

イオナイザを活用した生産現場の静電気対策に関する研究

Study of Static Electricity Countermeasure Utilized a Corona Discharge Air Ionizer in the Production Site

佐藤 崇志, 高橋 宏冶, 古井 英則, 池畑 隆

Takashi Sato, Koji Takahashi, Hidenori Furui, and Takashi Ikehata

Corona discharge air ionizers are widely used during the assembly of electronic products to reduce the electrostatic attraction (ESA) and the electrostatic discharge (ESD), that can attach particulate contaminants to printed circuit boards and destroy electronic parts. It is necessary to use the operating conditions of ionizer with caution, because a conventional air ionizer always generates ions. However, operating conditions and theoretical neutralizing of an air ionizer are based on experience for development, because there is not report for the theoretical static neutralization processes. In this study, we investigate static electricity countermeasure for printed circuit board, assessing the relationship between the neutralization current and the neutralization speed. It became clear that it was necessary to examine condition both a mixture of positive and negative static charged model.

Keyword: Static Electricity Countermeasure, Ion-Control, Corona Discharge Air Ionizer, Static Neutralization Processes

1. はじめに

高度な情報化社会を支える携帯電話やパーソナルコンピュータなどの各種電子機器は更に高速化, 大容量化, 低消費電力化, 省スペース化されることが求められている。これらの要求を満足させるためには, 電子デバイスの高集積化とプリント基板 (PCB : Printed Circuit Board) 実装時における電子デバイス配置の高密度化は不可欠である^[1~3]。電子デバイスの高集積化により, 動作電圧は低下する。また, 配置の高密度化により, 配置間隔と電子デバイス同士を接続するための配線間隔が狭まる。このような電子機器の組み立て工程において, 電子デバイスの誤動作や破壊, 電子デバイス実装時における破損や配線の短絡といった静電気障害が発生し, 製造歩留の低下が顕著に現れることが懸念される^{[4]~[8]}。

これらの障害は主に下記の通りである。

(1) 静電気放電 (ESD : Electrostatic Discharge)

電子デバイスの絶縁体層に ESD が発生すると, この静電気の電界に基づいて絶縁体層が静電破壊し, 電子デバイスが不良となるために製造歩留が低下する。

(2) 静電吸引 (ESA : Electrostatic Attraction)

主にウェーハ工程や電子デバイスの実装工程で発生する障害であり, 製品に静電気が存在すると, クリーンルーム中に浮遊する微粒子を吸引する。特に, リソグラフィ工程では微粒子が影を作るために歩留が低下する。

以上に示した静電気に基づく障害による製造歩留まりの低下を避けるためにさらなる静電気対策を行うことが必要である。このときの要求性能は, 主に下記のことがあげられる^[9]。

- ① 高速に帯電電位を±100V 以内にできること。
- ② 最終到達電位が 0V 付近であること。
- ③ 振動電圧が小さい (低ノイズである) こと。
- ④ 放電電流 (除電電流) が μA 以下であること。
- ⑤ 周辺機器を誤動作させることがないこと。

静電気対策は主に帯電物へ接触による除電方法と各種除電装置を用いて雰囲気ガスをイオン化させることによって帯電物に非接触で中和させる方法の二種類に大別できる^[10]。接触による対策では, リストストラップ, 導電性シューズ, 導電性マット等があるが除電時に大きな放電電流が発生し, 残留電荷が残ることが多いため, 電子機器の実装工程において実用的な方法ではない。

非接触による対策では, 主にコロナ放電型イオナイザといわれる放電針であるエミッタに電気エネルギーを与えることでコロナ放電を発生させ雰囲気ガスをイオン化する装置が用いられている。イオンによって放電電流を制御しながら除電することが可能なため電子機器の実装工程において, 搬送時や組立て時に帯電した PCB 上の電子デバイス等を除電するために広く用いられている。

このコロナ放電型イオナイザ (以下, イオナイザ) の除電性能は単一で均等な帯電状態である理想的な除電特

性の結果をもとに決定されている。しかし、実際の除電対象物は複雑に帯電しているため、この除電性能が生産現場において発揮されるものではない。

エミッタ先端の電界分布の解析やイオンの放出と雰囲気ガスの関係に関する説明はされているが、発生したイオンが複数に帯電する製品に到達する除電のメカニズムに関しては実験報告が無く、解析されていないため、具体的な静電気対策の指針がない。そのため、生産現場における歩留まりの低下の原因が静電気障害による場合、イオナイザの動作条件（設置場所、印加電圧、波形など）は試行錯誤しながら決定されている^[11]。

そこで本研究では、イオナイザを用いた静電気対策の指針を決めることを目的として、理想的な単極帯電時と実践的な複数極の帯電時における除電特性の比較を行い、除電における最適なイオナイザの動作条件の検討を行ったので報告する。

