

空気ばね装置の非線形モデルによる車両の曲線通過シミュレーション

車両構造技術研究部 車両運動

主任研究員 下澤 一行

1. はじめに

鉄道車両の車体支持装置には、比較的大きな荷重の柔支持が可能であること、ばね高さを低く抑えられことなどから空気ばねが普及している。車両の走行安全性や動揺特性に関わる数値解析を実施する場合、空気ばねの力学モデルとして等価線型モデル¹⁾が広く使われている。一方、急曲線を低速で走行する車両の挙動を扱う際には高さ調整弁や差圧弁を含めたモデル化の例もみられるが、実際の応答を説明するモデルでないことがある。

本研究では、振幅依存性をもつ空気ばねの特性を表現する非線形モデルを提案する。また、現在普及している2種類の高さ調整弁を個別にモデル化し、これらの応答特性や流量特性の違いが車両の挙動に及ぼす影響を比較検証した結果について報告する。

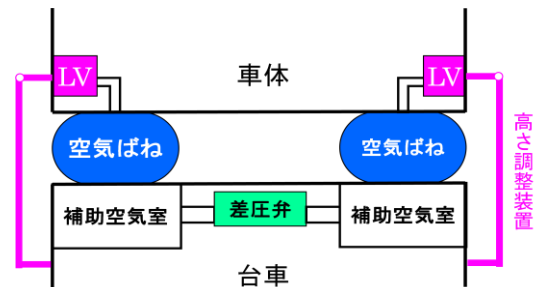


図1 空気ばね装置構成

2. 空気ばね装置のモデル化

2.1. 空気ばね装置の構成

空気ばね装置は空気ばね、補助空気室、高さ調整弁(LV)、および差圧弁で構成されている(図1)。空気ばねは、ゴム膜で囲まれた容積が変化する空気ばね本体と、補助空気室で構成され、その間にオリフィスを設けることで空気の圧縮性を利用するばね特性とオリフィスを通る空気の圧力損失を利用する減衰の2つの特性を併せ持っている(図2)。高さ調整弁は車体高さに応じて給排気を行い、車体高さを一定値内に保つ装置である。差圧弁は左右の空気ばねの内圧差を一定値内に抑え、輪重抜けを防止するとともに、空気ばねがパンクした際の安全弁の機能も担っている。

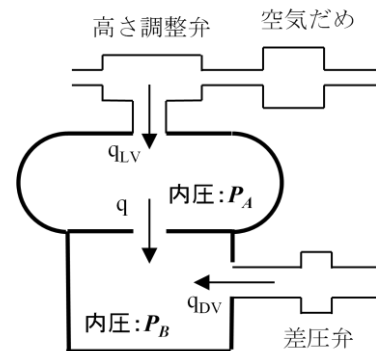


図2 空気ばね装置概略

2.2. 空気ばねの非線形モデル²⁾

等価線型モデルでは、オリフィスを通る空気の流量速度(\dot{q})が空気ばね内圧(P_A)と補助空気室内圧(P_B)の差に比例するとしていたが、ボルスタレス台車に用いられている空気ばねを用いた試験により、式(1)に示すようにオリフィスを通る空気の流量速度の1.7乗が空気ばねと補助空気室内の内圧差に比例するモデルとすると振幅に依らず測定値と計算値がよく一致することが確認できた(図3)。図中のシンボルは測定値を、実線は非線形モデルによる計算値を表している。

