

機能性材料を用いた軸箱支持装置の基礎検討

梅原 康宏* 鴨下 庄吾** 小黒 翼*** 三俣 哲#

Fundamental Study of Axle Box Suspensions Making Use of Functional Material

Yasuhiro UMEHARA Shogo KAMOSHITA Tsubasa OGURO Tetsu MITSUMATA

We have devised a steering system in which the functional material is used for the elastic members such as rubber bushings in the axle box suspension of railway vehicles. The functional material called the magnetic elastomer is composed of magnetic particles and the elastomer. This material is characterized by its hardness variation depending on the magnetic field. We prepared test pieces to be used for the development of the magnetic elastomer for the steering bogie. In a characteristic test, we confirmed that the Young's modulus of the magnetic elastomer changes in the range of about five times depending on the presence or absence of the magnetic field. In addition, we simulated the vehicle model running while applying the longitudinal stiffness change of the magnetic elastomer to the axle box suspension of the bogie. We confirmed that this type of axle box suspension was capable of reducing the average of the outer wheel lateral force in the circular curve section compared to that of the normal type of axle box suspension.

キーワード：磁性エラストマ，軸箱支持装置，前後支持剛性，操舵台車，横圧

1. はじめに

鉄道車両の台車において、高速走行時の走行安定性を確保するために軸箱前後支持剛性を高めることは効果的である。しかし、軸箱前後支持剛性を大きくするほど、曲線走行時の輪軸の自己操舵性が阻害されて曲線通過性能が低下する。そこで走行安定性を確保しつつ曲線通過性能を向上させるために、従来から様々な方式の操舵台車が研究開発されてきた。操舵台車とは、曲線走行中に輪軸の向きを変えて横圧を低減する台車であり、中でも車体と台車の相対的な動作に応じて輪軸を操舵するリンク式ボギー角連動操舵台車¹⁾は、曲線通過時の横圧低減効果に優れており、特急気動車で実用化されている。しかし、操舵はりや操舵リンクなどの機構を備えることで台車構造が複雑となり、保守作業が複雑化するなどの課題があるため、スリ板などの摩耗部品や重量部品をなくす省メンテナンス化が求められている。

そこで本稿では、磁性エラストマを用いた軸箱支持装置を導入することにより、省メンテナンスに配慮した新しい操舵台車の構成を提案する。はじめに、鉄道車両用に開発した磁性エラストマの特性試験結果について述べた後、これを台車の軸箱支持装置に適用した鉄道車両の

曲線通過性能シミュレーション解析結果に基づき、磁性エラストマを用いた軸箱支持装置の有効性を検討した結果について述べる。

2. 鉄道車両用磁性エラストマの開発

2.1 磁性エラストマ

磁性エラストマ²⁾とは、図1のように架橋天然ゴムや合成ゴムなどの柔らかいエラストマに磁性粒子を分散させた、磁場に応答する材料である。これに変動磁場を印加すると伸縮運動や回転運動を行う。また均一磁場を与えると弾性率が変化する。このメカニズムは磁性体間に働く微視的な凝集力によるものと考えられている。磁性エラストマの材料開発については、1990年代より活発に研究されるようになり、近年では最大で非磁場中の194倍まで弾性率が大きくなるポリウレタン磁性エラストマが発表されている³⁾。また、この磁場によって弾性率が変化する現象を利用して、自動車の振動制御材料⁴⁾や力覚提示装置⁵⁾などへの応用研究が進められている。鉄道車両用台車の軸箱支持装置への適用を想定する場合、他の応用分野に比べて高負荷下で性能を発揮する磁性エラストマが必要となる。

