

# 針付ロッド型放電極をもつ電気集じん装置

(コロナ電流密度分布による電極形状の決定)

羽野 光夫\*・川崎 元之\*\*・足立宜良\*

Electrostatic Precipitator Using Multi-rod Electrode with Discharging Projections

(Determination of Electrode Arrangement from Corona Current Distribution)

Mitsuo HANO, Motoyuki KAWASAKI and Takayoshi ADACHI

## Abstract

It is considered that ionic wind (IW) in electrostatic precipitator (EP) has much influence on collecting dust. Characteristics of IW closely depend on the voltage-current relation in EP and the current distribution on the collecting electrode. The research about IW and current distribution in the same gap distance as that of the practical EP has never been reported yet.

This paper is a report on the basic research for the study of IW in model EP which has a multi-rod discharge electrode with some projections. In our experiment, the number of rods and projections of discharge is increased in every experiment so as to check for the effect of rods and projections on discharging 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.

(2) The corona current is distributed elliptically on the collecting electrode. Therefore, the dead space, where no corona current exists, arises.

(3) According to the consideration for the current distribution, it is found that the best electrode arrangement is that both the distance between projections on the rod and the distance between the rods are equal to 60 mm.

## 1. まえがき

公害はもはや人類の不可避な問題として、クローズアップされている。中でもとりわけ大気汚染は、その性質上国土の狭い日本において全国的規模で広がり、早急な解決が迫られている。その対策として、工場からの排出ダストを回収する種々の除じん装置が設置されている。特に電気集じん装置（以下 EP と略）は性能の面で、現代はもちろん将来においても有望視されている。

EP はコロナ放電を応用した集じん装置で、基本原理及び構造共に非常に簡単で、しかも集じん効率が高く、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 を現実に動作する過程において EP の運転状態、EP の形状、ダストの性状、ガスの性状などのような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 EP の正常な動作を害する、(1) 放電線振動現象<sup>1)</sup>、(2) 放電線肥大現象<sup>2)</sup>、(3) 再飛散現象<sup>3)</sup>、(4) 逆電離現象<sup>4)</sup> などのような異常現象を発生させる。

一旦集じんされたダストが堆積層中のボイド放電によって、再びガス流中へ飛散してしまう逆電離現象はダストの見掛け固有抵抗が  $5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  以上の高抵抗ダストの集じんの際に多く発生する。この逆電離現象を避けるために、ガスの温度や湿度の調整によりダストの抵抗を下げる方法や、湿式 EP や二段式 EP などの特殊 EP を用いる方法などが開発されているが、万能な方法はまだ開発されていない。また、逆に低抵抗

\* 電気工学科

\*\* 西日本工業大学 電気工学科

ダストの集じんでは堆積層の付着が低下するために、再びガス流中へ飛散する再飛散現象が発生する。この現象は槌打の際にも発生し、対策として機械的集じん装置と併用したい、湿式 EP を用いる方法などがあるがいずれも高価になる。つぎに、集じんされるべきダストが電界のグラディエント力によって放電極へ付着する放電線肥大現象は、コロナ放電を抑制し、集じん効率の低下を来す。槌打や電源電圧に適切な考慮が払われているが多くの場合経験的である。放電線が弦のごとく振動する放電線振動現象は、火花電圧の低下や断線により EP の稼動条件を悪くする。対策として、放電線の位置や形状に注意が払われている。

EP が高い集じん効率を保持するには、上記の異常現象の防止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>4),5)</sup>やイオン風の対策<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 の設計は経験的なのが現状である。したがって、一旦も早く EP の動作を技術的、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。

上記の EP 内の異常現象に対する対策は相互に絡み合っているため、高効率は集じんを行なうには適切な条件を探ることが問題となる。特に放電線振動および放電線肥大の防止対策用として、針付ロッド型放電極を持つ EP (Fig.1 参照) が考察されている。しかし、この EP は実用的に用いられているのみであり、今だに集じん動作に対する解明は成されていない。本研究はこの針付ロッド型放電極を持つ EP の集じん作用力、特にクーロン力とイオン風作用力の定性的な解明を目的として行なっている。本報告はまず針付ロッド型放電極の電極形状を平板電極上のコロナ電流密度の面から決定したものである。

