

鉄道車両の走行安全性を測る

金元 啓幸

車両構造技術研究部(車両運動 研究員)



かねもと ひろゆき

はじめに

新型車両導入のときや車両の高速化のときには、車両の走行安全性や安定性、乗り心地などを評価します。そのなかで、走行安全性では、車両が脱線しないか、軌道を壊さないか、などを評価するために、「輪重・横圧測定(以下、PQ測定)」が実施されます。

PQ測定には、大きくわけて、車両側から測定する車上測定と軌道側から測定する地上測定があります。車上測定では、車輪や車軸をセンサとして用いますが、日本では主に図1のようなPQ軸と呼ばれる輪軸を用います。車上測定では、PQ軸を装架するため、車両は限定されますが、様々な軌道条件での測定を行うことができます。一方、地上測定では、レールをセンサとして用います。測定場所は限定されますが、その場所を通過する多くの車種や車両の測定を行い、比較、検討が可能です。

本稿では、PQ測定のなかでも、車上測定について紹介します。また、本稿の最後には、PQ測定以外の走行安全性の評価手法についても紹介します。

ナダルの式

はじめに、脱線に対する走行安全性の指標となる「ナダルの式」について説明します。

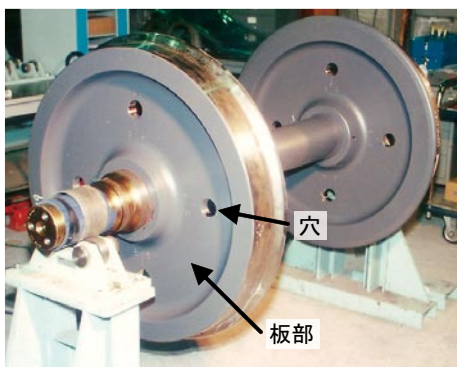
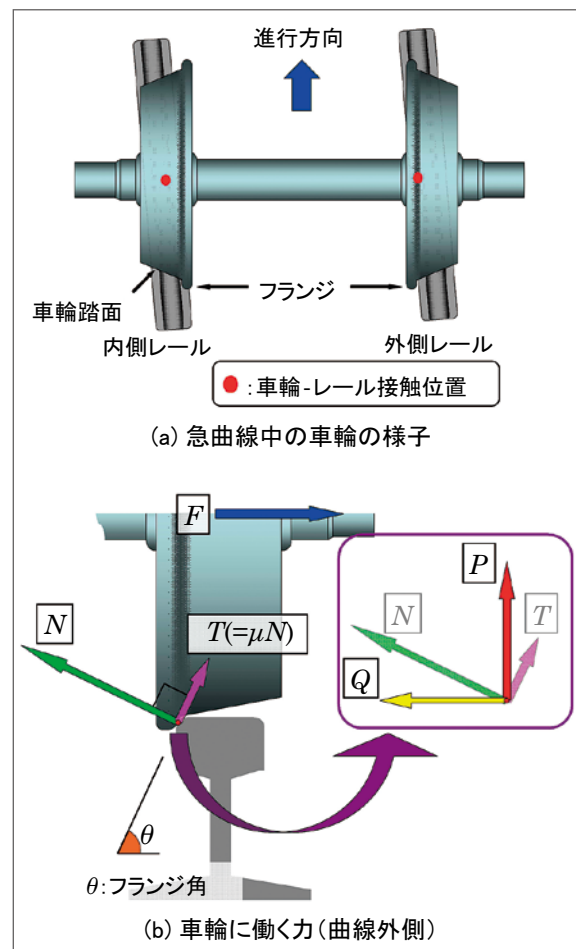


図1 PQ軸

鉄道車両は車輪踏面が傾斜しているために生じる左右車輪の回転半径差によって、内・外側レールの行程差に対応し、曲線を円滑に走行することができます。しかし実際には、輪軸は軸箱を介して台車枠に支持されていますので、自由に曲線接線方向へ向くことができません。つまり、曲線通過時には、図2(a)のように、曲線外側のレールに車輪の「フランジ」を押付けながら走行することになります。このとき、回転している車輪は、レールに対して斜めに当



