

# フォトンイオナイザの除電速度に及ぼす グランドグリッドの効果

吉野 龍太\*, 岡野 一雄\*,<sup>1</sup>

(2007年10月17日受付; 2007年11月29日受理)

## Effect of Grounded Grid on Neutralization Speed of Photon Air Ionizer

Ryuta YOSHINO\* and Kazuo OKANO\*,<sup>1</sup>

(Received October 17, 2007; Accepted November 29, 2007)

Soft X-ray air ionizers are widely used for static control in the manufacture of electronic devices such as LCD and LSI because of the contamination free. Higher neutralizing rate has been required for the air ionizers for increasing the productivity rate of the electronic devices. The grounded grid located between the soft X-ray ionizer and the charged product was proposed in order to increase the neutralization efficiency. It was found that the grounded grid play an important role to increase the static neutralizing speed. The relationship between the concentration distribution of the charged particles and the neutralizing speed were calculated by computer simulation to estimate the optimum operating conditions.

### 1. はじめに

LCD (Liquid Crystal Display) の製造工程においてガラス基板に静電気が発生すると、基板にコンタミネーションが付着し、LCD の製造歩留が低下することがある。この問題を解決するために、コンタミネーションフリーの軟 X 線式イオナイザが注目されている<sup>1)</sup>。このイオナイザで帯電したガラス基板を除電する際、イオナイザが生成した荷電粒子の内、除電に必要な極性の荷電粒子は基板の電界によって吸引され、基板を電氣的に中和する。一方、除電に不要な極性の荷電粒子は、電界によって基板から遠ざかる方向に移動する。この移動速度は、基板近傍の電界強度を高めることによって高くなる。荷電粒子の移動速度が高くなると、荷電粒子の飛行時間が短くなり、再結合で消滅する荷電粒子数が減少する。この結果、基板を除電するための除電電流が高くなると考えられる。

そこで、基板近傍にグランドグリッドを設け、電界強度を高め、除電速度を高くする方法を提案している。

本研究では、このグランドグリッドが除電速度に及ぼす効果を検討した。イオナイザの動作条件としてグランドグリッドと基板の間の距離および基板の電圧を選び、除電速度の指標として除電電流密度を選び、これらの関係を実験とシミュレーションの両面から検討した。

### 2. グランドグリッドの効果に関する実験的検討

#### 2.1 測定方法

図 1 はグランドグリッドが除電速度に及ぼす効果を実験的に検討するための装置である。本実験では、基板は LCD 用ガラス基板を想定している。一般に、このような基板状の帯電物の中央部と周辺部では電界強度は異なる。また、絶縁体基板を除電する場合には、基板の中央部と周辺の電位が一致していないことがあるため、基板表面近傍の電界強度が不均一になることが考えられる。そこで、基板を中央部と周辺部に分離し、中央部の除電速度を測定することにした。本研究では、基板の中央部だけの除電速度を検討するので、除電速度の指標として除電電流密度を測定することにした。

基板に相当する基板の中央部は、周辺部と電氣的に絶縁し、直径  $\phi$  が 35.7 mm (面積  $S$  が 1000 mm<sup>2</sup>) のステンレススチール板で構成した。この中央部を同軸ケーブルで CPM (Charge Plate Monitor) (ヒューグルエレクトロニクス株式会社 MODEL 700A) の金属プレートに接続した。本実験では、この部分をプローブと呼び、このプローブを使用して基板

**キーワード**: LCD, コンタミネーション, 軟 X 線, イオナイザ, 除電速度

\* 職業能力開発総合大学校電気システム工学科 (229-1196 神奈川県相模原市橋本台 4-1-1)

Department of Electrical Engineering, The University of Industrial Technology, 4-1-1 Hashimoto-dai, Sagami-hara, Kanagawa 229-1196, Japan

<sup>1</sup> [okano@uitech.ac.jp](mailto:okano@uitech.ac.jp)

