

輪重横圧測定用輪軸の車輪・レールの接触状態を
勘案した特性評価

田中 隆之* 國行 翔哉*

Characterization of Instrumented Wheelset Considering Contact Condition between Wheel and Rail

Takayuki TANAKA Shoya KUNIYUKI

Instrumented wheelsets are widely used for measuring wheel loads and lateral forces acting between wheel and rail. These forces are fundamental quantities in the context of running safety assessment of railway vehicles. Authors proposed a testing apparatus in order to clarify characteristics of strain output of instrumented wheelset which depend on the contact condition acting between wheel and rail. This paper describes some results of characteristic tests conducted using this apparatus. The aim of the tests was to confirm two aspects: the validity of the estimated force by the instrument wheelset, and the validity of an assumption generally utilized in the safety assessment against flange climbing.

キーワード：車両の走行安全性評価, PQ 測定, PQ 輪軸, 車輪・レール間接触

1. はじめに

鉄道車両が走行する際の、安全性に関する車両の運動性能（走行安全性）の評価は脱線を防止する見地から大変重要である。走行安全性評価においては、車輪とレールとの間に作用する力を用いることが一般的であり、車輪がレールから受ける上下方向の力である輪重(P)，ならびに左右方向（まくらぎ方向）の力である横圧(Q)が重要なパラメータとなる。特に、横圧を輪重で除した値は脱線係数と呼ばれ、走行安全性評価の指標として広く用いられている。

車両の走行安全性や曲線通過性能などを確認する目的で実施される走行試験で輪重や横圧を測定する際、国内では輪重横圧測定用輪軸（PQ 輪軸）を用いることが一般的である。PQ 輪軸では、輪重や横圧に相当する作用力が、車輪板部に発生するひずみ量により測定されるが、このひずみ量測定には車輪に貼り付けたひずみゲージを使用する。図1にPQ 輪軸上のひずみゲージの貼り付け位置、ならびにひずみ信号を出力するためのブリッジ回路の例（新連続法¹⁾の場合）を示す。

PQ 輪軸で輪重・横圧測定を行うにあたっては、事前検定を実施し、ひずみ量と輪重・横圧との関係を明らかにしておく必要がある。専用の検定装置により事前検定した結果に基づき、車両走行時に測定されるひずみ量は輪重・横圧に変換される。鉄道総合技術研究所が所有する輪重・横圧検定装置を図2に示す²⁾。本装置による輪重・横圧の検定は、それぞれ以下の要領で行われる。

- (1) 輪重：接触子を車輪の踏面基準位置（例えば、修正円弧踏面の場合には車輪背面から 65mm の位置）に押し当て、輪重に相当する荷重を鉛直方向に負荷する（図2(a)）。
- (2) 横圧：左右の車輪背面間にシリンダを挿入し、車輪の踏面基準位置の高さで車輪背面にロードセルを押し当てた状態でシリンダを伸長することで、横圧に相当する荷重を左右方向に負荷する（図2(b)）。

PQ 輪軸に貼り付けるひずみゲージは例えば図1(a)に示すような配置であるので、車輪円周上の荷重負荷位置に応じて出力されるひずみ量が変化する。そこで、PQ 輪軸の検定を行う際には、図1(a)に示すように円周に沿って均等に分割した測定点（図1の例では、点1, 2, 3・・・, 32の計32点）を定義し、測定点

