UDC 621.315.211.2.015.51.029.7: 621.315.616.96
678.742.2

論 文

53-A19

CV ケーブルの破壊電圧に及ぼす絶縁体表面の影響

正 員 古 川 博 康 (住友電工)

正 員 宮 本 俊 治 (住友電工)

正 員 速 水 敏 幸 (住友電工)

1. ま え が き

架橋ポリエチレン絶縁ケーブル（以後、CV ケーブルと略称する）は油浸紙ケーブルに比べると油を用いないこと、布設、保守が容易であることなどの優れた利点を持っている。このことから、現在は 33 kV クラス以下はほとんどが、132~154 kV クラスも次第に CV ケーブル化されつつある⁽¹⁾。

しかし、厚肉の CV ケーブルの破壊電圧は薄肉のフィルムの破壊電圧に比べると 1 けた近く低い。この原因は、絶縁体内部や界面にボイドや突起などの欠陥が存在するためと考えられる。絶縁体内部のボイドについては、例えば山田氏⁽²⁾は CV ケーブルのボイドと交流破壊電圧は密接な関係があり、ボイドが小さくなると破壊電圧が高くなると述べている。また、絶縁体中のボイドを極力なくす方法として、水蒸気を用いない赤外線架橋方式⁽³⁾やガス架橋方式⁽⁴⁾、ロングダイ架橋方式⁽⁵⁾が知られている。

一方、絶縁体表面に着目すると、表面は直接ケーブルしゃへい層（外部電極）に接しているため、その欠陥の形状によっては絶縁体内部より破壊電圧に大きい影響を及ぼすことが考えられるが、現在までの関係の報告が少ない。特に、表面の影響についてはケーブル中央部よりも現地施工時に外部半導電層を除去する

接続部、終端部などにおいて大きい問題となり検討が望まれている。

そこで、本論文では CV ケーブルおよびその接続部や終端部の破壊電圧を支配する絶縁体表面の欠陥の影響について検討した。

欠陥のモデルとして針状の突起とボイドを CV ケーブルの表面に作製し、これらの欠陥と破壊電圧の関係を定量的に調べ、今後の CV ケーブルの施工時における絶縁体表面処理状態はいかにあるべきかを定める指針とした。また、微小欠陥のモデルとして表面にサンドペーパー処理を施してその破壊電圧を調べた。

2. 試料および実験方法

針状欠陥の種類は第 1 図に示すように、CV ケーブルの表面に先端の曲率半径が 5 μm 以下に研摩した木綿針を差込んで針状突起を設けたもの、および木綿針を抜取って針状ボイドを設けたものの 2 種類である（針状突起と針状ボイドは混同しやすいので、以後は針状突起の方を針状金属突起と称する）。

ケーブルは 6.6~66 kV CV ケーブルを用いたが、特に断わらない限り内部および外部半導電層は押出タ

第 1 図 試験用試料の構成

Fig. 1. Sample arrangements for the breakdown voltage tests.

The Influence of Insulation Surface Conditions on the Breakdown Voltage of Crosslinked Polyethylene Cables. By Hiro-yasu Furukawa, Member, Syunji Miyamoto, Member & Toshiyuki Hayami, Member (Sumitomo Electric Industries, Ltd.).

古川博康：正員，住友電気工業株式会社研究開発本部
宮本俊治：正員，住友電気工業株式会社研究開発本部
速水敏幸：正員，住友電気工業株式会社研究開発本部

第 1 表 実験に使用したケーブル
Table 1. Cables used for the tests.

