

営業線におけるパンタグラフ接触力の地上モニタリング

白田 隆之* 池田 充*
山下 義隆* 源 導士**

Pantograph Contact Force Monitoring on Commercial Lines

Takayuki USUDA Mitsuru IKEDA
Yoshitaka YAMASHITA Michihito MINAMOTO

Although the wear of contact wire is one of the most important problems for maintenance of an overhead catenary system, the wear mechanism of the contact wire is very complicated, and many unsolved problems still exist. The authors have studied on the quantitative effect of the pantograph contact force and the arc due to contact loss on the contact wire wear. For this purpose, the authors have developed a method, by which contact forces of all pantographs are measurable during the train passing on sections where sensors installed on the catenary. This paper reports some results of the contact force measured on Shinkansen commercial lines. Furthermore, a contact wire wear progression model which was derived from these data is described. The method is adaptable to evaluate the satisfactory function of pantograph as well.

キーワード：パンタグラフ，接触力，離線アーク，地上モニタリング，トロリ線摩耗

1. はじめに

電車線設備は鉄道特有の長尺設備であるため、電車線の保守にはコストと時間を要している。その中でも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る。トロリ線の摩耗形成の要因としては主なものでも、パンタグラフの特性、パンタグラフ集電電流、すり板の特性、走行速度、架線種別、架線構成、トロリ線表面状態などが挙げられ、これらの要素がそれぞれ関連しあい、トロリ線摩耗に影響を及ぼしている。また、接触力やパンタグラフの離線に伴って発生するアークがトロリ線摩耗へ大きな影響を与えていることは過去の研究により確認されているが、これらの定量的関係は不明である。

そこで筆者らはトロリ線摩耗メカニズムの解明やパンタグラフのモニタリングを目的として、架線にセンサを設置し、測定区間を通過するパンタグラフの接触力を測定する手法¹⁾を開発した。本報告では新幹線営業線において本手法による接触力測定と離線アーク測定²⁾を同時に実施し、本手法の妥当性を検証した結果について報告する。さらに、同区間におけるトロリ線摩耗測定試験を実施し、接触力、離線アーク、トロリ線摩耗進行量を定量的に比較することによって、トロリ線摩耗進行予測モデルの構築を試みた結果についても言及する。

* 鉄道力学研究部（集電力学）

** 東日本旅客鉄道株式会社

また、本接触力測定手法が定点でのパンタグラフの異常モニタリングにも応用可能であることを示すとともに、センサ数を省略したケースにおいても平均接触力の推定が可能であることを示す。

2. 接触力測定手法

2.1 接触力測定原理

架線にセンサを設置して接触力を測定する手法の原理を図1に示す。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の作用する弦とみなして運動方程式の定式化を行う。パンタグラフの接触力を集中力 f とみなし、 $\delta(\cdot)$ をデルタ関数、 x を水平方向の座標、 y を x におけるトロリ線の上下変位、 ρ 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 x 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、トロリ線の挙動を

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

と表現できる。測定区間の長さを L とし、測定区間の始点と終点の座標をそれぞれ $x=L/2$, $x=-L/2$ とおくと、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。

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

特集：電力技術

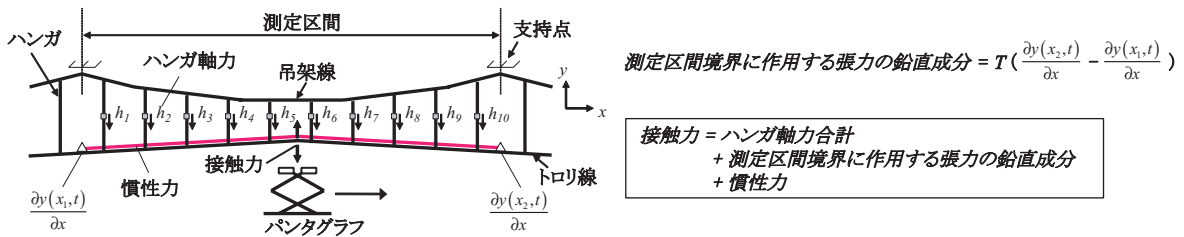


図1 接触力の測定原理

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計測可能である。また、式(2)右辺第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。

