

編成走行を模擬する HILS システムの開発

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**

A Hardware-in-the-loop Simulation System Duplicating the Actual Running Condition of the Train Consisting of Multiple Cars

Yasutaka MAKI Nobuyuki WATANABE Takayuki SHIMOMURA
Kimiaki SASAKI Takayuki TOHTAKE Hayato MORISHITA

Bench tests for actual cars are effective for grasping their dynamic performance. However, they have not been able yet to duplicate the actual running conditions of the train consisting of multiple cars. We have developed a hardware-in-the-loop simulation (HILS) system composed of the actual car, a distributed real-time simulator, a real-time network and simulators that reproduces the dynamic behaviors of the end surfaces of the adjacent carbodies. In this report, we introduce the HILS system and show the results of the shaking test for the actual car which is assumed to be under the running condition of three-car train in the HILS system.

キーワード：編成走行，HILS，車両試験台，車両運動モデル，分散型リアルタイムシミュレータ

1. はじめに

鉄道車両の開発において、計算シミュレーションによる車両性能の定性的な傾向把握は、人的・時間的コスト面を考慮すると有効な手段であるが、実車両の全ての要素、現象を網羅し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は反映されない。従って、最終的な車両性能の定量的評価は実車両により確認を行うことが必要である。しかし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多くが実施されている現状であり、走行回数や走行条件などに制約がある。また、これまで車両1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試験が各所で実施されているが、複数車両により構成される編成状態でのベンチ試験環境の構築は実現できていない^{1) 2)}。

そこで筆者らは、ソフトウェアのシミュレータと評価対象であるベンチ上の実車両を組合せ、実時間シミュレーションを可能とする 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きた³⁾。本論文では HILS システムの構成、車両試験台での編成走行模擬試験の結

果について報告する。

2. HILS システム構成

図1に、車両試験台ベンチ上の実車両に対して、3両編成状態を再現する HILS システム構成を示す。実物車両の前後に配置された車体間運動模擬装置は、車両側と対峙する側のフレームを5本の電動アクチュエータにより上下、左右、ヨー、ロールの4方向に駆動させることができる。このフレームと実物車両の間には、実際の編成時と同様に車体間前後ダンパ、車端ダンパが装備され相互を結合している。実物車両の前後に配される車両は、実物車両と同等の運動特性を持つようにモデル化され、分散型リアルタイムシミュレータ内でリアルタイムにその挙動が演算される。以下、実物車両前後の車両モデルを仮想車両と呼ぶ。

車体間運動模擬装置、軌条輪加振装置、軌道データの各コントローラと分散型リアルタイムシミュレータは光ファイバにより相互にリンクされ、各コントローラは共有メモリを持つことにより必要な情報が共有化される。分散型リアルタイムシミュレータによる仮想車両の挙動を模擬する車体間運動模擬装置への制御指令値はリアルタイムネットワークを通じて与えられる。実物車両と仮想車両間における車体間前後ダンパ、車端ダンパによる発生力は仮想車両重心への並進力、モーメントとして作用する。これによりハードウェアである中間2号車を実

