

トロリ線の振動測定によるすり板段付摩耗の検出

白田 隆之* 池田 充*

Detecting Method of Step-shaped Wear on Contact Strip by Measurement of Contact Wire Vibration

Takayuki USUDA Mitsuru IKEDA

Some factors such as arc between contact wire and contact strips of a pantograph cause wear on the contact strips. Once the local wear occurs, it is highly likely to grow to a step-shaped wear. The contact strip with the step-shaped wear may lead to accidents such as contact wire breaking. For preventing such accidents, authors have developed a contact strip step-shaped wear detecting method by measurement of contact wire vibration. This paper has described the new method and the result of experimental tests.

キーワード：モニタリング，パンタグラフ，すり板段付摩耗，トロリ線加速度，架線振動

1. はじめに

パンタグラフのすり板はトロリ線と摺動しながら集電する。異常なアークの発生など何らかの要因により、一度すり板に局所的な摩耗が発生すると、すり板上面におけるトロリ線のスムーズな左右移動が阻害され、局所的な摩耗が段付摩耗として更に発達することがある。このすり板の段付摩耗は凹凸の形状次第ではすり板破損、舟体溶断、架線切断などの架線・パンタグラフ事故につながることもあり、今までも様々な対策が行われている。段付摩耗の生成メカニズムの基礎検討を行った研究によれば、離線アークの頻発する環境下などにおいて段付摩耗が発生しやすいと考えられているが、まだ不明な点も多い。

本研究は、すり板段付摩耗をトロリ線に取り付けたセンサにより検知する方法を確立することにより、地上設備によるすり板の異常モニタリングを実現することを目的とするものである。

2. 試験概要

段付摩耗のあるすり板がトロリ線と摺動する際には、トロリ線に上下方向や左右方向の振動が励起される¹⁾。そこで本研究では、段付摩耗のあるすり板を取付けたパンタグラフを架線に摺動走行させる試験を行い、架線側に取り付けた加速度計や変位計などのセンサによりトロリ線の振動測定を行って、その測定波形から段付摩耗を検知する方法について検討を行った。

試験は鉄道総研の集電試験装置において実施し、走行

速度は4～130km/hとした。架線はシンプルカテナリ架線とし、ハンガ間隔5m、スパン長は50mとした。架線の左右偏位は2スパン半サイクルとし、計測区間の左右偏位を図1に示すように11号柱，21号柱でそれぞれ進行方向左側100mmおよび右側380mmに曲引金具で設定した。なお，16号柱には曲線引金具は取り付けしていない。トロリ線の加速度を計測するため，図1の①～⑤の箇所には加速度計取付け用イヤーを介して，上下・左右の加速度計を各1個ずつ取付けた（図2）。さらに，16号・21号柱間の第5ハンガの高さ中央付近にワイヤ式の変位計を水平に取り付け，ハンガの偏位方向の変位を測定した。また，図1に示す位置に位置マーカを設置し，パンタグラフ舟体が当該個所を通過する際に出力される信号を測定した。表1に架線張力の測定結果と，張力から計算した各線条の波動伝播速度を示す。

パンタグラフはシングルアームパンタグラフを使用し，営業線において段付摩耗が発生したすり板が取付けられた舟体と，摩耗していない新品すり板の取付けられた舟体とを使用した。いずれのすり板もカーボン系すり板である。段付摩耗すり板が取付けられた舟体のうち前舟のすり板摩耗プロファイルの測定結果を図3に示す。後舟のすり板摩耗プロファイルも前舟と同様の傾向である。図3の右側に観察される2本の細い溝状の摩耗は人

