

## 架線の振動測定によるパンタグラフの接触力推定手法

白田 隆之\* 池田 充\*

小山 達弥\* 山下 義隆\*

## Measurement Method of the Pantograph Contact Force in Overhead Catenary System

Takayuki USUDA Mitsuru IKEDA

Tatsuya KOYAMA Yoshitaka YAMASHITA

Although wear of contact wire is one of the most important problems in the catenary system maintenance, the wear mechanism of contact wire is very complicated, and there are many unsolved matters. We have started to research the quantitative effect of the pantograph contact force and the arc due to contact loss on the contact wire wear. However, the contact force of all pantographs which generate the contact wire wear in the measurement section must be measured in order to clarify the mechanism of contact wire wear. Measurement of the pantograph contact force by the inspection car is insufficient. The authors are developing the method which measures contact force of all pantographs passing the measurement section by placing sensors on catenary.

In this paper, the calculation and the experimental results of this measurement method are reported. The result of the research shows that this measurement method with sensors on catenary can measure the contact force up to 15Hz. It also indicates that the measurable frequency of the contact force depends on the number of sensors arrayed in the measurement section.

キーワード：架線，トロリ線，接触力，トロリ線摩耗，加速度，ハンガ軸力

## 1. はじめに

電車線保守においてトロリ線の摩耗抑制は重要課題の一つであるが、トロリ線摩耗はその形成機構が非常に複雑であり、未解明な事項が多い。トロリ線の摩耗形成に影響を与える要因としては、パンタグラフの動特性、パンタグラフ集電電流、すり板の材料特性、走行速度、架線構成、トロリ線表面状態などが挙げられる。より直接的には、上記要因によって生じるパンタグラフの接触力と離線アークがトロリ線摩耗と深い因果関係があることが予測されるが、その定量的関係は不明である。

そこで、鉄道総研ではトロリ線摩耗と接触力との定量的因果関係を明確にするため、架線に各種センサを設置し、測定区間を通過する全てのパンタグラフ接触力を推定する手法を開発した<sup>1)</sup>。本論文では、架線の振動測定によるパンタグラフ接触力推定手法と、その有効性について、数値計算および所内試験において検証を行った結果について報告する。

## 2. 接触力推定原理

架線における接触力の推定原理を以下に示す。(図1) まずトロリ線の挙動を、 $n$ 本のハンガ( $i=1 \sim n$ )で支持されている張力 $T$ の作用する弦として運動方程式の定式化を行う。パンタグラフ接触力を集中力 $F$ とみなし、 $\rho$ をトロリ線の線密度、 $T$ をトロリ線の張力、 $x_i$ を $i$ 番目のハンガ点の座標、 $h_i$ を $i$ 番目のハンガに作用する軸力、 $v$ を列車速度とすると、40Hz以下の低周波数領域ではトロリ線の挙動 $y(x,t)$ を

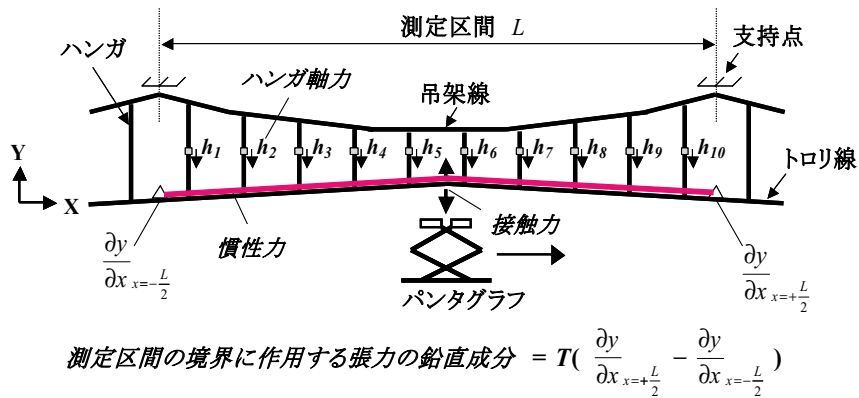
$$\sum_{i=1}^n h_i \delta(x-x_i) + \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = F(t) \delta(x-vt) \quad (1)$$

