

### 第7回

# 輪重横圧測定のおゆみ

## はじめに

現在では、新しい路線の開業前や新しい車両の導入前に、レールから車輪に作用する上下方向の力である輪重と横方向の力である横圧の測定が行われています。これは、車輪が回転しながらレールに乗り上がる脱線(乗り上がり脱線)が起きないなどの走行安全性を確認するためのものです。ここでは、普段なじみが薄いこの輪重横圧測定法および評価法の変遷を紹介します。

## 乗り上がり脱線とNadalの式

1825年、イギリスで現在の形の鉄道が開業して以来、鉄道は安全の確保を最大の使命として輸送を行ってきました。当初発生していた鉄道事故は、レールや車輪などの強度不足に起因する脱線や、運転取り扱いの誤りで生じた衝突などによるものが多数を占めていました。これら事故の件数は、その後、材料の製作技術の向上や運転規則の改善などにより減少しました。しかしその後も脱線事故は、車両側と軌道側の悪い条件が重なった場合に発生することが稀にありました。

ところで、車輪がレールに乗り上がり、脱線する条件はどのように表せるのでしょうか。これについては1880年代から研究が行われていますが、1908年にNadal(ナダル)というフランスの技術者がこの条件を簡単な形で示しています(図1)。これがNadalの式と呼ばれるもので、車輪のフランジ部とレール肩部との接触点において、車輪がレールに乗り上がろうとする時の準静的な力のつり合いから、車輪・レール間の摩擦係数 $\mu$ およびフランジ角(接触角) $\alpha$ の2つのパラメーターにより、輪重と横圧の関係を示し、横圧を輪重で除した脱線係数がこの値を越えるときに、車輪がレールの側面を乗り上がる可能性があることを示しています。

これに続いて多くの研究者が脱線の指標となる脱線係数の限度値を、走行角(レール方向と車輪の進行方向のなす角度)や前後(レール方向)接線力などの条件を考慮して求める試みをしています。しかし、摩擦係数の値が同じ場合には、これらの限度値がNadalの式による限度値を下回ることはありませんので、この限度値によって安全性の評価をしておけば、脱線に関する走行安全性が確認できることになります。ここにNadalの式が現在でも有用な指標である理由があります。つまり、車輪・レール接触点における輪重、横圧を精度よく測定できれば、脱線に関する安全性を確認できることになります。実際には摩擦係数の測定も必要ですが、同時測定できないので経験による値を当てはめています。また、走行角や前後接線力といった情報を同時に測定できれば、脱線係数がNadalの式の値を越える場合でも安全性に余裕があることを評価できる可能性があります。

限度値の検討が行われる一方で、脱線に至る場合の輪重と横圧の実際の値はどれくらいであるのか明らかにするため、実物の車両を用いて試験が行われたのは、第二次世界大戦の前後のことになります。

