

# ポリマーがいしの構造と劣化形態に着目した 保安全管理方法の提案

柴田 直樹\* 白木 理倫\*\*

## Proposal of a Maintenance Management Method Focusing on Internal Structure of Polymer Insulators and on Their Aging Deterioration Phenomena

Naoki SHIBATA Tadanori USUKI

Since polymer insulators are compact and lightweight, they have excellent workability. In addition, the water repellency of the rubber of the outer cover contributes to improving resistance against stains caused by sea salt and the like. These characteristics have led to expansion of introduction to electric railways recently. However, there is a problem, so far, that a maintenance management method for polymer insulators has not been established. Therefore, we have investigated the causes of polymer insulator accidents to propose a method for inspecting polymer insulators. In addition, we have investigated the structure and deterioration conditions of the polymer insulators removed from actual equipment. This paper proposes a maintenance method of polymer insulators on the basis of the results of these investigations.

キーワード：がいし，ポリマーがいし，シリコンゴム，EVA ゴム，X線CT

### 1. はじめに

従来、がいしには磁器製のものが広く使用されてきたが、1980年代頃から外被材に有機材料を使用したポリマーがいしが使用されるようになってきた。ポリマーがいしは、コンパクトで軽量なため施工性や耐震性に優れていること、外被材の有する撥水性により優れた耐汚損性を有していることから、近年使用が拡大している。

ポリマーがいしの製品規格としては、IEC規格、ANSI規格等が制定されており、日本国内でもIEC 61109:2008やIEC 62621:2011に準拠して製造されている。しかし、ポリマーがいしの保全上の課題として、経年ポリマーがいしの劣化評価方法が確立されていないこと、外被材の撥水性の低下と回復現象のメカニズムが不明確であることなどが挙げられている<sup>1)</sup>。近年では長期使用による不具合も発生しており、磁器がいしと異なるメカニズムで劣化している事例が見受けられる。

他方、電気鉄道におけるポリマーがいしの保安全管理方法は、一部の事業者を除き、磁器がいしと同一の検査を行っているのが現状である。このため、ポリマーがいし特有の劣化に対応した検査方法の確立が望まれている。

そこで、鉄道電力設備の安全性向上に資することを目的として、ポリマーがいしに関する過去の事故調査や撤去品の調査を行い、劣化の形態に対応した明かり区間に

おける経年ポリマーがいしの保安全管理方法について検討した。

### 2. ポリマーがいしの構造と劣化形態

#### 2.1 ポリマーがいしの構造概要

ポリマーがいしの基本構造を図1に、各部材の役割を表1に示す。磁器がいしと異なり機械的荷重はFRPロッドが負担し、電気絶縁は外被材が負担する、というように役割が分かれている。一般的に認識されている、ポリマーがいしの磁器がいしに対するメリット・デメリットを表2に示す<sup>1)</sup>。

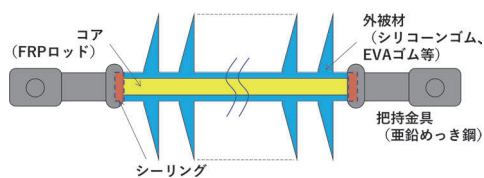


図1 ポリマーがいしの基本構造

表1 各部材の役割

役割	ポリマーがいし	磁器がいし
機械的荷重	FRPロッド	磁器部
電気絶縁性	外被材	磁器部
部材間の接続	圧縮加工or接着剤+シーリング材	セメント
支持物とがいしの接続	把持金具	把持金具

\* 電力技術研究部 き電研究室

\*\* 電力技術研究部 集電管理研究室

表2 ポリマーがいしの磁器がいしに対する  
メリット・デメリット<sup>1)</sup>

メリット	軽量なため、作業性・耐震性・耐衝撃性に優れる 強力な撥水性を有するため、汚損耐電圧が高い 把持金具の腐食状態を目視しやすい (懸垂タイプのみ) 破損時に破片が飛散しにくい
デメリット	外被材が柔らかく傷つきやすい 耐候性に劣る 耐薬品性に劣る 耐アーク性に劣る 撥水性がなくなった場合、耐汚損性が著しく低下する 長期使用の場合、エロージョンやトラッキングが発生する

