

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

# 軸ばね剛性を変化させて 曲線通過性能を向上する

鉄道車両の台車には、高速走行時の安定性（走行安定性）と曲線をスムーズに通過する性能（曲線通過性能）の両方が求められます。しかし、その2つの性能はトレードオフな関係なので、新しく台車を製作するときなどは、走行する区間の最高速度や曲線半径などの運用条件を考慮して台車特性を決定することになります。ここでは、軸ばね（軸箱支持装置）に用いられているゴムの前後剛性を大きくすることにより、走行安定性を確保しながら曲線通過性能の向上を目指した剛性可変軸箱支持装置の概要について紹介します。



梅原 康宏  
Yasuhiro Umehara  
車両構造技術研究部  
走り装置研究室  
主任研究員  
[専門分野] 台車構造、  
車両のダイナミクス

## はじめに

鉄道車両では、一般的に1本の車軸に2枚の車輪を圧入した一体輪軸が用いられています。また車両がレールに沿って走行し、曲線や分岐器をスムーズに通過するために、車輪のレールと接する面には勾配が設けられています。この勾配を踏面勾配とよびます。輪軸が左右のどちらかにずれると、踏面勾配によってレールとの接触点において左右の車輪で半径差が生じます。しかし、左右の車輪は同じ速度で回転しているため、輪軸はレール間の中心へ向かうようになります（図1）。自動車のようにハンドル操作しなくても鉄道車両がレールに沿って走ることができるのはこの効果によるものです。しかし、輪軸の左右の動きが持続しながら、さらに動きが大きくなると車体や台車が激しく左右に揺れ始める「蛇行動」とよばれる自励振動に発

展する場合があります。蛇行動は乗り心地を非常に悪化させるとともに、最悪の場合は軌道を壊したり脱線に至る危険さえある不安定現象です<sup>1)</sup>。営業車両においては、営業速度内で蛇行動が生じることがないように対策してい

