

Title	多針一平板電極系を用いたバリア放電とオゾン生成
Author(s)	上野, 秀樹; 川原, 慎太郎; 桑田, 健司 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2008, 17, p. 21-27
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/76846">https://hdl.handle.net/11094/76846</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 多針—平板電極系を用いたバリア放電とオゾン生成

上野秀樹、川原慎太郎、桑田健司、中山博史

兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻 〒671-2280 姫路市書写 2167

## Barrier Discharge and Ozone Generation Utilizing Multi-Point and Plane Configuration

Hideki UENO, Shintaro KAWAHARA, Takeshi KUWADA, Hiroshi NAKAYAMA

Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of Hyogo

2167 Shosha, Himeji 671-2280, Japan

Relationship between barrier discharge characteristics and ozone generation under ac voltage application has been investigated for triple needles-plane configuration with two different needle-tip radii ( $r=15, 80\mu\text{m}$ ) in dry air. Characteristics of barrier discharge and ozone generation depend on the needle-tip radius. Especially, ozone concentration and ozone generation efficiency for the triple needles with  $r=80\mu\text{m}$  were higher than those for the needles with  $r=15\mu\text{m}$ . These results can be interpreted by the effect of the space charges and accumulated charges induced by corona discharge and barrier discharge on the space for ozone generation.

キーワード：オゾン，バリア放電，コロナ放電，浴面放電，空間電荷

## 1. はじめに

オゾンは酸化力・殺菌力・消臭力に優れるとともに、自然分解で酸素に戻り、二次汚染のない性質を持つ。それゆえ、水処理や空気清浄機など、工業用から家庭用まで幅広く利用されている。オゾンの生成は、放電、紫外線照射、電気分解などにより可能であるが、効率面から無声放電や浴面放電などのバリア放電方式がオゾナイザに広く採用されている。しかし、オゾン生成効率は、放電方式においても、化学反応式による理論値に比べて実際の効率は低い。

このため、オゾナイザにおけるオゾン生成効率向上を図るための研究が盛んに行われている。その例として、放電の均一化を図った体積オゾナイザ法<sup>(1)</sup>や、放電管内にバリア放電と浴面放電を組み合わせる発生させる放電重畳法<sup>(2)(3)</sup>、放電部に紫外線を照射する方法<sup>(4)</sup>などが挙げられる。また、針—平板電極によるコロナ放電を用いたオゾン生成、多針電極を利用した装置の研究なども行われており<sup>(5)(6)</sup>、多針—平板電極系の放電特性とオゾン生成の関連性を解明することは重要である。特に、この多針—平板電極においては、針の密度がオゾンの生成に関与する放電の発生点や放電空間等に影響すると考えられる。しかし、オゾン濃度が針の本数に比例しないという報告例<sup>(8)</sup>があるものの、それぞれの針の間隔や針先端の曲率などの影響に関する検討例は少なく、詳細は明らかになっていない。

上記背景に対して、我々は2針あるいは3針構成の多針—平板電極系におけるバリア放電やオゾン生成特性を調べてきた。その結果、両端2針から反発して伸びる放電や中央部での放電の抑制、オゾン生成効率の針先端間隔依存性

などに特徴的な現象を見出した<sup>(7)-(10)</sup>。そこで、本研究では、特徴的な挙動が得られている3針—平板電極を用いて乾燥空気における放電の様子などの放電特性やオゾン生成に及ぼす針先端の曲率の影響について検討した。

## 2. 実験方法

本研究で用いた電極構成を図1に示す。針電極には直径1.05mmの針を用い、針先端間隔を針直径よりも短く設定できるように、両端の針を $10^\circ$ 傾けて支持した。なお、3つの針は接続されており同電位である。針の先端曲率半径は $15\mu\text{m}$ と $80\mu\text{m}$ の2種類のものを用いた。電極端に丸みを付けた黄銅製の平板電極(直径34mm厚さ7mm)の上に、厚さ $w=0.15\text{mm}$ 、大きさ $40\times 50\text{mm}^2$ の珪酸ガラス(体積抵抗率 $\rho=10^{12}\Omega\cdot\text{m}$ 、比誘電率 $\epsilon_r=7$ )製バリアを配置した。各針の先端からガラスバリアまでの距離をギャップ長 $g=3.0\text{mm}$ 一定とした。3針の針先端間隔を $d$ として $d=1.0\sim 7.0\text{mm}$ の範囲で変化させた。なお、比較として、両端の2つの針を取り除いた単針構成についても調べた。上述の電極系をアクリル容器内に設置し、乾燥空気を容器内に導入し流通させた。

図2に実験回路を示す。容器に取り付けた端子を介して交流電圧(60Hz)を印加した。電圧波形は放電部に並列に接続したコンデンサ分圧器を、電流波形は検出抵抗( $1\text{k}\Omega$ )に並列に接続したハイパスフィルタ(遮断周波数 $1\text{kHz}$ )を介して、デジタルオシロスコープ(DL-1540, 200MHz, 横河電機株)で観測した。印加電圧を徐々に上昇し、印加電圧のピーク付近で放電によるパルス電流が最初に観測された瞬間を放電開始とし、そのときの電圧値(ピーク値)を放電開始電圧と

した。この放電開始電圧をもとにオゾン生成時の印加電圧を設定した。また、消費電力は、ハイパスフィルタと検出抵抗を R-C 積分回路( $R=150\text{k}\Omega$ ,  $C=0.157\mu\text{F}$ )に取替えて、V-Q Lissajous 法にて測定した。放電の静止像は、一眼レフカメラ (EOS D30, Canon(株)) を用いて撮影した。生成オゾン濃度は、実験容器内に 300ml/min の乾燥空気を流し、容器出口に設置したオゾンモニター (EG-2001 NL30 型, 荏原実業(株)) により測定した。

