# 3707 トロリ線加速度を使用したすり板段付摩耗検出法の検討

正 [機] 〇臼田 隆之 (鉄道総研) 正 [機] 池田 充 (鉄道総研)

Detecting method of step-shaped wear on contact strip by acceleration of contact wire

Takayuki Usuda, Railway Technical Research Institute, Hikari-cho 2-8-38, Kokubunji-shi, Tokyo Mitsuru Ikeda, Railway Technical Research Institute

Some factors such as are between contact wire and contact strips of a pantograph cause local wear on the contact strips. Once the local wear occurs, the local wear 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 using acceleration of contact wire. In this paper, this new method and experimental test results are reported.

Keywords: step-shaped wear on contact strip, contact wire, pantograph, monitoring method, kurtosis

# 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壊、舟 体溶断、架線切断などの架線・パンタグラフの事故につ ながることがあり、今までも様々な対策が行われている。 また、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推測されているが、まだ不明 な点も多い。

本研究は、この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し、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。段 付摩耗のあるすり板とトロリ線が摺動する際には、トロ リ線に上下方向や左右方向の振動が励起される。そこで 本論文では、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て、架線側のセンサにより段 付摩耗の検知が可能か検討を行った。

## 2. 試験概要

図1に試験概要図を示す。試験用模擬架線はヘビーコ ンパウンド架線が架設されており、西端から 2.5m の箇 所に吊架線の支持点がある。本試験架線は元々、全ての 箇所で左右方向の架線偏位は 0mm であるが、本試験の ために西端から 6.25m の箇所において補助吊架線とトロ リ線をシメラで固定して南側に 120mm の架線偏位を設 定し、この偏位設定箇所の東側を試験区間とした。なお、 吊架線の支持点は偏位 0mm のままとした。試験区間の トロリ線の偏位方向の傾斜は、45m スパンで±300mm の 偏位を設定している条件とほぼ一致する。試験区間のト ロリ線の5 箇所に、上下方向と左右方向の加速度計を各 1 個ずつ設置した。また、パンタグラフ舟体に作用する 衝撃の確認をするため、前後の舟体のすり板上面偏位中 央にも、それぞれ上下方向と左右方向に加速度計を接着 した(図 2)。

本試験においては営業線ですり板に段付摩耗が発生し

た舟体をパンタグラフに取付けた。本論文ではこの段付 摩耗を段付摩耗 A とする。また、2 種類の人工的な段付 摩耗をグラインダと棒ヤスリによって作成し、それぞれ を段付摩耗 B、段付摩耗 C とした。試験実施後にすり板 の摩耗プロフィールを測定した結果を図3に示す。なお、 各舟体ともに段付摩耗 A の試験を実施するときには、紙 面手前側が東に向くように舟体をパンタグラフに取付け、 段付摩耗 B および C の試験を実施する際には、紙面手前 側が西に向くようにパンタグラフに取付けた。表1に架 線張力、線密度、波動伝搬速度を示す。





(b) Side view Fig.1 Sensor array and experimental apparatus





[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2009-12.2~4. 東京〕



(b) Rear side panhead Fig.3 Measurement results of contact strip wear

Table.1 Catenary condition

	Tension (kN)	Line density (kg m)	Wave propagation velocity (m/s)
Msssanger wire	22.5	1.45	125
Auxiliary wire	13.1	1.38	98
Contact wire	17.6	1.51	108
Catenary system	53.2	4.34	111

## 3. 段付摩耗検知方法

# 3.1 段付摩耗すり板摺動時の現象

段付摩耗が生じたすり板がトロリ線と摺動する時の模 式図を図4に示す。段付摩耗のあるすり板のパンタグラ フが試験区間を通る際に観察されるトロリ線の加速度波 形には以下の特徴が見られる。

- ①トロリ線がすり板摺面の上部から段付摩耗底部へ移行する際(図 4(a))には、トロリ線の上下方向と左右方向の加速度にインパルス状の信号が観察される。
- ②トロリ線が段付摩耗底部から上部に移行する際(図4(b))には、トロリ線がすり板から受けていた左右方向の拘束が解放されるため、弦をはじいた時のようにトロリ線は左右方向に低次の振動モードを中心として自由振動する。

