



シリコン材料の劣化特性の評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 陣内, 雅人, 山下, 大地, 岩本, 丈, 三宅, 琢磨, 迫田, 達也, Jinnai, Masato, Yamashita, Daichi, Iwamoto, Jou メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/5559

シリコン材料の劣化特性の評価

陣内 雅人^{a)}・山下 大地^{a)}・岩本 丈^{b)}・三宅 琢磨^{c)}・迫田 達也^{d)}

Evaluation of Degradation Characteristics of Silicone Rubber

Masato JINNAI, Daichi YAMASHITA, Jou IWAMOTO, Takuma MIYAKE, Tatsuya SAKODA

Abstract

Polymeric material has attracted much attention because of lightweight, high-insulation performance, and anti-weather aging performance. However, the aged deterioration is anxious because of dry band arc discharge generated on the surface of the polymer materials. In this paper, we first evaluated discharge ignition time on the polymeric material surface and weight decrease by a salt fog aging test with AC or DC voltage application. It was found that discharge ignition time became short as average electric field for a electrode gap was high. Secondly, we evaluated influence of conductivity of polluted material on the polymeric material surface on discharge ignition time by a salt fog aging test with AC voltage application. The results showed that the polluted material with high conductivity promoted the deterioration of the polymeric material surface by using the salt water of high conductivity.

Keywords: polymer, silicone rubber, salt fog aging test, discharge

1. はじめに

電気絶縁機器は、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いる。特に屋外で用いられるものにおいては、塩害等の厳しい使用条件に耐え得る絶縁耐力と、風・雪などの外力に耐え得る機械的強度が要求される¹⁾。従来、電気絶縁機器の外被材として、日本国内では磁器、海外では磁器やガラスなどの無機材料が主流として使われてきたが、近年、電気絶縁機器の外被材として有機高分子材料であるポリマー材料が注目されている^{2) 3)}。磁器等の無機材料は絶縁特性が良く、耐候性も優れているなどの長所がある反面、重量物であり、耐衝撃性が悪く、汚損時の耐電圧特性が大きく低下するなどの短所もある。一方、ポリマー材料は軽量で、機械的強度、耐汚損特性にも優れており、撥水性という特殊な性質も併せ持っている²⁾。また、ポリマー材料は加工性がよく、形状の自由度が大きく、構造の合理化と低コスト化が可能であると共に、軽量で作業性に優れている²⁾。これらのことから、欧米を中心に使用範囲が広がっている。

一方、日本国内での使用は限定的である。紫外線やバードアタック等の環境因子や放電現象による経年劣化が懸念されている。また、使用環境によって様々な汚損物質の付着が確認されており、経年使用に伴う汚損物質の堆積に

よるポリマー材料の変質や絶縁性能の低下も懸念されている^{4) 5)}。さらに、日本の気候は高温多湿であり、台風や積雪などの自然災害も頻繁に発生する。つまり、ポリマー材料の適用が進んでいる欧米などと比べて、日本の気候は苛酷であるといえる。そのため、ポリマー材料を日本で用いる上で、その劣化機構の解明と長期信頼性の把握は最重要課題である²⁾。加えて、国内外において、交流課電と直流課電による絶縁性能への違いを比較したデータはほとんど存在しない。

ところで、長期的なポリマー材料の劣化評価は、フィールドでの長期間曝露(屋外曝露試験)をすることが望ましいが、多くの時間と労力を費やすことなどの問題がある。そのため、劣化に影響する環境ストレスを凝縮・加速すること(人工加速劣化試験)により、短期間に寿命を評価し、曝露試験の結果と照らし合わせることによる長期信頼性の把握が求められている⁶⁾。

本研究では、2009 年よりポリマー機器の長期信頼性の評価に関する試験を行っている。その中で、ポリマー機器を用いて長期塩霧試験を行い、定格課電下で 1000 時間経過時においても、放電は発生せず十分な絶縁性能を保持していることが確認されている。しかし、1000 時間経過後も放電が発生してないため、どれだけの期間、絶縁性能を保持できるかは推測できない。そのため、ポリマー機器を加速的に劣化させて放電を発生させることができれば絶縁性能の保持期間の推定のための有益な情報を得ることができる。

本論文では、加速劣化の手法として試料表面の電圧スト

a)電気電子工学専攻大学院生

b)電気電子工学科学部生

c)工学部教育研究支援技術センター技術職員

d)電気システム工学科教授

レスと塩霧に用いる塩水の導電率に注目して、電圧ストレスと導電率の変化が放電開始時間等の放電特性に与える影響を評価した。また、それぞれの加速試験の有用性と加速指標の評価を行ったので報告する。

