

架線・パンタグラフ 3次元動的相互作用シミュレータ

鉄道力学研究部
部長 池田 充

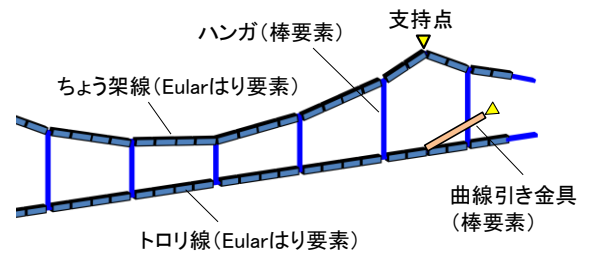
1. はじめに

架線・パンタグラフ系の接触性能評価は、電車線設備やパンタグラフの設計、開発更新を行ううえで重要な作業である。しかし、現車試験等による性能評価は費用と時間を要するうえ、特に営業線において試験を実施する場合には営業列車への影響も勘案する必要がある。そのため、架線・パンタグラフ系の動的挙動を数値シミュレーションにより評価することは非常に有用である。

わが国における架線・パンタグラフ系の数値シミュレーションは、1960年代後半に東京大学の藤井、江原らによって開発されたものを嚆矢とする。このシミュレーションは差分法に基づいたものであり、その後の種々の改良を経て、今日でも広く用いられている。ただし、このプログラムでは幾何学的非線形性が考慮されていないため、ハンガやドロップなどの吊り金具や曲線引金具などの3次元的な運動が正確に表現されていない。そのため、接触性能に大きな影響を与える、トロリ線の横張力に起因して生じる支持点のトロリ線引き上がりも正確に再現できていない。そこで鉄道総研では、鉄道シミュレータの一環として、幾何学的非線形性を考慮することができる架線・パンタグラフ系の3次元動的相互作用シミュレータを開発したので、紹介する。

2. シミュレーション手法の概要

吊り金具などの幾何学的非線形性を考慮するため、本シミュレータは非線形有限要素法をベースとしている。ただし、トロリ線やちょう架線などの主要な線条に関しては運動に伴う幾何学的非線形性の影響はわずかであることから、図1に示すようにこれら線条は線形なEularはり要素によりモデル化を行っている。一方、ハンガやドロップなどの吊り金具や曲線引き金具については、その幾何学的非線形性を無視すると実長と自然長との関係が実架線と整合しなくなり、架線構造を忠実に再現出来ない。そこで、これらに関してはその接線剛性を考慮した棒要素によりモデル化している。なお、トロリ線の押上量が大きいとハンガはちょう架線に対して浮く構造となっているため、本プログラムにおいてはハンガ要素の軸力に応じて自然長を切り替えることにより、これを模擬している。



(b) シンプル架線の有限要素モデル

図1 架線構成要素のモデル化

3. 架線の静構造計算

各線条および架線金具の諸元と、ちょう架線の支持点位置、各線条両端の引き留め位置、曲線

引き金具の取り付け位置などの境界条件を与えて架線の静構造を計算する。ただし、ドロップやハンガなどの吊り金具の長さは、想定するトロリ線静高さに合わせて決定しなくてはならない。そこでシンプル架線の場合には、トロリ線のハンガ点高さと同端の引き留め位置を与え、ハンガの軸力を未知としてトロリ線の静高さを求める。次に、ちょう架線を対象に、支持点位置と同端の引き留め位置を境界条件として与えるとともに、すでに求められたハンガ軸力を外力として与えてちょう架線の静構造を決定する。以上の操作によって各ハンガの上点ならびに下点位置が定まるため、各ハンガの軸力と弾性伸びとが適合するようにハンガの自然長を決定する。

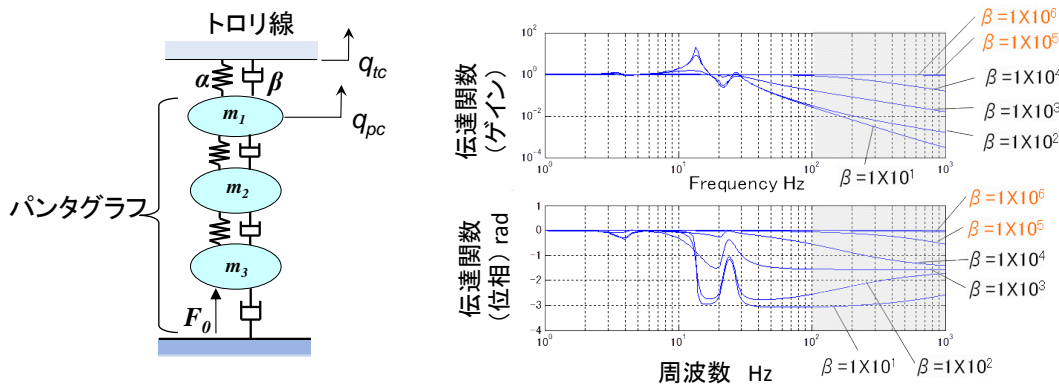
一方、コンパウンド架線では同一長さのハンガが用いられるため、最初にトロリ線と補助ちょう架線を対象として、その静構造を決定する。その際、トロリ線のハンガ下点高さを境界条件として与え、補助ちょう架線に作用するドロップ軸力を未知量として解く。あとは、シンプル架線の場合と同様にちょう架線の静構造を決定し、各ドロップの軸力と弾性伸びとが適合するようにドロップの自然長を決定する。ただし、一般にコンパウンド架線ではハンガ本数よりドロップ本数の方が少ないため、トロリ線と補助ちょう架線の静構造を決定する際に、与えたトロリ線のハンガ下点高さを厳密に実現できるようなドロップ軸力が存在する保証はなく、これを近似的に満足する解を求めていることに注意が必要である。トロリ線のハンガ下点高さではなく、補助ちょう架線のドロップ下点高さを境界条件として与えれば厳密解を得ることが可能であるが、実際の架線構造を設計するうえではトロリ線下点高さを与える方がより実用的であると判断した。

