

# 乾燥空気中における 3 針－平板電極のバリア放電と オゾン生成

川原 慎太郎 上野 秀樹 中山 博史

電気系工学専攻

## Barrier Discharge Characteristics and Ozone Generation on Triple Needle – Plane Electrode Configuration in Dry Air

Shintaro Kawahara, Hideki Ueno and Hiroshi Nakayama  
Department of Electrical Engineering and Computer Sciences

### Abstract

A relation of barrier discharge characteristics to ozone generation under ac voltage application has been investigated for various distances between three needle-tips ( $d=0\text{mm}\sim 7.0\text{mm}$ ) at constant distance between needle tip and plane ( $g=3.0\text{mm}$ ) in dry air. Characteristics of the barrier discharge and ozone generation are changed by the needle-tips distance. Those changes have been caused by the influence of tip needle each other and distance between three needle-tips. It is considered that the influence is caused by space charge and accumulated charge suggested from discharge image by still camera and CCD camera. And ozone generation efficiency was estimated by power consumption and ozone concentration. As a result, when the distance between three needle-tips is narrow, the above-mentioned influence is strengthened. And in this case, ozone generation efficiency improves.

Keywords: barrier discharge, corona discharge, creeping discharge, space charge, ozone

### 1. はじめに

オゾンはフッ素に次ぐ強力な酸化力・殺菌力・消臭力を持ちながらも、自然分解で人体に無害な酸素に分解するため、二次汚染のない優れた性質を持つ化学物質である。このことから、オゾンは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[1][2]。

オゾンの生成には、放電方式、紫外線照射方式、電気分解方式などがある。効率面では放電方式が最も良く、無声放電や沿面放電などのバリア放電による方式が広く用いられている。しかし、化学反応式から求まる理論的なオゾン生成効率に対し、効率が良いとされる放電方式でも理論値に及ばないのが現状である。

このため、オゾン生成効率の向上が望まれており、オゾンナイザの性能向上に関する研究などが国内外で盛んに行われている。最近では、放電形態を改善し、放電の均一化を図った体積オゾンナイザ法[3]や、バリア放電と沿面放電を組み合わせて放電管内に複数の放電を重畳させる放電重畳法[4][5]、紫外線と放電を重畳させる方法[6]などの研究が行われている。また、針－平板電極におけるコロナ放電のオゾン生成に関する研究[7]や、多針電極を用いてコロナ放電を利用する装置の研究[8]など、オゾンナイザの基本の電極構成としても使われる針－平板電極だけでなく、その針電極を多針電極にして放電特性とオゾン生成の関連性を調べる研究も注目されている。しかし、この多針－平板電極については、オゾン濃度が針の本数に比例しないという報告例[8]があるものの、それぞれの針の間隔によって互いの針がどう影響するのかといった検討例が少なく、詳細は明らかになっていない。

そこで本研究では、これらの背景をもとに多針電極において互いの針が放電特性にどのような影響を及ぼすのか、また、それによってオゾンの生成量がどのように変化していくのかを明らかにすることを目的とする。そして 3 針－平板電極を用いて乾燥空気中における放電の様子を観測し、放電開始電圧、消費電力、オゾン濃度を測定し、さらにそれらのデータからオゾン生成効率の算出を行った。

### 2. 実験方法

本研究で用いた電極構成を Fig.1 に示す。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、バリアとして厚さ  $w=0.15\text{mm}$ 、大きさ  $40\times 50\text{mm}^2$  の硼硅酸ガラス（体積抵抗率  $\rho=10^{12}\Omega\cdot\text{m}$ 、比誘電率  $\epsilon_r=7$ ）を

配置した。なお、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。針の先端曲率半径は約  $15\ \mu\text{m}$  である。3つの針は接続されており同電位である。放電開始電圧測定時を除き、それぞれの針の先端からガラス表面までの距離のギャップ長  $g$  を 3.0mm 一定とした。3針の針先端間隔を  $d$  として 0mm~7.0mm の範囲で変化させた。ただし、単針の場合は、両端の針を取って中央の針のみ残して測定を行った。上述の電極系をアクリル密封容器内に設置し、乾燥空気を容器内に導入し流通させた。

