

# 輪重測定用孔内部のせん断ひずみを活用した PQ 輪軸による横圧測定法

本堂 貴敏\* 國行 翔哉\* 田中 隆之\* 鈴木 貢\*

Measurement Method of Lateral Force Utilizing Shear Strains  
inside the Wheel Load Measuring Holes of Instrumented Wheelset

Takatoshi HONDO Shoya KUNIYUKI Takayuki TANAKA Mitsugi SUZUKI

This paper proposes a new configuration of instrumented wheelset, which is used to measure the wheel/rail contact forces for the purpose of assessment of a running safety and evaluation of a curving performance of railway vehicles. The lateral force, which is a component of the wheel/rail contact forces, is measured as strains which are caused by the bending deformation of the wheel web in the conventional instrumented wheelset. In this principle of measurement, the measured lateral force would be affected by the application of the wheel load, which leads a reduction of the measurement accuracy of the lateral force. This paper describes in detail a novel instrumentation method for measuring the lateral force which can reduce the influence of the wheel load by using of the shear strains inside holes of the wheel web.

キーワード：走行安全, 輪重・横圧測定, 脱線係数, 3軸ひずみゲージ, 曲げモーメント

## 1. はじめに

鉄道における輪重・横圧測定は、車両の走行安全性評価や曲線通過性能評価において重要な役割を果たしている。輪重 (P) とは、車輪がレールから受ける上下方向の力であり、横圧 (Q) とは、同じく左右方向の力である。横圧を輪重で除した値  $Q/P$  は脱線係数と呼ばれ、走行安全性評価の指標として用いられる。車両が実軌道を走行している際の輪重・横圧を連続的に測定する方法のひとつとして、車輪に複数のひずみゲージを貼付してロードセル化した「PQ 輪軸」(図1) が国内外で広く使用されている<sup>1)</sup>。その構成方法にはバリエーションがあるものの、車輪板部に複数設けられた孔側面に生じる垂直ひずみを用いて輪重を測定すること、および、車輪板部側面の曲げひずみを用いて横圧を測定することは、国内の PQ 輪軸に共通する特徴である<sup>2)3)</sup>。

曲げひずみを用いた横圧測定法 (以下、従来法) には、車輪・レール間接触位置が左右方向にシフトした場合に、輪重による曲げモーメントの影響を受け、測定精度が低下し得るという課題がある (図2)。具体的には、曲線通過中にフランジ近くで接触する曲線外軌側車輪の横圧は、輪重の影響でみかけ上大きく測定され、実態よりも厳しい評価となる場合があった。本研究ではこの課題に対し、輪重測定用孔内部のせん断ひずみを横圧尺度として活用する PQ 輪軸構成手法を提案する (以下、提案法)。そして、提案法が従来法と比較して輪重の影響を

