

論 文

気中棒対棒ギャップ放電における正雷インパルス 電圧印加時のバリア効果

豊福正治*, 工藤孝一*

(1990年6月9日受理)

Barrier Effect on Rod-to-Rod Air Gap Discharge with Positive Lightning Impulse Voltage

M. TOYOFUKU* and K. KUDO*

(Received June 9, 1990)

It has been known that an impulsive flashover voltage increases by insert of insulating plate (barrier) between two electrodes with non-uniform field. This phenomenon is called barrier effect. The barrier effect depends on many factors such as the wave form of applied voltage, the electrode shape, the arrangement of barrier and so on. In this work, the barrier effects are studied experimentally changing the arrangement and thickness of barrier with different materials in rod-to-rod gap under positive lightning impulse voltage of $1/40\ \mu s$. The results show that the flashover voltage increases with the increasing barrier thickness and with the decreasing dielectric constant of the barrier. Moreover, these measured results are summarized as one formula between the flashover voltage and the specific capacitance of barrier at a given gap length : $V_{50}/V_{050} = \alpha C_0^{-\beta}$ where, V_{50} is flashover voltage with barrier, V_{050} is flashover voltage without barrier, C_0 is specific capacitance and α and β are constants depending on the gap length.

1. まえがき

針對平板電極や棒対平板電極などのような不平等電界中に、絶縁板（以下、バリアと呼ぶ）を挿入すると、フラッシュオーバ電圧はバリアがない場合と比較して上昇することが知られている。このような現象は一般に隔壁効果またはバリア効果などと呼ばれている。バリア効果の研究は古く1930年ごろ Marx¹⁾ や Roser²⁾ が針對平板電極間に紙を挿入した場合に、フランシオーバ電圧は紙の挿入位置に依存して上昇することを見出したのが最初である。その後、これに関する研究は少なかったが、1970年代に入り電力機器のコンパクト化のために各方面で研究が再開されている。

例えば、紙をバリアとした場合において、奥村ら³⁾ は針對平板電極構成を主として各種の電圧を用い、また日

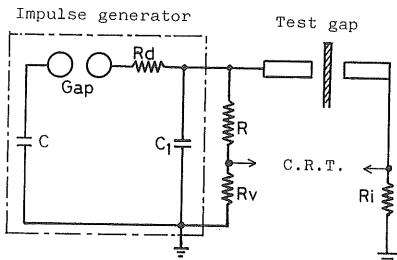
キーワード：バリア効果、固有容量、正雷インパルス、沿面放電、フランシオーバ電圧

* 福岡工業大学工学部電気工学科 (811-02 福岡市東区和白東 3-30-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Fukuoka Institute of Technology 30-1, Wajiro-higashi 3-chome Higashi-ku Fukuoka, 811-02 Japan

高ら⁴⁾ は棒対平板電極構成で雷インパルスおよび開閉インパルス電圧を用い、それぞれフランシオーバ電圧の上昇はバリア上への電荷供給量の拡がりで説明できることを報告している。一方、貫通破壊とはなりにくいフェノール製積層板をバリアとした場合において、高野ら⁵⁾ および吉田ら⁶⁾ はそれぞれ棒対棒、棒対平板電極構成において、正極性インパルス電圧を印加した場合のフランシオーバ電圧の上昇は、前駆放電が支配していることを報告している。このように、バリア効果は印加電圧の種類や極性、電極の形状や構成、ギャップ長、バリアの高さおよび挿入位置など種々の実験条件により異なるため、多くの実験が行われている⁷⁾。しかし、バリアの厚さ⁸⁾ および材質についての報告は比較的少ない。

そこで、筆者らは電気機器に対する実用性の面から貫通破壊しにくいバリアを用い、実用化における参考データを得ることを目的とし、バリアの厚さや材質および高さなどがバリア効果に及ぼす影響について詳細に検討した。この結果、バリアの厚さについては厚いほどバリア効果が大きく、バリアの材質については材質の比誘電率が小さい方がバリア効果が大きくなることが判明した。さらにのことより、バリアの厚さや比誘電率で定まる



回路の定数

$C : 0.25/12 \mu\text{F}$ $R : 600 \times 4 \Omega$
 $C_1 : 0.002 \mu\text{F}$ $R_v : 0.2 \Omega$
 $R_d : 20 \times 12 \Omega$ $R_i : 0.02 \Omega$

図1 実験回路図

Fig. 1 Experimental circuit.

