

# コロナ放電電界におけるイオン風の シュリーレン写真による研究 (第2報)

川崎 元之\*・陶山 俊道\*\*・足立 宜良\*\*

## Study on the Schlieren Photograph of Ionic Wind in the Corona Discharging Field (2nd Report)

Motoyuki KAWASAKI, Shundō SUYAMA and Takayoshi ADACHI

### Abstract

It is estimated that the dust collecting characteristics of the electrostatic precipitator (EP) is influenced by the ionic wind (IW) which caused by the corona discharge. For study of this influences, IW at the model EP which had the corona discharging field was observed and photographed by the Schlieren method. Three model EP were one needle to plate electrode, three needles to plate electrode and cylindrical type EP.

The results of these experiments were as follows. IW blew from discharging electrode to collecting electrode, and the spurt point of IW coincided with corona point. After the collision to electrode, IW interfered mutually in case of three needles and caused swirl phenomena complicatedly. It was considered that IW brought the accelerating act of dust, reentrainment of the collecting dust and the deposit phenomena on the discharging wire.

Authors call IW, causing by negative and positive corona discharge, the negative and positive IW respectively.

### 1. 緒 言

第1報<sup>1)</sup>は、放電線と平板からなる平板型模擬電気集じん器(以後電気集じん器をEPと省略)内のコロナ放電に伴うイオン風の挙動をシュリーレン装置で観察および写真撮影を行ない、イオン風の種々の挙動について考察し、さらに、この風がEPの集じん作用に与える2, 3の影響について推測したものである。この結果の一つとして、イオン風は模擬EP内で複雑な渦流現象を生じていることが観察された。そして、この渦流現象の発生源因は、放電線上の多くのコロナ輝点にもとずく個々のイオン風の相互干渉によるものと考察した。

そこで、今回はこの渦流現象に着目し、イオン風の相互干渉をなくすために単針対平板電極を、また、イオン風の相互干渉によって渦流現象が発生することを確認するために多針電極対平板電極を試作した。そして、これらの装置における電界内に発生するイオン風

の基本的挙動をシュリーレン装置で観察および写真撮影を行なった。また、円筒型EPについては、イオン風に関連した重要な問題が提起<sup>2)</sup>されながら未解決なので、同様の実験を行なった。これらの実験結果にもとずいて、イオン風の挙動を観察し、第1報と同様に、イオン風が集じん過程におよぼす影響についても考察したので報告する。

放電極の極性に関係なく、コロナ放電に伴って、放電極から対極に向かってイオン風が吹くこと<sup>3)</sup>は知られている。ここで、正コロナ放電ならびに負コロナ放電に伴って発生するイオン風を便宜上区別するために、それぞれ正性イオン風ならびに負性イオン風と呼ぶことにする。

### 2. 実 験 装 置

#### 2・1 実験装置の概要

実験に使用した装置をFig. 1に示す。ここで試験変圧器  $T_r$  は容量 350VA, 巻数比 150, 調整用スライダ

\* 西日本工業大学

\*\* 電気工学科

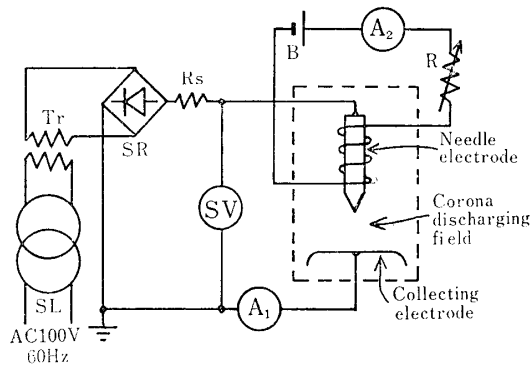


Fig. 1 Schematic diagram of experimental circuit.

