

応答性を向上した振り制御用空気圧アクチュエータの開発

車両構造技術研究部 走り装置研究室

副主任研究員 風戸 昭人

1. はじめに

現行の制御付き振り車両に使用されている空気圧アクチュエータは、位置決め精度や応答特性に限界があり、曲線が連続する区間での乗り心地悪化や、乗り物酔いを誘発しやすいという問題を抱えている。これらの問題を解決するため、鉄道総研では次世代振り制御システムの開発を行ってきた¹⁾。この中で、高応答、高出力の振り制御用アクチュエータとして、電動油圧式アクチュエータ (EHA) を開発し、乗り物酔いの原因となる低周波左右振動の低減効果を確認した²⁾。一方で、EHA は高コストであり、また高剛性であるが故に台車からの比較的高周波の振動を車体に伝えやすいという課題がある²⁾。そこで現行の振り制御用アクチュエータをベースとして、構成要素の変更、改良等を加えることで、低コストな空気圧方式で EHA に近い応答特性を実現するとともに、振りダンパ機能を兼ね備える振り制御用アクチュエータを開発したので報告する。

2. 応答性を向上した振り制御用空気圧アクチュエータ

図 1 に、応答性を向上した振り制御用空気圧アクチュエータを示す。シリンダには従来品と同様のものを用いるが、サーボ弁を圧力制御弁から流量制御弁に変更した。また、図中の制御・ダンパ回路切替弁ブロック内に振りダンパ回路を持ち、非制御時には振りダンパ相当の減衰力を発生できる。これにより、従来別に設置していた油圧式振りダンパを不要にでき、部品点数の削減、振り機構の簡略化を実現できる。以下に本アクチュエータの性能向上の取り組みを説明する。

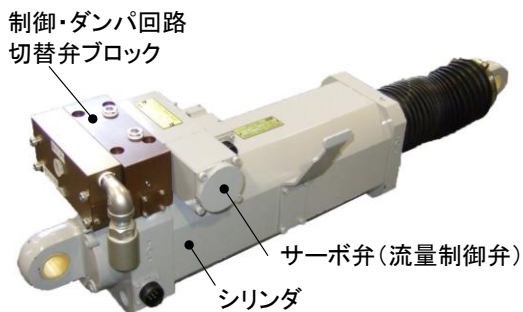


図1 新しい車体傾斜用空気圧アクチュエータ



図2 応答性を向上する流量制御弁

2. 1 応答性の向上

アクチュエータの応答性向上のため、次のことを行った。

①サーボ弁の変更による給排気特性向上

従来のアクチュエータには、圧力制御弁と呼ばれるサーボ弁が用いられている。圧力制

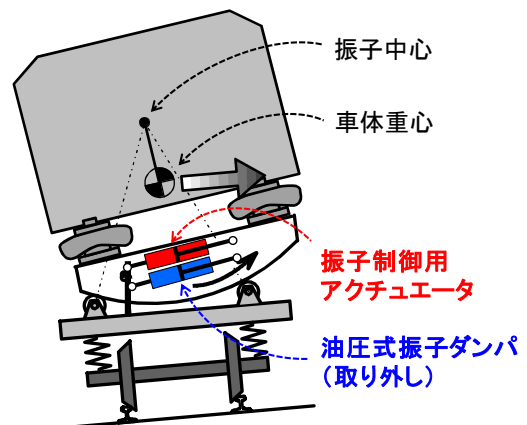


図3 振りダンパの取り外し

御弁は、空気の出し入れを行う弁体（スプール）の背面にシリンダ内圧がフィードバックされる構造であり、制御安定性は高いものの、応答性や発生力の点では不利である。本アクチュエータでは、シリンダ内圧のフィードバック構造を持たない流量制御弁（図2）を採用した。これにより、シリンダ内圧の大きさに影響されず弁を開閉できるため、給排気特性が向上し、応答性や発生力を向上できる。

