

ブロータイプイオンイザを用いた帯電対象物への イオン搬送分布に関する研究

深田 佳成*,**¹, 小根澤 和義**, 小辻 一雄**, 鹿野 一郎*, 八塚 京子*

(2012年9月11日受付; 2012年10月29日受理)

A Study on the Transferred Current Distribution onto the Electrified Object from a Blow-type Ionizer

Yoshinari FUKADA*,**¹ Kazuyoshi ONEZAWA,** Kazuo KOTSUJI,**

Ichiro KANO* and Kyoko YATSUZUKA*

(Received September 11, 2012; Accepted October 29, 2012)

Ionizers utilizing corona discharge are widely used in order to eliminate the electrostatic charge. The ions generated by AC discharge are often carried through a pipe toward the vicinity of the object by the jet flow. It is well known that the ion density decreases with the increase of the traveling distance along the pipe. In the last report, we developed an ionizer which was directly connected to Faraday Cage, in order to estimate the ion density blown from the blow-type ionizer, and revealed that the decreasing of ion density obeys the hyperbolic law. In the present report, the distributions of the jet flow and of the ion densities are reported. Comparing the spread of the jet flow and that of the ion density, different behaviors are observed: the transferred ions spread wider than the jet flow does because of repulsive force generated by Coulomb force. Furthermore, the relaxation of the surface potential on both the electrified metal and the electrified insulating material was measured by the modified CPM. It is proved that the neutralization has not been done at the same time for the insulating electrified plate, thus a current CPM would be merely effective for the metal like object.

1. はじめに

静電気対策は半導体製造装置, ハードディスクドライブやLCDの製造工程などの電子産業において重要なことは良く知られている。最近, 電子機器の微細化が進み, 微小帯電電位でも装置に重大な影響を及ぼすようになってきた。この除電に用いるイオンイザの多くはコロナ放電でイオンを発生し, 空気流によって目的対象物まで搬送する。コロナ放電によるイオン発生には直流方式と交流方式があるが, それぞれに特質があり, 目的によって使い分けられている。高周波交流高電圧を用いたイオンイザは除電性能が良いため広く用いられている^{1,2)}。その装置では, 発生した正・負両極性イオンが対象物に到来して除電を行う。このイオンイザの最も一般的な

評価方法はチャージドプレートモニタ (CPM) を用いた方法である³⁾。しかし, 高周波交流高電圧を用いたイオンイザの評価に CPM を用いる場合, 検出電極がオープンになっているため, 電源電圧等による誘導電流の影響を受けることや周波数特性が低いために正確な評価が行えない。我々は交流コロナ放電方式イオンイザの新しい評価法の確立を目指し, 圧縮空気を用いたブロータイプイオンイザを用いて直流コロナ放電方式, 交流コロナ放電方式それぞれで実験を行ってきている。我々はイオンイザにおける除電メカニズムを明らかにするため, 検討項目を図1のように四つに大別した。イオン発生, ノズル内イオン搬送, 大気中イオン搬送, 帯電対象物の除電の四つである。まず, 我々はイオンイザの放電部でのイオン発生特性, ノズル内でのイオン搬送特性を研究してきた。そして, ファラデーケージを用いてイオン搬送量を測定し⁴⁾,

キーワード: イオンイザ, ブロータイプ, コロナ放電, イオン搬送, 絶縁物除電

* 山形大学大学院理工学研究科 (992-8510 山形県米沢市城南4丁目3-16)

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4-3-16, Jonan Yonezawa-shi, Yamagata 992-8510, Japan

** 株式会社コガネイ (184-8533 東京都小金井市緑町3-11-28)

Koganei Corporation, 3-11-28, Midori-cho, Koganei-shi, Tokyo 184-8533, Japan

¹ fukada@koganei.co.jp

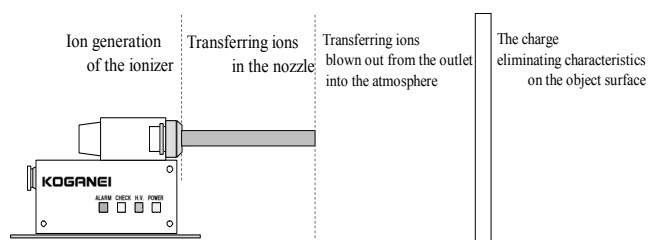


図1 除電メカニズム検討4項目

Fig.1 Eliminating electrostatic mechanism examination 4 items.

ファラデーケージの内部電極をリング型にし,双曲線緩和法則を用いることでイオン搬送量を推定する方法を確立した⁵⁾. これによりイオン発生部ではイオン発生量となる放電電流の大きさがイオン搬送量にあまり影響がないこと, 交流コロナ放電方式ではイオン発生期間が重要であることを明らかにした.

