

# 圧電素子を内蔵した軸ばね防振ゴムによる 台車の走行状態監視手法

間々田 祥吾\* 太田 達哉\* 嵯峨 信一\*\* 吉川 和宏\*\*\*

A Method for Monitoring Running Condition of a Bogie by Using an Axle Spring Isolation Rubber with a Built-in Piezoelectric Element

Shogo MAMADA Tatsuya OTA Shinichi SAGA Kazuhiro YOSHIKAWA

Axle spring isolation rubber installed on an axle box is subjected to loads equivalent to the wheel loads during running. Therefore, to investigate a method for monitoring running conditions of a bogie, as first step in the research in this paper, we fabricated an axle spring isolation rubber with a built-in piezoelectric element (AIBP). Since an AIBP can generate an electric charge in response to the load, it may be effective as a method for monitoring the running condition of the bogie. Then, running test with AIBP installed on the bogie was conducted to obtain wheel loads by calculated by converting the electric charge generated from the AIBP into a load. The test result of running tests showed that the calculated rubber load correlates with the wheel load, so that the time waveform of the rubber load could be used to monitor the running condition of the wheel.

キーワード：車軸軸受，軸箱，軸ばね防振ゴム，圧電素子，時間波形

## 1. はじめに

鉄道車両の走行にとって、台車は最も重要な部位である。そのため、これまでに台車の走行状態を監視する様々な手法が検討されている<sup>1) 2)</sup>。現在、台車の走行状態を監視する一般的な手法としては、PQ輪軸を用いて走行中の車輪に鉛直方向に加わる輪重および水平方向に加わる横圧を測定する手法や、台車の表面に加速度センサなどを設置して台車の各部位の振動状態を測定する手法などがある<sup>3) 4)</sup>。その一方で、PQ輪軸は高価であることに加え、測定に専門的な技術が求められる。そのため、全ての台車に設置して常時監視することは困難である。また、加速度センサなどを台車の表面に設置する場合、長期間の設置に対して、走行中の落失や飛来物との接触の危険性が懸念される。

そこで、筆者らは、できるだけ安価で簡易に測定でき、さらに長期間の設置に対しても落失などの危険性が低い監視手法を検討した。本検討では、過去の知見に基づき<sup>5) 6)</sup>、台車の走行状態を監視するセンサの箇所として、台車内の図1に示す車軸軸受を封入する軸箱上に設置される軸ばね防振ゴムに着目した。図1に示すように、軸ばね防振ゴムには走行中の輪重の変動（以下、輪重変動）に相当する荷重の変動が加わると考えられる。その

ため、荷重を測定するセンサとして軸ばね防振ゴムを活用することができれば、軌道状態や車両状態が反映された荷重変動によって走行状態を監視できると考えられる。

本検討では、軸ばね防振ゴムにセンサの機能を付与するため、圧電素子を内蔵させた軸ばね防振ゴム（以下、センサ軸ばね防振ゴム）を作製した。圧電素子は、加わった荷重に応じて電荷を発生させる特性があり、発生した電荷から加わった荷重を測定するフォースセンサの材料として利用される<sup>7) 8)</sup>。また、センサ軸ばね防振ゴムは、通常の軸ばね防振ゴムと交換して設置するため、設置方法がPQ輪軸と比較して簡易であることや走行中の落失などの危険性が低いという利点がある。

本報告では、センサ軸ばね防振ゴムの基本性能の評価結果、実際の台車に設置して実施した実軌道における走行試験の結果およびセンサ軸ばね防振ゴムを台車の走行状態監視に活用する手法について検討した結果を述べる。

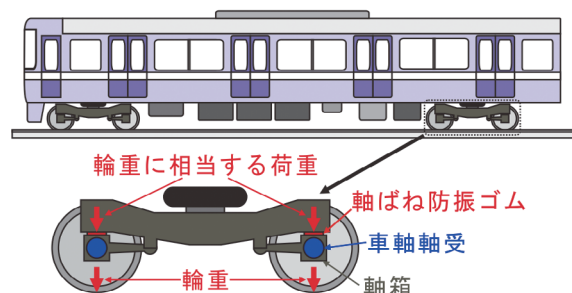


図1 軸ばね防振ゴムの設置箇所

\* 材料技術研究部 防振材料研究室

\*\* 車両技術研究部 ブレーキシステム研究室

\*\*\* 東日本旅客鉄道株式会社

## 2. センサ軸ばね防振ゴムの基本性能

### 2.1 センサ軸ばね防振ゴムの概要

作製したセンサ軸ばね防振ゴムの外観を図2に示す。

図2に示すように、1体のセンサ軸ばね防振ゴムに2体の圧電素子を内蔵した。使用した圧電素子は、現在最も一般的に使用されるチタン酸ジルコン酸鉛であり、直径約16mm、厚さ2mmの円盤状に成型したものをを用いた。また、センサ軸ばね防振ゴムには、内部の圧電素子から発生する電荷を取り出すための2本のケーブルが取り付けられている。