$$R\dot{q}^{1.7} = P_A - P_B \quad (1)$$

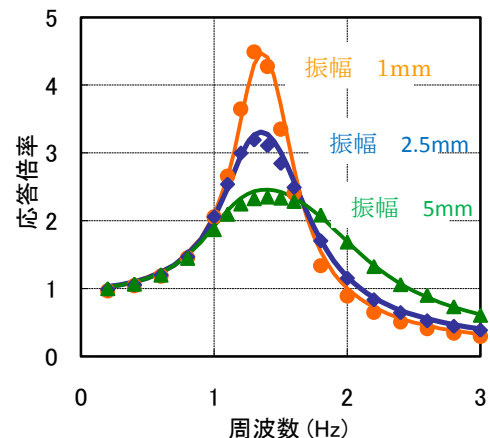


図3 自由加振による応答倍率

これを力学モデルに書き表すと、式(2)および図4となり、速度の1.7乗に比例する非線形ダンパで書き表せる。

$$c\dot{y}^{1.7} = K_I(z - y) \quad (2)$$

ここで、 y ：中間自由度、 z ：ばね変位、
 K_0 、 K_I ：等価ばね定数、 c ：減衰係数

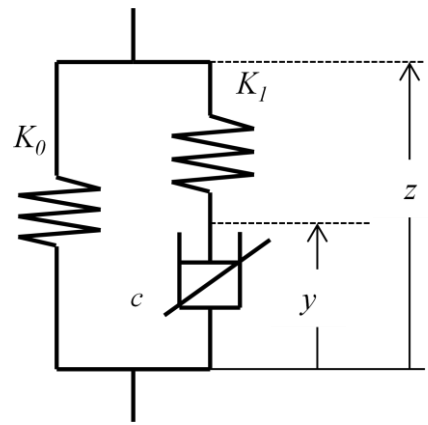


図4 非線形力学モデル

2.3. 高さ調整弁モデル

2.3.1. 高さ調整弁

高さ調整弁には国鉄時代から使用されている時間遅れを持つもの (LV4)³⁾ と、近年使われるようになった微少流量帯を持つもの (LV7)⁴⁾ の2種類がある。LV4には初圧のあるばねとオイルダンパが組み込まれ、これらにより時間遅れを与えている。また、中立位置付近には給排気動作を行わない不感帯を設けている。一方、LV7には時間遅れを与える機構がない。また、LV4に比較して、狭い幅の不感帯と空気ばね変位が小さい場合に極く少量の給排気が行われる微少流量帯を持っている。

2.3.2. 動作機構のモデル化

LV4の機構は弁開度を導入して図5のようにモデル化した。ダンパは片利きで、弁が開く方向に動く場合にのみ力を発生する。ばね (k_V) には初圧 (F_0) がかけられている。弁開度が上方に移動して $+\epsilon$ (2ϵ ：不感帯幅) を超えると空気が排気され空気ばねは縮み、弁開度が下方に移動して $-\epsilon$ を超えると空気が給気され空気ばねは伸びる。

ばね初圧を考慮すると、ダンパが作用する方向に変位する場合の空気ばねの変位 (Z_A) と弁開度の変位 (Z_V) の関係は次式となる。

$$\begin{cases} c_V \dot{Z}_V > F_0 & : \quad \dot{Z}_V = \alpha(Z_A - Z_V) + \text{sign}(\dot{Z}_V) \frac{F_0}{c_V} & (3a) \\ c_V \dot{Z}_V < F_0 & : \quad Z_V = Z_A & (3b) \end{cases}$$

ただし、 $\alpha = k_V / c_V$ 、

c_V ：ダンパ係数、 k_V ：ばね定数、 F_0 ：ばね初圧
 Z_A ：空気ばね変位、 Z_V ：弁開度変位

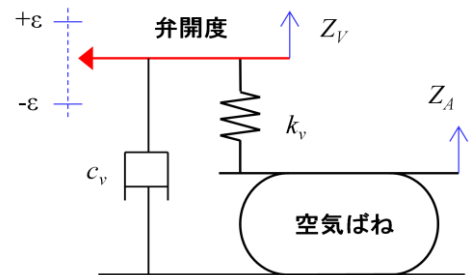


図5 LV4の機構モデル

式(3a)の右辺には1次遅れを表す第1項にばね初圧 (F_0) による第2項が加わるとともに、弁開度の変位速度 (\dot{Z}_V) により2式に場合分けされるため、単純な1次遅れ機構とは異なる。

一方、LV7では時間遅れ機構をもたないため、空気ばね変位と弁開度の変位が等しい ($Z_V = Z_A$) 単純なモデルとなる (図6)。

ばね (k_V) の初圧 (F_0) に関する項の導入によるLV4モデルの応答特性改善効果を図7に示す。ここで、一定速度で増加する Z_A が不感帯 ($\pm \epsilon$) を超えてから、 Z_V がこれを超えて実際に給排気が始まるまでに要する時間を、動作遅れ時間 (t_d) と定義する。

