

# 急曲線低速走行時に 高さ調整弁等が車両挙動に与える影響

下澤 一行\*

## Influence of the Leveling Valve on Vehicle Dynamics at Low Speed on a Sharp Curve

Kazuyuki SHIMOZAWA

Two types of leveling valves, with time lag and with throttled air flow, have prevailed for the air spring system in Japan. When investigating the dynamics of vehicle on curve, for the former, the time lag has treated as the first order lag mechanism, but for the latter nobody investigated the dynamics of vehicle on curve using these characteristics. Therefore, we created dynamic models of two types of leveling valves. This paper reports on the result of comparative study regarding the influence of the characteristic on the dynamics of vehicle using two models of leveling valves.

キーワード：空気ばね，高さ調整弁，遅れ時間，微小流量帯

### 1. はじめに

鉄道車両の空気ばね装置は図1に示すように、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、高さを一定値内に保ちながら車体荷重を支えている。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。高さ調整弁は、車体高さを一定値内に保つために空気ばねの給排気を行う装置である。差圧弁は左右の空気ばねを連通して内圧差を一定値内に抑え、輪重抜けを防止するとともに、片側の空気ばねがパンクした際の安全弁の機能も担っている。

空気ばねの上下方向の力学モデルとしては等価線形モデル<sup>1)</sup>が広く使われているが、振幅依存性をもつ実際の応答特性とは異なっている。筆者らはボルスタレス台車に使用されている空気ばねの特性確認試験により、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の内圧差に比例する非線形モデルを提案し、実態に合ったばね特性の振幅依存性を再現した<sup>2)</sup>。

高さ調整弁には国鉄時代から使用されているLV4形式に代表される「不感帯・時間遅れを持つもの」<sup>3)</sup>（以下、LV4）と、近年使われるようになったLV7形式に代表される「中立位置付近に微小流量帯を持つもの」<sup>4)</sup>（以下、LV7）の2種類が使われている。曲線走行中の車両の挙

動を解析する際にLV4の高さ調整弁を考慮した例<sup>5)~7)</sup>はあるが、時間遅れを「空気ばね高さが不感帯を越えて給排気するまでの時間」と単純化して扱っている。一方、近年使われはじめたLV7の特性を考慮した車両の曲線通過時の挙動に関する検討はなされていない。また、それら2種類の特性の違いが車両の挙動に与える影響について比較検討した例はない。

そこで、不感帯・時間遅れを持つ高さ調整弁については、ばね初圧を考慮したモデルを作成し、中立位置付近に微小流量帯を持つ高さ調整弁については、空気ばね変位と流量の関係を用いたモデル化を行い、高さ調整弁の特性が車両の挙動に与える影響について解析的検討を行ったので、その結果について報告する。

