

## ラピッドプロトタイプ台車の基礎試験

渡辺 信行\* 佐々木 君章\*\* 森下 隼人\*\*\*

## Fundamental Tests of Rapid Prototyping Bogie

Nobuyuki WATANABE Kimiaki SASAKI Hayato MORISHITA

In order to estimate a bogie performance more accurately in its planning stage, we have developed a rapid prototyping bogie, for which performance tests can be executed on the rolling stock test plant without manufacturing vital test components. In executing the tests, several actuators are installed and controlled in order to simulate desirable test dampers or rubber bushes. In this paper, we describe the outline of the rapid prototyping bogie, and the results of actuator control tests on the damper test equipment, and of fundamental tests on the rolling stock test plant.

キーワード：ラピッドプロトタイプ台車，車両設計，車両試験台

## 1. はじめに

台車の開発には試作から改良に至るまでに多くの時間とコストを必要とする。これらの過程を効率的に進めることは、開発期間の短縮やコスト低減だけではなく、評価する期間を十分確保することができることから、品質が向上することも期待できる。そこで、従来の開発手順を変え、試作することなく特性を評価するための試験台試験専用の台車としてラピッドプロトタイプ台車<sup>1)</sup>を開発した。本台車の目的を実現するためのキーコンセプトであるラピッドプロトタイプ台車とは、開発対象機器の特性を模擬する試験用のハードウェアを実機に搭載して試験することによって、試作品を製作することなく実機と組み合わせた性能評価を可能とする評価方法で、主に自動車の開発で用いられている手法<sup>2), 3)</sup>である。ラピッドプロトタイプ台車では、ばね、ダンパ等の受動部品をアクチュエータに置き換え、アクチュエータを制御することによって任意のばね、ダンパの特性を模擬する。これにより、設計途中の段階で車両試験台で台車の性能を評価することを可能とし、この試験結果をフィードバックさせることによって、①設計初期の段階において見直し可能となることによる開発期間の短縮とコスト低減、②評価試験数をより充実させることによる品質向上、が期待できる。

本稿では、ラピッドプロトタイプ台車の全体構成、ダンパ試験装置<sup>4)</sup>を用いた単体性能試験、および実際に車

両試験台で実施した性能試験結果について報告する。

## 2. ラピッドプロトタイプ台車

## 2.1 台車の基本構成

台車に装備されている様々なばね、ダンパすべてをアクチュエータに置き換えることは不可能なため、ラピッドプロトタイプ台車の使用目的により合致したばね、ダンパを対象とした。すなわち、走行安全性、走行安定性および乗心地に大きく影響するばね、ダンパ要素をシミュレーション検討により抽出した。

一例として、左右動ダンパの減衰係数と蛇行動限界速度、車体左右振動加速度の関係を図1に示す。この計算結果によると左右動ダンパの減衰係数を大きくすることにより蛇行動限界速度が高くなり、走行安定性はより良くなるが、一方で過大に設定すると台車の振動が車体に伝達しやすくなり、乗り心地が悪くなる可能性がある。このように、左右動ダンパ減衰係数は走行安定性と乗り心地両方に影響を与える要素であることから、ラピッドプロトタイプ台車で特性を可変にできる要素とした。

同様にばね・ダンパ各要素について検討した結果、①軸箱前後支持剛性、②ヨーダンパ特性、③空気ばね上下特性、④空気ばね左右特性、⑤左右動ダンパ特性について、特性を可変にする対象とした。

ラピッドプロトタイプ台車外観を図2に示す。空気ばね上下特性については、実物の空気ばねをアクチュエータに置換することが困難なため、通常の空気ばねと並列に設置したアクチュエータにより補正を行うこととした。空気ばね左右特性の補正についても、左右動ダンパの取付位置で等価的に実現可能であることから、左右動

