

架空送電線用複合がいしの開発（その2）

Development of Composite Insulators for Overhead Lines (Part 2)

小林 哲* 松崎 豊* 新子谷悦宏*² 木股隆三*
Satoshi Kobayashi Yutaka Matsuzaki Yoshihiro Arashitani Ryuzo Kimata

概要 当社の複合がいしはシリコンゴム外被を端末金具部までかぶせて一体成形することによる水密構造を特徴としている。沖縄において1995年から実規模がいしで77 kV課電ばく露試験を5年間実施したが劣化は見られておらず、また実規模がいしでIEC61109 Annex Cに準拠した加速劣化試験を行っても劣化は見られないことから十分な信頼性があることがわかった。更に複合がいしの使用寿命推定として漏れ電流をパラメータにして課電ばく露試験と加速劣化試験により評価すると、沖縄のように厳しい海塩汚損環境下でがいし表面にわずかな劣化が生じる年数として34年以上との結果が得られ、実用上十分な耐用年数であることを確認した。

1. はじめに

架空送電線に使われるがいし材料として、これまで磁器及びガラスが用いられてきた。それらは絶縁特性が良く、耐候性も優れているが、質量が重い、耐衝撃性（割れ）が悪い、汚損時の耐電圧特性が大きく低下するなどの欠点があった。この欠点を克服するため、外被に耐候性と汚損耐電圧特性の優れたシリコンゴムを用い、張力を分担する芯材にFRP（glass fiber reinforce plastics）を使った複合構造のがいしが考案され適用されるようになってきた。一方国内においては、相間スパーサなどの特殊な用途や研究目的の試験使用を除いてはいまだ一般的には使用されていない。しかし海外での普及の拡大や低コスト化を求める社会情勢から、近年では複合がいしの関心が高まっており、電協研では調査委員会が設置され専門的な調査が実施された。その報告書¹⁾によると海外では複合がいしによるコストメリットが認識され、使用に抵抗はないものの、一方では複合がいしの使用寿命を推定する方法が確立していないとの指摘がある。

当社の複合がいしは、端末部水密構造を特徴として開発当初から電氣的、機械的信頼性を向上させるように研究を重ねてきた。Part 1では架空送電線用複合がいしの開発経緯及び性能試験結果について報告したが²⁾、本報では複合がいしの長期信頼性について検討を行ったので報告する。

2. 複合がいしの構造

複合がいしは芯材・端末金具・外被ゴムから構成されている。芯材には、機械的強度（張力）を分担させるFRPが使用される。端末金具は、張力を電線から鉄塔に伝達させる部分で

鍛造鋼、可鍛鋳鉄、アルミ合金等が使用される。外被ゴムは、電氣的絶縁特性及び耐候性に優れたシリコンゴムを使用している。特に外被材としてのシリコンゴムは引き裂き強度の強いものを用い、工事上やその他の障害でも切れにくいように考慮している。端末金具とFRPは圧縮接続されている。端末金具の先端は電界が集中しコロナ放電が起きやすいため、電界計算により電界が緩和するよう最適に設計されている。シリコンゴム外被は端末金具をFRPに圧縮した後に端末金具の上までかぶせて一体成形される。この方法により端末金具とゴム間の接着長さを十分とれるので、端末金具部からFRP界面への水分侵入を防ぐ水密構造となる。複合がいしの構造例を図1に示す。

3. 複合がいしの長期信頼性

架空送電線用複合がいしは過酷な自然環境下で常時引張荷重と電気ストレスを受けながら使用される特徴がある。このため機械的特性として長期にわたって端末金具とFRP間のスリップがなく、しっかりと結合していることが必要である。電氣的には汚損湿潤時に生じるドライバンド局部アークやコロナ放電などによって侵食される有機材特有の問題に耐えることが必要である。

