

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：32508

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04329

研究課題名(和文)汚損湿潤がいし表面における放電の進展を考慮した動的放電モデルの開発

研究課題名(英文)Development of a dynamic discharge model on wet contaminated insulators taking the discharge propagation into account

研究代表者

山下 敬彦(Yamashita, Takahiko)

放送大学・長崎学習センター・特任教授

研究者番号：50182499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：水面における沿面放電の進展モデルを開発した。電圧・電流波形は、放電接触面積の増加に伴って水の抵抗が減少すると仮定した二重の指数関数を用いて計算した。所定の電位を有する導電性ディスクを使用して放電接触領域をモデル化し、ディスク半径の時間的変化を議論した。初期の放電接触面積を決定するために、針と水の間ギャップにおける静電場の計算を実行した。沿面方向の接触面積の拡大は、導電性ディスクの端での電界によって評価した。放電進展速度は印加電圧とともに増加した。また、最大接触半径は、水の導電率が低下するにつれて増加した。接触面積の拡大に関するシミュレーション結果は、これまでの放電進展の観察結果と一致した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

汚損沿面放電の進展特性や水上放電の電圧電流特性などをシミュレーションによって求めることができるので、これまで主に実験を通して行われてきたがいしの耐汚損設計・評価、ポリマーがいしの劣化評価、水処理装置の設計や運転制御などに利用可能である。また、分野毎に取り扱いが異なる汚損沿面放電と水上放電の研究成果を相互に活用できる。

研究成果の概要(英文)：Propagation model of a surface discharge on water was developed. Voltage/current waveforms are calculated using a double-exponential function which assumes the resistance of water decreases with increasing discharge contact area. A conductive disk having a given potential is used to model the discharge contact area and the temporal variation of the radius of the disk is discussed. The electrostatic field calculation at the needle-to-water gap is performed to determine the initial discharge contact area. Expansion of the contact area in the creepage direction is evaluated by the electric field calculation at the edge of the conductive disk. The velocity of the expansion increases with the applied voltage. The maximum contact radius increases with decreasing conductivity of water under the same applied voltage. The tendency of simulation results is consistent with the previous observation results of the discharge propagation.

研究分野：高電圧工学

キーワード：汚損沿面放電 水溶液 抵抗率 接触面積 電流密度 二次電子放出係数 放電維持機構

1. 研究開始当初の背景

がいしなど屋外に置かれた固体絶縁物は、海風などにより塩分等が付着し、霧や小雨などにより湿潤した場合、著しく低い電圧で絶縁破壊を生じることがある。これは、屋外絶縁物が汚損・湿潤すると、その表面で放電が発生・進展しやすくなるためである。高い電圧を扱う電力システムにおいてはこの問題は深刻であり、古くから汚損沿面放電の問題として研究されてきた。これまでに、絶縁破壊電圧と汚損度との関係を示すいくつかの数学的モデルが提案されているが、放電の維持・進展のメカニズムは十分に解明されておらず、それらの動的特性を含めた物理的放電モデルは開発されていない。そのため、放電進展のシミュレーションに基づく高機能がいしの開発は実現していない。また近年、耐震性などの観点から高分子のがいしなどの使用割合も増加しており、放電維持機構を考慮した高分子材料の劣化シミュレーションの必要性も高まっている。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、放電の維持・進展のメカニズムなどの動的特性を含めた物理的放電モデルを開発することである。本研究課題で提案する放電モデルは、放電と水溶液の接触面を考慮した電流場の解析をベースにしている。水溶液部分の抵抗の算出に当たって、放電と水溶液の接触面を円板と仮定し、接触面積と溶液の深さで決まる形状係数を電流場と静電場の類似性を利用して数値計算で求める。

3. 研究の方法

(1) 実験回路

図1に実験回路を示す。針電極に電圧を印加すると、まず針-水溶液間で放電が発生する。続いて、水溶液面に沿って放電が進展する。針-水溶液間で放電が発生した後、電圧の再配置が起きるので、針-水溶液間で放電の発生と水溶液面での放電の進展は別々に取り扱う。

