

電力技術に関する研究開発の動向

長谷 伸一*

Recent State of Researches on Power Supply Technology for Electric Railways

Shin-ichi HASE

The RTRI has promoted a number of researches on the technologies of power supply system for electric railways. The researches are classified into two categories; one is related to power stations and the power supply system, and another is to catenary system and other current collection systems. The final target common to the technologies classified in the two categories is how to supply stable and high-quality power. This paper mainly presents the outline of the result researched through the project theme entitled “study on performance improvement and streamlining of maintenance work for the current collection system”.

キーワード：電力設備，電車線，トロリ線，摩耗，疲労

1. はじめに

鉄道総研における電力技術関係の研究開発体制は、電力技術研究部のき電、集電管理、電車線構造研究室と鉄道力学研究部の集電力学研究室の4研究室と材料関係研究室となっている。き電関係では、電鉄変電所における電力変換制御と省エネルギー、き電回路網の現象解析と最適構成、絶縁協調と絶縁劣化診断、電車線関係では、電車線設備の計測・診断、しゅう動・集電材料の劣化現象、電車線材料の開発、新しい電車線の開発、集電系の高速化、集電現象解明のための計測技術、架線・パンタグラフ系の動力的相互作用の現象解明、精密計測法および改善手法の提案などの研究開発を実施している。

本稿では、電力関係の最近の研究開発について、2006年～2009年度に実施したプロジェクト的テーマ「集電系の高性能化と保守の高度化に関する研究」の中で、本特集で紹介する電車線の保守・架設基準を除いたその他の概要について紹介する。

2. 集電系の高性能化と保守の高度化に関する研究の概要

新幹線では300km/hを超える速度での営業運転が計画されているが、営業速度が高くなるにしたがって、電車線とパンタグラフ間の集電性能が悪化して保守作業量が増大することが予測され、保守作業改善手法の開発が望

まれている。このような保守作業量を抑制することを目的として、安定した集電性能を維持しつつ、効率的で信頼性の高い保全を実現するための研究開発を実施した。本テーマは、現状の300km/hと同等な接触力変動を維持し、局部摩耗が発生しにくい架線・パンタグラフ系設計手法を提案するとともに、疲労特性を向上したトロリ線の開発や新しい評価・保守手法の提案を行った。

図1に、本課題の構成を示す。架線・パンタグラフ間の接触力変動の要因としては、①径間周期運動によるもの、②ハンガ間周期運動によるもの、③トロリ線凹凸によるもの、④硬点によるものなどに分類される。①②については、これまでの研究により具体的な改善目標が示されているが、③については、電車線の架設精度に対する改善目標が示されていない。そこで架設精度の改善目標を示すため、新幹線高速走行に対する架設指針を策定するとともに、架設状態の診断技術の開発を行った。また④については、上記の架設指針を容易に実現するため、新たな支持点構造を開発した。さらにパンタグラフ側からの接触力変動低減手法を開発するため、接触力制御を含めたパンタグラフの接触性能向上手法を開発した。

一方、高速域における安定集電を確保するための評価基準を確立するため、トロリ線の摩耗特性や疲労特性などの影響要因を解析し、さらにトロリ線疲労強度の向上を図るため、断面形状変更による耐疲労強度を向上したトロリ線を開発した。

