

HILS用車両運動モデルの構築と検証

○真木 康隆 下村 隆行 [機] 佐々木 君章 (鉄道総研)

A Method of Building a Vehicle Model for Hardware In the Loop Simulation and Evaluation of Amplitude-frequency Response Tests Executed for Its Improvement

○Yasutaka MAKI, Takayuki SHIMOMURA, Kimiaki SASAKI,
(Railway Technical Research Institute)

We have developed a Hardware In the Loop Simulation (HILS) system to establish virtual running test environment to replace actual test runs. The vehicle model for HILS system is required to run in real time and simulate actual vehicle motion accurately. Then, we tried to divide the model to several parts, load each part to some separate simulators, and combined the simulated results so as to enable the model to run in real time.

In this paper, we show the model for HILS established with Matlab/Simulink programming tool which has characteristics of block diagram system, and report the result of amplitude-frequency response tests executed on the rolling stock motion stand for the performance improvement of the model by modifying its parameters.

キーワード：HILS, 車両運動モデル, Matlab/Simulink, 車両試験台, 周波数応答試験, パラメータ同定

Key Words : HILS, vehicle model, Matlab/Simulink, rolling stock motion stand, amplitude-frequency response test, parameter identification

1. はじめに

日本国内には鉄道車両専用の試験線がないため、実車両を用いた走行試験は営業線においてそのほとんどが実施されているが、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、レールを回転円板で置き換えて、その上に前後方向に拘束した車両を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。

筆者らも車両試験台を用いた同様の試験を実施してきたが、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、実時間シミュレーションを実現するHILS(Hardware In the Loop Simulation)システムを構築することでより実走行に近い試験環境の実現を目指している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。シミュレーション内で使用される車両運動モデルは実車両の運動を忠実に再現することが要求され、空力動揺など比較的大きい相対変位や速度を伴う場合は、一般的に鉄道車両で使用される線形化されたダンパや空気バネなどの計算モデルでは充分ではないと考えられる。そこで新たに開発したダンパ試験装置を用いて実車両搭載条件を網羅した試験を実施することでダンパ特性を把握するとともに²⁾、取得したデータからダンパに対する入出力関係についてニューラルネットワークを用いて特性同定することで非線形性が強いダンパのモデル化を試みてきた³⁾。本論文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するとともに、これを用いた線形モデルにおいて使用する各種パラメータについて同定した結果を報告する。

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 両モデルが車体、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・管理する構成をとっている (図 1)。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。

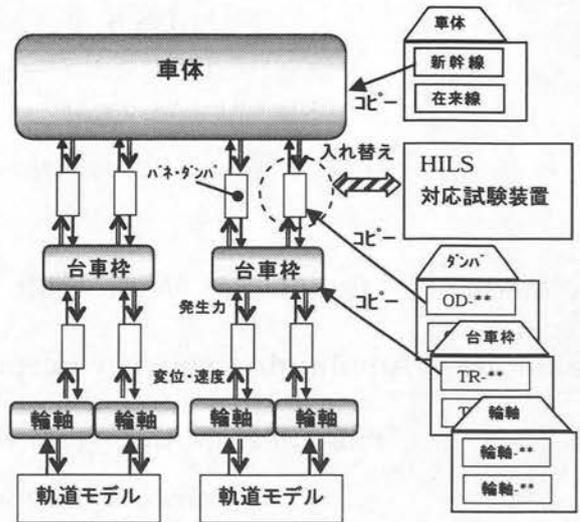


図 1 モデルとライブラリの構成

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た。

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 2(a))。

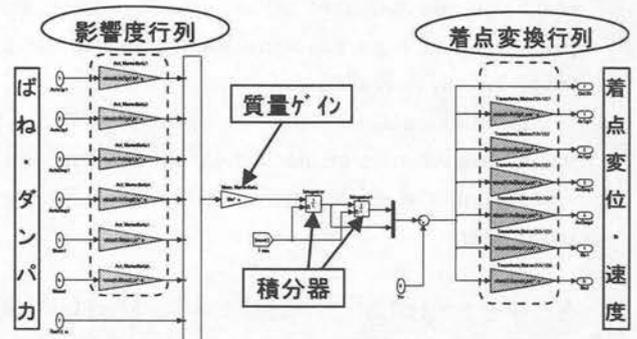
② 機能ブロック

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 2(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。