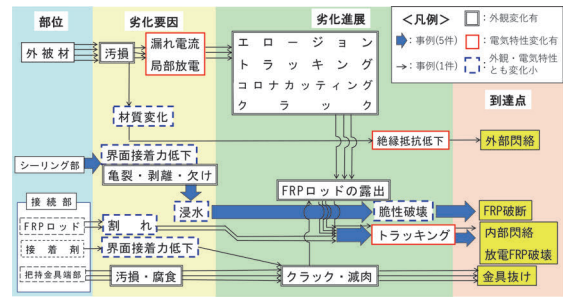


図3 不具合事例の劣化要因図

## 2.2 ポリマーがいしの劣化要因と部位

ポリマーがいしに起因する設備事故の形態について、アメリカ電力研究所の行った315件の事故事例調査の内訳と、鉄道総研で把握している国内の電鉄用ポリマーがいし不具合事例15件の内訳の比較を図2に示す。図中に示すように、件数は異なるがアメリカ電力研究所による調査と国内の調査は同様の傾向であった<sup>2)</sup>。

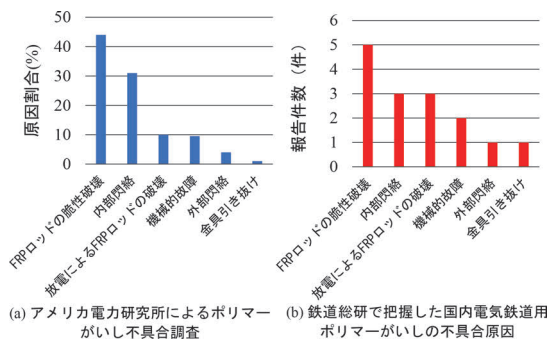


図2 不具合事例の比較

鉄道総研が把握している不具合について劣化要因とメカニズムを分析し、どの劣化形態が致命的な不具合につながるのかを整理した。その結果を図3に示す。図中の細矢印が1件の不具合事例を、太矢印が5件の不具合事例を示す。また、肉眼で外観上の変化を捉えられる可能性が高いものを二重棒、電気的な方法（例えば絶縁抵抗測定）で変化を捉えられる可能性が高いものを赤棒、どちらも難しいものを点線棒で示す。多くの不具合事象における共通点は、ポリマーがいしのどこかの気密構造が破れたことで、事故に至る点であった。

劣化に関わった部位としては、外被材、シーリング部、FRPロッドと把持金具の接着部（以下、接続部）に分けられることが判明した。他方、これらの変状を磁器がいしと同様の検査で発見することは難しい可能性が示された。そこで、不具合に至るまでの過程上で劣化を発見できる検査方法を確立することにより、不具合を未然に防止できると考え、各部位毎に撤去品調査を行った。

## 3. ポリマーがいしの撤去品調査

### 3.1 調査対象

劣化要因を調査するため、実際に設備として使用されていたポリマーがいしを撤去し、未使用品と比較して部位毎に各種調査および検査方法の検討を行った。供試体は撤去品97本、未使用品16本である。なお、調査の都合上、全ての供試体に対して、全項目の調査を実施できなかったため、各節に調査を実施した供試体数を記載している。

### 3.2 外被材の劣化調査

#### 3.2.1 外被材の材質

現在国内で使用されている外被材は、シリコンゴムとエチレン酢酸ビニル共重合体（以下、EVA）ゴムの2種類に集約されているが<sup>3)4)</sup>、撤去品を解体したところ外被材の厚さや硬さはメーカーによって異なっていた。

また、外被材は有機材料であるため、経年により外被材の分子結合が分断される、あるいは充填剤が析出する等により、材料特性が変化することが想定される。実際、外被材が劣化してFRPロッドが露出、あるいは絶縁性能が低下した場合の不具合事象も報告されている。

絶縁性能には撥水性が大きく影響しており、スプレー法による撥水性評価が提案されているが<sup>3)</sup>、撥水性は回復する場合もあるため、撥水性だけでの評価は難しいと考える。そこで、外被材の分子構造や特性を把握するため、赤外分光分析（以下、FT-IR：Fourier Transform Infrared spectrometer）や硬度計による劣化評価ができないか検討した。調査対象の内訳を表3に示す。