* 総務部 (総務)
** 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

特集：鉄道車両技術

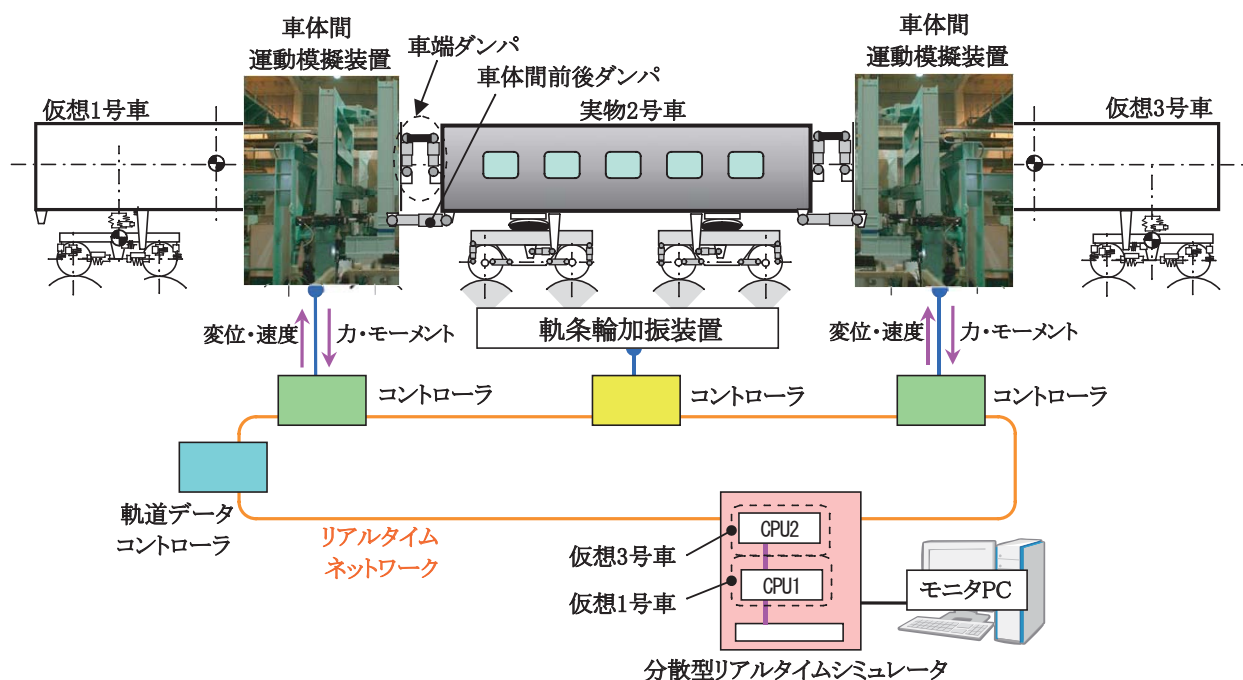


図1 HILSシステム構成（3両編成対応）

物車両，1号車と3号車をシミュレータによる仮想車両とするHILSが構成される。編成モデルへの外乱入力要素となるリアルタイムネットワークにより共有化された軌道データは，車両長，台車中心間距離，軸距および走行速度により決定される位相差を有し，仮想車両モデルの軌条輪変位および実物車両の軌条輪加振装置の制御指令値として入力される。このようにして，3両編成車両の本線走行状態を再現する。

現するには，ハードウェアであるシミュレータに対して高速演算能力が要求されるが，現状の市販CPU1つでこれを負担するのは困難な状況にある。そこで，本システムでは車両モデルを複数に分割し，それらを複数のCPUコアに演算を割り当てることで演算負荷の分散を図っている（図2）。そのためには，図3に示すように1両モデルが容易に分割できることが要求される。オフラインシミュレーションにより各ブロックごとの演算負荷を検証した結果，演算負荷がほぼ均等に割り振られることから，車両モデルの分割ラインは，車体支持装置と台車枠との間に設定し，車体+車体支持装置，台車枠+輪軸+レールの単位にまとめた。

