

パンタグラフすり板の段付摩耗検知アルゴリズム

小山 達弥* 臼田 隆之* 池田 充** 久家 広嗣*

Algorithm for Detecting Step-shaped Wear on Contact Strips of a Pantograph

Tatsuya KOYAMA Takayuki USUDA Mitsuru IKEDA Hirotsugu KUGA

Defects on pantographs may lead to serious accidents resulting in widespread damage of contact lines. Therefore, an early detection system for such defects is desired. The authors developed a method for detecting step-shaped wear on contact strips, which is one of the typical defects found on pantographs, by measuring the axial forces exerted on steady arms. Since the method only needs to measure the axial forces of steady arms, it can easily be applied to operational lines. In this paper, the principle of this method, the detection algorithm, the result of verification tests and a configuration example of the detection system are described.

キーワード：パンタグラフ，段付摩耗，ひずみ計測，検知，電車線，曲線引金具

1. はじめに

電気鉄道では車両に電力を供給するための必要不可欠な設備として電車線と集電装置がある。電車線と集電装置には多くの種類があるが，新幹線を含む多くの路線では電車線としてカテナリちょう架空電車線が，集電装置としてパンタグラフが，それぞれ使用されている。

パンタグラフに重大な異常が生じると，広範囲にわたって電車線設備が損傷する可能性があり，損傷の程度が大きい場合は長時間の輸送障害が発生する。現在，パンタグラフの異常を発見する手段として，車両基地等においてすり板の目視検査や自動検査が行われているが，列車運行中にパンタグラフに異常が発生した場合は，これを速やかに検知することは困難である。特に，すり板に生じる段付摩耗は車両運行中に急速に成長し，場合によってはパンタグラフや電車線の損傷を誘発することがあることから，その早期検知が求められている。また，定期的な目視検査においても，すり板の段付摩耗の危険度を判定するための定量的な基準はなく，検査者の判断に基づき段付摩耗の危険性の有無が判定されているため，段付摩耗の見逃しが起きる可能性がある。そのため，経験に依らない「定量的な評価」に基づく段付摩耗の判定手法は有用である。

そこで筆者らは，すり板に段付摩耗があるパンタグラフが通過した際に振止金具もしくは曲線引金具（以下では，これらを総称して曲線引金具と記す）に生じる特徴的なひずみ波形を計測することによりすり板段付摩耗を検知する手法（以下では，本手法という）を開発し，前

報¹⁾においてその有効性を示すとともに，本手法を営業線に適用するために新たに開発した計測装置についても報告した。

本報では，本手法を営業線に適用するうえで不可欠な，段付摩耗の発生を高い精度で検出するための検知アルゴリズムを提案するとともに，所内試験設備を用いた試験結果を用いて確認した本手法の検知精度について報告する。さらに，本手法の営業線への具体的な適用方法についての提案も行う。

2. すり板段付摩耗検知手法の概要

トロリ線としゅう動するすり板は，通常は列車走行に伴い徐々に，かつなめらかに摩耗する。しかし，稀にすり板に局所的かつ段状の摩耗が生じることがある。このような段状の摩耗形態を一般的に「段付摩耗」と呼ぶ。特に，段付摩耗が近接して溝状の摩耗が生じたものを「溝摩耗」と呼んでいる。

すり板の局所的摩耗を防ぐために，電車線にはジグザグ偏位が設けられており，トロリ線は支持点において曲線引金具により，まくらぎ方向に偏倚して支持されている。このジグザグ偏位により，走行中の列車から電車線を見ると電車線がまくらぎ方向に常に移動しているように見える。すり板に段付摩耗が生じると，このまくらぎ方向の動きが段付摩耗部において拘束される（図1）。図1（a）は段付摩耗が1箇所にある場合，図1（b）は溝摩耗の場合のトロリ線の拘束状態を表している。このように，トロリ線がすり板の段差により拘束を受けると，段付摩耗部においてトロリ線とのしゅう動頻度が高くなるため，段付摩耗はさらに成長し，最悪の場合にはすり

