

3次元構造に対応した架線・パンタグラフ運動シミュレーション

鉄道総研が開発を進めている「鉄道シミュレータ」¹⁾のシミュレーター群の1つとして架線・パンタグラフ運動シミュレーターを構築しました。このシミュレーターでは、有限要素法 (FEM : Finite Element Method) に基づいて架線の3次元構造をモデル化し、架線のジグザグ偏位や、風による架線のはらみ、曲線引金具などによるトロリー線の引き上げりの影響などを考慮した上で、架線とパンタグラフの動的挙動を評価することができます。ここでは、計算例を交えながら、本シミュレーターの概略を紹介します。



小山 達弥
Tatsuya Koyama
鉄道力学研究部
集電力学研究室
副主任研究員
[専門分野] 架線／パンタグラフ系の動的相互作用



池田 充
Mitsuru Ikeda
鉄道力学研究部
部長
[専門分野] 架線／パンタグラフ系の動的相互作用、パンタグラフの低騒音化

架線・パンタグラフシミュレーターの歴史

新線建設や既設路線の電化に伴う架線の新設、新方式架線や新型パンタグラフの開発、架線・パンタグラフに関わる事故の原因究明などを行う上で、架線やパンタグラフの動的挙動を把握することは重要です。

ところで、架線は複数の線条がハンガーなどの架線金具により離散的に結合されている複雑な構造をしています (図1 (a))。現在のようにコンピューターが発達していなかった時代には、架線とパンタグラフを簡単な物理モデルにより表現し、解析的に動的挙動を求めていました²⁾ (図1 (b))。しかしながら、解析的に解くことができるのは簡易なモデルに限られ、架線の複雑な構造を反映させたモデルについては、もはや解析的な取扱いとは不可能です。さらに、パンタグラフが架線から離れる「離線」や、ハンガーがちょう架線から離れてしまう「ハンガー浮き」

などの非線形現象が生じるため、定量的な評価を行うためにはこうした理論解析では限界があります。そこで、1960年代後半に東京大学の藤井、江原らにより、架線・パンタグラフシミュレーターが開発されました³⁾。このシミュレーターでは、架線を多質点でモデル化し (図1 (c))、差分法 (図1 参照) に基づいて動的挙動が計算されます。その後、ハンガー浮きへの対応などのさまざまな改良が加えられながら架線・パンタグラフシミュレーターは発展し続け、新しい架線やパンタグラフの開発に大きく寄与してきました。しかし、このシミュレーターは2次元構造を取扱っているため、電車線とパンタグラフの3次元構造を考慮しなければ再現・評価できない事象、例えば分岐器上で架線が交差している箇所 (わたり線) において生じた架線およびパンタグラフの事故の再現や、カーブ区間の集電性能のシミュレーションを行うことができません。そこで、こ

差分法 (FDM : Finite Difference Method)

