

車両のふわふわ感を抑える

風戸 昭人

車両構造技術研究部
(走り装置 副主任研究員)

菅原 能生

同
(車両振動 主任研究員)



かざと あきひと



すがはら よしき

はじめに

車両の乗り心地は、振動、騒音、においなど幅広い要因によって影響を受けますが、ここでは乗り心地に関係する要因の中でも、ふわふわとした振動に起因する乗り心地を向上する方法について、空気ばねの減衰制御による上下振動の低減方法を紹介します。

鉄道車両用のばねとして空気ばねの研究が本格的に開始されたのは昭和30年頃でした。基礎試験の後、その性能が従来のばね装置よりも優れているとされ、急速に実用化が進みました。さらに近年のボルスタレス台車の普及に伴い、車体支持の2次ばねとして広く普及しています。空気ばねはその柔らかなばね特性から、高周波の振動絶縁性に優れ、快適な乗り心地を提供します。一方で、1~2Hz付近に固有振動数を持つため、台車側からの加振や、勾配が変化する地点を走行する時に、乗客にふわふわとした感覚を与えることがあります。ここでは、このような振動を抑えることを主目的として開発した、「絞り制御弁内蔵型空気ばね」について紹介します。

す。空気ばねに込められた圧縮空気の圧力によって車体荷重を支えており、空気ばねが伸縮した時には、空気が圧縮・膨張されることでばね作用を発生します。また、空気ばねが伸縮すると、両空気室の間の絞りを通り空気が流れます。空気ばねの減衰は、絞りを通過する空気の圧力損失によって得ています。

多くの場合、減衰を発生する絞りには、内径13mm程度の固定絞り（円形オリフィス）が用いられます。この絞りの大きさは、各車両の諸元、走行条件に対してバランスのよい振動絶縁性能を持つように選択されますが、図2に示す1Hz程度の共振周波数付近と、高周波域での振動絶縁の両立は難しいのが実情です。

絞り制御弁内蔵型空気ばねは、この絞りの大きさを外部からの指令信号によって連続的に変化させて減衰を制御できるようにしたものです。

絞り制御弁内蔵型空気ばね

絞り制御弁内蔵型空気ばねは、空気ばねの内部に設置し

空気ばねの構造

はじめに、空気ばねの基本構造について説明します。空気ばねは、図1に示すように、ゴムベローズと積層ゴム部からなる空気ばね本体の空気室と、一般に台車枠内に設置された補助空気室（容積不変のタンク）、および両方の空気室の間を結ぶ通路の途中に設けられた絞りによって構成されま

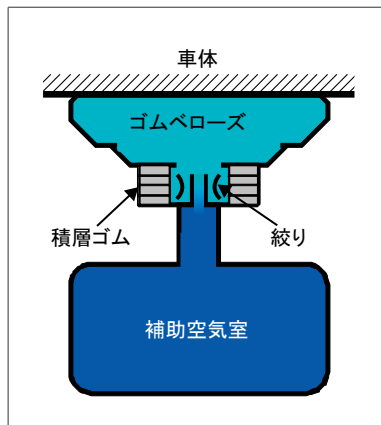


図1 空気ばねの基本構造

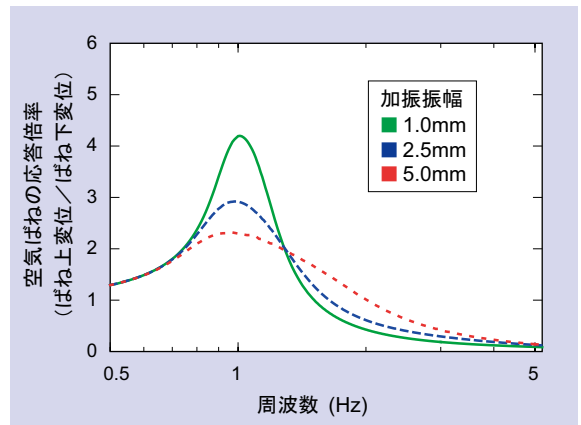


図2 加振周波数による空気ばねの応答倍率 (固定絞り：内径φ13mm)