なお、真空の誘電率を  $\epsilon_0$ 、誘電体の比誘電率を  $\epsilon_r$ 、誘電体の体積抵抗率を  $\rho$  とすれば誘電体の表面堆積電荷減衰の時定数は  $\epsilon_r \epsilon_0 \rho$  と表される。これから求まる硼硅酸ガラスの電位減衰の時定数は約 1 分であり、この影響を避けるため、1 分以上の間隔をおいて放電開始電圧の測定を行った。その他の実験の結果にはバリア上の堆積電荷の影響が含まれる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 オゾン生成特性

まず、本電極系におけるオゾン生成特性について調べて結果について述べる。図 3 に生成オゾン濃度の印加電圧依存性を示す。図 3(a) に示した針先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$  の場合では、単針、 $d=1.0, 3.0, 7.0\text{mm}$  いずれにおいても印加電圧の上昇とともに生成オゾン濃度は上昇するが、印加電圧  $V=6.0\text{kV}$  付近から生成オゾン濃度は飽和傾向を示し始めている。このときの生成オゾン濃度は単針構成で約 7ppm、 $d=1.0\text{mm}$  で約 18ppm、 $d=7.0\text{mm}$  で約 26ppm である。一方、針先端曲率半径  $r=80\mu\text{m}$  では、 $r=15\mu\text{m}$  の場合と同様印加電圧の上昇に対してオゾン濃度は上昇し、その後飽和傾向を示すが、 $r=15\mu\text{m}$  の場合ほど顕著ではない。また、印加電圧  $V=6.0\text{kV}$  における生成オゾン濃度は、単針構成で約 18ppm、 $d=1.0\text{mm}$  で約 20ppm、 $d=7.0\text{mm}$  で約 38ppm である。生成オゾン濃度を  $r=15\mu\text{m}$  の場合と同一印加電圧  $V=6.0\text{kV}$  で比較すると、先端曲率半径  $r=80\mu\text{m}$  のほうが、 $r=15\mu\text{m}$  の場合に比べて 1.5~2 倍高くなる結果が得られた。

図 4 に各条件における印加電圧と消費電力の関係を示した。単針、 $d=1.0, 3.0, 7.0\text{mm}$  のいずれの場合においても、同じ印加電圧では針先端曲率半径が  $r=15\mu\text{m}$  のほうが  $r=80\mu\text{m}$  よりも電力消費は大きくなっている。

例えば、印加電圧  $V=6.0\text{kV}$  について比較してみると、単針の場合、 $r=15\mu\text{m}$  では  $P=92.6\text{mW}$  に対して  $r=80\mu\text{m}$  では

$P=58.9\text{mW}$  で約 1.6 倍、 $d=1.0\text{mm}$  の場合、 $r=15\mu\text{m}$  では  $P=91.4\text{mW}$ 、 $r=80\mu\text{m}$  で  $35.8\text{mW}$  と約 2.6 倍、 $d=3.0\text{mm}$  の場合、 $r=15\mu\text{m}$  で  $148.8\text{mW}$ 、 $r=80\mu\text{m}$  で  $75.4\text{mW}$  と約 2.0 倍、 $d=7.0\text{mm}$  の場合、 $r=15\mu\text{m}$  で  $229.7\text{mW}$ 、 $r=80\mu\text{m}$  で  $134.6\text{mW}$  と約 1.7 倍となっており、 $r=15\mu\text{m}$  のほうが  $r=80\mu\text{m}$  の場合に比べて消費電力は大きい。また、針先端間隔が広がるにしたがい、その針先端曲率半径の変化による消費電力の増加の割合が小さくなっているものと見られる。

以上の生成オゾン濃度および消費電力の印加電圧依存性から、消費電力を基準として生成オゾン濃度を比較する。針先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$  の場合と  $r=80\mu\text{m}$  の場合における、消費電力と生成オゾン濃度の関係を図 5(a) および図 5(b) に示した。図 5(a) の  $r=15\mu\text{m}$  の場合、針先端間隔  $d$  が広がるにしたがいより大きな消費電力まで生成オゾン濃度は上昇を示している。すなわち、針先端間隔  $d$  が広がるほど生成オゾン濃度は飽和しにくい結果となった。しかしながら、飽和する生成オゾン濃度自体は  $d=1.0\text{mm}$  で約 20ppm、 $d=3.0\text{mm}$  で約 22ppm、 $d=7.0\text{mm}$  で約 26ppm でありあまり変化しておらず、針先端間隔  $d$  が狭い方がオゾン生成効率は良いものと思われる。一方、図 5(b) の  $r=80\mu\text{m}$  の場合、 $r=15\mu\text{m}$  の場合と同様に、針先端間隔  $d$  が広いほどより大きな消費電力まで生成オゾン濃度は上昇し続ける。さらに、飽和する生成オゾン濃度も  $d=1.0\text{mm}$  で約 25ppm、 $d=3.0\text{mm}$  で約 36ppm、 $d=7.0\text{mm}$  で約 51ppm と上昇し、 $r=15\mu\text{m}$  の場合とは

