

車両試験台における 実軌道走行模擬のための加振方法

山口 輝也* 下村 隆行** 佐々木 君章***

Proposed Method of Roller Rig Excitation Test for Simulating Vehicle Running Conditions on Actual Track

Teruya YAMAGUCHI Takayuki SHIMOMURA Kimiaki SASAKI

Rolling stock testing plants with roller rigs are widely used for the investigation of railway vehicles performance. Some plants can simulate track irregularities by the excitation of the rollers. However, the car dynamics in lateral direction on roller rigs are different from that on actual track. Therefore, the excitation of the rollers simulating the track irregularities does not reproduce running conditions on actual track. Thus, we have developed a compensating method for roller rig inputs, which enables the bogie motion on roller rig to be equivalent to that on actual track. Furthermore, we have also tested the validity of the method.

キーワード：車両試験台，軌条輪，軌道不整，実軌道走行模擬，シミュレーション

1. はじめに

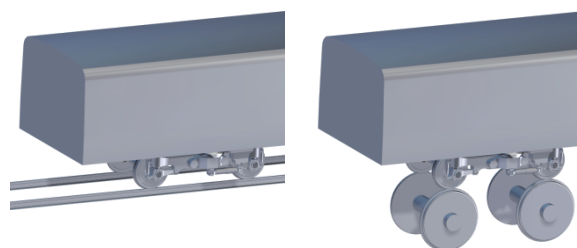
車両試験台は、軌条輪と呼ばれるレールと同じ断面形状を持つ回転円盤上に車両を設置して、走行する車両の状態を定置で再現する装置である。また、軌条輪に加振機能のあるものは軌道不整に合わせてこれを加振することで、軌道不整上の走行における車両の振動絶縁特性等を試験することができる。しかし、通り不整を模擬する場合には、実際の軌道と同じ変位量を軌条輪に与えても、車両の挙動は実際の軌道上とは異なったものとなる。その主な要因は軌条輪が加振の際に左右方向に絶対速度を持つことや、軌条輪と車輪の接触幾何がレールと車輪のものとは一般に異なるためである^{1), 2)}。足立ら³⁾はこの問題に対し、実際の軌道上を車両が走行した場合と、軌条輪上で車両を加振した場合の挙動の違いから重み付け関数を算出し、この重み付け関数によって通り不整量を補正した後に加振することを提案している。この方法によって少なくとも車両の特定の状態量の周波数領域における振幅を一致させることができるが、その位相までを模擬することは保証されておらず、時間領域で車両の挙動を模擬することはできなかった。さらに、一致させることのできる状態量の数も限られていた。

そこで本稿においては、軌条輪入力自由度を最大限に活用することによって台車枠と車体のすべての状態量を実際の軌道上を走行する場合と時間領域で一致させる

模擬加振方法を提案し、車両試験台試験により本手法の有効性を確認した。

2. レール上と軌条輪上でのクリープ力の違い

ここでは実際の軌道上と軌条輪上でそれぞれ輪軸が回転する場合の運動方程式を示し、輪軸にはたらくクリープ力が異なることを示す。以下では、図1に示すように実際の軌道のような直線軌道上を走行する場合を「レール上」と呼び、車両試験台に備えられた軌条輪の上を転走する場合を「軌条輪上」と呼んで区別する。



(a) レール上

(b) 軌条輪上

図1 レール上および軌条輪上の車両

また、本稿では一般の車両試験台で模擬の対象となる1両編成(単車)での直線走行のみを扱い、クリープ力はすべて線形クリープ則で表現できるものとする。軌条輪は高低、水準、通りの各軌道不整の模擬のために各軸を上下、ロール、左右の各方向に加振することができるが、高低不整と水準不整の模擬は特別な補正をしなくてもそのまま軌条輪の上下、ロール変位として加振すれば模擬

