

フランジ型除電器の除電能力の印加電圧周波数依存性

最上 智史^{*1}, 鈴木 輝夫^{*}, 崔 光石^{**}, 山隈 瑞樹^{**}

(2013年4月3日受付; 2013年7月29日受理)

Influence of Frequency of AC Voltage Applied to Flange-type Electrostatic Eliminator on Its Elimination Performance

Tomofumi MOGAMI^{*1}, Teruo SUZUKI^{*}, Kwang Seok CHOI^{**} and Mizuki YAMAGUMA^{**}

(Received April 3, 2013; Accepted July 29, 2013)

This paper deals with the effect of the frequency of AC voltage applied to the flange-type electrostatic eliminator on its elimination performance. An experimental silo was mainly used with polypropylene powders of 300 kg. In order to perform detailed analysis, static marks on the surface of the film using film-running equipment were also observed with the change in frequency. The experimental results are summarized as follows. The performance for the ion generation was not dependent on the frequency of electrostatic eliminator. However, in the experimental silo, the charge-to-mass ratio of powder decreased significantly with an increase in frequency. This is attributed to the increase of the elimination area

1. はじめに

近年, 粉体プロセスにおいて粉体の微粒子化が進み, 今まで以上に粉体プロセスでの静電気トラブルが増加している. 筆者らはこれまで, 静電気トラブルを防止するために粉体の帯電制御を試みてきた. その結果, 帯電制御を行うと粉体の帯電量を任意の値にすることが可能であるとの知見を得た¹⁾. しかし粉体の帯電制御を行うためには, 粉体の帯電量を測定するための機器, 粉体の除電や帯電を行うための機器, 除電器の除電能力を任意に変更するための特殊な電源などを要する.

通常の粉体プロセスにおいて静電気トラブルを防止するためには粉体の帯電量を ± 0.5 nC/g程度以下にするだけで, ほとんどの静電気トラブルを防止することが可能であると我々は考えている²⁾. そこで, 本研究においては, 粉体の帯電量を高精度に制御するような複雑なシステムでなく, 一般的な除電方法である交流式除電器を用いて粉体の除電を試みた. しかし, 我々はこれまでの研究において商用周波数(50 Hz)では除電不足になる可能性が高いとの知見を得ている³⁾. この結果は, 粉体は高速で除電器を通過し続けているため除電に寄与するイオ

ンが噴出されている時間帯に通過した粉体は除電されるが, 除電に有効なイオンが噴出されていない時間帯に通過した粉体は除電されないことを示唆している⁴⁾. また, 除電器への印加電圧の周波数を増加させるとイオンの輸送効率が上昇するといった研究報告もなされている⁵⁾. そこで本研究では除電器への印加電圧の周波数を変化させ粉体の除電の実験を行った. さらに, 前述の予想, すなわち除電に有効なイオンが噴出されている時間帯に通過する粉体だけが除電されることを確認するため, モデル実験としてフィルムランニング装置を用いてフィルムを走行させ, その除電挙動の観測も合わせて行った. これらの実験より粉体用除電器の除電能力の周波数依存性に関して新しい知見を得たので報告する.

2. 実験装置と実験方法

2.1 粉体除電システムおよび除電能力の評価

本研究では空気輸送実規模実験装置を用いた. この実験装置はSUS製縦置き円筒型サイロ(直径: 1.5 m, 胴長: 2 m, 容量: 1.5 m³)と, 全長23 mの空気輸送用4B(4インチ)配管から構成されている. 試料粉体としてはポリプロピレンペレット(粒径3 mm)を300 kg使用した. 実験では, ペレットはサイロ底部からロータリーバルブを通過して輸送配管へ排出され, その配管内を空気輸送されてサイロ上部から再びサイロ内に供給される. Fig.1に空気輸送実規模実験装置を示す. 配管内の空気輸送により試料のポリプロピレンペレットは負帯電する.