2. 単極帯電時の除電特性

2.1. コロナ放電の静特性 (V_E - I 特性) と動作条件の決定

動作条件を求めるために使用する曲率半径0.1mmの針状のタングステン製エミッタにおけるコロナ放電の静特性を調べる。

図1は静特性の実験装置を示し高電圧電源（最大電圧±10kV）にてエミッタ電圧 V_E を変化させ、高感度電流計（最大感度 20fA）で測定されるアルミ板からの接地面に流れるイオン電流値 $\pm I$ を調べた。実験条件としては、大気中、室温（21~25 度、湿度 20~50%RH）、無風である。エミッタと除電対象物までの距離 D_{EP} に大きく依存するため、 D_{EP} を 10,20,50,100mm に設置した。

図2は $V_E = +2.0kV \sim +8.0kV$ を印加したときの正のイオン電流値、図3は $V_E = -2.0kV \sim -8.0kV$ を印加したときの負のイオン電流値の測定結果を示す。なお、ここに表記したイオン電流値は高感度電流計で検出される1秒間の平均値を示す。

イオン電流 $\pm I$ は半導体の静特性と同様に立ち上がり電圧値において急峻な立ち上がりを示している。このことから、エミッタの印加電圧 V_E に伴って電流値が増加することから暗流によるものではなく、コロナ放電によるものである。この立ち上がり電圧は、 D_{EP} が同一距離の場合、エミッタの正電圧を印加するよりも負電圧の方が 10~15%程度低い電圧値でもイオン電流 I を検出している。

表1は、エミッタの印加電圧 V_E に対する正、負イオンによる電流値（イオン電流）の変化量 dI/dV_E を $D_{EP} = 10 \sim 50mm$ までまとめた結果である。変化量は負イオンの方が大きく、 D_{EP} が小さいほど大きくなることがわかった。

これは、正電圧印加時はコロナ放電開始時にエミッタ先端にバーストパルスコロナ放電が生じるのに対して、負電圧印加時はトリチェリパルスコロナ放電が生じる。トリチェリパルスの放電路はバーストパルスの放電路よりも長いことが原因であると考えられる^[12]。

表1に示すように $D_{EP} = 10mm$ では V_E の変化に対してイオン電流が大きくなるため、イオナイザによって除電後に帯電させてしまう。また、 $D_{EP} = 50mm$ ではイオン電流が小さいため、除電するための時間が長くなるため実用的ではない。

そこで、本研究では $D_{EP} = 20mm$ として、エミッタの印加電圧 V_E は正負のイオン電流 I が $\pm 1nA$ と同数値になるように $V_E = -2.46, +2.70kV$ とする。

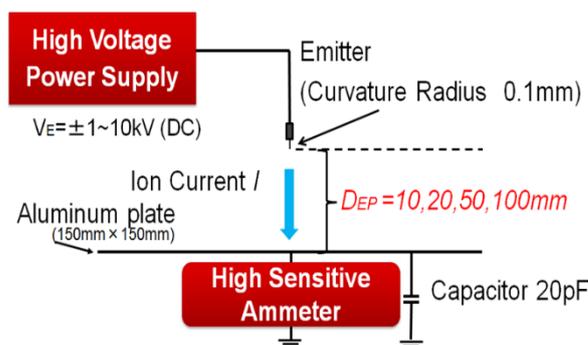


図1 エミッタ電圧 V_E 変化時のイオン電流 I の測定

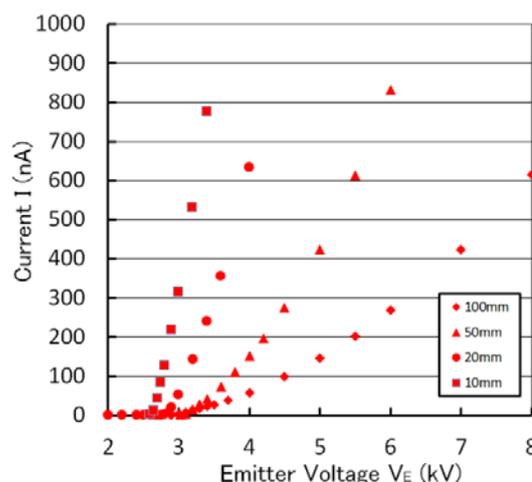


図2 正電圧印加時のアルミ板に到達するイオン電流

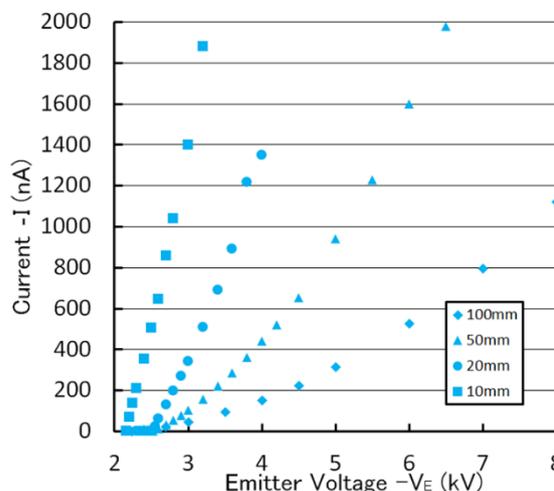


図3 負電圧印加時のアルミ板に到達するイオン電流

表 1 帯電物間距離 D_{EP} と除電電流の変化量 $\frac{\Delta I}{\Delta V_E}$ の関係

$D_{EP}[\text{mm}]$	$+\frac{\Delta I}{\Delta V_E}$ [nA/V]	$-\frac{\Delta I}{\Delta V_E}$ [nA/V]
10	1.05	-1.96
20	0.34	-0.72
50	0.06	-0.22