* 前 電力技術研究部 部長

特集：電力技術

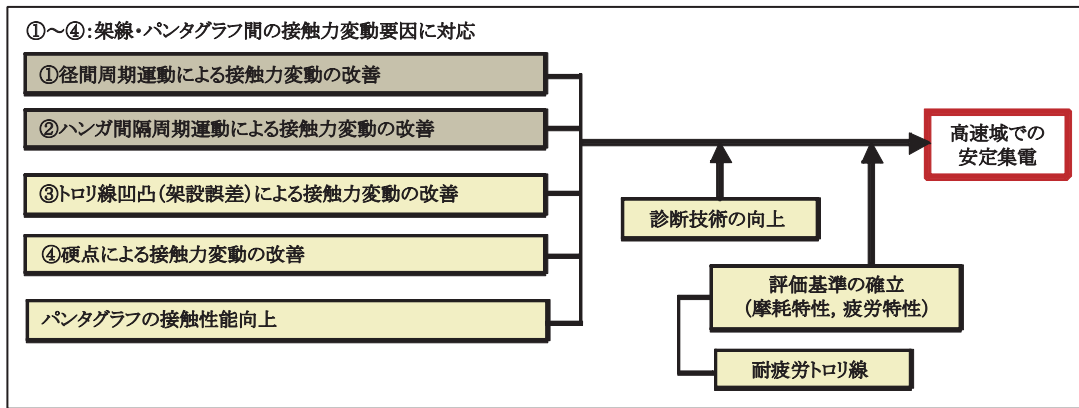


図1 集電系の高性能化と保守の高度化に関する研究の構成

3. 各課題の成果概要

3.1 評価基準の確立

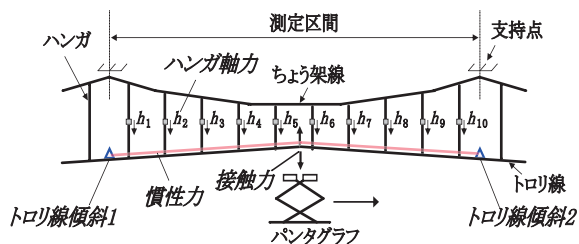
3.1.1 トロリ線摩耗予測手法の提案

現在、トロリ線の寿命は主に摩耗により決定づけられている。しかし、摩耗の進行予測は容易ではなく、摩耗管理のために多くの人工を要しているのが現状である。

そこで本研究では、新幹線営業線のデータから、パンタグラフの接触力による機械的摩耗と離線アークや集電電流による電気的摩耗のそれぞれの影響度を定量化し、トロリ線摩耗予測式を構築することを目標とした。そのために、図2に示す「架線に取付けたセンサによるパンタグラフ接触力の地上モニタリング手法」¹⁾と、「紫外線検出式地上離線測定器」²⁾を開発し、トロリ線の摩耗形態が異なる新幹線営業線の複数箇所において継続的な測定を実施した。

その結果得られたパンタグラフ接触力、離線アーク、集電電流とトロリ線摩耗量との相関からトロリ線摩耗予測式を提案した。図3は、継続的な測定を実施した箇所のトロリ線摩耗を、提案した摩耗予測式により推定した結果であるが、推定した摩耗は実測したトロリ線摩耗の傾向を正しく表現しており、本式の妥当性が確認できる。

トロリ線摩耗予測式は、さらに現地データから得られた知見をもとに検討を進め、トロリ線摩耗予測式の精度向上を図る。



$$\text{接触力} = \text{ハンガ軸力} + \text{測定区間の境界に作用する張力の鉛直成分} (\text{張力} \times (\text{トロリ線傾斜}2 - \text{トロリ線傾斜}1)) + \text{慣性力}$$

図2 架線における接触力測定手法の概念図

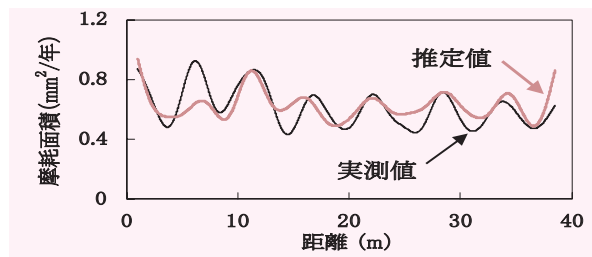


図3 トロリ線摩耗の推定結果

3.1.2 トロリ線疲労寿命予測手法

トロリ線の疲労寿命予測に関して、トロリ線へのレインフロー法の適用可能性を疲労試験で検証することを目標とした。レインフロー法とは³⁾、実際に加わる負荷波形のもとでの疲労寿命を推定するための波形カウント法として提案されているもののひとつである。