固有容量がバリア効果を評価する大切なパラメータになる。例えば、固有容量が小さいほどバリア効果が大きくなることが明らかとなつたので報告する。

本実験で得られた結果は、電気機器に対してバリア効果を利用する際に、有益な情報を提供するものと考える。

2. 実験装置および方法

図1は実験回路を、図2は電極構成およびバリア配置を示す。電極構成は棒対棒電極とし、棒電極は一辺が12.5 mm の正方形断面の真ちゅう製である。バリアは電極系の軸に垂直に挿入した。バリアの大きさは 400 mm × 450 mm とし、ラッショーバがバリア上部のみで生じるように、横および下部方向には十分長くした。使用したバリアはメラミン樹脂板（メラミン）、フェノール製積層板（ベーク）、アクリル樹脂板（アクリル）およびポリエチレン板（ポリエチレン）の4種類とし、その厚さ d は 2, 5, および 10 mm である。ギャップ長 G は 20, 40, 60 および 80 mm と変化させた。

実験はすべて大気中で行い、バリアの位置 a を $0 \sim (G-d)$ の範囲で、バリアの高さ H は $0 \sim 160$ mm の範囲で行った。印加電圧はほぼ $1/40 \mu\text{s}$ の正雷インパルス電圧とし、約30回の昇降法により50% ラッシュオーバ電圧（50% F.O.V.） V_{50} を測定した。なお、放電電圧のはらつきは最大と最小の差が V_{50} の10%程度で、大きいときでも20%以内であった。バリアを取り替えた場合と取り替えない場合の放電電圧のはらつきが、ほぼ同程度だったので、バリア表面の残留電荷の除去は特別には行っていない。以降の実験では、バリアに損傷がない限り、バリアは取り替えずに連続して使用した。

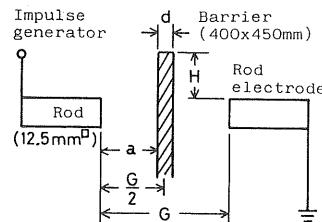


図2 電極とバリアの配置

Fig. 2 Arrangement of electrodes and barrier.

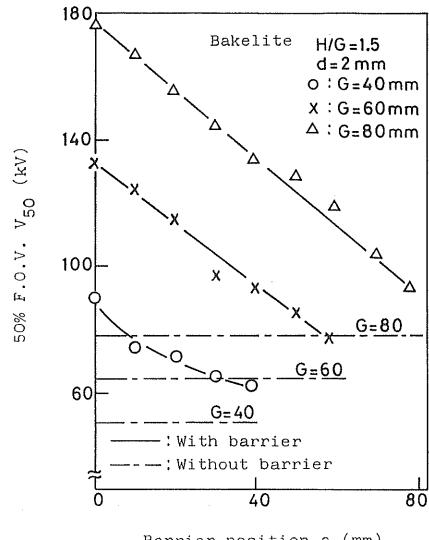


図3 50% ラッシュオーバ電圧とバリア位置の関係

Fig. 3 Relationship between 50% impulse flashover voltage and position of barrier.

3. 実験結果および考察

3.1 バリアの高さおよび插入位置による50% ラッシュオーバ電圧

バリアの高さおよび插入位置による50% ラッシュオーバ電圧の特性については、かなり調べられている^{5,6}。しかし、本論文ではバリアの厚さおよび材質による V_{50} への影響を調べる際の、插入位置および高さを定めるために以下の実験を行った。

図3は、ベークをバリアとし $G=40, 60, 80$ mm とした場合の V_{50} とバリア插入位置 a との関係を示す。ここで、 $d=2$ mm、バリアの高さ H は各 G に対して $H/G=1.5$ となるように変化した。なお、 V_{50} はバリアがない場合の50% ラッシュオーバ電圧で、同図では $G=40, 60, 80$ mm における V_{50} を、それぞれ一点鎖線で示している。

