

画像情報に基づくパンタグラフの接触力測定装置の実用化

鉄道力学研究部 集電力学研究室

副主任研究員 小山達弥

1. はじめに

架空電車線はレールに沿って架設された長大な設備であり、しかもレール面から約 5m の位置に架設されることから、その保守・管理をより合理的に行い、保守作業の省力化や保守コストの低減、さらには設備の長寿命化を実現することが強く求められている。このような要求を実現するための基本情報として、架線とパンタグラフの接触状態を把握しておくことは極めて重要である。現在、日本では架線とパンタグラフの接触状態を離線率により評価することが一般的である。しかしながら、離線が発生しない場合でも、過大な接触力の発生はトロリ線の機械的な摩耗を促進するのみならず、場合によっては電車線金具の変形、破損の原因となることもある。そこで、架線とパンタグラフの間の接触力を測定し、接触性能の評価指標として使用すれば、離線、すなわち接触力が 0 の状態だけを抽出するよりもより合理的な接触性能評価が可能になると考えられる。

このため、鉄道総研では接触力の測定手法をすでに開発しているが¹⁾、この測定方法は高電圧下にセンサを設置するため、そのデータ伝送にテレメータなどの伝送装置およびその電源の確保が必要であり、ある程度の規模の測定装置が必要となる。また、一部の新幹線用パンタグラフでは、追従性能向上のために複雑な舟体構造を備えたパンタグラフが使用されているため、接触力測定用センサを舟体の実装することが困難なケースも生じている。

そこで筆者らは、パンタグラフにセンサを実装しない、もしくは実装するセンサを極力少なくして、接触力測定を実現する手法として、画像情報を活用した接触力測定手法を開発した。

2. 接触力測定の基本原理

まず、接触力測定の基本原理について述べる¹⁾。ただし便宜的に、ばね系が舟体と枠組の間に 1 組だけ設けられている、いわゆる「2 元系パンタグラフ」を例にとって説明する。式(1)に示すように、パンタグラフの舟体に作用する接触力 F_c は、舟体の慣性力 F_I 、復元ばねに作用するばね力 F_s 、ならびに舟体に作用する揚力 F_a とつり合っている。

$$-F_c + (F_I + F_s + F_a) = 0 \quad (1)$$

したがって、 F_I 、 F_s 、 F_a を測定することで、接触力を算出することができる。

舟体の慣性力 F_I は、舟体の加速度 \ddot{x}_p (舟体変位 x_p の時間の二階微分) に舟体質量 m_p を乗じることによって求められる。ただし、舟体の弾性振動が卓越するような高い周波数領域まで接触力を測定する場合には、舟体の複数個所における加速度を測定したうえで、その各々に適切な等価質量を乗じることにより舟体の慣性力を求める必要がある。一方、復元ばねに作用するばね力(ばね反力) F_s は、舟体と枠組との相対変位 $x_p - x_f$ (x_f は枠組変位)、すなわち、ばねの伸縮量を求め、これにばね定数 k_p を乗じることにより求めることができる。これに対し、舟体に作用する揚力 F_a を直接測定することは困難であるが、揚力が列車速度 V の二乗に比例することを利用すれば、あらかじめ風洞試験を実施して速度に対する揚力の換算係数 C_a を求め、これに速度の二乗を乗じ

ることによって近似的に求めることが可能である。

以上より、式(1)を整理すると、

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_f} m_{p,i} \frac{d^2 x_{pm,i}}{dt^2} + \sum_{j=1}^{n_s} k_{p,j} (x_{pk,j} - x_f) + C_a V^2 \quad (2)$$