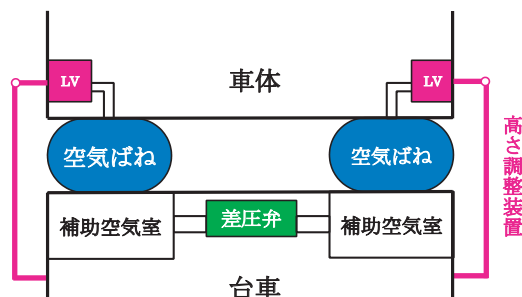


図1 空気ばね装置構成

### 2. 記号

各章での記号は以下の通りとする。なお、圧力は絶対圧力である。

\* 車両構造技術研究部（車両運動）

特集：車両技術

- $A$  : 空気ばねの受圧面積
- $A_a$  : 絞りの開口面積
- $A_V$  : 空気ばねの容積変化率
- $A_Z$  : 空気ばねの受圧面積変化率
- $C$  : 流量係数
- $C'$  : 流量特性係数
- $c_V$  : ダンパ係数
- $\Delta P_{DV}$  : 差圧弁の動作圧
- $\varepsilon$  : 不感帯幅の半分
- $F_a$  : 空気ばねの上下力
- $F_0$  : ばね初圧
- $k_V$  : ばね定数
- $\kappa$  : 比熱比
- $n$  : ポリトロープ指数
- $P_A$  : 空気ばね内圧
- $P_B$  : 補助空気室内内圧
- $P_0$  : 初期状態での空気ばね内圧
- $P_{at}$  : 大気圧
- $P_H$  : 上流側圧力
- $P_L$  : 下流側圧力
- $\rho_0$  : 初期状態での空気密度
- $\rho_{at}$  : 大気圧での空気密度
- $\rho_H$  : 上流側での空気密度
- $q$  : オリフィスを通る空気流量
- $q_{DV}$  : 差圧弁から空気ばねへの空気流量
- $q_{LV}$  : 高さ調整弁から空気ばねへの空気流量
- $q_m$  : 質量流量
- $R$  : 比例定数
- $R_F$  : 初圧率
- $t_0$  : 時間遅れ
- $t_d$  : 動作遅れ時間
- $\tau$  : 弁が戻る際の時定数
- $V_{A0}$  : 初期状態での空気ばね内容積
- $V_B$  : 補助空気室容積
- $Z_D$  : 時間遅れ測定時の変位
- $Z_A$  : 空気ばね変位
- $Z_V$  : 弁開度変位

3. 空気ばね装置モデル

空気ばねの非線形モデル<sup>2)</sup>により、オリフィスを通る空気の流量速度 ( $\dot{q}$ ) は、空気ばねと補助空気室の内圧より、

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

となる。

空気の状態変化をポリトロープ変化と仮定し、図2のように高さ調整弁と差圧弁の流量を考慮すると、空気ば

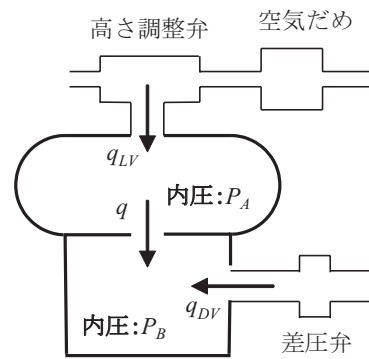


図2 空気ばねの空気の流れ

ねが  $Z_A$  変位した際の空気ばねと補助空気室の内圧は、式(2)で表せ、空気ばね内圧から空気ばねの上下力が式(3)により求められる。

$$P_A = P_0 \left\{ \frac{\rho_0 V_{A0} - q + q_{LV}}{\rho_0 (V_{A0} + A_V Z_A)} \right\}^n \quad (2)$$

$$P_B = P_0 \left\{ \frac{\rho_0 V_B + q + q_{DV}}{\rho_0 V_B} \right\}^n$$

$$F_a = (P_A - P_{at})(A + A_Z Z_A) - (P_0 - P_{at})A \quad (3)$$

空気ばねの上下力を求めるためには、式(2)により高さ調整弁および差圧弁の流量を求める必要がある。その方法について次章で説明する。

4. 高さ調整弁と差圧弁

4.1 高さ調整弁

不感帯・時間遅れを持つLV4内部には、初圧のあるばねと時間遅れを与えるためのオイルダンパが組み込まれ、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は時間遅れを持たず、LV4と比較して狭い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小流量帯を持っている。それぞれの高さ調整弁について、動作機構と流量に分けてモデル化を行った。

4.2 LV4

4.2.1 LV4の動作機構モデル

LV4の動作機構は弁開度を導入して図3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し、中立位置に戻る方向に動く場合には作用力は発生せず速やかに戻る。また、ばねには初圧 ( $F_0$ ) がかけられている。弁開度が上方に移動して  $+\varepsilon$  を超えると空気が排気され空気ばねは縮み、 $-\varepsilon$  を超えると空気が給気され空気ばねは伸びる。

ここで、ダンパが作用する方向に弁開度が動く場合を

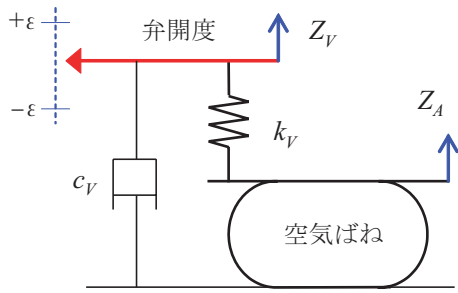


図3 LV4の機構モデル

考える。弁の質量を無視すると、ダンパ力がばね初圧以上の場合の弁の運動方程式は次式となる。

$$c_V \dot{Z}_V = k_V (Z_A - Z_V) + \text{sign}(\dot{Z}_V) F_0 \quad (4)$$

$$\text{ここで, } \text{sign}(\dot{Z}_V) = \begin{cases} 1 & (\dot{Z}_V > 0) \\ -1 & (\dot{Z}_V < 0) \end{cases}$$

