

5種類のイオン風の特性比較

足立宜良・*山下英俊**・中林広光**・正田 力**

The Comparative Characteristics of Five Types of Ionic Wind

Takayoshi ADACHI, Hidetoshi YAMASHITA, Hiromitsu NAKABAYASHI
and Chikara MASADA

Abstract

The force from ionic wind (IW), caused by a corona discharge, is one of the particle collecting forces in an electrostatic precipitator, which has recently been studied. The ionic wind is classified into five types by different discharge electrode polarity and discharge generation methods. These are: positive, negative, alternating current (AC), secondary and back discharge ionic wind.

This paper outlines the characteristics of these types of ionic wind and gives comparisons between them when observed in a needle to plate electrode system. To study back discharge ionic wind, mica of thickness 1 mm and area $226 \times 229 \text{ mm}^2$ with some 1 mm diameter holes was placed on the plate electrode.

The results may summarised as follows:

- (1) The peak value of ionic wind velocity at the same applied voltage is highest for positive ionic wind, lower for negative and lower still for AC.
- (2) The peak value of ionic wind velocity is proportional to the square root of the corona current and the slope of this straight line is highest for positive IW, less for negative and smaller still for AC.
- (3) With AC ionic wind, the special phenomenon of an arrow-current of air is observed, and this is named Arrow Type IW.
- (4) Back discharge IW occurs when the applied voltage exceeds about 17 kV at a discharge distance of 50 mm. Although back discharge IW becomes strong with increasing applied voltage, it tends to be suppressed by negative IW from the discharge electrode.

1. 緒 言

近年、大気汚染の問題に伴って、種々の集じん装置の中で特に電気集じん装置（以下 EP と略す）が注目を集めるようになってきた。EP はコロナ放電を利用して処理ガスに含まれる煙粒子を集じんするのであるが、この粒子には電氣的、機械的な各種作用力¹⁾が働いて捕集される。これらの作用力を分類してみると次のようになる。

- i) クーロン作用力：荷電粒子に電界が作用して粒子を集じん極へ駆動する作用力
- ii) イオン風作用力：イオン風による粒子捕集有効作用力と非有効作用力

- iii) 誘電作用力：不均一な電界中で粒子が強い電界の方向へ受ける力（電界強度の 2 乗の変化量に比例）
 - iv) イメージ作用力：荷電粒子が集じん極、放電極あるいは他の粒子に接近するとイメージ力によって吸引される力
 - v) 放電圧力：荷電した導電性粒子が集じん極近傍に近づいて放電による圧力、または逆電離現象におけるボイド放電による圧力
 - vi) 凝集粗大化作用力：粒子が物理的、電氣的的作用力を受けて凝集、粗大化される力
 - vii) 機械的作用力：重力、慣性力、粘性力
- これらの作用力のうち、イオン風作用力が最近集じん作用力として大きな関心を集めている²⁾。

EP の研究に関してイオン風（電風、電気風、コロナ風とも呼ばれる）の存在は古くから知られており、

* 工学部電気工学科

** 工学部大学院工学研究科電気専攻

次のような研究の歴史的流れがある。

- 1) W. Deutsh³⁾は針対平板電極を用いて、平板上に針端直下を中心とする輪形の dust figure がコロナ放電に伴うイオン風により作られることを実験的に示した。
- 2) 福田⁴⁾はイオン風が集じん作用を害するだけでなく、これを助ける性質もあることを非常に簡単に予想的に報告した。
- 3) M. Robinson⁵⁾はイオン風の速度は、特殊な実験装置を用いて、コロナ放電電流の1/2乗に比例すると報告した。
- 4) 前原、足立⁶⁾は針対および円筒放電極対金網集じん電極を用いて、放電極に対する金網の裏面におけるイオン風速分布をサーミスタ風速計で測定した。
- 5) 増田、足立、陶山⁷⁾らは放電空間におけるイオン風速をシュリーレン法で測定した。
- 6) 足立⁸⁾はEP内でのイオン風の有効性と有害性について予想的であるが、くわしく分類してそれぞれにくわしく検討を行なった。
- 7) 増田、阿久津、足立⁹⁾らは放電空間におけるイオン風速分布をレーザドップラメーターで測定した。

しかしながら、イオン風に関する研究は少なく、その定義すらあまり明確にされていない。したがって、イオン風の現象は放電現象、EP内での動静および集じん過程への影響等に関して数多くの疑問点が残されており、文部省特定研究(1975~1977)のひとつのテーマとして研究がなされている。そこで、イオン風を分類してそれぞれの特性を比較検討する。特に、逆電離イオン風についての研究は始めてのものである。

