

架線・パンタグラフ系の挙動を探る

池田 充
鉄道力学研究部(集電力学 室長)



いけだ みつる

はじめに

架線とパンタグラフは、移動体である車両に対し駆動用電力を供給するための装置です。両者はすべり接触によって接点を形成し、電力の授受を行います。同時に接点に作用する力を通じて一つの力学系をなしていますので、架線・パンタグラフ系、とも称されます。

架線とパンタグラフとのすべり接触は、接点に堅固なガイドがあるわけではなく、パンタグラフが架線を50～100N程度の力で機械的に押し付けているに過ぎません。パンタグラフの基部には押上機構が設けられており、ばねや空気シリンダにより発生させた力によってパンタグラフを架線に押し付けています。この力のことを押上力といいます。300km/hといえは毎秒83m進む速度です。このような高い速度で安定したすべり接触を維持することは容易ではなく、すべり接触面(摺動面)に作用する鉛直方向の力(接触力)には変動が生じます。接触力の変動成分が、接触力の平均値(押上力)よりも大きくなると、すべり接触を維持できなくなって架線とパンタグラフとが一時的に離れる現象が発生します。この現象を離線といいます。

機械的なエネルギーとは異なり、電気エネルギーはたとえ接点が開いていてもアーク放電という形でエネルギー伝送が

可能です。架線・パンタグラフ系でも、離線の発生によってただちに電力供給が断たれてしまうというわけではなく、離線アーク(図1)が発生してエネルギー伝送が継続されます。これは安定した電力供給という面においては利点ともいえますが、離線アークは架線、パンタグラフの双方に材料的なダメージを与え、すべり接触面の摩耗を促進します。場合によっては正常な機能を維持できないほどのダメージを与えてしまうこともあります(図2)。また、継続時間の長い離線ではアークが消弧してエネルギー授受の一時的な中断が発生します。そのため、できるだけ離線の発生を抑制することが、電力供給の安定化にとっては重要です。離線の発生を抑制するためにはすべり接触を維持できればよいわけですから、結局のところ、接触力の変動を小さくすることが肝要となります。

以上のような理由により、架線・パンタグラフ系の動的な挙動を調べ、両者の接触状態をとらえることによって安定した集電状態を実現する努力が継続的に進められてきました。ところで、架線とパンタグラフの動的な挙動を調べるためには、大きく三つの方法があります。一つ目は実験と観察によってその特性を調べる方法、二つ目は理論解析によって動的な挙動の特徴とパラメータの感度を調べる方



図1 離線に伴うアーク



図2 離線アークにより溶断した舟体



図3 架線の計測データを伝送するテレメータ

法、そして三つ目は数値シミュレーションにより動的な挙動を精緻に予測する方法です。このどれもが欠かすことのできないものです。本稿では、これらについて順に説明したいと思います。

実験と観察

実験と観察は物理現象の本質を見極めるための基本的な作業です。そのため、架線・パンタグラフ系に関しても実設備を使った実験と観察が継続的に実施されています。ただし、架線設備には高い電圧が印加されているため、通常の実験のように物理量を簡単に測定することができません。そこで、特殊なデータ伝送装置を架線あるいはパンタグラフに取り付け、測定データを非加圧部に伝送することによってはじめてデータを取得することができます(図3)。とはいえ伝送可能なデータ点数には限りがありますので、計測項目をよく吟味することが求められます。また、取り付け可能な測定センサにも制約がありますので、測定方法の開発も重要な技術課題です。

ところで、架線はレール方向に長く、しかも比較的低い剛性を有する構造物ですので、波動現象をきちんと捉えることが系の性質を理解するうえで重要です。波動を捉えるためには、架線の振動をできるだけ多点で測定することが望ましいのですが、前述の理由により、架線上の限られた点の振動を測定することしかできません。そこで、架線上を伝播する波動を直接とらえる方法が開発されています。この方法は、図4(a)に示すように加速度計2個を組み合わせたセンサをトロリ線に取り付けることによってトロリ線の上下加速度とその空間微分を求め、これをもとにトロリ線の波動を求めるもので、センサを取り付けた場所を右から左に伝播する波動と、左から右に伝播する波動とを分離して測定することが可能です(図4(b))。

