

HILS 用車両運動モデルの構築と検証

車両構造技術研究部 走り装置
主任研究員 真木 康隆

1.はじめに

鉄道車両を用いた走行試験はそのほとんどが営業線において実施されているが、蛇行試験など危険を伴う場合は、実施に際して試験続行の有無を判定する基準の設定や連絡体制の確保などの綿密な配慮を要するため、これを容易に実施することは困難である。そこで前後方向に拘束した車両を、軌条輪に載せて走行状態を模擬する車両試験台を用いたベンチテストが各所で実施されてきた。我々はさらにより実走行に近い試験環境の実現を目指して、新たにソフトウェアのシミュレータと、評価対象のハードウェアを組合せたリアルタイムシミュレーションを実現する鉄道車両用 HILS(Hardware In the Loop Simulation)システムの開発を行っている¹⁾。その一つとして車両試験台で編成車両を含めた実走行を忠実に再現できるように、ベンチ台に設置した実物車両に対して前後に配置した仮想車両の運動をシミュレーションし、これと連動させる HILS の構築を進めている(図1)。本報告では仮想車両として用いる車両運動モデルの構築方法について紹介し、本手法により作成した車両モデルと実車両との運動特性に着目した両者の比較検証結果について報告する。

2. HILS 用車両運動モデルの構築

2.1 HILS 用モデルの要件

車両運動シミュレーションをリアルタイムに実行するには、大きな演算能力が必要であるが、現状の演算能力では一つの CPU で1両モデルの運動計算を負荷するのは困難であることが確認された。そこで複数のシミュレータを相互に光ケーブルでリンクすることで、計算負荷を分散する構成を考案した。この構成を実現するには、1両モデルを車体、台車および輪軸といった単位に容易に分割できることが要求される。また空気バネ、ダンパといった要素部品についても個別に分割しライブラリ化することで、より多くの異なる車両部品を組合せた検証が容易に実現できる。そこで我々は上記の分割した各要素を、それぞれが入出力機能と動特性を持つシミュレーションプログラム(以下、ブロック)として分割・管理する構成とした(図2)。この要件を満たし、またシミュレータとして使用するハードウェア側の対応状況を考慮して、ブロックダイアグラム形式によるプログラミングを特徴とする Matlab/Simulink を用いて車両の運動モデルを構築した。

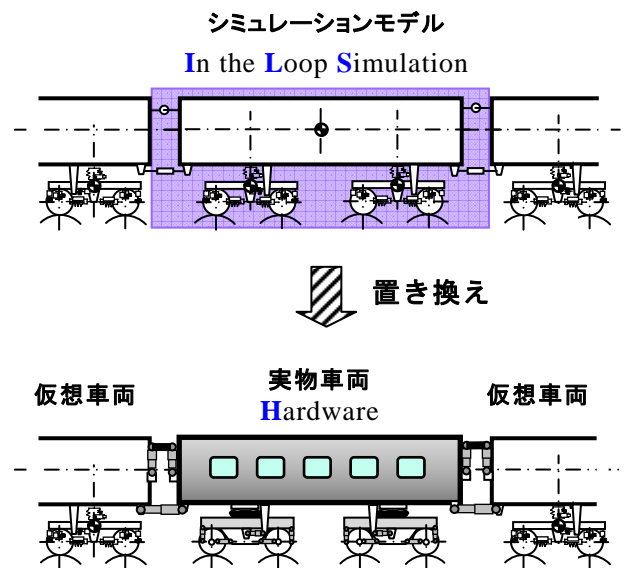


図1 編成車両モデルにおけるHILSイメージ

2.2 構成ブロックと自由度

車両モデルをブロック単位で構成するにあたり、機能別に以下のような種別を設定し、ブロック化を行う。

①構造体ブロック

車体、台車、輪軸といった、質量・慣性モーメントを持ち、各着力点から並進力、回転モーメントを受ける要素である。ブロック内は、ブロック外部にある各機能ブロックから発生した力を各重心に対する並進力、モーメントに変換する 6×6 の係数行列（以下、影響度行列）、力から質点の加速度を算出する質量ゲインブロック、積分器、重心の変位・速度から各着力点の変位・速度を算出する 12×12 の係数行列（以下、着点変換行列）から構成される（図 3(a)）。

②機能ブロック

ばね、ダンパといった構造体同士を結合し、変位・速度入力に対して内力を発生する要素である。ブロック内は、剛性行列、減衰行列などで構成される（図 3(b)）。車輪～レール間で発生するクリープ力もこのブロックに含まれる。