3. HILS用車両運動モデル

3.1 車両運動モデルの分割

車両1両の運動シミュレーションをリアルタイムに実

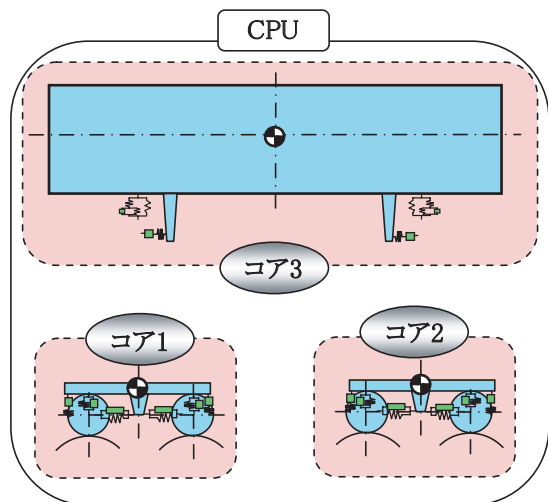


図2 車両分割モデルの複数のCPUコアへの分散

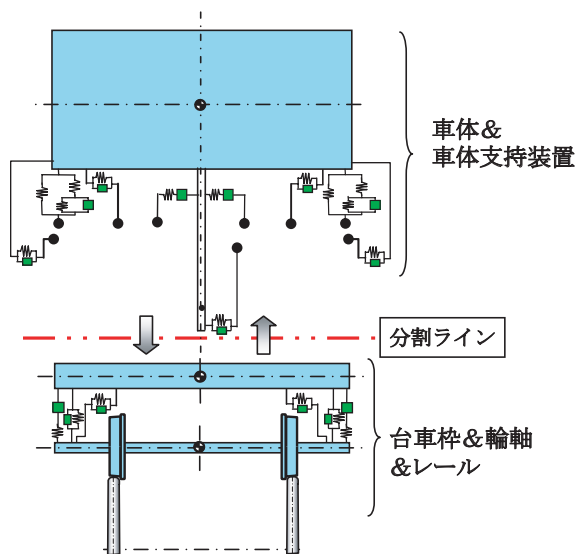


図3 車両運動モデルの分割イメージ

3.2 編成HILS用 Simulink モデル

筆者らは Matlab/Simulink⁴⁾ を用いて、車両モデル全体を構造体ブロック、機能ブロック、外乱ブロックの機能別に分類し、相互に結合することで車両モデルを構築する方法を考案した^{5) 6)}。

今回、実車両として車体を新幹線試作構体、前位側がモノリンク式新幹線試作台車、後位側が新幹線電用試作台車により構成される車両を使用した(図4)。なお前位側台車と後位側台車の形式が異なるのは所有している新幹線台車の整備状況の都合による。

これらに対して Simulink を用いてモデル作成を行い、車体+車体支持装置、台車枠+輪軸+レール単位でまとめ、それぞれに対して CPU コアの ID を割り当てる。図5に Simulink により作成した1号車および3号車の車両モデルイメージを示す。この車両モデルに対する車体間運動模擬装置からの並進力とモーメントは、シェアードメモリブロック経由で入力され、車両モデルから車体間運動模擬装置への変位と速度指令値もシェアードメモリブロック経由で出力される。



図4 新幹線試作車両

3.3 線形パラメータ同定

車両モデル各部のばね、ダンパは図3に示した線形モデルで構成される。実車両の運動特性を車両シミュレーションで忠実に再現するには、モデル各部のばね、ダンパ要素のパラメータ値に対して、設計諸元値をそのまま適用しても実現は困難である。そこで、車両試験台において実車両に対して上下および左右方向に、車体、台車枠、輪軸といった構造体の固有周波数を中心とした正弦波による周波数応答試験を行う。この周波数応答結果に対して、車両モデルが最も忠実に再現できる台車ばね系諸元の組み合わせを、パラメータ同定により探索する。

図6に示すように、使用した台車が前位側と後位側で形式が異なり、軸箱支持方式もモノリンク式とウィングばね式と大きく構造が異なるため、周波数応答試験を用いたパラメータ同定をそれぞれの台車に対して実施する必要性が生じた。そこで、実車両に対する周波数応答試験を実施するにあたり、前位台車の同定では1,2軸の軌条輪のみ加振を行い、後位側の3,4軸は加振を行わないこととした。一方、後位台車を同定する場合にはその逆となる。この際、台車に関するパラメータ同定を行うことを考慮して、加振周波数は、台車の固有振動数を中心とし、かつ車体の固有振動数からは除外されるように帯域4~15Hzを選択した。これにより車体の応答は極めて小さいものとなり、かつ加振側の台車のみが応答するため、前後の台車形式が異なっても台車毎にパラメータ同定を実施することが可能となった。台車に関するパラメータを決定した後、車体に関するパラメータ同定についても従来^{5) 6)}と同様に、車体の固有振動数を中心とする周波数応答試験により実施した。