円筒型サイロの内部構造をFig.2に示す. Fig.2に示したように, 以前に開発したフランジ型除電器⁶⁾をサイロ内の輸送配管の粉体投入口の直後に設置した. フランジ型除電器は内部にノズル型放電電極⁶⁾を8本組み込んだ

キーワード: 除電器, 空気輸送, 粉体, 交流式, 周波数

* 春日電機株式会社

(〒212-0032 神奈川県川崎市幸区新川崎 2-4)

Kasuga Denki, Inc 2-4, Shin-kawasaki, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, Japan

** 労働安全衛生総合研究所

(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

National Institute of Occupation Safety and Health
1-4-6, Umezono, Kiyose-shi, Tokyo, Japan

¹ mogami@s.jniosh.go.jp

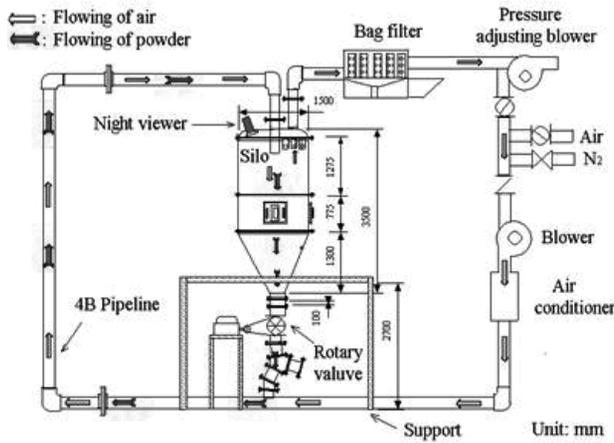


図1 空気輸送実規模実験装置概要
Fig.1 Schematic of Experimental facility for pneumatic powder transport test.

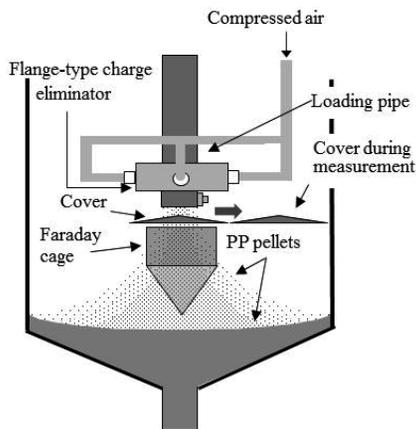


図2 粉体帯電量測定方法概要
Fig.2 Schematic of q measurement of charge of powder.

構造になっている。ノズル型放電電極のノズル部分は金属性で接地されている。また、ノズル部分から空気イオンを放出する。さらにその下部に、粉体の帯電量測定のためにファラデーケージを配置した。はじめファラデーケージの入り口は接地された金属でカバーしておき、粉体の輸送が定常状態に達してからそのカバーを横に移動して、粉体の帯電量測定を行った。

フランジ型除電器には、ファンクションジェネレータ (IWATS 社製, FG-330) と高電圧増幅器 (トレック社製 MODEL 664) を用いて、交流高電圧 (実効値 7 kV) の周波数 f を 2~200 Hz の範囲で変化させて印加した。また、フランジ型除電器内部への粉体の侵入を防止し、除電器で生成されるイオンを除電器外へ噴出させる目的で、フランジ型除電器にエアパージを行った。エアパージ圧は、0.05, 0.1, 0.15 MPa とした。

本システムにおける粉体の除電の効果は、フランジ型除電器への印加電圧の周波数 f をパラメータにして、ファラデーケージにより粉体の帯電量 q を測定して行っ

た。実験条件は輸送用エアの温度 30°C, 湿度 30%RH, 輸送風量 10 m³/min, 粉体供給量 0.38 kg/s で、輸送速度約 12 m/s とした。