そこで上記2つのケースについて、それぞれ観測され る加速度波形の特徴をとらえることによって、段付摩耗 の通過を検知する方法の検討を行った。

# 3.2 段付摩耗底部へのトロリ線移行の検知

トロリ線がすり板摺面の上部から段付摩耗底部に移行 する際に、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てすり板段付摩耗の検知を行う。 ここでは以下の方法でトロリ線上下加速度のクルトシス (波形の尖鋭度)を計算し、クルトシスの値を評価した。 この値が一定の閾値を超える場合に段付摩耗が発生して いるものと判定する。

あるサンプリング点 *j* でのトロリ線の加速度を *a<sub>j</sub>* とす ると、そのサンプリング点近傍の N 点のサンプリングに おけるトロリ線加速度の平均値 *a<sub>i</sub>* は

$$\overline{a}_{i} = \frac{1}{N} \sum_{i=j+N/2+1}^{j+N/2} a_{i}$$

となる。また同様に、あるサンプリング点 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  $\sigma_i$ は

$$\sigma_{i} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=i-N,2+1}^{i+N/2} \left( a_{i} - \overline{a}_{i} \right)^{2} \right\}^{\frac{1}{2}}$$
(2)

となる。この拡張として、あるサンプリング点 j 近傍の クルトシスは次式により定義される。

$$K_{j} = \frac{1}{\sigma_{j}^{4}} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i \in j - N/2+1}^{j + N/2} \left( a_{i} - \overline{a}_{j} \right)^{4} \right\}$$
(3)

本論文では5個の上下方向の加速度計からそれぞれの クルトシスを算出するとともに、これら全ての上下加速 度の加算波形からもクルトシスを算出し、これら合計 6 個のクルトシスの値を N=100 として算出し、すり板段付 摩耗の判定に使用した。また、判定に用いる閾値は個々 の加速度計に対しては18を、これらの加算波形に対して は10をそれぞれ用いた。最終的な判定処理については 4.2 節に示す。

# 3.3 段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行の検知

トロリ線がすり板摺面上を段付摩耗底部から上部に移 行した直後に、トロリ線は左右方向に低次の振動モード を中心として自由振動する。本現象に着目してすり板段 付摩耗の検知を行う。ただし、すり板に段付摩耗がない 場合でも、摺動に伴って生じるトロリ線の上下振動が左 右振動を励起する。このトロリ線左右振動と段付摩耗に よって生じる左右方向の自由振動とを区別して認識する 必要がある。

そこで本節では、段付摩耗に起因して生じるトロリ線 の左右方向の自由振動を選択的にとらえることが可能か 確認を行い、段付摩耗検知方法の提案を行う。

### 3.3.1 架線振動測定試験

トロリ線の上下方向振動による連成の影響を受けずに、 段付摩耗に起因して生じる左右方向の振動だけを測定可 能か検討するため、加速度計1から東へ190mmの地点 のトロリ線を手で上下方向と左右方向にそれぞれ引っ張 った状態から放し、自由振動をさせて、トロリ線の上下 方向と左右方向の加速度測定を行った。なお、振動試験 中はパンタグラフは折り畳み、トロリ線とは接触してい ない状態とした。

前記条件でトロリ線加速度のパワースペクトルを測定 した。図5はトロリ線を下に引いた状態から手を離した 時のトロリ線の自由振動を測定した結果、図6はトロリ 線を水平に引いた状態から手を離した時のトロリ線の自 由振動を測定した結果である。各図とも、加速度計1の



(a) Fall to the bottom of step-shaped wear

(b) Getting out of bottom of step-shaped wear Fig.4 Movement of contact wire sliding on the contact strip with step shaped wear

(1)

左右方向と上下方向のパワースペクトルを示した。

トロリ線の上下方向の自由振動を測定した図5の結果 からトロリ線の上下方向の固有振動数を求めると3.9、 9.5、12Hz などが確認できる。また、トロリ線の左右方 向の自由振動を測定した図6の結果からトロリ線の左右 方向の固有振動数を求めると、5.4、7.3、10.3Hz などが 確認できる。

このように、トロリ線に初期変位を与えた方向以外に も連成振動が観測される。しかし、本試験条件では 5~ 8Hz のバンドパスフィルタを適用することにより、トロ リ線の上下方向の連成振動の影響を受けずに、トロリ線 の左右方向の低次モードの自由振動を選択的に観測でき ることがわかる。

なお、トロリ線の上下方向の固有振動数のうち、最も 低次の 3.9Hz は吊架線支持点より東側のスパン長 12.75m の架線全体が半波長となる周波数にほぼ一致している。

