

論 文

高周波コロナ放電式ノズル型イオナイザの除電特性

清水 渡^{*1}, 永田秀海*, 和泉健吉*, 児玉 勉*

(2004年8月23日受付; 2005年1月14日受理)

Electrostatic Elimination Performance of Air-Nozzle Ionizer
with High Frequency Corona DischargeWataru SHIMIZU^{*1}, Hidemi NAGATA*, Kenkichi IZUMI* and Tsutomu KODAMA*

(Received August 23, 2004; Accepted January 14, 2005)

An air-nozzle ionizer with a high frequency corona discharge has been developed for the countermeasures against ESD troubles to electronics devices. The discharge is produced by a piezo-electric high voltage transformer (35 kHz, 2 kV in rms), and needle and cylindrical electrodes. The cylindrical electrode is covered by a plastic pipe to balance positive and negative ion currents because of no dc component in the discharge current. Also a tube can be attached to it to eliminate the charges on small objects locally exist. This paper investigates the effect of the tube on the charge elimination. The elimination ability naturally decreases with increasing tube length, but the increase in the frequency increases the ability. Due to the use of the plastic pipe, the ionizers both with and without the tube have a good performance in ion balance. Consequently, the developed ionizer using the tube may be suitable for a local charge-elimination as well as for ESD sensitive devices.

1. はじめに

電子デバイスは、その微細化、高密度化に伴い静電気による影響を受けやすくなり、ESD (electrostatic discharge) による素子破壊や静電気力による塵埃の付着等が問題となっている¹⁾。静電気除去装置（イオナイザ）は電子デバイスの静電気対策のために効果的である²⁾。イオナイザには、微小な時間・面積においても除電時間が短く、かつ、イオンバランスのよいものが要求される。また、製造技術の高度化に伴って、FA 機器に取り付けて除電・除塵を行うエアノズル型のイオナイザも要求されている。圧電トランス内蔵型の高周波コロナ放電式エアノズルイオナイザ（以下、高周波イオナイザという。）は、このようなニーズに沿うため開発されたもので、小型で除電性能に優れるとともに、生成イオンをチューブで送れるという特長を有している³⁾。イオンのチューブ搬送によって、電子デバイスのほか、これまで困難であったプラスチックボトル内やパーツフィーダーなどピンポイントの除電・除塵が可能となる。ここでは、高周波イオナイザの除電性能を実験的に検討したので、その結果を報告する。

2. 実験装置及び方法

2.1 供試イオナイザ及びチューブ、ノズル

2.1.1 高周波イオナイザ

実験に使用した高周波イオナイザは、図1に概要を示すように、直流24Vを電源とする圧電トランス、放電電極、ノズル部等から構成される。圧電トランスは、セラミック製の圧電素子とその駆動回路からなる⁴⁾。出力電圧の周波数は35kHz、定格値は2kV（実効値）である。出力電圧は針電極（放電針）とリング電極間に印加される。リング電極は金属製ノズルキャップと電気的に接触しているので、放電針とノズルキャップ内面（直径8.8mm）間でコロナ放電が発生し、高周波の正負イオンが交互に生成される。ノズルキャップには、内径4.4mm、厚さ2mm、長さ22mmのプラスチックパイプ及び金

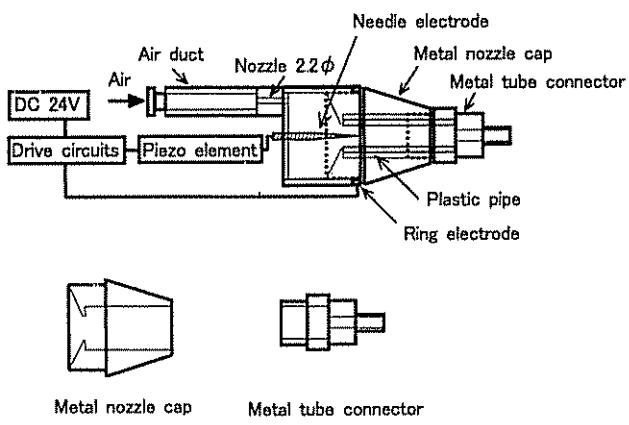


図1 高周波イオナイザの概要

Fig. 1 Schematic diagram of the high frequency ionizer.