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

ここで w_j は j 番目の加速度測定点に対する等価質量を表す慣性力補正係数とする。この場合、測定可能周波数は加速度計の設置密度に大きく依存する。本報告ではハンガ周期に依存する接触力変動をとらえることを目標とし、測定可能周波数範囲を DC ~ 14Hz に設定した。

2.2 慣性力補正係数の同定手法

本節では慣性力補正係数の同定手法について説明する。センサ仮設完了後の架線に対して加振点を変えながら加振試験を繰り返し行い、加振力、ハンガ軸力、加速度から慣性力補正係数を周波数領域で同定した。

接触力からハンガ軸力とトロリ線張力の鉛直成分を除いたものを $f_{ina}'(t)$ とおき、 j 番目のトロリ線の加速度を $a_j(t)$ とすると、式(3)は次式のように表される。

$$f(t) - \sum_{i=1}^n h_i + T \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=\frac{L}{2}} - \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{L}{2}} \right) = f_{ina}'(t) = \sum_{j=1}^p w_j a_j(t) \quad (4)$$

式(4)を周波数領域に変換すると、次式となる。

$$F_{ina}'(\omega) = \sum_{j=1}^p w_j A_j(\omega) \quad (5)$$

ここで、式(5)の両辺を $F_{ina}'(\omega)$ で割ると、

$$\frac{\sum_{j=1}^p w_j A_j(\omega)}{F_{ina}'(\omega)} = 1 \quad (6)$$

となる。 $F_{ina}'(\omega)$ 、 $A_j(\omega)$ は加振試験結果から得られるので、式(6)を実部と虚部に分け、 w_j を実定数として最小二乗法により算出する。

3. 営業線における接触力測定結果

3.1 慣性力補正係数の同定試験結果

前章の測定方法にしたがって、新幹線営業線において接触力測定試験を実施した。軸力測定用ハンガと加速度計は図2に示すように設置した。センサの設置完了後に、14箇所の加振試験データを使用して、式(6)に基づいて慣性力補正係数を同定した。同定した慣性力補正係数を使用して、同定に使用していない加振試験データから式(3)より接触力を推定した例を図3(a)に示す。また、図3(b)は式(3)右辺の各項の値である。本結果から接触力の推定結果と実際の加振力が良く一致していることが確認できる。加振試験での接触力推定精度の周波数特性を図4に示す。図4(a)接触力測定のゲイン、図4(b)は位相である。本結果から目標とする周波数範囲では、多少のばらつきはあるものの概ね正確に接触力が推定できていることが確認できる。

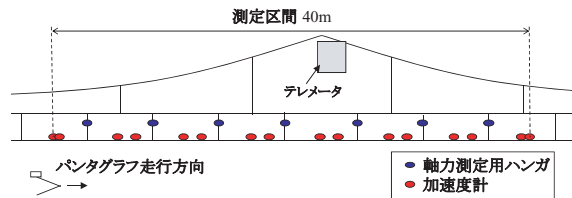


図2 接触力測定用センサの配置

3.2 接触力および離線アーク測定結果

3.1節で同定した慣性力補正係数を使用して、接触力測定試験を実施した。また、接触力測定値の検証のために接触力測定区間の沿線に紫外線検出式離線測定器を設置して離線アーク測定も合わせて実施した。接触力測定試験の様子を図5に、離線アーク測定試験の様子を図6にそれぞれ示す。図7に測定結果の1例を示す。本図は238km/hでパンタグラフ4台が通過した際の測定結果である。本図では、架線に設置した複数の加速度計の信号を利用してパンタグラフの位置を特定することにより、接触力と離線アークの信号を時間サンプリングから距離サンプリングのデータに変換した。図7(a)は測定区間の架線構造を示し、図7(b)~(e)はそれぞれ上から第1パンタグラフの接触力~第4パンタグラフの接触力を示し、赤い線は紫外線検出式離線測定器による測定結果で