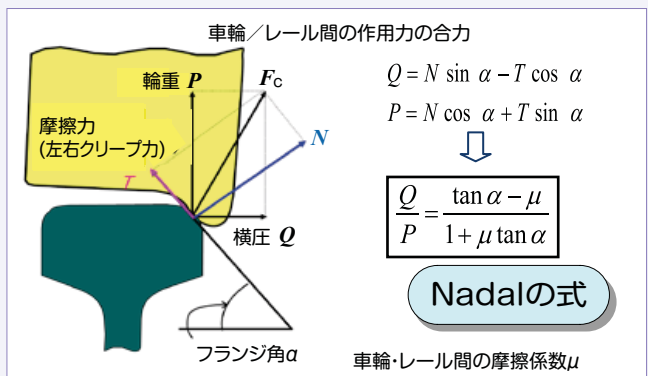


図1 車輪・レール間に作用する力とNadalの式による脱線限界

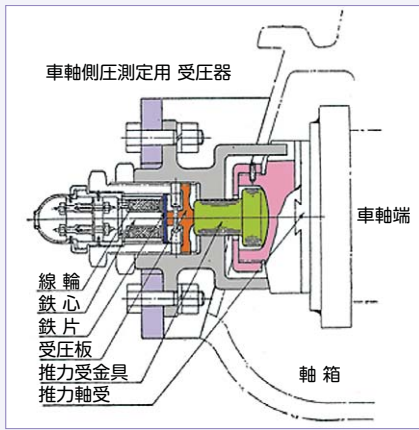


図2 側圧測定用受圧器

出典：鉄道技術研究所，穂坂ほか，鉄道業務研究資料第8巻第8号

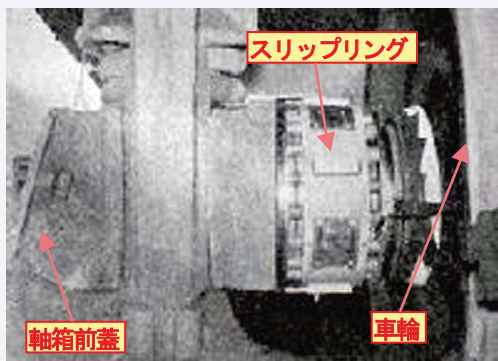


図3 日本初の鉄道車両用スリップリング  
出典：鉄道業務研究資料第13巻第11号(1956)

### 歪ゲージの輪重横圧直接測定への適用

部材に力を作用させると、その部材は弾性変形し歪(ひずみ)を生じます。車輪の歪を直接測定すれば、車輪に作用する力を求めることができます。この歪を測定するものとして今日では欠かせない歪ゲージが、1938年にアメリカにおいてSimmonsとRugeにより考案されました。

日本では、1949年に脱線現象の解明のため、穂坂らが車軸の側圧測定を試みました。これは軸力により受圧板を弾性変形させ、この変形により電磁石の磁気抵抗が変わることを利用したものです(図2)。これを用いて測定した側圧データは、戦後発足した脱線事故防止委員会に提供され、在来線における蛇行動現象を把握するのに役立ちました。ただし、これは輪軸に作用する力全体を測定するもので、左右の車輪別々に作用する横圧を測定するものではなく、また、上下方向力もばね変位の形でしか得られていません。

これとほぼ並行して、実用に耐えうるまで進歩してきた歪ゲージを用いて、車輪・レール間に作用する力を直接測定する取り組みが、1950年ごろから中村らの手により始

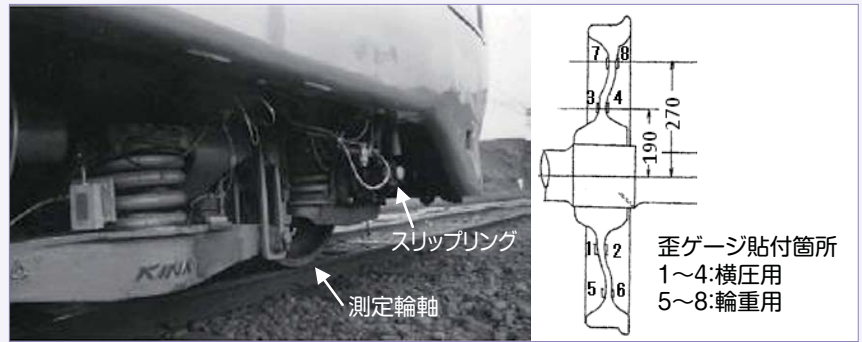


図4 連節車での輪重横圧測定(1957年)  
(リムが平らでないB型車輪による測定)

まりました。この際に問題となったのは、回転する車輪あるいは車軸上に貼り付けた歪ゲージからの信号を、車上にどのようにして伝えるかということでした。当初は車軸端から車上の計測器までの配線に余裕を持たせ、車軸回転により取り出したケーブルがねじ切れるまで測定するといった荒業も試みられましたが、構内走行以外の測定では使用できません。また、信号の伝達装置であるスリップリングは市販品もありましたが、実際に輪軸に取り付けて使用するには耐久性が不足していました。スリップリングの摺動部分や衝撃吸収などの改良を重ねた結果、1954年に鉄道車両用試作スリップリングが完成しました(図3)。1955年の10系軽量客車を皮切りに、輪重横圧測定が本格的に始められました。