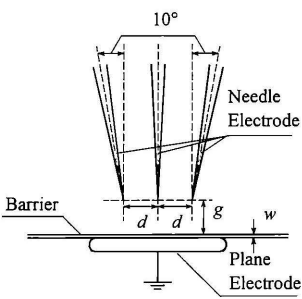


Fig.1 Electrode configuration

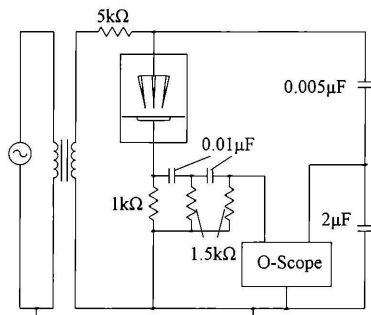


Fig.2 Diagram of experimental circuit

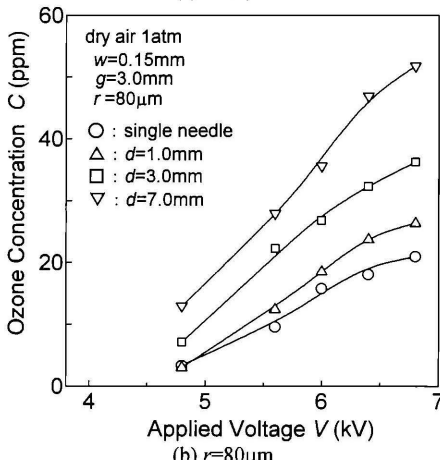
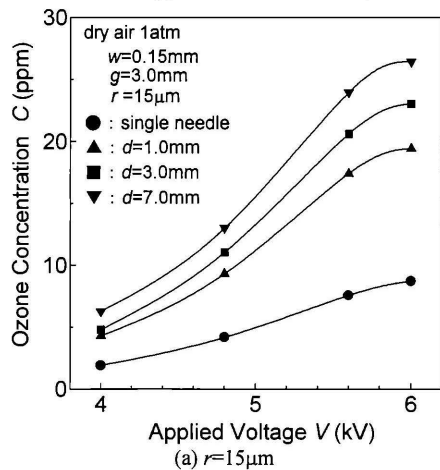


Fig.3 Applied voltage dependence of ozone concentration

異なる結果となった。

次に、針先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$  と  $r=80\mu\text{m}$  の場合の生成オゾン濃度を同じ消費電力で比較する。例えば、消費電力  $P=80\text{mW}$  で比較してみると、 $r=80\mu\text{m}$  におけるオゾン濃度は  $r=15\mu\text{m}$  におけるオゾン濃度に比べて、単針の場合で約 2.5 倍、 $d=1.0\text{mm}$  の場合で約 1.4 倍、 $d=3.0\text{mm}$  の場合で約 2.1 倍、 $d=7.0\text{mm}$  の場合では約 2.2 倍であり、 $r=80\mu\text{m}$  のほうがオゾン濃度は高くなっている。このことは、針先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$  の場合に比べて  $r=80\mu\text{m}$  のほうが、オゾン生成効率が高いことを示唆している。

以上の結果をもとに、針先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$  と  $r=80\mu\text{m}$  におけるオゾン生成効率を針先端間隔および印加電圧をパラメータとして表 1 にまとめた。まず、電極構成 (単針, 針先端間隔) に着目してみると、先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$ ,  $r=80\mu\text{m}$  いずれの場合においても、針先端間隔の狭い条件である  $d=1.0\text{mm}$  におけるオゾン生成効率が他の条件に比べて高くなっていることがわかる。この結果は、これまでに報告している 2 針あるいは 3 針—平板電極系の結果と同じである<sup>(7)(10)</sup>。次に、 $r=15\mu\text{m}$  のオゾン生成効率( $\eta_{15}$ )と  $r=80\mu\text{m}$  のオゾン生成効率( $\eta_{80}$ )を比較すると、いずれの針先端間隔, 印加電圧の条件においても、 $r=15\mu\text{m}$  のオゾン生成効率( $\eta_{15}$ )よりも  $r=80\mu\text{m}$  のオゾン生成効率( $\eta_{80}$ )のほうが高くなっている。また、オゾン生成効率の比率  $\eta_{80}/\eta_{15}$  も表 1 に示しているが、その値は  $V=4.8\text{kV}$  の  $d=1.0\text{mm}$  で 1.4 と調べた条件の中では最も小さく、 $V=6.0\text{kV}$  の単針で 2.9 と最も大きい。それ以外の条件では 1.8~2.4 となっており、 $r=80\mu\text{m}$  のオゾン生成効率は  $r=15\mu\text{m}$  の場合に比べて、概ね 2 倍となっている。

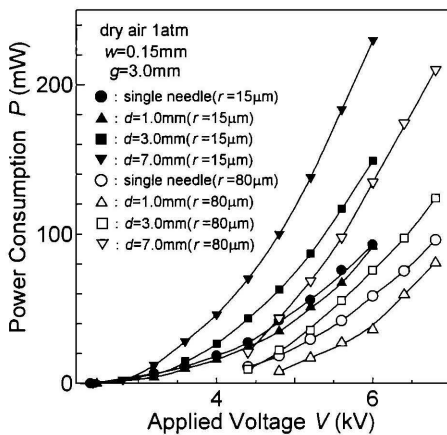


Fig. 4 Relationship between applied voltage and power consumption

### 3.2 バリア放電特性

前節で述べたように、本研究における多針—平板電極系のオゾン生成特性は、針電極の先端曲率半径  $r$  や針先端間隔  $d$  などの影響を受けることがわかった。この原因を明らかにするため、本電極系におけるバリア放電の形態や放電電流などの特性について調べた。

まず、バリア放電の形態について検討を行った。針先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$  と  $r=80\mu\text{m}$  における放電を一眼レフカメラにより撮影した。なお、露光時間はいずれの場合も 1 秒である。静止像の白い点線はバリアの位置を示している。

