

論 文

線対平板電極における縁効果の実験的検討

足立宜良*, 川崎元之**, 岸本勝美***

(1979年9月7日受理)

Experimental Discussion on the Edge Effect of Wire-Plate Electrode

T. ADACHI,* M. KAWASAKI,** and K. KISHIMOTO***

(Received September 7, 1979)

The breaking of discharge electrode that makes the operation of electrostatic precipitator (EP) impossible is considered to be the material fatigue of electrode caused by the excessive sparkover on discharge electrode opposite the edge part of collecting plate electrode. In this paper, the optimum countermeasure for edge effect has been determined with taking notice of the geometric structure of electrodes. As for the discussion of the edge effect, the corona current distributions on collecting and discharge electrode have been measured by the use of a divided electrode and a particular discharge electrode. Schlieren observations of corona discharge phenomena in the edge area have completed the edge effect measurements. The experimental results indicate that the edge effect reduces as the geometric coefficient D/R (D is the space distance between active and passive electrode and R is the radius of collecting electrode with edge) and the average field strength decreases. It is concluded that the countermeasure for the edge effect is sufficient if the geometric conditions, D/R is less than 1, are satisfied.

1. まえがき

電気集じん装置（以下 EP と略す）は他の集じん装置に比べて微細な粒子まで集じん可能であり、集じん効率が高く、運転費が安い等の特徴を持っているが、稼動中に生じる種々の障害も見逃がせない。その一つとして放電線断線があげられる。放電線断線は、放電線振動^{1,2)}による金属疲労に基づくもの、および集じん電極縁端部に対応する放電線上でのスパーク過多による線の損傷に基づくものの二つが原因と考えられている。

EP の集じん電極の縁端部は中央部に比べ電界が集中しやすく、そのため局部的にスパークも発生しやすくな

る。この現象を EP の縁効果（edge effect）現象と呼び、この効果をなくし、局部スパークの発生を抑制することを縁効果対策と呼ぶ。これまでに、集じん効率を向上させるため、集じん電極の形状についての研究³⁾は行なわれているが、最適な縁効果対策を行なった電極構造ならびに配置については十分に検討されていない。

本報告は平板型 EP における縁端部の形状について、電界の集中の緩和ならびに局部スパークの抑制を目的としたものである。実験用の EP としては、線対平板型模擬 EP を使用し、はじめに縁端部における電界の様子を調べるために、分割電極により電流分布を測定して、縁端部の電界パターンについて推定した。その結果、集じん電極の縁端部を適当な曲面にすることで、この電界の集中が緩和できると考えられたので、静電界における近似ロゴウスキ電極⁴⁾を参考にし、電流密度を基本にして縁効果が起きない適切な電極構造を求めた。また、シリーレン装置によりイオン風の挙動も観察し、この現象の確認をした。

ところで、放電線に対する要求としては、機械的な強度および軽量化などがあり、その対策として炭素繊維を素材とした放電線を使用すると、スパークに弱いという欠点がある。そこで、ステンレス線の場合に得た基礎知識をもとに、炭素繊維放電線のスパーク対策を実験的に考察した。

* 山口大学工学部電気工学科 (755 宇部市常盤台)
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube 755, Japan

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

*** 中国電力株式会社水島発電所運転課 (712 倉敷市潮通 1-1); 元山口大学大学院電気工学専攻
Operational Section, Mizushima Power Station, The Chugoku Electric Power Co., Ltd., 1-1, Shiodori, Kurashiki 712, Japan

結果として、線対平板電極における縁効果が明らかになり、縁効果対策として幾何学的電極構造を決定することができた。なお、本実験はダストを含むガスを流していないため、ダストによる影響については考慮していない。また、実験はすべて静止大気中にて行ない、雰囲気条件は気温 25~32°C、湿度 61~90%、気圧 1,010~1,035 mb であった。

2. 平板電極における縁効果の基礎特性

線対平板電極における平板の縁効果現象を明らかにするために、平板上に分割電極を設け、縁端部での電流分布を測定して、電界の集中の様子を測定した。

2.1 実験装置

図 1 に実験装置(1)の概要を示す。分割電極は断面積、 $9 \times 9 \text{ mm}^2$ 、長さ 600 mm (この値は、図中の D の最大値 150 mm から決定した) の四角い鉄棒を平行に並べて平面状にしたものである。各鉄棒は厚さ 1 mm のペーク板で絶縁され、集じん電極上のコロナ電流分布測定用の分割電極かつ平板電極として用いた。放電線 (ステンレス線、直径 0.5 mm、長さ 1,000 mm) は、分割電極の分割方向と直角に配置した。また、電極間距離 D は 50~150 mm の実用 EP の範囲を用いた。なお、直流高電圧発生装置は、ネオントランジスタを用いた倍電圧整流回路であり、電流計は可動コイル型マイクロアンペア計で内部抵抗は約 10 kΩ である。また、1 μA 以下の微小電流は增幅付き電流計 (YEW type 2709、感度 0.2 mA/div、内部抵抗 1 kΩ) を用いて測定した。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 放電特性

