

架線・パンタグラフ系の相互作用に係わる測定技術

鉄道力学研究部 集電力学

研究室長 池田 充

1. はじめに

架線(架空電車線)とパンタグラフは、地上設備から電気車にその駆動用電力を供給するための装置である。この両者は、架線とパンタグラフの間に作用する力、すなわち接触力を媒介として相互に影響を及ぼしあい、その結果として一つの力学系としてふるまうため、架線・パンタグラフ系と称されている(図1)。車両に対し確実に電力を供給するため、架線・パンタグラフ系では両者の安定した接触状態を維持することが求められる。

架線とパンタグラフとの間に作用する力、すなわち接触力は、架線・パンタグラフ系の動的相互作用を引き起こす直接的原因であると同時に、架線・パンタグラフ系の接触性能を表す指標でもある。したがって、接触力の測定は非常に重要である。しかしながら、高い電圧が課電された環境下における測定となるため、使用するセンサにも制約が多く、精度の高い測定は容易ではない。そのような環境のもと、鉄道総研では接触力の測定技術に関する開発・改良を行ってきた。本発表では、これらの技術について紹介を行なう。

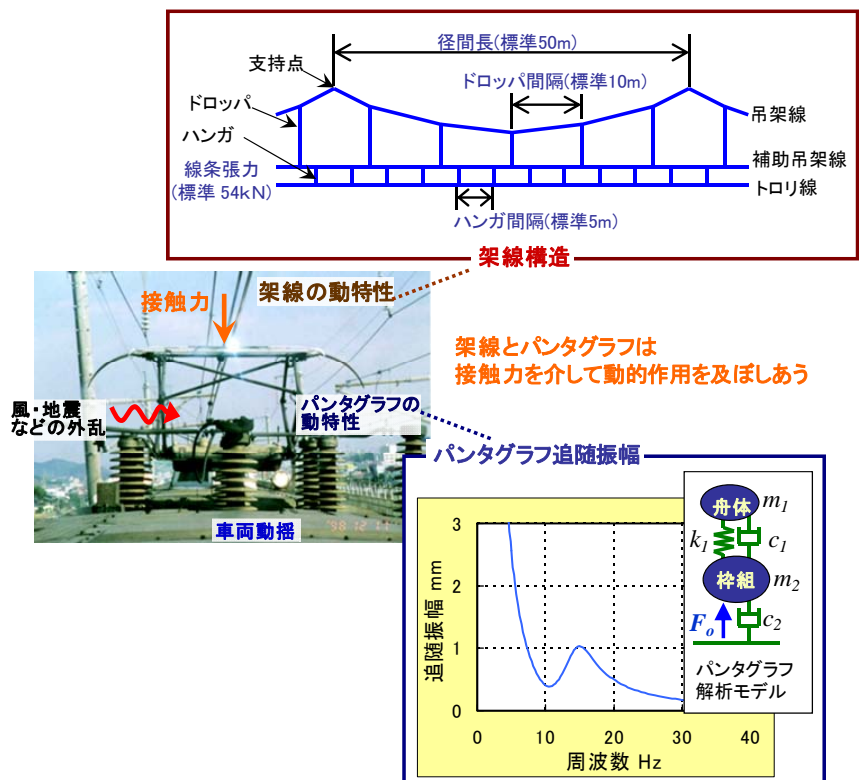


図1 架線・パンタグラフ系の動的相互作用

2. 接触力測定方法の分類

接触力測定方法を大きく分けると、パンタグラフ側で測定する方法と、地上側で測定を行う方法の2つに大別される。前者は、センサを取り付けたパンタグラフが走行する区間の接触力波形を効率よく測定することが可能であるが、接触力波形そのものが車両条件、すなわちパンタグラフ形式、編成中のパンタグラフ位置、走行速度、などの影響を強く受けていることに十分留意する必要がある。これに対し、地上側で計測する方法は計測可能な範囲がせいぜい数径間程度に限定されるが、計測する区間を通過する全ての列車の全てのパンタグラフの接触力波形を捉えることが可能である。したがって、架線設備を評価するためには、パンタグラフ側で接触力を計測する方法が向いており、パンタグラフの評価を行うためには地上側における接触力測定方法が適している。以下、これらについて順に紹介する。

3. パンタグラフにおける接触力測定方法

3.1. つり合い法

図 2 に示すように、パンタグラフの舟体に作用する全慣性力を F_{ine} 、舟体に作用する揚力を F_{aero} 、舟体と枠組との接続部に生じる内力を $F_{d,i}$ ($i=1\sim n$)とする。このとき、接触力 F_c とこれらの力との間には次のような関係が成り立つ。

$$F_c = \sum_n F_{d,i} + F_{ine} + F_{aero} \quad (1)$$

したがって、 F_{ine} 、 $F_{d,i}$ 、および F_{aero} を測定すれば接触力 F_c を求めることができる¹⁾。ただし、走行中の舟体揚力を求めることは容易ではないため、あらかじめパンタグラフの風洞試験を実施して揚力特性を速度の関数として求めておき、これを用いて列車速度に応じて舟体揚力を補正する方法がよく用いられる。

