

可変減衰上下動ダンパを用いた制振制御システムの開発と実用化

菅原 能生* 小島 崇* 中川 千鶴**
榎田 正春*** 松永 智***

Practical Use of a Vehicle Vibration Control System Using Secondary Variable Vertical Dampers

Yoshiki SUGAHARA Takashi KOJIMA Chizuru NAKAGAWA
Masaharu ENOKIDA Satoru MATSUNAGA

Vertical rigid-body-mode vibration of a car body affects the ride comfort aboard railway vehicles, especially when they are running on the track maintained according to moderately demanding maintenance criteria. A secondary suspension damping control system using variable vertical hydraulic oil dampers has been developed in an attempt to reduce this type of vibration. The results of vehicle running tests on a local commercial line demonstrate that the system can reduce the power spectral density peak value of vertical vibration acceleration in the rigid body mode by approximately 80% and the ride quality level (L_T) is reduced by 4.4 dB. This system suppressed the vibration to such a degree that passengers would be able to perceive it; accordingly it has been in practical use on some sightseeing trains.

キーワード：振動制御，可変減衰ダンパ，上下剛体振動，2次ばね，乗り心地

1. はじめに

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への影響が懸念された。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等の観点から困難なため，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，これまでに様々な検討・試験例があるが²⁾，実用化された例はないと思われる。鉄道総研では，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により実証している³⁾。そこで，このシステムをベースに，

実用化に必要な技術開発を行い，鉄道車両として初めて上下制振制御システムを実用化した。

本稿では，地方交通線の上下振動の特徴を述べたうえで，開発した上下制振制御システムの概要，およびその制振効果を検証するために実施した各種試験結果について報告し，本システムにより上下振動乗り心地を向上できることを示す。

2. 地方交通線の上下振動—システム導入の背景—

観光特急列車は，車両の製造コストを抑制するために，既存の通勤用気動車（キハ47）を大幅にリニューアルして製作されることとなった。この車両の2次ばね（まくらばね）には，最近の車両で一般的に使用されている空気ばねではなく，図1に示すようにコイルばねが用いられ，そのばねと並列に上下動オイルダンパが取り付けられている。この車両と同等の車両を，地方交通線で走行さ

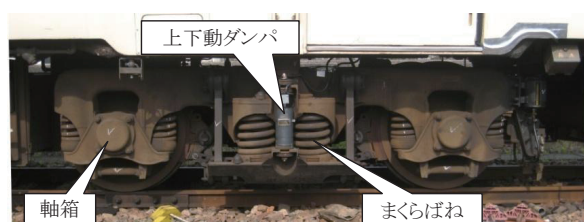


図1 コイルばね揺れまくら吊り台車の外観

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室
** 人間科学研究部 人間工学研究室
*** 九州旅客鉄道(株) (運輸部車両課)

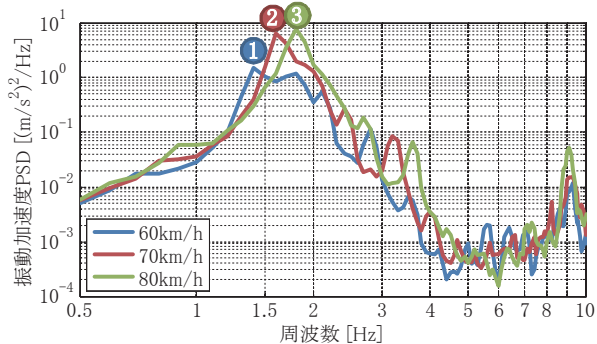
特集：車両技術

せた際の、車体の上下振動加速度パワースペクトル密度 (PSD) を図2 (a) に示す。1～2Hz 付近に非常に大きなピークがあり、この振動が上下乗り心地に大きな影響を与えることがわかる。このとき、輪軸を支持する軸箱の上下振動加速度 PSD を図2 (b) に示す。図2 (a) と比較すると、1～2Hz のピーク周波数 (図中①～③) がよく一致し、かつそのピーク周波数は走行速度に応じて変化することがわかる。ピーク周波数 f は走行速度を v [m/s] とすると、 $f = v/25$ [Hz] の整数倍になることから、図3 に示すような定尺レール (25m) の継目部の落ち込み (継目落ち) を車両が通過することに起因するものと考えられる。

