

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 造る前に台車を試験する

鉄道車両の特性には、曲線通過性能と高速安定性のように、両立するのが難しいものがあるため、車両の走行線区や列車の特徴に応じた適切な設計が台車開発には必要です。台車開発は試作、評価、改良を繰り返す必要があるため、非常にコストがかかります。そこで、台車部品をアクチュエーターに置き換えて、プログラムで台車部品を模擬することによって、これらの作業を効率化するラピッドプロトタイプ台車を開発しました。

## はじめに

何かものを作るというプロセスを図示するものとしてVモデルがあります(図1)。Vモデルでは、左辺を上から下ることによって、比較的抽象的な要求仕様を分解して設計を詳細化することを表わします。また、右辺を下から上ることによって、要素部品のテストから始まって最終的な組み合わせ試験までの過程を表わします。すなわち、Vモデルでは縦方向に抽象度(詳細さ)のレベルを、横方向に時間の流れを表現しています。

このVモデルを新型車両の開発にあてはめると、Vモデルで底の点で表現される「試作」過程にかなりの時間を割く必要があります。また、できあがった部品の要素試験から、現車試験のような性能評価試験に至るまで、Vモデルの右辺を順調に上ることができればよいのですが、万が一仕様を満たさなかった場合には、また左辺に戻って再検討する必要があります。したがって、Vモデルの左辺を下る間に精度の高い性能予測ができれば、開発効率を高めることができます。

しかし、Vモデルの左辺の段階では

実物がないため、通常はシミュレーションによって性能を予測しています。これを、実物を用いることによって評価できるようになれば、より一層現象を理解できるようになります。

実物を作る前に台車の試験を行うための鍵となる技術が「ラピッドプロトタイピング」と呼ばれる手法です。

## ラピッドプロトタイピング

インターネットでラピッドプロトタイピングと検索すると、CADデータから迅速(ラピッド)に試作品(プロトタイプ)を作るための3次元造形手法に関するページがたくさん出てきます。しかし、ここでのラピッドプロトタイピングとは、プログラムによって設計している部品と同じ挙動をするように制御された汎用の試験機材を実機に組み込むことによって、試作せずに実物の模擬試験を行う手法を指します。似たような手法としてHILS (Hardware In the Loop Simulation)<sup>1)</sup>があります。どちらもリアルタイムにシミュレーションを実行し、装置を制御する点では同じです。HILSでは開発品以外の試験環境をモデル化します。このモデ