本文ではまず、第 2 章で EP 内の各種異常現象の原因と今までに成された対策について述べ、次に針付ロッド型放電極のこれらの異常現象への対策の有利性について述べる。第 3 章ではコロナ電流密度分布測定用の実験装置、第 4 章ではコロナ放電特性およびコロナ電流密度分布からの電極形状の決定について述べる。なお、実験はすべて大気中、室温にて行なった。

## 2. 針付ロッド型放電極と電球配置決定の指針

### 2.1 針付ロッド型放電極の有利性

針付ロッド型放電極は始め放電線振動防止対策用として考え出されたものである。Fig. 1. に針付ロッド型放電極をもつ実用 EP の概要を示す。そして、その

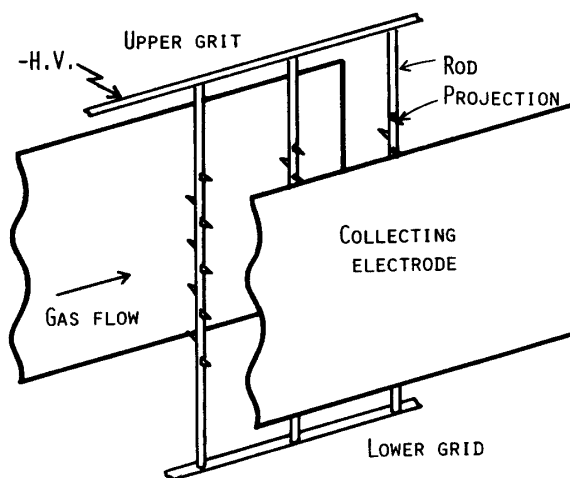


Fig.1 Structure of rod type EP

形状および特徴について述べる。

〈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コロナ放電の不安定性を引き起し、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、コロナを経ずして火花へ移行する。

したがって、線径の大きな放電棒（以下これをロッドという）に一定間隔で針を植え込み、そこから安定なコロナ放電を供給し、高い集じん効率を得ようとするのが針付ロッド型放電極の主旨である。

〈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い。しかも、放電線肥大防止のために槌打ちが行なわれるが、(b) 強い槌打衝撃に耐えられるため放電極着じんダストの剝離が有効になる。

また線形放電極 EP においては、コロナ輝点が不安定なため放電線肥大が急速に進み、コロナ電流が減少する。この針付ロッド型放電極は (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、針付ロッド型放電極は従来の線型電極に比べて、放電線振動、放電線肥大などの異常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、主にクーロン作用力およびイオン風作用力などが考えられている。これらはコロナ電流に直接的に、間接的に大きく依存している。

したがって、集じん電極上の電流分布も集じん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が発生し、逆に少ない場所では、堆積ダストの付着力が減少し、ダストの再飛散を起こす。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。

針付ロッド型放電極では予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ねばならない、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分布測定には大別して、電極分割形とプローブ移動形<sup>7)</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る。素子の面積が小さくなれば、そのばらつきは大きくなる。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、電流が零に収束しないという特殊現象が発生する<sup>7)</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、前者の電極分割形を用いた。実験に使用した直流高電圧電源装置をFig.2に示す。なお、工業用EPを考慮して、負の高電圧のみを印加した。

