

# 管路気中送電線路用絶縁スペーサのフラッシュオーバー特性

## Flashover Characteristics of Insulating Spacers for SF<sub>6</sub> Gas-Insulated Cable

池田 忠 禧\* 加藤 勇次郎\*\*  
Chuki Ikeda Yujiro Katô

### 要 旨

管路気中送電線路の絶縁設計上、絶縁スペーサ部分の特性は最も重要であり、この特性は形状により大幅に変化する。ガス自体の絶縁特性に近い形状のスペーサを見いだすため、各種形状のスペーサを用いて、その絶縁特性を調査した。その結果、「裾野」を持ち、中央曲り部の曲率の大なる形状のスペーサの特性が良好であることがわかった。また、電子計算機により、スペーサの電界を計算し、スペーサの形状と電界分布との関係を明らかにした。さらに、スペーサ課電時のダストフィガーをとり、フラッシュオーバーを引き起こすストリーマの発生個所、発生状況を調べたところ、先の電子計算機による電界分布の計算結果とよく対応していることが判明した。最後に、275 kV 管路気中送電線用試作スペーサの特性および実用上の問題点についても記述した。

### 1. 緒 言

最近の急激な電力需要の増大と大都市周辺における架空送電線建設用地難に対処するため、超高圧、大電流の密閉形電力輸送線路である管路気中送電線路が福田節雄教授により提案された<sup>(1)</sup>。これは大電流容量の導体（母線）を密閉パイプ状シース中に保持し、導体とシース間の空間に圧縮気体（一般に SF<sub>6</sub> ガス）を満たして、絶縁体とした送電方式である。

この線路の絶縁設計上最も重要であり、また、むずかしい問題は導体支持スペーサの沿面フラッシュオーバーをいかに防止するかということである。ここでは、同心円筒間のドーナツ形スペーサのフラッシュオーバー特性について検討したが、この沿面フラッシュオーバー電圧は一般に同心円筒間のガス自体の破壊電圧よりかなり低い。この低下の原因として下記の事項があげられる。

- (1) 内部あるいは外部円筒電極とスペーサとの接触部分に局部的な電界集中個所があり、ここに微小放電が発生する。
- (2) スペーサの中間部分においても、スペーサのひだの間でガスの部分の電界が強まり、ガスが局部的に破壊する。
- (3) スペーサとガスの境界面に沿っての破壊電界はガス自身の破壊電界より低下する場合がある。さらに、それはガス中あるいはスペーサの表面に付着した塵粒子や水分によって大きく左右される。

ここでは、200 mmφ/80 mmφの同心円筒を用いて種々の形状のスペーサのフラッシュオーバー特性と形状との関係を調査し、電子計算機による電界計算とも対応させ検討した。また、スペーサ表面のダストフィガーをとり、フラッシュオーバーを引き起こすストリーマの発生個所、発生状況を調査した。

### 2. 各種スペーサのフラッシュオーバー特性

スペーサの形状とフラッシュオーバー電圧との関係を調べるため、外部円筒内径 200 mmφ、内部円筒外径 80 mmφ、の同心円筒を用いて実験を行なった。スペーサはエポキシ樹脂製のものである。使用ガスは SF<sub>6</sub> ガスである。スペーサの表面は 12 S の程度に切削加工してある。スペーサの内部および外部円筒との接触面はエポキシ系導電ペイントを端部 2 mm を残して塗布してある。

図 1 は使用したスペーサの断面図を、図 2 ~ 4 はフラッシュオーバー特性を示したものである。

### 3. 電界分布とフラッシュオーバー特性

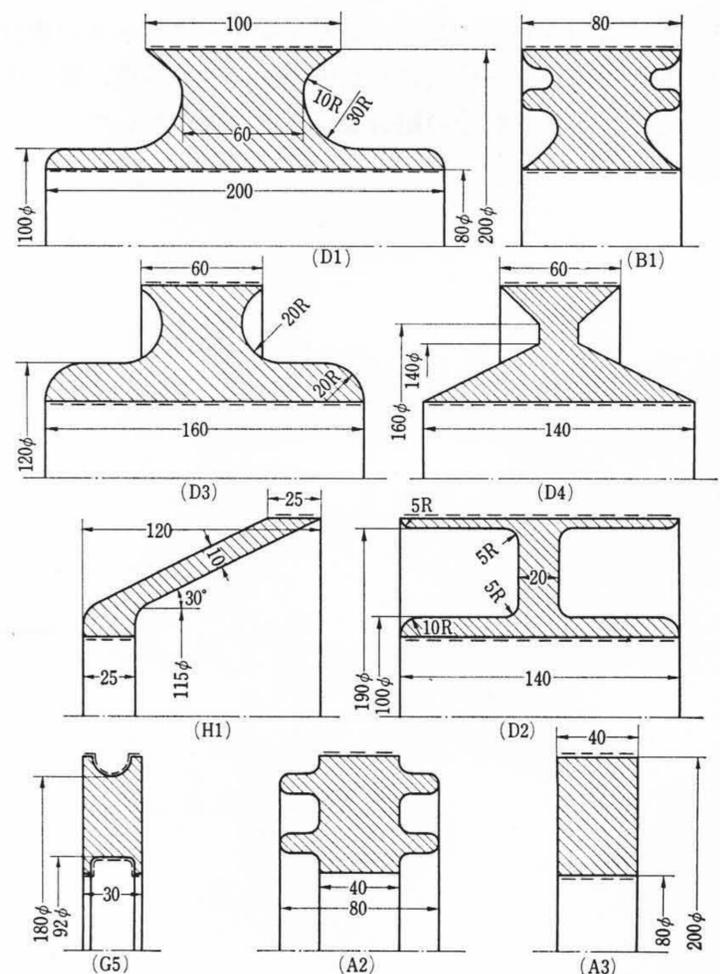
#### 3.1 スペーサの電界強度

スペーサの電界解析を電子計算機を用いて行なった。計算手法の概要は下記のとおりである。すなわち、ラプラス方程式を円筒座標系で表示し、今考えている領域を適当な間隔で区切り、格子点に関する差分方程式に変換する。これに境界値を与え、所定の誤差内におさまるまで繰り返し計算させるものである<sup>(2)(3)</sup>。