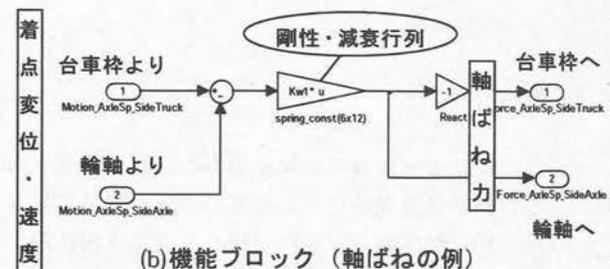
③ 外乱ブロック

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,φ,θ,ψ)、速度ベクトル (ẋ,ẏ,ż,φ̇,θ̇,ψ̇) と、6 自由度の並進力 (Fx, Fy, Fz)・モーメント (Mx, My, Mz) ベクトルがモデル内を流れることになる。



(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 2 ブロック種別と基本構造

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我々が所有している在来線試験車両 (図 3) を対象とし、各部のばね、ダンパは従来シミュ

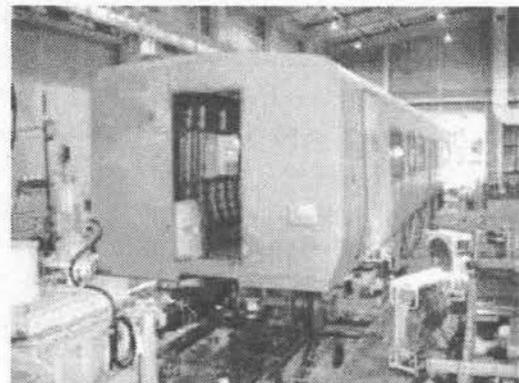


図 3 試験車両

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4に車両運動モデルを示し、図中使用する自由度の記号を表1に示す。このモデルを、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5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定が得られる。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3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・左右それぞれの応答試験結果例を図6(a) (b) 中のプロットで示す。凡例中の記号 zb、zt1 はそれぞれ車体上下変位、1位台車上下変位を、yt1、yt2 はそれぞれ1位、2位台車の左右変位を示す。

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、ダンパ減衰力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⁴⁾は、上下・左右それぞれの周波数応答試験結果に対して、図4、図5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。表2に代表的なパラメータの設計諸元値と同定値を示し、同定値を用いたモデルの周波数応答結果の一例をそれぞれ図6(a) (b) 中の実線で示す。図6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が確認できた。

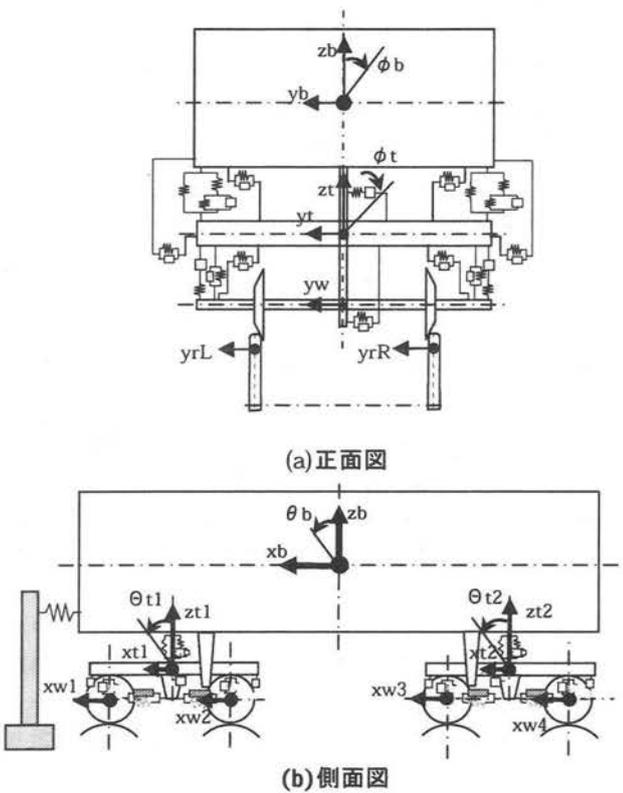


図4 車両運動モデル

表1 自由度記号一覧

記号	自由度
xb	車体前後変位
yb	車体左右変位
zb	車体上下変位
phi_b	車体ロール角
theta_b	車体ピッチ角
xt	台車枠前後変位
yt	台車枠左右変位
zt	台車枠上下変位
phi_t	台車枠ロール角
theta_t	台車枠ピッチ角
xw	輪軸前後変位
yw	輪軸左右変位
yrL	軌条輪左右変位 (左)
yrR	軌条輪左右変位 (右)

