

# 架線に取り付けたセンサによるパンタグラフ接触力推定

鉄道力学研究部 集電力学

副主任研究員 臼田 隆之

## 1. はじめに

電車線保守においては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、これらの要因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ものと思われる。特に、パンタグラフの接触力と離線によるアークはそれぞれ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、これら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の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逆問題的に推定する手法を開発した<sup>(1)</sup>。本発表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の紹介と、本手法の有効性について、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。

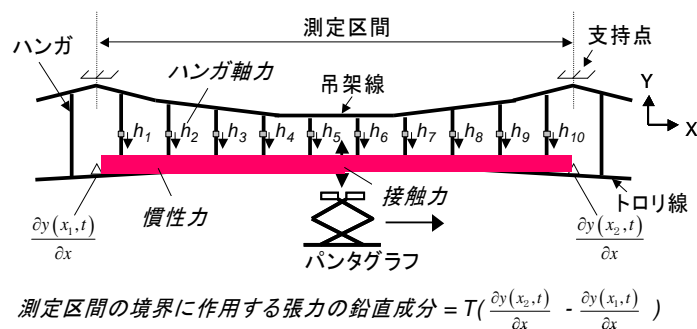
## 2. 接触力推定原理

架線における接触力推定の原理を以下に示す。測定区間の架線を、 $n$ 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  $F$ を集中力とみなし、 $\rho$ 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、数 10Hz 以下の低周波数領域ではトロリ線の挙動  $y(x,t)$ は

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

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。

$$F(t) = \sum_{i=1}^n h_i - T \left( \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=x_2} - \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=x_1} \right) + \rho \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx \tag{2}$$



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

図1 接触力測定概念図

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隣接する加速度計を2個配置することによって算出可能である。また、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、空間的に連続なトロリ線加速度分布を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。

$$F(t) = \sum_{i=1}^n h_i - T \left( \frac{\partial y}{\partial x_{x=x_2}} - \frac{\partial y}{\partial x_{x=x_1}} \right) + \sum_{j=1}^p w_j \frac{\partial^2 y_j}{\partial t^2} \quad (3)$$

ここで  $w_j$  は  $j$  点目の加速度に対する慣性力補正係数とする。なお、3.1節で紹介するシミュレーションでの検討において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節に示す集電試験装置での試験結果ではパンタグラフ側で測定を行った接触力を真値として、周波数領域で慣性力補正係数の同定を行った。

### 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それぞれ 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)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、支持点直下の傾斜、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、慣性力の推定精度に影響を与える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)測定区間内で等分布の50点のトロリ線上下加速度を用いる場合(50点)
- (2)ハンガ点から  $x$  方向に  $-1.3\text{m}$  と  $+2.5\text{m}$  のトロリ線上下加速度20点を用いる場合(20点)

図3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、50点の加速度または20点の加速度で慣性力評価を行った接触力推定結果である。また、図4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50点の加速度を使用した場合は接触力時刻歴波形はシミュレーションの接触力と良く一致し、周波数特性も 30Hz 程度ま

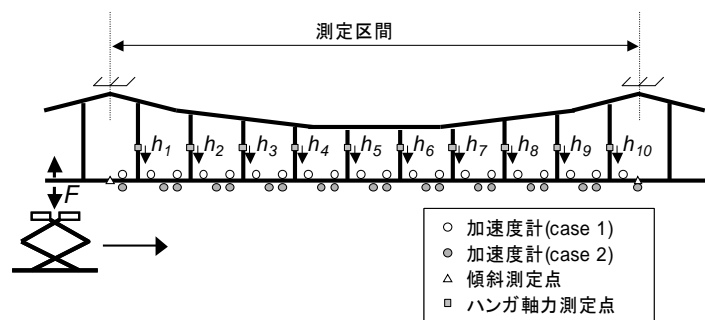


図2 センサ配置図 (シミュレーション)

で推定ができることがわかるが、実際の測定を念頭においた場合、50点の加速度を測定することは現実的ではない。しかし、20点の加速度を使用した場合は時刻歴では誤差は増えているが、図4から15Hz以下の周波数域まで推定ができていることが確認できる。以上の結果から本手法の有効性が確認できる。

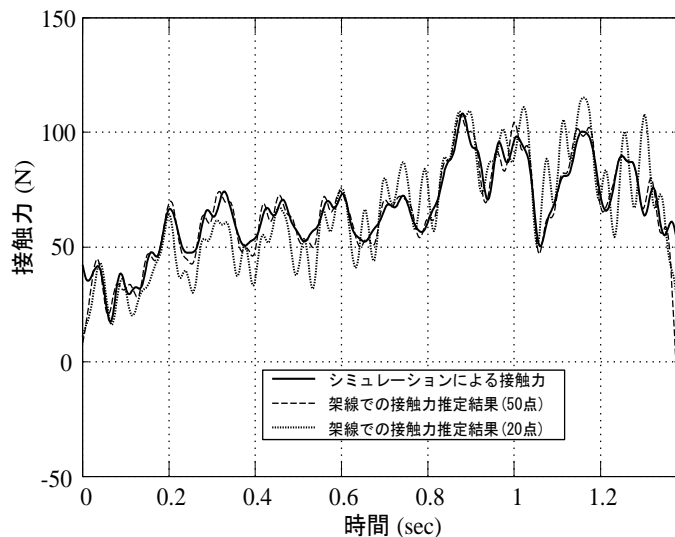


図3 接触力推定結果 (シミュレーション)

