

S1-4-2 鉄道車両用空気ばねの絞り制御に関する基礎試験 (その2)

(車両試験台を用いた半車体モデルの加振試験結果)

○ 風戸 昭人 (鉄道総研) 菅原 能生 (鉄道総研) [機] 瀧上 唯夫 (鉄道総研)

2nd Report, Elementary Test of Orifice Control for Railway Vehicle Air Suspension System
(The results of excitation tests using a 1/2 carbody on rolling stock testing plant)

Akihito Kazato, Yoshiki Sugahara, Tadao Takigami (Railway Technical Research Institute)

The air suspension system is now widely used for railway vehicles. To improve the riding comfort of vehicles equipped with this system, we tested semi-active control of an air suspension having a variable orifice, which is controlled by a controller designed based on the sky-hook algorithm, between air spring and auxiliary air chamber. The results of excitation tests using a 1/2 carbody on rolling stock testing plant show that the proposed system reduces effectively the power spectral density (PSD) of acceleration of the carbody floor.

キーワード：鉄道車両，セミアクティブサスペンション，空気ばね，振動制御，スカイフック制御

Keyword: Railway Vehicle, Semi-active Suspension, Air Spring, Vibration Control, Skyhook control

1. はじめに

近年の鉄道車両では、ボルスタレス台車の普及に伴い、車体支持の2次ばねとして空気ばねが広く使用されるようになった。空気ばねはその柔らかいばね特性から、高周波の振動絶縁性に優れ、快適な乗り心地を提供するが、その反面、1~2Hz程度に固有振動数を持つため、台車側からの加振により、乗客にふわふわとした不快な感覚を与えることがある。

空気ばねは、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との間に設けられた絞りによって減衰を得る構造である。多くの場合、絞りの径は、各車両の走行条件に対して最適な径で固定されておりバランスの良い振動絶縁性能を持っているが、共振点付近と高周波域での振動絶縁の両立が難しく、パッシブ系で現行以上の性能を得ることは難しい。そこで、絞りの径を可変な構造として、空気ばねの振動絶縁性能を向上させることを検討している。

前報⁽⁴⁾では、シミュレーション、および空気ばね単体試験により、絞りを制御して振動を低減できることを確認した。本報告では、試作した絞り制御弁内蔵空気ばねを半車体モデルに組み込み、スカイフック制御則を適用した場合の車両試験台試験結果について報告する。

2. 絞り制御弁内蔵空気ばねの構造

鉄道車両用空気ばねの基本構成を図1に示す。空気ばね本体は、ゴムベローズによる空気室と積層ゴムからなる。

絞りは空気ばね本体内に設けられており、補助空気室との間を行き来する空気によって減衰を得る。一般に、厚さ5mm、直径13~15mm程度の固定オリフィスが用いられていることが多い。

これに対し、今回使用する空気ばねは、図2のように、絞り制御弁を内蔵し、補助空気室とを結ぶ空気通路の有効断面積を可変とした構造である。車体の上下振動状態に応じて絞りの開度を制御して振動を低減する。

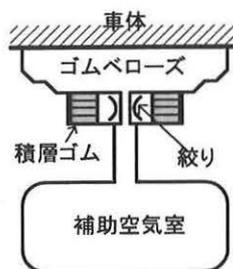


図1 空気ばねの基本構成

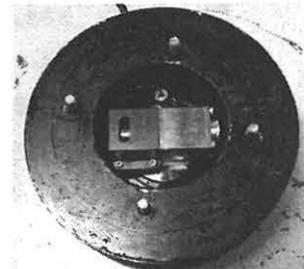


図2 絞り制御弁を取り付けた空気ばね

図3に絞り制御弁の構造を示す。ソレノイドモータでスプールの位置を制御して絞りの開口面積を変化させる。絞り制御弁指令電圧が大きいほど開口面積は大きくなり、減衰は小さくなる。逆に指令電圧が小さいほど絞りの開口面積は小さくなり、減衰は大きくなる。なお、フェールセーフ性を考慮するためには、電源断時の弁の開口面積を通常の固定絞りと同等となるようにしておけばよい。