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室

** 元 車両構造技術研究部 車両運動研究室

*** 車両構造技術研究部

特集：車両技術

できるため、簡単のため軌道不整は通り不整のみであるとし、軌条輪の加振方向も左右方向に限って議論を進める。

まず台車枠を走行速度で進行する慣性系に固定し、図2に示す輪軸の水平面内での運動方程式をレール上と軌条輪上のそれぞれについて導出する。レール上と軌条輪上での違いはこれらの単純な運動方程式にすべて現れているので、より大規模な車両1両の運動方程式は省略する。以下、必要な記号の定義をする。また、特に断らない限り添字 r でレール上、添字 p で軌条輪上での値を表す。

(記号)

- m_w : 輪軸質量
- i_{wz} : 輪軸ヨーイング慣性半径
- y : 輪軸左右変位
- y_r : レール(または軌条輪)左右変位
- ψ : 輪軸ヨー角変位
- k_y : 軸箱左右支持剛性(1軸あたり)
- c_y : 軸箱左右支持減衰係数(1軸あたり)
- k_x : 軸箱前後支持剛性(1軸あたり)
- c_x : 軸箱前後支持減衰係数(1軸あたり)
- d_0 : 車輪～レール左右接触点間隔の半分
- κ_{11r} : レール上での縦クリープ係数
- κ_{22r} : レール上での横クリープ係数
- κ_{11p} : 軌条輪上での縦クリープ係数
- κ_{22p} : 軌条輪上での横クリープ係数
- γ_{er} : レール上での等価踏面勾配
- γ_{ep} : 軌条輪上での等価踏面勾配
- r_0 : 車輪半径
- v : 走行速度または軌条輪周速
- (\cdot): 時間微分
- (\cdot)^T: ベクトルの転置

台車枠をレール長手方向に沿って走行速度と同じ速度で進行する慣性系に固定すると、レール上での輪軸の運動方程式は

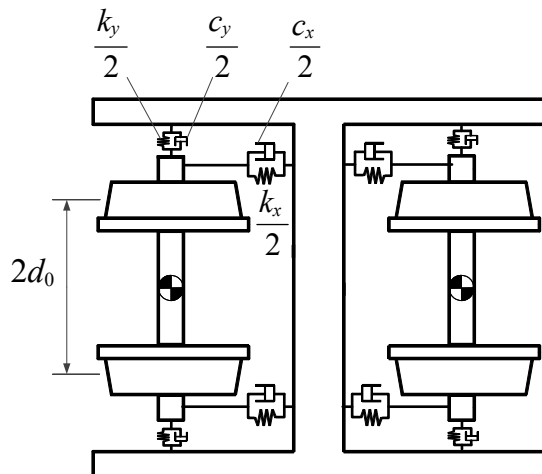


図2 輪軸のモデル

$$m_w \ddot{y}_r + c_y \dot{y}_r + k_y y_r = -2\kappa_{22r} \left(\frac{\dot{y}_r}{v} - \psi_r \right) \quad (1)$$

$$m_w i_{wz}^2 \ddot{\psi}_r + c_x d_0^2 \dot{\psi}_r + k_x d_0^2 \psi_r = -2\kappa_{11r} \left(\frac{d_0^2 \dot{\psi}_r}{v} + \frac{d_0 \gamma_{er} (y_r - y_R)}{r_0} \right) \quad (2)$$

となり、軌条輪上では

$$m_w \ddot{y}_p + c_y \dot{y}_p + k_y y_p = -2\kappa_{22p} \left(\frac{\dot{y}_p - \dot{y}_R}{v} - \psi_p \right) \quad (3)$$

$$m_w i_{wz}^2 \ddot{\psi}_p + c_x d_0^2 \dot{\psi}_p + k_x d_0^2 \psi_p = -2\kappa_{11p} \left(\frac{d_0^2 \dot{\psi}_p}{v} + \frac{d_0 \gamma_{ep} (y_p - y_R)}{r_0} \right) \quad (4)$$

となる。それぞれの右辺は車輪とレール(または軌条輪)の間にはたらくクリープ力を表している。これらと比較すると式(3)において右辺に \dot{y}_R を含む項が追加されていることが分かる。さらに、軌条輪がレール長手方向に有限な曲率半径をもつことにより、レール上と軌条輪上では等価踏面勾配や縦、横クリープ係数が異なる。これらの違いによって輪軸にはたらくクリープ力に違いが生じ、レール上と等しい通り不整を軌条輪に与えても、車両の挙動の完全な模擬にはならない。

