

## 論 文

## 針付ロッド対平行平板電極のコロナ放電特性(針の角度変化)

大久保 利一\*, 野本 幸治\*, 足立 宜良\*

(1983年3月31日受理)

## Corona Discharge Characteristics for Rod with Discharging Needle to Parallel Plate Electrode—Parameter of Needle-Angle

T. OHKUBO,\* Y. NOMOTO\* and T. ADACHI\*

(Received March 31, 1983)

In an industrial Electrostatic Precipitator (EP), rods with discharging needles are used in order to depress the vibration of discharging wires and dust buildup on them. Rods with needles are capable of regulating the distribution of the electric field and the corona current density in EP by adjusting the parameters, such as a set-angle of needles and a needle length. This paper is an experimental report on corona discharge in electrodes consisting of the plate and a rod with one or two needles. The distance between rod ( $34\text{ mm}\phi$ ) and plate ( $80 \times 80\text{ cm}$ ) is constant at 10 cm. Distributions of corona current are measured by many circular plane probes ( $5\text{ mm}\phi$ ) plugged up holes ( $5.5\text{ mm}\phi$ ) on the plate electrode. These measurements are performed with negative DC corona at the normal atmosphere. In an electrode of the rod with a needle, the square root of corona current is proportional to the applied voltage and the corona current distributions depend on the angle of the needle. In that of a rod with two needles, there is dead space on the plate electrode without corona current in the case beyond an adequate interval of needles. This dead space is an undesirable problem in EP.

## 1. まえがき

電気集じん装置(以下EPと省略)では、その構造、高電圧やコロナ電流などの電気的条件、ダストの性状、ガス流の流体力学的条件などが複雑に関連して、放電線振動<sup>1)</sup>、放電線肥大<sup>2)</sup>、再飛散<sup>3)</sup>、逆電離現象<sup>4)</sup>などの異常現象が発生する。高い集じん率を達成し、EPを安定に運転するためには、これらの異常現象の防止対策が必要であり、多くの研究が行なわれている。

放電線振動や放電線肥大の防止対策として用いられる針付ロッド型放電極は集じんのための電界形成と粒子荷電のためのコロナ電流の供給という二つの異なる機能をあわせもっており、ロッドの直径、針の長さ、針の間隔などのパラメータによってEP内の電界やコロナ電流密度分布を適切に調整できる。しかし、針付ロッド型放電極についての研究には、コロナ電流密度分布の相似則に関する報告<sup>5)</sup>および実用EPにおける電極配置を検討

した報告<sup>6)</sup>等があるが、いずれも平板電極に対して針が垂直な場合であり、平板電極に対して角度をつけて針を取り付けた場合の報告はみあたらないようである。

このたび、針付ロッド放電極の針を平板電極に対して角度をつけて取り付けた場合のコロナ放電特性および平板電極上のコロナ電流密度分布を測定し検討を行なった。平板電極上のコロナ電流密度分布はダストの再飛散や逆電離現象の発生、さらにEPの集じん率に大きな影響を及ぼすので、各種パラメータを変えて詳細に測定し検討した。

## 2. 実験装置と測定方法

## 2.1 実験装置

実験装置の概略図を図1に示す。縁効果対策<sup>7)</sup>を施した平板電極( $80 \times 80\text{ cm}$ )を平行に設置し、平板電極の間隔 $2D$ は電源の最高電圧ならびに実用EPを考慮して、 $20\text{ cm}$ 一定とした。図2に示すように、下側平板電極はコロナ電流密度測定のため、直径 $5.5\text{ mm}\phi$ の穴に直径 $5\text{ mm}\phi$ の円筒形プローブ電極が中心間隔 $6\text{ mm}$ で絶縁して十字型に埋設された基板と、縁効果対策を施したガード電極からできている。

\* 大分大学工学部電気工学科 (870-11 大分市旦野原 700)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Oita University, 700, Dannoharu, Oita, 870-11 Japan

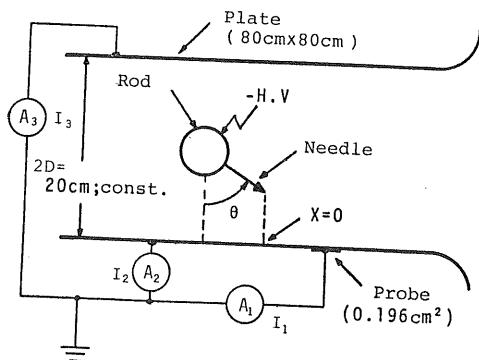


図1 針付ロッド電極対平行平板電極の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of rod with discharging needle and parallel plate electrodes.

