

## ホール電極におけるイオン風速度

宮下 皓高<sup>\*,1</sup>, 江原 由泰<sup>\*</sup>, 榎本 譲<sup>\*\*</sup>, 乾 貴誌<sup>\*\*</sup>

(2016年11月9日受付; 2017年1月17日受理)

## Study of Ionic Wind Velocity induced by Hole Electrode System

Hiroataka MIYASHITA<sup>\*,1</sup>, Yoshiyasu EHARA<sup>\*</sup>, Joe ENOMOTO<sup>\*\*</sup> and Takashi INUI<sup>\*\*</sup>

(Received November 9, 2016; Accepted January 17, 2017)

The electrohydrodynamic (EHD) phenomenon is generated by applying a high voltage and the ionic wind is caused by the corona discharge. Therefore, an investigation of the ionic wind is necessary to improve the performance of electrostatic precipitator (ESP) and to develop an EHD pump. In this paper, the characteristics of the ionic wind are presented at various pore sizes. The experimental system is composed of a needle discharge electrode and a plate electrode. The needle discharge electrode was installed above the hole. The values of the gap distance between the electrodes were 5, 8, 10, 15, 20, and 30 mm and the values of the pore size were 5, 8, 10, 13, 20, and 30 mm. It was determined that the ionic wind increases with increasing discharge current. Furthermore, in case the ratio of pore size to gap distance is 1, the ionic wind reached a maximum value. The fastest ionic wind observed was  $\Phi 20$ .

## 1. はじめに

コロナ放電は様々な分野に用いられており, その中でもコロナ放電下における物質の輸送はコロナ放電応用の一つとして関心が高まっている. コロナ放電下では, 一次流の他に, 電気流体力学 (Electrohydrodynamicis: EHD) による二次流が発生することが知られている. この電気流体力学現象はイオン風として知られており, イオン風は発生に必要な部品数が少ないことや, コントロールが容易なことが利点である<sup>1)</sup>. コロナ放電が発生するに伴い多量のイオンが生じ, このイオンにクーロン力が作用して対極に移動する. この場合に大気中の中性粒子と衝突を繰り返してイオン移動エネルギーを中性粒子に与えて, イオンおよび中性粒子はともに対極に向かって移動する. これらの移動現象が風であり, イオンに起因しているのがイオン風と呼ばれる<sup>2)</sup>. イオン風速は式(1)で表される<sup>3)</sup>.

$$U_{EHD} = \sqrt{\frac{J_p D}{\mu_i \rho_g}} \quad (1)$$

 $J_p$ : 電流密度,  $D$ : 電極間隔 $\mu_i$ : イオン移動度,  $\rho_g$ : ガス密度

電気集塵装置 (electrostatic precipitator: ESP) の内部では, 一次流 (ガス流) の他に, 流体に高電圧を印加した際に生じる EHD 効果が粒子挙動に影響を与えることが知られている<sup>4)</sup>.

電界強度 6 kV/cm の場合, イオン風速は実験によると最大値は 8 m/s<sup>5)</sup> にもなると言われているので, 低風速処理の ESP 内の気流にイオン風が関与すると考えられる. ESP 内では粒子の帯電機構にコロナ放電を用いているため, 必ずイオン風が発生する. そのため, イオン風を解明することで, 粒子挙動の把握および ESP の性能向上が期待できる.

また, イオン風を利用した装置として EHD アクチュエータや EHD ポンプがある<sup>6, 7)</sup>. これらは平行平板電極の間に高圧電極を設置することで, イオン風を発生させる構造である. イオン風速式に直接含まれていない接地電極の形状などのイオン風速への影響を検討することは, コロナ放電応用機器の新たな基礎データの蓄積となるであろう.

