

<b>氏名</b>	やまぐち しんいち 山口 晋一
本籍（国籍）	東京都
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第341号
学位授与年月日	令和5年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科電気電子・情報システム工学専攻
<b>学位論文 題目</b>	<b>高抵抗材料コーティンググリッド電極を用いた コロナ放電方式イオナイザによる誘導電圧の抑制</b>
学位審査委員	主査 教授 高木 浩一 副査 教授 向川 政治 副査 准教授 高橋 克幸

## 論文内容の要旨

我々の身近なところで経験することができる静電気学的物理現象として帯電現象がある。物体の帯電に帰着する静電気は、複写機やプリンタ、電気集塵機、静電塗装など様々な面で利用され、私たちの生活に貢献している。しかし、各産業分野における生産現場では静電気による多様な障害が深刻な問題となっている。特に半導体デバイス製造分野においては静電気放電や粒子付着が問題視されている。そのため、絶縁体あるいは電氣的に浮遊の金属の表面電荷の中和技術が重要視されている。この静電気障害対策として、コロナ放電方式イオナイザによる電荷中和方法がある。

これまで、より高い除電性能を有するコロナ放電イオナイザの開発が進められ、その特性化と最適化が行われてきた。具体的には、より多くのイオンを生成する事、プラスやマイナスのイオンを出来るだけ等量に生成する事である。学問的見地からイオナイザにより発生した荷電粒子の挙動は、ファラデーケージを用いたイオン電流計測、一次元数値解析等によって調べられてきた。また、コロナ放電によって発生したイオン流場中の電荷挙動は航空で使用されるプラズマアクチュエータのような工学的応用にも期待され、世界的に注目されている。

一方、電子デバイスの分野における静電気は、その製造工程においてデバイスを損傷させたり内部に潜在的な不良の原因を起こしてしまったり。その他の様々な製品の品質に関する問題の要因の一つとなっている。このような静電気問題を解決するための対策機器として、広く使用されているコロナ放電方式イオナイザにおいて、現時点での性能に関する要求事項は、除電速度とイオンバランス性能が重要な項目となっている。その中でも、パソコンやデータセンタで使用されているハ

ードディスクドライブ (HDD) , 自動車のヘッドライトや液晶表示装置のバックライトなどに使われている高輝度白色 LED, 携帯電話などで使われている高周波変調復調デバイス, カメラや自動車の安全装置に使われている高感度 CMOS イメージセンサ等最先端の電子デバイス製造工程において,  $\pm 5 \sim \pm 25V$  の静電気対策が求められている. ハードディスクの製造現場では直流放電式のイオナイザを採用されており, 交流コロナ放電方式のイオナイザの使用が制限されている. 理由は, イオナイザからの誘導帯電である. 今後電子デバイスの静電気耐性が弱くなってゆくことで, 様々なデバイスの製造工程で同様な課題が出てくる可能性が高い.

本研究では, イオナイザの放電電極からの誘導帯電現象を観測し, 誘導電位の緩和とそれに伴い相反する課題と想定される除電能力の維持・向上を研究対象としており, 研究背景と経緯について言及する.

研究の経緯は, 先ず高速応答が可能な評価装置の開発を行った. 市場で購入できるイオナイザ評価装置 (チャージドプレートモニタ) は, 周波数応答性が 80Hz (-3db) と市場で運用されているイオナイザ全ての評価が正確に出来ない状況のためである. 次に, 除電における印加電圧と周波数との影響を調べた. イオナイザがその性能を十分に発揮できる諸条件を確認した. イオナイザからイオンの生成やイオンバランスの安定化を図るための最適な周波数条件を確認した. 特に印加電圧は, 誘導帯電を引き超す主な要因であるため, 最適な印加電圧の条件を確認した. そして, 導電性グリッド電極を用いたコロナ放電方式イオナイザにおける誘導電位の抑制を確認した. 抑制効果は, グリッド電極の本数ではなく, 見かけ上の幅が増加することで静電誘導の影響を抑制できることがわかった. 導電性グリッドの抑制効果を印加電圧の周波数変化に対する特性を確認したが, 変動はほとんど確認できなかつた. グリッドのギャップ間隔と全体の幅の変化に対する除電特性を確認すると, ギャップ間隔よりグリッド全体の幅の影響が大きい事を確認し, プラス減衰時は 60 mm 以上で効果が安定し, マイナス減衰時では約 45 mm 以上で効果が安定した. しかしながら, 導電性グリッドを使用すると, 除電時間が長くなり除電能力が著しく低下する事がわかった. そこで次の段階として, 導電性グリッドに高抵抗の被覆を付けることで, 誘導電位の抑制を維持しながら, 除電効果を向上させることが可能か確認し, 導電性グリッドに比べ遜色のない誘導帯電の抑制と, 導電性グリッドを上回る除電能力が有る事を確認した.

最後に, 実際の装置 (バー型イオナイザ) で検証し, 同等の効果が有る事を確認した. 更に 20 cm 以下の距離でイオナイザを設置した場合, 除電時間が減少せず飽和してしまうが, 導電性被膜効果で, 除電時間も早くなり除電性能の向上も確認した.

