

# 汚損による高圧がいし性能低下の評価手法

田中 弘毅\* 重枝 秀紀\* 赤木 雅陽\*  
白木 理倫\*\* 松村 周\*\*

## Evaluation Technique of High Voltage Insulators under Contamination Environments

Hiroki TANAKA Hidenori SHIGEEDA Masataka AKAGI  
Tadanori USUKI Itaru MATSUMURA

The high voltage insulator may be soiled by the humidity in the atmosphere, dust, smoke (especially in industrial regions) and salt pollution in seaside areas; accordingly the surface resistance of the insulator may decrease, and the increase of the leakage current may cause insulation breakdowns. Since an insulation breakdown may have an adverse effect on railway traffic control, it is suitable that the high voltage insulator is hard to be soiled in addition to having high repellence and a form with a long leakage distance. In this study, we aimed to develop a technique for evaluating the performance degradation of polymer insulators whose introduction is commenced in heavy corruption areas. Moreover, an effective preservation inspection method for polymer insulators is proposed through a test result.

キーワード：がいし，絶縁，塩害，ACM センサ，保全

## 1. はじめに

き電回路や高圧配電線路で使用される電車線路用がいし（以下、「高圧がいし」という）は、加圧されたき電線・電車線等の絶縁並びに振止・曲線引装置等の付属設備を電柱・ビーム・腕金等に支持する場合、または可動ブラケットなどの直接支持物と絶縁する目的で使用されている。これら高圧がいしは、大気中の湿度、塵埃、煤煙（特に工場地帯）、臨海地域の塩害などにより表面が汚損され、その表面抵抗が低下し、漏れ電流の増大により絶縁破壊を起こす場合がある。絶縁破壊が発生すると、列車運行に支障を及ぼすことがあるため、高圧がいしはできるだけ表面漏れ距離が長い形状で、かつ高い撥水性を有するとともに汚損しにくい材質のものが適している。

そこで、これらの高圧がいしの性能低下を評価する手法の開発を目的として、近年導入が進みつつあるポリマーがいし（以下、断らない限り外被がシリコンゴムのがいしを指す）の汚損に対する電氣的性能の変化および機械的強度について評価するとともに、評価結果を通してポリマーがいしに対する有効な保全検査方法の提案を行ったので報告する。

## 2. 高圧がいしの概要

### 2.1 高圧がいしの種別<sup>1)</sup>

高圧がいしは、電線の支持・引留に使用される懸垂がいしと、可動ブラケット及び振止・曲線引装置等に使用される長幹がいしに分類される。特殊な用途や、機器の支持として支持がいしが使用される場合もある。また、高圧がいし絶縁部の材質は、磁器製、ガラス製、樹脂製（ポリマー等）がある。日本では磁器製がいしの使用割合が高いが、ポリマーがいしも導入されている。

### 2.2 ポリマーがいし

ポリマーがいしは、軽量かつ高い撥水性を有することから我が国では鉄道の電力設備で使用されている。ポリマーがいし用外被材料にはシリコンゴムやエチレン・酢酸ビニル共重合樹脂（EVA）等がある。

ポリマーがいしは、機械荷重を分担する FRP コアと、この FRP コアを保護し、必要な表面漏れ距離を得るための外被ゴム、および FRP コアが分担する機械荷重を支持物や電線に伝達するための端末金具から構成されている。外被ゴムとして、国内においてはシリコンゴムが主流であるが、EVA も使用されている。

## 3. 現状の高圧がいしの保全検査方法

### 3.1 汚損地域区分の考え方<sup>2)</sup>

高圧がいしの汚損対策は、事故実績に基づく考え方

\* 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

特集：電力技術

と、等価塩分付着密度（以下、ESDD：equivalent salt deposit density と記す）から設定する考え方がある。多くの電力会社では、後者に基づき表1に示すような耐塩対策地域を設定している。

JR各社における汚損地域区分の考え方は、電力会社の実測例に準じるものが多いようである。耐塩設計を行う場合の想定汚損量は、当該地区におけるESDDの最大値をとっている例が多い。

表1 標準汚損区分<sup>3)</sup>

区分	等価塩分付着密度 (mg/cm <sup>2</sup> ) ※	備考
一般地区	—	塩の影響がほとんどなく、塵埃汚損が主で塩害対策を特に必要としない地区で、ESDD 0.01 mg/cm <sup>2</sup> を目安とする。
塩害地区	軽汚損	0.03 以下
	中汚損	0.03 超過 ～ 0.06 以下
	重汚損	0.06 超過 ～ 0.12 以下
	超重汚損	0.12 超過 ～ 0.35 以下
	特殊地区	0.35 超過