トロリ線には張力負荷に伴って平均応力（以下 σ_m と略）が加わっている。レインフロー法で σ_m の影響を加味するには、図4に示すようにカウントされた波形要素ごとにその中点を σ_m と見なす方法があるが、疲労寿命推定にはそれぞれの σ_m ごとの疲労寿命特性が必要となる。 σ_m が異なる疲労試験結果を疲労過程の $\sqrt{\text{最大応力} \times \text{応力振幅}}$ （以下 σ_e と略）で統一的に整理できるという提案があり⁴⁾、トロリ線でも σ_e による整理が可能ならば、さまざまな σ_m のもとでの疲労寿命特性を推定できる。硬銅トロリ線について異なる σ_m での疲労試験を行い、疲労寿命特性の σ_e による整理の可能性を検証した結果、硬銅トロリ線では σ_e による疲労試験結果の統一の整理が可能とわかったので、レインフロー法で推定した疲労寿命と、実際の疲労試験での寿命を比較することで、硬銅トロリ線へのレインフロー法適用可能性を検証した。各種ひずみ波形による試験の結果、疲労試験寿命は推定疲労寿命より概ね長く、推定は安全側である。また、現状用いられているひずみピーク値での推定寿命よりレインフロー法の方が高精度であるとの結論を得た。更に、トロリ線の疲労特性の検討を行い、速度向上試験

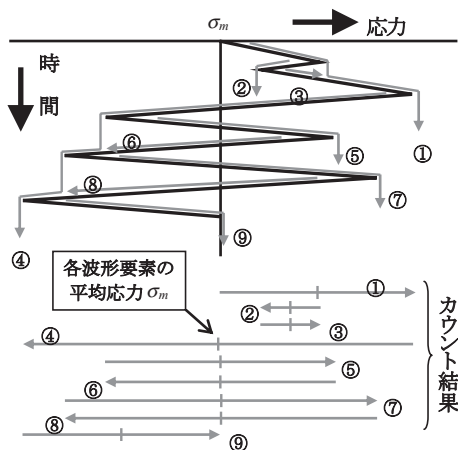


図4 レインフロー法による波形カウント

等におけるトロリ線ひずみ測定結果評価やひずみ目安値設定に活用する。

3.2 硬点による接触力変動の改善

支持点近傍におけるトロリ線の局部摩耗の原因として、支持点高さの不整や横張力によるトロリ線の引き上げ等が起因となり発生する過大な接触力が考えられる。また、偏位が過大な箇所は平均的なトロリ線摩耗率が高くなることが知られている。このため、支持点高さの不整や偏位を容易に調整できる機構を備え、引き角度を低減してトロリ線の引き上げを緩和した支持点構造を開発し、営業線における適用試験等によりその効果を確認した。

開発した支持構造は、曲線引金具の引き角度は 9° とし、ちょう架線支持金具とアーム支持金具に高さ・偏位を調整できる機構を設けている。ブラケットは従来品と大きな変更点はないが、偏位方向の調整幅を設けるため、水平部分を従来品より拡大している。

図5に曲線引金具の外観を示す。現状の営業速度で用いることを想定したパイプ形状と、 300km/h 超域での使用を想定したH型形状の2種類を試作した。引き角度を低減するため、長さは従来品より $50\sim 100\text{mm}$ 程度長くしている。パイプ形状は、従来品と同様にアーム部にアルミパイプを、支持部とイヤータ取付部にアルミ青銅を用いている。H型形状は、等価質量を軽減するため、アルミ合金の一体成形としイヤータ取付部のアルミ青銅部分を不要とし強度向上のため断面形状をH型としている。

新しい支持点構造（曲線引金具はパイプ形状）を新幹線の営業線に試験架設して集電特性を確認した。各測定点における1パンタ当たりの応力換算値（通過列車と停車列車の平均値に列車本数の割合を乗じて算出）を用いると、図6のように支持構造変更前の応力値と測定点におけるトロリ線の摩耗率は強い相関があることが示される。

