

# 電気集じん器のコロナ放電電界におけるイオン風の シュリーレン写真の研究 (第1報)

川崎 元之\*・足立 宜良\*\*

Study on the Schlieren Photograph of Ionic Wind in the Corona  
Discharging Field for the Electrostatic Precipitator (1st Report)

Motoyuki KAWASAKI and Takayoshi ADACHI

## Abstract

It is known that ionic wind is due to the flow of many ions in the corona discharging field. In complicated manner its force will act on the dust in the collecting field for an electrostatic precipitator.

The purpose of experiment is to find the influences of the ionic wind on the collecting forces in the corona discharging field for the electrostatic precipitator. The one step of studies is to observe the ionic wind phenomena in the corona discharging field in atmospheric air.

In this experiment, the ionic wind phenomena in the model of electrostatic precipitator was photographed by the schlieren method. The model-electrostatic precipitator was composed of one discharging wire and one plate as the collecting electrode. This discharging wire was heated by current because the variable density of air was to exist for this experimental method.

The experimental results were shown by the schlieren photographs of the ionic wind phenomena, and the comparison of the ionic wind phenomena with the corona current was considered.

## 1. 緒 言

電気集じん器のコロナ放電電界におけるイオン風について、筆者らの研究動機および研究意義、ならびにこれまで行なわれた過去の他の方々が行なった研究業績についての概略説明はすでに述べた<sup>1)</sup>ので省略する。

文献1)では放電極として針ならびに円筒型、また集じん電極として金網ならびに平板型のものを用いて負コロナ放電に伴って発生するイオン風をサーミスタ風速計で測定した。その結果は、イオン風の動静を定量的に決定することはできなかったが、今までに比較してかなり詳細な実験結果であった。しかし測定装置の関係のためあくまで集じん電極直後のイオン風の動静であった。

コロナ放電によって、両電極間の空間にイオン風が複雑に発生するであろうことは予想され、その発生形態が電気集じん器におけるダストの集じん過程におよぼす影響は重要な問題と考えられる。これまで、両電

極間の空間におけるイオン風の動静については、低い電界強度のもとでローソクを用いての実験結果の報告<sup>2)</sup>がある。しかし実用集じん器におけるコロナ放電が行なわれる平均電界強度範囲において、両電極間の空間におけるイオン風の動静についての実験ならびに考察は見あたらないようである。

筆者らはシュリーレン法装置を用いて、模擬集じん器内のイオン風の動静を写真撮影し、その現象にもとづいて考察したので報告する。また実験を行なった雰囲気条件は、温度16~25°C、湿度59~85%、気圧995~1,016mbであり、シュリーレン法装置の関係から、模擬集じん装置は小規模であったが、電界強度は最大20kV/cmまでである。また写真撮影のシャッタースピードは1/500秒である。

## 2. 実験装置および実験

### 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、調整用スライダッ

\* 大学院工学研究科電気工学専攻

\*\* 電気工学教室

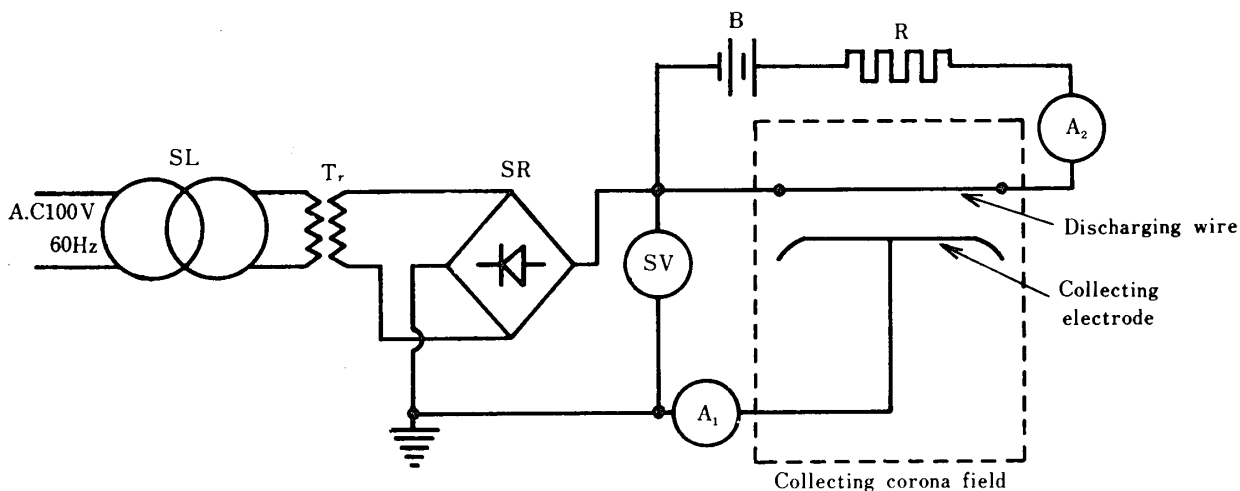


Fig.1 Schematic diagram of experimental circuit

クSLは定格0~130V, 10A, SRは高圧シリコン整流器をブリッジ結線にしたものである。SVは静電圧計(最大20kV), A<sub>1</sub>はコロナ電流測定用の検流計(感度1.1×10<sup>-7</sup>A)である。Fig.1の集じん電界を構成している模擬集じん器をFig.2に示し、その集じん電極の形状および寸法をFig.3に示す。

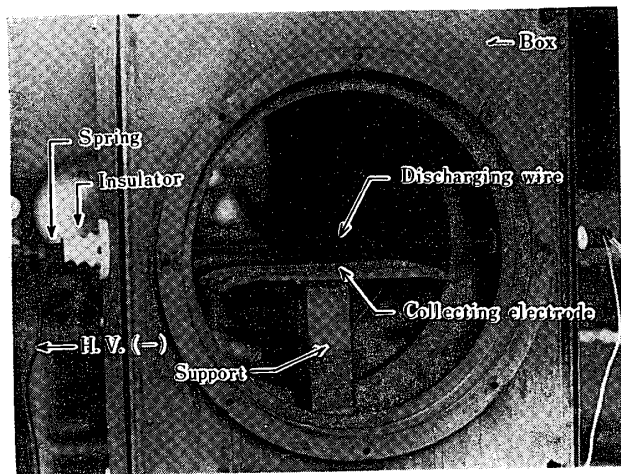


Fig.2 Model of electrostatic precipitator

シュリーレン法にはシュリーレンミラー(凹面鏡)を一個用いる単純法と一致法ならびに、シュリーレンミラーを二個用いる二面对向法とがある。本実験では、平行光線中で現象を観察できる二面对向法を用い、その概略図をFig.4に示す。Fig.4において、Lは点光源、M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>は凹面鏡、Sは観察試料(本実験ではコロナ放電電界)、Pは観察および撮影点である。

