

論 文

## 針付きロッド型放電電極をもつ電気集じん装置の 電極配置の決定

羽野光夫\*, 足立宜良\*

(1980年1月25日受理)

Determination of Electrode Arrangement for an Electrostatic  
Precipitator Using Rod Electrodes with  
Discharging Needles

M. HANO\* and T. ADACHI\*

(Received January 25, 1980)

This paper is a report for the corona current density on the plate electrode in a model electrostatic precipitator which has rod discharge electrodes (10 mm in diameter) with some needles (10 mm in length). In our experiments, the pitches of rods and needles on the rod are variable respectively so as to check for the effect of rods and needles on the negative corona characteristics. The main results are summarised as follows; (1) In our all experiments, the square root of the corona current is in proportion to applied voltage and is inverse to the square root of the gap distance between needles and plate electrode. (2) The corona current is distributed elliptically on the plate electrode, so that the dead space arises where no corona current exists on the plate. The average current density on the plate shows a tendency to increase with decreasing of the pitches of rods and needles. (3) According to our consideration for the current distribution, it is found that the better electrode arrangement is that the pitches of rods and needles are equal to about 60 mm when the gap distance between needles and plate electrode is 100 mm.

### 1. まえがき

電気集じん装置（以下 EP と略）はコロナ放電を応用した集じん装置で、基本原理および構造とも簡単であって集じん効率が高く、かつ微細粒子（サブミクロン粒子）の領域まで集じん可能という利点がある。しかし、EP を現実に稼動する過程において EP の運転状態、EP の形状、ダストの性状、ガスの性状などの非常に多くの要素に影響される。これらの要素は複雑に絡み合って、放電線振動現象<sup>1)</sup>、放電線肥大現象、再飛散現象、逆電離現象<sup>2,3)</sup>、などのような異常現象を発生させる。

上記の EP 内の異常現象は相互に絡み合っているので、高い集じん効率を得るには適切な対策を施さなければならず、各要素へのアプローチが行なわれている。し

かし、多くの研究や努力にもかかわらず、逆電離機構<sup>2,3)</sup>、イオン風による作用<sup>4,5)</sup>やダスト粒子凝集作用<sup>6)</sup>などの未解決な問題が多く、また負荷変動にも弱いなどの欠点を持ち、EP の設計には経験的ファクタが多い現状である。したがって、一日も早く EP の稼動条件を技術的、理論的レベルまで高め、安価で高効率な EP の設計が確立され、その実用化が望まれている。

前述の異常現象などの対策を施した種々のタイプの EP のなかで、放電線振動や放電線肥大現象などの対策を放電極に施した針付きロッド型放電極をもつ EP (図 1 参照) が実用されている。この EP の集じん作用について検討するにあたって、クーロン力やイオン風作用力などに直接関係のあるコロナ放電特性について検討する必要がある。ここで、線対平板電極ならびに針対平板電極のコロナ放電特性についての報告<sup>7,8)</sup> はすでになされていて、針付きロッド対平板電極については放電電流の相似側の見地から検討した報告<sup>8)</sup> はなされている。しかし、EP の立場からこの針付きロッド放電極の放電特

\* 山口大学工学部電気工学科 (775 宇部市常盤台)  
Department of Electrical Engineering, Faculty  
of Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai,  
Ube 775, Japan

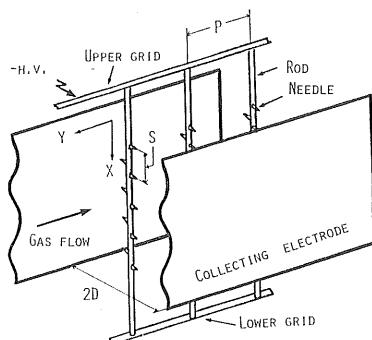


図1 ロッド型EPの概要

Fig. 1 Structure of rod type EP.

