

編成走行を模擬する HILS システムの精度検証

山口 輝也*

Quantitative Verification of Hardware-In-the-Loop Simulation System Simulating Train Vehicle Behaviour

Teruya YAMAGUCHI

For high-speed trains, devices coupling train coaches have been developed and are playing an important role for ride comfort, accordingly investigation of train vehicle dynamics has become more important. However, in Japan, field test conditions for high-speed trains are very restricted because the field test must be carried out on commercial lines. If we could explore dynamics of train equipped with coupling devices on a test bench, we could accelerate the development of such devices. Our research group has developed a Hardware-In-the-Loop Simulation (HILS) system to create a bench test environment for train vehicles. Now we present quantitative verification by comparing the HILS result and the simulation result of train vehicles.

キーワード：編成走行, HILS, 車両試験台

1. はじめに

新幹線などの高速鉄道では、車端ダンパや車体間前後ダンパ、車体間ロールダンパなどの隣接する車体間を連結する部品によって車体の振動を減衰させ、乗り心地の向上等に役立てることが多い。これらの車両部品は、シミュレーションによる仕様の検討や試作した部品単体でのベンチ試験、実際に部品を装備した状態での営業線上の走行試験などの段階を経て開発される。ここで営業線での走行試験は時間やコストに関する制約が大きく、試験項目は必要最小限に留めることが望ましい。このためには、シミュレーションやベンチ試験の精度を高め、走行試験を実施する前に乗り心地等の車両運動特性を正確に予測できることが求められる。

シミュレーションは開発品の諸元を自由に変更して車両運動特性を予測できるため、諸元の最適化等に効果を発揮するものの、実際に起こり得る現象の全てをモデル化することは難しく、開発品の定量的評価には試作品の実物を用いたベンチ試験や走行試験を行う必要がある。

ベンチ試験で実際の車両の走行状態を模擬できる装置として車両試験台があるが、一般的に車両試験台は車両1両での走行状態を模擬することを前提に設計されており、編成車両の走行状態を模擬して車体間部品を評価することはできない。そこで、鉄道総研では車両試験台で鉄道車両の編成走行を試験するための試験装置として、編成運動模擬 HILS (Hardware-In-the-Loop Simulation)

システムを開発し、保有している¹⁾。HILSとは実物の供試体によるベンチ試験と、その他の部分を表現するシミュレーションとを組み合わせることで大規模なシステムの中での供試体の挙動や効果を試験できる試験方法であり、鉄道分野に対しても適用が始まっている^{2)~6)}。編成運動模擬 HILS システムは従来1両での走行状態しか再現できなかった車両試験台において、供試車両に隣接する車両の運動をリアルタイムシミュレーションで計算し、算出された運動を供試車両に隣接して設置された車体間運動模擬装置で模擬することにより、編成走行特有の現象である隣接車体間の相互作用を模擬できる試験装置である。これにより、編成走行での車両運動特性を実物の車両と車体間部品を使用して試験することができるため、走行試験での車両運動特性をより正確に予測することができる。本稿ではこの編成運動模擬 HILS システムの試験装置としての精度を検証するために実施した試験結果について報告する。

2. 編成運動模擬 HILS システム

図1に編成運動模擬 HILS システムの構成、図2にその外観を示す。図1に示すように評価の対象となる供試車両は軌条輪の上に設置され、軌条輪を走行速度に対応した速度で回転させながら加振することによって軌道不整上の走行を模擬することができる。さらに供試車両に隣接して設置された車体間運動模擬装置は隣接車両の妻面の運動を模擬することができ、この装置と供試車両を車体間部品で連結することにより車体間の相対運動に

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室 (現ブリストル大学)