シュリーレン法では光の屈折を利用して屈折率のわずかな違いを見出す方法である。したがって、大気圧のもとでSの位置において、コロナ放電を生じさせても、そのままではコロナ放電にともなって発生する気

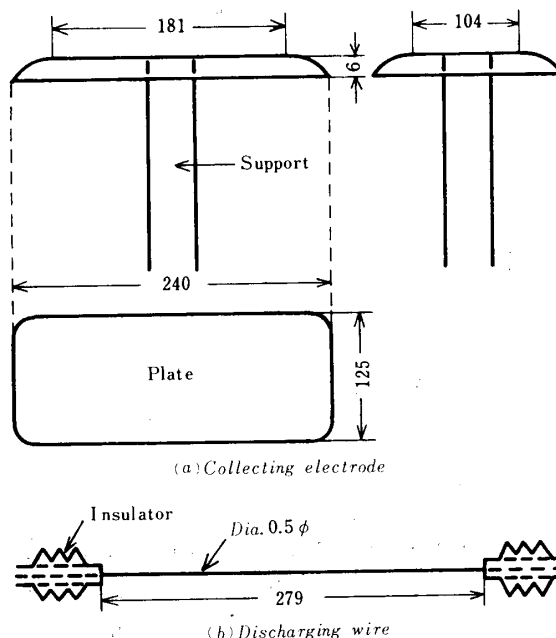


Fig.3 Electrodes of electrostatic precipitator

流の乱れ(イオン風)を観察することはできない。そこで、放電線を電流で加熱し放電線周囲の空気を温める。この状態でコロナ放電を生じさせると、放電線と集じん電極間の空気が乱され、その空間の空気密度の変化の乱れが生じる。すなわち、電極間の空気の屈折率の変化がイオン風に伴って発生し、コロナ放電電界におけるイオン風が観察される。イオン風を観察するための模擬集じん器は外部空気の流動を遮断するためにボックスに入れてガラスで半密閉としている。しかし、ボックスの上ならびに下方は開放にしている。

今回の実験は、両電極間に発生するイオン風の複雑な形態の動静を写真撮影し、あわせてコロナ電流との関連を考察するのが目的である。そこで、放電線の直

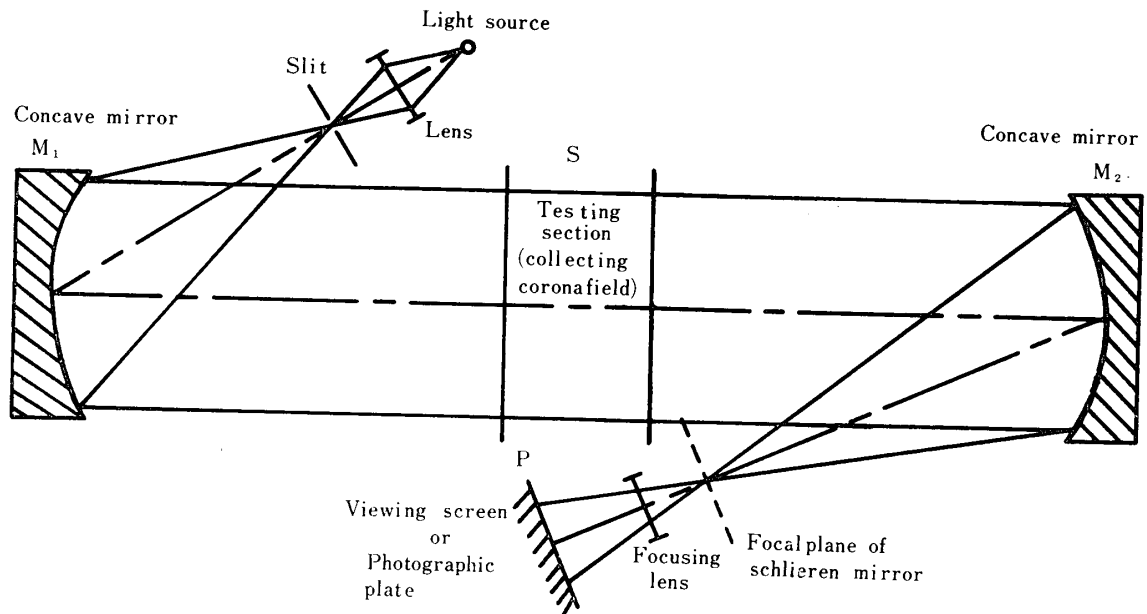


Fig.4 Schematic diagram of schlieren apparatus

径  $d$  は  $0.5\text{mm}$  のみとし、集じん電極構造を Fig. 2 に示す平板電極とし、電極間距離  $D$  は電源トランスの定格電圧の関係から  $10, 15, 20\text{mm}$  に変えて実験を行なった。イオン風をシュリーレン法装置で観察するための放電線加熱は Fig. 1 に示した回路とし、直流電源用バッテリー、ならびに可変抵抗は大地と絶縁した。なお、Fig. 1 の  $A_2$  は放電線加熱電流測定用電流計で、 $B$  は定格  $12\text{V}, 48\text{Ah}$  のバッテリー 4 台、 $R$  は電流調整用可変抵抗  $0 \sim 3.75\Omega$  である。放電線加熱電流値の選定にあたり、加熱電流が大きいくほど空気密度が大きく変化するものと思われ、イオン風がよく観察される。しかし、放電線  $0.5\text{mm}\phi$  の電流容量を考慮すると、その限界は  $6\text{A}$  位であるが、長時間実験なので  $5\text{A}$  を最大加熱電流とした。実際にイオン風がよく観察されるが熱電流は  $4\text{A}$  以上であった。また加熱電流によって、放電線が伸びを生じ、平板の集じん電極と平行を保たなくなる事、ならびに放電線の振動防止対策も考慮して放電線張力を  $4\text{kg}$  重にした。