②併設の油圧式振子ダンパ取り外し

従来の制御付き振子台車には、振子アクチュエータと並列に、油圧式の振子ダンパが設けられている。このダンパは、振子制御がフェールした際に自然振子状態で走行するときの減衰要素として必要なものであるが、制御走行時にはアクチュエータの動作に対する抵抗となる。そこでこの振子ダンパを取り外して応答性の向上を図った。（図3）

2. 2 制御安定性の向上

一般に空気圧アクチュエータの応答性を上げると、現行の制御方法である変位フィードバック制御では、空気の圧縮性により不安定になりやすい傾向がある。これを改善するため、ピストン変位を2階微分して得るピストン加速度のフィードバックを追加して安定性の向上を図った。図4に制御ブロック図を示す。なお、この制御則の変更には新たなセンサは必要としない。

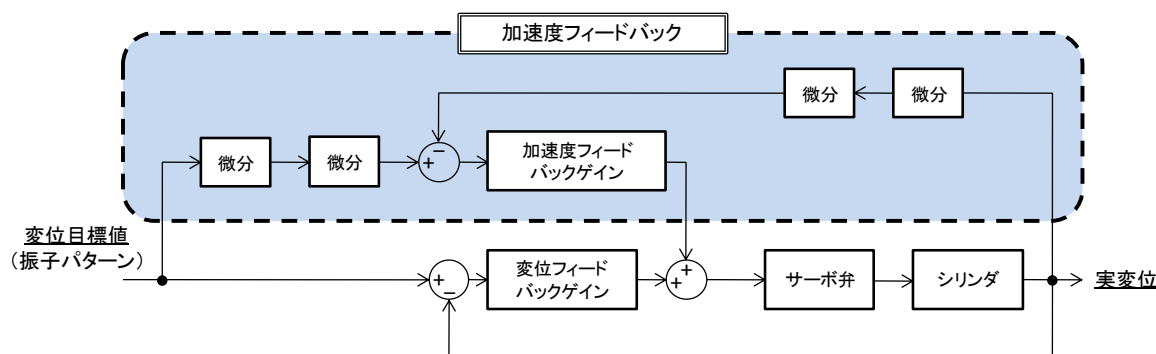


図4 変位フィードバックに加速度フィードバックを付加したときの制御ブロック図

3. 動作試験結果

3. 1 アクチュエータの追従性能

開発したアクチュエータの動作検証を、図5に示す実物大の振子試験装置により行った。図6に、変位目標値を周波数0.1Hz、振幅±136mm（振子角±5°に相当）の正弦波としたときの、アクチュエータの変位を示す。従来品では、目標値に対して1~1.5秒の遅れを持つのにに対し、開発品は約0.4秒に短縮し、かつ最大変位量も拡大した。EHAの遅れ（約0.15秒）には及ばないが、遅れ時間はほぼ一定であり、目標値である振子パターンを実際の走行位置よりもわずかに進めて出力することで補償できると考えられる。なお、加速度フィードバックを適用しないと、図6の薄青線の不安定な特性となる。こ

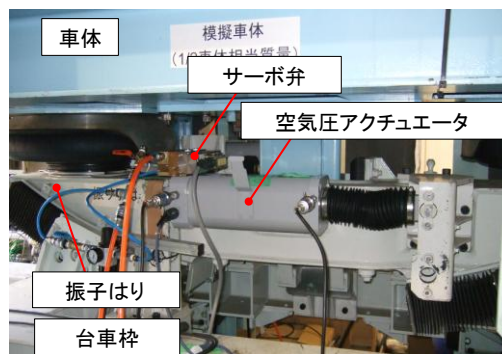


図5 定置試験装置への仮設状況

の結果から、加速度フィードバックが有効性がわかる。

3. 2 高周波振動の絶縁性能

EHAでは、比較的高周波の振動を台車から車体に伝えやすいという課題があった。そこで同じ試験装置を用いて、装置の台車枠相当のフレームを左右方向に加振（実車走行試験で取得した台車枠左右加速度のうち、0.9~4Hzの振動を再現した波形を使用）したときの車体左右振動加速度を測定した。振子制御の条件は中立制御である。図7に、車体左右振動加速度のパワースペクトル密度（PSD）と、自然振子を基準とした乗り心地レベル（ L_T ）の増分を示す。EHAは自然振子と比べて高周波側の振動が顕著に大きく、 L_T も3.5dB増加したのに対し、空気圧アクチュエータの場合は、従来品も開発品も自然振子とほぼ同等の振動状況であった。よって、開発品が車体の高周波左右振動を増加させることはないと考えられる。