3.1 複合がいしの劣化現象

複合がいしの劣化は、電氣的、機械的及び複合的なものに分

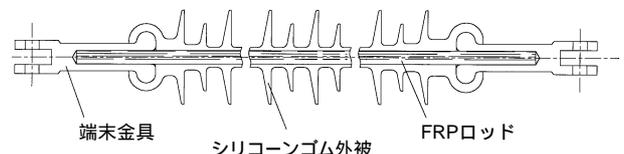


図1 複合がいし構造
Structure of composite insulator

* 裸線事業部 技術部

*² Furukawa Electric Institute of Technology

類される。

電気的にはトラッキング、エロージョン、かさのパンク、クラックなどがあり、機械的には長時間引張強度低下現象や繰返し曲げやねじりによる強度低下現象がある。

また複合的なものとしてぜい性破壊 (brittle fracture) があり、これは芯材であるFRPのガラス繊維が、酸に侵食され比較的小さい応力で破断する現象である。ぜい性破壊は端末金具部とシリコンゴム外被との界面のはく離等により水分がFRPまで侵入し、そこでのコロナや部分放電によって生成される硝酸などが原因で発生すると考えられている。この点当社の複合がいしは水密機構であるため、脆性破壊に対して信頼性が高い構造となっている。

3.2 複合がいしの信頼性評価方法

現在、複合がいしの外被劣化現象について、多くの機関で研究されている。国際規格ではIEC61109 Annex Cに環境ストレスによる加速劣化試験方法が規定されており、外被材料単体の試験方法としてIEC60587, IEC61302などがある。

長期的な外被劣化は環境ストレスにより変わるため複合がいしの信頼性を判断する方法としては、その使用環境で長期間ばく露するのが最適であるが、結果を得るまでに多くの時間を費やすことになる。そのため、劣化に影響する環境ストレスを凝縮し加速することにより評価することになる。外被材料の主流であるシリコンゴムは、優れた耐候性とともにはっ水性による高い汚損耐電圧特性に特徴があり、更に、いったんはっ水性が低下しても回復する特性があるので評価を難しくさせている。

このため使用環境と比較しながら加速試験を実施するのが妥当であり、この考えに基づき当社では以下に示す沖縄課電ばく露と加速劣化試験を実施して複合がいしの信頼性を評価した。

4. 信頼性評価試験

4.1 漏れ電流計測方法

機械的に適切に設計されたシリコンゴムを外被とする複合がいしが屋外で 사용되는場合に一般的に起こる劣化は、汚損環境で表面に漏れ電流が流れて熱的及び電気化学的な要因によって生じるエロージョンである。エロージョンが進展するとシリコンゴム外被が侵食されFRPが露出し、絶縁破壊やぜい性破壊に至る可能性がある。このエロージョン劣化特性を評価するパラメータの一つとして乾燥帯局部アーク放電時の漏れ電流が適切であると考えられる。

図2に実際のがいし漏れ電流波形を示す。長期信頼性試験で

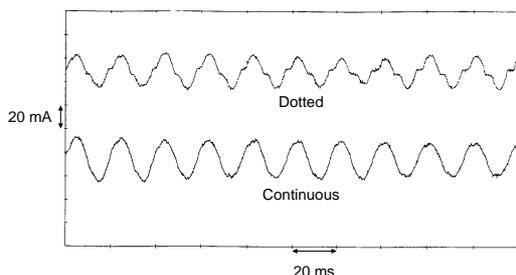


図2 複合がいしの漏れ電流計測波形
Leakage current shape at composite insulator

エロージョン劣化を的確に判断するため、乾燥帯局部アーク放電によって生じる漏れ電流を波形の特徴から以下の方法で分類し、間欠電流と定義して外被のエロージョン劣化に与える影響の少ない抵抗性成分電流である連続電流と区別した³⁾。

(1) 連続電流の定義 (抵抗性成分電流)

正弦波電流が1周期以上継続し、かつ、ゼロクロス部のしきい値未満の継続時間が3 msec以下となる電流 (図3)

(2) 間欠電流の定義 (乾燥帯局部アーク性電流)

