

車輪とレールの間に 作用する力を測定する



本堂 貴敏
Takatoshi Hondo
鉄道力学研究部
車両力学研究室
主任研究員

はじめに

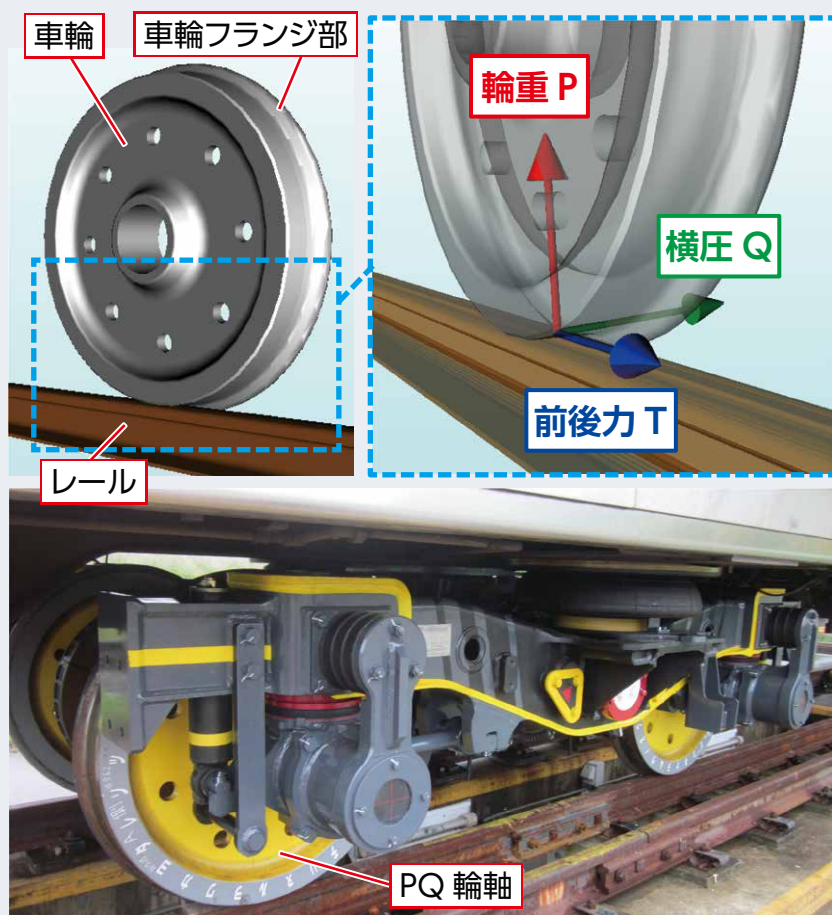
鉄道車両の脱線に対する安全性(走行安全性)を評価するためには、車輪とレールの間に作用する力を把握することが重要です。車両が軌道上を走行すると、軌道は車両からの力を受け、

少しずつ変形していきます。このとき、車両から受ける力の大きさが大きすぎると、軌道の破壊につながる危険性があります。また、車両が軌道に沿ってカーブを通過するときには、「車輪フランジ部」(図1)で、軌道から逸脱しないようにガイドします。このとき、車輪・レール間の接触力のうちの上方向の力(輪重P)と、左右方向の力(横圧Q)のバランス(脱線係数Q/P)を把握することで、ガイドが安全に機能しているかどうかを評価することができます。

近年では解析技術の発展により、コンピューターシミュレーションによって高精度に力を計算することも可能になってきましたが、実際に鉄道車両が走行する際にどのような力が作用しているかを測定することも、最終的に安全性を確認するうえで非常に重要です。

走行安全性評価では、車輪に**ひずみゲージ**を多数貼り付けて車輪表

図1 走行中に車輪・レール間に作用する力のイメージと鉄道車両に装荷された状態のPQ輪軸



ひずみゲージ

材料表面の微小な変形を電気信号に変換するためのセンサーの一種です。金属が伸び縮みすると電気抵抗値が変化することを利用して

面に生じるひずみを測定し、それを力に換算する測定法が広く採用されています。このような、力を測定するための専用の輪軸を、日本では「PQ輪軸」(図1)と呼んでいます。本記事では、現行のPQ輪軸を用いた車輪・レール間作用力測定技術を紹介するとともに、近年開発した、より高精度な測定方法についても紹介します。

