

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・パンタグラフの動的挙動を再現する

電氣車に安定した電力を供給するために、架線とパンタグラフには良好な接触状態を維持できる性能が要求されます。要求される性能を満たすためには、架線・パンタグラフの動的挙動を把握したうえでそれらの設計を進める必要があります。走行試験による測定のほか、試験設備を用いた実験や、理論計算、数値シミュレーションなどさまざまなアプローチが採られます。そのうちの数値シミュレーションは、開発中で実物がまだない場合や、安全面などの問題で実験が困難な条件においても系の複雑な動的挙動の検討が可能であるという利点を有し、その役割がますます大きくなりつつあります。ここでは、鉄道総研で開発を進めている架線・パンタグラフシミュレーターについて計算例を交えながら紹介します。

## 従来の架線・パンタグラフシミュレーションと課題

多くの電氣鉄道では、架線とパンタグラフにより集電を行っています。架線は、たとえば図1のようにちょう架線に取り付けられたハンガーによってトロリー線が吊り下げられた構造となっています。パンタグラフは図2のように電車の屋根上に設置され、トロリー線としゅう動しながら車両に電氣を供給します。パンタグラフとトロリー線の接触により、両者には複雑な振動が生じます。その結果、パンタグラフとトロリー線間の接触力（以下、接触力とよびます）が変動し、条件に

よっては過大なトロリー線の押し上げや、過大な接触力、離線アークの発生を引き起こし、集電の安全・安定性やメンテナンスコストに悪影響を及ぼします。

そのため、新しい架線構造や新型パンタグラフの設計などを行ううえで、架線とパンタグラフの動的挙動を把握することが重要です。たとえば、設計段階で実物がまだない場合や、試験の実施が困難な条件では、しばしば数値シミュレーションによって架線・パンタグラフ系の運動が解析されます。日本国内ではこれまで図3の有限差分法（※参照）による2次元のシミュレー