③外乱ブロック

遠心力、重力復元力など構造体ブロックに対して外力として作用する要素。

モデルは以上のブロックの組合せにより構成され、6 自由度の変位 $(x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ 、速度ベクトル $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ と、6 自由度の並進力 (F_x, F_y, F_z) ・モーメント (M_x, M_y, M_z) ベクトルがモデル内を流れることになる。

3. 車両モデルの作成とパラメータ同定

3.1 車両運動モデル

作成する車両モデルは鉄道総研が所有している在来線試験車両（図 4）を対象とし、各部のばね、ダンパは従来シミュレーションモデルで使用されてきた線形モデルで構成している。図 5 に車両運動モデルを示し、図中を使用している自由度の記号を表 1 に示す。この

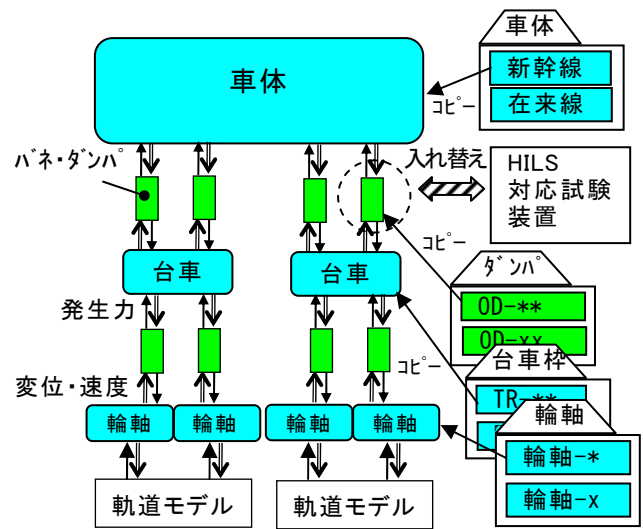
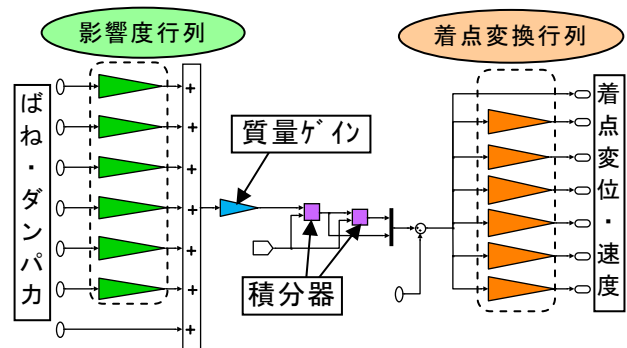
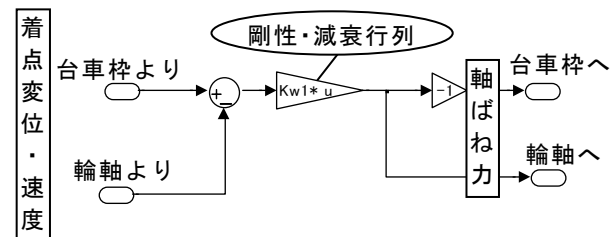


図 2 モデルとライブラリの構成



(a) 構造体ブロック（輪軸の例）



(b) 機能ブロック（軸ばねの例）

図 3 ブロック種別と基本構造



図 4 在来線試験車両

モデルを，Matlab/Simulink 上で定義した各ブロックにより構成したイメージ図を図 6 に示す。構造体ブロックである車体，台車枠，輪軸に対して，機能ブロックであるばね・ダンパ，クリープ力が接続される。

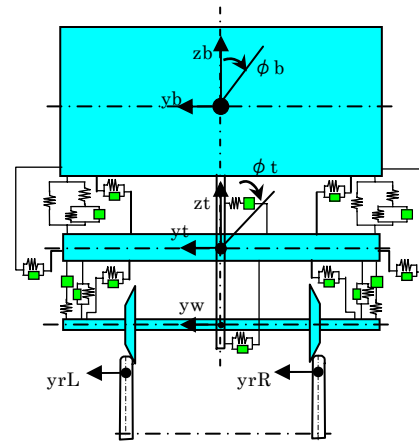
3.2 パラメータ同定

車両試験台での試験は，レールに相当する軌条輪を上下および左右方向にそれぞれ正弦波加振し，車体，台車枠，輪軸がそれぞれ固有に持つ応答ピーク周波数を中心に加振周波数を変化させる。この際に軸ダンパ，左右動ダンパなどを意図的に外した条件についても測定することにより，特徴的な応答ピークを有する周波数特性が得られる。このような応答特性は，これらのダンパ特性を調査する際に有効である。図 4 に示す試験車両を用いて車両試験台で実施した正弦波加振による上下応答試験結果の一例を図 7 中のプロットで示す。凡例中の記号 z_b ， z_{t1} はそれぞれ車体上下変位，1 位台車上下変位を示す。