※等価塩分付着密度は、長幹がいしに付着した値を基準とする。

#### 4. 高圧がいしの性能低下診断手法

高圧がいしは、同一線区内で一斉に取替されるのが一般的である。これより、取替範囲が広範囲の場合は、高圧がいしの劣化状態に差異があっても同時期に取替られるため、コスト増になる場合がある。そこで、高圧がいしの取替範囲を細分化し、高圧がいし劣化に影響を与える汚損環境を適正化し、個々の高圧がいし劣化の検知が望まれている。

文献4) から抜粋した高圧がいしの劣化診断手法を表2に示す。これらの方法は、活線状態で診断することを考慮すると、適用に制約が多い。また、ある程度劣化が進展しないと劣化検出が困難であることや、良否判定のしきい値が環境因子に左右されるなどの技術的な課題があり、確実な劣化診断方法は確立されていない。

##### 4.1 高圧がいしの電気的特性試験

表2に示す高圧がいしの劣化診断手法において、漏れ電流測定は高圧がいしの絶縁性能を直接測定できるという特徴がある。そこで、AC20kV用ポリマーがいし、DC1.5kV用の磁器およびポリマーがいしを供試品とし、勝木塩害実験所（新潟県村上市）で課電暴露試験を実施した。

表2 高圧がいしの劣化診断方法<sup>4)</sup>

劣化診断方法	目的	特徴	問題点
漏れ電流測定	漏れ電流による絶縁性能の調査	絶縁性能が直接的に測定できる	汚損湿潤に影響される
目視による観察	外被のエロージョン及びトラッキングなどの異常有無調査	容易に観測可能	異常識別の経験が必要
赤外線カメラ	放電などによる発熱異常箇所の調査	容易に測定でき、地上から計測記録可能	日射による温度上昇の影響有り
紫外線カメラ	放射光による異常箇所の調査	容易に測定でき、地上から計測記録可能	日中の紫外線による影響有り
撥水性調査	外被表面の撥水性低下状態の調査	容易に観測可能	汚損や凹凸の影響がある
がいし抵抗測定	がいしの異常抵抗有無による診断	メガー計測のほか漏れ電流との関係から調査可能	汚損湿潤に影響される
放電音測定	異常な部分放電音の調査	マイクなどの計測装置設置が容易	がいし以外の放電音も計測される

#### 4.2 課電暴露試験

##### 4.2.1 試験条件

勝木塩害実験所において、2年3ヶ月間にわたり20kV用ポリマーがいしをAC20kVで、DC1.5kV用ポリマーがいしをDC1.5kVでそれぞれ課電暴露し、漏れ電流を測定した。暴露した供試品を表3、表4、測定状況を図1にそれぞれ示す。

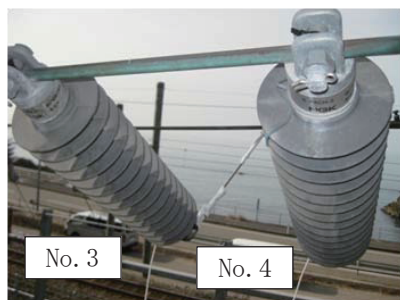
AC20kV用では健全品との比較対象として、3種類の高圧がいしを準備した。表3のNo.2の「傷有」は、ポリマーがいしの外被が柔らかいため取扱いにおいて外被に傷がついた場合（鳥に啄ばまれるといった報告もある）を想定した。また「粗研磨」は、ポリマーがいしの撥水性が紫外光の影響により劣化するという報告があったため、撥水性が低下した場合を想定した。「漏れ経路有」は、錆汁等によりがいし表面に漏れ経路が構築された場合の影響を検証するため、ポリマーがいしの上端・下端に導通経路を模擬した銅線を付加した。また表4に示すDC1.5kV用がいし試験は、トンネル等雨洗効果が期待できない箇所と明かり区間を想定して、屋根有および屋根なし条件を準備した。

表3 漏れ電流試験供試品 (AC20kV 架台)