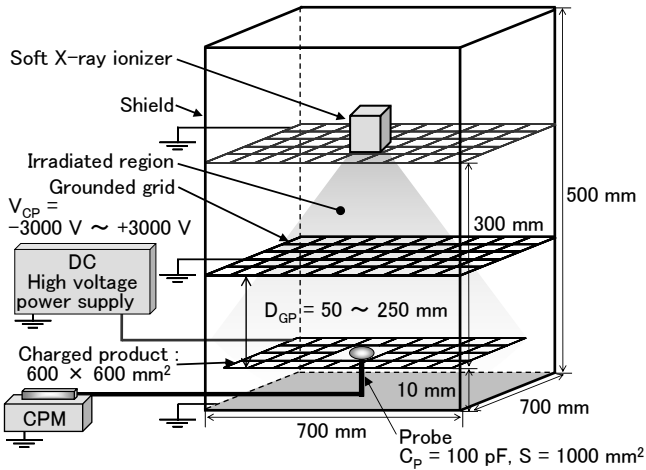


図1 除電電流密度の測定装置

Fig.1 Setup for measuring neutralizing current density  $J_N$ .

中央部の除電速度を測定した。なお、プローブの静電容量は 100 pF である。一方、周辺部は直径 1.2 mm のステンレススチール線を 13 mm 間隔の格子状に配置し、一辺が 600 mm の正方形のグリッドで構成した。

グランドグリッドは基板の周辺部と同じ材質、構造のグリッドで構成し、寸法は一辺が 700 mm の正方形とした。また、軟 X 線式イオナイザ用高圧ケーブル等から発生する外部電界が測定に及ぼす影響を除去するために、軟 X 線式イオナイザの照射口と同一平面上に接地したグリッドを設けた。なお、このグリッドの材質、寸法等はグランドグリッドと同様である。

この装置を使用して中央部の除電電流密度を測定し、除電速度に及ぼすグランドグリッドの効果を検討した。この装置は軟 X 線式イオナイザ、基板、高電圧発生装置、グランドグリッド、接地したグリッド、軟 X 線を遮蔽するシールドで構成されている。イオナイザとして軟 X 線発生装置 (浜松ホトニクス株式会社 L6941) を使用し、このイオナイザをシールド内の上部に設置した。また、高電圧発生装置に接続した基板を軟 X 線式イオナイザの下方 300 mm の位置に設置した。高電圧発生装置は直流安定化電源 (菊水電子工業株式会社 MODEL 7326) とアンプリファイア (トレック・ジャパン株式会社 MODEL 10/10B) で構成し、直流安定化電源の出力をアンプリファイアに入力し、アンプリファイアによって高電圧を出力させる構造とした。この高電圧発生装置を使用し、基板に -3000V ~ +3000 V の範囲の直流電圧  $V_{CP}$  を印加して充電した。グランドグリッドは軟 X 線式イオナイザと基板の間に設置し、グランドグリッドと基板の間の距離  $D_{GP}$  を 50 mm ~ 250 mm の範囲として、基板中央部の除電電流密度を測定した。また、グランドグリッドが除電速度に及ぼす効果を検討するために、グランドグリッドを設置

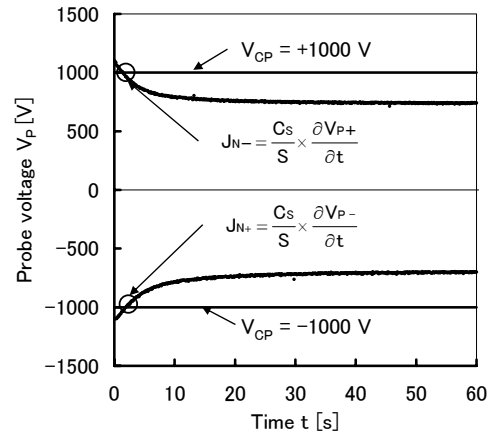


図2 時間とプローブ電圧との関係

Fig.2 Probe voltage  $V_p$  as a function of time  $t$ .