### 2.2 センサ軸ばね防振ゴムの校正値

センサ軸ばね防振ゴムで発生した電荷から加わった荷重を算出するためには、電荷の値を荷重に変換する校正値が必要である。以下に校正値の求め方を示す。

校正値は、図3に示すように、試験機を用いてセンサ軸ばね防振ゴムを厚さ方向に加振する動的加振試験を実施し、試験で得られる荷重振幅および電荷振幅の関係から求めた。動的加振試験の条件は、台車に設置した状態を想定して65kNを平均荷重とし、変動荷重として振幅1kN、5kN、10kN、15kN、20kN、25kN、周波数0.1Hz、1Hz、10Hzの正弦波を設定した。なお、電荷は、2体の圧電素子に対して個々にチャージアンプを接続し、発生した電荷量を電圧値として測定した。後述する走行試験では、4体のセンサ軸ばね防振ゴム（センサ軸ばね防振ゴムNo.1～No.4）を使用した。ここでは、例としてセンサ軸ばね防振ゴムNo.1の試験結果を示す。

動的加振試験における荷重およびセンサ軸ばね防振ゴムNo.1の2体の圧電素子（素子No.1-1、No.1-2）の電荷の時間波形例を図4に示す。図の結果は荷重振幅10kN、加振周波数1Hzの結果である。

図4より、2体の圧電素子から発生する電荷量はほぼ同等である。なお、圧縮方向の荷重に対して負の電荷が発生しているが、これは測定の際に使用したチャージアンプ内における積分回路の特性によるものである。次に、



図2 センサ軸ばね防振ゴムの外観

計測された時間波形に対して周波数解析を実施し、荷重振幅および電荷振幅を求めた結果を図5に示す。ただし、図4に示すように、素子No.1-1とNo.1-2の電荷振幅の大きさはほぼ同等であったため、図には素子No.1-1の結果のみを示す。

図5より、荷重振幅と電荷振幅は高い相関性を示している。また、加振周波数が0.1Hz、1Hzおよび10Hzにおける傾きはほぼ同等である。この結果は、センサ軸ばね防振ゴムに加えられる荷重の周波数が校正値に与える影響が小さいことを示している。

動的加振試験の結果より、校正値は動的加振試験において実施した全試験条件の荷重振幅と電荷振幅の傾きから算出した。なお、図5に示した結果では傾きが2.4pC/Nと算出されるが、図4に示すように荷重と電荷の位相が逆となるため、校正値は-2.4pC/Nとなる。なお、センサ軸ばね防振ゴムNo.2～4についても、センサ軸ばね防振