のように表現できる。測定区間の長さを $L$ とし、測定区間に1個のパンタグラフがあると仮定して式(1)を測定区間で積分すると次式を得る。

$$F(t) = \sum_{i=1}^n h_i - T \left( \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{L}{2}} - \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=\frac{L}{2}} \right) + \rho \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx \quad (2)$$

式(2)の右辺第1項は測定区間のハンガ軸力の合計である。第2項は測定区間の境界に作用するトロリ線張力の鉛直成分であり、測定区間両端のトロリ線傾斜により算

\* 鉄道力学研究部(集電力学)



$$\text{測定区間の境界に作用する張力の鉛直成分} = T \left( \frac{\partial y}{\partial x}_{x=L/2} - \frac{\partial y}{\partial x}_{x=-L/2} \right)$$

$$\text{接触力} = \text{ハンガ軸力合計} + \text{測定区間の境界に作用する張力の鉛直成分} + \text{慣性力}$$

図1 接触力推定概念図

出される。トロリ線の傾斜は測定区間両端に加速度計を2個隣接して配置することによって算出可能である。また、式(2)第3項は測定区間のトロリ線の慣性力である。その評価にはトロリ線上下加速度の空間分布が必要である。しかし、トロリ線加速度分布を空間的に連続に取得するのは現実的には困難であるため、 $p$ 箇所の加速度を用いて慣性力を推定することとし、式(2)を次式で近似する。

$$F(t) = \sum_{i=1}^n h_i - T \left( \frac{\partial y}{\partial x}_{x=L/2} - \frac{\partial y}{\partial x}_{x=-L/2} \right) + \sum_{j=1}^p w_j \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} \quad (3)$$

ここで $w_j$ は $j$ 番目の加速度点に対する等価質量に相当する慣性力補正係数とする。なお、3.1節で述べるシミュレーションによる検討では、慣性力補正係数の同定を時間領域において行ったが、3.2節に示す実験による検討では、時間領域と周波数領域でそれぞれ慣性力補正係数の同定を行った。

以下に、慣性力補正係数の同定手法について記述する。はじめに時間領域での慣性力補正係数の同定手法について述べる。まず、式表記の簡略化のため、以下のように定義する。

$$f_h(t) = \sum_{i=1}^n h_i \quad (4)$$

$$f_t(t) = -T \left( \frac{\partial y}{\partial x}_{x=L+\epsilon} - \frac{\partial y}{\partial x}_{x=L-\epsilon} \right) \quad (5)$$

$$a_j(t) = \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} \quad (6)$$

この時、式(3)は次式のように表される。

$$f(t) = f_h(t) + f_t(t) + \sum_{j=1}^p w_j a_j(t) \quad (7)$$

ここで、 $f(t)$ 、 $f_h(t)$ 、 $f_t(t)$ 、 $a_j(t)$ はシミュレーションもしくは実験結果から得られるので、式(7)から $w_j$ を定数とし

て最小二乗法により求めることができる。

次に、周波数領域での慣性力補正係数の同定手法について述べる。式(7)を周波数領域に変換すると、次式となる。

$$F(\omega) = F_h(\omega) + F_t(\omega) + \sum_{j=1}^p w_j A_j(\omega) \quad (8)$$

ここで、式(5)の両辺を $F(\omega)$ で割ると、

$$\frac{F_h(\omega)}{F(\omega)} + \frac{F_t(\omega)}{F(\omega)} + \frac{\sum_{j=1}^p w_j A_j(\omega)}{F(\omega)} = 1 \quad (9)$$

となる。式(9)を実部と虚部に分けると以下のように示すことができる。

$$\text{Re} \left[ \frac{F_h(\omega)}{F(\omega)} + \frac{F_t(\omega)}{F(\omega)} + \frac{\sum_{j=1}^p w_j A_j(\omega)}{F(\omega)} \right] = 1 \quad (10)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{F_h(\omega)}{F(\omega)} + \frac{F_t(\omega)}{F(\omega)} + \frac{\sum_{j=1}^p w_j A_j(\omega)}{F(\omega)} \right] = 0 \quad (11)$$