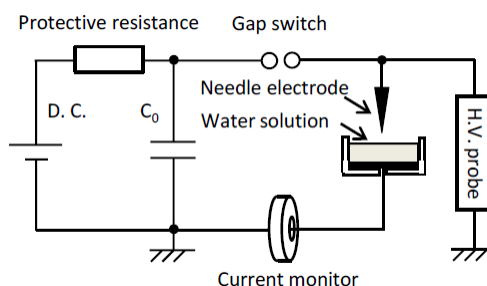


図1 実験回路

(2) 放電モデル

1) 電極 - 水溶液間放電モデル

針-水溶液間の放電については、水溶液を接地電極として針-水溶液間に気中の絶縁破壊理論を適用する。放電の広がり活性領域で決定される。そこで、水溶液面における活性領域を初期接触面とする。

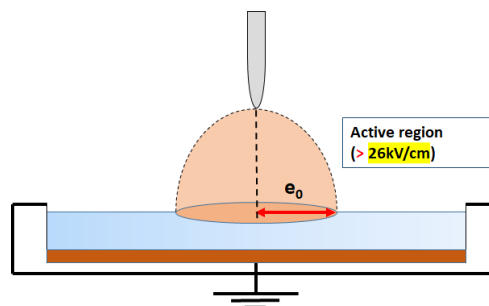


図2 電極 - 水溶液間放電モデル

2) 水溶液面進展モデル

放電は水溶液面上を放射状に進展するが、放電と水溶液との接触面を円板と仮定する。以下、この円板の面積を等価接触面積と呼ぶ。放電と水溶液との接触面の円板の先端において気中の絶縁破壊理論を適用し、沿面方向電界に基づいて放電進展を評価する。これを放電進展の物理モデルと呼ぶ。

電界を計算するためには円板の大きさと電位が必要である。円板電位は放電の進展によって変化する水溶液部分の抵抗によって変化する。しかし、放電の進展特性は明らかではない。そこで、水溶液部分の抵抗の時間変化を仮定した数学モデルを使用する。以前の研究では単一の指数関数を使用したのが、本研究ではより厳密に模擬できるように2つの指数関数を組み合わせた方法を開発した。

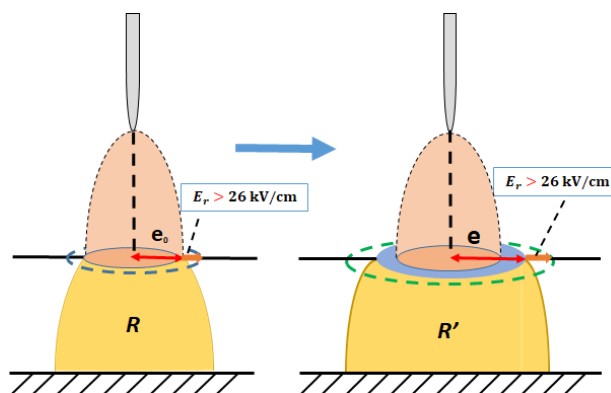


図3 水溶液面進展モデル

(3) 回路モデル

1) 等価回路

図4に実験回路の等価回路を示す。液体上での放電には数百ボルトの電極降下があるため、放電と液体抵抗の間に電圧源を考慮する必要がある。図2から、電極降下を仮定することで液体抵抗を求めることができる。なお、水溶液部分の静電容量に電荷が蓄えられても水溶液部分の抵抗を通して速やかに中和されるので、静電容量は無視しても構わない。したがって、基本的にはRC放電回路と考えられるが、抵抗は放電の広がり依存するため時定数が変化する。

