

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04331

研究課題名(和文) 直流設備用ポリマーの撥水性及び電気的特性の劣化回復機構の解明と劣化診断技術の開発

研究課題名(英文) Investigation of recovery characteristics of electrical property and hydrophobicity of polymer materials used for DC equipment and diagnostic techniques

研究代表者

迫田 達也 (SAKODA, TATSUYA)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：90310028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)： 直流電圧下において、水滴間の部分放電が発生するような湿潤汚損・導電率では、部分放電やフラッシュオーバーでポリマーの浸食が進むため、交流印加時よりも撥水性の低下が大きくなることを明らかにした。また、水滴間の部分放電による数 μm 程度の表面の物理的な形状変化が撥水性の高低を大きく左右すること、試料の劣化度(経年)によって撥水性回復時間に顕著な差があることを明らかにした。これらの成果を踏まえて、直流電圧印加の連続塩霧試験により、ポリマー材料の劣化度を速やかに把握できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ポリマー利用の直流機器の開発には、直流課電時のポリマー材料の撥水性及び電気的特性の劣化機構とその回復機構を明らかにすることが望まれている。得られる知見は、ニーズの高いポリマーの絶縁劣化を速やかに取得できる手法の開発に直結する。また、本研究で得られた成果の波及効果として、従来の磁器やエポキシ材料にはない特徴を有するポリマー材料を、屋外用電力設備の外被材に幅広く適用できるようになると考える。さらに、明らかにした撥水性と電気的特性の回復特性は、より優れた新しい材料の開発、応用研究を展開させるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)： At the conductivity that partial discharges forms between water droplets under DC voltage application, the decrease of hydrophobicity becomes remarkable. Additionally, physical shape change with several μm has an effect upon hydrophobicity, and the degradation degree of polymer material has influence on the recovery time of hydrophobicity.

Based on the results, it is found that a continuous salt-fog aging test under DC voltage application can grasp the degradation degree of polymer material.

研究分野：高電圧工学

キーワード：ポリマー シリコンゴム 撥水性 漏れ電流 部分放電 フラッシュオーバー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

屋外用の直流設備の開発・応用が進む中、海外では、直流用電力設備の外被材料にシリコン(SiR)等のポリマー材料を適用する例が増えている。屋外用電力設備の外被材には磁器やエポキシ樹脂があるが、これらの表面には大気中の塵埃、塩分を含んだ潮風の吹き付けや台風時の強風により塩分が付着することによって表面の絶縁抵抗が低下して絶縁破壊に至る場合がある。一方、ポリマー材料は、撥水性が高く雨洗効果が優れていることから耐汚損特性が従来の外被材よりも優れている。また、東日本大震災を経て、電力設備には巨大地震にも耐える耐震性能が求められており、機械的強度に優れたポリマーが注目されている。しかし、我が国において、ポリマーを外被材とする電力設備、特に直流用電力設備の開発は、以下の理由により進んでいない。

- (1) 撥水性の低下・回復特性と、撥水性回復に伴う電気的特性の変化が明らかでない。
- (2) 直流課電下で放電が発生すると交流と異なり電圧0点が存在しないために放電が継続してポリマーの表面損傷が懸念される。
- (3) ポリマー材の劣化診断の指標が定かでない。

ポリマーは高い撥水性に基づいた耐汚損特性を有する。この特性は、一時的に撥水性が失われても時間と共に内部から低分子成分が滲み出すことによる。国内外の研究者は、汚損湿潤時のポリマー表面の撥水性低下現象とこれに起因して発生する微小放電によるポリマー表面の電気的特性の劣化現象を明らかにしてきた。しかし、直流設備にポリマー材料を広く適用させるためには、未だ以下の学術的な点が明らかでない。

- (a) 直流課電時に発生する微小放電の表面抵抗依存性（交流課電時と異なる挙動は？）
- (b) 直流課電時における撥水性・電気的特性の低下機構（物理的作用か化学的作用か？）
- (c) 直流課電時における撥水性と電気的特性の回復機構（低下度と回復程度の関係は？）

2. 研究の目的

ポリマー利用の直流設備の利用を促すためには、直流課電時の撥水性及び電気的特性の劣化機構とその回復特性機構を明らかにする必要がある。加えて、ポリマーの劣化の程度を速やかに取得できる手法の開発が望まれる。

