

# 交流コロナ放電型イオナイザのイオン輸送効率に及ぼす周波数の効果

## Effects of Frequency of AC Corona Discharge Air Ionizer on Ion Transportation Efficiency

鈴木 誠也, 吉水 健剛

Seiya Suzuki, Yosimizu Kengo

Suppression of the particle generation from the emitter of the corona discharge air ionizer is one of the most important issues to maintain the clean room at low contamination level. The particle generation rate increases with increasing the ion creation rate, because the particles are generated by spattering effect of the generated ions. In order to find out the optimum operating condition by controlling the ion transportation efficiency, that is defined as the ratio of the ion number arrived at the working area to the of ion number created at the emitter of the air ionizer, we investigated the relationship between the ion transportation efficiency and the frequency of the power supply as an operating condition of the air ionizer. The low frequency operation was suitable to suppress particle generation without reducing the static neutralization performance, because the ion transportation efficiency increased with decreasing the operating frequency.

Keyword: ionizer, electrostatic charge, ion transportation, frequency, neutralization

### 1. はじめに

電子機器の高性能化を促進するために、高密度実装技術への期待が高まっている<sup>[1]</sup>。しかし、このような実装を行う工程において、静電吸引によって製品に微粒子が付着し、製品の信頼性が低下する問題や製造歩留が低下する問題が発生している<sup>[2]</sup>。このような静電気障害への対策として、AC コロナ放電型イオナイザが広く使用されている<sup>[3]</sup>。

しかし、このイオナイザがイオンを生成するとき、スパッタリング等によってエミッタを構成する物質の一部が微粒子となって飛散し、作業環境の清浄度が低下することが懸念されている。この微粒子の単位時間当たりの生成量は、単位時間当たりのイオンの生成量が多くなるに従って、多くなることが報告されている<sup>[4]</sup>。

したがって、イオナイザによる清浄度の低下を抑制しながら高速除電を実現するためには、生成したイオンを消滅させることなく、確実に製品に輸送することが重要となる。すなわちイオン輸送効率  $\eta_T$  を高める必要がある。このイオン輸送効率  $\eta_T$  は、

$$\eta_T = \frac{I_W}{I_E} = \frac{I_E - I_G - I_B - I_R}{I_E} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、

- ①  $I_E$  : エミッタを流れる電流,
- ②  $I_W$  : 作業領域に到達するイオンに基づく電流,
- ③  $I_G$  : グランドリングに吸収されるイオンに基づく電流,
- ④  $I_B$  : エミッタに吸収されるイオンに基づく電流,
- ⑤  $I_R$  : 再結合により消滅するイオンに基づく電流

である。イオン輸送効率  $\eta_T$  を高めるためには、生成後に消滅する電流成分  $I_G$ ,  $I_B$ ,  $I_R$  を抑制する必要がある。

実装工程のように、イオナイザを製品近傍に設置して使用する場合、グランドリングを除去しても除電に十分なイオンが生成できることが報告されている<sup>[5]</sup>。そこで、電流  $I_G$  を無くすために、グランドリングを除去することにした。また、エミッタ電圧の周波数を高くするに従って電流  $I_W$  は低下することが報告されている<sup>[6~8]</sup>。したがって、効率  $\eta_T$  を向上させるためには、イオナイザを低周波で動作させればよいことになる。しかし、イオナイザを低周波数で動作させた場合、エミッタ電流  $I_W$  が大きくなり、イオン生成量が増加していることも考えられる。このような状況では、微粒子の生成量も増加するため、本質的な対策にはならない。イオン生成量を増加させることなく、電流  $I_W$  を大きくするためには、イオン輸送効率  $\eta_T$  の周波数依存性を検討する必要がある。そこで、エミッタ電流  $I_E$  と作業領域に到達する電流  $I_W$  を測定し、イオン輸送効率  $\eta_T$  の周波数依存性について検討することにした。

