

塩霧試験におけるポリマー材料の撥水性特性の評価

南 英佑^{a)}・迫田 達也^{b)}・阿嘉 良昌^{c)}・安食 富和^{c)}・深野 孝人^{c)}

Evaluation of Hydrophobicity of Polymer Material on Salt Fog Aging Tests

Eisuke MINAMI, Tatsuya SAKODA, Yoshiaki AKA, Tomikazu ANJIKI, Takato FUKANO

Abstract

To evaluate the long-term reliability of polymeric material used for electric power equipment in the coastal area and to establish its insulation testing technique, we evaluated influence of conductivity change on hydrophobicity and relationship between hydrophobicity and electrical property of silicone rubber (SiR) by performing a salt fog aging test. As the result, hydrophobicity of SiR recovered even at very high conductivity. In addition, the required times for recovery between the hydrophobicity and the electrical property are different. The time when the leakage current begins to be detectable might be a good index of the degradation diagnosis.

Keywords : silicone rubber, hydrophobicity, salt deposit density

1. はじめに

ブッシングや避雷器などの電力機器は、電力エネルギーを安全且つ確実に送り届けるという重要な役割を担っており、塩害等の厳しい使用条件においても耐え得る絶縁耐力や機械的強度が求められる。これまで電気絶縁機器の外被材料には主に磁器が使われてきたが、近年では新たにポリマー材料を外被材とした電力機器が注目されている。ポリマー材料は磁器材料と比較して耐汚損特性や撥水性に優れ、且つ軽量であるため施工性が良い。しかしこれらの長所を持つ反面、有機物であるため重汚損下における環境ストレスや、表面で発生した放電による劣化が危惧されている。米国ではポリマー機器の適用拡大が進んでいるが、日本では劣化機構の詳細な把握と長期信頼性の獲得が不十分であることから導入は鉄道分野などの一部に限定されている。

このような背景の下、著者らはポリマー材料の一種であるシリコーンゴム(SiR:Silicone Rubber)特有の性質である撥水性の低下・回復特性に着目した。SiRは表面で発生した放電の影響などによって一時的に撥水性が低下しても時間経過とともに撥水性が再び回復するという性質を持つことが報告されている。しかし現状として使用環境ごとの撥水性の低下の度合いや回復時間などの定量的な評価は未だ達成されていない。ポリマー機器の絶縁耐力は主に

優れた撥水性によって保たれると考えられており、撥水性特性の詳細な把握は、日本におけるポリマー機器の適用拡大を実現する上で欠かすことのできない要素であると言える。

そこで本論文では、沿岸地域の重汚損地区におけるポリマー材料の劣化機構の把握と長期信頼性の獲得を目的としてSiRに対して塩霧試験を実施し、塩霧の導電率の差が撥水性の回復に与える影響と、撥水性の回復に伴う電氣的特性の変化を検証した結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 導電率が表面撥水性に与える影響評価方法

表1に試験条件、図1に試験装置の概要をそれぞれ示す。SiRを塩霧試験容器の中心の一組の対向電極に設置し、試料の傾斜角度を水平面に対して15°とした。塩霧容器内には直径約10 μmの塩霧を常時噴霧し、前述の電極に直流正極性の電圧を印加した。同電圧は、単相変圧器からの出力を高電圧整流ダイオードで半波整流し平滑コンデンサにより得た。電圧のリップルは、0.5%以下になるようにした。ここで直流電圧を用いたのは、予備実験において、交流電圧を印加する場合よりもエロージョンや漏れ電流が大きく、短時間で大きな表面ダメージをSiRに付与できることを確認できたためである。塩霧の導電率は16 mS/cm、113mS/cm、184mS/cmとした。184mS/cmを塩分濃度に換算すると約190g/Lであり、日本国内の平均的な塩分濃度は35g/Lであるため、今回の導電率は5倍以上の