次に、理論の組み立てを容易にするために、式(1)～(4)の運動方程式を以下の状態方程式表現に変換する。

$$\dot{x}_r = A_r x_r + B_r u_r \quad (5)$$

$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_p u_p \quad (6)$$

但し、

$$x_r = [\dot{y}_r \quad y_r \quad \dot{\psi}_r \quad \psi_r \quad y_R]^T \quad (7)$$

$$x_p = [\dot{y}_p \quad y_p \quad \dot{\psi}_p \quad \psi_p \quad y_R]^T \quad (8)$$

$$A_r = \begin{bmatrix} -2\frac{\kappa_{22r}}{m_w v} - \frac{c_y}{m_w} & -\frac{k_y}{m_w} \\ 1 & 0 \\ 0 & -2\frac{\kappa_{11r} d_0 \gamma_{er}}{m_w i_{wz}^2 r_0} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} -2\frac{\kappa_{22p}}{m_w v} - \frac{c_y}{m_w} & -\frac{k_y}{m_w} \\ 1 & 0 \\ 0 & -2\frac{\kappa_{11p} d_0 \gamma_{ep}}{m_w i_{wz}^2 r_0} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B_r = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (11)$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 2 \frac{\kappa_{22p}}{m_w v} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

$$u_r = \dot{y}_R \quad (13)$$

$$u_p = \dot{y}_R \quad (14)$$

である。ここで、式(5)と式(6)にはレール上と軌条輪上の違いのすべてが現れており、 A_r と A_p には両者の等価踏面勾配とクリープ係数の違い、 B_r と B_p には軌条輪の左右速度項の有無の違いが現れている。以上、輪軸のみの状態方程式を導出したが、車両全体の状態方程式も同様にして導出することができる。また、状態量 x_r 、 x_p には加速度が含まれないが、例えばレール上の輪軸の左右加速度を y_r とすると、定数行列 C_r を

$$C_r = \begin{bmatrix} -2 \frac{\kappa_{22r}}{m_w v} - \frac{c_y}{m_w} & -\frac{k_y}{m_w} & 0 & 2 \frac{\kappa_{22r}}{m_w} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

と定義すれば

$$y_r = C_r x_r \quad (16)$$

で取り出せることが式(5)より分かる。このことは後に

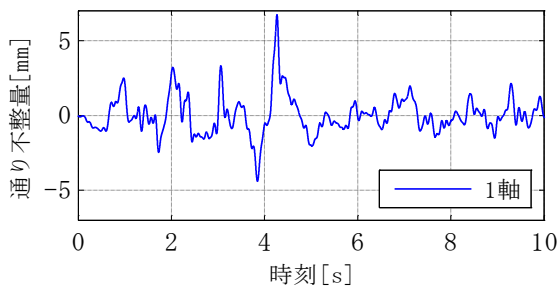
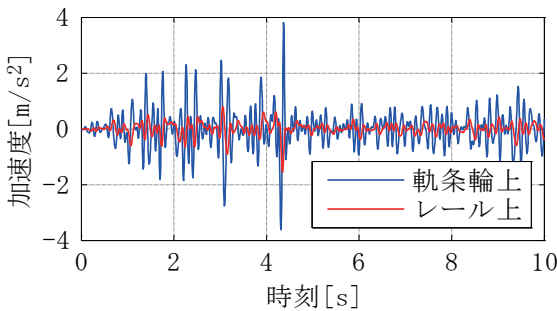
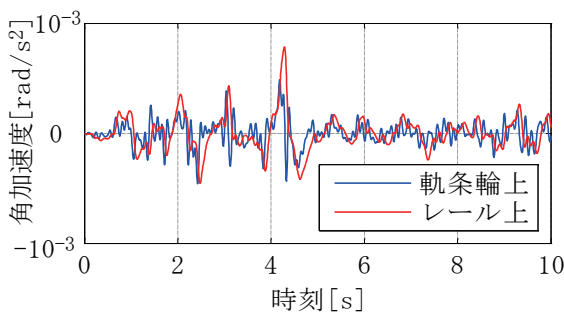