ところで、舟体の慣性力 F_{ine} を高い周波数まで求めることは容易ではない。なぜなら、高い周波数では弾性振動が卓越するため、もはや舟体を剛体とはみなせなくなるためである。そこで、舟体に加速度計を複数個取り付け、その出力を重みつき加算することによって慣性力を精度良く求める方法を開発している。その際に重要なことは、測定したい周波数範囲に存在する振動モードの数と同じか、それより多い数の加速度計を取り付けることにより、系を可観測な状態にしておくことである。図 3 に、加速度計の個数による測定精度の差異を比較した結果を示す。この例では、3 個の加速度計を各舟体に取り付けることによって 100Hz まで精度よい測定を可能にしている。

3.2. 逆問題法

つり合い法は原理が簡単で複雑な演算も不要であるが、センサの取り付け位置が非常に重要である。そのため、センサ取り付け位置に制約がある場合には、測定自体が困難となる場合がある。そこで図 4 に示すようにパンタグラフを線形システムとしてとらえ、接触力 F_c を入力、パンタグラフの振動応答 $x(t)$ を出力とみなしてその伝達関数を加振試験等により求めておく。その結果より導いた、振動応

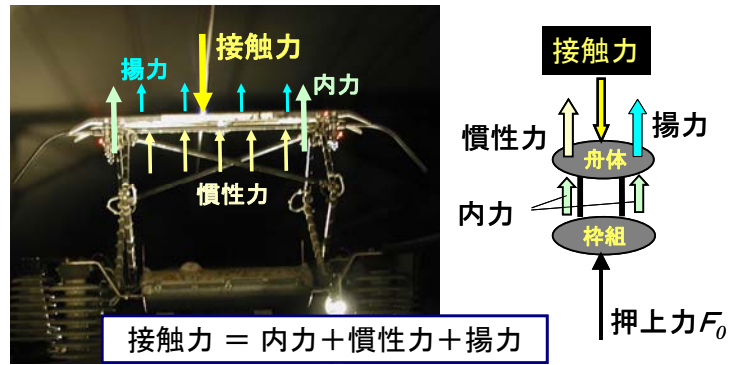
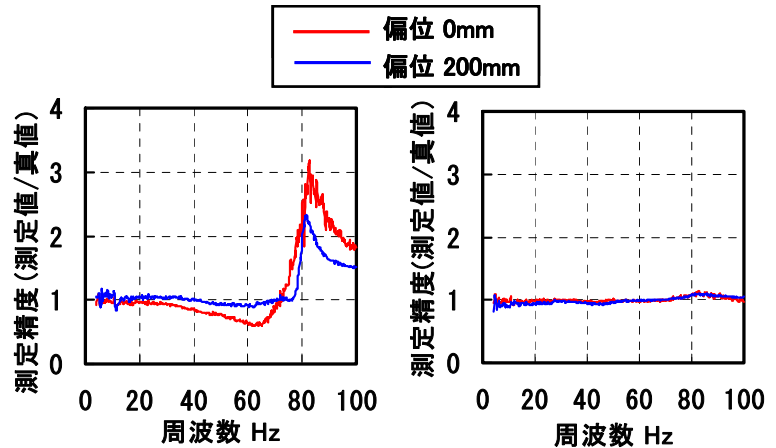


図 2 つり合い法による接触力測定



(a) 舟体あたり加速度計 1 個 (b) 舟体あたり加速度計 3 個

図 3 つり合い法による接触力測定精度

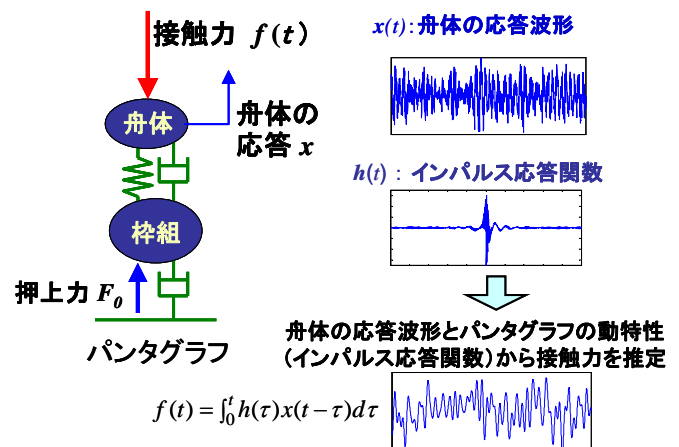


図 4 逆問題法による接触力測定 (1 入力 1 出力系としてモデル化する場合)