しない場合の除電電流密度も測定した。

この除電電流密度  $J_N$  は以下の手順で測定した。まず、高電圧発生装置で基板に  $V_{CP}$  [V] を印加した。次に、プローブを  $|V_{CP}|$  より 100 V 大きい電圧で充電した。これは、測定開始時のデータに含まれる不安定なデータを除去するためである。その後、イオナイザによってプローブが除電される時の  $V_p$  と時間  $t$  との関係測定した。この測定結果において、 $V_p$  が  $V_{CP}$  に一致したときの傾き ( $\partial V_p / \partial t$ ) から除電電流密度を求めた。すなわち、除電電流密度は、

$$J_{N+} = \frac{C_P}{S} \times \frac{\partial V_{P-}}{\partial t} \quad (1)$$

$$J_{N-} = \frac{C_P}{S} \times \frac{\partial V_{P+}}{\partial t} \quad (2)$$

と定義した。ここで、 $C_P$  はプローブの静電容量、 $S$  はプローブの面積である。また、 $J_{N+}$  は正の荷電粒子に基づく除電電流密度である。同様に、 $J_{N-}$  は負の荷電粒子に基づく除電電流密度である。図 2 はこの測定結果の一例である。この測定結果は  $V_{CP}$  が -1000 V または +1000 V の場合である。この際、基板の電圧  $V_{CP}$  が -1000 V の場合は  $V_p$  が -1000 V のときの傾きから  $J_{N+}$  を算出し、 $V_{CP}$  が +1000 V の場合は  $V_p$  が +1000 V のときの傾きから  $J_{N-}$  を算出した。同様な手順でそれぞれの  $V_{CP}$  に対して、除電電流密度を求めた。この除電電流密度が高いほど除電速度は高いことを表している。

## 2.2 測定結果

基板のそれぞれの電圧に対して、グランドグリッドと基板の間の距離を変化させた際の除電電流密度、およびグランド

グリッドを設置しない場合の除電電流密度を測定した。

図 3, 図 4 は基板の電圧  $V_{CP}$  をパラメータとし, グランドグリッドと基板の間の距離  $D_{GP}$  を変化させた際の除電電流密度  $J_N$  の測定結果である. 図 3 は  $V_{CP}$  が負の場合の結果であり, 図 4 は  $V_{CP}$  が正の場合の結果である. これらの図において,  $J_{N0}$  はランドグリッドを設置しない場合の除電電流密度である. これらの結果から以下のことが明らかになった. まず, すべての  $V_{CP}$  に対して,  $J_N$  は  $D_{GP}$  に依存していることが明らかになった.  $|V_{CP}|$  が 1000 V の場合は, グランドグリッドを設置することによって除電電流密度は高くなり,  $D_{GP}$  が 100 mm 付近のときに  $J_N$  は最大値を示す

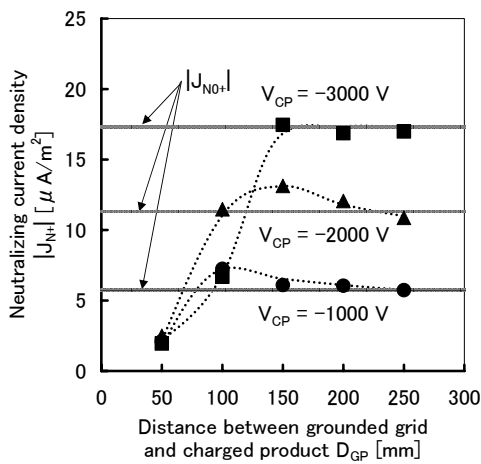


図 3 グランドグリッドと基板の間の距離と除電電流密度との関係

Fig.3 Neutralizing current density  $|J_{N+}|$  versus distance between grounded grid and charged product  $D_{GP}$  at various voltage of charged product  $V_{CP}$ .

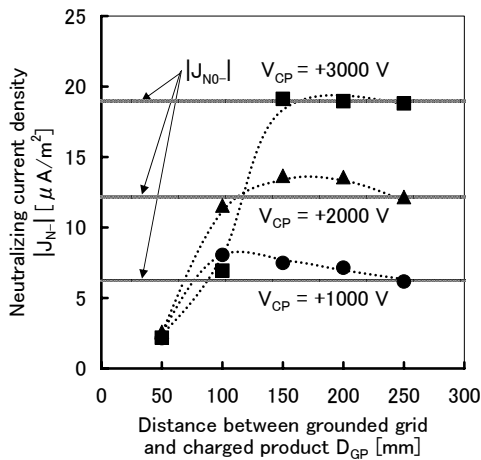


図 4 グランドグリッドと基板の間の距離と除電電流密度との関係

Fig.4 Neutralizing current density  $|J_{N-}|$  versus distance between grounded grid and charged product  $D_{GP}$  at various voltage of charged product  $V_{CP}$ .