キーワード: 静電気、除電、エアノズルイオナイザ、高周波コロナ放電、ESD

* シシド静電気株式会社横浜工場 (230-0004 横浜市鶴見区元宮1-10-8)

Yokohama Factory, Shishido Electrostatic, Ltd., 1-10-8 Motomiya, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa 230-0004, Japan

¹ w_shimizu@shishido-esd.co.jp

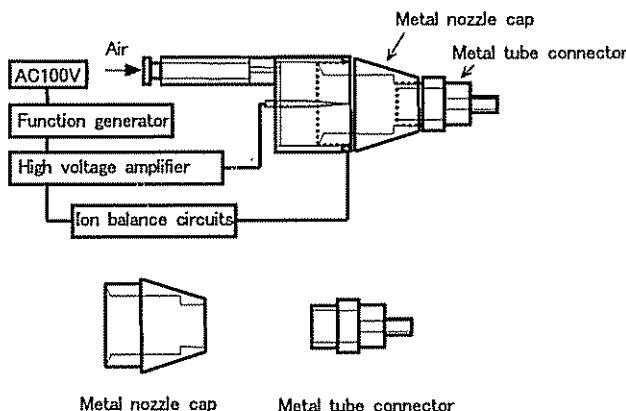


図2 低周波イオナイザの概要

Fig. 2 Schematic diagram of the low frequency ionizer.

属製チューブ緒手（細孔部の内径3.2mm、長さ14mm）が取り付けられる。プラスチックパイプはイオンバランス改善のためのものであり⁹⁾、その内部には直径2.2mmの細孔を経て高速（通常100m/s以上）のエア流が供給される。

2.1.2 低周波イオナイザ

比較のため上記イオナイザを用い、圧電トランスの代わりに50Hz、300Hz又は1000Hzの正弦波交流高電圧を放電電極に印加した、ただし、図2に概要を示すように、イオン生成能力を高めるため、プラスチックパイプは取り外し、ノズルキャップは内径10mmに加工したものを用いた。以下、これを低周波イオナイザという。

2.1.3 チューブ及びノズル

イオン搬送用として導電性チューブ、PTFE（テフロン）チューブ又はバーノズルを用いた。チューブは内径4mmでチューブ緒手に取り付けた。導電性チューブは導電性ポリウレタン製で、10cm当たりの内面の抵抗は50kΩである。バーノズルは、内径5mm、長さ220mmの金属製パイプで、その軸方向直線上に10mmの等間隔に直径1mmの21個の穴を設けたものである。このバーノズルは、チューブ緒手の代わりに金属製緒手（細孔部の内径4mm、長さ1mm）でノズルキャップに取り付けた。

2.2 除電時間の測定

除電能力の指標である除電時間は、図3に示すように帶電プレートモニタ（charged plate monitor）^⑨を用いて評価した。帶電プレートモニタ（シンド静電気 H0601）は、大きさ150×150mm、静電容量20±2pFの金属製の絶縁プレート、スイッチによってこれに電圧を印加する直流電源、絶縁プレート用の非接触式電位計、減衰時間測定タイマからなる。主な仕様は、測定電圧精度±5% rdg、応答速度（99.96%に達するまでの時間）0.032s、表示電圧精度±2Vである。イオナイザ

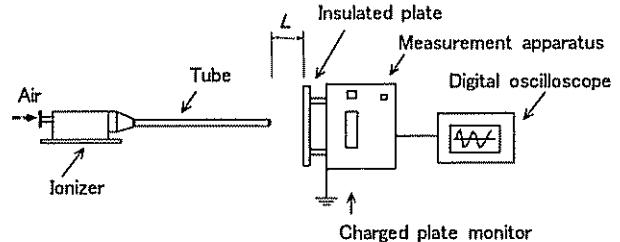


図3 除電特性測定の概要

Fig. 3 Schematic diagram of the measurement of electrostatic elimination performance for ionizers