実験装置の基礎特性である放電特性を図 2 に示す。図の縦軸は、縁効果の影響が出ていない分割電極に流れる放電線単位長さ当たりの電流の平方根である。コロナ開始電圧⁵⁾以上、すなわち印加電圧 V が約 20 kV 以上では、放電特性は次式のような直線関係で表わされる。

$$\sqrt{J_c} = aV + b \quad (1)$$

ただし、a, b は電極形状および雰囲気条件等に関する定数である。この直線の傾き a は、電極間距離 D が大きくなるにつれて小さくなる。また、図中に破線で示したように平均電界強度 E_{av} が一定のとき、電極間距離 D が大きくなるにつれ放電線単位長さ当たりの電流の平方根 $\sqrt{J_c}$ はいくらくらい大きくなっている。

2.2.2 縁効果現象

図 3 に縁から中心までの各分割平板電極 (分割数 30) に流れるコロナ電流 I_c を電流分布として捕え、その一例を示す (D=10 cm の場合)。電極の縁端部 ($X=0 \sim 10 \text{ cm}$ 近傍) における電流は急増しており、電界が集中し

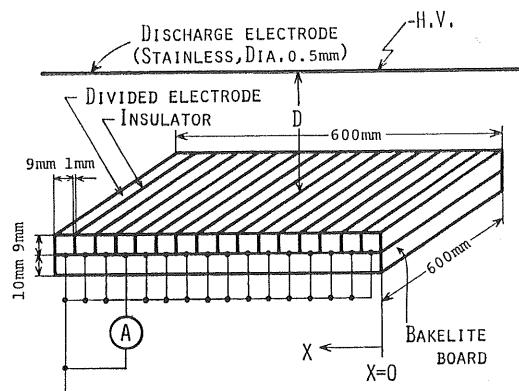


図 1 平板縁効果用実験装置 (1)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus (1) for the plate edge effect.

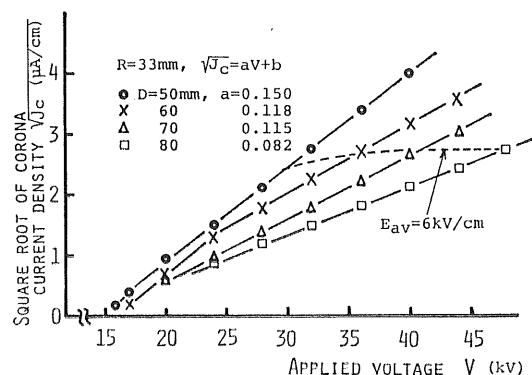


図 2 負コロナ放電特性

Fig. 2 Negative corona characteristics.

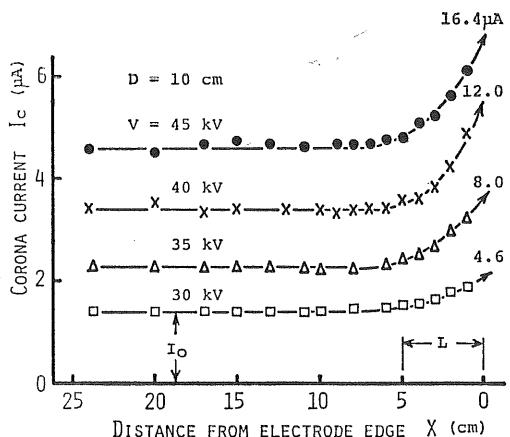


図 3 負コロナ電流分布

Fig. 3 Distribution of negative corona current.

たためと考えられる縁効果現象が現われはじめる。

縁効果の影響のない分割電極の電流の平均値 I_0 で、

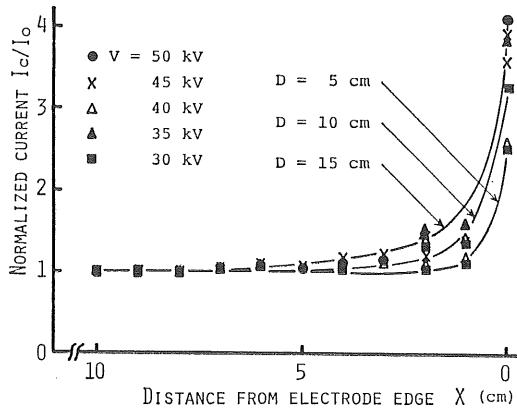


図4 規格化した負コロナ電流の分布

Fig. 4 Distribution of normalized negative corona current.

