

# 発泡ゴムを用いた低ばね定数軌道パッドの 低温特性の向上

鈴木 実\* 佐藤 大悟\* 間々田 祥吾\*  
玉川 新悟\*\* 弟子丸 将\*\*

## Improvement of the Low-temperature Characteristics of Resilient Rail Pads by Foam Structuring

Minoru SUZUKI Daigo SATO Shougo MAMADA  
Shingo TAMAGAWA Tadashi DESHIMARU

Because resilient rail pads are made from synthetic organic material, their physical properties such as spring constant are dependent on temperature and loading speed. Such properties would lead to low vibration-isolating performance under unfavorable conditions. Thus, the authors have improved the low-temperature characteristics of such pads by foam structuring of newly compounded ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber and styrene butadiene rubber (SBR). These foamed rubber compound consists of independent cells with size of several ten  $\mu\text{m}$  ~ 100  $\mu\text{m}$ . From the results of impact loading test, we confirmed that resilient rail pads made from foamed EPDM and SBR could evidently decrease the response load compared with the conventional ones of grooved solid SBR.

キーワード：軌道パッド，低ばね定数，動特性，温度依存性，低温，载荷速度，緩衝性能

### 1. はじめに

軌道パッドは、軌道支持ばね系に用いられる弾性部材として、スラブ軌道などの剛性の高い直結系軌道では主要な弾性要素である。近年、鉄道沿線の都市化や列車の高速化にともない、振動低減を図る目的で、低ばね定数軌道パッドにより軌道の支持ばね系を低ばね化する対策が採られる例がある<sup>1)</sup>。しかしながら、軌道パッドは、主に合成ゴムなどの有機高分子系弾性素材により構成され、载荷速度や環境温度によって弾性率などの物性値が変化することが知られている。特に、低温時や高速で応力が作用するときには、これらの依存性によって、弾性率が大幅に増加する傾向がある。このため、現状の低ばね定数軌道パッドを用いた対策では、低温環境下や高速移動荷重による振動に対して、予め期待された防振性能が十分に発揮できないことも想定される<sup>2)</sup>。現在、北海道などの寒冷な地域でも高速鉄道の建設が計画され、既にその一部で工事や運行が開始されている。このような状況の中で、低温環境においても緩衝性能を維持できる軌道パッドとして、素材内部を発泡構造化するなどにより、低温特性を向上させたエチレンプロピレンゴム (EPDM) とスチレンブタジエンゴム (SBR) からなる低ばね定数軌道パッドの開発を行っ

\* 材料技術研究部 防振材料研究室

\*\* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

た。本稿では、これらの軌道パッドの開発の概要と、静的ばね定数や衝撃応答などの低温特性について述べる。

### 2. 軌道パッドの敷設環境温度

軌道パッドの敷設環境温度の把握は、軌道パッドの特性を知る上で重要となる。北海道や東北地方北部など一部の地域は、亜寒帯に属し、都市圏やその近郊でも冬季の日最低気温が  $-10$   $^{\circ}\text{C}$  以下となることもある。そこで、軌道パッドの敷設環境温度と軌道パッドの内部温度の関係を把握するため、以下の計測を試みた。

#### 2.1 計測の概要

図1に示す装置を用いて軌道パッド内部やレール、路盤、大気などの各温度を計測した。ここでは、冠雪の影響を考慮し、路盤表面と路盤表面から高さ約 1m の位置に設置したコンクリート板上に模擬軌道を構築し、各部位の温度を測定するものとした。装置の構成と計測の概要は以下のとおりである。

##### 【装置の構成と計測概要】

模擬軌道：JIS 60 kg レール、直結 8 形締結装置

軌道パッド：SBR 製 (公称ばね定数 60MN/m)

温度計測装置：(株)キーエンス製 TR-V550

温度センサー：K 熱電対

計測地点：室蘭線追分駅構内 (北海道湧別郡追分町)