2.2. 直流電圧印加時の除電特性

イオナイザによる帯電電荷除去に関する評価方法については、IEC 61340-5-1 で規格化されており、除電時間 nT は、帯電電位 $V_P = \pm 1.0\text{kV}$ とした製品がコロナ放電型イオナイザで発生されたイオンによって $\pm 0.1\text{kV}$ に到達するまでの時間を除電時間 nT_{\pm} とする。図 4 に示すアメリカの EOS/ESD 規格で定められた Charged Plate Monitor (以下、CPM) が一般的に用いられている。CPM (静電容量 20pF) は内部に高電圧電源と表面電位計を内蔵し、 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ のアルミ板を特定の電圧値まで帯電させ、その帯電電位 V_P の時間変化をデジタルオシロスコープにて測定を行った。

おもに表面電位計より発生するノイズはデジタル処理で除去して測定を行った。図 5 は、エミッタと帯電物間距離 $D_{EP} = 20\text{mm}$ 、帯電電位 $V_P = +1.0\text{kV}$ のとき、エミッタに印加する電圧値 $V_E = -2.46\text{kV}$ 、 $V_P = -1\text{kV}$ のとき、 $V_E = +2.70\text{kV}$ 、横軸はエミッタに電圧を印加した時間を 0 s とした経過時間、縦軸は帯電電位 V_P とした除電特性である。実験結果より、2.1 項で設定した実験条件では、帯電電位が正のときの除電時間 $nT_+ \approx 0.15\text{s}$ 、負のときの除電時間 $nT_- \approx 0.20\text{s}$ であった。以上のことから、 $V_P = 0$ のときの正負イオンの発生量 ($I = \pm 1\text{nA}$) としても V_P の変化によって発生するイオンは帯電電位が負の方が遅延することが分かった。

2.3. 交流電圧印加時の除電特性

2.2 項で用いた電圧値を基に $V_{max} = +2.70\text{kV}$ 、 $V_{min} = -2.46\text{kV}$ となる方形波形 (Pulsed-AC) を生成して検討を行った。図 6 は方形波形の周波数 $f = 50 \sim 900\text{Hz}$ 範囲における除電特性の結果を示す。この結果より得られた除電時間 nT_{\pm} を図 7 に示す。なお、図中の周波数に関しては帯電物の電荷によってイオンの放出が妨げられる低周波域とエミッタ周辺のイオンの再結合が発生する高周波域を比較するために対数目盛とし、以降の図に関しても同様に表記する。全周波数において nT_- よりも nT_+ が遅延する傾向があった。直流電圧を印加した結果 ($nT_+ \approx 0.15\text{s}$ 、 $nT_- \approx 0.20\text{s}$) より、 $f = 50\text{Hz}$ までは除電時間が周波数とともに遅延する傾向がみられた。これはエミッタが帯電電位と同極になったことでイオンの放出を妨げることが原因であると考えられる。さらに周波数が高くなると $f = 100 \sim 200\text{Hz}$ をピークに高速となった。これは、方形波形印加時におけるイオンの放出は極性の切り替わり時が最も多く検出されているため^[13]、同極によるイオンの発生が妨げられる効果よりも周波数が高くなりイオンの発生が

