

- 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

# HILSシステムにより車両試験台上で編成走行を模擬する

鉄道車両の開発において、実験室で事前に十分な調整や評価が可能になれば、これまで走行試験に費やしてきた時間やコストが削減できるだけでなく、品質や安全性の向上が図れます。そこで、数値シミュレーションと車両試験台や要素部品試験装置に搭載した実物の動きを連動させるハイブリッドシミュレーションの一種であるHILSを用いて、実験室で仮想的な走行試験を行うことができる「鉄道車両用HILSシステム」を開発しました。ここではこのシステムの概要とこれまでに得られた試験結果を紹介します。



**小金井 玲子**  
Reiko Koganei  
車両構造技術研究部  
車両振動研究室  
副主任研究員  
[専門分野]車両運動特性, システム同定



**渡辺 信行**  
Nobuyuki Watanabe  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
主任研究員(上級)  
[専門分野]走り装置, 車両運動



**山口 輝也**  
Teruya Yamaguchi  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
研究員  
[専門分野]車両運動特性評価, 計測・制御技術

## はじめに

鉄道車両の開発過程において、数値シミュレーションにより車両の定性的な傾向を把握することは、労力や時間を考慮すると非常に有効な手段です。しかし、車両の全ての要素や現象をモデル化することは難しく、モデル化されていない現象についてはシミュレーション結果に反映されません。したがって、最終的な定量評価は実物車両

を用いた走行試験で行っています。

一方、営業線における走行試験は、車両の信頼性や性能を評価するために欠かせませんが、安全性を確保し、営業運転を最優先にする必要があることから、さまざまな制約を受けます。