図3 通し不整量



(a) 台車左右加速度



(b) 台車ヨー角加速度

図4 レール上と軌条輪上の応答の違い
(速度 250 [km/h])

利用する。

レール上と軌条輪上で応答が異なる例として、全く同一の車両1両が図3に示す通り不整上をレール上と軌条輪上で同じ走行速度で走行した場合の台車枠の応答をシミュレーションで比較した(図4)。

図4より軌条輪上の台車枠の応答はレール上のものとは大きく異なっており、レール上に比べて高周波振動が大きくなる傾向にあることが分かる。

3. 補正加振方法の導出

3.1 補正加振によって模擬できる車両の自由度

本稿で提案する手法の目的は、軌条輪にある適切な加振指令を与えて、軌道不整上を走行するレール上の車両の挙動を模擬することである。しかし、軌条輪にいかなる加振指令を与えてもレール上の車両の挙動を完全に模擬することはできない。前章で示したように、通り不整という1自由度の入力に対して輪軸は左右方向とヨー方向の2つの自由度で運動する。レール上と軌条輪上の輪軸は左右とヨーそれぞれの方向で異なる運動をするにも関わらず、これを軌条輪の左右方向の加振という1自由度の入力だけで同時に一致させることは一般に不可能である。

そこで輪軸の運動を一致させるような軌条輪入力を求めるのではなく、1台車あたり2軸分の軌条輪をそれぞれ独立に加振することによって、台車枠の左右方向とヨー方向の運動がレール上と軌条輪上で等しくなるような加振方法を開発することとした。つまり、台車枠の2つの自由度を2軸分の軌条輪の自由度を使って制御しようとするものである。台車枠の残りの自由度の運動は高低不整や水準不整をそのまま軌条輪へ入力することでレール上を走行する場合を模擬できるため、上記の方法を見つけることができれば、輪軸の挙動を完全に模擬することはできなくても、台車枠と車体の挙動を模擬することができる。

3.2 補正加振のアルゴリズム

まず、2章で輪軸の状態方程式を導出したのと同様にして、式(5)、(6)を車両1両の状態方程式に拡張し、以下のように離散化する。

$$\bar{x}_r(k+1) = \bar{A}_r \bar{x}_r(k) + \bar{B}_r \bar{u}_r(k) \quad (\text{レール上}) \quad (17)$$

$$\bar{x}_p(k+1) = \bar{A}_p \bar{x}_p(k) + \bar{B}_p \bar{u}_p(k) \quad (\text{軌条輪上}) \quad (18)$$

ここで括弧内の k 、 $k+1$ はサンプリング周期で刻まれた時刻を表すインデックスである。また、台車枠の左右加速度とヨー角加速度をまとめたベクトルを \bar{y}_r 、 \bar{y}_p とおき、式(16)と同様にして

$$\bar{y}_r(k) = \bar{C}_r \bar{x}_r(k) \quad (\text{レール上}) \quad (19)$$

$$\bar{y}_p(k) = \bar{C}_p \bar{x}_p(k) \quad (\text{軌条輪上}) \quad (20)$$

特集：車両技術

と表現する。時刻 k において通り不整 $\bar{u}_r(k)$ が入力された場合、時刻 $k+1$ での \bar{y}_r の値は

$$\bar{y}_r(k+1) = \bar{C}_r \bar{A}_r \bar{x}_r(k) + \bar{C}_r \bar{B}_r \bar{u}_r(k) \quad (21)$$

となる。一方、時刻 $k+1$ での \bar{y}_p の値は

$$\bar{y}_p(k+1) = \bar{C}_p \bar{A}_p \bar{x}_p(k) + \bar{C}_p \bar{B}_p \bar{u}_p(k) \quad (22)$$