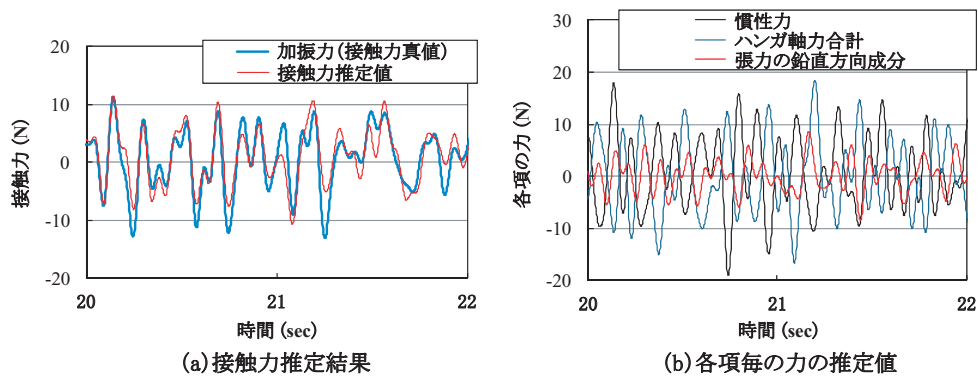


図3 加振試験データを用いた接触力測定結果

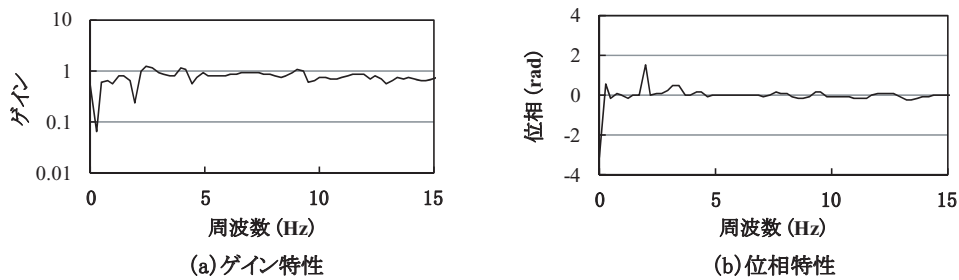


図4 接触力測定の周波数特性

ある。接触力が0近傍の箇所において離線アークが発生しているケースが多いことから、接触力測定の妥当性が確認できる。ただし、接触力0近傍の箇所です必ず離線アークが発生しているわけではないが、この理由はパンタグラフが2台ずつ高压母線で接続されているためである。

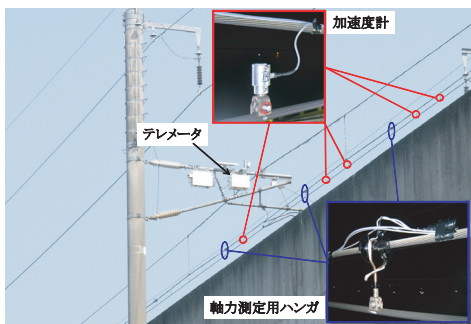


図5 現地試験の様子（接触力測定）

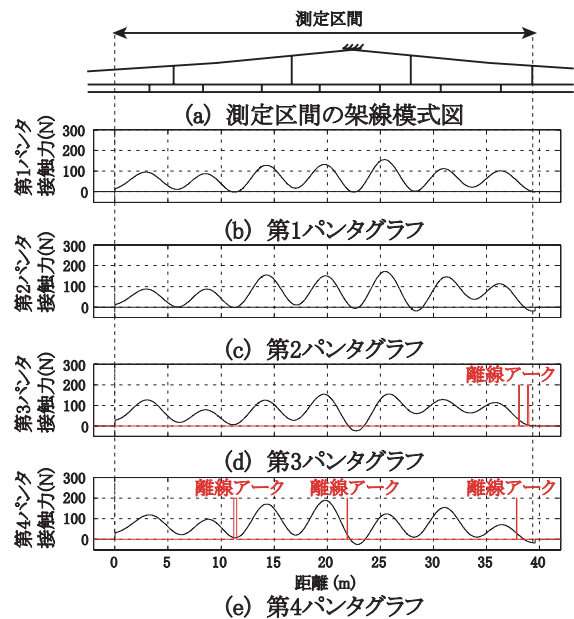


図7 接触力と離線アークの測定結果



図6 現地試験の様子（離線アーク測定）

3.3 トロリ線摩耗との対比結果

パンタグラフ接触力と離線アークがトロリ線摩耗進行に与える定量的影響を検討するため、前述の測定方法を使用して測定区間Aと測定区間Bの2箇所においてパンタグラフ接触力と離線アークを測定する継続的な試験を実施した。また、同区間においてトロリ線の摩耗残存径の調査も行った。パンタグラフ接触力、離線アークとトロリ線摩耗残存径の比較を行った結果を図8と図9に示す。図8は測定区間Aにおける368台の通過パンタグラ