**渡辺 信行**  
Nobuyuki Watanabe  
前 車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
主任研究員  
【専門分野】 走り装置、  
車両運動



**佐々木 君章**  
Kimiaki Sasaki  
車両構造技術研究部  
部長  
【専門分野】 車両運動制御



**小金井 玲子**  
Reiko Koganei  
車両構造技術研究部  
車両振動研究室  
副主任研究員  
【専門分野】 車両運動特性

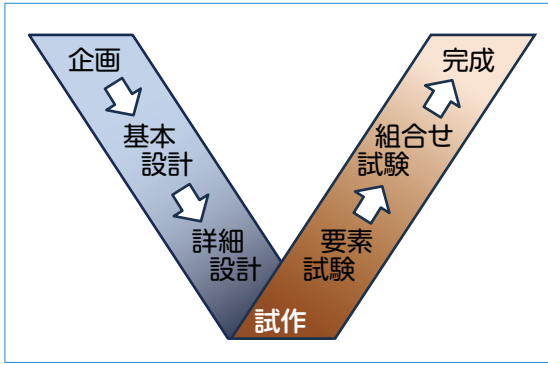


図1 Vモデル

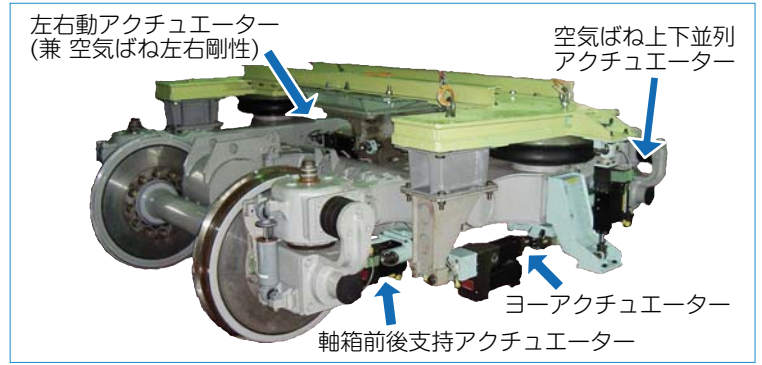


図2 ラピッドプロトタイプ台車

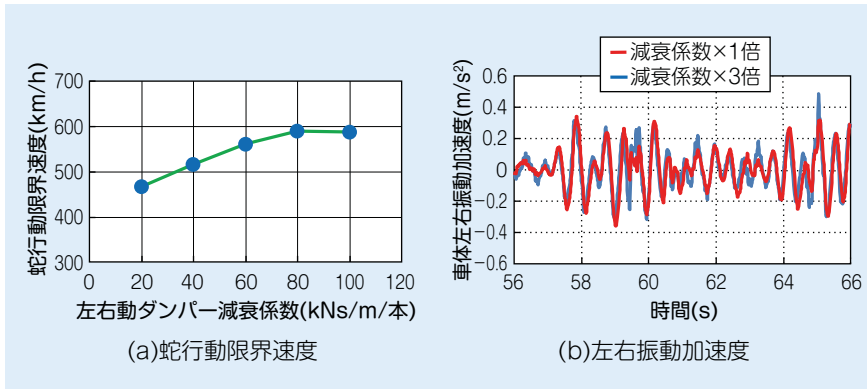


図3 左右動ダンパー減衰係数と車両の運動特性との関係(計算例)

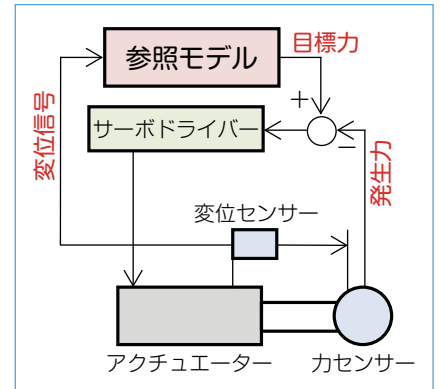


図4 アクチュエーター制御の基本構成

ルをリアルタイムに実行し、ベンチ試験装置で模擬することによって、仮想的な試験環境下における開発品の性能を評価することができます。これに対し、ラピッドプロトタイプングでは開発予定品をモデル化し、試験機材で模擬します。この試験機材を実環境に組み込むことによって開発予定品の性能予測を行います。したがって、HILSとは逆の使い方になります。

鉄道総研では、台車各部のばね・ダンパーをコンピューターで制御する電動アクチュエーターに置き換えたラピッドプロトタイプ台車を開発しました(図2)<sup>2)</sup>。これにより様々なばね・ダンパーを試作することなく、車両試験台で台車の性能試験を実施することができるようになります。

### 対象とする要素

ラピッドプロトタイプ台車では、走行安全性、走行安定性と乗り心地に大

きく影響を及ぼすばね・ダンパー要素を対象にアクチュエーターによって特性を可変とるようにしました。

図3に左右動ダンパー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についてシミュレーション検討した結果を示します。左右動ダンパーの減衰係数を大きくすることによって蛇行動限界速度が高くなり、走行安定性は高まりますが、一方で過大に設定することによって台車の振動が車体に伝わりやすくなり、乗り心地が悪化する要因となる可能性があるため、両方を満足する適正な値を選ぶ必要があります。

以上のような検討をばね・ダンパーを対象に行った結果、①軸箱前後支持剛性、②ヨーダンパー特性、③空気ばね上下特性、④空気ばね左右特性、⑤左右動ダンパー特性について、アクチュエーターによって特性を可変にできるようにしました。