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

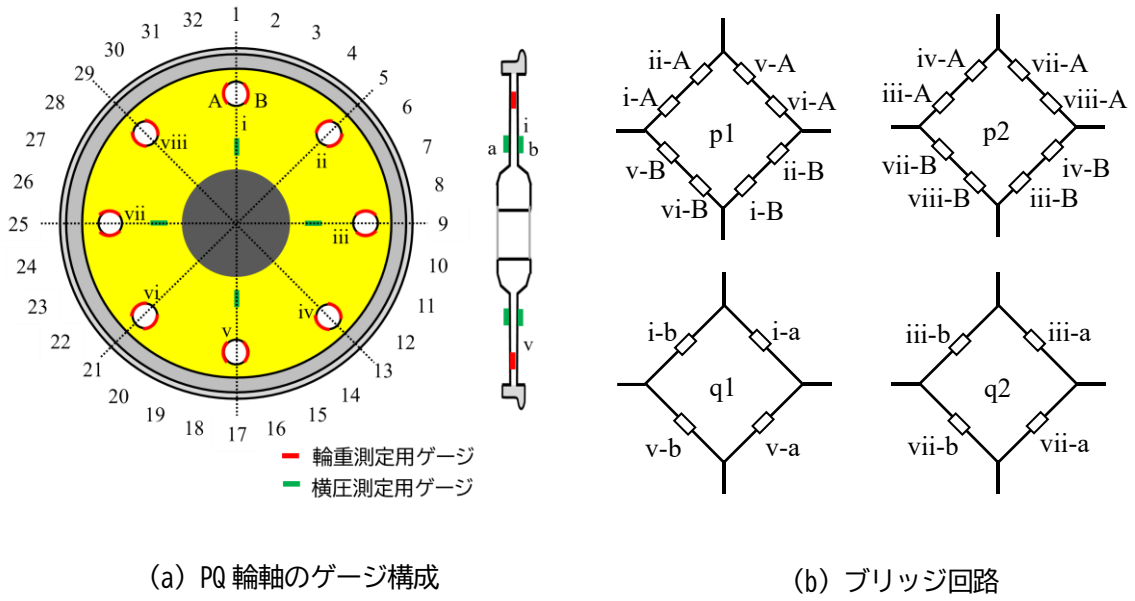
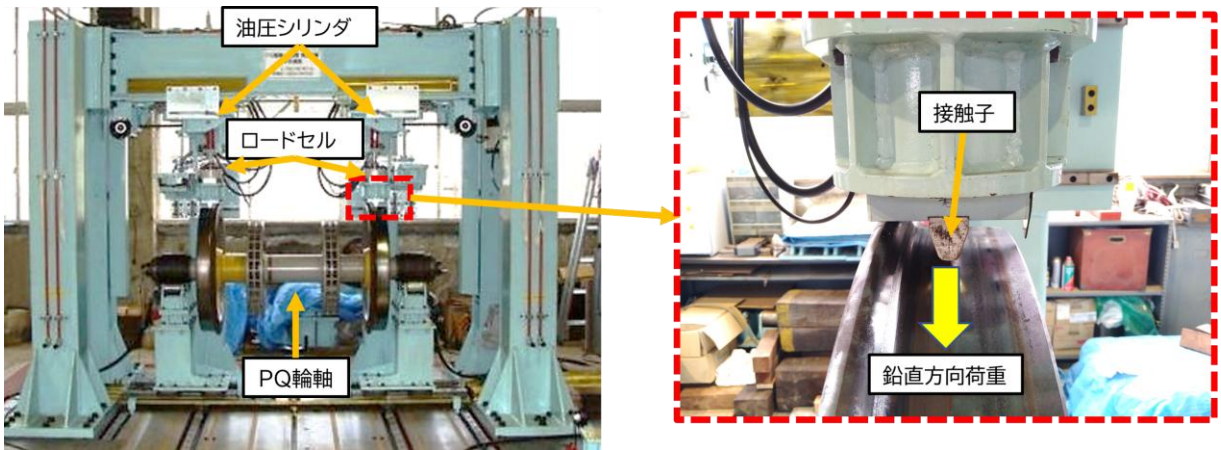
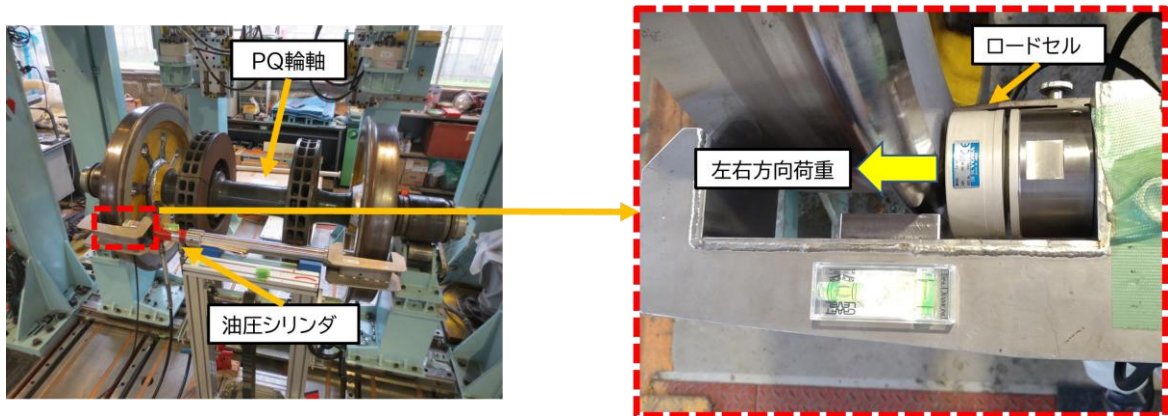


図1 PQ 輪軸とブリッジ回路の構成例



(a) 輪重の検定



(b) 横圧の検定

図2 PQ 輪軸の検定

毎に荷重負荷量に応じたひずみ出力を測定する。ここで、車両が軌道上を走行する場合を考える。その際の車輪・レールの接触状態は、軌道の線形や車輪・レールの表面形状などに応じて多種多様に変化すると考えられ、検定時のように一意に定められた状態とはならない。特に、摩耗した車輪・レールの接触で発生し得る、2点接触や接触領域がヘルツの接触楕円では表現できないような複雑な形状となる接触（コンフォーマル接触³⁾）が発生した際のPQ輪軸からのひずみ出力と、検定時の出力との差異については、これまで議論されてこなかった。また、急曲線走行時に発生し得る車輪フランジ乗り上がり時には、外軌側車輪がフランジ直線部で接触するが、車輪フランジ乗り上がり現象を考える際には、図3に示すように、接触面内に作用する接線力と接触面に対して垂直方向に作用する法線力の合力を定義し、その鉛直・水平方向成分として輪重・横圧を記述することが一般的である⁴⁾。この時、車輪フランジ角度を基準として接触面を定義し、力の各成分の関係を求めるが、この関係性を実験的に確認した事例は無い。

著者らは、このような走行時に発生し得る接触状態を静的に模擬し、その際のPQ輪軸からのひずみ量を測定するための試験（PQ輪軸特性試験）を提案した²⁾。本報ではPQ輪軸特性試験および本試験による、摩耗したレールと車輪の接触を模擬した場合のPQ輪軸の出力調査結果、およびフランジ直線部に法線力相当荷重を負荷した際にPQ輪軸の出力より予想される等価的な接触面角度について調査した結果⁵⁾について概説する。