しきい値以上の電流が1 msec以上継続し、ゼロクロス部のしきい値未満の継続時間が3 msec以上となる電流 (図4)

4.2 沖縄課電ばく露試験⁴⁾⁻⁶⁾

高温で海塩汚損が厳しく台風の接近が比較的多い沖縄県で海岸から約300 mの地点に、1995年から対地77 kVを課電できるばく露場を設け、複合がいしの汚損特性、劣化特性などについて継続して観測を行っている。

(1) 供試がいし

耐汚損設計要素として重要なパラメータである単位課電ストレス (V/mm) による影響を調べるため、同一構造で表面漏れ距離 (長さ) の異なるシリコンゴム複合がいしを使用した。また比較用として磁器がいしも試験をしている。供試複合がいしの諸元を表1に示す。

(2) 測定項目

本ばく露試験場では以下の項目について測定している。

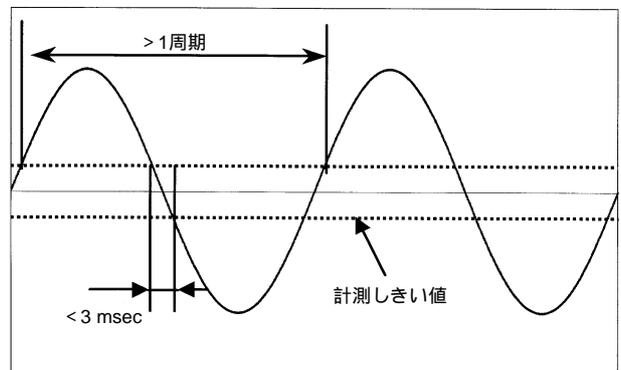


図3 連続電流の定義
Definition of continuous current

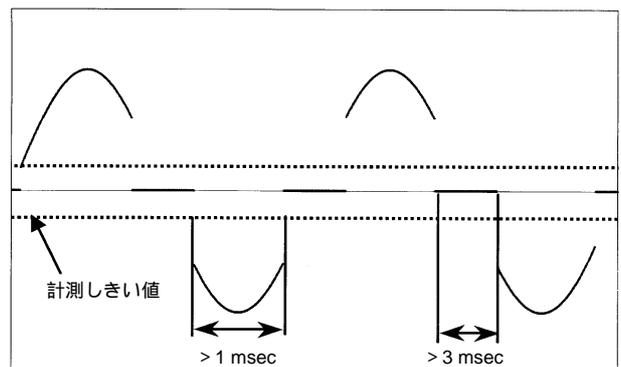


図4 間欠電流の定義
Definition of dotted current

表1 沖縄課電ばく露がいし諸元
Characteristics of test insulator at Okinawa

供試試料	全長	有効長	笠枚数	課電ストレス
A	1359 mm	1107 mm	31枚	24.2 V/mm
B	1488 mm	1237 mm	35枚	21.5 V/mm
C	1618 mm	1367 mm	39枚	19.4 V/mm
D	1813 mm	1560 mm	45枚	16.9 V/mm

- ・外観目視観察 (定期測定)
- ・塩分付着密度 (定期測定及び台風通過後測定)
- ・はっ水性 (定期測定)
- ・漏れ電流 (連続測定)
- ・複合がいし外被材の機器分析 (定期測定)
- ・気象観測 (気温・湿度・風向・風速・雨量)

(3) 観測結果

(a) 外観目視観察

海塩汚損の厳しい本ばく露場で5年間試験を行ったが、目視で観察できる複合がいしのエロージョンやトラッキング劣化などの兆候は全く見られず良好な特性を示した。

(b) 等価塩分付着密度

等価塩分付着密度の測定は200 mlの純水を用い、水を無じんワイパ(ベンコット)に含ませて複合がいし表面をふき取る方法で行った。

図5に、4年間にわたって1ヶ月間隔で測定された複合がいしの等価塩分付着密度(ESDD)の累積百分率を示す。図5より50%値は0.015 mg/cm²とさほど大きな値ではなかったが、台風通過の影響で最大値は0.30 mg/cm²とかなり大きな値であった。これより本試験場は台風の異常気象時には時として激しい汚損に見舞われることがある地域であることがわかる。

