

ラピッドプロトタイプ台車のアクチュエータ 制御性能向上のための DSS 手法の適用

渡辺 信行* David P. Stoten**

**Fundamental Study for the Improvement of Actuator Control Performance of a Rapid Prototyping Bogie,
Using a DSS Approach**

Nobuyuki WATANABE David P. Stoten

A rapid prototyping bogie (RPB) has multiple actuators, which emulate the characteristics of missing components. Considering the frequent changing of components' characteristics when the RPB is used for finding optimal characteristics, in the original RPB control scheme, each actuator was independently controlled by its own controller with hybrid control technique. Through the running tests on the rolling stock test plant in RTRI, we observed the control deterioration due to dynamic coupling among actuators. To solve this issue, we have developed a new controller based upon the dynamically substructured systems (DSS) method, which ensures the accurate synchronisation of the numerical and the physical states at their common boundaries. To confirm the effectiveness of the new approach, we implemented a DSS-based controller in an existing proof-of-concept test rig. A simplified single wheel-set system was chosen as an example. Through random excitation tests with the DSS controller, we confirmed that the actuators were well synchronized with their numerical models and that the unexpected frequency components, which were previously observed, were removed.

キーワード：ラピッドプロトタイプ台車, DSS, HILS, 車両試験台, 状態空間法

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ために、ラピッドプロトタイプ台車¹⁾を開発した。この台車は、ばね、ダンパ等の受動部品を汎用の電動アクチュエータに置き換え、任意の受動部品の特性をアクチュエータを制御して模擬することにより、諸元の異なる部品を複数試作することなく台車の性能試験を実施できる車両試験台専用の試験台車である。ラピッドプロトタイプ台車を台車設計に活用することで、試作過程を省略、縮小することによる開発期間の短縮やコスト低減が期待できるだけでなく、余裕ができた試作の期間をより詳細な性能評価試験に割り当てることにより品質向上も期待できる。

ラピッドプロトタイプ台車には9本のアクチュエータが装備されている。各アクチュエータは対応した仮想的な受動部品を模擬し、容易にその特性を変更することができるよう、当初は各アクチュエータを独立に制御する構成とした。各々のコントローラについては、アクチュ

エータを1本ずつ加振試験して、模擬する部品の特性を再現する性能を有していることを確認した。

アクチュエータ単体での動作確認試験の後、ラピッドプロトタイプ台車を用いて車両試験台で加振試験を実施したところ、各アクチュエータは基本的には仮想部品の特性を模擬できていたが、軌条輪加振周波数に含まれない周波数成分がアクチュエータの動作に含まれていることがわかった。単体の動作確認試験ではこのような現象が認められなかったことから、複数のアクチュエータ間の相互干渉が原因と考えられた。

そこで、数値シミュレーションと試験装置をリアルタイムに結合した試験手法である Hardware-In-the-Loop Simulation (以下、HILS と称す) に適した制御設計手法として近年提案されている、Dynamically Substructured Systems (以下、DSS と称す) 手法²⁾ をラピッドプロトタイプ台車のアクチュエータ制御に適用することを検討した。

本稿では、ラピッドプロトタイプ台車の概要と過去の試験結果について述べた後に、DSS 手法を既存の試験装置に適用し、ラピッドプロトタイプ台車のアクチュエータ制御への適用可能性を検討した結果を述べる。

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室

** ブリストル大学 機械工学科

特集：車両技術

2. ラピッドプロトタイプ台車の概要

2.1 台車およびアクチュエータ外観

ラピッドプロトタイプ台車の外観を図1に示す。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、制御により各特性を自由に設定できるようにする9本の電動アクチュエータを配置した構成となっている。図2に軸箱前後支持アクチュエータの構成を示す。アクチュエータの両端には、台車枠・軸箱間の相対変位を許容しながら、アクチュエータのロッドに負荷される曲げモーメントを低減するため、軸受とゴムブッシュを配置している。また、制御がフェイルした際に軸箱前後支持剛性が低下し、高速回転試験時に台車が不安定にならないよう、アクチュエータと並列に緩衝ゴムを配置している。

