

## 架線・パンタグラフの三次元シミュレーション

小山 達弥\* 長尾 恭平\* 池田 充\*\*

## Three-dimensional Simulation of Catenary/Pantograph Dynamic Interaction

Tatsuya KOYAMA Kyohei NAGAO Mitsuru IKEDA

Simulation of Catenary/Pantograph dynamic interaction is often used for understanding the dynamic behavior of the overhead contact lines and pantographs stably to supply electric power to a vehicle. However, since lumped-mass model of the pantograph has been used in the conventional simulation, the three-dimensional dynamic behavior of a pantograph is not able to be calculated. The authors developed a new simulation method using a three-dimensional model of overhead contact lines and a pantograph. This paper shows this simulation method, especially contact analysis between contact lines and a pantograph, with a simulation result when a pantograph passes a crossing section.

キーワード：パンタグラフ，架線，三次元シミュレーション，接触解析，集電，わたり区間

## 1. はじめに

電気鉄道において電力を車両に供給するシステムとして架空式電車線（以下、「架線」という）およびパンタグラフが国内外を問わず広く用いられている。車両に対して電力を安定供給するためには、架線とパンタグラフの動的挙動を十分に把握する必要があり、理論解析<sup>1)</sup>やシミュレーションによる解析が行われている。特に、パンタグラフが架線から離れる「離線」や、ハンガ頂部がパンタグラフの押上力によりちょう架線から離れる「ハンガ浮き」といった非線形現象を考慮した定量的な評価を行うためにはシミュレーションによる解析が不可欠であり、国内外を問わずシミュレーション手法の開発が進められている<sup>2)</sup>。

日本においては、1960年代後半に江原らによって、架線を上下方向およびレール方向に配置した質点と弦により、モデル化した、差分法によるシミュレーション手法が開発された<sup>3)</sup>。その後、この手法をもとにした方式が様々な改良を加えられて発展してきた<sup>4) 5)</sup>（以下、手法①）。さらに、2010年頃には、直線の線路上に配置した架線をはり要素によりモデル化した有限要素法によるシミュレーション手法が開発された<sup>6)</sup>（以下、手法②）。手法①では架線が鉛直方向にしか自由度を持たなかったのに対して、手法②では鉛直方向に加えて水平面内の線路直角方向への変形・運動を考慮できるため、架線のジグザグ偏位や横風による架線のはらみの影響などを考慮可能である。いずれの手法も直線区間をパンタグラフが

走行することを前提にしており、またパンタグラフは質点とばねによりモデル化していた。

一方、パンタグラフの三次元形状が影響を及ぼす区間、例えばわたり区間における架線とパンタグラフの運動解析手法が、事故究明などの観点から求められている。わたり区間の解析を実現するためには、以下のモデルおよび解析手法が必要となる。

- ・ 本線側架線と側線側架線の2組の架線モデル
- ・ 側線側架線は曲線区間上に架設されるため、曲線区間を表現可能な架線モデル
- ・ 他の架線への移り変わりを再現するための線路直角方向に幅を持ったパンタグラフモデル
- ・ パンタグラフの移動を再現するための線路の線形に応じたパンタグラフの走行軌跡
- ・ 上記の架線とパンタグラフの三次元的な接触を計算するための接触解析手法

筆者らは、これらの課題を解決するために三次元の架線モデルとパンタグラフモデルによるシミュレーション手法（以下、本手法）を開発することとした。これまでに、以下のモデルを構築している。

- ・ 手法②の架線モデルの節点自由度を6自由度に拡張することで、曲線区間や勾配区間を含む任意線形の軌道上に架設可能な架線モデル<sup>7) 8)</sup>
- ・ パンタグラフの三次元運動を再現可能なモデル<sup>9)</sup>

これらのモデルを統合し、かつ架線とパンタグラフの三次元的な接触を解析可能な架線・パンタグラフの三次元シミュレーション手法を開発することが本研究の目的である<sup>10)</sup>。本報では、本手法であらたに追加した三次元の接触解析法を提案するとともに、本手法を用いた計算事例としてわたり区間における計算結果を示す。

\* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

\*\* 電力技術研究部

## 2. 架線モデルとパンタグラフモデル

本章では、架線・パンタグラフの運動シミュレーションで用いる三次元架線モデルと三次元パンタグラフモデルについて概説する<sup>7) 8) 9)</sup>。

### 2.1 架線モデル

架線モデルは三次元有限要素モデルとし、架線を構成するトロリ線などの線条や、ハンガなどの架線金具を曲げ変形や伸縮、ねじれを考慮可能なはり要素に分割して表現する(図1)。ハンガ頂部がちょうど架線から離れる「ハンガ浮き」に対しては、ハンガ頂部の節点とちょうど架線の節点を共有化せずにばねを挿入することで再現する。具体的には、ハンガ頂部とちょうど架線の節点間に作用方向の異なる3方向のばねを挿入する。このうち、線路方向と線路直角方向にはばね定数の大きな線形ばねを挿入し、鉛直方向にはハンガ浮きを再現するためにハンガがちょうど架線から離れたときの剛性が0N/m、接触しているときには大きなばね定数(1×10<sup>5</sup>N/m)となる非線形ばねを挿入する。また、トロリ線などの線条については、引留装置の構成に応じて境界条件を変更し、固定式の場合は線条の端部の鉛直方向、線路方向、線路直角方向への変位を拘束し、自動張力調整装置がある場合は鉛直方向の変位を拘束しつつ線条長手方向に張力相当の荷重を与える。

この架線モデルの特徴は次のとおりである。

- ・ 曲線区間や勾配区間を含む任意線形の線路上に架設が可能
- ・ わたり区間など、複数の架線がある区間を考慮可能
- ・ ハンガ浮きを考慮可能
- ・ 線膨張係数を与えて線条の伸縮を計算することで、気温変化に伴う架線構造の変化を再現可能
- ・ 横風による線路直角方向へのはらみを再現可能

### 2.2 パンタグラフモデル

パンタグラフも架線と同様に、各部材を三次元のはり要素でモデル化することでパンタグラフ全体のモデルを構築する。ただし、パンタグラフの場合は下枠と上枠間にリンク機構があることから、リンク機構を再現可能なモデル化を行った(図2)<sup>9) 11)</sup>。なお、パンタグラフの舟体は、舟体を支える部材(図2では天井管)に対して一定量以上の変位が生じないように、ガイドやストップなどによって拘束されている。そこで、本報の解析に用いるパンタグラフモデルは既報<sup>7)</sup>でのモデルを使用し、以下のようにして復元ばねのストローク制限(以下、ストップという)を考慮する。

図2拡大図の「ストップの作用点」と表記した節点を常時監視し、ストップの作用点がストップに当たったと

きに大きな復元力を発生させる非線形ばねを挿入した。具体的には、ストップの作用点がストップに接触した際に、十分に剛なばね(1×10<sup>5</sup>N/m)で復元力を発生させることでそれ以上の変位を抑制し、接触していない場合はばね定数を0N/mとすることでストップの挙動を再現した。

## 3. 架線・パンタグラフのシミュレーション手法

以上に述べた架線モデルとパンタグラフモデルを組み合わせ、三次元架線・パンタグラフシミュレーションを構築した。シミュレーションを実行するための計算条件の設定と計算手順のフローを図3に示す。

計算に必要となるパラメータは、

- ・ 径間長や線条のヤング率などの架線条件
- ・ パンタグラフ自体の構造や部材の密度などのパンタグラフ条件
- ・ パンタグラフが走行する線路の曲線半径や勾配、カントなどの軌道条件
- ・ パンタグラフの走行速度などの運転条件

である。これらの他に気温変化に伴う架線構造の変化を再現する場合は気温変化量や、横風による架線のはらみを再現する場合は横風風速といった環境条件を設定する。これらのパラメータから、架線およびパンタグラフの三次元モデルを生成し、さらに走行に伴うパンタグ

