

## 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

最上 智史\*<sup>1</sup>, 崔 光石\*\*<sup>2</sup>, 山隈 瑞樹\*\*<sup>3</sup>,  
鈴木 輝夫\*\*\*<sup>4</sup>, 池畑 隆\*<sup>5</sup>

(2009年12月1日受付; 2010年6月11日受理)

## Influence of a Punched Plate on the Performance of a Nozzle-type Explosion-Proof Electrostatic Neutralizer

Tomofumi MOGAMI\*<sup>1</sup>, Kwang Seok CHOI\*\*<sup>2</sup>, Mizuki YAMAGUMA\*\*<sup>3</sup>,  
Teruo SUZUKI\*\*\*<sup>4</sup> and Takashi IKEHATA\*<sup>5</sup>

(Received December 1, 2009; Accepted June 11, 2010)

A nozzle-type explosion-proof electrostatic neutralizer has been developed. It can be used to effectively reduce the electrostatic charge on flammable material in an industrial situation with an explosive atmosphere. To satisfy the International Electrotechnical Commission (IEC) standard, a punched plate was inserted into the nozzle opening of a neutralizer. The punched plate prevents the ingress of solid foreign objects into the equipment. In this study, the use of punched plate and its influence on the performance of a multi-purpose explosion-proof electrostatic neutralizer is investigated. The charge neutralizing current,  $I_c$ , was measured with an ammeter connected between a charged metal plate impressed with DC 5 kV in bipolar and the ground. As a result,  $I_c$  increased as the hole size and/or the hole number of the punched plate increased. On the other hand, the optimum thickness of the punched plate was determined. The thickness depended on the velocity of ionized air used for neutralizing the charged materials.

## 1. はじめに

可燃性溶剤と樹脂との攪拌、液体塗料を使用する静電塗装、静電粉体塗装、粉体空気輸送などの可燃性ガス・蒸気、粉じん等を取り扱う爆発危険場所内の作業工程では、爆発・火災の抑制に除電が有効な場合がある。しかし、このとき使用する除電器は除電性能のみならず、可燃性雰囲気中で使用しても着火源とならないこと、すなわち防爆性能を兼ね備えていることを要求される。

このような背景から、筆者らは、可燃性物質が存在する雰囲気中で使用可能な汎用性のあるノズル型の防爆構造除電器の開発を行っている。防爆構造除電器はIEC規格の防爆構造の技術的要件である構造検査、内圧試験、温度試験、外

部からの固形異物の侵入に対する保護等級 (IP コード) などの防爆条件を満たす必要がある<sup>1,2,3</sup>。IP コードは容器の外郭による保護等級やそれらの付加的事項を定めたものである。本研究の防爆構造除電器はIP4Xに相当するものであり、開口部は直径1 mmの針金が外部から侵入しない構造にしなければならない<sup>2</sup>。

IP コードに準じた外部からの固形異物の侵入に対する保護等級の条件を満たすため、筆者らはノズル電極のイオン噴射口に金属製の多孔板を取り付けた。多孔板はノズル電極で生成したイオンの輸送を妨げたり、イオンを吸収する可能性があるため、多孔板のない場合と比較すると除電能力が低下する恐れがある。一方、多孔板により放電ギャップ長が短くなりイオン生成能力が増大する可能性もある。そこで、本研究では多孔板が除電能力に及ぼす影響について調べるとともに、防爆構造の技術的要件を満たし、かつ、十分な除電能力を有する多孔板を選定することを目的とした。

## 2. 実験

## 2.1 実験装置および方法

防爆構造除電器のノズル電極部分を図1に示す。ノズル電極は筆者らが開発した粉体用除電器<sup>4</sup>)に使用するものを原型とする。ここで、ノズルおよびノズルキャップは金属製で接地されている。保護構造にするため、ノズル

キーワード: 防爆構造, 除電器, 有効除電電流, 静電気.