a)工学研究科エネルギー系コース

b)電気システム工学科教授

c)東芝エネルギーシステムズ株式会社

過酷試験となる。塩霧試験後は直ちに表面の撥水性を STRI 法¹⁾(STRI:Swedish Transmission Research Institute) によって評価した。図 2 に STRI 法によるポリマー材料の分類例を示す。本法は試料表面に霧吹きを行い、水滴の輪郭形状や分布形状によって撥水性クラス HC (Hydrophobicity Classification) を評価するものである。クラスは 7 段階で評価され、撥水性が最も良い状態(新品試料と同様の撥水性)を HC1、撥水性を失い試料表面が完全に水膜に覆われた状態を HC7 と定めている。これにより簡易的に撥水性が評価できるが、その反面、目視での判断となるため分類が困難な場合がある。しかし著者らは本研究を最終的にポリマー機器の現場での劣化診断手法に適用する予定であるため、簡易的に撥水性を評価できる本法を採用している。また、試験終了から 5 日後に再度撥水性を確認し、回復特性を評価した。5 日という期間を設定した理由は、これまで様々な条件で塩霧試験を実施した試料において、その中の多くの SiR が 5 日後に HC1 まで撥水性が回復したことが確認されたためである。

加えて、撥水性の回復の前後において SiR 表面の微細な変化がないか確認するために、16mS/cm で実施した塩霧試験終了直後の撥水性が低下した試料と、そこから 5 日が経過し、撥水性が回復した試料の表面を走査電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope)によって評価した。倍率は 200 倍に統一した。

表 1 試験条件

Series resistor [kΩ]	100
Applied voltage [kV]	DC+3.0kV
Sample	SiR sample, HC (Hydrophobicity Classification) 1
Sample size [mm]	50×50×t 5
Gap length [mm]	30
Chamber size [m]	1.5×1.5×1.5
Spray quantity [L/h]	0.9
Conductivity [mS/cm]	16, 113, 184

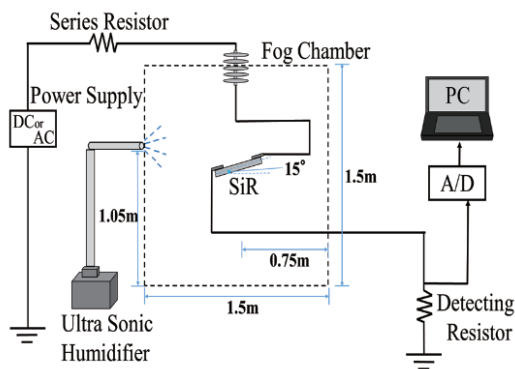


図 1 実験装置の概要

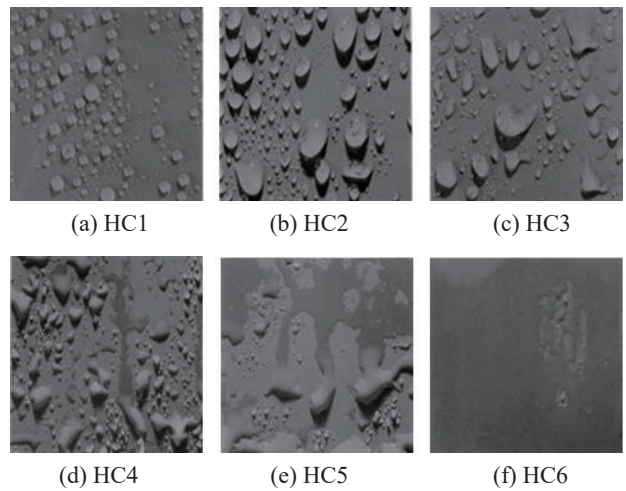


図 2 STRI 法による撥水性レベルの分類例

2.2 撥水性回復前後の電気的特性の評価方法

2.1 項における直流塩霧試験直後と試験終了から 5 日毎に 50 日間に亘って電気的特性を評価した。この試験では、交流 6 kV を試料に 3 時間印加し、その間の漏れ電流の変化を観測した。本試験は直流塩霧試験から漏れ電流を測定する交流塩霧試験を通して同一の SiR を用いている。図 3 に試験の流れを示す。塩霧の導電率は 16 mS/cm とした。試験回路と試験の手順については 2.1 項と同様である。電気的特性の評価のために交流電圧を用いた理由は、今後の発展研究において、微分法²⁾により放電成分の評価を検討しているためである。