図6には複合がいしの汚損たい積傾向を調査した結果を示す。図6より1ヶ月、3ヶ月、6ヶ月間隔及び32ヶ月ばく露品で等価塩分付着密度(ESDD)の値は飽和傾向が見られる。これよりシリコンゴム外被表面に汚損が累積することは無いということがわかる。

複合がいしに付着した汚損物について、溶解性イオン成分をイオンクロマトグラフィ(IC)及び誘導結合高周波プラズマ発光分光法(ICP-AEM)により分析した結果を表2に示す。

表2よりNa⁺、Cl⁻の付着が多く、汚損源は海塩の影響が大きいことがわかる。

(c) はっ水性

はっ水性は毎年同じがいしのかさ表面から5 mm角のサンプルを切り出し、4 µlの蒸留水を滴下後1分の接触角を静止接触角とし、その後8 µlの蒸留水を加え、8 µl吸引後1分後の接触角を後退接触角として接触角計により測定した。

表3に供試がいしのはっ水性として外被表面の水滴の接触角を調べた結果を示す。すべての供試試料で静止接触角は初期のはっ水性より高い値を示していた。一方、後退接触角は初期値より高いものもあるが、供試試料によっては

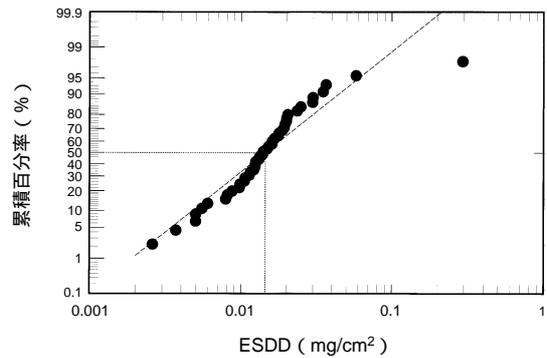


図5 複合がいしの等価塩分付着(ESDD)特性 (n = 44)
Characteristic of ESDD at composite insulator

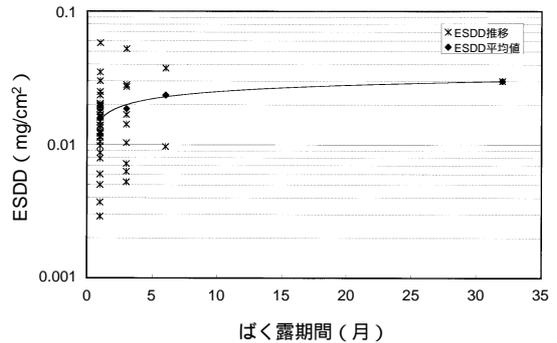


図6 ばく露期間に対する等価塩分付着密度
Trend of ESDD over exposure period

表2 イオン性付着量 (µg/cm²)
Deposit density of ion ingredients

分析イオン種	Na ⁺	K ⁺	Ca ³⁺	Mg ²⁺
付着量	26.8	1.3	3.4	1.4
分析イオン種	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺
付着量	29.0	6.3	11.6	0.1以下

表3 表面はっ水性
Characteristics of surface hydrophobicity

供試試料	静止接触角 (度)			後退接触角 (度)		
	97年	98年	99年	97年	98年	99年
A	128.0	130.4	132.9	103.8	94.9	97.8
B	112.3	123.1	114.7	79.1	88.1	74.0
C	121.1	130.8	136.8	88.9	99.4	102.9
D	112.0	105.9	111.6	82.4	70.9	68.5
原品	99.6			82.0		

初期と比べ最大14度程度低い結果を示しているものもある。また、年ごとのはっ水性の変化は低下のみではなく回復もしている。課電ストレスによる影響を見ると、はっ水性との相関はないことがわかる。