現行の車輪・レール間作用力測定技術

一般的に、力を測定する技術として「ロードセル」と呼ばれるセンサーがあります。これは、ある部材に力が加かったときに生じる微小な変形を力に変換するセンサーで、部材の微小な変形を測るために使用するのがひずみゲージです。PQ輪軸は、このロードセルの考え方を応用して、車輪そのものをロードセル化した、測定専用の輪軸です。

現在広く採用されているPQ輪軸の構成方法の一例を図2に示します。PQ輪軸用の車輪にはいくつかの孔^{あな}が開けられており、孔の側面に生じる**垂直ひずみ**^{あな}を測定します。この垂直ひずみの大きさは、輪重Pの大きさに比例するため、これを用いて輪重を測定することができます。

また、車輪板部の側面でも垂直ひずみを測定します。横圧Qが作用したときに生じる車輪全体の曲げ変形を捉えるためのもので、横圧の尺度として使用します。横圧を輪重で割った値 Q/P は「脱線係数」と呼ばれ、この値が小さいほど脱線に対するリスクが小さいと判断されます¹⁾。また、輪重と横圧の測定結果は、軌道部材の強度上問題ないかどうかを判断するためにも活用されます。車輪上に多数貼付したひずみゲージは、最終的に「ブリッジ回路」にまとめられます。一例として、横圧測定用のブリッジ回路の構成例を図3に示します。