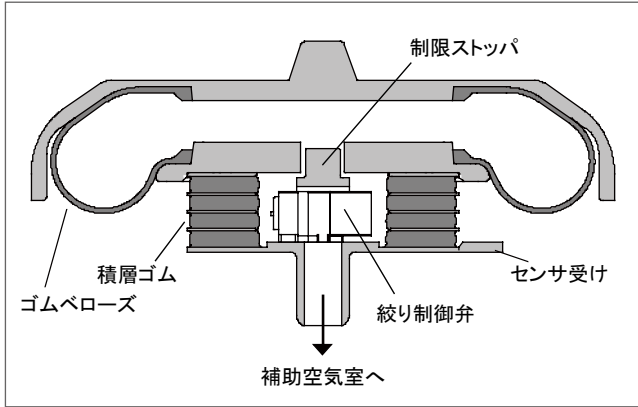


図3 絞り制御弁内蔵型空気ばねの断面図

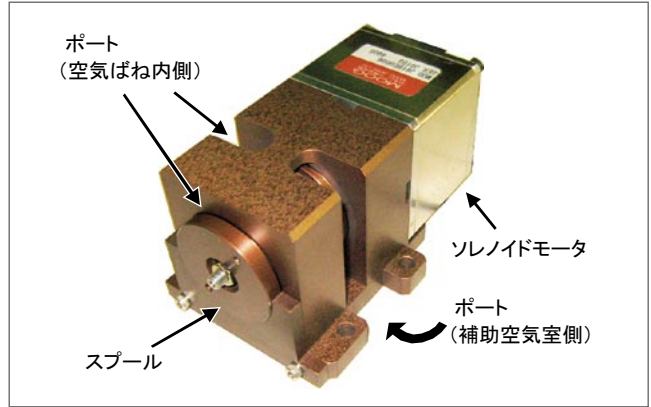


図5 絞り制御弁

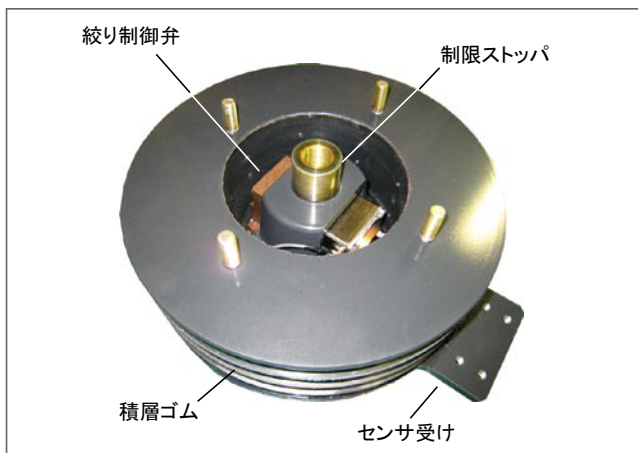


図4 空気ばね内部の様子

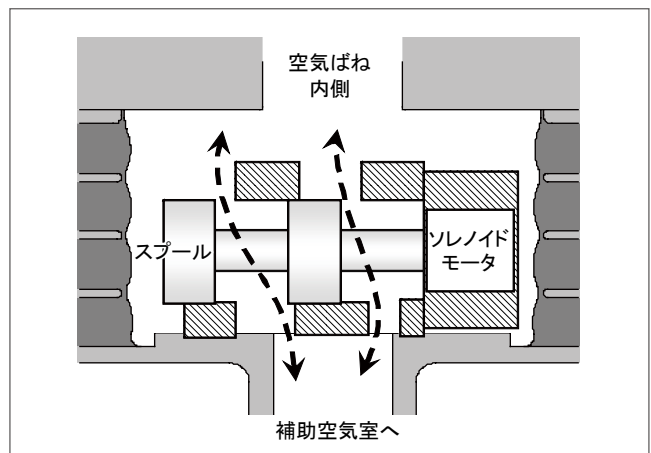


図6 絞り制御弁を通過する空気の流れ

た絞り制御弁により、絞りの開口面積を外部からの指令に従って変化させて、空気ばねの減衰を制御できるようにしたものです。図3に本空気ばねの断面図を、図4に空気ばね内部の様子を示します。固定絞りの代わりに絞り制御弁が取り付けられていること以外は通常の新幹線用空気ばねと同じ構造です。絞り制御弁は空気ばね内部の底板に固定され、弁を駆動するための電流は、空気ばね底面に設けた気密コネクタを介して供給します。また、最近の新幹線電車では空気ばねの左右方向の剛性に非線形性を持たせるため、積層ゴムの変位制限ストッパを設けることが多くなっています。通常の新幹線用空気ばねでは制限ストッパは円錐形ですが、本空気ばねでは絞り制御弁をまたぐ必要があるので門型としました。なお、車両が急曲線や分岐器などを通過するときには、空気ばねは前後方向に大きく変形します。このときはゴムベローズだけでなく積層ゴムも変形しますので、絞り制御弁と制限ストッパは積層ゴム内面と干渉しないように配置しました。

絞り制御弁の構造

次に絞り制御弁とその構成について説明します。図5に示すように絞り制御弁は比較的大きなスプールを持つ直動型の流量制御弁であり、外部からの電流指令によって絞りに相当する弁の開口面積を変化させることができます。空気ばね内部に設置された絞り制御弁内部の空気の流れを図6に示します。一般的に、減衰制御を行う際には、制御によって選択可能な最小の減衰力をできるだけ小さくすることが振動絶縁性能上好ましいと言われていました。そのため、今回開発した絞り制御弁は、特に弁の開度を大きく確保する必要がありました。しかし、スプールのストロークはそれほど大きくとれないため、スプールの径を極力大きく、また空気ばね本体室に通じるポートを2箇所に設けることや、空気通路の形状を適切に設計するなどの工夫を施しました。また、フェールセーフ性を考慮して、システム電源断時には従来の固定絞りと同等の流量特性となるようにスプールの中立位置を調整できるようにしました。

