

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560311

研究課題名(和文) 対向型コロナ放電電極対を用いる高密度正負イオン群の生成と応用

研究課題名(英文) Production and its application of high density positive and negative ions using opposed phi-type electrode

研究代表者

杉本 俊之 (Sugimoto, Toshiyuki)

山形大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10282237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：帯電した物体をミリ秒オーダーで数V以下まで除電する装置を開発した。また、その除電モデルと性能評価法を新たに提案した。この除電モデルと評価法は、除電のニーズに合わせて装置をどのように構築すればよいかを決定でき、一定速度で移動している対象物に対する除電にも適用できる。従来法では、正負のイオンを気流によって対象物に供給していたが、本方式では、気流を用いない。特殊なコロナ電極で高密度な正負イオン空間を作り、その下部に接地したメッシュを配置する。接地したメッシュ電極を帯電した対象物に近づけることで、両者の間の電界を強め、その電界がゼロにまで必要な極性のイオンがメッシュの開口部から対象物に供給される。

研究成果の概要(英文)：A new type ionizer has been developed for much faster charge elimination performance compared to conventional ionizer. The charge eliminating model including evaluation method for the charge elimination performance were also developed. This model can predict the optimum setup of the instrument for user's different needs. Although conventional ionizer use airflow to convey positive and negative ion, this technique never use airflow. High density of positive and negative ion were created by special electrode setup (opposed phi-type electrodes) and a grounded mesh electrode was located underneath the produced ions. By closing the instruments to the target, an electric field is formed between the target and the grounded mesh. The opposite polarity ions are transported by the electric field to the target until the electric field become zero, resulting in ms order charge elimination with lower final potential less than a few volts.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電力工学、電力変換、電気機器

キーワード：イオナイザー 除電 高速 低電圧 静電気

1. 研究開始当初の背景

ものづくりの微細化、高精度化に伴い、作業工程における静電気除去は、極めて重要なインフラになっている。これは、電子部品の小型化による耐電圧の低下に起因する。現在、半導体製造工程では $\pm 5V$ 、高密度実装工程では $\pm 50V$ と、要求される除電レベルは年々低電圧化してきている。除電レベルが低電圧化するほど、除電時間は長くならざるを得ないが、その除電時間は部品製造のリードタイムに直結する。したがって、帯電している物体を \pm 数Vまでミリ秒オーダーで除電できる技術(極低電圧・超高速除電)の確立が急務である。

静電気除去装置(イオナイザー)は、針状電極を含む高電圧電極系でコロナ放電を発生させ、生成した正負の気中イオン群を気流によって吹き付けるものである。これまで、除電速度の向上に関しては、電極電圧の波形や、イオン搬送気流の制御等に着眼した研究がおこなわれてきた。例えば、正負のコロナ放電電極を離れた位置に配置して正イオンと負イオンを別々に放出して統合する方法や、1つのコロナ放電電極から高い周波数で極性を切り替える方法などが提案され、或る程度の効果が上がっている。しかしながら、この方向性の検討のみでは、次世代の静電気除去における低電圧化と高速化に対応するには限界が来ることが分かってきた。これまでのコロナ電極構造では、単極性イオン同士の静電反発力によって、生成されたイオン群の空間電荷密度が、時間経過とともに急激に低下することは避けられないからである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、除電を行うイオナイザーの正負イオン群の空間電荷密度を飛躍的に大きく方法を開発することにより、これまでにない極低電圧・超高速除電技術を確立することである。具体的には、特殊な電極構造のコロナ放電電極系(対向型コロナ電極)を提案し、正負イオン群の挙動を理論と実験により明らかにするとともに、高い空間電荷密度を持つ正負イオン群を形成する方法について検討する。

3. 研究の方法

対向型コロナ放電電極を持つイオナイザーを試作し、高性能を示す電極パラメータを明らかにするための除電モデルを構築する。空間電荷密度は直接測定が困難であるため、チャージドプレートモニタ(所定の電圧

減衰時間を測定する装置)を使った新たな空間電荷密度評価法を開発するとともに、工程中での動く帯電物体に対する静電気除去性能を評価できる方法を開発する。最終的には、必要な空間電荷密度、あるいは必要な除電時間に合わせて、イオナイザーの気流の供給と電極配置が設計できるようにする。

4. 研究成果

型構造電極を図1に示す。接地した金属板電極に開口部を設け、その中心分針状電極を貫通させる電極を型構造電極と呼ぶ。当初は、図1に示すように2枚の接地平板の間に正負のイオンを形成し、気流でチャージドプレートモニタ(CPM)に吹き付ける構造をとっていたが、気流で吹き付ける構造よりも、図2に示すように、接地した金網の上部で正負のイオンを形成し、接地した金網と除電対象物との間に形成される電界Eでイオンを駆動する方法の方がよいことが分かった。このようなイオナイザーを近接設置型イオナイザーと呼ぶ。