\* 茨城大学大学院理工学研究科 (316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki, 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, Tokyo, Japan

\*\*\* 春日電機株式会社 (144-0031 東京都大田区東蒲田 2-16-18)

Kasuga Denki, Inc., 2-16-18 Higashi-Kamata Ohta-ku, Tokyo Japan

<sup>1</sup> mogami@s.jniosh.go.jp

ル電極のイオン噴射口の開口部に多孔板を取り付けている。多孔板としては、主に保護構造、加工のし易さ、イオンの生成量およびイオン輸送効率（ノズル電極外へ噴出するイオン/除電器内部で生成されたイオン）の四つの観点を考慮し、数種類の厚さの金属製円板の中心部に、円形の穴を1つ、または複数あけたものを実験用として製作した。使用したすべての多孔板を図2に示す。穴の直径  $D_p$  を1 mm 未満とすることで、IP コードの技術的基準に適合させた。

主な実験である除電能力の測定は、有効除電電流測定方法(図3)に準拠して行った<sup>5)</sup>。直流高圧電源 ( $V_0$ ) を用いて、+5 kV または -5 kV を絶縁された金属平板(以下、帯電プレート) (20 cm × 20 cm) に印加した。帯電プレートから距離 5 cm を隔ててノズル電極を配置し、作動させたとき、

印加電圧と逆極性のイオンを吸引することによって帯電プレートに流れる電流値が有効除電電流  $I_0$  である。針電極へ高電圧を印加するために、交流内蔵電源もしくは外部直流電源のいずれかを用いて実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 多孔板の位置とコロナ放電電流

有効除電電流による評価を行う前に、多孔板を用いたことによるイオン生成能力の向上を検討する。不平等電界によって発生するコロナ放電電流は印加電圧や電極の形状、放電ギャップ長などに強く依存することが知られている<sup>6)</sup>。

多孔板を用いることで、放電ギャップ長が短くなりイオン生成能力が向上する可能性が予想できる。多孔板がイオン生成能力に及ぼす影響を検討するために、放電ギャップ長  $x$  について検討する。

ノズル電極内部は図4のように勾配を有している。図4の構造の場合、 $a$  は針先端とノズル先端までの距離、 $b$  は針先端とノズル内側壁との最短距離、 $d$  はノズル先端の径、 $k$  はノズルの先端内半径と根元内半径との差、 $h$  はノズル根元から針先までの距離である。

多孔板を用いた場合の針先端とノズル電極内部側面との最短距離  $b$  は次式で表される。

$$b = \frac{1}{\sqrt{(a+h)^2 + k^2}} \left( \frac{d(a+h)}{2} + ak \right) \quad \text{--- (1)}$$

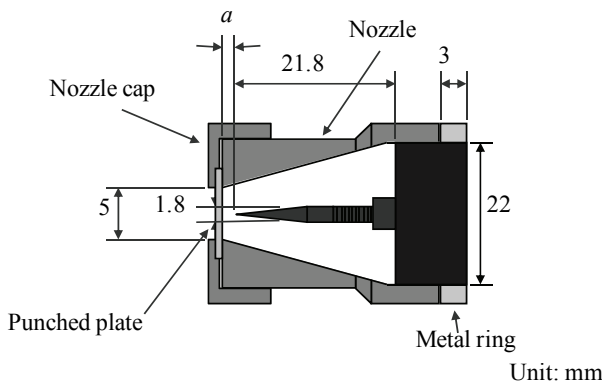
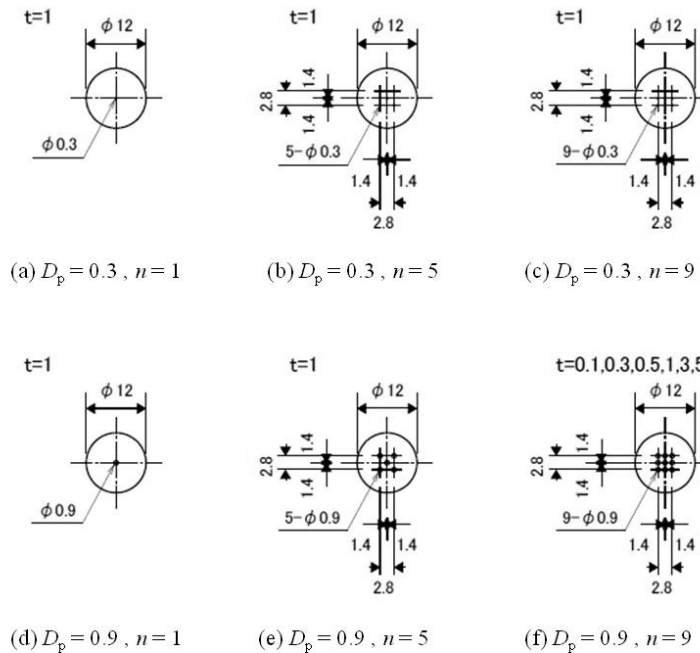


図1 ノズル電極概要

Fig. 1 Schematic of nozzle-type electrode.