2. 電圧ストレスが加速劣化試験に与える影響

2.1 試験方法

塩霧試験装置の概要を図1に、加速試験の試験条件を表1に示す。図1の試験回路は直流正極性課電時を示しており交流課電時には、整流ダイオードとコンデンサからなる整流回路を取り外した回路となる。

図2に、試験試料と共に高電圧電極と接地電極からなるSUS製金属電極の配置を示す。試験試料には、幅50 mm、長さ70 mm、厚さ5 mmの液状シリコンゴム（Liquid Silicone Rubber: LSR）を用い、同シリコンゴム板の片面に図2のような金属電極を配し、電極間距離は50 mmとした。図3に試料設置の模式図を示す。試料は、図3のように水平面から角度15度となるように、塩霧試験容器（1.5 × 1.5 × 1.5 m³）内に設置した。その後、密閉した塩霧試験容器内に可溶性の汚損物質を模擬した霧を噴霧量1.2 L/hで常時噴霧した。なお、噴霧した霧はイオン交換水に塩化ナトリウム（NaCl）を溶かして生成したもので、導電率は16 mS/cm一定とした。印加電圧は、試験表面の平均電界強度を30 - 100 V/mmの間で10 V/mm毎に変化させて測定を行うため、交流1.5 - 5.0 kVrms、又は直流正極性1.5 - 5.0 kVとした。試験中は常時課電するとともに、試験は放電が開始してから約6時間経過まで行った。試験中の漏れ電流（測定分解能0.1 mA）は、A/D変換ボード（National Instruments社製）を介して2.4 kS/sでPCに記録した。また、放電開始時間は、漏れ電流が継続的な増加が始まる時間帯とした。試料の損耗量は、試験前の試料の質量と試験終了時の質量の質量を比較することによって算出した。

図4に試験前の試料の様子を示す。試験前の試料表面上

で、水滴の結合はなく、撥水性は良好であり、STRI(Swedish Transmission Research Institute)法によれば、その撥水性レベルはHC1となる⁷⁾。

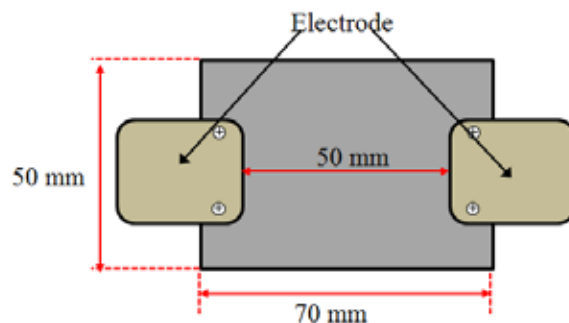


図2. シリコン板と電極配置

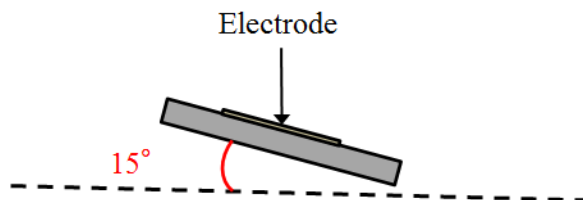


図3. 試料設置の概要



図4. 試験開始前の試料の様子

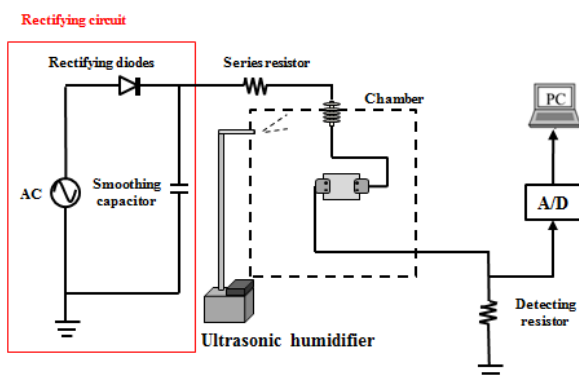


図1. 試験装置の概要（直流正極課電時）

表1 試験条件

Applied voltage [kV(rms)]	AC,DC+ 1.5 - 5.0
Test time	6 hours after discharge ignition
Chamber size [m×m×m]	1.5×1.5×1.5
Test liquid	Deionized water with NaCl
Spray quantity [L/h]	1.2
conductivity [mS/cm]	16
Temperature of test liquid [°C]	20±3

2.2 実験結果

2.2.1 直流課電時の結果

図5に試験終了時の試料の典型的な様子を示す。全ての印加電圧で、試料の撥水性はHC7程度まで低下していることが確認できる。また、接地側電極付近で激しいエロージョンが確認でき、質量の減少が起きていることが肉眼で確認することができた。さらに接地側電極付近では、塩の析出によって試料表面が白くなっている部分が確認された。このように、接地側電極付近で激しい放電が発生した。