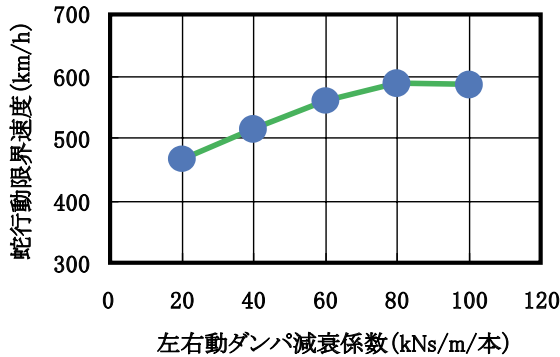
\* 車両構造技術研究部 走り装置研究室

\*\* 車両構造技術研究部

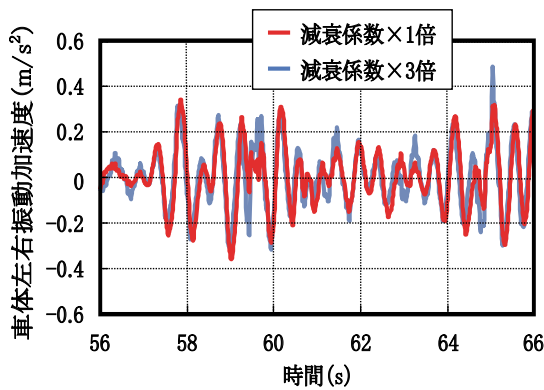
\*\*\* 車両構造技術研究部 走り装置研究室 (現 九州旅客鉄道㈱)

特集：車両技術

ダンパ特性模擬と兼用のアクチュエータとした。また、軸箱支持方式は軸箱前後支持部をアクチュエータに置き換える必要から、モノリンク方式とした。



(a) 蛇行動限界速度



(b) 左右振動加速度

図1 左右動ダンパ減衰係数と蛇行動限界速度・車体左右振動加速度関係の計算例

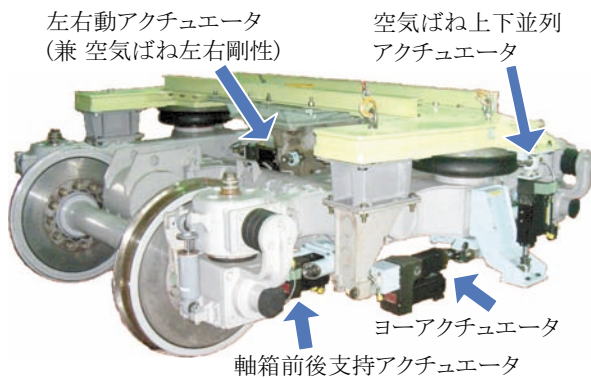


図2 ラピッドプロトタイプ台車外観

2.2 アクチュエータ

ラピッドプロトタイプ台車は9本のアクチュエータを装備することによって所要の特性を実現する。アクチュエータに油圧方式を用いれば高い推力を容易に得ることができるが、高速で回転する部品の付近に配管することは困難であるため、電動アクチュエータとした。本台車は試験台でのみ使用する台車であるため、車両限界を考

慮していない。

試験の安全上、制御フェール時における安全上の配慮が必要である。図3に軸箱前後支持アクチュエータの構成を示す。全体の寸法を短くするため、フォールドバック式のアクチュエータを使用しているが、ロッドがねじりモーメントを負担できないため、アクチュエータの両端に軸受とピン付きゴムブッシュを組み込むことによって、ねじりモーメントが負荷されない構成としている。また、制御フェール時に軸箱前後支持剛性の低下による蛇行動を防ぐため、軸箱前後支持アクチュエータと並列に緩衝ゴムを設置することにより、最低限の安定性を確保する構成とした。

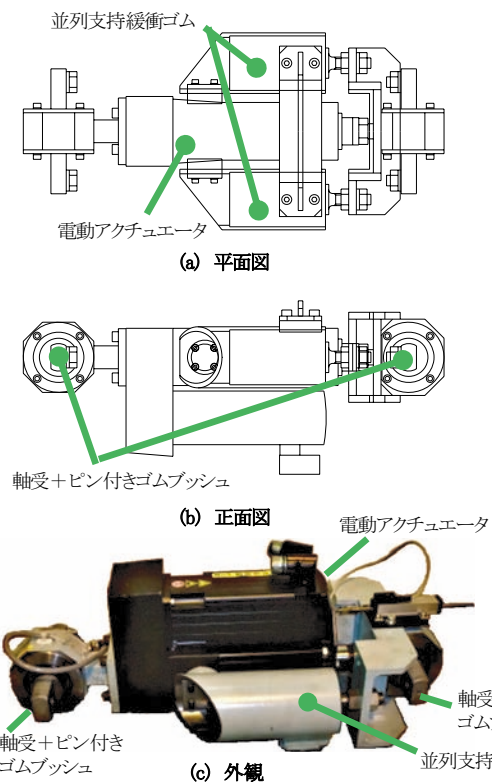


図3 軸箱前後支持アクチュエータ

2.3 制御システム

台車の基本特性をソフトウェアで可変にするため、図4のように、軸ばね等の実現したい仮想部品の参照モデルを用意し、台車が運動するときに参照モデルが計算した発生力を目標値としてアクチュエータの発生力を制御するシステムとした。このようなシステムを採用することによって、以下のようなメリットが得られる。