ケーブルの電圧階級 (kV)	導体サイズ (mm ²)	絶縁厚 (mm)	欠陥の種類
6.6	60	3.5	針状ボイド
22	100	6.0	
66	250	11.0	
66	250	11.0	針状金属突起
66	400	13.5	
6.6	60	3.5	サンドペーパー処理微小欠陥
22	150	6.0	

イプのケーブルである。針状金属突起の場合は、外部半導電層表面から直接針を差込んだため針がそのまま電極となったが、針状ボイドの場合はいったん外部半導電層を局部的に削り取り、そこに針状ボイドを作った後、半導電性テープやスズはくを巻いてボイドに電圧がかかるようにした。

使用した CV ケーブルの導体サイズおよび絶縁厚と設けた欠陥の種類をまとめると第 1 表に示すようになる。また、微小欠陥は番手を変えたサンドペーパーで表面をこすって作製した。

試験内容は、主としてケーブルの絶縁体表面に種々の欠陥を設けた試料の交流およびインパルス破壊試験である。インパルス破壊試験は負極性または正極性の標準波電圧 ($1 \times 40 \mu\text{s}$) をケーブル導体に印加して行なった (欠陥はケーブル表面側にあるためそれぞれこの逆極性となる)。電圧は予想破壊値の 50~70% からスタートし、5 または 10 kV 1 回のステップで昇圧した。交流破壊試験は 60 Hz の商用周波数を有する電圧を印加して行なった。電圧は予想破壊値の 50~70% までは短時間で昇圧し、それ以降は階段状の昇圧とした。それぞれの試料の昇圧法は第 3 図中の表に記すとおりである。

3. 実験結果

〈3・1〉 針状金属突起および針状ボイドの破壊電圧

第 1 表に示す 2 種類の欠陥を設けた試料を用いてインパルス破壊試験を行なった。ただし、欠陥の先端部に蓄積し、大きな電界緩和効果を及ぼすと考えられる負極性ホモ空間電荷の影響をできるだけ少なくするために、ここでは欠陥を正極性 (導体を負極性) とする試験の点数を多くとった。

試験結果を絶縁体表面からの突起の大きさ a と、絶縁破壊の強さ E_{BD} (破壊電圧/ケーブル絶縁厚) の関係にプロットすると第 2 図に示すようになる。

この結果、インパルス破壊の場合は針状金属突起と針状ボイドにほとんど差がないことがわかる。

いま、針状の突起の大きさと絶縁破壊の強さの関係

第 2 図 インパルス破壊電圧に及ぼす表面欠陥の影響

Fig. 2. Influence of surface defects on the impulse breakdown voltage of XLPE cables.

を計算で求めると (1) 式に示すようになる (式の展開は付録参照)。

$$E_{BD} = E_{\max} \left\{ 1 - \frac{\ln \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - ar_0}}{a - \sqrt{a^2 - ar_0}}} - \frac{\sqrt{a^2 - ar_0}}{r_0}}{\ln \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - ar_0}}{a - \sqrt{a^2 - ar_0}}} - \frac{\sqrt{a^2 - ar_0}}{a}} \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 E_{BD} : 絶縁破壊の強さ (ケーブルの破壊電圧/絶縁厚)、 $E_{\max}$: 突起先端の電界、 a : 突起の大きさ、 r_0 : 突起先端の曲率半径

ここで、突起先端の曲率半径 $r_0 = 10 \mu\text{m}$ 、 $E_{\max} = 1.6 \times 10^6 \text{ V/mm}$ として突起の大きさ a と見かけの絶縁破壊の強さを計算すると第 2 図の実線のようになり、実験値とかなり良く一致した。なお欠陥の大きさが絶縁厚の 50% を越えるものに対する計算値の適用は無理な面があると考えられるので一点鎖線で示した。このグラフはケーブル絶縁体の絶縁破壊の強さ (平均電位の傾き) と欠陥の大きさとの関係にまとめたのが特徴である。

次に、同じような実験を交流で行なった。結果を第 3 図に示す。この結果、交流の場合はインパルスと異なり針状金属突起と針状ボイドに著しく差がある。また、針状ボイドの場合は電圧の上昇速度によっても差があり、上昇速度が速いほど破壊電圧が高い。