3. 制御則

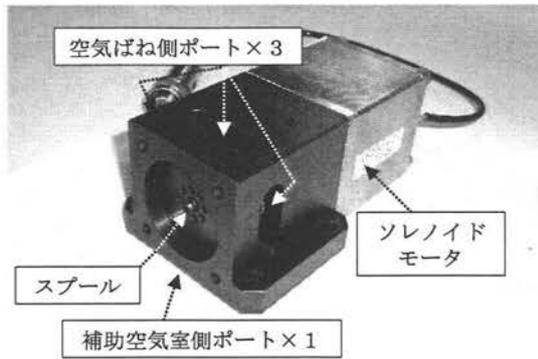


図3 絞り制御弁の構造

今回の車両試験台試験に使用した装置の構成を図4に示す。制御側には車体速度を用いたスカイフック・セミアクティブ制御則を用いた。制御アルゴリズムのブロック図を図5に示す。左右の空気ばね直上に配置した加速度センサで車体の上下振動加速度を計測し、これを上下並進モードとロールモードにモード分離する。これらの加速度を積分して算出されたモード別の速度にスカイフックゲインをかけて、モード別のスカイフック力を求める。そしてモード別のスカイフック力を合成して各空気ばねのスカイフック力を求め、カルノップ近似⁽²⁾を行う。ここで、スカイフック力は空気ばねの減衰要素で発生させるので、レーザ変位計で得られた空気ばね変位から空気ばね速度を計算し、これとスカイフック力から目標とする減衰係数を決定する。この減衰係数を実現する指令電圧で絞り制御弁を駆動する。

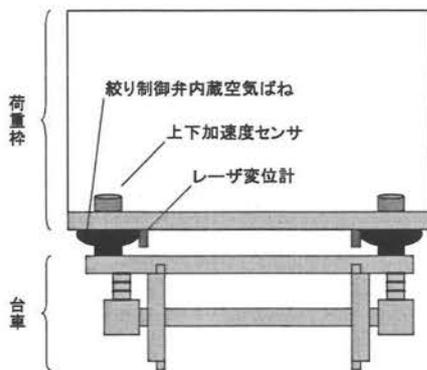


図4 試験台試験の装置構成

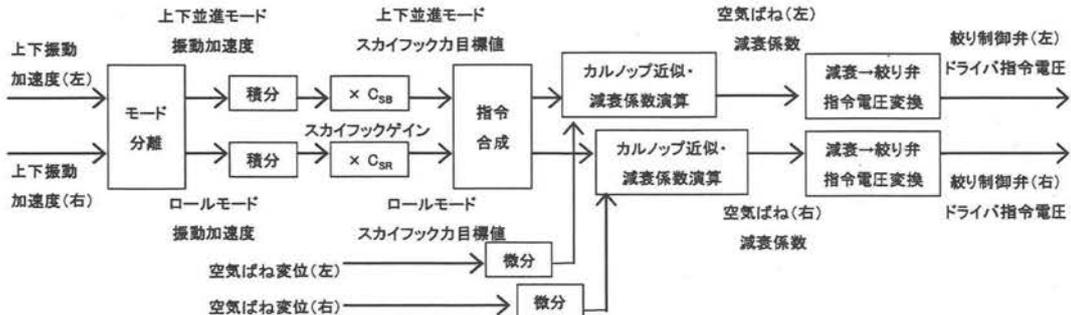


図5 半車体における車体上下並進・ロールモード振動制御アルゴリズム

なお、減衰係数と絞り制御弁指令電圧の関係は、単体試験で事前に求めることにした。

4. 加振試験結果

4.1 単体性能試験

車両試験台試験に先立ち、絞り制御弁内蔵空気ばねの特性を同定するため単体加振試験を行い、数種類の絞り制御弁指令電圧Vに対する空気ばね下からばね上変位までの応答倍率特性を調査した⁽⁵⁾。空気ばねの単体モデルは図6に示すような線形4要素モデルとし⁽¹⁾、各絞り制御弁指令電圧Vに対する空気ばね減衰係数cの同定結果を図7にプロットで示す。減衰係数には振幅依存性があるため、Vとcの関係は加振振幅を1, 2.5, 5mmの3種類に変化させてそれぞれの場合について求めた。次にこの関係の近似関数を求めたところ、式(1)が概ね良い結果を与えることが分かった。ただし $\beta_1 \sim \beta_4$ は定数である。この関数を用いた場合のVとcの関係を図7に実線で示す。