ここで、 $F(\omega)$ 、 $F_h(\omega)$ 、 $F_t(\omega)$ 、 $A_j(\omega)$ はシミュレーションもしくは実験結果から得られるので、式(10)、(11)から $w_j$ を定数として最小二乗法により算出する。

なお、本論文にて使用している慣性力補正係数は、時間領域、周波数領域をとわず、パンタグラフが測定区間を走行している間のデータを用いて同定したものである。

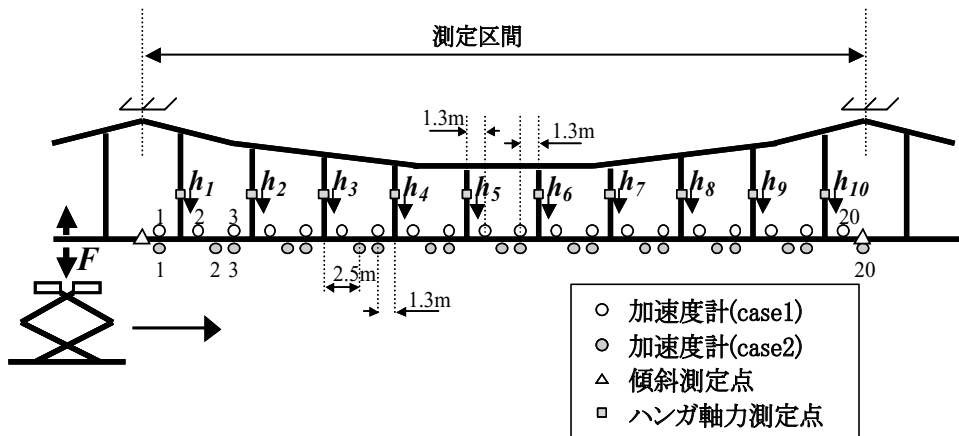


図2 センサ配置図 (シミュレーション)

### 3. 架線の振動測定によるパンタグラフ接触力推定

#### 3.1 シミュレーションによる検討

パンタグラフ走行シミュレーションから架線挙動およびパンタグラフ接触力を計算し、これを真値とみなして、2章の考え方に基づいて接触力推定手法の検証を行った。架線はシンプル架線とし、トロリ線と吊架線の張力はともに9.81kN、トロリ線と吊架線の線密度はそれぞれ0.99, 1.09kg/mとした。また、パンタグラフは標準的な在来線用パンタグラフとし、静押上力は54N、走行速度は130km/hとした。

上記の条件において計算したシミュレーションデータから式(3)右辺の各項を計算し、接触力の推定を行った。図2に示すように1径間を測定区間と設定し、シミュレーションで得られた各ハンガの軸力、測定区間両端のトロリ線の傾斜、トロリ線の上下加速度を与えて接触力を計算している。ただし、トロリ線上下加速度のデータ取得方法については以下の2種類の条件について検討を行った。

- (1) 各ハンガ点からx方向に±1.3mのトロリ線上下加速度を用いる場合 (case1)
- (2) 各ハンガ点からx方向に-1.3mと+2.5mのトロリ線上下加速度を用いる場合 (case2)

図3にトロリ線上下加速度に対する慣性力補正係数 $w_f$ の同定結果を示す。ここで、トロリ線上下加速度の測定点番号は図2の左から1番とした。図4に接触力推定結果の時刻歴波形を示す。図中のデータは、シミュレーションにより直接求めた接触力と、case1, case2の各方法で慣性力評価を行った接触力推定結果である。また、図5に接触力推定結果のパワースペクトルを示す。本結果からcase2の配置での検討結果の方が15Hz付近の周波数まで良好に推定ができていることが確認できる。

