1504　空気バネ可変絞りの開発

○岡本　康宏　　三原　丈和　　正［機］大塚　智広　　正［機］新村　浩　（日本車輌製造株式会社）

正［機］野崎　圭祐　　鈴木　貴之　（東海旅客鉄道株式会社）

Development of the Air Spring Variable Orifice

○ Yasuhiro OKAMOTO , Takeyoshi MIHARA , Tomohiro OTSUKA , Hiroshi SHINMURA　(NIPPON SHARYO,LTD.)

Keisuke NOZAKI , Takayuki SUZUKI　(Central Japan Railway Company)

Compatibility of the " decrement of the body roll unrest in the low frequency area" and　" vibration insulation in the high frequency area ", that was difficult only with conventional air spring, is aimed by using the newly-developed variable air spring valve with passive system structure. The content of the development is introduced here.

Keywords : vehicle, bogie, air spring, variable orifice

1. はじめに

車両走行時の車体動揺を低減させる為には、台車のバネ・ダンパ系を最適に設定することが必要である。その中で空気バネは2次バネと呼ばれ、ベローズ内の空気の圧縮性と、内部に設置された空気バネ絞りを通過する空気の圧力損失によって、振動の絶縁・減衰を得る仕組みになっている。

この空気バネを周波数応答で考えた場合、共振点である低周波域（1Hz 付近）に車体ロール動揺のピークがあり応答倍率が跳ね上がる特徴がある。このピークを抑える為には、絞り径を小さくすることが有効であるが、その場合は高周波域の減衰が逆に悪化してしまい、絞り径の設定は周波数応答を考える上で一長一短であり、固定諸元には限界がある。

過去この絞り径の設定には、空気バネ応答倍率の非線形特性を解消する為に開発された可変絞り [1)]や、振動制御技術を用いたメカトロ式の可変絞り [2)]が開発されているが、これらは低周波域での上下振動とロール動揺の改善を主としている。

今回新たに開発した可変絞り（以降、可変絞りと呼ぶ）は「低周波域（1Hz 付近）での車体ロール動揺の減衰」に加えて、「高周波域での振動絶縁」も改善の対象に加え、これらをパッシブ系の構造によって両立を目指したものである。

2. 開発した可変絞りについて

2.1 開発経緯

前述の通りメカトロ式の可変絞りは過去に開発の報告があるが、台車の改造や電源の確保など、搭載には大掛かりな工事が伴う場合があり、今回の開発にあたっては以下の点を考慮した。（図1参照）

- 台車に簡単に搭載できること。
- 電源を使用せず、パッシブ系で構成すること。

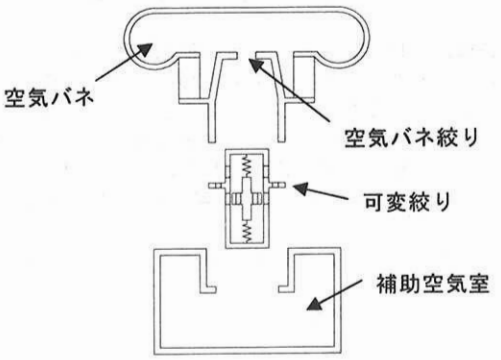

図1　可変絞りの搭載

2.2 構造

今回開発した可変絞りは、周波数によって適切に絞り径を変化させ「低周波域（1Hz 付近）での車体ロール動揺の減衰」では絞り径を小さく、「高周波域での振動絶縁」では絞り径を大きくとることでこれらの両立を目指している。

さらに、低周波域と高周波域でそれぞれ単独に絞り径が設定できるよう、低周波域で最適な絞り径を固定絞り部として配置し、高周波域で増加（バイパス）させる絞り径を可変絞り部として別々に配置した。（図2参照）

つまり絞り径は以下の通りとなる。

- 低周波域：固定絞り部のみ（図3参照）
- 高周波域：固定絞り部＋可変絞り部（図4参照）

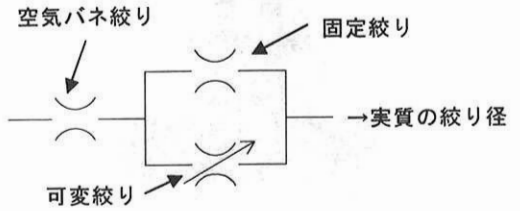

図2　各絞りの構成

[No. 12-79] 日本機械学会 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2012-12. 5～7. 東京]

