

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

架線・パンタグラフの三次元挙動を再現する

電気鉄道固有の設備として、車両に電力を供給する電車線と、電気を車両に取り込む集電装置があります。集電装置は電車線と接触しながら電気を取り込んでいます。電車線や集電装置の開発や、電車の速度向上の検討を行う際にはシミュレーションが利用されていますが、従来の二次元シミュレーションでは十分な性能評価ができないことが多くなってきました。そこで、架線・パンタグラフの三次元挙動を把握することができるシミュレーションを開発しましたのでここで解説します。

はじめに

電車線と集電装置にはさまざまな種類のものがありますが、安全性や経済性、高速走行への対応などの観点から、**図1**に示すような架空式カテナリー電車線（以下、架線）とパンタグラフの組み合わせが国内外を問わず広く採用されています（**図1**、**図2**）。

架線はおもに、パンタグラフと接触するトロリー線、トロリー線を所定の高さに保持するためのちょう架線、ちょう架線からトロリー線をつり下げるハンガーなどにより構成されていま

す。なお、トロリー線は標準的には線路から5m上方の高さに架設されています。電車線柱などによってちょう架線を支持している点を支持点といいます。また、パンタグラフの同じ箇所でもトロリー線と接触することを防ぐために架線に線路直角方向にジグザグの水平偏位（以下、左右偏位）がつけられています。左右偏位を設けるための金具として、振止金具や曲線引金具が使用されています。

パンタグラフはトロリー線と直接接触するすり板、すり板を固定している



小山 達弥
Tatsuya Koyama
鉄道力学研究部
集電力学研究室
主任研究員



長尾 恭平
Kyohei Nagao
前 鉄道力学研究部
集電力学研究室
研究員



池田 充
Mitsuru Ikeda
鉄道力学研究部
主管研究員

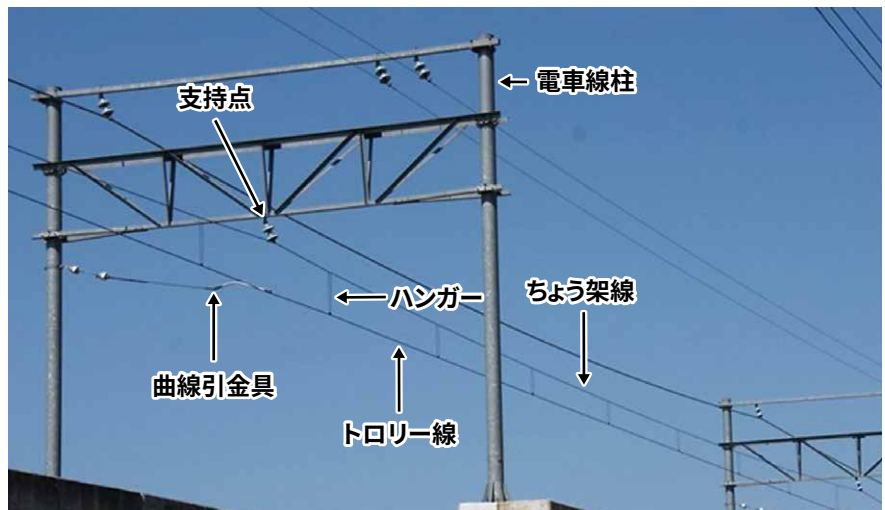


図1 架線の例（シンプル架線）

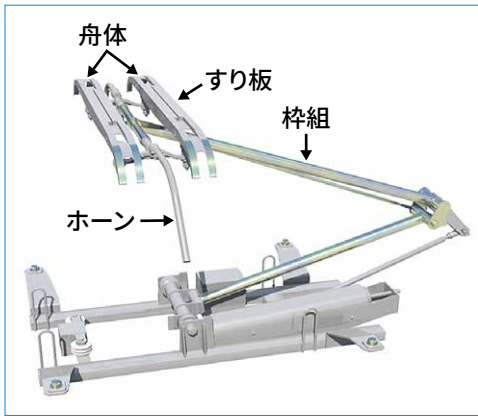


図2 パンタグラフの例
(シングルアームパンタグラフ)