性について検討された報告はみあたらないようである。

本研究は、針付きロッド型EPの実験条件を種々変えた場合の負コロナ放電特性に基づいて、放電極形状や配置などを定めることを目的としている。まずロッド電極に取り付けた針(図3参照)の数とこれらの間隔Sならびにロッドの数とこれらの間隔Pなどのパラメータを変えた場合の負コロナ放電特性および負コロナ電流密度分布特性を求めた。これらの実験データの検討結果、放電極形状や配置などの決定に有意義な条件が得られた。

ただし、集じん電極には平板電極のみを用い、実験は大気中、室温で行なった。

## 2. 針付きロッド型放電極と電極配置決定の指針

### 2.1 針付きロッド型放電極の有利性

針付きロッド型放電極は初め放電線振動防止対策用として考案されたものである。図1に針付きロッド型放電極を持つ実用EPの概要を示す。そして、その形状および特徴について述べる。

#### (1) 形 状

線対平板型EPのコロナ放電において、線振動ならびに断線対策として放電線径を大きくすると、コロナ開始電圧は上昇し、逆に火花電圧は低下する。よって安定なコロナ放電の領域は狭くなり、EP運用にあたってガス変動のためにコロナ放電の不安定性を引き起こし、集じん率の低下をきたす。また放電線径があまり大きくなると、コロナを経ずしてただちに火花へと移行する。したがって、線径の大きな放電棒(以下これをロッドといいう)に一定間隔で針を取り付けて、その先端から安定なコロナ放電電流を供給し、高い集じん効率を得ようとするのが針付きロッド型放電極の主旨である。

#### (2) 特 徴

ロッドには一般に直径1cm前後の鉄棒を用いているため、(a)放電極の振動が起りにくく、しかも、放電線

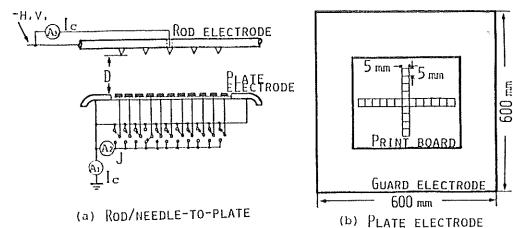


図2 電流密度測定用実験装置

Fig. 2 Experimental apparatus for current density measurement.

肥大防止のために槌打が行なわれるが、(b)強い槌打衝撃に耐えられるため放電極じんダストの剥離が有効になる。また、線放電極型EPにおいては、コロナ輝点が不安定なため放電線肥大が生じやすく、一度この現象が生じると急速に発展してコロナ電流が減少する。この針付きロッド型放電極は、(c)コロナ輝点が安定しているため針尖端には着じんしにくく、常に旺盛なコロナ放電が供給できる。

したがって、針付きロッド型放電極は従来の線放電極にくらべて、放電線振動、放電線肥大などの異状現象防止対策として有効であると考えられる。

### 2.2 電極配置決定の指針

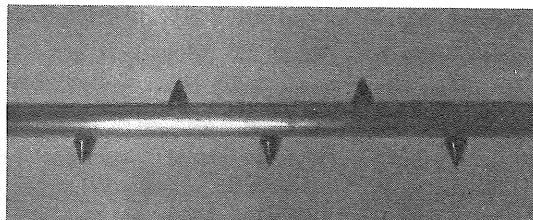
粒子捕集の過程から集じん効率を向上させるには、粒子の移動速度 $\omega$ を大きくしなければならない。粒子を直接集じん電極方向へ移動させる作用力には、おもにクーロン作用力およびイオン風作用力<sup>4)</sup>などが考えられている。これらはコロナ電流値ならびに分布状態等に大きく依存している。

したがって、集じん電極上の電流密度分布も集じん効率に大きな影響を与える。コロナ電流が部分的に集中し、あまり大きいと逆電離発生条件の一つとなり、逆に少ない場所では堆積ダストの付着力が減少し、ダストの飛散を起こすことにもなる。これらは直接集じん過程に関係し、ある特定のダストに対しては、最も重要な要素になることもある。

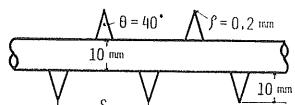
針付きロッド型放電極ではあらかじめコロナ輝点を固定させているため、一様なコロナ電流分布は望めないが、できるだけ多くのコロナ電流を流し、そして電流分布を一様な分布に近づけることが望まれる。このような観点から、本報告では平板電極上のコロナ電流分布を測定し、それを検討して集じん動作に最適と思われる電極配置を決定した。

## 3. 実験装置および方法

平板電極上のコロナ電流密度分布測定には大別して、



(a) PHOTOGRAPH



(b) ARRANGEMENT

図3 5針付きロッドの構成

Fig. 3 Structure of rod with 5 projections.