2.2 磁性エラストマを用いた軸箱支持装置構成案

本稿では、図2に示すような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）に磁性エラ

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室

** 車両構造技術研究部 車両振動研究室

*** 元 新潟大学

新潟大学

特集：車両技術

ストマを適用することを提案する。図3に剛性可変軸箱支持装置の構成案を示す。直線走行時は磁性エラストマに磁場を与え、軸箱前後支持剛性を向上させて高速走行安定性を確保する。また曲線走行時は磁場を与えず、軸箱前後支持剛性を低減させて自己操舵性能を向上する。通常の軸箱支持装置に対して磁場付与装置が付加されることになるが、操舵機構に付随する重量部品やスリ板などの摩耗部品がないため、現状より省メンテナンスな操舵台車が構成できる。本図においては片側ブッシュに適用した例を示しているが、両側に適用することも可能である。また前後方向だけでなく、磁場の有無によって左右やねじり、こじり方向の剛性も変化する。

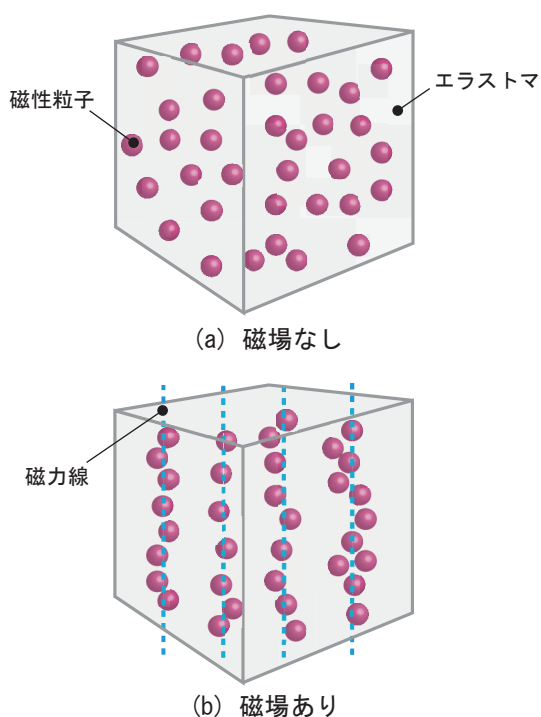
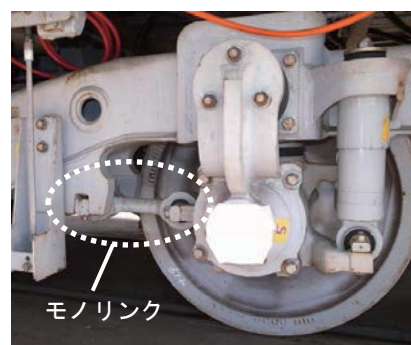
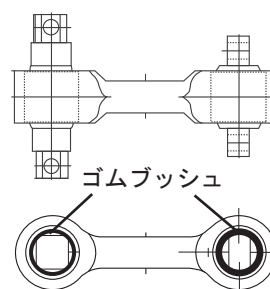


図1 磁性エラストマの概略図

磁場制御が必要となる曲線検知方法としては、振り車両で用いられているような車両側に軌道情報データベースを付与し、軌道側の信号用地上子などを検出して現在走行位置を把握することで曲線区間を予測する方法や、ヨーレートセンサなどを用いてリアルタイムに曲線を検知する方法などが考えられる。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用である。なお、本稿においては磁場を印加した場合に剛性が増す磁性エラストマの適用を検討したが、磁場印加中の高速走行時になんらかの理由により磁場が印加できなくなった場合、軸箱前後支持剛性が小さくなることで走行安定性に影響を与えることが懸念されるため、フェイルセーフの観点からは逆の性質が好ましい。磁性エラストマの合成方法により磁場を印加し