スペーサ表面上の電界を計算した一例は図 5 に示すとおりである。

#### 3.2 電界分布とフラッシュオーバー特性

図 2 ~ 4 のフラッシュオーバー電圧と形状との関係に電界計算結果をあわせ考えると下記の事項が明らかになる。



(破線部導電性ペイント塗布)

図 1 200 mmφ/80 mmφ 供試スペーサ

\* 日立電線株式会社研究所  
\*\* 日立電線株式会社日高工場

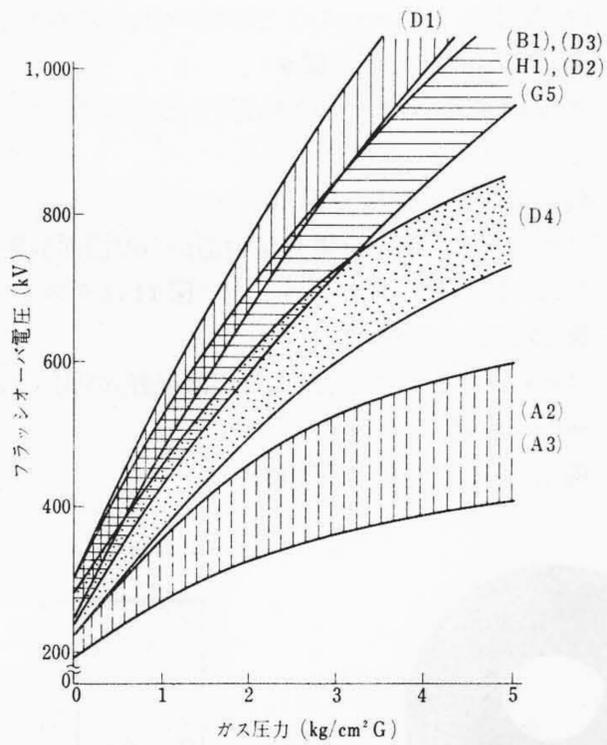


図2 200 mmφ/80 mmφ スペーサ SF<sub>6</sub> ガス中 ⊕インパルスフラッシュオーバー特性

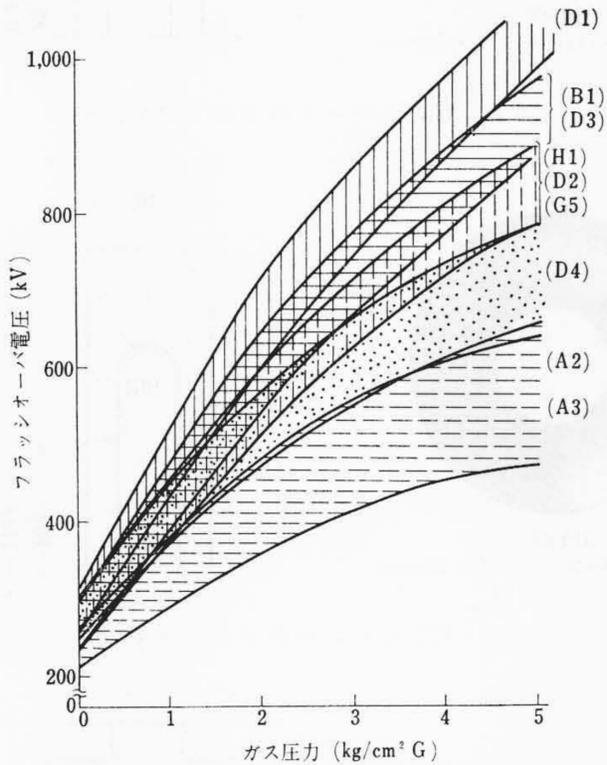


図3 200 mmφ/80 mmφ スペーサ SF<sub>6</sub> ガス中 ⊖インパルスフラッシュオーバー特性

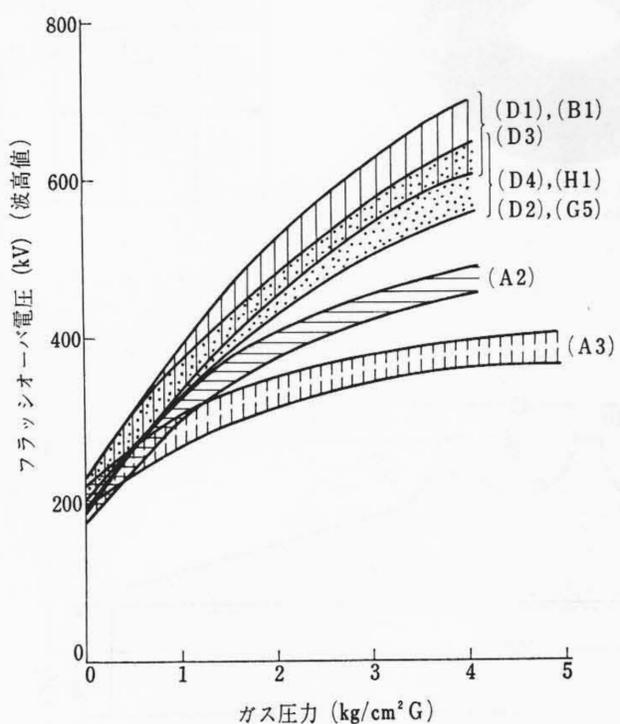


図4 200 mmφ/80 mmφ スペーサ SF<sub>6</sub> ガス中 交流フラッシュオーバー特性

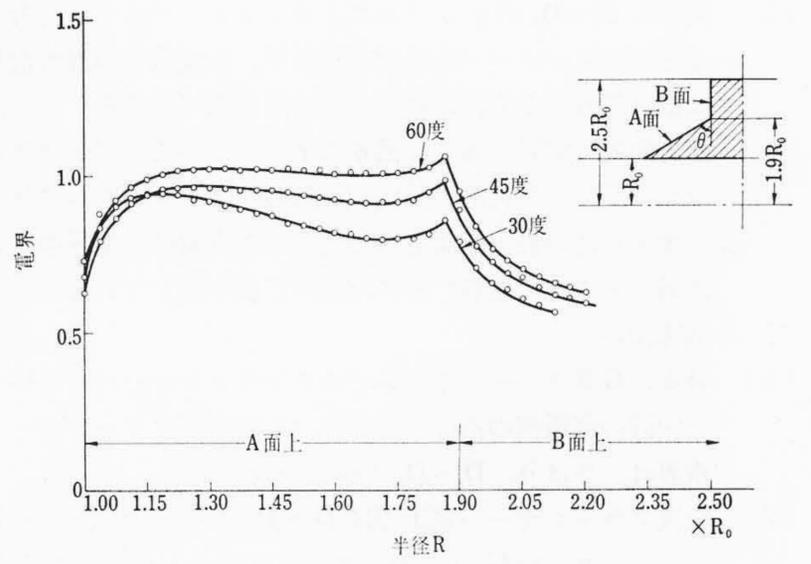
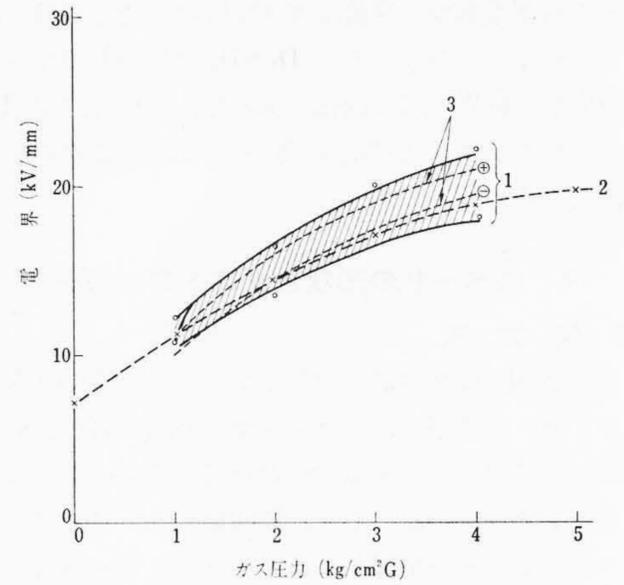


図5 テーパー裾野形スペーサの電界



- 1: D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub> スペーサの交流フラッシュオーバー時の半径方向最大電界強度
- 2: 200φ/80φ 同心円筒の内部円筒をエポキシ樹脂 (10 mm 厚) で被覆したときのエポキシ樹脂上の電界強度