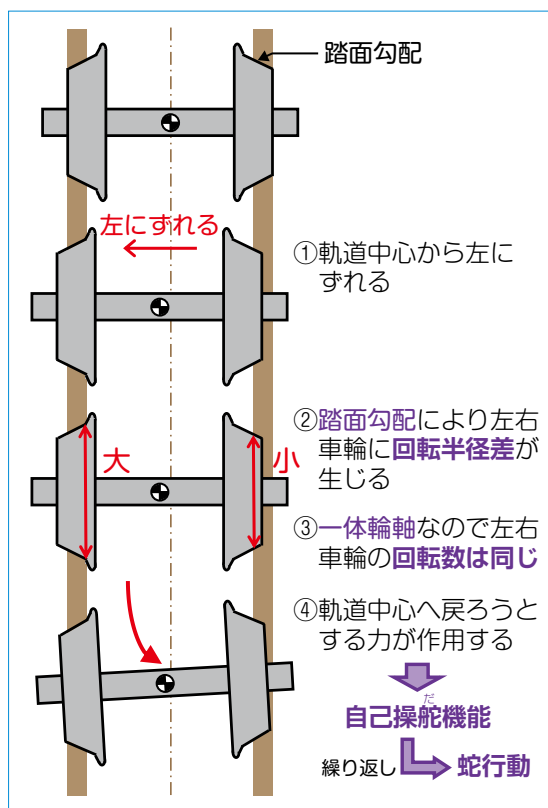


図1 転走する輪軸の自己操舵機能

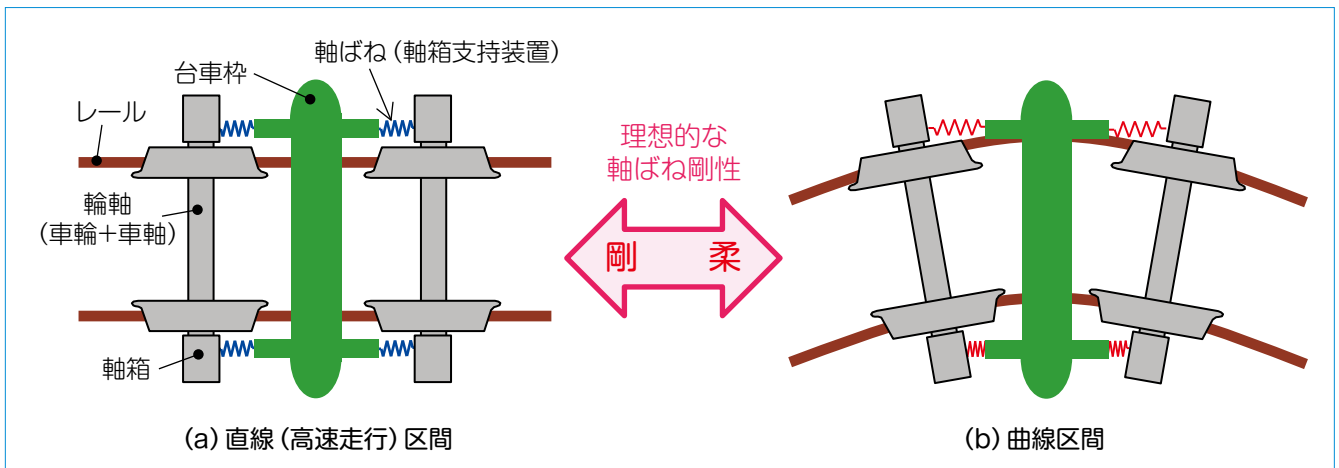


図2 走行区間による理想的な軸ばね剛性(前後方向)

ます。この対策のひとつとして軸箱支持装置に用いられるゴムの前後剛性を大きくすることが効果的です。一方で、車両が曲線を通る場合には、輪軸がレールに沿って転向しやすい方がよいため、軸箱支持装置に用いられるゴムの剛性は小さい方が適しています(図2)。このように、軸箱支持装置において求められる理想的なゴムの剛性は、走行安定性(☞参照)と曲線通過性能(☞参照)で反対になります。そこで通常は、軸箱支持装置に用いられるゴムの剛性は、車両が走行する区間の最高速度や曲線半径などの運用条件から走行安定性と曲線通過性能のバランスを考慮し決定されています。ここでは、磁性エラストマー<sup>2)</sup>とよばれる刺激応答性材料(☞参照)を軸箱支持装置に適用し、磁場によって剛性を切り替えることで、曲線通過性能を向上させることを目指した剛性可変軸箱支持装置<sup>3)</sup>について紹介します。

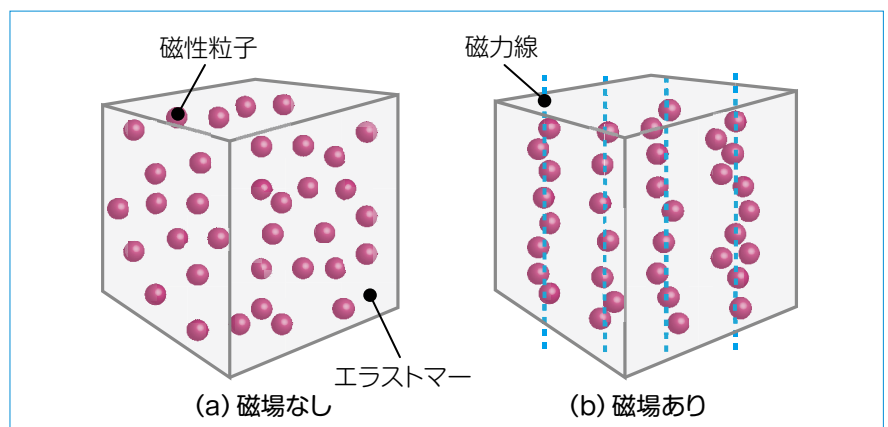


図3 磁性エラストマーの模式図

### 磁性エラストマー

磁性エラストマーは、図3のように合成ゴムなどの柔らかいエラストマーに磁性粒子を分散させた磁場に応答する材料です。均一な磁場を与えると、弾性率(弾力)が変化します。この現象は磁気粘弾性効果と呼ばれるもので、磁性流体ではよく知られた現象です。図3では少し大きさに表現していますが、磁性粒子が磁力線に沿って配列した構造(鎖構造)を形成すること

で弾性率が増加します。磁性エラストマーは1990年代より活発に研究されるようになり、自動車の振動制御材料やバーチャルリアリティシステムで用いる力覚提示装置などへの応用研究が進められています。ここで紹介する鉄道車両への適用を想定した場合、ほかの応用分野に比べて大きな力が作用する厳しい条件においても性能を発揮できる磁性エラストマーが必要となります。

