

高感度カメラと画像処理を用いた誘電体バリア放電の時間分解観察

Time resolved observation of discharge spots in dielectric barrier discharge by highly sensitive camera and image processing

○大澤直樹*, 渡部佳月*, 河井茂充**, 松田伸太郎**, 青木未知子**, 田口正樹**

* : 金沢工業大学工学部, ** ; メタウォーター株式会社

論文要旨

誘電体バリア放電式のオゾン発生装置では、オゾン生成に必要なエネルギー効率(オゾン生成効率)の向上法が研究されている。本研究では、イメージインテンシファイアを付けたデジタルカメラと画像処理ソフトウェアを用いて誘電体バリア放電の発光様相を時間分解観察した。その結果、ストリーマ放電の発生本数は、放電電流の瞬時値(絶対値)が大きくなると多くなること、ストリーマ放電の平均円相当直径や平均沿面放電長は、放電電流の瞬時値(絶対値)の大きさやパルス電流の極性の影響を受けないことがわかった。

キーワード : 誘電体バリア放電, 時間分解観察, 画像処理

1. はじめに

大容量のオゾン発生装置には、誘電体バリア放電(Dielectric Barrier Discharge: DBD)が利用される[1]。DBD はストリーマ放電と沿面放電で構成されており、オゾンの原料となる酸素原子はそれら放電部で生成される[2]。著者らは、DBD 空間で同時多発するストリーマ放電や沿面放電の発生様相を詳しく調べることにより、DBD によるオゾン生成のエネルギー効率を更に高くできる可能性があると考えている。これまでに、イメージインテンシファイア(Image Intensifier: I.I.)付きのデジタルカメラと画像処理ソフトウェア(ImageJ)を用いて、ストリーマ放電と沿面放電で構成される放電輝点を抽出する手法を開発した。本法を用いて、放電電力や接地電極に供給する冷却水の温度が、放電輝点の発生数、1 個の放電輝点に投入される電力ならびにオゾン生成効率に及ぼす影響を明らかにしてきた[3]。本研究では、映像増強度を更に高くした I.I. と画像処理方法の最適化により、ストリーマ放電の発生数、平均円相当直径ならびに平均沿面放電長の時間分解観察を行った。

2. 実験装置

2. 1 実験システム

図 1 に実験システムを示す。実験システムは、高電圧電源、ガス給排系、DBD 装置、接地電極冷却系、測定系で構成されている。ファンクションジェネレータと交直両用高圧アンプリファイア(Model 10/40A-HS, Trek)を用いて 8 kVp, 3 kHz の交流高電圧を発生させ、DBD 装置に印加した。DBD の観察には、I.I. (C14245, 浜松ホトニクス)を付けたデジタルカメラを用いた。高電圧電源と I.I.の同期ならびに I.I.のゲート時間の制御にはデジタル遅延パルス発生器(DG535, Stanford Research Systems)を用いた。チャンバには酸素(流量 : 0.200 L/min)と窒素(流量 : 1.00 mL/min)の混合ガスを供給した。ニードルバルブを用いてチャンバ内の初期ガス圧力を 100 kPaG に調整した。電流波形は、差動プローブを用いて電流測定用抵抗(9.1 k Ω)の電圧降下から測定した。接地電極に供給する冷却水は、チラーを用いて 10°C に設定した。

図 2 は DBD 装置である。装置の左右から原料ガスが供給され、中央のスリットからオゾンと未反応の原

料ガスが排気される。誘電体材料は硼珪酸ガラス、接地電極の材料はステンレス(SUS316L)である。ギャップ長は0.3 mmである。誘電体には、ITO(Indium Tin Oxide)が成膜されており、30 mm×30 mmの範囲でDBDを観察できる。なお、放電領域は50 mm×50 mmである。

2. 2 時間分解観察の方法

DBD装置は静電容量負荷であり、電圧と電流の位相差がほぼ90°となる。このため、印加電圧の極性とDBDの発生を表すパルス電流の極性が異なるときがある。そこで、本研究では、印加電圧ではなくパルス電流の極性に注目してDBDを時間分解観察することにした。図3は、印加電圧と電流の波形である。図内のPositiveは正極性のパルス電流が発生する期間を、Negativeは負極性のパルス電流が発生する期間を表す。I.I.のゲート時間は18°(16.7 μs)であり1サイクル(360°)を20分割してDBDを観察した。