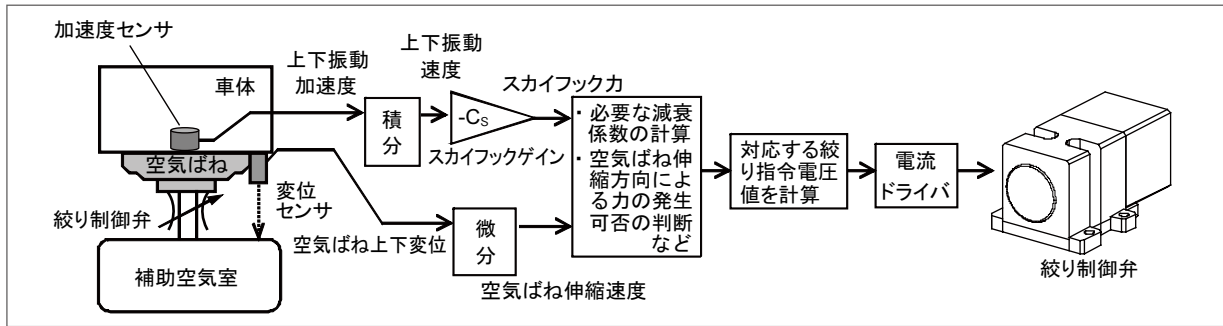


図7 制御の流れ

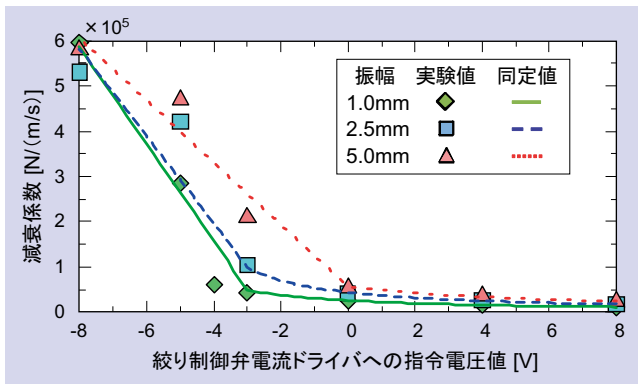


図8 絞り制御弁電流ドライバへの指令電圧値と減衰係数の関係

空気ばねの減衰制御システム

空気ばね単体(1個)を制御する場合を例にして減衰制御の方法を説明します。制御則には、アクティブサスペンション等に広く使われているスカイフック制御則を用いています。制御の流れを図7に示します。まず、車体の上下方向の振動状況を把握するため、車体に加速度センサを取り付けます。さらに、これから得られた加速度信号を積分して速度信号を取得します。得られた速度に適当なスカイフックゲイン(-Cs)を乗じることで、空気ばねで発生させたい力(スカイフック力)を求めます。本空気ばねでは減衰を制御しますので、スカイフック力をそのときの空気ばねの伸縮速度で除することで、絞りが持つべき減衰係数を求めることができます。なお、空気ばねの伸縮速度は、空気ばねと並列に取り付けた変位センサの信号を微分することで取得します。また、本システムのようなセミアクティブサスペンションでは、減衰力の制御となるため、空気ばねの伸縮方向と逆向きの力しか発生することができません。その判断にも空気ばねの伸縮速度情報を用いています。

