

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# 車両の上下動揺を制御して 乗り心地を向上する

地方交通線と呼ばれるようないわゆるローカル線を走行する車両では、車両がレールの継ぎ目部を通過する際などに車両が比較的大きく上下に振動し、乗り心地が悪くなることがあります。軌道側の対策を行うことなくこのような振動を低減する方策のひとつとして、鉄道車両用の上下方向の制振制御システムを開発し、実用化しました。本稿では、システム開発の経緯、装置の構成、そして制振効果について紹介します。



**菅原 能生**  
Yoshiki Sugahara  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
主任研究員  
【専門分野】制御技術とその応用



**小島 崇**  
Takashi Kojima  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
副主任研究員  
【専門分野】車両のダイナミクス、異常検出

## 上下制振制御システム開発の経緯

### ローカル線に観光特急列車を！

新幹線の停車駅とその先に位置する観光地とのアクセス性向上を目的として、在来線に観光特急列車が運行されることがあります。列車の走行線区が地方交通線と呼ばれるようないわゆるローカル線である場合、軌道(☞参照)の整備基準が比較的低く、他の路線と比べて軌道の不整が大きい傾向があります。そのような軌道の上を車両が走行すると、車両の振動が大きくなり、乗り心地への影響が懸念されます。これは、でこぼこした道路を自動車で走

ると大きく揺れ、高速道路など道路がしっかりしたところを走るとあまり揺れないことと同じです。

観光特急列車は、比較的古いタイプの車両を大幅にリニューアルして製作されることがあります。車両の台車と車体の間のばね(2次ばね、もしくはまくらばねと呼ばれる)には、最近の車両では空気ばねが一般的に使用されていますが、旧タイプの車両では図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ーが取り付けられている場合があります。このタイプの車両は、空気ばね式の車両より上下振動が大きくなる傾向があります。