本研究では、まず、単位時間当たりのイオンの生成量としてエミッタ電流  $I_E$ 、単位時間当たりに作業領域に到達するイオン量として到達電流  $I_W$  を測定し、これらの比からイオン輸送効率  $\eta_T$  を求めることにした。実際には、これらの電流  $I_E$ 、 $I_W$  の周波数依存性を測定し、イオン輸送効率  $\eta_T$  の周波数依存性を求めた。

## 2. エミッタ電流の周波数依存性

### 2.1. エミッタ電流の測定方法

図1に示した実験装置を用いて、エミッタ電流  $I_E$  に及ぼす周波数  $f$  の効果を調べた。本実験で用いたエミッタの寸法は、長さ 20mm、直径 2.0 mm、先端の曲率半径 0.1 mm である。エミッタ電流  $I_E$  の測定器として、エミッタ電流測定用センサを用いた<sup>[9~10]</sup>。イオナイザのエミッタへの印加電圧  $V_{E+}$  は矩形波とし、正の印加電圧  $V_{E+}$  は 7 kV とした。一方、負の印加電圧  $V_{E-}$  はヒューグルエレクトロニクス社製のチャージドプレートモニタ Model 700A (CPM) を使用して決定した。CPM をエミッタ直下に設置し、この最終到達電位が 0 V になるように調整して決定した。印加電圧の周波数  $f$  は 1 Hz ~ 20 Hz とした。なお、エミッタから被除電物までの距離  $D_{EP}$  は 300 mm 一定とし、エミッタ直下から CPM のプレート中心までの距離  $r_P$  は 0~500 mm の範囲で変化させた。作業領域の送風速度  $U_F$  は 0.3 m/s 一定とした。

このような方法でエミッタ電流を測定すると、測定結果はイオン電流  $I_{E+}$  と変位電流  $I_{ED}$  の和となる。そこで、エミッタの先端の曲率半径が 1.0 mm のエミッタを使用し、イオンが生成されない状態での電流、すなわち変位電流  $I_{ED}$  を測定し、全電流から変位電流  $I_{ED}$  を差し引いた値をエミッタ電流  $I_E$  とした。

図2は、エミッタ電流  $I_E$  と時間  $t$  との関係性を測定した一例である。エミッタ電流  $I_E$  の波形から、一周周期あたりに生成される正イオンと負イオンに基づく電気量  $Q_{E0}$  は、それぞれのイオンに基づく電気量  $Q_{E+}$ 、 $Q_{E-}$  の和であるから、

$$Q_{E0} = |Q_{E+}| + |Q_{E-}| = \int_0^{T/2} |I_E| dt + \int_{T/2}^T |I_E| dt \quad (2)$$

