

車両の快適性向上に関する最近の研究開発

佐々木 君章*

Recent Research and Development on Improvement in Ride Comfort

Kimiaki SASAKI

The Vehicle Research Group, RTRI, is now promoting researchers on various subjects to improve the performance of railway vehicles in service. This paper introduces the current status and several important points of the development activities on improvement in ride comfort using control technology, such as a study to suppress vertical vibration of railway vehicles by controlling the force of axle dampers, a low cost control of carbody tilting, and a noise reduction using piezoelectric materials.

キーワード：上上下下振動，騒音，振子，制御，乗り心地

1. はじめに

近年の鉄道車両は速度向上，輸送品質に対する要求の高まりから，性能の高度化が進んできている。このため，新幹線電車の左右振動対策のように，従来最適設計がされていた機構・部位にも制御技術を応用して，性能を向上していこうとする動きが乗り心地改良の分野においても進んでいる。

本稿では，最近の動向として制御による上下振動の改善，低コスト車体傾斜制御，騒音低減の問題を取り上げ，技術内容と開発状況を紹介する。

2. 上下制振制御システム

2.1 可変減衰軸ダンパを用いた上下制振制御システム

最近の新幹線車両等では，様々な左右振動低減策によって左右の振動乗り心地が向上した結果，相対的に上下振動が大きく感じられる傾向がある。上下振動のうち，特に車体の1次曲げ振動の固有振動数は，人間が上下振動を敏感に感じる周波数帯域（4～8Hz）に近接していることが多く，上下乗り心地向上のためにはこの振動の低減を必要とする場合が多い¹⁾。

これまでの車体の曲げ振動低減手法は，車体に制振材を貼付する²⁾ などして，“減衰要素の付加により車体の振動エネルギーを散逸させるもの”と，2次ばね系のアクティブサスペンション³⁾ のように，“制振力を車体に直接加えて振動を低減するもの”が主体であった。

これに対し，現在開発中の「可変減衰軸ダンパを用いた上下制振制御システム」は，1次ばね系の減衰要素である軸ダンパの減衰力を制御し，車体への主要な加振源である台車振動の低減によって車体振動を抑える方法

で，“車体の振動を台車から絶つ”ことに相当する。

開発中のシステム構成を図1に示す。振動制御システムは，台車枠に取り付ける加速度センサ（1台車あたり2個），可変減衰軸ダンパ（1台車あたり4本，図2），およびコントローラ（図2）により構成される。加速度センサの情報をもとに，車体1次曲げ振動の低減に必要な減衰力をコントローラで計算し，可変減衰軸ダンパに電流値で指令する。

本方式はこれまでに複数の箇所で行走試験が実施され，いずれも良好な振動低減効果，および乗り心地向上効果（乗心地レベル（ L_T 値）を3dB以上低減）が確認されている^{4) 5)}。この例として，新幹線電車で実施した走行試験での車体中央上下振動加速度 PSD の例を図3に示す⁵⁾。9Hz付近に車体の1次曲げ振動による PSD ピークが見られるが，制御を行うことによりこのピークが約1/5以下に低減されていることがわかる。

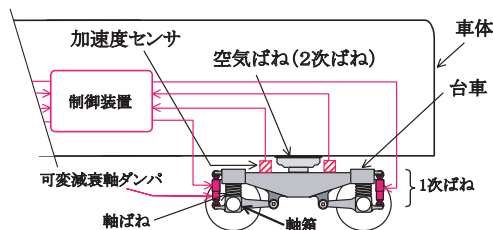


図1 可変減衰軸ダンパを用いた上下制振制御システム



図2 可変減衰軸ダンパと試作制御装置(営業車搭載用)