特集：電力技術

アの測定結果を集計したデータ、図9は測定区間Bにおける751台の通過パンタグラフの測定結果を集計したデータである。図8(a)は測定区間の架線構造を示し、図8(b)は別途測定した同区間のトロリ線摩耗残存径である。また、トロリ線0.1m毎の離線アーク発生回数とその前後0.5mずつの移動平均および測定した全てのパンタグラフのトロリ線0.1m毎の平均接触力を図8(c)と図8(d)にそれぞれ示す。図9の図の構成も図8と同様である。

図8に示したデータから、測定区間Aにおいてはトロリ線の摩耗進行の進んでいる箇所は接触力が低く、離線アークの発生頻度が高い傾向があることがわかる。このことから、測定区間Aの場合は、離線アークの発生がトロリ線の摩耗に大きな影響を与えていることが推測される。一方、図9に示したデータでは、測定区間Bではトロリ線の摩耗進行の進んでいる箇所は接触力が大きく、離線アークとトロリ線の摩耗量との相関性は見受けられないことがわかる。以上から測定区間Bにおいては著大な接触力による機械的な摩耗がトロリ線の摩耗に大きな影響を与えていることが推測される。

これらのデータを使用して測定区間ごとに摩耗マップを作成した。この摩耗マップは単位長さのトロリ線に加わる熱量を近似的に表わす変数として、アーク離線の発生確率を速度で除した値と、接触力の2つの変数を選び、これに対してトロリ線の年間面積摩耗率をプロットしたものである。なお、年間面積摩耗率は張替え直後から現在に至るまで面積摩耗率が一定と仮定して、1年間当たりの摩耗量を計算した。測定区間Aと測定区間Bの摩耗

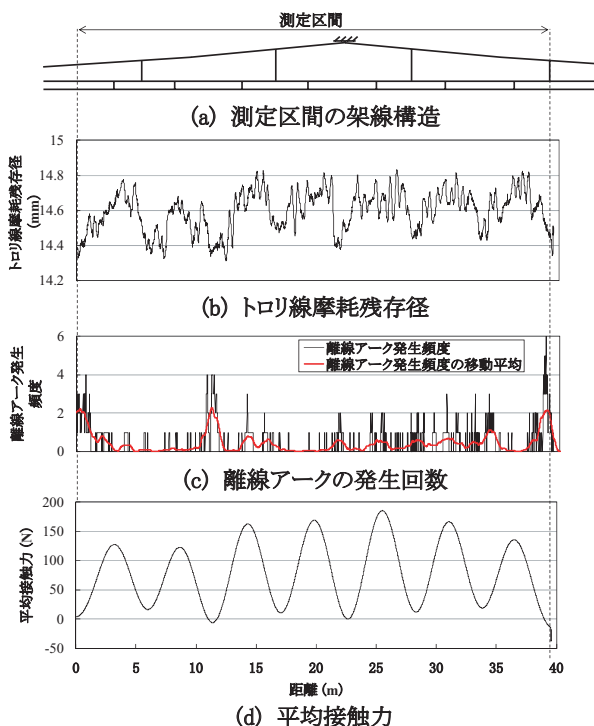


図8 トロリ線の摩耗残存径と離線アーク発生頻度ならびに平均接触力の関係（測定区間A）

マップをそれぞれ図10と図11に示す。本データからも測定区間Aでは離線アークの発生確率の高い箇所のトロリ線摩耗が進んでおり、測定区間Bでは接触力の高い箇所のトロリ線摩耗が進んでいることが確認できる。