図7は、 \dot{Z}_A を変えて t_d を計算した結果である。 Z_A が緩やかに変

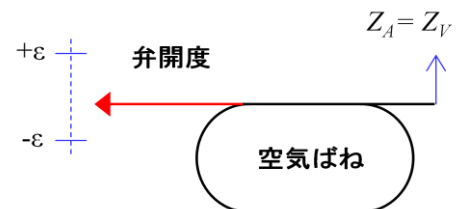


図6 LV7の機構モデル

化する場合 ($\dot{Z}_A < 0.1 \text{ mm/s}$)、従来の1次遅れモデル ($F_0=0$) では、 t_d は約10秒となる。これは、高さ調整弁のてこを手動でゆっくり動かした際に、操作量が不感帯を超えるのと同時に給排気が始まる実物の応答と異なる。一方、 k_v の初圧に関する項を導入した今回のモデル ($F_0 < 0$) では、 $\dot{Z}_A < 0.6 \text{ mm/s}$ において $t_d = 0$ となる。これは、 c_v の減衰力が常に F_0 より小さくなり、式(3b)に従って k_v がたわむことなく弁が開くため、先述の実態と一致する。なお、両モデルとも、 \dot{Z}_A が十分大きい条件では、 t_d はステップ入力に対する遅れ時間3秒に収束する。

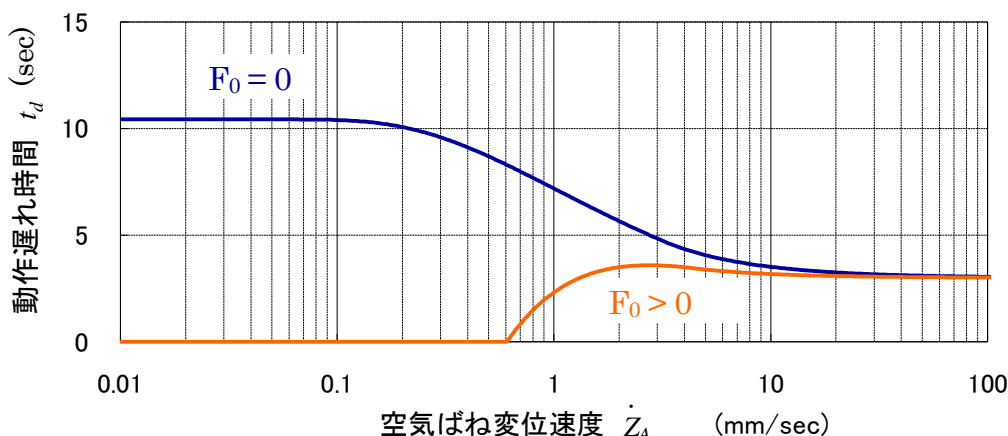


図7 空気ばね変位速度と動作遅れ時間の関係

2.3.3. 流量特性の定式化

高さ調整弁は管オリフィスとして扱う。高さ調整弁が動作する条件を考えると、上流側と下流側の圧力比は給気時（空気だめ内圧／空気ばね内圧）、排気時（空気ばね内圧／大気圧）とも臨界圧力比*以下となる。したがって、空気の質量流量 (dq_m/dt) は次式となる。

$$\frac{dq_m}{dt} = CA_a \sqrt{P_H \rho_H \kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{(\kappa+1)/(\kappa-1)}} \quad (4)$$

ここで、 κ は比熱比、 C は流量係数、 A_a は絞りの開口面積、 P_H は上流側の圧力、 ρ_H は上流側空気の密度である。

さらに、流量特性係数 C' を以下に定義する。

$$C' = CA_a \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{(\kappa+1)/(\kappa-1)}} \quad (5)$$

LV4では、 Z_V が不感帯を超えた際に流量が直ちに立ち上がるステップ状の特性をもつので、 $|Z_V| < \varepsilon$ の場合は、 $C'=0$ とし、 $|Z_V| > \varepsilon$ の場合には実際の流量特性から求めた約 $3.0 \times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{)}$ とした。