ことが明らかになった. 次に,  $|V_{CP}|$  が 2000 V の場合は, グランドグリッドを設置することによって除電電流密度は高くなり,  $D_{GP}$  が 150 mm 付近のときに  $J_N$  は最大値を示すことが明らかになった. しかし,  $|V_{CP}|$  が 3000 V の場合は,  $D_{GP}$  に関係なく  $J_N$  は  $J_{N0}$  よりも低くなっていることが明らかになった.

図 5, 図 6 はランドグリッドの効果を検討するために  $|J_N|$  を  $|J_{N0}|$  で規格化した結果である. 図 5 は  $V_{CP}$  が負の場合の結果であり, 図 6 は  $V_{CP}$  が正の場合の結果である. これらの図において,  $|J_N/J_{N0}| > 1.0$  の領域はランドグリッドを設置することによって除電電流密度が高くなったことを

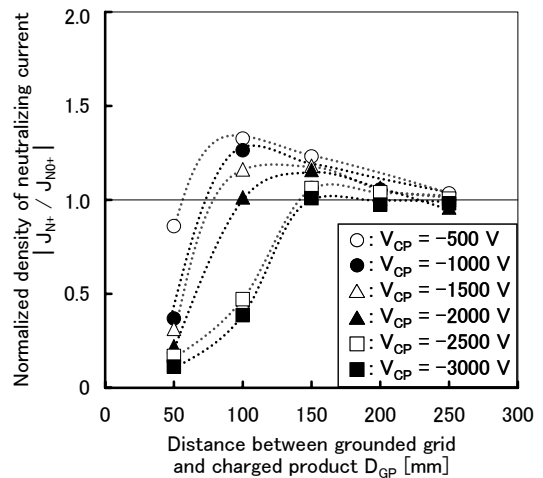


図 5 グランドグリッドと基板の間の距離と規格化した除電電流密度との関係

Fig.5 Normalized neutralizing current density  $|J_{N+} / J_{N0+}|$  versus distance between grounded grid and charged product  $D_{GP}$  at various voltage of charged product  $V_{CP}$ .

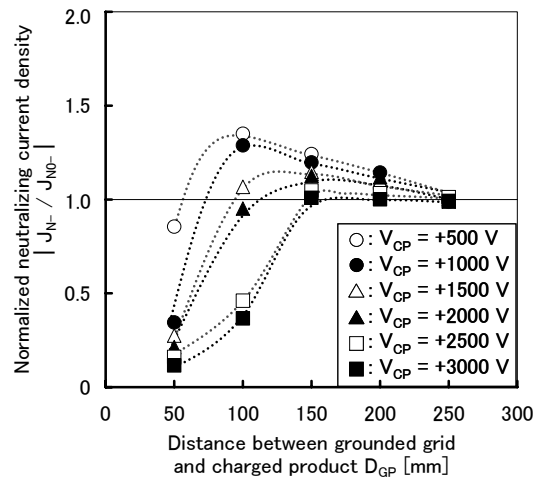


図 6 グランドグリッドと基板の間の距離と規格化した除電電流密度との関係

Fig.6 Normalized neutralizing current density  $|J_{N-} / J_{N0-}|$  versus distance between grounded grid and charged product  $D_{GP}$  at various voltage of charged product  $V_{CP}$ .

