

# 鉄道車両用特別高圧ケーブルヘッドへのポリマー材料適用

## Using Polymeric Materials for Rolling Stock High-Voltage Cable Termination

塚本 高一\*  
Koichi Tsukamoto

相島 幸則\*  
Yukinori Aishima

村田 亘\*  
Wataru Murata

鉄道車両用特別高圧ケーブルの終端接続部であるケーブルヘッドは、磁器碍管、エポキシ絶縁体、ゴムストレスコーンなどの複数の部品で構成されており高い信頼性が求められるが、重く、その大きさから狭所への設置が困難である。そこで、小型・軽量化を目的とし、ポリマー材料の採用を検討した。ポリマー材料にシリコンゴムを用い、機能集約したゴムブロック構造とすることでIEC (International Electrotechnical Commission) 規格に準拠し、電気性能、機械性能においても十分に実用化に適する性能を有していることを確認した。

High-voltage cable terminations for rolling stock require high reliability. They are composed of multiple components—such as a porcelain bushing, epoxy insulator and stress relief cone—and their size and weight makes it difficult to insert them in tight spaces.

This study discusses the use of polymeric materials for terminators as a way to make the terminations smaller and lighter. A verification test based on International Electrotechnical Commission (IEC) standard has confirmed that polymeric insulated terminations incorporating silicone rubber have the electrical and mechanical properties feasible for field application.

● Key Word : 鉄道, ケーブルヘッド, ポリマー

● R&D Stage : Development

## 1. 緒言

高速輸送手段である鉄道車両は、乗客の利便性向上を目的として高速化と到達時間の短縮を図ってきた。速度向上には、車両の軽量化は重要なテーマであり、車両構造体だけでなく、車両搭載する機器類にも軽量化が求められる<sup>1)</sup>。また、車両の速度向上によって問題となるのが、車両から発生する騒音である。そのひとつである車両屋根上から発生する風騒音に対し、低騒音化の研究開発が進められている<sup>2)</sup>。

鉄道車両は、トロリー線から車両屋根上のパンタグラフにより受電した電力を特別高圧ケーブル（以下、特高ケーブルと略す）を介して床下の変圧器へ送電する。ケーブルヘッドは、この特高ケーブルの終端接続部として使用される部品である（図1）。100系新幹線においては、特高ケーブルを車両間で接続するためにケーブルヘッドを屋根上に垂直に設置していた。しかし、これによりケーブルヘッドが屋根上の突起物となり、風騒音源となっていたことから、

日立金属はケーブルヘッドを屋根に対し傾斜させた製品を開発し、300系以降の新幹線に提供してきた。傾斜型ケーブルヘッドの構造を図2に示す。

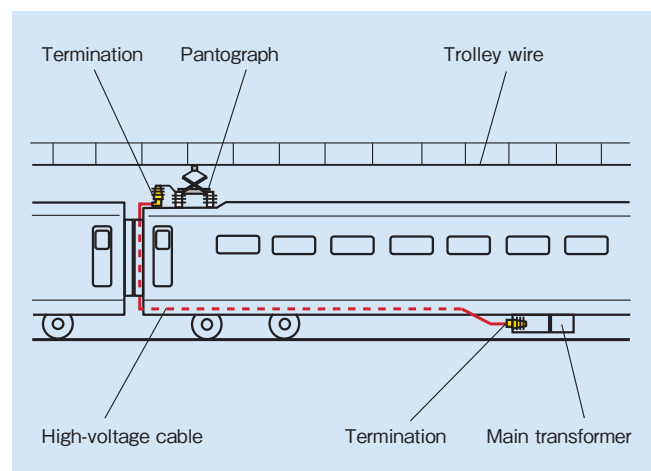


図1 鉄道車両の特別高圧ケーブル配線  
Fig. 1 Wiring of high-voltage cable for rolling stock

\* 日立金属株式会社 電線材料カンパニー

\* Cable Materials Company, Hitachi Metals, Ltd.