数値解析手法の一種で、計算対象を有限の格子に分割して近似解を得る手法。プログラム構造が比較的単純で、コンピューターへの負荷が小さい。

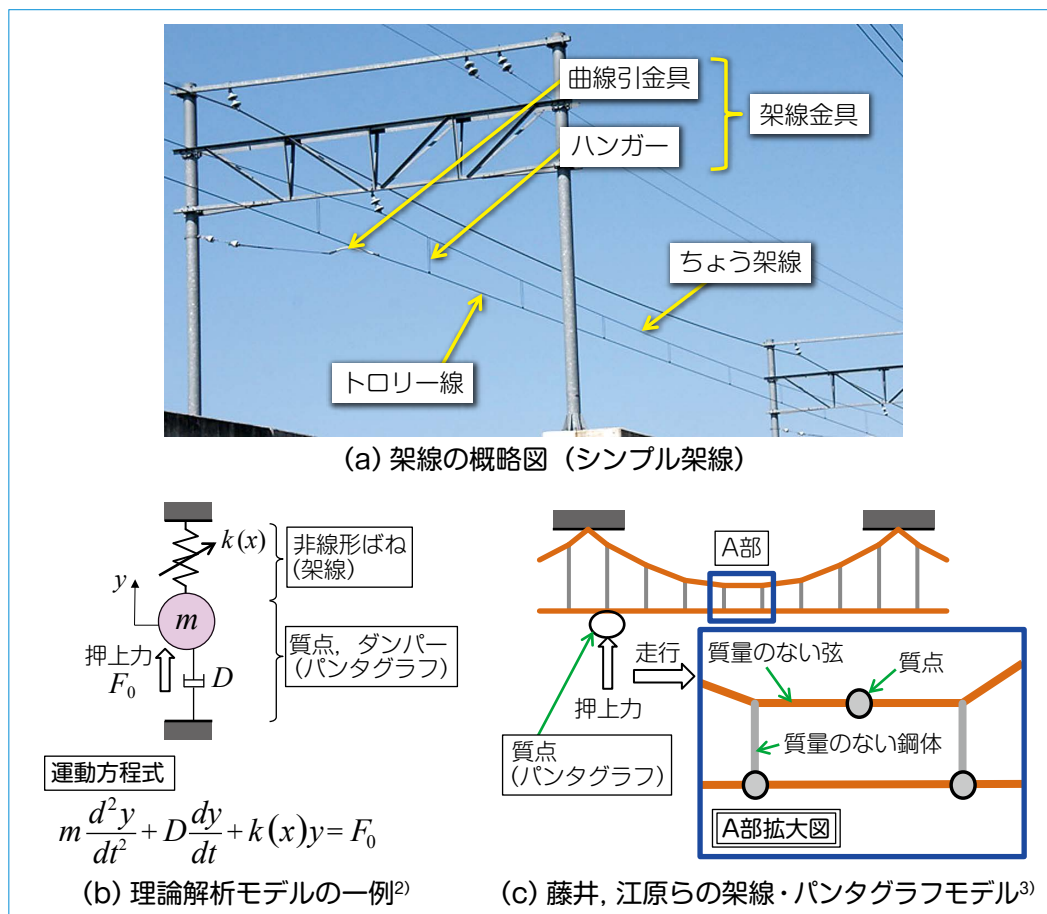


図1 架線・パンタグラフの動的挙動を把握するためのモデル例

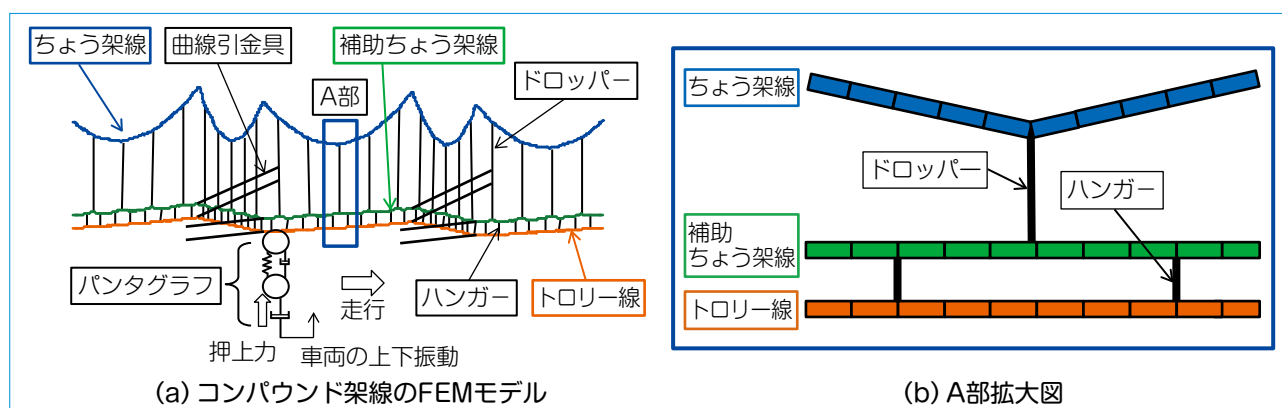


図2 本シミュレーターの架線・パンタグラフモデル

のような事象を再現・評価できるように、3次元構造に対応したシミュレーターを開発することとなりました。架線の3次元構造を正確にモデル化するためには、ハンガーや曲線引金具の傾斜により生じる非線形性（これを幾何