同図より、 V_{50} は $a=0$ において最大値を示し、 a を

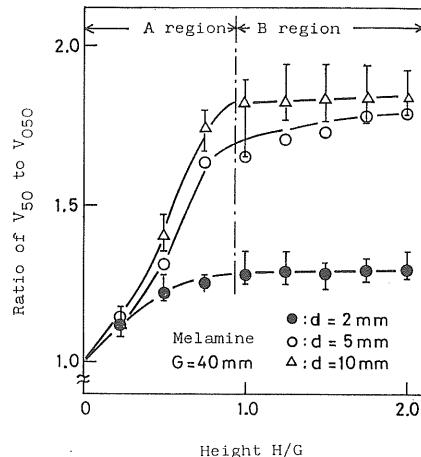


図4 V_{50}/V_{050} 対バリア高さの関係(メラミン, $G=40$ mm)

Fig. 4 Relationship between 50% impulse flashover voltage and normalized height of barrier.

増すにつれほぼ直線的に減少し, $a=G-d$ においては最小値となる。この V_{50} の最小値は V_{050} の値よりも大きく、バリアをどの位置に挿入してもバリア効果が得られる。このことに関しては、高野ら⁵⁾および吉田ら⁶⁾も同様な結果を得ている。なお、この特性は $H/G > 0$ となるすべての領域において、本実験における G , d およびバリアの材質を変えた場合もほぼ同様であった。

以上のように、正雷インパルス印加時においてバリアの挿入位置による 50% フラッシュオーバ電圧の上昇は、バリアを電圧印加電極側に配置した場合が最も大きく、接地側では最小となり、ギャップ中央ではほぼ最大と最小との平均的な値となる。本研究では棒対棒電極系で正雷インパルス電圧を印加したが、実用の機器では負雷インパルス電圧が高圧側になることもある。このことを考えるとギャップ中央にバリアを設置するのが、機器の耐圧向上のために最も有効と考えられる。これより、以降の本研究ではバリアの挿入位置はギャップの中央に固定する。

次に、バリアの高さを変化させた場合のフラッシュオーバ電圧の影響を調べた。なお、以下の実験を示すグラフにおいて、 V_{050} は $G=20, 40, 60$, および 80 mm の場合に、それぞれ 34, 51, 65 および 78 kV である。

図4は、メラミンをバリアとし $G=40$ mm における V_{50}/V_{050} 対 H/G の関係を示す。なお、図中には $d=2$ mm および 10 mm の場合の放電電圧のばらつきを縦棒で示しているが、放電電圧の最大値と最小値との差は $d=2$ mm の場合がほぼ 7%, $d=10$ mm の場合がほぼ 14% 程度である。この結果はギャップ長、バリアの材質を変

えた場合もほぼ同様で、ばらつきが大きいときでも V_{50} の 20% 以下であった。同図より明らかのように、 H/G を増すことにより V_{50}/V_{050} は、 $H/G < 1$ の範囲においてほぼ直線的に上昇し、 $H/G = 1$ 付近で飽和が始まり、 $H/G > 1$ の範囲においてはほぼ一定の値となる。なお、この結果は d を変化させた場合も同様であったが、 $H/G > 1$ の範囲では d が大きいほど V_{50}/V_{050} の飽和値は大きい。そこで、この d の効果については 3.2 節で詳しく述べる。