表3 供試体の内訳（外被材別）

外被材	撤去品	未使用品
シリコンゴム	41本	6本
EVAゴム	56本	10本

#### 3.2.2 FT-IR を用いた外被材検査

EVAゴムのFT-IR分析による赤外吸収ピーク強度測定を行った結果、充填剤として使用している水酸化アル

ミニウム由来の水酸基 (O-H) の赤外吸収 (波数  $3400\text{cm}^{-1}$  付近) 強度には、大気に曝露される表面と、曝露されない中心部ともに、経年による変化が少ないことが判明した。他方、EVA ゴムに由来するエステル結合 (C=O) は紫外線や局部放電等により寸断されていくことが想定された。そこで、 $3400\text{cm}^{-1}$  付近を基準とした場合の、エステル結合の赤外吸収 ( $1730\text{cm}^{-1}$  付近) における赤外吸収ピーク強度比を算出し、未使用品の値を 100% として評価した。その結果を図 4 に示す。同図に示すように、サンプル数は少ないが、経年とともにピーク強度比が低下している傾向が示唆された。また最も低い強度比となった供試体は、別途行った霧中耐圧試験で閃絡した供試体であった。

他方、シリコンゴムが劣化した場合、従来からシリコンゴムの主鎖 (Si-O) はほとんど変化しないが、側鎖 (Si-CH<sub>3</sub>) の割合は減少することが知られており、側鎖が減少することで撥水性が低下すると言われている<sup>5)</sup>。このため、主鎖の吸収スペクトル ( $1080\text{cm}^{-1}$  付近) と、側鎖の吸収スペクトル ( $1260\text{cm}^{-1}$  付近) の赤外吸収ピーク強度比を求めて外被シリコンゴム劣化の指標とすることが一般的である<sup>3)</sup>。同様の分析を行った結果を図 5 に示す。図中に示すように、サンプル数は少ないが全体的には経年とともに低下する傾向が認められた。

以上より、外被材の FT-IR 分析を行うことで、劣化評価を行うことができる可能性が示唆された。

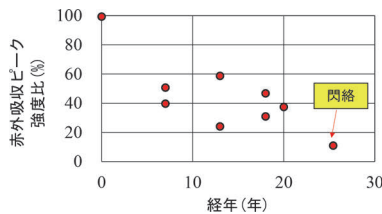


図 4 EVA ゴムの FT-IR 分析結果

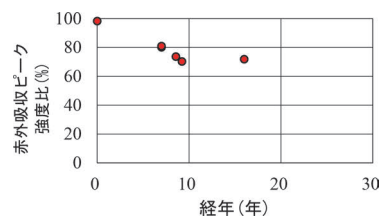


図 5 シリコンゴムの FT-IR 分析結果

### 3.2.3 硬度計を用いた外被材の検査

FT-IR を用いた外被材検査は、現場では行えないため、簡易にできる劣化判定手法があることが望まれる。そこで、一般にゴム材料は経年とともに硬度が変化することから、ゴムプラスチック硬度計 (ミットヨ製 HH-336) を用いた外被材の検査ができないか検討を行った。測定は上部から 3 枚目の笠上の 4 か所で行い、この平均値

を未使用品の同一製品の平均値で割った値を「ゴム硬度変化率」として評価した。その結果、EVA ゴムは初期の硬度が非常に高く、経年による変化が認められなかったが、シリコンゴムは供試体間で差異が認められた。

このため、FT-IR の分析結果と比較した。その結果を図 6 に示す。同図に示すように、FT-IR とゴム硬度変化率には、サンプル数が十分でないこともあり、明確な比例関係は認められなかった。また、ゴム硬度変化率と経年の関係を図 7 に示す。同図に示すように、経年とゴム硬度の変化率に比例関係が示唆されたものの同様に十分なサンプル数とはいえない。以上から、シリコンゴムについては、劣化評価を行うことができる可能性はあると思われるが、さらに継続的な調査が必要と考える。