Fig.2 は実験回路を示している。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 1kHz) を介して、プローブ (150MHz, 横河電機株) を用いて、デジタルオシロスコープ (DL-1540, 200MHz, 横河電機株) で観測した。電流波形で最初に放電によるパルス電流が生じた瞬間を放電開始とし、その瞬間の電圧値を放電開始電圧とした。放電の静止画は一眼レフカメラ (EOS D30, Canon株) および高速ゲートインテンシファイア CCD カメラ (C4346, 株浜松ホトニクス) を用いて撮影を行った。消費電力の測定のみハイパスフィルタと検出抵抗の部分に  $R$ - $C$  積分回路 ( $R=150\text{k}\Omega$ ,  $C=0.157\ \mu\text{F}$ ) にかえて  $V$ - $Q$  Lissajous 法により測定した。そして実験容器内から 300cc/min の気体を取り出し、排気側に設置したオゾンモニター (EG-2001 NL30 型, 荏原実業株) によって生成オゾン濃度の測定を行った。

ここで、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体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、本実験の結果にはガラス上の堆積電荷の影響が含まれると考えられる。

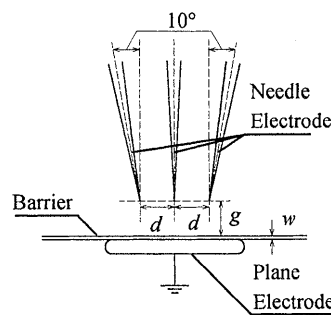


Fig.1 Electrode configuration

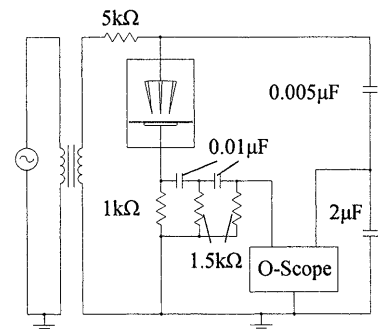


Fig.2 Diagram of experimental circuit

### 3. 実験結果

#### 3.1 放電開始電圧の針先端間隔依存性

乾燥空気中における放電開始電圧の針先端間隔依存性を Fig.3 に示す。放電開始電圧の測定は、同一条件で各々 5 回行い、その平均値を図中に示した。ばらつきは  $g=3.0\text{mm}$  の場合で  $d=1.0\text{mm}$  のときに  $0.16\text{kV}$  で最も大きかった。

放電開始電圧の結果は一見針先端間隔  $d$  にかかわらず放電開始電圧が一定であるように見える。しかし、 $d$  が狭い場合は広い場合に比べわずかに放電開始電圧が上昇した。例えば、ギャップ長  $g=3.0\text{mm}$  の場合、 $d=3.0\text{mm}$  と  $d=7.0\text{mm}$  を比べると  $d=3.0\text{mm}$  の方が高く、 $d=1.0\text{mm}$  と  $d=3.0\text{mm}$  を比べると  $d=1.0\text{mm}$  の方が高い。つまり、放電開始電圧の差を比較すると  $d=1.0\text{mm}$ ~ $3.0\text{mm}$  間の方が大きく、エラーバーの幅を考慮しても傾向としては、放電開始電圧はわずかながら  $d=1.0\text{mm}$  の場合が高いことが分かる。

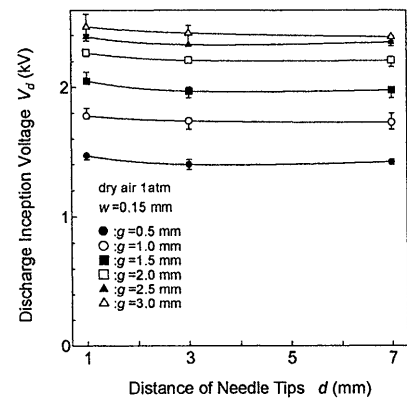


Fig.3 Dependence of discharge inception voltage on distance of needle tips

#### 3.2 一眼レフカメラによる放電の様子を観測と消費電力の印加電圧依存性

一眼レフカメラを用いて放電の様子を観測した。露光時間は 1 秒である。なお、ギャップ長  $g=3.0\text{mm}$  一定として針先端間隔を変化させて撮影した。放電の静止画を Fig.4 に示す。静止画の点線部はバリアの位置である。印加電圧が低すぎると放電の様子がみえず、高すぎると放電の光が強すぎるため、測定範囲の中間の印加電圧  $V=4.8\text{kV}$  一定として、単針、 $d=0\text{mm}$ ,  $0.5\text{mm}$ ,  $1.0\text{mm}$ ,  $3.0\text{mm}$ ,  $7.0\text{mm}$  の場合の放電の様子を示した。