増大したためと考えられる。しかし、以降はエミッタで発生したイオンが空間で中和されてしまうため^[14]、それ以上除電時間が高速になることはなかった。

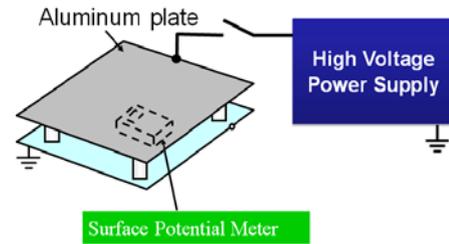


図 4 Charged Plate Monitor (CPM) の構成図

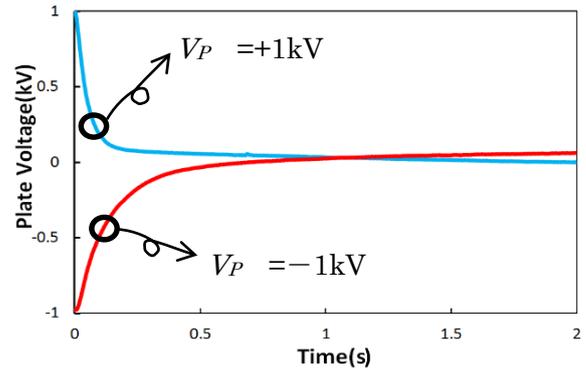


図 5 直流電圧印加時の除電特性

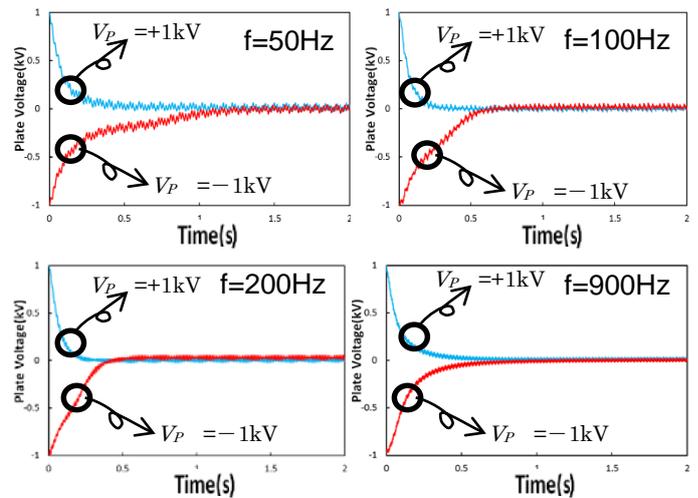


図 6 周波数変化させたときの除電特性

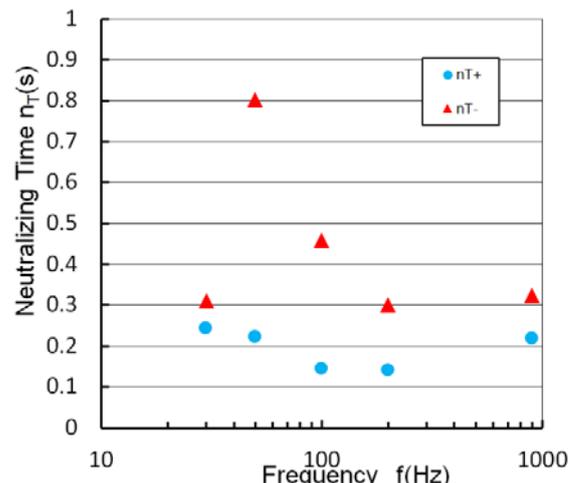


図 7 周波数と除電時間の関係

3. 複数極帯電時の除電特性

3.1. PCB 上の回路パターンにおける除電実験

ここでは帯電面積が小さく正負両極に帯電するモデル(両極帯電)を PCB 上に実現しその除電特性の測定を行った。まず、図 8 に示すガラスエポキシ基板上にエッチングし銅板(膜厚 $35\mu\text{m}$), 寸法 ($15\text{mm}\times 15\text{mm}$) で 20mm 離れた場所に回路パターンを作製し, 帯電モデルとした。なお, P1 の境界を $R=0\text{mm}$ と定義する。

帯電電位の測定方法は図 9 に示すように銅板の裏側から CPM と接続して, $P1=+1.0\text{kV}$, $P2=-1.0\text{kV}$ で帯電させた。なお, CPM はイオナイザの影響がない場所に設置した。よって, PCB 上の銅板上で除電が生じている。

図 10 はエミッタ位置を P1 と P2 の中間位置($R=10\text{mm}$) に設置し, 方形波形の周波数 $f=50\sim 900\text{Hz}$ まで変化させた除電特性を示す。

図 11 は PCB の P2 における除電時間の周波数依存性を同条件の CPM の実験結果と比較したものである。除電時間は測定範囲内で CPM の方が高速であった。また, PCB の除電時間は CPM の結果と同じように $f=100\sim 200\text{Hz}$ をピークに高速になる傾向が得られた。

図 12 はエミッタ位置を P1 の境界上 ($R=0\text{mm}$) に設置し, P1 を $+1.0\text{kV}$, P2 を -1.0kV に帯電, 周波数を $50\sim 900\text{Hz}$ まで変化させた除電特性を示す。

図 13 はその除電特性の結果から, 図 11 と同様に除電時間に関してまとめた。

CPM による結果では周波数に関わらず除電時間は 5 秒以内で除電可能であるが, 図 13 に示す PCB の P2 の除電特性 ($R=0\text{mm}$) において, どの周波数においても除電時間は 15 秒以上必要となり, 帯電物の面積が小さくなるとエミッタの設置位置によって帯電電荷が残留する可能性がある。

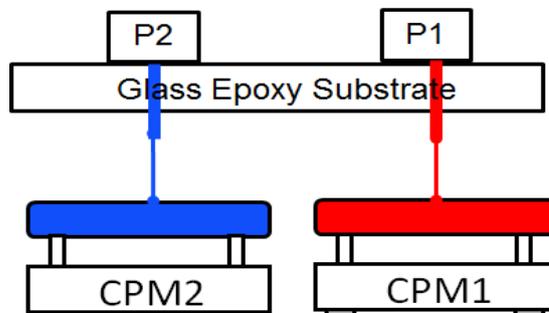
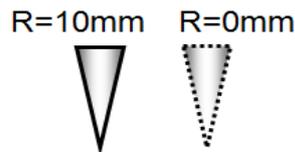