本論文では上述したブロータイプイオナイザを用いて, イオナイザから吹出されたエアフローとイオンの広がりを測定し, そのイオンを帯電した金属及び絶縁物平板に搬送することでどのように帯電対象物の電位が減衰するか実験によって明らかにしたので報告する.

2. 実験装置及び実験方法

今回用いた実験装置の概略を図2-4に示す. 図2に示すように放電部にはタングステン製の針状放電電極を用い, 放電部からの流路は内径 D を $\phi 5\text{ mm}$ とし, イオナイザには直流高電圧 $\pm 4\text{ kV}$ もしくは交流高電圧 8 kVpp を正弦波交流, 電源周波数 1, 10, 100, 1,000 Hz で印加し, 印加エア流量を 30-200 L/min とした. また, イオナイザには同じ流路内径をもつリング型ファラデーケージを接続し, イオナイザ内のエア流速・吹出しイオン量の推定に用いた⁵⁾. リング型内部電極と針状放電電極先端の距離 l は 40 mm とした. リング型内部電極はオシロスコープと接続し, 得られた電圧と測定部のインピーダンス ($1\text{ M}\Omega \pm 2\%$) から電流換算した. この電流をイオン電流と呼ぶ.

大気中エア流速測定では図3(a)のようにカノマックス製 Model1570, プローブ0964-01を用いて測定した. エア流速は時間変動したため, 各点ごとに1分間測定を行い, その平均値を測定値とした.

イオン搬送分布の測定では図3(b)のように, $\phi 3 \times 5\text{ mm}$ で先端を R1.5に丸めた電極をプローブとし, 配線は絶縁物で覆いイオンの捕集を防いだ. プローブには $10\text{ M}\Omega$ の抵抗を接続し, その両端の電圧を測定することでイオン捕集量を換算する. また, 測定電極は $\square 150\text{ mm}$ の金属板に設置し, 先端の測定プローブは金属平板から 50 mm の高さにある. エア流速測定の結果から平板上のエア流れによる影響はないことを確認している⁶⁾. 大気中エア流速, イオン搬送分布のそれぞれの測定でのイオナイザは図2の装置を用い, 直流高電圧 $\pm 4\text{ kV}$ を印加し, 印加エア流量を 30-200 L/min とした.

帯電対象物の除電性能測定では図4のように測定板に $\square 150\text{ mm}$ の金属板もしくはアクリル板を用い, もう一枚の $\square 150\text{ mm}$ の金属板と 5 mm 間隔で絶縁して設置した. 測定板が金属の場合は CPM と同様の構成となる³⁾. ただし, 2枚の平行金属平板での静電容量は約 40 pF である. 測定板の電位は非接触の表面電位計 (コガネイ製 DTY-EPS) で測定した. 測定範囲は表面電位計設置上面の測定板上の $\phi 20\text{ mm}$ である.

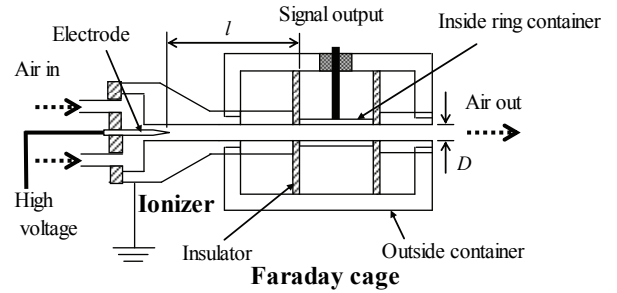
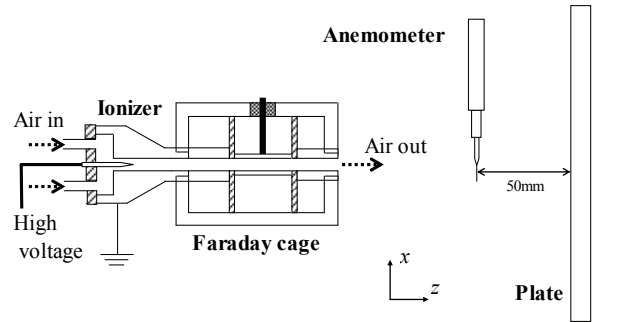
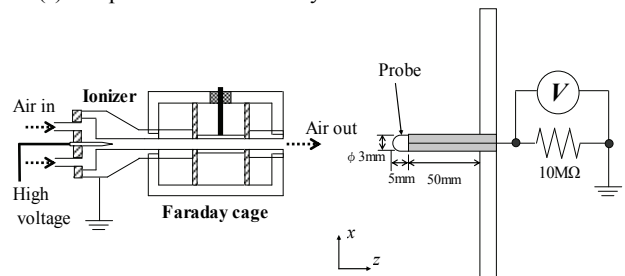


図2 ファラデーケージ接続イオナイザ
Fig.2 The ionizer connecting Faraday Cage.