帯電物体の上部に近接させて接地したメッシュ電極を置き、その上部で正負イオンが高密度に存在する空間を型電極構造で形成した。除電原理としては、接地メッシュ電極と帯電物体との間(距離h)に形成される電界に応じて、それと逆極性のイオンがメッシュの開口部から供給されるしくみになっている。

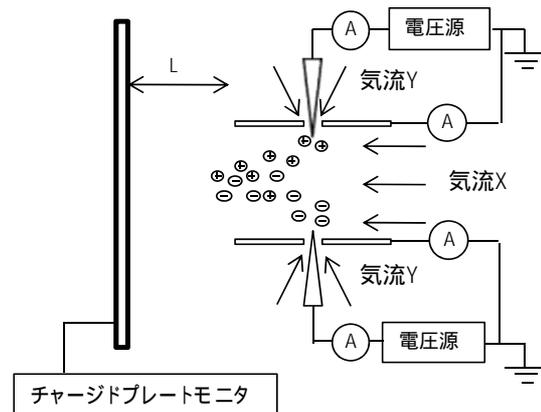


図1 対向型構造電極

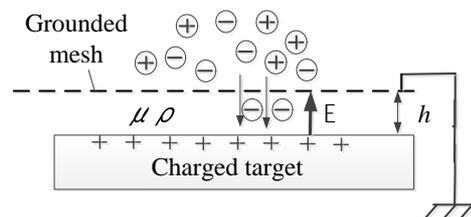


図2 近接設置型イオナイザー

この帯電物体が初期電圧 V_0 から $V_0/10$ まで減衰する時間を T_0 とすると、帯電物体に供給される電流(除電電流) I_0 は次式で与えられる¹⁾。

$$I_0 = C \ln 10 \frac{V_0}{T_0} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 C は帯電物体と接地された周囲の構造物との間に形成されるキャパシタンスである。ここで、測定を簡単にするため I_0 を $C \ln 10$ で割った値を簡易除電電流 I_0^* とおく。一方、供給される電荷の電荷密度を ρ 、移動度を μ とすると除電電流は次式でも与えられる。

$$I_0 = \frac{\rho A \mu}{h} V_0 \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 A はイオンが供給されている面積である。

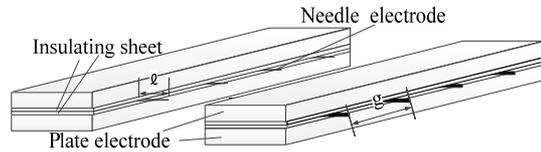
I_0^* を用いて式(2)を書き直すと次式になる。

$$I_0^* = \frac{1}{C \ln 10} \frac{\rho A \mu}{h} V_0 \quad \dots\dots(3)$$

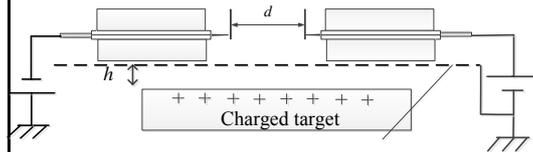
式(3)の左辺は V_0/T_0 で簡単に測定でき、右辺はイオナイザーの性能を向上させる指針を示した式になる。試作した新型イオナイザーを図3に示す。針電極対を容易に増やすことができるように、接地した2枚の平板電極で2枚の絶縁シートと針電極を挟む構造とした。針電極同士が距離 d を隔てて対向し、隣り合う針電極との距離は 30mm としている。

片側の4本の針電極に正極、これらと対向する4本に負極性の直流電圧を印加し、正負のコロナイオンを発生させた。このイオン空間の下部に接地メッシュ電極を敷くことで、図2のような構造のパーティイオナイザーを実現した。対向する針電極間を d 、除電対象物との距離を h 、隣り合う針電極間を g とする。これらの寸法を変化させて除電電流 I_0^* を調べた。チャージドプレートモニター(Trek Model 158)を除電対象物とし、初期電圧 V_0 を 200, 600, 1000 V の3段階に変化させ、それぞれの除電時間 T_0 を測定して I_0^* を算出した。また、場所による除電性能の違いを明らかにするため、メッシュ電極下部に小型チャージドプレート(25mm×25 mm)を設置したときの測定も行った。

簡易除電電流 I_0^* と距離 h との関係を図4に示す。除電対象物とイオナイザーの距離が近いほど除電電流 I_0^* が高い。式(3)においても h が小さくなるにしたがい I_0^* が大きくなることを示唆しており、モデルの妥当性が示された。除電時間 T_0 は V_0/I_0^* であるので、 I_0^*