$$V = \frac{\beta_1 |z_1|}{c - \beta_2 - \beta_3 |z_1|} - \beta_4 \quad (1)$$

なお、実験結果より絞り制御弁のバルブ開度範囲は、ほぼ全開 $\sim \phi 13\text{mm}$ オリフィス相当(=現行の固定絞りと同等)であることがわかった。

4.2 車両試験台試験

鉄道総研新車両試験台にて、半車体を用いた加振試験を実施した。試験風景を図8に示す。新幹線相当の台車1台

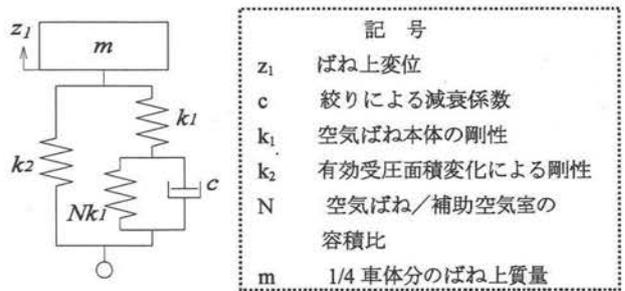


図6 空気ばねの単体モデル

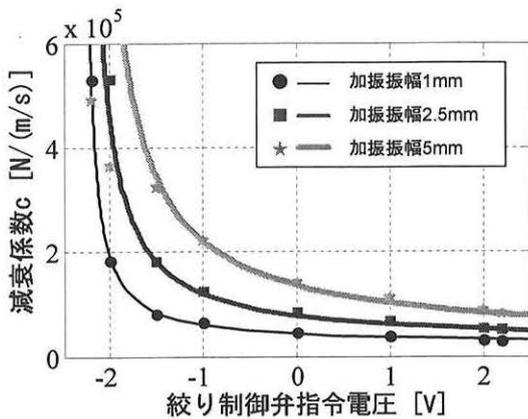


図7 絞り制御弁指令電圧と減衰係数の関係

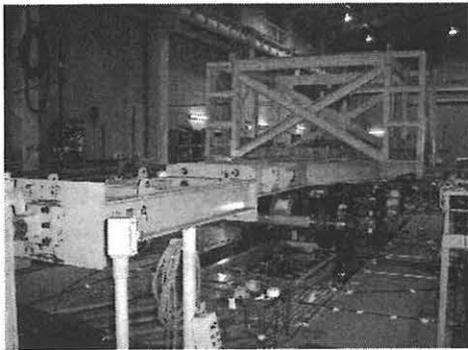


図8 試験風景

を軌条輪に載せ、その上に絞り制御弁内蔵空気ばねを介して車体を模擬する荷重枠を積載している。荷重枠には半車体質量に相当するウェイトを積載している。

4. 2. 1 上下並進モード制御試験

左右の軌条輪を同相で上下に加振するランダム波加振試験を実施した。ランダム波は、1~20Hzで軌条輪の上下振動加速度パワースペクトル密度(PSD)が一定となるようなバンドランダム波を用いた。試験結果を図9に示す。減衰制御を行うと空気ばね-車体で構成される系の1.1Hzの固有振動付近の応答が低減され、PSDピーク値で概ね1/2程度に低減されていることがわかる。その他の周波数帯域は制御の有無によらずほぼ同様のPSD値となっている。図中凡例に乗り心地レベル(LT)の増減を ΔLT で示す。制御によって1.0dB程度LTが減少していることがわかる。