意味している。これらの結果から、以下のことが明らかになった。まず、 $|V_{CP}|$  が低くなるほど、 $|J_N/J_{No}|$  の最大値は大きくなっていることが明らかになった。次に、 $|V_{CP}|$  が低くなるほど、 $|J_N/J_{No}|$  を最大にする最適な  $D_{GP}$  は短くなること明らかになった。

### 2.3 考察

以上の結果から、除電電流密度はグランドグリッドと基板の間の距離および基板の電圧に依存することが明らかになった。そこで、このような結果が得られた理由について考察する。

図7は基板が正に帯電している場合の軟X線照射領域内の荷電粒子濃度の分布状態およびグランドグリッドと基板の間の電界をモデル化した図である。この図において、 $n_+$  は正の荷電粒子濃度、 $n_-$  は負の荷電粒子濃度、 $r$  は軟X線式イオナイザの照射口からの距離である。この図に示すように、基板が発生する電界はグランドグリッドと基板の間だけに存在する。したがって、除電電流密度はグランドグリッドと基板の間に存在する荷電粒子の挙動に大きく依存することになる。また、グランドグリッドを設置しない場合、基板が発生する電界は接地したグリッドと基板の間に存在する。

まず、除電電流密度はグランドグリッドと基板の間の距離に依存する理由について考察する。 $D_{GP}$  が短くなると、以下の効果が現われたためと考えられる。

- (1) グランドグリッドと基板の間の体積が減少し、除電に必要な負の荷電粒子の総数が減少する。この結果、除電電流密度を低下させる効果が現われる。
- (2) グランドグリッドと基板の間の電界  $E_e$  が強くなり、荷電粒子の移動速度が上昇する。移動速度が上昇すると飛行時間が短くなり再結合が低下する。この結果、除電電流密度が上昇する効果が現われる。

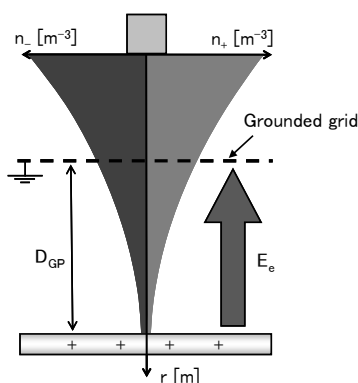


図7 荷電粒子の分布状態およびグランドグリッドと基板の間の電界

Fig.7 Model for concentration distribution of charged particles and electric field in the soft X-ray air ionizer.

このように除電電流密度を低下させる効果と上昇させる効果が重なったためと考えられる。

次に、除電電流密度は基板の電圧に依存する理由について考察する。 $V_{CP}$  が低くなるほど、 $E_e$  が弱くなり、荷電粒子の移動速度が減少する。移動速度が減少すると飛行時間が長くなり再結合で消滅する荷電粒子数が増加する。したがって、 $V_{CP}$  が低くなるほど、グランドグリッドを設置することによって除電電流密度が上昇する効果は大きくなり、除電電流密度が最大になるグランドグリッドと基板の間の最適距離は短くなったと考えられる。

## 3. グランドグリッドの効果に関するシミュレーションによる検討

### 3.1 シミュレーション方法

測定結果から除電電流密度はグランドグリッドと基板の間の距離および基板の電圧に依存することが明らかになった。また、除電電流密度が最大となる最適距離があることが明らかになった。さらに、この最適距離は基板の電圧によって変化することが明らかになった。このように除電電流密度を最大にするためには、グランドグリッドと基板の間の距離を適当に選定する必要がある。そこで、この最適距離をシミュレーションで推定する可能性を検討した。

除電電流密度は軟X線式イオナイザが生成した荷電粒子濃度の分布状態に依存する。また、この荷電粒子濃度の分布状態はグランドグリッドと基板の間の距離に依存する。そこで、グランドグリッドと基板の間の距離を変化させた際の除電電流密度を求めるためには荷電粒子濃度の空間的、時間的な分布状態を求めなければならない。荷電粒子濃度の分布状態を空間的、時間的に変化させる要素は以下の要素がある。

- 1) 荷電粒子の生成
- 2) 荷電粒子の再結合
- 3) グランドグリッドと基板の間の電界
- 4) 荷電粒子が作る局所電界
- 5) 荷電粒子の濃度差に基づく移動の拡散

である。したがって、これらの要素を考慮することによって荷電粒子濃度の分布状態をシミュレーションした。この際、シミュレーションは、連続の方程式、

$$\frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} = G_n - \alpha n_{\pm} n_{\mp} \mp \mu_{\pm} E_e \frac{\partial n_{\pm}}{\partial r} \mp \mu_{\pm} E_L \frac{\partial n_{\pm}}{\partial r} + D_{\pm} \frac{\partial^2 n_{\pm}}{\partial r^2} \quad (3)$$

