空間電荷効果を考慮した気中棒-平板ギャップ の 50% フラッシュオーバー電圧の一推定法

正 員 河 野 俊 彦 (京都大)

正 員 上之園 親 佐 (摂南大)

正 員 山 本 修 (京都大)

1. ま え が き

不平等電界のギャップにおける気中放電現象は、近年計測技術の進歩に伴い精密な観測がなされ、かつ計算機によるシミュレーション技術の発達により、その機構の解析が進められている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

一方、送電線や電力用機器の絶縁設計においては、多様なギャップに対する気中フラッシュオーバー電圧を予測する必要があるが、これを正確に計算できる理論体系はない。そこで、所定の範囲にだけ適用できる実験式や実規模のギャップに対する実測結果に依存しているのが現状である⁽⁴⁾。

不平等電界における気中放電では、周知のように特に前駆現象の過程で気中ギャップに空間電荷が形成され、これがためにギャップ中の電界が乱され、この電界は主として印加電圧波形の時間的変動と空間電荷の拡散に伴って変化する。従って、この電界変化は空間電荷の生成量、その分布および拡散などの確率的要素に依存しているので、気中ギャップのフラッシュオーバー電圧は実験的にも一意的には決まらないために 50% フラッシュオーバー電圧とその標準偏差で表示されている。このような手法で多様なギャップのフラッシュオーバー電圧を求めることは測定時間も長くなり、その間の気象変化などによりあいまいになる。よって、實際上

支障のない精度で、しかも理論的にも解釈できる気中ギャップのフラッシュオーバー電圧の推定が望まれる。

本論文では、このような要請にこたえるために、フラッシュオーバー瞬時の電圧における仮想静電界を用いて棒-平板ギャップの 50% フラッシュオーバー電圧を単純に推定する手法について報告する。

2. 前駆現象およびフラッシュオーバー電圧

不平等電界の代表的なギャップとしては、一般に棒-平板電極 ($R-P$) と棒-棒電極 ($R-R$) の両ギャップが対象となっている。このうち、前者では棒電極の先端に最大電界を有し、かつ電界強度は単調に緩和しており、このギャップにおける放電現象は最大電界の部分から前駆現象が始まり、そして進展するというように単純である。よって、 $R-P$ ギャップにおける 50% フラッシュオーバー電圧 V_{50} は、 R 電極の先端の最大電界に着目した考察が可能である。なお、実験は正極性電圧印加の場合のみ行っており、負極性についてはここでは取扱わない。

<2.1> 実験装置 図 1 に実験に用いた回路と主な装置を示す。使用した電源は雷インパルス発生装置 ($1/40 \mu s$) であり、コンデンサ C_1 によって電圧波形調整を行なう。図中、各回路素子は記号で示し、その値を () 中に示した。この電源回路では、時間応答の速い放電前駆現象に即応して C_1 からエネルギーを供給できる。電圧波形と電流波形の観測は時間応答の良いシンクロスコープ (CRT) によった。使用した棒電極には曲率半径 r 0.5~25 mm の先端半球状の黄銅製丸棒を用い、その長さおよび平板電極の半径は常にギャップの長さ G の 3 倍以上となるようにした。これにより、棒電極先端の電界に及ぼす棒と平板の両電極の端末効果を 3% 以下にすることができる。これ

An Estimation Method of 50% Flashover Voltage for Rod-Plane Gap in Air Considering Space Charge Effect. By Toshihiko Kouno, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kyoto University), Chikasa Uenosono, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Setsunan University) & Osamu Yamamoto, Member (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kyoto University).

河野俊彦：正員，京都大学工学部電気工学科
上之園親佐：正員，摂南大学工学部電気工学科
山本 修：正員，京都大学工学部電気工学科

図 1 電源回路、供試体および測定器の配置

Fig. 1. Impulse generator circuit, testing subject and measurement arrangement.