この回帰線により、支持点構造変更後の応力最大値から摩耗率を推定すると、今回の試験箇所では、 20% 程度

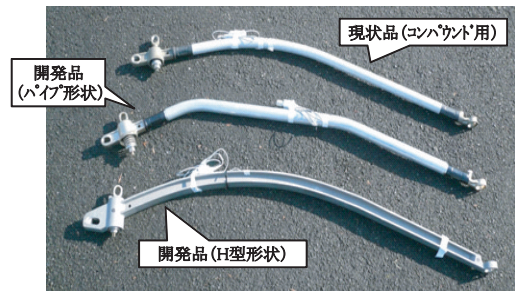


図5 曲引金具の概観

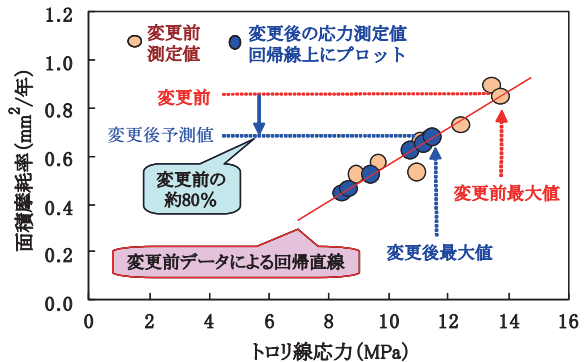


図6 変更前後の応力比較と摩耗率予測

摩耗率が改善するものと予測される。開発した支持点構造は、急曲線区間、オーバーラップ箇所等への適用を図る。

3.3 耐疲労トロリ線

トロリ線の耐疲労性向上には材質自体の改良のほか、断面形状を変更し同一の負荷における曲げひずみを低減する方法がある。断面積を大きく変えず、しゅう動面側半径を同一としたまま曲げひずみを低減するため、中立軸から上面までの距離を小さくする形状を検討すると、断面形状は自ずと上面が扁平かつ両肩部の半径が小さい「いかり肩」になる。いかり肩の断面形状ではギャロッピングが生じやすくなるため、ギャロッピング特性を確認しながら検討を進め図7に示す断面形状のトロリ線を試作した。

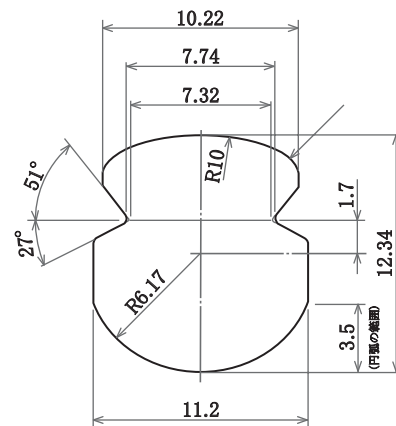


図7 試作トロリ線の断面形状
(断面積 113.17mm^2)

特集：電力技術

計算上は、硬銅トロリ線110mm² (GT110)と比較し、約10%のひずみ低減が見込まれる。

鉄道総研所内の集電試験装置により、ひずみ低減効果試験を行い、GT110との比較でひずみに有意差があるデータを得た。また、現地架設試験により、トロリ線ひずみ測定と施工性の確認を行った。架設の際に、断面形状を変更したことに伴う施工上の問題は認められなかった。試作トロリ線で測定されたひずみは、試験をデッドセクション箇所で行ったため最大 800×10^{-6} であった。ひずみが10%低減した結果 800×10^{-6} になったとすれば、硬銅トロリ線の材質では約1.5倍の寿命延伸に相当する。今後は、高速区間への適用を図る。