印加電圧  $V=4.8\text{kV}$  一定としたときの  $r=15\mu\text{m}$  と  $r=80\mu\text{m}$  における、単針, 針先端間隔  $d=1.0, 3.0, 7.0\text{mm}$  の放電の様子を図 6 に示している。単針の場合、 $r=15\mu\text{m}$  は針先の放電が強く、気中部分では比較的均一な発光の放電がみられ、バリア表面に達し沿面方向に拡がっている。一方、 $r=80\mu\text{m}$  では

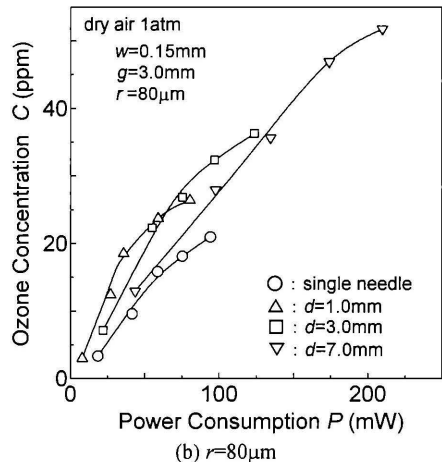
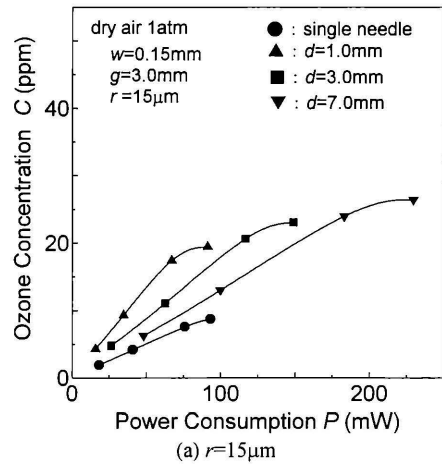


Fig. 5 Power consumption dependence of ozone concentration

Table 1 Summary of ozone generation efficiency for various conditions

Applied voltage (kV)	Single needle			$d=1.0\text{mm}$			$d=3.0\text{mm}$			$d=7.0\text{mm}$		
	Efficiency (mg/Wh)	ratio		Efficiency (mg/Wh)	ratio		Efficiency (mg/Wh)	ratio		Efficiency (mg/Wh)	ratio	
	$\eta_{15}$	$\eta_{80}$	$\eta_{80}/\eta_{15}$	$\eta_{15}$	$\eta_{80}$	$\eta_{80}/\eta_{15}$	$\eta_{15}$	$\eta_{80}$	$\eta_{80}/\eta_{15}$	$\eta_{15}$	$\eta_{80}$	$\eta_{80}/\eta_{15}$
4.8	3.9	6.9	1.8	10.3	14.5	1.4	6.8	12.5	1.8	5.0	11.4	2.3
5.6	3.8	8.8	2.3	10.0	17.7	1.8	6.8	15.6	2.3	5.0	11.0	2.2
6.0	3.6	10.3	2.9	8.2	19.9	2.4	6.0	13.7	2.3	4.4	10.2	2.3



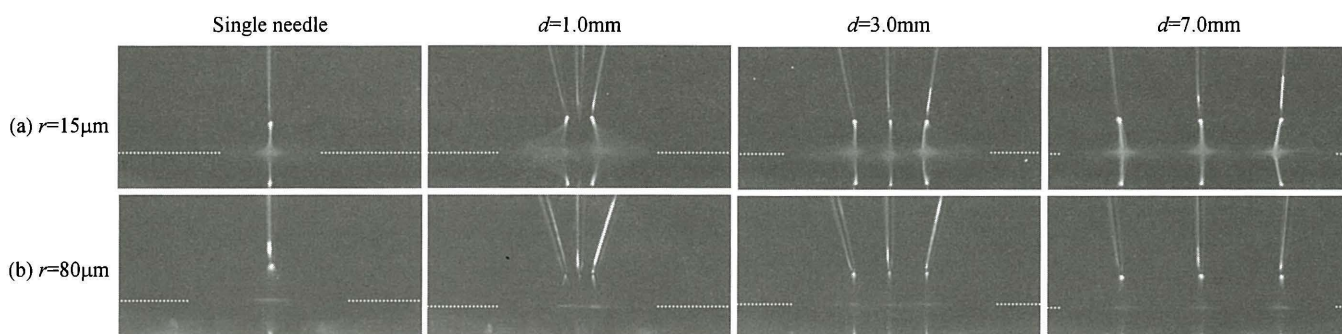


Fig.6 Discharge imaged for multi-needles barrier discharge ( $g=3.0\text{mm}$ ,  $V=4.8\text{kV}$ )

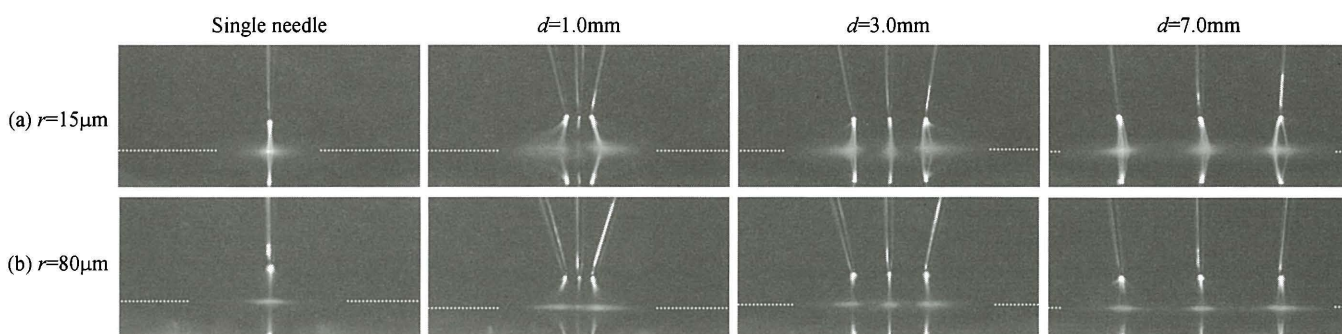


Fig.7 Discharge imaged for multi-needles barrier discharge ( $g=3.0\text{mm}$ ,  $V=6.0\text{kV}$ )