は、電界計算結果と実験結果との両面から言える。なお、 G は $5 \sim 50$ cm の範囲とした。高電圧側での電流測定は発光ダイオード (LED)、ライトガイドケーブル (LGC) と光電子増倍管 (PMT) によった。コロナの観測にはイメージンシ管を付けたカメラ (IIC) を用いた。また、本論文で行なったフラッシュオーバー試験は各条件で $20 \sim 50$ 回の印加回数で、フラッシュオーバー電圧の標準偏差は 3% 以下であった。

〈2.2〉 R - P ギャップにおける第一ストリーマ

R - P ギャップにおけるフラッシュオーバー時の前駆現象のうち、第一ストリーマによって発生する空間電荷が放電現象の進展を妨げることにについては既に知られている⁽⁸⁾。ここでは、 R - P ギャップにおける印加電圧と前駆現象としての第一ストリーマの発生とその大きさについて述べる。

正極性雷インパルス電圧を 10 cm のギャップの長さを持する $r=10$ mm の棒電極に印加してフラッシュオーバー実験を行ない、そのときの印加電圧と高電圧側で測定した放電電流の波形とを図 2 に示す。印加電圧には

- (1) 60 kV (フラッシュオーバーしない場合の電圧)
- (2) 75 kV (50% フラッシュオーバー電圧)
- (3) 90 kV (100% フラッシュオーバー電圧以上)

の三とおりを用いた。 60 kV を印加した場合には前駆現象のみであり、 75 kV、 90 kV を印加した場合はいずれも前駆現象を経てフラッシュオーバーに至っている。これらの電流波形において、最初に現われるピークは第一ストリーマによるものである。このストリーマの発生でギャップ中に空間電荷が生成し、棒電極先端からかさを開いたように分布する。電圧印加後、第一ストリーマが発生するまでの時間は印加電圧の大きさによって異なるが、これらの電流第一ピーク値はほぼ等しい。すなわち、第一ストリーマ発生による電流ピーク値は印加電圧の波高値に関係せず、それが発生する瞬時電圧と電流ピーク値とが比例関係にあることは、

図 2 棒-平板ギャップの放電における電圧および電流波形(正極性)

Fig. 2. Voltage and current wave at breakdown for rod to plane gap (positive polarity).

既に短ギャップにおける同様な実験による報告がある⁽⁵⁾。またリヒテンベルク図形の大きさと、それが発生する瞬時の電圧との関係においても同様な結果が得られている⁽⁶⁾。一方、ギャップに固有な電界不平等性と電流第一ピーク値とは関係があり、このとき発生する空間電荷については以下に述べる。

〈2.3〉 R - P ギャップにおける平等電界的放電領域と不平等電界的放電領域 R - P ギャップに正極性雷インパルス電圧を印加した場合の 50% フラッシュオーバー電圧-ギャップの長さ (V_{50} - G) 特性を図 3 に示す。同図は、横軸にギャップの長さ G 、縦軸に V_{50} を

図 3 棒-平板ギャップの 50% フラッシュオーバー電圧-ギャップの長さ (V_{50} - G) 特性 (正極性)

Fig. 3. 50% flashover voltage-gap length (V - g) curve for rod-plane gap (positive polarity).

とり、棒電極の先端曲率半径 r をパラメータとして表わしている。これらの特性曲線のうち、 $r=5$ mm のように r が小さい場合の曲線では G が長いところで飽和しており、 $r=20$ mm のように r が大きい場合の曲線では特性曲線全体の傾きが緩くなっている。しかし、同図に示すように全体としては V_{50} - G 曲線には規則性が見られない。

次に、 r を横軸にとって R - P ギャップの V_{50} およびコロナ開始電圧 cV を実験により求め、 G をパラメータとして V_{50} (または cV)- r 曲線を図 4 に示す。同図中、実線は V_{50} - r 曲線を、破線は cV - r 曲線を表わす。 r と G の各組合せにおける V_{50} - r 曲線と cV - r 曲線との交差する点を $\times$ 印で示し、これらの点を連ねて一点鎖線を引くと、この線を境界としてコロナ放電開始、すなわちフラッシュオーバーとなるか否かに分かれる。一点鎖線より右の領域では、電極系を決めて印加電圧を低下していくとフラッシュオーバー率は下がり、フラッシュオーバーしない場合にはコロナも発生しない。このような放電形式は平等電界における放電形式と同一であるので、この領域を平等電界の放電領域と呼ぶことにする。一方、一点鎖線の左側の領域ではコロナ放電のみに終る放電形式となるので、この領域を不平等電界の放電領域と呼ぶことにする。これらは直流電圧印加の際の呼称⁽⁷⁾に準拠するものである。

● : 50% フラッシュオーバー電圧, ○ : コロナ開始電圧

図 4 棒-平板ギャップの棒電圧の曲率半径を変えた場合のコロナ開始電圧および 50% フラッシュオーバー電圧 (正極性)

Fig. 4. 50% flashover voltage-radius of rod (V - r) and corona onset voltage-radius (V - r) curves for rod-plane gap (positive polarity).