日本で輪重横圧測定法の基礎が確立されたのと同じく1950年代に、スウェーデンにおいて輪軸の車輪に歪ゲージを貼りつけた測定輪軸が製作されました<sup>1)</sup>。しかし、この時は横圧の測定しかできず、走行安全性の確認に必要な輪重も測定できるようになったのは、1960年代のことです。

同じ1955年、フランス国鉄は電気機関車の高速試験を実施し、最高速度331km/hを記録しました。走行後の軌道は左右に大きく変形し、蛇行動の発生が原因の一つとして考えられました。この時の走行は脱線直前の危険な状態であったと、四半世紀経過してから報告されたとあります<sup>2)</sup>。しかし残念ながらこの走行試験での輪重横圧について記述は見当たりません。

### 横衝撃力や動的輪重抜け発生時の評価

さて、日本では先の歪ゲージを貼り付けた測定輪軸とスリップリングを用いて、101系通勤形電車、151系特急形電車、大物車、二軸貨車、電気機関車、小田急の連節車(図4、車輪リム部が平らでないB型車輪を用いているために、輪重横圧相互の影響が測定値に含まれていました)

など、様々な種類の車両の走行試験を実施しました。これらの測定データに基づいて走行安全性を評価し、その後の車両の設計へ反映させました。また、測定技法については、歪ゲージのブリッジ構成を工夫したことに加えて、測定輪軸に使用する車輪については、輪重の出力感度が高いが準備しにくいスポーク車輪に代えて、板車輪の利用（車輪に予め開けられている4か所の吊穴内に輪重測定用ゲージを貼付）を試みました。その結果、間欠法（車輪1回転あたり値が2点出力される方法。通常2系統使用することで1回転あたり4点の情報を得る）と連続法（車輪の回転角位置によらず値が出力される方法）という現在の測定の基礎が築かれ、目的により使い分けることになりました。

こうした中で東海道新幹線の建設が進められ、今まで経験したことのない高い速度域での走行安全性の評価が進められました。高速走行に伴い衝撃的な横圧が生じ大きな脱線係数が観測されることが予測されましたが、Nadalの式は車輪に作用する力が準静的であることを前提に定められているので、短時間に作用する衝撃力に対する新たな評価指標を別に検討する必要性がありました。

松平らは、模型輪軸を用いて軌条輪に衝突して飛び上がる時の挙動を調べました。理論解析の結果と合わせて、横圧の作用時間 $t$ という概念を考案し、 $t$ が0.05秒以下の場合には脱線係数の限度値は $0.05\lambda/t$ と、Nadalの式による値 $\lambda$ よりも大きな脱線係数の値を許容できることを決めました<sup>3)</sup>（緩やかに変動する輪重を用いた第二脱線係数）。新幹線の高速域での試験では、松平が理論的に予想していた車両のだ行動、特に台車が激しく振動する第2次蛇行動を計測によりとらえることができました（図5）。この横圧の連続測定波形から確認できるように、蛇行動時に車輪がレールに衝突して横圧が作用している時間は、飛び上がり脱線として評価できる横圧の作用時間よりも長くなるため、営業車両では蛇行動を生じさせないようにする必要があることを改めて指摘しました。

1963年11月7日、東海道本線鶴見駅付近で発生した貨

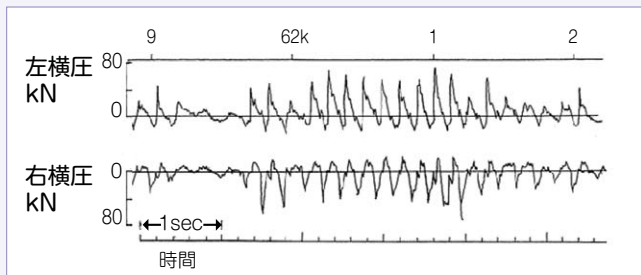


図5 新幹線モデル線でのだ行動時横圧波形  
（横圧が交互に出力され、輪軸が左右に衝突している様子がわかります）  
出典：東海道新幹線に関する研究 第3冊

物列車の脱線は、鶴見列車事故技術調査委員会での徹底的な調査の結果、競合脱線（車両や軌道それ単体では管理限度値以内であるものの、各要因が重なって生じる脱線）であるとされました。この現象に関与する要因の調査のために、北海道の狩勝実験線において大規模な脱線実験が行われました。スポーク車輪を用いた連続法による輪重横圧測定が実施され、その結果から、動的輪重抜けの許容限度が定められました。

