

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

菅原 能生
車両構造技術研究部
(車両振動 主任研究員)

小島 崇
同
(走り装置 研究員)



すがはら よしき



こじま たかし

はじめに

鉄道を利用していると、乗車する車両の種類や路線によって乗り心地の違いを体感することがあると思います。例えば、いわゆる“ローカル線”では、列車がそれほど速い速度で走行していなくても「ガタン、ゴトン」と音を立てて揺れながら走っていますが、多数の通勤列車や特急列車が運行されているような“幹線”では、そのような振動は比較的小さくなる傾向があります。

このような路線による乗り心地の違いは、軌道（レールや、それを支えている道床など）の構造や、その整備状況が原因である場合がほとんどです。一般に、軌道の整備基準はその路線の輸送量（通過トン数）によって定められ、輸送量が小さい路線ほど整備基準が低く設定されています。したがって、輸送量の小さいローカル線は、軌道不整が大きくなる傾向があり、そのため車両が揺れやすいのです。

そのようなローカル線であっても、車両の乗り心地を向上する方法はないのでしょうか。その方法のひとつとして、車両側に振動低減対策を行うことがあげられます。本稿では、輸送密度が低い、いわゆるローカル線向けに開発を進めている上下振動制御装置について紹介します。

なお、本稿では、“ローカル線”を“軌道の整備基準が低い路線”という意味で、“幹線”を“軌道の整備基準が高い路線”という意味で使用することにします。

幹線と“ローカル線”の上下方向の揺れの違い

前節で「路線によって揺れが違うことがある」と書きましたが、どれくらい違うのでしょうか。一例として、ある在来線の幹線とローカル線をそれぞれの営業速度で同一の車両(電車)が走行したときの車両の上下振動加速度パワースペクトル密度を図1に示します。振動加速度パワースペクトル密度(PSD)は各周波数における振動の強さを示し、値が大きいほどその周波数成分の振動が大きいことを示します。

図1(a)の青線は、ローカル線を速度83km/hで走行した場合、赤線は幹線を速度130km/hで走行した場合の台車直上の車体上下振動加速度PSDです。幹線を走行した場合に比べて、ローカル線を走行した場合は特に1~3Hz付近の振動が大きいことがわかります。図1(b)に車両への振動の入り口になっている軸箱(車軸を支える軸受を収めている箱)の上下振動加速度PSDを示します。とくに1~3Hzでは、赤線に比べて青線の値が大きく、車両への加振が大きいことがわかります。また、青線のピーク(極大値)が0.92Hz、1.84Hz、2.77Hz...というように、規則的に並んでいて、かつ、そのピークと図1(a)に示す車体上下振動加速度のピーク周波数が一致していることがわかります。