は、チューブ先端、バーノズルの場合は中央部のイオン吹き出し口が帶電プレート中央部に対して垂直に向くように除電距離Lを隔てて設置した。除電時間は、絶縁プレートに正又は負の電圧を印加し、これを切り離した後、絶縁プレートの電位が1000Vから100Vまで減衰する時間とした。

なお、低周波イオナイザはイオンバランス特性が悪いので、後述するオフセット電圧がおおよそ±20V以内に収まるように調整した。具体的には、可変抵抗とダイオードからなる回路をリング電極接続ラインに挿入し、イオンが多い方の極性の電圧を相対的に下げるよう調整した。印加電圧は、イオンバランス調整後、放電針とリング電極間の電圧を高電圧プローブ（Tektronix P5015A、入力抵抗100MΩ、入力容量3pF）とオシロスコープで読み取った値とした。

2.3 イオンバランス及び誘導電圧の測定

生成される正負イオンの均衡性の指標であるイオンバランスも、帶電プレートモニタ（図3）を用いて評価した。絶縁プレートに電圧を印加せず、イオナイザによって絶縁プレートに生じる電圧の直流成分（以下、オフセット電圧といふ）の定常値を測定した。また、電源投入時のイオンバランスの変動を調べるために、付属の非接触式電位計のアナログ出力をデジタルオシロスコープ（Tektronix TDS5052、周波数帯域500MHz）に入力し、オフセット電圧の初期変化を観察した。

イオナイザにより絶縁された導体が受ける静電誘導の影響を調べるために、上記オシロスコープの電圧プローブ（Tektronix P3010、周波数帯域100MHz、入力抵抗10MΩ、入力容量13pF）を絶縁プレートとアース間に接続して電圧波形を観察した。このほか50Hzの低周波イオナイザについては、絶縁プレートに金属製測定片（40×120mm）を取り付けて誘導電圧を実測した。絶縁プレートの端部に測定片の一部を重ねて固定し、外部に張り出した測定片に50HzAC測定モードを有する表面電位計（シンド静電気 スタチロン DZ 3）を5mm離して対向させて電位を測定した。なお、測定値は絶縁プレートに既知電圧を印加して校正を行った。測定片と電位計による静電容量の増加は0.7pFであった。

全ての実験は一般空調の室内で行い、実験を通じて温度は23~26°C、相対湿度は52~62%の範囲であった。

3. 実験結果及び検討

3.1 除電時間

3.1.1 周波数及び印加電圧の影響

高周波イオナイザと低周波イオナイザのチューブ使用時の除電特性を定量的に比較するためには、チューブを付けないときの両者のイオン生成能力がほぼ一致するように印加電圧を選定する必要がある。高周波イオナイザではノズルキャップ（高周波用、以下同じ）及びチューブ緒手をつけた状態で印加電圧が約2kV（固定）、除電時間が0.5sであった。後述するように、高周波イオナイザではチューブによるイオンの減衰は小さいので、チューブ緒手（特にノズル部分）が除電時間に及ぼす影響は小さいと推測される。そこで、チューブ緒手を除いた状態での除電能力がほぼ一致することを意図して、低周波イオナイザではノズルキャップ（低周波用、以下同じ）のみを付けた場合の除電時間が0.5sとなる印加電圧を選定することとした。

低周波イオナイザにノズルキャップのみを付けた条件で、周波数を変えて印加電圧（実効値）と除電時間との関係を求めた結果を図4に示す。以下、特に断らない限り、エア圧は0.1MPa、除電距離は50mmである。プロットを結んだ線が滑らかでないのは、1s以下の除電時間の表示値が0.1s単位であったためである。この図から周波数が高くなるほど、放電開始電圧が低くなり、同じイオン生成量を得るために低い印加電圧でよいことがわかる。結果的には、正及び負の除電時間から50Hz、300Hz及び1000Hzに対する印加電圧をそれぞれ3.2kV、2.8kV及び2.2kVと選定した。除電時間は正負とも