(d) 漏れ電流

表4に95年から4年間の漏れ電流電荷量の積算結果を連続電流電荷量、間欠電流電荷量に分けて示す。

表 4 沖縄課電ばく露場での4年積算電荷量
Four years' cumulated charge at Okinawa test site

供試試料	間欠電流電荷量	連続電流電荷量	間欠電流電荷量比率
A	0.81 mAh	55.20 mAh	1.4%
B	2.26 mAh	62.05 mAh	3.5%
C	0.36 mAh	49.85 mAh	0.7%
D	0.64 mAh	38.69 mAh	1.6%

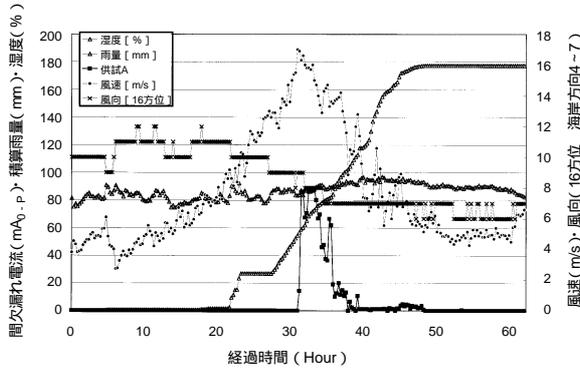


図 7 台風時の漏れ電流
Leakage current during a typhoon

表 4 より本ばく露試験場で発生した漏れ電流の種類はほとんどが連続電流であり、複合がいし外被の劣化に影響を及ぼすと考えられる間欠電流の比率は数%であった。また期間中に襲来した3回の台風時に、表4の間欠電流電荷量の約50%が、連続電流電荷量の約95%が得られた。このことから本ばく露場において漏れ電流の流れる事例はほとんどが台風時に集中していると言える。

図7に台風時の試料Aにおける15分ごとの最大間欠漏れ電流発生状況の一例を示すが、10分間平均風速7 m/s以上の海岸方向からの強風時に漏れ電流が見られることから、海水が強風により運ばれ漏れ電流発生したものと考えられる。

表4より連続電流電荷量は供試試料AとBで逆転しているものの課電ストレスとやや相関が見られる結果となった。一方、間欠電流については今回の課電ストレス範囲では、課電ストレスと電荷量との相関は見られなかった。

4.3 加速劣化試験^{4),5)}

沖縄ですすめている課電ばく露場と同じサイズの供試試料及び電圧(交流77 kV対地)でIEC61109に示される複合がいし外被材の加速劣化試験が可能な装置を作成し試験を実施した⁴⁾。

(1) 試験方法

試験条件を以下に示す。

- ・ 課電電圧: 交流 77 kV (対地電圧)
- ・ 試験室寸法: W4.4 m × D4.4 m × H3.3 m
- ・ 張力: 20 kN

本試験は表5に示される日サイクルを5000時間継続する試験であり、長期の時間を要する試験である。また、更に過酷な条件として表5の加速試験サイクルから降雨による雨洗効果をなくすために、降雨サイクルを省略した試験も行った。

表 5 加速試験サイクル
Accelerated aging test cycle

項目	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
加湿													
加温													
塩霧													
人工降雨													
紫外線照射													
荷重													
課電													

表 6 加速試験のがいし諸元
Characteristics of insulators for accelerated aging test

供試試料	全長	有効長	笠枚数	課電ストレス
A	1359 mm	1107 mm	31枚	24.2 V/mm
E	1748 mm	1495 mm	43枚	17.6 V/mm

(2) 測定項目

本試験では以下の項目について測定した。

- ・ 外観観察 (試験終了後)
- ・ 漏れ電流 (連続測定)
- ・ 複合がいし外被材の機器分析 (試験終了後)