以上述べたように、 V_{50}/V_{050} 対 H/G の関係は、 V_{50}/V_{050} が直線的に上昇する $H/G < 1$ の範囲と飽和する $H/G > 1$ の範囲の 2 つの領域に分けることができる。ここでは、前者を A 領域、後者を B 領域と呼ぶ。なお、メラミンの $G=60$ および 80 mm における V_{50}/V_{050} 対 H/G の関係も H/G を増すことにより、 $G=40$ mm の場合とほぼ同様な特性となった。なお、B 領域の始まる H/G の値は、 G の値に若干依存し、 $G=40$ mm の場合には 1.0 で、 $G=60$ および 80 mm の場合にはほぼ 0.75 とやや小さくなる。更に、図には示していないが、バークをバリアとした場合の V_{50}/V_{050} 対 H/G の関係もメラミンの場合とほぼ同様な特性となったが、B 領域における V_{50}/V_{050} の飽和値はメラミンと比較して各 G ともやや大きくなかった。例えば、 $G=40$ mm, $d=5$ mm の場合の V_{50}/V_{050} はメラミンの 1.73 に対してバークは 1.84 である。また、アクリルをバリアとし $G=20, 40, 60$, および 80 mm とした場合の V_{50}/V_{050} 対 H/G の関係もメラミンおよびバークの場合とほぼ同様な特性となった。ここで、 V_{50}/V_{050} の飽和値は各 G ともメラミン、バークの場合と比較して大きくなかった。例えば、 $G=40$ mm, $d=5$ mm の場合の V_{50}/V_{050} はバークの 1.84 に対してアクリルは 2.23 であった。次に、ポリエチレンをバリアとした場合の V_{50}/V_{050} 対 H/G の関係もアクリルなどの場合とほぼ同様な特性が得られたが、 V_{50}/V_{050} の飽和値はメラミン、バークおよびアクリルの場合と比較して大きくなかった。例えば、 $G=40$ mm, $d=5$ mm の場合の V_{50}/V_{050} はアクリルの 2.23 に対してポリエチレンは 2.27 であった。このことは、バリアの材質によりバリア効果の大きさが異なることを示唆していると考えられるので、3.3 節で詳しく述べる。

以上のように、バリアをギャップの中央に配置し高さを変えた場合の 50% フラッシュオーバ電圧は、 H/G を増すことにより A 領域ではほぼ直線的に上昇し、 H/G が 1.0 付近では飽和が始まり、B 領域ではほぼ一定となる。ところで、放電路写真観測によると⁹⁾、A 領域ではバリアが低いため放電はバリア表面を這うことなく、いわゆる気中放電になっているが、B 領域では放電が一度

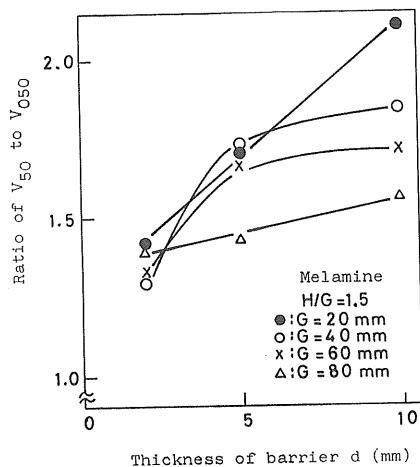


図5 V_{50}/V_{050} 対バリア厚さの特性 (メラミン, $H/G=1.5$)

Fig. 5 Characteristics of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. thickness with melamine barrier.

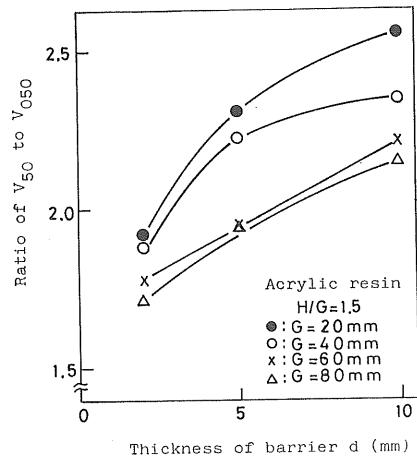


図7 V_{50}/V_{050} 対バリア厚さの特性 (アクリル, $H/G=1.5$)

Fig. 7 Characteristics of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. thickness with acrylic resin barrier.

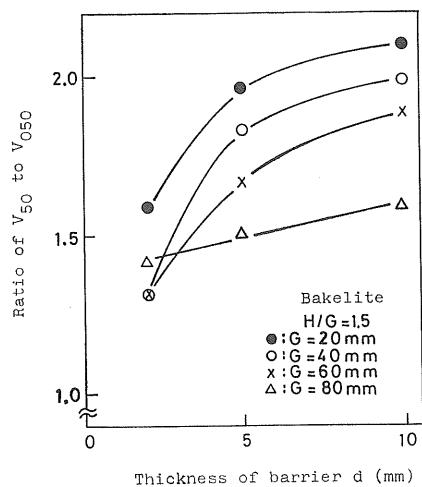


図6 V_{50}/V_{050} 対バリア厚さの特性 (ベーク, $H/G=1.5$)

Fig. 6 Characteristics of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. thickness with bakelite barrier.