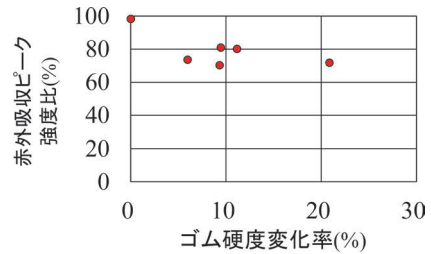


図 6 FT-IR 分析とシリコンゴム硬度変化率

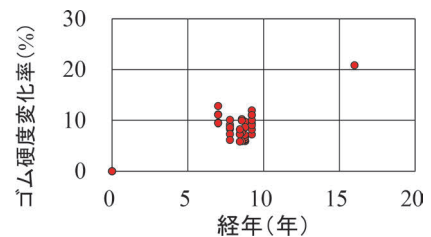


図 7 シリコンゴム硬度変化率と経年

## 3.3 シーリング部の劣化調査

### 3.3.1 シーリング部の構造

ポリマーがいしは複数の部材を組み合わせているため界面が多く存在するが、その中でも、FRP ロッド・外被材・把持金具の 3 つの界面が接近あるいは輻輳する部分である把持金具付近において、水等の異物浸入を防止する構造 (以下、シーリング部) が非常に重要となる。このシーリング部を長期的に維持することが重要であり、この劣化や欠陥から事故に至る例も多く報告されている。

現在、日本国内で電車線用ポリマーがいしとして普及しているメーカ各社のシーリング部を解体して、構造の概要を調査した結果を図 8 に示す。このように各社で構造が異なるが、大きく分けるとシリコンゴムにより気密構造を形成しているもの (以下、A タイプ) と、ポリウレタンにより気密構造を確保しているもの (以下、B タイプ) に大別される。調査対象の内訳を表 4 に示す。

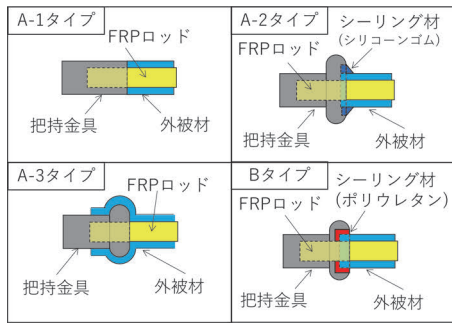


図8 各社のシーリング部の構造概要

表4 供試体の内訳（シーリング部の構造別）

シーリング構造	撤去品	未使用品
A-1タイプ	2本	2本
A-2タイプ	5本	5本
A-3タイプ	32本	2本
Bタイプ	48本	5本

### 3.3.2 密着性検査

撤去したポリマーがいしの内部への水浸入の有無を調査するため、供試体の密着性検査を行った。試験方法は、破壊前に試料のシール部付近に染色液（1wt% アストラゾンエタノール溶液）の塗布を20分間継続した後、切断して、染色液の金具内部への染み込みの有無を目視で評価する方法とした。

密着性検査の結果を図9に示す。図中に示すように、Aタイプでは3本の供試体に水浸入が認められたが、FRP ロッドに達していると認められるものはなかった。また、水浸入が認められた供試体は、すべて15年前後の経年品で把持金具に局部腐食が発生していた。

他方、Bタイプでは大半の供試体に水浸入が確認され、未使用品1本にも水浸入が認められた。加えて、目視でシーリング部に隙間や腐食、損傷があった供試体（Aタイプ：3本、Bタイプ：47本）は、全て内部への水の浸入が認められた。なお、Bタイプの供試体には、外観上の異常がなくても水の浸入が認められたものがあった。

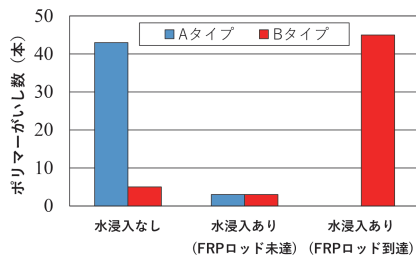


図9 密着性検査結果

## 3.4 接続部の劣化調査

### 3.4.1 接続部の構造

2.2節で示したように、多くの不具合事象では、ポリ

マーがいしのどこかの気密構造が破れたことで、事故に至っていた。長期的に気密構造を維持する上で、非常に重要な要因の1つが把持金具の接続部の構造である。例えば、圧縮力が必要以上に強ければFRP ロッド割れの原因となり、逆に不十分であれば内部への水浸入の原因となる。解体調査の結果、把持金具の接続方法はテーパ構造とかしめを併用した構造（以下、テーパ接続）、もしくはかしめによる接続構造（以下、かしめ接続）のどちらかが採用されていた。表5に把持金具の接続方法と特徴<sup>1)</sup>、調査対象の内訳を表6に示す。