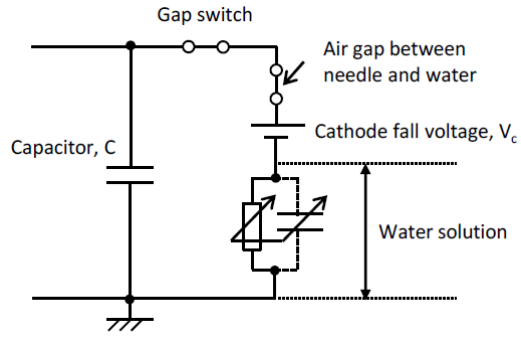


図4 実験回路の等価回路

時定数が変化するRC減衰回路では、時定数の変化(特に、Rの時間変化)が電圧・電流波形を特徴付ける。Rの変化は放電進展と関係しているが、放電進展速度は明らかになっていない。そのため、水溶液部分の抵抗の時間変化を仮定した数学モデルを使用する。

2) 電極降下電圧

これまでに報告されている文献の電極降下に関するデータをまとめると図5のようになる。この図から、330を電極降下の最小値として提案している。

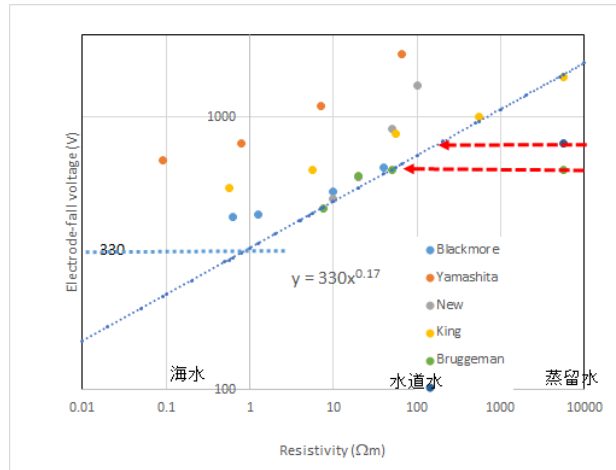


図5 電極降下

3) 水溶液部分の抵抗の近似

電圧・電流波形から得られる抵抗の時間変化は次式を用いて近似した。ここで、 $R(t)$ を水溶液の抵抗、 R_0 を針-水溶液放電発生時の抵抗とする。

$$R(t) = R_0 - A(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \dots (1)$$

この式は、いわゆるインパルス波形を表すものであり、 α, β の求め方は様々あるが、高電圧工学分野で馴染み深い簡易的な方法を用いた。最終的に、フィッティングを行ってAを決定する。詳細な方法は割愛するが、近似結果を図6に示す。よく近似されているのが分かる。なお、これまでは単一指数関数の次式を用いて近似を行っていた。

$$R_s(t) = (R_0 - R_{min})e^{-\beta t} + R_{min} \dots (2)$$

ただし、 $R_s(t)$ を水溶液の抵抗、 R_0 を針-水溶液放電発生時の抵抗、 R_{min} を水溶液の抵抗の最小値とする。比較のため、この式による近似も図4に示している。

4) 等価接触半径の求め方

放電と水溶液の接触面の円板の半径を仮定し、円板電荷を用いた電界計算から得られる円板の電位と電荷の関係から静電容量を求め、静電界と電流界の相似性を利用して抵抗を求める。接触面の円板の半径と水溶液の深さを変化させて同様の計算を行い、接触面の半径と水溶液部分の抵抗と接触面の半径および水溶液の深さの関係を求める。その関係を用いて、電圧・電流波形から得られる抵抗の値から放電の接触半径を求め、等価接触半径とした。

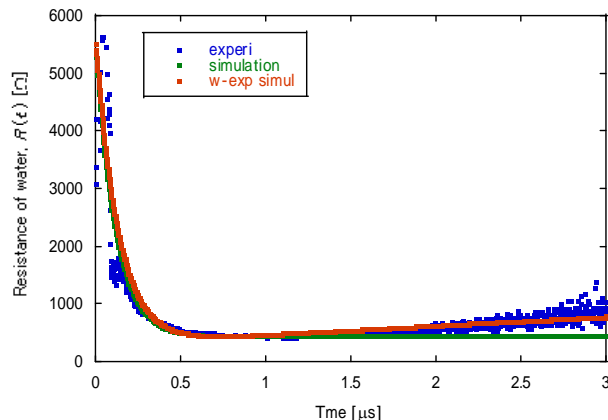


図4 水溶液部分の抵抗の近似

(4) 電圧・電流波形の近似

印加電圧から次式を用いて電圧波

形を求めた。次式は時間分割した n 番目の電圧を表している。抵抗は(2)式で求められる値を用い、 V_c 電極降下であり算出には4.2の式を用いた。また、電流波形は、電圧波形の電圧の値を抵抗で割って求めた。

