

令和元年6月19日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06231

研究課題名(和文) 湿潤汚損面における局部放電の放電形態と発光スペクトルおよび電流との関係

研究課題名(英文) Current dependence of discharge phase and emission spectra on wet polluted surfaces

研究代表者

山下 敬彦 (YAMASHITA, Takahiko)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：50182499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：汚損湿潤したがいし上で発生するドライバンド放電の形態は電流の増加に伴ってコロナや火花からドライバンドアークへと変化する。このときの放電の性質はグロー的な状態からアーク的な状態へと遷移し、境界となる電流の閾値は電解質の種類や電解質水溶液の導電率に依存せず、2～4 mAとほぼ一定であることを明らかにした。一方、空気中の窒素に由来する発光スペクトル強度は放電形態の遷移に関わらずあまり変化しないが、電解質に起因する発光スペクトルは電解質の種類に大きく依存し、電流に対するスペクトル強度の増加の割合は電解質水溶液の導電率の増加に伴って増加す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

これまで圧程度は分かっていたものの、その閾値が明らかにされていなかった汚損沿面放電のコロナや火花から局部アークへの遷移の閾値を明らかにした。また、ポリマーがいし材料の撥水性喪失特性試験における試験終了の判定基準の物理的意味を明確にした。ポリマーがいし材料の撥水性喪失特性試験はCIGRE(国際大電力会議)を中心に検討が行われており、試験終了要件として2 mA以上の連続電流が4秒以上現れることが採用されている。この要件はドライバンド放電が継続して現れることを意味することを明らかにしたことは意義がある。

研究成果の概要(英文)：The mode of dry-band discharge on wet polluted insulators change from corona or spark to dry-band arc with increasing of the discharge current. The author revealed that the characteristics of the dry-band discharge change from glow-like to arc-like, and the critical current of the transition of discharge mode is in the range between 2 to 4 mA irrespective of the kind of electrolyte and the conductivity. The spectrum intensity originated from Nitrogen in the air was revealed to be independent of the discharge transition, however, the spectrum intensity originated from the electrolyte strongly depend on the kind of electrolyte and to increase with the discharge current. The increasing rate was found to depend on the kind of the electrolyte.

研究分野：高電圧工学

キーワード：汚損沿面放電 局部放電 発光スペクトル 放電形態

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電気エネルギーシステムでは、自然環境の影響を大きく受ける外部絶縁の性能がシステムの安全性・安定性・経済性を決定する。外部絶縁の適正化・高度化を進めるためには、絶縁物表面における放電現象、特に汚損・湿潤を受けた場合の放電現象の解明が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、汚損・湿潤を受けた絶縁物表面における絶縁破壊の前駆現象として現れる局部放電の形態と電流の関係について、発光スペクトルと電流を時間分解して調べ、放電形態が変化する電流の条件を明らかにする。また、局部放電の放電形態の変化に対する電解質ならびに電解質水溶液の抵抗率の影響等について調べる。

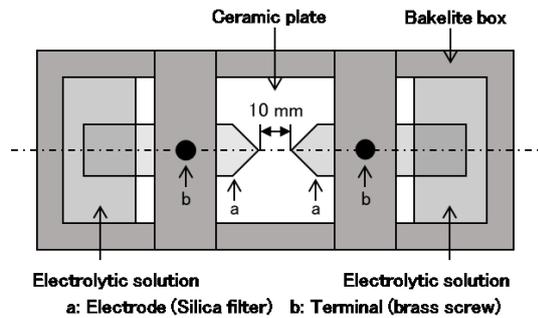
3. 研究の方法

図1に電極系を示す。電解質水溶液に浸したシリカろ紙をセラミック板の上に10 mm離して対向させることによってがいし上でのドライバンドを模擬した。ろ紙電極は真鍮製のねじで固定し、高圧変圧器(東京変圧器, T-G-50)に接続した。電極間に波高値が約22 kVの交流電圧を印加し、ドライバンド放電を発生させた。