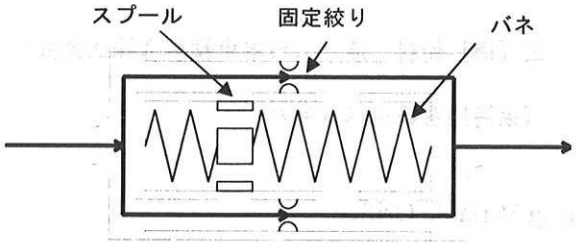

図 3　可変絞りの構造（低周波域）

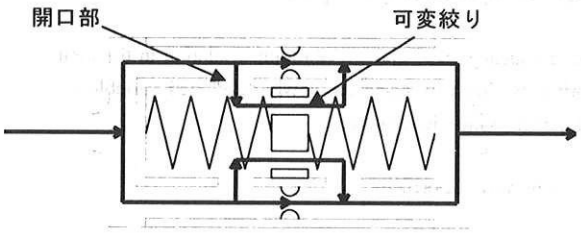

図 4　可変絞りの構造（高周波域）

この構成では、可変絞りを台車枠側に固定することでバネとスプールが台車の上下動を受けて動作する。

その際、バネ定数やスプール重量を適切に選択することで、目標の高周波域でバネの共振現象によって開口部が開き、可変絞り部を「通」としてバイパス回路を構成し、「固定絞り部＋可変絞り部＝実質の絞り径」を大きくとることが可能である。

バネ定数とスプール重量の関係は下式で示される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{k \times g}{m}}$$

f ：共振周波数 [Hz]
k ：バネ定数 [kgf/m]
m ：スプール重量 [kg]

また開口部の形状についても適切な大きさにすることで、可変絞り部動作時の実質の絞り径を調整することができる。

可変絞りの外形を示す。（図 5 参照）

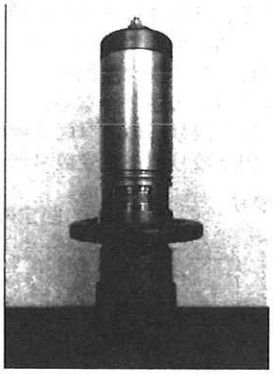

図 5　可変絞りの外形

2.3 共振周波数

前述の通り、共振周波数はバネ定数とスプール重量で決定される。

これらの選定には予めシミュレーションを実施し、高周波域での振動絶縁に効果的な値を検証している。

その結果、共振周波数を 5Hz 付近にすることで、可変絞り部が低周波域では動作せず、高周波域で適切に動作することが分かった。（図 6 参照）

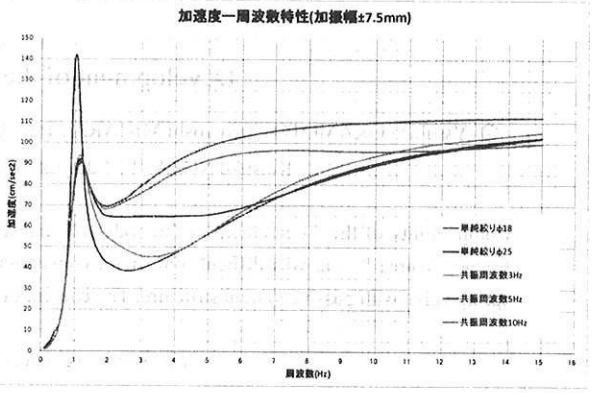

図 6　加速度-周波数特性における共振周波数の比較

3. ベンチ試験

可変絞りの特性を確認する為に、1 空気バネ系試験機にてベンチ試験を実施した。（図 7 参照）

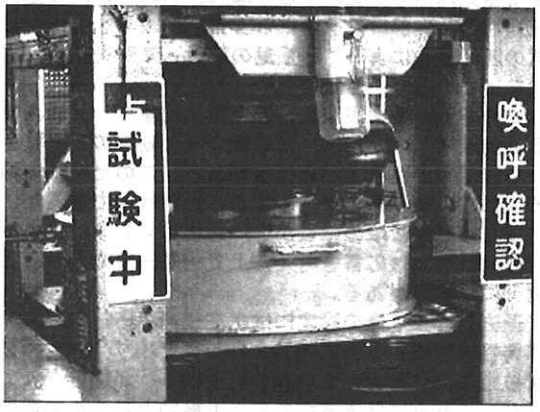

図 7　ベンチ試験姿

3.1 試番の設定

今回の試験では、以下の項目を確認した。

- 空気バネ絞りの有無
- 固定絞り部の絞り径（φ13.5・φ18・φ24）

3.2 試験条件

各種試験条件は以下の通りとする。

○ 測定項目
  - 応答倍率
    （空気バネ上面板変位／加振振幅）

○ 加振条件
  - 正弦波加振（周波数：0～20Hz、振幅：±1.0mm）
  - 矩形波加振（振幅：10.0mm、1.0mm）

○ 試番
  - 空気バネ絞りの有無
    有（φ18）、無（φ24 相当）
  - 固定絞り部の絞り径
    φ13.5、φ18、φ22

○ 比較対象
  - 比較基準品（空気バネ絞りの絞り径：φ18）

3.3 空気バネ絞りの有無

空気バネ絞りの有無で、可変絞りの効果を確認した。（図 8 参照）

	比較基準品	空気バネ絞り有	空気バネ絞り無
空気バネ絞りの絞り径	φ18	φ18	ー（φ24 相当）
可変絞り	ー	有	有
固定絞り部の絞り径	ー	φ18	φ18
低周波域(1Hz)の応答倍率	6.3	4.8 (△24%)	5.3 (△16%)
高周波域（対 比較基準品）	ー	同等	減衰不足