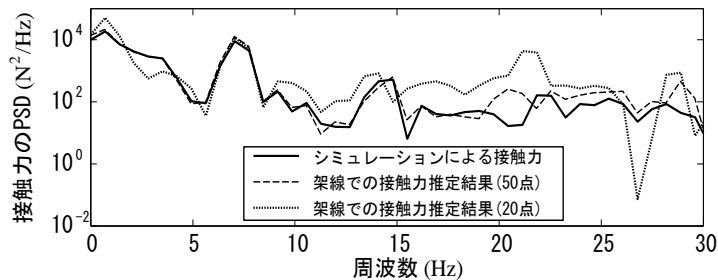


図4 接触力推定精度 (シミュレーション)

### 3.2 集電試験装置での試験結果

架線における接触力測定手法の検証を集電試験装置で行った。架線条件は3.1節と同様とし、測定区間は25m、センサは図5に示す構成で配置した。

地上側からの接触力測定と平行して、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。パンタグラフの静押上力は54N、走行速度は80~160km/hで試験を実施した。

接触力の推定結果を図6(a)に示す。本結果は走行速度が120km/hでの走行時の接触力推定結果である。各信号にはそれぞれ15Hzのローパスフィルタを適用した。また、図6(b)に接触力の

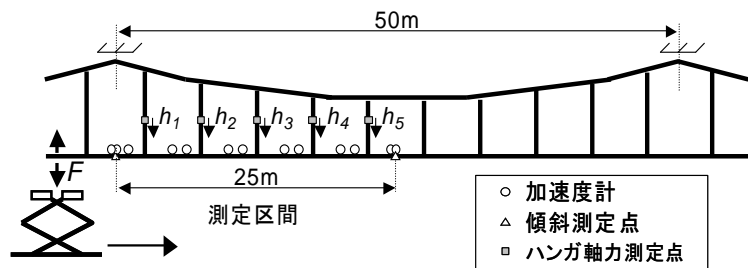


図5 センサ配置図 (集電試験装置試験)

推定精度を示す。本図から、トロリ線の慣性力補正を行った場合は 15Hz 以下の周波数域においては、測定区間を通過するパンタグラフの接触力が推定できていることがわかる。また、慣性力補正なしの場合でも、約 6Hz 以下の低周波数域の接触力は概ね得られている。つまり、平均揚力の推定であれば測定区間両端部の加速度計と、測定区間内の軸力測定用ハンガのみでもおおまかに推定できると思われ、本手法についても現在検討中である。

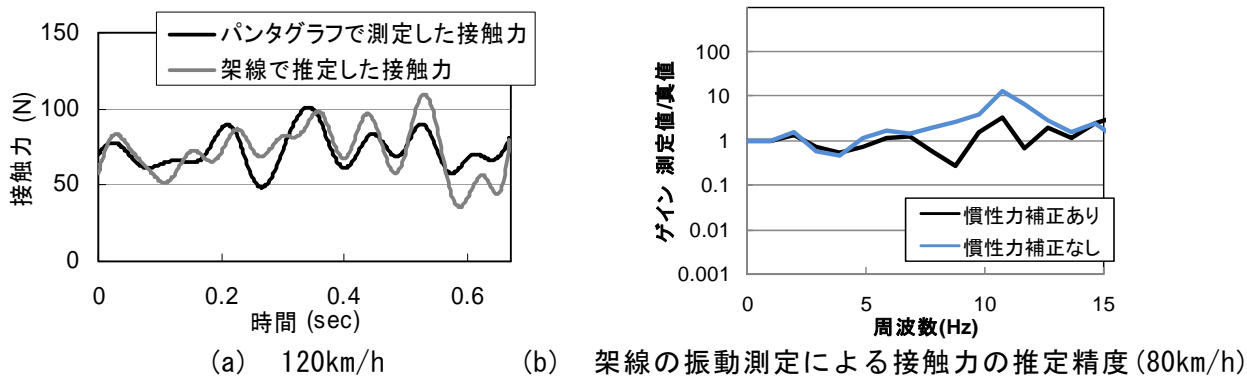


図6 接触力推定結果（集電試験装置試験）

#### 4. まとめ

本報告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において検討した結果を報告した。

なお、本研究の最終的な目標は、架線での接触力推定を行う本手法と、離線アーク測定（図7）と、トロリ線摩耗測定の種類3の手法によるデータを組み合わせることにより、トロリ線摩耗に対する接触力と離線アークの影響度の定量的評価を可能にするとともに、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して接触力の基準値を作成することであり、現在現地試験を実施中である（図8）。

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。



図7 紫外光式離線測定試験

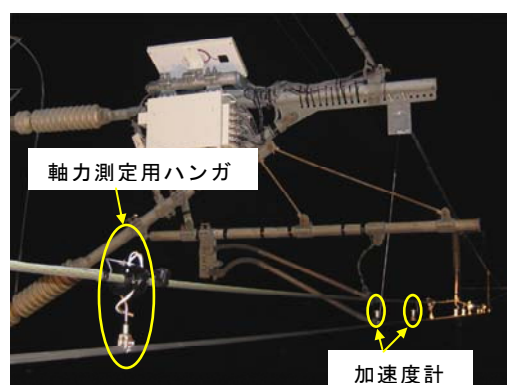


図8 接触力測定現地試験

#### 参考文献

- (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