となり、単位時間あたりに生成される正イオンと負イオンに基づく電気量、すなわちエミッタ電流  $I_E$  は、

$$I_E = Q_{E0}/T \quad (3)$$

となる。したがって、本研究では式 (2)、(3) を用いてエミッタ電流  $I_E$  を算出した。

### 2.2. エミッタ電流の測定結果と考察

前述の方法で測定したエミッタ電流  $I_E$  の周波数依存性を図3に示す。この結果から、エミッタ電流  $I_E$  は、周

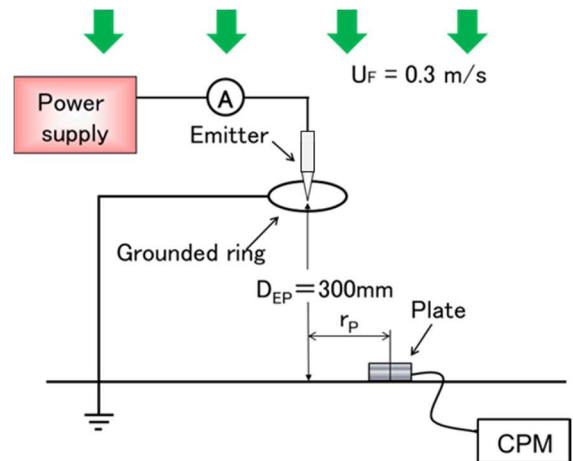


図1 イオナイザが生成したイオンによる電流の電流密度の測定方法

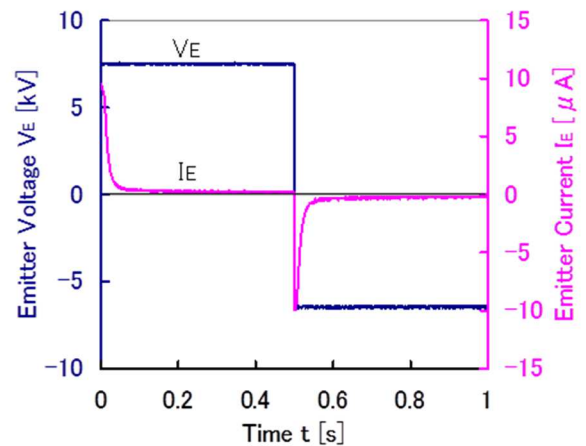


図2 イオナイザのエミッタ電圧波形およびエミッタ電流波形

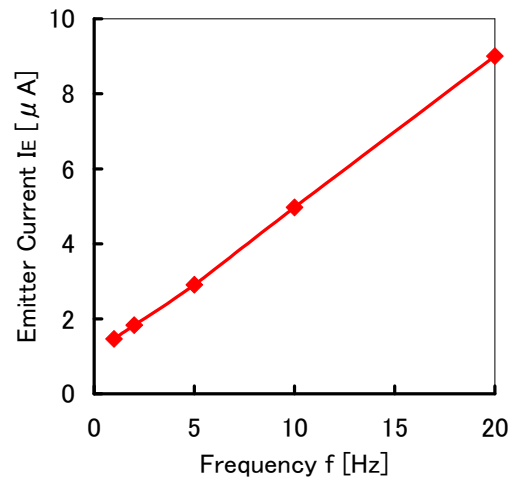


図3 エミッタ電流の周波数依存性

波数  $f$  が高くなるに従って大きくなることわかる。

このようにエミッタ電流  $I_E$  が周波数  $f$  に依存する理由は、次のように考えられる。エミッタへの印加電圧  $V_E$  の極性が反転する瞬間は、エミッタ電流  $I_E$  が著しく増加している。したがって、周波数  $f$  が高くなるに従って、前述の極性が反転する回数が増加するため、式 (2)、(3) を使って算出したエミッタ電流  $I_E$  の値は大きくなったと考えられる。

### 3. 到達電流の周波数依存性

#### 3.1. 到達電流の測定方法

到達電流  $I_W$  に及ぼす周波数  $f$  の効果は、図.1 に示した実験装置を用いて調べた。動作条件は、「2.1 エミッタ電流の測定方法」で述べた通りである。

エミッタの下方に、接地した金属製の網状の作業台を設けた。この作業台上にチャージドプレートモニタ (CPM) のプレートをセットしてプレートが除電されるようすを測定した。なお、測定位置の位置は、エミッタ直下から水平方向の距離  $r_P$  が 0 mm ~ 500 mm の範囲とした。また、本実験で使用した CPM のプレートの静電容量  $C_P$  は 20 pF である。

実際の測定では、まず CPM のプレートを -1100 V で充電し、イオナイザによってプレートが除電される際のプレート電位  $V_{P-}$  と時間  $t$  との関係性を求めた。次に、プレートを +1100 V で充電し、同様にプレート電位  $V_{P+}$  と時間  $t$  との関係性を求めた。

このようにして測定したプレート電位  $V_P$  と時間  $t$  との関係の一例を図 4 に示す。この図における曲線の接線の傾き ( $\partial V_P / \partial t$ )、すなわち除電速度は、

$$\frac{\partial V_{P\mp}}{\partial t} = \frac{\partial(Q_{P\mp}/C_P)}{\partial t} = \frac{1}{C_P} \times \frac{\partial Q_{P\mp}}{\partial t} = \frac{1}{C_P} \times I_{W\pm} \quad (4)$$

