

パンタグラフ接触力データの電車線保守への活用法

臼田 隆之* 池田 充**

Basic Study of OCL Maintenance by Pantograph Contact Force

Takayuki USUDA Mitsuru IKEDA

For preventing accidents occurring at contact area between overhead catenary system and a pantograph, the overhead catenary system must be periodically maintained, resulting in requiring heavy maintenance cost. The present on-board monitoring system for the overhead contact lines mainly keeps watch on dynamic states of the contact wire. However, its static states are extremely required for the efficient maintenance work of the overhead contact line. Therefore, the authors developed some methods which estimate static height of the contact wire by the contact force and the pantograph height. This paper describes estimation results of static height of the contact wire of on-track test by the proposed method and validates availability of the method. Furthermore, some contact force measurement results of on-track test are shown.

キーワード：パンタグラフ接触力，トロリ線静高さ，電車線メンテナンス，検測車，現車試験

1. はじめに

電車線のメンテナンスには非常に多くの労力がかけられているが、高齢社会での今後の労働人口減少に向け、保守の省力化は非常に重要な課題となっている。そのため、検測車にて測定したデータをさらに効率的に電車線の保守に活用しようと、今日まで多くの研究が進められてきた。特に近年の研究により、パンタグラフの接触力（以下、接触力と呼ぶ）が測定可能となっている。接触力は電車線とパンタグラフの接触状態を直接示す動的な状態量であり、これを電車線保守へ活用することによる、保守作業の効率化が期待されている^{1) 2) 3)}。

一方、現在の保守作業員による近接検査ではもっぱら電車線支持点などにおけるトロリ線の静的な架設状態が測定されており、架線の架設基準（トロリ線高さやその勾配、左右偏位、わたり線におけるトロリ線の相対位置、など）もまた、静的な状態を基準として許容値が定められている。

図1に電車線の各種状態と検測データとの位置づけを示す。電車線の静的な状態に対し、様々な条件でパンタグラフが通過すると、その条件に応じて、いくつもの動的な状態が生じる。この条件とは、パンタグラフの種類、パンタグラフ数、パンタグラフ間隔および列車速度などが想定される。この動的状態のうちの一つが検測データであり、これを電車線保守に活用している（A線）。また、先に述べたように、支持点など離散点のトロリ線の静的高さや偏位も測定し、設備の良否判定に活用されている（B線）。また、営業車検測は設備状態の急変を捉え、設

備診断に活用しようという考え方である（C線）。ここで、電車線の静的状態が詳細に把握できれば（D線）、シミュレーションにより、動的状態の全体が把握でき（E線）、電車線の診断や架設状態の改善提案に活用可能と考えられる。

一方で、高速で走行する検測車から架線の静構造を測定することは容易ではない。例えば、従来の検測車ではパンタグラフ高さを測定しているが、パンタグラフ高さにはパンタグラフ通過に伴う動的なトロリ線押上量が含まれているため、トロリ線の静高さとは一致しない。そこで、高速で走行する検測車の列車先頭部に設置したステレオ画像などから画像処理技術を活用して架線の静構造を測定する手法についても研究が進められている³⁾。筆者らは検測車にて測定が可能なパンタグラフ高さや接触力の信号を使用して、パンタグラフ通過前のトロリ線の静的な高さ（以下、トロリ線静高さとする）を推定する2種類の手法を提案している^{4) 5) 6)}。このうち伝達関数法については試験データによる検証が12km/hまで

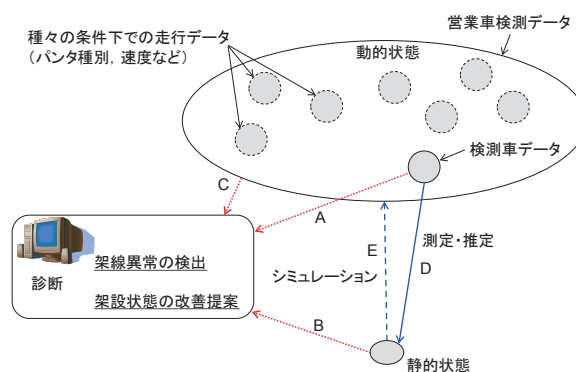


図1 検測データの位置づけ

* 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

の速度にとどまっていた。

そこで、本論文では、伝達関数法を新幹線と在来線の現車試験データに適用し、高速走行時のデータからトロリ線の静高さを推定した結果について報告する。また、在来線において接触力を測定した結果と、電車線設備の地上測定結果との対比を行ったいくつかの事例についても併せて報告する。