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

** 鉄道力学研究部

特集：電力技術

板の割損や電車線の損傷に至る可能性がある。

トロリ線のまくらぎ方向の動きが拘束されると、トロリ線はすり板からまくらぎ方向の力を受け、この力は曲線引金具に伝播する。以下では曲線引金具に伝播した力を横張力変動と記す。本手法は、この現象に着目し、曲線引金具に貼り付けたひずみゲージにより、横張力変動を捉えることですり板段付摩耗を検知するものである。横張力変動を捉えるためにひずみゲージを貼り付けた曲線引金具（以下、センサ付曲線引金具という）の例を図2に示す。この例ではひずみゲージを湾曲部に貼り付けている。これは横張力変動の測定精度を向上させるためである。本手法はひずみゲージを貼付けるだけで横張力変動測定が可能であるため比較的安価であり、なおかつ特殊な架線金具が不要であるという利点がある。また、トロリ線に対するセンサ取付けが不要なため、施工およびメンテナンスも容易である。

ところで、段付摩耗の形状によっては図1(a)の区間①のようにトロリ線に横張力変動が生じない場合がある。そこで、本手法では、このような形状の段付摩耗にも対応するために、2径間1サイクルのジグザグ偏位が設けられた直線区間の隣合う2径間を検知区間とし、その全ての支持点、つまり連続する3支持点にセンサ付曲線引金具を設置する。このような構成の電車線構成は一般的なものであるため、ほとんどの線区に適用可能である。

3. 検知アルゴリズム

曲線引金具に生じる横張力変動は、以下のパンタグラフの条件に応じて4つに大別されると考えられる。

- パンタグラフ①：高速走行かつ段付摩耗あり
- パンタグラフ②：低速走行かつ段付摩耗あり
- パンタグラフ③：高速走行かつ段付摩耗なし
- パンタグラフ④：低速走行かつ段付摩耗なし

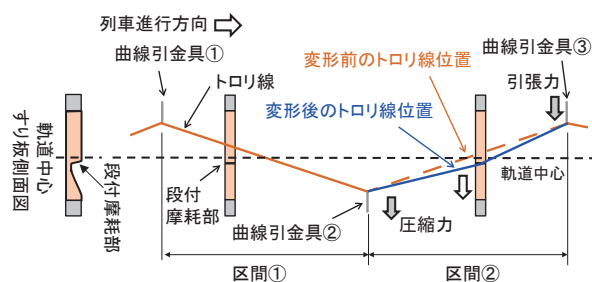
しかし、前報で報告した営業線における測定ではパンタグラフ①およびパンタグラフ④のデータを確認することができなかった。そこで、鉄道総研国立研究所構内にある集電試験装置²⁾(図3)においてこれらの条件において曲線引金具に生じる横張力変動の測定を行った。

本章では、集電試験装置における試験結果を示したのちに、本手法の核となる検知アルゴリズムを提案する。また、本手法の段付摩耗検知精度についても述べる。

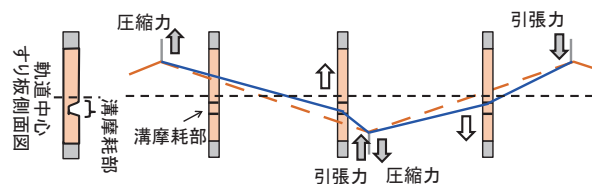
3.1 集電試験装置における試験条件

集電試験装置は、実際の電車線を架設した走行路に、実機パンタグラフを搭載した走行台車を走行させることで、電車線とパンタグラフの相互作用を観測する試験装置である。

今回の試験では、電車線として在来線で一般的に使



(a) 段付摩耗が1箇所にある場合



(b) 段付摩耗が2箇所にある場合(溝摩耗の場合)

図1 段付摩耗があるパンタグラフが通過した際のトロリ線の挙動と曲線引金具に作用する力の変動



図2 センサ付曲線引金具

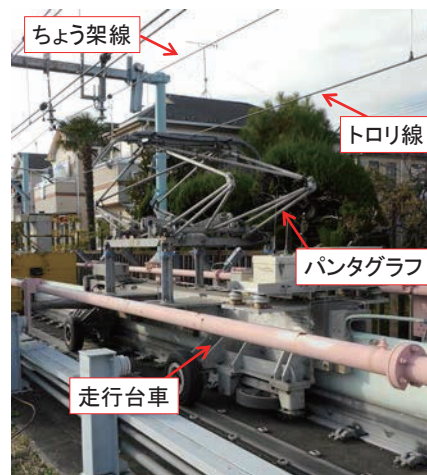


図3 集電試験装置

用されているカテナリちょう架式シンプル架線を架設した。トロリ線はGT-110mm²、ちょう架線はSt90mm²であり、それぞれの線条には9.8kN(1.0tf)の張力を与えた。電車線の支持間隔を50m、ハンガ間隔を5m、支持点におけるトロリ線偏位を±250mmとし、センサ付曲線引金具を連続する3支持点に設置した(センサ付曲線引金具①～③：図4参照)。