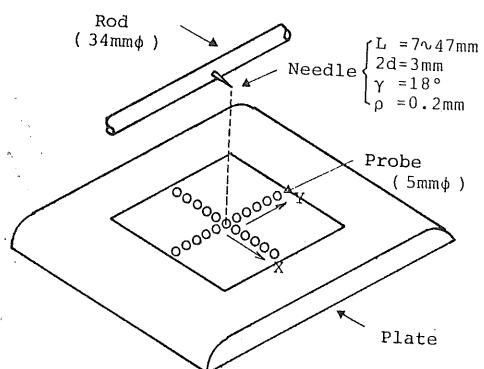


図2 コロナ電流密度測定用の配置図

Fig. 2 Arrangement for measurement of corona current density.

ロッド電極は電界形成の機能をもたせるためと工作的な容易さを考慮して、市販されている直径  $34\text{ mm}\phi$  の一般構造用炭素鋼管 (JIS G 3444) を使用した。このロッド電極に針電極を取り付けて、ロッドの中心と平板電極間の距離  $D$  を  $10\text{ cm}$  一定として平板電極間の中央に設置した。針電極は実験の再現性を図るため、直径  $2d = 3\text{ mm}\phi$ 、先端削角  $\gamma = 18^\circ$ 、先端曲率半径  $\rho = 0.2\text{ mm}$  に統一し、針長が  $7, 17, 27, 37, 47\text{ mm}$  の 5 種類を用いた。針の角度  $\theta$  は針が下側平板電極に対して、垂直な場合を  $0^\circ$  とし、対称性から  $90^\circ$  まで  $15^\circ$  間隔で実験を行なった。なお、負極性の火花電圧は正極性の火花電圧より高いことから、工業用 EP には負極性が用いられているので、本研究においても、静止大気圧中、室温で負極性の直流高电压を印加して実験を行なった。

## 2.2 測定方法

コロナ開始電圧の測定方法として種々の方法 (たとえば文献 8)) があるが、本実験では、コロナパルスの発

生がオシロスコープに確認されたときの電圧をコロナ開始電圧と定め、それを測定した。

平板電極上のコロナ電流密度はプローブ電極に流れるコロナ電流を微小電流計 (YHP 4304 B) で測定し、プローブ面積 ( $0.196\text{ cm}^2$ ) で除して求めた。コロナ電流密度分布の座標として、図 2 に示すように、平板電極上でロッドに垂直方向を  $X$  軸、針の向いている方向をその正方向に、ロッドに平行方向を  $Y$  軸とし、座標の原点を針先端直下に選んだ。ロッド電極の中心と平板電極間の距離が  $10\text{ cm}$  であることを考慮して、プローブ電極は全部で 109 個設置しており、 $X$  軸上、 $Y$  軸上、それぞれ約  $32\text{ cm}$  までコロナ電流密度分布の測定が可能である<sup>9)</sup>。

コロナ電流  $I_c$  は各プローブ電極に流れる電流  $I_1$ 、下側平板電極に流れる電流  $I_2$ 、および上側平板電極に流れる電流  $I_3$  を総計して算出した。