を使用した<sup>2)</sup>。ここで、 $G_n$  [ $m^3/s$ ] は荷電粒子濃度の生成係数、 $\alpha$  [ $m^3/s$ ] は荷電粒子濃度の再結合係数、 $\mu_{\pm}$  [ $m^2/Vs$ ]

正の荷電粒子の移動度,  $\mu_+$  [ $\text{m}^2/\text{Vs}$ ] 負の荷電粒子の移動度,  $\mu_-$  [ $\text{m}^2/\text{Vs}$ ] はグラウンドグリッドと基板の間の電界,  $E_e$  [ $\text{V}/\text{m}$ ] は荷電粒子が作る局所電界,  $E_L$  [ $\text{V}/\text{m}$ ] は正の荷電粒子の拡散定数,  $D_+$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] は負の荷電粒子の拡散定数である.

除電電流密度はグラウンドグリッドと基板の間に存在する荷電粒子の挙動に大きく依存する. そこで, シミュレーションはグラウンドグリッドと基板の間とし, 以下の手順で行った.

- 1) グラウンドグリッドと基板の間の空間を微小領域  $\Delta r$  に分割する.
- 2)  $t = t_i$  における空間的な濃度分布  $n(r, t_i)$  から, 各層に作用する要素から微小時間  $\Delta t$  [s] 後の変化量を算出する.
- 3) 微小時間  $\Delta t$  [s] 後の濃度分布  $n(r, t_{i+1})$  を算出する.
- 4) 任意の時間  $t = t_n$  となるまで, 2)~3) を繰り返す.

この際, 任意の微小領域における荷電粒子濃度の変化量は, (3) 式を使用した.  $G_n$  は  $r = 0$  で  $7.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}/\text{s}$  とし,  $G_n \propto 1/r^2$  としてそれぞれの距離における  $G_n(r)$  を求めた<sup>3~5)</sup>, また, 微小領域  $\Delta r$  は  $250 \mu\text{m}$ , 微小時間  $\Delta t$  は  $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ ,  $\alpha$  は  $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}^2$ ,  $\mu_+$  は  $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ ,  $\mu_-$  は  $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ <sup>6)</sup>,  $D_+$  は  $4.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_-$  は  $4.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  とした<sup>7)</sup>. なお, 帯電した基板が存在しない場合の  $r = 0 \text{ mm}$  における  $n_+$  および  $n_-$  は  $2.8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$  であり,  $r = 300 \text{ mm}$  における  $n_+$  および  $n_-$  は  $2.8 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$  とした.

### 3.2 シミュレーション結果

図 8, 図 9, 図 10 は基板の電圧  $V_{CP}$  が  $-1000 \text{ V}$  または  $+1000 \text{ V}$  の場合のグラウンドグリッドと基板の間の距離  $D_{GP}$  を変化させた際の荷電粒子濃度の分布状態のシミュレーション結果である. 図 8 は  $D_{GP}$  が  $100 \text{ mm}$ , 図 9 は  $D_{GP}$  が  $200 \text{ mm}$ , 図 10 はグラウンドグリッドを設置しない場合の結果である. これらの図において, 濃度軸の左側が負の荷電粒子濃度であり, 右側が正の荷電粒子濃度である. これらの結果から,  $D_{GP}$  が短くなるほど, 除電に必要な極性の荷電粒子の総数が減少していることが明らかになった. また,  $D_{GP}$  が短くなるほど, 荷電粒子濃度の分布状態は基板設置前より顕著に変化し, 除電に必要な極性の荷電粒子は基板の方へ移動し, 除電に不要な極性の荷電粒子はグラウンドグリッドの方へ移動していることが明らかになった.