左右動アクチュエータ (兼 空気ばね左右剛性) 空気ばね上下並列アクチュエータ

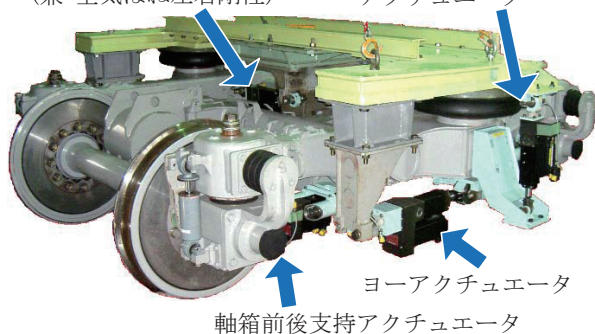


図1 ラピッドプロトタイプ台車外観

軸受+ピン付きゴムブッシュ 電動アクチュエータ

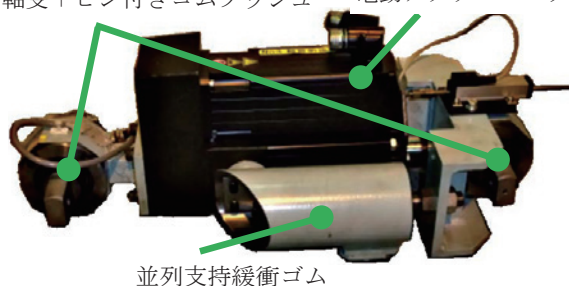


図2 軸箱前後支持アクチュエータ

2.2 初期の制御コントローラ

図3に制御のダイアグラム全体を示す。各アクチュエータに個別のコントローラが対応し、独立に制御する構成となっている。個々のコントローラは、アクチュエータが模擬する受動部品の特性を表す参照モデルと補償器からなる。参照モデルは計測したアクチュエータの長さの変化から模擬する受動部品の必要推力を算出する。また、補償器は、この必要推力と実発生力が一致するようフィードバック信号を参照して適切な指令を導く。

このような考え方は、元来自動車のECU (Engine

Control Unit) のようなDSPベースのハードウェアの検証用に考えられた狭義のHILS手法を、アクチュエータ等一般的な機械要素の制御手法に適用したものである。受動部品の特性の変更が参照モデルの置き換えだけで済み、毎回の制御パラメータチューニングを必要としない。このことはラピッドプロトタイプ台車の活用を考えたとき、望ましい特性と考えられる。

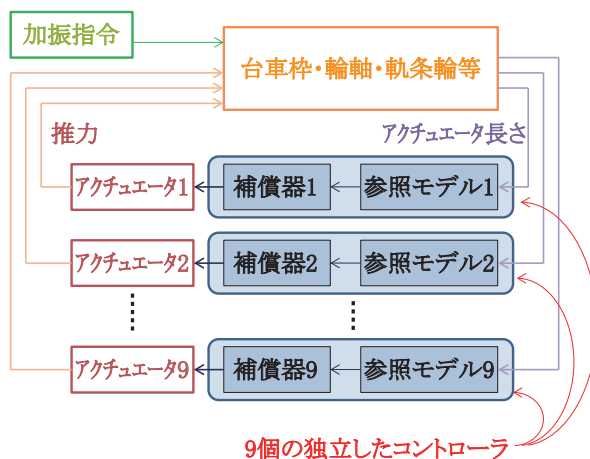


図3 制御ダイアグラム

軸箱前後アクチュエータをダンパ試験装置に組み込んで、正弦波加振試験を行った時の時刻歴波形を図4に示す。この時は、ばね・ダンパ並列モデルの参照モデルを設定し、実発生力が必要推力と一致することを確認した。

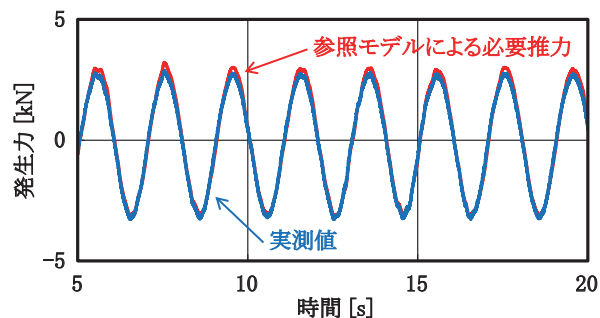


図4 軸箱前後支持アクチュエータの参照モデル出力と実測出力の比較

2.3 試験台試験結果³⁾

ラピッドプロト台車を車両に組み込み、300km/h以上で安定して走行できるような参照モデル設定として車両試験台で加振試験を実施した(図5)。この時の軸箱前後支持アクチュエータの必要推力と実発生力のPSD、および加振による軌条輪左右変位のPSDを図6に示す。同図には、明らかに加振周波数成分より高い7.7Hzと14Hz付近に高いピークが認められる。試験時の走行速度は50km/hであり、ラピッドプロトタイプ台車が適切に参照モデルを模擬していれば発生しない振動である。

