

# 配電用直列ギャップ付酸化亜鉛形避雷器の $V-t$ 特性の改善に関する研究

堀江 響<sup>a)</sup>・迫田 達也<sup>b)</sup>・久保 克隆<sup>c)</sup>・水谷 学<sup>c)</sup>・深野 孝人<sup>c)</sup>

## Study on Improvement of $V-t$ Characteristic of ZnO Surge Arrester with a Series Gap in distribution systems

Hibiki HORIE, Tatsuya SAKODA,

Katsutaka KUBO, Manabu MIZUTANI, Takato FUKANO

### Abstract

Surge arrester with a spark gap has been installed for reducing the electrical failures in Japanese distribution systems. The top and the bottom of a ceramic spacer for sustaining an electrode gap in a surge arrester contact with electrodes, in which there are triple junction points formed among the ceramic spacer, the gap electrodes, and the atmosphere. Electric field at the triple-junction point becomes large; therefore, the triple junction point may influence on the discharge characteristics.

In this study, we made some electrodes with a small step edge on an inclined plane of an electrode. The electric field around the small step edge became high, and we aimed that the small step edge functioned as if it were a triple junction points for a conventional spark gap. The results will contribute on a further stabilization of discharge and raising design tolerance.

**Keywords:**  $V-t$  characteristics, Spacer, Surge arrester, Series gap

## 1. はじめに

高度情報化社会の発展に伴い、電力の安定供給が強く求められている。しかし、配電系統において、自然災害による事故停電を完全に避けることは困難である。その中でも、落雷による停電は、依然として事故件数に占める割合が比較的高い。そのため、配電系統においては、雷から電力機器を保護するための配電用ギャップ付避雷器が数多く設置されている。これらの電力機器は、動作目的に合わせて、放電を精度良く制御できることが望ましい。しかしながら、大気圧中の放電は電極形状、印加電圧、電界といった諸要因により影響を受ける。ギャップ付避雷器においては、放電ギャップを形成するために、ギャップを保持するためのスペーサ(絶縁管)が利用されている。このスペーサにより、大気、スペーサ、ギャップ電極が接する箇所においては局所的に電界が高くなる三重点が形成される。<sup>1)2)</sup>このような高電界部は部分放電の発生箇所となり、放電特性にどのような影響を与えるか詳細に把握しておくことが望ましい。著者らは、ギャップ電極とスペーサから成る放電ギャップにおいて形成される高電界部がギャップ間の放電特性に与える影響およ

び放電特性の改善に関しての検討を行っている。<sup>3)</sup>

本論文では、ギャップ電極の形状の変更によって、初期電子生成に影響を与えるであろう電界強度や初期電子生成部から電極頂点までの距離の短縮化が、雷インパルス放電の  $V-t$  特性に与える影響を測定し、放電遅れを定量的に評価するためのラウエプロットの測定を行った結果について述べる。

## 2. 実験方法と電界解析

### 2.1 作製電極の形状および電界計算条件

図 1 に示すような 4 種類の放電電極を作製し、実機と同様に、スペーサを用いて同じ形状の電極を対向配置して 8mm の放電ギャップを形成した。また、全ての電極の頂上部にはアーク圧力を解放できるような孔を設けた。電極 A 及び B の孔径は、電極の斜面に設けた高電界部と電極頂点部までの距離を短くするために既製品(3mm)よりも大きな 7mm とした。更に、電極 B については、電極斜面に、電界が高くなり、初期電子の生成率に影響を与えると考えられる図 1(b)に示す高さ 4.5 mm のエッジを設けた。電極 C の孔径は更に広げて 8mm とし、電極斜面のエッジは電極 B と同様とした。電極 D の凸部の孔径は 9mm に広げ、凸部斜面のエッジは電極 B と同様とした。なお、ギャップ電極頂点の曲率半径は全ての電極で 2.5 mm とした。

a)工学研究科工学専攻エネルギー系コース大学院生

b)工学教育研究部教授

c)東芝エネルギーシステムズ株式会社

図2に、解析モデルの一例として、ギャップ電極Aとギャップ長を保持する円筒型スペーサから構成されるギャップ電極を示す。円筒型スペーサは内径が20mm、高さ26mmとなっており、ギャップ電極のギャップ長は8mmとなっている。ギャップ電極と円筒型スペーサにはそれぞれ、銅は導電率、セラミックスは誘電率を与え、上部電極に30kVの電位を与えた時の条件で電界強度分布を計算した。