在来線用パンタグラフを走行台車に搭載して様々な

速度（4～130km/h）で走行させた。パンタグラフに取付ける供試すり板は、新品すり板、営業線で生じた段付摩耗があるすり板（図5（a））、および新品すり板に機械加工により人工的に段付摩耗を形成した人工摩耗すり板（図5（b））とした。人工摩耗すり板は、深さ2mm、幅30mmもしくは深さ2mm、幅16mmの溝摩耗を舟体中心よりまくらぎ方向に+245mm、±155mm、±115mm、±23mmのいずれかの位置に人工的に形成したものを用意した。これらのすり板種別と走行速度を組合わせて、合計86試番の試験を実施した。

なお、この走行試験に合わせて、トロリ線の1箇所にもくらぎ方向の静荷重 F_s を作用させたときに曲線引金具に生じる横張力変化を測定する試験も実施した。図6にこの結果を示す。図6には、センサ付曲線引金具 i （ $i=①\sim③$ ）において観測した横張力変化 F_i と静荷重 F_s の比 $R_i(=F_i/F_s)$ を示しており、センサ付曲線引金具に引張方向の横張力変化が観測されたときを正、圧縮方向の横張力変化が観測されたときを負として示している。また、横軸にはセンサ付曲線引金具②が設置されている支持点を基準とした静荷重の作用位置を示す。図6から、

- ・ 隣接支持点に静荷重を作用させると出力がほぼ0
- ・ 当該支持点に静荷重を作用させると出力がほぼ1となるような三角波状の出力が観測されることがわかる。したがって、隣接する2つのセンサの出力の絶対値の和（出力の差）を求めれば、これらの支持点で挟まれる径間内に作用する荷重を確実に検出可能である。これらの特徴は、前報で報告した数値計算の結果と定性的に一致している。

そこで、本手法では各センサ付曲線引金具において観測された横張力変動の絶対値の最大値（以下、横張力変動の単体の最大値と記す）、および隣接する2本のセンサ付曲線金具でそれぞれ観測された横張力変動の絶対値の最大値の和（以下、横張力変動の最大値の和と記す）を用いて段付摩耗を検出する。

3.2 曲線引金具に生じる横張力波形の特徴

パンタグラフ①～④が通過する際に観測される代表的な波形を図7に示す。

パンタグラフ①では、卓越したピークを持つ著大な横張力変動が生じる（図7（a））。

パンタグラフ②では発生から収束までの時間が長い鋸波状の波形が生じ、その最大値はパンタグラフ①のピーク値より小さい（図7（b））。この鋸波状の波形は、パンタグラフが低速で進行する場合にトロリ線がすり板の段付摩耗部で拘束される時間が相対的に長いために生じるものである。

パンタグラフ③が通過する際には、パンタグラフ②と同程度の大きさの横張力変動が生じるが、鋸波状の波形

は観測されない（図7（a））。

パンタグラフ④では、パンタグラフ①～③の場合に比べて明確に小さな横張力変動だけが観測される（図7（b））。

このように、パンタグラフ条件に応じて特徴的な波形が観測されるため、これらを考慮した検知アルゴリズムを構築した。

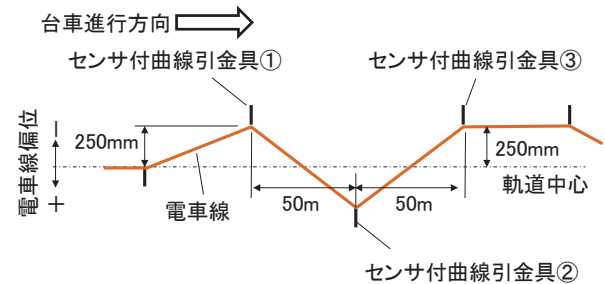
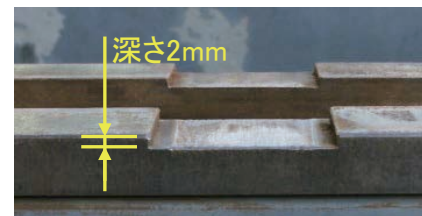


