

HILS 用車両運動モデルの構築と検証

真木 康隆* 下村 隆行** 佐々木 君章***

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

We have developed Hardware in the Loop Simulation (HILS) system to establish a virtual running test environment to replace actual test runs. The vehicle model for the HILS system is indispensable to run under real-time conditions, and simulate actual vehicle motions accurately. Then, we attempted to divide the model to several parts to enable the model to run under the foregoing conditions. In this paper, we introduce the model for the HILS, 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，車両試験台，周波数応答試験，パラメータ同定

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、蛇行動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(図1)。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。

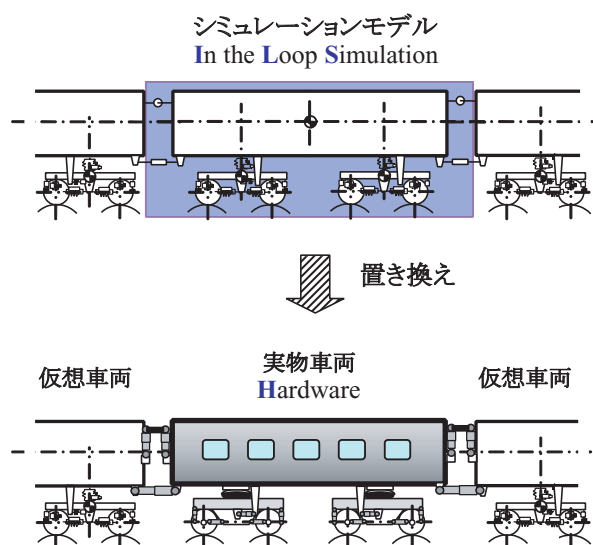


図1 編成車両モデルにおけるHILSイメージ

* 車両構造技術研究部 (走り装置)

** 車両構造技術研究部 (車両運動)

*** 車両構造技術研究部 (車両振動)

特集：車両技術

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。また空気ばね、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2）。

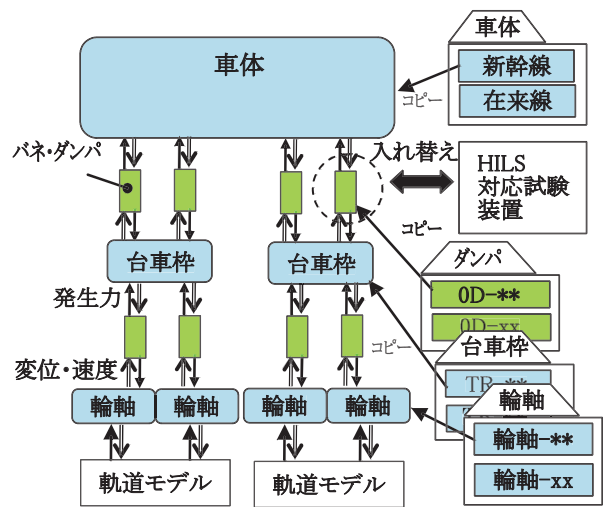


図2 モデルとライブラリの構成

2.2 Matlab/Simulink について

HILS 用車両モデル構築の要件を満たし、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 を用いて車両運動モデルを構築した。

Matlab/Simulink の特徴として、

- ・ 図3に示すように、入出力信号に対する演算内容をブロック線図で記述することができ、処理機能別にユーザが自由にブロック単位でまとめることが可能
- ・ 追加オプションを用いることでC言語プログラムの自動生成が可能となり、シミュレータへのモデル実装が容易