式(4)は $\dot{Z}_V$ の符号に対して対称なので、以下では、 $\dot{Z}_V$ が正の場合について議論する。

LV4の時間遅れ( $t_0$ )は、「入力 $Z_A$ が0から $Z_D$ に立ち上がるステップ入力に対し、 $Z_V$ が $\varepsilon$ に達するまでの時間」と規定されているので、この規定に合うように $k_V$ 、 $c_V$ を定める。

入力 $Z_A$ が $Z_D$ に立ち上がった時を考えると、式(4)より、

$$\dot{Z}_V + \alpha Z_V = \alpha(1 + R_F) Z_D \quad (5)$$

となる。ここで、

$$\begin{cases} \alpha = \frac{k_V}{c_V} \\ F_0 = R_F k_V Z_D \end{cases} \quad (6)$$

とした。 $R_F$ を初圧率と呼び、ばねが $Z_D$ 変位した際のばね力とばね初圧の比である。

式(5)を $t$ について解き、時間遅れの規定「 $t = t_0$ で $Z_V = \varepsilon$ 」を代入して、 $\alpha$ について解くと、

$$\alpha = -\frac{1}{t_0} \ln \left( 1 - \frac{1}{1 + R_F} \frac{\varepsilon}{Z_D} \right) \quad (7)$$

となる。

したがって、弁の運動方程式は式(4)より、

$$\dot{Z}_V = \alpha(Z_A - Z_V) + \text{sign}(\dot{Z}_V) \alpha R_F Z_D \quad (8)$$

となり、弁の応答は、不感帯、時間遅れ、時間遅れ測定時の変位、および初圧率により求められる。

一方、ダンパ力がばね初圧以下の場合には、ばねは変位しないので、

$$Z_V = Z_A \quad (9)$$

となる。

弁開度が中立位置方向(ダンパが作用しない方向)に

動く場合には、 $Z_V$ が $Z_A$ に急速に接近するようにするため、適当な時定数 $\tau$ を用いて、

$$\dot{Z}_V - \dot{Z}_A = (Z_V - Z_A) / \tau \quad (10)$$

とした。

#### 4.2.2 LV4の応答

空気ばね高さ( $Z_A$ )が時間0から $t_1$ までの間に0から $z_{A0}$ まで線形に立ち上がり、以降は一定値 $z_{A0}$ を保つときの応答は、式(8)、式(9)より次式となる。

$$\begin{cases} Z_V = z_{A0} t - \frac{z_{A0} - \alpha R_F Z_D}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \\ \quad + \frac{z_{A0}}{\alpha} \{ 1 - e^{-\alpha(t-t_1)} - \alpha(t-t_1) \} u(t-t_1) \\ \quad \quad \quad (\dot{z}_{A0} - \alpha R_F Z_D > 0) \\ Z_V = Z_A \\ \quad \quad \quad (\dot{z}_{A0} - \alpha R_F Z_D \leq 0) \end{cases} \quad (11)$$

ただし、 $\dot{z}_{A0}$ は空気ばねの変位速度( $= z_{A0} / t_1$ )、

$$u(t-t_1) = \begin{cases} 0 & t < t_1 \\ 1 & t \geq t_1 \end{cases}$$

である。

ここで、動作遅れ時間( $t_d$ )を空気ばね高さが不感帯を超えてから、高さ調整弁が給排気を始めるまでに要する時間と定義する。時刻 $t_a$ で $Z_A = \varepsilon$ 、時刻 $t_V$ で $Z_V = \varepsilon$ になるとすると、 $t_d = t_V - t_a$ となり、 $t_d$ は式(11)より

