ポリマー材料の塩霧エージング特性に及ぼす試料サイズの影響

正員 大坪 昌久* 学生員 穴見 直也*
 学生員 山下 清二* 正員 本田 親久*
 正員 竹之内 修** 正員 橋本 洋助***

Influence of Sample Size of Polymer Materials on Aging Characteristics in the Salt Fog Test

Masahisa Otsubo*, Member, Naoya Anami*, Student Member, Seiji Yamashita*, Student Member, Chikahisa Honda*, Member, Osamu Takenouchi**, Member, Yousuke Hashimoto***, Member

Polymer insulators have been used in worldwide because of some superior properties; light weight, high mechanical strength, good hydrophobicity etc., as compared with porcelain insulators. In this paper, effect of sample size on the aging characteristics in the salt fog test is examined. Leakage current was measured by using 100 MHz AD board or 100 MHz digital oscilloscope and separated three components as conductive current, corona discharge current and dry band arc discharge current by using FFT and the current differential method newly proposed. Each component cumulative charge was estimated automatically by a personal computer. As the results, when the sample size increased under the same average applied electric field, the peak values of leakage current and each component current increased. Especially, the cumulative charges and the arc discharge length of dry band arc discharge increased remarkably with the increase of gap length.

キーワード：シリコンゴム、塩霧試験、微分法、ドライバンドアーク放電、X線光電子分光法

Keywords: silicone rubber, salt fog test, differential technique, dry band arc discharge, X-ray photoelectron spectroscopy

1. まえがき

外被材にシリコンゴムなどの高分子材料を用いたポリマー碍子は、従来の磁器碍子と比べて軽量で、機械的強度も大きく、耐汚損特性に優れていることから、北米を中心に世界的に使用されつつある^{(1)~(4)}。最近では、ポリマー碍子の外被材としてのシリコンゴムに水酸化アルミニウムを充填することにより、トラッキングに強い材料が開発されてきた。また、シリコンゴムは表面に低分子量のシリコンオイル成分を持つことから従来の磁器碍子と比べて

優れた撥水性を有しており、外的要因により一時的に撥水性が失われたとしても内部から低分子量成分が表面に滲み出すことにより、撥水性を回復するという特性を持つ。このことは、シリコンゴムが高い絶縁特性を長期に維持するという特長となっている。

しかし、これらのポリマー碍子も、日本では実フィールドでの使用実績がなく、紫外線やオゾンによる重合や縮合などによる化学変化、雨などの吸湿による加水分解、塩霧や湿潤時の漏れ電流や放電によるエロージョンが発生し劣化を導くと考えられている⁽²⁾。特に、汚損湿潤時の局部乾燥帯を橋絡するドライバンドアーク放電は、高温となり材料劣化への影響が大きいと考えられている⁽³⁾⁽⁴⁾。また、乾燥帯の周辺や水滴間で発生する高周波のパルス性電流としてのコロナ放電は、空気中の窒素に関する青白い発光を伴うことからその電子エネルギーが大きく、その発光の一部はシリコンゴムの側鎖の切断への寄与が考えられている⁽⁵⁾。これらのコロナ放電の電流パルスと発光は、数十 ns のパルス幅をもつ高周波成分であることも分かっている⁽⁶⁾。これまで、加速塩霧エージング試験中の漏れ電流は、湿潤した材料表面水膜中を流れる導電性電流とドライバンドアーク

* 宮崎大学
〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1
Miyazaki University
1-1, Gakuenkibadai-Nishi, Miyazaki 889-2192
 ** 航空大学校
〒880-8580 宮崎市大字赤江字飛江田 652-2
Civil Aviation College
652-2, Akae-Hieda, Miyazaki 880-8580
 *** 九州電力(株)
〒815-8520 福岡市南区塩原 2-1-47
Kyushu Electric Power Co., Inc.
2-1-47, Siobara, Fukuoka 815-8520