Fig.3 平板電極上での電流密度測定装置の構成図を示す。平板電極にはプリント基板にガード電極を施し

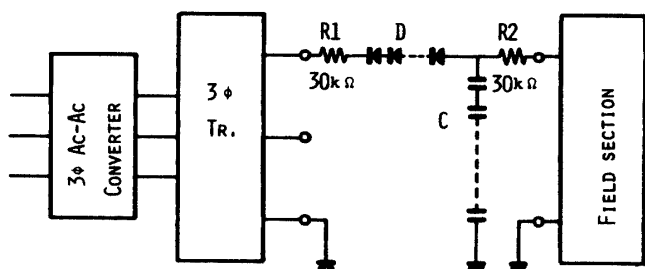
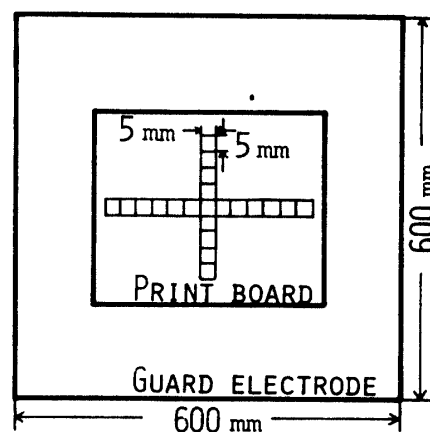
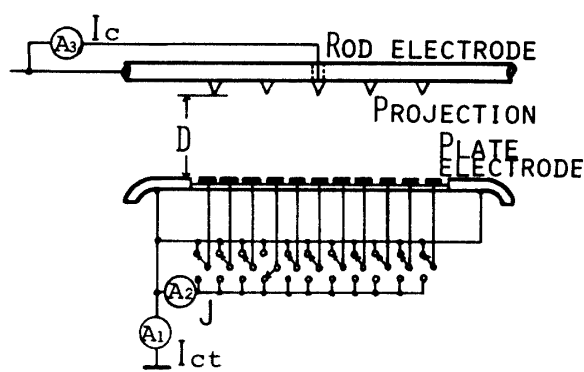


Fig.2. Power source



(a)



(b)

Fig.3. Experimental apparatus for current density measurement

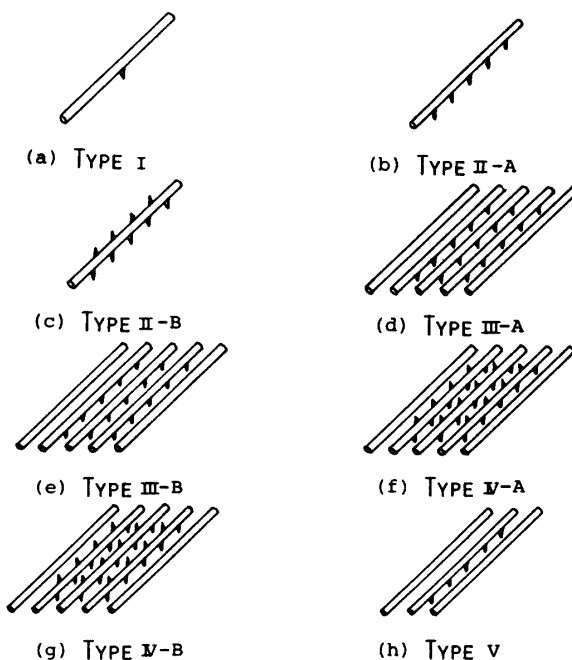


Fig.4. Arrangements of rod and projection

たものを用い、プリント基板上に5×5mm正方形のプローブ電極を十字形に多数エッチングした。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

ガルバノメータを通してコロナ電流を測定し、プローブ面積 (0.25cm<sup>2</sup>) で除して電流密度を算出した。なお、使用しないプローブはすべて、電流計 A<sub>2</sub> に接続した。

次に使用したロッドの構造は、(a) ロッドに1個の針を付けた場合、(b) ロッドの片側に一定間隔Sで数個の針を付けた場合、そして、(c) 両側に一定間隔Sで、それぞれ数個の針をつけた場合である。これら3種類のロッドと針の付けていない無針ロッドとによって、測定に用いた放電極配置を構成し、これを Fig. 4 に示す。また、集じん電極には Fig. 4 に示す Type I, II-A, III-A, III-B, V の放電極配置では片平板電極を、Type II-B, N-A, N-B の放電極配置では両平板電極を用いた。なお Type III, N, 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 放電特性

実験はまず、針付ロッドの基礎特性を知るために簡単な電極配置から行ない、次第に実用 EP の電極配置へと換えて行った。

まず、Fig. 5 に Type I における放電特性を示す。実用 EP での平均電界強度  $G_{av}=3\sim 7\text{kv/cm}$  では、次の実験式が得られた。

$$\sqrt{I_c} = K_1(E - E_0) \tag{1}$$

ここに、 $E_0$  は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、 $K_1$  は実験定数で放電間隔Dによって変化し、Fig. 6 に示すように横軸を  $E/\sqrt{D}$  にとれば、放電特性はほぼ一本の直線に載り、次式のような関係式が得られた。