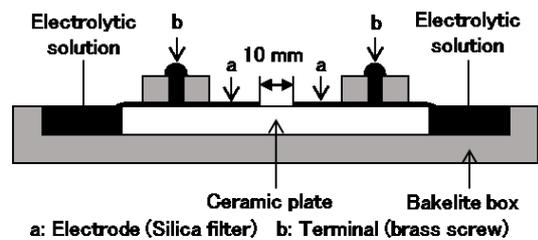
図2に実験装置と測定系の概略図を示す。電極系の端子間電圧は、高電圧プローブ(Iwatsu HV-P60)とデジタルオシロスコープ(Tektronix Inc., DPO-4104B-L)を用いて測定した。図中の $R_1$ は電流制限抵抗で、ギャップを流れる電流は抵抗値が47 $\Omega$ の電流測定抵抗 $R_2$ の電圧降下から求め、デジタルオシロスコープで波形を観察した。ドライバンド放電の発光スペクトル分布を分光計(BWTEK Inc., Glacier X)を用いて測定した。窒素分子と電解質に由来する発光スペクトルの経時変化は、モノクロメータ(Ritsu Oyo Kougaku Co., Ltd., MC-25NP)とデジタルオシロスコープを用いて測定した。ドライバンド放電と入射スリットとの間の距離は200 mmに設定し、モノクロメータからの出力光は、光電子増倍管システム(浜松ホトニクス, H10720-01)を用いて電気信号に変換され、デジタルオシロスコープで測定した。放電の画像はデジタルカメラ(Nikon, D610)を用いて記録した。

図3はシュリーレン法による密度変化の観測系を示す。ディレイジェネレータ(Stanford Research Systems, DG535)により放電開始後の任意の時間にパルス YAG レーザ(Continuum Electro-Optics, Minilite ML-1)を発振させ、カメラ(Nikon, D610)でシュリーレン図を撮影し、密度変化を観測した。

なお本研究では、ドライバンド放電の放電形態の遷移と電流との関係調べるため、電流制御用の抵抗 $R_1$ を電極システムに直列に接続し、2~7 M $\Omega$ の間で変化させてドライバンド放電の観測を行った。また、ドライバンド放電の放電形態の変化に対する電解質と電解質水溶液の抵抗率の影響についても調査するため、電解質として塩化カリウム(KCl)、塩化ナトリウム(NaCl)および塩化マグネシウム(MgCl<sub>2</sub>)を用い、電解質水溶液の抵抗率を20°Cで20, 200  $\Omega$ cmならびに2, 20 k  $\Omega$ cmに調製して実験を行った。なお、電解質水溶液の抵抗率は導電率計(DKK社, AOL-40)で測定した。さらに、放電の気体温度を窒素のスペクトル分布(N<sub>2</sub> 2PB)から推定した。



(a) 上から見た図



(b) 断面図

図1. 電極系.

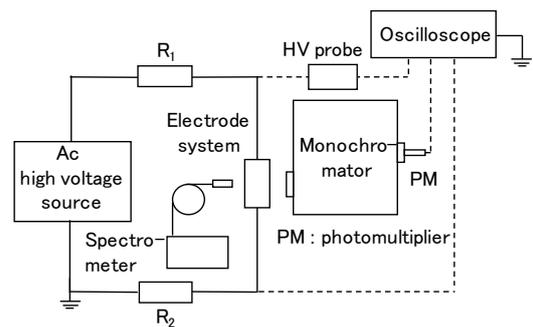


図2. 実験装置と測定系

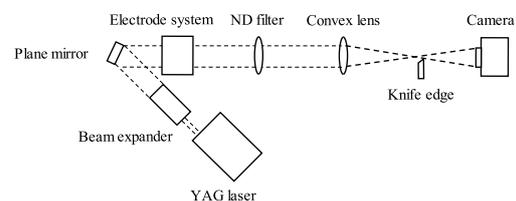


図3. シュリーレン法による観測系

#### 4. 研究成果

##### (1) 典型的な放電の形態と特徴

図4および5に電解質水溶液の抵抗率が比較的低い場合の電圧・電流波形および発光波形を同次観測した例を示す。直列抵抗が小さい場合には連続的な放電形態で、直列抵抗が大きくなると間欠的な放電形態をとった。

