

可変特性試験台車の開発

森下 隼人* 佐々木 君章 下村 隆行 渡辺 信行
 鉄道総合技術研究所

Development of a Variable Characteristics Test Truck

Hayato MORISHITA*, Kimiaki SASAKI, Takayuki SHIMOMURA, Nobuyuki WATANABE
 (Railway Technical Research Institute)

With the dual aims of the development efficiency of railway truck and advance in quality, we have aimed to create a feedback system for the design by simulating truck characteristic in designing from the planning stage.

We have developed a Variable Characteristics Test Truck for the bench tests that was able to create the generative force with nine actuators and change the characteristics with software about vital component such as axle box suspension and various dampers. In this paper, we introduce its system configuration and results of the bench tests, and show its availability.

キーワード：台車，可変特性，ばね/ダンパ，アクチュエータ，試験台試験
 (Keywords : Truck, Variable characteristics, Spring/Damper, Actuator, Bench test)

1. はじめに

鉄道車両の台車は空気ばねやヨーダンパのようなばね・ダンパ系により揺れや振動を低減させており，これらは安全・快適輸送を支える鉄道車両の大切な要素である．一般的に新しい台車を開発するにあたり注意を払うことのひとつとしてばね・ダンパ系の基本パラメータを走行環境に見合ったものに対応させていくことがあげられる．しかし従来の台車開発では試作した台車の走行試験結果から目標とする結果が得られなかった場合，改良して再度評価を行うサイクルで開発を行っており，そのチューニングには多くの時間とコストを要している．

そこで台車開発における期間短縮・コスト削減という観点に着目し，ラピッドプロトタイピングの概念⁽¹⁾を導入して試作の前段階で運動特性評価を行うことで走行環境に見合った基本パラメータを絞り，台車設計にフィードバックすることを目的とする「可変特性試験台車」の開発を行った．

本台車は鉄道総研が所有する新幹線台車を改造してばね・ダンパの取付け部分に電動式アクチュエータを組み込み，これらをソフトウェアによって制御することで軸ばね，ヨーダンパ，左右動ダンパ，空気ばねの特性を自在に変えることができる試験台専用の台車である．アクチュエータの制御パラメータを変えると様々なばね・ダンパを模擬することができるためそれらを交換する必要や仮設変更を行う手間がなくなり，従来よりも効率良くばね・ダンパ系の基本パラメータの策定が可能となる．

本論文では可変特性試験台車の基本構成，制御システムの基本構成について説明した上で，アクチュエータ単体の精度評価・安全性確認，そして車両試験台における性能試験の結果について報告する．

2. 可変特性試験台車

〈2-1〉 台車の基本構成

可変特性試験台車の製作にあたり，実際のばね・ダンパをアクチュエータに置き換える箇所を選定した．選定にあたって，走行安全性・安定性，乗り心地に影響するばね・ダンパの基本パラメータを予め車両運動シミュレーションにより検討を行った．

一例として左右動ダンパの減衰係数と蛇行動限界速度（走行安定性）・車体左右振動加速度（乗り心地）の関係を求めた計算例を図1に示す．

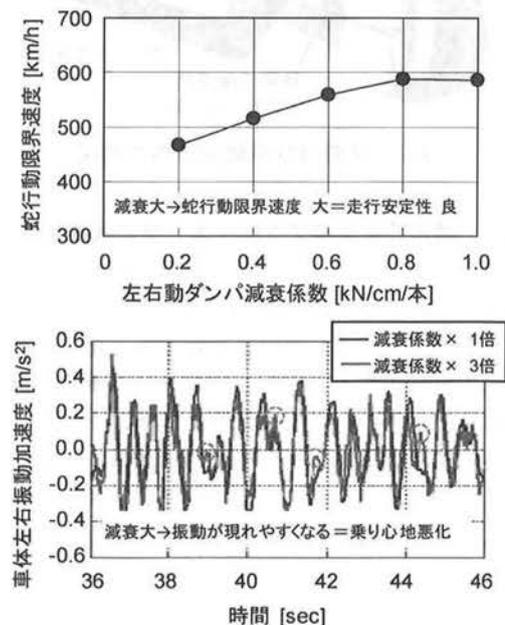


図1 左右動ダンパ減衰係数と蛇行動限界速度
 車体左右振動加速度関係の計算例

計算結果から左右動ダンパ減衰係数の増加により蛇行動限界速度が高くなり走行安定性は良くなるが、一方で大きく設定すると台車の振動が車体に現れやすくなり、乗り心地が悪くなる場合がある。したがって、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り制御の対象とする。

