

論 文

線対平行平板電極におけるコロナ放電特性の計算と測定

大久保 利一*, 川崎 元之**, 野本 幸治*, 足立 宜良*

(1983年9月30日受理)

Comparisons between Calculation and Measurement of Corona Discharge Characteristics for Wire-to-parallel Plate Electrode

T. OHKUBO,* M. KAWASAKI,** Y. NOMOTO* and T. ADACHI*

(Received September 30, 1983)

Corona current density, electric field and ion charge density in electrostatic precipitator(EP), are closely related to the abnormal phenomena, such as back discharge and particle reentrainment. Therefore, the measurement and calculation of corona discharging field are very important to investigate operating characteristics of EP. The calculated results by Sarma *et al.* in which Deutsch's assumption is used showed a very good agreement with experimental ones for DC transmission lines in a line-to-plane geometry. In this paper, this calculation method is applied to the electric field calculation of wire-to-parallel plate type EP in which average electric field strength is 2~4 kV/cm and the parallel plate spacing is 20 cm. The electrostatic fields without space charge are calculated by using charge simulation method. The measured corona onset voltage, corona current and corona current density on the plate electrode are compared with the calculated results. As a result, it is found that the method is applicable to the electric field calculation in wire-to-parallel plate type EP and the corona current density distributions on the plate electrode follow the similarity law: the normalized distributions are independent of wire diameter and applied voltage.

1. まえがき

電気集じん装置（以下 EP と省略）の集じん率^{1,2)}に關係する要素は、ダストやガスの化学的条件、ガス流速や流れのパターン³⁾などの流体力学的条件、イオン流分布や電界分布などの電気的条件、装置構造や寸法などの幾何学的条件などで、これらは相互に複雑に関連している。したがって、集じん率を正確に予測計算して、装置を設計することはむずかしく、これまでの多くの研究にもかかわらず経験にたよっている面が非常に多いのが現状である。集じん率の予測計算ならびに装置改良による集じん率の向上などの目的のために、これらの要因のなかで、ダスト粒子の荷電ならびに粒子に作用するクーロン力に關係が深い EP 内の絶縁空間のコロナ電流密度分

布や電界分布などの測定および解析はとくに重要である。

これまでに、針対平板電極において、絶縁空間のコロナ電流密度分布の測定結果と、ポアソンの式、電流連続の式の差分法による解析とを比較検討した結果が報告されている⁴⁻⁶⁾。これらの計算では、放電極近傍のコロナ放電領域の取扱い方や境界条件に種々の工夫がされているが、計算のなかには実験による電流値を必要とし、また結果として得られた数値解にもかなりの誤差が含まれているようである。

一方、直流送電線対大地におけるコロナ損の計算において、Sarma ら⁷⁾は Felici^{8,9)}の解法に基づいた数値計算を行ない、実測値と計算値のよい一致を得ている。最近、原ら^{10,11)}は単極性線対平板電極形状において平板電極上のコロナ電流密度分布と電界強度分布の測定結果と Sarma らのモデルによる計算結果との比較検討を行なっている。

本論文では、平行平板間隔 20 cm、平均電界強度 2~4 kV/cm の線対平行平板形 EP 内の電界解析に Sarma らのモデルを適用し¹²⁾、コロナ開始電圧、コロナ電流および平板電極上のコロナ電流密度について計算を行な

* 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

** 西日本工業大学電気工学科 (800-03 福岡県京都郡苅田町新津 1633)
Department of Electrical Engineering, Nishinippon Institute of Technology, 1633, Aratsu, Kanda-machi, Miyako-gun, Fukuoka, 800-03 Japan

い、これらの結果と測定値との比較検討を行なった。ただし、静電界は解析解が容易に求められない電極配置に対しても Sarma らの手法が適用できるように代用電荷法¹³⁾を使って計算した。また、実測値と計算値の検討に基づき、平板電極上のコロナ電流密度分布と電界強度分布の相似則および空間の電界分布等について考察を行なった。実験は静止大気中で、実用 EP を考慮して負極性の直流高電圧を用いて行なった。