2. イオン風の概要

不平等電界内の電界の集中した部分に多量のイオンが発生し、電界によって対極へ向かう。その際、中性分子との衝突によりイオンのエネルギーを中性分子に与える。その結果、イオンならびに中性分子は対極へ向かって移動する。この中性分子の移動がイオン風であり、液体中で発生する Ion Drag Pumping 現象¹⁰⁾と類似している。

ここで発生したイオンの移動速度 v は次式で与えられる。

$$v = bG \quad (\text{m/sec}) \quad (1)$$

ただし、 b は移動度 (m/sec/v/m)、 G は電界強度

(v/m) である。そこで、移動度 b が変化すると発生したイオン風の速度に大きく影響する。 b は Table 1 のように正、負で異なり、また電極近傍ではわずかに大きな値になるとの報告¹¹⁾がなされている。イオン速度 v は空間の任意の場所での平均速度であって、中性分子と衝突しながらかなりブラウン運動的な挙動を示しつつ移動するものと考えられる。

Table 1 Ion mobility (O°C, 1mmHg)¹²⁾

Gas	b_+ (m/s/V/m)	b_- (m/s/V/m)
Air (dry)	0.16	0.10
Air (pure)	0.19	0.14
H ₂	0.62	0.45
H ₂ (pure)	590	1.0
O ₂	0.14	0.1
N ₂	0.14	0.097
N ₂ (pure)	11	0.097

Table 2 Classification of Ionic Wind

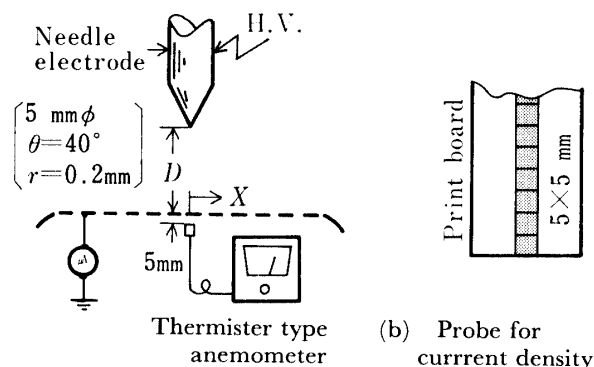
1	positive IW (by positive corona discharge)
2	negative IW (by negative corona discharge)
3	secondary IW (by collision between 1 and 2)
4	AC-IW (by AC corona discharge)
5	back discharge IW (by back discharge in EP)

イオン風は不平等電界におけるコロナ放電に伴って発生するので、放電極の極性(イオンの速度)およびその発生機構によって大きな相違が考えられる。したがって、イオン風は Table 2 に示す5種類のイオン風に分類される。次章から、これらのイオン風の比較検討を述べる。

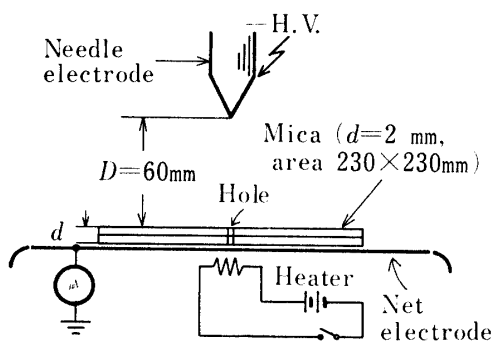
3. 実験装置

Fig. 1 に実験装置を示す。針電極に印加する電圧は、直流電圧の場合は交流をネオントランスで昇圧した後全波整流したもので、交流の場合は可変周波数トランスを通した交流電圧である。またイオン風速は平板電極の代わりに金網電極(目開き2.7mm)を設置し、その後方5mmの位置でサーミスタ風速計によって測定した。そして電流密度測定には Fig. 1 (b) に示す分割プローブを使用した。

逆電離イオン風の観測では、Fig. 1 (c) に示すように平板上に、逆電離現象が発生する高抵抗堆積ダストの代用としてマイカ（厚さ1mm×2枚）をのせた。マイカには穴（直径1mm）があげられており、各々1, 2, 3, 33個である。ここで、マイカを使用したことは、高抵抗 ($4.6 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ Fig. 10 の D 領域を満足している) であること、逆電離現象が観察しやすいこと、実験の再現性があることによる。また、逆電離イオン風が観察しやすいように、マイカの穴の下部にヒータ (70 W) を設置した。