* 車両構造技術研究部 部長

特集：鉄道車両技術

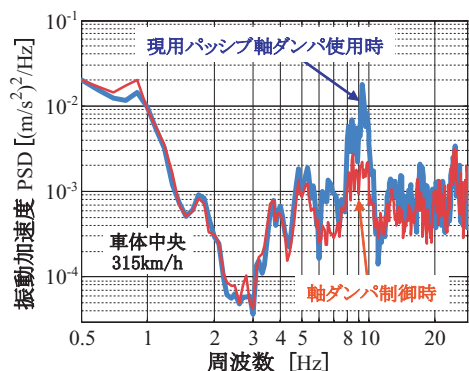


図3 軸ダンパの制御による車体上下振動低減効果

このシステムは、性能試験の後、走行距離約 75,000 km の中期耐久走行試験を実施し、損傷等の問題が発生しないことを確認している。現在、これまでの走行試験の結果をもとに、システム実用化に向けた信頼性向上および低コスト化のための開発が行われている。

2.2 可変減衰空気ばねによる上下制振制御システム

一方で、地方交通線のように軌道不整が大きい路線では、車体の剛体モードの振動（通常は1～2Hz）が卓越し、乗り心地に比較的大きな影響を与えていることが多い。そこで、空気ばねの減衰を制御することによって車体の剛体モードの振動を低減するシステムを開発した⁷⁾。

システム構成を図4に示す。可変減衰空気ばね、空気ばねの上下変位を計測する変位センサ、車体の振動を測定する加速度センサ、および制御装置により構成される。

空気ばねの構成、および可変減衰空気ばねの断面図を図5に示す。通常空気ばねは、空気ばね、補助空気室、およびこの両者の間に設けられた絞りにより構成され、絞りによって適度な減衰を与えている。可変減衰空気ばねは、空気ばね内部に搭載した“絞り制御弁”により、絞り開口面積を変化させ、減衰を制御することができる。この空気ばねは、通常空気ばねと互換性があり、車両の大幅な改造を伴わずにシステムを搭載できる。

新幹線電車に本システムを搭載して走行試験を実施した結果の例を図6に示す。制御により1～3Hzの車体の上下振動が低減されている。また、本システムと軸ダンパの減衰制御システムを組み合わせることにより、車体の剛体モードと曲げ振動を同時に低減でき、一段と高い乗り心地向上効果を得ることが可能である⁸⁾。

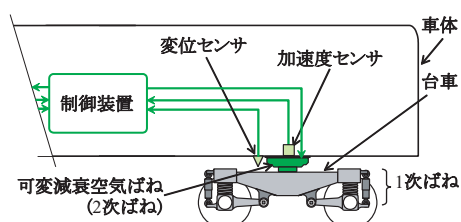


図4 可変減衰空気ばねによる上下制振システム

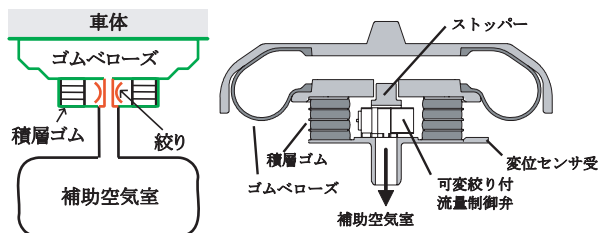


図5 可変減衰空気ばねの構造

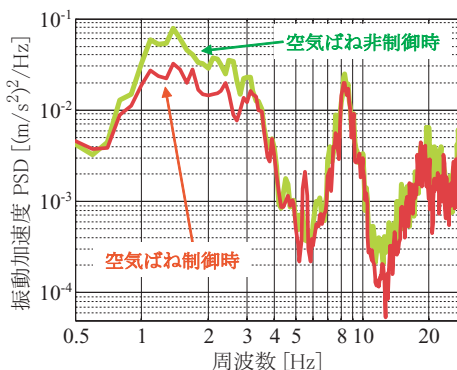


図6 空気ばねの減衰制御による車体上下振動低減効果

2.3 可変減衰上下動ダンパによる上下制振システム

上記の可変減衰空気ばねは、車両側の大きな改造が不要という長所を持つ反面、制御力が空気ばねを介して伝わるため、車体に対して直接大きな減衰力を作用させることができないという課題があった。