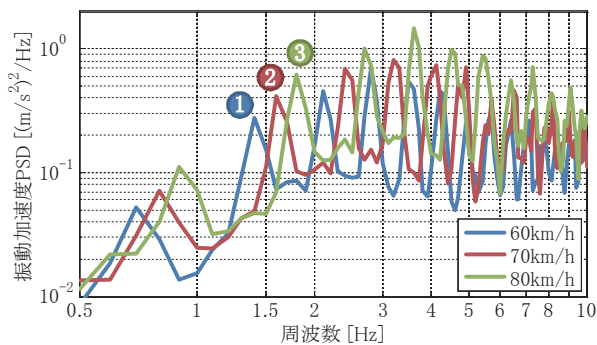
このレールの継目落ち通過に起因する車体の上下剛体振動を大幅に低減し乗り心地を向上するために、上下制振制御システムを開発した。

3. 上下制振制御装置の構成

図4 に開発した2次ばね系の上下制振制御システムの全体構成を示す。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



(a) 台車直上 車体上下振動加速度



(b) 軸箱上下振動加速度

図2 地方交通線走行時の車両の上下振動加速度 PSD

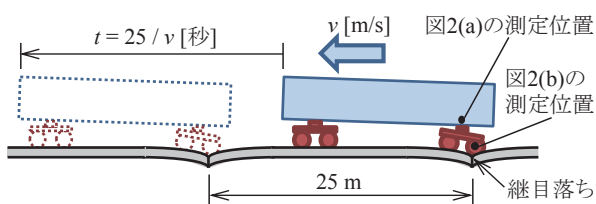


図3 25m レール走行時の車両とレールとの関係

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、今回は4個を使用した。

なお、開発にあたり、制御装置搭載のための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振動制御システムを車両に実装できるように配慮している。

3.1 可変減衰上下動ダンパ

可変減衰上下動ダンパを図5 に示す。車両への取付互換性を考慮して、この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 (取付長 374 mm, 最大減衰力 18kN) としており、現用の上下動ダンパを本ダンパに交換するだけで、この制振制御システム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が取り付けられている⁴⁾。ピストン速度一定 (0.06m/s 時) の、指令電流およびピストン速度に対する減衰力特性を図6 に示す。このダンパは、図6 (a) に示すように、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)

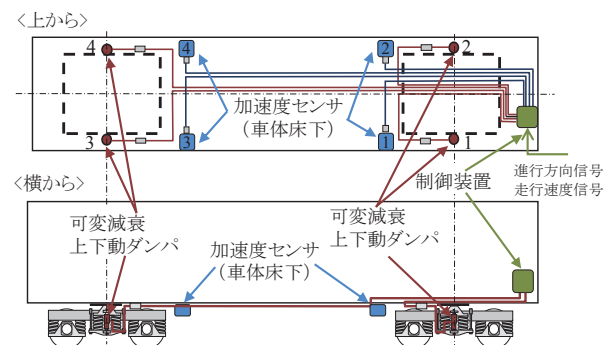


図4 上下制振制御システムの構成

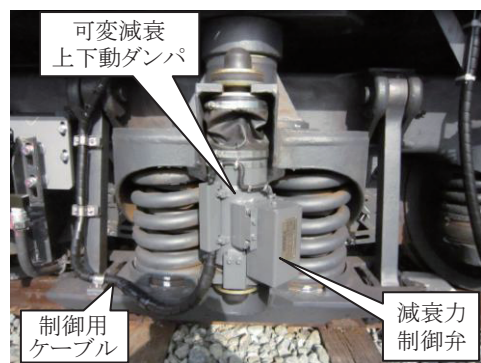


図5 可変減衰上下動ダンパ

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減衰力が最小になる。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できる。

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構成した。これにより、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。

3.2 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7に示すように車両の客室扉直下の床面に取り付け（計4か所：図4参照）、車体の上下並進、ピッチング、ローリング振動を制御対象とした。なお、車体中央にもセンサを配置することにより、車体の中央で振幅が極大となるような弾性振動も制御対象とすることができるが³⁾、今回の対象車両では、乗り心地に対する弾性振動の寄与が非常に小さかったため、弾性振動は考慮していない。