## 3. 実験結果と検討

### 3.1 針1本付ロッド電極のコロナ放電特性

ロッドに針長  $L$  が  $27\text{ mm}$  の針を 1 本取り付けた場合のコロナ電流-電圧特性を、針の角度  $\theta$  をパラメータとして図 3 に示す。針の角度が  $45^\circ$  以下では、コロナ電流  $I_c$  (図中は  $I_c$  の平方根でプロット) は上側平板電極にほとんど流れないが、 $60^\circ$  になるとコロナ電流の約 25 %、 $90^\circ$  では 50 % が流れる。図中に、 $\theta = 60^\circ$  と  $90^\circ$  の場合の上側平板電極に流れるコロナ電流  $I_3$  を破線で示す。この図から、実用 EP に使用される平均電界強度の範囲内 ( $2\sim 4\text{ kV/cm}$ ) のコロナ放電特性はほぼ次の式で与えられる。

$$\sqrt{I_c} = K_1(V - V_0) \quad (1)$$

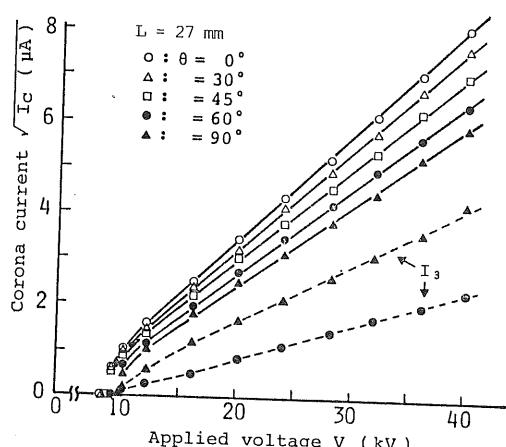


図3 針1本付ロッド電極のコロナ放電特性

Fig. 3 Characteristics of corona discharge for rod electrode with one needle.

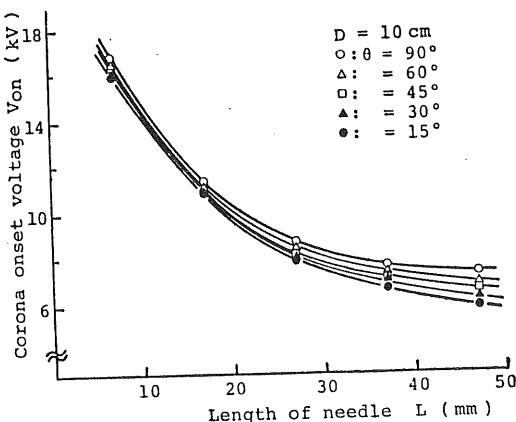


図4 コロナ開始電圧に対する針長の影響

Fig. 4 Effect of length of a needle on corona onset voltage.

ここで、 $I_c(\mu\text{A})$  はコロナ電流、 $V(\text{kV})$  は印加電圧、 $V_0$  は図3の直線部分を延長して得られる仮想コロナ開始電圧で、 $K_1$  は針の角度によって決まる実験定数である。(1)式で表わされるようなコロナ放電特性は、線対平板電極の特性よりもむしろ針対平板電極の特性に類似している。

針の長さとコロナ開始電圧の関係を図4に示す。コロナ開始電圧はロッドによる電界の影響を受けて針長 $L$ が短いと著しく高くなるが、針の角度 $\theta$ の影響はわずかである。コロナ電流値も針長によって影響を受ける。印加電圧が一定の場合、針電極が長いとコロナ電流は安定して大きいが、 $L=17\text{ mm}$  以下ではコロナ電流は非常に小さくなる。これは針先端近傍の電界がロッドの影響を強く受けたためと考えられる。

### 3.2 針1本付ロッド電極における平板電極上のコロナ電流密度分布

平板電極上のコロナ電流密度分布は EP 内の異常現象(逆電離現象、再飛散現象等)を検討する上で重要な要素である。ロッド電極に針長が 27 mm の針を1本取り付けた場合のロッド電極に垂直方向( $X$ 方向)の下側平板電極上のコロナ電流密度  $J$  の分布を  $\theta$  をパラメータにして、図5に示す。 $\theta=0^\circ$  の場合のコロナ電流密度分布は針先端直下を中心に対称であり、分布の両端ではロッドの電界の影響を受けて急激に減少する。針の角度が大きくなるとともに、コロナ電流密度の最大値  $J_p$  は減少し、 $\theta=90^\circ$  の  $J_p$  は  $\theta=0^\circ$  の場合の約 15% に減少している。また、 $\theta \geq 30^\circ$  の場合のコロナ電流密度は針先の方向に緩やかに分布し、針先端直下からロッド側方向のコロナ電流は急激に減少している。図3に示したように、 $\theta \geq 60^\circ$  になると上側平板電極にも流れ始め、これに対

