

接触力測定に基づくトロリ線の静高さ推定

臼田 隆之* 池田 充**

Estimation Method of Static Height of Contact Wire using Pantograph Contact Force

Takayuki USUDA Mitsuru IKEDA

For preventing accident occurring between overhead catenary system and pantograph, overhead catenary system must be carefully maintained, resulting in requiring heavy maintenance cost. The present on-board monitoring system for overhead contact lines mainly provides dynamic states of contact wire. However, its static states are intensively required for the maintenance work of the overhead contact line. Therefore, the authors have developed two methods which estimate static height of contact wire by contact force and pantograph height. This paper describes the new methods in detail and shows some simulation and experimental results.

キーワード：パンタグラフ接触力，トロリ線静高さ，メンテナンス，架線検測

1. はじめに

架線設備のメンテナンスには非常に多くの労力がかかっているが、今後の高齢化社会での労働人口の減少に向け、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架線設備の保守に活用しようと、今日までも多くの研究が進められている^{1) 2) 3)}。また、異常発生の予兆を事前に検出する技術なども注目を集めている⁴⁾。

保守要員による近接検査ではもっぱら電車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。そのため，検測車にて架線の静構造が測定できれば，架線保守上非常に有益である。また，連続的なトロリ線の静高さ情報が得られれば，架線の架設精度の良否判定やその改善方策を提案するシステムなどへの応用が可能である。

一方で，高速で走行する検測車から架線の静構造を直接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時の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。

過去には推定対象の架線に対してパンタグラフ通過のシミュレーションを実施して，パンタグラフ接触力（以下，接触力とする）とパンタグラフ高さからトロリ線の静高さを推定する試みが行われているが，この手法は支持点位置やハンガ位置などの正確な情報が事前に得られ

ている必要があり，その都度，比較的計算負荷の高い架線・パンタグラフの運動シミュレーションを実施する必要がある。また，列車先頭部に設置したステレオ画像などから架線の静構造を得ようとする研究も進められているが，高速走行時の測定精度などに課題が残されている。

そこで本論文では，現状の技術レベルで検測車で取得可能な信号から比較的簡便なアプローチでトロリ線の静高さを推定する2種類の手法を提案し，シミュレーション，実験および現車試験データで検証を行った結果について報告する。

2. トロリ線静高さの推定手法

本章ではトロリ線静高さの推定手法として，2種類の手法を提案する。

2.1 等価ばね定数法

トロリ線に鉛直方向の力を作用させると，架線はばねに近い特性を示す。ここではトロリ線に与えた力を，着力点におけるトロリ線の上下変位で除した値を，架線の等価ばね定数と称する。各線条の張力が表1に示されたコンパウンドカテナリ架線をパンタグラフが270km/hで走行した場合の，着力点における等価ばね定数を計算した結果を図1に示す。これは，3章にて後述する差分法に基づく，架線・パンタグラフ系の運動シミュレーション⁷⁾により計算した結果であり，x軸の0, 50, 100m点がそれぞれ架線の支持点位置となっている。また，図1に示した等価ばね定数の値をサンプリング周期7.5mでリサンプリングした結果を，図1中に赤線で示す。本結果より，ハンガ周期よりも長い周期成分だけに着目す

* 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

ば、270km/h で走行するパンタグラフから見た等価ばね定数の変動はそれほど大きくないことがわかる。そこで、走行中に計測した接触力からトロリ線の静高さを次式により推定することが可能であると考えられる。

$$y'_{0,LP}(x) = y_{pan1,LP}(x) - f_{1,LP}(x) / Stiff_{ave} \quad (1)$$

ただし、 $y'_0(x)$ は位置 x におけるトロリ線の静的な鉛直方向変位、 $y_{pan1}(x)$ は先頭パンタグラフが位置 x に到達したときのトロリ線の動的な鉛直方向変位、いいかえれば位置 x におけるパンタグラフ高さであり、 f_1 は先頭パンタグラフの位置 x における接触力である。また、下添え字 LP は、ハンガ周期より低い成分だけをローパスフィルタにより抽出することを意味する。 $Stiff_{ave}$ はパンタグラフが走行したときの着点における等価ばね定数の平均値であり、パンタグラフの走行速度に応じて値を与える。