もし、この走行試験の一部を実験室で行う仮想走行試験が実現できれば、幅広い条件で十分な確認・調整が事前に可能になり、車両開発の効率

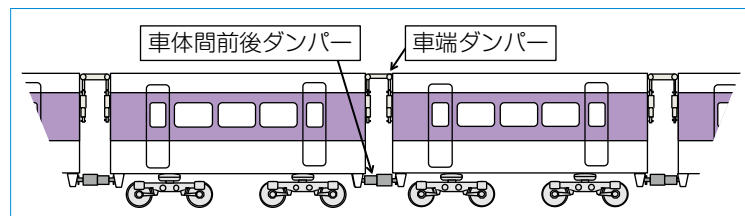


図1 編成車両

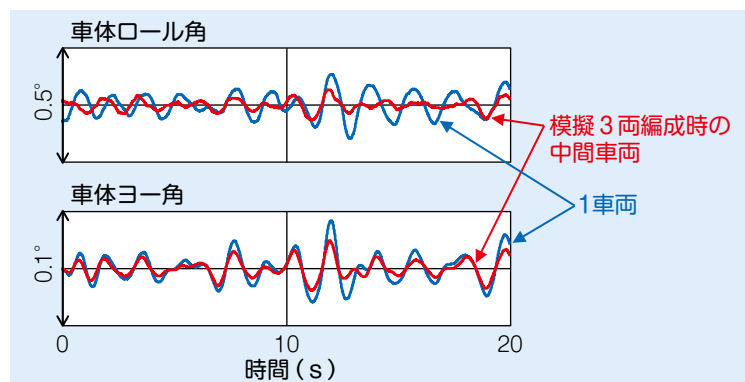


図2 1車両と模擬3両編成時の中間車両の挙動比較

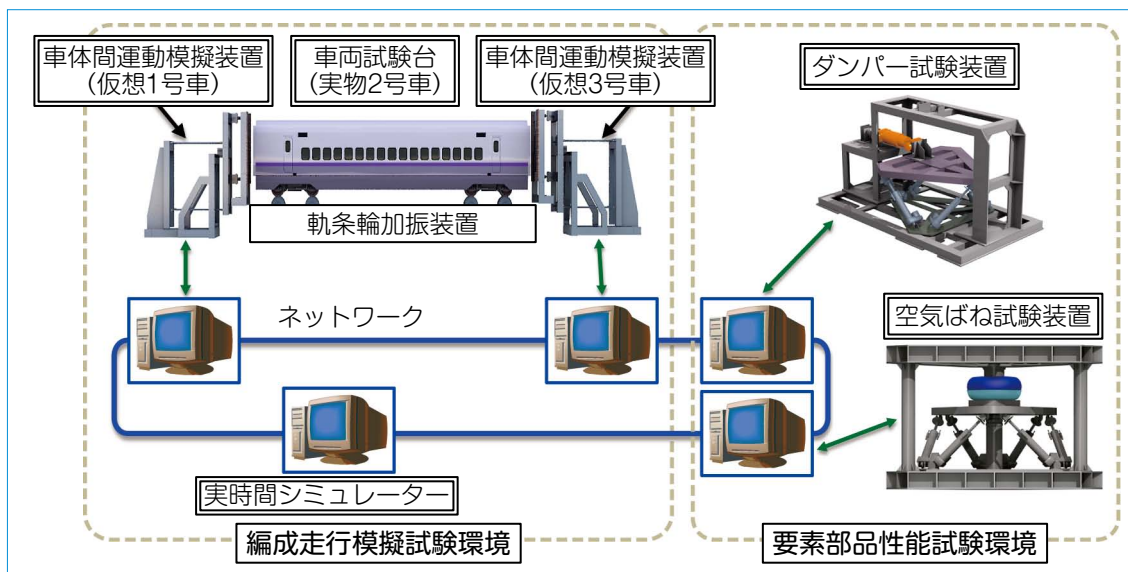


図3 鉄道車両用HILSシステムの全体構成

化が期待できます。ここで紹介する「鉄道車両用HILS (Hardware In the Loop Simulation) システム」(☞参照)は、この仮想走行試験を実現するために開発したものです。

### 仮想走行試験の必要性

鉄道総研には、実物車両1両を回転する円盤(軌条輪)上に載せて走行状態を模擬しながら、上下・左右に加振することができる車両試験台があります。この試験台を用いれば、1車両について走行時の運動特性を評価することができます。

ところで、営業線で走る多くの列車は、複数の車両を連結した編成状態で走行しています。編成の中間車両と、1車両の挙動には違いはあるのでしょうか。編成車両は、図1に示すように、例えば車体間前後ダンパーや車端ダンパーなどの結合要素によって、隣接する車両と連結されています。そのため、車両は隣接する車両の動きに互いに影響を与えることとなります。1車両と模擬3両編成時の中間車両における車体ロール角(車両の進行方向軸まわりの回転角)と車体ヨー角(車両の上下方向軸まわりの回転角)の挙動を比較した結果を図2に示します。1車両と模擬3両編成では、その振幅や位相に違

いがあることが分かります<sup>1)</sup>。このことから、より詳細に実際の車両の走行状態を評価するためには、編成状態での試験が必要であるといえます。ここで、模擬3両編成時の中間車両の挙動は、後で紹介する「鉄道車両用HILSシステム」を用いて得られた結果になります。

### 実験室で仮想走行試験をする

編成走行状態での試験は必要ですが、長いもので10両以上からなる編成での走行を実験室で再現することはできません。そこで、全て実物を用いて試験をするのではなく、評価したい箇所は実物、それ以外のところは数値モデルを用いるハイブリッドシミュレーターの一種であるHILSという試験手法を採用することにしました。

このHILSの考え方を利用して、仮想走行試験実現のための「鉄道車両用HILSシステム」を開発しました。図3にその全体構成を示します。本システ

ムは、実物車両を載せた車両試験台、HILS対応の試験装置(車体間運動模擬装置、ダンパー試験装置、空気ばね試験装置)、実時間シミュレーターから構成され、全体をネットワークで結合しています。

そして、「編成走行模擬試験」と「要素部品性能試験」の主に2つの使い方があります。

### 編成走行模擬試験

軌条輪上の実物車両と両端の車体間運動模擬装置、軌条輪加振装置、実時間シミュレーターを組み合わせることで、編成状態で走行する車両の運動特性の評価を行うことができます。

図3では、2号車が実物車両、前後の1・3号車が数値モデルで表現した仮想車両です。仮想1・3号車の動きは、高速な計算が可能な実時間シミュレーター上の数値モデルによって計算し、その車端部の動きを車体間運動模