2.2 有効除電電流の測定

フランジ型除電器に印加する交流電圧の周波数を変化させたときの有効除電電流の測定システムを Fig.3 に示す。静電気ハンドブックに記載されている電圧印加式除電装置の特性評価方法⁷⁾ に準拠して有効除電電流の測定を行った。金属円筒電極 (外径 0.025 m) をフランジ型除電器の中心に配置した。フランジ型除電器の内径と金属円筒電極の外径間の距離は 0.025 m とした。前述のように本実験では試料粉体は負帯電するため、除電に有効なイオンは正イオンである。そこで、有効除電電流の測定では、金属円筒電極に -5 kV の一定電圧を印加した状態で行った。フランジ型除電器から噴出された正イオンは、金属円筒電極とフランジ型除電器内壁との間に形成された電界により金属円筒電極に流れ込む。この流れ込む電流量を可動コイル型電流計で測定して、これを有効除電電流 I_e とした。一方、負イオンは、正イオンと反対にフランジ型除電器の内壁に流れ込み、接地へ流れる。除電効果を評価する実験と同じように、フランジ型除電器への印加電圧の周波数、エアパージ圧を変化させた。

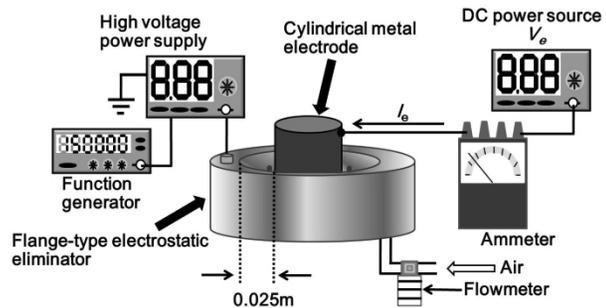


図3 フランジ型除電器の有効除電電流測定装置概要
Fig.3 Measurement apparatus for charge neutralizing current of flange-type charge eliminator.

2.3 フィルムの除電状態の周波数依存性(モデル実験)

空気輸送されている粉体の除電ムラを定性的に理解するためのモデル実験として、走行するフィルムの除電状態の観察を行った。フィルムランニング装置を用いたシステムの概要を Fig.4 に示す。ランニング装置にはフィルムを一律に帯電させるための帯電電極としてワイヤー電極を設置し、これに +10 kV 印加した。正帯電を施したのは、負極性では一律帯電が困難であったためである。また、この実験では除電対象がフィルムであるため、フランジ型でなくバータイプの除電器 (春日電機社製, KDB-400G) をフィルムから 0.03 m 上方に設置し、交流

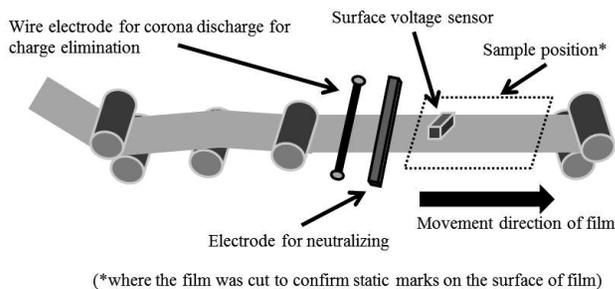


図4 フィルムランニング装置概要
Fig.4 Film running equipment.

電圧 7 kV (実効値) 印加した。周波数は 5 ~ 100 Hz の範囲で変化させた。周波数を除電のときと同じように 2 ~ 200 Hz にしなかった理由は、ランニング速度を速くすると、除電されたフィルムを Fig.4 に示すサンプリング位置に急停止 (後述) させることができないためである。

フィルムの走行および帯電が安定したのを確認した後、除電器を動作させ、表面電位計によってフィルムの電位を測定後ランニング装置を急停止させた。フィルムの除電状況の確認は、停止後サンプリング位置からフィルムを切り出し、青色が正の、赤色が負の帯電部分に付着するトナーをサンプリングしたフィルムに振りかけて確認した。なお、フィルムのランニング速度は 0.83 m/s と一定にした。