Unit : mm

図2 多孔板の寸法

Fig. 2 Dimension of punched plate.

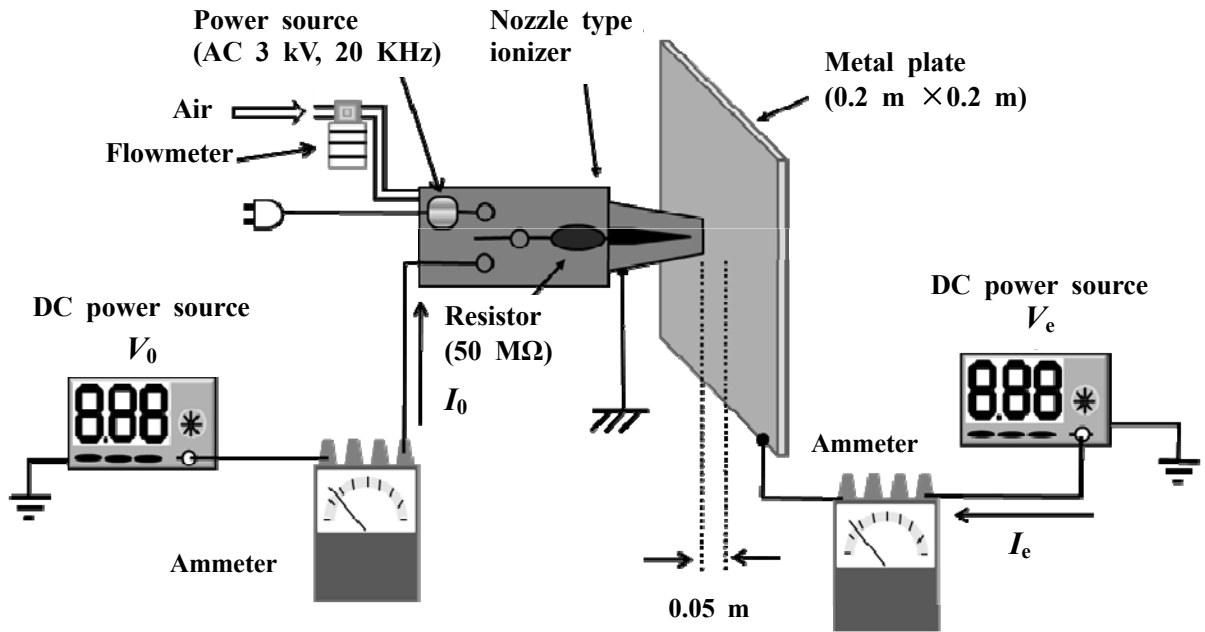


図3 放電電流および有効除電電流測定回路

Fig. 3 Measurement circuit for  $I_0$  and  $I_e$

多孔板を用いたときの放電ギャップ長  $x$  は  $a$  と  $b$  のうち小さいほうの値であり、多孔板を用いないときの  $x$  は  $b$  である。実験では、ノズル電極と除電器本体との間に厚みの違う金属リングを挿入することで、 $a$  を調整した。多孔板を用いることにより  $x$  が、多孔板を用いないときより短くなる条件は  $a < b$  である。本研究で用いたノズル電極は図1に示したように、 $d = 5 \text{ mm}$ 、 $h = 21.8 \text{ mm}$  であり、 $k$  はノズルの先端内半径  $2.5 \text{ mm}$  と、根元内半径  $11 \text{ mm}$  より  $k = 8.5 \text{ mm}$  である。式(1)から上記条件を満たす  $a$  は  $-1.66 \text{ mm} < a < 3.48 \text{ mm}$ 、 $-23.62 \text{ mm} < a < -21.8 \text{ mm}$  となる。 $a$  がマイナスの場合は針先端がノズル外へ突出することになり、矛盾が生じるため、この条件を除外すると、 $a < b$  の関係を満たす条件は  $a < 3.5 \text{ mm}$  となる。確認のため、 $a$  を変化させ、多孔板があるときとないときの放電電流  $I_0$  を測定した。