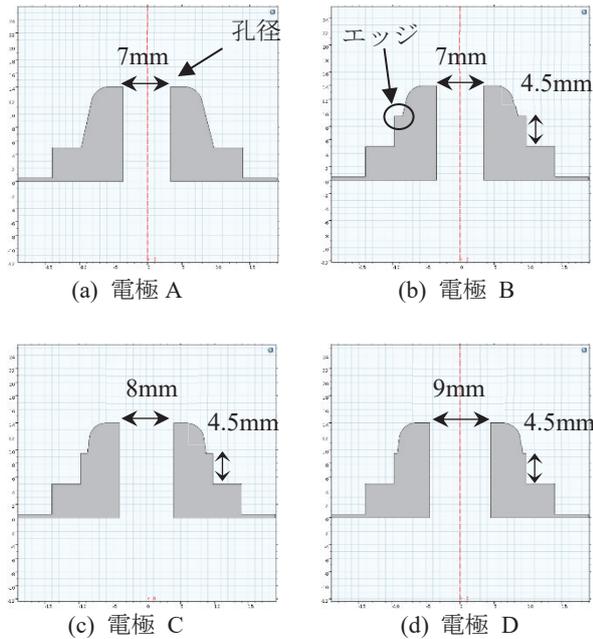


図1. 作製電極.

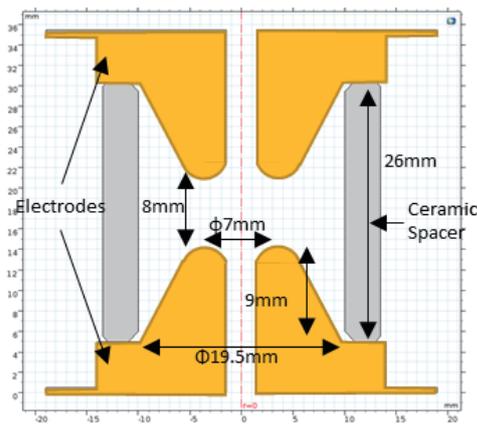


図2. 2次元解析モデルの例.

2.2 電界解析結果

図3から図6に電極A~Dの電界解析結果を示す。これらの図において白い部分は電界強度が5kV/mmを超えた箇所を示す。

初期電子生成部から電極頂点部までの最短距離と、最大電界強度を表1に示す。電極斜面にエッジが無い電極A

の三重点近傍の電界強度が2.4kV/mmであるのに対し、エッジ有りの電極Bではエッジ部の電界強度が16.5kV/mmと著しく高くなり、電極頂点部よりも高い電界領域が形成される。また、電極C、電極Dでも同じ傾向がある。このことからエッジを設けることによって電界強度が高くなり、放電が起こるための電子の供給量が多くなるため放電特性が安定すると考えられる。

以上のような電界計算によって得られた効果を*V-t*特性試験で明らかにすることとした。つまり、電極Aと電極Bの結果を比較することで三重点もしくはエッジ部の電界強度が与える影響を明らかにでき、電極Bと電極Cと電極Dを比較することで初期電子生成部から頂点までの距離が放電特性に与える影響を明らかにすることが出来る。

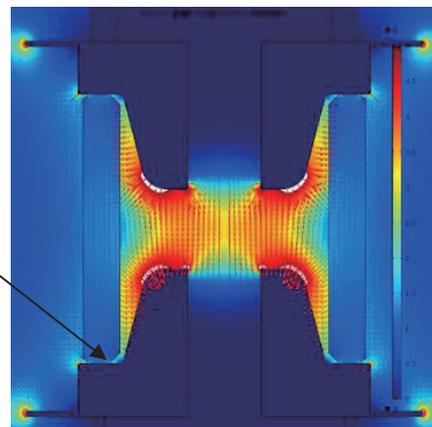


図3. 電極Aを用いた場合の電界強度分布.