また、図4で示した通り、アクチュエータ1本を制御した場合にはこのような振動が生じていない。従って、4本の軸箱前後アクチュエータの制御誤差が、輪軸を介して他のアクチュエータの制御に干渉しているものと考えられた。

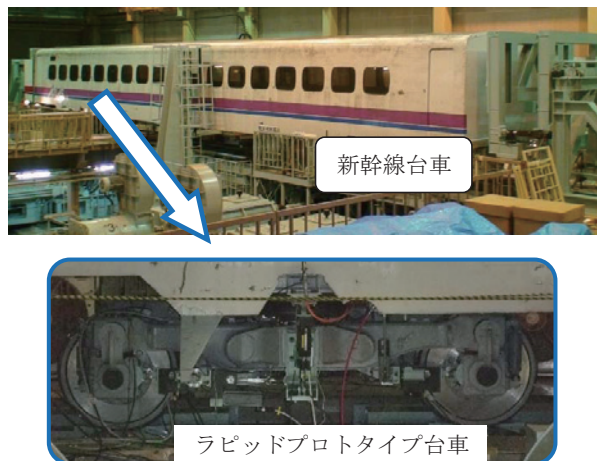


図5 試験台試験全景とラピッドプロトタイプ台車

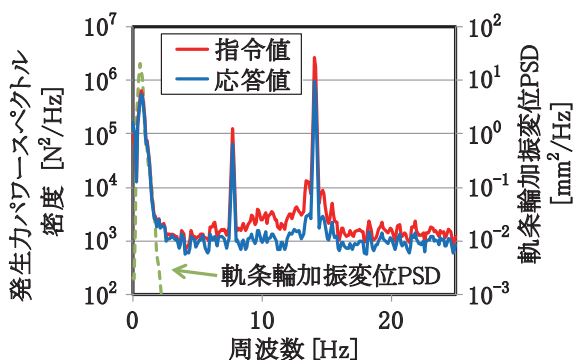


図6 軸箱前後支持アクチュエータ発生力の指令値と応答値の関係

3. 既存の試験装置を用いた DSS の適用検討

3.1 新しいコントローラの設計方針

前述したアクチュエータ間の干渉は各アクチュエータの制御を独立に行ったことや、補償器を参照モデルと独立に設計したことに起因すると考えられる。干渉を避けるためには、模擬する受動部品を含むラピッドプロトタイプ台車全体の特性を考慮したコントローラとすることが有効である。一方で、このような手法では参照モデルを変更する度に制御パラメータチューニングを要することとなり、ラピッドプロトタイプ台車を活用するメリットが損なわれることから、制御パラメータチューニングが不要でコントローラが自動的に導出される設計手法を検討した。

そこで、DSS 手法を適用することとした。DSS はアクチュエータ等完全にモデル化できない機械部品をハー

ドウェアに使用して HILS 試験を行う時のコントローラの設計手法として提案されているものである。DSS は、目標推力と実発生力のような、数値モデルが算出する目標と実機部の値が一致するようなコントローラを導出する手法である。大部分を手順に従って機械的に導くことができることから、模擬する受動部品の特性切り替えを制御パラメータのチューニングなしで進めることが期待できる。

本稿では、既存の試験装置に DSS コントローラを実装し、①複数のアクチュエータ間で干渉が発生しないこと、②ラピッドプロトタイプ台車のように模擬部品の特性を変えた際に、制御パラメータチューニングなしにコントローラを導出できること、を確認した結果について述べる。

3.2 試験装置および模擬するモデルの概要

ブリストル大学にある試験装置の外観を図7に示す。1本のはりの両端をサスペンションを介して2本の油圧アクチュエータで支持する構成となっている。従って、2本のアクチュエータ間で干渉が発生すればはりの挙動等からその影響を確認することができる。