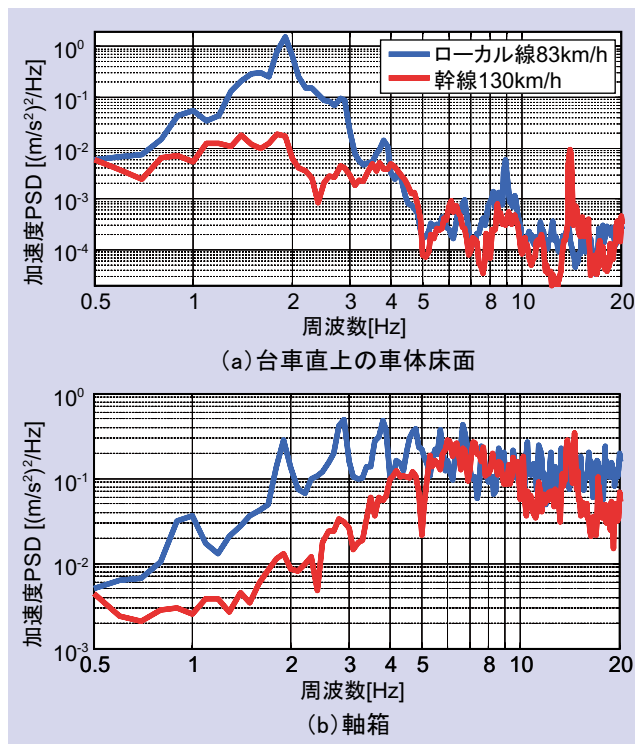


図1 路線による車両の上下振動加速度PSDの比較



図2 ローカル線のレールの継目の例

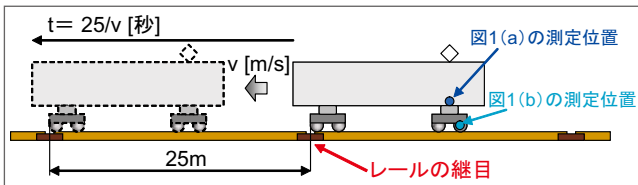


図3 25mレール走行時の様子

実は、このピークは車輪がレールの継目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2に示します。ローカル線の場合、一般に長さ25mのレールが使用されています。このデータを取得した線区でも25mレールが使われています。図3を参照すると、輪軸がレールの継目を踏む間隔は、速度を v [m/s]とすると、 $t = 25/v$ [秒]おきということになります。例えば、速度83km/h (23.1m/s)で走行していた場合、1.08秒おきに継目を通過します。これを周波数に直すと、 $1/1.08 = 0.92$ [Hz]となり、これはちょうど図1 (a), (b)の青線のピーク周波数と一致します。以上のように、ローカル線を走行する列車では、レールの継目走行時の振動が幹線に比べて特に目立つということがわかります。

さて、このような振動は乗り心地にどのように影響しているのでしょうか。人間の振動の感じやすさには、周波数依存性があることが知られています。その感度を表すものとして、日本では「乗り心地フィルタ」が用いられており、その上下方向のフィルタ特性を図4に示します。この図において、値が大きいほど人間の振動に対する感度が高いことを意味します。このフィルタを、図1に示した車体上下振動加速度PSDに適用して感覚補正して、0.5, 1, 2...といったような倍数を中心とした周波数帯ごとにまとめた結果を図5に示します。図4に示した人間の感じやすさを表す線図では、4~8Hzの振動が最も人間の感度が高く、乗り心地向上のために振動を低減する必要性が高いのですが、ローカル線では1~2Hz帯の振動成分が極めて大きいため、この周波数帯の振動が乗り心地に大きく寄与していることがわかります。

この1~2Hzの振動はどのようなものなのでしょうか。

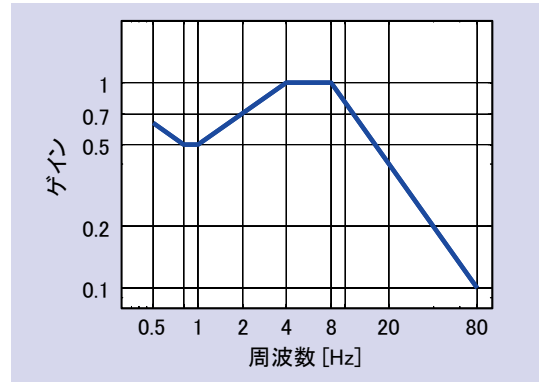


図4 乗り心地フィルタの特性(上下方向)