2. トロリ線静高さの推定

2.1 トロリ線静高さの推定手法

接触力などを活用して、トロリ線の静高さを推定する手法としては、等価ばね定数法^{4) 5)}と伝達関数法^{5) 6)}が提案されている。等価ばね定数法は径間における架線の等価ばね定数が近似的に一定とみなせるコンパウンド架線を対象として検証されているのに対し、伝達関数法は等価ばね定数の変動が大きいシンプル架線などへの適用も原理上可能である。また、等価ばね定数法と比較して、径間周期よりも短い波長成分についても推定可能である。そこで、本章では伝達関数法により、ヘビーコンパウンド架線およびヘビーシンプル架線の区間において、接触力を活用したトロリ線静高さの推定を行う。

本節では伝達関数法の概要を説明する。詳細は文献5), 6)に示すが、事前に架線の加振シミュレーションを行い、この結果から、加振点*i*、観測点*j*の位置毎にインパルス応答関数 $h_{ij}(t)$ を取得する。加振点*i*を速度*v*で走行する先頭パンタグラフの接触力 $f_1(i \cdot \Delta x/v)$ と、得られたインパルス応答関数を次式のように畳み込み積分することにより、位置*x*におけるトロリ線押上量 $y_{up1}(x)$ を推定する。

$$y_{up1}'(x) = \sum_{i=1}^m h_{ij}(x - i \cdot \Delta x/v) f_1(i \cdot \Delta x/v) \quad (1)$$

ここで、パンタグラフは走行により移動していくため、インパルス応答関数はそれぞれ当該時刻にパンタグラフが存在していた位置*i*を加振点とするトロリ線のインパルス応答関数 h_{ij} を使用する。ここで、式(1)の h_{ij} を整理し、行列 \mathbf{h} (以下、インパルス応答行列と呼ぶ)で表現すると、式(1)は式(2)のように書きかえることができる。

$$\begin{bmatrix} y_{up1}'(x_m) & \cdots & y_{up1}'(x_{m+50}) \end{bmatrix}^T = \mathbf{h} \begin{bmatrix} f_1(x_1) & \cdots & f_1(x_i) & \cdots & f_1(x_{m+50}) \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

トロリ線押上量の推定値が得られれば、パンタグラフ高さ $y_{pan1}(x)$ から次式によりトロリ線静高さ y'_0 を推定可能である。

$$y'_0(x) = y_{pan1}(x) - y_{up1}'(x) \quad (3)$$

2.2 新幹線におけるトロリ線静高さの推定

2.2.1 新幹線試験の概要

新幹線ヘビーコンパウンド架線区間の現車試験で測定されたデータに基づき、伝達関数法でトロリ線の静高さを推定した。試験区間の架線の張力を表1に示す。

表1 架線の張力(新幹線)