(a)電極構造



(b)断面図

図3 試作した新型イオナイザー

が大きいほど除電時間が短いことを示している。 $h=3\text{mm}$ のときは $I_0^* = 10000$ 程度であるので $V_0 = 1000\text{V}$ のときの除電時間は 0.1s 程度になる。本方式では帯電物と接地メッシュとの間の電界によってイオンが駆動するため、無風でも十分高速な除電性能が得られていることが分かる。プレートのサイズに合うように針電極対の数を増やせば、さらに高速な除電が可能である。

d を変化させ、4本の針の中間点(A点)、そこから 15mm ずれた点(B点)、30mm ずれた点(C点)の異なる点において除電電流を測定した結果を図5(a),(b)に示す。いずれの図においても V_0 の増加とともに I_0^* が増加しており、式(3)の妥当性が示された。また、 $d=10\text{mm}$ のときの方が 20mm のときよりも除電電流は小さくなるが、位置によるばらつきも小さく抑えられることが判明した。これは針電極から対抗する針電極に向かうイオンと接地メッシュ電極に向かうイオンとのバランスを考慮する必要があることを示唆している。

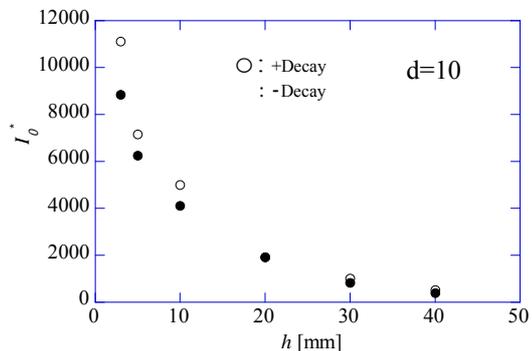
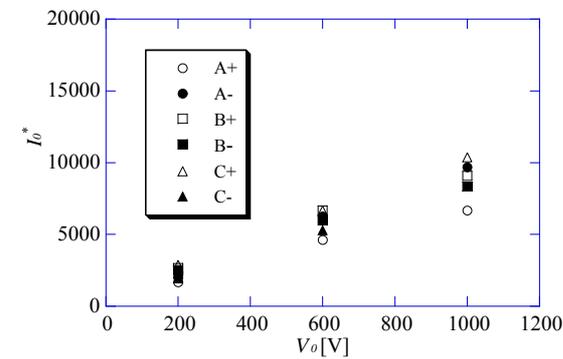
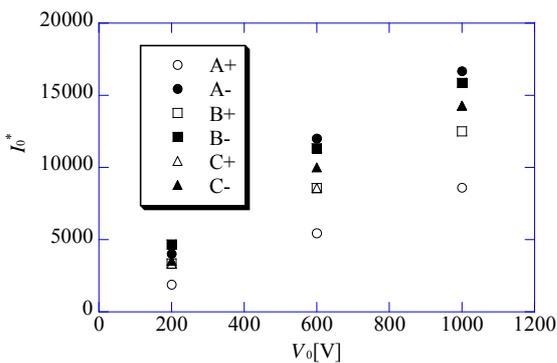


図4 簡易除電電流 I_0^* とギャップ h の関係



(a) d=10mm



(b) d=20mm

図5 dによる除電特性への影響

実際の除電では、イオナイザーを固定し、その下部を除電対象物が通過する場面が多いため、このような除電に適用できる除電モデルを構築した。図6に示すように、有効長さ l の除電イオン空間を速度 v で対象物が等速移動するとき、出発点の電位 ϕ_0 が除電イオン空間で ϕ_{end} まで減衰すると仮定し、その除電速度が対象物が持つキャパシタンス C と除電イオン空間の等価的な漏れ抵抗 R の積 CR で決まるとする。ここで、換算除電率 Y として次式を適用する。

$$Y = \ln\left(\frac{1}{1-P}\right) \quad \dots(4)$$

ただし、

$$P = \frac{\phi_0 - \phi_{end}}{\phi_0} = 1 - e^{-\frac{l}{CRv}} \quad \dots(5)$$

Y は除電された割合を重み付けして表した値であり、90%の除電が行われたときに 2.3 である。除電される量が多いほど大きな値をとる。 Y を用いると、移動速度 v の逆数との間に、次式のような簡単な関係が導かれる。

$$Y = \frac{l}{CR} \cdot \frac{1}{v} = \frac{M}{C} \cdot \frac{1}{v} \quad \dots(6)$$