イオン風の計測および解析に関しては様々な方法があり, これに関する報告がなされている. M. Robinson はイオン風速度が印加電圧にほぼ比例することを示した<sup>8)</sup>. また, 川崎氏らはシュリーレン法を用いて, 針-平板電極において, イオン風のコアが針電極から針直下方向に形成されることを示した<sup>9)</sup>. 大山氏はシリコンオイルの煙霧を用いて, 気相 EHD 現象を観測した. EHD 現象による気流の乱れが電極軸を対象にほぼ定常であり, 針

キーワード: イオン風, コロナ放電, 電磁流体力学, 電気集塵装置

\* 東京都市大学

(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

Tokyo City University, 1-28-1, tamazutsumi, setagayaku, Tokyo 158-8557, Japan

\*\* 富士電機株式会社

(〒191-8502 東京都日野市富士町 1 番地)

Fuji Electric CO., Ltd, 1banchi, hujityou, hinoshi, Tokyo 191-8502, Japan

<sup>1</sup> lg1691302@tcu.ac.jp

電極先端から平板電極へ流れが向かうことを明らかにした<sup>10)</sup>。大久保氏らは Alternating Di-rection Implicit method を用いて ESP 内の流れ場を計算した。渦が発生していない場合の速度分布は放電線近傍で速く、渦が発生している場合は渦近傍で速度が速いことが示された<sup>11)</sup>。

イオン風速は電流密度や電極間隔などの式(1)に示される要因が影響する。実際の ESP では電極構造によっても電流密度が変化し、多種多様に二次流は変化する。片谷氏らは平行平板電極構造において、高压電極および接地電極ともにトゲ電極にすることによって、イオン風が高風速となることを報告している<sup>12)</sup>。

著者らはイオン風を効果的に発生させ制御が容易な電極形状として、接地電極に孔を設け、その中心上に針電極を配置する構造に着目した。ここでは孔を開けた電極をホール電極と呼ぶことにする。この電極形状は構図が簡単で、EHD アクチュエータや ESP などに適応が容易である。

本研究では、ホール電極構造の実験装置を用いて、ホールを通過するイオン風の測定を行い、電極構造を変化させた際のイオン風特性を調べた。

2. 実験方法

実験装置の概略を図1に示す。高压電極はステンレス製の針電極（直径 2 mm，曲率半径 0.25 mm，角度 25°），接地電極は平板の中心に孔を開けたホール電極を使用した。ホール電極は縦 15 cm，横 9 cm，電極間距離  $d$  は 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30 mm，ホール径  $\Phi$  は 5, 8, 10, 13, 20, 25, 30 mm と変化させ実験を行った。高压針電極には負極性の直流高電圧を印加した。負極性はコロナ放電が安定する電流領域が広く、正極性に比べ、放電をコントロールしやすい。また、一部の実験では極性効果の検討のために正極性の特性も評価した。印加電圧は負極性 -4.9~12.9 kV，正極性 6.1~10 kV とした。風速は接地電極のホールを通過するイオン風をホール電極から 56 mm 下にあるベーン式風速計（hontzsch, HFA RS232）を用いて測定した。

図2に高压針電極を移動させた時の実験概略を示す。ホール径  $\Phi$  は 20 mm，電極間距離  $d$  は 20 mm，針電極の位置  $x$  をホールの中心から 0, 5, 7.5, 10 mm と変化させた。この時のホールを通過するイオン風速度を測定した。

実験装置内の電界強度をシミュレーションにより解析した。

解析には有限要素法ベースの汎用物理シミュレーションソフト（COMSOL）を用いた。解析モデルを図3に示す。モデルの寸法は図1の条件と同様である。解析条

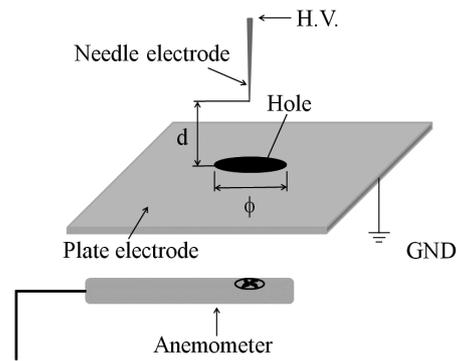


図1 実験装置  
Fig.1 Experimental system.

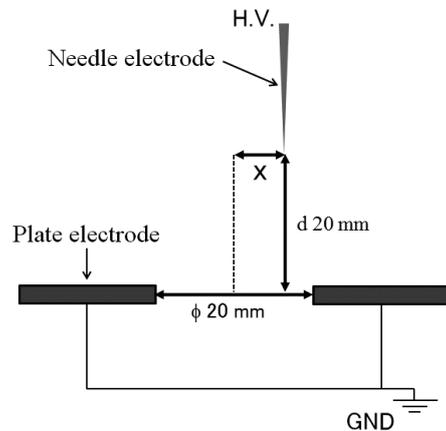


図2 針移動実験装置  
Fig.2 Experimental system of needle electrode movement.