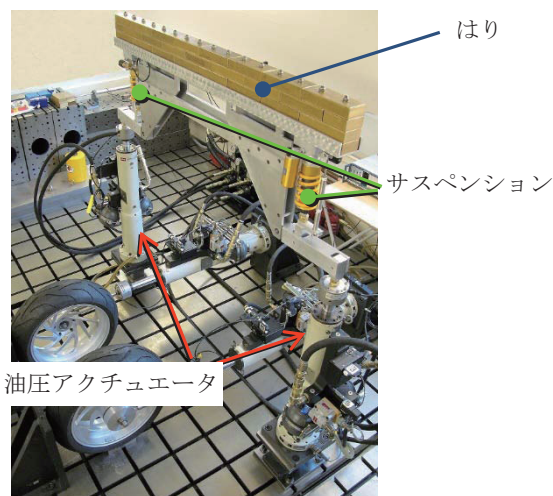


図7 試験装置外観

この試験装置で、図8に示すような1輪軸の模擬加振試験を行うこととした。試験装置のはりを輪軸とみなし、アクチュエータやサスペンションはその他の部分を模擬する。なお、今回のモデルは図7の試験装置に適用するため、台車の運動モデルとは異なるものである。

このとき、このモデルの運動方程式は式(1)、(2)で表すことができる。

$$m_w \ddot{z}_w + c_w \dot{z}_w + k_w z_w = 2c_R (\dot{r} - \dot{z}_w) \quad (1)$$

$$j_w \ddot{\phi}_w + b_1^2 c_w \dot{\phi}_w + b_1^2 k_w \phi_w = -2b^2 c_R \dot{\phi}_w \quad (2)$$

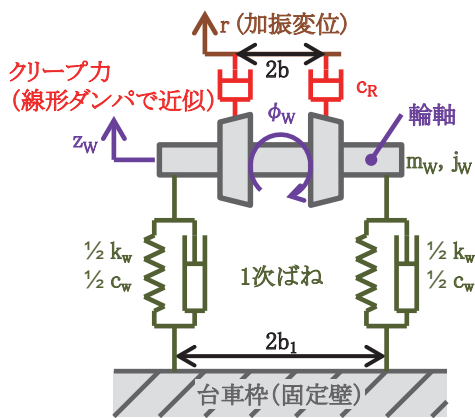


図8 模擬するモデル

3.3 コントローラの設計

初期のコントローラではアクチュエータ長さを入力として目標推力を算出していたが、今回の試験では計算式の導出の容易さから、アクチュエータ端部に取り付けたロードセルで検出される実発生力を入力として、アクチュエータ長さを同期させるコントローラを設計することとした。

初期のDSS手法ではラプラス変換した伝達関数を用いたコントローラの設計法が提案され、これを図7の試験装置に実装した文献⁴⁾もある。この方法は、参照モデルの伝達関数とその他の部分の伝達関数をそれぞれ導出できれば、機械的にコントローラを設計することが可能になる利点がある。ただし、コントローラが高次元の伝達関数になり易い欠点があり、図8のモデルに適用した場合にも導出したコントローラが安定して動作しなかった。低次元化等の手法を用いてコントローラを安定化することも考えられたが、今後ラピッドプロトタイプ台車に適用した場合を想定すると、さらに高次元になることが予想されるため、今回は状態空間モデル⁵⁾を用いて設計した。

図9に状態空間モデルを用いたDSSコントローラを設計する際のフレームワークを示す。1次ばねやクリープ力等の数値モデルで表現される Σ_N 、はりやサスペンション等の特性 Σ_2 、アクチュエータの特性 G_{TS} を含む機構部の特性を Σ_P として、それぞれを状態方程式で表す。また、 Σ_1 から Σ_2 への入力 y_i はロードセルで測定される実発生力、 Σ_N 、 Σ_P から出力される同期信号 z_N と z_P はそれぞれ目標と実際のアクチュエータ長さとした。

このとき、 Σ_N の状態変数は2本のアクチュエータの目標長さを含む6次元ベクトル、 Σ_P の状態変数も2本のアクチュエータの実長さを含む6次元ベクトルになる。フィードフォワード補償器 k_r では、上記12個の状態変数のうち、アクチュエータ長さを除く8個を、オブザーバ等で推定して用いることが提案されている⁵⁾が、