放電写真は、それぞれのゲート時間において10枚撮影した。画像処理ソフトウェアを用いて、それぞれのゲート時間で撮影された10枚の放電写真からストリーマ放電の平均発生数と平均円相当直径を求めた。ここで、平均円相当直径とは、画像処理によって抽出された全てのストリーマ放電に対して円相当直径を求め、それを平均化したものである。式(1)はストリーマ放電の平均円相当直径の計算式である。

$$D_{st} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{4 \cdot S_{sti}}{\pi}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 D_{st} : ストリーマ放電の平均円相当直径[m], n : ストリーマ放電の本数, S_{sti} : i 本目のストリーマ放電の投影面積[m²]である。

沿面放電は、ストリーマ放電の中心から放射状に発生することから、放電輝点の平均円相当直径とストリーマ放電の平均円相当直径から、式(2)を用いて平均沿面放電長を求めた。

$$L_{sur} = \frac{D_{spot} - D_{st}}{2} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 L_{sur} : 平均沿面放電長[m], D_{spot} : 放電輝点の平均円相当直径[m]である。

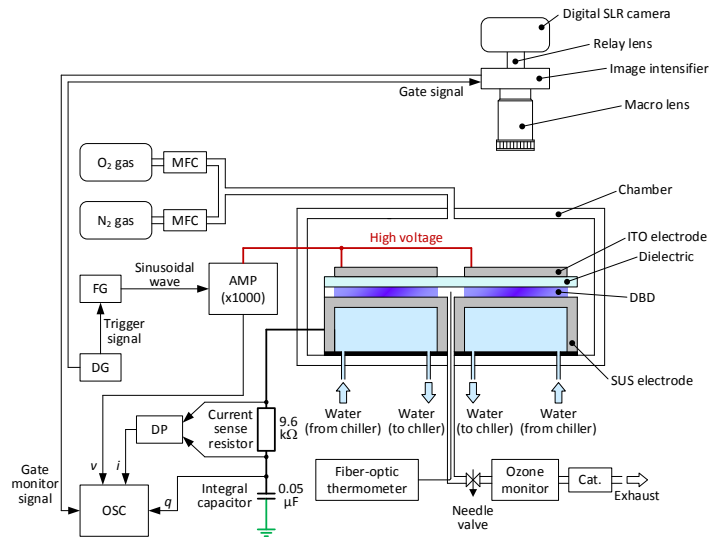
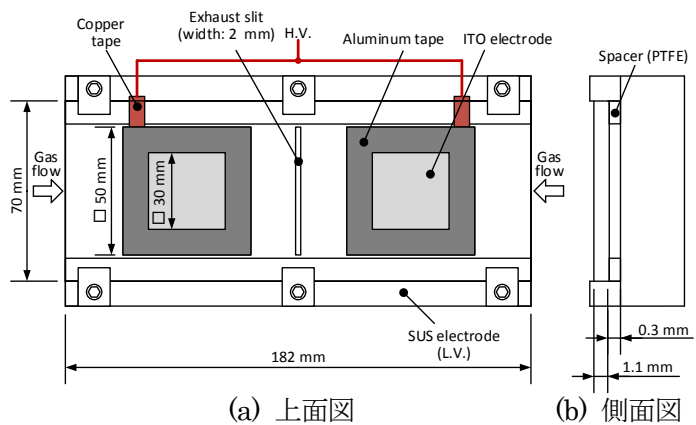


図-1 実験システム



(a) 上面図
図-2 DBD装置

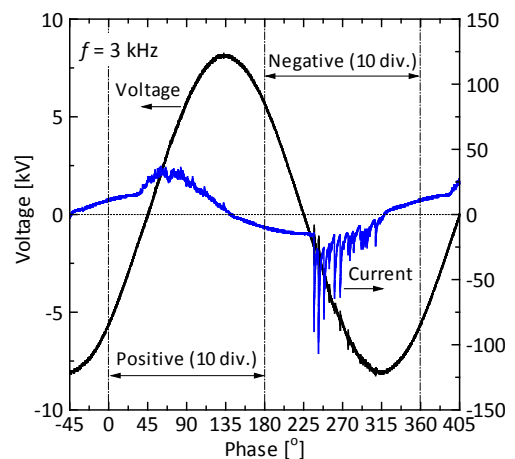


図-3 典型的な印加電圧・電流波形

3. 実験結果と考察

3. 1 DBDの発光様相

図4は、電流パルスの極性が正極性のときと負極性ときのDBDを撮影した一例である。正極性のパルス電流が発生したときは、ストリーマ放電と沿面放電で構成される放電輝点がITO電極全体に観察される場合が多かったが、負極性のときは放電輝点が不均一に観察される場合が多かった。これは、本研究で使用したDBD装置は、(1)高電圧側には硼珪酸ガラス、接地側にはSUSを用いており材料が異なったことや、(2)接地電極にのみ10°Cの冷却水を供給しており電極の温度が異なったことが関係していると考えられる。

