数0.8という値が走行安全性評価に用いられていたことがわかります。また、短時間に作用する瞬間的な横圧に対しては、横圧作用時間 t_1 (図5)を用いた脱線係数の安全限界値が提案されました。詳細は東海道新幹線に関する研究・第3冊²⁾に記されているので、そちらを参照して下さい。基礎式は、車輪フランジがレールに衝突した時の発生横圧ととび上がり高さとの関係式を輪重で除して脱線係数の形に直したものです。在来線車両を代表する数値ととび上がり高さ20mmを代入した値 $0.05/t_1$ に若干の安全率を見込んだ $0.04/t_1$ を、横圧作用時間が0.05秒以下の場合の許容限度としています。なお、ここで考慮されている輪重は、軸ばねを介して輪軸を上下に押さえている荷重とばね下重量の和であり、車輪とレール間に働く瞬時の輪重ではないことに注意が必要です。

脱線に対する安全基準

1963年に発生した鶴見事故(☞参照)

☞ 鶴見事故
1963年11月9日、東海道本線鶴見駅 - 横浜駅間で発生した貨物列車の脱線事故。死者161人。脱線原因は「競合脱線」とされた。

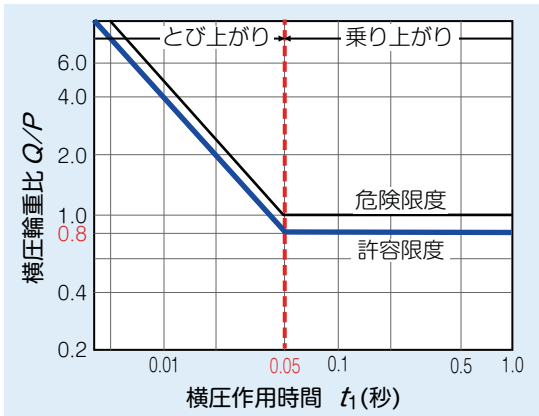


図6 脱線係数の許容限度

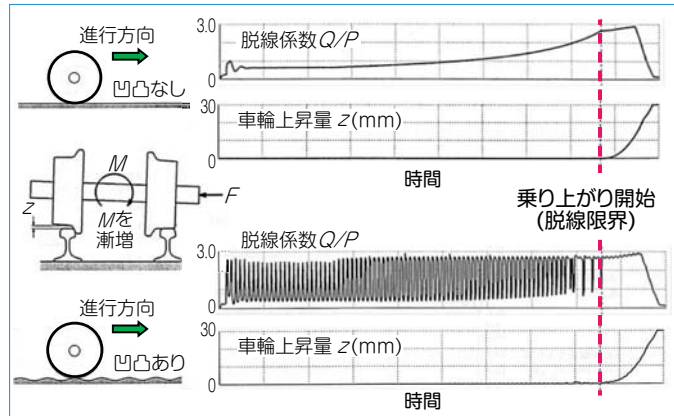


図7 脱線シミュレーションの例 (高周波輪重変動)

を受け、当時の国鉄は、脱線再現試験や狩勝実験線での大々的な脱線実験を行って貨車の脱線原因を徹底的に究明し、1968年に「脱線に対する安全基準」を策定しました。報告書は非公開でしたが、前述の乗り上がり脱線ととび上がり脱線に対する脱線係数（横圧輪重比）の許容限度（図6）は他の文献で紹介され、当時、海外でもJNRスタンダードとして注目を集めました。

高周波輪重変動発生時の評価

1987年の国鉄分割民営化後、各社は在来線、新幹線の速度向上を積極的に進めました。その走行試験において、レール頭頂面に微小な凹凸がある軌道を高速で走行した際、高周波の輪重変動が発生して瞬時の輪重減少により0.8を超える脱線係数の値が観測される場合があります。その時の走行安全性を判断する方法がないために、試験時に速度向上ができないという状況が時々発生した訳です。そこで鉄道総研は、400Hzまでの輪重と100Hzまでの横圧、脱線係数を連続的に測定する方法を開発し、そのデータを用いた走行安全性評価法を1992年に提案しました。後者は、転走する輪軸の脱線シミュレーション（図7）に基づいて定めた脱線係数超過時間 t_0 による評価法です（図8）。脱線係数超過時間とは、脱線係数の値が継続して目安値を超えている時間のことで、車輪がとび上がって輪重が0となった時間を含みます。脱線係数の目安値を、フランジ