(a) Apparatus for Ionic Wind measurement



(c) Apparatus for back discharge Ionic Wind measurement

Fig. 1 Experimental apparatus

イオン風の挙動の観察は凹面鏡対向法シュリーレン装置を用いて行なった。なお、実験はすべて静止大気中で行なった。

4. イオン風の比較

4.1 正、負イオン風および交流イオン風

上述したように、イオン風とはコロナ放電により発生したイオンが中性分子と衝突する際に中性分子にエネルギーを与えることによって生ずる数 m/sec 程度

の風速を持つ気流である。

正イオン風は放電極に正の直流高電圧を印加した際に正コロナ放電によって生じる正イオンに伴って発生する。同様に、負イオン風は放電極に負の直流電圧を印加した際に負コロナ放電によって生じる負イオンに伴って発生する。また、交流イオン風は両電極に交流高電圧を印加することによって発生するイオン風である。これは交流であるので、半サイクルごとにコロナ放電しない領域（非放電領域と呼ぶ）を伴って、交互に正、負イオンが発生し、その両イオンシャワー交互の駆動作用によって生ずることになる。

負イオン風の挙動をシュリーレン装置を使用して観察すると Fig. 2 に示すような気流の流れであって、正イオン風も同様で、正、負イオン風の区別はほとんどできないほど類似している。しかし、交流イオン風の場合は Fig. 3 に示されるような特殊な気流、すなわち矢印型の気流（以下、矢印型イオン風と呼ぶ）である。

この現象は交流のため印加電圧の変化に伴い発生するイオン風が正、負イオンとなり、その間の非放電領

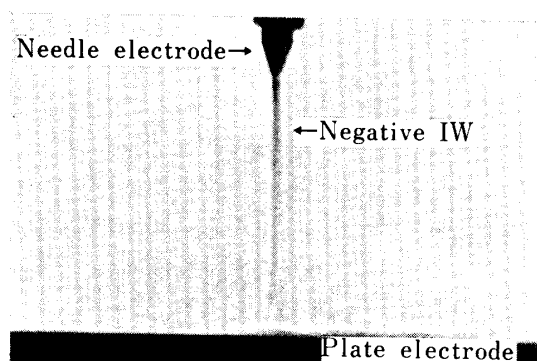
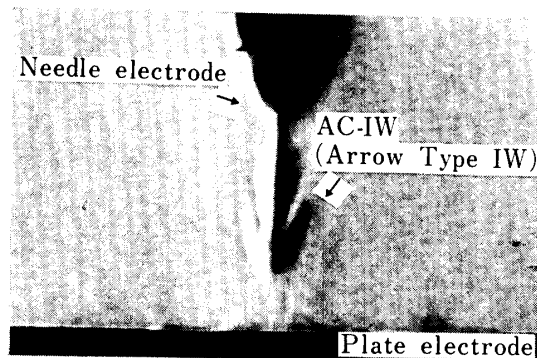
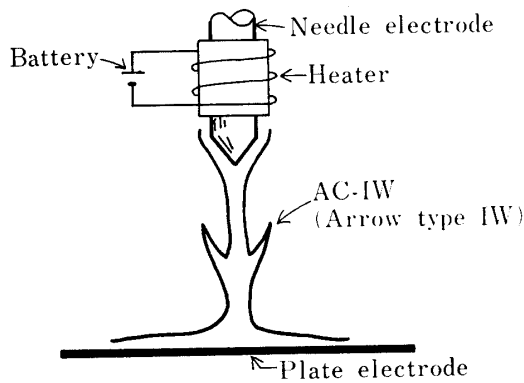


Fig. 2 Schlieren photograph of negative Ionic Wind, where $D=60 \text{ mm}$, $E=24 \text{ kV}$, $I_c=30 \mu\text{A}$ and $I_h=4 \text{ A}$



(a) Schlieren photograph of AC Ionic Wind, where $D=40 \text{ mm}$, $f=60 \text{ Hz}$, $E=10 \text{ kV}$, $I_c=37 \mu\text{A}$, $E_h=23.5 \text{ V}$ and $I_h=1.84 \text{ A}$



(b) Schematic diagram of AC Ionic Wind
 Fig. 3 Arrow Type IW due to AC discharge

域ではイオン風発生現象は存在しない（慣性作用で気流は流れている）ので、この両者が合わさって生ずるものと考えられる。すなわち、遅いイオン風（非放電領域のイオン風）に速いイオン風（放電領域のイオン風）が衝突して矢印型イオン風が生ずるものと思われる。

いま、平均電界強度 5 kV/cm でイオン速度を計算すると約 100 m/sec （正イオンと負イオンとでその速度は若干相違）である。したがって両電極間距離 $D=4 \text{ cm}$ とするとイオンが針電極から平板電極に到達する時間は 0.4 m/sec である。 60 Hz の半サイクル期間は 8.33 m/sec でイオン到達時間の約 21 倍となる。また平均イオン風速を 2 m/sec とすると両電極間到達時間は 20 m/sec で半サイクル期間の約 2.4 倍となる。結果として、わずか 4 cm の間でも交流イオン風の矢印が2つ現われることになる。このことはシュリーレン写真からも観察することができた。