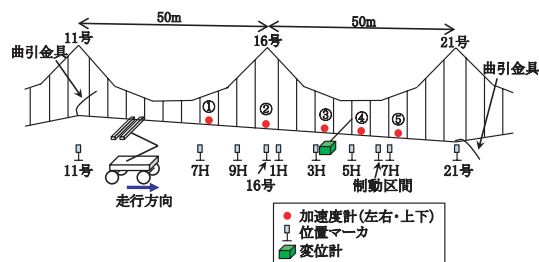


図1 試験概要図

* 鉄道力学研究部（集電力学）

特集：電力技術

工的に作成した段付摩擦であるが、これについての試験結果は本報告では省略する。



図2 トロリ線の加速度計取付け状況

表1 架線張力の条件

| 線種 | 張力 (kN) | 線密度 (kgf/m) | 波動伝播速度 (m/s) |
|------|---------|-------------|--------------|
| 吊架線 | St90 | 9.8 | 0.70 |
| トロリ線 | GT110 | 10.2 | 0.99 |
| 架線全体 | | 20.1 | 1.69 |

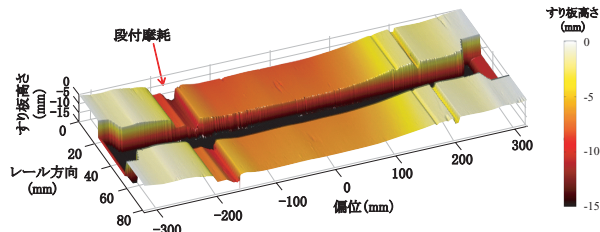


図3 すり板段付摩擦の測定結果（前舟）

3. 段付摩擦検知方法

すり板に段付摩擦のあるパンタグラフを走行させた時に観測したトロリ線振動波形の代表例を図4に示す。この例のように、段付摩擦のあるすり板のパンタグラフが測定区間を通る際に観察されるトロリ線挙動には以下の特徴が見られることがわかった。

- ① トロリ線がすり板摺面の上部から段付摩擦底部へ移行する際には、トロリ線上下加速度とトロリ線左右加速度にインパルス状の信号が観察される（図4 (a)）。
- ② トロリ線がすり板摺面上を段付摩擦底部から上部に移行した直後に、トロリ線は左右方向に大きく自由振動する（図4 (b)）。

そこで上記2つのケースについて、それぞれ波形の特徴をとらえることによって、段付摩擦の通過を検知する手法を検討した。

3.1 段付摩擦底部へのトロリ線移行の検知

本節ではトロリ線がすり板摺面の上部から段付摩擦底部に移行する際（図4 (a)）に、トロリ線上下加速度にインパルス状の信号が観察されることに着目したすり板段付摩擦の検知法について検討を行う。ここでは、以下に示すトロリ線上下加速度のクルトシス（波形の尖鋭

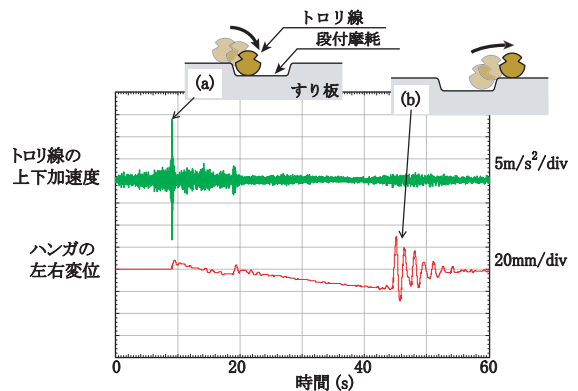


図4 段付摩擦とトロリ線との位置とトロリ線振動との関係

度) を評価した。

ある時刻 j でのトロリ線加速度を a_j とすると、その時刻近傍の N 点のサンプリングにおけるトロリ線加速度の平均値 \bar{a}_j は

$$\bar{a}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=j-N/2+1}^{j+N/2} a_i \quad (1)$$

となる。同様に、ある時刻 j 近傍の N 点のサンプリングにおけるトロリ線加速度の標準偏差 σ_j は

$$\sigma_j = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=j-N/2+1}^{j+N/2} (a_i - \bar{a}_j)^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

となる。この拡張として、ある時刻 j 近傍のクルトシス K_j は次式により定義される。

$$K_j = \frac{1}{\sigma_j^4} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=j-N/2+1}^{j+N/2} (a_i - \bar{a}_j)^4 \right\} \quad (3)$$

