

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

架線モデルと実機パンタグラフで集電性能を評価する

鉄道車両への安定した電力供給を実現するためには、走行中のパンタグラフの運動を予測あるいは測定することで、パンタグラフの性能を評価することが重要となります。しかし現状のシミュレーション手法や試験装置には、実施コストと得られる結果との間に大きなトレードオフの関係があります。そこで、シミュレーションと実験を融合したハイブリッドな手法であるHILS（図1参照）を用いた集電性能評価手法を開発しました。ここでは、実機のパンタグラフと架線の運動シミュレーションに基づくHILSの試験結果について示します。



小林 樹幸
Shigeyuki Kobayashi
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



臼田 隆之
Takayuki Usuda
鉄道力学研究部
集電力学研究室
室長
[専門分野] 架線／パンタグラフ系の動的相互作用



山下 義隆
Yoshitaka Yamashita
電力技術研究部
電車線構造研究室
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

はじめに

パンタグラフは架線から車両へ電力を供給するために、車両の屋根上に搭載される装置です。図1のようにパンタグラフは舟体と枠組から構成され、日本の電車では、あらかじめ伸ばされているコイルばねが縮もうとする力を使って、舟体を架線に押し付けています。このとき、架線と舟体の間に作用する力を接触力とよび、列車

が停止している状態では舟体の高さによらず接触力が一定となるように設計されています。しかし列車が走行している状態ではパンタグラフと架線に振動が生じるため、接触力が変動します。列車の走行速度が高いほど接触力の変動が大きくなり、パンタグラフが架線から離れる離線とよばれる現象が起こります。離線によって生じるアーク放電は数千度の高温になるため、パンタ

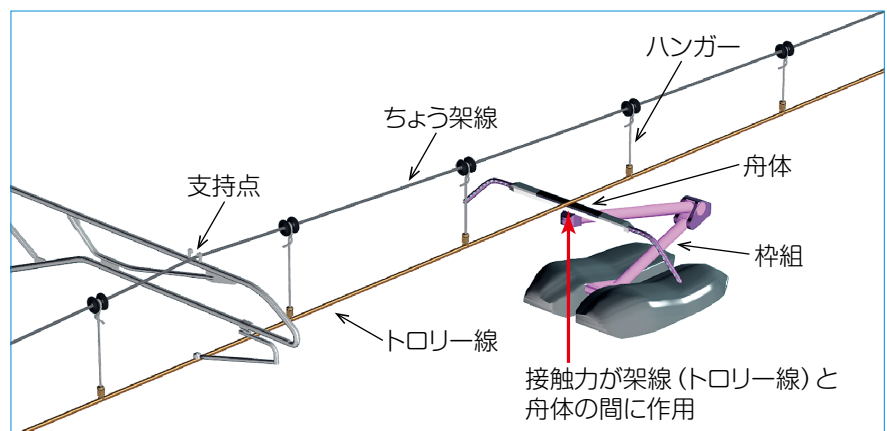


図1 架線とパンタグラフの概略図

図1 HILS : Hardware-In-the-Loop Simulation

シミュレーションループの中に、ハードウェアである実構造物を組み込んだハイブリッドなシミュレーション手法です。シミュレーションを用いた柔軟な条件設定と、実構造物を用いた詳細な特性評価が可能になります。鉄道以外の分野では、自動車のエンジンコントロールユニットの開発などに用いられています。