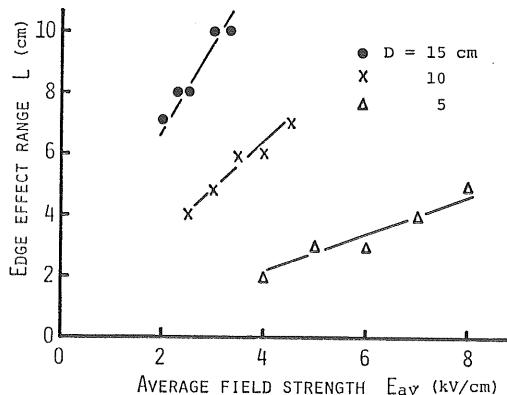


図5 縁効果領域の特性

Fig. 5 Characteristics of the edge effect range.

I_c を規格化した場合の規格化電流 (I_c/I_0) を図4に分布として示す。電極間距離 D が一定の場合、分割電極の同一位置における規格化電流 I_c/I_0 の値は、印加電圧 V にあまり影響されない。また、印加電圧 V が一定の場合、電極間距離 D を小さくするほど平均電界強度は大きくなる。そのとき、規格化電流 I_c/I_0 は減少している。したがって、縁効果の程度を示す I_c/I_0 は、平均電界強度もしくは印加電圧の影響より、電極の幾何学的形状および配置の影響のほうが多いと考えられる。

分割平板電極の縁端部から縁効果の影響が及ぶ位置までの距離を L (図3参照、以後、縁効果領域と呼ぶ) として、平均電界強度 E_{av} との関係を図5に示す。電極間距離 D が一定の場合、縁効果領域 L は平均電界強度 E_{av} にほぼ比例しており、電極間距離 D が小さくなるほど同一平均電界強度に対する縁効果の影響は減少する。

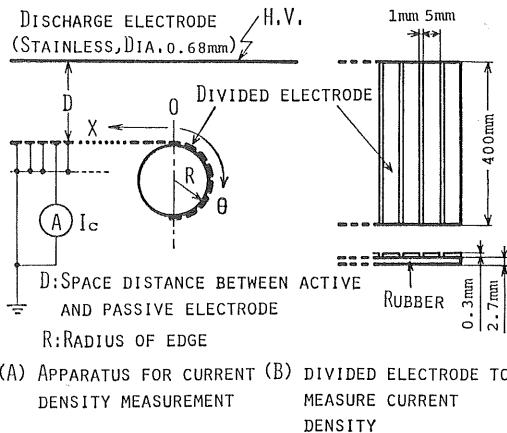


図6 平板縁効果対策等の実験装置(2)

Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus (2) for the countermeasure of plate edge effect.

これらの実験より、電極の幾何学的配置と平均電界強度が縁効果に影響を与えることが明らかになった。前者は主として規格化電流の値に影響を与え、後者は縁効果領域に影響を及ぼす傾向がある。全体的に見れば、電極間距離および平均電界強度が小さいほど縁効果の影響は小さくなる傾向にある。

3. 集じん電極の縁効果対策

前章で判明した結果をふまえて、集じん電極の縁端部に縁効果対策を行なった場合について考察する。

通常、縁効果対策としては次のような方法が考えられる。

- (1) 集じん電極の縁端部を適当な曲面にする。
- (2) 集じん電極の縁端部に絶縁物で丸味をつける。
- (3) 放電線実効長(集じん電極の長さ)以外の部分の放電線径を大きくするかまたは絶縁物で覆う¹⁷⁾。

以上のような方法は、装置の規模により適時経験的に定められているようである。

ここでは、縁効果対策として上記の(1)の方法に基づき、近似ロゴウスキ電極を参考にして、集じん電極の縁端部を半径 R の円に沿う曲面にし、その集じん電極縁端部半径 R と電極間距離 D を変化させて、縁効果をなくすための最適な電極の幾何学的配置について実験的に検討した。

3.1 実験装置

図6に実験装置(2)の概要を示す。ここでは、集じん電極の縁端部を曲面にするため、実験装置(1)で用いた四角い鉄棒の分割電極の代わりに薄いアルミ製の分割電極 ($5 \times 400 \text{ mm}^2$) を使用し、1 mm 間隔でゴム板に取り付

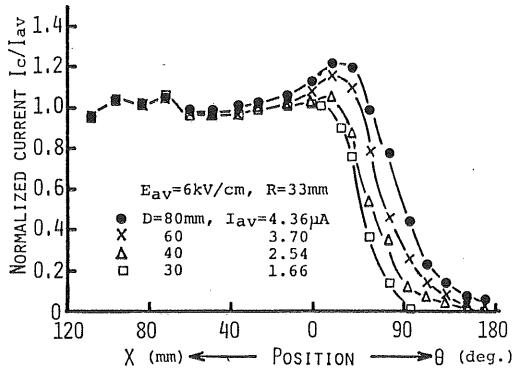


図7 規格化した正コロナ電流の分布（図6参照）

Fig. 7 Distribution of normalized positive corona current (see Fig. 6 A).