となる。ここで、 $Q_P$  はプレートに蓄えられた電気量である。また、式 (4) の ( $\partial Q_P / \partial t$ ) は単位時間あたりにプレートに流入する電気量であるから、プレートに流入する電流、すなわち到達電流  $I_W$  を意味することになる。したがって、到達電流  $I_W$  は、式 (4) から、

$$I_{W\pm} = \frac{\partial V_{P\mp}}{\partial t} \times C_P \quad (5)$$

となる。この到達電流  $I_N$  は、プレート電位  $V_P$  の変化に伴って変化するので、本研究では、プレート電位が 1000 V のときの接線の傾き ( $\partial V_P / \partial t$ ) を到達電流  $I_W$  とした。プレートを -1100 V で充電した場合、プレートを除電するために吸引されるイオンは正イオンとなる。この正イオンの移動に基づく到達電流  $I_W$  を正の到達電

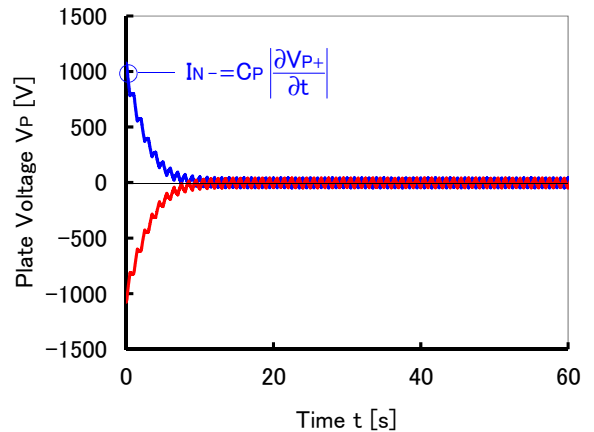


図 4 CPM のプレート電位の減衰特性

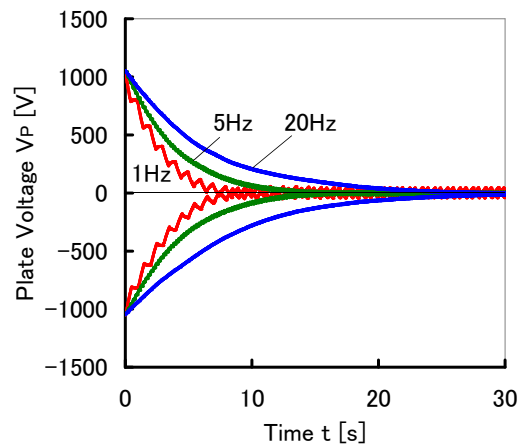


図 5 CPM のプレート電位の減衰特性 ( $r_P = 0$  mm)

流  $I_{W+}$  と呼ぶことにした。一方、プレートを +1100 V で充電した場合、プレートに吸引されるイオンは負イオンとなるので、この電流を負の到達電流  $I_{W-}$  と呼ぶことにした。

これらの到達電流  $I_{W+}$ ,  $I_{W-}$  および CPM のプレートの面積  $S_P$  から到達電流密度  $J_{W+}$ ,  $J_{W-}$  を算出した。また、到達電流密度  $J_{W+}$ ,  $J_{W-}$  の絶対値の代数平均から平均到達電流密度  $J_{WM}$  を求めた。到達電流  $I_{W+}$ ,  $I_{W-}$  は、到達電流密度  $J_{W+}$ ,  $J_{W-}$  の分布の積分値、すなわち、