表2 同定パラメータの一例

パラメータ項目	単位	設計値(A)	同定値(B)	B/A
軸ばね上下剛性	MN/m/軸箱	1.257	1.371	1.09
軸ばね左右剛性	MN/m/軸箱	3.920	5.070	1.29
軸ばね前後剛性	MN/m/軸箱	6.150	5.931	0.96
空気ばね上下剛性	MN/m/個	1.120	1.314	1.17
空気ばね上下減衰	kN・s/m/個	93.982	69.039	0.73
空気ばね左右剛性	MN/m/個	0.188	0.160	0.85

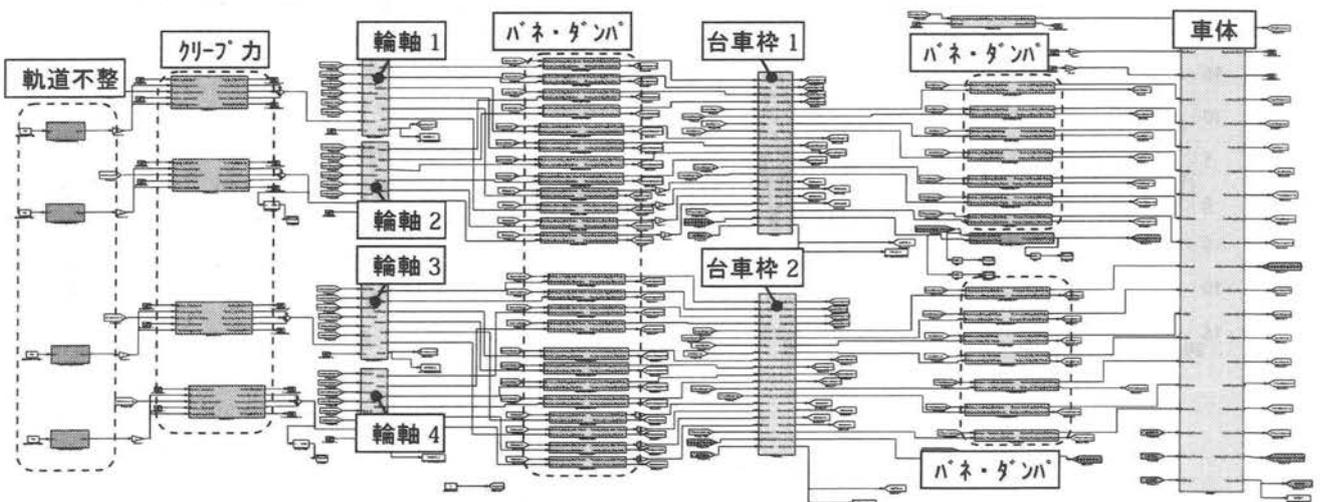
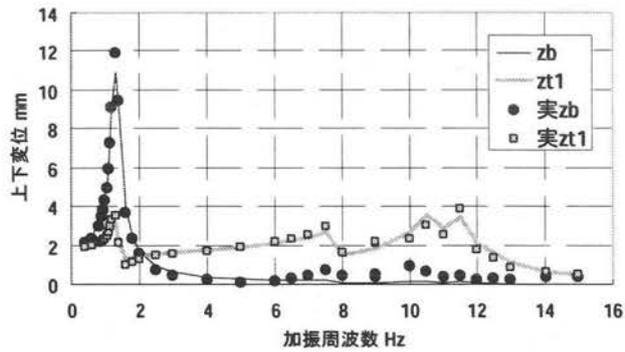
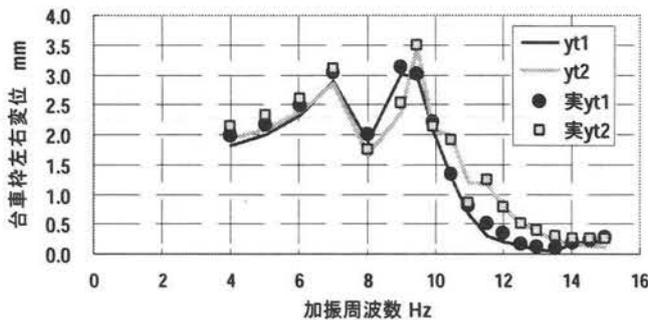