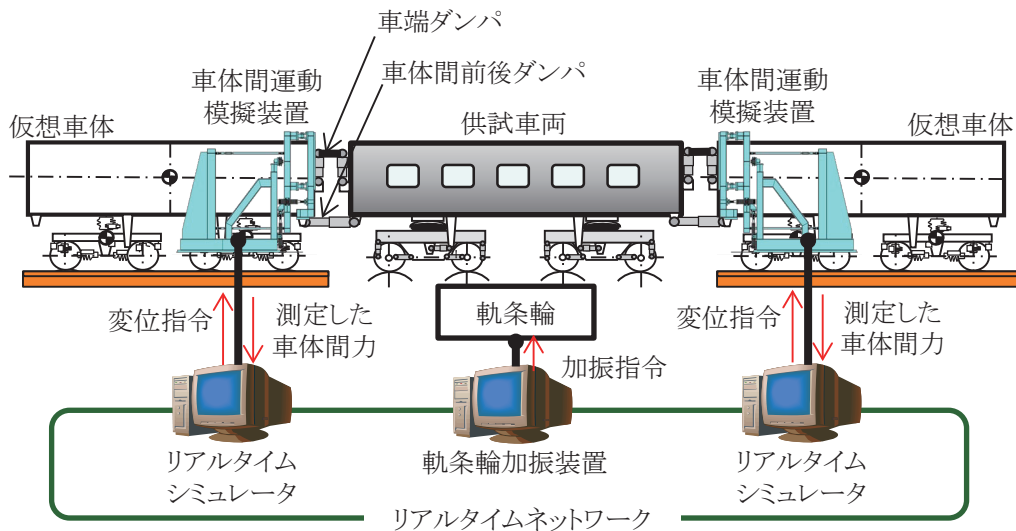


図1 編成運動模擬 HILS システムの構成

よって生ずる各 부품の発生力および供試車両の運動特性の変化等を評価することができる。ここで、車体間運動模擬装置によって模擬される隣接車両の運動はリアルタイムシミュレータで計算され、車体間部品の発生力をリアルタイムに隣接する仮想車両にも反映させることで、実物部品の効果が編成全体に現れるようになっている。以上のことから、編成運動模擬 HILS システムを用いて試験することで、あたかも実験室で編成車両が走行しているかのような状況で車両運動特性を評価できることが分かる。

本稿では、車体間前後ダンパと車端ダンパで車体同士を連結して3両編成の列車を構成し、その中間車両の応答に注目して精度検証を進める。



図2 編成運動模擬 HILS システムの外観

3. 精度検証

3.1 精度検証項目

編成運動模擬 HILS システムの試験装置としての精度を検証するために、以下の項目について順に検証した。

- ① 隣接車両の運動を計算する車両モデルの精度

- ② 軌道不整を模擬する軌条輪の加振に関する精度
- ③ 車体間運動模擬装置の動作精度
- ④ 編成運動模擬 HILS システム全体が実際の編成走行状態を模擬する精度

以下ではこれらの検証結果について順に報告する。

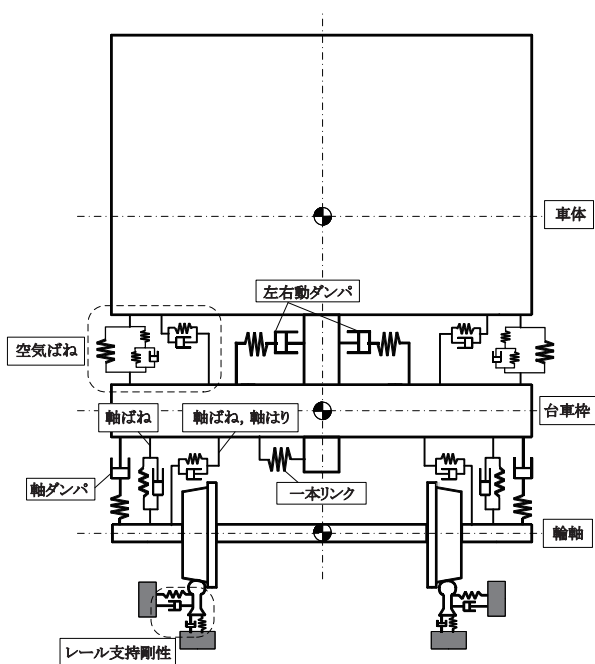
3.2 隣接車両の運動を計算する車両モデルの精度

編成運動模擬 HILS システムにおいて隣接車両の運動は車両1両の完全な車両モデルに基づいて計算される。この車両モデルは一般にどのようなものを選んでよいが、通常編成車両は比較的運動特性の揃った車両で構成されることが多いため、ここでは供試車両と同じ特性を持つ車両モデルを作成することを目標として供試車両の各パラメータを同定し、その精度を評価した。供試車両の諸元を表1、車両モデルを図3に示す。