図6に印加平均電界強度毎の試料の損耗量を示す。図6より、試料の損耗量は、印加平均電界強度が高くなるにつれて増加することが確認された。また、印加平均電界強度が40 V/mm以下になると急激に損耗量は減少することが確認できる。

図7に印加平均電界強度毎の放電開始時間を示す。印加平均電界強度30V/mm (DC+1.5 kV)では、24時間過ぎても放電を確認することができなかったため記載していない。



(a)5kV

(b)4.5kV



(c)3kV

(d)2.5kV

図5. 典型的な試験終了時の試料の様子

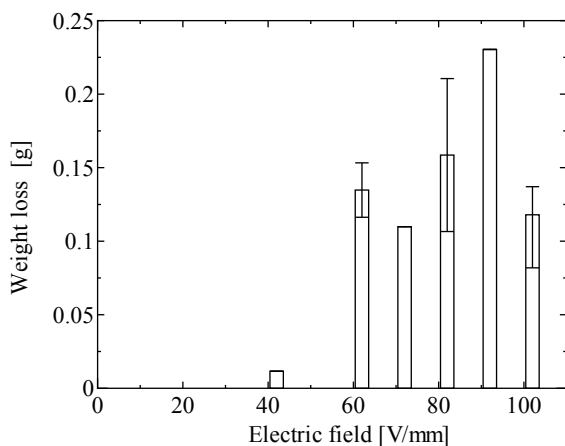


図6. 印加平均電界強度毎の損耗量

図7より、放電開始時間は、印加平均電界強度が高くなるにつれて、減少することが確認された。30 V/mmで24時間過ぎても放電が確認できなかったことや、50 V/mm以下のように印加平均電界強度が低くなると放電開始時間にバラつきが見られることから、低い電界強度になると損耗量も急激に減少すると思われる。

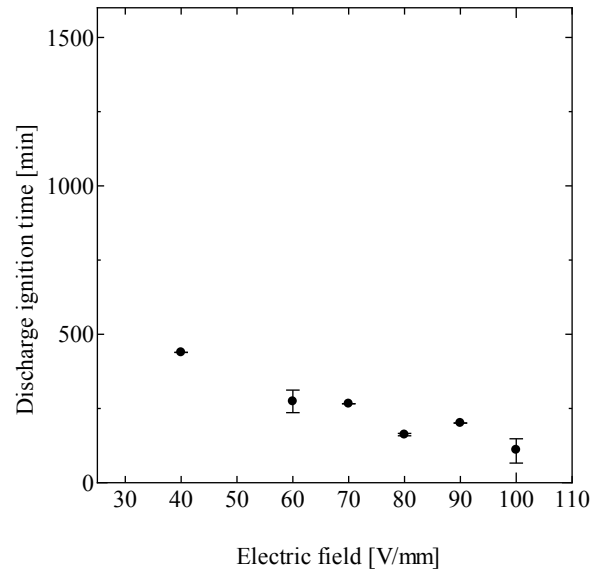


図7. 印加平均電界強度毎の放電開始時間

2.2.2 交流課電時の結果

図8に試験終了時の典型的な試料の様子を示す。全ての印加電圧で、試料の撥水性低下が確認された。しかし、試料の撥水性の低下が顕著に確認できるのは試料の下側で、直流課電時のように、試料全体が最低ランクであるHC7まで下がることはなかった。また、エロージョンも激しいものは見られず、主に電極付近の一部分で確認された。なお、直流課電時のように接地側電極付近では、塩の析出によって試料表面が白くなっている部分が確認された。これらより、放電は起きてはいるものの試料に激しいダメージを与えるものではないことが分かる。

図9に印加平均電界強度毎の試料の損耗量を示す。同図より、試料の損耗量は、印加平均電界強度が高くなるにつれて増加することが確認された。また、印加平均電界強度60 V/mmで損耗量が小さくなっているものを除くと、印加平均電界強度40 V/mm以下になると急激に損耗量が減少する。しかし、損耗量自体の値が、それほど大きくないため、差は大きくない。

図10に印加平均電界強度毎の放電開始時間を示す。同図より、放電開始時間は直流課電時のように、印加平均電界強度が高くなるにつれて、減少することが確認された。また、印加平均電界強度50 V/mm以下のように印加平均電界強度が低くなると放電開始時間に差が見られ、印加平均電界強度30 V/mmで急激に増加することが分かる。