以上のように求めた減衰係数を満たすように、絞り制御弁の開度を制御します。絞り制御弁の開度を実際に調整するのは、弁のソレノイドモータへの駆動電流ですので、



図9 走行試験に使用した空気ばね

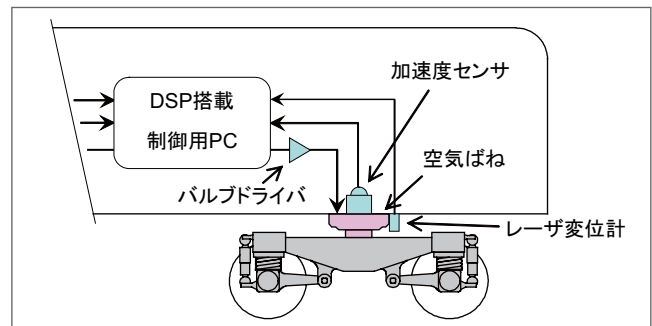


図10 走行試験における制御装置の構成

この駆動電流(実際には電流ドライバへの指令電圧値)と、そのときの空気ばねの減衰係数の関係を事前の試験により実験的に求めておきます。電流ドライバへの指令電圧値と減衰係数の関係を図8に示します。

以上のようにして、車体の上下振動を抑えるように絞り制御弁を制御します。

新幹線電車による走行試験結果

西日本旅客鉄道(株)の協力を得て、山陽新幹線にて走行試験を実施しました。図9に、絞り制御弁内蔵型空気ばねを実際の新幹線台車に取り付けた様子を示します。編成中の中間車両1両の前後台車上に各2個ずつ計4個の絞り制御弁内蔵型空気ばねとセンサ類を設置しました。また、図10に走行試験における制御装置の構成を示します。

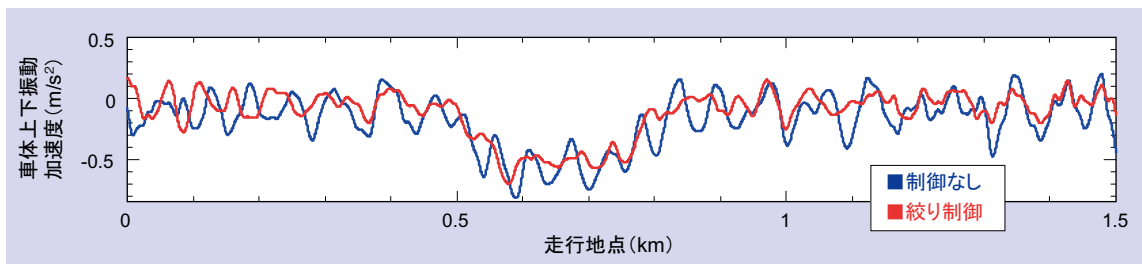


図11 絞り制御の有無による車体上下振動加速度の違い(車体中央の床面)