$\dot{z}_{A0} - \alpha R_F Z_D > 0$ の場合：

$$\begin{aligned} t_a &= \frac{\varepsilon}{\dot{z}_{A0}} \\ \text{および} \\ \varepsilon &= \dot{z}_{A0} t_V - \frac{\dot{z}_{A0} - \alpha R_F Z_D}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t_V}) \\ &\quad + \frac{\dot{z}_{A0}}{\alpha} \{ 1 - e^{-\alpha(t_V-t_1)} - \alpha(t_V-t_1) \} u(t_V-t_1) \end{aligned}$$

から解いた $t_V$ より求める。 (12a)

$\dot{z}_{A0} - \alpha R_F Z_D \leq 0$ の場合： $t_d = 0$  (12b)  
となる。

LV4の特性( $\varepsilon = 5\text{mm}$ ,  $t_d = 3$ 秒,  $Z_D = 20\text{mm}$ )を用い、空気ばね変位( $z_{A0}$ )を10mmおよび20mmとした時の動作遅れ時間を初圧率と変位速度を変数として計算した結果を図4、図5に示す。

動作遅れ時間は、ばね初圧、空気ばね変位および変位速度に依存する。ばね初圧を考慮しない( $R_F = 0$ )と、空気ばねの変位速度が小さい場合、すなわち、空気ばねが緩やかに変化する場合には動作遅れ時間は10秒程度となる。しかし、ばね初圧を考慮すると、空気ばねが緩やかに変化する場合には式(12b)により動作遅れ時間は0となる。このことは車両の高さ調整を行う際に、高さ調整弁を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と同時に給排気が始まることと一致している。

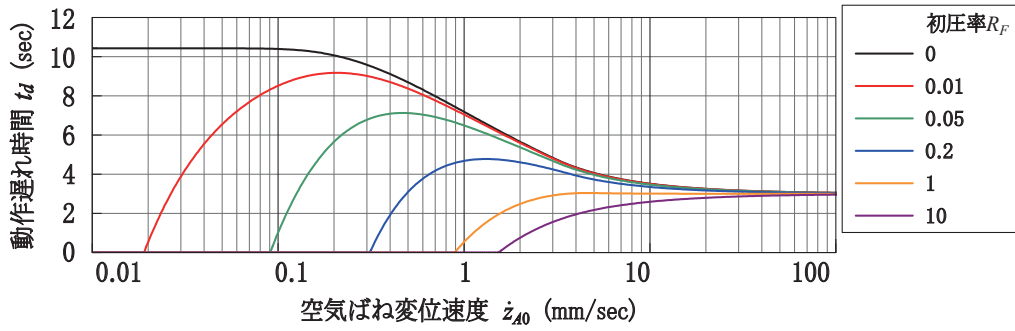


図4 空気ばね変位速度と動作遅れ時間の関係 ( $z_{40} = 10\text{mm}$ )

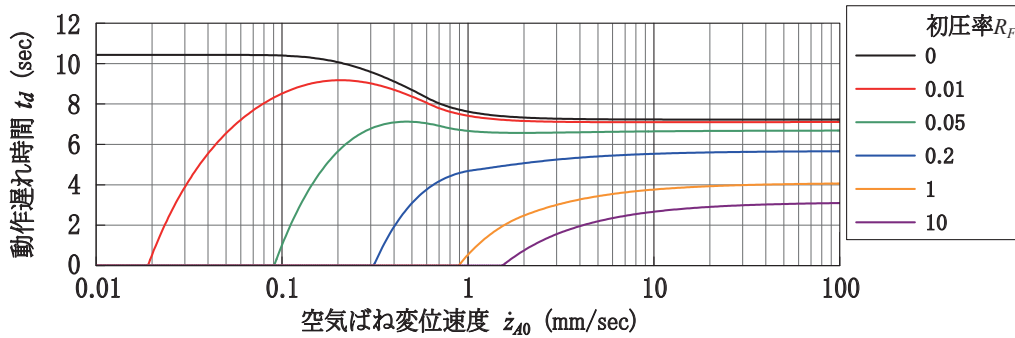


図5 空気ばね変位速度と動作遅れ時間の関係 ( $z_{40} = 20\text{mm}$ )