け、電極上のコロナ電流分布を測定した。なお、放電線はステンレス線で直径 0.68 mm、また電極間距離 D は電源の関係上 30~80 mm、集じん電極縁端部半径 R は 27.5~74 mm の範囲内で変化させた。電源および電流計等は実験装置(1)と同様である。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 電流分布

図7、8に各分割電極に流れる正、負コロナ電流の規格化したものと示す。ただし規格化は縁効果の影響のない集じん電極平板部の各分割電極に流入する電流の平均値 I_{av} によって行なっている。また、このときの平均電界強度 E_{av} は 6 kV/cm 一定とした。図7の正コロナ放電の場合、電極間距離 D が大きくなるほど、規格化電流のピーク値は増加する。また、同一の縁端部角度 θ における規格化電流は、電極間距離 D が大きくなるほど大きくなっている。このように電極間距離 D を大きくするほど、集じん電極縁端部の電流は平板部に比較して大きくなっている。このとき、縁効果による電界の乱れは、図からも明らかなように平板の曲がりはじめの点を原点として、 X 方向に約 30~40 mm の位置まで及んでいる。一方、負コロナ放電の場合は、図8より正コロナ放電に比べて電流値の変動が大きいものの、全体的には電極間距離 D が大きくなるにつれて、縁効果が顕著になる傾向は一致する。また、前章の結果と同様、平均電界強度 E_{av} は縁端部の電界集中に影響を与えない。

3.2.2 幾何学的形状の影響

正コロナ放電の規格化電流のピーク値の位置を図9に示す。電極間距離 D が 60~80 mm では、ピークは縁端部の角度 θ が 20~30° の範囲にあるが、電極間距離 D が小さくなるにつれて、ピークは角度の小さいほうへと

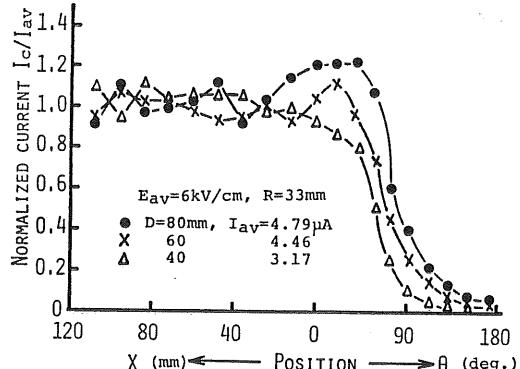


図8 規格化した負コロナ電流の分布（図6参照）

Fig. 8 Distribution of normalized negative corona current (see Fig. 6 A).

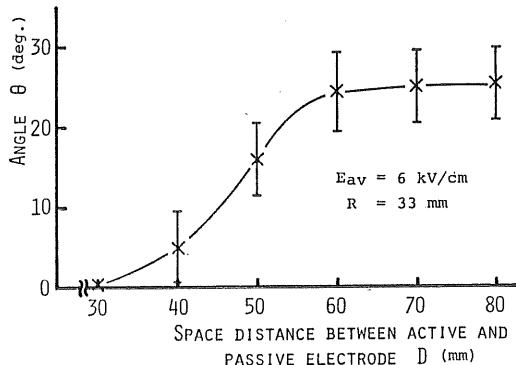


図9 規格化電流の最大値の位置

Fig. 9 Position of normalized peak current (positive corona).

移行し、縁端部への電界集中がなくなる。また、電極間距離 D が大きいほど、放電線上では集じん電極縁端部からより遠く離れた点までコロナ放電を行なっていると考えられる。

ところで、電極間距離 D の増加は相対的に集じん電極の縁端部半径 R の減少を意味する。よって、 D/R という幾何学的係数を導入し、これとそれぞれ独立に電極間距離 D と集じん電極縁端部半径 R を変化させた場合の縁端部領域の規格化電流のピーク値との相関を求めた。その結果を図10に示す。集じん電極平板領域のコロナ電流の変動の割合が約 7 % であることを考慮すると、縁端部の電界集中が柔らぎ、縁効果の影響が無視できる電極配置は、幾何学的係数 D/R が約 1 以下のときであることがわかる。

結果として、(1)幾何学的係数 D/R が約 1 以上では、 D/R と規格化電流のピーク値は相関関係が強く、(2)幾何学的係数 D/R が約 1 以下になるように電極配置を考

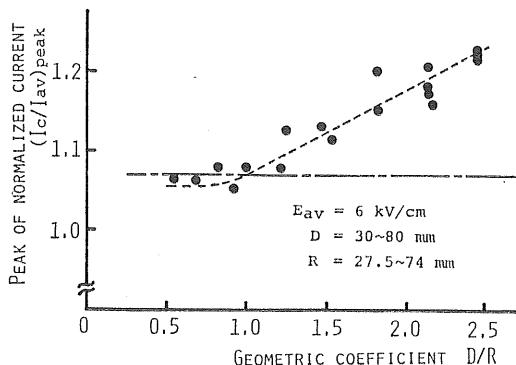
図 10 幾何学的係数 D/R と規格化電流最大値

Fig. 10 Schematic diagram between geometric coefficient D/R and normalized peak current $(I_c/I_{av})_{peak}$ (positive corona).

