

博士学位論文

AC コロナ放電型イオナイザの
最適周波数決定法に関する研究

平成 25 年 9 月

茨城大学大学院理工学研究科
応用粒子線科学 専攻

吉水 健剛

The Method of Determining the Optimum Frequency of AC Corona Discharge Air Ionizer

Kengo Yoshimizu

Abstract

In the manufacturing process of electronic device, decreases of manufacturing yield due to electrostatic charges have become a major problem. As a precautionary measure against electrostatic interference, AC corona discharge air ionizers are widely used in assembly process. AC corona discharge air ionizer is device which generates charged particles by applying a high voltage to a needle shape electrode that called emitter. The charged particles generated by the air ionizer would be absorbed by the charged printed circuit boards (PCB) which are typical products in assembly process. It means the neutralization of electrostatic charges could be obtained by using the air ionizer.

The performance of air ionizers depend on operating conditions. If the operating conditions are inappropriate, it may cause not only poor neutralizing performance, but also the static charging. Static charging is storing charges on the charged PCB. Therefore, the relationship between the operating conditions and the performance of the air ionizer should be investigated to operate the ionizer in the maximum performance.

The operating conditions of the air ionizer are classified into three groups. Those are the applied voltage of emitter, the frequency of the applied voltage, and the distance between the emitter and the charged PCB. The performance of the air ionizer is classified into two groups. Those are the neutralizing power and the fluctuation voltage. The neutralizing power could be defined as neutralizing speed. The

fluctuation voltage is defined as the voltage which is generated by the charged particle accumulated on the charged PCB.

The purpose of this study is to find out the optimum frequency of the air ionizer used in assembly process. The optimum frequency is defined as the frequency which has the highest neutralizing speed and the lowest fluctuation voltage based on the charged particles generated by the ionizer. To find out the optimum frequency of the air ionizer, the performance of the air ionizer in different frequencies were investigated. The experiment set up consists of a modeled clean room, ion generation unit, and the charged plate monitor (CPM). CPM is the equipment which measures the performance of the air ionizer.

Even though the neutralizing power would be increased by decreasing the frequency, it also may increase the fluctuation voltage in the same time. It means in the low frequencies, the charged PCB might be charged by the air ionizer.

There are two kinds of current in working area. One is the displacement current and the other is the conduction current. The conduction current is one of the causes of the charging problem. Therefore, the conduction current pass through the working area should be rejected to decrease the charging effect on the charged PCB.

To avoid conduction current passing through the working area, both the displacement current and the conduction current must be measured. Because the CPM could not measure the displacement current and conduction current separately, the high sensitivity current sensor was made.

The conduction current could be measured by using the high sensitivity current sensor. The air ionizer adjusted not to appear the conduction current component to reject the charging effect.

According to the experiment result, the methodology of finding out the optimum operating condition of AC corona air ionizer is follows:

- (1) finding out the transport time of ion from emitter to the charged PCB (t_t).
- (2) finding out the period of the applied voltage of the emitter (T).
- (3) finding out whether $T/2 < t_t$.

The optimum frequency (f_0) could be given as follows;

$$f_0 = 1/2t_t.$$

This report could be summarized as follows:

- (1) In low frequencies, the neutralizing power would be stronger however the fluctuation voltage would also be high.
- (2) The high sensitivity current sensor could measure the displacement current and the conduction current separately.
- (3) The methodology to find out the optimum frequency of the air ionizer could be established.

AC コロナ放電型イオナイザの最適周波数決定法に関する研究

吉水健剛

概要

電子デバイス実装工程において、静電気に基づくデバイスの破壊や誤動作等の静電気障害が発生し、製造歩留の低下が問題になっている。この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。コロナ放電型イオナイザとは、エミッタと呼ばれる針状の電極に高電圧を印加し、エミッタ先端付近の雰囲気中に荷電粒子を生成する装置である。この荷電粒子を被除電物へ輸送し吸収させ、被除電物を電氣的に中和することで除電が可能となる。一般にイオナイザの性能は動作条件に大きく依存する。したがって、イオナイザの性能を最大限に引き出すためには、動作条件を最適化することが重要となる。動作条件が不適当な場合、製品は完全に除電されないだけでなく、帯電することさえある。現在、イオナイザの最適動作条件の決定方法はまだ確立されていない。ここで、イオナイザの動作条件としては、①エミッタへの印加電圧、②動作周波数、③エミッタから被除電物までの距離等がある。一方、イオナイザの性能には、①除電能力、すなわちイオナイザが被除電物を除電する能力、②電圧振幅、すなわちイオナイザの動作に基づく被除電物の電圧の振幅等がある。本研究では、電子デバイスの実装工程において、搬送中の製品の除電を扱う。イオナイザの動作条件としては動作周波数を選び、性能としては除電能力と電圧振幅を選び、動作周波数がイオナイザの性能に及ぼす効果を検討した。また、この検討結果からイオナイザの最適周波数の決定方法を確立した。

イオナイザの性能と周波数との関係を検討するために、送風用ファンとイオナイザから成る実験装置を製作し、このイオナイザの除電能力をチャージプレートモニタで測定した。この結果、周波数が低くなるに従って除電能力が高くなることがわかった。また、周波数が低くなるに従って電圧振幅が大きくなることがわかった。そこでイオナイザの実用上の最適周波数の決定を考慮して、除電能力と電圧振幅についてさらに詳しく検討をすることにした。

イオナイザの実用的な除電能力と周波数との関係を検討した。搬送中の被除電物を除電する場合、被除電物はイオナイザの周辺に分布した荷電粒子によって除電される。そ

ここで、全ての除電領域における除電電流密度の分布を測定し、除電領域全体の除電電流、すなわち全除電電流を除電能力として検討を進めた。この結果、周波数が低くなるに従って実用上の除電能力が高くなることが明らかになった。

電圧振幅についても実用的な検討を行った。電圧振幅には変位電流に基づく電圧振幅と伝導電流に基づく電圧振幅とがある。このうち伝導電流に基づく電圧振幅は、被除電物を帯電させる原因となる。したがって実用上は、この伝導電流に基づく電圧振幅の周波数依存性を検討すればよいことになる。しかしながら、チャージプレートモニタでは、この二種類の電流を分離して測定することができない。そこで、高感度の簡易帯電センサを提案し、設計、製作、評価を行った。その結果、このセンサは変位電流と伝導電流とを分離して測定可能であることが明らかになった。ここで、この簡易帯電センサで帯電特性を測定できることが明らかになった。

本研究における最適周波数を「除電能力が最も高く、荷電粒子が被除電物を帯電させない周波数」と定義した。除電能力と電圧振幅の実用的な検討結果から、最適周波数の決定方法を検討した。除電能力を高めるためには動作周波数 f は低くする必要がある。一方、被除電物を帯電させないためには、イオナイザが生成した荷電粒子が被除電物に到達する前に、エミッタへの印加電圧の極性を反転させる必要がある。このためには、エミッタへの印加電圧の周期を T 、荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間を t_t とすると、 $T/2 < t_t$ を満足することが帯電させない条件となる。したがって、被除電物を帯電させずに、除電能力を最大にするための最適周波数 f_0 は、 $f_0 = 1/2t_t$ となることが明らかになった。

以上のように、本研究ではイオナイザの性能に及ぼす動作周波数の効果について検討し、最適周波数の決定方法を確立した。本研究の成果は以下のようにまとめられる。

- (1) 周波数が低くなるに従って、除電能力は高くなり、電圧振幅は大きくなる。
- (2) 荷電粒子による帯電を測定するための簡易帯電センサを開発した。
- (3) 簡易帯電センサを使用して、被除電物を帯電させない周波数範囲を明らかにし、この範囲内の最低周波数が最適周波数となる。

目 次

第 1 章 序論	
1.1 本研究の背景	1
1.2 電子デバイス製造工程における静電気対策	2
1.3 イオナイザの動作条件と性能の関係	4
1.4 本研究の目的	7
1.5 本論文の構成	8
第 2 章 イオナイザの性能の周波数依存性	
2.1 はじめに	14
2.2 実験装置の設計・製作	14
2.3 周波数と除電電流密度との関係	16
2.4 周波数と電圧振幅との関係	20
2.5 周波数とイオナイザの性能との関係	22
2.6 まとめ	23
第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響	
3.1 はじめに	36
3.2 除電能力の測定方法	36
3.3 除電能力の測定結果	38
3.4 周波数と除電能力との関係	40
3.5 まとめ	42
第 4 章 簡易帯電センサの設計・製作・評価	
4.1 はじめに	52
4.2 簡易帯電センサの設計・製作	53
4.3 絶縁体シートの帯電特性	59
4.4 まとめ	63
第 5 章 最適周波数の決定	
5.1 はじめに	77
5.2 最適周波数の定義と決定方法	77
5.3 最適周波数と動作条件との関係	79
5.4 まとめ	83
第 6 章 結論	92
参考文献	95
本研究に関する発表論文一覧	97
謝辞	98

第 1 章

序論

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

現在、高度情報通信社会が到来し、ユビキタス社会が訪れようとしている。ユビキタスとは、ラテン語を語源とし、いたるところに存在するという意味である。すなわち、ユビキタス社会とは、インターネットなどの情報ネットワークに、いつでも、どこからでもアクセスできる社会環境を指している¹⁾。ユビキタスが普及すると、場所にとらわれない働き方や娯楽が実現出来るようになる。アクセスに使う端末は、パソコンや携帯電話に限らず、冷蔵庫や電子レンジといった家電製品、自動車、自動販売機等もインターネット接続され、膨大な情報が高速にやり取りされることになる。このような高度情報通信社会において、これらの膨大な情報を高速に処理できる電子デバイスが強く求められている。この要求を満たすためには、電子デバイスの大容量化、高速化、低消費電力化が要求される。大容量化を実現するためには、単位面積当たりのデバイスの数、すなわち集積度を上げることが必要となり、デバイスの製造プロセスにおける微細化が重要となる。高速化を実現するためには、デバイスの配線長を短くすること、寄生容量を減少させること等が必要となり、これらを実現するためにもデバイスの微細化が重要となる。また、低消費電力化を実現するためにもデバイスの微細化が重要となる。このように、デバイスの大容量化、高速化、低消費電力化を実現するために微細化がますます進むと考えられる^{2)~5)}。

電子デバイスの微細化に伴い、電子デバイス製造工程において、デバイスに静電気が発生することによる歩留が低下する現象、すなわち静電気障害がより深刻な問題となる^{6)~8)}。この問題は、静電気によりデバイスに欠陥が発生し歩留が低下する問題と、静電気によりデバイスが誤動作することで歩留が低下する問題の 2 種類に大別できる。

1.1.1 電子デバイスの不良による歩留低下

電子デバイスの欠陥による歩留の低下は、デバイスに発生した静電気による静電気放電(ESD)や静電吸引(ESA)によって起こる。ESD による歩留の低下

は、デバイスに発生した静電気が放電することにより、デバイス内部の非常に狭い領域の一部が絶縁破壊することに起因する。また、ESA による歩留の低下は、LSI 等の半導体デバイス製造工程において、ウェーハに発生した静電気が、雰囲気中の塵埃を吸引することに起因する。このような ESA が発生するとウェーハの拡散工程において、ウェーハに付着した不純物が半導体内に拡散し、その特性を変化させることがある。この問題は、電子デバイス製造の前工程において発生し易い⁹⁾。これらの静電気障害に基づく歩留の低下は、電子デバイスの微細化が進むに従って、深刻化すると考えられる。

1.1.2 電子デバイスの誤動作による歩留低下

電子デバイスの誤動作による歩留の低下は、電子デバイスの検査工程において発生する¹⁰⁾。この歩留の低下は、電子デバイスに発生した静電気によって、検査工程中のデバイスが誤動作することに起因する。すなわち、誤動作によって、良品のデバイスが不良品と判断されることが原因である。電子デバイスの微細化が進み、動作電圧の低下が進んでいる近年、この種の静電気障害に基づく歩留の低下は、一層深刻な問題になると考えられる。

1.2 電子デバイス製造工程における静電気対策

電子デバイス製造工程における静電気対策は 2 種類に大別できる。すなわち、

- ① 帯電物を接地する方法、
- ② 雰囲気中に荷電粒子を分散する方法

である。

1.2.1 帯電物を接地する方法

帯電物を接地する方法とは、図 1-1 に示すように、帯電物と作業台を大地と電氣的に接続することで、帯電物と大地との間で電子の授受を発生させ、帯電物を除電する方法である。しかし、この除電方法では、非常に速い速度で電子の授受が行われるため、帯電した電子デバイス内に放電を誘発する原因にもなる。すなわち、この除電方法は、静電破壊による電子デバイスの歩留の低下を促進する恐れがあるため、デバイスの静電気対策には用いられな

い。この方法は、主として作業人や電子デバイス製造装置に対して実施される静電気対策である¹¹⁾。

1.2.2 荷電粒子を分散する方法

荷電粒子を分散する方法とは、図 1-2 に示すように、コロナ放電や軟 X 線等を利用して、空気分子をイオン化し、荷電粒子を生成し、その荷電粒子を帯電物に輸送、吸収させることで帯電物を除電する方法である。

この方法では、雰囲気中の荷電粒子が帯電物を除々に除電するため、帯電した電子デバイスは部分的な放電を起こすことなく除電が可能となる。したがって、除電時にデバイスが静電破壊することはない。このような方法で除電するための除電装置は、コロナ放電型イオナイザと呼ばれ、電子デバイスの静電気対策に広く用いられている^{12)~15)}。コロナ放電型イオナイザによる荷電粒子生成のメカニズムを図 1-3 に示す。コロナ放電型イオナイザは、エミッタと呼ばれる針状の電極を有しており、このエミッタに高電圧を印加することで針先端部に電界を集中させ、高電界を発生させる。この高電界によって加速された電子が雰囲気中の気体分子や原子に衝突し、雪崩状に電離を発生させる。この結果、イオナイザのエミッタ近傍には、高濃度の正負の荷電粒子が生成される。ここで、エミッタに正の高電圧が印加されている場合、正の荷電粒子はエミッタから遠ざかる方向に移動し、負の荷電粒子はエミッタから近づく方向に移動する。したがって、正の高電圧が印加されたエミッタは、正の荷電粒子を生成しているように見える。同様のメカニズムで、負の高電圧が印加されたエミッタは、負の荷電粒子を生成しているように見える。

このようなコロナ放電型イオナイザは、エミッタに印加する電圧の種類によって、DC コロナ放電型イオナイザと AC コロナ放電型イオナイザの 2 種類に大別される。

(1) DC コロナ放電型イオナイザ

DC コロナ放電型イオナイザとは、図 1-4 に示すように、空間的に離れた位置に、正の荷電粒子を発生するためのエミッタと、負の荷電粒子を発生するためのエミッタを持ったイオナイザである。したがって、空間的に異なる

位置で、常に正の荷電粒子と負の荷電粒子を同時に生成している。このため、正負の荷電粒子濃度は空間的に不均一に分布することになる。この不均一を解消するためには、正の荷電粒子発生用エミッタと負の荷電粒子発生用エミッタを近接して設置すればよいことになる。しかし、2 本のエミッタを著しく近づけると、エミッタ間に火花放電が発生し、実用上使用できなくなる。したがって、DC コロナ放電型イオナイザを使用して、正負の荷電粒子の濃度分布を空間的に均一にすることは著しく困難であると考えられている。

(2) AC コロナ放電型イオナイザ

AC コロナ放電型イオナイザとは、図 1-5 に示すように、1 本のエミッタに正負の電圧を交互に印加することにより、正の荷電粒子と負の荷電粒子を交互に生成するイオナイザである。

AC コロナ放電型イオナイザでは、それぞれのエミッタに正負の電圧が交互に印加されるため、正負の荷電粒子の空間的分布は均一となるが、時間的分布に不均一が現れることがある。しかし、この不均一はイオナイザの動作周波数等の動作条件で制御することができる。

1.3 イオナイザの動作条件と性能の関係

電子デバイス製造工程の生産性を高め、歩留を向上させるのにイオナイザが広く利用されているが、このイオナイザは荷電粒子を生成する装置である。したがって、この荷電粒子を使って帯電した製品を除電することが可能となる。しかし、その動作条件が不相当であると、製品を帯電させることにもなる。したがって、イオナイザを使用する場合には、その動作条件を最適化し、最高の性能を引き出すように調整して使用しなければならない。また、電子デバイスが完成するまでには、数百に及ぶ製造工程がある¹⁴⁾。また、それぞれの工程に対して、動作条件の最適化を検討してイオナイザを使用する必要がある。一般にイオナイザに期待される性能は、

- ① 除電速度が高いこと、
- ② 除電後の最終的な電位が 0 V に近づくこと、
- ③ 発塵源にならないこと、

- ④ ノイズ源にならないこと、
- ⑤ 製品を帯電させないこと

等がある。

「① 除電速度が高いこと」は、除電の速度に関する性能である。製品を短時間で除電することはイオナイザにとって重要な性能であり、生産性の面からこの除電速度が高いことが要求されている。図 1-6 は、帯電した金属プレートがイオナイザによって除電される様子の一例である。この図において、除電を開始するとプレートの電位は徐々に低下し、0 V 付近に到達する。除電速度とは、単位時間当たりのプレート電位の変化、すなわち $\partial V_P / \partial t$ のことをいう。この変化率が急激であれば、除電速度は高いことになる。また、プレートの電位は、

$$V_P = \frac{Q_P}{C_P} \quad (1-1)$$

と表すことができる。したがって、この除電速度を使って、除電時に被除電物に流れる電流、すなわち除電電流 I_N を、

$$I_N = C_P \frac{\partial V_P}{\partial t} = C_P \frac{\partial (Q_P / C_P)}{\partial t} = \frac{\partial Q_P}{\partial t} \quad (1-2)$$

と定義することができる。さらに、この除電電流を使って除電電流密度 J_N は、

$$J_N = \frac{I_N}{S_P} \quad (1-3)$$

と定義することができる。ここで、 Q_P はプレートに蓄えられた電荷、 C_P はプレートの静電容量、 S_P はプレートの面積である。

「② 除電後の最終的な電位が 0 V に近づくこと」は、イオナイザの除電の精度に関する性能である。イオナイザによる除電後の最終的な電位が 0 V 付近に到達することは、イオナイザにとって重要な性能である。この性能が満足されない場合には、イオナイザによって製品が完全に除電されなくなるばかりでなく、逆に製品を帯電させることにもなる。したがって、除電後の最終的な製品の電位、すなわち図 1-6 の除電後の最終的なプレート電位 V_{PF} が 0 V 付近になることが要求されている。この要求が満足されない原因として、イオナイザが生成する正の荷電粒子と負の荷電粒子の量が異なること、すなわちイオナイザのイオンバランスが崩れた状態で使用されていることが挙げられる。このようなイオンバランスの不完全性は、イオナイザのエミッタの劣化やエミッタ先端に付着した微粒子の量に依存し、この量はイオナイザが動作している際には常に変化している。このため、このイオンバランスを完全な状態に保つためには、常時、作業領域のイオンバランスを測定し、リアルタイムで補正できるような自動制御システムで対応することが一般的になっている。したがって、この項目に関しては、本研究の対象から外すことにした。

「③ 発塵源にならないこと」は、イオナイザのコンタミネーションに関する性能である。イオナイザが動作中に発塵すると、クリーンルーム内の清浄度を低下させることになる。したがって、これはイオナイザにとって重要な性能となる。特に、電子デバイスがパッケージに収納されていない工程、すなわち前工程において重要な条件となる。

「④ ノイズ源にならないこと」は、電磁障害 (EMI) に関する性能である。これは、電子デバイスの検査工程において重要な性能となる。イオナイザがノイズ源となると、このノイズ、すなわち図 1-6 の電圧振幅 V_s のうち、イオナイザが生成した荷電粒子の電束に基づく電圧振幅 $V_{s\phi}$ によってデバイスが誤動作し、良品のデバイスが不良と判断される。この結果、デバイスの歩留が低下する。したがって、イオナイザには、イオナイザ自身がノイズ源にならないことが要求される。

最後に、「⑤ 製品を帯電させないこと」について述べる。この帯電は、イ

イオナイザが生成する正負荷電粒子の分布状態が時間的、空間的に不均一になった場合に発生する。このような製品の帯電の有無は、図 1-6 における電圧振幅 V_s のうち、プレートに到着する荷電粒子に基づく電圧振幅 V_{sq} を測定することにより確認できる。

一方、イオナイザの動作条件としては、

- ① エミッタへの印加電圧、
- ② イオナイザの動作周波数、
- ③ イオナイザの使用環境の風速、
- ④ イオナイザから製品までの距離

等がある。したがって、イオナイザを使用する各工程において、イオナイザが最高性能を発揮するためには、これらの動作条件を最適化して使用する必要がある。

1.4 本研究の目的

前述のようなイオナイザの性能は動作条件に大きく依存するため、最高性能を発揮させるためには、

- ① イオナイザの動作条件と性能の関係を明確にすること、
- ② 最適動作条件を決定するための手法を確立すること

が重要となる。

本研究では、電子デバイスの実装工程で搬送中の製品の除電を前提とする。この搬送中の除電とは、図 1-7 に示すように、回路基板にデバイスを取り付ける工程の製品や半製品がベルトコンベヤ等によって輸送される工程である。この輸送中の回路基板にイオナイザが生成した荷電粒子を飛散させて回路基板上のデバイスや回路基板自身を除電する。本研究では、このような工程での除電を高効率で行うための方法論を検討する。

本研究では、イオナイザの動作条件として動作周波数を選び、イオナイザの最適動作条件を決定するための方法を検討することにした。すなわち、イオナイザの最適周波数の決定方法の確立を最終目的とした。したがって、本研究の目的は、

- ① イオナイザの動作周波数と性能との関係を明らかにすること、
- ② 最適周波数の決定方法を確立すること

である。ただし、本研究では実装工程で使用することを前提としている。したがって、前述のイオナイザの性能の内、前処理工程で重要となる「③ 発塵源にならないこと」や、検査工程で重要となる「④ ノイズ源にならないこと」等の性能は議論の対象外となる。すなわち、「① 除電速度が高いこと」および「⑤ 製品を帯電させないこと」の二項目をイオナイザの性能として扱う。

1.5 本論文の構成

本研究の目的は、電子デバイスの実装工程で使用する AC コロナ放電型イオナイザの動作周波数と性能との関係を明らかにし、イオナイザの最適周波数を決定する方法を確立することである。

本論文は、図 1-8 に示すように、第 1 章から第 6 章で構成されている。各章で取り扱う内容は、以下のように要約できる。

「第 1 章 序論」では、電子デバイス製造工程における静電気対策にとって AC コロナ放電型イオナイザが有効であることを述べた。また、このイオナイザの性能は動作条件に大きく依存するので、最適な動作条件で動作させることの重要性を述べた。さらに、本研究の目的である最適動作条件決定法の確立が期待されていることを述べた。

「第 2 章 イオナイザの性能の周波数依存性」では、イオナイザの性能と周波数との関係を検討するための実験装置を作製し、イオナイザの動作条件としての周波数と、性能としての除電電流密度および電圧振幅との関係を検討する。

「第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響」では、除電能力を 3 種類、すなわちエミッタ直下の除電電流密度、搬送領域の除電電流、除電領域の全除電電流に分類して定義し、それぞれの定義に基づいた除電能力の周波数依存性を検討する。

「第 4 章 簡易帯電センサの設計・製作・評価」では、イオナイザが生成した荷電粒子が被除電物を帯電させる可能性を評価するためのセンサを検討

する。また、イオナイザによる絶縁体シートの帯電特性を実験的に検討し、この実験結果を利用して簡易帯電センサのキャリブレーションを行い、簡易帯電センサの帯電検出性能に関する評価を行う。

「第 5 章 最適周波数の決定方法」では、「第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響」で検討した結果および「第 4 章 簡易帯電センサの設計・製作・評価」で製作した簡易帯電センサを用いてイオナイザの最適周波数決定法を確立する。また、エミッタから被除電物までの距離、エミッタへの印加電圧を変化させた場合にも、本研究で確立した最適周波数決定法を適用し、最適周波数の検討を行った。