3. 実験結果および考察

3.1 有効除電電流の周波数依存性

フランジ型除電器の有効除電電流の周波数依存性に関する実験結果を Fig.5 に示す。印加電圧の周波数の有効除電電流への影響は、100 Hz までは殆どみられず、100 Hz を超えると有効除電電流が減少する傾向を示した。この結果は、周波数が増加することで、正イオンと負イオンの生成時間間隔が短くなり、クーロン力による再結合率が増加し正負両イオンが中和された結果、有効除電電流が減少したと考えられる。また、フランジ型除電器へのエアパージ圧 (A_p) を高くすると有効除電電流が大きくなっている。これは、パージ圧を高くすると、それに伴って、イオンの輸送速度が上昇し単位時間にノズルから吹き出すイオン量が増加するためと考えられ、今までの知見と同様の傾向を示した²⁾。

3.2 空気輸送粉体における除電能力の周波数依存性

粉体の空気輸送実験装置におけるフランジ型除電器の除電能力の周波数依存性を Fig.6 に示す。この結果は、有効除電電流の周波数依存性 (Fig.5) とは異なる結果となった。Fig.4 の結果では周波数を増加させても有効除電電流はほとんど変化しないか、もしくは減少する傾

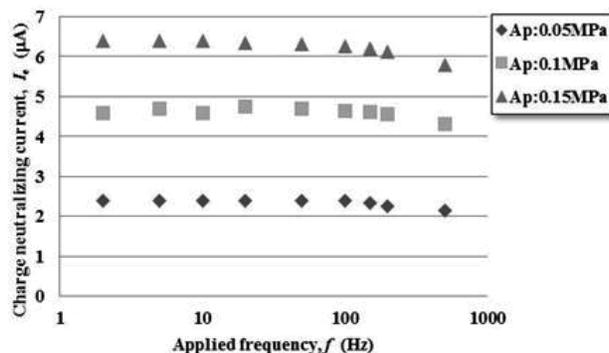


図5 印加電圧周波数と有効除電電流の関係
Fig.5 Relationship between I_e and f of eliminator.

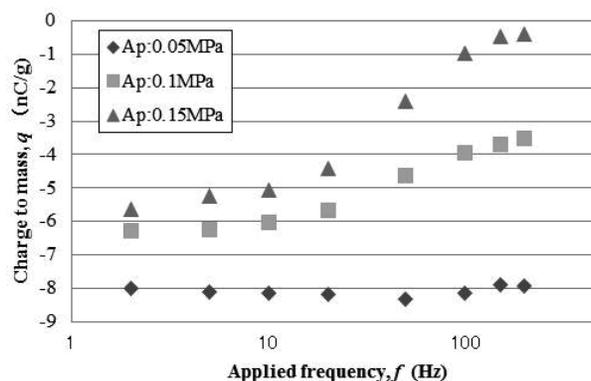


図6 印加電圧周波数の粉体除電効率に与える影響
Fig.6 Relationship between q of powder and f of eliminator.

向を示した。一方、粉体の除電結果においては、Fig.6 に示したように、周波数を増加させると粉体の除電効率が増加する傾向が確認できた。とくに周波数の低いとき、たとえば 50 Hz 以下では以前の実験¹⁾と同様に除電不足の結果が得られた。

しかし、周波数を 50 Hz 以上にすると、帯電した粉体は劇的に除電されることが確認された。とくにパージ圧が 0.1, 0.15 MPa の時は、周波数を上昇させたことによる除電能力の向上が顕著に見られた。