ック SL は定格 0~130V, 10A, SR は高圧シリコン整流器を全波ブリッジ結線にしたものである。SV は静電圧計 (最大20kV), コロナ電流測定用の A<sub>1</sub> は万能分流器と検流計 (感度  $1.1 \times 10^{-7}A$ ) を組み合わせたものである。

コロナ放電電界を構成した種々の電極寸法を Fig. 2 に示す。(a)の針電極周囲にはヒータ線を取り付け、バッテリー B で電流加熱している。これは、シュリーレン装置でイオン風を観察するために、針電極周囲を温める必要があることによる。針電極と組み合わせて使用する (b)の平板電極では端効果の対策がなされている。

つぎに、(c)は円筒型 EP の放電線 ( $d=0.52mm\phi$ , 鉄製, 第1報と同じ径) であり、バッテリーで直接加熱される。(d)は円筒集じん電極である、円筒の大きさは印加電圧の最大値が 20kV であることと、円筒内部のイオン風の挙動がシュリーレン装置で観察されやすいことから、内径106.2mmの既成の鉄管を使用した。

コロナ放電に伴うイオン風によって放電極と平板間の空気が乱されると、電極間の空気の屈折率の変化が生じ、イオン風が観察される。シュリーレン装置は平行光線中で現象を観察できる二面对向法<sup>1)</sup>を用いてい

る。

針電極のヒータは、針電極の周囲に石綿を取り付けて、その周囲にヒータ線 (0.5mm $\phi$ , 抵抗値 0.0625 $\Omega/cm$ , 長さ 60cm) を巻き付けている。ヒータ電流  $I_h$  は観察の容易さから 5 A (発熱量 93.8W), また、電極間距離 D は実用 EP の平均電界強度が 4~6 kV/cm<sup>4)</sup> であることと最高の印加電圧 20kV を考慮して 30 mm とした。

なお、実験を行なった雰囲気条件は大気中で温度は 18~29°C, 湿度 57~84%, 気圧 998~1022mb である。また、シュリーレン写真はシャッタースピード 1/500 秒で、ASA 200 のフィルムを増感現像した。

### 2・2 実験装置の基礎特性

水平に取り付けた平板電極の上に、平板電極と垂直になるように針電極を取りつけて、ヒータによる上昇気流がイオン風を乱さないようにしている。針電極は 5 mm $\phi$  の鉄棒を用い、先端削り角を 18° にしている。先端削り角を変えてもコロナ放電特性がわずかに変わるだけで、イオン風の挙動そのものには顕著な相異は見られなかった。

Fig. 3 に単針対平板電極の場合の正負コロナ放電特性を示す。第1報の放電線対平板電極の場合は、イオン風によって放電線が冷却され、印加電圧の増加とともに各  $I_h$  パラメータのコロナ放電特性は  $I_h = 0 A$  の特性に近づく傾向を示したが、針電極の場合にはこの傾向は見られず、印加電圧の高いところで、各特性は平行となっている。これは放電線の場合と比較して、電極構造の違いと集中的な発熱によるもので、イオン風によるヒータ冷却がほとんどなされていないためと考えられる。実際に光高温計でヒータの温度を測定した結果、 $I_h = 5 A$  で  $E = 0 kV$  のときは 740°C であったが、 $E = 20 kV$  のときには少し低下して 700°C 以下となった (光高温計測定範囲 700°C 以上)。しかし、

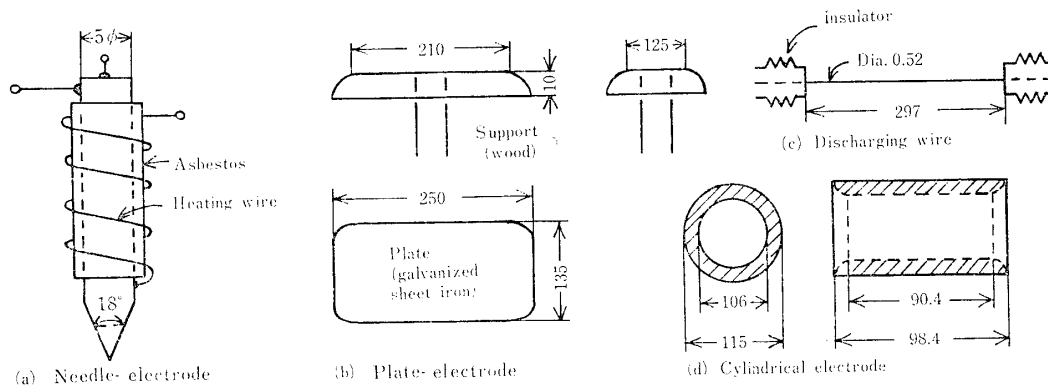


Fig. 2 Electrodes of electrostatic Precipitator.