答に対する接触力のインパルス応答関数と、実測した振動応答との畳み込み積分を計算することにより、接触力を求めることができる。この方法は一種の逆問題を解くことに相当するため、逆問題法と称している。逆問題法はつり合い法に比べセンサ構成の自由度が高いことが特徴である。

ただし、架線の左右偏位に応じて舟体上の接触力作用位置が移動する。着力点の移動により、接触力とパンタグラフの振動応答との入出力関係も変化するため、接触力の測定精度が低下する。そこで、架線偏位に応じて変化する接触力作用位置を n 箇所 に分散化するとともに、パンタグラフの振動を m 箇所 の応答により表し、パンタグラフを線形の n 入力 m 出力系としてモデル化する。あとは、先述した 1 入力 1 出力モデルによる接触力測定法を多入力多出力モデルに拡張すれば、接触力をより精度良く測定することができる。なお、つり合い法と同様、十分な測定精度を確保するためには、動的応答の計測箇所数 m を測定したい周波数範囲に存在する振動モードの数と同じか、それより多くすることにより、系を可観測な状態にしておくことが重要である。

3.3. 可動すり板方式パンタグラフに適合した接触力測定法

近年、追従性能向上を意図した可動すり板付きパンタグラフが増えてきた。前述したつり合い法、逆問題法のいずれを採用するにせよ、可動すり板付きパンタグラフは比較的低い周波数領域にたくさんの振動モードが存在するため、測定精度を確保するためには必然的に多数のセンサを舟体に内蔵する必要がある。しかし、舟体内部にはすり板可動機構が組み込まれており、センサのケーブル配線に苦慮することが多い。

そこで、センシング部が小型で、なおかつ 1 本の配線で複数箇所のひずみが計測可能な光式ひずみ測定装置を用いることにより、センサの組み込みを容易にする方法を提案している。光式ひずみ測定装置にはいくつかの方法があるが、高い周波数まで動的測定が可能な FBG (Fiber Bragg Grating) センサが接触力測定に適している。FBG センサを用いた接触力測定の構成例を図 5 に示す。

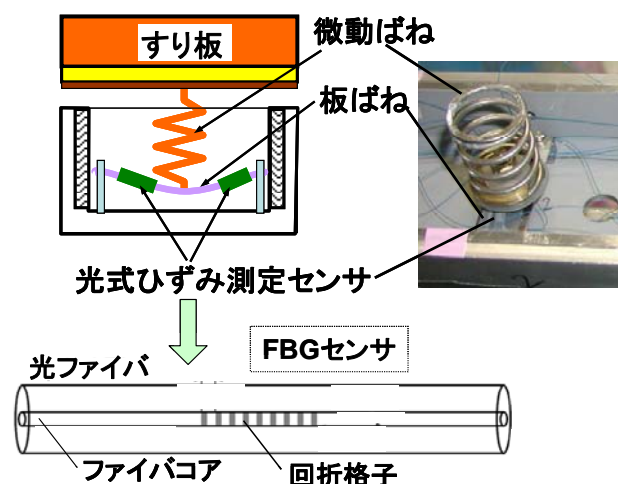
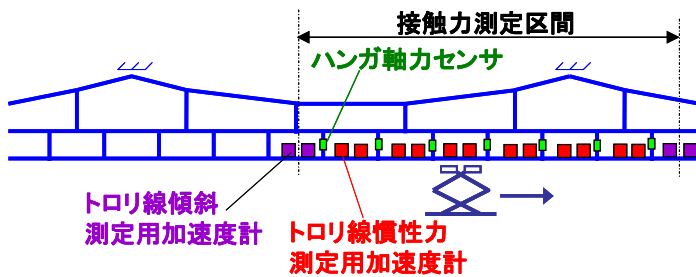


図 5 光式ひずみ測定センサを用いた接触力測定 (可動すり板付きパンタグラフ)

