

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04360

研究課題名 (和文) 低侵襲なプラズマ処理を可能とする大気圧空気中での均一バリア放電発生メカニズム解明

研究課題名 (英文) Elucidation of the generating mechanism of diffuse barrier discharge in air at atmospheric pressure

研究代表者

大澤 直樹 (OSAWA, Naoki)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：40454227

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,400,000 円

研究成果の概要 (和文) : 本研究では、低侵襲な大気圧プラズマ源として、均一バリア放電の一種である大気圧タウンゼント放電(APTD)の発生メカニズムを検討した。任意のタイミングで交流高電圧を遮断できる電源装置や誘電体表面電荷計測システムを用いて、APTD発生前後の誘電体表面電荷特性を調べた。その結果、誘電体表面に蓄積される負極性の電荷密度が高くなると、APTDが発生することを明らかにできた。また、APTDが発生できる誘電体でも、誘電体の表面抵抗率を低くするとAPTDが単独で発生しなくなることを明らかにできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高純度窒素を使用しない新しいAPTDの発生メカニズムを解明し、空気中でもAPTDを安定して発生できる方法を提供するものである。これにより、患者の身体的負担や生体組織へのダメージを抑制できる低侵襲な医療・農業用バリア放電装置の開発に貢献できる。

研究成果の概要 (英文) : In this research, we investigated the generation mechanism of Atmospheric Pressure Townsend Discharge (APTD) in air as a minimally invasive atmospheric pressure plasma source. We analyzed the surface charge density characteristics before and after APTD generation using a programmable high-voltage power source and a surface charge scanning system. The important findings are as follows. (1) APTD generates in air when the negative charge density accumulated on the barrier surface is high using specific alumina barrier. (2) The surface resistivity of barrier, which generates APTD, can be decreased by 3 orders of magnitude by spraying water mist on the barrier surface. (3) If we use the barrier with decreased surface resistivity by water mist spraying method, APTD generation becomes unstable. These results suggested that surface resistivity of barrier material plays an important role for stable generation of APTD in air.

研究分野：電気電子工学

キーワード：大気圧タウンゼント放電 誘電体バリア放電 表面電荷密度測定 放電観察 低侵襲な大気圧プラズマ源

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

電極間に少なくとも一枚の誘電体を挿入した状態で交流高電圧を印加すると、ギャップには無数のフィラメント状のストリーマ放電がランダムに発生する。この放電はバリア放電(DBD: Dielectric Barrier Discharge の略)と呼ばれ、熱に弱いオゾンの生成や高分子材料の表面改質などに用いられている。近年では、癌細胞の死滅や農作物の収率改善などの医療・農業分野にも応用されている。これらの分野では、効能だけではなく、患者の身体的負担や生体組織へのダメージを抑制する方法が切望されている。

高純度の窒素中で DBD を発生させると、ストリーマ放電が発生しない均一バリア放電の一種である大気圧タウンゼント放電(APTD: Atmospheric Pressure Townsend Discharge の略)が発生する⁽¹⁾。これは、準安定状態の窒素分子同士による結合性電離によって、APTD の発生に必要な種電子を一様に供給できるためである。しかし、酸素分子が数 ppm でも放電空間に混入すると、APTD は典型的な DBD に遷移する⁽²⁾。典型的な DBD で発生するストリーマ放電先端部の換算電界は 500–800 Td と高いが、APTD の換算電界は約 100 Td と低い。このため、APTD は低侵襲かつ均一なプラズマ処理に利用できる可能性がある。