Fig. 4 が針対金網電極における金網上の正、負、交

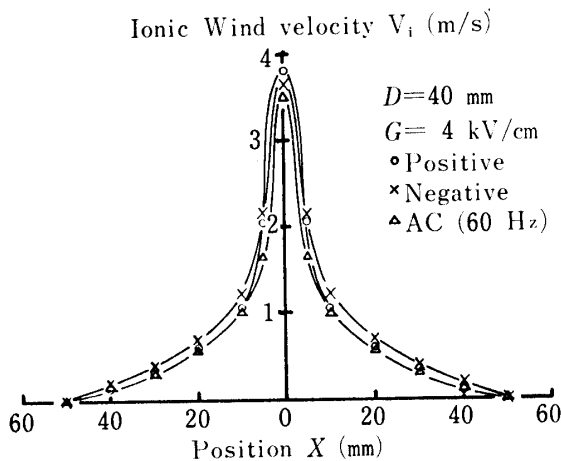


Fig. 4 Comparative distributions for positive, negative and AC Ionic Wind

流イオン風の速度分布である。 $G=$ 一定における針直下での最大イオン風速値を比べると、正イオン風、負イオン風、交流イオン風の順に少しずつ小さくなっている。これは同一コロナ電流値で考えると、正コロナの方は正イオンの全てがコロナ電流となり、イオン風の発生原動力となるが、負コロナの方は電子と電子付着による負イオンがコロナ電流となる。しかし、イオン風の発生原動力は負コロナの場合、負イオンと考えられるので、針電極近傍で付着現象を生じなかった電子の数に比例してイオン風は減少するものと考えられ、また後述の電流分布から判断して針電極近傍で電子拡散が生じるためとも考えられる。一方、 x 軸方向の風速分布域は負イオン風が他の2つに比べて少し広く、これも針電極近傍の電子拡散があると考えられる。

Fig. 5 はこれら3つのイオン風についての電流密度分布である。最大電流密度は負イオン風、交流イオン風、正イオン風の順になり、イオン風速分布とは異なる結果となっている。また、分布域も正イオン風が狭くなっている。正、負イオン風を比べると、イオン風はイオンの駆動によるものであるが、正イオン風の方が電流密度分布は小であるのに対して針直下の最大イオン風速は大という結果となっている。これは前述（イオン風速について）のような原因によるものと考えられる。

交流イオン風の場合は正イオンと負イオンが交互に発生しているので空間での電荷の中和が考えられ、交流 EP¹³⁾ 内に実際に粒子が注入されると電荷が減少され、そのため集じん率の低下をきたすと考えられる。

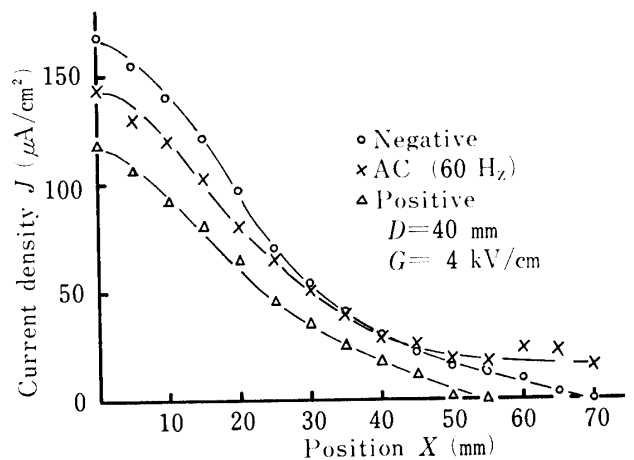


Fig. 5 Comparative distributions for positive, negative and AC current density

また、針直下の最大イオン風速 $v_{ip} \text{ (m/sec)}$ とコロナ電流 $I_c \text{ (}\mu\text{A)}$ の平方根との関係を見ると Fig. 6 の

ように直線で示される。ただし、交流イオン風の場合だけが途中で1つの折点をもつ。この折点はイオン風の吹き始めから安定状態へ移り変わる点と考えられる。

同一実験条件下においては必ず正、負、交流イオン風の順に傾きが減少している。コロナ放電が安定な領域で、正、負同一電圧下ではコロナ電流でも正コロナ電流は負コロナ電流より小である。これは Fig. 5 の電流密度分布からわかる。これらのことはコロナ放電機構、正、負イオン移動度の相違によるものと思われる。交流イオン風では交流電圧は半サイクルごとに極性が反転するので非放電領域が存在する。これはコロナ開始電圧よりも低い部分であるので、この期間中は中性分子が駆動されないことになる。したがって、交流イオン風速は正、負イオン風速よりも小となるものと考えられる。