なお、本手法は等価ばね定数が架線位置によって大きく変わらず、定数とみなせるという近似が前提となっているため、架線の等価ばね定数の不等率が大きくなるシンプル架線の条件における適用可能性については今後検討が必要である。

2.2 伝達関数法

前節では、ハンガ周期周波数よりも低い周波数を対象とし、架線の等価ばね定数を一定とみなせるものと近似した。本節ではハンガ周期周波数相当の架線の等価ばね定数の変動についても考慮した推定法について提案する。

本手法は、事前にシミュレーション等により架線の加振試験を実施し、その結果から得られた架線の動特性情報を使用して、先頭パンタグラフの接触力 $f_1(x)$ 、および先頭パンタグラフの舟体軌跡（パンタグラフ高さ） $y_{pan1}(x)$ からトロリ線静高さ $y'_0(x)$ を推定する。以下、提案するトロリ線静高さ推定手法の詳細な流れについて説明する。

はじめに、ハンガ位置のトロリ線静高さが一定のモデル架線において、トロリ線を10秒間加振するシミュレーションを実施する。本検討では200mの区間において $\Delta x = 1m$ 毎に加振点を設定した。シミュレーションの時間刻みは0.1msecとし、加振力は-100～100Nのランダム波と、直流分による影響も加味出来るように1NのDC成分との合成波形を使用した。また、加振は加振点に力のみを入力することとし、トロリ線を下方向に引張る方向の加振力も作用させた。

以上のシミュレーションから得られたデータより、トロリ線静高さを基準とした観測点 j （列車進行方向の座標を x とする）のトロリ線変位のフーリエ変換結果 $Y_j(\omega)$ と、加振点 i に作用する加振力のフーリエ変換結果 $F_i(\omega)$ を算出し、加振点 i における加振力に対する観測点 j のトロリ線変位の伝達関数 $H_{ij}(\omega)$ を算出する。

表1 架線モデルの張力

	張力 (N)
ちょう架線	19,600
補助ちょう架線	14,700
トロリ線	19,600

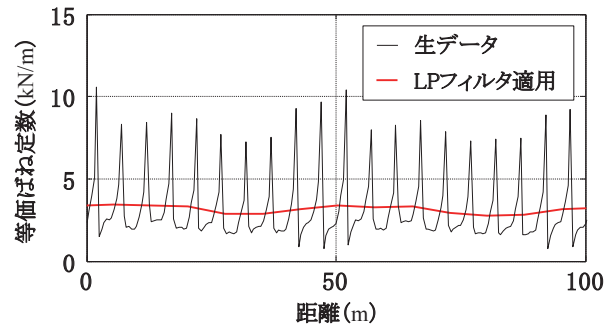


図1 架線の等価ばね定数

$$H_{ij}(\omega) = \frac{Y_j(\omega)}{F_i(\omega)} \quad (2)$$

伝達関数を計算する際には、表2の上段に示すように、シミュレーションにより得られたサンプリング周波数10kHzの時刻歴データに対して、サンプリング周波数を75Hzにリサンプルして得られたデータを用い、データ点数150点のフーリエ変換を実施して伝達関数を求め、これに対して16回の平均化を行った。次に、 $H_{ij}(\omega)$ を逆フーリエ変換して、インパルス応答関数 $h_{ij}(t)$ を加振点 i 、観測点 j の位置毎に算出した。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。

$$y_{up1}'(x) = \sum_{i=1}^m h_{ij}(x - i \cdot \Delta x / v) f_1(i \cdot \Delta x / v) \quad (3)$$