同様に各ばね・ダンパ系要素について検討した結果、①軸箱前後支持剛性、②ヨーダンパ減衰係数、③空気ばね上下減衰係数、④空気ばね左右剛性、⑤左右動ダンパ減衰係数が走行安全性・安定性、乗り心地への寄与度が大きいいため、最終的にこれらを可変特性試験台車における制御の対象とした。

実際に台車に取り付けたアクチュエータは①を模擬する軸箱前後支持アクチュエータ4本、②を模擬するヨーアクチュエータ2本、③を模擬する空気ばね上下並列アクチュエータ2本、④⑤を模擬する左右動アクチュエータ1本の4箇所、合計9本である。ここで空気ばね左右剛性についてはその設置高さが左右動ダンパと同じであり、左右剛性は等価とみなすことができるため、専用のアクチュエータを設けずに左右動アクチュエータの制御モデルに空気ばね左右剛性モデルを組み込むことによって実現することとした。図2に可変特性試験台車の概略図を示す。

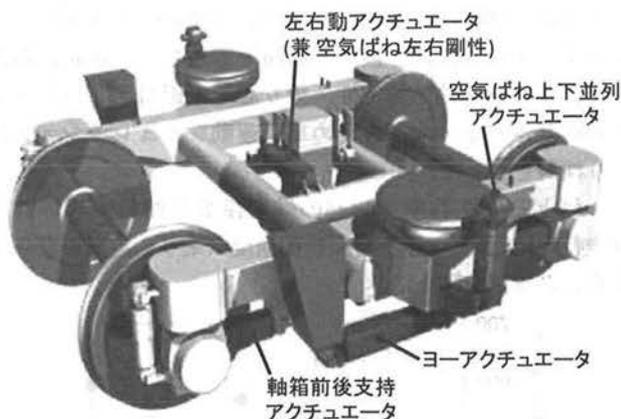


図2 可変特性試験台車の概略図

〈2.2〉 軸箱前後支持アクチュエータの構成検討

軸箱前後支持アクチュエータは台車の運動性能に大きな影響を持つだけでなく、試験の安全性にも密接に関わってくる。制御がフェールした際に軸箱前後支持アクチュエータの復元力が減少すると、激しいフランジ衝突を伴う蛇行動が発生し、台車のみならず試験台試験においてレールに相当する軌条輪の損傷、最悪の場合は脱線する可能性がある。そこで軸箱前後支持アクチュエータと並列にゴムを配置することによって、異常時にアクチュエータがフェールした場合でも安全を保つ必要最小限の復元力が得られるような構造を検討した。図3に軸箱前後支持アクチュエータの構成を示す。

並列に配置するゴムの剛性を検討するために、制御フェール時を想定し軸箱前後支持剛性をパラメータとする蛇行

動限界速度をシミュレーションにより求めた。シミュレーションでは車両試験台で蛇行動限界速度を測定するのと同様にヨーダンパ非装備の条件で行った。結果を図4に示す。評価基準を試験台試験で通常行う蛇行動試験(ヨーダンパ非装備)における蛇行動限界速度200 km/h以上とすると、干渉ゴムの剛性はおよそ5 kN/mm/軸程度必要と見積もられた。これに対し若干余裕を見て6 kN/mm/軸を制御フェール時の軸箱前後支持剛性の目標値とし、同等の剛性を有するゴムを使用した。