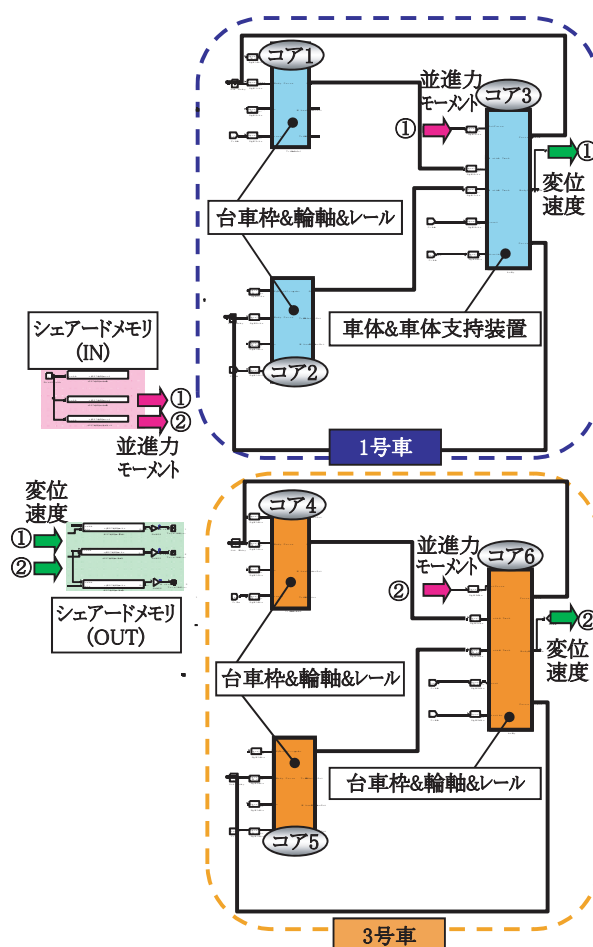


図5 Simulink による車両モデルイメージ

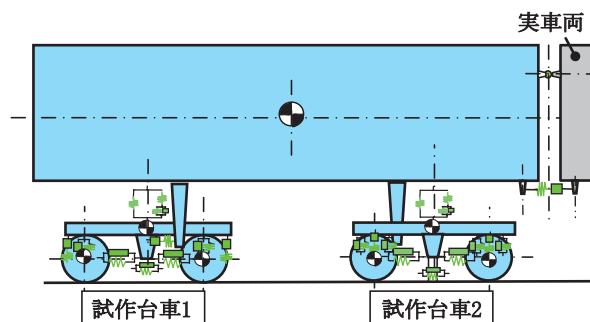


図6 車両運動1両モデル

特集：鉄道車両技術

3.4 実軌道不整データによるモデル検証結果

作成した1両の車両運動モデルに、同定したパラメータを適用した場合のモデル挙動を検証するため、軌道検測車により測定された軌道不整データと図4に示す新幹線試作車両を用いて、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、車両各部の変位量を測定した。その際、車両前後に設置した車体間運動模擬装置と実車両とはダンパによる結合はせず、1両単独での加振とした。なお、軌道不整データは在来線での検測データを使用しており、これは軌道不整量が新幹線に対して在来線がより大きく、車両挙動がより明確になるためである。一方、車両運動モデルについても実車同様に、1両単独モデルを用いて実軌道不整データによる加振シミュレーションを行った。

このようにして得られた車両試験台における実車両の上下および左右加振結果と、車両運動モデル時刻歴シミュレーション結果のうち、加振開始から0～20secの車体上下変位、車体左右変位を図7、図8にそれぞれ示す。同図より、軌道不整データの入力に対して上下および左右加振の場合ともに実車両の挙動を、同定パラメータを適用した車両運動モデルがほぼ忠実に再現できることを確認した。