制御装置は、乗務員室の補助椅子の下に設置した（図8）。この制御装置は、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。また、制御装置には、これら制御に必要な機能に加え、

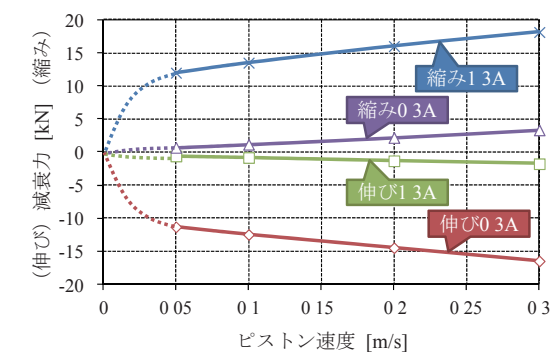
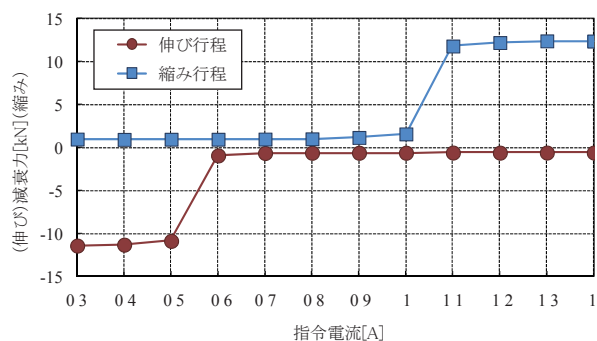


図6 可変減衰上下動ダンパの減衰力特性（先行試作品）

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が搭載されている。異常検知時には、ダンパの制御が自動的に停止されるとともに、制御装置に取り付けられた7セグメント LED により異常種別が表示され、装置内部に発生したイベントが保存される。この保存された記録は、パソコンを接続して読み出すことによりメンテナンスに活用することができる。

3.3 制御アルゴリズム

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。車体に取り付けた加速度センサから得た上下振動加速度を、図9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成分ごとの振動速度を計算する。この振動速度にスカイフックゲインを乗じて振動成分ごとのスカイフック

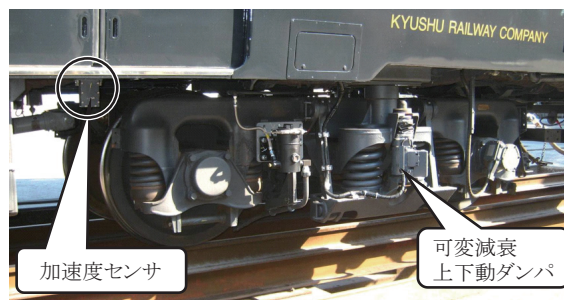


図7 加速度センサ設置状況



図8 制御装置設置状況

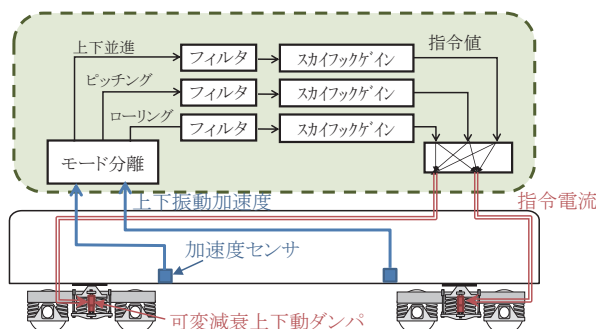


図9 制御アルゴリズム

特集：車両技術

ク力（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で指令する。スカイフックゲインの大きさは、実際に走行試験を実施して調整する。

3.4 ダンパ減衰力異常検知アルゴリズム

ダンパの減衰力制御弁等に何らかの不具合が生じ、所定の減衰力が発生できなくなったことを検知するために、例えば、ダンパのピストンロッドに歪ゲージを貼付するなど異常検知専用のセンサを用いる方法が考えられる。しかし、専用のセンサを搭載するコストや、そのセンサの信頼性などを考慮すると、この手法は望ましくない。そこで、制御のために使用している車体の上下振動加速度センサを用いてダンパの異常を検出する方法を検討した。検知する異常として、FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) 等の結果から、ダンパが減衰力を発生しなくなった場合を想定した。