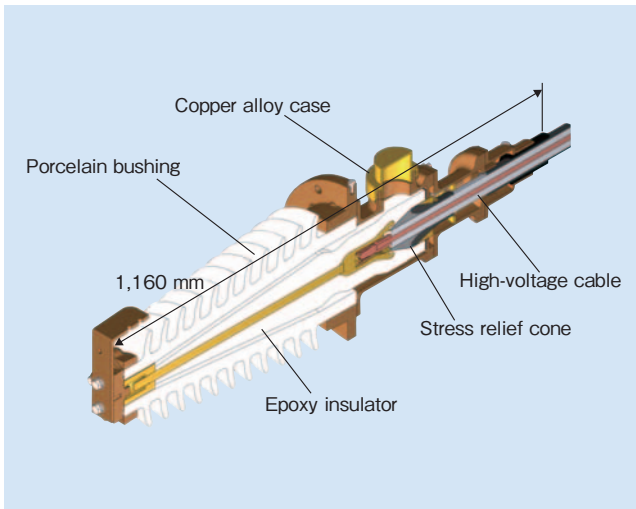


図2 傾斜型ケーブルヘッドの構造  
Fig.2 Construction of "slant-type" termination for high-voltage cable

一方、成長市場である中国、欧州などの海外の鉄道車両では、遮断器、断路器や避雷器等の機器類や空調設備が屋根上に設置されることから、ケーブルヘッドは屋根上の限られたスペースに設置されることとなる。また、車体軽量化に適した仕様であることも求められるが、図2に示した現行のケーブルヘッドではこれに対応できない。以上の状況から、海外市場に適した小型、軽量のケーブルヘッドの開発を目的に、ポリマー材料の適用について検討した。

## 2. ポリマーケーブルヘッドの設計

### 2.1 目標仕様

ポリマーケーブルヘッドの目標仕様を表1に示す。質量は取付時の作業性を考慮し、手での持ち運びができるよう、現行のケーブルヘッドから85%減の15kgとした。全長は、車両敷設条件により現行品の40%減と短くし、部品数は、現行品の50%減を目標とした。電気特性および機械特性については現行のケーブルヘッドと同等の性能を有することを目標とした。

表1 ポリマーケーブルヘッドの目標仕様  
Table 1 Target specifications of polymeric insulated termination

Item	Existing termination	Development target
Mass	100 kg	15 kg
Length	1,160 mm	700 mm
Number of parts	Approx. 70 pcs	35 pcs
Electrical properties	Withstand AC 70 kV, 1 min. Impulse test: ±175 kV, 3 times	Same as at left
Mechanical properties	Withstand shock and vibration based on IEC61373	Same as at left

### 2.2 絶縁構造

図2に示すとおり現行のケーブルヘッドは外部絶縁、内部絶縁、電界緩和等を担う磁器碍管、エポキシ絶縁体、ゴムストレスコーンゴムと各役割を持つ複数の部品で構成されている。開発するケーブルヘッドは、これら絶縁機能をポリマー材料であるゴムで一体成型したゴムブロックに集約し、小型・軽量化、部品数の削減を図ることとした。

しかし、ゴム材料で成形する場合、剛性が確保できず、ケーブルヘッドが自立できない。そこで、対策として、ゴムブロック内部に金属製のパイプおよびフランジを埋め込み、ゴムブロックに剛性を持たせ、自立する構造とした。ポリマーケーブルヘッドの構造を図3に示す。部品数は合計28個、質量12kgと目標値を超える設計とした。

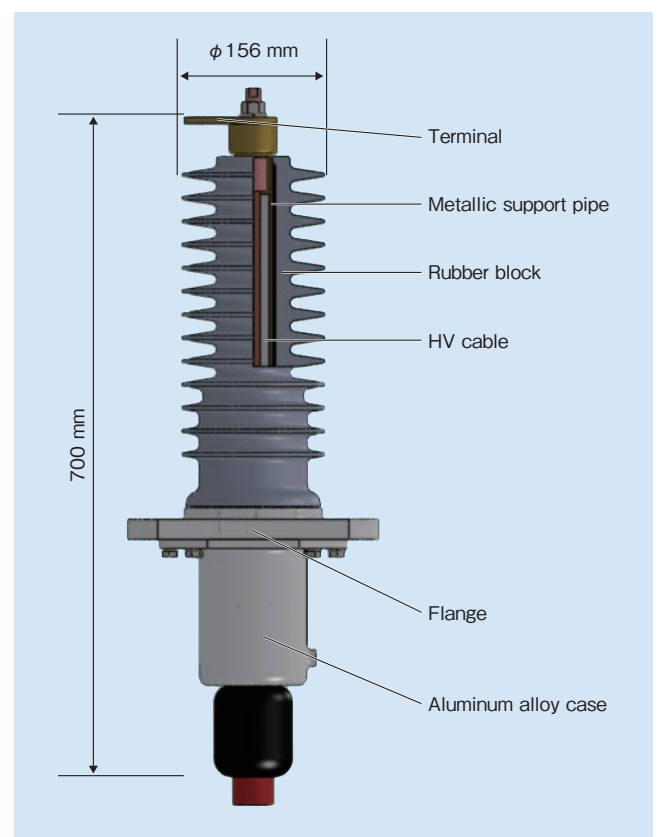


図3 ポリマーケーブルヘッドの構造  
Fig.3 Construction of polymeric insulated termination for high-voltage cable