4. 地上側における接触力測定方法

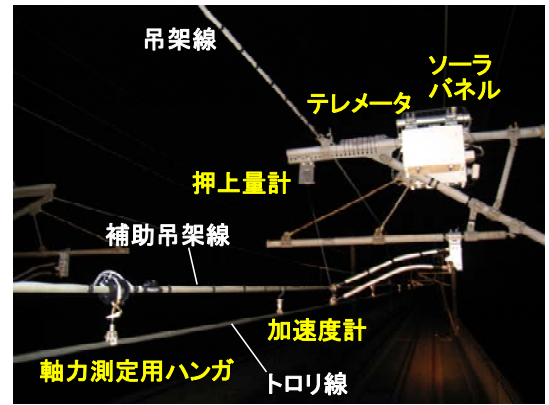
走行中のパンタグラフの接触力を地上側から測定する方法として、鉄道総研ではこれまでに二つの方法を提案している。一つ目は異方倍率レンズによって列車通過時の架線挙動を測定し、画像処理によって接触力を求める方法²⁾、二つ目は架線にセンサを複数個取り付けておき、パンタグラフ通過時に生じる架線振動を計測することによって接触力を求める方法である。前者は架線に対する特別な仮設作業が不要なため、比較的容易にデータ収録が可能であるという利点を持つが、線路柵外からの画像取得となるため夜間や雨天時の測定ができないほか、オーバーラップ区間での測定も困難である。これに対し、後者の方法は架線に対するセンサの仮設作業を要するものの、夜間、雨天を問わず計測が可能である。ここでは後者の方法について紹介する。

架線に振動センサを複数個取り付けて接触力測定を行う方法の、センサ構成ならびに測定原理を図 6 に示す。基本的な考え方は、パンタグラフにおける接触力測定方法で説明したつり合い法



$$\text{トロリ線傾斜} \Rightarrow \text{測定区間境界の張力鉛直成分} = T \left(\frac{\partial y(x_2, t)}{\partial x} - \frac{\partial y(x_1, t)}{\partial x} \right)$$

$$\text{接触力} = \text{ハンガ軸力合計} + \text{測定区間境界の張力鉛直成分} + \text{慣性力}$$



(a) センサ配置と測定原理

(b) 架線に対するセンサ取付状況

図 6 地上側における接触力測定方法(架線に振動センサを取付ける方法)

と同一である。この場合、「測定区間のハンガ軸力の総和」、「測定区間両側の境界に作用する張力の鉛直成分」、および「測定区間のトロリ線の慣性力」の合計として接触力が算出される。このうち「測定区間のハンガ軸力」はハンガに軸力測定用ひずみゲージを取り付けて測定する。また、「測定区間両側の境界に作用する張力の鉛直成分」は、測定区間両端のトロリ線傾斜より計算する。ここで、トロリ線傾斜は近接して設置した2個の加速度計から求められる。「測定区間のトロリ線の慣性力」は、トロリ線に設置した複数の加速度計から算出する。

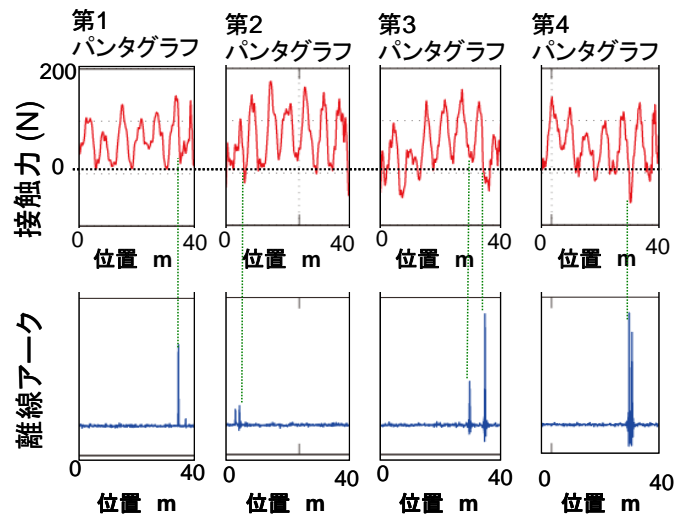


図 7 地上側における接触力測定例

図 7 に、地上における接触力測定例を示す。この図は、測定区間を通過するパンタグラフの接触力と離線アークを並べて示したものである。離線アーク発生時の接触力は 0 近傍の値となっており、接触力測定結果の妥当性が確認できる。なお、車両には高圧母線が設備されているため、接触力が 0 近傍であっても離線アークが必ず発生するとは限らない。

5. おわりに

本発表では、架線・パンタグラフ間に作用する接触力の測定方法について、これまで鉄道総研で開発した手法の紹介を行った。接触力測定に関わる研究は、架線・パンタグラフ系の接触性能評価を目的としたものから、接触力波形に基づく架線設備・パンタグラフの異常診断や、接触力のアクティブ制御機構などの実用化へと進展している。鉄道総研では、その実現のための研究開発を鋭意進めているところであり、関係各位のご協力を引き続きお願いする所存である。

参考文献

- 1) 池田;「架線・パンタグラフ間の接触力測定手法に関する研究」、日本機械学会論文集(C編)、Vol.70、No.69、(2004)
- 2) 真鍋、ほか3名;「異方倍率画像による架線の振動計測法」、日本機械学会論文集(C編)、Vol.64、No.628、(1998)