### ローカル線走行時の車体振動の例

この車両と同等の車両を、地方交通線で走行させた際の、車体の上下・左右の

#### ☞ 軌道

レール、まくらぎ、および道床と呼ばれるレールとまくらぎを支える部分を合わせたもの。

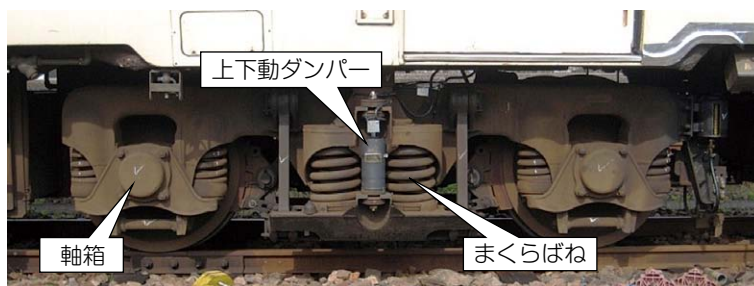


図1 コイルばね揺れまくら吊り台車の外観

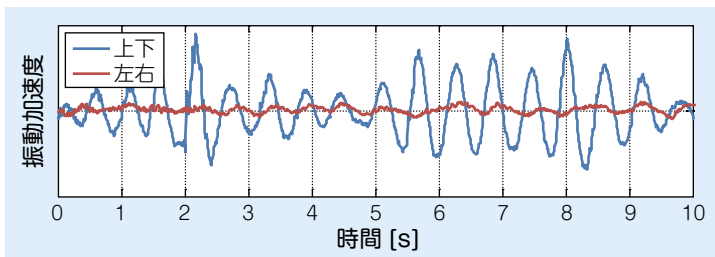


図2 ローカル線走行時の車体の上下・左右振動例

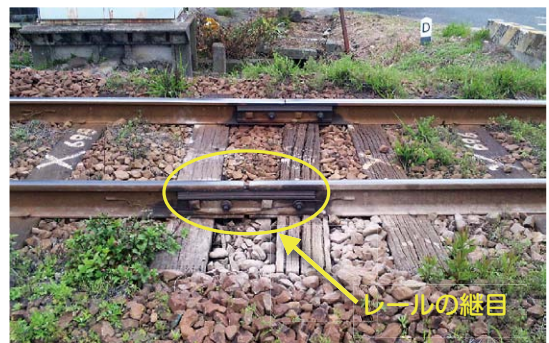


図3 ローカル線のレール継目の例

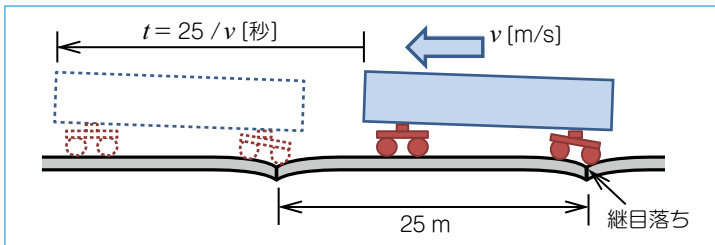


図4 25mレール走行時の車両とレールとの関係

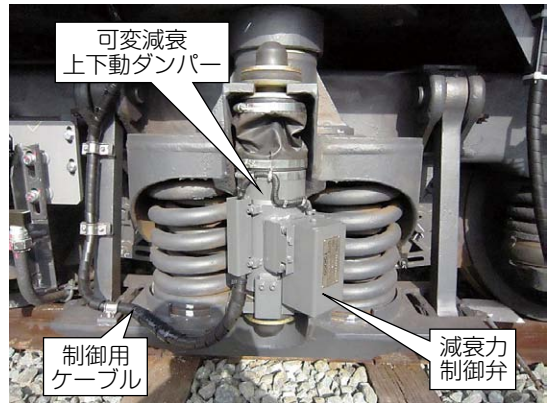


図6 可変減衰上下動ダンパー

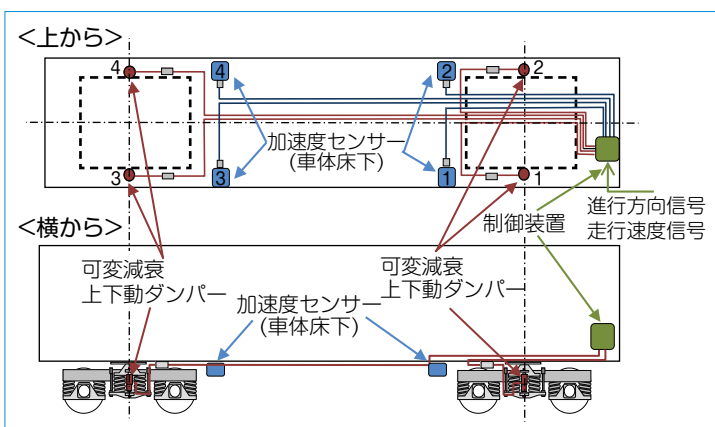


図5 上下制振制御システムの構成

振動加速度を図2に示します。左右より上下方向の振動加速度が大幅に大きく、乗り心地を向上するためには上下方向の振動低減が必要であることがわかります。

この上下振動は、車輪がレールの継目部(図3)を走行する際に発生するものであることがわかっています。その様子を図4に示します。ローカル線の場合、長さ25mのレールが一般的に使用されていて、このレールの継目の位置が他の部分より荷重に弱く、図4のようにやや落ち込んだ状態になっています。このような軌道の状態を“継目落ち”と呼んでいます。レールの継目を通過する時間間隔は、速度を $v[m/s]$ とすると、 $t = 25/v[秒]$ おきになります。このように周期的に車両が加振されることで、図2のような上下振動が発生します<sup>1)</sup>。

### 車体の振動を低減するには

このような車体の振動を低減するためには、①軌道の整備基準を上げて軌道の不整を小さくすること(車両を揺らさない線路にする)、②車両側に何らかの振動対策を行う(揺らされても揺れにくい車両にする)、という2つの方法が考えられます。

