

パンタグラフ走行試験による 架線・パンタグラフシミュレータの妥当性検証

長尾 恭平* 小山 達弥 小林 樹幸 (鉄道総研)

Validation of Catenary-Pantograph Simulation with Experimental Data of Running Test of the Pantograph

Kyohei Nagao*, Tatsuya Koyama, Shigeyuki Kobayashi, (Railway Technical Research Institute)

The catenary-pantograph simulation has been developed in Railway Technical Research Institute (RTRI). The simulation model of catenary is based on finite element method, and the pantograph model is based on flexible multibody dynamics. In this paper, the validation procedure of the simulation is shown. For validation, running test of the pantograph is conducted using the current collection testing equipment in RTRI. Then, the validity of simulation is evaluated by comparing experimental and numerical result of running tests of pantograph.

キーワード：電車線，パンタグラフ，有限要素法，マルチボディダイナミクス，集電試験装置，妥当性検証
(Overhead contact line, pantograph, finite element method, multibody dynamics, current collection testing equipment, validation)

1. はじめに

鉄道総研では、架線・パンタグラフ系の運動に関する現象解明や設計への応用，メンテナンスへの活用を見据えて、架線・パンタグラフシミュレータの開発を継続的に進めている^{(1)~(3)}。現在では、3次元柔軟マルチボディダイナミクスのパンタグラフモデルが任意の線形の軌道の上に架設された架線に対して走行する運動シミュレーションを実行することが可能である⁽⁴⁾。

一方、シミュレーションの開発においては、実現象と比較し、その計算結果の妥当性を評価することが重要である。上述のシミュレータに関しては、現在のところ、従来の2次元シミュレーション⁽⁵⁾の結果との比較による計算結果の検証に留まっており、実現象との比較・検証は十分ではない。

そこで、本稿では、上述の架線・パンタグラフシミュレータの妥当性検証のためのデータ取得を目的として、鉄道総研が所有する実験設備である集電試験装置⁽⁶⁾を用いて架線に対してパンタグラフをしゅう動走行させる試験を実施した。そして、試験で取得したパンタグラフ高さ・トロリ線変位や、パンタグラフとトロリ線の間の接触力等の動的なデータと、シミュレーションによる計算結果との比較・検証を行ったので結果を報告する。

2. パンタグラフモデル

集電試験装置によるパンタグラフ走行試験では、在来線用下枠交差型パンタグラフを用いる。ここで、近年一般的なシングルアーム型ではなく、下枠交差型を用いる理由は、下

枠交差型の方がリンク機構の前後方向の対称性が高いため、集電試験装置による急激な加減速により励起される不自然な振動がシングルアーム型と比較して小さく、妥当性の検証がより容易になると考えたためである。

パンタグラフモデルは、3次元柔軟マルチボディダイナミクス (MBD) に基づき作成した⁽⁷⁾。図1 (a)に作成したモデルの全体図を示す。本パンタグラフは大きく、枠組・舟支え・舟体からなる3元系のパンタグラフモデルであり、従来の質点モデルで表現すると図1 (b)のようになる。

MBDモデルの寸法、剛性等のパラメータは、主に実機パンタグラフの材質・寸法から決定される。しかし、減衰等を中心としたパラメータは実機の加振試験結果と良く一致するように同定する必要がある。同定手法については、既報⁽⁸⁾に詳しいため、ここでは詳細には述べないが、まずはパン

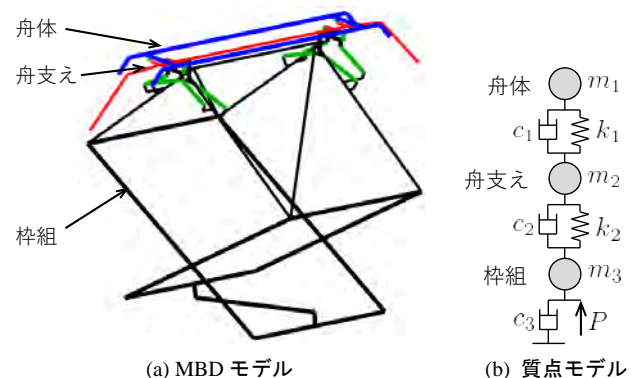


図1 在来線パンタグラフモデル

タグラフの部材のストローク限界を決めるストップ機構が作用しない小振幅での実機パンタグラフの加振試験によってモデルを同定した後で、ストップを付与したモデルで大振幅加振を行い、その追従振幅特性を確認する。