ただし、この段階では架線の3次元構造を考慮していないことから、架線の左右偏位を考慮したうえで、各線条の端点位置、ちょう架線の各支持点位置、ならびに曲線引き金具（主アーム、補助アームとも）の取り付け位置を境界条件として与え、さらにすでに求められたハンガ、あるいはドロップの自然長を与えることにより、最終的な架線の3次元静構造を求めている。その際、吊り金具や曲線引き金具の幾何学的非線形性を考慮することにより、横張力に起因するトロリ線や補助ちょう架線の支持点における引き上がりや、吊り金具のまくらぎ方向への傾斜などが正確に計算される。

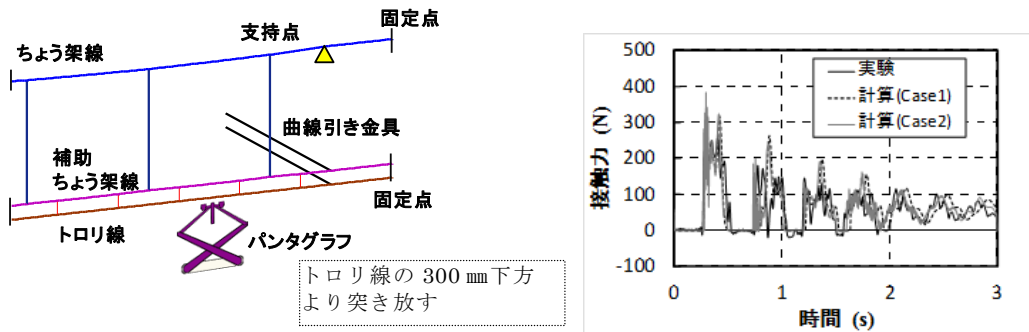
4. 架線・パンタグラフ系の動的挙動の計算

架線とパンタグラフの動的挙動は、系の運動方程式を逐次積分することにより求める。逐次積分法は陽解法と陰解法とに大別できるが、本シミュレータでは架線の幾何学的非線形性を考慮する必要があることから陰解法を採用し、各節点のつり合い力が許容値以下となるまで、ニュートンラプソン法による繰り返し計算を行っている。

架線・パンタグラフ系の動的問題を扱う上で最も重要なのは、架線とパンタグラフとの間の接触力の扱いである。接触問題の取り扱いにはいくつかの方法が提案されているが、本シミュレータでは汎用性を重視してペナルティ法により接触力を求めている。これはトロリ線に対するパンタグラフ舟体の侵入量、ならびに侵入速度に応じて接触力を与える方法である。ただし、ペナルティ法ではペナルティ係数と呼ばれる定数を与える必要があるが、その値を物理的な考察をもとに与えることは難しい。そこで、簡単なモデル計算によってペナルティ係数の妥当性を判断する手法を提案している。これは、図 2(a)に示すようにパンタグラフの舟体変位とトロリ線変位との伝達関数を評価することにより、接触力の過度な減衰や不自然な振動の有無を評価するものである。さらに、実験と対照することにより、その妥当性を確認している(図 2(b))。



(a) モデル計算によるペナルティ係数の評価 (舟体変位に対するトロリ線変位の伝達関数)



(b) 接触力の計算結果と実物実験による測定結果との比較

図 2 パンタグラフとトロリ線の間作用する接触力算出法の検討

5. 計算例

最初に、新幹線用コンパウンド架線の静構造を計算した例を図 3 に示す。支持点ごとに ± 200 mm の左右偏位を与えたときの架線の 3 次元静構造を求めた結果であるが、各線条に作用する横張力によってトロリ線と補助ちょう架線が支持点において引き上げられている状況が再現されていることがわかる。