しかし、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いて、新たに導入される観光列車の乗り心地向上のためだけにこれ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した。そこで、車両側に振動対策を行い、乗り心地を向上することになりました。

### 上下制振制御システムの構成

車両の振動を低減するために開発し

た、上下制振制御システムの構成を図5に示します。このシステムは、

- ①車体と台車の間に取り付けて、振動を抑制するための力を発生させる“可変減衰上下動ダンパー”
- ②振動を測定する“加速度センサー”
- ③測定した振動加速度から力の指令値を計算したり、システム全体の異常を監視したりする“制御装置”

から構成されています。それぞれの詳しい機能を順に紹介したいと思います。なお、なぜ車体と台車間に取り付けるダンパーを制御するのか、という理由については、2010年12月号のRRR<sup>1)</sup>に記載されているので、そちらをご覧ください。

### 可変減衰上下動ダンパー

このシステムでは、現用の上下動ダンパー(図1)の代わりに、“可変減衰上下動ダンパー”を取り付けます。このダンパーは、ダンパーの発生力(減衰力と呼びます)を外からの指令電流によって制御することができる上下方向のダンパーで、その外観を図6に示します。通常の上動ダンパー

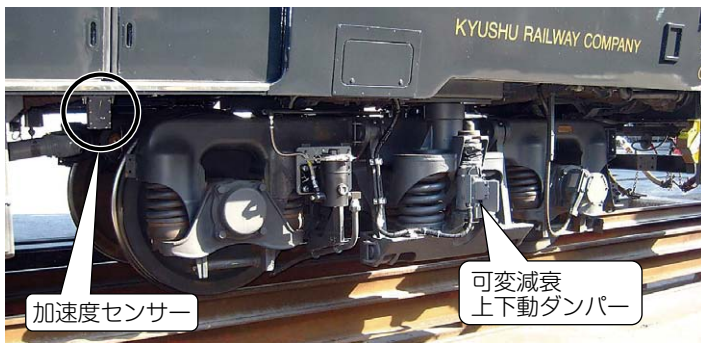


図7 加速度センサーの取付状況



図8 制御装置の外観

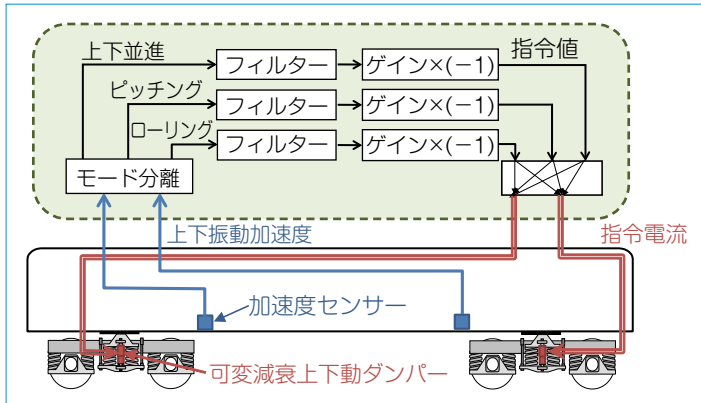


図9 上下制振制御システムの制御アルゴリズム

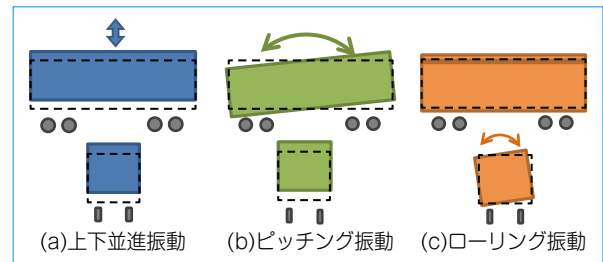


図10 制御対象とする振動成分の種類

(図1)と比較すると、減衰力を制御する弁がダンパー本体の横にくっついたような構造になっています。

このダンパーは低コスト化と信頼性を確保するため、減衰力の制御をダンパー1本あたり1個の制御弁だけでできるように工夫されています。制御弁が1個しかないのでシンプルであり、減衰力制御弁に電流を供給するケーブルが、ダンパー1本あたり1本で済むなど、コストが低く、ケーブルに起因するトラブルも少なくできます。