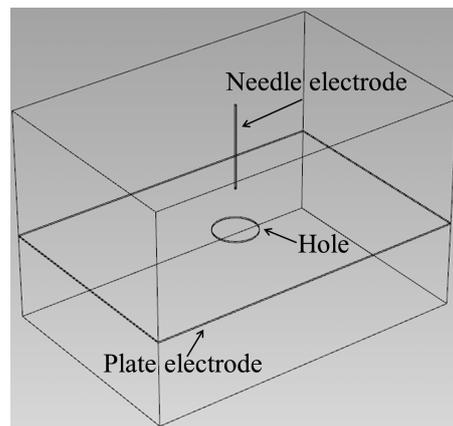


図3 解析モデル  
Fig.3 Simulation model.

件は針電極に -10 kV，電極間距離  $d$  は 5~20 mm，ホール径  $\Phi$  は 5~40 mm，針電極とホール電極は Iron，解析空間は Air，メッシュサイズは 2.7 mm，要素数は 180 万とした。計算結果はポアソン方程式とイオンの連続式を連成させ、ポアソン電界として算出した。

3. 結果及び考察

図4に本研究で用いた針対ホール電極のV-I特性を示す。ホール径 $\Phi$ は20 mm, 電極間距離dは5, 8, 10, 15, 20 mmとした。電極間距離によってV-I特性は異なるため, この試験範囲では電極間距離が大きいほど, V-I特性の傾きが小さい傾向を示した。電極間距離が大きいほど, コロナ放電開始電圧は高く, 放電電流は流れにくい。このことから, 電極間距離が大きくなるとV-I特性の傾きが小さくなった。また, V-I特性の実験値とシミュレーションにおける計算値を比較したところ, ほぼ同じ値を示した。

図5にホール径 $\Phi$ を5 mmとした時のイオン風の放電電流特性を示す。放電電流値は2.5~30  $\mu$ A, 電極間距離dは5, 8, 10, 15, 20 mmとした。いずれの電極間距離においても放電電流値の増加に伴いイオン風は増加し

た。放電電流値の増加に伴い式(1)の電流密度 $J_p$ が増加するため, イオン風が速くなったと考えられる。放電電流値30  $\mu$ Aでは電極間距離5 mmのイオン風が最も速い結果であった。放電空間内の電界は高圧針電極とホールのエッジ近傍が強く, 放電はエッジに集中することが考えられる。したがって, イオン風の主流は針先より, ホールのエッジに向かって流れることになる。エッジ付近では, イオン風はホールを通過する流れと, 接地電極に当たり, 反対方向へ向かう流れに分流する。したがって, ホールを通過するイオン風の割合は, 針先端とホールエッジの位置関係に大きく依存することが考えられる。ホール径5 mmでは, 電極間距離が長くなるとホールから針電極までの距離が長くなるため, イオン風がホールを通過する前に分散してしまう。電極間距離が5 mmになると, ホールのエッジに針電極が近づくため, イオン風はホールを通過する割合が多くなる。

図6にホール径を20 mmとした時のイオン風の放電電流特性を示す。放電電流値は2.5~30  $\mu$ A, 電極間距離dは5, 8, 10, 15, 20 mm, とした。ホール径5 mmと同様に, 放電電流値の増加に伴いイオン風は増加し, 電極間距離が20 mmの時に最大値を示した。電極間距離が20 mmより短い場合は, 針先端とホールのエッジとの距離が近づき, エッジから針先までの角度が浅くなる。このとき, イオン風がホールのエッジに向かって流れるため, ホールを通過するイオン風が少なくなったと考えられる。以上のことから, 各ホール径においてイオン風が最大値を示す最適な電極間距離が存在し, ホール径5 mmでは電極間距離5 mm, ホール径20 mmでは電極間距離20 mmが最適な電極構成であることが明らかとなった。