電極分割型とプローブ移動型<sup>8)</sup>とがある。それぞれ一長一短があり、前者は測定点が固定しているが、各素子の面積には製作上どうしてもばらつきが生じて、素子の面積が小さいほど、そのばらつきの影響は大きくなる。また後者はプローブ面積が一定であるが、各測定点ごとにプローブを移動させるため、測定点にばらつきが生じ、しかも電流密度が小さい領域では、電流がゼロに収束しないという特殊現象が発生する<sup>8)</sup>。したがってどちらを採用するかは他の電極配置、あるいは寸法などの条件によって決定しなければならない。

本実験では、測定範囲が 20cm 前後と広いため可動部分を設けることは測定に誤差をきたしやすく、前者の電極分割型を用いた。実験に使用した直流高電圧は工業用 EP を考慮して、負の高電圧（全波整流後コンデンサにて平滑）のみを印加した。以下では、印加負電圧や負コロナ電流などの用語の負の言葉は省略する。

図 2(a)に平板電極上でのコロナ電流密度測定装置の構成図を示す。十分な縁効果対策<sup>11)</sup>を施した平板電極にはプリント基板にガード電極を施したものを使い、同図(b)に示すようにプリント基板上に  $5 \times 5 \text{ mm}$  正方形のプローブ電極をエッチングして作成した。この正方形のユニットをプローブとして、エレクトロニックガルバノメータ ( $A_2$ ) を通してコロナ電流を測定し、プローブ面積 ( $0.25 \text{ cm}^2$ ) で除して電流密度を算出した。図 2(a)に示すように使用しないプローブはすべて電流計  $A_1$  に接続した。

放電電極の一例として、5針付きロッド電極の構成を図 3 に示す。長さ 10 mm, 先端削角  $40^\circ$ , 先端曲率半径 0.2 mm の針をロッド電極にねじ取付けたもので、針

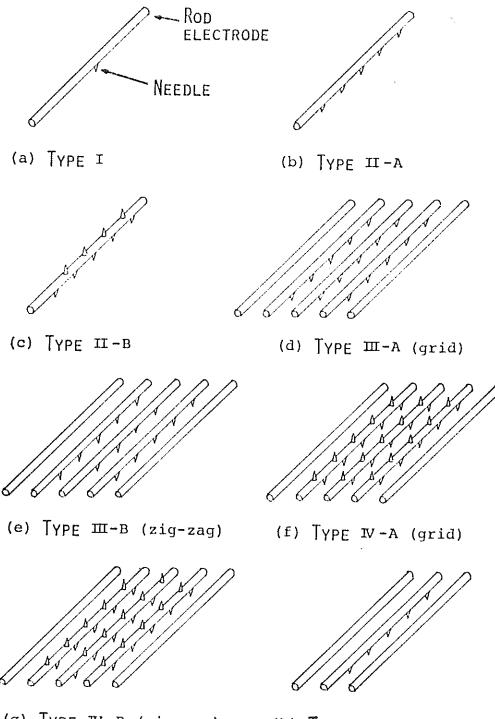


図4 ロッドと針の配置

Fig. 4 Arrangements of rod and projection.

