

電気集じん器のコロナ放電々界における

イオン風についての研究 (第一報)

前原 弘典*・足立 宜良**

Study on the Ionic Wind in the Corona Discharging Field for the Electrical Precipitator (1st Report)

Hirohumi MAEHARA and Takayoshi ADACHI

Abstract

Ionic wind occurs in the corona discharging field because of the flow of many ions. It acts in complicated manner in the collecting field of the electrical precipitator.

The purpose of the experiment is to find the influences of the ionic wind on the collecting forces in the corona discharging field of the electrical precipitator. The first step of studies is to investigate the natures of the ionic wind in the corona discharging field in atmospheric air. Generally the negative corona is used in the electrical precipitation, therefore in this experiment only the negative corona is used. The 1-needle, the 7-needles or the cylinder electrode are used as the discharging electrode, and the wire net or the plate as the collecting electrode.

The experimental considerations are on the comparison between the distribution of ionic wind velocity and that of corona current density, and the relation between ionic wind velocity and applied voltage.

The results of experiments show the behavior of the ionic wind qualitatively well, and are useful to consider its effect on the collecting forces.

1. 緒 言

近年、原子力が重油にかわるエネルギー源として徐々に使用量が増加しているが、それにもまして重油はなお、エネルギー源としてあるいは原料として最も重要な地位を占め、その消費量は大幅に増大している。そして、重油消費に伴う亜硫酸ガス (SO_2) による大気汚染は、公害問題のうちでも大きな比率を占めている。

排ガス中の亜硫酸ガスを減少させるには、重油中のイオウ分を除去することが根本的な解決策であるが、この方法は経済性の面で難点がある¹⁾。排ガス中から亜硫酸ガスを除去する方法も、種々研究²⁾がなされているが、筆者らは、湿式の電気集じん器によってガス流中の亜硫酸ガスを除去するため、種々の研究を行ってきた。この結果はかなりの成果を得たが、亜硫酸ガスの集じん過程において、本来の電気集じん器の集じん過程で考慮されるイオン化による集じん作用力より

も、イオン風による集じん作用力が大きいのではないかという問題に直面した³⁾。

イオン風は、コロナ放電々界において多量のイオンが移動する際に、その運動エネルギーを中性のガス分子に与えることにより発生する一種の風であり、他に電気風、あるいはコロナ風とも呼ばれている。電気集じん器の研究においても、古くからその存在について W. Deutsch⁴⁾ や福田⁵⁾ によって発表されているが、現在まで定量的に集じん作用力として、その動静を明らかにするに至っていない。イオン風は、コロナ放電々界で発生するために、測定器の選定がむづかしく、また電気集じん器内の粒子の運動から電気的作用力とイオン風による作用力を分離することも困難である。

筆者らは、電気集じん器内のイオン風の動静を研究する第1段階として、イオン風がコロナ電流と深い関係にあることに着目して、模擬集じん器におけるイオン風の分布状態とコロナ電流密度の分布状態を比較する実験的考察を行なった。実験は電気集じん器におけるイオン風を対象としているため、負性コロナ⁵⁾ だけに問題を限定した。また、実験を行なった雰囲気条件

* 大学院工学研究科電気工学専攻

** 電気工学教室

は、温度6~13°C、湿度71~77%、気圧1008~1015mbであった。

実験の結果、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、今までに比してかなり詳細な実験結果を得て考察を行ったので報告する。

2. 実験装置および実験

2.1 実験装置の概要

実験に使用した直流電源装置をFig. 1に示す。ここで試験変圧器 Tr_1 は容量5 kVA、巻数比250、ヒータトランス Tr_2 は容量0.2kVA、巻数比0.1、調整用スライダック SL_1 および SL_2 は定格0~260 V、20A、平滑コンデンサー C は 3.3×10^{-6} F、高電圧整

流管 K は 150kVP の熱電子整流管である。Fig. 1の Electric field を構成しているところの放電々極（負電極）ならびに集じん電極（正電極）の詳しい形状および寸法をFig. 2に示す。放電々極の選定にあたっては、これまでの他の研究との関連も考慮して、電界分布が変化に富みイオン風速度分布およびコロナ電流密度分布が顕著に現れるものを選んだ。

Fig. 3は、イオン風測定装置の構成要領を示したものである。使用した放電々極は1針、7針、円筒の各電極であり、集じん電極としては網目の大きさが異なる二種類の金網電極を使用している（Fig. 2, eを参照）。これらの電極を図のように設置し金網電極後方には、この電極と平行に置かれたレール上を自由に移

