

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

小山 達弥* 白田 隆之* 川崎 邦弘**
中村 一城** 川村 智輝**

Detecting Methods of Pantograph Failure by Using Sensors Installed on Contact Lines

Tatsuya KOYAMA Takayuki USUDA Kunihiro KAWASAKI
Kazuki NAKAMURA Tomoki KAWAMURA

Pantograph failure may lead to a serious accident resulting in the widespread damage of contact lines. Therefore, an early detection system for pantograph failure has been required. The authors developed a new detecting method of step-shaped wear on contact strips which is one of the typical pantograph failure modes and carried out field tests in order to verify the effectiveness of this method. The test results show that this method which detects characteristic waveforms generated when a pantograph containing contact strips with step-shaped wear passes is available on a commercial line.

キーワード：パンタグラフ，段付摩耗，電車線，モニタリング，異常検知，電波雑音

1. はじめに

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運転阻害が発生する。このようなパンタグラフの異常の一つに、すり板段付摩耗（以下、段付摩耗と記す）がある。段付摩耗はすり板や舟体の割損、ひいてはパンタグラフ全体の破損の原因にもなり得る。そこで、筆者らはパンタグラフ異常として段付摩耗に焦点を当て、段付摩耗の早期発見を可能とする2つの手法を開発している¹⁾。しかし、これらの手法を適用するためには多数のセンサが必要であるなどのいくつかの問題があった。そこで、少ないセンサにより効果的に段付摩耗を検知可能な新しい手法を開発し、その有効性を営業線において確認した。また、段付摩耗検知システムを構築するためには、小型・軽量、省電力、および長距離信号伝送が可能なテレメータが必要となる。そこで、これらの要件を満たす小電力デジタルテレメータの開発も行った。

2. 段付摩耗の検知手法

2.1 すり板の段付摩耗の特徴と検知手法への要求

すり板は列車走行に伴い徐々にかつなだらかに摩耗するのが一般的であるが（図1 (a)）、稀に局所的かつ段

差状の摩耗が生じることがある。これを一般的に段付摩耗と呼んでいる（図1 (b), (c)）。特に図1 (c) を溝摩耗と呼ぶ。段付摩耗の発生は、直流区間において多くみられるが、交流区間でも報告されている。また、特定のパンタグラフやすり板で発生しているだけでなく、パンタグラフ種別（シングルアーム、ひし形）やすり板種別（金属系すり板、カーボン系すり板）によらず発生が報告されている。さらに、段付摩耗の傾斜や摩耗深さ（数mm～10mm前後）には様々なものがある。なお、発生位置は舟体中央付近や、主すり板と補助すり板との境界付近などにおいて多く発生する傾向があるものの、その他の位置における発生も報告されている。また、段付摩耗が発生

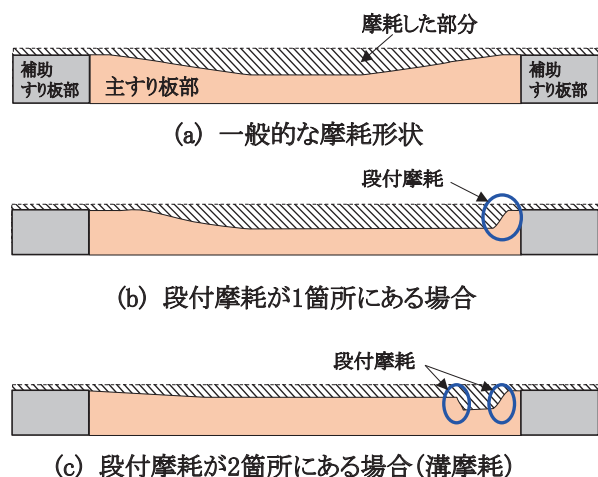


図1 すり板の摩耗形状

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

** 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

特集：電力技術

した電車のパンタグラフ搭載数や走行速度も様々である。段付摩耗が生じると、段付摩耗部においてトロリ線がすり板に引っ掛かり、トロリ線とのしゅう動頻度が高くなるため、段付摩耗部の摩耗がさらに進展し、場合によってはすり板や舟体の割損、ならびにこれに伴う電車線の破損に至る可能性がある。このような事故を防ぐために、鉄道事業者では定期検査の際にすり板の目視検査を実施するとともに、車両基地の入り口にパンタグラフすり板測定装置を設置して段付摩耗の有無を判断し、段付摩耗が認められるすり板については適宜交換がなされている。しかし、段付摩耗の進展速度が速い場合は、次のこれらの検査までの間に段付摩耗が発生・成長し、すり板や舟体の割損が生じる可能性がある。そのため、これらの検査の周期よりも短い周期で段付摩耗の有無を自動で検知することが求められている。