#### ☞ 走行安定性

走行時に発生する車両の蛇行動など振動に対する減衰性能を示します。走行安定性がよい車両を言い換えると、減衰がよく、振動が持続しない車両ということになります。似ている用語として「走行安全性」がありますが、こちらは脱線や転覆に対する安全性を示し、両者は区別して用いられます。

#### ☞ 曲線通過性能

車両が曲線を通る際の運動性能を示します。横圧(車輪～レール間に作用する横方向の力)の値で評価することが多く、その値が小さいほど曲線通過性能はよいとされます。

#### ☞ 刺激応答性材料

物理的的刺激(磁場、電場、温度、光など)や化学的環境変化(水素イオン化指数、化学物質の濃度など)に敏感に応答して性質を変化させる材料です。

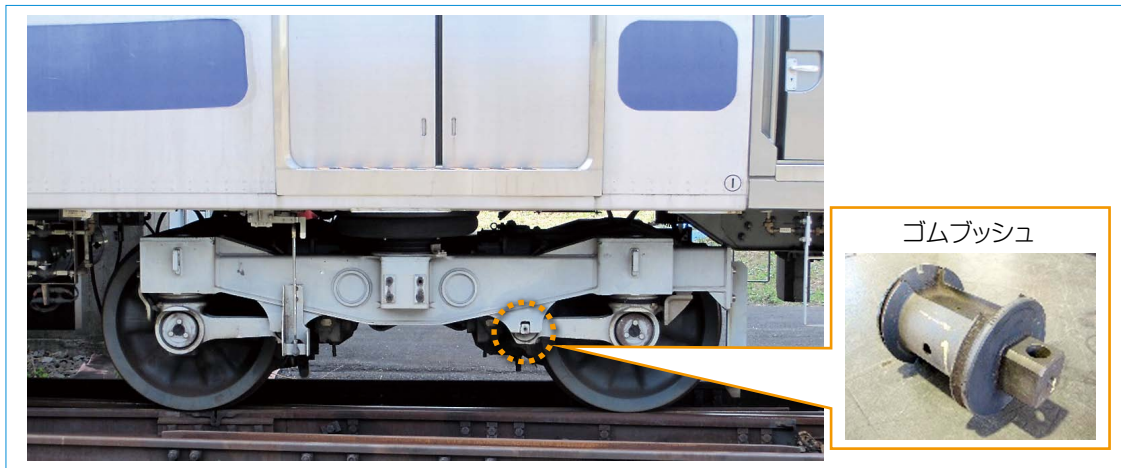


図4 軸箱支持装置に用いられるゴムブッシュの例

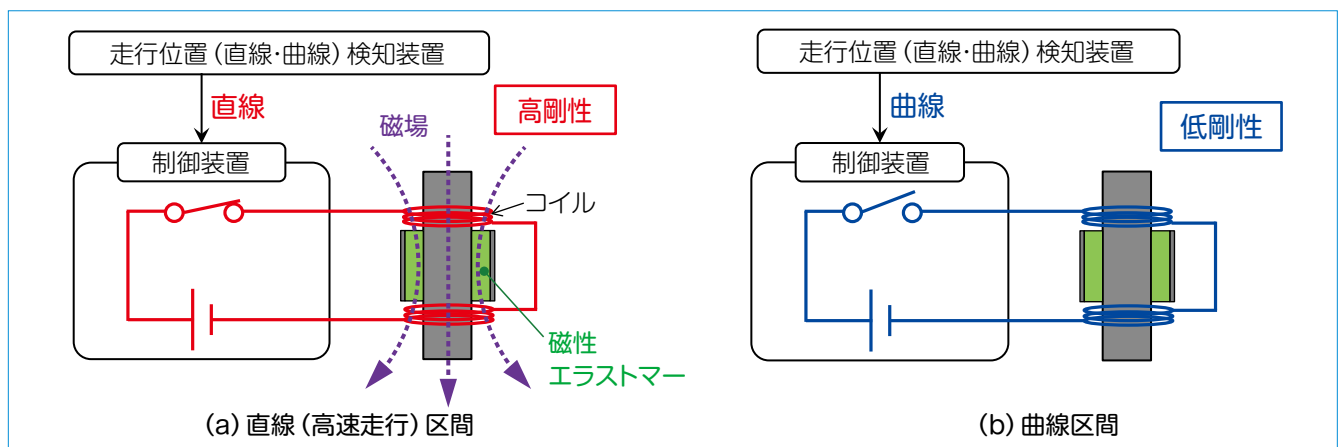


図5 剛性可変軸箱支持装置の構成案

### 剛性可変軸箱支持装置

軸箱支持装置に使用されている弾性部材（ゴムブッシュや積層ゴムなど）に磁性エラストマーを適用した剛性可変軸箱支持装置を解説します（図4）。図5に剛性可変軸箱支持装置の構成案を示します。直線走行時は磁性エラストマーに磁場を与え、軸ばねの前後剛性を大きくし走行安定性を確保します。一方、曲線走行中は磁場を与えず、軸ばねの前後剛性を小さくしレールに沿って転向しやすくさせます。通常の

軸箱支持装置に対して磁場を付与する装置が付加されることとなりますが、操舵台車（図6参照）で搭載されているような重量部品や摩耗部品がないため、大きな改造もなく曲線通過向上を図ることが可能になります。