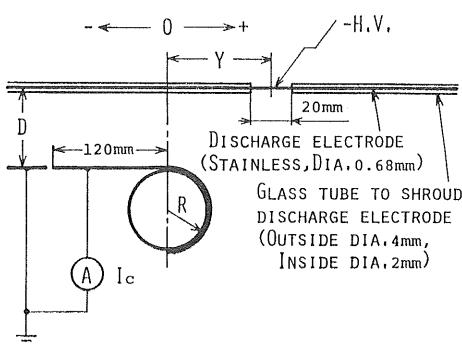


図 11 線縁効果用実験装置(3)

Fig. 11 Schematic diagram of experimental apparatus (3) for the wire edge effect.

慮すれば、実用的には縁効果が無視されることが明らかになった。

4. 放電線の縁端部特性

これまでの実験で、適切な集じん電極縁端部における幾何学的関係が定まったが、この状態での放電の様子をさらに詳しく知る必要がある。これまでには、電流密度を中心と考えてきたが、EP 内ではイオン風の挙動も無視できない⁶⁾。そこで、シュリーレン装置によりイオン風の挙動もあわせて調べ、縁効果対策の成果について検討した。

4.1 実験装置

図 11 に実験装置(3)の概要を示す。集じん電極は、図 6 の実験装置(2)と同様である。放電線上のコロナ電流分布は、ガラス管(外径 4 mm、内径 2 mm)で放電線を覆い、2 cm の間隙部分だけが放電を行なうようにして、その間隙部分を順次スライドさせ、集じん電極の縁端部

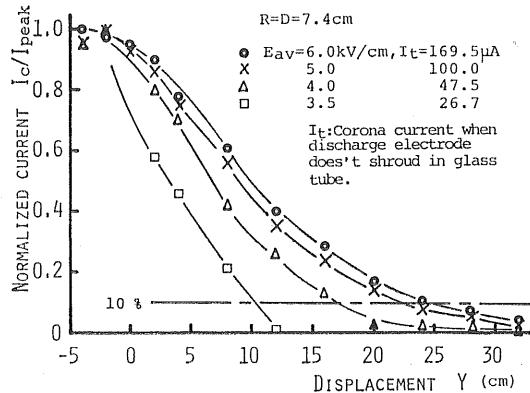


図 12 放電線上の負コロナ電流の規格化電流

Fig. 12 Distribution of normalized corona current on discharge electrode (negative corona).

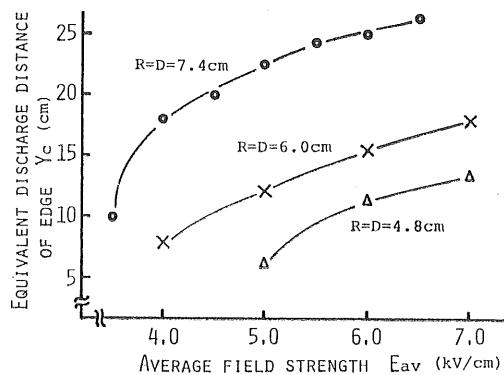


図 13 平均電界強度と端からの等価距離との関係(負コロナ)

Fig. 13 Correlation between average field strength and equivalent discharge distance from electrode edge (negative corona).

に流れ込む全電流を測定して求めた。また、放電電極を加熱し(ヒータ電流は約 5 A)、シュリーレン装置でイオン風の挙動を観察した。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 放電線上の電流分布

図 12 に平均電界強度 E_{av} をパラメータとした場合の放電線上の規格化電流分布を示す。平均電界強度 E_{av} が 4 kV/cm 以上になると、放電線上では集じん電極縁端部の曲がりはじめの直上を原点として、その点から約 30 cm 以上、すなわち電極間距離の約 4 倍以上の点までコロナ放電を行なっている。

次に放電線 Y 方向のコロナ放電状態を調べるために、図 12 よりコロナ電流がピーク値の 10% 以下となるまでの距離 Y_c (以後、等価縁端部放電距離と呼ぶ) を求めた。図 13 に平均電界強度 E_{av} と等価縁端部放電距離

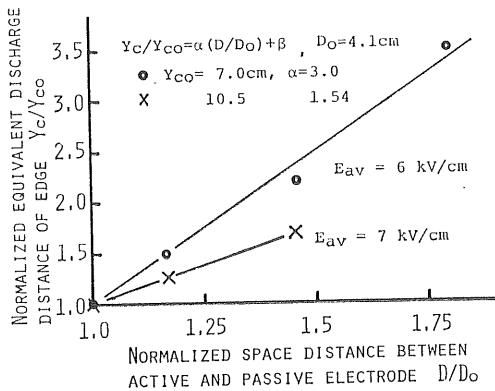


図 14 規格化 D/D_0 と Y_c/Y_{c0} の関係 (負コロナ)
Fig. 14 Correlation between normalized D/D_0 and Y_c/Y_{c0} (negative corona).