ただし、段付摩耗は特定のすり板種別や特定の部位において発生するわけではないことから、その検知には以下の事項が要求される。

- ① 段付摩耗の発生位置（舟体中央や、主すり板と補助すり板の境界付近など）によらず検知可能であること
- ② パンタグラフ種別、すり板種別、パンタグラフの搭載位置、搭載数、および電車走行速度に依存せず検知可能であること
- ③ 摩耗形態には様々なものがあるが、このうち摩耗速度が急速に成長する可能性が高い形態のもののみを段付摩耗と判定すること
- ④ 高頻度で検出可能であること

検知手法としては、パンタグラフ、もしくは電車線等の地上設備のいずれかにセンサなどを実装する手法が考えられる。しかし、前者については、パンタグラフの常時監視が可能であるものの、全てのパンタグラフに検知システムを実装することが必要となるため、導入コストが高い。後者については、(1) 加速度計などのセンサにより検知する方法と、(2) ビデオカメラ等により撮影した画像から検知する方法が考えられる。しかし、トロリ線が引っ掛かる摩耗形状をあらかじめ決定しておくことは困難であるため、(2) により段付摩耗を検知することは難しい。そこで、本研究では加速度計等のセンサを地上設備に設置し、直流/交流き電区間によらず、当該区間を通過する全てのパンタグラフを監視する手法を開発することとした。

2.2 電車線の振動測定による段付摩耗検知手法

電車線には左右偏位が設けられているため、段付摩耗のあるパンタグラフが電車線をしゅう動すると、車両の進行に伴いトロリ線と段付摩耗との相対位置が図2のように変化する。なお、図中の (a) と (b) の丸数字は同一地点を示している。図2②ではトロリ線が段付摩耗下

部に移行した瞬間にトロリ線にはインパルス的な上下振動(図3 (a))が生じる。次に、図2③までパンタグラフが移動しトロリ線が段付摩耗部に接しているときは、トロリ線は段付摩耗部から力を受けるためまくらぎ方向に変位する。その後、トロリ線が段付摩耗下部からすり板上面へ抜け出た後にまくらぎ方向の自由振動(図2④、図3 (b))が生じる。その後も同様の現象が繰り返される(図2①'~④')。これらの特徴的なトロリ線の挙動のうち、トロリ線の振動を加速度計により測定し、上下方向のインパルス的な振動と、左右方向の自由振動をそれぞれ観測することで段付摩耗を検知する2つの手法をすでに開発している¹⁾。

1つ目の手法は、上下方向に感度を持つ加速度計をトロリ線に設置して、トロリ線が段付摩耗部に移行した瞬間

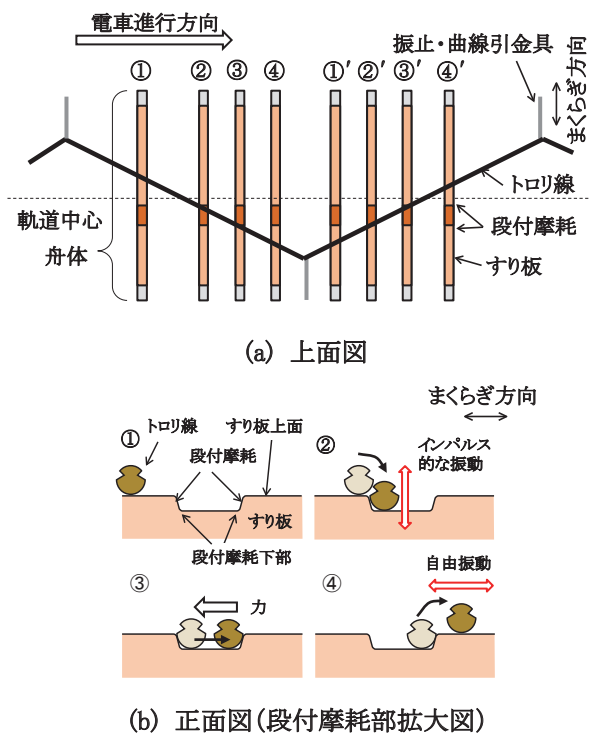


図2 トロリ線と段付摩耗の相対位置 ((a) と (b) の丸数字は同一地点を示す)

