

解 説

技術開発賞受賞 鉄道車両用上下制振制御装置の開発*

菅原 能生**

*平成 25 年 6 月 24 日原稿受付

**鉄道総合技術研究所，〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

1. はじめに

本稿では，技術開発賞を受賞した「鉄道車両用上下制振制御装置の開発」について，その概要を紹介する．

2. 開発の背景

2011 年 3 月の九州新幹線（博多～鹿児島中央）の全線開業と同時に，新幹線と接続する在来線の観光特急列車を新たに運行することが計画された．この観光列車が走行する線区は軌道の整備基準が低いため，他の線区と比較して軌道の不整が大きく，そのため特に 1～2Hz の車両の上下振動が大きくなり乗り心地の低下が懸念された．軌道の整備基準はその路線の輸送量や列車速度によって定められており¹⁾，この観光列車の乗り心地向上のためだけに軌道の整備基準を引き上げることは，軌道整備にかかるコストなどの観点から困難であった．そこで，車両側で上下振動を低減し，乗り心地を向上する対策が新たに必要になった．

このような振動を車両側で低減するためには，アクティブ（ないしセミアクティブ）サスペンションが有効であることが知られており，これまでにさまざまな検討・試験例があるが²⁾，鉄道車両用の上下方向で実用化された例はないと思われる．筆者らは，以前から上下方向の可変減衰油圧ダンパを用いた 2 次ばね系の振動制御システムの開発を行っており，優れた振動低減効果が得られることを走行試験で実証している³⁾．そこで，このシステムをベースに，技術開発を行い実用化した．

3. 装置の構成と制振効果

3.1 全体構成

図 1 に開発した本装置の全体構成を示す．減衰力を制御するために使用する可変減衰上下動ダンパは，現用の（パッシブ）上下動ダンパと交換して取り付け，1 車両あたり 4 本使用する．制御装置は，1 車両あたり 1 台搭載し，加速度センサによって得られた車体上下振動加速度から，振動低減に必要なとなるダンパの減衰力目標値を計算し，ダンパへ指令電流を供給する．加速度センサの個数および車体への設置位置は，制御対象とする車体の振動モードと，その数によって異なるが，概ね 3～4 個使用する．なお開発にあたり，既存車両に本装置を搭載する場合，車両側の改造を最小限に抑えるため，上下動ダンパの交換と，センサ・制御装置・配線の追加搭載のみで実装できるように配慮した．

3.2 可変減衰上下動ダンパ

開発した可変減衰上下動ダンパを図 2 に示す．車両への取付互換性を考慮して，ダンパの取付長と最大減衰力は，現用の上下動ダンパと同様とした（取付長 374 mm，最大減衰力 18kN）．したがって，車両側の大幅な改造を行うことなく，現用の上下動ダンパを本ダンパに交換するだけで，本装置を搭載することができる．このダンパには，「反転式」と呼ばれる機構を用いた減衰力制御弁を使用している⁴⁾．ピストン速度一定（0.06m/s 時）の，指令電流に対するダンパの減衰力特性を図 3 に示す．このダンパは，指令電流が小さいときには（0.3A 程度），伸び行程では減衰力を発生するが，縮み行程では最小減衰となる．そして，指令電流を大きくすると（1.3A 程度）この逆となり，中間の電流（0.8A 程度）では伸び・縮みいずれの行程に対しても最小減衰となる．このように，このダンパは指令電流のみによってダンパの減衰力発生方向を制御できるため，コントローラ側でダンパの伸縮方向を考慮する必要がない．したがって，ダンパの変位を測定せずに減衰力を制御することができる．さらに，指令電流が供給されていない場合は，自動的に現用ダンパに近い減

衰力特性に切り替わるようになっている。そのため、1本のダンパに対して1個の制御弁でフェールセーフ性を考慮した減衰制御が実現でき、部品点数削減による信頼性向上とコスト低減に貢献している。

