

## 電車線・パンタグラフ系への HILS 技術の適用

鉄道力学研究部 集電力学研究室

研究員 小林 樹幸

### 1. はじめに

パンタグラフが電車線の下を走行した際に発生するパンタグラフの接触力変動や変位などは、電車線とパンタグラフとが互いに動的な影響を及ぼしあうことによって生じるものであり、電車線・パンタグラフ系の性能評価において重要な項目である。しかし、現車試験でこれらの値を測定する場合には高電圧環境下へ測定器を仮設する必要があることから、取得できるデータには制約がある場合が多い。そこで、試験装置を用いて電車線・パンタグラフ系の性能を評価するいくつかの手法が確立されている。パンタグラフ単体の動的性能を評価する場合には、剛体の回転円盤を用いてすり板と電車線とのしゅう動状態を模擬する鉄道総研のパンタグラフ総合試験装置が用いられるが、本試験装置では電車線の動特性が考慮されていない。一方、電車線とパンタグラフ間の動的相互作用を考慮できる試験装置としては、鉄道総研の集電試験装置が挙げられる。集電試験装置とは、架空電車線が架設されている直線区間において、パンタグラフが搭載された走行台車を最高速度 200km/h で走行させることができる試験装置であり、電車線とパンタグラフを組み合わせた性能評価試験に用いられている。ただし、集電試験装置は測定可能な区間が約 60m であるなどの制約がある。このように現状の試験装置は一長一短であるため、電車線との動的相互作用を考慮した上で比較的容易に、なおかつ高速で走行した際のパンタグラフの性能を評価できる試験装置を開発することは、更なる鉄道の高速化を図る上で重要である。

そこで本発表では、実機パンタグラフと電車線の力学モデルを組合せたハイブリッドな試験手法に関する基礎検討結果について報告する。本試験手法は産業分野において広く活用されている HILS (Hardware In the Loop Simulation)<sup>1)2)</sup>の技術を電車線・パンタグラフ系へ適用するものである。HILS とは試験対象物(本ケースではパンタグラフ)以外のプラント(本ケースでは電車線)を数学モデルとして用意し、数学モデルで表される電車線の挙動については加振機を用いて実現象として表現するシステムである。そのため、電車線の挙動に関するシミュレーションを、実際に物理現象が発生している時間(実時間と称する)と同期させる必要がある。HILS を電車線・パンタグラフ系へ適用した本試験手法を、本発表ではパンタグラフ HILS と称する。

### 2. パンタグラフ HILS の概要

試作した電車線・パンタグラフ系の HILS システムは、実機パンタグラフ、リアルタイムシミュレータ、サーボアンプ、加振機から成り、これらが閉ループを構成している(図 1)。システムの動作に関する流れは以下のとおりである。①実機パンタグラフの舟体に作用する接触力を測定する。測定された接触力を、A/D 変換ボードを介してプロセッサボード内に構築された電車線モデルへ入力として与える。②接触力を電車線モデルへ与えることで次の時間ステップにおけるトロリ線の変位を算出し、D/A 変換ボードを介して変位信号をサーボアンプへ入力する。③サーボアンプによって加振機を駆動する。④加振機が電車線の挙動を再現し、パンタグラフ舟体に接触

力が生じる。この①から④のプロセスを一定の時間間隔で実行し、さらにリアルタイムシミュレータ内部の動作時間を実時間と同期させることで、パンタグラフが電車線の下を走行している状況を模擬する。