- 3: D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>, H<sub>1</sub>, G<sub>5</sub> スペーサのインパルスフラッシュオーバー時の沿面電界強度

図6 フラッシュオーバー時の電界強度

(1) スペーサは

A形: (A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> スペーサ)

B形: (B<sub>1</sub> スペーサ)

D形: (D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub> スペーサ)

H形: (H<sub>1</sub> スペーサ)

G形: (G<sub>5</sub> スペーサ)

に分けることができる。A形は他のB, D形に比較して著しくフラッシュオーバー電圧が低い。内部円筒との接触部における電界集中により、そこからフラッシュオーバーが起るためである。

(2) D形に含まれるD<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub> スペーサについて考えると、後述のダストフィガーにも示すとおり、SF<sub>6</sub> ガス中の交流フラッシュオーバーは電界が最も高いガス空間、すなわち、外部円筒とスペーサの裾野の間あるいは、外部円筒側スペーサのひだと裾野の間でのストリーマにより起こると考えられる。

試みに、このガス空間のフラッシュオーバー時最大電界 (裾野上半径方向) を調べるとD<sub>1</sub>~D<sub>4</sub>の各スペーサともほぼ等しく、また、これは200 mmφ/80 mmφ 同心円筒において、内部導体に10 mm厚のエポキシ樹脂被覆 (端部は10 mmの曲率半径で丸めてある) を施した場合の交流フラッシュオーバー電界 (被覆上ガス空間半径方向) とほぼ等しい。これらの関係は図6に示すとおりである。