ダンパーの減衰力は、制御用ケーブルから供給する指令電流の大きさに制御します。詳しい電流と減衰力の大きさの関係については、例えば文献<sup>2)</sup>を参照してください。ダンパーの電源を切ったとき(指令電流が0のとき)は、現用の上下動ダンパーとほぼ同等の減衰力特性になるように設計されていて、ダンパーのフェールセーフ性(☞参照)を確保しています。

#### ☞ フェールセーフ

故障・異常が発生した場合でも、常に安全側になること。

#### 加速度センサー

振動を検知する加速度センサーは、図7に示すように車両の客室扉直下の床面に取り付けています(計4か所:図5参照)。この位置に取り付けて、後述するように3種類の成分の振動を検出します。

#### 制御装置

制御装置は、乗務員室の補助椅子の下に設置されています(図8)。この制御装置は、車両から供給される直流24V電源で動作し、加速度センサーの電源供給・信号受信の機能、可変減衰上下動ダンパーの減衰力指令値の計算および指令電流の供給を行います。

また、制御装置には、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ー、ダンパー減衰力異常を検知する機能が搭載されています。異常検知時には、ダンパー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LEDにより異常種別が表示され、異常情報が装置内部に保存されます。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ます。

なお、異常検出機能のうち特にダンパーの減衰力異常検出については、制御に用いる加速度センサーの信号から異常を検出するアルゴリズムを新たに開発して搭載しました。これについては、2013年2月号のRRRに詳しく記載されているので<sup>3)</sup>、そちらをご覧ください。

#### 制御アルゴリズム

車両の振動を加速度センサーで測定して、その振動からどのようにダンパーへの指令値を計算するのでしょうか。このシステムでは、“スカイフック制御”<sup>4)</sup>と呼ばれるアルゴリズムを用いました。そのブロック図を図9に示します。図に示したように、シンプルアルゴリズムなので、計算負荷が軽く、制御装置の調整も比較的容易なため、実用性が高いのが特徴です。

制御の流れですが、加速度センサーから得た上下振動加速度を、まずは車体の上下並進・ピッチング・ローリング成分(図10)に分解します。

そして、フィルターで積分して各成

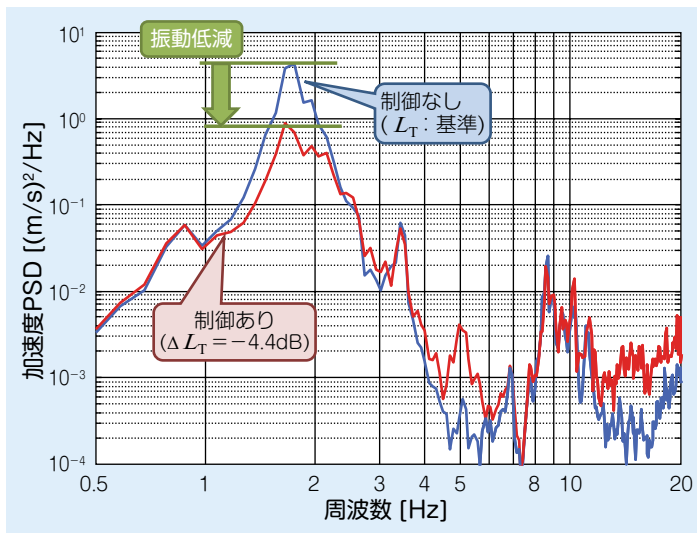


図11 上下振動加速度パワースペクトル密度の比較  
(在来線 走行試験結果 走行速度72km/h)