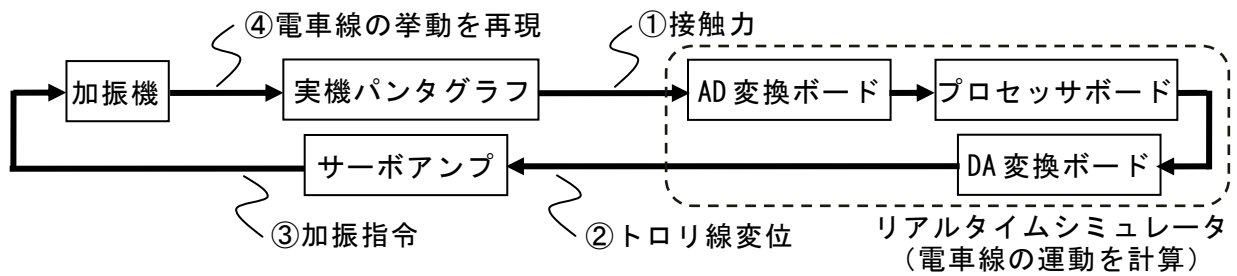


図1 パンタグラフ HILS のブロック図

### 3. 検証試験 (基礎試験)

本章では、リアルタイムシミュレータと加振機を用いて力学モデルの挙動を表現できることを確認するために、図2に示す3自由度振動系を加振機に再現させることを試みた。検証に用いた3自由度振動系の各物理定数を表1に記す。ここでは試験機の構成は図3に示すとおりとし、ロードセルに対して加振力を与え、そのときの加振機の挙動を調べる検証試験を実施した。ロードセルに作用した加振力をA/D変換することで質点1に作用する加振力とし、計算により求めた次の時間ステップにおける質点1の変位を指令信号として加振機へ与えた。なお、リアルタイムシミュレータによる計算は1ms間隔で実行した。

質点1の周波数応答関数(加速度/力)について、解析的に得られた値と加振試験の結果得られた値を図4に比較する。これより、試験から得られた周波数応答関数と、その理論値とは概ね一致しており、試作したシステムは、リアルタイムシミュレータの内部に構築されたモデルの動特性を表現可能であることが確認できた。ただし、HILS試験によって得られた周波数応答関数(図4における赤線)は、周波数が高くなると共に位相が遅れる傾向が認められる。これは加振機が有する周波数特性に起因するものと考えられる。従って今後は、加振機の位相遅れを補償することでHILSシステムの精度向上を図る必要がある。

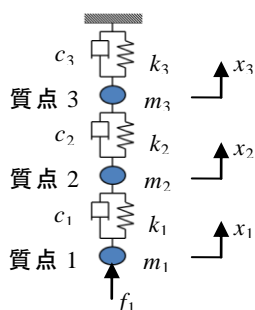


図2 リアルタイムシミュレーション検証用の3自由度系

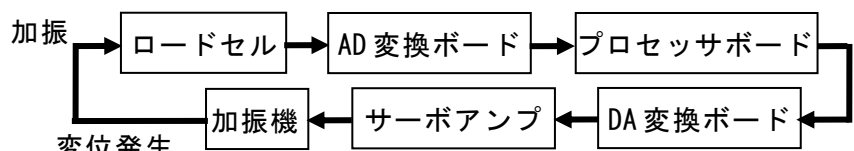


図3 パンタグラフ HILS のブロック図

表1 3自由度系の物理定数

質量	剛性	減衰
$m_1 = 30\text{kg}$	$k_1 = 8000\text{N/m}$	$c_1 = 0.007 \times k_1 \text{ Ns/m}$
$m_2 = 40\text{kg}$	$k_2 = 10000\text{N/m}$	$c_2 = 0.007 \times k_2 \text{ Ns/m}$
$m_3 = 50\text{kg}$	$k_3 = 15000\text{N/m}$	$c_3 = 0.007 \times k_3 \text{ Ns/m}$