## 海外での輪重横圧測定

1973年、UIC（世界鉄道連合）によって、輪重横圧測定法の調査が行われています<sup>4)</sup>。測定方法が各国独自に発展してきた経緯があるので、それらの差異を比較することが目的でした。測定用輪軸に限って見ても、それらを使用する車輪の形状（スポーク車輪、海外で主に使用されるS断面形状の車輪、および日本で主に使用される直線断面を有する板車輪）、歪ゲージのブリッジ構成、出力感度（同じ力に対して、どれだけの歪量が出力されるか）、横感度の影響（図4の連節車での測定で現れた、輪重出力に対する横圧の影響および横圧出力に対する輪重の影響）、検定方法（輪重横圧の輪軸への負荷位置およびその方法、動的荷重を付加した検定）、車輪回転に対する信号出力の変動特性など、様々な違いがあることがわかりました。また、ドイツのように車輪ではなく車軸の曲げ歪により測定する方法なども明らかになりました。

走行安全性の評価手法についても統計的処理を含んだ測定データの解析などを通じて議論が行われ、脱線係数については走行0.5mごとに計算する2m平均値を、通常の場合は目安値0.8、急曲線の場合には1.2と照合する方法が提示されています<sup>5)</sup>。

アメリカでは、1981年、車輪・レール間力測定技術会議が開催され、内外の測定法について意見交換が行われています。

## 高周波輪重変動現象をとらえる

JR発足後、新幹線の速度を向上させるための走行試験の際に、高周波輪重抜けと呼ばれる現象が生じるようにな

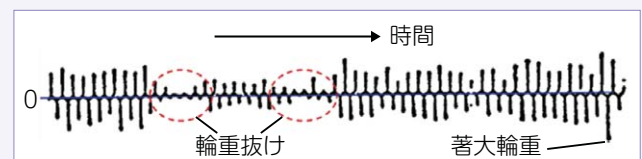


図6 高周波輪重抜けの間欠法による測定例

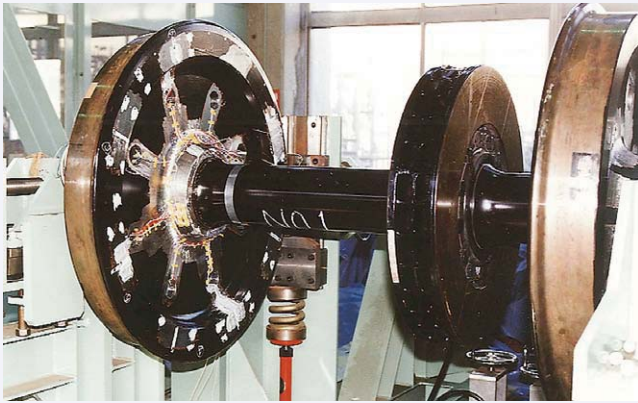


図7 新連続法用測定輪軸  
(板部に8か所輪重測定用に穴が開けてあります)

りました。これは、レール頭頂部の短い波長の凹凸などに起因して輪重変動が発生するために、脱線係数や動的輪重減少率の目安値（走行試験で安全を判断する目安の数値）を超える値が観測されるという問題でした。また、間欠法による輪重測定では、輪重抜けが継続しているように見える波形がありました（図6）。軸箱に取り付けた振動加速度計の波形から、輪重減少が継続しているのではなく、輪軸が高周波で上下振動していることが推定できましたが、その場合の評価方法が検討課題に上がりました。従来からも、歪ゲージのブリッジ構成を工夫した輪重の連続測定法が試験の目的に合わせて使用されています。しかし車輪の温度変化により出力が変動するという歪測定上の問題があるために、車輪にディスクブレーキを取り付ける新幹線車両では多く使用されていませんでした。