$$V_n = (V_{n-1} - V_c) \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_S(t_{n-1})C}\right) + V_c \dots (3)$$

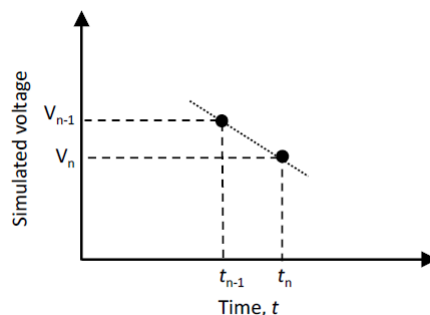
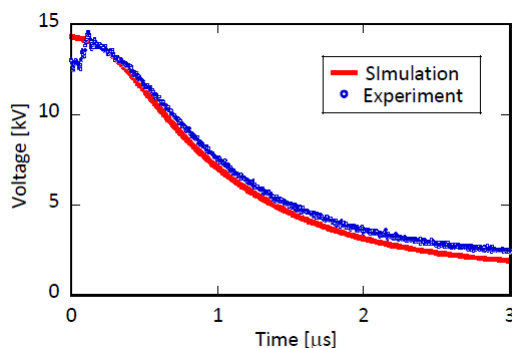


図5 時間分割による離散化

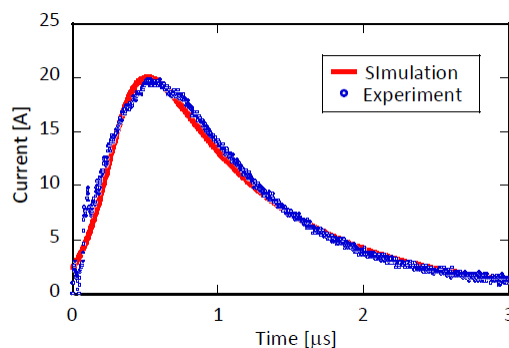
4. 研究成果

(1) 電圧・電流波形の詳細検討

上述の方法を用いて、電圧・電流波形のシミュレーションを行った。その結果、図に示すように観測波形とよく一致した。ただし、図では一重の指数関数を用いた抵抗による近似結果を示している。さらに、スタートギャップや針 - 水溶液間の静電容量なども考慮した詳細な等価回路を用いて、電圧・電流波形の検討を行った。その結果、図に矢印で示すように、スタートギャップの始動に合わせて電流波形に最初のパルスが現れ、続いて針 - 水溶液の放電の発生に合わせて2つ目の電流パルスが現れる。これに対応して、電圧波形では電荷再配置による電圧の変動が起きている。



(a) 電圧波形



(b) 電流波形

図6 電圧・電流波形

(2) 放電の等価接触半径の時間変化

水溶液部分の抵抗の時間変化から求められる等価接触半径を用いて、放電の等価的な接触半径の時間変化を求めた。図7からもわかるように、放電の進展をよく表している。

(3) まとめ

水面における沿面放電の進展モデルを開発し、水溶液部分を二重指数関数で近似し、電圧・電流波形および接触面積の拡大に関するシミュレーションを実施した。シミュレーション結果は、これまでの放電進展の観察結果と一致し、モデルの有効性が確認された。