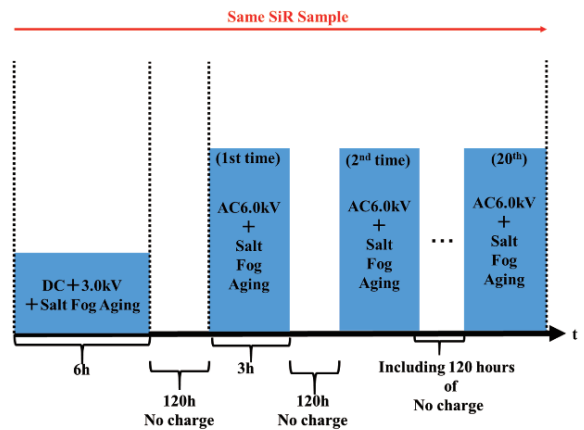


図 3 試験の流れ

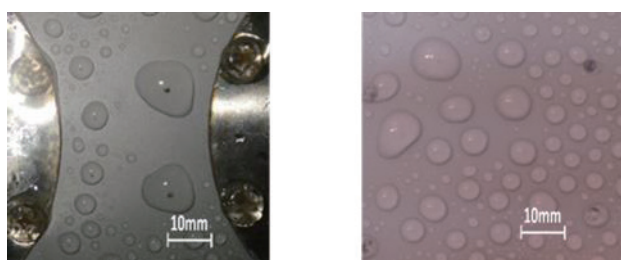
3. 実験結果および考察

3.1 導電率が表面撥水性に与える影響

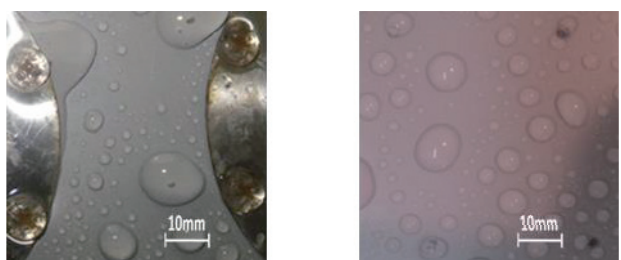
図 4 に 16mS/cm、図 5 に 113mS/cm、図 6 に 184mS/cm で行った塩霧試験直後と終了から 5 日後の撥水性を評価した結果を示す。また図 7 に、直流課電中に塩霧試験容器内に設置したポリマー試料表面を観察した結果を示す。直流課電の塩霧試験終了直後には、ポリマー試料表面の水滴を発端とした図 7(b)の微小放電に起因³⁾した HC3 程度のやや大きい水滴が確認できた。16mS/cm と 113mS/cm は

72 時間経過時まで顕著な回復傾向は見られなかったが、それ以降 96 時間経過までの間で回復が加速した。5 日目では一部 HC2 程度の水滴が残っているものの、その他の大部分で HC1 まで回復することが確認された。184mS/cm の試料についても回復の兆候が見られたのは 96 時間経過時であったが、5 日経過時には他の試料と同様に大部分で HC1 であることが確認された。導電率を高くした場合には、試料表面の漏れ電流が増加し撥水性も大きく低下すると予想されたが 16mS/cm と 184mS/cm の撥水性は同程度である。また、5 日経過後の撥水性の回復度も同程度である。これはポリマー材料の優れた撥水性回復特性に加えて、高い耐汚損性によって表面抵抗率の低下が進まず、試料表面の劣化が進行しなかったと考えられる。

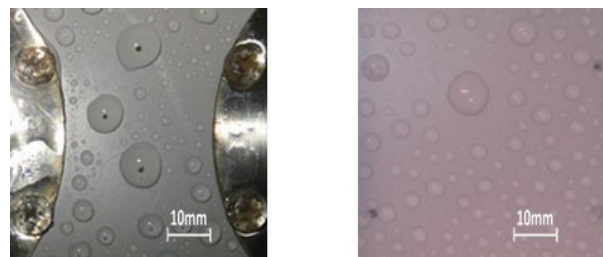
次に撥水性の回復前後の SiR を SEM によって評価した結果を図 8 に示す。図 8(a) に示している新品試料の表面は凹凸のない滑らかな状態である。これに対し、図 8(b) の直流塩霧試験終了直後に撥水性が一部 HC5 程度まで低下した部分では、全体的に筋張ったような形態の凹凸が確認された。そして図 8(c) に撥水性が HC1 まで回復した部分を示す。図 8(c) の試料は 5 日経過後に新品試料と同様の撥水性を示したにも関わらず、SEM 画像では新品試料のような滑らかな表面状態ではなく、塩霧試験直後と同様の凹凸が確認された。この結果より、確認された凹凸は SiR の撥水性の回復特性を損なう程度のものではないと判断した。しかし、凹凸が増加し、SiR 表面が粗くなることで各所の電界が高くなり、微小放電の増加に繋がる可能性などが十分考えられるため、今後も考察が必要である。