どの条件においても針先からバリアまでの放電が見られ、バリア表面に広がる沿面放電が観測された。Fig.4 の単針の場合、針先からバリアまで、バリアに対して垂直な放電の様子が見られた。そして、注目すべき点は針先端間隔によって放電の様子が異なる点である。 $d=7.0\text{mm}$  は、針の傾きやバリア表面の堆積電荷の影響で針先からバリアまでの放電の様子がわずかに内側に進展しているが、3本の針先からバリアまでの放電が細くまっすぐ進展し、沿面放電と気中放電の境目のバリア表面の発光が強いので、基本的に単針の放電と同じである。一方、特徴的なのが Fig.4 の  $d=0.5\text{mm}$  や  $d=1.0\text{mm}$  の場合で、両端の針からの放電が互いに反発する方向に広がって進展している。ま

た、中央の針からの放電が見られなかった。さらに、針先端間隔を狭めて  $d=0\text{mm}$  にすると、針先からバリアまでの放電が 1 本となり単針の放電の様子に似ている。しかし、単針の場合と異なるのはバリアに近づくにつれ放電が広がっていることが分かる。また、放電の発光の様子はどの場合でも針先に近づくにつれ発光が強くなっている。

消費電力については、Fig.5 の消費電力の印加電圧依存性では針先端間隔が広がるほど消費電力が大きくなっている。 $V=4.8\text{kV}$  で  $d=7.0\text{mm}$  は  $99.8\text{mW}$  で、 $d=1.0\text{mm}$  の  $34.7\text{mW}$  の約 2.9 倍消費電力が大きいう結果になっている。単針と  $d=0\text{mm}$  の場合に注目すると、先程述べたように Fig.4 をみると似たような放電の様子であるが、 $V=4.8\text{kV}$  の消費電力を見ると単針の場合は  $42.1\text{mW}$  で、 $d=0\text{mm}$  のときの  $27.5\text{mW}$  の 1.5 倍消費電力が大きくなっている。

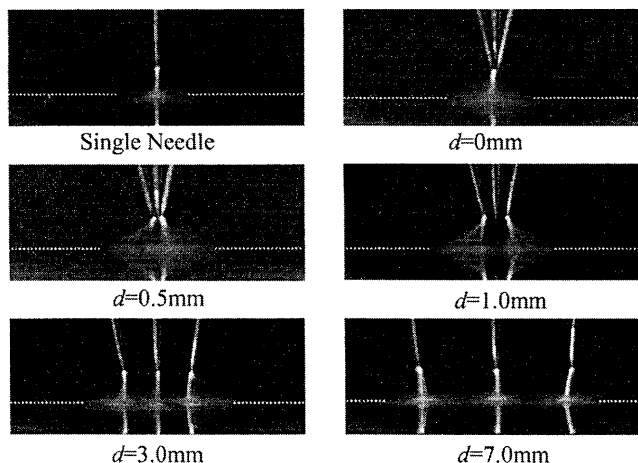


Fig.4 Discharge images with still camera ( $g=3.0\text{mm}$ )

### 3.3 CCDカメラによる放電の様子の観測と電流波形

一眼レフカメラによる前項 Fig.4 の放電の様子は露光時間が 1 秒であり、ここでは 1 周期、半周期、さらに正の半周期を 10 分割した周期に露光時間を合わせて撮影した。特に、この章では特徴的な放電が観測された  $d=1.0\text{mm}$  の場合について述べ、さらにその時の電流波形についても言及する。

はじめに、 $V=4.8\text{kV}$ 、 $d=1.0\text{mm}$  のときの電流波形について説明する。Fig.6 は  $V=4.8\text{kV}$ 、 $d=1.0\text{mm}$  のときの電圧・電流波形である。最初の電流パルスが発生する時間は、負の電流パルスの方が正よりも早くその時の電圧は Fig.6 から約  $1.8\text{kV}$  である。これはこの場合の放電開始電圧  $2.47\text{kV}$  よりも低い。負の電流パルスは Fig.6 を見ると  $0.25\text{mA}$  程度の大きさであることが分かる。さらに、電流パルスの数が正の場合と比べてはるかに多い。一方、正の電流パルスは最大で  $10\text{mA}$  程度の大きさである。これは負の場合に比べてはるかに大きい。つまり、正の電流パルスは大きい数が少なく、負の電流パルスは小さい数が多いう結果になっている。この正負の放電パルスの違いは、この後述べる極性の違いによる放電の様子の違いに関わる。