図3に示す回路で放電針に直流高電圧 ( $V_0$ )  $\pm 3 \text{ kV}$  を印加して放電針と金属ノズル (接地) 間に流れる  $I_0$  (絶対値) を測定した結果を表1に示す。なお、この測定ではエア圧の供給はない。表1に示すように、多孔板の有無にかかわらず  $a$  が大きくなると  $I_0$  は減少した。また、 $a = 1.5, 2, 3 \text{ mm}$  では、多孔板のないときよりも、多孔板のあるときのほうが  $I_0$  は大きかった。 $a = 4 \text{ mm}$  の状態では、多孔板の有無によらず、ほぼ同等の  $I_0$  であった。前ページより金属平板対放電針間のコロナ放電に関する関谷<sup>6)</sup>らの実験により、放電電流は放電ギャップ長の増加につれて減少する傾向が示されていることから、 $a < 3.5 \text{ mm}$  のとき多孔板により放電ギャップ長が短くなり、コロナ放電電流が増加したことがほぼ確認された。コロナ放電電流の増加はイオン生

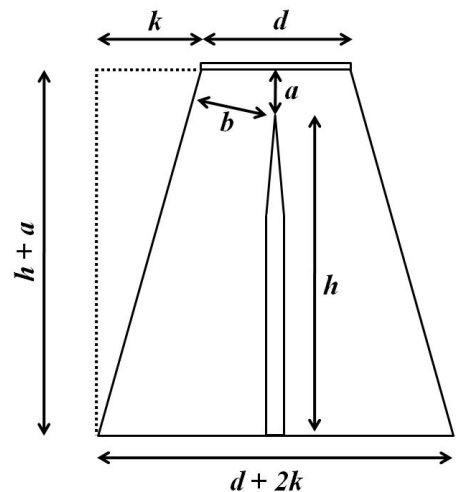


図4 ノズル電極内部概要

Fig. 4 Dimension inside nozzle type electrode.

表1 多孔板と放電針の距離が放電電流に及ぼす影響

Table 1  $I_0$  as a function of  $a$ .

Distance $a$ [mm]	Discharge current, $I_0$ [ $\mu\text{A}$ ] at $V_0$			
	Without a punched plate		With a punched plate*	
	+3 kV	-3 kV	+3 kV	-3 kV
1.5	5.0	39	9.2	57.5
2	4.8	37	5.9	45
3	4.3	33	4.4	34
4	3.6	27	3.4	27

\*: $D_p$  : 0.9 mm,  $n$ : 9,  $t$ : 1 mm.

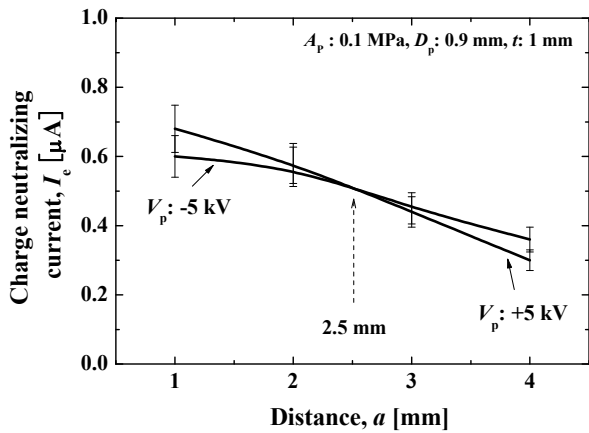


図5 多孔板と放電針の距離が有効除電電流に及ぼす影響  
Fig. 5  $I_e$  as a function of  $a$ .

成量の増加に寄与すると考えられるので、 $a$  が 3 mm 以下では多孔板を用いることで、多孔板を用いない場合より多くのイオンを生成することが予想される。

3.2 多孔板の位置と有効除電電流

上記結果を踏まえて、最適な多孔板位置の選定を行うため、ノズル型除電器の内蔵電源を使用して AC 3 kV, 20 kHz を針電極に印加し、 $a$  を 1, 2, 3, 4 mm に変化させたときの有効除電電流  $I_e$  (絶対値) を測定した。ノズルのエア圧は 0.1 MPa とした。

得られた結果を図 5 に示す。実験に使用した多孔板は  $D_p=0.9$  mm, 厚さ  $t=1$  mm, 穴の数  $n=9$  個である。実験結果によると、 $a$  が大きくなるに従って  $I_e$  は減少する。これは  $a$  が大きくなるに従って放電電流が減少する結果と一致する。図 5 の結果と多孔板のないときの  $I_e^{(4)}$  は、ほぼ同程度であることから多孔板によりイオンの輸送が妨げられる効果と、多孔板により  $I_0$  が増加する効果がほぼ相殺することが示唆される。すなわち、防爆構造にするため多孔板を設置する必要があるが、多孔板により除電性能が必ずしも低下しないことが分かった。