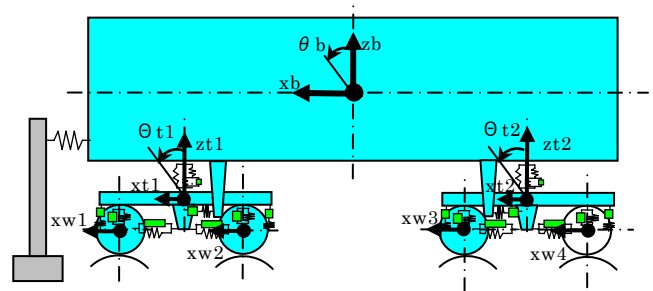
これらの応答試験結果を用い，作成したモデル内で使用するばね定数，ダンパ減衰係数といった機能ブロック内のパラメータ，および車体慣性半径，車体重心といった構造体ブロック内のパラメータ同定を行った。パラメータの探索は，上下・左右それぞれの周波数応答試験結果に対して，図 5，図 6 で作成したモデルによる応答が最も近似するように，各パラメータ同士

表 1 自由度記号一覧

記号	自由度	記号	自由度
x_b	車体前後変位	z_t	台車枠上下変位
y_b	車体左右変位	ϕ_t	台車枠ロール角
z_b	車体上下変位	θ_t	台車枠ピッチ角
ϕ_b	車体ロール角	x_w	輪軸前後変位
θ_b	車体ピッチ角	y_w	輪軸左右変位
x_t	台車枠前後変位	y_{rL}	軌条輪左右変位 (左)
y_t	台車枠左右変位	y_{rR}	軌条輪左右変位 (右)



(a) 正面図



(b) 側面図

図 5 車両運動モデル

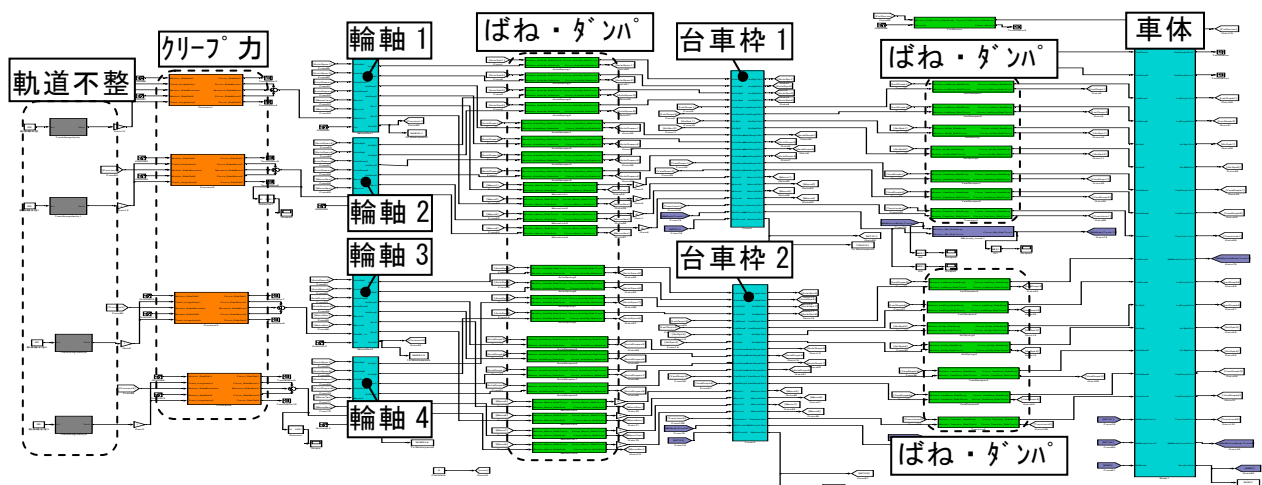


図 6 Matlab/Simulink による車両モデルのイメージ

の複数の組み合わせについて実車同様に応答計算を行う。同定値を用いたモデルの周波数応答結果の一例を図7の実線で示す。この結果より、各パラメータ値を同定し、その値をモデル内で使用することにより、実車の周波数応答を忠実に再現できることを確認した。