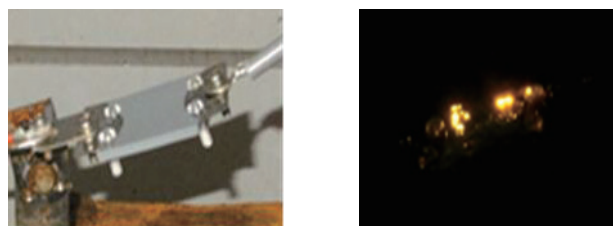
(a) 塩霧試験終了直後 (b) 5 日後
図 4 16mS/cm で実施した試験の SiR 表面状態



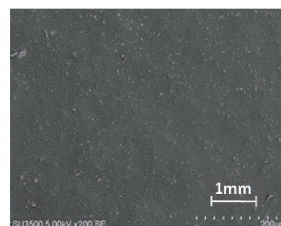
(a) 塩霧試験終了直後 (b) 5 日後
図 5 113mS/cm で実施した試験の SiR 表面状態



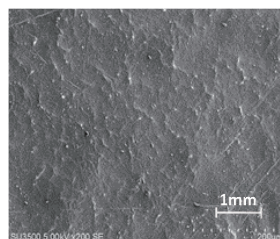
(a) 塩霧試験終了直後 (b) 5 日後
図 6 184mS/cm で実施した試験の SiR 表面状態



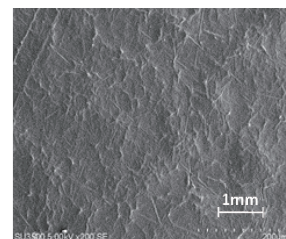
(a) 試験前 (b) 放電時
図 7 直流塩霧試験時に確認された放電の様子



(a) 新品試料(HC1)



(b) 塩霧試験直後(HC5)



(c) 撥水性回復後(HC1)

図 8 撥水性回復前後の SiR の表面状態

3.2 撥水性回復前後での電気的特性

交流課電の連続試験時の撥水性に関しても、試験直後は HC5 程度までの低下が見られるが次の試験時 (5 日後) には HC1 まで回復することが確認されている。

図 9 に、塩霧試験の直後と試験終了から 5 日後の試料に交流 6 kV を 3 時間印加する間に得られた漏れ電流の時間変化を示す。また、直流課電の塩霧試験を未実施で交流課電塩霧試験により得られた漏れ電流の変化も併せて示す。直流課電の塩霧試験を行っていない試料の場合、漏れ電流の平均値は約 5 mA で、漏れ電流が観測され始める時間は約 70 分であった。直流課電を行った試料では漏れ電流の最大値は撥水性回復とともに小さくなると予測していたが変化はなく、塩霧試験を未実施のものよりも約 12 倍大

きい。一方で、漏れ電流が検出され始める時間は、塩霧試験直後と試験終了から5日経過した試料では著しい差が見られた。塩霧試験直後の試料では観測開始と同時に漏れ電流が検出されるが、5日経過後の試料で漏れ電流が観測され始める時間は新品試料と同様とまではいかないものの平均40分である。この結果より、放電に起因する漏れ電流値が連続的に取得される時間を新品試料と比較することで、SiRの絶縁耐力を評価する指標の一つになり得ることが示唆された。