加速度計の計測位置について考察するため、シミュ

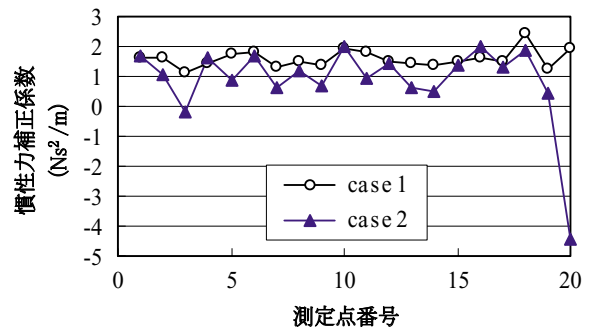


図3 慣性力補正係数同定結果

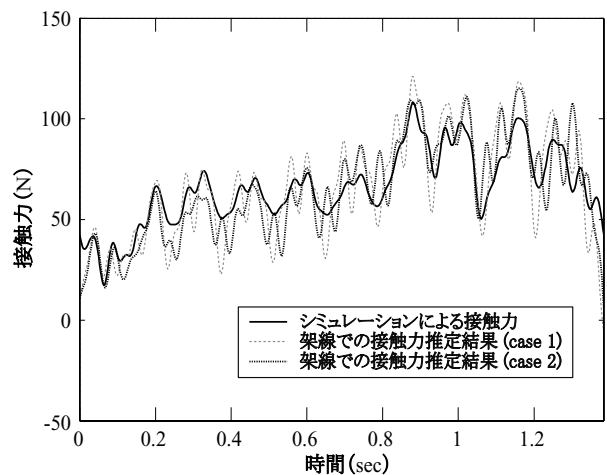


図4 接触力推定結果 (シミュレーション)

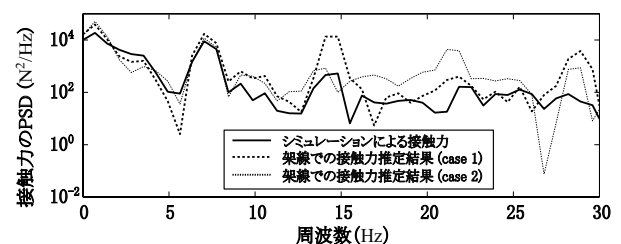


図5 接触力推定値のパワースペクトル

特集：電力技術

レーション結果をもとに、径間中央のトロリ線振動波形とトロリ線各点の上下振動のクロススペクトルを計算し、その実部を図6に示す。本図の横軸はトロリ線の位置を示しており、図の上部に示す架線モデル図のトロリ線位置に対応する。また、縦軸は周波数軸である。各周波数において径間中央のトロリ線と同位相で振動している箇所は濃く、逆位相で振動している箇所は淡い色で示されている。本図のa点に着目すると、10Hz付近では隣り合うハンガ間で濃淡が逆になっており、ハンガ毎に逆位相で振動していることがわかる。したがって、半波長分の振動が1ハンガ間に含まれる振動モードと考えられ、ハンガ点中間のトロリ線加速度を測定することにより、この振動モードを捉えることが可能である。次に、b点に着目すると、22Hz付近ではハンガ間に濃淡が2色ずつ示されている。したがって、1波長分の振動が1ハンガ間に含まれている振動モードとなっており、ハンガ点から1.3mのトロリ線加速度を測定することにより、この振動モードの腹を捉えることが可能である。以上の検証からも、比較的低周波数域での接触力推定にはcase2の加速度計の配置が望ましいといえる。

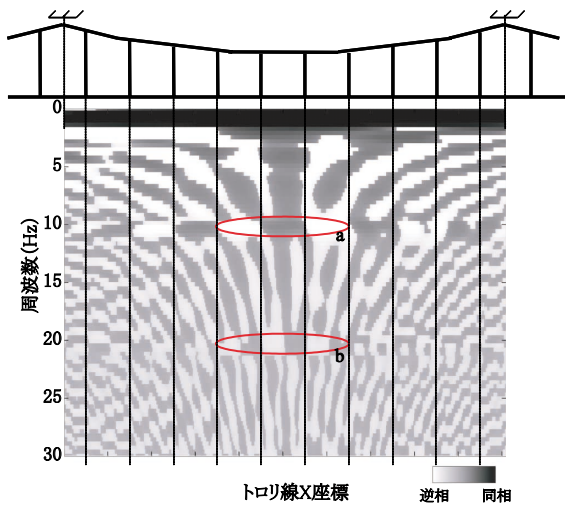


図6 架線振動のクロススペクトル実部

3.2 集電試験装置での試験結果

接触力推定手法の検証を鉄道総研の集電試験装置において行った。集電試験装置は、全長500mの架線を設置した走行路をパンタグラフ実機を搭載したリニアモータ駆動の台車が走行可能な試験装置で、最高速度は200km/hである。架線種別は3.1節と同じくシンプルカテナリ架線、測定区間は25m、加速度計の配置法は前節での検討結果からcase2としたがセンサ数は減らしている。また、ハンガ軸力はハンガバーに接着した歪みゲージにより測定を行った。集電試験装置におけるセンサ配置を図7に、試験状況を図8にそれぞれ示す。