各電極間距離におけるイオン風の最大値と最小値の差

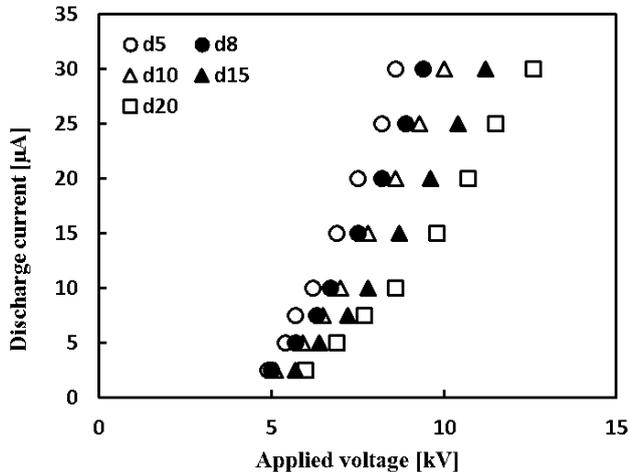


図4 V-I特性 ( $\Phi$ 20 mm)  
Fig.4 Discharge current as a function of applied voltage. ( $\Phi$ 20 mm)

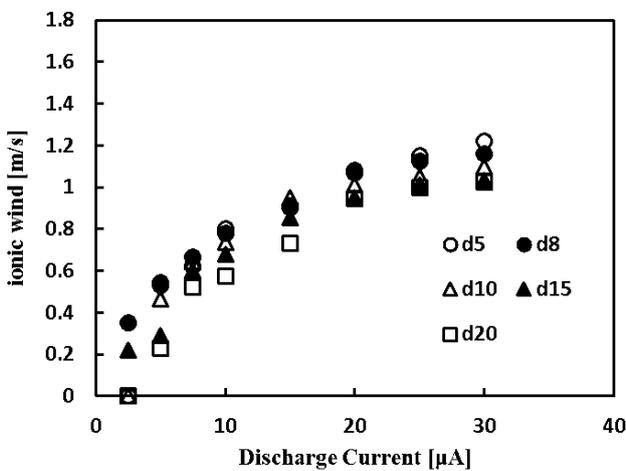


図5 イオン風の放電電流特性 ( $\Phi$ 5 mm)  
Fig.5 Ionic wind as a function of discharge current. ( $\Phi$ 5 mm)

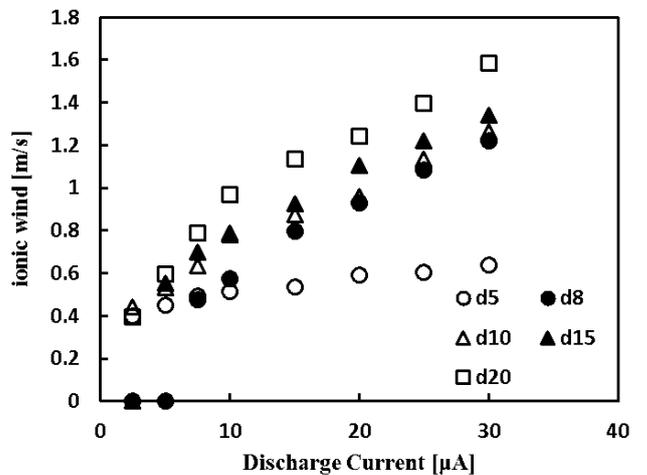


図6 イオン風の放電電流特性 ( $\Phi$ 20 mm)  
Fig.6 Ionic wind as a function of discharge current. ( $\Phi$ 20 mm)

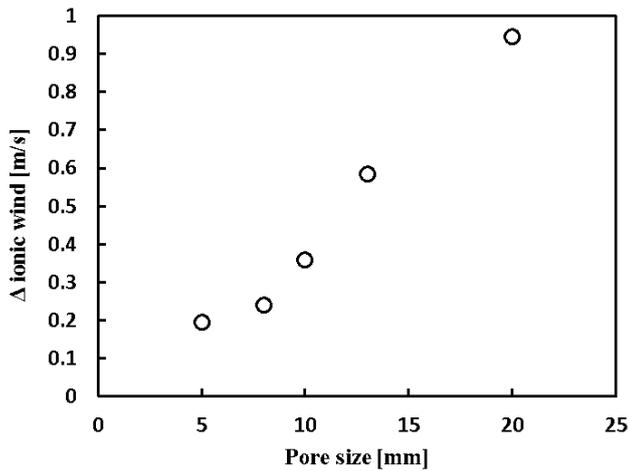


図7 イオン風の差とホール径の関係  
Fig.7 Δionic wind as a function of pore size.