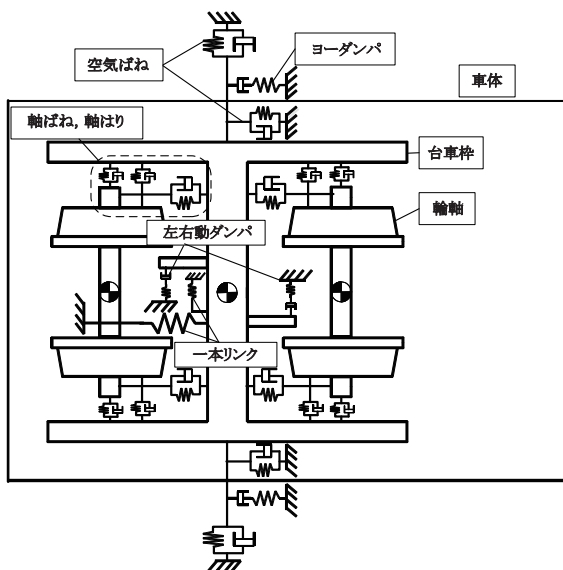
軌条輪上で供試車両を加振した場合の応答と、同定した車両モデルでその応答を予測した結果を図4に比較した。図4より同定した車両モデルは供試車両の応答を精度よく予測できており、十分な精度を有していることが分かる。

表1 供試車両の諸元

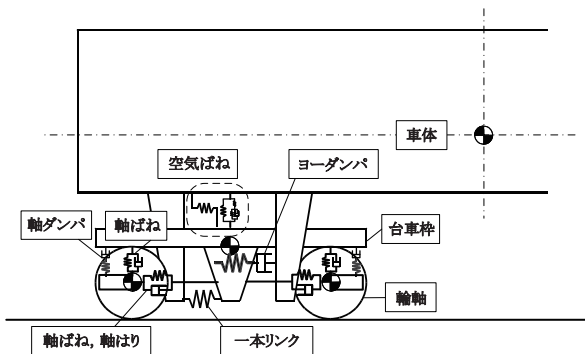
車体	新幹線用試作車体
台車	新幹線用台車
軸距	2,500mm
軌間	1,435mm
軸箱支持装置	軸はり式
車体支持装置	ボルスタレス方式
牽引装置	一本リンク方式
セミアクティブサスペンション	使用しない (左右動ダンパを使用)
車体間部品	車体間前後ダンパ、車端ダンパ
走行速度	250km/h



(a) 正面図

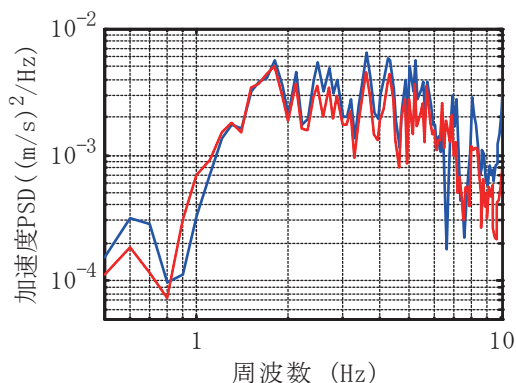


(b) 平面図

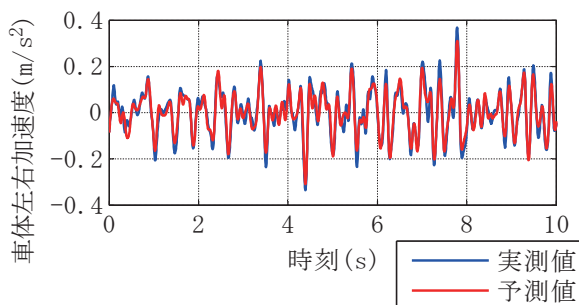


(c) 側面図

図3 計算に使用した車両モデル



(a) パワースペクトル密度 (PSD)



(b) 時刻歴

図4 車両モデルの精度検証結果
(前位台車上车体床面左右加速度)

3.3 軌道不整を模擬する軌条輪の加振に関する精度

車両試験台に装備されている軌条輪は、回転させながら上下、左右に加振することで軌道不整上の走行を模擬することができる。しかし、軌条輪上と実際のレール上では車両運動特性が異なるために、軌道不整形をそのまま軌条輪に模擬させてもレール上の走行を完全に模擬することができない^{7) 8)}。そこで、軌道不整形に適切な補正を加えて軌条輪を加振することで、レール上の車両の応答を軌条輪上で再現するための方法を開発した^{9) 10)}。