針先にやや強い発光の放電が見られ、放電はバリアに向かい 1~2mm 伸びているが、バリア表面付近の気中部分では放電発光が非常に弱くなっている。しかし、バリア表面では沿面放電の発光が観測されている。また、この針先付近の水平方向への放電の拡がりを比較すると、 $r=15\mu\text{m}$  は 0.5mm 程度、 $r=80\mu\text{m}$  で 1mm 程度と  $r=80\mu\text{m}$  のほうが水平方向の拡がり大きい。また、 $d=1.0\text{mm}$  のとき、 $r=15\mu\text{m}$  は両端の針からの放電に拡がりが見られ、バリア表面に達しているが、 $r=80\mu\text{m}$  の場合は針先と針先から下に 1mm 程度伸びた放電、針電極の下のバリア表面の放電のみで気中部分の放電の発光はほとんど見られない。 $d=3.0\text{mm}$  のときも  $r=15\mu\text{m}$  のときは針先から気中、バリア表面の沿面部の放電がはっきりと見られるのに対し、 $r=80\mu\text{m}$  では針先近傍とバリア表面の放電の発光が見られるものの、それらは  $r=15\mu\text{m}$  の場合に比べ弱くなっている。さらに、針先端間隔が広い  $d=7.0\text{mm}$  の場合で、 $r=15\mu\text{m}$ 、 $r=80\mu\text{m}$  共にそれぞれの針からの放電の様子が単針の場合と似ており、個々の針からの放電の様子は、単針の場合とほぼ同様の結果が得られている。

印加電圧  $V=6.0\text{kV}$  の場合についても調べた結果を図 7 に示しているが、印加電圧を高くした  $V=6.0\text{kV}$  においても、 $r=15\mu\text{m}$  では針先からバリアまでの放電がはっきりと見られるのに対し、 $r=80\mu\text{m}$  でも針先からバリアまでの放電が見られるが、バリア表面に近い気中部分の発光が弱い。そして、 $r=80\mu\text{m}$  の場合、バリア表面に見られている沿面放電は、 $r=15\mu\text{m}$  の場合と比べると発光が弱く、領域は狭い。

以上のことより、針先端曲率半径を  $r=15\mu\text{m}$  から  $r=80\mu\text{m}$  へと大きくすると、印加電圧に関係なく、針先近傍の放電とバリア表面の放電は強いが、バリア表面に近い気中部分の放電は弱くなるということが分かった。この様な針先端曲率半

径や針先端間隔によるオゾン生成特性の変化は、上述の放電空間などの相違などが関係しているものと思われる。

次に、針先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$  と  $r=80\mu\text{m}$  について、印加電圧  $V=6.0\text{kV}$  における放電電流波形を針先端間隔  $d$  をパラメータとして調べた結果を図 8 に示した。

まず、いずれの針先端曲率半径においてもオゾン生成効率が最も高かった  $d=1.0\text{mm}$  の場合について放電電流を比較する。まず、正の電圧印加時において電流パルスが最初に発生するときの電圧は、 $r=15\mu\text{m}$  で 1.6kV、 $r=80\mu\text{m}$  では 5.4kV と差が見られる。放電電流パルスのピーク値は図からは読み取れないが、 $r=15\mu\text{m}$  では約 5.5mA、 $r=80\mu\text{m}$  では約 6.0mA であり、 $r=80\mu\text{m}$  のほうが若干大きくなっている。放電電流パルスの数は、 $r=15\mu\text{m}$  では 10 本以上であるのに対して、 $r=80\mu\text{m}$  では数本と  $r=15\mu\text{m}$  のほうが多い。また、正の印加電圧上昇の初期に負の方向の電流パルスが  $r=15\mu\text{m}$ 、 $r=80\mu\text{m}$  ともに見られ、そのピーク値は  $r=15\mu\text{m}$  の場合約 0.2mA、 $r=80\mu\text{m}$  で約 1.5mA であり、 $r=80\mu\text{m}$  の場合のほうが大きい。一方、負の電圧印加時においては、電流パルスが最初に発生する印加電圧は、 $r=15\mu\text{m}$  で -2.4kV、 $r=80\mu\text{m}$  で -3.4kV であり、1.0kV の差が見られた。また、正のときと同様に電圧上昇の初期段階で逆極性の電流パルスが観測されたが、その値は  $r=80\mu\text{m}$  で約 0.1mA、 $r=15\mu\text{m}$  では確認できなかった。さらに、負の放電電流パルスのピーク値は  $r=15\mu\text{m}$  のとき約 0.2mA、 $r=80\mu\text{m}$  のとき約 0.4mA、 $r=80\mu\text{m}$  のほうが 2 倍大きい。また、放電電流パルス数は、負の場合いずれの先端曲率半径においても多数の電流パルスが観測されるが、観測される時間領域(電圧に対する位相範囲)から見て、 $r=15\mu\text{m}$  のほうがより多くの電流パルスが発生しているものと考えられる。

