

論 文

絶縁物沿面電界の沿面形状依存性

原 雅 則*, 久富木 譲*, 李 亨 浩*, 江 頭 孝*

(1989年10月7日受理)

Dependence of Electrostatic Field along Insulator Surface on Its Geometrical Shape

M. HARA,* M. KUBUKI,* H.H. LEE* and T. EGASHIRA*

(Received October 7, 1989)

The electrostatic field along the gas-dielectric intersurface has a critical influence on the withstand voltage of SF₆ gas insulated systems. It has been known from the past studies that the flashover voltage of a clean spacer is inevitably proportional to the field enhancement on the interface. Methods to find the insulator shape with a uniform electric field along its surface were developed for various gap geometries. However, the optimum shape for the clean insulator is in conflict with that for particle contaminated insulator. In this paper, the dependence of electrostatic field along insulator surface on its geometrical shape is investigated to obtain a basic concept for the design of insulator under particle contaminated conditions.

1. まえがき

準平等電界ギャップにおけるSF₆ガスの破壊電圧は、ギャップ中の最大電界で決まる。この最大電界を作るギャップ中における電界集中の原因として、電極表面の突起、高電圧導体支持絶縁物、電極と支持絶縁物の接觸点、混入粒子、ならびにそれらの複合状態が考えられる。

これまで、支持絶縁物形状に関して、沿面がクリーンである場合には、表面の電界を均一にすることによって沿面から離れたガス中で破壊させて耐電圧を向上できることから、沿面の電界を均一にする支持物形状を最適形状と考えて、いくつかの設定条件のもとで最適支持物形状の求め方が検討されてきた¹⁻⁴⁾。ここで言う設定条件とは、例えば同軸円筒電極系であれば、支持物がコーン形かポスト形か、ポスト形であればひだを設けるか否か、ひだを設けるとすればひだ間隔、等が設定条件となる。

ところで、支持絶縁物上に混入粒子が付着するような複合状態を考えると、このときの沿面の最適電界分布はクリーンな沿面の場合とは異なり、粒子が存在する場合

の破壊機構と特性を考慮して見いだされなければならない⁵⁾。実験によって最適電界分布が推定された場合、その分布を得るための手法として、(1)支持物沿面形状を変える方法と、(2)電極形状を変える方法の2つが考えられる。本論文の目的は、(1)に関する、特にポスト形支持物の形状パラメータを変えた場合、沿面電界がどのように変化するかを電荷重畠法で求め、支持絶縁物の沿面電界制御のための支持物形状決定の指針を得ようとするものである。

2. 問題の設定

金属粒子がポスト形支持絶縁物に付着する場合の支持物形状を検討するプロセスを考えるために、平行平板電極間に置かれた円柱支持絶縁物上の粒子付着位置を変えたときのSF₆ガスの破壊特性を図1に示す。図によると、電極近傍に粒子が存在するときに破壊電圧V_{BD}が低くなっている。このことは、粒子の存在する可能性がある場合、支持物の電極近傍の電界を低減すれば耐電圧の向上が可能であることを示唆している。この図には出でていないが、例えば、絶縁物表面にひだ（以下、リブと呼ぶ）を設けると、粒子でトリガされた放電がリブによって止められるいわゆる壁（バリア）効果が出て、耐電圧の向上が望めると推定される。そこで、本研究では、図2のようなポスト形支持物にリブが付いている場合のリブ形状パラメータと電界分布の関係を調べることとした。

キーワード：電界計算、スペーサ、バリア効果、電界増強係数

*九州大学工学部電気工学科 (812 福岡市東区箱崎 6-10-1)
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812 Japan