No.	項目	詳細
1	健全	健全品
2	傷有	ひだ1枚に20mm程度の傷を人工的に付加
3	粗研磨	表面をサンドペーパーで研磨
4	漏れ経路有	漏れ経路（銅線）を人工的に布設

表4 漏れ電流試験供試品 (DC1.5kV 架台)

No.	課電 電圧	項目	屋根
1	DC 1.5 kV	懸垂がいし (磁器) 2 個連	無
2		長幹がいし (磁器)	無
3		懸垂がいし (ポリマー) 2 個連相当	無
4		長幹がいし (ポリマー)	無
5		懸垂がいし (磁器) 2 個連	有
6		懸垂がいし (ポリマー) 2 個連相当	有



(a) AC20kV課電暴露架台



(b) DC1.5kV課電暴露架台 (屋根有)

図1 測定状況

#### 4.2.2 測定結果

AC20kV用がいしの漏れ電流測定結果を図2、DC1.5kV用がいしの漏れ電流の測定結果を図3にそれぞれ示す。

図2から「傷有」のポリマーがいしは、20mm程度の傷であっても健全品と比較して漏れ電流が大きくなる傾向があることから、ポリマーがいしの外被の傷等取扱いには十分注意が必要である。

また、「粗研磨」のポリマーがいしの漏れ電流は健全品と同程度であった。これは、表面は研磨したが外被のアメーバ作用 (外被に汚損物が付着した場合、内部のシリコンが滲み出し汚損物を包み込む作用) により暴露期間内では高い撥水性を有したためと思われる。

さらに、「漏れ経路有」のポリマーがいしでは、一旦漏れ経路が構築されると、同一の気象条件においても漏れ電流が他の3つの高圧がいしと比較して大きくなることを確認できた。

雨洗効果が得られる屋根なし DC1.5kV 課電暴露試験では (図3)、撥水性の高いポリマーがいしの漏れ電流が磁器がいしに比べて小さいことを確認した。また、雨

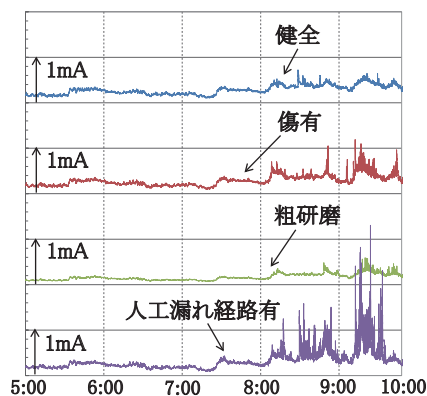


図2 ポリマーがいし漏れ電流

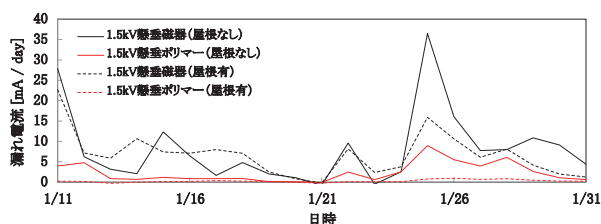


図3 高圧がいし漏れ電流 (2012年1月)

洗効果があまり期待できない屋根有架台においても、ポリマーがいしの漏れ電流の方が磁器がいしより小さかった。

#### 4.3 磁器がいしとポリマーがいしのESDD

勝木塩害実験所において2年3ヵ月暴露したDC1.5kV用懸垂がいしに対して、磁器がいし2個連の上段・下段およびポリマーがいしは全面を測定対象として筆洗いでESDDを測定した。図4に測定結果を示す。

磁器がいし、ポリマーがいしともに屋根なし架台と比較して、屋根有り架台のESDDが大きかった。また、磁器がいしと比較して、ポリマーがいしのESDDが大きかった。特に屋根有りのポリマーがいしは顕著にESDDが大きかった。これは、ポリマーがいしは高い撥水性を特徴とするが、雨洗効果が期待されないトンネル等では、汚損物が付着しやすいことを示す。