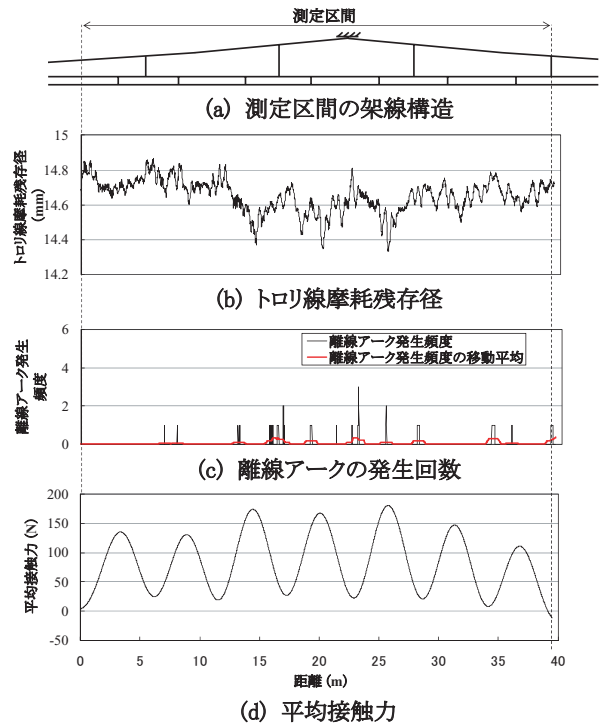


図9 トロリ線の摩耗残存径と離線アーク発生頻度ならびに平均接触力の関係（測定区間B）

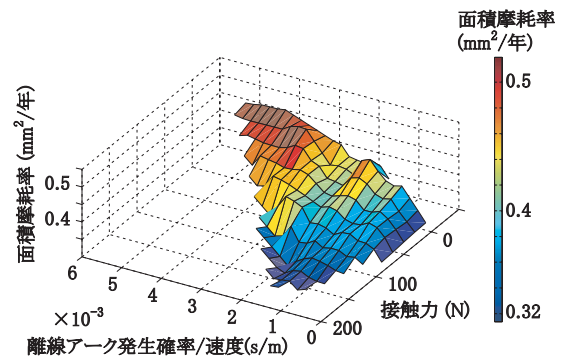


図10 接触力と離線アーク発生確率に対するトロリ線摩耗量の関係（測定区間A）

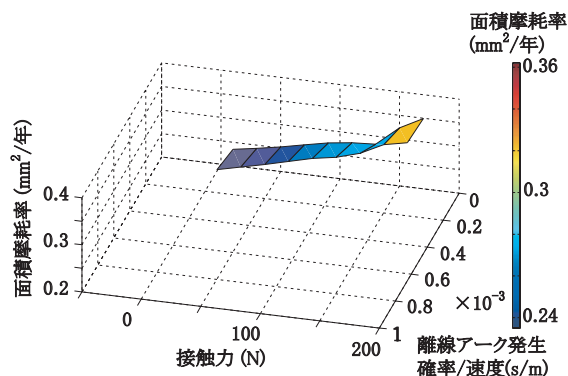


図11 接触力と離線アーク発生確率に対するトロリ線摩耗量の関係（測定区間B）

3.4 トロリ線摩耗予測モデルの検討

前節のデータを使用して、トロリ線摩耗予測式の検討を行った。BRUNIらによって提案されている予測式³⁾を参考に、BRUNIの式においては検討されていない離線アークによる摩耗への影響の項を新たに追加した予測式を構築した。

この予測式では、トロリ線摩耗が接触力、離線アーク、およびトロリ線とすり板間の接触抵抗によってそれぞれ発生する発熱量によって決定すると仮定する。

まず、接触力により単位長さあたりのトロリ線に加えられる熱量に起因して1年間に進行する摩耗断面積 w_f は

$$w_f = k_1 \mu \left(1 + \frac{i}{i_0}\right)^\alpha F \quad (7)$$

とした。ここで、 k_1 は接触力により発生する熱量から年間のトロリ線摩耗断面積へ変換する定数とし、 μ は動摩擦係数、 α は通電による摺面の潤滑に関する定数、 i はパンタグラフの集電電流、 i_0 は基準電流、 F はパンタグラフの接触力である。

離線アークにより単位長さ当たりのトロリ線に加えられる熱量に起因して1年間に進行する摩耗断面積 w_a は

$$w_a = k_2 V^* \frac{i\varepsilon}{v} \quad (8)$$

とした。ここで、 k_2 は離線アークにより発生する熱量から年間のトロリ線摩耗断面積へ変換する定数とし、 ε は各点における離線アーク発生確率、 v はパンタグラフの速度である。 V^* はアーク発生時のトロリ線・すり板間の電位差で、本報告では定数と仮定する。