## 2.2 実験装置の特性

模擬集じん器の放電線と集じん電極は平行で、かつ水平にした場合の負コロナ放電特性を Fig. 5 に示す。ただし、放電線加熱電流  $I_h$  は零とした。Fig. 5 のコロナ放電特性において、本実験における電極間距離  $D$  の範囲では、 $D$  にほとんど関係なく、コロナ電流  $I_c$  が、 $0.5\mu\text{A}$  前後にあたる印加電圧で叱音が発生し始め、 $I_c$  は急激に増加して  $10\mu\text{A}$  程度で不安定なコロナ輝点が発生する。そして、 $100\mu\text{A}$  程度でコロナ輝点は安定な状態であった。

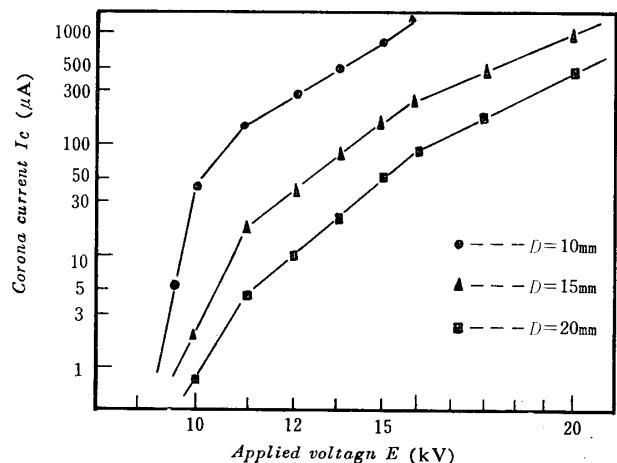
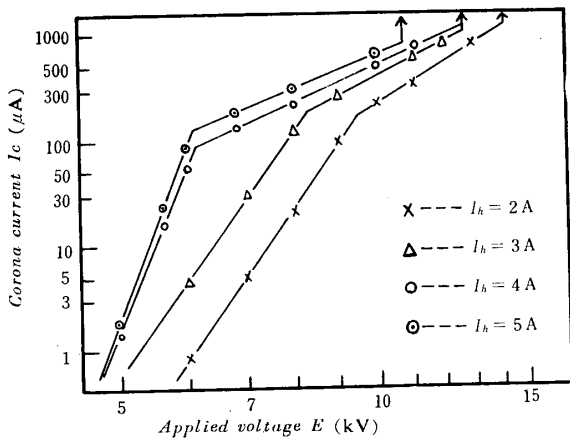


Fig.5 Discharging characteristics for applied voltage vs. corona current, where  $I_h = 0\text{A}$ , negative corona, vertical type-electrostatic precipitator

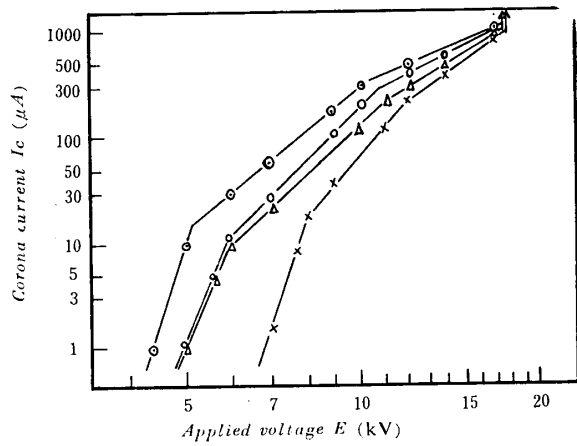
## 3. 実験の結果および考察

### 3.1 放電線水平の場合のイオン風とコロナ電流の関係

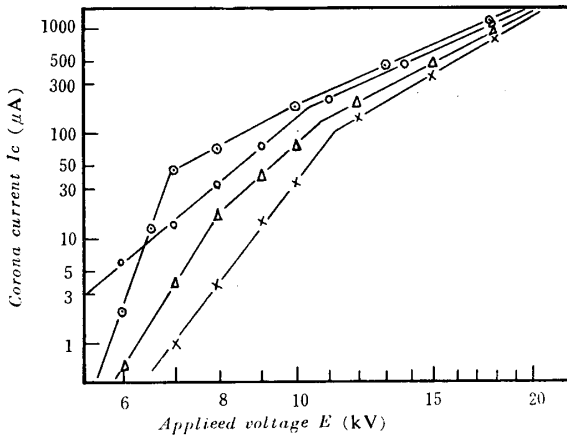
放電線加熱電流  $I_h$ 、ならびに電極間距離  $D$  をパラメータとして実験を行なった。負コロナ、および正コロナの放電特性を Fig. 6 に示す。各々の放電特性において、 $1\mu\text{A}$  以下のコロナ電流は非常に不安定で、このことは電極表面の不均一性、ならびに空間電荷の影響と思われる。また放電線加熱による放電線表面における酸化の度合によっても影響されると考えられるが、この影響はできるだけ削除した。放電線加熱電流