ク放電やコロナ放電の電流を区別せずに測定されてきた。そこで、これらの放電による電流を導電性電流と区別して測定し定量的に評価することが望まれている⁽⁶⁾。

筆者らは、ポリマー材料の劣化特性評価に有効な電流を漏れ電流から抽出して、劣化指標を定量的に行えるようにこれら3種の電流成分を求めることを提案してきた。これまで、ポリマー材料の劣化と漏れ電流の関係を時系列的に議論する場合、Bärshらはこの3領域をEAP (early aging period), TP (transition period), LAP (late aging period)と呼んで区別している⁽⁷⁾。すなわち、材料使用の初期には撥水性が維持されて漏れ電流がほとんど流れない期間 (EAP)、次に撥水性が失われ部分 (コロナ) 放電が活発になりドライバンドアーク放電が現れ始めて漏れ電流が大きくなる期間 (TP)、更なるエージングで撥水性が完全に失われ漏れ電流が時間とともに増加しドライバンドアーク放電で材料の損失が発生する期間 (LAP) である。またLopesらは、同様にこれらをそれぞれ領域I~IIIの3領域で説明している⁽⁸⁾。またこのようにドライバンドアークが材料劣化に大きく寄与すると言われているがその電気量の定量評価法は、十分確立されていない。そこでこの場合、ドライバンドアーク放電を漏れ電流としての導電性電流と分離する波形分離法として、微分法を適用した⁽⁹⁾。しかし、実験室レベルの小さい試料の漏れ電流や放電現象が、寸法の大きい笠付きのポリマー碍子の場合の現象を模擬できるかという疑問が生じて来た。

そこで、本報告では、試料のサイズを変えて漏れ電流を調べ、それぞれの漏れ電流成分すなわち部分放電やドライバンドアーク放電及びその電気量がどのように異なるかということ調べた。

2. 実験の方法および各種電気量の算定方法

〈2・1〉 実験方法 図1に実験装置の概略図を示す。実験に用いた試料は、板状の高温硬化型 (HTV: High temperature vulcanized) シリコンゴム (充填剤としての三

図1 実験装置概略図

Fig. 1. Schematic outline of experimental equipment.

水和アルミナ (ATH: Alumina trihydrate) は60%) を用いた。表1に各実験条件を示す。サイズの異なる試料をそれぞれ実験A, B, Cとしてエージング距離すなわち電極間隔gを18cm, 12cm, 8cmとした。各試料の印加電圧を変えて平均印加電界は600V/cm一定とした。塩霧水の導電率は800 μ S/cmとし、塩霧は超音波加湿器により0.6liter/hで発生させた。常時課電状態で10時間塩霧, 14時間塩霧停止 (自然乾燥) の24時間を1サイクルとし、これを10サイクル (240時間) 繰り返した。各試料は、図1に示すように、1 $\times$ 1 $\times$ 1mの亚克力製塩霧室内に横方向に設置した。エージング中の漏れ電流は、5分または10分毎に5M $\sim$ 100MサンプリングのAD変換ボードを装着したパソコンで計測され、〈2・2〉で述べる漏れ電流解析法で解析した。また、サイズの異なる試料を用いたそれぞれの塩霧エージング中の放電発光の静止写真を撮影し、比較した。

〈2・2〉 波形分離と解析方法 コロナ放電電流の漏れ電流からの分離は、FFTによる周波数分離を用いた。漏れ電流の周波数特性からコロナ放電の主な周波数帯域は、約5kHz以上であり、導電性漏れ電流の主な周波数帯域は約2kHz以下であるので、2.5kHz以上をコロナ放電成分とした⁽¹⁰⁾。またドライバンドアーク放電電流の判定は電流値の急変を用いた微分法により行い、以下の定義から判定する。

(1) ドライバンドアーク放電の発生時には、コロナ放電はほとんど発生しないので全てドライバンドアーク放電電流と定義する。ドライバンドアーク放電電流は正弦波に近い電流が突然鋭く (不連続に) 立ち上がり数ms以内に急速に低下して零となり極性が反転するまでとする。

(2) 全漏れ電流からコロナ放電電流とドライバンドアーク放電電流を除いた全ての電流を導電性電流と定義する。

図2は、塩霧試験の漏れ電流の観測波形より求めた、分離波形と電流の時間微分値を示す。この図は、導電性電流とドライバンドアーク放電電流が混在して観測される場合の例で、同図(a)は導電性電流とドライバンドアーク放電電流の混在したものである。同図(b)に微分値の時間変化を示す。この微分値によってドライバンドアーク放電かどうかの判定を行う。微分値のしきい値について、本実験では、図2に示す計測範囲における電流の微分値の平均に対

表1 実験条件

Table 1. Experimental condition.