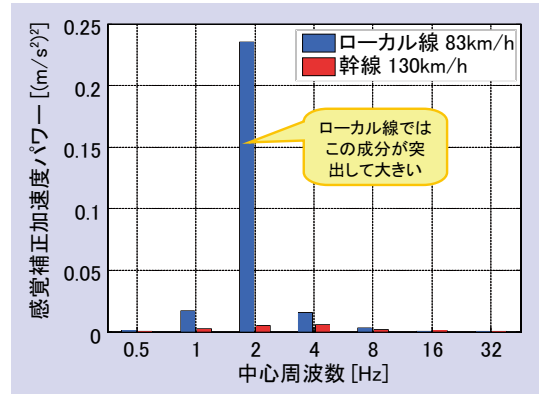


図5 感覚補正した上下振動加速度パワー

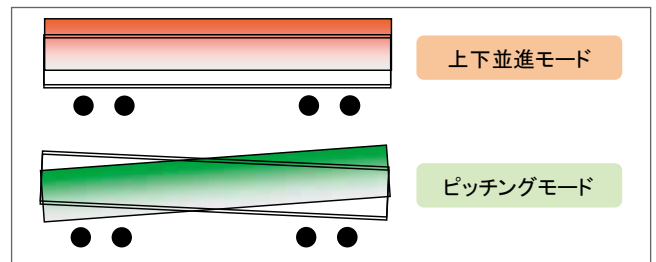


図6 車体の剛体モードの振動形状の例

これは、車体を支える空気ばねの上で車体が上下方向に動くことによるもので、車体の変形が伴わないことから、「剛体モードの振動」ともいいます。特にローカル線では、図6に示すような上下並進、ピッチング成分の振動が多くみられます。つまり、ローカル線での上下乗り心地を向上するためには、レール継目走行に起因する1~2Hzの車体上下並進・ピッチング振動を低減することが効果的といえます。

可変減衰上下動ダンパによる制振制御システム 開発の目的—車両側の対策による上下乗り心地向上—

このような上下振動を低減して乗り心地を向上するためにはどうしたらよいでしょうか。まず、軌道の整備条件を厳しくしたり、軌道を強化したりすることにより、車両を揺らす原因となるものを減らす、という方法があります。

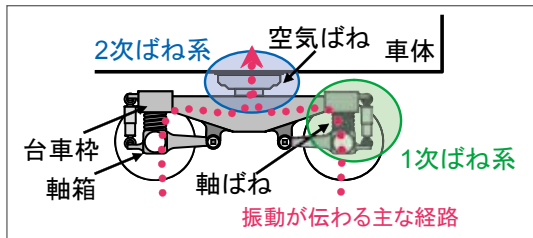


図7 鉄道車両の車体支持装置の構成例

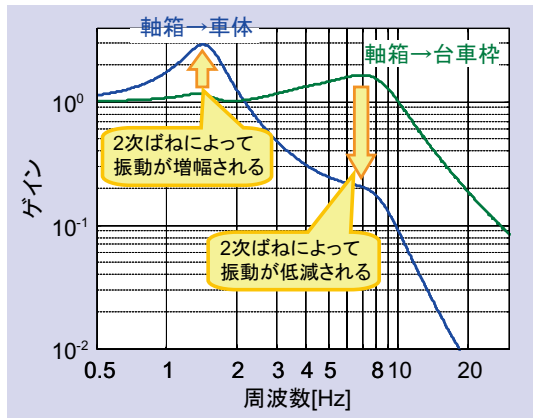


図8 車体支持装置の上下方向の振動伝達特性例

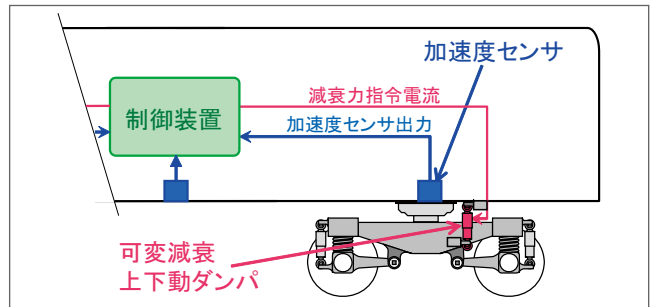


図9 可変減衰上下動ダンパによる制振制御システム

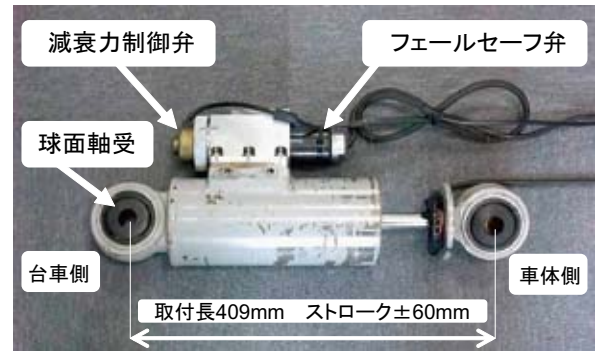


図10 可変減衰上下動ダンパ

ただし、先に記したように、軌道の整備条件は乗り心地よりも輸送量で決められている場合がほとんどです。

そこで、ここでは車両側での対策により乗り心地を向上する方法をとることにします。車両側に対策を行う方法は、例えば以下のような場合に、効果的と考えられます。

- ・“特急列車”，ないし“特急列車のグリーン車”，といったように、優先的に一部の車両の乗り心地を向上したい場合
- ・様々な路線にまたがって走行する車両の乗り心地を向上したい場合