- ① 参照モデルをソフトウェアで構成することから、非線形性や時間遅れ特性など、任意の特性を設定することが可能となる。
- ② アクチュエータと参照モデルが一对一に対応していることから、アクチュエータ間で協調して制御する必要がなく、個々の仮想部品の発生力を正確に再現

する力制御を実現すればよい。

参照モデルでは、サーボモータに内蔵したロータリーエンコーダ信号から算出した変位信号を使用し、アクチュエータ端部に貼付した歪ゲージにより測定した発生力をフィードバックさせて推力制御する構成とした。

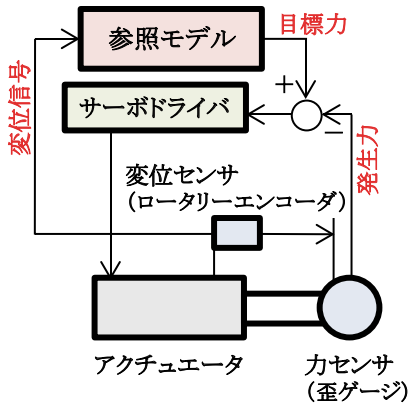


図4 アクチュエータ制御の基本構成

### 3. ダンパ試験装置を用いた単体性能試験

ラピッドプロトタイプ台車は高速に回転する車両試験台上で使用されるため、異常動作が発生すると非常に危険である。このため、アクチュエータを実際に台車に実装する前に、ダンパ試験装置を用いて精度評価と安定性を確認した。

試験は設定すべき参照モデルをあらかじめ定めた上でダンパ試験装置で加振し、①参照モデルと同じ発生力が得られること、②不安定な挙動を示さないこと、の2点を検証した。また、安全のため、車両試験台における試験は本試験で確認した制御パラメータにより実施することとした。当初の計画では、サーボモータの電流制御により所定の推力を実現する予定であったが、アクチュエータ自身の摩擦抵抗や慣性負荷により十分な精度が得られないため、目標推力と歪ゲージで検出した軸力の偏差をフィードバックしてサーボモータの回転数を制御する方式とした。

なお、空気ばね上下並列アクチュエータについては、使用しているアクチュエータの仕様や参照モデルの構成等が左右動アクチュエータと同等であるとみなし、単体性能試験を実施しなかった。

#### 3.1 軸箱前後支持アクチュエータ

軸箱前後支持装置の参照モデルはばね (K) ・ダンパ (C) 並列モデルとした。この参照モデルに基づいてアクチュエータを制御するブロック線図を図5に示す。図3に示したように、軸箱前後支持アクチュエータの両端にはピン付きゴムブッシュが取り付けられていることから、このゴムブッシュのたわみ量分の補正項がばね力の

計算に含まれている。一方で、ゴムブッシュのたわみ速度は大きくないものとして、ダンパ力ではこの補正を省略している。ダンパ試験装置において正弦波で加振した実測アクチュエータ発生力と同パターンに対する参照モデルの出力を図6に示す。アクチュエータが発生した推力は参照モデルの出力と良好に一致している。