1両あたり4本搭載されているダンパのうちの1本に減衰力異常が発生した場合、車体の加速度の大きさそのものの変化から異常の有無を判別するのは困難であった。これに対し、車体の上下加速度を上下並進成分とピッチング成分に分解し、両者の位相差を用いることで異常を検知できることがわかった⁵⁾。この新たに開発した異常検知アルゴリズムの概要を図10に示す。この位相差があらかじめ設定したしきい値の範囲内にあるかどうかで、ダンパの減衰力異常を検知する。低速走行時は車体の振動が小さいため異常検知は行わない。また、位相差は進行方向によって異なるため、異常判定を行うしきい値を進行方向（前・後進）に応じて切り替える。

実際の走行時の位相差計算例を図11に示す。減衰力が正常の場合、異常検知指標である位相差は、おおむね60度程度である。これに対し、減衰力に異常が発生した場合は走行するにつれて位相差が60度から離れてゆく。図に示すように例えば72度と53度にしきい値を設定し、この範囲から外れた場合にダンパの減衰力に異常が発生したと判断することができる。また、減衰力異常が発生した部位によって、位相差が変化する方向が異なることから、前台車/後台車のどちらのダンパに異常が発生したのかも判断できる。

4. 走行試験による制振性能の評価

本システムを在来線気動車（車体長さ21m、台車中心間距離14.4m、車両重量約37ton）に適用し、地方交通線において走行試験を実施した。

4.1 上下振動加速度 PSD と乗り心地評価指標による評価

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 PSD を図12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、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。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。

次に、走行試験区間全線での乗り心地向上効果を確認するため、全線の短時間 L_T 値を図13に示す。短時間 L_T とは、通常の L_T 値の評価時間 (3 ± 2分) を短縮して1分以下で評価したもので、走行地点ごとの乗り心地を評価することができる。図13より、制御を行った場合の方が走行試験区間全線にわたり短時間 L_T 値が低減され、本システムにより安定した乗り心地向上効果が得られることがわかる。特に、短時間 L_T 値が大きい箇所ほど L_T 値の低減効果が高く、本システムの有効性を示している。