離 Y_c の関係を示す。平均電界強度 E_{av} が大きくなるにつれて、縁端部からより遠く離れた点までコロナ放電を行なっていると考えられる。

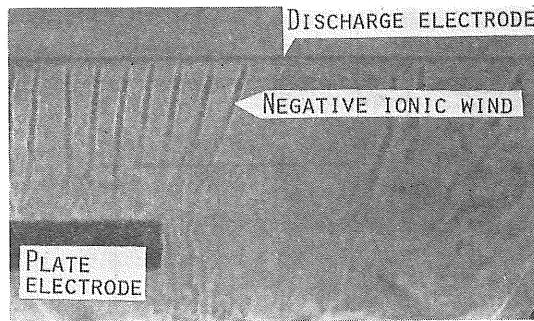
図 14 に、平均電界強度 E_{av} をパラメータとして、実験に使用した最小の電極間距離 D_0 および Y_{c0} で無次元化した場合の電極系の大きさと放電線縁端部の放電状態の関係を示す。無次元化した D/D_0 と Y_c/Y_{c0} の関係はほぼ直線となり、次式のように表わされる。

$$Y_c/Y_{c0} = \alpha(D/D_0) + \beta \quad (2)$$

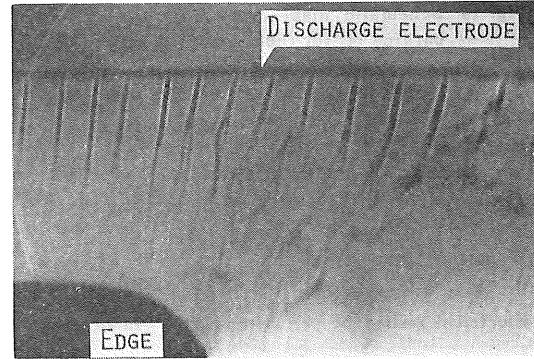
ここで、 α 、 β は電極形状による定数と考えられる。この直線の傾き α が 1 以上であることより、電極系を大きくすれば、等価縁端部放電距離 Y_c は電極系の大きさに比例した値以上になる。よって、 D/R が一定のとき、電極間距離 D の増加は相対的に放電線径の減少となり、それだけ縁端部からより遠く離れた点までコロナ放電を行なうものと考えられる。

4.2.2 シュリーレン写真によるイオン風の挙動

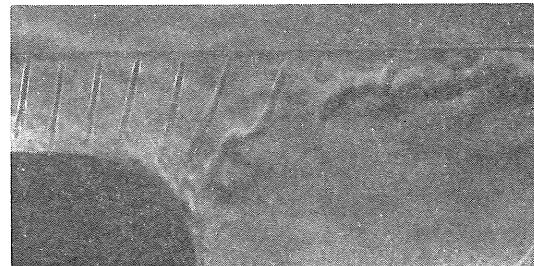
図 15 にシュリーレン装置により観察した縁端部領域のイオン風^⑩挙動から判断される放電状態の写真を示す。(a)は縁効果対策を行なわない状態、(b), (c)は集じん電極に縁効果対策を行なった状態で、とくに(c)は適切な縁効果対策を行なった状態である。(a)では、イオン風が集じん電極の縁端部に向かって吹き、電界が集中していることがわかる。(b)と(c)を比較すると、イオン風の吹出し点の間隔が、(b)では縁端部でやや密になっているのに対し、(c)では縁端部から離れるにつれて一様に広くなる傾向を示す。このことより、(c)のように適切な縁効果対策を行なった場合には、縁端部の電界集中が緩和されることが確認できた。また、放電は集じん電極の縁端部から離れるにつれて間欠的となる。これは、その点の電界強度が放電を行なうために十分な大きさにまで達してい



(a) $D=60 \text{ mm}$ (see Fig. 1)



(b) $D/R=2.0, R=38 \text{ mm}$ (see Fig. 6)



(c) $D/R=1.0, R=38 \text{ mm}$

図 15 負イオン風のシュリーレン写真 ($E_{av}=6 \text{ kV/cm}$)

Fig. 15 Schlieren photographs of negative ionic wind ($E_{av}=6 \text{ kV/cm}$).