続いて、Fig.6 の電圧波形の 1 周期、正の半周期、負の半周期に分けた放電の様子を Fig.7 に示す。正極性の放電の様子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、負極性の放電の様子は針先のみははっきりと観測できた。1 周期と正極性の放電の様子を比べるとほとんど同じだが、1 周期のほうは正極性と負極性両方が含まれているため、針先の放電領域が正極性より広がっている。この正極性・負極性の放電の様子を比べると、両端の針からの放電に広がりが見られることは、正極性の放電に深く関わっていると考えられる。

このことから、さらに正の半周期を 10 分割して正極性の放電の様子を調べた。これらを Fig.8 に示す。半周期は約  $8.3\text{ms}$  であるので、1 つの写真の露光時間は  $0.83\text{ms}$  とした。放電の様子が観測されたのは  $0\sim 5.81\text{ms}$  の間である。これは、Fig.6 の電流パルスが出ている時間軸と一致している。電流パルスにも当てはまるが、 $0\sim 4.15\text{ms}$  にかけて電圧波形が最大電圧に向けて増加し放電が起こっているが、それ以降の  $4.15\text{ms}\sim 5.81\text{ms}$  で電圧が低下しても放電が起こっていることが分かる。放電の様子は最初の写真で針からバリアに向かって真下に放電し、それから時間が経つ

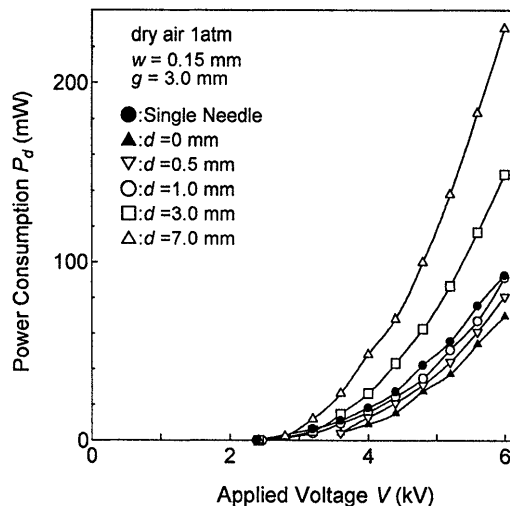


Fig.5 Dependence of power consumption on applied voltage ( $g=3.0\text{mm}$ )

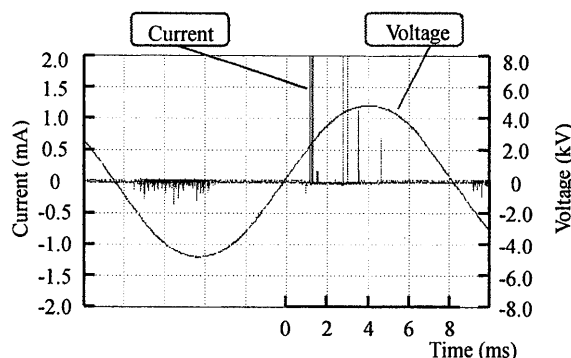


Fig.6 Discharge current and voltage ( $d=1.0\text{mm}$ ,  $g=3.0\text{mm}$ ,  $V=4.8\text{kV}$ )

につれて放電に広がりを見せている。0.83ms~2.49msの範囲の2つの写真で放電の発光が強くなった。5.81ms以降は放電が観測されなかった。

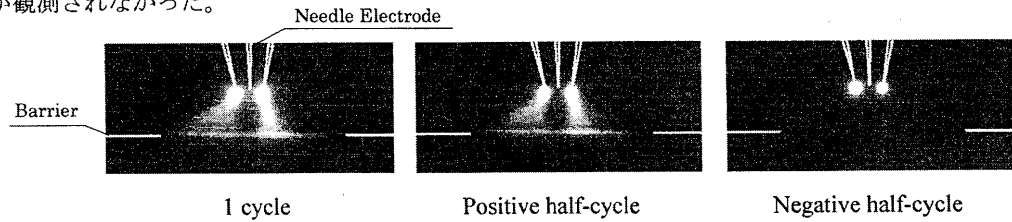


Fig.7 Time-resolved discharge image with CCD ( $d=1.0\text{mm}$ ,  $g=3.0\text{mm}$ ,  $V=4.8\text{kV}$ )