サイロに投入される粉体の除電に必要な有効除電電流は、単位時間当たりの粉体の流量 (kg/s) と除電器未使用時における粉体の比電荷量 (C/g) の積 ($C/s = A$) となる。この積の値が除電器の有効除電電流より小さければ除電に十分なイオンが供給されていると考えられる。本実験に使用した空気輸送実験装置における除電器未使用時の粉体の比電荷量は約 -14 nC/g で、単位時間あたりにサイロに投入される粉体の供給量は 375 g/s であった。故に、除電に必要な有効除電電流は 5.25 μA となる。一方、測定された有効除電電流は Fig.5 の結果からパージ圧が 0.15 MPa の時は 6.5 μA であった。この結果より、単純な電流値のみの比較では、パージ圧が 0.15 MPa の時は、印加電圧周波数に関係なく十分に除電可能であると考え

られる。Fig.6 に示した除電実験の結果では、周波数が 100 Hz のときは 90% 程度除電されていて十分除電可能な状態と判断できるが、たとえば 2~10Hz の低い場合は 60% 程度しか除電できていない。

この原因は除電ムラであると考えられる。本研究で使用するフランジ型除電器では今までの実験により 3 kV でコロナ放電が開始することが分かっている。除電電極に 7 kV (実効値) の正弦波を印加したとき、除電に有効な正イオンが出ている時間的割合 (3 kV 以上の割合) は 1 周期あたり約 42% である。単純には、これ以外の時間帯に除電器を通過する粉体は全く除電されずに通過することになる。これが除電ムラの現象である。たとえば印加電圧周波数が 2 Hz の場合、一周期の時間は 0.5 s であり除電に必要な正イオンが生成される時間は、0.21 s となる。交流式除電器においてイオン生成量が十分であっても除電不足が生じる原因はこの除電ムラであると考えられる。

本研究の実験条件では、周波数に関係なく正イオンが生成される時間的割合は約 42% であるため、周波数によらず残りの 58% の時間帯に除電器を通過する粉体は除電されないことになる。ところが Fig.6 に示したように、実験では周波数が増加すると除電効率が増加した。この食い違いは定性的には次のように考えられる。放電電極が放電している時間帯に放電電極の位置 (ポイント) を通過した粉体は除電されるが、加えて、放電により生成されるイオンの到達範囲は多少広がりがあるため放電開始の瞬間にすでに放電電極の位置を少し通り過ぎていた粉体も除電される。逆に、放電終了の瞬間にはまだ放電電極の位置に達していない粉体も除電される。このように放電イオンの広がりのため除電される範囲が少し広がるが、本論文ではその広がりを除電エリアと呼ぶことにする。すなわち、除電エリアがあるため周波数が増加すると粉体の除電効率が増加すると考えられる。

除電ムラが除電効率に与える影響を調べるため、除電器へ印加する電圧の一周期分に除電器によって除電される範囲を通過する粉体をどの程度除電が行えるかの検討を行った。

除電器から吹き出すイオンのスピードはノズルから噴出する風速とはほぼ等しく、たとえば 0.15 MPa のエアページ圧の時はノズル噴き出し直後の風速は (従って、イオンの速度も) 約 350 m/s と非常に速い⁴⁾。上述のようにコロナ放電開始と共に除電イオンが照射されるエリアに存在する粉体は除電を完了すると考えられる。また、コロナ放電終了時点で除電エリアに存在する粉体も除電される。したがって、印加電圧一周期に除電される粉体

は、コロナ放電開始時およびコロナ放電終了時に除電エリアに存在する粉体 (A) と除電に必要なイオンが照射されている時間内に除電器を通過する粉体 (B) との和になる。除電に必要なイオンを生成する時間は単位時間当たりで考えると一定でこの時間に除電される粉体 (B) は印加電圧の周波数の影響は受けないのに対して、コロナ放電開始および終了時の除電エリアに存在する粉体 (A) は単位時間当たりで考えると総量は周波数が高くなれば増えることになる。Fig.6 の結果は定性的にはこのように説明できる。

以下にこの現象を定量的に議論する。

印加電圧周波数の増加に伴うコロナ放電開始および終了時除電エリアの除電回数の増加が、除電効率を増加させる効果を確認するため、除電エリアを仮定し、その時の除電効率 η の算出を試みる。