	実験 A	実験 B	実験 C
試料 (ATH wt%)	HTV シリコンゴム (60%)		
形状	板状		
電極間隔	18cm	12cm	8cm
印加電圧	10.8kV	7.2kV	4.8kV
平均印加電界	600V/cm		
塩水導電率	800 μ S/cm		
塩霧	超音波加湿器, 0.6 liter/h		
実験サイクル	常時課電で, 10 時間塩霧, 14 時間塩霧停止, 240 時間

(a) 導電性電流とドライバンドアーク電流

(b) 微分値の時間変化

図 2 漏れ電流の計測

Fig. 2. Leakage current and differential.

して5倍のしきい値を設定すればほぼ分離できることが分かった。なお、計測範囲におけるドライバンドアーク放電の出現数で平均値は変化するが、本実験条件では分離には影響しなかった。そこで、以下の解析ではこの設定値を微分値の平均の5倍とした。

同図(a)中の各半波の内①～③, ⑦, ⑨で示したものが導電性電流成分のみ, ④～⑥と⑧がドライバンドアーク放電電流成分を含む場合で、ハッチングで示した部分がドライバンドアーク放電の電流領域を示す。

これらのハッチングの部分を判定する場合の基準は、微分値が設定値(図(b)のThreshold)以上を示したものをドライバンドアーク放電の開始とした。なお、ドライバンドアーク放電か否かは、発光波形において、ドライバンドアーク放電とその他では異なる特徴を示すことも考慮した⁽⁵⁾。

3. 実験結果

〈3・1〉 試料サイズとアーク放電路の関係 図3に、各試料サイズに対応する放電発光の静止写真を示す。同図(a), (b), (c)にそれぞれ $g=18\text{ cm}$, 12 cm , 8 cm の場合の写真を示す。これらの図は縮尺を同じとしてある。

図3(a)の下部や同図(c)の上部に点在する小さい発光の一部は、空気中の窒素に関係する青白い発光をしており、光電子増倍管と 500 nm 以上または以下の波長を通すフィルタを用いた発光観測と電流波形からパルス幅が数十 ns のコロナ放電である⁽⁶⁾。一方、放電路の長い発光はオレンジ色の発光であるドライバンドアーク放電である⁽⁵⁾。同図(a), (b), (c)より、写真上でアークスポット間の直線距離で測定

(a) 導電性電流とドライバンドアーク電流

(b) 電極間隔 $g=12\text{ cm}$ (c) 電極間隔 $g=8\text{ cm}$

図 3 試料サイズごとの放電発光の静止写真

Fig. 3. Still photographs of discharge.

したドライバンドアーク放電路の長さ L_a は、試料サイズが大きい順に長いことが分った。これは、乾燥帯発生時には印加電圧の大部分が、乾燥帯に集中することが考えられ、単位長さ当たりの電圧は等しいと考えられるので L_a は電極間隔の大きさすなわち印加電圧に比例するものと考えられる。 $g=18\text{ cm}$ の試料の場合、放電路の長さ $L_a=0.3\sim 2.9\text{ cm}$ であり、 $g=12\text{ cm}$ と $g=8\text{ cm}$ ではそれぞれ $L_a=0.2\sim 1.4\text{ cm}$, $L_a=0.2\sim 0.5\text{ cm}$ であった。このことからドライバンドアーク放電路の長さは、ほぼ印加電圧が高いほど長くなることが分かる。

なお、放電の発生位置は、実験期間中一箇所に固定することはなかった。

〈3・2〉 試料サイズと電気量の関係 塩霧エージング試験における漏れ電流は、導電性電流、コロナ放電電流およびドライバンドアーク放電電流の3種に分類できる⁽¹⁰⁾。図4に、各試料サイズにおけるそれぞれの電流成分の電気量を示す。同図(a)は、ギャップの長さ $g=18\text{ cm}$ の場合で全漏れ電流に対する導電性電気量、ドライバンドアーク放電電気量、コロナ放電電気量の割合はそれぞれ約57%, 37%, 6%であった。吸湿等による撥水性の低下が考えられる約50時間以降ドライバンドアーク放電電気量は増加することが分かった。漏れ電流による全電気量は $230(\text{C})$