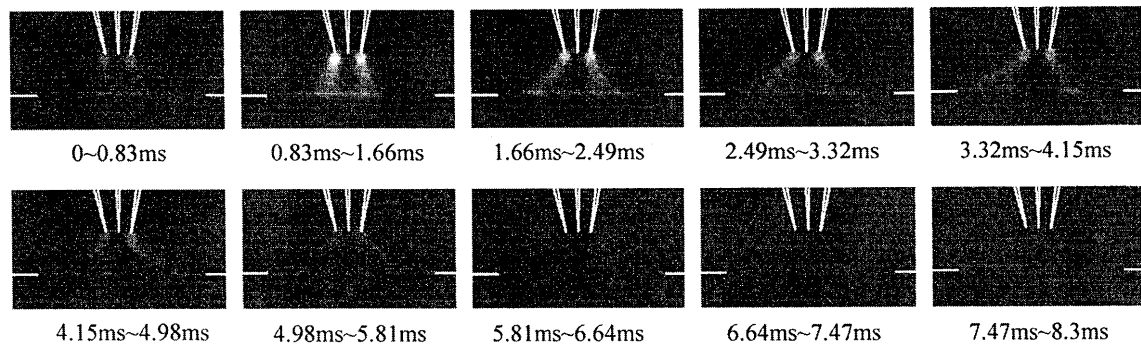


Fig.8 Time-resolved discharge image in positive half-cycle with CCD ( $d=1.0\text{mm}$ ,  $g=3.0\text{mm}$ ,  $V=4.8\text{kV}$ )

### 3.4 生成オゾン濃度の印加電圧依存性とオゾン生成効率の針先端間隔依存性

Fig.9に単針と $d=0, 0.5\text{mm}, 1.0\text{mm}, 3.0\text{mm}, 7.0\text{mm}$ の場合の生成オゾン濃度の印加電圧依存性を示し、オゾン生成効率の針先端間隔依存性のほうは、Fig.10に印加電圧 $V=4.0\text{kV}, 4.8\text{kV}, 5.6\text{kV}, 6.0\text{kV}$ の場合を示した。オゾン生成効率とは、単位消費電力あたりのオゾン生成量で、オゾン濃度はオゾン生成量のみに関わってくるものです。

まず、生成オゾン濃度の印加電圧依存性のほうは針先端間隔が広がると生成オゾン濃度は高くなっている。 $V=4.8\text{kV}$ のとき $d=7.0\text{mm}$ は13ppm、 $d=1.0\text{mm}$ の9.3ppmの約1.4倍高い。この比較で、 $V=4.8\text{kV}$ のときの消費電力の比較では、3.2章で述べたように $d=7.0\text{mm}$ の方が $d=1.0\text{mm}$ よりも約2.9倍大きくなったのに対し、オゾン濃度のほうは増加の割合が約1.4倍と低いことが分かる。そして、どの針先端間隔の場合でも、印加電圧が $5.6\text{kV}\sim 6.0\text{kV}$ にかけてオゾン濃度の増加率が小さくなっている。さらに、単針と $d=0\text{mm}$ の場合を比べると同じような特性をとっていることが分かる。

オゾン生成効率の針先端間隔依存性のほうは $d=0.5\text{mm}\sim 1.0\text{mm}$ にかけてオゾン生成効率が最も良くなっている。つまり、針先端間隔が狭いときのほうがオゾン生成効率は良いという結果になった。針先端間隔が広がるほどオゾン生成効率は低下する特性を示した。ただし、 $d=0\text{mm}$ ではオゾン生成効率は $d=0.5\text{mm}$ に比べて低下している。また、単針の場合のオゾン生成効率は $4\text{mg/Wh}$ であり、Fig.10を見ると針先端間隔を広げていくと単針のオゾン生成効率の値に近づくような特性になっていることが分かる。これは、3.2章のFig.4の $d=7.0\text{mm}$ の放電の様子を見ると、それぞれの針が単針の放電の様子と似ているため、このような特性になったと考えられる。さらに、単針の場合と $d=0\text{mm}$ の場合を比べてみると、 $d=0\text{mm}$ の方がオゾン生成効率は良い。