となる。式 (21) と式 (22) の右辺が等しくなるような $\bar{u}_p(k)$ を加えることができれば、時刻 $k+1$ で $\bar{y}_r(k+1)$ と $\bar{y}_p(k+1)$ は互いに等しくなる。全ての時刻 k にわたってこのような $\bar{u}_p(k)$ を加え続けることができれば、軌条輪上の台車枠の左右加速度とヨー角加速度は各サンプリング時刻で常にレール上のものと等しくなる。つまり、

$$\begin{aligned} & \bar{C}_p \bar{B}_p \bar{u}_p(k) \\ &= \bar{C}_r \bar{A}_r \bar{x}_r(k) + \bar{C}_r \bar{B}_r \bar{u}_r(k) - \bar{C}_p \bar{A}_p \bar{x}_p(k) \end{aligned} \quad (23)$$

整理して

$$\begin{aligned} & \bar{u}_p(k) = (\bar{C}_p \bar{B}_p)^{-1} \\ & \times (\bar{C}_r \bar{A}_r \bar{x}_r(k) + \bar{C}_r \bar{B}_r \bar{u}_r(k) - \bar{C}_p \bar{A}_p \bar{x}_p(k)) \end{aligned} \quad (24)$$

で求まる軌条輪入力を加え続けることで、軌条輪上の台車枠の左右加速度とヨー角加速度はレール上のものと等しくなり、結果として台車枠上部の車体の運動もレール上のものと等しくなる。以上が本稿で提案する補正加振のアルゴリズムである。

4. 適用結果

ここでは、車両試験台において提案手法の有効性を実験により検証した結果を示す。車両試験台において新幹線向けボルスタレス台車を装備した車両を軌条輪に設置し、同じ車両が設計形状の 60kg レールの通り不整上を、250[km/h] の速度で走行する場合の挙動を模擬した。車両試験台において車両の諸元を同定し、補正加振波形を生成した結果を図 5 に示す。参考のため、通り不整の補正をしない場合の加振波形を図 6 に示す。補正をしない場合は各軸の加振波形は同一形状であり各軸間の距離と走行速度で決まる時間差を持って各軸に入力される。一方、補正をした場合の各軸の加振波形の形状は互いに似ているが同一ではなく、位相差が補正をしない場合に比べて大きくなっている。

求められた補正加振波形で軌条輪を加振した結果を図 7 に示す。供試車両が実際にレール上を走行した場合の試験結果が得られなかったため、供試車両のモデルが設計形状のレール上を走行した場合のシミュレーション結果を比較対象とした。このモデルは試験台試験における車両の応答を精度よく予測できるため、レール上の等価踏面勾配、およびクリープ係数を正確に把握できていれば、レール上の車両の応答も同様に正確に予測し得るものと考えられる。図 7 より台車左右加速度、台車ヨー角加速度ともにレール上のものとよく一致しており、提案手法により軌条輪上でレール上の車両の挙動が模擬でき

ていることが確認できた。

5. 加振波形に及ぼす車両パラメータの影響

提案手法は補正加振波形を求める際に車両全体のパラメータを必要とする。従って、一般に正確にレール上の車両の挙動を模擬するためには、車両のモデルを予め正確に把握する必要がある。しかし、非線形性等のために同定しにくい車両のパラメータがある場合や、開発品のようにパラメータを変化させながら試験したい場合など、車両モデルを正確に把握することが困難な場合も考えられる。

今回の提案手法を用いると、レール上の台車枠と車体の挙動が模擬されるため、試験台試験の評価の対象となるのは 2 次ばね系など台車枠より上部に装備される車両部品である。これらのパラメータやモデル化の誤差によって補正加振波形に現れる誤差は少なく、正確にパラメータを把握できない場合や、パラメータに変動がある場合でも、提案手法を適用することである程度レール上の車両の挙動を軌条輪上で模擬することが可能となる。この意味で提案手法は車両のパラメータ変動やモデル化誤差に対してロバスト（頑健）であるといえる。