地上側からの接触力推定と平行して、パンタグラフの舟体上面に3分力計を介してすり板を取付けることにより、パンタグラフにおいても接触力測定を行った。その際、すり板に取り付けた加速度計の出力からすり板の慣性力の補正も行った。パンタグラフの静押上力は54N、走行速度は80、120、160km/hで試験を実施した。慣性力補正係数の算出には上記3種類の速度での走行結果より得られたデータを使用した。なお、本節における接触力の推定には、時間領域と周波数領域でそれぞれ同定を行った慣性力補正係数を使用している。時間領域で同定する慣性力補正係数は各試番毎の走行時間で時刻歴信号の正規化を行い、式(7)より算出した。また、周波数領域で同定する慣性力補正係数は各試番から得られるスペクトルの平均値から式(10)、(11)を用いて算出した。慣性力補正係数の算出結果を図9に示す。

120km/hでの走行試験の測定データおよび周波数領域で同定を行った慣性力補正係数を用いて、接触力の推定を行った結果を図10に示す。支持点マーカ以外の測定値は全て15HzのLPフィルタを適用している。本結果から、測定区間外にパンタグラフがある状況でも架線からの接触力推定値が0Nになっていないことがわかる。この主な要因は、トロリ線の加速度測定点数が少ないために慣性力に誤差が含まれていることが考えられる。しかし、パンタグラフが測定区間内にある場合の接触力推定結果は良好である。パンタグラフが測定区間内にある時の接

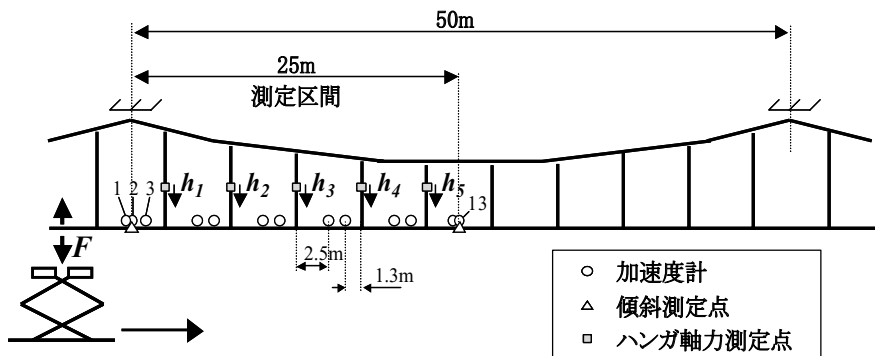


図7 センサ配置図 (集電試験装置試験)

触力推定結果を図11(a)～(c)に示す。各図は走行速度が80, 120, 160km/hにおける走行結果である。各信号にはそれぞれ15HzのLPフィルタを適用した。また、図12に接触力の推定精度を示す。図11, 図12から15Hz以下の周波数域においては架線に取り付けたセンサによって測定区間を通過するパンタグラフの接触力が精度良く推定できていることがわかる。また、図12より慣性力補正を行わない場合でも、5Hz以下程度の周波数までは接触力の推定が可能であることがわかる。したがって、慣性力補正用の加速度計を多数設置しなくても、通過するパンタグラフの平均揚力であれば十分に測定可能である。

なお、今回の検討では慣性力補正係数の同定を時間領域で行った場合と周波数領域で行った場合とで、明確な優劣は見受けられなかった。精度向上をはかるため、慣性力補正係数の同定方法については今後も検討を進めていきたい。

#### 4. まとめ

本論文では架線の振動測定によるパンタグラフ接触力推定手法について、数値計算と実験より検討し、本手法が接触力の推定手法として有効であることを確認した。今後は本手法を現車に適用し、走行車両の接触力の推定を試みる予定である。