(a) 急曲線中の車輪の様子

(b) 車輪に働く力(曲線外側)

図2 ナダルの式の説明図

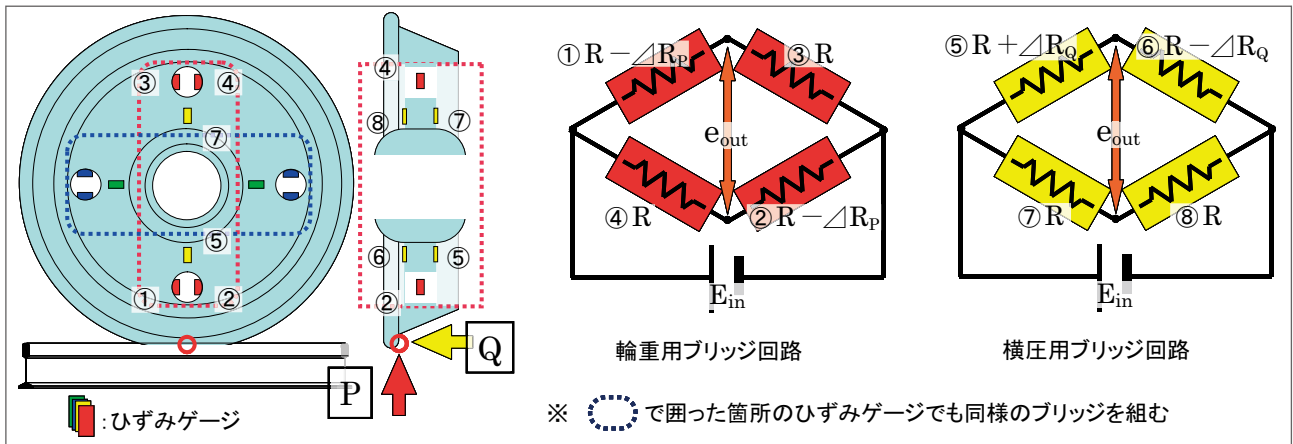


図3 ブリッジ回路(間欠法)

たるため、自分でレールをよじ登ろうとします。つまり、図2 (b) に示す力 T が車輪へ作用します。この力 T は、回転している車輪とレールの間に働く摩擦力¹⁾のまくらぎ方向成分で、最大で $T = \mu N$ (μ : 摩擦係数, N : 法線力) となります。ここで、曲線内側の車輪からの力や遠心力などの合力 F を考えます。車輪がレールをよじ登って脱線しないためには、図2 (b) の右向きの力の合力が、左向きの力の合力よりも小さくなければいけません。つまり、次式を満たす必要があります。

$$F + \mu N \cos \theta \leq N \sin \theta \quad (1)$$

次に、摩擦力 T や法線力 N は、図2 (b) に示すように、垂直方向の成分 P と水平方向の成分 Q として表すこともできます。このレールから車輪に作用する垂直方向の成分 P を「輪重」、水平方向の成分 Q を「横圧」といいます。このとき、

$$P = \mu N \sin \theta + N \cos \theta, \quad Q = F \quad (2)$$

が成り立ちます。ここで、式 (2) を式 (1) に代入して、 F , N を消去すると、

$$\frac{Q}{P} \leq \frac{\tan \theta - \mu}{1 + \mu \tan \theta} \quad (3)$$

となります。この式 (3) が「ナダルの式」です。式 (3) から、右辺のフランジ角 θ と摩擦係数 μ から決まる値よりも、左辺の横圧 Q / 輪重 P の値が大きくなると、車輪がレールをよじ登って脱線してしまうことがわかります。つまり、輪重 P と横圧 Q を測定すれば、脱線に対する走行安全性を評価できるのです。

輪重と横圧の測定方法

輪重と横圧を測定することが、車両の脱線に対する走行安全性の評価になることを前章で説明しました。また、輪重と横圧を測定することで、軌道部材の耐力を超えるような著大な輪重、横圧も監視できます。しかし、車輪とレールの接触点周りで、輪重と横圧を直接測定することは簡単