以下では正確にパラメータを把握できない例として 2 次ばね系にセミアクティブサスペンションを装備した車両のレール上の走行状態を車両試験台で模擬することを想定し、これをシミュレーションで検討した。ここでは補正加振波形を求める際の車両モデルにおいて、セミアクティブ制御される可変減衰ダンパをモデル化する代わりに、一定の減衰係数を持つ左右動ダンパのモデルで置き換えて提案手法を適用した場合の車両の乗り心地評価に与える影響について考察した。

1.0×10^4 [Ns/m] ~ 55.0×10^4 [Ns/m] の範囲で減衰係数を制御できる可変減衰ダンパを装備した車両が速度 250[km/h] で同じ通り不整上を走行した場合のシミュレーション結果を図 8 (a) に示す。軌条輪上、レール上ともにセミアクティブ制御によって低周波の振動が低減されているが、加振波形の補正をしない場合は軌条輪上でレール上の模擬が十分にできないことが分かる。

一方、車両モデルの可変減衰ダンパの部分を一一定の減衰係数 4.7×10^4 [Ns/m] を持つ左右動ダンパで置き換えて補正加振波形を生成し、これを用いて軌条輪上で可変減衰ダンパを装備した車両を加振する場合をシミュレーションした (図 8 (b), 図 9)。本図より補正加振を行う場合、軌条輪上の車体と台車枠の応答はレール上のものとほぼ一致しており、可変減衰ダンパのパラメータやその挙動について予め詳細に知らなくても、車両試験台でそのレール上での挙動と乗り心地に与える影響を定量的に評価できることが分かった。