手法の詳細は文献 9), 10) に示しているので省略し、ここでは開発した加振方法で軌道不整のあるレール上での走行状態を軌条輪上で模擬できるかを前節により得られた車両モデルによりレール上の応答を予測した結果と、軌条輪上の供試車両の応答の実測値を比較することにより検証した。

図5に供試車両のモデルから予測したレール上での車両の応答と、軌道不整形をそのまま軌条輪に模擬させて加振した場合(加振補正なし)および開発した加振方法で軌条輪を加振した場合(加振補正あり)のそれぞれの応答を比較して示した。同図より、開発した加振方法によりレール上の応答に近い挙動が軌条輪上で再現できていることが分かる。なお、凡例中の数値は乗り心地レベルである。

特集：車両技術

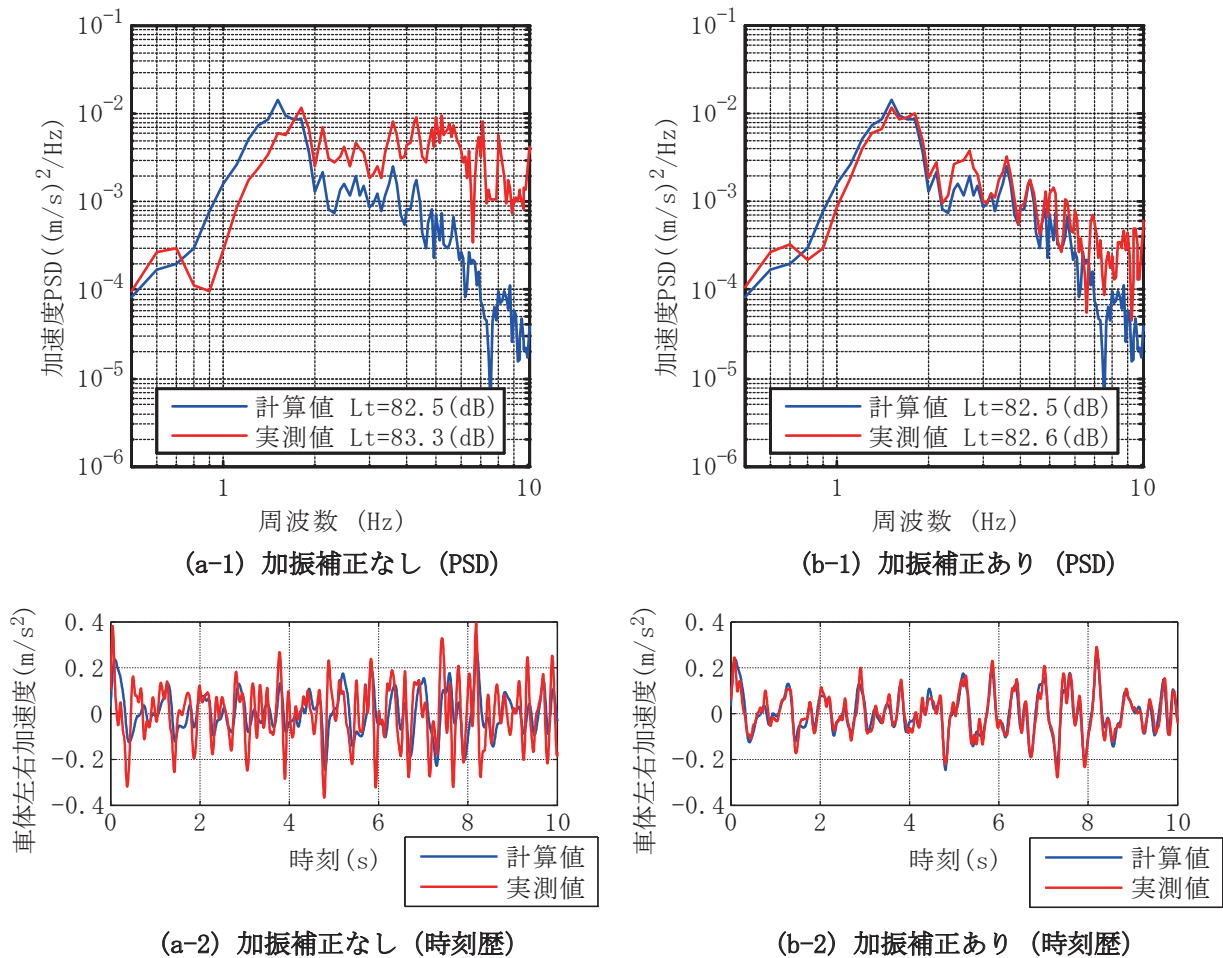


図5 軌道不整を模擬する軌条輪の加振に関する精度検証結果（前位台車上車体床面左右加速度）

3.4 車体間運動模擬装置の動作精度

編成運動模擬 HILS システムのうち、車体間運動模擬装置はリアルタイムシミュレータによって算出された隣接車体の運動を複数の電動アクチュエータを用いて物理的に実現する装置である。開発した車体間運動模擬装置は5本の電動アクチュエータで隣接車体の上下、左右、ロール、ヨーの4自由度の運動を模擬できる。ここで、編成車両の運動を正確に実験室で再現するためには算出された隣接車体の運動を指令値として、これに高速かつ高精度に車体間運動模擬装置の応答を追従させなければならない。しかし、このためには以下に挙げる技術的課題を克服する必要がある。

- ① 車体間を連結する部品は微小振幅での挙動がその効果にとって重要であることから、車体間運動模擬装置は装置が大型であるにもかかわらず高い動作精度が求められる。
- ② 車体間運動模擬装置は多自由度の運動を模擬するため構造が複雑であり、装置の剛性が低い。