図 5 の結果から最適な  $a$  の値を検討する。帯電プレートを正極性にしても負極性にしても  $I_e$  が同じになるのは  $a = 2.5$  mm のときであり、このときイオンバランスが最も良いことが分かる。除電器においてはイオン生成量とならんでイオンバランスも重要であるので、 $a$  の最適値を 2.5 mm と決定し、以下の実験はこの条件で行った。

3.3 多孔板の穴径・穴数と有効除電電流

イオン輸送効率の向上のため、多孔板の  $D_p$  および  $n$  の影響を調べた。 $D_p=0.3, 0.9$  mm の 2 種類とし、 $n=1, 5, 9$  個とした。図 6 にエア圧 0.1 MPa における  $I_e$  の測定結果を示す。この結果から、 $I_e$  は  $D_p=0.3$  mm の多孔板に比べて、 $D_p=0.9$  mm のほうが、また、同じ  $D_p$  では  $n$  が多い

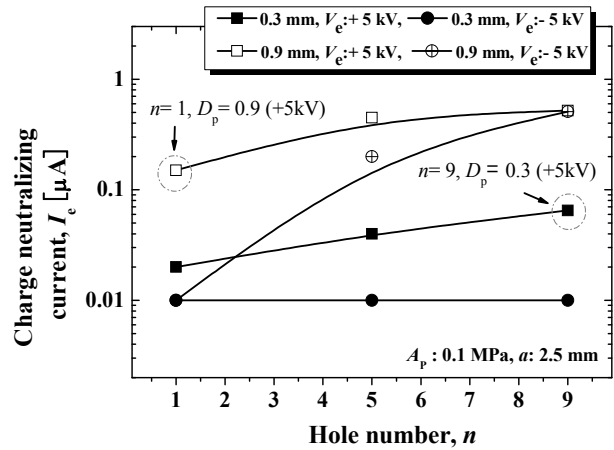


図6 多孔板の穴径・穴数が有効除電電流に及ぼす影響  
Fig. 6  $I_e$  as a function of  $n$  and  $D_p$ .

ほうが大きいことが確認された。ただし、 $D_p=0.3$  mm で  $V_e=-5$  kV の場合、 $I_e$  は 0.01  $\mu$ A 以下であり、 $n$  による  $I_e$  の変化が表われない。 $V_e=+5$  kV のとき、 $D_p=0.3$  mm で  $n=9$  個より、 $D_p=0.9$  mm で  $n=1$  個の多孔板のほうが、より大きい  $I_e$  が測定された。 $D_p=0.3$  mm で  $n=9$  個の多孔板の開口部総面積  $S_3$  は、 $S_3 = 0.15^2 \times \pi \times 9 \approx 0.64$  mm<sup>2</sup> である。一方、 $D_p=0.9$  mm で  $n=1$  個の多孔板の場合、 $S_9 = 0.45^2 \times \pi \times 1 \approx 0.64$  mm<sup>2</sup> であり、開口部総面積が等しいにもかかわらず、後者の  $I_e$  は 2 倍以上である。この結果は、イオンが多孔板を通過できる割合が多孔板の開口部総面積よりも穴径に大きく依存することを示唆している。これは、ノズル電極内部で生成されたイオンがノズル電極に供給されたエアの流れに伴って多孔板の穴を通過するとき、多孔板の穴径が小さいほうが穴内のイオンにより形成される電界強度が強くなり、電界によりイオンが穴の壁方向にドリフトしやすく、穴を通過するイオン量が減少するためと考えられる。

3.4 多孔板の厚さと有効除電電流

多孔板の厚さ  $t$  がイオン輸送効率に与える影響に関して実験を行った。多孔板は  $D_p=0.9$  mm,  $n=9$  個のものにし、 $t=0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 5$  mm と変化させた。エア圧 0.1 MPa における  $I_e$  の測定結果を図 7 に示す。実験結果によると、 $t=0.5$  mm 以上になると、 $I_e$  は減少することが確認できる。一方、 $t=0.5$  mm 以下では  $t$  の増加に伴う  $I_e$  の減少は認められない。これは、イオンが多孔板を通過する際、電界により穴の壁方向にドリフトしても、 $t$  が小さいため壁に衝突せず通過するためと考えられる。もし、イオンの多孔板通過時間が一定以下であると、イオンがほとんど減衰せず輸送効率が低下しないならば、この一定時間から、イオン輸送効率が低下しない多孔板の厚さを決定することが可能になる。