粉体の除電効率は以下のように表わされる。

除電効率 η

$$= (\text{一周期に除電可能な粉体の範囲} / \text{一周期に進む粉体の範囲}) \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

一周期に除電可能な粉体の範囲は以下の式から算出する。

一周期に除電可能な粉体の範囲

$$= (\text{除電器への印加電圧の周期} \times 0.42 (\text{除電に必要なイオンを生成している時間割合}) \times \text{粉体の移動速度}) + \text{除電エリア} \dots \dots \dots (2)$$

この計算のため、以下の仮定を行った。

- ① 除電に有効なイオンを除電器が噴出中は除電器を通過する粉体は除電される。さらに、放電開始および終了時に除電エリアにある粉体も除電される。
- ② 除電に寄与しない負イオンは接地に吸収される。

なお、除電に必要な正イオンを生成している時間割合 (約 42%) は印加電圧の周波数に依存しない。

除電対象が粉体の場合、除電エリア、すなわち放電により生成されるイオンの空間的拡がりを直接求めるのは困難であるので、除電エリアの大きさを 0.005~0.05 m の範囲で 4 つ仮定して、(1) 式を用いて計算した除電効率と実際の実験結果の比較を試みた。その結果を Fig.7 に示す。粉体の移動速度は 12 m/s として計算した。本計算結果ではほぼすべての周波数において実験値が計算値より大きい値となった。これは①の仮定において条件内にある粉体は除電されると仮定したのに対し、実際は①の条件内にある粉体の多くは除電に必要な量以上のイオンが粉体に吸着し逆帯電現象が発生していると考えられる。これは粉体の直流式除電器を用いた実験条件より明らかである⁷⁾。この違いが計算値より実験値が大きい

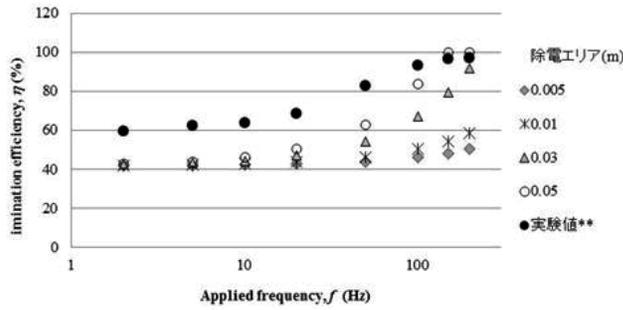


図7 放電時除電エリアが除電効率に与える影響 (*: 放電時除電エリアを表記の値とした時の計算値, **: Fig.6, Ap=0.15 MPa 時の粉体帯電量から算出した実験値).
 Fig.7 Effect of eliminated area as discharges start on elimination efficiency.

値を示した要因である。しかし、計算値において除電エリアを設定することで、実際の実験値と同様に周波数を高くすると除電効率が増加することが確認された。なお、除電効率が100%を超えた箇所があったが、これは除電に有効なイオンを二周期分照射される粉体が存在することを示している。そのため、除電効率 η では100%以上の算出結果になったものは除電に有効なイオンが照射されている事を示しているためすべて100%と表記した。

3.3 フィルムの除電状態の周波数依存性

空気輸送粉体の除電器による除電では放電開始時除電エリアが存在し、このエリアが印加電圧周波数と除電効率との関係に大きく影響していることを3.2で考察した。この除電エリアは、粉体を用いた実験においては直接確認することは難しい。そこで、粉体と同様に高速で移動し、なおかつ除電状態を確認するため、モデル実験として印加電圧周波数と比較して高速で走行するフィルムの除電を行って、除電エリアと印加電圧周波数が除電効率に与える影響を確認した。