上記の境界曲線上における V_{50} を臨界の 50% フラッシュオーバー電圧 cV_{50} と呼び、これと棒電極の r との関係を実験式として導けば次式が得られる。

$$cV_{50} = 25.0 e^{(0.15(r-7.0))} + 20.0 \dots\dots\dots (1)$$

このように境界曲線が棒電極の曲率半径 r だけの関数として表現できることから、ギャップの電界不平等性と cV_{50} との間には比較的簡単な関係が存在することがわかる。この電界不平等性は当然 G にも関係するが、この G は r を指定すると図 4 の境界線上であるための条件から実験式として導き出され、次式のとおりである。

$$cG = 4.5 e^{(0.15(r-7.0))} \dots\dots\dots (2)$$

3. R - P ギャップの最大静電界

電荷重畳法を用いた電界計算によって最大静電界を求めた結果について検討する。

まず、簡単のために記号を以下のように定義する。

$1E$ (規格化した静電界): 平板電極を接地し、棒電極に 1V を与えた場合に求まる電界。

$1E_{\max}$ (規格化した静電界の最大値): 棒電極の先端に存在する電界。

ここで、 $1E_{\max}$ はフラッシュオーバー時の印加電圧に無関

係な R - P ギャップに固有な幾何学的配置のみによって定まる電界である。

また、 R - P ギャップに電圧 V が印加されたときの静電界 E は、前記の記号の定義により

$$E = V \times {}_1E \quad \dots\dots\dots (3)$$

${}_B E_{\max}$ (仮想最大電界): フラッシュオーバー時の電圧 V_B によって次式のように定義される。ただし、フラッシュオーバー時には前駆現象によってギャップ中に空間電荷の分布があり、これにより電界緩和を生じるので実際には存在しない電界であるから仮想とする。

$${}_B E_{\max} = V_B \times {}_1E_{\max} \quad \dots\dots\dots (4)$$

R - P ギャップの r および G を変えて、 ${}_1E_{\max}$ を求め、図5と表1を得た。図5は横軸に r 、縦軸に R - P ギャップの ${}_1E_{\max}$ およびパラメータに G をとって表わしている。同図から、 r が大きい場合に ${}_1E_{\max}$ は

図5 棒-平板ギャップの棒電極の曲率半径を変えた場合の規格化最大電界

Fig. 5. The standardized maximum field for radius of rod electrode of rod-plane gap.

表1 ギャップの長さや棒電極の曲率半径を変えた場合の規格化最大電界

Table 1. The standardized maximum field strength in the case of change of the geometric condition of the gap.

r (mm)	G (cm)			
	5	10	20	30
0.5	14.5	14.0	13.54	13.45
1.0	11.35	11.00	10.65	10.50
2.5	3.00	2.80	2.63	2.55
5.0	1.68	1.58	1.41	1.37
10.0	0.94	0.84	0.77	0.72
25.0	0.62	0.54	0.39	0.30

(V/cm)

$G=5 \sim 10$ cm の範囲では $G=20 \sim 30$ cm のそれと比較して高くなっていることがわかる。また、曲率半径が非常に小さい $r=0.5$ mm の場合には G の違いの程度に比べて ${}_1E_{\max}$ はあまり変化がない。このような ${}_1E_{\max}$ の性質によって、 V_{50} は図4に示したように r の小さいところで低下している。このような電界ひずみの非常に大きい領域では空間電荷効果はまた別の振舞があると思われ、フラッシュオーバー電圧が再び低下するこの領域については本論文では対象としない。