このように針状金属突起と針状ボイド、特に針状ボ

イドの場合には昇圧速度によって差が生じるのは部分放電による影響と考えられる。交流の場合は $r_0=10\ \mu\text{m}$, $E_{\text{max}}=1.0\times 10^6\ \text{V/mm}$ (実効値では $7.1\times 10^5\ \text{V/mm}$) として計算すると第3図の実線のようになり、針状金属突起の実験値に比較的良好に一致する。

以上のことから、このような形状において突起先端の電界がインパルスでは $1.6\times 10^6\ \text{V/mm}$, 交流では $1.0\times 10^6\ \text{V/mm}$ に達すると絶縁体が全路破壊に至るものと考えられる。また、第2図および第3図のグラフは表面の欠陥の大きさが比較的小さい領域で破壊電圧が大きく変化することを示唆している。

〈3.2〉 サンドペーパーによる微小欠陥の破壊電圧

前節において針を用いて人工的に制御できる欠陥の大きさは $0.5\ \text{mm}$ 以上である。ここでは、それ以下の微小な表面の欠陥が特に交流破壊電圧に及ぼす影響について検討した。

微小欠陥はCVケーブルの表面をサンドペーパーでこすって作製した。欠陥の大きさはサンドペーパーの番手を変えて制御した。ケーブルは外部半導電層がテープの $6.6\ \text{kV}\ 60\ \text{mm}^2$ CVケーブルを用いた。微小欠陥はこのケーブルの外部半導電性テープを除去した後の傷のない絶縁体表面を #60~1000 (番手の小さい方が目が荒い) のサンドペーパーでこすって作製した。

これらの微小欠陥の大きさは表面荒さ計の測定と走査形電子顕微鏡の観察などで調べた。表面荒さ計で調べた代表的な表面荒さのチャートを第4図に、表面を走査形電子顕微鏡で観察した結果を第5図に示す。また、サンドペーパーの番手と上記測定結果の最大値およびサンドペーパーの研磨材の粒度の関係をまとめると第2表に示すようになる。

これらの結果、サンドペーパーによる傷の最大の

第4図 サンドペーパーによる表面荒さ

Fig. 4. Roughness chart of surface scratched by sand papers.

第3図 交流破壊電圧に及ぼす表面欠陥の影響

Fig. 3. Influence of surface defects on the AC breakdown voltage of XLPE cables.

第5図 絶縁体表面の顕微鏡写真 (×500)

Fig. 5. Small scratch on the surface of XLPE cables.

第 2 表 サンドペーパーと表面の傷の関係

Table 2. Relation between sand papers and defects on the surface.

サンドペーパーの番手	研磨剤の粒度 (PS 規格) (μm)	表面荒さ計による最大欠陥 (μm)	顕微鏡観察による最大欠陥 (μm)
# 1000	5~20	3	20
# 600	10~30	8	25
# 400	20~50	11.5	45
# 240	30~80	19.5	80
# 120	~100	30	100
# 60	~240	55	220

第 6 図 表面微小欠陥の試料

Fig. 6. Samples of XLPE cable having small scratch on the insulation surface.

第 7 図 破壊電圧に及ぼす表面処理の影響

Fig. 7. Influence of small scratch on the AC breakdown voltage of XLPE cables.

きさは顕微鏡観察の結果から、サンドペーパーの研磨材の最大径にほぼ近い値の傷が入ることがわかった。

次に、第 6 図に示すようにケーブルの電極部 1m の中央 10cm の幅をサンドペーパーで数回こすり、電極部全体に導電性塗料を塗布し、更にスズはくを巻き電極として交流破壊試験を行なった。電圧は 5kV/30 分のステップで昇圧した。結果を第 7 図に示すが、# 400 以下の番手のサンドペーパーで表面をこすると、このケーブルの交流破壊電圧が低下することがわかる。

〈3.3〉 外部半導電層の検討 次に、CV ケーブルの表面に微小な傷を付けた後、外部半導電層を加熱モールドしその破壊電圧を調べた。ケーブルは外部半導電層押出の 6.6kV 60mm² CV ケーブルを用いた。

表面の処理は第 8 図に示すように、ケーブルの押出半導電層を削り取り、# 60 のサンドペーパーで約 10

第 8 図 外部半導電層モールドの試料

Fig. 8. Sample of XLPE cable having on the scratched insulation surface heat molded outer semiconductive layer.