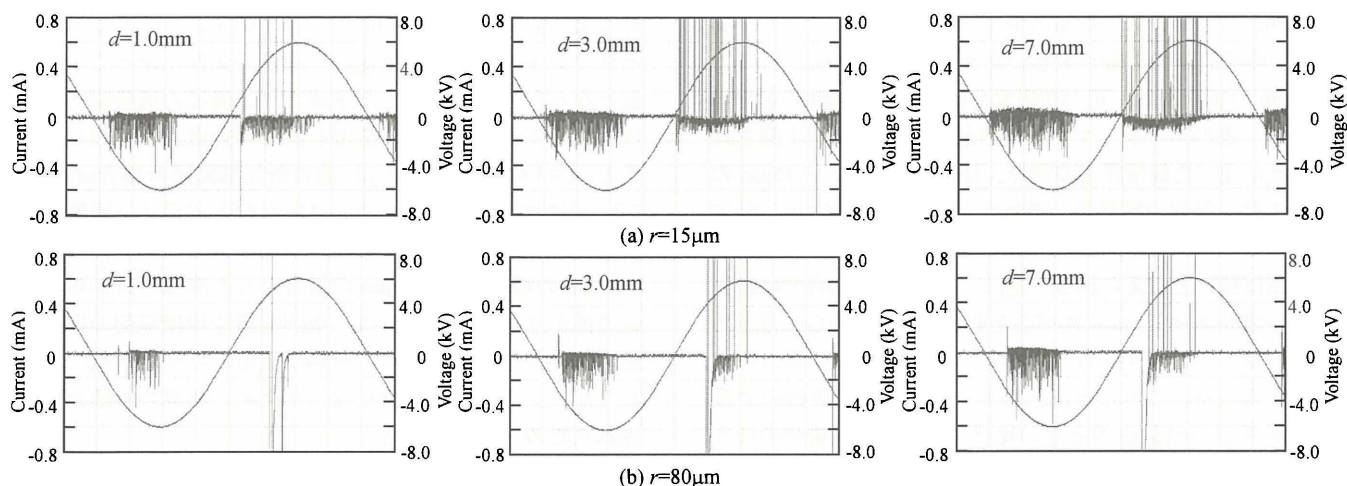


Fig. 8 Discharge current for various conditions ( $g=3.0\text{mm}$ ,  $V=6.0\text{kV}$ )

$d=3.0, 7.0\text{mm}$  と針先端間隔が広くなるに従い、正負の放電電流パルスのピーク値およびの発生放電パルス数は増大するが、針先端曲率半径  $r$  による違いについては、針先端間隔  $d=1.0\text{mm}$  場合と同様の結果が得られた。すなわち、最初に電流パルスが発生する印加電圧は、正負極性ともに  $r=80\mu\text{m}$  のほうが高く、またその段階で逆極性電流パルスも発生し、そのピーク値も  $r=80\mu\text{m}$  の場合の方が大きいものとなった。さらに、同極性の放電電流パルスについて  $r=15\mu\text{m}$  と  $r=80\mu\text{m}$  の場合を比較したとき、電流パルスのピーク値は、 $r=80\mu\text{m}$  のほうが大きく、 $d=3.0, 7.0\text{mm}$  では2-3倍大きくなった。一方、発生電流パルス数は、正負いずれの極性においても  $r=15\mu\text{m}$  のほうが多い。

針先端曲率半径によるこれらの放電電流の違いが、放電形態、消費電力などに影響を及ぼし、その結果としてオゾン生成特性にも差が生じたものと考えられる。

## 4. 検討

### 4.1 バリア放電特性

以上の実験結果から、まず3針—平板電極におけるバリア放電特性に及ぼす針先端曲率半径の影響について検討を行う。

バリア放電特性、オゾン生成の検討を行うにあたり、まず静電界における電位分布、電界について検討を行った。ギャップ長  $g=3\text{mm}$  において単針—平板電極系での針先端電界を回転双曲面法によって計算した針先の電界強度を比較すると、 $r=15\mu\text{m}$  の場合が  $4.8 \times 10^7 \text{V/m}$ 、 $r=80\mu\text{m}$  の場合が  $2.0 \times 10^7 \text{V/m}$  と見積もられ、 $r=15\mu\text{m}$  のほうが針先の電界は強いことが分かる。なお、この計算においてはバリアの存在は考慮されていない。次に、有限要素法による解析ソフト JMAG (日本総合研究所㈱) を用いて、バリアも含めた3次元モデルにより電位分布を調べた。針先端の電位を1として規格化した針先端近傍の電位分布を図9に単針の場合と比較して示した。針先端曲率半径  $r=80\mu\text{m}$  の電位分布は  $r=15\mu\text{m}$  の場合と比べて、単針、 $d=1.0, 3.0, 7.0\text{mm}$  いずれの場合も針先では緩やかになっている。また、針先端部分

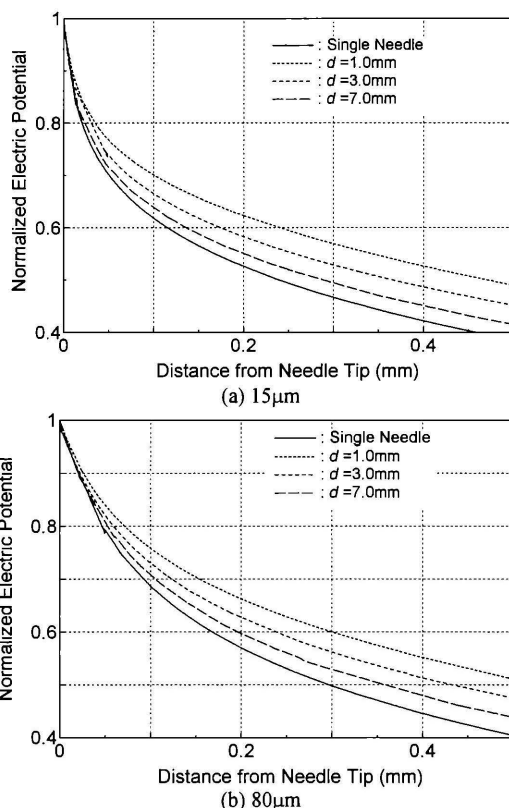


Fig.9 Normalized electric potential distribution

から離れたところでは、 $r=15\mu\text{m}$  の電位分布の傾きは  $r=80\mu\text{m}$  の場合に比べて急速に緩やかになる。すなわち、先端曲率半径  $r$  が大きくなると、針先の電界は弱まることを示している。