4. 2. 2 上下並進・ロールモード複合制御試験

上下並進モード制御に加えて、ロールモードも制御する複合制御試験を実施した。加振波形は、1~20Hzで軌条輪の上下並進振動加速度PSDが一定となるようなバンドランダム波と、0.6~20Hzのロール方向加速度PSDが一定となるようなバンドランダム波を合成したもの(以下、混合ランダム加振とする)を用いた。図10に混合ランダム加振結果を示す。上下並進・ロールモード複合制御を行うと、上下並進モードの固有振動1.1Hz付近だけでなく、ロール

モードの固有振動0.8Hz付近も低減出来ていることがわかる。またLTは、上下並進モード制御、複合制御共に0.9dB程度の減少であった。複合制御でロールモードの固有振動を低減できたにも関わらずLTに差が出ていないのは、約2Hz以上の領域でPSD値が大きくなっているためと考えられる。

4. 2. 3 縦曲線走行模擬試験

新幹線等の車両が、「縦曲線」と呼ばれる勾配の変化する区間を高速走行すると、車両に加わる上下加速度がステップ状に変化し、車体-空気ばね系の固有振動が励起され、その残留振動が継続することがある。このような区間を走行した場合の本システムの効果を検証する模擬試験を行った。ただし、車両試験台を用いて実走行と同様の加速度ステップ入力を再現することは極めて困難なため、軌条輪をほぼステップ状に変位させ、車体-空気ばね系の固有振動を励起してその収束状態を調べた。加振信号は、図11の上段に示す $\pm 5\text{mm}$ の台形波とした。なお、車両試験台への負荷を軽減するため、台形波の折れ点を滑らかにした。空気ばねの試験条件は、通常減衰(制御なし)、減衰大固定(車

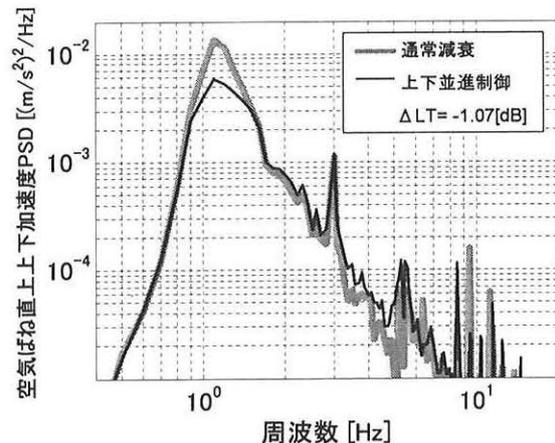


図9 上下並進モード制御試験の結果

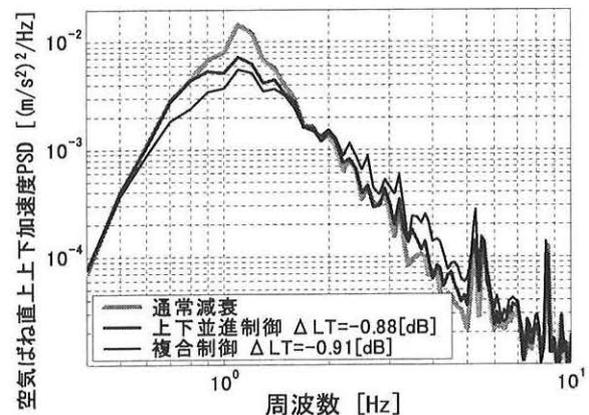


図10 上下並進・ロールモード複合制御試験の結果

体床面上下加速度 PSD 波形で固有振動のピークがセミアクティブ制御と同様になる減衰値で固定), 減衰制御の 3 種類で行った。

試験結果を図 11 に示す。通常減衰では残留振動の振幅が大きく、継続時間も長いことが車体上下加速度の波形などからわかる。減衰大固定の場合は、振動継続時間は減少するものの、振幅のピーク値は大きくなっている。これらに対して、減衰を制御すると、振動継続時間は減少し、振幅のピーク値も低減していることがわかる。