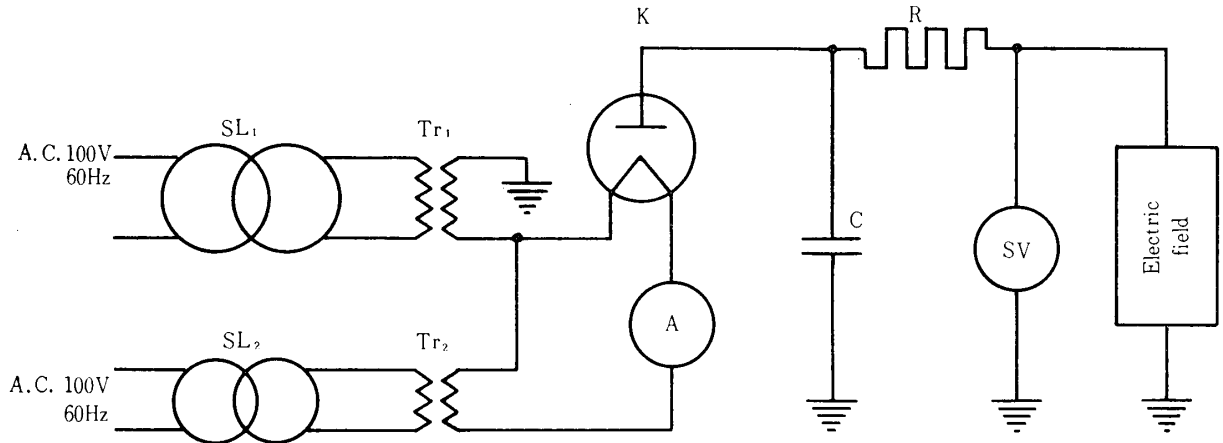


Fig. 1 Schematic diagram of experimental circuit

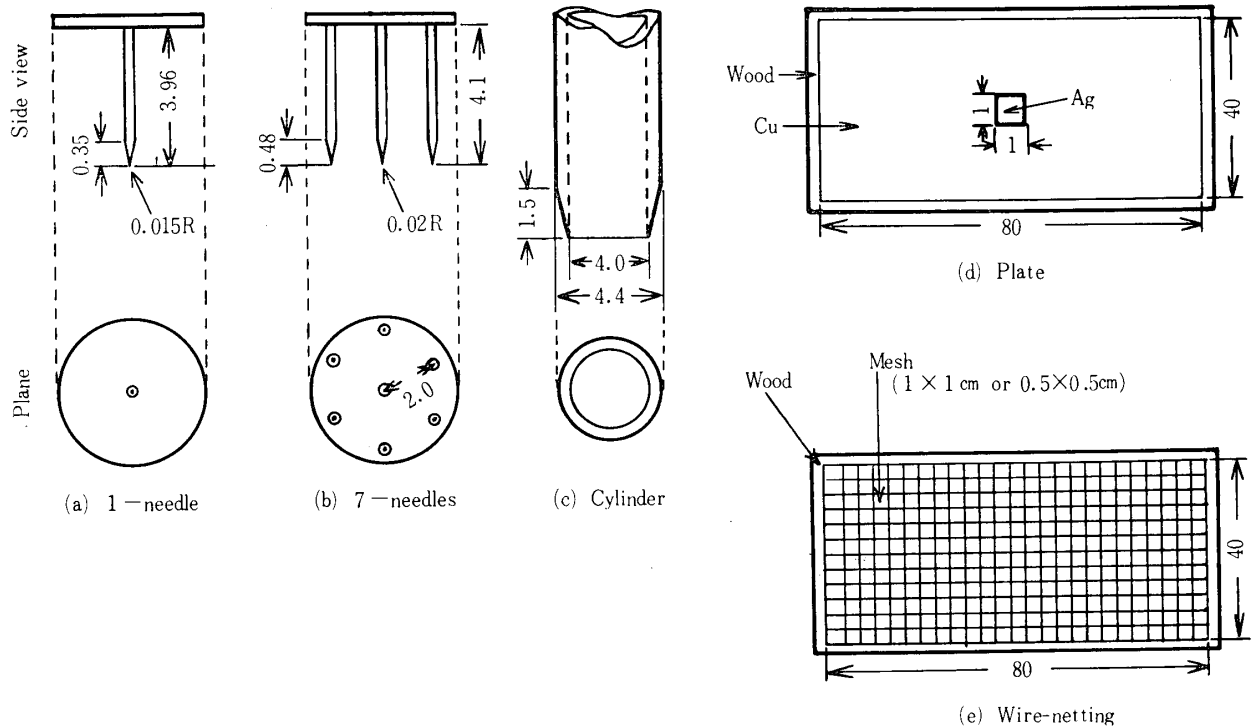


Fig. 2 Form of the negative (a,b,c) and positive (d,e) electrodes (unit : cm)