2. 実験装置と測定方法

実験装置の概略図を図 1 に示す。EP の基礎的特性を次節に述べる数値解析と比較するため、放電線は 1 本だけを用い、0.5 mm から 1.48 mm までの 4 種類の直径のステンレスワイヤを用いて実験を行なった。実験の再現性をよくし、コロナ開始電圧を精度高く測定するために、放電線を十分加熱して、伸張したあと表面を液体研磨剤でみがき、さらにアセトンで表面の油分を取り除いた。また、放電線に張力を加えて、放電線振動がほとんど目視されないようにした。放電線の直径は上記の処理を行なった後、マイクロメータで 5 回測定し、その平均値を放電線の直径として、計算に用いた。

集じん極は、縁効果対策¹⁴⁾を施した平板電極 (65 × 70 cm) を平行に設置し、その平板間隔 $2D$ は電源の最高電圧ならびに実用 EP を考慮して 20 cm 一定とした。下側平板電極は、図 2 に示すように、直径 $5.5 \text{ mm} \phi$ の穴に直径 $5 \text{ mm} \phi$ のコロナ電流密度測定用の円筒プローブを絶縁して、中心間隔 6 mm で 109 個埋設した基板とガード電極からできている。プローブは、放電線に対して平行方向と垂直方向のコロナ電流密度が測定できるよう十字型に配置しており、それぞれの方向とも 32.4 cm にわたって測定可能である。

コロナ電流密度はプローブに流れるコロナ電流を微小

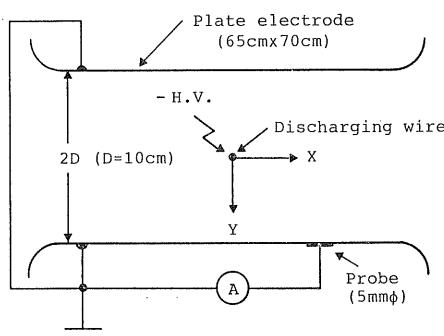


図 1 線対平行平板電極の実験装置の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for wire-to-parallel plate electrode.

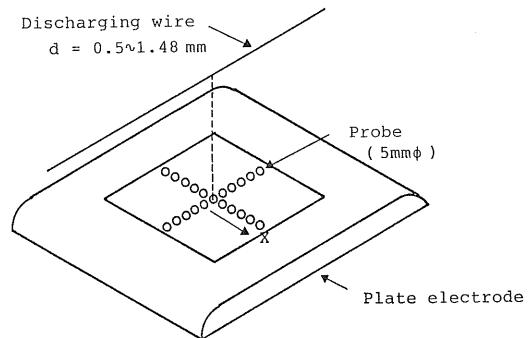


図 2 コロナ電流密度測定プローブの配置図

Fig. 2 Arrangement diagram of corona current density measuring probe.

電流計 (YHP 4304B) で測定し、実効プローブ面積 (0.216 cm^2) で割って算出した。しかし、負コロナ放電であるため、放電線上のコロナ輝点は点在し、時間的にも移動する。そのため、平板電極上のコロナ電流密度は放電線に沿ってかなりの変動がある。そこで、放電線直下のコロナ電流密度 J_p はとくに重要な値 (図 5, 6 参照) なので、放電線に平行な 37 個のプローブに流れるコロナ電流を平均して求めた。また、他の位置のコロナ電流密度の値は 3 回の実験の測定値を平均して求めた。

本実験においては、上側平板電極に流れる電流波形をオシロスコープで観測し、トリニティルパルスの発生時の印加電圧をコロナ開始電圧とする方法¹⁵⁾により、コロナ開始電圧を測定した。

3. EP 内の電界計算法

EP 内の電界計算の基礎方程式として次に示す、ポアソンの式、電流連続の式、電流密度の式が一般によく使われる。

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

$$J = \rho \mu E \quad (3)$$

ここで、 ρ はイオンの電荷密度 (C/m^3)、 ϵ_0 は真空の誘電率 (F/m)、 E は電界 (V/m)、 J はコロナ電流密度 (A/m^2)、 μ はイオンの移動度 ($m^2/V \cdot s$) である。これらの式の解析は非線形の連立偏微分方程式を解くことになり、数値計算の手順やコロナ電離域の取扱い方などの境界条件の設定の仕方に工夫があり、精度のよい計算がむずかしい。Sarma らは直流送電線のコロナ損の計算において、次の仮定を用いて、(1)～(3)式を空間電荷がない場合の静電界の電気力線に沿っての連立常微分方程式に変換した式を解析して、数値計算を行なった。そ

