

# 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

車両構造技術研究部 車両振動

主任研究員 菅原 能生

## 1. はじめに

軌道保守条件があまり厳しくない線区を走行する車両では、レールの継目落ちや軌道不整に起因する車体の上下剛体モード（上下並進、ピッチング）の振動が乗り心地に対して支配的であることが多い。このような線区は、一般に断面輸送密度が低く、軌道整備により乗り心地向上を行うことがコスト的に困難である場合が多い。

このような振動を低減するため、空気ばねと並列にパッシブ上下動ダンパを取付ける方法が検討され、走行試験が実施されている<sup>1)</sup>。さらなる乗り心地向上効果を得る方法として、この上下動ダンパに制御技術を導入し、振動制御を行う方法が考えられる。そこで、空気ばねと並列に取付ける可変減衰上下動ダンパ、およびその制御方法について実用的な研究開発を行い、装置を開発した<sup>2)</sup>。本発表では、装置の概要および走行試験結果について述べ、このシステムが車体の振動を低減して効果的に乗り心地を向上できることを示す。

## 2. システム構成と制御則

### 2.1 全体構成

可変減衰上下動ダンパを用いた制振制御システムの全体構成を図1に示す。上下動ダンパ（1両あたり4本）は、指令電流の大きさに減衰力を変化できる「可変減衰ダンパ」であり、車体に取り付けた加速度センサの出力をもとに、制御装置において目標減衰力を計算して各ダンパの減衰力を制御する。加速度センサの個数および車体への取付け位置は、制御対象とする車体の振動モードの数と種類によって異なるが、概ね3~4個で行う。

### 2.2 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。このダンパには、減衰力を制御するための“減衰力制御弁”と、システム電源がOffのときに現用パッシブ上下動ダンパ（試験対象車両に元々取付けられていた試験実績のあるパッシブ上下動ダンパ）に近い特性とするための“フェールセーフ弁”と呼ぶ切替弁が取り付けられており、フェールセーフ性を備えた減衰制御を行うことができる。

本ダンパの指令電流-減衰力特性を図3(a)に示す。このダンパの減衰制御機構（減衰力制御弁）には、反転式と呼ばれる制御弁を採用した<sup>3)</sup>。これにより、ダンパに対して伸縮を助長する方向の力が要求されるときには最小減衰になる機能を制御弁自体の作用として実現した。

指令電流を一定としたときのピストン速度-減衰力特性を図3(b)に示す。本ダンパの最大減衰力は約6kN、最小減衰力は約0.5kNであり、0.01 m/s以上の速度領域では約5kNの減衰力可変幅

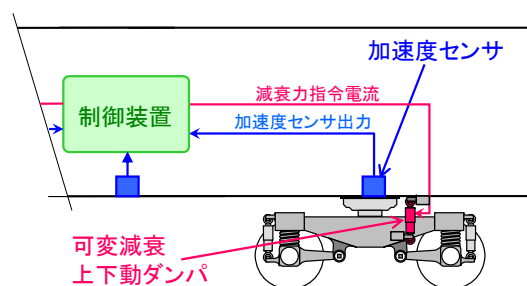


図1 全体構成

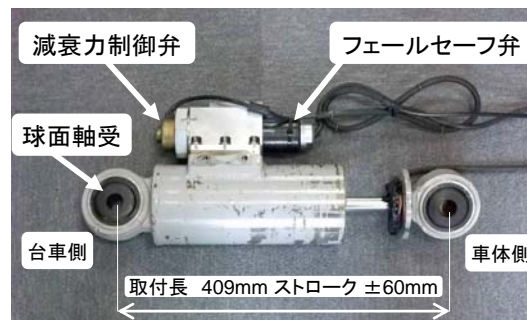


図2 走行試験用可変減衰上下動ダンパ

を有する．図 3 (b)において“パッシブダンパ”として表記した線は，現用パッシブ上下動ダンパ（減衰係数 40kN/(m/s) 固定）の特性である．本システムはフェールセーフ性を考慮し，システム電源断の際にはこのダンパに近い減衰力特性となるように設計・製作を行った．また，減衰力制御弁の他に安全弁がダンパに内蔵されており，減衰力制御弁が故障した場合でも概ね 6kN 以上の減衰力が発生しないよう配慮した．