(a) Experiment of air velocity



(b) Experiment of ion current

図3 大気中イオン・空気流れ測定装置

Fig.3 An ion, air flow measuring equipment in the atmosphere.

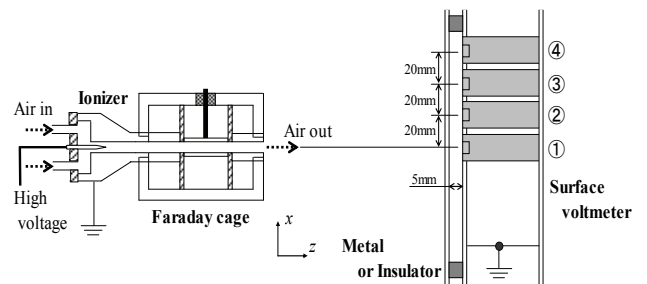


図4 帯電対象物除電測定装置

Fig.4 Eliminating electrostatic measuring equipment onto the electrified object.

表面電位計は1台を測定板の中心に設置し, そこから 20 mm の間隔で計4台設置し表面電位測定を行った. 中心の表面電位計を No. 1とし, 外にいくに従い, No. 2, 3, 4と番号付けた. イオナイザは図2の装置を用い, 交流高電圧 8 kVpp を正弦波交流, 電源周波数 1, 10, 100, 1,000 Hz で印加した. すべての測定はブロータイプイオナイザに印加エア流量 50 L/min を供給し, 定常状態にしてから測定を開始し, 測定開

始 0.5 秒後にイオナイザの放電電極に電圧を印加した。金属板・アクリル板の帯電にはスコトロンを用いた⁷⁾。スコトロンの放電電極に±9 kV, 有孔電極に±2 kV の電圧をそれぞれ印加し, 十分な時間をかけてコロナ帯電を行った。

3. イオナイザ内部特性

図5に図2の装置を用いてイオンの移動速度から推定したイオナイザ内のエア流速を示す⁶⁾。図より印加エア流量の増加に伴いエア流速も増加した。流路内部での圧力変化も考慮すると, 平均流速は印加エア流量の平方にゆるやかに比例する。また, 吹出しイオン量はパイプ内部でのイオン搬送量の減衰が双曲線緩和法則と一致することから, その双曲線緩和法則を用いて推定できる⁵⁾。吹出しイオン量とはファラデーケージ後方で大気中に吹き出されたイオン量をいう。電荷密度で換算した結果を図6に示す。ただし, 負イオンは絶対値で示している。これも印加エア流量の増加に伴い搬送された正・負イオンの電荷密度は比例して増加した。また, 図より正イオンの電荷密度の方が負イオンの電荷密度より5.5-7.7%大きいのがわかる。これは正イオンの方が負イオンより移動度が小さいためである。

4. イオナイザ外部特性

図7に図3(a), (b)の方法で測定したノズル軸上 (z 軸) のエア流速 u ・イオン電流 I を無次元化したものを示す。イオン電流は正・負イオンによる差はみられなかったため平均値で示した。ただし, z はイオナイザ吹出し口とそれぞれのプローブとの距離, u_0 は最大エア流速, I_0 は最大イオン電流, D はノズル直径を示す。 u_0 は吹出し口でのエア流速, I_0 は $z/D=4$ の位置での値とした。 $z/D < 4$ ではプローブがノズルに近づくに従い I_0 が減少した。プローブをノズルに近づけた際に放電部内圧が増加したため, I_0 が減少したと考えられる。図よりノズルから離れるに従いエア流速・イオン電流は減少する。ただし, エア流速は $z/D=3$ まで減少がない。この領域ではポテンシャルコアが形成されていると考えられる⁸⁾。つまり, ノズル出口から流れ出る噴流には平均速度が全く衰えないポテンシャルコアが存在し, そして流れが進むにつれて外部からの乱れが次第に浸透してポテンシャルコアがなくなること示している。図よりイオン電流の減衰はエア流速の減衰に比べなだらかである。ノズル吹出し口付近のイオン同士の拡散速度は数 m/s であることから⁹⁾, イオン同士の反発などのクーロン力, またイオンとプローブ電極の間で形成される電界が影響してノズル軸上のイオン電流の減衰はエア流速の減衰よりも小さくなったと考えられる。