となった。同図 (b) は $g=12\text{ cm}$ の場合で全漏れ電気量は、 $g=18\text{ cm}$ の 230(C) に対して 135(C) となり約 60%であった。全漏れ電気量に対する各電気量の割合は、74%, 20%, 6%となり $g=18\text{ cm}$ の場合に比べてドライバンドアーク放電電気量は、85(C) に対して 25(C) と極端に少なかった。同図 (c) の $g=8\text{ cm}$ の場合、全漏れ電気量は約 55(C) となり、 $g=18\text{ cm}$ と $g=12\text{ cm}$ の場合と比べて約 24%と 40%と少なかった。また、全漏れ電気量に対する各電気量の割合は、80%, 15%, 5%となり $g=12\text{ cm}$ の場合に比べて放電電気量がわずかに低下した。このことから試料の大きさすなわちギャップの長さ g を大きくすると、平均印加電界を等しくしてもドライバンドアーク放電電気量が増加することが分かった。また、試料サイズが大きくなるにつれて漏

(a) 電極間隔 $g=18\text{ cm}$

(b) 電極間隔 $g=12\text{ cm}$

(c) 電極間隔 $g=8\text{ cm}$

図 4 試料サイズごとの各電気量

Fig. 4. Cumulative charge of each sample size.

(a) 全電気量

(b) 導電性電気量

(c) ドライバンドアーク放電電気量

(d) コロナ放電電気量

図 5 試料サイズによる各電気量の比較

Fig. 5. Comparison of each component cumulative charge.

れ電流は全体的に増加し、実験条件で異なる微分法のしきい値としての微分値（絶対値）は僅かに大きくなった。

図5に、全電気量、導電性電気量、ドライバンドアーク放電電気量とコロナ放電電気量の試料サイズによる比較を示す。同図において全ての電気量は、 $g=18, 12, 8\text{ cm}$ に対してギャップ長が長いほど電気量が大きくなった。ここで、ギャップ長が長くなった場合、電界分布が不平等になるため電極付近の電界が高くなり、同図(d)に見られるようにコロナ放電電気量はエージング初期から、同図(c)からドライバンドアーク放電電気量は25～100時間以降に増加が認められる。ドライバンドアーク放電電気量は、電極間隔が大きい場合は約25時間程度から増加するのに対して、短い電極間隔の場合にはその増加量も小さく、増加の時期も遅れる傾向にあった。これは、電極間隔が大きくなるにつれて電界歪みのために電極近傍でコロナ放電が顕著となり、ポリマー材料表面の絶縁抵抗低下が導電性電流の増加をもたらすものと考えられる。これらの繰り返しにより、材料表面には乾燥帯が形成される。同図(c)に示すドライバンドアーク放電電気量も、これらの影響を受け短ギャップのものより早期に電気量の増加が見られる。このように、ギャップの長さを変えるとドライバンドアーク放電電気量が大きく変化して試料サイズの影響を受けること（サイズ効果を示す）が分かった。また、約240時間エージング時のドライバンドアーク放電が発生しない場合の漏れ電流（導電性電流）の波高値は、 $g=8\text{ cm}$ で約0.32 mA、 $g=12\text{ cm}$ で約0.72 mA、 $g=18\text{ cm}$ で約0.90 mAと電極間隔の増加と共に増加した。

これらの結果から、たとえ平均印加電界を等しくしても、試料のサイズを大きくすることによって、漏れ電流の波高値とコロナ放電電気量やドライバンドアーク放電電気量が増加することが分かった。