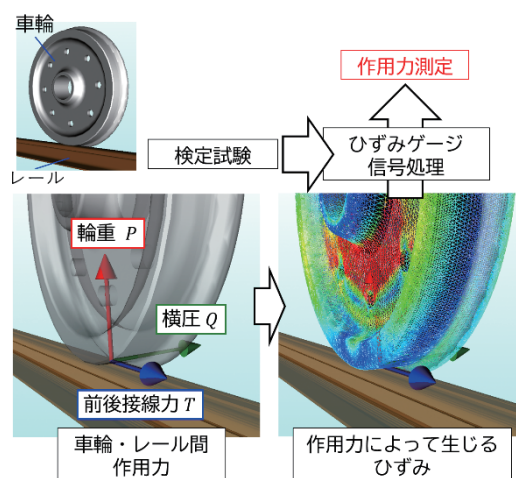


図1 PQ 輪軸による車輪・レール間作用力の測定原理

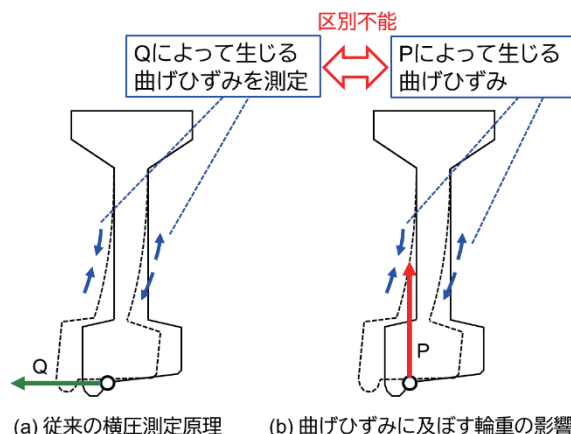


図2 輪重作用による横圧測定精度低下メカニズム

\* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

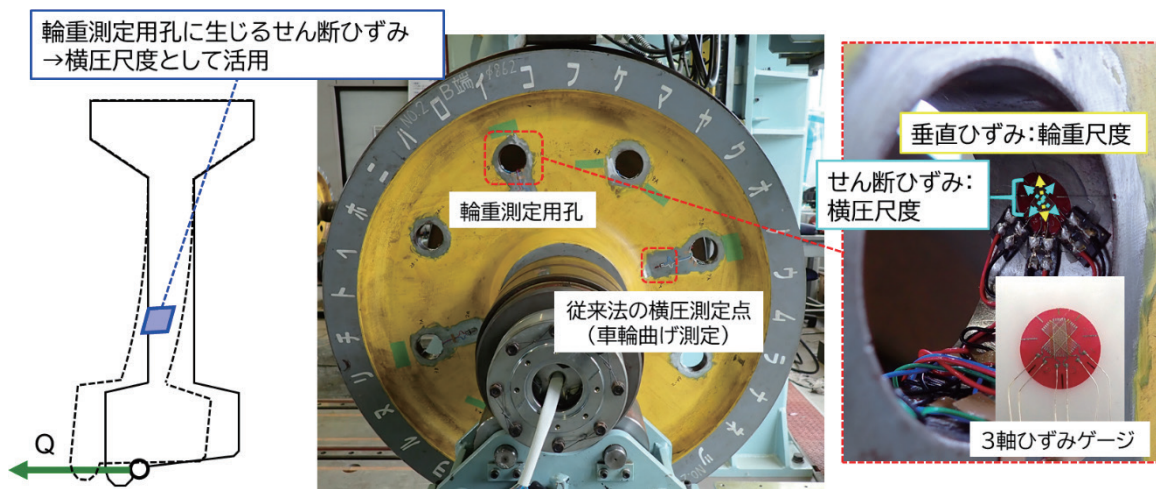


図3 輪重測定用孔内部のせん断ひずみを活用した横圧測定法のコンセプト

受けにくいことを、FEM解析および静荷重試験を通じて示す。

## 2. 輪重測定用孔内部のせん断ひずみを活用した横圧測定法の概要

### 2.1 提案法のコンセプトと特長

本研究で提案する横圧測定法は、図3に示すように、横圧作用時に車輪板部に生じるせん断ひずみを活用するものである。本手法では、PQ輪軸の輪重測定用ひずみゲージの貼付位置に、ロゼット解析用の3軸ひずみゲージを貼付し、垂直ひずみと同時にせん断ひずみを測定する。具体的には、中央のひずみゲージで垂直ひずみを測定し、輪重の尺度とする。一方、残り2点の直交するひずみゲージでせん断ひずみを測定し、横圧の尺度とするのが提案法のコンセプトである。

本手法を横圧測定法として採用した場合でも、輪重の影響を完全に除去できるわけではない。しかし、本稿の検証で示す通り、従来法と比較すると輪重の影響は軽減される。輪重の影響を完全に除去し得る方法として、左右方向の接触位置を同時に測定し、その結果を用いて横圧を補正する方法が考えられる<sup>4)~8)</sup>。この方法は、接触位置を測定するために追加測定機器<sup>4)5)</sup>、もしくは通常よりも多くのブリッジ回路<sup>6)7)8)</sup>を必要とする。特にPQ輪軸に追加のブリッジ回路を設ける方法では、それに対応した多チャンネル信号伝送装置が同時に必要である。本稿で提案する測定法は、輪重の影響を完全に除去することはできないものの、チャンネル数やひずみゲージの貼付位置などに従来の方法と互換性があるという特長がある。