空気ばねの変位速度が速い場合においては、空気ばね変位が時間遅れ測定時の規定変位と同じ場合 ( $z_{40} = Z_D = 20\text{mm}$ , 図5) では、動作遅れ時間は時間遅れの規定値 (3秒) に収束するが、空気ばね変位が時間遅れ測定時の規定変位より小さい場合 ( $z_{40} < Z_D$ , 図4) では、初圧率を考慮すると初圧率が小さいほど動作遅れ時間は時間遅れの規定値よりも長くなる。

4.2.3 LV4の流量特性

高さ調整弁を管オリフィスとして扱うと、高さ調整弁を流れる空気の質量流量 ( $dq_m/dt$ , kg/sec) は、上流側圧力 ( $P_H$ ) と下流側圧力 ( $P_L$ ) の比により次式で求められる。

(a)  $\frac{P_L}{P_H} > \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\kappa/\kappa-1}$  の場合：

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

(13a)

(b)  $\frac{P_L}{P_H} \leq \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\kappa/\kappa-1}$  の場合：

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

(13b)

$(2/(\kappa+1))^{\kappa/\kappa-1}$  は臨界圧力比と呼ばれ、空気の場合は約0.528である。

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 (空気ばね内圧/空気だめ内圧)、排気時 (大気圧/空気ばね内圧) とともに臨界圧力比以下となるので、高さ調整弁を流れる空気の流量は式 (13b) となる。さらに、

$$\rho_H = \frac{P_H}{P_{at}} \rho_{at}$$

を代入すると、

$$\frac{dq_m}{dt} = C' \sqrt{\frac{\rho_{at}}{P_{at}}} P_H \tag{13b'}$$

ここで、 $C'$  を流量特性係数と呼び、

$$C' = CA_a \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{(\kappa+1)/(\kappa-1)}} \tag{14}$$

となる。したがって、流量はオリフィスの特性 (流量係数、開口面積)、 $\kappa$  による定数項、および上流側の圧力で決まる。高さ調整弁のオリフィスとしての特性は不明であるので、流量特性係数を実際の流量特性から求める。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、 $|Z_V| < \epsilon$  の場合は  $C' = 0$  とし、 $|Z_V| > \epsilon$  の場合には実際の流量特性から求めた  $C' = 3.0 \times 10^{-6}$  とした。

4.3 LV7

4.3.1 LV7の動作機構モデル

LV7では時間遅れ機構をもたないため、図6に示すように空気ばね変位と弁開度が等しい ( $Z_V = Z_A$ ) 単純な

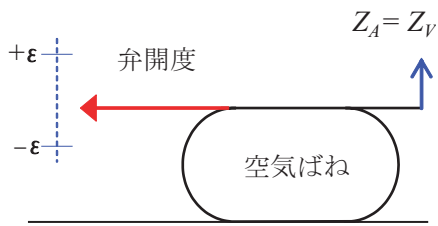


図6 LV7の機構モデル

モデルとなる。

#### 4.3.2 LV7の流量特性

LV7には微小流量帯があるため、LV4で仮定したステップ状の特性とはならず、空気ばね変位の関数となる。そこで、LV7の流量は、LV4では定数とした流量特性係数C'を空気ばね変位の関数とした。流量特性図から求めた流量特性係数を図7に示す。

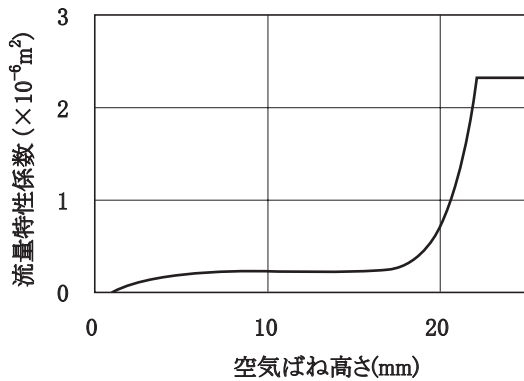


図7 LV7の流量特性係数

#### 4.3.3 LV7の応答

LV7は時間遅れを持たず不感帯が1mmであることから、空気ばね変位が小さな場合でもLV7が動作することが予想される。そこで、LV4とLV7について半径600m、カント105mmの曲線を速度100km/hで走行するシミュレーションを行った。図8に車体ロール角と前台車の高