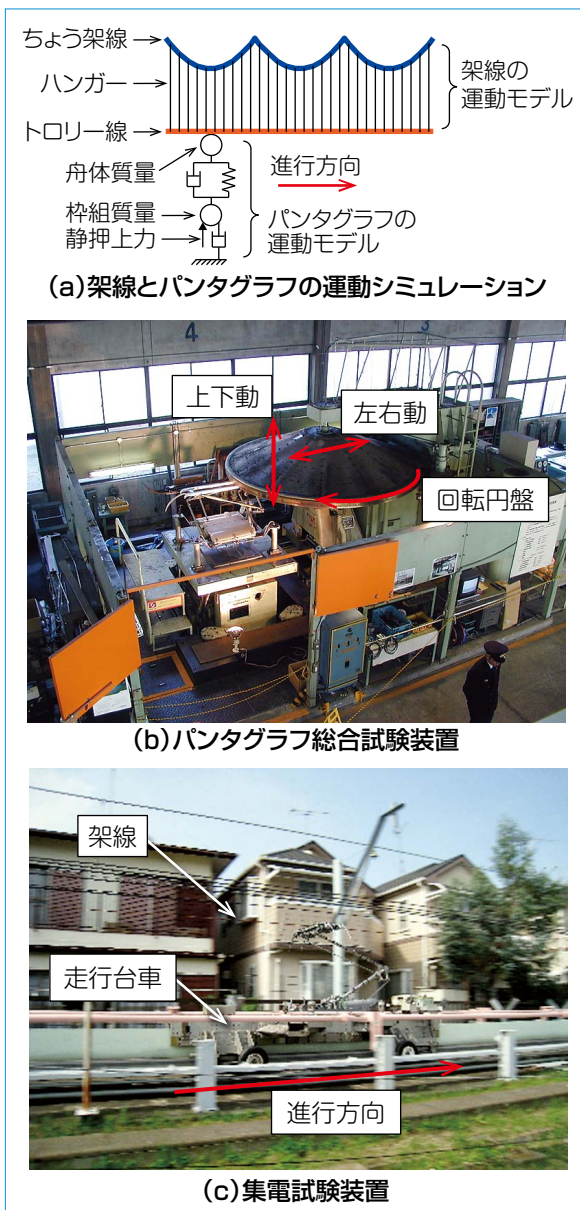


図2 既存の集電性能評価手法

グラフと架線の保守の観点から避けるべき現象です。したがって、鉄道を高速化するためには接触力の変動が小さくなるような工夫が必要になります。

接触力変動の大小などはパンタグラフが車両へ電力を供給する(集電する)際の評価指標となるため、集電性能とよばれます。新しくパンタグラフを開発する際には、さまざまな方法で集電性能を評価します(図2)。その一つとしてシミュレーションの活用があげられます。図2(a)は、架線の運動モデルの下をパンタグラフの運動モデルが左から右へ走行する状況を表しています。このように、架線とパンタグラフ

モデルを作成することは容易ではありません。つぎに、試験装置を用いた集電性能の評価手法があげられます。鉄道総研では、パンタグラフ総合試験装置(図2(b))や集電試験装置(図2(c))を用いたパンタグラフの性能評価を実施できます。パンタグラフ総合試験装置では、最高速度300km/hで回転する円盤と実機パンタグラフの舟体をしゅう動させながら、回転円盤を上下左右に振動させることでパンタグラフの走行を模擬した集電性能評価が可能です。しかし、回転円盤の上下左右の動きは、あらかじめ決められた運動を再現するものなので、実際にパンタグラフ

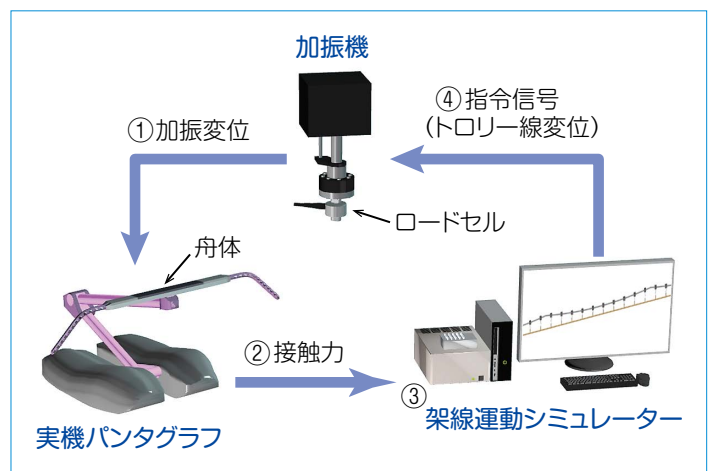


図3 パンタグラフHILSシステムの概要

の運動モデルをコンピュータ上に構築して、架線下をパンタグラフが走行した際の双方の挙動を計算によって求めることで、接触力や舟体の変位などの集電性能を評価します。シミュレーションを利用することで、さまざまな条件でパンタグラフが走行した際の集電性能を調べることができますが、パンタグラフのように部品点数が多く、なおかつ複雑な機構を有する運動