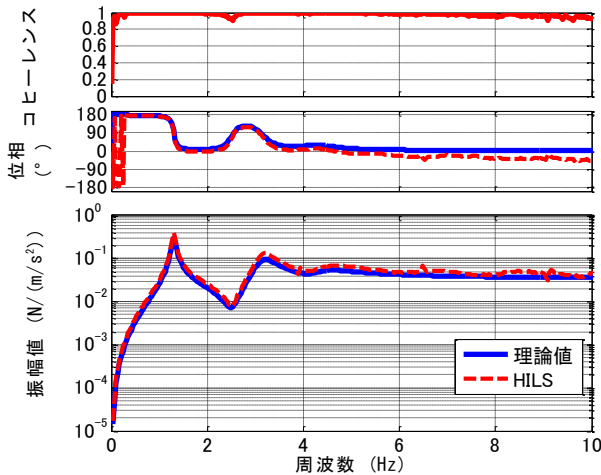


図4 周波数応答関数の比較

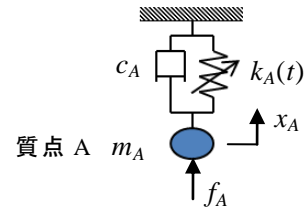


図5 時変剛性を有する電車線モデル

#### 4. 検証試験 (1自由度時変剛性電車線モデルを用いたパンタグラフ HILS)

##### 4.1 電車線モデルの概要

電車線を、質量  $m_A$ 、減衰  $c_A$  と、時間とともに変化する剛性  $k_A(t)$  からなる比較的小規模な 1 自由度振動系としてモデル化した (図 5)。このように、剛性を時変とすることにより支持点やハンガ点のちょう架間隔に起因する電車線の等価ばね定数の変動を表現し、パンタグラフ走行時における電車線の挙動を模擬する。なお、以降では本モデルを時変剛性モデルと称する。図 5 において  $x_A$  は質点 A の変位を、 $f_A$  は質点 A に作用する外力を、それぞれ表している。時変剛性モデルを用いたパンタグラフ HILS では、ロードセルで測定した荷重を  $f_A$  として質点 A に作用させることで、パンタグラフと電車線との接触状態を模擬する。

##### 4.2 時変剛性電車線モデルを用いたパンタグラフ HILS の試験方法

実機パンタグラフと電車線の時変剛性モデル (図 5) を使用したパンタグラフ HILS 試験を行った。電車線モデルは、ちょう架線とトロリ線の張力がいずれも 9800N であるシンプル架線を時変剛性モデルとして表現したものであり、径間長は 50m、ハンガ間隔は 5m とした。電車線モデルの物理定数は、 $m_A = 100\text{kg}$ 、 $c_A = 300\text{Ns/m}$  とし、電車線の静的な等価剛性  $k_A(t)$  は電気抵抗法により求めた<sup>3)</sup>。パンタグラフの走行速度は 100km/h とし、計算時間間隔を 1ms とした。

さらにパンタグラフ HILS の試験結果に関する妥当性を検証するために、別途パンタグラフの走行シミュレーションを実施した。このシミュレーションでは図 6 に示すように、電車線モデルとパンタグラフの力学モデルの接触を表現するために、これらをばね・ダンパで結合する系を用いており、接触を表現するためのばね・ダンパに基づいてトロリ線変位と接触力をそれぞれ計算した。ただし、電車線モデルは HILS 試験に用いた時変剛性モデルと同一であり、パンタグラフモデルは HILS 試験に供したパンタグラフを 2 自由度モデルとして表現したものである。図 6 に示すシミュレーションモデルの各物理定数は、 $m_1 = 9.8\text{kg}$ 、 $m_2 = 15.5\text{kg}$ 、 $k_c = 50000\text{N/m}$ 、 $k = 10600\text{N/m}$ 、 $c_c = 100\text{Ns/m}$ 、 $c_1 = 80\text{Ns/m}$ 、 $c_2 = 80\text{Ns/m}$  とし、 $m_A$ 、 $k_A(t)$ 、 $c_A$  については HILS で使用したモデルと同じ値を用いた。また、静押上力  $P_0$  は HILS 試験と同じ 54N とした。