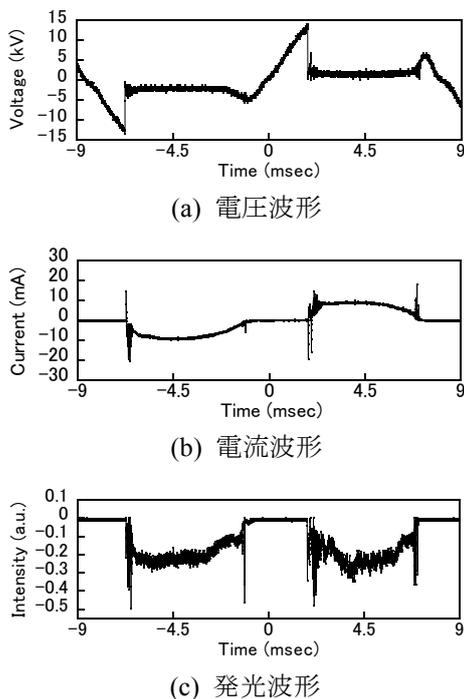


図 4. 連続的なドライバント放電の電圧・電流波形および発光波形の例 (NaCl aq. 20 Ωcm,  $R_1=2$  (MΩ)) .

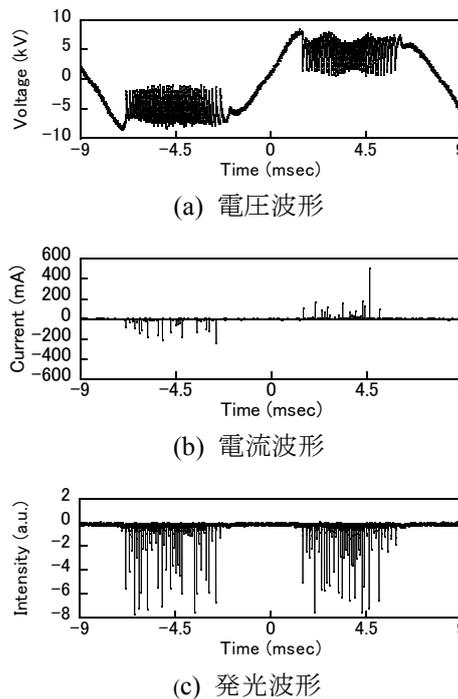


図 5. 間欠的なドライバント放電の電圧・電流波形および発光波形の例 (NaCl aq. 20 Ωcm,  $R_1=7$  (MΩ)) .

中間的な直列抵抗の場合は両者が交じり合った形態となった。図6に例示するように、連続的な放電が占める時間割合は直列抵抗の値とともに減少し、間欠的な放電の時間割合が増加した。

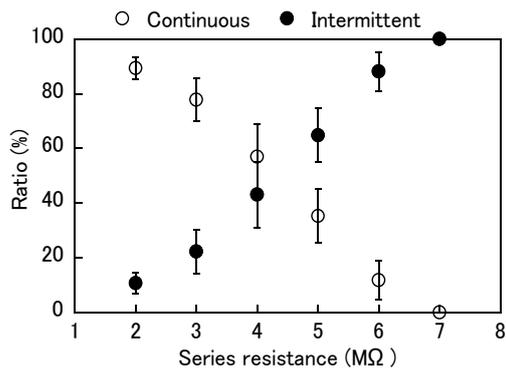
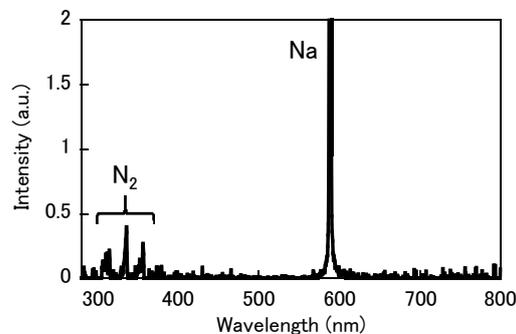