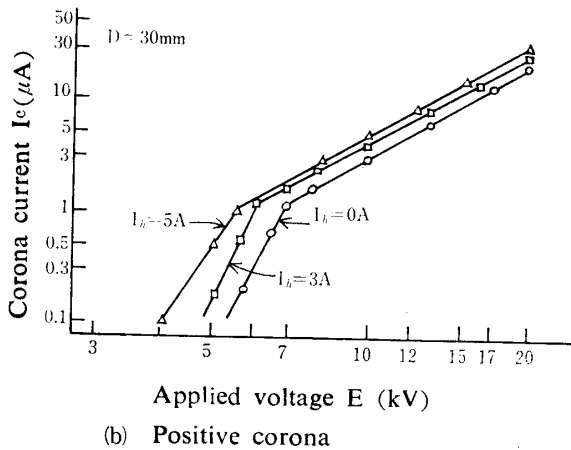
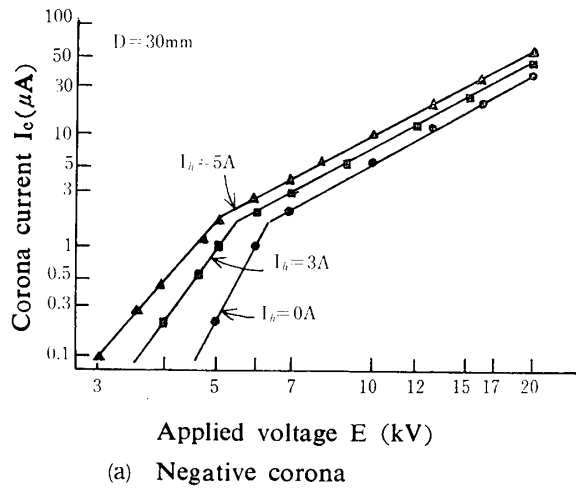


Fig. 3 Relation between applied voltage and corona current for one needle to plate electrode.

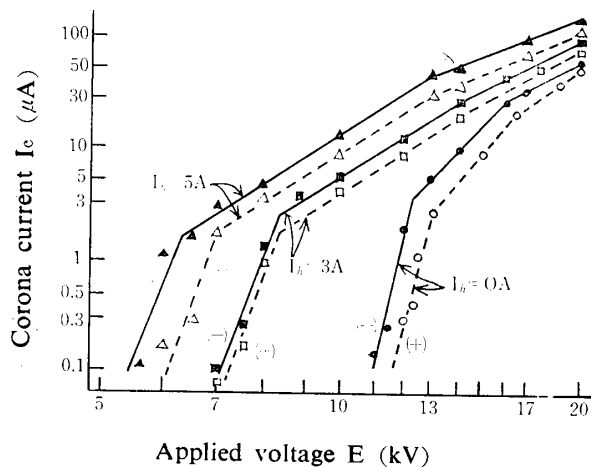


Fig. 4 Relation between applied voltage and corona current for cylindrical type EP

赤熱の度合からして、わずかに冷却されるのみで  $E=10\text{ kV}$  位で丁度  $700^\circ\text{C}$  であった。

つぎに、Fig. 2 の(c), (d)で構成された円筒型 EP のコロナ放電特性をFig. 4に示す。この場合も針対平板電極の場合と同様に折点を2つもつコロナ放電特性となった。放電線対平板電極の場合には印加電圧  $E$  の高いところで、各特性は  $I_h=0\text{ A}$  の特性にほとんど一致する傾向を示したが、円筒電極の場合はあまり近づく傾向を示さない。このことは、放電線のまわりに円筒電極があるので、大気が密閉された状態になり、内部温度が上昇するので、放電線対平板電極ほどにはイオン風による冷却がなされないためである。

### 3. 実験の結果および考察

#### 3・1 単針電極対平板電極におけるイオン風の挙動

Fig. 5に針電極から生じた負性イオン風の挙動のシュリーレン写真を示す。(a)は初期コロナ段階で、イオン風が発生し始めたときである。(b)は印加電圧を大きくした場合で、イオン風速は(a)に比べて増加し、電極表面を直撃した後、電極表面に沿って広がっていくのが観察される。

印加電圧の極性を変えても、正性ならばに負性イオン風の挙動はほとんど同じ形態で観察される。単針の場合は、印加電圧を上昇させても、イオン風は針の先端から平板電極に向かって発生し、平板電極に衝突したのち電極表面上に沿って広がるのみで渦状にならない。これはあたかも水平板上に垂直に、ホースで油を流した場合の現象によく似ている。針電極1本の場合のイオン風の挙動のモデル図をFig. 6に示す。このモデル図は W. Deutsch<sup>5)</sup> が推測していたものであるが、シュリーレン装置によってこれを確認した。