図8に図3(a),(b)の方法で測定した $z/D=6-30$ でのエアの広がり方向 (x 軸) のエア流速・イオン電流を無次元化したも

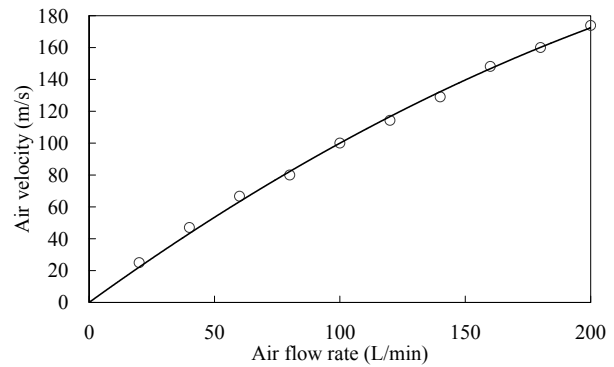


図5 イオナイザ内部平均エア流速

Fig.5 Average air velocity inside the ionizer.

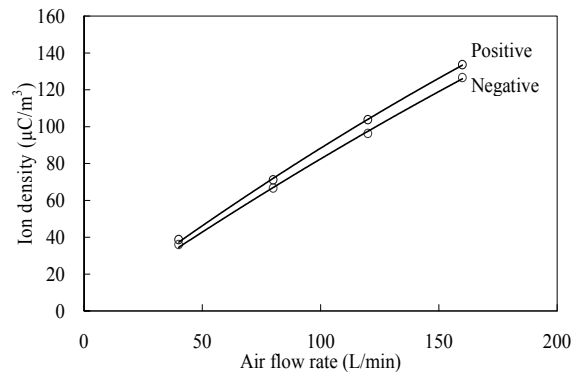


図6 イオナイザから吹き出される推定イオン密度

Fig.6 Estimated blown ion density outside the ionizer.

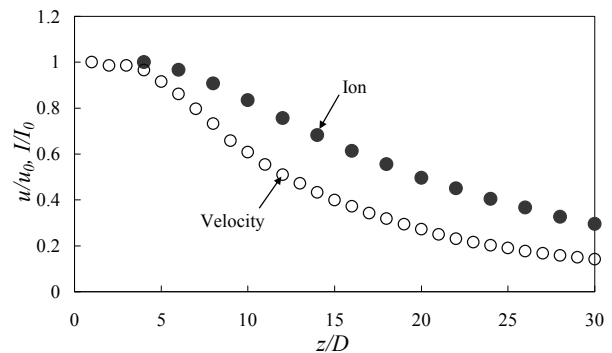


図7 無次元化エア流速・イオン電流特性 (z 軸上)

Fig.7 Nondimensional air velocity and ion current outside the ionizer on z -axis.

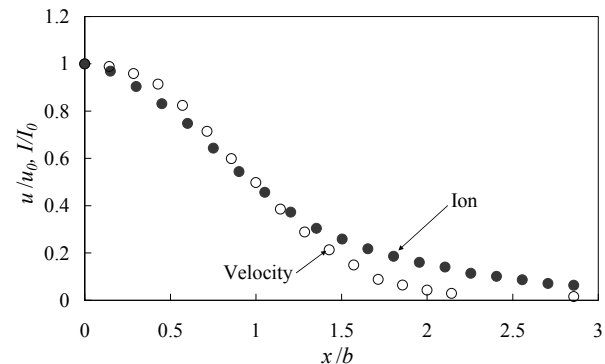


図8 無次元化エア流速・イオン電流特性 (x 軸)

Fig.8 Nondimensional air velocity and ion current outside the ionizer on x -axis.

のを示す。ただし、 u_0 , I_0 は中心軸上のエア流速・イオン電流、 b はエア流速とイオン電流それぞれの半値幅を示す。図より中心から離れるに従いエア流速・イオン電流は減少する。エア流速とイオン電流の減衰特性は一致を示さず、イオン電流の方が広がり大きい。これもイオンの電界による拡散の影響が考えられる。これらよりイオンは空気流に大きく影響を受けながらもイオン同士の拡散を加えて搬送されていることが考えられる。

