

# 小型防爆構造除電器の開発†

崔 光 石\*1 最 上 智 史\*2 鈴 木 輝 夫\*2 山 隈 瑞 樹\*1

可燃性粉体の空気輸送・貯蔵工程等において発生する静電気放電は、爆発・火災の原因となる。このような静電気放電による災害を防止する目的で、2個のノズルタイプ除電器で構成される小型・高性能の防爆性能を有する除電器(±10 kVp-p, 28 kHz)を開発した。この開発した小型防爆構造除電器をモデル実験および実規模粉体空気輸送実験設備により性能評価を行った。試料粉体としてポリプロピレンペレットで約300 kgを使用した。その結果、当該除電器を4台使用することで、帯電粉体の電荷を77%まで除電でき、可燃性粉体への着火性が強いバルク表面放電の発生を抑制する効果があることが確認できた。

**キーワード:** 静電気帯電, 静電気放電, 除電器, 粉体空気輸送設備, サイロ

## 1 はじめに

可燃性粉体の空気輸送・貯蔵工程等において発生する静電気放電は、爆発・火災の原因となる可能性が高い。その中でもバルク表面放電は粉体の帯電量が極めて高くなったときに堆積した粉体の表面に沿って強い発光を伴って起こる着火能力が高い静電気放電である。これらのバルク表面放電による災害を防止するためには、除電器の使用が有効であり、産業現場では非常に注目されている。しかし、一般環境下の電子関連向けの現場に適用する除電器の研究や開発は多数報告されているが、大量の粉体を扱うサイロ、流動層、集じん装置などにおける使用可能な除電器についてはほとんどないのが実状である。従来、このような工程で粉塵爆発事故を防止する対策としては、窒素パージ対策を実施することが有効で一般的であった。しかし、昨今では、原材料を粉体で取り扱うことが多くなり、窒素パージ対策が実施できない工程も増えてきた。さらに、窒素パージ対策では、着火事故は防止できるが、粉体は帯電したままで、次工程で静電気障災害を発生する危険性が危惧された。このような背景から、災害防止用除電器の開発が望まれてきていたが、イオン生成のため必要な放電部のエアパージ機構の構築、パージア圧検出センサの小型化、高電圧電源と除電電極の一体化および小型化等、開発課題が多く十分な製品開発が行われてこなかった。そこで、本研究では小型で高性能かつ安全性(防爆構造)に利点を持ち、また、システム化が可能な使い勝手がよい除電器(以下、小型防爆構造除電器)を開発し、その性能評価を行ったので報告する。ただし、防爆構造についての詳しいことは、報告済み<sup>1)</sup>であり、本報では省略する。

## 2 実験内容

### 1) 小型防爆構造除電器

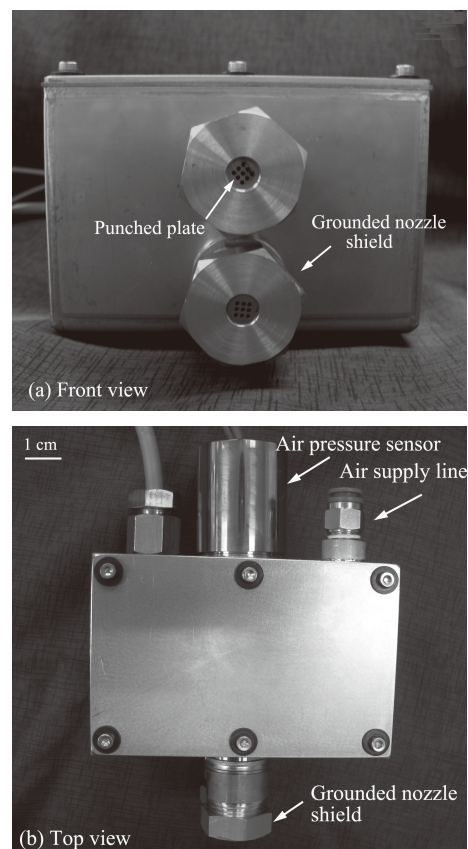


図1 小型防爆構造除電器

図1に小型防爆構造除電器(11cm(幅)×7.5cm(高さ)×7cm(奥行き))の外観を示す。小型防爆構造除電器は、主に(1)安全な構造(2)現場での適用のし易さ(3)除電効率、の三つの観点から考慮し開発したものである。

小型防爆構造除電器を\*危険場所(爆発性雰囲気)でも安全に使用できる防爆要件を満たした構造<sup>2,3)</sup>にするため、ノズル電極のイオン噴出口の開口部に多孔板(孔径:0.9mm, 厚さ:1mm, 穴の数:9個)を取り付けた。