図5 Simulinkによる車両モデルイメージ図

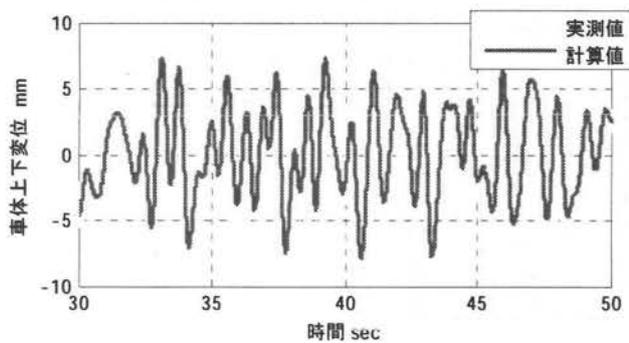


(a)上下加振の一例
(軸ダンパなし)

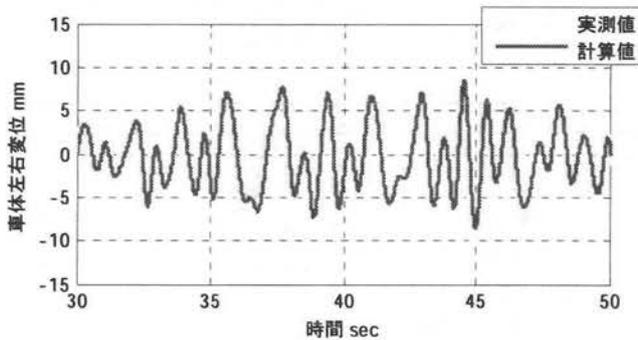


(b)左右加振の一例
(左右動ダンパ, ヨーダンパなし)

図 6 周波数応答試験結果と同定結果



(a)上下方向



(b)左右方向

図 7 実軌道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

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 3 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時刻歴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、それぞれ試験台での実車測定データと時刻歴シミュレーション結果の比較を図 7(a)(b)に示す。なお検証にあたり、モデルの実行は汎用 PC において Matlab/Simulink 上で実施した。したがってリアルタイム性については考慮していない。

検証結果より、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シミュレーションによりほぼ忠実に再現できることが確認できた。

5. 今後の予定

今回報告した 1 両モデル内のダンパ、空気ばねは従来から用いられている線形モデルを使用したが、空力動揺など非線形領域に至る変位の入力に対しては対応できない可能性がある。今後はニューラルネットワークで同定した各機能ブロックについて車両運動モデルに組み込んだ検証を行い、線形領域だけではなく、非線形領域まで網羅できるモデルの構築を行う予定である。また今回の 1 両モデルの検証は汎用 PC 上において実施したが、別途リアルタイム OS を搭載したシミュレータを用いて HILS システムに必要なリアルタイム性の確保についても検証を行っている。今後この経過についても報告するとともに、車両試験台をハードウェアとする HILS システム構築のための試験に取り組んでいく予定である。

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.
- 2) 梅原康宏, 渡辺信行, 朝比奈峰之, 小金井玲子: 車両用ダンパ試験装置の開発, pp. 287-288, J-RAIL2007, 2007.
- 3) 小金井玲子, 渡辺信行, 飯田忠史, 朝比奈峰之, 山長雄亮: ニューラルネットワークを用いた鉄道車両用ダンパの特性同定, pp. 289-292, J-RAIL2007, 2007.
- 4) 城取岳夫: 試験台での実軌道波加振による鉄道車両の同定実験, 178, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008.