3.4 パンタグラフの接触性能向上手法の開発

3.4.1 パンタグラフ復元ばねの剛性最適化

従来、解析に用いられていたパンタグラフの運動モデルは、舟体や舟支えの上下運動のみを考慮していたが、舟体や舟支えのローリングやピッチングなどの回転運動も考慮した運動モデルを考案した。このモデルを用い、舟体の復元ばねのばね定数の最適な組み合わせをGA(遺伝的アルゴリズム)によって求め、これを実機パンタグラフに適用し、離線率低減効果を現車試験にて確認した結果、パンタグラフ復元ばねを最適にすると、標準状態に対して離線率が半減することがわかった⁵⁾。

3.4.2 パンタグラフ復元ばねの剛性制御

パンタグラフ追従振幅のピーク周波数に対応する接触力変動成分は、他の周波数成分に比べると接触力変動分が抑制される。そこで代表的な架線凹凸周期と列車走行速度で決まる周波数とパンタグラフ追従振幅のピーク周波数を一致させるように、パンタグラフのばね要素の剛性を制御すると、広い速度域で接触力変動が低減できることを数値シミュレーションによって確認した。この接触力変動低減手法を実現させるために、空気ばねを利用した可変剛性ばねを組み込んだパンタグラフの舟体に上下強制変位振動を与え、可変剛性ばねの空気圧を制御することでコンプライアンス(舟体変位と接触力との比)が変化することが確認でき、パンタグラフの追従振幅制御が可能である⁶⁾。

3.4.3 パンタグラフの接触力制御による接触性能向上

パンタグラフの接触力をアクティブに制御する方法として、PID制御とインピーダンス制御を用いた接触力制御について試験を行った。アクチュエータは、パンタグラフの主ばねと並列に取り付けられたサーボ付きエアシリンダを用いた。PID制御により、定常成分から約1.0Hz程度までの範囲の接触力変動を低減可能であるこ

とを、インピーダンス制御では、PID制御の場合の接触力と比較すると、高周波数成分の信号の重畳があまりないため、制御系が安定し、1.5Hz、2.0Hzに対しても接触力変動の低減が実現しており、良好な制御効果を確認することができた。

4. おわりに

2006年から2009年度に亘り実施した「集電系の高性能化と保守の高度化に関する研究」の成果概要について述べた。この他に電力のき電関係の研究開発課題を簡単に述べる。エネルギー関連として、地上用電力貯蔵装置の制御手法の開発を実施している。本開発は、エネルギー貯蔵媒体の充電状況に応じた充放電制御手法を提案し、シミュレーションによる有効性の確認を行い、さらに、エネルギー貯蔵媒体として電気二重層キャパシタを用いた電力貯蔵装置と実車両および整流装置の組み合わせにより基本的な特性を確認している。また、信頼性の向上を目的として、在来線交流電化区間の駅構内の地絡保護能力の向上のため、低電圧放電保安器を試作し、実用器として適正な素子定数を決定し、長期暴露試験に供している。また、交流き電回路の故障点標定装置としてサージ検知方式、差電圧方式等の開発を実施している。

これら、鉄道総研の研究開発にあたっては、現地試験等でJR各社はじめ多くの鉄道事業者の皆さまのご協力を頂いており、本誌面を借りて深く感謝申し上げますとともに、成果の活用をお願いいたします。

文献

- 1) 白田隆之, 他: 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, 鉄道総研報告, No.24-2, pp.29-34, 2010.2
- 2) 白田隆之, 他: 紫外線検出式地上離線測定装置の開発, 第15回鉄道技術・政策連合シンポジウム, pp.511-514, 2008
- 3) 遠藤達雄, 井上肇: レインフロウ法の考え方とその応用, 日本造船学会誌, 706号, p.204, 1988
- 4) K. N. Smith, P. Watson and T. H. Topper: A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals, Journal of Materials, Vol. 5, No. 4, 1970.
- 5) 白田隆之: パンタグラフの動特性最適化手法と現車試験における検証, 日本機械学会, 2007年度年次大会, 2007
- 6) 山下義隆, 池田充, 菅原能生, 白田隆之: 可変剛性によるパンタグラフの追従性能向上, 第14回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2007), 2007