一方、架線の挙動を地上側から観察することにより、高電圧環境下における測定を回避する方法も開発されてい

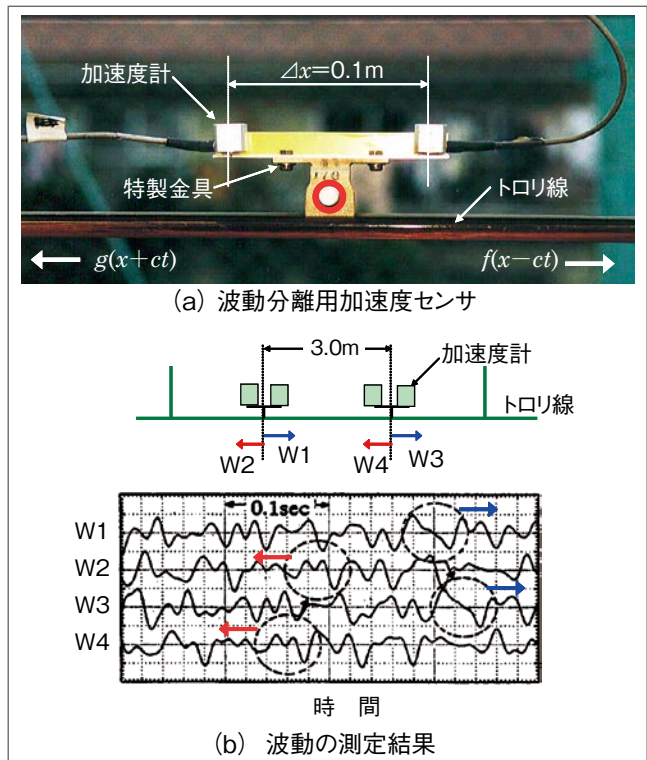


図4 架線を伝播する波動の測定

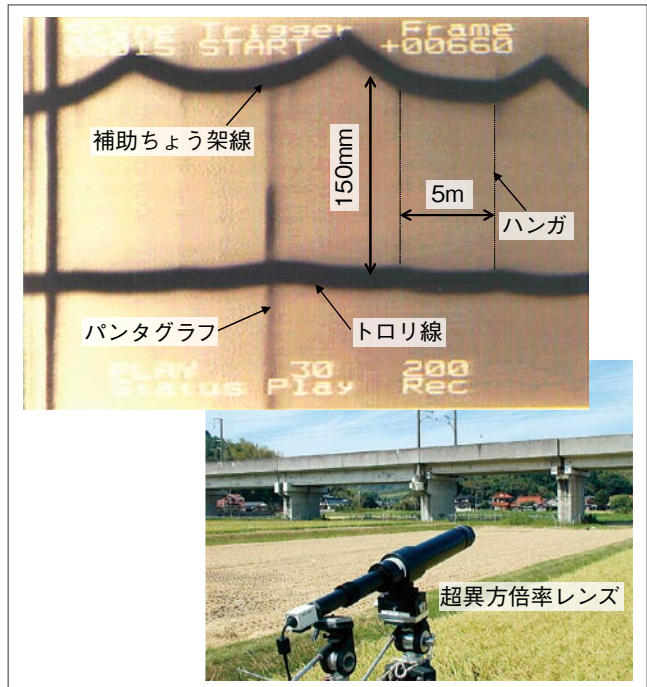


図5 超異方倍率レンズによる架線振動測定

す。この方法では架線振動を画像として取得し、画像処理によって種々の物理量を求めます。画像計測の利点は空間上の2次元データを得ることが可能なことですので、その特徴を最大限に活かすため、鉛直方向の倍率が水平方向の約80倍にもなる特殊なレンズ(超異方倍率レンズ)を用いています。このレンズを用いて取得した画像の例を図5に示します。加速度計などによって架線の運動を直接測定す

