UDC 621.3.015.52: 621.3.015.33
621.315.619.3: 621.315.614.6

論文

56-A76

正極性インパルス印加時における隔壁効果 とフラッシュオーバー電圧の理論計算

正員 日高 邦彦 (防衛大)

正員 河野 照哉 (東京大)

1. ま え が き

複合誘電体を用いた基本的な絶縁構成の一つに、気中の電極間へ板状の誘電体をそう入したものがある。中でも、電界の不等性が強い電極配置(例えば、針対平板電極)の場合には、薄い絶縁紙をそう入ただけで電極間のフラッシュオーバー電圧が著しく影響を受ける。このような現象を隔壁効果と呼んでいる。正極性の放電に対しては、隔壁を用いることにより隔壁がないときのフラッシュオーバー電圧に比べ、その値を大きく向上させることができる。この点から、各方面で隔壁効果の研究が進められている^{(1)~(6)}。

絶縁紙を隔壁として利用した場合、絶縁紙自体の絶縁耐力はギャップ全体のフラッシュオーバー電圧に大きな影響を与えず、絶縁紙は空間電荷の発生、移動を制御する働きだけを担う。従って、絶縁紙隔壁を用いることにより、複合誘電体のフラッシュオーバーに対する空間電荷の作用を抽出して考察することができる。

本論文では、正極性インパルス電圧が印加された針対平板電極に絶縁紙隔壁をそう入したときのフラッシュオーバー機構をまず検討した。次にフラッシュオーバー機構を説明する簡単なモデルを想定した。測定された空間電荷と、その隔壁上の分布に規則性があることからこれらを定式化し、想定したモデルの下にフラッシュオーバー電圧を理論的に求めた。理論計算の有用性をみるため、各種実験状況下のフラッシュオーバー電圧を推定し、実測値と比較した。

2. 隔壁を有するギャップのフラッシュオーバー機構

今までの研究⁽⁶⁾から、絶縁紙隔壁を有するギャップがフラッシュオーバーするか否かは、隔壁・平板電極間の電界の大きさに左右され、その電界がストリーマの発生に必要な値になったときフラッシュオーバーに移行すると推定されている。そこで、本章ではイメージコンバータカメラによる観察などを交え、更にフラッシュオーバー機構の考察を進める。

〈2・1〉 実験装置 実験装置の概略を図1に示す。針対平板電極間に、厚さ 0.05 mm のクラフト紙を隔壁としてそう入した。針電極は 6mmφ の黄銅棒を先端角 30 度に仕上げたものである。正極性雷インパルス電圧 $(1.5 \times 48) \mu s$ を針電極に印加した。

フラッシュオーバー直前の放電過程を、イメージコンバータカメラ (Quantrad 社製) で観察した。イメージコンバータカメラの使用時には、主ギャップに並列してダイバータギャップを設けた。主ギャップがフラッシュオーバーに移行した場合は、ダイバータギャップに放電

図1 実験装置

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Barrier Effect for Positive Impulse Voltage and a Calculation Method of its Breakdown Voltage. By Kunihiro Hidaka, Member (Department of Electrical Engineering, The National Defense Academy) & Teruya Kouno, Member (Faculty of Engineering, University of Tokyo).

日高邦彦: 正員, 防衛大学校電気工学教室
河野照哉: 正員, 東京大学工学部電気工学科

図 2 フラッシュオーバー時に見られる放電の流し撮り写真

Fig. 2. Streak photographs of breakdown phenomena.