### 2.3 絶縁材料

採用を検討したゴム材料の特性を表2に示す<sup>3), 4)</sup>。一般的に電気絶縁用のゴム材料には高い絶縁性を持つエチレンプロピレンゴム、ブチルゴム、シリコンゴムが用いられるが、鉄道車両に搭載する電気部品の有機材料については、難燃性であることも必要である。これらの点からシリコンゴムは他ゴムに比べ車両用電気部品に適している。

さらに、開発するポリマーケーブルヘッドは、屋外に暴露される外部絶縁部にもゴム材料を使用するため、耐汚損性能、耐候性に優れた材料が求められる。

表2 ゴムの材料特性

Table 2 Properties of rubber material

Item		Silicone rubber	Ethylene-propylene rubber	Butyl rubber
Electrical properties	Breakdown voltage (kV/mm)	20-30	30-45	20-30
	Volume resistivity ( $\Omega \cdot m$ )	$1 \times 10^{12}$ - $1 \times 10^{13}$	$1 \times 10^{13}$	$1 \times 10^{13}$
	Dielectric tangent (%)	2-4	1-2	1-3
Flame retardant properties	Oxygen index (%)	25.5-27	20.5-23	21.5

電力設備では絶縁特性、汚損特性が優れていることからシリコンゴムを外被に使用したシリコン端子が用いられている。シリコンゴムの汚損特性に寄与する撥水性は、表面に付着した水が、不連続な水滴を形成する状態である。外表面の撥水性が低い状態で雨などに曝されると水膜が形成されて、漏れ電流が増大し、絶縁抵抗が低下する。一方、撥水性が高いと不連続な水滴の状態になり、外表面の漏れ電流を防ぐことが知られている<sup>5)</sup>。また、シリコンゴムは一時的に外表面の撥水性が低下しても、経時的に内部から低分子量物質が表面にしみ出してくるため、撥水性が回復する。これら撥水性、撥水性の回復といった特徴からシリコンゴムは耐汚損性に優れている。

以上の点からポリマーケーブルヘッドの絶縁材料には絶縁、難燃性、耐汚損性に優れたシリコンゴムを採用した。

## 2.4 外部絶縁

屋外で使用する場合、埃、雨等によってケーブルヘッド表面の絶縁機能を損なわないために、複数の笠を表面に設け、表面の沿面距離を増やす必要がある。そのため現行のケーブルヘッドの磁器碍管の沿面距離 1,040 mm 以上とすることを目標に設計を行い、開発ポリマーケーブルヘッドの笠は 13 枚、沿面距離は 1,090 mm とした。

## 2.5 機械強度

ケーブルヘッドは車両搭載部品として車両走行時の振動に耐える必要があるため、振動加速度に対する開発ケーブルヘッドの内部応力について解析を行った(図4)。解析は図4(a)に示す通りケーブルヘッドを水平に設置した条件で行った。応力解析によるポリマーケーブルヘッドのひずみ分布を図4(b)に、応力解析によるポリマーケーブルヘッドの加速度と応力の関係を図5に示す。ケーブルヘッドに加速度が加わると、内部の金属製パイプ先端に応力が集中するが、IEC61373 振動および衝撃試験(shock and vibration tests)の加速度条件で発生する応力に対し、シリコンゴムの破断強度は十分な裕度があることを確認した。