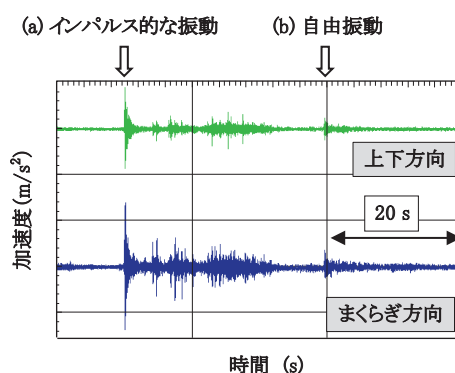


図3 トロリ線に生じる振動

間(図2②)にトロリ線に生じる上下方向のインパルスの振動を捉えることで段付摩耗を検知する手法である(以下、従来手法①と記す)。従来手法①では、上下加速度波形の尖鋭度をあらかじめ決定しておいたサンプル点数ごとに計算し、尖鋭度が閾値を超過したときに段付摩耗ありと判定する。

2つ目の手法は、まくらぎ方向に感度を持つ加速度計をトロリ線に設置して、トロリ線が段付摩耗下部から抜け出た後にトロリ線に生じるまくらぎ方向の自由振動(図2④)を捉えることで段付摩耗を検知する手法である(以下、従来手法②と記す)。ただし、パンタグラフが通過するときには、段付摩耗の有無に関わらず、トロリ線に上下振動が生じ、これに連成してまくらぎ方向の振動が励起される。したがって、振止金具や曲線引金具(以下、曲線引金具と総称する)がすべての支持点に設置されている電車線(以下、電車線①という)ではトロリ線の上下方向とまくらぎ方向の固有振動数が一致するため、この電車線に従来手法②を適用すると、上下方向の振動に連成して生じたまくらぎ方向の振動により正常なパンタグラフに対しても段付摩耗ありと判定してしまう可能性がある。一方、曲線引金具が2径間ごとに設置されている電車線(以下、電車線②という)では、トロリ線の上下方向とまくらぎ方向の固有振動数が異なるため、段付摩耗により生じたまくらぎ方向の振動成分のみを抽出することができる。そのため、従来手法②は電車線②に適用する。従来手法②では、まくらぎ方向の加速度波形に、まくらぎ方向の1次の固有振動数付近の成分のみを通過するバンドパスフィルタ(以下、BPFと記す)処理を行い、あらかじめ決定しておいたサンプル点数のデータ列から標準偏差を計算して、この標準偏差が閾値を越えたときに段付摩耗ありと判断する。なお、この標準偏差は自由振動の振幅に相当する。

従来手法①②の有効性を所内試験設備で確認したところ、いずれも精度よく段付摩耗を検知できることが確認された。しかし、従来手法①の観測対象であるインパルスの振動は早く減衰するため1箇所センサによる検

知範囲が10m程度となり、多くのセンサが必要となる。また、従来手法②は、標準偏差の大小により段付摩耗の有無を判定しているが、トロリ線が段付摩耗下部から抜け出る地点が曲線引金具のある支持点付近の場合、励起される振動の振幅が小さくなり、段付摩耗を見逃す可能性がある。図4は、径間長50mの電車線の地点 x_f においてトロリ線に100Nのまくらぎ方向の静的な力が加わったときに、地点 x_f のトロリ線まくらぎ方向変位を電気抵抗法²⁾により簡易に求めた結果である。支持点から約6mの位置では、径間中央に比べてまくらぎ方向変位が約1/2になっていることがわかる。そのため、支持点付近においてトロリ線が段付摩耗下部からすり板上面へ抜け出るような位置に形成された段付摩耗では自由振動の振幅が小さく従来手法②により検知することが難しいので、支持点付近では従来手法①による検知が必要である。

2.3 曲線引金具に生じるひずみ測定による段付摩耗検知手法

前節で述べたように、電車線①には従来手法①を単独で適用し、電車線②には従来手法①と従来手法②を併用することにより、段付摩耗の検知が可能である。しかし、いずれの場合でも多数のセンサが必要となるうえ、後者については一般的な電車線構成とはいえない電車線②のみ適用可能である。そこで、より少ないセンサ数で、かつ一般的な構成である電車線①で段付摩耗を検知する新たな手法を提案する。