### 2.2 提案法におけるブリッジ回路の構成

輪重測定用孔が1車輪につき8箇所設けられている

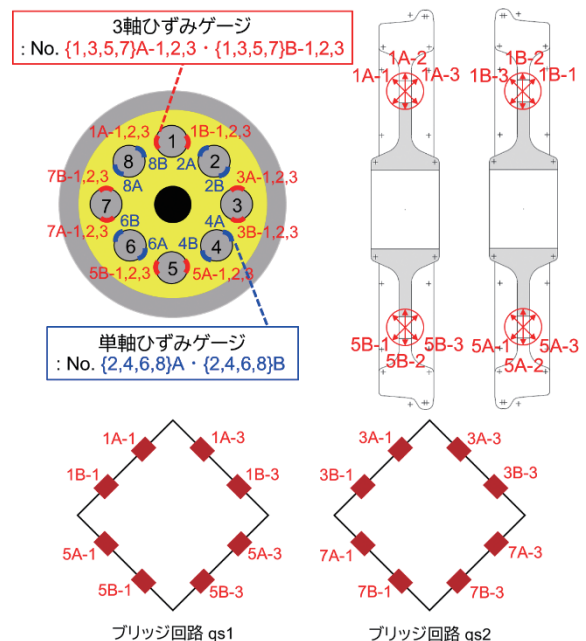


図4 提案法におけるブリッジ回路の構成例

新連続法<sup>2)</sup>用の輪軸における、提案法のブリッジ回路構成例を図4に示す。便宜上図に示すように、輪重測定用孔に1から8まで付番する。3軸ひずみゲージを貼付するのは1, 3, 5, 7番の孔(4箇所)であり、各孔の対向する位置に2枚ずつ貼付する。残りの4箇所の孔には、従来と同じように単軸ひずみゲージを貼付し、ブリッジ回路を構成する。3軸ひずみゲージの45度傾いたチャンネルについては、図4下段に示すように、2系統のブリッジ回路qs1, qs2にまとめる。

8箇所全ての孔に3軸ひずみゲージを貼付することも考えられるが、後述するように、3軸ひずみゲージの貼付位置が4箇所であっても、車輪全周にわたって十分な横圧感度が確保される。したがって、感度の観点では新連続法と間欠法の両方に、図4に示す構成で対応できる。