	張力 (kN)
ちょう架線	19.6
補助ちょう架線	14.7
トロリ線	19.6

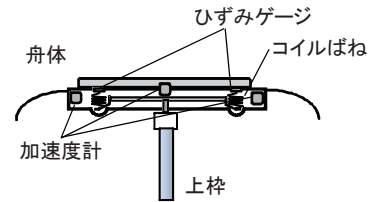


図2 接触力測定センサの設置状況

接触力は、パンタグラフの舟体に加速度計な

らびにひずみゲージを組み込むことによって測定した。図2に、舟体に組み込んだセンサの配置を示す。加速度計により舟体の慣性力を、ひずみゲージにより枠組から舟体に作用する力を、それぞれ計測し、これらを基に接触力を算出した。本手法では、おおよそ60Hz以下の周波数範囲において精度のよい計測が可能である。パンタグラフ高さは、パンタグラフの下枠の角度を計測し、これを舟体高さに換算することによって求めた。これらの測定結果をもとに、式(2), (3)によってトロリ線静高さを推定した。なお、試験データは速度270km/hで走行中のデータを使用した。図3に本ケースで使用した径間長50mの区間のインパルス応答行列を示す。本図の押上量の推定箇所は0m点および50m点がそれぞれ架線の支持点に相当しており、接触力の作用点の-150m点、-100m点、-50m点および50m点も架線の支持点に相当している。本結果から、各押上量の推定箇所におけるインパルス応答行列の最大値は、径間中央と支持点近傍とで大きな差異はなく、ハンガ間隔に相当する5m周期でピークを持つ関数となっていることが確認される。