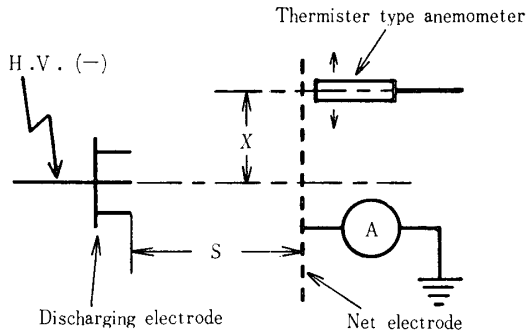


Fig. 3 Experimental set for the ionic wind velocity distribution

動できるような台車にとりつけたサーミスター風速計 (芝浦電機製) が放電々極と同じ高さの位置に置かれている。イオン風速度分布の測定にあたっては、Fig. 1 に示した直流電源によって得られた負の高電圧を放電々極に印加し、サーミスター風速計を放電々極正面 (この点を $X = 0 \text{ cm}$ の点とする) を中心に左右に移動させて各点の風速を測定した。また、金網電極の後方において測定したのは、コロナ電界内に測定器を設置することにより生じるコロナ電界分布の乱れを防ぐための配慮である。

Fig. 4 は、コロナ電流密度分布の測定装置を示した

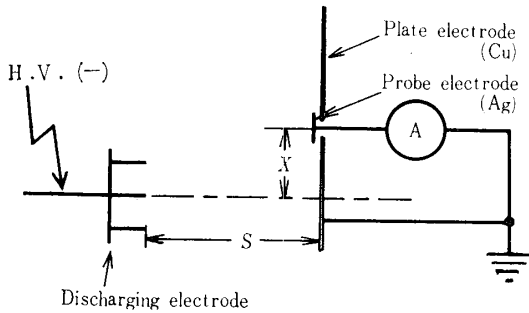


Fig. 4 Experimental set for the corona current density distribution

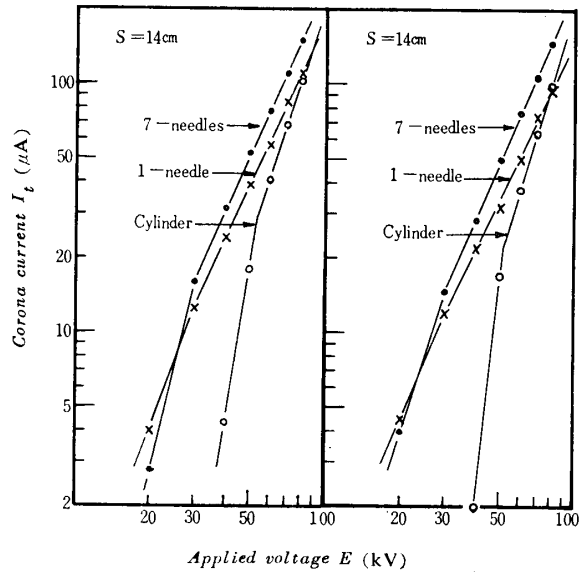
ものである。放電々極はFig. 3 に使用したのと同じであるが、集じん電極は平板電極 (銅) の中央に、小さなプローブ電極 (銀) を絶縁して取りつけたもので構成し (Fig. 2 のb参照)。このプローブ電極はコロナ電流密度測定用の電流計を通して接地されている。そして、この平板電極には滑車を取りつけ、支持台上のレールの上を自由に移動できるようになっている。

コロナ電流密度分布の測定は、平板電極を左右に移動させてイオン風測定と同様、 X の各点でプローブ電極に流れるコロナ電流を測定した。この場合、 X が大きい位置に平板電極を移動させると、放電々極と平板

電極はかなり非対称の位置に置かれることになり、電界分布の変化が考えられるが、筆者らの実験範囲 ($-20 \text{ cm} \leq X \leq 20 \text{ cm}$) については、電界分布の変化を考えなくても良い程度の大きさに平板電極を設計してある。

2.2 実験装置の特性

各放電々極の平板電極および金網電極に対するコロナ放電特性をFig. 5 に示す。コロナ開始電圧が最小で



(a) Plate electrode (b) Net electrode

Fig. 5 Discharging characteristics for applied voltage vs. corona current

あるのは、1 針放電々極であるが、電圧がある程度上昇したとき電流の大きいのは7 針の場合である。円筒電極の場合、コロナ開始電圧が最高となっているのは、電極の構造上、表面電界強度が針電極に比して小さくなるためである。

つぎに、同じ放電々極に対して平板電極と金網電極を比べてみた場合、コロナ放電特性は、ほとんど一致している。電界分布は、集じん電極の近傍では平板電極と金網電極の構造の違いにより異なった分布状態を示すと考えられるが、網目に対して相当大きく電極間距離 S をとった場合は、両集じん電極に対する電界分布は、実用的に一致していると考えられる。ただし、実験装置ならびに方法は異なるが、実用規模の範囲 $S > 8 \text{ cm}$ 、印加電圧 $E > 45 \text{ kV}$ での両者の放電特性についての実験的考察は発表されている⁷⁾。これらのことから、イオン風速度分布とコロナ電流密度分布の定性的な比較において、使用した集じん極の違いから生じる問題は無視してよいと考えられる。