4. 分散型リアルタイムシミュレータ

HILSシステムの構成要素の一つである分散型リアルタイムシミュレータ(図1の下部)は複数のCPUが搭載可能で、CPU間の信号はHyper Transportという高速専用バスで結合されており、シェアードメモリアクセスなどCPU以外のチップのバス占有に伴う遅延は発生しない。したがって、複数のCPUコアにモデルを分散した場合でもモデル間の信号伝達が高速に実行されるため、編成車両のような大規模モデルでもリアルタイムシミュレーションが可能となっている(図9)。

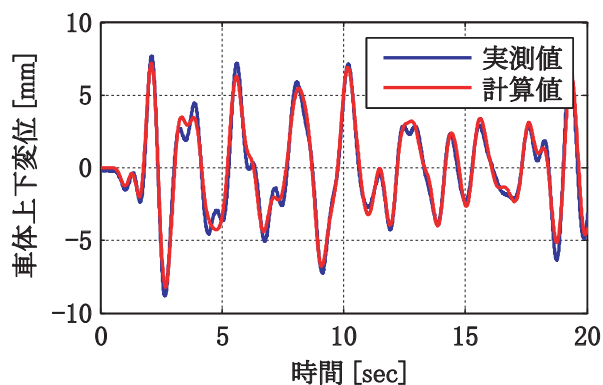
5. 編成走行模擬試験

5.1 シミュレーション設定条件の確認

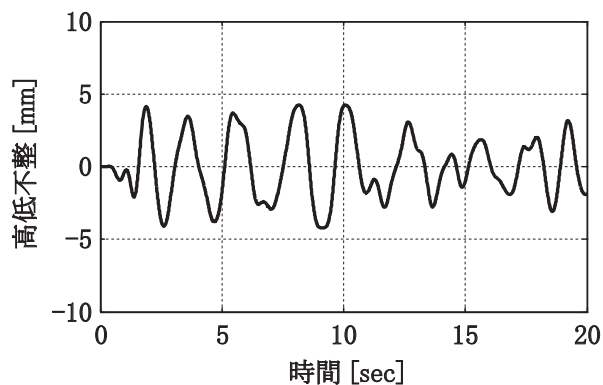
シミュレーション設定条件は、安定性、演算負荷を考慮して事前にオフラインシミュレーションによる検証を行い、計算ステップ0.2msec、積分器ソルバは離散ソルバとした。表1に各CPUコアの処理時間および演算負荷率を示す。演算負荷率はいずれのCPUコアも20%以下となっており、リアルタイムシミュレーションが問題なく実行できることを確認した。