- (3) 同様に  $D_1 \sim D_4$  のインパルスフラッシュオーバーについて考えるとフラッシュオーバーは沿面で起こり、沿面方向の最大電界は裾野部分と中央部分の接合部の曲り部で生ずる。この沿面方向最大電界も同じく図6に示されている。交流フラッシュオーバー時の最大電界強度(半径方向)とインパルスフラッシュオーバー時の最大沿面電界強度(半径方向最大電界強度とは異なることに注意)とがほぼ同じ値を示していることは興味深い。
- (4) H1, G5 スペーサのインパルスフラッシュオーバーもスペーサ中間の高電部の沿面で起こり、その沿面フラッシュオーバー電界は、やはり、 $D_1 \sim D_4$  の値と一致する。
- (5) 交流フラッシュオーバー電圧では  $D_1 \sim D_4$  スペーサにほとんど差がみられないが、インパルスフラッシュオーバー電圧は  $D_1$  がいちばん高く、 $D_4$  がいちばん低い。インパルスはスペーサの沿面電界で、交流はガス空間の半径方向最大電界でフラッシュオーバーがきまる。 $D_1 \sim D_4$  は裾野上のガス空間半径方向最大電界がほぼ同様であるが、沿面電界は  $D_1$  がいちばん低く、 $D_4$  がいちばん高い。これがこの差を生ずる原因である。

4. スペーサの形状とダストフィガー

4.1 実験方法

大気中および  $SF_6$  ガス中におけるインパルスあるいは交流印加時のダストフィガーを観察し、フラッシュオーバー前の火花進展状況を各スペーサについて調べた。大気中において、インパルスを印加した場合、フラッシュオーバーが起こると、鮮明なダストフィガーが得られず、またフラッシュオーバーが起きずにダストフィガーが現われる電圧範囲がかなり限られていたので、50% フラッシュオーバー電圧よりも高い過電圧を印加し、供試スペーサと並列につないだ  $250\phi$  球ギャップで電圧を裁断した。

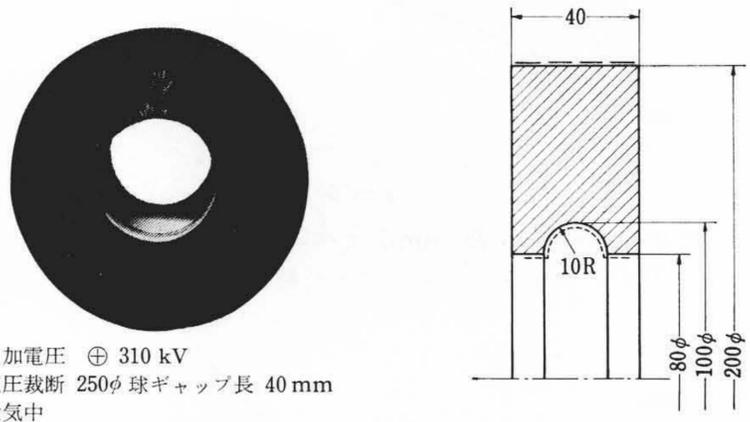
大気中における交流の印加あるいは  $SF_6$  ガス中におけるインパルス印加の場合はフラッシュオーバーが起っても鮮明なダストフィガーを得ることができたので、フラッシュオーバー後ダストをふりかけた。

ダストは鉛丹と硫黄(いおう)粉をよく混合したものであり、正の電荷には黄色の硫黄粉が、負の電荷には赤色の鉛丹が付着する。エポキシ製スペーサは表面が灰白色でダストフィガーの黄色、または赤色をはっきり識別しにくいので、黒色絶縁ワニスに塗布した。

4.2 ダストフィガーと考察

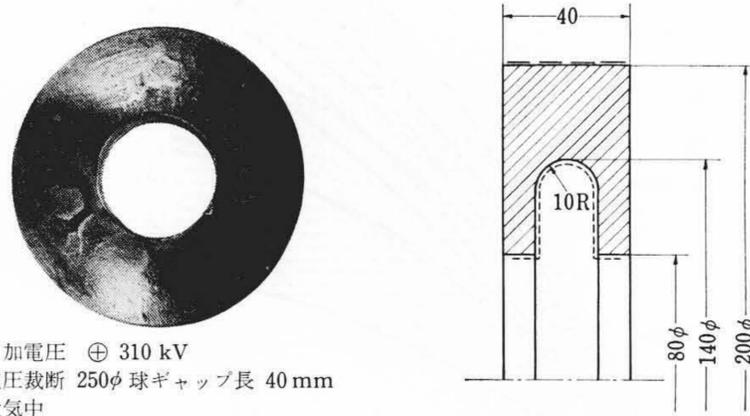
- (1) ストリーマの発生および進展は下記の6種類に分類される。
  - (a) 内部円筒との接触部からスペーサの沿面放電  
例..... $A_1$ , G4 スペーサ (図7)
  - (b) 外部円筒との接触部からスペーサの沿面放電  
例.....G2 スペーサ (図8)

- (c) 内部円筒とスペーサのひだの間のガス空間の放電  
例..... $A_1$  スペーサ (図9)
- (d) 外部円筒とスペーサの裾野(すその)の間のガス空間の放電  
例..... $D_6$  スペーサ (図10)
- (e) スペーサの中間部分電界集中部からの沿面放電  
例..... $D_4, D_2, G1$  スペーサ (図11はダストフィガー, 図12は電界分布)
- (f) スペーサのひだとひだ(あるいは裾野)の間におけるガス空間の放電  
例..... $D_2$  スペーサ (図13)



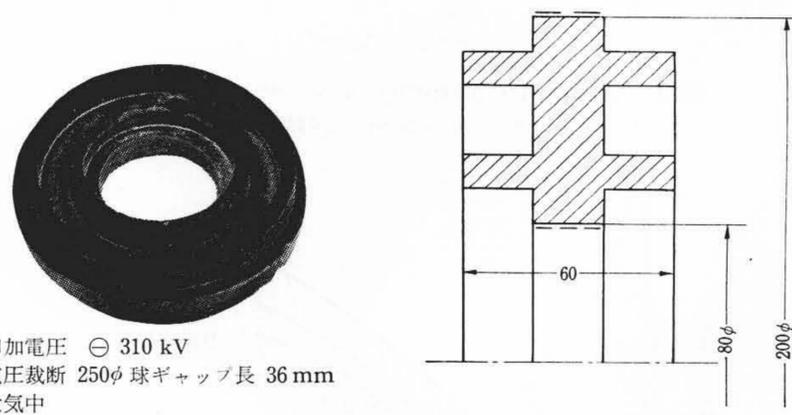
印加電圧  $\oplus 310$  kV  
電圧裁断  $250\phi$  球ギャップ長 40 mm  
大気中