長尾 恭平  
Kyohei Nagao  
鉄道力学研究部  
集電力学研究室  
研究員  
[専門分野] 機械力学



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  
[専門分野] 機械力学



池田 充  
Mitsuru Ikeda  
電力技術研究部  
部長  
[専門分野] 機械力学,  
流体工学

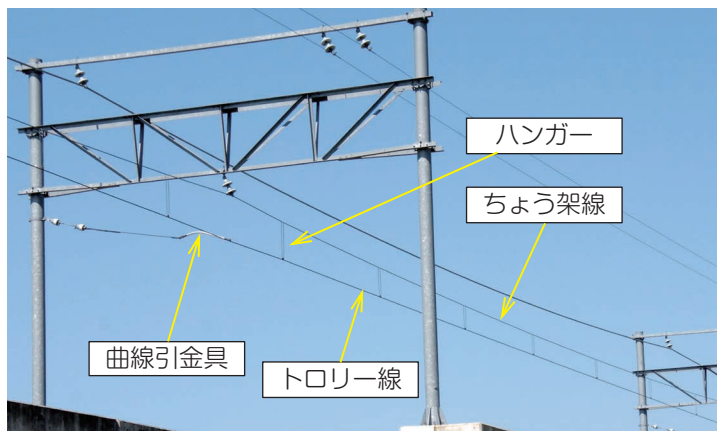


図1 架線の概略図（シンプル架線）

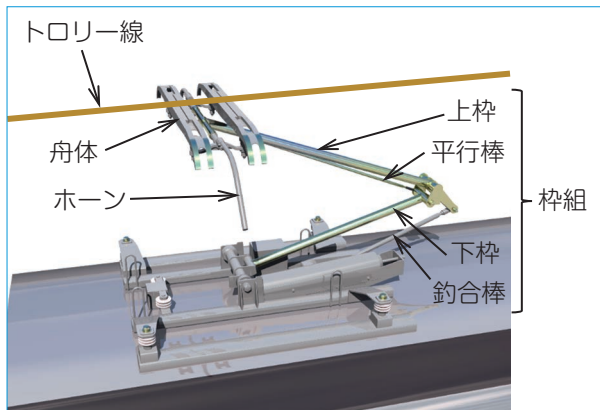


図2 パンタグラフの概略図

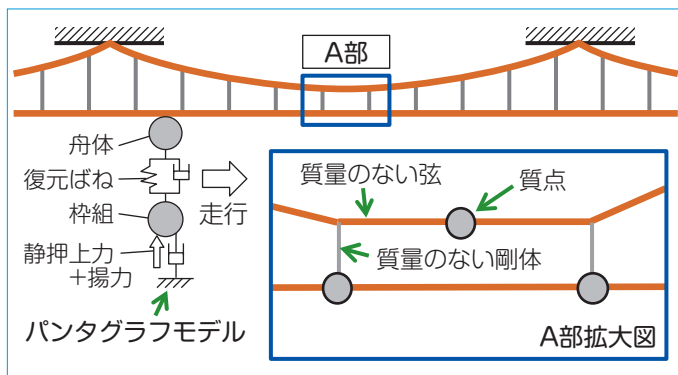


図3 架線・パンタグラフ系の2次元有限差分法モデル

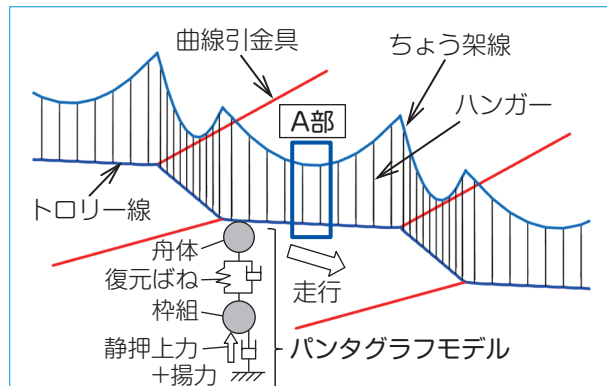
ションが活用されてきました。  
 しかし、上記のシミュレーションでは、  
 ①温度変化にともなう架線の伸縮  
 ②トンネル突入時のパンタグラフ対向風速の過渡的な変動によるパンタグラフに作用する揚力の変化  
 ③架線の偏位や、曲線区間・わたり線における3次元的な架線構成に起因する運動

の影響を再現することができませんでした。そこで、3次元架線モデルを作成し、①を計算可能としました。また、②を考慮するために、トンネル内の空気の流れを計算するシミュレーターと組み合わせた計算を行いました。さら

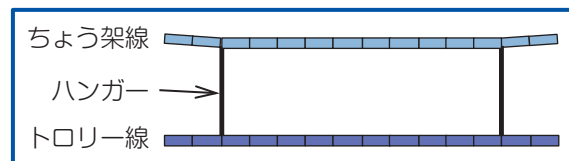
に、③の考慮を目指して、3次元パンタグラフモデルを作成しました。3次元パンタグラフモデルと3次元架線モデルの接触解析によって③の考慮が可能となります。以下では、各改良の内容について紹介します。

### 3次元架線モデルの作成と架線の温度変化を考慮した解析例

前述の目的により、図4に示す3次元架線モデルを作成しました。図4(a)のように、ばね・質点系のパンタグラフモデルと組み合わせた運動解析を行うことが可能です。3次元架線モデルは、有限要素法(☞参照)に基づき作



(a) シンプル架線の有限要素モデル



(b) A部拡大図

図4 3次元架線モデル

成しており、ハンガーを棒要素、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4(b))。3次元モデルであるため、以前の架線モデルでは考慮できなかった線路方向やまくらぎ方向の架線の運動を考慮できます。さらに、曲線や分岐を含むさまざまな軌道に対する架線モデルを生成可能です。

線路方向を含む方向への運動が考慮可能になったことで、トロリー線やちょう架線などの線條の温度が変化し、線條が伸縮したときの影響を計算できるようになりました。温度変化にともなう架線が伸縮すると各線條の張力や高さ変化します。架線設備は適切な位置範囲に保つ必要があるため、温度変化による影響を評価することは重要です。