さらに、軌道条件の異なる3線区で走行試験を実施し、特に L_T 値が大きかった区間の乗り心地向上効果を整理した結果を図14に示す。これらはいずれも同じ制御バ

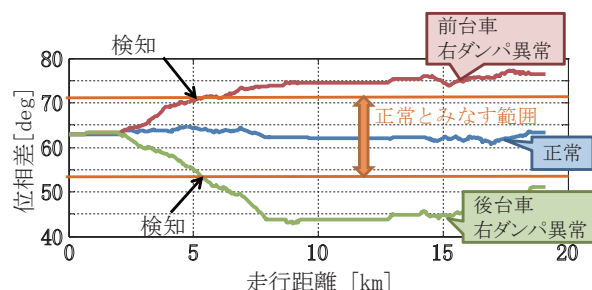


図11 異常検知指標（位相差）の推移状況例

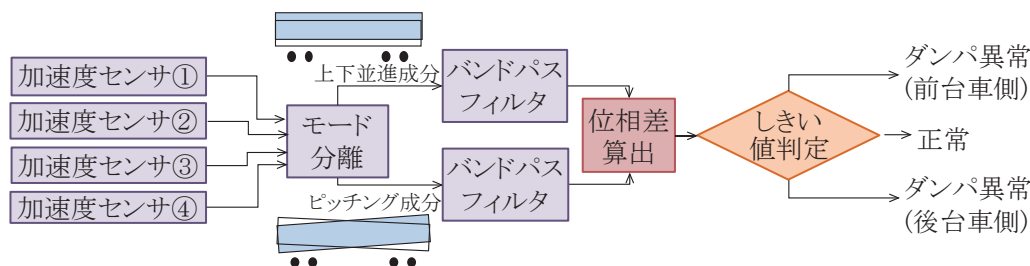


図10 ダンパ異常検知アルゴリズム

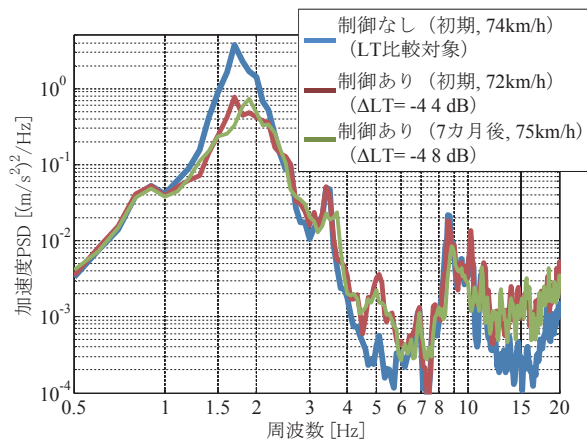


図 12 台車直上 車体上下振動加速度 PSD
(本線走行試験時 走行速度 75km/h)

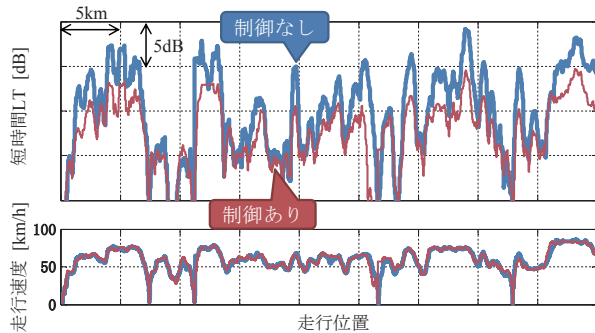


図 13 走行試験区間全線の短時間 L_T 値と走行速度

ラメータで走行しているが、各線区で3～4dB程度の L_T 値低減効果が得られ、本システムが走行線区によらず有効であることが確認できる。

また、このダンパを7カ月間営業運転で使用した後に同一区間を同一速度で走行した時の加速度 PSD を図 12 に併記する（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。

4.2 ロール角速度による評価

本システムは車体の上下振動の他にロール振動も制御することができる。速度 50km/h 一定で走行時の車体床面のロール振動角速度を図 15 に示す。制御を行うことによりロール角速度の振幅が最大で 40% 程度減少しており、振動低減効果が得られていることがわかる。

4.3 被験者試験による乗り心地の検証

制振制御システムによる体感上の乗り心地向上効果を検証するため、鉄道関係者 8 名による乗り心地評価調査として、座位姿勢での乗り心地体感調査を行った。この調査は、4.1 節と同一編成の他の車両で、車内の台車直上に比較的近い位置で実施した。

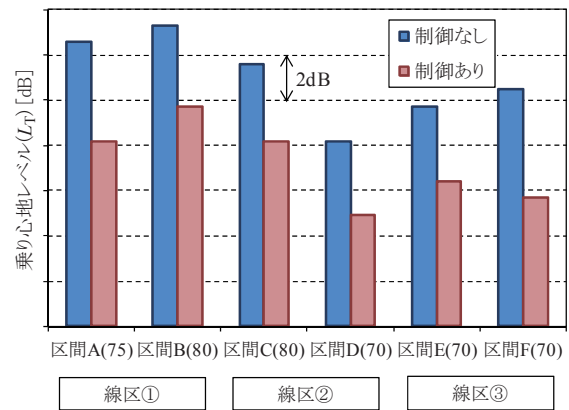


図 14 異なる走行線区での乗り心地向上効果
(後位側台車直上の上下乗り心地レベル比較)
※括弧内の数字は走行速度の平均値

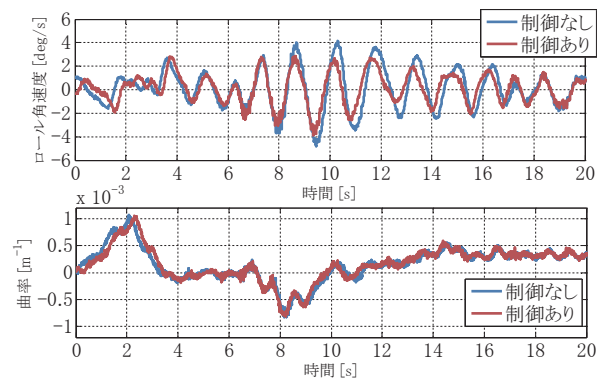


図 15 車体ロール振動比較(走行試験 走行速度 50km/h)