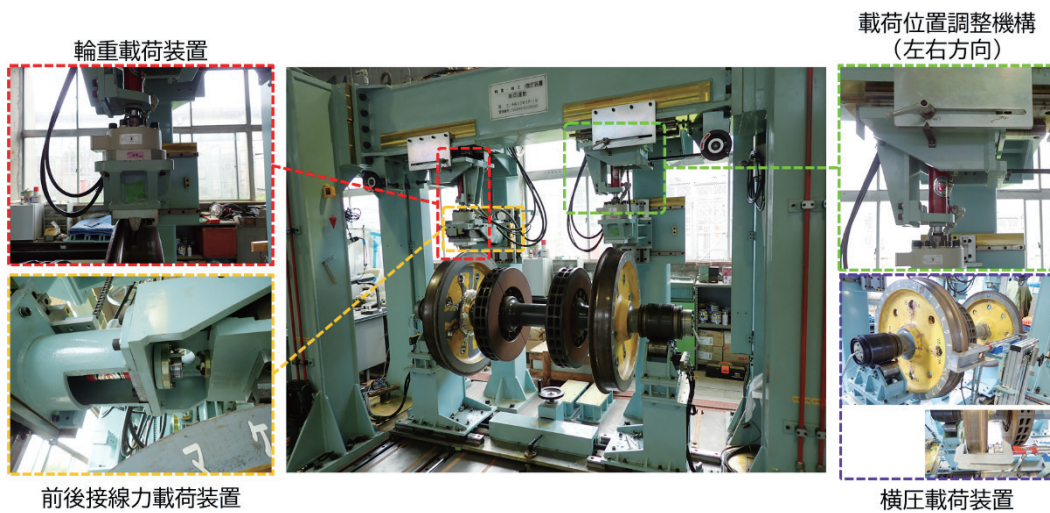


図6 PQ 輪軸検定装置の概観

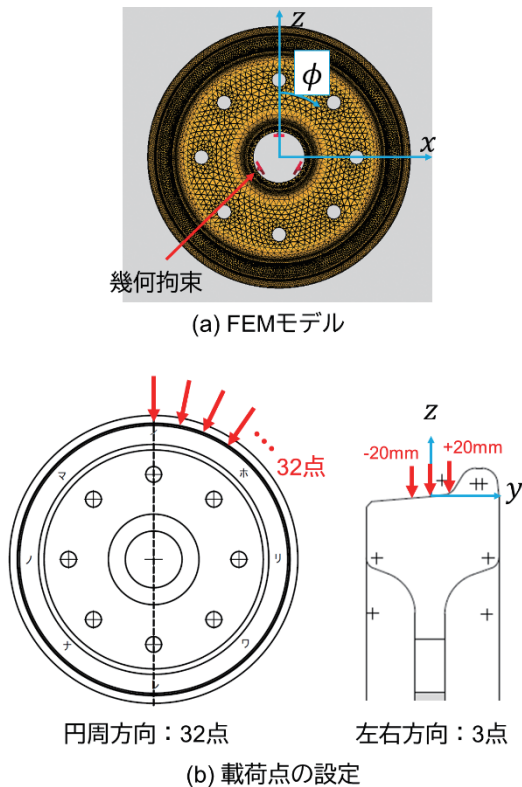


図5 FEM モデルの概要と荷重点の設定

### 3. 提案する横圧測定法の特性格検証方法

本章では、提案する横圧測定法の各種検証に用いた、FEM 解析と静荷重試験の概要について説明する。

#### 3.1 FEM 解析による検証

実際の PQ 輪軸を用いた試験に先立ち、車軸が圧入される穴の内面に幾何拘束を設定した 1 車輪有限要素モデルを用いた FEM 解析を実施した。FEM モデルの概

要を図 5 に示す。車輪の 3 次元幾何学モデルを、3D CAD ソフトウェアである“FreeCAD”で作成し、オートメッシュである“NETGEN”で 2 次精度四面体要素に要素分割したうえで、FEM ソルバである“CalculiX”を用いて、各種荷重条件におけるひずみ場を解析した。荷重点は図 5 に示すように、円周方向 32 箇所、左右方向 3 箇所 ( $y=0\text{mm}$ ,  $y=\pm 20\text{mm}$ ) の合計 96 箇所を設定した。

CalculiX による解析結果は、ノード位置における Lagrange ひずみテンソルとして得られる。ひずみゲージによるひずみ測定結果を得るために、まずひずみテンソルを 2 次関数で補間し、ひずみゲージ貼付位置におけるひずみテンソルを算出する。さらに、そのひずみテンソルをひずみゲージ感度方向に座標変換する。例えば、3 軸ひずみゲージの 45 度傾いたひずみゲージについては、計算されたひずみテンソルを 45 度回転変換し、ひずみゲージ貼付方向のひずみ成分を求める。このひずみ成分から、ひずみゲージの抵抗値を計算し、ホイートストンブリッジ回路の解放電圧の公式を当てはめることにより、ブリッジ回路の出力を計算する。

#### 3.2 静荷重試験による検証

FEM 解析結果の妥当性を確認するために、鉄道総研が所有する PQ 輪軸検定装置 (図 6) を用いた静荷重試験を実施した。この装置は PQ 輪軸に輪重や横圧に相当する力を荷重する装置で、ロードセルによる荷重荷重の測定と、PQ 輪軸のブリッジ回路出力の測定を同時に行うことで、PQ 輪軸のキャリブレーションを行うための装置である。輪重の荷重位置は、図 6 に示す荷重位置調整機構によって変更することができ、これによって輪重荷重点が左右方向にシフトした場合のブリッジ回路出力を評価する。