図 2 に実機およびパラメータ同定したパンタグラフモデルをそれぞれ加振した際の、加振力に対する加速度応答の周波数応答関数を比較して示す。参考に質点モデルの周波数応答関数も示している。MBD モデルでは、加振偏位に応じて変化する応答特性を良く再現できていることが分かる。図 3 にモデルのモード形状の例を示す。振動の形状についても実機を再現できていることを確認している。

さらに、パンタグラフのストップが作用する状況下での比較として、実機とモデルをそれぞれ大振幅で加振し、追従振幅特性を求めた。追従振幅とは、パンタグラフを正弦波加振した際に、パンタグラフが加振点から離れずに追従できる最大振幅を表す。図 4 を見ると、両者の傾向は一致していることが確認できる。特に、6 Hz 付近では、質点モデル

に対して、MBD モデルの方が実機の特徴を良く再現できている。本稿では、本 MBD モデルを用いて、走行シミュレーションを実施する。

3. 集電試験装置走行試験

〈3・1〉 集電試験装置の構成 集電試験装置は、実物のパンタグラフを搭載した走行台車がリニアモーター駆動により走行し、その時の架線とパンタグラフとの間の集電にともなう現象を観測することのできる装置である。

今回の試験における集電試験装置の電車線路平面図を図 5 に示す。架線はシンプル架線であり、ちょう架線は $St90mm^2$ 、トロリ線は $GT110mm^2$ 、各張力は 1t である。

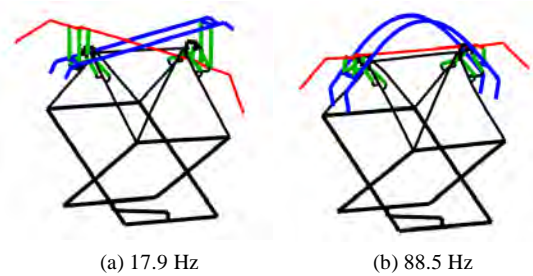
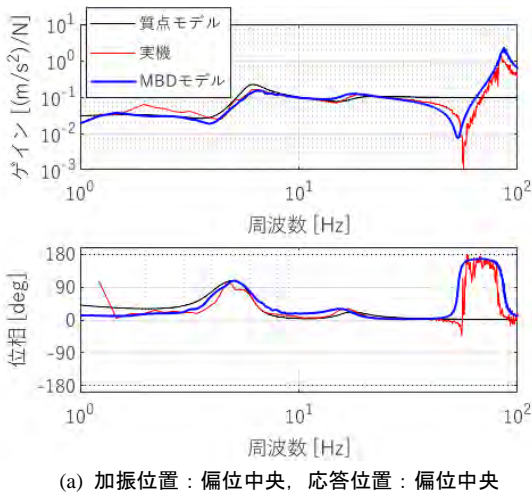
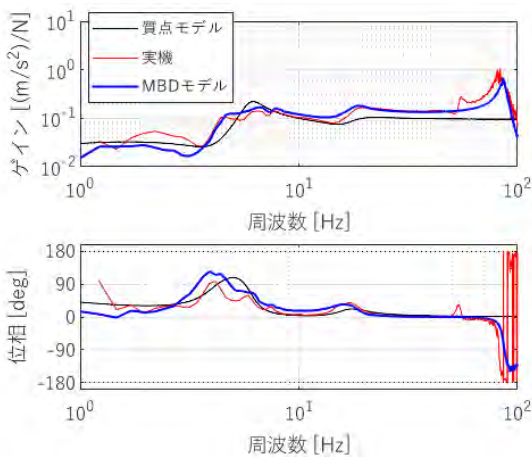