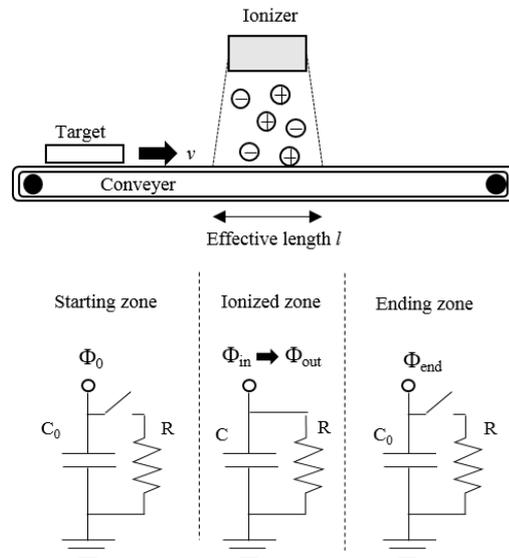


図6 移動する対象物の除電モデル

ここで M は l/R であり、イオナイザーの性能を示す指数(定数)となる。式(6)は、 Y と $1/v$ との間で正比例が成立することを示しており、比例直線の傾きが大きいくほど、除電性能が良いことを示す。また、この比例関係が実験により導かれれば、希望の除電性能を得るために必要な移動速度を求めることも可能となる。

等速移動可能なステージの上に小型のCPMを置き、除電前後のプレート電位から式(4)と(5)を用いて換算除電率 Y を求め、異なる移動速度にて実験した結果の一例を図7に示す。市販のファンタイプイオナイザーと、図3に示した新型イオナイザーを縦向きと横向きに置いたときの結果のいずれにおいても、 Y と $1/v$ との間に正比例の関係が示されており、式(6)の妥当性が検証された。また、新型の方が傾きが大きく、性能が高いことが分かる。横向き配置では、縦向き配置よりも有効除電長が5倍程度長くなるので、5倍程度傾きが大きくなっている。新型の有効除電長はファンタイプより小さいにもかかわらず、このような大きな性能の差が現れたのは、

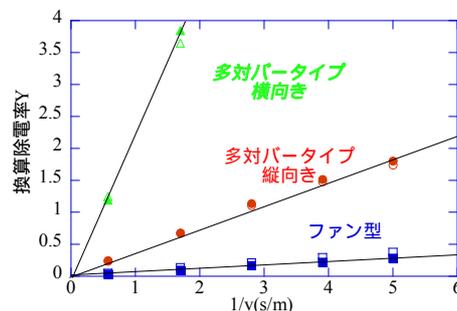


図7 移動する対象物の除電性能評価

両者の除電機構の違いによるものと考えられる。ファン型は、イオンを気流対象物に送風するので、イオンの移動速度は気流の速度に依存し、さらに、正負のイオンを均一に混合させるためイオンが生成された位置から動作点までの距離を離す必要がある。これにより、低い電荷密度で遅いイオンの供給にならざるを得ない。一方、新型はイオンが生成された位置の近くで使用するため、そのイオン密度が高い。また、対象物と接地金網との間の電界で加速するため、多量のイオンが瞬時に移動できる。図示していないが、近接設置型のイオン供給源として、対向型構造と針対針型構造を比較した結果は、対向型構造の方が1.5倍高い除電性能を示した。

以上の結果から、型構造の電極を用いて近接設置するタイプのイオナイザーを構築することにより、従来のイオナイザーに比べて飛躍的に高い除電性能を示すことが実証された。今後は、正負の電荷が高密度に帯電し、見かけの電位はゼロVに近くになっている材料（高密度帯電材料）に対して、本方式を適用したときの効果について検証するとともに、その除電効率を上げるための工夫が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

T. Sugimoto, S. Kato, K. Furutachi, Y. Higashiyama: "DC ionizer with opposed-type corona electrodes for high speed charge elimination" Trans. of IEEE Ind. Appl. Soc. 査読有 掲載予定

DOI 10.1109/TIA.2013.2282714

[学会発表](計5件)

古舘主寿、杉本俊之、近接設置型イオナイザーの除電モデルと性能評価、静電気学会2013、平成25年9月11日、千葉大学

古舘主寿、杉本俊之、近接設置型イオナイザーの開発とその評価法の検討、H25年度電気関係学会東北支部連合大会、平成25年8月23日、会津大学

T. Sugimoto, S. Kato, K. Furutachi, Y. Higashiyama: "DC ionizer with opposed-type corona electrodes for high speed charge elimination" IEEE IAS Annual meeting 2012, 8th Oct. Las Vegas, USA

古舘主寿、杉本俊之、近接設置型イオナイザーの開発、H24年度電気関係学会東北支部

連合大会、平成24年8月30日、秋田県立大学

加藤誠也、杉本俊之、イオナイザーの除電能力評価に関する一考察、H23年度電気関係学会東北支部連合大会、平成23年8月25日、東北学院大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 俊之 (SUGIMOTO, Toshiyuki)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号 10282237