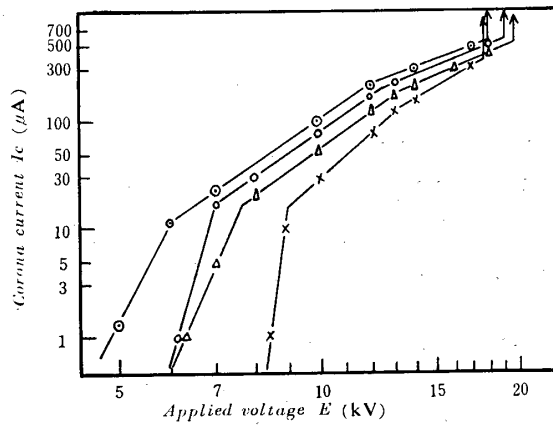
(a) Negative corona,  $D=10$  mm



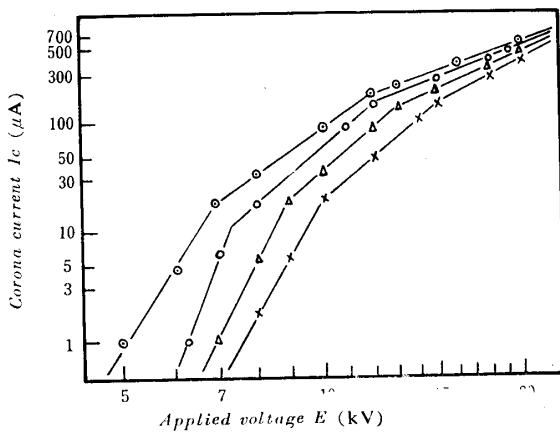
(d) Positive corona,  $D=10$  mm



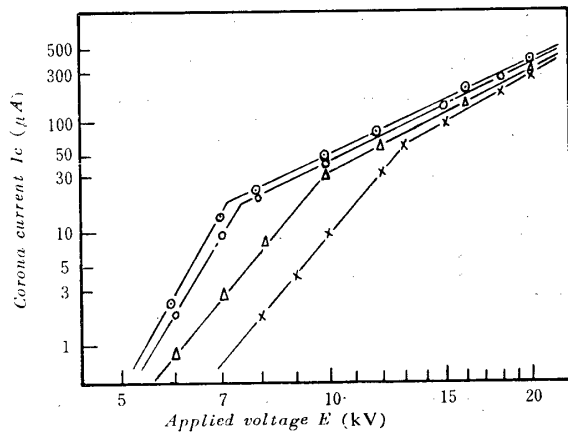
(b) Negative corona,  $D=15$  mm



(e) Positive corona,  $D=15$  mm



(c) Negative corona,  $D=20$  mm



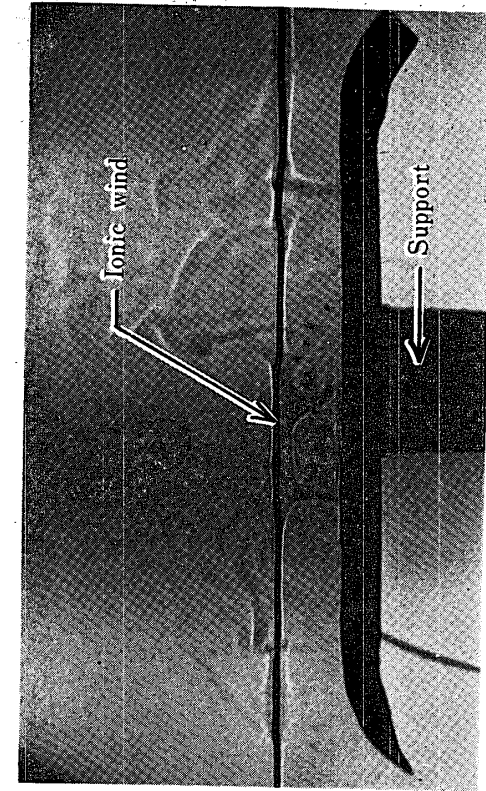
(f) Positive corona,  $D=20$  mm

Fig. 6 Discharging characteristics for applied voltage vs. corona current where horizontal wire

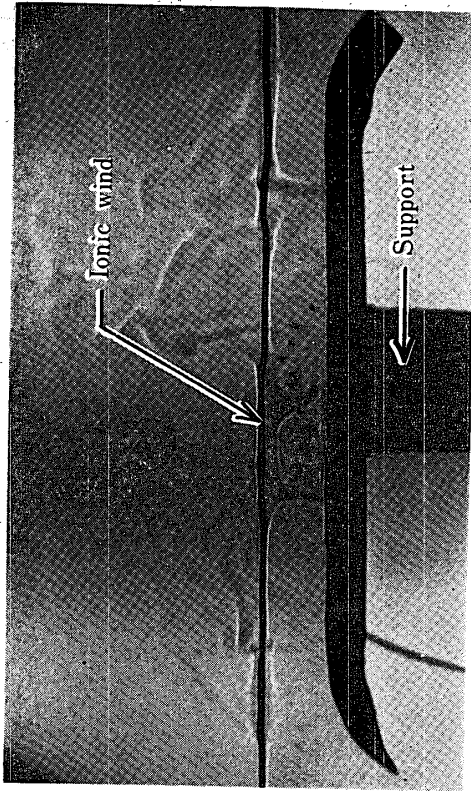
$I_h$ が大きくなれば、同一コロナ電流を得るためには印加電圧はかりな小さくてよいことになる。負コロナ、ならびに正コロナ放電特性において、両者とも印加電圧が増大すれば、 $I_h=0$  Aのときの $I_c$ の値に除々に近づく傾向を示している。これは印加電圧を増加させる

と、コロナ電流の増加にともなってイオン風の速度が増大するため、放電線の冷却効果がよくなり、 $I_h=0$ のときの $I_c$ の値に近づくものと考えられる。

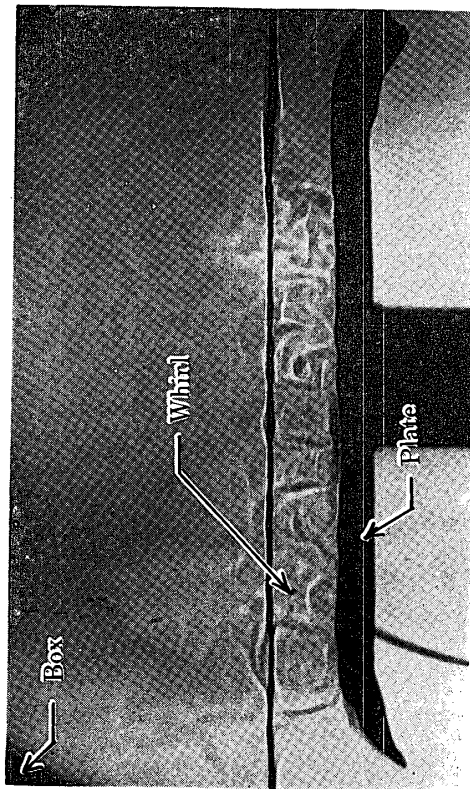
Fig. 7はFig. 6の(c)に示す負コロナ、 $D=20$  mm、 $I_h=5$  Aの場合の放電特性におけるイオン風を写真撮