が架線を走行した際と同等の結果を得ることが困難です。いっぽう、集電試験装置ではパンタグラフを搭載した台車が実際の架線下を最高速度200km/hで走行することができますが、全長が400mであり、また定速走行区間が70mであるなどの制約があります。このように、既存の手法による集電性能の評価はいずれも一長一短です。

そこで、パンタグラフが架線の下を走行する状況を高精度に、なおかつ低コストで実施できる試験装置を開発しました¹⁾。

ハイブリッドな試験手法(HILS)

実験とシミュレーションを融合したハイブリッドな手法であるHILSは、さまざまな産業分野で使われています。HILSでは機械や土木構造物などからなるシステムの一部に実機を利用し、残りの部分をシミュレーションで表現することにより、実際のシステムの動きを簡便に表現することができます。

集電性能を評価する際には、実機のパンタグラフと架線の運動モデルを用いてHILSを行うことができます(図3)。パンタグラフのHILSは、以下の仕組みで動作します。①はじめに加振機がパンタグラフ舟体を加振します。このときに加振機と舟体との間の力(②接触力)をロードセルで測定します。測定した接触力が、③架線運動

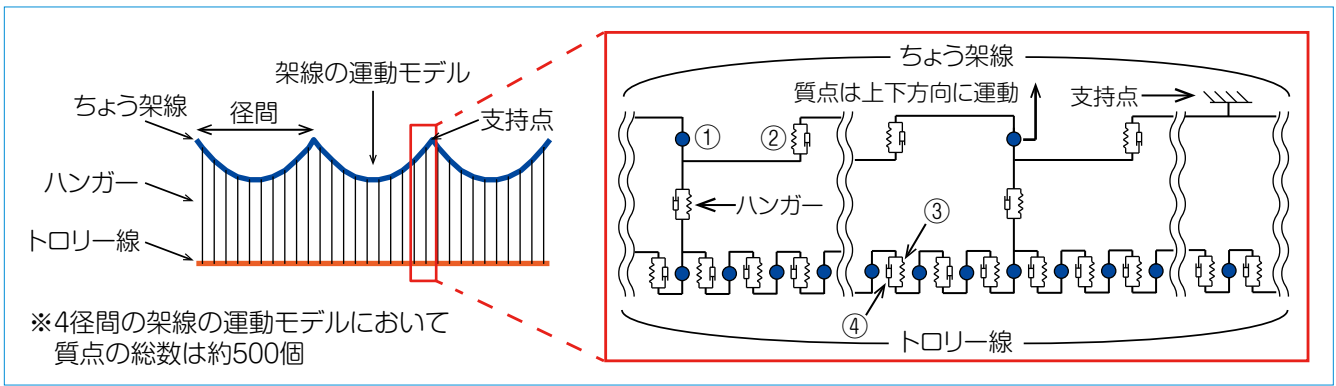


図4 架線の運動モデル

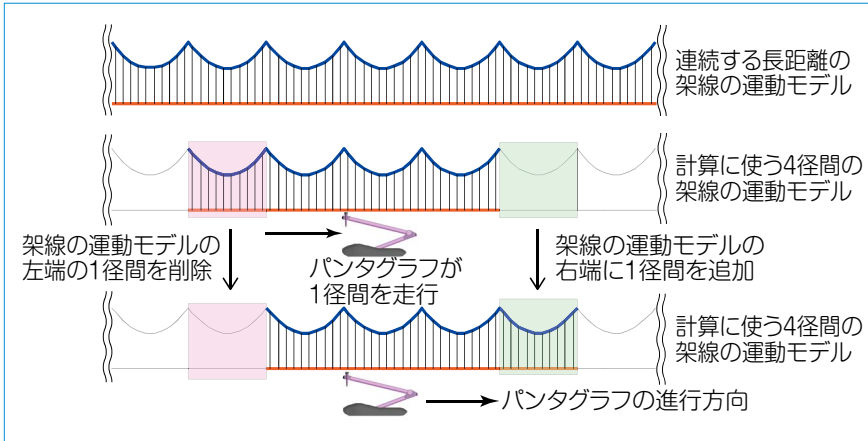


図5 HILSにおける長距離走行の模擬手法

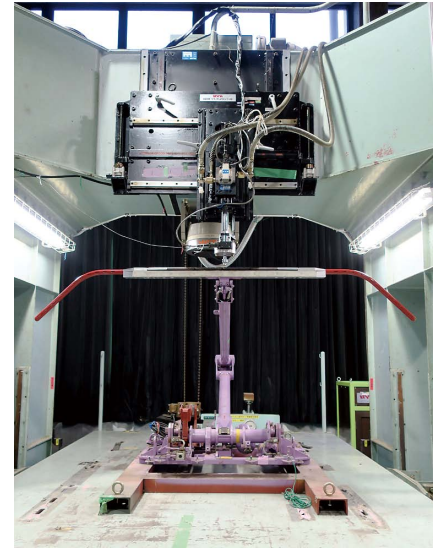


図6 HILSの実施概要図

シミュレーター内に構築された架線の運動モデルに作用します。④このときの架線の運動モデルの運動計算をリアルタイムに実行します。このリアルタイムな運動計算は、たとえば0.2ミリ秒程度の短い時間間隔で行われ、その計算結果が0.2ミリ秒ごとに出力されます。