図 3 パンタグラフモデルのモード形状の例



(a) 加振位置：偏位中央、応答位置：偏位中央



(b) 加振位置：偏位 100mm、応答位置：偏位 450mm

図 2 実機とモデルの周波数応答関数の比較

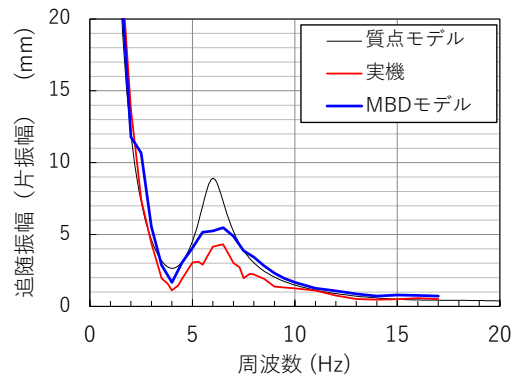


図 4 実機と計算モデルの追従振幅特性の比較 (偏位中央)

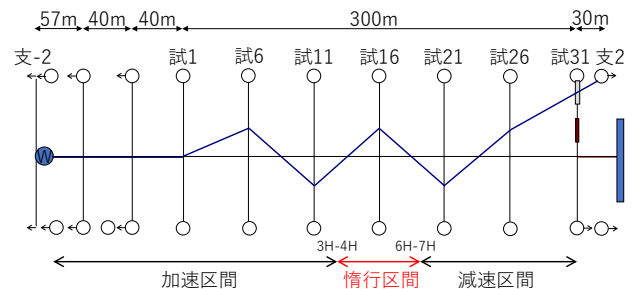


図 5 集電試験装置の架線構成

惰行区間 (試 11～試 21 間) において、径間 50 m、架線偏位 200 mm とし、架線高さは 2300 mm (実設備で R.L.5000 mm 相当) でできるだけ一定となるように架線を設定した。図 5 の架線に対して、図の左側から右側へと在来線用パンタグラフを最大時速 130 km で走行させたときのパンタグラフおよび架線の応答を測定した。測定項目および測定装置の概要を図 6 に示す。さらに、図 7 の舟体に取りつけた加速度センサおよびひずみゲージの出力の線形結合によってパンタグラフ接触力を算出した⁽¹⁰⁾。試験結果は 3.3 節にて、シミュレーションの結果と合わせて示す。

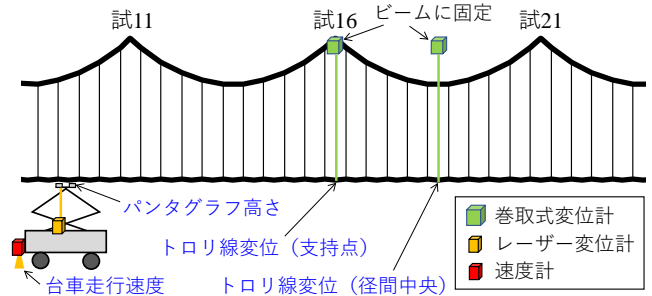


図 6 集電試験装置の架線構成

〈3・2〉 架線モデル 集電試験装置の構成に対応する 3 次元有限要素モデルの架線モデルを作成した。図 8 に走行開始直前の架線およびパンタグラフモデルの俯瞰図を示す。架線モデルの諸元は表 1 に示す通りである。

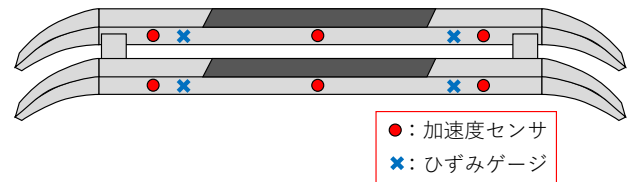


図 7 接触力測定用舟体

〈3・3〉 結果の比較 走行試験とシミュレーションの結果の比較を図 9～図 12 に示す。結果の比較に際して、すべての波形に 20 Hz のローパスフィルタ処理を施している。