図 8. 典型的な試験終了時の試料の様子

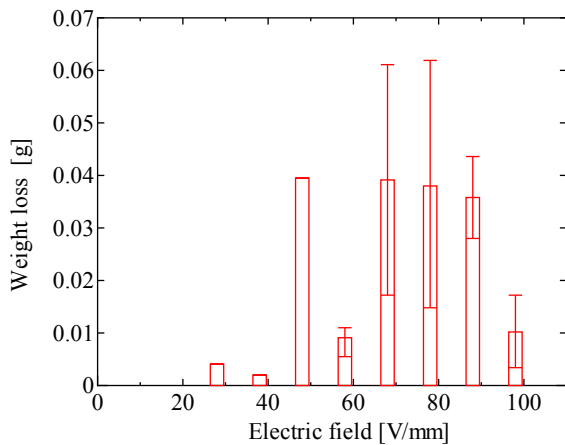


図 9. 印加平均電界強度毎の損耗量

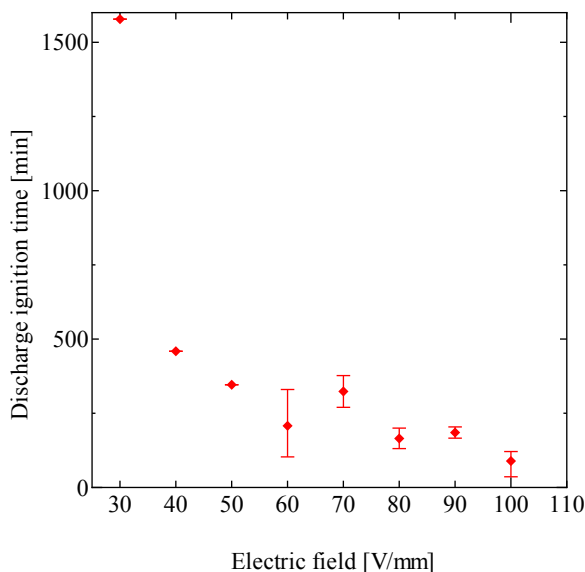


図 10. 印加平均電界強度毎の放電開始時間

2.3 電圧ストレスが加速劣化試験に与える影響の考察

図 11 に印加平均電界強度毎の試料の損耗量を示す。等しい印加平均電界強度では、交流課電に比べて直流課電の方が損耗量は最大で 10 倍以上、最小でも約 3 倍大きい。過去に行った実験でも、等しい印加平均電界強度では直流課電の方が非常に大きくなることが報告されている⁸⁾。このように直流課電と交流課電時において、試料の劣化に大きな違いが生じたのは、直流アークは電圧零点が存在しないことから自然消弧しにくく、アークの継続時間が比較的長くなりやすいために試料の特定箇所が放電に曝されるためである。

図 12 に印加平均電界強度毎の放電開始時間を示す。同図より、放電開始時間は直流課電と交流課電で、電界強度が同じ場合にはほぼ等しいことが分かる。過去に行った試験でも試料の表面の平均電界強度が同じであれば、直流課電と交流課電の放電開始時間は同程度になることが得られているため、今回の試験でも同様の傾向が確認された。しかし、低い印加平均電界強度においては、直流課電と交流課電の試験結果に差が見られる。これは、低い電界強度では、試料表面で持続的な放電が起こりにくいためである。また、Dynamic Drop Test(以下、DDT)の結果より電圧が低くなることで、撥水性消失時間が長くなることが報告されているため、低い電圧ストレス下においては撥水性の消失の速度も関係してくるものと考えられる⁸⁾。

今回の試験条件だけで考えると、電圧ストレスが低くなるにつれて損耗量が増加していたので、電圧ストレスを上げて劣化を促進させることが可能である。また、30 V/mm で直流課電の場合は 24 時間過ぎても放電は発生していないが、交流課電の場合は 1578 min で放電が確認されているため、等しい電圧ストレス下では等しくなるので、30 V/mm の場合は 1600 min 程度で放電すると考えられる。また、今回行った試験の最大印加平均電界強度の 100 V/mm での放電開始時間が約 100 min であるため、30 V/mm と 100 V/mm の放電開始時間を比較すると、加速倍率は約 16 倍となり、電圧加速試験の有用性を確認できた。