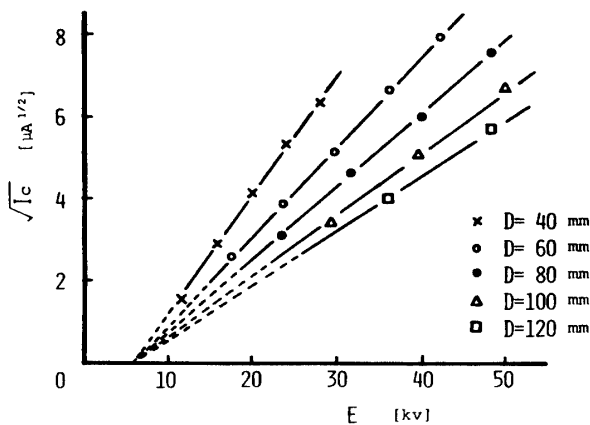


Fig. 5. Corona characteristics for Type I

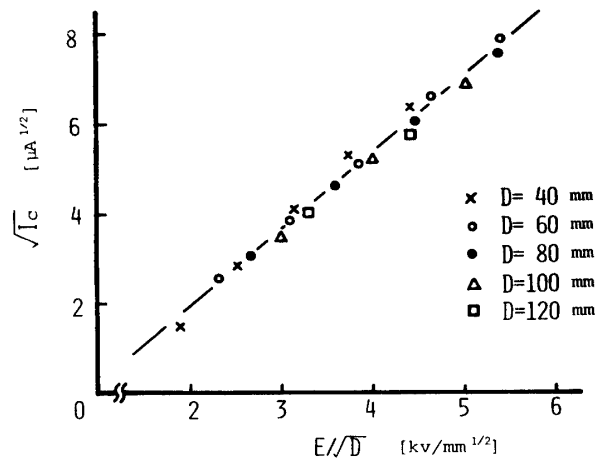


Fig. 6.  $\sqrt{I_c} - E/\sqrt{D}$  characteristics for Type I

$$\sqrt{I_c} = (K_2/\sqrt{D})(E - E_0) \tag{2}$$

ここで、 $K_2$  は電極形状、雰囲気条件によって決まる定数である。

一般に、針電極の放電特性は EP の実用電界範囲内で両対数座標において一本の直線となる。一方線電極においては折れ線では近似できない<sup>6)</sup> ため、針付ロッド型 EP の放電特性は針電極型の放電特性に類似していることになる。以下の多針付多ロッド型電極配置 (Fig. 4 参照) においても、これと同様な傾向となる。

4.2 ロッドの影響

次に、Type I における平板電極上の標準化コロナ電流分布を Fig 7 に示す (a) 図には針直下を原点とし X 方向の標準化コロナ電流分布を、(b) 図には針直下を原点として、Y 方向の標準化コロナ電流分布を示す。 $G_{av}$  一定で、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  $G_{av}$  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、コロナ電流分布は  $D=40\sim 120\text{mm}$ ,  $G_{av}=3\sim 7\text{kv/cm}$  の範囲で相似則が成立するものと考えてもよい。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。この違いは、緩和法によって求めた Fig. 8 に示す静電位分布から明らかになる。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

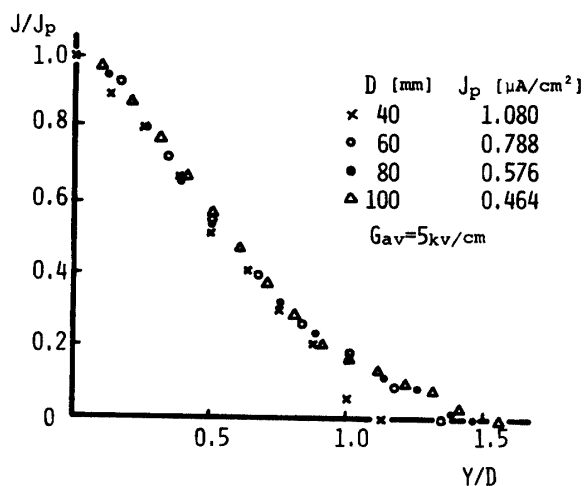
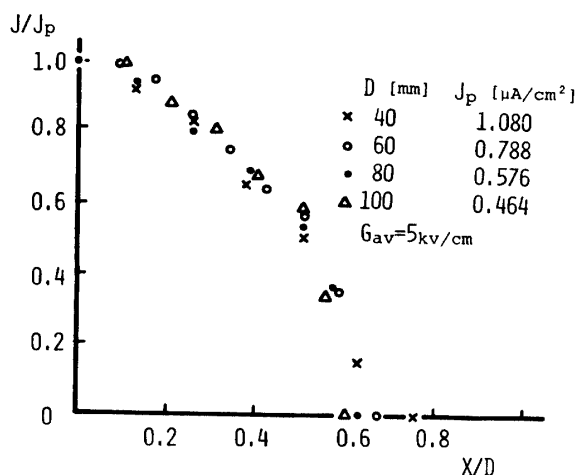