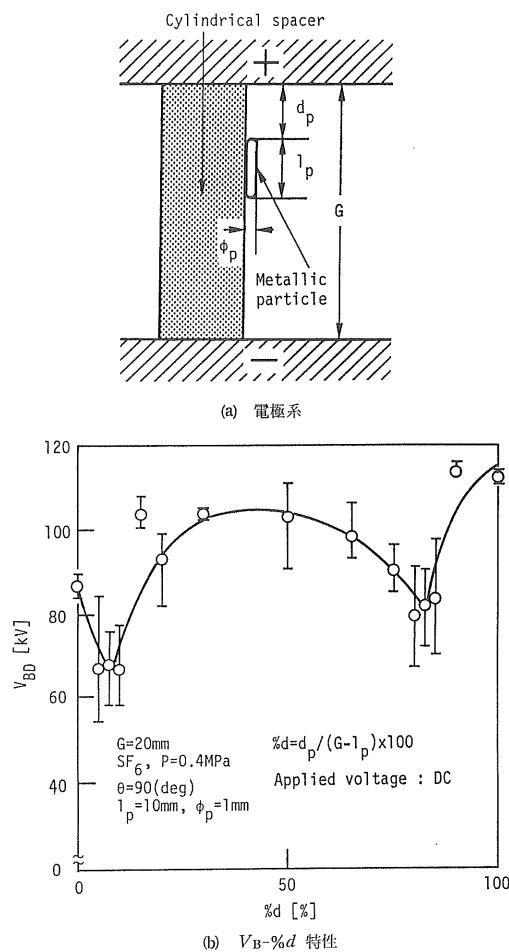


図1 円柱支持絶縁物(エポキシ)上に金属粒子が付着する場合の破壊特性

Fig. 1 Breakdown voltage as a function of particle location in the presence of metallic particle on the surface of cylindrical dielectrics.

リブの形状パラメータとして、リブ間隔 D 、リブ幅 W_r 、リブ高さ h_r 、リブ角度 θ_r を図3のように定義する。放電が図2の α まで伸びているとき、放電は次に溝にさしかかることになり、 β まで伸びているときはリブにさしかかることになる。 α と β の放電がさらに進展するときにさらされる溝とリブの沿面電界は図のⒶ-Ⓑ間の電界を計算し、これをⒶまたはⒷの等電位面に関して対称に描くことによって求めることができる。

ところで、将来、放電機構と沿面形状の関係を研究する場合、平面上に溝とリブが存在する2次元的な沿面の電界分布を求めておくと放電進展過程に関する実験結果の検討に便利であると考えられる。そこで、先述のこととも考慮して、図3のような図2のⒶ-Ⓑ間に応するリブ間の半分を切り出した2次元沿面の電界を計算する

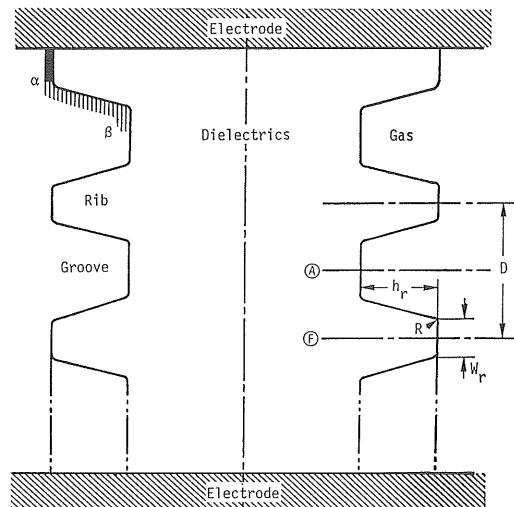


図2 リブ付きポスト形支持物

Fig. 2 Post type insulator with ribs.

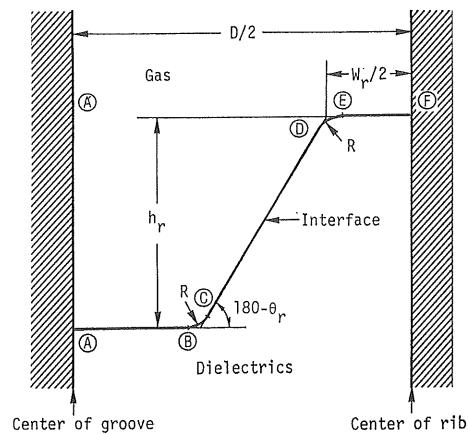


図3 リブの形状パラメータ

Fig. 3 Geometrical parameters for rib.