学的非線形性といいます）を取扱う必要がありますが、従来のシミュレーターではそれを考慮することが容易ではありません。そこで、有限要素法（※参照）に基づいて架線の3次元構造に対応した架線・パンタグラフ運動

シミュレーター（以下、本シミュレーターと記します）を開発しました。本シミュレーターでは、シンプル架線、コンパウンド架線のほか、斜ちょう式架線なども取扱うことができます。本シミュレーターで作成したコンパウンド架線のFEMモデルを図2(a)に示します。さらに、他のシミュレーターで計算した車両の上下振動を入力として与え、その影響を評価することも可能です。

※ 有限要素法 (FEM : Finite Element Method)

数値解析手法の一種で、計算対象を有限の要素に分割して近似解を得る手法。複雑な形状でも対応しやすい。本稿のような動的挙動解析の他にも、電磁場解析、流体解析でも利用されています。

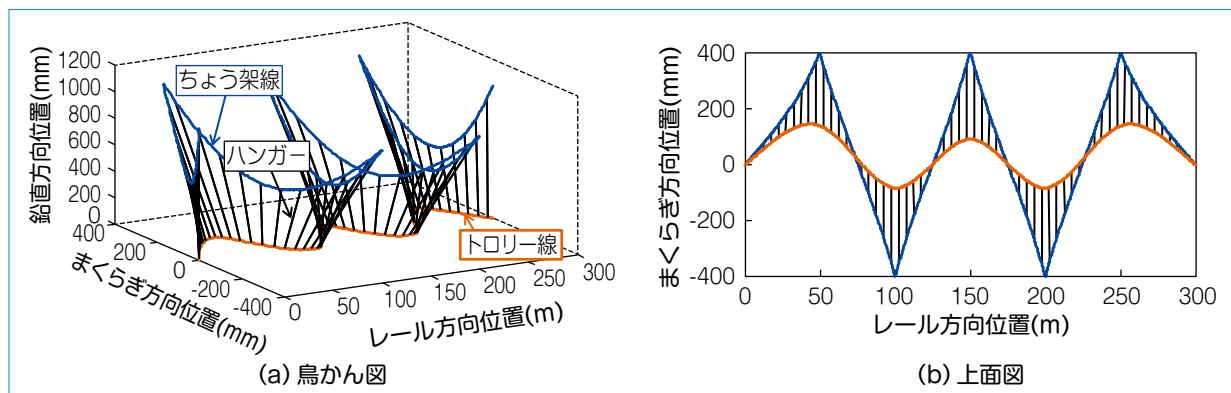


図3 軟斜ちょう式架線の静構造計算結果

本シミュレーターの構成

本シミュレーターは、大きく分けて次の3つの部分から構成されます。

- ①計算条件の入力を行うプリ処理部
- ②架線の静構造計算と動的挙動計算を行うソルバー部
- ③計算結果を保存、表示するポスト処理部

プリ処理部では、架線種別、支持点間隔(径間長)、架線のジグザグ偏位量、ハンガー間隔、トロリー線張力、線密度、風速などの計算条件を入力します。これらの情報をもとに、ハンガーを棒要素として、トロリー線やちょう架線を複数のはり要素として、それぞれモデル化します(図2(b))。なお、棒要素とは圧縮・引張荷重のみを受ける要素を、はり要素とは圧縮・引張に加えて曲げモーメントを受ける要素を、それぞれ意味しています。さらに、ソルバー部で必要となる、トロリー線静高さもしくはハンガー長さ、列車(パンタグラフ)の走行速度、パンタグラフの諸元、車両の上下振動などに関する情報も入力します。