イオン風測定器の選定にあたって、アネモメータ

一、マノメーターならびにサーミスター風速計の3種を比較検討してみたが、アネモメーターは、約0.3m/sce以下の風速では指示値がほとんど零となり、微小風速測定にあたっては誤差が大きく、また風速検出面積が大きく測定には不適當である。マノメーターは、感度が悪く実用集じん電界で発生する程度のイオン風(0~約2 m/sec)では測定に適さない。サーミスター風速計は、応答遅れはかなり大きい、検出素子が小さく、風速を直接指示するので適當と思われる。したがって、筆者らはサーミスター風速計を用いたが、測定にあたって、イオン風の速度変動があり、上下限の各々について平均指示値を記録した。

3. 実験の結果および考察

3.1 放電々極形状がイオン風速とコロナ電流密度の分布に与える影響

3.1.1 1針放電々極におけるイオン風速度分布とコロナ電流密度分布 Fig. 3の実験装置において、集じん電極として金網電極(網目1×1cm)を使用し、電極間距離Sを14cmとした場合のイオン風速度分布をFig. 6に示す。ここで、一般に実用集じん電界強度は

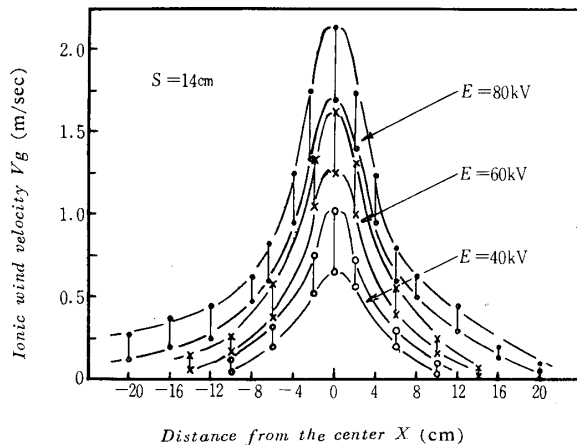


Fig. 6 Ionic wind velocity distribution for 1-needle vs. net (mesh: 1×1cm) electrode

種々の状態条件で異なるが、3~6 kV/cmが最適とされており⁸⁾、この条件と電源容量を考慮してS=14cmを決定した。また、Fig. 7にS=14cmのときのコロナ電流密度分布を示す。

コロナ電流密度は、放電々極正面すなわちX=0cmの点において最高値を示し、左右に対称な山形の分布状態を示している。放電々極正面においては電界がもっとも強く、コロナ電流がこの点に集中することは容易に理解されることである。

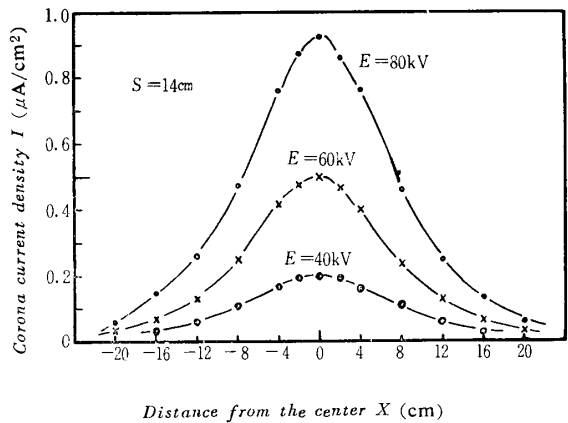


Fig. 7 Corona current density distribution for 1-needle vs. plate electrode

また、印加電圧Eの増加におけるコロナ電流密度Iの増加の傾向は、一般的なコロナ放電特性式⁹⁾

$$\log I = \alpha \log E + \beta \quad (1)$$

に一致している。ただし、αはガスの性質ならびに電極の構造および状態などで定まり、βはガスの性質によって定まる実験的定数である。

Fig. 6とFig. 7を比較してみると、イオン風速度分布とコロナ電流密度分布の傾向は非常に類似していることがわかる。しかし、イオン風速と印加電圧のあいだの関係は、(1)式のようにはならない。(3.3節参照)

Fig. 6においてイオン風速の最高値は、E=80kVのとき2 m/sec前後であり、この程度の風速であるなら人間の体にもかなり強い風圧として感じることができると。

3.1.2 7針放電々極におけるイオン風速度分布とコロナ電流密度分布 Fig. 8は、金網集じん電極(網目

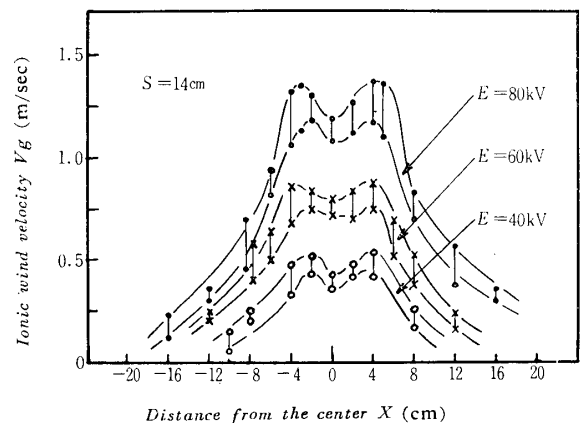


Fig. 8 Ionic wind velocity distribution for 7-needles vs. net (mesh: 1×1cm) electrode

1 × 1 cm) を使用し, S=14cmとしたときのイオン風速度分布, Fig. 9はS=14cmのときのコロナ電流密度分布である.