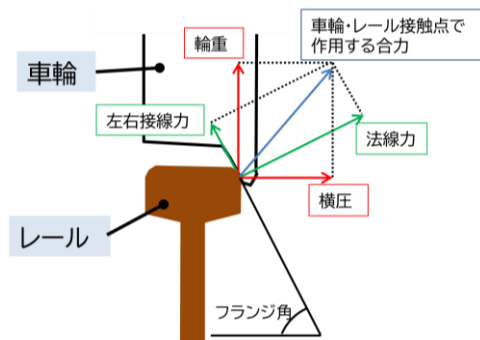


図3 フランジ接触時に車輪・レール間に作用する力

2. 車両が軌道上を走行する際の車輪・レールの接触状態

表1に軌道を走行する時と検定時における、車輪・レールの接触状態の差異をまとめる。表1では、車輪・レールの接触状態を考えるうえで重要な項目として、車輪上の左右方向接触位置、接触点の数、接触形状（領域）、荷重が負荷される状況、荷重負荷方向の5つの項目を挙げた。以下に、それぞれの項目における差異について概説する。

表1 車輪・レール間の接触状態の比較：走行時と検定時

	走行時	検定時
車輪上の左右方向接触位置	踏面～フランジ部(走行条件に応じて変化)	定点
接触点の数	多点での接触となり得る	1点
接触形状(領域)	(新品形状) 楕円形 (摩耗形状) 多様な楕円形状または複雑な形状	短径が小さい楕円形
荷重が負荷される状況	鉛直/左右方向荷重が同時に負荷	鉛直/左右方向に個別・独立に負荷
荷重負荷方向	接触角や鉛直/左右方向荷重に応じて変化	固定方向(鉛直または左右)

(1) 車輪上の左右方向接触位置

走行する軌道線形に応じて、軌道中心線から見た輪軸位置は変化する。例えば、直線走行時に輪軸中心と軌道中心のまくらぎ方向位置が一致している場合、左右車輪の接触位置はともに踏面中心付近となるので、検定時の接触位置と近い位置となる。一方、曲線通過時には輪軸位置が曲線外方に移動するので、外軌側車輪の接触位置はフランジ寄りに、内軌側の接触位置は反フランジ寄りに遷移する。

(2) 接触点の数

日本国内で広く使用される車輪・レールの組み合わせを考えると、両者が新品形状である場合、接触点は概ね 1 点となる。検定時に関しても単一のくさび型をした接触子で車輪に荷重負荷を行うため、同様である。一方で、摩耗が進展した車輪・レールが接触する場合や、分岐器通過時には、輪軸の左右方向変位によっては複数の接触点が生じ得る⁶⁾。

(3) 接触形状(領域)

新品形状の車輪・レールの接触は一般的には楕円形で近似可能な形状となる。検定時についても、短径がやや小さいものの楕円に近い接触形状となる。一方、摩耗が進展した車輪・レールにおいて、例えば車輪のど部とレール肩部が接触する状況下では、接触形状は楕円に近い形状ではなく、複雑な形状となり得る⁷⁾。

(4) 荷重が負荷される状況

走行時には輪重と横圧が同時に車輪に作用する一方、検定時には輪重と横圧に相当する荷重はそれぞれ個別に負荷される。

(5) 荷重負荷方向

上記(4)で述べたように、輪重と横圧が同時に車輪に作用するため、その合力ベクトルはその比率や荷重負荷位置に応じて変化する。特にフランジ乗り上がり状態時には図 3 で示したような作用力の関係となっており、この関係性を記述する際には、接触面を定義するためのフランジ角度が重要な要素となる。一方で、検定時には輪重相当荷重はフランジ角度をほぼ 0deg と近似できる踏面位置に、横圧相当荷重は車輪背面に負荷する。したがって、走行時には、車輪は斜め方向の合力を受けるのに対し、検定時には鉛直もしくは水平方向の負荷荷重のみを受ける。

上記(1)~(5)の項目のうち、(1)で述べた車輪上の接触位置の変化に伴う PQ 輪軸のひずみ出力変化については、既往研究にて調査がなされており^{8) 9)}、その傾向が明らかになっている。特に、フランジ近傍で接触が発生する場合には、輪重が車輪に及ぼす曲げモーメントの影響により、実際よりも大きめの横圧が見積もられることが分かっている。本報では、これまでに検討がなされてこなかった(2)~(5)の項目に示す差異が、輪重・横圧測定に及ぼす影響について述べる。

3. PQ 輪軸特性試験

PQ 輪軸特性試験は、鉄道総合技術研究所所有の輪重・横圧検定装置へ治具を追設することにより行う。これにより、多様な接触状態を模擬しつつ、静的荷重を車輪上に負荷することを実現する。接触子や荷重負荷治具の違いにより、本試験は下記に示す 3 パターンに大別される。

パターン 1： 2 点接触状態模擬試験

フランジ部と踏面部の 2 点を同時に荷重負荷できる 2 つの接触子を用いて、2 点接触状態を模擬する試験である。2 つの接触子が車輪に負荷する荷重は、それぞれ独立に測定することが可能である。