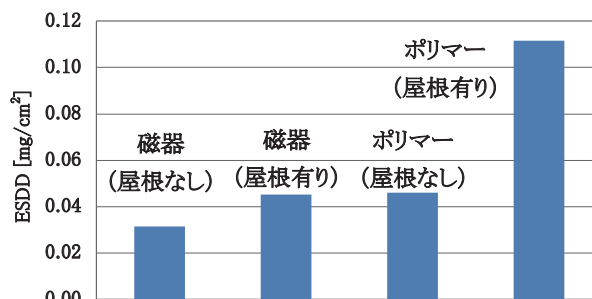


図4 暴露試験撤去後の高圧がいし等価塩分付着密度

#### 5. 新たな保安全管理手法の提案

高圧がいしの絶縁性能は、当該の高圧がいしまたは仮設したパイロットがいしの漏れ電流測定で確認すること

特集：電力技術

ができるが、測定対象線区すべてに測定装置を仮設することは現実的ではない。

そこで本章では、センシング技術を活用し、漏れ電流の間接的な測定に基づく保安全管理手法について検討した。センサとして、大気中の腐食進行の計測に使用されている ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) センサを適用し、高圧がいしの漏れ電流とセンサ出力の相関関係から妥当性を評価する。

5.1 ACM センサの活用

5.1.1 ACM センサ概要

ACM センサの原理は図 5 に示すように互いに絶縁された二つの異種金属 (Fe-Ag または Zn-Ag) と電流計で構成されており、実際のセンサは図 6 の構造となっている。

Fe-Ag タイプの場合、電位列が卑な金属として Fe (炭素鋼) を基板とし、BN (窒化ホウ素) を添加したエポキシ樹脂製の絶縁ペーストをスリット形状で基板に塗布し、その上に貴な金属として銀入り導電ペーストを積層している。Zn-Ag タイプの場合は炭素鋼の代わりに亜鉛板を用いる。絶縁ペーストのスリット部には炭素鋼または Zn 表面が露出するため、海塩粒子 (NaCl や MgCl<sub>2</sub> など) や大気含有成分 (SO<sub>2</sub> など) が直接あるいは水溶液の状態では付着する。これによって、炭素鋼上で式 (1) の腐食反応が促進され、Fe 原子から電子が水膜中に溶出する。Ag 上では式 (2) の反応が生じる。



この反応によって授受される電子が炭素鋼と Ag とを短絡したリード線に流れる電流として測定され、ACM センサの出力となる。電流の累積値は (1) 式と (2) 式の反応で生じた電子の累積値であり、暴露環境下の炭素鋼

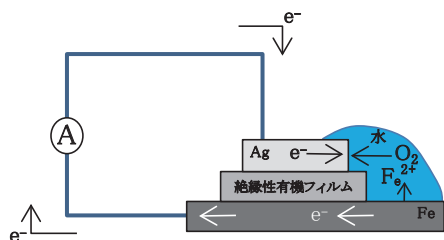


図 5 ACM センサの原理

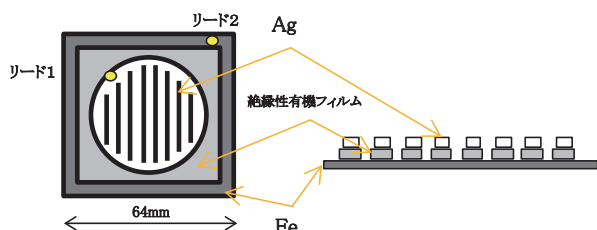


図 6 ACM センサの構造

基板の腐食量を示している。センサの取替周期について、Fe-Ag タイプは 1～2 ヶ月程度、Zn-Ag タイプは 6～12 ヶ月程度が推奨されている。

さらに、ACM センサ出力から 12 時間毎の塩分付着量を推定できる。センサ出力から ESDD への換算は、10 分サンプリングの ACM センサの腐食電流値と測定箇所相対湿度から、表面に付着した塩の質量を割り出す較正曲線に基づき換算する<sup>5)</sup>。

5.1.2 ACM センサと高圧がいし漏れ電流の相関関係

勝木塩害実験所の DC 架台、屋根有り架台、AC20kV 架台に Fe-Ag タイプおよび Zn-Ag タイプをそれぞれ 1 つずつ計 6 個取付け、1 年 2 ヶ月暴露した。平成 22 年 11 月の AC20kV 架台のポリマーがいし漏れ電流と ACM センサ (Fe-Ag タイプ) 出力および湿度を図 7 に示す。湿度に応じて高圧がいしの漏れ電流が変動し、ACM センサ出力も同様に変動することが確認できる。