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を加振点とするトロリ線のインパルス応答関数を使用する。ただし、(3)式を用いて $y_{up1}(x)$ を推定する際には、表2の最下段に示すように伝達関数推定時のサンプリング周波数に合わせてリサンプルした接触力波形を使用した。なお、表2のサンプリング周波数75Hzは、列車速度270km/hで走行した時に、1サンプリングの間に走行する距離 Δx を1mとして設定した時の値であり、列車速度と質点間隔に応じて、リサンプリングの周波数は変更する。式(3)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(3)は以下のように書きかえることができる。

$$\begin{bmatrix} y_{up1}'(x_m) & \cdots & y_{up1}'(x_{m+50}) \end{bmatrix}^T \\ = \mathbf{h} [f_1(x_1) \cdots f_1(x_i) \cdots f_1(x_{m+50})]^T \quad (4)$$

インパルス応答行列 \mathbf{h} の計算例を図2に示す。なお、本図の底面を構成する2軸の原点は高さ推定区間の始点である支持点位置とした。インパルス応答行列 \mathbf{h} を列車速度ごとに事前に用意しておくことにより、パンタグラフ接触力の実測値を元に、式(3)から推定区間全体にわたってトロリ線の押上量が推定可能である。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。

$$y'_0(x) = y_{pan1}(x) - y'_{up1}(x) \quad (5)$$

3. パンタグラフ走行シミュレーションの条件

新幹線用コンパウンド架線を、1編成あたり2台の新幹線用パンタグラフが列車速度270km/hでしゅう動する場合を想定し、鉄道総研が所有する差分法に基づく架線・パンタグラフ系の運動シミュレーションプログラムを利用して、各提案手法の検証用データの作成を行った。また、伝達関数法で使用する架線の動特性を算出する目的で、架線を加振するシミュレーションも実施した。シミュレーションでは、表1に示す架線定数を使用した。

4. 等価ばね定数法によるトロリ線静高さの推定結果

4.1 シミュレーションによる検討結果

2.1節において提案した等価ばね定数法によって、どの程度の精度でトロリ線静高さが推定可能か、シミュレーションにより検証した結果を図3に示す。速度270km/hにおける接触力とトロリ線の動的変位、ならびに図1より求めた等価ばね定数の平均値をもとに、式(1)によりトロリ線静高さを推定した値を、トロリ線静高さの真値、ならびにパンタグラフ高さに対してプロットしている。ただし、トロリ線静高さの推定においては、接触力波形ならびにパンタグラフ高さに対して、波長が7.5mより短い接触力成分をローパスフィルタで取り除いたうえで、式(1)を適用した。

図3より、パンタグラフ高さとの静的変位の差(押上量)は最大で35mm程度あるのに対し、トロリ線静高さの推定誤差は4mm程度であることがわかる。

4.2 現車試験データによる検討結果

前節と同様の手法に基づき、実際に車上で測定したデータをもとにトロリ線静高さを推定するとともに、推

表2 推定時の計算条件

		接触力	サンプリング
		作用点間隔 (m)	周波数 (Hz)
		Δx	f
加振シミュレーションデータ	シミュレーション時	1.0	10,000
	同定時	1.0	75
パンタグラフ走行シミュレーションデータ	シミュレーション時	0.2	375
	推定時	1.0	75