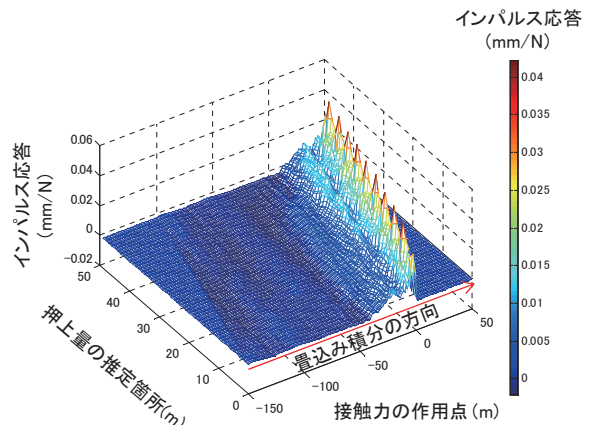


図3 インパルス応答行列の計算結果(新幹線)⁵⁾

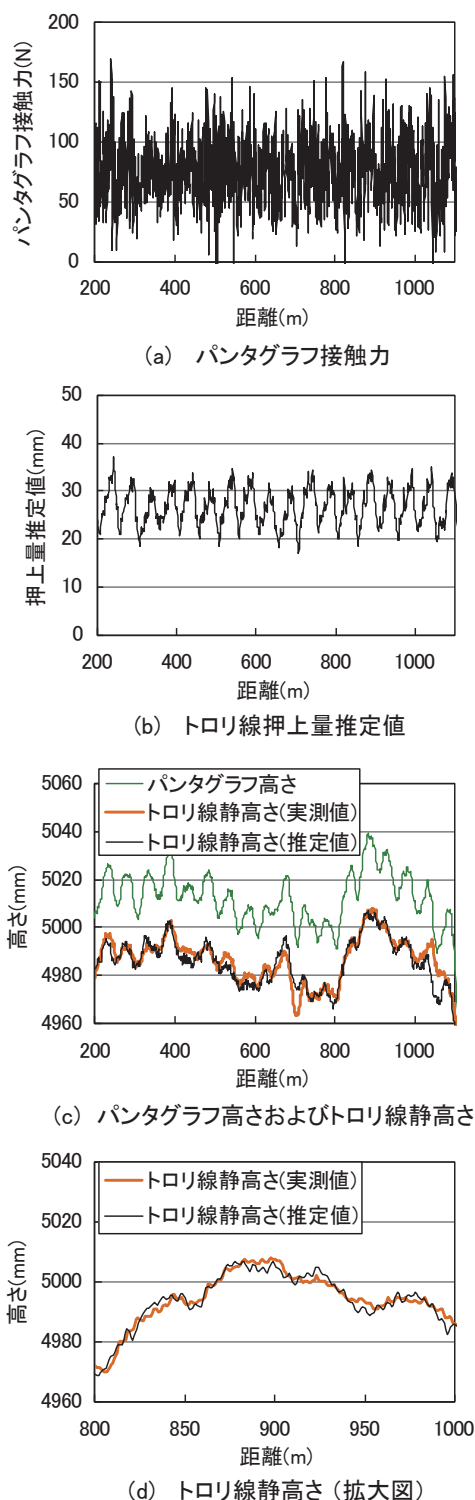


図4 トロリ線静高さの推定結果(新幹線)⁶⁾

これはヘビーコンパウンド架線は径間周期の剛性変化が小さく、ハンガ周期での動特性変化が電車線の動特性の支配要素となっていることを示している。

以下では、保守用車作業台に設置したトロリ線高さ測定器にてトロリ線の静高さを測定(以下、地上測定試験と記す)し、このデータを検証用データとして使用した。

2.2.2 新幹線におけるトロリ線静高さの推定結果

伝達関数法を2.2.1項の現車試験のデータに対し適用し、トロリ線の静高さを推定した。図4に測定データからトロリ線の静高さを推定した結果を示す。図4(a)は試験列車で測定した接触力の時刻歴、図4(b)は本手法によるトロリ線押上量の推定値、図4(c)は試験列車で測定したパンタグラフ高さ、トロリ線静高さの測定値と本手法による推定値である。また、図4(d)は図4(c)の横軸800~1000mの区間を拡大し、トロリ線静高さの測定値と推定値を示したものである。ただし、図4(c)および図4(d)に示したトロリ線静高さの推定値はパンタグラフ高さの実測値が真値に対して、38mm高くと仮定し、その高さの補正を行った。これは試験列車で測定したパンタグラフ高さ、保守用車にて測定したトロリ線静高さの両者に含まれていたと推測される誤差要因により、トロリ線静高さの推定結果が実測値に対して、平均的に38mm高くなったためである。

図4(c)から伝達関数法によるトロリ線静高さの推定値は実測値と概ね良く一致しており、ほとんどの区間において±4mm程度の誤差で推定できていることが確認できる。ただし、700m地点および1050m地点付近では推定誤差が大きく、±10mm程度の誤差が認められる。この原因は不明だが、当該箇所は電車線を定数一定のばねと近似して推定する等価ばね定数法⁴⁾においても推定誤差が大きくなっている箇所であり、電車線側にシミュレーションモデルと異なる動特性が含まれていたか、試験列車の車両動揺などの影響や、現車試験から地上測定試験までの間に軌道整正が実施された可能性などが考えられる。また図4(d)より、伝達関数法は等価ばね定数法では推定困難なハンガ周期などのように径間周期よりも短い波長のトロリ線の高さ変動についても概ね良好な精度で推定できていることが確認できる。

2.3 在来線におけるトロリ線静高さの推定

2.3.1 在来線試験の概要

在来線で現車試験を実施し、試験列車で測定されたヘビーコンパウンド架線区間のデータに基づき、伝達関数法でトロリ線の静高さを推定した。試験区間の架線の諸元を表2に示す。

接触力は2.2節と同様に、パンタグラフの舟体に加速度計ならびにひずみゲージを組み込むことによってDC~80Hzの周波数帯で測定した。パンタグラフ高さは、レーザー変位計で計測した。これらの測定結果をもとに、2.2節と同様の手法でトロリ線静高

表2 架線の諸元(在来線)

	線密度 (kg/m)	張力 (kN)
ちょう架線	0.70	19.6
トロリ線	1.51	14.7

特集：電力技術

さを推定した。なお、試験データは速度 125km/h で走行中のデータを使用した。図 5 に本ケースで使用した径間長 50m 区間のインパルス応答行列を示す。図 5 から各押上量の推定箇所におけるインパルス応答行列は地点によりその傾向が異なっており、径間中央よりも進行方向前方側において最大値が最も大きくなっていることが確認できる。これは図 3 との大きな違いであり、この差異はシンプル系の架線の径間内の剛性変化がコンパウンド系の架線よりも大きいために生じたものである。本結果から、シンプル系の架線では、架線のばね定数を一定と近似する等価ばね定数法によってパンタグラフの押上量を高い精度で推定することは困難であることが推測される。