以上の測定原理のうち、横圧の測定原理については、図4に示すように、輪重の負荷位置によっては測定誤差が生じるという欠点がありま

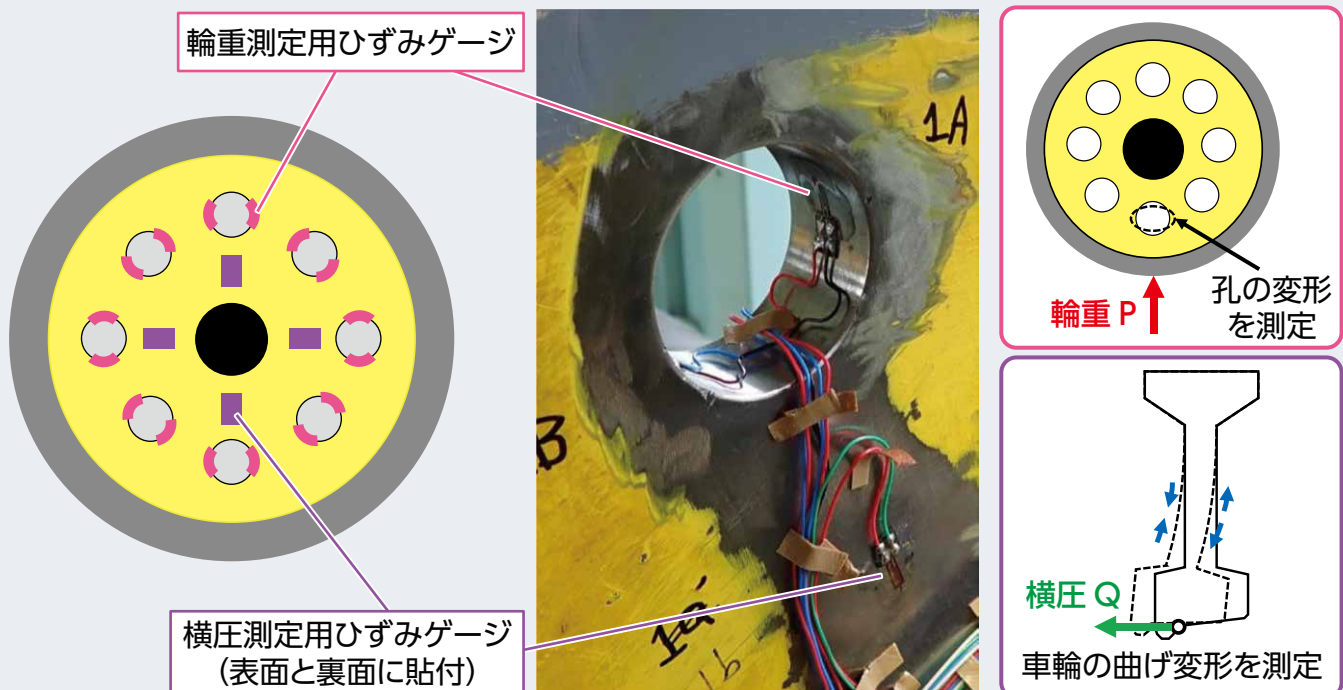
垂直ひずみ

材料に引張、圧縮の力が作用したときに生じる引張、圧縮の変形率です。

ブリッジ回路

複数のひずみゲージや抵抗器の電気配線を相互につなぎ合わせて閉回路にしたものです。それぞれのセンサーの信号の微小な変化を電氣的に取り出すために利用されます。

図2 PQ輪軸の構成例



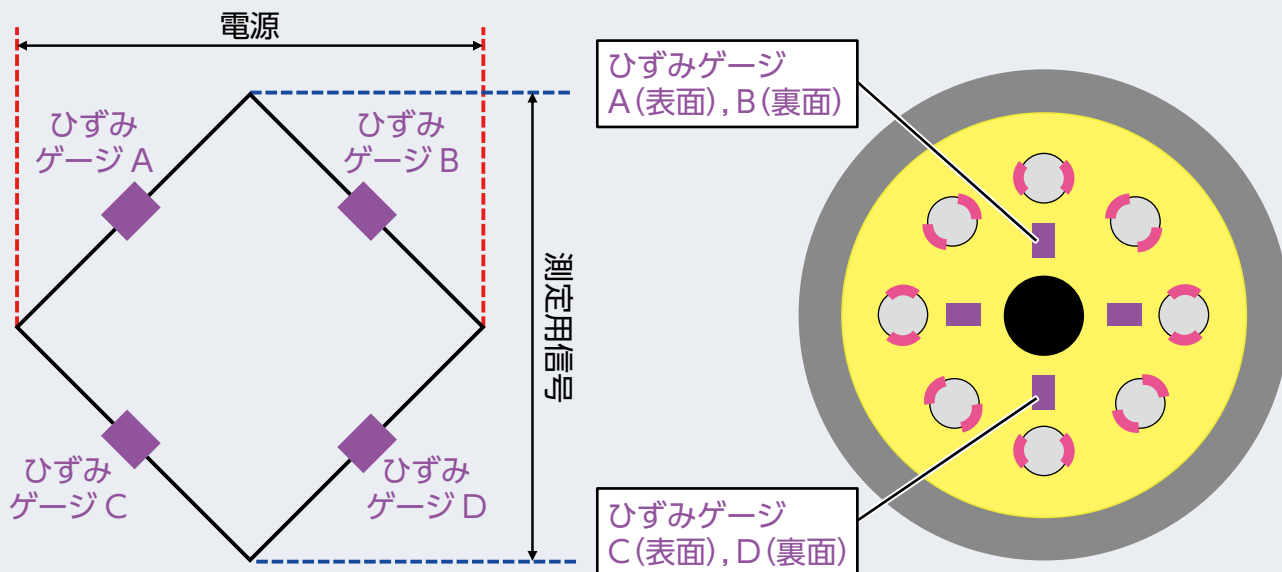


図3 横圧測定用ブリッジ回路の構成例

す。具体的には、輪重が車輪踏面（車輪がレールと接触する面）の中央付近に作用しているときには、輪重は車輪の曲げ変形にほとんど寄与しないため、横圧の測定精度は高くなります。しかし、輪重が左右方向にずれた位置に作用すると、横圧によって生じる曲げ変形に、輪重によって生じる曲げ変形が足し合わされ、横圧の測定精度が低下してしまいます。これにより、カーブの外側の車輪では、横圧を実態よりも大きく見積もることになります。これは、安全性

