

## 3508 新方式制御装置を用いた空気ばね系の制御に関する研究

### Study on control of air suspensions in railway vehicles using the new concept devices

[機] 須田 義大 (東大)、黒崎 由紀夫 (東大院)、[機] 小峰 久直 (東大)  
佐藤 興志、[機] 中居 拓自、[機] 下川 嘉之 (住金)

Yoshihiro SUDA, Yukio KUROSAKI, Hisanao KOMINE (The University of Tokyo)

Yoshi SATO, Takuji NAKAI, Yoshiyuki SHIMOKAWA (Sumitomo Metal Industries)

This paper presents the curving performance of railway vehicles with air suspensions. Air suspensions sometimes cause reduction of wheel load at transition curve, so it is very important to evaluate the performance on transition curve and to control air suspensions properly. In previous study it was found that the air suspensions have non-linear characteristics at low speed and that the performance is influenced by the initial condition, the entrance transition curve condition and so on by computer simulation and experiments using one-car-modeled test bench. In this study, the new concept devices which have functions to make the link rod of air suspension systems extend or shorten were proposed. The control strategies to compensate the difference of initial condition at the curve entry and prevent the reduction of wheel load at exit transition curve at low speed were also proposed. These proposed control methods were examined by the experiments using one-car-modeled test bench and simulations. As the result, expected performance were obtained so that reduction of wheel load was restraint very much.

Keywords : Railway Vehicle, Air Suspension, Control, Transition Curve, Safety of Running

#### 1. 序論

都市鉄道では、地形的な制約から急曲線区間が数多く存在するうえ、ラッシュ時には先行列車に接近して低速走行や一時停止をすることが多い。急曲線を低速で走行すると、曲線上ではカント超過のために外軌側輪重が小さくなり、出口緩和曲線上では軌道面のねじれによってさらに各車両先頭輪軸の外軌側の「輪重抜け」が生じてしまう。

一方、近年の鉄道車両では、乗り心地向上のため空気ばねが一般的である。空気ばねには高さ調整機能を備えているため、ばね定数を小さくすることができ、定常走行中には優れた安定性と乗り心地を与えているものの、個別の空気ばねに対する機械的なフィードバック制御を行っているため、緩和曲線上での挙動の課題が指摘されていた[1]。

さらにコンピュータシミュレーション、試験機による走行模擬試験により、低速では空気ばね特性の非線形性が大きくなること、またその非線形性により曲線上の車両の挙動は走行履歴に大きく依存することがわかった[2,3]。

本論文では、以上の背景から空気ばね系の新方式の制御装置を考案し、試験機による走行模擬試験を行い輪重抜けを抑える効果を確認し、空気ばね系の非線形性による影響を打ち消す制御方法を提案する。空気ばね系の制御については、電磁弁を用いてフィードバック制御を行う空気ばね制御方式が提案されている[4]が、本方式は、現状の機械式制御手法（高さ調整機構；LV 機構）を前提とする方式であり、フェイルセーフ性を備えた方法である。

#### 2. 鉄道車両における空気ばね

空気ばね系のモデルを Fig.1 に示す。空気ばねは本体と補助空気室からなり、空気ばねのたわみ量を一定範囲にするために LV（高さ調整弁）がある。LV は空気ばねのた

わみが設定値を超えると給気弁または排気弁が開き、給気または排気によりたわみを設定値内に制御する。

また、左右の空気ばね間には差圧弁があり、左右の空気ばねの圧力差が設定圧以上になると弁が開き、高压側から低压側に空気が流れて圧力差を設定圧以下に保っている。

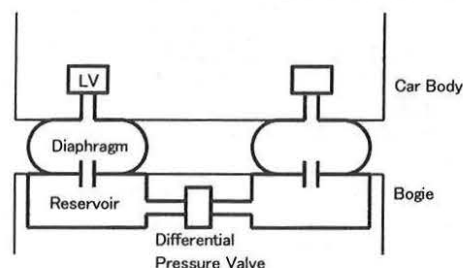


Fig.1 Air suspension system model

#### 3. シミュレーションモデル

コンピュータシミュレーションのモデルは、空気ばねの上下方向の力に注目することから、上下・左右・ロール方向に自由度を与えたモデルとした (Fig.2)。各剛体の接続は、空気ばね上下方向以外はすべて線形のばね・ダンパとした。空気ばね上下方向は、ダンパは線形のまま残し、ばねの代わりに非線形な特性を持った外力を加えることとした。この外力の計算では、LV または差圧弁が作動するときに弁を流れる空気を Fig. 2 のような理想的な絞りを通過する流れとして扱って流量を求め、空気ばねに流入される空気量から内圧、上下方向にかかる力を求めている。