† 本報は、Journal of loss prevention in the process industries, Vol. 26, No.1, pp. 255-260(2013)において一部誌上発表した。

\*1 労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ

\*2 春日電機株式会社

\*危険場所とは、事業場で可燃性物質を取り扱っていて、それらが作業中に大気に放出・漏洩することにより、空気と混合して爆発性雰囲気を形成する場所や、同時に着火源としての電気設備の存在によって爆発につながる可能性のある場所を指す。

ノズル電極には粉体の侵入防止およびイオン化エアを吹き出すために、0.05~0.20 MPa の圧縮空気を供給する。

本防爆構造除電器は、現場運転上の安全性をより高めるため、小型高電圧電源と圧力センサを2個ずつ内蔵し、1個の高電圧電源や圧力センサが故障しても、もう1個が稼働することで、除電停止による災害発生を避けるようにした。また、実際の現場で容易に適用できるように、除電器を小型のものとし、かつ高電圧電源の入力電圧を24Vと低電圧化した。さらに、小型化と除電効率を高めるために、本防爆構造除電器の高電圧電源の出力電圧は、±10 kV (peak to peak value)と高く、28 kHzの高周波交流高電圧とした。交流方式を採用することによって、粉体の帯電極性にかかわらず除電可能である。

## 2) 実験装置および方法

### (1)モデル実験による小型防爆構造除電器の基礎除電特性

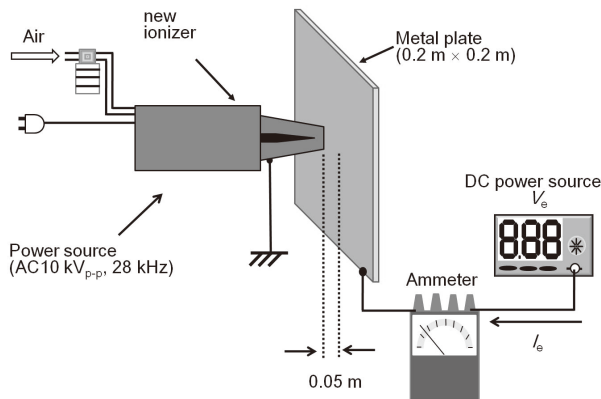


図2 モデル実験装置の構成図

まず、小型防爆構造除電器の基礎除電能力の推定のため、ノズル電極1本のみで特性を調べた。モデル実験(図2)は、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<sup>4)</sup>に準拠して有効除電電流の測定を行った。実験では、直流高電圧電源により-5 kVを印加した模擬帯電物体(0.2 m x 0.2 m)に、距離0.05 mを隔てて除電器を配置して作動させたとき、模擬帯電物体に流れる電流値を有効除電電流  $I_0$  として測定した。試料粉体は金属配管内を輸送されると、負帯電する傾向があるため、除電に有効なイオンは正イオンである。除電器から噴出された正イオンは、模擬帯電物体と除電器との間に形成された電界により模擬帯電物体に流れ込む。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  $I_0$  とした。一方、負イオンは、正イオンと反対に形成された電界により、接地されているノズル電極部分や近傍の接地体へ流れ込む。さらに、放電電極に供給するエア圧  $A_p$  を0.05~0.2 MPaと変化させ、この時の  $I_0$  の測定も行った。なお、 $I_0$  測定用可動コイル形の電流計はテフロン板で接地から絶縁した。

### (2)粉体空気輸送設備による小型防爆構造除電器の性能評価

実際の現場への適用を考慮して、実規模粉体空気輸送実験設備を使用し、その除電能力を評価した。図3のように実験設備は、サイロ(SUS製円筒型、直径:1.5 m、胴長:3.3 m、容量:3.8 m<sup>3</sup>)、配管(材質:SUS、直径:0.1 m、全長:約30 m)、輸送空気の制御盤(最大風量:11 m<sup>3</sup>/min、インバータ制御型)、空調ユニット(温度:30℃、相対湿度:30%)等から構成されている。実験においては、サイロ内に粉体試料を約300 kg充填し、サイロ底部に設置したロータリーバルブを稼働させ、粉体をサイロ底部から排出して輸送配管系へ導く。サイロから配管へ供給された粉体は空気輸送され、サイロ上部から再びサイロ内に投入される。実験時の粉体の単位時間あたりの供給量は、0.38 kg/sとした。