となる。なお、慣性力とばね反力の算出にそれぞれ用いる舟体変位（加速度）を同一箇所測定するとは限らないため、式(2)では慣性力を算出するために用いる舟体変位を x_{pm} 、ばね力を算出するために用いる舟体変位を x_{pk} としている。また、 n_f は舟体加速度の測定点数を、 n_s はばね反力の測定点数をそれぞれ示す。式(2)より、速度情報を列車から取得し、舟体と枠組の変位を時系列で正確に測定できれば、接触力を求めることが可能であることがわかる。なお、舟体と枠組の間に摩擦要素やストッパ要素が存在するような場合については、センサを別途内蔵して摩擦力を測定する必要がある。

従来手法では、舟体内部に設置した加速度計により慣性力（式(2)右辺第1項）を、ロードセルなどによりばね反力（式(2)右辺第2項）を、ひずみゲージなどにより摩擦力等を、それぞれ測定して接触力を算出している。この場合、①センサを舟体の実装する必要があるため動特性や揚力特性が変化する場合があること、②データ伝送にテレメータなどの特殊な伝送装置が必要となり測定システムの規模が大きくなること、③複雑な構造を有している舟体ではセンサ数が増大しセンサの実装が困難となること、などが問題となる。

3. 画像情報を活用した接触力測定手法

上記①～③の問題を解決する測定手法として、画像情報を活用して接触力を算出する手法（以下、「本測定手法」と記す）を開発した。以下では、摩擦要素やストッパ要素を無視できる、つまりパンタグラフにセンサを実装する必要のない場合を例に、本測定手法について説明する。

本測定手法による接触力測定装置の基本構成を図1に示す。舟体と枠組の変位を測定するために、白と黒の帯状の模様から構成されるマーカを舟体と枠組に貼り付ける。これらのマーカの動きをパンタグラフ近傍に設置したカメラにより画像として捉える。なお、画像の取得には種々の方法があるが、高い時間分解能と空間分解能が要求されること、舟体および枠組の特定の点の鉛直方向の動き（1次元方向）さえわかればよいことなどから、本測定手法ではラインセンサカメラを用いることとした。

パンタグラフに貼付けしたマーカをラインセンサカメラで撮影すると、図2左に示すような時間とともにマーカ位置が上下に変動する画像を取得できる。なお、図2はラインセンサカメラにより撮影した画像を横方向（時間方向）に並べて一枚の画像にしたものである。あらかじめ校正作業を実施し、画像上のマーカ位置から実際のマーカ位置をマッピングする関数を求めておくことで、図2右に示すように、舟体と枠組の上下変位を得ることができる。このようにして得られた変位量を

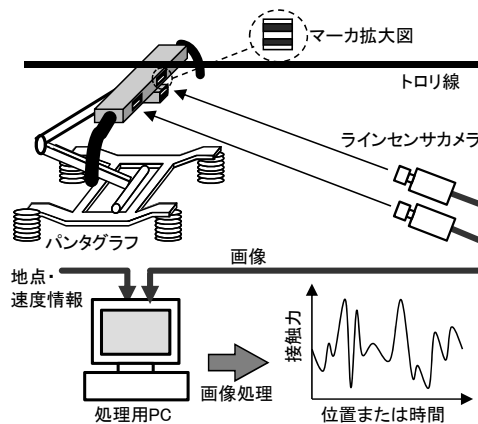


図1 画像情報を活用した接触力測定装置の基本構成

式(2)に代入することで、接触力を求める。

本測定手法の精度検証を行うため、測定精度検証試験を実施した。実機パンタグラフの周辺にラインセンサカメラと照明を配置するとともに、パンタグラフの舟体と枠組にマークを貼付し、上記の方法に基づいてパンタグラフに作用する接触力を測定した。なお、後述する実車への適用を想定し、本試験では実車に搭載される撮影機材と同じものを用いるとともに、実車におけるカメラ配置と同一条件で試験を行った。使用したラインセンサカメラは、スキャンレートが 4.7 k Hz、画素数が約 7000 ピクセルである。本試験では、ワイヤとアルミフレームから構成される治具を用いて加振機により舟体のすり板上面を加振して変動接触力を再現するとともに、加振点にロードセルを設置することで接触力の真値（加振力）を測定した。周波数領域において連続的な測定精度を確認するために、加振波形として疑似ランダム波を用いた。