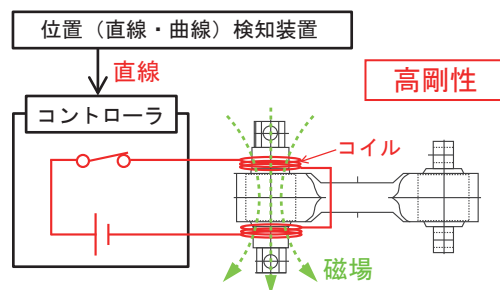


(a) 軸箱支持装置

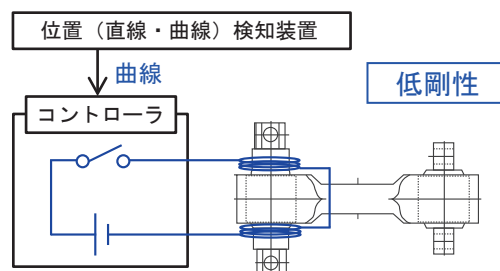


(b) モノリンク

図2 軸箱支持装置の一例



(a) 直線区間



(b) 曲線区間

図3 剛性可変軸箱支持装置の構成案

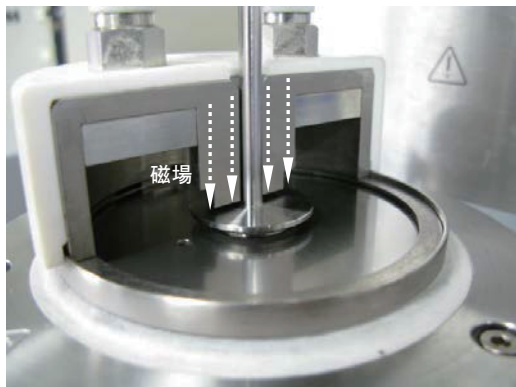
た場合に剛性が低下する磁性エラストマ⁶⁾を製作することは可能であるが、現時点では基本となる弾性率が小さいなど鉄道車両用部品への応用はかなり困難であるため、今後の材料開発状況に応じて磁性エラストマの置き換えを検討していきたい。

2.3 磁場の有無による貯蔵弾性率変化

鉄道車両用磁性エラストマは、ウレタンエラストマに純鉄系磁性粒子を 80 wt% 混合し、約 100 °C に設定した恒温器において 1 時間反応させることで合成した。まず基本特性を把握するために、図 4 に示すような試験片（直径 20 mm，厚さ 1.5 mm）にて、動的粘弾性における弾性成分である貯蔵弾性率について磁場の有無による変化を調査した。試験にはレオメータ（Anton Paar MCR 301）を用いて、60 秒毎に 0 mT，500 mT の磁場を交互に印加し、ひずみ 10^{-4} を与えることにより貯蔵弾性率を測定した。図 5 に周期的な磁場の印加に伴う貯蔵弾性率の時系列応答を示す。磁場を印加していない時の貯蔵弾性率は約 50 kPa，磁場を印加すると約 10 MPa に増加し、磁場の有無によって貯蔵弾性率が 200 倍程度変化することを確認した。



(a) 磁性エラストマ試験片



(b) 磁場印加時のイメージ

図 4 動的粘弾性試験の様子

2.4 磁場の有無によるヤング率変化

前項で性能を確認した磁性エラストマと同じ配合により、図 6 に示すような鉄道部品サイズの試験片（直径 35 mm，厚さ 10 mm）を製作し、磁場の有無によるヤング率の変化を調査した。試験では材料試験機（SHIMAZU EZ-S 500N）を用い、試験片に圧縮速度 10 mm/min でひずみを与えながら圧縮力を測定した。また磁場ありの条件では表面磁束密度 310 mT のネオジム磁石を磁性エ

ラストマの下に設置することにより磁場を印加した。図 7 に磁場の有無によるひずみと応力の関係を示す。磁場を印加していない時のヤング率は約 0.4 MPa，磁場を印加すると約 2 MPa に増加し、磁場の有無によりヤング率が 5 倍程度変化することを確認した。