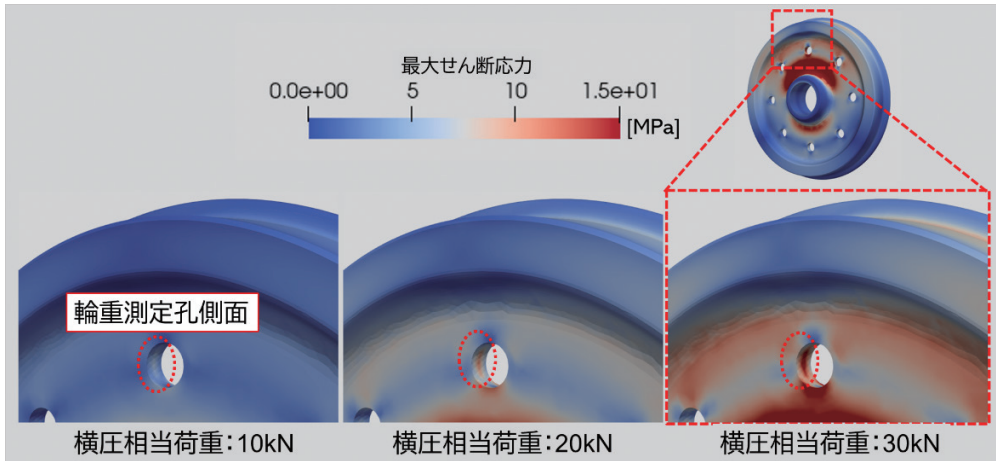


図7 横圧相当荷重と輪重測定用孔内部の最大せん断応力の関係：FEM 解析結果のカラーコンター図

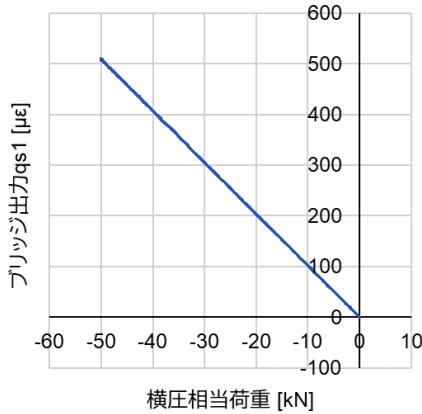


図8 静荷重試験における横圧相当荷重とブリッジ出力の関係（1番の孔の直上）

#### 4. 各種特性の検証結果

##### 4.1 横圧尺度としての活用可能性検証

輪重測定用孔内部のせん断ひずみを横圧の尺度として活用可能であるかを検証するために、横圧相当の荷重とせん断ひずみの関係をFEMで調査した。なお、横圧荷重については、左右方向の荷重位置の違いは顕著な影響を及ぼさないため、荷重位置は $y=0\text{mm}$ の1条件とした。

FEM解析結果の例として、輪重測定用孔付近の最大せん断応力分布をカラーコンターで表現したものを図7に示す。同図には、図4に示す1番の孔の直上に横圧相当の荷重を10kN、20kN、30kNの3段階で荷重した解析結果を表している。この図より、横圧相当の荷重が増加するにつれて、輪重測定用孔内部のせん断応力が増加する傾向が確認できる。一方、図8には、静荷重試験において、1番の孔の直上に横圧相当荷重を荷重、および除荷した際の、荷重とブリッジ回路qs1の出力の関係を示している。同図において、横圧相当荷重とブリッジ出力の間に比例関係が認められることから、せん断ひず