学術的に未解明で、本研究で対象とする上述の(a)～(c)の3点の内、特に(c)の観点の研究は国内外においても例がない。それは、ポリマー機器の電気的特性（絶縁性能）が撥水性によって維持され、撥水性の回復とともに電気的特性も回復するとの解釈がなされているためである。しかし、本研究従事者は、撥水性は回復しても電気的特性は撥水性ほどには回復しない現象を確認している。(c)及び(a)、(b)を明らかにして、ポリマー機器の劣化診断手法の開発につなげる。

3. 研究の方法

学術的に未解明な(a)～(c)の項目を以下のように実施する。本研究では、ポリマー材料としてSiRを用いた。

- (a) (直流課電時に発生する微小放電の表面抵抗依存性（交流課電時と異なる挙動は?))
低導電率の塩霧（直径約10 μ m）供給によりSiR表面上に直径1mm程度の無数の水滴を形成した状態で交流電圧を印加すると、水滴・水路に沿った放電路が形成される。直流の場合は、大部分の放電路が水滴上方で形成される。また、交流の場合は放電によって撥水性が低下するものの、直流課電下の撥水性は放電が水滴上方で発生するため低下しない。しかし、高導電率の16mS/cmの塩霧供給の下で得られた直流課電時の撥水性は交流の場合よりも低下する。これは、SiR表面の湿潤汚損による表面抵抗が交流・直流時の放電挙動に影響を与えていることを示す。このような交流とは異なる放電挙動を明らかにする。具体的には、異なる導電率の塩霧で湿潤汚損したSiRに交流あるいは直流電圧を印加してフラッシュオーバー試験を行い、試料表面上で発生する微小放電の観測を高速ビデオカメラにより行う。加えて、交流あるいは直流課電時にSiR表面上で異なる挙動を示す水滴と、湿潤汚損した試料上の表面抵抗がSiR表面で発生する放電の挙動にどのような影響を与えるか明らかにする。
- (b) (直流課電時における撥水性・電気的特性の低下機構の解明（物理的作用か化学的作用か?))
SiRに対して直径約10 μ mで導電率16mS/cmの塩霧を噴霧しながら直流正極性あるいは交流3kVを6時間課電して加速劣化させた上で、5日間の無課電と3時間課電とを1セットとして20回繰り返した場合、20回目の課電後の表面状態は交流と直流課電で異なる。表面の撥水性はSTRI法（撥水性をHC1(良好)→HC7(撥水性消失)の7段階で評価）で評価すると、直流課電時の撥水性が交流よりも低下する。交流とは異なる撥水性の低下特性がポリマー表面の化学的な組成変化に拠るものか、表面で発生した微小放電による表面形状の変化あるいは放電によ

って生成された生成物による影響の物理化学的要因が支配しているか明らかにする。

- (c) (直流課電時の撥水性と電気的特性の回復機構の解明 (低下度と回復度の関係は?))
加速劣化させた SiR の撥水性及び電気的特性の回復程度を調べ、直流課電時における撥水性に係る電気的特性の低下と回復の違いを左右する機構を明らかにする。具体的には、劣化の程度を変えた試料の撥水性及び電気的特性の回復度を調べる。これにより、直流課電時における撥水性と電気的特性の低下度と回復の違いを左右する機構を明らかにする。

以上の研究成果を基に、ポリマー材料の劣化度を速やかに取得できる手法を提案・開発する。

4. 研究成果

本研究で得られた成果の概要を以下に示す。

- (1) 直流あるいは交流電圧印加の下、SiR に対して複数回の連続フラッシュオーバー(以下、F.O.)試験を行い、湿潤汚損がポリマーの表面・絶縁性能に与える影響を評価した。また、F.O.発生に至る過程を高速ビデオカメラで観測した。

湿潤汚損した SiR に交流電圧を印加した場合、試料上の水滴から部分放電が発生し、試料表面の撥水性が低下して F.O.が発生した。この F.O.に至る過程は、連続試験 5 回を通して同様で、汚損水の導電率を変えても同過程に変化はなかった。また、導電率を 1~10mS/cm とした場合、図 1 のように、2 回目以降の F.O.電圧の大きな低下は確認されず、試料表面の侵食も確認されなかった。一方で、導電率 16mS/cm 以上では侵食が発生し、F.O.電圧も F.O.回数と共に低下した。