### 部品を模擬する方法

1台のラピッドプロトタイプ台車には、9本のアクチュエーターが装備されています。ラピッドプロトタイプ台車の場合、個々のアクチュエーターには模擬対象の台車部品が1対1に対応しています。そこで、図4のように、実現したい仮想部品単体のモデルを用意して、台車が動いたときの仮想部品の発生力を計算して、これに合わせてアクチュエーターを制御する構成としています。したがって、9本のアクチュエーターは完全に独立して動作しています。これによって制御システムをシンプルに構成することができます。

具体的な例として、ヨーアクチュエーターの制御について説明します。このアクチュエーターは台車と車体の間に取り付けられたヨーダンパーを模擬するものです。ヨーダンパーの両端には複雑な動きを許容するためのゴムが取り付けられていますので、近似的には

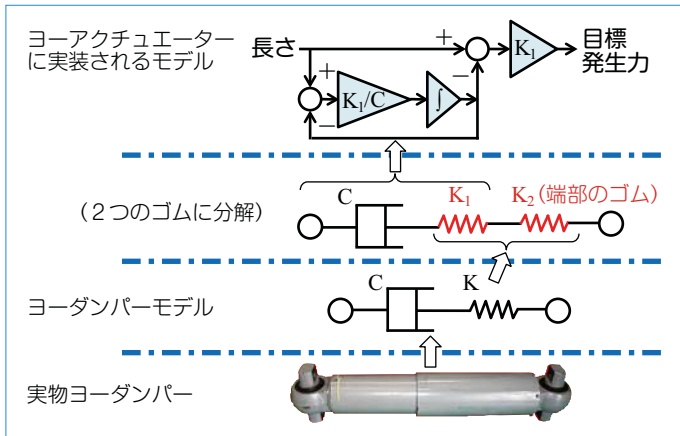


図5 ユーアクチュエーター参照モデル

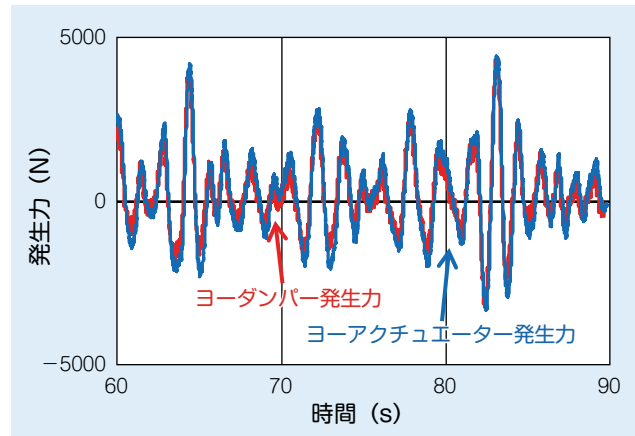


図6 ユーアクチュエーター単体加振試験結果

ばね・ダンパー直列モデルで表わすことができます。一方で、アクチュエーターについてもアクチュエーターを保護するために端部にゴムが取り付けられていますので、それを考慮すると、図5のような参照モデルが得られます。

ヨーアクチュエーター単体の試験結果を図6に示します。これは、ダンパー試験装置にアクチュエーターを取り付けて、加振試験を行った際のアクチュエーター発生力を表わしたものです。また、比較のために、車両試験台で実際のヨーダンパーが伸縮した際のダンパー発生力も示します。車両試験台でのダンパー発生力よりアクチュエーター発生力が若干大きくなっていますが、アクチュエーターによりヨーダンパーを模擬できていることが確認できます。

### 車両試験台試験

以上のように調整した各アクチュエーターをラピッドプロトタイプ台車に実装して、車両試験台で走行安定性と特性変更の確認試験を実施しました。図7にそのときの試験風景を示します。なお、1車両での試験でしたが、ラピッドプロトタイプ台車は1台車しかありませんので、もう一方には通常の台車を装備して行いました。