「第 6 章 結論」では、本研究で得られた結果を総括する。

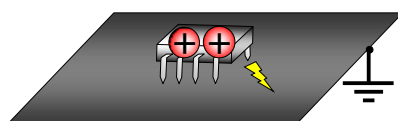


図 1-1 接地による電子デバイス実装工程における静電気対策

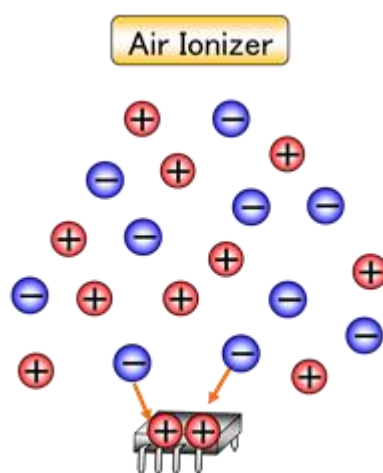


図 1-2 イオナイザによる電子デバイス実装工程の静電気対策

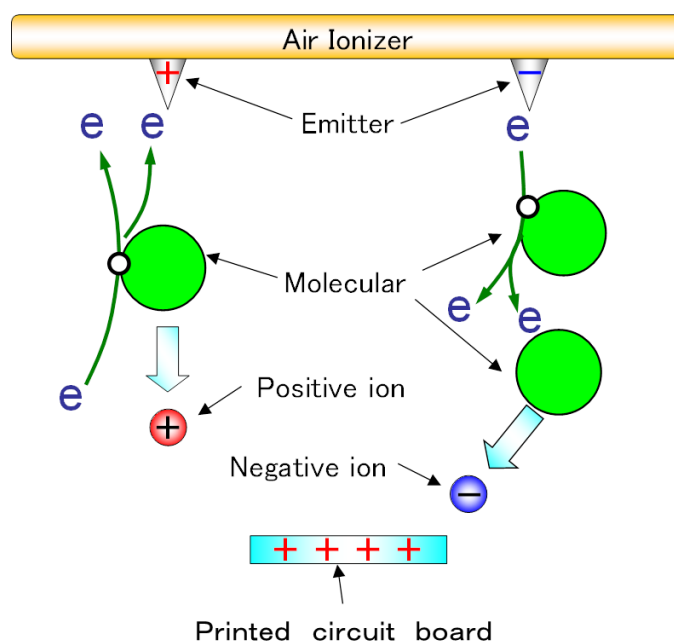


図 1-3 コロナ放電型イオナイザによる荷電粒子の生成メカニズム

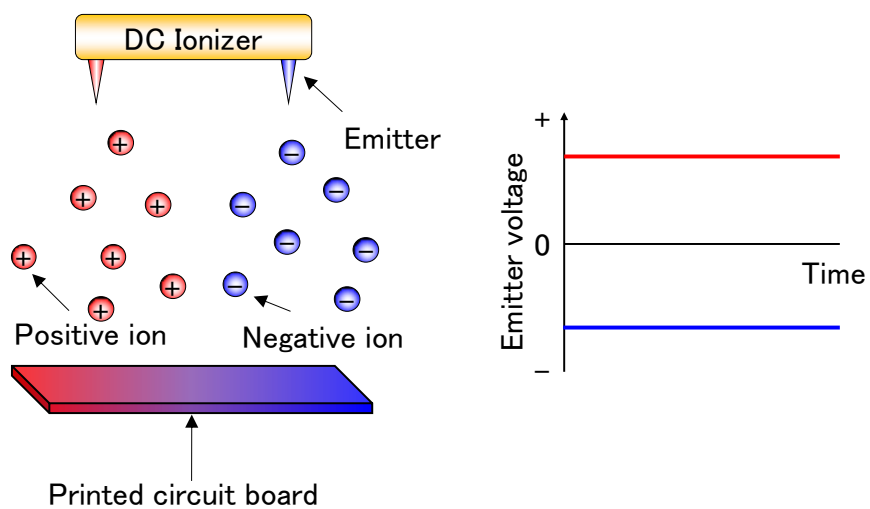


図 1-4 DC コロナ放電型イオナイザが生成した荷電粒子の分布

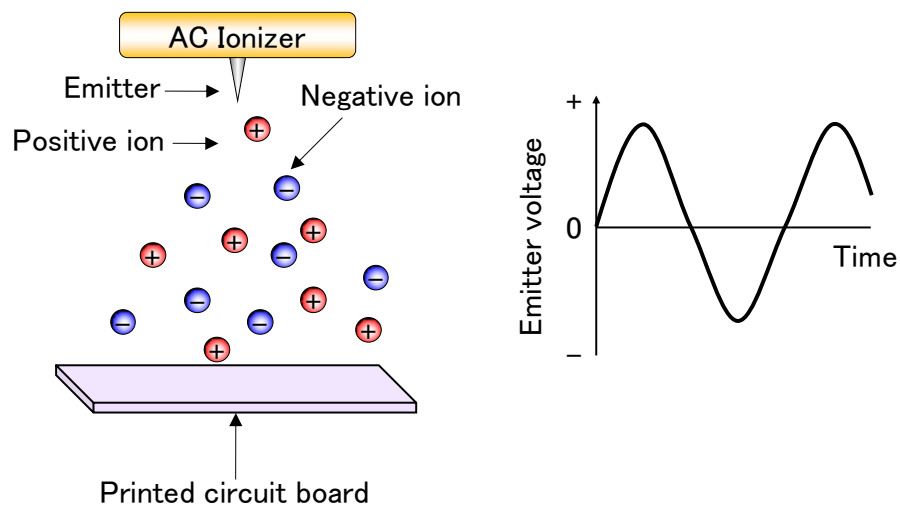


図 1-5 AC コロナ放電型イオナイザが生成した荷電粒子の分布

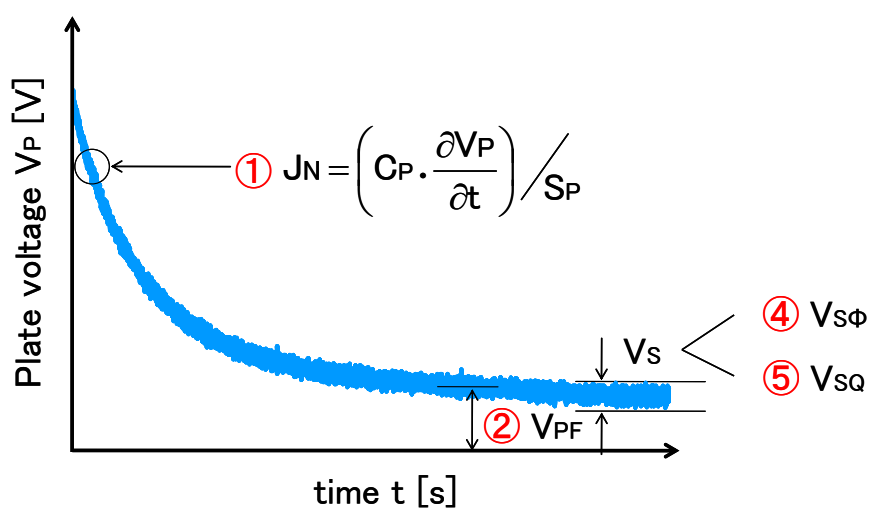


図 1-6 コロナ放電型イオナイザの性能

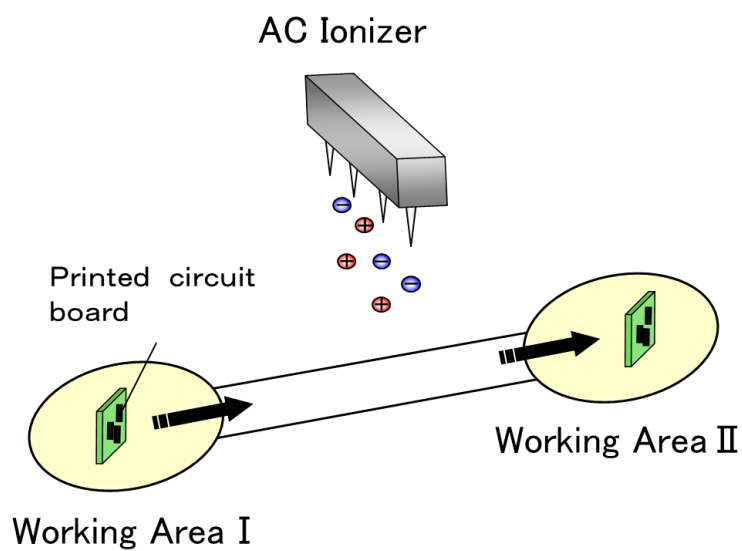


図 1-7 イオナイザによる搬送中の製品の除電方法

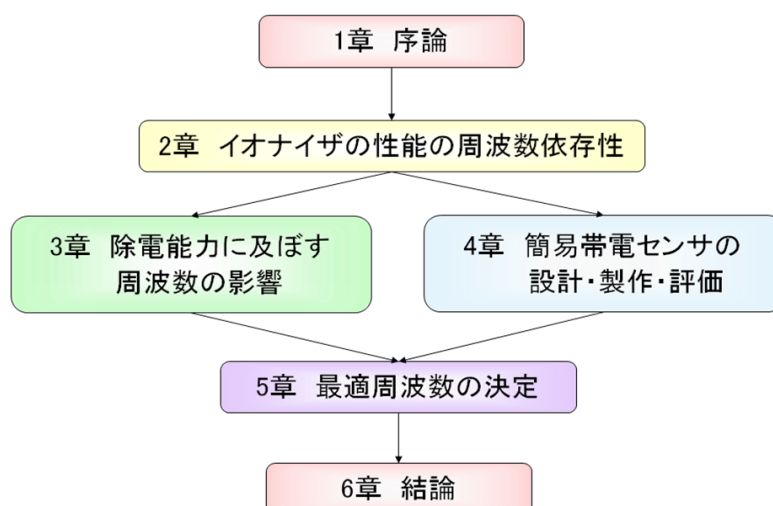


図 1-8 本論文のフローチャート

第 2 章

イオナイザの性能の 周波数依存性

第 2 章 イオナイザの性能の周波数依存性

2.1 はじめに

「第 1 章 序論」で述べたように、AC コロナ放電型イオナイザの性能を最大限に発揮するためには、最適動作条件でイオナイザを動作させる必要がある。この最適動作条件を決定するためには、まず、イオナイザの動作条件とイオナイザの性能との関係を明確にする必要がある。ただし、本研究では、この動作条件として動作周波数に限定し、最適周波数を決定する方法について検討する。そこで本章では、まず、イオナイザの性能の周波数依存性について明らかにする。なお、本研究では、電子デバイス実装工程における除電を研究の対象としたため、「第 1 章 序論」で述べたように、イオナイザの性能として「除電速度が高いこと」と「製品を帯電させないこと」を選んだ。

図 2-1 に本章のフローチャートを示す。まず、「2.2 実験装置の設計・製作」では、動作周波数とイオナイザの性能との関係を測定するための実験装置を設計・製作する。次に、「2.3 周波数と除電電流密度との関係」では、この実験装置を使用して、動作周波数と除電電流密度との関係について明らかにする。また、「2.4 周波数と電圧振幅との関係」では、動作周波数と電圧振幅との関係について明らかにする。さらに、「2.5 周波数とイオナイザの性能との関係」では、動作周波数と除電電流密度との関係、および動作周波数と電圧振幅との関係から、イオナイザの性能の周波数依存性について検討を行う。

2.2 実験装置の設計・製作

本研究で用いる実験装置は、クリーンルームをモデル化した風洞と荷電粒子生成部とで構成されている。ここでは、これらを組み合わせて、実験装置を設計・製作する方法について述べる。

2.2.1 風洞

電子デバイス実装工程における除電環境を再現するためには、クリーンル

ームのように均一な送風の中で荷電粒子を輸送する必要がある。そこで、図 2-2 に示すような風洞を設計・製作した。この風洞は、ステンレススチール製の直方体とし、この上部と下部にファンを設けた。このファンへの印加電圧を変化させることで、風速を変えることができる。また、フィルタを設けることで、風洞内の送風を均一にすることを可能にした。なお、この風洞内の風速 U_F は、風速計 (TSI 社 Model 8330) を用いて測定した。

2.2.2 荷電粒子生成部

荷電粒子生成部は、エミッタと高電圧電源から構成されている。ここでは、エミッタと高電圧電源を組み合わせて、荷電粒子生成部を設計・製作した。

(1) エミッタ

本研究で使用したエミッタを図 2-3 に示す。エミッタとして、直径が 1.6 mm のタングステン棒を研磨し、針状に加工したものを用了。また、エミッタ先端の曲率半径は、0.025 mm とした。

(2) 高電圧電源

本研究で用いた高電圧電源は、ファンクション・ジェネレータ (岩崎通信機株式会社 SG-4104) とアンプリファイア (トレック・ジャパン株式会社 MODEL 10/10B) とで構成されている。ファンクション・ジェネレータの出力電圧をアンプリファイアによって 1000 倍に増幅し、エミッタへの印加電圧 V_E とした。なお、エミッタへの印加電圧 V_E はオシロスコープ (岩崎通信機株式会社 DS-8617) でモニタできる。

(3) 荷電粒子生成部

エミッタと高電圧電源を組み合わせて、荷電粒子生成部を完成させた。エミッタは作業領域の上方に固定し、実験装置外部に設置されている高電圧電源と接続した。

2.2.3 実験装置の組み立て

前述のように設計・製作した風洞、荷電粒子生成部を組み合わせて、実験装置を組み立てた。この実験装置を図 2-4 に示す。また、エミッタ下端に、接地した網状のステンレススチールを設けた。

2.3 周波数と除電電流密度との関係

本章では、イオナイザの性能である「除電速度が高いこと」について、除電電流密度 J_N を定義して検討を行う。そこで、まず、除電電流密度 J_N の測定に使用する機器、測定におけるイオナイザの動作条件、および測定方法について述べる。次に、動作周波数 f を変化させた場合の除電電流密度 J_N の測定結果について述べる。

2.3.1 除電電流密度の測定機器

本章において、測定はチャージプレートモニタ (CPM : トレック・ジャパン株式会社 Model 158) を用いて行った。図 2-5 に CPM の構成を示す。CPM はイオナイザの性能をモニタするための機器であり、金属プレート、非接触型電位計、高電圧電源、および減衰時間測定用タイマで構成されている。金属プレートの大きさは $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ (静電容量 20 pF) であり、高電圧電源からプラス、マイナスいずれかの電荷を任意に充電できる構造となっている。

2.3.2 イオナイザの動作条件

本研究では、動作周波数 f がイオナイザの性能に及ぼす効果を明確にすることが目的の一つである。そこで、動作周波数 f を変化させて、イオナイザの性能を測定する。したがって、本章における測定の際のイオナイザの動作条件は、動作周波数 f のみを変化させ、その他の動作条件は一定値とした。本章の測定におけるイオナイザの動作条件は、下記の通りである。

(1) エミッタから被除電物までの距離

エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} を遠ざけた場合、生成された荷電粒子が被除電物まで輸送される時間 t_t が長くなる。そのため、多くの荷電粒子が輸送される間に再結合して消滅することが考えられる。この結果、被除電物に到達する荷電粒子の量が減少し、除電速度が低くなる可能性がある。一方、近づけた場合、イオナイザが生成した荷電粒子は被除電物に直接照射されることになる。この結果、イオナイザが被除電物を高電位に帯電させる可能性がある。そこで本章では、これらの可能性を考慮して、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} を 300 mm とした。

(2) 実験装置内の風速

本研究では、電子デバイスの実装工程における除電を検討している。そこで、実験装置内の風速 U_F は、クリーンルーム内の送風速度と同程度の値である 0.3 m/s とした。

(3) 動作周波数

本章における動作周波数 f は、商用電源周波数である 50Hz を基準と考え、 1Hz から 100 Hz までの範囲とした。

(4) エミッタへの印加電圧

イオナイザに荷電粒子を生成させるためには、エミッタへ 4 kV 以上の電圧を印加する必要がある。一方、エミッタへ 10 kV 以上の電圧を印加してイオナイザを長時間動作させた場合、イオナイザの内部で使用している高圧ケーブルの劣化速度が高くなる。そこで本章では、エミッタに印加する電圧 V_E の波形を矩形波とし、 4 kV と 10 kV の中間電圧である 7 kV を正の印加電圧 V_{E+} とした。また、生成された正負の荷電粒子量が等量である場合のみ、被除電物の最終的な到達電位 V_{PF} は 0 V 程度になる。そのため、一般のイオナイザは、この最終到達電位 V_{PF} が常に 0 V 程度になるように自動制御システムを備えている。したがって、本研究においても、最終到達電位 V_{PF} が 0 V 程度になるようにイオンバランスを調整し、正負荷電粒子が等量に生成されている状態で測定を行う必要がある。そこで本章では、作業領域の電位をモニタし、正の印加電圧 V_{E+} を 7 kV 一定として、除電領域の電位が 0 V 程度になるように負の印加電圧 V_{E-} を調整した。なお、これらの作業は、各動作周波数 f に対して行った。また、除電領域の電位は、CPM を使用して測定した。

2.3.3 除電電流密度の測定方法

ここでは、除電電流密度の測定方法について述べる。除電電流密度 J_N は、「2.3.2 イオナイザの動作条件」で述べた条件下で、CPM を使用して測定した。また、CPM の金属プレートの配置は、図 2-6 に示すように、実験装置内の除電領域の中心、すなわちエミッタの真下とした。

除電電流密度 J_N は、被除電物が除電される際に、単位時間に被除電物に

流入する電荷量 Q_P 、すなわち除電される際の電流 ($\partial Q_P / \partial t$) から求めることができる。この電流は、時間の経過とともに CPM の金属プレートが除電され、プレート電位 V_P が減衰する様子から求められる。図 2-7 は、充電後の CPM のプレート電位が、時間の経過とともに除電され、0 V 程度まで減衰している様子の一例である。この図において、除電されるプレート電位 V_P の時間変化 ($\partial V_P / \partial t$) は、

$$\frac{\partial V_P}{\partial t} = \frac{\partial(Q_P / C_P)}{\partial t} = \frac{1}{C_P} \times \frac{\partial Q_P}{\partial t} = \frac{1}{C_P} \times I_N \quad (2-1)$$

となる。ここで、 Q_P はプレートの電荷量、 C_P はプレートの静電容量、 I_N は除電電流である。この除電電流 I_N から、本章における除電電流密度 J_N を算出する。

除電電流 I_N は、次の方法から求めることができる。まず、CPM の金属プレートを -1050 V に充電し、この金属プレートがイオナイザによって除電され、プレートの電位 V_{P-} が 0 V 程度まで減衰する様子を測定する。次に、CPM のプレートの電位 V_{P-} が -1000 V から -500 V になるまでの電位の傾き ($\partial V_{P-} / \partial t$) を求め、この傾きと CPM の金属プレートの静電容量 ($C_P = 20$ pF) から、正の荷電粒子に基づく除電電流 I_{N+} を算出する。同様に、CPM の金属プレートを $+1050$ V に充電し、プレート電位 V_{P+} が 0 V 程度まで減衰する様子を測定する。このプレート電位 V_{P+} が 1000 V から 500 V になるまでの電位の傾き ($\partial V_{P+} / \partial t$) から、負の荷電粒子に基づく除電電流 I_{N-} を算出した。したがって、正および負の荷電粒子に基づく除電電流は、

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

$$I_{N-} = C_P \times \frac{\partial V_{P+}}{\partial t} \quad (2-3)$$

となる。次に、このようにして求めた除電電流 I_{N+} と I_{N-} の絶対値を平均し、除電電流 I_N を算出した。したがって、除電電流 I_N は、

$$I_N = \frac{|I_{N+}| + |I_{N-}|}{2} \quad (2-4)$$

となる。さらに、この除電電流 I_N と CPM の金属プレートの面積 ($S_P = 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$) から、除電電流密度 J_N を算出した。したがって、除電電流密度 J_N は、

$$J_N = \left(\frac{|I_{N+}| + |I_{N-}|}{2} \right) / S_P \quad (2-5)$$

となる。

2.3.4 除電電流密度の測定結果

ここでは、まず、動作周波数 f を変化させた際の時間 t とプレート電位 V_P との関係の測定結果について述べる。次に、これらの結果から求めた動作周波数 f と除電電流密度 J_N およびその際の負の印加電圧 V_{E-} との関係をもとめた結果について述べる。

(1) 周波数を変化させた際の時間とプレート電位との関係

動作周波数 f を 1 ～ 100 Hz の範囲で変化させた場合の時間 t とプレート電位 V_P との関係を図 2-8 ～ 図 2-12 に示す。これらの各図の中には、

- ① イオンバランス調整前の負の荷電粒子による除電の様子：緑線、
- ② イオンバランス調整前の正の荷電粒子による除電の様子：橙線、
- ③ イオンバランス調整後の負の荷電粒子による除電の様子：青線、
- ④ イオンバランス調整後の正の荷電粒子による除電の様子：赤線

の 4 種類の測定結果が含まれている。図 2-8 に示すように、動作周波数 f が 1 Hz の場合は、4 種類の測定結果が重なっている。しかし、図 2-9 ～ 図 2-12 に示すように、動作周波数 f が 5 Hz ～ 100 Hz の場合は、明らかに

イオンバランスを調整した効果が現れている。イオンバランス調整前における除電後のプレート電位 V_P は、マイナス側で一定となっているが、イオンバランス調整後における除電後のプレート電位 V_P は、0 V 程度で一定となっている。すなわち、イオンバランスの調整を行わずにイオナイザを動作させた場合、被除電物はマイナスに帯電する可能性がある。しかし、イオンバランスの調整をしてイオナイザを動作させた場合、被除電物は 0 V 程度に除電されることが期待できる。そこで、本章では、イオンバランス調整後における時間 t とプレート電位 V_P との関係から、除電電流密度 J_N を算出した。

図 2-8 ~ 図 2-12 に示した結果の内、イオンバランス調整後の結果、すなわちイオンバランス調整後の負の荷電粒子による除電の様子（青線）とイオンバランス調整後の正の荷電粒子による除電の様子（赤線）から、動作周波数 f が低くなるに従って、単位時間当たりのプレート電位 V_P の変化 ($\partial V_P / \partial t$) は大きくなることがわかる。

(2) 周波数と除電電流および負の印加電圧との関係

各動作周波数 f における時間 t とプレート電位 V_P との関係から、除電電流密度 J_N を算出した。図 2-13 に除電電流密度 J_N と負の印加電圧 V_{E-} の周波数依存性の結果を示す。この結果から、動作周波数 f が低くなるに従って除電電流密度 J_N は高くなることがわかる。また、エミッタへの負の印加電圧 V_{E-} は、高周波側では一定であるが、5 Hz 付近で急激に変化していることがわかる。

2.4 周波数と電圧振幅との関係

本章では、イオナイザの性能である「製品を帯電させないこと」について、電圧振幅 V_S を定義して検討を行う。そこで、まず、電圧振幅 V_S の測定に使用する機器、測定におけるイオナイザの動作条件、および測定方法について述べる。次に、動作周波数 f を変化させた場合の電圧振幅 V_S の測定結果について述べる。

2.4.1 電圧振幅の測定機器およびイオナイザの動作条件

電圧振幅 V_S の測定は、「2.3.1 除電電流密度の測定機器」で述べた CPM

を用いて行った。また、測定の際のイオナイザの動作条件は、「2.3.2 イオナイザの動作条件」で述べた条件と同様の条件とした。

2.4.2 電圧振幅の測定方法

電圧振幅 V_s は、「2.3.4 除電電流密度の測定結果」に示した時間 t とプレート電位 V_P との関係において、金属プレートが除電された後、すなわちプレート電位 V_P が 0 V 程度になった後におけるプレート電位 V_P の変動幅から求めた。図 2-14 は、CPM の金属プレートが除電されて 0 V 程度になった後のプレート電位 V_P を拡大した一例である。この図において、プレート電位 V_P の変動幅の最大値から最小値までを電圧振幅 V_s とした。

2.4.3 電圧振幅の測定結果

ここでは、まず、動作周波数 f を変化させた際の除電後の時間 t とプレート電位 V_P との関係の測定結果について述べる。次に、これらの結果から求めた動作周波数 f と電圧振幅 V_s との関係をまとめた結果について述べる。

(1) 周波数を変化させた際の除電後の時間とプレート電位との関係

動作周波数 f を 1 ~ 100 Hz の範囲で変化させた場合の除電後のプレート電位 V_P を図 2-15 ~ 図 2-19 に示す。また、各動作周波数 f における除電後のプレート電位 V_P の変動幅を比較するために、これらの結果を一つにまとめた。この結果を図 2-20 に示す。なお、この図の横軸は、エミッタへの印加電圧 V_E の 2 周期で規格化してある。この結果から、動作周波数 f が低くなるに従って、除電後のプレート電位 V_P の変動幅は大きくなることわかる。

(2) 周波数と電圧振幅との関係

各動作周波数 f における除電後のプレート電位 V_P の変動幅から電圧振幅 V_s を求めた。図 2-21 に電圧振幅 V_s の周波数依存性を示す。この結果から、動作周波数 f が 5 Hz 以上の領域では、動作周波数 f が低くなるに従って電圧振幅 V_s は徐々に増加するが、5 Hz 以下の領域では、動作周波数 f が低くなるに従って急激に増加していることがわかる。

2.5 周波数とイオナイザの性能との関係

本章では、AC コロナ放電型イオナイザの性能として、除電電流密度 J_N および電圧振幅 V_S を取り上げ、各性能と動作周波数 f との関係について検討を行った。図 2-22 に除電電流密度 J_N 、電圧振幅 V_S およびエミッタへの負の印加電圧 V_{E-} の周波数依存性の結果を示す。この結果から、イオナイザの性能は動作周波数 f に大きく依存することが明らかになった。そこで、ここではまず、除電電流密度 J_N の周波数依存性について考察する。次に、電圧振幅 V_S の周波数依存性について考察する。

2.5.1 除電電流密度の周波数依存性

除電電流密度 J_N は、作業領域に到達する荷電粒子の量によって決まる。また、この到達する荷電粒子の量は、荷電粒子の分布状態に依存する。さらに、この荷電粒子の空間分布は、動作周波数 f に大きく依存する。図 2-23 に低周波および高周波の場合の荷電粒子の空間分布の様子を示す。動作周波数 f が低くなるに従って、半周期に生成される荷電粒子の量 Q_G が多くなるため、生成された荷電粒子間の斥力に基づく広がりも顕著になる。図 2-23 において、紫色の破線は、この広がりを示している。この広がり領域は、正の荷電粒子または負の荷電粒子の内、一方の極性の荷電粒子濃度が、他方に比べて著しく高い領域（単極荷電粒子領域）であるため、再結合による荷電粒子の消滅はない。また、この領域の外側は、正の荷電粒子と負の荷電粒子が混在し、同程度の荷電粒子濃度の領域（混在領域）であるため、再結合によって荷電粒子は消滅する。したがって、動作周波数 f が低くなるに従って、単極荷電粒子領域が大きくなり、再結合によって消滅する荷電粒子の数が減少するので、除電電流密度 J_N が高くなったと考えられる。

2.5.2 電圧振幅の周波数依存性

電圧振幅 V_S は、図 2-24 に示すように、エミッタに充電された電荷からの電束 Φ_I に基づく電圧振幅 $V_{S\Phi E}$ 、イオナイザによって生成された荷電粒子からの電束 Φ_E に基づく電圧振幅 $V_{S\Phi I}$ 、CPM に到達した荷電粒子 Q_G に基づく電圧振幅 V_{SQ} に分類できる。エミッタに充電された電荷からの電束に基づく電圧振幅 $V_{S\Phi E}$ は、周波数に依存しない。しかし、イオナイザによって生成

された荷電粒子からの電束に基づく電圧振幅 $V_{s\phi I}$ は、前述の単極荷電粒子領域の荷電粒子量に依存するため、動作周波数 f が低くなるに従って大きくなる。また、CPM に到達した荷電粒子に基づく電圧振幅 V_{sq} は、CPM に到達した荷電粒子の量に依存するため、単極荷電粒子領域が CPM のプレート的位置まで広がった場合に、急激に大きくなると考えられる。このような V_{sq} の急激な上昇は、単極荷電粒子が被除電物に到達していることを意味する。したがって、このように単極荷電粒子が CPM に直接到達するような条件でイオナイザを動作させた場合、イオナイザは除電器ではなく、帯電器として作用することが懸念される。

2.6 まとめ

本章では、AC コロナ放電型イオナイザの動作周波数 f とイオナイザの性能との関係を明らかにすることを目的とした。そこで、まず、動作周波数 f が性能に及ぼす効果を測定するための実験装置を設計・製作した。次に、動作周波数 f を変化させた場合の除電電流密度 J_N と電圧振幅 V_s を測定した。さらに、これらの測定結果から、イオナイザの性能の周波数依存性について検討を行った。これらの成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 風洞と荷電粒子生成部を組み合わせて、実験装置を完成させた。
- (2) イオナイザの性能である除電電流密度 J_N と電圧振幅 V_s は、動作周波数 f に大きく依存することが明らかとなった。
- (3) 除電電流密度 J_N は、動作周波数 f が低くなるに従って高くなる。したがって、動作周波数 f が低くなるに従って除電速度は高くなることが明らかとなった。
- (4) 電圧振幅 V_s は、動作周波数 f が低くなるに従って大きくなる。