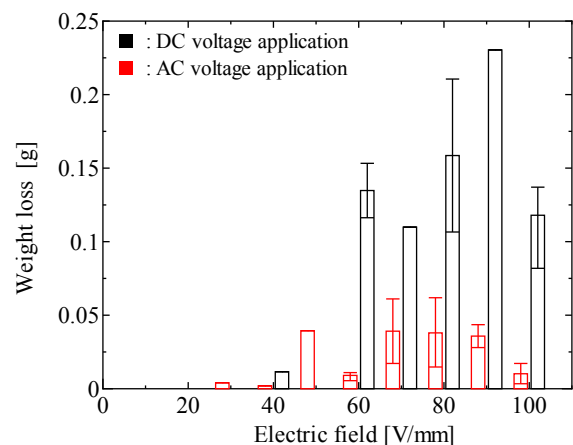


図 11. 直流課電時と交流課電時の損耗量

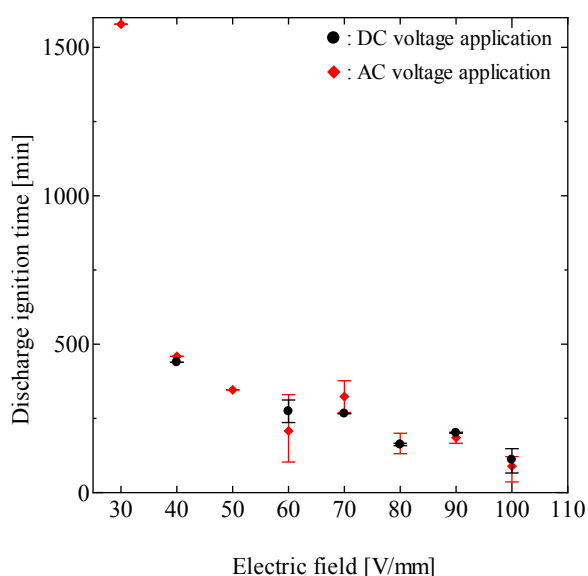


図 12. 直流課電時と交流課電時の放電開始時間

3. 導電率が加速劣化試験に与える影響

3.1 試験方法

表 2 に試験条件を示す。試験装置の概要、試料の詳細、試料設置の仕方は前節の図 1 から図 3 に示したものと同様である。また、試験条件は電圧ストレスの変化における加速劣化試験と同様となっている。塩霧に用いる塩水の導電率は 16、8、4、0.5、0.1 mS/cm と変化させ、試験は各条件で 3 回ずつ行った。なお、電圧ストレスの変化における加速劣化試験の結果より、直流課電と交流課電の放電開始時間の差が小さいことから試料表面の印加平均電界強度は 80 V/mm とした。また、実際に、高導電率下での運用の可能性を考慮した結果、印加電圧は交流 4.0 kVrms とした。試験中は常時課電するとともに、試験は放電が開始してから約 3 時間経過まで行った。

表 2 試験条件

Applied voltage [kVrms]	AC 4.0
Test time [h]	3 hours after discharge ignition
Chamber size [m×m×m]	1.5×1.5×1.5
Test liquid	Deionized water with NaCl
Spray quantity [l/h]	1.2
conductivity [mS/cm]	16, 8, 4, 0.5, 0.1
Temperature of test liquid [°C]	20±3

3.2 実験結果

3.2.1 試料の様子と放電開始時間

図 13 に試験終了時の典型的な試料の様子を導電率毎に示す。同図より、全ての試料で撥水性の低下が確認できる。また、エロージョンは電極付近に見られ、試料の一部では放電によって塩が析出して表面が白くなっている部分も確認された。全体的に放電によるダメージは見られるが、HC2～HC3 程度の十分な撥水性を保持している。従って、放電によるダメージは小さく、目視では大きな差は見られない。

図 14 に導電率毎の放電開始時間を示す。また、過去に行った DDT で得られたときの、導電率と撥水性消失時間の関係を図 15 に示す⁸⁾。図 14 より、導電率の増加によって放電開始時間が、若干減少している。しかし、その変化は緩やかで、DDT 時の撥水性消失時間のような急激な増加はない。これは、試料の一部で撥水性が残っており、試料表面の完全な撥水性消失前に、継続的な放電が起こるためだと考えられる。また、低導電率では、若干ではあるが放電開始時間の差が大きくなっている。塩分が試料表面を部分的に覆うことで、一時的に撥水性の消失が失われることが報告されているが、低導電率では NaCl が少ないことで放電による塩分の析出が少なく、放電の発生が低減するためだと考えられる⁹⁾。