次に、塩霧試験から25日及び50日経過後に、交流6kVを3時間課電する間に得られた漏れ電流の変化を図10に示す。25日後には継続して流れる漏れ電流が5日後より若干小さくなるのみである。しかし、漏れ電流が検出され始める時間は確実に遅くなり50日で新品試料と同程度まで回復している。このように、撥水性と電気的特性の回復時間は大きく異なり、漏れ電流が流れ始めた後の漏れ電流最大値は変化しないことが明らかとなった。外被材が設備の絶縁特性を主に担い、ポリマー材料の劣化診断が有用な場合、撥水性回復特性だけで劣化の程度を評価することは不十分であり、漏れ電流が検出され始める時間が有用な指標になり得ることが明らかとなった。

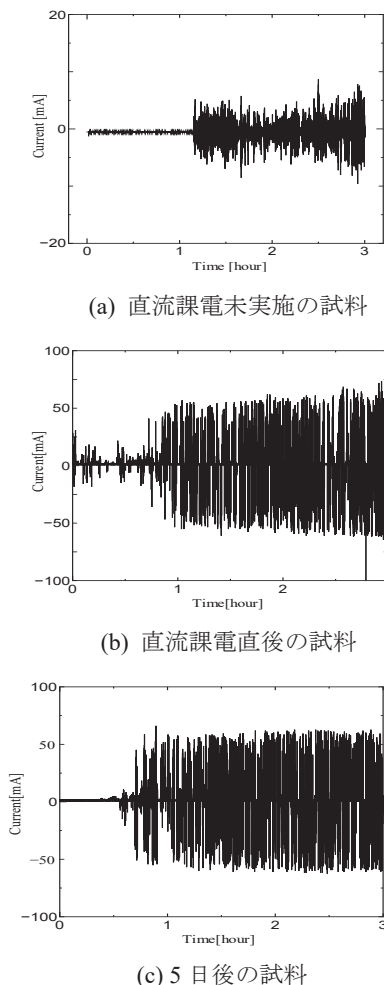


図9 撥水性の回復前後での漏れ電流の時間変化

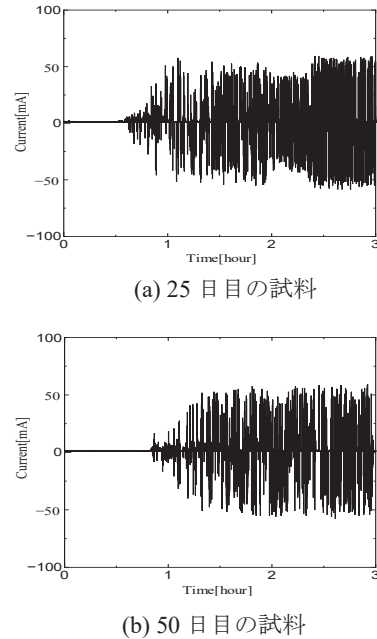


図10 25日及び50日経過後の試料の漏れ電流の時間変化

4. まとめ

ポリマー表面の撥水性の導電率依存性と、撥水性回復前後の電気的特性の変化を検証した。STRI法によって確認したポリマー試料の撥水性は、日本国内の海水の塩分濃度の平均よりも5倍程高い場合でも高い回復特性を維持した。これにより、国内での塩害に十分耐えうる撥水性と耐汚損性を示すと考えられる。一方、漏れ電流は新品試料程度までには戻らなかったが、撥水性の回復と並行して放電開始時間は顕著に遅くなることが確認できた。従来ポリマー材料の絶縁性能に関しては撥水性ありきのものでされ、撥水性が保たれている期間は電気的特性も保たれているというような解釈が行われていたが、今回の研究によって、放電によって一時的に撥水性が失われて一定の時間が経過した後には新品試料と同様の撥水性が示されるにもかかわらず、新品状態の電気的特性よりも回復が遅れることが分かった。

参考文献

- 1) S. Banski, R. Hartings: "Swedish Research on the Application of Composite Insulators in Outdoor Insulation" IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 5 (1995)
- 2) M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O. Takenouchi, T. Sakoda, Y. Hashimoto: "Evaluation of insulation performance of polymeric surface using a novel separation technique of leakage current" IEEE Trans. DEI, Vol. 10, No. 6 (2003)
- 3) T. Sakoda, D. Yamashita, T. Deguchi, T. Miyake, N. Hayashi, K. Haji, Y. Aka, T. Anjiki, and T. Fukano: "Characteristics of flashover on polluted polymer surface" 2015 Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and HV Engineering, pp. 81-84 (2015)