これらの仮定は

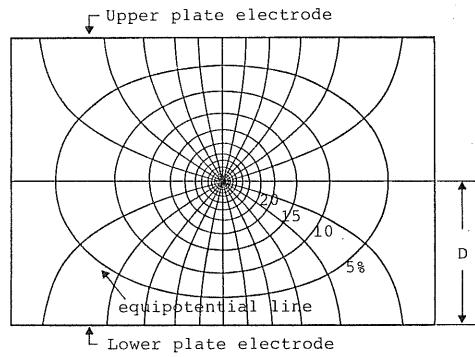
- (1) コロナ電流による空間電荷によって空間の電界の方向は影響を受けず、電界の大きさのみが変わる。
- (2) コロナ開始電圧以上では、放電線表面の電界強度はコロナ開始電界強度一定に保たれる。
- (3) イオンの拡散は無視できる。
- (4) 移動度 μ は電界強度によらず一定である。
- (5) 電離域の大きさは無視できる。

であり、仮定(1)が近似的に成り立つような電極配置の電界計算に適している。

Sarma らの論文では空間電荷のない場合の静電界として解析解を用いて、積分の形で数値計算が行なわれている。しかし、本論文では解析解が求まらない電極配置に対しても計算が可能なように、静電界を代用電荷法を使って求めて、精度のよい計算方法の開発が進んでいる連立常微分方程式の形で数値計算を行なった。図 1 の電極配置に対して、放電線を24個の輪郭点で、上側平板を有効長 L を1 m として、101個の輪郭点で近似した。放電線と平板電極の距離 D が 10 cm、放電線直径 d が 0.5 mm の場合の静電界の分布の一例を図 3 に示す。この図には計算を行なった領域の一部しか図示していないが、放電線からのほとんどの電気力線は平板電極において、放電線直下から $1.5D$ の範囲内に到達している。また、放電線近傍では等電位線が非常に密になっている。このため、空間電荷のない場合の静電界の電気力線に沿っての連立常微分方程式の計算は、キザミ幅および次数制御付きのアダムス法¹⁶⁾を用いて行なった。仮定(2)のコロナ開始電界強度 E_{on} は、Peek の式¹⁷⁾と同形の次式を用いた¹⁸⁾。

$$E_{on} = 31.028\delta + 9.54\sqrt{\delta/r_0} \quad (\text{kV/cm}) \quad (4)$$

ここで、 r_0 は放電線半径 (cm) で、 δ は 760 Torr, 25°C の空気に対する相対空気密度である。負イオンの移動度 μ は $1.9 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を用いた。計算は九州大学大型計算機 M200 を使用して行なった。



D=10 cm, d=0.5 mm, L=100 cm

図 3 線対平行平板電極の静電界の計算例

Fig. 3 Calculated electrostatic field for wire-to-parallel plate electrode by charge simulation method.

4. 実験結果と計算結果の比較検討

4.1 コロナ放電特性

コロナ開始電圧、放電線直下の平板電極上のコロナ電流密度 J_p およびコロナ電流-電圧特性の基礎的なコロナ放電特性について、放電線の直径をパラメータにして、実験と計算を行ない比較検討する。表 1 に、(4)式から得られたコロナ開始電界強度、電界計算から求めたコロナ開始電圧ならびにコロナ開始電圧の測定値のそれぞれの値を示す。コロナ開始電圧の測定値は 3 回の測定の平均値をとって算出した。コロナ開始電圧の測定値と計算値はよく一致しており、代用電荷法による電界計算と(4)式の E_{on} を用いることによってコロナ開始電圧が計算できることがわかった。ただし、放電線の直径が大きくてコロナ開始電圧が高いと実験回路の放電線以外の場所でもコロナが発生しやすく、できるだけ装置の構造や操作に注意を払ったが、計算値よりも実験値のほうがやや低く測定される傾向となった。

コロナ電流-電圧特性の測定値と計算値を、 d をパラメータにして、図 4 に示す。実用 EP に用いられる平均電界強度 (2~4 kV/cm) の範囲内で計算値と測定値は

表 1 コロナ開始電圧の計算値と実験値の比較

Table 1 Comparison between the measured and calculated corona onset voltage with diameter of discharging wire as a parameter.