図4のモデルを用いて、温度変化が架線高さに与える影響を調査した結果を紹介します。図5(a)に、気温15℃のときにトロリー線が水平になるように架線を調整した後に、気温が-10℃まで低下した場合の架線の静的

☞ 有限差分法 (FDM : Finite Difference Method) と有限要素法 (FEM : Finite Element Method)

それぞれ一般的によく用いられる数値解析手法であり、計算対象の領域を、前者では格子に、後者では要素に分割することによって微分方程式の近似解を得ることができます。

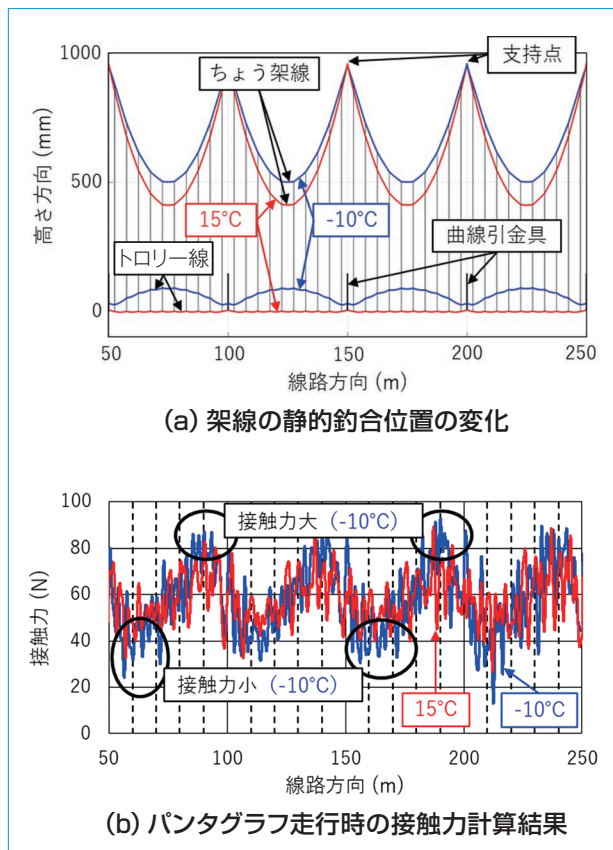


図5 温度変化を考慮した解析結果

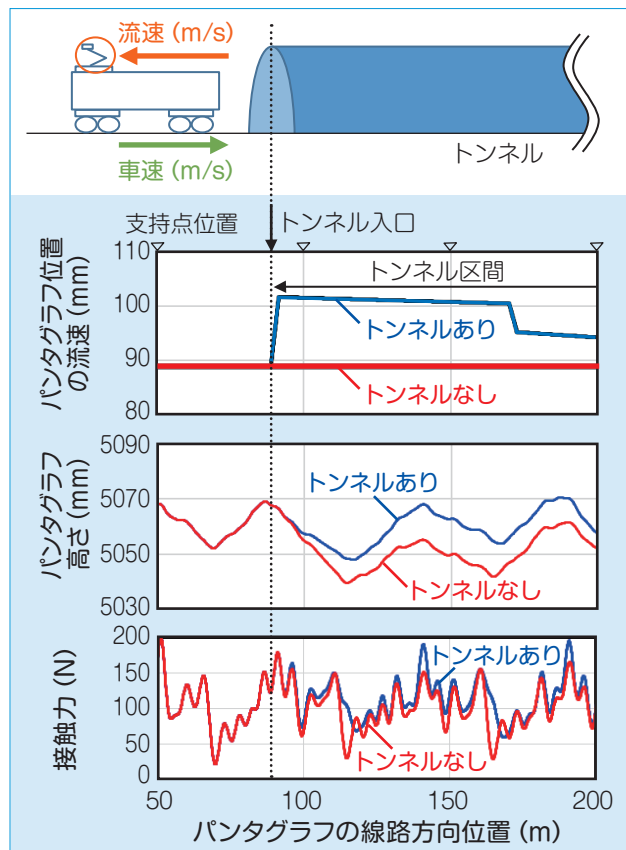


図6 空気流動シミュレーターとの連成計算例

位置の変化の計算結果を示します。気温の低下にともなって各線条が縮み、**図5 (a)**の青色線のようにトロリー線の高さに凹凸が生じている様子がわかります。なお、本ケースでは、ちょう架線は両端を固定とし、トロリー線は自動張力調整装置により張力が一定に保たれる条件を想定しています。