空気ばねに関する設定値は試験機に合わせて Table 1 のとおりとした。

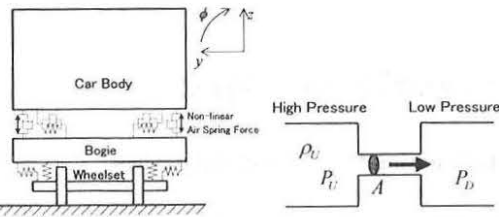


Fig.2 Model of simulation vehicle and air flow of the valve

Table 1 Specification of air suspension model

|                                         |         |
|-----------------------------------------|---------|
| Dead zone of LV                         | 5.6 mm  |
| Time delay constant of LV               | 1.0 sec |
| Pressure of differential pressure valve | 120 kPa |

#### 4. 一車両モデル試験機

走行模擬試験は Fig.3 に示す一車両モデル試験機を用いた。台車は空気ばねボルスタレス台車とし、台車の構造や諸元、車体の重量や重心位置などは、地下鉄で使用されている典型的な実車両を想定して設定した。各輪軸の車輪に相当する部分のアクチュエータにより各軸独立にローリング変位を与え、カントのついた軌道上の走行模擬ができる。なお、遠心力に相当する外力は作用させていないが、低速走行に限定しているので問題ない。

試験条件は、直線から曲線を経て再び直線に至るまでの軌道を設定し、1 回の試験につき、走行速度、入口緩和曲線長、円曲線長、出口緩和曲線長、カント量を限度内で自由に設定した。また、この走行模擬試験で測定した項目は Table 2 のとおりである。

Table 2 Measurement objects

|                                                 |                         |          |
|-------------------------------------------------|-------------------------|----------|
| Wheel load                                      | Both sides per wheelset | 8 points |
| Vertical Displacement of primary suspension     | Both sides per wheelset | 8 points |
| Vertical Displacement of air suspension         | Both sides per bogie    | 4 points |
| Air pressure                                    | Both sides per bogie    | 4 points |
| Lateral displacement between bogie and car body | Per bogie               | 2 points |

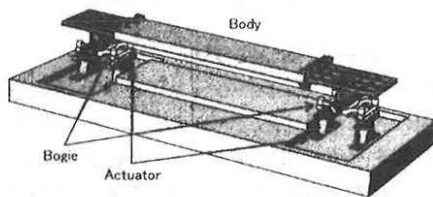


Fig.3 The full scaled one-car-modeled test bench

#### 5. 走行履歴の影響[2,3]

曲線を通過する際、入口緩和曲線での軌道・走行条件の違いがその後の車両の挙動に及ぼす影響について、一車両モデル試験機を用いて走行模擬試験を行なって調べた結果をここでは述べる。走行速度を 10,15,30[km/h]の 3 通り、

それぞれ入口緩和曲線長のみ 18,24,30,60,90[m]の 5 通りに変化させ、計 15 通りの条件を設定した。出口緩和曲線での第 1 軸外軌側の輪重変動率の極小値（輪重減少地点の値）を Fig.4 に示す。速度が低いほど入口緩和曲線長の違いによる影響が大きくなり、入口緩和曲線長が長いほど出口緩和曲線での輪重が減少することがわかった。

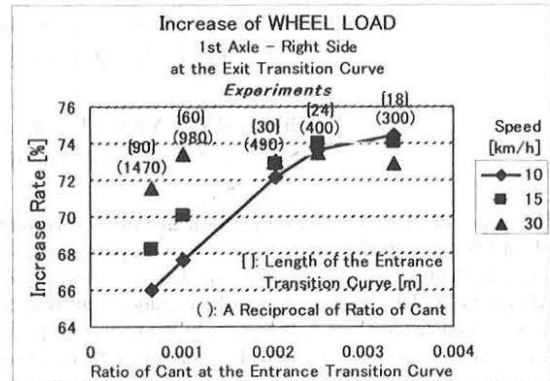


Fig.4 Comparison about increase of wheel load

#### 6. 新方式制御装置の提案

##### 6.1 装置概要

本研究では空気ばね系を制御する機構として、従来試みられた電磁弁を用いて空気ばねの給排気を制御する方式ではなく、車体・台車間の上下相対変位を伝達する役目を持つ連結棒の長さを、直動アクチュエータを用いて伸縮させるという新方式の装置を Fig.5 のように考案した。実験では基本的な特性を持つ(a)の装置を用いた。実際に試作した装置を Fig.6 に示す。これらの装置は次の特徴を持つ。