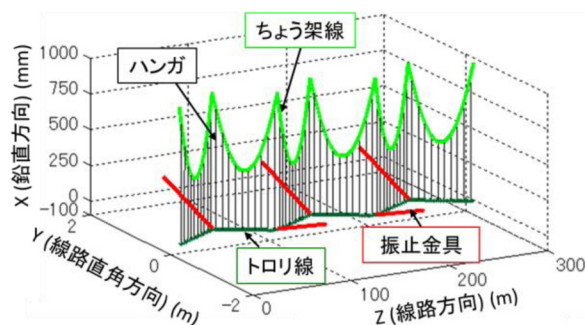


図1 有限要素による架線の三次元モデル

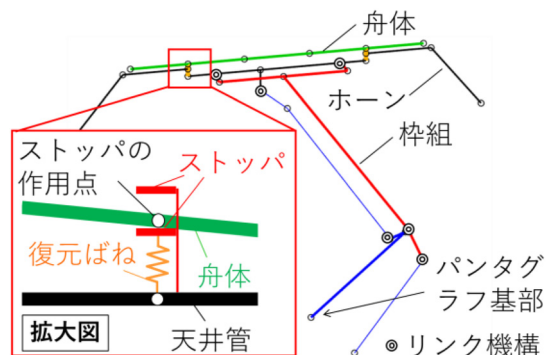


図2 有限要素によるパンタグラフの三次元モデル

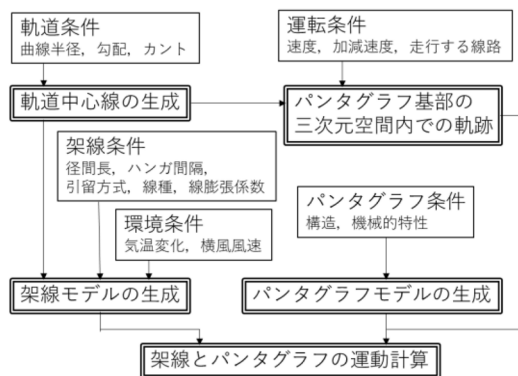


図3 架線・パンタグラフシミュレータの計算手順

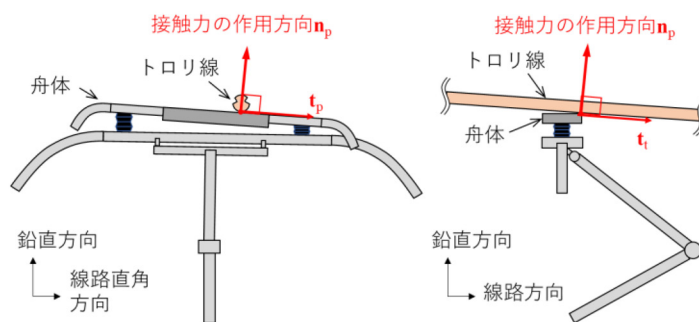


図4 接触力の作用方向の概略図

ラフ基部 (図2) の軌跡をあらかじめ計算してパンタグラフ全体の三次元空間内における位置と向きを求めておき、架線とパンタグラフの接触解析を実行する。なお、紙面の都合上詳細は割愛するが、本手法の機能として、車両運動シミュレータ<sup>12)</sup>によりパンタグラフ基部の軌跡を計算することで車両動揺を考慮したシミュレーションを行うことや、空気流動シミュレータ<sup>13)</sup>によりトンネル内の流速を計算することでトンネル突入時およびトンネル内のパンタグラフ周りの流速変化を考慮した考慮したシミュレーション<sup>14)</sup>を行うことが可能である。ただし、前者については前述の計算条件に加えて台車間距離などの条件が、後者についてはトンネル断面などの条件がそれぞれ必要となる。

以上のように生成した架線モデルなどを用いて、架線とパンタグラフの運動解析を実行することで、架線・パンタグラフ間の接触力 (以下、接触力と記す) や各部材の変位を求める。以下では、運動解析の核となる、架線とパンタグラフの接触解析および運動方程式の解法について詳述する。

### 3.1 接触解析

架線とパンタグラフの相互作用を考慮した運動解析を行うためには、架線とパンタグラフの接触解析が必要となる。代表的な接触解析法として拘束接触法と弾性接触法があるが<sup>15)</sup>、本シミュレータでは扱いが容易な後者を採用し、トロリ線とパンタグラフ舟体間にペナルティばねを設けることとした。なお、接触解析の前提として、架線側ではトロリ線を構成する要素 (以下、トロリ線要素) が、パンタグラフ側では舟体もしくはホーンを構成する要素 (以下、舟体要素) が相互に接触するものとしている。また、トロリ線には左右偏位や勾配があり、舟体にはローリングなどの三次元的な運動が生じるため、これらを考慮して架線とパンタグラフの間には舟体長手方向とトロリ線長手方向の両方と直交する向きに接触力が生じると仮定する (図4)。