クルトシスは平均値のまわりの4次モーメントを標準偏差の4乗で正規化したもので、波形の尖鋭度を表す指標である。例えば a_j が正規分布関数であるとき、そのクルトシスは3となる。正規分布関数よりもとがった波形では3より大きく、正規分布よりも鈍な波形では3より小さくなる。ここでは、トロリ線上下加速度のクルトシスの計算結果が一定の閾値を超える場合に、すり板段付摩擦が発生したと判別することが可能かどうかを検討した。

今回の検討ではサンプリング周波数2kHzのA/D変換データをサンプリング周波数200Hzにリサンプルしたデータを使用し、式(3)の N は100、5箇所のトロリ線上下加速度のクルトシスに対する閾値は16とした。また、同様の処理をトロリ線上下加速度1～5の合計値に対しても行い、その場合のクルトシスに対する閾値を12とした。これら合計6つの波形に対するクルトシスを段付摩擦の判定に使用した。検討の詳細は3.4節に示す。

3.2 加速度による段付摩擦上部へのトロリ線移行検知

本節ではトロリ線がすり板摺面上を段付摩擦底部から上部に移行する直後（図4 (b)）に、トロリ線が左右方

向に大きく自由振動することに着目したすり板段付摩耗の検知法について検討を行う。高周波数のトロリ線振動は測定場所による影響が大きいため、検知対象とするトロリ線左右振動モードは低い周波数領域に限定する。トロリ線上下振動の最も低次の固有振動数より低い周波数で、なおかつトロリ線左右振動の固有振動数である周波数を透過するフィルタをトロリ線の左右加速度信号に適用することにより、トロリ線上下振動による連成の影響を受けずに、段付摩耗によって生じたトロリ線左右方向の自由振動のみを効率良く検知可能と考えられる。

そこで、検知対象とする周波数範囲を決定するため予備試験として、試験区間のトロリ線に対し上下方向と左右方向の2種類の加振試験を実施した。図1の加速度測定点③におけるトロリ線振動加速度のパワースペクトルを一例として図5に示す。この結果から、当該トロリ線の上下方向の固有振動数のうち、最も低次の周波数は1.1Hzであることが確認できた。この周波数はスパン長50mの架線系が半波長となる周波数にほぼ一致している。

$$109(\text{m/s})/50(\text{m})/2 = 1.09\text{Hz} \approx 1.1\text{Hz}$$

また、当該トロリ線の左右方向の固有振動数のうち、最も低次の固有振動数は0.7Hzであった。この周波数は、測定範囲の偏位を固定している11号柱から21号柱までの距離100mのトロリ線に半波長の定在波が発生する周波数におおよそ一致している。

$$102(\text{m/s})/100(\text{m})/2 = 0.5\text{Hz} \approx 0.7\text{Hz}$$

固有振動数の実測値と計算値との誤差要因としては16号柱に吊架線が支持されているため、トロリ線の左右方向の支持状態が完全にフリーにはなっていないためと推測される。

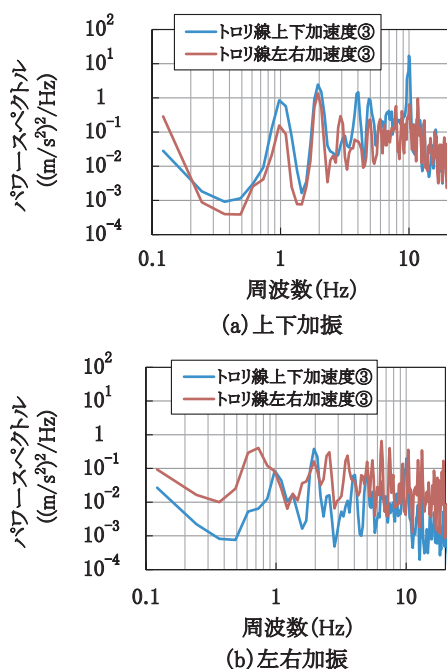


図5 トロリ線加振試験結果

以上の検討から、本試験条件では0.5～0.8Hzのバンドパスフィルタを適用することにより、トロリ線の上下方向の自由振動の影響を受けることなく、左右方向の自由振動だけを抽出することが可能であることがわかる。このフィルタを適用した波形に対して、標準偏差 σ_j を式(2)により計算し、計算した標準偏差が閾値を超えるものを抽出すれば、すり板段付摩耗を検知できると考えられる。