車両のどの部分に対策を行うのか

車体の剛体モードの振動を車両側で低減するためには、車両のどの部分を工夫すればよいのでしょうか。図7に鉄道車両の車体支持装置の代表的な構成例を示します。車体は、レールに近いほうから順に、軸ばね（1次ばね系）、空気ばね（2次ばね系）と呼ばれる2段階のばね系で支えられています。それぞれのばね系には様々な重要な機能が備わっていますが、基本的には、1次ばね系はレールと車輪の接触状態を良好に保ち走行安全性を確保すること、2次ばね系は台車から車体への振動の伝搬を小さくして乗り心地を良くすることが目的です。

これら車体支持系の振動の伝わりやすさの例を図8に示します。このグラフの縦軸で、 $10^0 (= 1)$ と表された値を境に、それより上側（値が大きい側）は、軸箱からの振動が増加して伝わることを表し、下側は振動が減少して伝わることを意味します。車両の上下振動の主な伝搬経路は、

図7に示したように、軸箱→1次ばね→台車枠→2次ばね→車体ですが、台車枠の段階では、1～2Hzの振動はそれほど増加しない一方で、3～10Hzの振動が増加することがわかります（図8の緑線）。この周波数帯は図4に示したように人間の上下振動に対する感度が高いため、このままでは乗り心地が悪くなってしまいます。そこで、2次ばね系で車体を柔らかく支持することでこれらの振動を低減し、車体に振動を伝えにくくしています（図8の青線）。しかしこの結果、1～2Hzの振動が増幅されていることがわかります。ローカル線では、この周波数帯の振動がレール側から顕著に加わるために、図1に示したように低周波の振動が大きくなって、乗り心地が悪くなってしまいます。

そこで、この2次ばね系に制御技術を導入して、空気ばねが振動を伝えやすい1～2Hzの振動を伝えにくくすることによって、乗り心地を向上することにしました。

システム構成

開発した制振装置のシステムの構成を図9に示します。空気ばねと並列に油圧ダンパを取り付けますが、この油圧ダンパは通常の車両で使用されている油圧ダンパとは異なり、図10に示すように電流で動作する減衰力制御弁が取り付けられていて、外部からの制御信号（電流）によって、減衰力が制御できるようになっています。このようなダンパを可変減衰ダンパと呼び、とくに今回は上下方向に取り付けるので、可変減衰上下動ダンパと呼びます。

車体には、振動を測定する加速度センサと、制御装置が搭載します。制御装置は、加速度センサからの信号をもと

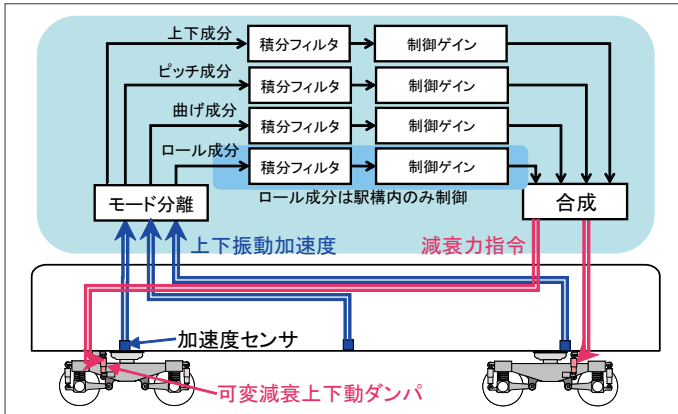


図11 制御アルゴリズム

に、車体の振動を低減するために必要な力を計算し、ダンパに指令電流を送ります。可変減衰上下動ダンパは、指令された電流値に従って減衰力を発生させて、車体の振動を抑制します。加速度センサは、振動低減対象とする車体の振動モード形状、およびその数によって異なりますが、概ね3~4個程度使用します。

なお、可変減衰上下動ダンパには、フェールセーフ弁と呼ぶ切替弁が取り付けられています。この弁は、制御装置の電源が切れた場合に制御装置の電源と連動して自動的に切り替わり、車両の2次ばね系の特性がほぼ通常の車両と同じになるような減衰力特性に切り替えます。この機能によって、制御システムに異常が発生した場合でも、制御装置の電源を切ることによって、通常の車両とほぼ同等に走行することができます。