図4 集電試験装置に架設した電車線（上面図）



(a) 営業線で生じた段付摩耗すり板



(b) 人工摩耗すり板（溝摩耗）

図5 走行試験で用いた段付摩耗すり板

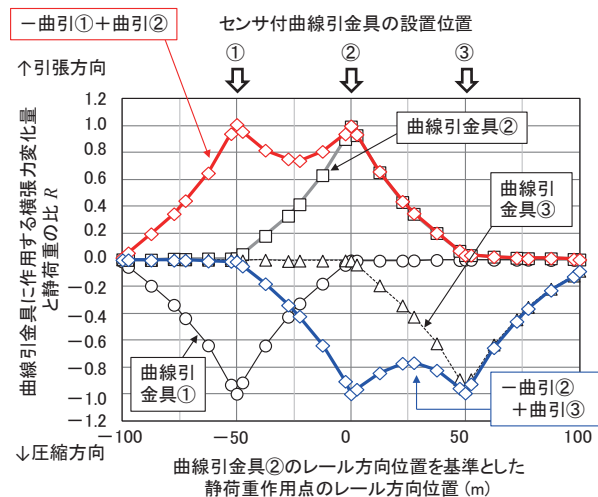


図6 静荷重試験結果

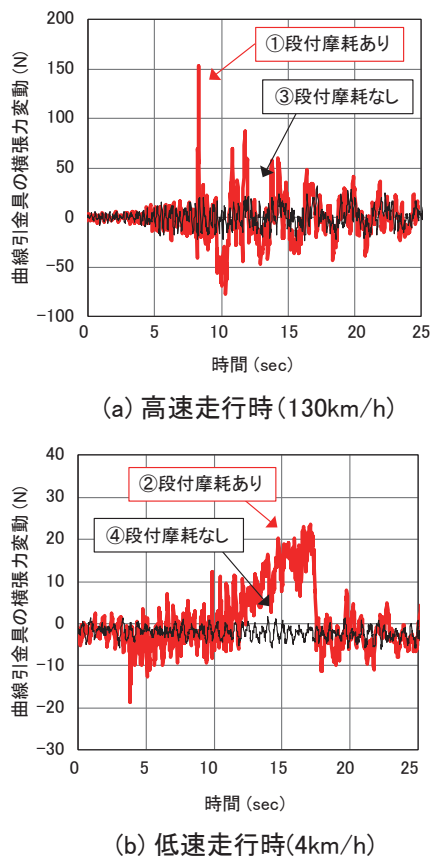


図7 曲線引金具で観測される横張力変動波形

3.3 検知アルゴリズム

すり板段付摩耗の有無を判定する最も単純な検知アルゴリズムとして、取得した横張力変動波形からピーク値を算出し、その値を基に段付摩耗の有無を判定するアルゴリズムが考えられる。ただしパンタグラフ③のように、段付摩耗がない場合でもパンタグラフが高速で通過する場合には、やや大きなピーク値が観測されることから、段付摩耗の有無を判定するための閾値を速度に応じて変化させる必要がある。そのため、このアルゴリズム自体は単純ではあるものの、パンタグラフの通過速度を測定するためのセンサを別途導入する必要がある。

そこで、パンタグラフの通過速度測定が不要な、2段階の判定によるアルゴリズムを構築した(図8)。以下では、各段階における判定方法の詳細を述べるとともに、閾値の決定方法を述べる。

3.3.1 1段階目の判定

前節に示したように、パンタグラフ①が通過した際の横張力変動のピーク値はパンタグラフ②～④の場合と比較して大きな値となる。そこで、1段階目の判定では高速で通過するパンタグラフの段付摩耗を検知するために、取得した各センサ付曲線引金具の横張力変動波形から横張力変動の単体の最大値 $|F_{1,max}|$ 、 $|F_{2,max}|$ 、 $|F_{3,max}|$ 、横張力変動の最大値の和 $|F_{1,max}|+|F_{2,max}|$ 、 $|F_{2,max}|+|F_{3,max}|$ をそ