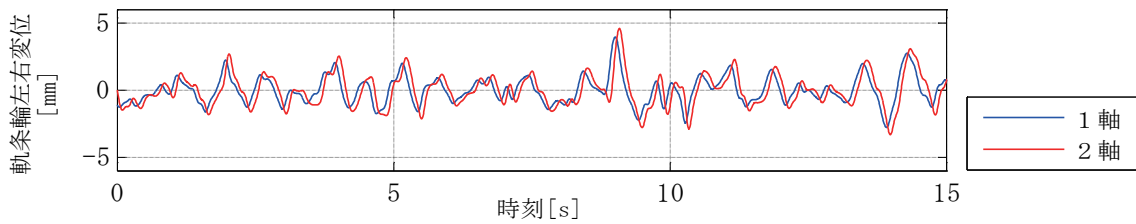


図5 補正加振波形

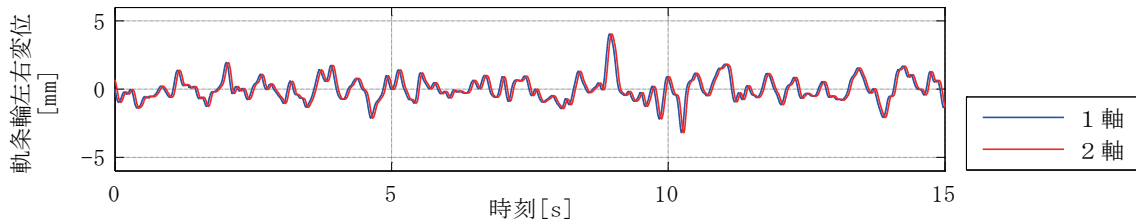


図6 補正しない場合の軌条輪加振波形

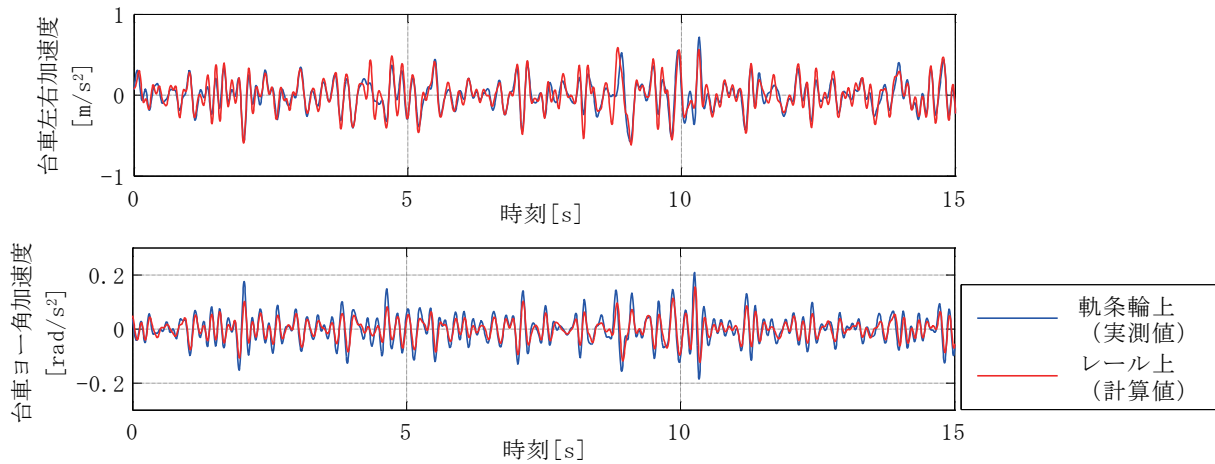


図7 補正加振時とレール走行時の台車の応答比較

6. 適用範囲の拡張

提案した補正加振のアルゴリズムをわずかに拡張することで通り不整上の走行模擬だけでなく、これまで軌条輪上では模擬できなかったさまざまな形態での走行を模擬することができる。

式 (21) の右辺はレール上を走行する場合の台車枠の左右加速度とヨー角加速度であるが、これを任意の時刻歴波形に置き換えることによって、その波形を軌条輪上で再現することができる。適当なシミュレーション装置を用いて、摩耗した車輪やレールでの走行や、軌条輪の断面形状とは異なる断面形状を持つ各種規格のレール上の走行、ロングレールの溶接継ぎ目や直線軌道中の分岐器通過などによる台車枠の応答を計算すれば、軌条輪上でその応答を模擬することができる。以上のように、提案手法を用いればレールの断面形状が変化する条件の試験も実施することができる。但しこの場合も評価の対象となるのは車輪～レール間のダイナミクスなどではな

く、2 次ばね系など台車枠より上部に装備される車両部品に限られる。

7. まとめ

本稿では軌条輪上でレール上を走行する車両の挙動を模擬するための加振方法について示した。ここで得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 軌条輪にいかなる入力を加えても、輪軸、台車枠、車体の各挙動をレール上で走行する場合と等しくすることはできない。そこで、軌条輪上の台車枠の左右加速度とヨー角加速度をレール上のものと等しくすることにより、レール上の台車枠と車体の挙動を模擬できる手法を開発した。
- (2) 本手法を適用した実軌道加振試験を車両試験台で実施した結果、試験結果はレール上のモデルの応答と近い応答を示しており、本手法の有効性が実証された。