4. フラッシュオーバー電圧と最大静電界

ここでは、 R - P ギャップにおける規格化した最大静電界 ${}_1E_{\max}$ によるフラッシュオーバー電圧 V_B の推定法について述べる。 R - P ギャップの電極形状および配置 (r と G) に関係して、さきに定義した二つの放電領域の境界線上での cV_{50} に ${}_1E_{\max}$ を掛けて求める ${}_B E_{\max}$ を縦軸に、 G を横軸にとって示せば図6を得る。同図によると、その値は G の広い範囲で一定値 (52 kV/cm) を得る。このように r と G によって定まる ${}_1E_{\max}$ が異なるにもかかわらず、境界線上の電極条件で cV_{50} を印加した場合の仮想電界強度 ${}_B E_{\max}$ が一定値になる。これを臨界電界 E_{cr} と呼ぶことにする。不平等電界的放電となる領域における R - P ギャップでは、前駆現象のうち第一ストリーマによって空間電荷が R - P ギャップ中に分布し、その大きさは図2に対して論じたように、印加電圧の波高値によらずストリーマ発生の瞬時値によって定まる。

そして、 R - P ギャップの電界を緩和して放電進展を妨げるように働く⁽⁹⁾。なお、文献(8)では、これと同様な空間電荷による電界緩和量を含んだ最大電界を、ある条件 ($r=0.5$ cm, $G=10$ cm, $V=40 \sim 50$ kV の場合 (この条件は本論文で述べた境界線上よりも左

図6 図4に示した二つの放電領域を区分する境界線上の条件における仮想最大電界強度

Fig. 6. The imaginary maximum field strength on the boundary line separating two domains different discharge forms shown in Fig. 4.

の不等電界的放電領域にあたる)) の下に別の計算から求めて、約 $60 \sim 75 \text{ kV/cm}$ になれば第一ストリーマによる空間電荷の電界緩和に打ち勝ってリーダからアークへと進展し、フラッシュオーバーに至ることを示している。本論文では、上記のように第一ストリーマによって発生する空間電荷の電界緩和に打ち勝って、再び放電が進展し始めるに必要な限界として、かつ平等電界的放電領域の境界として、ここに $E_{cr} = 52 \text{ kV/cm}$ が算出された。

図4の実験結果を基にして電界計算を行ない、横軸には $1E_{max}$ をとって、 G をパラメータとし、 $(B E_{max} - E_{cr})$ を縦軸に表わすと図7を得る。ただし、 $B E_{max}$ は50% フラッシュオーバー電圧印加時の仮想最大電界強度として、(4)式の V_B の代わりに V_{50} を代入して得られる。同図では、ギャップ条件ごとの各直線が横軸と交わる場所よりも低い $1E_{max}$ では $B E_{max} - E_{cr} = 0$ の横軸上に沿っており、この領域では各ギャップの長さにおいて平等電界的放電領域であり、ここでは次式が満足される。

$$B E_{max} = E_{cr} \dots\dots\dots (5)$$

この領域では、図4の境界線の左における現象と異なり、ストリーマが発生すると必ずフラッシュオーバー状態まで放電現象は進展し、フラッシュオーバーしない場合にはストリーマなどの前駆現象は現われない。なお、

図7 規格化した最大電界によって整理した50%フラッシュオーバー時の仮想最大電界強度

Fig. 7. The imaginary maximum field strength compared with the standardized maximum field in the case of 50% flashover.

表2 各ギャップの長さにおける仮想最大電界強度とギャップの電界不平等性との関係式

Table 2. Equations of the imaginary maximum field strength relation to the nonuniformity of the gap for each gap length.

ギャップの長さ (cm)	実験式 ($B E_{max} - E_{cr}$)
5	$44.4 (1E_{max} - 0.85)$
10	$85.0 (1E_{max} - 0.70)$
20	$155 (1E_{max} - 0.45)$
30	$210 (1E_{max} - 0.35)$

図7の横軸には各ギャップの長さの場合の使用棒電極の先端曲率半径も示した。

不等電界的放電領域では図7に示したように、ギャップの長さごとに各々の直線で表わされていて、 $1E_{max}$ の増大と共に空間電荷によって緩和される仮想の電界差 ($B E_{max} - E_{cr}$) が増大する。各ギャップの長さに対するこれらの関係は実験式として表わすことができ、表2に示す。これらの実験式はギャップの長さごとに固有であり、かつ図7に示すように $1E_{max}$ が増せば第一ストリーマによる電界緩和の大きさ ($B E_{max} - E_{cr}$) も増すことを示している。また、ギャップの $1E_{max}$ が同じでも G が違えば放電進展を妨げる空間電荷による電界緩和の大きさが変わることを示している。