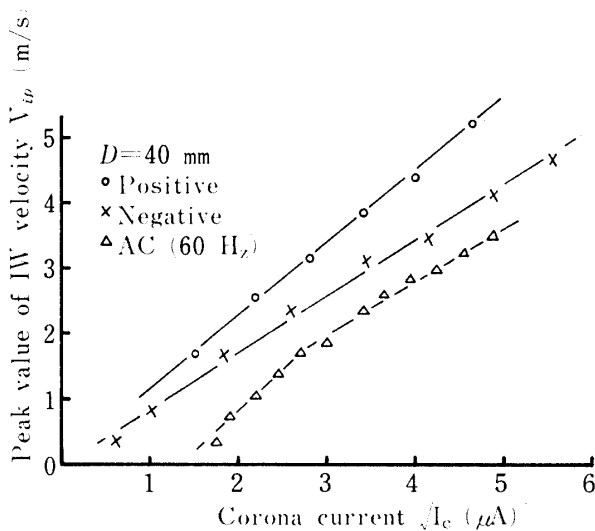


Fig. 6 Comparative characteristics of the peak value of IW velocity for positive, negative and AC discharge

Fig. 7 は各イオン風の効率特性である。これらのイオン風効率 η は

$$\eta = \frac{W_i}{W_e} \times 100 (\%) \quad (2)$$

で示される。

ここで、 W_i はイオン風総運動エネルギーでイオン風速分布曲線を区分して、ある区分におけるイオン風の運動エネルギー W_{ij} の総和である。

$$W_i = \sum_j W_{ij} = \frac{1}{2} \rho \sum Q_j V_{ij}^2 (W) \quad (3)$$

ここで、 ρ は空気密度、 Q_j はある区分域の風量、 V_{ij} はある区分域の平均イオン風速である。

また、 W_e は電気エネルギーで印加電圧 E とコロナ電流 I_c の積で次のように表される。

$$W_e = EI_c (W) \quad (4)$$

正、負イオン風の場合でも効率は高々 0.8% 程度であり、交流イオン風はさらに少さくなる。これは電気エネルギーのほとんどが放電極近傍での電離に消費されると考えられる。なお、交流イオン風の場合は非放電領域のある間けつ放電であり、また空間におけるイオン移動度と電界強度の間に位相差も考えられるので、他に比較して効率は低くなると考えられる。

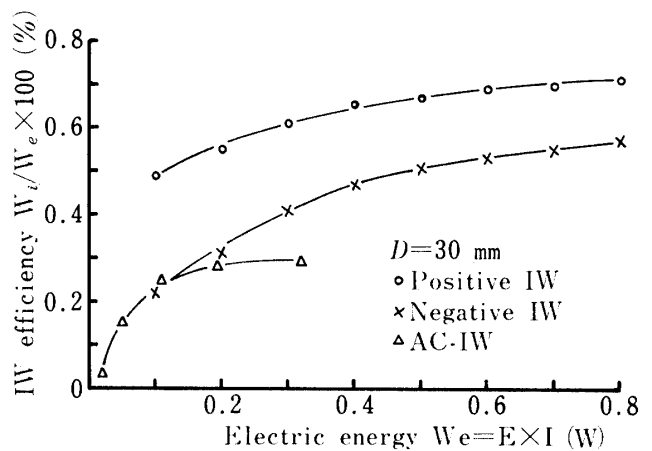


Fig. 7 Comparative characteristics of Ionic Wind efficiency for positive, negative and AC Ionic Wind

4.2 2次イオン風

Fig. 8 のように針対針電極において、一針に直流高電圧を印加すると、各々に正コロナ、負コロナの2つのコロナ放電が生じ、そのため正イオン風と負イオン風の二種類の風が発生する。両極より発生したそれらのイオン風はほぼ中央において衝突し Fig. 8 のように発散する。この状態をシュリーレン装置で観測する

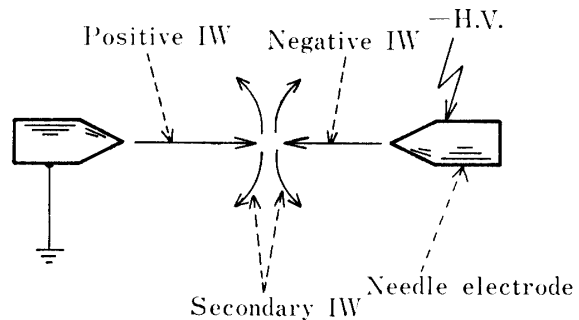


Fig. 8 Schematic diagram of secondary Ionic Wind due to positive IW and negative IW for needle electrode