こととする。沿面上の位置は、溝の中心に対応する位置をⒶ、リブの中心に対応する位置をⒷとし、沿面の曲率半径が変わる点を順番に①②③④と記号を付けて表示した。

沿面電界として、全電界 E_T 、沿面に対して接線成分電界 E_t 、法線成分電界 E_n の3つがあり、 E_T は電離強度に、 E_t は放電の進展に、 E_n は電荷や粒子の沿面への付着に関与すると考えられるので、本研究でもこれらの値を求めるとした。なお、全電界 E_T の定義は、次のとおりである。

$$E_T = \sqrt{E_t^2 + E_n^2} \quad (1)$$

また、これらの計算結果は、一般性を持たせるために、平均電界 (V/D) で規格化して求めた。ただし、 V はリ

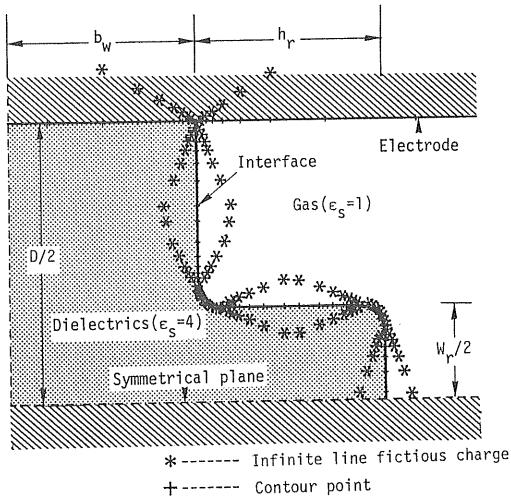


図4 仮想電荷と輪郭点の配置

Fig. 4 Arrangement of fictitious charges and contour points.

部間の電位差である。すなわち、

$$m_T = \frac{E_T}{(V/D)} \quad (2)$$

$$m_t = \frac{E_t}{(V/D)} \quad (3)$$

$$m_n = \frac{E_n}{(V/D)} \quad (4)$$

において、 m_i ($i=T, t, n$) を求めた。 m_i はしばしば電界増強係数と呼ばれる。

3. 等電位線、電気力線、電界分布および誤差評価

図4に、 $\theta_r=90^\circ$, $W_r/D=0.33$, $h_r/D=0.33$, $b_w/D=0.33$, $R/D=3.3 \times 10^{-2}$ の形状パラメータを与えた場合の仮想電荷と輪郭点の配置例を示す。高圧側電極上の三重接合点近傍と沿面の屈曲部においては輪郭点を密に配置した。このとき、アサインメント係数を電極内では1.3、誘電体境界では1.3~1.5として計算した。電荷は、リブ中心線に対して対称に最大268個を配置し、計算はすべてマイコン(PC9801)で行った。

第2章でも述べたように、 m_T , m_t , m_n のいずれの値も放電機構を考える上で重要であるが、ここでは溝の中心Ⓐ付近に対する値には第二の添字bを、リブの中心Ⓑ付近に対する値には第二の添字tを、またリブ側面Ⓒ-Ⓓの中央付近の値には第二の添字sを付した。また、 m_T の極大値のうちリブ頂側の値を m_{Tmax1} 、底側の値を m_{Tmax2} とした(後出の図6を参照)。

図5に、誘電体の比誘電率が4(アクリルを想定)で

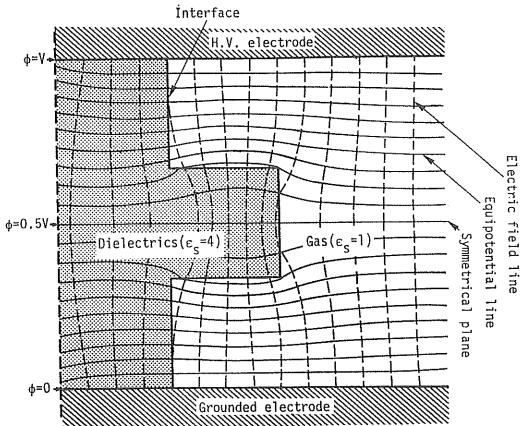
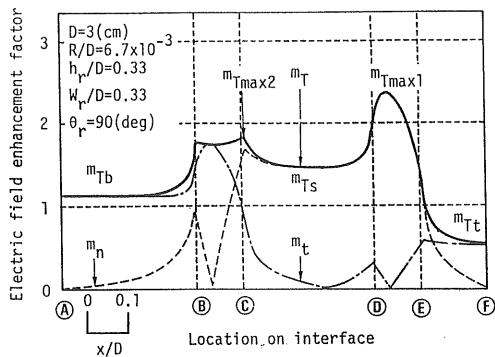


図5 等電位線と電気力線

Fig. 5 Equipotential and electric field lines.