バリアに衝突し、沿面に沿って進展する形態となってい
る。バリアの厚さや材質を変えてても、電極からの放電進
展に対してはバリアの存在の影響は小さいと考えられ,
上記のような結果になったと考えられる。

3.2 バリアの厚さによるバリア効果

B領域における厚さによる効果を詳細に調べるために,
 $H/G=1.5$ に固定し, V_{50}/V_{050} 対 d の関係を求めた。
図5～図8に、それらの結果を示す。

図5は、メラミンの場合の $G=20, 40, 60$, および
 80 mm における V_{50}/V_{050} 対 d の関係を示す。同図より
明らかなように、バリア効果の大きさは d に依存し d を

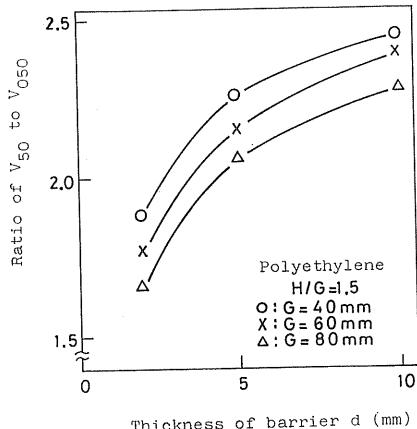


図8 V_{50}/V_{050} 対バリア厚さの特性 (ポリエチレン, $H/G=1.5$)

Fig. 8 Characteristics of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. thickness with polyethylene barrier.

増すことにより V_{50}/V_{050} は徐々に増加する。例えば,
 $G=20\text{ mm}$, $d=10\text{ mm}$ における V_{50}/V_{050} は $d=2\text{ mm}$
の場合と比較して 1.5 倍となる。この結果は、 G を変化
させた場合もほぼ同様な特性を示し、 $G=40, 60$, およ
び 80 mm とした場合にそれぞれ 1.45, 1.30, およ
び 1.10 倍となった。なお、 d の変化によるバリア効果は G
が小さい方が大きい。

図6～図8は、ベーク、アクリルおよびポリエチレン
の場合の $G=20, 40, 60$, および 80 mm における V_{50}/V_{050}
対 d の関係であるが、全体としての傾向はメラミン
の場合と同様である。しかし、バリア効果の絶対値は異
なり、ベークの場合 $G=20\text{ mm}$, $d=10\text{ mm}$ における

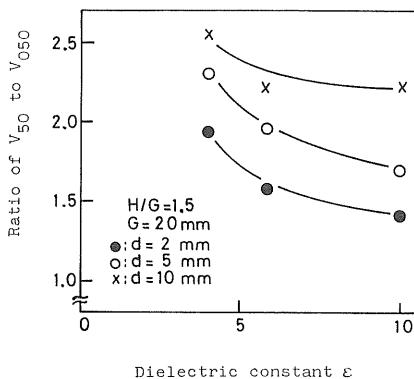
図 9 V_{50}/V_{050} 対誘電率の特性 ($G=20$ mm)

Fig. 9 Characteristics of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. dielectric constant with gap length 20 mm.

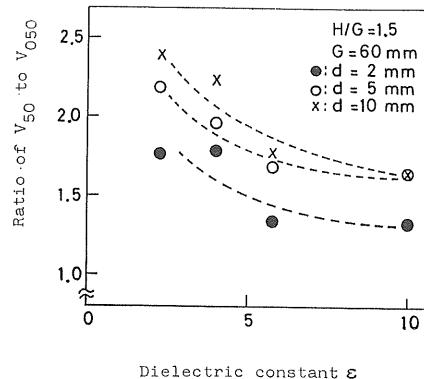
図 11 V_{50}/V_{050} 対誘電率の特性 ($G=60$ mm)

Fig. 11 Characteristics of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. dielectric constant with gap length 60 mm.