第 9 図 外部半導電層モールドの効果

Fig. 9. Effect of heat-molded outer semiconductive layer on the AC breakdown voltage.

cm の幅に微小傷を付け、ケーブルの外部半導電層とほぼ同材質の半導電性テープを巻き、約 3 kg/cm² の圧力をかけて加熱モールドした。モールド温度は 100, 150, 200, 250, 300°C で各 3 時間である。このようにして作製した試料の交流破壊試験を行なった。電圧は 50kV から 10kV/30 分ステップで昇圧した。

試験結果を破壊電圧とモールド温度の関係にまとめると第 9 図に示すようになる。ここで、オリジナルは外部半導電層を削り取らない場合のケーブルの破壊電圧である。この試験結果から、100°C および 150°C でモールドした場合は破壊電圧が低く、200°C 以上でモールドすると破壊電圧はオリジナルと同等になることがわかる。

このように外部半導電層のモールド温度を高くしていくと、表面の欠陥の破壊電圧に及ぼす影響が現われなくなるのは、欠陥の中に半導電性材料が十分に充てんされ、空気層がなくなり、部分放電が起らなかったためと考えられる。

一方、CV ケーブルの押出による外部半導電層は一般には融着形である。従って、接続部や終端部において外部半導電層は切削工具を用いて削り取らなければならないが、その後、絶縁体表面はサンドペーパーな

第 10 図 フリーストリップ外導をはいだケーブル表面

Fig. 10. Surface of XLPE cable removed free strippable outer semiconductive layer.

どで平滑に仕上げる必要がある。

これに対してフリーストリッピング⁽⁶⁾の外部半導電層は融着形ではあるが、半導電層と絶縁体との相互の分子間力が一般の融着形に比べると小さいので削り取る必要がなく、半導電層のみ比較的簡単にはぎ取れる。フリーストリッピングの外部半導電層を施した CV ケーブルの外部半導電層をはぎ取った後の表面の荒さを表面荒さ計で測定した結果は第 10 図に示すとおりである。

同図より、フリーストリッピングの外部半導電層をはぎ取った表面は先の第 2 表に示した # 1000 のサンドペーパー仕上げより平滑と言える。

次に、このフリーストリッピング形外部半導電層を施した 22kV 150mm² CV ケーブルを用いて、次に示すような試料を作製し交流破壊試験を行なった。すなわち、外部半導電層はそのまま残したオリジナル試料、第 8 図と同じように中央 10cm の幅に外部半導電層を除去し、半導電性塗料を塗布したもの、外部半導電層を除去した後 # 60 および # 1000 のサンドペーパーがけを施し、その上に半導電性塗料を塗布した 4 種類の試料を作製した。外部電極はそれぞれスズはくを巻いた。電圧は 100kV から 10kV/30 分のステップで昇圧した。

試験結果を第 11 図に示すが、この結果から、まずフリーストリッピングの外部半導電層から半導電性塗料に変わっただけで破壊電圧が若干低下することがわかった。また、# 60 のサンドペーパーを施した場合は第 7 図と同じように破壊電圧はかなり低下し、絶縁厚が異なっても絶縁破壊の強さで整理すると第 7 図とほぼ同じ値になる。

〈3・4〉表面欠陥の破壊電圧に及ぼす液体およびガスの効果 CV ケーブルの表面に針状ボイドや微小な欠陥があると、特に交流破壊電圧が低下するが、その対策として表面を平滑化することや外部半導電層を高温でモールドすると良いことを前節で述べた。その他の対策として、これらの表面のボイドや欠陥に液体およびガスを充てんする方法が考えられる。

液体を充てんする方法については、すでに筆者らの

第 11 図 フリーストリップ外導の効果

Fig. 11. Effect of free-strippable outer semiconductive layer.

