

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560272

研究課題名(和文) 電解質溶液面における局部放電からの電流分布および電極降下に対する電解質の影響

研究課題名(英文) Effect of Electrolyte on the Current Distribution and Electrode-fall of Local Discharge on Electrolytic Solution

研究代表者

山下 敬彦 (YAMASHITA TAKAHIKO)

長崎大学・工学部・教授

研究者番号：50182499

研究成果の概要(和文)：様々な種類の電解質を用いて、電解質溶液面での局部放電からの電流分布ならびに局部放電の電極降下と電解質の種類との関係を調べ、局部放電の維持機構について検討した。その結果、電流分布は電解質の種類に依存し、電極降下は電解質溶液の抵抗率が大きくなるほど高くなることなどを明らかにした。また、カリウムやナトリウムなど電解質に依存する発光が見られることを明らかにした。以上より、局部放電はグロー放電的な性質とアーク放電的な性質を併せ持つと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The relationships between the kind of the electrolyte and the current distribution from the local discharge on the electrode-fall of the local discharge were examined by using a variety of kinds of electrolytes. Moreover, the mechanism of maintenance of the local discharge was examined. As a result, it was found that the current distribution depended on the kind of the electrolyte and the electrode-fall increased with the resistivity of the electrolyte solution. Moreover, the light according to the electrolyte such as potassium and sodium were observed. Therefore, it has been thought that the local discharge has characteristics both of glow discharge and an arc discharge.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 平成20年度 | 2,900,000 | 870,000 | 3,770,000 |
| 平成21年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 平成22年度 | 300,000 | 90,000 | 390,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気エネルギー工学(発生・変換・貯蔵、省エネルギーなど)

1. 研究開始当初の背景

電気エネルギーシステムでは、外部絶縁の適正化・高度化がシステム全体の安全性・安定性を決定する重要なキー・テクノロジーである。そのため、古くから国内外で様々な研究が実施されてきた。しかしながら、外部絶

縁は様々な環境要因の影響を大きく受けるため、それに伴う現象自体が複雑であり、絶縁破壊等の現象の解明は充分には進んでいないのが現状である。

一方で、外部絶縁に用いられる材料も時代とともに変化し、従来多く利用されてきた磁

器やガラス等の無機材料に加えてエポキシやシリコン等の有機（ポリマー）材料も利用されるようになってきている。これに伴い、特に有機材料を用いた絶縁では要求される耐圧の他に部分放電による長期劣化特性が把握すべき性能として注目されている。しかしながら、放電と絶縁材料との相互作用も十分に明らかにされておらず、有効な試験法も開発されていない。

いずれにしても、汚損・湿潤状態における絶縁物表面での放電現象の解明が必要である。著者はこれまでに外部絶縁の破壊モデル（沿面放電モデル）と関連して、外部絶縁物の表面で発生する局部放電（ドライバンド・アークとも呼ばれる）の進展に関する一連の研究を実施してきており、いくつかの重要な研究成果を得ている。本研究はその延長線上に位置付けられ、これまで解明されていない局部放電の維持機構に関する手がかりをつかむためのものである。

ところで、近年の汚損環境の多様化から農業地域における肥料や農薬、工業地域における各種ガスや煤塵による汚損の問題が顕著化しており、従来の塩害のみならず種々の汚損物質が付着した場合の汚損沿面放電が問題とされるようになってきている。すなわち、外部絶縁における絶縁破壊で問題とされてきた導電率（通常塩分換算で示される）の他に汚損物質の種類とそれらが材料劣化に及ぼす影響が問題とされている。これらのことより、絶縁物表面における局部放電の進展機構だけでなく、滞留した場合を含めた局部放電の維持機構の解明も重要になっている。

2. 研究の目的

本研究では、局部放電の進展機構の解明と関連して、局部放電の維持機構に注目した。局部放電の維持機構を解明するための基礎データとして、放電維持機構と関連した局部放電の電極降下や電流分布と汚損物質の種類との関係を得ることを目的としている。

具体的には、電解質水溶液面でのフラッシュオーバー電圧ならびに放電による材料劣化に対する影響の異なる様々な種類の電解質を用いて、インパルス電圧により局部放電を発生させ、局部放電から電解質水溶液への電流流入分布ならびに局部放電の電極降下と電解質の種類との関係を明らかにする。それを基に局部放電の維持機構について検討を行う。