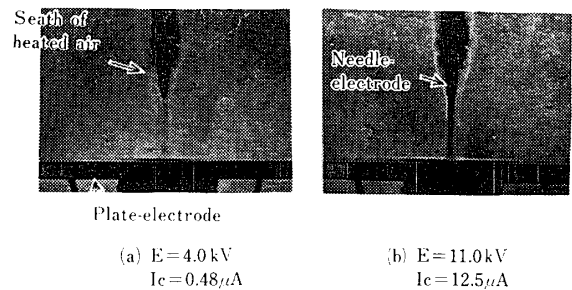


Fig. 5 Schlieren photographs of ionic wind for one needle to plate electrode, where  $I_h=5\text{ A}$ ,  $D=30\text{ mm}$ , negative corona.

#### 3・2 多針電極 (3本) 対平板電極におけるイオン風の挙動

3・1 では針電極1本の場合のイオン風の基本的挙

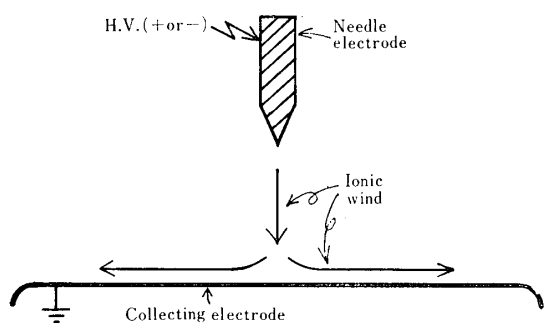
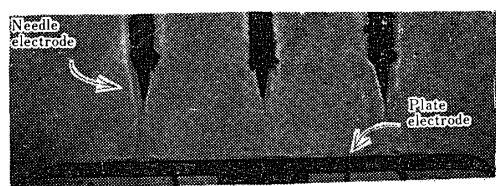
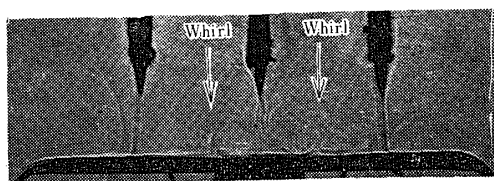


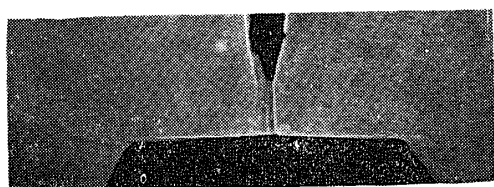
Fig. 6 Movement of ionic wind for one needle to plate electrode.



(a)  $E=4.5\text{ kV}$ ,  $I_c=2.4\mu\text{A}$



(b)  $E=11.0\text{ kV}$ ,  $I_c=33.0\mu\text{A}$



(c)  $E=11.0\text{ kV}$ ,  $I_c=33.0\mu\text{A}$

Fig. 7 Schlieren photographs of ionic wind for three needles to plate electrode, where  $I_h=5\text{ A}$ ,  $D=30\text{ mm}$ , negative corona.

動を観察した。つぎに針電極3本を等間隔に平行に取り付け、イオン風相互を干渉させ、負性イオン風の渦流現象の発生形態を観察した。針電極の間隔は60 mm、平板電極との間隔は30 mmにしている。これらの間隔は印加電圧最大 20 kV を考慮し、渦流現象がよく観察されやすい間隔としている。

Fig. 7 にそのシュリーレン写真を示す。印加電圧  $E=0\text{ kV}$  のときには、加熱による上昇気流のみが針電極から上に、電極に沿って見られていたのが、(a) の初期コロナの段階で、各針電極から平板に向かってイオン風が観察される。しかしながら、まだイオン風相互の

干渉は生じていない。電圧を増加させた(b)では、集じん電極面に衝突したイオン風が、平板面上に拡がり、他の針電極から発生した同様のイオン風と互に衝突した後、針電極のほぼ中間位置付近で渦流となっている。また、両端のイオン風は、風圧のため、少し外側方向に吹いている。さらに印加電圧  $E$  を増加していくと、イオン風速も増大し、渦流の回転速度も増加することが観察された。

(c) は(b)の状態を  $90^\circ$  横から観察したものである。したがって、針電極3本は重なって1本のように見えている。(b)では渦流が生じているにもかかわらず、全く同一条件の(c)では渦流は観察されず、針電極1本の場合と全く同様な挙動を示す。すなわち、渦流現象は針電極3本を含み、平板電極に垂直な平面上で生じていることになる。