いくつかの報告がある。例えば、ポリエチレンフィルムの表面に傷を付け、シリコン油を塗布すると耐部分放電性が著しく向上することや、シートに針状ボイドを作製しシリコン油を充てんすると $V-t$ 特性が向上することを述べた⁽⁷⁾。

また、針試験において針の先端部に液体を充てんすると耐トリイニング性が向上すること、およびポリエチレンにアセトフェノンを吸収させると交流破壊電圧が向上することを述べた^{(8)~(10)}。

このようにポリエチレンの場合、電極と接する欠陥部に液体を充てんすると、交流における破壊電圧や耐トリイニング性、耐部分放電性などの特性が向上することから、その原因は部分放電を抑制するためと考えられる。

一方、ガスについては SF_6 ガスを CV ケーブルの主として絶縁体中の微小ボイドに充てんして交流破壊電圧を調べた結果を報告した⁽¹¹⁾。ここでは表面の針状ボイドに対する SF_6 ガスの効果について検討する。

実験は内外半導電層が押出の 6.6kV 60mm² CV ケーブルを用い、表面に針状ボイドを作製し、この試料を前回報告⁽¹¹⁾の試験用容器に入れ、真空引後 SF_6 ガスを封入した。 SF_6 ガスの圧力はゲージ圧で 3 およ

第 12 図 SF₆ ガスの効果

Fig. 12. Effect of defects in SF₆ gas on the AC breakdown voltage of XLPE cables.

び 10 kg/cm² である。交流破壊試験は SF₆ ガスを封入し 1~2 日後に行なった。電圧は 10 kV 5 分印加後、2.5 kV/5 分のステップで昇圧した。試験結果を第 12 図に示す。なお、欠陥を設けない場合（横軸 0 にプロット）の破壊電圧は前報⁽¹¹⁾の値を代入した。この結果、SF₆ ガスを充てんした場合も空気の場合と同様の傾向を示し、欠陥の小さい領域で破壊電圧が大きく変化し、欠陥部の SF₆ ガスの圧力が高くなるにつれ全体の破壊電圧が高くなることがわかった。

4. 実験結果の考察

今回の実験では、まず CV ケーブルの表面に設けた針状金属突起と針状ボイドのそれぞれがインパルスおよび交流破壊電圧に及ぼす影響について調べた。しかし、実際のケーブルの場合、例えば接続部などの処理で表面に 1 mm とか 2 mm の深さの大きい欠陥ができることは予想できない。従って、実用的な面から検討しなければならないのは、せいぜい 0.5 mm 以下の深さの小さい欠陥と考えられる。

このような意味から、微小欠陥のモデルとしてサンドペーパーを用いたのであるが、表面の傷の最大深さ（この場合、粒子最大径を基準とした）と交流破壊電圧との関係にまとめ、第 3 図の針による針状ボイドのデータ（同じステップ電圧）とつぎ合わせると第 14 図に示すようになる。

なお、同図には表面にサンドペーパーによる微小欠陥を作り、外部半導電層をモールドした一部のデータと針による針状金属突起のデータを合わせて示した。

この結果、導電性塗料を塗ったサンドペーパーによる微小欠陥と完全に空気の層が存在する針状ボイドが比較的良好につながることがわかった。また、同じサンドペーパーによる欠陥でも半導電層を加熱モールドして融着せしめると破壊電圧が高くなり、しかも針状金属突起のデータとつながる。