舟体、トロリー線の高さ変化に応じてパンタグラフを上下方向に可動させるための枠組などにより構成されています。また、後述する線路が合流・分岐する箇所において車両が進入する際、パンタグラフが合流側・分岐側でも安全に架線をしゅう動して通過するためにホーンが舟体の左右に備わっています。

パンタグラフはトロリー線に接触して電気を車両に取り込みます(これを集電といいます)。このとき、架線とパンタグラフとの間に作用する力を接触力といいます。車両が停止している状態では、パンタグラフはほぼ一定の接触力(50~60N)でトロリー線と接触していますが、走行する際には支持点とそれら中間部におけるトロリー線の高低差などの影響により接触力は変動します。接触力が過大な場合はトロリー線の断線や各種金具の破損、トロリー線の摩耗の増加などが生じるおそれがあります。一方、接触力が0になると、パンタグラフが架線から離れる(これを離線といいます)場合があります、その際にトロリー線とすり板との間にアーカが発生して双方の摩耗が増加することがあります。

電車線や集電装置の開発や、電車の速度向上を行う場合において、以上のような問題が発生しないかを確認する必要があります。しかし、接触力の変動は、架線やパンタグラフの振動や、

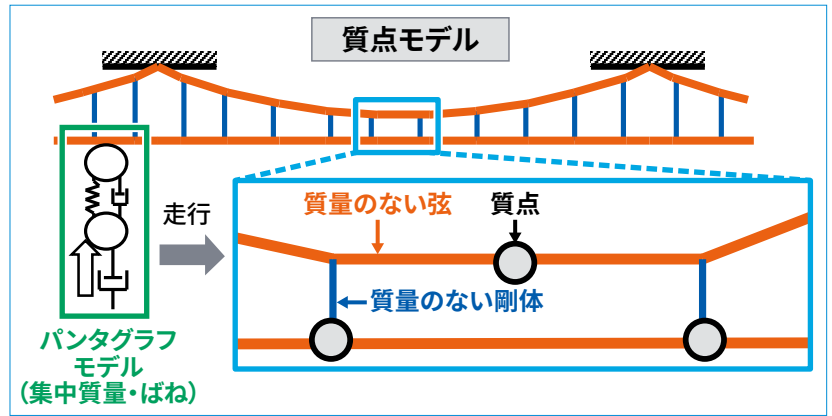


図3 架線とパンタグラフを質点としてモデル化した従来の二次元シミュレーション

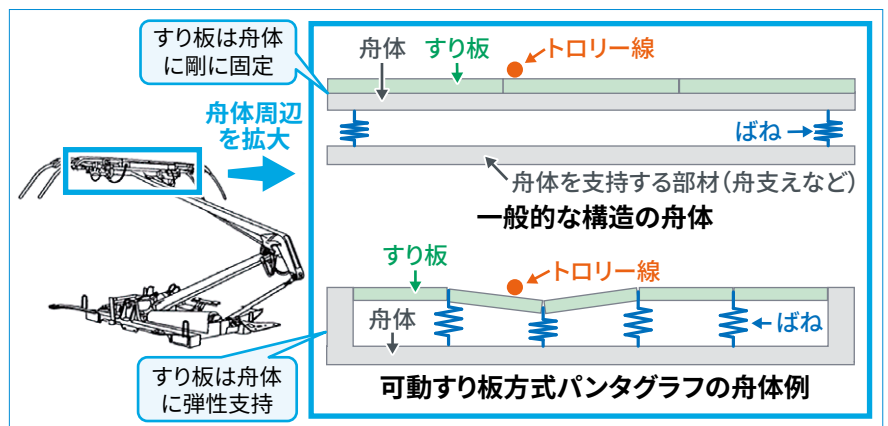


図4 パンタグラフの舟体構造

架線の高さ変化、架線を伝わる波動など、多くの要因により生じます。そのため、架線とパンタグラフ相互の挙動を把握することは容易ではありません。そこで、架線とパンタグラフをモデル化したコンピューターシミュレーションが利用されます。

三次元シミュレーションの概要

従来のシミュレーションでは、架線とパンタグラフをそれぞれ質点、ばねなどでモデル化していました(図3)。このシミュレーションでは、架線とパンタグラフの上下方向の振動のみを対象としており、架線の左右偏位やパンタグラフ舟体の回転運動などを表すことができませんでした。そのため、左右偏位が集電に与える影響や、曲線区間における性能、線路直角方向に複数のすり板を配置した構造を有する可動