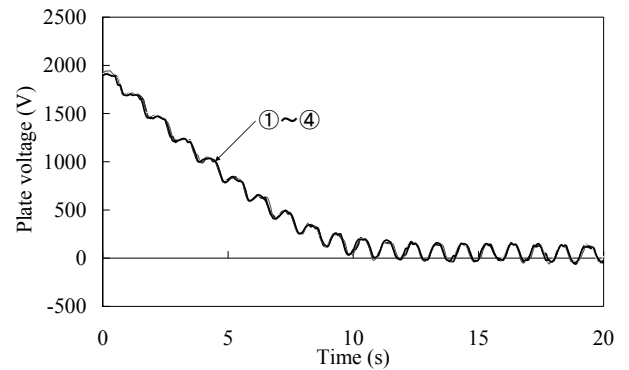
5. 帯電対象物除電特性

5.1 金属対象物の除電特性

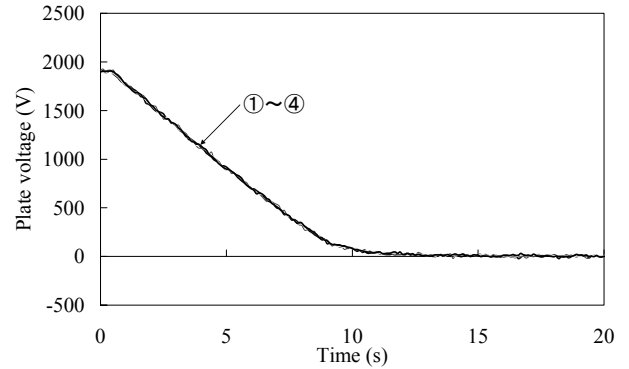
図9に図4の方法で測定した対象物を金属板としたときの金属板の帯電電位の時間変化の一例を示す。なお、図中の①-④は図4で示した表面電位計の番号である。ただし、 f は電源周波数、 z はイオナイザ吹出し口と金属板との距離、 Q は印加エア流量を示す。図9よりイオナイザの電源電圧印加開始と金属板電位減衰開始にほぼ差はない。これは高速気流によって搬送されたイオンが到達するのに必要な時間が十分に短いからである。金属板の電位は表面電位計の位置による差はなく一致している。図9(a)のように電源周波数1 Hz の場合は電位振幅が大きく、金属板の電位減衰後も変動した。電源周波数10 Hz の場合は図9(b)のように金属板の電位振幅は見られなかった。これは金属板の静電容量が CPM と比較しても大きかったことが要因と考えられる。静電容量を小さくすれば電源周波数10 Hz でも金属板の電位振幅が見られると考えられる。

図10にイオナイザの印加エア流量を変えた場合の除電時間の結果を示す。ただし、除電時間は1,000 V から100 V に減衰するまでの時間とする。図より印加エア流量の増加に伴い、除電時間が短くなることがわかる。これは図6からも分かるように印加エア流量の増加に伴い、イオナイザから吹出されるイオン量も増加することによって考えられる。印加エア流量50 L/min では正帯電の除電時間が負帯電の除電時間に比べ長くなったが、150 L/min では正帯電の除電時間の方が短くなった。これは印加エア流量の増加に伴い放電部のエア圧力が増加し、正の放電発生期間が負の放電発生期間に比べ短くなったためであると考えられる⁴⁾。

図11にイオナイザの電源周波数、搬送距離を変えた場合の除電時間の結果を示す。印加エア流量は50 L/min とした。ただし、電源周波数1 Hz の場合のみ、測定ごとの差が大きく、一端100 V 以下になった後に100 V 以上に電位が振動したため測定不能であった。図より、電源周波数の増加に伴い除電時間が短くなることがわかる。これは清水ら¹⁾によって報告された結果と同様の結果である。また、搬送距離を長くすると除電時間も長くなった。これらはイオナイザから大気中



(a) $f = 1$ Hz, $z = 50$ mm, $Q = 50$ L/min.



(b) $f = 10$ Hz, $z = 50$ mm, $Q = 50$ L/min.

図9 金属板除電特性

Fig. 9 Dependency of charge decay of metal plate.

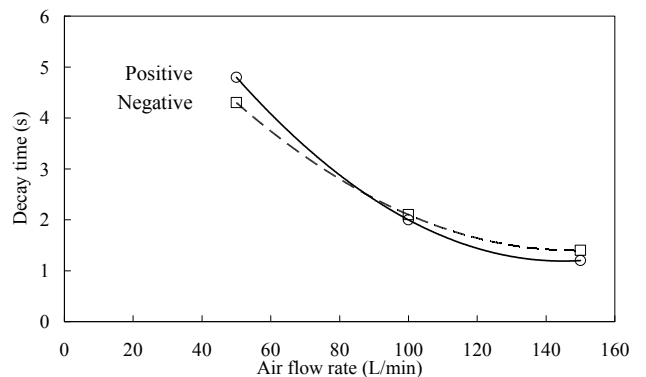


図10 印加エア流量-除電時間特性

Fig.10 Dependency of charge decay on air flow rate.