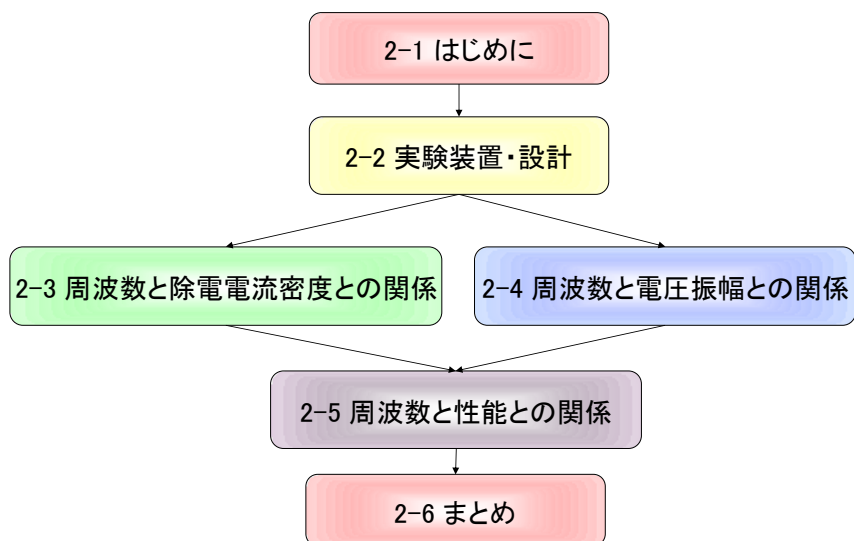


図 2-1 第 2 章のフローチャート

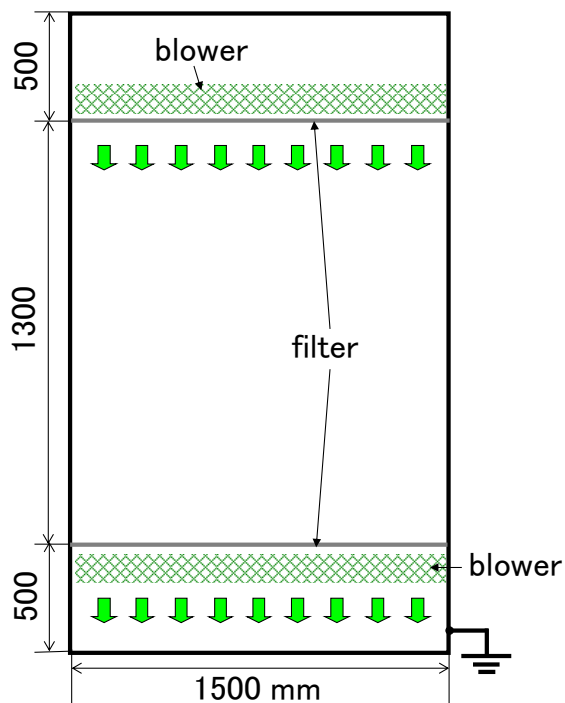


図 2-2 クリーンルームをモデル化した風洞

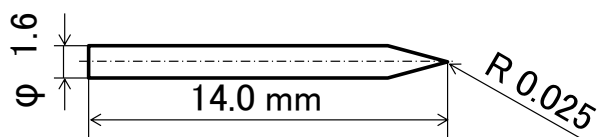


図 2-3 エミッタの寸法

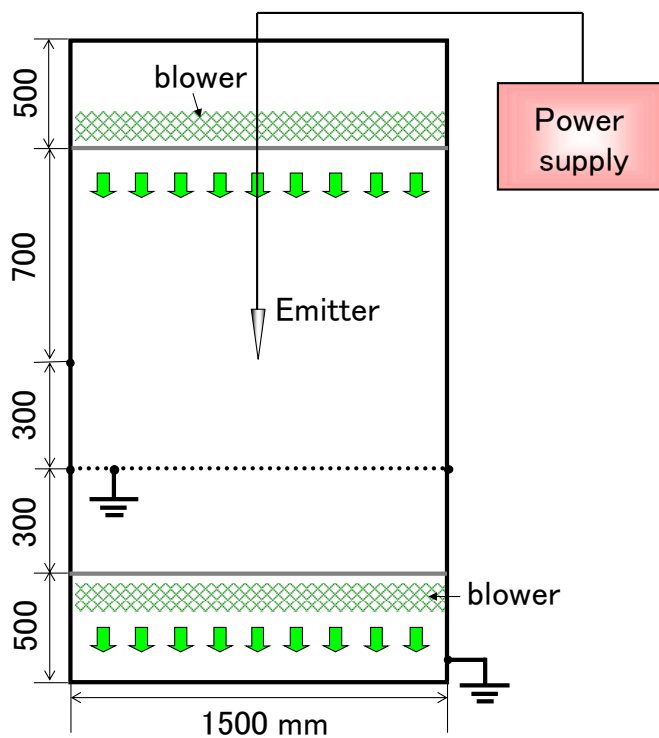


図 2-4 実験装置

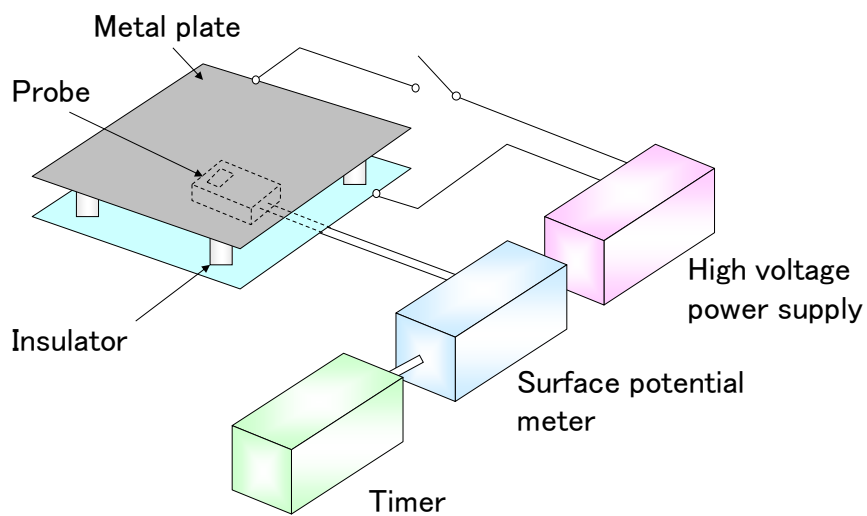


図 2-5 CPM の構造

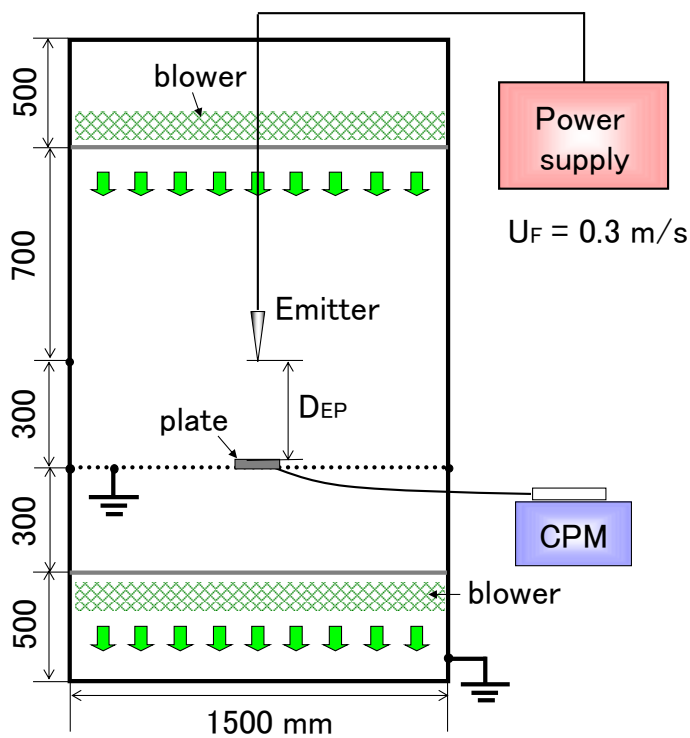


図 2-6 CPM の配置

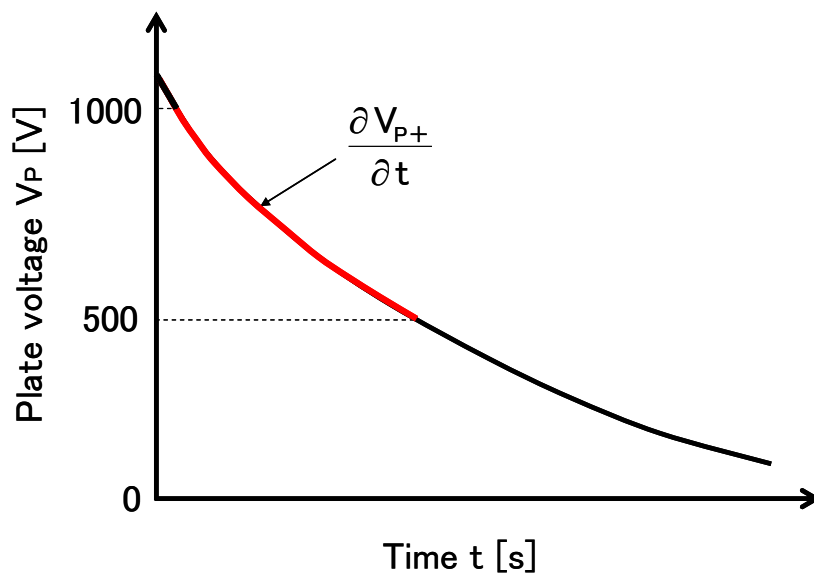


図 2-7 時間とプレート電位との関係（除電電流密度の定義）

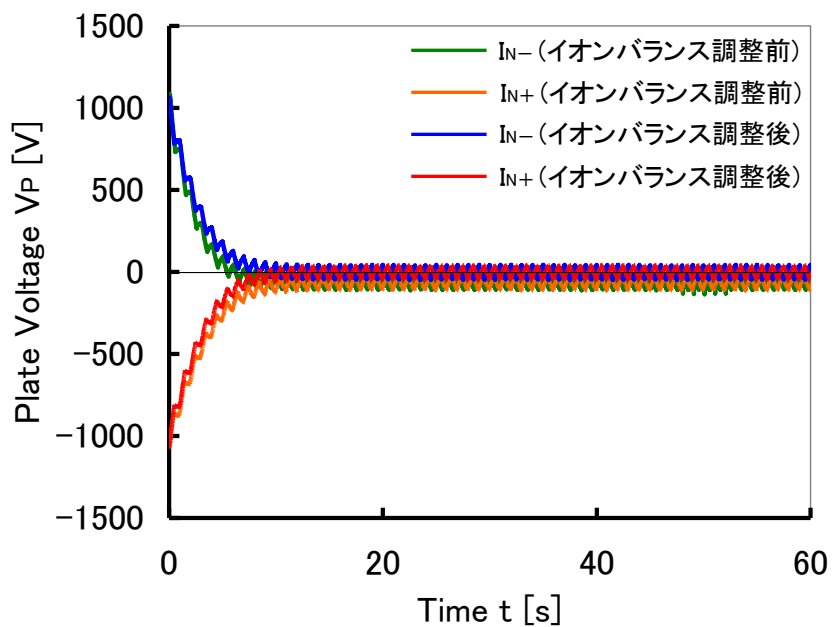


図 2-8 時間とプレート電位との関係（ $f = 1$ Hz の場合）

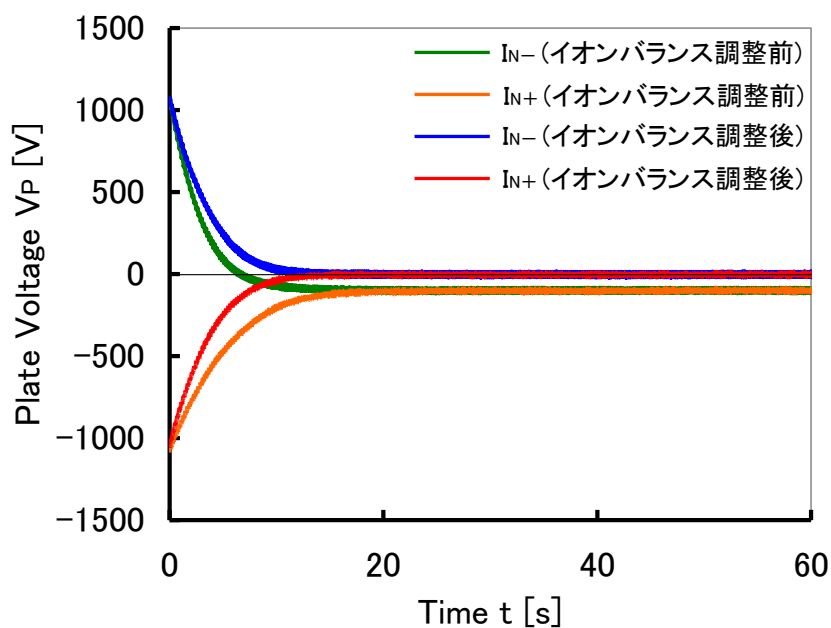


図 2-9 時間とプレート電位との関係 ($f = 5 \text{ Hz}$ の場合)

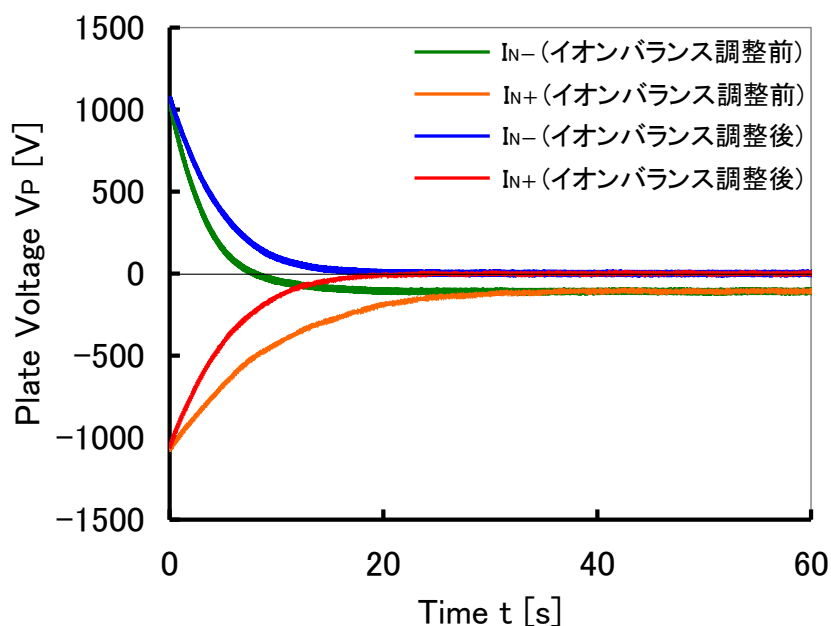


図 2-10 時間とプレート電位との関係 ($f = 10 \text{ Hz}$ の場合)

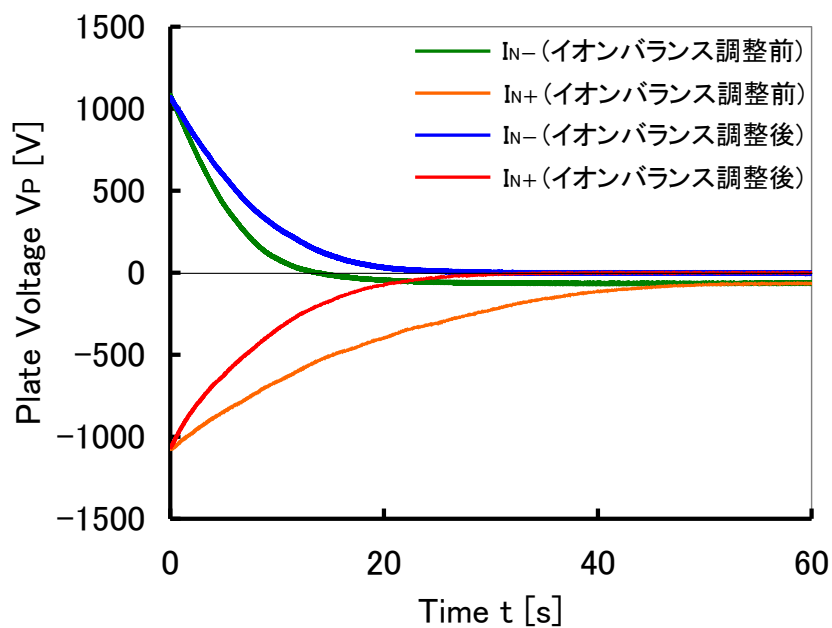


図 2-11 時間とプレート電位との関係 ($f = 50$ Hz の場合)

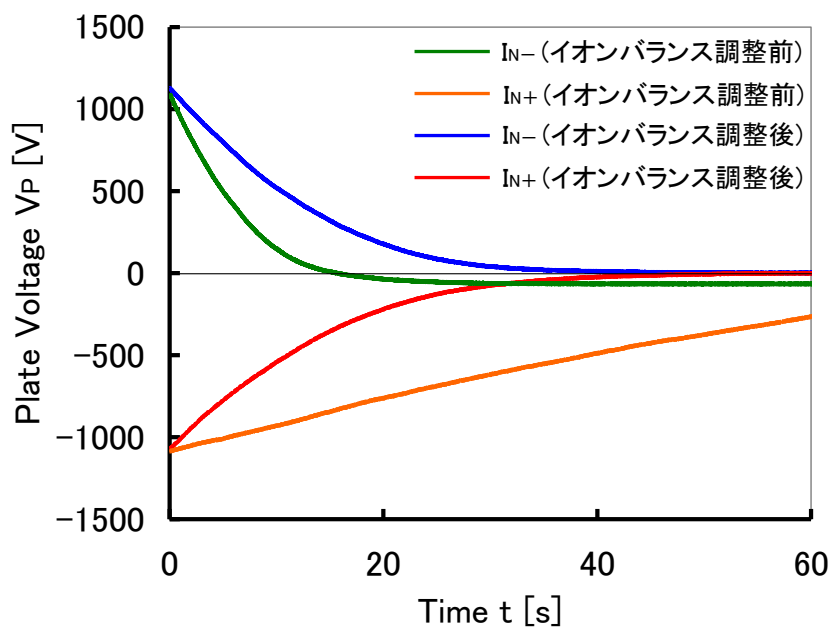


図 2-12 時間とプレート電位との関係 ($f = 100$ Hz の場合)

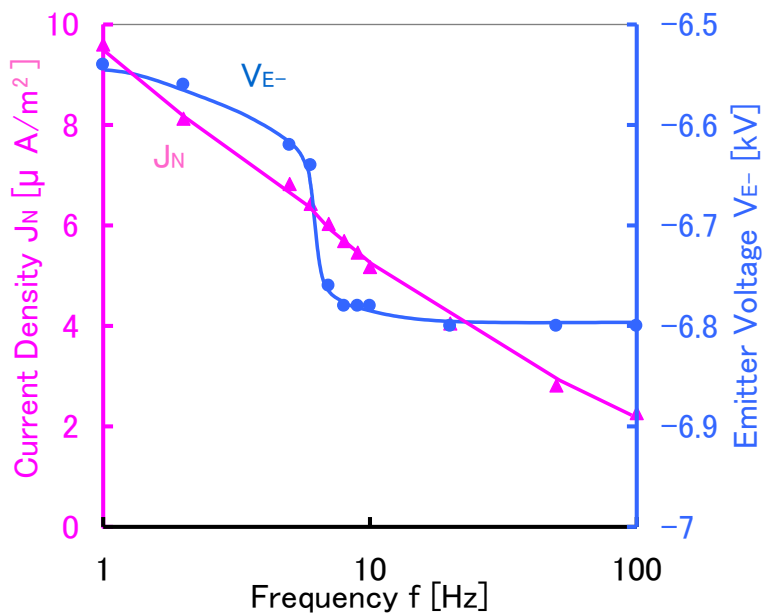


図 2-13 周波数と除電電流密度およびエミッタへの負の印加電圧との関係

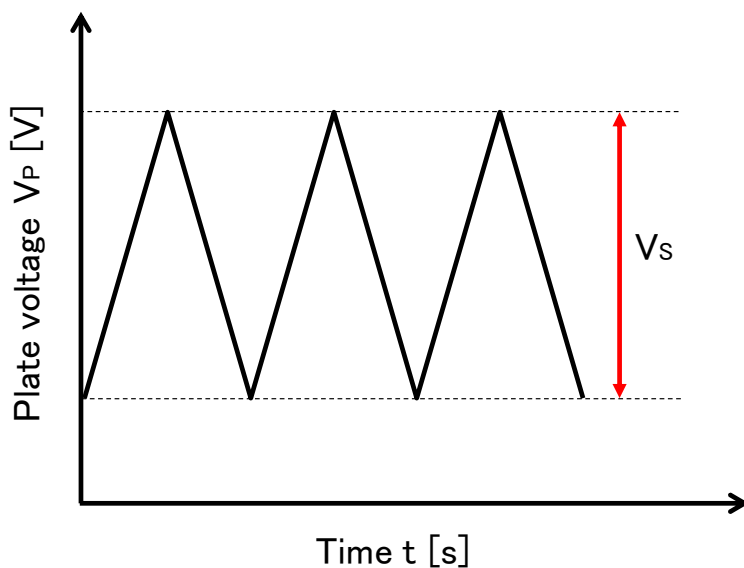


図 2-14 除電後における時間とプレート電位との関係（電圧振幅の定義）

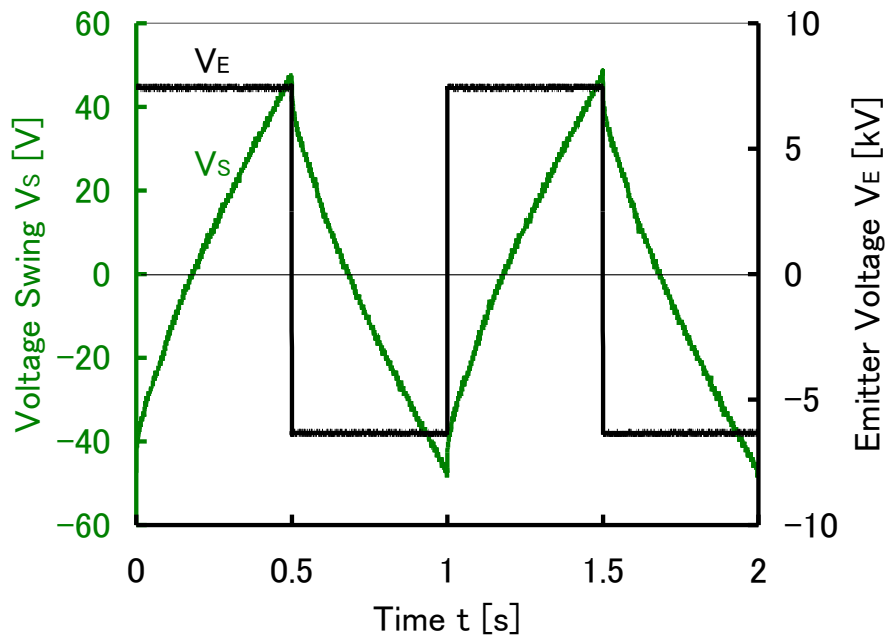


図 2-15 除電後における時間とプレート電位との関係 ($f = 1 \text{ Hz}$ の場合)

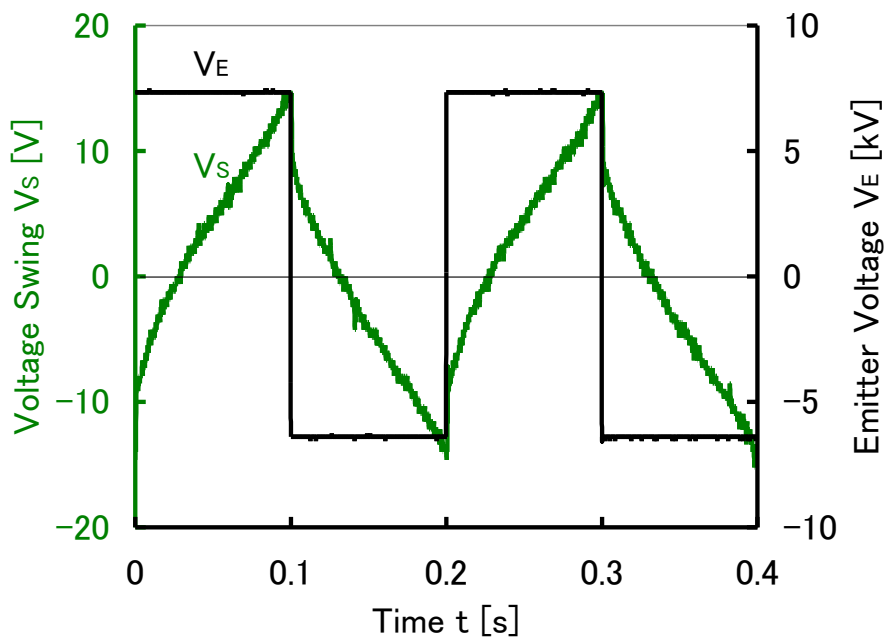


図 2-16 除電後における時間とプレート電位との関係 ($f = 5 \text{ Hz}$ の場合)

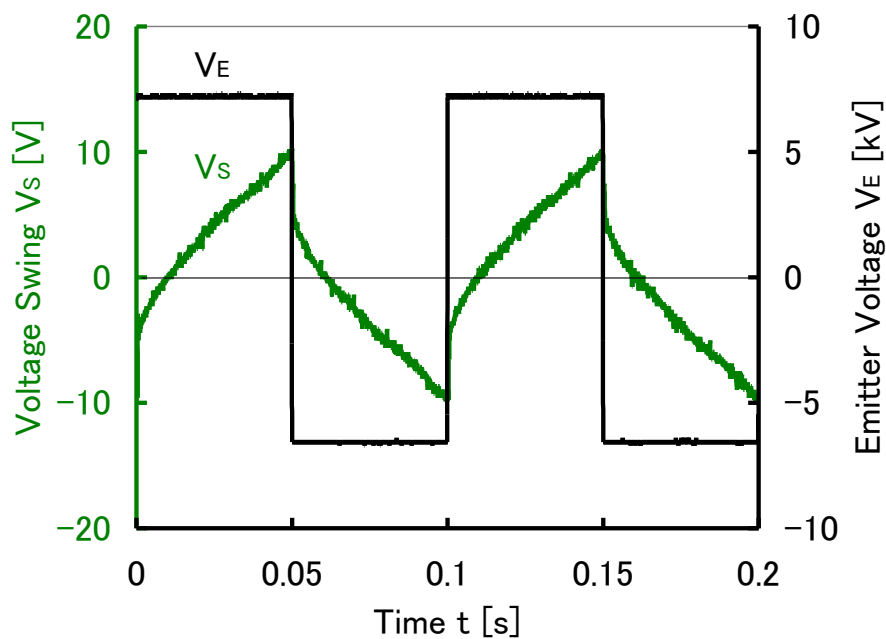


図 2-17 除電後における時間とプレート電位との関係 ($f = 10$ Hz の場合)

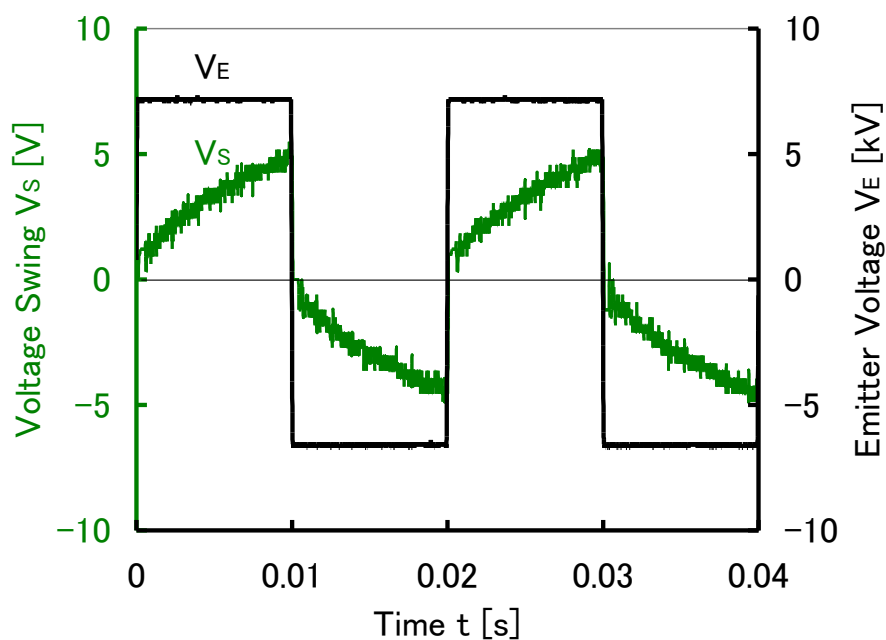


図 2-18 除電後における時間とプレート電位との関係 ($f = 50$ Hz の場合)

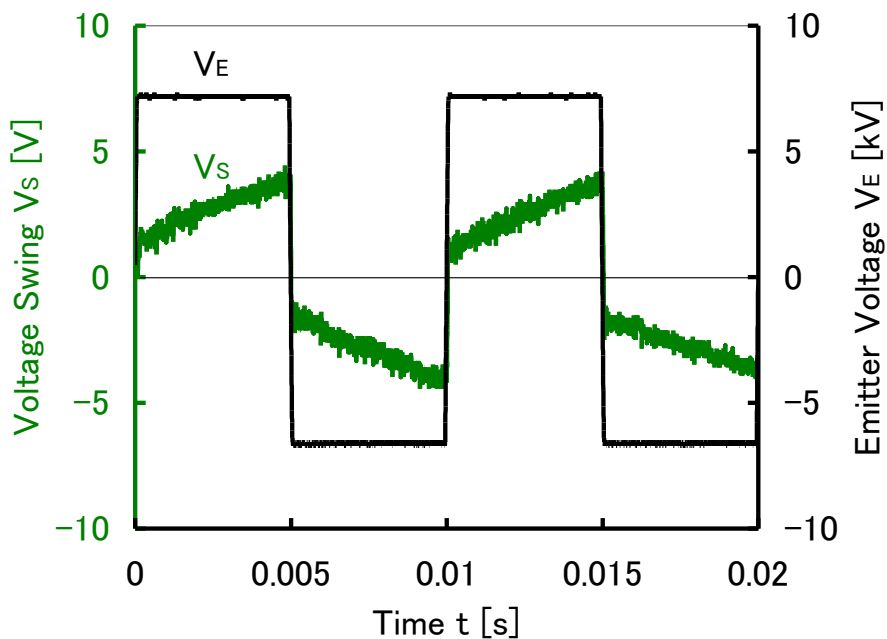


図 2-19 除電後における時間とプレート電位との関係 ($f = 100 \text{ Hz}$ の場合)

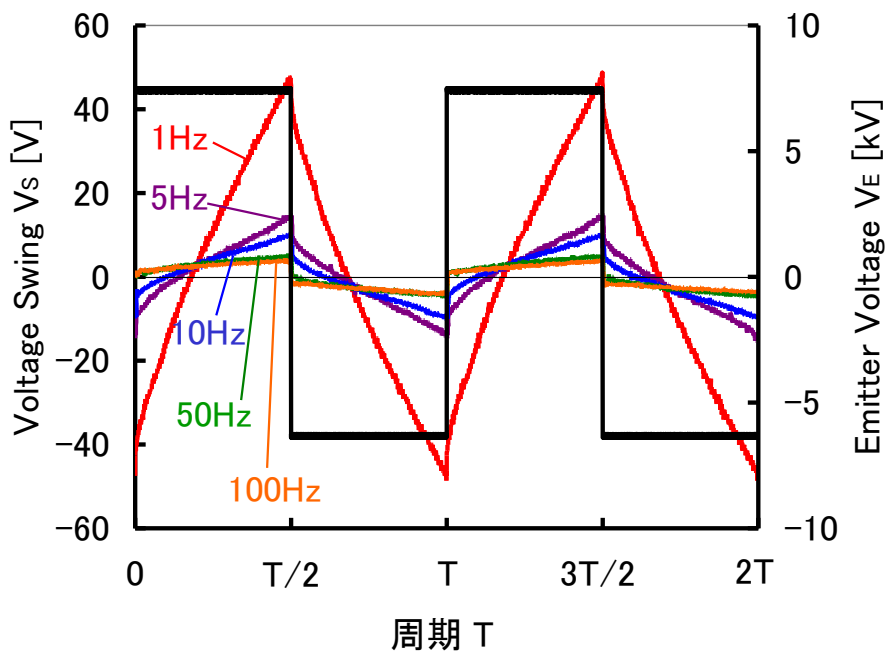


図 2-20 除電後における時間とプレート電位との関係 ($f = 1 \sim 100 \text{ Hz}$ の場合)