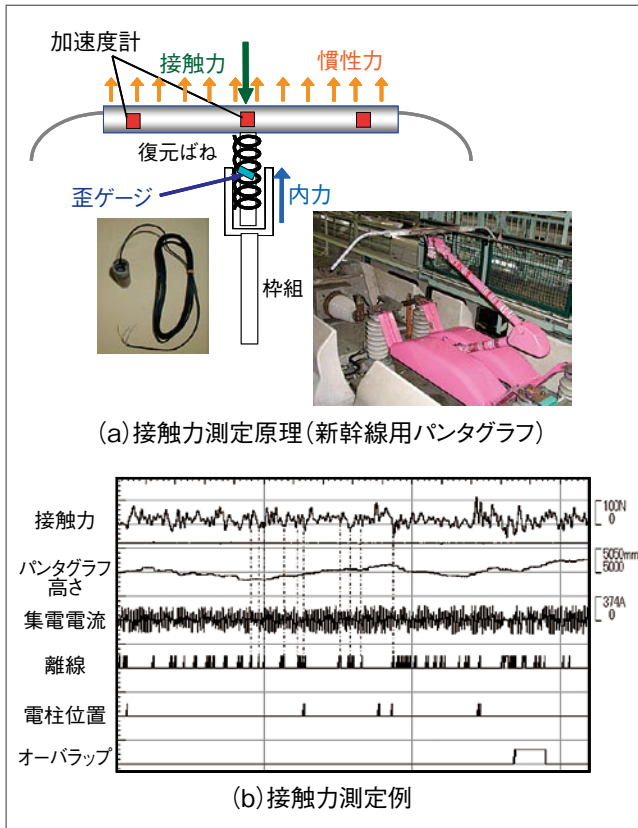


図6 パンタグラフの接触力測定

る方法に比べると空間分解能は劣りますが、1径間(40~50m)にわたる架線の運動を同時にとらえることができるのは画像計測ならではのことで

です。パンタグラフに作用する接触力の計測手法についても開発が行われています。図6(a)に示すように、パンタグラフの舟体およびその近傍に加速度計と歪ゲージを取り付けます。接触力測定においては舟体の慣性力の影響を正しく補正することが要求されますが、一般に周波数が高くなるほど慣性力の空間分布が複雑になります。そこで複数の加速度計を使用することにより、測定可能な周波数範囲を広く設定することが可能となりました。接触力の測定例を図6(b)に示しますが、同時に行った離線検出結果との整合性も良好で、精度良く測定されていることがわかります。

理論解析と数値シミュレーション

先ほども述べたように、架線はレール方向に長く、しかも比較的低い剛性を有する構造物です。したがって、架線の動的な性質に大きな影響を与える固有振動数や振動モードが、比較的低い周波数範囲に多数表れます。このことは、架線の動的挙動を簡単な数式で表現することが容易ではないことを意味しています。したがって、理論的な取り扱いをするためには、架線を単純化した解析モデルによって表現することが必要となります。