すり板方式パンタグラフ(図4、参照)の挙動などを正確に把握することができませんでした。

そこで、このような課題を解決するため、架線とパンタグラフの三次元モデル(図5)を用いたシミュレーターを開発しました。このシミュレーターでは、架線とパンタグラフをそれぞれ複

可動すり板方式パンタグラフ

高速走行を実現するためには、高周波域でのパンタグラフの追随性が要求されます。これを実現する手段の一つに、トロリー線と接触する部材の軽量化があります。一般的なパンタグラフではすり板が舟体に剛に固定されていますが、可動すり板方式パンタグラフではすり板が舟体に弾性支持されており、トロリー線と接触する部材を軽量化しています。可動すり板方式は、近年、新幹線のパンタグラフで多く採用されるようになってきました。

数の有限要素 (☞参照) を組み合わせて表現しています¹⁾。これらのモデルでは、架線は左右偏位を考慮した三次元的な配置を、パンタグラフは線路方向および線路直角方向の部材の配置を、それぞれ考慮することができます。これらのモデルをそれぞれ用いて電車走行中の架線とパンタグラフの挙動を再現します。

パンタグラフと架線は接触することで力のやり取りが生じ、これを動的相互作用とよびます。このシミュレーションでは、図6に示すように、架線とパンタグラフの接触点において、大きさが同じでかつ反対向きの力をそれぞれに加えることで動的相互作用を表現しています²⁾。

シミュレーションにおける計算手順は次のとおりです。時刻0におけるパンタグラフの位置やトロリー線の位置などの初期状態を計算した後に、時間を少し進めた状態でパンタグラフ移動後の新しい位置や、各部材の変形量、速度などを計算します。このとき、架線とパンタグラフはそれぞれどの要素のどの位置で接触している可能性があるか探索します(これを接触点探索といいます)。つぎに、架線とパンタグラフが接触しているか、離線しているかを判別します。接触している場合は接触力を計算し、架線とパンタグラフにそれぞれ与えます。一方、離線している場合は、接触力を0Nとして再計算を行います。このような操作をあらかじめ定めた時間刻みごとにくりかえ

有限要素

複雑な形状をもつ部材の変形などをそのままの形状で解析することは一般的には困難です。そのため、このような部材を数値的に解析可能な形状をもつ有限の大きさの要素に分割して解析が行われます。このような要素を有限要素といいます。