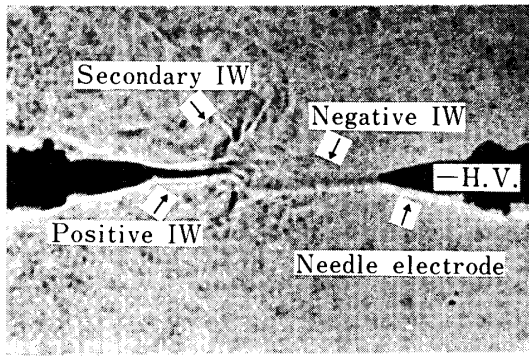


Fig. 9 Schlieren photograph of secondary Ionic Wind due to positive IW and negative IW, where $D=50\text{ mm}$ and $E=15\text{ kV}$

と Fig. 9 のようであり、この発散する風が2次イオン風である。この2次イオン風は正イオン風と負イオン風の衝突によって生ずるものであるから正イオンと負イオンはほとんど中和したと思われるので、2次イオン風はイオンを含まないと考えてさしつかえない。

なお、次節に述べる逆電離イオン風が発生した場合も複雑な2次イオン風が発生するものと考えられる。

4.3 逆電離イオン風

逆電離現象はEP内の異常現象の一つであって、これは一旦集じんされたダストが堆積したダスト層中のボイド放電により再びガス流中へ飛散する現象と云われている。集じん極に堆積したダスト層中の平均電界強度 G_a は次のように表される¹⁴⁾。

$$G_a = \rho_a \times J_a \quad (V/m) \quad (5)$$

ここで、 ρ_a は煙霧体の見掛け固有抵抗、 J_a は堆積

中のコロナ電流密度である。高抵抗ダストを集じんする際に、この G_a がダスト層の破壊電界強度以上になり、ダスト層内で局所的な絶縁破壊(ボイド放電)が発生する。その結果、堆積ダスト表面上に点状の正コロナが発生し、ここで発生した正イオンはすでに堆積しているダスト層の電荷を中和し、その結果ダストは付着力が減少し、気流により剥離されて再飛散すると一般に云われてきた。これは Fig. 10¹⁵⁾ に示される D の固有抵抗が非常に高い領域で放電電流は非常に大きくなり、集じん効率は非常に低下する。

一方、発生した正イオンが集じん空間にとび出し、放電極から飛来する負イオンを中和するが、その際に堆積層から放電極へ向かって吹く気流が存在する。この気流が逆電離現象に伴って発生するイオン風、すなわち逆電離イオン風である。

そこで、逆電離イオン風を観測しやすくするため高抵抗ダスト堆積層の代用としてマイカ(厚さ1mm×2枚)を使用して実験を行なった。針電極、1穴の場合その真上、2穴(穴の間隔1cm, 以下同じ)はその中間、3穴は真中の穴、そして33穴(穴を1列に7個と6個あけ、交互に5列配置した)はその中心に電極間距離 $D=5\text{ cm}$ の位置に設置した。

各々の場合のコロナ放電特性を Fig. 11 に示す。印加電圧が増加するほどコロナ電流が大きくなる。そして、その特性は約 3.4 kV/cm ($D=5\text{ cm}$) あたりで折点を持つ特性を示す。すなわち、この折点あたりまで穴の数にかかわらず1本の直線で表されるが、それ以上になると傾きが大きくなって逆電離現象が発生したものと考えられる。穴の数が増加すると逆電離の発生場所が増加したことによって、結果として、図のように

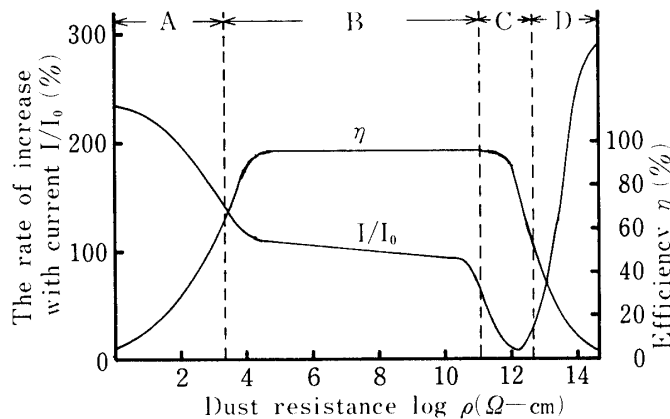


Fig. 10 Characteristics of η and I/I_0 for the variable dust resistance

- A: Reentrainment region
- B: High efficiency region
- C: High resistance effect region
- D: Back discharge region

傾きが増加する。また、マイカを載せていない場合の放電電流は図から明らかに多く流れるが、マイカを載せるとマイカ表面の電荷による電位が増加するので放電電流は抑制されて減少する。そして、マイカに穴がない場合は逆電離が発生しないので折点が生じないと考えられる。