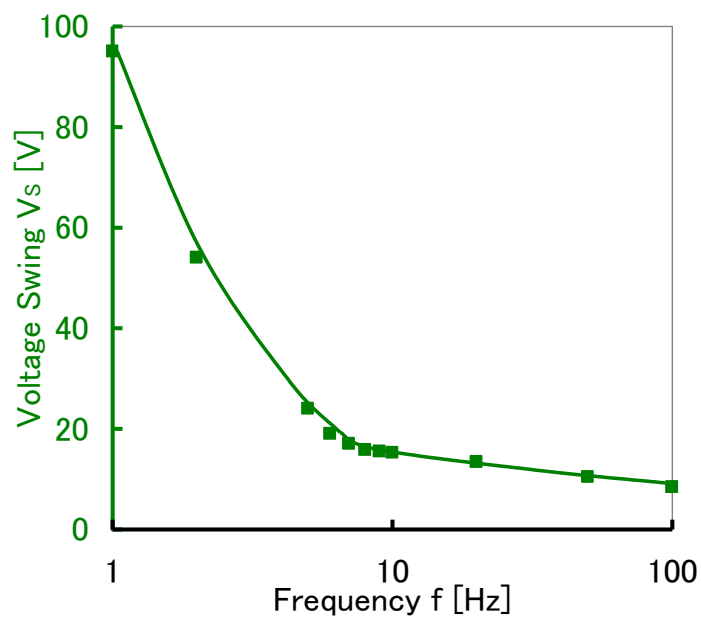


図 2-21 周波数と電圧振幅との関係

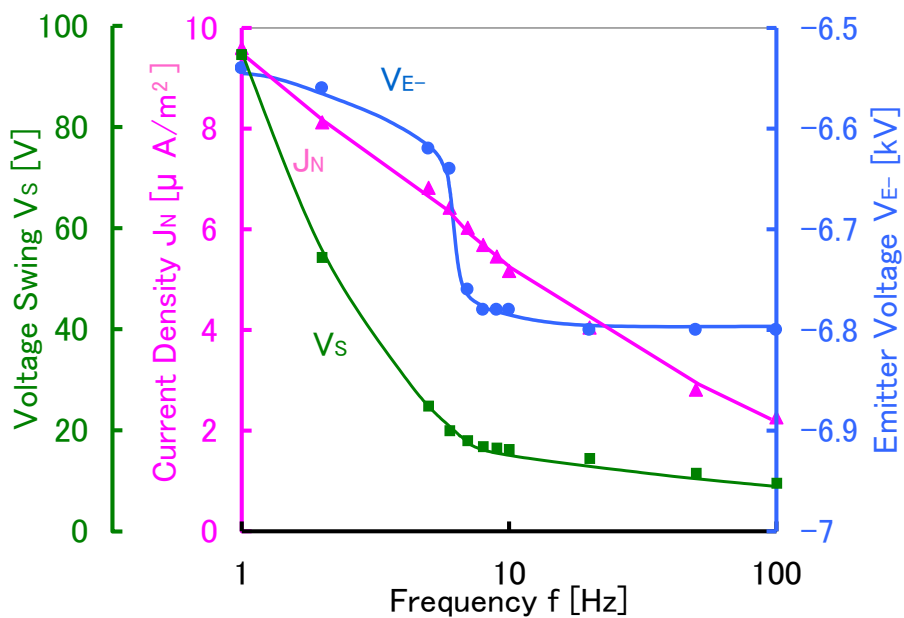


図 2-22 除電電流密度、電圧振幅、エミッタへの負の印加電圧の周波数依存性

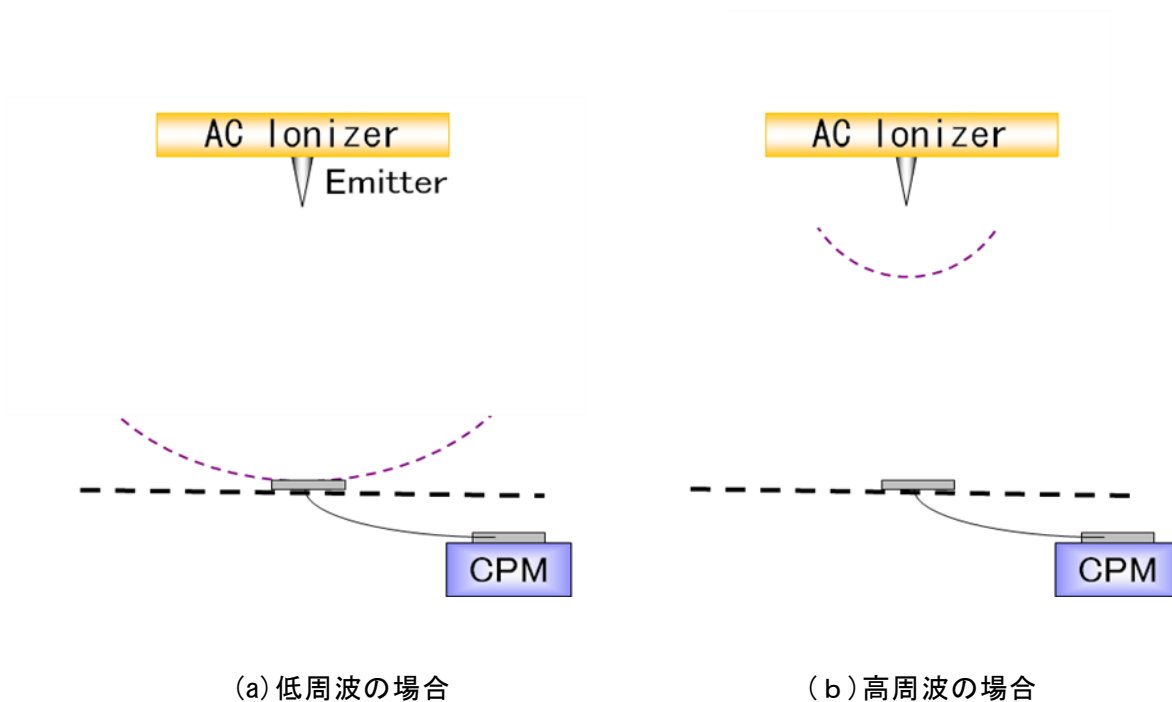


図 2-23 荷電粒子の空間分布の周波数依存性

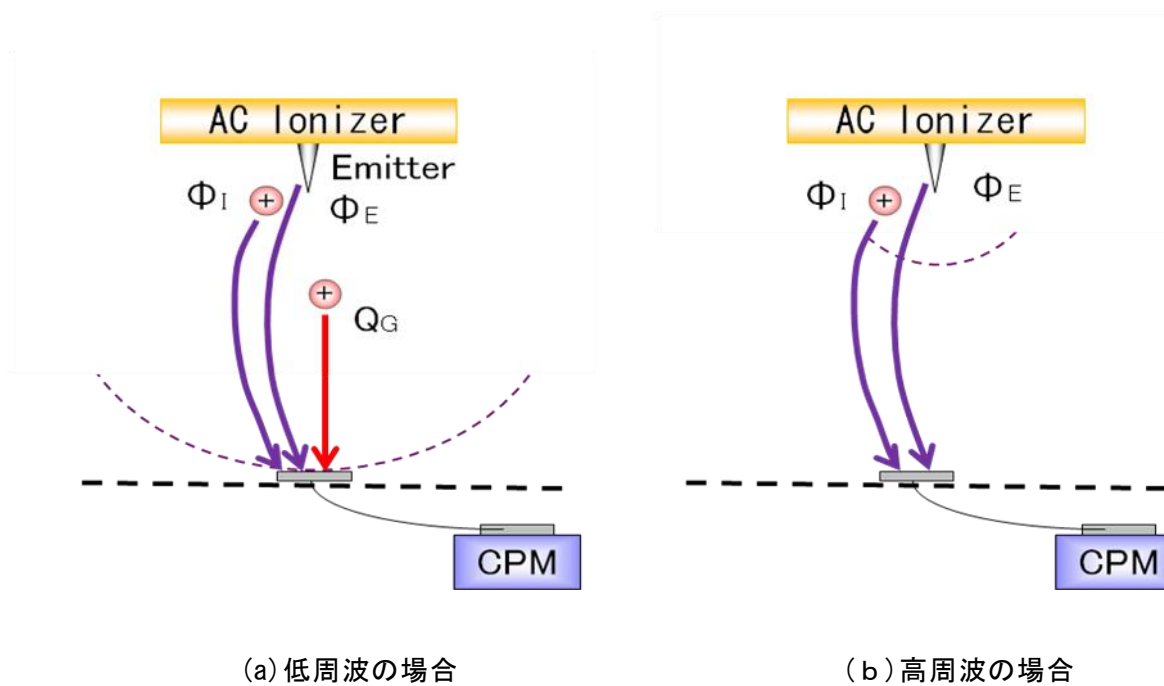


図 2-24 電圧振幅のメカニズム

第 3 章

除電能力に及ぼす 周波数の影響

第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響

3.1 はじめに

イオナイザの性能を評価する際、従来はエミッタ直下、すなわち除電領域の中心における除電の様子を測定していた。したがって、前章では、AC コロナ放電型イオナイザの性能として、除電領域の中心における除電電流密度を取り扱った。しかし、本研究では、「1.5 本研究の目的」で述べたように、被除電物である電子デバイスが搬送中に除電されることを前提としている。そのため、被除電物が静止状態で除電されるのではなく、搬送されながら除電されることを考慮して検討を行う必要がある。そこで、本章では、被除電物が搬送されながら除電されることを考慮して、イオナイザの動作周波数が除電の能力に及ぼす影響について明らかにする。

図 3-1 に本章のフローチャートを示す。まず、「3.2 除電能力の測定方法」では、本章における除電能力を定義し、除電能力の測定方法および算出方法を確立する。次に、「3.3 除電能力の測定結果」では、動作周波数と除電能力との関係の測定結果について述べる。さらに、「3.4 周波数と除電能力との関係」では、これらの測定結果から、動作周波数が除電能力に及ぼす影響について検討する。

3.2 除電能力の測定方法

本章では、まず、被除電物が搬送中に除電されることを考慮して、イオナイザの除電能力を定義する。次に、除電能力の測定方法および算出方法について述べる。

3.2.1 除電能力の定義

図 3-2 に本章におけるイオナイザの除電能力を示す。本章では、被除電物が搬送されながら除電されることを考慮して、除電能力を 3 種類に分類した。ここでは、それぞれの除電能力について詳細を述べる。

(1) 除電領域中心の除電電流密度

除電領域中心の除電電流密度 J_{NC} は、前章で定義した除電電流密度 J_N と

同様に、エミッタ直下における除電電流密度のことである。

(2) 搬送領域の除電電流

搬送領域の除電電流 I_L は、被除電物が搬送される領域における除電電流のことである。

(3) 除電領域の全除電電流

除電領域の全除電電流 I_s は、搬送領域を含む除電領域全体における除電電流のことである。

3.2.2 除電能力の測定方法

前述のように定義した除電能力は、除電電流密度 J_{Nr} の分布を測定することで求められる。そこで、ここでは、除電電流密度分布の測定における測定機器、測定の際のイオナイザの条件、および測定方法について述べる。

(1) 測定機器およびイオナイザの動作条件

除電電流密度分布の測定は、「2.2 実験装置の設計・製作」で作製した実験装置内で行った。また、測定における測定機器およびイオナイザの動作条件は、「2.3 周波数と除電電流密度との関係」で述べた測定機器およびイオナイザの動作条件と同様とした。したがって、測定機器として CPM を用いた。また、イオナイザの動作条件は、

- ① エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} : 300 mm、
- ② 実験装置内の風速 U_F : 0.3 m/s、
- ③ 動作周波数 f : 1 ~ 100 Hz、
- ④ エミッタへの正の印加電圧 V_{E+} : +7 kV、
- ⑤ エミッタへの負の印加電圧 V_{E-} : イオンバランス調整後の電圧値

とした。また、測定範囲は、除電領域中心から水平方向 r_w に 0 mm ~ 500 mm の範囲とした。

(2) 測定方法

除電電流密度分布の測定は、図 3-3 に示すように、CPM の金属プレートを除電領域の中心から水平方向 r_w に 500 mm の位置まで移動させて行った。なお、測定位置の間隔は 100 mm とした。このようにして測定した除電電流密度分布から、それぞれの除電能力を算出する。なお、除電電流密度 J_{Nr} の

算出方法は、「2.3.3 除電電流密度の測定方法」で述べた方法と同様である。また、除電領域中心の除電電流密度 J_{NC} は、前章で述べた実験装置内の除電領域の中心、すなわちエミッタの真下における除電電流密度 J_N である。

3.2.3 搬送領域の除電電流の算出方法

搬送領域の除電電流 I_L は、搬送領域全体における除電電流密度 J_{Nr} を積分することで算出できる。したがって、除電電流密度分布の測定結果から、搬送領域の除電電流 I_L を

$$I_L = W \int J_{Nr} dr_w \quad (3-1)$$

として算出した。ここで、 W は搬送領域の幅、 r_w は除電領域中心からの距離である。

3.2.4 除電領域の全除電電流の算出方法

除電領域の全除電電流 I_s は、除電領域全体における除電電流密度 J_{Nr} を積分することで算出できる。したがって、除電電流密度分布の測定結果から、除電領域の全除電電流 I_s を

$$I_s = \int J_{Nr} ds \quad (3-2)$$

として算出した。ここで、 s は除電領域の面積である。

3.3 除電能力の測定結果

ここでは、まず、除電領域全体における時間 t とプレート電位 V_P との関係の測定結果について述べる。次に、この測定結果から算出した除電電流密度 J_{Nr} の分布の測定結果について述べる。さらに、この除電電流密度分布からそれぞれの除電能力を算出し、各除電能力の周波数依存性について比較検討する。

3.3.1 測定位置を変化させた際の時間とプレート電位との関係

距離 r_w を変化させた際の時間 t とプレート電位 V_P との関係を図 3-4 ～

図 3-9 に示す。なお、これらの図における動作周波数 f は 50 Hz である。これらの結果から、距離 r_w が長くなるに従って、単位時間当たりのプレート電位 V_P の変化 ($\partial V_P / \partial t$) は小さくなることがわかる。また、図 3-9 に示すように、距離 r_w が 500 mm の場合、プレート電位 V_P の変化 ($\partial V_P / \partial t$) は非常に小さいことがわかる。すなわち、この位置において、被除電物が 0 V 程度まで除電される時間は著しく長くなることがわかる。

3.3.2 周波数と除電電流密度分布との関係

(1) 周波数と正の荷電粒子に基づく除電電流密度分布との関係

各動作周波数 f において、距離 r_w を変化させた際の正の荷電粒子に基づく除電の様子を測定した。次に、この測定結果から、正の荷電粒子に基づく除電電流密度 J_{Nr+} を算出した。これらをまとめた結果を図 3-10 に示す。この図から、動作周波数 f と正の荷電粒子に基づく除電電流密度 J_{Nr+} の分布との関係がわかる。この結果から、動作周波数 f に関係なく、距離 r_w が長くなるに従って、除電電流密度 J_{Nr+} は低くなることがわかる。すなわち、エミッタ直下から離れるに従って、除電の能力は低くなることがわかる。また、距離 r_w に関係なく、動作周波数 f が低くなるに従って、除電電流密度 J_{Nr+} は大きくなることがわかる。

(2) 周波数と負の荷電粒子に基づく除電電流密度分布との関係

図 3-10 に示した動作周波数 f と除電電流密度 J_{Nr+} の分布との関係と同様に、負の荷電粒子に基づく除電電流密度 J_{Nr-} の分布を求めた。この結果を図 3-11 に示す。この結果から、正の荷電粒子に基づく結果と同様に、動作周波数 f に関係なく、距離 r_w が長くなるに従って、除電電流密度 J_{Nr-} は低くなることがわかる。また、距離 r_w に関係なく、動作周波数 f が低くなるに従って、除電電流密度 J_{Nr-} は大きくなることがわかる。

(3) 周波数と除電電流密度分布との関係

図 3-10 および図 3-11 に示した正および負の荷電粒子に基づく除電電流密度の絶対値を平均し、この値を除電電流密度 J_{Nr} とした。図 3-12 に動作周波数 f と除電電流密度 J_{Nr} の分布との関係を示す。この結果から、正および負の荷電粒子に基づく結果と同様に、動作周波数 f に関係なく、距離 r_w が

長くなるに従って、除電電流密度 J_{Nr} は低くなることがわかる。また、距離 r_w に関係なく、動作周波数 f が低くなるに従って、除電電流密度 J_{Nr} は大きくなることわかる。

3.3.3 周波数と高除電電流密度領域との関係

図 3-12 に示した動作周波数 f と除電電流密度 J_{Nr} の分布との関係において、
 ① 除電電流密度 J_{Nr} が $0.25 \mu A/m^2$ 以上の領域：高除電電流密度領域、
 ② 除電電流密度 J_{Nr} が $0.25 \mu A/m^2$ 未満の領域：低除電電流密度領域
 と定義した。図 3-13 にこれらの領域と動作周波数 f との関係を示す。この結果から、動作周波数 f が低くなるに従って、高除電電流密度領域が広くなることわかる。

3.3.4 除電能力の周波数依存性

本章における除電能力である除電領域中心の除電電流密度 J_{Nc} 、搬送領域の除電電流 I_L および除電領域の全除電電流 I_s の周波数依存性を比較検討する。そこで、これらの値をそれぞれの最大値、すなわち 1 Hz の J_{Nc} 、 I_L および I_s で規格化した。この結果を図 3-14 に示す。この結果から、動作周波数 f が低くなるに従って、除電領域中心の除電電流密度 J_{Nc} 、搬送領域の除電電流 I_L 、除電領域の全除電電流 I_s はすべて大きくなることわかる。また、1 Hz の除電領域中心の除電電流密度 J_{Nc} は、100 Hz に比べて 1.8 倍になることがわかる。しかし、1 Hz の搬送領域の除電電流 I_L は、100 Hz に比べて 2.2 倍になることがわかる。さらに、1 Hz の除電領域の全除電電流 I_s は、100 Hz に比べて 3.8 倍になることがわかる。

3.4 周波数と除電能力との関係

「3.3 除電能力の測定結果」では、動作周波数 f と除電能力との関係の測定結果について述べた。ここでは、これらの結果について考察を行い、動作周波数 f が除電能力に及ぼす影響について明らかにする。

3.4.1 周波数が除電電流密度分布へ及ぼす影響

図 3-10 ～ 図 3-13 の結果が示すように、動作周波数 f が低い場合と高い場合では、除電電流密度 J_{Nr} の分布が異なることが明らかになった。この

結果から、イオナイザを低周波で動作させた場合、

- ① 除電電流密度 J_{Nr} は高くなること、
- ② 高除電電流密度領域は広くなること

がわかる。図 3-15 に、動作周波数 f が低い場合と高い場合の荷電粒子分布の様子を示す。なお、この図において、紫色の破線は、半周期に生成される荷電粒子 Q_G の互いの斥力に基づく広がり（単極荷電粒子領域）を示している。また、黒色の点線は、生成された荷電粒子が分布する領域を示している。除電電流密度 J_{Nr} が高くなる理由は、「2.5.1 除電電流密度の周波数依存性」で述べたように、低周波で動作している場合、生成された荷電粒子が除電領域に到達するまでの全輸送工程の内、単極荷電粒子領域、すなわち再結合が発生しない領域が大きくなるため、除電電流密度 J_{Nr} は高くなると考えられる。また、高除電電流密度領域が広くなる理由は、次のように考えられる。高除電電流密度領域の広さは、除電領域に到達した荷電粒子の分布幅によって決まる。図 3-15 に示すように、低周波でイオナイザを動作している場合は、高周波で動作している場合に比べて、イオナイザが生成した荷電粒子は広範囲に分布すると考えられる。この結果、除電領域に到達する荷電粒子の分布幅は広くなるため、高除電電流密度領域も広くなると考えられる。

3.4.2 除電能力の周波数依存性

図 3-14 が示すように、1 Hz の搬送領域の除電電流 I_L が、100 Hz に比べて 2.2 倍になる理由は、次のように考えられる。搬送領域の除電電流 I_L は、除電電流密度 J_{Nr} を搬送領域で積分した結果である。すなわち、搬送領域の除電電流 I_L は、除電領域に到達する荷電粒子の分布幅と除電電流密度 J_{Nr} に大きく依存する。したがって、低周波でイオナイザを動作させた場合は、高周波で動作させた場合に比べて、除電領域に到達する荷電粒子の分布幅は広く、除電電流密度 J_{Nr} も高くなるので、1 Hz の搬送領域の除電電流 I_L は、100 Hz に比べて大きくなると考えられる。

3.4.3 除電能力の評価方法

図 3-14 から除電領域中心の除電電流密度 J_{Nc} 、搬送領域の除電電流 I_L および除電領域の全除電電流 I_s の周波数依存性には大きな差があることがわ

かった。従来は、除電領域中心の除電電流密度 J_{NC} を除電能力として評価していた。しかし、被除電物が移動している場合、被除電物が除電領域を通過する間に除電されることになるので、除電領域中心の除電電流密度 J_{NC} を測定し、除電能力と定義することは不十分である。すなわち、除電領域を通過する間に被除電物に到達する電気量を考慮して測定を行う必要がある。したがって、本研究における搬送領域の除電電流 I_L は、除電電流密度 J_{Nr} を搬送領域全体において積分した結果であるため、被除電物が移動している場合には、この搬送領域の除電電流 I_L を除電能力とすることが妥当であると考えられる。

3.5 まとめ

本章では、AC コロナ放電型イオナイザの動作周波数 f が除電能力に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。そこで、まず、被除電物が搬送中に除電されることを考慮して、除電能力を 3 種類に分類した。次に、それぞれの除電能力を求めるために、除電領域全体における除電電流密度 J_{Nr} の分布を測定した。さらに、これらの測定結果から、各除電能力の周波数依存性について比較検討した。この成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 搬送中の被除電物における除電能力を、
 - ① 除電領域中心の除電電流密度 J_{NC} 、
 - ② 搬送領域の除電電流 I_L 、
 - ③ 除電領域の全除電電流 I_sと定義した。
- (2) 動作周波数 f が低くなるに従って、除電領域全体における除電電流密度 J_{Nr} は高くなる。
- (3) 動作周波数 f が低くなるに従って、高除電電流密度領域は広くなる。
- (4) 1 Hz の除電能力と 100 Hz の除電能力を比較すると、
 - ① 除電領域中心の除電電流密度 J_{NC} は 1.8 倍、
 - ② 搬送領域の除電電流 I_L は 2.2 倍、
 - ③ 除電領域の全除電電流 I_s は 3.8 倍

となる。すなわち、動作周波数 f を低くするに従って、除電能力はすべて高くなる。したがって、除電能力を高くするためには、動作周波数 f を低くすることが効果的である。

- (5) 被除電物が搬送されている場合は、搬送領域の除電電流 I_L を除電能力とすることが妥当である。

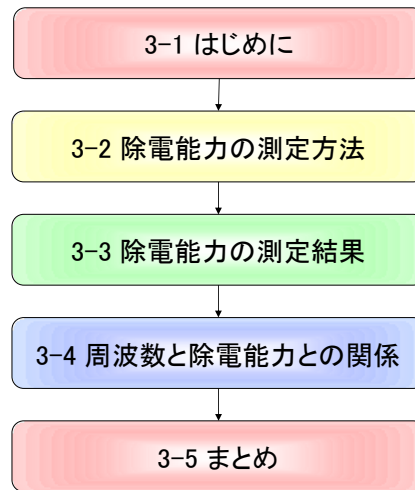


図 3-1 第 3 章のフローチャート

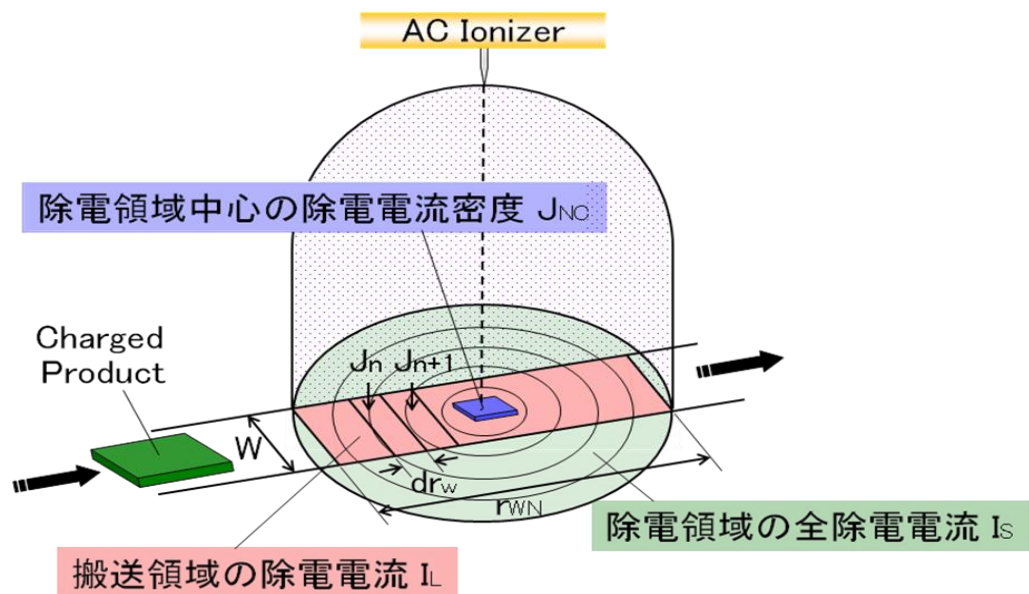


図 3-2 3 種類の除電能力の定義

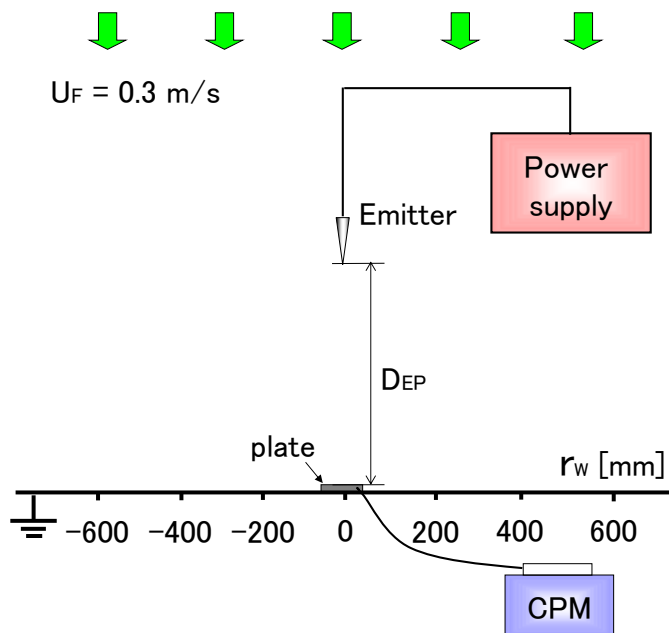


図 3-3 除電電流密度分布の測定方法

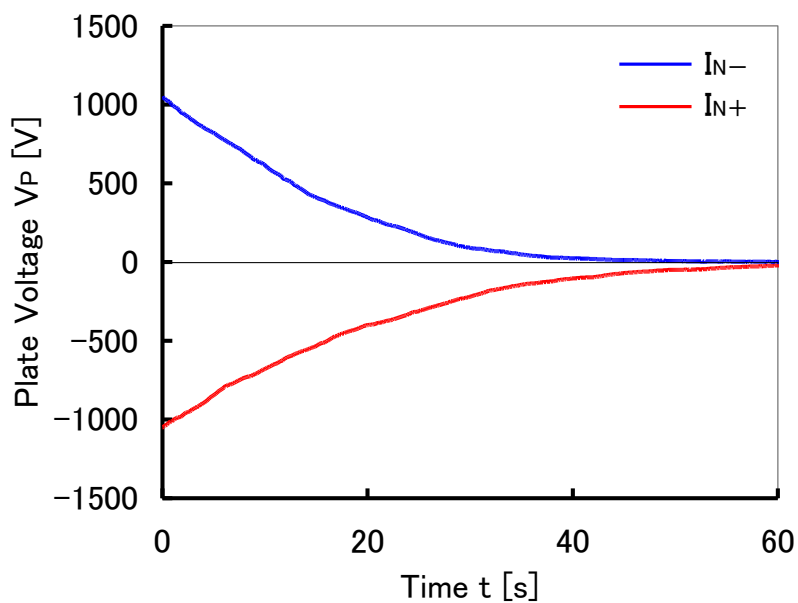


図 3-4 時間とプレート電位との関係 ($r_w = 0$ mm の場合)