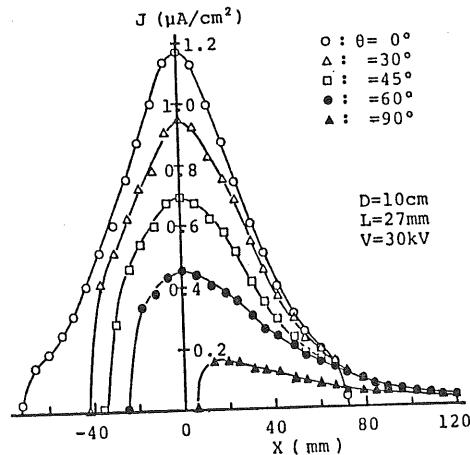
図5 平板電極上のコロナ電流密度分布( $X$ 軸上)

Fig. 5 Distribution of corona current density on the plate electrode (on  $X$ -axis).

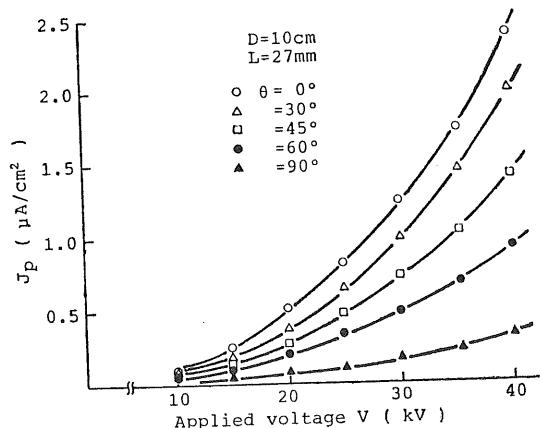
図6 コロナ電流密度の最大値  $J_p$  と印加電圧の関係

Fig. 6 Relations between peak of corona current density  $J_p$  and applied voltage.

応したコロナ電流密度が上側平板電極にも存在するのが実験で確認された。

針長が 27 mm の場合の  $J_p$  と印加電圧の関係を図6に示す。この図から、印加電圧および針の角度によつて、 $J_p$  の値は大きく変化することがわかり、EP の特性に合わせて針の角度が選択できる。

針長が 27 mm の場合の  $J_p$  で規格化した  $X$  方向のコロナ電流密度分布と印加電圧の関係を図7に示す。図(a)の  $\theta=0^\circ$  の場合、 $J/J_p$  が 0.5 以上の  $X$  方向のコロナ電流密度分布の形状は印加電圧に対して相似則が成り立つが、0.5 以下になると若干異なってくる。図(b)の  $\theta=45^\circ$  の場合は、針先方向のコロナ電流密度分布は緩やかで、その形状は、 $V$  が 10 kV と小さいときを除いて