などが挙げられる。

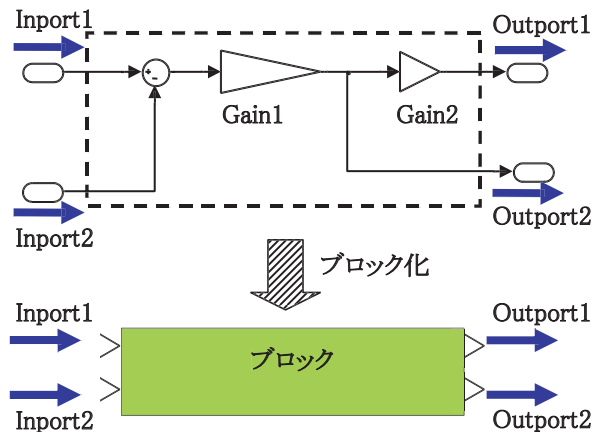


図3 機能別ブロック化

2.3 構成ブロックと自由度

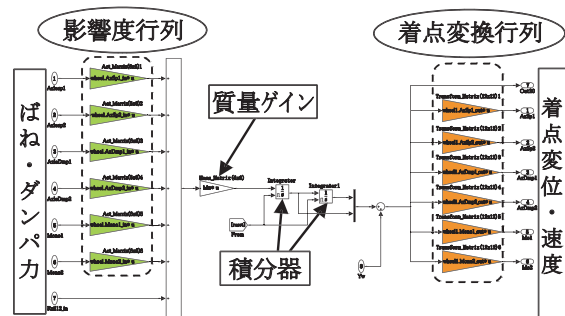
車両モデルをブロック単位で構成するにあたり、機能別に以下のような種別を設定した。

① 構造体ブロック

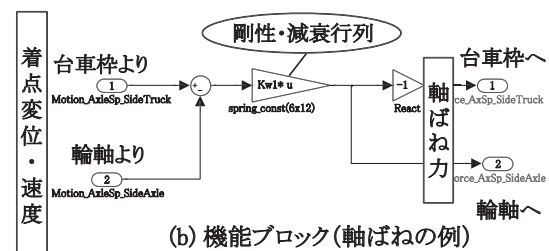
車体、台車枠、輪軸といった、質量・慣性モーメントを持ち、各着力点から並進力、回転モーメントを受ける要素である。ブロック内は、ブロック外部にある各機能ブロックから発生した力を各重心に対する並進力、モーメントに変換する6×6の係数行列（以下、影響度行列）、力から質点の加速度を算出する質量ゲインブロック、積分器、重心の変位・速度から各着力点の変位・速度を算出する12×12の係数行列（以下、着点変換行列）から構成される（図4（a））。

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



(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4 ブロック種別と基本構造

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4 (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、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。



図5 在来線試験車両

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

今回作成するHILS用車両モデルは我々が所有している在来線試験車両(図5)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6に車両運動モデルを示し、図中使用している自由度の記号を表1に示す。実車両の動きを忠実に再現するために、車体6自由度、台車枠6自由度、輪軸3自由度で構成している。車両は、レールに相当する軌条輪上に設置され、車体は前後方向に対して地上側に固定されたベースユニットへ連結器を介して固定される。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を図7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、外乱ブロックとして重力復元力が接続される。

表1 自由度記号一覧

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

3.2 パラメータ同定

車両試験台での試験は、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5に示す在来線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8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は1位台車左右変位を示す。図8 (a) は台車枠と輪軸間に装架された軸ダンパ8本全てを外した条件で軌条輪を上下に強制変位させた結果を示している。上下系に関する機能ブロックとして軸ばね上下剛性・減衰、軸ダンパ減衰・直列剛性、空気ばね上下剛性・減衰が主に挙げられるが、軸ダンパを意図的に外すことにより車体、台車枠が固有