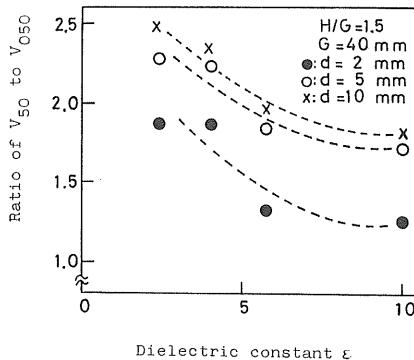
図 10 V_{50}/V_{050} 対誘電率の特性 ($G=40$ mm)

Fig. 10 Characteristics of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. dielectric constant with gap length 40 mm.

V_{50}/V_{050} は $d=2$ mm の場合と比較して 1.30 倍となる。この結果は、 G を変化させた場合もほぼ同様な特性を示し、 $G=40, 60$, および 80 mm とした場合に、それぞれ 1.50, 1.35, および 1.10 倍となった。また、アクリルの場合の $G=20$ mm, $d=10$ mm における V_{50}/V_{050} は $d=2$ mm の場合と比較して 1.32 倍となる。この結果は、 G を変化させた場合もほぼ同様な特性を示し、 $G=40, 60$, および 80 mm とした場合に、それぞれ 1.26, 1.25, および 1.24 倍となった。なお、 d の変化によるバリア効果はメラミンの場合と同様に G が小さい方が若干大きい。

更に、ポリエチレンの場合の $G=40$ mm, $d=10$ mm における V_{50}/V_{050} は $d=2$ mm の場合と比較して 1.30 倍となる。この結果は、 G を変化させた場合もほぼ同様な特性を示し、 $G=60$ および 80 mm とした場合にそれぞれ 1.34 および 1.39 倍となった。

以上のように、バリア効果は、A 領域では d にほとん

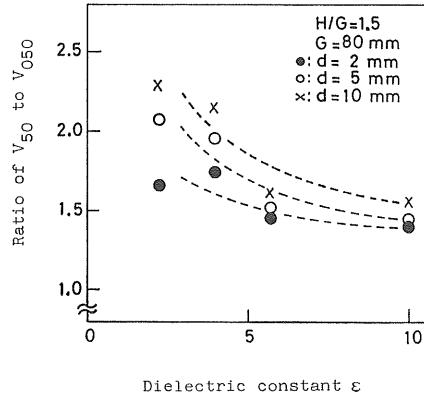
図 12 V_{50}/V_{050} 対誘電率の特性 ($G=80$ mm)

Fig. 12 Characteristics of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. dielectric constant with gap length 80 mm.

ど関係なく H/G とともに増加し、B 領域では H/G に無関係で d が大きいほど大きい。このことは 3.1 節で述べた放電の機構が、A 領域では気中放電形態となることから厚さの影響が小さく、B 領域ではバリア部において沿面放電形態となることから放電の進展が、バリアの厚さ、すなわち固有容量に影響されるために生じたと考えられる。固有容量と破壊電圧の関係については、3.4 節で改めて述べる。

3.3 バリアの材質によるバリア効果

3.1 節で述べたように、B 領域におけるバリア効果はバリアの材質に影響されることを示した。ここで、バリアの材質によるバリア効果の大きさについて検討する。

図 9～図 12 は、 V_{50}/V_{050} 対バリアの誘電率 ϵ の関係を示す。ここで、各種材質の比誘電率 ϵ_s^{100} はメラミン、ペーク、アクリルおよびポリエチレンの場合にそれぞれ 9～11, 5～6.5, 3.5～4.5, および 2.25～2.35 である

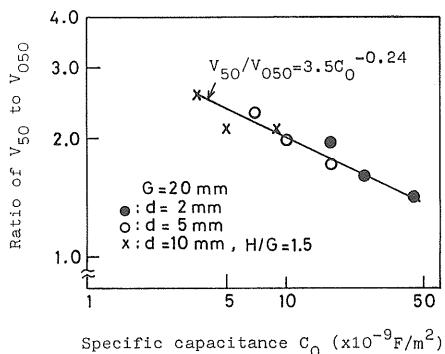


図 13 V_{50}/V_{050} 対固有容量の特性 ($G=20\text{ mm}$)
Fig. 13 Characteristic of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. specific capacitance with gap length 20 mm.