図 9 PCB を用いた両極帯電の除電実験

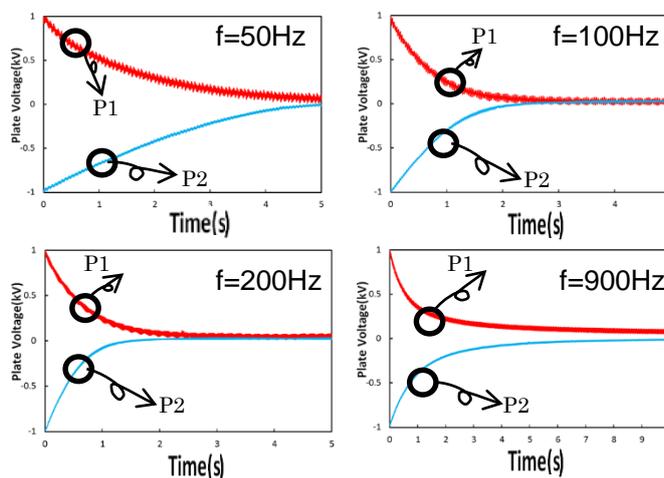


図 10 PCB における両極帯電時の除電特性 ($R=10\text{mm}$)

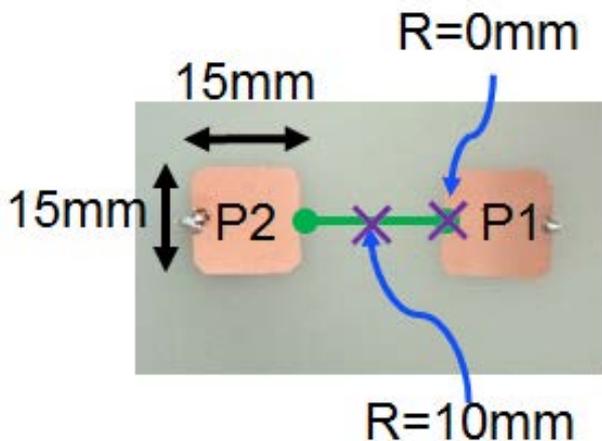


図 8 作製した PCB 基板と寸法

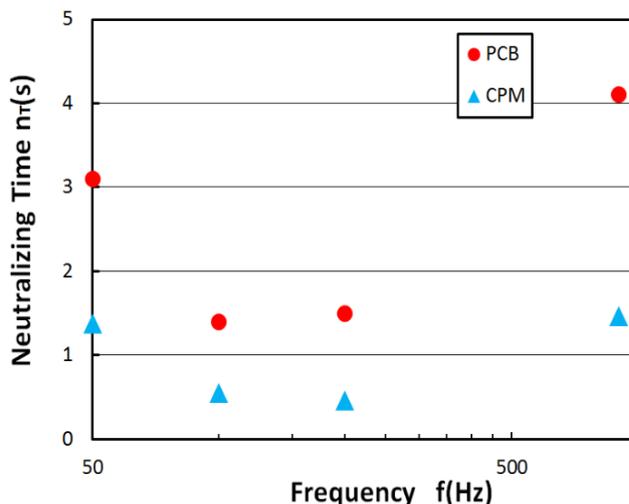


図 11 PCB (P2) と CPM1 の両極帯電時における周波数と除電時間の関係 ($R=10\text{mm}$)

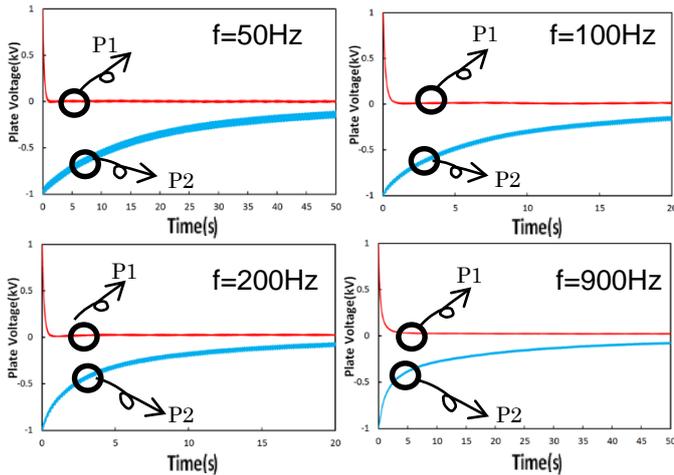


図 12 PCB における両極帯電時の除電特性 ($R=0\text{mm}$)

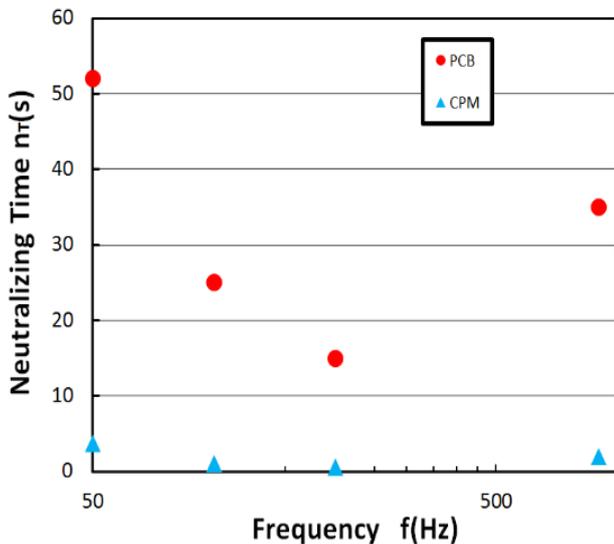


図 13 PCB(P2)と CPM の両極帯電時における周波数と除電時間の関係 ($R=0\text{mm}$)