特集：材料技術

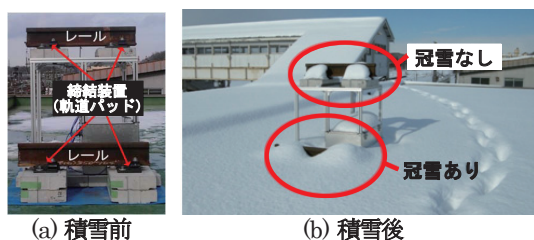


図1 軌道パッド温度計測用装置設置状況

2.2 結果と考察

軌道パッドの内部温度は、図2に示すように冠雪のない状況では、日中は日射によるレール温度の上昇に伴い上昇し、夜間から早朝にかけて大気温度に追従して低下する。一方、冠雪のある状況では、日中・夜間ともに積雪による断熱効果により、軌道パッドの内部温度は路盤温度に近似する傾向を示すことがわかった。

以上の結果や気象庁の統計等を踏まえると、札幌近郊での冬季の軌道パッドの敷設環境温度は、 $-10 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 程度となることが想定される。

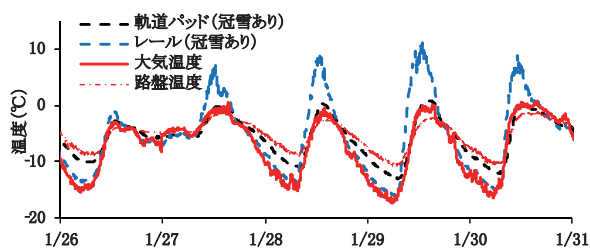


図2 軌道パッドの温度測定結果 (冠雪なし)

3. 低温用素材と構造の検討

3.1 低温用素材

前章での敷設環境温度の検討結果より、耐寒性の目標温度を $-20^{\circ}\text{C}$ とした上で、ガラス転移温度 $T_g$ および溶解性パラメータ $\delta_p$ などの特性に着目し、文献値などをもとに $T_g$ や $\delta_p$ が低いものほど低温特性の向上が期待できるものとして、軌道パッド用素材を選定した。

両者の違いは、ガラス転移温度 $T_g$ が粘弾性体の相転移が生じる温度であり、主に分子の運動性からみた耐寒性を示す指標であるのに対し、溶解性パラメータ $\delta_p$ は分子間力と密接な関係にある耐溶剤性を示す尺度であり、素材の低温特性に支配的な影響を及ぼすとされる。この $\delta_p$ が高い素材では、分子の極性が高く、分子間凝集力が大きい。このため、特に低温下では結晶化などにより分子運動性が低下し、弾性が大幅に増加するなど耐寒性が悪くなる傾向を示すと考えられる<sup>3)</sup>。

軌道パッドでは、以上の特性の他、周波数特性や衝撃応答特性が緩衝性能を評価する上で重要な指標となるが、疲労特性、圧縮特性、引張特性、耐薬品性などの特性も実用化の際に求められることになる。

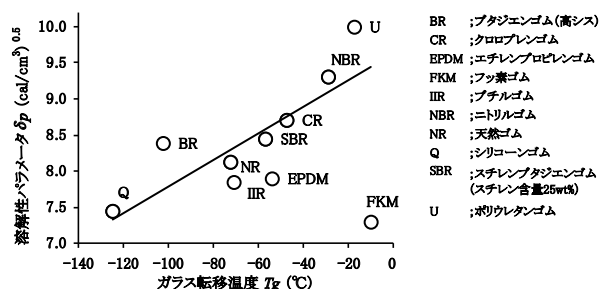


図3 各種ゴムの $T_g$ と $\delta_p$ の関係<sup>4)</sup>

3.2 ガラス転移温度と溶解性パラメータ

図3に各種ゴムのガラス転移温度 $T_g$ と溶解性パラメータ $\delta_p$ との関係を示す。現行素材であるSBRと比較すると、Q, BR, NR, IIRの4種の $T_g$ 値が低く、FKM, Q, IIR, EPDM, NRの5種の $\delta_p$ 値が低いことがわかる。

これらの素材のうち、FKM, Q, IIRの3種は機械的強度やゴム状弾性が低いが、BR, NR, EPDMの3種は低温特性が高く、軌道パッド用素材の候補となり得る。

中でもEPDMは、プロピレンの共重合化により、ポリエチレンの配列に立体障害が加わることで結晶化が阻害される。このため、ほぼ同等の $T_g$ をもつSBRに対し、 $\delta_p$ が $7.8 \sim 8.0 (\text{cal}/\text{cm}^3)^{0.5}$ と小さく、低温でも分子運動性が比較的良好に維持できると考えられる。このEPDMは、1980年代以降、SBRの代替素材として軌道パッドの長寿命化を検討した際に有望視された経緯がある。その後の現地敷設試験においてもばね定数変化が少ないなどの特性が確認されており、長期の安定性が期待できる素材である<sup>4)</sup>。