ではありません。そこで、輪重、横圧によって生じる車輪のひずみから、間接的にこれらを測定します。

PQ軸の多くは、図1に示すように、板部が平らな車輪に、直径50mmほどの丸い穴が開けられています。この丸い穴付近の車輪踏面に輪重が作用すると、穴がゆがみます。また、車輪に横圧が作用すると、車輪の板部が曲がります。このような場合に生じるひずみ量を、ひずみゲージを用いたブリッジ回路によって測定します。ひずみゲージとは、細い金属線の抵抗器で、接着した材料がひずむと、金属線が伸縮して断面積と共に、抵抗値が変わるようになっています。

たとえば、図3左のように車輪へひずみゲージ(抵抗値 R) を接着し、図3右のブリッジ回路を組みます。いま、図3左の赤丸の位置に、輪重 P と横圧 Q が作用したとします。このとき、輪重 P によって生じた圧縮ひずみ量に比例して、①と②のゲージの抵抗値は ΔR_p だけ小さくなります。また、横圧 Q によって生じた曲げひずみ量に比例して、⑤のゲージの抵抗値は ΔR_Q だけ大きくなり、⑥のゲージの抵抗値は ΔR_Q だけ小さくなります。すると、それぞれのブリッジ回路の抵抗のバランスが崩れ、電圧 e_{out} が生じます。そして、作用した力とひずみ量の関係を事前に検定しておけば、電圧 e_{out} を測定することで輪重値、横圧値がわかります。ちなみに、図3のようなブリッジ回路の組み方は「間欠法」と呼ばれており、車輪1回転につき4点の輪重値、横圧値がわかります。

車上測定に用いる機器

車上測定には、PQ軸のほかに、主に以下の測定機器が必要になります。

(1) 動ひずみアンブ

ブリッジ回路に電圧 E_{in} を与えるとともに、電圧 e_{out} を測定し、増幅する装置です。通常、PQ軸を購入した際に、

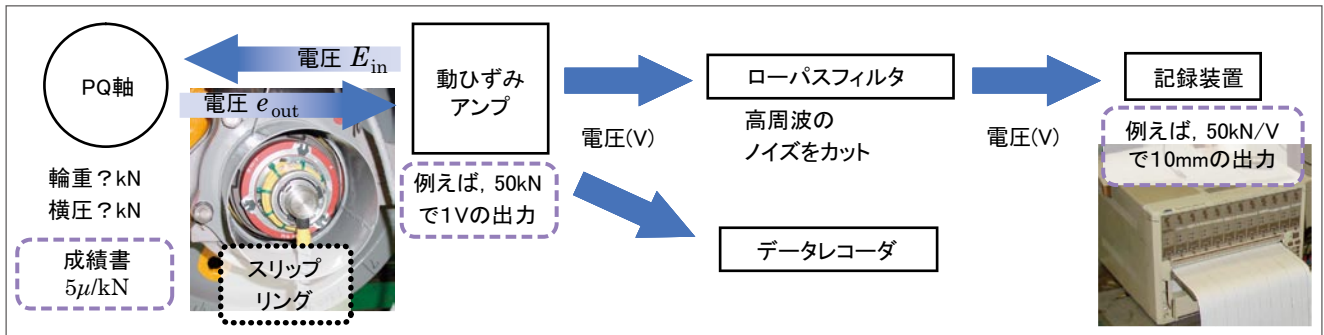


図4 車上測定に用いる機器と装置の配線例

荷重何kNで何 μ ($\mu = 10^{-6}$) ひずむかを記した「検査成績書」が付いてきます。この数値を参考に、動ひずみアンプの調整を行います。たとえば、成績書に $5\mu/kN$ とあったとき、アンプの較正值を調整して 500μ で2Vの出力が得られるようにします。すると、50kNの荷重で1Vの出力が得られます。

(2) スリップリング

ブリッジ回路と動ひずみアンプを直接つないでしまうと、車輪の回転により、配線がねじれて断線してしまいます。そこで、回転している物体に対し、外部への電気信号の入出力を可能にするスリップリングをPQ軸の両端に取り付けます(図4左写真)。そして、このスリップリングを介して、ブリッジ回路と動ひずみアンプをつなぎます。