次に, 除電電流密度  $J_N$  を検討するために荷電粒子の分布子状態から基板に到達する荷電粒子濃度を求め,

$$J_{N\pm} = n_{\pm}(r, t) \cdot q \cdot \mu_{\pm}(E_e + E_L) \quad (4)$$

から除電電流密度  $J_N$  を算出した.  $q$  は電気素量であり,  $q$  は  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  とした. 図 11, 図 12 は基板の電圧  $V_{CP}$  を

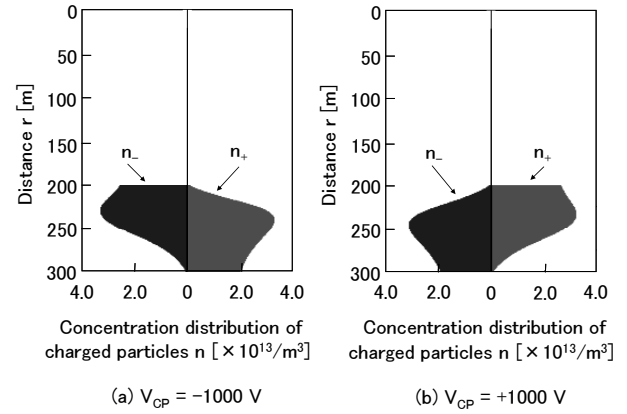


図 8  $D_{GP}$  が  $100 \text{ mm}$  場合の荷電粒子の分布状態のシミュレーション結果  
Fig.8 Simulated result of concentration distribution of charged particles at  $D_G = 100 \text{ mm}$ .

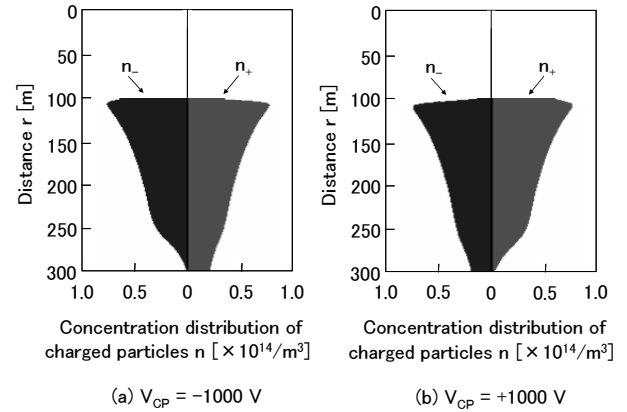


図 9  $D_{GP}$  が  $200 \text{ mm}$  場合の荷電粒子の分布状態のシミュレーション結果  
Fig.9 Simulated result of concentration distribution of charged particles at  $D_G = 200 \text{ mm}$ .

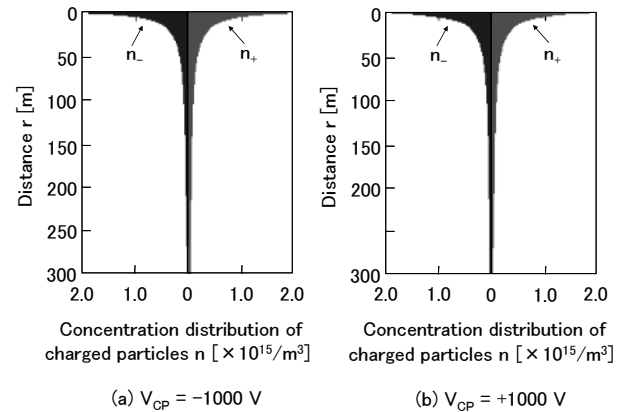


図 10 グラウンドグリッドを設置しない場合の荷電粒子の分布状態のシミュレーション結果  
Fig.10 Simulated result of concentration distribution of charged particles at without grounded grid.

パラメータとし、グラウンドグリッドと基板の間の距離  $D_{GP}$  を変化させた際の  $J_N$  を  $J_{N0}$  で規格化した  $|J_N / J_{N0}|$  の結果である。図 11 は  $V_{CP}$  が負の場合の結果であり、図 12 は  $V_{CP}$  が正の場合の結果である。これらの図において、実線がシミュレーション結果であり、プロットが測定値である。これらの結果から、シミュレーション結果は測定値と類似した傾向を示していることが明らかになった。以上のことから、除電電流密度は推定可能であり、最適距離をシミュレーションにより推定可能であることが明らかになった。