そこで、図7に示すように、車体一台車間に油圧ダンパを取り付け、このダンパの減衰力を制御することにより車体の上下振動を低減するシステムを現在開発している。本装置は可変減衰上下動ダンパと車体に取り付ける加速度センサ、および制御装置により構成される。

最近の主流であるボルスタレス台車は、上下動ダンパが装備されていないため、本システムを搭載するには取付ブラケットの追加の工事が必要であるが、特に軌道不整が比較的大きい箇所効果的に車体の上下振動を低減できることが走行試験により確認された⁹⁾。

現在、2年以内の実用化を目指してこのシステムの開発を進めている。

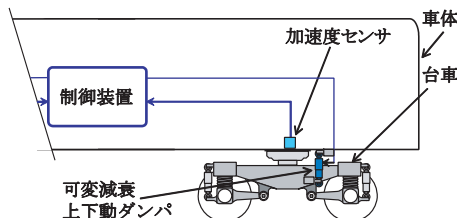


図7 可変減衰上下動ダンパによる上下制振システム

3. 低コスト振子制御システム

振り車両技術は、曲線区間が多い線区の到達時間短縮に非常に有効で、制御付振り車両が各地の特急車両に広

く採用されている。現行の振り制御システムは、車上の線路データベースに基づく予測制御方式が最大の特徴で、傾斜遅れのない制御が可能なが最大の長所である。一方で、良好な乗り心地を確保するため、線路データベースの精度や正確な位置検知が必要であり、これらを保つためのメンテナンスや、信頼性の高い車両間通信が必要であるなど、コスト面の課題があった。

そこで、乗り物酔いが発生しにくい制御が可能ながことを前提に、自然振り車両を含む現在の振り車両に大幅な改造工事を伴わずに適用可能な、簡易な車体傾斜制御システム（低コスト振り制御システム）の開発を行った。

本システムは車両の走行により検出されるヨー角速度に基づく制御で、従来の振り制御のような線路データベースや車両間通信を持たないため、システムが単純化される。走行試験による性能確認で、本システムは乗り物酔い低減に効果があることが確認された。

3.1 システムの概要

鉄道車両における乗り物酔いの発現は、低周波の左右加速度の被曝量に深い関係を持つとされており、この評価方法として、0.3Hz付近にピークを持つ重み付けフィルタで重み付けされた車体左右加速度の積分値で評価する指標「MSDV-y」が提案されている⁹⁾。

本指標は、傾斜速度の大きさは評価しない。現状の振り車両において本指標を悪化させる主要因は、緩和曲線における傾斜動作の遅れや、傾斜角速度の制限で発生する左右加速度のうねりである。

本システムでは構成を単純化するため、線路データベースを持たない構造としたが、このような左右加速度のうねりを加速度フィードバックで直接的に抑制することは、以下の点から困難である。

- ① 加速度の振動成分を除去するフィルタの遅れにより、必要な即応性が得られない。
- ② 制御性能を上げると発振を起こす危険性がある。

このため、ヨー角速度センサと走行速度から演算した予測超過遠心加速度による制御を考案した。

超過遠心加速度の推定には、その位置における走行速度、線路曲線、カントの情報が必要である。線路曲率は車体のヨー角速度を走行速度で割ることと比較的に計算できるのに対して、カントを車上センサ信号の処理によって求めることは高精度の測定が必要で難しい。一方で、カントは基本的にその線区を走る最高速度の列車を考慮して決められるため、特定の線区上では線路曲率と密接な関係を持つと考えられる。試験線区で実測した曲率とカントの相関関係を図8に示す。構内や分岐器などの低速区間を除き、曲率とカントの間には概ね線形性がみられる。低速走行区間においては傾斜制御の必要がないので除外すると、この比例係数（図中の赤色破線）を