図7 G4 スペーサのダストフィガー



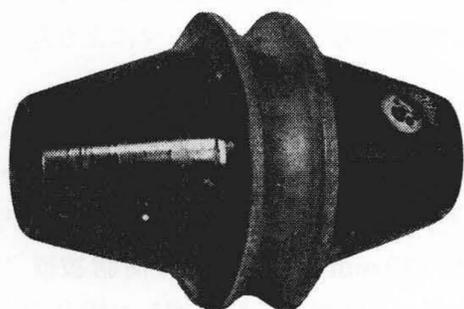
印加電圧  $\oplus 310$  kV  
電圧裁断  $250\phi$  球ギャップ長 40 mm  
大気中

図8 G2 スペーサのダストフィガー



印加電圧  $\ominus 310$  kV  
電圧裁断  $250\phi$  球ギャップ長 36 mm  
大気中

図9  $A_1$  スペーサのダストフィガー



印加電圧 交流 60 kV 大気中

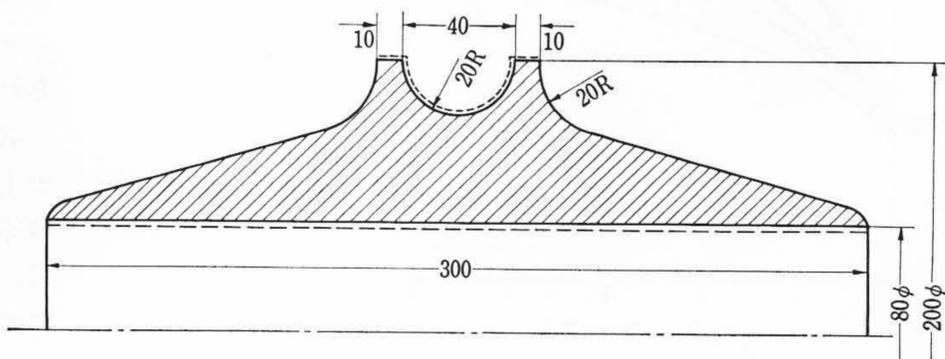


図10  $D_6$  スペーサのダストフィガー

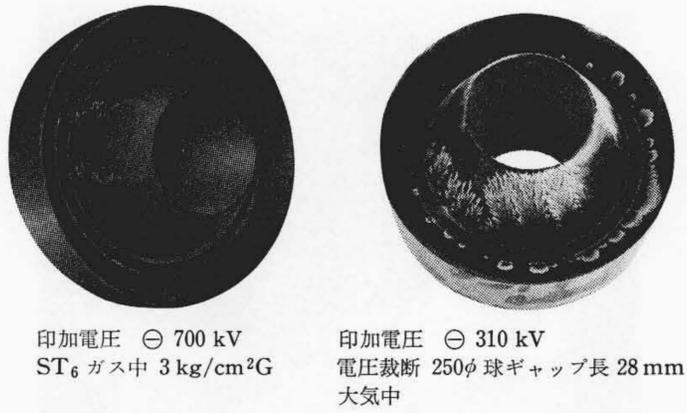


図 11 D<sub>4</sub> スペーサのダストフィガー

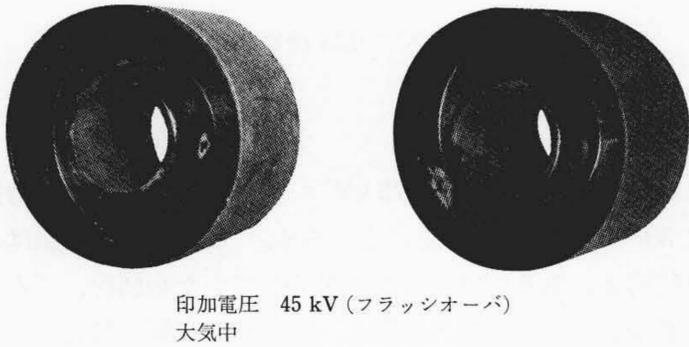


図 13 D<sub>2</sub> スペーサのダストフィガー