段付摩耗があるパンタグラフがしゅう動し、図2③の状態になると段付摩耗部からトロリ線にまくらぎ方向の力が作用する。この作用力は列車の進行に伴い徐々に増加し、段付摩耗下部からトロリ線が抜け出した瞬間に急激に減少するため、全体としてみれば鋸歯状の波形となる。ところで、トロリ線にまくらぎ方向の力が作用すると、曲線引金具にはその反力が発生する(図5)。前述のように、トロリ線は段付摩耗部から鋸歯状の力を受けるため、曲線引金具のひずみ波形も鋸歯状のものとなる。この現象に着目し、曲線引金具に生じるひずみを測定して特徴的な波形を検出することで段付摩耗を検知する新しい手法(以下、新手法と記す)を開発した。

新手法により測定可能な範囲を見積もるために、前述の電気抵抗法により径間長50mの電車線のトロリ線にまくらぎ方向荷重(100N)が作用したときの曲線引金具に生じる反力を求めた(図6)。図6では、地点 x_f にまくらぎ方向の荷重(100N)が作用したときの第一支持点の曲線引金具に生じる力 f_{1,x_f} 、ならびに電車線①では第二支持点の曲線引金具に、電車線②では第三支持点の曲線引金具に、それぞれ生じる力 f_{2,x_f} をそれぞれ示している。また、 $f_{1,x_f} + f_{2,x_f}$ も併記している。なお、図中の

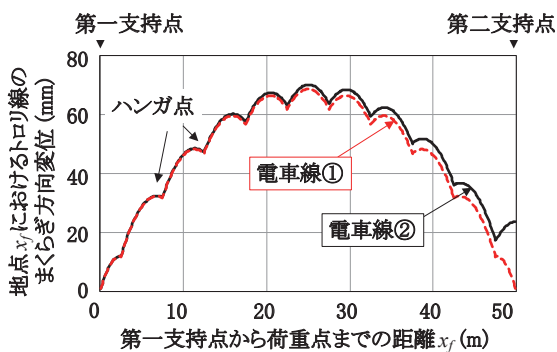


図4 まくらぎ方向の静的荷重(100N)に対する荷重点におけるトロリ線のまくらぎ方向変位

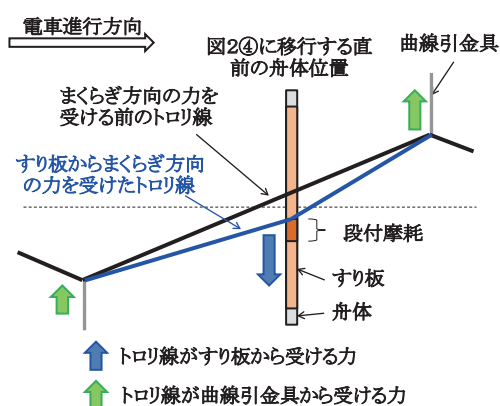


図5 曲線引金具に作用する力

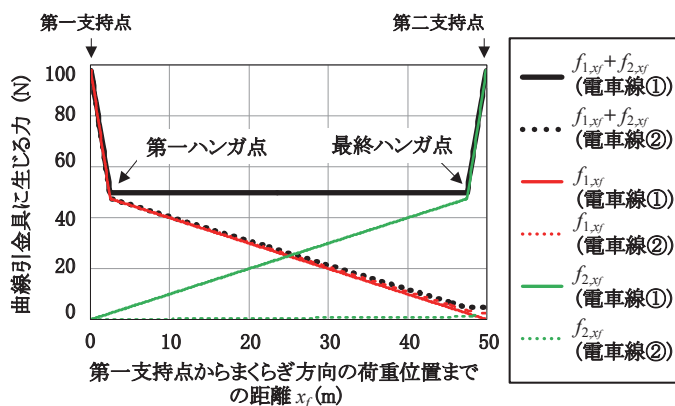


図6 曲線引金具に生じる力

電車線①における計算結果を実線で示し、参考として電車線②における計算結果を破線で示す。図6より、電車線①では $f_{1,x_f} + f_{2,x_f}$ を測定することで静荷重の50%程度の力を把握することができるため段付摩擦の有無を十分に判別することが可能であると考えられる。そのため、 f_{1,x_f} と f_{2,x_f} を同時に測定することで電車線①における段付摩擦の検知が可能であると考えられる。