Diameter of the discharging wire (mm)	Corona onset voltage (kV)		Corona onset electric field strength (kV/cm)
	Measurement	Calculation	
0.50	14.1	14.2	91.36
0.71	17.0	17.0	81.40
1.09	21.4	21.4	71.89
1.48	24.8	25.2	66.25

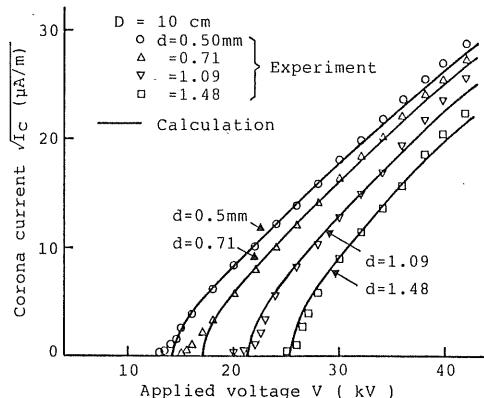


図 4 実測値と計算値のコロナ放電特性比較

Fig. 4 Comparison between the measured and calculated corona discharge characteristics.

10% 誤差内で一致している。コロナ電流の計算値は放電線表面の電流密度を数値積分して算出した。この計算は Deutsch の仮定を用いているので、 V が大きい場合の $\theta=90^\circ$ 方向の計算値は誤差が大きいと考えられ、図

4 で V が大きい場合の測定値との差が大きくなるのはこの仮定が最も大きく影響していると考えられる。

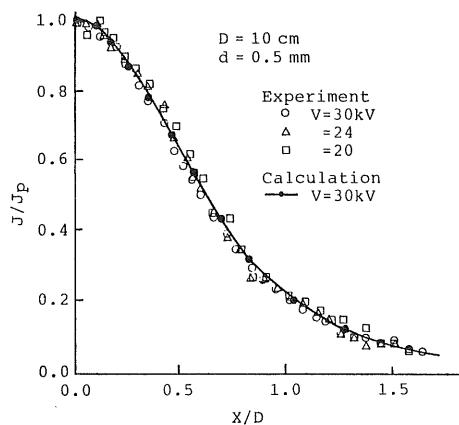
印加電圧 V が 30 kV と 42 kV の場合の放電線直下のコロナ電流密度 J_p の測定値と計算値の比較を表 2 に示す。放電線の直径が 0.5~1.48 mm において、両者は 10% 程度の誤差内で一致する。印加電圧がコロナ開始電圧より十分大きい場合、 J_p の平均値は安定に測定され、再現性もあった。しかし、印加電圧がコロナ開始電圧よりも大きくなる場合は、2. 節の測定方法のところで述べたように、放電線直下のコロナ電流密度の測定値を平均してもばらつきが大きく、安定した測定ができなかった。

この計算方法は、仮定(1)~(5)のような多くの仮定の下に解析しているにもかかわらず、コロナ開始電圧、コロナ電流-電圧特性および放電線直下の平板電極上のコロナ電流密度の計算値と測定値はよい一致を示すことがわかった。したがって、線対平板電極配置の直流送電線に対して用いられているこの計算方法は $2D=20$ cm、平均電界強度 $2\sim 4$ kV の線対平行平板型 EP に対しても

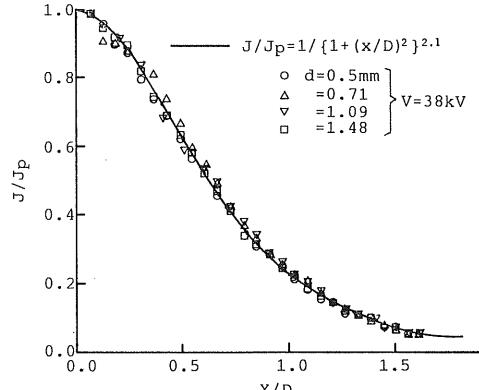
表 2 平板電極上のコロナ電流密度の最大値 J_p の計算値と測定値の比較

Table 2 Comparison between the calculated and measured peak corona current density J_p on the plate electrode.

