

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 乗り心地を保ちながら 曲線を高速走行する

乗り心地を保ちながら曲線を高速走行するための車体傾斜機構にはいくつかの方式があり、空気ばね車体傾斜方式を採用する場合は乗客に作用する遠心力を軽減することはできても空気ばねが負担する左右方向力を軽減することができません。このため台車・車体間の左右相対変位が大きくなりやすく、曲線を高速走行する場合に車体中心ピンが左右動ストッパーに接触し、左右乗り心地が低下することがあります。ここでは、この接触による影響を軽減し、乗り心地を保ちながら曲線の高速走行を実現するための空気圧式シリンダーについて紹介します。



**石栗 航太郎**  
Kotaro Ishiguri  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
副主任研究員  
【専門分野】 台車・車両  
運動特性評価、振動工  
学、油空圧技術

## はじめに

良好な乗り心地を保ちながら曲線通過速度を向上させるために、車体傾斜機構を有する車両が実用化されています。車体を曲線の内側に傾斜させることにより、乗客にかかる遠心力を緩和する仕組みであり、傾斜機構として近年では、「振子式」に比べて台車構造を簡素化できる「空気ばね式」が導入される場合があります<sup>1)</sup>。しかし、空気ばね式により振子式と同等の曲線通過速度を実現しようとする、振子式に比べて曲線走行時の台車に対する車体左右（まくらぎ方向）移動量が大きく、

台車枠に設けられている左右動ストッパーに車体が接触（図1）する頻度が高まり乗り心地が低下します<sup>2)</sup>。ここでは、車体左右変位を抑制する「空気圧式シリンダー」を適用することで曲線を高速に走行する際に乗り心地を保つ方法・取り組みについて紹介します。

## 左右動ストッパー当たり

鉄道車両には、車体が左右方向に変位したときにも車両限界の範囲内にとどまるように、車体と台車間に左右動ストッパーが設けられています（図2）。通常、台車側にストッパーゴムが設け

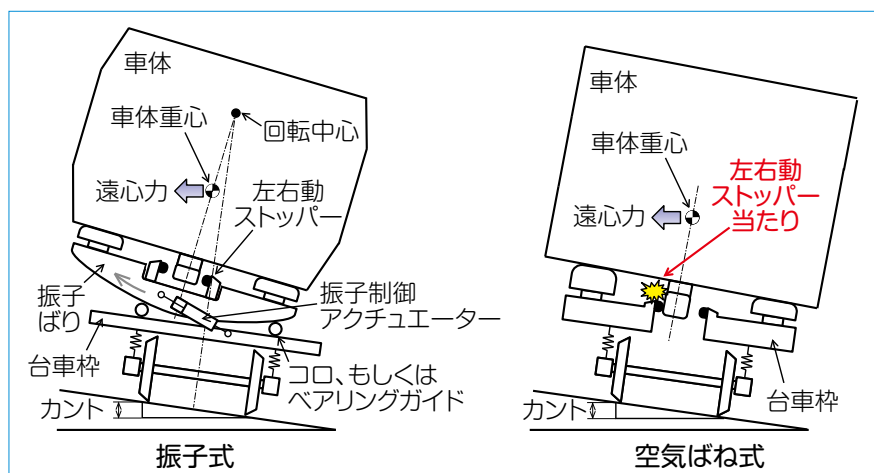


図1 車体傾斜方式と左右動ストッパー当たり

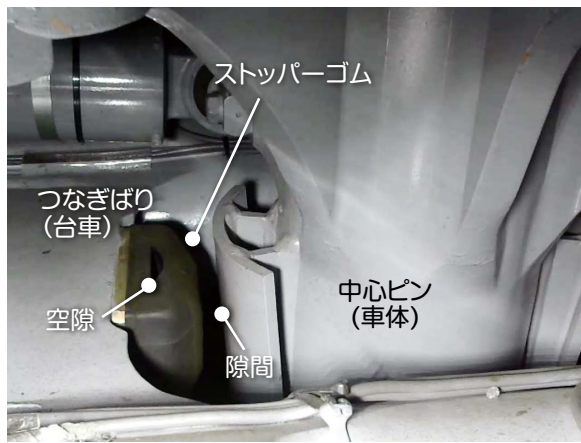


図2 左右動ストッパーの構成



図3 左右動ストッパー当たり

られ、車体が接触した際の緩衝が図られており、車体が中立位置にあるときストッパーゴムと車体の間には左右方向に10～30mm程度の隙間が設けられています。このため、直線走行中にストッパーゴムと車体が接触することはありませんが、分岐器通過時や曲線区間高速走行時に接触することがあります。これを「左右動ストッパー当たり」と呼びます(図3)。曲線を走行する際にストッパーゴムへの接触が継続すると、ストッパーゴムが台車の振動を車体に伝達する要素として作用し、ゴムによる緩衝はあるもののレール継ぎ目や踏切などの軌道変位に由来する台車振動が車体に伝達されることで乗り心地が低下します。