フィルムランニング装置を用いてフィルムを走行させ、除電器に印加する電圧の周波数を5~100 Hzの範囲で変化させた時のフィルムの除電模様をFig.8に示す。なお、実験結果を10, 20, 30Hzとしたのは、周波数が10 Hz未満では除電エリアが長くなり過ぎて、30 Hzより大きいと除電エリアが重なってしまい除電ムラの判別が難しかったためである。今回の実験ではあらかじめフィルムを正帯電させた状態で除電器を使用しているため、Fig.8では、水滴が付着しているように見える部分が除電エリアで、その他の部分が非除電エリアとなる。印加電圧の周波数が高くなるにつれて、水滴が付着しているように見える部分の面積が増えることから、除電エリアが増加していることが確認できた。

Fig.9はこの時のフィルムの表面電位の変化を表面電位計で測定した結果である。印加電圧の周波数が高くな

るにつれて、表面電位が低くなる傾向を示し、30 Hz以上は飽和することが確認された。この結果は、空気輸送粉体の除電効率の測定結果 (Fig.7) と同様の傾向を示した。すなわち、印加電圧の周波数が高くなると除電器の除電性能が高くなる傾向が認められた。

Fig.10にフィルムの詳細な除電状況を示す。Fig.8と同様に水滴が付着しているように見える部分を除電範囲、その他の部分が除電器からイオンの照射がない未除電範囲とした。さらに、未除電範囲のフィルム進行方向に長さを測定した。この長さを未除電範囲の長さ L_u とし、同様に除電範囲の長さを L_e とし、除電エリアの検討を行った。Table 1に未除電範囲 L_u と除電範囲の L_e の実測値を示す。さらに除電を行った範囲と除電できなかった範囲の和 L_s を算出した。この値は一周期毎にフィルムの進む距離 L_d と同じになるはずであり、 L_u はフィルムのランニング速度と印加電圧周波数から容易に計算可能である。 L_e と L_u はほぼ同じ値となったため、測定結果に大きな誤差はないことが確認された。

さらに、除電範囲に関して考察する。除電エリアを考慮せず単純に除電範囲を算出すると除電範囲は除電器からイオンを噴出する時間とフィルムの移動速度の積となる。この値をTable 1の L_e に示す。この値は除電エリアが存在しない場合、除電範囲の長さ L_e と同じになるはずであるが、除電範囲の長さ L_e と大きな違いが見られた。測定された除電範囲の長さ L_e と算出された除電範囲の長さ L_e との差を表Table 1の L_r に示す。一周期あたり、この L_r の値分測定された除電範囲が長くなっていることが分かり、この値は3.2の除電エリアの長さであり、走行するフィルムの除電においても除電エリアの存在を考慮すべきであることが結論される。

以上のことから、高速で移動する帯電物体を除電する

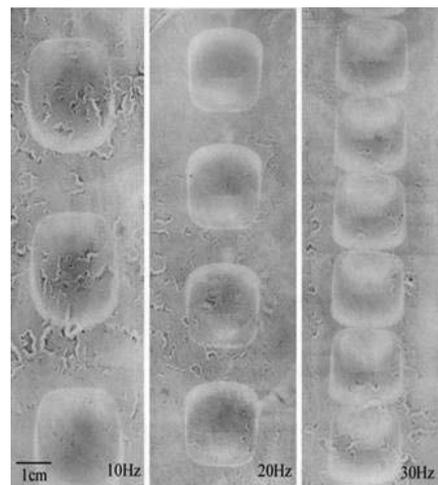


図8 フィルムの除電状態
 Fig.8 Static marks as a function of the f of eliminator.