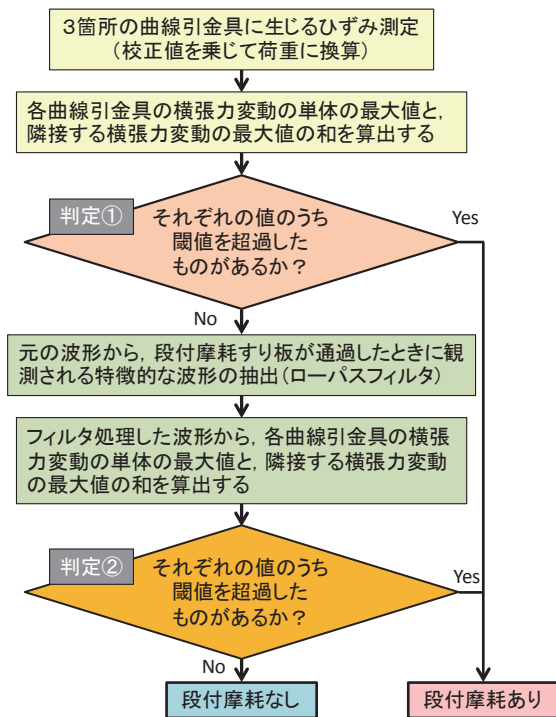


図8 段付摩耗の検知アルゴリズム

れぞれ求め(下添え字の数字はセンサ付曲線引金具の番号を示す)、いずれかの値が横張力変動の単体の最大値に対する閾値 θ_{11} 、横張力変動の最大値の和に対する閾値 θ_{12} を超過していたときに段付摩耗ありと判定する。この判定方法は、前述した単純なアルゴリズムと同様であるが、低速で通過するパンタグラフの段付摩耗を検知対象としていない。これについては次節で説明する2段階目の判定で検知する。

3.3.2 2段階目の判定

1段階目の判定を終えると、2段階目の判定を行う。

まず、低速で走行するパンタグラフの段付摩耗(パンタグラフ②)を検知するために、パンタグラフ②の横張力変動波形の特徴である鋸歯状の波形をローパスフィルタ処理により抽出する。図9にパンタグラフ②とパンタグラフ③が通過する際に観測された波形に対して、カットオフ周波数0.8Hzのローパスフィルタ処理を施した波形を示す。なお、カットオフ周波数を0.8Hzとしたのは次の理由による。今回の試験で架設した電車線のまくらぎ方向振動の固有振動数は約1.0Hzであった。段付摩耗がない場合に曲線引金具に生じる横張力変動のピーク周波数は、電車線の固有振動数に一致すると考え、これを除去するためにカットオフ周波数を0.8Hzとした。図9から、ローパスフィルタを施したあとの波形では、パンタグラフ②とパンタグラフ③のピーク値に明瞭な差が生じていることがわかる。したがって、これらの値を比較することでパンタグラフ②とパンタグラフ③

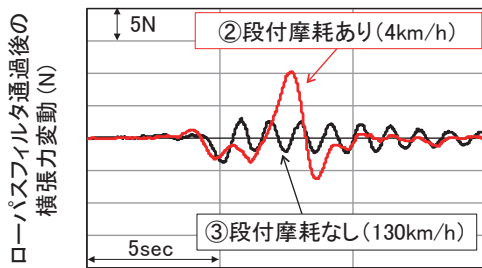


図9 ローパスフィルタ処理後の横張力変動波形

を判別することが可能である。なお、パンタグラフ④については、横張力変動自体が小さいため、フィルタ処理を施してもピーク値は小さく、問題なく判別することができる。

以上のフィルタ処理を施したあとの各センサ付曲線引金具の横張力変動波形 $F_{i,filter}$ ($i=1,2,3$: センサ付曲線引金具の番号) から、1段階目の判定と同様に横張力変動の単体の最大値 $|F_{1,filter}|_{max}$, $|F_{2,filter}|_{max}$, $|F_{3,filter}|_{max}$, 横張力変動の最大値の和 $|F_{1,filter}|_{max}+|F_{2,filter}|_{max}$, $|F_{2,filter}|_{max}+|F_{3,filter}|_{max}$ をそれぞれ求める。いずれかの値が横張力変動の単体の最大値に対する閾値 θ_{21} , 横張力変動の最大値の和に対する閾値 θ_{22} を超過していたときに段付摩耗ありと判定する。