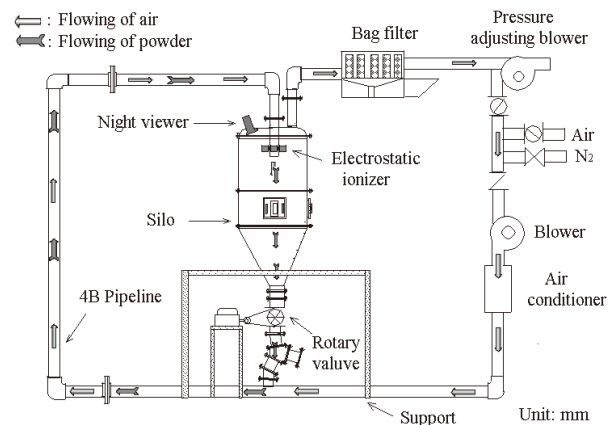


図3 実規模粉体空気輸送実験設備

粉体の単位重量当たりの電荷量すなわち比電荷  $q$  [C/kg]は、サイロ内を落下する粉体を図4に示すようなカバー付きファラデーケージで採取し、その電荷量  $Q$  [C]を重量  $m$  [kg]で除して求めた。ファラデーケージは絶縁された2重円筒からなる電荷量測定装置である。サイロ中央部に設置されている粉体投入口から投入される落下粉体のすべてを捕集するため、内筒の内径は0.3 mとした。さらに、ファラデーケージ上部には開閉可能なカバーを取り付けた。このカバーによって任意のタイミングでファラデーケージ内へ粉体を投入させることが可能である。本研究においては、サイロ内への粉体の供給が安定した後、カバーを5秒間開放させ、ファラデーケージへ粉体を投入させた。また、ファラデーケージ底部は、メッシュ構造とした。これは粉体だけを捕集し、粉体輸送用エアは通過する構造にして、サイロ内のエアの流れを乱さないようするためである。

サイロ内の着火性放電を観測にはイメージインテンシファイア付き光学カメラを用いた。このイメージインテンシファイア付き光学カメラをサイロ上部屋根の点検用ガラス窓に設置してサイロ内部で発生する静電気放電を撮影した。イメージインテンシファイアとして、暗視装

置（浜松ホトニクス製，ナイトビュア C9016-02，感度波長範囲：280 nm～780 nm，最大ゲイン 100 万倍）を使用した．

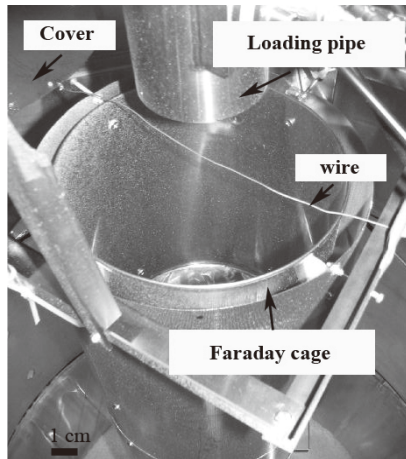


図4 サイロ内に取り付けたファラデーケージ

### (3) 粉体試料

試料粉体は化学プラントの工場では原材料として広く使用されているポリプロピレン(PP)ペレット（平均粒子径：約 2 mm，図 5）で約 300 kg を使用した．PP 粉体の見掛けの体積抵抗率は，非常に高く， $10^{15} \Omega \cdot m$  のオーダーである．

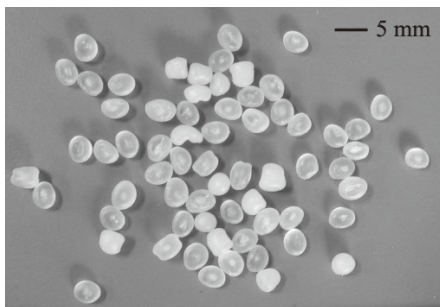


図5 ポリプロピレン(PP)粉体

## 3 実験結果および考察

### 1) モデル実験による小型防爆構造除電器の基礎除電特性

小型防爆構造除電器に内蔵されているノズル電極 1 本の除電特性の実験結果を図 6 に示す．この結果は，ノズル電極に供給するエア圧 ( $A_p$ ) と有効除電電流 ( $I_e$ ) の関係を示したものである． $A_p$  は 0.05 MPa, 0.1 MPa, 0.15 MPa, 0.2 MPa と変化させた．今回の実験での放電距離  $a$  (放電針と多孔板の間隔) は，除電能力，異常火花放電の抑制（例えば，ノズル電極の部分が何らかの理由で衝撃を受けた時，変形・破損し多孔板の一部が放電針と接触する恐れがある）を考慮し 3 mm とした．