Diameter of the discharging wire (mm)	$V=30$ kV		$V=42$ kV	
	J_p (calc.) (nA/cm ²)	J_p (meas.)	J_p (calc.) (nA/cm ²)	J_p (meas.)
0.50	101.6	101.7	257.4	287.1
0.71	83.5	81.2	234.9	249.0
1.09	54.8	51.1	195.4	197.3
1.48	27.8	31.2	157.3	166.0



(a) Applied voltage as a parameter



(b) Diameter as a parameter

図 5 規格化コロナ電流密度分布の測定値

Fig. 5 Measured distributions of normalized corona current density.

適用可能であると考えられる。

4.2 平板電極上のコロナ電流密度分布の相似則

$d=0.5\text{ mm}$ の場合の平板電極上の規格化コロナ電流密度分布を図5(a)に示す。 $V=18\text{ kV}$ 以下のコロナ電流密度分布は、コロナ放電が微弱なため、電流計の指示の変動が激しく、3回の測定を平均しても、図の規格化コロナ電流密度分布に合わず、かなりばらついた。図に示した $V=20\text{ kV}$ 以上の場合には電流計の指示も安定し、実験の再現性があったので、3回の測定値を平均して示した。また、図中に $V=30\text{ kV}$ の場合の規格化コロナ電流密度分布の計算値を実線で示した。

$V=38\text{ kV}$ の場合の平板電極上の規格化コロナ電流密度分布の測定値を d をパラメータにして図5(b)に示す。印加電圧の大きいコロナ放電が安定した領域の規格化コロナ電流密度分布は放電線の直径に依存せずにほぼ一致した。これらの図および他の実験結果から、コロナ放電が活発な場合の規格化コロナ電流密度分布は放電線の直径や印加電圧に依存せずに同一の分布をするという相似則が成り立つことが得られた。そして、この曲線の実験式は次式のように表わされる。

$$J/J_p = 1/\{1 + (X/D)^2\}^{2.1} \quad (5)$$

この式は直流送電線の線対平板電極系における実験式^{10,11)}に類似しているが指指数項が少し異なっている。(5)式の曲線を図5(b)中に実線で示した。

$d=1.09\text{ mm}$ の場合の平板電極上の規格化コロナ電流密度分布の計算値を、 V をパラメータにして図6に示す。図の実線は(5)式である。この図および他のコロナ電流密度の計算結果を検討した結果、規格化コロナ電流密度分布の計算値も、印加電圧が高いときは、印加電圧および放電線の直径に依存せずに(5)式でよく近似されることがわかった。以上のことから、負コロナ放電を使

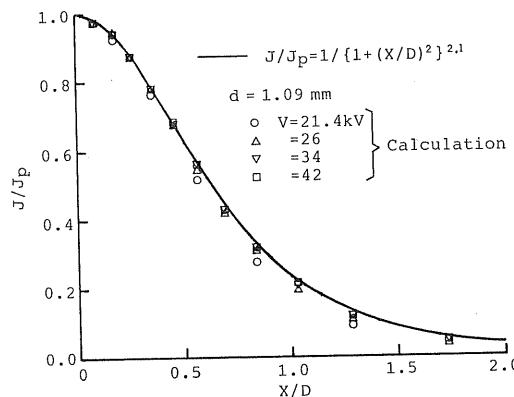


図6 規格化コロナ電流密度分布の計算値

Fig. 6 Calculated distributions of normalized corona current density.

用する平行平板間隔 $2D=20\text{ cm}$ のEPにおける平板電極上のコロナ電流密度分布をこの論文の計算方法で計算が可能であり、印加電圧が高くコロナ放電が安定している場合のコロナ電流密度分布には(5)式のような相似則が成り立つことがわかる。

4.3 電界分布

平板間隔が $20\sim25\text{ cm}$ 、平均電界強度が $2\sim4\text{ kV/cm}$ 程度であるEPにおける空間の電界分布または平板電極上の電界分布の測定はむずかしく、詳しい測定はしなかった。しかし、前述のように、コロナ放電特性およびコロナ電流密度分布の測定値と計算値がよい一致を示していること、また、直流送電線に対してSarmaらの計算方法による平板電極上の電界分布が測定値とよく一致していることから¹⁰⁾、ここに用いた計算方法による電界分布は信頼性があり、EP内の電界分布の検討に十分役立つと考えられる。本節では、電界計算に基づく電界分布およびそれに関連する物理量について述べる。