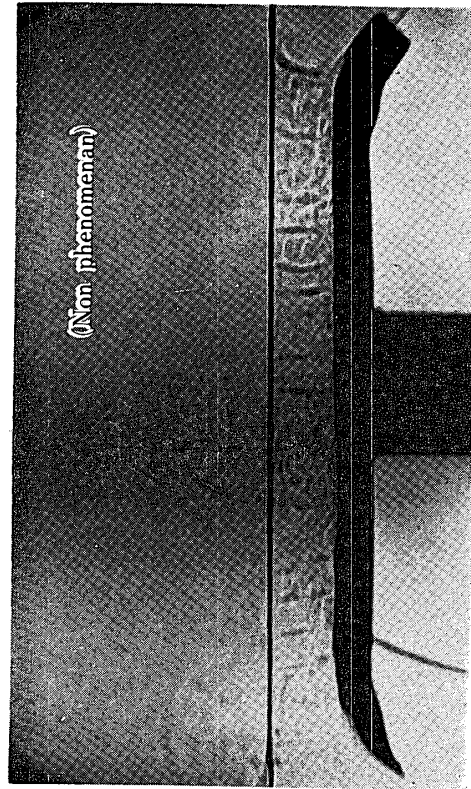
(a)  $E = 4 \text{ kV}$ ,  $I_c = 0 \mu\text{A}$



(b)  $E = 6 \text{ kV}$ ,  $I_c = 1.6 \mu\text{A}$



(c)  $E = 7 \text{ kV}$ ,  $I_c = 15.4 \mu\text{A}$



(d)  $E = 10 \text{ kV}$ ,  $I_c = 70.5 \mu\text{A}$

Fig. 7 Schlieren photograph of ionic wind in the negative corona discharging field, where  $I_n = 5 \text{ A}$ ,  $D = 20 \text{ mm}$

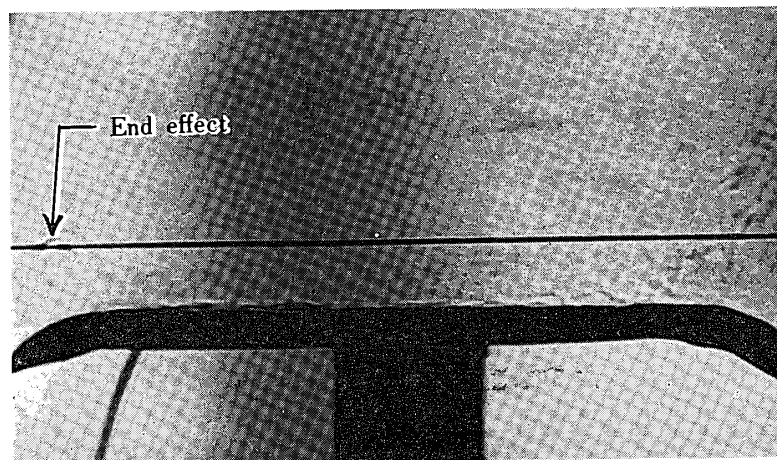
影したものである。Fig. 7において、(a)はコロナ電流が零の場合で、放電線の周囲の空気は加熱電流で温められて鞘状になるわけであるが、光の関係で層状になっていることが観察される。(b)はコロナ電流初期にあたる部分コロナ領域で、(c)は全コロナ領域に移った段階のイオン風で渦状に複雑に生じている。(d)はコロナ輝点が安定した段階でのイオン風で、針状に見える部分はコロナ放電路と思われる。印加電圧 $E$ の増加に伴って、赤熱されていた放電線 ( $I_h = 5 \text{ A}$ ,  $E = 0 \text{ V}$  で光高温計の測定値は  $740^\circ\text{C}$ ) はイオン風の冷却効果の増加により、だんだん暗くなる。(b)の場合はコロナ放電を生じている放電線の部分がやや薄暗くなり、(c)の場合は放電線全体が薄暗くなり、赤黒い状態である。(d)の場合はすでに放電線が暗くなり、コロナのためにその表面は青紫に光るようになる。そして、またイオン風の冷却効果のために、気流の熱による密度変化も減少するので、写真には実際に発生して

いる気流変化より微弱に表われると考えられ、印加電圧の増加とともに、とくにコロナ輝点が安定する段階以上の印加電圧において、コロナ放電路のみ観察されるようになる。コロナ輝点が発生するのは負コロナの場合であって、イオン風は放電線(陰極)から集じん電極(陽極)に向かって吹いている。またFig. 6の(a)、(b)の場合も同じようなイオン風の現象が観察される。

正コロナの場合、コロナ輝点は生じなくコロナ鞘のみであるが、負コロナの場合と同様に放電電極(陽極)より集じん電極(陰極)にイオン風が吹くことが観察される。Fig. 8に  $I_h = 5 \text{ A}$ ,  $D = 20 \text{ mm}$  の場合の正コロナ放電に伴って発生するイオン風現象の写真を示す。Fig. 7の負コロナによるイオン風の方がFig. 8の正コロナによるイオン風よりも顕著に発生していることがうかがわれる。これはコロナ輝点が生じる負コロナの方が、コロナ輝点不定常性<sup>3)</sup>のためイオン風は複雑に発生しているものと思われる。