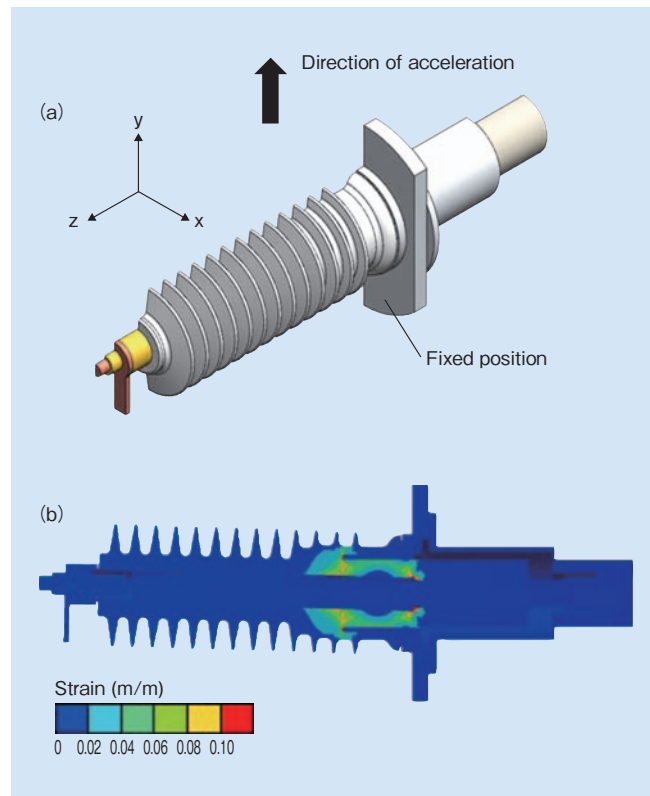


図4 ポリマーケーブルヘッドの内部応力解析 (a) 解析条件 (b) ひずみ分布

Fig.4 Stress analysis of polymeric insulated terminator (a) analysis condition (b) strain distribution

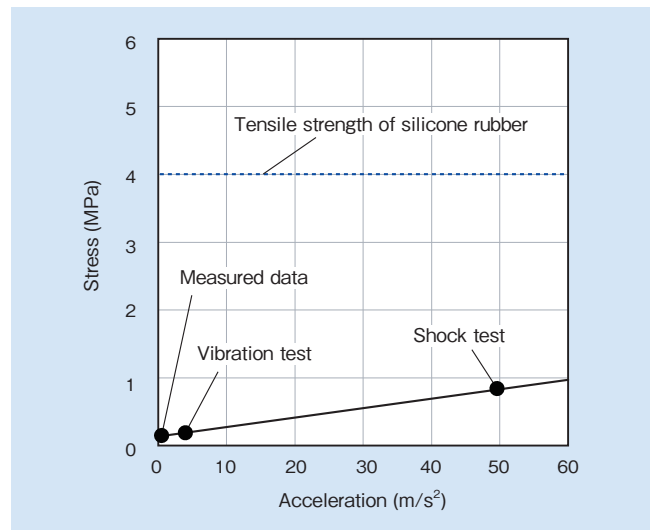


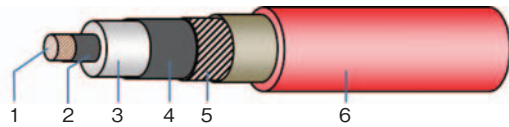
図5 応力解析によるポリマーケーブルヘッドの加速度と応力の関係  
Fig.5 Relationship between acceleration and stress observed during stress analysis testing

### 3. 電気・機械特性検証試験方法

開発ポリマーケーブルヘッドの電気、機械特性検証試験を行った。試験に用いた特高ケーブルは、鉄道車両に用いられているエチレンプロピレンゴム絶縁のケーブルで、内部半導電層、絶縁体、外部半導電層の3層を同時押出法により成形したものである。その仕様を表3に示す。

また、海外の鉄道車両で使用することを考慮し、検証試験はIEC (International Electrotechnical Commission) 規格に準拠した。

表3 特別高圧ケーブルの仕様  
Table 3 Specification of high-voltage cable for rolling stock



No.	Part	Remarks
1	Conductor	Flexible stranded tin-plated copper wire
2	Semiconductive layer	Semiconducting tape and semiconductive compound
3	Insulation	Ethylene propylene rubber (EPR)
4	Semiconductive layer	Semiconductive compound
5	Shield layer	Spiral of tin-plated copper wire
6	Sheath	Red polyolefin elastomer
-	Diameter	43 mm for 120 mm <sup>2</sup>

#### 3.1 交流耐電圧試験および雷インパルス試験

絶縁性能の検証を目的とした交流耐電圧試験 (AC voltage withstand test) および雷インパルス耐電圧試験 (Impulse voltage withstand test) は IEC60502.4 に準拠し試験を行った。交流耐電圧試験は 104 kV/15 min, 雷インパルス耐電圧試験は ±200 kV/10 times の試験条件で行った。試験状況を図6に示す。