### 走行安定性の確認

アクチュエーターの代わりに通常の

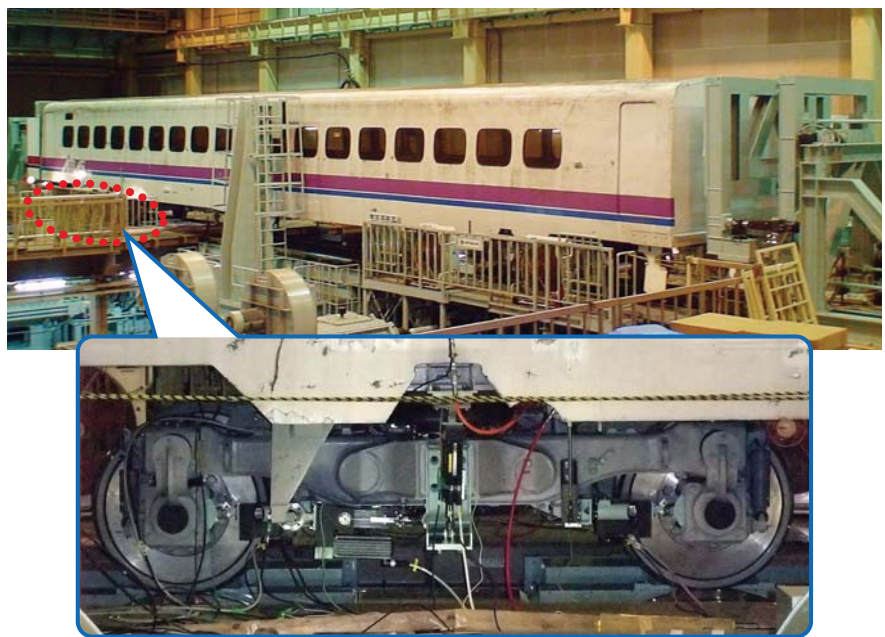


図7 試験台試験全景とラピッドプロトタイプ台車

ばね・ダンパーを装備した条件で試験して抽出したパラメーターをアクチュエーターで使用するモデルに代入して、試験を実施しました。その結果、制御が不安定になって発振状態になることなく、ラピッドプロトタイプ台車が安定して走行できることを確認しました。一方で、さらに改善が必要なこともわかってきました。図8に軸箱前後支持アクチュエーター発生力の時刻歴波形とパワースペクトル密度 (Power Spectral Density : PSD) を示します。時刻歴波形を見ると指令値に対して遅れることなく良好に追従できているこ

とが確認できますが、指令に比べて応答が小さいこと、また、高い周波数の振動があることがわかります。PSDで見ると、この振動は台車を加振するために与えた軌条輪変位の周波数成分には含まれていないものです。逆に、軌条輪変位のPSDが大きい周波数成分については指令と応答の大きさがほぼ等しいことがわかります。

ラピッドプロトタイプ台車では、2本の軸箱前後支持アクチュエーターが1本の輪軸の両端に接続し、個々のアクチュエーターが独立して制御する構成となっています。このことから、2