$$I_{W\pm} = \int J_{W\pm} ds \quad (6)$$

から算出した。また、平均到達電流  $I_{WM}$  は到達電流  $I_{W+}$ ,  $I_{W-}$  の絶対値の代数平均から求めた。

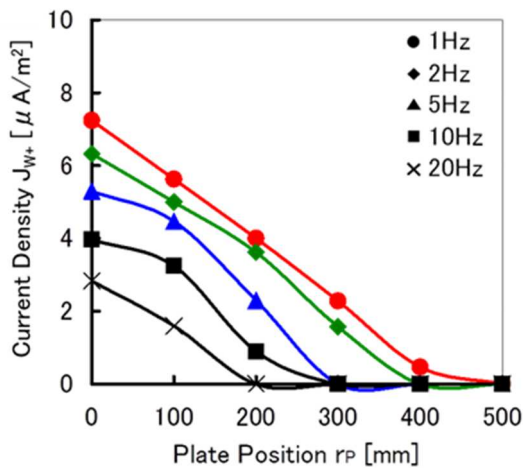


図6 正イオンによるイオン電流密度と測定位置との関係

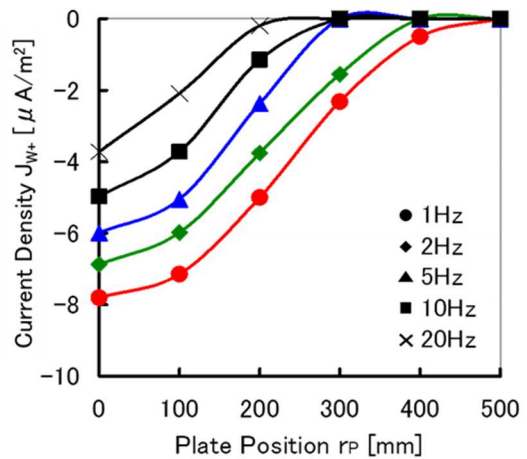


図7 負イオンによるイオン電流密度と測定位置との関係

3.2. 到達電流の測定結果と考察

図5は、周波数  $f$  が 1, 5, 20 Hz の場合のプレート電位  $V_p$  と時間  $t$  との関係を示した結果である。なお、測定位置は、距離  $r_p$  が 0 mm の場合である。この図において、プレート電位  $V_p$  の減衰の傾き、すなわち到達電流  $I_w$  は、周波数  $f$  が高くなるに従って小さくなっていく。

図6～8は、イオナイザ直下からの水平方向の距離  $r_p$  と到達電流密度との関係を示した結果である。図6は正の到達電流密度  $J_{w+}$ 、図7は負の到達電流密度  $J_{w-}$ 、図8は平均電流密度  $J_{wm}$  の分布である。これらの結果において、到達電流密度の絶対値は、正イオン、負イオン、平均値の種類に関係なく、イオナイザ直下で最大値を示し、距離  $r_p$  が大きくなるに従って低くなっている。また、到達電流密度の広がり幅は、周波数  $f$  が高くなるに従って狭くなっている。さらに、これらの到達電流密度の絶対値は、周波数  $f$  が高くなるに従って低くなっている。

図9に到達電流  $I_w$  の周波数依存性を示す。この結果から、到達電流  $I_w$  は、周波数  $f$  が高くなるに従って小さくなるということが明らかになった。

このように到達電流  $I_w$  が周波数  $f$  に依存する理由は、次のように考えられる。イオナイザのエミッタに交流電圧  $V_E$  を印加した場合、エミッタ周辺の空間は、半周期毎に正または負の単極性イオンが分布した領域（単極領域）となる。また、この単極領域の外側は、正イオンと負イオンが混合状態となった領域（混合領域）となる。周波数  $f$  が低い場合、半周期の時間が長くなるため、図10(a)に示すように、単極領域は大きくなる。一方、周波数  $f$  が高い場合には、Fig.10(b)に示すように、単極領域は小さくなる。この結果、周波数  $f$  が高くなるに従って、到達電流密度の水平方向への広がり幅は、狭くなったと考えられる。また、水平方向と同様に