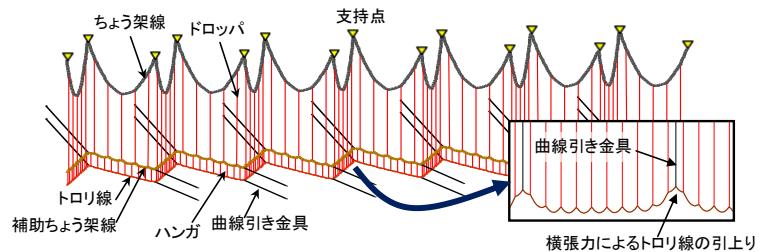


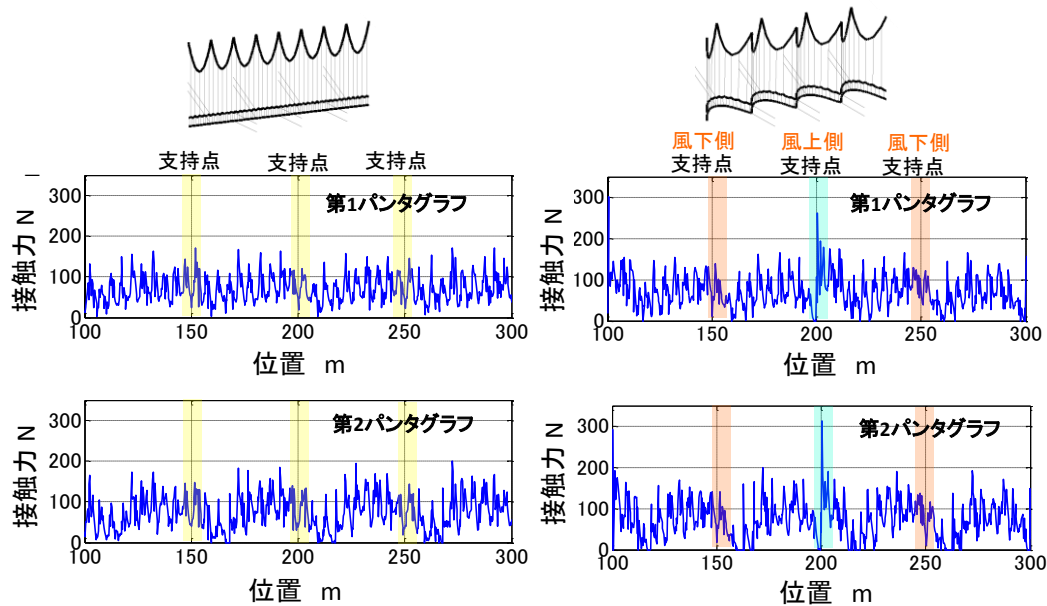
図 3 コンパウンド架線の静構造計算

次に、このコンパウンド架線をパンタグラフ 2 台が 300km/h でしゅう動走行したときの系の挙動を計算した結果を示す。ただし、計算は以下の 2 条件に対して実施した。

(1) Case 1 : 架線の左右偏位なし

(2) Case 2 : 架線の左右偏位 200mm 横風 25m/s

パンタグラフに作用する接触力の計算結果を図 4 に示す。上段は先頭側パンタグラフの接触力波形を、下段は後続側パンタグラフの接触力波形を、それぞれ示している。Case1 と Case3 を比べると、全体としてはよく似た接触力波形が得られているが、支持点直近における接触力変動に差異が認められる。特に、曲線引き金具が風上側となる支持点 (図中の 100m, 200m, 300m 地点) においてはその差が顕著である。これは、風上側の曲線引き金具には大きな横張力が作用するた



(a) Case1(左右偏位なし) (b) Case2(左右偏位±200 mm 横風 25m/s)

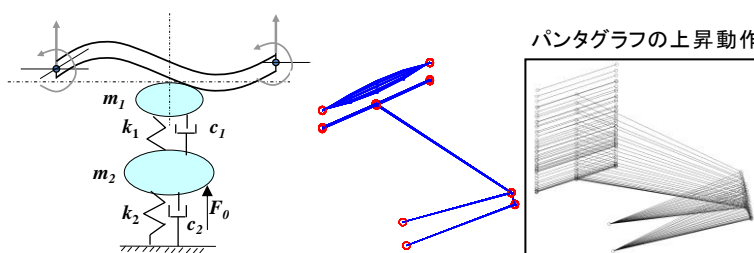
図3 コンパウンド架線の静構造計算結果

め、この支持点においてトリリ線の引き上げが顕著となるためである。この例からわかるように、架線の3次元構造を正確に再現したうえで運動シミュレーションを実施することにより、系の挙動をより正確に表現することが可能である。

なお、車両走行シミュレータにより算出した車両屋根上のパンタグラフ固定部変位を本シミュレータの入力として与えれば、車両動揺が架線・パンタグラフ系の接触性能に与える影響についても評価が可能である。

6. おわりに

本発表では、非線形有限要素法に基づく架線・パンタグラフ系の3次元動的相互作用シミュレータについて紹介した。ここで紹介した事例では、パンタグラフはばね・質点系によりモデル化している。しかし、実際のパンタグラフの構造はより複雑である。すでに、パンタグラフ単体の運動についてはマルチボディモデルを用いた解析が可能となっている。今後は、このモデルを本シミュレータと組み合わせることにより、より精度の高いシミュレーションを実現する予定である。



(a) ばね・質点モデル (b) マルチボディモデル

図4 パンタグラフモデル

7. 参考文献

- 1) 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, (2012.8)