この0.2ミリ秒という時間間隔は、架線の運動モデルをリアルタイムかつ高精度に計算可能な値であり、経験的に得たものです。こうして計算されたトロリー線の運動を加振機が再現するように、加振機へ指令信号を送ります。これにより、加振機がトロリー線の動きと同じようにパンタグラフ舟体を加振します。上記の流れを0.2ミリ秒の時間間隔で繰り返し、なおかつ架線へ接触力を作用させる位置をパンタグラフの進行方向へ進めることで、パンタグラフの走行状態を模擬することができます。

HILSシステムの遅れ対策

一般的なHILSでは、HILSシステムが有する動作遅れによって加振機が所望の動きをせず、場合によっては不安定な挙動を振る舞うことがあります。パンタグラフのHILSシステムでは油圧駆動型の加振機を用いていることから、油を介して電気信号を運動に変換することによって加振機に動作遅れが生じます。また、加振機を制御する装置や架線運動シミュレーターの計算時間間隔によってもHILSシステムの遅れが生じます。

このような不安定挙動を解消するために、本HILSシステムでは制御手法による遅れ対策を施しています。この手法では、架線運動シミュレーターで得られたトロリー線の運動と、加振機に生じる実際の運動をモニターし、これらの運動に応じて適切な指令信号を加振機へ送ることで、加振機が所望の

運動をするように制御を施しています。

架線の運動モデル

架線の運動モデルは、図4に示すように①トロリー線とちょう架線を複数の質点で分割し、②隣り合う質点どうしをばねとダンパーで接続します。③このばねは、ちょう架線やトロリー線に作用する張力に対する剛性を表現するもので、④ダンパーはちょう架線やトロリー線の運動が時間とともに小さくなる現象を表現するために設けています。

このように作られた架線の運動モデルは、4径間程度の短い架線であっても質点の数が約500個と非常に多くなるため、架線運動シミュレーターが運動計算を0.2ミリ秒の間隔で行うことができません。そこで本HILSシステム