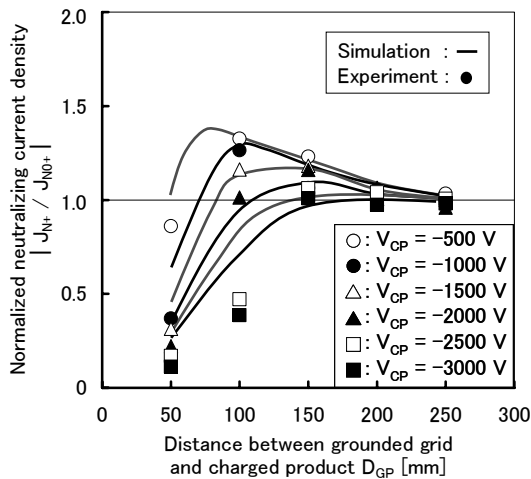


図 1 1 シミュレーションによるグラウンドグリッドと基板の間の距離と規格化した除電電流密度との関係  
 Fig.11 Simulated result of normalized neutralizing current density  $|J_{N+} / J_{N0+}|$  versus distance between grounded grid and charged product  $D_{GP}$  at various voltage of charged product  $V_{CP}$ .

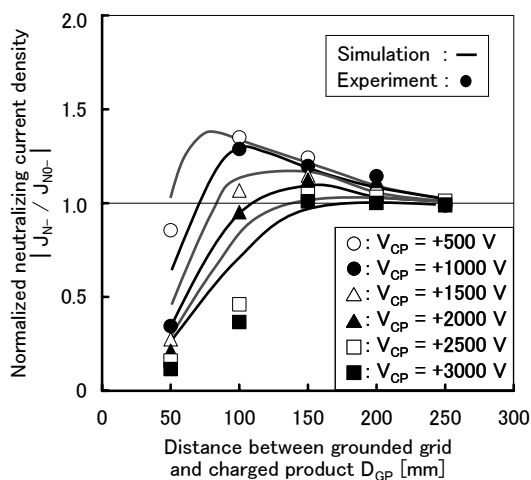


図 1 2 シミュレーションによるグラウンドグリッドと基板の間の距離と規格化した除電電流密度との関係  
 Fig.12 Simulated result of normalized neutralizing current density  $|J_{N-} / J_{N0-}|$  versus distance between grounded grid and charged product  $D_{GP}$  at various voltage of charged product  $V_{CP}$ .

4. まとめ

本研究では、グラウンドグリッドが除電速度に及ぼす効果を検討した。イオナイザの動作条件としてグラウンドグリッドと基板の間の距離および基板の電圧を選び、除電速度の指標として除電電流密度を選び、これらの関係を実験とシミュレーションの両面から検討した。この結果以下のことが明らかになった。

- (1) グラウンドグリッドを設置することによって、除電電流密度は高くなり、除電速度を高めるグラウンドグリッドの効果が現われる。
- (2) このグラウンドグリッドの効果はグラウンドグリッドと基板の間の距離に依存する。
- (3) このグラウンドグリッドの効果は基板の電圧が低くなるほど大きくなる。
- (4) このグラウンドグリッドの効果を最大にするグラウンドグリッドと基板の間の最適距離は基板の電圧が低くなるほど短くなる。
- (5) このグラウンドグリッドの効果は荷電粒子の分布状態を考慮したシミュレーションによって推定可能である。

参考文献

- 1) H.Inaba, T.Ohmi, T.Yoshida, T.Okada, IEICE Transactions on Electronics, Vol.E79C, No.3, pp.328-335 (1996)
- 2) 依田安基, 吉岡ひさよ, 岡野一雄: 第 15 回 RCJ 信頼性シンポジウム発表論文集, pp.157-160 (2005)
- 3) 作山昌史, 竹内学, 吉野龍太, 岡野一雄: 静電気学会講演論文集 '06 pp.29-30 (2006)
- 4) ナインゴーランシモン, 岡野一雄: 2007 年度静電気学会春期講演会論文集, pp.41-44 (2007)
- 5) 山崎泰寿, ナインゴーランシモン, 作山昌史, 竹内学, 岡野一雄: 第 54 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, p.248 (2007)
- 6) 尹治文, 大谷吉生, 並木則和, 江見準: 第 14 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会, pp.121-124 (1996)
- 7) 高橋清: 「半導体工学」, pp.97-98, 森北出版 (2001)