(3) 供試がいし

供試がいしの諸元を表6に示す。正規の加速試験サイクルに用いたがいしは、沖縄課電ばく露場で最も厳しいストレスの供試試料Aと重汚損用の供試試料Eを用い、降雨を省略した試験には供試試料Aのみとした。

(4) 試験結果

(a) 全般

先報にて外被にはエロージョン及びトラッキング劣化などが認められなかったことを報告した^{1),2)}。このときはIEC61109 Annex Cでは考慮されていないがブリトルフラクチャーにつながる端末金具部の水密性の検証として、本加速劣化試験装置独特の20 kN張力印加をした状態で試験を行っており、端末でははがれなどの問題も発生しなかった。

また、端末部及び中央付近の胴部に、がいし長手方向に対して直角に長さ約20 mmで深さを1 mmからFRPまで達するまでの傷を外被材に付けたがいし(供試試料Aと同じ)も試験したが、傷部のトラッキング及びエロージョンの進展は認められなかった。

過酷な条件として加速試験サイクル中の降雨を省略した試験では複合がいしの外被にエロージョンが発生した。このことよりIEC61109 Annex Cにおいては降雨による雨洗効果ががいしに対する劣化条件を緩和しているものと考えられる。

(b) 漏れ電流

図8には加速劣化試験中の間欠漏れ電流電荷量の時系列変化を示すが、漏れ電流電荷量には大きなばらつきが見られており、5000時間経過後でもほとんど漏れ電流の生じていない試料もあることがわかる。また、間欠漏れ電流は

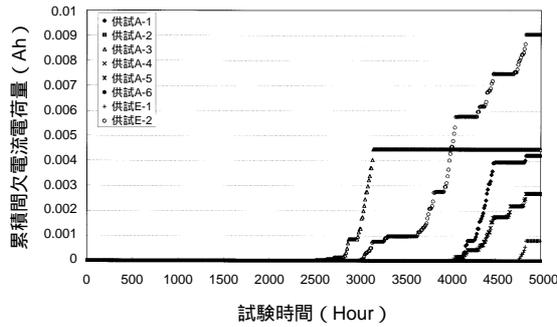


図8 間欠漏れ電流の推移
Transition of dotted current

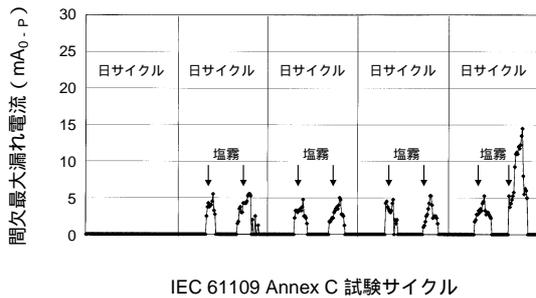


図9 加速試験時の間欠漏れ電流
Dotted current at IEC61109 Annex C test

表7 積算電荷量測定結果 (5000時間後)
Results of cumulated charge measurement after 5000 hr

試験条件	間欠電流電荷量	連続電流電荷量	間欠電流電荷量比率
降雨無し	41.47 mAh	0.81 mAh	97.9%

試験開始当初にはほとんど発生しておらず複合がいしのはっ水性が健全であることを示している。その後ある時間経過後に急激に間欠漏れ電流が流れ出す傾向を示しており、かつ供試試料間でも発生開始時間に差が見られる。これは本試験が実物のがいしサンプルを用いているために、がいしの長さ方向ではっ水性低下が同じ試験室に入っているにもかかわらず個体差があることを示しており、実規模がいしを使った加速劣化試験の特徴と考えられる。

図9には間欠漏れ電流が流れているときの加速劣化サイクルと漏れ電流発生との関係を示す。図9より間欠漏れ電流が発生するのは、塩霧期間で加湿や人工降雨時には見られないことがわかる。