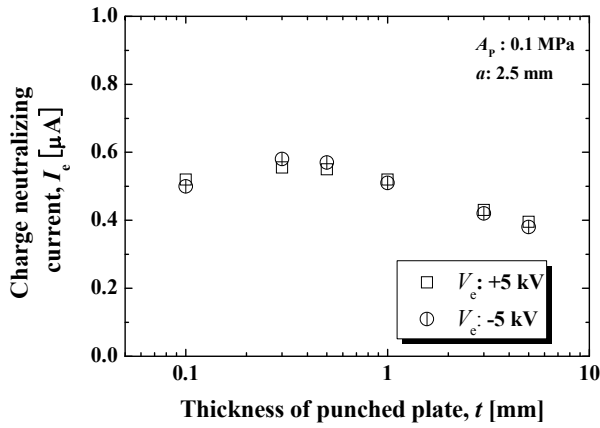


図7 多孔板の厚さがイオン輸送効率に及ぼす影響

Fig. 7  $I_e$  as a function of  $t$ .

表2 エアーの圧力, 流量および速度の関係

Table 2 Air flow rate and velocity under various air pressures.

Air pressure [MPa]	Air flow rate [L/min]	Air velocity [m/s]
0.05	70	204
0.1	88	256
0.2	120	350

### 3.5 多孔板の厚さとイオン輸送効率

多孔板穴内のイオンの輸送速度  $v_i$  は  $v_i = w_p + v_a$  で示される<sup>7)</sup>. この式の  $w_p$  は電界によるイオンのドリフト速度,  $v_a$  は風速である. 多孔板穴内の風速を推測するため, 多孔板 ( $D_p = 0.9$  mm,  $n = 9$  個) を用いたときの, エアー流量  $W_a$  の測定を行った.  $W_a$  と多孔板の開口部総面積  $S_a$  から,  $v_a = W_a / S_a$  により  $v_a$  を算出した. 表2に各エアーク圧におけるエアーク流量および多孔板穴内部の風速を示す. 多孔板穴内部ではエアーク圧が 0.05 MPa の場合においても風速が 204 m/s であった. 一方, ドリフト速度の大きな因子である電界はイオン自身によって形成された電界以外はほとんど多孔板の穴内までは及ばないので, 多孔板穴内部のイオンの輸送速度を考えた場合, 風速に比べて, ドリフト速度は無視することが可能である. したがって, 多孔板のイオンの通過時間の算出には多孔板穴内の風速を用いる.

$t$  を 0.1-5 mm まで変化させ, さらにイオンが多孔板を通過する速度を変化させる目的でエアーク圧  $A_p = 0.05, 0.1, 0.2$  MPa と変え, 各多孔板をイオンが通過する時間  $T$  を  $T = t / v_a$  から算出した. この条件で  $I_e$  を測定し, 各  $A_p$  について  $t = 0.1$  mm の  $I_e$  に対するその他の  $t$  における  $I_e$  の比率 (規格化したイオン輸送係数,  $\eta$ ) を算出した.  $\eta$  と  $T$  の関係を図8に示す. この結果,  $T$  が 2.4  $\mu$ s 以上であると  $\eta$  は減少し, それ以下であるとほぼ一定であることが分かる.

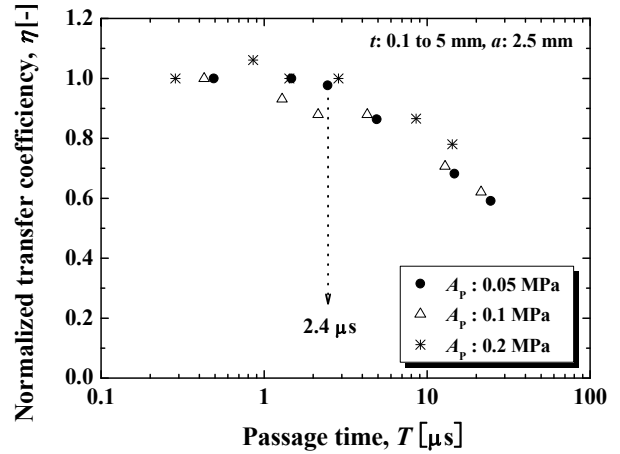
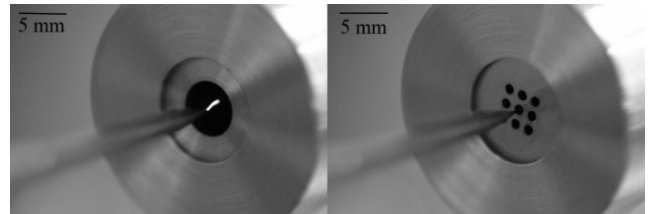