Fig. 5 の(b)と Fig. 7 の(b)で、針電極1本と3本の場合のコロナ電流の比が3倍とならず、2.6倍であるのは、針電極3本の場合は1本の場合の電界強度を単純に加え合えたものより弱いためである。したがって、針電極の間隔を拡げることによって、針電極による電界が独立となり、3倍に近づく。このことは実験によって確認した。

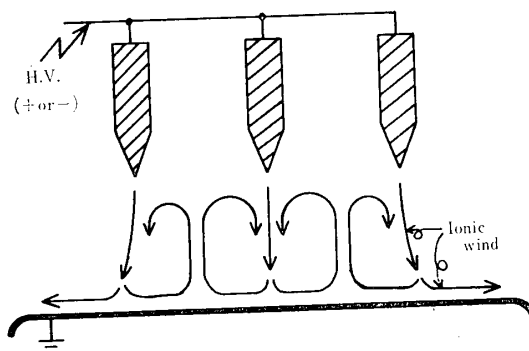


Fig. 8 Movement of ionic wind for three needles to plate electrode.

針電極3本の場合、イオン風の相互干渉によって生じる渦流現象のモデル図を Fig. 8 に示す。渦流の発生形態は、針電極先端のコロナ輝点から生じたイオン風が平板電極を直撃し、平板表面に沿って拡がっていく。一方他の針電極から生じたイオン風も同様に拡がり針電極間のほぼ中央で互に衝突し、針電極方向に吹き返して、針電極先端からのイオン風に巻き込まれて再び平板方向に向う。この結果、針電極間において渦流が生じる。

それゆえ、渦流現象はコロナ輝点が1個では生じることなく、少なくとも2個のコロナ輝点があって、そ

の点から生じるイオン風の相互干渉の結果である。正コロナの場合にも以上のことと同じような挙動が観察された。

以上得られたこと、および放電線の場合には渦流現象が同一状態で静止せず、さらに渦流相互の干渉があり一層複雑となる<sup>1)</sup>ことから、つぎのことが確認された。イオン風はコロナ輝点から発生するイオンの移動によって生じ、放電線の場合はこのコロナ輝点が線上の一点に固定されず、発生、消滅、移動をくり返すので複雑な挙動を示し、針電極の場合は先端にコロナ輝点があるため、比較的単純な挙動を示す。

### 3・3 円筒集じん電極におけるイオン風の挙動

一般に EP は平板型が用いられ、円筒型は主として湿式 EP に用いられている。ガラス二重式円筒型の湿式 EP を用いての SO<sub>2</sub> ガス除去効果にとってイオン風が問題になっている<sup>2)</sup>。この湿式 EP 内部のイオン風の動静をシュリーレン装置で観察しようと試みた。しかし、円筒がガラス製ではあるが、内壁に水膜が流動していること、また円筒のレンズ作用によって観察は不可能であった。したがって、Fig. 2 の(d) に示される鉄製の短い円筒を用い、水膜のない状態でイオン風の挙動を観察した。

Fig. 9 に円筒型 EP における負性イオン風のシュリーレン写真を示す。(a) はコロナ放電が活発になった段階で、それまで赤熱されていた放電線はイオン風によ

って冷却され暗くなっている。イオン風が放電線から円筒電極に向って放射状に吹いていることがうかがわれる。しかし、これは円筒の全体にわたって生じているイオン風が重なり合って観察されたものであり、前述のように円筒内部の大気温度上昇により、空気密度変化が小さくなったことを考えあわせると事実より、かなり不明確と考えられる。(b) になると一層激しく放射状に吹いていることがわかる。この現象は同一条件下の正コロナ、負コロナの場合もほとんど同じ挙動を示すことが観察された。

円筒内では激しく複雑にイオン風が発生するが、放射状に生じ、円筒電極にイオン風が衝突して相互干渉によって円筒内いたる所で渦状になる。このことは平板電極の場合からも推測できる。