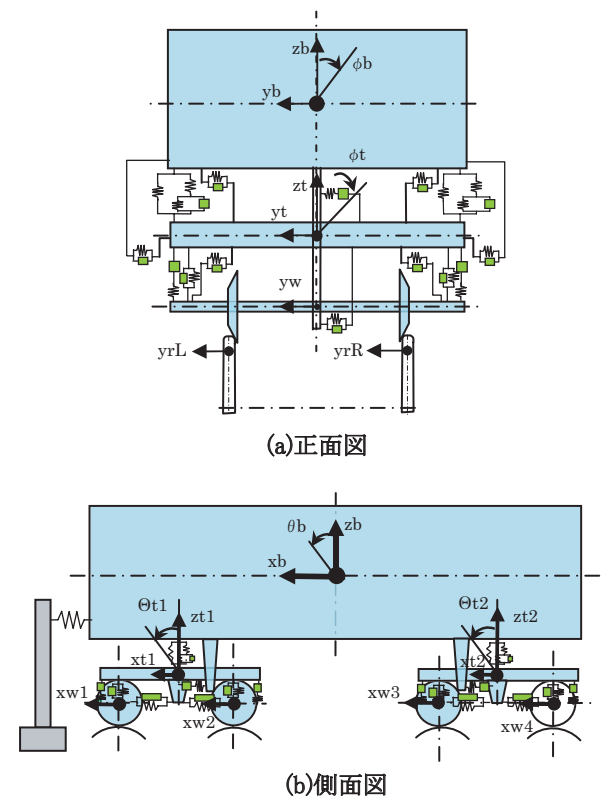


図6 車両運動モデル

特集：車両技術

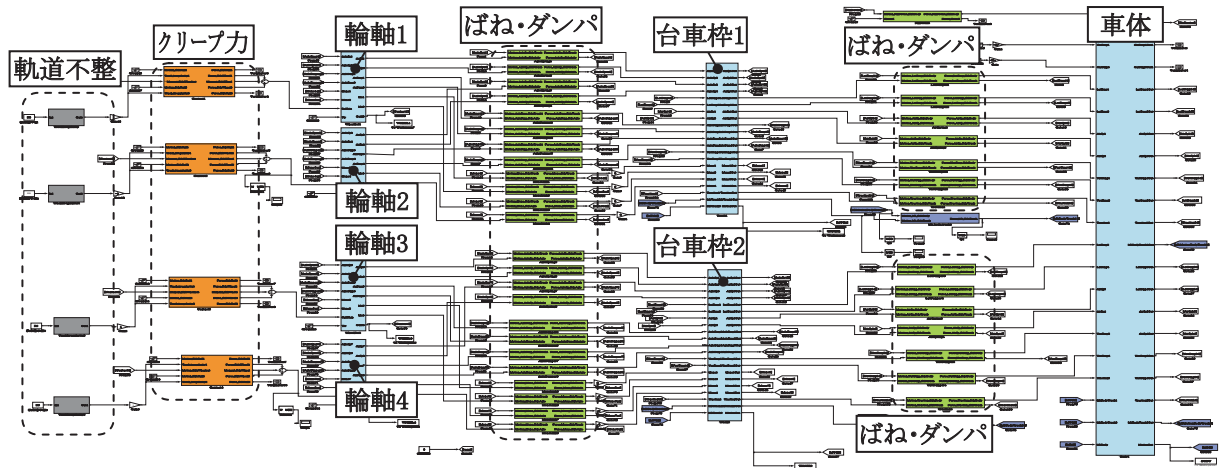


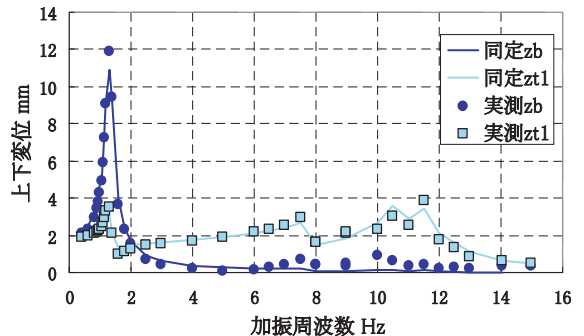
図7 Simulinkによる車両モデルイメージ

に持つ上下ピークが顕著になるだけでなく、同定するパラメータを軸ばね上下剛性・減衰，空気ばね上下剛性・減衰に絞り込むことができる。図8 (b) は軸ダンパを全て装架した条件で軌条輪4軸全てを上下方向に同振幅，同位相で強制変位をした結果であり，同定すべきパラメータは軸ダンパ減衰・直列剛性のみとなる。左右系についても同様に，左右動ダンパ，ヨーダンパを外した条件で軌条輪4軸全てを左右方向に同振幅，同位相で強制変位させた結果を図8 (c) に示す。この条件で同定すべきパラメータは，軸ばね左右剛性・減衰，空気ばね左右剛性・減衰となる。

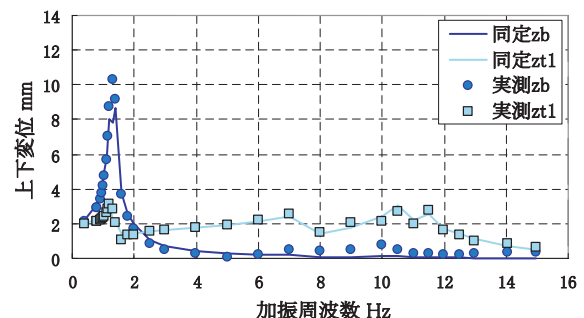
以上のように周波数応答試験結果を用い，車両モデルにおける機能ブロック内のばね定数，ダンパ減衰力係数，構造体ブロック内の車体慣性半径といったパラメータの同定を行った。パラメータの探索は，上下・左右それぞれの周波数応答試験結果に対して，図6，図7で作成したモデルによる応答が最も近似するように，各パラメータ同士の複数の組み合わせについて実車同様に応答計算を行う。表2に代表的なパラメータの設計諸元値と同定値を示し，同定値を用いたモデルの周波数応答結果の一例をそれぞれ図8 (a) (b) (c) 中の実線で示す。図8の結果より，同定値をモデル内で使用することにより，実車の周波数応答を忠実に再現できることが確認できた。