3.2. 両極帯電時の除電特性に関する検討

エミッタを中央に設置した除電時におけるイオン発生モデルを図 14 に示す。エミッタの極性変化時に異極の CPM 側のエミッタ近傍にイオンが発生し、同極側はイオンの発生が同極の CPM の帯電電荷によって妨げられる。

エミッタを CPM1 の境界上に設置した除電時におけるイオン発生モデルを図 15 に示す。CPM1 境界上にエミッタを設置した場合は CPM1 の帯電電荷が CPM2 の除電を妨げるため、帯電電極が分かれている場合は単極性の時と比べて除電時間が低速になることが考えられる。

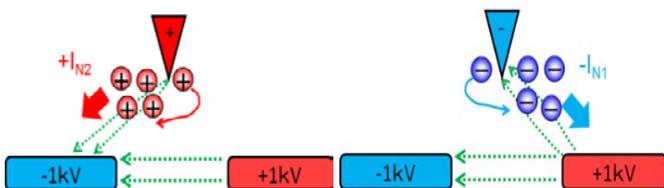


図 14 中間位置に設置時のイオン発生モデル

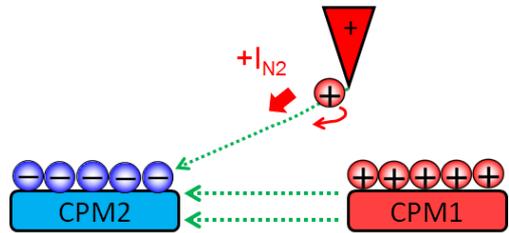


図 15 CPM1 境界上に設置時のイオン発生モデル

3.3. PCB を用いた複合帯電の除電実験

正負の電荷が複合的に帯電した場合の除電特性について検討を行った。図 16 に示すように PCB 上に回路パターンを作製し、P1, P2, P3 を各々帯電させ、P4 は接地した帯電モデルとした場合の除電特性の測定を行った。帯電電極数が 2 極から 3 極に増えたので複合帯電と定義する。

図 17 は周波数 50Hz で帯電電位をそれぞれ変化させたときの実験結果と図 18 は同様に周波数 100Hz の除電特性の実験結果を示す。

本実験条件では負の帯電電極数が増えると除電時間が低速になる傾向を示した。また、周波数に対する除電時間は 2 極 ($P1=+1\text{kV}$, $P2=-1\text{kV}$) の場合、 $f=50\text{Hz}$ のとき、帯電電位が正のときの除電時間 $n_{T+} \approx 3.0\text{s}$ に対して 3 極 ($P1=-1.0\text{kV}$, $P2=+1.0\text{kV}$, $P3=-1.0\text{kV}$ 帯電時) の $n_{T+} \approx 5.0\text{s}$ と帯電電極数が増えることによって除電時間は大きく遅延する傾向を示したが、 $f=100\text{Hz}$ のときは、2 極は $n_{T+} \approx 1.5\text{s}$ 、3 極は $n_{T+} \approx 1.8\text{s}$ となり、帯電電極数による除電時間の変化が小さくなるのが分かった。

これは、3.2 項で述べた異極性の帯電電位によるイオンの放出が制限されるため、帯電電極数が増えた複合帯電において、低周波域では負の帯電電極数が増えた分、正イオンが発生しづらくなるため除電時間に影響を及ぼしたが、周波数が高くなると正イオン放出が妨げられる時間が短くなるため、除電時間が向上したことが原因である。