が、以下の検討ではそれぞれの中央値を用いた。

図 9 は、 $G=20\text{ mm}$, $d=2, 5$, および 10 mm の場合の V_{50}/V_{050} 対 ϵ の関係を示す。同図より明らかなように、 ϵ を増すことにより V_{50}/V_{050} は徐々に減少し、 ϵ によるバリア効果の大きさは ϵ に依存し、 ϵ が小さいほどバリア効果が大きくなつた。例えれば、 $d=5\text{ mm}$ の場合の ϵ が 4.0 における V_{50}/V_{050} は ϵ が 10 の場合と比較して 1.36 倍となる。この結果は、 d を変化させた場合もほぼ同様であった。

図 10～図 12 は、 $G=40, 60$, および 80 mm とした場合の $d=2, 5$, および 10 mm の場合の V_{50}/V_{050} 対 ϵ の関係であるが、全体としての傾向は $G=20\text{ mm}$ の場合と同様である。しかし、バリア効果の絶対値は異なり、 $G=40\text{ mm}$ の場合の $G=5\text{ mm}$ の ϵ が 2.3 における V_{50}/V_{050} は ϵ が 10 の場合と比較して 1.31 倍となる。この結果は、 d を変化させた場合もほぼ同様であった。また、 $G=60\text{ mm}$ の場合の $d=5\text{ mm}$ の ϵ が 2.3 における V_{50}/V_{050} は ϵ が 10 の場合と比較して 1.32 倍となる。この結果は、 d を変化させた場合もほぼ同様であった。更に、 $G=80\text{ mm}$ の場合の $d=5\text{ mm}$ の ϵ が 2.3 における V_{50}/V_{050} は ϵ が 10 の場合と比較して 1.45 倍となる。この結果は、 d を変化させた場合もほぼ同様であった。

以上の結果より、B 領域におけるバリア効果はバリアの材質を変えることにより異なる。すなわち、バリア効果はバリア材質の比誘電率が小さいほど大きい。この結果は、B 領域における絶縁破壊は沿面放電が関係しており、沿面放電の絶縁破壊電圧を決める沿面距離と固有容量とのうち、バリアの比誘電率の変化すなわち、固有容量の影響による効果が現れたものと考えられる。このことについて、次節で詳しく述べる。

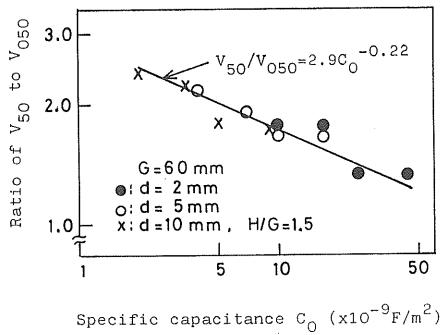


図 14 V_{50}/V_{050} 対固有容量の特性 ($G=60\text{ mm}$)
Fig. 14 Characteristic of the ratio of V_{50}/V_{050} vs. specific capacitance with gap length 60 mm.

3.4 バリア効果と固有容量の関係

前述のように、B 領域ではバリア効果の大きさはバリアの厚さ d が大きいほど大きく、また、材質の比誘電率が小さいほど大きいことがわかつた。そこで、これらの値を結合したパラメータとしてバリアの固有容量を取り上げ、バリア効果に及ぼす固有容量の影響について検討した。

図 13, 図 14 は、 $G=20, 60\text{ mm}$ の場合の V_{50}/V_{050} 対 C_0 の特性を示す。ここで、 C_0 はバリアの固有容量 (F/m^2) で、沿面単位面積当りの静電容量であり、3.3 節に示した比誘電率 ϵ_s を用いて計算した。これらの図より、 C_0 を増すにつれ V_{50}/V_{050} は C_0 に依存しほば直線的に減少する。例えれば、 $G=20\text{ mm}$ の場合は C_0 が $3.5 \sim 44 \times 10^{-9} \text{ F/m}^2$ での V_{50}/V_{050} は $2.54 \sim 1.41$ へとほぼ直線的に減少する。この特性の傾向は $G=40, 80\text{ mm}$ の場合もほぼ同様である。しかし、 V_{50}/V_{050} の絶対値は異なり、例えれば $G=60\text{ mm}$ の場合は C_0 が $2.0 \sim 44 \times 10^{-9} \text{ F/m}^2$ での V_{50}/V_{050} は $2.38 \sim 1.33$ へと減少する。