これらから、サンドペーパーによる欠陥の場合は導電性塗料が十分にその先端まで入り込まず、そこに微小ボイドが残存するのではないかと考えられる。

一般に架橋ポリエチレンによく接着する塗料はほとんどないが、ここで用いた導電性塗料も乾いた後には比較的簡単に膜状にはくりすることからも、表面の欠陥内に塗料が完全に流れ込む可能性は少ないと考えられる。

次に第 14 図からわかるように、交流の場合は表面にボイドが存在すると破壊電圧が著しく低下するが、特にその深さが極めて小さいところで破壊電圧が大きく変化することに注意する必要がある。すなわち、CV ケーブルの交流破壊電圧は表面の微小なボイド状欠陥に大きい影響を受けると言える。従って、実用の電圧クラスが高い場合、これらの欠陥の対策としては半導電層を加熱モールドして微小ボイドをなくするか、あるいは破壊電圧が低下しはじめた表面荒さ計測定値の約 10 μm 以下の値まで表面を平滑にすることが望ましい。

これらから表面処理に着目すると、外部半導電層を削り取るタイプのものよりフリーストリッピングのタ

第 14 図 表面の欠陥と破壊電圧

Fig. 14. Relation between defect on the surface and AC breakdown voltage.

イブの半導電層の方が有利である。更にシリコン油のような液体塗布や SF₆ ガス充てんが効果があるので、実用的にもこれらの利用が考えられる。

現在、特高圧 CV ケーブルの接続部に使用する自己融着性テープにシリコン油を塗布したテープは、この効果も備えていると言える⁽¹²⁾。

5. まとめ

本論文は CV ケーブルおよびその接続部の破壊電圧を支配する絶縁体表面の欠陥の影響について木綿針やサイドペーパーによるモデル欠陥を作製して検討した結果をまとめた。

得た結果を要約して列記すると次のようになる。

(1) インパルス破壊電圧はケーブル表面に設けた針状金属突起と針状ボイドでは、ほとんど差がない。また、絶縁破壊の強さと欠陥の深さの関係式を導いたが、上記結果は先端の電界を $1.6 \times 10^6 \text{ V/mm}$ にしたときの理論曲線と良く一致した。

(2) 交流破壊電圧の針状金属突起の実験結果は、先端の電界が $1.0 \times 10^6 \text{ V/mm}$ にしたときの理論曲線と比較的よく一致した。針状ボイドの交流破壊電圧はこれより更に低く、時間効果がある。

(3) ケーブル表面をサンドペーパーにより微小欠陥を施した場合の交流破壊電圧は、# 400 以下で低下する。この結果、破壊電圧の向上を目指すためには表面はできるだけ平滑にする必要があると言える。

(4) CV ケーブルの表面をサンドペーパーで荒し、外部半導電層を加熱モールドするとモールド条件が適正なら破壊電圧は向上する。

(5) 針状ボイドの対策としてガスや液体を充てんとすると、特に交流の諸特性が向上する。SF₆ ガスを充てんした場合、圧力が高くなると交流破壊電圧が高くなる。

なお、本論文では絶縁体表面の微小欠陥のモデルとしてサンドペーパーを用いて、実際は複数の欠陥を作製して実験を行なったが、今後は単一のモデルを作製して検討する必要がある。そのためには、モデルの作製法とその観察技術の向上が望まれる。

最後に、本研究にあたり種々御助言いただいた名古屋大学工学部 家田正之教授および御協力いただいた名古屋大学工学部 長尾雅行氏、住友電気工業(株) 研究開発本部 山田有一技師、米山 治技師および小熊一郎氏、また実験を遂行していただいた電力ケーブル第2研究室の方々に厚くお礼申し上げる次第である。(昭和52年2月28日受付、同52年9月19日再受付)