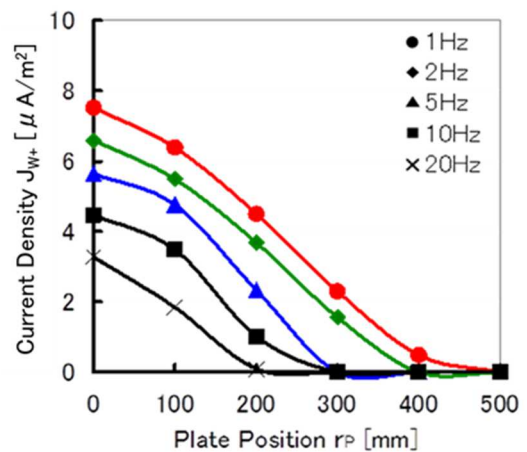


図8 正負イオンの平均イオン電流密度と測定位置との関係

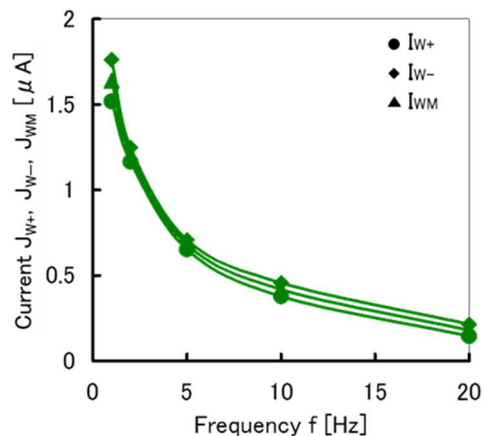


図9 作業領域中央部における除電電流密度の周波数依存性

垂直方向の単極領域の大きさも、周波数  $f$  が高くなるに従って小さくなる。すなわち、周波数  $f$  が高くなるに従って、混合領域は大きくなる。この混合領域では正と負のイオンは再結合しながら輸送されるので、この領域が大きくなると再結合で消滅するイオンが増加する。この結果、周波数  $f$  が高くなるに従って、到達電流  $I_w$  は小さくなったと考えられる。

図 10 の単極領域でも再結合が発生することがある。極性が反転する瞬間は、この領域は混合領域となる。したがって、この領域でも再結合によって消滅するイオンが発生する。この領域が混合領域になる頻度は、周波数  $f$  に比例する。したがって、単極領域における再結合で消滅するイオンの量は、周波数  $f$  が高くなるに従って多くなると考えられる。

以上のように、イオナイザを低周波で動作させることによって、到達電流  $I_w$  を増加させること、すなわち高速除電が可能となることが明らかになった。しかし、イオナイザを低周波で使用すると、イオナイザが帯電器として作用することも懸念される。イオナイザは正イオンと負イオンを交互に生成しているが、低周波で使用した場合、イオナイザ周辺の空間が正または負のどちらか一方のイオンで支配的になることがある。そこで、このイオンに基づく CPM のプレートの帯電電位を測定した。

この帯電電位は、「3.1. 到達電流の測定方法」で述べた方法で測定した。すなわち、CPM の電位が 0 V 付近に到達した時点でのプレート電位のゆらぎの振幅を測定した。この結果を図 11 に示す。この図において、1 Hz での振幅が最大であり、80 V 程度である。この結果から、帯電に基づくプレート電位は  $\pm 40$  V 程度であることがわかる。イオナイザを電子製品の検査工程で使用する場合には、この帯電が製品の誤動作の原因になることが考えられる。しかし、イオナイザが静電吸引の対策に使用される場合には、問題にならない値である。イオナイザの用途によって検討すべき問題であるが、実用上、大きな問題にはならないと考える。

#### 4. イオン輸送効率の周波数依存性

##### 4.1. イオン輸送効率の算出方法

エミッタ電流  $I_E$  は、式 (2), (3) で示したように、正イオンに基づく電流  $I_{E+}$  と負イオンに基づく電流  $I_{E-}$  との和である。一方、到達電流  $I_w$  は、CPM で測定しているため、プレートが正に帯電しているときは負イオンに基づく電流  $I_{w-}$  を測定し、プレートが負に帯電しているときは正イオンに基づく電流  $I_{w+}$  を測定していることになる。すなわち、イオン輸送効率  $\eta_{T+}$ ,  $\eta_{T-}$  は、