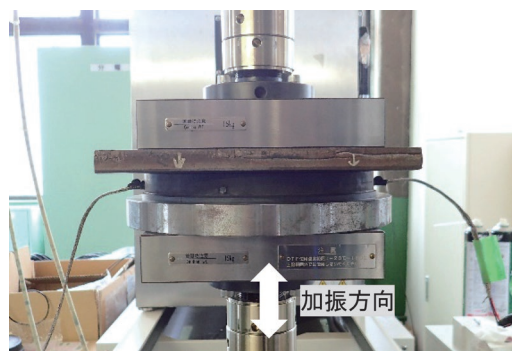


図3 動的加振試験の状況

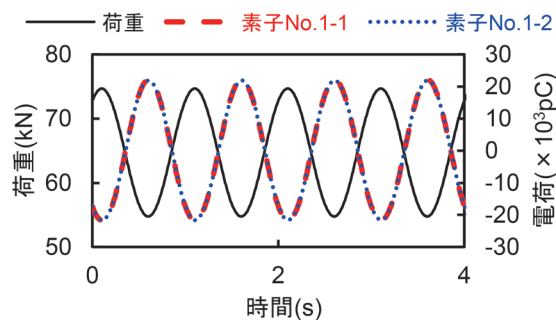


図4 荷重および電荷の時間波形

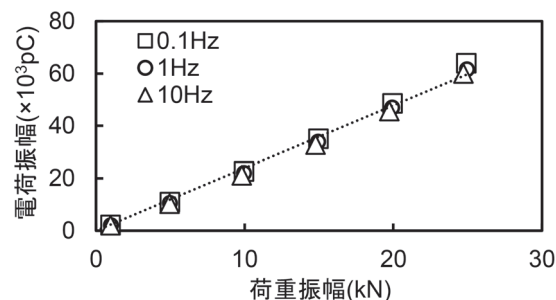


図5 電荷振幅と荷重振幅の関係

ゴム No.1 とほぼ同等の試験結果が得られた。

### 3. 実軌道における走行試験

#### 3.1 走行試験におけるセンサ軸ばね防振ゴムの配置

走行試験では、1台の台車における1位～4位の全ての軸箱上にセンサ軸ばね防振ゴムを設置した。走行試験におけるセンサ軸ばね防振ゴムの配置を図6に示す。

図に示すように、センサ軸ばね防振ゴム No.1, No.2 を設置した1軸はPQ 輪軸であり、センサ軸ばね防振ゴム No.3, No.4 を設置した2軸は通常の輪軸である。また、センサ軸ばね防振ゴム内の2体の圧電素子の配置は、図6に示すように、車軸に対して平行となるように設置した。なお、図6に示すように、素子 No. の枝番号が-1 (以下、素子 No.-1) の圧電素子は台車外側となり、-2 (以下、素子 No.-2) の圧電素子は台車内側となる。

#### 3.2 センサ軸ばね防振ゴムによる荷重の測定方法

走行試験において、センサ軸ばね防振ゴムには走行中の上下方向の輪重変動に相当する荷重が加わり、その荷重に応じて電荷が発生すると考えられる。そこで、電荷量の測定結果と前述した方法によって試験前に算出しておいた校正値  $d$  から、以下の式を用いてセンサ軸ばね防振ゴムで測定される荷重 (以下、ゴム荷重) を算出した。

$$F_R = Q/d \quad (1)$$

ここで、 $F_R$  はゴム荷重、 $Q$  は発生電荷である。

センサ軸ばね防振ゴムから発生した電荷は動的加振試験の場合と同様にチャージアンプを介して測定した。ここで、測定されるゴム荷重は、チャージアンプのフィードバック回路における抵抗値と静電容量の積である時定数によって、入力された荷重に対する応答性が異なる。時定数が短いほど、ゆっくり変動する荷重に対する追従

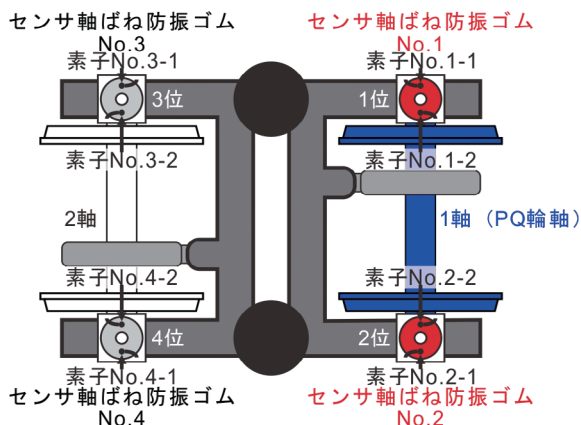


図6 走行試験におけるセンサ軸ばね防振ゴムの配置

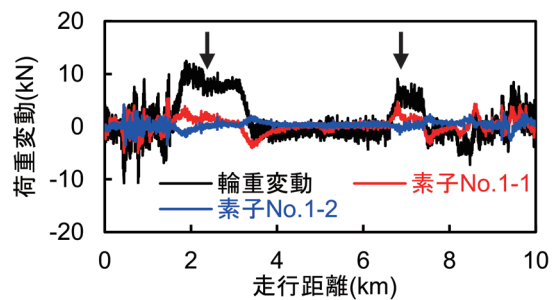
性は低下するが、時間経過に伴って波形のベースラインがずれるドリフトの影響が小さくなる。一方、時定数が長いほどゆっくり変動する荷重に対する追従性は向上するが、ドリフトの影響が大きくなる。走行試験では、時定数を10sに設定してゴム荷重を測定した。時定数を10sの設定では、一定の荷重が継続的に入力された場合、見かけ上の荷重が10s後に63.2%まで低下することになる。