- ・連結棒を伸縮させることで LV の給排気を制御できる。
- ・従来の空気ばね系に付加する装置なので導入が容易。
- ・設置スペースの制約が少ない。
- ・装置不具合時にも連結棒長さを固定することにより従来の機能が維持できる。（フェイルセーフ機能の確保）
- ・空気ばね高さの目標値設定もできるので、超過遠心加速度を補償する車体の傾斜角制御、ホーム段差縮小のためのニーリング機能への応用も可能である。

また、制御の概念図を Fig.7 に示す。制御における入力情報は、地点情報、軌道情報（曲線長、カントなど）、走行速度とし、あらかじめ軌道条件や走行速度に応じて制御方法が一意に対応づけられているフィードフォワード制御を行なうことを想定している。

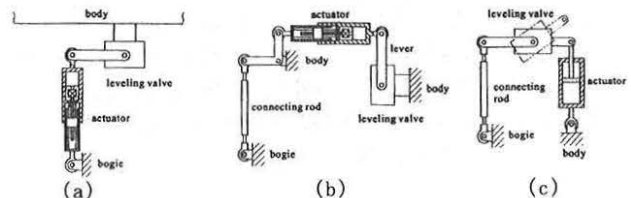


Fig.5 Proposed control system

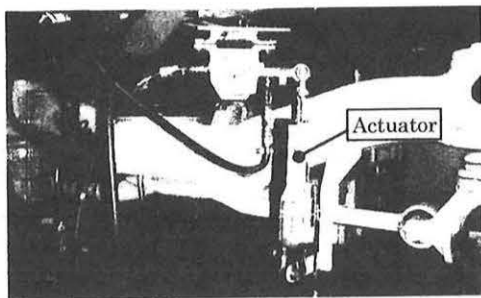


Fig.6 New control device

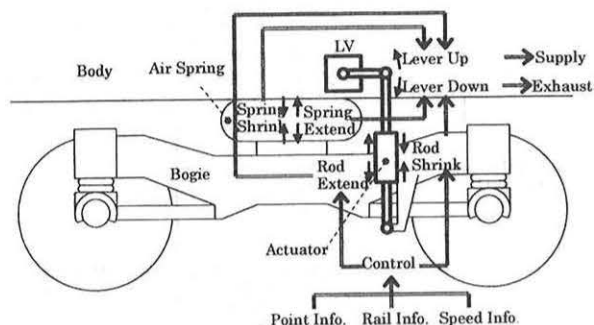


Fig.7 Concept of control system

## 6.2 基礎試験

この装置の効果を、シミュレーションと、試験機による走行模擬試験をとともに行なって確かめた。輪重の減少が問題となるのは、入口緩和曲線での第2台車外軌側と出口緩和曲線での第1台車外軌側であるが、これらの箇所では軌道のねじれにより空気ばねが伸ばされて、空気が排気されるため空気ばね内圧が減少し、輪重も減少する。そこで、それらの箇所で連結棒を伸ばすことにより、逆に空気を給気させて輪重減少を抑えることを目指した。なお今回は、車体の重心高さの変動を少なくするために、連結棒伸縮動作では各台車について左右対称的な動作、つまり外内軌における伸縮量を等しくし、各台車外軌側のみの伸縮動作だけを考えることとした。以降の記述も外軌側についてのみとする。この基礎試験の結果を Fig.8 に示す。

まず試験(A)は、輪重減少地点で該当箇所の連結棒のみ伸ばしたものである。入口・出口ともにその直前からの輪重減少量は小さくなっているが、第1台車外軌側を見ると円曲線での輪重が小さくなるため、出口緩和曲線での輪重が従来よりも悪化してしまう結果となった。