今回の検討ではサンプリング周波数2kHzのA/D変換データをサンプリング周波数200Hzにリサンプルしたデータを使用し、式(2)のNは200、トロリ線左右加速度の標準偏差に対する閾値は0.05m/s²とした。また、5箇所測定した各トロリ線左右加速度波形を時間軸上で加算した波形に対しても標準偏差を求め、これに対する閾値を0.1m/s²とした。これら合計6個の標準偏差をすり板段付摩耗の判定に使用した。検討の詳細については3.4節に示す。

3.3 トロリ線左右変位による段付摩耗上部への移行検知

前節と同様に、トロリ線がすり板摺面上を段付摩耗底部から上部に移行する直後のトロリ線の左右方向の自由振動を検出するため、ハンガの左右変位を用いる方法についても検討した。ある時刻jでのハンガの左右変位を x_j とすると、その時刻近傍のN点のサンプリングにおけるハンガの左右変位の平均値 \bar{x}_j は

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=j-N/2+1}^{j+N/2} x_i \quad (4)$$

となる。また同様に、ある時刻j近傍のN点のサンプリングにおけるハンガの左右変位の標準偏差 σ'_j は

$$\sigma'_j = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=j-N/2+1}^{j+N/2} (x_i - \bar{x}_j)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

となる。今回の検討ではサンプリング周波数2kHzのA/D変換データをサンプリング周波数200Hzにリサンプルしたデータを使用し、式(5)のNは200、ハンガの左右変位の標準偏差による段付摩耗検出の閾値は7mmとした。なお、ハンガの左右変位は加速度の2階積分に相当するため、前節での加速度を使用した検出方法と比較すると、低周波数の振動が卓越し、フィルタ処理を行わずとも11号柱から21号柱までの距離100mのトロリ線に水平方向に半波長の定在波が発生する振動モードが卓越する。そのため、本節の処理においては3.2節で適用したようなフィルタ処理は行わない。

3.4 複数個のセンサ出力の統合方法について

3.1節と3.2節で述べた、トロリ線加速度を使用したすり板段付摩耗の検知では、複数個のセンサを使用して異常判定を行っているため、複数のセンサの検知結果を統合する必要がある。そこで、3.1節のトロリ線上下加速度

特集：電力技術

のクルトシスによる検知では加速度計5個のうち、1つ以上の加速度計において算出したクルトシスが閾値を超え、なおかつ5個の加速度計の合計値に対するクルトシスも閾値を超えた場合にすり板段付摩耗と検知するよう試みた。また、3.2節のトロリ線左右加速度の標準偏差による検知では加速度計5個のうち、3個以上の加速度計において算出した標準偏差が閾値を超え、なおかつ5個の加速度計の合計値に対する標準偏差も閾値を超えた場合にすり板段付摩耗と検知するよう試みた。

なお、複数の上下加速度計のクルトシスの検知結果の論理積を使用する際には、センサ設置位置によりパンタグラフからの波動伝播距離が異なるため、異常波形の検知に時間差が生じる。しかもクルトシスによる検知はインパルス的な入力を検知するため、閾値を超えている時間は非常に短い。したがって、センサの設置間隔をトロリ線の波動伝播速度で割った時間範囲で検知タイミングのずれを許容した。

一方、トロリ線の左右方向自由振動の検知は11号柱から21号柱の架線全体がほぼ一体となって振動するモードであり、1箇所のセンサにおいて異常を検知している時間も比較的長いため、上述の処理は適用しない。