2.3.2 在来線におけるトロリ線静高さの推定結果

伝達関数法を 2.3.1 項の現車試験のデータに対し適用し、トロリ線の静高さを推定した。図 6 に測定データからトロリ線の静高さを推定した結果を示す。図 6 (a) は試験列車で測定した接触力の時刻歴、図 6 (b) は本手法によるトロリ線押上量の推定値、図 6 (c) は試験列車で測定したパンタグラフ高さ、トロリ線静高さの測定値と本手法による推定値である。図 6 (b) を図 4 (b) と比較すると、トロリ線押上量の径間周期での変動が大きくなっていることがわかる。本結果からも、シンプル系の架線のトロリ線静高さを接触力から推定するためには、本手法のように径間周期の架線の剛性変化を考慮した推定手法を適用する必要があることがわかる。

図 6 (c) より、伝達関数法によるトロリ線静高さの推定値は実測値と概ね良く一致しており、ほとんどの区間において ± 5mm 程度の誤差で推定可能であることが確認できる。ただし、280m 地点などでは推定誤差が大きく、± 20mm 程度の誤差が認められる。この原因については 2.2.2 項と同様の理由が想定され、今後検討が必要である。

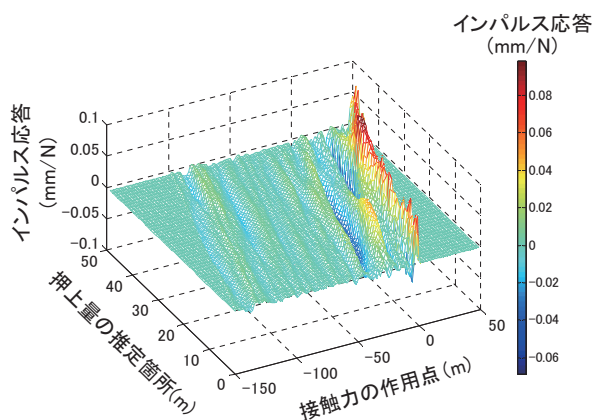
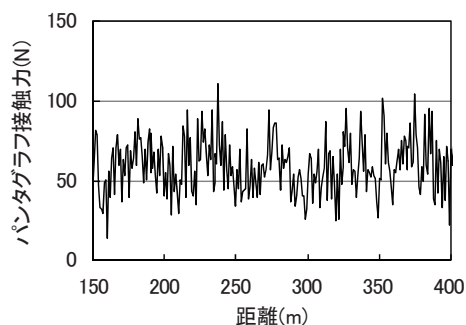
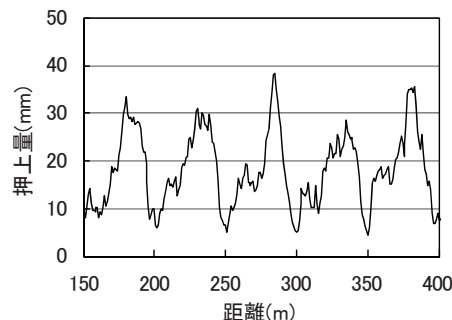


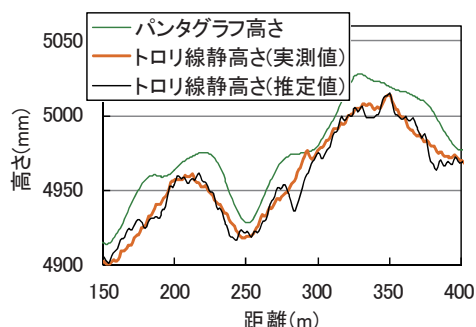
図 5 インパルス応答行列の計算結果（在来線）



(a) パンタグラフ接触力



(b) トロリ線押上量推定値



(c) パンタグラフ高さおよびトロリ線静高さ

図 6 トロリ線静高さの推定結果（在来線）

3. パンタグラフ接触力のその他の活用例

本章では、在来線の接触力測定試験（以下、車上測定と記す）のデータのうち、接触力に特徴的な波形が確認された箇所などについてトロリ線摩耗や静高さなどの調査（以下、地上測定と記す）を実施した結果について報告する。これら結果から、トロリ線静高さ推定以外の電車線保守への接触力の有用性について示す。