表5 接続部の構造<sup>1)</sup>

構造模式図	特徴
<p>テーパ接続</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>樹脂充填によるクサビ構造。</li> <li>かしめ接続と併用して採用。</li> <li>引張強度を高くできる。</li> <li>引張強度がばらつきやすい。</li> <li>軸方向ずれが生じやすい。</li> <li>使用荷重でもクサビ-金属間に隙間が生じる可能性有。</li> </ul>
<p>かしめ接続</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>製品間の引張強度のばらつきが少ない。</li> <li>軸方向ずれが生じにくい。</li> <li>かしめ（圧縮圧力）を適切に制御できない場合、FRP ロッドに割れが発生する可能性有。</li> </ul>

表6 供試体の内訳（接続部の構造別）

接続方法	撤去品	未使用品
テーパ接続	53本	10本
かしめ接続	41本	4本

### 3.4.2 X線CT装置を用いた接続部の検査

接続部は特性の異なる材料の複合体であるため、本検討では、材料の制約が少ないX線を用いた方式について検討を行った。

X線は波長1pm~10nmの電磁波であり、X線を対象に照射した際の吸収量の違いを利用して、材質や構造を把握することが可能である。しかし、把持金具のような密度が高く厚みのある材料の内部を知るためには、高出力のX線照射を行わないと内部を透過することができない。一方、把持金具を透過できるほど高出力のX線照射では空隙とFRPのわずかな密度差の検出は困難である。そこで、産業用X線CTスキャン装置の非破壊検査への適用可能性を検討した。本検討ではHitachi製産業用X線CT装置HiXCT-9MV（X線源9MV）を使用して把持金具内部の観察を行った。撮影例を図10に示す。図中に示すように、非破壊でポリマーがいしの内部構造の状態を把握することが可能である。

ポリマーがいし両端の把持金具に対してこの観察を行い、空隙が観察された場合には、円周方向の断面積が最大となる空隙を最大空隙断面積として算出した。テーパ接続とかしめ接続それぞれに対する結果を図11に示す。テーパ接続は、すべての供試体で空隙が認められ、

かしめ接続の供試体は一部で比較的小さな空隙が認められた。また、どちらの接続方法とも空隙の断面積と経年にはほとんど相関がなかったため、これらの空隙は製造時から存在していたと考えられる。

空隙は外界と繋がらなければ問題とはならないが、経年などによりシーリング部や外被材に剥離や損傷が生じた場合には、空隙が無い場合と比較して早期にFRP ロッドに水が到達してしまうことが予想される。なお、今回使用したX線CT装置は非常に大型なため、可搬型とすることは現在の技術では不可能である。このため、本検査方法は製品改良の検討や、製品の型式試験や経年品の抜き取り検査に活用することが望ましいと考えられる。

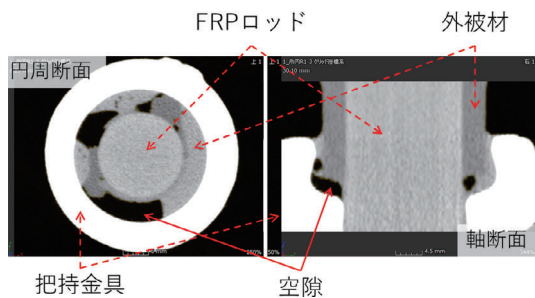


図10 X線CT撮影による撮影例

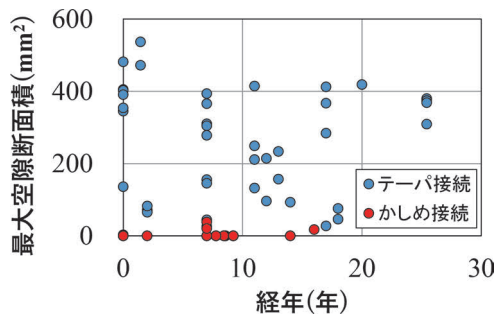


図11 把持金具付近の最大空隙断面積

### 3.4.3 引張破壊荷重

ポリマーがいしの接続部の機械的特性を調査するため、万能試験装置 (SHIMADZU 製 SFL-300kNAGA) を使用して引張破壊荷重を測定した。引張速度は1.0 mm/min として供試体が破断するまで実施し、破断までの間で最大となった引張荷重を引張破壊荷重とした。