$d=0.5\text{ mm}$ の場合の放電線直下方向の電位分布を図7に示す。コロナ開始電圧以上の電位分布は負イオンの空間電荷効果により、静電界に比べて一様になり、放電線近傍ではその傾きは減少し、平板電極近傍ではその傾きは増大している。そこで、コロナ放電が発生していないとして計算した放電線直下方向の電界強度 $E_1(Y/D)$ とコロナ放電による空間電荷効果を考慮した場合の電界強度 $E(Y/D)$ の比を図8に示す。印加電圧が大きくなると空間電荷効果によってこの比が変化し、とくに平板電極近傍でその変化が大きい。 $d=0.5\text{ mm}$, $V=34\text{ kV}$ の場合、放電線直下の平板電極上の電界は空間電荷のない静電界の約4倍にもなっている。

放電線直下の平板電極上の電界強度 E_p と印加電圧の関係を図9に示す。一例として、図中に○印で示す実験値は、平板電極上に絶縁して埋設された直径 9 mm , ギ

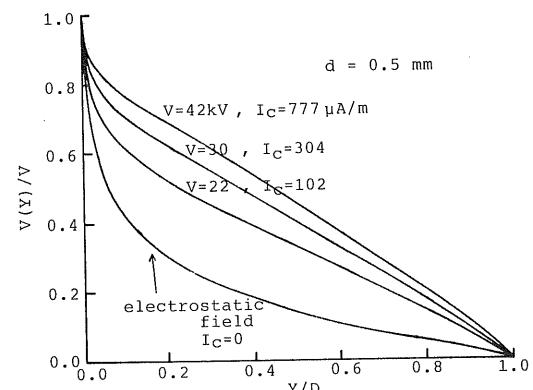


図7 Y軸上の電位分布

Fig. 7 Potential distributions on the Y axis.

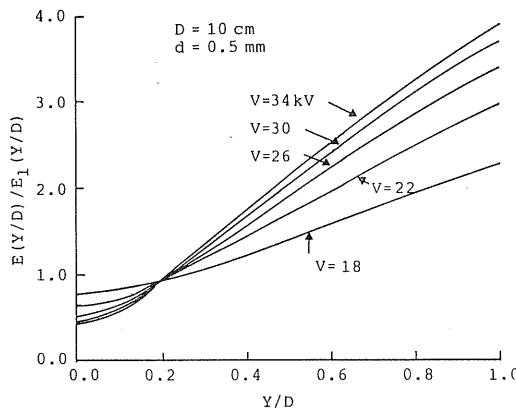
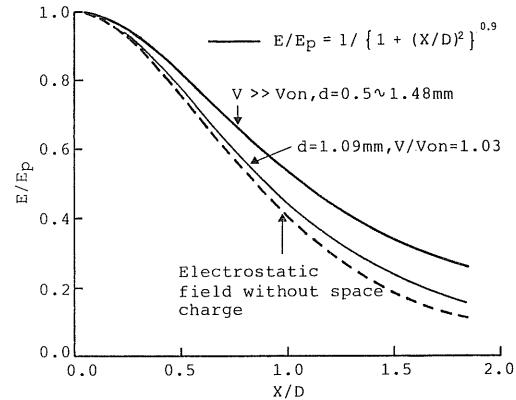
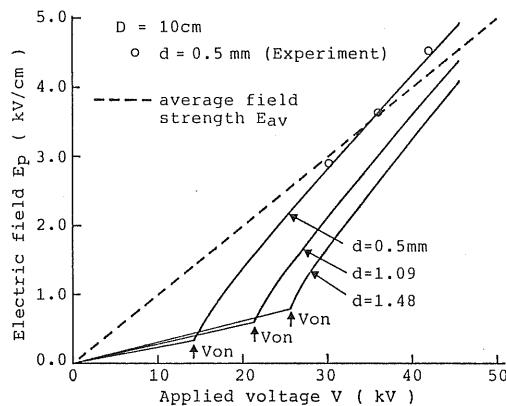
図 8 Y/D と $E(Y/D)/E_1(Y/D)$ の関係 (図 1 参照)Fig. 8 Relations between Y/D and $E(Y/D)/E_1(Y/D)$ (See Fig. 1).