電流を転流できる。このようにしてアーク放電から発生する強い発光を、極力イメージコンバータカメラに入れないようにした。なお、図 1 中で直流電圧を印加した球電極は、フラッシュオーバーが印加インパルス電圧の波頭、波尾いずれで生じてもダイバータギップが有効に動作するようにそう入されている。

また、クラフト紙と平板電極の間にポッケルス素子を配置し、電界測定を行なった。ポッケルス素子中を伝搬するレーザー光の偏光状態は、素子に印加される電界の強さによって変化する。従って、素子を通過したレーザー光の偏光状態を観測することにより、電界の大きさを知ることができる⁽⁶⁾。

〈2・2〉 フラッシュオーバー直前の放電過程 フラッシュオーバー直前の放電をイメージコンバータカメラで観察した。絶縁紙隔壁を有する針対平板電極に雷インパルス印加した場合の放電を、流し撮り写真で捕えたものが図 2 である。ここでは、隔壁が針電極に近い場合として $a=3\text{cm}$ (針電極から隔壁までの距離を a と定義した)、平板電極に近い場合として $a=7\text{cm}$ を取上げた。印加電圧は各隔壁位置における 50% フラッシュオーバー電圧 (以下、単にフラッシュオーバー電圧と呼ぶ) である。

多数の流し撮り写真を撮り、相互に比較し、平均的な観察結果を以下に述べることにする。また、フラッシュオーバー時における絶縁紙隔壁と平板電極間の電界をポッケルス素子により測定した。その結果を図 3 に示し、これも併せて検討を行なう。

(1) 隔壁位置 $a=3\text{cm}$ における観察結果 [図 2 (a)]

(i) フラッシュオーバーの約 $0.3\sim 0.5\mu\text{s}$ 前に隔壁・平板電極間でストリーマの発光が見られる。隔壁・平板電極間のストリーマに対応して、針電極からも隔壁のほうに向けて発光 (リーダ先端と呼ぶ) が進展し始める。

(ii) 針電極から出発したリーダ先端が隔壁に近づ

くと、まず隔壁・平板電極間に強い発光が現われ、フラッシュオーバーに至る。

(iii) 非フラッシュオーバー時には、針電極近傍に弱い発光だけが観察される。

隔壁・平板電極間の電界 [図 3 (a)] を見ると、一度 30kV/cm を越える程度に電界が上昇した後大きく低下し、その直後にフラッシュオーバーに移行している。ここで見られる電界の低下は、電界測定点付近にストリーマが現われたことを示している。従って、電界測定結果もフラッシュオーバーに先行して隔壁・平板電極間にストリーマが発生することを支持している。

(2) 隔壁位置 $a=7\text{cm}$ の観察結果 [図 2 (b)]

(i) フラッシュオーバーの約 $0.6\sim 0.7\mu\text{s}$ 前に隔壁・平板電極間にストリーマが発生する。それと同時に針電極前方 2cm くらいの所から隔壁に向かって発光 (リーダ先端と呼ぶ) が進展開始する。このとき、隔壁・平板電極間ストリーマとリーダ先端の間に弱い発光も観察される。その後、針電極先端も発光を開始している。

(ii) リーダ先端がギャップ中央付近に到達したとき、リーダ先端と平板電極の間に強い発光が生じ、フラッシュオーバーに至っている。

(iii) 非フラッシュオーバー時には針電極近傍に弱い発光だけが観察される。

電界の測定値 [図 3 (b)] を見ると、フラッシュオーバー時には隔壁・平板電極間のストリーマ発生に対応する電界の低下が認められる。ただし、 $a=3\text{cm}$ の場合ほど大きな電界の低下ではない。

$a=3\text{cm}$ および $a=7\text{cm}$ の場合に共通している点は、フラッシュオーバー直前に隔壁・平板電極間で明確なストリーマ発生が見られ、そのストリーマに呼応してリーダが針電極方向から隔壁に向かって進展していることである。隔壁・平板電極間は完全にストリーマで橋絡されている。隔壁・平板電極間のストリーマ発生とリーダ進展開始は、どちらが時間的に先行しているかを明確に見極めることは難しい。しかし、隔壁・平

図3 隔壁・平板電極間の電界変化

Fig. 3. Electric field between barrier and plane electrode versus time.