3.3 周波数特性

3.3.1 試験概要と供試体

低温用素材の周波数特性に関する基礎的検討を行うため、表1の試験条件での正弦波加振試験を行い、緩衝性能への影響が大きい動的弾性率 $E'$ の周波数特性を求めた。供試体は表2に示すとおりであり、現用素材であるSBRとPURに加えて、減衰の大きいBRとともに、EPDMの2種を比較素材として用いた。

表1 試験条件

試験装置	驚宮製作所製 KC-V-2
載荷荷重	12.0kN $\pm$ 100m/s <sup>2</sup> (正弦波加振)
周波数	100 ~ 700Hz (1Hz刻みにて連続的に周波数を増加)

表2 供試体の概要

素材	現用素材：SBR, PUR (発泡ウレタンゴム) 比較素材：BR, EPDM
構造・形状	SBR, EPDM, BR；無発泡ゴム・溝付形状 PUR；発泡ゴム・平板
供試体寸法	載荷面積 100mm $\times$ 100mm, 厚さ 10mm

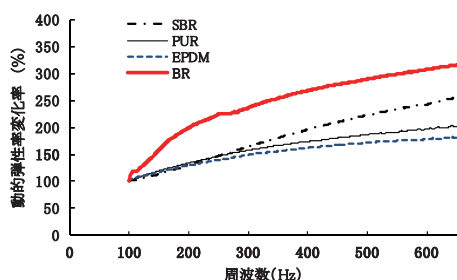


図4 各種汎用ゴムシート材の周波数特性

### 3.3.2 試験結果

各材料の100 Hzでの動的弾性率を100としたときの変化率を図4に示す。動的弾性率は、周波数とともに増加し、その変化率は素材毎に異なることがわかる。600Hzで比較すると、変化率はBR > SBR > PUR > EPDMの順に小さく、速度依存性が低くなることがわかる。このため、高速载荷時の緩衝性能は、変化率が小さいEPDMが最も優れていると考えられる。

### 3.4 構造と形状の検討

現行の汎用軌道パッドには、溝付形状の無発泡ゴムシートが一般に用いられている。一方、静的ばね定数が30MN/m未満の低ばね定数軌道パッドでは、溝付形状以外にも溝のない平板形状の発泡ゴムが用いられている。

衝撃輪重作用時の非線形構造解析により、衝撃応答時の軌道パッドの応力分布を検討した結果、無発泡ゴム・溝付形状では、圧縮時に隅角部に局部的な応力集中が発生するのに対し、発泡ゴム・平板形状では、比較的均等に応力が分布することが明らかとなっている(図5)。応力集中箇所は繰り返し応力による疲労劣化の起点とな

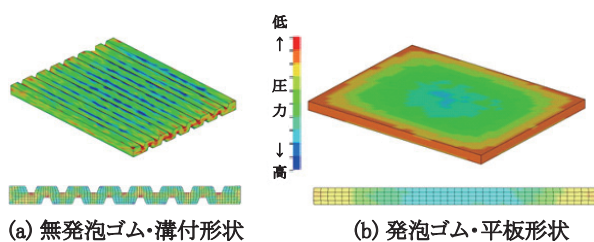


図5 構造・形状の違いによる応力分布の比較

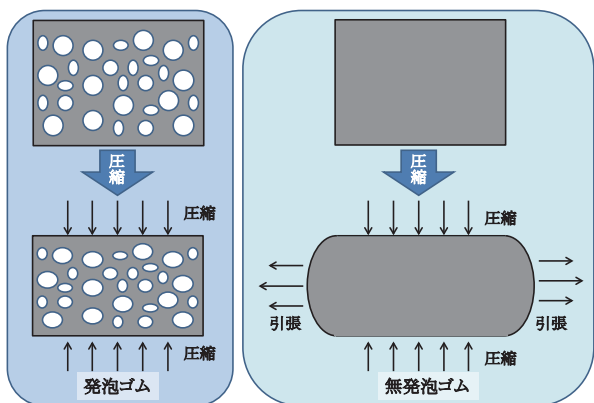


図6 発泡構造の有無による圧縮変形イメージの比較

り得るため、耐久性の観点からも発泡ゴム・平板形状が有利と考えられる。また、ガラス転移領域やその近傍では、 $E \propto 1/T^2$ の関係で、温度の低下とともに弾性率 $E'$ が大幅に増加するため、内部の独立気泡(セル)が微小変形することによって、衝撃(ひずみ)を効果的に吸収することができる発泡構造が緩衝性能の面でも有利であると考えられる(図6)。