ないためと考えられる。

結果として、縁効果対策を行なった電極系 ($D/R=1$)において、(1)平均電界強度が大きくなるほど等価縁端部放電距離は増加する。(2)電極系を大きくすれば、等価縁端部放電距離は電極系の大きさに比例した値よりも大きくなる。

5. 炭素繊維放電線にビニールパイプを用いた縁効果対策

集じん電極の縁端部でスパークが起こらないようにするための第 2 の縁効果対策として、前述したような放電線の縁端部を絶縁物で覆う方法が知られている。しかし、

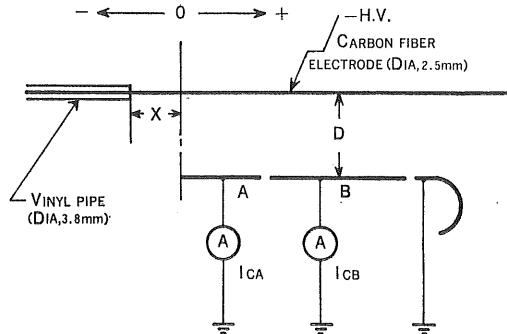


図 16 炭素繊維放電線の縁効果対策の実験装置 (4)

Fig. 16 Schematic diagram of experimental apparatus (4) for the countermeasure of wire edge effect using carbon fiber discharge electrode.

表 1 炭素繊維の諸特性

Table 1 Characteristics of carbon fiber.

Diameter	2.5 mm
Weight per unit length	3 g/m
Breaking strength	70 kg
Electrical resistance per unit length	15-20 Ω /m

絶縁物の位置による影響については、検討されていないようである。とくに、放電線の軽量化のために開発された炭素繊維放電線の場合は、スパークによる線の損傷が大であるため、放電電極を絶縁物で覆い、縁効果対策を行なう必要がある。ここでは、絶縁物（ビニールパイプ）の各位置におけるスパーク特性（スパーク電圧、スパークの発生する場所）に注目し、スパークを集じん電極の縁端部にではなく、平板部では散在的に発生させる適切な縁効果対策について実験的に検討した。

5.1 実験装置

図 16 に上記の目的に使用した実験装置の概要を示す。放電線としては、表 1 に示すような実用 EP に使用されている軽量（同直径のステンレス線 38.8 g/m）にして機械的強度の強い炭素繊維放電線を使用した。そして、放電線の縁端部をビニールパイプで覆い、順次放電線上をスライドさせ、各位置におけるスパーク電圧の測定およびスパークの発生する場所に注目して実験を行なった。なお、高圧トランス出力を整流平滑した印加電圧は、トランスの 1 次側に接続した誘導電圧調整器で徐々に上げて（約 3~4 kV/min）、スパークが起こるときの電圧を静電電圧計で読み取った。スパーク電圧は 3 回の測定値の平均とした。

5.2 実験結果

図 17 に放電特性を示す。スパークは、図中に破線で示しているように、平板 A に流入するコロナ電流がほぼ

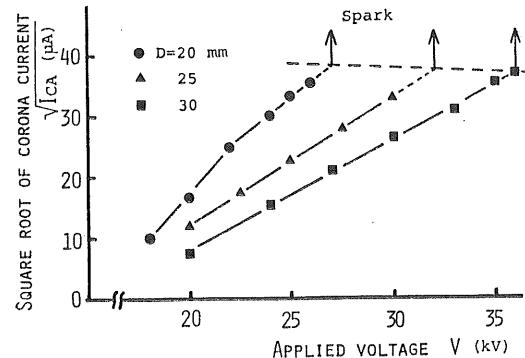


図 17 端部の負コロナ特性

Fig. 17 Negative corona characteristics on edge.

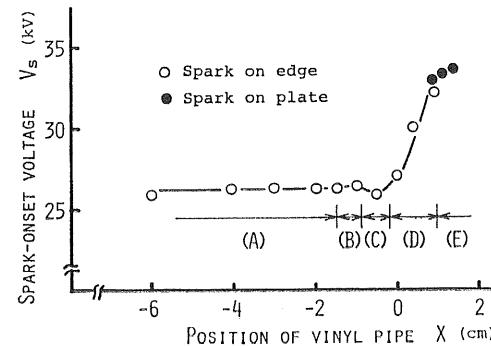


図 18 ビニール被覆パイプ位置とスパーク開始電圧の関係
Fig. 18 Correlation between position of vinyl pipe and spark-onset voltage ($D=20$ mm).