図 6. 連続的な放電と間欠的な放電の占める時間割合 (NaCl aq. 20 Ωcm)

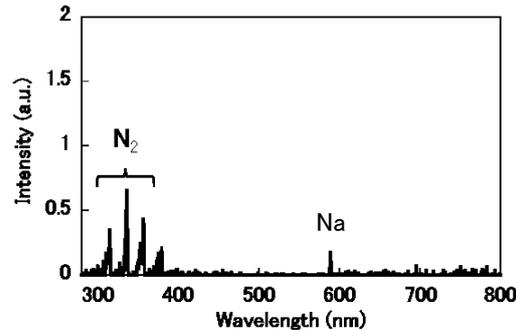
##### (2) 放電形態の境界と電流の閾値

図7に発光スペクトル分布の一例を示す。電解質に起因するスペクトル強度は直列抵抗に大きく依存するが、窒素のスペクトルはあまり変化しないことがわかる。このような特性は、電解質の種類および電解質水溶液の抵抗率に関わらず認められた。

電解質水溶液の抵抗率が比較的低い場合、連



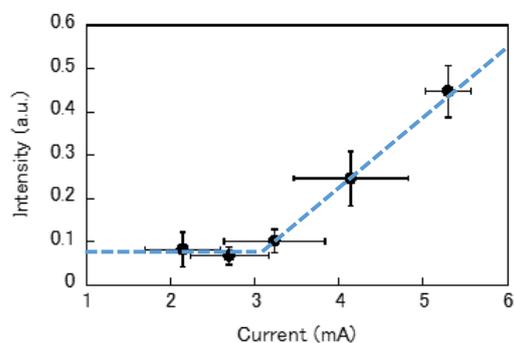
(a)  $R_1=2$  (MΩ)



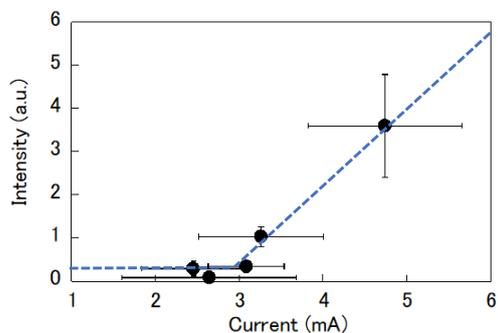
(b)  $R_1=7$  (MΩ)

図 7. 典型的なスペクトル分布 (NaCl aq., 20 Ωcm)

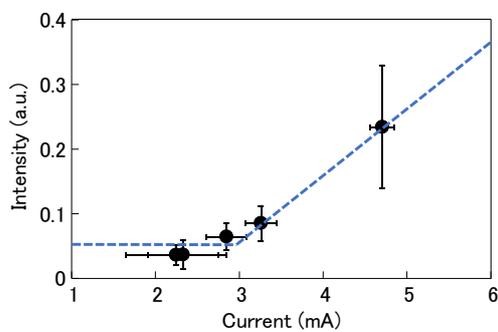
連続的な放電の電流の最大値と電解質に起因するスペクトル強度との間には、図8に示すように一定の関係が存在し、電流が約3 mA（直列抵抗4～5 M $\Omega$ ）を境にスペクトル強度が急激に大きくなる。このときの電流の値を放電形態が変化する電流の閾値とした。この電流の閾値を満たす場合の連続的な放電と間欠的な放電の占める時間割合は図6に示したようにほぼ50%であった。なお、この閾値は電解質の種類に関わらずほぼ一定で、連続的な放電の気体温度は約6000Kで、間欠的な放電の気体温度は1700～1800 Kであった。