## 4. 試作配合素材の材料特性評価

### 4.1 試作配合供試体の作製

低温用素材と周波数特性の検討結果より、EPDMの発泡素材が低温特性を向上する軌道パッド用素材として有望と考えられる。このため、現用素材であるSBR系の素材(NRとのブレンド配合を含む)とともに、EPDM素材をベースとした表3に示す発泡ゴムの試作配合供試体を作製した。この際、EPDM素材には、製法の異なるメタロセン系(メタロセン触媒系)と非メタロセン系(チーグララー・ナツタ触媒系)の2つのポリマーを供試した。また、発泡剤には、成型時の加熱分解反応によって窒素ガスを放出し、独立気泡(セル)を形成する有機系発泡剤をともに用いた<sup>5)</sup>。

表3 試作配合供試体の概要

種別	試作配合略称	概要
SBR系無発泡ゴム	SBR汎用素材	SBR現行汎用素材の無発泡ゴム
SBR系発泡ゴム	SBR+NRブレンド	SBR現行低ばね素材の配合をベースにNRを共重合した発泡ゴム
	SBR(低温配合)	低温用として補強材、同添加量等を変更したSBR発泡ゴム
EPDM系無発泡ゴム	EPDM汎用素材	EPDM汎用素材の無発泡ゴム
EPDM系発泡ゴム	非メタロセン系	EPDM汎用素材(従来触媒系)を用いた発泡ゴム
	メタロセン系	分子量分布の均質性が高く、低温特性の良いメタロセン触媒系EPDM素材を用いた発泡ゴム

### 4.2 動的粘弾性試験

#### 4.2.1 供試体

試作配合供試体から幅5.0mm、厚さ約2mmの試験片を作製し、動的粘弾性試験装置DDV-25FP(株)エーアンドデー製)により、表4の試験条件で引張加振時の動的弾性率を求め、低温特性の評価を行った。

表4 動的粘弾性試験の試験条件

項目	試験条件
荷重条件	0.49N ± 25.0 μm, 正弦波 20Hz
温度条件	-60 ~ 60℃, 昇温速度 1℃/min
試験片寸法	幅 5.0mm, 厚さ約 2mm
つかみ距離	30.0mm

#### 4.2.2 結果と考察

図7に試験結果を示す。動的弾性率変化の変曲点となる $T_g$ は、SBR系では、図7(a)に示すように「SBR汎用素材;無発泡ゴム」,「SBR+NRブレンド;発泡ゴム(発泡倍

特集：材料技術

率 1.39 倍) および「SBR (低温配合); 発泡ゴム (同 1.31 倍)」の 3 つの供試体間で大きな差はなく、 $T_g$  の低減効果は認められなかった。

EPDM 系においても、図 7 (b) に示すように  $T_g$  は非メタロセン系 EPDM (同 1.55 倍) が約  $-32^\circ\text{C}$ 、メタロセン系 EPDM (同 1.55 倍) が約  $-29^\circ\text{C}$  と、無発泡 EPDM ( $T_g = -33^\circ\text{C}$ ) との差は僅かであった。

一方で、SBR や EPDM の発泡ゴムでは、SBR の無発泡ゴムと比較して、 $T_g$  よりも高温側の領域で動的弾性率が急激に低減している。このため、これらの発泡ゴムでは、 $T_g$  に近い低温域を含む、より広範な温度域で弾性率が低く維持されることがわかる。

なお、EPDM では、メタロセン系と非メタロセン系の温度特性がほぼ等しい一方、メタロセン系の動的弾性率は比較的高く、安定した発泡構造が得られていると推察できる。

4.3 発泡セルの分散性

発泡セルの大きさや分散性などゴム内部の発泡状態は、材料強度や疲労特性に大きく影響すると考えられる。図 8 は、各供試体断面の走査型電子顕微鏡 (SEM) による反射