5.2 HILS編成化による実車両の挙動変化

図1に示したHILSシステムを用いて、3両編成を模擬

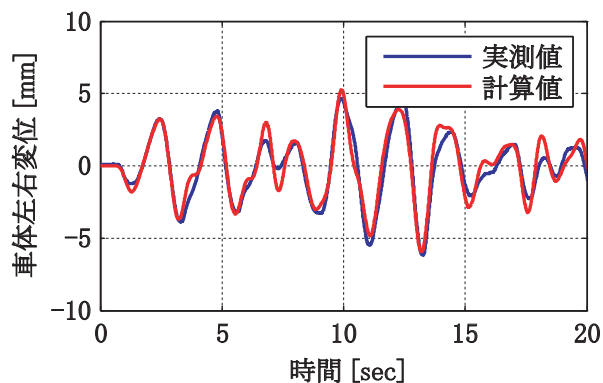


(a) 車体上下変位

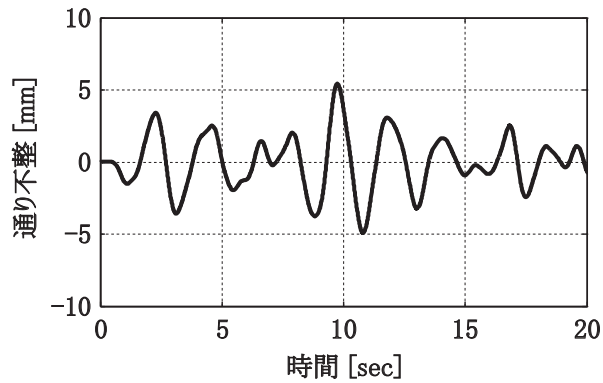


(b) 高低不整

図7 実車両と車両モデルの上下挙動比較



(a) 車体左右変位



(b) 通り不整

図8 実車両と車両モデルの左右挙動比較

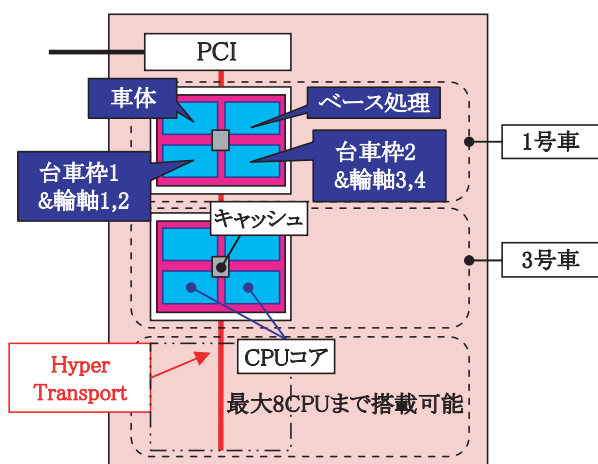


図9 分散型リアルタイムシミュレータ

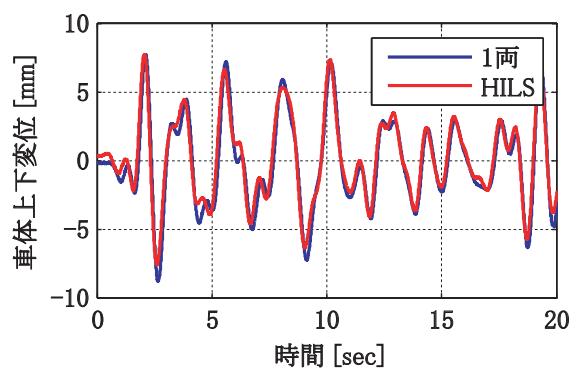
表1 各CPUコアの演算処理時間

CPU コアID	モデル内容	処理時間 msec	演算 負荷率 %
0	ベース処理	0.040	20
1	1号車	車体1 + 車体支持装置	0.032
2		台車枠1 + 輪軸1, 2	0.024
3		台車枠2 + 輪軸3, 4	0.025
4	3号車	車体2 + 車体支持装置	0.030
5		台車枠3 + 輪軸5, 6	0.024
6		台車枠4 + 輪軸7, 8	0.026

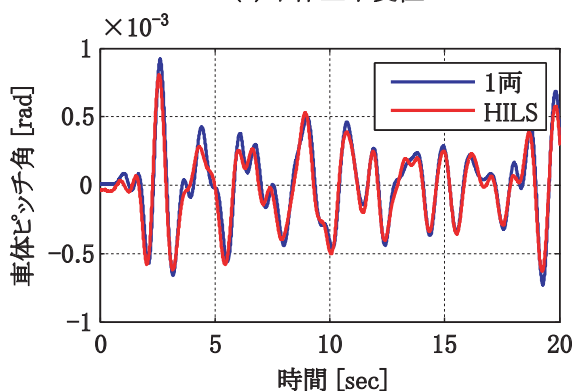
した加振試験を走行速度130km/hの下、実軌道高低不整データによる上下加振，通り不整データによる左右加振により実施した。