3. 研究の方法

これまですでに、汚損がいし表面を模擬した塩化カリウム水溶液面をインパルス電圧印加の下で局部放電が進展する場合、局部放電と電解質水溶液との接触形状は放電の進展長さ、溶液の抵抗率、印加電圧に関わらず同一であることを明らかにしている。本研究

では、新たに塩化ナトリウム水溶液と塩酸を用いて放電の進展長さ、溶液の抵抗率、印加電圧の影響について調べた。さらに、塩化カリウム水溶液、塩化ナトリウム水溶液、塩酸の結果から局部放電の電流分布に対する電解質の種類の影響についても調べた。さらにはこれら3種類の電解質を用いて電流値、放電の発光についても比較を行った。また、塩化カリウム水溶液、塩化ナトリウム水溶液、塩酸における電極降下を測定し、電極降下に対する電解質の影響についても調べた。

〈1〉実験装置と実験方法

①電流分布の測定 電流分布を測定するため、図1に示すような長さ20cm、幅1cmの容器に電解質水溶液を深さ1cmまで入れ、汚損がいし表面を模擬した。また、針-平板電極を設置し、針電極の先端と平板電極との距離は10cmとした。なお、溶液と針電極の先端との間の距離は1mmとした。

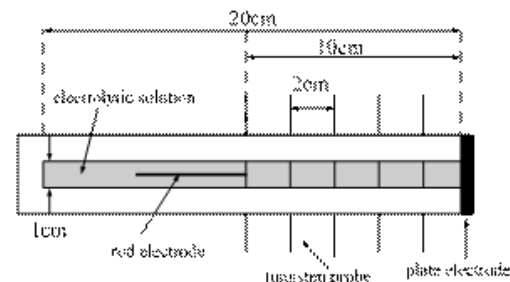


図1 電流分布測定用電極系およびプローブの配置図（平面図）

図2に示すように、プローブを電解質水溶液中に設置した。プローブは上下2本のタングステン棒からなり、針電極先端の真下を原点として平板電極方向に2cm間隔で設置した。上下2本のタングステン棒間の距離は2mmで、上のタングステン棒と溶液表面との距離は1mmである。

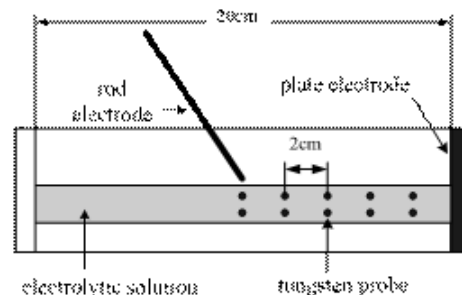


図2 電流分布測定用電極系およびプローブの配置図（側面図）

針-平板電極間にインパルス電圧を印加すると、局部放電が発生し、溶液面上を平板電

極方向へ進展する。このときの局部放電から光信号を検出するために、図3に示すように電解質水溶液面上にスリット系を設置した。スリット系は8個のスリットで構成されている。各スリットは局部放電の進展方向に並んでおり、幅0.3mm、スリット間隔4mmである。検出された光はそれぞれ光電子増倍管（浜松ホトニクス、1P21）へ導き、オシロスコープ（Tektronix TDS 2024B）を用いて観測した。なお、スリット系は局部放電の進展方向に対して自由に移動できるので、この出力から局部放電が任意の位置まで進展した時刻を検出することができる。

局部放電が溶液の表面をプローブ付近まで進展すると、局部放電から溶液に流入する電流によってタングステン棒間に電位差が生じる。そのため、タングステン棒間の電位差を測定することによって、局部放電からの電流分布を求めることができる。印加電圧、放電電流およびタングステン棒間電位差は高圧プローブを通してオシロスコープ（Tektronix TDS 2024B）で測定した。

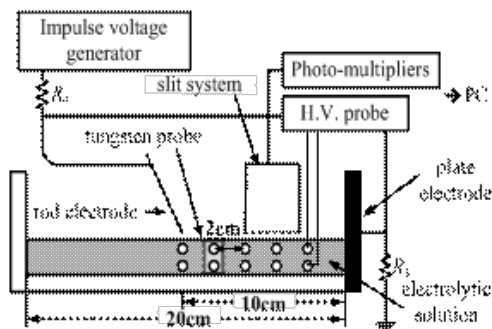


図3 電流分布測定系の概略図

図4にタングステン棒間電位差およびスリット系によって観測された波形を示す。AからH点は各スリットに光が入射した瞬間、すなわち局部放電がそれぞれのスリットの真下まで進展した瞬間を表している。したがって、観測された波形から局部放電が任意の点まで進展した瞬間のタングステン棒間電位差を求めることができる。なお、スリットBがプローブの真上にくるように設置した。