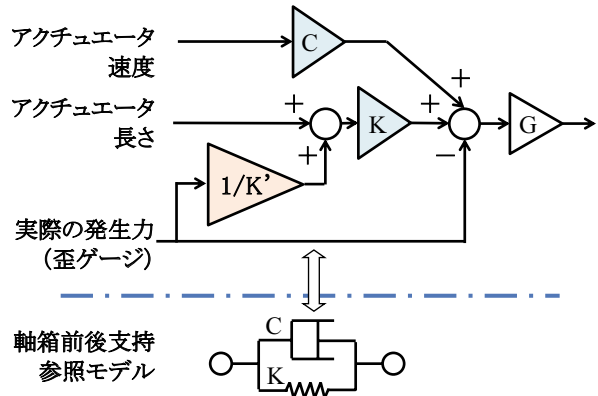


図5 軸箱前後支持アクチュエータ参照モデルと制御ブロック

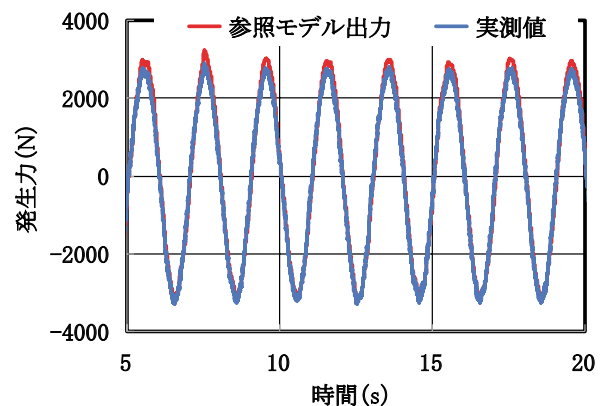


図6 軸箱前後支持アクチュエータの参照モデル出力と実測出力の比較

#### 3.2 左右動アクチュエータ

左右動アクチュエータの参照モデルは、ピン付きゴムブッシュで両端を支持した左右動ダンパとして、ばね (K) ・ダンパ (C) 直列モデルとした。この参照モデルに基づいてアクチュエータを制御するブロック線図を図7に示す。軸箱前後支持アクチュエータとは異なり、ゴムブッシュのような伸縮する部材がアクチュエータと直列にないため、アクチュエータ長さから参照モデルのばね・ダンパ接続部の中間自由度の動きを計算して目標発生力を算出する構成とした。図8にダンパ試験装置で加振した際の左右動アクチュエータの発生力と試験台試験における実物ダンパの発生力の時刻歴波形を示す。左右動アクチュエータには実物ダンパの試験台試験同定値の特性を設定した上で、ダンパ試験装置の加振パターンは試験台試験で観測した波形を使用している。全体的には

特集：車両技術

良好に再現できているものの、高い周波数で振動する成分が残っており、改良の余地があると考えられる。

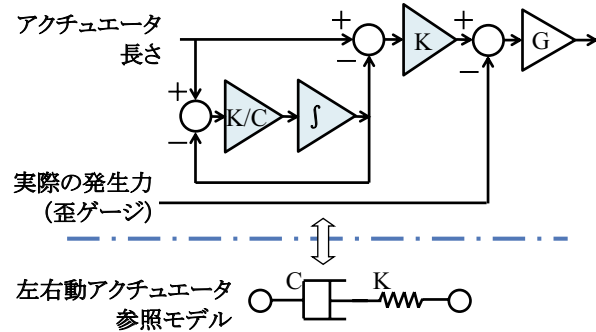


図7 左右動アクチュエータ参照モデルと制御ブロック

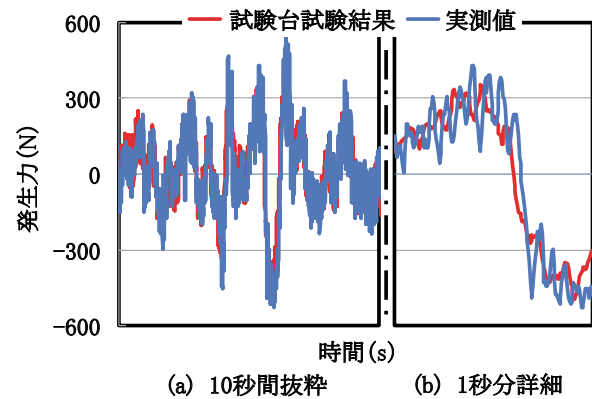


図8 試験台試験における実物ダンパの出力とダンパ試験装置における左右動アクチュエータ実測出力の比較

3.3 ヨーアクチュエータ

ヨーアクチュエータの参照モデルを図9に示す。左右動アクチュエータ同様に、ばね (K)・ダンパ (C) 直列モデルとしている。ただし、ヨーアクチュエータの端部には、ガタなくこじりを許容するためにピン付きゴムブッシュを使用していることから、ばね部分を仮想ばね ( $K_1$ ) とアクチュエータ端部のゴム ( $K_2$ ) の2つのばねに分解した上で、アクチュエータは  $K_1$  と C の直列モデルとなるように実装した (図9)。