$D=3\text{cm}$, $R/D=6.7 \times 10^{-3}$, $W_r/D=0.33$, $h_r/D=0.33$, $\theta_r=90^\circ$ に対する等電位線と電気力線の計算結果を示す。等電位線は、0.05V間隔で描き、電気力線は電極から等間隔に出発させた。また、リブ沿面の両側で電気力線を連続に描いた。したがって、リブ近傍の電界強度をこの図から推定する場合、等電位面の疎密から行う方が直接的で、電気力線の疎密による場合はリブ内の電気力線の密度を1/4にして行わなければならない。図5によれば、等電位線はリブ頂付近で疎であって、この部分では電界が弱まり、いわゆる電界の谷が形成されていることがわかる。リブ内部では、等電位線が疎になって、電界が弱まっている。

沿面の電界分布について、さらに詳しく考えてみる。図3に示したⒶからⒷに至る沿面の電界分布の計算結果を図6に示す。図6において横軸は沿面長であるが、沿面の屈曲部では電界の変化が大きいので、Ⓐ-Ⓑ間およびⒹ-Ⓔ間では横軸を拡大して図示し、それぞれの位置を横軸に記号で表示している。Ⓐ-Ⓑ, Ⓑ-Ⓓ, Ⓒ-Ⓔ間の位置は、Ⓐから沿面に沿って x で表し、リブ間隔 D で規格化した x/D の値で示した。図6によると、溝の部分では m_T はほぼ一定値であるが、Ⓑに近づくにつれて次第に m_T の値は大きくなっている。Ⓓ付近で極大値 m_{Tmax2} をとる。Ⓔを過ぎると、 m_T は再び小さくなり、リブ側面ではほぼ一定の m_T を取る。しかし、屈曲部であるⒹ-Ⓔ間では m_T は再び増加し、極大値 m_{Tmax1} をとる。Ⓔを過ぎたりブ頂付近では、電界の谷となって、 m_T の値は急激に低下し、最低値である m_{Tmin} を取るようになる。 m_t , m_n については、図からも明らかのように溝とリブ頂付近では $m_t \gg m_n$ 、リブ側面では $m_t \ll m_n$ となり、Ⓓ-Ⓔ間では m_n が、Ⓓ-Ⓔ間では m_t が急激に0になることがわかる。以上のことから、リブの設計を

図6 沿面電界分布の計算例 ($\theta_r=90^\circ$)Fig. 6 Distribution of electric field enhancement factors along the insulator surface. ($\theta_r=90^\circ$)

行うにあたっては $m_{T\max 1}$, $m_{T\max 2}$ の両方が比較的小さな値になるような形状パラメータ (R , W_r など) を与えなければならない。

なお、本研究における電極上の計算誤差は、④から距離 $2h_r$ の範囲内で最大 $10^{-2}[\%]$ 程度である。

沿面における誤差については、電位と電束の連続性に関する評価を行った。いま、沿面の任意の計算点においてガス側および誘電体側の電位を ϕ_g , ϕ_d とすれば、電位誤差 δ_V は

$$\delta_V = \frac{2(\phi_d - \phi_g)}{\phi_d + \phi_g} \times 100 [\%] \quad (5)$$

電束誤差 δ_D も、ガス側および誘電体側の電束を D_g , D_d とすれば、

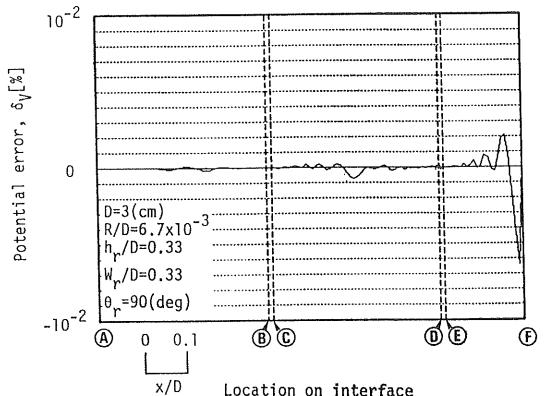
$$\delta_D = \frac{2(D_d - D_g)}{D_d + D_g} \times 100 [\%] \quad (6)$$

と定義する。(5), (6)式によって、沿面の誤差評価した結果を図7に示す。図7によれば、 δ_V は対称面の近傍で大きくなり、最大値は $\delta_{V,\max} = 6 \times 10^{-2} [\%]$ である。これに対して、 δ_D は沿面の屈曲部近傍で大きくなり、最大値は $\delta_{D,\max} = 4.12 [\%]$ となる。