このほかに、動ひずみアンプからの出力を記録、表示する装置(たとえば、図4右写真のサーマルレコーダ)や、アナログ信号をバックアップしておくデータレコーダ、信号からノイズなどの高周波成分を除去するローパスフィルタも必要です。参考のため、図4にPQ軸から記録装置までの配線例を示します。

測定項目と目安値

高速化を目指した試験などでは、輪重値、横圧値などが目安値を超えていないかを、その場で確認する必要があります。そのために、サーマルレコーダなどから出力される記録チャートの波形にもものさしを当て、輪重値、横圧値を読みます。たとえば、間欠法による輪重と横圧の波形は、図5に示すように、輪重は魚の背骨、横圧は正弦波のような波形になります。車輪1回転で2点(1回路)現れるこの波形のピーク値が、輪重値、横圧値です。さて、以下にPQ測定における主な測定項目と目安値を示します。

(a) 脱線係数

式(3)で示したQ/P値のことで、輪重値と横圧値から算出されます。目安値については、たとえば、フランジ角 θ

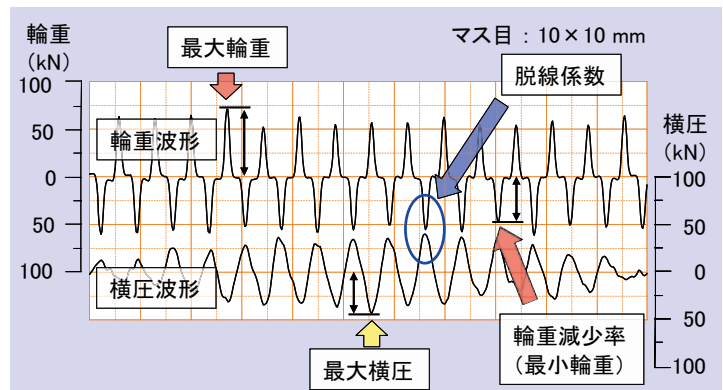


図5 記録チャート例(間欠法)

*このチャートでは記録装置を10mm=50kN/Vで較正した

を 65° 、摩擦係数 μ を0.3とし、15%の余裕をみたときは、0.95となります。ただし、安全率を乗じていることやナダルのは定常的な力の均衡に基づくことから、過渡的な横圧のピーク値に対するQ/Pが目安値を超えても直ちに乗り上がるわけではありません。そこで、横圧の作用時間を加味した評価を用います。

(b) 輪重減少率

車両走行中の輪重は、軌道のねじれなどにより増減します。輪重が減少すると、脱線の危険性が高まります。そこで、その最小値から、静止時の輪重に対する減少量を算出します。これを輪重減少率といいます。従来から、レールの継目や短い波長の軌道変位を原因とする局所的な輪重減少については、80%を目安値としています。

(c) 輪重・横圧(最大値)

まくらぎやレール締結装置などの部材を破壊したり、軌道変位が急速に大きくなったりしないかを確認するための値です。たとえば、PCまくらぎの輪重目安値は200kN程度、在来線用レール締結装置の横圧目安値は60kN程度以下となります。

新連続法による測定

PQ測定について、車上測定の「間欠法」を中心に説明し

てきました。間欠法は、必要なひずみゲージ枚数が少なくPQ軸の製作が容易であるなどの理由から、現在でも広く行われています。しかし、ひずみゲージを接着した箇所以外での輪重・横圧値や脱線係数の目安値超過を測定できません。そこで、輪重、横圧、脱線係数を車輪全周にわたって測定できる「新連続法」が開発されました。

新連続法は、図6左のように車輪へひずみゲージを接着し、図6右のブリッジ回路を組みます(横圧用ブリッジ回路は間欠法と同様)。そして、荷重が作用する車輪周上の位置とひずみゲージを接着した位置との関係による電圧 e_{out} の変動を、専用の処理装置で補整して、連続的な輪重、横圧、脱線係数を算出します。ただし、電圧 e_{out} の変動を適切に補整するためには、車輪の回転角を正確に知る必要があります。そのために新連続法では、車輪の回転角が測定できるロータリーエンコーダをスリップリングに組み込んでいます。