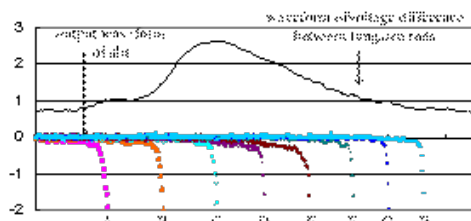


図4 プローブおよびスリット系の観測波形の例

実験の準備として、各条件における50%フラッシュオーバー電圧 V_{50} を測定した。その結果を表1に示す。その際、図4の装置からスリット系およびプローブをはずした状態で昇降法を用いてフラッシュオーバー電圧を求めた。絶縁破壊の発生は放電に伴う光、音の発生、オシロスコープに現れる印加電圧波形および電流波形によって確認した。

表1 電解質水溶液の抵抗率に対するフラッシュオーバー電圧

| 電解質 | 抵抗率 (□cm) | V_{50} (kV) |
|------|-----------|---------------|
| KCl | 81 | 10.8 |
| | 151 | 12.5 |
| | 366 | 16.2 |
| NaCl | 81 | 10.5 |
| | 151 | 12.7 |
| | 366 | 16.2 |
| HCl | 81 | 12.9 |
| | 151 | 14.1 |
| | 366 | 16.7 |

②電極降下の測定 電極降下電圧を測定するにあたって、図5に示すように塩化ビニルパイプ内に平板電極を設置した容器に電解質水溶液を入れることで汚損がいし表面を模擬した。針電極には先端が尖った直径1mmのタングステン棒を使用し、溶液と針電極の先端との間の距離は1mmとした。平板電極には表面にクロムメッキを施した直径10cmの真ちゅう製円板を使用した。また、針電極にはマイクロメータが接続されており、針電極先端と電解質水溶液表面との距離を調節できるようになっている。

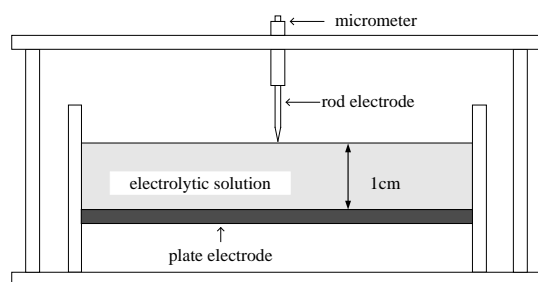


図5 電極降下電圧測定用電極系

図6のように針-平板電極間に正極性のインパルス電圧を印加し、針電極と溶液面との間に局部放電を生じさせた。局部放電の電極降下を V_E 、電流を I 、電解質水溶液部分の抵抗を R とすると電極間電圧 V は次式のように

表される。なお、局部放電部分はきわめて短いので抵抗は無視することができる。

$$V = VE + IR \quad (1)$$

印加電圧を変化させると、電流値が変化すが電極降下は変化しないと考えられる。

(1) 式で $I=0$ における電圧の値が電極降下であるが、電流を 0 にすることはできないので、電圧電流特性を測定し、 $I=0$ における電圧値を外挿によって求めることにより電極降下電圧 VE の値を求める。

図 6 に示すように電圧波形は高圧プローブを使って測定した。また、電流波形は電流測定用抵抗を用いて測定した。

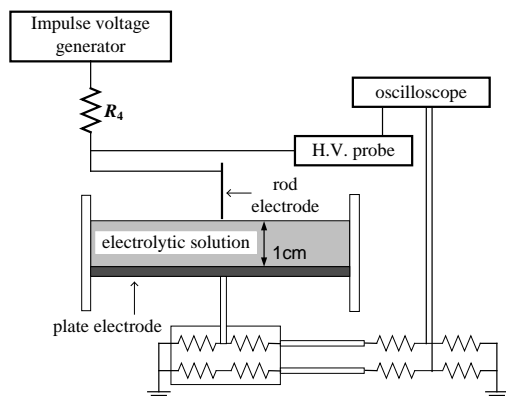


図 6 電極降下測定系の概略図

図 7 に印加電圧波形および電流波形を示す。図のように電流波形は急激に上昇する部分と緩やかに上昇する部分に分かれる。この境目部分は局部放電が溶液に接触した瞬間と考えられる。そこでこの部分の電流の値と同じ時間における印加電圧の値を測定し、電圧電流特性を求めた。