#### 3.3 ゴム荷重と輪重変動の比較

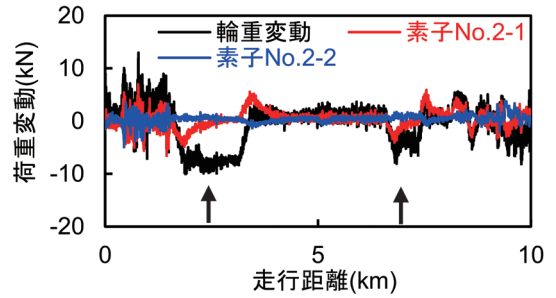
最高速度約100km/h、走行距離約10km (以下、A区間)におけるゴム荷重およびPQ輪軸による輪重変動の時間波形の比較を図7に示す。図に示す輪重変動は走行中の輪重から停車中の静止輪重を引いた値を示す。なお、図7に示す時間波形には以下に示す処理をしている。

輪重変動によって台車の走行状態を監視するためには時間波形を長時間測定する必要があるが、長時間の測定では、遅く変動する波形の方が監視しやすい。また、PQ輪軸によって簡易的に輪重の緩やかな変動成分を監視する場合、5Hz程度よりも高い周波数帯域の波形を除去するローパスフィルター (以下、LPF) 処理をされることがある。これらを考慮して、走行試験ではゴム荷重、輪重ともに5HzのLPF処理をした。

図7より、輪重変動とゴム荷重を比較すると、全体的にゴム荷重の振幅が輪重変動の振幅よりも小さい。これは、センサ軸ばね防振ゴムの場合、圧電素子がゴムに内蔵されており、衝撃的に大きく変動する荷重が緩和されるためと考えられる。また、図中の矢印で示した曲線区



(a) 1位



(b) 2位

図7 A区間における輪重変動とゴム荷重の時間波形

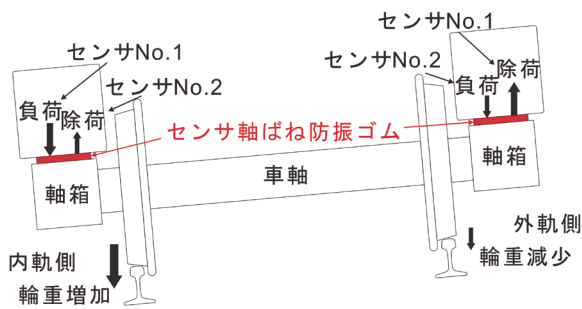


図8 曲線区間における輪重およびゴム荷重の推測

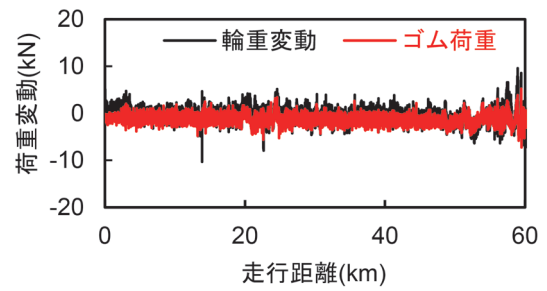
間ではゴム荷重が輪重変動に追従しにくく、0kNに戻る傾向がある。これは、前述したチャージアンプの時定数により、曲線区間のように増加した輪重が継続的に加わり続ける場合、ゴム荷重が見かけ上変化するような波形になったものと考えられる。なお、走行試験では時定数を100sに設定した場合でも測定したが、その場合、曲線区間におけるゴム荷重の追従性は向上するものの、ドリフトの影響により、正確な測定が困難であった。

次に、素子 No.-1 と素子 No.-2 のゴム荷重を比較すると、素子 No.-1 のゴム荷重は振幅が大きく、変動傾向が輪重変動と概ね相関するのに対して、素子 No.-2 のゴム荷重は振幅が小さく、変動の傾向も輪重変動と逆となっている。このような結果が得られた要因については今後詳細な検討が必要であるが、走行中に軸箱上加わる荷重が均一でなく、曲線区間ではゴム荷重および輪重に図8に示すような偏りが生じ、軸箱上面の内側よりも外側の荷重の変動が大きくなる可能性が考えられる。