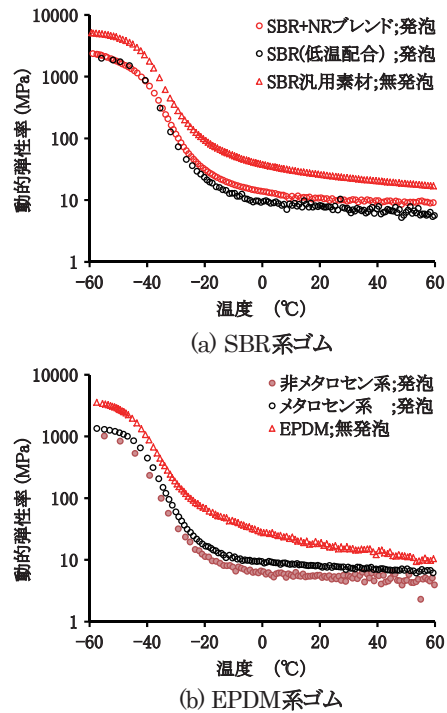
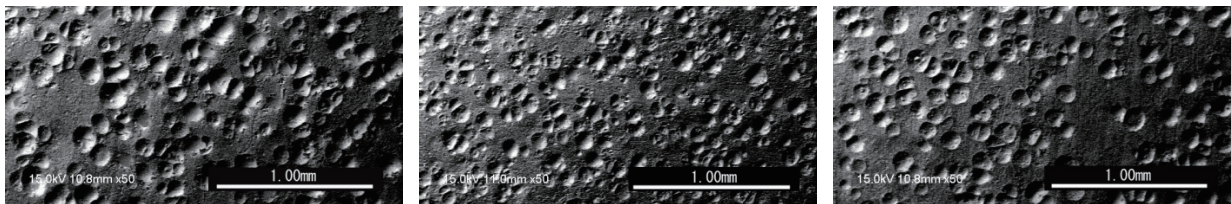


図 7 動的粘弾性試験結果



(a) 非メタロセン系 EPDM (発泡倍率 1.58 倍) (b) メタロセン系 EPDM (発泡倍率 1.38 倍) (c) SBR (低温配合; 発泡倍率 1.31 倍)

図 8 各供試体断面の反射電子像

電子像である。(a) は非メタロセン系 EPDM、(b) はメタロセン系 EPDM である。これらの EPDM では、ゴムポリマーの粘度が低いため、発泡剤の分散性が良好となるが、メタロセン系では発泡倍率が 1.3 倍前後の低発泡時においても、 $60 \sim 80 \mu\text{m}$  の微細な発泡セルの構造が得られる。

(c) は、SBR (低温配合、発泡倍率 1.31 倍) である。メタロセン系 EPDM に比べ、ゴムポリマーの粘度が高い SBR は発泡化に不利といえるが、配合改良によりセルサイズが  $80 \sim 100 \mu\text{m}$  とやや大きいものの、単位体積当りのセル数が非メタロセン系の約 1.3 倍の良好な発泡状態が得られた。

5. 試作パッドの特性評価

5.1 概要

材料特性の検討の結果より、セルの分散状態などが良好であった SBR (低温配合) と EPDM (メタロセン系) の 2 つの試作配合素材を用いて軌道パッドを試作し、静的ばね定数試験、動特性試験、および衝撃応答試験による温度特性評価を行い、従来品と比較をした。

5.2 試験方法

5.2.1 静的ばね定数試験

表 5 の供試体を所定の各温度で恒温とした後、材料動特性試験機 (株島津製作所製 UHF-EUV100kN) により、载荷速度  $2\text{kN/s}$  で  $0 \rightarrow 100 \rightarrow 10 \rightarrow 40 \rightarrow 10 \rightarrow 100 \rightarrow 0\text{kN}$  の順に圧縮と除荷を繰り返す、最後の圧縮荷重時の荷重と変位から式 (1) を用いて、静的ばね定数値を求めた。

$$K_s = \frac{F_2 - F_1}{\delta_2 - \delta_1} \quad (1)$$

ここで、 $K_s$  は静的ばね定数、 $F_1$  は算出区間の下限荷重  $10\text{ kN}$ 、 $F_2$  は算出区間の上限荷重  $50\text{ kN}$ 、 $\delta_1$  は荷重  $F_1$  のときの変位、 $\delta_2$  は荷重  $F_2$  のときの変位である。