4. 試験結果

図6～8に走行試験の測定データおよび解析結果の時刻歴データを示す。本図は上段から、位置マーカー、トロリ線左右・上下加速度計1～5の生波形、ハンガの左右変位、トロリ線上下加速度計1～5の波形に対してクルトシスを計算した結果、トロリ線上下加速度の合計波形に対してクルトシスを計算した結果、クルトシスによる段付摩耗の検知結果、トロリ線左右加速度計1～5とトロリ線左右加速度の合計値のそれぞれに3.2節のバンドパスフィルタを適用した結果、トロリ線左右加速度計1～5とトロリ線左右加速度の合計値のそれぞれにバンドパスフィルタを適用し標準偏差を計算した結果、標準偏差による段付摩耗の検知結果およびハンガの左右変位による段付摩耗の検知結果である。

図6は段付摩耗すり板を取付けたパンタグラフを時速3.6km/hで走行させた時の測定結果である。本試番は62sec付近でトロリ線が上部から段付摩耗底部へ移行し、83sec付近でトロリ線が段付摩耗底部から上部へ移行している。本図の検知結果ではクルトシスまたは標準偏差による判定によって、「トロリ線上下加速度による段付摩耗底部へのトロリ線移行時の検知」と「トロリ線左右加速度による段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行時の検知」および「トロリ線左右変位による段付摩耗上部