トロリ線とすり板との接触抵抗によりトロリ線に加えられる熱量に起因して1年間に進行する摩耗断面積 w_r は

$$w_r = k_3 R \frac{i^2}{v} \quad (9)$$

とした。ここで、 k_3 はトロリ線とすり板との接触抵抗により発生する熱量から年間のトロリ線摩耗断面積へ変換する定数である。 R はトロリ線と走行中のすり板との接触抵抗であり、本報告では定数と仮定する。

式(7)～(9)より1年間に進行するトロリ線の摩耗断面積 w を次式のようにモデル化した。

$$w = w_f + w_a + w_r = A_f \left(1 + \frac{i}{i_0}\right)^\alpha F + B_a \frac{i\varepsilon}{v} + C_R \frac{i^2}{v} \quad (10)$$

ただし、 $A_f = k_1 \mu$ 、 $B_a = k_2 V^*$ 、 $C_R = k_3 R$ とする。なお、本試験ではパンタグラフの集電電流を測定していないため、ここでは線路勾配から測定区間Aでは160A、測定区間Bでは120Aと仮定した。

式(10)の各定数 A_f 、 B_a 、 C_R を実測データから同定し、

トロリ線の面積摩耗率を推定した結果を図12と図13に示す。各図の上段が年間のトロリ線摩耗断面積の実測値と推定値である。本結果から、式(10)に基づいて推定したトロリ線摩耗断面積は実測値と比較的一致しており、本報告で提案する摩耗予測モデルの妥当性が確認できる。なお、図12～13の下段に式(7)～(9)をそれぞれ計算した結果を示す。

ただし、今回の検討では試験期間中の摩耗進行量が小さく、試験期間前後のトロリ線残存径の差を正しく評価することが難しかった。そこで、新線時から年間の面積摩耗率が一定で摩耗が進行したと仮定して面積摩耗率を算出したため、トロリ線架設後の列車編成やランカーブの変化、摩耗進行過程の接触面圧変化に伴う摩耗形態の変化などが考慮できていない。今後、継続試験によって測定期間中の摩耗進行量を予測式の同定に使用するとともに、集電電流についても現地試験においてデータを直接取得し、摩耗予測モデルの精度向上を図る予定である。

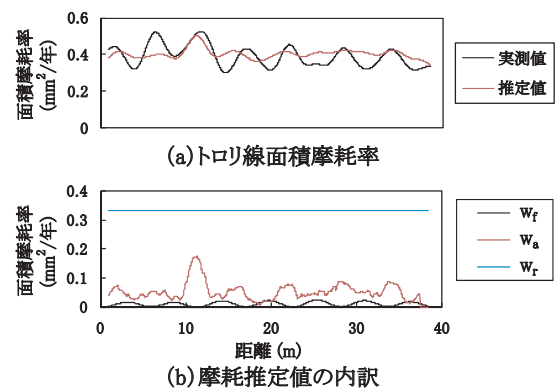


図12 トロリ線摩耗の要因分析（測定区間A）

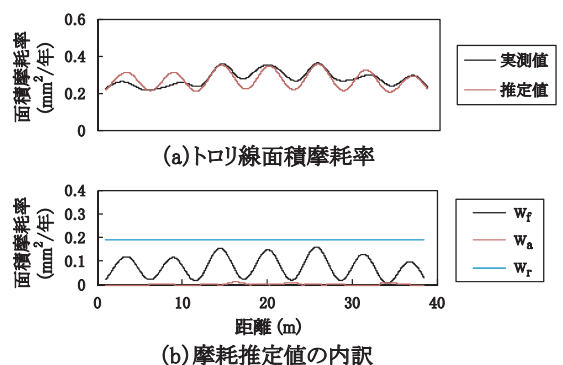


図13 トロリ線摩耗の要因分析（測定区間B）

4. パンタグラフの異常監視の検討

通過するパンタグラフの接触力を地上設備で測定可能であれば、パンタグラフの揚力異常やパンタグラフの動特性異常の検知に適用できる可能性がある。パンタグラフの揚力異常はパンタグラフの平均接触力から検出可能であり、動特性異常については接触力の標準偏差や最大