$$\eta_{T+} = \frac{|I_{w-}|}{|I_{E+}| + |I_{E-}|} \quad (7)$$

$$\eta_{T-} = \frac{|I_{w+}|}{|I_{E+}| + |I_{E-}|} \quad (8)$$

となる。ここでエミッタ電流  $I_E$  は、正イオンに基づく電流  $I_{E+}$  と負イオンに基づく電流  $I_{E-}$  との和である。

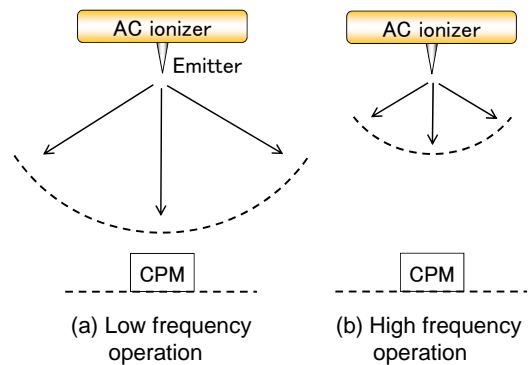


図 10 イオナイザを低周波で動作させた場合と高周波で動作させた場合のイオン分布モデル

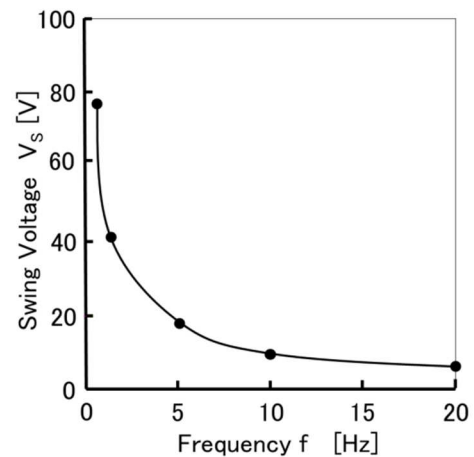


図 11 CPM のスイング電圧とイオナイザの動作周波数との関係

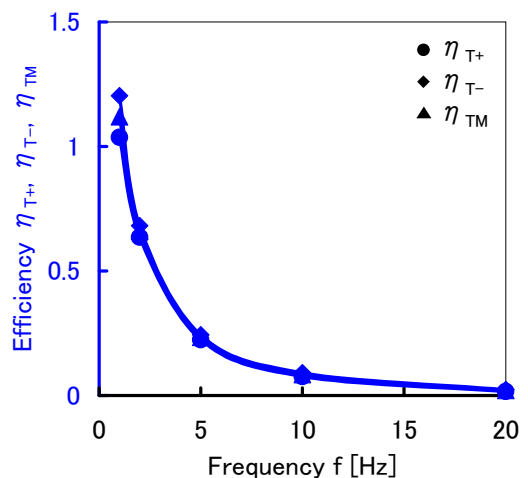


図 12 イオンの輸送効率とイオナイザの動作周波数との関係

一方、到達電流  $I_W$  は、正イオンに基づく電流  $I_{W+}$  または負イオンに基づく電流  $I_{W-}$  の値を使って、イオン輸送効率  $\eta_T$  を算出していることになる。本研究では、微粒子の発生を低減するための最適動作条件を検討するために、イオン輸送効率  $\eta_T$  を利用している。したがって、微粒子は、正のエミッタ電流  $I_{E+}$  が流れている半周期と、負のエミッタ電流  $I_{E-}$  が流れている半周期の両方で発生している。すなわち、微粒子を発生させるための実効的な電流は、正のエミッタ電流  $I_{E+}$  と負のエミッタ電流  $I_{E-}$  との和になる。一方、単位時間当たりに製品に到達するイオンに基づく電流量、すなわち、正の到達電流  $I_{W+}$  または負の到達電流  $I_{W-}$  のどちらか一方が製品に吸収されることになる。したがって、生成イオン量は正イオンと負イオンの和、到達イオン量は正イオンまたは負イオンのどちらか一方を使うことが妥当と考えられる。そこで本研究では、イオン輸送効率  $\eta_{T+}$ 、 $\eta_{T-}$  を式 (7)、(8) から算出することにした。また、平均イオン輸送効率  $\eta_{TM}$  はイオン輸送効率  $\eta_{T+}$ 、 $\eta_{T-}$  の代数平均から求めた。