図6 電気試験の状況  
Fig. 6 Electrical test setup

#### 3.2 塩水噴霧試験

ポリマーケーブルヘッドが車両屋根上で使用されることを想定し、外部絶縁の検証試験として IEC60502.4 に準拠した塩水噴霧試験 (Salt fog test) を行った。これはポリマーケーブルヘッドを導電度 1,600 ± 200 mS/m の塩水を噴霧した雰囲気中に設置し、一定の電圧を長時間印加し、劣化の有無を確認する方法である。

#### 3.3 振動および衝撃試験

車両からの振動、衝撃に対する検証として、IEC61373 振動および衝撃試験 (Shock and vibration test) に基づいて試験を行った。振動および衝撃試験の試験装置の構成を図7、振動条件および衝撃条件を表4に示す。

ケーブルを接続した試料は水平状態に加振台に設置し、長手、縦、横の三方向それぞれに対し、所定の振動、衝撃を加えた。

ポリマーケーブルヘッドの取り付け方向は車両によって異なり、長手、横方向について特定できないことから、横方向 (Transvers) の加速度条件は、横方向の加速度条件に

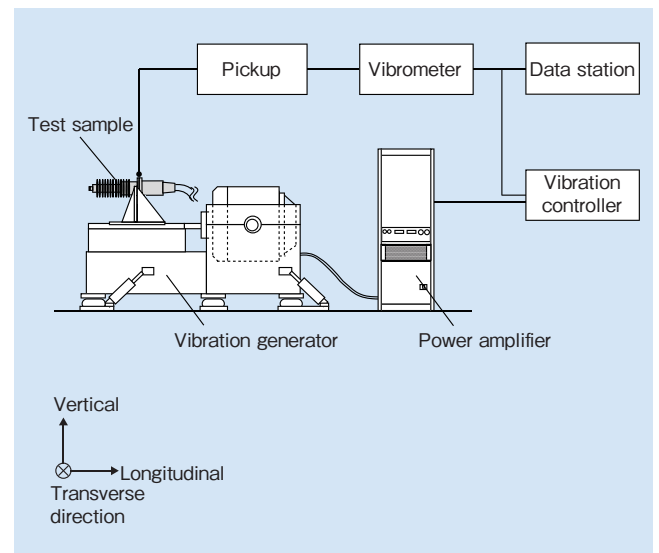


図7 振動および衝撃試験の試験装置構成  
Fig. 7 Configuration of shock and vibration tests

表4 振動および衝撃試験条件 (IEC61373 Category 1 Class A)  
Table 4 Test conditions during shock and vibration tests, IEC61373 Category 1 Class A

Item	Condition
Vibration test	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frequency range: 5 to 150 Hz</li> <li>Acceleration                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Vertical: 4.25 m/s<sup>2</sup></li> <li>Transverse: 2.83 m/s<sup>2</sup></li> <li>Longitudinal: 2.83 m/s<sup>2</sup></li> </ul> </li> <li>Time: 5 hours</li> </ul>
Shock test	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pulse shape: Single half-sine pulse</li> <li>Acceleration                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Vertical: 30 m/s<sup>2</sup></li> <li>Transverse: 50 m/s<sup>2</sup></li> <li>Longitudinal: 50 m/s<sup>2</sup></li> </ul> </li> <li>Number of shocks: 18 times*</li> </ul>

\* Three shocks each in positive and negative directions for each of three orthogonal axes

比べ厳しい条件である長手方向 (Longitudinal) の加速度条件とした。試験状況を図 8 に示す。また、振動および衝撃による機能不全の有無を確認する目的で振動および衝撃試験後に電気試験を行った。