板電極間の電界測定結果と併せて考えると、一つの推定が可能である。すなわち、隔壁・平板電極間にストリーマが発生したために隔壁付近で電位が急に低下し、その結果リーダ先端付近の電界が上昇し、進展が開始したと考えることができる。一方、非フラッシュオーバー時にはフラッシュオーバー時に見られる隔壁・平板電極間のストリーマ発生はない。

以上の観測および検討から、隔壁・平板電極間がストリーマにより橋絡され、それが誘因になりフラッシュオーバーに移行すると結論できる。

〈2・3〉 フラッシュオーバー機構 前節および文献(6)の結果から、絶縁紙隔壁を有する針対平板電極のフラッシュオーバー機構をまとめておくと以下ようになる。

(1) 針電極から発生したストリーマは隔壁で進展を阻止され、隔壁を越えて平板電極に到達することは

できない。その結果、隔壁をそう入ることによりフラッシュオーバー電圧は上昇する。

(2) 針電極から発生したコロナ放電電荷は徐々に隔壁に蓄積し、隔壁・平板電極間の電界は上昇する。印加電圧の増加と共にコロナ放電電荷量は増加し、隔壁・平板電極間の電界も高くなる。

(3) 隔壁・平板電極間の電界が 30kV/cm 程度になるとそこにストリーマが発生し、隔壁・平板電極間はストリーマで橋絡されてしまう。それに呼応して針電極近傍からリーダが隔壁の方向へ進展し始める。

(4) リーダがある程度進展した段階で、リーダ先端と隔壁・平板電極間ストリーマの間で結合が生じ、フラッシュオーバーに移行する。

3. フラッシュオーバー電圧の理論計算

〈3・1〉 計算の前提 前章の考察により、隔壁・平板電極間にストリーマが発生するとギャップ全体のフラッシュオーバーが生じ、そのストリーマが発生しないとフラッシュオーバーに至らないことが明らかになった。言い換えると、フラッシュオーバー電圧以下ではストリーマはすべて隔壁で進展を阻止される。しかし、フラッシュオーバー電圧以上の電圧が印加されると、隔壁・平板電極間にもストリーマが発生し、ギャップ全体が放電路で橋絡されフラッシュオーバーに至ることになる。このようなフラッシュオーバー機構をもとに、フラッシュオーバー電圧の計算を行なう。

コロナ放電電荷が隔壁に付着したことを考えると、ある印加電圧で、どのくらいの電荷量が、どのくらいの広がりをもって、どういう形に分布するかを知らば隔壁・平板電極間の電界は計算できる。その電界からストリーマが発生できるかどうかを判定することも可能である。判定の結果、隔壁・平板電極間にストリーマが発生可能な場合は、フラッシュオーバーが生じるとみなすことにする。

隔壁上の電荷の分布形については、文献(6)の隔壁裏面上の電界測定結果により、ギャップ軸から周辺方向に向かって電荷密度が直線的に減少する分布が妥当であろう。他の諸量については、〈3・2〉、〈3・3〉節で関係式を導くことにする。本論文の計算において仮定したギャップの構成、空間電荷の状態を図4に示しておく。空間電荷を隔壁上に位置する等価的な円板状電荷で近似した。

〈3・2〉 印加電圧とコロナ放電電荷量 コロナ放電電荷量の測定値は文献(4)に示されている。針電極を用いた場合について、印加電圧 V とコロナ放電電荷量 Q の関係を整理すると図5になる。文献(4)の

図 4 ギャップの構成

Fig. 4. A view of gap.