3. 2 ストリーマ放電の抽出と発生数の位相特性

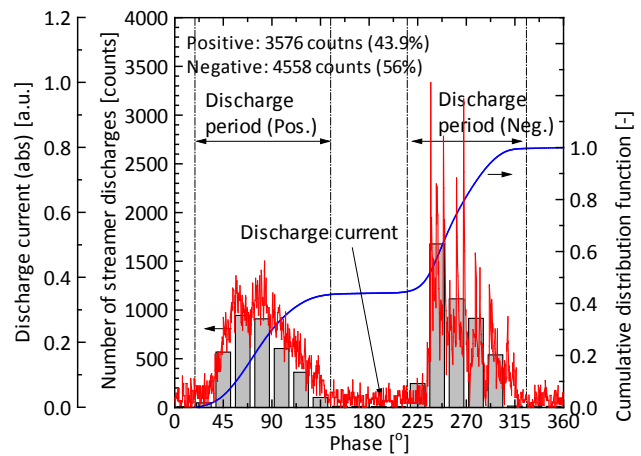
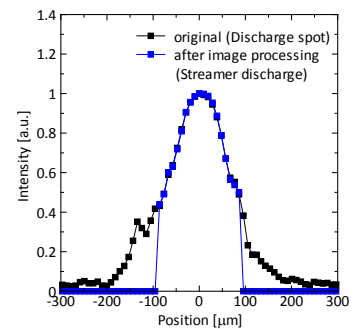
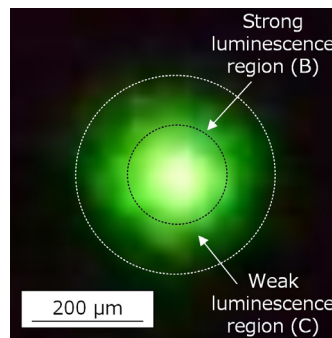
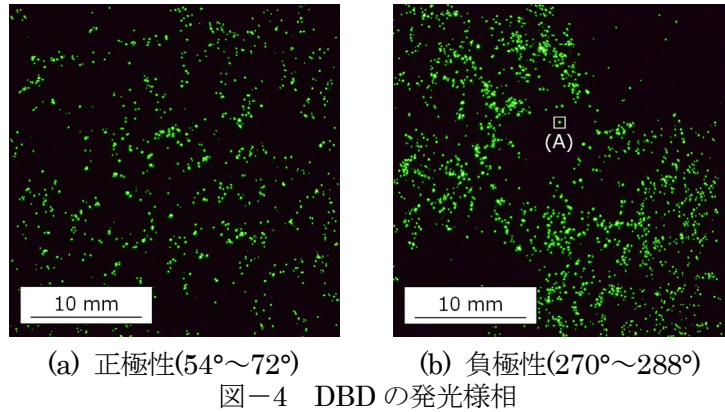
図5は、図4(b)内の領域(A)を拡大したものである。放電輝点は発光の強い領域(図内B)と弱い領域(図内C)で構成されている。輝度の高い領域はストリーマ放電、輝度の低い領域は沿面放電と考えられる。

図6は、図5の放電輝点とストリーマ放電の輝度をグレイ値で表したものである。ここで、ストリーマ放電のグレイ値分布は、画像処理により閾値を最適化して求めた。

図7は、ストリーマ放電の発生本数と放電電流(絶対値)の位相特性である。放電電流は、測定された電流から充電電流を減じて求めた。ストリーマ放電の発生数分布と放電電流波形から、正極性と負極性のストリーマ放電は、それぞれ、27°~135°の位相と225°~315°の位相で発生しているのがわかった。放電が発生していない期間でもストリーマ放電がわずかに計数されたが、これは、写真に写った輝点ノイズが原因である。ストリーマ放電の発生本数の位相特性と放電電流の瞬時値(絶対値)の位相特性が定性的に一致したことから、放電電流の瞬時値(絶対値)が大きくなるとストリーマ放電の発生本数が増えることがわかった。ここで、ストリーマ放電の発生本数の総和は、正極性のパルス電流が発生した期間(0~180°)では3,576本であり、負極性のパルス電流が発生した期間(180~360°)では4,558本であった。この違いは、ストリーマ放電の進展方向が金属電極から誘電体からかの違いや、電極の温度が関係していると考えられる。

3. 3 ストリーマ放電の平均円相当直径の位相特性

図8はストリーマ放電の平均円相当直径と放電電流(絶対値)の位相特性である。ストリーマ放電の平均円相当直径は、パルス電流の極性や瞬時値(絶対値)に関係なく、110 μm から 120 μm になったあと 115 μm に