を実態よりも厳しく評価することになり、安全性評価のうえでは問題ありません。一方で、より実態に即した評価を実現することが課題でした。

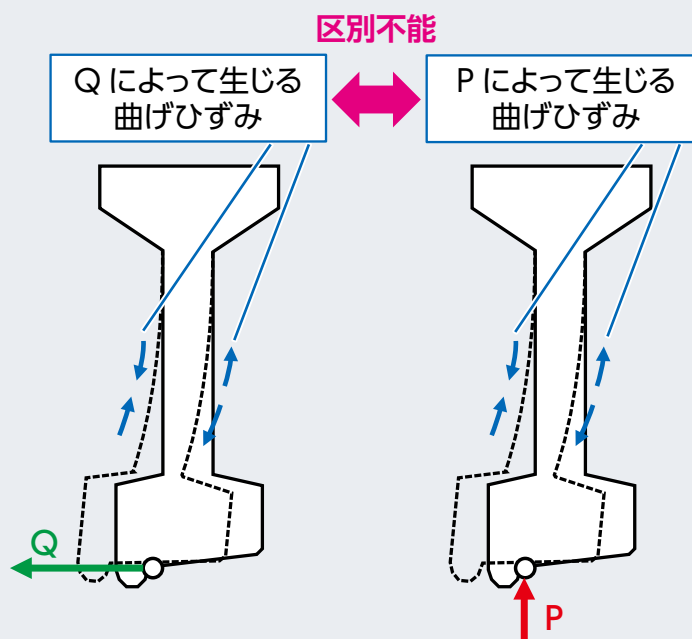
せん断ひずみを活用した横圧測定法の提案

以上の課題を解決するため、「孔の側面のせん断ひずみ^⑤を用いて横圧を測定する」という新しい測定原理を考案しました。具体的には、図5に示すように、輪重測定用のひずみゲージを貼付する位置に、測定方向が45度ずつ異なる3系統のひずみゲージが1セットになった「3軸ひずみゲージ」を貼付します。このうち、中央の1系統のひずみゲージは、現行の方法と同じように輪重測定に使用します。残り2系統については、従来の測定方法と信号の数が同じになるように、複数のひずみゲージをまとめてブリッジ回路を構成します。もともと、輪重測定用の