線区のパラメータとして設定することで、曲率からカント、さらには超過遠心加速度が予測できる。基本的な制御ブロック線図を図9に示す。

3.2 走行試験結果

低コスト振り制御システムを既存の自然振り車両に仮設し、走行試験を実施した。傾斜アクチュエータには応答性に優れる電動油圧式アクチュエータを用いた。

S字曲線を通過する際の車体傾斜状況の比較を図10に示す。自然振りでは傾斜動作の遅れにより、MSDV-yを悪化させる左右加速度の低周波うねりが大きく現われているのに対して、低コスト振り制御システムでは抑制されている。

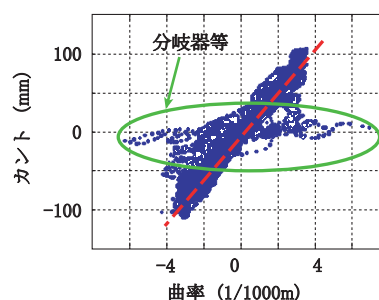


図8 曲率とカントの関係

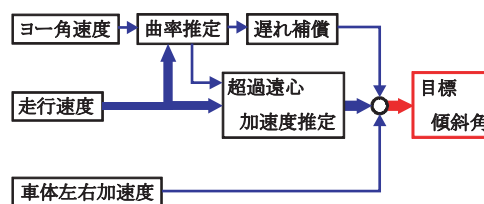


図9 制御ブロック線図

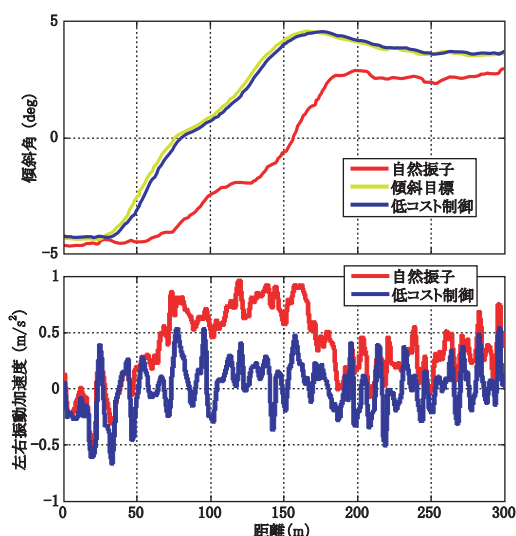


図10 S字曲線通過時の状況

4. 騒音低減システム

高速化が進む鉄道車両では、空力騒音等の増大に伴い、

特集：鉄道車両技術

車内騒音が大きくなる。車内騒音の対策は、これまで質量則を根拠としたパッシブ対策が主な方法であったが、内装透過音に対する新しい騒音低減法の開発を進めている。

この騒音低減システムは、圧電材料を貼付した小型平板（遮音板）を平面状に配列したパネル（騒音低減パネル：図11）と、制御回路で構成される。

入射音による遮音板の振動を、圧電材料と制御回路間で発生する制御力で抑制することで、透過音を低減する。この騒音低減パネルを内装板に空気層を設けて取り付け、壁を透過する音の低減を図る。制御回路は、アナログ回路によるインダクタンス回路であり、遮音板上の圧電材料の静電容量との間に共振回路を構成することで、共振周波数を中心に遮音板の振動低減効果が得られる。

内装板の振動状態を把握する必要がないため、加速度センサやマイクロホンなどは不要であり、本パネルを取り付けるだけで、透過音の低減が可能となる。

走行中の特性検証のため、新幹線車両のデッキ部における騒音低減効果を評価した。予め測定したデッキ部の騒音特性より低減する中心周波数を200Hzに定め、この周波数において最も騒音低減効果が得られる遮音板の騒音低減パネルの製作と制御回路定数の設定を行った。本パネルを、デッキ部の接続側の妻壁と天井に取り付け、