結果に、ギャップの長さ 20cm の場合の測定結果が追加されている。ここで用いたコロナ放電電荷量は、電荷が隔壁に付着したことを想定し、文献(7)に従って測定値に補正を加え真の放電電荷量に修正した値である。図 5 (a) は $(1.5 \times 48) \mu\text{s}$ の雷インパルス電圧 (以下、単に雷インパルス電圧と呼ぶ) を印加時、また (b) 図は $(360 \times 6,000) \mu\text{s}$ の開閉インパルス電圧 (以下、単に開閉インパルス電圧と呼ぶ) を印加時の結果である。図中、横軸は絶縁紙隔壁をそう入しないとき (以下、紙なしと略記する場合がある) のフラッシュオーバー電圧 V_0 を基準にした過電圧率 $(V-V_0)/V_0$ を示す。一方、縦軸は次に定義される電荷量 Q_n を基準とした $(Q-Q_n)/Q_n$ という規格値 (以下、放電電荷量増倍率と呼ぶ) を表わす。基準量 Q_n としては、隔壁をそう入しないギャップに V_0 を印加し、フラッシュオーバーしないときのコロナ放電電荷量 Q_0 を用い、 Q_0 の 1/2 の値をもって Q_n と定義した。なお、隔壁が存在するとき V_0 を印加すると、そのときの電荷量は $0.3Q_0$ から $0.8Q_0$ になるので、 Q_n は妥当な規約基準値になる。

各 a の値において、測定値を次式で整理することを考える。

$$\left(\frac{Q-Q_n}{Q_n} \right) = K \left(\frac{V-V_0}{V_0} \right)^\alpha \dots\dots\dots (1)$$

K, α : 定数

最小二乗法 (東京大学大型計算機センター内にある最小二乗法標準プログラム「SALS」を用いた) により α を推定すると 1.2~1.6 程度になる。そこで α を 1.4 に固定し、(1) 式にあてはめて計算した結果が、図 5 中の実線および破線で表わした曲線である。

図 5 ではギャップの長さ 10cm および 20cm の二つの場合を示したが、ギャップの長さによらず統一的に過電圧率と放電電荷量増倍率の関係を取扱うため、幾何学的静電位の概念を導入してみる。ここで言う幾何学的静電位は、ギャップ軸上の静電位を考え、ギャップ間に単位の大さきの電圧を加えたとき隔壁の位置に現われる静電位を指す。隔壁位置の幾何学的静電位 P と (1) 式中の定数 K の関係を、図 5 で取上げた隔壁

図 5 過電圧率 $(V-V_0)/V_0$ と放電電荷量増倍率 $(Q-Q_n)/Q_n$ の関係Fig. 5. Amplification factor of space charge $(Q-Q_n)/Q_n$ versus overvoltage $(V-V_0)/V_0$.

位置について示すと図 6 になる。図中の実線は

$$K = k P^{-\beta} \dots\dots\dots (2)$$

P : 幾何学的静電位 (%), k, β : 定数

の形で近似し、最小二乗法で定数を決定して得たものである。 β の推定値は、雷インパルス電圧印加時

図 6 隔壁位置の幾何学的静電位 P と定数 K の関係

Fig. 6. Constant K versus geometrical electrostatic potential at barrier (P).

0.56, 開閉インパルス電圧印加時で 0.55 であった。そこで、簡便のため共に $\beta=0.55$ にした。(1)式に(2)式を代入すると、最終的に過電圧率と放電電荷量増倍率の関係は次の近似式で示すことができる。

$$\left(\frac{Q-Q_n}{Q_n}\right) = k P^{-0.55} \left(\frac{V-V_0}{V_0}\right)^{1.4} \dots\dots\dots (3)$$

定数 k は雷インパルス電圧印加時 60.3, 開閉インパルス電圧印加時 10.8 になる。

実測値を近似した(3)式を考えると、過電圧率と放電電荷量増倍率について次のことが言える。

(1) 過電圧率に対する放電電荷量増倍率の変化の形態は、雷インパルス電圧印加時と開閉インパルス電圧印加時で相似である。ただ、変化の程度を示す比例係数が雷インパルス電圧印加時に大きな値となる。