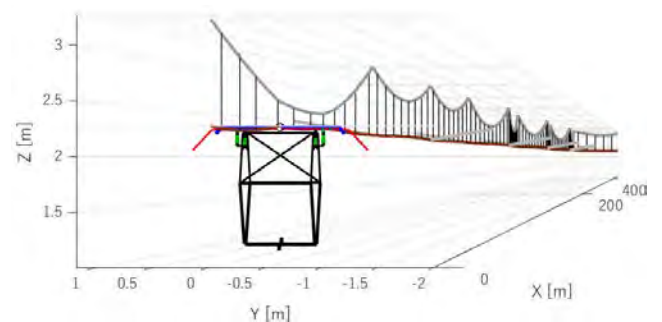


図 8 架線・パンタグラフモデル俯瞰図

図 9 は、支持点 (試 16) のトロリ線変位の時刻歴応答である。パンタグラフ通過時の変位最大値は、実験で 14.1 mm、計算で 15.1 mm であり、波形・値ともに良く一致している。しかし、残留振動の波形が異なっている。これは、支持点箇所の曲線引金具を精緻にモデル化しなかった影響であると考えられる。

表 1 架線モデルの諸元

図 10 は径間中央 (試 16～試 21 間) のトロリ線変位の時刻歴応答である。変位最大値は、実験で 68.7 mm、計算で 72.4 mm であり、良く一致している。残留振動も良く一致しているが、15 秒までの前駆振動は、実験と比較して計算の方が小さい。

	線種	張力	標準* 要素長	質量比 例減衰	剛性比 例減衰
トロリ線	GT110 mm ²	1 tf	0.25 m	5×10 ⁻⁴ s	1×10 ⁻⁴ s
ちょう架線	St90 mm ²	1 tf	0.5 m	5×10 ⁻⁴ s	1×10 ⁻⁴ s

図 11 はパンタグラフ高さの時刻歴波形である。実験値の分解能が低く、詳細な精度は議論できないが、計算結果は実験の径間周期の振動を良く再現できているといえる。

※試験装置の架線寸法を再現するために、要素長は一定ではなく、要素により若干異なる。

図 12 は接触力の時刻歴波形である。まず、波形の傾向であるが、径間ごと (惰行区間で約 1.4 秒周期) の接触力の増減の傾向は実験と計算で良く一致している。一方、惰行区間における接触力の平均値は、実験で 100.0 N、計算で 71.0 N、標準偏差はそれぞれ 24.6 N、17.6 N と大きく異なる。ただし、実験値が必ずしも正しいとは言えない。なぜなら、パンタグラフの押上力は 59 N に設定しているため、130 km/h での走行時のパンタグラフ揚力を加味しても、平均接触力は、65 N 前後になることが妥当と考えられるからである。本原因としては、軌道の不整による台車の振動の影響や、センサによる接触力の推定精度の影響が考えられるが、トロリ線変位が良好に一致していることを考えると、接触力の推定精度に問題がある可能性が高い。原因の詳細は調査中である。