新連続法では、連続的な輪重、横圧、脱線係数が得られるため、車輪全周にわたっての測定ができることや測定波形が連続的なグラフとなり見やすいことなど、多くの利点があります。ただし、ひずみゲージ枚数が多いことなどからPQ軸の製作に手間がかかります。また、専用の処理装置が必要なことから、試験実施のコストが高くなります。さらに、間欠法と比べると、輪重が作用して抵抗値が変化した際の電圧 e_{out} が小さく、ノイズに対して不利になる場合があります。

最近の技術動向

前章の最後に紹介した、新連続法における出力電圧の低下は、輪重測定用ブリッジ回路中にひずみゲージが多いために、輪重(ひずみ)に対する抵抗値の変化が相対的に小さいことが原因です。その対策として、図6に示したPQ軸に対して、間欠法の輪重用ブリッジ回路(図3)を、45°間隔に4つ作る方法が考えられます。しかしこの方法には、24極ある小型のロータリーエンコーダ付スリップリングが必要です。現在、鉄道車両での測定に使用できるスリップリングは20極が最大なので、鉄道総研ではメーカーと共同で24極のロータリーエンコーダ付スリップリングを開発中です。

間欠法においては、輪重値、横圧値を自動的に読み、各目安値の超過がないか判別してくれる輪重・横圧データ処理システムが実用化されています。新幹線など短時間に大量のデータが得られる試験では、大いに活躍しています。

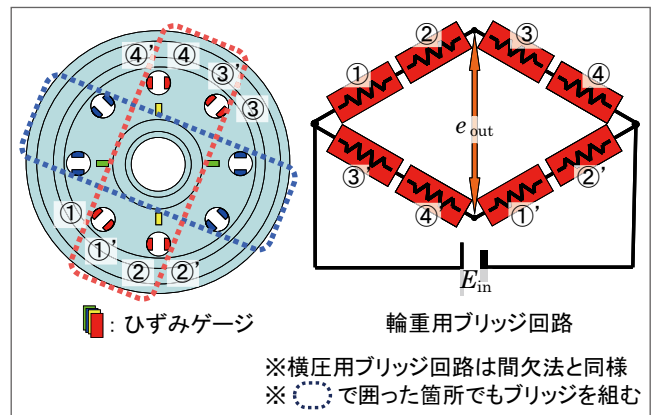


図6 ブリッジ回路(新連続法)

上下動・左右動による走行安全性評価

振子車両でない車両の高速化のとき、手間のかかるPQ測定をせずに、車両の上下動・左右動の加速度測定を行って走行安全性を評価する方法があります。この方法は、目標速度が100km/h以下で速度向上幅が10km/h以下の場合と、目標速度が120km/h以下で速度向上幅が5km/h以下の場合に用いられます。ただし、曲線半径やカント(左右レールの高低差)、軌間によって、この方法を適用できる速度向上幅は異なります¹⁾。

上下動・左右動の加速度の目安値については、車体重量などを考慮して検討する必要があります。ただし一般的に、フランジ角と摩擦係数によって決まる脱線係数の目安値に対応して、低速域での速度向上においては以下の値が用いられます。

脱線係数0.8 → 上下動：0.4G 左右動：0.3G

脱線係数1.1 → 上下動：0.45G 左右動：0.35G

ここでGは重力加速度です。またそれぞれの評価に用いる測定値は、振動数5Hz以下の全振幅としています。

おわりに

PQ測定を中心に、車両の走行安全性を測定・評価する方法について説明しました。鉄道車両の走行安全性を測る技術や測定データに適用する目安値などは、数多くの技術開発と実測データの上に成り立っており、現在の車両が安全に走行するための土台となっています。今後も、車両の走行安全性を簡易に精度よく測定するための技術開発を進めたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) (財)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，鉄道総合技術研究所，1993