図11に車体中央の床面で計測された上下振動加速度の時系列波形を示します。なおこの波形は、絞り制御の効果を確認しやすくするため、ローパスフィルタによって3Hz以下の振動成分を抜き出したものです。青線で示した制御なしの場合に比べて、赤線で示した絞り制御を行った場合には、振動加速度の振幅が小さくなっていることがわかります。

次に、図12に車体床面で計測された上下振動加速度のパワースペクトル密度(PSD)を示します。データを解析した区間は、速度300km/hで一定速走行中の約5km区間(走行時間にして約60秒間)を選択しました。図12(a)は車体中央の床面で観測されたものです。1.1Hz付近に見られるピークは、車体の上下並進モードの振動によるものです。絞りを制御することによって、この振動を約40%に低減できました。絞り制御が上下並進モードの振動低減に有効であることがわかります。また、他の周波数領域においては制御なしの場合と比較して振動が増大していません。

また、図12(b)は台車の真上の車体床面で計測されたものです。1~3Hz付近に見られるピークは、車体の上下並進モードとピッチングモードの振動が複合したものです。制御により、この周波数域の振動を低減でき、特に1.4HzのPSDのピーク値に着目すると、約40%に低減できました。絞り制御はピッチングモードの振動低減にも有効であることがわかります。また、車体中央の場合と同様に、他の周波数領域においては制御によって振動が増大することはほとんどありませんでした。

おわりに

以上のように、絞り制御弁内蔵型空気ばねを用いることで、車体のふわふわとした振動を低減できることが明らかになりました。さらに鉄道総研では、軸ダンパの減衰制御を行うことによって、車体のビビリ振動(8Hz前後の弾性振動)低減にも取り組んでいます¹⁾。ふわふわとした振動とビビリ振動が共存するときには、人間はビビリ振動をより不快に感じると言われています²⁾。実際に両方の振動低減システムを併用して走行試験を行ったところ、軸ダンパ

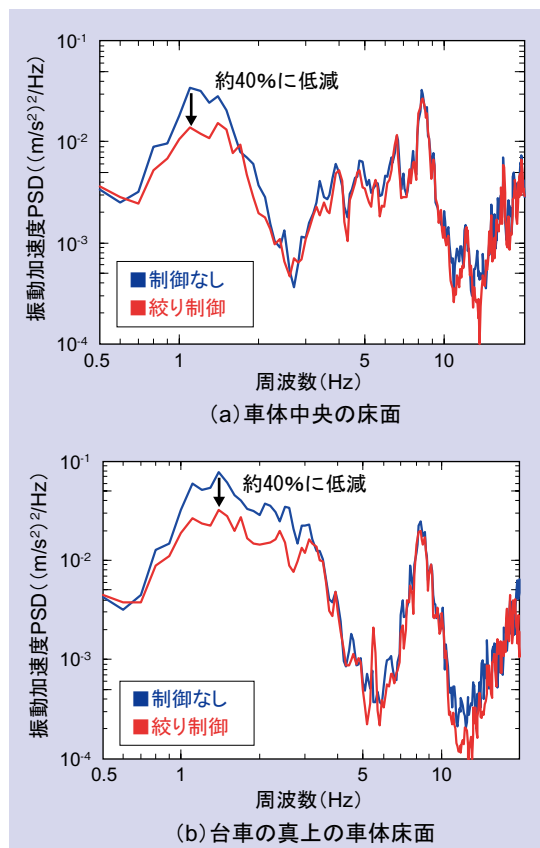


図12 車体上下振動加速度パワースペクトル密度(PSD)の比較

のみの制御によってビビリ振動が減ると、ふわふわとした振動が気になるようになりました。そこで空気ばねの制御を加えると、この振動が抑えられたことを体感できました。今後、新幹線の速度がさらに向上されていくと、上下振動乗り心地に対する要求もより高まっていくと思われます。その際に効果的なデバイスとして本システムを提案できるよう、準備をしていきたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 菅原能生：車体の振動を台車から絶つ，RRR, Vol.65, No.6, 2008
- 2) 鈴木浩明：人間科学からみた乗り心地の定量的評価，RRR, Vol.62, No.12, 2005