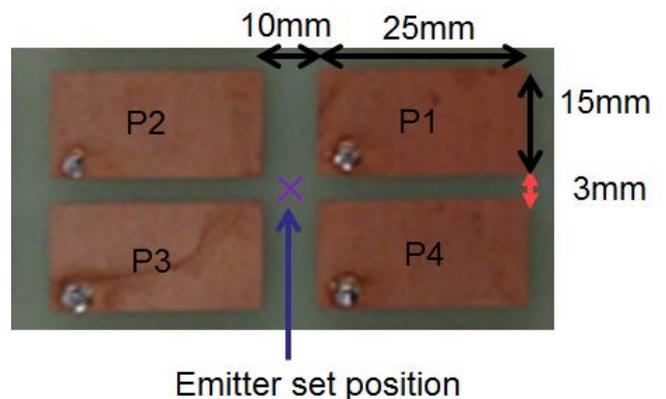


図 16 PCB 上の回路パターンと寸法

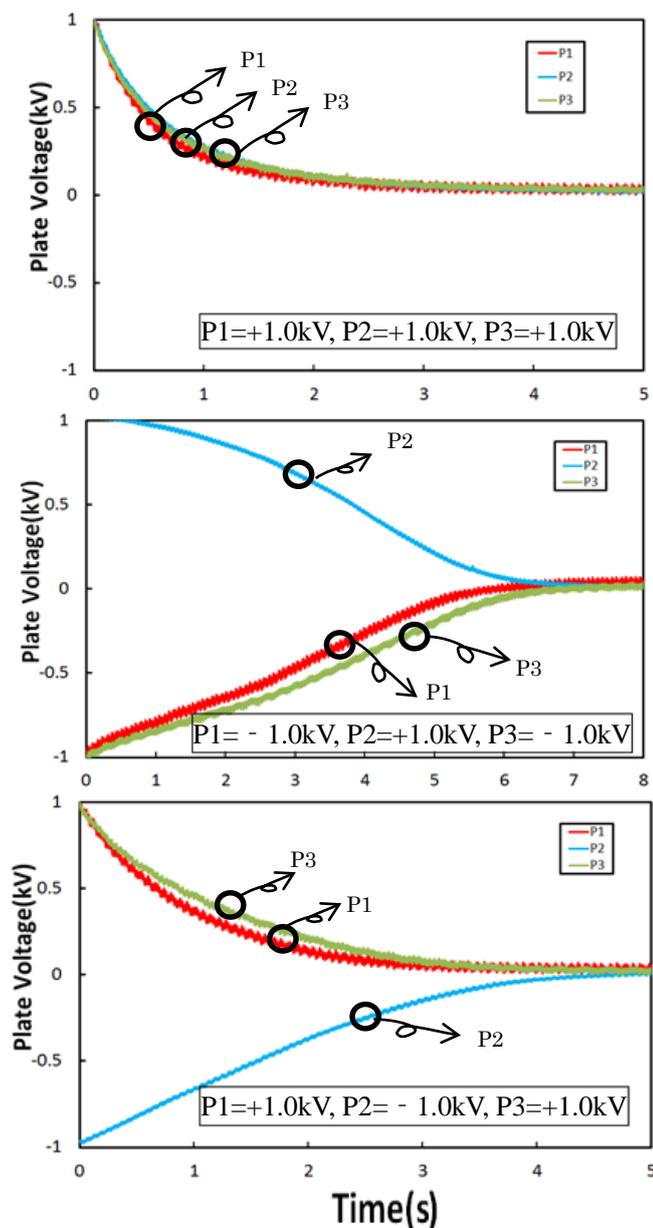


図 17 複合帯電の除電特性 ($f=50\text{Hz}$)

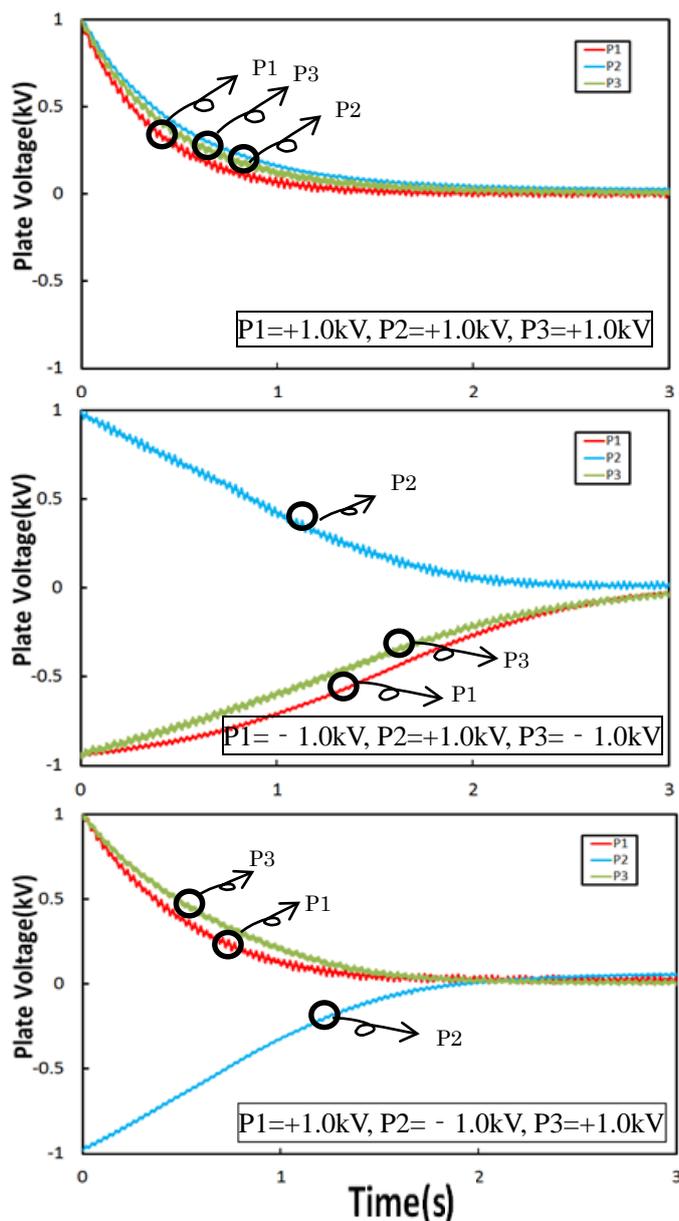


図 18 複合帯電の除電特性 ($f=100\text{Hz}$)