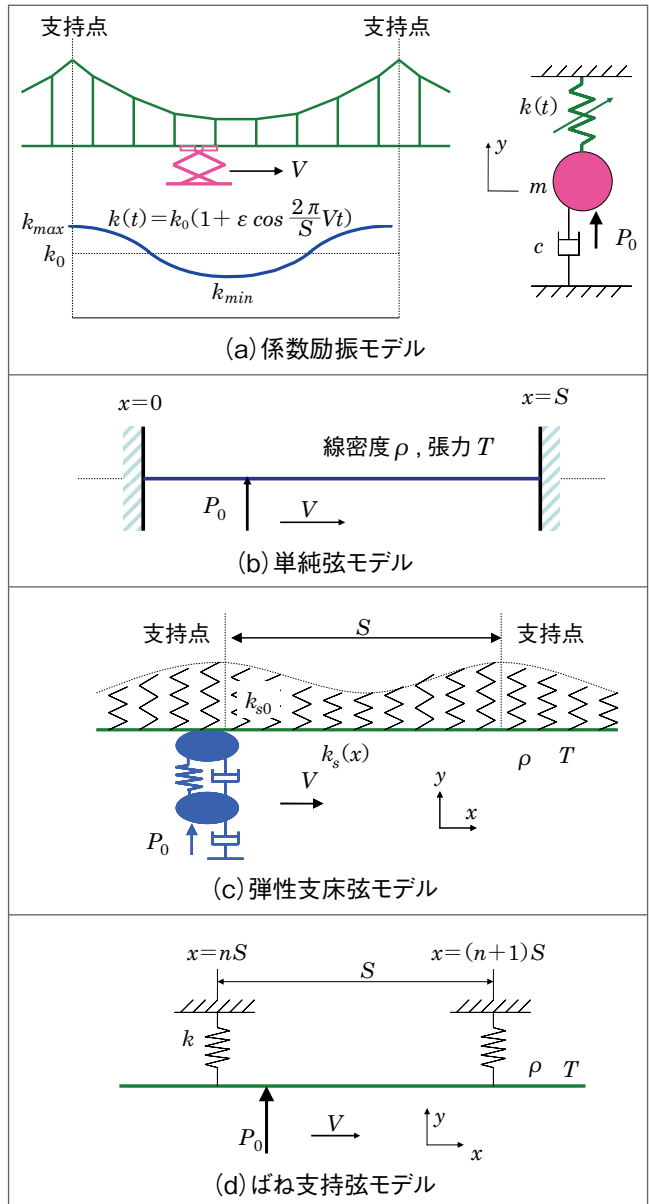


図7 架線の周期構造を表現した種々のモデル

モデル化を行う上で重要な点は、着目する物理的な特徴を損なうことのない範囲で可能な限りの単純化を行うことと、単純化によって損なわれる物理的性質をよく理解しておくことです。架線・パンタグラフ系を表現する解析モデルのいくつかの例を図7に示します。いずれも、架線の構造上の特徴である空間的な周期が、その動的な挙動に与える影響について調べるためのモデルですが、それぞれ長所、短所があります。たとえば図7(a)の係数励振モデルは、架線の周期性を表現するため、周期的に変動するばね定数を有するばねとして架線をモデル化しています。架線のもつ波動として性質を完全に無視していますので、モデルの支配方程式を解いて得られる変位や接触力の値は実際の現象と定量的には一致しませんが、近似解が比較的簡単な式で与えられるため、モデルの各パラメータがパンタグ

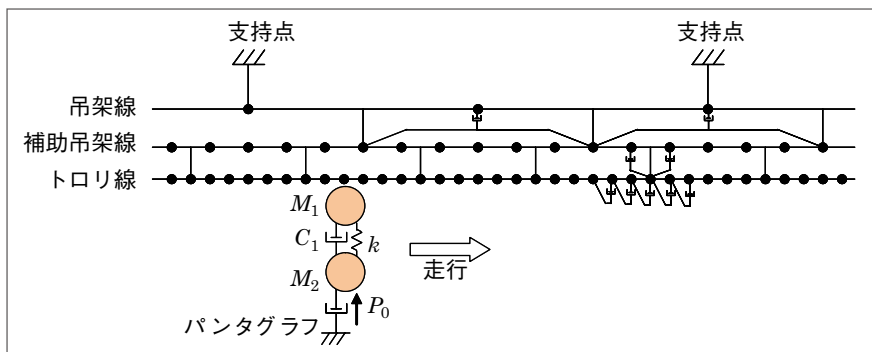


図8 架線・パンタグラフ系のシミュレーションモデル(差分法)