実軌道高低不整データによる上下加振試験により、実車両1両の場合と、HILSにより3両編成化された中間車に相当する実車両の挙動を比較した。車体上下変位，車体ピッチ角の時系列測定データを図10に、PSDを図11に示す。凡例中の「1両」は実車両単独の加振結果を示し、「HILS」はHILSにより3両編成化された中間車に相当する実車両の加振結果を示す。これらの結果から、車体上下変位については1.0Hz付近で若干の差が見られるものの、ピーク周波数0.6Hzでは顕著な差は見られない。1.0Hz付近のパワーが減衰したのは、実車両の両端部に装備された車体間前後ダンパが車体ピッチング運動に対する減衰要素として有効に作用したためと考えられる。位相特性については、編成化による大きな変化は確認されなかった。

実軌道通り不整データによる左右加振試験により、実車両単独の場合と、HILSにより3両編成化された中間車に相当する実車両の挙動を比較した。車体のロール角およびヨー角の時系列測定データを図12に、PSDを図13に示す。凡例中の「1両」は実車両単独の加振結果を示し、「HILS」はHILSにより3両編成化された中間車に相当する実車両の加振結果を示す。この結果より、0.5Hz

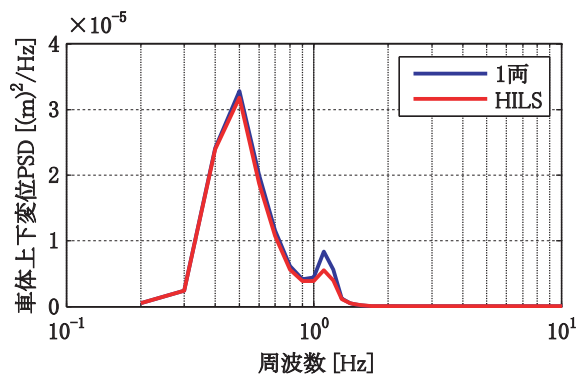


(a) 車体上下変位

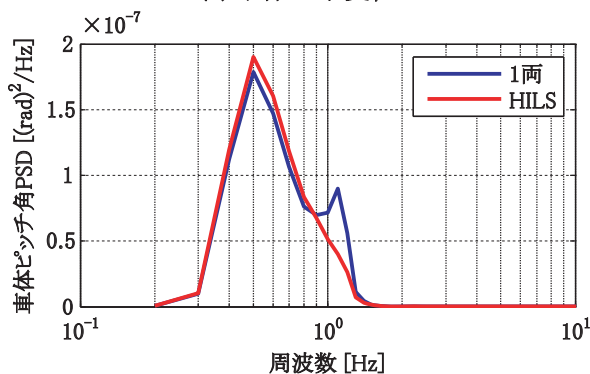


(b) 車体ピッチ角

図10 HILS 編成化による実車両への影響 (実軌道高低不整加振)

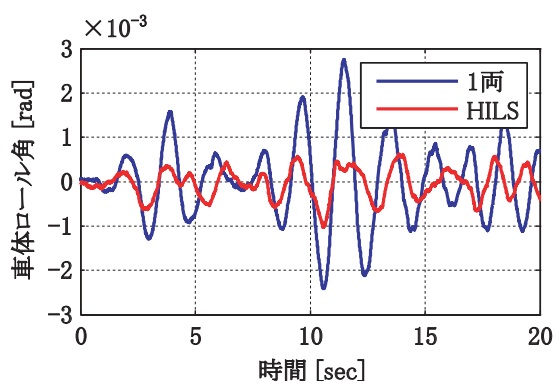


(a) 車体上下変位 PSD

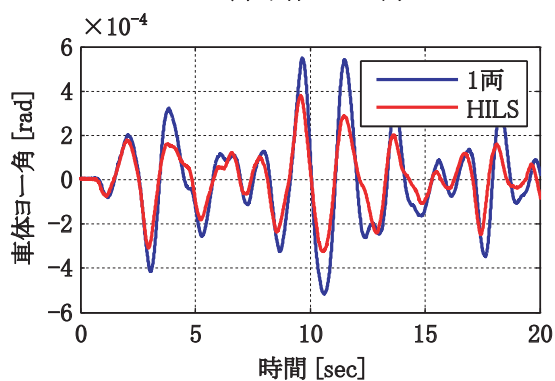


(b) 車体ピッチ角 PSD

図11 実車両のHILS編成化によるPSD比較 (実軌道高低不整加振)