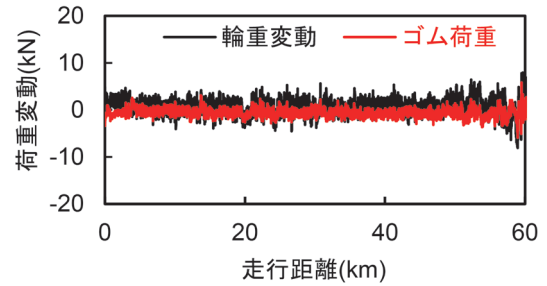
図7に示す結果より、センサ軸ばね防振ゴムで得られるゴム荷重を用いて台車の走行状態を監視する場合、素子 No.-1 のゴム荷重の方が輪重変動傾向に近く、より正確に走行状態を監視できる可能性があることがわかった。そこで、A区間と最高速度および走行距離が異なる最高速度約200km/h、走行距離約60km（以下、B区間）および最高速度約300km/h、走行距離約50km（以下、C区間）において素子 No.-1 のゴム荷重と輪重変動を比較した。結果を図9および図10に示す。

図9、図10より、1位および2位ともにA区間よりもゴム荷重と輪重変動には高い相関がある。この要因を以下に考察する。

まず、B区間については、A区間のように増加した輪重が加わり続けるような曲線区間が存在しなかったことが要因と考えられる。次に、C区間については曲線区間の距離が約2kmであり、A区間と同程度である。その一方で、A区間よりも走行速度が速いことから、輪重の変動の変化が速いことに加え、輪重が増加して加わる時間も短いため、ゴム荷重が輪重に追従しやすかったことが要因と考えられる。

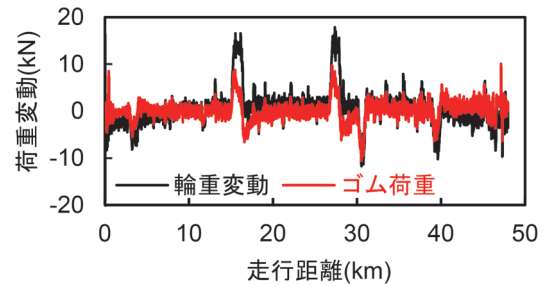


(a) 1位

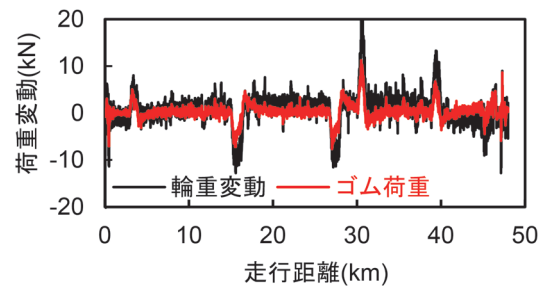


(b) 2位

図9 B区間における輪重変動とゴム荷重の時間波形



(a) 1位



(b) 2位

図10 C区間における輪重変動とゴム荷重の時間波形

以上の結果より、センサ軸ばね防振ゴムで得られるゴム荷重は輪重変動と相関することがわかった。なお、センサ軸ばね防振ゴムを用いた監視手法としては、ゴム荷重の変動を輪重変動と正確に一致させることを目的としておらず、後述するような適用方法を検討している。

#### 4. センサ軸ばね防振ゴムを活用した監視手法の提案

走行試験の結果より、ゴム荷重は輪重変動と相関があり、ゴム荷重を活用して台車の走行状態を監視できる可能性があることが見出せた。ここでは、実際の運用において、センサ軸ばね防振ゴムを活用して台車の走行状態を監視する手法について検討した結果を述べる。

##### 4.1 センサ軸ばね防振ゴムの設置数の低減方法

走行試験では、図6に示すように1台の台車に対して1位～4位の全ての軸箱上に設置した4体のセンサ軸ばね防振ゴムによって計8体の圧電素子で得られるゴム荷重を個々に測定した。一方、実際の運用における監視手法を想定すると、全ての軸箱上にセンサ軸ばね防振ゴムを設置し、圧電素子に接続されたケーブルを車上まで配線することは煩雑であり、施工性に劣る。また、個々の圧電素子で得られるゴム荷重を個別に評価することは煩雑であり、チャージアンプやデータロガーなども圧電素子と同じ数が必要であるため、コストにも影響する。そこで、監視に用いるゴム荷重の波形の数や設置する圧電素子の数を減らす手法を検討した。