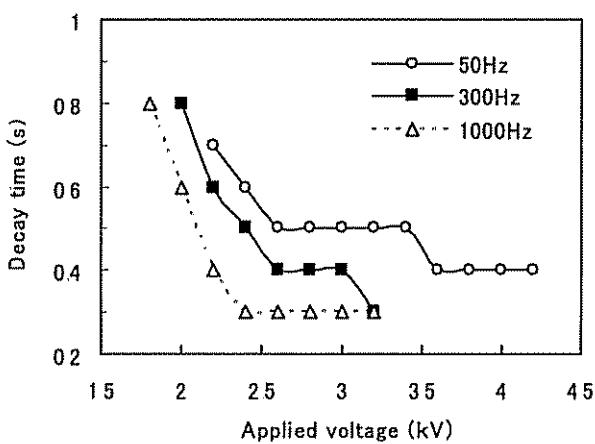


図4 低周波イオナイザの除電時間に対する周波数及び印加電圧の影響

Fig. 4 Effect of the frequency and applied voltage on the decay time for the low frequency ionizer.

に測定したが、これらに大きな差が見られなかったので、本報告では正帯電に対する除電時間のみを図示する。低周波イオナイザの除電時間はイオンバランス調整後のものである。

3.1.2 チューブによるイオン搬送特性

PTFEチューブ及び導電性チューブについて、チューブの長さを変えて除電時間を測定した結果を図5に示す。低周波イオナイザ(50Hz)ではチューブ長ゼロにおける除電時間が高周波イオナイザの0.5sに比べて約1sと大きくなっている。これは、チューブ緒手が付いた状態で測定したため、緒手ノズル部分でのイオン減衰により除電時間が長くなったものと推測される。このことは後述するように、低周波イオナイザではチューブによるイオンの減衰が大きいことからも裏付けられる。

図5から除電時間はチューブの導電性に依らないことが示される。この原因としては、絶縁性材質であっても正負バランスのとれたイオンの搬送では、チューブ内面がほとんど帶電しないことが考えられる。導電性以外の物性の違いも、チューブ面へのイオンの付着に大きく関与しないかぎり、イオン搬送特性に影響を及ぼさないと考えられる。一方、チューブ長さの影響は大きく、チューブが長くなるにつれて除電時間は長くなる。周波数が低いほどその影響が大きく、長さ400mmでは50Hzの除電時間は35kHzの約3倍になる。

チューブにより除電時間が長くなるのは、正負イオンがチューブ壁へ付着するためと考えられる。コロナ放電によって交互に生成された正、負イオンが単純にエア流に乗って搬送されると仮定すると、チューブ内を正、負イオン群が互いに一定の距離を保って進むことになる。正、負イオン群の中心間距離（以下、正負イオン距離という。）は近似的に半周期時

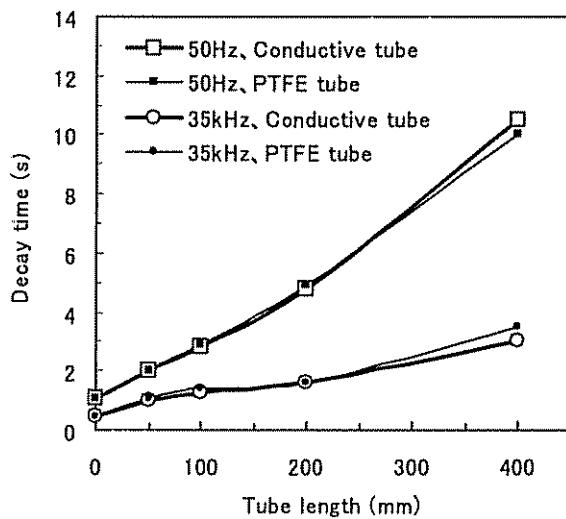


図5 除電時間に対するチューブの材質及び長さの影響

Fig. 5 Effect of the material and length of tube on the decay time

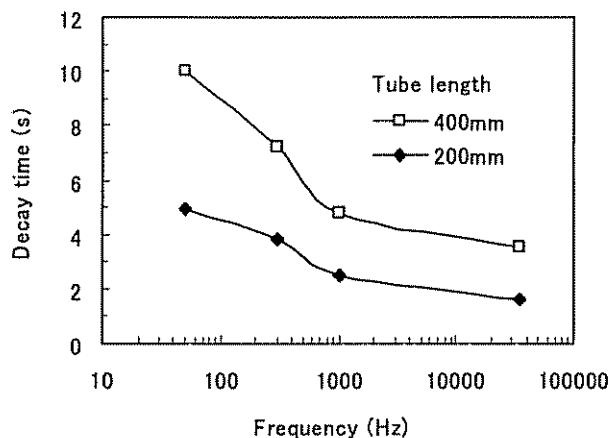


図 6 除電時間に対する周波数の影響

Fig. 6 Effect of the frequency on the decay time.