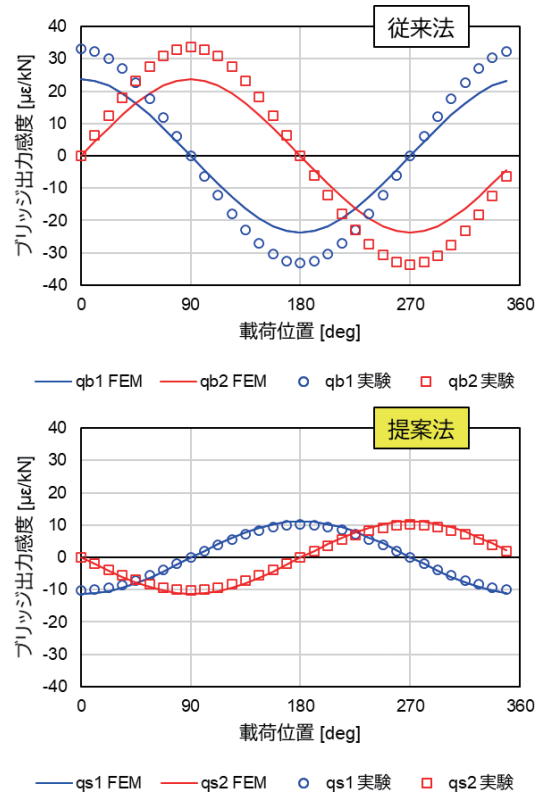


図9 車輪円周上32点の荷重位置と横圧に対するブリッジ出力感度の関係

みを横圧尺度として活用できることが確認された。

車輪円周上に設定した32点の荷重点全てについて、横圧に対するブリッジ出力感度（ブリッジ出力を荷重で除した値）を調査した結果を図9に示す。図には、従来の車輪曲げを用いた横圧測定法の出力も、ブリッジ回路qb1、qb2として示している。提案法の横圧感度は、従来法と同様に、概ね車輪円周上の荷重位置に対して位相が90度異なる三角関数状となる。したがって、先に述べた通り、使用する孔が4箇所であっても、車輪全周にわたって十分な感度が確保される。従来法と比較する

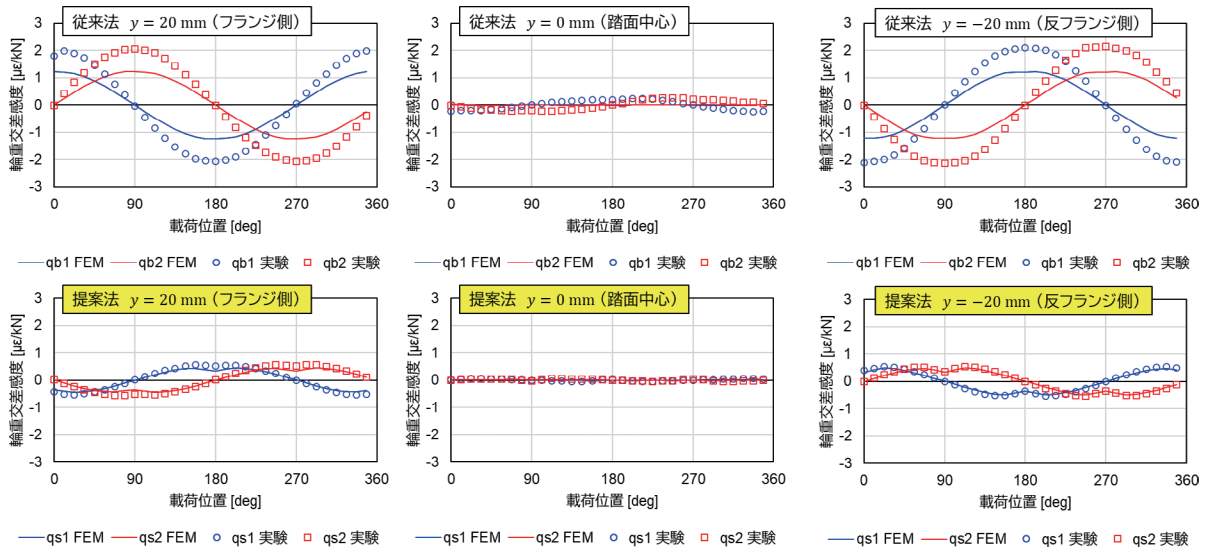


図 10 輪重作用時のブリッジ出力交差感度

と、提案法の感度のピーク値は 1/3 程度に低減するものの、一般的な在来線用輪軸の場合、輪重測定用のブリッジ回路のピーク感度は  $2.5\mu\text{e}/\text{kN}$  程度<sup>9)10)</sup> (提案法の 1/4 程度) である。したがって、PQ 測定系全体でみると、提案法の横圧感度は感度上のボトルネックとはならない。

なお、従来法では、FEM と実験の間に乖離が見られるが、その理由として曲げひずみの評価位置誤差の影響が考えられる。具体的には、横圧測定用ひずみゲージの車輪半径方向の貼付位置には明確な決まりはないため、FEM 解析では暫定的な位置においてひずみ量を評価した。この乖離はそのために生じたものと考えられる。