漸近する傾向が見られた。放電開始直後は、放電領域内のオゾン濃度が低く酸素分子がオゾン分子に転換されやすい環境になっている。よって、ストリーマ放電が発生すると分子数密度(圧力)が減少し、ストリーマ放電が拡散しやすくなると考えられる。このため、放電発生後は平均円相当直径が大きくなったと考えられる。DBD が継続し、放電領域内のオゾン濃度と酸素原子の濃度が高くなると、電子衝突による分解や酸素原子との反応によって酸素分子に戻るオゾン分子が増えてくる。これにより、圧力は、放電開始直後以上、放電開始直前以下になっていると考えられる。これにより、ストリーマ放電の拡散がわずかに抑制され、平均円相当直径が $115 \mu\text{m}$ に漸近したと考えられる。

3. 4 平均沿面放電長の位相特性

図9は平均沿面放電長と放電電流(絶対値)の位相特性である。平均沿面放電長は、パルス電流の極性や瞬時値(絶対値)に関係なく、 $20 \mu\text{m}$ から $25 \mu\text{m}$ に伸びる傾向が見られた。これは、放電によって誘電体表面に蓄積される壁電荷の極性や量が影響を受けたためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、映像増強度の高い I.I. を付けたデジタルカメラを用いて DBD を極短時間で撮影した。また、画像処理ソフトウェアで放電写真を処理し、ストリーマ放電の発生本数、平均円相当直径ならびに平均沿面放電長の位相特性や放電電流との関係を調べ、以下の知見を得た。

- (1) 正極性の電流パルスが発生したときは、ストリーマ放電と沿面放電で構成される放電輝点が ITO 電極全体に観察される場合が多かったが、負極性では放電輝点が不均一に観察される場合が多かった。
- (2) ストリーマ放電の発生本数の位相特性と放電電流の瞬時値(絶対値)の位相特性が定性的に一致したことから、ストリーマ放電の発生本数は、放電電流が大きくなると多くなることがわかった。
- (3) ストリーマ放電の平均円相当直径は、パルス電流の極性や瞬時値(絶対値)に関係なく、 $110 \mu\text{m}$ から $120 \mu\text{m}$ に広がったあと $115 \mu\text{m}$ に漸近する傾向が見られた。
- (4) 平均沿面放電長は、パルス電流の極性や瞬時値(絶対値)に関係なく、 $20 \mu\text{m}$ から $25 \mu\text{m}$ に伸びる傾向が見られた。

金沢工業大学工学部電気電子工学科卒業生の田中大輔氏と村上貴哉氏には、実験の実施とデータの解析にご協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 山部長兵衛, プラズマ・核融合学会誌, Vol.74, No.2, pp.134-139 (1998)
- [2] B. Eliasson, M. Hirsh, U. Kogelschitz, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, pp.1421-1437 (1987)
- [3] 大澤直樹, 鈴木涼平, 河井茂充, 青木未知子, 田口正樹, 第30回日本オゾン協会年次研究講演会講演集, pp.9-12 (2021)

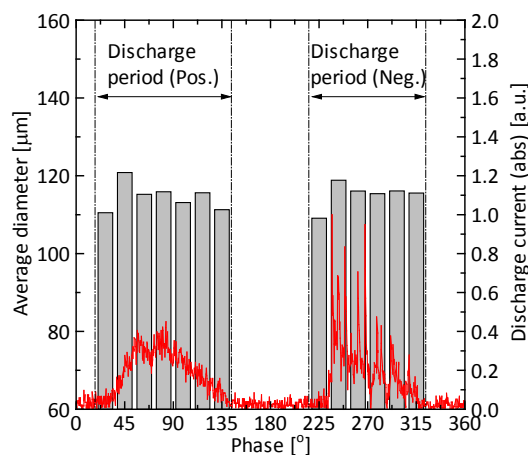


図-8 ストリーマ放電の平均円相当直径と放電電流の位相特性

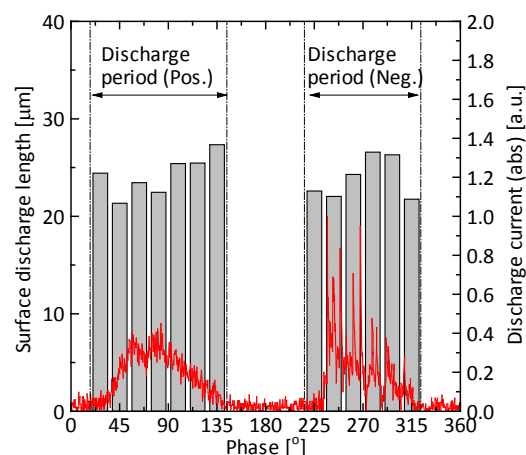


図-9 平均沿面放電長と放電電流の位相特性