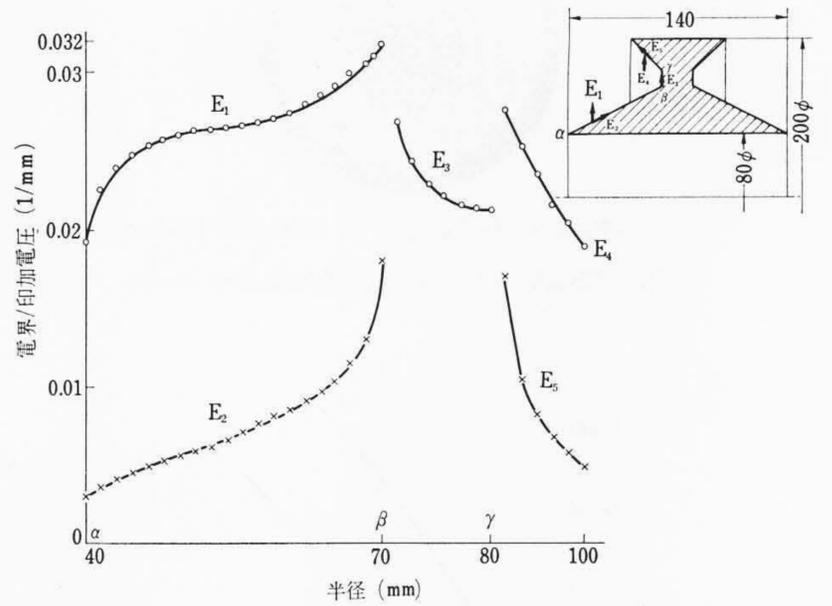


図 12 D<sub>4</sub> スペーサの電界分布

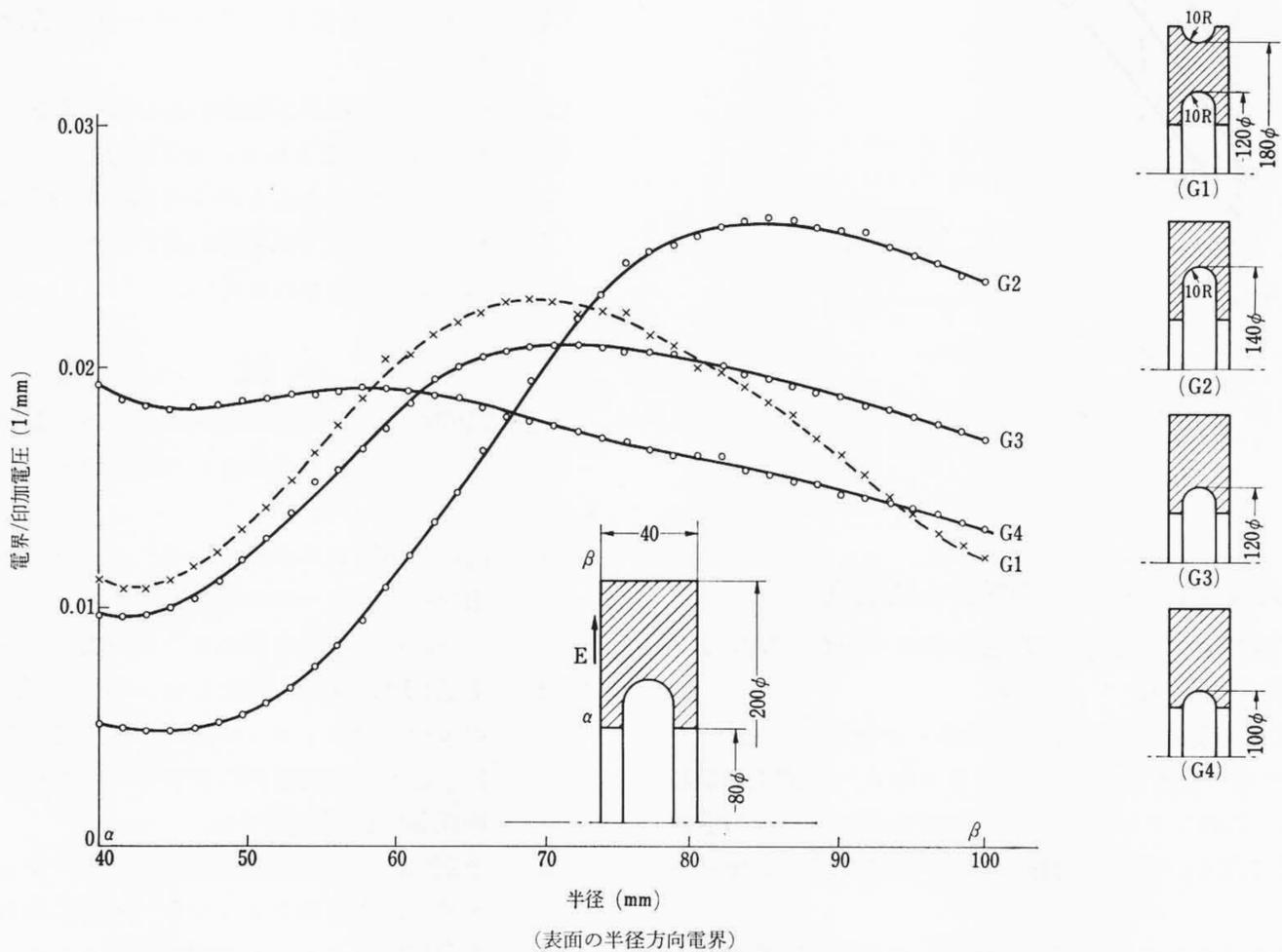
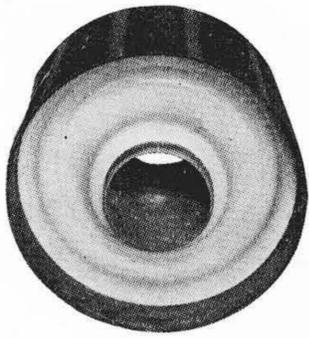


図 14 G1~G4 スペーサの電界分布

- (2) 従来, 印加電圧の波頭が急しゅんであるほど, また, ガス圧力の高いほど, 放電は絶縁物の面に沿って起こりやすくなることが知られているが, この場合も特に D<sub>2</sub> スペーサの例が注目される。D<sub>2</sub> スペーサのストリーマの発生, 進展の状況は上述の(a)~(f)の分類によれば, 大気中交流印加では(f)のタイプ, SF<sub>6</sub> ガス中インパルス印加では(e)のタイプ, 大気中インパルス印加では(e)と(f)の両者のタイプが生じている。
- (3) ストリーマ発生之源となる場所は電界計算の結果と対応させると電界の集中している場所である。