このとき、ペナルティばねによる架線とパンタグラフ間の接触力  $F_{\text{cont}}$  は式 (1) により算出する。

$$F_{\text{cont}} = \alpha x_r + \beta \dot{x}_r \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$  はそれぞれペナルティばねのばね定数と減衰定数、 $x_r$  は架線側接触点とパンタグラフ側接触点との相対変位の接触力の作用方向成分である。また、変数上部の「 $\cdot$ 」は時間微分を表し「 $\cdot$ 」の数が階数を示す。 $\alpha$  は着線時は正の値 (50,000N/m)、離線時は 0N/m となるように、 $\beta$  は着線かつパンタグラフが架線に貫入する方向の場合は正の値 (10,000Ns/m)、それ以外の条件では 0Ns/m となるように、それぞれ非線形特性を持たせた。

接触する要素の特定と接触点の探査、および接触力の方向の決定は以下の手順により行う。まず、1 ステップ前に接触していた要素 (1 ステップ目の場合は要素に割り当てた要素番号が小さい要素) を対象として、トロリ線要素両端の節点を結ぶ線分 (図5の青い破線) の方向ベクトル  $t_t'$  と舟体要素両端の節点を結ぶ線分 (図5の緑の破線) の方向ベクトル  $t_p'$  の外積から仮の接触力方向  $n_p' (= t_t' \times t_p')$  を算出する。つぎに、これらの線分を仮の接触力方向  $n_p'$  に垂直な平面に投影し、投影した線分の交点の有無を判定する。ここで、交点が存在する場合には、この交点をトロリ線要素と舟体要素の接触点とする。交点が存在しなかった場合には、交点の探索対象の要素を更新し、交点が見つかるまで繰り返す。

交点が決めた後は、各節点の状態量ベクトル、形状関数に各線分に対する交点の内分比を代入した行列、および要素座標系から全体座標系に変換する座標変換行列などを基にトロリ線要素と舟体要素の接触点における三次元空間内の座標および速度をそれぞれ算出する。これらの座標および速度から離着線の状態や相対速度の向きに応じた  $\alpha$ 、 $\beta$  を選択して、式 (1) により接触力を算出する。この際、接触点におけるトロリ線要素と舟体要素の接線ベクトル  $t_t$ 、 $t_p$  をそれぞれ算出し、その外積から

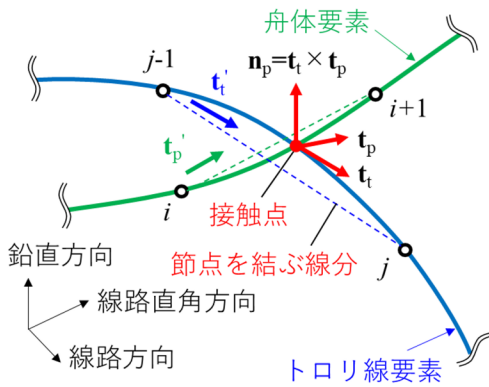


図5 要素間の接触力の作用方向

あらためて接触力の方向  $\mathbf{n}_p$  を算出する (図5)。また、後述する運動方程式を数値積分により解く際には、全節点の状態量ベクトルと接触行列の積により記述されるベクトル形式で接触力を表現するため、 $\alpha, \beta, \mathbf{n}_p$ , 形状関数, 座標変換行列から成る接触行列を作成する。

### 3.2 運動方程式の解法

架線・パンタグラフの運動シミュレーションにおける運動方程式を式(2)に表す。

$$\mathbf{G}_m + \mathbf{G}_c + \mathbf{G}_k = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{\text{cont}} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{G}_m, \mathbf{G}_c, \mathbf{G}_k$  はそれぞれ架線とパンタグラフを含む系全体の慣性力、減衰力、復元力をそれぞれ表す。 $\mathbf{F}$  は、架線モデルに対するちょう架線の支持点反力、張力など、パンタグラフモデルに対する押上力などの外力を、 $\mathbf{F}_{\text{cont}}$  はベクトル形式で表現した接触力をそれぞれ表す。

この運動方程式を数値積分 (Newmark- $\beta$  法) により解くが、式(2)には非線形項が含まれるため収束計算 (Newton-Raphson 法) を実行する。収束計算では、架線およびパンタグラフの幾何学的非線形性に起因して生じる各節点の不釣り合い力が無視できる程度以下に小さくなるまで繰り返し計算を実行する。