Fig. 7. Normalized corona current density on the collecting electrode for Type I

られているため、電気力線の広がりが狭くなっている。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ほぼ一致するため広範囲に広がっている。コロナ放電電場は静電場とかなり電界分布を異にするが<sup>8)</sup>、大まかに電気力線の傾向を類推することができると思われる。また、静電界の作る電気力線がコロナ電流分布に大きな影響を与えることは、次の実験によりなお一層明瞭にされる。

Fig. 9 に Fig. 4 に示した (a) Type III-A, (b) Type V および (c) Type II-A の放電極配置における Y 方向のコロナ電流分布を示す。ただし、 $P=60\text{mm}$  とした。(a) は (c) に比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、コロナ電流分布はロッドの中央までとなっている。そこで (b) のように、隣接ロッドの針を全て除けると、コロナの勢力は中央ロッドの分だけとなるが、その電流分布は差程広がっていない。これは無

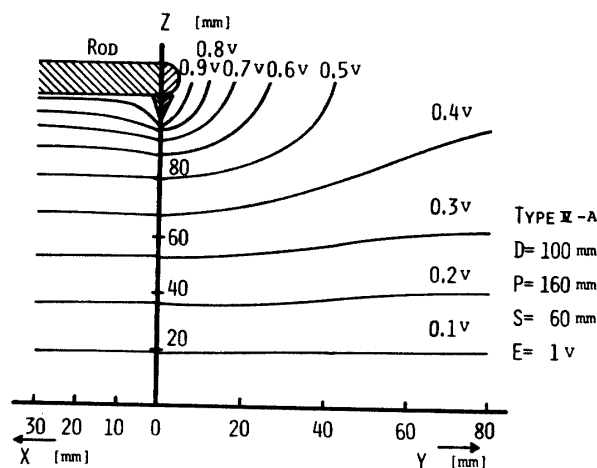


Fig. 8. Distribution of electrostatic potential

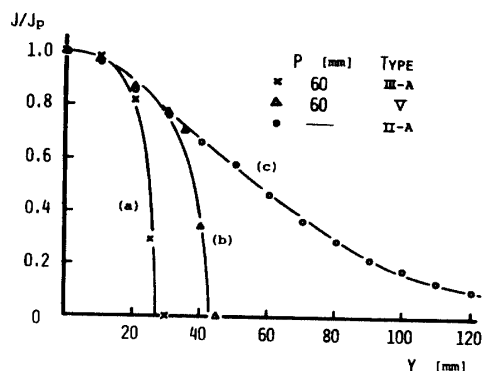


Fig. 9. Normalized corona current density on Y line

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。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 デッドスペース

針付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、コロナ電流の流れない場所（以下、デッドスペースと言う）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 S や P を選ぶ有効な集じん動作を行なわなければならない。

まず、Fig. 4 の Type II-A 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分布を Fig. 10 に示す。針の間を  $X=0$  とした。S=80mm ではデッドスペースは約 10mm 程度である。これを  $L_x$  と

し、Fig.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、  $5 \text{mm}$  以下の測定は困難である。実際には  $S$  をいかに小さくしようとも、  $X=0$  の部分は両方の針の電気力線の接点となるために、コロナ電流は流れないということが、より小さなプローブにより測定が行なわれている。なお  $Y$  方向のコロナ電流分布は Fig.7 (b) と同様であった。