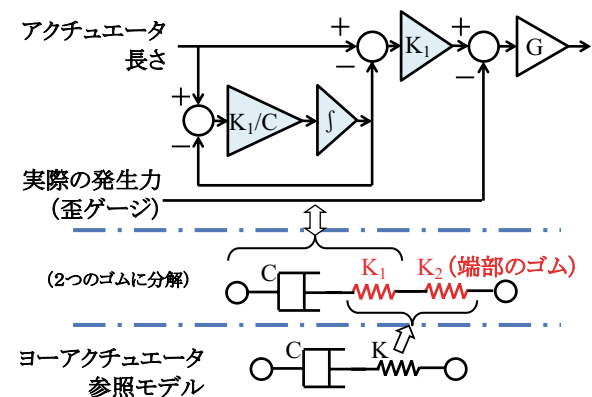


図9 ヨーアクチュエータ参照モデルと制御ブロック

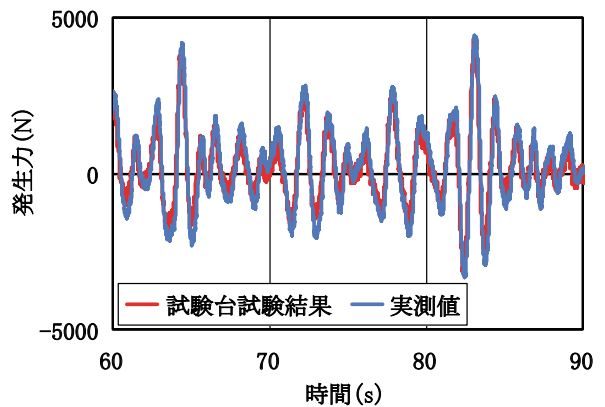


図10 試験台試験における実物ダンパの出力とダンパ試験装置におけるヨーアクチュエータ実測出力の比較

図10にダンパ試験装置で加振した際のヨーアクチュエータの発生力と試験台試験における実物ダンパの発生力の時刻歴波形を示す。左右動アクチュエータの試験同様に、ヨーアクチュエータには試験台試験同定値の特性を設定し、試験台試験で観測した波形で加振している。若干試験台試験結果よりもヨーアクチュエータの推力が大きいが、基本特性としては良好に一致している。

4. 車両試験台における性能試験

調整の終了したアクチュエータをラピッドプロトタイプ台車に実装し、車両試験台上で走行安定性、特性変更等の試験を実施した。図11に試験状況を示す。試験台試験は標準軌1両の条件で実施したが、ラピッドプロトタイプ台車は1台しかないため、車体の反対側には別の新幹線台車を装備して試験を実施した。

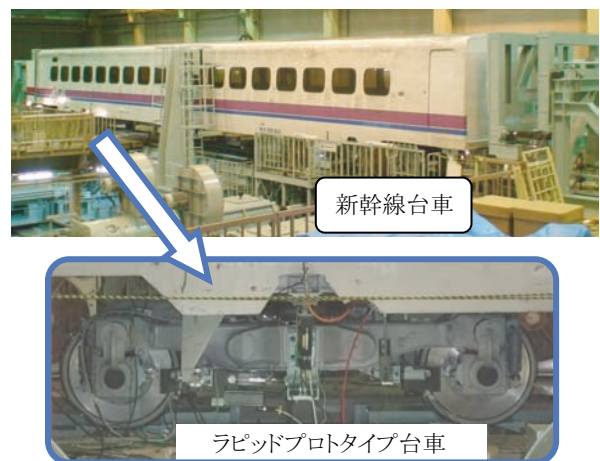
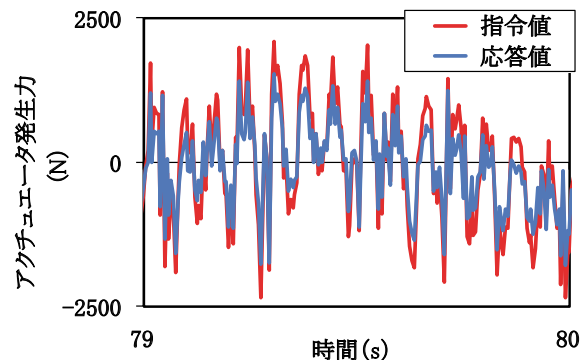