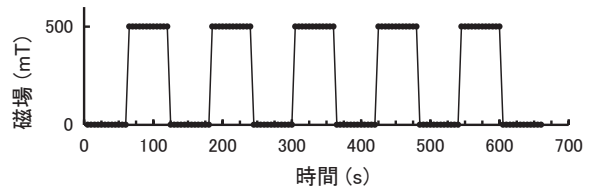
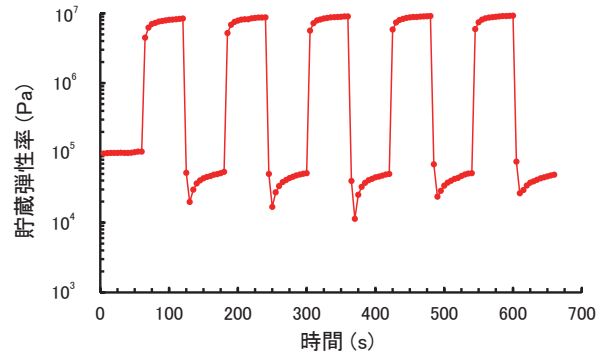


図 5 磁場の有無による貯蔵弾性率変化



図 6 圧縮試験の様子

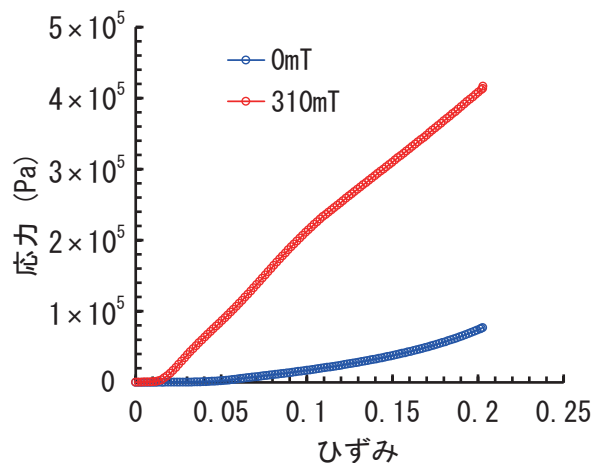


図 7 磁場の有無によるひずみと応力の関係

特集：車両技術

3. 車両運動シミュレーションによる評価

3.1 車両モデル

前章で得られた磁場の有無による磁性エラストマのヤング率変化を4軸すべての軸箱前後支持剛性に適用した車両運動シミュレーションモデルを作成した。図8に本稿で解析に用いた車両モデルの概略図を示す。また、図に用いている記号の説明を以下に示す。

(記号)