研究代表者は、バリア放電装置の誘電体にある種のアルミナを使用することにより、空気や純度 99.5%の酸素などでも APTD を発生させることに世界で初めて成功した⁽³⁾。また、その放電の換算電界は、窒素中の APTD と同様であることを確認した⁽⁴⁾。したがって、低侵襲かつ均一なプラズマ処理を空气中で実施できる可能性が示された。この APTD は、99.5%の酸素中でも発生できたことから、準安定状態の窒素分子が関与しない新しい APTD の発生メカニズムが存在すると確信している。しかし、これまでの研究では、APTD 発生中の陰極側誘電体表面電荷の時間変化特性や、交流電圧印加後数サイクルの間に陰極側誘電体表面電荷がどのように変化し、APTD の発生に寄与するのかを明らかにできていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、任意のタイミングで交流高電圧を遮断できる電源装置や誘電体表面電荷計測システムを用いて、(1)ストリーマ放電の発生位置制御方法を構築する、(2)APTD 発生前後の誘電体表面電荷特性を明らかにする、(3)誘電体表面抵抗が APTD の発生特性に及ぼす影響を明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1) ストリーマ放電の発生位置制御方法の構築

図1は、本研究で用いる DBD 装置である。この DBD 装置では、半球棒電極に印加する電圧の極性が正のときに APTD が発生し、負のときにストリーマ放電が発生する特徴がある。APTD の発生に欠かせない負極性の壁電荷は、負極性のストリーマ放電によって形成される。このため、APTD を安定して発生させるには、負極性のストリーマ放電の発生様相を統一する必要がある。この研究では、半球棒電極の先端部半径、ギャップ長、印加電圧がストリーマ放電の発生に及ぼす影響を調べ、1本のストリーマ放電を安定して発生する方法を構築する。

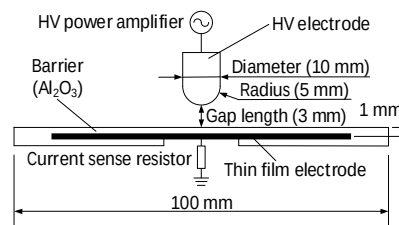


図1 DBD 装置

(2) APTD 発生前後の誘電体表面電荷特性

APTD の発生は、誘電体の表面に蓄積された負極性の壁電荷量に関係していると考えられる。この研究では、誘電体の表面が帯電していない状態で DBD 装置に電圧を印加したときの電圧電流波形や、印加電圧のサイクル数を増やしたときに APTD がどのように発生していくかを調べる。

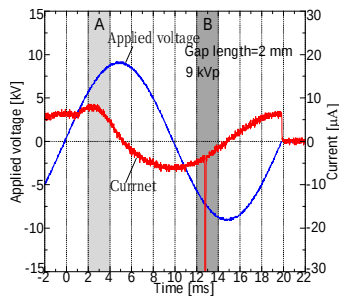
(3) 誘電体表面抵抗が APTD の発生特性に及ぼす影響

壁電荷の蓄積量は誘電体表面抵抗の影響を受けると考えられる。ここでは、加湿器から噴出されるミストを誘電体表面に吹付け、誘電体表面抵抗を制御する手法を構築する。また、APTD を発生できる誘電体において、表面抵抗を低くした場合の電流電圧波形を観察する。

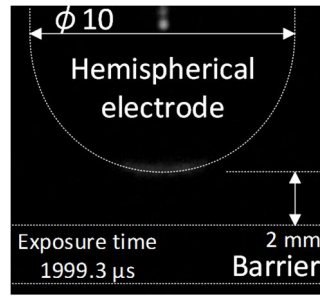
4. 研究成果

(1) ストリーマ放電の発生位置制御法の構築

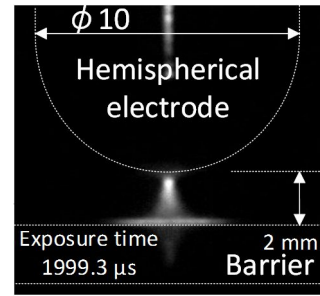
図2と図3は、印加電圧を変えたときの電流電圧波形と放電写真である。図2より、2~4 ms(期間 A)において連続的な電流が発生し、13 ms 付近(期間 B)においてパルス状の電流が発生した。また、期間 A では、半球棒電極先端部で一様に発光する APTD が観察され、期間 B では、半球棒電極の先端部において1本のストリーマ放電が観察された。図3より、印加電圧を 11.5 kVp に