LV7の流量特性には微少流量帯があるため、LV4で仮定したステップ状の立ち上がりとはならず、空気ばね変位の関数となる。したがってLV7では、LV4で定数と

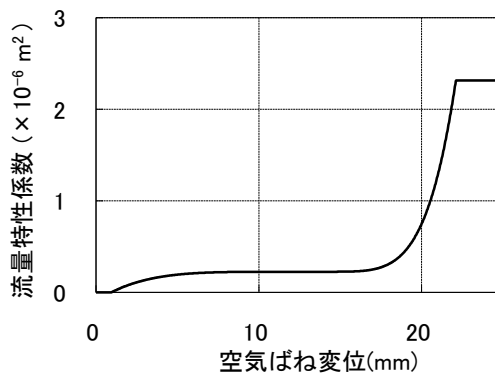


図8 LV7の流量特性係数

*臨界圧力比：オリフィスを通る気体の流速が音速に達したときの上流と下流の圧力の比。

した流量特性係数 C が空気ばね変位の関数となる。実際の流量特性から求めた流量特性係数を図 8 に示す。

3. 曲線通過シミュレーション

高さ調整弁の特性が車両の挙動に与える影響を見るために、曲線（半径 160m、カント 95mm、緩和曲線長 40m）を低速（10km/h）で走行するシミュレーションを行った。車両モデルは在来線通勤車を対象とした 49 自由度の 1 車両左右系モデルとした。

高さ調整弁を考慮しない等価線形モデルと、高さ調整弁として LV4 および LV7 を用いた場合の曲線走行中の車体ロール角を図 9 に示す。円曲線中において、高さ調整弁を考慮すると内軌側は給気されることで空気ばねは伸び、外軌側は排気されることで縮むため等価線形モデルに対して車体ロール角は小さくなる。LV4 では円曲線進入時に給排気動作を行うため、曲線通過後には内軌側の空気ばねは中立位置から伸びた状態で、外軌側の空気ばねは中立位置から縮んだ状態となり、車体が外傾した状態になる。LV7 では曲線通過中に継続的に給排気を行うため、円曲線中で車体ロール角に変化が見られる。さらに曲線通過後も微少流量帯での給排気が継続するため、車体ロール角は徐々に 0 に近づく。

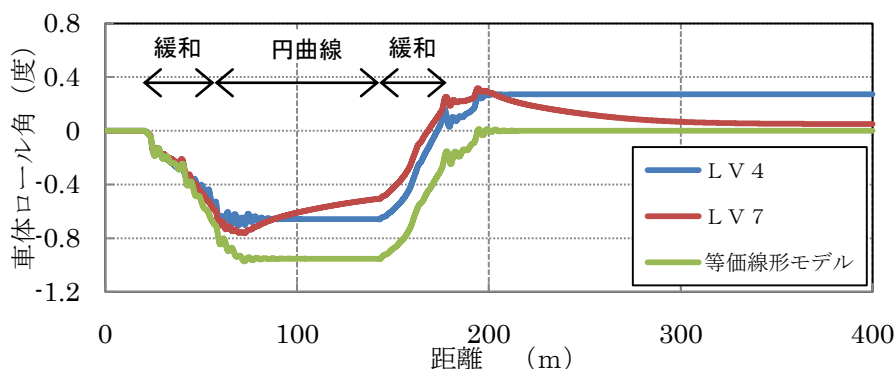


図 9 高さ調整弁と車体ロール角

4. まとめ

空気ばね装置をもつ車両の挙動を精度よく検討するために差圧弁および高さ調整弁を組み込み、かつ、空気ばねの非線形特性も考慮した空気ばね装置の非線形モデルを作成した。空気ばねの減衰特性は、粘性減衰および速度 2 乗減衰のどちらでもなく、速度の 1.7 乗に比例するとした非線形減衰とすることで計算値と測定値がよく一致することが確認できた。また、LV4 における時間遅れ、LV7 における微少流量帯の特性を表現する高さ調整弁の計算モデルを構築することができた。LV4 では、ばね初圧を考慮することで、空気ばねの緩やかな変化に対しては遅れ時間をもたずに、空気ばね変位が不感帯を超えたと同時に高さ調整弁が給排気動作を行うことがわかった。

今後は、このモデルを用い急曲線における低速走行時や停車時の現象解明に取り組む予定である。

[参考文献]

- 1) 小田、西村：空気ばね懸架の振動特性とその設計，機械学会論文集，Vol.35, No.273, 1969
- 2) 下澤、遠竹：非線形減衰特性を考慮した上下系空気ばねモデルの検討，鉄道総研報告，Vol.22, No.22, 2008
- 3) JRIS E4117-1 鉄道車両－自動高さ調整弁－第 1 部：不感帯・時間遅れを持つもの
- 4) JRIS E4117-2 鉄道車両－自動高さ調整弁－第 2 部：中立位置付近に微少流量帯を持つもの