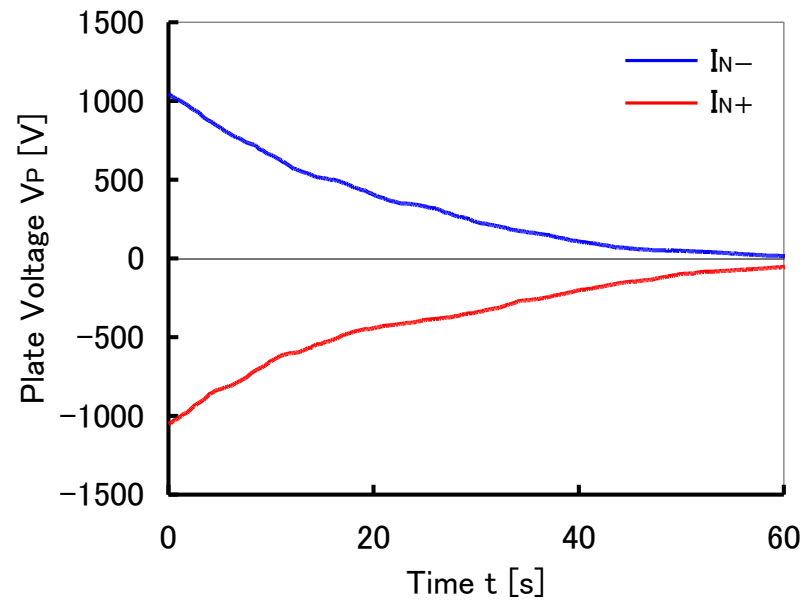


図 3-5 時間とプレート電位との関係 ($r_w = 100$ mm の場合)

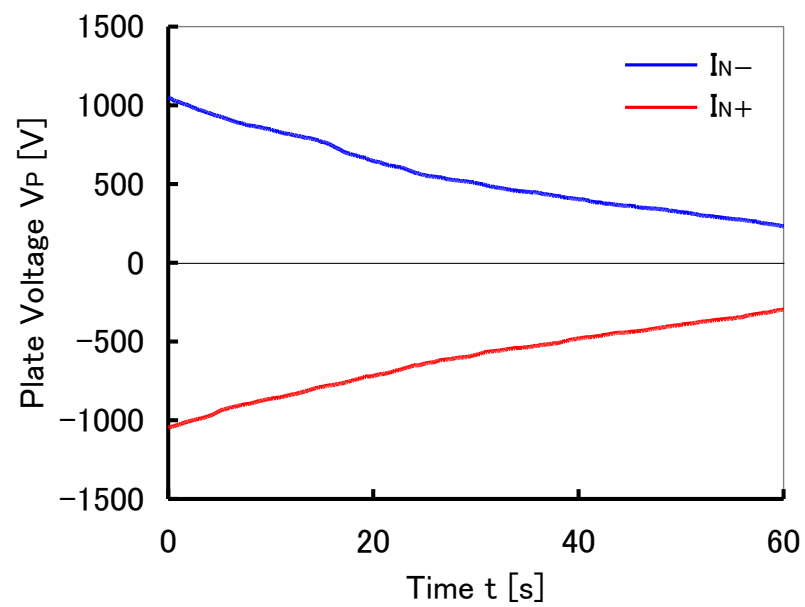


図 3-6 時間とプレート電位との関係 ($r_w = 200$ mm の場合)

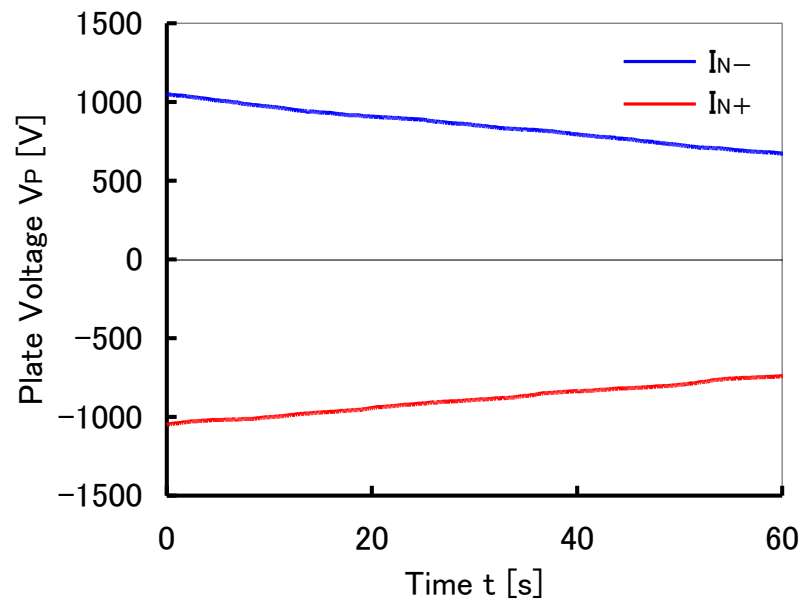


図 3-7 時間とプレート電位との関係 ($r_w = 300$ mm の場合)

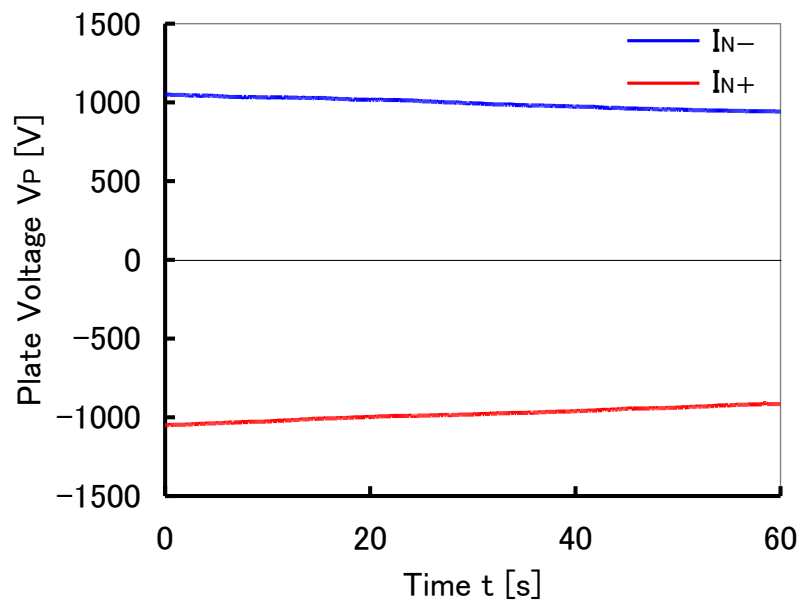


図 3-8 時間とプレート電位との関係 ($r_w = 400$ mm の場合)

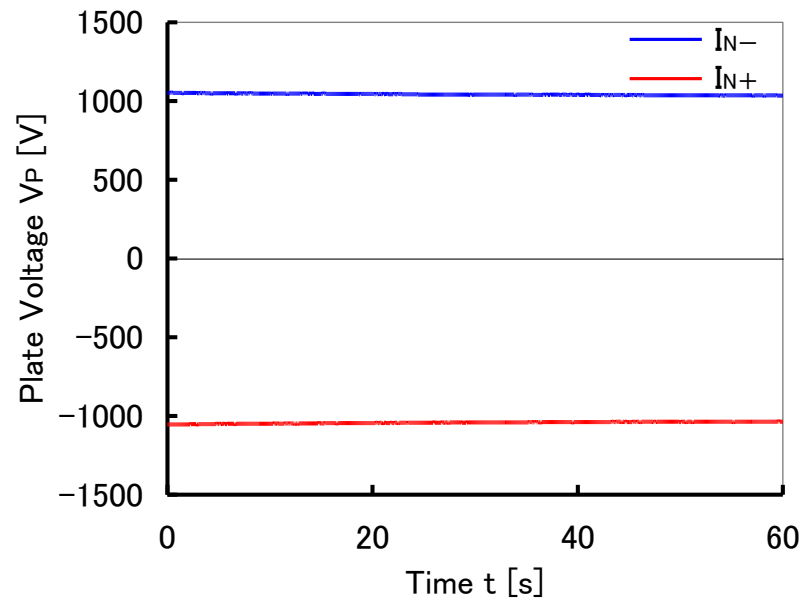


図 3-9 時間とプレート電位との関係 ($r_w = 500$ mm の場合)

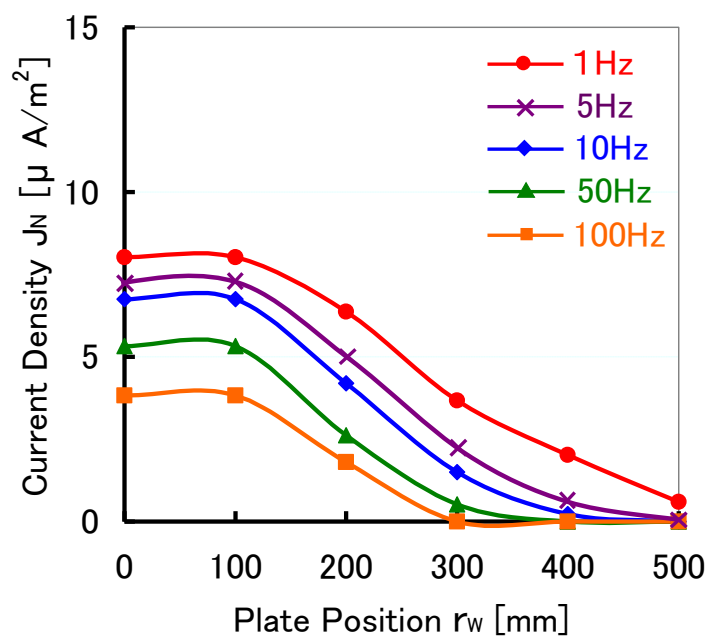


図 3-10 周波数と正の荷電粒子に基づく除電電流密度分布との関係

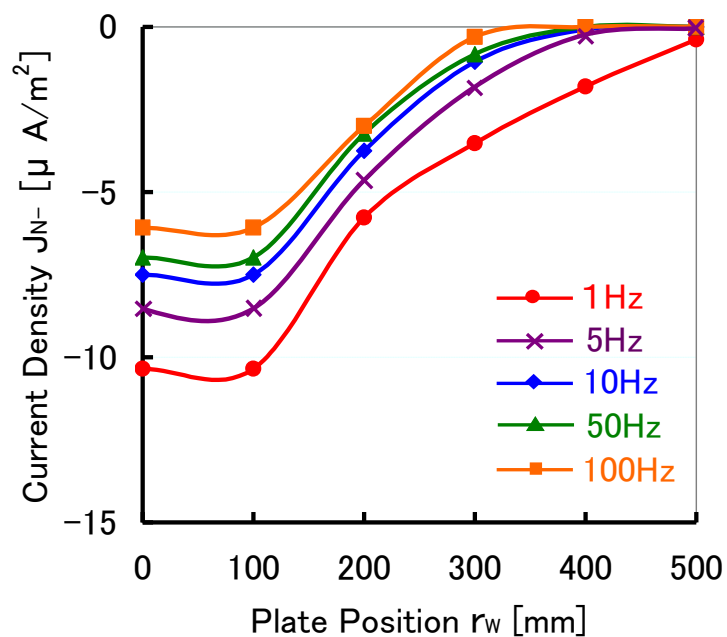


図 3-11 周波数と負の荷電粒子に基づく除電電流密度分布との関係

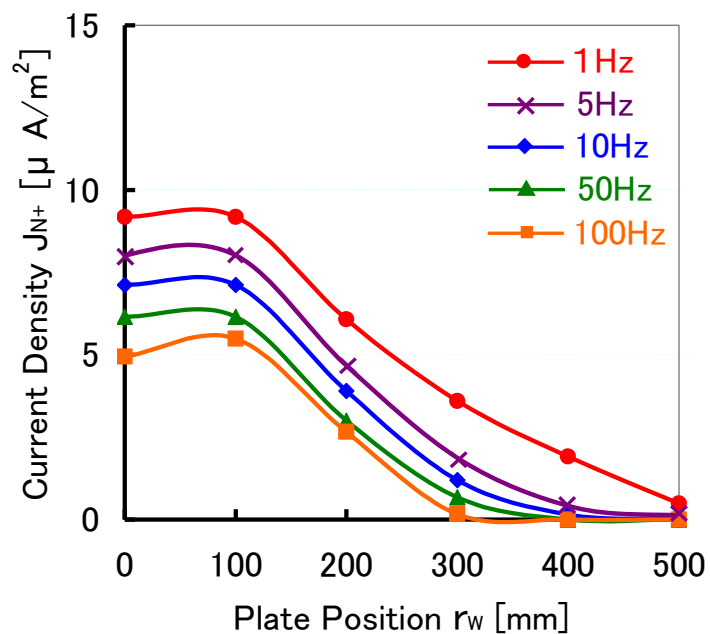


図 3-12 周波数と除電電流密度分布との関係

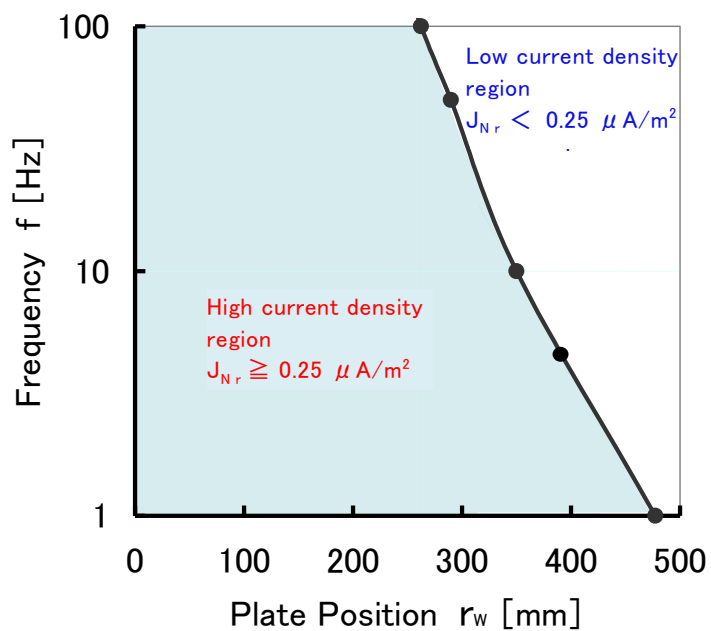


図 3-13 周波数と高除電電流密度領域との関係

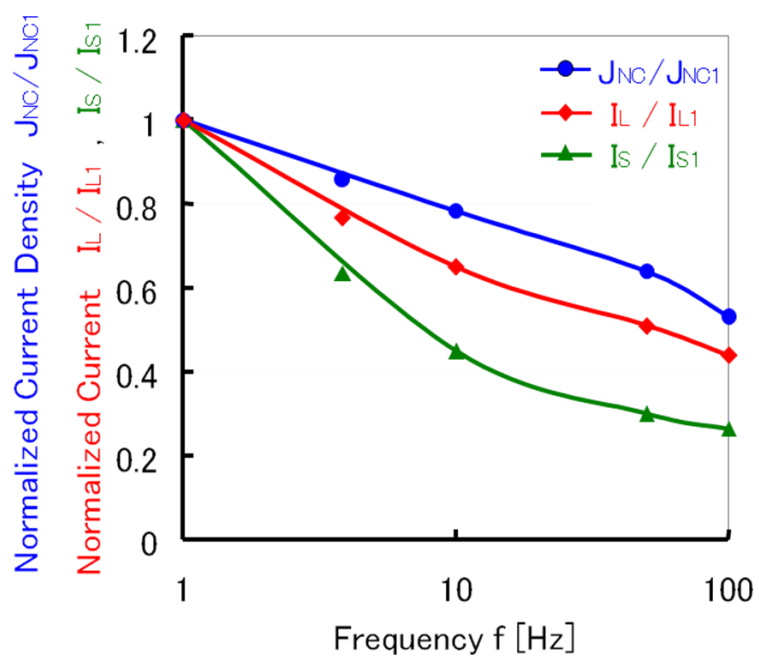


図 3-14 除電能力の周波数依存性

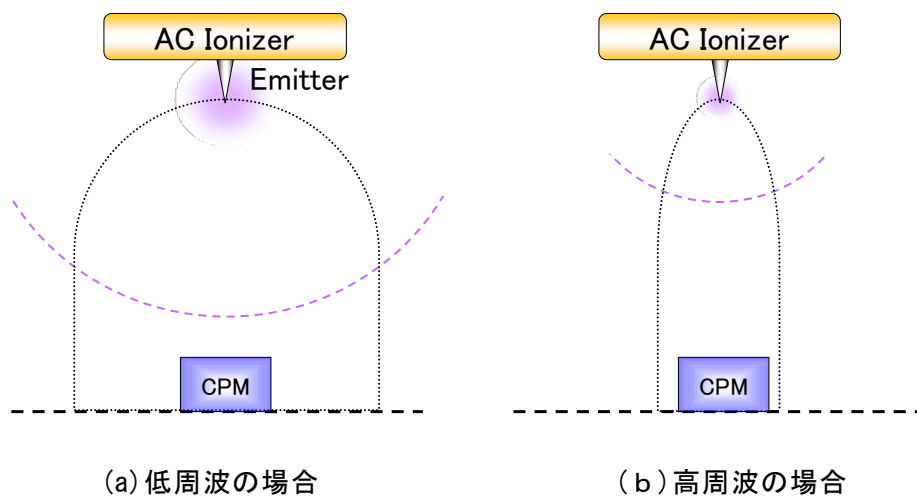


図 3-15 荷電粒子分布の周波数依存性

第 4 章

簡易帯電センサの 設計・製作・評価

第 4 章 簡易帯電センサの設計・製作・評価

4.1 はじめに

「第 2 章 イオナイザの性能の周波数依存性」では、イオナイザの性能として、除電能力の一つである除電電流密度、および被除電物の電圧振幅を扱った。また、「第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響」では、除電能力を除電領域中心の除電電流密度だけでなく、搬送領域の除電電流、除電領域の全電除電流についても検討し、総合的な見地から除電能力の周波数依存性を検討した。

そこで、次のプロセスとして、被除電物の電圧振幅について詳細な検討を行う。「第 2 章 イオナイザの性能の周波数依存性」でも述べたように、電圧振幅の発生原因としては、

- ① エミッタに充電された電荷が発生する電束に基づく電圧振幅、
- ② イオナイザによって生成された荷電粒子からの電束に基づく電圧振幅、
- ③ 被除電物に到達した荷電粒子に基づく電圧振幅

が考えられる。この内、①、②は電束に基づく電圧振幅であるから被除電物を帯電させることはない。したがって、イオナイザによる帯電特性を測定するためには、「③ 被除電物に到達した荷電粒子に基づく電圧振幅」のみを分離して測定する必要がある。このような要求を満足するためには、高感度で高速応答のセンサが必要となる。

本章では、図 4-1 のフローチャートに示すように、この電圧振幅を検討するための帯電センサの設計、製作、評価を取り扱う。まず、「4.2 簡易帯電センサの設計・製作」では、本章で提案する簡易帯電センサの動作原理を述べる。次に、このセンサの検出部を設計、製作し、この検出部の基本的特性を測定する。さらに、この検出部に周辺回路を接続し、簡易帯電センサを完成させ、本センサの有効性について議論する。「4.3 絶縁体シートの帯電特性」では、輸送中の絶縁体シートの上方でイオナイザを動作させ、この絶縁体シートが帯電する様子を測定する。さらに、絶縁体シートの帯電特性に及ぼすイオナイザの周波数の影響を測定する。また、前述の「4.2 簡易帯電セ

ンサの設計・製作」で完成させたセンサで計測できる帯電特性を示す電流ピークの信頼性を高めるために「4.3 絶縁体シートの帯電特性」との結果から、簡易帯電センサのキャリブレーションを行うとともに、簡易帯電センサの帯電検出性能に関する評価を行う。

4.2 簡易帯電センサの設計・製作

ここでは、まず、簡易帯電センサの動作原理について述べる。次に、このセンサの検出部を構成している個々の部品に関する検討結果を述べ、これらの部品を組み合わせて、検出部を完成するプロセスを述べる。なお、このセンサの検出部は、アンテナ、MOSFET、抵抗とで構成されている。ここで、MOSFETには静電破壊防止用ダイオードが内蔵させているため、この特性を含めて検討を行う。さらに、この検出部を使用して簡易帯電センサを完成するまでのプロセスを述べる。

4.2.1 簡易帯電センサの動作原理

本研究で提案している簡易帯電センサの検出部を図 4-2 に示す。このセンサの動作原理は下記のようにになっている。

イオナイザを動作させると、まず、エミッタに充電された電荷に基づく電束 Φ_E が検出部のアンテナに到達する。次に、イオナイザによって生成された荷電粒子に基づく電束 Φ_I が到達する。最後にイオナイザによって生成された荷電粒子がアンテナに到達する。このとき、抵抗 R_{GS} には図 4-3 に示すように、まず電束に基づく変位電流 I_{AD} が流れ、次に、アンテナに到達した荷電粒子に基づく伝導電流 I_{AC} が流れる。ここで、荷電粒子に基づく伝導電流 I_{AC} が被除電物に到達した場合、被除電物が帯電することになる。したがって、これらの電流を分離して検出できるセンサを完成させる必要がある。この電束に基づく変位電流 I_{AD} とアンテナに到達した荷電粒子に基づく伝導電流 I_{AC} は、到達時間に差が生じるので時間的に分離することができると考えられる。すなわち、アンテナに到達した荷電粒子に基づく伝導電流 I_{AC} は、図 4-3 に示すように電流ピークとして現れると考えられる。したがって、このセンサを使って、前述の伝導電流の電流ピークが検出されない条件でイオ

ナイザを使用すれば、被除電物は帯電しないことになる。

4.2.2 簡易帯電センサの検出部

本研究で扱う簡易帯電センサの検出部は、図 4-2 に示したように、アンテナ、MOSFET、抵抗とで構成されている。ここでは、まず、個々の部品の設計について述べる。

(1) アンテナ

検出部のアンテナは、除電領域に到達する電束や電荷を検出する部分であり、この大きさや取り付け位置の高さは検出部の性能に大きな影響を及ぼす。また、このアンテナの寸法や高さはイオナイザが発生する電界の影響を受け、この電界に基づくノイズの大きさにも影響を及ぼす。本研究では、被除電物として LSI を想定しているので、アンテナの大きさは図 4-4 に示すように LSI と同程度の大きさ、すなわち、直径 10 mm の円盤状とした。また IC 上面の高さは、回路基板表面から 10 mm 程度であることを考慮し、アンテナの位置は接地した作業テーブル表面から 10 mm の高さに設置することにした。

(2) MOSFET

本研究における検出部の動作原理は、前述のように、アンテナからゲートに流入した電流 I_A によって抵抗 R_{GS} に電圧降下を発生させ、この電圧降下によって MOSFET のドレイン-ソース間の抵抗 R_{DS} を変化させるものである。この簡易帯電センサの特性は、MOSFET の特性に大きく依存する。本研究で使用した MOSFET (2SK241) の I-V 特性を調べるための回路を図 4-5 に示す。この測定回路において、電流計はアドバンテスト社製 R8340A、電圧計は岩崎通信機社製 VOAC 7411 を使用した。このような回路で MOSFET のゲート-ソース間に 0 V ~ ±5 V の電圧を印加し、I-V 特性を測定した。この結果を図 4-6 に示す。この図から明らかであるように、この MOSFET はデプレッション型であるために、ゲート電圧が 0 V の場合にもチャンネルが形成され、 $V_{GS} = 0$ V 付近で最も大きな傾きを示している。

電束に基づく変位電流 I_{AD} とアンテナに到達した荷電粒子に基づく伝導電流 I_{AC} は数 nA 程度という微小な電流である。そこで、この MOSFET のゲート-ソース間に大きな抵抗値の抵抗を接続し、この抵抗に変位電流と伝導電

流を流すことによって、ゲートソース間に電圧降下 V_{GS} を発生させ、帯電特性の測定を可能とした。

(3) 抵抗

本研究で扱う簡易帯電センサの検出部には、MOSFET のゲートソース間に抵抗 R_{GS} が挿入されている。この抵抗 R_{GS} を使用した理由および効果について述べる。前述のように、MOSFET のゲート電圧はこの抵抗 R_{GS} の抵抗値と抵抗 R_{GS} を流れる電流 I_A の積で決定される。したがって、この抵抗 R_{GS} には、その抵抗値が変動しないことが要求される。しかし、MOSFET にはゲート酸化膜を保護するためのダイオードがゲートソース間に挿入されている。このダイオードへの印加電圧と電流との関係は非線形であるため、このダイオードに発生する電圧降下がゲート電圧に影響を及ぼすと、この検出部は正常に動作しなくなる。そこで、この保護ダイオードの特性を調べ、このダイオードに比べて十分低い抵抗をダイオードに並列に挿入することにした。

保護ダイオードの I-V 特性を測定するための回路を図 4-7 に示す。この測定回路において、電流計はアドバンテスト社製 R8340A、電圧計は岩崎通信機社製 VOAC 7411 を使用した。このような回路で MOSFET のゲートソース間に 0 V ~ ±14 V の電圧を印加し、I-V 特性を測定した。この結果を図 4-8、図 4-9 に示す。図 4-8 はゲートに正の電圧を印加した場合、図 4-9 はゲートに負の電圧を印加した場合の結果である。これらの図において、ゲートに正の電圧を印加した場合は、3 V 程度までは電流は 1 pA 以下であり、負の電圧を印加した場合は、-8 V 程度までは電流は 1 pA 以下であった。また、電圧を上昇させるに従って電流は徐々に上昇し、印加電圧の絶対値が 13 V 程度になると急峻な立ち上がり特性を示している。これらの I-V 特性の結果から、ゲートソース間に印加する電圧 V_{GS} と保護ダイオードの抵抗値 R_{GP} との関係性を求めた。この結果を図 4-10 に示す。この図において、 V_{GS} が -8 V ~ +3 V の範囲では抵抗 R_{GP} は 10 TΩ 以上であり、測定不能であった。この MOSFET の規格上のゲート電圧の最大印加電圧は ±5 V である。この図から、-5 V ~ +5 V の範囲における抵抗値 R_{GP} の最小値は $V_{GS} = +5$ V 付近で $R_{GP} = 1$ TΩ であることがわかる。ゲートソース間に挿入する抵抗 R_{GS}

には、保護ダイオードの抵抗 R_{GP} の値に比べて充分小さい抵抗値を使うことが要求される。また、保護ダイオードの抵抗値 R_{GP} は、ゲート電圧 V_{GS} が 5V 付近で急激に変化している。これらを考慮し、ゲートソース間に挿入できる抵抗 R_{GS} の最大値は、常に $R_{GP} \gg R_{GS}$ という条件を満たす抵抗値とした。本研究において、 R_{GS} の最大値は 100 M Ω 程度であるため、 R_{GP} を流れる電流が測定誤差の原因になることはない。

4.2.3 検出部の周辺回路

前述の各部品を組み合わせて、簡易帯電センサの検出部を作製した。この検出部は電流 I_A を入力とし、抵抗 R_{DS} を出力とするエネルギー制御型センサデバイスである。そこで、この検出部を使って、図 4-11 に示すような簡易帯電センサを製作した。この図において、検出部は、ブリッジ回路に組み込まれたひとつの抵抗として使用される。なお、ブリッジ回路中の抵抗 R_B はブリッジの平衡を取るための調整用抵抗である。このブリッジ回路の出力をオペアンプ(テキサス・インスツルメンツ社製 TL071)で 20 倍に増幅し、簡易帯電センサの出力電圧 V_0 を取り出すことにした。

4.2.4 簡易帯電センサの感度

ここでは、簡易帯電センサの感度について検討する。このセンサは、製品の帯電の有無を作業領域に到達する荷電粒子の有無で判定するメカニズムになっている。すなわち、荷電粒子に基づく電流の有無を測定するためのセンサである。したがって、検出部のアンテナに流入する電流を I_A 、センサからの出力電圧を V_0 とすると、このシステムの実用上の感度 S は $\partial V_0 / \partial I_A$ となる。また、このセンサは、検出部とその周辺回路で構成されている。したがって、このセンサのアンテナに荷電粒子が到達すると、

- ① I_A の変化分に基づいて V_{GS} が変化、
- ② V_{GS} の変化分に基づいて R_{DS} が変化、
- ③ R_{DS} の変化分に基づいて V_{DS} が変化、
- ④ V_{DS} の変化分に基づいて V_B が変化、
- ⑤ V_B の変化分に基づいて V_0 が変化する。

したがって、この $\partial V_0 / \partial I_A$ は、

$$\frac{\partial V_0}{\partial I_A} = \frac{\partial V_0}{\partial V_B} \cdot \frac{\partial V_B}{\partial V_{DS}} \cdot \frac{\partial V_{DS}}{\partial R_{DS}} \cdot \frac{\partial R_{DS}}{\partial V_{GS}} \cdot \frac{\partial V_{GS}}{\partial I_A} \quad (4-1)$$

となる。ここで、 V_{GS} はゲートソース間の電圧降下、 R_{DS} はドレインソース間の抵抗、 V_{DS} はドレインソース間の電圧降下、 V_B はブリッジ回路の出力電圧である。ここで、①、②、③ は、検出部の特性である。また、④、⑤ は、周辺回路の特性である。