図11 試験台試験全景とラピッドプロトタイプ台車

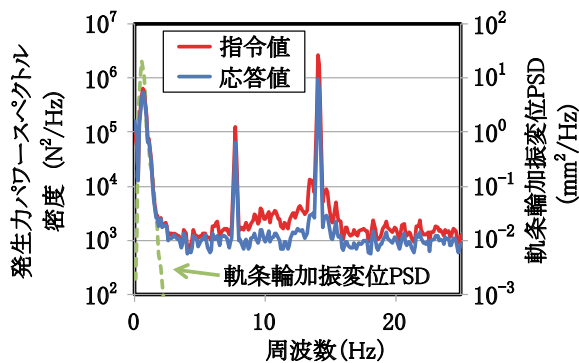
4.1 走行安定性の確認

各アクチュエータに試験台試験で同定した実物のダンパまたはモノリンクの特性を設定し、試験台上で実軌道加振試験を実施した。軸箱前後支持アクチュエータ発生力の指令値と応答値の時刻歴波形とそのパワースペクトル密度 (Power Spectral Density : PSD) を図12に示す。指令値に対して遅れることなく良好に追従できることを確認した。ただし、応答値のピークが指令値に対して低く、かつ、軌条輪変位と比較して発生力が高い周波数成分が多い。PSDでは7.7Hzと14Hz付近に高いピークがみられ、その間の周波数帯において指令値に比べて応答値のパワーが低いことがわかる。一方で3Hz以下の低周波成分では指令値と応答値のパワーに乖離は見られない。従って、軌条輪変位に含まれない高い周波数成分が指令値に含まれていることに課題があると考えられる。図6に示すように、単体の動作試験では高い周波数成分が認められなかった。このことから、1つの輪軸の両端に2つのアクチュエータが接続され、各アクチュエータが独立に推力制御することによって、2本のアクチュエータが相互に干渉している可能性が考えられる。

図13に左右動アクチュエータ発生力の指令値と応答値の時刻歴波形を示す。指令値に対して追従しているが、



(a) 時刻歴波形



(b) パワースペクトル密度

図12 軸箱前後支持アクチュエータ発生力の指令値と応答値の関係

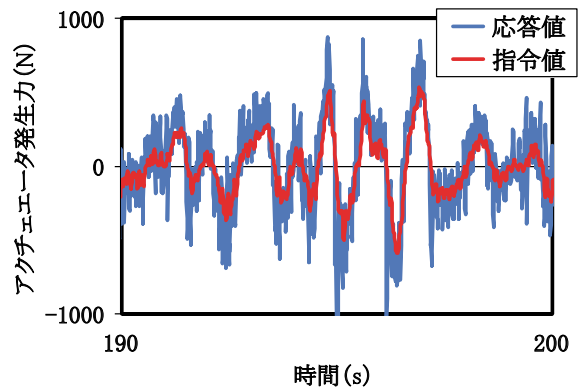


図13 左右動アクチュエータ発生力指令値と応答値の関係

ノイズが大きく、ノイズ対策が必要と考えられる。

ただし、これらの試験を通じ、蛇行動の発生はみられなかった。

4.2 特性変更試験

仮想部品特性の変更により車両の運動特性が変化する例として、空気ばね上下並列アクチュエータの特性を変えた試験を実施した。試験Aは参照モデルとして減衰係数0のダンパ、すなわち、通常の空気ばねの減衰による試験、試験Bは減衰係数200kNs/mのダンパを空気ばねと並列に設置することを模擬した試験である。実軌道加振時の車体の応答を図14～16に示す。試験A、Bで車体左右変位とヨー角はほぼ同じ応答を示している。それに対して、車体ロール角は試験Aと比較して試験Bの応答が非常に小さい。試験Bにおいて、アクチュエータは空気ばねと並列に上下方向に強いダンパとして作用したため、車体左右動に伴って発生するロール動が抑制された効果と考えられる。このことはソフトウェアで車両の運動特性を変化させられることを示している。