- ③ 車体間を連結する部品は最大で10kNを超える力を発生させるが、車体間運動模擬装置の剛性が低いとこの発生力の影響を受け、その部品取り付け位置の

動作精度が低下する。

①、③に示した項目は特に車体間前後ダンパの挙動を模擬する場合に顕著である。

まず、車体間運動模擬装置の車体間部品取り付け位置における動作精度を正確に把握するために、図6に示す6自由度変位検出器を設計、製作した。

この6自由度変位検出器は2点間の上下、左右、前後、ロール、ピッチ、ヨーの相対的な変位および姿勢を検出できる計測器で、機械的なリンクとレーザー変位計およびロータリーエンコーダで構成される。

図7に示すようにこの6自由度変位検出器を車体間運動模擬装置の車体間部品取り付け位置と地面との相対的な変位や姿勢を計測できるように設置して車体間運動模擬装置の動作精度を検証したところ、車体間部品を取り

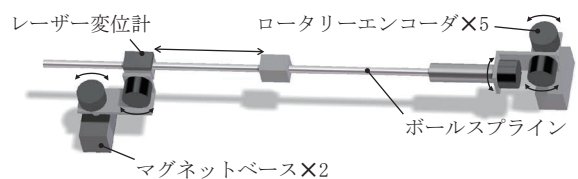


図6 6自由度変位検出器
(矢印は検出する変位の方向を示す)

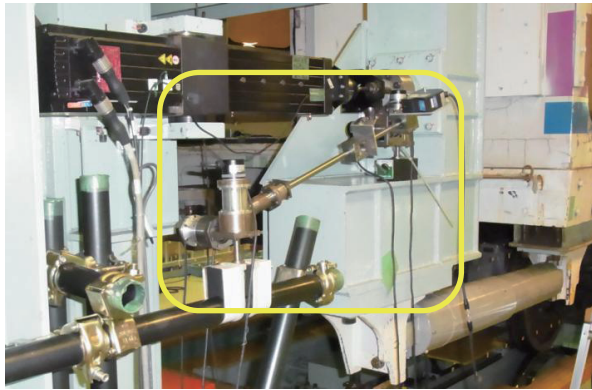


図7 車体間運動模擬装置に設置された
6自由度変位検出器（黄枠で囲まれた部分）

付けた状態では前記のような理由から動作精度が十分確保できないことを確認した。

そこで図8に示すように、6自由度変位検出器で計測される変位情報をフィードバックし、車体間運動模擬装置の制御系を適切に構成することで動作精度を向上させることができた。このときの車体間運動模擬装置への指令値と実測値を比較した結果を図9(a)に示す。また、図9(b)にこのときの車体間前後ダンパ発生力を示す。図9(a)より車体間運動模擬装置は指令値にほぼ完全に追従しており、十分な動作精度が確保できていることを確認した。