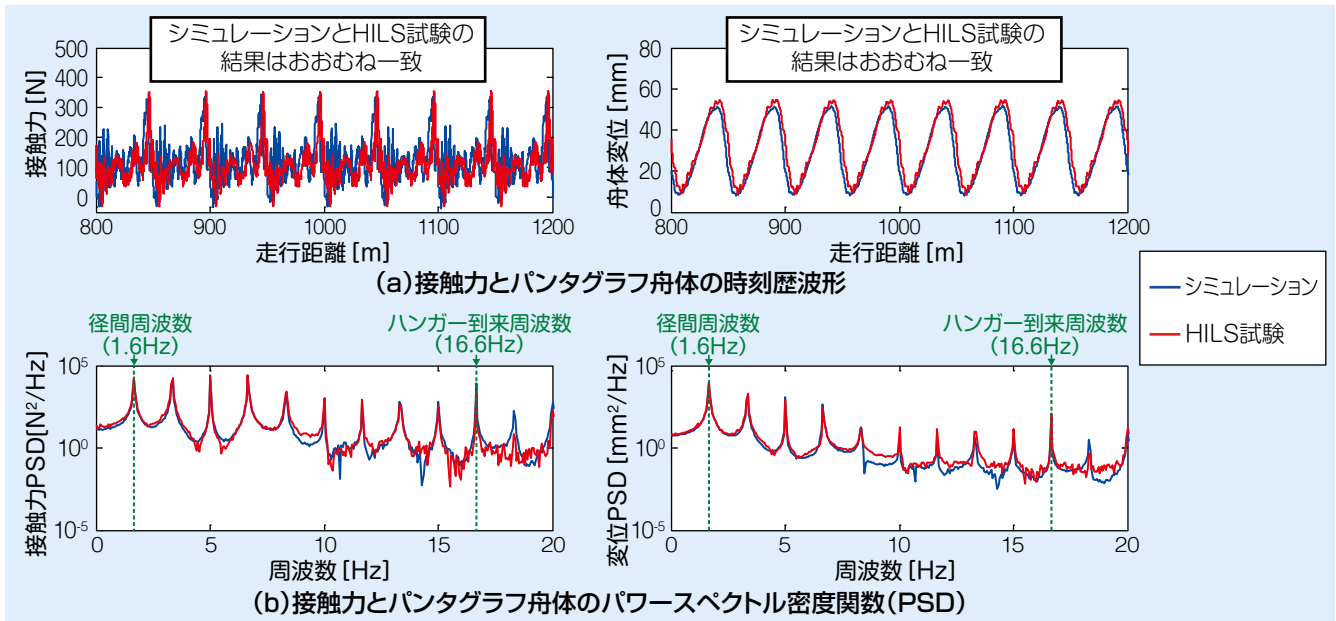


図7 HILSの試験結果

ムでは、架線の運動を表現する上で重要な50個程度の代表的な運動(固有モード)を用いて近似的に架線の運動を表現します。集電性能を評価する上で重要な、走行するパンタグラフがハンガーの位置を通過する周波数(ハンガー到来周波数)より高い周波数の運動を表現するため、50個の固有モードを用いることで架線の運動を十分に表現することができます。

しかし、4径間の短い架線の運動モデルでは集電性能を十分に評価することができません。そこで、図5に示すようにパンタグラフが1径間を走行するごとに架線の運動モデルの一番後ろの(左端の)1径間を削除し、その代わりに一番前に(右端に)1径間のモデルを付け足します。こうすることで、計算に使う架線の運動モデルの規模は4径間でありながら、あたかも連続する長距離の架線をパンタグラフが走行する状況を模擬することが可能になります。

HILS試験の実施

図6に示すように、試験装置でパンタグラフのHILSを実施しました。ここでは、新幹線用のシングルアームパンタグラフが速度100km/hと300km/hで

走行する状況を模擬します。またHILSの結果を評価するために、架線とパンタグラフの詳細な運動モデルを用いたパンタグラフの走行シミュレーションを別途行いました。この走行シミュレーションでは、加振機などの動作遅れを考慮せず、また総延長が1kmの大規模な架線の運動モデルを使用しました。

試験によって得られた接触力とパンタグラフ舟体の変位の時刻歴波形を図7(a)に示します。本システムではHILSシステムの遅れ対策を施しているため、HILS試験の結果はシミュレーションの結果とおおむね一致します。また、変位や接触力の大きさを周波数領域で評価するパワースペクトル密度(PSD)(参照)を図7(b)に示します。集電性能を評価する上で重要な径間周波数(1.6Hz)やハンガー到来周波数(16.6Hz)の挙動をHILS試験によって高精度に表現できていることがわかります。

パワースペクトル密度 (PSD)

PSD (Power Spectral Density) は、変位や接触力などのデータを周波数分析したもので、各周波数における単位周波数あたりのパワーを示したものです。

まとめ

パンタグラフの集電性能を、実機パンタグラフと架線の運動シミュレーションを融合することで、簡便かつ高精度に評価することができるHILSシステムを紹介しました。本システムでは制御手法を導入することで、動作遅れが生じる環境においても加振機がトロリー線の変位を正確に再現することができます。また、重要な50個の固有モードを用いて架線の運動を表現することで、リアルタイムな架線の運動計算を可能にするとともに、4径間の小規模な架線の運動モデルを用いながらも長距離走行を模擬できる手法をHILSへ適用することで、パンタグラフの集電性能を評価することができます。本手法の適用により、パンタグラフの開発期間の短縮が期待できます。

RRR

文献

- 1) 山下義隆, 小林樹幸, 臼田隆之, David P.Stoten: 多質点系架線モデルを用いた架線パンタグラフ系HILSシステムの実現, 第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, S8-3, 2017