表 5 供試体の諸元

供試体	素材	発泡の有無	溝の有無	公称ばね値
SBR 従来品	SBR 現行配合	なし	あり	28MN/m
PUR 従来品	PUR 現行配合	あり	なし	30MN/m
SBR 試作品	SBR 低温配合	あり	なし	30MN/m
EPDM 試作品	EPDM メタロセン系	あり	なし	30MN/m

※外形寸法 =  $180\text{mm} \times 140\text{mm} \times 10 \sim 12\text{mm}$

### 5.2.2 動特性試験

表5のSBRおよびEPDMの供試体について、所定の各温度で恒温とした後、材料動特性試験機（㈱島津製作所製UHF-EUV100kN）を用い、以下の荷重条件で正弦波加振したときの動的ばね定数と損失係数を測定した。

平均荷重：30 kN

荷重振幅：± 20 kN

加振周波数：30～5 Hz（1Hz刻みで連続的に減少）

### 5.2.3 衝撃応答試験

表5の供試体について、図9の衝撃応答実験装置により重錘落下時のレール圧力を測定した。この衝撃実験応答装置は、鉄道総研が開発し、実軌道における衝撃輪重発生時に輪重分散や準静的な静止輪重相当の予荷重などの荷重条件を模擬できる。締結装置内には、冷却機構が設けられており、供試軌道パッドを-20～40℃の各所定温度で恒温状態とした上で、表6の試験条件で測定を行った<sup>6)</sup>。

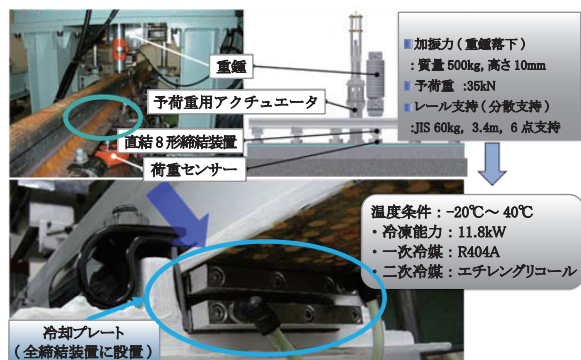


図9 衝撃実験装置

表6 衝撃応答試験の主な条件

項目	条件値等
重錘質量	500kg
落下高さ	10mm
レール種別	60kg レール
レール長	3.5m
締結装置	直結8形改（低ばね用）
支持点数	6点
予荷重	35kN

## 5.3 結果と考察

### 5.3.1 静的ばね定数試験

静的ばね定数と温度の関係は、図10に示すように全ての供試体で0℃未満の低温側で増加傾向が見られる。

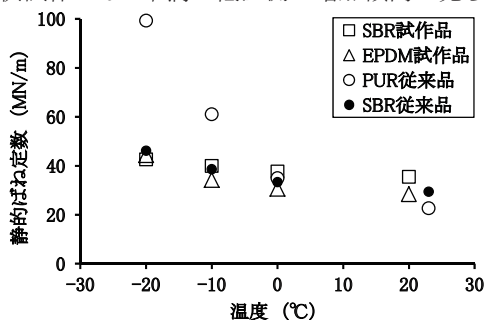


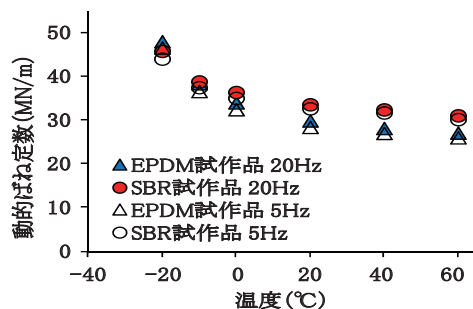
図10 静的ばね定数と温度の関係

PUR 従来品では -20℃の静的ばね定数が 100MN/m となり、公称値の3倍超の増加を示すのに対し、EPDMとSBRの試作品やSBR従来品では増加が少なく、低温時の特性に問題のないことがわかる。この理由として、PUR従来品では、Uの $T_g$ や $\delta_p$ が高いことなど、素材自体の低温特性が大きく影響しているものと推察される。