の間隔  $S$  は自由に変えられる。使用した針付きロッド電極の構造は図 4 に示すように、1 本のロッドに 1 個の針を取り付けたもの (type I), ロッドの片側のみに一定間隔  $S$  で数個の針を取り付けたもの (type II-A), ロッドの両側に互い違いにそれぞれ一定間隔  $S$  で数個の針を取り付けたもの (type II-B) および針のないロッドなどの四種類のロッドを基本として、これらを組み合わせた type III~V の多ロッド型放電電極を構成した。type III-A, B は type II-A のロッドを使用し、type III-A ではすべての針が格子状に配置されているが、一方 type III-B では中央のロッドの針が軸方向に  $S/2$  ずれた zig-zag 状に配置されている。また、type IV-A, B は type II-B のロッドを使用し、type IV-A ではすべての針は格子状に配置されているが、一方 type IV-B では type III-B と同様に zig-zag 状に配置されている。type V は Type II-A のロッドと無針ロッドなど 3 本のロッドから構成されている。

集じん電極には図 4 に示すように、針がロッドの片側のみにある場合 (type I, II-A, III-A, III-B, V) に片平板電極を用い、またロッドの両側に針がある場合 (type II-B, IV-A, IV-B) に両平板電極を用いた。ただし、type III, IV の放電電極において、ロッド間隔  $P$

が120mm以上になると実験装置の関係上、両サイドの無針ロッドを取り外した。

#### 4. 実験結果と検討

##### 4.1 コロナ放電特性

実験はまず、針付きロッドの基礎特性を知るために簡

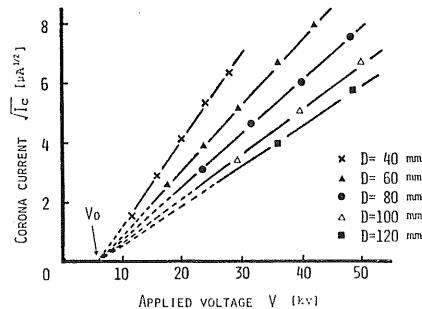


図5 放電極タイプIのコロナ電流特性

Fig. 5 Corona current characteristics for type I (see Fig. 4).

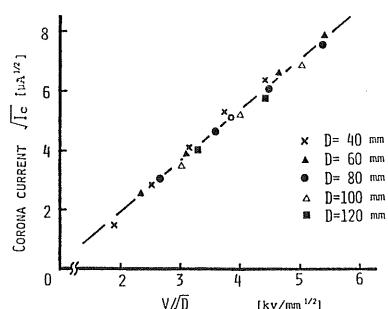


図6 放電極タイプIにおけるコロナ電流の一直線特性

Fig. 6 One line characteristics of the corona current for type I (see Fig. 4).

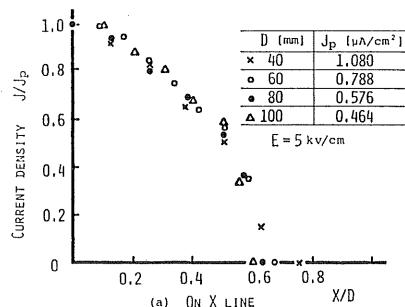


図7 集じん電極上の標準化コロナ電流密度

Fig. 7 Normalized corona current density on the collecting electrode for type I (see Fig. 4).

単な電極配置から行ない、しだいに実用EPの電極配置へと変えていった。

図5は図4に示すtype I電極を用いたコロナ放電特性である。実用EPでの平均電界強度範囲( $E=3\sim7\text{ kV/cm}$ )では、次の実験式が得られた。

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

ここで、 $V_0$ は図5から得られた仮想コロナ開始電圧で、約6.5kVであった。しかし、実際のコロナ開始電圧は少し高い。また、 $K_1$ は実験定数で放電極間隔 $D$ によって変化し、図6に示すように横軸を $V/\sqrt{D}$ にとれば、放電特性はほぼ1本の直線上に載り、次式のような関係式が得られた。

$$\sqrt{I_c} = (K_2/\sqrt{D})(V - V_0) \quad (2)$$

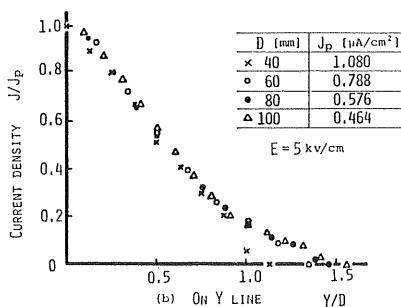
ここで、 $K_2$ は電極形状、霧潤気条件によって決まる定数である。

一般に、針放電電極の放電特性は、EPの実用電界範囲内で両対数座標において1本の直線となる。一方、線放電電極においては折れ線でしか近似できない<sup>4)</sup>ため、針付きロッド型EPの放電特性は針放電電極型の放電特性に類似していることになる。図4に示したtype II~Vのすべての放電電極におけるコロナ放電特性はtype Iの1針の場合と同様に(2)式によって表わすことができて、前述と同様な類似特性と考えられる。