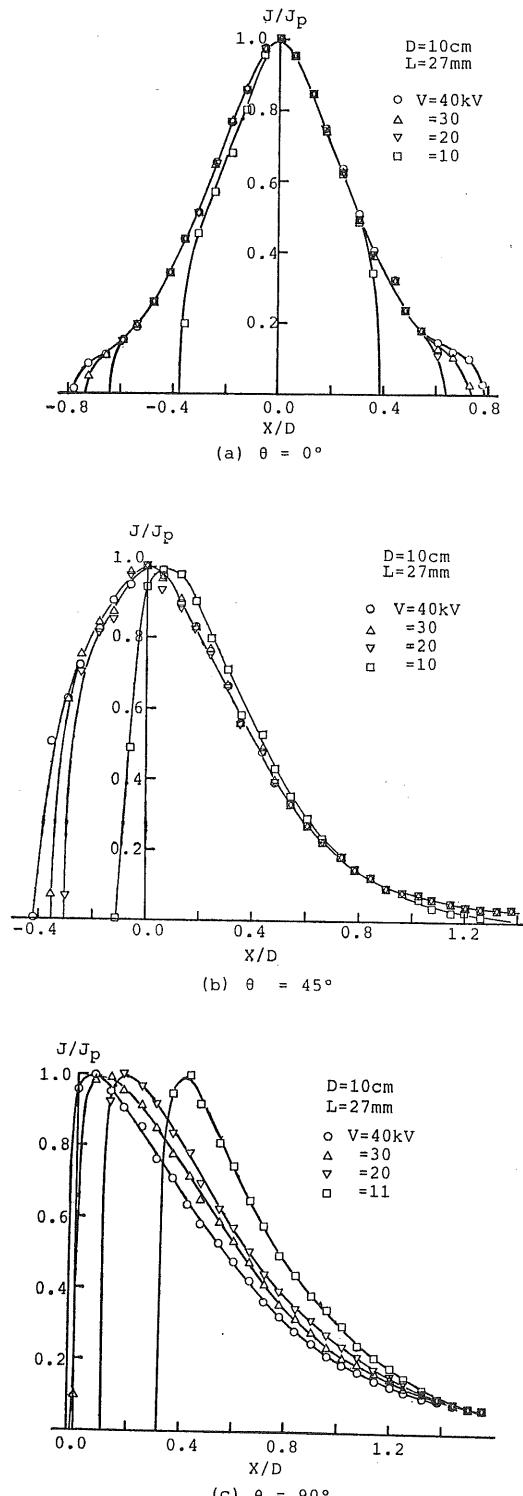


図7  $X$  軸上のコロナ電流密度分布と印加電圧の関係  
Fig. 7 Distributions of corona current density on  $X$ -axis vs. applied voltage.

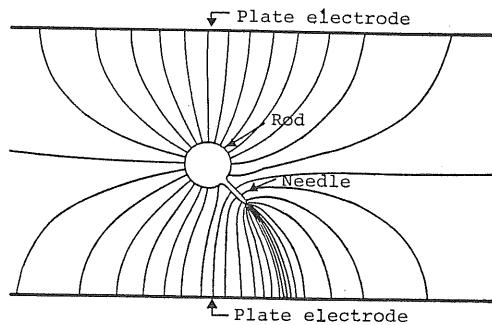


図8 二次元の静電界における電気力線

Fig. 8 Electric field map in two-dimensional field calculated by charge simulation method ( $\theta=45^\circ$ ).

近似的に相似則が成立する。しかし、針と逆方向の分布は急激に減少しており、相似則は成立しない。図(c)の  $\theta=90^\circ$  の場合の  $J_p$  の位置は印加電圧によって変化し、印加電圧が小さくなると針先方向へ移動する傾向を示す。ただし、 $J_p$  の位置を平行移動すれば、印加電圧によらず近似的に相似則が成立する。

これらの場合の3次元電界解析は困難なので、近似手法として代用電荷法<sup>9-11)</sup>による2次元静電界解析を  $\theta=45^\circ$  の場合について行ない、結果を図8に示す。この図の針先端からの電気力線は針直下ではなくて、その前方の平板上に集中している。のことから図7(b)の印加電圧最低の10 kVにおいて、最大電流密度が針前方  $X=10\text{ mm}$  のところにあることが理解される。

針長  $L=17\text{ mm}$ 、印加電圧 30 kV で針の角度  $\theta$  がそれぞれ、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  の場合の平極電極上のコロナ電流密度分布を図9に示す。 $\theta=0^\circ$  のコロナ電流密度分布はロッドに平行方向に比べて垂直方向に長く、分布域の周辺部で急激に減少してゼロになる形態をしている。このような傾向は、針対平板電極の特性にはみられない。 $\theta=45^\circ$  と  $90^\circ$  のコロナ電流密度は針先端前方に緩やかに分布し、逆方向の周辺部では急激に減少している。図7、9から、コロナ電流密度分布は針の角度  $\theta$  によって大きく異なることがわかる。