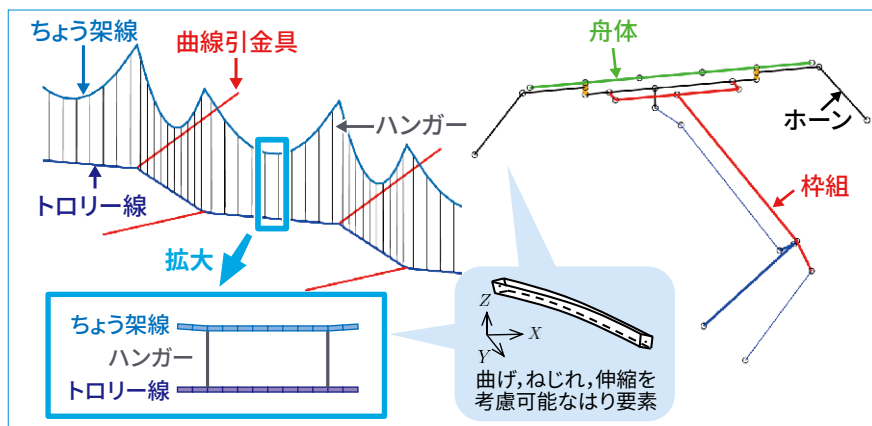


図5 架線とパンタグラフの三次元モデル

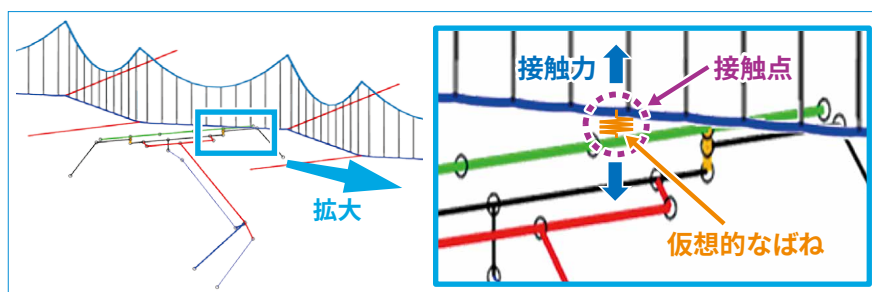


図6 接触点と接触力

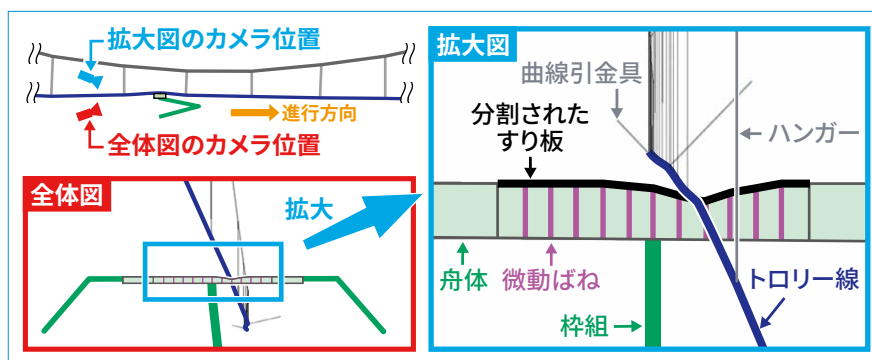


図7 可動すり板方式パンタグラフの計算結果

し行うことで架線とパンタグラフの三次元挙動を計算します²⁾。なお、このシミュレーターでは、接触力の計算には弾性接触法(ペナルティー法)とよばれる方法を用いています。具体的には、架線とパンタグラフの間に仮想的なばね(図6)を挿入し、接触している場合はばねが縮んだ量に応じたばねの反力を接触力としています²⁾。

以下では、このシミュレーションにより計算した2つの計算例を示します。

パンタグラフの挙動解析

パンタグラフを構成する部材の三次

元挙動を解析した例として、前述した可動すり板方式パンタグラフの解析結果を図7に示します。なお、図7は紙面手前から奥に向けてパンタグラフが移動しています。このシミュレーションで使用したパンタグラフはシングルアームパンタグラフで、細分化された複数のすり板(図7拡大図の黒の太線)が微動ばね(図7拡大図の紫線)を介して舟体と接続されています。図7からわかるように、このような構造のパンタグラフでは、トロリー線との接触点付近のすり板のみが動き、接触点から離れたすり板は動いていないことが