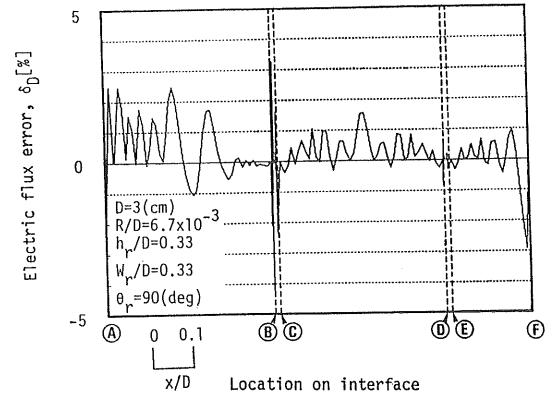
4. リブ形状パラメータと電界増強係数の関係

図8に、 $\theta_r=90^\circ$ のときの h_r , W_r , R に対する m_i の変化を示す。 h_r , W_r , R は、すべてリブ間隔 D で規格化した値で示してある。図8(a)によれば、 h_r を変化しても m_i の変化量は小さく、沿面電界を制御する場合、リブ高さ h_r を変えてもほとんど効果はないと思われる。逆にこのことは、 h_r を大きくすることによって沿面の最大電界を大きくすることなく、放電に対するバリア効果の増大および沿面距離の増加を望めることを示している。

図8(b)は、 W_r を変化させたときの m_i の変化を示しているが、 W_r を変えてても沿面距離およびバリア効果は



(a) 沿面における電位誤差



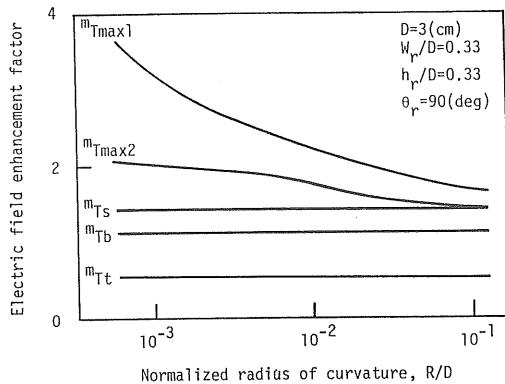
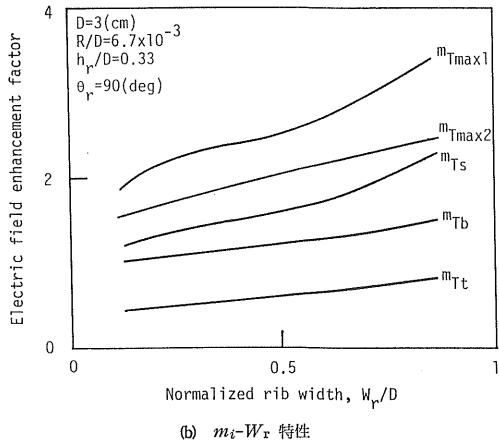
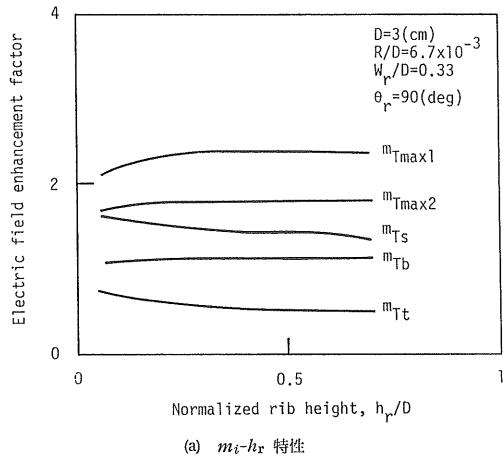
(b) 沿面における電束誤差

図7 計算誤差の評価

Fig. 7 Discrepancies of potential and normal flux density along the insulator surface.