湿潤汚損試料に直流電圧を印加した場合、導電率 0.1-1mS/cm での 1 回目の F.O.では水滴からの部分放電が発生することなくポリマー試料上の気相で発生した。低導電率の場合は直流課電の方が交流課電に比べ湿潤汚損の影響を受けにくいことが明らかとなった。また、導電率が 10mS/cm 以上では、交流電圧印加の場合と同様に F.O.が発生し、F.O.試験を重ねる毎に侵食範囲が広がり、F.O.電圧は交流の場合よりも大きく低下した。

以上のように、直流電圧下において低導電率で湿潤汚損されたポリマー試料表面では水滴間の部分放電現象が確認されることなく試料上方の気相で発生し、交流電圧時よりも F.O.電圧が高くなる。また、導電率が高くなるにつれて、試料表面で発生する侵食並びに F.O.電圧の低下は交流電圧印加時よりも大きくなる。水滴間の部分放電が発生するような導電率では、部分放電や部分放電に続くフラッシュオーバーでポリマーの侵食が進むため、交流印加時よりも撥水性の低下が大きくなるためであると考えられる。

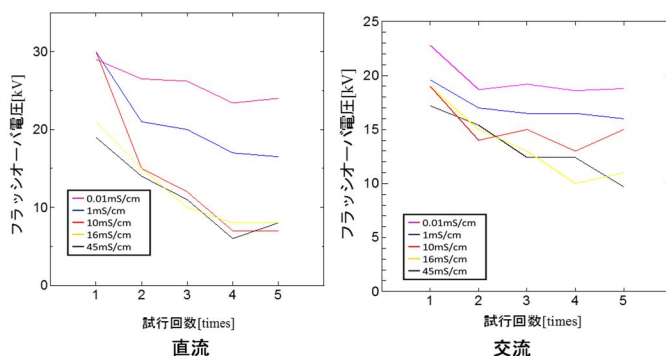


図 1 直流/交流電圧印加によるフラッシュオーバー試験結果

- (2) 劣化度の異なる SiR 表面上に距離 30 mm で対向電極を配し、導電率 16 mS/cm の塩霧中で DC 電圧を 3 時間印加する塩霧試験、その後、撥水性や電気的特性の回復のための 72 時間 (無課電) を空けるといった試験を連続で 20 回繰り返した。フーリエ変換赤外分光法で表面の化学的結合状態を測定した結果、連続塩霧試験によってメチル基と同基における C-H 結合が減少することを確認した。加えて、塩霧試験中に試料表面の水滴間の部分放電は SiR の充填剤である三水和アルミナ(ATH) 中に存在する O-H 基も減少させることを確認した。さらに、図 2 に示すように、連続塩霧試験後の表面は、10 μm 以上の孔が存在する粗い表面となっており、メチル基やメチル基における C-H 結合は減少しているものの水滴の接触角は 90 度以上あり、高い撥水性回復特性も確認された。なお、数 μm 程度の表面の物理的な形状変化が撥水性の高低を大きく左右することが確認され、DC 課電下では水滴間の微少放電の発生頻度が高く、撥水性の高低を大きく左右する物理的な形状変化が短時間で形成しやすいことを明らかにした。

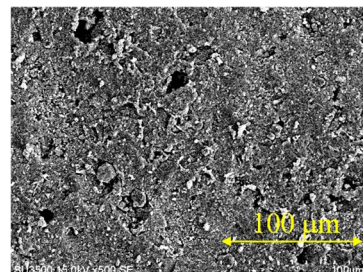


図 2 連続塩霧試験後の表面

(3) 図3に示すように、試料の劣化度(経年)によって撥水性回復時間に顕著な差があることを明らかにした。一方で、電気的特性については、試料表面の水滴間の放電開始時間で判定できるものの、漏れ電流最大値では試料間の大きな違いを確認できなかった。劣化が進行した試料表面はメチル基と同基における C-H 結合の切断箇所があるため、未劣化の試料表面程には撥水性が高くなり、水滴間の部分放電現象が早く発生しやすい。また、撥水性が一旦低下しても、SiR の低分子成分が表面に滲み出すことで試料表面の撥水性は回復するが、結合が切断された箇所が存在する表面では撥水性回復に時間を要することを明らかにした。