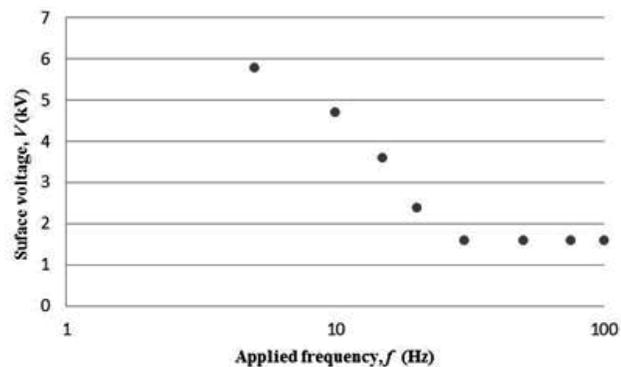


図9 印加電圧周波数とフィルム電位との関係
Fig.9 Relationship between V and f of eliminator.

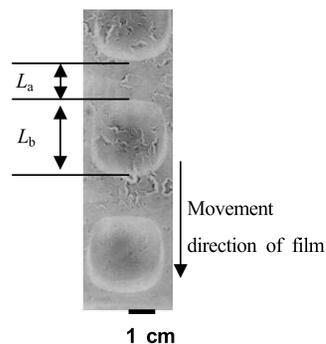


図10 非除電エリアと除電エリアに関して
Fig.10 Length of non-eliminated area (L_a) and length of eliminated area (L_b).

表1 除電エリアと非除電エリアの実験値と計算値との比較 (一周期あたり)
Table 1 comparison of experimental values and calculated values.

f (Hz)	L_a (cm)	L_b (cm)	L_c (cm)	L_d (cm)	L_e (cm)	L_f (cm)
10	4.45	4.00	8.45	8.33	3.33	0.67
20	0.70	3.57	4.27	4.17	1.67	1.90
30	0.17	2.62	2.79	2.75	1.10	1.52

L_a : Length of non-eliminated area.
 L_b : Length of eliminated area.
 L_c : $L_a + L_b$
 L_d : Movement distance of film in 1 cycle off.
 L_e : ion generation time \times movement velocity of film
 L_f : $L_b - L_e$

場合は、除電エリアが存在するため、周波数を高くすることにより単位時間当たりの除電可能範囲が増加し、除電効率が増加することが結論できる。

4. まとめ

空気輸送中の粉体やフィルムなど、高速で移動する物体の除電を行うために、除電能力不足であると考えられた交流式除電器の除電能力向上を目的とし検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 印加電圧周波数を増加させたとしても、除電器のイオン生成能力は上昇しない。
- 2) 空気輸送実規模実験装置で用いているフランジ型除電器の印加電圧周波数を増加させた時、落下粉体の帯電量を大きく減少させた。
- 3) 除電能力向上の原因は放電時除電エリアの増加に起因していると考えられ、フィルムの除電実験により確認された。

以上の検討結果から、高速で移動する物体の除電を交流式除電器で行うには、印加電圧の周波数を十分に検討する必要があると結論できる。

参考文献

- 1) T.Mogami, T.Suzuki, K.S.Choi, T.Ikehata: Control of electrostatic charge for powder by using feedback control-type ionizer system. J.Loss Prevention Process Industries, **23** (2010) 237-241
- 2) 児玉勉, 山隈瑞樹, 鈴木輝夫, 最上智史: 空気輸送粉体用自己放電式除電器の開発. 産業安全研究所報告, NIIS-RR-2004 (2005) 81
- 3) 鈴木輝夫, 最上智史, 児玉勉, 綿野哲: 交流式粉体用除電器の除電特性. 静電気学会講演論文集 '02 (2002) 231-232
- 4) 最上智史, 崔光石, 山隈瑞樹, 鈴木輝夫, 池畑隆: ノズル型防爆構造除電器の多孔板が除電能力に及ぼす影響. 静電気学会誌, **34** (2010) 193-198
- 5) 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, **36** (2012) 297-302
- 6) 児玉勉, 鈴木輝夫, 最上智史: 粉体用除電器によるサイロ内着火性放電の抑制. 産業安全研究所報告, NIIS-RR-2003 (2004) 95-106
- 7) 静電気学会編: 新版静電気ハンドブック, p.392, オーム社 (1998)