(a) KCl aq., 20  $\Omega$ cm



(b) NaCl aq., 20  $\Omega$ cm



(c) MgCl<sub>2</sub> aq., 20  $\Omega$ cm

図8. 連続的な放電の最大電流と電解質に起因するスペクトル強度との関係

### (3) 放電形態と発光スペクトル

電解質由来のスペクトル強度は、図8に示したように、連続放電時の電流のピーク値に依存して増加し、その増加の特性は電解質の種類と抵抗率によって著しく変化した。そこで、図8のスペクトル強度の増加の割合と電解質水溶液の抵抗率との関係を調べた。結果を図10に示す。なお、MgCl<sub>2</sub>の場合はスペクトル強度が極めて小さいため、図には示していない。

図より NaCl の場合、電解質に起因する発光強度は顕著に電解質水溶液の抵抗率の増加に伴って減少することがわかる。窒素に起因する波長の短い発光は有機絶縁材料の撥水性の低下に関係するが、滞留性のドライバンド放電が発生すると、電解質に起因する発光が著しく増加す

電解質水溶液の抵抗率が大きくなると連続的な放電のみが現れるようになる。しかし、連続的な放電の電流の最大値と電解質に起因するスペクトル強度の関係は図8と同様の関係を示し、電流の閾値は2～4 mA となった。なお、MgCl<sub>2</sub>の場合は電解質水溶液の抵抗率が大きくなると電解質に起因するスペクトル強度が著しく弱くなる。このときの電流の閾値は放電の気体温度の変化から決定した。図9に直列抵抗の値に対する放電の気体温度の変化の例を示す。

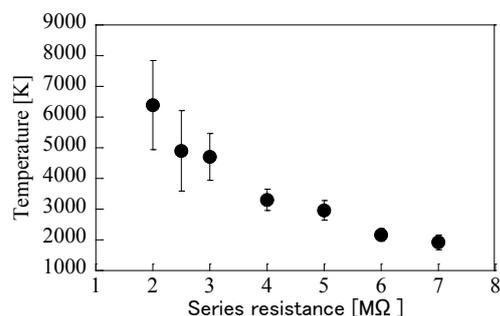


図9. 放電の気体温度と電流制限抵抗の関係 (MgCl<sub>2</sub> aq., 2 k $\Omega$ cm)

直列抵抗が2 M $\Omega$ の場合は約6000K でアーク的であり、6 M $\Omega$ 以上になると2000 K程度でグロー的になる。この間に放電の気体温度は大きく変化する。すなわち、放電形態が変化する。このときの連続的な放電の電流の最大値は図10に示すように2～4 mA である。したがって、放電形態の遷移の閾値となる電流値は2～4 mA と考えられる。

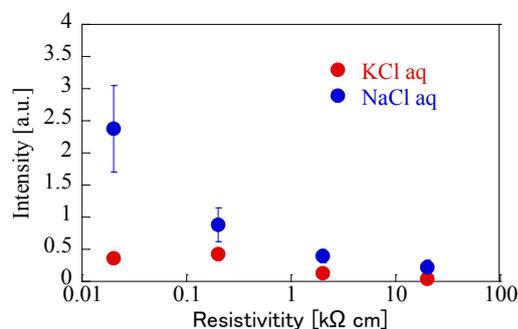


図10. 水溶液の抵抗率と電解質に起因するスペクトル強度との関係

ることから、電解質に起因する発光は撥水性喪失後のエロージョン（損耗）劣化に関係すると考えられる。

#### (4) 放電路の密度変化と衝撃波

ところで、火花あるいはコロナの放電特性と滞留性のドライバンド放電の特性は気体温度をはじめとして大きく異なる。そのため、放電路の密度変化や衝撃波の特性が両者では異なると考えられる。そこで、シュリーレン法を用いて放電路の密度変化および衝撃波を観測した。その結果、図 11 に示すように密度変化の様子は両者で異なることを明らかにした。しかし、両者の境界を密度変化の違いから判定することは困難であった。また、衝撃波の進行速度は両者とも同等であった。