ダスト粒子を荷電して集じんする EP の機能上、コロナ電流は平板電極上に広く、均一に分布することが好ましい。そこで、図10(a)に示すように、 $J_p$  の 10% と 50% コロナ電流密度に対する等電流密度線を描き、それぞれの等電流密度線の  $X$  方向の分布幅を  $D_t$  および  $D_h$ 、またそれぞれの等電流密度線の囲む面積を  $A_t$  および  $A_h$  としてコロナ電流密度の広さや均一性の評価基準とした。10% と 50% の等電流密度線の比較はコロナ電流密度の均一さ、10% 等電流密度線はダストの再飛

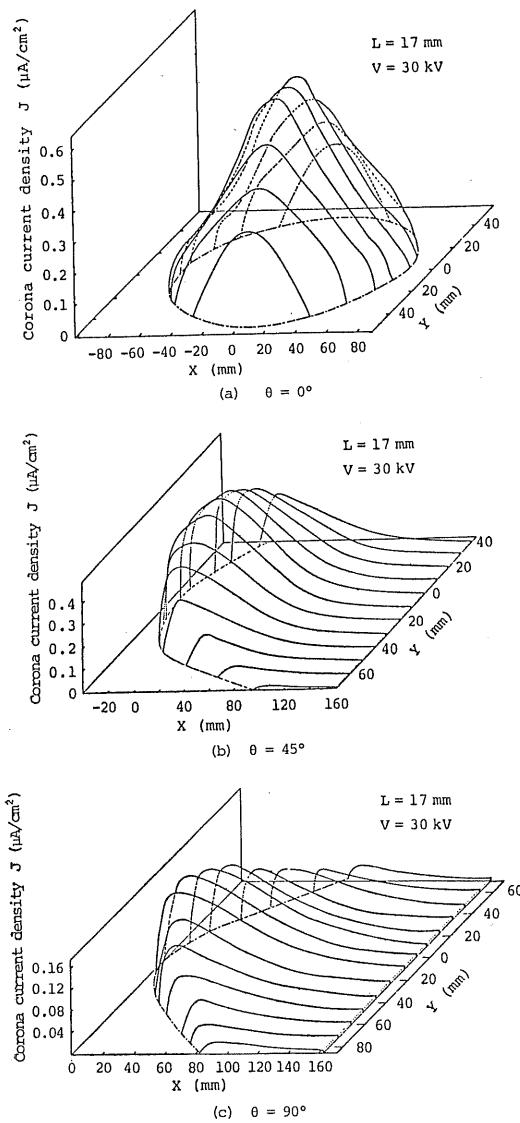


図9 平板電極上のコロナ電流密度分布

Fig. 9 Distributions of corona current density on the plate electrode.

散を防いで有効に集じんする領域<sup>5)</sup>の一つの目安と考えられる。

図10(b)に示すように、 $D_t$  は  $\theta=75^\circ$  で、 $D_h$  は  $\theta=60^\circ$  で針長に依らずほぼ一定の値をとる。また、集じん率に関与すると考えられる  $A_t$  と  $A_h$  は図 10(c)から明らかのように、 $\theta=60^\circ$  近くでは針長に依らずほぼ一定となっている。 $L=17 \text{ mm}$  の  $D_t$  が  $\theta$  の増大によって減少しているのに、 $A_t$  が増大しているのは、 $Y$  方向の分布幅が非常に大きくなるためである。