間(50Hz では 10ms)と風速の積で表される。エア圧が 0.1MPa ではチューブ出口での風速の実測値が約 100m/s であったので、50Hz, 300Hz, 1000Hz 及び 35kHz における正負イオン距離はそれぞれ 1m, 17cm, 5cm 及び 1.4mm と算出される。チューブ内の正負イオン距離が近いほど拡散やイオン移動による正負イオンの混合が起こりやすくなり、これにより空間電荷密度及び径方向の電界が低くなり、結果的にイオンの径方向への移動によるチューブ壁への付着が少なくなるものと推測される。要約すると、周波数が高くなるほど、チューブ内での正負イオンの混合が進み、その結果チューブ壁へのイオンの付着が少なくなり、イオン搬送特性がよくなると考えられる。

PTFE チューブを使用したときの除電時間に対する周波数の影響を図 6 に示す。周波数が高くなるにつれて除電時間は短くなり、チューブが長いほどその効果は大きい。1000Hz 以上では周波数の効果が小さくなるが、これは正負イオンの混合が飽和傾向を示すためと考えられる。

3.1.3 エア圧の影響

除電時間に対するエア圧の影響を図 7 に示す。チューブ無し(高周波イオナイザではノズルキャップ及びチューブ継手付き、低周波イオナイザではノズルキャップのみ、以下同じ)も、長さ 200mm の PTFE チューブ及びバーノズルも共に除電時間はエア圧に反比例して減少する。また、チューブ無しでは高周波イオナイザと低周波イオナイザ(50Hz、以下同じ)の除電性能はよく一致する。除電性能に関係するのは単位時間当たりのイオンの搬送量であり、これはイオン濃度と流量の積に比例するので、圧力が高くなると流量が増加して除電能力が増加するものと推測される。

図 7 に示されるように、高周波、低周波にかかわらず、内径 5mm、長さ 220mm のバーノズルは内径 4mm、長さ 200mm の PTFE チューブとほぼ同じ除電特性を示す。このことから

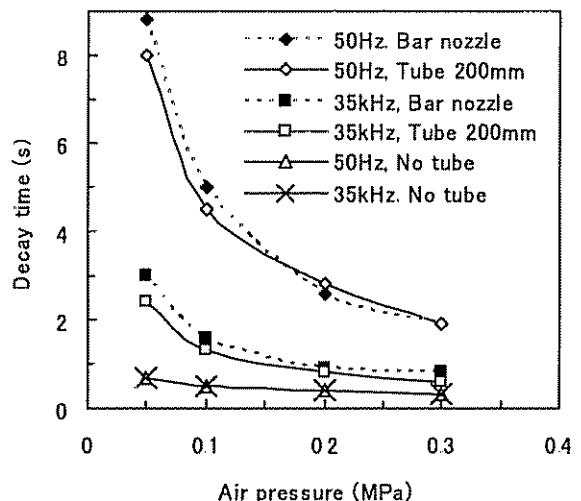


図 7 除電時間に対するエア圧の影響

Fig. 7 Effect of the air pressure on the decay time

も、除電特性にはチューブ長さの影響が大きいことが示唆される。また、直径 1mm の孔 21 個を持つバーノズルの総開口面積 (16.5mm^2) は内径 4mm のチューブ断面積 (12.6mm^2) の 1.3 倍に過ぎないことから、直径 1mm の細孔でもイオンが十分通過することが示唆される。