表2 同定パラメータの一例

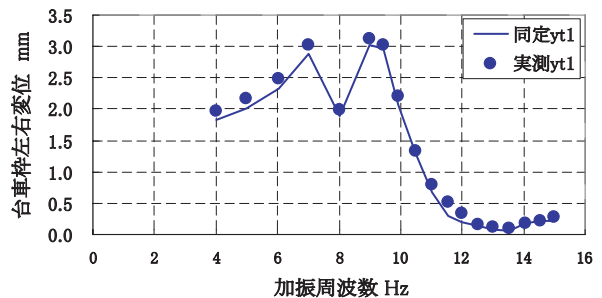
パラメータ項目	単位	設計値 (A)	同定値 (B)	B/A
軸ばね上下剛性	MN/m/ 軸箱	1.257	1.371	1.09
軸ばね左右剛性	MN/m/ 軸箱	3.920	5.070	1.29
軸ばね前後剛性	MN/m/ 軸箱	6.150	5.931	0.96
空気ばね上下剛性	MN/m/ 個	1.120	1.314	1.17
空気ばね上下減衰	kN・s/m/ 個	93.982	69.039	0.73
空気ばね左右剛性	MN/m/ 個	0.188	0.160	0.85



(a) 上下加振の一例 (軸ダンパなし)



(b) 上下加振の一例 (軸ダンパあり)



(c) 左右加振の一例 (左右動ダンパ，ヨーダンパなし)