##### 4.2 ロッドの影響

次に、type I放電電極における平板電極上の標準化コロナ電流密度分布を図7に示す。同図(a)は針直下を原点とし、X方向の標準化コロナ電流密度分布を、同(b)には針直下を原点として、Y方向の標準化コロナ電流密度分布を示す。

平均電界強度 $E$ 一定で、放電極間隔 $D$ を変化させても分布はまったく同一のパターンを示した。また、 $D$ 一定で $E$ を変化させても、前者と同様に同一のパターンが得られた。よって、コロナ電流密度分布は $D=40\sim120\text{ mm}$ ,  $E=3\sim7\text{ kV/cm}$ の範囲で相似則が成立するもの



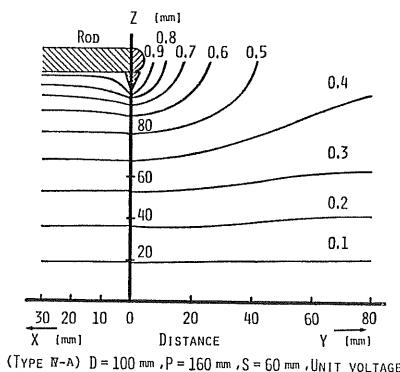


図 8 静電電位の分布

Fig. 8 Distribution of electrostatic potential.

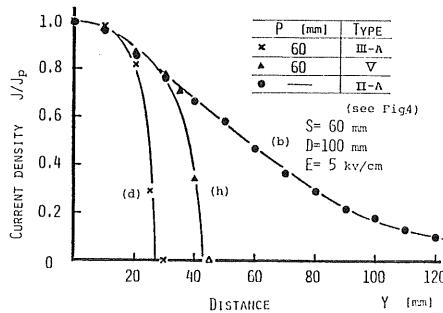


図 9 Y 軸方向の標準化コロナ電流密度

Fig. 9 Normalized corona current density on Y line.

と考えてもよい。これは電極配置の幾何学的相似性がほぼ成立しているからである。また、一般的にコロナ電流密度分布に相似則が成立するならば、今後の EP の解析を容易にする有力な手段になるものと思われる。

一方、X 方向の分布と Y 方向の分布は大きく違い、それぞれ  $X/D$ ,  $Y/D$  が 0.5 まではほぼ同一の分布であるが、それ以上になると X 方向の分布は急激に減少し、Y 方向は  $Y/D=1.5$  あたりまで広く分布している。

これらの相違は、緩和法でラプラスの式を計算機で解いて求めた図 8 の静電位分布（単位電圧印加）から明らかである。この図で、X 方向において針から出た電気力線はロッドから出た電気力線によって抑えられているため、電気力線の広がりが狭くなっていると考えられる。一方、Y 方向においては針からの電気力線はロッドの作る電気力線にはほぼ一致するため広範囲に広がっている。コロナ放電電界は静電界とかなり電界分布を異にするが<sup>9)</sup>、大まかに電気力線の傾向を類推することができると考えられる。

図 9 に図 4 に示した (d)type III-A, (h)type V および

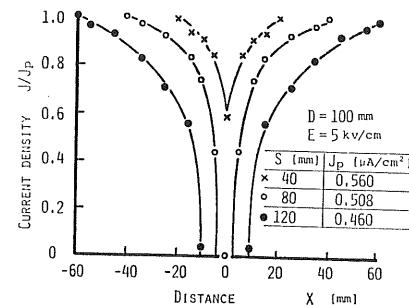


図 10 X 軸方向の標準化コロナ電流密度

Fig. 10 Normalized corona current density on X line for type II-A (see Fig. 4).