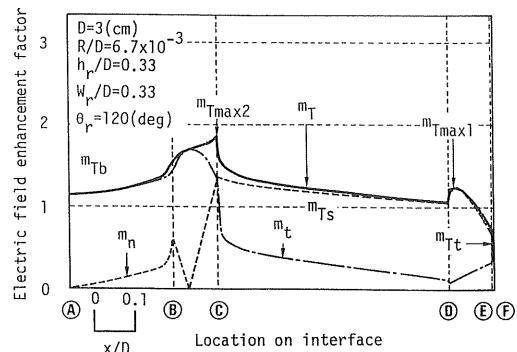
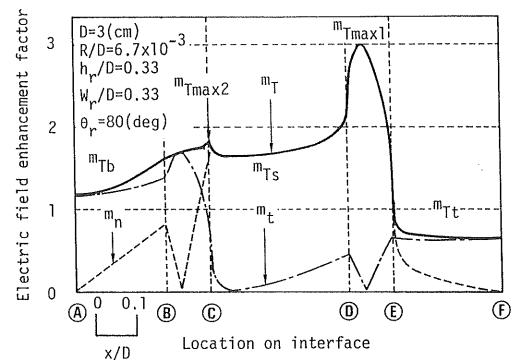
変わらない。しかし、図によれば W_r を小さくすれば m_i は小さくなっている。リブ幅 W_r を小さくすると沿面の耐電圧の向上につながることを示している。実際のリブ設計の立場からすれば、リブの幅を小さくすると、放電によってリブの貫通破壊が起こることが考えられるため、リブの幅を極端に小さくすることは実際的でない。

次に屈曲部の曲率半径 R を変えると、 $m_{T\max 1}$ は図8(c)のように $\log R$ に対してほぼ直線的に減少する。すなわち、 R のオーダーの変化が $m_{T\max 1}$ のファクタの変化をもたらすので、 R が小さい領域で R を変化させると、 $m_{T\max 1}$ に大きな影響を及ぼす。図によれば、 R を1mm ($R/D=3.3 \times 10^{-2}$) 程度以下にするときには、 $m_{T\max 1}$ の増加が大きくなるので、リブ設計においては注意しなければならない。 $m_{T\max 1}$ に比べると、他の m_i ($m_{T\max 2}$, m_{ts} 等) の値は R が変化してもその影響は比較的小さい。したがって、屈曲部の曲率半径 R は、 $m_{T\max 1}$ ができるだけ小さくなるように選ぶべきであ

図 8 $\theta_r=90^\circ$ のリブにおける m_i 特性Fig. 8 m_i characteristics for rib with $\theta_r=90^\circ$.

る。

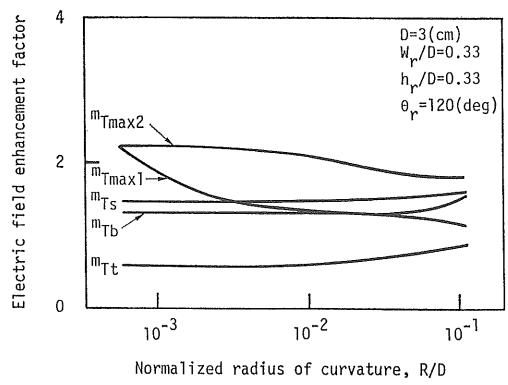
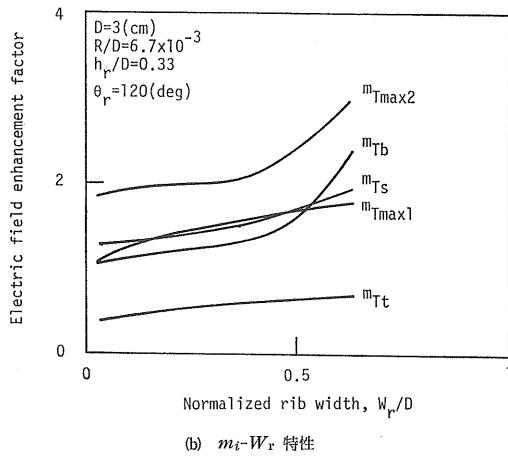
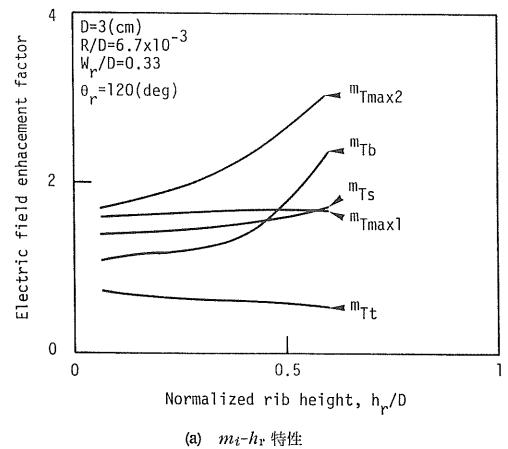
図 9, 10 は、 m_i の分布に対する θ_r の影響を見るために、 $\theta_r=120^\circ, 80^\circ$ の沿面電界分布の計算結果である。これと同様な θ_r を変化した一連の計算結果から、リブ