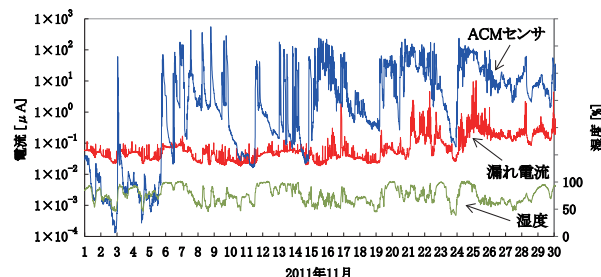


図 7 ACM センサ出力とがいし漏れ電流の相関関係<sup>6)</sup>

5.2 ACM センサによる ESDD の推定

5.2.1 ACM センサとがいし漏れ電流の相関関係

平成 24 年 3 月の勝木塩害実験所 ACM センサ出力から換算した ESDD 換算値と AC20kV ポリマーがいし漏れ電流を図 8 に示す。がいし漏れ電流は 3 月 23 日午後および 28 日午前に大となっており、両日に観測された降雨の影響が考えられる。ACM センサ出力から換算した ESDD は、同期間において大凡 0.0～0.5mg/cm<sup>2</sup> の範囲内で変動している。筆洗い法による勝木塩害実験所の ESDD 測定値は 0.272～0.311mg/cm<sup>2</sup><sup>7)</sup> の範囲であり、ACM センサ出力換算値と近い。以上により、ACM センサを用いて連続的に ESDD を監視可能であることがわかる。

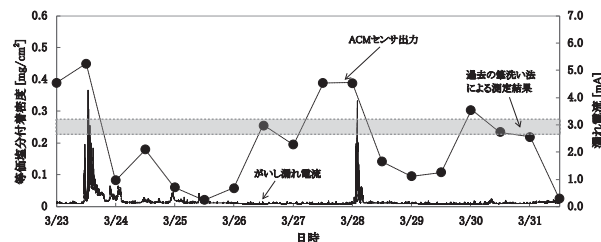


図 8 塩分量と漏れ電流 (2012 年 3 月)

5.2.2 異なる地域での汚損環境測定

ACM センサを用いて異なる汚損環境を測定した。測定場所は、気動車の煤煙が多いトンネルの入り口および

中央部、塩害箇所および降灰箇所を選定した。

(1) トンネルの汚損環境

一般的に明かり区間に比べてトンネル区間の汚損度が大きいことが知られているが、定量的に評価した例は少ない。そこで、気動車の排気による汚損が懸念されるトンネルの入口および中央に ACM センサを設置し 4 ヶ月間データ収集した。なお、ACM センサは煤煙等を直接評価するものではなく、トンネル内の汚損環境を対象とし評価するものである。

図 9 に示す測定結果は、トンネル入口付近の方が中央よりも ESDD 換算値が大きいことから、このトンネルでは外気による汚損度への影響が大きいと推測できる。

(2) 塩害および降灰地区の汚損環境

塩害および沿岸に位置する降灰地区に一ヶ月程度 ACM センサを設置した結果を図 10 に示す。塩害地区の ESDD 換算値の最大値は  $0.14\text{mg}/\text{cm}^2$ 、沿岸に位置する降灰地区は  $0.39\text{mg}/\text{cm}^2$  であった。

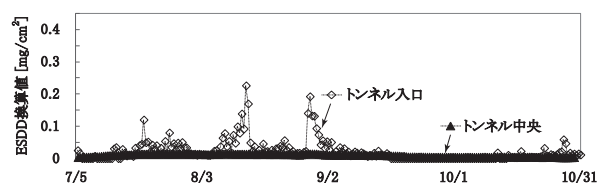


図 9 トンネル各部の ESDD 換算値 (2012 年)

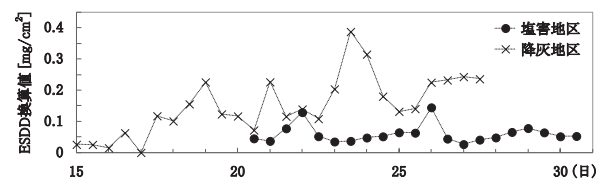


図 10 塩害地区および降灰地区の ESDD 換算値 (2012 年 11 月)

5.2.3 センサ活用による高圧がいし取替範囲適正化

一般的に、電車線路における汚損対策はトンネル内および塩害地区を区別せず、線区毎に一律とする例が多い。また、同一線区内の点検・清掃等の周期は、雨洗効果の有無や塵埃等の影響を考慮して決められている。一方、高圧がいし取替は経年によって線区単位で一斉に行われることが多い (図 11)。