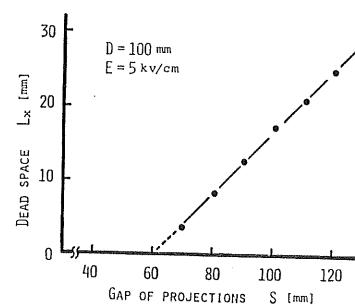


図 11 X 軸方向のデッドスペース特性

Fig. 11 Dead space ( $L_x$ ) characteristics on X line (see Fig. 10).

(b)type II-A の放電電極配置における Y 方向のコロナ電流密度分布を示す。ただし、 $P=60 \text{ mm}$ とした。(d)は(b)にくらべて電流分布は圧縮され、 $P/2$ までの分布となった。これはロッド間のコロナの勢力が同一であるから、コロナ電流密度分布はロッドの中央までとなっている。そこで(h)のように、隣接ロッドの針をすべて除くと、コロナの勢力は中央ロッドの分だけとなるが、その電流密度分布はさほど広がっていない。これは無針ロッドのつくる静電界の勢力がコロナの勢力とほぼ同程度に強くコロナ電流の広がりを抑制しているためである。したがって、コロナ電流の分布はロッドのつくる静電界の支配を大きく受けているものと考えられる。

#### 4.3 コロナ電流密度分布のデッドスペース

針付きロッド型放電極はコロナ輝点をロッド上に一定間隔で固定させているために、コロナコーンが散在し、平板上でコロナ電流の流れない場所（以下、デッドスペースという）が存在する。これはそれぞれの針から出る電気力線が絶対に交差しないために生じる現象である。このデッドスペースは針間隔によって変化し、その間隔が狭ければデッドスペースも少なくなる。すなわち、デッドスペースでは集じんが行なわれにくく、しかも再飛

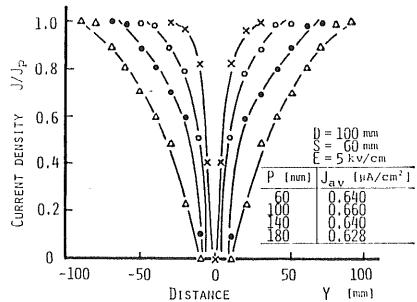


図 12 放電極タイプ III-A の Y 軸方向の標準化コロナ電流密度

Fig. 12 Normalized corona current density on Y line for type III-A (See Fig. 4)

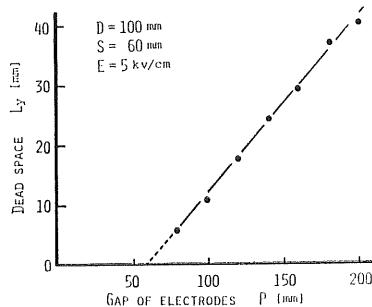


図 13 Y 軸方向のデッドスペース特性

Fig. 13 Dead space ( $L_y$ ) characteristics on Y line (see Fig. 12).

散の原因にもなる。したがって、このようなことを考慮して技術的、経済的な面で適切な針間隔  $S$  やロッド間隔  $P$  を選び有効な集じん動作を行なわなければならない。

まず、図 4 の type II-A の放電電極配置において針間隔  $S$  を変えた場合の針間の平板電極上のコロナ電流密度分布を図 10 に示す。針の中間を  $X=0$  とした。 $S=80 \text{ mm}$  では平板上でのデッドスペースは約 10 mm 程度である。これを  $L_x$  とし、図 11 に  $L_x$  と  $S$  の関係を示した。 $S$  が減少すると、 $L_x$  は直線的に減少し、 $S/2D=0.3$  で  $L_x=0$  となり、デッドスペースが最小になったと考えられる。しかし、本実験では検出プローブを  $5 \times 5 \text{ mm}$  としているため、5 mm 以下の測定は困難である。しかし、実際には  $S$  を非常に小さくした場合でも  $X=0$  の部分は両方の針の電気力線の接点となるためコロナ電流は流れないと考えてもさしつかえない。そして、Y 方向のコロナ電流密度分布は図 7(a)と同様であった。

次に type III-A の放電電極配置によって、ロッド間隔  $P$  を変えた場合の Y 方向のコロナ電流密度分布の変化の様子を図 12 に示す。針間隔  $S$  は上述の結果から、