以上の結果から、ドライバンドアーク放電路の長さには、試料サイズによる影響が認められることが分かる。

〈3・3〉 試料表面の化学変化 図6に、光電子分光法(XPS: X-ray photoelectron spectroscopy)を用いて、エージング後の各試料表面を分析した結果を示す。同図(a)はVirgin 試料の場合で、ポリジメチルシロキサン(PDMS: Polydimethylsiloxane)の主成分であるO-Si-O結合としてのSi-O₂成分がその大部分を占めていることを示す。同図(b), (c), (d)はそれぞれ $g=18, 12, 8\text{ cm}$ のときのスペクトルで、Si-O₃、Si-O₄が増加していることを示している。しかし、その変化量は、1サンプルについて6箇所の測定から場所によって10%程度の違いはあるが、位置に対する顕著な影響は認められなかった。またサンプルのサイズによる影響もほとんど認められなかった。すなわち、試料サイズによって電流値等は大きくなるが、エージングを受ける面積も大きいので全電気量と比べて、その化学変化もほぼ等しくなったものと考えられる。ただ、エージングが進み、ドライバンドアーク放電の位置が固定されるようになると局部的にエネルギーが使われ、エロージョンやトラッ

図6 スペクトル分布図

Fig. 6. Observed and separated spectra of Si2p3/2.

キングを引き起こすものと推測される。

これらのことから、試料サイズが変わっても放電路が集中しない限り、化学変化には試料サイズによる影響が認められないことを示す。

4. まとめ

撥水性の回復を考慮した加速塩霧エージング試験において、試料のサイズが異なる場合、漏れ電流の波高値、コロナ放電やドライバンドアーク放電電気量がどう異なるか、表面の化学変化はどのように影響されるかを明らかにするこ

とを目的として実験を行った。主な結果は以下のとおりである。

(1) 試料に印加する平均電界を等しくして、試料の大きさを大きくすると、漏れ電流の波高値とともにコロナ放電電流量やドライバンドアーク放電電流量が増加する。

(2) ドライバンドアーク放電路の長さには、顕著な試料サイズの影響が認められる。

(3) 試料サイズが変わってもドライバンドアーク放電路が集中しない限り、試料の化学変化には試料サイズの影響は認められない。

これらのことから、実碍子においては沿面距離が更に長くなるので、ドライバンドアーク放電やコロナ放電の電流値はより大きくなることが考えられる。今後は、実環境での暴露試験と共に汚損付着物を考慮した劣化過程の解析を行うつもりである。

本研究を進めるにあたり、問題提起と有益な助言いただいた、電気学会の絶縁界面の評価・改質技術調査専門委員会の皆様に厚く御礼申し上げます。また、試料を提供頂いた東レダウコーニングシリコン（株）の関係各位に謝意を表します。

(平成 14 年 5 月 2 日受付, 平成 14 年 12 月 26 日再受付)

文 献

- (1) R. Hackam: "Outdoor HV composite Polymeric Insulators", *IEEE Trans. DEI*, Vol.6, pp.262-269 (1999)
- (2) Technical Committee of Polymer Insulator for Overhead Transmission System: "Present and Future in the Polymer Insulator for Overhead Transmission System", *Electric Technology Research*, Vol.56, No.1 (2000) (in Japanese)
架空送電用有機碍子技術専門委員会:「架空送電用有機碍子の現状と今後の展望」, 電気協同研究, 56, No.1 (2000)
- (3) S. Nishimura: "Influence of Properties and Kinds of Electrolyte on Arc across Polluted Insulator Surface", *Proc. Institute Electronics Japan*, Vol.13, No.3, pp.213-218 (1989)
西村:「塩塵汚損沿面放電現象に及ぼす電解液の性状と種類の影響」, 静電気学誌, 13, No.3, pp.213-218 (1989)
- (4) 西村:「ポリマー碍子の劣化と寿命評価」, 電気評論, 第 399 号, Vol.83, No.11, pp.42-48 (1998)
- (5) M. Otsubo: "Discharged and Emission Spectra on the Surface of the Polymer Insulator Materials in the Salt Fog Aging Test", 2001CEIDP, pp.620-623 (2001)
- (6) T. Hisatsune, M. Miyata, S. Ohtsuka, Y. Hashimoto, K. Hirowatari, and M. Hikita: "Construction of Leakage Current Measuring System to Separate it into Three Frequency Components for Evaluating Surface Degradation of Polymeric Insulating Materials", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.4, pp.486-491 (2002-4) (in Japanese)
久恒・宮田・大塚・橋本・広渡・匹田:「ポリマー碍子の表面劣化評価試験のための漏れ電流周波数 3 成分分離自動測定システムの構築」, 電学論 B, 122, 4, pp.486-491 (2002-4)
- (7) R. Bärsh, J. Rambrecht, and H.J. Winter: "On the Valuation of the Early Aging Period of Polymer Insulation Surfaces during Accelerated Aging Tests", 9th ISH, pp.3023-1-3023-4 (1995)
- (8) L.J.S. Lopes, S.H. Jayaram, and E.A. Cherney: "A Study of Partial Discharges from Water Droplets on a Silicone Rubber Insulating Surface", *IEEE Trans. DEI*, Vol.8, No.2, pp.262-268 (2001)