#### 4.2 輪重作用時のブリッジ出力交差感度の検証

本節では、輪重を作用させた場合の横圧測定用ブリッジ回路の出力 (以下、「交差感度」と表現する) について検証する。FEM 解析、および静荷重試験によって得られた円周方向載荷位置と交差感度の関係を、左右方向の載荷位置ごとに図 10 に示す。図に示すように、輪重の載荷位置を左右方向 (y 方向) に変化させると、横圧測定用ブリッジ回路にも比較的大きな出力が生じることがわかる。

輪重の影響の受けやすさを従来法と提案法で比較する場合、各ひずみ測定点での基本的なひずみやすさが異なるため、交差感度そのものを両者で比較しても公平な比較にはならない。輪重  $P$  と横圧  $Q$  が同時に作用した場合、ブリッジ回路出力  $\epsilon$  は近似的に式 (1) で表せる。

$$\epsilon = \alpha Q + \beta P \quad (1)$$

ただし、 $\alpha$  は横圧感度、 $\beta$  は輪重交差感度である。いま、第 2 項の交差感度の大きさが把握できないと仮定した

場合、計測結果としての横圧  $\hat{Q}$  は式 (2) のように表せる。

$$\hat{Q} = \frac{\epsilon}{\alpha} = Q + \frac{\beta}{\alpha} P \quad (2)$$

すなわち、計測結果  $\hat{Q}$  は、真の横圧  $Q$  に交差感度項が加算された結果として得られ、その影響の度合いは、輪重  $P$  が同じ値であれば  $\beta/\alpha$  によって決まる。また、式 (2) の両辺を  $P$  で割ると、式 (3) となる。

$$\frac{\hat{Q}}{P} = \frac{Q}{P} + \frac{\beta}{\alpha} \quad (3)$$

輪重  $P$  が正しく測定されていると仮定すると、左辺の  $\hat{Q}/P$  は測定結果から計算した脱線係数、右辺の  $Q/P$  は真の脱線係数である。したがって、 $\beta/\alpha$  は、脱線係数の見積もり誤差そのものとなる。本稿では  $\beta/\alpha$  を「交差感度比」と定義する。これまでの検証結果からも明らかなように、 $\alpha$  および  $\beta$  は車輪円周方向の載荷位置  $\phi$ 、および左右方向の載荷位置  $y$  の関数であり、さらに 2 系統のブリッジ回路それぞれに対して  $\alpha_1(\phi)$ 、 $\beta_1(\phi, y)$  および  $\alpha_2(\phi)$ 、 $\beta_2(\phi, y)$  が定義できる。それぞれの関数が、 $\phi$  に関して位相が 90 度異なる周期関数で表現できることを鑑みて、 $\phi$  と  $y$  の関数としての交差感度比  $r(\phi, y)$  を式 (4) のように定義する。

$$r(\phi, y) = \frac{\sqrt{\beta_1(\phi, y)^2 + \beta_2(\phi, y)^2}}{\sqrt{\alpha_1(\phi)^2 + \alpha_2(\phi)^2}} \quad (4)$$