図12に、テープ接続の供試体について、引張破壊荷重の測定結果を、別途行った外観検査結果と共に示す。同図に示すように、シーリング部の隙間は経年とともに発生している可能性が示唆されたが、撤去品の中で保証荷重を下回るものではなく、また経年との明確な相関は認められなかった。

破壊形態毎の本数を図13に示す。全52本中、44本がFRP ロッドの破断であった。FRP ロッド破断面には、

脆性破壊の特徴である平滑面を一部に含んだ破断面がみられた。これは、水浸入が影響した可能性がある。

かしめ接続の供試体について、図14に経年と引張破壊荷重の関係を示す。図中に示すように、未使用品の引張破壊荷重 (以下、初期値) にはメーカー毎の違いがあり、撤去品も同様の傾向を示す結果となった。そこで初期値に対する引張破壊荷重の経年変化率を図15に示す。経年とともに引張破壊荷重は低下する相関 ( $R=-0.52$ ) があり、最大で未使用品に対して25%の低下が認められた。また、破壊形態についてはFRP ロッドの破断はなく、把持金具の破壊 ( $N=35$ ) または金具抜け ( $N=6$ ) であった。外観検査で、把持金具に顕著な腐食減肉がある供試体はなかったことから、原因として経年によるかしめ部の圧縮力低下が考えられる。

文献2によれば、金具を取り付けたFRP ロッドに対して静荷重とインパルス荷重を印加して行う加速劣化試験において、引張破壊荷重は50年想定試験で新品時から30~40%程度低下することが報告されている。電鉄設備はその設備特性上、列車通過による振動が常にあり、ポリマーがいしにとって一般に使用される環境より過酷な振動環境であると考えられるため、上記の実験結果より早く引張破壊荷重が低下する可能性がある。

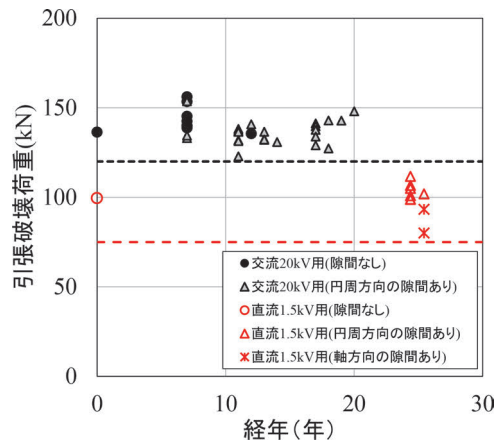


図12 経年と引張破壊荷重 (テープ接続)

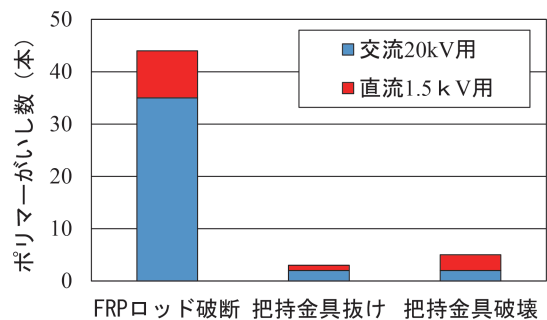


図13 破壊形態毎の本数 (テープ接続)