(2) 隔壁が針電極から遠い、すなわち幾何学的静電位が低い所にあるほど、同じ印加電圧に対してコロナ放電電荷量は増大する。

〈3.3〉 コロナ放電電荷量と隔壁の広がり半径

半径方向に対し電荷密度が直線的に減少し、かつ電荷量総量がコロナ放電電荷量に等しい円板電荷を考えてみる。このような円板電荷が隔壁の位置にあると仮定し、隔壁裏面上の電界を計算した例が既に報告されている⁽⁶⁾。その報告で、円板電荷の半径 R (この半径のところで電荷密度が零になる) を適当に選ぶと、測定電界とほぼ一致することが示されている。よって、コロナ放電電荷の広がり半径を表わす値として、この円板電荷の半径 R を用いることにする。

コロナ放電電荷量 Q と上述の広がり半径 R の関係をまとめると図 7 になる。フラッシュオーバー電圧以下

図 7 コロナ放電電荷量 Q と隔壁上での放電電荷の広がり半径 R

Fig. 7. Radius of space charge spread on barrier (R) versus quantity of the charge (Q).

の電圧を印加したときの測定結果は、フラッシュオーバー電圧印加時に比べ、隔壁上の電荷によって作られる電界が弱くなるような領域にあることがわかる。すなわち、同一の広がり半径に対して、フラッシュオーバー電圧に満たない電圧が印加されたときのほうが電荷量は小さくなっている。フラッシュオーバー電圧印加時の値だけを用い、 R は Q の累乗で表わせるとして、最小二乗法近似を行なった結果、次式を得ることができた。

$$R = 14.7 Q^{0.43} \dots\dots\dots (4)$$

R : 広がり半径 (cm), Q : コロナ放電電荷量 (μC)

(4) 式の関係は、図 7 の中で実線で示されている。(4) 式の関係にある Q や R を用い計算した円板電荷による電界は、実測した Q や R から得た電界に比べ不当に低い値を見積ることはない。従って、(4) 式から得られる Q や R の値を用いて電界の計算を行なうことにする。

〈3.4〉 フラッシュオーバー電圧の計算法 (3) 式および(4)式を用いれば、ある印加電圧 V に対して Q や R の値が定まり、隔壁・平板電極間の電界が計算できる。そこで、この電界においてストリーマが発生するかどうかを判定しなければならない。判定を行なう特性値として、電離指数を採用した。電離指数は実効電離係数を電界方向に沿った積分経路で積分することで得られる。一般に、空気中では電離指数が 20 になるとストリーマが発生すると言われている。しかし Pedersen 氏⁽⁸⁾によれば、電離指数が 10 でもストリ

図 8 フラッシュオーバー電圧の計算手順

Fig. 8. Flow chart of calculation of breakdown voltage.

ーマが発生すると指摘している。従って、本論文ではストリーマ発生判定基準として電離指数が 10 および 20, 両方の場合を検討した。

大気圧空気中の実効電離係数 α_{eff} は, Harrison 氏らの実験値⁽⁹⁾を次式で近似した。

$$\alpha_{\text{eff}} = 0.138(E - 21.4)^2 - 0.958 \quad \dots\dots (5)$$

α_{eff} : 実効電離係数 (1/cm), E : 電界 (kV/cm)

本論文で用いる電離指数 I は次のように計算される。

$$I = \int_l \alpha_{\text{eff}} dl \quad \dots\dots\dots (6)$$

l : 隔壁・平板電極間のギャップ軸に沿った積分経路

印加電圧を上昇させながら計算を進め、電離指数 I が 10 ないし 20 になった時点で隔壁・平板電極間にストリーマが発生し、その結果フラッシュオーバーが生じると判定する。

フラッシュオーバー電圧の計算手順を図 8 にまとめておく。隔壁のないギャップにおいて、測定あるいは推定される V_0 , Q_n の値と、隔壁の位置を示す幾何学的静電位 P を入力すれば、隔壁をそう入したときのフラッシュオーバー電圧が計算できる。なお、本論文文中における電界計算は電荷重畳法で行なった。