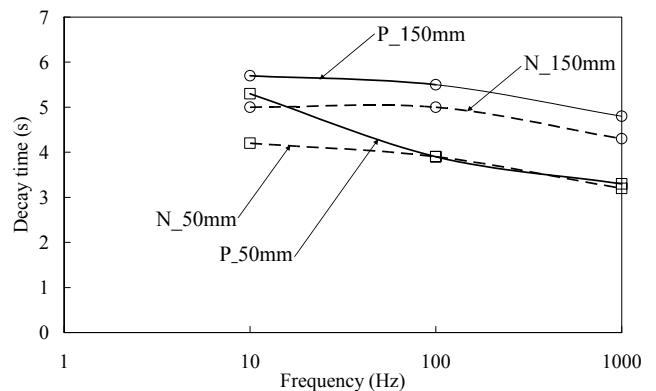


図11 電源周波数-除電時間特性 (金属板)

Fig.11 Dependency of charge decay on frequency.

に吹き出された後もイオナイザのノズルに捕集されることや、大気中でイオンの分布が拡散して広がるためであると考えられる。各電源周波数において正帯電の除電時間が負帯電の除電時間に比べ長くなる傾向を示した。つまり、負帯電の除電時間が短いということは正のイオン搬送量の方が負のイオン搬送量より多いということを示すことから図6の結果と同じ傾向を示す。

5.2 絶縁対象物の除電特性

続いて除電対象物を金属板からアクリル板に変更して同様の実験を行った。アクリル板の帯電にもスコトロンを用いた。絶縁物の場合は図12のように200V弱の初期帯電電位の差がみられた。なお、図中の①-④は図4で示した表面電位計の番号である。そこで帯電電位をそれぞれの初期電位 V_0 で無次元化して示したものを図13に示す。図より表面電位計 No. 1, 2 の電位振幅に大きな差はないが、No. 3, 4 と外側にいくに従い電位減衰開始に遅れが生じ、2次遅れのような減衰特性を示した。また、図の No.1, 2 の減衰曲線より1秒以内に $V/V_0 = 1$ から $V/V_0 = 0.7$ 程度にまで電位が急激に減衰しているのがわかる。これはイオンの流れが図8に示すように噴流内のイオン分布の広がりが少ない直進的な流れであり、アクリル板に衝突後壁面を沿うように流れていくため、吹出されたイオンの大半が最初に平板中心の電位減衰に用いられたのが原因であると考えられる。加えて、中心部のみ急激に電荷がなくなったことにより、アクリル板上での表面電荷分布が変化し電荷の移動が発生したことも考えられる。また、電位減衰後の $V/V_0 = 0.1$ 以下への到達時間は No. 1-4 で差がほぼないことがわかる。これより対象物が $\square 150$ mm 程度の平板であれば、吹出口 $\phi 5$ mm のブロータイプでも平面全体を同時に除電完了できるといえる。

図9(a), (b) と図13(a), (b) は対象の平板材質が金属かアクリルか以外は実験条件が同じである。図より電源周波数1Hzではアクリル板の方が正負イオンによる電位振幅が大きいこ

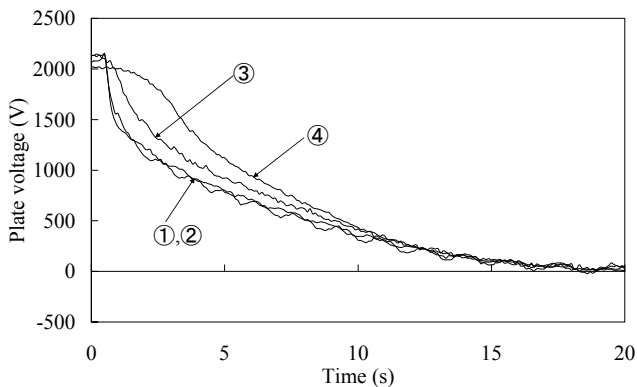
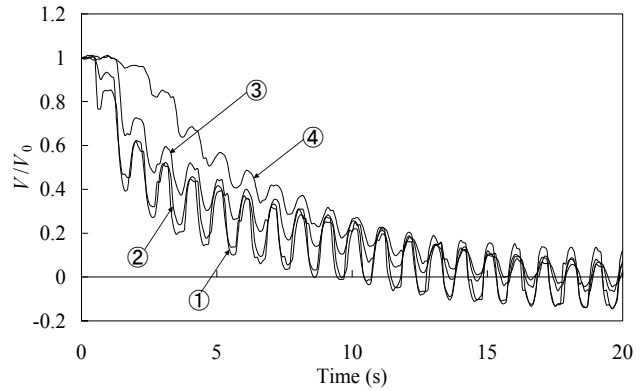
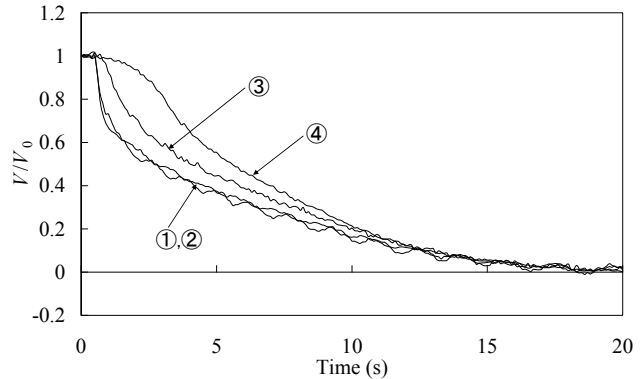