図では、分かりやすくするために、電極と密度変化の輪郭を白線で示している。連続的な放電の場合の密度変化の領域は間欠的な放電に比べて広いことがわかる。

#### (5) 研究成果のまとめ

本研究の主な結果を次にまとめて示す。

- ① 電解質の導電率が比較的高い場合には、いずれの電解質の場合も連続的なドライバンド放電と間欠的なドライバンド放電が観察された。直列抵抗が比較的低いときに連続的なドライバンド放電が観察され、放電のガス温度は約 6000 K でアーク的性質をもつ放電であった。一方、直列抵抗が比較的低いときに間欠的なドライバンド放電が観察され、放電のガス温度は 1700~1800 K でグロー的性質をもつ放電であった。直列抵抗が中間的な値のときは、両者が混じった放電形態となった。
  - ② 一方、電解質の導電率が比較的低い場合には、いずれの電解質の場合も連続的なドライバンド放電のみが観察された。しかしドライバンド放電の性質は直列抵抗の値とともにアーク的性質からグロー的性質へと変化し、変化の様子は電解質の導電率が比較的高い場合と同様であった。
  - ③ 電解質の導電率が比較的高い場合に、連続的でアーク的なドライバンド放電と間欠的でグロー的なドライバンド放電の境界は連続的な放電の電流で決定され、電流の閾値は約 3 mA であった。電解質の導電率が比較的高い場合にも、アーク的なドライバンド放電とグロー的なドライバンド放電の境界は連続的な放電の電流で決定され、電流の閾値は 2~4 mA と電解質の導電率が比較的高い場合と同様であった。
  - ④ 電解質由来の分光発光強度は、間欠放電に比べて連続放電時の方が強かった。強度は電解質の種類によって著しく変化した。他方、窒素分子のスペクトル放出は間欠放電中に支配的であった。窒素分子のスペクトル強度は電解質の種類とは無関係であった。
- 以上より、滞留性のドライバンド放電はアーク放電及びグロー放電のいずれの性質も取りえること、その境界は連続的な電流の大きさによって決定されることを明らかにした。本研究の成果は、ドライバンド放電によるポリマーがいしの劣化試験における材料の消耗劣化に寄与する放電の開始を示す指標として重要である。

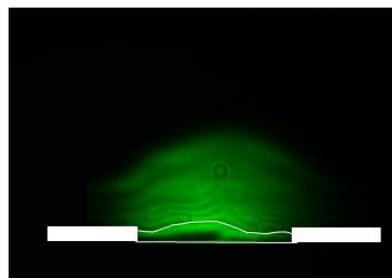
#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

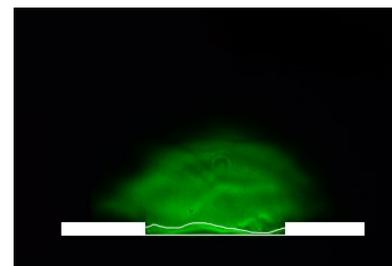
- ① [T. Yamashita](#), [T. Furusato](#), R. Konishi, T. Kurokawa, K. Yaji, Critical current for phase shift of dry-band discharge on wet polluted insulators, Journal of Electrostatics, 査読有, 97, 2019, 51-57, DOI: 10.1016/j.elstat.2018.11.008
- ② [T. Furusato](#), D. Obata, Y. Yamamoto, [T. Yamashita](#), A New Evaluation Method of Contact Area at Interface between Pulsed Surface Discharge and Water, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 査読有, 46, 2018, 2079-2084, DOI: 10.1109/TPS.2018.2837091
- ③ [T. Yamashita](#), R. Ishimoto and [T. Furusato](#), Influence of Series Resistance on Dry-Band Discharge Characteristics on Wet Polluted Insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 査読有, 25, 2018, 154-161, DOI: 10.1109/TDEI.2018.007005