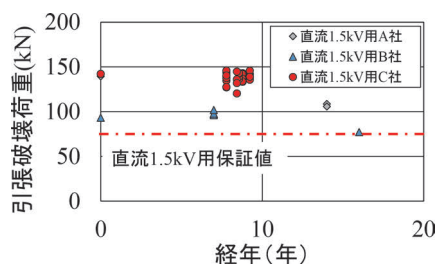


図 14 経年と引張破壊荷重（かしめ接続）

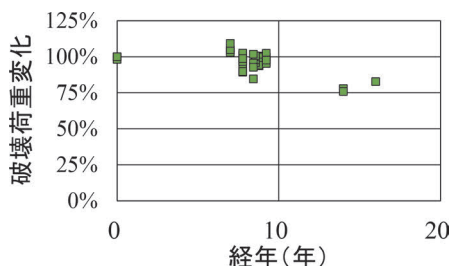


図 15 経年と引張破壊荷重変化率（かしめ接続）

#### 4. 保全管理方法の提案

3章までの各部位の構造と劣化形態の検討結果から、明かり区間におけるポリマーがいしについて、以下の保全管理方法を提案する。

- ・共通する事項として、外観上で気密構造の破れが疑われる傷等の変状があるものについては、速やかに交換する。
- ・外被材はEVA、シリコンゴムとも基本は経年管理でよいが、変状があるものについては、スプレー法による撥水性評価の他、一部を抜き取りFT-IR分析を継続的に実施し、変化を注視する。ゴム硬度による評価については、さらに継続調査が必要と考えられる。
- ・シーリング部は、隙間や損傷が発生した場合に、致命的な不具合に繋がるため、定期的な目視確認が重要となる。
- ・接続部は、経年管理と隙間や損傷の定期的な目視確認を行うことに加えて、製品の型式試験や経年品の抜き取り検査には、X線CTの活用を検討する。

#### 5. まとめ

明かり区間で使用されているポリマーがいしの保全手法を確立するため、鉄道電力設備から撤去したポリマーがいしに対して各種分析を行い、ポリマーがいしの構造と部位毎の劣化形態に着目した保全管理方法を提案した。主な成果を以下にまとめる。

- (1) 過去の不具合事例を調査した結果、多くの事例において、ポリマーがいしのどこかの気密構造が破

れたことで、事故に至るというメカニズムで発生していた。これには外被材、シーリング部、接続部が関係していた。他方、事故に至る過程を、従来の検査のみで発見することは難しいことも示された。

- (2) 外被材について調査した結果、FT-IR分析を行うことで劣化を評価できる可能性が示唆されたものの、十分なサンプル数が得られていないため、今後も継続的に測定していく必要がある。
- (3) シーリング部について調査した結果、内部構造によらず、隙間や損傷があるものは全て内部への水の浸入が認められた。このことから、シーリング部の目視検査が、特に重要になると考えられる。
- (4) 接続部について調査した結果、テープ接続では経年とともにシーリング部に隙間が生じていることがわかった。また、かしめ接続では引張破壊荷重と経年に相関があることがわかった。このことから、両者とも外観検査と経年による管理が重要となると考えられる。
- (5) X線CTによる接続部付近の内部観察を行った結果、テープ接続ではすべての供試体で、かしめ接続の一部の供試体で、空隙が認められた。これらの空隙は、経年劣化ではなく製造時に発生した可能性があるため、製造時の検査方法として、X線CTの活用が望ましいことを提案した。
- (6) 以上を踏まえて、明かり区間におけるポリマーがいしの各部位の検査方法の提案を行った。

#### 謝 辞

本研究における実設備のポリマーがいしの取得にあたり、西日本旅客鉄道株式会社、四国旅客鉄道株式会社、九州旅客鉄道株式会社のご関係の皆様には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

#### 文 献

- 1) 電気協同研究会：架空送電用有機がいしの現状と今後の展望，電気協同研究，No.56，vol.1,2000
- 2) CIGRE WG B2.21: Assessment of Inservice Composite Insulators by Using Diagnostic Tools, CIGRE Technical Brochure, No.545, 2013.
- 3) 電気協同研究会：ポリマーがいし管の設計基準・試験法の標準化，電気協同研究，No.72，Vol.4，2017
- 4) 電気学会調査専門委員会：ポリマーがいし材料表面の放電特性と劣化現象評価，電気学会技術報告，No.1071，2006
- 5) 電気学会調査専門委員会：屋外用ポリマー絶縁材料の表面撥水機能と長期性能，No.1325，2014