3.3.3 閾値の決定方法

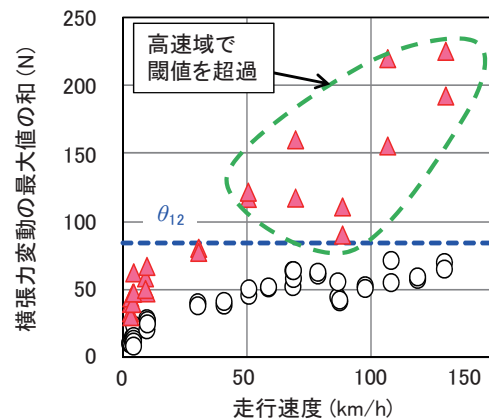
各段階で使用する閾値については、複数の正常なパンタグラフが通過した際に観測される横張力変動波形から決定する。

1段階目の閾値 θ_{11} および θ_{12} については、まず複数の正常なパンタグラフの横張力変動波形から、それぞれのパンタグラフが通過した際の横張力変動の単体の最大値と横張力変動の最大値の和を算出する。このとき、低速で通過するパンタグラフは横張力変動が小さいため算出対象から外す。複数のパンタグラフから算出した横張力変動の単体の最大値の集合と、横張力変動の和の最大値の集合から、それぞれの集合の平均値および標準偏差を算出する。次に、得られた平均値に標準偏差の3倍を加えた値をそれぞれ求め、これらの値を閾値 θ_{11} および θ_{12} とする。

二段階目の閾値 θ_{21} および θ_{22} についても、1段階目の閾値の決定方法と基本的には同様であるが、ここではフィルタ処理を施したあとの波形を用いる。

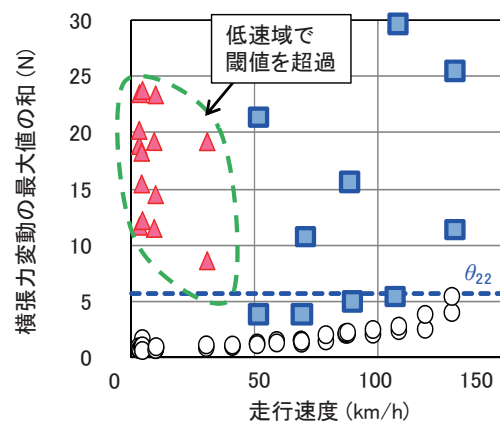
3.4 本手法の検知精度の検証

前述の走行試験結果を用いて、本手法によるすり板段付摩耗の検知精度を確認した。図10に幅30mm、深さ2mmの溝摩耗を舟体中心よりまくらぎ方向-23mmの位置に形成した人工摩耗すり板(図10の△印と□印)および新品すり板(図10の○印)の試験結果を示す。



▲ 段付摩耗あり ○ 段付摩耗なし

(a) 判定①における判定結果



▲ 段付摩耗あり ○ 段付摩耗なし

■ 判定①で「段付摩耗あり」と判定

(b) 判定②における判定結果

図10 検証試験結果(横張力変動の最大値の和)

図10(a)は1段階目の判定結果を、図10(b)は2段階目の判定結果を、それぞれ示す。ここで、図10(b)の□印は1段階目の判定により段付摩耗ありと判定されたものであるため、2段階目の判定が行われる際には判定対象とはしないが、参考として掲載する。また、各段階の判定における閾値 θ_{11} , θ_{12} , θ_{21} , θ_{22} は、新品すり板を用いた走行試験のうち、60km/h以上の試番の値を用いて決定しており、図10には横張力変動の最大値の和による判定結果を示す。図10から、第1段階目の判定では高速しゅう動しているパンタグラフの段付摩耗(パンタグラフ①)を、第2段階目の判定では低速しゅう動しているパンタグラフの段付摩耗をそれぞれ検知できていることが確認できる。なお、営業線で段付摩耗が生じたすり板を用いた試験でも横張力変動の単体の最大値と横張力変動の最大値の和は人工摩耗すり板を用いた試験と同程度の値が観測されていた。そのため、人工摩耗すり板を用いた試験結果を用いて本手法の精度検証を行うことは妥当であると考えられる。