図8 イオンの多孔板通過時間とイオン輸送効率の関係

Fig. 8 Relationship between  $\eta$  and  $T$ .



(a) without punched plate (b) with punched plate

図9 多孔板有無における放電の発光

Fig. 9 Electric discharge between nozzle-type electrode and earthed outer needle electrode.

すなわち  $T$  が 2.4  $\mu$ s 以下であれば多孔板穴の壁に達するイオンドリフト量が軸方向のイオン輸送量に比べて無視できる. したがって,  $t$  は  $A_p$  ごとに 0.05 MPa では 0.49 mm 以下, 0.1 MPa では 0.61 mm 以下, 0.2 MPa では 0.84 mm 以下とするのが最適である. 0.1 MPa の場合の最適値 0.61 mm 以下は図7で得られた  $I_e$  が減少を始める  $t$  の値, 0.5 mm とよく一致しており, 考察の妥当性が裏づけられる.

### 3.6 放電針から外部への放電

多孔板を用いることで, ノズル電極外部への着火性放電の抑制効果も期待される. そこで, 接地された針電極 (直径 2 mm, 先端角 30°, 以下, 外部針電極) をノズル電極外部より多孔板の中心部に表面まで接近させたとき, 多孔板 ( $D_p = 0.9$  mm,  $n = 9$  個,  $t = 1$  mm) の有無におけるノズル電極内部に設置された針電極から発生する放電の進展観測を行った. 図9(a)に示すように多孔板を設置しない場合, 高電圧が印加されている内部針電極からストリーマー状の放電が外部針電極に向かって発生することが確認された. 一方, 多孔板を設置した場合 (図9(b)), 外部針電極へ向かう放電は観測されなかった. これは, 多孔板が内部針電極によって形成されている電界を遮蔽するためと考えられ

る。この結果は、万が一ノズル電極のイオン噴射口へ接地された金属物体などが近接した場合においても、着火性放電が発生しないことを示している。

#### 4. 結論

IEC に規定する防爆構造の技術的要件の保護等級を満たすとともに、除電能力を有するノズル型防爆構造除電器の開発にあたって重要な多孔板の選定のための検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 外部からの異物侵入に対する保護等級を満たすため、多孔板を用いても、放電ギャップ長の短縮によって多孔板のない場合と同等以上のイオン生成量が得られる。
- 2) 多孔板の穴は防爆構造の技術的要件を満たす範囲内で可能な限り大きくし、かつ、穴の数を多くすれば除電能力が向上する。
- 3) エアー圧が一定のとき、多孔板の厚さが一定以下であれば除電能力は多孔板の厚さに依存しない。

- 4) エアー圧が異なっても除電能力が低下し始めるエアーの多孔板穴内通過時間は一定である。したがって、この通過時間からエアー圧毎に最適な多孔板の厚さを決定できる。
- 5) イオン噴射口近傍に外部から接地導体が接近しても多孔板の遮蔽効果により着火性放電は発生しない。

#### 参考文献

- 1) IEC, International Standard, IEC-60079 (2004)
- 2) IEC, International Standard, IEC-60529 (1992)
- 3) 産業安全研究所技術指針「工場電気設備防爆指針」(国際規格に整合した技術的基準対応 (2006))
- 4) 児玉勉, 山隈瑞樹, 鈴木輝夫, 最上智史: 産業安全研究所報告, NIIS-RR-2004, p.81 (2005)
- 5) 静電気学会編: 新版静電気ハンドブック, p.392, オーム社 (1998)
- 6) 関谷昌久, 細川辰三, 長谷部堅陸: 電気学会論文誌, **107-A** (1987) 312
- 7) A.Ohsawa, J. Electrostatics, **63** (2005) 767