#### ☞ HILS (Hardware In the Loop Simulation)

HILSは、数値シミュレーションループの中に、実物の評価対象(ハードウェア)を組み込んだハイブリッドシミュレーターの一種で、

- ・柔軟かつ容易に条件設定ができる数値シミュレーション
- ・実物を用いることで実際の詳細な特性が得られる試験

のような、それぞれの利点を兼ね備えています。

このようにHILSを用いて性能評価を行うシステムをHILSシステムといい、例えば自動車ではエンジンや変速機制御の開発に用いられています<sup>2)</sup>。

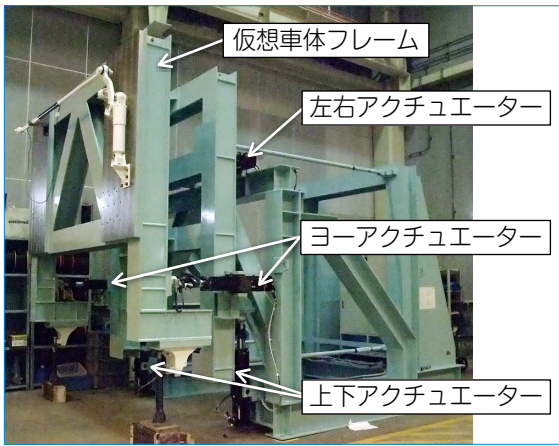


図4 車体間運動模擬装置

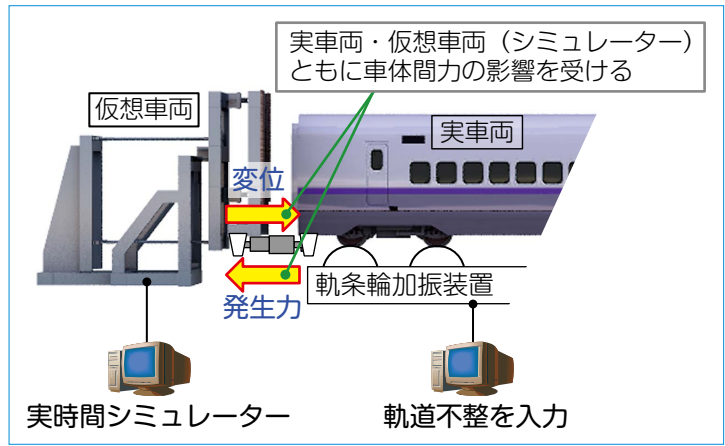


図5 実車両と仮想車両間の相互作用

擬装置によって模擬しています。この車体間運動模擬装置(図4)は、5本の電動アクチュエーターで構成され、上下・左右アクチュエーターで上下・左右・ロール方向、ヨーアクチュエーターでヨー方向、の4自由度の動きを表現することができます。

この仮想車両(車体間運動模擬装置)と実物車両を結ぶのは、実際の編成車両と同様、車体間前後ダンパーや車端ダンパーなどの結合要素です。これらの結合要素に発生した反力を計測し、実時間シミュレーター上の数値モデルにフィードバックします。その結果を用いて数値モデルで運動を計算し、車体間運動模擬装置を動作させます。このように車体間運動模擬装置と車両試験台を組み合わせて動作させることで、実物車両と仮想車両の相互作用を考慮した編成車両の運動を再現することができます(図5)。

ここで使用する実時間シミュレーター上の数値モデルは、図6のように車両を車体や台車枠などの構造体要素とばねやダンパーなどの結合要素に分解し、それぞれが入出力機能と動特性を持つ小さなブロックとして作成されています。それぞれのブロックが独立しているため、