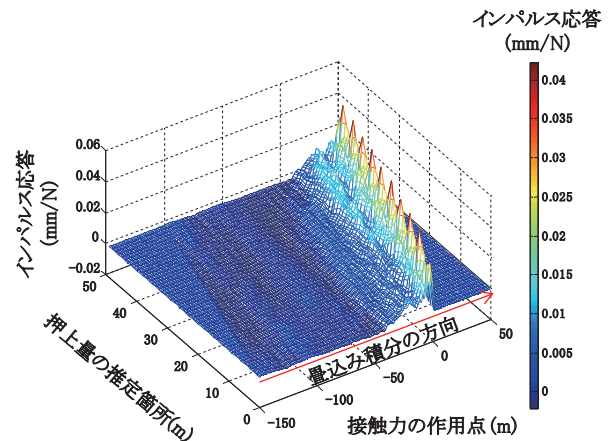


図2 インパルス応答行列の計算結果

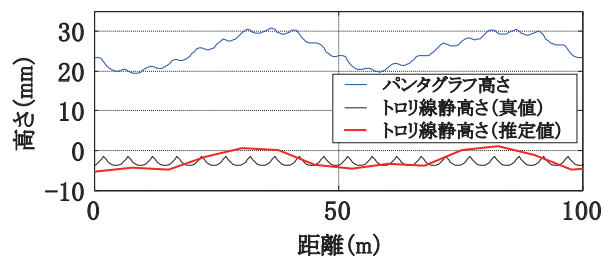


図3 トロリ線静高さの推定結果
(シミュレーション結果、等価ばね定数法)

定した区間のトロリ線静高さの実測を行い、両者を比較して推定手法の検証を行った。

接触力は、パンタグラフの舟体に加速度計ならびに荷重センサを組み込むことによって測定した。図4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⁸⁾。本測定例ではおおよそ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。一方、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(1)によってトロリ線静高さを推定した。

この測定結果をもとに、式(1)を用いてトロリ線静高さの推定を約1000mの区間に対して行った。また、トロリ線静高さの真値を求めるため、営業時間外に保守用車を用いて同区間のトロリ線静高さの実測を行った。この両者を比較したものを図5に示す。車上で計測したパンタグラフ舟体軌跡(トロリ線の動的変位)も同図中に

特集：電力技術

示している。なお、車上計測は速度 270km/h において実施したものであり、トロリ線静高さの推定に必要となる、パンタグラフ走行時における着点の等価ばね定数の平均値 $Stiff_{ave}$ は、3 章で示したシミュレーションデータから算出した。また、図 5 に示すトロリ線静高さの推定波形は、ハンガ周期より低い成分だけを抽出するため、波数 0.03 (1/m) のローパスフィルタを施している。

図 5 を見ると、トロリ線静高さの推定結果と実測結果はよく一致している。このように、本推定手法は径間長やハンガ割りなどの影響を無視しているにもかかわらず、トロリ線静高さの径間周期の変動を十分な精度で推定可能であることがわかる。

5. 伝達関数法によるトロリ線静高さの推定結果

5.1 シミュレーションによる検討結果

2.2 節において提案した伝達関数法によって、トロリ線静高さ推定の有効性検証を行った結果を図 6～7 に示す。各図ともに (a)～(d) はそれぞれパンタグラフ高さ、接触力、トロリ線押上量のシミュレーション結果と伝達関数法による推定結果 (シミュレーションのパンタグラフ接触力を使用して押上量を推定した結果)、およびトロリ線静高さの設定値 (真値) と伝達関数法による推定結果を示す。なお、各図ともに x 軸の 250m と 300m の点が支持点箇所に相当する。

図 6 はトロリ線静高さが水平の場合 (case 1) の推定結果である。本結果から、トロリ線がほぼ水平に近い状態であれば、約 3mm 程度の誤差でトロリ線の静高さを推定できることが確認できる。なお、約 3mm 程度の誤差が生じる理由として、第 2 パンタグラフから励起される波動が第 1 パンタグラフのしゅう動する位置まで伝搬する影響なども考えられたため、パンタグラフが 1 台のみのケースについてトロリ線静高さの推定も行ったが、推定精度に有意な差は確認されなかった。