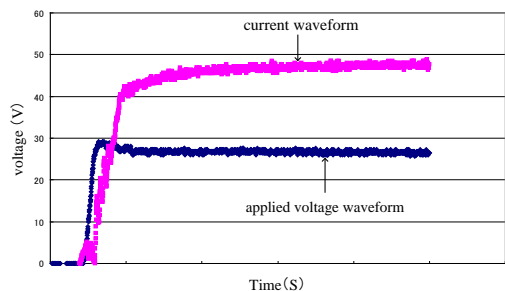


図 7 電圧波形および電流波形

4. 研究成果

(1) 電流分布

図 8 に塩化ナトリウム水溶液の場合の局部放電からの電流分布の一例を示す。電流分布の形は塩化カリウム水溶液の場合とほぼ

同様であった。塩化カリウム水溶液の場合、電流分布は局部放電の進展長さ、溶液の抵抗率、印加電圧に関わらず同一であることが分かっている。塩化ナトリウム水溶液の場合も電流分布は局部放電の進展長さ、溶液の抵抗率、印加電圧に関わらず同一であった。

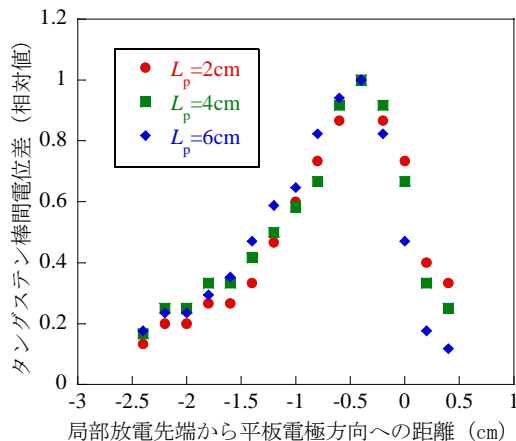


図 8 塩化ナトリウム水溶液における局部放電からの電流分布 ($\rho = 151 \Omega \text{ cm}$, $V_a = V_{50} \times 1.1$)

図 9 に塩酸の場合の局部放電からの電流分布の一例を示す。電流分布の形は塩化カリウム水溶液および塩化ナトリウム水溶液の場合と大きく異なっていた。しかしながら、塩酸の場合も電流分布は局部放電の進展長さ、溶液の抵抗率、印加電圧に関わらず変化しないことがわかった。

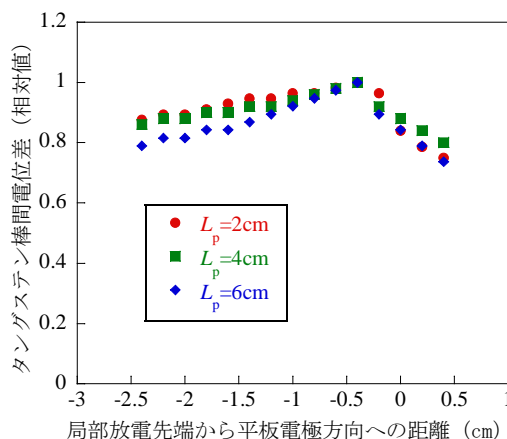


図 9 塩酸における局部放電からの電流分布 ($\rho = 151 \Omega \text{ cm}$, $V_a = V_{50} \times 1.1$)

以上より、電解質水溶液面を進展する局部放電からの電流分布は、局部放電の進展長さ、電解質水溶液の抵抗率、印加電圧に関わらず変化しないことがわかった。また、電解質水溶液面を進展する局部放電からの電流分布は、電解質の種類に依存し、塩化カリウム水

溶液と塩化ナトリウム水溶液ではほぼ同様であることがわかった。一方、塩酸の場合の電流分布は塩化カリウムや塩化ナトリウムの場合と大きく異なり、電流は局部放電の進展方向の広い範囲から流入していることがわかった。

(2) 局部放電の発光

図 10 に塩化カリウム水溶液、塩化ナトリウム水溶液および塩酸における局部放電の発光の写真を示す。溶液の抵抗率を 81, 151, 366 Ωcm と変化させ、印加電圧をそれぞれの場合のフラッシュオーバー電圧の 0.9 倍として観察を行った。