パターン 2： 車輪フランジ直線部に対して垂直荷重を負荷する試験

車輪フランジ直線部に対して垂直方向に配置された接触子を用いることで、車輪フランジ直線部に掛か

る法線力を直接負荷・測定する試験である。

パターン3： 接触子としてレール片を用いる試験

車輪とレールの接触を模擬するための試験である。接触子として用いるレール片は、試験目的に応じて、新品形状や摩耗形状など、さまざまなものに付け替えることができる。

PQ 輪軸特性試験の概略図を図 4 に示す。また、上記のパターン 1～3 に対応した接触子が、車輪に荷重を負荷している状態を図 5(a)～(c)にそれぞれ示す。

2 章で述べた軌道走行時と検定時の接触状態の違いによる差異を踏まえ、以下の観点で PQ 輪軸特性試験を実施した。ここで、供試する輪軸は踏面形状として修正円弧踏面を有する、在来線用 PQ 輪軸とした。また、円周方向の荷重負荷点による出力変化を調べる目的で、図 1(a)に示す PQ 輪軸の円周上に定義した点 1 を 0deg として、時計回りに 45deg 分、計 5 点 (点 1～5) に荷重を負荷した。

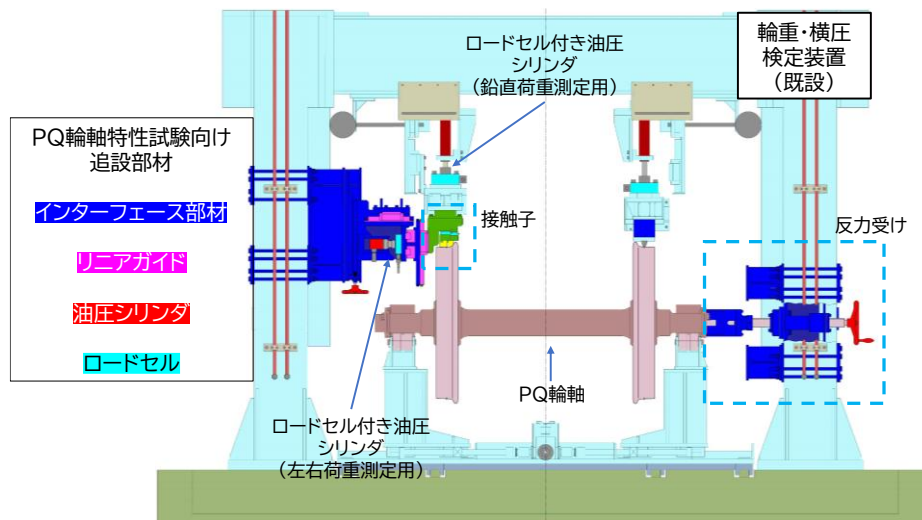


図 4 PQ 輪軸特性試験の概略図

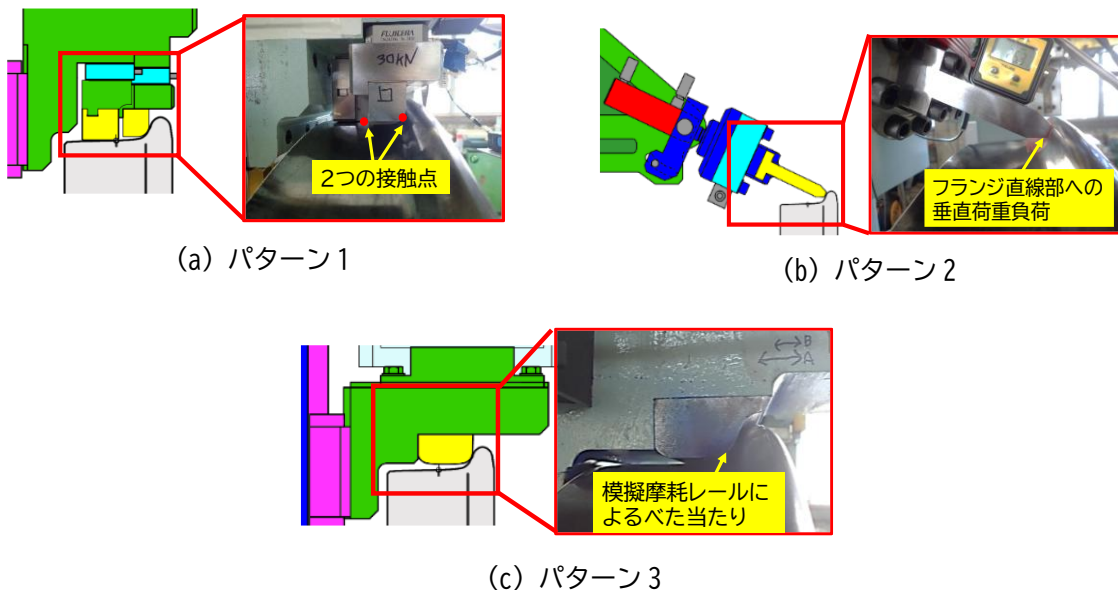


図 5 パターン1～3での荷重負荷

(1) 2点接触状態やコンフォーマル接触状態における PQ 輪軸出力調査

パターン 1 で、車輪・レールの 2 点接触状態を静的に模擬する。このとき、それぞれの接触点で車輪が受ける荷重配分（荷重分担率）を調整し、2 種の荷重分担率条件を設定する。また、パターン 3 で摩耗レール形状を模擬した接触子を用いて、コンフォーマル接触状態を模擬する。パターン 1 を用いる試験は 2 章(2)、パターン 3 を用いる試験は 2 章(3)、および両者を統合して 2 章(4)に示す差異項目の検証を目指す。試験で得られる PQ 輪軸のひずみ出力を、予め検定により得られた係数を用いて輪重・横圧相当荷重に換算する（以下では輪重相当荷重を出力輪重、および横圧相当荷重を出力横圧と称し、両者を出力荷重と総称する）。それぞれの試験時に入力する輪重・横圧相当荷重は、装置備え付けのロードセルで測定する（以下では入力荷重と称す）。ここで、仮に出力荷重が入力荷重と等しければ、PQ 輪軸のひずみ出力は接触状態に依らないと結論付けられる。