車上測定データと地上測定データの位置を合わせた結果を図 7～図 9 に示す。また、図 8 および図 9 の上段には検測車によるトロリ線摩耗残存径の測定結果も併記した。なお、接触力測定の現車試験は速達タイプの営業列車と同等のランカーブで実施した。

3.1 接触力著大値観測箇所の調査結果

図 7 (a) は、車上測定において接触力に著大値が観測された箇所を地上測定で確認した結果である。地上測定の結果、当該箇所はトロリ線がダブルイヤーで接続さ

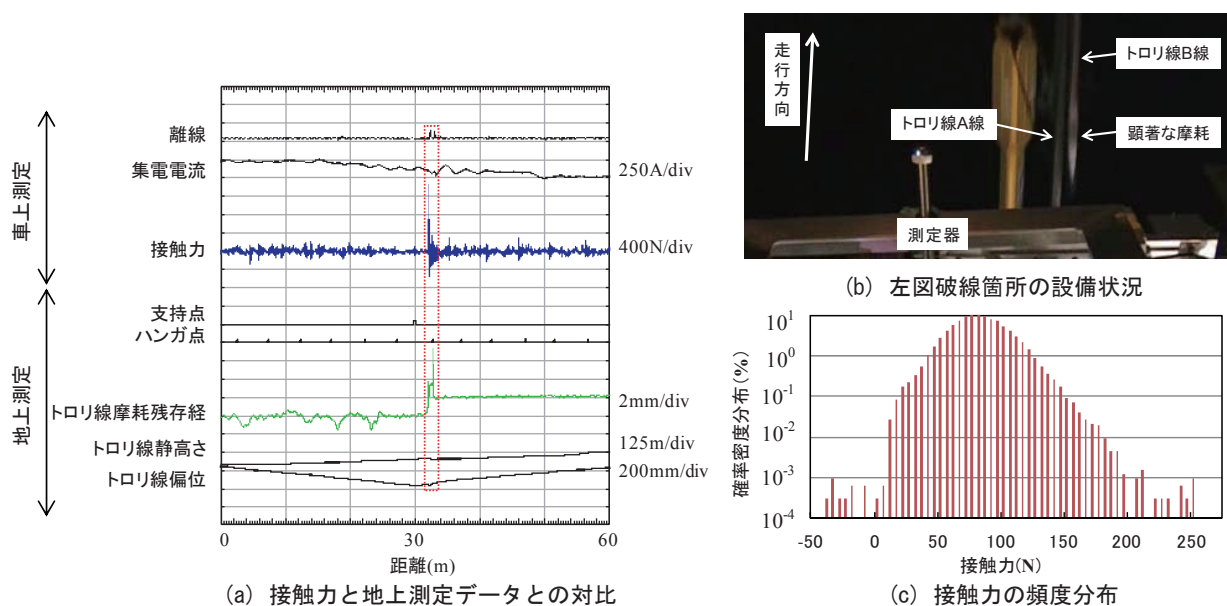


図7 接触力特徴点の電車線設備

れており、B線側のトロリ線の高さが低く、そのしゅう動面には機械的摩耗と推測される顕著な摩耗(図7(b))が確認された。同区間周辺4ドラムの接触力の確率密度分布をログスケールで図7(c)に示す。本データのうち、0以下および210N以上に確認される不自然なプロットは全て図7(b)の箇所に起因したものであった。本結果から、電車線に短波長の顕著な不整がある場合は接触力の統計処理から、検出できる可能性があることがわかる。なお、従来の硬点・衝撃による測定は、同様の不整であっても電車線偏位によりその値が変化したが、接触力を用いることにより、画一的なしきい値で評価を行うことが可能である。ただし、接触力のしきい値は最終的にはトロリ線の摩耗メカニズムなどを勘案して設定することが望ましく、この点については今後の課題である。