(c) エロージョンと間欠漏れ電流

表7に降雨省略試験においてエロージョンが確認された試料の5000時間後の漏れ電流電荷量を示す。写真1にエロージョン発生状況を示す。

降雨省略試験で発見されたエロージョンの経緯を以下に示す。まず試験開始から2550時間でエロージョン2箇所がいし中央部笠部に目視で確認され、この時点での間欠電流電荷量は18.98 mAhであった。その後5000時間まで試験継続したところエロージョン箇所が5箇所に加え、間欠

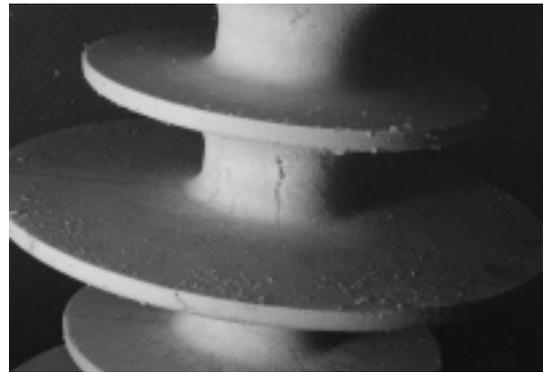


写真1 IEC試験5000時間後のエロージョン状況
Surface after 5000 hr of IEC61109 Annex C test

電流電荷量は2.2倍の41.47 mAhになった⁵⁾。これより実物のがいしのエロージョン劣化は必ずしも一箇所に集中して発生するものではなく、ランダムに発生することがわかる。

また、沖縄課電ばく露場での4年間積算連続電流電荷量は60 mAhを超えており、加速劣化試験でエロージョンが認められた間欠電流電荷量約19 mAhの3倍を超えているにもかかわらず沖縄課電ばく露場ではエロージョンが認められなかったことより、連続電流はエロージョンにさほど寄与しないものと考えられる²⁾。

5. 沖縄課電ばく露試験と加速劣化試験の比較による複合がいしの寿命推定

降雨省略加速劣化試験によりエロージョン発生が確認されたため、沖縄課電ばく露場での観測結果と加速劣化試験結果からシリコンゴム外被の使用寿命を推定した。推定するにあたり以下の仮定で行った。

- ・シリコンゴム外被のエロージョンに影響するものは間欠電流電荷量であるとして、沖縄課電ばく露場と加速劣化試験で観測された間欠電流電荷量を用いる。

- ・複合がいしのエロージョンが発生するまでに生じる積算間欠電流電荷量の値はどの環境(加速劣化試験, 屋外ばく露試験ともに)でも同じである。

- ・最終的ながいしとしての外被寿命は、送電電圧に耐えられない状態としてIEC61109規定によるとFRPコアまで達するエロージョンが限度となっている。しかし現段階では安全側として外被のわずかなエロージョン発生を寿命の第一段階と考える。

上記の仮定に基づき、降雨省略加速劣化試験でエロージョンが発生した時点の間欠電流電荷量と、4年間沖縄課電ばく露場でばく露されている供試がいし中で間欠電流電荷量が最大であった供試試料Bの値の比較から、沖縄課電ばく露場の条件でエロージョン発生に至る年数を次式により計算した。

$$\frac{\text{エロージョン発生時の積算間欠電荷量}}{\text{ばく露場での最大積算間欠電荷量年平均}} = \text{エロージョンの発生年数}$$

$$18.98 \text{ mAh} \div (2.26 \text{ mAh} \div 4 \text{ 年}) = 34 \text{ 年}$$

これより海岸近くで台風通過による急速汚損もある沖縄課電ばく露場のような環境で複合がいし表面にわずかなエロージョンが発生するのは34年と推定された。

この使用寿命は複合がいし表面にエロージョンが起こった時点の検討結果である。実際にはエロージョンががいし表面に発生した後、更にシリコンゴム外被を侵食してFRPコアまで達すると複合がいしとして致命的な状態と考えられる。一般にがいしのシリコンゴム外被の厚みは胴部で3 mm以上あるため致命的な状態になるには更に時間がかかることになる。