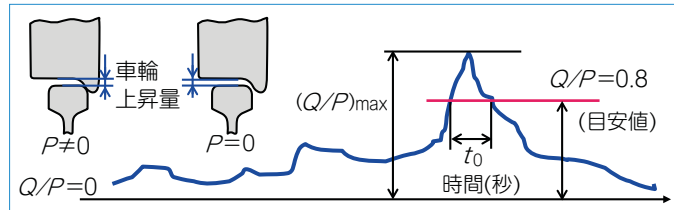


図8 脱線係数超過時間 t_0

角60度の場合は0.8、70度の場合は1.0として、脱線係数超過時間が0.015秒以下の時には、車輪上昇量（図8）がフランジ高さに比べて十分小さいので安全と判断して差し支えないというのが最初の提案内容でした。しかし当時、フランジ角70度の新幹線試験電車に適用する際、安全側の評価となるよう脱線係数の目安値を0.8のまま変えずに、脱線係数が継続して0.8を超えている時間を脱線係数超過時間としました。以後、他の走行試験においても、上記の考え方を踏襲して測定データの評価と蓄積が行われてきています。この手法は、瞬時の輪重減少だけでなく、とび上がり脱線の評価にも有効です。

速度向上試験マニュアル(略称)

速度向上を進めるにあたって、安全確認のための走行試験における試験方法等を体系化する必要性が高まり、研究会での検討を経て1993年5月に在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説³⁾が発刊されました。130km/hまでの速度向上試験を対象とした本マニュアルでは、走行安全性の評価に関し、前述の脱線に対する安全基準をベースに各種走行試験での経験やデータの蓄積を踏まえた整理・改訂が行われてい

ます。主な改訂内容は以下の通りです。

- 省令等で定められているもの以外の安全限界値、許容限度等といわれていた数値を目安値と呼ぶ。
- 脱線係数の原則的目安値0.8のほか、フランジ角に応じた目安値の上限を定めてどちらかを選択できる。
- 輪重減少の発生した地点で軸箱上下振動が顕著であり、その振動の周波数が約50Hz以上である時は、安全性に支障がないと判断して差し支えない。

本マニュアルの検討中に提案された輪重横圧の新連続測定と脱線係数超過時間による評価については、まだ適用実績が少ないということで記載が見送られました。しかし、軸箱上下振動加速度を併用した輪重減少率（静止輪重からの輪重減少量を静止輪重で除した割合）の評価という形で、瞬時の輪重減少を評価する方法が追記されています。これは、輪軸の上下振動に起因した輪重減少の継続時間が0.01秒程度以下であれば、脱線係数超過時間が0.015秒を超えることはないという判断に基づいたものです。