磁場の制御が必要となる曲線検知方法としては、車両側に軌道情報データベースを持ち、軌道側の信号用地上子などを検出して現在走行している位置を把握することで次の曲線区間を予見する方法や、ヨー角速度センサーなどを用いてリアルタイムに曲線を検出する方法などが適用できます。また運転制御装置より得られる運行番号などから走行区間を判断し、郊外の高速度走行区間と都市部の低速走行区間で軸箱支持剛性を切り替える方法も有効的です。

### 磁性エラストマーの製作

磁性エラストマーは、ウレタンエラストマーに純鉄系磁性粒子を混合し、約100℃に設定した恒温器で1時間反応させることで製作しました。図6に示すような鉄道部品サイズの試験片（直径35mm、厚さ10mm）について、磁場の有無による応力とひずみの比例関係を表すヤング率の変化を調査しました。試験では材料試験機を用いて、試験片に圧縮速度10mm/minでひずみを与えながら圧縮力を測定しました。磁場ありの条件では表面磁束密度310mTのネオジム磁石を磁性エラストマーの下に置いて測定しました。図7に磁場の有無によるひずみと応力の関係を示します。磁場なしのヤング率は約0.4MPa、磁場ありでは約2.0MPaとなり、磁場の有無によって

#### 操舵台車

曲線走行中に輪軸の向きを変えて横圧を低減する台車。中でも車体と台車の相対運動を利用して輪軸を操舵するリンク式操舵台車は、横圧低減効果に優れています。

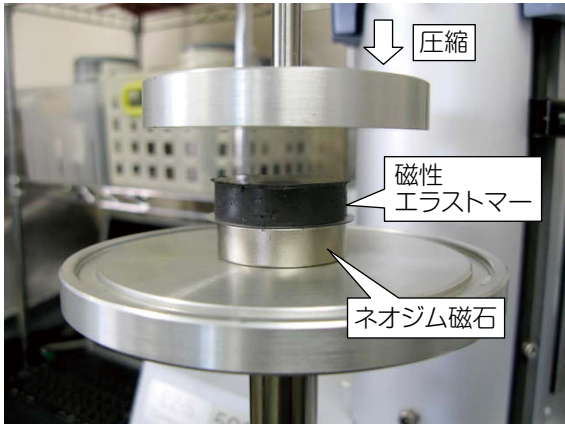


図6 圧縮試験の様子

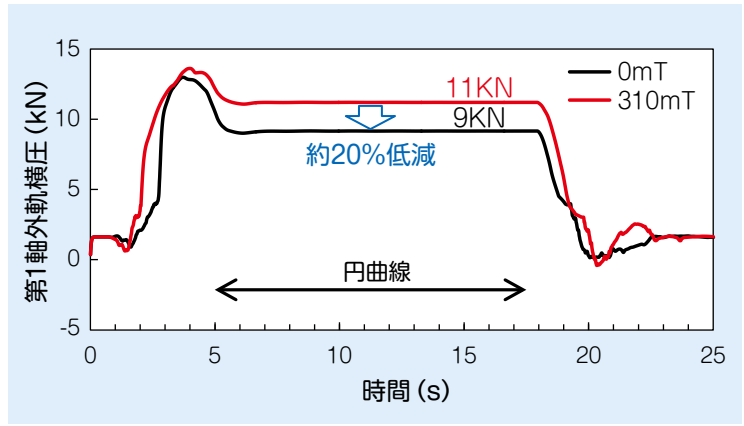


図8 磁場の有無による横圧低減効果(曲線半径400m)