- (9) T. Hashiguchi, T. Matsui, S. Yamashita, M. Otsubo, C. Honda, O. Takenouchi, Y. Hashimoto, and M. Nakamura: "Separation of the Leakage Current of Salt Fog Aging Test of Polymer Materials", The Papers of Technical Meetings on Electrical Discharge, Dielectric and Insulating Materials, and High Voltage, IEE Japan, ED-01-19, DEI-01-36, HV-01-28 (2002) (in Japanese)
橋口・穴見・大坪・橋本他:「塩霧エージング試験における漏れ電流波形の分離」, 電気学会放電, 誘電・絶縁材料, 高電圧合同研資, ED-01-19, DEI-01-36, HV-01-28 (2002)
- (10) M. Otsubo, T. Hashiguchi, O. Takenouchi, and C. Honda: "Proposal of Automatic Separation and Analytical Technique of Leakage Current Component in Salt Fog", *T. IEE Japan*, Vol.122-A, No.1, pp.123-124 (2002-1) (in Japanese)
大坪・橋口・本田・竹之内:「塩霧試験における漏れ電流の自動分離・解析法の提案」, 電学論 A, 122, 1, pp.123-124 (2002-1)

大坪 昌久 (正員) 1947 年 1 月 10 日生。1970 年 3 月宮崎大学工学部専攻科電気工学専攻卒業。同年 4 月宮崎大学工学部助手, 現在同電気電子工学科助教授。1994 年 5 月から米国 Clarkson 大学に研究留学。工学博士。放電と応用, 電力工学に関する研究に従事。静電気学会, 応用物理学会, IEEE 会員。

穴見 直也 (学生員) 1979 年 10 月 25 日生。2002 年 3 月宮崎大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士前期過程進学, 現在に至る。主として, ポリマー材の劣化に及ぼす環境因子の影響に関する研究に従事。電気学会, 高分子学会会員。

山下 清二 (学生員) 1978 年 11 月 30 日生。2001 年 3 月宮崎大学工学部電気電子工学科卒業。2003 年 3 月同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士前期過程終了。同年 4 月旭有機材工業株式会社入社, 現在に至る。在学中, 主としてポリマー材料表面上の水滴の挙動と絶縁劣化との関係の研究に従事。

本田 親久 (正員) 1943 年 2 月 12 日生。1965 年 3 月九州大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月同大学助手, 1989 年同大学大学院総合理工学研究科客員助教授を経て, 1993 年宮崎大学工学部電気電子工学科教授, 現在に至る。主として, レーザ応用プラズマ計測の研究に従事。工学博士。電気学会会員。

竹之内 修 (正員) 1966年12月15日生。1991年3月宮崎大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月長崎大学工学部助手。1993年4月運輸省航空大学校に勤務。1997年3月長崎大学大学院海洋生産科学研究科博士課程修了。1998年4月運輸省航空大学校助教授、現在に至る。工学博士。主として、高電圧現象の研究に従事。電気学会、静電気学会、航空宇宙学会会員。

橋本 洋助 (正員) 1962年7月14日生。86年3月熊本大学工学部電気工学科卒業。同年4月九州電力株式会社入社。現在、同社総合研究所流通設備グループ主幹研究員。主として配電線の雷害対策、絶縁に関する研究に従事。