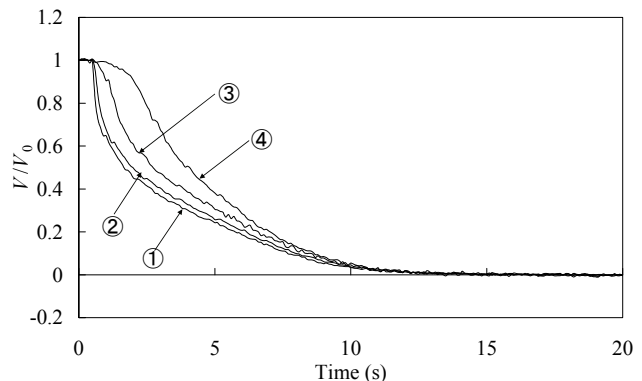
図12 絶縁板除電特性
 $f = 10$ Hz, $z = 50$ mm, $Q = 50$ L/min.
 Fig.12 Dependency of charge decay of insulator plate.
 $f = 10$ Hz, $z = 50$ mm, $Q = 50$ L/min.



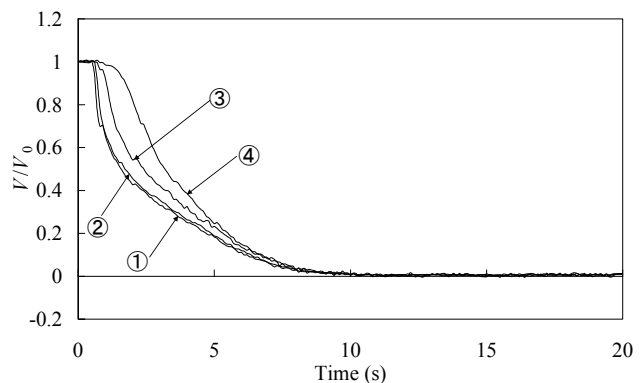
(a) $f = 1$ Hz, $z = 50$ mm, $Q = 50$ L/min.



(b) $f = 10$ Hz, $z = 50$ mm, $Q = 50$ L/min.



(c) $f = 100$ Hz, $z = 50$ mm, $Q = 50$ L/min.



(d) $f = 1,000$ Hz, $z = 50$ mm, $Q = 50$ L/min.

図13 絶縁板除電率特性
 Fig.13 Dependency of charge decay rate of metal plate.

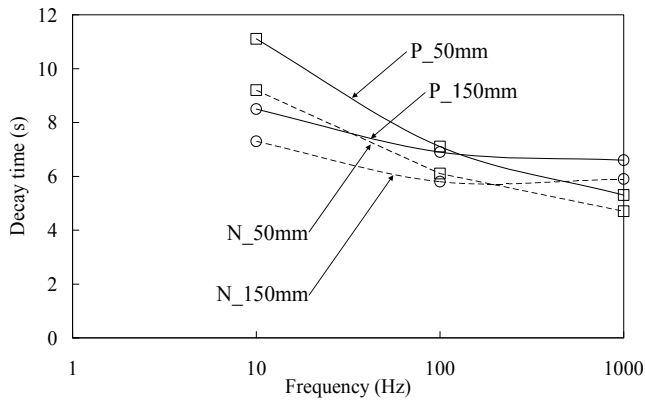


図14 電源周波数-除電時間特性 (絶縁板)

Fig.14 Dependency of charge decay time on frequency.