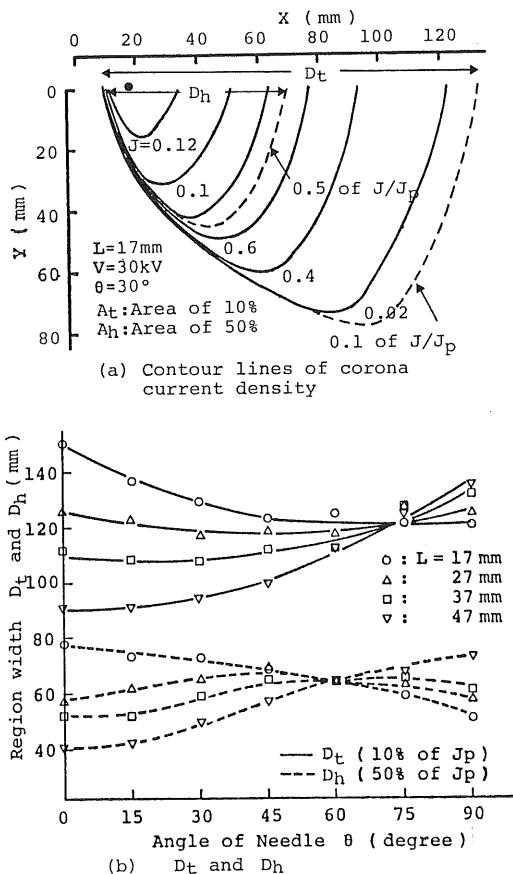


図10 針の角度と等コロナ電流密度線の大きさの関係

Fig. 10 Relation between angle of a needle and contour lines of corona current density.

### 3.3 針2本付ロッド電極のコロナ電流密度分布

ロッド電極に多数の針を取り付けた場合のコロナ放電特性を調べることは、EP の特性を検討する上で重要で

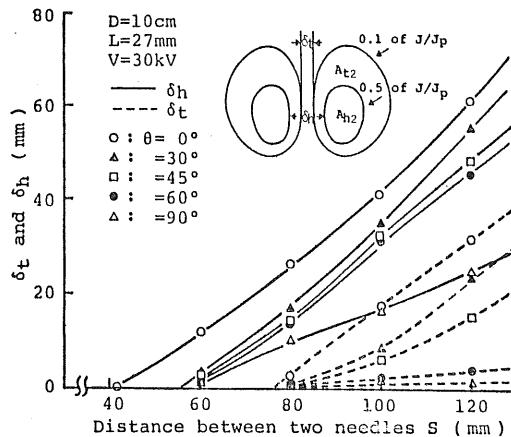
図 11  $J/J_p$  の二つの等電流密度線間の距離の特性

Fig. 11 Characteristics of the distance between two contour lines of  $J/J_p$ .

ある。そこで、ロッド電極に2本の針を取り付けて、コロナ電流密度分布に及ぼす針の角度と針間隔  $S$ (mm) の影響を調べた。平板電極上において、2本の針の中間にコロナ電流が流れない領域（デッドスペース）が存在することが報告されている<sup>6)</sup>。デッドスペースが存在することは、コロナ放電空間にもイオンシャワーが存在しない空間が存在することになり、ダストの荷電が不十分になる。

2本の針によってできる10%と50%等電流密度線間の最短距離を  $\delta_t$  および  $\delta_h$  として図 11 に示す。  $S$  が 80 mm 以下では、等電流密度線は対称面の近傍で非常に密になり、 $\delta_t$  は測定されない。 $S$  が 80 mm になると  $\delta_t$  は  $S$  とともに増加し、増加の割合は針の角度が小さいほど大きく、 $\theta=0^\circ$  の場合の直線の傾きは約 1 である。 $\theta=90^\circ$  の  $\delta_t$  は 10% 等電流密度線が針先方向へ広く分布するため、 $S$  に対して増加する割合は小さい。これに対して、 $\theta$  が  $30^\circ$  以上の  $\delta_h$  は  $S$  が約 60 mm 以上で存在する。 $\delta_t$  はデッドスペースの大きさの目安になると考えられる。

針2本付ロッド電極のコロナ電流密度分布の面積と針間隔の関係を図 12 に示す。縦軸の  $A_{t2}/A_{t1}$  と  $A_{h2}/A_{h1}$  は針1本付ロッド電極の10%と50%等電流密度線が囲む面積に対する針2本付ロッド電極の針1本当りのそれぞれの面積の比である（図 11 参照）。50%等電流密度線の面積は  $S$  が 80 mm 以上ではあまり針間隔の影響を受けないが、60 mm 程度以下になると急激に減少している。また、10%等電流密度線の面積は  $S$  が 20 mm の場合、針1本の場合の約 65% に減少している。