新手法を電車線に適用する際は、図1(b)のように1箇所にしか段付摩擦がない場合を考慮しても、連続する3箇所の支持点の曲線引金具のひずみを測定することで段付摩擦検知が可能であると考えられる。したがって、従来手法に比べて少ないセンサ数で段付摩擦を検知可能である。さらに、従来手法①や②では支持点から離れた位置にセンサを設置するため、有線のセンサを使用する場合はちょう架線にセンサ用ケーブルを配線する必要があったが、新手法では支持点のみで測定するためセンサの設置が従来手法に比べて極めて容易である。なお、図6より電車線②では荷重位置が曲線引金具のない支持点に近づくとつれて f_{1,x_f} だけでなく $f_{1,x_f} + f_{2,x_f}$ も低下することがわかる。これは、トロリ線の作用力がハンガとちょう架線を介して、曲線引金具のない支持点のちょう架線支持部に伝わり、結果として両端の曲線引金具に作用する力が小さくなるためである。

2.4 段付摩擦検知に必要とされる測定装置

段付摩擦検知システムとして電車線にセンサを設置する手法を採用する場合、センサからの測定信号を何らかの方法で伝送する必要がある。ここでは、加圧部（電車線側）と非加圧部（地上側）を確実に絶縁可能な無線通信機器を備えた測定器（以下、テレメータと記す）による段付摩擦検知システムの構築について検討する。なお、加圧部の測定器において測定波形から段付摩擦の有無を判定し、その結果のみを送信することも考えられるが、加圧部に設置する装置が大型化する可能性があるため、ここでは検討しない。

営業線に常設するテレメータには、設置場所を制約しないために「小型・軽量」であること、バッテリー交換頻度を低くする、つまりメンテナンスコストを低くするために「省電力」であることが必要である。また、新手法では3箇所の支持点、つまり約100mの範囲にセンサが設置される。そのため、地上側（非加圧側）の受信設備を簡素化するためには、センサ群からの信号を1箇所で受信することが合理的であり、「長距離伝送」が可能なテレメータの採用が望ましい。さらに、テレメータは特別の免許を必要としない「小電力無線局」とすることが望ましい。そこで、以上の要件の内、消費電力と送信距離はトレードオフの関係となるため、消費電力を抑えつつ、必要とする距離の信号伝送が可能なテレメータを製作することとした。

3. 現地試験の概要

3.1 段付摩擦検知手法の検証

段付摩擦検知システムに新手法を適用することを想定し、十分小さな段付摩擦に対して現地試験により誤検知や見逃しが生じないことを確認した。なお、本稿では、誤検知とは正常なパンタグラフが通過した際に段付摩擦ありと判断することを、見逃しとはすり板に段付摩擦があるパンタグラフを正常なものとして判断することをそれぞれ意味する。

段付摩擦が発生したすり板をパンタグラフに搭載して営業線を走行させる試験を実施することは困難であるため、機械加工により段付摩擦を形成したすり板を保守用車の接地用パンタグラフに固定し、保守用車を走行させることで段付摩擦ありの条件を模擬した。このすり板には、2箇所に段付摩擦があり溝摩擦が形成されている。溝摩擦の深さは2mm、段付摩擦間の距離つまり溝摩擦の幅は20mmである。この段付摩擦は、過去に段付摩擦と判断された摩擦と比べると小さな段差であるため、この段付摩擦を検知できれば検知能力としては十分である。

この試験のセンサ設置状況を図7に示す。図7においてS1からS4は支持点を示しており、S3には曲線引金具は取付けられていない。つまり、S2を境にS1寄りには電車線①が、S3寄りには電車線②が、それぞれ構成されている。S2の曲線引金具には新手法の検証を行うためにひずみゲージを設置した。模擬段付摩耗を有する保守用車については走行速度を時速5kmとし、段付摩耗部のまくらぎ方向位置は軌道中心からS2方向に115mmとした。また、試験期間中は、営業列車のパンタグラフに段付摩耗の発生は認められなかったため、これらの試験では営業列車のパンタグラフを全て健全なものとして取り扱った。