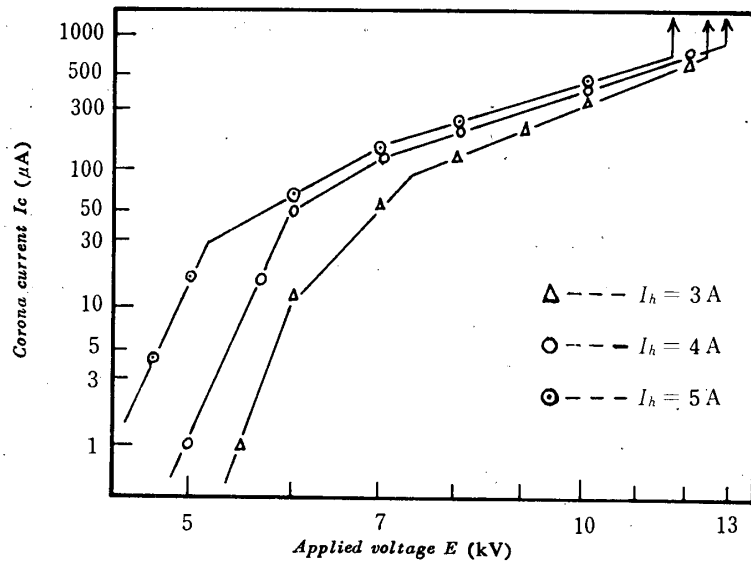


(a)  $E = 7 \text{ kV}$ ,  $I_c = 11.0 \mu\text{A}$

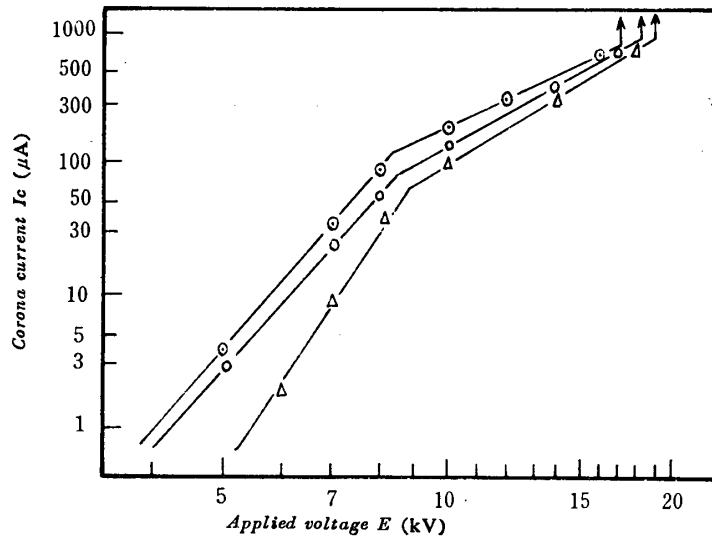


(b)  $E = 11 \text{ kV}$ ,  $I_c = 66.0 \mu\text{A}$

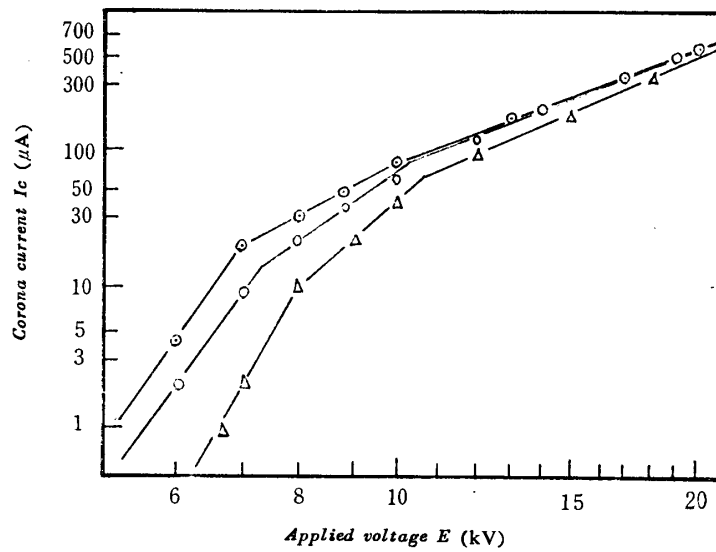
Fig. 8 Schlieren photographs of ionic wind in the positive corona discharging field, where  $I_h = 5 \text{ A}$ ,  $D = 20 \text{ mm}$



(a) Negative corona,  $D=10\text{mm}$



(b) Negative corona,  $D=15\text{mm}$



(c) Negative corona,  $D=20\text{mm}$

Fig.9 Discharging characteristics for applied voltage vs. corona current, where vertical type-electrostatic precipitator



### 3.2 放電線垂直の場合のイオン風とコロナ電流の関係

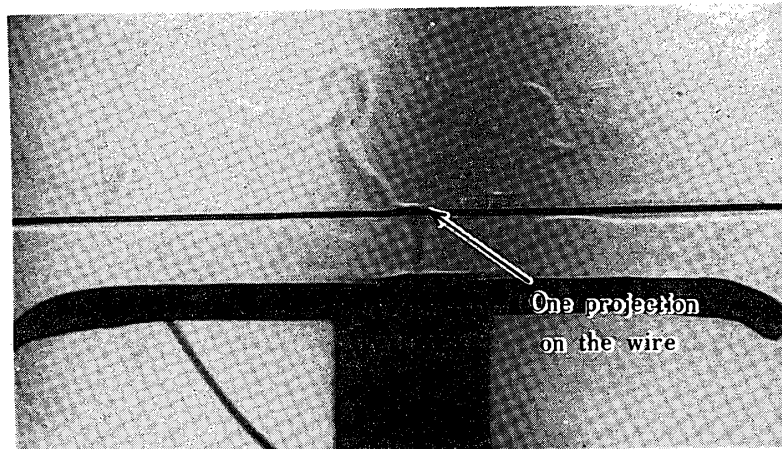
放電線と集じん電極を平行、かつ垂直にした場合の負コロナ放電特性を Fig. 9 に示す。放電線 水平の場合の Fig. 6 の (a), (b), (c) と比較して、現象に顕著な相違があるとはうかがえない。ただし、印加電圧が低い場合には、放電線を垂直にして加熱しているので、放電線下部の熱せられた空気が電極間を上昇し、放電線上部におけるイオン風を乱して観察しにくい。放電線下部では水平の場合と全く同様に、電極間  $D$  に渦状のイオン風が吹いているので、放電線加熱による上昇気流がなければ、通常放電線上部のところにおいても放電線が水平の場合に発生するイオン風の形態がそのまま発生するものと推察される。