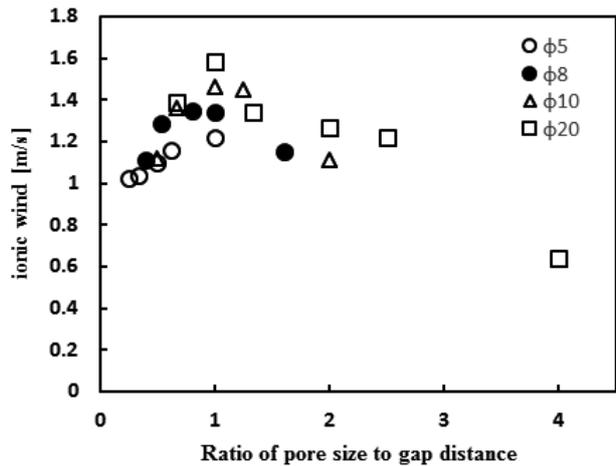


図8 ホール径と電極間距離の比によるイオン風の変化  
Fig.8 Ionic wind as a function of ratio of pore size to gap distance.

を, Δ Ionic wind として, ホール径との関係を図7に示す. Δ Ionic wind の計算は放電電流値を 30 μA とし各ホール径において求めた. 例えば, Φ 20 mm (図6) における最大値は d20 の 1.59 m/s, 最小値は d5 の 0.64 m/s, したがって, Δ Ionic wind は 0.96 m/s となる. ホール径 5 mm に比べてホール径 20 mm のイオン風で最大値と最小値に著しい差が生じていることがわかる. 針先端からエッジまでの距離はホール径が広がるほど長くなる. つまり, 同一電流における電圧はホール径 5 mm よりも 20 mm の方が高くなる. このことから, ホール径が広がるとイオン風の最大値が速くなることがわかる. ホール径 20 mm, 電極間距離 5 mm では, 針先とホールエッジとの距離が近づき, エッジから針先までの角度が浅くなった. このため, イオン風がホールのエッジに向かって流れるため, 最小値が著しく遅くなった. 以上のことから, ホール径が広がるにつれて Δ Ionic wind が大きくなったと考えられる.

図8にイオン風速に対するホール径と電極間距離の影響を示す. グラフの横軸はホール径と電極間距離の比とし, 次式で表される.

$$\text{ホール径と電極間距離の比} = \frac{\text{ホール径}}{\text{電極間距離}} \quad (2)$$

ホール径は 5, 8, 10, 20 mm, 電極間距離は 5, 8, 10, 13, 20, 30 mm とした. ホール径と電極間距離の比が 1 付近で最も速いイオン風が確認できた. ホール径と電極間距離の比が 1 付近で電界が最も強まるため, イオン風が最大値を示したと考えられる. これらのことから, 最大イオン風を発生させる最適な電極構成はホール径と電極間距離の比が 1 のときであることが明らかとなった.

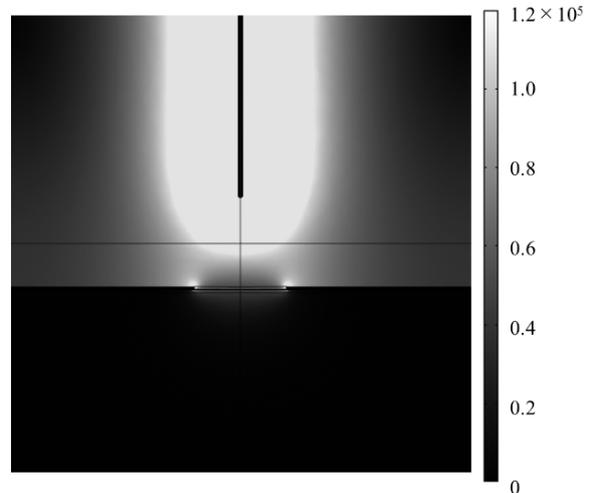


図9 電界分布 (d20 mm, Φ20 mm)  
Fig.9 Electric field distribution. (d20 mm, Φ20 mm)