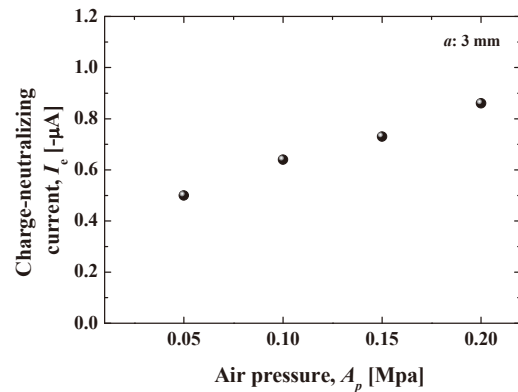


図6 エア圧と除電能力との関係

実験結果によると， $A_p$  が高くなると  $I_e$  は増加した．実際， $I_e$  は  $-0.50 \mu A$  ( $A_p$  : 0.05 MPa),  $-0.64 \mu A$  (0.1 MPa),  $-0.73 \mu A$  (0.15 MPa) と  $A_p$  に比例して増加し，0.2 MPa の時  $-0.86 \mu A$  で最大であった．これは放電針近傍の空間電荷雲がエアによって拡散することから放電が起こりやすくなったこと<sup>5)</sup>，また，エアにより，放電針で生成されたイオンの輸送効率が上昇したためと考えられる<sup>1)</sup>．図 6 の結果は従来式粉体用除電器<sup>6)</sup> (1 本) の  $I_e$  を同じ実験条件と比較すると，30%以上も除電能力が向上した．これは，小型防爆構造除電器に印加した電圧が高周波方式であるためと推定されるが，現在分析中であり，詳しいことは今後報告する．

### 2) 粉体空気輸送実験設備による小型防爆構造除電器の性能評価

実際の現場での小型防爆構造除電器の有効性および除電に必要な除電器の台数を調べる目的で，図 1 に示した小型防爆構造除電器を複数個，サイロ内の粉体投入配管に取り付け，帯電粉体の除電実験を行った．実験に当たって，除電するのに必要な小型防爆構造除電器の台数についてモデル実験の結果を用いて以下のように検討した．

サイロ内の投入配管から排出される帯電粉体の等価電流  $I_p$  [A] は次式(1)で与えられる．

$$I_p = \rho A v \quad (1)$$

ただし， $A$  は配管の断面積[m<sup>2</sup>]， $v$  は粉体の流速[m/s]， $\rho$  は空間電荷密度[C/m<sup>3</sup>]である．

$\rho$  は式(2)で与えられる．

$$\rho = (q/m) \times M \quad (2)$$

ただし， $q/m$  は比電荷[C/kg]， $M$  は粉体の濃度[kg/m<sup>3</sup>]である．

また， $M$  は式(3)で与えられる．

$$M = \frac{u}{A v} \quad (3)$$



ただし、 $u$  は粉体流量 [kg/s]、 $A$  は配管の断面積 [m<sup>2</sup>]、 $v$  は粉体の流速[m/s]である。

これらの式を整理すると、次式(4)を得る。

$$I_p = (q/m) \times u \quad (4)$$

本実験では、 $v : 7 \text{ m/s}$ 、 $A : 0.0078 \text{ m}^2$ 、 $d : 0.1 \text{ m}$ 、除電前の  $q/m : -11.4 \text{ } \mu\text{C/kg}$ 、 $u : 0.38 \text{ kg/s}$  であり、これを式(4)に適用すると、 $I_p$  は  $-4.33 \mu\text{A}$  である。

ノズル電極1本の  $I_e$  は  $-0.69 \mu\text{A}$  (図6,  $A_p : 0.125 \text{ MPa}$ ) であり、上記の  $I_p$  と比較すると、除電器3台以下では除電不足であり、4台であれば、十分除電可能となると考えられた。ノズル電極への  $A_p$  は、実際の現場での適用を考慮した値である。