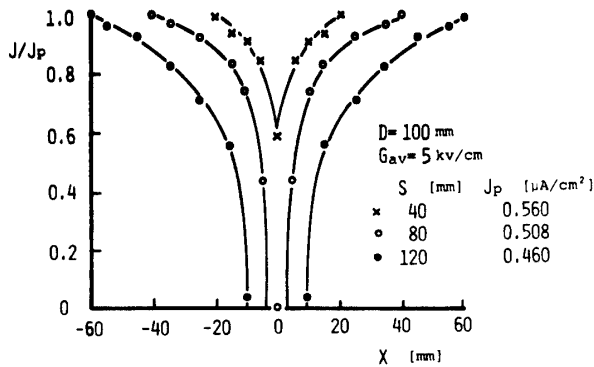


Fig.10. Normalized corona current density on X line for Type II -A

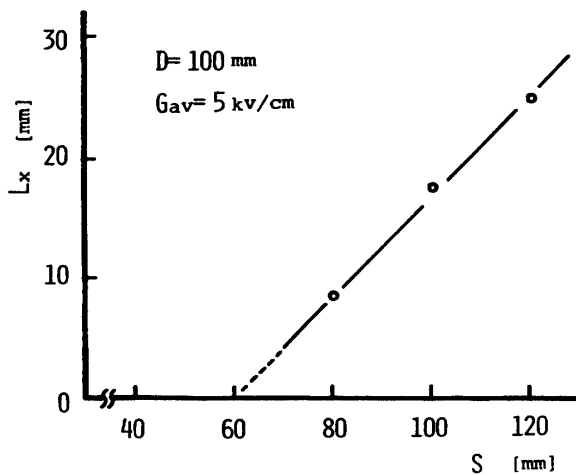


Fig.11.  $L_x$ (dead space)-s characteristics

次に Type III -A によって、ロッド間隔  $P$  を考えた場合の  $Y$  方向のコロナ電流分布の変化の様子を Fig.12 に示す。針間隔  $S$  は上述の結果から、  $60 \text{mm}$  一定とした、この場合も Fig.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 Fig.13 に、  $L_y$  と  $P$  の関係を示す。  $P$  の減少と共に  $L_y$  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、これらのことから電極配置決定の