### 2.3 制御則

制御アルゴリズムのブロック図を図 4 に示す．車体の上下振動加速度から，車体の上下並進，ピッチング，1次曲げ，ロール成分を抽出し，それぞれの振動モードごとにスカイフック制御を行う．ただし，ロール成分は他の成分と比較して相対的に振動が小さいため，ロール振動が顕著な駅構内のみ制御を行うこととした．

## 3. 走行試験による検証

### 3.1 走行試験条件

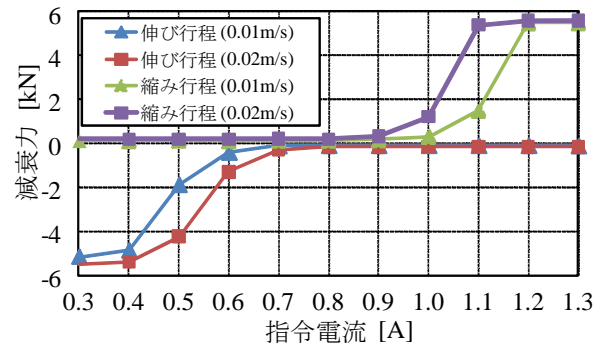
走行試験は，西日本旅客鉄道（株）の協力を得て在来線において実施した．使用車両は，車両長 20m，台車中心間距離 13.8m の近郊型通勤電車相当の試験車である<sup>1)</sup>．

可変減衰上下動ダンパの現車への取付状況を図 5 に示す．今回の走行試験においては，ダンパの減衰制御性能を最大限に利用するため，ダンパ取付時には空気ばね内部の固定絞りを取り外し，2次ばね系の減衰はほぼすべて可変減衰上下動ダンパが負担するようにした．

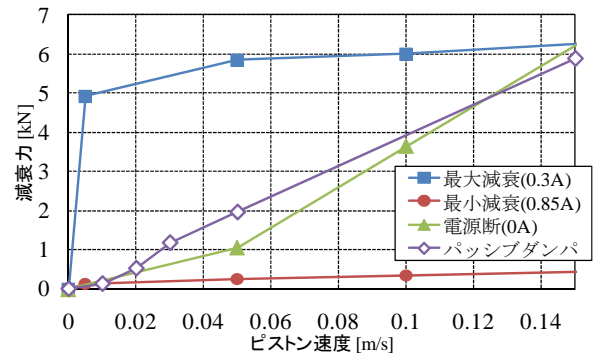
以下，上下並進・ピッチング制御を行った場合を“組合せ制御 A”，これに加えて曲げ振動制御を行った場合を“組合せ制御 B”，さらにロール制御を行った場合を“組合せ制御 B'”と記す．

### 3.2 走行試験結果

試験を実施した閑散線区において，とくに車体剛体モードの振動が顕著であった試験区間（区間 a，走行速度 62km/h）の上下振動加速度パワースペクトル密度(PSD)を図 6 に示す．台車直上，車体中央ともに，1.4Hz 付近に剛体モードの振動による加速度 PSD ピークが見られる．組合せ制御 B により，上下動ダンパなしの場合に比べて 2Hz 以下の振動が全体的に減少し，特に 1.4Hz の PSD ピーク値は 1/5 程度に減少した．その結果，