〈3・5〉 フラッシュオーバー電圧の計算値と実測値の比較 (3)式および(4)式が今回測定しなかった条件下でも成立すると仮定し、種々の実験状況における隔壁を有するギャップのフラッシュオーバー電圧を計算してみた。

まず、ギャップの長さによる隔壁効果の現われ方の違いを見たものが図 9 である。図中、横軸は針電極と隔壁の間の距離 a をギャップの長さ G で規格化した値で示した。図 9 (a) は雷インパルス電圧を印加したときの、また同図 (b) は閉鎖インパルス電圧を印加したときの結果である。電離指数 I が 10 になる判定条件でフラッシュオーバー電圧を計算した結果を実線で、また 20 となる判定条件で計算した結果を破線で示した。Marx 氏⁽¹⁾や奥村氏⁽²⁾の実験に対しても、計算値を求めてみた。理論計算に必要な V_0 の値は実測値を用いた。ギャップの長さ 10cm, 20cm 以外の Q_n の値は以下に述べる推定法に従って求め、フラッシュオーバー電圧の計算を行なった。ギャップの長さ 10cm, 20cm における Q_n の値は V_0 の値に対してほぼ比例関係にある。よって、他のギャップの長さでの Q_n としては、ギャップ 10cm, 20cm における Q_n と V_0 の関係を直線で外そうし、求めたいギャップの長さの V_0 に対応する Q_n の値を採用した。計算に利用した Q_n の値は、 V_0 の値と共に図 9 中に示されている。

なお、電極系の構成はギャップの長さ 10cm, 20cm では針対平板電極であるが、他のギャップの長さでは針対無限平面である。Marx 氏や奥村氏が用いた針電極形状はあまり明確でないで、Marx 氏の場合は本論文と同一形状の電極を、奥村氏らの場合は直径 1mm の針電極をそれぞれ仮定した。

図 9 において、Marx 氏の a/G の小さいところでの実測値以外は、電離指数が 10 ないし 20 になる条件から求めた計算値と実測値はほぼ一致している。また、フラッシュオーバー電圧が最大になる隔壁の位置が、ギャップの長さの増加につれギャップ中央に移ってくる傾向も計算値は明確に示している。

Marx 氏の用いた紙の厚さは 1.5mm で、本論文での紙厚 0.05mm および奥村氏らの紙厚 0.08mm と比べて非常に厚い。そのため、フラッシュオーバー機構が本論文で考察したものと違ってくるのが予想される。ベーク板など厚い隔壁を用いると、隔壁上の沿面放電や隔壁の外側を回り込む放電を介してフラッシュオーバーに至る。そのときのフラッシュオーバー電圧は $a=0$ の付近で最大になる⁽³⁾⁽⁵⁾。Marx 氏の実測値を見るとフラッシュオーバー電圧が最大になる a の値が計算値に比べかなり零に近くなっている。これは厚さ 1.5mm の紙になると、ベーク板などによる隔壁効果に類似してくることを示している。

次に、針電極以外の半球棒電極、円筒刃形電極についても針電極と同様の手順で計算を行なった。その結果を図 10 に示す。半球棒電極は 6mmφ の黄銅棒先

図 9 隔壁を有するギャップのフラッシュオーバー電圧における計算値と実測値の比較

Fig. 9. Comparison between calculated and measured breakdown voltage of gap insulation with barrier.

端を半球状にしたものであり、また円筒刃形電極は外径 16mm、肉厚 1mm の黄銅管の端面を刃先角 40 度に仕上げたものである。

雷インパルス電圧印加時の半球棒電極の場合に、フラッシュオーバー電圧が最大になる隔壁位置が実測値と計算値の間でずれている。半球棒電極に雷インパルス電圧を加えると、針電極とは異なり 1 回ないし 2 回のパルス的なコロナ放電しか生じない⁽⁴⁾。コロナ放電形態が特異な場合に本論文の計算手法を適用するのは、やや無理があるかもしれない。開閉インパルス電圧印加