各電極間距離・ホール径における電界強度の分布を明らかにするために, 有限要素法を用いてポアソン電界強度を算出した. 図9に針対ホール電極における電界分布の計算値を示す. 印加電圧は -10 kV, 電極間距離 d は 20 mm, ホール径 Φ は 20 mm とした. 境界条件は針表面を印加電圧, 平板電極の表面を零電位とし, 電流密度は針先端のコロナ領域の境界から全コロナ電流が流れると仮定した. 図中の濃淡は最小値を黒色, 最大を白色とした. 電界は針先が最も強く, 等電界線は接地電極へ向け放射状となることが確認された. また, ホールのエッジ付近の電界が強くなるエッジ効果が確認された.

針対ホール電極において, ホール径を変化させた時のホールエッジ近傍の最大電界強度を図10に示す. ここに示したプロットは図9の解析結果におけるホールのエッジ近傍の最大値である. 印加電圧は -10 kV とした. 電極間

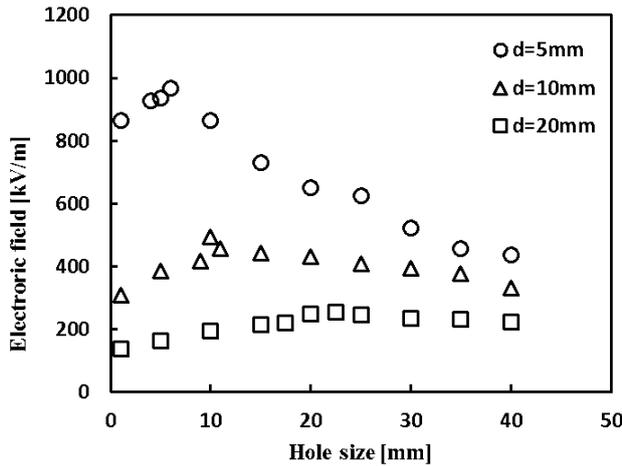


図 10 針対ホール電極における電界強度  
Fig.10 Electrode field as a function of hole size.

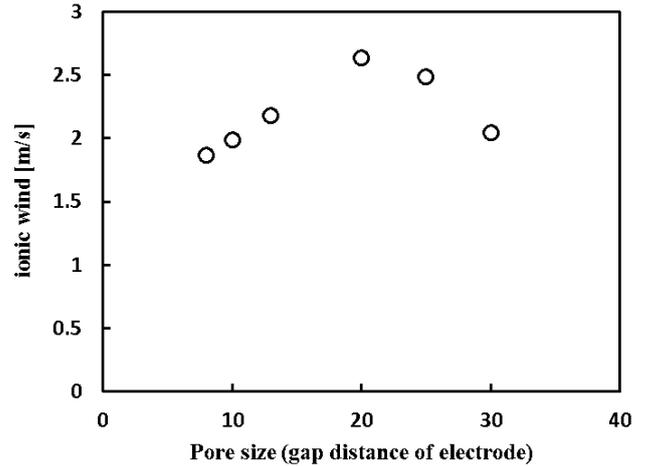


図 11 イオン風の最大値  
Fig.11 The maximum velocity of ionic wind.

距離が 20, 10, 5 mm と近づくにつれて電界が高い。また、どの電極間距離においても、同じ長さのホール径で電界が高い。つまり、ホール径と電極間距離の比が 1 付近で各電極間距離における電界の最大値を示している。これは、電界強度が最も強くなる形状は針対針電極であり、ホール径と電極間距離の比が 1 付近で最も針対針電極の形状に近づくため、電界が最大値を示したと考えられる。以上のことから、図 7 で考察したイオン風速度の最大値には、電界の最大値が関係していることが明らかとなった。また、電界の値は電極間距離  $d$  が 5 mm, 10 mm, 20 mm の順に高い。これは、解析時の条件が電圧一定であるため、電極間距離 5 mm の電界値が最も高くなった。