当該区間には、1編成に1基のパンタグラフが搭載されている列車だけでなく、パンタグラフが搭載されている車両を複数含む列車や、1両に2基のパンタグラフが搭載されている電気機関車などが運行されている。また、試験区間は駅に近いが、当該駅を通過する列車もあるため、検知区間を通過する際の列車走行速度は様々であった。

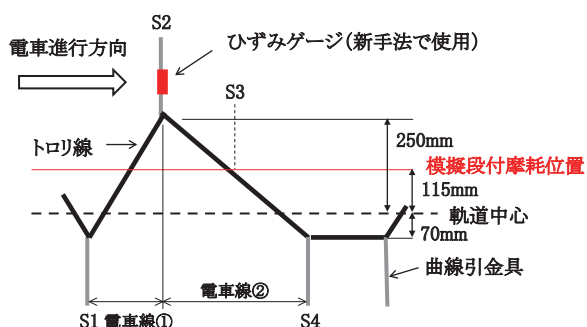


図7 現地試験における電車線構成とセンサ配置

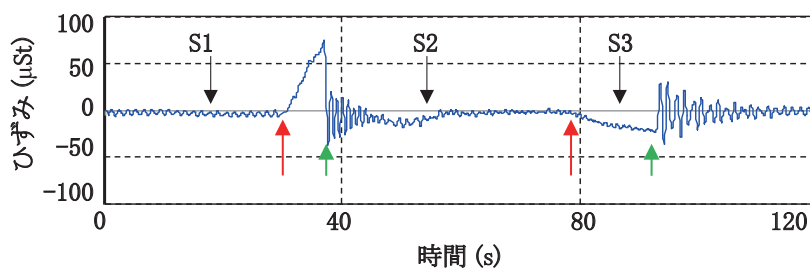
3.2 電波雑音測定

2.4節に示したように、段付摩耗検知システムに使用するテレメータは、消費電力を抑えるために送信電力を最小限にする必要がある。電車線路に設置するテレメータは、走行する列車の至近にあるため、列車から放射される電波雑音や離線アークによる電波雑音の影響を受ける可能性がある。そのため、省電力のテレメータを開発する際には、これらの電波雑音強度をあらかじめ把握し、その電波雑音の影響を受けない程度の送信電力により信号を伝送するテレメータを使用する必要がある。そこで、列車や離線アークから放出される電波雑音を線路沿線において測定した。測定箇所は、直流き電区間（稠密線区と閑散線区）と在来線交流き電区間（2箇所）である。なお、直流き電区間の稠密線区はマンション等が林立する住宅密集地である。また、交流き電区間の2箇所のうち、1箇所は新幹線と平行する区間である。なお、後述する小電力テレメータの開発を考慮し、測定対象の周波数帯は小電力無線機器に使用される2.4GHz帯とした。

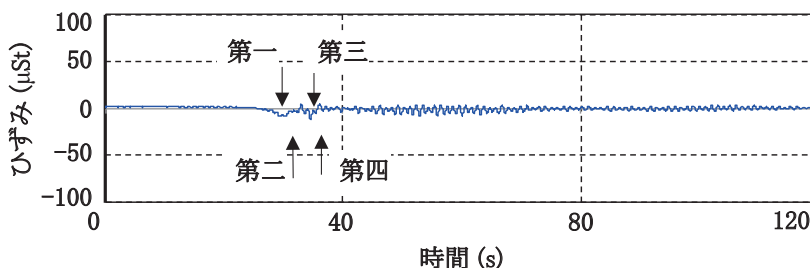
4. 現地試験結果

4.1 振止・曲線引金具に生じる応力測定による段付摩耗検知手法

新手法の有効性を検証するため、曲線引金具のひずみ測定波形に1Hz以下を通過帯域とするローパスフィルタを施したものを図8に示す。図8(a)は保守用車（段付摩耗あり）が図7に示す区間を通過したときのひずみ波形であり、図中のS1、S2、S3の黒矢印は模擬段付摩耗のあるパンタグラフが各点に到達した時刻を示す。ま