⑤ せん断ひずみ

材料がひし形に変形する際の、ひし形の傾き角度に相当する量です。適当な座標変換によって、垂直ひずみに変換することもできます。

図4 輪重の作用が横圧測定に及ぼす影響



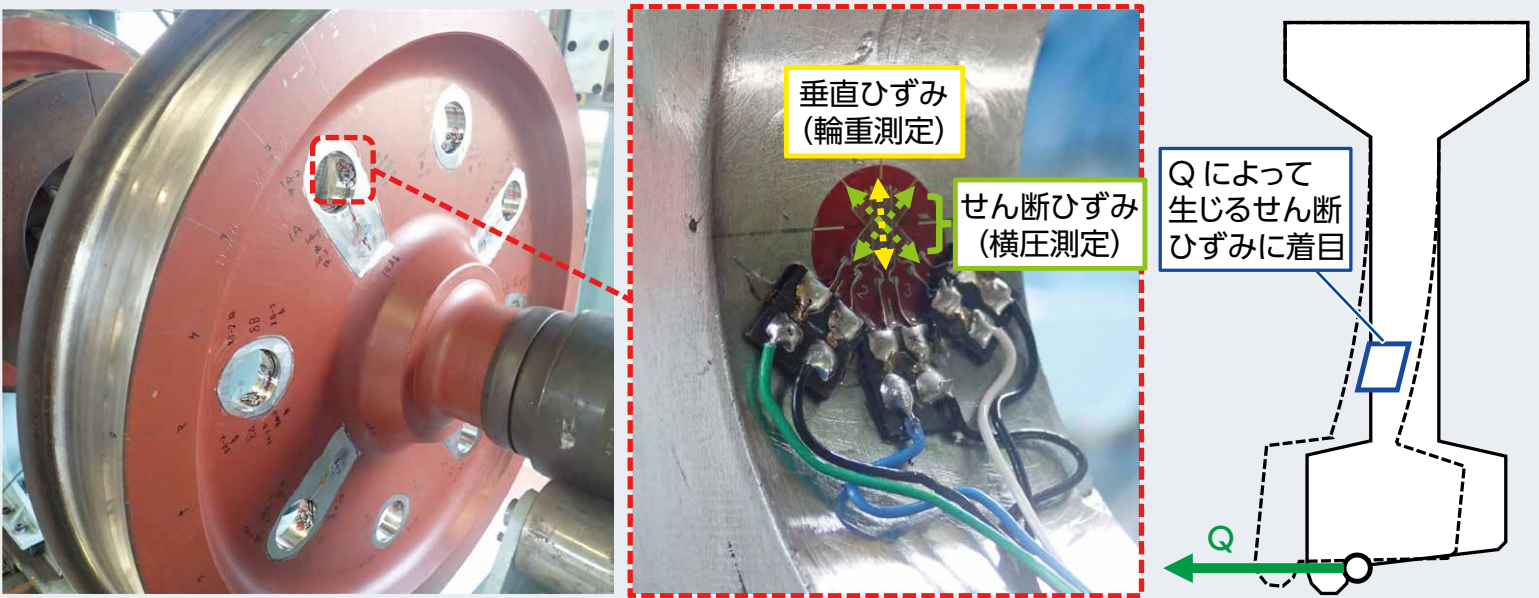


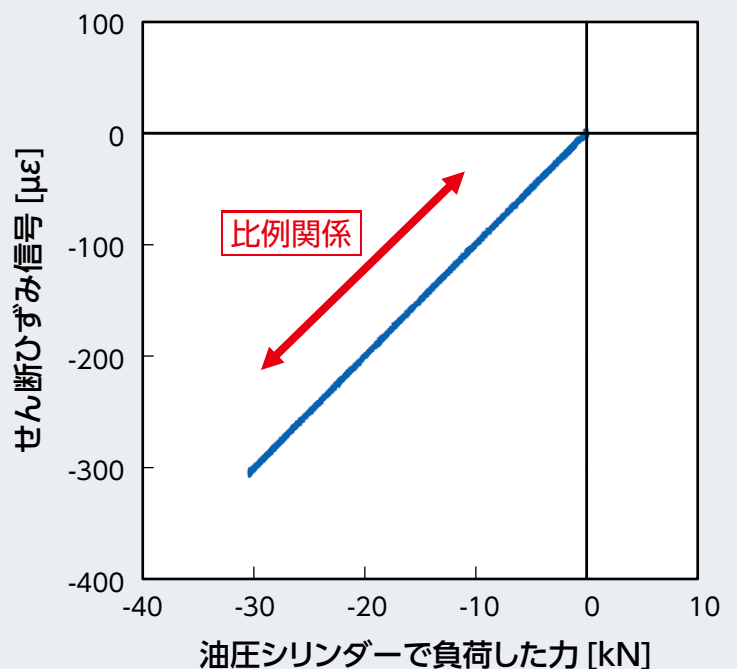
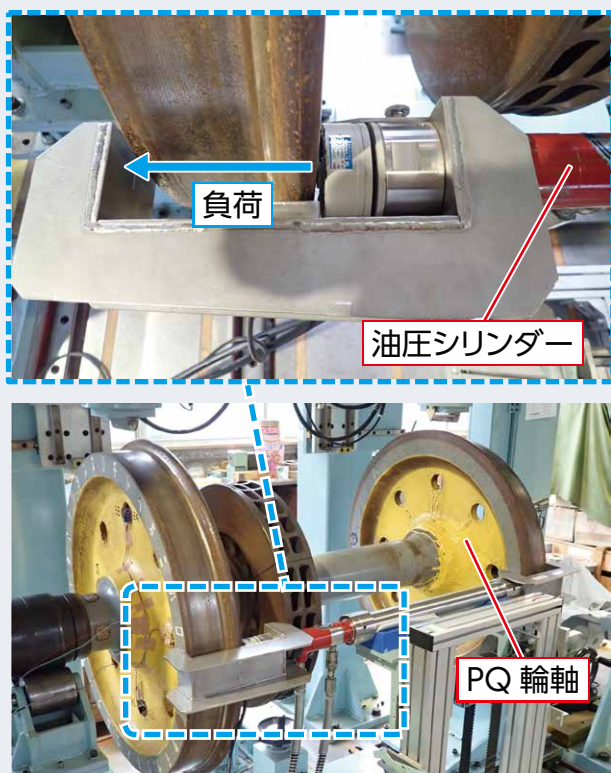
図5 せん断ひずみを活用した横圧測定法

ひずみゲージが少し傾いていると、このひずみゲージが横圧の影響を受けやすい、ということが経験的に知られており、輪重の測定精度を向上させるためには、できる限り真っすぐ貼り付けなければなりません。一方、提案した横圧測定法は、このことを逆手に取り、むしろ極端に斜めに貼ることで、横圧を測定できるようにならないか、という発想から生まれました。

まず、せん断ひずみを横圧の尺度として利用で

きるかどうかを検証するため、油圧シリンダーを用いて車輪に静的に横圧を负荷する実験を行いました(図6)。図に示すように、负荷した横圧とせん断ひずみとの間には比例関係が見られ、せん断ひずみを横圧の尺度として利用できることを確認しました。続いて、輪重が作用したときの影響を実験的に評価しました(図7)。図7に示すグラフの縦軸は、脱線係数の誤差を試験結果から推定した値を示しており、この値が小さ