つぎに、架線が持つ非線形性の一例として、ハンガ浮きの影響についてケーススタディーを行った。ハンガ浮きが起こり得る架線条件とした場合と、ハンガ浮きが生じないようにハンガとちょう架線とを固定した場合について、それぞれシミュレーションにより接触力を計算し、ハンガ浮きを許容しない条件で作成したインパルス応答行列からトロリ線静高さの推定を行った。図 7 はハンガ浮きが発生しやすくなるように、意図的にトロリ線に過剰な凹凸を設けた場合 (case 2) の、トロリ線静高さの推定結果である。本結果より、x 軸中央付近において、ハンガ浮きを許容しない条件と、許容した条件とで接触力に差があることが確認できる。これはハンガ浮きが発生すると架線が押し上がり易くなり、著大な接触力の発生が回避されるためである。しかしながら、ハンガ浮きを許容したケースにおいてもトロリ線の静高さは概ね良好に推定できて

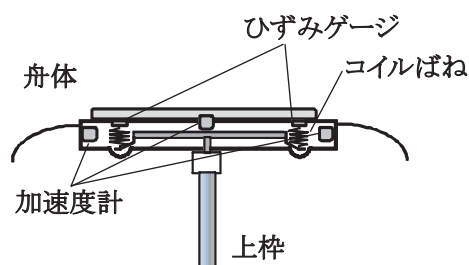


図4 接触力測定用舟体

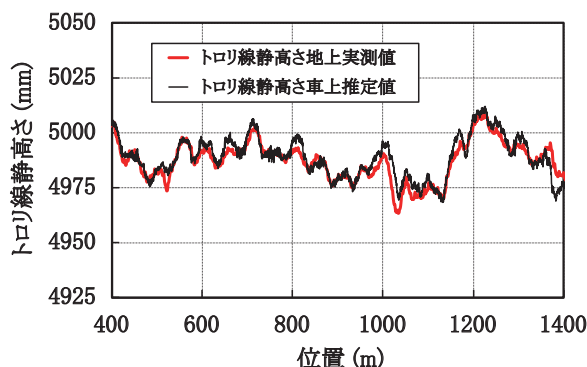


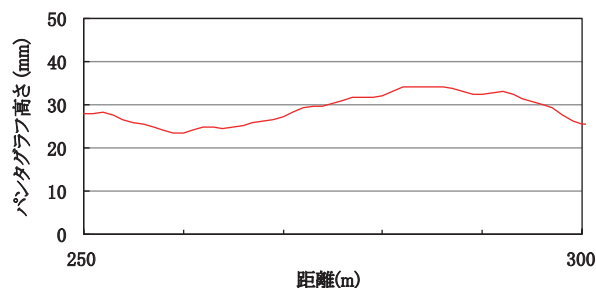
図5 トロリ線静高さの推定結果

(現車試験データによる推定, 等価ばね定数法)

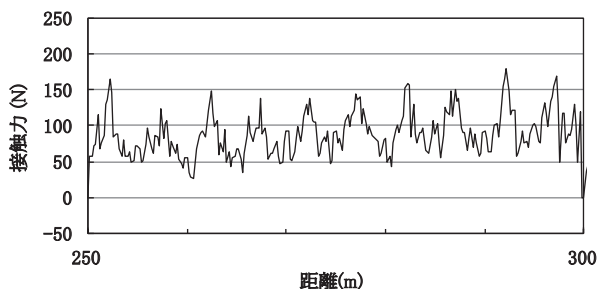
いることが確認できる。この理由としてはある程度長い範囲で畳み込み積分を行っているため、ハンガ浮きの様な瞬間的な系の変化の影響を受けにくいと推測される。