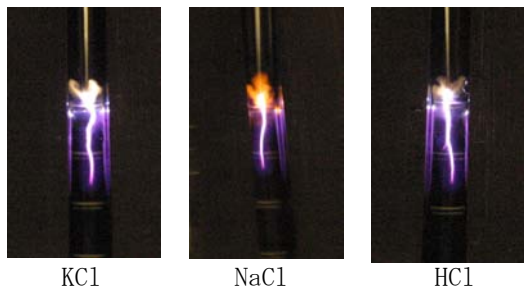


図 10 局部放電の発光の様子 ($\rho=81\ \Omega\text{cm}$)

塩化ナトリウム水溶液の場合、針電極先端近傍での発光の色が他の電解質と比べて異なり、ナトリウムの発光スペクトルによると思われるオレンジ色が観察された。進展する局部放電の先端部分の発光はいずれの場合もほぼ同様で、薄い青紫であった。なお、電解質水溶液の抵抗率が大きくなるに従い、針電極近傍の発光は薄くなり、いずれの場合も区別が付かなくなることがわかった。

図 11 および図 12 は図 5 の電極系で針-電解質水溶液面で発生する局部放電の発光スペクトルを分光器を用いて観測した結果である。図 11 は塩化ナトリウム水溶液の場合で、ナトリウムのスペクトルが観測された。また、図 12 の塩化カリウム水溶液の場合はカリウムのスペクトルが観測された。なお、図 12 でナトリウムのスペクトルが現れているが、これは針電極に付着した塩化ナトリウムによるものと考えられる。

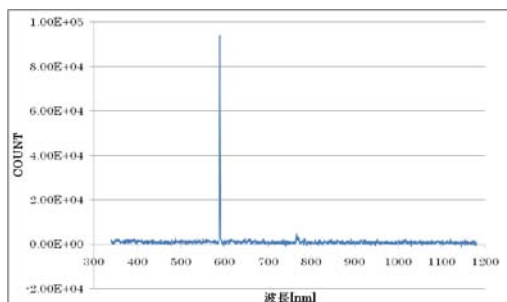


図 11 局部放電の発光スペクトル (塩化ナトリウム水溶液)

なお、発光スペクトル強度は電解質の濃度が薄くなるほど弱くなることがわかった。また、塩酸の場合は特定の波長の発光スペクトルは観測されなかった。

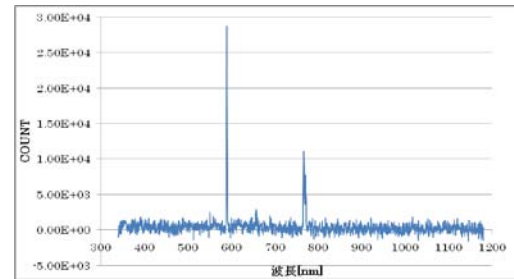


図 12 局部放電の発光スペクトル (塩化カリウム水溶液)

(3) 電極降下

図 13 に針-平板電極間の電圧電流特性の一例を示す。図は塩化カリウム水溶液の場合であるが、他の電解質水溶液の場合もほぼ同様の関係となる。電圧電流特性はほぼ直線関係になった。なお、外部抵抗の影響を見るために直列抵抗を変化させて実験を行ったが、電極降下の測定結果に対する影響は見られなかった。

図 13 で電流零の場合の値、すなわち縦軸の切片が電極降下となる。このようにして電解質水溶液の抵抗率を 18, 78, 714, 6560 Ωcm と変化させて電極降下を求めた。図 14 にその結果を示す。

局部放電の電極降下は電解質の種類に関わりなくほぼ電解質水溶液の抵抗率によって決まり、その値は電解質水溶液の抵抗率が大きくなるほど高くなることがわかった。また、いずれの場合も金属アークの場合の電極降下 (数十ボルト程度) とは異なり、グロー放電の電極降下に近い値であることがわかった。

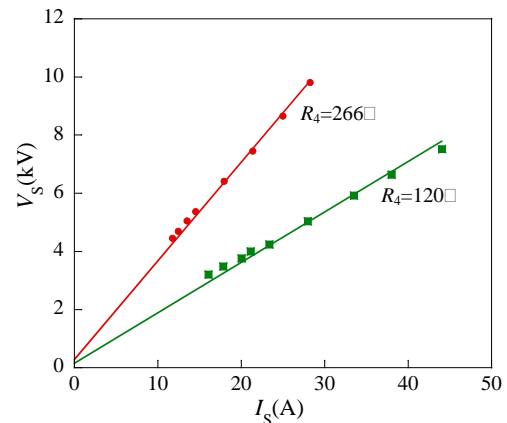


図 13 電圧電流特性 (KCl, $\rho=18\ \Omega\text{cm}$)