左右動ストッパーは、過大な車体左右変位を制限し、車体が車両限界内にとどまることを担保する装置であるた

め、ストッパーゴムと車体の間の隙間を乗り心地に配慮して過大に設定することはできません。左右動ストッパー当たりによる乗り心地の低下を防ぐには、曲線を高速で走行する場合など車体に大きな遠心力が作用している際にも台車に対する車体の左右変位を抑制し、車体が左右動ストッパーに接触しないようにする必要があります。

### センタリングシリンダーの適用

このように、車体の左右変位を抑制するためには、台車枠と車体の間に設ける緩衝用のばね(2次ばね(☞参照))系の左右剛性を大きく設定する必要がありますが、鉄道車両の2次ばねの構成要素として現在主流となっている空気ばねは、構造上、左右方向剛性が低く、この剛性の低さにより良好な乗り心地確保を指向して発展してきたもの

です。このため、空気ばねの左右剛性向上のみで対応するのは容易ではありません。そこで、別の手段(装置や方法)を適用する必要があります。イタリアのPendolino車両(たとえばETR450型)は車体を中立位置に保持(センタリング制御)する大型の空気圧式アクチュエーターを搭載しています<sup>3)</sup>。これにより、曲線を高速で走行する際など2次ばね系の左右剛性向上が必要な場合のみ剛性を変化させることができ、曲線を高速で走行する際の左右動ストッパー当たりを軽減することができます。しかしながら、大型のアクチュエーターを1台車あたり2本搭載すること、制御弁や多くの空気配管を必要とすることから、国内の狭軌用台車にそのまま適用することは容易ではありません。そこで、筆者らは、機械的フィードバック(☞参照)を有し、制御装置やセンサーを必要としない小型の空気圧式アクチュエーター<sup>4)</sup>を鉄道車両へ適用するにあたっての詳細仕様検討ならびに走行試験を行いました。このアクチュエーターは、規定のピストン変位を超えると空気の流路が切り替わる機械式制御弁をピストンロッド部に内蔵しており、車体左右変位に応じて制御状況を切り替える仕組みです。ロッド変位に対応した反力を生じるように構成されており、曲線走行中の車体を中立位

#### ☞ 2次ばね

台車枠と車体との間に用いる緩衝用のばねのことで、台車から車体に伝わる振動を低減し、車両の乗り心地を向上させます。古くからある車両では金属製のばねが用いられていましたが、最近では空気ばねが用いられます。まくらばねともいいます。

#### ☞ 機械的フィードバック

現在の値と目標値を比較し、両者の差に応じて操作量を決定し調整する場合に、この差の検出を機械的に行うことを指します。

鉄道車両において機械的フィードバックを持つ装置の例として空気ばね自動高さ調整弁(LV)があります。これは、負荷の変動により生じる空気ばね高さ変化をリンク機構で検出し、目標高さとの差に応じて空気の給排気を行い、空気ばね高さを一定の範囲内に保つ弁です。