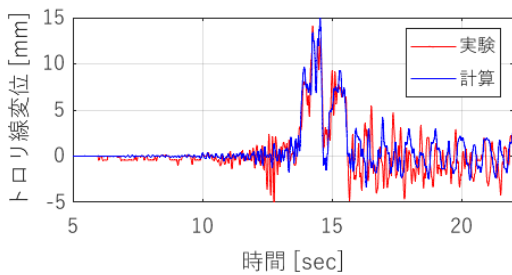


図9 トロリ線変位(支持点)の時刻歴応答

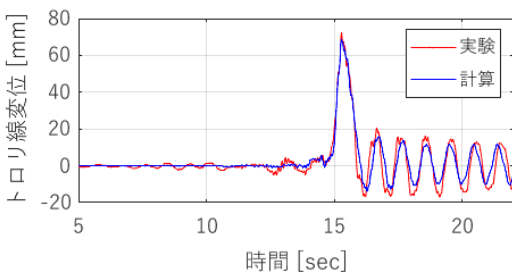


図10 トロリ線変位(径間中央)の時刻歴応答

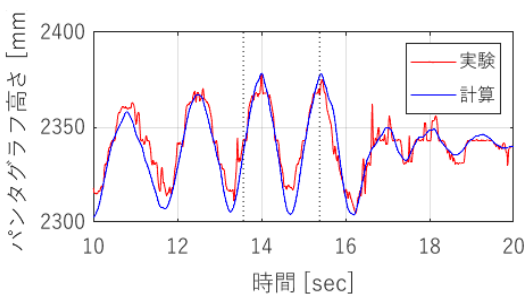


図11 パンタグラフ高さの時刻歴応答

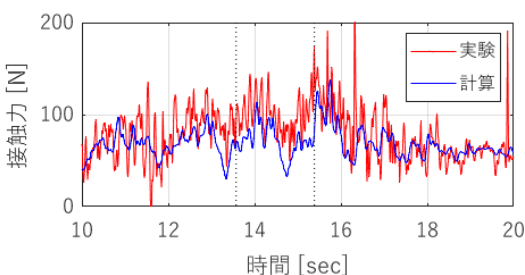


図12 接触力の時刻歴応答

4. おわりに

鉄道総研で開発を進めている架線・パンタグラフの運動シミュレータの妥当性を検証するために、集電試験装置を用いて架線に対してパンタグラフをしゅう動走行させる試験を実施した。試験で取得したトロリ線変位、パンタグラフの高さ、およびパンタグラフとトロリ線間の接触力とシミュレーションによる計算結果との比較・検証を行った結果、次のことが確認できた。

- 支持点、径間中央のトロリ線変位に関して、変位最大値は良好に一致する。しかし、支持点の残留振動の波形に差異がみられる。
- パンタグラフ高さに関して、計算により、実験の径間周期の振動を良く再現できている。
- 接触力は、径間周期の接触力の増減の傾向は良く一致している。しかし、実験の方が接触力の平均値が 20 N 以上大きく、値も 100 N と過大であるため、実験の接触力推定の精度が疑われた。

以上により、架線・パンタグラフシミュレーションでは、実設備の動的な応答を精度良く再現可能であることが確認された。

今後は、曲線引金具やブラケットのモデルを精緻化し、より精度の高いシミュレーションを目指すとともに、接触力等の測定手法の改良についても継続的に検討していく。

文 献

- (1) 池田 充：「有限要素法による架線・パンタグラフ系の 3 次元運動シミュレーション」, Dynamic and Design Conference 2011, CD-ROM (2011)
- (2) 小山達弥, 池田充：「任意軌道に対する電車線モデルの作成手法(その1)」, 日本機械学会, 2017 年度 年次大会 Web 論文集(2017)
- (3) 池田充, 小山達弥：「任意軌道に対する電車線モデルの作成手法(その2)」, 日本機械学会, 2017 年度 年次大会 Web 論文集(2017)
- (4) 小山達弥, 長尾恭平, 池田充, 臼田隆之：「MBD モデルを用いた架線・パンタグラフの三次元運動シミュレーション」, Dynamic and Design Conference 2020, CD-ROM (2020)
- (5) 山下義隆, 池田充：「可変剛性ばねによるパンタグラフの追従性能向上(第一報：追従性能向上手法概要と数値シミュレーションによる確認)」, 日本機械学会論文集 C 編, No.77-777, pp.1990-1997(2011)
- (6) 佐藤宏紀, 原田智：「電車線とパンタグラフの性能を評価できる集電試験装置」, RRR, Vol.74, No.12 pp.10-13 (2017)
- (7) 長尾 恭平・小山 達弥・池田 充・臼田 隆之：「マルチボディダイナミクスを用いた 3 次元パンタグラフモデル」, 第 24 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL2017), CD-ROM (2017)
- (8) 長尾 恭平・小山 達弥・池田 充：「実機パンタグラフ加振試験による 3 次元パンタグラフモデルのパラメータ同定」, 第 25 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL2018), No.25, pp.1309, CD-ROM (2018)
- (9) 長尾浩平, 小山達弥, 池田充, 臼田隆之：「変位拘束を受ける舟体を有する 3 次元パンタグラフモデルの追従振幅の計算」, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL2019), No.26, pp.S7-1-3, CD-ROM (2019)
- (10) 池田充：「擬似逆行列を用いた振動の逆問題によるパンタグラフ接触力測定法」, 日本機械学会, 年次大会講演論文集, No.2002-7, pp.181-182 (2002)