図8 集電試験装置での試験状況

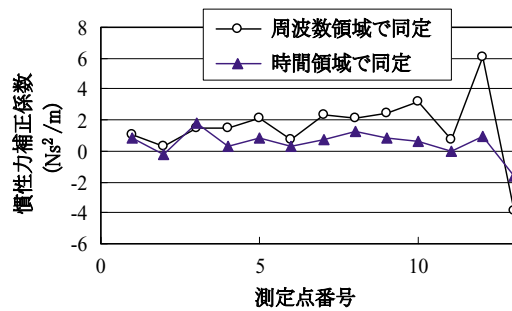


図9 慣性力補正係数同定結果

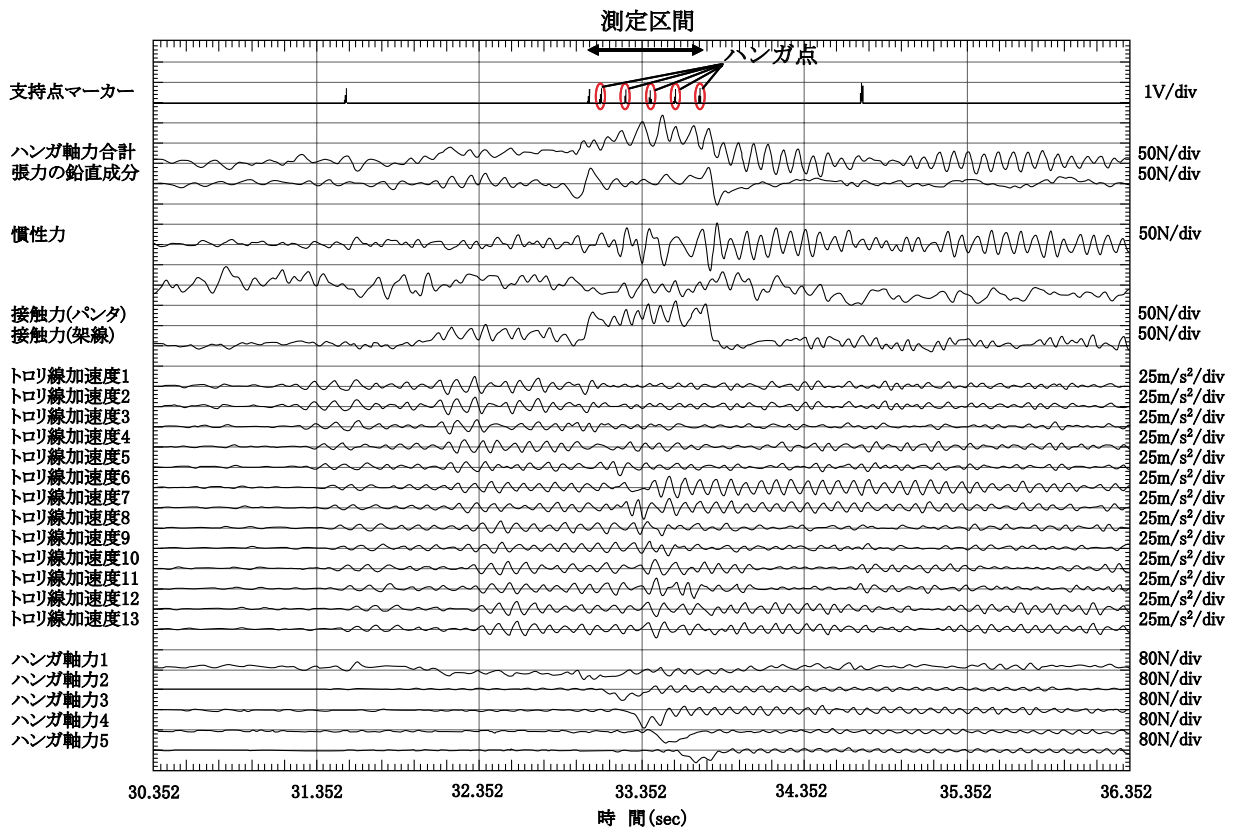
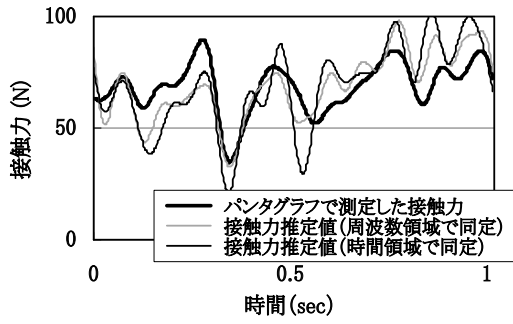
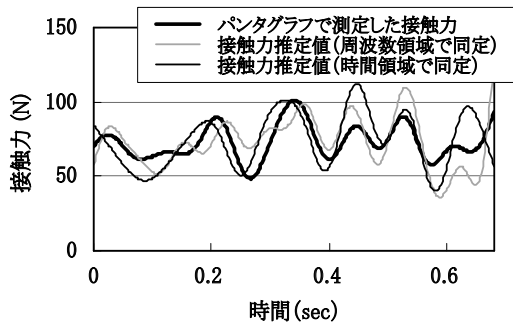