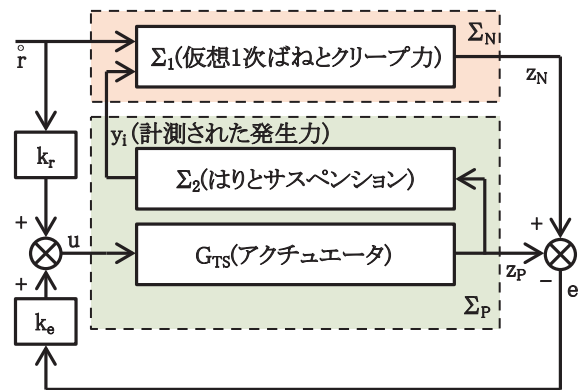


図9 DSSコントローラ設計用フレームワーク

本稿では k_r の内部に Σ_N と Σ_P のノミナルモデルを組み込み、数値シミュレーションで状態量を算出することとした。

また、フィードバック補償器 k_c は極配置法で設計した。

3.4 試験条件

表1に数値モデルに設定したパラメータを示す。ラピッドプロトタイプ台車で1次ばねの特性を変えて試験することをイメージしたものである。加振入力としては0.1~3Hzで加振速度一定のバンドランダム波とした。なおこの周波数帯には試験装置の共振周波数が含まれている。

表1 試験時に設定したパラメータ一覧

	条件1	条件2	条件3
k_w (kN/m)	400	200	100
c_w (Ns/m)	400	200	100
c_r (Ns/m)	1000		

3.5 試験結果

図10に条件1の試験結果を示す。アクチュエータ長さの時刻歴波形が示すように、目標長さを実長さは概ね一致し、同期誤差は十分小さい。また、発生力やアクチュエータ長さのPSDに加振周波数と無関係の周波数成分が認められない。従って設計したDSSコントローラがアクチュエータ間の干渉を起こさず、適切に動作していることが確認できる。

また、図11に条件2の試験結果を示す。紙面の都合で条件3の試験結果を省略するが、条件1と同様の結果が条件2, 3で得られたことから、受動部品のパラメータを変更した場合でも今回用いた設計手法で一元的に対応できることが確認できた。

一方、図8のモデルは、理想的な動作状態(輪軸の回転 $\phi_w \equiv 0$)の場合、1/2輪軸と1本のアクチュエータの直動モデル(図12)と等価になる。図12(b)のモデルの