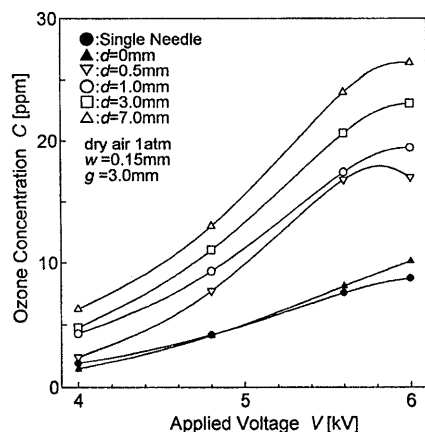


Fig.9 Dependence of ozone concentration on applied voltage ( $g=3.0\text{mm}$ )

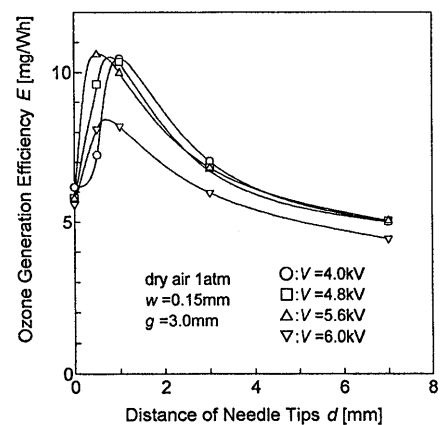
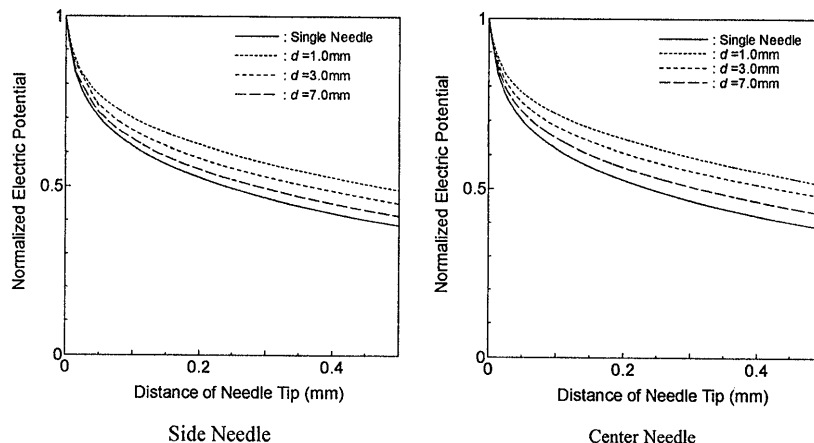


Fig.10 Dependence of ozone generation efficiency on distance of needle tips ( $g=3.0\text{mm}$ )

## 4. 検討

以上の結果から、まず乾燥空気中における3針-平板電極のバリア放電特性の検討を行う。

放電開始電圧の結果の検討を行う前に電界計算ソフト (JMAG-Studio 日本総合研究所(株)) を用いて、有限要素法による静電界における電界計算を行った。その計算の結果得られた電位分布を Fig.11 に示している。針先の位置が 0mm, バリア表面が 3mm になっている。この計算結果で放電開始時でも針先端間隔が違うことで、針先端付近で電位分布の傾きが違う、つまり針先の電界が違うことが分かる。針先の電界は Fig.11 の電位分布の針先付近の傾きで決まる

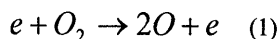
Fig.11 Electric potential ( $g=3.0\text{mm}$ )

ので、ここから比較すると、この中では単針の場合は電界が最も強く、 $d=1.0\text{mm}$  の場合は最も弱いということが分かる。このことから、針先端間隔が違うことで電位・電界分布に影響を及ぼしていることが考えられる。しかし、極端に電位分布が変わることは計算結果から見受けられない。Fig.3の放電開始電圧の針先端間隔依存性で、針先端間隔が狭くなるとわずかに放電開始電圧が上昇したという結果は、この針先端間隔における針先の電界の違いによるものと考えられる。また、中央の針と両端の針を単針の電位分布を基準にし、比較すると、中央の針の電位分布の傾きの方がわずかに緩やかになっているため、両端の針先よりも、中央の針先の方が電界は弱いことが分かる。