前述のように、各計算ステップでは架線とパンタグラフの接触状態 (離線または着線, 相対速度の正負) に応じてペナルティ係数  $\alpha, \beta$  を更新し、またちょう架線に対するハンガの接触状態 (接触または浮き) によってもばね定数を更新する。しかしながら、収束計算の過程でペナルティ係数等を更新すると計算が不安定になる (収束しない) 可能性がある。そこで、本シミュレータでは次の方法によりこれらの更新を行う。

- $n-1$  ステップ目の接触状態が  $n$  ステップ目でも継続するものと仮定して数値積分および収束計算を実行して第一収束解を得る。

表1 接触解析の検証に用いた計算条件

【架線条件】		【パンタグラフ条件】	
径間長	50m	種別	在来線用シングルアームパンタグラフ
径間数	6 (全長300m)	基数	1基
線条種別	トロリ線	走行速度	110km/h
	ちょう架線		
張力	トロリ線	【その他の条件】	
	ちょう架線		
ハンガ数	10本/径間		
架線偏位	なし	時間刻み	本手法 1ms, 従来手法 約16ms
ハンガ浮き	あり	架線モデル	要素長 0.25m, 質点間隔 0.5m

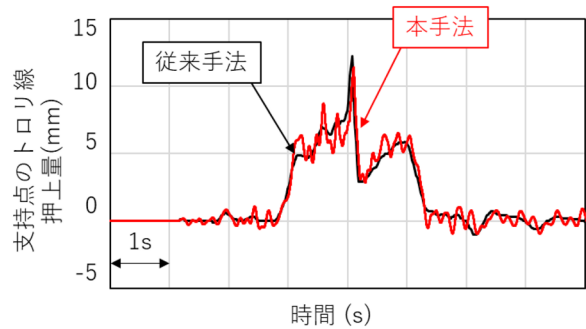


図6 従来シミュレータとの比較 (第三支持点のトロリ線押上量)

- 接触状態を確認し、 $n$  ステップ目と  $n-1$  ステップ目の接触状態に変化がなければ第一収束解を  $n$  ステップ目の解であるものとして次ステップ ( $n+1$  ステップ) の計算に進む
- $n-1$  ステップ目と  $n$  ステップ目の接触状態が異なれば、第一収束解の接触状態に合致するペナルティ係数やばね定数を用いて数値積分および収束計算を再度実行する。これにより得られた近似解を  $n$  ステップ目の解として次ステップの計算に進む。

なお、本シミュレータでは、静押上力に揚力を加算した押上力でパンタグラフが架線に着線している条件において、静的な釣り合い状態を解いた結果として得られる架線とパンタグラフの位置を、運動解析の開始位置としている。

## 4. 接触解析の検証

本手法における接触解析方法の検証を行うために、従来手法の差分法による二次元シミュレーション<sup>4)</sup> との比較を行った。ただし、前述のように二次元シミュレーションは直線区間を想定し、架線偏位を考慮できないことから、本シミュレーション手法でも架線偏位なしの条件で計算を行った。計算条件を表1に、比較結果を図6にそれぞれ示す。

各手法による結果を比較すると、架線・パンタグラフのモデルや解法の違いがあるため完全には一致しないものの、トロリ線押上量の最大値や低い周波数領域での変動が同等であるため、本手法で用いた接触解析により概ね妥当な計算が可能であると考えられる。

### 5. 計算例

本シミュレーション手法による計算例として、わたり区間走行時のシミュレーション結果を示す<sup>10)</sup>。計算条件は以下のとおりである。

- ・ 本線の軌道は直線とし、側線の軌道は分岐付近で曲線半径約930mの曲線とする。
- ・ 本線・側線共に架線をPHCシンプル架線とする。

- ・ わたり線は交差わたりとし本線の起点から120m付近に交差箇所を設ける。
- ・ 本線と側線のトロリ線の交差箇所に交差金具を模擬したばねを挿入し双方を接続する。
- ・ わたり線のトロリ線は本線のトロリ線よりも60mm上方に架設する。
- ・ 新幹線用パンタグラフが側線から本線に30km/hで進入するものとする。