3.1.4 除電距離の影響

イオナイザのイオン吹き出し口と帶電プレート間の除電距離が除電時間に及ぼす影響を図 8 に示す。PTFE チューブの有無、周波数にかかわらず除電時間は除電距離とともに長くなるが、変化量は大きくない。このことから開放空間における高速イオン搬送ではイオン濃度の減衰が少ないといえる。また、距離の影響が周波数に依らないことから、距離によるイオン搬送性能の低下に対しては、流れと垂直方向の放射電界によるイオンの移動より流れの広がり又は流速の減少の方

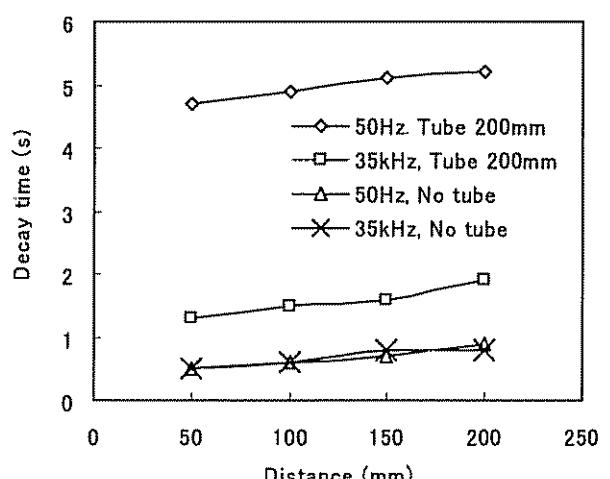


図 8 除電時間に対する除電距離の影響

Fig. 8 Effect of the distance between ionizer and charged plate on the decay time

がより支配的であることが示唆される。

3.2 イオンバランス特性

帶電プレートモニタを用いて高周波イオナイザによる絶縁プレートのオフセット電圧を測定した結果を図9に示す。チューブはPTFEチューブ、除電距離は50mmである。高周波イオナイザは、放電針を覆っているプラスチックパイプによる自己イオンバランス調整作用⁹⁾により、チューブの有無・種類・長さ、エア圧、除電距離が変わっても、オフセット電圧は通常±数V以内、最大でも±10V以内には

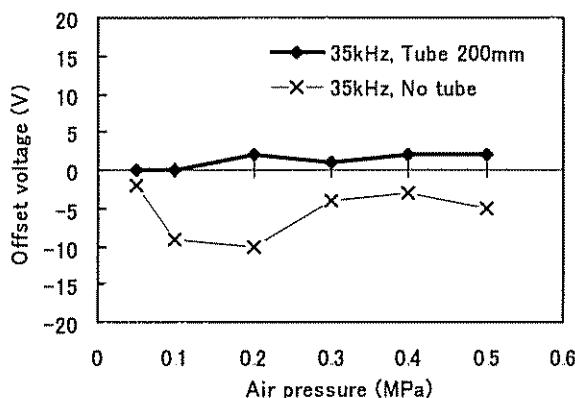


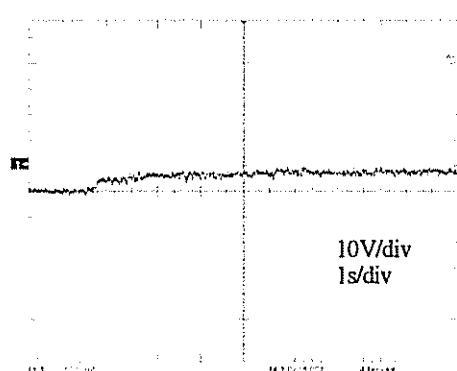
図9 高周波イオナイザによるオフセット電圧
Fig. 9 Offset voltage for the high frequency ionizer.