4. 空気圧を用いた振子ダンパの開発

応答性向上のためには振子ダンパを取り外すことが有効であるが、振子制御がフェールし自然振子で走行する場合には、振子ダンパ相当の減衰力が必要となる。そこで、振子制御を行わないときには、アクチュエータを振子ダンパとして機能させることとした。図8に空気圧式振子ダンパの回路構成を示す。減衰力は絞りを通過する空気の圧力損失によって得る。ピストン速度が大きいときには、空気の圧縮性によるばね作用が発現するため、リリース弁を設けて過大なばね力の発生を抑制した。

5. シミュレーションによる乗り心地評価

開発品を用いたときの乗り心地を検証するため、振子車両の一両モデルを用いたシミュレーションを行った。空気圧アクチュエータのモデルは、理想気体の状態方程式を用いた詳細なもの³⁾とした。車両モデルは、汎用のマルチボディダイナミクス解析ソフトであるSIMPACKで作成し、空気圧アクチュエータのモデルをこれに組み込んだ（図9）。計算に用いた軌道線形は、急曲線が連続する実在の区間（4km）とし、軌道不整を含んでいる。図10に、計算された車体左右振動加速度から求めた乗り物酔い暴露量値⁴⁾（MSDV_y：酔いやすさを表す指標で、小さいほど良い）を示す。開発品を用いた新システムは、MSDV_yを低減

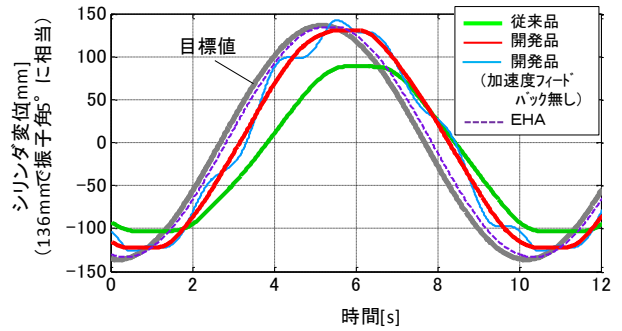


図6 ベンチ試験結果(追従性能)

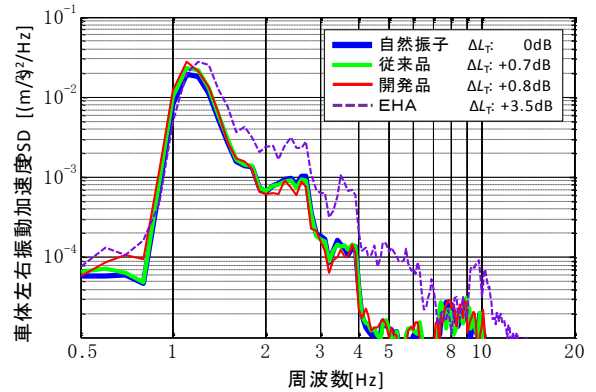


図7 ベンチ試験結果(高周波振動絶縁性能)

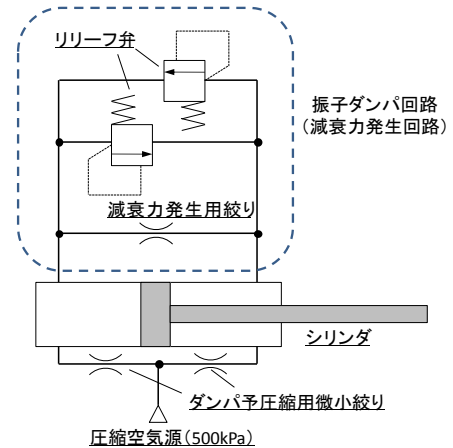


図8 空気圧式振子ダンパ回路

できることを確認した。特に、自然振子時に MSDVy の大きい車体前方ほど低減量が大きく、前位台車直上においては、自然振子に対して 54%、従来システムに対して 75%となった。図 11 には乗り心地レベル (L_T) を示す。新システムでは若干増加したが、差は最大 1dB 程度であり、無視できると考えられる。車体ロール角速度は目安値の $5^\circ / s$ 以下であった。また、空気圧式振子ダンパをモデル化し、自然振子で走行させたときの乗り心地は、従来の油圧式振子ダンパで走行した場合と同等であった。