### 3.3 突起状針をもつ放電線からの負コロナ放電に伴うイオン風の現象

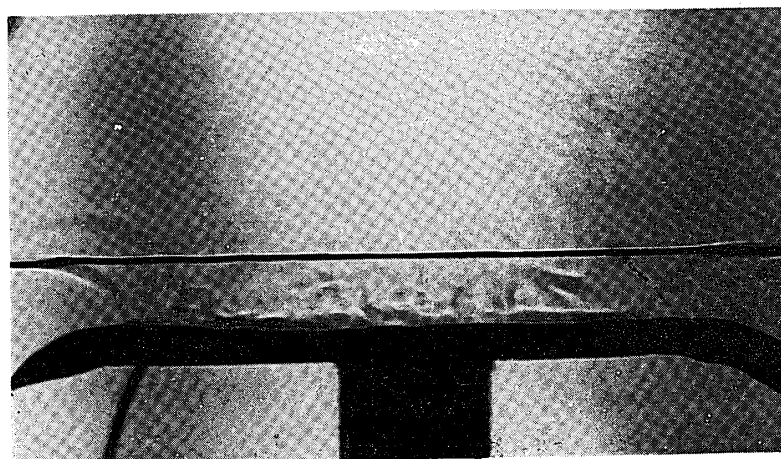
Fig. 7 は直線状の放電線全体より不規則に発生する負コロナ放電に伴うイオン風の現象観察写真であって、渦状にイオン風が発生していることはうかがえ

る。しかし、イオン風が複雑に相互干渉しあった現象を観察したものにはすぎない。

そこで、個々のイオン風の相互干渉がなく、ある一点からのコロナ放電に伴うイオン風現象の基本的動静を観察するために、直線状の放電線上に突起状針を付け、その先端に集中的に負コロナ放電を発生させて、イオン風の動静を観察した。この場合も、 $I_h = 5 \text{ A}$ 、 $D = 20 \text{ mm}$  とし、放電線上に取付けた突起状針はイオン風現象の観察に最適と思われる長さ  $3 \text{ mm}$  に試行により選定した。これらの条件におけるイオン風の動静を Fig. 10 に示す。Fig. 10 において、(a) はコロナ放電が発生し始めた初期段階で、コロナ放電路に沿ってイオン風の現象が観察される。さらに印加電圧  $E$  を増加させると、コロナ放電路周囲にも気流の乱れが生じ、イオン風の速度が上昇したことが (b) からうかがえる。(c) に示すように、さらに印加電圧を増加させると針端以外の放電線の部分からもコロナ放電が発生して、イオン風の現象は複雑になる。(a), (b) からうかがえるように、ある一点からの集中的なコロナ放電に伴うイオン風は、集じん電極に衝突し集じん電極表面

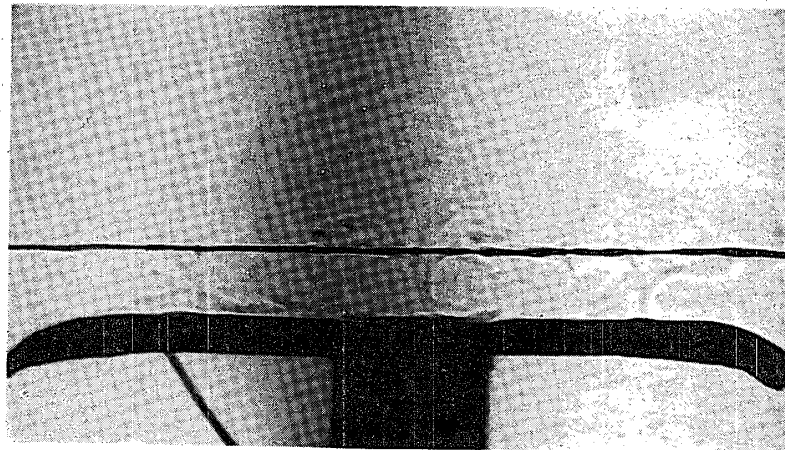


(a)  $E = 3.8 \text{ kV}$ ,  $I_c = 1.1 \mu\text{A}$



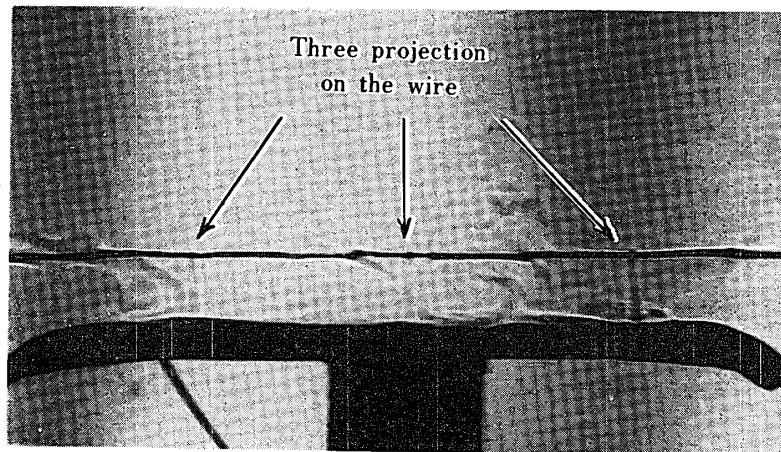
(b)  $E = 4.8 \text{ kV}$ ,  $I_c = 5.5 \mu\text{A}$



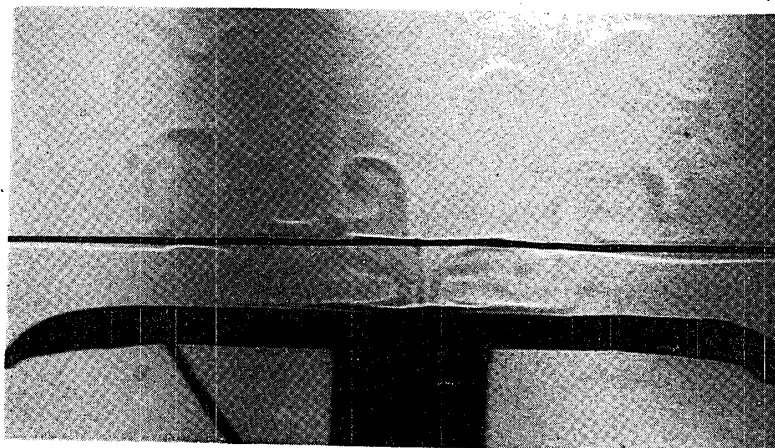


(c)  $E=0.8\text{kV}$ ,  $I_c=18.1\mu\text{A}$

Fig.10 Schlieren photographs of ionic wind in the negative one point corona discharging field, where  $I_h=5\text{A}$ ,  $D=20\text{mm}$