(a) 指令電流－減衰力特性例



(b) ピストン速度－減衰力特性例

図 3 可変減衰上下動ダンパの減衰力特性

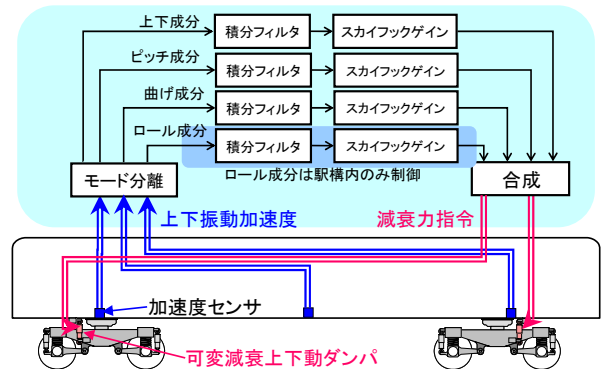


図 4 制御則の構成

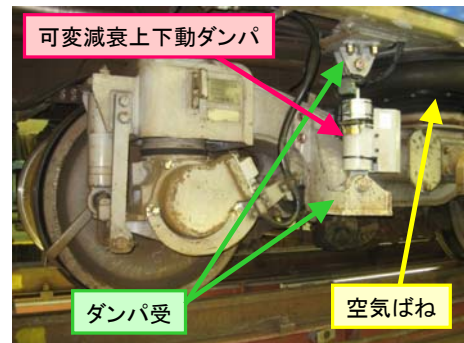


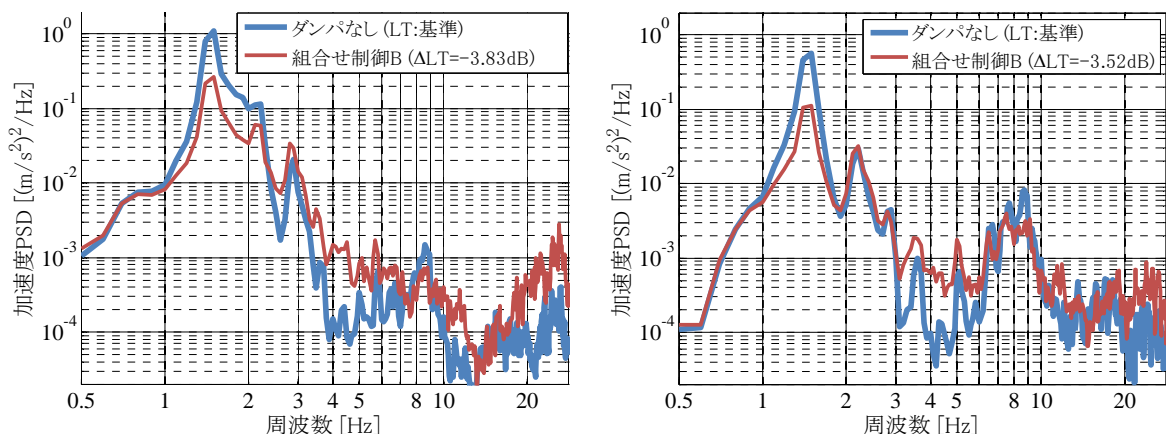
図 5 可変減衰上下動ダンパの実車への取付状況

$L_T$  値（乗り心地レベル）は 3.5~3.8dB 程度低減された。一般に  $L_T$  値で 3~5dB 程度の相違があると乗り心地の差が体感できるとされていることから<sup>3)</sup>、本システムにより、体感でわかるレベルで振動を低減できたといえる。