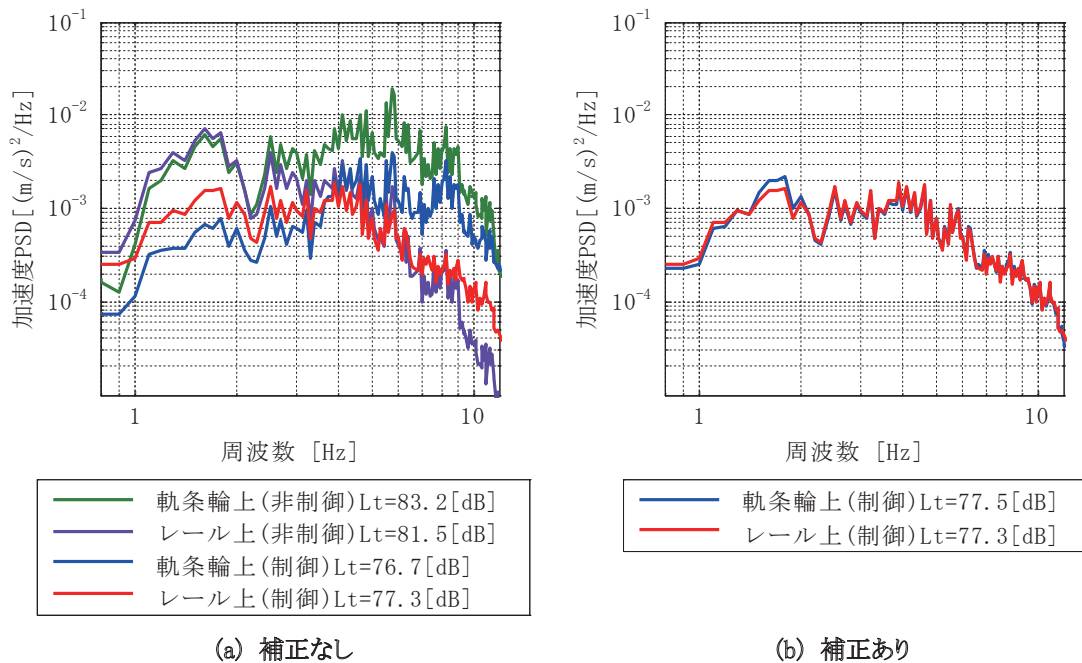


図8 車体左右加速度（前位台車上・計算値）

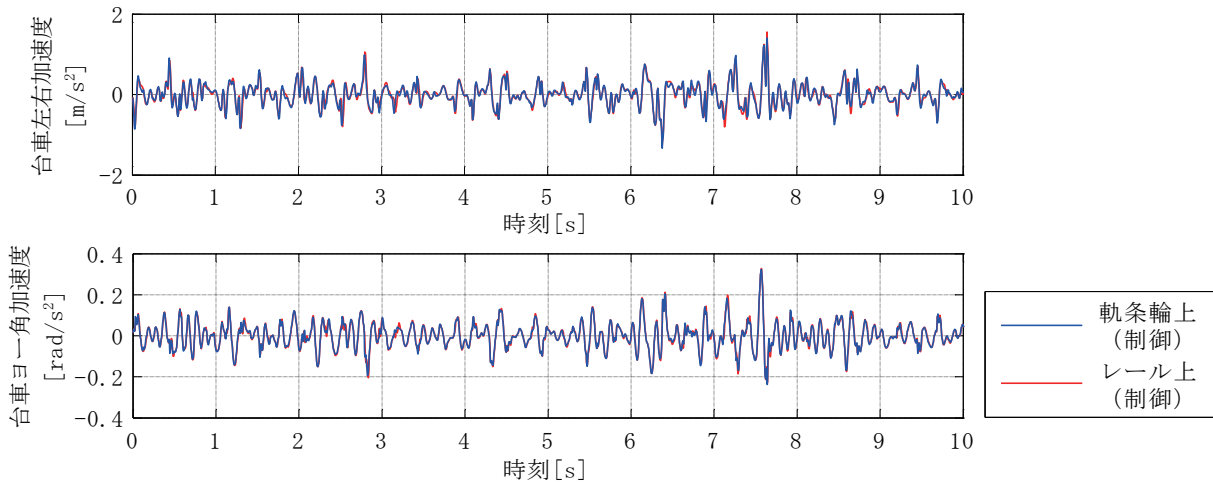


図9 補正加振時とレール走行時の台車の応答比較（計算値）

- (3) 本手法は予め車両のパラメータを同定する必要があるが、2次ばね系のパラメータの同定誤差が補正加振波形に与える影響は極めて小さい。よって2次ばね系の特性を予め詳細に知らなくても、車両試験台でそのレール上での挙動を定量的に評価することができる。
- (4) 本手法は通り不整の模擬に利用できるだけでなく、断面形状の変化する軌道の上を走行する場合の模擬等にも拡張することができる。

文献

- 1) 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
- 2) S. Iwnicki, *Handbook of railway vehicle dynamics*, Taylor & Francis, pp.457-506, 2006.
- 3) 足立雅和，鈴木貢，飯田忠史：台上走行試験における軌道不整模擬のための新しい加振方法，日本機械学会論文集C編，Vol.72, No.720, pp.2439-2446, 2006