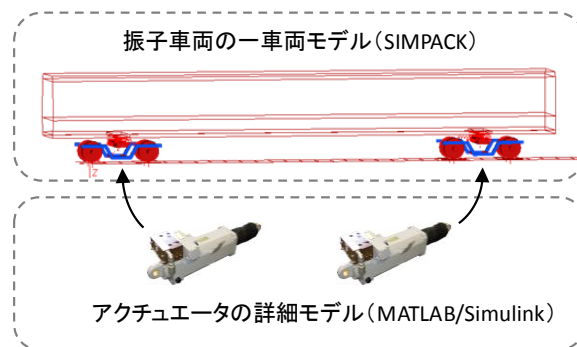


図9 シミュレーションに用いた車両モデル

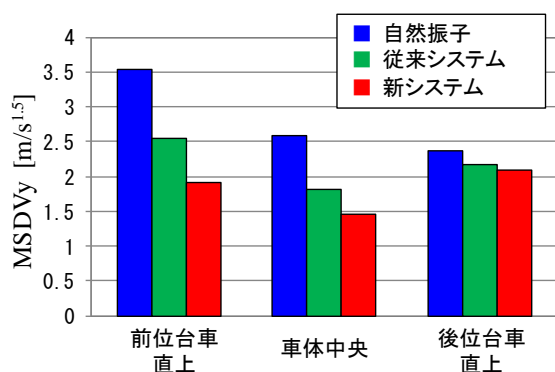


図10 乗り物酔い暴露量値(MSDVy)

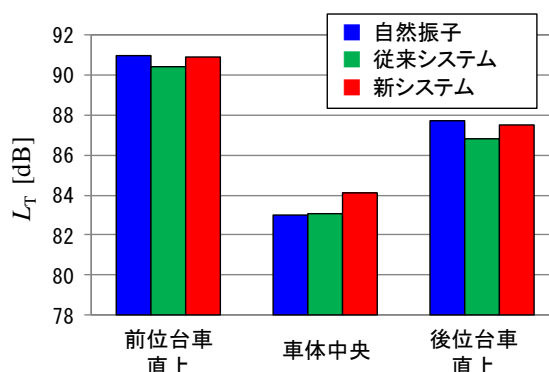


図11 乗り心地レベル(L_T)

6. まとめ

現行の振子制御用空気圧アクチュエータに対して、サーボ弁の変更による給排気特性の向上、及び併設の油圧式振子ダンパを取り外すことによって、アクチュエータの応答性を向上でき、かつ、シリンダ変位の 2 階微分によって得られるシリンダ加速度をフィードバックすることによって、制御安定性を確保できることを示した。本アクチュエータを用いて、振子車両の乗り物酔いを改善できることをシミュレーションで確認した。その際に、比較的高周波の振動は増加させず、 L_T を悪化させないことを確認した。さらに、振子ダンパの機能をアクチュエータに統合したことで、振子機構の簡略化、部品点数削減によるメンテナンス性向上にも貢献することができる。

参考文献

- 1) 榎本ほか: 電動油圧アクチュエータを用いた振子制御システムの開発、鉄道総研報告、Vol.19、No.4、pp.29-34、2005
- 2) 畠田ほか: 乗り物酔いに着目した振子制御システムの開発、J-Rail2007 講演論文集、pp.283-286、2007
- 3) 風戸ほか: 振子制御用空気圧サーボシステムの応答性向上、鉄道総研報告、Vol.25、No.1、pp.17-20、2011
- 4) 鈴木ほか: 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