**図5 (a)**の各気温での架線に対してパンタグラフが走行したときの接触力を計算した結果を**図5 (b)**に示します。接触力は、ちょう架線の支持点(**図5 (a)**参照)の直下をパンタグラフが通過した直後に減少し、支持点手前にかけて再び増加する傾向が見られます。安定して電車に電気を供給するうえで、このような接触力の変動は小さいことが望ましいのですが、温度が $-10^{\circ}\text{C}$ に低下し、トロリー線の高さに凹凸が生じた影響で、接触力の変動が大きくなっています。

### 空気流動シミュレーターとの連成によるトンネル突入時の解析

電車が走行するとパンタグラフは走行速度に応じた対向風を受けます。このとき、パンタグラフにはおおむね流速の2乗に比例する揚力が発生するため、接触力が増加し、パンタグラフによるトロリー線の押上量が増大します。パンタグラフが安全に架線としゅう動するためにはこれらが過大あるいは過小にならないように管理しなければなりません。

揚力の影響が大きい箇所として、トンネルがあります。とくに列車がトンネルに突入する際にはパンタグラフへの対向風速が急激に増加します。この

影響を考慮するために、**図4**のシミュレーターと、鉄道総研で別途開発した空気流動シミュレーターとの連成解析(☞参照)を行いました。

**図6**に計算結果を示します。パンタグラフは時間とともに線路方向の正の向きに進行します。上段のグラフの青色線は、列車が速度 $320\text{ km/h}$ ( $\approx 89\text{ m/s}$ )でトンネルに突入したときのパンタグラフ対向風の流速を空気流動シミュレーターで計算した結果を表しており、トンネルに突入した直後から25 mの間に流速が約 $13\text{ m/s}$ 上昇しています。これは、車両が押しのけたトンネル内の空気が車両後方に向かって押し出されるためです。

#### ☞ 連成解析

機械振動と空気流などの異なる分野の現象の解析を組み合わせることで各分野間の作用を考慮した解析。ここでは、連成解析のなかでも一方向連成解析とよばれる解析を行っており、流体シミュレーションの計算結果を架線・パンタグラフシミュレーションに入力することで連成解析を実現しています。

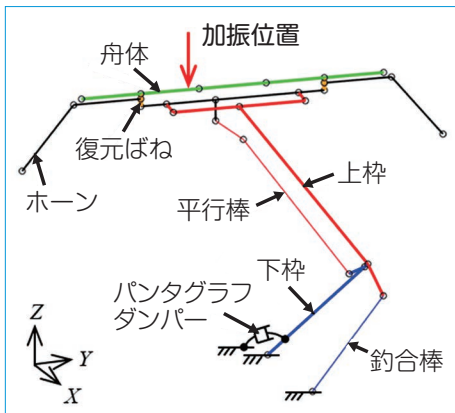


図7 3次元パンタグラフモデル

流速とパンタグラフに生じる揚力との関係は風洞試験からあらかじめ求めておきます<sup>1)</sup>。そして、時々刻々と変化する流速に対する揚力を図4のパンタグラフモデルの質点に外力として与え、架線・パンタグラフシミュレーターによる運動計算を行います。

図6の中段のグラフはパンタグラフ高さ、すなわち、パンタグラフとパンタグラフによって押し上げられたトロリー線の接触位置のレール上面からの高さの計算結果、図6の下段のグラフは接触力の計算結果です。図6の赤色線のようにトンネルによる流速変化の影響を考慮しない場合と比べて、青色線のようにトンネルの影響を考慮した場合の方が、パンタグラフ高さや接触力が増加する結果が得られています。このような計算結果は、トンネル通過時のパンタグラフと架線に関わる走行安全性の検討・評価に用いることができます。