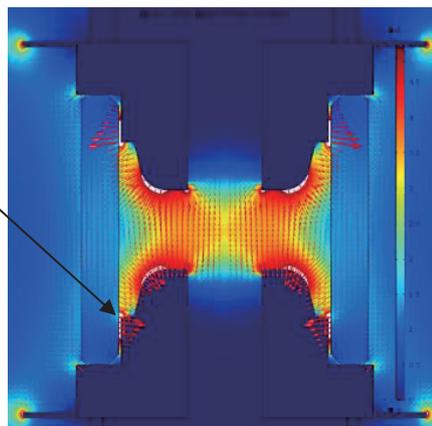


図4. 電極Bを用いた場合の電界強度分布.

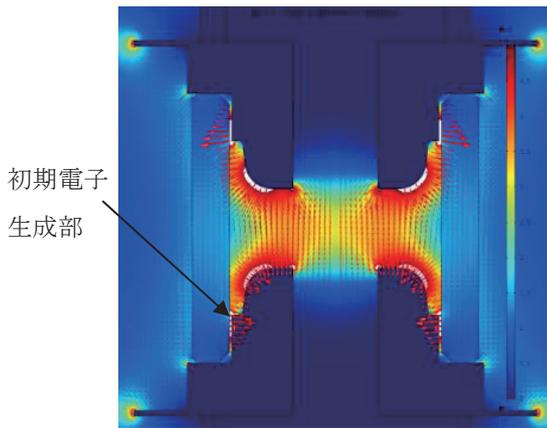


図5. 電極Cを用いた場合の電界強度分布.

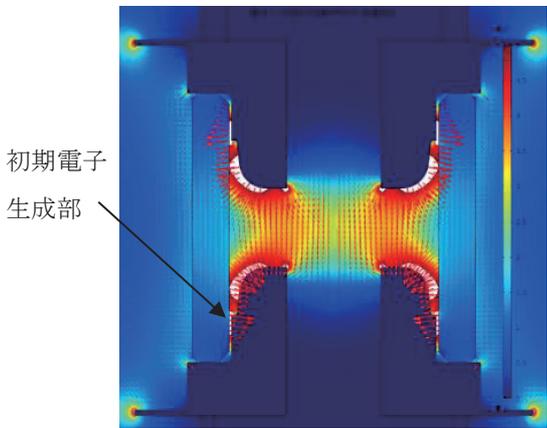


図6. 電極Dを用いた場合の電界強度分布.

表1. 初期電子生成部の最大電界強度及び電極頂点までの最短距離

Type	Shortest distance (mm)	Maximum E. (kV/mm)
A	7.06	2.46
B	4.03	16.5
C	3.51	15.6
D	3.05	12.2

### 2.3 雷インパルス放電試験条件

A から D の 4 種類のギャップ電極とスペーサを用いて構成した放電ギャップを碍管容器無しの避雷器内部要素を湿度制御が可能な容器内に配置し、湿度が放電特性に与える影響を小さくするために、容器内の絶対湿度を約  $5[\text{g}/\text{m}^3]$  に調整した。雷インパルス電圧は、図7に示す  $1.2/50 \mu\text{s}$  の標準雷インパルス電圧発生回路において、充電電圧を  $25 \text{ kV}$  から最大  $40 \text{ kV}$  の範囲で出力することとし、3 分間隔で  $1 \text{ kV}$  ずつ昇圧して印加した。放電電圧 ( $V$ ) と放電時間 ( $t$ ) はデジタルオシロスコープで記録した。

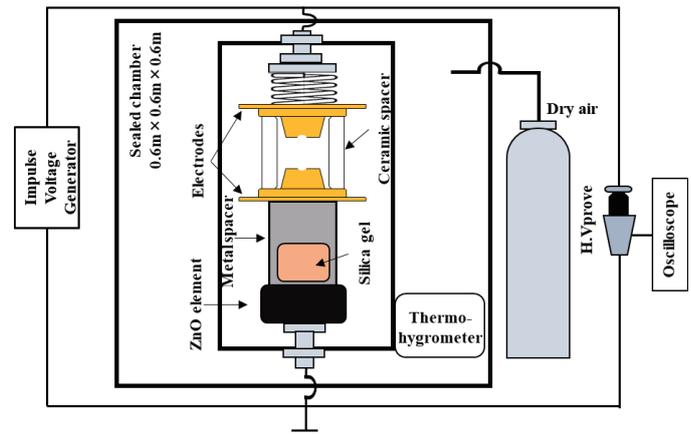


図7. 実験回路.