実際の EP 内の処理ガス流は、イオン風の影響も加わって乱流状態となり、粒子は複雑な運動を行なうものと十分に考えられる。

### 3・4 EP におよぼすイオン風の効果

実際の EP では、ダストの集じん過程において、前述のようなイオン風の存在は集じんにとってつぎのような効果的な面と非効果的な面の作用に分けて考えることができる。

- 1) 効果的な面
  - a) 多量のダストを集じん電極に駆動する作用
  - b) 渦流現象にもとづく物理的凝集作用<sup>6)</sup>
- 2) 非効果的な面
  - a) 再飛散現象<sup>7)</sup> と類似な現象を誘発する作用
  - b) 放電線肥大現象 (付録参照) の誘発作用

ここで上記4つの作用について考察する。1-a) については、Fig. 6, Fig. 8 のイオン風のモデル図から、イオン風が放電線から集じん電極に向う際に多量のダストを集じん電極に駆動することは多分にあると考えられ、集じんにとって効果的に作用すると思われる。1-b) は渦流現象による微粒子の衝突により、物理的凝集が行なわれ、粒子径が大きくなって集じん作用が増大する。また、電極に粒子が加速されて衝突することで、サイクロンの作用で物理的凝集が行なわれるが、2-a) を考慮すれば乾式 EP の場合効果的と考えることはややむりである。

2-a) について、イオン風が集じん電極表面を直撃すると、すでに集じんされているダストが再び吹き飛ばされ、再飛散現象を呈してよくない効果を生じるものと考えられる。イオン風圧が非常に大きい場合、またダストの固有抵抗が低い場合にこの現象が顕著である。

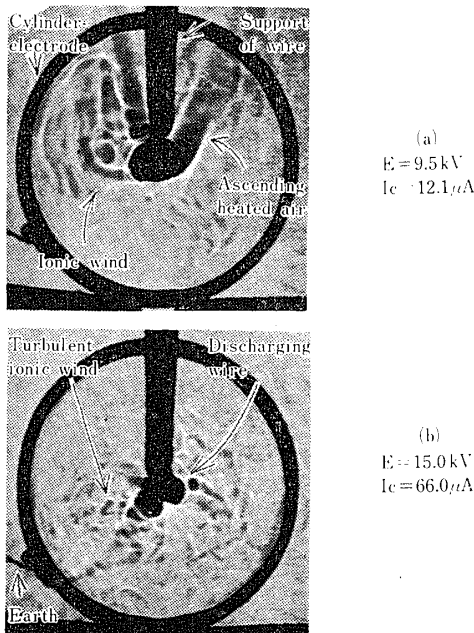


Fig. 9 Schlieren photographs of ionic wind for cylindrical type EP, where negative corona

2-b) の作用は、この再飛散現象やイオン風の相互干渉による渦流現象によって、放電線方向に逆に駆動されるダストも少なくないと考えられる。したがって、放電線近傍の誘電作用力<sup>9)</sup>によって放電線肥大現象を誘発するというよくない性質があると考えられる。

#### 4. 結 言

針対平板電極および放電線対円筒電極におけるイオン風の挙動をシュリーレン装置で観察し、考察した結果を要約するとつぎのようである。

1. 放電線対平板電極では、イオン風の挙動は複雑で種々の渦流現象を生じる(第1報参照)。しかし、単針対平板電極におけるイオン風の挙動は渦流現象を生じず、針先端のコロナ輝点よりイオン風が発生し、平板電極に衝突した後平板電極表面に沿って拡がっていく。

2. 三針対平板電極におけるイオン風の挙動は、平板電極に衝突するまでは針1本の場合と同じである。しかし、平板電極に沿って拡がるイオン風相互が電極面上で衝突した後、針電極方向に逆に吹き返し、再び針電極先端より生じるイオン風に巻き込まれる。その結果、針電極間で渦流を生じる。この現象は針を含む平面内で発生する。

3. 放電線対円筒電極においては、イオン風は放電線より円筒電極に向かって放射状に発生し、イオン風の相互干渉によって小さい多数の渦流を生じる。実際のEP内のガス流は、イオン風の影響も加わって乱流状態にあり、粒子は複雑な運動を行なうものと考えられる。湿式EPによるSO<sub>2</sub>ガスの除去実験<sup>2)</sup>で除去効率にイオン風の影響がかなり大でなからうかと推測されているが、シュリーレン装置による観察からも大きなものと考えられる。

4. 針対平板電極によるイオン風の基本的挙動観察より、集じん過程に与える影響は3つの作用があると考えられる。

- a) 多量のダストを集じん電極方向に駆動する効果的な作用
- b) イオン風が集じん電極を直撃することによってすでに集じんされていたダストを吹き飛ばすという再飛散現象と類似な非効果的作用
- c) 渦流現象などによってダストが放電線側にも駆動され、放電線近傍の誘電作用力によって放電線肥大現象を生じる非効果的な作用