つぎに、図6のバリア放電の様子について考える。針先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$  の針を用いた場合、 $d=1.0\text{mm}$  の中央の針からの放電を除いて、針先からバリア表面までの発光が明瞭に認められた。これに対して、 $r=80\mu\text{m}$  ではバリア表面に近い気中部分での放電発光が弱くなった。同様の放電挙動は、 $r=15\mu\text{m}$ 、 $d=1.0\text{mm}$  における中央の針からの放電においても観測されている。これは、針先近傍の空間電荷やその下のバリア表面の堆積電荷の影響で説明される<sup>(9)(10)</sup>。



$r=80\mu\text{m}$  の気中部分の放電の発光が弱いことも、この空間電荷・堆積電荷の影響が大きいと考えられる。さらに、 $r=80\mu\text{m}$  の場合では、正の空間電荷による電界緩和の影響が大きく、正のストリーマが形成されにくいことが予測される。先に述べた静電界での電界、電位分布から、 $r=15\mu\text{m}$  の場合では、針先の電界は  $r=80\mu\text{m}$  に比べると強いが、針先を離れるとすぐに電位分布が緩やかになっており、電離可能な領域は狭いと考えられる。逆に、 $r=80\mu\text{m}$  の場合では針先付近の電界は  $r=15\mu\text{m}$  に比べると弱い、針先からの電位の変化は徐々に緩やかになっており、電離可能な領域は広いと考えられる。このことは、図6に示した針先近傍の放電の拡がり、 $r=15\mu\text{m}$  のときに比べて  $r=80\mu\text{m}$  の場合のほうが広がっていることから示唆される。また、このことより、 $r=15\mu\text{m}$  に比べて  $r=80\mu\text{m}$  の場合、正の空間電荷領域も広く分布するものと考えられる。このため、電子なだれが形成される部分の電界が緩和され、ストリーマが進展し難くなる。 $r=15\mu\text{m}$  は電離領域が狭いため、この正の空間電荷の電界緩和作用の影響を受け難くなり、ストリーマは進展し易い。これらのことから、針先端曲率半径によって放電の様子が異なったものと考えられる。

#### 4.2 オゾン生成特性

オゾン生成効率の比較では、針先端曲率半径が大きい  $r=80\mu\text{m}$  のほうが生成効率は高くなった。このことについて検討を行う。

オゾンの生成には酸素の解離プロセスが重要である。針電極の場合、針先近傍の電界が高く、針先から離れるにしたがい電界は急速に弱まる。そのため、針先近傍に高いエネルギーを持った電子が多数存在し、これによって酸素の解離反応が盛んに行われる<sup>(11)-(13)</sup>。すなわち、針先近傍の放電とその空間がオゾンの生成に対する影響が大きい。今回得られた結果では、針先端曲率半径の大きい  $r=80\mu\text{m}$  のほうがオゾン濃度は高くなった。この原因として、前節でも述べた針先付近の放電の違いが関係しているものと考えられる。針先端曲率半径が大きい  $r=80\mu\text{m}$  の場合、針先端曲率半径が小さい  $r=15\mu\text{m}$  の場合に比べて、針先近傍の放電領域が広い。この放電領域がオゾン生成領域と関連している。すなわち、針先の放電領域が広い  $r=80\mu\text{m}$  の場合のほうが、オゾン生成空間が広く、電流波形からパルス電流の値が、 $r=15\mu\text{m}$  よりも  $r=80\mu\text{m}$  のほうが大きいことから、酸素の解離が盛んであり、オゾン濃度が高くなったと言える。また、消費電力について考えてみる。同一印加電圧における放電の様子を比較すると、空間電荷やバリア表面での堆積電荷の影響を受けて、バリア表面の沿面放電部やバリア表面に近い気中部の放電は、 $r=15\mu\text{m}$  に比べ  $r=80\mu\text{m}$  の場合弱い。このため、同じ印加電圧で消費電力を比較した場合、 $r=80\mu\text{m}$  の針を用いたときの方が小さくなったものと考えられる。これらの結果により、針先端曲率半径が大きい  $r=80\mu\text{m}$  のほうがオゾン生成効率が高くなったものと言える。

また、印加電圧が低い領域 ( $V=4.8, 5.6\text{kV}$ ) においては、

針先端間隔が狭い  $d=1.0\text{mm}$  の針先端曲率半径の変化によるオゾン生成効率の変化  $\eta_{80}/\eta_{15}$  は他の条件に比べて小さな値となった。図5に示した生成オゾン濃度の消費電力依存性において、生成オゾン濃度を同じ消費電力で比較してみると、 $d=1.0\text{mm}$  においては、他の針先端間隔の場合 ( $d=3.0, 7.0\text{mm}$ ) に比べて、 $r=80\mu\text{m}$  と  $r=15\mu\text{m}$  の生成オゾン濃度の比が小さいことがわかる。また、放電の様子の比較すると、 $r=80\mu\text{m}$  の場合は、 $r=15\mu\text{m}$  の場合よりも両端の針からの放電の拡がり狭い。これは、空間電荷や堆積電荷の影響が他の条件に比べて大きく、両端の放電の拡がる領域、すなわちオゾン生成領域が狭くなったため、酸素の解離が制限されたためと考えられる。