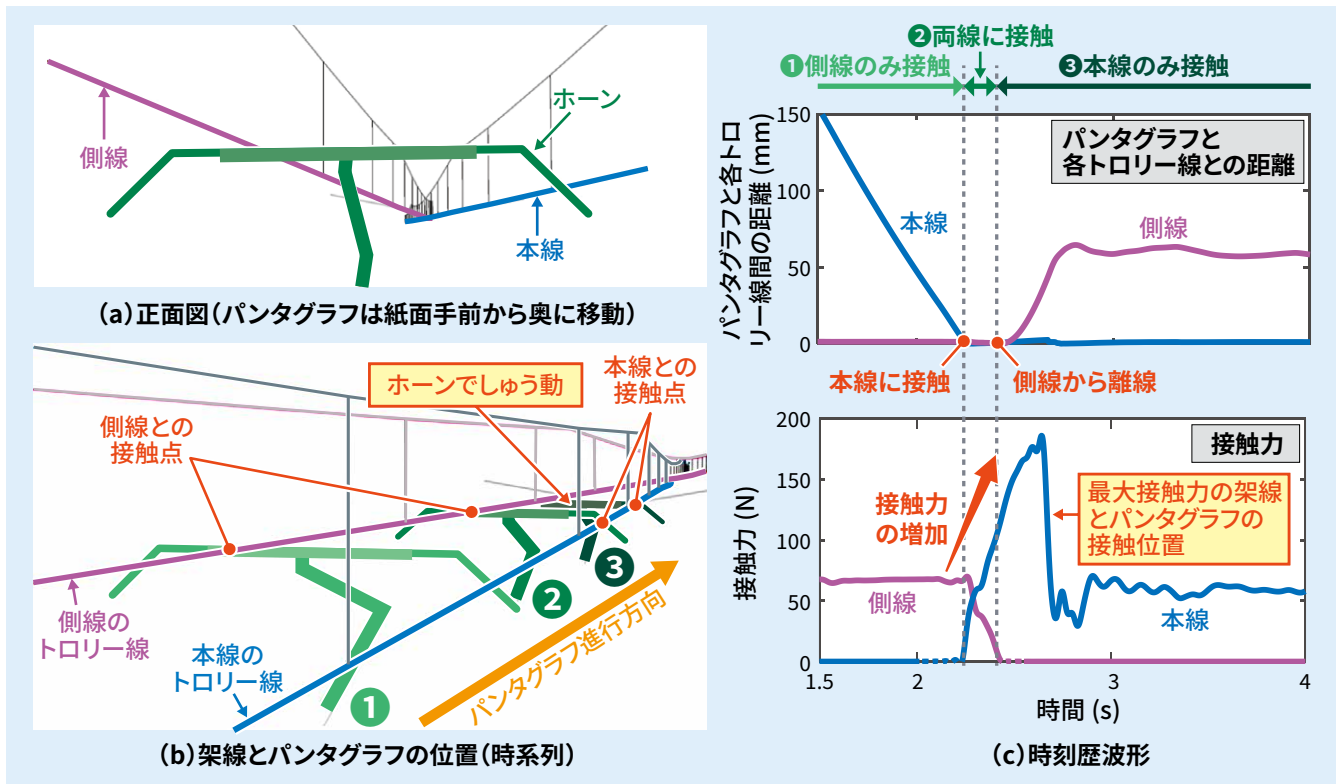


図8 線路が合流する箇所の解析結果

わかります。

このような新たな計算モデルを構築することで、これまでは考慮できなかった複雑な構造のパンタグラフの性能評価ができ、近年機構が複雑化・高度化しているパンタグラフの開発や改良に活用できると考えられます。なお、図3に示した従来のシミュレーションでは、すり板を一つの質点として表現しているため、複数の可動すり板の挙動を個別に再現することができません。

線路が合流する箇所の解析

次に、架線の三次元配置を考慮した解析として、線路が合流する箇所を対象とした解析例を示します(図8)。2本の線路が合流する場合、一方を本線、他方を副本線、側線などといいます。このような箇所では、各線路の上方にある計2組の架線が交差もしくは近接して架設されています。ここでは、本線を走行する際にパンタグラフが本線のトロリー線のみと接触するように、トロリー線は側線よりも本線の方が低

くなるように架設されています。一方、図8(a)に示すように側線から本線に進入する際には、パンタグラフが側線のトロリー線から本線のトロリー線にスムーズに移行できるように架設される必要があります(図8(a))。

図8(b)は側線から本線に車両が進入する際の地点ごとのパンタグラフの位置と架線との接触点を示しています。地点①ではパンタグラフは側線の架線のみと接触していますが、地点②では側線の架線と接触しつつ本線の架線をホーンで押し上げながら進んでいきます。さらに進んだ地点③より先では側線の架線から離れて本線の架線のみと接触するようになります。

図8(c)は、本解析で得られた結果を示しており、上の図はパンタグラフと各トロリー線間の距離の変化を、下の図は接触力の大きさの変化を示しています。地点②の前後で側線のトロリー線から本線のトロリー線に移行する様子を読み取ることができます。

このような解析結果を用いることで、

車両の速度向上にともなう安全性の検討や、トロリー線摩耗の原因究明などを行うことができます。

おわりに

架線とパンタグラフの三次元挙動を再現するシミュレーションについて解説しました。このような三次元シミュレーションを行うことで、架線やパンタグラフ開発の効率化や、三次元挙動の把握、事故原因の究明などが行えるようになると考えられます。今後は架線とパンタグラフのさまざまな課題解決に本シミュレーションを活用していきます。RRR

文献

- 1) 長尾恭平, 小山達弥, 池田充: 架線・パンタグラフの動的挙動を再現する, RRR, Vol.77, No.4, pp.16-19, 2020
- 2) 小山達弥, 長尾恭平, 池田充: 架線・パンタグラフの三次元シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.34, No.9, pp.5-10, 2020