(a) 電流電圧波形

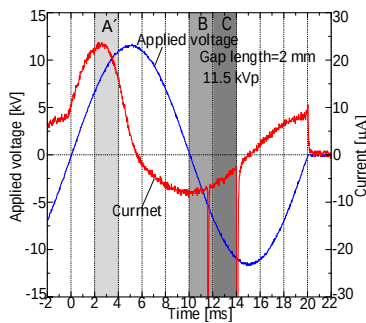


(b) APTD
(期間 A)

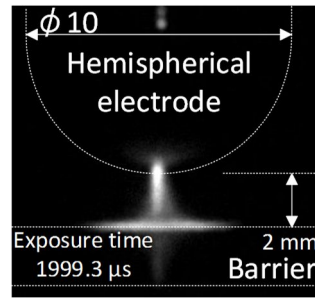


(c) 1本のストリーマ放電
(期間 B)

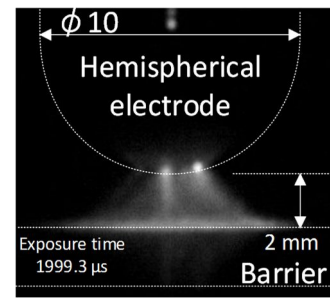
図2 9 kVpの電圧を印加したときの電流電圧波形と放電写真



(a) 電流電圧波形



(b) 1本のストリーマ放電
(期間 B)

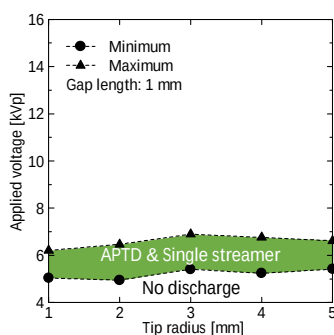


(c) 2本のストリーマ放電
(期間 C)

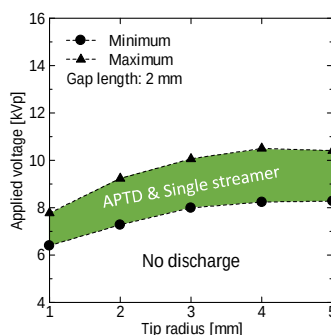
図3 11.5 kVpの電圧を印加したときの電流電圧波形とストリーマ放電の写真

すると、12 ms 付近(期間 B)と14 ms 付近(期間 C)において、パルス状の電流が発生した。また、期間 Bでは、1本のストリーマ放電が観察されたが、期間 Cでは2本のストリーマ放電が観察された。以上のことから、印加電圧を適切な値に制御することにより、ストリーマ放電の発生回数や発生本数を制御できることがわかった。以後、図 2(c)に示すようなストリーマ放電を単一ストリーマ放電と呼ぶことにする。

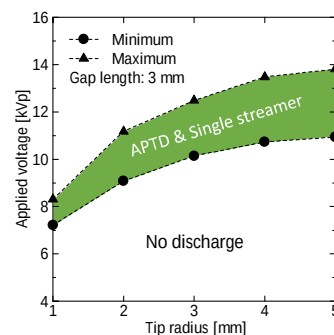
図4は、単一ストリーマ放電が観察される印加電圧領域について、半球棒電極の先端部半径やギャップ長の影響を調べたものである。半球棒電極先端部の半径を大きくすると、ギャップ長を大きくすると、単一ストリーマ放電の観察される印加電圧領域が広がることがわかった。印加電圧を高くすると APTD の発光が強くなり放電観察が容易になることから、以後の研究では、半球棒電極先端部の半径を5 mm、ギャップ長を3 mm に設定することにした。



(a) gap length: 1 mm



(b) gap length: 2 mm



(c) gap length: 3 mm

図4 単一ストリーマ放電の安定発生領域(半球棒電極の先端部半径とギャップ長の影響)

(2) APTD 発生前後の誘電体表面電荷特性

図5は、代表的な電流電圧波形である。電圧印加1サイクル目では、印加電圧の極性に関係なく、ストリーマ放電が発生し、APTDが発生しなかった。一方、2サイクル目以降は、印加電圧の極性が正のときに APTD が発生し、負のときにストリーマ放電が発生した。