図13 観光特急列車「指宿のたまて箱」  
(写真提供：九州旅客鉄道(株))

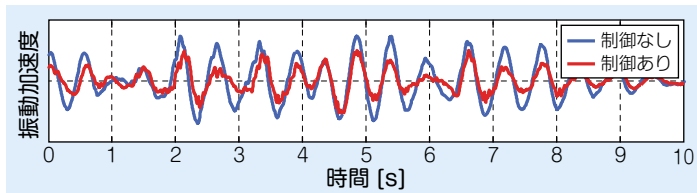


図12 制御の有無による振動加速度(実時間波形)の比較

分の振動速度を計算します。“スカイフック制御則”を用いた場合、この振動速度に定数(ゲインと呼びます)を乗じて逆向きに(マイナス1倍)したものが指令値となります。この逆向きの意味は、例えば車体が上向きに動いているときは、その逆の下向きの力を加えて車体が上に動くのを抑制することを意味します。また、ゲインは、車体が1というスピードで動いていた場合、その何倍の力をダンパーに指令するのか、ということの意味しています。

このようにして、上下並進・ピッチング・ローリングの3つの成分に対する力を計算し、これらを合成したうえで、4つのダンパーにこの力を振り分けます。これで、ダンパー1本あたりの減衰力指令値が求まり、これを上下動ダンパーに電流値の大きさで指令します。ゲインの大きさは、数通りの値を設定して実際に走行試験を実施し、最も乗り心地が良かったものを採用します。

### 走行試験による制振効果の確認

本システムを在来線の気動車に取

り付けて、走行試験を実施しました。72km/hで等速走行したときの台車直上の車体上下振動加速度パワースペクトル密度(PSD)(参照)を図11に示します。レール継目通過に伴う加速度PSDピークが1.7Hzに見られますが、ダンパーを制御することによって、この振動が1/4以下に減少しています。この結果、乗り心地の良さを示す $L_T$ 値(参照)は4dB以上低減され、ダンパーの制御により体感レベルで乗り心地が向上していることがわかります。

また加速度の実時間波形例を図12に示します。制御を行うと振幅が30%程度減少し、明らかな振動低減効果が得られていることがわかります。

#### ☞ 加速度パワースペクトル密度

振動の強さを表し、値が大きいほど振動が大きいことを示します。

#### ☞ $L_T$ 値

乗り心地レベルの値。デシベル(dB)値で表示され、値が小さいほど乗り心地がよいことを示します。一般に3~5dB $L_T$ 値が異なると乗り心地の差を体感できるとされています。

### おわりに

本稿では、車両の上下乗り心地を向上する方法の一つとして開発した、可変減衰上下動ダンパーによる制振制御システムについて紹介しました。本システムを用いることにより、コストが高い軌道側の工事を行わずに上下方向の乗り心地を向上することができます。

このシステムは、九州旅客鉄道(株)の観光特急列車「指宿のたまて箱」(鹿児島中央~指宿、図13)に採用されました。鉄道車両の上下方向の制振装置としては、世界で初めての実用化例になります。その後、特急「はやとの風」(鹿児島中央~吉松)にも搭載され、ローカル線を走行する特急列車の上下方向の乗り心地向上に貢献しています。

RRR

### 文献

- 1) 菅原, 小島: 輸送密度の低い線区を走行する車両の上下乗り心地を向上する, RRR, Vol.67, No.12, 2010
- 2) 菅原ほか: 可変減衰上下動ダンパーを用いた制振制御システムの開発と実用化, 鉄道総研報告, Vol.27, No.5, 2013
- 3) 小島, 菅原: 車両の油圧ダンパーの異常を走行しながら見つける, RRR, Vol.70, No.2, 2013
- 4) 佐々木: 車両の揺れを賢く抑える, RRR, Vol.60, No.2, 2003