### 2.4 ラウエプロットによる放電遅れの評価

ラウエプロット法により、形状の異なる 4 種類の電極を用いた実験用避雷器における放電遅れ時間の測定及び単位時間当たりのギャップ間の電子数を求めた。電圧印加から火花放電が発生するまでに時間を要する現象を火花遅れといい、静的絶縁破壊電圧よりも急峻な電圧を印加すると顕著に現れる。火花遅れ  $t$  は、統計遅れ  $t_s$  と形成遅れ  $t_f$  の和として考えられている<sup>4),5)</sup>。また、火花を形成する初期電子のギャップ中における単位時間当たりの生成率  $\lambda_L$  を用いて(1)式のようなになる。なお、 $\lambda_L$  は時間に依存せず一定と仮定している。同一波形のパルス電圧を  $n$  回印加して放電遅れが  $t$  以上である回数が  $n_i$  である場合、(2)式のような関係が成り立ち、 $n_i/n = 1$  の時に  $t$  は  $t_f$  であり、 $n_i/n = 0.368$  で  $t = t_s + t_f$  と定義されている。

$$\lambda_L = 1 / t_s \quad (1)$$

$$n_i / n = \exp\{-\lambda_L(t - t_f)\} \quad (2)$$

ここでは、まず、放電ギャップの静的絶縁破壊電圧を事前に求め、過電圧率  $40\%$ 、 $30\%$  に相当する両極性の雷インパルス電圧を実験用避雷器に  $30$  回印加して、放電時間を測定した。その後、ラウエプロットから統計遅れ  $t_s$  と形成遅れ  $t_f$ 、単位時間当たりの初期電子の生成率  $\lambda_L$  を求めた。

## 3. 実験結果

### 3.1 放電ギャップの放電特性試験の結果

図8から図11に、電極Aから電極Dで得られた  $V-t$  特性を示す。表2に、火花放電開始電圧、火花放電電圧の範囲、火花放電の時間、標準偏差を示す。図8及び表2より、電極Aにおいては火花放電時間(放電遅れ)が顕著であり、放電時間の標準偏差が大きくなっていることが分かる。電極Bは、電極Aの結果と比較すると、火花放電電圧の範囲は比較的狭く、放電に至る時間も短いため、標準偏差も小さい。以

上のことから、電極斜面にエッジを設けることで放電特性が改善されることが分かる。また、電極C、電極Dにおいても、より放電特性が改善しており、特に電極Dでは火花放電電圧が低く、放電に至る時間も短くなっており、放電特性が大きく改善している。以上のように、ギャップ電極の孔径を広げ、初期電子生成部(エッジ部)から電極頂点までの距離を短くすることによって、放電特性を安定させることができる。

表 2. 電極 A-D における  $V-t$  特性

Type	Ignition voltage of sparkover (kV)	Range of sparkover voltage (kV)	Range of time to sparkover ( $\mu\text{s}$ )	Standard deviation
A	30	25~35	1.0~10	1.37
B	25	25~30	0.7~2.2	0.34
C	25	25~30	0.6~1.8	0.40
D	25	20~25	0.4~1.5	0.21