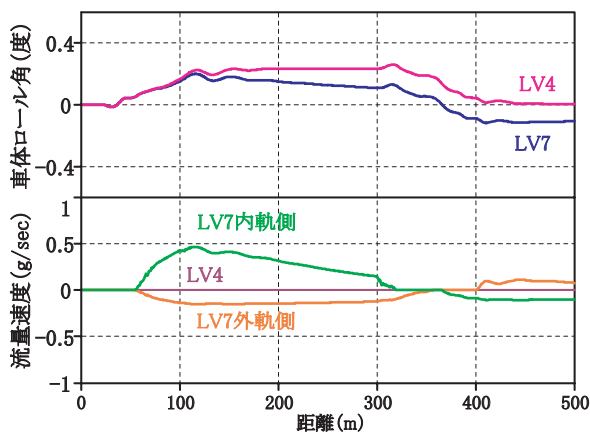


図8 車体ロール角と高さ調整弁の給排気動作 (半径：600m 速度：100km/h)

さ調整弁の流量速度を示す。ここで、流量速度が正であることは給気を、負であることは排気を示している。LV4では給排気をしていないが、LV7では給排気を行っている。

LV4が動作しないような車体ロール角が小さく空気ばね変位が小さな場合でも、LV7は動作することがシミュレーションで示された。高さ調整弁の違いで車体ロール角に違いがあることについては次章で説明する。

#### 4.4 差圧弁

差圧弁も管オリフィスとして扱う。差圧弁の動作圧を $\Delta P_{DV}$ とすると、差圧弁が動作する際の上流側と下流側の圧力比は

$$\frac{P_L}{P_H} = \frac{P_H - \Delta P_{DV}}{P_H} \quad (15)$$

となり、一般に用いられている動作圧 ( $\Delta P_{DV} = 100, 150\text{kPa}$ ) のものでは、図9に示すように臨界圧力比以上となるので、差圧弁を流れる空気の流量は式(13a)となる。

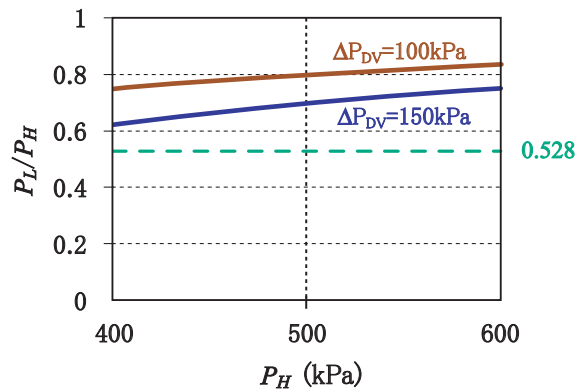


図9 上流側と下流側の圧力比

### 5. 曲線通過シミュレーション

#### 5.1 車両モデルとシミュレーション

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、車体は空車とした。高さ調整弁および差圧弁を介した空気の給排気により空気ばね高さが変化するので、従来の左右系モデルに対し、車体重心の上下変位も自由度として加わっている。

シミュレーションは、曲線(半径160m、カント95mm、緩和曲線長40m)を低速(10km/h)で走行する条件で、直線、入口緩和曲線、円曲線、出口緩和曲線、直線を順に走行させ、時間刻みを0.1msとしたRunge-Kutta-Gill法による数値積分で行った。

特集：車両技術

5.2 高さ調整弁の特性と車両の挙動

高さ調整弁を考慮しない等価線形モデルを用いた場合と、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、およびそのときの前台車の高さ調整弁の流量速度を図10に示す。車体ロール角が負であることは車体が内傾していることを示し、流量速度が正であることは給気を、負であることは排気を示している。なお、LV4では、 $R_F = 0.2$ 、 $\tau = 0.2$ とした。