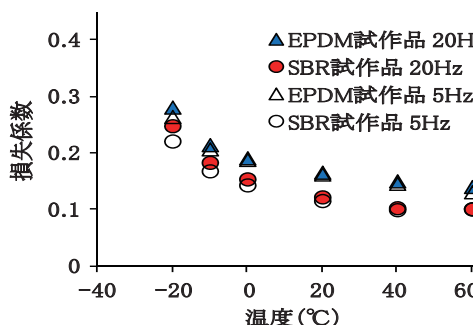
### 5.3.2 動特性試験

図11に5Hzと20Hzにおける測定結果を示す。(a)は動的ばね定数、(b)は損失係数の温度特性である。動的ばね定数については、室温以上の温度域でSBRがEPDMをやや上回り、0℃以下では温度の低下にともない両者ともに同様の増加傾向を示した。この結果、両者はともに、-20℃において室温時の約1.5倍の動的ばね定数を示した。また、周波数による違いについては、どちらの供試体も5Hzと20Hzでの差はほとんど認められなかった。

損失係数では、室温以上の温度域でEPDMがSBRをやや上回り、0℃以下では温度の低下にともない両者ともに増加傾向を示し、-20℃では室温時の1.5～2倍相当の0.25前後となった。この変化は、低温時の衝撃荷重など高速負荷に対する緩衝性能には不利となるが、SBR従来品などと比べて相対的には低い値といえる。



(a) 動的ばね定数



(b) 損失係数

図11 動特性試験結果

### 5.3.3 衝撃応答試験

図12に衝撃応答試験の結果を示す。SBRとPURの従来品では、室温以下の領域でレール圧力の増加傾向がみられる。これに対し、SBRとEPDMの試作品では、0℃までほぼ増加は認められず、それ以下の低温でも増加率は比較的小さいことがわかる。この結果、増加が最も少

ない EPDM 試作品では、-20℃でもレール圧力が SBR 従来品の約 45%に相当する 80 kN 以下となり、低温時の緩衝性能が大幅に向上することがわかる。

一方、SBR 試作品でも、-10℃まで EPDM 試作品とほぼ同じレール圧力を示し、SBR 従来品よりも約 32%レール圧力が低減することが確認できた。

このように EPDM と SBR の試作品では、ともに内部を発泡構造化することで、低温特性の大幅な向上が確認できた。特に、EPDM では、0℃未満の低温領域において、SBR よりもレール圧力が低く、低温特性が良好であった。

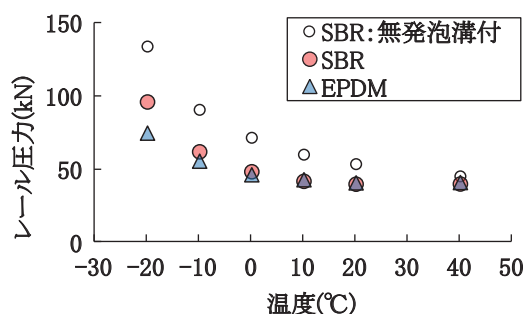


図 12 衝撃応答試験時のレール圧力

## 6. 実用性能（物性）

試作した SBR および EPDM の低ばね定数軌道パッド（以下、開発品という）の材料物性面からの実用性能を確認するため、物性試験による評価を行った。

### 6.1 試験方法

軌道パッドの物性は、JIS E1117 の他、「パッド製作仕様書（案）<sup>7)</sup>」により一般の規格が定められ、「レール締結装置類仕様書（案）<sup>8)</sup>」において NR および PUF（発泡ポリウレタンゴム）などの低ばね定数品の規定が提案されている。ここでは、これらの規格等を参考に「発泡 EPDM・SBR 製低ばね軌道パッド」の物性仕様を提案し、これに基づく確認試験を行った。試験項目は、比重、引張特性、耐熱性、耐水性、耐アルカリ性、耐油性、圧縮特性などの 8 項目である。

### 6.2 試験結果

表 7 に示すとおり、SBR と EPDM の開発品の物性は、実用上の性能を満たすことを確認した。

一方、耐油性に関しては、開発品の双方で、浸漬後の試験片の膨潤や引張試験時の破断時伸度の低下などの変状や変質が認められた。この耐油性試験は、マシン油（添加剤が配合されていない鉱物油）への耐性を確認する項目である。このため、SBR と EPDM の開発品は、多量の油脂が常時付着するレール塗油装置の設置箇所近傍など、特定箇所への適用では、油脂の付着を避けるなどの措置を講ずることが望ましいと言える。