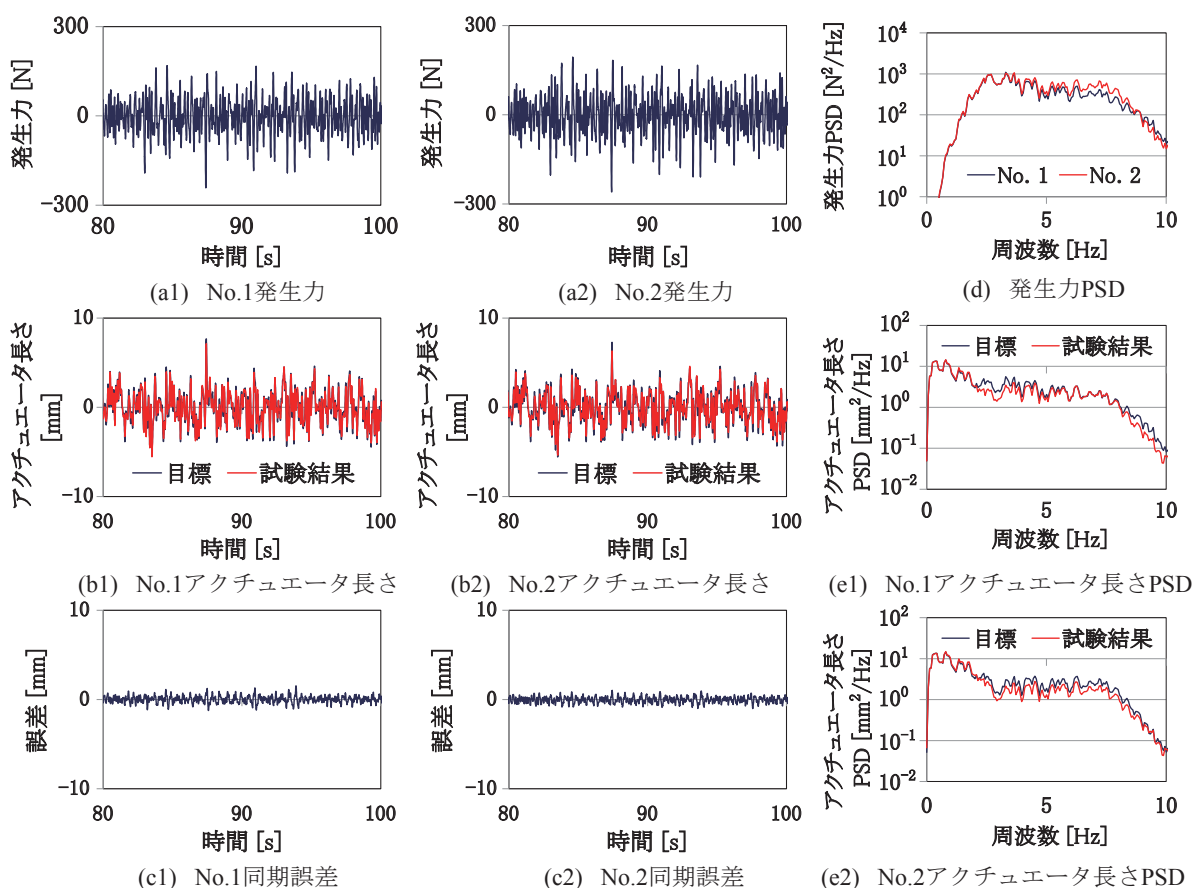


図 10 試験結果 (条件 1)

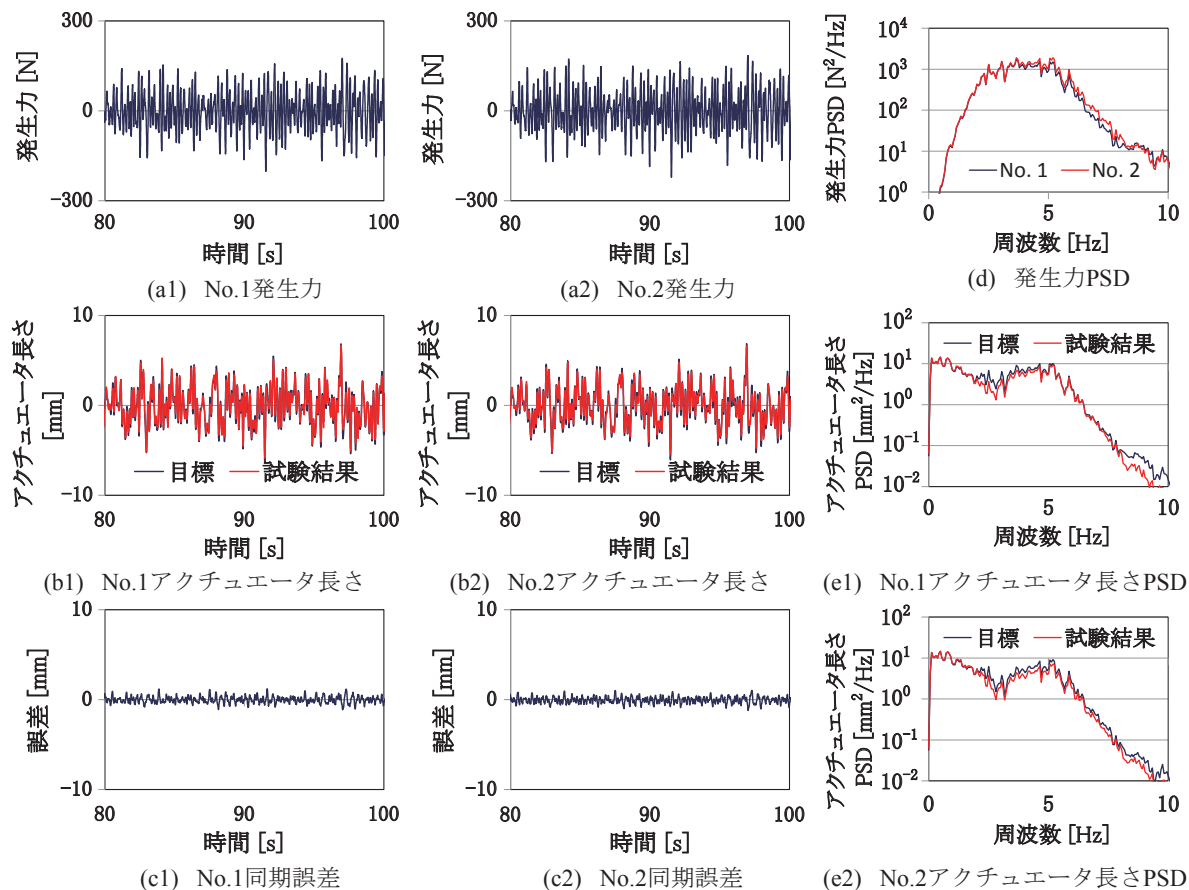


図 11 試験結果 (条件 2)