図10 測定データおよび接触力の推定結果 (120km/h)

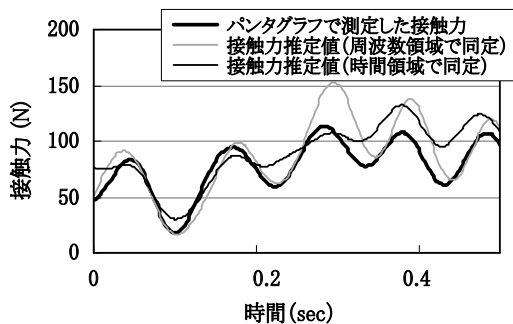
特集：電力技術



(a) 80km/h



(b) 120km/h

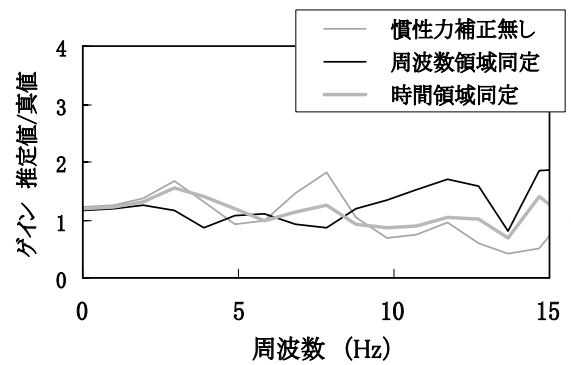


(c) 160km/h

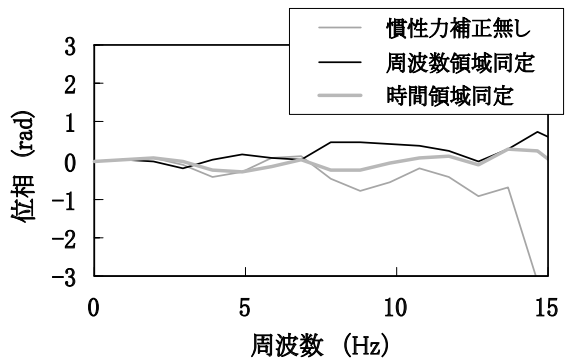
図 11 接触力推定結果（集電試験装置試験）

なお、本研究の最終的な目標は、架線での接触力推定結果を、離線アーク測定結果、トロリ線摩耗測定結果と比較対照することにより、トロリ線摩耗に対する接触力と離線アークの影響度を定量的に評価し、これを用いてトロリ線の寿命予測や寿命短絡因子を特定するとともに、接触力の評価基準を作成することである。

また、本手法を用いればパンタグラフに作用する揚力を全て含んだ接触力を測定することができる。そこで、本手法により接触力の定点測定を行い、パンタグラフの異常監視に活用することも検討中である。



(a) ゲイン



(b) 位相

図 12 接触力の推定精度（160km/h）

文献

- 1) 臼田 隆之, 他 2 名：逆問題解析によるパンタグラフ接触力の推定, 第 19 回計算力学講演会, pp.411-412, 2006.11
- 2) 久須美 俊一, 他 3 名：300km/h 超域に対応する架線系の技術開発, RRR, pp.18-21, 2007.7