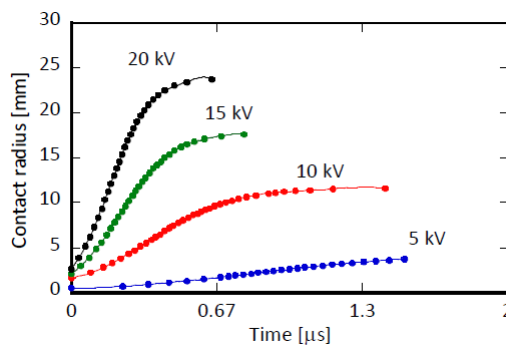


図7 等価接触半径の時間変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Furusato Tomohiro, Sasaki Mitsuru, Matsuda Yoshinobu, Yamashita Takahiko	4. 巻 55
2. 論文標題 Underwater shock wave induced by pulsed discharge on water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 115203 ~ 115203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac3f57	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 Tomohiro Furusato, Kazushi Oura, Yoshinobu Matsuda, Mitsuru Sasaki, Yuki Inada, Takahiko Yamashita	4. 巻 59
2. 論文標題 Validation of the local thermodynamic equilibrium at a local current concentration area of positive pulsed surface discharge plasma on water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 07-1 - 07-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab71d9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 T. Furusato, Y. Yamamoto, T. Sakamoto, K. Oura, Y. Matsuda, T. Yamashita	4. 巻 26
2. 論文標題 Simulation of voltage/current waveforms and contact area of pulsed surface discharge on water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	6. 最初と最後の頁 439 - 446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TDEI.2018.007748	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10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 鍋島雄飛, 古里友宏, 是枝弘行, 山下敬彦
2. 発表標題 電解質水溶液面における放電の陰極降下と二次電子放出係数
3. 学会等名 静電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鍋島雄飛, 是枝弘行, 古里友宏, 山下敬彦
2. 発表標題 汚損湿潤面における放電の陰極降下と二次電子放出係数による放電維持機構の検討
3. 学会等名 電気学会誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧 合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大浦和志, 古里友宏, 稲田優貴, 松田良信, 山下敬彦
2. 発表標題 水上パルス沿面放電プラズマの局所熱平衡状態の評価
3. 学会等名 電気学会 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂本拓也, 古里友宏, 山下敬彦
2. 発表標題 放電接触面積の推定による水上パルス沿面放電の特性解明
3. 学会等名 電気学会 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒川崇文, 古里友宏, 山下敬彦
2. 発表標題 水上沿面パルス沿面放電から発生する衝撃波および発光スペクトルの観測
3. 学会等名 電気学会 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takafumi Kurokawa, Tomohiro Furusato, Yoshinobu Matsuda, Takahiko Yamashita
2. 発表標題 Observation of shock wave generated by pulsed surface discharge on water
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩永 拓実, 小西凌, 古里友宏, 山下敬彦
2. 発表標題 汚損湿潤面におけるドライバンド放電の形態の遷移と電流の関係
3. 学会等名 2019年度(第72回)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 古里友宏, 坂本拓也, 山下敬彦
2. 発表標題 水上パルス沿面放電の陰極降下電圧と電流密度
3. 学会等名 静電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Sakamoto, Tomohiro Furusato, Yota Yamamoto, Kensuke Sasaki, Takahiko Yamashita
2. 発表標題 Evaluation of current density of pulsed surface discharge on water solution by analyzing voltage/current waveforms
3. 学会等名 International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazushi Oura, Tomohiro Furusato, Takahiko Yamashita
2. 発表標題 Evaluation of local thermal equilibrium of pulsed surface discharge on water
3. 学会等名 International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP-10) (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
研究分担者	古里 友宏 (Furusato Tomohiro) (70734002)	長崎大学・工学研究科・准教授 (17301)	

	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
研究協力者	鍋島 雄飛 (Nabeshima Yuhi)		
研究協力者	大浦 和志 (Oura Kazushi)		
研究協力者	坂本 拓也 (Sakamoto Takuya)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	黒川 崇文 (Kurokawa Takafumi)		
研究協力者	岩永 拓実 (Iwanaga Takumi)		
研究協力者	小西 凌 (Konishi Ryo)		
研究協力者	山本 遥太 (Yamamoto Yota)		

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