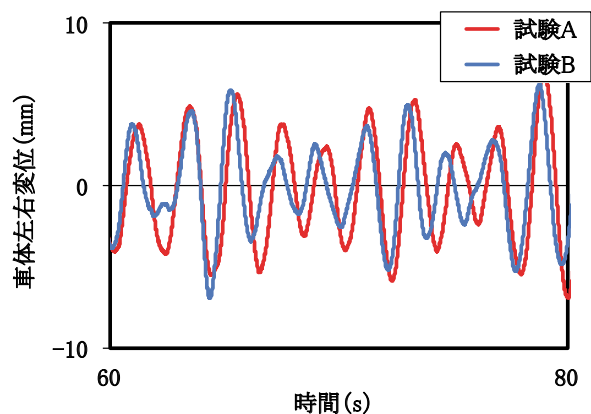


図14 特性変更による車体左右変位の変化

特集：車両技術

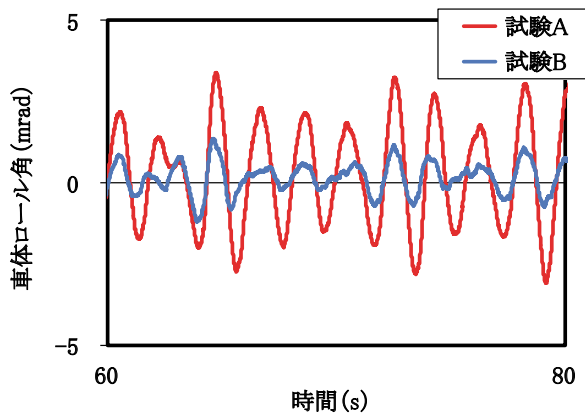


図 15 特性変更による車体ロール角の変化

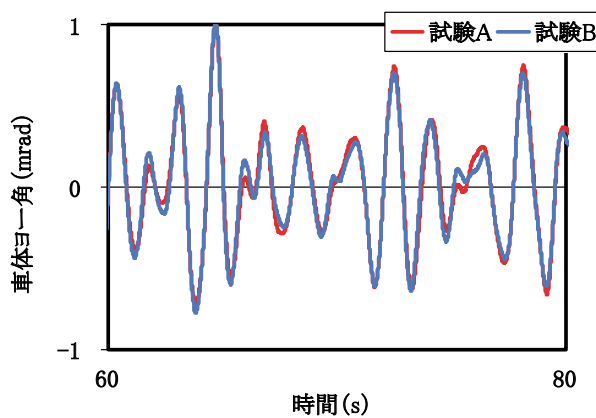


図 16 特性変更による車体ヨー角の変化

5. まとめ

台車の開発効率と品質の向上を目的として、要素部品を試作することなく特性を評価するための車両試験台専用のラピッドプロトタイプ台車を開発した。この台車は、軸箱支持方式をモノリンク方式として、軸箱前後支持4本、左右動1本、空気ばね上下並列2本、ヨー2本、合計9本のアクチュエータを装備している。各アクチュエータによって台車各部のばね・ダンパの発生力を模擬し、ソフトウェアによって模擬する運動特性を変更可能

な構成としている。実現したい仮想部品の発生力を算出する参照モデルとアクチュエータを一对一で対応させ、この参照モデルに基づいてアクチュエータを推力制御することによって、アクチュエータ間で協調させることなく、任意の特性を模擬することができる。

試験台試験実施に先立ち、ダンパ試験装置で評価試験を行って、車両試験台における試験に耐える精度と安定性を有することを検証した。その結果、若干残る高周波の振動成分等、改善の必要性もあるが、基本的に精度よく動作することを確認した。

単体での評価試験後、アクチュエータおよび制御システムをラピッドプロトタイプ台車に実装し、車両試験台で走行試験を行った。その結果、① 車両試験台上で安定な走行状態を保てること、② 台車構成要素の参照モデルの設定パラメータを変えることで、車両の運動特性を変化させることができること、を確認した。以上より、ラピッドプロトタイプ台車としての基本機能が実現されていることを確認した。

今後は試験装置としての精度向上を図り、車両開発のツールとして完成度を高めていく予定である。

なお、本研究開発の一部は、国土交通省からの国庫補助金の受けて実施した。

文献

- 1) 森下隼人, 佐々木君章, 下村隆行, 渡辺信行: 可変特性試験台車の開発, J-RAIL2010講演論文集, pp.165-168, 2010
- 2) 大塚郁, 大井正也: 車載ソフトウェア開発へのモデルベース開発適用, 自動車技術, Vol.60, No.6, pp.80-85, 2006
- 3) 石山拓二, 山寄雅和, 内田登, 稲垣和久: ディーゼルエンジン開発におけるシミュレーション技術, 自動車技術, Vol.65, No.1, pp.33-39, 2011
- 4) 渡辺信行, 飯田忠史, 梅原康宏, 朝比奈峰之, 小金井玲子, 山長雄亮: 実走行条件に対応した車両用ダンパ試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.7, pp.5-10, 2007