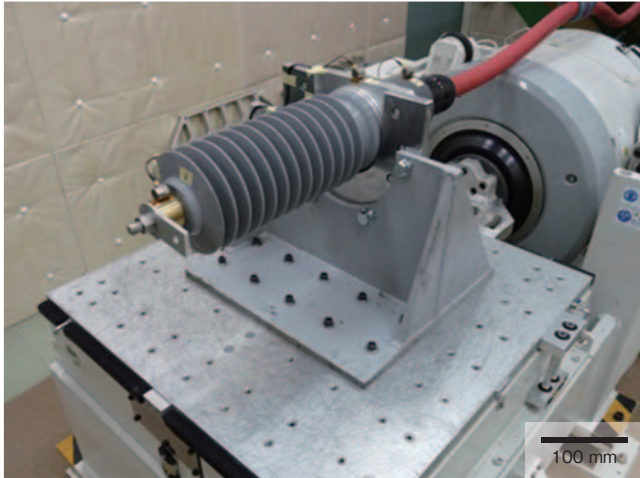


図 8 振動および衝撃試験の状況  
Fig. 8 Shock and vibration test setup

#### 4. 電気・機械特性検証試験結果

ポリマーケーブルヘッドの電気、機械特性検証試験結果を表 5 に示す。

交流耐電圧試験、雷インパルス耐電圧試験では、所定の耐圧値に耐え、良好な結果を得た。また、交流破壊試験 (AC breakdown test)、雷インパルス破壊試験 (Impulse breakdown test) とともに、外部閃絡 (Flash over) するものの、ケーブルヘッド内部の絶縁破壊には至っていない。塩水噴霧試験では、AC32.5 kV/1,000 時間に耐え、大きな劣化は確認されず良好な結果を得た。

振動および衝撃試験では、欠陥は発生せず、振動および衝撃試験後の交流耐電圧試験にも耐え、良好な結果を得た。

他、熱サイクル試験、短絡試験、浸水試験においても良好な結果を得た。

表 5 検証試験結果

Table 5 Verification test results

	Item	Standard	Conditions	Results
Electrical properties	AC voltage withstand test	IEC60502.4	104 kV, 15 min.	Withstood at 104 kV for 15 min.
	AC breakdown test	—	Stepped up by 10 kV/10 min.	Flashover
	Impulse voltage withstand test	IEC60502.4	±200 kV, 10 times	Withstood at ±200 kV for 10 times
	Impulse breakdown test	—	Stepped up by 10 kV, 3 times	Flashover
	Partial discharge test	IEC60502.4	> 45 kV	Not occurred at AC 45 kV
	Thermal cycling test	IEC60502.4	AC 65kV for 60 cycles (1) Conductor temperature: 95-100°C, 2 hours (2) Conductor temperature: Down to ambient temperature Repeat (1) and (2) 60 times	No defects
	Thermal short-circuit test (Screen)	IEC60502.4	Current 5 kA/1 sec.	No defects
	Thermal short-circuit test (Conductor)	IEC60502.4	Current 21 kA/1 sec.	No defects
	Salt fog test	IEC60502.4	32.5 kV, 1,000 h	Withstood at 32.5 kV for 1,000 h
Mechanical properties	Shock and vibration test	IEC61373	Category 1, Class A	No defects and withstood at AC104 kV/15 min after shock and vibration test
	Water immersion test	—	Immersed in water for 24 hours	No defects

## 5. 結 言

小型、軽量化を目的とした鉄道車両用特別高圧ケーブルヘッドのポリマー材料の検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 外部絶縁、内部絶縁、電界緩和の機能を集約したシリコーンゴム製のゴムブロックを設計し、部品数を削減し、現行品に比べ質量 88% 減の 12 kg、全長を 40% 減の 700 mm、部品数を 60% 減の 28 個としたポリマーケーブルヘッドを開発した。
- (2) 交流耐電圧 104 kV/15 min、雷インパルス耐電圧  $\pm 200$  kV に耐え、現行品と同等以上の絶縁性能を有していることを確認した。
- (3) 塩水噴霧試験 AC32.5 kV/1,000 h に耐え、屋外での使用に対応できる性能を有していることを確認した。
- (4) IEC61373 に準拠した振動および衝撃試験では欠陥、機能劣化は認められず、実用化には問題ないことを確認した。

ポリマー材料によるゴムブロック式構造により、軽量化、小型化、部品数削減について開発目標を達成することができ、電気性能、機械性能ともに現行品と同等以上の性能を有していることを確認した。鉄道車両の軽量化、低騒音化に本製品の貢献が期待できる。

## 引用文献

- 1) 鈴木康文：軽金属，第 60 巻(2010)，第 11 号，p.565.
- 2) 池田充：RRR,66 巻 8 号 (2009)，p.18.
- 3) 田中久雄：電力ケーブル技術ハンドブック，電気書院，(1974)，p.90.
- 4) 反町，外：日立電線，No.4 (1985)，p.33.
- 5) 梅田逸樹：NGK レビュー，第 59 号(2002)，p.9.



塚本 高一  
Koichi Tsukamoto  
日立金属株式会社  
電線材料カンパニー  
電線統括部



相島 幸則  
Yukinori Aishima  
日立金属株式会社  
電線材料カンパニー  
電線統括部



村田 亘  
Wataru Murata  
日立金属株式会社  
電線材料カンパニー  
電線統括部