4. まとめ

静電気対策における最適なイオナイザの動作条件に関する所見を得るために、一般的な評価装置と実際の帯電状態に近づけたプリント基板の除電特性を測定したところ下記の結果を得た。

- (1) イオナイザによるプリント基板 (PCB) の除電時間は同一動作条件時の場合、評価装置 (CPM) の結果より大きく遅延する。
- (2) 帯電面積が小さくなると除電時間は帯電物の境界からの距離 R と方形波形の周波数依存性が大きくなる。
- (3) 両極帯電時の除電時間は単極帯電時よりも低速になる。帯電モデルが複雑になると、除電時間が更に遅延する。

- (4) エミッタの印加電圧が一定の場合、帯電電位の影響によってエミッタで生成されるイオンの発生が制限される。
- (5) エミッタの印加電圧が一定値の場合、方形波形の周波数 $f=100\sim 200\text{Hz}$ がすべての帯電モデルにおいて最も除電時間が高速である。

以上から、一般的な評価方法である CPM を用いた除電特性のみで最適なイオナイザの動作条件を決定することは、静電気障害の原因となる可能性がある。

よって、製品に模した帯電モデルを用いて除電特性を測定し、その結果に基づいて動作条件を調整する必要があることが明らかになった。

参考文献

- [1] 小田俊理:「21世紀の単電子デバイス」, 電気学会論文誌 C, Vol.121-C, No.1, pp.19-22 (2001).
- [2] S.Monfray, S.Cristoloveanu, T.Skotnicki: “Silicon-on-Nothing MOSFETs: Performance, Short-Channel Effects, and Backgate Coupling”, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL.51, NO.2, pp.240-245 (2004).
- [3] M.Ono, T.Ishihara, A.Nishiyama: “Influence of Dielectric Constant Distribution in Gate Dielectrics on the Degradation of Electron Mobility by Remote Coulomb Scattering in Inversion Layers”, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL.51, NO.5, pp.736-740 (2004).
- [4] 阪田総一郎, 岡田孝夫:「静電気による微粒子の付着」, 空気洗浄, 27,6,pp.406-415(1990).
- [5] 辻幹夫:「LSI製造における静電気問題と対策」, 静電気学会誌, Vol.19, No.1, pp.28-34 (1995).
- [6] 萩原良昭:「DRAM/SRAM技術と静電気」, 静電気学会誌, Vol.22, No.6, pp.277-281 (1998).
- [7] 鈴木功一:「静電誘導による半導体デバイスの故障メカニズム」, 静電気学会誌, Vol.23, No.6, pp.303-308 (1999).
- [8] 福田保裕:「電子デバイスにおける静電気対策の動向」, 電子情報通信学会総合大会誌, pp.558-559 (2001).
- [9] 村田雄司監修:「除電器と除電技術」, p.87~100,シーエムシー出版, (2004).
- [10] 阪田総一郎:「クリーンルームにおけるコンタミネーション防止技術」, 静電気学会誌, Vol.18, No.3, pp.268-269 (1994).
- [11] 大澤敦:「コロナ除電の電気流体力学シミュレーション」, 静電気学会誌イオナイザ特集号, 38.3, 145-150 (2014).
- [12] チャング ジェン シー:「大気圧プラズマの物理と化学」 J. Plasma Fusion Res. Vol.82, No.10, 682-692 (2006).
- [13] Takashi Sato, Takashi Ikehata, Takashi Terashige, Kazuo Okano;

Basic Characteristics of Self-Control Corona Discharge Air Ionizer, IEEJ Trans 2016; 11(S1): S19-S23

- [14] 榎園昌弘, 田邊敏雄, 吉水健剛, 岡野一雄:「AC コロナ放電型イオナイザの除電電流測定用センサ」, 第18回RCJ信頼性シンポジウム発表論文集, pp.193-196 (2008).

(原稿受付 2017/01/10, 受理 2017/03/31)

*佐藤 崇志, 博士 (工学)

職業能力開発総合大学校, 能力開発院 制御工学ユニット,
〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1
email:t-satou@uitech.ac.jp

Takashi Sato, Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035.

*高橋 宏治, 工学博士

職業能力開発総合大学校, 能力開発院 制御工学ユニット,
〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1
Email: k-takahashi@uitech.ac.jp

Koji Takahashi, Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035.

*古井 英則

職業能力開発総合大学校, 能力開発院 制御工学ユニット,
〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1
Email: furui@uitech.ac.jp

Hidegori Furui, Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035.

*池畑 隆, 理学博士

茨城大学大学院理工学研究科量子線科学専攻, 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1

Email: takashi.ikehata.eng@vc.ibaraki.ac.jp

Takashi Ikehata, Institute of Applied Beam Science, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi, Ibaraki, 316-8511, Japan.