- ①複数のCPUで並行して計算する分散処理が容易
- ②各構成要素をモデルの部品としてデータベース化することで、必

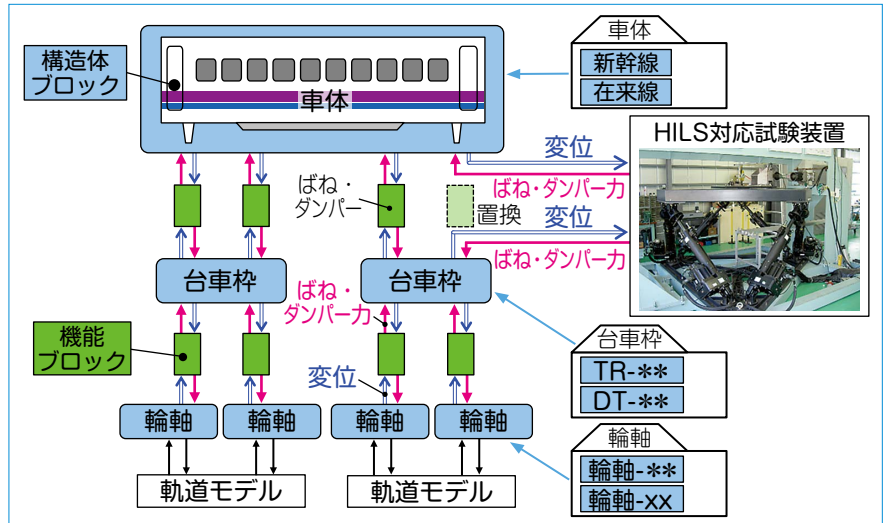


図6 実時間シミュレーター上のモデル

要な部品を選択・接続するだけでシミュレーションが可能

- ③評価対象のブロックをHILS対応試験装置と入れ替えることで、通常シミュレーションとHILSによるシミュレーションが可能といったメリットがあります。

さて、この編成走行模擬試験ですが、精度向上のため、

- ①隣接車両の運動を計算する車両数値モデルの精度向上
- ②軌道不整上の走行を模擬する軌条輪の加振方法の開発
- ③車体間運動模擬装置の動作精度の向上

など、さまざまな検討を行ってきました。①や③はこの編成走行模擬試験ならではの課題です。一方、②は1車両での試験も含めて、実際の軌道上の

走行を車両試験台で模擬する上で、非常に重要な課題でした<sup>3)</sup>。これらについて検討を行い<sup>4)</sup>、図7に示す編成走行模擬試験結果を得ることができました。これは、中間車両が実物、その前後が仮想車両の模擬3両編成(実測値)による試験結果です。車両試験台で用いた実物車両の本線走行を想定した計算値(本線走行相当)と、実測値が概ね一致していることが分かります。

このようなシステムにより、図3のような模擬3両編成の評価が可能ですが、そのほかに、1台の車体間運動模擬装置のみを使用して実物車両を先頭車あるいは最後尾車とした試験を行うこともできます。

### 要素部品性能評価試験

鉄道車両用のダンパーや一本リンク、

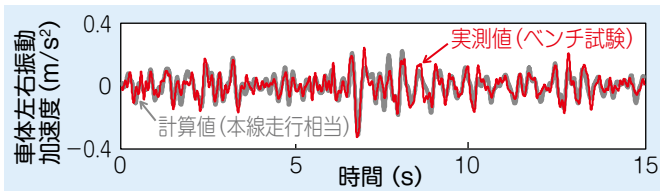


図7 編成走行模擬試験結果(3両の場合)

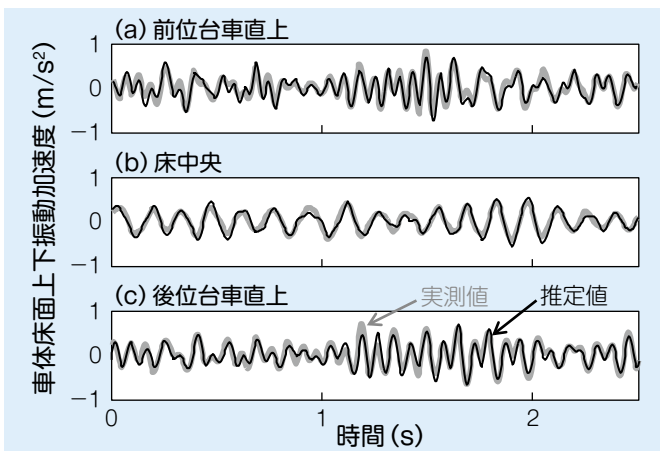


図8 車体数値モデルの精度検証結果  
(実測値と推定値の比較)