そこで、試験(B)では、試験(A)の伸縮動作に加え、輪重減少地点を過ぎたあとにその影響を打ち消すために、試験(A)で動作させなかった側の台車で伸縮動作をさせた。この場合、円曲線での輪重を従来並に戻すことができ、入口・出口どちらの緩和曲線でも輪重減少を抑えることができた。

## 7. 制御則の提案

以上の実験結果を基に、提案する制御装置の効果的な制御側を検討した。動作方法や動作パラメータの決定方法に

ついて、シミュレーションにより検討した。

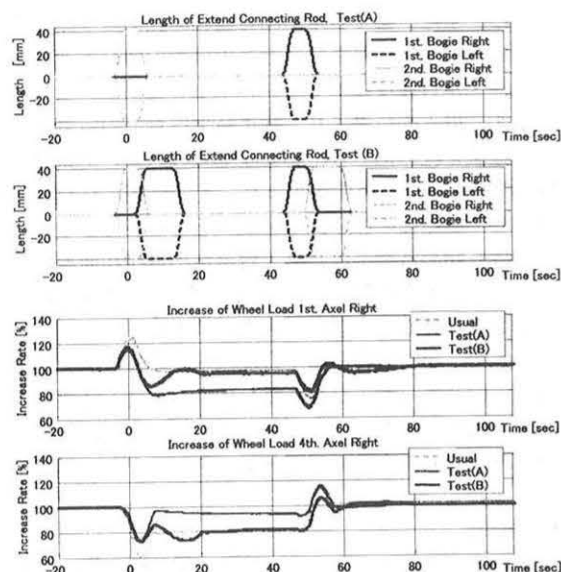


Fig.8 Results of basic test

## 7.1 履歴補償制御

5章で述べたように、曲線での車両の挙動は走行履歴に大きく依存する。一番問題となる出口緩和曲線での輪重減少を抑える制御を行なうとき、円曲線での輪重の値がそれまでの曲線条件によって異なるため、安定した制御を行なうことが難しくなると考えられる。そこで、入口緩和曲線の軌道・走行条件に関わらず、円曲線での定常値がほぼ同じになるような制御方法を検討した。

6.2において試験(B)で付加した動作に着目すると、この動作によって円曲線での輪重の状態が改善できることが確認できた。そこで、輪重減少が顕著となる入口緩和曲線長が長く、速度が低いときのみ、入口緩和曲線の後半で先頭台車の連結棒を伸縮させる動作を行なうこととし、その動作パラメータを調整した。その結果の一例として、入口緩和曲線長 90[m]、走行速度 15[km/h]のときの結果を Fig. 9 に示す。円曲線での輪重の状態を、入口緩和曲線長が短い 18[m]の結果とほぼ一致させることができ、その後の出口緩和曲線での輪重減少を抑える効果がほぼ等しく発揮できることが確認できた。

## 7.2 輪重減少抑制制御

6.2において、先頭台車が出口緩和曲線を通過するとき外軌側の連結棒を伸ばすことによって輪重減少を抑えることができた。ここでは、この輪重減少抑制制御について特性を調べ、様々な軌道・走行条件に対しても目標どおりの効果を得られるように、伸縮方法を一意に決定する制御則について検討した。このうち、連結棒伸縮長さを求めるためのフローチャートを Fig. 10 に示した。

様々な試験条件でシミュレーションを行なった結果から、出口緩和曲線での輪重減少地点における第1台車外軌側の

空気流入量・空気ばね内圧をプロットした結果を Fig. 11 に示す。走行速度には依存せず軌道条件に依存することがわかる。また、第1台車が出口緩和曲線に入り始めると同時に空気ばねに給気させたときのばねの伸びる速度を、軌道条件・走行速度に対してプロットしたグラフを Fig. 12 に示す。以上の結果より、輪重減少地点での空気ばね内圧の目標値を決めたとき、必要な空気流入量と空気流量から LV の弁を開ける時間が求まり、その時間にばねの伸速度を乗じて連結棒の伸び長さを求めることができる。

伸ばし始める時刻は、第1台車が出口緩和曲線に入り始めたときに LV が作動するように、連結棒の伸縮特性や LV の時間遅れ特性を考慮して決めればよい。

そこで、出口緩和曲線でのばね内圧の目標値を円曲線での値と同じ値（減少なし）とし、この考え方に従って制御装置を動作させたところ、Fig. 13 のようにほぼ目標どおりばね内圧の減少を抑えることができた。