5.2 集電試験装置での検討結果

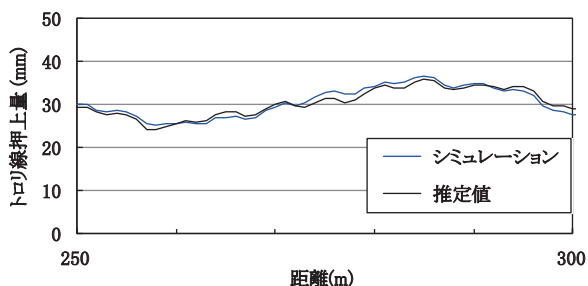
実際の架線下にパンタグラフを 12km/h で走行させる試験を実施し、前節と同様の手法を試験結果に適用し、有効性の検証を行った。インパルス応答行列は 2.2 節に記載した手法により、試験を実施した諸元の架線を加振するシミュレーションを実施し、得られたデータ (サンプリング周波数 10kHz) を、3.3Hz にリサンプルし、データ点数 20 点のフーリエ変換を実施して算出した。インパルス応答行列の計算結果を図 8 に示す。また、接触力は図 4 に示したセンサにより測定し、パンタグラフ高さはパンタグラフ台枠から舟体下面までの距離をレーザ変位計にて測定した。本試験におけるトロリ線静高さの推定結果を図 9 に示す。図 9 (a)～(d) はそれぞれパンタグラフ高さ、接触力、トロリ線押上量の伝達関数法による推定結果、およびトロリ線静高さの実測結果と推定結果を示す。なお、図 9 (d) に示すトロリ線静高さの測定値は接触式のトロリ線高さの測定結果であるため、センサヘッドをトロリ線に押し当てることによる影響が若干含まれているが、ここではその影響は無視できるものとする。なお、各図ともに x 軸の 50m, 100m, 150m 点が支持点箇所に相当する。図 9 (d) から、提案した手法により、低速ではあるが、4mm 程度の精度でトロリ線の静高さを推定可能であることが確認できる。



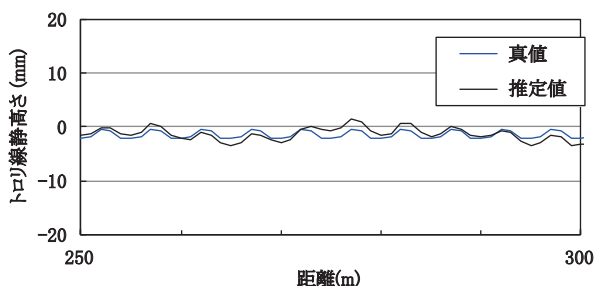
(a) パンタグラフ高さ



(b) パンタグラフ接触力



(c) トロリ線押上量

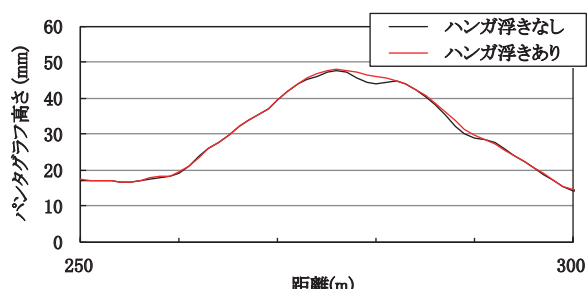


(d) トロリ線静高さ

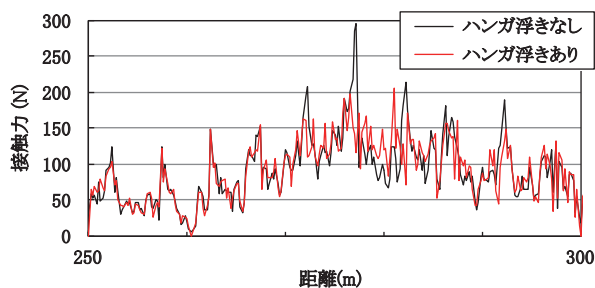
図6 トロリ線静高さの推定結果
(伝達関数法, シミュレーション case 1)