図 10 平板電極上の規格化電界強度分布の計算値

Fig. 10 Calculated normalized electric field strength on the plate electrode.

図 9 放電線直下の平板電極上の電界強度と印加電圧の関係
Fig. 9 Relations between electric field strength on the plate electrode under the discharging wire and applied voltage.

ヤップ 0.5 mm の円形プローブと平板電極間にバイアス電圧を印加する方法^{19,20}を用いて得られたものであり、理論値と実験値は非常によい一致を示している。コロナ開始電圧以上の E_p は負イオンの空間電荷効果で静電界に比べて高くなり、電圧が大きくなると平均電界強度 $E_{av}(V/D)$ を超えることがある。

E_p で規格化した平板電極上の電界強度分布の計算値を図 10 に示す。 V が V_{on} に対して十分大きい場合の平板電極上の規格化電界強度分布は、図中の実線で示すように印加電圧および放電線の直径によらず同一の分布をして、その曲線は次式で近似される。

$$E/E_p = 1 / \{ 1 + (X/D)^2 \}^{0.9} \quad (6)$$

電界強度に対しても、直流送電線に対する近似式¹⁰に類似した式で表わされる。図中の静電界の分布と比較す

ると空間電荷のある場合の電界強度分布は広がっている。また、印加電圧が低く、コロナ開始電圧程度のとき(図中の細線)は(6)式からずれ静電界分布に近づいている。以上のことより、印加電圧がコロナ開始電圧に比べて十分高い場合、平板電極上の規格化電界強度分布に対しても、コロナ電流密度分布と同様に相似則が成り立つことがわかった。

放電線直下の平板電極上の電荷密度 ρ_p の計算値と印加電圧の関係を図 11 に示す。図 9 に示すように、 V が V_{on} より十分大きい場合の E_p は V にほぼ比例しているが、 ρ_p も同様の傾向を示している。 J と E は印加電圧と放電線の直径に対して相似則が成り立つので、 $J = \rho \mu E$ から平板電極上の電荷密度 ρ についても同様な相似則が成り立つと考えられる。

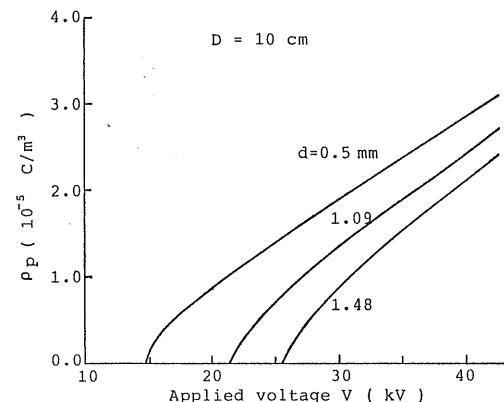


図 11 放電線直下の平板電極上の電荷密度と印加電圧の関係

Fig. 11 Relations between charge density on the plate electrode under the discharging wire and applied voltage.

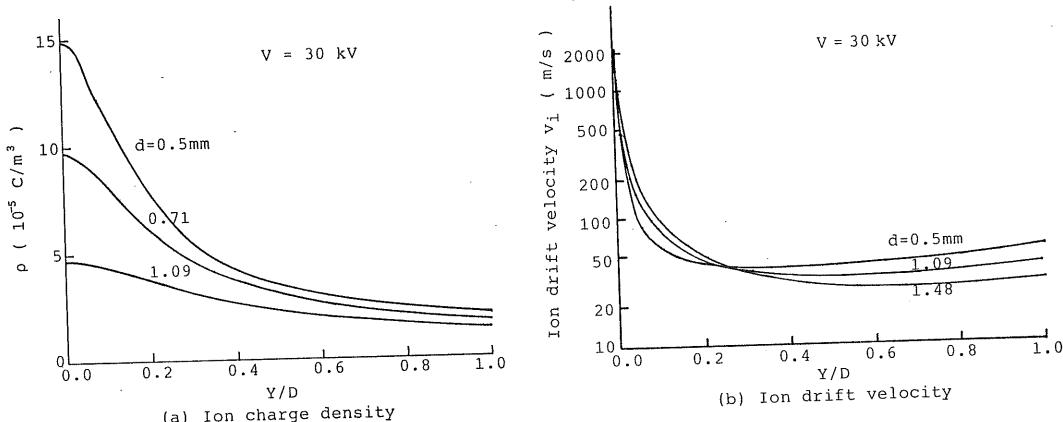


図 12 Y 軸上の電荷密度と負イオンの移動速度

Fig. 12 Charge density and drift velocity of negative ion on the Y axis.