以上の条件のもとで、本測定手法によって測定した接触力（推定力）をロードセルで測定した真値（加振力）と比較し、測定精度を評価した結果を図 3 に示す。図 3 は推定力と加振力の伝達関数（推定力/加振力）を示している。図に示すとおり、20Hz 以下の周波数では、伝達関数のゲインと位相はそれぞれほぼ 1.0, 0° であり、本測定手法は良好な接触力測定精度を有していることがわかる。なお、接触力測定精度の許容値については、現在、新規国際規格(IEC 規格)の策定作業のなかで審議中であるが、その原案である EN50317:2012 に定められている要求事項 (DC~20Hz の範囲における誤差が 10%以下であること) を本測定手法は満足しており、実用上十分な精度で接触力を測定可能であるといえる。

4. 実車適用例

図 4 に本測定手法の実車適用例を示す。この列車には 2 基のパンタグラフが搭載さ

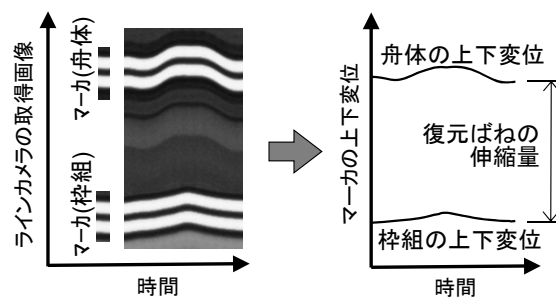
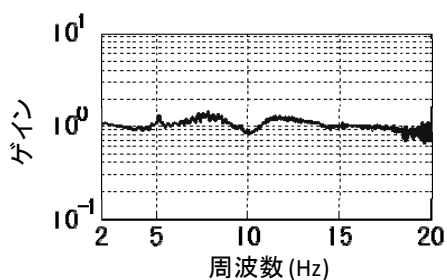
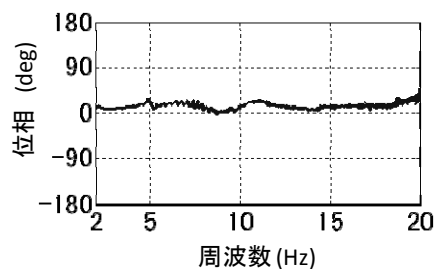


図 2 ラインセンサカメラにより取得したマーク画像



(a) ゲイン



(b) 位相

図 3 本測定手法の測定精度 (推定力/加振力)

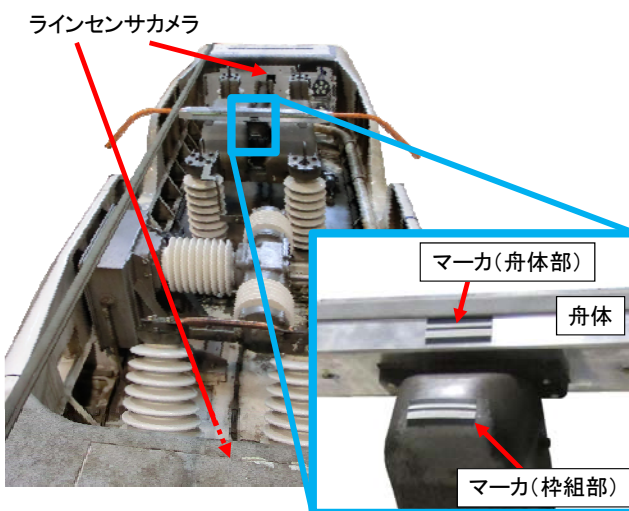


図 4 実車適用例

れているが、そのうち一方のパンタグラフでは接触力、トロリ線の摩耗と左右偏位、パンタグラフ高さ、離線などを、もう片方のパンタグラフでは離線のみを、それぞれ測定している。本例の車両は営業車であるが、これらの測定項目は基本的に画像処理をベースとした測定システムであり、全ての測定機器類を既設碍子オオイ内部に設置可能であるため、集電性能への影響の懸念がなく、営業車で運用にも支障がない。そのため、高頻度の測定を実現している。