近年、高経年を迎える高圧がいしが増加傾向にあり、既設の高圧がいしの継続保守による延命化を進めるべきか、あるいは更新すべきかを判断する必要がある。更新する場合であっても、適切な取替指標があれば、優先順位を付けた部分取替が可能となり、コスト削減が期待できる。

前節までの検討に示すように、ACM センサを使用することにより地域毎の塩分付着量を連続的かつ定量的に把握することが可能である。同センサは高圧課電が不要であり、取付けおよび操作も容易である。そこで、区間毎に ACM センサを 1~2 ヶ月程度仮設して ESDD 換算値を測

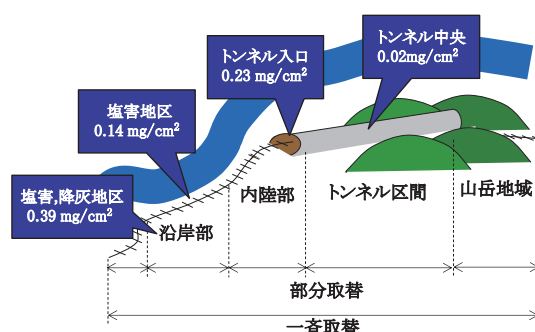


図 11 高圧がいしの取替例

定し、表 1 の標準汚損区分と照合することで、区間毎の部分取替または清掃周期の指標を得ることが可能となる。

例えば、超重塩害地区である勝木塩害実験所の ESDD 最大値は  $0.65\text{mg}/\text{cm}^2$  程度であったように、測定した ACM センサからの ESDD 換算値が一般地区と塩害地区の境界である  $0.03\text{mg}/\text{cm}^2$  を超過した区間を優先して高圧がいし取替工事を施工することで、高圧がいしの絶縁性能を保ちながら、取替範囲の適正化を図ることができる。

一方、ACM センサを要注意箇所を設置して、当該箇所の汚損環境を連続的に測定する使用方法も考えられる。勝木塩害実験所における塩分量と ACM センサ出力換算値の関係 (図 8) から、高圧がいし漏れ電流の変動に応じて ACM センサ出力が大となっている。この特性により ACM センサ出力をリモート監視することで、高圧がいし漏れ電流の推移を把握できる。さらには、センサ出力から得られる ESDD 換算値を閾値とした汚損区分の見直しおよび取替・清掃周期の策定に繋がる指標を得ることもできる。

6. 高圧がいしの機械的強度試験

ポリマーがいしの引留箇所への導入初期 (2000 年頃) においては、引張荷重および曲げ荷重により破断といった事象も報告されている。そこで、勝木塩害実験所において、AC20kV、DC1.5kV および DC3.0kV で 2 年 3 ヶ月間課電暴露した磁器がいし、ポリマーがいしおよび 5~15 年間実使用された撤去品に対して懸垂がいしは引張試験、長幹がいしは曲げ試験を実施し、機械的強度を確認した。

なお、撤去品のポリマーがいしは EVA 製であり、勝木塩害実験所暴露品はシリコン製である。

6.1 懸垂がいしの引張耐荷重試験

JIS がいし試験方法<sup>1)</sup>に則り、供試品の懸垂がいし上下金具間に軸心方向に荷重が加わるよう、荷重試験装置に取り付けた。磁器懸垂がいしの規定荷重値 (75kN) の約 75% まで荷重を適宜に増加させ、以後は徐々に増加させて、高圧がいし損傷に至る過程の最大引張荷重値に達した値を記録した。同時に、供試品の各部の異常の有無を調査した。

特集：電力技術

6.2 長幹がいしの曲げ耐荷重試験

ラインポストがいしの場合、供試品片端を鉄製の台にボルトで固定し、これに供試品の軸心と直角の方向に荷重を加えて曲げ耐荷重を測定する<sup>1)</sup>。本試験では、試験機構造の制約のため、長幹がいし両端を固定し、高圧がいし中央部に上方から荷重をかけた。磁器長幹がいしの規定荷重値（AC20kV用 2.3kN、DC1.5kV用 3.2kN）の約75%まで荷重を適宜に増加させ、以後は徐々に増加させ、高圧がいし損傷に至る過程の最大曲げ荷重値に達する値を記録した。同時に、供試品の各部の異常の有無を調査した。