4. 実軌道不整データによる検証結果

在来線の軌道検測車両により測定された軌道不整データと図4に示す試験車両を用いて、車両試験台の軌条輪を上下および左右方向にそれぞれ強制変位させ、その際の車両各部の変位量を測定した。車両モデルについても同様に、上記の軌道不整データを用いたシミュレーションを実施し、両者の結果を比較することでモデルの妥当性を検証した。上下および左右加振結果についてそれぞれ図8、図9に示す。

この結果より、上下および左右方向の振幅、位相ともに試験における挙動がほぼ忠実に再現できることを確認した。

5. まとめ

HILS 用車両運動モデルを構築し、実車両から取得したパラメータ同定値をモデルに組み込むことにより、その運動特性を忠実に再現できることを確認した。現在、HILS により編成状態を再現する車両試験台試験を実施しており、結果について今後報告していく予定である。

なお本研究開発の一部は、国土交通省からの国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 佐々木君章: 鉄道車両研究への HILS システムの応用, 鉄道総研報告, No.6/V-20, pp.5-10, 2006

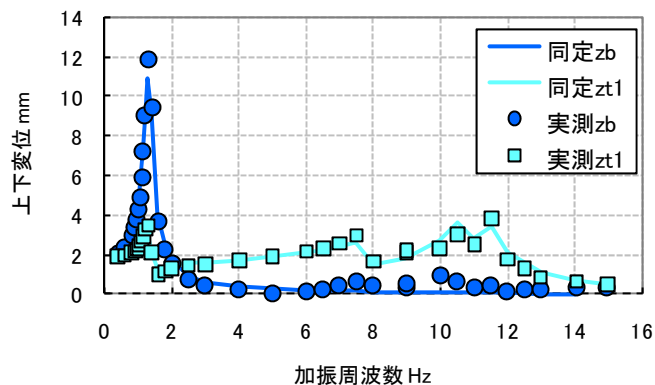


図7 上下応答試験結果と同定結果

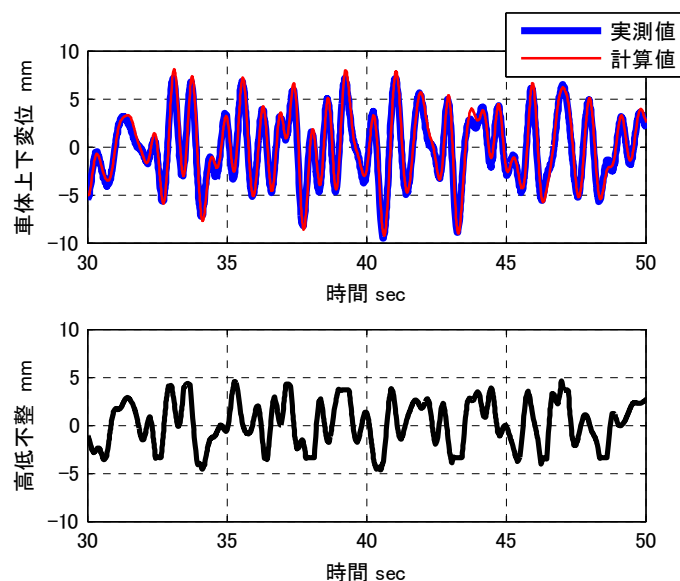


図8 実軌道高低不整データによる試験結果とシミュレーション結果の比較

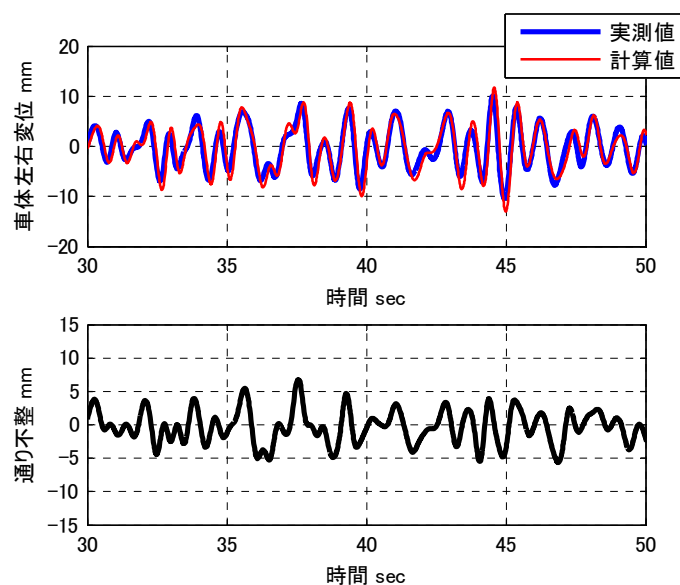


図9 実軌道通り不整データによる試験結果とシミュレーション結果の比較