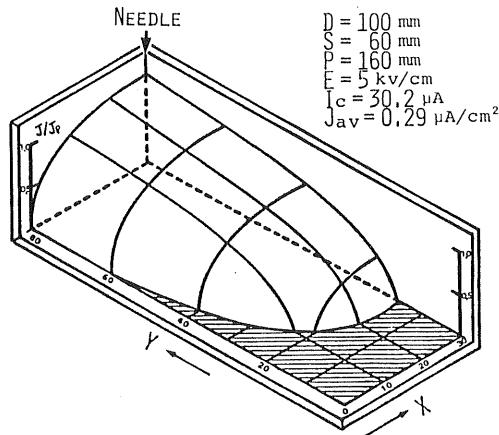


図 14 放電極タイプ III-A の集じん極上のコロナ電流分布

Fig. 14 Distribution of corona current on collecting electrode for type III-A (see Fig. 4).

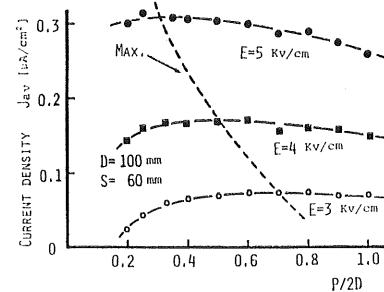


図 15 平均電流密度特性

Fig. 15 Average current density ( $J_{av}$ ) characteristics.

60 mm 一定とした。この場合も図 10 と同様に、ロッドの中央にデッドスペースを生じた。このデッドスペースを  $L_y$  とし、図 13 に  $L_y$  と  $P$  の関係を示す。 $P$  の減少とともに  $L_y$  は直線的に減少し、 $P/2D=0.3$  で  $L_y=0$  となった。したがって、これらの結果から電極配置決定の目安が得られた。

次に一例として、一般に線放電電極型 EP で用いられている  $P/2D=0.8$  の条件における平板電極上でのコロナ電流密度分布を図 14 に示す。コロナ電流は針直下を中心とした円形に分布し、斜線で示すかなり広いデッドスペースが認められる。

#### 4.4 平均コロナ電流密度

粒子捕集過程の中で、平均コロナ電流密度を大きくすることが良好な集じん能力を得るために必要である。したがって、放電極の配置はこの必要条件を満たすように決定される。線放電電極型 EP では、放電線の数を変えて、コロナ電流が最大に流れよう放電電極間隔が用

いられている。一般に、 $P/2D=0.8\sim1.0$ に選べば、最も多くのコロナ電流が得られる<sup>7)</sup>。

このような観点から、本実験においても平均コロナ電流密度  $J_{av}$  を測定した。電極配置には type III-A を用い、 $S=60\text{ mm}$ ,  $D=100\text{ mm}$  一定として、 $P$ を変化させた場合の針1本当りのコロナ電流  $I_c$  を測定した。そして、この  $I_c$  を、その針が平板電極にコロナ電流を供給するはずである面積  $S \times P(\text{cm}^2)$  で除して  $J_{av}$  を求め、その結果を図15に示す。平均電界強度  $E$ を一定にすれば、 $J_{av}$  が最大となる  $P$  が存在する。すなわち、 $P$  が大きくなれば、針からのコロナ放電は旺盛になるが、デッドスペースが広がり  $J_{av}$  は減少する。また、逆に  $P$  があまり小さくなると、デッドスペースは狭くなるが、隣接ロッド間の相互干渉により電界が弱まり、コロナ電流が減少するため  $J_{av}$  も減少する。

また、最大の  $J_{av}$  を示す  $P$  は  $E$  によって変化し、図1に破線で示すように  $E$  が大きくなるにしたがって減少している。しかし、 $E \leq 4\text{ kV/cm}$ ,  $P/2D \approx 0.4\sim1.0$  の範囲ではコロナ電流密度は  $P/2D$  に対して、ほぼ 10% 程度の差で一定値を示しているので、実用的には集じん機能や経済性を配慮して、広い範囲の  $P/2D$  を任意に選択できる特徴があるとも考えられる。