## 論文審査結果の要旨

我々の身近なところで経験する静電気学的物理現象として帯電現象がある。物体の帯電に帰着する静電気は、複写機やプリンタ、電気集塵機、静電塗装など様々な面で利用され、私たちの生活に貢献している。しかし、各産業分野における生産現場では静電気による多様な障害が問題となっている。特に半導体デバイス製造分野においては静電気放電や粒子付着が問題視されている。そのため、絶縁体あるいは電氣的に浮遊の金属の表面電荷の中和技術が重要視され、この静電気障害対策として、コロナ放電方式イオナイザによる電荷中和方法がある。

これまでは、より高い除電性能を有するイオナイザの開発が進められ、その特性化と最適化が行われてきた。具体的には、より多くのイオンを生成する事、プラスやマイナスのイオンを等量に生成する事である。学問的見地からイオナイザにより発生した荷電粒子の挙動は、ファラデーケージを用いたイオン電流計測、一次元数値解析等によって調べられてきた。また、コロナ放電によって発生したイオン流場中の電荷挙動は航空で使用されるプラズマアクチュエータのような工学的応用にも期待されている。

一方、電子デバイスの分野においては、その製造工程においてデバイスを損傷させたり内部に潜在的な不良の原因を起こしてしまったり、様々な製品の品質に関する問題の要因の一つとなっている。この様な静電気問題を解決するための対策機器として、広く使用されているコロナ放電方式イオナイザにおいて、現時点での性能に関する要求事項は、除電速度とイオンバランス性能が重要な項目となっている。その中でも、パソコンやデータセンターで使用されているハードディスクドライブ（HDD）、自動車のヘッドライトや液晶表示装置のバックライトなどに使われている高輝度白色 LED、携帯電話などで使われている高周波変調復調素子、カメラや自動車の安全装置に使われている高感度 CMOS イメージセンサ等最先端デバイスの製造工程において、 $\pm 5 \sim \pm 25V$  の静電気対策が求められている。ハードディスクの製造現場では直流放電式のイオナイザを採用されており、交流コロナ放電方式のイオナイザの使用が制限されている。理由は、イオナイザからの誘導帯電である。今後電子デバイスの静電気耐性が弱くなってゆくことで、様々なデバイスの製造工程で同様な課題が出てくる可能性が高い。

本研究では、イオナイザの放電電極からの誘導帯電現象を観測し、誘導電位の緩和とそれに伴い相反する課題と想定される除電能力の維持・向上を研究対象としており、研究背景と経緯について言及する。

研究の経緯は、先ず高速応答が可能な評価装置の開発を行った。市場で購入できるイオナイザ評価装置（チャージドプレートモニタ）は、周波数応答性が 80Hz（-3db）と運用されているイオナイザ全ての評価が正確に出来ないためである。次に、除電における印加電圧と周波数との影響を調べ、イオナイザがその性能を十分に発揮できる諸条件を確認した。イオナイザからイオンの生成やイオンバランスの安定

化を図るための最適な周波数条件を確認した。特に印加電圧は、誘導帯電を引き超す主な要因であるため、最適な印加電圧の条件を確認した。そして、導電性グリッド電極を用いたコロナ放電方式イオナイザにおける誘導電位の抑制を確認した。抑制効果は、グリッド電極の本数ではなく、見かけ上の幅が増加することで静電誘導の影響を抑制できることがわかった。導電性グリッドの抑制効果を印加電圧の周波数変化に対する特性を確認したが、変動はほとんど確認できなかった。グリッドのギャップ間隔と全体の幅の変化に対する除電特性を確認すると、ギャップ間隔よりグリッド全体の幅の影響が大きい事を確認し、プラス減衰時は 60 mm 以上で効果が安定し、マイナス減衰時では約 45 mm 以上で効果が安定した。しかしながら、導電性グリッドを使用すると、除電能力が著しく低下する事がわかった。次の段階として、導電性グリッドに高抵抗の被覆を付けることで、誘導電位の抑制を維持しながら、除電効果を向上させることが可能か確認し、導電性グリッドに比べ遜色のない誘導帯電の抑制と、導電性グリッドを上回る除電能力が有る事を確認した。

最後に、実際の装置（バー型イオナイザ）で検証し、同等の効果が有る事を確認した。更に 20 cm 以下の距離でイオナイザを設置した場合、除電時間が減少せず飽和してしまうが、導電性被膜効果で、除電時間が早くなり除電性能の向上も確認した。

以上の研究成果から、本方式は AC 型イオナイザからの誘導電圧を抑制し、除電性能を向上させることに効果の成ることが言える。今後、電子デバイス業界から求められる除電能力を維持し、デバイスの損傷を押さえられる低誘導電圧に対応でき、製造現場での応用が大いに期待できる。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

#### 原著論文名（1編）

- ① 山口晋一・久保勝也・内御堂駆・高橋克幸・高木浩一・永田秀海：「コロナ放電型イオナイザを用いた除電における印加電圧と周波数の影響」, プラズマ応用科学, 28 巻, 2 号, 76-82 ページ, 発行年月：2020 年 12 月