3.2 特徴的な接触力波形観測箇所の調査結果

ツインシンプル架線の各支持点で、車上測定時に接触力に三角形の特徴的な波形が観測された区間の測定データを図8に示す。車上測定のパンタグラフ高さにパンタグラフ高さの径間周期の変動が確認され、トロリ線静高さがサグになっていることが予測されたため、地上測定を実施したところ、当該箇所はトロリ線静高さが50~100mm程度と大きいことが確認された。また、同区間では曲線引金具の引き角度も最大で25°となっていた。顕著なサグおよび曲線引金具の引き上げを設定したシミュレーションを実施した結果、同様の特徴的な接触力波形が確認されたため、この特徴的な接触力波形の原因は大きなサグと曲線引金具によるトロリ線の顕著な引き上げによるものと推測される。このように、接触力波形の特徴に着目することで波長の長いトロリ線静

高さの不整を直接検出できる可能性がある。なお、図中①および③に対応する箇所では、接触力が比較的高い箇所においてトロリ線の摩耗が進行しており、②に対応する箇所では接触力が低く、離線アークが発生している位置において、トロリ線摩耗が進行していた。本結果から、著大な接触力の変動を低減する必要性が改めて確認される。

3.3 トロリ線摩耗が特徴的箇所の調査結果

図9はヘビーシンプル架線区間において、引留め長の前半と後半でトロリ線の摩耗形態が大きく異なっている箇所のデータである。当該ドラムのは前半部分はトロリ線に径間周期の摩耗と径間中央付近に局部摩耗が発生しており、ドラム後半部分は径間周期の摩耗が発生している。接触力、電柱間隔、トロリ線の静高さや架線偏位の傾向はドラムのは前半と後半で大きな違いはなく、試験列車では離線アークはほとんど発生していない。一方、パンタグラフ1台当りの集電電流はドラム前半部分で約400A、後半部分で約15Aとなっており、前半部分の局部摩耗箇所の接触力は比較的小さくなっている。以上の結果から、前記トロリ線の局部摩耗は、営業列車の集電電流が大きく、接触力が低くなる箇所において、小さな離線アークやトロリ線とすり板間の溶融ブリッジ⁷⁾により進行した可能性が想定されるが、車上測定の結果が全ての通過列車を反映しているとは限らないため、発生原因の特定には現地トロリ線の更なる詳細分析なども必要である。

本ケースでは、離線アークが観測されていないにも関わらず接触力の比較的低い箇所でもトロリ線の摩耗が進んでいるため、今後の電車線保守の方法を検討する上で留意すべき結果である。

特集：電力技術

3.4 接触力測定結果に関するまとめ

本章にて報告した現地試験結果から、従来の離線アーカの測定に重きを置いた測定法だけでなく、接触力を活用することにより、電車線設備の要調整箇所の抽出など、電車線保守に有益な情報が得られる可能性が示された。また、トロリ線の摩耗進行を考える上で集電電流に関する情報も重要であることも十分認識しておく必要がある。

4. おわりに

本報告では、検測車で取得可能なデータから電車線の動特性データを利用してトロリ線静高さを推定する伝達関数法を新幹線や在来線の現車試験測定データに適用しその有効性の検証を行った。また、接触力測定結果の活用例を示した。本論文の結論を以下に示す。

- (1) 新幹線でヘビーコンパウンド架線を270km/hで走行している条件と、在来線ヘビースンプル架線を125km/hで走行している際のパンタグラフ接触力データを使用し、伝達関数法によりパンタグラフ高さや接触力から、トロリ線の静高さを推定を行った。推定結果を地上測定結果と比較することで、提案手法の有効性を確認した。
- (2) 特徴的な接触力波形が観測された箇所における架線設備の地上測定を実施した結果、ダブルイヤーの高低差不良や、顕著なサグなどが発生していることを