$V=30\text{ kV}$ の場合の放電線直下方向の電荷密度 ρ と負イオンの移動速度 v_i をそれぞれ図 12 (a), (b) に示す。 ρ は放電線から平板電極へ単調に減少しているが、 v_i は放電線と平板電極の間で最小値をとる。この場合、 v_i の最小値は 30 m/s 程度であるので、EP 内の代表的な風速 1 m/s、イオン風速の数 m/s⁵ の効果の負イオンの分布に与える影響は工学的には小さいと考えられる。

5. ま と め

直流送電線対大地におけるイオン流場の計算に用いられる、Sarma らの計算方法を線対平行平板型の EP 内の電界計算に使用し、実験値と比較した。その結果をまとめると以下のようになる。

(1) 線対平行平板型 EP におけるコロナ開始電圧、コロナ放電特性およびコロナ電流密度分布の測定値は、代用電荷法による静電界を用いた Sarma の計算法による計算値とよく一致した。

(2) 規格化コロナ電流密度分布は、印加電圧がコロナ開始電圧より十分高く、コロナ放電が活発な場合には、印加電圧および放電線の半径によらず同一の形状を示すという相似則が成り立つ。

(3) 平板電極上の電界強度は静電界に比較して空間電荷の効果で大きく上昇し、また、規格化電界強度分布は印加電圧がコロナ開始電圧より十分高い場合には、印加電圧および放電線の半径によらず同一の形状となる計算結果が得られた。

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（九大工学部）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、高城実講師（西日本工大）ならびに本学の永瀬徳美君（大学院生）に感謝する。

参 考 文 献

- 1) W. Deutsch : Ann. Physik., 68 (1922) 335
- 2) 藤村謙祐、足立宜良：静電気学会誌, 6 (1982) 312
- 3) 藤村謙祐、大久保利一、足立宜良：静電気学会講演論文集'82, p. 24 (1982)
- 4) 増田閃一、新岡正樹：電気学会論文誌 A, 96 (1976) 411
- 5) 足立宜良、増田閃一、阿久津顕右：電気学会論文誌 A, 97 (1976) 37
- 6) 足立宜良、川崎元之：静電気学会誌, 2 (1978) 158
- 7) M.P. Sarma and W. Janischewskyj : IEEE Trans. Power Appar. Syst., PAS-88 (1969) 718
- 8) N.J. Felici : Direct Curr., September (1963) 252
- 9) N.J. Felici : ibid., October (1963) 278
- 10) 原 雅則、林 則行、汐月慶士、赤崎正則：電気学会論文誌 A, 101 (1981) 387
- 11) M. Hara, N. Hayashi, K. Shiotsuki and M. Akazaki : IEEE Trans. Power Appar. Syst., PAS-101 (1982) 803
- 12) 足立宜良、大久保利一：文部省特定研究「環境科学」報告集, R173-R34 (1982) 93
- 13) H. Steinbigler : Dissertation, Tech. Univ. München (1969)
- 14) 足立宜良、川崎元之、岸本勝美：静電気学会誌, 4 (1980) 44
- 15) 大久保利一、野本幸治、足立宜良：静電気学会誌（投稿中）
- 16) FACOM FORTRAN SSL II 使用手引書, p. 427, 富士通 (1980)
- 17) H.J. White : *Industrial Electrostatic Precipitation*, p. 91, Addison-Wesley, Massachusetts (1963)
- 18) 静電気学会編：静電気ハンドブック, p. 486, オーム社 (1981)
- 19) O.J. Tassicker : Proc. IEE, 121 (1974) 213
- 20) E.O. Selim and R.T. Waters : IEEE Trans. Ind. Appl., IA-16 (1980) 803