図 11 にホール径と電極間距離の比を 1 としたときのイオン風を示す。印加電圧はスパーク電圧から 1 割下げた値とした。ホール径および電極間距離が 20 mm の条件で最もイオン風が速い。電極間距離が近い場合、すぐにスパーク電圧に達してしまいが、電極間距離を伸ばすことでより高い電圧を印加することができ、より電流を流すことができるため、速いイオン風が吹いたと考えられる。電極間距離が 20 mm よりも長い場合では、針電極からホールまでの距離が遠くなるため、測定箇所に辿り着く前にイオン風が分散してしまう。これは、風は移動距離が長くなるにつれて発達していくため、中心の速い風は発達空間に存在する遅い風を巻き込み進展していく。よって、中心の風速が遅くなったと考えられる。このことから、電極間距離とホール径は長ければ良いとは言えず、20 mm が最適であることが明らかとなった。本研究ではスパーク電圧は電極間距離 20 mm までは直線的に増加するが、電極間距離 20 mm 以降ではスパーク電圧の増加率が低い。このことから、イオン風の最大値

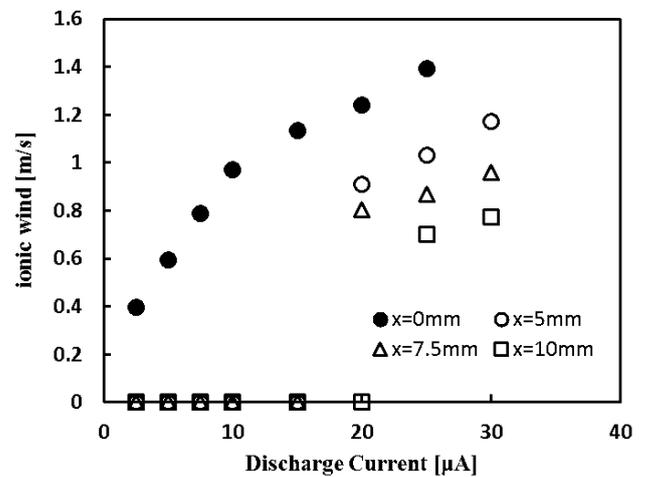


図 12 イオン風のホール位置特性  
Fig.12 Ionic wind as a function of discharge current for position of the hole.

が 20 mm の条件で確認できたと考えられる。

イオン風に対する針電極の位置の影響を検討するため、針電極の位置を中心から移動して実験を行った。イオン風の針電極位置特性を図 12 に示す。ホール径  $\Phi$  は 20 mm, 電極間距離  $d$  は 20 mm, 実験装置は図 2 に示す電極構造を用い、 $x = 0, 5, 7.5, 10$  mm において測定を行った。ホールの中心である  $x = 0$  mm では、低い電流値でイオン風が検出され、 $x = 5, 7.5$  mm では 15  $\mu$ A まで 0 m/s である。このことから、針電極がホールの中心から外れた場合、電流値を増加しないとイオン風がホール内に流入しないことが明らかとなった。また、 $x$  が大きくなるほど、イオン風が減少した。針電極の位置を移動すると、ホールのエッジの電界が不均一になり、一部のエッジに放電が偏る。それに伴いホールの片側のみイオン風が吹いてしまい、ホールを通るイオン風が減少し

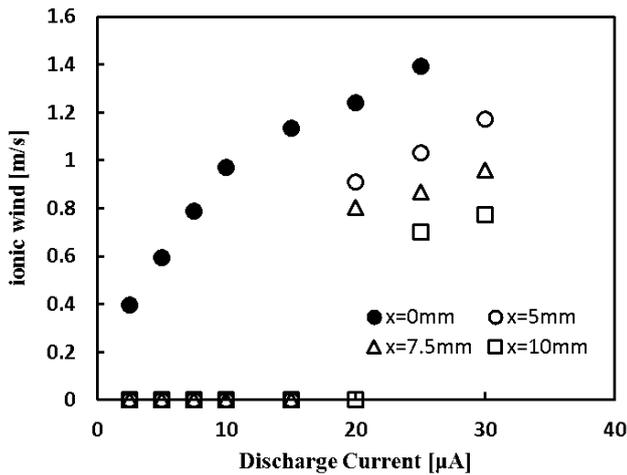


図13 イオン風の極性特性

Fig.13 Ionic wind as a function of discharge current for positive and negative.