一定の値（約 $1,400 \mu\text{A}$ ）になると発生するようである。

図 18 に、電極間距離 D を 20 mm とした場合のビニールパイプの位置 X (図 16 参照) とスパーク電圧 V_s の関係を示す。これらの関係は、ビニールパイプの位置 X により以下の五つの領域に分けられる。

- (A) : スパーク電圧が位置 X に依存せず一定である。
- (B) : スパーク電圧が領域(A)に比べてやや増加する。
- (C) : スパーク電圧が減少し最小となる。
- (D) : スパーク電圧が再び急激に増加する。
- (E) : スパーク電圧が増加し最大となる。

以上の五つの領域をスパークの発生する場所からみれば、領域(A)~(D)においては集じん電極の縁端部で発生するのに対し、領域(E)においては散在的に平板部で発生する。また、スパークの進展過程に注目すれば、領域(A)では放電線上の領域(C)から負ストリーマ^③が進展し、集じん電極の縁端部からブランシ状の正ストリーマが進展する。よって、放電線上では領域(C)に電界が集中している

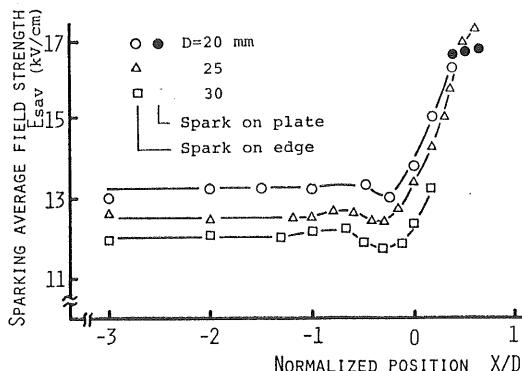
図 19 X/D とスパーク平均電界強度の関係

Fig. 19 Correlation between normalized position X/D and sparking average field strength E_{sav}

ものと考えられる。また、領域(B), (C)においてスパーク電圧が増加および減少する理由は、ビニールパイプの切れ目に電界が集中しやすいためであると考えられる。すなわち、領域(B)においては放電線上で電界が集中する点とビニールパイプの切れ目が一致していないために、互いにスパークを抑制しており、領域(C)においては二つの点が一致するため、さらに強い電界集中が起こりスパーク電圧が減少するものと考えられる。

図 19 に、電極間距離 D をパラメータとした X/D とスパーク時の平均電界強度 E_{sav} ($= V_s/D$) の関係を示す。電極間距離 D が 20 mm のとき、 X/D が約 0.5 以上（領域(E)）になるとスパークは集じん電極の縁端部ではなく平板部で発生する。このときのスパーク電圧は、領域(A)のときの値に比べて約 1.25 倍ほど高くなっている。よって、ビニールパイプの位置としては X/D が 0.5 以上であることが好ましいが、極端にビニールパイプで放電線を平板の内側まで覆うと集じん空間が狭くなり、好ましくない。よって、その境界付近が適切であると考えられる。ところで、電極間距離 D が 25, 30 mm のときの領域(E)に関しては、電源装置の関係上確認できなかったが、 X/D の値は 0.5 以上であり、電極間距離 D の増加につれてその値は大きくなるようである。

結果として、 X/D が約 0.5 以上になる条件を満足す

るようビニールパイプを設定すれば、適切な縁効果対策が行なえる。なお、 X/D の境界値は D の増加につれて大きくなる傾向を示す。

6. まとめ

縁効果対策については、四つの段階を踏まえて実験的に検討した。その結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 縁効果対策を行なっていない線対平板電極において、電極の幾何学的配置は縁端部の電界集中に影響を与える、平均電界強度は縁効果領域に影響を及ぼす傾向がある。
- (2) 電極間距離 D と集じん電極縁端部の半径 R の比 D/R が約 1 以下になるように電極配置を考慮すれば、集じん電極の適切な縁効果対策が行なえることがわかった。このことはショリーレン写真によるイオン風の挙動でも確認した。
- (3) 炭素繊維放電線を用いた場合、電極間距離 D とビニールパイプの位置 X の比 X/D が約 0.5 以上になるようにすれば、縁端部のスパークが解消されて実用的に有効であると判断される。

終りに、本研究を行なうにあたって、ご指導ならびにご支援を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、山口大学工学部橋崎久矩教授に深く感謝する。なお、実験その他について何かとご援助いただいた本学池田隆技官に感謝する。

参考文献

- 1) 平松 力、小堀与一：日立評論、45, 4 (1963), 728.
- 2) 竹中智彦、川崎元之、足立宜良：山口大学工学部研究報告、29 (1979), 233.
- 3) H.J. White and W.A. Baxter, Jr.: Mech. Eng., 82 (1960), 54.
- 4) 増田閃一、河野照哉共訳：プリンツ電界計算法, p. 78, 初倉書店 (1974).
- 5) 川崎元之：電気学会論文誌、99-B (1979), 1.
- 6) 足立宜良、川崎元之：静電気学会誌、2, 3 (1978), 158.
- 7) 橋本清隆、足立宜良：静電気とその工業への応用, p. 85, 東京電機大学出版局 (1973).
- 8) 大重 力、原 雅則：高電圧現象, p. 57, 森北出版 (1976).