111(m/s)/25.5(m)=4.4Hz=3.9Hz

(4)

(5)

また、トロリ線の左右方向の固有振動数のうち、最も 低次の 5.4Hz は試験区間の東側端部からシメラによる偏 位固定箇所までの長さ 9m のトロリ線に半波長の定在波 が発生する周波数にほぼ一致している。

108(m/s)/18(m)=6.0Hz=5.4Hz

なお、加速度計1以外の他の測定点でも10Hz以下の 周波数帯ではほぼ同様の結果が得られたが、周波数が高 くなるにつれて測定点によりパワースペクトルの傾向が 大きく異なるケースも見受けられた。この理由としては 低周波数域では架線が一体として揺れるモードが卓越し ているが、周波数が高くなるにつれて波長が短い複雑な 振動モードとなり、測定点の位置による影響が大きくな るためと推測される。



Fig.5 PSD of contact wire acceleration in vertical direction free vibration test



Fig.6 PSD of contact wire acceleration in lateral direction free vibration test

# 3.3.2 トロリ線の左右方向自由振動の検知方法

3.3.1 節での結果から、本試験条件では 5.0~8.0Hz のバ ンドパスフィルタを適用することにより、すり板の段付 摩耗に起因して生じるトロリ線の左右方向振動を正常な すり板が通過する際に現れるトロリ線左右加速度信号と 分離して観察可能である。そこで、このフィルタを適用 した波形に対して、標準偏差を式(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すり板の段付摩耗と して検知した。本論文では Nを 800 として式(2)を用いて、 5 個の左右方向の加速度計からそれぞれの標準偏差を算 出するとともに、5 個の左右方向の加速度の加算波形か らも標準偏差を算出し、これら合計6チャンネル分の標 準偏差を判定に使用した。

また、判定に用いる閾値は個々の加速度計に対しては 0.5(m/s<sup>2</sup>)を、これらの加算波形に対しては 2.0(m/s<sup>2</sup>)をそ れぞれ用いた。最終的な判定処理については 4.2 節に示 す。

なお、本試験条件ではトロリ線の左右方向と上下方向 の固有振動数が異なり、通常時のトロリ線の左右方向振 動と段付摩耗すり板通過時のトロリ線の左右方向振動の 分離が可能であったが、トロリ線の左右方向と上下方向 の固有振動数が近接する可能性もある。そこで、実設備 条件での検討を行う。トロリ線の上下方向の支持点間隔 を一般的な値である 50m とし、偏位の半周期を 100m と 仮定し、3.3.1節の議論に基づいて最も低次の固有振動数 を試算すると、トロリ線の上下方向振動の場合は1.0Hz、 トロリ線の左右方向振動の場合は 0.5Hz となり、ローパ スフィルタにより段付摩耗すり板通過時のトロリ線の左 右方向振動の分離測定が可能である。また、抽出可能な 振動の次数も低く、測定位置による検知精度低下の影響 を受けにくいため本試験での条件よりも有利な点もある。 なお、上記計算ではトロリ線および架線系全体の波動伝 搬速度を100m/s、測定区間は偏位端部以外の曲引きはな いものと仮定して計算した。

#### 4. 走行試験

#### 4.1 試験方法

段付摩耗のあるすり板あるいは段付摩耗の無いすり板 を取付けたパンタグラフを速度 1~4km/h で走行させ、 トロリ線と舟体に取付けた加速度計の信号を測定した。 全ての信号は 2kHz のサンプリング周波数で A/D 変換を 行った。

また、パンタグラフの離線検出の目的で、中間ヒンジ 側ではない舟体(以下、後舟とする)とトロリ線との間 に離線検出回路を構成した。なお、中間ヒンジ側の舟体 (以下、前舟とする)と後舟とは電気的に絶縁し、後舟 が機械的に離線すると約 0.8V の信号が出力される回路 とした。

## 4.2 複数個のセンサの出力の処理方法について

3.2 節と3.3 節で述べたすり板段付摩耗検知法では、複 数個のセンサ出力から統合して判断する必要がある。こ の方法としては複数個のセンサの出力からそれぞれ算出 される検知結果の全ての論理積や、全ての論理和を計算 する方法などが考えられる。前者の場合は段付摩耗の発 生を見逃す可能性が高くなり、後者の場合は誤検知の可 能性が高くなる可能性がある。また、実使用時には測定 区間が 50m 以上となりセンサの配置範囲が広くなるた め、検知結果の全ての論理積を用いる方法では、センサ から離れた箇所で発生した段付摩耗による振動を全ての センサが確実に検知できるか疑問である。