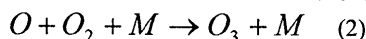
Fig.4の一眼レフカメラによる放電の様子は $d=1.0\text{mm}$ のときに中央の針からの放電が見えず、両端の針からの放電に広がりが見られる特徴的な放電の様子が見られた。 $d=0\text{mm}$ の場合も単針の場合のように放電が1本となっているが、バリアに近づくにつれ広がりを持っている。しかし、針先端間隔が広い場合や、単針の場合、針先からバリア表面までの気中放電ではまっすぐに放電しバリア付近で広がりも見られず、そのまま沿面放電となってバリアに張り付くように広がっている。つまり、針先端間隔が広い場合と単針の場合、堆積電荷が存在するも堆積が少なく放電への影響はほとんどないと考えられるが、針電極の針先端間隔が狭い場合は、放電が重なるとともに、それぞれの放電によってできる堆積電荷も重なり、バリア表面の堆積電荷の蓄積が多いため両端に放電に広がりが見られたと考えられる。また、中央の針からの放電が見えなかったのは、中央の針先近傍に空間電荷が多く存在し、針先近傍の電界が緩和したためと思われる。Fig.8の $d=1.0\text{mm}$ のCCDカメラを用いた正の半周期を10分割した放電の様子を見ると、この空間電荷の存在や堆積電荷の存在が分かりやすい。交流電圧を印加し、放電が連続的に起こっていることは電流波形の結果を見ると分かる。時間が経つにつれて放電に広がりを持つのは、放電が断続的に起こり、そのたびにバリア表面に堆積電荷が蓄積するためこのような放電になった[9]と考えられる。

また、Fig.5から消費電力は針先端間隔が広いほど大きくなった。これは放電領域が大きくなっていると思われるが、空間電荷や堆積電荷の消費電力への影響も考えられる。例えば、単針の場合と $d=0\text{mm}$ の場合である。放電領域はあまり変わらないが、消費電力が単針の方が約1.5倍大きくなっている。これは、 $d=0\text{mm}$ の場合、空間電荷や堆積電荷が多く存在し、電界が緩和され電子の運動エネルギーが低下したため消費電力は低下し、このような結果が得られたと考えられる。

次に、オゾン生成について考える。まず、放電方式からオゾンができる過程は、放電により生じた電子による酸素分子の解離



が行われ、その後生じる3体衝突反応



と主にこの2つの式の過程を経てオゾンが生成される。 $M$ は $O$ ,  $O_2$ または $O_3$ である[10]。

オゾンに関する実験結果の検討を行う前に、まずどちらの極性の放電でオゾンが盛んに生成されているのかをFig.7のCCDカメラで観測された放電と合わせて考える。まず、CCDカメラで観測した負極性の放電は針先近傍の放電だけが見られた。しかし、正極性の放電は針先からバリアまでの気中放電に加え、バリア表面に沿面放電も見られる。この放電領域の違いからオゾン生成量が多いのは正極性であると考えられる。しかし、オゾン生成効率という観点から考えると負極性の方が良いと思われる。これは、放電領域が狭いこととFig.6の電流パルスが正に比べてとても小さいため消費電力が小さく、また、高電界で電子がエネルギーを持ちやすい針先端のみで放電が観測されたためであると考えられる。しかし、オゾンの生成量に関しては正極性の方が多いのでこの場合を検討することとする。

これをふまえて、Fig.9のオゾン濃度の印加電圧依存性について検討する。まず、針先端間隔が広がるほどオゾン濃度が高くなるのは、放電領域が広いためである。印加電圧が高い領域でオゾン濃度の増加割合が減少したのは、(1)式の酸素分子の解離がうまくいっていないためと考えられる。酸素分子が解離しないと(2)式の反応は起こらないので結果的にオゾンが生成しにくくなる。この(1)式の酸素の解離は、電子の運動エネルギーによって決まる電子が酸素分子にぶつかる衝突確率・電離確率に依存する[11]。Fig.9を見ると印加電圧が低い領域でもオゾン濃度の増加割合はわずかに小さくなっている。これは、電子の運動エネルギーが小さすぎるため電離確率が低くなるからである。しかし、印加電圧が高い領域では逆に電子の運動エネルギーが大きすぎるために電離確率が低くなる。電離確率が低いと酸素分子が解離されずオゾンもできないため、印加電圧が高い領域でもオゾン濃度の増加割合が減少したと考えられる。