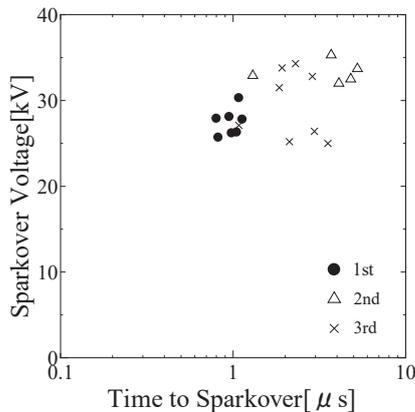


図 8. 電極 A における  $V-t$  特性

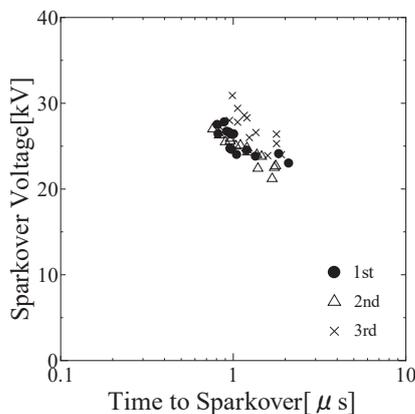


図 9. 電極 B における  $V-t$  特性

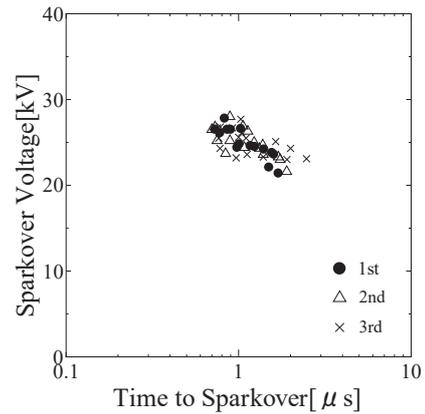


図 10. 電極 C における  $V-t$  特性

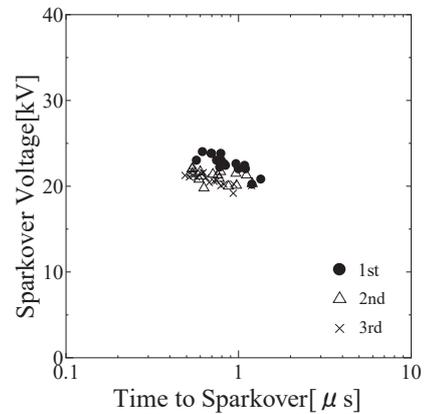


図 11. 電極 D における  $V-t$  特性

### 3.2 ラウエプロットの結果

図12から図15にラウエプロットを示す。また、表3及び表4には過電圧率40%及び30%時の、放電遅れ $t_d$ 、統計遅れ時間 $t_s$ と形成遅れ時間 $t_f$ の測定結果を示す。これらの結果より、電極の形状によって統計遅れ時間 $t_s$ と形成遅れ時間 $t_f$ 共に差が見られ、特に、統計遅れ時間 $t_s$ に大きな差が確認できる。

ラウエプロットの直線部分の勾配からギャップ中における単位時間当たりの初期電子の生成率 $\lambda_i$ を算出した結果を表5に示す。電極Aと電極Dを比較すると生成される電子数には14倍以上の差がある。以上の結果から、電極の形状によってギャップ中の電子生成率が異なり、放電遅れ時間に影響すると考えられる。具体的にはエッジで発生するコロナ放電のUV光によるギャップ中の光電離、あるいはコロナ放電によって生成された荷電粒子の一部がギャップ部に供給されることでギャップ部の電子が増え、放電の統計遅れが減少すると思われる。

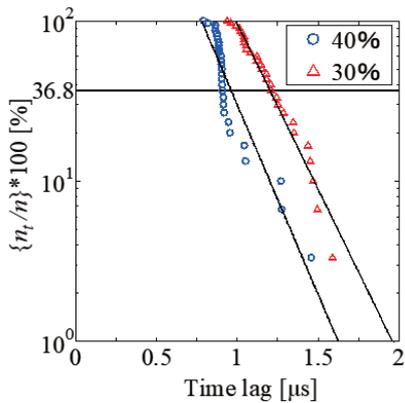


図 12. 電極 A におけるラウエプロット.

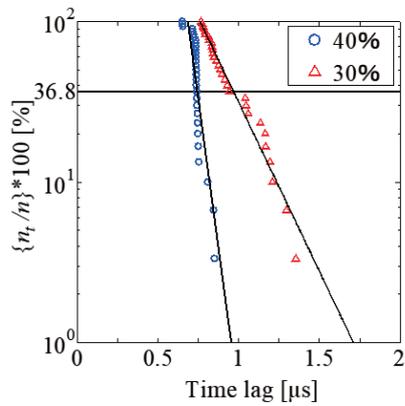


図 13. 電極 B におけるラウエプロット.