6. まとめ

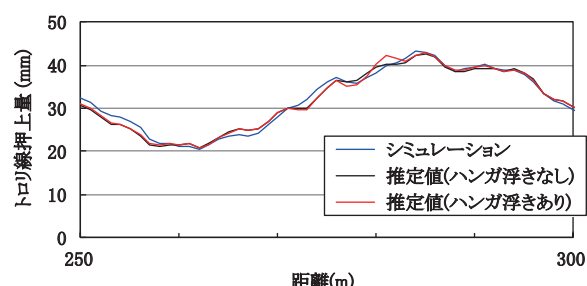
本論文では、検測車で取得可能なデータからトロリ線静高さを推定する手法として、架線を定数が一定のばねと近似して、パンタグラフ高さとパンタグラフ接触力からトロリ線静高さを推定する手法（等価ばね定数法）と、事前に求めた架線の動特性を表現するインパルス応答行列を使用して、パンタグラフ高さとパンタグラフ接触力からトロリ線静高さを推定する手法（伝達関数法）の2種類の手法を提案するとともに、シミュレーションと実験や現車試験データを用いてその有効性の検証を行っ



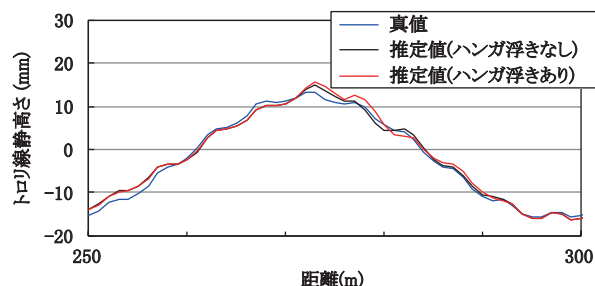
(a) パンタグラフ高さ



(b) パンタグラフ接触力



(c) トロリ線押上量



(d) トロリ線静高さ

図7 トロリ線静高さの推定結果
(伝達関数法, シミュレーション case 2)

た。本論文の結論を以下に示す。

- (1) 等価ばね定数法は、ハンガ周期よりも長い周期成分（径間周期の高さの変動）だけに注目すれば、パンタグラフ高さとパンタグラフ接触力から、おおよそのトロリ線静高さの推定が可能であることをシミュレーションおよび現車試験データから確認した。ただし、シンプル架線などの条件においてはさらなる検証が必要である。
- (2) 伝達関数法は、パンタグラフ高さとパンタグラフ接触力から、トロリ線静高さの推定が可能であることをシミュレーションおよび実験により検証した。今

特集：電力技術

回検証を行った条件では、ハンガ周期を含めたトロリ線の静高さを約3～4mm程度の精度で推定可能であることを確認した。さらに、トロリ線静高さの推定誤差となりうるハンガ浮きについての検討をシミュレーションにて実施し、短時間のハンガ浮きは推定精度に大きな影響を与えないことも確認した。

今後は提案した2種類の手法の改良による推定精度の向上について検討を進め、径間長が変化する箇所での推定方法などについても検討を進める。また、伝達関数法については高速走行データによる精度検証を行う予定である。

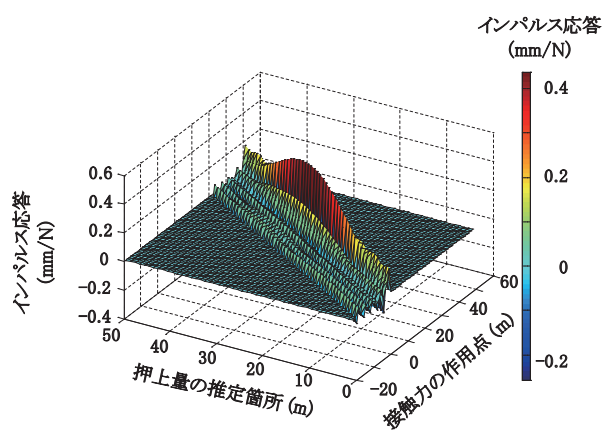
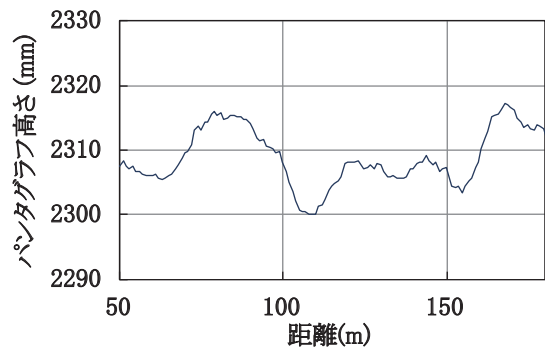