3.5 編成運動模擬 HILS システム全体が実際の編成走行状態を模擬する精度

精度検証の最終段階として、開発した編成運動模擬 HILS システムが全体として実際のレール上の編成走行状態を模擬できるか検証した。精度検証試験で使用した供試車両と同じ車両を用いて本線上で走行試験を行い、その結果と比較することが理想的であるが、これを実際に行うことは困難であるので、本稿では3.3節と同様に供試車両の応答を精度よく予測できる車両モデルがあることを利用して、供試車両がレール上で編成走行を行った場合の応答を計算で予測し、編成運動模擬 HILS システムの応答と比較して精度検証を行った。

図10(a)に供試車両のモデルを使用して1両編成(単車)および3両編成の中間車の応答をそれぞれ計算して比較した結果を示す。同図より車体間前後ダンパ、車端ダンパの効果によって1~2Hzの帯域で車体左右加速度の低減が期待できることが分かる。一方、図10(b)に編成運動模擬 HILS システムを用いて同様に単車および3両編成の中間車の応答を試験した結果を示す。また図10(c)に編成状態における計算での予測値と HILS 試験結果を比較した。これらの図より計算での予測と同様に1~2Hzの帯域での車体左右加速度の低減が再現

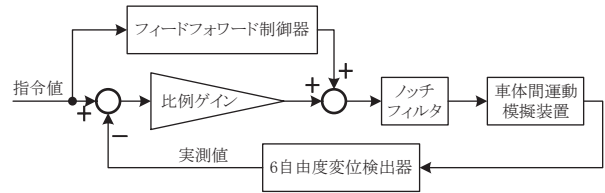
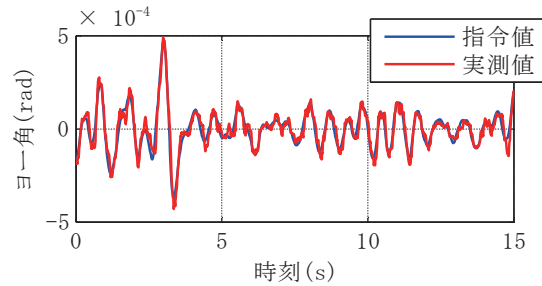
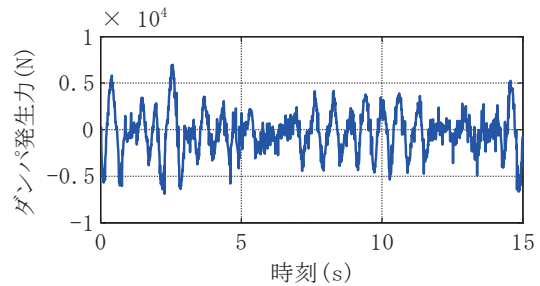


図8 車体間運動模擬装置の制御系



(a) 車体間運動模擬装置の指令値に対する応答(ヨー角)



(b) 車体間前後ダンパ発生力

図9 車体間運動模擬装置の動作精度検証結果

できており、開発した編成運動模擬 HILS システムは車体間部品の編成車両中での実際の効果を試験する装置として十分な精度を有していることを確認した。

本稿では比較的計算でその応答を予測しやすい供試車両を使用して試験を実施したが、今後開発される車体間部品等も含めて全ての供試車両が計算でその応答を正確に予測できるとは限らない。一方、編成運動模擬 HILS システムでは実物を使用して試験するため、モデル化できない現象も含めて再現することができ、走行試験を実施する前に正確に編成車両の運動特性を確認できると期待できる。

4. まとめ

本稿では鉄道総研の保有する編成運動模擬 HILS システムの精度検証のための試験結果について報告した。その要点は以下の通りである。

- (1) 作成した車両モデルは軌条輪上での供試車両の応答を正確に予測できることを確認した。そこで本稿ではこの車両モデルにより予測される編成車両の応答と、HILS 試験結果とを比較することにより、精度