#### 4.2. イオン輸送効率の算出結果と考察

図 12 にイオン輸送効率  $\eta_T$  の周波数依存性を示す。この結果から、イオン輸送効率  $\eta_T$  は、周波数  $f$  が高くなるに従って小さくなることが明らかになった。

本研究では、イオン輸送効率  $\eta_{T+}$ 、 $\eta_{T-}$  を式 (7)、(8) のように定義している。したがって、イオン輸送効率  $\eta_T$  は 0.5 以下の値となるはずである。しかし、Fig. 12 において、周波数  $f$  が 1 Hz のとき、イオン輸送効率  $\eta_T$  が 1.0 以上の値を示している。この理由について考察する。本研究では、イオナイザを運転した状態で放置し、CPM のプレートに電圧を印加して、プレートが除電されるようすから正の到達電流  $I_{W+}$  または負の到達電流  $I_{W-}$  を測定した。このとき、エミッタとプレートの間の空間には、測定開始前に生成されたイオンが空間電荷として分布している。これらのイオンは、プレートに電圧が印加された際、プレートの除電に貢献する。すなわち、プレートを除電するイオンは、

- ① エミッタで発生したイオン、
- ② 空間に分布していたイオン

に分類できる。到達電流  $I_W$  には、これらの両者が関与するが、エミッタ電流  $I_E$  には「① エミッタで発生したイオン」だけが関与する。この結果、到達電流  $I_W$  がエミッタ電流  $I_E$  より大きくなることが発生したと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、AC コロナ放電型イオナイザの動作条件であるエミッタへの印加電圧の周波数とイオン輸送効率との関係を検討した。この結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) イオナイザの動作周波数を高くするに従って、エミッタ電流は大きくなる。
- (2) イオナイザの動作周波数を高くするに従って、到達電流は小さくなる。
- (3) イオナイザの動作周波数を高くするに従って、イオン輸送効率は低くなる。

### 参考文献

- [1] 原田亨, 杉崎吉昭, 田窪知章: 東芝レビュー, Vol.59, No.8, pp.26-30 (2004).
- [2] 静電気学会: 静電気ハンドブック, pp.202-221 オーム社 (1998).
- [3] 村田雄司: 静電気除電の装置と技術, pp.15-24, シーエムシー出版 (2009).
- [4] 岩本菜夏, 望月亮吾, 岡野一雄: 第 59 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 09-17 (2012).
- [5] サシカクレ, 安藤祐樹, 岡野一雄: 第 59 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 09-18 (2012).
- [6] A. Ohsawa, J. Electrostatics, Vol.65, No.9, pp598-606 (2007)
- [7] 望月亮吾, 岩本菜夏, 岡野一雄: 職業能力開発総合大学校紀要, 第 41 号 A, pp39-43 (2012).
- [8] 吉水健剛, 池畑隆, 岩本菜夏, 岡野一雄: 静電気学会誌, Vol.36, No.5, pp.297-302 (2012).
- [9] S. Yoshioka, T. Ikehata, T. Terashige, Y. Hirata, K. Okano: IEEE Transaction on Sensors Micromachines, Vol.135, No.1, pp.7-12 (2015).
- [10] プッタソンニョイノッド, 吉岡大貴, 岡野一雄: 第 59 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 09-19 (2012).

(原稿受付 2017/01/10, 受理 2017/03/31)

\*鈴木 誠也

株式会社ヒップ, 電子設計部, 〒220-0003 神奈川県横浜市西区楠町 8-8 email:1993windfish@gmail.com  
Seiya Suzuki, A corporation Hip, 8-8Kusunoki-Machi, Nishi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

\*吉水 健剛, 博士 (工学)

職業能力開発総合大学校, 能力開発院, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email:yosimizu@uitech.ac.jp  
Kengo Yoshimizu, Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035.