手法の一つとして、同じ車軸に設置した2体のセンサ軸ばね防振ゴム内の素子 No.-1 のゴム荷重の差（以下、並行ゴム荷重差）を用いることを検討した。ここで、素子 No.-1 のみを用いる理由は、前述したように外側に設置した素子 No.-1の方がゴム荷重の変動が大きく、台車の走行状態を反映しやすいと考えたためである。その結果、並行ゴム荷重差によって、後述する手法と同様に台車の走行状態を監視できる可能性があることがわかった。その一方で、本手法では、監視に用いるゴム荷重の波形の数を減らすことができ、センサ軸ばね防振ゴムに内蔵するセンサを1体に減らすことができるが、センサ軸ばね防振ゴムの数を減らすことができない。また、センサ軸ばね防振ゴムの数を減らすために、台車内の1本の車軸のみにセンサ軸ばね防振ゴムを設置した場合、個々の軸の状態を把握することができない。

そこで、図11に示すように、台車の対角の位置に設置したセンサ軸ばね防振ゴム内の素子 No.-1 のゴム荷重の差（以下、対角ゴム荷重差）を用いる手法を検討した。本手法では、1台の台車に設置するセンサ軸ばね防振ゴムの設置数が2体となることに加え、並行ゴム荷重差と同様にゴム荷重の変動が大きい素子 No.-1のみを用いることにより、圧電素子の数が2体となる。また、対角ゴム荷重差を算出することにより、監視に用いるゴム荷重の波形の数を減らすことができる。以下の記述では、素子 No.1-1 と素子 No.4-1 の対角ゴム荷重差を No.1-No.4、素子 No.3-1 と素子 No.2-1 の対角ゴム荷重差を

No.3-No.2 と示す。

本手法では、個々の車輪の輪重変動を詳細に把握することは困難であるが、台車全体としての走行状態を把握することは可能であると考えられる。

##### 4.2 対角ゴム荷重差の比較

A 区間、B 区間および C 区間において、走行日が異なる走行試験における対角ゴム荷重差の比較を図12、図13および図14に示す。図中の日数は、センサ軸ばね防振ゴムを設置後、走行を開始した日からの経過日数を示す。なお、図に示した結果は、走行速度などの走行条件がほぼ同等の複数の走行日における結果である。

図12～図14より、対角ゴム荷重差の波形は全ての区間において、異なる走行日であってもほぼ同様である。

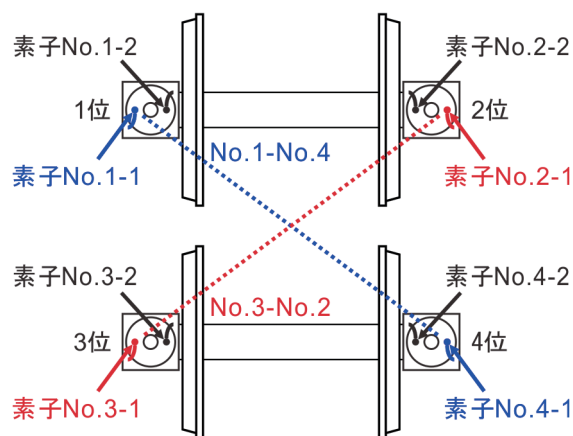
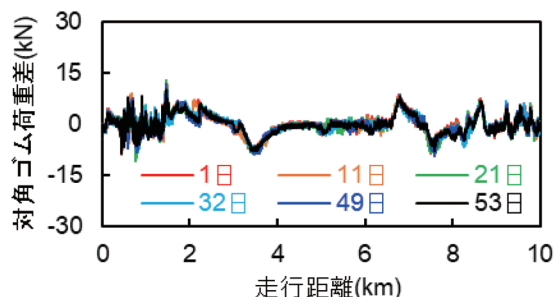
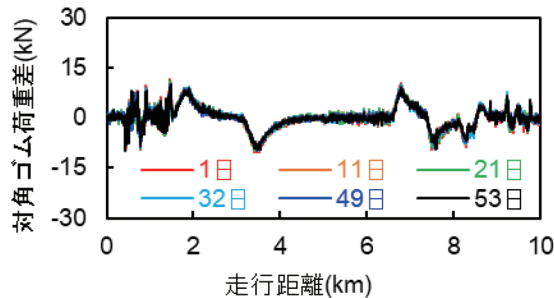