輪重の影響が大きくなる  $y = \pm 20\text{mm}$  の条件におい

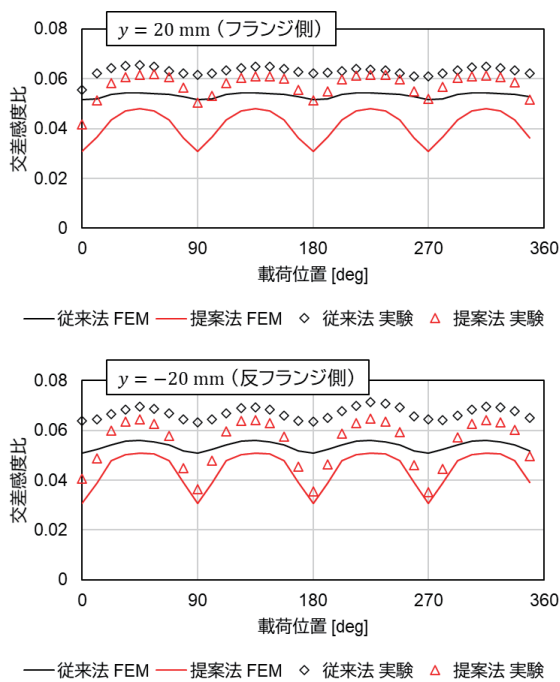


図 11 交差感度比の計算結果

て、交差感度比を $\phi$ の関数として計算した結果を図11に示す。従来法と比較して、提案法の交差感度比は、接触位置の違いにかかわらず小さいことがわかる。特に、3軸ひずみゲージを貼付した孔の近辺(0deg, 90deg, 180deg, 270deg)で、特に交差感度比低減効果が大きいことから、間欠法によるPQ測定の精度が向上することが見込まれる。また、新連続法においては、著大横圧が作用する位置によっては、交差感度比が従来法と同程度となる場合があるものの、脱線係数の目安値超過継続時間については従来法よりも実態に近づくことが期待できる。

従来法と提案法の、フランジ側载荷条件( $y=20\text{mm}$ )の実験結果を比較すると、最大で0.015(1.5%)の交差感度比低減効果が確認された。ただし、これは踏面中心からフランジ側に20mm载荷位置をシフトさせた場合の結果であり、急曲線ではよりフランジ側で接触するため、交差感度比低減幅はより大きくなると考えられる。

## 5. まとめ

本稿では、輪重測定用孔の内部のせん断ひずみを活用した横圧測定法を提案した。この方法は、PQ輪軸の輪重測定用ひずみゲージ貼付位置に3軸ひずみゲージを貼付し、垂直ひずみとせん断ひずみを同時に測定することで、輪重と横圧を同時に測定することを特徴とする。従来の車輪板部の曲げひずみによる横圧測定法と比較して、輪重が作用した際のブリッジ出力(交差感度)の影響が相対的に小さいことを、有限要素法による解析、お

よび静荷重試験を通じて示した。また、この方法には、チャンネル数やひずみゲージ貼付位置などに、従来の方法と互換性があるという特長がある。すなわち、提案手法を適用することにより、大幅なコストアップをもたらすことなく、従来よりも実態に近い走行安全性評価を行えるようになることが期待できる。

今後は、輪軸が回転している状態での精度検証のほか、新連続法への適用性の検証や、接触位置測定への応用などに取り組む予定である。

## 文献

- 1) Bracciali, A., et al., "Review of Instrumented Wheelset Technology and Applications," in Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, No.167, 2014.
- 2) 石田弘明ほか：鉄道車両の新しい輪重、横圧、脱線係数連続測定法(測定装置の開発)、日本機械学会論文集C編, Vol.63, No.614, pp.3417-3423, 1997
- 3) 佐藤潔ほか：間欠・連続併用に対応した輪重・横圧測定処理システムの開発、鉄道総研報告, Vol.29, No.2, pp.17-22, 2008
- 4) Burstow, M., De Podesta, M. and Pearce, J., "Understanding Wheel/rail Interaction with Thermographic Imaging," in Proceedings of the 22nd IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, No.105, 2011.
- 5) Yamamoto, D., "Locating of the Contact Position Between the Wheel and the Rail by Means of Thermal Imaging," Quarterly Report of RTRI, Vol.60, No.32, pp.65-71, 2019.
- 6) Kanehara, H. and Fujioka, T., "Measuring Rail/Wheel Contact Points of Running Railway Vehicles," Wear, Vol.253, pp.275-283, 2002.
- 7) Bižićić, M.B., Petrovic, D.Z., Tomić, M.C. and Djinović, Z.V., "Development of Method for Experimental Determination of Wheel-rail Contact forces and Contact Point Position by Using Instrumented Wheelset," Measurement Science and Technology, Vol.28, DOI: 10.1088/1361-6501/aa666f, 2017.
- 8) 小澤諒太ほか：車輪板部のひずみ量解析を用いた車輪とレールの接触位置の特定手法、交通・物流部門大会講演論文集, p.3211, 2018
- 9) Hondo, T., and Noguchi, Y., "Measurement Method for longitudinal displacement of wheel/rail contact point using strain gauges put on wheels," Mechanical Engineering Journal, Vol.7, No.3, p.19-00659, 2020.
- 10) 本堂貴敏：PQ輪軸のひずみ出力に対する回転角度センサが不要な縦クリープ力車輪1回転移動平均値抽出手法、日本機械学会論文集, Vol.87, No.894, p.20-00237, 2021