台車と車体の間は、台車の旋回や、台車や車体の動揺によって、左右・前後方向にも相対的な変位が発生します。この変位を妨げないようにするために、図10に示すように、ダンパの両端には球面軸受を取り付けて、ダンパの取り付け点を中心に滑らかにダンパが動くようになっています。

車体の振動からダンパの減衰力指令値を決定するアルゴリズムを図11に示します。加速度センサからの信号を、車体の振動モード別に分解して、各振動モードの成分ごとの加速度を積分して速度を求め、これに対して制御ゲイン(定数)をかけて各振動モード別の減衰力指令値を計算します。この指令値を重ね合わせて、各ダンパに対して指令値を電流の大きさで指令します。このような絶対速度に比例した力を指令値とする制御は、スカイフック制御とも呼ばれ、新幹線の振動制御装置などで使用されています。

在来線電車による走行試験結果

本システムを在来線電車相当の車両に適用し、走行試験を実施しました。可変減衰上下動ダンパの実車への取り付け状況を図12に示します。ローカル線を83km/hで等速走行したときの車体中央床面の上下振動加速度PSDの例

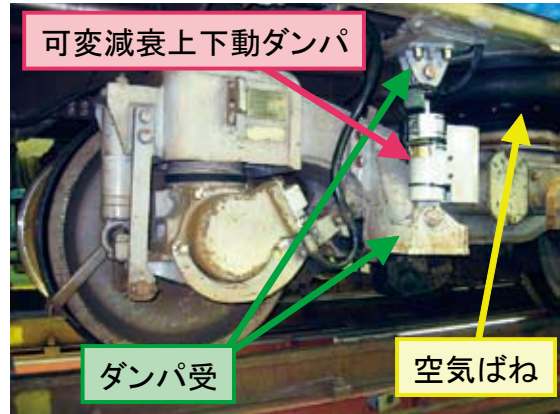


図12 実車への可変減衰上下動ダンパの取り付け

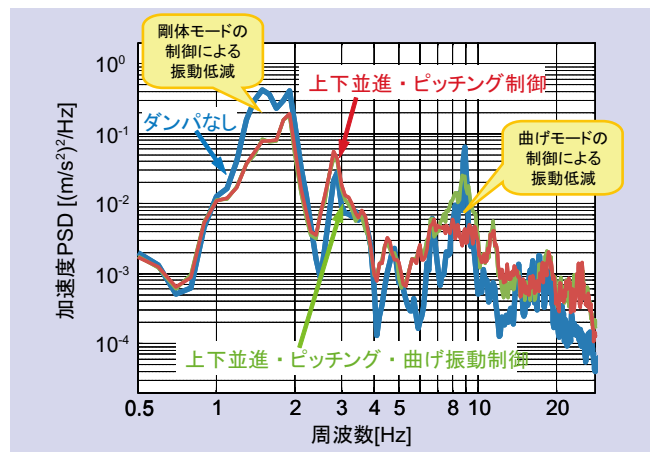


図13 車体中央上下振動加速度PSDの比較
(ローカル線での走行試験結果：走行速度 83km/h)

を図13に示します。レール継目通過に伴う加速度PSDピークが1.5~2Hzに見られます。剛体モードのみ制御した場合(図13緑線)、この周波数帯の振動が減少し、制御による効果が得られていることがわかります。

一方、9Hz付近は車体の変形に伴って発生する曲げ振動によるピークが見られます。剛体モードに加えて車体の曲げ振動も制御すると、1~2Hz付近の剛体モードの制振効果を損なうことなく、9Hz付近のピークを1/10程度に低減することができました。

おわりに

本稿では、在来線の輸送密度の低い線区の上振動乗り心地向上する方法の一つとして開発している可変減衰上下動ダンパによる制振制御システムについて紹介しました。

本システムは、在来線の走行試験において優れた振動低減・乗り心地向上効果が実証できたため、現在、早期実用化に向けた技術開発を実施しています。

最後に、本件に関してご協力いただいた西日本旅客鉄道(株)、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します。[RRR]