6. 試験結果のまとめ

1995年から現在まで5年間にわたって行っている海塩汚損の厳しい沖縄での長期課電ばく露試験では、当社の相間スペーサ用複合がいしや送電用複合がいしに劣化は見られていない。

また実規模の長さの複合がいしを77 kVで課電しながらIEC61109 Annex Cに準拠した加速劣化条件と引張荷重を重畳できる大型加速劣化試験装置を製作し、正規の加速劣化サイクル、及び雨洗効果を排除した降雨省略試験を実施した。正規の加速劣化サイクルでは端末への塩分や湿気の侵入がなくまた、外被のシリコンゴムにも劣化は現れず何ら問題がなかった。更に工事上でがいしに傷がついたことを想定してFRPが露出するようにシリコンゴム外被を切り取って規定の加速劣化試験を行っても、当社のがいしは外被とFRP界面の接着性に優れているために水分の侵入による電気的な問題は発生せず、傷が万一できてそこから直ちに破壊事故に至ることはないことが確認できた。

一方降雨省略試験ではがいしの中間部に人工的にエロージョンを発生させることができたため、複合がいしの品質を確認する目的でなく劣化を促進する方法としては降雨省略試験が有効であるといえる。降雨省略加速劣化試験と沖縄課電ばく露試験とから、複合がいしの劣化に影響を及ぼすパラメータとして、放電時に発生する間欠漏れ電流の積算電荷量を用いて複合がいしの使用寿命を推定すると、沖縄のような海塩汚損の厳しい地区ですら34年以上と実用上十分な結果が得られた。

しかし本検討はがいし設計において主要因である海塩汚損を想定した場合の比較検討であるため、高湿潤や激しい工業汚損地区など特殊な地域において適用する場合には別途検討が必要である。

7. おわりに

当社複合がいしは確実な品質管理と独特の端末部水密構造のために、今まで実送電線に適用されて海外で懸垂がいしとして20年以上⁷⁾、国内でも相間スペーサとして10年、引留がいしとして約4年の実績があり、いまだに不具合のない優れた信頼性を有している。

本報では、沖縄での課電ばく露試験と屋内での加速劣化試験の双方より検討を行い、実送電線へ適用するうえでネックとなっていたシリコンゴム外被の劣化について実用上十分な耐用年数であることを確認した。

謝辞

沖縄課電ばく露試験と加速劣化試験は、有機相間スペーサの寿命評価研究として東京電力株式会社の委託により実施されたものである。また沖縄課電ばく露場の測定では琉球大学工学部電気工学科東盛教授並びに伊波技官に御協力頂いた。未筆ながら関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 架空送電線用有機がいしの現状と今後の展望、電気協同研究 第56巻 第1号、2000.5
- 2) 小林 哲、松崎 豊、榎屋 博、新子谷 悦宏、木股 隆三:架空送電用複合がいしの開発(その1)、古河電工時報 第104号、1999.7
- 3) R. Kimata, L. Kalocsai, A. Bogнар: Monitoring system for evaluation of leakage current on composite insulators, 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, No.5125, 1994
- 4) 中内 一志、大浦 一隆、小林 哲、木股 隆三、西村 誠介:シリコンゴムがいしの自然曝露試験及び加速劣化試験、高電圧研究会、電気学会、HV-97-41、1997
- 5) 角谷 靖明、小林 哲、松崎 豊、木股 隆三:有機(シリコンゴム)がいしのIEC61109 Annex C 試験および自然曝露試験の比較、電気学会全国大会、Vol 7-051、2000
- 6) 中内 一志、小林 哲、新子谷 悦宏、木股 隆三、東盛 良夫、伊波 善清、西村 誠介:シリコンゴムがいしの汚損に関する検討、高電圧研究会、電気学会、HV-98-73、1998
- 7) A. Bogнар, P. Szaplanczay, Pz. Pinter, G. Banhegyi: Investigations on a 20 years old composite insulator, 10th ISH, 1997