ほぼ収まる。例えば正イオンの生成が多いと、プラスチックパイプ内面が正に帯電し、印加電圧が正のとき放電針の電界が弱められ、相対的に正イオンの生成が減少する。一方、詳細は省略するが、イオンバランス調整を行わない低周波イオナイザでは、オフセット電圧は数100Vに達した。

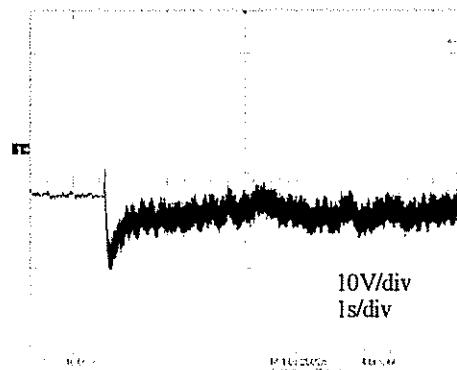
チューブなし、エア圧0.05MPa、除電距離200mmの条件で、電源投入時におけるオフセット電圧の時間的変動を観察した結果を図10に示す。高周波イオナイザでは圧電トランジスの立ち上がり特性がよく、かつ、プラスチックパイプによるイオンバランスの自動調整作用により、図10aのように電源投入直後にもオフセット電圧がほぼ一定の安定したイオンバランス特性を示す。一方、低周波イオナイザでは、図10bのように電源投入時にオフセット電圧が定常の約2倍となる比較的大きな過渡変化が見られる。これは、巻線トランジスを使用する高圧電源の過渡特性、又はイオンバランス調整回路による影響と思われる。

3.3 誘導電圧

チューブなし、エア供給なし、除電距離200mmの条件で、絶縁プレートの誘導電圧波形を測定した結果を図11に示す。高周波イオナイザでは2.2Vpp (peak to peak)、低周波イオナイザでは1.2Vpp値が観測された。また、図は省略したが、長



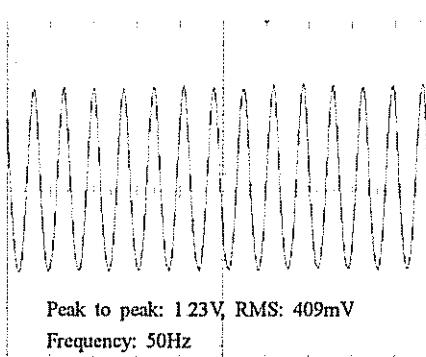
(a) High frequency ionizer



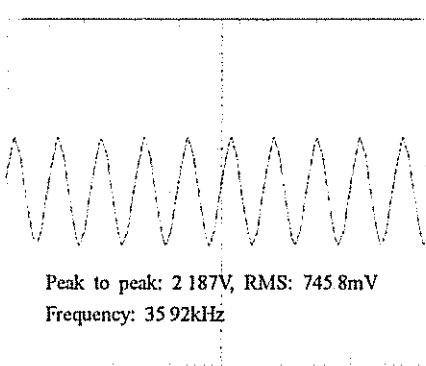
(b) Low frequency ionizer

図10 電源投入時のオフセット電圧の変動

Fig. 10 Temporal variation of the offset voltage after switching on the power.



(a) High frequency ionizer



(b) Low frequency ionizer

図11 イオナイザによる誘導電圧波形

Fig. 11 Waveform of induced voltage by the ionizers.

さ 200mm の PTFE チューブの付いた高周波イオナイザでは 0.64Vpp まで低減した。一方、低周波イオナイザによる誘導電圧の表面電位計による測定値は 23Vpp であった。なお、印加電圧を変えて誘導電圧を測定した結果から、低電圧では高電圧に比べて印加電圧に対する誘導電圧の比が相対的に小さいというイオン電流の影響が見られたが、測定精度の問題もあり、ここでは無視することにする。

以下、誘導電圧はイオナイザ印加電圧のインピーダンス分割によるとして検討する。放電針と絶縁プレート間のインピーダンスを Z_1 、絶縁プレートとアース間のそれを Z_2 とすると、その合成インピーダンス Z は次式となる。

$$Z = Z_1 + Z_2 \quad (1)$$

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} \quad (2)$$

$$Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C_2} \quad (3)$$

ただし、 C_1 ：放電針と絶縁プレート間の静電容量、 C_2 ：絶縁プレートとアース間の静電容量(測定系の入力容量を含む)、 R ：絶縁プレートとアース間の抵抗(測定系の入力抵抗)