6.3 試験結果

表5に示す引張耐荷重試験の結果、最長15年実使用したAC20kV用懸垂ポリマーがいし（12本）は、磁器がいしの強度規定値に対して1.8倍以上と実用上十分な強度を確認した。同様に、2年3ヵ月経年のDC1.5kV用ポリマーがいし（7本）は残存強度が規定値の1.7倍以上、同磁器がいしは1.3倍以上であった。

表6に示す曲げ耐荷重試験の結果、2年3ヵ月暴露課電したAC20kV用長幹がいし（5本）は、未使用品と比較して若干の強度低下が確認されるものの、磁器がいしの強度規定値に対して6.0倍以上の曲げ強度を保っていた。

同様に、DC1.5kV用長幹がいし（5本）も2年3ヵ月暴露課電による強度低下はほとんど認められなかった。

表5 引張耐荷重試験結果

用途	材質	本数	布設場所	経年	対基準値
AC 20kV	ポリマー	12	トンネル内	5～15年	1.8倍以上
DC 1.5kV	磁器	3	塩害実験所	2年3ヵ月	1.3倍以上
	ポリマー	4			1.7倍以上

表6 曲げ耐荷重試験の結果

用途	材質	暴露期間	対基準値
AC 20kV	磁器	2年3ヵ月	約6倍
	ポリマー		約18倍
DC 1.5kV	磁器	2年3ヵ月	約6倍
	ポリマー		約17倍

7. まとめ

き電回路や高圧配電線路で使用される高圧がいしの性能劣化評価手法を開発する目的で、重汚損地区においてポリマーがいしの課電暴露試験により、汚損に対する電気的性能の変化および機械的強度について評価した。また、試験結果を通してポリマーがいしに対する有効な保全検査手法を提案した。

以下に得られた結論を要約する。

- (1) 現在ポリマーがいしの保全に関する明確な指標はないため、現行の磁器がいしに準じた検査を実施しており、巡視による目視点検が主である。また、検査周期に関連するJR各社の汚損地域区分は、電力会社の実測結果に基づくものが多い。
- (2) 鉄道総研の勝木塩害実験所において、課電暴露試験を実施して磁器がいしとポリマーがいしの電気的特性を比較した。その結果、磁器がいしと比較してポリマーがいしの漏れ電流は極めて小さいこと、屋根が有る等雨洗効果が期待されない箇所では汚損しやすいこと、さらに外被表面に傷等があると漏れ電流が増大すること、一旦漏れ経路が構築されると、同一の気象条件においても漏れ電流が増加することを確認した。
- (3) 金属腐食を原理とするACMセンサ出力とポリマーがいしの漏れ電流測定値を比較した結果、汚損環境に応じて変動する漏れ電流と同様にセンサ出力が変動することを確認した。さらに環境が異なる各所でのACMセンサ仮設測定結果から、同センサによる汚損区分の定量化を実現し、高圧がいし取替範囲および清掃周期等の指標を得ることが可能であることを示した。
- (4) 勝木塩害実験所で2年半課電暴露した磁器がいしとポリマーがいし（AC20kV、DC1.5kV）の機械的強度試験の結果、若干の強度低下は確認されたが実用上問題となる値ではなかった。また、経年15年のポリマー懸垂がいし（EVA）も実用上十分な引張耐強度を有していた。

文献

- 1) 日本工業規格，“がいし試験方法 - 第1部：架空線路用がいし,” JIS C 3801-1, 1999
- 2) 社団法人電気協同研究会，“配電設備の耐塩性向上対策,” 電気協同研究, Vol51, No.3, pp.48-62, 1996
- 3) 社団法人電気協同研究会，“変電設備の耐塩設計,” 電気協同研究, Vol35, No.3, pp.77-81, 1979
- 4) 社団法人電気協同研究会，“架空送電用有機がいしの現状と今後の展望,” Vol56, No.1, pp.58-60, 2000
- 5) (独)物質・材料研究機構；アーク溶接・レーザー溶接“近未来の鉄鋼材料を知る”, No.6, 2004
- 6) 田中, 重枝, 赤木, 白木, 松村：ACMセンサを用いた高圧がいし性能劣化評価に関する一検討, 平成24年電気学会研究会, TER-12-70, pp.39-42, 2012
- 7) 安喰, 持永, 田中, 藤村, 鈴木：電線路フッ素樹脂塗膜がいしの課電暴露試験（その2）, 平成8年電気学会全国大会, No.1252, 1996