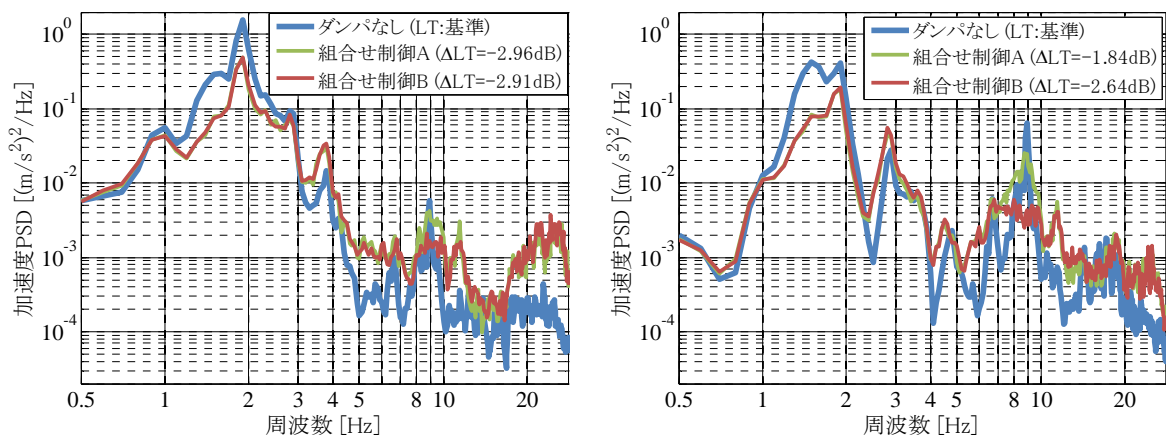
次に、車体剛体モードの振動に加えて車体曲げ振動が顕著であった区間（区間 b、走行速度 83km/h）の上下振動加速度 PSD を図 7 に示す。組合せ制御 A を行うと、1~2Hz の剛体モードの振動が低減されるが、車体中央における 9Hz 付近の曲げ振動に起因する PSD ピークの低減効果はあまり得られていない（図 7 (b)）。これに対し、曲げ振動も制御する組合せ制御 B を行うと、1~2Hz の剛体モードの振動の低減効果を損なうことなく、車体曲げ振動による PSD ピーク値を約 1/10 に低減させることができた。その結果、車体中央での  $L_T$  値低減効果は 1.8dB から 2.6dB に向上し、剛体モードに加えて曲げ振動を制御することにより、さらに優れた乗り心地向上効果が得られることを確認した。

なお、図 6、図 7 を比較すると、1.5Hz 付近の加速度 PSD ピーク周波数が走行速度によって異なることがわかる。これは、25m の定尺レールをそれぞれの走行速度で走行した場合のレール継目を通る周波数と一致しており、他の閑散線区の走行試験でも同様の結果であった。これより、閑散線区では、レールの継目落ちに起因する振動が乗り心地に対して支配的であるといえる。

走行試験区間全体での乗り心地向上効果を確認するため、短時間  $L_T$ （各地点における乗り心地評価のため、 $L_T$  の評価時間を 1 分未満としたもの）を計算した結果を図 8 に示す。約 50km の試



(a) 上下振動加速度 PSD (後位台車直上) (b) 上下振動加速度 PSD (車体中央)  
図 6 上下動ダンパ制御による振動低減効果 (閑散線区, 区間 a, 走行速度 62km/h)



(a) 上下振動加速度 PSD (後位台車直上) (b) 上下振動加速度 PSD (車体中央)  
図 7 上下動ダンパ制御による振動低減効果 (閑散線区, 区間 b, 走行速度 83km/h)

験区間内には様々な軌道条件が含まれ、走行速度も変化するが、走行区間全体にわたり短時間  $L_T$  値が 2.5~3dB 程度低減され、本システムが安定した乗り心地向上効果を発揮していることがわかる。

駅の構内では、ポイント通過や局所的な軌道不整により、比較的大きなロール振動が発生することがある。そのような区間で、組合せ制御Bに加えてロール振動も制御した場合（組合せ制御B'）の結果を図9に示す。ダンパなしに対し、単にパッシブダンパ（図中 C40：減衰係数 40kN/(m/s) 固定）を取り付けても、振動はほとんど低減されていない。しかし、比較的低いピストン速度(0.05m/s 程度)であっても、大きな力（約 6kN）を選択的に発生させることができる本システムを適用した場合、ロール振動角速度を約 60%に低減させる効果が得られた。

#### 4. まとめ

空気ばねに並列に取り付ける上下動ダンパの制御により、車体の剛体モードに加えて曲げ振動の低減効果が得られることを走行試験により実証した。本システムは、軌道に手を入れることなく特定の列車ないし車両の乗り心地を低コストで向上させたい場合に特に有効な手法であると考えられ、現在、本システムの早期実用化に向けた取り組みを行っている。