4.3.1 調査方法

被験者は、座席に座った状態で5秒ごとに5段階の乗り心地評価（1：問題ない～5：非常に不快）を押しボタンで行った。評価区間は、速度 80km/h で定速走行する区間およびその前後を含み、1回の長さは10分前後とした。走行条件は「制御あり」と「制御なし」の2条件とした。

4.3.2 調査結果

評価区間の主観評価と乗り心地レベル L_T 値の時間変化を図 16 に示す。「制御あり」の方が「制御なし」より主観評価、 L_T 値とも良好な箇所が多く、その差は大きい所で主観評価 0.5 ポイント、 L_T 値で 5dB 程度減少していることがわかる。また、「制御なし」の場合に見られる著大値（ピーク）が制御により低減されていることもわかる（ L_T 値で顕著）。これは「乗り心地が悪い」という印象を軽減する効果があると考えられる。

なお、本被験者試験結果は、被験者が少ないため必ずしも統計的正確さを証明できるデータではないが、本システムによる体感乗り心地の向上効果を示すものと捉えてよいと思われる。

特集：車両技術

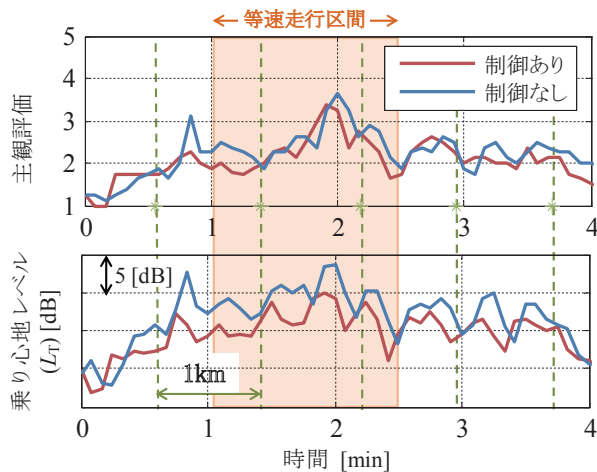


図 16 乗り心地の主観評価と乗り心地レベル
(本線走行試験時)

5. おわりに

本稿では、鉄道車両の上下乗り心地を向上するための上下制振制御システムの概要について述べ、営業線での走行試験結果を報告した。振動加速度 PSD と乗り心地評価指標による評価により、乗り心地向上効果が得られることを示した。また、本システムが旅客の乗り心地に対する印象を向上させる効果があることを被験者試験により示した。

本システムは、JR 九州の観光特急列車「指宿のたまたま箱」(鹿児島中央～指宿)⁷⁾で初めて実用化され、2011 年から営業運転が開始された。その後約 2 年が経過したが、その間に制御システムに大きなトラブルはなく導入当初と同様の振動低減効果を発揮している。また、その後本システムは特急「はやとの風」にも搭載され、

営業運転が行われている。

可変減衰上下動ダンパによる制振制御システムは、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い場合に特に有効であると考えられる。今後も、旅客サービス向上のうちのひとつとして、このような振動制御装置による乗り心地向上方法について、さらなる検討を進めたいと考えている。

最後に、システム開発、および走行試験実施にあたり多大なるご助力を頂いた、日立オートモティブシステムズ(株)の関係各位に心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) 鉄道構造物等維持管理標準(軌道編)の手引き, 鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター, 2007
- 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, pp.53-56, 2009
- 3) 菅原能生, ほか: 空気ばね並列油圧ダンパの減衰力制御による車体上下振動低減, 鉄道総研報告, Vol.24, No.6, pp.17-22, 2010
- 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, pp.76-80, 2004
- 5) 小島崇, 菅原能生: 車両の振動位相差に着目した上下動ダンパの異常検出, 鉄道総研報告, Vol.26, No. 10, pp. 17-22, 2012
- 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, pp.5-10, 2002
- 7) 榎田正春: JR 九州キハ47 形「指宿のたまたま箱」, 鉄道ビクトリアル, No. 855, pp. 116-117, 2011