(a)  $E=5.5\text{kV}$ ,  $I_c=24.2\mu\text{A}$



(b)  $E=8\text{kV}$ ,  $I_c=45.7\mu\text{A}$

Fig.11 Schlieren photographs of ionic wind in the negative three point corona discharging field, where  $I_h=5\text{A}$ ,  $D=0\text{mm}$

上をうように広がっていくことが観察される。すなわち、この場合のイオン風は渦状に複雑には発生しないものと思われる。このイオン風の動静は、突起状針をもたない場合の放電線全体からのコロナ放電におい

ては観察されない現象である。つぎに、前と条件を同じくして、さらに突起状針を等間隔に3本放電線に添付した場合のイオン風現象観察写真をFig.11に示す。針の間隔は65mmで、初期コロナ放電の段階でイオン

風が相互干渉しない距離を試行で選定した。印加電圧を増加させていくと、針一本の場合と異なり、集じん電極表面上に衝突して表面上に広がったイオン風は、針と針の中間の集じん電極面上で相互に衝突して、放電線の方へ、すなわち逆方向へ吹きあがり、そしてまた集じん電極に向かって吹く渦流現象を呈する。これらの渦状に発生するイオン風の動静がFig. 11から観察される。また、放電線に取付ける針をさらに増していくにつれ、針のない場合のイオン風の動静に近づいていくことが観察される。

以上のシュリーレン法装置を用いてイオン風の現象を観察したが、実際の集じん器ではイオン風により、集じん電極方向へ駆動される多くのダストも存在することは多分に考えられる。しかし一方では、コロナ輝点以外の領域での放電線肥大現象はもっぱら誘電作用力<sup>4)</sup>のみで説明されていたが、イオン風の渦流作用による煙粒子の誘導付着現象の影響も考慮すべきと考える。円筒型ガラス製電気集じん器を用いての実験では、ガラスの不均一性ならびに円筒型によるレンズ作用により、イオン風の動静を明らかにすることはできなかった。しかし、半密閉型の実用集じん器において、イオン風の渦流作用は本実験より顕著に発生するものと考えられ、その集じん過程への影響は大なるものと考えられる。これらのことから、従来の集じん効率の基本的考え方<sup>5)</sup>に影響を与えるものと考えられる。

#### 4. 結 言

以上のシュリーレン法装置を用いて、コロナ放電に伴って発生するイオン風の動静を写真観察にもとずいて、筆者らが考察した結果を要約するとつぎのようである。

1. 放電線加熱によって、コロナ電流は著しく増加し、コロナ開始電圧が大幅に下がる<sup>6)</sup>が、コロナ輝点表われる程度の電界強度以上では、コロナ放電に伴うかなりの量のイオン風によって、放電線は冷却される。そして、電界強度の上昇に伴ってその冷却作用は増大し、放電線を加熱しないときのコロナ電流値に近づく傾向がうかがわれた。
2. イオン風は叱音と共に発生し、文献3)で推測したようにその動静は、放電極表面付近の風圧分布にかなり激しいむらと変化があり、これによるコロナ輝点の不定常性とは関連して起こると考えられていたが、全くそのように観察できた。すなわち、コロナ輝点不安定の電界強度範囲では渦状に複雑にイオン風が発生するが、コロナ輝点が安定するにしたがって、放電線に垂直に一樣にイオン風が発生する現象が観察で

きた。

3. ある一点の針端からのコロナ放電に伴って発生するイオン風はコロナ放電路に沿って集じん電極表面上を広がるのみであるようだが、直線状の放電線の場合、コロナ輝点不安定の電界強度内ではイオン風の相互干渉により、集じん電極から放電線の方へ逆に向う現象が生じる。そして、これは放電線と集じん電極間に渦状に吹き返すように観察できた。これはダストの再飛散現象<sup>7)</sup>に似た効果をもたらすものと考えられる。

4. 放電極に多針を取付けての実験から、渦状のイオン風がはっきりと観察され、この渦流作用力は、これまで放電線肥大現象を誘電作用力のみで説明されていたことに影響をあたえるものと考えられる。

5. 湿式電気集じん器による亜硫酸ガスの除去実験<sup>8)</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したが、今度の実験から判断して、効率に与える影響は非常に大きなものと考えられる。

今後は二つの平板電極とその中央に放電線を設置した場合、ならびに平板電極のかわりに金網電極を使用した場合の実験考察を行なう予定である。またこれまでは現象にもとずいての考察にすぎなかったが、さらに理論的考察へと発展する予定である。

本報告をまとめるにあたり、御指導いただいた西日本工業大学橋本清隆教授、シュリーレン装置使用につき便宜をはかっていただいた日立製作所諫早典男博士、シュリーレン装置について御助言をいただいた本学佐伯節夫助教授、放電線に突起状物をつけての実験につき御助言をいただいた本学齋藤隆助教授に深く感謝の意を表す。また、実験その他について御援助していただいた本学技官池田隆、大学院2年前原弘典、学部4年末沢洋介諸氏に深く感謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) 前原弘典, 足立宜良: 山口大学工学部研究報告, 20, 385 (1970)
- 2) K. G. Payne & F. J. Weinberg: Proc. Roy. Soc. A, 250, 316 (1958)
- 3) 橋本清隆, 足立宜良: 静電気とその産業技術, 東京電機大学出版局, (1969) p.79
- 4) 足立宜良: 電学誌, 90-4, 710 (1970)
- 5) H. J. White: "Electrostatic Precipitation" Addison-Wesley Publishing Co. (1965) p. 169
- 6) 高分子学会: 静電気ハンドブック, 地人書館, (1967) p.454
- 7) 庄靖彦, 足立宜良: 山口大学工学部研究報告, 20, 261 (1969)
- 8) 足立宜良: 山口大学工学部研究報告, 19, 81 (1968)

(昭和45年9月15日受理)