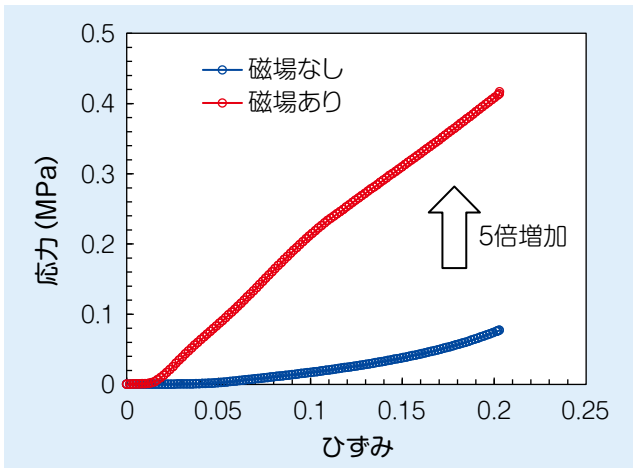


図7 磁場の有無によるひずみと応力の関係

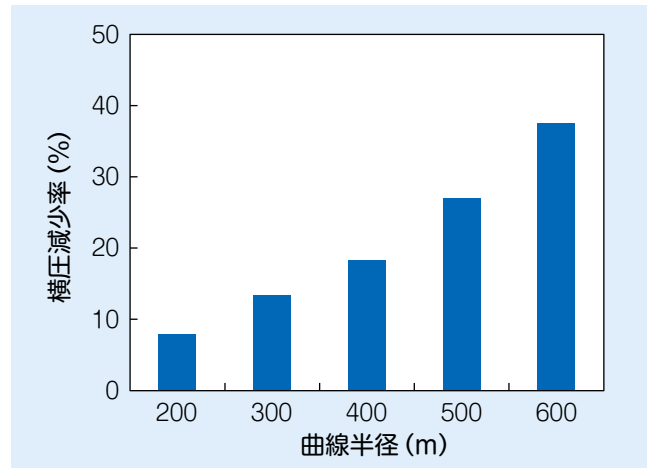


図9 曲線半径別の横圧低減効果

ヤング率が5倍程度変化することを確認しました。

### 車両運動シミュレーションによる横圧低減予測

製作した磁性エラストマーについて、車両走行シミュレーションによる曲線通過性能で評価しました。在来線車両が、曲線半径400mの曲線を走行速度70km/hで走行したときのシミュレーション結果を図8に示します。なお、シミュレーションの条件として、図7の実験結果を参考に1軸あたりの軸箱前後剛性は、磁場ありの条件で在来線車両相当の値とし、磁場なしの条件ではその1/5倍の値としました。ここで、円曲線区間における横圧の平均値を算出すると、磁場ありの条件で約11kN、磁場なしの条件で約9kNとな

りました。磁場ありの条件の軸箱前後支持剛性は一般的な車両の値と同じなので、磁場の有無によって円曲線区間の横圧平均値を約20%低減できることがわかりました。

次に平均曲線半径200m～600mの曲線を均衡速度(☞参照)で通過した際に発生する横圧について、磁場の有無による減少率で評価しました。図9に示すように、曲線半径が大きくなるほど横圧減少率が大きくなることがわかりました。

#### ☞ 均衡速度

曲線走行中の車両にかかる遠心力と、カントによって曲線内側に傾く力が釣り合う速度です。

### おわりに

ここでは、磁性エラストマーと呼ばれる刺激応答性材料を鉄道車両に応用し、とくに曲線通過性能向上を目的とした剛性可変軸箱支持装置を紹介しました。今後は、磁性エラストマーを用いて実物大の軸箱支持装置を製作し、実車に搭載した走行試験により有用性を確認したいと考えています。[RRR]

### 文献

- 1) 日本機械学会編：鉄道車両のダイナミクス, 電気車研究会, pp.13-14, 1996
- 2) 大堀優, 三俣哲：磁場応答性ゲル・エラストマーの機能と応用, 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.5, pp.473-476, 2013
- 3) 梅原康宏, 鴨下庄吾, 小黑翼, 三俣哲：機能性材料を用いた軸箱支持装置の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.32, No.1, pp.5-10, 2018