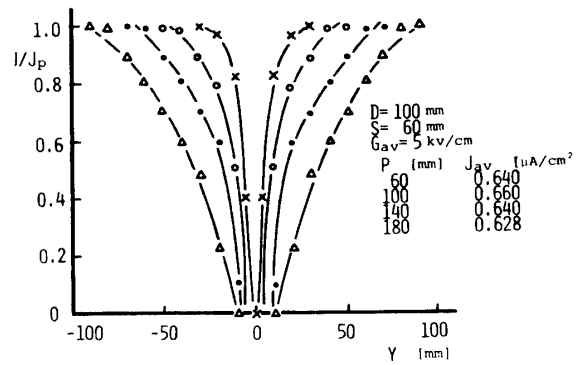


Fig.12. Normalized corona current density on Y line for Type III -A

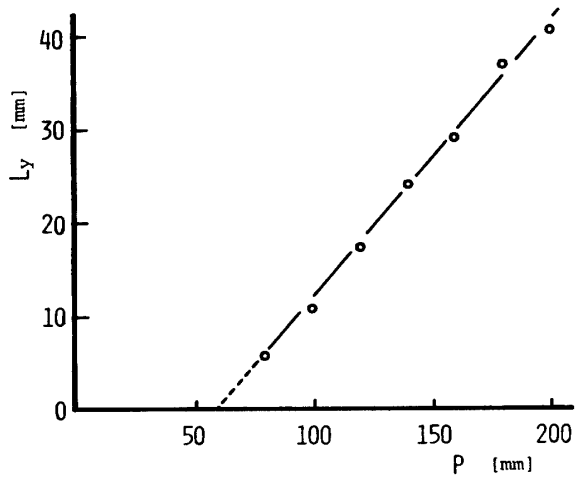


Fig.13.  $L_y$ (dead space)-p characteristics

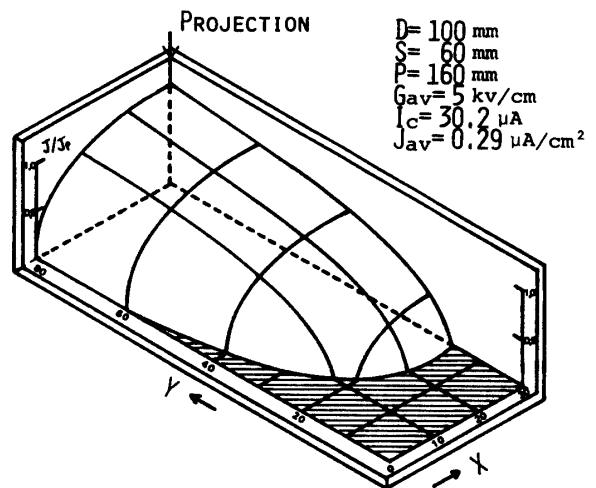


Fig.14. Distribution of corona current on collecting electrode for Type III -A

目安が得られた。

次に一例として、一般に線電極型 EP で用いられて

いる  $P/2D=0.8$  における平板電極上でのコロナ電流分布を Fig.14 に示す、コロナ電流は針直下を中心に楕円状に分布し、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、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のに必要である。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。放電極が線型の EP では、放電線の数を変えて、コロナ電流が最大に流れるような放電極間隔が用いられている。一般に、 $P/2D=0.8\sim 1.0$  に選べば、最も多くのコロナ電流が得られる<sup>9)</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 Type III-A を用い、 $S=60\text{mm}$ 、 $D=100\text{mm}$  一定として、 $P$  を変化した場合の針一本当たりのコロナ電流  $I_c$  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 Fig.15 に示す。平均電界強度  $G_{av}$  を一定すれば、 $J_{av}$  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  $G_{av}$  によって変化し、Fig.15 に破線で示すように  $G_{av}$  が大きくなるに従って減少している。したがって、針付ロッド型 EP では線型 EP に比べて放電極間隔を狭くした方が、多くのコロナ電流を供給できるものと考えられる。

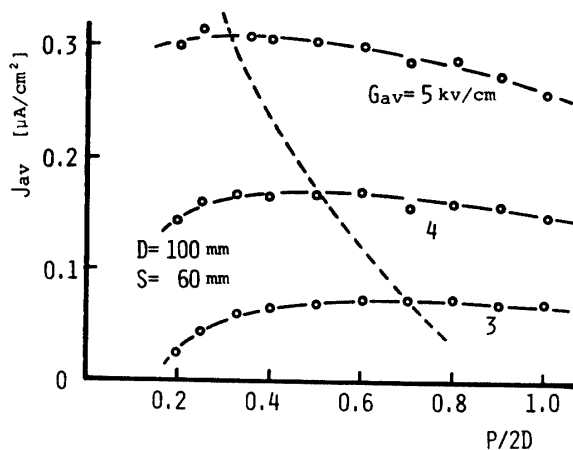


Fig.15.  $J_{av}$ - $P/2D$  characteristics

#### 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、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  $G_{av}=5\text{kv/cm}$  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2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、針付ロッド型放電極をもつ EP の集じん電極上でのコロナ電流分布から、放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. 針付ロッド型放電極をもつ EP の放電特性は線放電極よりも針放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、針直下を中心に楕円状に分布する。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、逆に狭くなっ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。
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  $60\text{mm}$ 、ロッド間隔が  $60\text{mm}$  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。

**謝辞** 本報告について、御指導ならびに御支援いただいた増田教授（東大・工）、赤崎教授（九大・工）、梶崎教授（山口大・工）、加屋野教授（山口大・理）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) 例えば、竹中智彦、川崎元之、足立宜良：山口大学工学部研究報告、29, 2, 233 (1979)
- 2) K. Hashimoto, T. Adachi and M. Kawasaki, Inter. Workshop El. Diel., 11BP10 (1978)

- 3) 足立宜良：電気学会誌，**90**, 4, 710 (1970) 719
- 4) S. Masuda and A. Mizuno: J. Electrostatics, **2**, 375 (1977)
- 5) 増田閃一：電気学会誌，**80**, 1482 (1960)
- 6) 足立宜良：電気学会論文誌，**93-B**, 273 (1973)
- 7) 増田閃一， 新岡正樹：昭和49年電気学会全国大会， No. 8) 足立宜良， 増田閃一， 阿久津顕右：電気学会論文誌， **97-B**, 259 (1977)
- 9) 橋本清隆， 足立宜良：静電気とその産業技術， 東京電気大学出版局 (1971) p.86

(昭和54年10月15日 受理)