以上の検討結果から、実験では、図7に示すように、金属製接続短管(材質:SUS, 直径:10.2 cm, 長さ:20 cm)の外周上に8個の小孔を設け、その各所に小型防爆構造除電器(4台, A~D)を取り付けた。実験条件はノズル電極への  $A_p$  を  $0.125 \text{ MPa}$  で、輸送空気風量  $10 \text{ m}^3/\text{min}$ 、粉体流量  $0.38 \text{ kg/min}$ 、輸送空気温度  $30 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、輸送空気湿度  $30 \pm 5\%$  である。主な実験結果を図8に示す。この結果によると、小型防爆構造除電器は帯電粉体の除電に効果があるものの、除電器の台数に大きく影響を受けることが確認された。除電器の除電効率  $E_r$  を求める式を式(5)に示す。除電効率  $E_r$  (および除電後の粉体の比電荷) は、小型防爆構造除電器1台使用時では  $26\%$  ( $-8.46 \text{ } \mu\text{C/kg}$ )、2台では  $48\%$  ( $-5.90 \text{ } \mu\text{C/kg}$ )、3台では  $64\%$  ( $-4.08 \text{ } \mu\text{C/kg}$ )、4台では  $77\%$  ( $-2.54 \text{ } \mu\text{C/kg}$ ) であった。

$$E_r = \frac{(q/m)_{before} - (q/m)_{after}}{(q/m)_{before}} \times 100 \quad (5)$$

ただし、 $(q/m)_{before}$  は除電前の粉体の比電荷、 $(q/m)_{after}$  は除電後の粉体の比電荷である。

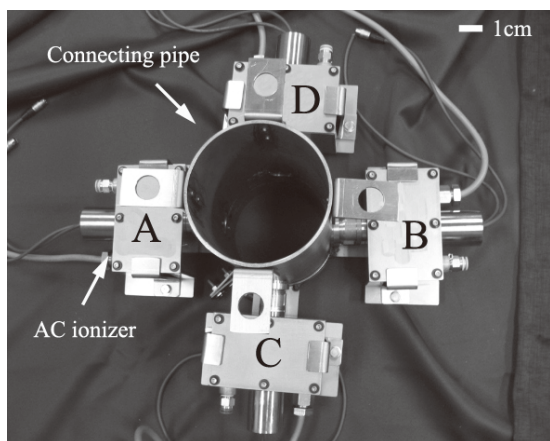


図7 接続短管に取り付ける小型防爆構造除電器

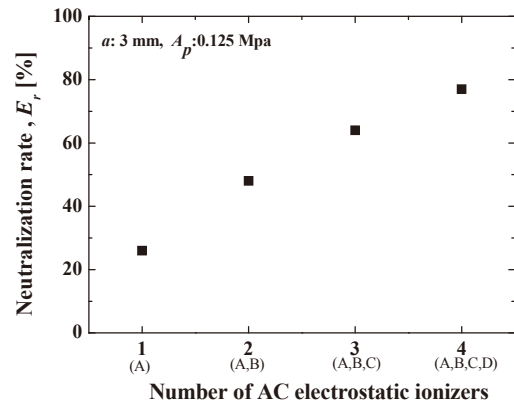


図8 小型防爆構造除電器の台数と除電能力との関係

除電器4台使用で、十分除電可能との推測に反し、実際のサイロでの実験では除電不足になった理由は、帯電粉体へのイオン除電器近傍に存在する帯電粉体によって形成される電界値が除電により低くなり、イオンを吸引するためのクーロン力が減少し、イオン輸送効率・除電効率がモデル実験より悪くなった事が原因であると考えられる。

一方、帯電粉体を多量にサイロへ投入すると、堆積した粉体の表面で静電気放電が発生することがある。実際、今回の実験でイメージインテンシファイア付き光学カメラを用いてサイロの内部の静電気放電を観察し、その一例を図9に示す。結果によると、サイロ側壁では、ブラシ放電と呼ばれる、比較的発光の小さい線状の放電が頻繁に発生した。また、バルク表面放電と呼ばれる、サイロ側壁と中心との中間部では、比較的発光の大きい面状の着火性放電が間欠的に発生した。それらの放電の詳しい特徴などは、本報告書の「光センサーによる着火性静電気放電の検出に関する研究」を参照されたい。小型防爆構造除電器の稼働台数と静電気放電の発生状況との関係を図10に示す。イメージインテンシファイア付き光学カメラの露光時間は2秒である。結果によると、静電気放電は小型防爆構造除電器を増やすと全体的に弱くなり、発生頻度も減少する傾向を示したものの、ブラシ放電の発生を完全に抑制するには不十分であった。また、可燃性粉体への着火性が強いバルク表面放電の発生は見られなかった。今回の小型防爆構造除電器の4台の使用で十分な災害防止効果があると考えられる。