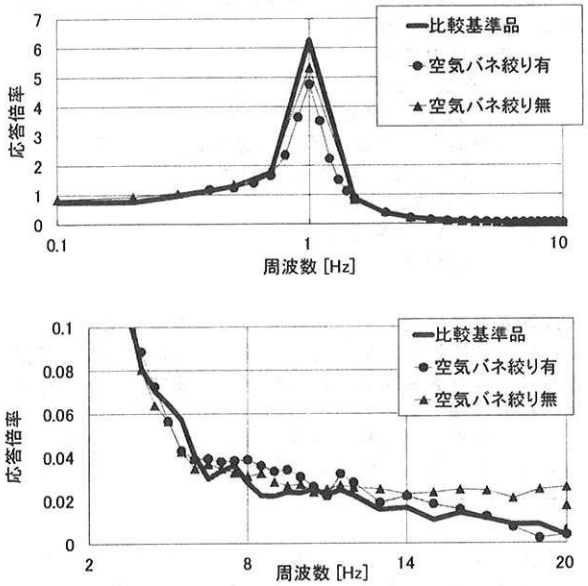

図 8　空気バネ絞りの有無における応答倍率の比較

低周波域では「比較基準品」に対して「空気バネ絞り有」「空気バネ絞り無」ともに良好であった。これは可変絞りの固定絞り部によって、空気バネ絞りと直列に 2 つの絞りが存在することになり、実質の絞り径が比較基準品より小さくなり、良好な減衰を得られたと考えられる。

一方、高周波域では「空気バネ絞り無」が減衰不足であった。これは高周波域で可変絞り部が動作した場合に実質の絞り径が十分に確保できなかった為と考えられる。

「空気バネ絞り有」では高周波域が良好であったことから、空気の流れの上流側にあたる空気バネ絞りの絞り径によって、可変絞りが動作する高周波域では実質の絞り径が変化することが分かった。

従って以降の試験では、良好な結果であった「空気バネ絞り有」を条件として実施した。

3.4 固定絞り部の絞り径

「空気バネ絞り有」とした場合、可変絞りの固定絞り部の絞り径を変化させ、可変絞りの効果を確認した。（図 9 参照）

	比較基準品	φ22	φ18	φ13.5
空気バネ絞りの絞り径	φ18	φ18	φ18	φ18
可変絞り	ー	有	有	有
固定絞り部の絞り径	ー	φ22	φ18	φ13.5
低周波域(1Hz)の応答倍率	6.3	6.3 (±0)	4.8 (△24%)	3.4 (△46%)
高周波域（対 比較基準品）	ー	良好	同等	減衰不足

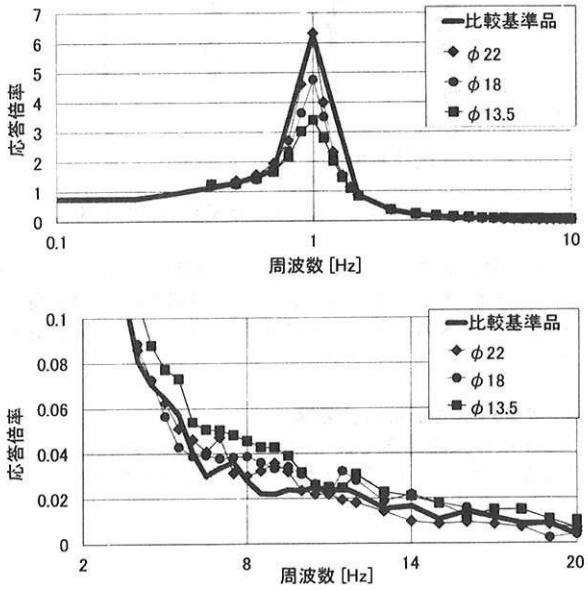

図 9　固定絞り部の絞り径における応答倍率の比較

固定絞りの絞り径は、φ18 が最も効果的であり、それ以外は比較基準品に対して低周波域では同等以上であるが、高周波域では減衰不足の傾向が見られた。

本試験では、空気の流れの上流側にあたる空気バネ絞りでφ18 を挿入しているが、可変絞りの固定絞り部の絞り径がφ22 の場合は、低周波域で比較基準品（空気バネ絞りφ18 のみ）と同等であり、実質の絞り径はφ18 相当であったと考えられる。