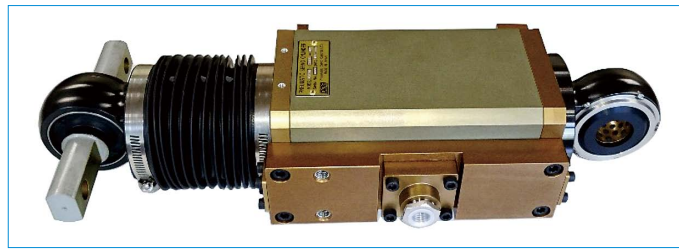


図4 センタリングシリンダー

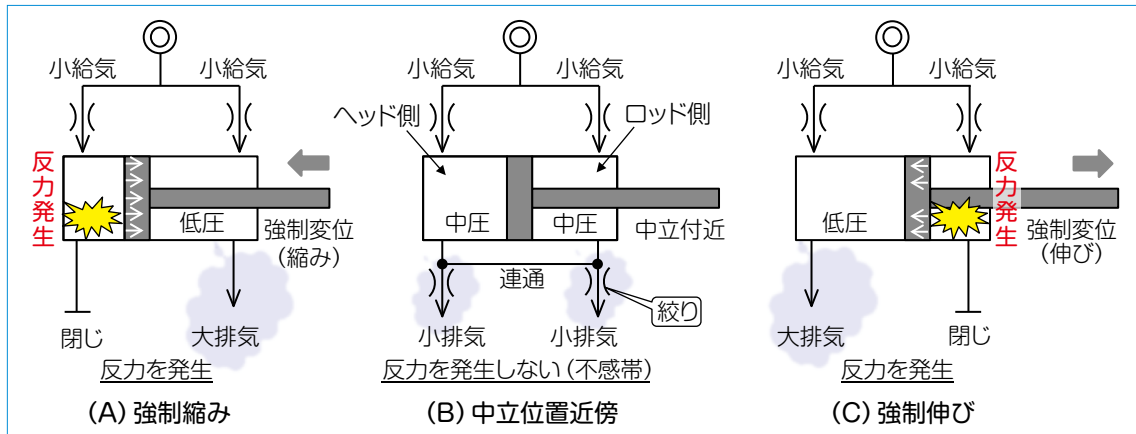


図5 センタリングシリンダーの機構と動作原理

置近傍に保持するために用いることから、このアクチュエーターを「センタリングシリンダー<sup>4)</sup>」(図4)と呼びます。

センタリングシリンダーは、その一端を車体に、他端を台車枠に結合するよう左右動ダンパーと並列に配置し、台車に対する車体の左右相対変位に応じて反力を発生することで、曲線走行時の車体左右変位を抑制します。なお、直線区間走行時などに不要な反力の発生を避けるため、中立位置近傍における反力は小さくなるよう、また、台車振動の影響を避けるため、高い周波数で動作した場合の発生力も小さくなるように設計されています。反力発生源には圧縮空気を用いており、図5に示すように、シリンダーの給気ポートには微小絞りを介して圧縮空気が常時供給され、ピストン変位に応じて排気ポートの開閉を行うことで反力を制御します。直線区間を走行している場合や、曲線半径の大きな(緩い)曲線を走行している場合のようにピストンが

中立位置近傍にあるとき(図5(B))は、ヘッド側とロッド側の両シリンダー室の排気ポートを連通させ、これと同時に、微小絞りを介して大気へ開放することで反力の発生を抑えます。一方、半径の小さな曲線を高速走行している場合のように、遠心力による車体左右変位が大きくなり、たとえばピストンが縮み側に規定の変位を超えて変位したとき(図5(A))は、ヘッド側シリンダー室の排気ポートを閉じ、かつ、ロッド側シリンダー室の排気ポートを大きく開口して両側のシリンダー室の差圧を大きくし、反力を発生させます。ピストンが伸び側に規定の変位を超えて変位したとき(図5(C))は、開閉するポートが逆になり同様に反力を発生させます。これら排気ポートなどの開閉は、ピストンロッド部に構成した機械式制御弁によりピストン変位に応じて行う仕組みとなっており、センサーや電氣的な制御は不要で、圧縮空気の供給のみで動作します。

## 走行試験による性能評価

### (1) 車体の左右方向移動量の抑制

試験車両にセンタリングシリンダーを仮設し、走行試験を行いました。なお、比較のための非制御条件測定の際には、シリンダーへの空気供給を停止しました。

台車に対する車体の左右変位を図6に示します。これは、半径300mの曲線を速度85km/h(本則+20km/h, カント不足量 $C_d$ 97mm)にて走行した結果であり、センタリングシリンダーを用いない場合に比べて車体左右変位を10mm程度抑制することができました。一般に、左右動ストッパーに用いられるストッパーゴムの内部には空隙があるため、車体中心ピンが左右動ストッパーゴムに接触してから空隙が完全に潰されるまでの間は左右動ストッパーゴムの剛性が低く、空隙が完全に潰されてからは剛性が高くなる特性をもっています。このため、曲線走行中に車体を完全な中立位置に保つことが