針間隔を小さくするとデッドスペースは減少するが、

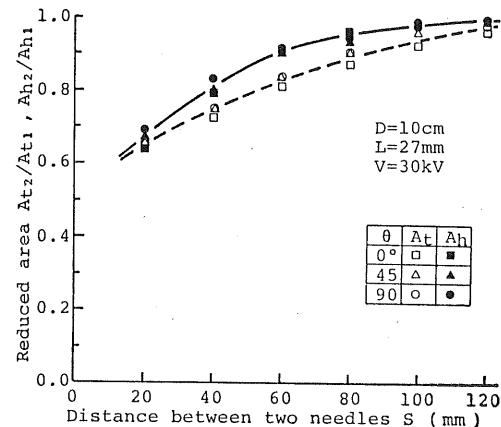


図 12 等コロナ電流密度線に囲まれた面積の比

Fig. 12 Ratio of the region-area within corona current densities for 10 and 50% of  $J_p$  (See Figs. 10 and 11).

反面、コロナ開始電圧は上昇し、コロナ電流は減少する結果が得られている。また、針間隔を小さくして、針の本数を増やすと、EP の建設費が高くなる。以上のことと、図 11 および 12 から、EP にとって 60~80 mm 程度の針間隔が適当であると考えられる。

#### 4. ま と め

針付ロッド電極対平板電極のコロナ放電特性と平板電極上のコロナ電流密度分布の測定結果およびこれらの検討を要約すると以下のようになる。

(1) 針付ロッド電極のコロナ放電特性は線対平板電極の特性よりも針対平板電極の特性に類似しており、コロナ電流の平方根は印加電圧と仮想コロナ開始電圧との差に比例する。

(2) 針1本付ロッド電極のコロナ電流密度分布は針の角度によって非常に異なり、針の角度をつけたときは、ロッド側のコロナ電流密度は分布域の周辺部で急激に減少する形態をしている。コロナ電流密度の最大値は、印加電圧および針の角度によって大きく変化する。

(3)  $\theta=0^\circ$  の場合、 $J/J_p$  が 0.5 以上の規格化コロナ電流密度分布は印加電圧によって変化しないという相似則が成り立つ。 $\theta=90^\circ$  の場合のコロナ電流密度の最大値  $J_p$  の位置は印加電圧によって変化する。この場合も規格化コロナ電流密度分布は、 $J_p$  の位置を平行移動すれば、印加電圧によらず近似的に相似則が成り立つ。

(4) 本実験において得られた結果を具体的に検討すると、針長は約 30 mm、針の角度は  $60\sim75^\circ$ 、針間隔は  $60\sim80$  mm が本実験に用いた針付ロッド電極のパラメータとして適しているといえる。

最後に、本報告にあたって、ご指導、ご支援をいただいた赤崎正則教授(九大・総合理工)、村上昭年教授、原雅則助教授(九大、工)ならびに、ご討論いただいた川崎元之助教授、高城実講師(西日本工大)、電気学会放電研究会の方々に感謝する。また、本実験を行なうにあたり、ご協力いただいた永山謙吾君(大学院生)、河野泰久技官および卒研の学生に感謝する。

### 参考文献

- 1) 川崎元之、原 雅則：静電気学会誌、6 (1982) 29
- 2) H.J. White : *Industrial Electrostatic Precipitator*, p. 26, Addison-Wesley Publ. Co., Reading, Mass. (1973)

- 3) T. Adachi and T. Ohkubo : *Proceedings of International Powder Technology '81*, S 4-9, p. 588 (1981)
- 4) S. Masuda and A. Mizuno : J. Electrostat., 2 (1977) 375
- 5) 増田閃一、新岡正樹：電気学会論文誌A, 96 (1976) 411
- 6) 羽野光夫、足立宜良：静電気学会誌、4 (1980) 353
- 7) 足立宜良、川崎元之、岸本勝美：静電気学会誌、4 (1980) 44
- 8) 川崎元之：電気学会論文誌 B, 99 (1979) 1
- 9) 大久保利一、野本幸治、足立宜良：電気学会放電研究会資料 ED-83-23, p. 85 (1983)
- 10) 村島定行：代用電荷法とその応用, p. 21, 森北出版 (1983)
- 11) 大久保利一、川崎元之、野本幸治、足立宜良：静電気学会誌、8 (1982) 278