空気ばねなどの主要な要素部品の開発にあたり、実車両搭載時の条件で性能評価を行うことができます。

ここでは、評価対象の要素部品は実物を用い、車体を含むそれ以外の部分は車体の数値モデルで表現します。HILSシステムは評価対象に実物を用いていますが、この車体の数値モデルの精度も重要です。最近の取り組みの一つとして、図8にその車体数値モデルを弾性振動領域まで拡張し<sup>5)</sup>、精度検証を行った結果を示します。車体床面上下振動加速度の時刻歴応答で、数値モデルを用いて算出した推定値と実測値が概ね一致していることが分かります。

図9は評価対象をダンパーとした要素部品試験の流れです。上述の車両数値モデルをコンピューターに与え、数値シミュレーションで車両の運動を計算します。次に、評価対象を搭載したダンパー試験装置を、その計算結果を目標に駆動させ、その発生力を測定します。この発生力は車両運動に影響を及ぼすため、発生力を次の時間ステップの応答計算に入力することによって、評価対象の影響が車両の運動に反映さ

れます。ここで用いるダンパー試験装置は、鉄道車両に取り付けられているさまざまなダンパーについて、実際と同様にピン付きゴムブッシュなどの弾性部材も含めて取り付けることが可能です。さらに、ダンパーの相対的な動きが車両の実走行時と同様になるように3次元的に加振することもできます。そのため、ダンパー単体での減衰特性だけでなく、取り付け部分の影響や軸方向以外の干渉を考慮した、より実態に即した特性を評価することができます。

このような試験装置と高精度な数値モデルが実時間で連動することで、仮想的な車両搭載条件下で実物の要素部品を評価することができます。

また、要素部品の性能試験装置として使用するだけでなく、実時間シミュレーターに組み込む要素部品の数値モデルを作成するため、部品の特性を正確に調べる同定用の試験装置としても使用することができます<sup>6)</sup>。

### おわりに

鉄道総研で開発を進めている「鉄道車両用HILSシステム」について紹介

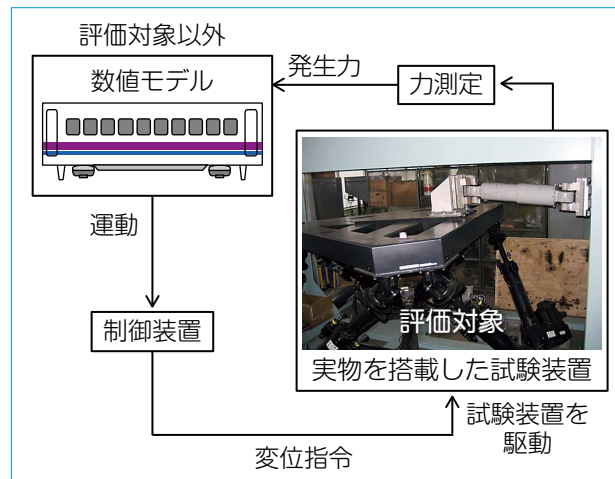


図9 要素部品性能試験のイメージ

しました。このシステムによって、営業線にて走行試験を実施する前に、十分な調整・検証をすることができ、走行試験などの開発にかかる費用や時間を抑えることができます。また、実施が困難な走行条件を、コンピューターの仮想環境上で実現することができるため、安全性の向上にもつながります。

鉄道車両の開発期間短縮や品質向上に貢献できるツールとなれるように、今後も研究開発を継続していきたいと考えています。[RRR]

### 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) 荻原顕治, 寺山哲, 竹田洋平, 依田公: 自動変速制御システム開発へのHILSの適用, 自動車技術, Vol.56, No.9, pp.64-69, 2002
- 3) 山口輝也, 下村隆行, 佐々木君章: 車両試験台でレール上の走行を模擬する, RRR, Vol.70, No.8, pp.8-11, 2011
- 4) 山口輝也: 編成走行を模擬するHILSシステムの精度検証, 鉄道総研報告, Vol.28, No.7, pp.29-34, 2014
- 5) 小金井玲子, 渡辺信行, 小島崇, 真木康隆, 石栗航太郎: HILSシステムの車体弾性振動領域への拡張, 鉄道総研報告, Vol.28, No.7, pp.29-34, 2014
- 6) 小金井玲子: 鉄道車両のダンパを高精度にモデル化する, RRR, Vol.68, No.12, pp.10-13, 2011