G1~G4 スペーサは円板形で, その内部に電極を突き出しているものである。これらのスペーサのストリーマ発生状況は図 14 に示した電界分布により非常によく説明される。

- (4) SF<sub>6</sub> ガス中の⊕および⊖ストリーマは大気中と大きく異なる形状をしている。
- (5) 従来のダストフィガーは針電極などの金属電極から⊕または⊖のストリーマが進展するものであったが, スペーサの中間部の電界集中箇所を源として, ⊕および⊖ストリーマがそれぞれ逆方向に進展していくのもみられる(図 11)。



(=ポキソ製絶縁体部外径 328 φ, 内径 122 φ, 長さ 200 mm)

図 15 275 kV 管路気中送電線用試作スペーサ

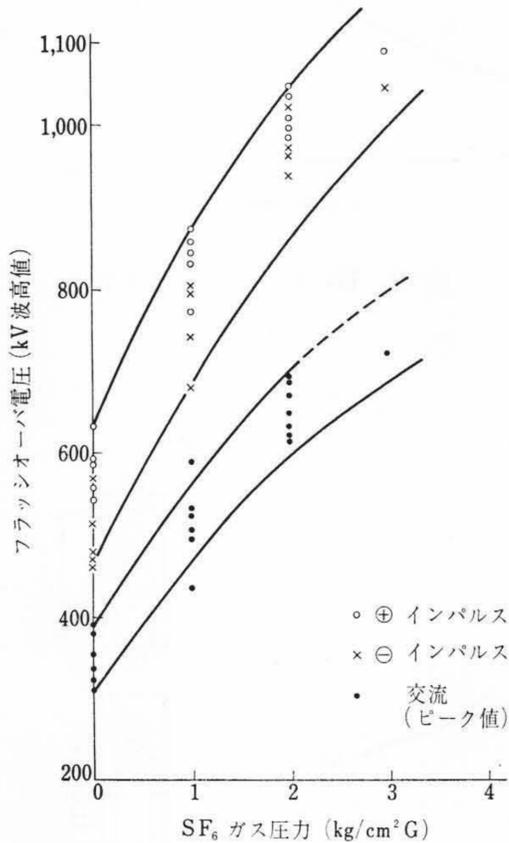


図 16 275 kV 管路気中送電線用試作スペーサのフラッシュオーバー特性

### 5. 実規模のスペーサの特性と問題点

#### 5.1 340 mmφ/120 mmφ 管路気中送電線用スペーサのフラッシュオーバー特性

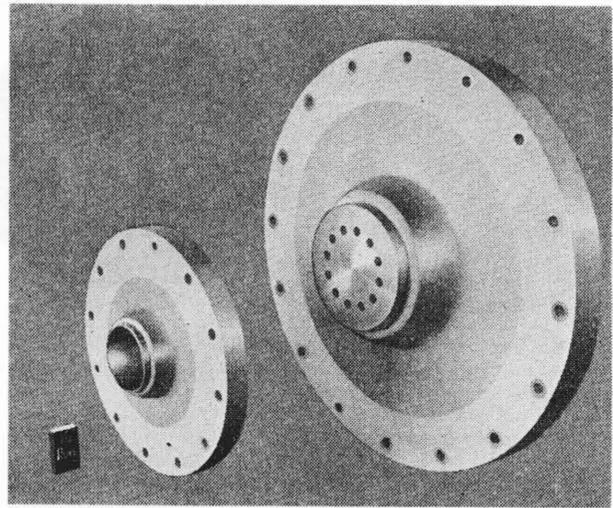
図 15 は 275 kV 管路気中送電線用試作スペーサを示したものの。

図 16 はこのスペーサを入れた管路のフラッシュオーバー電圧を示したものである<sup>(11)</sup>。このフラッシュオーバーは必ずしもスペーサの沿面で起きたものだけでなく、管路の導体とシース間のフラッシュオーバーも含まれている。

管路の寸法が大きくなるにつれて、導体シース表面の凹凸をなくしたり、付着している金属粉などを完全に除去することが困難になるので、200 mmφ/80 mmφ に比べて、非常に低い電界でフラッシュオーバーが起こる。この管路の所要耐電圧値は交流 420 kV (R. M. S), インパルス ±900 kV であり、常用ガス圧力は 5 kg/cm<sup>2</sup>G である。図 16 の値からじゅうぶん上記の耐電圧保証値を満たすことがわかる。今後、管路気中送電線およびほかの SF<sub>6</sub> ガス絶縁機器においてはガス中の塵(じん)粒子、あるいは金属ケース、導体表面の凹凸、付着物をできるだけ少なくする技術と、絶縁性能がそれらによって左右されないようにする技術が重要である。

#### 5.2 スペーサの表面汚損

スペーサの表面汚損によりフラッシュオーバー電圧が著しく低下する場合がある。図 17 は現在、ガス絶縁コンパクト変電所の母線用に



(左: 70 号, 右: 200 号)

図 17 SF<sub>6</sub> ガス絶縁機器用スペーサ

大量に使用されている 77~275 kV スペーサであるが<sup>(12)</sup>、汚損によっては 30~40% も低下することがある。この表面の汚損はスペーサ取付後導体、あるいはシースに付着していた金属粉、ごみ、油滴などが真空脱気、ガス封入に際し、スペーサ表面に付着して生ずるものである。この汚損の定量的解析は困難であったが、定性的には下記の事項がわかっている。