これらの試験結果より、以下の条件が最も効果的であることが分かった。

- 空気バネ絞りの有無：有（φ18）
- 固定絞り部の絞り径：φ18

→2 つの絞り（空気バネ絞りと可変絞りの固定絞り部）を直列に配置

3.5 矩形波加振

3.4 項の最も効果的な条件にて、矩形波加振を実施し、可変絞りの効果を確認した。(図 10 参照)

		比較基準品	空気バネ絞り有
空気バネ絞りの絞り径		φ18	φ18
可変絞り		ー	有
固定絞り部の絞り径		ー	φ18
減衰時間 [s]	振幅 10.0mm	5.5	3 (△45%)
	振幅 1.0mm	3.9	2.4 (△38%)
対 比較基準品		ー	良好 (平均△42%)

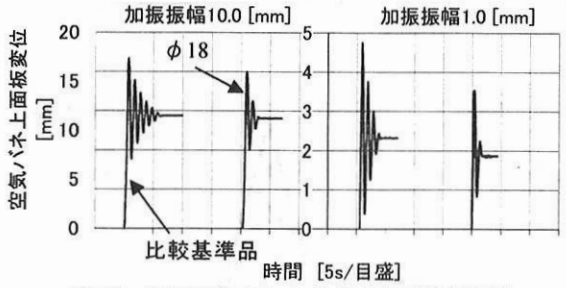

図 10　矩形波加振における減衰時間の比較

矩形波加振では、減衰時間が比較基準品に対して平均△42%と良好な結果となり、可変絞りはレール継目などの衝撃的な入力波形に対して有効であることが確認された。

4. 空気バネモデルへの展開

3.4 項の試験結果で最も効果的であった条件について、1 空気バネモデル (図 11 参照) の理論式と比較した。(図 12 参照)

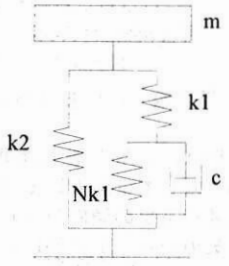

図 11　1 空気バネモデル

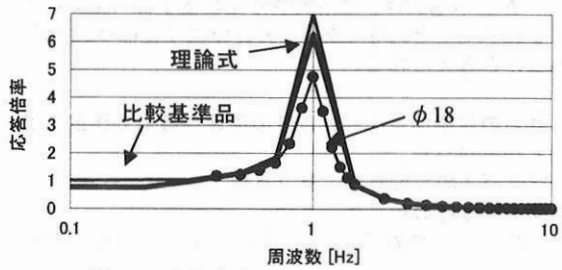

図 12　応答倍率における理論式との比較

理論式では「比較基準品」をシミュレーションしたもので、大よそ試験結果と一致しており、理論上も可変絞りの効果が確認できた。

また共振周波数 5Hz 付近では、可変絞りが積極的に動作することにより、部分的に応答倍率が低減された。(図 13 参照)

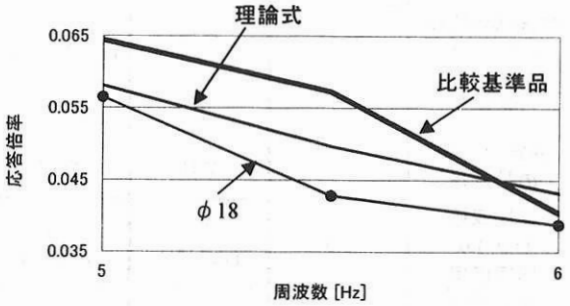

図 13　共振周波数 5Hz 付近における応答倍率の比較

5. まとめ、今後の展開

可変絞りの開発とベンチ試験による特性確認により、以下の結論が得られた。

- 可変絞りの条件
  - 空気バネ絞りの有無：有 (φ18)
  - 固定絞り部の絞り径：φ18
- 正弦波の応答倍率 (対 比較基準品)
  - 低周波域：良好 (△24%)
  - 高周波域：同等
- 矩形波 (対 比較基準品)
  - 減衰時間：良好 (△42%)

比較基準品に対して、正弦波の応答倍率では低周波域で良好、高周波域では同等の結果となった。当初は両周波数域で良好を目指していたが、高周波域については今後の検討課題である。

一方、矩形波では比較基準品に対して△42%と良好な結果であり、レール継目などの衝撃的な入力波形に対して有効であることが確認された。

今後は高周波域の改善を進め、1 台車系ベンチ試験や現車試験に加え、シミュレーションを用いた解析を実施し、構造の最適化を目指す。

参考文献

1) 小柳志郎：“空気ばね防振系の最適設計法”，日本機械学会論文集 (C 編) 49 巻 439 号，(昭和 58-3)
2) 風戸昭人，菅原能生，瀧上唯夫：“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”，鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2005)，(2005)