3.3 加速度センサと制御装置

振動を検知する加速度センサは、図1のように車体の4箇所に配置した。実際の車両床下へのセンサ取付状況を図4に示す。この配置の場合、車体の上下並進、ピッチング、ローリング振動を制御できる。1次曲げ振動のように、車体中央で振幅が極大となるような弾性振動を考慮する必要がある場合は、センサ配置を変更することにより対応できる³⁾。制御装置(図5)は、DC24V電源で動作し、加速度センサの電源供給・信号受信の機能、可変減衰上下動ダンパの減衰力指令値の計算および指令電流の供給を行う。さらに、これら制御に必要な機能に加え、各配線の断線検知や加速度センサ、ダンパ減衰力異常を検知する機能⁵⁾が搭載されている。

3.4 制御則

ダンパの制御アルゴリズムには、スカイフック制御則を使用した。加速度センサから得た上下振動加速度を、図6に示すように車体の上下並進・ピッチング・ローリング成分に分解した後に、フィルタで積分してスカイフックゲインを乗じ、成分ごとに減衰力指令値を計算し、これを上下動ダンパに電流値の大きさに指令する。スカイフックゲインの大きさは、走行試験を実施して調整する。

4. 走行試験による振動低減効果の検証

本装置を在来線車両に取り付けて走行試験を実施した。特に車体の剛体振動が顕著な区間を一定速度(速度約75km/h)で走行した際の、台車直上の車体床面上下振動加速度パワースペクトル密度(PSD)を図7に示す。レールの継目部走行に起因するPSDピークが1.7Hz付近に見られるが(青線)、制御を行うことによりこのピーク値が1/5程度に低減された(赤線)。この結果、乗り心地評価指標である「乗り心地レベル(L_T)」⁶⁾は4.4dB低減された。 L_T 値は小さいほど乗り心地がよいことを表し、一般に3~5dB異なると乗り心地の差を体感できるとされている。また、この後7カ月間営業運転を行った後に同一区間を同一速度で走行した時の加速度PSDを併記する(緑線)。経時的な変化は見られず、7カ月前と同様に良好な振動低減効果が得られていることがわかる。この後6カ月後にも同様な試験を実施し、良好な性能を確認している。

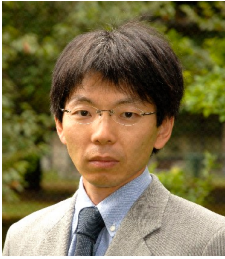
5. おわりに

本稿では、可変減衰上下動ダンパを用いた制振制御装置の概要とその乗り心地向上効果について紹介した。本装置は、軌道整備状況を変更することなく特定の編成や号車の乗り心地を比較的低いコストで向上させた場合に特に有効であると考えられる。本装置は鉄道車両用の上下制振制御装置として初めて実用化され、九州旅客鉄道(株)の観光特急列車「指宿のたまて箱」⁷⁾(鹿児島中央~指宿)、そして「はやとの風」(鹿児島中央~吉松)に搭載されている。なお、装置開発にあたり九州旅客鉄道(株)に多大なるご助力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター(2007): 鉄道構造物等維持管理標準(軌道編)の手引き,.
- 2) 菅原能生, 佐々木君章: 制振制御技術(その2), R&M, Vol.17, No.2(2009), pp.53/56.
- 3) 菅原能生ほか: 2次ばね系油圧ダンパの減衰力制御による車体上下振動低減, 第17回鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail2010)講演論文集, (2010), pp.179/182.
- 4) 木村隆: セミアクティブサスペンションシステムの開発, 自動車技術, Vol.58, No.4(2004), pp.76/80.
- 5) 小島崇, 菅原能生: 並進運動と回転運動の位相差に着目した鉄道車両のダンパの異常検出, 日本機械学会論文集(C編), Vol.78, No.786(2012), pp.396/410.
- 6) 鈴木浩明ほか: 鉄道車両の乗り心地評価法と国際標準化, 鉄道総研報告, Vol. 16, No.1(2002), pp.5/10.
- 7) 榎田正春: JR九州キハ47形「指宿のたまて箱」, 鉄道ピクトリアル, No. 855(2011), pp. 116/117.