(a) 段付摩耗あり（保守用車、約5km/h）



(b) 段付摩耗なし（営業列車、約60km/h）

図8 曲線引金具に生じるひずみ

特集：電力技術

た、赤矢印はトロリ線が段付摩耗部に移行した瞬間を、緑矢印はトロリ線が段付摩耗部から抜け出した瞬間をそれぞれ示す。なお、3.1節に示したようにすり板には溝摩耗があるため、S2の前後でそれぞれ一回ずつすり板の段付摩耗部からトロリ線にまくらぎ方向の力が作用する。図8(b)はパンタグラフを4基搭載した電車(段付摩耗なし)が検知区間を通過したときの波形を示し、図中の矢印は第一～第四パンタグラフ(進行方向前側が第一パンタグラフ)が地点S2を通過した時間を示している。

段付摩耗がある場合は、曲線引金具に鋸歯状の大きなひずみが生じている。また、段付摩耗部から抜け出した後のトロリ線の左右方向の自由振動により曲線引金具にひずみが生じていることがわかる。さらに、S2を通過した後は電車線の構成が電車線②となるため、2.3節に示したように、S2を通過する前(電車線①)に生じる曲線引金具のひずみよりもS2を通過した後(電車線②)のひずみの方が小さくなっていることがわかる。これに対し、段付摩耗がない場合は複数のパンタグラフが連続して通過しても大きなひずみは観測されていない。このように、段付摩耗の有無によりひずみ波形に顕著な差が生じることから、新手法を適用することによって段付摩耗を精度よく検知することが可能であることがわかった。

4.2 電波雑音測定結果

鉄道沿線において電車通過時の2.4GHz帯の電波雑音強度を測定したところ、いずれの線区でも電車の通過に伴う2.4GHz帯の電波雑音強度の上昇は確認されなかった。なお、測定中に離線アークが放出されることもあったが、そのようなときでも2.4GHz帯の顕著な電波雑音強度の上昇は観測されなかった。そのため、2.4GHz帯を利用するテレメータの送信出力を決定するうえで、列車から放出される電磁波を考慮する必要はないことがわかった。

5. 小電力デジタルテレメータの開発

電波雑音測定結果を基に、「小型・軽量」「省電力」「長距離伝送」「小電力無線」を満足する小電力デジタルテレメータの開発を行った。開発した測定器の送信機の写真を図9に示す。このテレメータは、2.4GHz帯の電波を利用した長距離伝送が可能な小型のテレメータで、周辺の電波雑音が低い環境では伝送距離は200m、サイズ

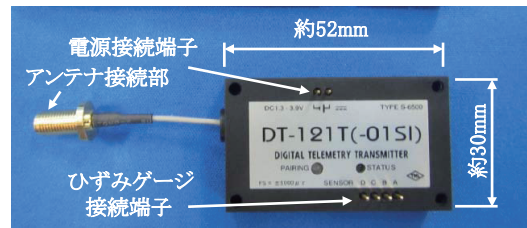


図9 開発した小電力デジタルテレメータ

は約52mm(横)×約30mm(縦)×約10mm(高さ)、重さは約20gである。測定時の消費電力は約230mW、待機時の消費電力は約7mWであり(共に電源電圧3V時)、測定区間を1日に100列車が運行する区間において1列車当たりの測定時間を1分とすると、理論上は単一形アルカリ電池6本で約120日の連続使用が可能であり、段付摩耗検知システムへの適用が十分可能である。

6. おわりに

前報で報告した手法よりも少ないセンサ数ですり板段付摩耗を検知可能な、曲線引金具に生じるひずみ測定による手法を新たに開発した。この手法の有効性を営業線において検証したところ、段付摩耗を精度よく検知することが可能であることがわかった。また、段付摩耗検知システムに適用するテレメータを開発する際に必要となる電波雑音(2.4GHz帯)を線路沿線で測定し、列車からは2.4GHz帯の電波雑音の放射がほとんど認められないことを確認した。そのため、テレメータを開発する際は、列車から放出される電磁波を考慮する必要がないことがわかった。さらに、段付摩耗検知システムに適用可能な、小型・軽量、省電力のデジタルテレメータを開発した。

謝辞

現地試験に多大なるご協力をいただいた東日本旅客鉄道株式会社へ深く謝意を表する。

文献

- 1) 臼田隆之, 池田充: トロリ線の振動測定によるすり板段付摩耗の検出, 鉄道総研報告, Vol.25, No.4, pp.35-40, 2011
- 2) 鉄道総合技術研究所編, 電車線とパンタグラフの特性, 研友社, 1993