図6は、印加電圧のサイクル数を増やしたときに APTD がどのように発生していくのかを調べ

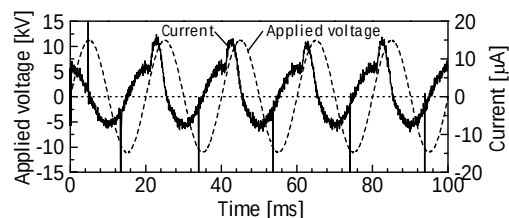


図5 代表的な電流電圧波形

たものである。1 サイクル目では、APTD は発生せずストリーマ放電しか発生しなかったが、2 サイクル目以降では、ストリーマ放電は発生せず、APTD が発生するようになった。

図 7 は、印加電圧を調整して印加電圧の極性が負のときに発生するストリーマ放電の電流波高値と、印加電圧の極性が正のときに発生する APTD の電流波高値の関係を調べたものである。ストリーマ放電の電流波高値が閾値(-0.5 mA)を超えると APTD が発生することがわかった。

図 8 は負極性のストリーマ放電が発生した後の誘電体表面電荷密度分布である。ここで、位置 0 mm は誘電体中心部(半球棒電極直下)を表す。APTD が発生しなかったときの半球棒電極直下の表面電荷密度は-3.5 nC/cm²であったが、APTD が発生したときの表面電荷密度は-42 nC/cm²であった。

以上より、誘電体表面に蓄積される電荷量が APTD の発生に強く関係していることを明らかにできた。

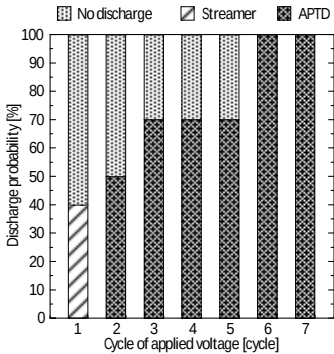


図 6 印加電圧のサイクル数と各種放電の発生確率

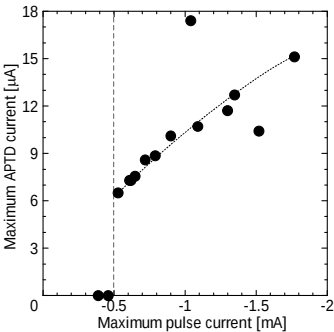


図 7 ストリーマ放電の電流波高値と APTD の電流波高値の関係

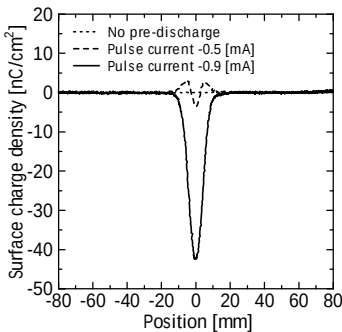


図 8 APTD が発生したと発生しなかったときの表面電荷密度分布

(3) 誘電体表面抵抗が APTD の発生特性に及ぼす影響

表 1 は、誘電体表面へのミスト吹付時間と表面抵抗率(11.8%トリム平均)の関係である。10 s のミスト吹付により、誘電体の表面抵抗率を最低でも 10³ オーダー制御できることを確認した。

図 9 は、表面抵抗率を低くしたバリアを用いたときの印加電圧のサイクル数と各種放電の発生率を整理したものである。電圧印加 1 サイクル目では、印加電圧の極性に関係なくストリーマ放電が発生し、APTD が発生しなかった。一方、2 サイクル目以降は、ストリーマ放電のみ、または、ストリーマ放電と APTD が混在する電流波形が観測された。

以上より、APTD を発生できる誘電体を利用しても、表面抵抗率が低くなると APTD が単独で発生しなくなることを明らかにできた。これは、表面抵抗率が低くなることにより、APTD の発生に必要な負極性の荷電粒子が誘電体表面に蓄積されにくくなったためである。