図11 対角ゴム荷重差の算出位置

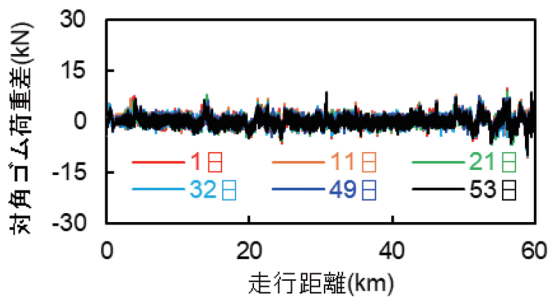


(a) No. 1-No. 4

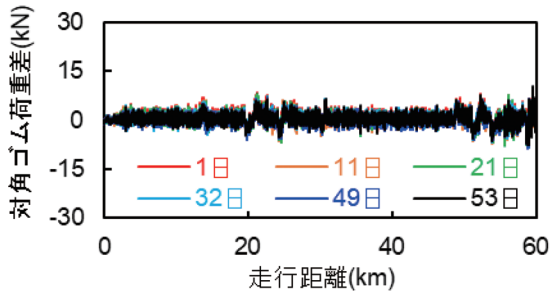


(b) No. 3-No. 2

図12 A 区間における対角ゴム荷重差の比較

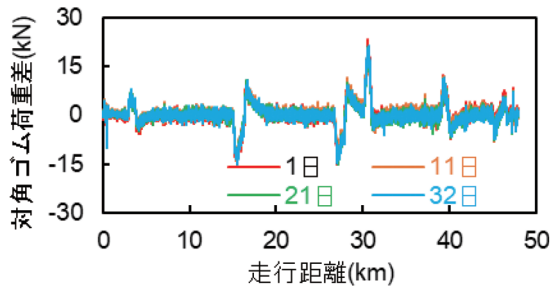


(a) No. 1-No. 4

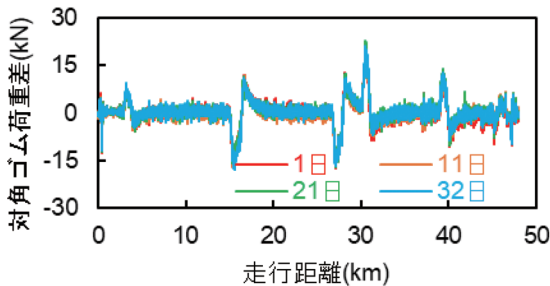


(b) No. 3-No. 2

図 13 B 区間における対角ゴム荷重差の比較



(a) No. 1-No. 4



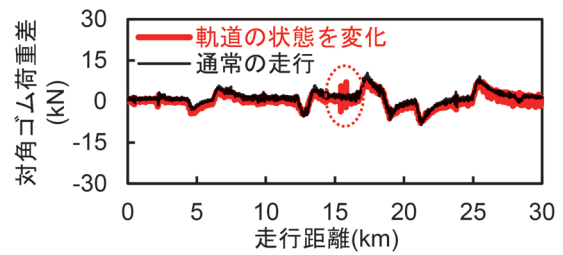
(b) No. 3-No. 2

図 14 C 区間における対角ゴム荷重差の比較

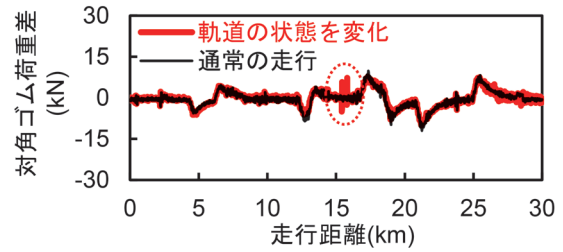
これは、同じ走行条件で同一の走行区間を走行した場合、得られる対角ゴム荷重差の波形がほぼ同様となることを示している。この結果より、対角ゴム荷重差の波形を通常の走行状態と比較することによって通常と異なる走行状態となった事象を早期に検知できる可能性がある。