(2) 法線力と輪重・横圧出力の関係調査

パターン 2 で、車輪フランジ直線部に対して垂直な荷重（フランジ面に対する法線力）を負荷する。ここでは、2 章(5)に示す差異項目の検証を目指す。車輪回転を伴わない、静的な荷重負荷状態においては、図 3 に示した接線力成分は発生しない。したがって、特性試験においては負荷する法線力 N に相当する荷重に対する鉛直・水平方向成分がそれぞれ輪重・横圧相当荷重となる。すなわち、接触角を α とすると以下の関係が成り立つ。

$$P = N \cos\alpha \tag{1}$$

$$Q = N \sin\alpha \tag{2}$$

ここで、車輪がフランジ部でレールと接触する場合には、接触角はフランジ角に等しいものとして取り扱うことが一般的であるので、この前提条件下では、フランジ角を α' （今回使用した車輪では 65deg）と置いて以下が成立する。

$$Q/P = \tan\alpha' \tag{3}$$

本報では、式(3)の関係を PQ 輪軸特性試験結果に基づいて検証する。

4. 試験結果

4.1 接触状態の違いによる PQ 輪軸出力調査

(1) 2点接触状態

パターン 1 で、PQ 輪軸への入力荷重として鉛直方向に 30kN、左右方向に 20kN を負荷した。それぞれの方向の入力荷重は、目標値の $\pm 0.1\text{kN}$ の範囲に収まるように調整した。車輪上に塗料を塗布して接触子押し当てることで、2 つの接触点を可視化した結果を図 6 に示す。2 つの接触点は踏面中心とフランジ直線部になるようにそれぞれ調整し、その位置は車輪背面より 65mm（踏面中心側）、29mm（フランジ直線部側）とした。それぞれの接触点には表 2 に示すように、2 つの輪重・横圧の荷重分担条件（①、②）を設定した。ここで、2 つの接触点で負荷する輪重の荷重中心点（輪重によるモーメントがゼロになる点）は輪重の分担率と負荷位置から得られ、それぞれ車輪背面より 50.3mm（条件①）、および 57.2mm（条件②）となる。

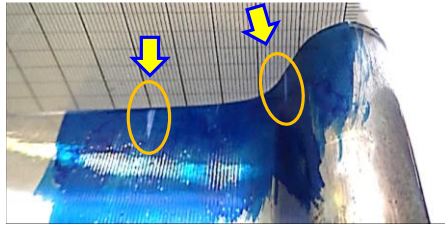


図6 パターン1での2点接触の例

表2 パターン1の荷重負荷条件

条件	輪重		横圧	
	踏面	フランジ	踏面	フランジ
①	18	12	2.5	17.5
②	24	6	6	14

(単位: kN)