とがわかる。特に中心部である No. 1, 2 での電位振幅が大きく、電源周波数 10 Hz でもアクリル板では No.1 に正負の電位振幅がみられる。一般にイオナイザは測定板が金属の CPM で評価されるが、実際に使用の際は対象物のほとんどが絶縁体であると考えられるので、イオナイザの電源周波数による帯電対象物の電位振幅の影響を局所的に受けるなどすると対象物の表面で電位分布が生じ、これが静電気放電などを引き起こす可能性がある。ただし、この電位振幅は電源周波数を高くすることで防ぐことができると考えられる。

図14に電源周波数、搬送距離を変えた場合の除電時間の結果を示す。ただし、除電時間は表面電位計 No.1 での 1,000 V から 100 V に到るまでの時間とする。そのため初期の急激な電位減衰は無視している。また、電源周波数 1 Hz での電位減衰は図11の結果同様に測定不能であった。図より金属板での結果同様、電源周波数の増加に対し除電時間が短くなることわかる。ただし、搬送距離による比較では、電源周波数 1,000 Hz では金属板同様搬送距離の増加に伴い除電時間が長くなったが、電源周波数 10 Hz では搬送距離の増加に伴い除電時間が短くなった。この要因は不明であり、実験条件を増やすなどしてより詳細に今後検討を行っていく。

図11, 14よりどの条件でもアクリル板の方が金属板より除電時間が長くなっている。これらより絶縁物の方がイオナイザからの搬送イオンの影響を受け、局所的に電位振幅が大きくなる箇所がある可能性があり、除電スピードは全体的に遅くなるという結果となった。また、この電位減衰特性は単純に CPM で考えられる RC 回路モデル¹⁰⁾とは異なる特性を示すことがわかった。

6. まとめ

本研究は、ブロータイプイオナイザの除電メカニズムを解明する上で検討項目を四つに大別し、その中でブロータイプから大気中へ吹き出されたエア流れ・イオン搬送特性、また、

その搬送されたイオンによって金属及び絶縁体の帯電対象物における除電特性に関して実験によって検証した。本研究により以下の4点がわかった。

- (1) ブロータイプイオナイザではイオンの流れはエア流れの影響を大きく受け、吹出し口から広がり少ない直進的な流れとなる。また、イオンの流れの方がエア流れに比べ拡散が大きい。
- (2) 金属板の除電では板上の位置による電位減衰に差は無いが、絶縁板の除電ではイオンの流れが衝突する中心部で初期に大きな電位減衰が起きる。更に、絶縁板の除電では平板の外側にいくに従い、帯電電位の減衰開始が遅く2次遅れのような減衰特性を示す。
- (3) 絶縁板における電位振幅はイオンの流れが直接吹き付けられている中心部で大きく、金属板よりイオナイザの搬送イオンによる電位振幅が大きい。また、絶縁板の方が金属板より除電時間が長くなる。
- (4) 吹出口φ5 mmのブロータイプイオナイザでは□150 mmの絶縁板の電位を中心でも外側でもほぼ同時に0 V 近傍まで減衰する。

参考文献

- 1) 清水 渡, 永田秀海, 和泉健吉, 児玉 勉: 高周波コロナ放電式ノズル型イオナイザの除電特性. 静電気学会誌, **29** (2005) 62
- 2) A. Osawa: Efficient charge neutralization with an ac corona ionizer. J. Electrostat., **65** (2007) 598
- 3) EOS/ESD Association: Standard for protection of electrostatic discharge susceptible items-ionization, EOS/ESD-S 3.1-1991 (1991)
- 4) K. Asano, Y. Fukada and T. Yasukawa: Measurement of AC ion current from a corona ionizer using a faraday cage. J. Electrostat., **66** (2008) 275
- 5) 深田佳成, 小根澤和義, 小辻一雄, 八塚京子: 双曲線緩和法則によるイオナイザからのパイプ搬送イオン量の推定. 静電気学会誌, **36** (2012) 229
- 6) 深田佳成, 小辻一雄, 鹿野一郎, 八塚京子: ノズル吹出しイオン流れに関する研究. 2011年静電気学会講演論文集, p.53, 静電気学会 (2011)
- 7) 静電気学会編: 新版静電気ハンドブック, p.1171, オーム社, (1998)
- 8) N. Rajaratnam: Turbulent jets, p.27, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam (1976)
- 9) 深田佳成, 小辻一雄, 八塚京子: パイプ搬送イオンの拡散特性に関する研究. 2010年静電気学会春期講演論文集, p.5, 静電気学会 (2010)
- 10) J. Crowley, D. Leri, G. Dahlhoff and L. Levit: Equivalent circuits for air ionizers used in static control. J. Electrostat., **61** (2004) 71