#### 4.5 電極配置の決定

以上の実験結果、すなわちデッドスペースならびに平均コロナ電流密度から、放電間隔  $D=100\text{ mm}$ , 平均電界強度  $E=5\text{ kV/cm}$  のもとでは、格子型、千鳥型配置を問わず針間隔  $S=60\text{ mm}$ , ロッド間隔  $P=60\text{ mm}$  の電極配置において、最も多くのコロナ電流を供給でき、高い集じん効果が期待できる。また、これら二つの結果が一致したことは、有意義であると考えられる。

### 5. まとめ

以上、針付きロッド型放電電極をもつEPの集じん電極上でのコロナ電流密度分布から、放電電極配置を決定した。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 針付きロッド型放電電極をもつEPのコロナ放電特性は種々のタイプの放電電極（図4参照）にかかわらず線放電電極よりも針放電電極の放電特性に類似している。コロナ電流の1/2乗は印加電圧と仮想コロナ開始電圧との差に比例して電極間隔の1/2乗に逆比例する。
- (2) ロッドのつくる電気力線がコロナ電流分布に大きな影響を与える、針直下を中心には円形に分布する。そして、針電極間にコロナ電流の流れないデッドスペースが存在する。
- (3) 平均コロナ電流密度はロッド間隔によって変化す

る。間隔が大きくなればデッドスペースの拡大によって、平均電流密度は減少し、逆に狭くなても隣接ロッド間の相互干渉によって電界が弱まり平均電流密度は減少する。したがって、平均コロナ電流密度はロッド間隔に対してピーク値が存在する。しかし、 $E \leq 4\text{ kV/cm}$ ,  $P/2D \approx 0.4\sim1.0$  の範囲では、コロナ電流密度の変化は約 10% 以下であり、実用的にはそれほど大きな差はない。

- (4) デッドスペースおよび平均コロナ電流密度から放電間隔が  $100\text{ mm}$ , 平均電界強度が  $5\text{ kV/cm}$  のもとでは、針間隔が約  $60\text{ mm}$ , ロッド間隔が約  $60\text{ mm}$  の電極配置で最も多くのコロナ電流が供給でき、高い集じん効果が期待できるものと考えられる。

本研究では集じん電極に平板電極を使用した場合の放電電極形状ならびに配置について実験検討を行なったもので、種々の集じん電極形状<sup>10)</sup>の場合に本実験結果を適用するにはさらに実験検討を必要とする。また、本実験結果と実際の電気集じん装置機能との関連については、帶電ダスト粒子群の空間電荷効果や集じん極堆積ダスト層の影響などを加味した集じんテストにより、さらに明確にする必要があると考えられる。

本報告について、ご指導ならびにご支援いただいた東京大学工学部増田閃一教授、九州大学工学部赤崎正則教授、山口大学工学部檜崎久矩教授ならびに理学部加屋野洋教授に深く感謝する。また、実験その他で援助いただいた本学池田技官ならびに研究室の学生諸兄に深く感謝する。

### 参考文献

- 1) 川崎元之、高城 実、足立宜良：静電気学会講演論文集'79, p. 81 (1979).
- 2) S. Masuda and A. Mizuno : J. Electrostatics, 2 (1977), 375.
- 3) 増田閃一：電気学会誌, 80 (1960), 1482.
- 4) 足立宜良：電気学会論文誌 B, 93 (1973), 273.
- 5) 足立宜良、川崎元之：静電気学会誌, 2, 3 (1978), 158.
- 6) 澄本 健：静電気学会誌, 3, 4 (1979), 224.
- 7) 橋本清隆、足立宜良：静電気とその産業技術, p. 86, 東京電気大学出版局 (1971).
- 8) 増田閃一、新岡正樹：電気学会論文誌 A, 96 (1976), 411.
- 9) 足立宜良、増田閃一、阿久津顯右：電気学会論文誌 B, 97 (1977), 259.
- 10) S. Oglesby and G.B. Nichols : A Manual of Electrostatic Precipitator Technology (1), p. 232, Southern Res. Inst. (1970).
- 11) 足立宜良、川崎元之、岸本勝美：静電気学会誌, 4, 1 (1980), 44,