誘導電圧 V_2 は放電針の電圧 V_1 から次式で求められる。

$$V_2 = \frac{V_1 Z_2}{Z} \quad (4)$$

高周波イオナイザでは C_2 (33pF) のリアクタンスは $14 \times 10^3 \Omega$ であり、抵抗 R ($1 \times 10^7 \Omega$) はほぼ無視できる。 V_1 を 5660Vpp (実効値 2000V)、 V_2 を 2.2Vpp (測定値) として、式(1)～(4)から C_1 を求めると 0.013pF である。この結果は、抵抗 R を無視して容量分割の式式で求めた結果と一致する。

$$C_1 = \frac{C_2}{\frac{V_1}{V_2} - 1} \quad (5)$$

オシロスコープを接続しない場合の誘導電圧は、式(5)を変形した次式に C_2 として絶縁プレートの静電容量 (20pF) を代入して求められ、3.7Vpp となった。

$$V_2 = \frac{V_1}{1 + \frac{C_2}{C_1}} \quad (6)$$

低周波イオナイザの場合は、 C_2 (33pF) のリアクタンスは $9.7 \times 10^3 \Omega$ となり、 R ($1 \times 10^7 \Omega$) の 9.7 倍であり、オシロスコープ接続時には C_2 はほぼ無視できる。 V_1 を 9050Vpp (実効値 3200V)、 V_2 を 1.2Vpp (測定値) として、式(1)～(4)から C_1 を求めた結果は 0.060pF である。オシロスコープを接続しない場合の誘導電圧は式(6)から 25Vpp と計算される。これは、前述した表面電位計による測定値 23Vpp とほぼ一致する。

低周波イオナイザの静電容量 C_1 が高周波イオナイザに比

べて 4.6 倍と大きいのは、放電針の遮蔽状態の違いによると推測される。200mm のチューブが付くと誘導電圧がさらに低減するのは、距離が長くなり式(6)における C_1 がより小さくなるためと推測される。また、高周波イオナイザは低周波イオナイザに比べて印加電圧が低いので、誘導電圧も低くなる。

実際の誘導電圧は式(4)によって与えられるので、イオナイザの印加電圧、周波数及び遮蔽状態、除電距離のほか、誘導を受ける導体の大きさ、静電容量、絶縁抵抗及び配置状況等に依存し複雑なものになる。

4. まとめ

電子デバイスの ESD 対策を目的として開発された圧電トランジスト内蔵型の高周波コロナ放電式エアノズルイオナイザの除電特性について実験的に検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 高周波イオナイザはチューブを取り付けても有効な除電性能を示す。チューブ使用時の除電性能は周波数の増加につれて高まり、1kHz 以上では飽和傾向を示す。除電性能の低下にはチューブ長の影響が大きく、チューブの導電性はほとんど影響しない。また、口径 1mm の細孔を多数有するバー ノズルも、バーの内径及び長さがチューブと同じであれば、チューブとほぼ同じ除電性能を示す。
- 2) チューブの有無、周波数にかかわらず、エア圧が上がるとき除電性能が高まる。また、イオナイザと除電対象との距離が増加すると除電性能は低下するが、除電距離が 200mm 以内ではその影響は大きくない。
- 3) 高周波イオナイザは、放電針と対向電極間に挿入されるプラスチックパイプによるイオンバランス調整作用のため、チューブの有無、エア圧等の条件にかかわらず優れたイオンバランス特性を示す。また、電源投入時も安定したイオンバランスの過渡特性を示す。
- 4) 高周波イオナイザは、放電針が金属製のノズルキャップ、チューブ総手で遮蔽されるとともに、印加電圧が低周波イオナイザより低いため、除電対象に及ぼす静電誘導の影響は小さい。チューブを使用すると、イオナイザの距離が増加するためさらに静電誘導は小さくなる。

参考文献

- 1) 藤江明雄：静電気学会誌、23(1999)297
- 2) 静電気学会編：静電気ハンドブック、p.383、オーム社(1998)
- 3) 和泉健吉、司建敏、菅野功、永田秀海：特開 2000-138090
- 4) 斎藤智克：特開 2001-85189
- 5) 和泉健吉、司建敏、菅野功、永田秀海：特開 2000-123956
- 6) EOS/ESD Association: Standard for Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items- Ionization, ANSI/ESD -STM3.1-2000