文 献

- (1) 長崎, 他: 「154 kV CV ケーブルの開発」住友電気 110, 45 (昭 50)
- (2) 山田, 他: 「XLPE 中のボイドと破壊電圧に関する考察」第8回電気絶縁材料シンポジウム III-5 (昭 50)
- (3) S. Nagasaki, et al.: "High voltage crosslinked polyethylene power cables and their accessories", IEEE 1974 Underground Transmission and Distribution Conference.
- (4) 水上, 他: 「ガス架橋法による架橋ポリエチレンケーブルの絶縁性能」電学論 A, 94, 281 (昭 49-7)
- (5) 山内, 他: 「MDCV プロセスの概要」大日本電線時報 59, 1 (昭 50-5)
- (6) 長崎, 他: 「架橋ポリエチレン電力ケーブルのフリーストリッピング外部半導電層の開発」住友電気 110, 86 (昭 50)
- (7) 速水: 「ポリエチレンの耐部分放電性に及ぼす液体塗布の効果」電学誌 91, 1661 (昭 46-9)
- (8) 速水: 「ポリエチレンの耐トリッキング性に及ぼす液体吸収の効果」電学論 A, 92, 343 (昭 47-7)
- (9) 速水: 「架橋ポリエチレンの耐トリッキング性に及ぼす機械的ひずみの影響」同上 A, 94, 538 (昭 49-12)
- (10) 速水: 「ポリエチレンの交流破壊電圧を向上させる表面効果について」電学誌 91, 1917 (昭 46-10)
- (11) 速水: 「架橋ポリエチレンケーブルの交流破壊電圧に及ぼす SF₆ ガス含浸の効果」電学論 A, 96, 397 (昭 51-9)
- (12) 速水・米山: 「66~77 kV PEX ケーブルの接続部の開発」住友電気 103, 21 (昭 46)
- (13) 原, 他: 「不平等電界における大気の大気絶縁破壊特性」三菱電機技報 37, 873 (昭 38)
- (14) 相原, 他: 昭 49 電気学会全大 No. 858

付 録

欠陥の大きさと絶縁破壊の強さ 平等電界中に付第1図に示すような回転円体の突起が存在する場合、その先端部の電界は(付1)式で表わされる⁽¹³⁾。

$$E_{\max} = \frac{V}{l} \left\{ 1 - \frac{\ln \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - ar_0}}{a - \sqrt{a^2 - ar_0}}} - \frac{\sqrt{a^2 - ar_0}}{r_0}}{\ln \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - ar_0}}{a - \sqrt{a^2 - ar_0}}} - \frac{\sqrt{a^2 - ar_0}}{a}} \right\} \quad \dots\dots\dots (付1)$$

ここで、V: 印加電圧, l: 絶縁厚, a: 突起の大きさ, r₀: 突起先端の曲率半径

いま、最も電界の高い突起の先端部の絶縁体が部分破壊を起すと直ちに全路破壊に至るものと仮定する。この場合、空間電荷効果およびストリーマ先端部の電位降下などは考慮しない。そのときの絶縁体の破壊電圧を V_{BD}, また見かけの絶縁破壊の強さを

$$E_{BD} = V_{BD}/l \quad \dots\dots\dots (付2)$$

とすると、(付1)式は(付3)式のようになる。

$$E_{BD} = E_{\max} \left\{ 1 - \frac{\ln \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - ar_0}}{a - \sqrt{a^2 - ar_0}}} - \frac{\sqrt{a^2 - ar_0}}{r_0}}{\ln \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 - ar_0}}{a - \sqrt{a^2 - ar_0}}} - \frac{\sqrt{a^2 - ar_0}}{a}} \right\} \quad \dots\dots\dots (付3)$$

付第 1 図 回転円体突起の形状
app. Fig. 1. Shape of protrusion.

ここで、 $E_{\max}$ を例えば $1.0 \times 10^6 \text{ V/mm}$ とおき、突起先端の曲率半径をパラメータとして、見かけの絶縁体の絶縁破壊の強さと突起の大きさの関係をまとめると付第 2 図に示すようになる。

付第 2 図 電極突起の大きさと見かけの絶縁破壊の強さ

app. Fig. 2. Relation between length of protrusion and breakdown strength.