なお、走行試験実施にあたり、多大なご協力を頂いた西日本旅客鉄道(株)、可変減衰上下動ダンパの開発にご尽力頂いた日立オートモティブシステムズ(株)の関係各位に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 山之口ほか：ロール振動改善の取り組み（在来線試験車 U@tech 試験台車による技術検証），第 14 回鉄道技術連合シンポジウム CD-ROM 論文集，pp.135-136, 2007.
- 2) 菅原ほか：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.
- 3) 木村：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.
- 4) 山崎ほか：乗心地評価法の研究，鉄道労働科学，Vol.36, pp.57-73, 1982.

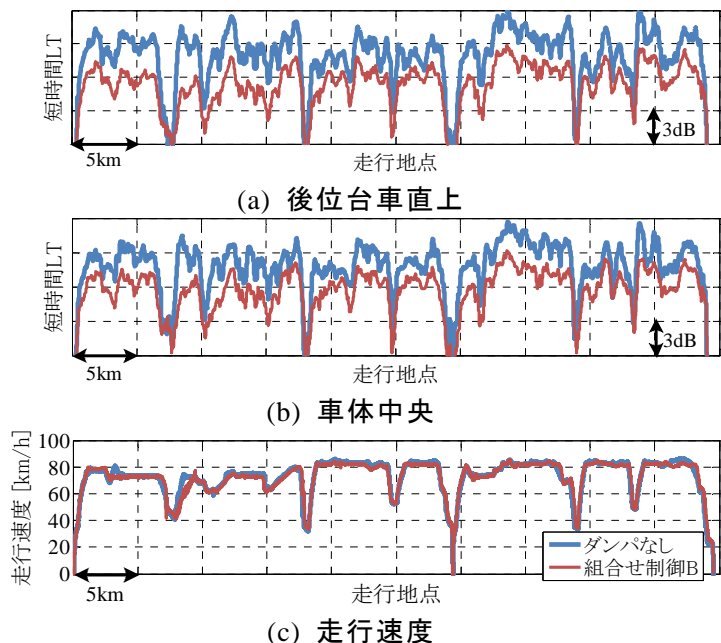


図8 走行区間全線の短時間  $L_T$  値の比較（閑散線区）

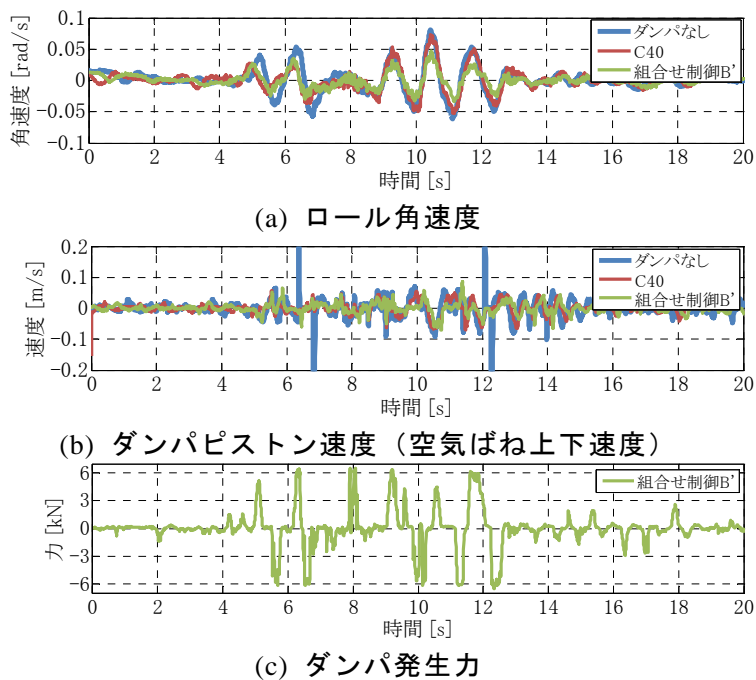


図9 駅構内でのロール振動低減効果（走行速度 42km/h）