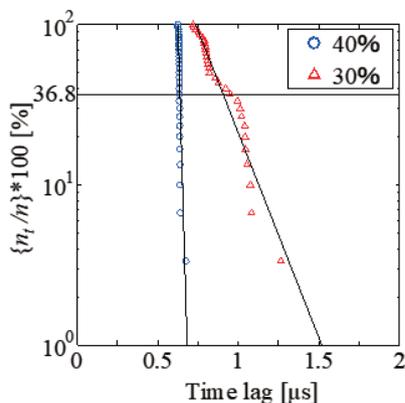


図 14. 電極 C におけるラウエプロット.

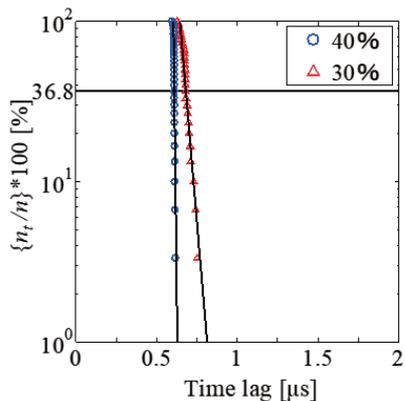


図 15. 電極 D におけるラウエプロット.

表 3 放電遅れ時間  $t$  の測定結果(40%)

Type	$t$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_s$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_f$ ( $\mu\text{s}$ )
A	0.962	0.17	0.792
B	0.742	0.092	0.65
C	0.637	0.012	0.625
D	0.609	0.012	0.597

表 4 放電遅れ時間  $t$  の測定結果(30%)

Type	$t$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_s$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_f$ ( $\mu\text{s}$ )
A	1.202	0.265	0.937
B	0.966	0.201	0.765
C	0.906	0.187	0.719
D	0.681	0.053	0.628

表 5 単位時間当たりの初期電子の生成率  $\lambda_L$

	過電圧率 40%	過電圧率 30%
Type	$\lambda_L$	$\lambda_L$
A	$5.8 \times 10^6$	$3.8 \times 10^6$
B	$1.1 \times 10^7$	$4.6 \times 10^6$
C	$8.3 \times 10^7$	$5.3 \times 10^6$
D	$8.3 \times 10^7$	$1.8 \times 10^7$

#### 4. 結論

電極の形状が放電遅れにどのような影響を与えるか明らかにするために、形状の異なる4種類の電極を用いて、放電特性試験、電極周辺の電界計算及びラウエプロットによる電子数の測定を行った。その結果、電極の斜面にエッジを設けることによりエッジ部の電界強度は、スペーサ、大気、電極の間に形成される三重点近傍の電界強度より高くなることを示した。すなわち、エッジを設けた電極を使用した場合には、電極周りの電界が高いこと、また、電極頂点の曲部とエッジとの距離を短いことによりコロナ放電のUV光によるギャップ中の光電離、あるいはコロナ放電によって生成された荷電粒子の一部がギャップ部に供給されることでギャップ部の電子が増え、放電の統計遅れが減少する。これによって放電開始電圧・時間が安定することが明らかとなった。

#### 参考文献

1) Masanori Hara, Takashi Kurihara, Susumu Kozuru, Junya Suehiro, Noriyuki Hayashi, "Estimation of partial discharge onset characteristics in gasses around a triple-junction", IEEE Transactions on FM, vol.116, No.7, pp.650-657, 2002.

- 2) Tadashi Kawamoto, Tadasu Takuma, Hisashi Goshima, Hiroyuki Shinkai, Hideo, Hideo Fujinami , “Triple-junction effect and its electric field relaxation in three dielectrics, IEEJ Transactions on FM, vol.127, No.2, pp.59-64, 2007.
- 3) Tatsuya Tokunaga, Shinnosuke Nishikawa, Tatsuya Sakoda, Takato Fukano, “Influence of triple-junction on sparkover voltage for a series gap of arrester”, 2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) pp. 2334-0975, 2013.
- 4) Yasushiti Gosyo, “Anomalous decrease of time lag of breakdown of gaps in gases by mixing water vapor”, IEEJ Transactions on FM, vol.116, No.6,pp.488-493, 1996.
- 5) M. G. Hogg, I. V. Timoshkin, M. J. Given, M. P. Wilson, S. J. Macgregor, T. Wang, R. A. Fouracre, J. M. Lehr: “Impulse breakdown of water with different conductivities”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, No. 5, pp. 1559-1568, 2012.