特集：電力技術

値などから検出できると考えられる。そこで、今回の現地試験で得られたデータのうち特定の編成のデータに着目し、平均接触力と接触力標準偏差の速度特性の検討を行った。

特定形式のパンタグラフが通過した際の平均接触力と接触力標準偏差の速度特性を算出した結果を図14 (a), (b) にそれぞれ示す。図14 (a) には当該パンタグラフの揚力特性を風洞試験で測定した結果も合わせて示した。本結果から、今回得られた平均接触力は風洞試験結果よりも若干大きい傾向が見られた。この理由としては、接触力測定の測定誤差、風洞試験と現車とのパンタグラフ近傍の流れ場の違いなどが考えられるが、現時点でははっきりとした原因は不明である。しかしながら、通過パンタグラフの揚力特性を定量的に評価することは十分可能であると思われる。一方、図14 (b) からパンタグラフの接触力標準偏差の速度特性はばらつきが少ないことがわかり、接触力標準偏差からパンタグラフの動特性異常を検出できる可能性が見込まれる。

また、本報告の接触力測定法を簡略化し、図15のように測定区間内部の加速度計を取り除いて、慣性力補正を省略した場合の平均接触力の推定結果を図16に示す。図中の直線は慣性力補正なしで求めた平均接触力が慣性力

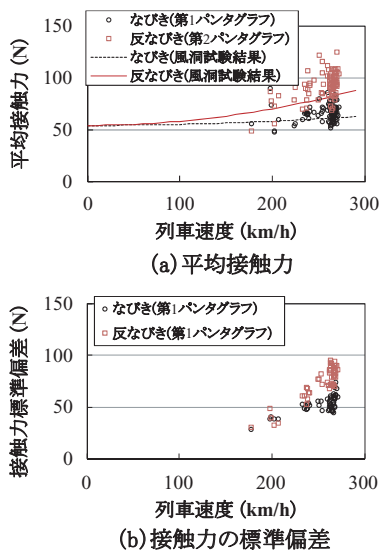


図14 接触力の速度特性

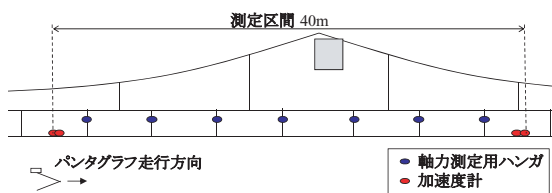


図15 慣性力補正を省略した場合のセンサ配置

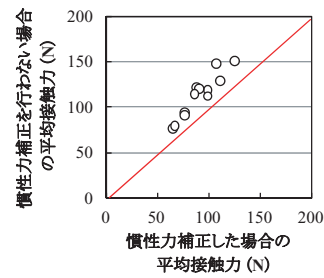


図16 慣性力補正しない場合の平均接触力の推定精度

補正を行った場合の平均接触力と一致している箇所である。本結果から、慣性力を無視しても平均接触力の大まかな推定が可能であることが確認できる。

5. まとめ

本報告では架線にセンサを設置し、測定区間を通過するパンタグラフの接触力を測定する手法と、新幹線営業線で実施した試験の結果を報告した。試験結果より以下のことがわかった。

- (1) 接触力測定と同時に実施した離線アーク測定の両データの比較から、提案した接触力測定手法が概ね妥当であることを確認した。
- (2) 接触力測定と離線アーク測定を同時に実施するとともに、別途トロリ線摩耗測定を実施し、これらデータからトロリ線摩耗予測式を提案した。提案した摩耗予測式は摩耗形態の異なる2つのドラムのトロリ線摩耗の傾向を表現できることを確認した。
- (3) 提案した接触力測定手法をパンタグラフ異常の地上監視に適用できる可能性を示した。
- (4) 提案した接触力測定手法は、慣性力を無視しても平均接触力を近似的に得ることが可能であることを確認した。

文献

- 1) 白田隆之, 他3名:「架線の振動測定によるパンタグラフの接触力推定手法」, 鉄道総研報告, No.21, Vol.10, pp.41-46, 2007
- 2) 白田隆之, 他3名: 紫外線検出式地上離線測定装置の開発, 鉄道技術連合シンポジウム, pp.511-514, 2008.9
- 3) S. Bruni, G. Bucca and A. Collina: Pantograph-catenary dynamic interaction in the medium-high frequency range, Vehicle System Dynamics Supplement Vol.41, pp.697-706, 2004.