m_b, m_t, m_w, m_r : 車体, ばね間 (台車枠), ばね下 (輪軸), レールの質量

k_{wx}, c_{wx} : 軸箱前後支持剛性, 減衰係数

k_{wy}, c_{wy} : 軸箱左右支持剛性, 減衰係数

k_y, c_y : ヨーダンパ直列剛性, 減衰係数

k_d, c_d : 左右動ダンパ直列剛性, 減衰係数

k_{bx} : 空気ばね前後剛性

k_{by} : 空気ばね左右剛性

k_2 : 空気ばね上下剛性

k_3 : 有効受圧面積変化率による空気ばね上下剛性

c_2 : 空気ばね上下減衰係数

N : 空気ばね本体と補助空気室の容積比

k_1, c_1 : 軸ばね上下剛性, 減衰係数

k_{rx} : 牽引装置前後剛性

k_r, c_r : レール左右支持剛性, 減衰係数

h_b, h_t : レール面上車体, ばね間の重心高さ

h_d, h_{as} : 左右動ダンパ, 空気ばね高さ

r_0 : 車輪半径

a : 固定軸距

d : 台車中心間距離

b_1, b_2 : 軸ばね, 空気ばね左右間隔

b_0 : ヨーダンパ左右間隔

車体を4自由度 (左右, 前後, ロール, ヨー), 各台車を4自由度 (左右, 前後, ロール, ヨー), 各輪軸を

3自由度 (左右, 前後, ヨー), 各レールを1自由度 (左右) とした32自由度モデルの運動方程式の時系列応答解をRunge-Kutta-Gill法を用いて解析した。車輪～レール間力モデルは, レビ・シャルテの非線形クリープ則を適用した。また, 車輪～レール間の接触状態については, 2次元幾何学接触計算により輪軸の左右変位に対する接触角や接触半径, 接触間隔などのデータベースをあらかじめ作成しておき, シミュレーションより逐次参照することとした。車両モデルは在来線車両を想定し, 主要な諸元は表1のように設定した。なお車輪踏面形状は修正円弧踏面, レール形状はJIS60kgレールである。

表1 車両主要諸元

項目	値
台車中心間距離: d	13.8 m
軸距: a	2.1 m
車体質量: m_b	18820 kg
ばね間質量: m_t	2070 kg
ばね下質量: m_w	1520 kg
車輪半径: r_0	0.43 m
走行速度	70 km/h

3.2 磁場の有無による横圧低減効果

曲線通過時に発生する横圧について磁場の有無による比較評価を行った。曲線の主要諸元を表2, 曲線通過時の第1軸内外軌横圧を図9に示す。磁場の有無による軸箱前後支持剛性の変化率は, 磁束密度310mTの均一磁場を付与できると仮定し, 図7の結果を用いて5倍とした。なお, 1軸あたりの軸箱前後支持剛性は, 磁場あり時が在来線車両相当の14.3 MN/mとし, 磁場なし時は1/5倍の2.86 MN/mである。図9の赤色線が磁場あり(310 mT), 黒色線が磁場なし(0 mT)の結果である。ここで, 円曲線における外軌側平均横圧を算出すると, 磁場あり時は約11 kN, 磁場なしは約9 kNとなった。磁場あり時の軸箱前後支持剛性は一般的な車両の値と同等であるた