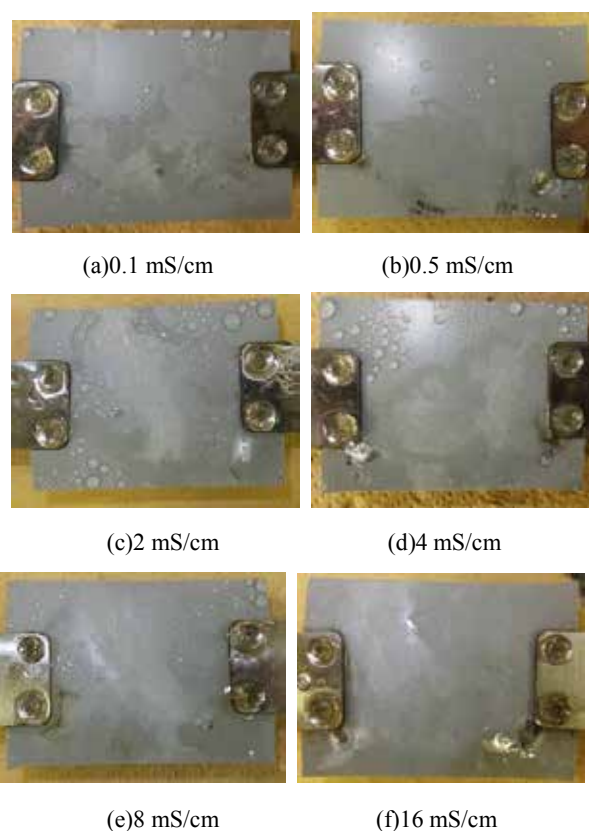


図 13. 試験終了時の試料の様子

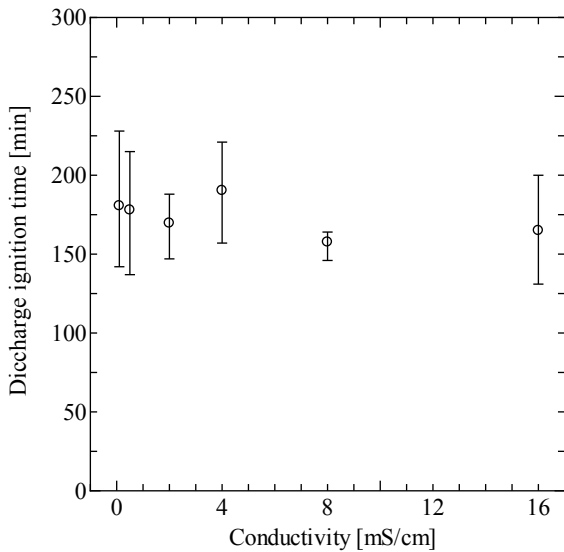
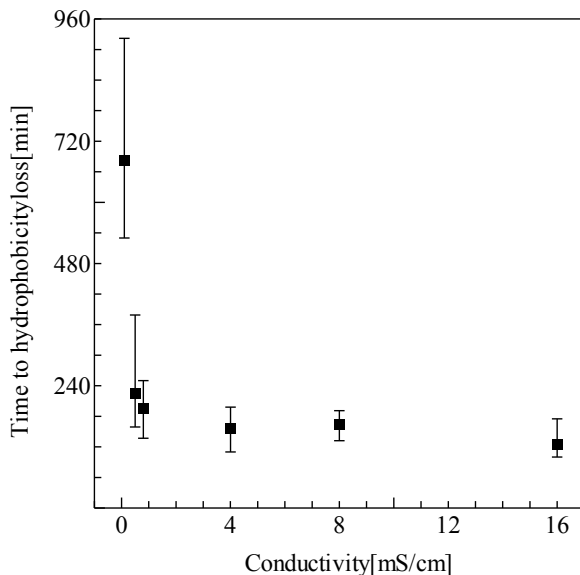


図 14. 導電率と放電開始時間

図 15. DDT の結果 (AC 6 kVrms、12 drop/min) ⁸⁾

3.2.2 累積電気量

図 16 に累積放電電気量を示す。電気量は、放電開始時まで緩やかに増加し、放電開始後に急激に増加している。また、放電開始前までは全ての導電率で電気量の増加率はほぼ同様であり、導電率の変化による違いは確認できない。また、放電後の増加量に着目すると、導電率が高くなるにつれて増加傾向にあることが分かる。しかし、8 mS/cm 以上で大きな差は確認できず、ある程度まで導電率が高くなると電気量の違いが分かりにくい。

導電率が 4 mS/cm 以下では電気量は 2~4 C 程度、8 mS/cm 以上では約 8 C と約 3 倍大きいことが分かる。これは、導電率が高くなることで導電性電流が流れやすくなったためだと考えられる。また、先ほどの導電率の増加量の