表2の各々の式は次式によって一本化され、図8に示される。

$$B E_{max} - E_{cr} = \alpha G (1E_{max} - \beta) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 α , β は実験式として次式のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 8.5 - 0.075(G - 10.0) \\ \beta &= 4.5 \times 10^{-4}(G - 40.0)^2 + 0.30 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

これら α および β は、本来なら r にも関係すべきであろうが、ここでは簡単のために G だけの関数として表わした。しかし、これによっても実験値を説明するには十分な精度である。

ここで、(6)式を変形して次式を得る。

$$\frac{B E_{max} - E_{cr}}{\alpha \beta G} = \frac{1E_{max}}{\beta} - 1.0 \dots\dots\dots (8)$$

図8には、横軸 $1E_{max}/\beta$ を1.0で切る直線として上式の関係を示しているが、これは $R-P$ ギャップにおける不等電界的放電領域のすべてのギャップ条件におけるフラッシュオーバー電圧を表現している。

ここで、不等電界的放電領域における50%フラッシュオーバー電圧の算出は、(6)式と(4)式とから得られる次式によって行なう。

$$V_{50} = \alpha G \left(1.0 - \frac{\beta}{1E_{max}} \right) + \frac{E_{cr}}{1E_{max}} \dots\dots\dots (9)$$

また、図4に示した平等電界的放電領域では V_{50} は

図 8 図 7 から各ギャップの長さについて整理し、一つの実験式で表現できるように縦軸と横軸をとって示した仮想最大電界強度

Fig. 8. The relation between nonuniformity of the gap and imaginary maximum field strength given in Eq. 8.

次式により得られる。

$$V_{50} = 52/iE_{\max} \dots \dots \dots (10)$$

5. む す び

本論文では、棒-平板ギャップにおける電極系の電界不平等性を定義すると共に、空間電荷による電界緩和の効果を考慮して、最大静電界と 50% フラッシュオーバー電圧との関係を中心に、以下のような結果を得た。

(1) ギャップの幾何学的条件から定まる規格化した静電界の最大値 $iE_{\max}$ と平等電界の放電の場合に必

要な臨界電界とから、50% フラッシュオーバー電圧を推定する関係式を導出した。

(2) 雷インパルス電圧印加時にも、直流電圧印加の場合と同様に放電形式として平等電界の放電領域と不平等電界の放電領域とが存在し、これらを区分する境界では仮想最大電界強度は 52 kV/cm となった。

(3) 不平等電界の放電領域では、前駆現象による空間電荷の電界緩和の大きさはそのギャップの $iE_{\max}$ によって異なり、これらの緩和に打ち勝つために必要な仮想最大電界強度を得るような電圧を印加したときにフラッシュオーバーする。

(4) 前駆現象の第一ストリーマは印加電圧の波高値によらず、それが発生する瞬時の電圧により、かつ R-P ギャップの幾何学的条件によって定まり、このときに発生する空間電荷はそのギャップの電界を緩和する。

終りに、本研究のまとめにあたって適切な討論と助言をいただいた京都大学 林 宗明教授に謝意を表します。

(昭和 58 年 11 月 24 日受付, 同 59 年 9 月 7 日再受付)

文 献

- (1) 上之園・山本・河野:「静電誘導形プローブ法による気中ギャップの空間電荷の測定」, 電学論 A, 102, 235 (昭 57-4)
- (2) 日高:「ボックセル素子を用いたフラッシュオーバー時における針対平板ギャップの電界測定」, 同上 A, 102, 343 (昭 57-6)
- (3) 田頭:「放電現象の電算機シミュレーション」, 電学誌, 100, 119 (昭 56-2)
- (4) 有働・瀬田・鈴木・桜井:「UHV 交流送電, III 過電圧と絶縁」, 同上, 102, 985 (昭 57-11)
- (5) H. Isa & M. Hayashi: "The Transient Characteristics of Arc Channel in Air under Impulse Voltage", Memo. of The Facul. of Eng. Kyoto Univ., 39, 65 (1977)
- (6) 辻村・中村:「衝撃沿面放電における電流波形と放電図形」, 電気学会放電研究, ED-72-6 (昭 47)
- (7) 電気学会 編: 放電ハンドブック, p. 84 (昭 53) 電気学会
- (8) 山本・広岡・河野・上之園:「棒対平板ギャップの正コロナストリーマによる空間電荷分布」, 電学論 A, 102, 643 (昭 57-12)