表 1 表面抵抗率

ミスト吹付時間 [s]	表面抵抗率 (11.8%トリム平均) [Ω/sq]
0	9.99×10 ¹⁵ 以上
10	5.70×10 ¹¹

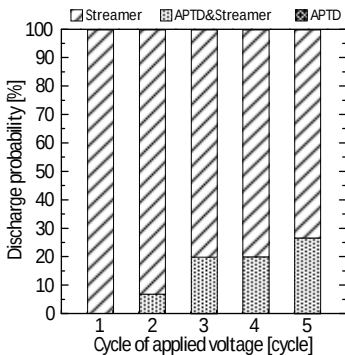


図 9 印加電圧のサイクル数と各種放電の発生確率

<引用文献>

- (1) 田中正明, 八木重典, 田畑則一:「超高感度カメラによる空気, 酸素, 窒素中での無声放電の観測」電学論 A, 102 巻, 10 号, pp.533-540 (1982)
- (2) F. Massines, N. Gherardi, N. Naudé, P. Ségur, “Recent advances in the understanding of homogeneous dielectric barrier discharges”, Eur. Phys. J. Appl. Phys., 47, 22805 (2009)
- (3) N. Osawa, Y. Yoshioka, “Generation of low-frequency homogeneous dielectric barrier discharge at atmospheric pressure”, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.40, No.1, pp.2-8 (2012)
- (4) N. Osawa, A. Takashi, Y. Yoshioka, R. Hanaoka, “Generation of high pressure homogeneous dielectric barrier discharge in air”, Eur. Phys. J. Appl. Phys., 61, 24317 (2013)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 渡部佳月・山田幸四朗・大澤直樹
2. 発表標題 表面抵抗率と大気圧空気中での均一バリア放電の関係
3. 学会等名 2022年度静電気学会春期講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Watanabe, Naoki Osawa
2. 発表標題 Effect of Pre-discharge on Diffuse Dielectric Barrier Discharge Generation in Atmospheric Pressure Air
3. 学会等名 International Young Electrostatic Scholar Symposium for Convergence Technology 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部佳月・大木貴智・木下昶流・大澤直樹
2. 発表標題 表面電荷密度と大気圧均一バリア放電の関係
3. 学会等名 第22回静電気学会春期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡部佳月・大木貴智・木下昶流・大澤直樹・吉岡芳夫
2. 発表標題 大気圧空気中での均一バリア放電現象の解明 ―電圧印加サイクル数と均一バリア放電発生との関係―
3. 学会等名 第44回静電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Osawa, Kazuki Watanabe, Kenta Isomura, Yoshio Yoshioka
2. 発表標題 Calculated 2-dimensional structure of surface charge density on barrier plate before and after diffuse dielectric barrier discharge in atmospheric pressure air
3. 学会等名 The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta Isomura, Wataru Takao, Kazuki Watanabe, Naoki Osawa, Yoshio Yoshioka
2. 発表標題 Development in diffuse and filamentary barrier discharge in atmospheric pressure air by a hemispherical tip SUS rod and alumina coated plane electrode system
3. 学会等名 The 4th International Symposium on New Plasma and Electrical Discharge Applications; and on Dielectric Materials (ISNPEDADM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五十村健汰・高尾渉・大澤直樹・吉岡芳夫
2. 発表標題 半球棒対アルミナ被覆平板電極を用いた大気圧空気中でのタウンゼント放電（APTD）発生メカニズムの解明－APTDの安定発生とストリーマ放電の観察－
3. 学会等名 令和元年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡部佳月・五十村健汰・大澤直樹・吉岡芳夫
2. 発表標題 半球棒電極とアルミナ被覆平板電極を用いた大気圧空気中での均一パリア放電の発生と表面電位分布の回転対称性
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

research_map (大澤 直樹)
<https://researchmap.jp/read0095501>

金沢工業大学 研究室ガイド 工学部 電気電子工学科 大澤直樹 研究室
<https://kitnet.jp/laboratories/labo0048/index.html>

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
研究協力者	五十村 健汰 (ISOMURA Kenta)		
研究協力者	渡部 佳月 (WATANABE Kazuki)		

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
---------	---------