本センサは、イオナイザが生成した荷電粒子が作業領域に到達したか否かを推定するための簡易帯電センサである。このセンサは、帯電の有無をアンテナに流入する電流によって推定する。したがって、前述の簡易帯電センサのアンテナへの入力電流の変化分 ΔI_A と出力電圧の変化分 ΔV_0 との比 $\partial V_0 / \partial I_A$ が簡易帯電センサの実用上の感度 S となる。そこで、 R_{GS} をパラメータとした時の簡易帯電センサのアンテナへの入力電流 I_A と簡易帯電センサの出力電圧 V_0 との関係を検討した。その結果を図 4-12 に示す。この図において、 R_{GS} が大きくなるに従って、 $\partial V_0 / \partial I_A$ は急激に変化している。また、 R_{GS} が大きくなるに従って、 I_A と V_0 が直線的に変化している範囲すなわち、簡易帯電センサの測定範囲が狭くなることがわかる。この関係より、簡易帯電センサの感度は抵抗 R_{GS} に大きく依存することがわかる。

この簡易帯電センサの感度 S は、

$$S = \frac{\partial V_0}{\partial I_A} = \alpha \cdot R_{GS} \quad (4-2)$$

と表すことができる。ここで、 R_{GS} は感度選択用抵抗、 α は周辺回路の感度である。したがって、簡易帯電センサの出力電圧 V_0 は、

$$V_0 = \alpha \cdot R_{GS} \cdot I_A \quad (4-3)$$

と表すことができる。この式より、簡易帯電センサの感度は感度選択用抵抗

R_{GS} によって感度が変わることがわかる。そこで、本センサでは測定条件に応じて感度選択用抵抗 R_{GS} を $10 \text{ M}\Omega \sim 100 \text{ M}\Omega$ の範囲で自由に変えられる構造とした。また、この出力電圧からアンテナに流入する電流 I_A を求める際には、

$$I_A = \frac{1}{\alpha R_{GS}} \cdot V_0 \quad (4-4)$$

で算出することが可能となる。したがって、簡易帯電センサの除電電流密度 J_A は、

$$J_A = \frac{I_A}{S_{CS}} = \frac{1}{\alpha R_{GS} S_{CS}} \cdot V_0 \quad (4-5)$$

となる。ここで、 S_{CS} は簡易帯電センサのアンテナの面積である。

4.2.5 帯電特性の測定

上述のように設計した簡易帯電センサを用いて帯電特性を測定した。ここでは、この帯電特性の測定方法、および測定結果について述べる。

(1) 測定方法

アンテナに到達する荷電粒子の有無は、簡易帯電センサから得られる除電電流密度 J_A より検討を行った。この実験を行うに当たって、エミッタへの印加電圧 V_E は 7 kV 一定、風速 U_F は 0.3 m/s 一定、エミッタから簡易帯電センサのアンテナまでの距離 D_{EP} は 300 mm 一定とした。なお、この測定を行うに当たって、イオナイザの動作周波数 f は 1 Hz とした。また、本実験で使用する簡易帯電センサについては、一般的なイオナイザの除電電流密度 J_A が $10 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 程度であることを考慮し、その 10 倍の $100 \mu\text{A}/\text{m}^2$ までを測定範囲とした。なお、この電流密度の荷電粒子がアンテナ ($S_{CS} = 75 \text{ mm}^2$) に流入した際、その電流は 10 nA 程度となる。そこで、感度選択用抵抗 R_{GS} については、最高感度で測定するために、この電流によってゲートソース

間電圧に MOSFET が直線領域を示す電圧範囲 ($\pm 0.5V$) が発生するように R_{GS} は $50 M\Omega$ とした。

(2) 測定結果

図 4-13 は、イオナイザの動作周波数を $1 Hz$ 、エミッタへの印加電圧 V_E を $7kV$ で動作させた場合の簡易帯電センサの出力結果である。この結果より、前述の図 4-3 で示したアンテナに到達する荷電粒子に基づく伝導電流の電流ピークを確認することができた。この結果から、本センサで帯電の有無を確認することができると考えられる。

4.3 絶縁体シートの帯電特性

「4.2 簡易帯電センサの設計・製作」では、帯電特性を測定できるセンサを完成させた。この簡易帯電センサによる測定の際に現れる電流ピークは、イオナイザが生成した荷電粒子による帯電を示していると考えられる。そこで、本節では、簡易帯電センサによる測定の際に現れる電流ピークの意味を確認するために、図 4-14 に示すような絶縁体シートの帯電実験を行い、簡易帯電センサによる測定結果と比較検討する。

4.3.1 絶縁体シートによる帯電実験の原理

絶縁体シートによる帯電実験の原理は、次の通りである。まず、搬送装置で絶縁体シートを移動させた状態でイオナイザを動作させると、イオナイザが生成した荷電粒子が絶縁体シートを帯電させる。次に、この帯電した絶縁体シートの電位を表面電位計（ヒューグルエレクトロニクス株式会社 MODEL-720）で測定し、イオナイザによる帯電の様子を観察する。ここで、この絶縁体シートの帯電電圧が高くなることと、簡易帯電センサの電流ピークが発生することは、両者ともイオナイザによる帯電を意味していると考えられる。したがって、これらの二つの現象が同時に発生すれば、簡易帯電センサのピークが帯電を示していることになる。なお、この帯電実験で使用する実験装置は、

- ① 絶縁体シート除電用イオナイザ、
- ② イオナイザ、

- ③ 搬送装置、
- ④ シールド、
- ⑤ 表面電位計

とで構成されている。

この実験を行うに当たって、実験装置内の絶縁体シートが搬送中に摩擦や剥離によって帯電する可能性がある。この帯電は、本実験の誤差の原因となる。また、イオナイザのエミッタやイオナイザが発生した荷電粒子が発生する電束の影響が表面電位計に現れることが懸念される。そこで、これらの影響を除去して実験を行うことにした。

4.3.2 絶縁体シートの摩擦帯電と剥離帯電の影響

前述のように、絶縁体シートの帯電実験を行う際、イオナイザの荷電粒子が存在しなくても帯電が現れることが考えられる。その帯電要因は、二つ挙げられる。一つは、搬送装置の絶縁体シートとシートを搬送するローラーが擦れることによって生じる摩擦帯電である。もう一つは、搬送装置の絶縁体シートとシートを搬送するローラーとの接触面が剥がれることによって生じる剥離帯電である。したがって、荷電粒子に基づく帯電特性を測定する際、絶縁体シートに生じる摩擦帯電や剥離帯電の影響を除去する必要がある。そこで、図 4-15 に示す実験装置を用いて、搬送装置を動作させた際の絶縁体シートの帯電特性を検討した。この結果を図 4-16 に示す。この結果から、搬送装置を動作させた場合、常に-150 V 程度に帯電することがわかる。そこで、この影響を除去するために、図 4-17 に示すような絶縁体シート除電用イオナイザを設置し、このイオナイザによって絶縁体シートを除電することを試みた。この結果を図 4-18 に示す。この図からわかるように、摩擦や剥離による絶縁体シートの帯電は、除電用イオナイザを使用することで $\pm 20V$ の範囲内に抑えられることが確認できた。このことから、除電用イオナイザを使用することによって、絶縁体シートが摩擦や剥離によって帯電する現象はほとんど除去できることが明らかになった。

4.3.3 イオナイザからの静電誘導の影響

図 4-14 に示した実験装置で絶縁体シートの帯電を測定する場合、表面電

位計は次の 2 種類の電圧を同時に測定すると考えられる。すなわち、

- ① 静電誘導に基づく電圧 V_{Φ} : イオナイザのエミッタやイオナイザが生成した荷電粒子が発生する電束に基づく電圧、
- ② 帯電電圧 V_Q : 絶縁体シートの帯電に基づく電圧

である。

この帯電実験では、イオナイザが生成した荷電粒子による帯電特性を測定しているため、静電誘導に基づく電圧 V_{Φ} は誤差の原因となる。したがって、この電圧 V_{Φ} を除去する必要がある。そこで、図 4-19 に示すように表面電位計の周囲を金属製のシールドで覆い、電圧 V_{Φ} を除去することを試みた。この図に示すようにシールドを設置して搬送装置を停止させた状態では、表面電位計は電圧 V_{Φ} だけを表示する。図 4-20 は、このような状態で電圧 V_{Φ} を測定した結果である。この結果から、シールドを施したにも関わらず、表面電位計には ± 500 V 程度の電圧 V_{Φ} が現れることが明らかになった。

そこで、この電圧 V_{Φ} の影響を除去するために、まず、図 4-21 に示す方法、すなわち搬送装置を動作させた状態で、帯電電圧 V_Q と電圧 V_{Φ} を同時に測定した。次に、図 4-19 に示す方法、すなわち搬送装置を止めた状態で電圧 V_{Φ} を測定した。図 4-22 に帯電電圧 V_Q と電圧 V_{Φ} の和、すなわち表面電位計の出力表示 ($V_Q + V_{\Phi}$) を示す。また、図 4-20 に電圧 V_{Φ} の測定結果を示す。これらの図における表面電位計の出力表示 ($V_Q + V_{\Phi}$) と電圧 V_{Φ} の差から、帯電電圧 V_Q を算出した。この結果を図 4-23 に示す。したがって、このような方法によって電圧 V_{Φ} を除去できることが明らかになった。

なお、図 4-21 に示す方法で帯電電圧 V_Q と電圧 V_{Φ} を同時に測定する際、表面電位計の出力表示は両者の和 ($V_Q + V_{\Phi}$) となる。したがって、表面電位計の設置位置は、帯電電圧 V_Q の最大値と電圧 V_{Φ} の最大値を同時に測定できる位置にしなければならない。すなわち、表面電位計の配置位置は、

$$L_{ES} = U_s \cdot T = \frac{1}{f} \quad (4-6)$$

を満足する位置にしなければならない。ここで、 L_{ES} はエミッタから表面電位計までの距離、 U_s は絶縁体シートの手速度、 f はイオナイザの動作周波数である。

4.3.4 絶縁体シートの手電特性の手測定結果

絶縁体シートを使った手電特性の実験は、イオナイザの動作周波数 f を 1 ~ 100 Hz の範囲で変化させ、「4.3.2 イオナイザからの手電誘導の影響」で述べた測定方法で行った。この実験において、イオナイザのエミッタへの印加電圧 V_E は 7 kV 一定、エミッタから絶縁体シートまでの距離 D_{EP} は 300 mm 一定、風速 U_F は 0.3 m/s 一定とした。また、測定結果の手電電圧 V_Q は、変動幅の最大値から最小値までの値とした。このようにして測定した結果を図 4-24 に示す。この図から、動作周波数 f が高くなるに従って、絶縁体シートの手電に基づく電圧は低くなることがわかる。

4.3.5 簡易帯電センサの手キャリブレーション

「4.2 簡易帯電センサの設計・製作」で完成させた簡易帯電センサの手キャリブレーションを行った。このキャリブレーションを行うに当たって、エミッタへの印加電圧 V_E は 7 kV 一定、エミッタから絶縁体シートおよび簡易帯電センサまでの距離 D_{EP} は 300 mm 一定、風速 U_F は 0.3 m/s 一定とした。なお、動作周波数 f は、1 ~ 100 Hz の範囲で変化させた。このような条件下で、簡易帯電センサを使用して電流ピークの有無を測定した。この結果と図 4-24 に示した結果を重ね合わせた結果が図 4-25 である。なお、本研究では手電電圧 V_Q が 100 V 以上の場合を手電状態として扱うことにした¹⁶⁾。この結果において、簡易帯電センサの電流ピークが現れた周波数範囲は赤色で塗りつぶされている。一方、電流ピークが現れなかった周波数範囲は緑色で塗りつぶされている。この結果から、簡易帯電センサの電流ピークが現れている周波数範囲において、絶縁体シートの手電電圧は急激に上昇している。すなわち、絶縁体シートが手電した周波数範囲と簡易帯電センサの電流ピークが現れた周波数範囲が一致することがわかる。以上の結果より、簡易帯電センサの電流ピークから、手電の有無を検出できることが明らかになった。

4.4 まとめ

本章では、被除電物の電圧振幅について詳細な検討を行うための簡易帯電センサを提案し、設計、製作を行った。また、簡易帯電センサの電流ピークが被除電物の帯電を測定していることを確認するための帯電実験を行った。この成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 提案した簡易帯電センサをイオナイザの下で使用した場合、除電電流密度波形にピークが現れることが明らかになった。
- (2) このピークは絶縁体シート帯電実験で計測した帯電を示す電圧と一致する。
- (3) 簡易帯電センサで帯電特性の測定ができることが明らかになった。

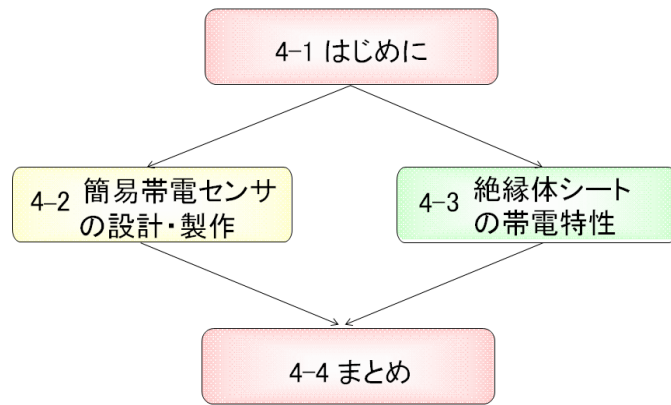


図 4-1 第 4 章のフローチャート

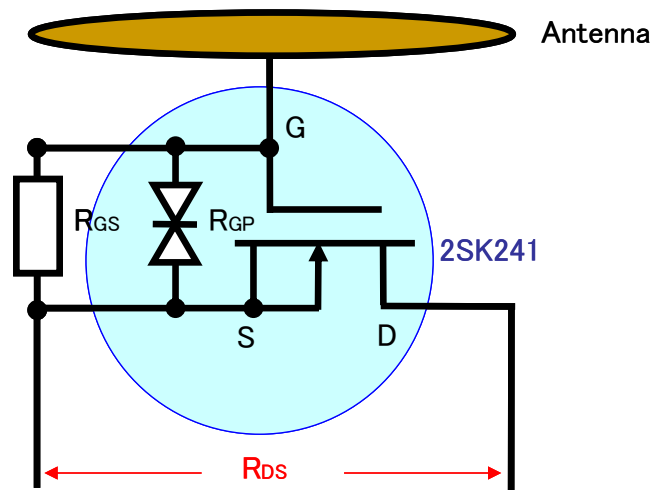


図 4-2 簡易帯電センサの検出部

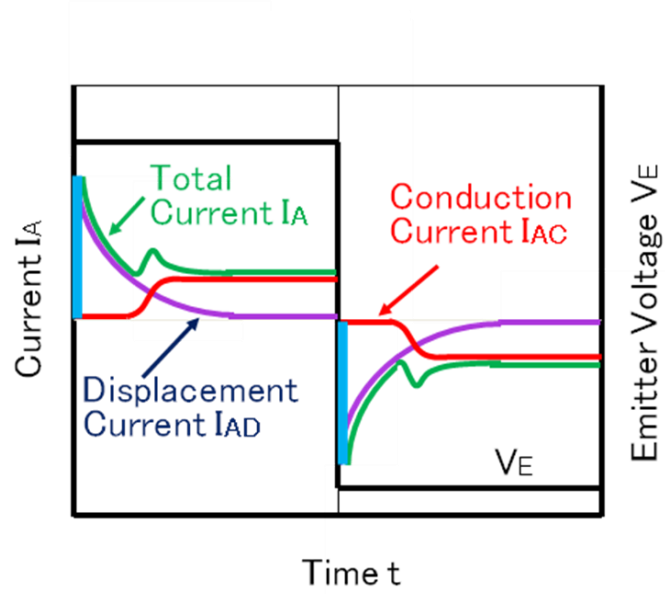


図 4-3 ゲートソース間の抵抗 R_{GS} に流れる電流

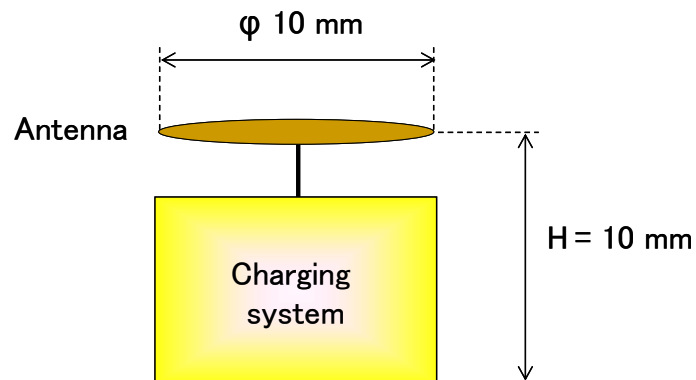


図 4-4 簡易帯電センサのアンテナの位置と大きさ

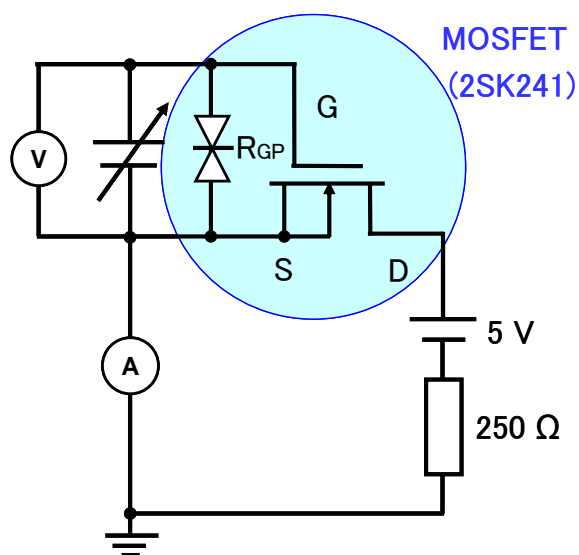


図 4-5 MOSFET の I-V 特性評価回路

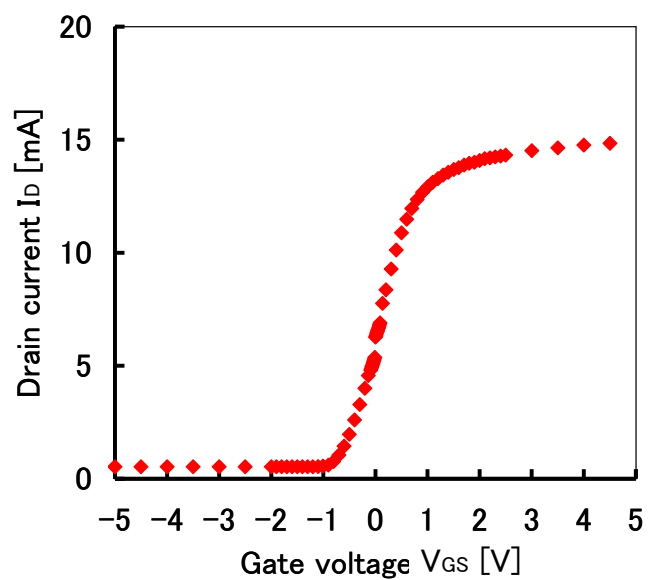


図 4-6 MOSFET の I-V 特性

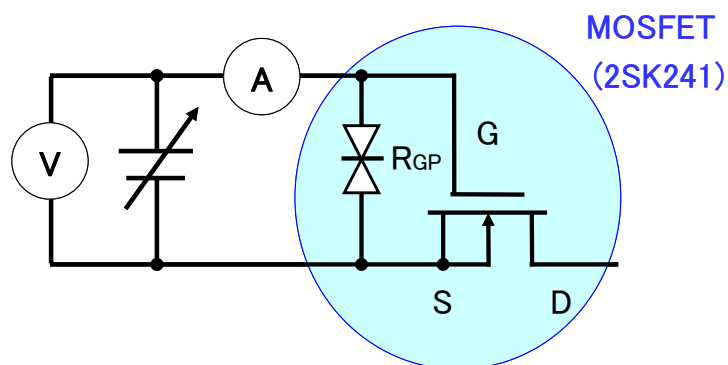


図 4-7 保護ダイオードの I-V 特性評価回路

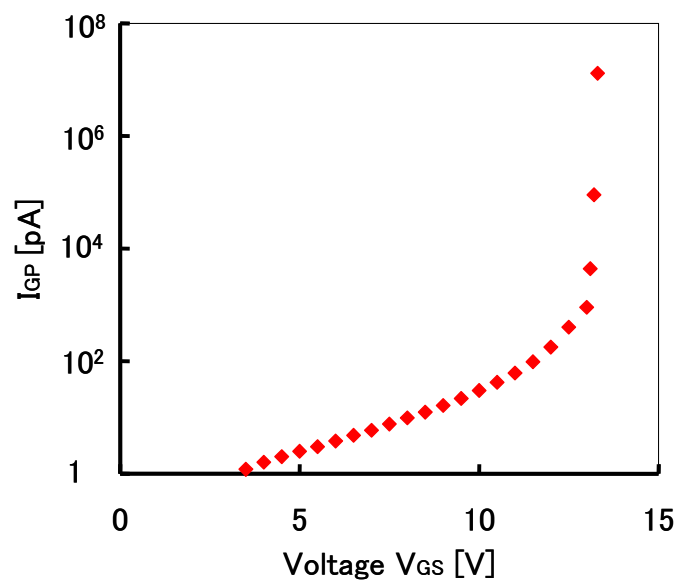


図 4-8 保護ダイオードの I-V 特性 (V_{Gs} に正の電圧を印加した場合)

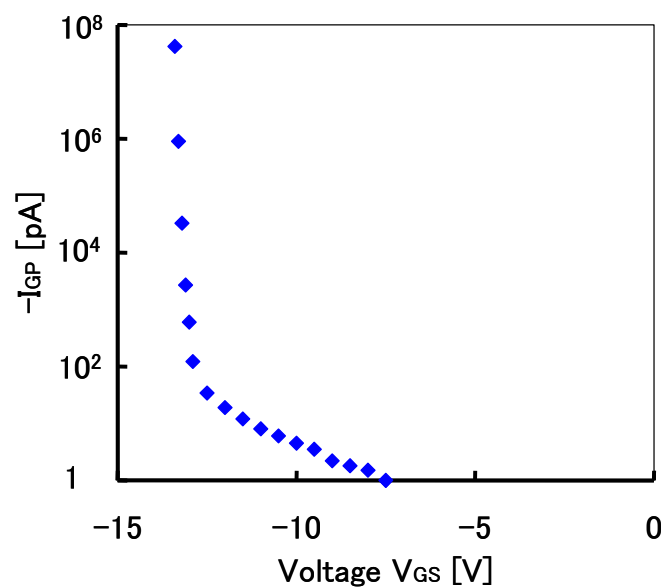


図 4-9 保護ダイオードの I-V 特性 (V_{GS} に負の電圧を印加した場合)

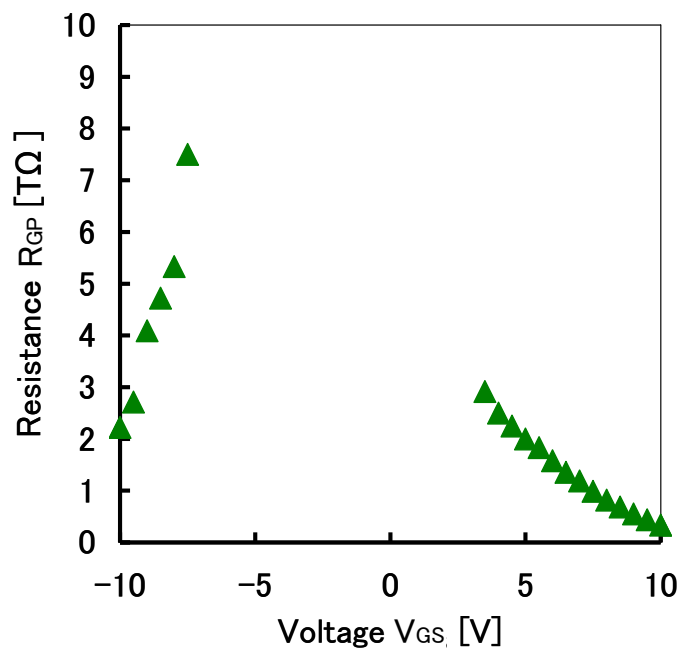


図 4-10 ゲートソース間電圧 V_{GS} と保護ダイオードの抵抗値 R_{GP} との関係

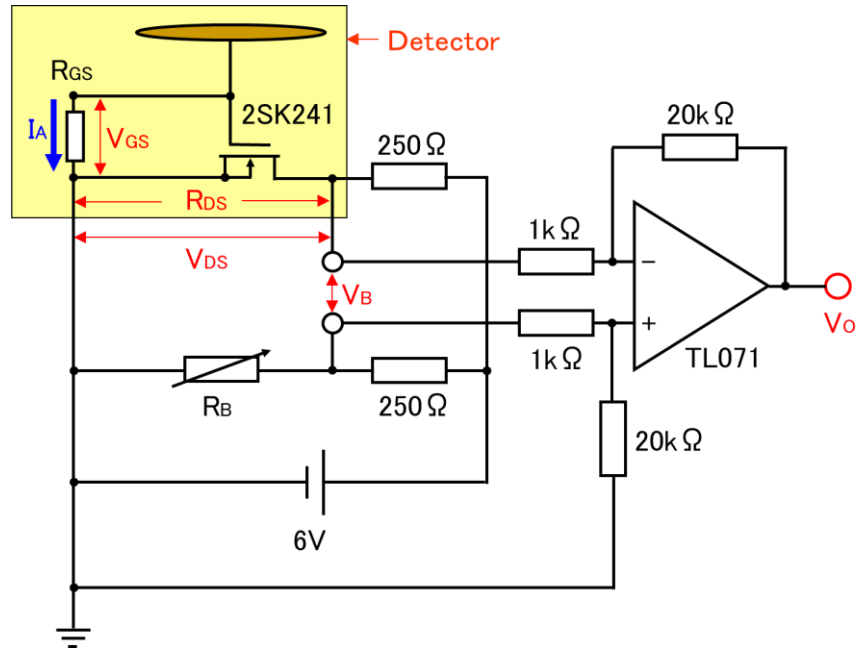


図 4-11 簡易帯電センサの回路図

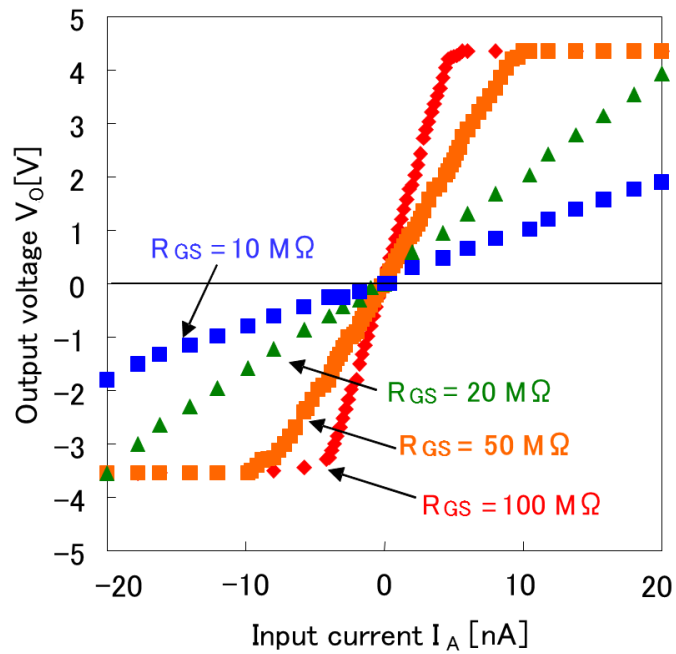


図 4-12 抵抗 R_{GS} をパラメータとした時の簡易帯電センサのアンテナへの入力電流 I_A と出力電圧 V_o の関係

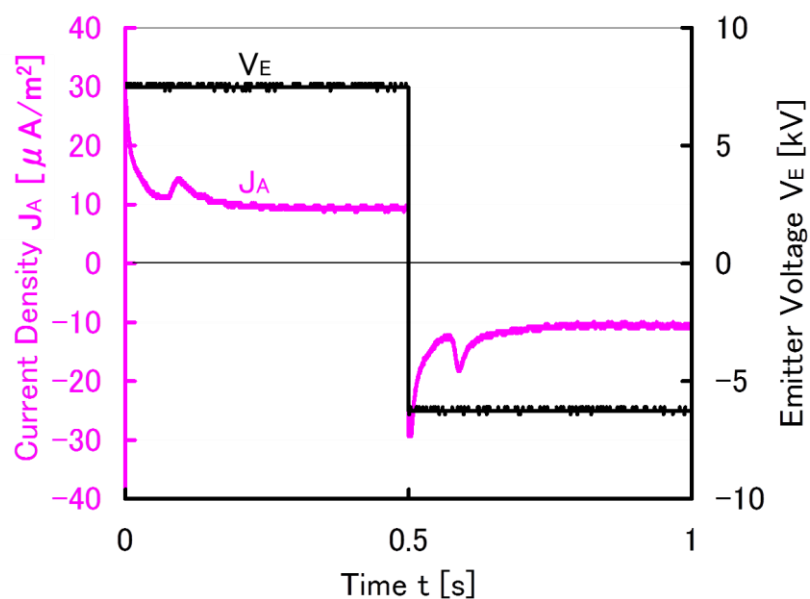


図 4-13 簡易帯電センサの出力結果 (DEP = 300 mm、 $V_E = 7$ kV とした場合)