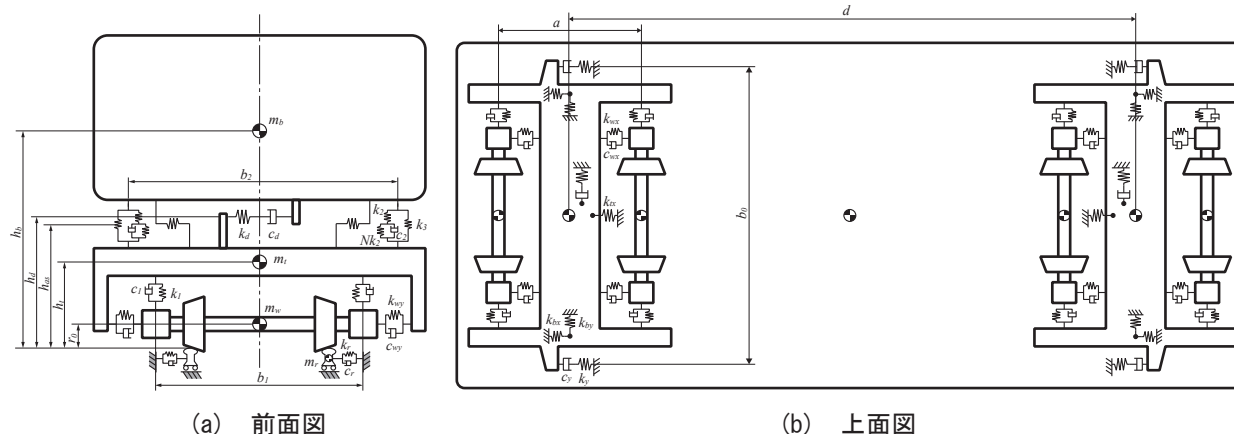


図8 車両モデルの概略図

め、磁場の有無による軸箱前後支持剛性の制御により外軌側平均横圧を2割程度低減できることを示した。

表2 曲線主要諸元

項目	値
曲線半径	400 m
円曲線長	250 m
緩和曲線長	85 m
カント	0.105 m

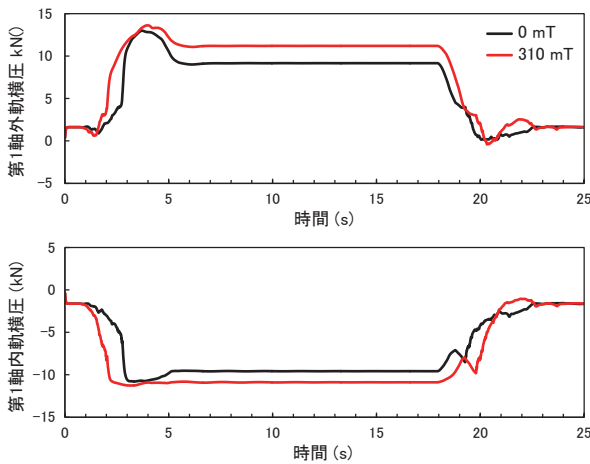


図9 磁場の有無による横圧低減効果

3.3 磁場制御による横圧変化

曲線検知の誤差や磁場制御の遅れなどが生じることを想定し、曲線中に磁場が切り替わった場合の走行安全性や曲線通過性能への影響を確認した。表2の曲線通過中に磁場が切り替わった場合の第1軸の内外軌横圧および

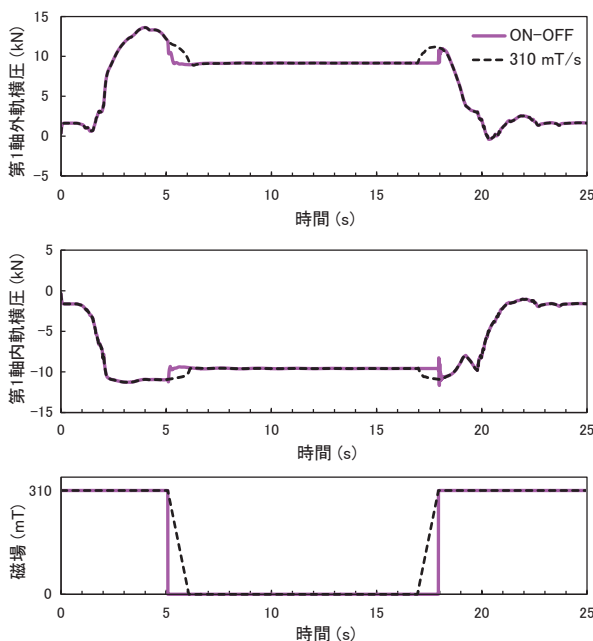


図10 磁場制御による横圧変化

磁場強度の変化を図10に示す。桃色線が磁場をステップ状に制御した場合の結果であるが、磁場切り替えのタイミングで、特に内軌側に急激な横圧変動が確認された。この程度の変動であれば走行安全上の問題はないが、対策として電磁石により磁場の強さを310 mT/s程度の範囲で連続的に制御する方法の適用を検討し、車両モデルにおいて磁場の強さに応じて軸箱前後支持剛性が線形に変化する特性を持たせた。なお磁性エラストマは、磁場の強さに応じて剛性が連続的に変化する性質を有している⁷⁾。図10の黒色破線が比例制御の結果であるが、急激な横圧変動を抑制できていることを確認した。

3.4 曲線半径別の横圧低減効果

磁場制御を適用した場合の曲線通過時の横圧について曲線半径別に評価を行った。曲線半径200 m～600 mについて、磁場の有無による円曲線の外軌側平均横圧を算出した結果を表3、これをもとに磁性エラストマの適用による横圧減少率を整理した結果を図11に示す。なお曲線半径以外の線形条件は一定として、曲線通過時の走行速度は各曲線半径に応じた均衡速度とした。本図を見ると曲線半径が大きくなるほど横圧減少率が大きくなっていることが分かる。これは、輪軸-レール間の相対角度を0°（ラジアル位置）にするために必要となる軸箱前後変位量が曲線半径の増加に応じて減少するので、磁場の有無による軸箱前後剛性の変化割合が同じでも、曲線半径が大きくなるほどラジアル位置に近づく割合が増加するためである。