たため、イオン風に差が生じた。

正極性コロナと負極性コロナでは放電形態が違うため、イオン風に差が生じると考えられる。このことから、極性効果を確認するために、正極性と負極性を高圧針電極に印加し実験を行った。イオン風の極性特性を図13に示す。電極間距離  $d = 10 \text{ mm}$ 、ホール径  $\Phi 20 \text{ mm}$ 、極性は正極性と負極性、電流値は  $2.5 \mu\text{A} \sim 15 \mu\text{A}$  とした。正極性、負極性ともにイオン風は電流値の増加に伴い増加した。また、負極性に比べて正極性のイオン風が約1.2倍速い値を示した。放電電流値が  $10 \mu\text{A}$  のとき、負極性の電圧は  $7.1 \text{ kV}$ 、正極性は  $8.8 \text{ kV}$  である。このことから、同一電流では正極性の方が負極性に比べて印加電圧が高いため、イオン風が速くなった。

#### 4. おわりに

針対ホール電極構造から発生するイオン風の解明をすることで、コロナ放電応用機器の新たな基礎データに繋がる。そこで、針対ホール電極構造におけるイオン風の変化について検討を行った。本研究で明らかになったことを以下に述べる。

1. イオン風は電流値の増加に伴い速くなった。また、イオン風が最も速いホール径と電極間距離の比は1であり、 $d = 20 \text{ mm}$ 、 $\Phi = 20 \text{ mm}$  の時、イオン風は  $1.59 \text{ m/s}$  となり、他の電極間距離、ホール径に比べて最も速い結果となった。
2. 針電極がホールの中心から離れるにつれ、電流値を増加しないとイオン風がホール内に流入しないことが確認できた。 $x$  が  $5 \text{ mm}$ 、 $7.5 \text{ mm}$  では  $20 \mu\text{A}$ 、 $10 \text{ mm}$  では  $25 \mu\text{A}$  必要とした。また、 $x$  が  $0$ 、 $5$ 、 $7.5$ 、 $10 \text{ mm}$

と大きくなるほど、イオン風は減少した。

3. 放電電流値が等しい時、負極性に比べて正極性のイオン風が約1.2倍高い値を示した。放電電流値が  $10 \mu\text{A}$  のとき、負極性の電圧が正極性の電圧に比べて  $1.7 \text{ kV}$  高い。このことから、同一電流では正極性の方が負極性に比べて印加電圧が高いため、イオン風が速くなった。

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16H04606 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- 1) 静電気学会：静電気ハンドブック，株式会社オーム社（2006）
- 2) 足立宜良：電気集じん器内のイオン風－シュリーレン法による実験的考察－。電気学会論文誌 B, **93** [7] (1973) 273-280
- 3) 村井一弘，川島陽介，坂田亮彦，村上哲郎：電気集塵装置の性能に及ぼす電気流体力学場の影響。エアロゾル研究, **11** [2] (1996) 129-136
- 4) 藤島英勝，上田泰稔，富松一隆：電気集じん装置における EHD 場の解析と実験。静電気学会誌, **28** [4] (2004) 218-223
- 5) 足立宜良，大久保利一：コロナ放電に伴って発生するイオン風。静電気学会誌, **11** [4] (1987) 246-254
- 6) 寺阪澄孝，工藤周，三井和幸：EHD 現象を応用した回転型アクチュエータの開発。精密工学学会誌, **74** [1] (2008) 81-91
- 7) Yuhei FUJIWARA, Ichiro KANO : Development of an Electrohydrodynamic (EHD) Micropump to Generate Oscillating Flow at Low Frequencies. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, **4** [1] (2009) 344-355
- 8) M. Robinson : Movement of air in the electric wind of the corona discharge. Trans. Am. Inst. Electr. Eng., **80**
- 9) 川崎元之，赤崎正則：針対金網電極系におけるイオン風反動力の実験的検討。電気学会論文誌 A, **104** [8] (1984) 427-434
- 10) 大山龍一郎：EHD 現象の可視化 - コロナ放電場において誘起する EHD 流動。可視化情報学会誌, **27** [105] (2007) 98-102
- 11) 大久保利一，村上昭年，足立宜良：線対平行平板電極形電気集じん装置における流れ場解析と実験。電気学会論文誌 A, **106** [8] (1986) 377-383
- 12) 片谷篤史，水野彰：平行平板によるイオン風の発生技術。静電気学会誌, **34** [4] (2010) 187-192