確認した。

文献

- 1) 池田充, 長坂整: 接触力の測定手法と架線設備診断への応用に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.16, No.6, pp.45-50, 2002.6
- 2) 白田隆之: ニューラルネットワークによるパンタグラフ接触力とトロリ線摩耗との関係の学習, J-rail2001, pp.515-518, 2001.12
- 3) 根津一嘉, 松村周, 網干光雄: 電車線路検査・状態監視への画像技術適用に関する動向調査, 鉄道総研報告, Vol.25, No4, pp.47-50, 2011.4
- 4) 池田充: 架線・パンタグラフ間の接触力測定に基づく架線の静的状態診断, 第12回 評価・診断に関するシンポジウム, pp.20-23, 2013.12
- 5) 白田隆之, 池田充: 接触力測定に基づくトロリ線の静高さ推定, 鉄道総研報告, Vol.28, No10, pp.35-40, 2014.10
- 6) 白田隆之, 池田充: 検測データを活用したトロリ線静高さ推定手法の検討, 日本機械学会, 2015年度年次大会, G1800101, pp.35-40, 2015.9
- 7) 山下主税, 菅原淳: 通電条件下におけるトロリ線とすり板の摩耗形態, 鉄道総研報告, Vol.27, No.8, pp.35-40, 2013

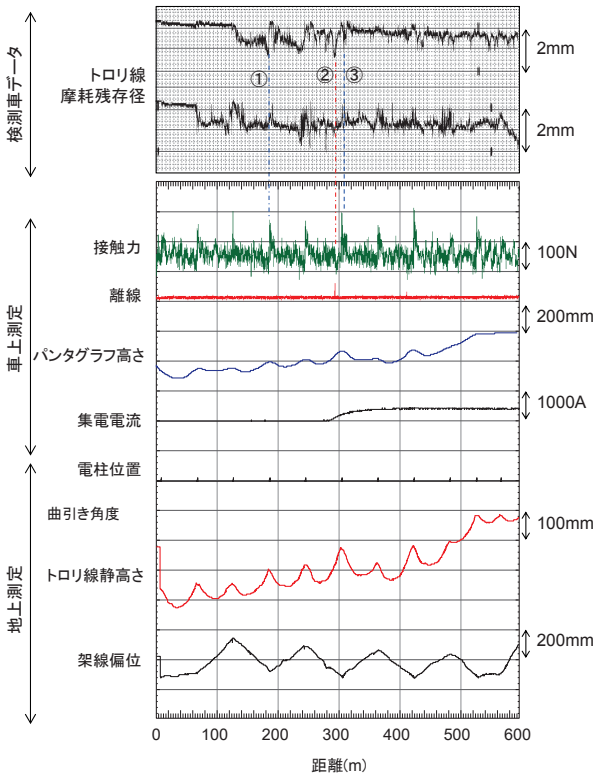


図8 接触力特徴点の現地試験データ (ツインシンプル架線区間)

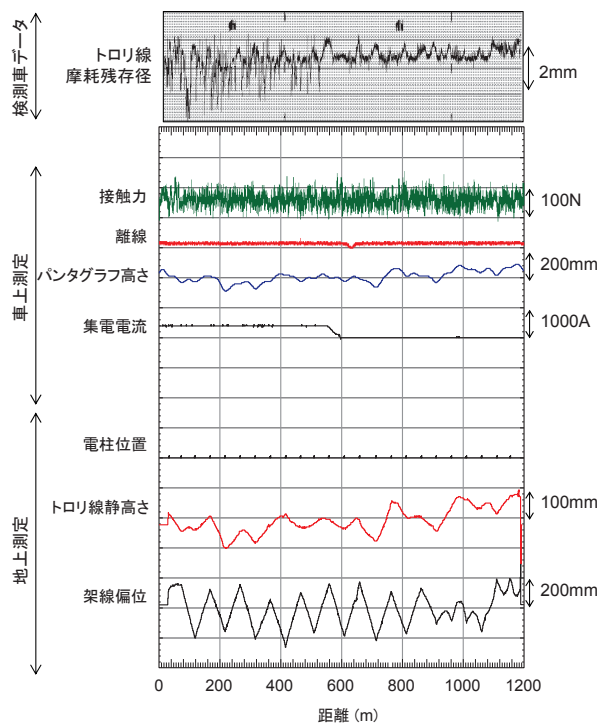


図9 接触力特徴点の現地試験データ (ヘビースンプル架線区間)