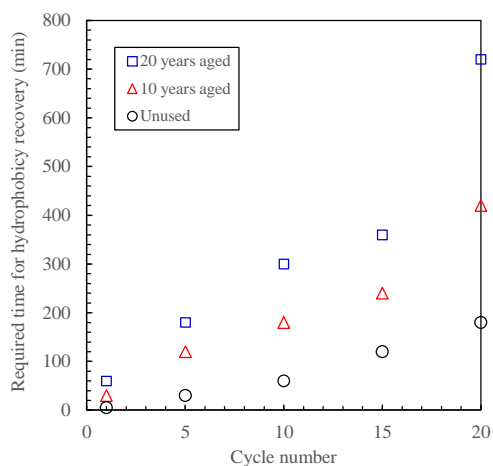


図3 連続塩霧試験における経年品の撥水性回復時間

(3) 塩霧試験時の直流電圧による電圧加速がどの程度か検討した。その結果、ATH 0%の SiR 試料においては、DC 3.6 kV が試料表面に与える劣化は AC 8.5kV 以上 13.3kV 未満の課電と同等で、ATH 50%の SiR 試料では AC 8.5kV と同等であることを明らかにした。

(4) 直流電圧(3.6kV)印加による連続塩霧試験は、ポリマー材料の劣化度を速やかに把握できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 足立昂平, 三宅 琢磨, 迫田 達也 | 4. 巻 141 |
| 2. 論文標題 連続塩霧試験による経年シリコンゴムの劣化評価 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌) | 6. 最初と最後の頁 590, 596 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.141.590 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Sakoda Tatsuya, Minami Eisuke, Miyake Takuma, Hayashi Noriyuki, Goto Shigehiko, Aka Yoshiaki, Anjiki Tomikazu, Kasuga Yasunori, Fukano Takato | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 Study on degradation diagnostic method for silicone rubber | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Electrostatics | 6. 最初と最後の頁 103479 - 103479 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elstat.2020.103479 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 香田顕司, 足立昂平, 三宅琢磨, 迫田達也, 後藤成彦, 安食富和, 春日靖宣, 深野孝人 |
| 2. 発表標題 10年間の屋外曝露後のシリコンゴムの特性評価 |
| 3. 学会等名 2021年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 足立昂平, 三宅琢磨, 迫田達也, 中原洋一 |
| 2. 発表標題 ポリマー材料の長期信頼性評価法の確立に関する研究 |
| 3. 学会等名 令和2年度電気学会電力・エネルギー部門大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 峯野夢絃, 岩切遥祐, 三宅琢磨, 迫田達也, 近藤房和, 東山昇一, 稲岡優子 |
| 2. 発表標題 交流連続塩霧試験におけるポリマー材料の撥水性回復特性 |
| 3. 学会等名 令和2年電力・エネルギー部門大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 岩切遥祐, 峯野夢絃, 三宅琢磨, 迫田達也, 近藤房和, 東山昇一, 稲岡優子 |
| 2. 発表標題 傾斜平板法による耐エロージョン特性の評価 |
| 3. 学会等名 2020年度電気関係学会九州支部連合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 足立昂平, 迫田達也, 三宅琢磨, 後藤成彦, 阿嘉良昌, 安食富和, 春日靖宜, 深野孝人 |
| 2. 発表標題 傾斜平板法におけるポリマー絶縁材料表面の影響 |
| 3. 学会等名 2020年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 峯野夢絃, 岩切遥祐, 三宅琢磨, 迫田達也, 近藤房和, 東山昇一, 稲岡優子 |
| 2. 発表標題 交流連続塩霧試験におけるポリマー材料の電気的特性と撥水性回復特性 |
| 3. 学会等名 2020年度電気関係学会九州支部連合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 竹崎道人, 迫田達也, 三宅琢磨, 後藤成彦, 阿嘉良昌, 安食富和, 春日靖宣, 深野孝人 |
| 2. 発表標題 塩霧試験によるシリコンゴムの電気的特性の変化 |
| 3. 学会等名 2019年度電気, 情報関係学会九州支部連合大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 岩切遥祐, 迫田達也, 稲岡優子, 東山昇一, 大江信宏 |
| 2. 発表標題 連続フラッシュオーバによるポリマー材料表面の撥水性の変化 |
| 3. 学会等名 2019年度電気, 情報関係学会九州支部連合大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 TAKEZAKI Kento, MIYAKE Takuma, SAKODA Tatsuya, GOTO Shigehiko, AKA Yoshiaki, and ANJIKI Tomikazu |
| 2. 発表標題 Electrical characteristics of artificially polluted silicone rubber |
| 3. 学会等名 The International Council on Electrical Engineering (ICEE) Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|