図6 静的に横圧を负荷する実験の結果



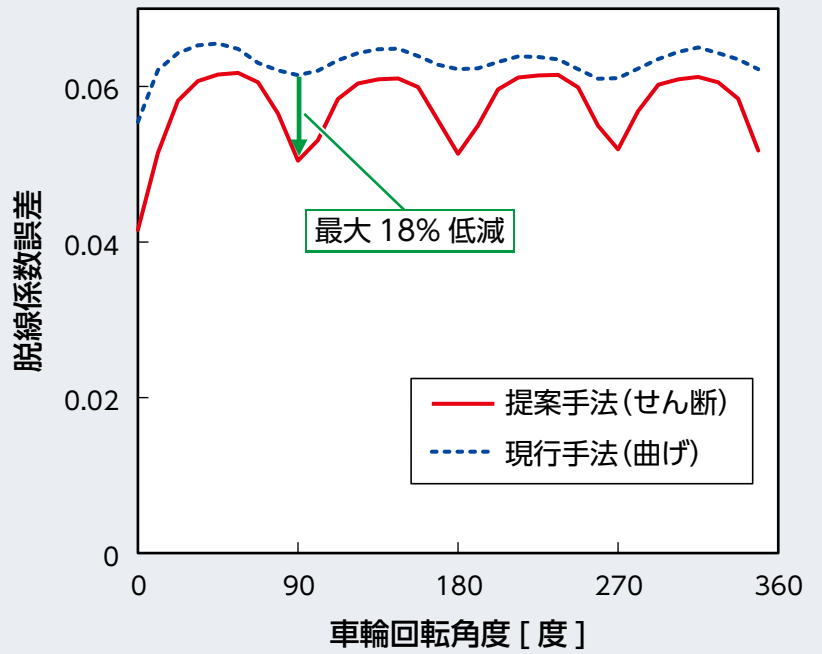
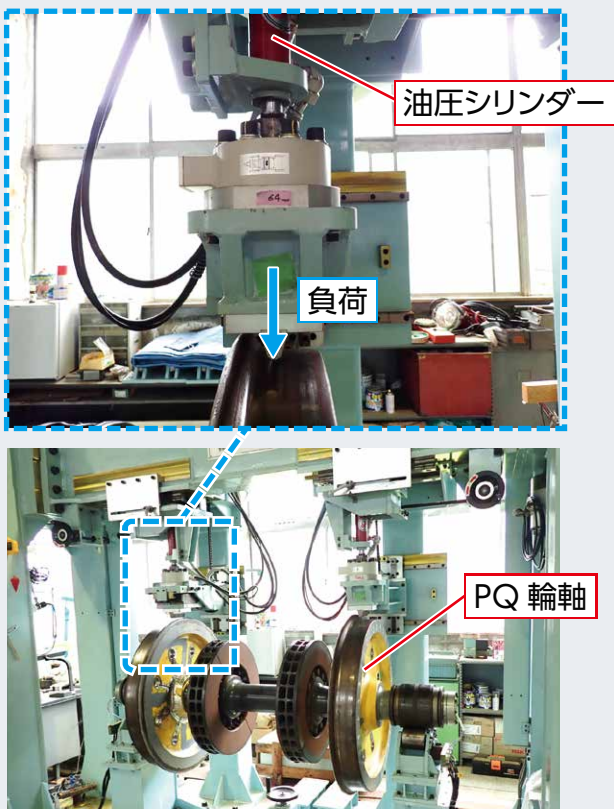