4. 2. 4 走行安定性確認試験

本システムが、走行安定性に与える影響を確認するため、だ行動試験を実施した。だ行動を励起するための加振は、振幅 2mm, 5Hz, 連続 3 波の左右正弦波加振とした。また、減衰制御を動作させるための加振は、振幅 1mm, 1Hz, 連続 10 波の 1,2 軸同相上下正弦波加振とした。ヨーダンパはなしである。通常減衰の場合は 270km/h で発散した。減衰制御の場合は、上下並進モード, 上下並進・ロールモード複合制御とも 275km/h で発散した。これより、本システムは車両の走行安定性に悪影響を与えないと考えられる。

5. おわりに

空気ばねと補助空気室との間に設けられた絞りによる減衰力をスカイフック・セミアクティブ制御して、空気ばね系の振動低減を図れることを、半車体モデルを用いた車両試験台試験で確認した。その結果、以下の知見を得た。

- 上下並進モードのバンドランダム加振に対して、上下並進制御を行うと、高周波域の振動絶縁性能を大きく

損なうことなく、1.1Hz 付近の固有振動を低減できた。

- 上下並進とロールモードの複合ランダム加振に対して両モードの制御を同時に行うと、上下並進モードの固有振動に加えて、0.8Hz 付近のロールモードの固有振動も低減できた。
- 縦曲線走行模擬加振に対して、残留振動、及び加速度ピーク値を低減できた。
- 本システムは車両の走行安定性に影響を与えないことが分かった。

現在、よりコンパクトで、通路面積を大きく取れる絞り制御弁を開発中である。通路面積を大きく取ることで、制御の際に空気ばねの低減側側の特性も使用できるようになるため、約 2Hz 以上の領域の振動伝達率をさらに低減できると考えている。この絞り制御弁を用いて 1 車両モデルによる試験台試験を実施する予定である。

参考文献

- 小田尚輝, 西村誠一, “空気ばね懸架の振動特性とその設計”, 機論, Vol.35, No.273, pp.996-1002 (1969)
- D.Karnopp, et al., “Vibration Control Using Semi-Active Force Generators”, Trans. ASME, J.Eng.Ind., pp.619-626 (1974)
- 根来仁, 他, “2 室型空気ばねを用いたスカイフック剛性制御”, D&D2002CD-ROM 論文集, No.02-9 (2002)
- 菅原能生, 風戸昭人, “鉄道車両用空気ばねの絞り制御に関する基礎試験”, J-Rail2004, pp.513-514 (2004)
- 菅原能生, 瀧上唯夫, 風戸昭人, “空気ばねの減衰制御による鉄道車両の車体上下振動低減”, MOVIC2005 講演論文集, pp140-145 (2005)

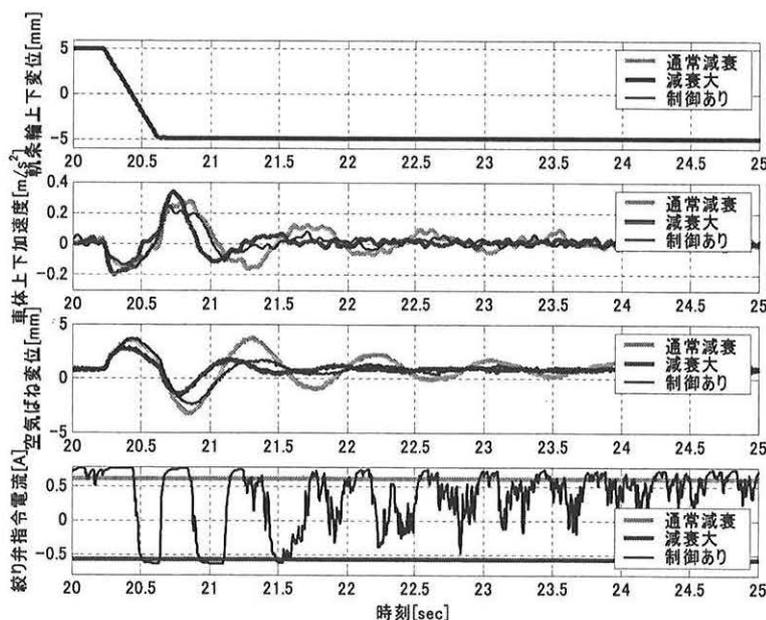


図 11 縦曲線走行模擬試験の結果