時の半球棒電極および円筒刃形電極の場合は、一応、実測値は計算値によって推定されていると見ることができる。コロナ放電形態は両者とも針電極の場合と良く似ている。

上記計算において、 Q_n の値を推定して用いた場合も多い。そこで、 Q_n の値を変動させたとき、フラッシュオーバー電圧がどの程度変化するかを調べてみた。その結果、 Q_n の値が 20% 変動してもフラッシュオーバー電圧は最大 5% 程度しか変化しないことを確認した。従って、 Q_n の推定誤りがフラッシュオーバー電圧に大き

図 10 半球棒電極および円筒刃形電極をもつギャップに隔壁をそう入したときのフラッシュオーバー電圧、計算値と実測値の比較

Fig. 10. Comparison between calculated and measured breakdown voltage of hemispherical rod-to-plane and cylindrical edge-to-plane gaps with barrier.

く影響しないと断定できる。

以上、コロナ放電が間欠的または連続的に発生する電極をもち、隔壁が薄い場合の隔壁効果におけるフラッシュオーバー電圧は、本論文の計算法により理論的に求められることがわかった。フラッシュオーバー電圧の推定値としては、値を過大評価しない意味において電離指数が 10 になる判定条件で計算した値を採用するのが望ましいだろう。

4. ま と め

絶縁紙隔壁を有する針対平板電極に正極性インパルス電圧を印加した場合のフラッシュオーバー機構およびフラッシュオーバー電圧の計算法を検討した。本論文で得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 針電極から発生したストリーマは隔壁で進展を阻止され、隔壁を越えて平板電極に到達できない。その結果、隔壁をそう入することによりフラッシュオーバー電圧は上昇する。

(2) 印加電圧が高くなりコロナ放電電荷量も増加すると、隔壁・平板電極間の電界は上昇する。電界がある程度以上になると、隔壁・平板電極間にもストリーマが発生し、その部分を橋絡する。最後に針電極から進展してきたリーダと隔壁・平板電極間のストリーマが結合し、フラッシュオーバーに至る。

(3) 隔壁・平板電極間にストリーマが発生できる

電界の条件が成立したときフラッシュオーバーが生じると仮定し、また各種測定量を定式化した後フラッシュオーバー電圧の理論計算を行なった。特殊な場合を除いて、計算値と理論値は一致することが判明した。

最後に、本研究を進めるにあたり御教授、御助力をいただいた東京大学千葉政邦氏、防衛大学校室岡義広教授に感謝の意を表します。

(昭和 56 年 5 月 8 日受付)

文 献

- (1) E. Marx: "Der Durchschlag der Luft im unhomogenen elektrischen Felde bei verschiedenen Spannungsarten", *Electrotech. Z. (ETZ)-A*, **33**, 1161 (1930),
- (2) 奥村・大石:「不平等電界における隔壁効果」, 電学論 A, **96**, 127 (昭 51-3)
- (3) 高野, 他:「気中棒ギャップにおける絶縁バリアの効果」, 電気学会放電研資 ED-78-35 (昭 53)
- (4) 日高・河野:「正極性インパルス電圧印加時における空間電荷と隔壁効果」, 電学論 A, **99**, 313 (昭 54-7)
- (5) 吉田, 他:「気中バリア絶縁による耐圧向上の検討」, 電学論 B, **100**, 57 (昭 55-1)
- (6) 日高・河野:「ボッケルス素子を用いたインパルス領域の電界測定法と隔壁効果への応用」, 電学論 A, **100**, 401 (昭 55-7)
- (7) 堀井:「空間電荷注入により電極上へ静電誘導される電荷」, 昭 51 電気学会全大, 102
- (8) A. Pedersen: "Calculation of spark breakdown or corona starting voltages in nonuniform fields", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-86**, 200 (1967)
- (9) A. Harrison & R. Geball: "Simultaneous measurement of ionization and attachment coefficients", *Phys. Rev.*, **91**, 1 (1953)