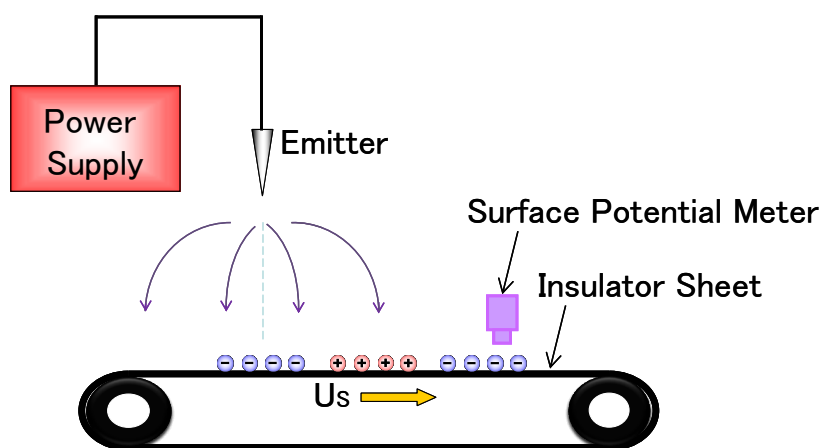


図 4-14 絶縁体シートの帯電特性測定用実験装置

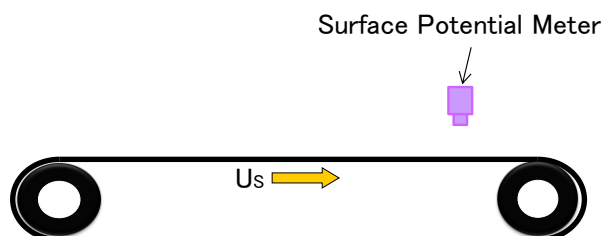


図 4-15 絶縁体シートの帯電特性測定装置の摩擦帯電と剥離帯電の測定方法

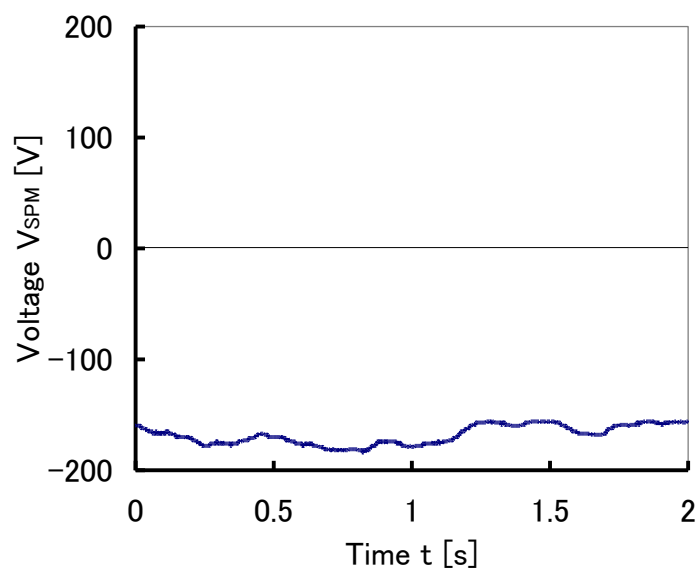


図 4-16 絶縁シート帯電特性測定装置の摩擦帯電と剥離帯電の測定結果

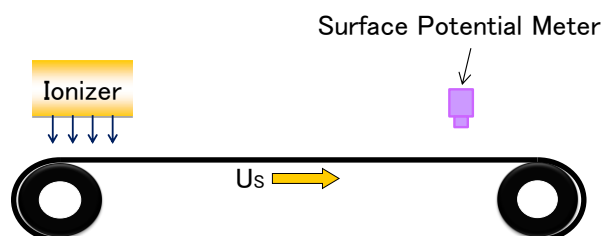


図 4-17 摩擦帯電と剥離帯電の除去方法

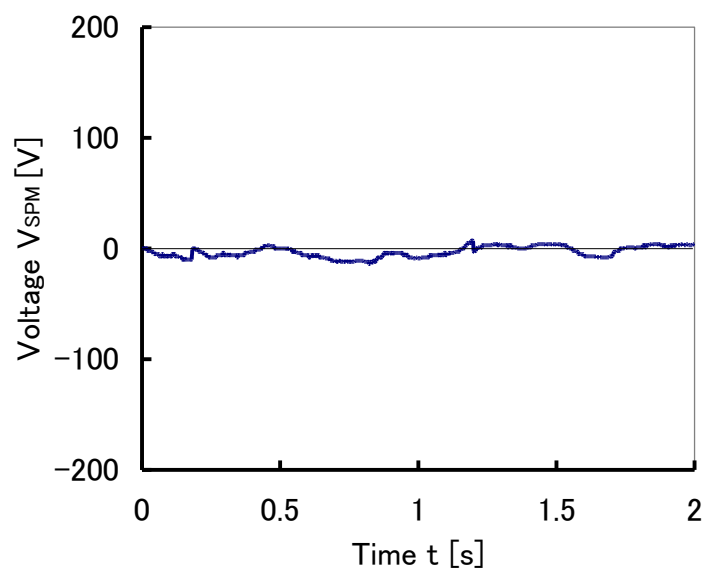


図 4-18 摩擦帯電と剥離帯電除去後の測定結果

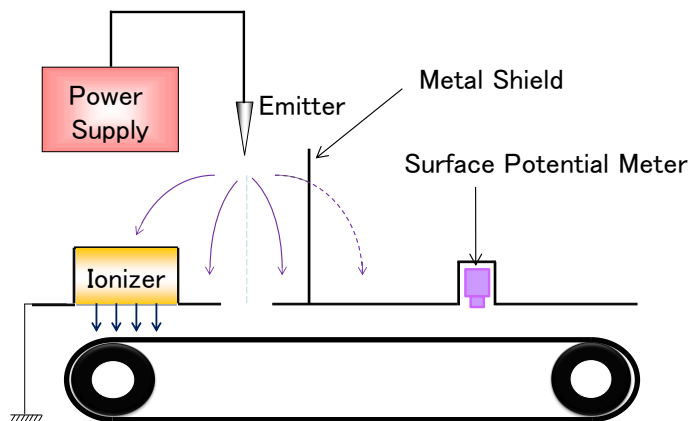


図 4-19 イオナイザが生成した荷電粒子とエミッタから発生した電束に基づく SPM の測定方法

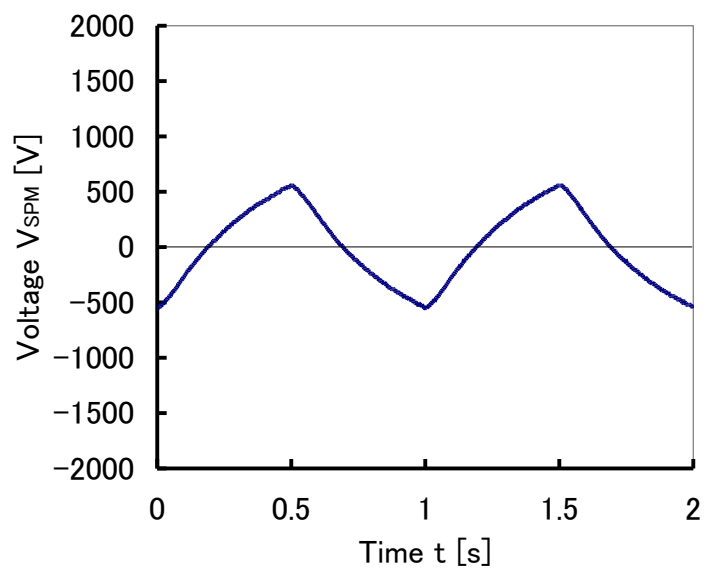


図 4-20 イオナイザが生成した荷電粒子とエミッタから発生した電束に基づく SPM の出力結果

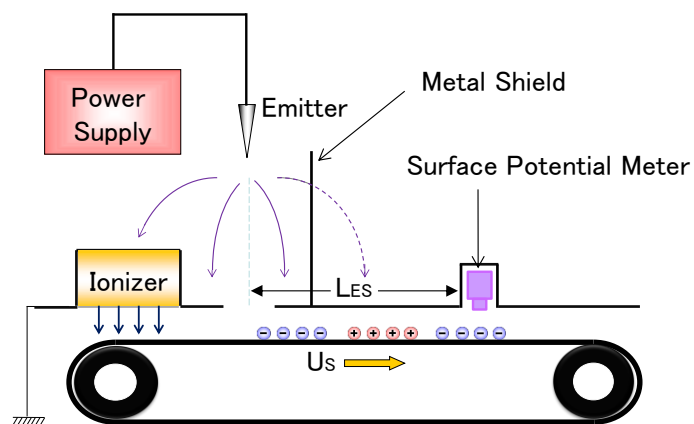


図 4-21 エミッタから発生した電束と絶縁体シートに帯電した荷電粒子に基づく SPM の測定方法

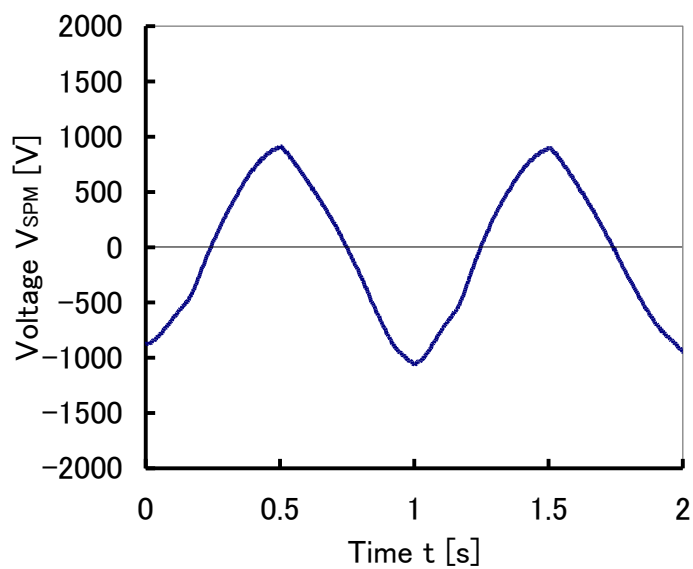


図 4-22 エミッタから発生した電束と絶縁体シートに帯電した荷電粒子に基づく SPM の出力結果

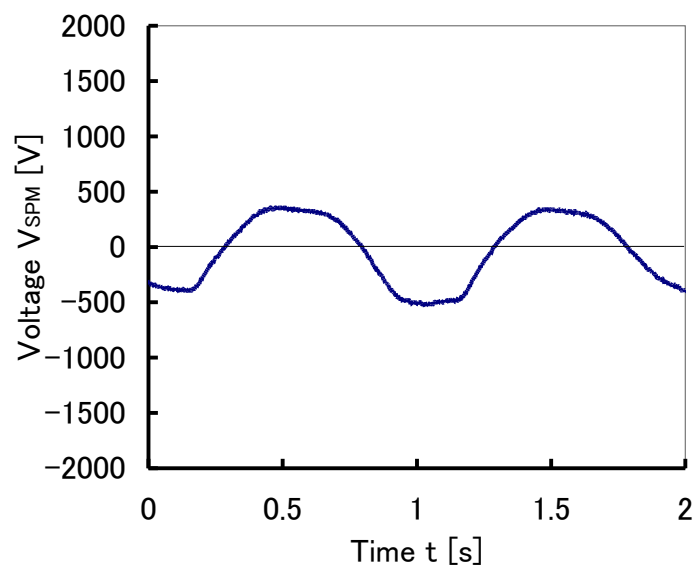


図 4-23 絶縁体シートに帯電した荷電粒子に基づく SPM の出力結果

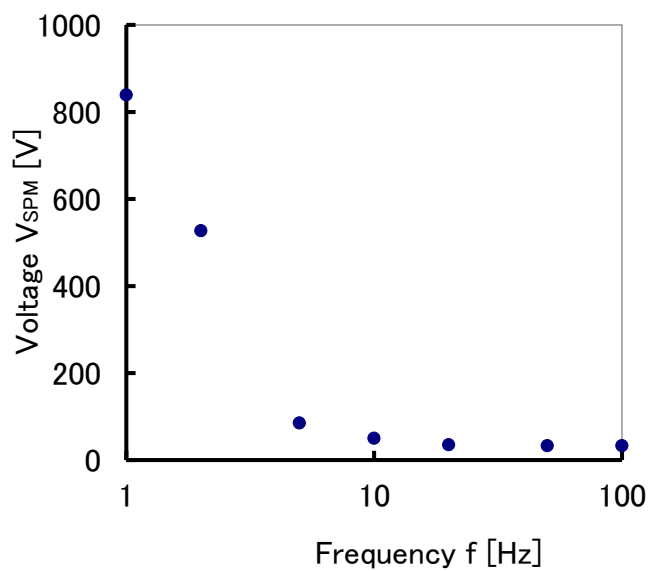


図 4-24 絶縁体シートに帯電した荷電粒子に基づく SPM の出力の周波数依存性

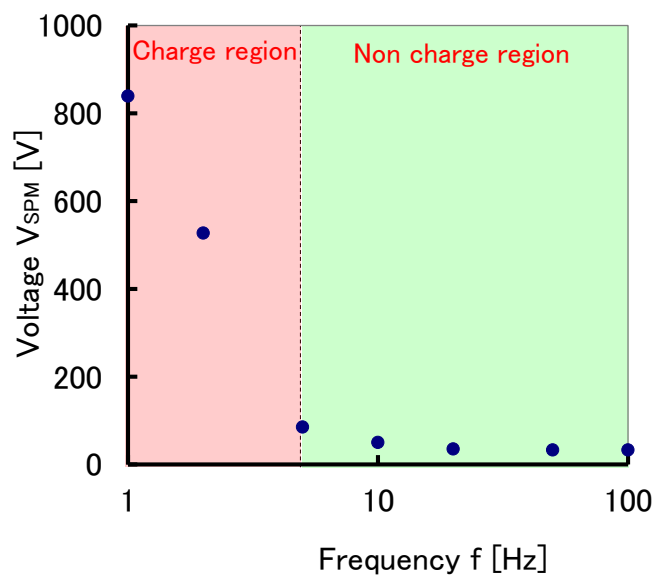


図 4-25 絶縁体シートに帯電した荷電粒子に基づく SPM の出力と簡易帯電センサで測定した帯電状態との比較

第 5 章

最適周波数の決定

第 5 章 最適周波数の決定

5.1 はじめに

「第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響」では、3 種類の除電能力、すなわち除電領域中心の除電電流密度、搬送領域の除電電流、除電領域の全除電電流の周波数依存性を検討した。また、「第 4 章 簡易帯電センサの設計・製作・評価」では、被除電物の帯電特性を測定するための簡易帯電センサを作製した。そこで、本章では図 5-1 のフローチャートに示すように、これらの成果を利用して、イオナイザを除電器として最高性能で動作させるための最適周波数を決定するための方法論を検討する。「5.2 最適周波数の定義と決定方法」では、最適周波数の定義を決定し、この最適周波数を決定するための方法を確立する。次に、本決定法の実用性を検討するために、「5.3 最適周波数と動作条件との関係」では、エミッタから被除電物までの距離、エミッタへの印加電圧の値を変化させ、それぞれの場合の最適周波数について検討する。

5.2 最適周波数の定義と決定方法

ここでは、まず、本研究における最適周波数の定義を明確にし、次に、最適周波数の決定方法について述べる。

5.2.1 最適周波数の定義

イオナイザが除電器として最高性能を発揮するためには、「第 1 章 序論」の「1.3 イオナイザの動作条件と性能の関係」のイオナイザに期待される性能で述べたように、

- ① 除電速度が高いこと、
- ② 製品を帯電させないこと

が重要である。そこで、本研究では AC コロナ放電型イオナイザの最適周波数は、

- ① 除電能力が最も高く、
- ② 荷電粒子が被除電物を帯電させない周波数

と定義して検討を進める。

5.2.2 最適周波数の決定方法

「第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響」では、除電能力を除電領域中心の除電電流密度、搬送領域の除電電流、除電領域の全除電電流の 3 種類に分け、その周波数依存性を検討した。この結果、除電能力の種類に関係なく、除電能力は周波数が低くなるに従って高くなることが明らかになった。したがって、イオナイザの除電能力を高めるためには、動作周波数は低い方が望ましいことになる。

一方、被除電物を帯電させないためには、「第 4 章 簡易帯電センサの設計・製作・評価」で製作したセンサを用いて測定した際、荷電粒子に基づく電流ピークが現れないことが条件となる。この二つの条件を満足する周波数がイオナイザの最適周波数 f_0 となる。

図 5-2 は、動作周波数 f を変化させた場合の除電電流密度 J_A の測定結果である。この図において、動作周波数は (a) 1 Hz、(b) 5 Hz、(c) 10 Hz である。1 Hz の場合は、荷電粒子に基づく電流ピークが正負の両極で確認できる。5 Hz の場合では、負の荷電粒子に基づく電流ピークは検出されたが、正の電流ピークは検出されなかった。10 Hz の場合では、電流ピークは正負ともに現れなかった。そこで、最適周波数は、負の荷電粒子の電流ピークに基づき検討を行う。電流ピークを発生させないためには、エミッタ電圧の周期を T 、荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間を t_t とした場合、 $T/2 < t_t$ を満足すること、すなわち $f_0 > 1/2t_t$ が条件となる。ここで、上述のように除電能力を高めるためには、動作周波数 f を低くすることが要求される。この要求を加味すると最適周波数 f_0 は、

$$f_0 = \frac{1}{2t_t} \quad (5-1)$$

となる。

以上のことから、最適周波数決定法は、

- ② 前述の簡易帯電センサを使用して除電電流密度 J_A を測定、
- ② 負の荷電粒子に基づく除電電流密度 J_A の電流ピークから荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間 t_t を測定、
- ③ $t_t = T/2 = 1/2f_0$ から f_0 を決定

の手順となる。

5.2.3 考察

最適周波数を決定するプロセスで、簡易帯電センサで除電電流密度を測定した際、図 5-2 (b) に示したように、電流ピークが負の除電電流密度 J_A だけ現れた。これは、エミッタで発生した正の荷電粒子と負の荷電粒子がアンテナに到達するまでの時間に差ができたことを意味する。このように、正の荷電粒子に基づく電流ピークと負の荷電粒子に基づく電流ピークの現れる時間に差が発生する理由は次のように考えられる。図 5-3 は、イオナイザによって生成された正と負の荷電粒子が半周期に進む距離、すなわち荷電粒子の広がりを表した図である。正と負の荷電粒子の易動度は、正の荷電粒子では $1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、負の荷電粒子では $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ である¹⁷⁾。したがって、エミッタ近傍の電界の大きさが一定の場合、正の荷電粒子の速度と負の荷電粒子の速度を比較すると、負の荷電粒子の方が高くなる。この結果、エミッタで発生した荷電粒子が被除電物まで到達するまでの時間 t_t は、負の荷電粒子のほうが短くなる。したがって、簡易帯電センサで除電電流密度を測定した際に、正の荷電粒子に基づく電流ピークと負の荷電粒子に基づく電流ピークに差が生じたと考えられる。

5.3 最適周波数と動作条件との関係

「第 2 章 イオナイザの性能の周波数依存性」、「第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響」および「第 4 章 簡易帯電センサの設計・制作・評価」では、イオナイザのエミッタへの印加電圧 V_E とエミッタから被除電物までの距離 D_{EP} は、一定として検討を進めてきた。ここでは、本研究で検討した最適周波数決定法の実用性の評価を行う。すなわち、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} を変化させた場合、およびエミッタへの印加電圧 V_E を変化

させた場合に、本研究で確立した最適周波数決定法を適応して最適周波数 f_0 を求めた。

5.3.1 最適周波数に及ぼすエミッタから被除電物までの距離の影響

エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} は、200 mm ~ 400 mm の範囲で距離を変化させ、それぞれの距離 D_{EP} における最適周波数を検討した。この検討を行うに当たって、エミッタへの印加電圧 V_E は 7 kV 一定、風速 U_F は 0.3 m/s 一定とした。このような条件でイオナイザを動作させ、「5.2.2 最適周波数の決定方法」で述べた方法で最適周波数を決定した。なお、この測定を行うに当たって、イオナイザの動作周波数 f は 1 Hz とした。

図 5-4、図 5-5、図 5-6 は、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} を 200 mm、300 mm、400 mm とした場合の結果である。この結果より、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} は、長くなるに従って除電電流密度 J_A に現れる電流ピークの出現時間が遅くなることがわかる。また、除電電流密度 J_A に現れる電流ピークが小さくなることがわかる。

これらの結果から最適周波数を検討する。まず、200 mm、300 mm、400 mm のそれぞれに対して、荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間 t_t は、正の荷電粒子の場合、42 ms、104 ms、218 ms、負の荷電粒子の場合、34 ms、88 ms、150 ms である。この結果から、式(5-1)を用いて最適周波数 f_0 を求めると、正の荷電粒子の場合、12 Hz、5 Hz、3 Hz、負の荷電粒子の場合 15 Hz、6 Hz、4 Hz となる。このようにして、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} が 200 mm~400 mm の範囲で変化した場合の最適周波数 f_0 を求めた。正の荷電粒子と負の荷電粒子に基づく最適周波数とエミッタから被除電物までの距離 D_{EP} の関係を図 5-7 に示す。この図において、最適周波数は、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} が長くなるに従って低くなることがわかる。また、最適周波数は、正の荷電粒子に基づく最適周波数より負の荷電粒子に基づく最適周波数の方が高いことがわかる。

5.3.2 最適周波数に及ぼすエミッタへの印加電圧への影響

エミッタへの印加電圧 V_E は、5 kV ~ 9 kV の範囲で電圧を変化させ、それぞれの電圧 V_E における最適周波数を検討した。この検討を行うに当たっ

て、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} は 300 mm 一定、風速 U_F は 0.3 m/s 一定とした。このような条件でイオナイザを動作させ、「5.2.2 最適周波数の決定方法」で述べた方法で最適周波数を決定した。なお、この測定を行うに当たって、イオナイザの動作周波数 f は 1 Hz とした。

図 5-8、図 5-5、図 5-9 は、エミッタへの印加電圧 V_E を 5 kV、7 kV、9 kV とした場合の結果である。この結果より、エミッタへの印加電圧 V_E が高くなるに従って、除電電流密度 J_A に現れる電流ピークの出現時間が早くなることがわかる。また、除電電流密度 J_A に現れる電流ピークが大きくなることもわかる。

これらの結果から最適周波数を検討する。まず、5 kV、7 kV、9 kV のそれぞれに対して、荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間 t_t は、正の荷電粒子の場合、200 ms、104 ms、75 ms、負の荷電粒子の場合、160 ms、88 ms、60 ms である。この結果から、式 (5-1) を用いて最適周波数 f_0 を求めると正の荷電粒子の場合、3 Hz、5 Hz、7 Hz、負の荷電粒子の場合 4 Hz、6 Hz、9 Hz となる。このようにして、エミッタへの印加電圧 V_E が 5 kV ~ 7 kV の範囲で変化した場合の最適周波数 f_0 を求めた。正の荷電粒子と負の荷電粒子に基づく最適周波数とエミッタへの印加電圧 V_E の関係を図 5-10 に示す。この図において、最適周波数は、エミッタへの印加電圧 V_E が高くなるに従って高くなることがわかる。また、最適周波数は、正の荷電粒子に基づく最適周波数より負の荷電粒子に基づく最適周波数の方が高いことがわかる。

5.3.3 最適周波数 f_0 の動作条件依存性

エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} を 200 mm ~ 400 mm の範囲で距離を変化させ、エミッタへの印加電圧 V_E を 5 kV ~ 7 kV の範囲で変化させ、それぞれの動作条件における最適周波数を検討した。この検討を行うに当たって風速 U_F は 0.3 m/s 一定とした。このような条件でイオナイザを動作させ、「5.3.1 最適周波数に及ぼすエミッタから被除電物までの距離の影響」、「5.3.2 最適周波数に及ぼすエミッタへの印加電圧への影響」で述べた方法で最適周波数を決定した。なお、この測定を行うに当たって、イオナイザの

動作周波数 f は 1 Hz とした。図 5-11、図 5-12 はエミッタへの印加電圧 V_E をパラメータとした時のエミッタから被除電物までの距離 D_{EP} と最適周波数との関係である。これらの結果から、最適周波数 f_0 は、エミッタへの印加電圧 V_E に関係なく、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} が長くなるに従って、低くなることが明らかになった。また、図 5-13、図 5-14 は、前図をリプロットしてエミッタから被除電物までの距離 D_{EP} をパラメータとした時の最適周波数とエミッタへの印加電圧 V_E との関係を示した結果である。これらの結果から、最適周波数 f_0 は、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} に関係なく、エミッタへの印加電圧 V_E は高くなるに従って、高くなることが明らかになった。

5.3.4 考察

「5.3 最適周波数と動作条件との関係」では、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} 、エミッタへの印加電圧 V_E を変えた場合の最適周波数決定法の妥当性を検討した。その結果、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} を長くするに従って、最適周波数 f_0 は、低くなることがわかる。この理由は以下のように考えられる。すなわち、

- ① エミッタから被除電物までの距離を長くすると荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間 t_t が長くなる。
- ② 式(5-1)より、荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間 t_t が長くなると最適周波数が低くなる。

したがって、エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} を長くすると、最適周波数は低くなると考えられる。

一方、エミッタへの印加電圧 V_E を高くするに従って、最適周波数は、高くなることがわかる。この理由は以下のように考えられる。すなわち、

- ① エミッタへの印加電圧を高くすると荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間 t_t が短くなる。
- ② 式(5-1)より、荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間 t_t が短くなると最適周波数が高くなる。

したがって、エミッタへの印加電圧 V_E を高くすると、最適周波数は高くな

ると考えられる。また、「最適周波数とエミッタから被除電物までの距離 D_{EP} との関係」、「最適周波数とエミッタへの印加電圧 V_E との関係」を示した結果では、負の荷電粒子に基づいた結果の方が正の荷電粒子に基づいた結果より最適周波数が高くなるという違いが現れた。これについては、前述で、考察したように、正の荷電粒子と負の荷電粒子の易動度の違いが結果に現れたと考えられる。

5.4 まとめ

本章では、「第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響」で検討した結果と「第 4 章 簡易帯電センサの設計・製作・評価」で製作した簡易帯電センサを用いてイオナイザの最適周波数を決定する方法論を提案した。また、この方法論を用いて、動作条件を変えた場合の検討を行った。その成果は、以下のようにまとめられる。

(1) イオナイザに期待される性能、すなわち

- ① 除電速度が高いこと、
- ② 製品を帯電させないこと

から、AC コロナ放電型イオナイザの最適周波数は、

- ① 除電能力が最も高く、
- ② 荷電粒子が被除電物を帯電させない周波数

と定義した。

(2) 最適周波数決定法は、

- ① 簡易帯電センサを使用して除電電流密度 J_A を測定、
- ② 負の荷電粒子に基づく除電電流密度 J_A の電流ピークから荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間 t_t を測定、
- ③ $t_t = T/2 = 1/2f_0$ から f_0 を決定