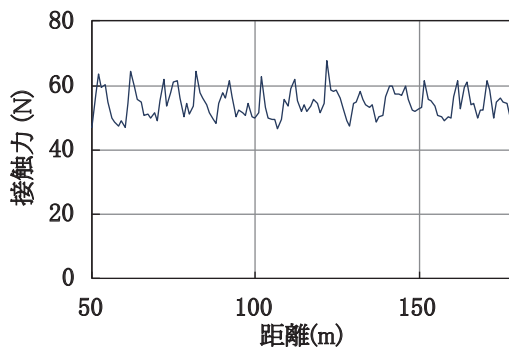
図8 インパルス応答行列

文献

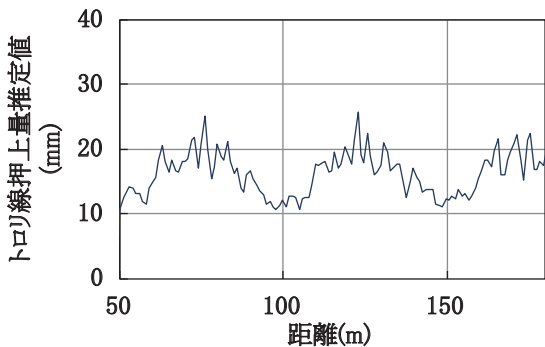
- 1) 池田充, 長坂整: 接触力の測定手法と架線設備診断への応用に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.16, No6, pp.45-50, 2002
- 2) 白田隆之: ニューラルネットワークによるパンタグラフ接触力とトロリ線摩耗との関係の学習, J-rail2001, pp.515-518, 2001.12
- 3) 根津一嘉, 他2名: 電車線路検査・状態監視への画像技術適用に関する動向調査, 鉄道総研報告, Vol.25, No4, pp.47-50, 2011
- 4) Marco Corfiati, et al.; "Evolution lines in the maintenance of rolling stock", Ingegneria Ferroviaria, pp.751-772, Vol. 66, No.9, 2011.
- 5) 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
- 6) 白田隆之, 池田充: 検測車データに基づいたトロリ線静高さの推定手法, D&D2013 講演論文アブストラクト集, pp.91, 2013.8
- 7) 真鍋克士: 架線・パンタグラフ系の運動シミュレーション, 平成7年電気学会産業応用部門全国大会, pp.S-39-42, 1995
- 8) 池田充: 架線・パンタグラフ間の接触力測定手法に関する研究 (第1報), 日本機械学会論文集 (C編), 70巻, 694号, pp.1636-1643, 2004



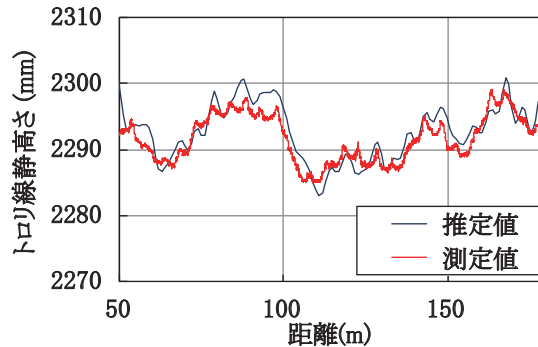
(a) パンタグラフ高さ



(b) パンタグラフ接触力



(c) トロリ線押上量



(d) トロリ線静高さ

図9 トロリ線静高さの推定結果
(伝達関数法, 実験結果)