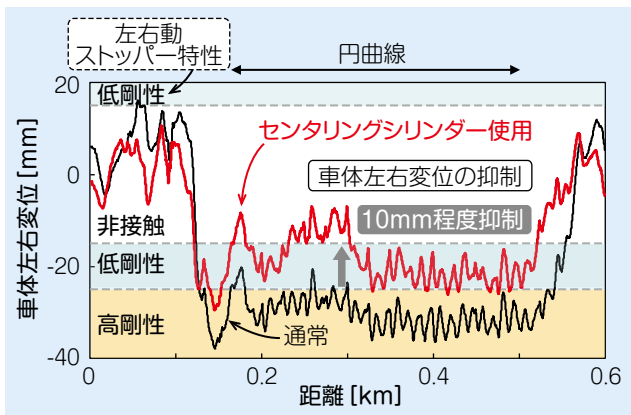


図6 車体左右変位の抑制状況

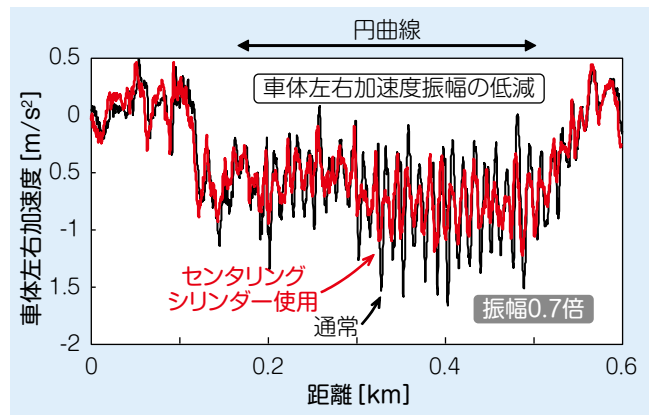


図7 車体床面左右加速度の抑制状況

できなくても、センタリングシリンダーを用いて車体の左右変位を抑制し、左右動ストッパーゴムの剛性が低い範囲内における接触にとどめることができれば、左右動ストッパーゴムは大きな反力を発生しないため乗り心地の低下を防ぐことができます。

## (2) 振動乗り心地の改善

図7に車体床面で測定した左右加速度を示します。図6と同一の曲線を走行した結果であり、車体左右変位の抑制効果により、センタリングシリンダーを用いない場合に比べて左右振動加速度振幅が0.7倍程度と小さくなり、左右動ストッパー当たりを緩和していることが確認できます。

図8に、半径300mの曲線が多く存在する区間における短時間左右乗り心地レベル $L_T$ 値の改善状況を示します。短時間 $L_T$ 値とは、特定の短い区間の振動乗り心地を評価するために通常の $L_T$ 値とは異なり評価時間（通常は3±2分）を短く設定したもので、ここでは評価時間を30秒としています。図に示すように曲線が連続する区間において、センタリング制御を行った場合の短時間 $L_T$ 値は非制御時に比べて2～4dB程度低く抑えられ、センタリング制御による左右乗り心地改善効果を確認しました。なお、一部でセンタリング制御時の $L_T$ 値が非制御時を上

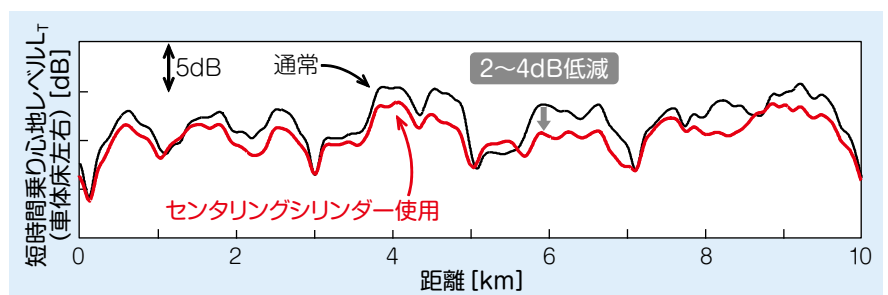


図8 短時間左右乗り心地レベル ( $L_T$ ) の改善状況

回っている区間がありますが、これは制御時の走行速度が非制御時の走行速度を上回っていた区間です。

このように、センタリングシリンダーを用いることにより、曲線を高速で走行する際の車体左右変位を抑制することで、左右動ストッパー当たりにもなる車体左右振動を軽減し、左右乗り心地を改善することができます。

## おわりに

乗り心地を保ちながら曲線を高速走行するために、空気圧式シリンダーを適用する例について紹介しました。曲線を高速走行する場合の車体左右変位を抑制し、車体中心ピンが左右動ストッパーに接触する左右動ストッパー当たりを軽減させるこのシリンダーは機械式制御弁をピストンロッド部に内蔵しており、車体左右変位に応じて制御状況を切り替える仕組みです。セン

サーや電気的な制御は不要で、圧縮空気の供給のみで動作する簡便さから、すでに営業車両に搭載されて曲線高速走行中の左右乗り心地の改善に貢献しています。[RRR]

## 文献

- 1) 風戸昭人：振子車両・車体傾斜車両，RRR，Vol.72，No.3，pp.28-31，2015
- 2) 菅原重光，後藤昭祐，藤本賢治，佐藤頼光，中澤文善，山田忠：空気ばねを利用した車体傾斜制御の最適化 空気ばね車体傾斜による曲線通過速度向上，第36回鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集，pp.168-171，1999
- 3) 岡本勲：最近の振子車両の動向（上），電気車の科学，Vol.46，No.1，pp.13-15，1993
- 4) ピー・エス・シー株式会社，住友金属工業株式会社：車体支持装置，特許第4839154号，2011.10.7