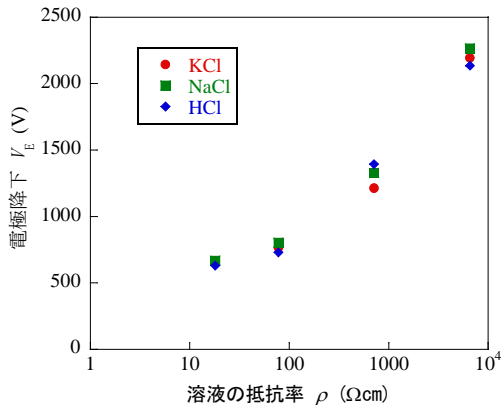


図 14 溶液の抵抗率と電極降下の関係

(4) フラッシュオーバー電圧と電解質の関係

図 15 は 50mS/cm (25°C) のときの種々の電解質水溶液面における電極間隔 10cm のフラッシュオーバー電圧と電解質水溶液中の陽イオン密度とを比較したものである。

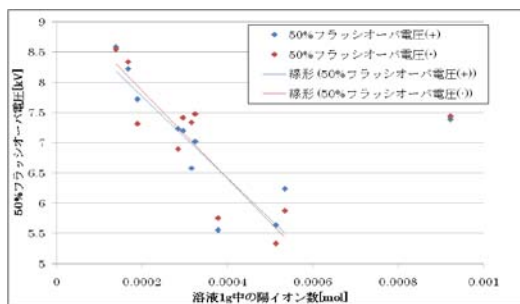


図 15 フラッシュオーバー電圧と陽イオン密度の関係

電解質水溶液中の陰イオンが 1 価の場合、フラッシュオーバー電圧と陽イオン密度との間には特定の関係が認められる。しかし、1 価の陰イオン以外の場合は特定の関係は認められない。また、陰イオン密度とフラッシュオーバー電圧との間にも特定の関係は認められなかった。

図より、塩酸の場合抵抗率が同じでも陽イオン密度はかなり小さいことがわかる。このことが塩酸の電流が広い範囲に分布する原因になっていると考えられる。また、広い範囲から電荷を吸収するためフラッシュオーバー電圧も高くなるものと考えられる。

また、塩化カリウム水溶液、塩化ナトリウム水溶液および塩酸のフラッシュオーバー電圧と抵抗率の関係を詳細に調べたところ、いずれの場合もフラッシュオーバー電圧は抵抗率とともに変化するが、変化の割合は電解質によって異なることがわかった。

(5) 以上の結果をまとめると下記のようになる。

①電解質水溶液面を進展する局部放電からの電流分布は、局部放電の進展長さ、電解質水溶液の抵抗率、印加電圧に関わらず変化しない。

②電解質水溶液面を進展する局部放電からの電流分布は、電解質の種類に依存し、塩化カリウム水溶液と塩化ナトリウム水溶液ではほぼ同様で、塩酸の場合は大きく異なる。

③局部放電の電極降下は電解質の種類に関わりなくほぼ電解質水溶液の抵抗率によって決まり、その値は電解質水溶液の抵抗率が大きくなるほど高くなる。

④塩化カリウム水溶液と塩化ナトリウム水溶液の場合、局部放電の発光スペクトルに電解質由来するスペクトルが観測された。

⑤以上のことを考慮すると、電解質水溶液面を進展する局部放電はグロー放電の性質とアーク放電の性質を併せ持つと考えられる。

5

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

①松井貫祐 (山下敬彦): 「電解質液面における局部放電からの電流分布に対する電解質の影響」, 電気関係学会九州支部連合大会, (2009. 9. 29) 福岡

②松井貫祐 (山下敬彦): 「電解質液面における局部放電からの電流流入特性に対する電解質の影響」, 電気学会放電/誘電・絶縁材料/高電圧合同研究会, (2010. 1. 28) 佐賀

③松井貫祐 (山下敬彦): "Influence of Electrolyte on Current Distribution from Local Discharge on Electrolytic Solution", Korea- Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, (2009. 11. 6) Pusan, Korea

④森山靖朋 (山下敬彦): "Influence of Electrolyte on Current Distribution from Local Discharge and Electrode-fall on Electrolytic Solution", Asian Conference on Electrical Discharge, A76, (2010. 11. 8) Xian, China

〔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〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 敬彦 (YAMASHITA TAKAHIKO)
長崎大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50182499