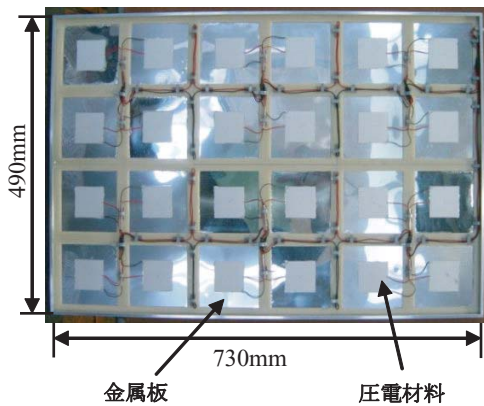


図11 騒音低減パネル

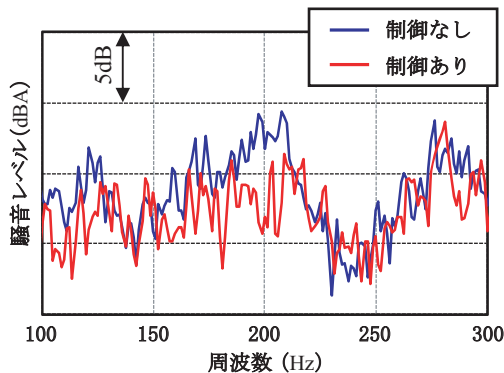


図12 デッキ部騒音低減試験結果

制御なしとありのデッキ部騒音の変化を比較したところ、図12のように、200Hz近傍のデッキ部騒音が最大約7dB低減した。

今後は、騒音低減帯域の拡大等の性能向上と、合わせて車両搭載機器からの発生音に対する実用化を進める予定である。

5. おわりに

制御技術による乗り心地向上に関する最近の研究事例を紹介した。車両の高性能化を図っていく上で、制御技術は技術革新が見込まれる、最も有望な技術の一つであり、応用範囲の拡大が続くと予想される。今後も新しい技術、発想の開拓を心がけていきたいと考えている。

文献

- 1) 鈴木康文・ほか：車体の曲げ振動解析—車体曲げ剛性と振動乗り心地に関する—考察—，鉄道総研報告，Vol.3, No.2, pp.44-50, 1989
- 2) 鈴木康文：鉄道車両の振動解析法および制振法に関する研究，鉄道総研報告，特別第16号，1997
- 3) 上林賢治郎・ほか：上下系アクティブ制振制御装置の開発（300X新幹線電車での走行試験結果），第5回鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail98）講演論文集，pp.499-502, 1998
- 4) 菅原能生・ほか：鉄道車両の1次ばね系の減衰制御による上下振動低減（新幹線電車による高速走行試験結果），日本機械学会論文集（C編），Vol.74, No.741, pp.1222-1230, 2008
- 5) 菅原能生・ほか：鉄道車両の1次ばね系の減衰制御による上下振動低減（車両諸元による制振性能への影響），日本機械学会論文集（C編），Vol.75, No.753, pp.1304-1311, 2009
- 6) 菅原能生・ほか：鉄道車両の1次ばね系の減衰制御による上下振動低減（フェールセーフ機能統合型減衰力制御弁による走行試験結果），日本フルードパワーシステム学会 春期講演会 講演論文集，pp.59-61, 2009
- 7) 菅原能生・ほか：空気ばねの減衰制御による鉄道車両の上下振動低減，鉄道総研報告，Vol.21, No.7, pp.17-22, 2007
- 8) 菅原能生・ほか：軸ダンパと空気ばねの減衰制御を併用した車両の上下振動低減，鉄道総研報告，Vol.22, No.2, pp.17-22, 2008
- 9) 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
- 10) 鈴木浩明ほか：低周波振動が列車酔いに及ぼす影響，鉄道総研報告，Vol.18, No.2, PP.9-14, 2004