著者紹介



すがはら よしき
菅原 能生 君

1969 年 10 月 30 日 生まれ。

1995 年東京工業大学理工学研究科制御工学専攻修了。同年鉄道総合技術研究所入社，現在に至る。制御技術を用いた鉄道車両の乗り心地向上等の研究に従事。日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会，計測自動制御学会の会員。工学博士。

E-mail: sugahara@rtri.or.jp URL: <http://www.rtri.or.jp/>

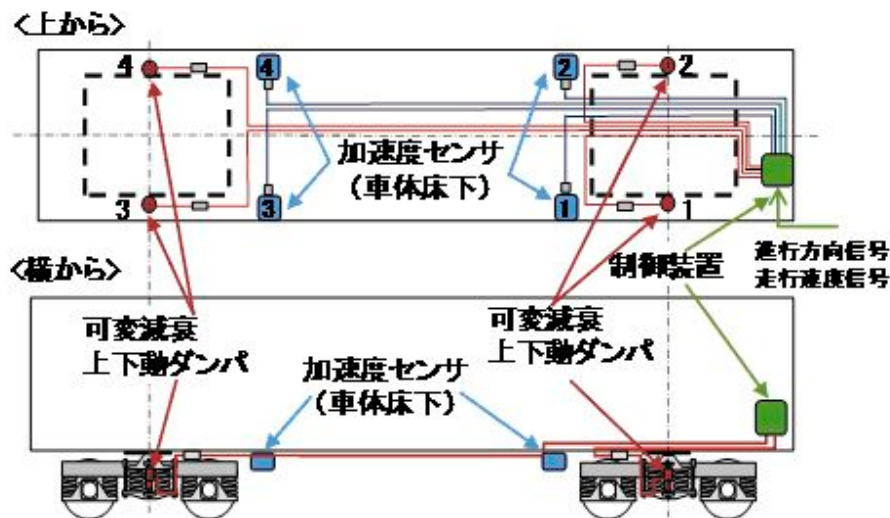


図 1 可変減衰上下動ダンパを用いた制振システムの構成