図5は本線走行中における接触力測定結果の一例である。離線アークが発生している箇所では接触力もほぼゼロとなっていること、パンタグラフ高さが急激に減少している箇所では接触力が大きくなることなど、妥当な結果が得られている。ただし、当該車両には高压母線で接続された複数のパンタグラフが搭載されているため、接触力がゼロとなっても必ず離線アークが発生するわけではない。図5にはオーバーラップ区間が含まれているが、この場所で顕著な接触力変動は観測されておらず、その架線構成に問題はないと判定できるほか、離線発生に対する径間周期ならびにハンガ周期の接触力変動の寄与を定量的に評価できる(図5最下段参照)。こうした評価は接触力を測定してはじめて可能となるものである。

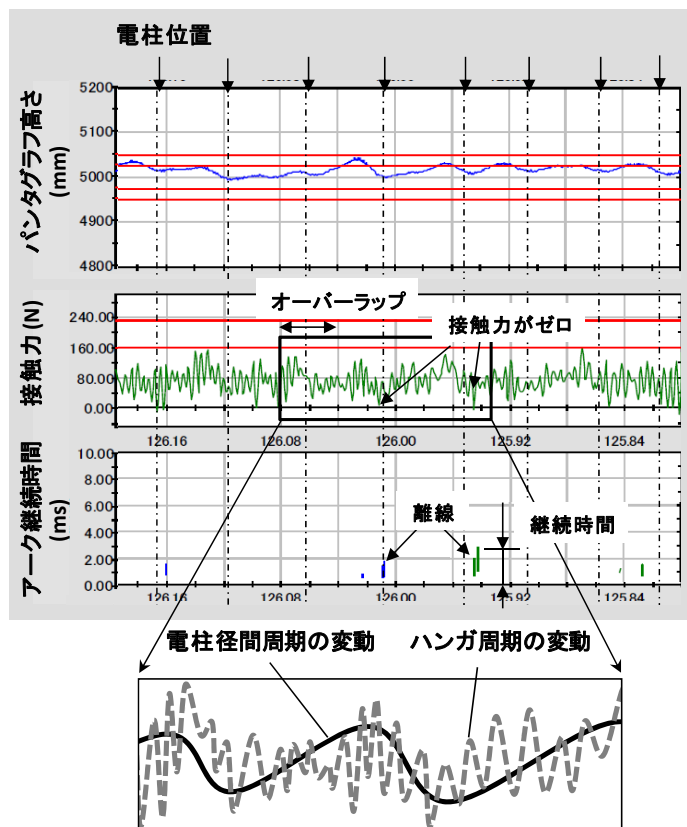


図5 測定波形の例 (280km/h 走行)

5. 結論

画像情報を活用した接触力測定手法を提案した。本手法は、パンタグラフにセンサを実装することなく、もしくは実装するセンサを極力少なくして、接触力測定が実現可能であるため、測定に対する制約が少ないという特徴を有している。本測定手法による測定精度は良好であり、EN規格に定められている要求事項を満足することも確認した。現在、本測定手法に基づく接触力測定装置が営業車に搭載され、運用中である。営業車両に接触力測定装置を常時実装し、定期的な測定を行っている例は本例が世界で最初のものである。このように、本手法は営業車検測に適しており、今後の適用拡大が期待される。

なお、本手法は、鉄道総研と株式会社明電舎との共同研究により開発したものである。

文献

- (1) 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 パンタグラフの慣性力評価方法の改善による接触力測定可能周波数範囲の拡大，日本機械学会論文集 C 編，Vol.70，694号，2004