5. 放電線肥大現象は、これまでもっぱら誘電作用

力によるものが有力と考えられていた。しかし、イオン風によって粒子が電離領域内に入り、放電線表面近くの正イオンで荷電され、クーロン力で放電線に付着することも十分考えられる。したがって、これら2つの作用力が働く領域に粒子を運び込むイオン風の作用もみのがせない。

6. 単針または三針対平板電極ならびに円筒型EPにおいて、正性イオン風と負性イオン風とのあいだには、その現象に定性的な相異はほとんど見られなかった。

本報告をまとめるにあたり、御指導をいただいた西日本工業大学橋本清隆教授に深く感謝します。また、実験その他について御援助いただいた山口大学池田隆技官、卒論生久留修二氏(日新製鋼K. K)ならびに大学院生下田、三木両君に感謝します。

#### 参 考 文 献

- 1) 川崎元之, 足立宜良: 山口大学工学部研究報告, 21, 179 (1970)
- 2) 足立宜良: 大気汚染研究, 4-2, 188 (1970)
- 3) 西健, 本多侃士: 理研彙報, 7, 314, 887 (1978)
- 4) H. J. White: "Electrostatic Precipitation" Addison-Wesley Publishing Co. (1963) P. 235
- 5) W. Deutsch: Ann. d. Phys. 476, 729 (1925)
- 6) 諫早典夫: 学位論文(東京大学) (昭36-12)
- 7) 橋本清隆, 谷口堯: 電気集じん装置の理論と実際, 電気書院 (1965) p. 64
- 8) 足立宜良: 電学誌, 90-4, 712 (1970)
- 9) 文献7) のP. 92
- 10) 福田節雄: 電学誌, 50-1, 1 (1930)
- 11) 佐藤芳夫: 電学誌, 53-3, 188 (1933)
- 12) L. B. Loeb: J. appl. Phys. 19, 882 (1948)

(昭和48年4月16日受理)

#### (付録) 放電線肥大現象と集じん作用力

放電線に粉じんが付着する放電線肥大現象について、橋本・谷口<sup>9)</sup>はその状況を写真で示し、発生原因と対策を比較的くわしく述べている。ここでは、発生原因のうち電気的作用力を中心に、EP内の集じん作用力について筆者らの見解を述べる。

まず、EP内の各作用をつぎのように分類し、この概略をFig. 10に示す。ただし、負性コロナ放電の場合とし、⊕は集じん電極方向、⊖は放電線方向の作用力とする。また、図中の作用力はある一つの粉じんに働くのではなく、全体的に見てどの程度集じんに寄与するかを表わしている。

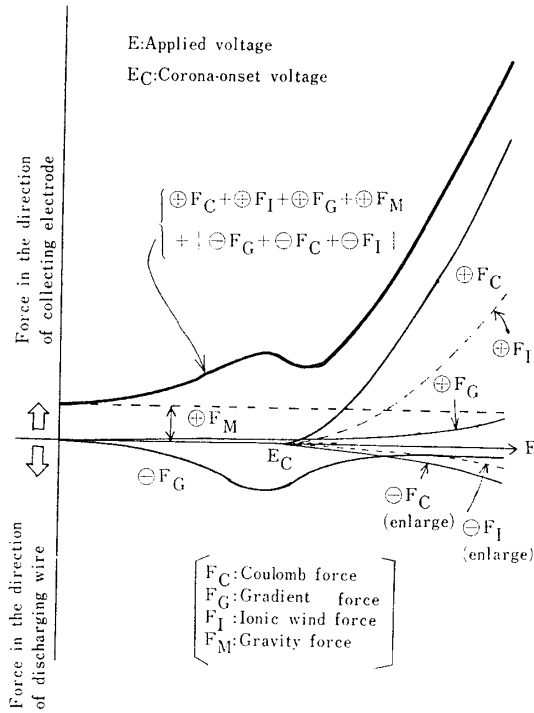


Fig.10 Collecting forces for explanation of deposit phenomena.