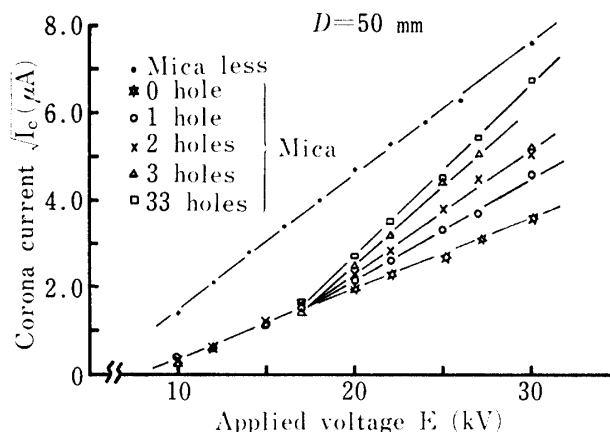


Fig. 11 Comparison of back discharging characteristics of Mica for variable number of hole (See Fig. 1 (c))

次にこの関係を実用 EP の放電特性¹⁶⁾によく利用される両対数グラフに整理すると、次のような実験式が得られた。

$$\log I_c = \beta \log E + C \quad (6)$$

I_c : コロナ電流 (μA)

E : 印加実効電圧 (kV)

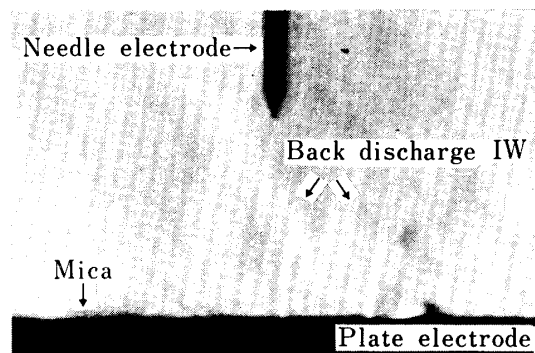
β : 電離とイオン再結合の関係および電離の主役による定数、換言すれば放電極形式および寸法などによる定数

C : 雰囲気ガスの状態や性質ならびに電極寸法などに関する定数

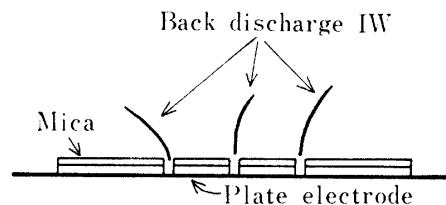
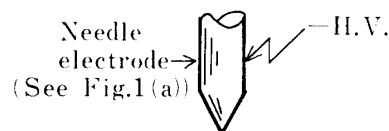
ここでは穴が1穴から33穴の場合には β の値が3.9~5.5である。マイカがない場合の大气中の放電特性では $\beta \approx 2.0$ となることから、 $\beta > 2$ では逆電離が行なわれていると判断される。

Fig. 12, Fig. 13 は逆電離により生じた逆電離イオン風のシュリーレン写真である。逆電離イオン風は約 3.4kV/cm 以上で観測され、また Fig. 11 の放電特性からも裏付けられる。各穴のそれぞれのイオン風の強さは平等ではなく、印加電圧が増加するとともにその強さも大きくなるが、針電極直下のイオン風は、針電極から生ずる負イオン風により抑えられる形となる(この時、負イオン風と逆電離イオン風の衝突により2次イオン風も存在する)。

1穴の場合は針直下に穴があるので前述の理由より、シュリーレン像はかすかに目で観察できるが、写真測定は困難である。したがって、2穴以上についてのシュリーレン写真を2枚載せた。

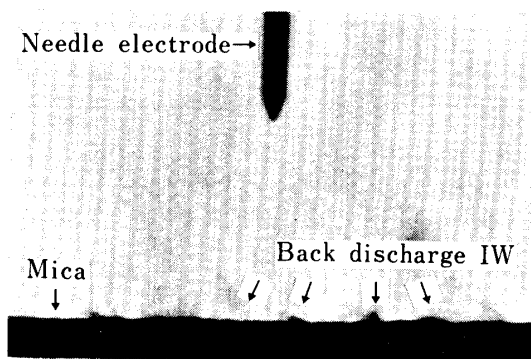


(a) Schlieren photograph of back discharge Ionic Wind, where $D=50$ mm, $E=20$ kV, $I_c=7.7 \mu A$ and 3 holes

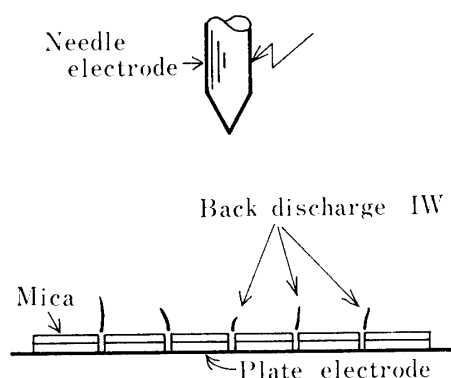


(b) Schematic diagram of back discharge Ionic Wind, where 3 holes

Fig. 12 Back discharge IW due to back discharge for Mica holes (3 holes)