の手順となる。

(3) エミッタから被除電物までの距離 D_{EP} が長くなるに従って、最適周波数は低くなる。

(4) エミッタへの印加電圧 V_E が高くなるに従って、最適周波数は高くなる。

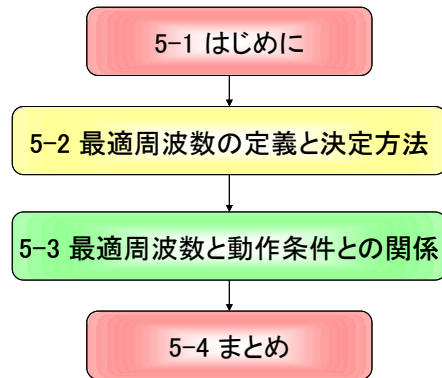


図 5-1 第 5 章のフローチャート

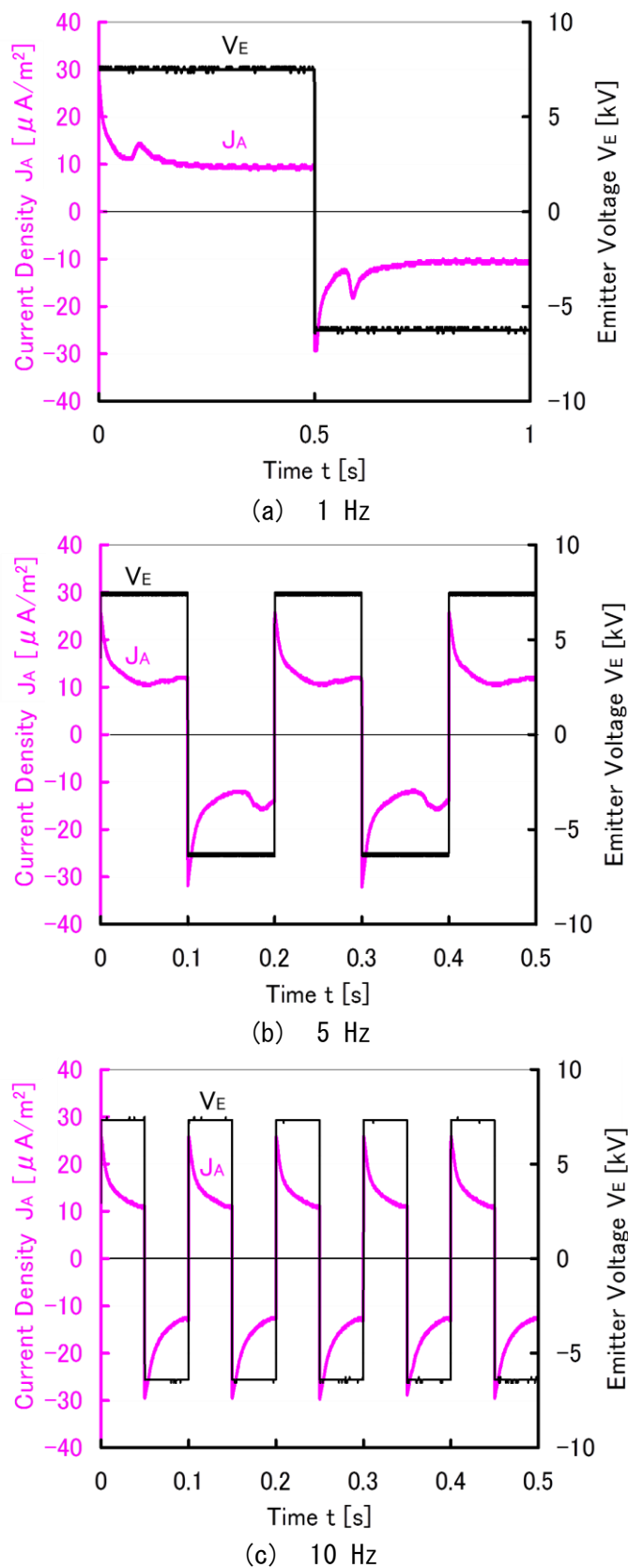


図 5-2 簡易帯電センサの出力結果(周波数 f を変化させた場合)

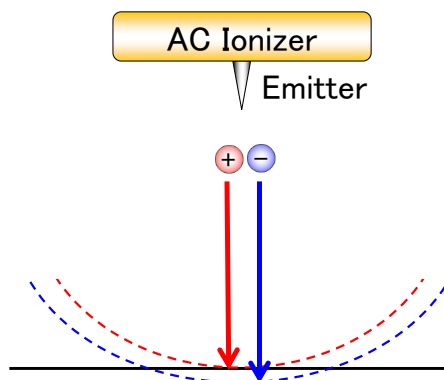


図 5-3 正負の荷電粒子の広がり

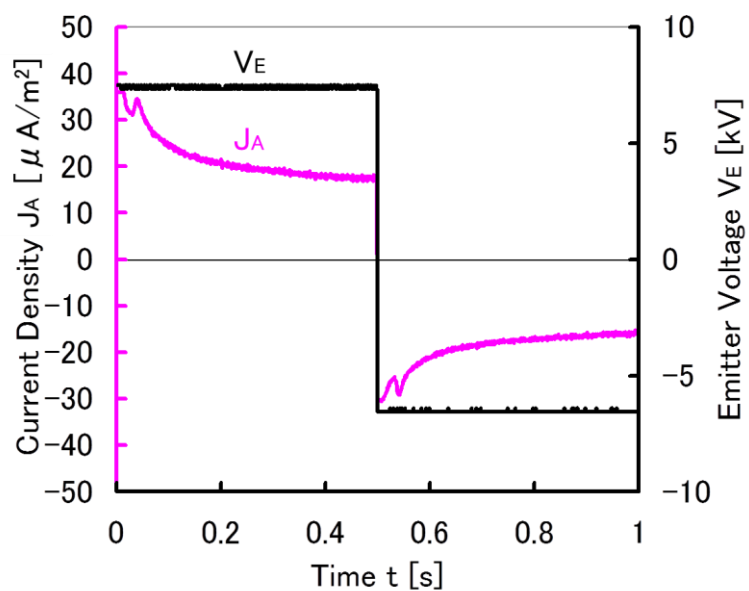


図 5-4 簡易帯電センサの出力結果 (DEP = 200 mm、 $V_E = 7$ kV とした場合)

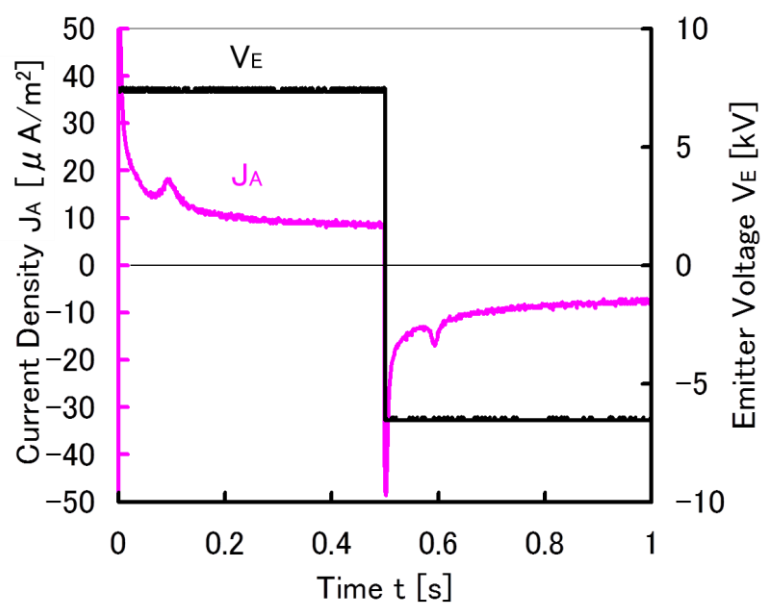


図 5-5 簡易帯電センサの出力結果 (DEP = 300 mm、 $V_E = 7$ kV とした場合)

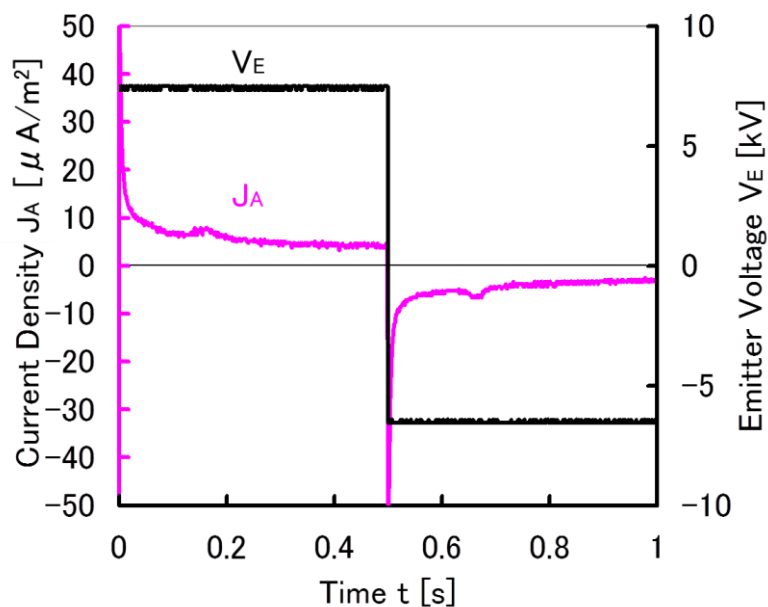


図 5-6 簡易帯電センサの出力結果 (DEP = 400 mm、 $V_E = 7$ kV とした場合)

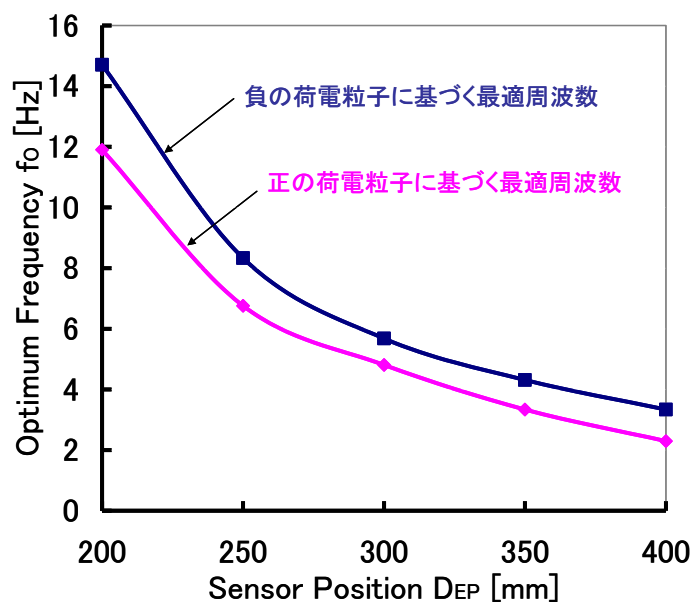


図 5-7 最適周波数とエミッタから被除電物までの距離との関係

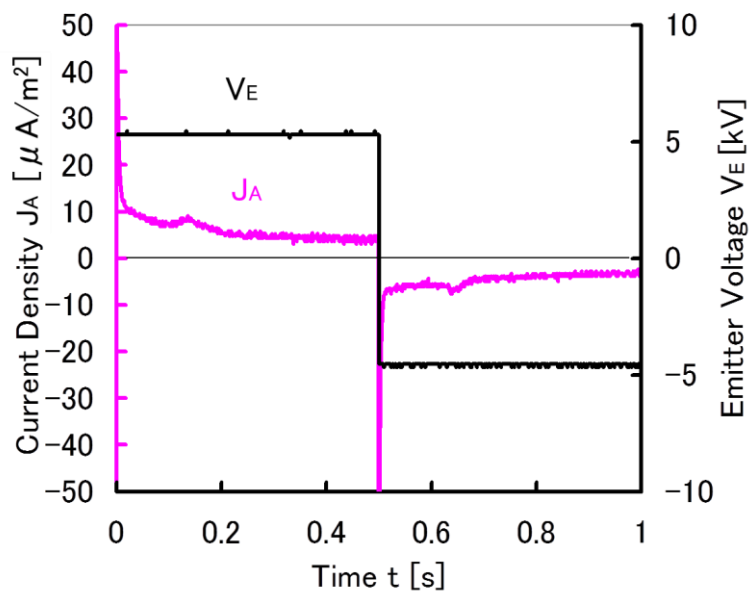


図 5-8 簡易帯電センサの出力結果 ($V_E = 5 \text{ kV}$ 、 $DEP = 300 \text{ mm}$ とした場合)

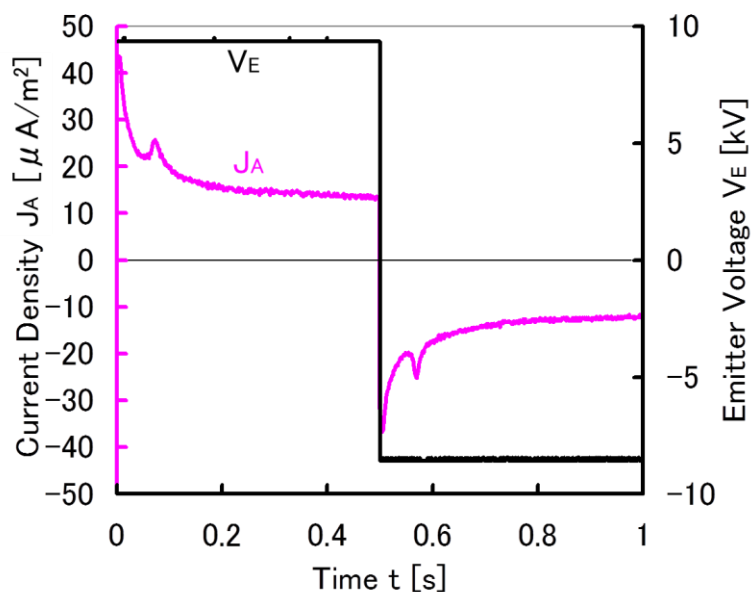


図 5-9 簡易帯電センサの出力結果 ($V_E = 9 \text{ kV}$ 、 $\text{DEP} = 300 \text{ mm}$ とした場合)

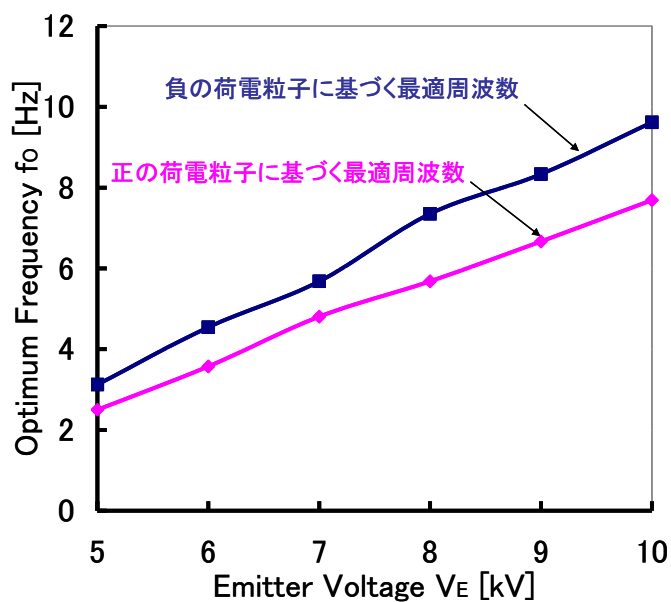


図 5-10 最適周波数とエミッタへの印加電圧との関係

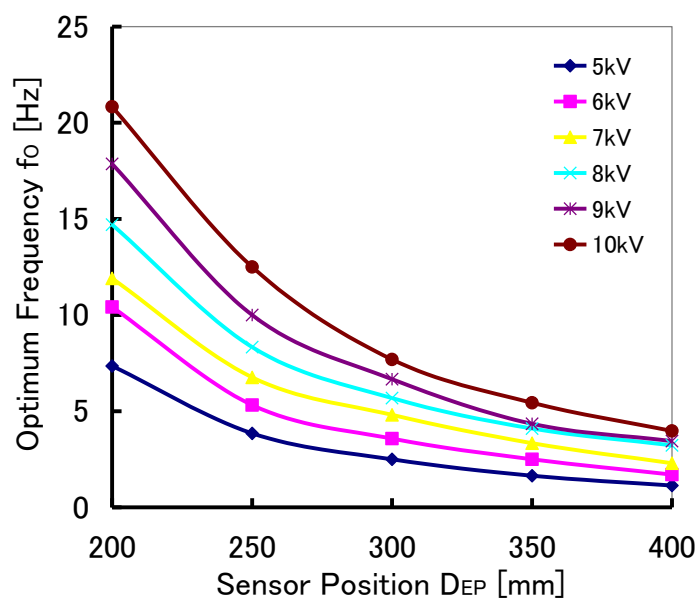


図 5-11 エミッタへの印加電圧をパラメータとした時のエミッタから被除電物までの距離と正の荷電粒子の電流ピークに基づく最適周波数との関係

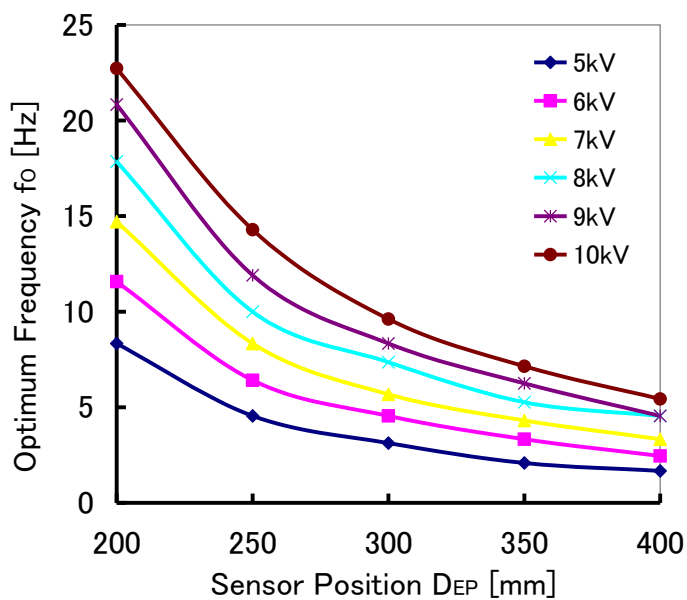


図 5-12 エミッタへの印加電圧をパラメータとした時のエミッタから被除電物までの距離と負の荷電粒子の電流ピークに基づく最適周波数との関係

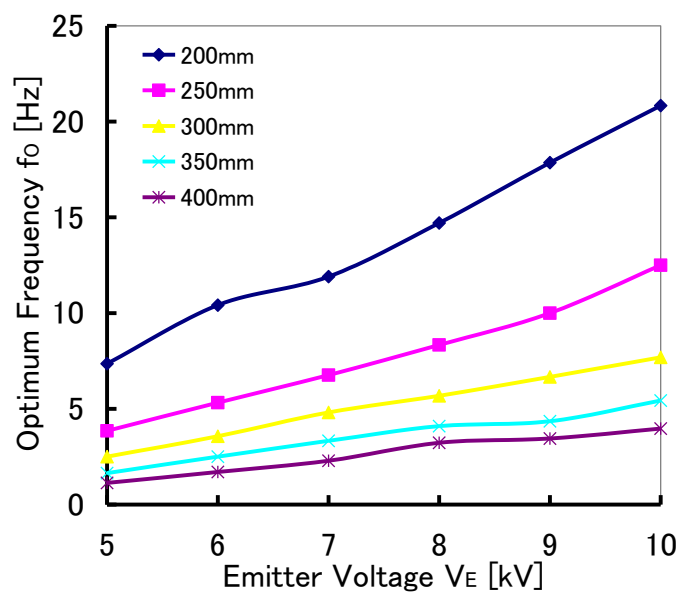


図 5-13 エミッタから被除電物までの距離をパラメータとした時のエミッタへの印加電圧と正の荷電粒子の電流ピークに基づく最適周波数との関係

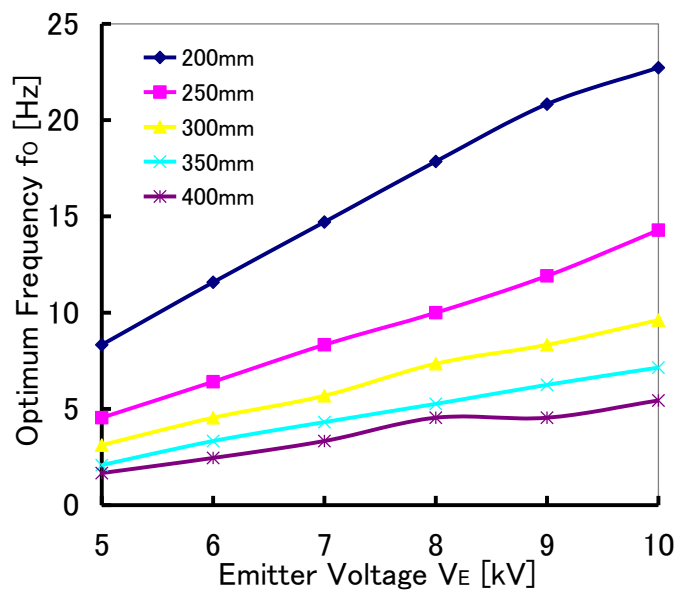


図 5-14 エミッタから被除電物までの距離をパラメータとした時のエミッタへの印加電圧と負の荷電粒子の電流ピークに基づく最適周波数との関係

第 6 章

結論

第 6 章 結論

本研究では、電子デバイスの実装工程における AC コロナ放電型イオナイザの搬送中の製品の除電を前提とし、このような工程での除電を高効率で行うための方法論を検討した。この検討を行うに当たって、イオナイザの動作条件として動作周波数を選び、性能として除電電流密度と電圧振幅を選び、これらの関係について詳細な検討を行った。この結果よりイオナイザの最適周波数決定法を検討した。これらの検討結果は、以下のようにまとめられる。

「第 1 章 序論」では、電子デバイス製造工程における静電気対策にとって AC コロナ放電型イオナイザが有効であることを述べた。また、このイオナイザの性能は動作条件に大きく依存するので、最適な動作条件で動作させることの重要性を述べた。さらに、本研究の目的である最適動作条件決定法の確立が期待されていることを述べた。

「第 2 章 イオナイザの性能の周波数依存性」では、AC コロナ放電型イオナイザの動作周波数 f とイオナイザの性能との関係を明らかにすることを目的とした。そこで、まず、動作周波数 f が性能に及ぼす効果を測定するための実験装置を設計・製作した。次に、動作周波数 f を変化させた場合の除電電流密度 J_N と電圧振幅 V_s を測定した。さらに、これらの測定結果から、イオナイザの性能の周波数依存性について検討を行った。これらの成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 風洞と荷電粒子生成部を組み合わせて、実験装置を完成させた。
- (2) イオナイザの性能である除電電流密度 J_N と電圧振幅 V_s は、動作周波数 f に大きく依存することが明らかとなった。
- (3) 除電電流密度 J_N は、動作周波数 f が低くなるに従って高くなる。したがって、動作周波数 f が低くなるに従って除電速度は高くなることが明らかとなった。
- (4) 電圧振幅 V_s は、動作周波数 f が低くなるに従って大きくなる。

「第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響」では、AC コロナ放電型イオナイザの動作周波数 f が除電能力に及ぼす影響について明らかにすること

を目的とした。そこで、まず、被除電物が搬送中に除電されることを考慮して、除電能力を 3 種類に分類した。次に、それぞれの除電能力を求めるために、除電領域全体における除電電流密度 J_{Nr} の分布を測定した。さらに、これらの測定結果から、各除電能力の周波数依存性について比較検討した。この成果は、以下のようにまとめられる。

(1) 搬送中の被除電物における除電能力を、

- ① 除電領域中心の除電電流密度 J_{Nc} 、
- ② 搬送領域の除電電流 I_L 、
- ③ 除電領域の全除電電流 I_s

と定義した。

(2) 動作周波数 f が低くなるに従って、除電領域全体における除電電流密度 J_N は高くなる。

(3) 動作周波数 f が低くなるに従って、高除電電流密度領域は広くなる。

(4) 1 Hz の除電能力と 100 Hz の除電能力を比較すると、

- ① 除電領域中心の除電電流密度 J_{Nc} は 1.8 倍、
- ② 搬送領域の除電電流 I_L は 2.2 倍、
- ③ 除電領域の全除電電流 I_s は 3.8 倍

となる。すなわち、動作周波数 f を低くするに従って、除電能力はすべて高くなる。したがって、除電能力を高くするためには、動作周波数 f を低くすることが効果的である。

(5) 被除電物が搬送されている場合は、搬送領域の除電電流 I_L を除電能力とすることが妥当である。

「第 4 章 簡易帯電センサの設計・製作・評価」では、被除電物の電圧振幅について詳細な検討を行うための簡易帯電センサを提案し、設計、製作を行った。また、簡易帯電センサの電流ピークが被除電物の帯電を測定していることを確認するための帯電実験を行った。この成果は、以下のようにまとめられる。

(1) 提案した簡易帯電センサをイオナイザの下で使用した場合、除電電流密度波形にピークが現れることが明らかになった。

(2) このピークは絶縁体シート帯電実験で計測した帯電を示す電圧と一致する。

(3) 簡易帯電センサで帯電特性の測定ができることが明らかになった。

「第 5 章 最適周波数の決定法」では、「第 3 章 除電能力に及ぼす周波数の影響」で検討した結果と「第 4 章 簡易帯電センサの設計・製作・評価」で製作した簡易帯電センサを用いてイオナイザの最適周波数を決定する方法論を提案した。また、この方法論を用いて、動作条件を変えた場合の検討を行った。その成果は、以下のようにまとめられる。

(1) イオナイザに期待される性能、すなわち

- ① 除電速度が高いこと、
- ② 製品を帯電させないこと

から、AC コロナ放電型イオナイザの最適周波数は、

- ① 除電能力が最も高く、
- ② 荷電粒子が被除電物を帯電させない周波数

と定義した。

(2) 最適周波数決定法は、

- ① 簡易帯電センサを使用して除電電流密度 J_A を測定、
- ② 負の荷電粒子に基づく除電電流密度 J_A の電流ピークから荷電粒子がエミッタから被除電物に到達するまでの時間 t_t を測定、
- ③ $t_t = T/2 = 1/2f_0$ から f_0 を決定

の手順となる。

(3) エミッタから被除電物までの距離 DEP が長くなるに従って、最適周波数は低くなる。

(4) エミッタへの印加電圧 V_E が高くなるに従って、最適周波数は高くなる。

以上の結果から、イオナイザの動作周波数と性能との関係を明確にし、この結果から最適周波数を決定する方法論を確立することができた。

参考文献

参考文献

- 1) 森川博之：「ワイヤレスが開くユビキタスネットワーク」、電子情報通信学会誌、Vol. 87、No. 5、pp. 356-361 (2004)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) A. Yagishita、T. Saito、S. Inumiya、K. Matsuo、Y. Tsunashima、K. Suguro：“Dynamic Threshold Voltage Damascene Metal Gate MOSFET (DT-DMG-MOS) Technology for Very Low Voltage Operation of Under 0.7V”、IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES、VOL. 49、NO. 3、pp. 422-428 (2002)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) 静電気学会編：「新版静電気ハンドブック」、pp. 192-193、オーム社 (1998)
- 10) 長尾諭志：「AC コロナ放電型イオナイザの除電特性と EMI 特性」、職業能力開発総合大学校、修士論文 (2005)
- 11) 静電気学会編：「新版静電気ハンドブック」、pp. 203-212、オーム社 (1998)
- 12) 静電気学会編：「新版静電気ハンドブック」、pp. 212-215、オーム社 (1998)

- 13) 大見忠弘：「ウルトラクリーン ULSI 技術」、pp. 294-297、培風館（1995）
- 14) 菊地正典：「半導体のすべて」、pp. 74-75、日本実業出版社（1998）
- 15) H. Imazono、T. Terashige、K. Okano：“The Double Jet Ionizer for ULSI Manufacturing Processed”、IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING、VOL. 15、NO. 2、pp. 189-193（2002）
- 16) 稲葉仁：「超クリーン化技術/静電気対策技術」、静電気学会誌、Vol. 22、No. 6、pp. 295-299（1998）
- 17) 尹治文、大谷吉生、並木則和、江見準：「気中イオンの電気移動度分布の簡易測定」、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)

本研究に関する発表論文一覧

本研究に関する発表論文一覧

- 1) 吉水健剛、池畑隆、岩本菜夏、岡野一雄 : 「AC イオナイザの周波数が除電能力に及ぼす影響」、静電気学会誌、第 36 巻 第 5 号, 297 頁, 2012 年 9 月掲載

- 2) Kengou Yoshimizu , Takashi Ikehata , Masahiro Enokizono , Takashi Terashige , Kazuo Okano : Neutralizing current sensor for AC corona ionizer (AC コロナ放電型イオナイザの除電電流測定用センサの開発) , Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings 2010, pp.273-277, Sparks(Reno), Nevada, U.S.A., Electrostatic Discharge Association, 2010.Oct

謝辭

謝辞

本論文をまとめる当たり、在学中常に適切なお助言を賜りました主指導教員の 茨城大学 大学院理工学研究科 応用粒子線科学専攻 池畑 隆 教授に謹んで深く感謝申し上げます。また、本論文を進めるに当たり、様々な有益なお助言をいただきました、副指導教員の 茨城大学大学院理工学研究科 三枝 幹雄 教授、佐藤直幸 准教授へ深く感謝いたします。

そして、学位取得に際しまして、特段の配慮をいただきました私の職務する職業能力開発総合大学校 電気システム工学科 岡野一雄 主任教授、渡邊信公 教授、寺内美奈 准教授、にはこの場を借りまして深く感謝いたします。また、本研究を行うにあたって協力して頂いた、当校研究課程 岩本菜夏さん、望月亮吾君、ならびに本研究室の長期課程、平田安奈さん、サシカクレ君、マルチウーランサリさん、杉浦拓真君に心より御礼申し上げます。

最後になりましたが、私の研究生生活を色々な面で支援いただいた家族、両親、兄、祖父母に深く感謝の意を表し、本論文を終わらせていただきます。