ソルバー部では、はじめに架線の静構造計算を行います。ここでは、プリ処理部で入力されたハンガー点のトロリー線静高さもしくはハンガー長さをもとにトロリー線などの自重を考慮して架線の静構造計算を行います。その

後、架線の静構造計算結果とプリ処理部で与えられた条件にしたがって架線・パンタグラフの動的挙動解析を行います。ここでは、ハンガー浮きやパンタグラフの離線だけではなく、幾何学的非線形性も考慮してシミュレーションを行います。なお、計算に使用したすべての要素のすべての変位などの情報を保存すると膨大なデータとなります。そこで、後述のポスト処理を効率的に行うために、ソルバー部では必要な情報のみを抽出して保存する機能を持たせています。

ポスト処理部では、ソルバー部で得られた計算結果のグラフ化や動画作成を行います。

計算例

幾何学的非線形性を考慮したことで評価が可能となった事例として、2つの計算結果をご紹介します。

はじめに、軟斜ちょう式架線の静構造計算例を図3に示します。図3(a)に鳥かん図を、図3(b)に上面図を、それぞれ示します。軟斜ちょう式架線は、ちょう架線に大きなジグザグ偏位を与えることによって、振止金具や曲線引金具を用いることなく、トロリー線に所要のジグザグ偏位を与える架線のことです。本シミュレーターでは幾何学的非線形性に対応することが可能であ

るため、本例のようにハンガーが大きく傾斜している架線の静構造を精度よく評価することが可能となりました。

次に、風によりはんだ架線の静構造および動的挙動の計算例を図4に示します。図4(a)に計算区間全体の静構造計算結果を示します。この計算では、架線はシンプル架線、パンタグラフの走行速度は130km/h、横風の風速を20m/s、風向はまぐらぎ方向と平行な向きとしています。ただし、風荷重を一定の分布力として架線に作用させているので、風により生じる架線振動は再現していません。図4(b)より、風荷重に伴い、風上側の支持点ではトロリー線が曲線引金具により大きく引き上がっていることがわかります。また、図4(c)より、トロリー線の引き上げにより、風がない場合に比べて、支持点(300m地点)における接触力が大きく変動することがわかります。本シミュレーターでは曲線引金具の幾何学的非線形性を考慮しているため、このような状態でのシミュレーションが可能となりました。