#### 5. まとめ

3 針-平板電極系におけるバリア放電とオゾン生成に及ぼす針先端曲率半径の影響について検討を行った。

針先端曲率半径  $r=15\mu\text{m}$  と  $r=80\mu\text{m}$  について比較した結果、針先端曲率半径が小さい  $15\mu\text{m}$  の場合よりも、針先端曲率半径が大きい  $80\mu\text{m}$  の場合の方が、生成オゾン濃度は高くなり、またオゾン生成効率も高くなった。これは、針先端曲率半径  $r=80\mu\text{m}$  の場合、 $r=15\mu\text{m}$  の場合に比べて、針先端の放電領域、すなわちオゾン生成に関する空間が広く、また放電電流のピーク値も大きく、酸素の解離反応、すなわちオゾン生成活発に行われている。一方、空間電荷・堆積電荷の影響により、 $r=15\mu\text{m}$  の場合よりも消費電力が抑えられる。その結果として、針先端曲率半径  $r=80\mu\text{m}$  のほうが生成オゾン濃度およびオゾン生成効率は高くなった。また、空間電荷・堆積電荷の影響は、いずれの針先端曲率半径においても針先端間隔が狭い方が大きいことも明らかとなった。

#### 参考文献

- (1) 前園一郎：「正ストリーマコロナ放電を応用した体積オゾンナイザの特性」, 電気学会論文誌, Vol.113-A, No.8, pp.567-571 (1993)
- (2) 岸田治夫・田村征史・江原由泰・伊藤泰郎：「オゾン生成における三相放電重畳法の効果」, 電気学会論文誌, Vol.119-A, No.8/9, pp.1084-1089 (1999)
- (3) 岸田治夫・尾内弘樹・田村征史・江原由泰・伊藤泰郎：「放電重畳法によるオゾン生成の高収率化」, 電気学会論文誌, Vol.117-A, No.11, pp.1103-1108 (1997)
- (4) 岸田治夫・石坂光識・田中 穰・江原由泰・伊藤泰郎：「放電によるオゾン生成に及ぼす紫外線の効果」, 電気学会論文誌, Vol.117-A, No.6, pp.585-590 (1997)
- (5) 増井典明・八島健・浜口拓也・村田雄司・谷辰夫：「針対平板電極におけるコロナ放電とオゾン生成特性」, 静電気学会誌, Vol.22, pp.98-101 (1998)
- (6) 金子一弥・中島規雄：「針対セラミックトランス電極を使用したオゾン発生器」, 平成 16 年電気学会全国大会講演論文集, No.1-053, p.57 (2004)
- (7) 畑孝司・松井良介・上野秀樹・中山博史：「乾燥空気中での2針-平板電極のバリア放電とオゾン生成」, 電気学会論文誌, Vol.124-C, No.11, pp.2228-2234 (2004)
- (8) H.Ueno, K.Hata and H.Nakayama : "Barrier Discharge Characteristics for The Multiple Needles-to-Plane Configuration", Proc. 15th Int. Conf. Gas Discharges and Their Applications, Vol.1,

- pp.227-230 (2004)
- (9) H.Ueno, K.Hata and H.Nakayama: "Development of Repulsive Barrier Discharge from Twin Needles", Jpn.J.Appl.Phys., Vol.46(3A), pp.1142-1148 (2007)
- (10) 上野秀樹・川原慎太郎・中山博史:「複針—平板電極のバリア放電とオゾン生成における針先端間隔の影響」, 電気学会論文誌, Vol.128-A, No.11 (2008)印刷中
- (11) 電気学会放電ハンドブック出版委員会: 放電ハンドブック上巻, pp.353-356, オーム社 (2003)
- (12) 村田隆昭・沖田裕二・飯島崇文:「堆積放電と共面放電のオゾン発生特性」, 放電学会誌, Vol.49, No.2, pp.61-63 (2006)
- (13) 和田昇:「最大オゾン発生効率と電子電流比」, 放電学会誌, Vol.49, No.2, pp.64-66 (2006)

(平成20年9月10日受理)



**上野秀樹 (会員)**

昭和35年生まれ。昭和60年3月信州大学大学院工学研究科修士課程, 昭和63年3月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月住友電気工業(株)入社。平成9年10月姫路工業大学工学部助教授, 平成14年4月大学院助教授, 平成16年4月兵庫県立大学大学院助教授, 現在同准教授。平成16~17年ドイツ・アーヘン工科大学高電圧技術研究所研究員。主として, 複合絶縁, 沿面放電と応用に関する研究に従事。工学博士。



**川原慎太郎 (非会員)**

昭和58年6月4日生。平成18年3月姫路工業大学電気工学科卒業。平成20年3月兵庫県立大学大学院工学研究科博士前期課程電気系工学専攻修了。同年4月富士通テン株式会社入社, 現在に至る。

**論文: 多針—平板電極系を用いたバリア放電とオゾン生成**

**桑田健司 (非会員)**



昭和60年1月11日生。平成19年3月姫路工業大学電気工学科卒業。平成19年4月兵庫県立大学大学院工学研究科博士前期課程電気系工学専攻入学。現在に至る。平成19年度電気関係学会関西支部連合大会奨励賞。

**中山博史 (会員)**



昭和18年生まれ。昭和40年3月姫路工業大学電気工学科卒業。平成3年10月同大学電気工学科教授, 平成14年4月同大学大学院教授, 平成10年から2年間同大学学生部長兼任。平成16年4月兵庫県立大学大学院教授, 平成20年4月同大学名誉教授, 特任教授。主として, 気体および固体誘電体の絶縁破壊に関する研究に従事。工学博士。