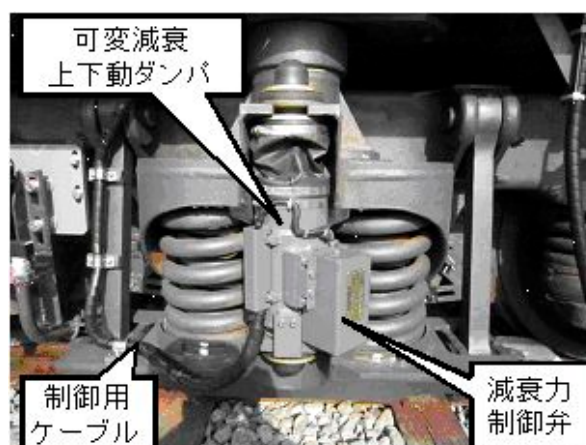


図 2 可変減衰上下動ダンパ

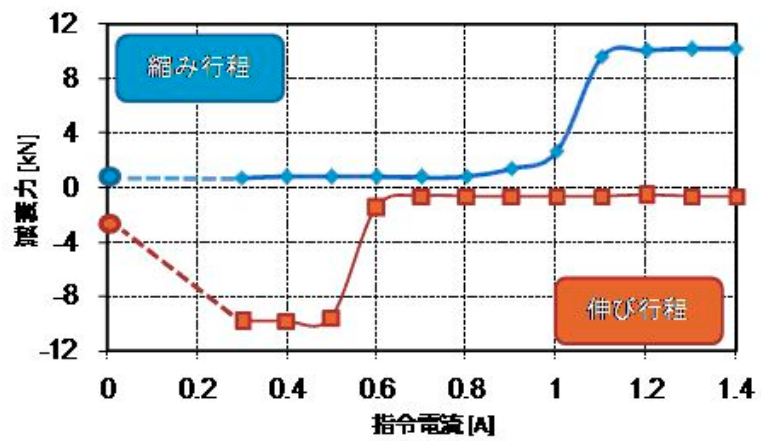


図 3 可変減衰上下動ダンパの減衰力特性（ピストン速度 0.06 m/s 時）

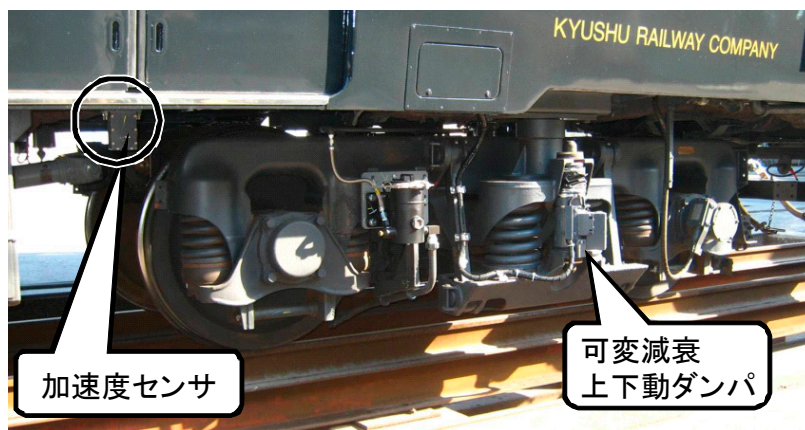


図 4 変減衰上下動ダンパと加速度センサの取付状況



図 5 制御装置

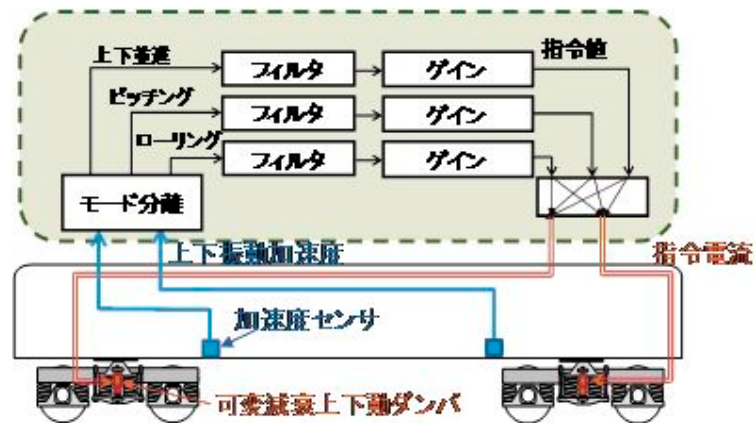


図6 制御アルゴリズム

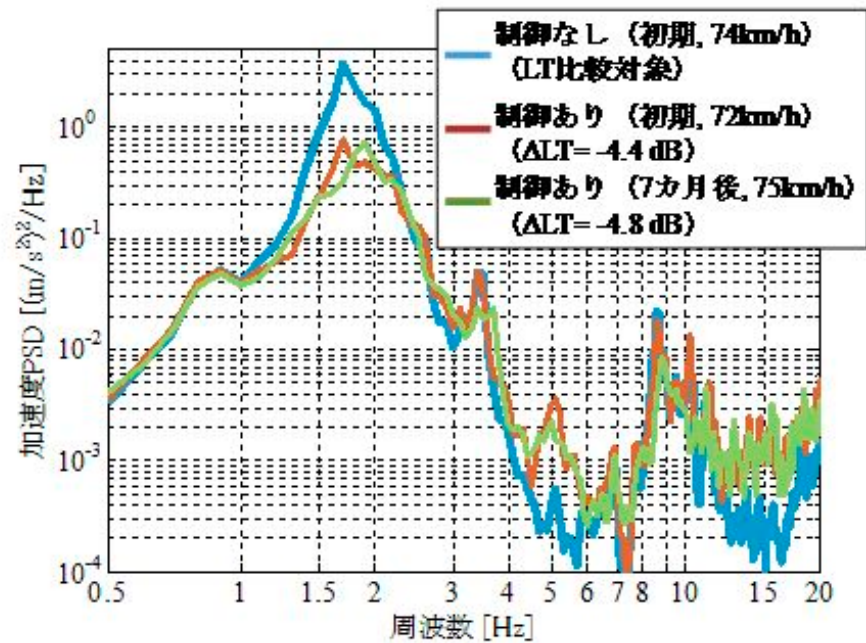


図7 車体上下振動加速度 低減効果例（本線走行試験結果例）