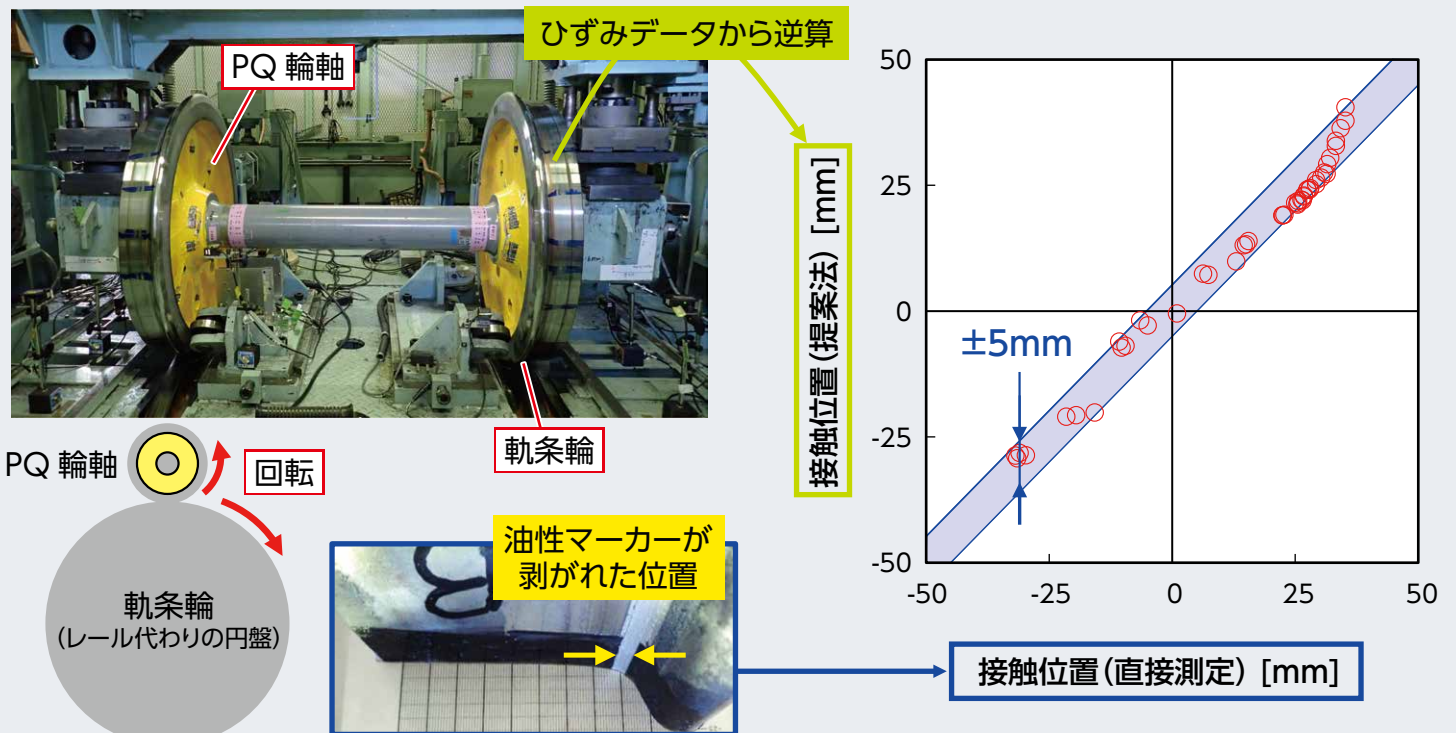
図7 輪重が作用した時の影響の実験結果

いほど輪重の影響を受けにくく、横圧の測定精度が高いことを示しています。図に示すように、完全に輪重の影響を除去することはできないものの、現行の横圧測定法に比べて、提案法の方が輪重の影響を受けにくいことがわかりました。

接触位置測定への応用

前述したとおり、輪重がどの程度横圧測定誤差に影響を及ぼすかは、車輪・レール間の接触位置によって変化します。さらに、これまでに説明したように、現行の車輪曲げによる横圧測