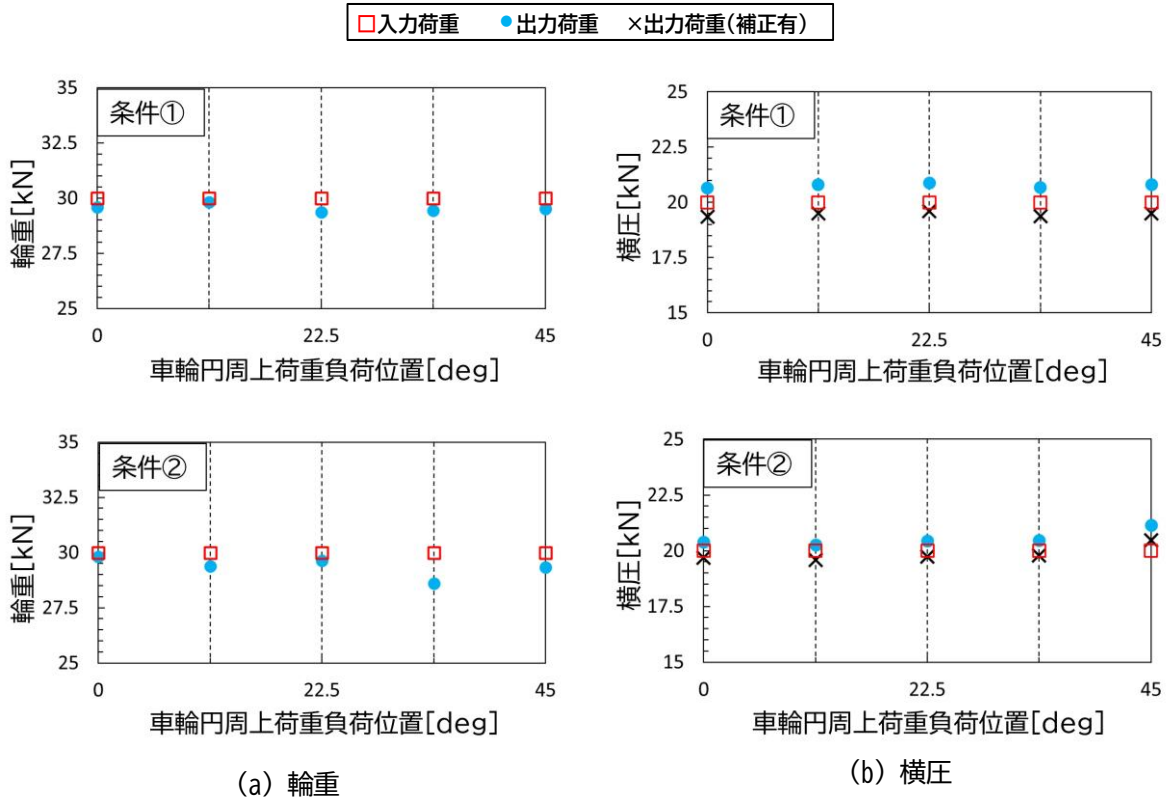


図7 パターン1での輪重・横圧測定結果

試験結果を図7に示す。図7では、入力荷重と、PQ輪軸からのひずみ出力を基に、検定より得られた係数を用いて輪重・横圧へ換算した出力荷重を比較する。また、横圧については荷重中心点の位置を、文献9で得られている輪重負荷位置の左右変化による横圧感度の変化式に当てはめて補正した値も図7(b)に併せて示す。結果として、輪重については両条件ともに、入力荷重に対して出力輪重は小さめになる傾向があり、その差の平均は0.7kN(約2.3%)程度であるものの、この2倍程度の差異が見られる箇所が1点あった(条件②における33.75degの点)。一方で、入力荷重に対する出力横圧は大きめに得られる傾向があり、その差は条件①、②でそれぞれ0.8kN(約4.0%)、0.4kN(約2.0%)程度であった。こちらについても、1点のみ大きく差異が見られる測定点があった(条件②における45degの点: 差異1.2kN)。なお、出力横圧に対して補正を施した場合には、両条件のすべての点で差異は0.5kN(約2.5%)程度に収まっている。

(2) コンフォーマル接触状態

PQ輪軸への入力荷重として、鉛直方向に60kN、左右方向に10kNを負荷する、パターン3を実施した。本試験では、「べた当たり形状」と、「実摩耗形状」を模擬する。前者では広範囲にわたり車輪に接触するように、後者では実際にフィールドで良く見られる摩耗形状に、それぞれJIS60kgレールを加工することで接触子を製作した。それぞれの形状を図8に示す。これらの接触子を、車輪フランジののど部を狙って押

し当てた。接触子に光明丹を塗布し車輪に転写することで測定した接触領域の例を図9に示す。べた当たり形状では、フランジ部からのど部に掛けて広がりを持った接触領域に、実摩耗形状ではフランジ部（楕円形）と踏面部（非楕円形）の2つの接触領域が得られた。輪重・横圧測定結果を図10に示す。パターン1の場合と同様に比較すると、入力荷重と出力輪重との差異は約0.6kN（1%）以内、出力横圧との差異は約0.5kN（5%）以内という結果であった。ただし、横圧に関して、本検討では接触位置が広がりを持ち、輪重相当の荷重負荷中心位置を定義できないため、輪重負荷位置の左右変化に伴う補正を施していない。横圧測定結果は、概ね負荷荷重に比べて大きく得られており、本補正を施せば横圧の差異は低減することが見込まれる。