- 1) 誘電作用力:  $\oplus F_G, \ominus F_G$
- 2) グローン作用力:  $\oplus F_C, \ominus F_C$
- 3) イオン風作用:  $\oplus F_I, \ominus F_I$
- 4) 機械的洗殿作用力:  $\oplus F_M$

誘電作用力  $F_G$  は球形粒子の場合つぎの式で表わされる<sup>10)</sup>.

$$F_G = k \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1} r^3 \frac{dG^2}{dx}$$

ただし、 $k$  は比例定数、 $\epsilon$  は誘電率、 $r$  は粒子の半径、 $G$  は電界強度、 $x$  は放電線から集じん電極方向の距離である。また、電測強度  $G$  は Fig. 11<sup>10)</sup> に示される。この図から、コロナ電流が減少するほど  $\ominus F_G$  は強くなり、働く領域 (図中の点線から左側) も広がるので、このようなときには放電線肥大現象も生じやすい状態となる。また、 $\oplus F_G$  は図からあきらかに、電流の増加とともにわずかに大きくなる。

ところで、コロナ放電は、放電線表面の荒さ、コロナ輝点の不定常性、複雑なイオン風の挙動などが関連してよりいっそう複雑となる。このような状況のもとでは、上記の  $\ominus F_G$  の作用力やイオン風作用力  $\ominus F_I$  によって、粉じんを電離領域内に持ち込む現象が起り得る。電離領域内においては、放電線に近い所に正イオンが多くあり<sup>11)</sup>、粉じんはこれにより荷電されて  $\ominus F_C$  の作用力を受けて放電線に付着することが考

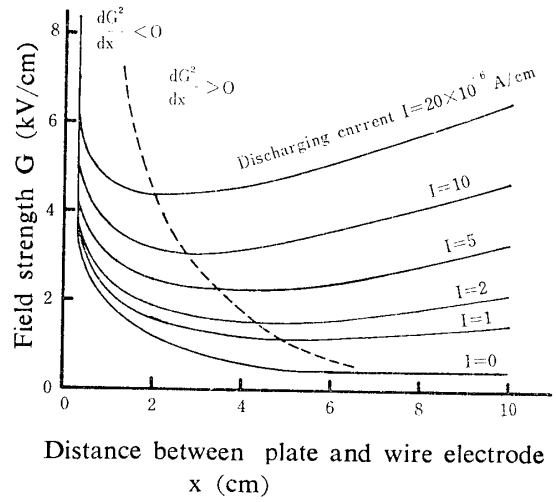


Fig.11 Field intensity distribution between plate electrode and wire electrode.

えられる。領域内には正イオンの外側に電子も存在しているので、このような単純な取り扱いはできないであろうが、領域内の電位分布<sup>12)</sup>から、あるいは領域内のイオン風の微視的な挙動などが判明すればもっとくわしい取り扱いができるであろう。

本文中の写真におけるイオン風速が比較的大きいことから、 $\oplus F_I$  は集じんにとって非常に役立つものと考えられる。 $\oplus F_C$  は、EPの目的とする集じん作用の大部分を占めるクーロン力である。 $F_I$  は集じんにとって直接的作用ではなく、 $F_C, F_G$  の援助的役割をするものと考えられる。

放電線方向に働く  $\ominus$  の力の和の特性は  $\{\ominus F_G + \ominus F_C + \ominus F_I\}$  であるが、 $\ominus F_G$  の力を受ける場に存在する粉じんが多いため、 $\ominus F_G$  の特性に近くなるので、コロナ開始電圧付近で最大となる。このような力によって粉じんが放電線に付着して放電線肥大現象を生じると、放電線の実効直径が増大し、コロナ開始電圧  $E_C$  が高まってコロナ電流が減少するので、Fig. 10の特性は右方向へ移る。また、 $\ominus$  作用力の和の最大値も大きくなって一層この傾向を促進する。

集じんの立場からは Fig. 10の下半分の  $\ominus$  作用力、すなわち放電線肥大も集じんに含めることができる。したがって、総合集じん作用力は  $\{\oplus F_C + \oplus F_I + \oplus F_G + \oplus F_M + |\ominus F_G + \ominus F_C + \ominus F_I|\}$  となり、この特性を Fig. 10 に示す。

EPにとって、放電線肥大現象はつぎの理由によって集じん率を低下させる悪い結果をもたらす。

- (1) コロナ開始電圧の増加とコロナ電流の減少をきたす。

(2) 付着物の性質と状態によっては異常放電が起こり、放電が不安定になる。対策としては印加電圧を下げる。

(3) ガス、ダストの成分、放電状態の条件によっては半導電性鞘を形成して、もっともらしい放電特性を示す。