場合と同様に高い導電率での違いは確認することができなかった。

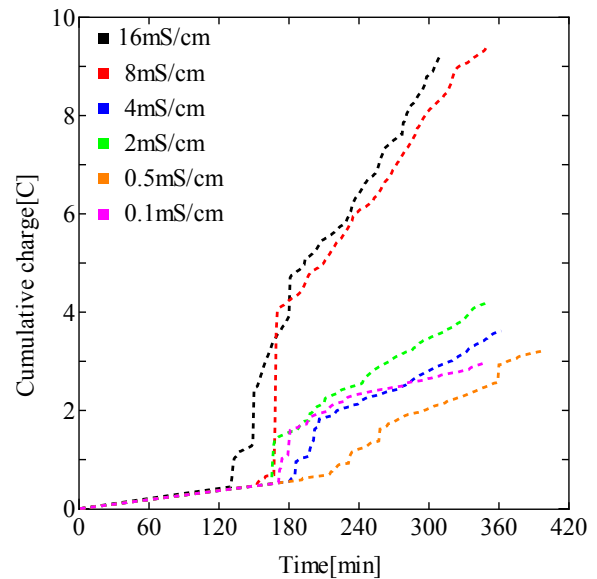


図 16. 累積放電電気量

3.2.3 漏れ電流波高値

図 17 に各導電率における漏れ電流波高値の時間変化を示す。0.1、0.5 mS/cm では 10 mA を超える漏れ電流波高値は少なく、大きな漏れ電流波高値は放電開始直後の一時的なものとなっている。2、4 mS/cm では放電開始直後の大

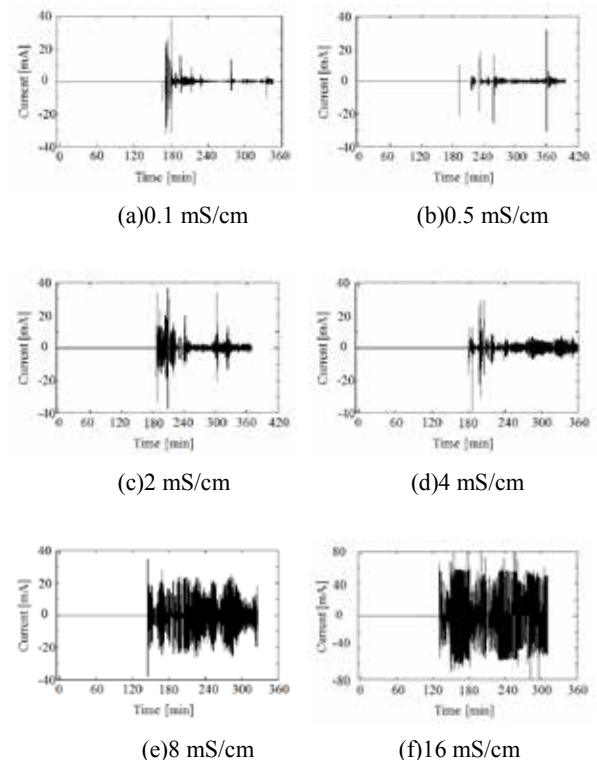


図 17. 各導電率における漏れ電流波高値の時間変化

きな漏れ電流波高値が見られ、その後減少し再度大きな漏れ電流が観測されるのが分かる。また、減少時も数 mA の漏れ電流が確認でき、0.5 mS/cm 以下に比べると電流が流れやすいことが分かる。8 mS/cm では放電開始直後から 10 mA を超える高い漏れ電流が継続的に検出されている。

次に、放電開始から試験終了時までの 3 時間で波高値 ± 10 mA 以上の漏れ電流を放電として計数した。図 18 に各導電率の放電回数を示す。4 mS/cm 以下の低導電率では放電回数は少なく約 10000 回程度で、導電率の違いによる放電回数の差は小さい。16 mS/cm では約 70000 回で最大となり、導電率の増加に伴って放電回数も増加する。また、累積電気量では大きな違いが見られなかった 8 mS/cm と 16 mS/cm ではあるが、8 mS/cm が約 30000 回で 16 mS/cm の方が 2.3 倍も多い。これらのことから、高導電率では、電流が流れやすいだけでなく、持続的な放電が起こりやすいことが分かった。