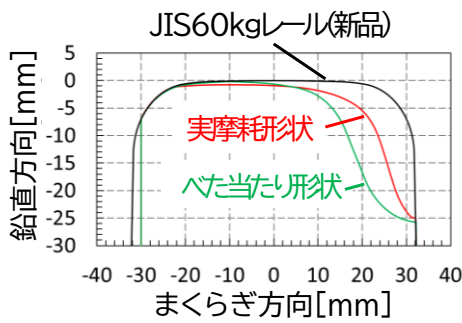


図8 パターン3で用いた接触子

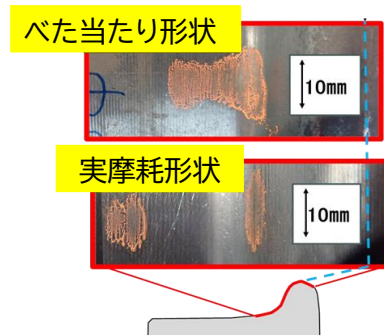


図9 パターン3での接触領域例

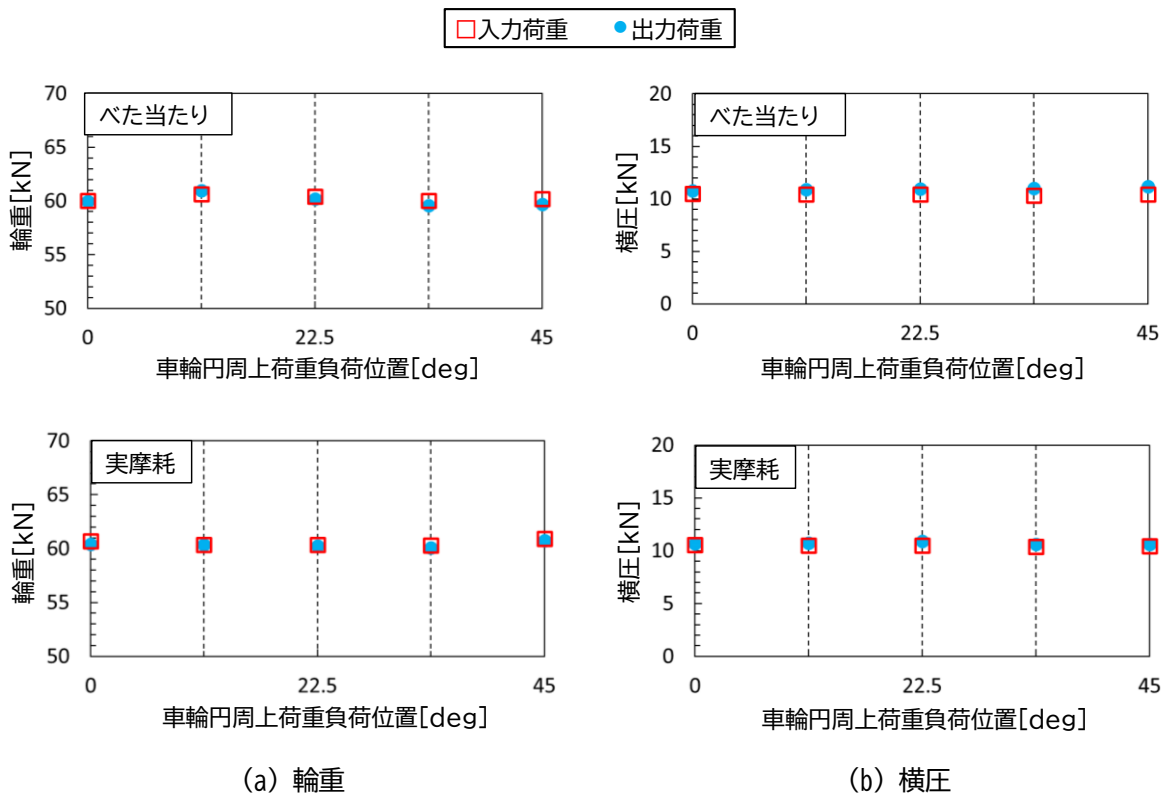


図10 パターン3での輪重・横圧測定結果

4.2 法線力と輪重・横圧出力の関係調査

パターン2により、フランジ面に対する法線力に相当する入力荷重として50kNを車輪フランジ直線部の中心付近（車輪背面より27mmの位置）に負荷した。輪重・横圧測定結果を図11に示す。本図では、入

力荷重に対して、フランジ直線部の接触角である 65deg（修正円弧踏面の設計フランジ角と等価）を想定した際、ならびに 67deg を想定した際の鉛直（輪重相当）、水平（横圧相当）方向の分力を併せて示した。ただし、横圧測定結果に対してはパターン 1 の場合と同様に、輪重負荷位置の左右変化による横圧感度の変化の効果を踏まえた補正を施して表す。仮定する接触角を 65deg 周りで変化させて分力の算出を行った所、図 11 に示す接触角度を 67deg と仮定した場合に、PQ 輪軸で見積もられる輪重や横圧に最も近い値が得られた。