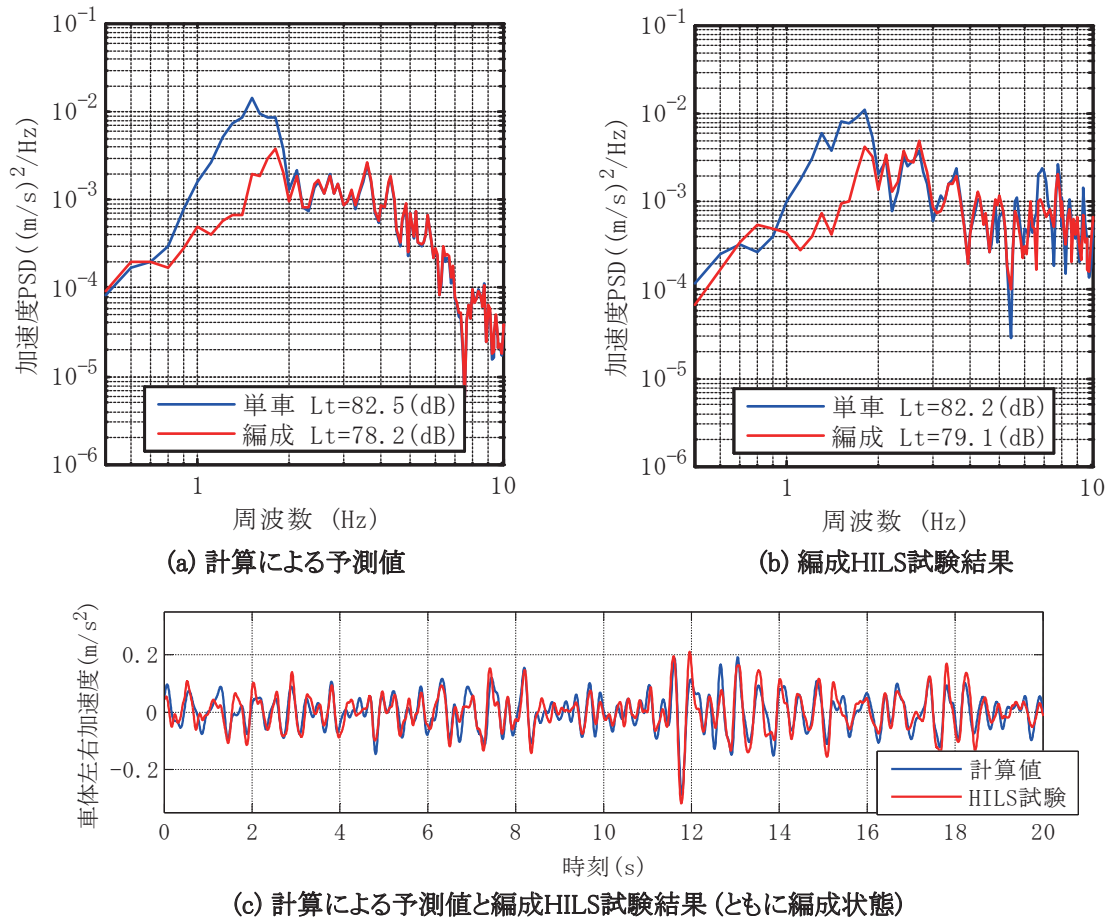


図 10 編成運動模擬 HILS システムの精度検証結果 (前位台車上車体床面左右加速度)

検証を実施した。

- (2) 軌条輪上でレール上の走行を模擬するための加振方法、および車体間運動模擬装置の指令値に対する追従性能はともに十分な精度を有していることを確認した。
- (3) 開発した編成運動模擬 HILS システムは車体間部品の編成車両中での実際の効果を試験する装置として十分な精度を有していることを確認した。

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) Spiriyagin, M. and Cole, C., "Hardware-in-the-loop simulations for railway research", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51, Issue 4, pp. 497-498, 2013.
- 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) Facchinetti, A., Gasparetto, L. and Bruni, S., "Real-time catenary models for the hardware-in-the-loop simulation of the pantograph-catenary interaction", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51, Issue 4, pp. 499-516, 2013.
- 5) Bosso, N., and Zampieri, N., "Real-time implementation of a traction control algorithm on a scaled roller rig", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51, Issue 4, pp. 517-541, 2013.
- 6) 山口輝也: 実ヨーダンパを用いた Hardware-In-the-Loop シミュレーションによる鉄道車両の蛇行動安定性試験 (試験環境の構築と定性的な検証), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.806, pp.3420-3431, 2013
- 7) 日本機械学会: 鉄道車両のダイナミクス, 電気車研究会, pp.76-82, 1994
- 8) Iwnicki, S., *Handbook of railway vehicle dynamics*, Taylor & Francis, pp.457-506, 2006.
- 9) 山口輝也, 下村隆行, 佐々木君章: 車両試験台における実軌道走行模擬のための加振方法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.5, pp. 11-16, 2013
- 10) 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, 2013