(a) Schlieren photograph of back discharge Ionic Wind, where $D=50$ mm, $E=20$ kV, $I_c=5.0 \mu A$ and 33 holes



(b) Schematic diagram of back discharge Ionic Wind, where 33 holes

Fig. 13 Back discharge IW due to back discharge for Mica holes (33 holes)

以上によって逆電離現象に伴って逆電離イオン風が発生することが明らかとなった。したがって、EP内でのこの現象が発生すると負荷電粒子は正イオンで逆荷電されてクーロン力で放電極方向へ行くだけでなく、逆電離イオン風によっても放電極方向へ運ばれると考えられる。この2つの考察は逆電離イオン風が観察されたことによって得られた、まったく新しい考察である。なお、文献17)のFig. 10に示される多針対平板電極において、平板に載せられたセメント中間生成物(厚さ0.4cm)が針電極(負の高電圧, -8.7kV/cm)直下で針電極方向へ柱状に立上り、あたかも噴水のごとき挙動を示す飛散現象が報告されている。この現象について、前述の2つの考察を適用すると非常に理解しやすい。

5. 結 言

イオン風を分類し、その特性比較することにより得られた結果を要約すると次のようである。

- 1) イオン風を分類すると、Table 2のように正イオン風、負イオン風、2次イオン風、交流イオン風および逆電離イオン風の5つに分けることができる。
- 2) 針電極直下での最大イオン風速値を同一条件下で比較してみると、正イオン風、負イオン風、交流イオン風の順に減少している。しかし、電流密度ピーク値は、負、交流、正の順である。
- 3) 最大イオン風速値とコロナ電流の平方根との関係は直線で表され、その傾きは、正イオン風、負イオン風、交流イオン風の順で小さくなる。
- 4) 交流イオン風は特色のある気流、すなわち矢印

Vol. 27 No. 1 (1976)

型イオン風と呼ばれる現象を呈する。

- 5) イオン風効率は非常に小さく高々1%程度である。
- 6) 逆電離放電特性は約 3.4kV/cm ($D=5\text{cm}$) で折点をもつ2つの直線で表され、この折点あたりで逆電離が発生し始めるものと考えられる。
- 7) 逆電離イオン風は約 3.4kV/cm ($D=5\text{cm}$) あたりで発生し、印加電圧を上げるとその強さは大きくなるが、一方、針電極からの負イオン風のため抑制される傾向がある。

今後の研究として、交流イオン風をより深く追求すること、および、これらイオン風による粒子の集じん効果の適正についての研究が必要である。

終わりに、本研究を行なうにあたって、御指導をいただいた増田閃一教授(東大・工)ならびに橋本清隆教授(西日本工大)、また御支援いただいた本学檜崎久矩教授に深く感謝する。さらに、実験について何かと御援助いただいた本学池田 隆技官、昭和49年度修了生下田 誠君(現在日立製作所)に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 橋本清隆, 足立宜良; 静電気と産業技術, 東京電機大学出版局 (1969) p. 69
- 2) 足立宜良; 粉体工学研究会誌, **12**, 3, 145 (1975)
- 3) W. Deutsch; Anu. d. Phys, **476**, 729 (1925)
- 4) 福田節雄; 電学誌, **50**, 1, 1 (1930)
- 5) M. Robinson; A.I.E.E. Trans., **80**, 1, 143 (1961)
- 6) 前原弘典, 足立宜良; 山田大学工学部研究報告, **20**, 3, 385 (1970)
- 7) 増田閃一, 足立宜良, 他2名; 昭和48年電気学会全国大会講演論文集, 718
- 8) 足立宜良, 表面, **12**, 557 (1974)
- 9) 増田閃一, 阿久津顕石, 足立宜良; 昭和51年電気学会全国大会講演論文集, 476
- 10) 上田 実, 他3名; 静電気の基礎, 朝倉書店, (1971) p. 222
- 11) 佐藤芳夫; 電学誌, **53**, 182 (1933)
- 12) 関口 忠, 他2名; 電離気体論, 電気学会, (1973) p. 54
- 13) 文献1)の p. 120
- 14) S. Masuda; Inst, Phys, Conf, Ser, **27**, 154 (1975)
- 15) 橋本清隆, 谷口 克; 電気集じん装置の理論と実際, 電気書院, (1965) p. 60
- 16) 浜田 満, 池田 隆, 足立宜良; 山田大学工学部研究報告, **21**, 1, 53 (1970)
- 17) 庄 晴彦, 足立宜良; 山田大学工学部研究報告, **20**, 2, 261 (1996)

(昭和51年4月15日 受理)