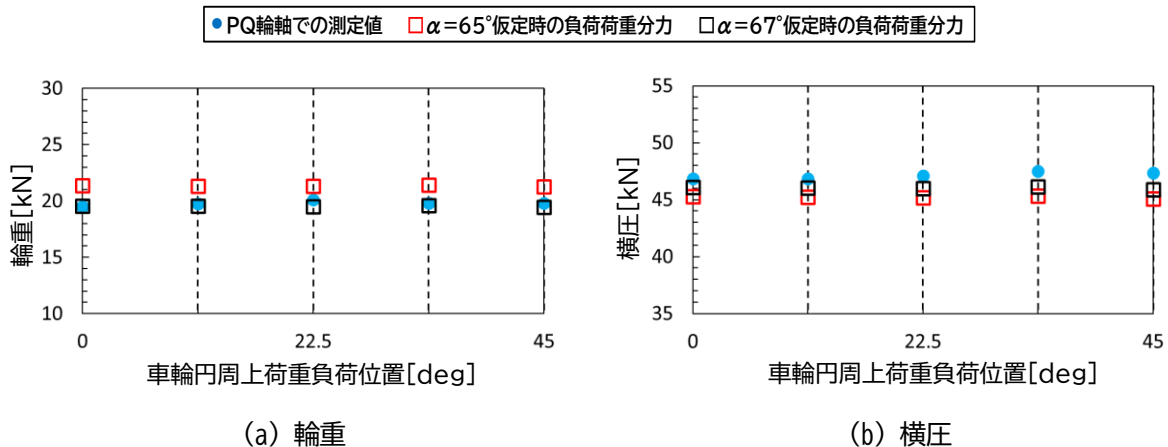


図 11 パターン 2 での輪重・横圧測定結果と分力予測値

5. 考察

前章で述べた試験結果から、以下のようなことが考察される。

- 今回調査した 2 点接触状態やコンフォーマル接触状態を模擬した状況下において、PQ 輪軸出力から見積もられる荷重は入力荷重に比べ、輪重では小さめ、横圧では大きめに出力される傾向があり、その差異はそれぞれ数%程度であった。これより、接触状態の違いが PQ 輪軸の出力に与える影響は小さいといえる。また、得られた入力荷重と出力荷重の大小傾向を踏まえると、PQ 輪軸からの横圧出力を輪重出力で除した脱線係数を指標にして行う走行安全性評価において、この傾向下では実際よりも大きな脱線係数が得られることとなり、安全側の走行安全性評価がなされているといえる。また、横圧に対しては、既知の効果である、左右方向の輪重相当荷重負荷位置の変化による影響を補正することにより、この差異分はより小さくなる傾向があることが分かり、より高精度に横圧を得るためには本補正が有効であることが示された。
- 法線方向の入力荷重と輪重・横圧出力の関係調査では、入力荷重に対して、フランジ角相当の接触角である 65deg を用いて輪重・横圧相当の分力を計算する場合に比べ、接触角を 67deg としてみ積もった方が、PQ 輪軸からの出力荷重に近い結果が得られた。この時、接触面ではすべりは観察されておらず、また試験中の接触子の姿勢も $65 \pm 0.1 \text{deg}$ と計測されていた。これより、この結果の要因としては、静的に荷重を負荷する際に車輪・車軸にたわみが生じ、PQ 輪軸上に作用する実効的な接触角が設計値から変化した、あるいは接触面の微小な凹凸による影響があった、などが考えられる。このような事象が走行時にも発生し、フランジ乗り上がりに対する走行安全性評価で仮定するフランジ角の取扱いに影響を及ぼし得るか、今後の検討で明らかにする予定である。

6. まとめ

車輪・レール間作用力の測定で広く用いられる PQ 輪軸に対して、実際の走行で発生し得る多様な接触条件下における出力特性を調査した。PQ 輪軸の検定時と走行時の接触状態の差異を整理するとともに、PQ 輪軸特性試験を提案した。試験の概要と得られた結果は以下の通りである。

- (1) 摩耗した車輪／レールの接触時などに発生し得る 2 点接触やコンフォーマル接触を試験装置で再現した時の、PQ 輪軸の出力特性試験を実施した。今回調査した状況下において、PQ 輪軸の出力荷重は入力荷重と比べると、輪重では小さめに、横圧は大きめに出力される傾向があり、その差異は数%程度以下であった。これより、今回調査したような接触状態の違いが PQ 輪軸の出力に及ぼす影響度合いは小さいといえる。また、出力荷重の大小傾向を踏まえると、接触状態が変化した場合に、脱線係数による走行安全性評価は安全側でなされるといえる。
- (2) 法線力の分力としての輪重・横圧が、フランジ乗り上がり時の力のつり合いを考える際に仮定するように、フランジ角を基準とした配分で出力されるかを調査した。その結果、今回供試した輪軸のフランジ角である 65deg よりも、2deg 程度大きめの接触角 (67deg) として考える方が実態に合うことが示された。

今後、本報で得られた結果を基に PQ 輪軸に対する構造解析なども援用した追試験を行うことで、結果の検証や一般性の精査を進め、PQ 輪軸を用いた輪重・横圧測定精度のさらなる向上を目指す予定である。

文 献

- 1) 石田弘明, 松尾雅樹, 手塚和彦, 植木健司: 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
- 2) 田中隆之, 國行翔哉, 土井久代, 西山幸夫: 接触状態を勘案した輪重横圧測定用輪軸の特性試験, 第 31 回交通・部門大会 (TRANSLOG2022), 2022
- 3) Tanaka T. and Sugiyama H.: "Numerical procedure for non-Hertzian wheel-rail contact model integrated in quasi-steady railway motion solver", Proceedings of the ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conferences, August 17-19, 2020.
- 4) 田中隆之, 土井久代, 宮本岳史: 鉄道台車のモーメントに着目した横圧推定式の検討, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 842, pp. 16-00054, 2016
- 5) 田中隆之, 國行翔哉: 接触状態を勘案した輪重横圧測定用輪軸の特性試験 - 特性試験結果の報告 -, 第 33 回交通・部門大会 (TRANSLOG2024), 2024
- 6) 寺尾明紘, 杉山博之: 接触テーブルを用いた鉄道車両の急曲線および分岐通過時の車輪/レール多点接触解析法の開発, Dynamics & Design Conference 2012 講演論文集, 2012
- 7) Sugiyama H., Sekiguchi T., Matsumura R., Yamashita S. and Suda Y.: "Wheel/rail contact dynamics in turnout negotiations with combined nodal and non-conformal contact approach", Multibody System Dynamics, Vol.27, pp.55-74, 2012.
- 8) 本堂貴敏: PQ 測定用輪軸を用いた車輪・レール間接触点前後移動量推定法, 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL 2018), 2018
- 9) 野口芳直: ひずみゲージを用いた車輪／レール接触位置測定手法の検討, 電気学会論文誌 D, Vol.141, No.3, pp.241-248, 2021