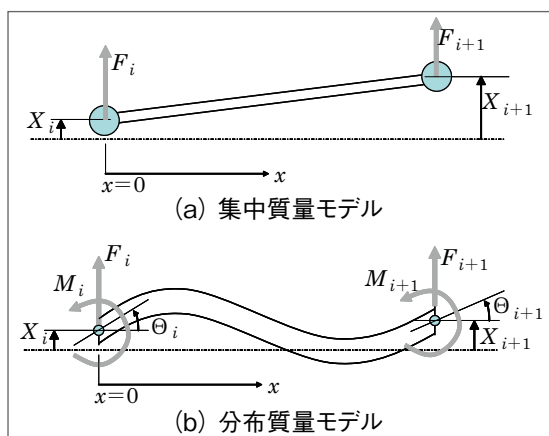


図9 線条のモデル化手法

ラフの周期的運動に対しどのような影響を与えるのかについて、見通しよく理解することが可能です。一方、図7(b)のモデルは主としてトロリ線の波動特性に注目したものです。境界条件として両端固定を与えていますので、架線の持つ周期性は無視されていますが、波動としての基本的な性質を理解する上では有用なモデルです。図7(c)～(d)は、どちらもトロリ線の波動特性と周期性の両方を表現しているモデルです。ただし、上部線条(吊架線)の取り扱いが異なっており、図7(c)では定数が周期的に変化するばねが連続的に配置されていますが、図7(d)では離散的なばねによりこれを表現しています。両者は波動の伝播特性を若干異なった形式で表現しますが、架線・パンタグラフ系の共振現象の性質を検討する上でどちらも有用なモデルです。以上のように、架線・パンタグラフ系の解析モデルとして種々のものが提案されていますが、着目したい挙動の性質・特徴が何であるのかよく理解したうえで解析モデルを選択することが重要です。

これに対し、モデルの単純化よりも、実際の現象をできるだけ忠実に再現することが求められる場合も多くあります。このような場合に用いられるのが数値シミュレーションです。架線・パンタグラフ系についても、その動的挙動を再現する数値シミュレーションが開発され(図8)、現象

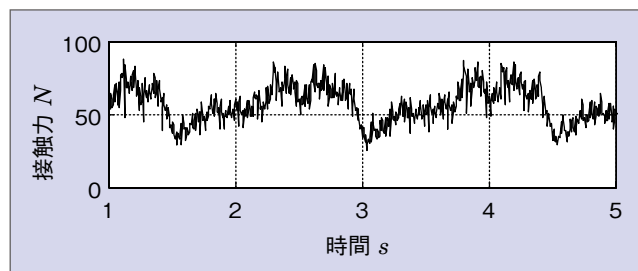


図10 有限要素法による数値シミュレーション例

解明のような基礎的分野から新しい架線構造の開発など実用的な分野まで、広く利用されています。

動的挙動に関わる数値シミュレーションでは、系の支配方程式を離散化したうえで代数方程式の形式に変換し、これを繰り返して計算等により解くことが一般的です。そのうち離散化の方法にいくつかの方法があり、これが数値シミュレーションを特徴づけます。日本で用いられている架線・パンタグラフ系の数値シミュレーションは図9(a)に示すような、差分法を基本とした集中質量モデルを使用しています。一方、海外では図9(b)に示すような有限要素法を基本とした整合質量モデルが良く用いられています。後者の方が拡張性が高いため、鉄道総研でも有限要素法をベースとした架線・パンタグラフ系の数値シミュレーションを現在開発しているところです(図10)。

おわりに

架線とパンタグラフの動的な挙動を調べる方法として、実験・観察、理論解析、数値シミュレーションの三つを紹介しました。この三つは相互に補完し合うものであり、決して数値シミュレーションさえできればそれでよいというものではありません。鉄道総研では、これらをバランスよく発展させることを目指して鋭意努力を重ねています。読者諸氏のご助言ご協力をよろしくお願い致します。

RRR