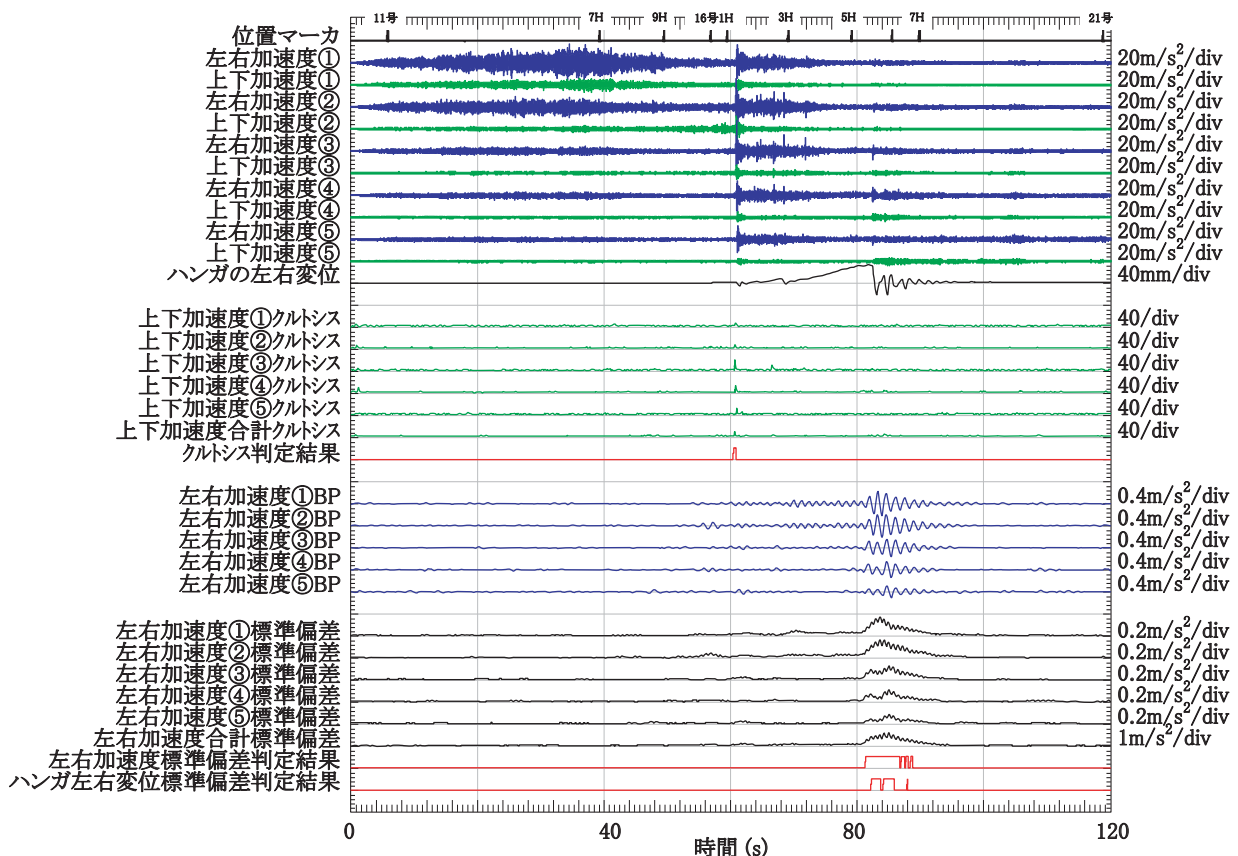


図6 走行試験結果 (段付摩耗あり, 時速3.6km/h)

への移行検知」に成功している。

図7は段付摩耗の無い新品すり板を取付けて121km/hで走行させたときの結果である。本結果から、高速走行でも全ての判定項目について誤検出が発生していないことが確認できる。

図8は段付摩耗のあるすり板を取付けて120km/hで走行させたときの試験結果である。ハンガ左右変位の信号から、本試番は4sec付近でトロリ線が上部から段付摩耗底部へ移行し、4.3sec付近でトロリ線が段付摩耗底部から上部へ移行していると推測される。この推測は120km/h走行時に当該の架線がすり板上をまくらぎ方向に一定速度160mm/sで移動すると仮定した場合に、段付摩耗の幅40mmをトロリ線が移動する時間0.25secからも概ね妥当であると考えられる。図8の検知結果では「トロリ線左右加速度による段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行時の検知」および「ハンガの左右変位による段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行時の検知」には成功している。これら2種類の検出方法は今回実施した約100試番中で異常検知の正答率が100%であった。しかし本試番では、「トロリ線上下加速度による段付摩耗底部へのトロリ線移行時の検知」を見逃している。この主な理由としては、高速走行時は段付摩耗底部へのトロリ線移行時にトロリ線に上下方向に作用するインパルス入力に対して、通常摺動時の接触力や前後力の変動による

トロリ線への波動励起の寄与度が大きくなるため、すり板段付摩耗によるインパルス状の波形が卓越せず、その尖鋭度を検知しにくいということが推測される。本手法の実用化の際には段付摩耗形状に依存しないよう、様々な検出方法を組み合わせて確実性を上げることが望ましいため、「段付摩耗底部へのトロリ線移行時の検知方法」については今後も検討を進めていく。

同様に、焼結合金すり板を搭載した菱形パンタグラフについて3種類の人工的な段付摩耗形状で最高130km/hまでの速度で同様な試験を実施した。本試験においても「トロリ線上下加速度による段付摩耗底部へのトロリ線移行時の検知」は高速時に検出できなかったが、他の2つの検出方法では誤検出は発生しなかった。なお、試験を実施中に、図9に示すように段付摩耗すり板によるイヤーへの打痕やトロリ線側面への傷も観測された。このような架線へのダメージを未然に防ぐためにも本手法の実用化が有効であろう。

5. まとめ

本研究はすり板の段付摩耗をトロリ線に取り付けた加速度計により検知することによって、地上設備でパタグラフのモニタリングを実現することを目的としたものである。集電試験装置において実架線での試験を実施した