## 8. 結論

本研究ではシミュレーションと、試験機を用いた走行模擬試験を行い、緩和曲線出口における輪重抜けを抑制する空気ばね制御手法を提案し、以下の知見を得た。

- ・ 曲線通過時に入口緩和曲線での軌道・走行条件による履歴の影響が残り、特に走行速度が小さいほどその影響が大きくなることを示した。
- ・ 連結棒を伸縮させる機構を持った新方式制御装置を提案し、その装置を用いて緩和曲線での輪重減少を抑えることができた。
- ・ 新方式制御装置による効果的な制御則について検討し、履歴補償制御則と、出口緩和曲線での輪重減少抑制制御則を確立し、その効果を確認した。

本研究は、財団法人地下鉄互助会（現、メトロ文化財団）による公益基金の交付を受けて行なわれた。関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 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，機論 C, 64-617, (1998.1) 104-109.
- [2] 須田・小峰・黒崎；空気ばね特性を考慮した緩和曲線通過特性への軌道・走行条件の影響，J-RAIL'01 講演論文集，(2001.12)，pp465-468.
- [3] 須田・黒崎・小峰他；急曲線通過特性を考慮した空気ばね系の制御に関する研究，J-RAIL'02 講演論文集，(2002.12)，pp309-312.
- [4] 小林ほか；鉄道車両用空気ばね制御システムの開発，機論 C 編，57-541, (1991-9)，p.2860-2865.

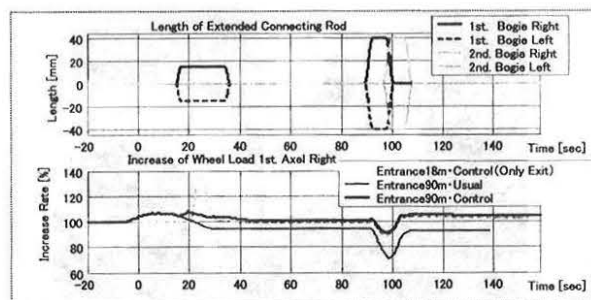


Fig. 9 Effect of Control for compensation of curve entry.

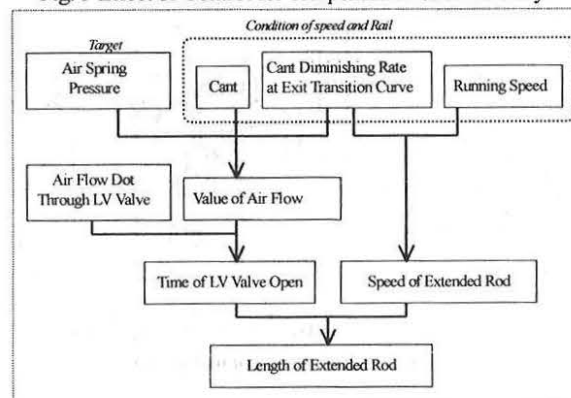


Fig. 10 Flow chart of control low for prevention of wheel load reduction

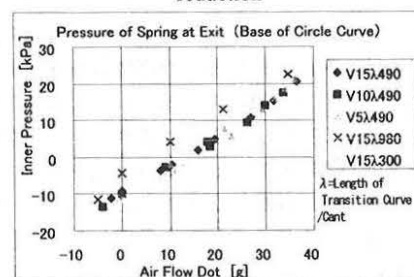


Fig. 11 Relationship between air flow and pressure

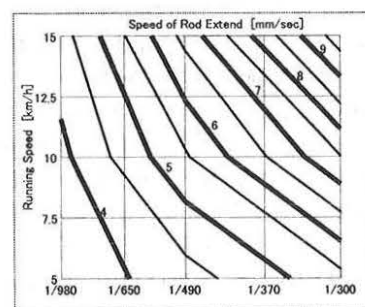


Fig. 12 Extension speed of air spring

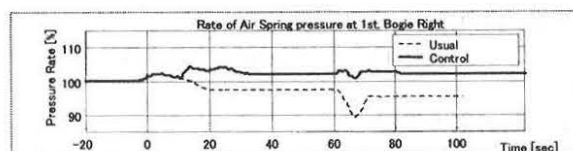


Fig. 13 Control effect of proposed control low