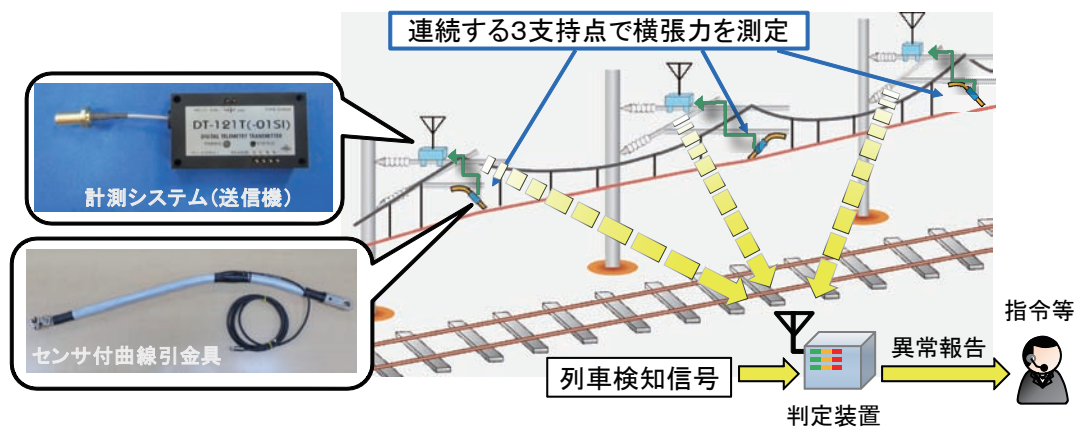


図 11 本手法の営業線への適用

走行試験で実施した全 86 試番に対する正答率は 100% であり、本検知アルゴリズムは高い精度で段付摩耗を検知できることを確認した。

4. 本手法の営業線への適用

本手法を営業線に適用するためには、横張力変動の測定波形を高電圧が印加された電車線から地上設備に伝送する必要がある。そこで、本手法に適した計測システムを開発した¹⁾。この計測システムは、ひずみ計測と無線通信による信号伝送を 1 台で行う。小型・軽量であり、さらに消費電力が低いことから電源の軽量化が可能である。これにより、計測システムを設置する支持物に大きな耐荷重が不要であるため、さまざまな支持物に設置することができる。そのため、本線上の複数区間においてモニタリングが可能となり、高頻度の検査が実現できることから、段付摩耗の早期検知が期待できる。

本手法を営業線に適用する具体例を図 11 に示す。連続する 3 支持点にセンサ付曲線引金具を設置し、横張力変動の計測に上記計測システムを用いる。計測システムの出力信号を地上に設置した判定装置に伝送し、前述したアルゴリズムに基づき段付摩耗の有無を判定する。もし、通過したパンタグラフに段付摩耗があると判断された場合は、指令などの必要箇所に異常報告を行い、列車抑止など所要の処置を講じる。

なお、図中の列車検知信号は、計測システムのオン・オフを行うために使用する。これにより、列車通過がない時間帯には計測システムの電源を切ることによって電力消費を必要最小限に抑える。これにより、加圧部に設置する電源をコンパクトなものとすることができる。また、段付摩耗があると判断した際には、その列車を特定する必要がある。列車の特定にはさまざまな方法が考えられるが、車両に設置された RFID タグを読み取り³⁾、

異常報告とともに RFID タグの情報を送信する方法が考えられる。また、在線列車の位置を取得できるシステムがすでに導入されている線区であれば、このシステムと本手法により構成された検知システムとを組み合わせることで、列車検知信号の取得と段付摩耗がある列車の特定を容易に行うことができる。

5. おわりに

曲線引金具のひずみ測定波形をもとに、すり板段付摩耗を確実に検知するための検知アルゴリズムを提案した。この検知アルゴリズムでは 2 段階の判定を行う。1 段階目の判定では高速で通過するパンタグラフに生じた段付摩耗を、2 段階目の判定では低速で通過するパンタグラフに生じた段付摩耗を、それぞれ検知する。所内試験設備を用いて本手法の検知精度を確認したところ、正答率 100% で段付摩耗を検知できることを確認した。

本手法および既開発の計測システムを組合わせて営業線に導入することにより、高精度かつ高頻度のすり板段付摩耗検知が可能となり、鉄道の更なる安定輸送を実現することが期待される。

文 献

- 1) 小山達弥, 白田隆之, 川崎邦弘, 中村一城, 川村智樹: 電車線に設置したセンサ群によるパンタグラフ異常検知手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.12, pp.35-40, 2015
- 2) 中道好信: 電力に関する大型実験設備, RRR, Vol.61, No.7, pp.10-11, 2004
- 3) 三島潤一郎, 一木剛, 杉浦芳光: 画像によるパンタグラフすり板計測装置の開発, JR EAST Technical Review, No.55, pp.17-18, 2016