#### 4.3 通常と異なる走行状態における対角ゴム荷重差

対角ゴム荷重差によって通常と異なる走行状態となっ

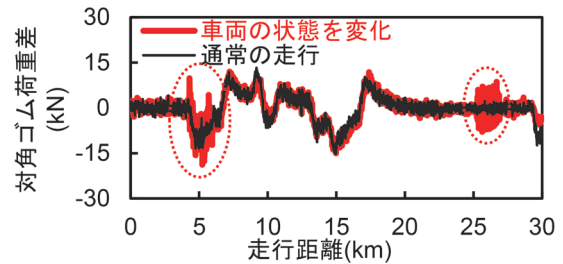


(a) No. 1-No. 4

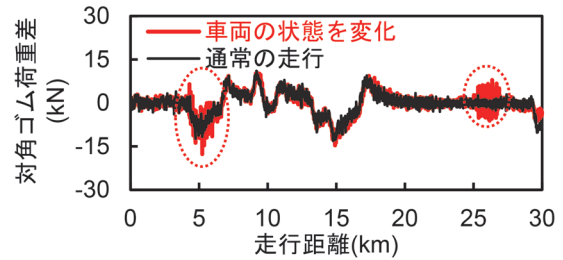


(b) No. 3-No. 2

図 15 軌道の状態を変化させた場合の対角ゴム荷重差



(a) No. 1-No. 4



(b) No. 3-No. 2

図 16 車両の状態を変化させた場合の対角ゴム荷重差

た事象を把握できるか検討するため、走行試験において通常の走行状態と人工的に軌道不整を発生させた状態（以下、軌道状態を変化させた場合）および車体を強制的に加振させた場合（以下、車両状態を変化させた場合）の対角ゴム荷重差を比較した。結果を図 15 および図 16 に示す。軌道状態および車両状態を変化させた区間は図中の赤い丸で囲った箇所である。

図 15、図 16 より、図中の赤い丸で囲んだ区間において、通常の走行の場合は対角差ゴム荷重に大きな変動がないのに対して、軌道状態および車両状態を変化させた場合に対角ゴム荷重差が顕著に上下に変動している。

以上の結果より、対角ゴム荷重差によって台車の走行状態を監視できる可能性がある。実際の運用における監視手法としては、通常の走行状態における対角ゴム荷重差の波形を蓄積して機械学習させておき、通常の走行状態と異なる状況が同地点において継続して発生した場合に軌道状態を調査し、断続的に発生した場合に車両状態を調査するなどの運用方法が想定される。

## 5. おわりに

台車の走行状態を簡易に評価でき、長期間の設置に対して落失などの危険性を低減する新たな監視手法として、軸ばね防振ゴムに圧電素子を内蔵したセンサ軸ばね防振ゴムを活用する手法を検討した。

センサ軸ばね防振ゴムの基本性能を評価した結果、センサ軸ばね防振ゴムは圧電素子の特性を利用することにより、走行中にセンサ軸ばね防振ゴムに加わる荷重（ゴム荷重）の変動を把握できることがわかった。

センサ軸ばね防振ゴムを台車に設置し、実軌道における走行試験を実施した結果、ゴム荷重は、輪重変動と相関があり、台車の走行状態を把握できる可能性が見出された。また、センサ軸ばね防振ゴムを活用した監視手法を検討した結果、台車の対角の軸箱上に設置されたセンサ軸ばね防振ゴムのゴム荷重の差を求めることにより、通常と異なる走行状態となった場合を検知できる可能性があることがわかった。

今後、センサ軸ばね防振ゴムの長期耐久性の評価や走行状態を監視するシステムの構築などの課題を克服する

ことにより、センサ軸ばね防振ゴムを用いて台車の走行状態を常時監視できる可能性がある。

## 文 献

- 1) 大庭拓也, 山田幸一, 岡田信之, 相馬仁, 谷藤克也: 振動解析に基づく新幹線台車の状態監視, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.757, pp.2459-2467, 2009
- 2) 宮崎裕汰郎, 道辻洋平, 久田行徳, 長澤研介: PQ 輪軸による鉄道車両走行試験データの分析支援システム, 日本機械学会 2018 年度年次大会 講演論文集, G1800102, 2018
- 3) 野木村龍, 間々田祥吾, 岡村吉晃, 山中翔, 鈴木康大: センサ防振ゴムを用いた軸受の損傷検知手法の開発, 第 24 回鉄道技術連合シンポジウム 講演論文集, S2-7-5, 2017
- 4) 千葉智: TC 型軸箱温度検知装置の開発, JR EAST Technical Review, No.21, pp.27-30, 2009
- 5) 辺見信彦: 転がり軸受けの異常診断, 計測と制御, 第 55 巻, 第 3 号, pp.221-227, 2016
- 6) 間々田祥吾, 太田達哉, 宮本修吏, 岡村吉晃: 鉄道車両用車軸軸受の自律型損傷検知システム, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.902, DOI:10.1299/transjsme.21-00124, 2021
- 7) 大嶋和彦, 石黒稜人, 尾形和哉: 圧電素子の正・逆圧電効果を利用した静荷重センサの開発, 日本 AEM 学会誌, Vol.27, No.4, pp.419-427, 2019
- 8) 下井信浩, 間所洋和: 3 軸加速度とピエゾ荷重センサを用いたベッドモニタリングシステムに関する研究, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.12, pp.1092-1100, 2013