### 3次元パンタグラフモデルの作成

たとえば、分岐上のわたり線はパンタグラフがトロリー線から別のトロ

リー線へと乗り移る箇所ですが、このような箇所をパンタグラフが通過する際に過大な接触力が生じ、集電の安全性やメンテナンスコストに悪影響を及ぼす場合があります。そこで、わたり線などでの運動を詳細に検討可能とするための数値シミュレーションの開発に取り組んでいます。

上述の運動を解析するには、架線とパンタグラフの3次元的な接触位置を把握する必要があるため、図4のばね・質点系のパンタグラフモデルでは不十分です。そこで、新たに3次元パンタグラフモデルを作成しました。このモデルは、3次元柔軟マルチボディダイナミクス(☞参照)に基づき、3次元的な変形を考慮できるはり要素を結合して構成しています(図7)。

本モデルが、実機パンタグラフの運動特性をよく再現するように、パンタグラフの加振試験結果からシミュレーションモデルの剛性・減衰などのパラメーターを決定しました。図8(a)に実機パンタグラフとシミュレーションモデルの加振力に対する加振点加速度

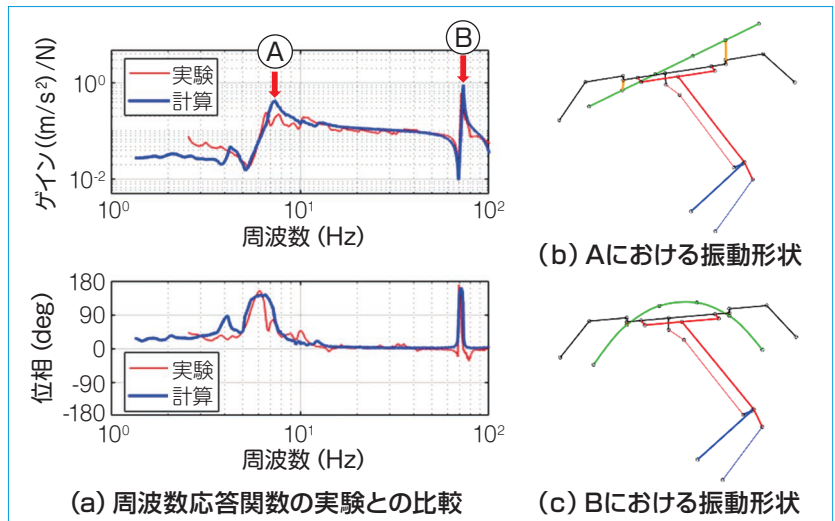


図8 3次元パンタグラフモデルの運動計算結果

応答の周波数応答関数の比較図を示します。加振位置は図7に示すとおりです。図8(a)のAの周波数では図8(b)のように舟体が左右に回転するような振動が、図8(a)のBの周波数では図8(c)のように舟体が大きく曲がるような振動がそれぞれ発生していることがシミュレーション結果より観察されます。これらの振動形状は実機でも同様であり、シミュレーションモデルが実機パンタグラフの運動をよく再現していることが確認できています。

### 今後の取り組み

ここでは、架線・パンタグラフの運動挙動を従来よりも詳細に再現・把握するために開発を進めているシミュレーションモデルと計算例を紹介しました。今後は、3次元の架線モデルと3次元のパンタグラフモデルの接触解析によって、曲線区間やわたり線などにおける架線とパンタグラフの3次元配置に起因する現象を精緻に再現可能なシミュレーターへの改良を進めます。

RRR

#### ☞ 柔軟マルチボディダイナミクス (Flexible Multibody Dynamics)

対象を変形を考慮可能なはり要素などの要素に分割し、各要素同士をピンやボールジョイントなどによって結合した力学モデルを作成することによって、対象の力学現象を解析するための手法。

#### 文献

- 1) 光用剛, 池田充, 臼田隆之: パンタグラフに関する試験に活用する, RRR, Vol.73, No.11, pp.20-23, 2016