[学会発表] (計 11 件)

- ① 山本遥太, [古里友宏](#), 坂本拓也, 是枝弘行, [山下敬彦](#), 電圧電流波形解析による水溶液上



(a) 連続的な放電の場合 (KCl, aq. 導電率: 20 Ωcm, R<sub>1</sub>: 2 MΩ)



(b) 間欠的な放電の場合 KCl, aq. 導電率: 20 Ωcm, R<sub>1</sub>: 7 MΩ)

図 11. シュリーレン法による放電路の密度変化の観測結果

- パルス沿面放電の進展特性の評価, 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, 2019
- ② 森田健斗, 小西凌, 石本燎, 是枝弘行, 古里友宏, 山下敬彦, 汚損湿潤沿面上のドライバンド放電の放電特性に対する電解質の種類と抵抗率の影響, 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, 2019
  - ③ T. Furusato, Y. Yamamoto, T. Sakamoto, K. Oura, Y. Matsuda, and T. Yamashita, Efficient production conditions of OH radicals generated by pulsed surface discharge plasma on water, ESCAMPIG XXIV (国際学会), 2018
  - ④ 小西凌, 古里友宏, 森田健斗, 山下敬彦, 汚損湿潤面上のドライバンド放電の放電特性に対する電解質水溶液の抵抗率の影響, 平成 30 年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2018
  - ⑤ 黒川崇文, 石本燎, 古里友宏, 山下敬彦, シュリーレン法を用いた汚損湿潤面上におけるドライバンド放電の衝撃波の観測, 平成 30 年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2018
  - ⑥ S. Yamashita, T. Furusato, H. Koreeda, T. Fujishima, T. Yamashita, Effect of Water Depth on Propagation Characteristics of Surface Discharge on Water Generated by Pulsed Power, 19th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (国際学会), 2017
  - ⑦ 山本遥太, 山下翔太郎, 古里友宏, 是枝弘行, 藤島友之, 山下敬彦, 電圧電流波形解析による水上パルス沿面放電と水溶液の等価的な接触面積の推定法, 電気学会プラズマ・パルスパワー・放電合同研究会, 2017
  - ⑧ 森田健斗, 石本燎, 田原正基, 古里友宏, 山下敬彦, ドライバンド放電の放電形態の時間的変化と直列抵抗の関係, 平成 29 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017
  - ⑨ 石本燎, 森田健斗, 田原正基, 古里友宏, 山下敬彦, ドライバンド放電の発光スペクトル特性と直列抵抗の関係, 平成 29 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2017
  - ⑩ 田原正基, 古里友宏, 是枝弘行, 藤島友之, 山下敬彦, 滞留性局部放電のスペクトル特性および気体温度に対する電流の影響, 平成 28 年度電気学会 基礎・材料・共通部門大会, 2016
  - ⑪ T. Sadamatsu, T. Furusato, T. Fujishima and T. Yamashita, Evaluation of Rotational and Vibrational Temperature of Nanosecond Pulsed Surface Discharge on Water, IEEE Power Modulator and High Voltage Conference (国際学会), 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

古里 友宏 (FURUSATO, Tomohiro)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号: 70734002

### (2) 研究協力者

貞松 孝洋 (SADAMATSU, Takahiro)

田原 正基 (TAHARA, Masaki)

石本 燎 (ISHIMOTO, Ryo)

森田 健斗 (MORITA, Kento)

小西 凌 (KONISHI, Ryo)

黒川 崇文 (KUROKAWA, Takafumi)