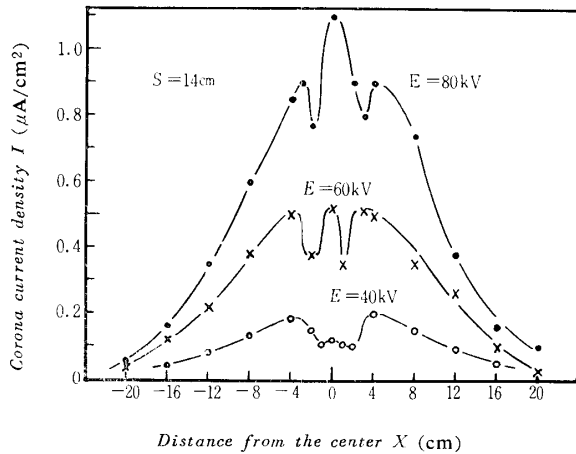


Fig. 9 Corona current density distribution for 7-needles vs. plate electrode

両者を比較してみると, 印加電圧 E が低い場合には類似した分布状態を示しているが, E が大きくなると, コロナ電流密度分布には, 放電々極の中心にある針端の静電シールド効果の軽減の影響で放電が強くなる. これに対して, イオン風速度分布では中心の針端による影響が顕著には見られない. すなわち, E の値が小的时候, 放電々極中心の針端は静電的にシールドされた状態にあり, 周囲の6本の針端に比してコロナ電流が小となっている. しかし, E の増加につれて, これら6本の針端は表面電荷密度が飽和の傾向を示し, 反対に中心の針端に電圧増加による電界強度増加の傾向が現れることから, E が大のところでは, 中心の針端によるコロナ電流の影響が強くなっていくものと考えられる.

しかしながら, イオン風速度分布は E の値が高いところでも中心の針端の影響が強く現れないのは, つぎのように考えられる. すなわち, コロナ電流密度分布は, 電界中のイオンあるいは電子の運動 (電子移動距離 S が14~20cmに対して移動速度が約100m/sec) によって分布状態が決定されるのであるが, イオン風速度分布では, 大イオンおよび塵埃の移動速度ならびにガスの粘性から移動方向と直角方向の圧力も考慮しなくてはならない. コロナ電流がすべてイオンの移動によるものとした場合, 単位体積中のイオン密度は約 10^8 個/cm³¹⁰⁾ であるのに比して, 中性のガス分子が占める割合 (アボガドロ数から) は, はるかに多い. このことから, イオン風速度分布は中性のガス分子の運動量によって決定されると考えることができる.

いま, Fig. 9 の $E=60$ kV の場合で考えると, 中心

のピークと外側の2個のピークは, ほとんど大きさが等しい (注: 外側の2個のピークの間隔は放電々極の包絡直径よりもやや大であるのは, 電荷の斥力¹¹⁾ に原因する). すなわち, 電界中において中性ガス分子が均一に分布しているとすれば Fig. 8 の同電圧におけるイオン風速度分布もコロナ電流密度分布と類似でなくてはならない. しかし, 放電々極が円板に7本の針電極を取りつけた構造であることから, 中心に向かって流れようとする気体は, 中心に到達する以前に周囲の6本の針電極で駆動されたイオンによって集じん極方向に作用力を受けるが, 中心には充分な量の中性ガス分子が供給されない. そのため, 中心においてはイオン風のエネルギー源として, イオンの駆動による大きな力を持ちながらイオン風の構成因子となるガス分子が不足しているために, イオン風速は外側のピークに比して, 中心では小さくなっているものと考えられる. しかしここで, 空気分子の平均速度, 衝突回数, ならびに分子直径など考慮し, 検討されなければならない.

3.1.3 円筒放電々極におけるイオン風速度分布とコロナ電流密度分布 1針および7針の場合と同様の条件で測定した円筒放電々極におけるイオン風速度分布を Fig. 10に, コロナ電流密度分布を Fig. 11に示す.

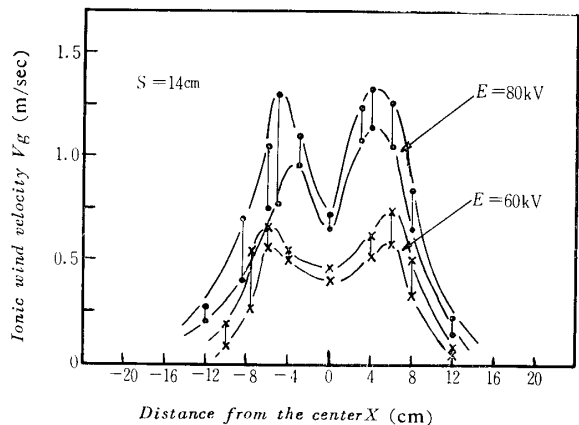


Fig. 10 Ionic wind velocity distribution for cylinder vs. net (mesh: 1 × 1 cm) electrode

円筒放電々極を使用した場合のコロナ電流密度は, Fig. 11からわかるように, 中心においてほとんど零に近い値を示し, 放電々極のふちに対応して, 中心の外側に2個のピークが生じる. この場合も7針のときと同じ理由によりピーク間の距離は, 円筒直径よりもやや大となる.