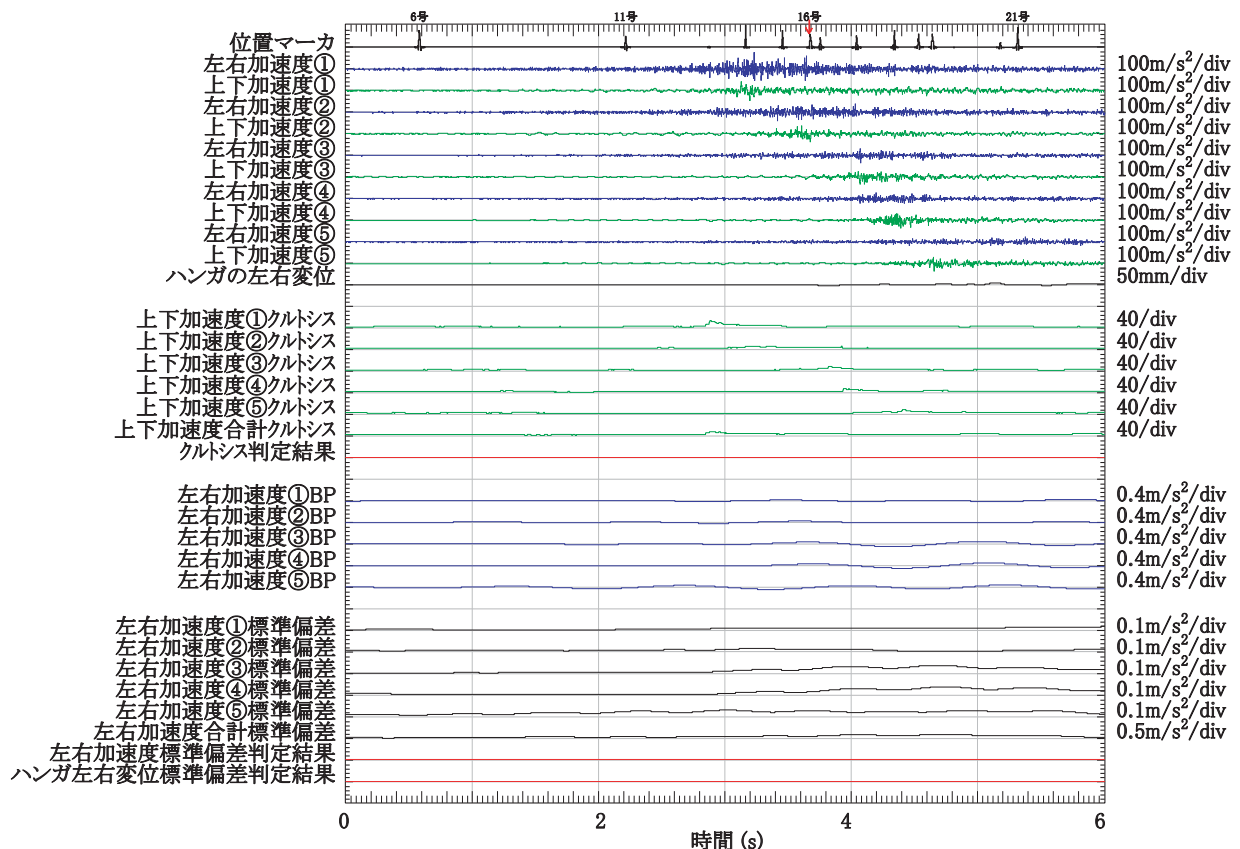


図7 走行試験結果（段付摩耗なし，時速121km/h）

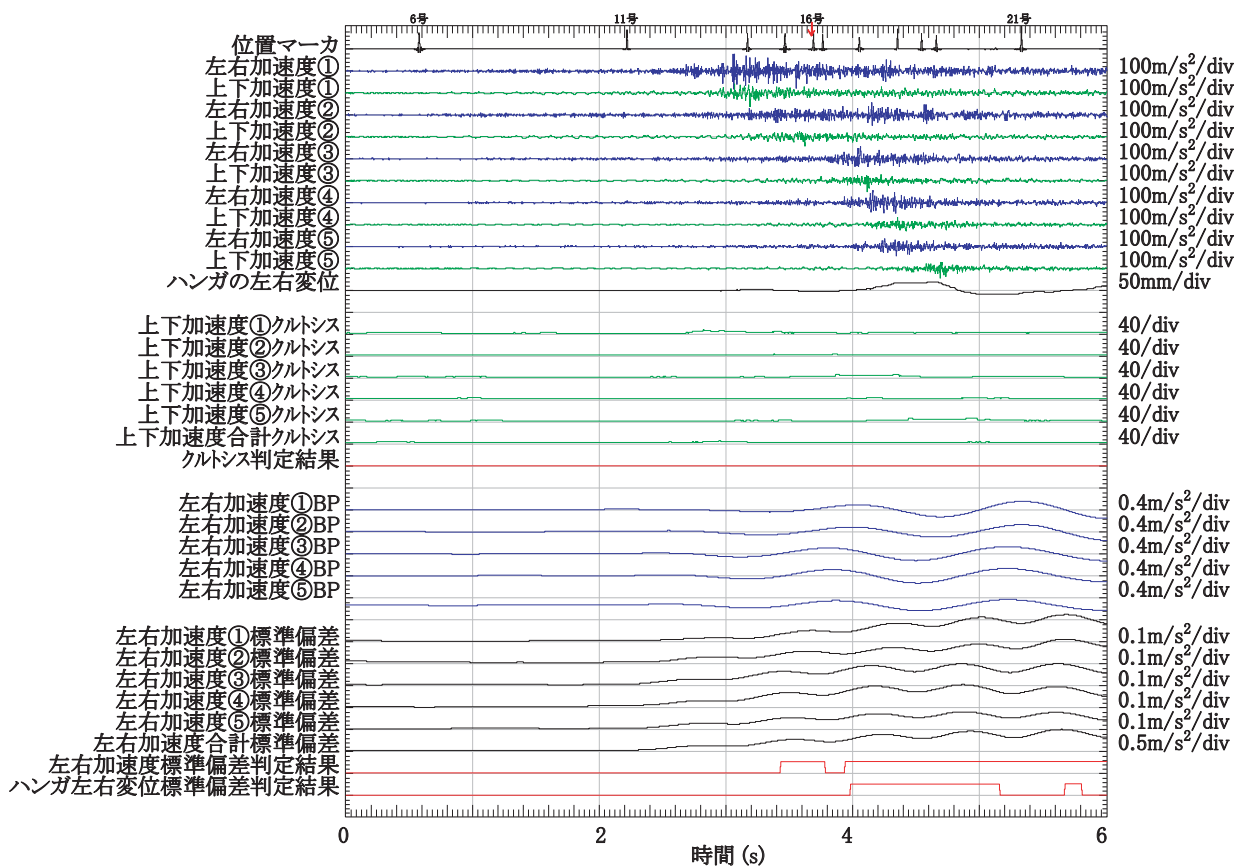


図8 走行試験結果（段付摩耗あり，時速 120km/h）

結果，4～130km/hの速度域でトロリ線の振動加速度やハンガの左右変位に基づいてすり板の段付摩耗発生を検知可能であることが確認でき，以下の結果が得られた。

- (1) 「段付摩耗底部へのトロリ線の移行」はトロリ線上下加速度のクルトシスから検知可能である。ただし，パンタグラフの走行速度が高速の場合は検出できないケースもあった。
- (2) 「段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行」はトロリ線左右加速度に含まれるトロリ線の左右方向の固有振動数成分の標準偏差と，ハンガの左右変位の標準偏差から検知可能であり，段付摩耗すり板の見逃しも，誤検出も発生しなかった。
- (3) 新品のすり板を取付けた試験において，段付摩耗の誤検出は発生しなかった。

なお，本報告では複数のセンサの出力を組合せることによってすり板異常の検知を行ったが，センサの設置間隔やセンサ出力の組合せ方法については更に検証が必要である。また，本手法はパンタグラフの通過速度の影響を受けると考えられるため，パンタグラフの通過速度により閾値を変更するなどの処理も今後の課題である。



図9 段付摩耗すり板によるイヤーへの打痕およびトロリ線側面への傷

文献

- 1) 白田 隆之, 池田 充: 「トロリ線加速度を使用したすり板段付摩耗検知法の検討」, J-RAIL2009, pp.717-720, 2009
- 2) Y. Yamashita, et al.: “A basic study on the method for detecting step-shaped wear on contact stripes”, *Condition monitoring and diagnostic engineering management*, pp.305-312, 2010.