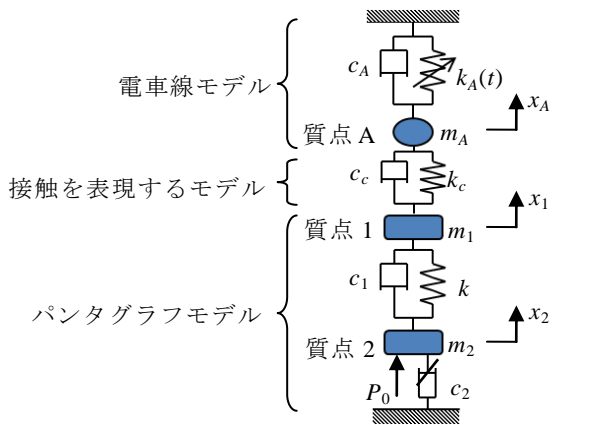


図6 HILS 検証用シミュレーションモデル

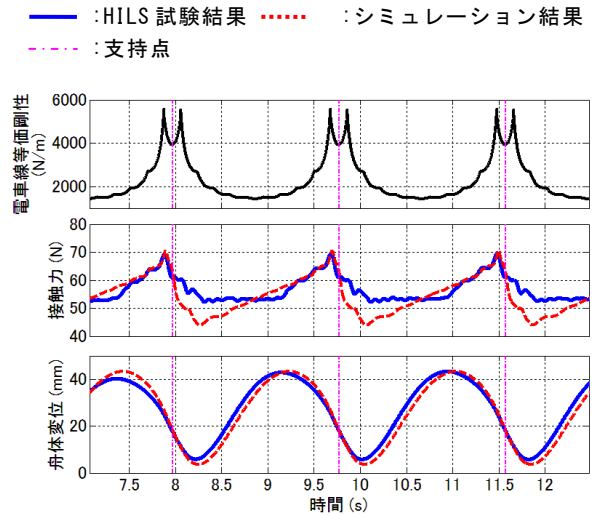


図7 パンタグラフ HILS の試験結果

### 4.3 試験結果

HILS 試験の結果とシミュレーション結果の比較を図7に示す。図7には上から順に、電車線モデルの等価剛性  $k_A(t)$ 、接触力、トロリ線変位を示しており、一点鎖線は支持点が到来した時間であることを意味している。図から、HILS 試験では支持点間隔に起因した接触力変動や舟体の上下変位といった現象を再現できていることがわかる。しかしながら、HILS 試験の結果とシミュレーション結果を比較すると、部分的に差異が生じている範囲がある。このような差異が生じる要因として、加振機の周波数特性が挙げられる。

以上の結果より、本 HILS システムはパンタグラフの走行シミュレーションにおいて電車線の径間周期に起因する現象を概ね表現することができることがわかった。今後、加振機の位相特性を補償する機構を導入することにより、HILS システムのさらなる性能向上を図る予定である。

### 5. まとめ

本研究では、電車線・パンタグラフ系の性能評価試験に対して HILS 技術を適用した新しい試験手法を提案した。はじめに、3 自由度振動系を加振機に再現させる基礎試験を実施し、試作したシステムが、リアルタイムシミュレータの内部に構築されたモデルの動特性を表現できることを確認した。電車線の力学モデルとして時変剛性を有する 1 自由度振動系（時変剛性モデル）を適用し、試作した HILS システムの妥当性に関する検証試験を実施した。時変剛性モデルについては、系の剛性を時変とすることで、パンタグラフの走行によるパンタグラフ位置における電車線の等価剛性変動を模擬している。実機パンタグラフを用いて時変剛性モデルに基づく HILS システムの妥当性を検証した結果から、時変剛性モデルに基づく HILS システムは、パンタグラフの走行シミュレーションにおいて電車線の径間周期に起因する現象を概ね表現可能だと言える。

### 参考文献

- 1) 真木康隆，渡辺信行，下村隆行，佐々木君章，遠竹隆行，森下隼人：編成走行を模擬する HILS システムの開発，鉄道総研報告，Vol.24, No.6, pp.11-16, 2010
- 2) 渡邊達己，田川泰敬，三浦淳，弘中浩二：機械・構造系 HILS 型動的試験装置の開発，Dynamics and Design Conference 2011，2011
- 3) 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，pp.9-11，1993