イオン風速度分布も, 中心の外側においてピークを示すという定性的な特性においては, コロナ電流密度

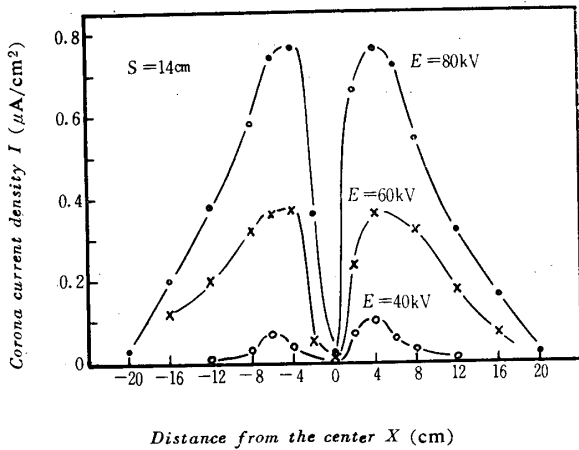


Fig. 11 Corona current density distribution for cylinder vs. plate electrode

分布と大差はないが、中心においては7針の場合と反対に、コロナ電流がほとんど存在しないのにイオン風速は相当大きい値を示している。7針の場合には、中心に周囲からのガス分子の供給が少ないために、イオン風が小さい値をとるものとして説明したが、円筒放電電極の場合には、構造上内部が空洞のため筒内を通してガスの供給がある。しかし、円筒電極では中心においてコロナ電流がほとんど零に近いため、中性ガス分子は粘性によって運動し、これがFig.10における中心のイオン風として現われているものと考えられる。

3.2 放電電極形状以外の因子がイオン風速度分布に与える影響

1. 針放電電極を使用し、電極間距離を $S=20\text{cm}$ とし

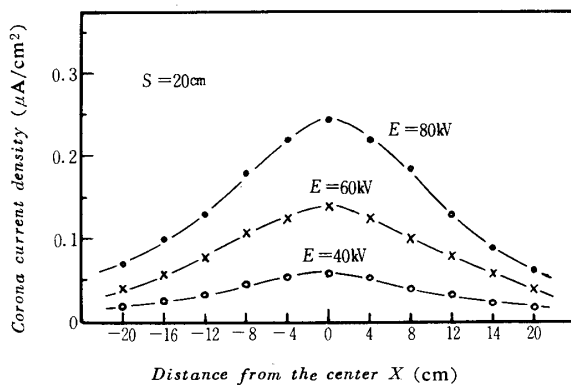


Fig. 12 Corona current density distribution for 1-needle vs. plate electrode

たときのコロナ電流密度分布をFig.12に、同じ条件で金網集じん電極 (網目 $1 \times 1\text{cm}$) を使用したときのイオン風速度分布をFig.13に示す。 $S=14\text{cm}$ のときに

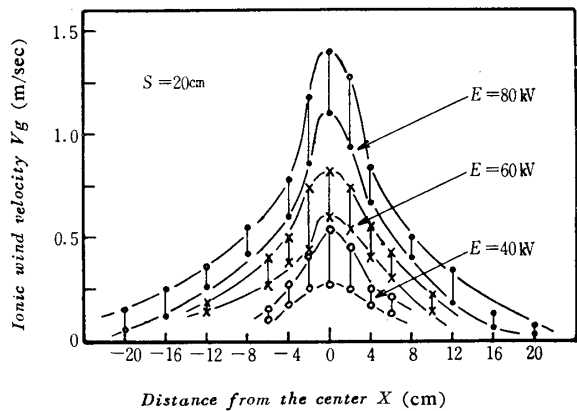


Fig. 13 Ionic wind velocity distribution for 1-needle vs. net (mesh: $1 \times 1\text{cm}$) electrode

比して、両者とも値は小となり、ゆるやかな曲線となっている。 S が大になると、平均電界強度が減少し、電界が広がるので、このように変化の少ない分布状態を示す。この傾向は、7針および円筒放電電極の場合にもみられる。

つぎに、1針放電電極において、 $S=14\text{cm}$ とし網目の小さい金網電極 (網目 $0.5 \times 0.5\text{cm}$) を使用した場合のイオン風速度分布をFig.14に示す。これをFig. 6