架線条件を表2に、線路の軌道中心線と架線の静構造計算結果を図7にそれぞれ示す。また、計算結果として、計算開始から1.8秒後(時刻①)、2.35秒後(時刻②)、2.9秒後(時刻③)のパンタグラフ位置と接触点を図8に、トロリ線高さ等の波形を図9にそれぞれ示す。なお、図8では、パンタグラフは紙面手前から紙面奥に向けて進む様子を示している。図9内の①～③は図8内の時刻①～③をそれぞれ示している。また、パンタグラフ高さは、接触点ではなく舟体中心のすり板上面高さを示しているため、トロリ線高さと必ずしも一致しない。

表2 わたり区間の計算に用いた計算条件

径間長	50m	
径間数	本線：4径間 側線：3径間	
線条種別	トロリ線	PHC110mm <sup>2</sup>
	ちょう架線	PH150mm <sup>2</sup>
張力	トロリ線	19800N
	ちょう架線	19800N
ハンガ数	10本/径間	
架線偏位	あり	
ハンガ浮き	あり	

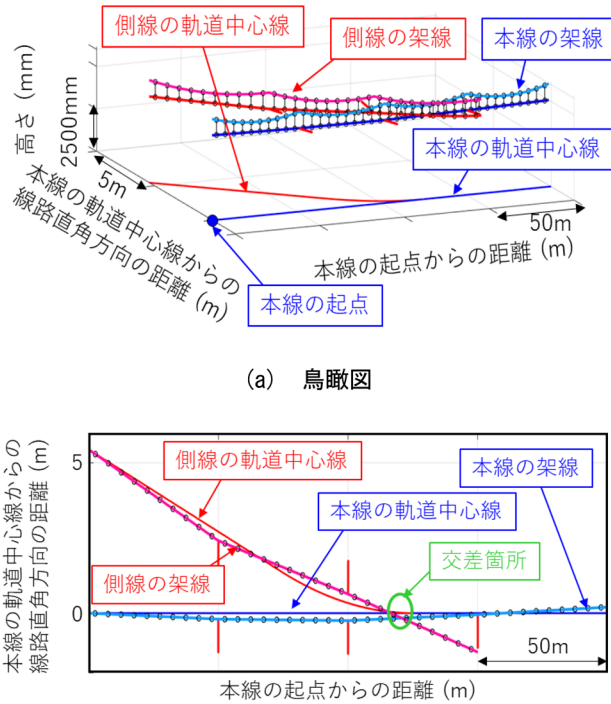


図7 わたり区間の計算例(架線の静構造計算結果)

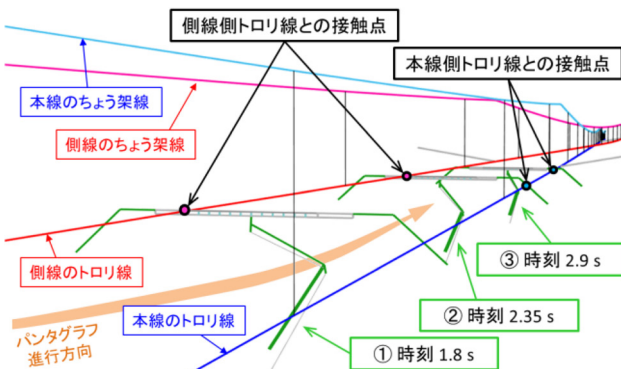


図8 わたり線通過時の接触位置

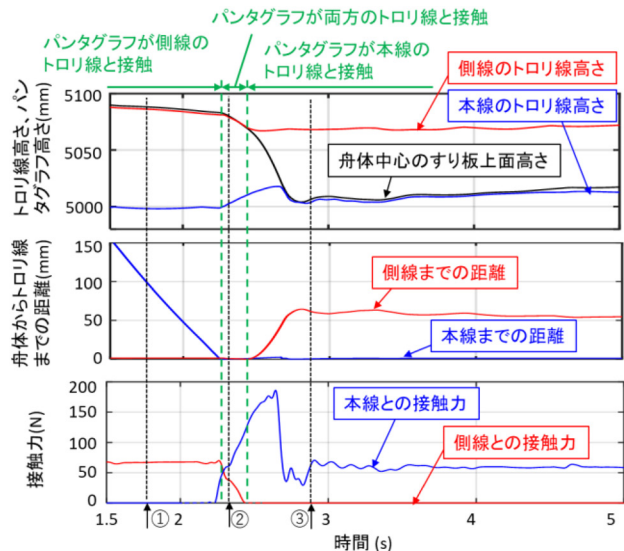


図9 パンタグラフとトロリ線の相対位置と接触力

図8および図9から、時刻②付近でパンタグラフが本線のトロリ線に移行していく様子や、パンタグラフが本線のトロリ線と接触する地点やその地点での架線偏位、そのときに生じる接触力を把握できることがわかる。