- (1) 表面の汚損によってスペーサの沿面放電が生じやすくなる。
- (2) 沿面方向静電界が小さいものほど影響が少ない。
- (3) G1~G5 のようにシールド電極をくりこんであるが、平らな円板形状であるものでは汚損の影響を大きく受ける<sup>(13)</sup>。
- (4) 静電界の計算では電界が高いひだ、くぼみを持つスペーサは汚損に左右されにくい。

### 6. 結 言

同心円筒間のドーナツ形スペーサの形状と電界分布、フラッシュオーバーストリーマの発生と進展などの関係を調べ、下記の諸点を解明した。

- (1) 高圧力 SF<sub>6</sub> ガス中において、スペーサのフラッシュオーバー電圧を高める第一の条件は導体あるいはシースと接するスペーサ端部の電界を弱めることである。
- (2) 上記(1)の条件を満たしたスペーサではフラッシュオーバーを引き起こすストリーマはスペーサの「ひだ」あるいは「裾野」と半径方向直列に存在するガス空間部分か、スペーサ中間部の沿面で生ずる。
- (3) 上記(2)のガス空間部分放電からフラッシュオーバーを生ずるタイプは交流のフラッシュオーバー時にみられる。
- (4) 上記(2)のスペーサ中間の沿面ストリーマからフラッシュオーバーが生ずるタイプはインパルスフラッシュオーバー時にみられる。この沿面ストリーマは局部的沿面電界強度がガス圧力で定まる一定値に達すると発生する。この沿面破壊電界はガスだけの破壊電界よりかなり低い。
- (5) 上記(2), (3), (4)より、スペーサのフラッシュオーバー電圧を高める第2の条件は「ひだ」あるいは「裾野」と半径方向に直列に存在するガス空間の半径方向電界およびスペーサ中間部の沿面方向電界を低くすることである。
- (6) 「裾野」を持つスペーサでは「裾野」の厚さ、「裾野」の曲部の形状などを適当に選べば、上記(1), (5)の条件を満たすことができる。電子計算機を用いて行なわれた電界解析は設計に役だつ。

- (7) 電極をスペーサに繰り込ませたスペーサ(G1~G5)は上記(1)の条件を満たすが、スペーサの中間部分の沿面電界をある程度以上には小さくできない。
- (8) スペーサ表面に汚損膜が存在すると、フラッシュオーバー電圧は著しく低下する場合がある。
- (9) 現在実用されているスペーサは機械的問題、スペーサ製造上、組立上の問題なども考慮に入れられており、必ずしも電氣的に理想的な形状ではないが、以上の検討結果が今後の設計、改良に役だつものと考える。

最後に管路気中送電開発にあたりご指導いただいた電力中央研究所福田節雄博士、有益なるご教示、ご協力をいただいた武蔵工業大学鳥山四男博士をはじめ日立電線株式会社の関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) S. Fukuda: IEEE Trans, PAS-86, 1, 60 (1967)
- (2) J. T. Storey, B. J. Billing: IEEE 114, (6) 824 (1967)
- (3) I. Cermak, P. Silvester IEEE Trans PAS-89 (516) 925 (1970)
- (4) S. Fukuda: IEEE Trans PAS-88, 2, 147 (1969)
- (5) S. Fukuda: IEEE Paper 69 TP 707-PWR (1969)
- (6) 電力中央研究所, 送電機能研究会, 管路気中送電 (昭45-4)
- (7) H. C. Doepkin: IEEE Paper 68 TP 630 PWR (1968)
- (8) J. G. Trump: Elec. Eng. 60, (11), 986 (1941)
- (9) B. L. Johnson: IEEE Paper 68 TP 631 PWR (1968)
- (10) 永野, 池田: 電気四連大 858 (昭39)
- (11) 乗松, 永野, 池田: 電気四連大 1200 (昭40)
- (12) 山崎, 細包: 日立評論 51, 1141 (昭44-12)
- (13) K. Itaka, G. Ikeda: IEEE Paper 70 TP 174-PWR (1970)



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第869997号

小野瀬 隆久・丸山 祐護

エレベータ乗籠防振形ガイドシュー

本考案は、エレベータのガイドシューに関するもので、図示のように、シュー軸部1にカラー2を設け、このカラー2をはさんで両側に弾性体3、4を設け、かつこの弾性体3、4の外周を乗籠の一部に固定される外筒によりおおうようにしたものである。

本考案にはよれば、レール継目のわずかな段付き、工作誤差あるいは据付誤差などによって走行中に生ずる振動は、弾性体3のみによる変位によって吸収するため乗籠にほとんど伝わらない。また万一地震などにより大きく振動した場合、カラー2が弾性体4の内筒に接触し、弾性体3、4の両者にてその振動を吸収するので、係合装置の関係上きびしく制限される前後方向の変位量を規定内に押えることができる。(郷古)

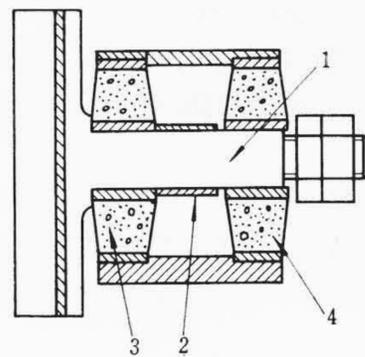


図 1



特 許 と 新 案



日立製作所所有の特許(主要特許のみを抜すい)

■ 研 磨 機

登録番号	公告番号	名 称	登録番号	公告番号	名 称
実 799686	40-10395	振動形バレル研磨機			

■ 床 上 装 入 機

登録番号	公告番号	名 称	登録番号	公告番号	名 称
実 778226	40-9686	クラブ後退装置付装入機			