今後の開発

これまでの開発では、本シミュレーターの開発自体を主眼としていたため、高速化を行っていませんでした。そのため、長い計算時間を必要とし、特定

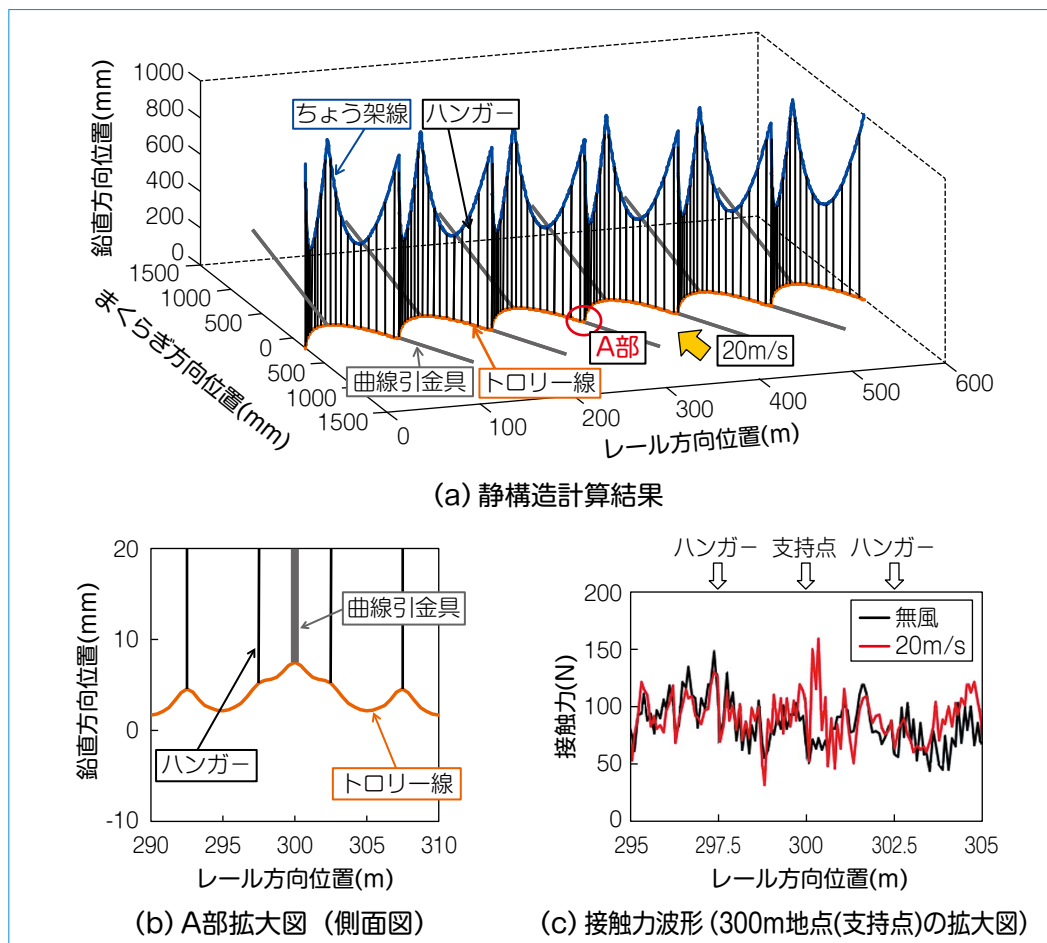


図4 架線・パンタグラフの動的挙動に与える横風の影響

の線区全体（数十km）を対象としたシミュレーションや、パンタグラフのばね定数やハンガー間隔の最適値を求めるためのシミュレーションなどのような大規模なシミュレーションには適していません。そこで、本シミュレーター的高速化、具体的には本シミュレーターのスーパコンピュータ対応と並列化計算処理の導入を行い、計算時間の短縮化を進めています。また、本シミュレーターでは3次元構造を模擬することができることから、曲線区間を模擬したシミュレーションが行えるように本シミュレーターの改良を行っています。さらに、将来的にはトロリー線とパンタグラフの詳細な3次元形状をシミュレーター上でモデル化し、わたり線や、架線両端の重複箇所（オーバーラップ）において発生した架線・

パンタグラフ事故をシミュレーションにより再現できるようにすることを目指しています。

まとめ

ここでは、3次元構造を考慮した架線・パンタグラフ運動シミュレーションについてご紹介しました。本シミュレーターを活用することで架線・パンタグラフのさらなる高性能化や架線・パンタグラフ事故の現象解明が行われるようになると思われます。

ただし、シミュレーターの高度化により理論解析が不要になるわけではありません。また、シミュレーション結果の妥当性を検証するためにも、実験は必要不可欠です。そのため、シミュレーション技術の向上と併せて、理論解析や測定技術の高度化についても研

究を進めています。

なお、文献4)には本シミュレーターでご紹介した静構造計算や動的挙動計算の詳細が述べられています。併せてご参照いただければ幸いです。[RRR]

文献

- 1) 池田充：鉄道シミュレータのコアシステムの設計・開発、RRR, Vol.72, No.7, 2015
- 2) 鉄道総合技術研究所編：電車線とパンタグラフの特性、研友社, 1993
- 3) 江原信郎：高速集電の動力学的研究（第1法、高速集電系のモデルとその検討）、日本機械学会論文集, 36巻, 287号, pp.1067-1074, 1970
- 4) 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