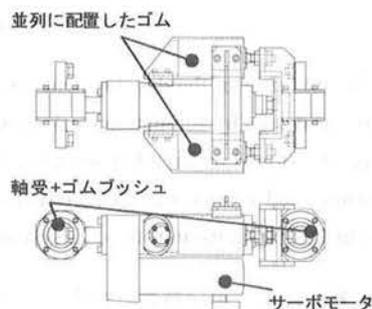


図3 軸箱前後支持アクチュエータの構成

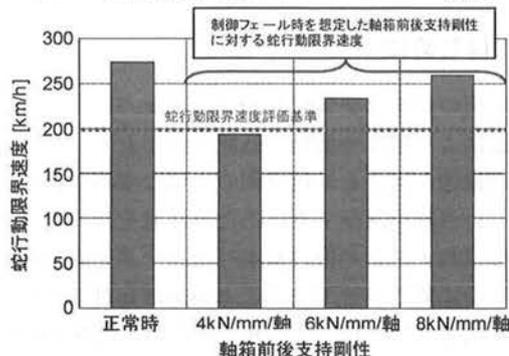


図4 制御フェール時を想定した軸箱前後支持剛性と蛇行動限界速度の関係

〈2.3〉 アクチュエータ発生力の制御モデル

制御の基本構成について述べる。本台車はばね・ダンパの基本パラメータをソフトウェアで可変にするため、ばね・ダンパを置き換える4箇所、合計9本のアクチュエータに対してそれぞればね・ダンパモデルを模擬する制御用の参照モデルを用意する。台車の運動による各アクチュエータの変位信号を入力に参照モデルで計算した出力を目標力とし、アクチュエータのロッドに取り付けた歪ゲージから検出した実際の軸力(発生力)の偏差をフィードバックし、補正することでアクチュエータの発生力を制御するシステムとした。

一例としてヨーアクチュエータ発生力の制御モデルを図5に示す。実際のヨーダンパは減衰要素Cと直列にピン付ゴムブッシュが使用され、ばね要素Kを持っているため参照モデルでは両方の特性を模擬する必要がある。ここでアクチュエータの取り付け部にも実物のゴムブッシュがあり、その剛性を K_{end} とすると参照モデルで実物のヨーダンパを模擬するためには仮想ゴム K_I を直列に挿入し模擬しようと

するヨーダンパの特性を合わせる必要がある。この考えをもとに参照モデルを構築し、アクチュエータに取り付けた変位センサの入力から仮想ゴム K1 部分の変位をもとめ、ヨーダンパモデルの目標力(発生力)を計算する。そしてアクチュエータのロッド部に取り付けた歪ゲージから得られる実際の軸力(発生力)とを比較し、偏差に対するゲイン G を掛けることによってアクチュエータを伸縮させて目標力と発生力を合わせるよう補正制御を行っている。

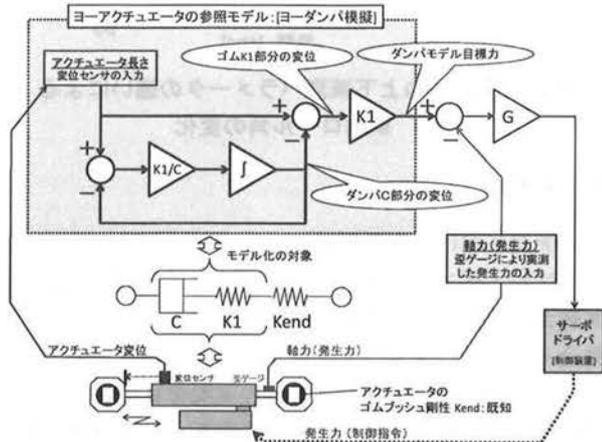


図 5 ヨーアクチュエータ発生力の制御モデル

このシステムの基本構成をもとに制御装置の製作を行った。図 6 にブロック図を示す。本システムでは制御用コンピュータに参照モデルを持たせ、制御を行う 9 本のアクチュエータそれぞれに対応する電源回路、指令回路を設けている。図 7 に制御装置の外観を示す。

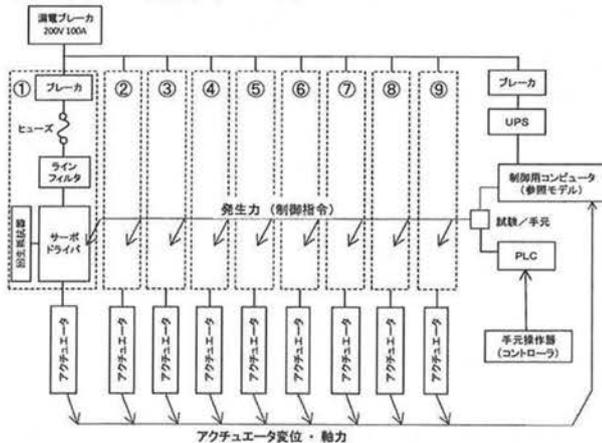


図 6 制御装置のブロック図

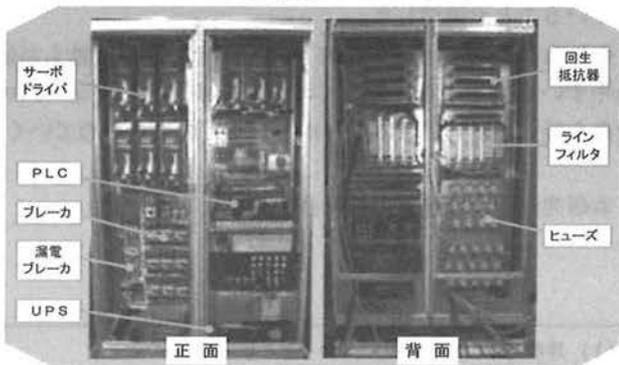


図 7 制御装置の外観

3. アクチュエータ単体の精度評価・安全性確認

可変特性試験台車は高速回転する車両試験台上で使用するため、異常動作が発生すると非常に危険である。そのため台車へのアクチュエータ実装の前に、図 8 に示す鉄道総研所有のダンパ試験装置を用いて、アクチュエータ単体の精度評価と安定性の確認を目的とした試験を実施した。