一方、小型防爆構造除電器3台の場合の性能評価時に、取り付け配管内の空間カバー率を考えると、3台の除電器を120度ずつずらして設置(配管円周上に均等に配置)すれば、今回の配置より、除電能力が高くなる可能性がある。その確認は、今後の課題にしたい。

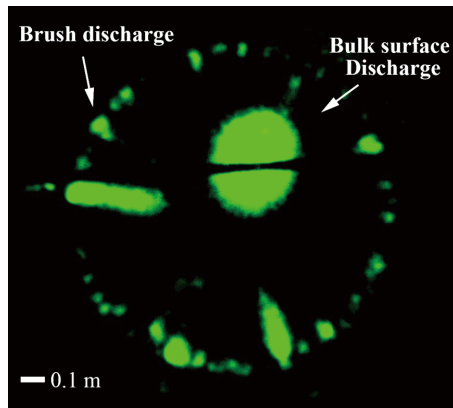


図9 サイロ内で発生する静電気放電の様子 (除電器使用前)

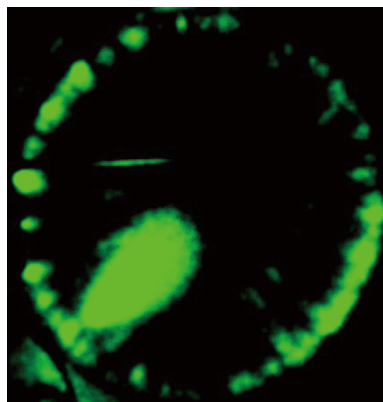
#### 4 まとめ

本論文で提案した除電器は小型・高性能で防爆形であることから、殆ど制約条件無く生産現場に適用可能になる。サイロ内での帯電粉体の除電や着火性バルク表面放電の抑制に小型防爆構造除電器が有効であることが確認された。小型防爆構造除電器を使用することで、粉体プ

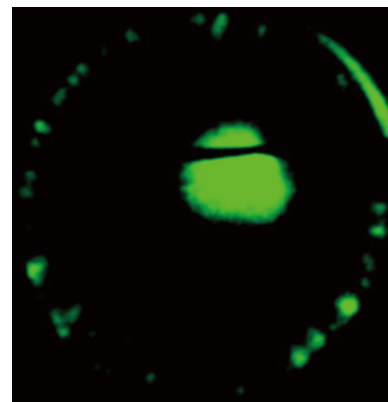
ロセスにおける静電気災害防止に十分寄与できると考えられる。

#### 文 献

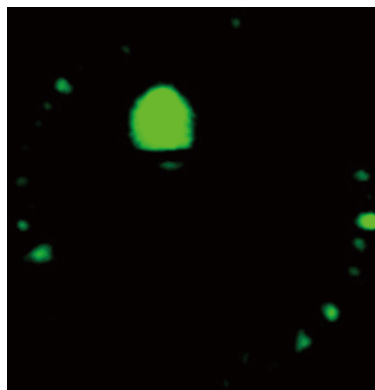
- 1) 最上智史, 崔光石, 山隈瑞樹, 鈴木輝夫, 池畑隆. ノズル型防爆構造除電器の多孔板が除電能力に及ぼす影響. 静電気学会誌. 2010 ; 34 : 193-198.
- 2) IEC. International Standard. IEC-60079. Explosive atmospheres - Equipment - General requirements 2004.
- 3) IEC. International Standard. IEC-60529. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code) /1992.
- 4) 静電気学会編. 新版静電気ハンドブック. オーム社 ; 1998 : 392.
- 5) Kwangseok Choi, Takashi. Fujiki, Yuji Murata. Effect of a hot air flow on the charging performance of a corona charger in electrophotography. Japanese J. Applied Physics. 2004; 43, 11A: 7693-7695.
- 6) 最上智史. 粉体プロセスにおける静電気防止技術の開発. 学位論文. 茨城大. 2011.



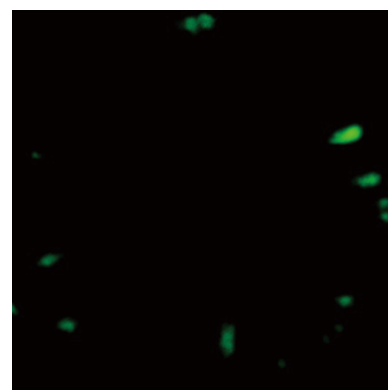
(a) 1台 (A)



(b) 2台 (A, B)



(c) 3台 (A, B, C)



(d) 4台 (A, B, C, D)

図10 小型防爆構造除電器使用台数ごとの放電の様子