図 9 沿面電界分布の計算例 ($\theta_r=120^\circ$)Fig. 9 Distribution of electric field enhancement factors along the insulator surface. ($\theta_r=120^\circ$)図 10 沿面電界分布の計算例 ($\theta_r=80^\circ$)Fig. 10 Distribution of electric field enhancement factors along the insulator surface. ($\theta_r=80^\circ$)

側面の m_t は、 $\theta_r > 90^\circ$ のときは、(C)-(D)間で x の増加とともに次第に減少するのに対して、 $\theta_r < 90^\circ$ では逆に増加していることがわかる。他の沿面部分においては、 m_T , m_t , m_n の大きさと沿面上の位置との関係は $\theta_r=90^\circ$ の場合とほぼ同じである。

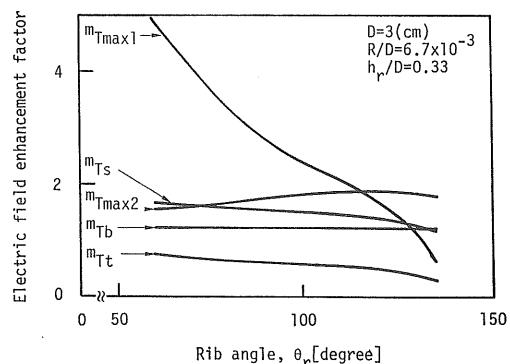
θ_r が変化すると、 m_{Tmax1} と m_{Tmax2} の大きさの関係に最も顕著な変化が見られる。つまり $\theta_r > 90^\circ$ では、 $m_{Tmax1} < m_{Tmax2}$ であるのにに対して、 $\theta_r < 90^\circ$ では、 $m_{Tmax1} > m_{Tmax2}$ となる。これは、 θ_r が小さくなるとリブ頂側の屈曲部が、高電圧電極側に偏ってしまうからである。図 6, 9, 10, を比べると、 θ_r が 120° から 80° まで変化することにより m_{Tmax2} の値はほとんど変化しないのに対して、 m_{Tmax1} は 1.2 から 3.0 程度にまで大きくなっている。すなわち、 θ_r は沿面最大電界の制御には効果的パラメータであり、 θ_r だけに注目すれば、 $\theta_r > 90^\circ$ となるような値を選ぶことが望ましい。

一般にリブ付き支持絶縁物の製作を考えると $\theta_r > 90^\circ$

図 11 $\theta_r=120^\circ$ のリブにおける m_i 特性Fig. 11 m_i characteristics for rib with $\theta_r=120^\circ$.

となるので、ここで $\theta_r=120^\circ$ の場合を例にとって、 R , h_r , W_r を変えたときの m_i の計算結果を図 11 に示す。

図 11(a)は h_r を変化させた場合の m_i の変化を示しているが、 $\theta_r=90^\circ$ の場合には、 h_r が変化しても m_i の値はほとんど変化しなかったのに対して、 $\theta_r=120^\circ$ の場合、

図 12 m_i - θ_r 特性
Fig. 12 m_i vs. θ_r characteristics.

h_r が増加すると特に m_{Tmax2} の値が大きくなる。これは、 $\theta_r=120^\circ$ の場合 h_r を大きくすると、リブの底側の屈曲部が高電圧電極に近づくために⑧-⑨間の電界が強くなるためである。このため $\theta_r=90^\circ$ の時のように h_r を増加することによって耐電圧の上昇は必ずしも望めないことを示唆している。

図 11(b)は、 W_r を変化させた場合の m_i 特性であるが $m_{Tmax1} < m_{Tmax2}$ であることを除けば、 $\theta_r=90^\circ$ とほぼ同様な結果が得られており、 W_r を比較的小さくする方がよいと思われる。