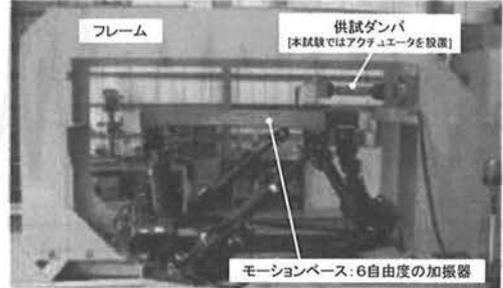


図 8 ダンパ試験装置

試験では予め参照モデルを設定した上で、ダンパ試験装置で加振し、①実物ダンパ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。

一例としてヨーアクチュエータの加振試験結果を図 9 に示す。比較対象データは試験台試験でのヨーダンパ発生力(実測値)であり、加振データは同時に測定した実物のヨーダンパのストロークとした。参照モデルによるヨーアクチュエータの発生力は実測値とほぼ一致しており、良好な結果が得られていることを確認した。

また本精度評価においてアクチュエータは不安定な挙動を示さないことを確認した。

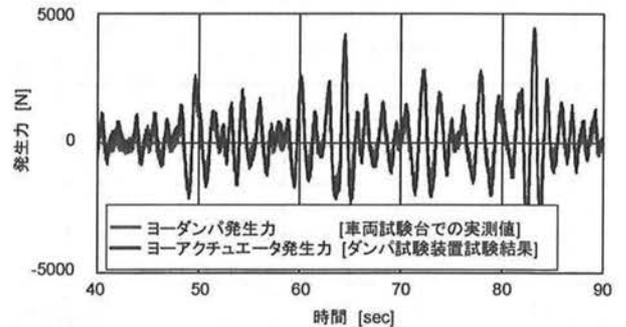


図 9 ヨーダンパとヨーアクチュエータの発生力の比較

4 車両試験台における性能試験

アクチュエータを可変特性試験台車に実装し、車両試験台上でアクチュエータの応答と走行安定性の確認、参照モデルのパラメータ変更等の性能試験を実施した。図 10 に実装した様子を示す。

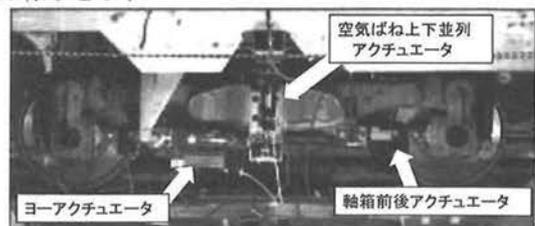


図 10 アクチュエータ実装の写真

まず車両試験台におけるアクチュエータの応答の確認を行った。一例として実軌道加振における軸箱支持アクチュエータのアクチュエータ軸力(発生力)と参照モデルの出力(目標力)を図 11 に示す。

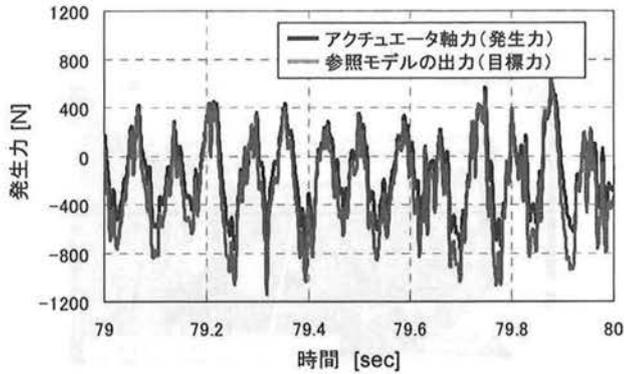


図 11 軸箱支持アクチュエータ軸力(発生力)と参照モデルの出力(目標力)の比較

図より、参照モデルの出力(目標力)とアクチュエータの軸力(発生力)は良好に追従していることが確認できる。また試験中、急に蛇行動が発生するなどの異常動作はなく走行安定性上、問題がないことを確認した。