図8 周波数応答試験結果と同定結果

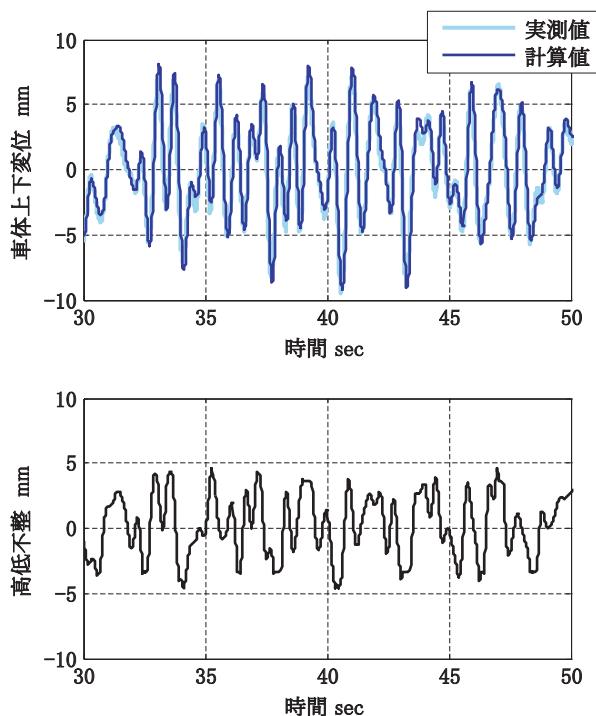


図9 実軌道高低不整データによる試験結果とシミュレーション結果の比較

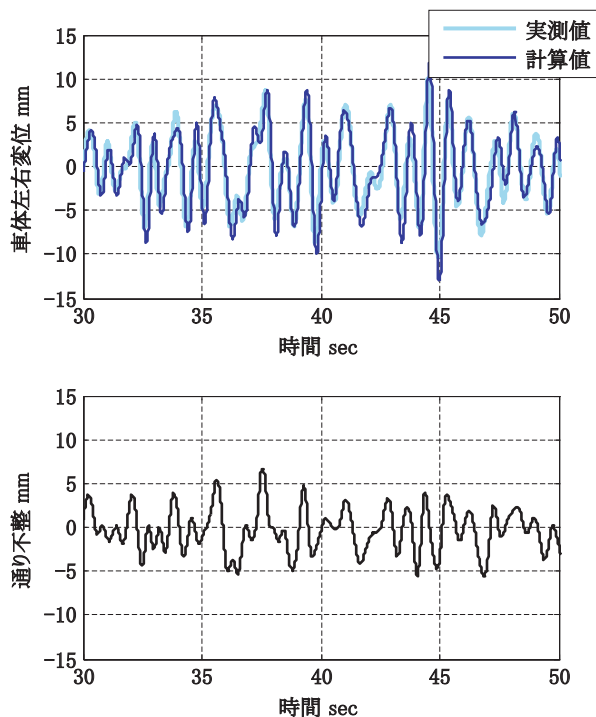


図10 実軌道通り不整データによる試験結果とシミュレーション結果の比較

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5に示す在来線試験車両を用いて、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。実軌道上を車両が走行する条件とするため、走行速度、軸距、台車中心間距離により算出される各軸間の遅延時間を考慮して、1軸から4軸までの軌条輪を軌道不整データに基づいて強制変位させた。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、試験台での実測定データと時刻歴シミュレーション結果のうち、シミュレーション開始から30～50[sec]後の車体上下変位、車体左右変位を図9、図10にそれぞれ示す。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、上下および左右加振の場合ともに、振幅、位相の点において実車両の挙動が車両モデルによる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. まとめ

以上、実走行に近い試験環境の実現を目指したHILS用車両運動モデルを構築し、実車両との比較検証を実施した。本報告において得られた主な成果をまとめると以下の通りである。

- (1) HILS用車両モデルを、Matlab/Simulinkを用いて構造体ブロック、機能ブロックからなるブロック定義に基づき構築した。
- (2) 車両モデルの対象となる実車両の車両試験台による周波数応答試験を実施し、車両諸元に関するパラメータ同定を実施した。
- (3) 車両モデルの妥当性検証のため、パラメータ同定値を車両モデルに組み込み、実軌道不整データによる強制変位試験を実車両および車両モデルに対してそれぞれ実施した。その結果、上下および左右方向の振幅、位相ともに実車両試験における車両挙動が車両モデルによるシミュレーションによりほぼ忠実に再現できることを確認した。

特集：車両技術

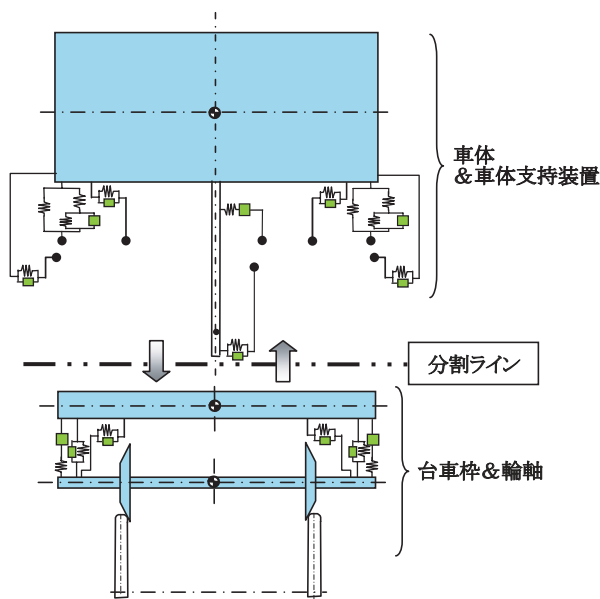


図 11 車両モデルの分割

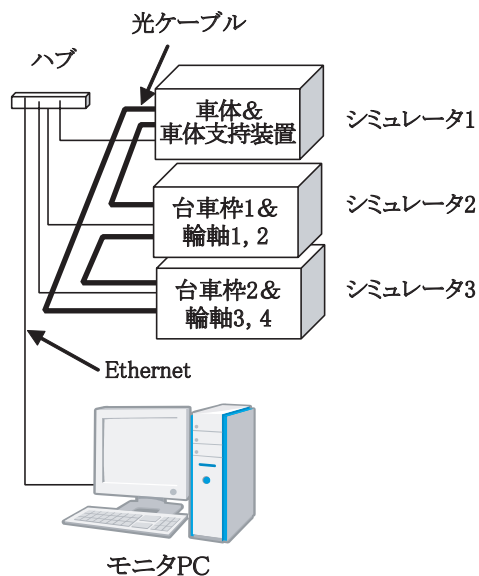


図 12 複数シミュレータによる分散構成

6. おわりに

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ている線形モデルを使用した，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，非線形領域まで網羅できるモデル構築を行う予定である。

今回の1両モデルの検証は汎用PC上で実施したが，今後リアルタイムOSを搭載したシミュレータを用いてリアルタイム性の確保についても検証を行い，図11に示すように車両モデルを複数に分割し，それぞれをシミュレータに割り当てることでシミュレーション演算負荷の分散を図る（図12）。この経過については別途報告するとともに，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。

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