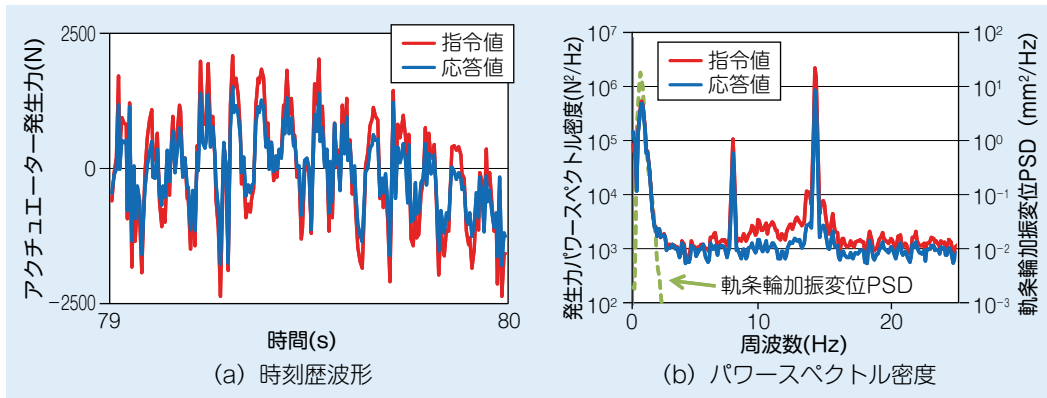


図8 軸箱前後支持アクチュエーター発生力の指令値と応答値の関係

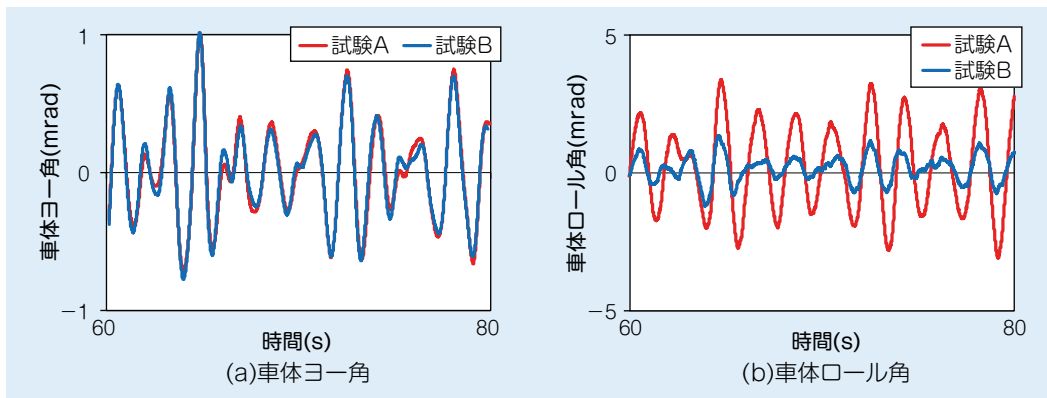


図9 空気ばね上下並列アクチュエーターの特性変更による車体応答の変化

本のアクチュエーターが1本の輪軸を介して相互に干渉することによって、高い周波数の振動が発生している可能性があることがわかりました。

#### 特性変更試験

図9は空気ばね上下並列アクチュエーターの特性を変えて加振試験を実施した際の車体の動きを示したものです。試験Aではアクチュエーターを減衰係数0のダンパーとした条件、試験Bでは非常に強い減衰特性をアクチュエーターに持たせた条件となっています。

2つの試験で車体ヨー角については顕著な差がありませんが、ロール角については試験Bの方が試験Aに比べて非常に小さくなっています。車体の左右方向の動きに伴って発生するロール運動が、試験Bでは大きく抑制されていることがわかります。このことは、ラピッドプロトタイプ台車に実装したソフトウェアの特性によって車両の運

動特性を変化させられることを示しています。

#### おわりに

実物を造る前に台車の試験を行うためのラピッドプロトタイプ台車を開発しました。電動アクチュエーターでばね・ダンパー部品を模擬することによって、試作工程を省略して評価試験を実施することが可能になります。

性能試験を実施したところ、複数のアクチュエーターが干渉するといった改善点はみつかりましたが、安定して動作し、また、パラメーター変更によって車両の運動特性を変化させられることを確認しました。

取付条件さえ適合すれば、ラピッドプロトタイプ台車で使用している一部のアクチュエーターのみを既存の台車に移植して使用することもできます。また、アクチュエーターに実装される

モデルは通常のはね・ダンパーだけではなく、プログラムで表現できるものであればアクティブなものを実装して試験をすることも可能です。こういった点で、ラピッドプロトタイプ手法は車両開発の新しいツールとして幅広く活用できると考えられます。

今後はさらに精度向上を図り、車両開発のツールとして完成度を高めていく予定です。

なお、本研究は国土交通省からの補助金を受けて実施しました。RRR

#### 文献

- 1) 佐々木君章：ハイブリッドシミュレーターにより車両運動を解析する，RRR, Vol.67, No.6, pp.6-9, 2010
- 2) 渡辺信行, 佐々木君章, 森下隼人：ラピッドプロトタイプ台車の基礎試験，鉄道総研報告, Vol.26, No.3, pp.5-10, 2012