そこで、本検討では加速度計 5 個のうち、2 個以上の 加速度計において算出した値が閾値を超え、なおかつ 5 個の加速度計の加算波形に対する算出結果も閾値を超え た場合に異常と検知した。

ただし、本処理方法が最適な処理法であるかについて はまだ十分に検証できておらず、センサの配置間隔など の検討とともに、今後詳細検討が必要である。



Fig.7 Experimental result

なお、複数の上下方向の加速度計のクルトシスによる 検知結果の論理積を使用する際には、センサ設置位置に より波動の入射のタイミングに時間差が生じる。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、1 箇所のセンサ信号からクルトシスよって異常が 検知され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搬速度で割った時間の範囲で 時間軸上の検知タイミングのずれを許容した。今回の検 討ではトロリ線の波動伝搬速度が 108m/s、最大センサ間 隔が 2m (加速度計 1 と加速度計 5 との距離) であるた め、検知タイミングの許容ずれ時間を±0.01sec とした。

4.2.2 節のトロリ線の左右方向自由振動の検知の際に は 5~8Hz のバンドパスフィルタを使用しているが、こ の周波数帯は試験区間のトロリ線が同相で振動するモー 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、前記処理は適用しない。

## 4.3 走行試験結果

図7に試験時の時刻歴データ例を示す。本データでは 走行路を東から西へ時速3.4km/h で走行した試番の測定 データおよび解析結果である。架線偏位が段付摩耗Aよ りもすり板中央側(図3 x=140mm付近)の地点から走 行を開始した。トロリ線は0.25sec で図3の段付摩耗A 底部に移行し、4.0sec で段付摩耗A 底部からすり板上部 (図3 x=220mm付近)へ移行した。

本図は上段から、トロリ線左右・上下加速度計 1~5 の生波形、パンタグラフの前舟の左右・上下加速度、パ ンタグラフの後舟の左右・上下加速度、離線検知電圧、 トロリ線上下・左右加速度計 1~5の波形に対してクルト シスを計算した結果、全トロリ線上下加速度の加算波形 に対してクルトシスを計算した結果、クルトシスによる すり板段付摩耗の検知結果、トロリ線左右加速度計 1~5 に 5.0~8.0Hz のパ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 と全トロリ線左右加速度の加 算波形にそれぞれ前記のバンドパスフィルタを適用した 波形の標準偏差を計算した結果、標準偏差によるすり板 段付摩耗の検知結果である。段付摩耗検知結果の波形は 通常時は0、段付摩耗検知時は1とした。

本結果から、「段付摩耗底部へのトロリ線移行時の検 知」と「段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行時の検 知」が正確に行われていることが確認できる。

また、他の段付摩耗や段付摩耗の無い条件において、 速度や進行方向を変えて約 10 試番ずつ試験を実施し本 手法の有効性の確認を実施した。その結果、以下のこと がわかった。

- ○段付摩耗のない試番において誤検知は発生しなかった。
  ○段付摩耗 A および段付摩耗 B の試番において、14%の
  段付摩耗の見逃しと 9%の段付摩耗の誤検知が発生していた。しかし、「段付摩耗底部へのトロリ線の移行」
  と「段付摩耗底部から上部へのトロリ線移行」の両者
  同時の誤検知、もしくは両者同時の見逃しは発生しなかった。
- ○段付摩耗 C の検知率は 33%と非常に低かったが、段付 摩耗 C は 1mm 程度のわずかな凹みであり、走行時の 離線も一切検知されていないため、この形状の段付摩 耗が進展する可能性は低いと推測されるため、検知で きなくても大きな問題にはならないと考えられる。

## 5. おわりに

本論文で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手法を提案し、実験結果から本 手法の有効性を示した。今後は実架線での確認を含め、 検出精度の向上をはかり、地上設備によるパンタグラフ 異常のモニタリングシステムとして構築していく予定で ある。

また、今回の検討では低速域の確認しか実施していないが、本手法はパンタグラフの速度により影響を受ける と考えられるため、通過速度に応じて閾値を変更するな どの処理についても今後検討進めていく予定である。

さらに、架線種別が変わった場合や複数パンタグラフ が連続で通過する場合にも本手法が適用できるのかとい った点についても検討を進めていく予定である。