高さ調整弁を考慮すると、円曲線中において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、曲線通過後の直線では内軌側の空気ばねは中立位置から不感帯の範囲内で伸びた状態に、外軌側の空気ばねは中立位置から不感帯の範囲内で縮んだ状態となるので、車体は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、さらに曲線通過後の直線でも給排気が継続するため、車体ロール角は徐々に解消される。なお、いずれの場合も差圧弁は動作しなかった。

6. まとめ

高さ調整弁のモデル化にあたりLV4については、ばね初圧を考慮することにより、空気ばねが緩やかに変化する場合には動作遅れ時間が0となり、遅れ時間を持たずに動作する現実の応答を再現することができた。一方、LV7については、空気の流量を空気ばね変位の関数としたモデルとし、微少流量帯での流量を表現するモデルと

した。

急曲線を低速で走行する場合について両モデルを比較すると、LV4は円曲線の入り口付近でのみ動作するが、LV7は入口緩和曲線から曲線通過後の直線まで動作が継続している。また、曲線通過後の直線において、LV4では不感帯の影響により車体が外傾した状態となり、LV7では微少流量帯での給排気が継続し車体の傾きは徐々に解消されていく。

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。

文献

- 1) 小田, 西村: 空気ばね懸架の振動特性とその設計, 日本機械学会論文集, 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
- 5) 佐藤, 平林: 空気ばねを備えた鉄道車両の車体傾斜制御, 東急車輛技報, No.45, p2, 1995
- 6) 須田, 熊木: 非線形な空気ばね系を考慮した車両の曲線通過特性の研究, 日本機械学会論文集C, Vol.64, No.617, 1998
- 7) 小柳: 空気ばね車両の輪重減少に対する空気ばね装置非線形性の影響, 日本機械学会論文集C, Vol.54, No.508, 1988

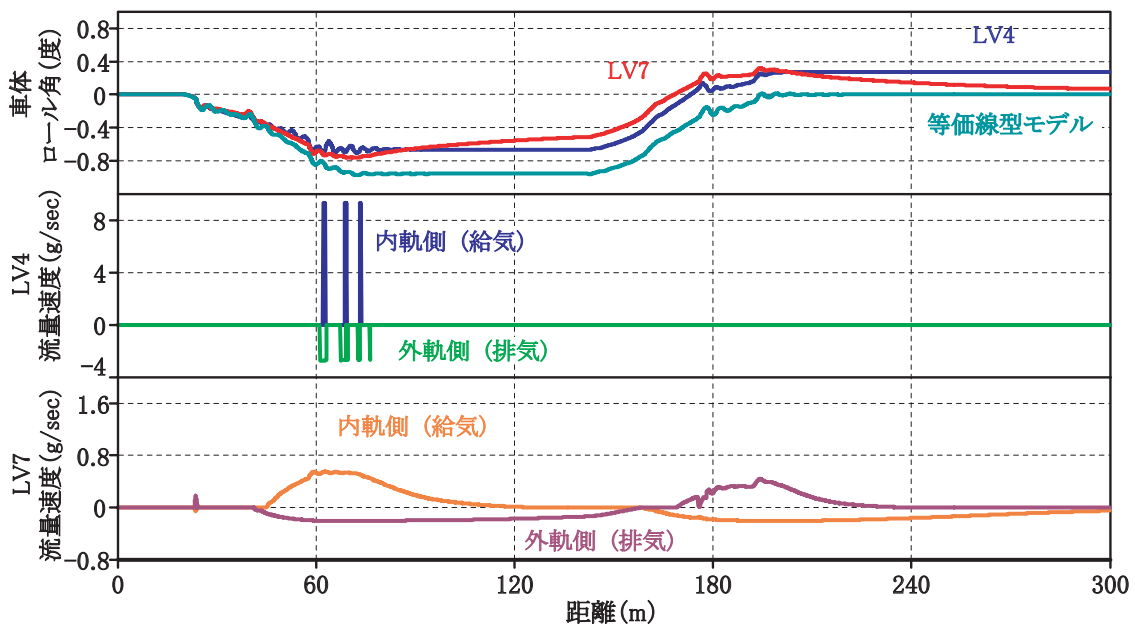


図10 車体ロール角と高さ調整弁の給排気動作  
(半径: 160m 速度: 10km/h)