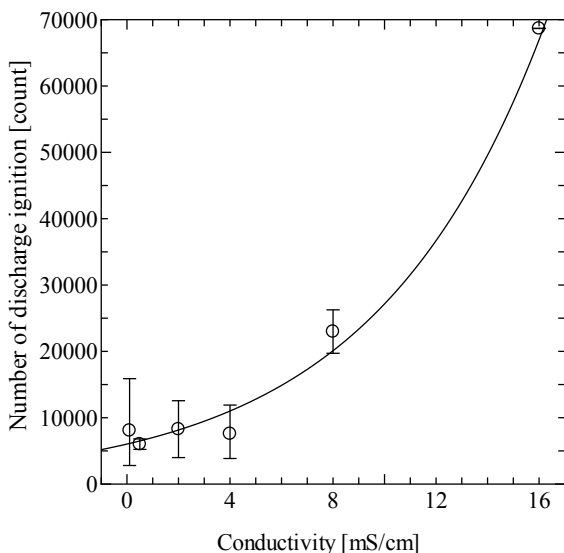


図 18. 各導電率の放電回数

3.3 導電率が加速劣化試験に与える影響の考察

導電率を変えた試験終了時の試料の様子および放電開始時間に大きな差はなく、累積放電電気量は放電開始まで全ての条件でほぼ同程度であった。すなわち、導電率の変化は放電開始の電気的特性には大きな影響を与えない。放電開始後に高導電率で累積電気量電気量の増加が大きいことと、放電回数が導電率の増加に伴って増加していることから、導電率の変化は放電開始後の電流の流れ易さや放電の持続し易さに影響を与えると思われる。以上のことから、高導電率の試験水を用いて塩霧試験を行うことで、試料表面の劣化を促進できることが分かった。

4. 結論

本研究では、直流及び交流課電がポリマー絶縁機器用外被材料の電気的特性に及ぼす影響について、ポリマー板状試料を用いた各種試験より検討した。その結果、以下のことが分かった。

(1) 電圧ストレスの変化における加速劣化試験

同じ電圧ストレスを加えた場合、直流課電と交流課電で放電開始時間はほぼ同程度、損耗量は直流課電の方が交流課電に比べ最大で 10 倍以上大きくなることが示された。放電開始時間は、電圧ストレスが増加するにつれて減少傾向にあった。さらに、電圧ストレスが大きい場合は放電開始時間の差は小さいが、電圧ストレスが小さい場合は撥水性の低下や放電の起こり易さなどが寄与して、差が大きくなることが示された。

また、印加平均電界強度 30 V/mm と 100 V/mm の放電開始時間を比較すると、加速倍率は約 16 倍となり、電圧加速試験の有用性を確認できた。

(2) 導電率の変化における加速劣化試験

放電開始時間は導電率が低くなるにつれて若干減少傾向にあったが、その変化は小さくほぼ一定であった。累積放電電気量は放電開始までは導電率の変化による違いは見られないが、放電発生後は導電率が増加するにつれて増加量が大きくなる。また、試験終了時までの電気量は、4 mS/cm 以下の低い導電率では約 3 C、4 mS/cm を超える高い導電率では約 8 C となり 2 倍以上大きくなることが確認された。放電回数は、導電率が高くなるにつれて増加傾向にあることが確認された。

これらのことから常時課電状態行う塩霧試験のような過酷な試験において、導電率の変化は放電開始に大きな影響を与えないが、放電開始後の漏れ電流の流れやすさや、放電の持続のし易さに影響を与えることが確認できた。以上より、実際に使用される環境よりもある程度の高導電率の試験水を用いて塩霧試験を行うことで、試料表面の劣化を促進させられることが可能となることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 関根泰次: 「送配電工学」, オーム社, pp.93-118, 1989.
- 2) R. Hackam: "Outdoor HV Composite Polymeric Insulators", IEEE Trans.DEI, Vol.6, No.5, pp.557-585, 1999.
- 3) 本間宏也: 「ポリマー材料の電気絶縁機器への適用」, 電気学会誌, Vol.120, No.3, pp.152-155, 2000.
- 4) 押川, 徳永, 本田, 三宅, 迫田, 安食: 「複合汚損試験によるシリコンゴム表面上の放電開始時間の評価」, 電学論 A, Vol.133, No.4, pp.205-210, 2013.
- 5) 本田, 押川, 三宅, 迫田, 吉田, 古河: 「微細藻類がポリマーがいし外被材の絶縁特性に与える影響の評価」,

電学論 A, Vol.132, No.11, pp.944-950, 2012.

- 6) 小林, 松崎, 新子谷, 木股: 「架空送電線複合がいしの開発(その 2)」, 古河電工時報, No.108, pp55-60, 2001.
- 7) STRI Guide 9211, “Hydrophobicity Classification Guide.” 1992.
- 8) 三宅琢磨: 「屋外用電気絶縁機器におけるポリマー外被材料の電気的特性」, 宮崎大学大学院博士学位論文, 2012.
- 9) 椎原, 荒田, 栢, 三宅, 迫田, 大坪: 「Dynamic Drop Test における帯電及び塩分による試料表面の撥水性へ影響」, 電学論 A, Vol.129, No.9, 657-663, 2009.