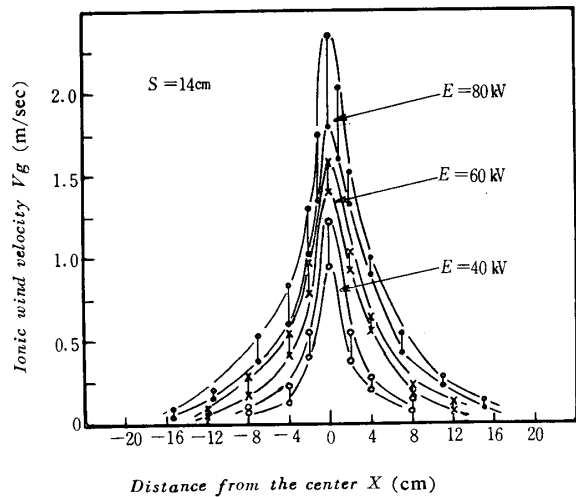


Fig. 14 Ionic wind velocity distribution for 1-needle vs. net (mesh: $0.5 \times 0.5\text{cm}$) electrode

の網目が大きい場合と比較してみると、網目が小さいときの方が全体の風量は、空気抵抗が大になることから少ないようである。

なお、正確には実験を行なった雰囲気の影響も考慮するべきであるが、筆者らの実験において雰囲気状態はほぼ一定であったので、この点に関しては考察して

いない。(「緒言」の雰囲気条件参照)

3.3 印加電圧とイオン風の関係

Fig. 15 は、1針放電々極と金網電極(網目1×1 cm)を使用し、電極間距離 $S=14\text{cm}$ として、印加電

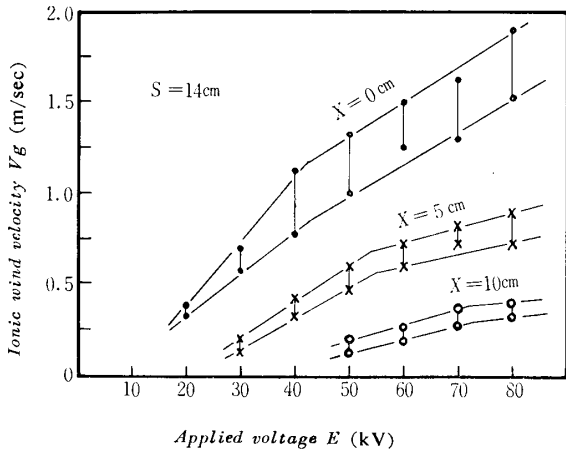


Fig. 15 Applied voltage vs. ionic wind velocity for 1-needle vs. net (mesh: 1×1cm) electrode

圧 E を変化させたときのイオン風速の変化を、放電々極正面からの距離 X を 0 cm, 5 cm, 10 cm とするパラメータで示したものである。

印加電圧 E の増加につれて、イオン風速 V_g はほぼ直線的に増加し途中で勾配が減少する2直線からなるが、実験を行なった電界強度 G の範囲内では飽和の傾向を示さない。したがって、 V_g と E の実験的關係は、

$$V_g = aE + b \quad (G < 3 \sim 4 \text{ kV/cm}) \quad (2)$$

$$V_g = a'E + b' \quad (G > 3 \sim 4 \text{ kV/cm}) \quad (3)$$

として表わされる。ただし、 a, a', b, b' は放電々極の構造条件ならびに距離 X によって定まる定数で、 $a > a', b < b'$ である。

1針放電々極、 $S=14\text{cm}$ の場合の X をパラメータとする印加電圧 E とコロナ電流密度 I の特性を Fig. 7 か

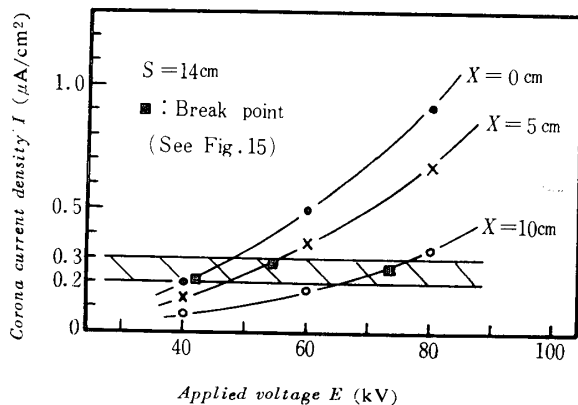


Fig. 16 Applied voltage vs. current density at the distance X from the center

ら求めて、これを Fig. 16 に示す。Fig. 15 における2直線の交点(屈折点)の意味を考察するために、これらの点の印加電圧に相当する点を Fig. 16 のグラフ上にプロットしてみると、これらの点のコロナ電流密度 I は図中に示す斜線の部分にあたり、 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の範囲であり、電界強度 G は $3 \sim 4 \text{ kV}/\text{cm}$ (距離 X を考慮して計算) の範囲である。