急曲線部での低速走行試験

2000年に発生した日比谷線脱線事

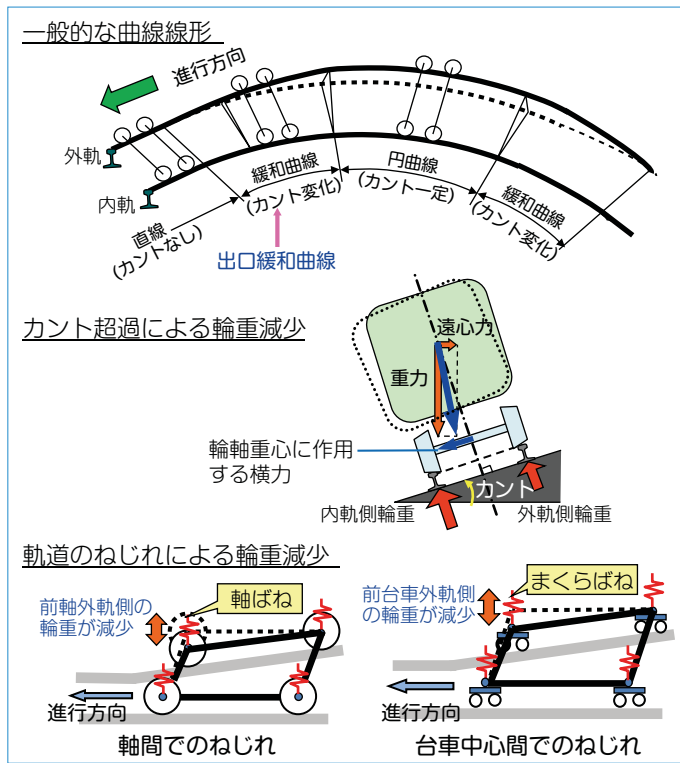


図9 急曲線部の出口緩和曲線における輪重減少

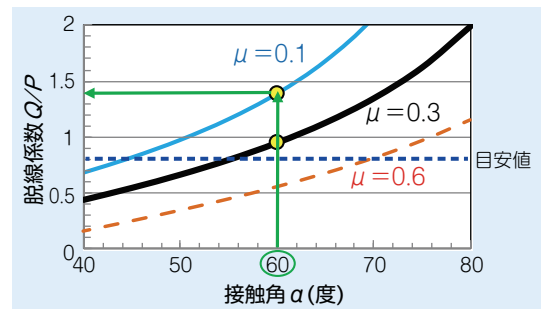


図10 式(2)による脱線係数の計算値 (摩擦係数 μ の影響)

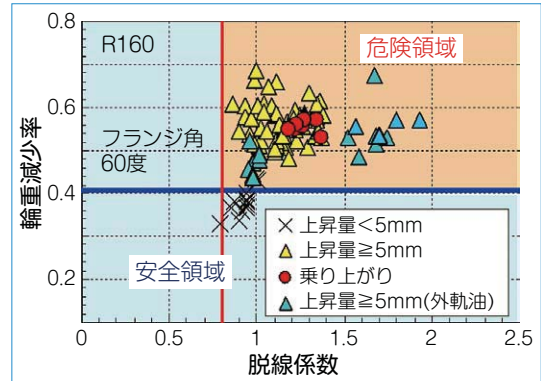


図11 低速走行試験での評価例 (鉄道総研構内脱線走行試験)

故を受け、曲線区間の出口緩和曲線を低速で走行した際(図9)の乗り上がり脱線防止策が検討されました。その過程で、摩擦係数は0.6程度の値をとり得ることも明らかにされています。そして、走行安全性の評価法として、推定脱線係数比を用いた机上検討と急曲線部の低速走行試験による評価の二つが新たに加えられました。特に後者については、2004年6月の国の通達により、「従来からの目安値を用いることを原則とするが、測定結果がこの値を上回る場合には、輪重減少率による安全性の評価によること。」と改正されました。この趣旨は以下の通りです。

半径の小さい急曲線を車両が低速で走行した場合、外軌側の車輪は大きなアタック角を持ち、フランジの直線部がレール肩部に接触した状態で脱線せずに通過する場合があります。これは言い換えれば、脱線限界の状態でつり合ったまま曲線を走行するという事です。このような走行実態を許容しようとする、脱線係数の値が従来の目安値を超える場合があります。特に外軌に塗油を施している箇所ではその

傾向が顕著です(図10)。また、走行試験の時には大丈夫でも、油が切れたら脱線する危険がないかどうかを判定しなければなりません。そこで、想定されるアタック角の範囲内で外軌側の摩擦係数の影響を受けにくい輪重減少率を、脱線係数が目安値を超えた場合の評価指標としました(図11)。その目安値は、摩擦係数0.6を考慮して、輪軸の運動という観点で車輪が乗り上がらないような条件から定められています。ただし、そこには以下のような前提があるので、実際の適用にあたっては十分に注意する必要があります。

- カントの付いた曲線区間を概ね10km/h以下の速度で走行する試験であること。すなわち、カント超過の状態であって輪軸重心に働く横力が0もしくは曲線内方を向いていること(図9)。
- 試験車両が軸距約2mの一般的な2軸ボギー車両であること。

脱線係数と異なり、脱線限界での輪重減少率の値は横力の影響を大きく受けることに注意が必要です。なお、この研究の一部は、国土交通省鉄道技術

開発費補助金を受けて実施しました。

おわりに

走行安全性評価法の変遷を振り返ってみると、「厳に過ぎず緩におちいらない」よう安全を確保しつつ、走行実態を反映させるための努力が続けられてきたことがわかります。その妥当性は試験データの蓄積により裏付けられています。正しい評価には測定値も重要で、測定精度と評価目的の両面から、その周波数に目を向ける必要があります。また、車両の軽量化が進む一方、摩擦係数に関する新たな知見も得られています。脱線事故ゼロに向け、技術の進歩に応じて車両の走行安全性評価法を逐次見直していく、地道な調査研究を今後も続けていくことが大切です。[RRR]

文献

- 1) 鉄道技研：東海道新幹線に関する研究、第1冊、1960.4
- 2) 鉄道技研：東海道新幹線に関する研究、第3冊、1962.4
- 3) 鉄道総研編：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説、研友社、1993.5