Fig.10のオゾン生成効率の針先端間隔依存性のほうは針先端間隔が狭い方がオゾン生成効率は良かった。これは、針先端間隔が広いときと比べて放電が空間電荷やバリア表面の堆積電荷などの影響を受けやすいため、放電領域が狭いながらも、両端の針からの放電に広がりやすいためである。また、針先端間隔が大きいときに比べると、この空間・堆積電荷の影響で電界が緩和し電子の運動エネルギーは減少しているが、酸素の解離にはこちらの方が適しており電離確率も向上したためであるとも考えられる。しかし、 $d=0\text{mm}$ のように針をくっつけてしまうと針先近傍での空間電荷の影響を受けすぎたせいか、放電が単針のときと同じように1本となり放電領域が狭くなり、オゾン自体が生成されにくくなったためオゾン生成効率は悪くなった。つまり、空間・堆積電荷の影響を受けすぎても電子エネルギーが低下して放電が起こらなくなることや、電離確率が低くなるため、酸素分子の解離に適さない。つまり、針先端間隔だけでなく電極の配置や針電極の状態を変えることでこの空間・堆積電荷をコントロールし、オゾン生成に最も適した電子の運動エネルギーで効率よくオゾンが生成できるものとする。

## 5. まとめ

乾燥空気中における3針-平板電極のバリア放電とオゾン生成について調べた結果を以下にまとめる。

- (1) 放電開始電圧はほぼ一定となった。しかしわずかながら針先端間隔が狭くなると放電開始電圧が上昇した。これは針先端間隔による針先の電界が違うからである。
- (2) 放電の様子は針先端間隔が狭い場合、中央からの放電があまり見られず両端の針からの放電に広がりが見られるといった特徴的な放電が観測できた。これは針先近傍の空間電荷やバリア表面の堆積電荷が影響しているためと考えられる。消費電力については、針先端間隔が広いと放電領域が広いので消費電力が多いが、針先端間隔が狭い場合はこの電荷の影響で消費電力が抑えられたため少なくなったと考えられる。
- (3) オゾン生成には酸素分子の解離の過程が必要である。酸素分子の解離は電子の運動エネルギーによって決まる電離確率に依存する。この研究では、針先端間隔  $d=0.5\text{mm}\sim 1.0\text{mm}$  のときにオゾン生成効率が最も良かった。バリア放電を用いたオゾン生成の具体的なメカニズムについては、不明瞭な点が多いため、今後さらにこれらの点についての詳細な検討が必要である。

## 文 献

- [1] 畑・松井・上野・中山：「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」, 電学論 C, **124**, pp.2228-2234 (2004)
- [2] 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, **1**, pp.227-230 (2004)
- [3] 前園：「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」, 電学論 A, **113**, pp.567-571 (1993)
- [4] 岸田・田村・江原・伊藤：「オゾン生成における三相放電重畳法の効果」, 電学論 A, **119**, pp.1084-1089 (1999)
- [5] 岸田・尾内・田村・江原・伊藤：「放電重畳法によるオゾン生成の高収率化」, 電学論 A, **117**, pp.1103-1108 (1997)
- [6] 岸田・石坂・田中・江原・伊藤：「放電によるオゾン生成に及ぼす紫外線の効果」, 電学論 A, **117**, pp.585-590 (1997)
- [7] 松井・八島・浜口・村田・谷：「針対平板電極におけるコロナ放電とオゾン生成特性」, 静電学誌, **22**, pp.98-101 (1998)
- [8] 金子・中島：「針対セラミックストランス電極を使用したオゾン発生器」, 平成 16 電気学会全大講演論文集, No.1-53, p.57 (2004)
- [9] H.Ueno, K.Hata and H.Nakayama: "Development of Repulsive Barrier Discharge from Twin Needles", Jpn.J.Appl.Phys., **46**, pp.1142-1148 (2007)
- [10] 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)
- [11] J.S.Chang・R.M.Hobson・市川・金田：電離気体の原子・分子過程, p.124, 東京電機大学出版局 (1982)