次にソフトウェア上でアクチュエータの参照モデルのパラメータを変えることにより車両の運動特性の変化を確認する性能試験を行った。試験条件の一例を表 1 に示す。

表 1 性能試験 試験条件表(一例)

No	アクチュエータ参照モデル	設定パラメータ		試験番号	
				Roll 1	Roll 2
①	軸箱前後 Actuator 1位	K_{wx}	kN/mm	8	8
		C_{wx}	N/mm/s	8	8
②	軸箱前後 Actuator 2位	K_{wx}	kN/mm	8	8
		C_{wx}	N/mm/s	8	8
③	軸箱前後 Actuator 3位	K_{wx}	kN/mm	8	8
		C_{wx}	N/mm/s	8	8
④	軸箱前後 Actuator 4位	K_{wx}	kN/mm	8	8
		C_{wx}	N/mm/s	8	8
⑤	空気ばね上下 Actuator 1位	K_{2z}	kN/mm	0	0
		C_{2z}	N/mm/s	0	200
⑥	空気ばね上下 Actuator 2位	K_{3z}	kN/mm	0	0
		C_{3z}	N/mm/s	0	200
⑦	左右動 Actuator	K_d	kN/mm	3.2	3.2
		C_d	N/mm/s	14	14
⑧	ヨー Actuator 1位	K_0	kN/mm	8.7	8.7
		C_0	kN/mm/s	2.2	2.2
⑨	ヨー Actuator 2位	K_1	kN/mm	8.7	8.7
		C_1	kN/mm/s	2.2	2.2

表 1 に示す通り、空気ばね上下アクチュエータ 1・2 位における参照モデルの減衰係数パラメータ C_{2z} 、 C_{3z} を変化させ、ロール応答の比較を行った。結果を図 12 に示す。参照モデルの減衰係数パラメータを大きくすることで車体ロールの振幅が小さくなっており、ソフトウェアによって運動特性を変えられる可変特性試験台車の基本機能を満たしていることを確認した。

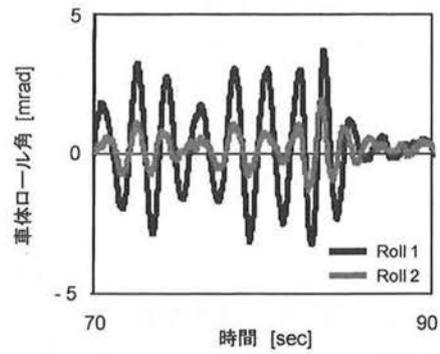


図 12 空気ばね上下減衰パラメータの違いによる車体ロール角の変化

5 まとめ

台車開発における期間短縮・コスト削減という観点に着目し、ばね・ダンパ系要素のチューニングを試作の前段階で試験台試験によって運動特性評価を行うことで走行環境に見合った基本パラメータを絞り、設計情報として台車設計にフィードバックするシステムの実現を目指した。このため軸箱支持装置や各種ダンパ等の重要な台車の構成要素の中から車両運動シミュレーションにより選定した 4 箇所、合計 9 本のアクチュエータで発生力を模擬し、ソフトウェアで特性を変えることができる車両試験台専用の「可変特性試験台車」を開発した。またこれらを制御するための制御装置の製作も行った。

台車構成要素の特性を模擬するために、各アクチュエータに対してシミュレーションで使用する参照モデルを用意し、参照モデルの出力(目標力)とアクチュエータロッド部の実際の軸力(発生力)の偏差からアクチュエータを制御する方法を考案した。

アクチュエータを台車に実装する前にダンパ試験装置でアクチュエータ単体の精度評価と安全性を確認する試験を行い、良好な精度と安定性を有することを確認した。

アクチュエータを台車に実装し、車両試験台で性能試験を行った。その結果、以下 2 点を確認した。

- (1) 車両試験台上で安定な走行状態を保てること
- (2) アクチュエータ参照モデルの設定パラメータの

変更により車両の運動特性を変化させられること

以上より、可変特性試験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精度を向上させ、さらに誰もが使いやすいシステムを目指してユーザーインターフェースの改良を行い、車両開発のツールとして完成度を高めていく。

本研究は国土交通省の補助金を受けて実施した。

文 献

- (1) 岸浪 建史:「ラビッド・プロトタイプング技術の展望」日本機械学会誌, Vol.100, No.941, pp.34-37 (1997)