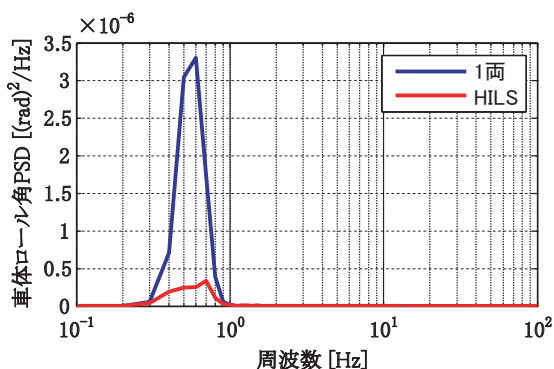


(a) 車体ロール角

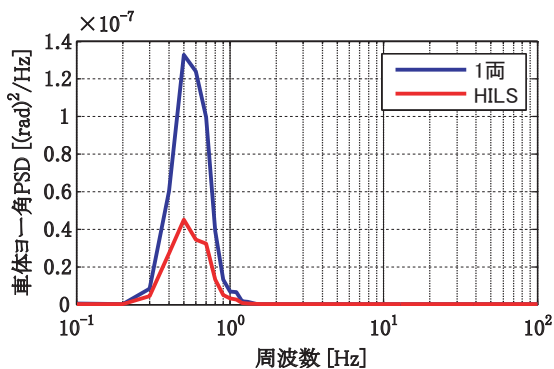


(b) 車体ヨー角

図 12 HILS 編成化による実車両への影響
(実軌道通り不整加振)



(a) 車体ロール角 PSD



(b) 車体ヨー角 PSD

図 13 実車両の HILS 編成化による PSD 比較
(実軌道通り不整加振)

近辺における車体のロール角およびヨー角のピークは、編成化により大きく減衰した。これは実車両の両端に装備された車体間前後ダンパが、車体ヨー運動の減衰要素として大きく作用し、これに伴い車体のロール運動にも減衰効果として表れたためと考えられる。また、車体ロール角のピーク周波数が、0.6Hz から 0.7Hz へと若干変化する結果となった。

6. まとめ

本報告において得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) HILS 用車両モデルの対象となる実車両を用いた周波数応答試験を行い、これに基づく車両諸元に関するパラメータ同定を実施した。同定値を車両運動モデルに適用したところ、上下および左右方向ともに実車両の挙動をほぼ忠実に再現できることが確認された。
- (2) 車両運動モデルを3つに分割し、分散型リアルタイムシミュレータに搭載することで、3両編成車両の編成走行時の先頭車および最後尾車のリアルタイムシミュレーションが可能であることが示された。
- (3) 車両試験台において実車両をハードウェアとする HILS システムを構築し、実軌道不整データを用いた3両編成走行試験を実施した。その結果、編成化が実車両の上下方向の運動に与える影響は車体ピッチ角に、左右方向の場合は車体のロール角およびヨー角に現れることを確認した。

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) 宮本昌幸：鉄道車両試験台，車両と電気，Vol.43，No.12，pp.16-19，1992
- 2) 菊野敏：車両走行試験装置を活用した新たな挑戦，JR東海技報，Vol.8，pp.34-35，2009
- 3) 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，Vol.20，No.6，pp.5-10，2006
- 4) The MathWorks™，Simulink ユーザーズガイド
- 5) 真木康隆，下村隆行，佐々木君章：HILS 用車両運動モデルの構築と検証，鉄道総研報告，Vol.23，No.4，pp.6-8，2009
- 6) Maki, Shimomura, Sasaki, "Building a Railway Vehicle Model for Hardware-in-the-loop Simulation," Quart Rep. of RTRI, Vol.50, No.4, pp.193-198, 2009.