空間におけるイオン密度が増大すると、空間電荷効果が大きくなり、イオンの移動が困難になり、イオン風の増勢が衰えると考察した研究発表がある¹²⁾。しかし、前述の電界強度は実用集じん器の範囲であり、この範囲におけるコロナ電流密度 ($0.2 \sim 0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) 以上において、イオン風速度の増勢が衰えるという実用的かつ数値的結果を得たことは有意義だと考えられる。すなわち、実験式(2)と(3)とは、放電形式が異なることによるものと考えべきで、(2)式は、 E の増加に伴いコロナ輝点密度とイオン速度の増加の特性を示し、(3)式は、コロナ輝点密度が飽和状態に達してもっぱらイオン加速の特性を示すものと考えられる。

3.4 イオン風が集じん作用力に与える影響

本実験における最高イオン風速度は、 $2.4 \text{ m}/\text{sec}$ (Fig. 14 参照) であった。平板集じん電極にあつては電極面上での面に垂直方向のイオン風速は零となるので、同一印加電圧のもとでも放電々極正面の平均イオン風速は、金網電極の場合より小さいと考えられる。

電気集じん器において、煙粒子が放電々極近傍の誘電作用力⁵⁾ が働らく範囲にあると、放電々極に吸引され、放電線を肥大させて、集じん機能の低下を招くことになる¹³⁾。また、放電々極の表面付近での風圧分布には、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などが相関連して起こると考えられる¹³⁾。

このような状況のもとで、煙粒子が誘電作用力の範囲に運び込まれると、前述の現象ならびに結果を招くが、イオン風それ自体が放電々極より集じん電極方向へ作用するのであるから、イオン風により集じん電極方向に駆動される多くの粒子も存在することは多分に考えられる。特に帯電されていない中性粒子に対しては、誘電作用力による放電々極方向への作用力と反対に働らくので、集じん形式や集じん対象によっては、有効な集じん作用力として考える必要があるのではないかと考えられる。

しかし、この問題については、放電々極表面のコロナ輝点以外の域へのイオン風による煙粒子の誘導付着現象の影響なども考えられるので、今後、多くの実験

ならびに考察をかさねてつぎの機会に報告したく思っている。

4. 結 言

以上の実験および考察にもとずいて、筆者らが得た結果を要約すると、つぎのようである。

1. 平板電極上でのコロナ電流密度分布は、放電々極形状によって分布状態が特徴づけられる。すなわち、放電々極の電界が集中する部分に近似的に対応して平板電極上にコロナ電流密度の極大値が現われる。

2. 金網集じん電極面でのイオン風速度分布は一般的には放電々極形状ならびにコロナ電流密度によって決定される。定性的に、イオン風速度分布とコロナ電流密度分布は一致すると考えて良いが、雰囲気条件特に放電々極構造によっては、放電々極中心部にあたるところで一致しない場合がある。

3. イオン風速度は、印加電圧に対して直線的な傾向にある。しかし、平均電界強度が $3\sim 4\text{ kV/cm}$ で、イオン風の増加の傾向が小になるが、この点では、コロナ電流密度が一定範囲内 ($0.2\sim 0.3\mu\text{A/cm}^2$) にあり、コロナ電流密度がこれより増大すると、空間電荷効果が顕著になり、イオン風の増勢が衰えるものと考えられる。

4. 実用の電気集じん器における集じん電界の範囲 ($3\sim 6\text{ kV/cm}$) では、イオン風速の飽和はみられず、また、イオン風速度の増勢変化がこの範囲内で起こることは、興味ある放電理論の展開を示すものとして有意義な結果である。

5. 実用電気集じん器において、イオン風の存在は放電線肥大などの障害となり、機能を低下させる場合も考えられるが、集じん形式や集じん対象によっては有効な集じん作用力として働らく場合も考慮される。

本報告をまとめるにあたり、ご指導いただいた本学橋本清隆教授、ならびに実験その他について御援助をいただいた本学助手城市久徳、技官池田隆、大学院2年庄靖彦、中国電力K.K.座田敏男(昭和43年度卒論学生)諸氏に深く感謝する。また、イオン風測定にあたり、ご援助、ご助言をいただいた本学上野五郎助教授ならびに宇部工業高等専門学校川上靖助教授に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 清浦雷作：公害と対策，2，10，676 (1966)
- 2) 石原義巳：電学誌，85—5，944，840 (1967)
- 3) 足立宜良：山口大学工学部研究報告，19，1，67 (1968)
- 4) W. Deutsch：Ann. d. Phys.，476，729 (1925)
- 5) 福田節夫：電学誌，48—1，6 (1930)
- 6) 庄靖彦：足立宜良：山口大学工学部研究報告，20，2，261 (1969)
- 7) 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.99
- 8) H. J. White：“Electrostatic Precipitation” Addison Wesley Publishing. Co. (1965) p.235
- 9) L. R. Koller&H. A. Fremont：Tour. App. Phys.，21，741 (1950)
- 10) 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.35
- 11) 橋本清隆：新しい塗装と乾燥，オーム社 (1957) p.32
- 12) 足立宜良：山口大学工学部研究報告，17，1，5 (1966)
- 13) 文献7)，p.79

(昭和44年12月15日受理)