この問題を解決するために新たな連続測定法が石田らにより1993年に開発されました<sup>6)</sup>（図7, 8）。これにより、目安値との照合、整理作業の自動化が可能になりました。また、脱線係数の超過時間という新しい指標を設定しました。シミュレーションでの検討結果から、Q/Pが0.8を超えている時間が0.015秒以下の短時間の輪重抜けや衝撃的横圧に対しては、安全性に支障がないという評価をできるようになりました。

#### 今後の展望

以上の変遷を経て、測定用輪軸を用いた輪重横圧測定法が国内外で実用化され、車両の走行安全性の評価手法の研究が進められてきました。“輪軸の歪を利用して、車輪・レール間に作用する力を測定する”原理自体は変化していませんが、様々な現象解明のために、測定法に改良が加えられ現在に至っています。しかし、現在の測定輪軸を用いた方式では、準備に時間およびコストがかかることから、新し

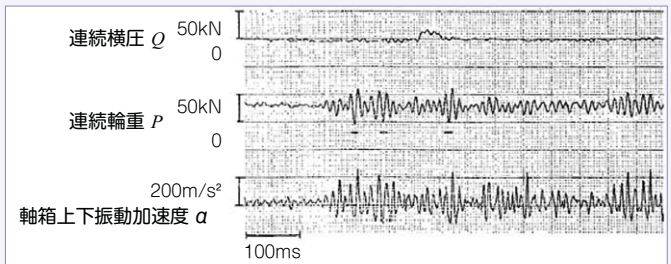


図8 新連続法による高周波輪重変動測定例

い車両の導入時や、脱線事故の原因調査、および車両運動力学に関する基礎実験の場面での測定に限られています。

これから輪重横圧測定の進む方向としては、一つには簡易的な常時輪重横圧測定を行うことにより、車両や軌道のメンテナンスに役立てることであります。これまでも台車軸ばねの変位や台車枠の歪の利用といった、輪重横圧を簡易に測定する方法があります。これらはかつて、歪ゲージが開発される前に試行しながら測定していた項目と重なるのですが、現代のセンサー技術を適用して、モニタリング装置としての活用に向けて改良が進められています<sup>7)</sup>。

また、先にも述べましたが、前後接線力や走行角の精度良い測定、走行中の車輪とレールの接触点の効果的な測定、および車輪のレールに対する上昇量の測定などを行うことにより、車輪・レール接触点における作用力および車両の挙動をより正確にとらえ、“過不足の無い”走行安全性の評価へと進む方向があります。歪ゲージに依らない測定法の開発もそれと密接に関係します。海外では、スリッピングをなくし、輪軸上の歪信号をデジタル化して無線伝送する方式なども実用化されています<sup>1)</sup>。

さらに、海外のUIC518（動的挙動の見地からの鉄道車両の試験及び確認）およびそれを引き継いだ形の欧州規格EN14363（車両の走行特性の確認試験）などの動向にも注目する必要があると考えています。

(植木健司／研究開発推進室 設計・試作)

#### 文献

- 1) K.Hempelmann他：Experiences on the first commercial use of IWT 4, the new instrumented wheelset technology, in the approval process for Germany, ZEV Rail 132, 2008
- 2) Knothe他：History of Stability of Railway and Road Vehicles, VSD 31, 1999
- 3) 松平 他：車輪の横衝撃による脱線について、東海道新幹線に関する研究(第3冊), 日本国有鉄道, 鉄道技術研究所, 1962
- 4) ORE B10/Rp.14 Measurement of the forces acting between wheel and rail, 1973
- 5) ORE C138/Rp.9 Verification of limit values, 1986
- 6) 石田 他：鉄道車両用輪軸の高周波輪重変動下における走行安全性評価に関する研究, 日本機械学会論文集C, 71-702, 2005
- 7) 大野：鉄道営業車両を用いた軌道状態監視システム, 日本機械学会誌 112.No.1084, 2009