表 7 発泡 EPDM・SBR 製低ばね定数軌道パッドの物性仕様（案）と物性試験結果

項目	評価項目	単位	規格値（案）	SBR	EPDM	
比重	比重	—	0.90 ± 0.10	0.92	0.84	
	引張特性	引張強さ	MPa	5.0 ≤	6.4	5.9
		破断時伸び	%	100 ≤	161	173
耐熱性（70℃）	100% モジュラス	MPa	3.0 ≤ ≤ 5.0	3.8	3.8	
	引張強さ保持率	%	70 ≤	98	105	
	破断時伸び保持率	%	70 ≤ ≤ 130	98	101	
耐水性	100% モジュラス保持率	%	70 ≤ ≤ 130	100	105	
	引張強さ保持率	%	70 ≤	89	107	
	破断時伸び保持率	%	70 ≤ ≤ 130	93	112	
耐アルカリ性	100% モジュラス保持率	%	70 ≤ ≤ 130	95	97	
	引張強さ保持率	%	70 ≤	92	105	
	破断時伸び保持率	%	70 ≤ ≤ 130	97	109	
耐油性	100% モジュラス保持率	%	70 ≤ ≤ 130	95	97	
	引張強さ保持率	%	70 ≤	50	54	
	破断時伸び保持率	%	70 ≤ ≤ 130	57	53	
圧縮特性（2.4MPa 定荷重）	100% モジュラス保持率	%	70 ≤ ≤ 130	NG	NG	
	外観検査	—	亀裂、割れが生じないこと	異常なし	異常なし	
	圧縮永久ひずみ	%	≤ 10.0	6.3	9.0	
絶縁抵抗	常態	MΩ	3.0 × 10 <sup>3</sup> ≤	4.1 × 10 <sup>4</sup>	1.2 × 10 <sup>4</sup>	
	浸水後	MΩ	3.0 × 10 <sup>3</sup> ≤	1.0 × 10 <sup>4</sup>	3.8 × 10 <sup>3</sup>	
耐疲労	外観検査	—	亀裂、割れが生じないこと	異常なし	異常なし	
	ひずみ	%	≤ 10.0	2.5	2.0	

## 7. 結論

低ばね定数軌道パッドの低温特性の向上を検討し、EPDM と SBR の発泡ゴムを用いた試作品を開発した。これらの特性評価試験の結果、開発品では従来品に比べ、低温域でも静的ばね定数や動的ばね定数が低く維持できる他、衝撃応答試験でも優れた緩衝性能を維持することを確認した。特に、EPDM では、-20℃においても SBR 従来品（無発泡）に比べ、約 45%緩衝性能が向上するなど、低温環境下での緩衝性能が優れることを明らかとした。また、これらの開発品では、その他の材料物性も実用性能を満たすことを確認した。

## 文 献

- 1) 横山秀史, 岩田直泰, 芦屋公稔: 低ばね定数軌道パッドによる地盤振動低減効果, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.29-34, 2008
- 2) Fenander Å., Frequency-Dependent Stiffness and Damping of Railpads. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.211, No.1, pp.51-62, 1997.
- 3) 山田幸男: 特殊ゴムの特性と配合 (FKM, ACM, ECO その特性と応用), 日本ゴム協会誌, 第 82 巻第 1 号, pp.20-26, 2009
- 4) 片岡謙一, 山口義信, 鈴木実: 長寿命軌道パッドの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 4 部 Vol.54, pp.808-809, 1999
- 5) 秋葉光雄, 小林幸夫: スポンジゴムの配合と加工方法, 日本ゴム協会誌, Vol.74, No.10, pp.386-391, 2001
- 6) 鈴木実, 半坂征則, 間々田祥吾, 矢口直幸: 重錘落下試験による軌道パッドの衝撃応答特性評価, 鉄道総研報告, No.4, Vol.22, pp.35-40, 2008
- 7) 日本鉄道建設公団: 「軌道パッド製作仕様書（案）[低ばね定数]」, 1995
- 8) (財) 鉄道総合技術研究所: 「レール締結装置類仕様書（案）/標準施工・保守要領（案）」, 研友社, 1993