表3 円曲線における外軌側平均横圧

曲線半径	0 mT	310 mT
200 m	17.1 kN	18.5 kN
300 m	12.4 kN	14.3 kN
400 m	9.16 kN	11.2 kN
500 m	6.53 kN	8.93 kN
600 m	4.49 kN	7.18 kN

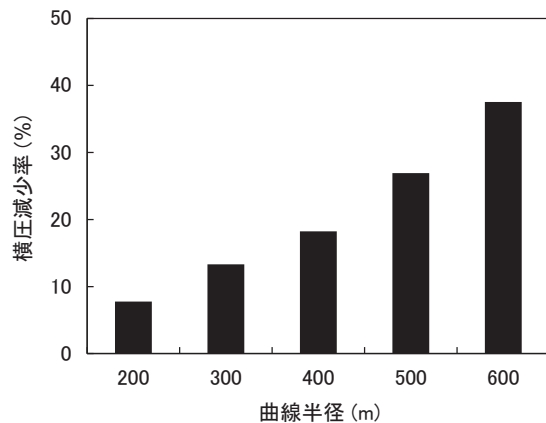


図11 曲線半径別の横圧低減効果

4. おわりに

本稿では磁性エラストマを用いた軸箱支持装置を考案し、テストピースによる磁性エラストマの特性確認試験および磁性エラストマを軸箱支持装置に適用した台車を装架した車両の車両運動シミュレーションによりその曲線通過性能を評価した。まず鉄道部品サイズの試験片を用いた圧縮試験においては、磁場の有無によりヤング率が5倍程度変化することを確認した。さらに磁場の有無により軸箱前後支持剛性が変化する車両運動シミュレーションモデルを用いて曲線通過性能評価を行い、曲線半径400 mでは外軌側横圧を2割程度低減できることが期待でき、曲線半径が大きくなるほど外軌側の横圧減少率が大きくなることを確認した。今後は、磁性エラストマを用いた実物大の軸箱支持装置を製作し、単体試験や実車に取り付けた走行試験により、磁性エラストマを用いた軸箱支持装置の操舵制御への有用性を確認していく予定である。

文 献

- 1) 佐藤栄作, 小林秀之, 岡本勲, 手塚和彦, 柿沼博彦, 玉置俊治, リンク式ボギー角運動方式による特急気動車用操舵台車の曲線通過横圧, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.625 (1998), pp. 3563-3570
- 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 (2013), pp.473-476
- 3) Chiba, N., Yamamoto, K., Hojo, T., Kawai, M. and Mitsumata, T., Wide-range modulation of dynamic modulus and loss tangent for magnetic elastomers containing submillimeter magnetic particles, Chemistry letters, No.42 (2013), p.253.
- 4) Ginder, J. M., Nichols, M. K., Elie, L. D. and Tardiff, J. L., Magnetorheological elastomers: properties and applications, Smart Structures and Materials 1999: Smart Materials Technologies (1999), DOI:10.1117/12.352787.
- 5) Kikuchi, T., Masuda, Y., Amano, K., Mitsumata, T. and Ohori, S., Haptic interface with magnetic field sensitive elastomer, Journal of Mechanics Engineering and Automation, No.3 (2013), pp.146-151.
- 6) 阿部憲幸, 三俣哲, 磁性コンポジットゲルのマグネトロロジー, 日本ゴム協会誌, Vol.82, No.8 (2009), pp.28-34
- 7) Böse, H. and Röder, R., Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties, Journal of Physics: Conference Series 149 (2009), DOI:10.1088/1742-6596/149/1/012090.