以上の結果より、図に実線で示した V_{50}/V_{050} の実験式を求めるに、次式で与えられる。

$G=20\text{ mm}$ の場合

$$V_{50}/V_{050} = 3.5C_0^{-0.24} \quad (1)$$

$G=60\text{ mm}$ の場合

$$V_{50}/V_{050} = 2.9C_0^{-0.22} \quad (2)$$

V_{50}/V_{050} はそれぞれ $C_0^{-0.24}, C_0^{-0.22}$ に比例している。従来、空気中の沿面破壊は $C^{-0.4}$ に比例するとされていて¹¹⁾。本研究の場合は、B 領域の V_{50} は C_0 に依存するものの、 C_0 の依存に関する指数が小さくなっている。これは、B 領域の破壊が気中の放電と沿面の放電の両方に支配され、全体として沿面の割合が純粋な沿面放電の場合より少なくなっているためと考えられる。

以上述べたように、バリアの厚さおよび材質によるバリア効果は、これらの値を結合したパラメータとしての

バリアの固有容量で定まり、 V_{50}/V_{050} と C_0 の関係より実験式が求められる。この式より、バリア効果の大きさが評価できることが明らかになった。

4. ま と め

気中棒対棒電極を用い、正雷インパルス電圧を印加した場合のバリア効果について、主としてバリアの厚さおよび材質が及ぼす影響について検討した。本研究で得られた主な結果を要約すると、次のようになる。

(1) バリアの高さと放電電圧の関係は、放電電圧が直線的に上昇する $H/G < 1$ の範囲と飽和する $H/G > 1$ の範囲の 2 つの領域に分けることができ、前者を A 領域、後者を B 領域とする。

(2) バリアの厚さによるバリア効果は、B 領域ではバリアの厚さ d に依存し、 d が大きい方がバリア効果は大きくなる。なお、A 領域では d にほとんど無関係である。

(3) バリアの材質によるバリア効果は、B 領域では材質の比誘電率 ϵ_s に依存し、 ϵ_s が小さい方が大きくなる。

(4) (2), (3)の結果は、バリアの厚さと材質の ϵ_s で定まる固有容量 C_0 で説明することができ、 C_0 が小さい方がバリア効果は大きくなる。ここでは、バリア効果の大

きさを評価する実験式を示した。

(5) ギャップ長の変化によるバリア効果は、B 領域ではギャップ長が小さい方が大きくなる。

最後に、日頃から御指導頂く九州大学工学部 原雅則教授に深く感謝の意を表すものである。

参 考 文 献

- 1) E. Marx : Electrotech, Z. H-33 (1930) 1161
- 2) M. Roser : Electrotech, Z. H-17 (1932) 411
- 3) 奥村典男, 犬石嘉雄: 電気学会論文誌 A, 96 (1976) 127
- 4) 日高邦彦, 河野照哉: 電気学会論文誌 A, 99 (1979) 313
- 5) 高野哲美, 夏目文夫, 山田 守, 松浦 清: 電気学会放電研究会資料, ED-78-35 (1978)
- 6) 吉田哲雄, 西川尚男, 高木邦彦, 今駒 澄, 正木信男: 電気学会論文誌 B, 100 (1980) 57
- 7) 電気学会放電バリア効果調査専門委員会編: 電気学会技術報告 II 部, 第270号 (1988)
- 8) K.S. Naidu, S.K. Jain, V.N. Maller and P. Satyanarayana: IEEE Trans. EI, EI-14 (1979) 285
- 9) 豊福正治, 工藤孝一, 久保田克人: 電気学会放電研究会資料, ED-83-13 (1983)
- 10) 平井平八郎, 豊田 実, 犬石嘉雄, 成田賢仁, 安藤賢一: 大学過程 電気材料 (改訂 第2版) pp. 38, 42, オーム社 (1980)
- 11) 電気学会編: 放電 ハンドブック, p. 227, 電気学会 (1982)