図 11(c)は、 R をえた場合の m_i の変化を示している。 $\theta_r=90^\circ$ の場合(図 8(c))は、 R の減少が m_{Tmax1} の大きな増加を招いたが、 $\theta_r=120^\circ$ の場合には、 R の m_{Tmax1} に及ぼす効果が小さくなり、 R を小さくしても m_{Tmax1} の増加はほとんど見られない。 $\theta_r=120^\circ$ では、 $m_{Tmax1} < m_{Tmax2}$ であるが、 m_{Tmax2} に対しても m_{Tmax1} の場合と同様に R の影響はほとんどない。

図 12 は、 m_i 対 θ_r 特性を示す図である。これまで述べてきたように、 θ_r は沿面電界の制御に有効なパラメータである。図によれば、 θ_r が大きくなると m_{Tmax1} は大きく減少するが、他の m_i の値は角度 θ_r の変化に対しては鈍感である。電極近傍の電界を低くして沿面電界の極端に高い部分ができるないようにするために $m_{Tmax1}=m_{Tmax2}$ となるような θ_r を選べばよいので図 12 からそのような θ_r の値を求めれば、 $\theta_r=115^\circ$ となる。この θ_r では、 m_{Tmax1} , m_{Tmax2} に対する R の影響も小さく、リブ設計にあたってはこのような θ_r の値が望ましい。

5. む　す　び

絶縁物表面に設けるリブの設計指針を得るとともに、望ましい沿面電界分布を与えるリブ形状を求めるときの初期形状を設定する指針を得るために、リブの形状パラ

メータと沿面の電界増強係数の関係を電荷重畠法によつて求めた。結果を要約すると次のようになる。ただし、 D はリブの間隔、 W_r はリブ幅、 h_r はリブ高さ、 R はリブの屈曲部の曲率半径、 θ_r はリブ角度である(図3参照)。

1. リブ高さを変える場合、 $\theta_r=90^\circ$ では、 $h_r/D > 0.2$ の範囲でこの値を変化させても沿面最大電界はほとんど変わらない。したがって、リブ高さを高くすることにより、バリア効果および沿面距離の増大によって耐電圧の上昇が期待できる。これに対して、 $\theta_r > 90^\circ$ では、 h_r が大きくなると最大電界も大きくなるため、 $\theta_r=90^\circ$ の場合のような h_r の増加に伴う耐圧上昇効果が小さくなると考えられる。
2. リブ幅 W_r を小さくすると、沿面の電界は低下する。したがって、 W_r を小さくすると耐電圧の上昇を期待できるが、限度を超えると放電によってリブの貫通破壊の可能性が高くなる。
3. $\theta_r < 90^\circ$ の場合、沿面最大電界はリブ頂のエッジの部分で現れ、曲率半径 R が小さくなると高くなる。
4. $\theta_r > 90^\circ$ の場合、最大電界はリブ底のエッジの部分に現れる。一方、リブ頂のエッジの部分の電界は θ_r の増加に伴って小さくなる。またこのような θ_r の値に対しては、電界増強係数に対する R の影響は比較的小さい。
5. リブ底のエッジの電界は、 θ_r を変化してもほとんど変化しないが、リブ頂のエッジの電界は θ_r の変化に対して大きく変化する。

リブ設計の観点からいえば、沿面最大電界がリブ形状パラメータに対して鈍感になるようなパラメータ値の領域が見つかるようにすればよい。本研究で行った計算結果によると、 $\theta_r > 115^\circ$ 、 $R > 3 \times 10^{-2}$ (cm) の範囲にあれば、 W_r 、 h_r がファクタ程度変化しても最大電界の変化は小さく、このような θ_r と R の領域で最大電界を変化することなく沿面距離とリブによるバリア効果を増大させることが可能である。

本研究は、文部省科学研究費一般研究(B)と九州大学-九州電力間の共同研究によった。

参考文献

- 1) C.M. Cooke and J.G. Trump : IEEE Trans. on PAS, PAS-92 (1973) 1441
- 2) T. Takuma and T. Watanabe : Proc. IEE, 122 (1975) 183
- 3) H.H. Däumling : Proc. of 5th ISH, Braunschweig, Paper No. 31.05 (1987)
- 4) H.H. Däumling and H. Singer : IEEE Trans. on PD, PD-4 (1989) 787
- 5) M. Hara, H. Tobata, K. Hidaka and H. Yakabe: Proc. of 5th ISH, Braunschweig, Paper No. 15.03 (1987)