特集：車両技術

運動方程式は式(1)と同じなので、加振入力からアクチュエータへの伝達関数は、

$$\frac{Z_{ai}}{sR} = \frac{C_R}{\gamma^2 G_{ei}} \frac{(m_w s^2 + 2\gamma^2 G_{ei})}{(m_w s^2 + c_w s + k_w)} \quad (3)$$

で表現することができる。ただし、 Z_{ai} は*i*番目のアクチュエータ長さをラプラス変換したもの、 G_{ei} は*i*番目のサスペンションの特性、 s はラプラス演算子、 γ はサスペンション取り付け部のテコ比である。

式(3)に前述の試験条件1の加振入力を代入して得られたアクチュエータ長さの計算結果と、試験結果のPSDを図13に示す。両者のグラフは非常に近く、設計したDSSコントローラによって、はりが理想的に上下動したことが確認できる。しかし、このことは今回の試験が非線形性の少ない条件で行われたことを示唆している。ラピッドプロトタイプ台車による車両試験台での性能試験に向けて、数値計算では評価しにくいクリープ力のような非線形要素に関する検証は今後の課題である。

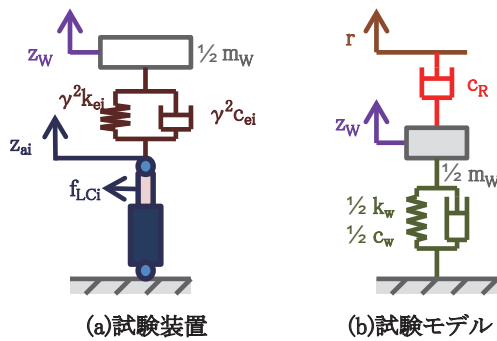


図12 理想的な条件で簡易化した試験装置とモデル

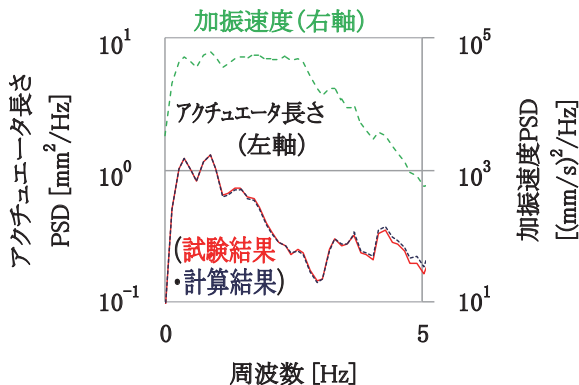


図13 簡易化モデルと実機試験結果の比較

4. おわりに

本稿では、ラピッドプロトタイプ台車の加振試験で認められたアクチュエータ間の干渉を改善するためにDSS手法を適用することを検討し、ブリストル大学にある既存の試験装置にDSSコントローラを実装して効果を確認した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 状態空間モデルを用いたDSSコントローラを実装した試験ではアクチュエータ間の干渉は認められなかった。
- (2) 数値計算結果と実際のアクチュエータの応答が非常に近いことから、アクチュエータは模擬すべき受動部品の特性を再現できていると考えられる。
- (3) 模擬する受動部品のパラメータ変更に対し、本設計手法を画一的に適用しても、同様の性能が得られることを確認した。
- (4) 以上より、DSS手法がラピッドプロトタイプ台車のアクチュエータ制御コントローラの導出法として望ましい性質を有していることを確認した。

今後は、より非線形性の強い条件等、検討の深度化を図り、実際にラピッドプロトタイプ台車に実装し、検証する予定である。

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) Stoten, D. P. and Hyde, R. A., "Adaptive control of dynamically substructured systems: the single-input single-output case," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol.220, No.2, pp.63-79, 2006.
- 3) 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
- 4) Stoten, D. P., Tu, J. Y. and Li, G., "Synthesis and control of generalized dynamically substructured systems," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol.223, No.3, pp.371-392, 2009.
- 5) Tu, J. Y., Stoten, D. P., Li, G. and Hyde, R. A., "A state-space approach for the control of multivariable dynamically substructured systems," Proceedings of the Third IEEE Conference on Systems and Control, pp. 1093-1098, 2009.