このように、架線の三次元配置や、パンタグラフの三次元形状を考慮した計算を行うことで、わたり区間やオーバーラップ構成の改良や、高低差管理値の策定、わたり線で生じた事故の原因究明などに活用できると考えられる。

## 6. まとめ

三次元架線モデルに対して三次元パンタグラフモデルが走行する際の動的挙動を計算可能とするシミュレーション手法を開発した。本手法により、これまでのシミュレーションでは再現できなかったわたり区間等における架線とパンタグラフの運動を把握することが可能となる。

今後は、シミュレーションの精度向上を行いつつ、架線やパンタグラフの開発における詳細検討、わたり線等における事故原因の究明に本シミュレーション手法を活用していく予定である。

さらに将来的には、別途開発している電車線非接触測定装置<sup>16)</sup>などから得られた架線の位置情報から架線モデルを構築して架線・パンタグラフシミュレーションを実施し、摩耗進行箇所における原因究明や架線の改良方法の提案を行うなどより高度な保守管理への活用を目指す。

## 文 献

- 1) 網干光雄：弾性支床弦モデルによる架線・パンタグラフ系の径間周期運動解析，日本機械学会論文集（C編），75巻755号，pp.1950-1956，2009
- 2) Stefano Bruni, Jorge Ambrosio, Alberto Carnicero, Yong Hyeon Cho, Lars Finner, Mitsuru Ikeda, Sam Young Kwon, Jean-Pierre Massat, Sebastian Stichel, Manuel Tur, Weihua Zhang: The results of the pantograph–catenary interaction benchmark, *Vehicle System Dynamics* Vol.53, No.3, pp.412-435, 2015.
- 3) 江原信郎：高速集電の動力学研究（第1報，高速集電系のモデルとその検討），日本機械学会論文集（第1部），36巻287号，pp.1067-1074，1970
- 4) 真鍋克士：架線・パンタグラフ系の運動シミュレーション，平成7年電気学会産業応用部門全国大会，46巻5号，1995
- 5) 網干光雄：動特性計算による架空電車線凹凸の評価法，電気学会論文誌D部門，126巻7号，pp.983-988，2006
- 6) 池田充：有限要素法に基づく架線・パンタグラフ系の3次元運動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.26, No.8, pp.11-16，2012
- 7) 小山達弥，長尾恭平，池田充：任意線形に対応した架線およびパンタグラフモデルの開発，鉄道総研報告，Vol.32, No.6, pp.5-10，2018
- 8) 小山達弥，長尾恭平，池田充：温度変化に伴う静的構造変化を考慮した架線・パンタグラフシミュレーション，鉄道総研報告，Vol.33, No.8, pp.5-10，2019
- 9) 長尾恭平，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（J-RAIL2019）講演論文集，2019
- 10) 小山達弥，長尾恭平，池田充：パンタグラフの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，日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2020 講演論文集，2020
- 11) 日本機械学会編：コンピュータダイナミクスシリーズ4 マルチボディダイナミクス(2)-数値解析と実際-，コロナ社，2007
- 12) 鴨下庄吾，風戸昭人，梅原康宏，山長雄亮：車両運動の制御手法を開発する，RRR，Vol.70, No.9, pp.12-15，2013
- 13) 梶山博司，飯田雅宣，前田達夫：大深度地下鉄道の空気流動シミュレーション，鉄道総研報告，Vol. 7, No. 7, pp.51-58，1993
- 14) 小山達弥，長尾恭平：トンネル突入時の架線・パンタグラフ挙動の解析，日本機械学会第32回計算力学講演会（CMD2019）講演論文集，2019
- 15) 日本機械学会：マルチボディダイナミクスの接触問題（発展編），講習会教材，2008
- 16) 松村周，根津一嘉，薄広歩，川畑匠朗，渡部勇介：電車線非接触測定装置の在来線車載試験による性能検証，鉄道総研報告，Vol.34, No.9, pp.11-16，2020