図8 回転試験による接触位置測定の精度検証結果



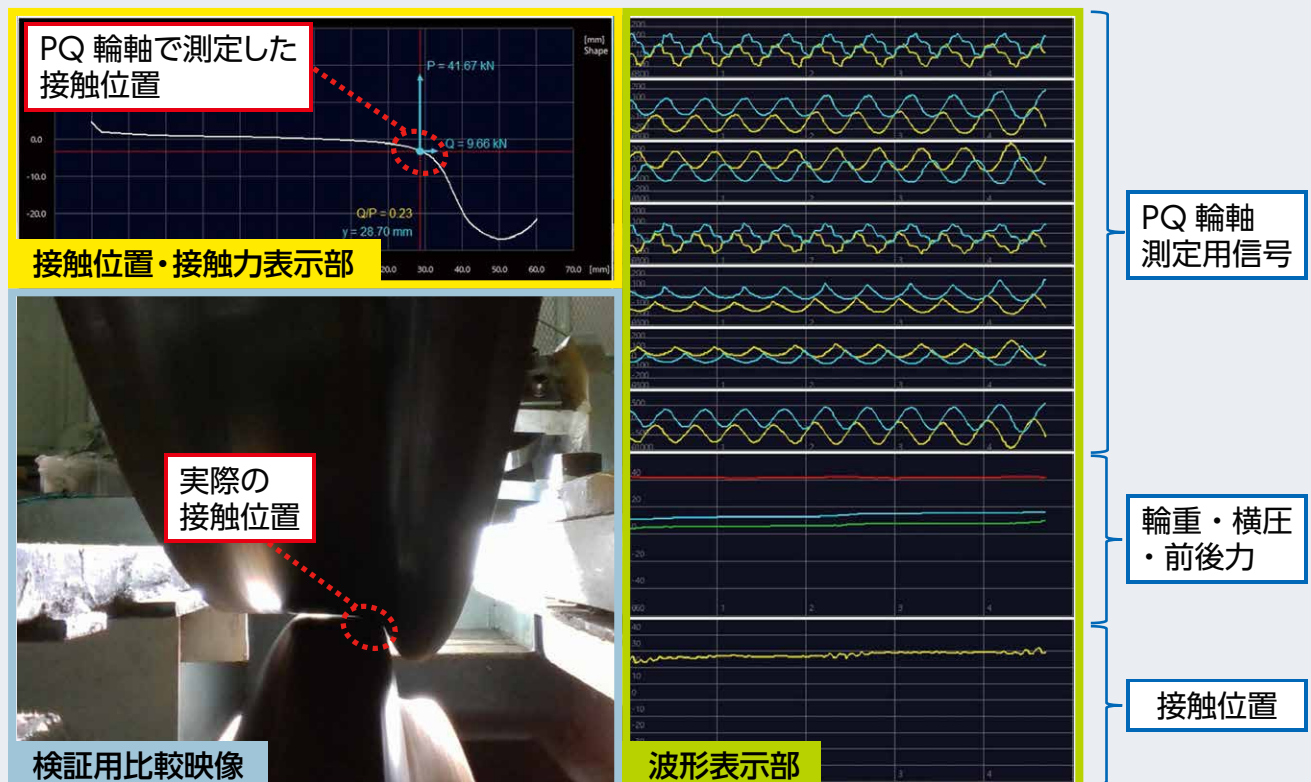


図9 開発中の接触位置と力の測定システム

定法と、せん断ひずみを活用した横圧測定法では、接触位置が同じであっても輪重の影響の受けやすさが異なります。この特性を応用すると、PQ輪軸から取得したひずみデータから、車輪・レール間の接触位置を逆算することができます。接触位置を測定することができれば、例えば新しい車輪形状の性能評価や、摩耗対策の効果検証など、PQ輪軸の活用の幅を広げられる可能性があります。

接触位置の測定精度を検証するために、レールの代わりに巨大な円盤の上で輪軸を回転させる装置である「軌条輪装置」²⁾を使用した回転試験を行いました(図8)。ここでは、あらかじめ車輪踏面上に油性マーカーを塗布しておき、車輪回転後に油性マーカーが剥がれた位置を測定した値を、比較対象としました。油性マーカーを用いて測定した接触位置と比較すると、ひずみデータを用いて±5mm程度の誤差で接触位置を測定できることがわかりました。

現在では、輪重の影響をより受けにくいブリッジ回路の構成方法や信号処理方法の開発と

ともに、ひずみデータをリアルタイムに処理して力と接触位置を同時に測定するシステムの開発(図9)にも取り組んでいます。

おわりに

鉄道車両の走行安全性評価のために近年開発した、より高精度な測定方法である「せん断ひずみを活用した横圧測定法」について紹介しました。PQ輪軸を用いた車輪・レール間作用力の測定技術は、普段一般のお客様の目に触れることはありませんが、鉄道の安全を陰で支える「縁の下の力持ち」のような存在です。本研究の成果が、より実態に即した走行安全性評価の実現に寄与して参ります。RRR

文献

- 1) 金元啓幸：鉄道車両の走行安全性を測る，RRR，Vol.66，No.6，pp.2-5，2009
- 2) 石田誠，石田弘明，伴巧：車輪／レールに関する大型実験設備，RRR，Vol.61，No.6，pp.8-13，2004